

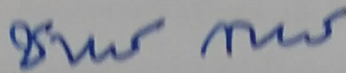
การปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียวในท้องถิ่นเพื่อใช้ในการก่อสร้างคันดินป้องกันน้ำทะเล
กรณีศึกษา พื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ อำเภอเมือง จังหวัดสตูล

ปฏิพล วงษ์พระจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
พฤษภาคม 2561
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

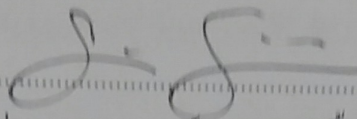
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ ปฏิพล วงษ์พรหมจันทร์ ฉบับนี้แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะ
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์



.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

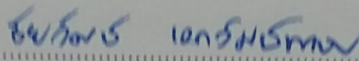
(ดร. ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

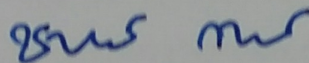
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



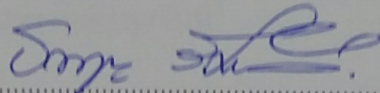
.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์)



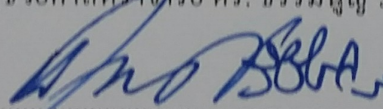
.....กรรมการ

(ดร. ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)



.....กรรมการ

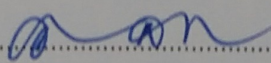
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชรรมนนุญ รัศมีมาสเมือง)



.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชงชัย ศรีวิชัยรัตน์)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยบูรพา



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 21 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2561

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยทำให้คำปรึกษา ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จาก ดร. ชาญยุทธ กาฬกาญจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รวมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สยาม ยิ้มศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญาโททุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้กับผู้วิจัย รวมทั้งขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุนการเรียนของผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณสรกฤษณ์ รัตนโสภณ และคุณสิริยุภา ห้วยใหญ่ นิสิตปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทดลองของผู้วิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ อีกทั้งขอขอบคุณทุนอุดหนุน โครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 และ พ.ศ. 2561 ที่สนับสนุนทุนวิจัย

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูแด่เวทีแม่บพการีบูรพาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ทำให้ข้าพเจ้าเป็นผู้มีการศึกษาและประสบความสำเร็จมาจนตราบเท่าทุกวันนี้

ปฏิพล วงษ์พระจันทร์

58910228: สาขาวิชา: วิศวกรรมโยธา; วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา)

คำสำคัญ: ดินซีเมนต์/ ดินเหนียวอินทรีย์/ คันดินกั้นน้ำทะเล/ น้ำทะเลท่วมชายฝั่ง/ ค่าความเต็ม

ปฏิพล วงษ์พระจันทร์: การปรับปรุงคุณสมบัติดินเหนียวในท้องถิ่นเพื่อใช้ในการก่อสร้างคันดินป้องกันน้ำทะเล กรณีศึกษา พื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลตำมะลัง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล (IMPROVEMENT OF LOCAL CLAY FOR THE SEA DIKE CONSTRUCTION CASE STUDY VILLAGE NO. 2 AND 3 TAMBOL TAMMALUNG AMPHOR MUEANG CHANGWAT SATUN) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: ชาญยุทธ กาฬกาญจน์, Ph.D., สยาม ยิ้มศิริ, Ph.D., 273 หน้า. ปี พ.ศ. 2560.

พื้นที่บริเวณตำบลตำมะลัง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล เผชิญหน้ากับปัญหาน้ำท่วมชายฝั่งอย่างรุนแรง ส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวไม่สามารถใช้ประโยชน์ในการเพาะปลูกพืชได้ ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการลดผลกระทบจากปัญหาด้วยการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเลโดยใช้ดินในพื้นที่เป็นวัสดุก่อสร้าง เพื่อลดราคาก่อสร้าง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของดินและปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เพื่อนำดินที่ได้มาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล โดยตัวอย่างดินจะถูกผสมกับปูนซีเมนต์ในสัดส่วน 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมตัวอย่าง ได้จากปริมาณค่าความชื้นที่เหมาะสมของการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานของแต่ละอัตราส่วนผสมดินซีเมนต์ วิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระถูกนำมาใช้เพื่อประเมินคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดินซีเมนต์ ที่ระยะเวลาการบ่ม 0 7 และ 28 วัน จากตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาจากพื้นที่ศึกษาพบว่า เป็นดินเหนียวอินทรีย์ชนิด Clay of low plasticity (CL) และ Clay of high plasticity (CH) ตาม Unified soil classification system จากผลการทดสอบ พบว่า อัตราส่วนของดินและปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล คือ ดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน และดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน เนื่องจากปริมาณดังกล่าวเป็นอัตราส่วนผสมที่น้อยที่สุดที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้มีค่าน้อยกว่า 10^{-8} เมตร/วินาที และยังมีกำลังรับแรงเฉือนที่เพียงพอในการนำไปใช้ก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล

นอกจากนี้ อัตราส่วนดินซีเมนต์ที่เหมาะสมถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาเสถียรภาพของลาดดิน ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน และค่าความเต็มของน้ำที่ไหลซึมผ่านคันดิน โดยใช้โปรแกรม GeoStudio 2007 ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ดินเหนียวในพื้นที่ซึ่งผสมปูนซีเมนต์สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างคันดินได้ และที่อัตราส่วนผสมนี้ ค่าความเต็มของน้ำทะเลที่ไหลซึมผ่านคันดินและฐานรากมีค่าน้อยกว่า 10 กก./ลบ.ม. (10 ppt) ดังนั้น เพื่อเป็นการลดค่าวัสดุก่อสร้าง การใช้ดินในพื้นที่ผสมกับปูนซีเมนต์สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างของคันดินได้ และคันดินสามารถป้องกันพื้นที่จากความเต็มของน้ำทะเลได้ ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ด้านหลังคันดินสามารถนำมาใช้ทำการเกษตรได้

58910228: MAJOR: CIVIL ENGINEERING; M.Eng. (CIVIL ENGINEERING)

KEYWORDS: SOIL-CEMENT/ ORGANIC CLAY/ SEA DIKE/ COASTAL FLOODING/
SALINITY

PATIPOL WONGPRACHAN: IMPROVEMENT OF LOCAL CLAY FOR THE SEA
DIKE CONSTRUCTION CASE STUDY VILLAGE NO. 2 AND 3 TAMBOL TAMMALUNG
AMPHOR MUEANG CHANGWAT SATUN. ADVISORY COMMITTEE: CHANYUT
KALAKAN, Ph.D., SIAM YIMSIRI, Ph.D., 273 P. 2017.

Tammalang, Mueang, Satun province had been facing with a severe coastal flooding problem which prohibits this area from farming. A sea dike had been considered as one of the potential approaches to minimize this problem. In order to reduce a construction cost, local soils will be used as construction materials.

This research was aimed to assess suitable mixture ratios between local soils and Portland cement type I for using as construction materials of a sea dike. Soil specimens are mixed with Portland cement with ratios of 0, 2, 5, 8, and 10% by dry weight of soil. The water quantity used in specimens was the optimum moisture content obtained from the standard compaction test for each soil-cement mixtures. Consolidation test and unconfined compression test were used to evaluate the soil engineering properties after curing at 0, 7, and 28 days. It was found that the local soil was organic clay and was categorized as Clay of Low Plasticity (CL) and Clay of High Plasticity (CH) according to the unified soil classification system. The results demonstrated that the optimum Portland cement contents for the construction of sea dike were at 2% with 0-day curing and 5% with 7-day curing by weight of oven-dry CL clay and CH clay, respectively. At these ratios, the permeability coefficient was less than 10^{-8} meters per second with enough shear strength for the construction of the sea dike.

Furthermore, the optimum mixing ratio was analyzed to determine the stability of the slope, the seepage through sea dike, and the salinity flowing through the sea dike by using GeoStudio 2007. The result demonstrated that the in-situ clay mixed with cement could be considered as sea dike construction material. At these ratios, the salinity of saltwater intrusion was lower than 10 kg/m^3 (10 ppt). In conclusion, the optimal construction materials with low cost were successfully obtained and the protected areas could be used for agricultural farming.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
พื้นที่ศึกษา	4
การรुक้ำของน้ำทะเล.....	6
การป้องกันการรुक้ำของน้ำทะเล	18
ดินเหนียว.....	24
ดินเหนียวอินทรีย์.....	25
การปรับปรุงคุณภาพของดินด้านวิศวกรรม	26
การปรับปรุงคุณภาพดินด้านเกษตร	33
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	36
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	52
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ.....	52
การทดสอบทางวิศวกรรมปฐพีในห้องปฏิบัติการ	52
การทดสอบวิศวกรรมปฐพีในสนาม.....	69
ข้อมูลกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ สถานีเกาะตะรุเตา จังหวัดสตูล.....	70
การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	72
การวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล	79

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย.....	80
ผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมปฐพีในห้องปฏิบัติการ	80
ผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมปฐพีในสนาม	113
ผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	115
ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล	129
5 อภิปรายและสรุปผลการวิจัย.....	131
อภิปรายผลการทดสอบทางวิศวกรรมปฐพี.....	131
อภิปรายผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	134
อภิปรายผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล.....	135
สรุปผลการวิจัย.....	135
บรรณานุกรม	137
ภาคผนวก	141
ภาคผนวก ก	142
ภาคผนวก ข	149
ภาคผนวก ค	154
ภาคผนวก ง.....	160
ภาคผนวก จ.....	167
ภาคผนวก ฉ	193
ภาคผนวก ช	213
ภาคผนวก ซ	230
ภาคผนวก ฌ.....	249
ภาคผนวก ฎ.....	261
ประวัติผู้ทำวิจัย.....	273

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1	ระยะ Freeboard ของคันดิน 21
2-2	การจำแนกดินตามปริมาณสารอินทรีย์ในดิน 26
2-3	การจำแนกความเค็มของดินที่ส่งต่อการเจริญเติบโตของพืช..... 34
2-4	พันธุ์พืชทนเค็ม 35
2-5	เกณฑ์ต่ำสุดของอัตราส่วนปลอดภัยของคันดิน 43
3-1	ค่าความเป็นกรด-เบสของดิน 63
3-2	ค่าความสูงของระดับน้ำสูงสุด และระดับน้ำต่ำสุด จากข้อมูลกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือสถานีเกาะตะรุเตา จังหวัดสตูล ปี พ.ศ. 2547-พ.ศ. 2559 71
3-3	รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ 72
3-4	รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ..... 73
3-5	รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบไม่มีทางน้ำ..... 74
3-6	รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ 75
3-7	รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบมีทางน้ำ 75
3-8	รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ..... 76
3-9	รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ..... 77
3-10	รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ..... 77
3-11	รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ 78
3-12	รายละเอียดการวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล..... 79
4-1	ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและดัชนีของดิน 81
4-2	ผลการทดสอบหาปริมาณสารประกอบในตัวอย่างดิน 82
4-3	ผลการทดสอบหาปริมาณสารอินทรีย์ในตัวอย่างดิน 83

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-4 ผลการทดสอบการหาค่า pH	83
4-5 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL.....	85
4-6 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH	86
4-7 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL แบบไม่แช่น้ำ	104
4-8 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL แบบแช่น้ำ.....	105
4-9 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH แบบไม่แช่น้ำ.....	107
4-10 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH แบบแช่น้ำ	109
4-11 คุณสมบัติของดินเหนียว CL ที่ได้จากการทดสอบ	111
4-12 คุณสมบัติของดินเหนียว CH ที่ได้จากการทดสอบ	112
4-13 ลักษณะชั้นดินจากการสำรวจ	113
4-14 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล	115
4-15 ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ของความลาดคันดินกั้นน้ำแบบไม่มีทางน้ำ	116
4-16 ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ที่ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ ต่าง ๆ	117
4-17 ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ของความลาดคันดินกั้นน้ำแบบมีทางน้ำ.....	118
4-18 ปริมาณการไหลซึม และไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1	120
4-19 ปริมาณการไหลซึม และไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-2	123
4-20 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล	129
4-21 ค่าการทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล.....	130
5-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติกายภาพและดัชนีของดิน	131
5-2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดิน	132

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 พื้นที่ศึกษาหมู่ที่ 2 และ 3 บ้านตำมะลังใต้ ตำบลตำมะลัง อำเภอเมืองสตูล จังหวัดสตูล ...	5
2-2 การรुक้ำของน้ำทะเลในพื้นที่ลุ่มน้ำ	6
2-3 การเรียงตัวของโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ ทำให้ปรากฏการณ์น้ำเกิด – น้ำตาย.....	7
2-4 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงให้เห็นถึงความเสียหายบริเวณชายฝั่งของมลรัฐนิวเจอร์ซีย์ ประเทศสหรัฐอเมริกา หลังจากเกิดเหตุการณ์ Superstorm Sandy เมื่อวันที่ 30 ตุลาคม 2555	8
2-5 ภาพถ่ายบ้านตามแนวถนน Lighthouse ริมหาดทรายฝั่งทะเล เมืองเซทจูเวท ในมลรัฐแมสซาชูเซตส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้รับผลกระทบจากพายุฝน เมื่อวันที่ 2 มีนาคม 2561	8
2-6 การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล.....	10
2-7 รอยต่อระหว่างน้ำทะเลและน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล โดยใช้เงื่อนไขของไหลสถิต และไม่เกิดการผสมกันระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเล	10
2-8 เส้นสายธารการไหลที่ได้จากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์	11
2-9 เส้นชั้นค่าอัตราส่วนของความเค็ม (Isochor) ที่ได้จากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์.....	11
2-10 รอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเลในชั้นน้ำบาดาลโดยวิธีการเชิงตัวเลข สำหรับแนวการไหลของน้ำออกจากชั้นน้ำบาดาลวางตัวในแนวตั้ง และวางตัวในแนวราบ.....	12
2-11 ลักษณะการไหลของน้ำจืดและการแทรกซึมของน้ำเค็มในชั้นน้ำบาดาลบริเวณริมชายฝั่งทะเล	13
2-12 ภาพตัดขวางของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดันบิสเคียนบริเวณชายฝั่งทะเลเมืองไมอามี มลรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อค่าความดัน (เฮด) ของน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น	14
2-13 ภาพตัดขวางของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดันบิสเคียนบริเวณชายฝั่งทะเลเมืองไมอามี มลรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อค่าความดัน (เฮด) ของน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลลดลง	14
2-14 ภาพตัดขวางของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดันบิสเคียน บริเวณชายฝั่งทะเลเมืองไมอามี มลรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อระดับน้ำทะเลสูงขึ้น	15

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-15 ภาพตัดขวางของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดันบิสเคียน บริเวณชายฝั่งทะเลเมืองไมอามี มลรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อระดับน้ำทะเลลดลง.....	16
2-16 การเปรียบเทียบแบบจำลองเชิงแนวคิดเพื่อให้เห็นผลกระทบของระดับน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้น ที่เกิดการแทรกซึมของน้ำทะเลในชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล	17
2-17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และตำแหน่งของรอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเล (X_f) เมื่อ ระดับน้ำทะเลสูงขึ้นที่ได้จากผลลัพท์ของการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	18
2-18 ตัวอย่างคันดินกั้นน้ำทะเลรอดหน้าด้วยหิน และยางมะตอย พร้อมทั้งมีการปลูกหญ้าที่สัน คันดิน	19
2-19 ตัวอย่างของคันดินกั้นน้ำทะเลรอดหน้าด้วยหญ้าซึ่งปลูกอยู่บนชั้นดินเหนียวที่ชายฝั่งทะเล ทางตอนเหนือของประเทศเดนมาร์ก.....	19
2-20 การพิบัติเนื่องจากการเคลื่อนพังของลาดดิน	19
2-21 การพิบัติเนื่องจากการกัดเซาะ	20
2-22 ผนังกั้น โดยการสูบน้ำ	22
2-23 ผนังกั้น โดยการอัดน้ำ	23
2-24 ผนังกั้นน้ำใต้ผิวดิน	23
2-25 แผนผังดินเหนียวทรงเหลี่ยมสี่หน้า และทรงเหลี่ยมแปดหน้า.....	24
2-26 โครงสร้างของดินเหนียว.....	25
2-27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้และอัตราส่วนช่องว่าง	30
2-28 การวิเคราะห์หาปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในดินซีเมนต์ด้วยวิธี XRD...	31
2-29 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มเมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน SEM	31
2-30 ผลกระทบของน้ำทะเลตามการทดสอบแอดเตอร์เบิร์กลิ้มิต	32
2-31 ผลกระทบของน้ำทะเลตามการทดสอบอัดตัวคายน้ำ.....	33
2-32 แผนภาพชิ้นดิน (Slice) แสดงสัญลักษณ์ และตัวแปรต่าง ๆ	38
2-33 ตัวอย่างแสดงค่าความชัน ค่าฟังก์ชัน และค่า λ สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี Mergensern and Price	42

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2-34 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิเคราะห์เสถียรภาพ ของความลาดชันดิน	42
2-35 การไหลของน้ำผ่านรูปลูกบาศก์.....	44
2-36 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่าน ดิน	47
2-37 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเล ผ่านชั้นดิน โดย Advection-Dispersion Analysis	50
2-38 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเล ผ่านชั้นดิน โดย Density-Dependent Analysis	51
3-1 ชุดทดสอบการร่อนตะแกรงแบบเปียก.....	53
3-2 ชุดทดสอบไฮโดรมิเตอร์	54
3-3 อุปกรณ์ทดสอบพิกัดเหลว	55
3-4 อุปกรณ์ทดสอบพิกัดพลาสติก	56
3-5 อุปกรณ์ทดสอบพิกัดหดตัว.....	56
3-6 อุปกรณ์สำหรับทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน	57
3-7 Unified soil classification system	58
3-8 ขนาดกะละของอนุภาคเม็ดดิน	59
3-9 การจำแนกดินมวลหยาบ	60
3-10 การจำแนกดินมวลละเอียด.....	61
3-11 แผนภูมิความเหนียว	61
3-12 ตู้อบตัวอย่างดิน.....	62
3-13 เครื่องวัดค่า pH.....	63
3-14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน	64
3-15 อุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ.....	65
3-16 ชุดทดสอบการอัดแบบอิสระ	66
3-17 ขั้นตอนการดำเนินงานการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน	67
3-18 แนวคันดินกั้นน้ำทะเล.....	69

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-19 ตำแหน่งที่ทำการเจาะสำรวจดิน	70
3-20 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ.....	72
3-21 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ	73
3-22 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบไม่มีทางน้ำ.....	74
3-23 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบมีทางน้ำ.....	74
3-24 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ.....	76
3-25 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ	76
3-26 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ.....	78
3-27 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ.....	78
4-1 การกระจายตัวของดินเหนียวชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2	81
4-2 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL.....	85
4-3 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH	86
4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%).....	87
4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดิน เหนียว CL	88
4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดิน เหนียว CH.....	89
4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (C_c) และปริมาณซีเมนต์ (%).....	90
4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (C_c) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL	90
4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (C_c) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH.....	91
4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_u) และปริมาณซีเมนต์ (%).....	92
4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_u) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL	93
4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_u) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH.....	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%).....	95
4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL	96
4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH.....	97
4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%)	98
4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL	98
4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH.....	99
4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%).....	100
4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL	101
4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL	102
4-22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrain Shear Strength, c (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL แบบไม่แช่น้ำ.....	103
4-23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrain Shear Strength, c (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL แบบแช่น้ำ	106
4-24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrain Shear Strength, c (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH แบบไม่แช่น้ำ	108
4-25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrain Shear Strength, c (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH แบบแช่น้ำ.....	109
4-26 ลักษณะของชั้นดิน BH-1	114
4-27 ลักษณะของชั้นดิน BH-2	114

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-28 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1.....	120
4-29 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1	121
4-30 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1.....	121
4-31 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1	122
4-32 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2.....	123
4-33 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2	124
4-34 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2.....	124
4-35 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2	125
4-36 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m ³ ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ.....	126
4-37 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m ³ ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ.....	127
4-38 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m ³ ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ.....	127
4-39 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m ³ ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ.....	128

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การรุกคืบของน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเล ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ “น้ำทะเลท่วมชายฝั่ง” (Coastal flooding) คือ การเคลื่อนที่ของน้ำทะเลบนผิวดินที่เกิดจากน้ำทะเลหนุน เป็นการรุกคืบของน้ำทะเลบนผิวดิน และ “การแทรกซึมของน้ำทะเล” (Saltwater intrusion) คือ การเคลื่อนที่ของน้ำทะเลใต้ผิวดินที่เกิดจากน้ำทะเลท่วมชายฝั่งซึมลงใต้ผิวดิน หรือการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลในชั้นดินอุ้มน้ำ โดยทั่วไปวิธีการป้องกันการรุกคืบของน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล คือ การก่อสร้างโครงสร้างกั้นน้ำบนผิวดิน โดยอาจทำเป็นกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือคันดิน เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำทะเลไหลเข้าท่วมพื้นที่ด้านหลังแนวป้องกัน การใช้วิธีดังกล่าวนี้อาจไม่เพียงพอในการป้องกันการรุกคืบของน้ำทะเล เพราะน้ำทะเลอาจซึมผ่านใต้ฐานรากแนวป้องกัน หรือผ่านชั้นดินอุ้มน้ำ ซึ่งหากพื้นที่บริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลมีพื้นที่การเกษตร น้ำทะเลที่เคลื่อนที่ผ่านฐานรากแนวป้องกันอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับผลผลิตได้ ดังนั้นในการป้องกันการรุกคืบของน้ำทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล ต้องคำนึงถึงการป้องกันการรุกคืบของน้ำทะเลทั้งบนผิวดินและใต้ผิวดิน

พื้นที่ริมชายฝั่งทะเลอาจเป็นบริเวณที่เกิดจากการพัดพาของตะกอนดินจากสิ่งต่าง ๆ เช่น การพัดพาจากกระแสน้ำ หรือการพัดพาของกระแสน้ำ และการตกตะกอนในทะเล เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดเป็นแผ่นดินชั้น โดยปกติมวลดินที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียด เช่น ทราย (Sand) ดินเหนียว (Clay) และดินตะกอน (Silt) เป็นต้น ซึ่งอาจเกิดการทับถมเป็นระยะเวลานาน ทำให้เกิดเป็นชั้นดินต่าง ๆ อีกทั้งด้วยลักษณะการเกิดของแผ่นดินเช่นนี้ ทำให้ดินชั้นบน (Top Soil) มีแร่ธาตุอาหารที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช และเมื่อเกิดการเจริญเติบโตของต้นพืช มีการล้มตายลงของต้นไม้มันมีการเน่าเปื่อยผุพัง เกิดการทับถมกันในแต่ละชั้นของมวลดิน ทำให้มีสารอินทรีย์ (Organic matter) สะสมเกิดขึ้นในมวลดิน โดยปริมาณสารอินทรีย์มีมากหรือน้อยนั้นแตกต่างกันไปตามสภาพของพื้นที่ ผลจากการเกิดขึ้นของเหตุการณ์ดังกล่าวนี้ ทำให้ดินมีลักษณะเป็นดินเนื้อละเอียด (Fine particle) ความชื้นในดินมีค่ามาก (High water content) มีค่าหน่วยน้ำหนักต่ำ (Low unit weight) เมื่อรับน้ำหนักจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูง หรือมีการยุบตัวมาก (High compressibility) ทำให้ดินมีเสถียรภาพต่ำ ไม่มั่นคงแข็งแรง ความสามารถในการรับแรงน้อย (Low strength) เมื่อสูญเสียความชื้นจะเปลี่ยนแปลงปริมาตรมาก ซึ่งจะปรากฏรอยแตกของมวลดินให้เห็น

อย่างชัดเจน ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการทำงานในด้านวิศวกรรม โดยปกติหากเราพบดินดังกล่าวในสถานที่ก่อสร้าง จะต้องดำเนินการขุดและนำออกไปให้พ้นจากสถานที่ก่อสร้าง

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษา เพื่อนำเสนอวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอินทรีย์ในท้องถิ่นด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical stabilization) โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (Portland type I) เป็นสารผสมสารผสมเพิ่ม (Cementation) หรือสารเสถียรภาพ (Stabilizing agents) แล้วนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบคันดินที่เหมาะสมต่อการป้องกันน้ำทะเล

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอินทรีย์
2. เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอินทรีย์ด้วยวิธีทางเคมี โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 เป็นสารผสมเพิ่ม ด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง
3. เพื่อศึกษาการพัฒนากำลัง ค่าความตึบน้ำ และเสถียรภาพของดินเหนียวอินทรีย์ผสมซีเมนต์ โดยพิจารณาจากชนิดดินเหนียวอินทรีย์ ปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุการบ่ม
4. เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบคันดินที่เหมาะสมเพื่อป้องกันน้ำทะเล โดยใช้กรณีศึกษาจากพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ่ง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล
5. เพื่อแนะนำพันธุ์พืชที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกในพื้นที่ศึกษา

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการทดลองเพื่อคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดินเหนียวอินทรีย์ ที่เก็บตัวอย่างมาจากพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ่ง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล
2. ศึกษาการพัฒนากำลังและค่าความตึบน้ำของดินเหนียวอินทรีย์ผสมซีเมนต์ โดยใช้การทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined compression test) และการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) เพื่อให้ได้ค่าปริมาณปูนซีเมนต์ และอายุการบ่มที่เหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอินทรีย์แต่ละชนิด
3. ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 ซึ่งใช้เป็นสารผสมเพิ่มในการผสมตัวอย่างดินเหนียวอินทรีย์ ในอัตราส่วน 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง
4. ระยะเวลาการบ่มตัวอย่างดินเหนียวอินทรีย์ผสมซีเมนต์ที่ 0 7 และ 28 วัน
5. วิธีการทดสอบอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined compression test) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2166 - 00 และมาตรฐานที่ ทล.ม. 204/2533 ส่วนวิธีการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) ซึ่งเป็นไปตาม ASTM D2435-66

6. ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GeoStudio 2007 ในการคำนวณหาความมีเสถียรภาพของความลาดชันดิน โดยวิเคราะห์ด้วยวิธี Morgenstern & Price
7. ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GeoStudio 2007 ในการคำนวณหาปริมาณการไหลซึมคันดิน และปริมาณการไหลตลอดของน้ำทะเลผ่านฐานรากคันดิน โดยใช้เงื่อนไขการวิเคราะห์แบบสถานะคงที่ (Steady-state analysis) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สมการของลาปลาซ (Laplace's equation)
8. ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GeoStudio 2007 ในการประเมินประสิทธิภาพการป้องกันความเค็มของน้ำทะเลจากการเคลื่อนที่ผ่านคันดินและฐานราก โดยใช้วิธีการจำลองการไหลของน้ำ และการเคลื่อนที่ของเกลือด้วยการกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Density-dependent analysis)
9. ใช้ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้น ในการแนะนำพันธุ์พืชสำหรับการเพาะปลูกในพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ่ง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้ทราบถึงวิธีการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอินทรีย์ด้วยการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม เพื่อให้คุณสมบัติด้านวิศวกรรมของดิน ได้แก่ กำลัง และความตึบแน่น มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับการก่อสร้างคันดินเพื่อการป้องกันน้ำทะเล
2. ได้ทราบถึงอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอินทรีย์
3. ได้ทราบถึงรูปแบบของคันดินที่เหมาะสมต่อการป้องกันการรุกค้ำของน้ำทะเล ทั้งการไหลซึมผ่านคันดิน และการซึมผ่านฐานรากของคันดิน
4. ได้ทราบถึงพันธุ์พืชที่เหมาะสมสำหรับเพาะปลูกในพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลท่ามะลิ่ง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงลักษณะของพื้นที่ศึกษา การรुकกล้าของน้ำทะเลตามธรรมชาติ การป้องกันการรुकกล้าของน้ำทะเล ดินตะกอน การปรับปรุงคุณภาพดินสำหรับคันดินกั้นน้ำทะเล และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้จำลองสถานการณ์

พื้นที่ศึกษา

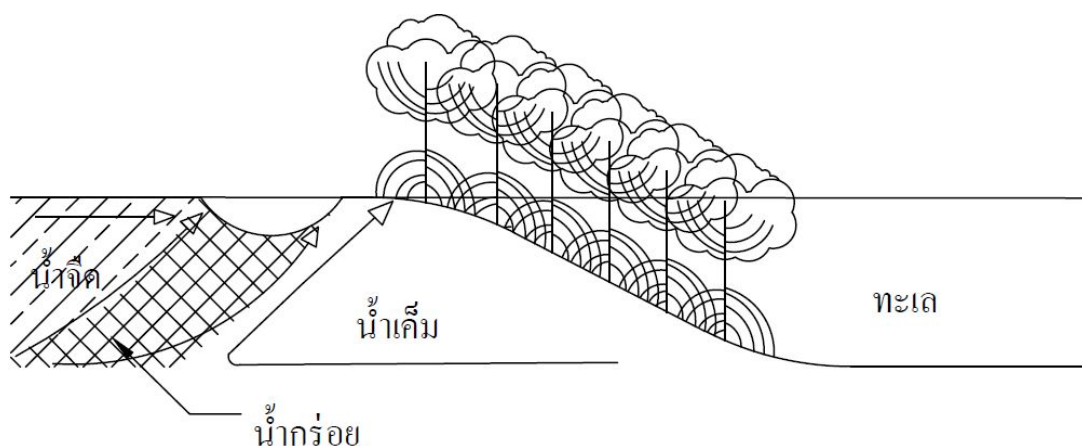
พื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ คือ พื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลตำมะลัง อำเภอเมืองสตูล จังหวัดสตูล ได้แก่ หมู่ที่ 1 บ้านกาลันบาตู หมู่ที่ 2 บ้านตำมะลังเหนือ และหมู่ที่ 3 บ้านตำมะลังใต้ มีจำนวนครัวเรือน 72 518 และ 619 ครัวเรือน ตามลำดับ (ข้อมูล ณ เดือนพฤษภาคม 2555) ดังภาพที่ 2-1 คิดเป็นพื้นที่ประมาณ 2,000 ไร่ มีราษฎรอาศัยอยู่ประมาณ 200 ครัวเรือน จากคำบอกเล่าของราษฎรในพื้นที่ ในอดีตที่ผ่านมาพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่สามารถทำการเกษตร และเลี้ยงสัตว์ได้ แต่ปัจจุบันพื้นที่ดังกล่าวไม่สามารถทำการเกษตรใด ๆ ได้ เนื่องจากประสบปัญหาการรुकกล้าของน้ำทะเล โดยปัญหานี้ อาจเกิดจาก 3 สาเหตุใหญ่ ๆ ได้แก่ อาจเกิดการทรุดตัวของพื้นดิน (Subsidence) เนื่องจากการระบายน้ำออกจากมวลดิน เพราะลักษณะดินในพื้นที่เป็นดินเนื้อละเอียด มีปริมาณน้ำในมวลดินสูงมาก การระบายน้ำออกจากมวลดินส่งผลให้ดินเกิดการทรุดตัวต่ำลง และอาจผนวกกับการเกิดปรากฏการณ์น้ำขึ้น-น้ำลงของน้ำทะเล (Tides) ที่เกิดขึ้นตามสภาพธรรมชาติ ทำให้น้ำสามารถไหลเข้าท่วมพื้นที่ซึ่งอยู่ติดกับชายฝั่งทะเลได้มากยิ่งขึ้น หรืออาจเกิดจากการที่ราษฎรเปลี่ยนแปลงการใช้พื้นที่ (Land use) จากการทำนาข้าวไปเป็นนาุ้ง ทำให้เกิดการรुकกล้าของน้ำทะเลเข้าไปสู่พื้นที่ทำการเกษตรของราษฎร

จากปัญหาดังกล่าว ซึ่งส่งผลให้ราษฎรมีความเดือดร้อน จึงได้แจ้งไปยังสำนักชลประทานที่ 16 กรมชลประทาน ให้เข้ามาดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยในเบื้องต้นราษฎรมีความต้องการให้สร้างคันดินกั้นน้ำทะเลเป็นระยะทางยาวประมาณ 2,800 m เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำทะเลไหลเข้าท่วมพื้นที่ เพื่อนำพื้นที่กลับมาใช้ทำการเกษตรต่อไป

การรुक้ำของน้ำทะเล

การรुक้ำของน้ำทะเลเป็นปรากฏการณ์ตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของน้ำทะเล ซึ่งจำแนกได้ 2 ลักษณะ คือ การเคลื่อนที่ของน้ำทะเลบนผิวดินที่เกิดจากการสูงขึ้นของระดับน้ำทะเล เรียกว่า “น้ำทะเลท่วมชายฝั่ง (Coastal flooding)” และการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลใต้ผิวดินที่เกิดจากน้ำทะเลซึมผ่านชั้นดิน เรียกว่า “การแทรกซึมของน้ำทะเล (Seawater intrusion)”

ดั่งภาพที่ 2-2

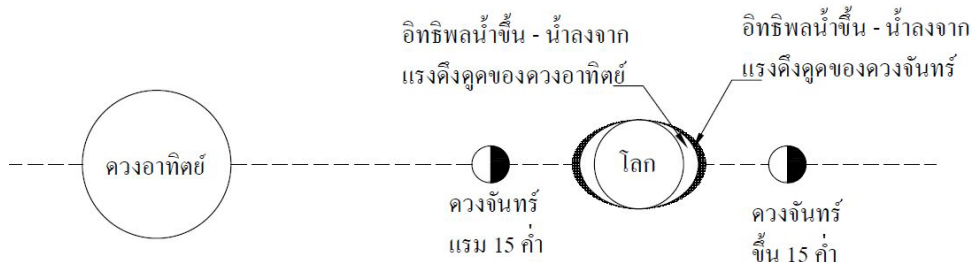


ภาพที่ 2-2 การรुक้ำของน้ำทะเลในพื้นที่ลุ่มน้ำ

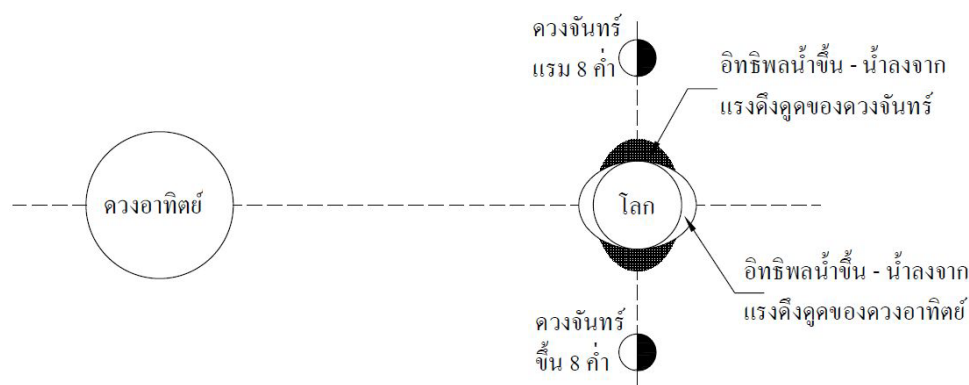
ปรากฏการณ์น้ำขึ้น-น้ำลง

ปรากฏการณ์น้ำขึ้น-น้ำลง (Tides) เป็นปรากฏการณ์ที่ระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้น จากแรงดึงดูดระหว่างมวลของโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ ซึ่งคือ ความแตกต่างของแรงโน้มถ่วง หรือ เกรเดียนต์ของแรง (Force gradient) ที่ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ กระทำต่อผิวโลกซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำกับน้ำทะเลบริเวณผิวโลก ทำให้ระดับน้ำทะเลยกตัวขึ้น และลดระดับลง วันละ 1-2 ครั้ง ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่ และการเรียงตัวของโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ ดั่งภาพที่ 2-3

ส่งผลต่อปรากฏการณ์น้ำขึ้น-น้ำลง คือ ระยะเวลาที่น้ำขึ้น-น้ำลงมากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์เรียงตัวในแนวเดียวกัน คือ ช่วงเวลาขึ้น 15 ค่ำ และแรม 15 ค่ำ เรียกว่า “น้ำเกิด (Spring tides)” และระยะเวลาที่น้ำขึ้น-น้ำลงน้อยที่สุดเกิดขึ้นเมื่อโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ เรียงตัวแบบทำมุม ซึ่งคือ ช่วงเวลาขึ้น 8 ค่ำ และแรม 8 ค่ำ เรียกว่า “น้ำตาย (Neap tides)”



(ก) น้ำเกิด



(ข) น้ำตาย

ภาพที่ 2-3 การเรียงตัวของโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ ทำให้ปรากฏการณ์น้ำเกิด-น้ำตาย

น้ำทะเลท่วมชายฝั่ง

“น้ำทะเลท่วมชายฝั่ง (Coastal flooding)” เป็นปรากฏการณ์ที่น้ำทะเลไหลเข้าท่วมพื้นที่บริเวณริมชายฝั่งทะเล ซึ่งการสูงขึ้นของระดับน้ำทะเลนั้น อาจเกิดจากปรากฏการณ์น้ำขึ้น-น้ำลงที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างมวลของดวงจันทร์และโลก หรืออาจเกิดจากอิทธิพลของคลื่นลมซึ่งเกิดจากพายุทำให้ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ดังเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นที่ Long Beach Island มลรัฐนิวเจอร์ซีย์ ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อปี ค.ศ. 1962 ดังภาพที่ 2-4 และ 2-5

นอกจากนี้ การทรุดตัวของพื้นดินบริเวณชายฝั่งทะเลที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ หรือการกระทำต่าง ๆ ของมนุษย์ การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลที่เกิดจากภาวะโลกร้อน ส่งผลให้น้ำแข็งบริเวณขั้วโลกละลายลงสู่ทะเล หรือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำทะเล ซึ่งอาจ

ส่งผลทำให้เกิดน้ำทะเลท่วมชายฝั่งเพิ่มบ่อยครั้งมากยิ่งขึ้น หรือมีจำนวนพื้นที่ซึ่งได้รับผลกระทบจากน้ำทะเลท่วมชายฝั่งมากขึ้น



ภาพที่ 2-4 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงให้เห็นถึงความเสียหายบริเวณชายฝั่งของมลรัฐนิวเจอร์ซีย์ ประเทศสหรัฐอเมริกา หลังจากเกิดเหตุการณ์ Superstorm Sandy เมื่อวันที่ 30 ตุลาคม 2555 (ภาพถ่ายโดย: U.S. Air Force photo/Master Sgt. Mark C. Olsen) (U.S. Army, 2018)



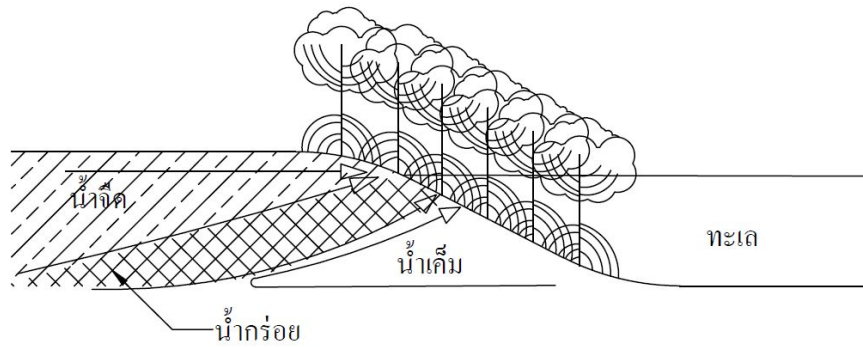
ภาพที่ 2-5 ภาพถ่ายบ้านตามแนวถนน Lighthouse ริมหายฝั่งทะเล เมืองแซทจูเวท ในมลรัฐแมสซาชูเซตส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้รับผลกระทบจากพายุฝน เมื่อวันที่ 2 มีนาคม 2561 (ภาพถ่ายโดย: Jesse Costa, WBUR) (Swasey & Creamer, 2018)

Doornkamp (1998) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่สำคัญของปัญหาน้ำทะเลท่วมชายฝั่ง ภายใต้สภาวะโลกร้อน พบว่า การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลจากภาวะโลกร้อนและการทรุดตัวของพื้นดินบริเวณชายฝั่งทะเลที่เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติหรือการกระทำต่าง ๆ ของมนุษย์ โดยกระบวนการเหล่านี้ถือเป็นการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในลักษณะของน้ำท่วม และ Nicholls and Cazenave (2010) นำเสนอผลการศึกษาว่า มีหลักฐานที่แสดงให้เห็นถึง การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลที่เกิดขึ้นในช่วงศตวรรษที่ 20 และเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในเวลาต่อมา ซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะโลกร้อน และขณะนี้ยังไม่มีข้อมูลยืนยันถึงระดับความรุนแรงที่จะเกิดขึ้นได้ โดยเฉพาะเกาะกรีนแลนด์ (Greenland) แผ่นน้ำแข็งที่ขั้วโลกใต้ฝั่งตะวันตก (West Antarctic) ได้ละลายลงสู่ทะเล และระดับความลึกของน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงไป ในหลาย ๆ พื้นที่นั้นอาจพิจารณาได้ว่าไม่มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศและระดับน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้น สูงขึ้น โดยตรง แต่เรายังพบปัญหาการทรุดตัวของพื้นที่ (Subsidence) ซึ่งได้รับผลกระทบจากระดับน้ำทะเลที่เพิ่มสูงขึ้น ถึงแม้ว่ายังไม่สามารถคาดการณ์ความรุนแรงของความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลได้ในอนาคต แต่การใช้วิธีการทางเทคโนโลยี นโยบายการจัดการ และปรับตัวให้เข้ากับสภาพปัญหาดังกล่าวเพื่อช่วยลดสภาวะโลกร้อนจำเป็นต้องได้รับดำเนินการและต้องทำให้ประสบความสำเร็จให้มากยิ่งขึ้น

การแทรกซึมของน้ำทะเล

นอกจากปัญหาน้ำทะเลท่วมชายฝั่งส่งผลให้ระบบนิเวศทางชายฝั่งทะเลเปลี่ยนแปลงไป ยังมีปัญหา “การแทรกซึมของน้ำทะเล (Saltwater intrusion)” ในชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล (Coastal aquifer) ก็เกิดขึ้นด้วย

การแทรกซึมของน้ำทะเล เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากน้ำทะเลท่วมชายฝั่งแทรกซึมเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล ซึ่งทำให้คุณภาพของน้ำในชั้นน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงไป ดังภาพที่ 2-6 Drabbe and Ghyben (1889); Herzberg (1901) ได้อธิบายเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของรอยต่อระหว่างน้ำทะเลและน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล โดยใช้เงื่อนไขของไหลสถิต (Hydrostatic) คือ มีสมมติฐานว่า น้ำทะเลมีระดับคงที่ และไม่เกิดการผสมกันระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเล ดังภาพที่ 2-7 ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ 2-1 (Cooper, Jr., 1986)



ภาพที่ 2-6 การแทรกซึมของน้ำทะเลเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล

$$z = \frac{P_f}{P_s - P_f} h \tag{2-1}$$

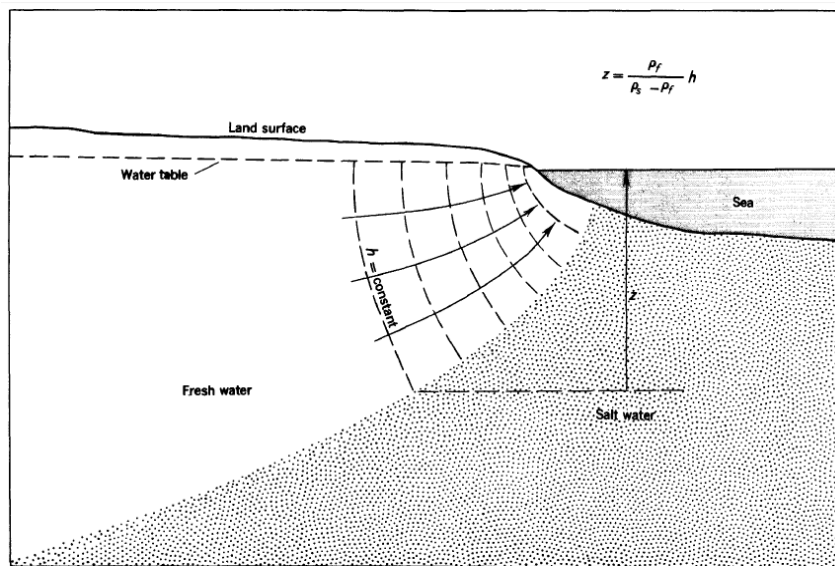
เมื่อ z คือ ความลึกใต้ระดับน้ำทะเลถึงตำแหน่งบนเส้นปฏิสมพันธ์ (m)

p_f คือ ความหนาแน่นของน้ำจืด (kg/m^3)

p_s คือ ความหนาแน่นของน้ำทะเล (kg/m^3)

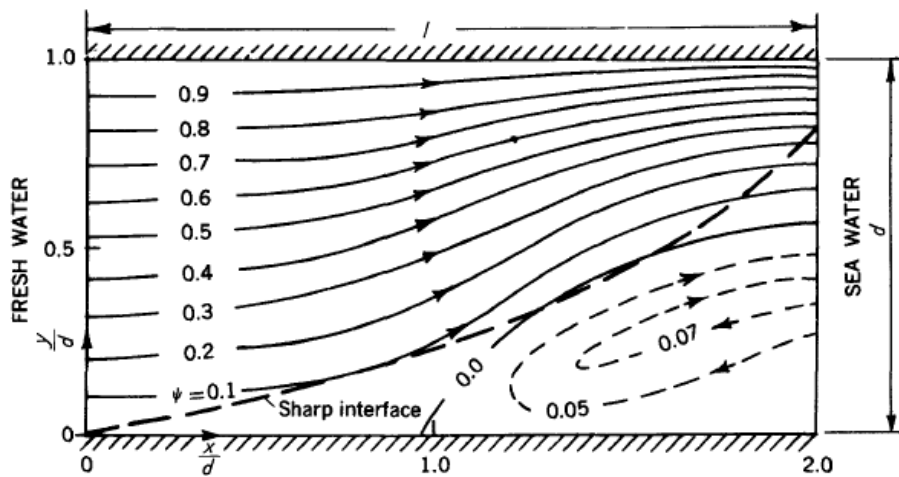
และ h คือ เสดน้ำจืดเหนือระดับน้ำทะเลที่ตำแหน่งบนรอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเล

(m)

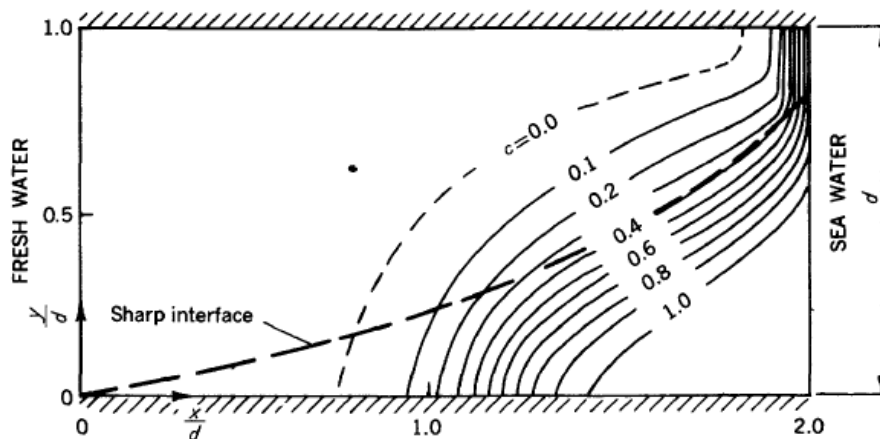


ภาพที่ 2-7 รอยต่อระหว่างน้ำทะเลและน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล โดยใช้เงื่อนไขของไหลสถิต และไม่เกิดการผสมกันระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเล (Cooper, Jr., 1986)

Henry (1986) ได้ศึกษาผลกระทบของการกระจายตัวความเค็มเมื่อน้ำทะเลแทรกซึมเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล โดยใช้วิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytical solution) พบว่า เส้นสายธารการไหล (Flow line) ปากภูน้ำทะเลไหลเข้ามาบรรจบกับน้ำจืดจากด้านล่างของชั้นน้ำบาดาล แล้วไหลกลับไปสู่ทะเลอีกครั้งที่ด้านบนของชั้นดินอุ้มน้ำ แล้วไหลออกสู่ทะเล ดังภาพที่ 2-8 และมีการกระจายตัวของความเค็มลดลงจากด้านล่างไปสู่ด้านบนของชั้นน้ำบาดาล ดังภาพที่ 2-9 (Shape interface คือ รอยต่อระหว่างน้ำทะเลและน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล ซึ่งกำหนดให้ไม่เกิดการผสมกันระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเล)

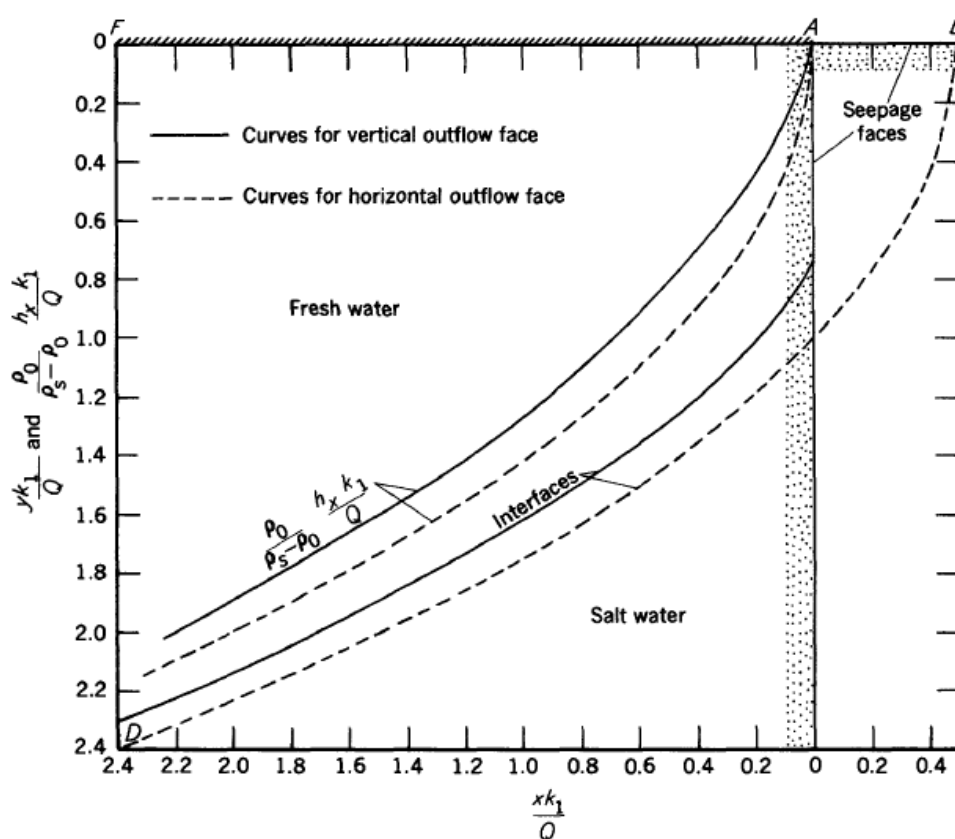


ภาพที่ 2-8 เส้นสายธารการไหลที่ได้จากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Henry, 1986)



ภาพที่ 2-9 เส้นชั้นค่าอัตราส่วนของความเค็ม (Isochor) ที่ได้จากวิธีการหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Henry, 1986)

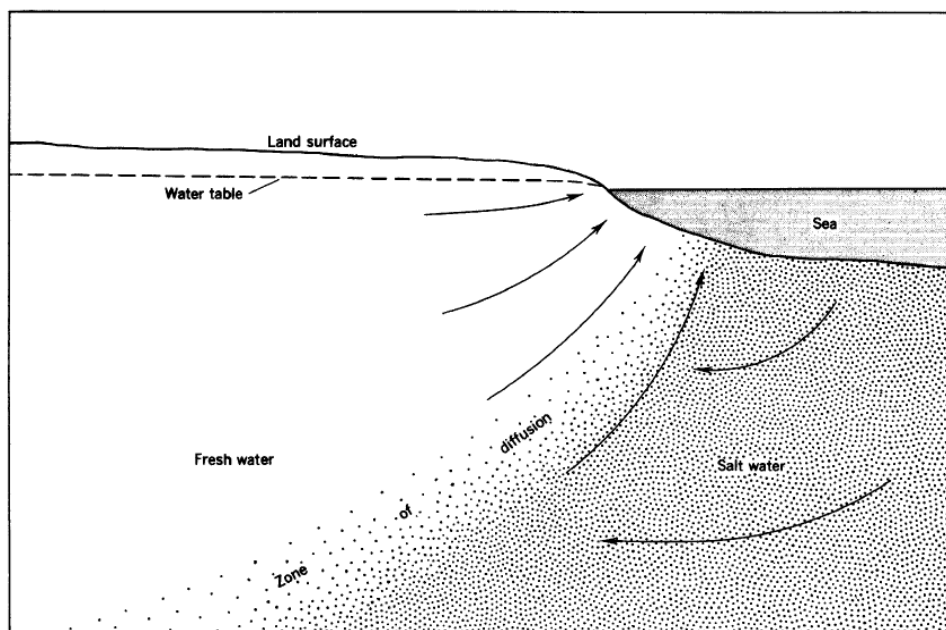
รอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเล (Sharp interface) ดังกล่าว เป็นเพียงเส้นที่สมมุติขึ้น เพื่อช่วยอธิบายลักษณะของการไหลของน้ำจืดและน้ำเค็มในชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล โดย Henry (1986) ทำการศึกษารอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเลในชั้นน้ำบาดาล ภายใต้สมมุติฐานของ Drabbe and Ghyben (1889); Herzberg (1901) โดยใช้วิธีการหาผลเฉลยเชิงตัวเลข (Numerical solution) โดยมีสมมุติฐานของการวิเคราะห์ 2 ลักษณะ คือ กำหนดให้แนวการไหลของน้ำออกจากชั้นน้ำบาดาลวางตัวในแนวตั้ง และวางตัวในแนวราบ จากการหาผลเฉลย พบว่า รอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเลที่เกิดขึ้นมีรูปร่างดังภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 รอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเลในชั้นน้ำบาดาลโดยวิธีการเชิงตัวเลข สำหรับแนวการไหลของน้ำออกจากชั้นน้ำบาดาลวางตัวในแนวตั้ง และวางตัวในแนวราบ (Henry, 1986)

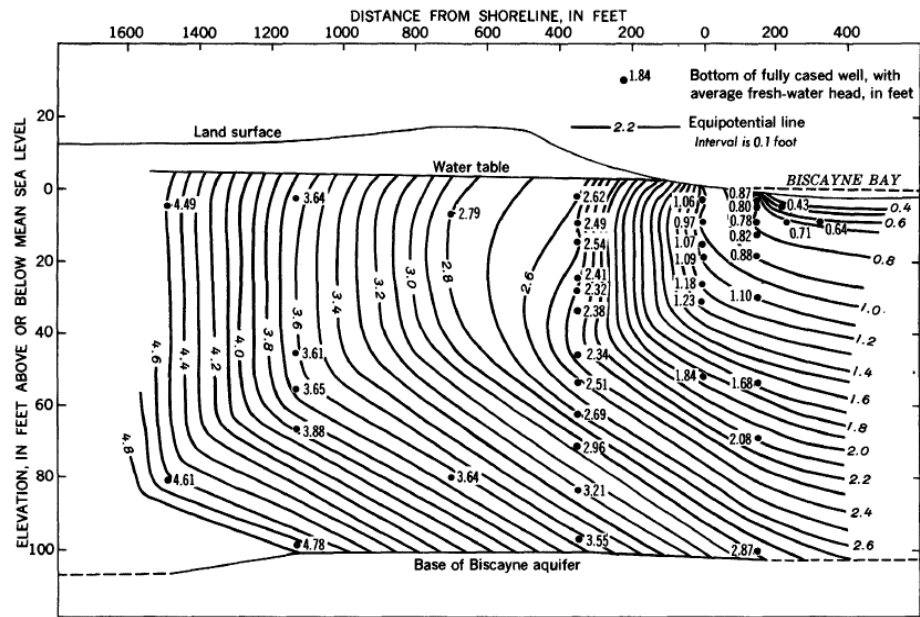
Cooper, Jr. (1986) ศึกษากรณีที่ระดับน้ำน้ำทะเลเปลี่ยนแปลง และการกระจายตัวของความเค็มในชั้นน้ำบาดาล พบว่า มีการกระจายตัวของความเค็มในชั้นน้ำบาดาลเกิดขึ้น โดยการแทรกซึมของน้ำเค็มเกิดขึ้น ณ ด้านล่างของชั้นน้ำบาดาลมากที่สุดและค่อย ๆ ลดลงจนถึงด้านบน

ของชั้นน้ำบาดาล และเกิดแนวของการแพร่ระหว่างน้ำทะเล และน้ำจืด (Zone of diffusion) หลังจาก
 นั้นการไหลของน้ำจืดจะนำพาความเค็มกลับออกสู่ทะเล ดังภาพที่ 2-11

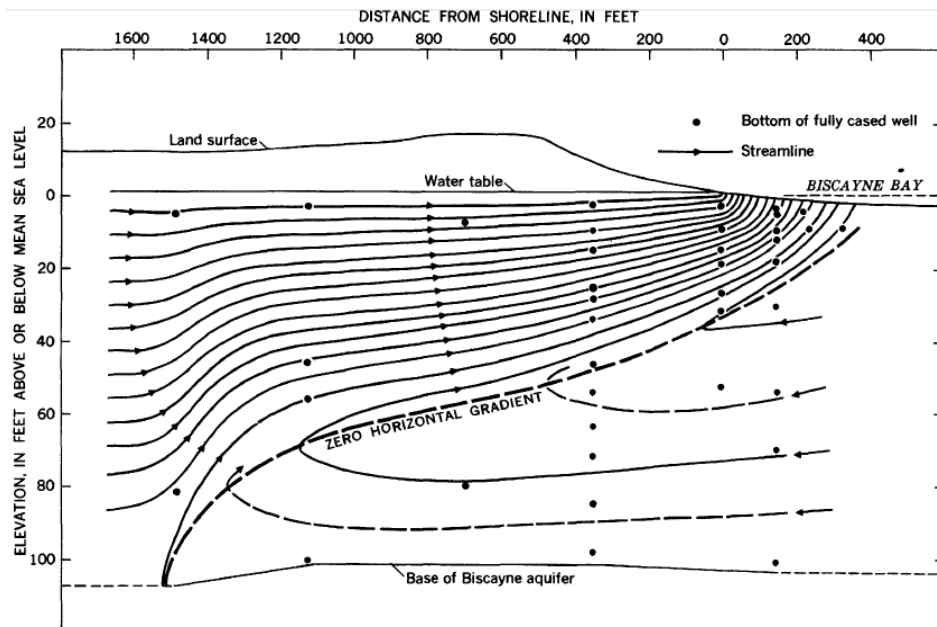


ภาพที่ 2-11 ลักษณะการไหลของน้ำจืดและการแทรกซึมของน้ำเค็มในชั้นน้ำบาดาลบริเวณ
 ริมชายฝั่งทะเล (Cooper, Jr., 1986)

Kohout (1986) ได้ตรวจสอบชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดันบิสเคย์น (Biscayne unconfined aquifer) บริเวณพื้นที่ชายฝั่งทะเลเมืองไมอามี มลรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา ในช่วงที่มีฝนตกหนัก ค่าความดัน (เฮด) ของน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น และจะผลักดันให้น้ำทะเลไหลกลับไปสู่ทะเล และเมื่อค่าความดัน (เฮด) ของน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลลดลง น้ำทะเลจะแทรกซึมเข้าชั้นน้ำบาดาลได้อีกครั้งเกิดเป็นวัฏจักรของการเคลื่อนที่ของน้ำในชั้นน้ำบาดาล ดังภาพที่ 2-12 และ 2-13

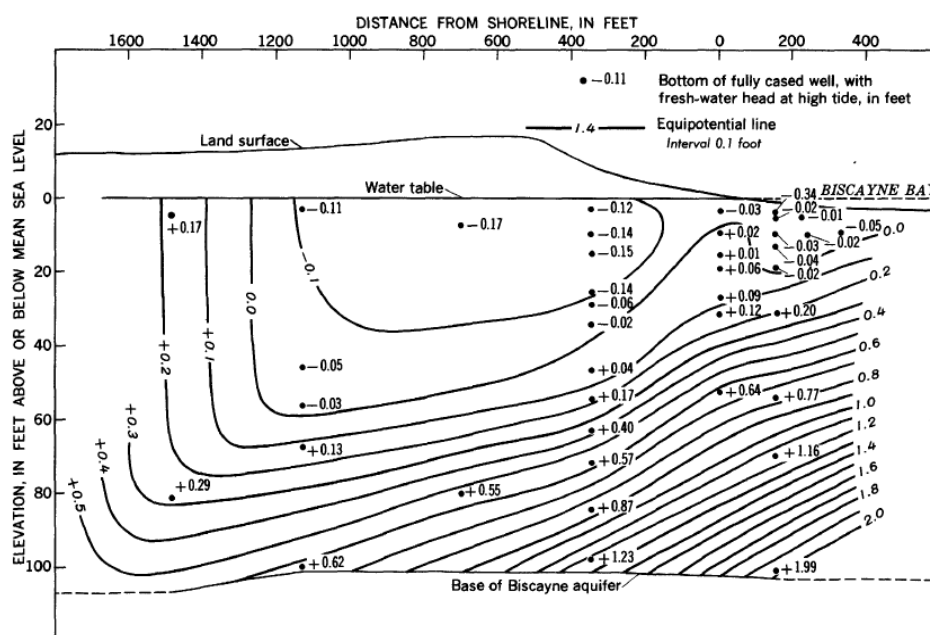


ภาพที่ 2-12 ภาพตัดขวางของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดันบิสเคย์นบริเวณชายฝั่งทะเลเมืองไมอามี มลรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อค่าความดัน (เฮด) ของน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลเพิ่มขึ้น (Kohout, 1986)

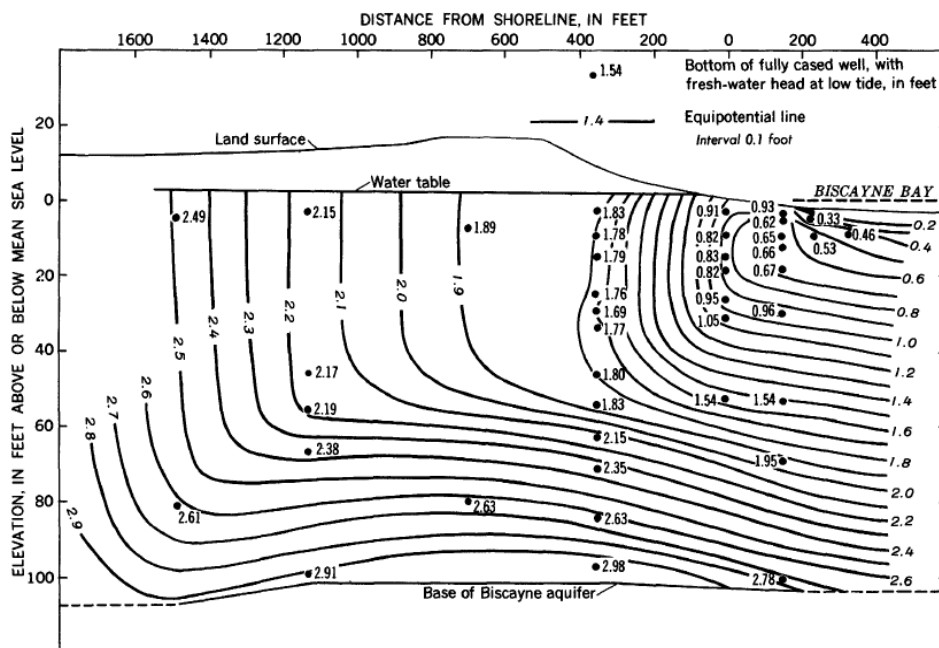


ภาพที่ 2-13 ภาพตัดขวางของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดันบิสเคย์นบริเวณชายฝั่งทะเลเมืองไมอามี มลรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อค่าความดัน (เฮด) ของน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลลดลง (Kohout, 1986)

อีกทั้ง Kohout (1986) ได้ตรวจวัดค่าระดับน้ำของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดันบิสเคียน (Biscayne unconfined aquifer) เมื่อระดับน้ำทะเลสูงขึ้น เส้นที่มีระดับแรงดันเท่ากัน (Equipotential line) มีความลาดเข้าสู่พื้นดิน ดังภาพที่ 2-14 ซึ่งแสดงว่า การไหลของน้ำส่วนใหญ่เป็นการไหลของน้ำทะเลเข้าสู่พื้นดิน และเมื่อระดับน้ำทะเลลดต่ำลง เส้นที่มีระดับแรงดันเท่ากัน (Equipotential line) มีความลาดออกสู่ทะเล ดังภาพที่ 2-15 ซึ่งแสดงว่า น้ำจืดในชั้นน้ำบาดาลและน้ำทะเลมีทิศทางไหลออกสู่ทะเล

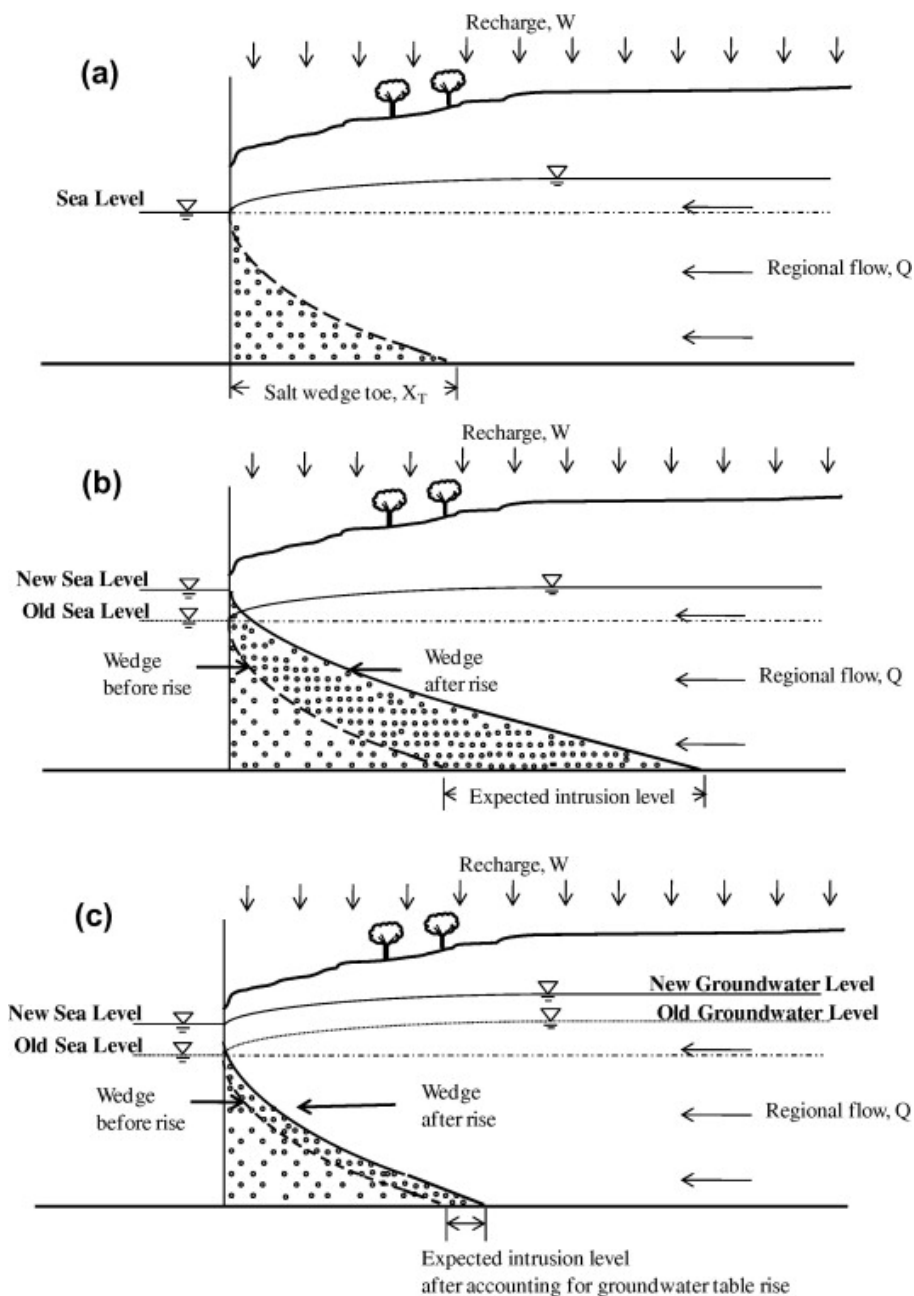


ภาพที่ 2-14 ภาพตัดขวางของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดันบิสเคียน บริเวณชายฝั่งทะเลเมืองไมอามี มลรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อระดับน้ำทะเลสูงขึ้น (Kohout, 1986)

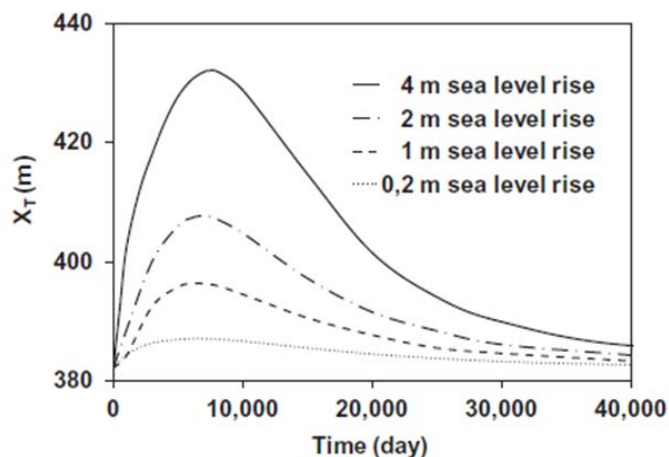


ภาพที่ 2-15 ภาพตัดขวางของชั้นน้ำบาดาลไม่มีแรงดันบิสเคย์น บริเวณชายฝั่งทะเลเมืองไมอามี มลรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อระดับน้ำทะเลลดลง (Kohout, 1986)

Chang, Clement, Simpson and Lee (2011) ทำการศึกษาการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลมีผลกระทบต่อการแทรกซึมของน้ำทะเลหรือไม่ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า เมื่อระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ตำแหน่งของรอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเลในชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล (X_f) มีค่ามากขึ้น ดังภาพที่ 2-16 แต่ตำแหน่งนี้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาแรกจนกระทั่งประมาณ 8,000 วัน หลังจากนั้นระยะที่น้ำทะเลเข้าไปในชั้นน้ำบาดาลที่ตำแหน่งล่างสุดจะค่อย ๆ ลดลง ดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-16 การเปรียบเทียบแบบจำลองเชิงแนวคิดเพื่อให้เห็นผลกระทบของระดับน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้นที่เกิดการแทรกซึมของน้ำทะเลในชั้นน้ำบาดาลบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล โดยที่ a) สถานะเริ่มต้นก่อนน้ำทะเลมีระดับสูงขึ้น b) ลิ่มความเค็มเกิดขึ้นหลังจากน้ำทะเลมีระดับสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานทั่วไป โดยไม่พิจารณาผลของแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นน้ำ และ c) ลิ่มความเค็มเกิดขึ้นหลังจากน้ำทะเลมีระดับสูงขึ้น เมื่อพิจารณาผลของแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นน้ำ (Chang, Clement, Simpson & Lee, 2011)



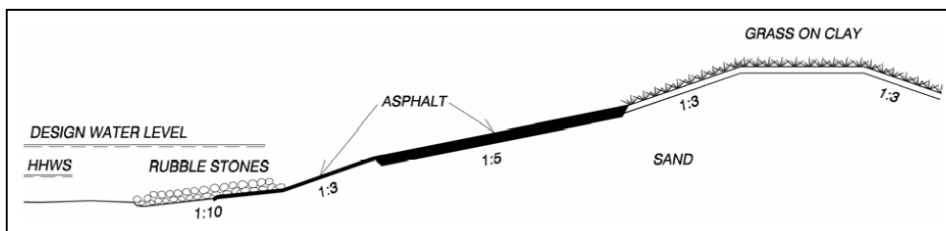
ภาพที่ 2-17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และตำแหน่งของรอยต่อระหว่างน้ำจืดและน้ำทะเล (X_T) เมื่อระดับน้ำทะเลสูงขึ้นที่ได้จากผลลัพธ์ของการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Chang et al., 2011)

การป้องกันการรุกคืบของน้ำทะเล

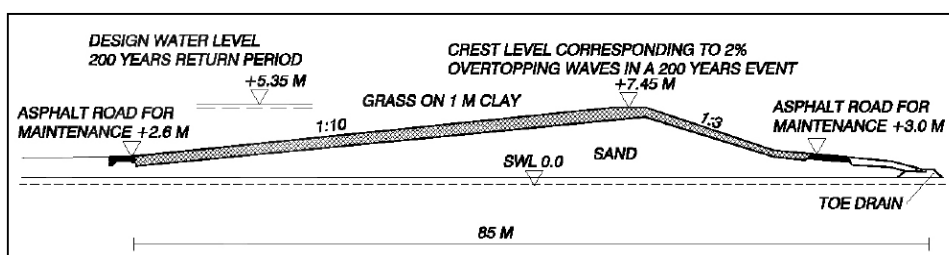
วิธีการป้องกันการรุกคืบของน้ำทะเลมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา ซึ่งสามารถแบ่งวิธีการป้องกันได้ 2 วิธีการ คือ วิธีการป้องกันน้ำทะเลท่วมชายฝั่ง และวิธีการป้องกันการแทรกซึมของน้ำทะเล โดย Hewitt and Burton (1971) กล่าวว่า วิธีการที่ใช้นั้นต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ของการสร้างและการใช้งาน ความคุ้มค่าในการก่อสร้างและการใช้งาน การยอมรับจากสังคมในการก่อสร้าง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Doornkamp, 1998)

วิธีการป้องกันน้ำทะเลท่วมชายฝั่ง

โดยทั่วไปการป้องกันน้ำทะเลท่วมชายฝั่งใช้วิธีการสร้างสิ่งกีดขวางกั้นทางน้ำหรือบริเวณที่น้ำทะเลท่วมถึง เช่น คันดิน เขื่อนดิน หรือเขื่อนคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งหากพิจารณาใช้คันดินเพื่อป้องกันน้ำทะเลท่วมชายฝั่งนั้น คันดินจะมีลักษณะเป็น โครงสร้างที่บ้น้ำ ซึ่งอาจถูกสร้างขึ้นด้วยทราย (Sand) ทรายปนทรายแป้ง (Silty sand) หรือดินเหนียว (Clay) มีความลาดชันข้างเพียงพอที่จะลดผลกระทบจากคลื่น และมีความมั่นคงเพียงพอต่อการพังทลายของลาดดิน อีกทั้งผิวหน้าของคันดินควรมีการป้องกันการกัดเซาะ เช่น การปลูกหญ้า หรือลาดหน้าด้วยยางมะตอย (Asphalt) หิน หรือคอนกรีต เป็นต้น เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับคันดิน พร้อมทั้งเป็นการปรับทัศนียภาพ ดังภาพที่ 2-18 และ 2-19



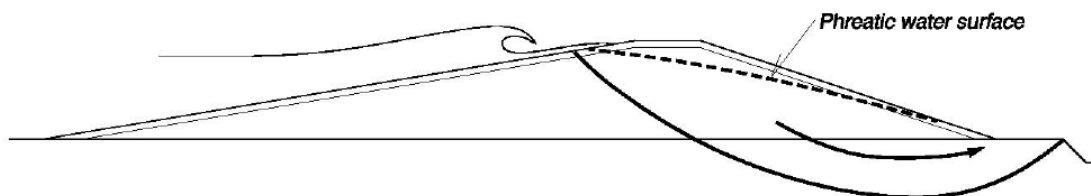
ภาพที่ 2-18 ตัวอย่างคันดินกั้นน้ำทะเลรอดหน้าด้วยหิน และยางมะตอย พร้อมทั้งมีการปลูกหญ้าที่สันคันดิน (USACE, 2006)



ภาพที่ 2-19 ตัวอย่างของคันดินกั้นน้ำทะเลรอดหน้าด้วยหญ้าซึ่งปลูกอยู่บนชั้นดินเหนียวที่ชายฝั่งทะเลทางตอนเหนือของประเทศเคนมาร์ก (USACE, 2006)

การพิบัติของคันดินกั้นน้ำทะเล

คันดินกั้นน้ำทะเลนั้นมีลักษณะคล้ายกับคันดิน หรือทำนบดินทั่วไป ซึ่งอาจเกิดการพิบัติได้ เนื่องจากการเคลื่อนพังของลาดดิน ดังภาพที่ 2-20



ภาพที่ 2-20 การพิบัติเนื่องจากการเคลื่อนพังของลาดดิน (USACE, 2006)

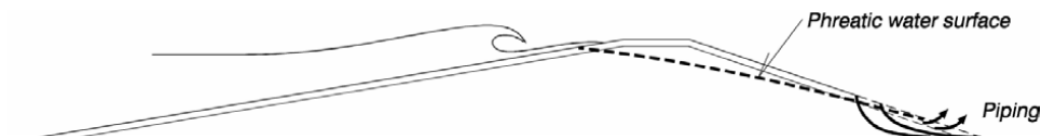
นอกจากนี้ คันดินกั้นน้ำทะเลยังสามารถพินดีได้ จากการกัดเซาะจากคลื่นน้ำทะเลซึ่งเกิดจากอิทธิพลของลม การไหลสั้นข้ามคันดิน และการรั่วซึมผ่านตัวคันดิน เรียกว่า การพินดีเนื่องจากการกัดเซาะ ดังภาพที่ 2-21



(ก) การกัดเซาะของความลาด



(ข) การกัดเซาะบริเวณตีนคันดิน



(ค) การกัดเซาะเนื่องจากการไหลสั้นและการรั่วซึม

ภาพที่ 2-21 การพินดีเนื่องจากการกัดเซาะ (USACE, 2006)

ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเล

ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเล (H) พิจารณาจากผลรวมระหว่างความสูงผิวดินตามวัสดุและระยะ Freeboard โดยความสูงของคันกั้นน้ำทะเลต้องมีความสูงไม่น้อยกว่าระดับน้ำทะเลสูงสุด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (วรากร ไม่เรียง, 2542)

$$H = \text{ความสูงเพื่อตามวัสดุ} + \text{ระยะ Freeboard} \quad (2-2)$$

โดยความสูงเพื่อตามวัสดุ มีค่าเท่ากับ 1.0 m เนื่องจาก คันถูกสร้างจากดินหรือหิน สำหรับค่าระยะ Freeboard มีค่าตามตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ระยะ Freeboard ของคันดิน

ความสูงของคันดิน (H)	ระยะ Freeboard (m) คันดินสร้างจากดินหรือหิน
น้อยกว่า 50 m	2.0
50-100 m	3.0
มากกว่า 100 m	3.5

ความกว้างของสันคันดิน

ความกว้างของสันคันดิน (B) พิจารณาจากความสูงของคันดิน (H) โดยต้องมีค่าไม่น้อยกว่าสมการที่ 2-3 และไม่เกินกว่าสมการที่ 2-4 (วรากร ไม้เรียง, 2542)

$$B \geq 3.6H^{\frac{1}{3}} - 3.0 \quad (2-3)$$

$$B \leq 5.5 + 0.055H \quad (2-4)$$

เมื่อ B คือ ความกว้างของสันคันดิน

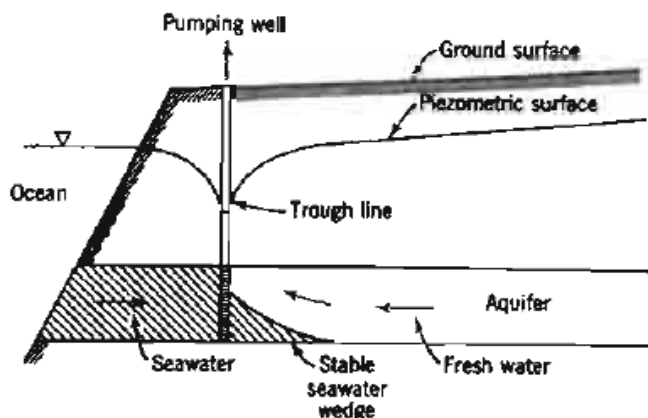
H คือ ความสูงของคันดิน

การสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล เป็นวิธีการป้องกันการรุกตัวของน้ำทะเลบนผิวดินเท่านั้น น้ำทะเลยังคงสามารถไหลซึมผ่านชั้นดิน และไหลลอดคันดินผ่านทางฐานรากซึ่งอยู่ใต้ผิวดิน โดยวิธีการป้องกันการรุกตัวของน้ำทะเลใต้ผิวดินจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

การป้องกันการรุกล้ำของน้ำทะเลใต้ผิวดิน

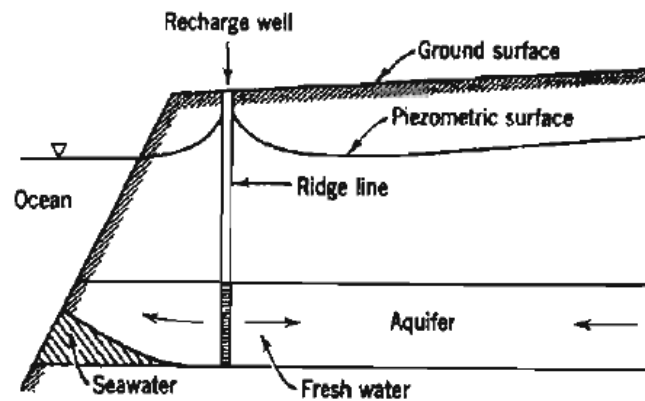
การป้องกันการรุกล้ำของน้ำทะเลใต้ผิวดินมีหลายวิธีการ ซึ่งมีจุดประสงค์คือ เพื่อป้องกันน้ำทะเลไหลรวมเข้ากับน้ำจืดในชั้นน้ำบาดาล โดยวิธีการป้องกันการรุกล้ำของน้ำทะเลใต้ผิวดินสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้ (ทวิศักดิ์ ระมิงค์วงศ์, 2546; Todd & Mays, 2004)

1. การปรับเปลี่ยนรูปแบบการสูบน้ำ (Modification of pumping pattern) เช่น การเปลี่ยนตำแหน่งของหลุมเจาะสำหรับสูบน้ำ โดยเลื่อนตำแหน่งให้เข้าไปในแผ่นดินมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นการปรับความลาดชันของลาดชลศาสตร์ ให้น้ำจืดออกสู่ทะเลปริมาณมากขึ้น หรือการลดปริมาณการสูบน้ำบาดาล เพื่อให้มีปริมาณน้ำจืดจำนวนมากขึ้นที่ไหลไปผลักดันน้ำทะเลกลับออกไปสู่ทะเล
2. การอัดเพิ่มเติมน้ำ (Artificial recharge) เป็นการทำให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นเหนือระดับน้ำทะเล สำหรับชั้นน้ำบาดาลแบบไม่มีแรงดัน อาจใช้วิธีการขังน้ำไว้ในแอ่งน้ำ หรือแหล่งเก็บกักน้ำต่าง ๆ บนผิวดิน และสำหรับชั้นน้ำบาดาลแบบมีแรงดัน อาจใช้วิธีการอัดน้ำผ่านบ่อน้ำบาดาล
3. ผนังกั้นโดยการสูบน้ำ (Extraction barrier) เป็นวิธีการสูบน้ำทะเลออกจากบ่อสูบน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยบ่อสูบน้ำจะถูกสร้างไว้ตามแนวริมชายฝั่งทะเล เพื่อทำให้เกิดแนวป้องกันไม่ให้น้ำทะเลไหลเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาล และในขณะเดียวกันน้ำจืดภายในชั้นน้ำบาดาลจะไหลออกสู่ทะเล และช่วยผลักดันน้ำทะเลให้กลับออกไปสู่ทะเล ดังภาพที่ 2-22



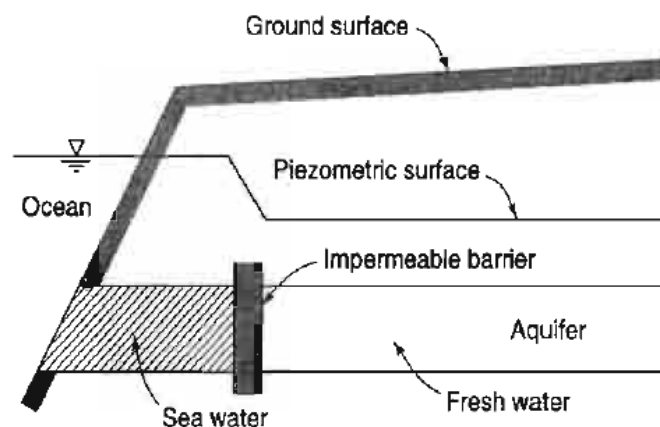
ภาพที่ 2-22 ผนังกั้นโดยการสูบน้ำ (Todd & Mays, 2004)

4. ผนังกั้นโดยการอัดน้ำ (Injection barrier) เป็นวิธีการอัดน้ำเข้าไปในบ่ออัดน้ำที่ถูกสร้างขึ้นตามแนวริมชายฝั่งทะเล เพื่อผลักดันน้ำทะเลให้ไหลกลับออกไปสู่ทะเล และเพิ่มปริมาณน้ำจืดให้ไหลเข้าสู่พื้นดิน ดังภาพที่ 2-23



ภาพที่ 2-23 ผนังกั้นโดยการอัดน้ำ (Todd & Mays, 2004)

5. ผนังกั้นน้ำใต้ผิวดิน (Subsurface barrier) เป็นการก่อสร้างสิ่งกีดขวาง หรือผนังกั้นน้ำใต้ผิวดินเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำทะเลไหลเข้าสู่ชั้นน้ำบาดาล โดยผนังกั้นน้ำนั้นต้องมีความแข็งแรงมากเพียงพอ เนื่องจากโครงสร้างอยู่ใต้ผิวดิน ทำให้ยากต่อการตรวจสอบความสมบูรณ์ของโครงสร้างตลอดอายุการใช้งาน ดังภาพที่ 2-21



ภาพที่ 2-24 ผนังกั้นน้ำใต้ผิวดิน (Todd & Mays, 2004)

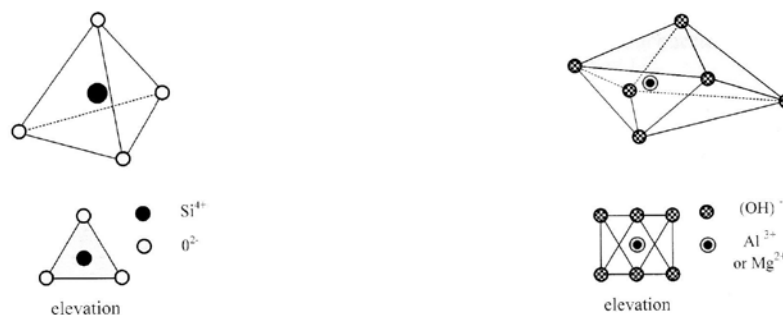
การเลือกใช้วิธีการป้องกันการรุกรานของน้ำทะเลใต้ผิวดินนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ระยะเวลาการก่อสร้าง ลักษณะของปัญหา งบประมาณ เป็นต้น การรุกรานของน้ำทะเลใต้ผิวดินไม่ได้เกิดขึ้น ณ บริเวณใต้ผิวดินที่มีน้ำทะเลเท่านั้น แต่อาจเกิดบนผิวดินที่มีน้ำทะเลขังอยู่ ซึ่งสามารถเคลื่อนตัวลงสู่ชั้นดิน และเกิดการแทรกซึมลงใต้ผิวดินได้อีกทางหนึ่งด้วย เพราะฉะนั้น

การป้องกันการรุกรานของน้ำทะเลควรป้องกันการรุกรานของน้ำทะเลใต้ทั้งบนดินและผิวดิน โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอถึงลักษณะของคันดินกั้นน้ำทะเลที่มีความสามารถในการป้องกันการรุกรานของน้ำทะเลใต้ทั้งบนผิวดินและใต้ผิวดิน โดยใช้การปรับปรุงดินในท้องถิ่นเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างคันดิน

ดินเหนียว

โดยทั่วไปดินเหนียวเป็นดินจำพวกมวลละเอียด มีค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) และมีขนาดอนุภาคดินเล็กกว่า 0.002 mm ในทางวิศวกรรมนั้นดินเหนียวเกิดจากการผุพังทางเคมี (Chemical weathering) ของหินที่มีไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrous aluminum silicates) ซึ่งธาตุอะลูมิเนียม (Aluminum, Al) อาจถูกแทนที่ด้วยธาตุกลุ่มโลหะ (Metallic elements) ทั้งหมด หรือเพียงบางส่วน เช่น ธาตุแมกนีเซียม (Magnesium, Mg) หรือธาตุเหล็ก (Iron หรือ Ferrum, Fe) เป็นต้น โดยมีสารประกอบเบสเป็นส่วนประกอบสำคัญ ทำให้เกิดเป็นดินเหนียวขึ้น

ดินเหนียวมีคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซึมน้ำ และการหดตัว และจากคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของอนุภาคดินทำให้เกิดการจัดเรียงตัวในโครงสร้างของเม็ดดิน โดยในโครงสร้างดินเหนียวประกอบไปด้วย ทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Silica tetrahedron) และทรงเหลี่ยมแปดหน้า (Alumina octahedron) เมื่ออะตอมของทรงเหลี่ยมสี่หน้ามารวมตัวกันเป็นแผ่นชั้น เรียกว่า แผ่นซิลิกา (Silica layer, Si_4O_{10}) ซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และเมื่ออะตอมของทรงเหลี่ยมแปดหน้ามารวมตัวกัน เรียกว่า แผ่นออกตะฮีดรอน (Octahedral layer, $\text{Al}_4(\text{OH})_{12}$) ซึ่งมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ดังภาพที่ 2-25

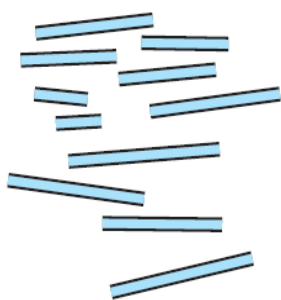


(ก) ทรงเหลี่ยมสี่หน้า

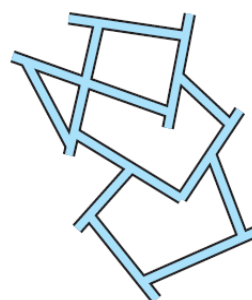
(ข) ทรงเหลี่ยมแปดหน้า

ภาพที่ 2-25 แผนผังดินเหนียวทรงเหลี่ยมสี่หน้า และทรงเหลี่ยมแปดหน้า (Holtz & Kovacs, 1981)

ดินเหนียวที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมในน้ำจืด และผลลัพธ์ของการแลกเปลี่ยนไอออนทำให้อนุภาคของดินมีการจัดเรียงตัวแบบ Face-to-face เป็นโครงสร้างแบบเป็นระเบียบ (Dispersed structure) ดังภาพที่ 2-26 (ก) หรืออาจมีการจัดเรียงตัวแบบ Edge-to-face เป็นโครงสร้างแบบระเกะระกะ (Flocculent structure) ดังภาพที่ 2-26 (ข) แต่เมื่อถูกแรง หรือน้ำหนักมากกระทำ จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็น โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ



(ก) โครงสร้างแบบเป็นระเบียบ



(ข) โครงสร้างแบบระเกะระกะ

ภาพที่ 2-26 โครงสร้างของดินเหนียว (Das, 2010)

ดินเหนียวอินทรีย์

ดินเหนียวอินทรีย์ คือ ดินเหนียวที่มีการสะสมของสารอินทรีย์ (Organic matter) ซึ่ง ได้แก่ ซากพืช หรือซากสัตว์ เป็นต้น ปริมาณสารอินทรีย์หรืออินทรีย์วัตถุที่พบในดินทั่วไปมีปริมาณแตกต่างกัน สำหรับประเทศที่อยู่ในเขตร้อนมีการสะสมอินทรีย์วัตถุที่น้อย เนื่องจาก อุณหภูมิและความชื้นสูง ส่งผลให้การสลายตัวของจุลินทรีย์ในดินเกิดได้อย่างรวดเร็ว ส่วนประเทศที่อยู่ในเขตอากาศหนาวเย็น มีการสะสมอินทรีย์วัตถุที่มาก เพราะการสลายตัวของจุลินทรีย์ในดินเกิดได้ช้ากว่า เพราะว่าอุณหภูมิและความชื้นต่ำกว่า (พรชัย สุชาทร, 2525)

Germaine and Germaine (2009) ได้จำแนกดินตามปริมาณสารอินทรีย์ในดินได้เป็น 8 ชนิด ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 การจำแนกดินตามปริมาณสารอินทรีย์ในดิน

ประเภท	ปริมาณสารอินทรีย์ (%)
ดินที่มีการทับถมของซากพืช (Peats)	75-100
ดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์ หรือดินอินทรีย์สาร (Organic matter)	75-100
ดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์มาก (Highly organic soils)	30-75
ดินตะกอน/ทรายที่มีปริมาณอินทรีย์ (Organic silts/sand)	5-30
ดินร่วน (Loam borrow)	4-20
ดินซากพืช (Peat borrow)	< 25
วัสดุชั้นรองพื้นทาง (Road base material)	< 5
วัสดุสำหรับใช้ในงานถม (Structural fill)	< 2

การปรับปรุงคุณภาพดินด้านวิศวกรรม

การปรับปรุงคุณภาพดินนั้นมีหลายวิธีการ โดยมีการศึกษาแนวทางการปรับปรุงคุณภาพดิน วัสดุที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน และคุณสมบัติของดินที่เปลี่ยนแปลงไป

วิธีการปรับปรุงคุณภาพดิน

วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีคุณสมบัติด้านวิศวกรรมดีขึ้น ทั้งด้านกำลังและความตึบน้ำ โดยทั่วไปมีวิธีการที่นิยมใช้อยู่ 4 ประการ ได้แก่

1. การทำให้แน่นขึ้น (Densification) คือ การทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดดินมีขนาดลดลง หรือเม็ดดินเคลื่อนที่เข้าใกล้ชิดกันด้วยการให้พลังงานในการบดอัดดิน โดยใช้เครื่องจักรที่มีน้ำหนักมาก วิธีการนี้ต้องใช้พลังงานค่อนข้างมากในการบดอัด หากใช้พลังงานบดอัดที่สูงเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของดินบริเวณนั้น

2. การเสริมแรง (Reinforcement) คือ การเสริมวัสดุเพิ่มเข้าไปในเนื้อดิน ช่วยให้ดินรับกำลังได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งวัสดุที่นิยมนำมาใช้คือ วัสดุสังเคราะห์ ที่เรียกว่า Geosynthetics

3. การระบายน้ำ (Drainage) คือ เป็นวิธีการเร่งระบายน้ำออกจากมวลดินโดยใช้น้ำหนักกดทับ ซึ่งช่วยทำให้ดินมีความแข็งแรงมากขึ้น และมีปริมาณการยุบตัวน้อยลง

4. การใช้สารผสมเพิ่ม (Cementation) คือ การนำสารผสมเพิ่มมาเป็นตัวกลางทำปฏิกิริยาภายในเนื้อดิน ผลที่ได้ช่วยให้ดินมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปและมีเสถียรภาพดียิ่งขึ้น สารผสมเพิ่มถูกเรียกอีกชื่อว่า “สารเสถียรภาพ” (Stabilizing agents) ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้ เช่น เบนโทไนด์ ปูนขาว และปูนซีเมนต์ เป็นต้น

ในงานวิจัยชิ้นนี้เลือกวิธีการใช้สารเสถียรภาพ เพราะวิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้และใช้ระยะเวลาสั้น ผลที่ได้ช่วยให้ดินมีโครงสร้างและคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการ

คุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้สารเสถียรภาพ

คุณสมบัติด้านความทึบน้ำ Gleason, Daniel and Eykhole (1997) ได้นำเสนอการเลือกใช้ แคลเซียมเบนโทไนต์และโซเดียมเบนโทไนต์สำหรับการนำไปใช้ในสถานที่เก็บกักน้ำ พบว่าการใช้โซเดียมเบนโทไนต์มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (Permeability, k) น้อยกว่า แคลเซียมเบนโทไนต์ที่ปริมาณเท่ากัน และทวีศักดิ์ วังไพศาล และนท แสงเทียน (2553); Chalermyanont & Arrykul (2004) เสนออัตราส่วนผสมระหว่างทรายและโซเดียมเบนโทไนต์ที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) ของน้ำน้อยกว่า 10^{-9} m/s พบว่า อัตราส่วนผสมระหว่างทรายและโซเดียมเบนโทไนต์ที่ 3% ของน้ำหนักทรายแห้งเพียงพอที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) ของน้ำน้อยกว่า 10^{-9} m/s

สำหรับคุณสมบัติด้านกำลัง Gleason et al. (1997) ได้นำเสนอการเลือกใช้ แคลเซียมเบนโทไนต์และโซเดียมเบนโทไนต์สำหรับการนำไปใช้ในสถานที่เก็บกักน้ำ พบว่าการใช้แคลเซียมเบนโทไนต์มีกำลังรับแรงเฉือนมากกว่าโซเดียมเบนโทไนต์ และ ศิริศักดิ์ จินดาพล, สยาม ยิ้มศิริ, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และสัจชัย มิตรเอม (2550) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินท้องถิ่นในสภาพเข่น้ำโดยการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาวเพื่อให้มีคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันดินทางรถไฟ ซึ่งใช้การทดสอบ California bearing ratio หรือ CBR ตามมาตรฐาน ASTM D1883 Standard test method for CBR (California bearing ratio) of laboratory-compacted soils พบว่า การผสมปูนซีเมนต์ที่ปริมาณ 8% ทำให้ค่า CBR มากกว่าปูนขาวที่ปริมาณเดียวกัน

หน่วยงานกรมทางหลวงของสหรัฐอเมริกา (AASHTO, 1995) แนะนำว่า ดินในการบดอัดดินผสมปูนซีเมนต์ ดินเหนียวอินทรีย์ที่มีสีเทาถึงสีเทาเข้มควรผสมปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 4% และดินเหนียวอินทรีย์ที่มีสีดำควรผสมปูนซีเมนต์ไม่น้อยกว่า 6%

สารเสถียรภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน

สารเสถียรภาพ (Stabilizing agent) ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินนั้นมีหลายชนิด เช่น ปูนขาว (Lime) เถ้าลอย (Fly ash) ปูนซีเมนต์ (Cement portland) เป็นต้น แต่ละชนิดจะให้ผลที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของดิน สารที่อยู่ในดิน และผลลัพท์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีนั้น เพื่อใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเลให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยคำนึงคุณสมบัติทางด้านกำลังและความทึบน้ำ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเสถียรภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดิน เนื่องจากเป็นสารเสถียรภาพที่นิยมใช้งาน คุณภาพปูนซีเมนต์คงที่ได้มาตรฐาน

สามารถหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง มีวิธีการใช้งานง่ายไม่ต้องมีขั้นตอนการเตรียมก่อนใช้งาน และคุณสมบัติของผลลัพท์ที่ได้สอดคล้องกับความต้องการ

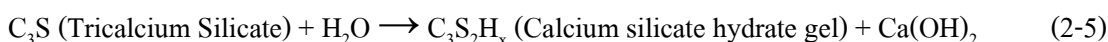
กลไกของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำ

Davidson (1961) อธิบายว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ และ โครงสร้างของดินได้ แต่ผลลัพท์ที่ได้นั้นอาจแตกต่างกัน ถ้าคุณสมบัติทางเคมีของดินแตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน และดินมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่เหมือนกันก็ตาม การผสมปูนซีเมนต์กับดินทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration ขึ้นระหว่างน้ำในมวลดินและปูนซีเมนต์ ทำให้เกิด Calcium ion และมีกรแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้ารอบ ๆ เม็ดดิน ทำให้เม็ดดินจับตัวเป็นก้อน ส่งผลให้ค่า Plasticity ลดลง และในขณะที่เกิดปฏิกิริยา Hydration นั้น จะมีการยึดประสานเกิดขึ้นระหว่างเม็ดดินกับปูนซีเมนต์ และระหว่างปูนซีเมนต์กับปูนซีเมนต์

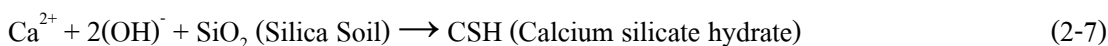
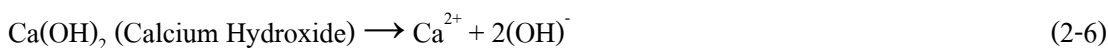
Lambe, Metchael and Moh (1959); Moh (1962) พบว่า เมื่อน้ำผสมกับปูนซีเมนต์ทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydration นั้นทำให้เกิดสารประกอบ Calcium silicate hydrate (CSH), Calcium alumina hydrate (CAH) และ Released hydrate lime กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ทำให้กำลังของดินเพิ่มสูงขึ้น ส่วน Released hydrate lime ทำให้ pH ของน้ำในมวลดินมีค่าเพิ่มขึ้น (มีสภาพเป็นเบส) ซึ่งทำให้ Colloid gel หรือ Cement gel เกิดการรวมตัวยึดเกาะกันทำให้มีกำลังสูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำ

Bergado et al. (1996) กล่าวว่า ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์ ดิน และน้ำสามารถเขียนสมการแสดงได้ดังนี้



สารผลิตภัณฑ์ชนิดแรก



สารผลิตภัณฑ์ชนิดที่สอง



สารผลิตภัณฑ์ชนิดที่สอง

จากสมการที่ 2-5 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำในดิน ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารผลิตภัณฑ์ชนิดแรก ($C_3S_2H_x$ (Calcium silicate hydrate gel)) โดย

แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะแยกออกเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนดังสมการที่ 2-6 ซึ่งไปทำปฏิกิริยากับแร่ในดินทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ชนิดที่สอง (CSH (Calcium silicate hydrate) และ CAH (Calcium alumina hydrate)) ดังสมการที่ 2-7 ถึง 2-8 ซึ่งสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ ทำให้เกิดการเชื่อมประสานและการแข็งตัวของดินซีเมนต์ ส่งผลให้มีคุณสมบัติด้านกำลังเพิ่มขึ้น และความทึบน้ำสูงขึ้น แต่ถ้าดินมีค่า pH น้อยกว่า 12.6 จะมีปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นตามมาดังสมการที่ 2-9



สารผลิตภัณฑ์ชนิดแรก

สารผลิตภัณฑ์ชนิดแรกเกิดการแตกตัวเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารผลิตภัณฑ์ชนิดแรก ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_x$) อีกครั้ง โดยสารผลิตภัณฑ์ที่ได้กระบวนการนี้มีกำลังที่น้อยกว่าสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำในดิน ส่งผลให้กำลังของดินซีเมนต์มีค่าลดลงซึ่งการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ เรียกว่า ดินซีเมนต์ (ณพล อยู่บรรพต, 2556)

คุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเสถียรภาพ

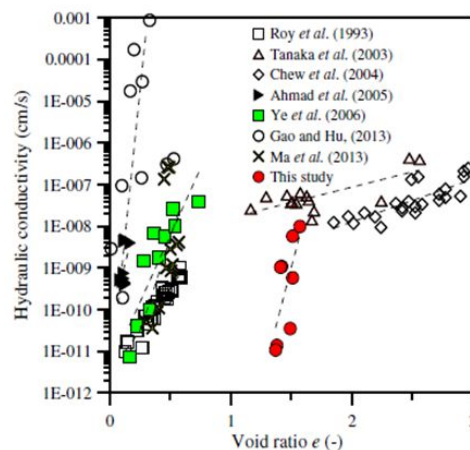
สำหรับคุณสมบัติด้านความทึบน้ำต้องคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) ซึ่งกมล อมรฟ้า (2545) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว พบว่า เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) ของน้ำลดลง แต่เมื่อปริมาณปูนขาวเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) ของน้ำเพิ่มขึ้น และ มนตรี ฝ้ายอุประ (2547) ได้ศึกษาการลดค่าความซึมของดินกำแพงแสน โดยใช้ปูนขาว ชิลิก้าซีเมนต์ และปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 พบว่า ดินที่ผสมปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 1 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำกว่าดินที่ผสมชิลิก้าซีเมนต์ และปูนขาว

ส่วนคุณสมบัติด้านกำลังหรือความแข็งแรงในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล ต้องพิจารณาค่าแรงเชื่อมแน่น (c) ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอผลของการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังทางกลศาสตร์ (Strength และ Stiffness) ของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในสภาพแช่น้ำ จากการทดสอบแบบแรงอัดไม่มีขอบเขตจำกัด ได้แก่ ศิริศักดิ์ จินดาพล, สยาม ยิ้มศิริ, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, และอภินิติ โชติสังกัส (2550) โดยผลการปรับปรุงดินนั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่า เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าแรงเชื่อมแน่น (c) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ Sarosseiri and Muhunthan (2009); Pakbaz and Alipour (2009) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของปูนซีเมนต์ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในท้องถิ่น พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ส่งผลให้มีความแข็งแรงของดินเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ เกษม เพชรเกตุ และ โกศล ไกรพัฒน์พงศ์ (2553) ได้ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH value) ต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ พบว่า ค่า Unconfined compressive strength จะเพิ่มขึ้น เมื่อค่า pH และอายุการบ่มเพิ่มขึ้น

สำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นทะเลต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านความทึบน้ำสูง (หรือมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้น้ำต่ำ) และคุณสมบัติด้านกำลัง

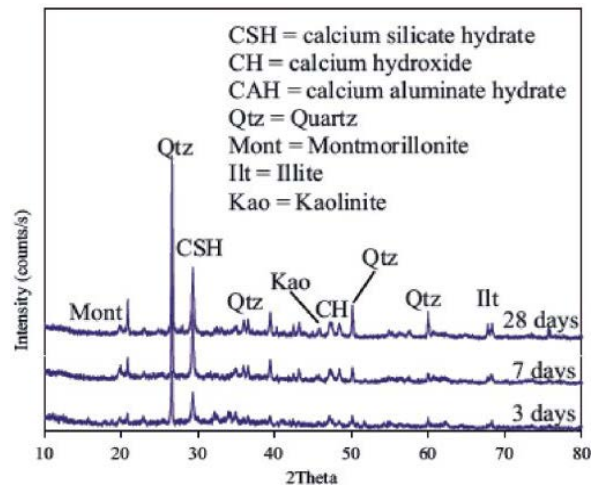
Deng, Yue, Liu, Chen, & Zhan (2015) แสดงให้เห็น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้และอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio, e) ดังภาพที่ 2-27 ซึ่งแสดงให้เห็นถึง เมื่ออัตราส่วนช่องว่างลดลง จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้น้ำลดลงเช่นกัน



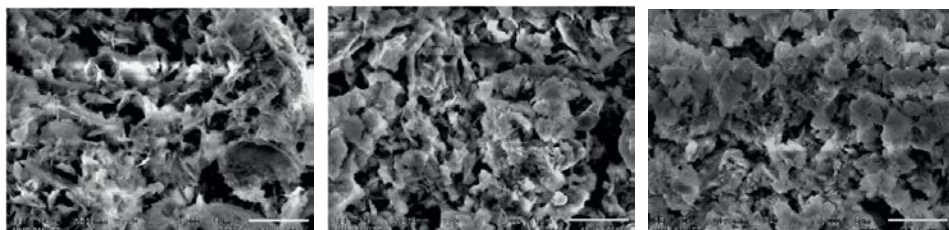
ภาพที่ 2-27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้และอัตราส่วนช่องว่าง (Deng, Yue, Liu, Chen, & Zhan, 2015)

ณพล อยู่บรรพต (2556) เสนอวิธีการศึกษาโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ช่วยอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ทำให้ทราบถึงประเภทและปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในสารผลิตภัณฑ์ และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ถ่ายภาพการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive method) พบว่า ผลลัพธ์จากปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำในดินเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์หลักประเภท Calcium silicate hydrate (CSH) ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้เกิดการเชื่อมประสานและการแข็งตัวของดินซีเมนต์ เมื่อปริมาณของ CSH เพิ่มมากขึ้นทำให้กำลังอัดของดินซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น และ CSH มีปริมาณสูงขึ้นตามอายุการบ่มโดยใช้วิธี XRD ในการวิเคราะห์

ดั่งภาพที่ 2-28 และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มทราบโดยการใช้ SEM ดั่งภาพที่ 2-29



ภาพที่ 2-28 การวิเคราะห์หาปริมาณสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในดินซีเมนต์ด้วยวิธี XRD (ณพล อยู่บรรพต, 2556)



(ก) อายุการบ่ม 3 วัน

(ข) อายุการบ่ม 7 วัน

(ค) อายุการบ่ม 28 วัน

ภาพที่ 2-29 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินซีเมนต์ตามอายุการบ่มเมื่อถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM (ณพล อยู่บรรพต, 2556)

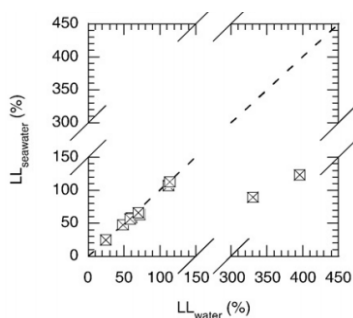
ดังนั้น คุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเลต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านความตึบแน่นสูงหรือมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้น้ำต่ำ และคุณสมบัติด้านกำลัง โดยที่ความตึบแน่นสามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนช่องว่างหรือช่องว่างภายในเนื้อดิน และด้านกำลังสามารถพิจารณาได้จากปริมาณ CSH ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำในดินมีคุณสมบัติทำให้เกิดการเชื่อมประสานและการแข็งตัวของดินซีเมนต์ โดยสามารถตรวจสอบได้โดยการทดสอบ Unconfined compressive strength

ผลกระทบของน้ำทะเลต่อคุณสมบัติของดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ปูนซีเมนต์

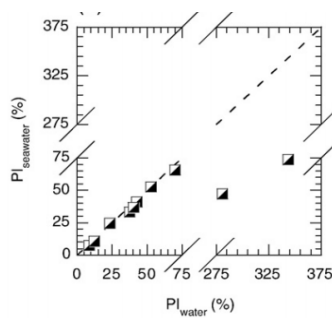
Ingles and Metcalf (1973) พบว่า เมื่อปรับปรุงคุณภาพดิน โดยการผสมเกลือ โซเดียมคลอไรด์กับดิน จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของดินสูงขึ้น ลดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ ลดการบวมตัวของดินและการหดตัวของมวลดิน โดยเฉพาะในบริเวณที่มีสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงมาก ๆ

Hausmann (1990) อธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของน้ำที่มีเกลือโซเดียมคลอไรด์ละลายอยู่ เมื่อน้ำไปผสมกับดิน จะมีผลทำให้ น้ำที่ผสมในมวลดินมีค่าแรงตึงผิวมากขึ้น จุดเยือกแข็งของน้ำมีค่าลดลง แต่จุดเดือดของน้ำมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคุณสมบัติของดินที่ได้รับการบดอัดจะยังคงสภาพอยู่ได้ เพราะการสูญเสียน้ำในมวลดินเกิดขึ้นน้อยกว่าการใช้น้ำปกติ หรือหากน้ำมีการระเหยออกไปจากมวลดิน ก้อนผลึกของเกลือโซเดียมคลอไรด์จะคงอยู่ในมวลดินทำให้ช่องว่างของมวลดินเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่ากว่าการใช้น้ำปกติในการบดอัด

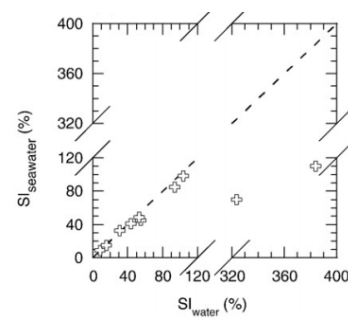
Yukselen-Aksoy, Kaya, and Ören (2008) เสนอการศึกษาผลกระทบน้ำทะเลในการทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์กและการอัดตัวคายน้ำ โดยทำการศึกษาจากตัวอย่างดินภายในประเทศตุรกี 8 แห่ง ซึ่งประกอบไปด้วยแร่ต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น แร่มอนต์โมริโอไนต์ แร่ดินเหนียวผสม แร่ฮัลโลไอไซต์ และ แร่อีลไลต์ เป็นต้น และตัวอย่างดินสังเคราะห์ 2 ชนิด โดยได้ใช้น้ำกลั่น และน้ำทะเล โดยทำการทดสอบแอดเตอร์เบิร์กจำกัด และการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ



(ก) ขีดจำกัดของของเหลว

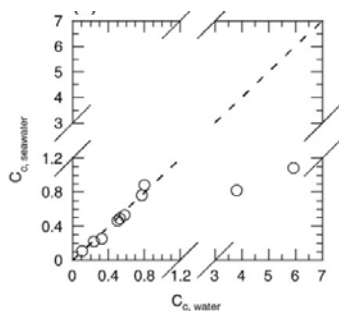


(ข) ดัชนีความเหนียว

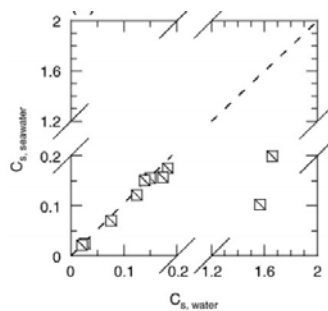


(ค) ดัชนีของการหดตัว

ภาพที่ 2-30 ผลกระทบของน้ำทะเลตามการทดสอบแอดเตอร์เบิร์กจำกัด (Yukselen-Aksoy, Kaya, & Ören, 2008)



(ก) การอัดตัว



(ข) การขยายตัว

ภาพที่ 2-31 ผลกระทบของน้ำทะเลตามการทดสอบอัดตัวคายน้ำ (Yukselen-Aksoy et al., 2008)

จากภาพที่ 2-30 และ 2-31 แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างดินที่ทดสอบส่วนใหญ่มีอิทธิพลต่อน้ำกลั่นและน้ำทะเลเป็นแบบ 1 : 1 ดังนั้น การใช้น้ำทะเลในการทดสอบให้ผลที่คล้ายกันกับการใช้น้ำกลั่นในการทดสอบ หรือน้ำทะเลไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของดิน

การปรับปรุงคุณภาพดินด้านเกษตร

การจำแนกระดับความเค็มในดิน

หากดินที่มีปริมาณเกลือละลายสะสมอยู่ จะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช และปริมาณรวมทั้งคุณภาพของผลผลิต และหากมีปริมาณเกลือละลายสะสมอยู่จำนวนมากอาจทำให้พืชตายได้ เนื่องจากเกิดความไม่สมดุลของแร่ธาตุในพืช พืชจะเกิดอาการขาดน้ำ และสะสมไอออนที่เป็นพิษกับพืชมากเกินไป วิธีการจำแนกความเค็มของดินที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช นิยมใช้วิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าของดิน (Electrical conductivity, EC) โดยเป็นการวัดค่าการนำไฟฟ้าของดินในขณะที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Electrical conductivity at saturation extract, E_{ce}) ที่ 25°C ดังตารางที่ 2-3 (สมศรี อรุณินท์, 2539)

ตารางที่ 2-3 การจำแนกความเค็มของดินที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

ECe (dS/m)	ปริมาณเกลือ ในดิน (%)	ปริมาณเกลือ ในดิน (ppt)	ระดับความเค็ม ของดิน	อิทธิพลต่อพืช / พืชที่ สามารถเจริญเติบโตได้
2	<0.1	< 1-0	ไม่เค็ม	ไม่มีผลใด ๆ ต่อพืช
2-4	0.1-0.2	1.0-2.0	เค็มเล็กน้อย	มีผลต่อพืชที่ไม่ทนเค็ม
4-8	0.2-0.4	2.0-4.0	เค็มปานกลาง	มีผลต่อพืชหลาย ๆ ชนิด
8-16	0.4-0.8	4.0-8.0	เค็มมาก	พืชทนเค็ม
16	>0.8	>8.0	เค็มจัด	พืชทนเค็มไม่กี่ชนิด

หมายเหตุ: ppt คือ อัตราส่วนของปริมาณของแข็ง 1 ส่วน ต่อปริมาณของเหลว 1,000 ส่วน

การปรับปรุงคุณภาพดินเค็ม

การปรับปรุงคุณภาพของดินเค็ม คือ วิธีการที่ทำให้ปริมาณเกลือละลายสะสมอยู่ในดินลดลง โดยคำนึงถึงแนวทางการป้องกันไม่ให้เกิดการแพร่กระจายความเค็มเพิ่มมากขึ้น โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้ (สมศรี อรุณินท์, 2539)

1. การควบคุมความเค็ม เป็นวิธีการควบคุมการแพร่กระจายของความเค็ม ซึ่งทำได้โดยการให้น้ำถี่ขึ้น การเลือกชนิดพืชที่จะปลูก การเพิ่มปริมาณน้ำเพื่อการชะล้าง การให้น้ำปริมาณมากก่อนการปลูกพืช การเลือกตำแหน่งหยอดเมล็ด การเปลี่ยนวิธีการให้น้ำชลประทาน การเปลี่ยนแหล่งน้ำชลประทาน การปรับระดับพื้นที่ การปรับปรุงหน้าตัดดิน และการระบายน้ำ

2. การทำให้น้ำซึมลงไปในดินได้เพิ่มขึ้น เป็นวิธีการที่ทำให้ดินมีความพรุนมากขึ้น ส่งผลให้น้ำสามารถไหลซึมลงไปในดินได้มากขึ้น โดยมีวิธีการที่นิยมใช้อยู่ 2 วิธี คือ วิธีการทางเคมีซึ่งเป็นการใช้ยิปซัมไล่ที่โซเดียมที่มีมากเกินไป และวิธีการทางกายภาพซึ่งใช้วิธีการไถเพื่อทำลายชั้นดาน (Sub Soiling) ช่วยให้การไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดินดียิ่งขึ้น

3. การเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดิน เมื่อดินเค็มปริมาณเกลือละลายได้ที่สะสมอยู่ทำให้อินทรีย์วัตถุในดินถูกชะล้างไปจากเนื้อดินได้ง่าย เมื่อระดับความเค็มในดินลดลง ควรใส่อินทรีย์วัตถุจำพวกปุ๋ยเพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้แก่ดิน

พืชทนเค็ม

พืชทนเค็ม คือ พืชที่มีความสามารถเจริญเติบโตได้ครบวงจรชีวิตในสภาพดินซึ่งมีความเค็มปรากฏอยู่ แต่เมื่อระดับความเค็มเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้การเจริญเติบโต และผลผลิตของ

พืชลดลง และอาจรุนแรงถึงทำให้พืชตายได้เช่นกัน โดยขึ้นกับระดับความสามารถในการทนเค็มของพืชแต่ละชนิด ดังตารางที่ 2-4 (สมศรี อรุณินท์, 2539)

ตารางที่ 2-4 พันธุ์พืชทนเค็ม (อรุณี ยูวะนิยม และสมศรี อรุณินท์, 2539)

ระดับความเค็มของดิน	เค็มน้อย	เค็มปานกลาง	เค็มมาก	
เปอร์เซ็นต์เกลือ (%)	0.12-0.25	0.25-0.50	0.50-0.75	0.75-1.00
พืชสวน	ถั่วฝักยาว	บวบ กะหล่ำดอก	ผักโขม ผักกาด	หน่อไม้ฝรั่ง
	ผักกาด	พริกยักษ์ ถั่วลิ้นเต่า	หัว มะเขือเทศ	คะน้า กระเพรา
	ขึ้นฉ่าย	กะหล่ำปลี มันฝรั่ง		ชะอมผักบุ้งจีน
	พริกไทย	น้ำเต้า กระเทียม		
	แตงร้าน	หอมใหญ่ หอมแดง		
	แตงไทย	ข้าวโพดหวาน		
		แตงโม ผักกาดหอม		
		องุ่น แคนตาลูป		
		สับปะรด ผักชี		
ไม้ดอก	เยอบีร่า	กุหลาบ	บานบุรี เฟื่องฟ้า	คุณนายตื่นสาย
			บานไม่รู้โรย	เข็ม เขียวหมื่นปี
			เล็บมือนาง ชบา	แพรเชียงใหม่
พืชไร่ พืชอาหารสัตว์	ถั่วเขียว	ข้าว โสนอินเดีย	หญ้านวลน้อย	ฝ้าย แห้วหมู หญ้า
	ถั่วแขก	ป่าน ทานตะวัน	โสนคางคก ข้าว	แพรก ป่าน หญ้า
	ถั่วเหลือง	โสนพื้นเมือง	ทนเค็ม คำฝอย	ชันอากาศ
	ถั่วแดง	ปอแก้ว ข้าวโพด	โสนอัฟริกัน	ศรนารายณ์
	ถั่วลิสง	หม่อน ข้าวฟ่าง	มันเทศ หญ้าขน	
	ถั่วปากอ้า	หญ้าเจ้าชู้ ถั่วพริ้ว	หญ้างิณี	
	งา	ถั่วอัญชัญ มัน		
		สำปะหลัง ถั่วพุ่ม		

ตารางที่ 2-4 (ต่อ)

ระดับความเค็มของดิน	เค็มน้อย	เค็มปานกลาง	เค็มมาก	
ไม้ผล ไม้โตเร็ว	อาโวคาโด	ชมพู ทับทิม ปาล์ม	ฝรั่ง ขี้เหล็ก	ละมุด พุทรา สน
	กล้วย ลิ้นจี่	น้ำมัน มะกอก แคน	มะยม มะม่วง	มะขาม มะพร้าว
	มะนาว ส้ม	มะเดื่อ	ยูคาลิปตัส	อินทผาลัม
	มะม่วง		กระถินณรงค์	มะขามเทศ
			หิมพานต์	สะเดา

หมายเหตุ: พีชที่สามารถทนเค็มจัด (เปอร์เซ็นต์เกลือมากกว่า 1%) ได้แก่ ชะคราม, สะเม็ด, แสม และ โกงกาง

: พันธุ์ข้าวทนเค็ม ได้แก่ พันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกในพื้นที่, พันธุ์หอมมะลิ 105, พันธุ์หอมจันทร์, พันธุ์ข้าวตาแห้ง, พันธุ์หอมอิน, พันธุ์เจ๊กกระโดด, พันธุ์ข้าวตาอู๋, พันธุ์กอเดียวเบา, พันธุ์แดงน้อย, พันธุ์เจ๊กกระโดด, พันธุ์ กข.1, พันธุ์ กข.6, พันธุ์ กข.7, พันธุ์ กข.8, พันธุ์ กข.15, พันธุ์สันป่าตอง, พันธุ์ข้าวตาแห้ง, พันธุ์คำผาย 41, พันธุ์เก้ารวง 88, พันธุ์ข้าวปากหม้อ 148 เป็นต้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การจำลองสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ GeoStudio 2007 ซึ่ง ได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 แบบจำลองย่อย ได้แก่

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดชันดิน (Slope stability analysis)
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านดิน (Seepage analysis)
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านดิน (Density-dependent flow and transport analysis)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความลาดชันดินและทางน้ำ

แบบจำลองนี้เป็นการจำลองสำหรับคำนวณหาค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของความลาดของดินและหินโดยใช้ทฤษฎีสสมดุลจำกัด (Limit equilibrium theory) ได้ และพิจารณาลักษณะการพังของความลาดของดินและหิน ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์เพื่อการแก้ไขปัญหา

เสถียรภาพของความลาดทั้งแบบง่ายและแบบซับซ้อน การคำนวณหาค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Safety factor, F.S.) ของความลาดของคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ หาได้จากสมการที่ 2-10

$$F.S. = \frac{s}{s_m} = \frac{\tan(\phi')}{\tan(\phi_m'')} \quad (2-10)$$

เมื่อ F.S. คือ ค่าสัดส่วนความปลอดภัย (Safety factor)

S คือ กำลังรับแรงเฉือนของดิน (kPa)

S_m คือ หน่วยแรงเฉือนที่พัฒนาขึ้นบนพื้นผิววิกฤติ (kPa)

ϕ' คือ ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผลของดิน (องศา)

ϕ_m'' คือ ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผลของดินที่พัฒนาขึ้น (องศา)

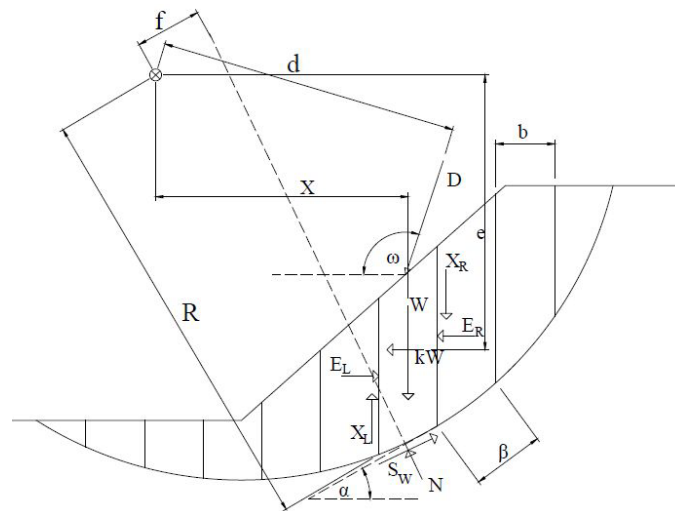
ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนของดินเกิดจากการพิจารณาวัสดุแบบ Mohr-coulomb โดยมี ความสัมพันธ์ของค่าความเชื่อมั่น (Cohesion) และค่ามุมเสียดทาน (Friction angle) ซึ่งสามารถ เขียนอยู่ในรูปสมการดังสมการที่ 2-11

$$s = c' + (\sigma_n - u) \tan(\phi') \quad (2-11)$$

เมื่อ c' คือ ความเชื่อมั่นประสิทธิผล (kPa)

σ_n คือ หน่วยแรงตั้งฉากทั้งหมด (kPa)

u คือ ความดันของน้ำในมวลดิน (kPa)



ภาพที่ 2-32 แผนภาพชิ้นดิน (Slice) แสดงสัญลักษณ์ และตัวแปรต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาแผนภาพชิ้นดิน (Slice) แสดงสัญลักษณ์ และตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ แรงกระทำต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นดิน ตำแหน่งของแรงลัพธ์ และมุมต่าง ๆ ดังภาพที่ 2-28 มีดังนี้

W คือ น้ำหนักทั้งหมดของชิ้นดิน (N)

N คือ แรงตั้งฉาก (Normal force) ที่ฐานของชิ้นดินย่อย (N)

E คือ แรงตั้งฉาก (Normal force) ที่ด้านข้างของชิ้นดินย่อย (N)

X คือ แรงเฉือน (Shear force) ที่ด้านข้างของชิ้นดินย่อย (N)

D คือ แรงกระทำภายนอกแบบจุด (External point load) (N)

kW คือ แรงกระทำแนวราบเนื่องจากความสิ้นสะเทือน (N)

R คือ ระยะฉากระหว่างแรง S_m และจุดศูนย์กลาง

f คือ ระยะฉากระหว่างแรง N และจุดศูนย์กลาง

x คือ ระยะฉากระหว่างแรง W และจุดศูนย์กลาง

e คือ ระยะฉากระหว่างแรง kW และจุดศูนย์กลาง

d คือ ระยะฉากระหว่างแรง D และจุดศูนย์กลาง

h คือ ความสูงเฉลี่ยของชิ้นดินย่อย

ω คือ มุมระหว่างเส้นแก้นาฬิกาและแรง D วัดตามเข็มนาฬิกาจากเส้นแก้นาฬิกา

α คือ มุมระหว่างแกน x และแรง S_m วัดทวนเข็มนาฬิกา

β คือ ความยาวฐานของชิ้นดิน

λ คือ ตัวคูณของฟังก์ชันของแรงลัพธ์ระหว่างชิ้นดิน

จากสมการที่ 2-10 และ 2-11 สามารถนำมาเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2-12

$$F.S. = \frac{c' + (\sigma_n - u) \tan(\phi')}{s_m} = \frac{c' \beta + (N - u\beta) \tan(\phi')}{s_m} \quad (2-12)$$

เมื่อ N คือ แรงตั้งฉาก (Normal Force) ที่ฐานของชั้นย่อย (N)

β คือ ความยาวของฐานรากของชั้นดินในแนวดิ่ง (m ต่อ ความยาว 1 m)

จากภาพที่ 2-32 ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่กำหนดพื้นที่ผิววิบัติ ผลรวมของโมเมนต์ในทุก ๆ ชั้นดิ่ง ซึ่งพิจารณาให้โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาเป็นบวกแสดงดังสมการที่ 2-13

$$\sum Wx - \sum s_m R - \sum Nf + \sum kWe \pm \sum Dd = 0 \quad (2-13)$$

จากสมการที่ 2-12 สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2-14 และแทนสมการที่ 2-14 ลงในสมการที่ 2-13 และจัดรูปแบบใหม่ได้สมการค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากสมดุลโมเมนต์ดังสมการที่ 2-15

$$s_m = \frac{c' \beta + (N - u\beta) \tan(\phi')}{F.S.} \quad (2-14)$$

$$F.S._{moment} = \frac{\sum (c' \beta + (N - u\beta) \tan(\phi'))}{\sum Wx - \sum Nf + \sum kWe \pm \sum Dd} \quad (2-15)$$

หากพิจารณาภาพที่ 2-32 โดยพิจารณาจากผลรวมของแรงในราบของทุก ๆ ชั้นดินให้แรงในทิศทางไปทางขวาเป็นบวก ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2-16

$$\sum (E_L - E_R) - \sum s_m \cos(\alpha) - \sum N \sin(\alpha) + \sum kW \pm \sum D \cos(\omega) = 0 \quad (2-16)$$

จากสมการที่ 2-14 แทนลงในสมการที่ 2-16 และจัดรูปแบบใหม่ได้สมการค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากสมดุลแรงดังสมการที่ 2-17

$$F.S._{force} = \frac{\sum (c' \beta \cos(\alpha) + (N - u\beta) \tan(\phi') \cos(\alpha))}{\sum N \sin(\alpha) + \sum kW \pm \sum D \cos(\omega)} \quad (2-17)$$

หากพิจารณาภาพที่ 2-32 โดยพิจารณาจากผลรวมของแรงในราบของชั้นดินหนึ่งให้แรงในทิศทางไปทางขวาเป็นบวก ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2-18

$$-W + (X_L - X_R) + N \cos(\alpha) + S_m \sin(\alpha) - D \sin(\omega) = 0 \quad (2-18)$$

จากสมการที่ 2-14 แทนลงในสมการที่ 2-18 และจัดรูปแบบใหม่ได้สมการค่าสัดส่วนความปลอดภัยจากสมมูลแรงดังสมการที่ 2-19

$$N = \frac{W + (X_L - X_R) + D \sin(\omega) + \frac{\beta \sin(\alpha) (c' - u \tan(\phi'))}{F.S.}}{\cos(\alpha) - \frac{\sin(\alpha) \tan(\phi')}{F.S.}} \quad (2-19)$$

ความสัมพันธ์ของแรง X และแรง E ถูกสมมุติขึ้นเพื่อสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดและคำนวณหาค่าสัดส่วนปลอดภัย ซึ่งถูกสมมุติให้อยู่ในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์และตัวคูณเลขจำนวนจริง ดังสมการที่ 2-20

$$X = \lambda E f(x) \quad (2-20)$$

เมื่อพิจารณาภาพที่ 2-32 สมมูลแรงในแนวราบของชั้นดินชั้นหนึ่ง ซึ่งแสดงในสมการที่ 2-21

$$(E_L - E_R) - N \sin \alpha + s_m \cos \alpha - kW + D \cos \omega = 0 \quad (2-21)$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2-21 ใหม่ให้สอดคล้องกับสมการอื่น ๆ โดยแทนสมการที่ 2-14 ลงในสมการที่ 2-21 จะได้สมการที่ 2-22 ดังนี้

$$E_R = E_L - kW + D \cos \omega + N \sin \alpha + \frac{\cos \alpha (c' \beta + (N - \beta u) \tan \phi)}{F.S.} \quad (2-22)$$

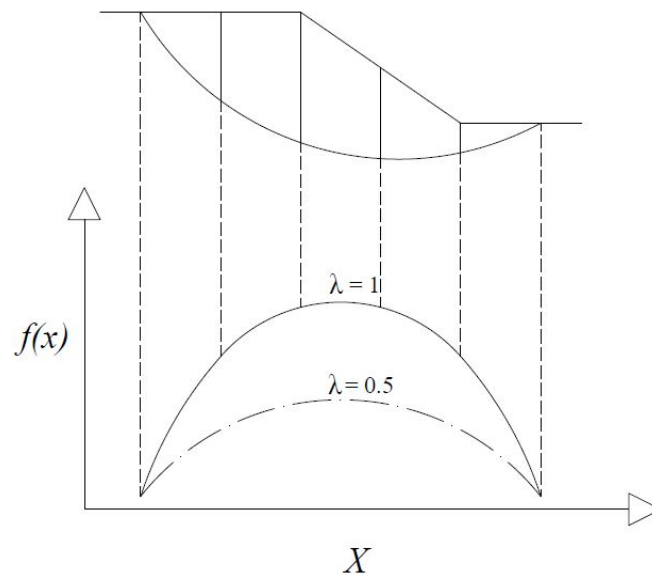
ในการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ ได้ใช้วิธีของ Mergenstern and Price's method (1965) มีสมมติฐานว่าแรงที่เกิดขึ้นบนระนาบวิบัติที่ต่อเนื่องกัน หรืออาจกล่าวว่าเป็นดินตลอดพื้นผิววิบัติเป็นวัสดุที่เปลี่ยนแปลงต่อเนื่องกันเป็นอย่างดี ซึ่งแรงลัพธ์ของชั้นดิน คือ ความชันของแรงลัพธ์ของแรงด้านข้างของชั้นย่อยแปรผันไปตามฟังก์ชันที่กำหนดให้ ซึ่งเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ใด ๆ โดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2-23

$$\frac{X}{E} = \lambda f(x) \quad (2-23)$$

จากสมการที่ 2-23 แทนลงในสมการที่ 2-19 และจัดรูปแบบใหม่ได้ดังสมการที่ 2-24

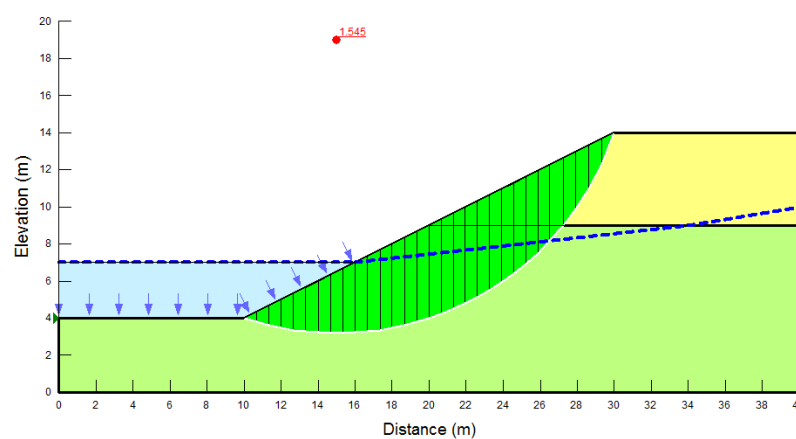
$$N = \frac{W + (E_L \lambda f(x) - E_R \lambda f(x)) + D \sin(\omega) + \frac{\beta \sin(\alpha)(c' - u \tan(\phi'))}{F.S.}}{\cos(\alpha) - \frac{\sin(\alpha) \tan(\phi')}{F.S.}} \quad (2-24)$$

พิจารณาสมการที่ 2-24 สามารถแทนได้โดยสมการที่ 2-22 ดังนั้นจึงสามารถหาค่าของแรง N ได้ โดยจำเป็นต้องสมมุติค่า λ และ F.S. จากนั้นนำไปสมการที่ 2-15 และ 2-17 โดยขั้นตอนทั่วไปต้องสมมุติ λ ก่อน จากนั้นสมมุติค่า F.S. เป็นผลให้ได้ค่า F.S._{Force} และ F.S._{Moment} ซึ่งค่า λ ที่เหมาะสมทำให้ค่า F.S._{Force} และ F.S._{Moment} มีค่าเท่ากัน โดยค่าที่คำนวณภาพที่ 2-33 ซึ่งแสดงตัวอย่างค่าความชัน ค่าฟังก์ชัน และค่า λ สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี Mergenstern and Price



ภาพที่ 2-33 ตัวอย่างแสดงค่าความชัน ค่าฟังก์ชัน และค่า λ สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี Mergensm and Price

ภาพที่ 2-34 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์หาค่าความปลอดภัยโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นการกำหนดจุดศูนย์กลาง และรัศมีของการเลื่อนไหลแบบจุดเดียวในการคำนวณ โดยค่าความปลอดภัยของความลาดชันดินที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ถูกกำหนดค่าความปลอดภัยต่ำสุดที่ยอมรับ (Minimum allowable Safety factor) ตามตารางที่ 2-5



ภาพที่ 2-34 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดชันดิน

ตารางที่ 2-5 เกณฑ์ต่ำสุดของอัตราส่วนปลอดภัยของคันดิน

กรณี	สภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์		Shear Strength	ลาดคัน ที่ต้อง วิเคราะห์	ค่า ความปลอดภัย ต่ำสุดที่ยอมให้
	สภาพคันดิน	ระดับน้ำ			
1	เมื่อสร้างคันดินเสร็จใหม่ ๆ	-	UU-test	เหนือน้ำ	1.3
2	ยังไม่มีน้ำท่วม	-		ท้ายน้ำ	
3	ระหว่างเก็บกักน้ำ	N.H.W.L.	CU-test	ท้ายน้ำ	1.5
4		I.W.L.		เหนือน้ำ	
5	น้ำลดระดับลงกะทันหัน	L.W.L.	CU-test	เหนือน้ำ	1.2

หมายเหตุ: N.H.W.L. คือ ระดับน้ำเก็บกักปกติสูงสุด (Normal high water level)

I.W.L. คือ ระดับน้ำเก็บกักปานกลาง (Intermediate water level)

L.W.L. คือ ระดับน้ำต่ำสุด (Low water level)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน

แบบจำลองนี้เป็นการจำลองการเคลื่อนที่และการแพร่กระจายความดันของน้ำในช่องว่างภายในชั้นดินและชั้นหิน โดยใช้ Finite element สามารถวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาการซึมผ่านได้ทั้งแบบง่ายและแบบซับซ้อน ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบสำหรับโครงการทางวิศวกรรมปฐพี วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุทกธรณี และวิศวกรรมเหมืองแร่

การคำนวณหาปริมาณการไหลซึมและไหลลอดผ่านคันดิน ใช้สมการพื้นฐานของการไหลของน้ำผ่านตัวกลาง ซึ่งการวิเคราะห์การไหลซึมรูปแบบต่าง ๆ โดยพิจารณาชิ้นส่วนเล็ก ๆ รูปลูกบาศก์ และสามารถเขียนสมการดังต่อไปนี้

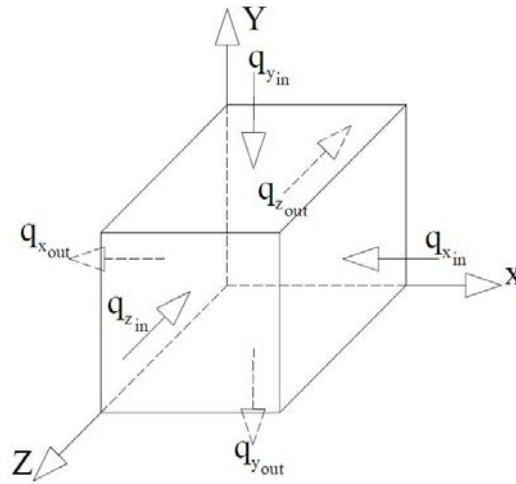
$$q = q_x + q_y + q_z \quad (2-25)$$

เมื่อ q คือ ปริมาณการไหลของน้ำในดิน (m^3/s)

q_x คือ ปริมาณการไหลของน้ำในดินสุทธิในทิศทางแกน x (m^3/s)

q_y คือ ปริมาณการไหลของน้ำในดินสุทธิในทิศทางแกน y (m^3/s)

q_z คือ ปริมาณการไหลของน้ำในดินสุทธิในทิศทางแกน z (m^3/s)



ภาพที่ 2-35 การไหลของน้ำผ่านรูปลูกบาศก์

จากภาพที่ 2-35 การคำนวณหาปริมาณการไหลซึมและไหลลอดผ่านชั้นดินปริมาณน้ำที่ไหลเข้าในแต่ละทิศทาง จะคำนวณได้จาก $q = v \cdot A$ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q_{x_{in}} = v_x \cdot dy \cdot dz \quad (2-26)$$

$$q_{y_{in}} = v_y \cdot dz \cdot dx \quad (2-27)$$

$$q_{z_{in}} = v_z \cdot dx \cdot dy \quad (2-28)$$

เมื่อ v_x คือ ความเร็วการไหลของน้ำในดินในทิศทางแกน x (m^3/s)

v_y คือ ความเร็วการไหลของน้ำในดินในทิศทางแกน y (m^3/s)

v_z คือ ความเร็วการไหลของน้ำในดินในทิศทางแกน z (m^3/s)

ปริมาณน้ำที่ไหลออกในแต่ละทิศทางสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q_{x_{out}} = (v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot dx) dy \cdot dz \quad (2-29)$$

$$q_{y_{out}} = (v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dy) dz \cdot dx \quad (2-30)$$

$$q_{z_{out}} = (v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \cdot dz) dx \cdot dy \quad (2-31)$$

ดังนั้นปริมาณการไหลของน้ำในดินสุทธิในแต่ละแกนมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและปริมาณน้ำที่ไหลออก ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$q_x = q_{x_{in}} - q_{x_{out}} = -\frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2-32)$$

$$q_y = q_{y_{in}} - q_{y_{out}} = -\frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2-33)$$

$$q_z = q_{z_{in}} - q_{z_{out}} = -\frac{\partial v_z}{\partial z} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2-34)$$

จากนั้นนำสมการที่ 2-29-สมการที่ 2-31 ไปแทนลงสมการที่ 2-22 ซึ่งสามารถเขียนสมการและจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ 2-32 โดยที่ปริมาณการไหลของน้ำในดินมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในดิน 1 ลูกบาศก์ต่อเวลา ต่อปริมาตร ($q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz$)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) \quad (2-35)$$

โดยสมการที่ 2-32 ถูกเรียกว่า Continuity equation ซึ่งเป็นพื้นฐานของการไหลของน้ำแบบ Laminar ผ่านตัวกลางของดิน และนอกจากนี้ในการคำนวณหารปริมาณการไหลของน้ำแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ

1. กรณี Steady-state flow เป็นกรณีเฉพาะที่มีปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกมีอัตราเท่ากัน คือ ไม่มีน้ำเพิ่มขึ้นหรือลดลงในดิน ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำในมวลดินเมื่อเทียบกับเวลาตามเวลา ($\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$) และจากกฎของ Darcy's law ($v_i = ki$) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (2-36)$$

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2-37)$$

เมื่อ k_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดินในทิศทางแกน x (m^3/s)

k_y คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดินในทิศทางแกน y (m^3/s)

k_z คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดินในทิศทางแกน z (m^3/s)

h คือ ความสูงของระดับน้ำ (m)

x คือ ระยะทางในทิศทางแกน x (m)

y คือ ระยะทางในทิศทางแกน y (m)

z คือ ระยะทางในทิศทางแกน z (m)

2. กรณี Isotropic permeability เป็นกรณีที่คล้ายกับกรณี Steady-state flow แต่ดินมีเนื้อสม่ำเสมอ และมีสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในดินทั้ง 3 ทิศทางมีค่าเท่ากัน ($k_x = k_y = k_z = k$) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2-35

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2-38)$$

3. กรณีการไหลซึม 2 ทิศทาง เป็นกรณีที่คล้ายกับกรณี Isotropic permeability แต่ใช้ในกรณีของสิ่งก่อสร้างที่มีความยาวมากเมื่อเทียบกับความกว้าง และการไหลซึมที่เกิดขึ้นตั้งฉากกับแกนยาวเท่านั้น (ในทิศทางแกน x และ y) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในทิศทางแกน z จึงไม่มี คือ

$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2-36

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (2-39)$$

สมการที่ 2-34 ถึงสมการที่ 2-36 เป็นสมการที่ถูกเรียกว่า Laplace's equation เป็นสมการเอาไว้ใช้ในการหาตาข่ายการไหล (Flow net) ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นกราฟที่เรียกว่า Equipotential line ซึ่งลากจากสิ่งกีดขวางหรือเส้นแบ่งระหว่างดินไม่อิ่มตัวและดินอิ่มตัวไปยังฐานของชั้นดิน และเส้นกราฟอีกเส้นที่เรียกว่า Flow line ซึ่งลากจากบริเวณน้ำที่ไหลเข้าไปยังบริเวณน้ำที่ไหลออก โดยเส้นกราฟทั้งสองเส้นตัดกันและตั้งฉากกัน นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านคันดินสามารถแบ่งการไหลซึมได้เป็น 2 ระยะ คือ

1. Unsteady-state flow เป็นระยะที่เริ่มเก็บกัก กล่าวคือ มีการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำในอ่างและเป็นไปได้ที่ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากดินยังไม่อิ่มตัว ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาส่งผลให้ทำให้ขอบเขตการไหล (Boundary condition) มีการเปลี่ยนแปลง

2. Steady-state flow เป็นการไหลของน้ำผ่านช่องว่างของดิน โดยที่ระดับน้ำในอ่างและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

ในงานวิจัยชิ้นนี้การคำนวณหาปริมาณน้ำที่ไหลซึมผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล โดยใช้เงื่อนไขการวิเคราะห์แบบสถานะคงที่ (Steady-state analysis) ซึ่งคำนวณจากสมการของลาปลาซ (Laplace's equation) เพื่อหาตาข่ายการไหลจากสมการที่ 2-34 ถึงสมการที่ 2-36 และหาปริมาณการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินกั้นน้ำทะเลจากสมการที่ 2-37

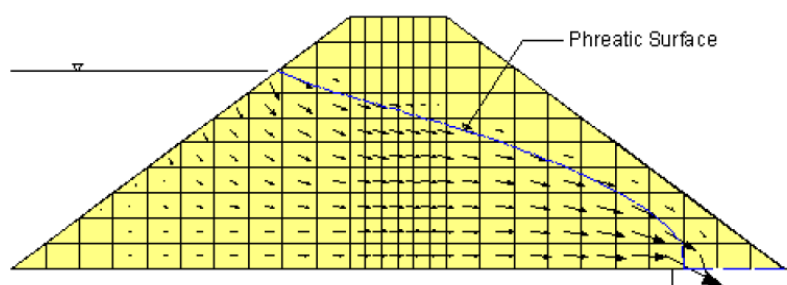
$$Q = (\Delta h)k \frac{n_f}{n_d} \quad (2-40)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (m^3/s)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (m/s)

n_f คือ จำนวนของเส้นทางการไหล (Flow path)

และ n_d คือ จำนวนของ Equipotential drops



ภาพที่ 2-36 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน (GEO-SLOPE International Ltd., 2002)

จากภาพที่ 2-36 ลูกศร (\rightarrow) แสดงทิศทางและความเร็วของการไหลของน้ำผ่านคันดิน ยิ่งลูกศรมีความยาวความเร็วของน้ำยิ่งมาก และสำหรับเส้น Phreatic surface แสดงขอบเขตของดินที่อิ่มตัวภายในคันดินใต้ระดับน้ำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน

แบบจำลองนี้เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนหรือน้ำทะเลในน้ำผ่านชั้นดินและชั้นหิน วิธีการที่ใช้ในแบบจำลองสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของน้ำและกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจาย การกระจายตัว การดูดซับ การสลายตัวของสารปนเปื้อน และความแตกต่างของความหนาแน่น โดยแบบจำลองนี้ต้องใช้ควบคู่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน ซึ่งสามารถใช้การคำนวณได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ วิธี Advection-dispersion analysis และวิธี Density-dependent analysis

ในการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลในน้ำใต้ดินมีลักษณะคล้ายกับกระบวนการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ซึ่งมีกระบวนการที่สำคัญ 3 กระบวนการ ดังนี้

Advection คือ กระบวนการพาสารไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของน้ำอันเนื่องมาจากความแตกต่างของระดับน้ำ โดยการไหลผ่านของน้ำผ่านช่องว่างของเม็ดดิน ถ้าชั้นดินประกอบด้วยชั้นทราย หรือกรวด ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูง ลักษณะการเคลื่อนที่จะเป็นแบบ Advection เป็นหลัก

Dispersion คือ กระบวนการที่สารแพร่กระจายในน้ำ โดยการแพร่กระจายมีการเคลื่อนที่ทั้งในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของน้ำ และในทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วของการไหลของน้ำและการแพร่ (Diffusion) จากบริเวณที่ความเข้มข้นของสารที่สูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ

Hydrodynamic คือ การศึกษาการเคลื่อนที่ของการไหลของน้ำ ซึ่งการไหลที่เกิดขึ้นเป็นการไหลของของไหลในอุดมคติ โดยประกอบไปด้วยการไหลในสถานะคงที่ (Steady flow) การไหลที่อัดไม่ได้ (Incompressible flow) การไหลที่ไม่มีความหนืด (Nonviscous flow) และการไหลที่ไม่มีการหมุนวน (Irrotational flow)

วิธี Advection-dispersion analysis เป็นวิธีการที่ใช้การพาเป็นการเคลื่อนที่ตัวด้วยการไหลของน้ำใต้ดิน และมีกระบวนการแพร่เป็นปรากฏการณ์ของการแพร่กระจายจากการเคลื่อนที่ในการประเมิน ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2-38

$$\Theta D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda \Theta C - \lambda S \rho_d = (\Theta + \rho_d) \frac{\partial S}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2-41)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (kg/m^3)

Θ คือ ปริมาณของน้ำโดยปริมาตร (m^3)

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (m^2/s)

U คือ ความเร็วของ Darcian (m/s)

S คือ ค่าการดูดซึม

ρ_d คือ ความหนาแน่นแห้งของดิน (kg/m^3)

λ คือ ค่าอัตราการสลายตัว

t คือ เวลา (s)

และ x คือ ระยะทางในทิศทางแกน x (m)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient, D) เกิดจากการเคลื่อนที่ของของเหลว 2 แบบ คือ แบบกระจายตัวเชิงกลของของเหลว (Mechanical dispersion, D_{mech}) และแบบกระจายตัวเชิงโมเลกุลของของเหลว (Molecular dispersion, D_{mol}) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 2-39

$$D = D_{\text{mech}} + D_{\text{mol}} \quad (2-42)$$

นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient, D) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-40 และ 2-41 โดยสมการนี้ได้คำนึงถึงผลของการแพร่กระจายและการกระจายตัวของสสารต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ในน้ำ

$$D_L = \alpha_L v + D^* \quad (2-43)$$

$$D_T = \alpha_T v + D^* \quad (2-44)$$

เมื่อ D_L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในทิศทางตามแนวยาว (m^2/s)

D_T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในทิศทางตามแนวขวาง (m^2/s)

α_L คือ ค่าการปรับแก้ของการกระจายตัวในทิศทางตามแนวยาว (m)

α_T คือ ค่าการปรับแก้ของการกระจายตัวในทิศทางตามแนวขวาง (m)

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

D^* คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของโมเลกุล (m^2/s)

จากสมการที่ 2-11 ตามทฤษฎีของ Fickian อธิบายไว้ว่า ค่าการปรับแก้ของการกระจายตัวในทิศทางตามแนวยาว (α_L) ขึ้นอยู่กับความยาวของการไหลของของเหลวในทิศทางตามแนวยาว (L) โดยสามารถแสดงสมการได้ดังนี้ (Gelhar, Welty, & Kenneth, 1992)

$$\alpha_L = 0.1L \quad (2-45)$$

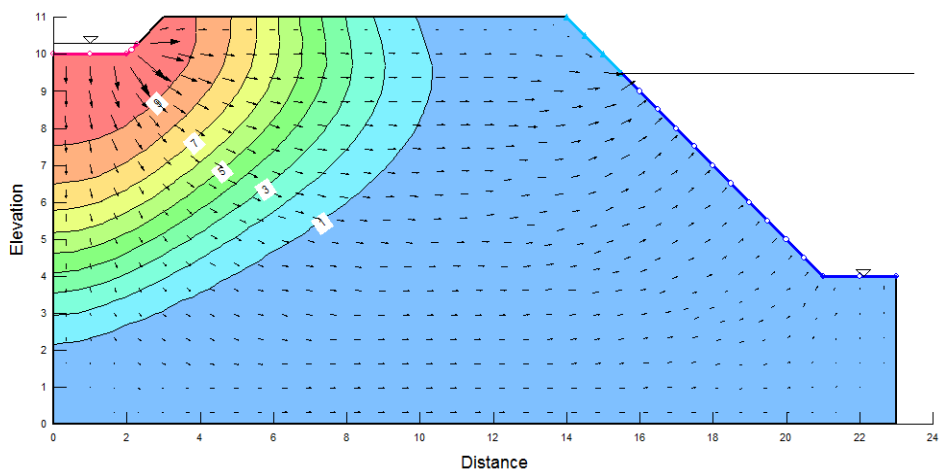
เมื่อ L คือ ความยาวของการไหลของของเหลวในทิศทางตามแนวยาว (m)

เมื่อความยาวของการไหลของของเหลวในทิศทางตามแนวยาวน้อยกว่า 3,500 m Nueman (1990) เสนอว่าควรใช้ค่า α_L ดังสมการที่ 2-43

$$\alpha_L = 0.0175L^{1.46} \quad (2-46)$$

เมื่อ L คือ ความยาวของการไหลของของเหลวในทิศทางตามแนวยาว (m)

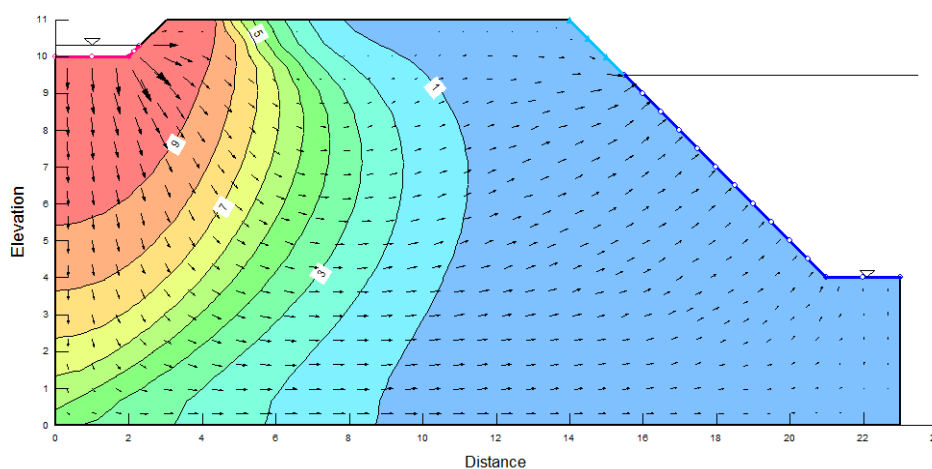
สำหรับค่าการปรับแก้ของการกระจายตัวในทิศทางตามแนวขวาง (α_T) มีค่า 1 ใน 10 ถึง 1 ใน 100 ของค่าการปรับแก้ของการกระจายตัวในทิศทางตามแนวยาว (α_L) (Gelhar et al., 1992)



ภาพที่ 2-37 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านชั้นดิน โดย Advection-dispersion analysis

จากภาพที่ 2-37 เป็นผลการวิเคราะห์ของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนผ่านชั้นดิน โดยมีเส้นและสีแสดงความเข้มข้นของสารปนเปื้อน และลูกศร (→) แสดงทิศทางและขนาดของความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านชั้นดิน

วิธีการ Density-dependent analysis เป็นการวิเคราะห์โดยการคำนึงถึงความหนาแน่นของสารปนเปื้อนที่มีความแตกต่างกับความหนาแน่นของน้ำอย่างชัดเจนในการประเมิน ซึ่งถูกใช้แก้ปัญหาในการรुक้าของน้ำทะเล



ภาพที่ 2-38 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านชั้นดิน โดย Density-dependent analysis

จากภาพที่ 2-38 เป็นผลการวิเคราะห์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเล โดยมีเส้นและแถบสีแสดงความเข้มข้นของน้ำทะเล และลูกศร (→) แสดงทิศทางและขนาดของความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านชั้นดิน

การวิเคราะห์ทฤษฎีเกี่ยวกับแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดินว่า วิธี Density-dependent analysis มีความถูกต้องมากกว่าวิธี Advection-dispersion analysis สำหรับการศึกษารเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านชั้นดิน (Simpsons & Clement, 2003)

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการทดสอบเพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลัง และความทึบ
น้ำของตัวอย่างดินที่นำมาจากพื้นที่ศึกษา โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 เป็นสารผสม
เพิ่ม ด้วยวิธีการผสมแบบแห้ง รวมถึงรูปแบบของคันดินเพื่อนำไปใช้สำหรับการออกแบบคันดินที่
เหมาะสมต่อการป้องกันน้ำทะเล โดยการใช้การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
GeoStudio 2007

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ตัวอย่างดิน ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ นำมาจากพื้นที่หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลคำมะลิ่ง
อำเภอเมือง จังหวัดสตูล โดยการเก็บตัวอย่างดินแบบรบกวน (Disturb sample) จำนวน 1 ตัวอย่าง
ต่อ 1 หลุมเจาะสำรวจ ที่ระดับความลึกประมาณ 1-2 m จากผิวดิน โดยมีจำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 50
ตัวอย่าง
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 นำมาใช้เป็นสารเสถียรภาพ (Stabilizing agents)
เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลัง และความทึบน้ำ
3. น้ำประปา นำมาใช้ในการผสมตัวอย่างดินและปูนซีเมนต์

การทดสอบทางวิศวกรรมปฐพีในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบต่าง ๆ เหล่านี้ทำเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างดินและปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม
สำหรับคันดินกั้นน้ำทะเล โดยแบ่งออกเป็น 3 การทดสอบ คือ

1. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีของดิน
2. การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดิน
3. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

1. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีของดิน

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีของดิน เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะ
พื้นฐานของดินที่นำมาทดสอบ ซึ่งประกอบไปด้วย 1) การทดสอบการร่อนตะแกรงแบบเปียก 2)

การทดสอบไฮโดรมิเตอร์ 3) การทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก และ 4) การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

1.1 การทดสอบการร่อนตะแกรงแบบเปียก

เป็นการทดสอบเพื่อหาขนาดของเม็ดดินตามมาตรฐาน ASTM D422-Standard test method for particle-size analysis of soils โดยใช้อุปกรณ์ดังภาพที่ 3-1 วิธีการทดสอบโดยสรุป คือนำตัวอย่างดินมาแช่น้ำก่อนการทดสอบเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินมาล้างด้วยน้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จนกระทั่งน้ำที่ใช้ล้างตัวอย่างดินใส หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินที่ค้าง และที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ไปอบด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 3-1 ชุดทดสอบการร่อนตะแกรงแบบเปียก

นำตัวอย่างดินที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 200 มาทำการล้างผ่านตะแกรงเบอร์ต่าง ๆ ที่มีขนาดใหญ่กว่าเบอร์ 200 อีกครั้ง จนกระทั่งน้ำที่ใช้ล้างใส แล้วนำดินที่ค้างตะแกรงบนขนาดต่าง ๆ ไปอบด้วยตู้อบ ที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำข้อมูลน้ำหนักตัวอย่างดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ต่าง ๆ ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเม็ดดิน (mm) และเปอร์เซ็นต์การผ่านสะสม

1.2 การทดสอบไฮโดรมิเตอร์

เป็นการทดสอบเพื่อหาขนาดของเม็ดดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ตามมาตรฐาน ASTM D4221-99 Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer โดยใช้อุปกรณ์ดังภาพที่ 3-2 วิธีการทดสอบโดยสรุป คือนำตัวอย่างดินที่ถูกร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มาจำนวน 50 g ผสมกับ Dispersing agent (สารละลาย Sodium

hexametaphosphate) จำนวน 5 g และน้ำ จำนวน 125 ml แล้วปล่อยให้ตั้งไว้เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

ภาพที่ 3-2 ชุดทดสอบไฮโดรมิเตอร์ (ก) เครื่องกวนดิน (ข) เทอร์โมมิเตอร์ (ค) ชุดทดสอบ Sedimentary cylinder และ (ง) เครื่องมือวัดค่าความถ่วงจำเพาะ

นำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้เข้าเครื่องผสมโดยกวนเป็นระยะเวลา 1 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างดินเทลงในกระบอกตวง (Measuring cylinder หรือ Sedimentary cylinder) แล้วเติมน้ำจนกระทั่งมีปริมาณน้ำ 1,000 ml จากนั้นนำจุกยางปิดปากชุดทดสอบ เขย่าขวดไปมาประมาณ 60 ครั้ง หรือ 1 นาที เพื่อให้ตัวอย่างดินและน้ำผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเขย่าขวดเสร็จให้ตั้งชุดทดสอบไว้บนพื้นราบ และเริ่มอ่านค่าของเครื่องมือวัดค่าความถ่วงจำเพาะ (Hydrometer) ตามเวลาดังนี้ 0.5 1 2 5 15 30 60 250 และ 1,440 นาที เมื่อเวลามากกว่า 1,440 นาที ให้ทำการอ่านค่าทุก ๆ 1,440 นาที ต่อไปจนกระทั่งค่าที่อ่านได้คงที่

1.3 การทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก

การทดสอบนี้ประกอบไปด้วย 3 การทดสอบย่อย คือ 1) การทดสอบพิกัดหดตัว (Shrinkage limit, S.L.) ตามมาตรฐาน ASTM D427-98 Test method for shrinkage factors of soils by the mercury method เพื่อหาค่าความชื้นที่มวลดินไม่เปลี่ยนแปลงปริมาตรอีกต่อไป 2) การทดสอบพิกัดพลาสติก (Plastic limit, P.L.) เพื่อหาค่าความชื้นที่มวลดินเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นพลาสติก และ 3) การทดสอบพิกัดเหลว (Liquid limit, L.L.) เพื่อหาค่าความชื้นที่มวลดินจากพลาสติกเป็นของเหลวตามมาตรฐาน ASTM D4318-00 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils เพื่อนำค่าความชื้นในมวลดินไปใช้ในการจำแนกชนิดของดิน

วิธีการทดสอบโดยสรุป คือ การทดสอบพิกัดเหลว (Liquid limit, L.L.) ทำการทดสอบโดยนำดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ผสมกับน้ำให้เข้ากัน แล้วนำตัวอย่างดินใส่ลงในถ้วยทองเหลือง (Casarade cup) ดังภาพที่ 3-3 โดยความหนาของดินตรงกลางประมาณ 1 cm แล้วบากให้เป็นร่องตรงกลาง Grooving tool จากนั้นทำการหมุนถ้วยทองเหลืองให้ตกกระทบ 1-2 ครั้งต่อวินาที จนกระทั่งดินด้านข้างของรอยบากที่ทำได้เคลื่อนที่เข้ามาชนกันจนกระทั่งมีความยาวของการชนกันประมาณ 12.7 mm หาปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินโดยเก็บตัวอย่างดินนำเข้าสู่อบอุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดสอบอีก 2-3 ครั้ง โดยให้มีจำนวนครั้งของการเคาะแตกต่างกันประมาณ 10 ครั้ง (จำนวนการเคาะน้อยที่สุดควรอยู่ราว 5 ถึง 10 ครั้ง)



ภาพที่ 3-3 อุปกรณ์ทดสอบพิกัดเหลว

นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟ Semi-log แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งของการเคาะบนแกน X (Log scale) และปริมาณเปอร์เซ็นต์ความชื้น บนแกน Y จากกราฟดังกล่าว ปริมาณเปอร์เซ็นต์ความชื้น ณ ตำแหน่งของจำนวนการเคาะ 25 ครั้ง คือ ค่าความชื้นพิกัดพิกัดเหลวของตัวอย่างดิน

การทดสอบพิกัดพลาสติก (Plastic limit, P.L.) ทำการทดสอบโดยนำดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ผสมกับน้ำให้เข้ากัน แล้วแบ่งตัวอย่างดินมาปั้นคลึงบนแผ่นกระจกเป็นเส้นกลมยาวโดยพยายามปั้นให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 mm (1/8 นิ้ว) ดังภาพที่ 3-4 แล้วคลึงต่อไปเรื่อย ๆ โดยพยายามรักษารูปร่างดังกล่าว จนกระทั่งเกิดรอยแตกเล็ก ๆ รอบตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างเข้าสู่อบอุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดสอบอีก 2-3 ครั้ง เพื่อหาปริมาณความชื้นพิกัดพลาสติกของตัวอย่างดิน



ภาพที่ 3-4 อุปกรณ์ทดสอบพิกัดพลาสติก

การทดสอบพิกัดหดตัว (Shrinkage limit, S.L.) นำดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 มาผสมน้ำโดยใช้มีดปาด (Spatula) ผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันโดยมีความเหลวมากกว่าการทดสอบ Liquid limit ทาจาระบีในถ้วยทดสอบ (Shrinkage dish) ดังภาพที่ 3-5 แล้วนำตัวอย่างดินซึ่งผสมน้ำแล้วใส่ในถ้วยทดสอบประมาณหนึ่งในสามของถ้วย แล้วเคาะกับโต๊ะเพื่อไล่ฟองอากาศในมวลดินจนหมด ทำเช่นนี้อีกสองครั้งจนตัวอย่างดินเต็มถ้วย จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 24 ชั่วโมง จึงนำเข้าตู้อบอุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อนำดินออกจากตู้อบทิ้งให้อุณหภูมิลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องจึงค่อยชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นทำการหาปริมาตรก้อนดิน โดยนำก้อนดินแห้งใส่ในถ้วยวัดปริมาตรซึ่งมีปรอทอยู่เต็ม ด้วยความหนาแน่นของก้อนดินแห้งที่น้อยกว่าปรอททำให้ดินลอยอยู่บนปรอท ดังนั้นให้กดก้อนดินให้จมลงในปรอทโดยใช้แผ่นพลาสติกเพื่อให้ก้อนดินจมลงในปรอทพร้อมกันทั้งก้อน ปรอทที่มีปริมาตรเท่ากับดินจะถูกไล่ที่ล้นออกไป ชั่งปรอทส่วนที่เหลือในถ้วยวัดปริมาตรสามารถนำไปคำนวณหาปริมาตรก้อนดินได้ ซึ่งนำไปหาค่าความชื้นพิกัดหดตัวของตัวอย่างดิน



ภาพที่ 3-5 อุปกรณ์ทดสอบพิกัดหดตัว

1.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของดินตามมาตรฐาน ASTM D854-00

Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer

วิธีการทดสอบโดยสรุป คือ นำขวดวัดปริมาตร ดังภาพที่ 3-6 ใส่ น้ำ แล้วต็มไล่

ฟองอากาศให้ออกจากน้ำจนหมด วัดอุณหภูมิ และชั่งน้ำหนัก แล้วทำการลดอุณหภูมิของน้ำลง แล้วชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำประมาณ 5 ครั้ง เพื่อนำข้อมูล ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) และน้ำหนักของขวดวัดปริมาตร และน้ำ (g)



(ก) ขวดวัดปริมาตร (Flask)



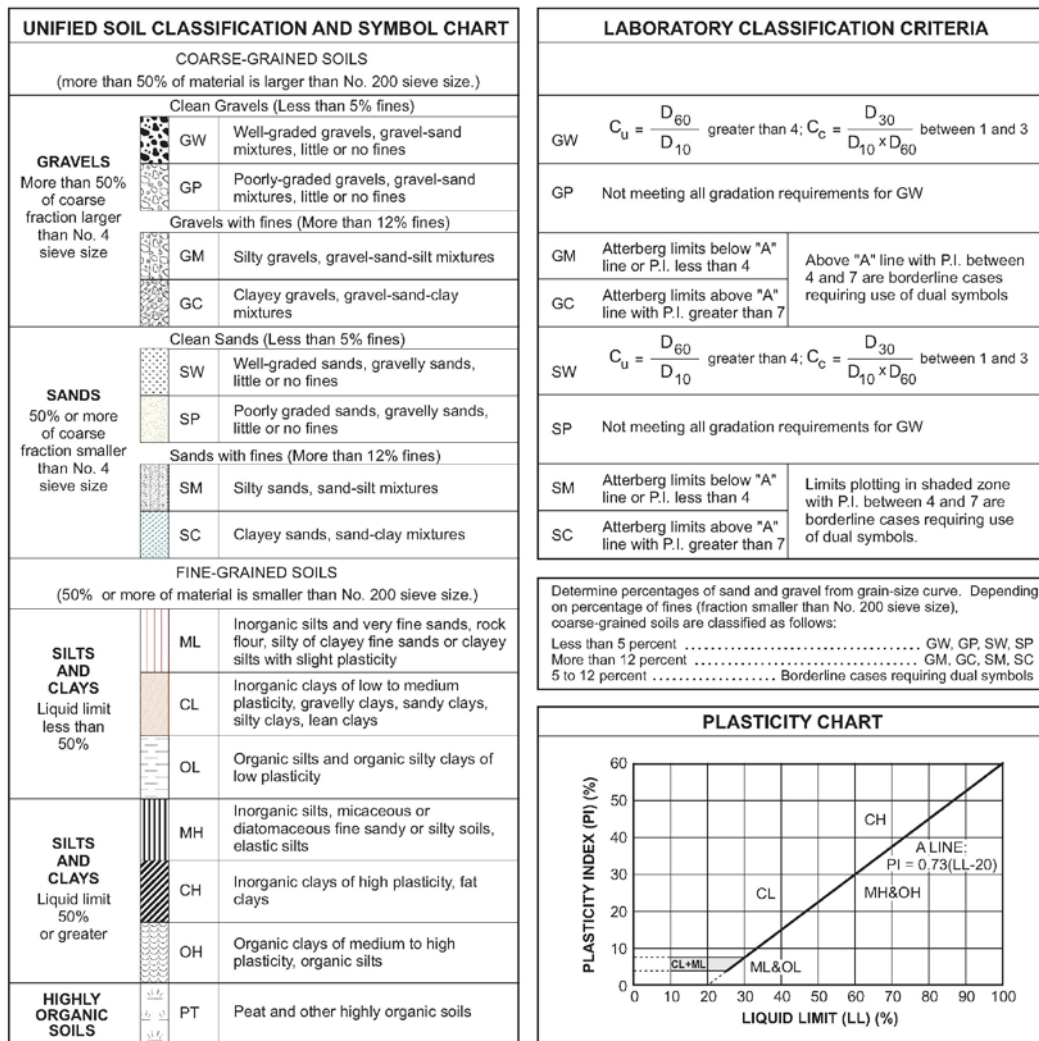
(ข) เทอร์โมมิเตอร์

ภาพที่ 3-6 อุปกรณ์สำหรับทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

นำตัวอย่างดินที่ต้องการทดสอบใส่ลงในขวดวัดปริมาตร แล้วใส่น้ำ หลังจากนั้นต็มไล่ฟองอากาศให้ออกจากน้ำไปจนหมด ลดอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 19-30 °C แล้วทำการลดอุณหภูมิและชั่งน้ำหนัก นำค่าอุณหภูมิที่บันทึกได้ไปหาค่าน้ำหนักของขวดวัดปริมาตร และน้ำจากกราฟที่ทำขึ้นก่อนหน้า เพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะของดิน

1.5 การจำแนกชนิดของดิน

หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและดัชนีของดินที่ได้จากการทดสอบข้างต้น ผลที่ได้จะนำมาใช้ในการจำแนกชนิดดิน โดยใช้วิธี Unified soil classification system (USCS) ดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 Unified soil classification system (Das, 2010)

โดยการพิจารณาผลการทดสอบการร่อนตะแกรงแบบเปียก ซึ่งถ้าดินสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้น้อยกว่า 50% ของน้ำหนักตัวอย่างดิน จะถูกจำแนกเป็นดินมวลหยาบ แต่ถ้าร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้มากกว่า 50% ของน้ำหนักตัวอย่างดิน จะถูกจำแนกเป็นดินมวลละเอียด

การจำแนกดินมวลหยาบ ดังภาพที่ 3-7 และ 3-9 สามารถจำแนกได้โดยใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรง หากสามารถร่อนตัวอย่างดินผ่านเบอร์ 4 ได้มากกว่า 50% ของน้ำหนักตัวอย่างดินถูกจำแนกเป็นทราย (Sand, S) แต่หากผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ได้น้อยกว่า 50% ของน้ำหนักตัวอย่างดิน จะถูกจำแนกเป็นกรวด (Gravel, G) ถ้าส่วนที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เกินกว่า 5% ของน้ำหนักตัวอย่างดิน จะถูกนำไปจำแนกชนิดของดินตามวิธีการแบบเดียวกันกับดินมวลละเอียด และส่วนที่

ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 น้อยกว่า 5% ของน้ำหนักตัวอย่างดิน จะจำแนกชนิดของดินโดยพิจารณาจากขนาดผละของดิน ดังภาพที่ 3-8 สามารถคำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดินที่เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม 10%, 30% และ 60% ดังสมการที่ 3-1 และ 3-2 หากค่า C_u มีค่าอยู่ในช่วง 1-3 แสดงว่า ดินมีขนาดผละดี (Well graded หรือ W, no. II) แต่หากค่า C_u มีค่าไม่อยู่ในช่วง 1-3 และ/หรือค่า C_u มีค่าน้อยกว่า 4 แสดงว่า ดินมีขนาดผละเพียงขนาดเดียว สม่่าเสมอ (Poorly graded หรือ P, no. I) หรือมีขนาดผละแบบขาดช่วง (Gap graded หรือ P, no. III) สำหรับค่า C_u ถูกพิจารณาเพื่อแบ่งดินมวลหยาบ โดยที่กรวดมีค่า C_u มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 ทราบมีค่า C_u มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 6

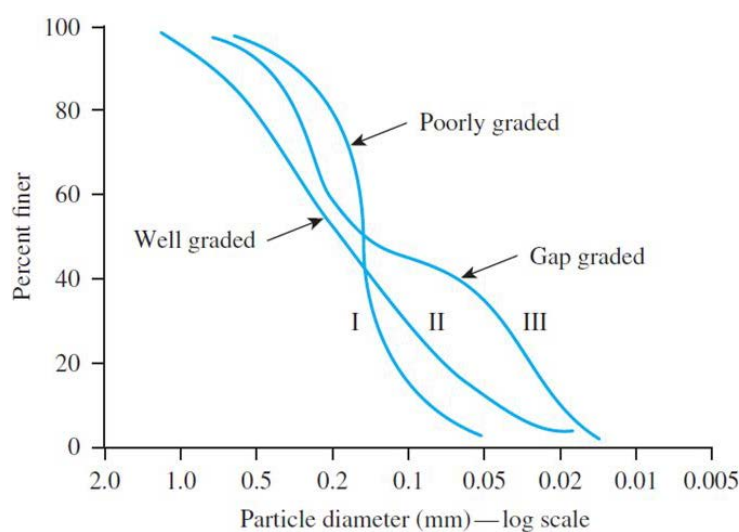
$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3-1)$$

เมื่อ D_{10} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดินที่เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม 10%

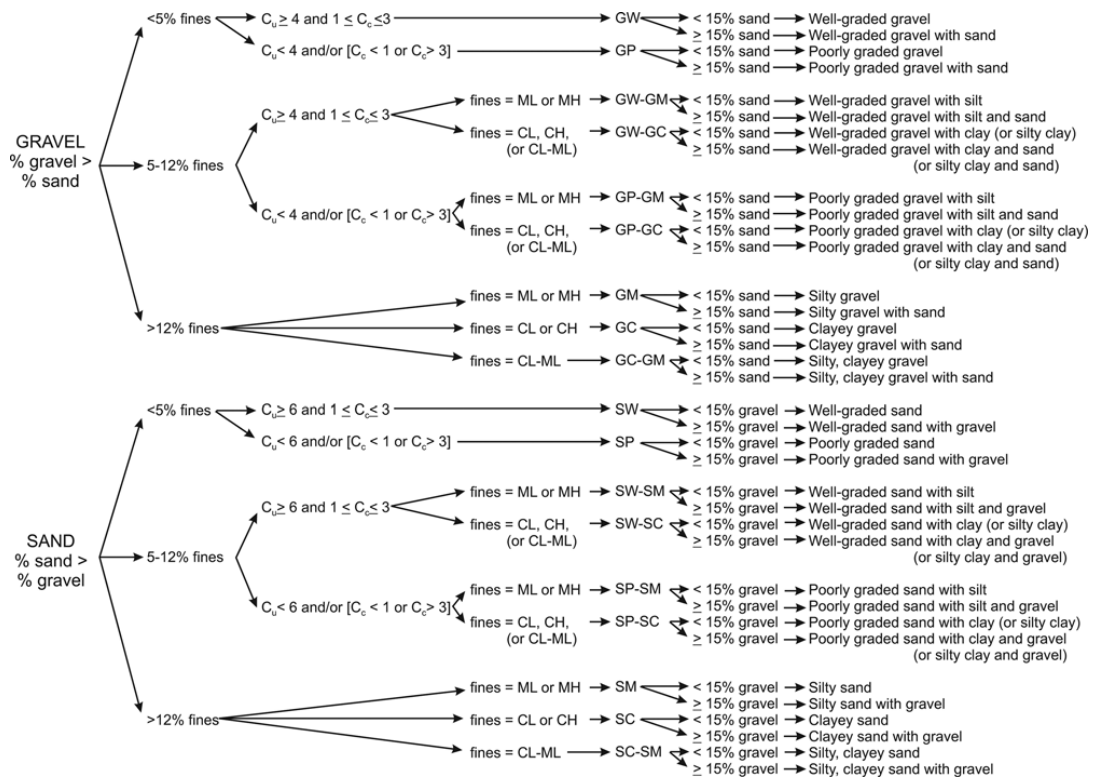
D_{60} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดินที่เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม 60%

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})} \quad (3-2)$$

เมื่อ D_{30} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดินที่เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม 30%

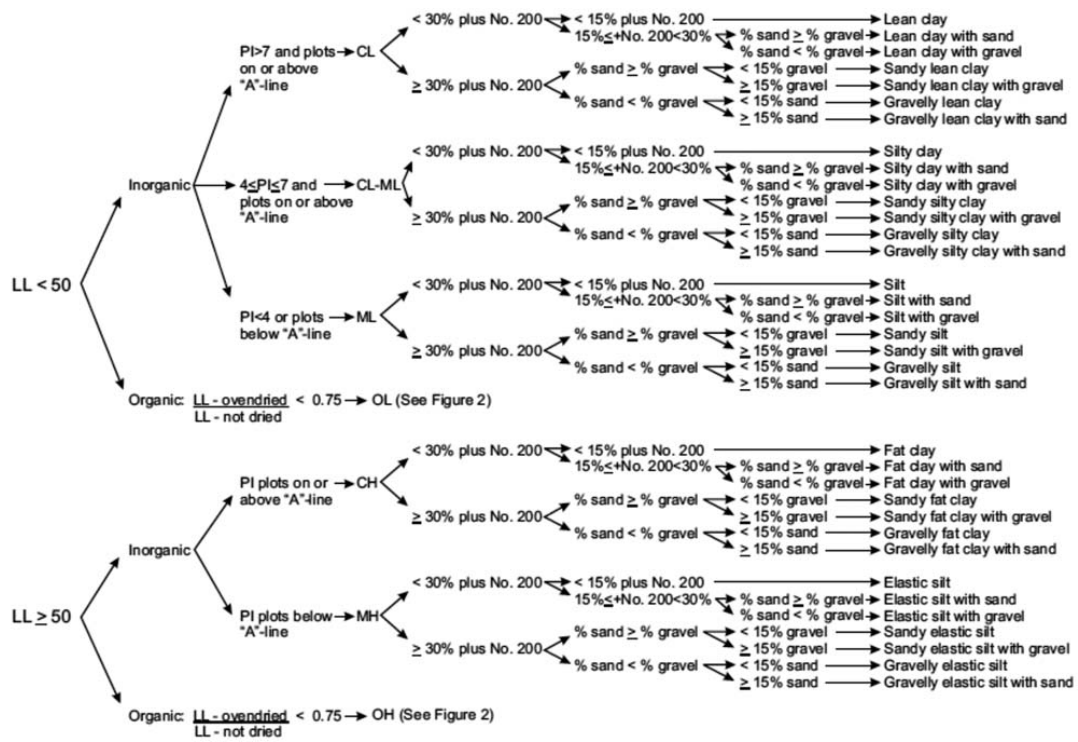


ภาพที่ 3-8 ขนาดผละของอนุภาคเม็ดดิน (Das, 2010)

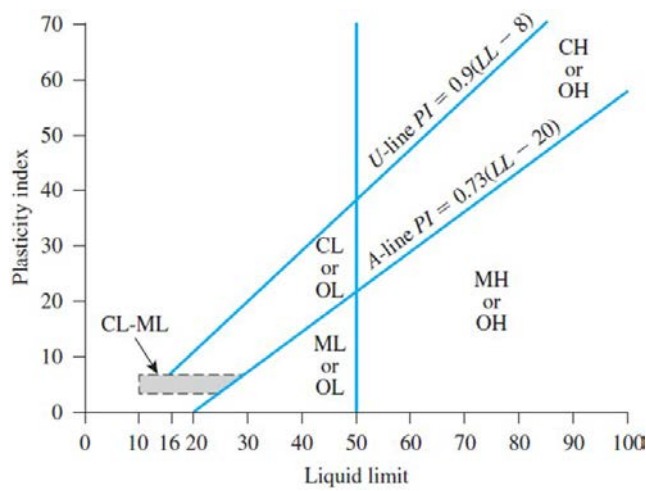


ภาพที่ 3-9 การจำแนกดินมวลหยาบ (Das, 2010)

การจำแนกดินมวลละเอียด นอกจากจะใช้วิธีการร้อนตัวอย่างดินผ่านตะแกรงแล้ว ดังภาพที่ 3-7 และ 3-10 ยังนำผลการทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์กมาทำการวิเคราะห์โดยใช้แผนภูมิความเหนียวดังภาพที่ 3-11 ถ้าค่าดัชนีของพลาสติก (P.I.) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ค่าพิกัดเหลว (L.L.) ลบด้วยค่าพิกัดพลาสติก (P.L.) อยู่ต่ำกว่าเส้น A-line และต่ำกว่าเส้น U-line เป็นดินตะกอน (Silt, M) หากค่าดัชนีของพลาสติกอยู่ระหว่างเส้น A-line และ เส้น U-line เป็น ดินเหนียว (Clay, C) นอกจากนี้หากดินมีกลิ่นและสีที่ไม่กลมกลืนกัน ดินถูกจัดเป็นดินอินทรีย์ (Organic, O) โดยไม่คำนึงถึงว่า ดัชนีของพลาสติก (P.I.) อยู่ตำแหน่งใดของเส้น A-line และถ้าค่าพิกัดเหลว (L.L.) มีค่าน้อยกว่า 50% แสดงว่า ดินเป็น Low plasticity (L) แต่หากค่าพิกัดเหลว (L.L.) มีค่ามากกว่า 50% แสดงว่า ดินเป็น High plasticity (H)



ภาพที่ 3-10 การจำแนกดินมวลละเอียด (Das, 2010)



ภาพที่ 3-11 แผนภูมิความเหนียว (Das, 2010)

2. การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดิน

การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างดิน ประกอบไปด้วย การทดสอบเพื่อหาชนิดและปริมาณของธาตุ การทดสอบเพื่อหาปริมาณสารอินทรีย์ และการทดสอบเพื่อหาค่า pH

2.1 การทดสอบหาปริมาณของธาตุในตัวอย่างดิน

การทดสอบเพื่อหาปริมาณของธาตุในตัวอย่างดิน โดยใช้เทคนิควิธีการวิเคราะห์แบบการวาวรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence spectrometry, XRF) ดำเนินการทดสอบโดยสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลวและสารแขวนลอยได้ ซึ่งอาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานมีความยาวคลื่น เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้

2.2 การทดสอบเพื่อหาปริมาณสารอินทรีย์ในตัวอย่างดิน

การทดสอบเพื่อหาปริมาณสารอินทรีย์ในตัวอย่างดินเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D2974-14 Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils

วิธีการทดสอบโดยสรุป คือ นำตัวอย่างดินอบในตู้อบอุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเข้าสู่ตู้อบกำหนดอุณหภูมิการอบที่ 440 °C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง นำตัวอย่างออกมาพักด้านนอกตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างดินคงที่ โดยตู้อบที่ใช้มีลักษณะดังภาพที่ 3-12



ภาพที่ 3-12 ตู้อบตัวอย่างดิน

2.3 การทดสอบเพื่อหาค่า pH ในตัวอย่างดิน

การทดสอบเพื่อหาค่า pH ในตัวอย่างดิน เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเป็นกรด-เป็นด่างของดินตามมาตรฐาน ASTM D4972-89 Standard test method for pH of soils

วิธีทำการทดสอบโดยสรุป คือ เตรียมตัวอย่างดินแห้ง และบดตัวอย่างดินให้ละเอียด จากนั้นนำตัวอย่างดินร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 จนได้น้ำหนักประมาณ 40 g แล้วจึงนำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบใส่ลงในภาชนะประมาณ 20 g และเติมน้ำในอัตราส่วนระหว่างดินต่อน้ำ (1 : 5) จากนั้นทำการคนสารละลายตัวอย่างดินเป็นเวลา 30 วินาที แล้วทิ้งไว้ 3 นาที และทำซ้ำอีก 4 ครั้ง รอจนกระทั่งดินตกตะกอน จากนั้นนำเครื่องวัดค่า pH มาติดตั้งเข้ากับก้านยึดอุปกรณ์ดังภาพที่ 3-13 เพื่อวัดค่าความเป็นกรด-เป็นด่างของสารละลายตัวอย่างที่เตรียมไว้ แล้วบันทึกค่าความเป็นกรด-เป็นด่างที่ปรากฏบนหน้าจอ ค่าความเป็นกรด-เป็นด่างของดินถูกจำแนกเป็นค่าพิสัยได้ 11 ระดับ ดังตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-13 เครื่องวัดค่า pH

ตารางที่ 3-1 ค่าความเป็นกรด-เบสของดิน

ค่า pH	ความหมาย	ค่า pH	ความหมาย
<3-5	กรดรุนแรง (Ultra-acid)	6.6-7.3	กลาง (Neutral)
3.6-4.4	กรดแก่จัด (Extremely acid)	7.4-7.8	เบสอ่อน (Slightly alkaline)
4.5-5.0	กรดจัดมาก (Very strongly acid)	7.9-8.4	เบสปานกลาง (Moderately alkaline)
5.1-5.4	กรดจัด (Strongly acid)	8.5-9.0	เบสจัด (Strongly alkaline)
5.5-6.0	กรดปานกลาง (Moderately acid)	9.0>	เบสจัดมาก (Very strongly alkaline)
6.1-6.5	กรดอ่อน (Slightly acid)		

3. การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติของ ตัวอย่างดินที่มีสภาพตามธรรมชาติ และตัวอย่างดินผสมปูนซีเมนต์ ซึ่งประกอบไปด้วย การทดสอบ การบดอัดดินแบบมาตรฐาน การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ

3.1 การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard compaction test)

การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard compaction test) ตาม ASTM D1557 Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ or 2,700 kN-m/m³) ซึ่งเป็นวิธีการทดสอบเพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{dry\ max}$) และค่าความชื้น หรือปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ในแต่ละ อัตราส่วนผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์

วิธีการทดสอบโดยสรุป คือ ขั้นแรก นำตัวอย่างดินแห้งมาผสมกับน้ำที่ปริมาณ ความชื้นที่ต้องการเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำดินมาทำการบดอัดในแบบ ทรงกระบอกที่ใช้ในการบดอัด (Mold) จำนวน 3 ชั้น ๆ ละ 25 ครั้ง แล้วทำการชั่งน้ำหนัก เก็บ ตัวอย่างดินเพื่อนำไปหาปริมาณความชื้น ทำซ้ำโดยการเพิ่มปริมาณน้ำให้มากขึ้น จนกระทั่งน้ำหนัก เปลี่ยนจากเพิ่มขึ้นเป็นลดลง จากนั้นมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งสูงสุด ($\gamma_{dry\ max}$) และหาค่าความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) อุปกรณ์ที่ใช้ในการ ทดสอบดังภาพที่ 3-14



ภาพที่ 3-14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน

3.2 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test)

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) ตาม ASTM D2435-96 Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) โดยใช้ดิน และอัตราการทรุดตัวในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์ ในการทดสอบได้ใช้อุปกรณ์ดังภาพที่ 3-15



ภาพที่ 3-15 อุปกรณ์การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

ทำการเตรียมตัวอย่างด้วยการใช้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d, (max)}$) และค่าความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ผสมให้ตัวอย่างและน้ำเข้ากัน แล้วนำมาอัดเข้าภายในแหวนทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm และหนา 20 mm จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ติดตั้งเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบ แล้วเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกกับตัวอย่างดิน ขณะทำการทดลองทำการบันทึกค่าที่เวลา 6 15 30 วินาที 1 2 4 8 15 30 นาที 1 2 4 8 และ 24 ชั่วโมง นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟโดยวิธี Square root time หรือ Log time เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมงให้ทำการเพิ่มน้ำหนักและบันทึกค่าที่เวลาเดิม

3.3 การทดสอบการอัดแบบอิสระ (Unconfined compression test)

การทดสอบการอัดแบบอิสระ (Unconfined compression test) ตาม ASTM

D2166/D2166M-16 Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของกำลังรับแรงเฉือนของดิน ในการทดสอบได้ใช้อุปกรณ์ดังภาพที่ 3-16

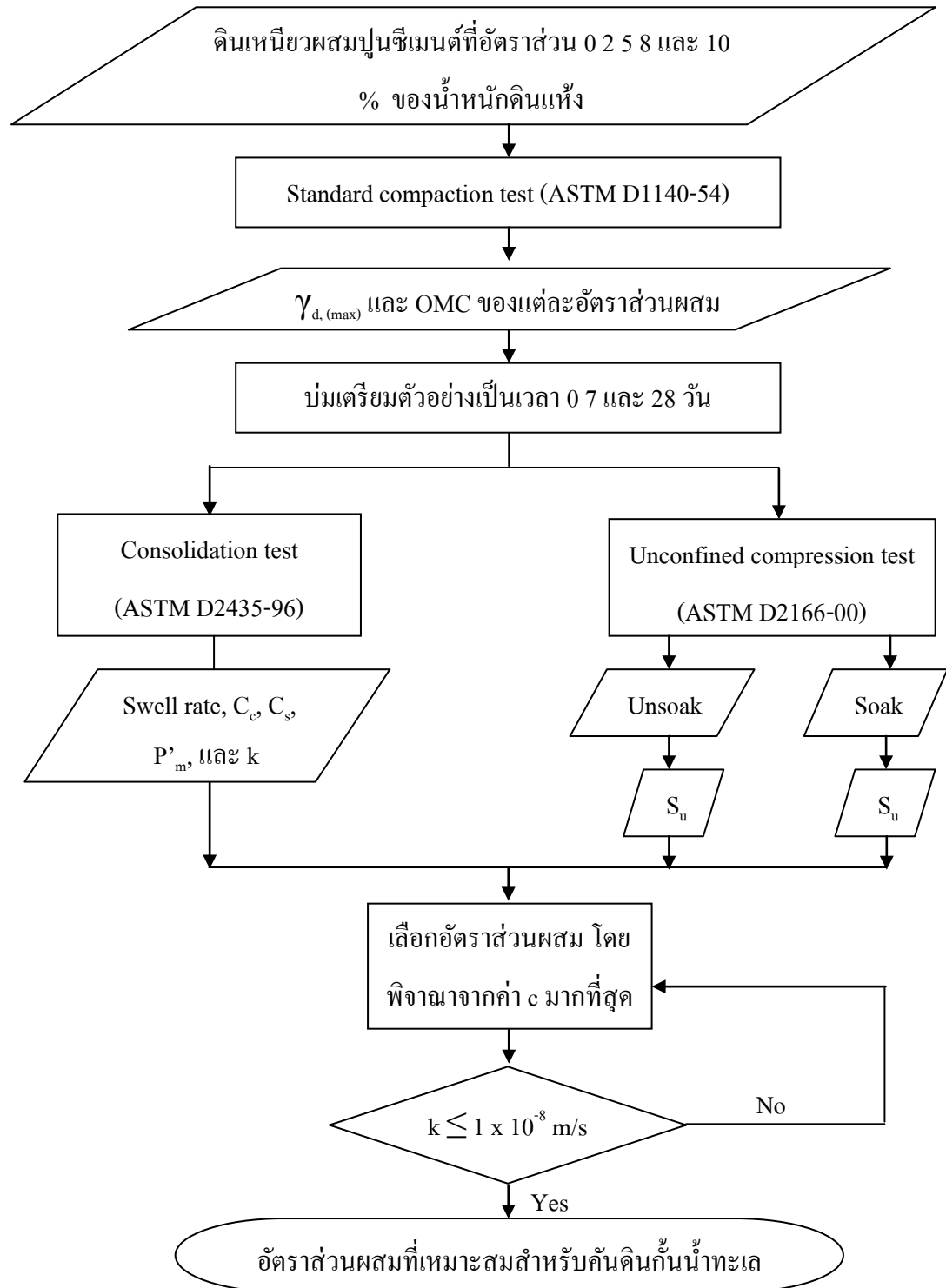


ภาพที่ 3-16 ชุดทดสอบการอัดแบบอิสระ

วิธีการทดสอบโดยสรุป คือ เตรียมตัวอย่างโดยใช้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{dry\ max}$) และค่าความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) แล้วนำตัวอย่างมาอัดเข้าแบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm และสูง 100 mm หลังจากนั้นติดตั้งแบบหล่อเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบ และทำการทดสอบโดยให้อัตราการกดคงที่ 0.05 นิ้วต่อนาที บันทึกข้อมูลทุก ๆ ระยะการกด 0.5 นิ้ว กดตัวอย่างจนกระทั่งแรงที่กระทำมีค่าลดลง หรือ จนกระทั่งระยะการกดมีค่าเท่ากับ 15% strain ถ่ายรูปหรือวาดรูปตัวอย่างในสภาพวิบัติ เพื่อหามุมที่กระทำกับแนวราบของระนาบวิบัติ และเก็บตัวอย่างดินนำไปหาความชื้น

ทำการทดสอบทั้งแบบ Unsoak และ Soak โดยการทดสอบแบบ Unsoak คือ เมื่อตัวอย่างอายุถึงกำหนดจะทำการทดสอบโดยทันที แต่สำหรับการทดสอบแบบ Soak คือ เมื่อตัวอย่างอายุถึงกำหนด จะนำตัวอย่างไปแช่น้ำ 2 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างมาทิ้งไว้ให้แห้งในสภาพอากาศปกติเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบ การทดสอบแบบ Soak เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง ทล.ม. 204/2533 มาตรฐานพื้นทางซีเมนต์

3.4 ลำดับขั้นตอน และการเตรียมตัวอย่างการทดสอบของการปรับปรุงคุณภาพดิน



ภาพที่ 3-17 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน

จากภาพที่ 3-15 แสดงขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อหาอัตราส่วนระหว่างดินและปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับคันดินกั้นน้ำทะเล โดยทดลองนำดินมาผสมปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งตัวอย่างดินผสมปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง คือ มีปริมาณดิน 100 ส่วน และมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10 ส่วน โดยน้ำหนักมาทำการทดสอบบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard proctor test) ซึ่งจะได้ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d,max}$) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ของแต่ละอัตราส่วน

ต่อมานำค่าที่ได้จากการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานมาทำการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำซึ่งได้ค่าอัตราการบวมตัว ค่าดัชนีของการอัดตัว (C_c) ค่าดัชนีของการคายตัว (C_u) ค่า Maximum past pressure (P'_m) และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระเพื่อหาค่าความเชื่อมแน่น (Undrain shear strength, S_u) ของแต่ละอัตราส่วน

ในการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระถูกแบ่งออกเป็นแบบ Unsoak (ไม่แช่น้ำ) และแบบ Soak (แช่น้ำ) โดยในการทดสอบแบบ Unsoak เมื่อตัวอย่างอายุถึงกำหนดจะทำการทดสอบตัวอย่างในทันที และสำหรับการทดสอบแบบ Soak เมื่อตัวอย่างอายุถึงกำหนด ต้องนำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ต่อมาทำตัวอย่างให้แห้งโดยการปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการทดสอบตัวอย่าง

หลังจากนั้น เลือกอัตราส่วนระหว่างดินและปูนซีเมนต์ โดยจากพิจารณาค่า c มากที่สุดและต้องมีค่า k น้อยกว่า 1×10^{-8} m/s แต่ถ้าค่า k มากกว่า 1×10^{-8} m/s ให้ทำการเลือกอัตราส่วนระหว่างดินและปูนซีเมนต์ใหม่ เมื่อได้ค่าอัตราส่วนระหว่างดินและปูนซีเมนต์จะเป็นค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล เพื่อนำอัตราส่วนที่ได้นำไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การทดสอบวิศวกรรมปฐพีในสนาม

การทดสอบวิศวกรรมปฐพีในสนาม เป็นการสำรวจในพื้นที่ศึกษา ซึ่งตั้งอยู่ที่หมู่บ้านหมู่ที่ 2 และ 3 ต.ตำมะลัง อ.เมือง จ.สตูล ได้ประสบปัญหาน้ำทะเลไหลเข้าท่วมพื้นที่เกษตรกรรม ส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวเกิดความเสียหาย 3,000 ไร่ โดยชาวบ้านในพื้นที่ศึกษามีความต้องการให้ก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล ซึ่งทางกรมชลประทานที่ 16 มีการวางแผนก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเลมีความยาวทั้ง 2,800 m ดังภาพที่ 3-16



ภาพที่ 3-18 แนวคันดินกั้นน้ำทะเล

จากการดำเนินการเจาะสำรวจและทดสอบดินในสนามช่วงเดือนกรกฎาคม 2559 โดยเจาะสำรวจลักษณะของชั้นดิน (Borehole, BH) จำนวน 2 หลุม ความลึก 21.50 m จากระดับผิวดิน และทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในสนาม (Field permeability test, FPT) จำนวน 5 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 3-17 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของกำลัง (ค่า c และ ϕ) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ (k) ความพรุน (n) และค่าดัชนีการเปลี่ยนแปลงมวล

ดินเมื่อเทียบกับแรง 1 kPa ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ถูกนำไปสร้างรูปตัดตามยาวเพื่อจำลองของลักษณะ
ชั้นดิน



ภาพที่ 3-19 ตำแหน่งของหลุมเจาะสำรวจดิน

ข้อมูลกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ สถานีเกาะตะรุเตา จังหวัดสตูล

จากข้อมูลกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ สถานีเกาะตะรุเตา จังหวัดสตูล ซึ่งรวบรวมไว้
ในช่วงปี พ.ศ. 2547-พ.ศ. 2559 พบว่า ค่าระดับน้ำสูงสุด เท่ากับ 2.070 m (รทก.) เมื่อเดือน
พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 และค่าระดับน้ำต่ำสุด เท่ากับ -2.260 m (รทก.) เมื่อเดือนเมษายน พ.ศ.
2555 ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ค่าความสูงของระดับน้ำสูงสุด และระดับน้ำต่ำสุด จากข้อมูลกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ สถานีเกาะตะรุเตา จังหวัดสตูล ปี พ.ศ. 2547-พ.ศ. 2559

เดือน	มกราคม		กุมภาพันธ์		มีนาคม		เมษายน		พฤษภาคม		มิถุนายน		กรกฎาคม		สิงหาคม		กันยายน		ตุลาคม		พฤศจิกายน		ธันวาคม		
	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	ระดับน้ำสูงสุด (m)	ระดับน้ำต่ำสุด (m)	
ปี																									
2547	-	-	-	-	-	-	0.97	-1.86	0.92	-2.04	0.96	-1.82	0.63	-1.90	0.92	-2.02	0.82	-1.96	1.06	-1.86	1.02	-1.90	1.78	-1.18	
2548	1.56	-1.24	1.55	-1.32	1.43	-1.36	1.52	-1.47	1.70	-1.20	1.71	-1.02	1.80	-1.14	1.64	-1.42	1.36	-1.26	-	-	-	-	-	-	
2549	1.38	-1.68	1.77	-1.73	1.74	-1.33	1.78	-1.13	1.49	-1.06	1.42	-1.10	1.74	-1.14	1.86	-1.04	1.77	-1.07	1.84	-1.13	1.68	-1.16	-	-	
2550	1.42	-1.23	1.44	-1.50	1.57	-1.44	1.80	-1.27	1.69	-1.11	1.48	-1.15	1.67	-1.22	1.74	-1.30	1.88	-1.36	1.93	-1.23	1.78	-1.13	1.63	-1.17	
2551	1.50	-1.40	1.52	-1.37	1.55	-1.46	1.74	-1.33	1.86	-1.08	1.60	-1.17	1.58	-1.21	1.78	-1.27	1.68	-1.27	1.84	-1.15	1.84	-1.07	1.70	-1.15	
2552	1.54	-1.47	1.60	-1.49	1.60	-1.33	1.71	-1.24	1.66	-1.11	1.75	-1.09	1.79	-1.28	1.86	-1.33	1.68	-1.33	1.68	-1.12	1.59	-1.26	1.53	-1.26	
2553	1.61	-1.54	1.62	-1.56	1.61	-1.57	1.61	-1.31	1.60	-1.05	1.56	-1.12	1.73	-1.21	1.81	-1.34	1.70	-1.48	2.01	-1.10	1.81	-1.02	1.94	-1.04	
2554	1.86	-1.22	1.73	-1.50	1.62	-1.50	1.63	-1.40	1.79	-1.18	1.72	-0.89	1.67	-1.13	1.74	-1.60	1.58	-1.57	1.51	-1.59	1.31	-1.62	1.13	-1.68	
2555	1.05	-1.82	0.95	-2.08	0.94	-2.17	0.81	-2.26	1.77	-1.84	1.93	-0.91	1.78	-1.01	1.80	-1.23	1.61	-1.42	1.82	-1.27	2.01	-1.08	1.73	-1.29	
2556	1.81	-1.24	1.72	-1.32	1.59	-1.36	1.70	-1.22	1.95	-1.33	1.64	-1.25	1.77	-1.26	1.85	-1.08	1.84	-1.00	1.92	-0.88	2.07	-0.87	1.80	-1.20	
2557	1.84	-1.50	1.60	-1.57	1.62	-1.50	1.74	-1.35	1.78	-0.98	1.83	-0.93	1.94	-1.02	1.90	-1.19	1.81	-1.18	1.86	-1.15	1.77	-1.06	1.77	-1.16	
2558	1.39	-1.65	1.38	-1.73	1.37	-1.61	1.52	-1.35	1.54	-1.14	1.52	-1.05	1.55	-1.13	1.63	-1.35	1.63	-1.36	1.67	-1.28	1.53	-1.29	1.37	-1.35	
2559	1.31	-1.47	1.33	-1.66	1.36	-1.66	1.51	-1.47	1.63	-1.24	1.61	-1.13	1.5	-1.14	1.52	-1.27	1.58	-1.32	1.69	-1.3	1.66	-1.33	1.47	-1.41	
ค่าเฉลี่ย (m)	1.52	-1.46	1.52	-1.57	1.50	-1.52	1.54	-1.44	1.64	-1.26	1.59	-1.13	1.63	-1.21	1.70	-1.34	1.61	-1.35	1.74	-1.26	1.67	-1.23	1.62	-1.26	
ค่า Max (m)	1.86	-1.22	1.77	-1.32	1.74	-1.33	1.80	-1.13	1.95	-0.98	1.93	-0.89	1.94	-1.01	1.90	-1.04	1.88	-1.00	2.01	-0.88	2.07	-0.87	1.94	-1.04	
ค่า Min (m)	1.05	-1.82	0.95	-2.08	0.94	-2.17	0.81	-2.26	0.92	-2.04	0.96	-1.82	0.63	-1.90	0.92	-2.02	0.82	-1.96	1.06	-1.86	1.02	-1.90	1.13	-1.68	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (m)	0.24	0.20	0.23	0.21	0.21	0.23	0.31	0.30	0.25	0.32	0.24	0.23	0.32	0.22	0.26	0.25	0.27	0.24	0.25	0.25	0.29	0.28	0.23	0.17	

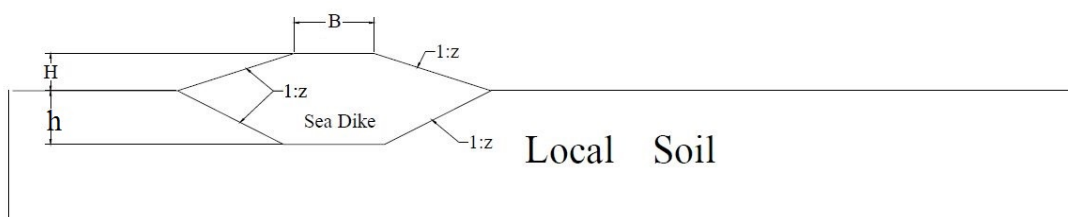
หมายเหตุ:ระดับน้ำจากระดับน้ำทะเลปานกลาง

การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม GeoStudio 2007 ในการวิเคราะห์แบบจำลอง เพื่อออกแบบคันดินกั้นน้ำทะเล และประเมินประสิทธิภาพในการป้องกันการรुक้าของน้ำทะเลของคันดินกั้นน้ำทะเล ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ทำการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 แบบจำลอง ได้แก่

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ (บ่อขี้มดิน)
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน

โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 3-20 และตารางที่ 3-3 ในการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เราได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ (บ่อขี้มดิน) ในการออกแบบคันดินกั้นน้ำทะเล และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินประเมินประสิทธิภาพในการป้องกันการรुक้าของน้ำทะเลของคันดินกั้นน้ำทะเล

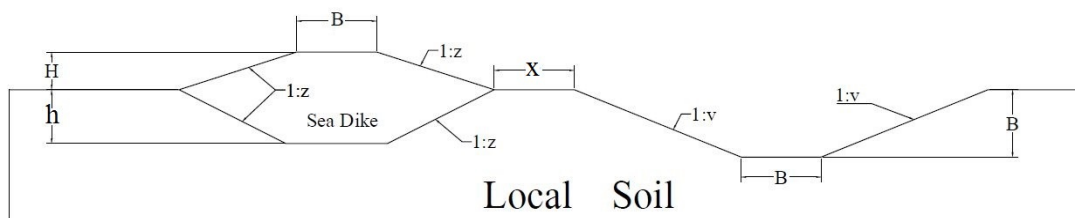


ภาพที่ 3-20 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ

ตารางที่ 3-3 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ

รายละเอียด	ค่า
ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเล, H (m. MSL.)	3.00
ความลึกของฐานรากคันดินกั้นน้ำทะเล, h (m)	0.50
ความกว้างของสันคันดินกั้นน้ำทะเล, B (m)	3.00
ความลาดของคันดินกั้นน้ำทะเลและความลาดของฐานราก (1 : z)	1 : 2
ลักษณะของชั้นดิน	แบบที่ 1 และ แบบที่ 2
จำนวนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2

ซึ่งในการก่อสร้างคันดินจริงนั้น นำดินในพื้นที่ศึกษามาใช้ในการก่อสร้างซึ่งมีลักษณะ
ดังภาพที่ 3-21 และมีรายละเอียดดังตารางที่ 3-4



ภาพที่ 3-21 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ

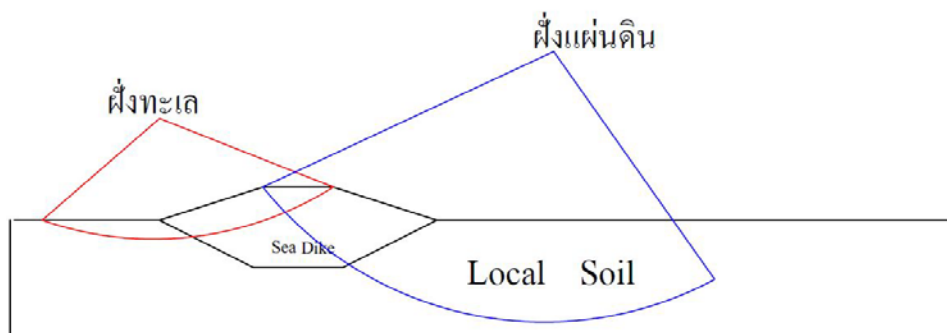
ตารางที่ 3-4 รายละเอียดการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ

รายละเอียด	ค่า
ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเล, H (m. MSL.)	3.00
ความลึกของฐานรากคันดินกั้นน้ำทะเล, h (m)	0.50
ความกว้างของสันคันดินกั้นน้ำทะเล, B (m)	3.00
ความลาดของคันดินกั้นน้ำทะเลและความลาดของฐานราก (1 : z)	1 : 2
ความลึกของทางน้ำ, D (m)	2.50
ความกว้างของพื้นที่ช่องทางน้ำ, B (m)	3.00
ความลาดของทางน้ำ (1 : v)	1 : 2.5
ลักษณะของชั้นดิน	แบบที่ 1 และ แบบที่ 2
จำนวนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ

เป็นการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพ (ค่าอัตราส่วนปลอดภัย) ของความลาดคันดิน
กั้นน้ำทะเลดังภาพที่ 3-22 โดยทำการวิเคราะห์แบบ Morgenstern-price ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่

3-5

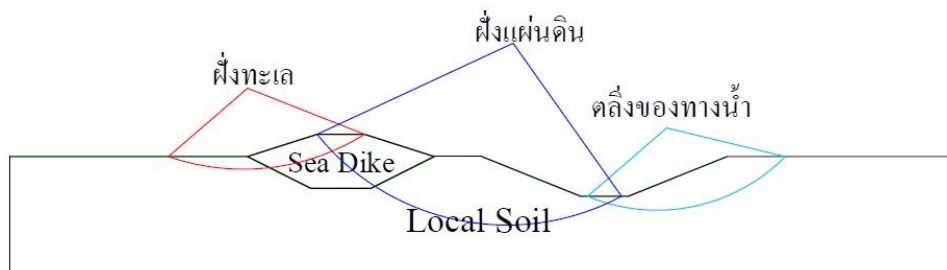


ภาพที่ 3-22 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

ตารางที่ 3-5 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	2
สภาพที่ใช้ทำการวิเคราะห์ (เมื่อก่อสร้างเสร็จ ขณะใช้งาน และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน)	3
ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ (เหนือน้ำ(ฝั่งทะเล) ใต้หน้า(ฝั่งแผ่นดิน))	2
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	24

สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบมีทางน้ำต้องวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพของความลาดบริเวณฝั่งแผ่นดินเมื่อก่อสร้างเสร็จ มีดังภาพที่ 3-23 และมีรายละเอียดดังตารางที่ 3-6



ภาพที่ 3-23 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบมีทางน้ำ

ตารางที่ 3-6 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	1
สภาพที่ใช้ทำการวิเคราะห์ (เมื่อก่อสร้างเสร็จ)	1
ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ (ฝั่งแผ่นดิน)	1
ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ, X (m)	x
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2x

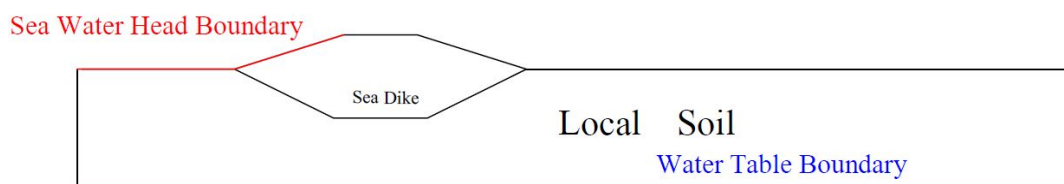
โดยระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ เริ่มที่ 3 m และเพิ่มทีละ 1 m จนกระทั่งค่าเสถียรภาพ (ค่าอัตราส่วนปลอดภัย) ของความลาดบริเวณฝั่งแผ่นดินเมื่อก่อสร้างเสร็จมีค่ามากกว่า 1.4 เนื่องจากค่าเสถียรภาพ (ค่าอัตราส่วนปลอดภัย) เมื่อขณะก่อสร้างเสร็จ มีค่า 1.3 ซึ่งเมื่อได้ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ ถูกนำมาวิเคราะห์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เสถียรภาพคันดินและทางน้ำอีกครั้ง โดยมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินแบบมีทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	2
สภาพที่ใช้ทำการวิเคราะห์ (เมื่อก่อสร้างเสร็จ ขณะใช้งาน และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน)	3
ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ (ฝั่งทะเล ฝั่งแผ่นดิน และตลิ่งของทางน้ำ)	3
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	36

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน

เป็นการวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลออกของน้ำทะเลผ่านคันดินดังภาพที่ 3-24 โดยทำการวิเคราะห์แบบ Steady state ซึ่งมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3-8

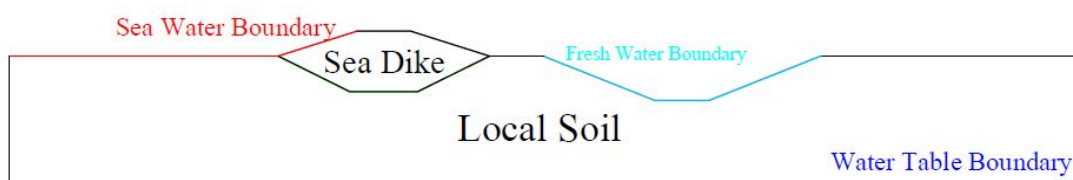


ภาพที่ 3-24 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

ตารางที่ 3-8 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	2
ระดับน้ำทะเล (m. MSL.)	2-07
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	1

สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลออกของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำดังภาพที่ 3-25 และมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3-9



ภาพที่ 3-25 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ

ตารางที่ 3-9 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ

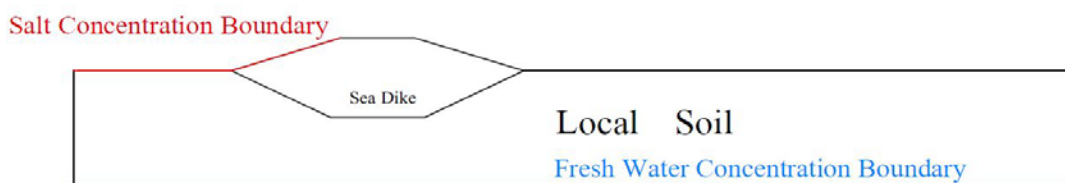
รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	2
ระดับจืดที่ถูกเก็บกักไว้ (m. จากระดับผิวดิน)	- 0-30
ระดับน้ำทะเล (m. MSL.)	2-07
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	4

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน

เป็นการวิเคราะห์เพื่อประเมินและตรวจสอบประสิทธิภาพการป้องกันการรุกตัวของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเลดังภาพที่ 3-26 ในการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ใช้การวิเคราะห์แบบ Density-dependent analysis โดยทำการศึกษาดังตารางที่ 3-10

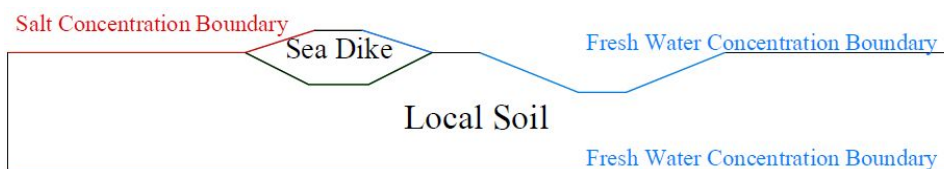
ตารางที่ 3-10 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	1
ระดับน้ำทะเล (m- MSL-)	2-07
ความเข้มข้นของน้ำทะเล, $C_{\text{sea water}}$ (kg/m^3)	35
ระยะเวลา (ปี)	100
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2



ภาพที่ 3-26 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ

ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันการรุกตัวของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีและมีทางน้ำเข้าไปในพื้นที่ศึกษา โดยแบบจำลองมีลักษณะดังภาพที่ 3-27 และมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3-11



ภาพที่ 3-27 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ

ตารางที่ 3-11 รายละเอียดการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำ

รายละเอียด	ข้อมูล
จำนวนแบบจำลองคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2
คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล (ลักษณะ)	1
ระดับจืดที่ถูกเก็บกักไว้ (m- จากระดับผิวดิน)	- 0-30
ระดับน้ำทะเล (m- MSL-)	2-07
ความเข้มข้นของน้ำทะเล, $C_{\text{sea water}}$ (kg/m^3)	35
ระยะเวลา (ปี)	100
ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (แบบจำลอง)	2

การวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล

เป็นการคำนวณการทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล ซึ่งในการวิเคราะห์ซึ่งมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3-12

ตารางที่ 3-12 รายละเอียดการวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล

ชั้นดิน	Depth จาก	Unit Weight	Void Ratio		Depth จาก	Unit Weight	Void Ratio	
	ระดับผิวดิน				ระดับผิวดิน			
	-	γ	C_c	e	-	γ	C_c	e
	m	(kN/m ³)	-	(m ³ /m ³)	m	(kN/m ³)	-	(m ³ /m ³)
	BH-1				BH-2			
Clay-1	0-3.8	16.3	0.70	2.3	0-3.8	16.3	0.50	2.6
Clay-2	3.8-9.8	16.3	0.70	1.5	3.8-6.8	16.3	0.50	1.5
Clay-3	9.8- 15.8	16.2	0.75	1.5	6.8-12.8	16.5	1.20	2.3

หมายเหตุ: ระดับน้ำใต้ดิน -2.00 mจากระดับผิวดิน

บทที่ 4

ผลการวิจัย

บทนี้ได้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณสมบัติด้านกำลัง และความที่บ้น้ำของดินในพื้นที่ศึกษา รวมถึงผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อการออกแบบคันดินกั้นน้ำทะเล และประเมินความสามารถในการป้องกันการรุกตัวของน้ำทะเลของคันดินกั้นน้ำทะเล

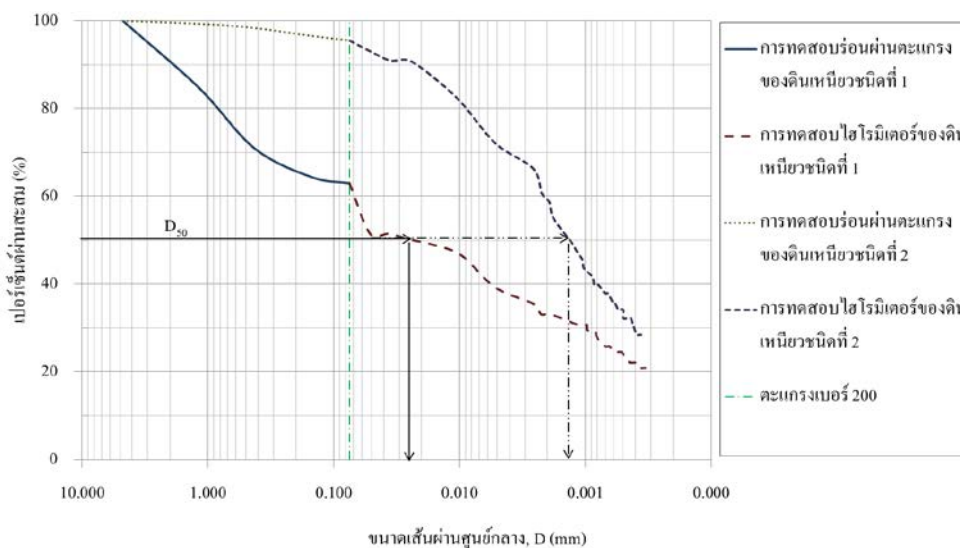
ผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมปฐพีในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบทางวิศวกรรมปฐพี ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการวิเคราะห์เพื่อการจำแนกชนิดดินและองค์ประกอบต่าง ๆ ในมวลดิน โดยอาศัยการทดสอบคุณสมบัติกายภาพ และดัชนีของดิน การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดิน และผลการวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดินแล้ว

1. ผลการทดสอบคุณสมบัติกายภาพและดัชนีของดิน

ผลการทดสอบการร่อนตะแกรงแบบเปียก (Wet sieve analysis) ดังภาพที่ 4-1 ซึ่งอธิบายได้ว่า ตัวอย่างดินมี 2 ชนิด ดินสามารถถูกร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้มากกว่า 50% ทำให้ทราบว่า ดินในพื้นที่ศึกษาเป็นดินมวลละเอียด (Fine particle) โดยดินเหนียวชนิดที่ 1 มีเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงที่ตะแกรงเบอร์ 200 ที่ 63.0% และดินเหนียวชนิดที่ 2 มีเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงที่ตะแกรงเบอร์ 200 ที่ 95.5% และจากการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ดินเหนียวทั้ง 2 ชนิด มีอนุภาคดินที่เล็กกว่า 0.005 mm ซึ่งบ่งบอกค่าปริมาณ Clay content โดยดินเหนียวชนิดที่ 1 มีปริมาณ Clay content 39.0% และดินเหนียวชนิดที่ 2 มีปริมาณ Clay content 71.0% และสำหรับค่า C_u และ C_c ไม่สามารถหาได้ เนื่องจากค่า C_u และ C_c ต้องใช้ข้อมูลจากเส้นกราฟที่ได้จากการทดสอบการร่อนผ่านตะแกรงที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคดินที่เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรง 10 30 และ 60%

นอกจากนี้ จากการทดสอบการร่อนตะแกรงแบบเปียก และการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ ทำให้ทราบว่า ดินเหนียวชนิดที่ 1 และดินเหนียวชนิดที่ 2 มีขนาดของเม็ดดินเฉลี่ย 0.025 และ 0.0015 mm ตามลำดับ



ภาพที่ 4-1 การกระจายตัวของดินเหนียวชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและดัชนีของดิน

การทดสอบ	รายการ	ดินเหนียวชนิดที่ 1	ดินเหนียวชนิดที่ 2
การทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก	Liquid limit, L.L. (%)	40.7	58.0
	Plastic limit, P.L. (%)	21.5	26.4
	Shrinkage limit, S.L. (%)	16.3	17.1
	Plastic index, P.I. (%)	19.2	31.6
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	Specific gravity, S_G	2.77	2.68

จากการทดสอบขีดจำกัดแอดเตอร์เบิร์ก (ตารางที่ 4-1) ทำให้ทราบว่า ดินในพื้นที่ศึกษาเป็นดินเหนียว โดยเมื่อนำค่า Plastic index ($P.I. = L.L. - P.L.$) และค่า Liquid limit (L.L.) ของดินทั้งสองชนิด ไปพล็อตลงในแผนภูมิความเหนียว (ภาพที่ 3-6) พบว่า ดินเหนียวชนิดที่ 1 มีค่า $P.I. = 19.2\%$ อยู่ระหว่างเส้น A-line คือ เส้นซึ่งแทนด้วยสมการ $PI = 0.73(L.L. - 20)$ และเส้น U-line คือ เส้นที่แทนด้วยสมการ $P.I. = 0.9(L.L. - 8)$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินชนิดนี้เป็น ดินเหนียว (C) และค่า $L.L. = 40.7\%$ ยืนยันว่าดินเป็นดินเหนียวกลุ่ม Low plasticity (L) และตัวอย่างดินเหนียวชนิดที่ 2 มีค่า $P.I. = 31.6\%$ อยู่ระหว่างเส้น A-line และเส้น U-line ซึ่งเป็นสิ่งที่สนับสนุนว่า ดินชนิดนี้เป็นดินเหนียว (C) และมีค่า $L.L. = 58.0\%$ ยืนยันว่าดินเป็นดินเหนียวกลุ่ม High plasticity (H)

นอกจากนี้ ค่าขีดจำกัดการหดตัว (Shrinkage limit, S.L.) หรือปริมาณน้ำที่ทำให้มวลดินไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยค่าขีดจำกัดการหดตัวของตัวอย่างดินเหนียวชนิดที่ 1 (ดินเหนียว CL) และชนิดที่ 2 (ดินเหนียว CH) มีค่าเท่ากับ 16.3 และ 17.1% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน บ่งบอกว่า ปริมาณน้ำดังกล่าวที่ทำให้ดินเหนียวทั้ง 2 ชนิดไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมีค่าใกล้เคียงกัน และจากการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่า ดินเหนียว CL และดินเหนียว CH มีค่าความถ่วงจำเพาะ (S_G) เท่ากับ 2.77 และ 2.68 ตามลำดับ ตัวอย่างดินทั้งสองมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วงค่าความถ่วงจำเพาะของดินเหนียวที่มีการแนะนำไว้ คือ 2.6-2.8 (Das, 2010)

ดังนั้น จากผลการทดสอบคุณสมบัติกายภาพและดัชนีของดิน พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาจากพื้นที่ศึกษา สามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ ดินเหนียว (Clay) กลุ่ม Low plasticity หรือ CL และดินเหนียว (Clay) กลุ่ม High plasticity หรือ CH ตามการจำแนกดินของ USCS (Unified soil classification system)

2. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดิน

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมี ได้มาจากการทดสอบหาปริมาณสารประกอบในตัวอย่างดิน การทดสอบหาค่าปริมาณสารอินทรีย์ และการทดสอบการหาค่า pH ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบแสดงในตารางที่ 4-2-ตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบหาปริมาณสารประกอบในตัวอย่างดิน

สารประกอบ	ปริมาณที่พบในตัวอย่างดิน (%)	
	ดินเหนียว CL	ดินเหนียว CH
Al_2O_3	14.58	17.22
SiO_2	68.66	70.10
Fe_2O_3	3.89	3.49
CaO	0.46	0.28
อื่น ๆ (%)	12.41	8.91

จากตารางที่ 4-2 แสดงรายละเอียดผลการทดสอบหาปริมาณของสารประกอบในตัวอย่างดินด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบการวาวรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry, XRF) พบว่า ตัวอย่างดินทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) จำนวนมาก

ซึ่งสอดคล้องกับสารประกอบที่พบในดินเหนียว ดังนั้น จึงเป็นเหตุผลสนับสนุนที่ทำให้สามารถระบุได้ว่าตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบเป็นดินเหนียว (Das, 2010)

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบหาปริมาณสารอินทรีย์ในตัวอย่างดิน

รายการ	ปริมาณที่พบในตัวอย่างดิน (%)	
	ดินเหนียว CL	ดินเหนียว CH
ค่าเฉลี่ย	8.30	8.80
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.59	2.23

ผลการทดสอบการหาค่าปริมาณสารอินทรีย์ด้วยวิธีการเผาตามมาตรฐาน ASTM D2974-07 Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils ดังตารางที่ 4-3 พบว่า มีปริมาณสารอินทรีย์ในตัวอย่างดิน โดยจากการจำแนกชนิดดิน และการหาค่าปริมาณสารอินทรีย์ ทำให้ทราบว่า ตัวอย่างดิน CL และ CH มีปริมาณสารอินทรีย์ (Organic matter) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 8.30 และ 8.80% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินเป็นดินเหนียวที่มีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ในมวลดิน และจากการจำแนกของ Germaine and Germaine (2009) พบว่าตัวอย่างดินเป็น ดินร่วน (Loam borrow) ซึ่งมีดินที่มีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 4-20%

ตารางที่ 4-4 ผลการทดสอบการหาค่า pH

รายการ	ปริมาณที่พบในตัวอย่างดิน (%)	
	ดินเหนียว CL	ดินเหนียว CH
ค่าเฉลี่ย	4.0	4.9
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.34	0.71

จากการทดสอบการหาค่า pH ดังตารางที่ 4-4 พบว่า ตัวอย่างดิน CL มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ดินอยู่ในช่วงกรดแก่จัด (Extremely acid soil) และจากตัวอย่างดิน CH มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ดินมีอยู่ในช่วงกรดจัดมาก (Strongly acid soil) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ดินเหนียวที่พบนั้น เป็นดินเหนียวอินทรีย์ (Organic clay) ซึ่งยังคงมีการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในมวลดิน ทำให้ดินมีสภาพความเป็นกรด

จากผลการวิเคราะห์เพื่อการจำแนกชนิดดินและองค์ประกอบต่าง ๆ ในมวลดิน โดยอาศัย การทดสอบคุณสมบัติกายภาพและดัชนีของดิน รวมทั้งการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดิน พบว่า ตัวอย่างดินจากพื้นที่ศึกษาที่สำรวจพบนั้นเป็น ดินเหนียว (Clay) ชนิด Low plasticity (CL) และ ชนิด High plasticity (CH) มีสารอินทรีย์ประมาณ 8-9% ปะปนอยู่ในมวลดิน แสดงให้เห็นว่ามี ลักษณะเป็นดินเหนียวอินทรีย์ (Organic clay) ซึ่งยังคงมีการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในมวลดิน ทำให้ดินมีสภาพความเป็นกรด ส่งผลให้ดินมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการ ก่อสร้างด้านวิศวกรรม เพราะดินมีความชื้นสูง ความสามารถในการรับน้ำหนักน้อย และการทรุดตัว มาก อีกทั้งดินที่มีสารอินทรีย์เป็นจำนวนมากจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้ ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่เพิ่มมากขึ้น

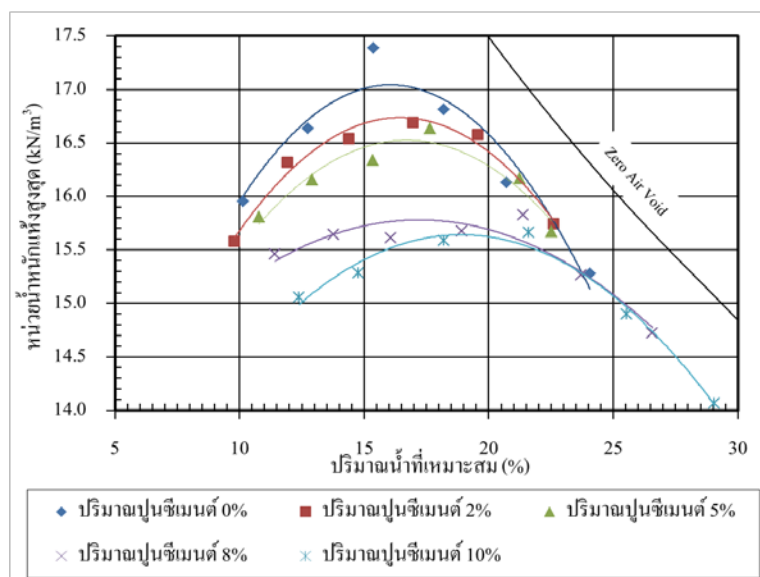
แต่เนื่องจากดินมีสภาพเป็นดินเหนียวซึ่งมีค่าการซึมผ่านของน้ำต่ำ ดังนั้นหากต้องการ นำมาใช้งาน ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพดินก่อนเพื่อให้มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะด้านกำลังให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ซึ่งผลการวิเคราะห์เพื่อหา คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดินจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

3. ผลการวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพ ดิน

การปรับปรุงคุณภาพดิน กระทำโดยทดลองนำตัวอย่างดินมาผสมสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1) ที่ปริมาณ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้งแล้วนำไป ทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจาก 3 วิธีการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบ การบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard compaction test) การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined compression test)

3.1 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน

การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard compaction test) เป็นการทดสอบ เพื่อหาหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d, max}$) และหาค่าความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) ในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4-5 และ 4-6 และดังภาพที่ 4-2 และ 4-3

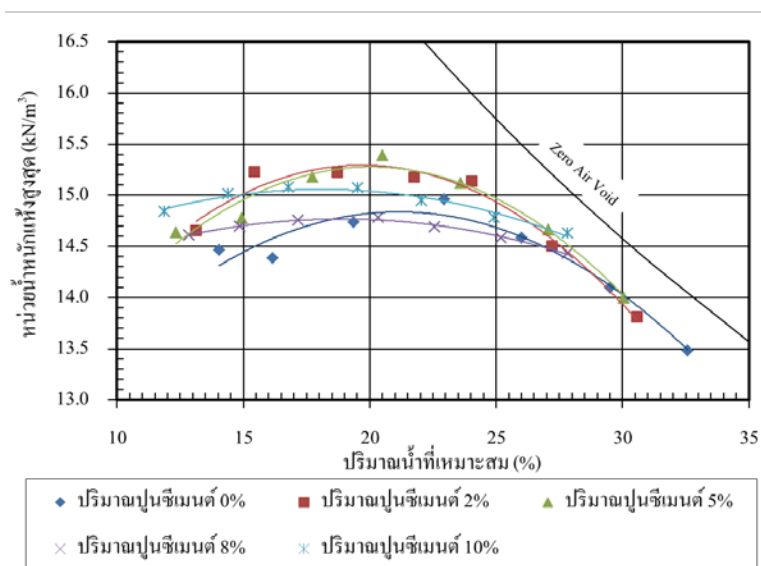


ภาพที่ 4-2 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL

ชื่อ	ปริมาณปูนซีเมนต์ (%)	$\gamma_{d, (max)}$ (kN/m ³)	OMC (%)
CL-C00	0	17.1	16-0
CL-C02	2	16.7	16-4
CL-C05	5	16.6	16.6
CL-C08	8	15.8	17.2
CL-C010	10	15.6	18.9

จากภาพที่ 4-2 และตารางที่ 4-5 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดลง เนื่องจากดินที่นำมาใช้มีขนาดละเอียดที่ไม่ดี (Poorly graded soil) และเมื่อผสมปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดละเอียดเพียงขนาดเดียว ทำให้ขนาดละเอียดของดินมีขนาดใดขนาดหนึ่งมากขึ้นทำให้มีขนาดละเอียดที่ไม่ดี (Poorly graded soil) และเป็นผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดลง แต่เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีค่ามากขึ้น เพราะดินเหนียว CL ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่าง ๆ มีความต้องการปริมาณน้ำมากเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน และหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีค่าลดลง



ภาพที่ 4-3 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH

ชื่อ	ปริมาณปูนซีเมนต์ (%)	$\gamma_{d, (max)}$ (kN/m ³)	OMC (%)
CH-C00	0	14.8	21.1
CH-C02	2	15.3	19.7
CH-C05	5	15.3	20.0
CH-C08	8	14.8	19.0
CH-C10	10	15.1	18.5

จากภาพที่ 4-3 และตารางที่ 4-3 พบว่า สำหรับดินเหนียว CH เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนและอยู่ในช่วงแคบ ๆ ซึ่งมีค่าประมาณ 14.5-15.5 kN/m³ และเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นปริมาณความชื้นที่เหมาะสมมีแนวโน้มที่ลดลง และมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบ ๆ ประมาณ 18.0-23.0% และสังเกตเห็นได้ว่า ที่การผสมอัตราส่วนปูนซีเมนต์มากขึ้น ไม่ต้องการเพิ่มปริมาณความชื้นที่มากขึ้น เนื่องจากปูนซีเมนต์ใช้น้ำที่มีอยู่ในมวลดินเพื่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งผลการทดสอบมีลักษณะสอดคล้องกับผลการทดสอบของสิริศักดิ์ จินดาพล, สยาม ยิ้มศิริ, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, และสัจชัย มิตรเอม (2550)

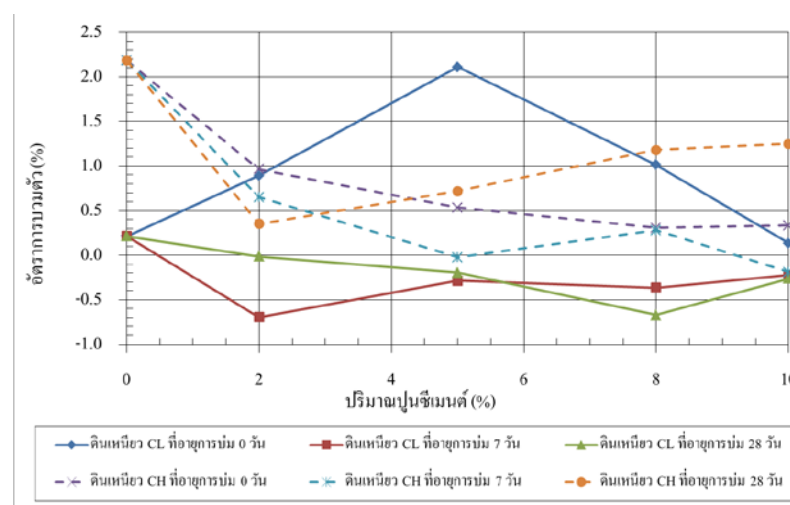
จากภาพที่ 4-2 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL และ ภาพที่ 4-3 ผลการทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH ทำให้ทราบค่าหน่วย น้ำหนักแห้งสูงสุด ($\gamma_{d, \max}$) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content, OMC) ในการบดอัดดินเหนียวแต่ละประเภท สำหรับอัตราส่วนผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งค่าทั้งสองจะนำไปใช้ในการเตรียมตัวอย่างการทดสอบการอัดตัว คายน้ำ และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระต่อไป

3.2 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test) เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราการ บวมตัว ดัชนีของการอัดตัว (C_c) ดัชนีของการบวมตัว (C_s) แรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) โดยใช้ น้ำ ในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างดินและปูนซีเมนต์ที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงดังภาพที่ 4-4 ถึงภาพที่ 4-9

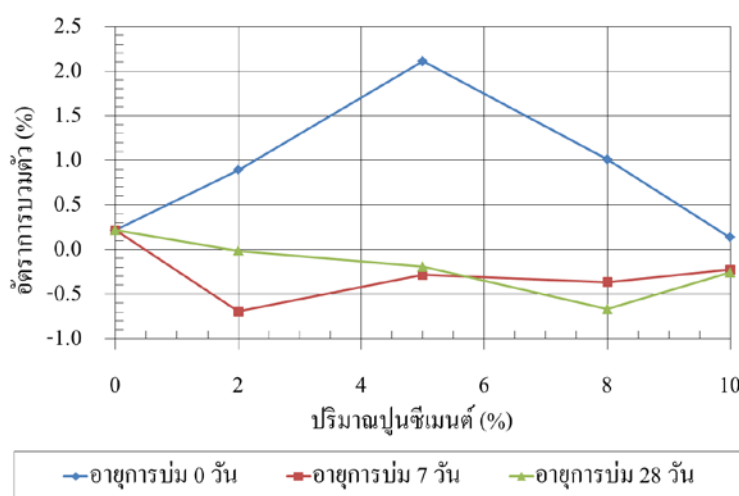
3.2.1 ค่าอัตราการบวมตัว

ค่าอัตราการบวมตัวในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ พิจารณาจากค่าการทรุดตัว ของตัวอย่างดิน ในการรับน้ำหนักที่ 25 kPa หากค่าอัตราการบวมตัวมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างดินมีการทรุดตัวลงเมื่อรับน้ำหนักที่ 25 kPa แต่ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าเป็นบวก แสดงให้ เห็นว่าตัวอย่างดินมีการบวมตัวเมื่อรับน้ำหนักที่ 25 kPa ซึ่งค่าอัตราการบวมตัวที่ได้จากการทดสอบ นำไปใช้ในการอธิบายว่า เมื่อดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ แล้วสัมผัสน้ำมีโอกาส เกิดการบวมตัวขึ้นหรือไม่



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%)

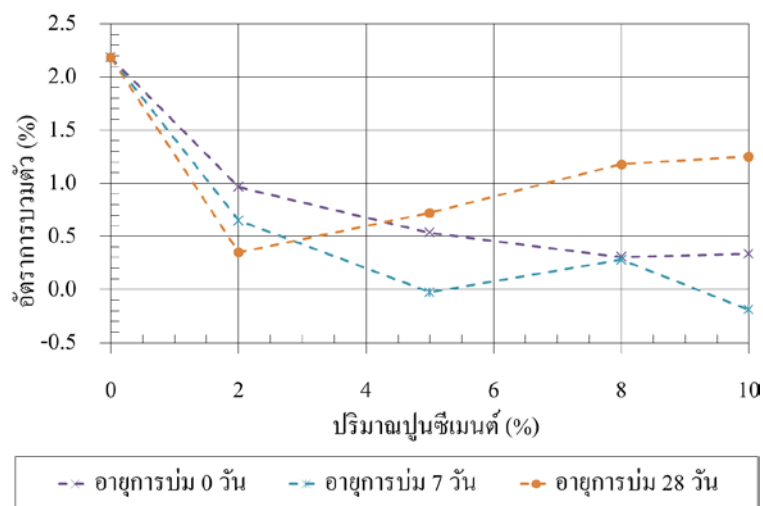
โดยการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) ดังแสดงในภาพที่ 4-4 โดยตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ของตัวอย่างดินเหนียว CH มีอัตราการบวมตัวมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CL เนื่องจากดินเหนียว CH เป็นดินเหนียวกลุ่ม High plasticity ซึ่งมีค่า Liquid limit สูงกว่าดินเหนียว CL ซึ่งเป็นดินเหนียวกลุ่ม Low plasticity ทำให้มีความไวต่อน้ำ (Sensitive) มากกว่าดินเหนียวกลุ่ม High plasticity



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

หากพิจารณาดินเหนียว CL (ภาพที่ 4-5) ที่อายุการบ่ม 0 วัน เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าอัตราการบวมตัวมีค่ามากขึ้น แต่หากมีปริมาณซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นมาจากสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน รวมไปถึงสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกที่ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% ทำให้ดินเหนียว CL มีค่าอัตราการบวมตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับดินเหนียว CL ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ แต่หากมีปริมาณซีเมนต์มากกว่า 5% สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกช่วยให้ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ที่ 5% เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าอัตราการบวมตัวของดินเหนียว CL ลดลง โดยช่วงอัตรา

การบวมตัวของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการบวมตัวน้อยกว่าดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงให้เห็นว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าลดลง

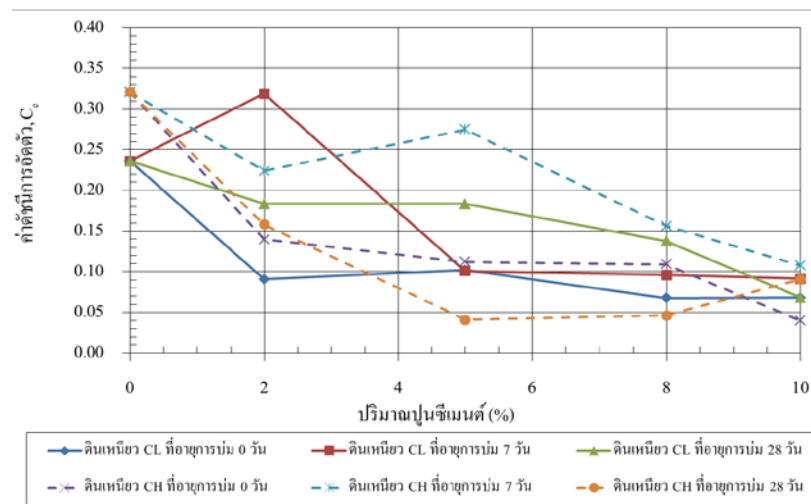


ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

สำหรับดินเหนียว CH (ภาพที่ 4-6) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าอัตราการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ช่วงอัตราการบวมตัวของดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 28 วัน แต่เมื่อปริมาณซีเมนต์มากกว่า 2% ค่าอัตราการบวมตัวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกนำมาใช้ในการทดสอบมีลักษณะที่แตกต่างกัน ช่วงของค่าอัตราการบวมตัวน้อยกว่าดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราการบวมตัวน้อยกว่าดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 และ 7 วัน ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่า แม้ว่าอายุการบ่มมากและปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้น ไม่ช่วยให้ค่าอัตราการบวมตัวลดลงมากนักในดินเหนียว CH

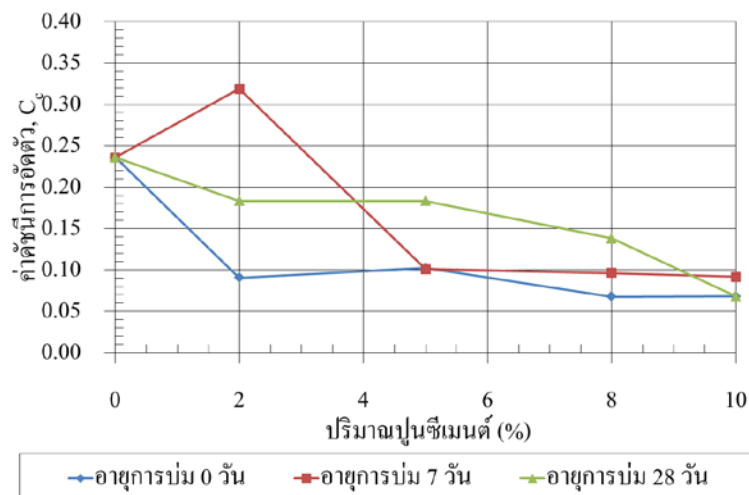
3.2.2 ค่าดัชนีของการอัดตัว (Compressibility index, C_c)

ค่าดัชนีของการอัดตัว (C_c) ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ บ่งบอกว่า เมื่อนำดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไปใช้ในการก่อสร้างแล้ว มีโอกาสเกิดการทรุดตัวมากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งจากการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (C_c) และปริมาณซีเมนต์ (%)



ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (C) และปริมาณซีเมนต์ (%)

จากภาพที่ 4-7 พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ตัวอย่างดินเหนียว CH มีดัชนีของการอัดตัวมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CL เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานทางวิศวกรรมของดินเหนียว CH จะมีการทรุดตัวที่มากเมื่อมีน้ำหนักรวมคดทับ

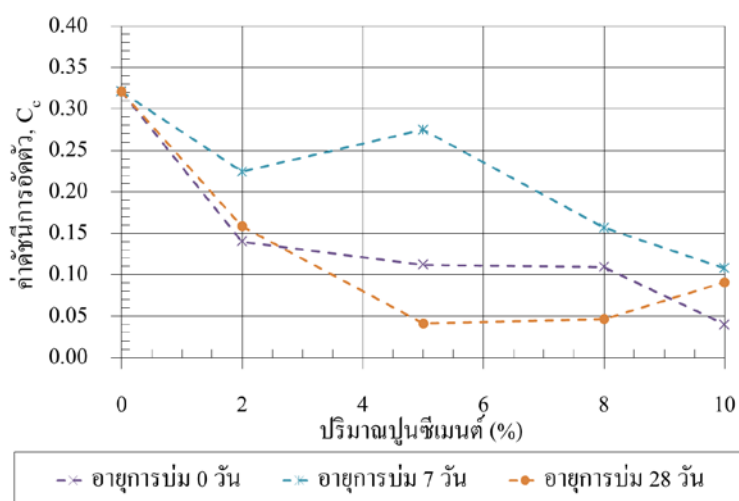


ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (C) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว

CL

สำหรับดินเหนียว CL (ภาพที่ 4-8) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่า สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL มีค่าลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์ไม่เกินกว่า 5% แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่ามากกว่าดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งบ่งบอกที่ปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มที่มากไม่ช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL มีค่าลดลง

นอกจากนี้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่ามากกว่าดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของอายุการบ่มไม่ช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL มีค่าลดลง



ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการอัดตัว (C_c) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว

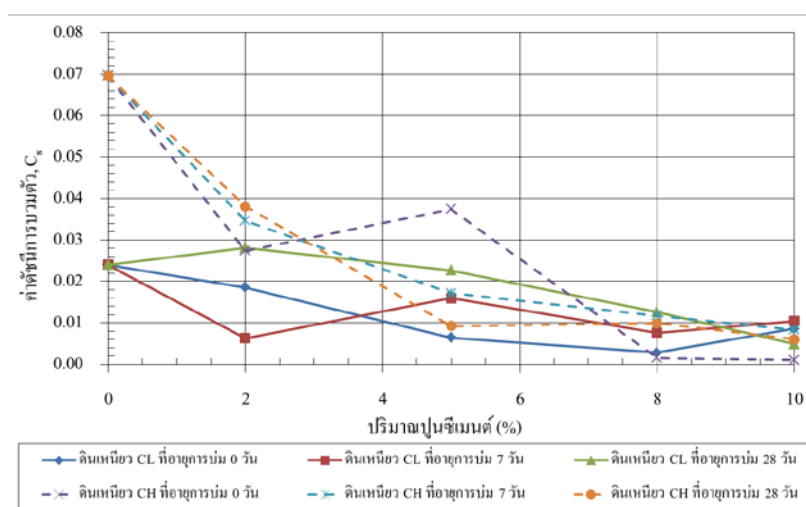
CH

สำหรับดินเหนียว CH (ภาพที่ 4-9) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเห็นได้ว่า สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CH มีค่าลดลง แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าดัชนีของการอัดตัวมากที่สุด และดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าดัชนีของการอัดตัวน้อยที่สุด สาเหตุที่เกิดขึ้นอาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกันจึงอาจทำให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่ามากกว่า

ดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน และสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CH มีค่าลดลง เมื่อมีอายุการบ่มที่มาก

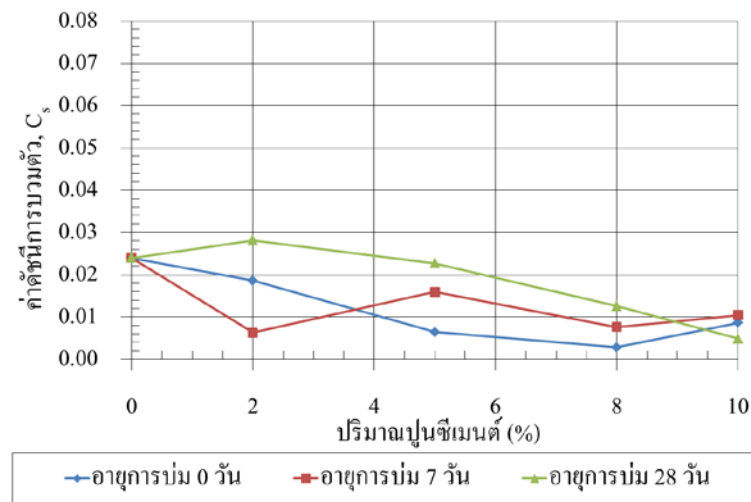
3.2.3 ค่าดัชนีของการบวมตัว (Swelling index, C_s)

ค่าดัชนีของการบวมตัว (C_s) ในการทดสอบการอัดตัวภายน้ำ บ่งบอกว่า เมื่อนำดินที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไปใช้ในการก่อสร้างแล้ว มีโอกาสเกิดการคืบตัวมากหรือน้อยเพียงใด โดยจากการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%)



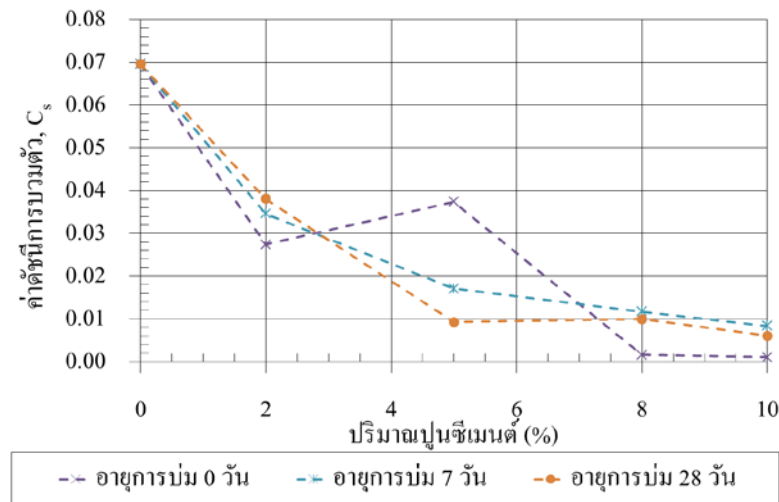
ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%)

จากภาพที่ 4-10 พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ตัวอย่างดินเหนียว CH มีดัชนีของการอัดตัวมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CL เนื่องจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการบวมตัว (Swell Rate, %) และปริมาณซีเมนต์ (%) พบว่า ตัวอย่างดินเหนียว CH มีอัตราการบวมตัวมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CL ซึ่งบ่งบอกว่า ค้นดินที่ถูกสร้างโดยดินเหนียว CH มีโอกาสเกิดการคืบตัวได้มากกว่าค้นดินที่ถูกสร้างโดยดินเหนียว CL เมื่อผสมปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% แต่เมื่อผสมปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค้นดินที่ถูกสร้างโดยดินเหนียว CH มีโอกาสเกิดการคืบตัวได้ใกล้เคียงกับค้นดินที่ถูกสร้างโดยดินเหนียว CL



ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

สำหรับดินเหนียว CL (ภาพที่ 4-11) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่า สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีของการบวมตัวของดินเหนียว CL มีค่าลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าดัชนีของการอัดตัวมากที่สุด ดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าดัชนีของการอัดตัวน้อยที่สุดในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% แต่เมื่อปริมาณซีเมนต์เกินกว่า 5% ดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่าดัชนีของการอัดตัวน้อยที่สุด โดยมีสาเหตุมาจากสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน และสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CH จึงอาจทำให้ค่าดัชนีของการอัดตัวของดินเหนียว CL เกิดขึ้น

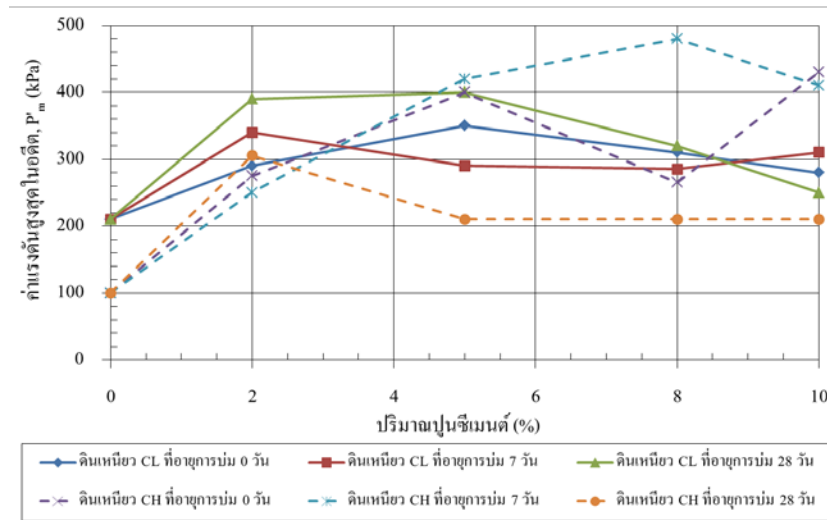


ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีของการบวมตัว (C_s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

สำหรับดินเหนียว CH (ภาพที่ 4-12) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการอัดตัวมีความแตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งเห็นได้ว่า สารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีส่วนช่วยให้ดินเหนียว CH มีค่าดัชนีของการบวมตัวลดลง

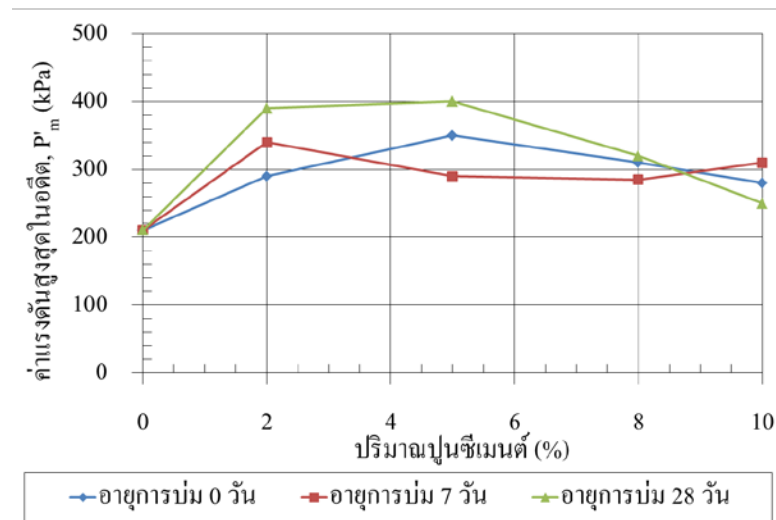
3.2.4 ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต (Maximum past pressure, P'_m)

ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) ในการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ บ่งบอกว่า แรงที่มากระทำต่อคันดินแล้วทำให้เริ่มเกิดการทรุดตัว โดยจากการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%)



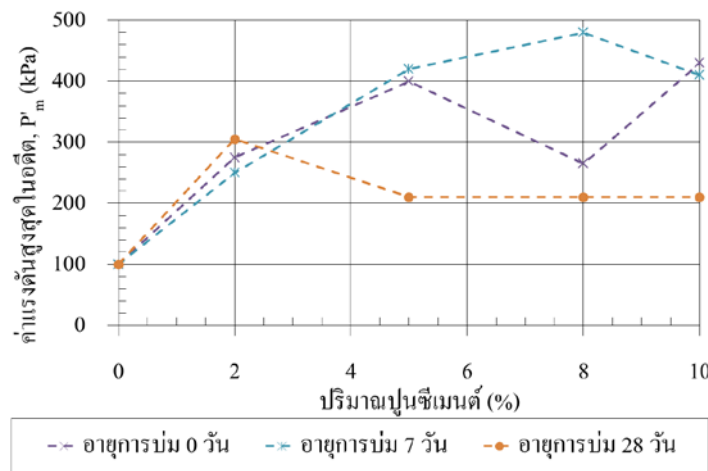
ภาพที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%)

จากภาพที่ 4-13 พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ตัวอย่างดินเหนียว CL มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CH เนื่องจากดินเหนียว CH เป็นดินเหนียว High plasticity ซึ่งมีค่า L.L. มากกว่าดินเหนียว CL เป็นดินเหนียว Low plasticity และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียว CL สามารถรับแรงได้ดีกว่าดินเหนียว CH ซึ่งดินเหนียว CL ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตเท่ากับ 200 kPa หากเมื่อผสมปูนซีเมนต์ดินเหนียว CL มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมากกว่า 300 kPa และดินเหนียว CH ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตเท่ากับ 100 kPa หากเมื่อผสมปูนซีเมนต์ดินเหนียว CH มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมากกว่า 250 kPa



ภาพที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

ดินเหนียว CL (ภาพที่ 4-14) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่ามีปริมาณปูนซีเมนต์มาก ก็ไม่ช่วยให้ดินเหนียว CL มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากเกินไป จึงทำให้ดินเหนียว CL มีคุณสมบัติแข็ง แต่เปราะ และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ามากที่สุด และค่าแรงดันสูงสุดในอดีตของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าน้อยที่สุดในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์ไม่เกินกว่า 8% แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 8% ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่ามากที่สุด และค่าแรงดันสูงสุดในอดีตของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 28 วัน ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน

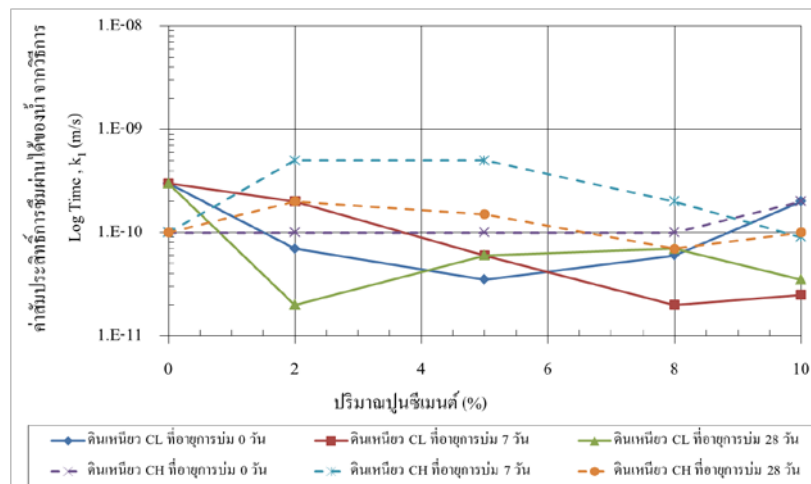


ภาพที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

สำหรับดินเหนียว CH (ภาพที่ 4-15) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ว่ามีปริมาณปูนซีเมนต์มาก ก็ไม่ช่วยให้ดินเหนียว CH มีค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีสาเหตุมาจากมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่มากเกินไป จึงทำให้ดินเหนียว CH มีคุณสมบัติแข็ง แต่เปราะ และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีอายุการบ่ม 28 วัน ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตมีค่าลดลงและยังมีค่าน้อยกว่าดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน ซึ่งอาจเป็นสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน

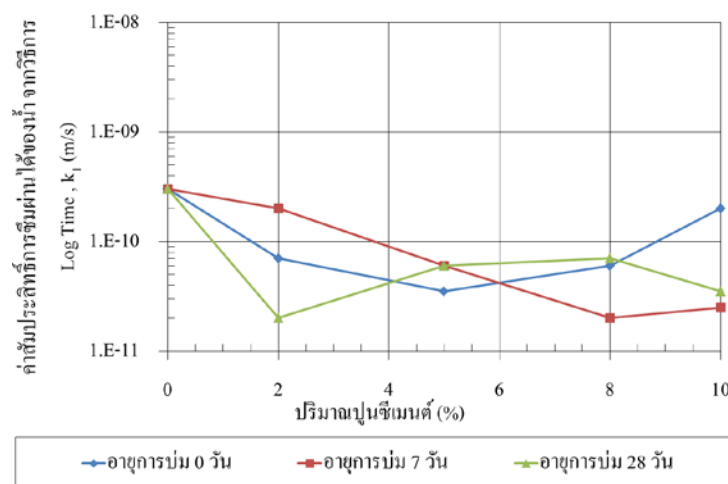
3.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ (Permeability, k)

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ (k) ในการทดสอบการอัดตัวคาน้ำ ซึ่งสามารถหาได้จากวิธีการ Log time และ Square root time โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ (k) บ่งบอกว่า ความเร็วของน้ำที่ไหล โดยจากการทดสอบสามารถนำมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability from the log time method, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) และความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability from the square root time method, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%)



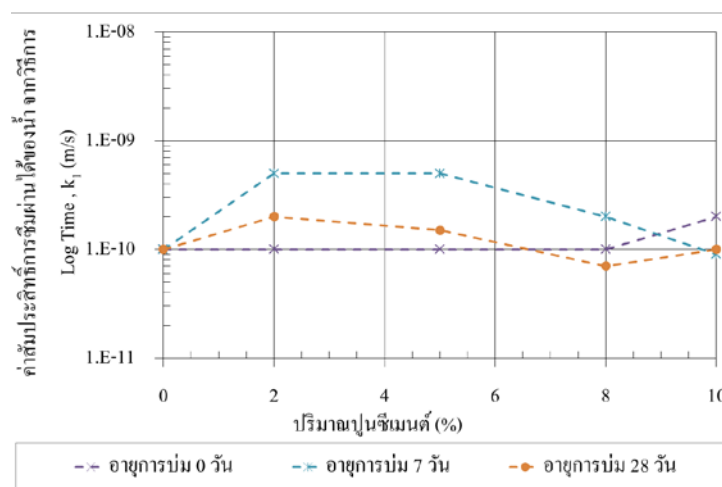
ภาพที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%)

จากภาพที่ 4-16 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ตัวอย่างดินเหนียว CL มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CH เนื่องจากดินเหนียว CL มีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านได้ของน้ำดีกว่าดินเหนียว CH



ภาพที่ 4-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

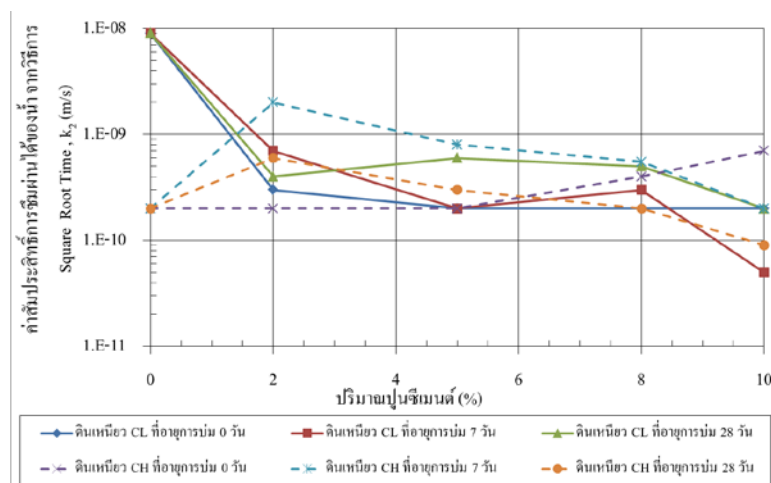
ดินเหนียว CL (ภาพที่ 4-17) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ช่วยให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CL มีความเร็วลดลง เนื่องจากสารผลติภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติยึดเกาะช่วยอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลง แม้ว่าในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 8% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The log time, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

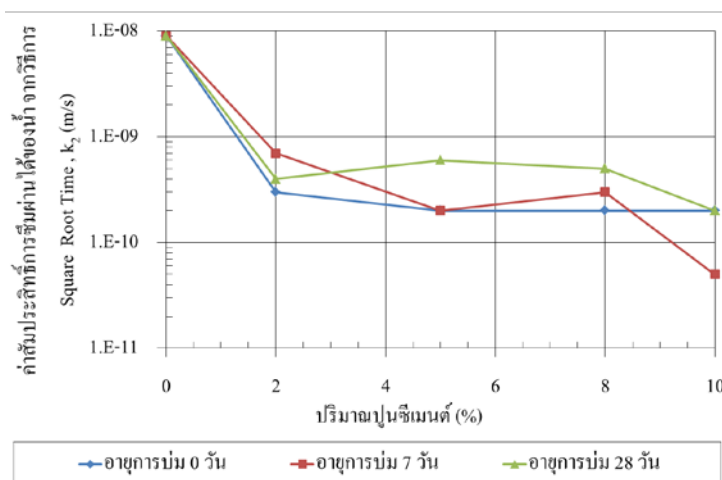
ดินเหนียว CH (ภาพที่ 4-18) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลงในดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับดินเหนียว CL คือ การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CH ช่วยให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CH มีความเร็วลดลง เนื่องจากสารผลติภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติยึดเกาะช่วยอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แต่ดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังเกิดไม่สมบูรณ์และ/ หรือสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CH มีความเร็วเพิ่มขึ้น และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลง แม้ว่าในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 8% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่าน้อยที่สุดในช่วง

ปริมาณปูนซีเมนต์ไม่เกินกว่า 5% แต่เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่าน้อยกว่าดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน



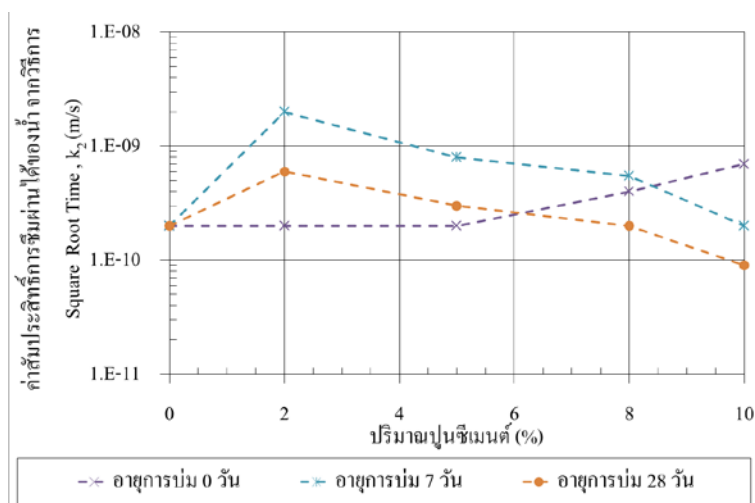
ภาพที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ the square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%)

จากภาพที่ 4-19 แสดง ความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability from the square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) พบว่า ตัวอย่างดินเหนียวที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ตัวอย่างดินเหนียว CL มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมากกว่าตัวอย่างดินเหนียว CH เนื่องจากดินเหนียว CL มีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านได้ของน้ำดีกว่าดินเหนียว CH



ภาพที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL

ดินเหนียว CL (ภาพที่ 4-20) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ช่วยให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CL มีความเร็วลดลง เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติยึดเกาะช่วยอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลงในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 8% แม้ว่าในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่า 8% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ไม่ปรากฏแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน ซึ่งอาจบ่งบอกได้ว่า การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ที่อัตราส่วนเกินกว่า 8% สามารถทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านดินเหนียว CL ได้



ภาพที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำจากวิธีการ The square root time, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH

ดินเหนียว CH (ภาพที่ 4-21) เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลงในดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับดินเหนียว CH คือ การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CH ช่วยให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CH มีความเร็วลดลง เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติยึดเกาะช่วยอุดช่องว่างระหว่างเม็ดดิน แต่ดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังเกิดไม่สมบูรณ์และ/หรือสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความเร็วของน้ำที่ไหลซึมผ่านดินเหนียว CH มีความเร็วเพิ่มขึ้น และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลง แม้ว่าในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 8% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่าน้อยที่สุดในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์ไม่เกินกว่า 5% แต่เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน มีค่าน้อยกว่าดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ซึ่งอาจเป็นเพราะสภาพแวดล้อมของดินที่ถูกเก็บมามีลักษณะที่แตกต่างกัน

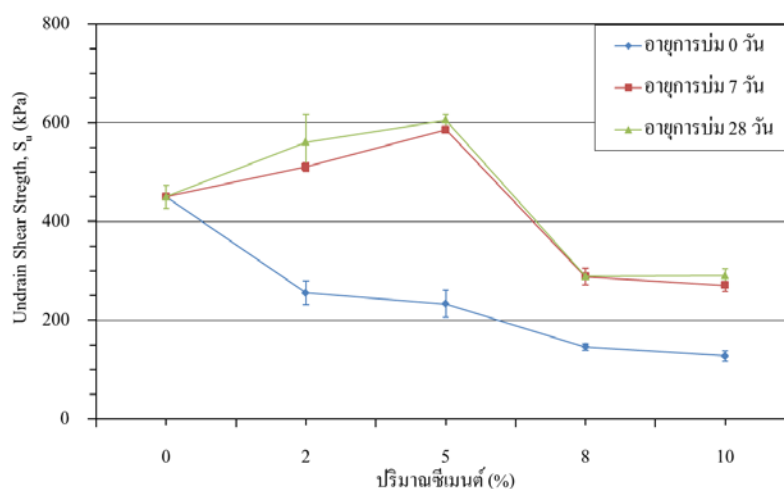
จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability from the log time method, k_1 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) และความสัมพันธ์ระหว่าง Permeability from the square root time

method, k_2 (m/s) และปริมาณซีเมนต์ (%) ทำให้ทราบว่า ดินเหนียวทั้ง 2 ชนิด มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำน้อยกว่า 10^{-8} m/s

จากผลการทดสอบทั้งหมดของการทดสอบอัดตัวคายน้ำ ทำให้ทราบว่า ดินเหนียว CL ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5% เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ทำให้ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตสูง และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำน้อยกว่า 10^{-8} m/s ถึงแม้ว่าอัตราการบวมตัวในช่วงอายุการบ่มแรก (อายุการบ่ม 0 วัน) ทำให้เกิดการบวมตัวมากเกินไปก็ตาม และดินเหนียว CH ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 8% เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ทำให้ค่าแรงดันสูงสุดในอดีตสูง อัตราการบวมตัวในช่วงอายุการบ่มแรกที่น้อย และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำน้อยกว่า 10^{-8} m/s ซึ่งน้อยกว่าค่าแนะนำการนำดินไปใช้ในสร้างส่วนที่ทับน้ำ (วรากร ไม่เรียง, 2542)

3.3 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ

การทดสอบการอัดแบบอิสระ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเชื่อมั่นแน่น (S_u) ในแต่ละอัตราส่วนผสมระหว่างดินและสารเชื่อมประสานที่ 0 2 5 8 และ 10% ของน้ำหนักดินแห้ง ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4-7 ถึงตารางที่ 4-10 และมีลักษณะดังภาพที่ 4-22 ถึงภาพที่ 4-25



ภาพที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL แบบไม่แช่น้ำ

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL แบบไม่แช่น้ำ

ปริมาณซีเมนต์ (%)	Undrained shear strength, S_u											
	ค่าเฉลี่ย (kPa)				ค่าเบี่ยงเบน, S.D. (kPa)				Relative standard deviation, R.S.D. (%)			
	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน
0		449.84				23.45				5.21		
2	255.45	510.18	560.76	24.58	9.09	56.55	9.62	1.78	10.08			
5	233.41	585.33	604.84	27.81	3.75	12.50	11.91	0.64	2.07			
8	145.61	287.97	289.05	6.35	16.66	7.22	4.36	5.79	2.50			
10	127.54	270.62	290.50	10.30	12.93	13.91	8.08	4.78	4.54			

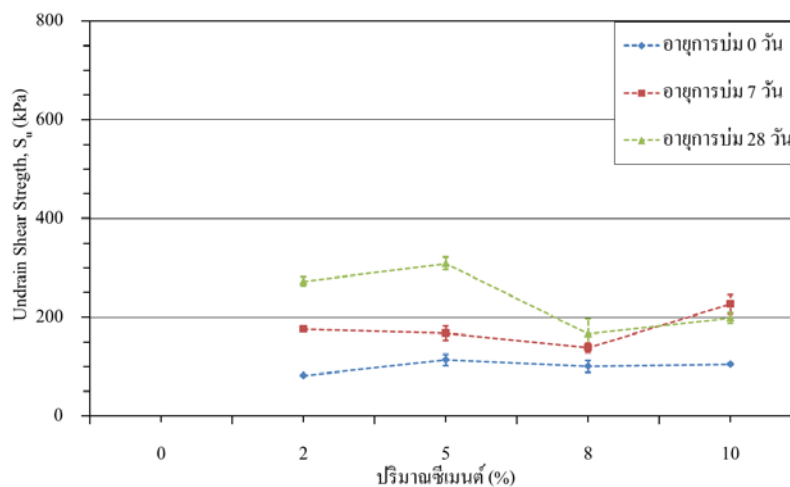
จากตารางที่ 4-7 และจากภาพที่ 4-22 พบว่า ในการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มลดลงในช่วงอายุการบ่ม 0 วัน ซึ่งบ่งบอกว่า ในช่วงอายุการบ่ม 0 วัน กำลังของดินเหนียว CL มีค่าลดลง ถึงแม้ว่าปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังไม่สมบูรณ์ และกำลังของดินเหนียว CL ในช่วงอายุการบ่ม 0 วันขึ้นอยู่กับค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียว CL ซึ่งเห็นได้จากภาพที่ 4-3 เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียว CL ลดลง แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเกินกว่า 7 วัน ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5% แต่หากมีปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่า 5% ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มลดลง โดยแสดงให้เห็นว่าการผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ช่วยให้ดินรับกำลังได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้กำลังของดินเหนียว CL มีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อปริมาณปูนเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณ ๆ หนึ่ง การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ไม่ช่วยให้ดินเหนียว CL รับกำลังได้มากขึ้น แต่กลับได้ค่ากำลังของดินเหนียว CL ลดลง เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งความแข็งแรงอาจมีความแข็งแรงน้อย เพราะดินเหนียว CL มีสภาพเป็นกรดซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยา

ไฮดรชันของปูนซีเมนต์เป็นผลให้ค่ากำลังของดินเหนียว CL ลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออายุการบ่มของสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์มากขึ้นส่งผลให้ดินเหนียว CL มีกำลังมากขึ้น ถึงแม้ว่าค่า Undrained shear strength ที่อายุการบ่ม 28 วัน เพิ่มขึ้นแต่เพิ่มในค่าที่น้อย เนื่องจากดินเหนียว CL มีสภาพเป็นกรดซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์เป็นผลให้การพัฒนากำลังของดินเหนียว CL ลดลง

ตารางที่ 4-8 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL แบบแช่น้ำ

ปริมาณซีเมนต์ (%)	Undrained shear strength, S_u									
	ค่าเฉลี่ย (kPa)				ค่าเบี่ยงเบน, S.D. (kPa)				Relative standard deviation, R.S.D. (%)	
	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	
0	N/A			N/A			N/A			
2	82.38	175.96	279.66	1.88	4.38	9.03	2.28	2.49	3.31	
5	113.45	167.29	309.28	11.69	14.56	12.66	10.30	8.70	4.09	
8	100.81	138.02	165.84	12.07	9.84	31.36	11.97	7.13	18.91	
10	105.14	226.18	198.36	2.17	19.88	10.34	2.06	8.79	5.21	

หมายเหตุ: N/A คือ ตัวอย่างดินสลายตัว ไม่สามารถคงรูปเป็นแท่งอยู่ในในขณะที่แช่น้ำ จึงไม่สามารถนำมาทดสอบได้



ภาพที่ 4-23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrained shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CL แบบแช่น้ำ

จากตารางที่ 4-8 และจากภาพที่ 4-23 พบว่า ในการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soak) ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ 0% ดินเหนียว CL ไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ เนื่องจากไม่มีสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ในการช่วยยึดเกาะอนุภาคดินเหนียว แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่า 2% ดินเหนียว CL สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ โดยเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มคงที่ในช่วงอายุการบ่ม 0 วัน มีค่าประมาณ 100 kPa ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ช่วยยึดเกาะอนุภาคดินเหนียว แต่ไม่ช่วยให้กำลังของดินเหนียว CL เพิ่มขึ้น โดยอาจเป็นเพราะน้ำที่ซึมลงดินเหนียว CL ทำให้แรงเชื่อมแน่นของอนุภาคของดินเหนียว CL ที่จับกันลดลง แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเกินกว่า 7 วัน เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่า Undrained shear strength มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน อาจเป็นเพราะดินเหนียว CL ที่นำมาผสมกับปูนซีเมนต์มีลักษณะที่แตกต่างกัน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่า 5% ที่อายุ 28 วัน มีค่า Undrained shear strength ลดลง ซึ่งเมื่อปริมาณปูนเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณ ๆ หนึ่ง การผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CL ไม่ช่วยให้ดินเหนียว CL รับกำลังได้มากขึ้น แต่กลับได้ค่ากำลังของดินเหนียว CL ลดลงเนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งความแข็งแรงอาจมีความแข็งแรงน้อย เพราะดินเหนียว CL มีสภาพเป็นกรดซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นผลให้ค่ากำลังของดินเหนียว CL ลดลง และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะ

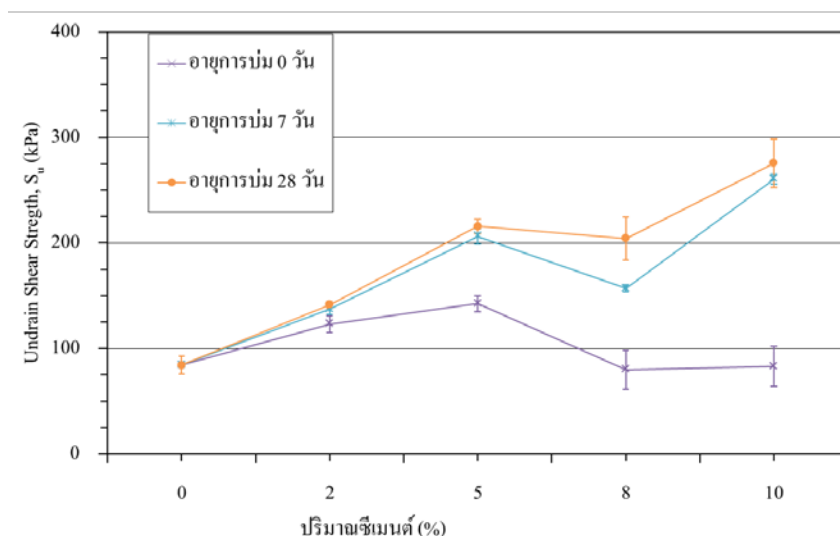
เมื่ออายุการบ่มของสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์มากขึ้นส่งผลให้ดินเหนียว CL มีกำลังมากขึ้น ซึ่งบ่งบอกว่า เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังของดินมีค่าเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าค่า Undrained shear strength ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 10% ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าน้อยกว่าดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 10% ที่อายุการบ่ม 7 วัน เนื่องจากดินเหนียว CL มีสภาพเป็นกรดซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นผลให้การพัฒนากำลังของดินเหนียว CL ลดลง

ค่า Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) มีค่ามากกว่าค่า Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soak) เนื่องจากมีน้ำที่ไหลซึมเข้าไปในแท่งตัวอย่างทดสอบ ทำให้แรงเชื่อมแน่นของอนุภาคของดินเหนียว CL ลดลง

จากผลการทดสอบ พบว่า ดินเหนียว CL ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 2% เพราะเป็นอัตราส่วนน้อยที่สุดที่ทำให้ดินเหนียวสามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกแช่น้ำ และยังมีกำลังรับแรงเฉือนที่มากเพียงพอต่อการรับน้ำหนัก (มากกว่า 80 kPa)

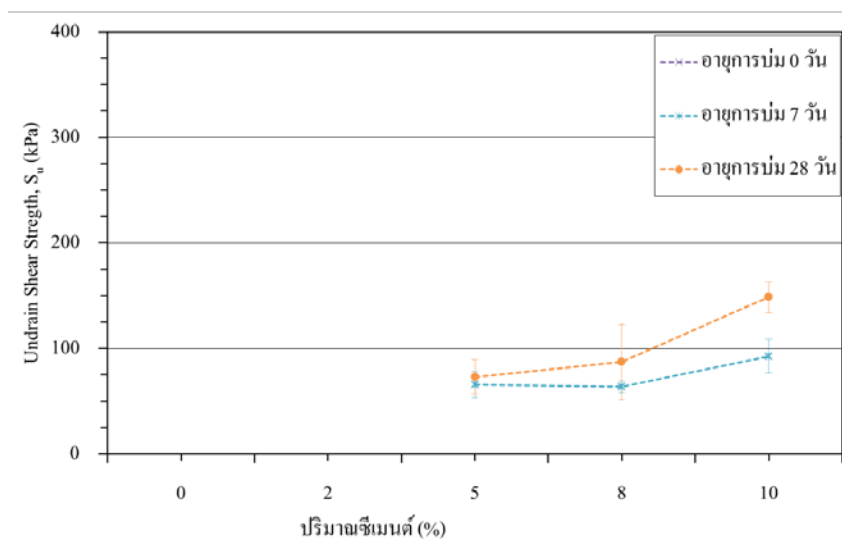
ตารางที่ 4-9 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH แบบไม่แช่น้ำ

ปริมาณซีเมนต์ (%)	Undrained shear strength, S_u											
	ค่าเฉลี่ย (kPa)				ค่าเบี่ยงเบน, S.D. (kPa)				Relative standard deviation, R.S.D. (%)			
	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน
0		84.19			8.42			10.00				
2	123.21	137.30	141.64	7.99	5.01	3.31	6.48	3.65	2.34			
5	142.36	206.31	215.70	7.22	7.38	6.59	5.07	3.58	3.06			
8	79.85	156.81	204.50	18.60	3.31	20.29	23.29	2.11	9.92			
10	83.10	260.51	275.68	19.28	4.89	22.90	23.20	1.88	8.31			



ภาพที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrain shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH แบบไม่แช่น้ำ

จากตารางที่ 4-9 และจากภาพที่ 4-24 พบว่า ในการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น ค่า Undrain shear strength มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน ในช่วงอายุการบ่ม 0 วัน อาจเป็นเพราะสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังไม่สมบูรณ์ และกำลังของดินเหนียว CH ในช่วงอายุการบ่ม 0 วันขึ้นอยู่กับค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียว CH ซึ่งเห็นได้จากภาพที่ 4-4 คือ เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดของดินเหนียว CL มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้นเกินกว่า 7 วัน ค่า Undrain shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยแสดงให้เห็นว่าการผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CH ช่วยให้ดินเหนียว CH รับกำลังได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้กำลังของดินเหนียว CH มีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่า Undrain shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออายุการบ่มของสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์มากขึ้นส่งผลให้ดินเหนียว CH มีกำลังมากขึ้น ถึงแม้ว่าค่า Undrain shear strength ที่อายุการบ่ม 28 วัน เพิ่มขึ้นแต่เพิ่มในค่าที่น้อย เนื่องจากดินเหนียว CH มีสภาพเป็นกรดซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นผลให้การพัฒนากำลังของดินเหนียว CH ลดลง



ภาพที่ 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Undrain shear strength, S_u (kPa) และปริมาณซีเมนต์ (%) ของดินเหนียว CH แบบแช่น้ำ

ตารางที่ 4-10 ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH แบบแช่น้ำ

ปริมาณซีเมนต์ (%)	Undrain shear strength, S_u											
	ค่าเฉลี่ย (kPa)			ค่าเบี่ยงเบน, S.D. (kPa)			Relative standard deviation, R.S.D. (%)					
	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน	อายุการบ่ม 0 วัน	อายุการบ่ม 7 วัน	อายุการบ่ม 28 วัน
0	N/A			N/A			N/A					
2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
5	N/A	65.76	72.99	N/A	12.70	16.59	N/A	19.31	22.73			
8	N/A	63.59	87.08	N/A	5.46	35.46	N/A	8.59	40.72			
10	N/A	92.86	148.86	N/A	16.24	14.72	N/A	17.49	9.89			

หมายเหตุ: N/A คือ ตัวอย่างดินสลายตัว ไม่สามารถคงรูปเป็นแท่งอยู่ในในขณะแช่น้ำ จึงไม่สามารถนำมาทดสอบได้

จากตารางที่ 4-10 และจากภาพที่ 4-25 พบว่า ในการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soak) ดินเหนียว CH ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์ ไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ ถึงแม้ว่าดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ก็ยังไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ เนื่องจากไม่มีสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ในการช่วยยึดเกาะอนุภาคดินเหนียว รวมถึงดินเหนียว CH มีอัตราการบวมตัวที่มาก แต่เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์เกินกว่า 5% ดินเหนียว CH สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ โดยเมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งบอกว่าการผสมปูนซีเมนต์กับดินเหนียว CH ช่วยให้อายุการบวมตัวของดินเหนียว CH รับกำลังได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้อายุการบวมตัวของดินเหนียว CH มีค่าเพิ่มมากขึ้น และดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน ดินเหนียว CH ไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ ถึงแม้ว่าดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ก็ยังไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกสัมผัสกับน้ำ เนื่องจากไม่มีสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ในการช่วยยึดเกาะอนุภาคดินเหนียว รวมถึงดินเหนียว CH มีอัตราการบวมตัวที่มาก แต่เมื่อดินเหนียว CH ที่อายุเกินกว่า 7 วัน สามารถคงสภาพอยู่ได้ เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่า Undrained shear strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออายุการบ่มของสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์มากขึ้นส่งผลให้ดินเหนียว CH มีกำลังมากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารผลิตภัณฑ์ของปูนซีเมนต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้อายุการบวมตัวของดินเหนียว CH มีค่าเพิ่มมากขึ้น

ค่า Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoak) มีค่ามากกว่าค่า Undrained shear strength ที่ได้จากการทดสอบแบบแช่น้ำ (Soak) เนื่องจากมีน้ำที่ไหลซึมเข้าไปในแท่งตัวอย่างทดสอบ ทำให้แรงเชื่อมแน่นของอนุภาคของดินเหนียว CH ลดลง

จากผลการทดสอบ พบว่า ดินเหนียว CH ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5% เพราะเป็นอัตราส่วนน้อยที่สุดที่ทำให้ดินเหนียวสามารถคงสภาพอยู่ได้เมื่อถูกแช่น้ำ และยังมีกำลังรับแรงเฉือนที่มากเพียงพอต่อการรับน้ำหนัก (มากกว่า 60 kPa)

ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL และ CH ที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-11 และ 4-12

ตารางที่ 4-11 คุณสมบัติของดินเหนียว CL ที่ได้จากการทดสอบ

ชื่อ	อัตราความรวมตัว (%)	ค่าดัชนีการอัดตัว, C_c	ค่าดัชนีการคายตัว, C_s	ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต, P'_m (kPa)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำที่คำนวณจากวิธี Log time method (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำที่คำนวณจากวิธี Square root time method (m/s)	Unsoaked Undrained shear strength, S_u (kPa)	Soaked Undrained shear strength, S_u (kPa)
CL-C00	0.215	0.236	0.024	210	3.0×10^{-10}	9.0×10^{-9}	449.84	N/A
CL-C02-D00	0.890	0.091	0.019	290	7.0×10^{-10}	3.0×10^{-10}	255.45	82.38
CL-C02-D07	-0.695	0.319	0.006	340	2.0×10^{-10}	7.0×10^{-10}	510.18	175.96
CL-C02-D28	-0.015	0.183	0.028	390	2.0×10^{-11}	4.0×10^{-10}	560.76	272.43
CL-C05-D00	2.110	0.102	0.006	350	3.5×10^{-11}	2.0×10^{-10}	233.41	113.45
CL-C05-D07	-0.285	0.101	0.016	290	6.0×10^{-11}	2.0×10^{-10}	585.33	167.29
CL-C05-D28	-0.195	0.183	0.023	400	6.0×10^{-11}	6.0×10^{-10}	604.84	309.28
CL-C08-D00	1.010	0.068	0.003	310	6.0×10^{-11}	2.0×10^{-10}	145.61	100.81
CL-C08-D07	-0.365	0.096	0.008	285	2.0×10^{-11}	3.0×10^{-10}	287.97	138.02
CL-C08-D28	-0.670	0.138	0.013	320	7.0×10^{-11}	5.0×10^{-10}	289.05	179.93
CL-C10-D00	0.135	0.068	0.009	280	2.0×10^{-10}	2.0×10^{-10}	127.54	105.14
CL-C10-D07	-0.225	0.092	0.010	310	2.5×10^{-11}	5.0×10^{-11}	270.62	226.18
CL-C10-D28	-0.260	0.068	0.005	250	3.5×10^{-11}	2.0×10^{-10}	290.50	198.36

ตารางที่ 4-12 คุณสมบัติของดินเหนียว CH ที่ได้จากการทดสอบ

ชื่อ	อัตราความตัว (%)	ค่าดัชนีการอัดตัว, C_c	ค่าดัชนีการคายตัว, C_s	ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต, P'_m (kPa)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำที่คำนวณจากวิธี Log time method (m/s)	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำที่คำนวณจากวิธี Square root time method (m/s)	Unsoaked Undrained shear strength, S_u (kPa)	Soaked Undrained shear strength, S_u (kPa)
CH-C00	2.180	0.321	0.070	100	1.0×10^{-10}	2.0×10^{-10}	84.19	N/A
CH-C02-D00	0.965	0.140	0.027	275	1.0×10^{-10}	4.0×10^{-10}	123.21	N/A
CH-C02-D07	0.650	0.224	0.035	250	5.0×10^{-10}	2.0×10^{-9}	137.30	N/A
CH-C02-D28	0.350	0.158	0.038	305	2.0×10^{-10}	6.0×10^{-10}	141.64	N/A
CH-C05-D00	0.535	0.112	0.037	400	2.0×10^{-10}	7.0×10^{-10}	142.36	N/A
CH-C05-D07	-0.025	0.275	0.017	420	5.0×10^{-10}	8.0×10^{-10}	206.31	65.76
CH-C05-D28	0.720	0.041	0.009	210	1.5×10^{-10}	3.0×10^{-10}	215.70	72.99
CH-C08-D00	0.305	0.109	0.002	265	3.0×10^{-10}	5.5×10^{-10}	79.85	N/A
CH-C08-D07	0.280	0.156	0.012	480	2.0×10^{-10}	5.5×10^{-10}	156.81	63.59
CH-C08-D28	1.180	0.047	0.010	210	7.0×10^{-11}	2.0×10^{-10}	204.50	87.08
CH-C10-D00	0.335	0.040	0.001	430	2.0×10^{-11}	5.0×10^{-11}	83.10	N/A
CH-C10-D07	-0.190	0.108	0.008	410	9.0×10^{-11}	2.0×10^{-10}	260.51	92.86
CH-C10-D28	1.250	0.091	0.006	210	1.0×10^{-10}	9.0×10^{-11}	275.68	148.86

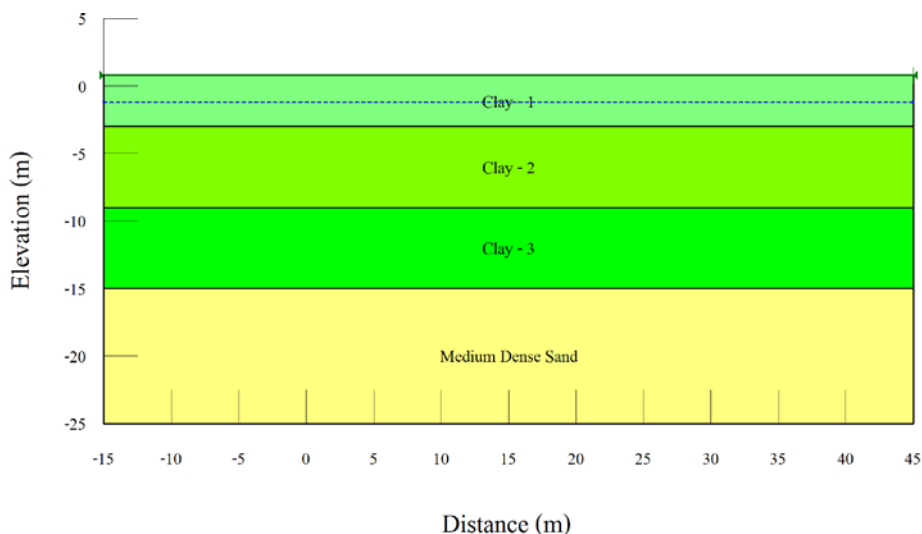
ผลการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมปฐพีในสนาม

จากผลการสำรวจสำรวจลักษณะของชั้นดิน (Borehole, BH) จำนวนทั้งสิ้น 2 หลุม ความลึกประมาณ 21-50 m จากระดับผิวดิน และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำในสนาม (Field permeability test, FPT) จำนวนทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง ทำให้ทราบว่าพื้นที่ศึกษามีลักษณะชั้นดินอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ มีข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ของกำลัง (c และ ϕ) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำ (k) ความพรุน (n) และค่าดัชนีการเปลี่ยนแปลงมวลดินเมื่อเทียบกับแรง 1 kPa ดังตารางที่ 4-13 และค่าพารามิเตอร์ที่ได้ถูกนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลักษณะชั้นดินมีลักษณะดังภาพที่ 4-26 และ 4-27

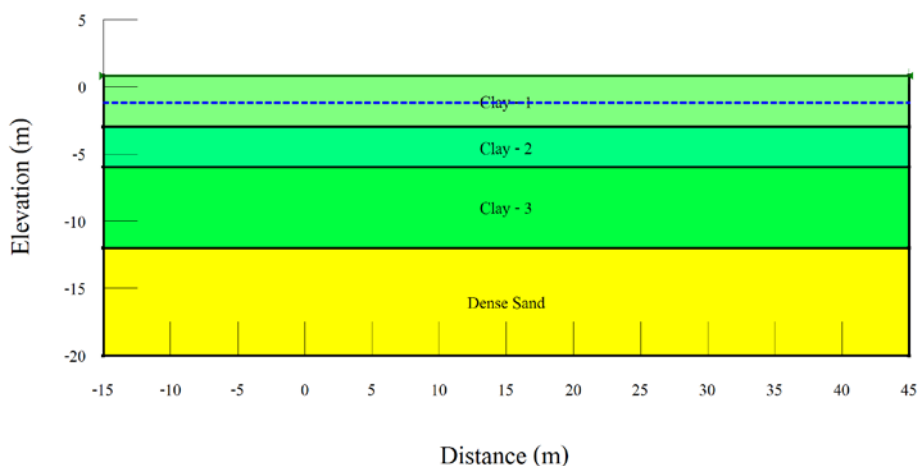
ตารางที่ 4-13 ลักษณะชั้นดินจากการสำรวจ

ชั้นดิน	Unit	Cohesion	Friction	Hydraulic		Porosity	
	weight			angle	conductivity		
	γ	c	ϕ	k	n	m_v	
	(kN/m ³)	(kPa)	(degree)	(m/s)	(m/day)	(m ³ /m ³)	(m ² /kN)
BH-1							
Clay-1	16.0	15.0	0	1.0×10^{-6}	0.0864	0.697	1.0×10^{-3}
Clay-2	16.6	12.5	0	2.0×10^{-6}	0.1728	0.600	1.0×10^{-3}
Clay-3	16.2	20.0	0	2.0×10^{-6}	0.1728	0.600	1.2×10^{-3}
Medium Dense Sand	18.0	0	33	1.0×10^{-6}	0.0864	0.286	1.0×10^{-5}
BH-2							
Clay-1	16.0	15.0	0	1.0×10^{-6}	0.0864	0.722	1.7×10^{-3}
Clay-2	16.6	10.0	0	5.0×10^{-7}	0.0432	0.600	1.7×10^{-3}
Clay-3	16.5	17.5	0	5.0×10^{-7}	0.0432	0.697	1.8×10^{-3}
Dense Sand	21.0	0	39	1.0×10^{-6}	0.0864	0.286	1.0×10^{-5}

หมายเหตุ: ระดับน้ำใต้ดิน -2.00 m จากระดับผิวดิน



ภาพที่ 4-26 ลักษณะของชั้นดิน BH-1



ภาพที่ 4-27 ลักษณะของชั้นดิน BH-2

จากตารางที่ 4-5 และภาพที่ 4-12 และ 4-13 แสดงให้เห็นว่า ลักษณะของชั้นดินในพื้นที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ชั้น โดยสามชั้นแรกเป็นดินเหนียวและชั้นสุดท้ายเป็นดินทราย ซึ่งมีคุณสมบัติของแต่ละชั้นและแต่ละหลุมแตกต่างกัน โดยค่ากำลังของดินเหนียวของชั้นดิน BH-1 มากกว่า BH-2 และค่ากำลังของดินทรายของชั้นดิน BH-1 น้อยกว่า BH-2 แต่ BH-1 มีค่าการซึมผ่านมากกว่า BH-2 นอกจากนี้ ความหนาของชั้นดิน BH-1 มากกว่า BH-2

ค่ากำลังของดินประกอบไปด้วย 2 พารามิเตอร์ คือ ค่าความเชื่อมแน่น (Cohesion, c) และค่ามุมเสียดทาน (Friction angle, ϕ) ซึ่งสังเกตได้ว่า ดินเหนียวมีค่าความเชื่อมแน่นเพียงอย่างเดียว

เนื่องจากดินเหนียวเป็นดินมวลละเอียด อนุภาคของดินจับกันและกันจึงเกิดเป็นแรงเชื่อมแน่น และดินทรายมีค่ามุมเสียดทานเพียงอย่างเดียว เพราะว่า ดินทรายเป็นดินมวลหยาบ ซึ่งอนุภาคของดินขัดกันและกัน และอาจเป็นเพราะมีปริมาณของดินมวลละเอียดน้อย จึงทำให้ดินทรายไม่มีค่าความเชื่อมแน่น

ผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน ในการศึกษานี้ กำหนดให้มีวัสดุสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล คือ ดินเหนียว CL ที่ผสมปูนซีเมนต์ 2% มีอายุการบ่ม 0 วัน (CL-C02-D00) ถูกเรียกว่า Sea dike-1 และดินเหนียว CH บดอัดที่ผสมปูนซีเมนต์ 5% มีอายุการบ่ม 7 วัน (CH-C05-D07) ถูกเรียกว่า Sea dike-2 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล

ชื่อ	Unit		Hydraulic		Void	Porosity	
	weight		conductivity		ratio		
	γ	S_u	k		e		
	(kN/m ³)	(kPa)	(m/s)	(m/day)	(m ³ /m ³)	(m ³ /m ³)	(m ² /kN)
CL-C02-D00	19.4	82.38	3.0×10^{-10}	2.6×10^{-5}	0.690	0.408	2.1×10^{-5}
CH-C05-D07	18.4	65.76	8.0×10^{-10}	6.9×10^{-5}	0.893	0.472	2.0×10^{-5}

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดิน

จากการวิเคราะห์แบบจำลองแบบไม่มีทางน้ำได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4-15 ซึ่งทำให้ทราบค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของความลาดคันดินกั้นน้ำทะเล โดยกำหนดให้มีน้ำหนักคงที่จากพื้นทางและน้ำหนักจรจากยานพาหนะ กระทำบนสันคันดิน 20 kN/m²

ตารางที่ 4-15 ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของความลาดคั่นดินแบบไม่มีทางน้ำ

คั่นดิน	เหนือน้ำ (ฝั่งทะเล)			ท้ายน้ำ (ฝั่งแผ่นดิน)		
	เมื่อก่อสร้างเสร็จ	ขณะใช้งาน	ระดับน้ำลดลง อย่างกะทันหัน	เมื่อก่อสร้างเสร็จ	ขณะใช้งาน	ระดับน้ำลดลง อย่างกะทันหัน
BH-1						
Sea dike-1	3.646	7.596	3.914	3.876	3.876	3.876
Sea dike-2	3.838	7.697	4.130	3.946	3.946	3.946
BH-2						
Sea dike-1	3.646	7.596	4.817	3.872	3.872	3.872
Sea dike-2	3.838	7.697	5.021	3.943	3.943	3.943

จากตารางที่ 4-15 พบว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) บริเวณท้ายน้ำ (ฝั่งแผ่นดิน) ในแต่ละกรณี มีค่าเท่ากันไม่ว่าคั่นดินกั้นน้ำทะเลอยู่ในสภาพเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ ขณะใช้งาน และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน เนื่องจากบริเวณท้ายน้ำไม่รับผลกระทบจากระดับน้ำทะเลและระดับน้ำใต้ดิน จึงทำให้อัตราส่วนปลอดภัยมีค่าเท่ากัน และอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณท้ายน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1 มากกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 เพราะว่า ค่ากำลัง (ค่า Cohesion และ Friction angle) ของพื้นที่ BH-2 น้อยกว่าพื้นที่ BH-1

สำหรับค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณเหนือน้ำ (ฝั่งทะเล) โดยขณะใช้งานมีค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณเหนือน้ำมากที่สุด และเมื่อก่อสร้างเสร็จค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณเหนือน้ำน้อยที่สุด ซึ่งมีสาเหตุมาจากผลกระทบจากระดับน้ำทะเลและระดับน้ำใต้ดิน เป็นผลให้ขณะใช้งานมีแรงดันน้ำช่วยผลักดันคั่นดิน ไม่เหมือนกับขณะก่อสร้างเสร็จ และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหันที่ไม่มีแรงดันน้ำช่วยผลักดันคั่นดิน แต่ค่าอัตราส่วนปลอดภัยขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหันมากกว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัยขณะก่อสร้างเสร็จ เนื่องจากมีแรงดันน้ำที่ซึมลงไปนคั่นดินช่วยผลักดันคั่นดิน

นอกจากนี้ คั่นดิน Sea dike-2 มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยมากกว่าคั่นดิน Sea dike-1 เพราะว่า คั่นดิน Sea dike-1 (ใช้ดินเหนียว CL ในการก่อสร้าง) มีค่าหน่วยน้ำหนักที่มากกว่าคั่นดิน

Sea dike-2 (ใช้ดินเหนียว CH ในการก่อสร้าง) ส่งผลให้พื้นดินในพื้นที่ศึกษารับน้ำหนักคันดิน Sea dike-1 มากกว่าคันดิน Sea dike-2 ทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัยลดลง

รูปแบบคันดินกั้นน้ำทะเลดังภาพที่ 3-21 (คันดินกั้นน้ำทะเลแบบไม่มีทางน้ำ) สามารถนำไปก่อสร้างได้จริง เนื่องจากค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) ในตารางที่ 4-15 มีค่ามากกว่าเกณฑ์ต่ำสุดของอัตราส่วนปลอดภัยของคันดิน โดยค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) เมื่อขณะก่อสร้างเสร็จ ขณะใช้งาน และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหันมีค่า 1.3 1.5 และ 1.2 ตามลำดับ แต่ในสภาพความเป็นจริง เราทำการก่อสร้างคันดินโดยใช้ดินในพื้นที่ศึกษา (บ่อยืมดิน) โดยอาจขุดเพื่อให้เป็นทางน้ำ หรือแหล่งเก็บกักน้ำในพื้นที่ด้วย ทั้งนี้ต้องขุดให้ห่างจากคันดิน เพื่อไม่ให้เกิดการพังทลายของลาดดิน การวิเคราะห์ที่คันดิน Sea dike-1 และระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำต่าง ๆ ดังตารางที่ 4-16 ซึ่งพิจารณาจากค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณท้ายน้ำเมื่อก่อสร้างเสร็จ

ตารางที่ 4-16 ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ที่ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำต่าง ๆ

ระยะห่าง, x(m)	ค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณท้ายน้ำเมื่อก่อสร้างเสร็จ
BH-1	
3	1.298
4	1.399
5	1.411
BH-2	
5	1.216
6	1.250
7	1.334
8	1.363
9	1.386
10	1.443

จากตารางที่ 4-16 ค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณท้ายน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นได้ว่า ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำ

ในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่ระยะ 4-5 m และ ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่ระยะ 7-10 m มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยขณะก่อสร้างเสร็จมากกว่า 1.3 บ่งบอกว่า ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเลในช่วงพื้นที่ BH-1 ควรมีระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำไม่น้อยกว่า 4 m และในช่วงพื้นที่ BH-2 ควรมีระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำไม่น้อยกว่า 7 m

ดังนั้น ในการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเลจริง (คันดินกั้นน้ำทะเลแบบมีทางน้ำ) โดยระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1 ควรมีระยะ 5 m และ ระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2 ควรมีระยะ 10 m ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์อีกครั้ง มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยแสดงดังตารางที่ 4-17

ตารางที่ 4-17 ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของความลาดคันดินแบบมีทางน้ำ

ชื่อ	เหนือน้ำ (ฝั่งทะเล)				ท้ายน้ำ (ฝั่งแผ่นดิน)				ตลิ่งของทางน้ำ			
	เมื่อก่อสร้างเสร็จ	ขณะใช้งาน	ระดับน้ำลดลง	อย่างกะทันหัน	เมื่อก่อสร้างเสร็จ	ขณะใช้งาน	ระดับน้ำลดลง	อย่างกะทันหัน	เมื่อก่อสร้างเสร็จ	ขณะใช้งาน	ระดับน้ำลดลง	อย่างกะทันหัน
BH-1												
Sea dike-1	3.646	7.596	4.054	1.411	2.143	2.143	2.069	4.360	4.360			
Sea dike-2	3.838	7.697	4.283	1.445	2.222	2.222	2.069	4.360	4.360			
BH-2												
Sea dike-1	3.646	7.596	4.895	1.443	2.222	2.222	1.842	3.842	3.842			
Sea dike-2	3.838	7.697	5.117	1.463	2.269	2.269	1.842	3.842	3.842			

จากตารางที่ 4-17 พบว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัย บริเวณตลิ่งของทางน้ำในแต่ละกรณี มีค่าเท่ากัน เนื่องจากตลิ่งของทางน้ำถูกสร้างในพื้นที่เดียวกัน

ค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณเหนือน้ำ (ฝั่งทะเล) ในแต่ละกรณี คันดินที่ Sea dike-1 มีค่ามากกว่าคันดิน Sea dike-2 เพราะว่า จากตารางที่ 4-9 ค่า Undrained shear strength (S_u) ของดินเหนียว CL (ใช้ในการก่อสร้าง Sea dike-1) มีค่ามากกว่าดินเหนียว CH (ใช้ในการก่อสร้าง Sea dike-

2) เป็นผลให้คันดินสามารถรับกำลังได้มาก ซึ่งส่งผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) ของคันดินกั้นน้ำทะเล

ค่าอัตราส่วนปลอดภัยบริเวณท้ายน้ำ (ฝั่งแผ่นดิน) คันดิน Sea dike-1 มีค่าน้อยกว่าคันดิน Sea dike-2 เนื่องจาก ตารางที่ 4-9 ค่า Unit weight (γ) ของดินเหนียว CL (ใช้ในการก่อสร้าง Sea dike-1) มีค่ามากกว่าดินเหนียว CH (ใช้ในการก่อสร้าง Sea dike-2) เป็นผลให้สภาพพื้นที่รับกำลังมากขึ้น ส่งผลต่อค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) ของคันดินกั้นน้ำทะเล

ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) ในตารางที่ 4-15 มีค่ามากกว่าเกณฑ์ต่ำสุดของอัตราส่วนปลอดภัยของคันดิน โดยค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) เมื่อขณะก่อสร้างเสร็จขณะใช้งาน และระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหันมีค่า 1.3 1.5 และ 1.2 ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) ขณะใช้งานมีค่ามากที่สุดเนื่องจากมีแรงดันน้ำช่วยผลักดันดินบริเวณที่จะเคลื่อนพังไม่ให้เกิดการเสีรูปส่งผลให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) มีค่ามาก และเมื่อระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหันแรงดันน้ำลดลงคันดินสามารถเคลื่อนพังได้จึงทำให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) มีค่าลดลง แต่ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) เมื่อขณะก่อสร้างเสร็จมีค่าน้อย เนื่องจากคันดินไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันน้ำคอยช่วยผลักดันดินบริเวณที่จะเคลื่อนพังไม่ให้เกิดการเสีรูปเป็นผลให้ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) มีค่าน้อย

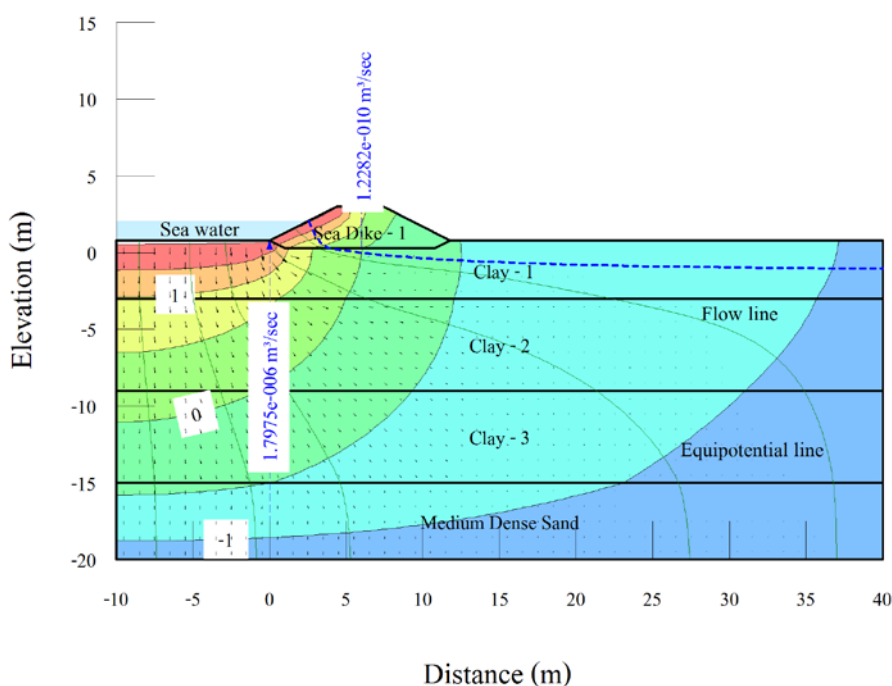
จากข้างต้น เห็นได้ว่า ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) บริเวณเหนือน้ำ (ฝั่งทะเล) มีค่ามากที่สุด และค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) บริเวณเหนือน้ำ (ฝั่งทะเล) มีค่ามากกว่าค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) บริเวณท้ายน้ำ (ฝั่งแผ่นดิน) เนื่องจากค่า Undrained Shear Strength ของคันดินกั้นน้ำทะเลและค่ากำลังของดินในพื้นที่เป็นตัวควบคุมค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) แต่ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor) บริเวณตลิ่งของทางน้ำ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นดินเดิมซึ่งค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินเดิมเป็นตัวควบคุมค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety factor)

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน

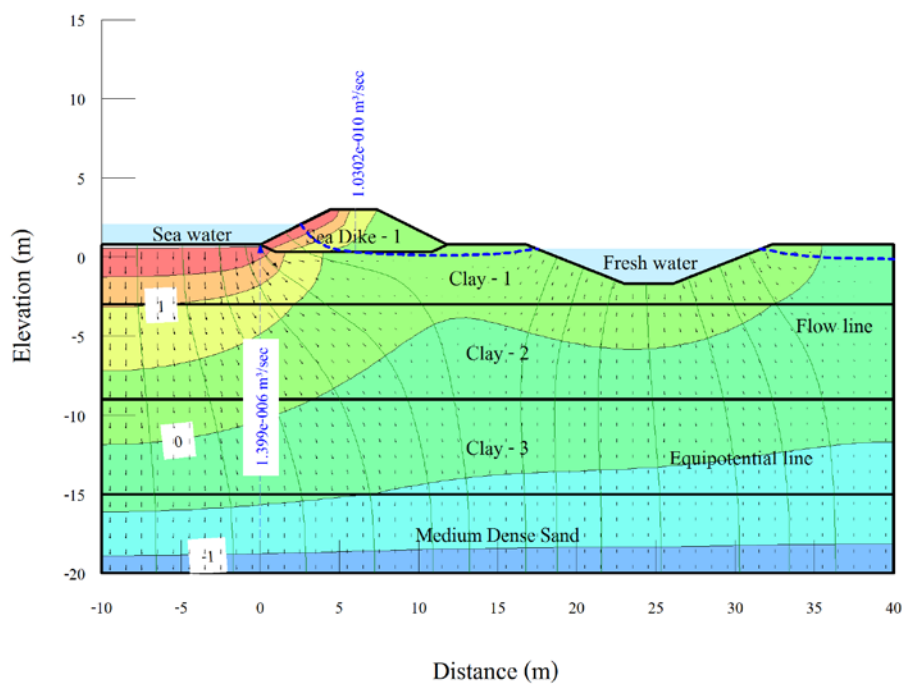
จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งทำให้ทราบปริมาณการไหลซึมและปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดิน ซึ่งมีค่าดังภาพที่ 4-28 ถึง 4-35 และดังตารางที่ 4-18 และ 4-19

ตารางที่ 4-18 ปริมาณการไหลซึม และไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1

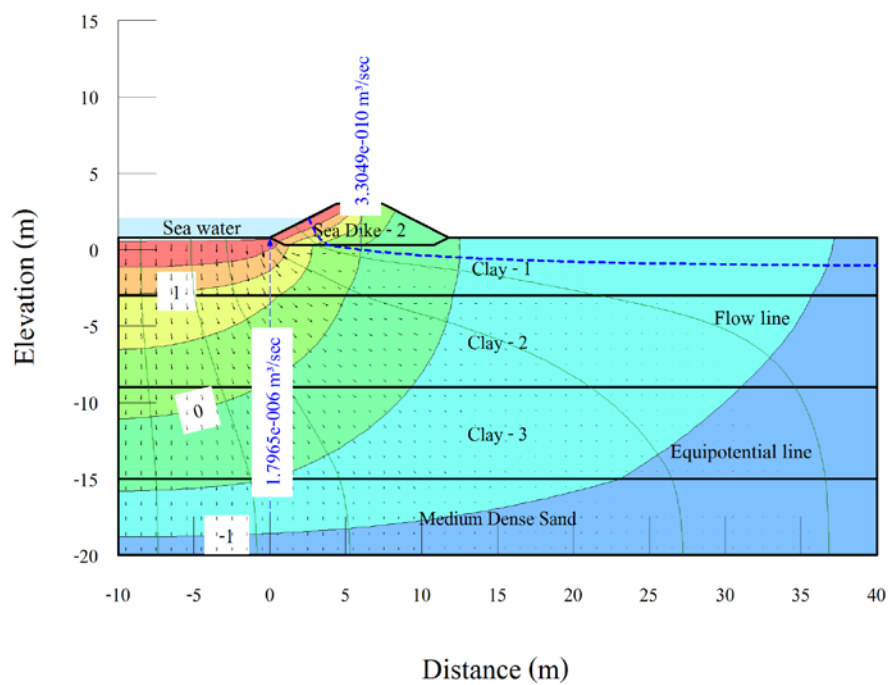
ชื่อ	ปริมาณการไหลซึมผ่านคันดิน ของน้ำทะเล, q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)		ปริมาณการไหลลอดผ่านคันดิน ของน้ำทะเล, q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	
	แบบไม่มีทางน้ำ	แบบมีทางน้ำ	แบบไม่มีทางน้ำ	แบบมีทางน้ำ
Sea dike-1	1.2282×10^{-10}	1.0302×10^{-10}	1.7975×10^{-6}	1.3990×10^{-6}
Sea dike-2	3.3049×10^{-10}	2.7694×10^{-10}	1.7965×10^{-6}	1.3982×10^{-6}



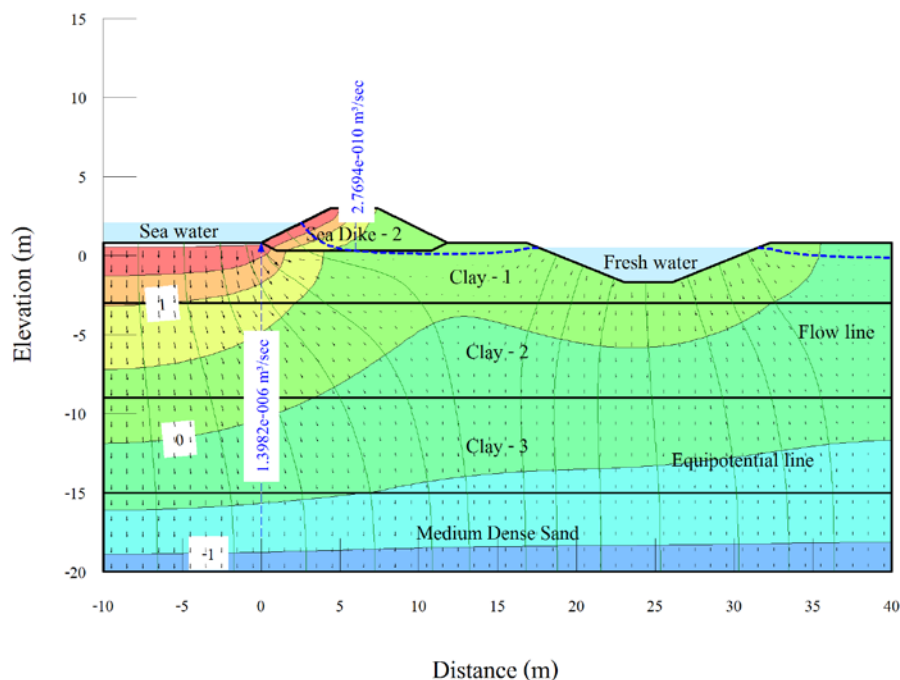
ภาพที่ 4-28 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1



ภาพที่ 4-29 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลตลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบมีทางน้ำ ในช่วงพื้นที่ BH-1



ภาพที่ 4-30 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลตลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบไม่มีทางน้ำ ในช่วงพื้นที่ BH-1



ภาพที่ 4-31 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1

จากภาพที่ 4-28 ถึง 4-31 และตารางที่ 4-18 แสดงปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1 พบว่า การวิเคราะห์ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน พบว่า คันดิน Sea dike-1 มีปริมาณการไหลซึมผ่านคันดินที่น้อยกว่าคันดิน Sea dike-2 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของ Sea dike-1 (ใช้ดินเหนียว CL ในการก่อสร้าง) มีค่าน้อยกว่า Sea dike-2 (ใช้ดินเหนียว CH ในการก่อสร้าง)

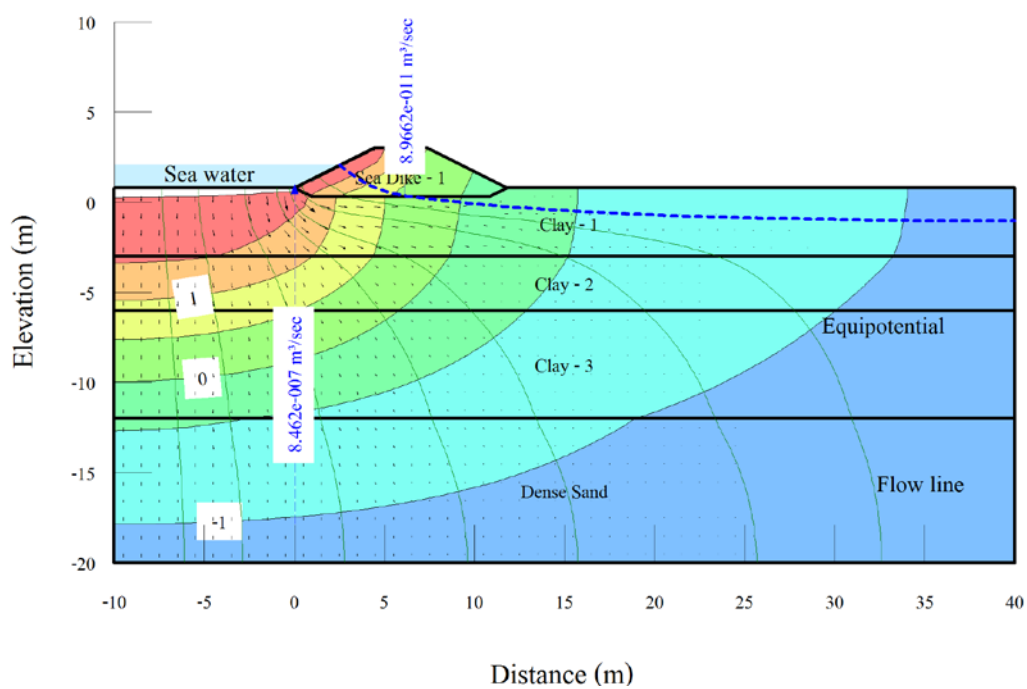
สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1 มีค่าประมาณ $1-8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ไม่ว่าคันดิน Sea dike-1 และ Sea dike-2 เนื่องจากปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของน้ำของดินแต่ละชั้น

นอกจากนี้ ทั้งปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำมีค่าลดลงและน้อยกว่าแบบไม่มีทางน้ำ ซึ่งบ่งบอกว่า เสดน้ำในทางน้ำช่วยลดปริมาณของน้ำทะเลที่ไหลซึมและไหลลอดผ่านคันดิน

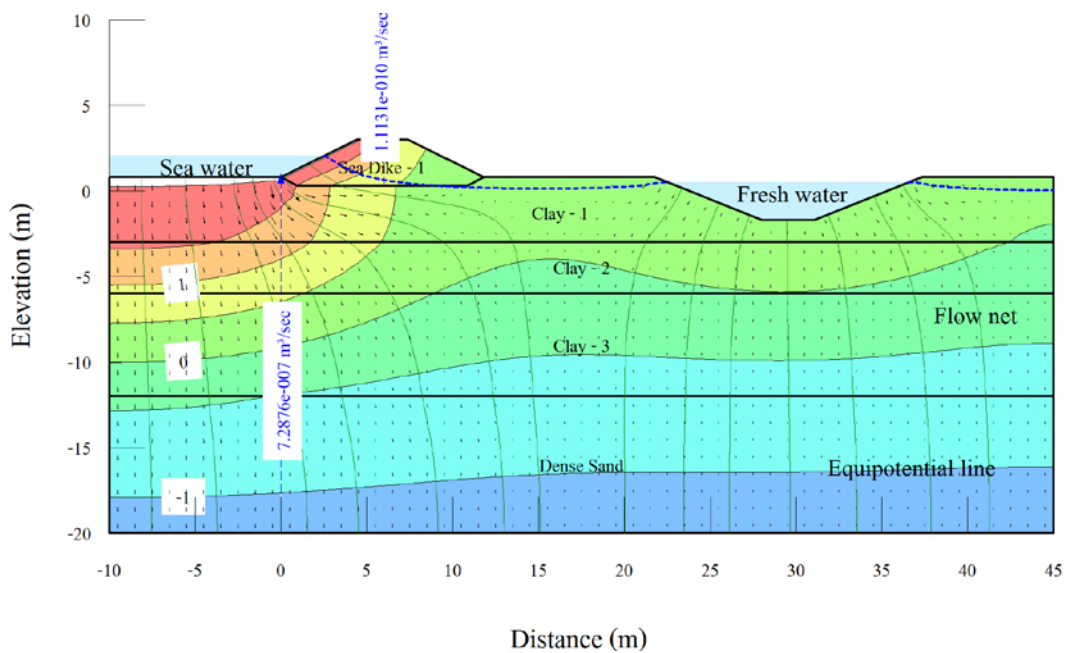
ส่วนปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดิน และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1 ดังตารางที่ 4-19

ตารางที่ 4-19 ปริมาณการไหลซึม และไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-2

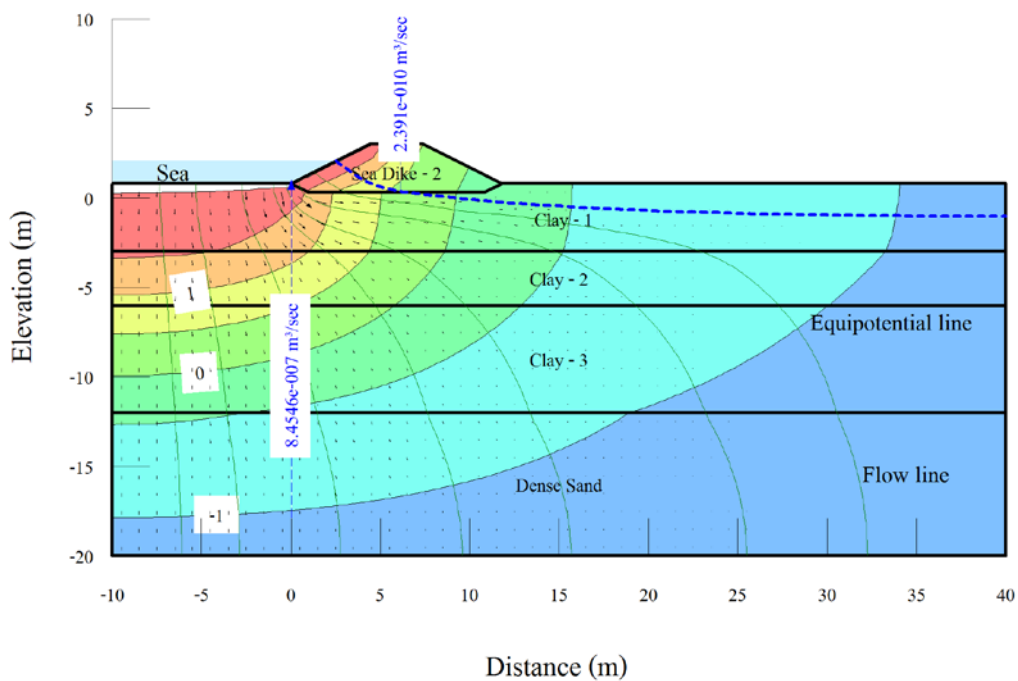
ชื่อ	ปริมาณการไหลซึมผ่านคันดิน ของน้ำทะเล, q ($m^3/s/m$)		ปริมาณการไหลลอดผ่านคันดิน ของน้ำทะเล, q ($m^3/s/m$)	
	แบบไม่มีทางน้ำ	แบบมีทางน้ำ	แบบไม่มีทางน้ำ	แบบมีทางน้ำ
	Sea dike-1	8.9662×10^{-11}	1.1131×10^{-10}	8.4620×10^{-7}
Sea dike-2	2.3910×10^{-10}	2.9690×10^{-10}	8.4546×10^{-7}	7.2810×10^{-7}



ภาพที่ 4-32 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2



ภาพที่ 4-33 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลออกของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-1) แบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2



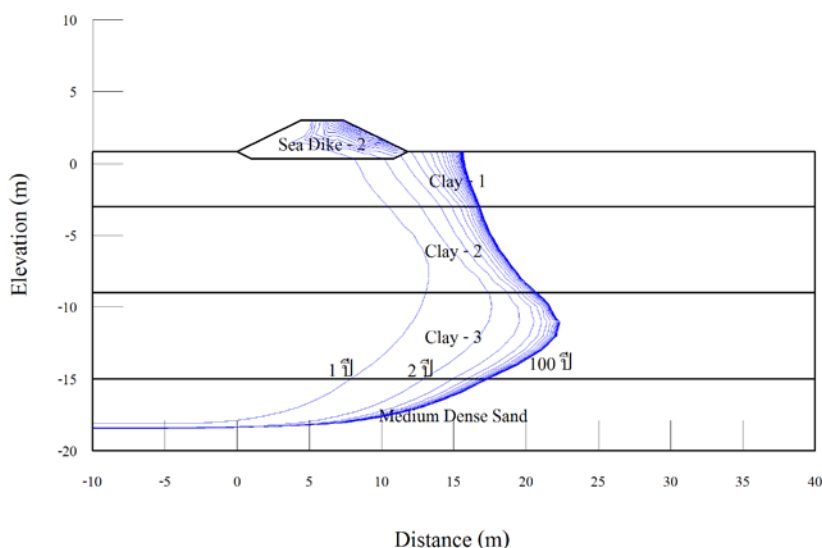
ภาพที่ 4-34 ปริมาณการไหลซึม และปริมาณการไหลออกของน้ำทะเลผ่านคันดินกั้นน้ำทะเล (Sea dike-2) แบบไม่มีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2

เพราะมีเสื่อน้ำจืดจากการขังน้ำไว้ในทางน้ำทำให้ลดปริมาณของน้ำทะเลที่ไหลลอดผ่านคันดิน น้ำทะเลจึงไหลซึมผ่านคันดินได้มากกว่าไหลลอดผ่านคันดิน

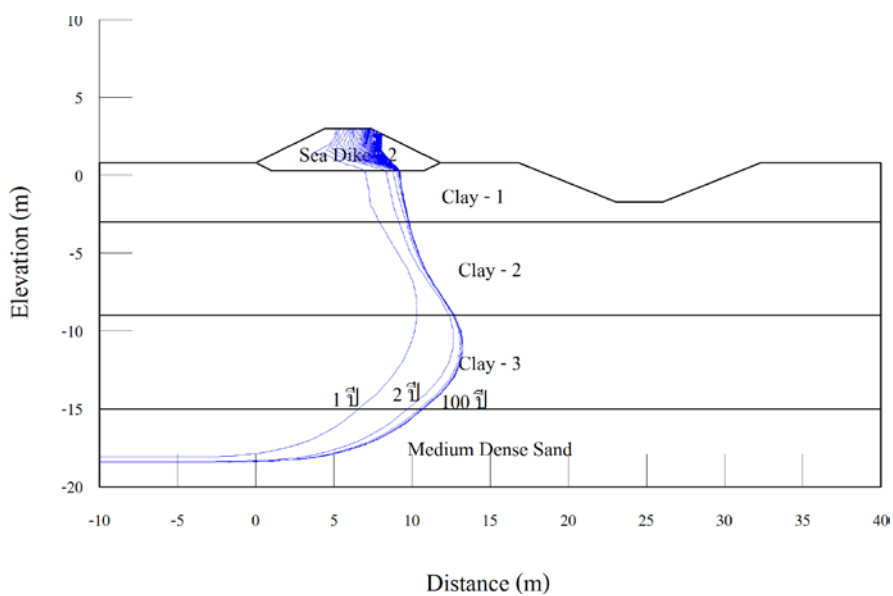
หากเปรียบเทียบข้อมูลทั้งสอง (ตารางที่ 4-18 และ ตารางที่ 4-19) ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบไม่มีทางน้ำ และปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินทั้งแบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1 มีค่ามากกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 เพราะค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้น้ำในช่วงพื้นที่ BH-1 มากกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 แต่ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดินแบบมีทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1 มีค่าน้อยกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้น้ำในช่วงพื้นที่ BH-1 มากกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 ผนวกกับมีเสื่อน้ำจืดจากการขังน้ำไว้ในทางน้ำทำให้ลดปริมาณของน้ำทะเลที่ไหลลอดผ่านคันดิน น้ำทะเลจึงไหลซึมผ่านคันดินได้มากกว่าไหลลอดผ่านคันดิน

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน

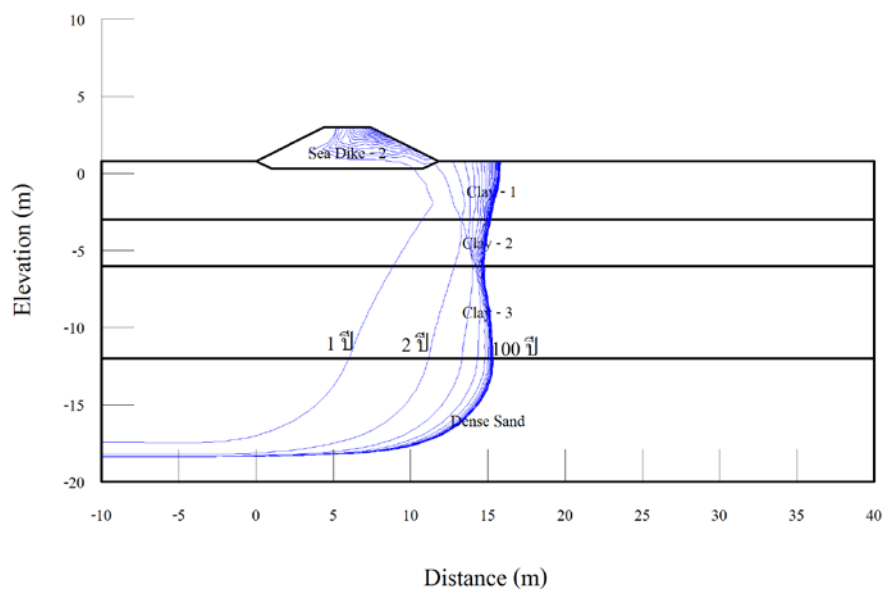
จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน ทำให้ทราบว่า ปริมาณการไหลซึมของน้ำทะเลผ่านคันดินในคันดิน Sea dike-1 มีค่าน้อยกว่าคันดิน Sea dike-2 ดังนั้น ในการวิเคราะห์ได้ใช้คันดิน (Sea dike-2) ซึ่งสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ที่ 5% และมีอายุการบ่ม 7 วัน ศึกษาค่าความเค็มที่ 10 kg/m^3 (10 ppt) ไหลเข้าไปในแต่ละพื้นที่ ณ เวลาที่ผ่านไปเป็นเวลา 100 ปี ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่พืชสามารถทนได้ โดยแสดงเส้นความเข้มข้นของความเค็มที่พันธุ์พืชสามารถทนได้ที่เวลาต่าง ๆ ซึ่งแสดงทุก ๆ 1 ปี ดังภาพที่ 4-36 ถึง 4-39



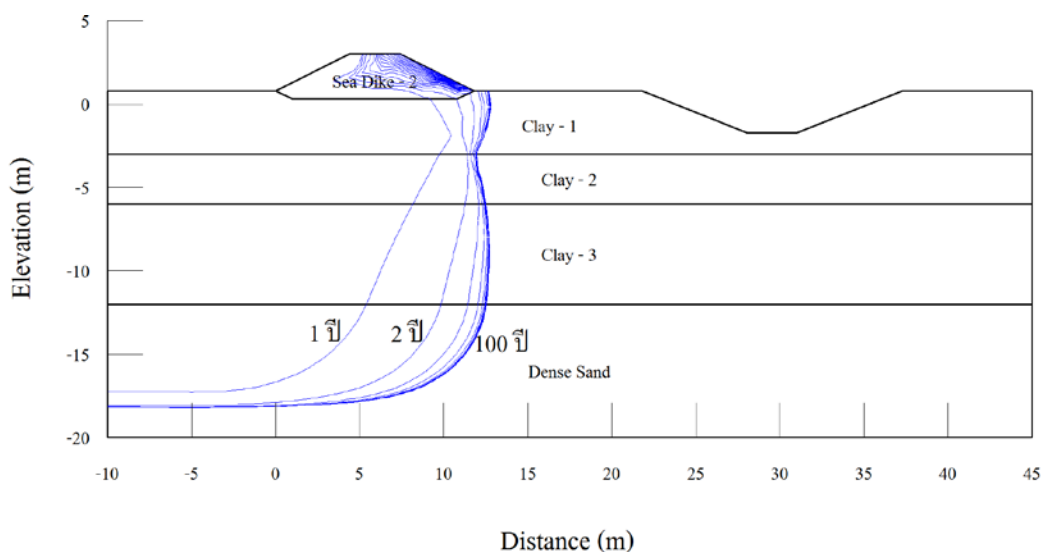
ภาพที่ 4-36 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ



ภาพที่ 4-37 เส้นแสดงการซึมผ่านของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ



ภาพที่ 4-38 เส้นแสดงการซึมผ่านของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ



ภาพที่ 4-39 เส้นแสดงความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลาต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ

จากภาพที่ 4-36 และ 4-37 พบว่า ในช่วงพื้นที่ BH-1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 10 ปี มีการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งความเข้มข้นของความเค็มน้อย เนื่องจากรูปแบบการเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของความเค็มจึงเปลี่ยนจากการเคลื่อนแบบการพาเป็นการเคลื่อนแบบการออสโมซิส ซึ่งอยู่ที่ระยะประมาณ 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งแผ่นดิน (ที่ระยะประมาณ 16.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งทะเล) โดยเมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ ใช้เวลาเพียง 3 ปี ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ถึงจะอยู่ที่สภาวะสมดุล แต่อยู่ที่ระยะประมาณ -2.50 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งแผ่นดิน (ที่ระยะประมาณ 9.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งทะเล) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เสดน้ำจืดในทางน้ำที่ถูกขังไว้ช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของความเค็ม

จากภาพที่ 4-38 และ 4-39 พบว่า ในช่วงพื้นที่ BH-2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ ต้องใช้เวลามากกว่า 10 ปี ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ถึงจะอยู่ที่สภาวะสมดุล และอยู่ที่ระยะประมาณ 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งแผ่นดิน (ที่ระยะประมาณ 16.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งทะเล) หากเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ เมื่อเวลาผ่านไปมากกว่า 5 ปี ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ถึงจะปี มีการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งความเข้มข้นของความเค็มน้อยและอยู่ที่ระยะประมาณ 1.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งแผ่นดิน (ที่ระยะประมาณ 13.00 m ที่ระดับผิวดินจากตื้นคันดินฝั่งทะเล) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เสดน้ำ

จืดในทางน้ำที่ถูกขังไว้ช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของความเค็มเช่นเดียวกันกับในช่วงพื้นที่ BH-1

เมื่อเปรียบเทียบในช่วงพื้นที่ BH-1 และ BH-2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่มีทางน้ำ ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 สามารถไหลเข้าไปในพื้นที่ศึกษาได้มากที่สุดที่ระยะประมาณ 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน และสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบมีทางน้ำ ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 ในช่วงพื้นที่ BH-1 ไหลเข้าไปในพื้นที่ศึกษาได้น้อยกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 ซึ่งอาจเป็นเพราะระยะห่างระหว่างคันดินกั้นน้ำทะเลและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2 มีระยะมากกว่าในช่วงพื้นที่ BH-1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณการไหลลอดของน้ำทะเลผ่านคันดินไม่ส่งผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของความเค็ม แต่เสดน้ำจืดในทางน้ำที่ถูกขังไว้ช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของความเข้มข้นของความเค็ม

จากข้างต้นที่กล่าวมา สามารถอธิบายได้ว่า ความเข้มข้นของความเค็มไหลเข้าสู่พื้นที่เกษตรกรรมผ่านเข้ามาในช่วงพื้นที่ BH-1 เข้าไปได้้น้อยกว่าในช่วงพื้นที่ BH-2 และยังสามารถใช้พื้นที่เกษตรกรรมในการเพาะปลูกข้าวได้มากกว่า 50 ปี และถึงแม้ว่าทางน้ำจะพังทลาย ความเข้มข้นของความเค็มที่ 10 kg/m^3 อยู่ที่ระยะประมาณ 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน

ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการคำนวณหาการทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล โดยในการวิเคราะห์ใช้ น้ำหนักของคันดินกั้นน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 20.0 kg/m^3 เนื่องจาก น้ำหนักของดินเหนียว CL บดอัดที่ผสมปูนซีเมนต์ 2% (CL-C02) ในทุก ๆ อายุการบ่ม มีค่าเท่ากับ 19.4 kg/m^3 และน้ำหนักของดินเหนียว CH บดอัดที่ผสมปูนซีเมนต์ 5% (CH-C05) ในทุก ๆ อายุการบ่ม มีค่าเท่ากับ 18.4 kg/m^3 มาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4-20 โดยมีผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4-21

ตารางที่ 4-20 คุณสมบัติของวัสดุสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล

ชื่อดิน	Unit weight (γ)	C_c	C_s	Void ratio (e)
	(kN/m^3)	-	-	(m^3/m^3)
CL-C02-D00	19.4	0.091	0.019	0.676
CH-C05-D07	18.4	0.275	0.017	0.895

หมายเหตุ: ระดับน้ำใต้ดิน -2.00 m จากระดับผิวดิน

ตารางที่ 4-21 ค่าการทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล

วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง	ค่าการทรุดตัว (cm)	
	ช่วงพื้นที่ BH-1	ช่วงพื้นที่ BH-2
CL-C02-D00	60.4-63.1	50.8-53.5
CH-C05-D07	60.0-67.0	50.5-57.3

จากผลการวิเคราะห์ ทำให้ทราบว่า ลักษณะของชั้นดินช่วงพื้นที่ BH-1 มีการทรุดตัวอยู่ในช่วง 60.0-67.0 cm และสำหรับลักษณะของชั้นดินช่วงพื้นที่ BH-2 มีการทรุดตัวอยู่ในช่วง 50.5-57.3 cm ซึ่งบ่งบอกว่า ในช่วงพื้นที่ BH-2 มีการทรุดตัวน้อยกว่าช่วงพื้นที่ BH-1 โดยเป็นผลมาจากค่าดัชนีการอัดตัวของชั้นดิน 2 ชั้นแรกของช่วงพื้นที่ BH-2 มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีการอัดตัวของชั้นดิน 2 ชั้นแรกของช่วงพื้นที่ BH-1 รวมไปถึงความหนาของชั้นดิน (จากตารางที่ 3-8)

จากข้างต้นที่กล่าว หากเกิดการทรุดตัวขึ้นในช่วงพื้นที่ BH-1 ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเลจะมีค่าเท่ากับ 2.330 m. MSL. (ค่าการทรุดตัวที่มากที่สุด 67.0 cm) และในช่วงพื้นที่ BH-2 ความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเลจะมีค่าเท่ากับ 2.427 m. MSL. (ค่าการทรุดตัวที่มากที่สุด 57.3 cm) ซึ่งยังมีความสูงที่เพียงพอต่อการป้องกันไม่ให้น้ำทะเลไหลเข้าท่วมพื้นที่เกษตรกรรม เนื่องจากระดับน้ำทะเลสูงสุดอยู่ 2.070 m. MSL.

บทที่ 5

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

อภิปรายผลการทดสอบทางวิศวกรรมปฐพี

จากการศึกษา ซึ่งนำดินตัวอย่างมาจากพื้นที่ศึกษาบริเวณ หมู่ที่ 2 และ 3 ตำบลตำมะลัง อำเภอเมือง จังหวัดสตูล โดยทำการเจาะสำรวจเพื่อเก็บตัวอย่างที่ระดับความลึกประมาณ 1-2 m ในลักษณะของการเก็บตัวอย่างดินแบบรบกวน (Disturbed soil samples) แล้วนำตัวอย่างดินที่ได้มา ผสมกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (Portland cement type I) โดยใช้วิธีการผสมแบบแห้ง หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธีการทดสอบคุณสมบัติกายภาพ และดัชนีของดิน คุณสมบัติทางเคมีของดิน และคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดิน

ผลการทดสอบคุณสมบัติกายภาพและดัชนีของดิน

ผลที่ได้จากการทดสอบโดยใช้ Unified soil classification system ทำให้สามารถจำแนกชนิดของดินในพื้นที่ศึกษาได้เป็น 2 ประเภท คือ ดินเหนียว CH (High-plasticity clay) และดินเหนียว CL (Low-plasticity clay) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติกายภาพและดัชนีของดิน

การทดสอบ	รายการ	ดินเหนียว CL	ดินเหนียว CH
การทดสอบขีดจำกัด แอสเตอร์เบิร์ก	Liquid limit, L.L. (%)	40.7	58.0
	Plastic limit, P.L. (%)	21.5	26.4
	Shrinkage limit, S.L. (%)	16.3	17.1
	Plastic index, P.I. (%)	19.2	31.6
การทดสอบหาค่า ความถ่วงจำเพาะ	Specific gravity, S_G	2.77	2.68
การทดสอบการร่อน ตะแกรงแบบเปียก และไฮโดรมิเตอร์	เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงที่ตะแกรงเบอร์ 200 (%)	63.0	95.5
	ปริมาณ Clay content (<0.005 mm, %)	39.0	71.0
	ขนาดของเม็ดดินเหนียว (mm)	0.025	0.0015

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดิน

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดินด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบการวาวรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence spectrometry, XRF) เพื่อหาปริมาณของสารประกอบในตัวอย่างดิน ทำให้สามารถระบุได้ว่าตัวอย่างดินที่ทำการทดสอบเป็นดินเหนียว (Das, 2010)

จากการหาค่าปริมาณสารอินทรีย์ด้วยวิธีการเผาตามมาตรฐาน ASTM D2974-07 Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils พบว่า ตัวอย่างดิน CL และ CH มีปริมาณสารอินทรีย์ (Organic matter) เฉลี่ยอยู่ที่ 8.30 และ 8.80% ตามลำดับ จากการจำแนกของ Germaine and Germaine (2009) พบว่า ตัวอย่างดินเป็น ดินร่วน (Loam borrow) จากการทดสอบการหาค่า pH ตามมาตรฐาน ASTM D4972-89 Standard test method for pH of soils พบว่า ตัวอย่างดิน CL มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ดินอยู่ในช่วงกรดแก่จัด (Extremely acid soil) และจากตัวอย่างดิน CH มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ดินมีอยู่ในช่วงกรดจัดมาก (Strongly acid soil) ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดิน พบว่า ดินเหนียวที่พบนั้น เป็นดินเหนียวอินทรีย์ (Organic clay) ซึ่งยังคงมีการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในมวลดิน ทำให้ดินมีสภาพความเป็นกรด สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดิน

การทดสอบ	รายการ	ดินเหนียว CL	ดินเหนียว CH
การทดสอบหาค่าการหาชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่าง	Al ₂ O ₃ (%)	14.58	17.22
	SiO ₂ (%)	68.66	70.10
	Fe ₂ O ₃ (%)	3.89	3.49
	CaO (%)	0.46	0.28
	อื่นๆ (%)	12.41	8.91
การทดสอบหาค่าปริมาณสารอินทรีย์	Organic Matter (%)	8.3	8.8
การทดสอบการหาค่า pH	ค่าความเป็นกรดด่าง	4.0	4.9

ผลการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดิน การปรับปรุงคุณภาพดิน กระทำโดยทดลองนำตัวอย่างดินมาผสมสารเชื่อมประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1) ที่ปริมาณ 0 2 5 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักดินแห้งแล้ว

นำไปทดสอบเพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินจาก 3 วิธีการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการบดอัดดินแบบมาตรฐาน (Standard Compaction Test) การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) และการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระ (Unconfined Compression Test) โดยมีอายุการบ่มที่ 0 7 และ 28 วัน

ผลการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินภายหลังการปรับปรุงคุณภาพดินสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ค่าอัตราการบวมตัว ดินเหนียว CL เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น อัตราการบวมตัวมีแนวโน้มคงที่ แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นอัตราการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง สำหรับดินเหนียว CH อัตราการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์และอายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น แต่ที่ปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่า 5% เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ค่าอัตราการบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

2. ค่าดัชนีของการอัดตัว (C_c) ทั้งดินเหนียว CL และดิน CH เมื่อผสมปูนซีเมนต์ การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีของการอัดตัวมีแนวโน้มลดลงในทุก ๆ อายุการบ่ม

3. ค่าดัชนีของการบวมตัว (C_s) ทั้งดินเหนียว CL และดินเหนียว CH ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีของการลดลงตัวมีแนวโน้มลดลง ในทุก ๆ อายุการบ่ม

4. ค่าแรงดันสูงสุดในอดีต (P'_m) ดินเหนียว CL เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ตัวอย่างดินเหนียว CL มีค่าแรงดันในอดีตสูงสุดเพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่ดินเหนียว CH เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันในอดีตสูงสุดเพิ่มขึ้นในช่วงอายุการบ่ม 0 ถึง 7 วัน

5. ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (k) เมื่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ดินเหนียว CL มีแนวโน้มลดลง และดินเหนียว CH มีแนวโน้มคงที่ ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงของคุณสมบัติของวัสดุที่บ่มน้ำ มีค่าน้อยกว่า 1×10^{-8} m/วินาที (วรากร ไผ่เรียง, 2542)

6. ค่าแรงยึดเหนี่ยว (S_u) ของการทดสอบตัวอย่างแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked sample) ดินเหนียว CL ที่อายุการบ่ม 0 วัน ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่ามากขึ้นในทุกๆอายุการบ่ม ซึ่งที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ดินเหนียว CL มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่มากกว่า 5% กำลังการรับแรงเฉือนมีแนวโน้มจะลดลงและคงที่ ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ 8 และ 10% และดินเหนียว CH ที่อายุการบ่ม 0 วัน ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มคงที่ แต่เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงเฉือนมีค่ามากขึ้นในทุกๆอายุการบ่ม ที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ดินเหนียว CH ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์มากกว่า 5% กำลังรับแรงเฉือนมีแนวโน้มคงที่ในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นในช่วงหลัง

7. ค่าแรงยึดเหนี่ยว (S_u) ของการทดสอบตัวอย่างแบบแช่น้ำ (Soaked sample) ดินเหนียว CL เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นและอายุการบ่มที่นานขึ้น ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว CL มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่มากกว่า 5% กำลังการรับแรงเฉือนมีแนวโน้มที่ลดลงและคงที่ ทั้งในอายุการบ่มที่ 0 7 และ 28 วัน และสำหรับดินเหนียว CH เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์มากขึ้น ทำให้กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียว CH มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทุกๆอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์และอายุการบ่ม

8. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ดินเหนียวที่มีการปรับปรุงคุณภาพแล้ว และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการก่อสร้าง ได้แก่

8.1 ดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 0 วัน (CL-C02-D00) โดยมีค่าอัตราการบวมตัว = 0.890%, $C_c = 0.091$, $C_s = 0.019$, $P'_m = 290$ kPa, $k = 3.0 \times 10^{-10}$ m/s, S_u (Unsoaked sample) = 255.45 kPa, และ S_u (Soaked sample) = 82.38 kPa

8.2 ดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 7 วัน (CH-C05-D07) โดยมีค่าอัตราการบวมตัว = -0.025%, $C_c = 0.275$, $C_s = 0.017$, $P'_m = 420$ kPa, $k = 5.0 \times 10^{-10}$ m/s, S_u (Unsoaked sample) = 206.31 kPa, และ S_u (Soaked sample) = 65.76 kPa

ผลการทดสอบที่ได้ปรากฏความแปรปรวนอยู่บ้าง ซึ่งอาจเกิดจากการนำตัวอย่างดินจากหลาย ๆ หลุมเจาะสำรวจมาใช้ในการทดสอบ ซึ่งหากต้องการลดความแปรปรวนดังกล่าวอาจต้องนำตัวอย่างดินทั้งหมดมารวมกันแล้วจึงทำตัวอย่างเพื่อการทดสอบ

อภิปรายผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้เพื่อออกแบบคันดินกั้นน้ำทะเล และประเมินประสิทธิภาพในการป้องกันการรुक้าของน้ำทะเลของคันดินกั้นน้ำทะเล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพลาดคันดินและทางน้ำ

ค่าอัตราส่วนปลอดภัย (Safety Factor) ของเสถียรภาพลาดคันดินและทางน้ำ สำหรับทั้ง 3 กรณี ได้แก่ 1) เมื่อก่อสร้างเสร็จ 2) ขณะใช้งาน และ 3) ระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน โดยคำนวณด้วยวิธี Morgenstern & Price พบว่า ดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 0 วัน และดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 7 วัน มีค่าอัตราส่วนปลอดภัยของเสถียรภาพมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ตามเกณฑ์การออกแบบในทุกกรณี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลซึมของน้ำผ่านคันดิน

ดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 0 วัน และดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้งที่อายุการบ่ม 7 วัน เมื่อนำมาก่อสร้างเป็นคันดิน โดย

คำนวณด้วยวิธีแบบสถานะคงที่ (Steady-state analysis) ซึ่งจะมีปริมาณน้ำไหลผ่านคันดินน้อยกว่า $3.5 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$: ความยาว 1 m เมื่อระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้นสูงสุด และมีปริมาณน้ำไหลผ่านฐานรากน้อยกว่า $1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$: ความยาว 1 m เมื่อระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้นสูงสุด หากมีทางน้ำ ปริมาณน้ำไหลผ่านคันดินน้อยกว่า $3.0 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$: ความยาว 1 m เมื่อระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้นสูงสุด และปริมาณน้ำไหลผ่านฐานรากน้อยกว่า $1.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$: ความยาว 1 m เมื่อระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้นสูงสุด

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดิน

ค่าความเข้มข้นของความเค็มที่เคลื่อนที่ผ่านตัวคันดินและฐานรากของคันดิน เมื่อคำนวณด้วยวิธีการจำลองการไหลของน้ำ และการเคลื่อนที่ของเกลือด้วยการกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำไม่คงที่ (Density-dependent analysis) พิจารณาที่ค่าความเค็มที่ 10 kg/m^3 (10 ppt) พบว่า เมื่อเวลาที่ผ่านไปเป็นระยะเวลา 100 ปี ค่าความเค็มดังกล่าวอยู่ที่ระยะประมาณ 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน หากมีทางน้ำ พบว่า เมื่อเวลาที่ผ่านไปเป็นระยะเวลา 100 ปี ค่าความเค็มดังกล่าวอยู่ที่ระยะประมาณ -2.50 ถึง 1.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน

อภิปรายผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของคันดินกั้นน้ำทะเล

การทรุดตัวของคันดินมีค่าอยู่ระหว่าง 50.0-70.0 cm ทำให้ค่าความสูงของคันดินที่ถูกกำหนดขึ้นนั้น มีการกำหนดให้สอดคล้องกับค่าการทรุดตัวของคันดินไว้แล้ว

สรุปผลการวิจัย

1. ถ้าหากสามารถจำแนกชนิดดินเหนียวในพื้นที่ได้ ค่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างคันดินกั้นน้ำทะเล คือ ดินเหนียว CL ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 2% โดยไม่ต้องทำการบ่มคันดินภายหลังการก่อสร้าง และดินเหนียว CH ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5% และทำการบ่มคันดินภายหลังการก่อสร้างเป็นเวลา 7 วัน

แต่หากไม่สามารถจำแนกชนิดของดินเหนียวในพื้นที่ได้ ควรผสมปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วน 5% และทำการบ่มคันดินเป็นเวลา 7 วันภายหลังการก่อสร้าง เนื่องจากปริมาณดังกล่าวเป็นอัตราส่วนผสมที่น้อยที่สุดที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้มีค่าน้อยกว่า 10^{-8} m/s และยังมีกำลังรับแรงเฉือนที่เพียงพอต่อการป้องกันการเคลื่อนพังของลาดดิน

2. จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ค่าความเข้มข้นของความเค็มไหลเข้าไปในพื้นที่ที่ระยะไม่เกิน 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน แต่เมื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ ระยะที่ค่าความเข้มข้นของความเค็มไหลเข้าไปในพื้นที่ได้น้อยกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ คือ ที่ระยะไม่เกิน 1.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน

3. ระดับความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเล เท่ากับ +3.00 m. (รทก.) มีความสูงเพียงพอสำหรับการป้องกันไม่ให้น้ำทะเลไหลเข้าท่วมพื้นที่เกษตรกรรมด้านหลังคันดิน เนื่องจากหากเกิดการทรุดตัวขึ้นในช่วงพื้นที่ BH-1 มีค่าการทรุดตัวที่มากที่สุด 67.0 cm ทำให้ระดับความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 2.330 m. (รทก.) และในช่วงพื้นที่ BH-2 ค่าการทรุดตัวที่มากที่สุด 57.3 cm ทำให้ระดับความสูงของคันดินกั้นน้ำทะเลมีค่าเท่ากับ 2.427 m. (รทก.) จากข้อมูลกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ค่าระดับน้ำทะเลสูงสุดอยู่ 2.070 m. (รทก.)

4. ในการก่อสร้างคันดิน หากต้องการขุดบ่อยึดดินขึ้นในพื้นที่ อาจขุดให้มีลักษณะเป็นทางน้ำขนานกับแนวคันดิน โดยให้มีระยะห่างระหว่างคันดินกับบ่อยึดดิน (ทางน้ำ) ประมาณ 5 m ช่วงพื้นที่ BH-1 และประมาณ 10 m ช่วงพื้นที่ BH-2

5. พันธุ์พืชดังตารางที่ 2-4 สามารถนำพื้นที่บริเวณฝั่งแผ่นดินไปใช้ในการเกษตรได้ เมื่อทำการก่อสร้างคันกั้นน้ำทะเลแล้วเสร็จ เนื่องจากค่าความเข้มข้นของความเค็มไหลเข้าไปในพื้นที่ที่ระยะไม่เกิน 4.00 m ที่ระดับผิวดินจากดินคันดินฝั่งแผ่นดิน

บรรณานุกรม

- กมล อมรฟ้า. (2545). การปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน โดยใช้ซีเมนต์และปูนขาว. ปรินญา วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เกษม เพชรเกตุ และโกศล ไกรพัฒน์พงศ์. (2553). การศึกษาผลกระทบของโซเดียมคลอไรด์ สารอินทรีย์ และค่าความเป็นกรดต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อน กรุงเทพมหานครซีเมนต์แบบเปียก. วิศวกรรมฐานราก เสริมดินซีเมนต์, 145-163.
- ณพล อยู่บรรพต. (2556). แนวทางการเลือกสารเสถียรภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพดินด้วย วิธีการทางเคมี. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 23(3), 773-782.
- ทวีศักดิ์ ระมิงวงศ์. 2546. น้ำบาดาล. ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ทวีศักดิ์ วัชไพศาล และ นท แสงเทียน. (2553). คุณสมบัติของดินทรายผสมเบนโทไนต์สำหรับ ก่อสร้างชั้นกันซึม. วารสารวิชาการ มอช., 12(1), 19-29.
- พรชัย สุชาทร. (2525). อินทรีย์วัตถุในดิน. วารสารฝ่ายวิชาการ โครงการพัฒนาที่ดินทุ่งกุลาร้องไห้, 1(2), 25-36.
- มนตรี ฝายอุประ. (2545). การลดค่าความชื้นน้ำของดินกำแพงแสน โดยใช้ปูนขาว ซิลิกาซีเมนต์ และปอร์ตแลนด์ซีเมนต์. ปรินญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิชาโยธา คณะครุศาสตร์โยธา, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วรากร ไม้เรียง. (2542). วิศวกรรมเขื่อนดิน (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: ไรบรารี นาย.
- ศิริศักดิ์ จินดาพล, สยาม ยิ้มศิริ, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, และสัญญา มิตรเอม. (2550). การปรับปรุง คุณภาพของดินในสภาพแช่น้ำด้วยการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว. การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, 5, GTE 42-GTE 43.
- ศิริศักดิ์ จินดาพล, สยาม ยิ้มศิริ, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, และอภินิติ โชติสังกาส. (2550). คุณสมบัติทาง กลศาสตร์ของดินที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในสภาพแช่น้ำจากการทดสอบแบบ แรงอัดไม่มีขอบเขตจำกัดและแบบแรงเฉือนตรง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 12, 3(GTE), 98-103.
- สมศรี อรุณินท์. (2539). ดินเค็มในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและ สหกรณ์,

- อรุณี ยูวะนิชม และสมศรี อรุณินท์. (2539). การวิจัยพีชทนเค็มและพีชชอบเกลือบางชนิดในพื้นที่ดินเค็มจัด. *เอกสารคู่มือเจ้าหน้าที่ของรัฐ เรื่องดินเค็ม กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์*, 278-283.
- AASHTO. (1995). Resilient modulus of unbound granular base/subbase materials and subgrade soils. *American Association of state highway and transportation officials*, 46, 794-807.
- Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N., & Balasubramaniam, A.S. (1996). *Soft ground improvement*. United States of America: American society of civil engineers.
- Chalermyanont, T. & Arrykul, S. (2004). Compacted sand-bentonte mixtures for hydraulic containment liners. *Songklanakar J. Sci. Technol.*, 27(2), 313-323.
- Chang, S. W., Clement, T. P., Simpson, M. J., & Lee, K. (2011). Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion?. *Advances in water resources*, 34, 1283-1291.
- Cooper, Jr., H. H. (1986). A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. In T. B. Nolan (Ed.), *Sea water in coastal aquifers* (pp. 1-12), Washington D.C.: U.S. Government printing office.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering (Seventh edition)*. United States of America: RPK editorial services.
- Davidson, D. T. (1961). Soil stabilization with Portland cement. *National Research Council*, 292, 474.
- Deng, Y., Yue, X., Liu, S., Chen, Y., & Zhang, D. (2015). Hydraulic conductivity of cement stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution. *Engineering geology*, 193, 146-153.
- Doornkamp, J. C. (1998). Coastal flooding, global warming and environmental management. *Journal of environmental management*, 52, 327-333.
- Drabbe, J., & Ghyben, B. W. (1889). Nota inverband met de voorgenomen putboring nabji Amsterdam [Notes on the probable results of the proposed well drilling near Amsterdam]: The Hague, *Koninkl. Inst. Ing. Tijdschr*, 8-22.
- Gelhar, L. W., Welty, C., & Kenneth, R. R. (1992). A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water resources research*, 28, 1955-1974.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2002). *Seep/W for infinite element seepage analysis*. Canada: GEO-SLOPE International Ltd.

- Germaine, J. T., & Germaine, A. V. (2009). *Geotechnical laboratory measurements for engineers*. New York: John Wiley & Sons.
- Gleason, M. H., Daniel, D. E., & Eykholt, G. E. (1997). Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment application. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, May 1997, 438-445.
- Hausmann, M. R. (1990). *Engineering principles of ground modification*. New York: McGraw-Hill.
- Henry, H. R. (1986). Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers. In T. B. Nolan (Ed.), *Sea water in coastal aquifers* (pp. 70-82), Washington D.C.: U.S. Government printing office.
- Henry, H. R. (1986). Interfaces between salt water and fresh water in coastal aquifers. In T. B. Nolan (Ed.), *Sea water in coastal aquifers* (pp. 30-70), Washington D.C.: U.S. Government printing office.
- Herzberg, A. (1901). Die Wasserversorgung einiger nordssbäder [The water supply on parts of the North Sea Coast]: Munich, Jour. *Gasbeleucht. U. Wasserversorg.*, 44, 815-819; 842-844.
- Hewitt, K., & Burton, I. (2008). *The hazardousness of place: a regional ecology of damaging events*. Toronto: University of Toronto Press.
- Holtz, R. D. & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. United States of America: New Jersey.
- Ingles, O. G. & Metcalf, J. B. (1973). *Soil stabilization: Principles and practice*. New York: John Wiley & Sons.
- Kohout, F. A. (1986). The flow of fresh water and salt water in the biscayne aquifer of the Miami Area, Florida. In T. B. Nolan (Ed.), *Sea water in coastal aquifers* (pp. 12-32), Washington D.C.: U.S. Government printing office.
- Lambe, T. W., Metchael, A. S., & Moh, Z. C. (1959). Improvement of soil-cement with alkali metal compound. *National Research Council (Highway research board bulletin)*, 241, 67-103.
- Moh, Z. C. (1960). Soil stabilization with cement and sodium additives. *Journal of soil mechanic foundation engineering*, 88, 81-105.

- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of generalised slip surface. *Geotechnique*, 15, 79-93.
- National Soil Survey Center. (2002). *Field book for describing and sampling soils* (Second edition). United States of America: Natural resources conservation service.
- Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zone. *Science*, 328, 1517-1520.
- Pakbaz, M. S., & Alipour, R. (2009). Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay. *Applied clay science*, 67-68, 1-4.
- Sariosseiri, F., & Muhunthan, B. (2009). Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington state soils. *Engineering geology*, 104, 119-125.
- Simpson, M. J., & Clement, T. P. (2003). Theoretical analysis of the worthiness of Henry and Elder problems as benchmarks of density-dependent groundwater flow models. *Advances in water resources*, 26, 17-31.
- Swasey, B. & Creamer, L. (2018). *Nor'easter Brings coastal flooding, heavy precipitation to mass*. Retrieved from <http://www.wbur.org/news/2018/03/02/storm-coastal-flooding-massachusetts>
- Todd, D. K. & Mays, L. W. (2004). *Groundwater hydrology* (Third edition). United States of America: Wiley.
- U.S. Army (2018). *Air force photos*. Retrieved from <http://www.af.mil/News/Photos/igphoto/2000098970/>
- USACE. (2006). Coastal engineering manual. *Engineer manual 1110-2-1100*. Washington D.C.: US army corps of engineers,
- Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A., & Ören, A. H. (2008). Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. *Engineering geology*, 102, 54-61.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและดัชนีของดิน

ตารางภาคผนวก ก-1 ข้อมูลจากการทดสอบการร่อนตะแกรงแบบเปียกและการทดสอบ
ไฮโดรมิเตอร์ดินเหนียวชนิดที่ 1 (ดินเหนียว CL)

ขนาดเส้นศูนย์กลาง ของดิน (mm)	เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม (%)	ขนาดเส้นศูนย์กลาง ของดิน (mm)	เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม (%)
4.7500	100.00	0.0008	26.97
1.1800	84.76	0.0008	26.97
0.4250	70.88	0.0007	25.75
0.1500	64.38	0.0007	25.75
0.0750	62.95	0.0006	25.75
0.0515	51.50	0.0006	24.52
0.0364	51.50	0.0006	24.52
0.0259	50.27	0.0005	24.52
0.0167	49.04	0.0005	24.52
0.0097	46.59	0.0005	23.30
0.0052	39.23	0.0005	23.30
0.0026	35.56	0.0004	22.68
0.0022	33.10	0.0004	22.07
0.0019	33.10	0.0004	22.07
0.0011	30.65	0.0004	22.07
0.0010	30.65	0.0004	22.07
0.0010	30.65	0.0004	22.07
0.0010	29.43	0.0004	20.84
0.0008	29.43	0.0003	20.84
0.0008	28.20	0.0003	20.84

ตารางภาคผนวก ก-2 ข้อมูลจากการทดสอบการร่อนตะแกรงแบบเปียกและการทดสอบ
ไฮโดรมิเตอร์ของดินเหนียวชนิดที่ 2 (ดินเหนียว CH)

ขนาดเส้นศูนย์กลาง ของดิน (mm)	เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม (%)	ขนาดเส้นศูนย์กลาง ของดิน (mm)	เปอร์เซ็นต์ผ่านสะสม (%)
4.7500	100.00	0.0009	41.68
1.1800	99.31	0.0008	39.79
0.4250	98.35	0.0008	39.79
0.1500	96.56	0.0007	37.89
0.0750	95.51	0.0007	37.89
0.0497	92.83	0.0006	36.00
0.0356	90.94	0.0006	36.00
0.0252	90.94	0.0005	34.10
0.0162	87.15	0.0005	34.10
0.0098	81.47	0.0005	34.10
0.0052	71.99	0.0005	32.21
0.0026	66.31	0.0005	32.21
0.0022	60.63	0.0004	32.21
0.0019	58.73	0.0004	32.21
0.0018	54.94	0.0004	30.31
0.0013	49.26	0.0004	28.42
0.0012	47.36	0.0004	28.42
0.0011	45.47	0.0004	28.42
0.0010	43.57		

ตารางภาคผนวก ก-3 ผลการทดสอบขีดจำกัดแอมเตอร์เบิร์ต

Hole No.	P.L. (%)	S.L.(%)	L.L. (%)	P.I. (%)	ชนิดของดิน เหนียว
BA - 1	17.86	14.38	33.11	15.25	CL
BA - 2	26.42	17.62	58.67	32.24	CH
BA - 3	18.18	16.74	36.83	18.65	CL
BA - 4	21.65	16.01	36.08	14.43	CL
BA - 5	25.83	20.24	50.93	25.11	CH
BA - 6	23.53	17.74	42.87	19.34	CL
BA - 7	24.17	14.45	40.57	16.40	CL
BA - 8	18.40	16.30	37.94	19.53	CL
BA - 9	21.14	8.94	38.48	17.34	CL
BA - 10	26.20	16.49	52.87	26.66	CH
BA - 11	26.91	17.97	50.28	23.38	CH
BA - 12	22.10	15.90	43.22	21.12	CL
BA - 13	23.29	20.04	48.08	24.79	CL
BA - 14	22.48	17.00	38.70	16.22	CL
BA - 15	20.19	17.76	38.03	17.83	CL
BA - 16	21.06	16.19	38.52	17.46	CL
BA - 17	19.95	15.24	43.02	23.06	CL
BA - 18	25.75	17.71	54.61	28.87	CH
BA - 19	27.26	17.95	51.21	23.95	CH
BA - 20	26.98	18.40	50.76	23.78	CH
BA - 21	29.01	15.44	67.31	38.30	CH
BA - 22	27.62	18.70	53.12	25.50	CH
BA - 23	25.07	18.01	59.36	34.28	CH
BA - 24	24.31	20.07	46.99	22.68	CL

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

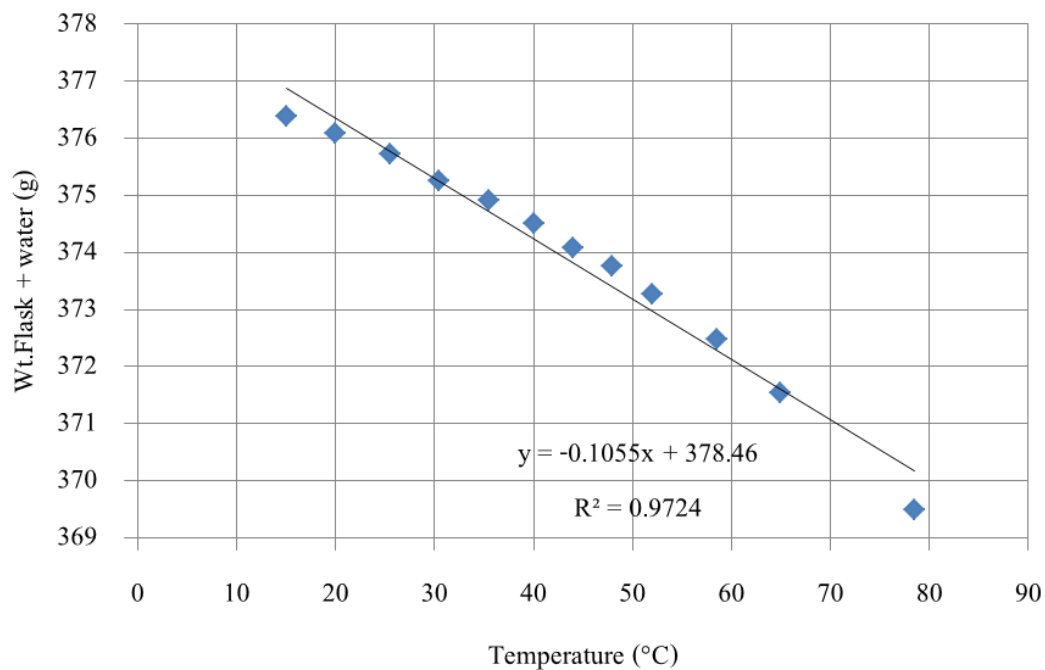
Hole No.	P.L. (%)	S.L.(%)	L.L. (%)	P.I. (%)	ชนิดของดิน เหนียว
BA - 25	24.53	18.32	47.65	23.13	CL
BA - 26	27.99	16.53	55.27	27.27	CH
BA - 27	28.71	21.80	65.91	37.20	CH
BA - 28	22.55	14.88	60.33	37.78	CH
BA - 29	22.92	16.46	53.00	30.08	CH
BA - 30	23.85	17.55	50.58	26.73	CH
BA - 31	23.86	12.82	62.50	38.64	CH
BA - 32	28.70	18.50	63.53	34.83	CH
BA - 33	23.37	18.03	53.92	30.55	CH
BA - 34	24.26	16.18	58.51	34.25	CH
BA - 35	25.64	16.39	68.12	42.48	CH
BA - 36	25.30	16.66	61.96	36.66	CH
BA - 37	23.58	16.91	50.96	27.37	CH
BA - 38	27.85	16.35	59.89	32.05	CH
BA - 39	25.45	16.15	60.41	34.96	CH
BA - 40	28.74	16.84	65.82	37.08	CH
BA - 41	29.38	16.29	57.08	27.70	CH
BA - 42	24.40	15.71	59.46	35.06	CH
BA - 43	25.43	16.58	65.53	40.10	CH
BA - 44	25.77	17.04	56.94	31.16	CH
BA - 45	23.09	16.20	51.46	28.37	CH
BA - 46	29.53	18.07	57.32	27.79	CH
BA - 47	32.44	19.39	60.92	28.48	CH
BA - 48	25.15	15.83	62.98	37.83	CH

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Hole No.	P.L. (%)	S.L.(%)	L.L. (%)	P.I. (%)	ชนิดของดิน เหนียว
BA - 49	32.41	17.84	64.07	31.66	CH
BA - 50	25.88	16.02	55.78	29.90	CH

ตารางภาคผนวก ก-4 Flask Calibration

No.	Temperature (°C)	Wt.Flask + water (g)
1	78.5	369.48
2	65	371.54
3	58.5	372.48
4	52	373.26
5	48	373.76
6	44	374.08
7	40	374.51
8	35.5	374.92
9	30.5	375.25
10	25.5	375.72
11	20	376.09
12	15	376.38



ภาพภาคผนวก ก-1 Flask Calibration

ตารางภาคผนวก ก-5 Specific Gravity of Soil

No.	I	II	I	II
Soil Sample	CH	CH	CL	CL
Temperature (°C)	28.50	41.50	29.50	48.67
Wt.Flask + water (g)	375.45	374.08	375.35	373.33
Wt.Flask + water + Soil (g)	398.17	389.75	396.62	390.05
Wt.Container + Soil (g)	150.90	187.19	144.07	189.65
Wt.Container (g)	114.72	162.36	110.84	163.55
Wt. Dry Soil (g)	36.18	24.83	33.23	26.10
Specific Gravity of Water	0.99788	0.99160	0.99759	0.9917
Specific Gravity of Soil	2.682	2.687	2.772	2.761
Average	2.68		2.77	

ภาคผนวก ข

การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของดิน

ตารางภาคผนวก ข-1 ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ของดินเหนียว CL

สารประกอบ	ปริมาณพบในตัวอย่างดิน	สารประกอบ	ปริมาณพบในตัวอย่างดิน
Al ₂ O ₃	14.58	MnO	0.02
Br	0.01	Na ₂ O	2.11
CaO	0.46	P ₂ O ₃	0.12
CeO ₂	0.03	PbO	0.01
Cl	0.25	Rb ₂ O	0.01
Cr ₂ O ₃	0.01	SO ₃	0.01
Fe ₂ O ₃	3.89	SiO ₂	68.66
HfO ₂	0.01	SrO	0.01
K ₂ O	1.30	TiO ₂	0.73
MgO	1.29	ZrO ₂	0.04

ตารางภาคผนวก ข-2 ผลการทดสอบ X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ของดินเหนียว CL

สารประกอบ	ปริมาณพบในตัวอย่างดิน	สารประกอบ	ปริมาณพบในตัวอย่างดิน
Al ₂ O ₃	17.22	Na ₂ O	2.42
BaO	0.01	P ₂ O ₃	0.15
Br	0.01	PbO	0.01
CaO	0.28	Rb ₂ O	0.01
Cl	1.4	SO ₃	0.92
Cr ₂ O ₃	0.02	SiO ₂	70.1
Fe ₂ O ₃	3.49	TiO ₂	0.77
K ₂ O	1.44	ZrO ₂	0.03
MgO	1.71		

ตารางภาคผนวก ข-3 ผลการทดสอบหาปริมาณอินทรีย์

ชื่อหลุม	Unified	ความชื้นในดิน (%)	ปริมาณอินทรีย์ในดิน (%)
BA-2	CL	59.15	7.46
BA-16	CL	77.39	8.70
BA-17	CL	95.58	8.71
BA-25	CL	91.76	8.21
BA-5	CH	71.75	6.70
BA-33	CH	94.65	8.50
BA-45	CH	84.43	11.17

ตารางภาคผนวก ข-4 ผลการทดสอบหาค่า pH

ชื่อหลุม	Temperature (°C)	Unified	ค่าที่วัดได้			ค่าเฉลี่ย (Average)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
BA - 1	29.5	CL	4.22	4.21	4.21	4.213
BA - 2	29.5	CH	4.23	4.22	4.22	4.223
BA - 3	29.9	CL	3.93	3.91	3.90	3.913
BA - 4	29.6	CL	3.82	3.81	3.81	3.813
BA - 5	29.7	CH	3.81	3.81	3.81	3.810
BA - 6	29.5	CL	3.87	3.86	3.86	3.863
BA - 7	29.6	CL	3.90	3.90	3.90	3.900
BA - 8	29.7	CL	3.76	3.76	3.76	3.760
BA - 9	29.7	CL	3.69	3.70	3.69	3.693
BA - 10	29.6	CH	4.02	4.02	4.03	4.023
BA - 11	29.3	CH	4.32	4.29	4.29	4.300
BA - 12	29.7	CL	4.07	4.08	4.07	4.073

ตารางภาคผนวก ข-4 ผลการทดสอบหาค่า pH (ต่อ)

ชื่อหลุม	Temperature (°C)	Unified	ค่าที่วัดได้			ค่าเฉลี่ย (Average)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
BA - 13	29.6	CL	3.82	3.82	3.82	3.820
BA - 14	29.7	CL	3.72	3.72	3.72	3.720
BA - 15	29.7	CL	3.84	3.85	3.84	3.843
BA - 16	29.7	CL	3.92	3.92	3.92	3.920
BA - 17	29.5	CL	4.01	4.01	4.01	4.010
BA - 18	29.6	CH	5.12	5.14	5.16	5.140
BA - 19	29.6	CH	4.16	4.16	4.16	4.160
BA - 20	29.5	CH	4.22	4.22	4.21	4.217
BA - 21	29.5	CH	4.48	4.48	4.50	4.487
BA - 22	29.5	CH	4.53	4.53	4.53	4.530
BA - 23	29.5	CH	5.81	5.86	5.87	5.847
BA - 24	29.4	CL	4.61	4.60	4.58	4.597
BA - 25	29.6	CL	4.91	4.92	4.91	4.913
BA - 26	29.3	CH	4.94	4.92	4.91	4.923
BA - 27	29.1	CH	5.00	5.03	5.01	5.013
BA - 28	29.3	CH	5.00	5.00	4.99	4.997
BA - 29	29	CH	4.97	4.96	4.97	4.967
BA - 30	29.1	CH	5.17	5.17	5.18	5.173
BA - 31	28.9	CH	5.13	5.11	5.09	5.110
BA - 32	28.9	CH	5.19	5.21	5.22	5.207
BA - 33	29.1	CH	4.77	4.73	4.77	4.757
BA - 34	29	CH	5.20	5.25	5.25	5.233
BA - 35	28.8	CH	6.17	6.20	6.23	6.200
BA - 36	28.8	CH	5.86	5.86	5.89	5.870

ตารางภาคผนวก ข-4 ผลการทดสอบหาค่า pH (ต่อ)

ชื่อหลุม	Temperature (°C)	Unified	ค่าที่วัดได้			ค่าเฉลี่ย (Average)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
BA - 37	28.9	CH	4.26	4.25	4.25	4.253
BA - 38	28.7	CH	5.53	5.52	5.49	5.513
BA - 39	28.8	CH	6.23	6.30	6.30	6.277
BA - 40	28.8	CH	6.01	5.99	5.99	5.997
BA - 41	32.2	CH	5.11	5.05	5.08	5.080
BA - 42	32.5	CH	5.89	5.91	5.93	5.910
BA - 43	31.1	CH	5.83	5.81	5.86	5.833
BA - 44	30.5	CH	4.27	4.24	4.22	4.243
BA - 45	29.8	CH	4.17	4.14	4.14	4.150
BA - 46	29.6	CH	3.39	3.40	3.39	3.393
BA - 47	29.3	CH	4.48	4.52	4.55	4.517
BA - 48	28.9	CH	5.44	5.49	5.51	5.480
BA - 49	28.6	CH	4.21	4.17	4.18	4.187
BA - 50	28.4	CH	5.21	5.26	5.28	5.250

ภาคผนวก ค

การทดสอบการบัดกรีแบบมาตรฐาน

ตารางภาคผนวก ค-1 บันทึกการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์

No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Mold, (g)	4,620.6	4,620.6	4,620.6	4,620.6	4,620.6	4,620.6
Wt. of Soil + Mold, (g)	6,298.5	6,411.5	6,535.6	6,517.8	6,479.6	6,429.9
Wt. of Soil in Mold, (g)	1,677.9	1,790.9	1,915.0	1,897.2	1,859.0	1,809.3
Average Water Content, (%)	10.15	12.75	15.37	18.21	20.73	24.06
Wet Unit Weight, (kN/m ³)	17.57	18.76	20.06	19.87	19.47	18.95
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	15.95	16.64	17.38	16.81	16.13	15.27

ตารางภาคผนวก ค-2 บันทึกการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL ที่ผสมปูนซีเมนต์ 2%

No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Mold, (g)	4,617.0	4,617.0	4,617.0	4,617.0	4,617.0	4,617.0
Wt. of Soil + Mold, (g)	6,250.4	6,360.6	6,423.0	6,481.0	6,509.4	6,460.2
Wt. of Soil in Mold, (g)	1,633.4	1,743.6	1,806.0	1,864.0	1,892.4	1,843.2
Average Water Content, (%)	9.80	11.91	14.38	16.95	19.55	22.60
Wet Unit Weight, (kN/m ³)	17.11	18.26	18.91	19.52	19.82	19.30
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	15.58	16.32	16.54	16.69	16.58	15.75

ตารางภาคผนวก ค-3 บันทึกการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL ที่ผสมปูนซีเมนต์ 5%

No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Mold, (g)	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0
Wt. of Soil + Mold, (g)	6,187.7	6,257.5	6,315.3	6,384.8	6,388.1	6,348.8
Wt. of Soil in Mold, (g)	1,671.7	1,741.5	1,799.3	1,868.8	1,872.1	1,832.8
Average Water Content, (%)	10.78	12.91	15.34	17.65	21.26	22.52
Wet Unit Weight, (kN/m ³)	17.51	18.24	18.84	19.57	19.61	19.20
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	15.80	16.15	16.34	16.64	16.17	15.67

ตารางภาคผนวก ค-4 บันทึกการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL ที่ผสมปูนซีเมนต์ 8%

No.	1	2	3	4	5	6	7
Wt. of Mold, (g)	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0
Wt. of Soil + Mold, (g)	6,161.1	6,215.0	6,246.2	6,295.8	6,350.3	6,319.1	6,294.7
Wt. of Soil in Mold, (g)	1,645.1	1,699.0	1,730.2	1,779.8	1,834.3	1,803.1	1,778.7
Average Water Content, (%)	11.43	13.76	16.07	18.93	21.39	23.71	26.56
Wet Unit Weight, (kN/m ³)	17.23	17.79	18.12	18.64	19.21	18.88	18.63
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	15.46	15.64	15.61	15.67	15.83	15.26	14.72

ตารางภาคผนวก ค-5 บันทึกการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CL ที่ผสมปูนซีเมนต์ 10%

No.	1	2	3	4	5	6
Wt. of Mold, (g)	4,601.5	4,601.5	4,601.5	4,601.5	4,601.5	4,601.5
Wt. of Soil + Mold, (g)	6,217.2	6,276.2	6,360.5	6,420.2	6,387.1	6,334.5
Wt. of Soil in Mold, (g)	1,615.7	1,674.7	1,759.0	1,818.7	1,785.6	1,733.0
Average Water Content, (%)	12.39	14.76	18.20	21.60	25.54	29.05
Wet Unit Weight, (kN/m ³)	16.92	17.54	18.42	19.05	18.70	18.15
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	15.06	15.28	15.59	15.66	14.90	14.06

ตารางภาคผนวก ค-6 บันทึกการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์

No.	1	2	3	4	5	6	7
Wt. of Mold, (g)	4,620.6	4,620.6	4,620.6	4,620.6	4,620.6	4,620.6	4,620.6
Wt. of Soil + Mold, (g)	6,195.3	6,216.2	6,300.2	6,376.8	6,375.2	6,363.6	6,326.9
Wt. of Soil in Mold, (g)	1,574.7	1,595.6	1,679.6	1,756.2	1,754.6	1,743.0	1,706.3
Average Water Content, (%)	14.05	16.17	19.38	22.94	26.02	29.53	32.58
Wet Unit Weight, (kN/m ³)	16.49	16.71	17.59	18.39	18.38	18.25	17.87
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	14.46	14.38	14.74	14.96	14.58	14.09	13.48

ตารางภาคผนวก ก-7 บันทึกการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH ที่ผสมปูนซีเมนต์ 2%

No.	1	2	3	4	5	6	7
Wt. of Mold, (g)	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0	4,516.0
Wt. of Soil + Mold, (g)	6,099.0	6,194.3	6,241.9	6,280.6	6,308.7	6,277.6	6,238.0
Wt. of Soil in Mold, (g)	1,583.0	1,678.3	1,725.9	1,764.6	1,792.7	1,761.6	1,722.0
Average Water Content, (%)	13.13	15.43	18.72	21.76	24.03	27.20	30.57
Wet Unit Weight, (kN/m ³)	16.58	17.58	18.08	18.48	18.78	18.45	18.03
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	14.65	15.23	15.23	15.18	15.14	14.50	13.81

ตารางภาคผนวก ก-8 บันทึกการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH ที่ผสมปูนซีเมนต์ 5%

No.	1	2	3	4	5	6	7
Wt. of Mold, (g)	4,616.9	4,616.9	4,616.9	4,616.9	4,616.9	4,616.9	4,616.9
Wt. of Soil + Mold, (g)	6,187.1	6,238.5	6,323.0	6,387.4	6,400.9	6,396.0	6,355.1
Wt. of Soil in Mold, (g)	1,570.2	1,621.6	1,706.1	1,770.5	1,784.0	1,779.1	1,738.2
Average Water Content, (%)	12.34	14.94	17.74	20.50	23.60	27.08	30.06
Wet Unit Weight, (kN/m ³)	16.44	16.98	17.87	18.54	18.68	18.63	18.20
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	14.64	14.78	15.18	15.39	15.12	14.66	14.00

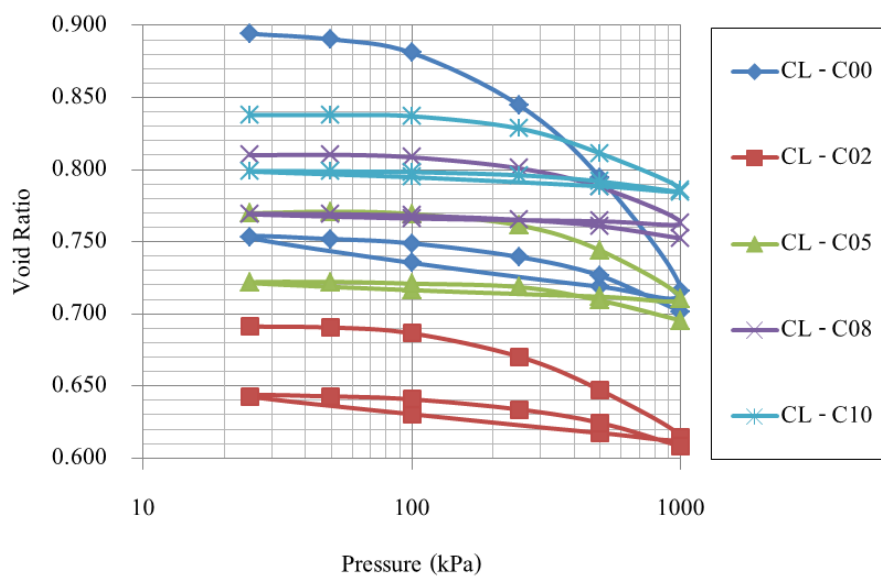
ตารางภาคผนวก ก-9 บันทึกการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH ที่ผสมปูนซีเมนต์ 8%

No.	14.0%	17.0%	20.0%	23.0%	26.0%	29.0%	31.0%
Wt. of Mold, (g)	4,619.9	4,619.9	4,619.9	4,619.9	4,619.9	4,619.9	4,619.9
Wt. of Soil + Mold, (g)	6,194.0	6,232.0	6,270.9	6,318.8	6,338.7	6,362.9	6,381.7
Wt. of Soil in Mold, (g)	1,574.1	1,612.1	1,651.0	1,698.9	1,718.8	1,743.0	1,761.8
Average Water Content, (%)	12.86	14.87	17.18	20.36	22.56	25.19	27.84
Wet Unit Weight, (kN/m ³)	16.49	16.88	17.29	17.79	18.00	18.25	18.45
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	14.61	14.70	14.76	14.78	14.69	14.58	14.43

ตารางภาคผนวก ก-10 บันทึกการบดอัดดินแบบมาตรฐานของดินเหนียว CH ที่ผสมปูนซีเมนต์ 10%

No.	1	2	3	4	5	6	7
Wt. of Mold, (g)	4,515.9	4,515.9	4,515.9	4,515.9	4,515.9	4,515.9	4,515.9
Wt. of Soil + Mold, (g)	6,101.1	6,155.5	6,197.3	6,235.9	6,258.0	6,279.3	6,301.8
Wt. of Soil in Mold, (g)	1,585.2	1,639.6	1,681.4	1,720.0	1,742.1	1,763.4	1,785.9
Average Water Content, (%)	11.88	14.41	16.79	19.52	22.06	24.94	27.84
Wet Unit Weight, (kN/m ³)	16.60	17.17	17.61	18.01	18.25	18.47	18.70
Dry Unit Weight, (kN/m ³)	14.84	15.01	15.08	15.07	14.95	14.78	14.63

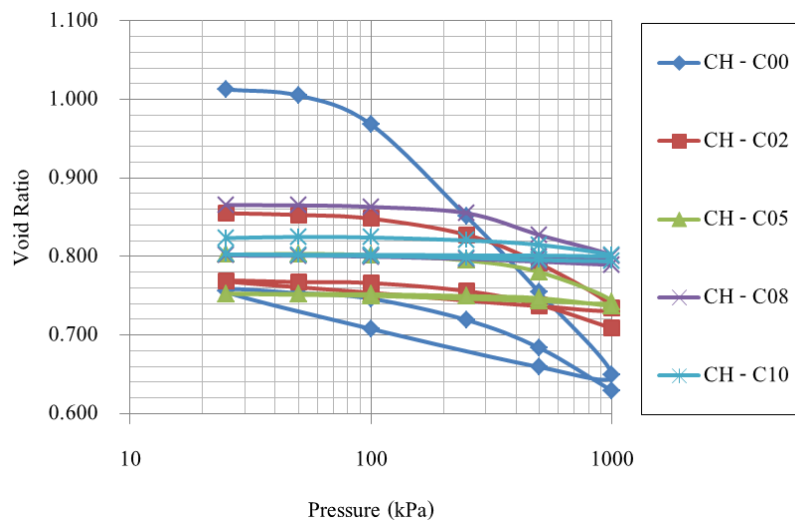
ภาคผนวก ง
ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ



ภาพภาคผนวก ง-1 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 0 วัน

ตารางภาคผนวก ง-1 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 0 วัน

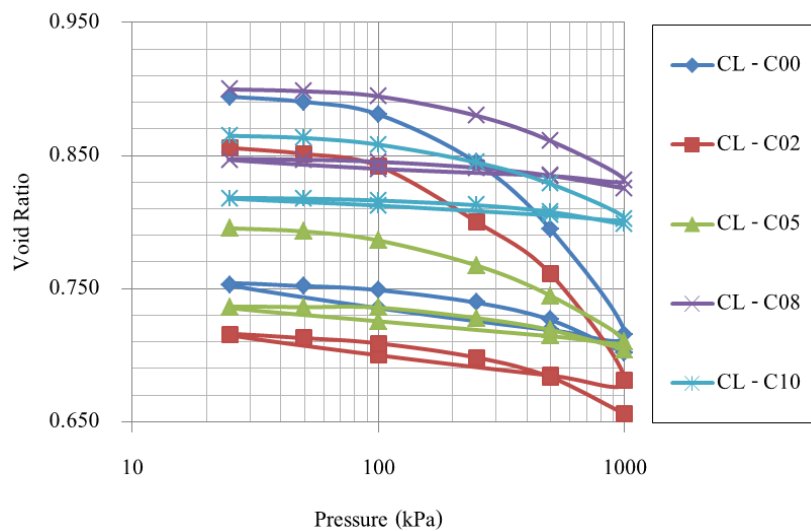
ชื่อ	Initial Void Ratio (e_0)	Swell Rate (%)	k from the Root Time Method (m/s)	k from the Log Time Method (m/s)	Maximum Past Pressure, P'_m (kPa)	Compressibility Index, C_c	Swelling Index, C_s
CL-C00	0.890	0.215	9.0E-09	3.0E-10	210	0.236	0.024
CL-C02	0.676	0.890	3.0E-10	7.0E-11	290	0.091	0.019
CL-C05	0.733	2.110	2.0E-10	3.5E-11	350	0.102	0.006
CL-C08	0.792	1.010	2.0E-10	6.0E-11	310	0.068	0.003
CL-C10	0.835	0.135	2.0E-10	2.0E-10	280	0.068	0.009



ภาพภาคผนวก ง-2 ผลการทดสอบการอัดตัวของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 0 วัน

ตารางภาคผนวก ง-2 ผลการทดสอบการอัดตัวของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 0 วัน

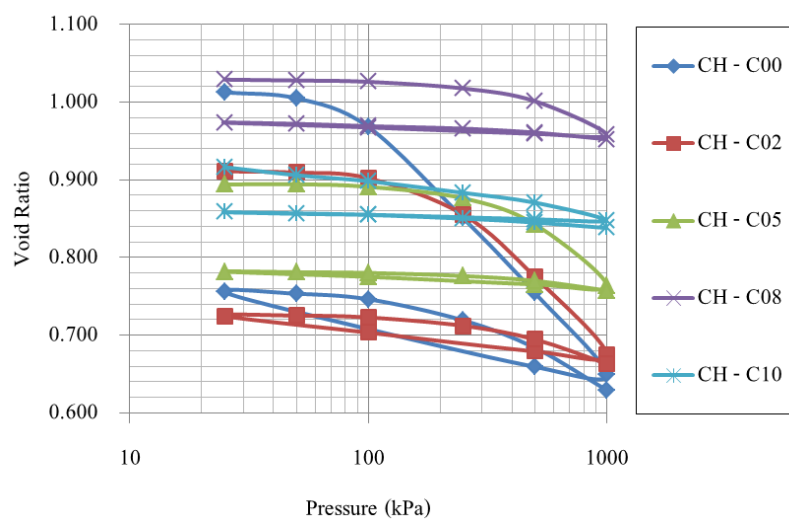
ชื่อ	Initial Void Ratio (e_0)	Swell Rate (%)	k from the Root Time Method (m/s)	k from the Log Time Method (m/s)	Maximum Past Pressure, P'_m (kPa)	Compressibility Index, C_c	Swelling Index, C_s
CH-C00	0.970	2.180	2.0E-10	1.0E-10	100	0.321	0.070
CH-C02	0.837	0.965	4.0E-10	1.0E-10	275	0.140	0.027
CH-C05	0.793	0.535	7.0E-10	2.0E-10	400	0.112	0.037
CH-C08	0.860	0.305	5.5E-10	3.0E-10	265	0.109	0.002
CH-C10	0.817	0.335	5.0E-11	2.0E-11	430	0.040	0.001



ภาพภาคผนวก ง-3 ผลการทดสอบการอัดตัวของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ตารางภาคผนวก ง-3 ผลการทดสอบการอัดตัวของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน

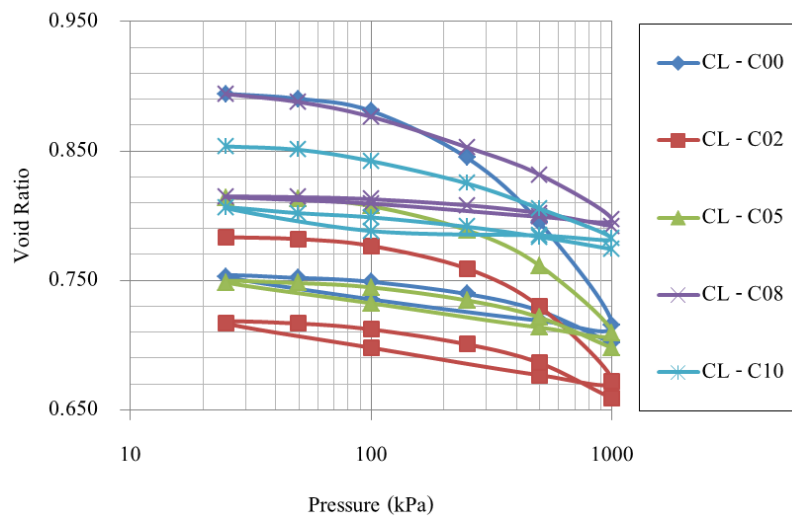
ชื่อ	Initial Void Ratio (e_0)	Swell Rate (%)	k from the Root Time Method (m/s)	k from the Log Time Method (m/s)	Maximum Past Pressure, P'_m (kPa)	Compressibility Index, C_c	Swelling Index, C_s
CL-C00	0.890	0.215	9.0E-09	3.0E-10	210	0.236	0.024
CL-C02	0.869	-0.695	7.0E-10	2.0E-10	340	0.319	0.006
CL-C05	0.800	-0.285	2.0E-10	6.0E-11	290	0.101	0.016
CL-C08	0.907	-0.365	3.0E-10	2.0E-11	285	0.096	0.008
CL-C10	0.869	-0.225	5.0E-11	2.5E-11	310	0.092	0.010



ภาพภาคผนวก ง-4 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ตารางภาคผนวก ง-4 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 7 วัน

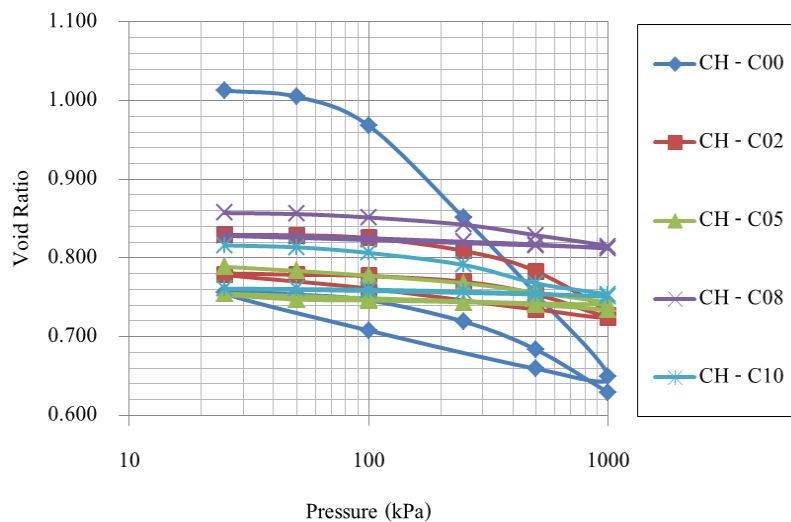
ชื่อ	Initial Void Ratio (e_0)	Swell Rate (%)	k from the Root Time Method (m/s)	k from the Log Time Method (m/s)	Maximum Past Pressure, P'_m (kPa)	Compressibility Index, C_c	Swelling Index, C_s
CH-C00	0.970	2.180	2.0E-10	1.0E-10	100	0.321	0.070
CH-C02	0.899	0.650	2.0E-09	5.0E-10	250	0.224	0.035
CH-C05	0.895	- 0.025	8.0E-10	5.0E-10	420	0.275	0.017
CH-C08	1.023	0.280	5.5E-10	2.0E-10	480	0.156	0.012
CH-C10	0.920	- 0.190	2.0E-10	9.0E-11	410	0.108	0.008



ภาพภาคผนวก ง-5 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตารางภาคผนวก ง-5 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ชื่อ	Initial Void Ratio (e_0)	Swell Rate (%)	k from the Root Time Method (m/s)	k from the Log Time Method (m/s)	Maximum Past Pressure, P'_m (kPa)	Compressibility Index, C_c	Swelling Index, C_s
CL-C00	0.890	0.215	9.0E-09	3.0E-10	210	0.236	0.024
CL-C02	0.784	-0.015	4.0E-10	2.0E-11	390	0.183	0.028
CL-C05	0.818	-0.195	6.0E-10	6.0E-11	400	0.183	0.023
CL-C08	0.907	-0.670	5.0E-10	7.0E-11	320	0.138	0.013
CL-C10	0.849	-0.260	2.0E-10	3.5E-11	250	0.068	0.005



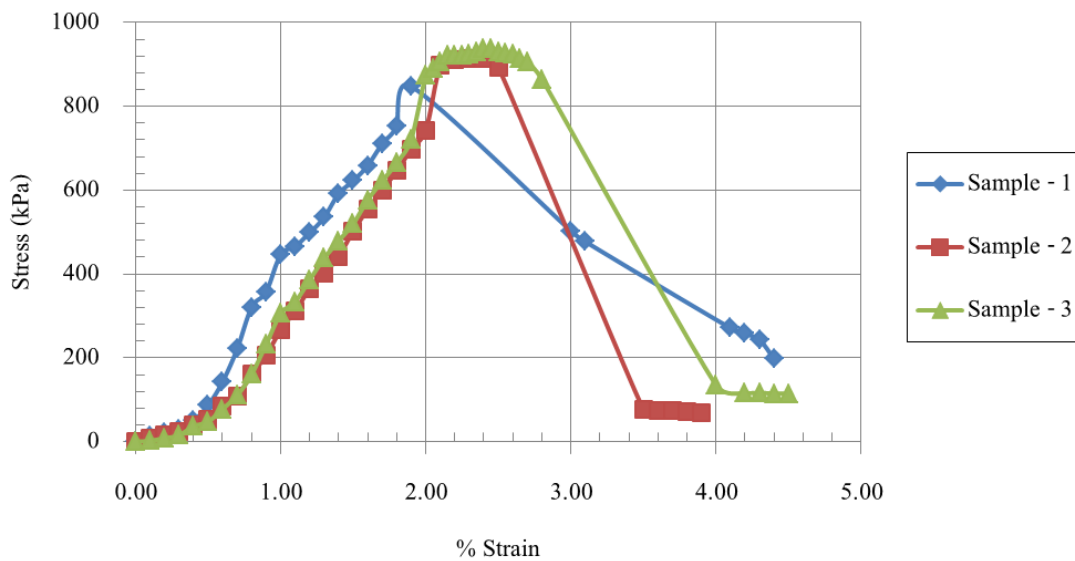
ภาพภาคผนวก ง-6 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตารางภาคผนวก ง-6 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ชื่อ	Initial Void Ratio (e_0)	Swell Rate (%)	k from the Root Time Method (m/s)	k from the Log Time Method (m/s)	Maximum Past Pressure, P'_m (kPa)	Compressibility Index, C_c	Swelling Index, C_s
CH-C00	0.970	2.180	2.0E-10	1.0E-10	100	0.321	0.070
CH-C02	0.823	0.350	6.0E-10	2.0E-10	305	0.158	0.038
CH-C05	0.802	0.720	3.0E-10	1.5E-10	210	0.041	0.009
CH-C08	0.879	1.180	2.0E-10	7.0E-11	210	0.047	0.010
CH-C10	0.839	1.250	9.0E-11	1.0E-10	210	0.091	0.006

ภาคผนวก จ

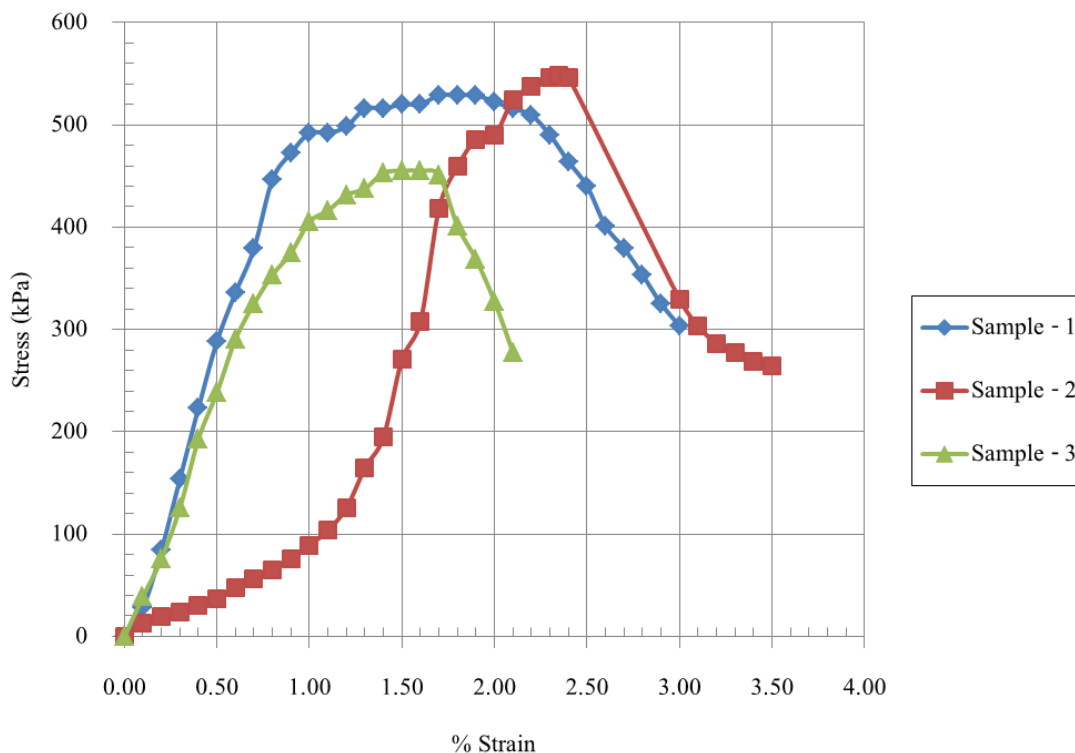
ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL



ภาพภาคผนวก จ-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-1 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

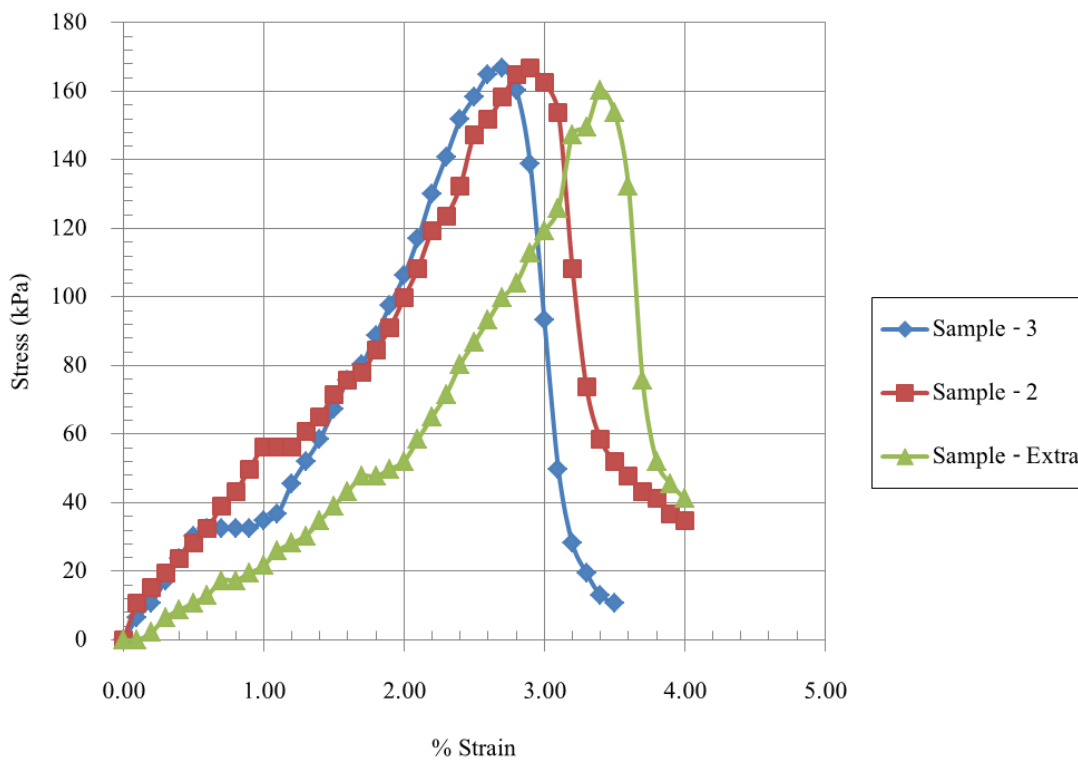
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	847.64	912.68	938.69	899.67
Undrain Shear Strength (kPa)	423.82	456.34	469.35	449.84
% Strain at Failure	1.90	2.40	2.45	2.25



ภาพภาคผนวก จ-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-2 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

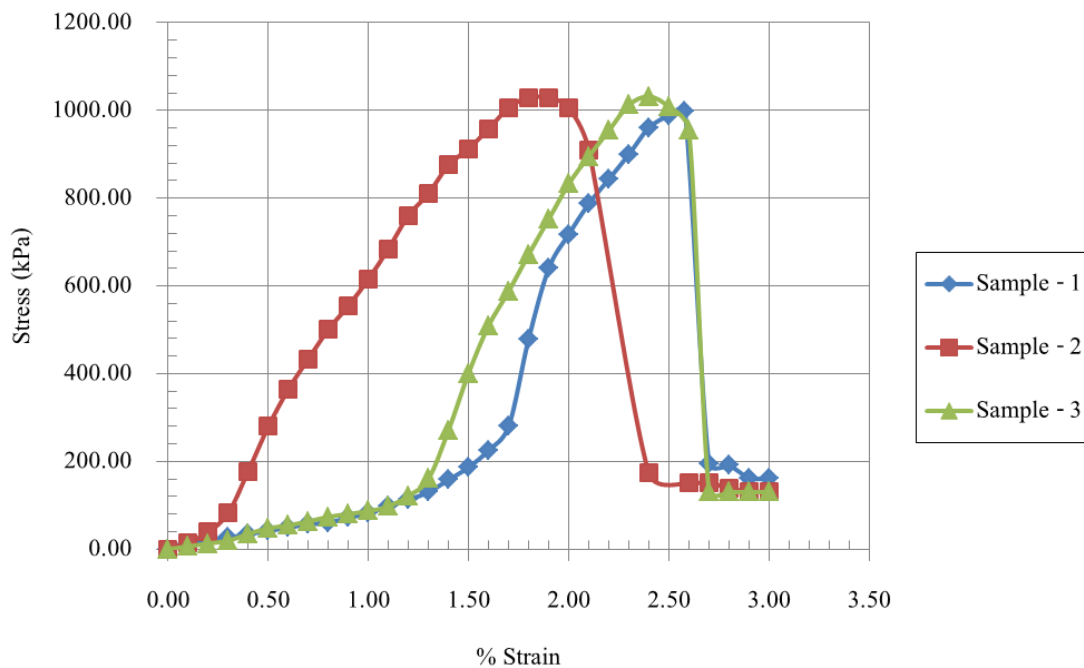
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	528.96	548.47	455.26	510.90
Undrain Shear Strength (kPa)	264.48	274.24	227.63	255.45
% Strain at Failure	1.90	2.35	1.60	1.95



ภาพภาคผนวก จ-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 0 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-3 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 0 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

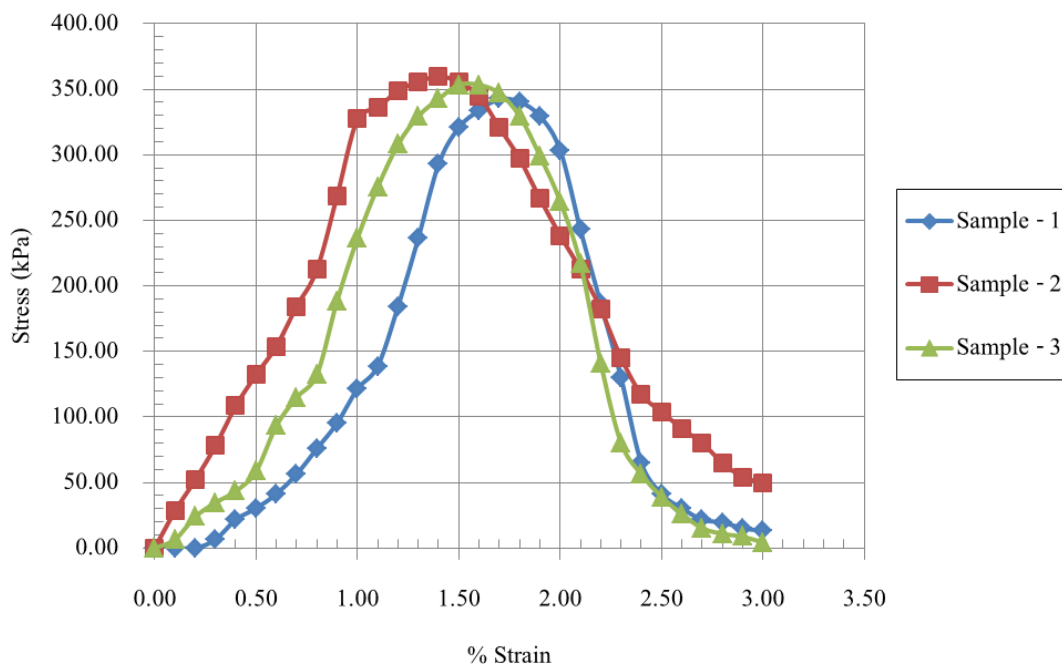
	Sample-3	Sample-2	Sample -Extra	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	166.93	166.93	160.42	164.76
Undrain Shear Stregth (kPa)	83.46	83.46	80.21	82.38
% Strain at Failure	2.70	2.90	3.40	3.00



ภาพภาคผนวก จ-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-4 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

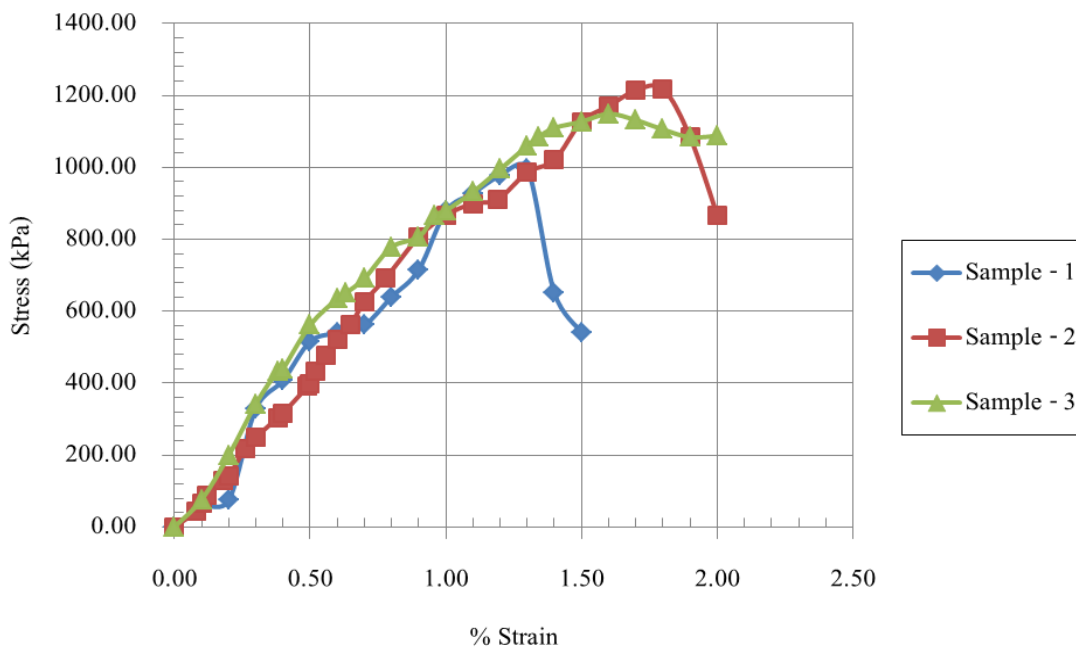
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	999.39	1029.74	1031.91	1020.35
Undrain Shear Stregth (kPa)	499.70	514.87	515.96	510.18
% Strain at Failure	2.58	1.80	2.40	2.26



ภาพภาคผนวก จ-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-5 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

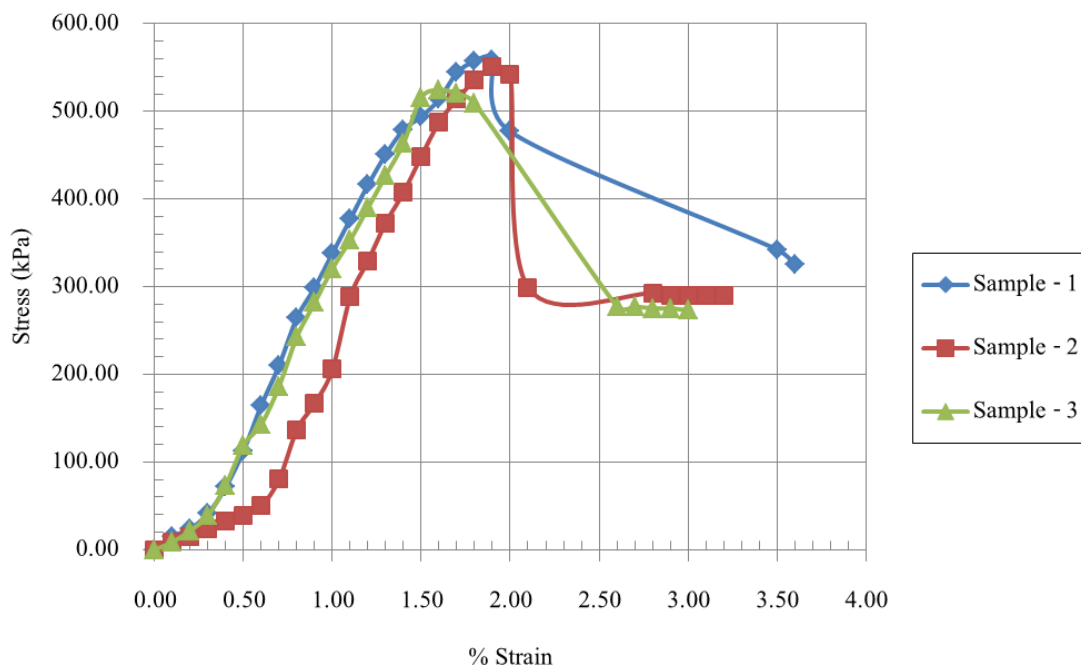
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	342.53	359.87	353.37	351.92
Undrain Shear Stregth (kPa)	171.26	179.93	176.68	175.96
% Strain at Failure	1.70	1.40	1.60	1.57



ภาพภาคผนวก จ-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-6 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

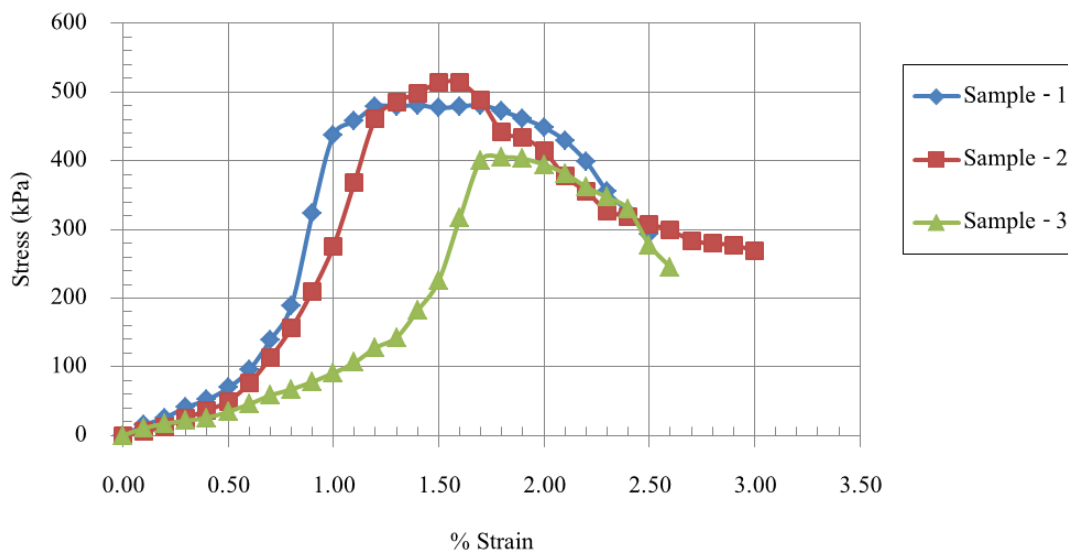
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	997.23	1218.35	1148.98	1121.52
Undrain Shear Stregth (kPa)	498.61	609.18	574.49	560.76
% Strain at Failure	1.30	1.80	1.60	1.57



ภาพภาคผนวก จ-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-7 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

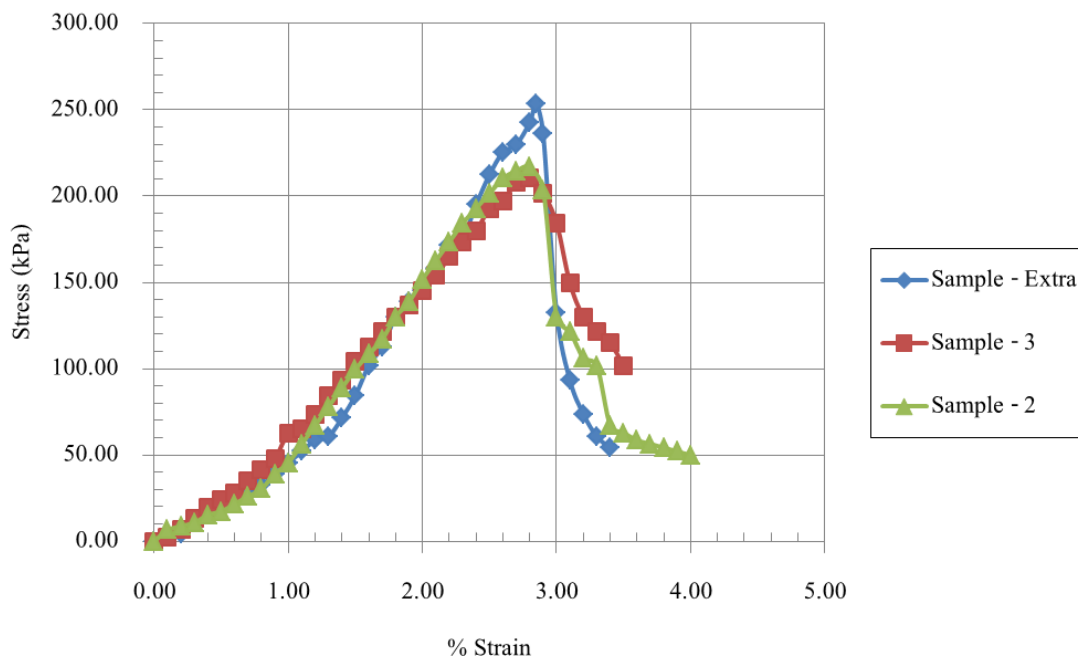
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	559.31	550.64	524.63	544.86
Undrain Shear Strength (kPa)	279.66	275.32	262.31	272.43
% Strain at Failure	1.40	1.50	1.60	1.50



ภาพภาคผนวก จ-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-8 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

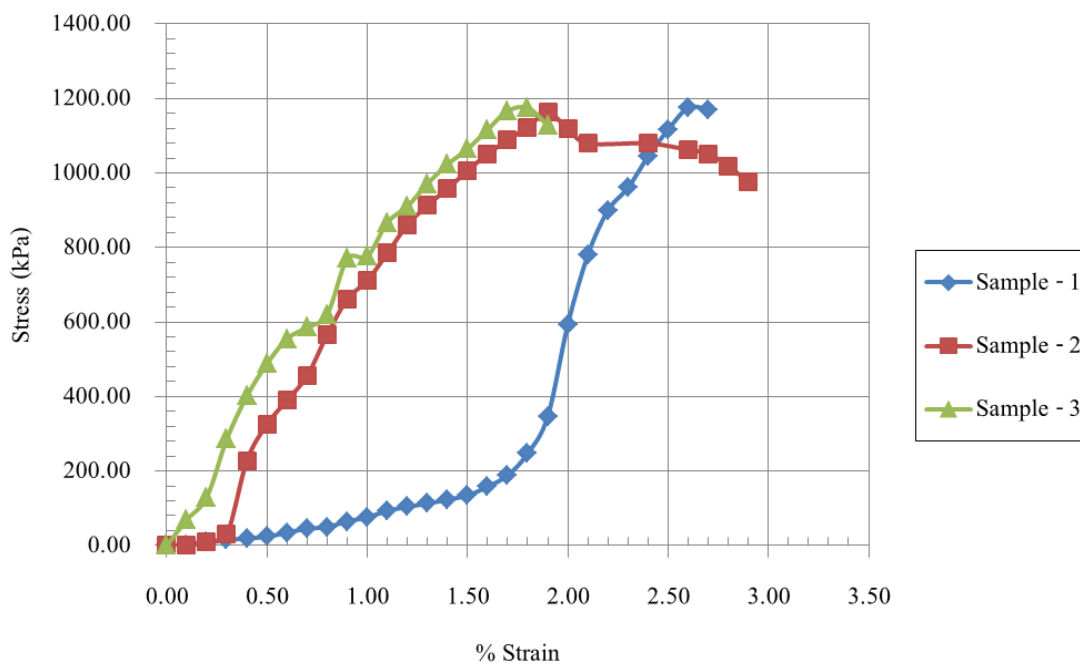
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	481.27	513.79	405.39	466.82
Undrain Shear Strength (kPa)	240.64	256.89	202.70	233.41
% Strain at Failure	1.40	1.60	1.80	1.60



ภาพภาคผนวก จ-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
5% อายุการบ่ม 0 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-9 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
5% อายุการบ่ม 0 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

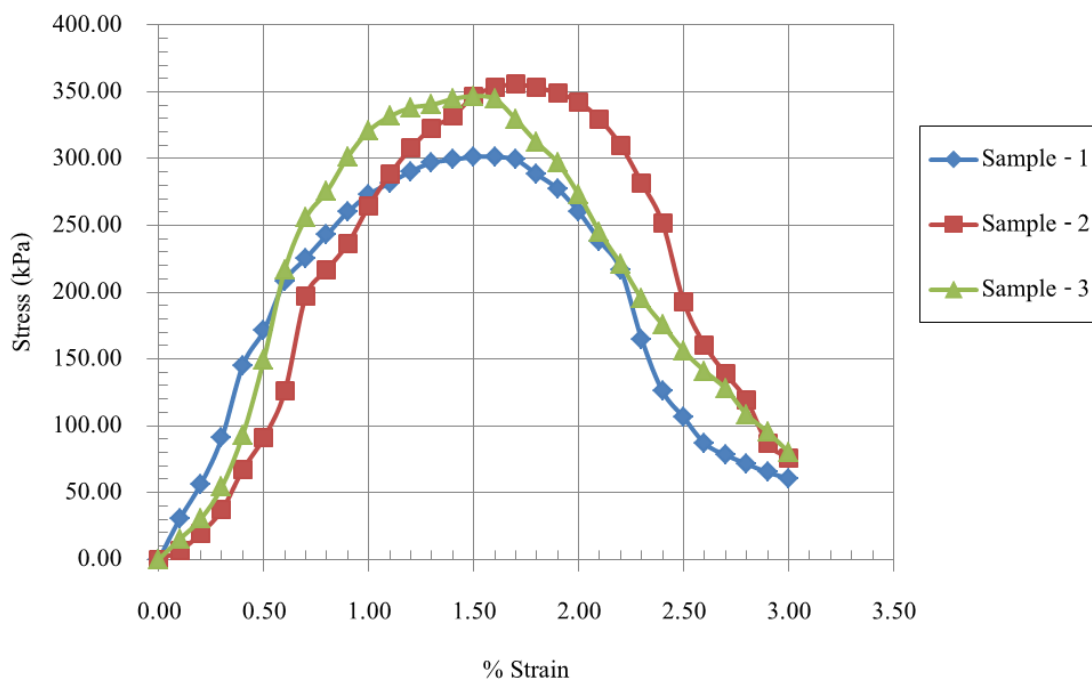
	Sample-Extra	Sample-3	Sample-2	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	253.64	210.28	216.79	226.91
Undrain Shear Stregth (kPa)	126.82	105.14	108.39	113.45
% Strain at Failure	2.85	2.80	2.80	2.82



ภาพภาคผนวก จ-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-10 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

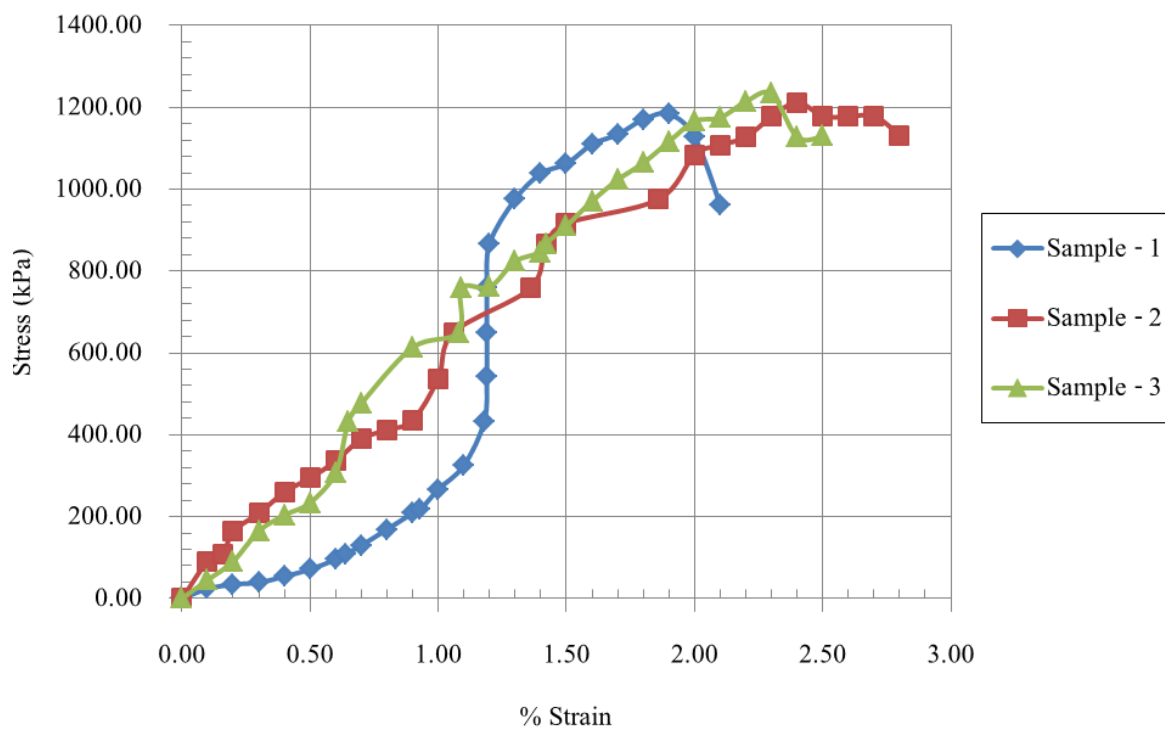
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	1174.99	1161.99	1174.99	1170.66
Undrain Shear Strength (kPa)	587.50	580.99	587.50	585.33
% Strain at Failure	2.60	1.90	1.80	2.10



ภาพภาคผนวก จ-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-11 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

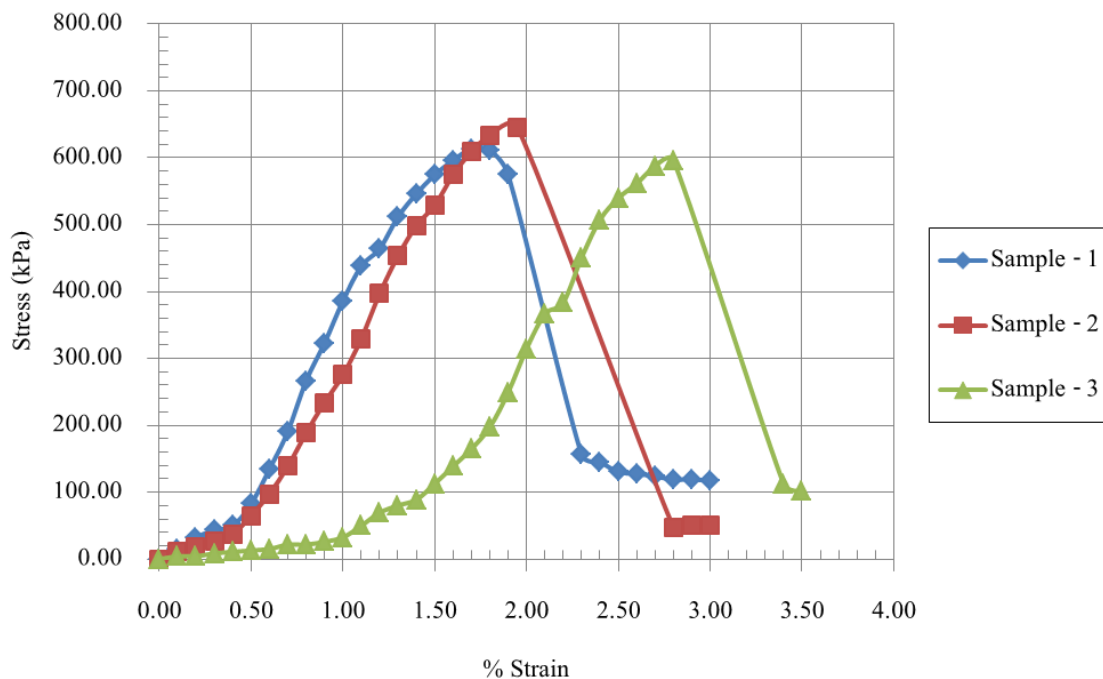
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	301.34	355.53	346.86	334.58
Undrain Shear Strength (kPa)	150.67	177.77	173.43	167.29
% Strain at Failure	1.60	1.70	1.50	1.60



ภาพภาคผนวก จ-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-12 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

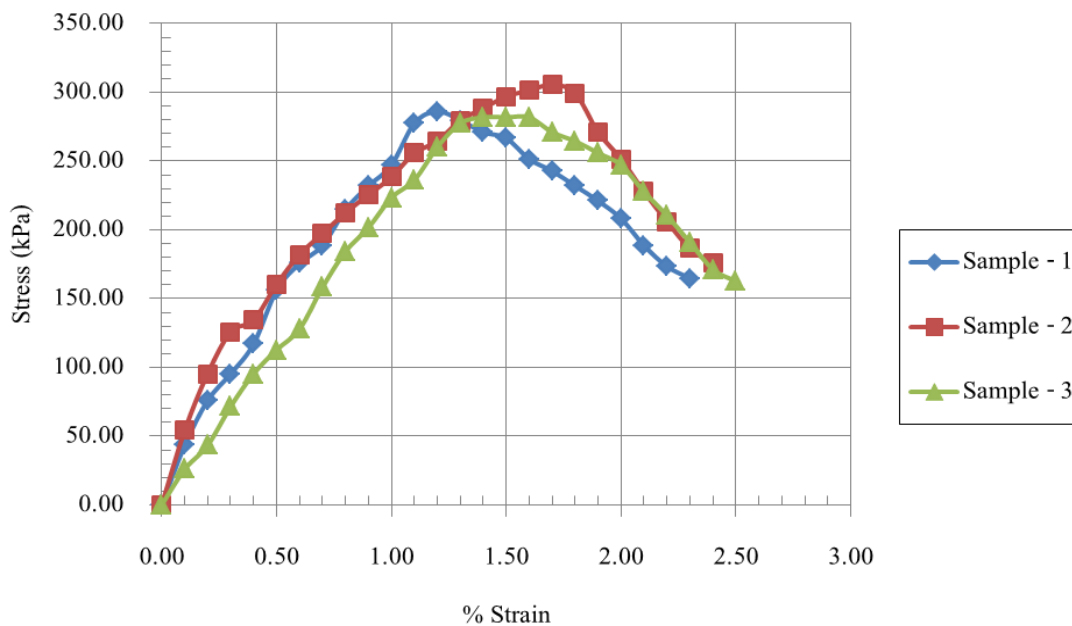
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	1183.66	1211.85	1233.53	1209.68
Undrain Shear Strength (kPa)	591.83	605.92	616.76	604.84
% Strain at Failure	1.90	2.40	2.30	2.20



ภาพภาคผนวก จ-13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-13 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

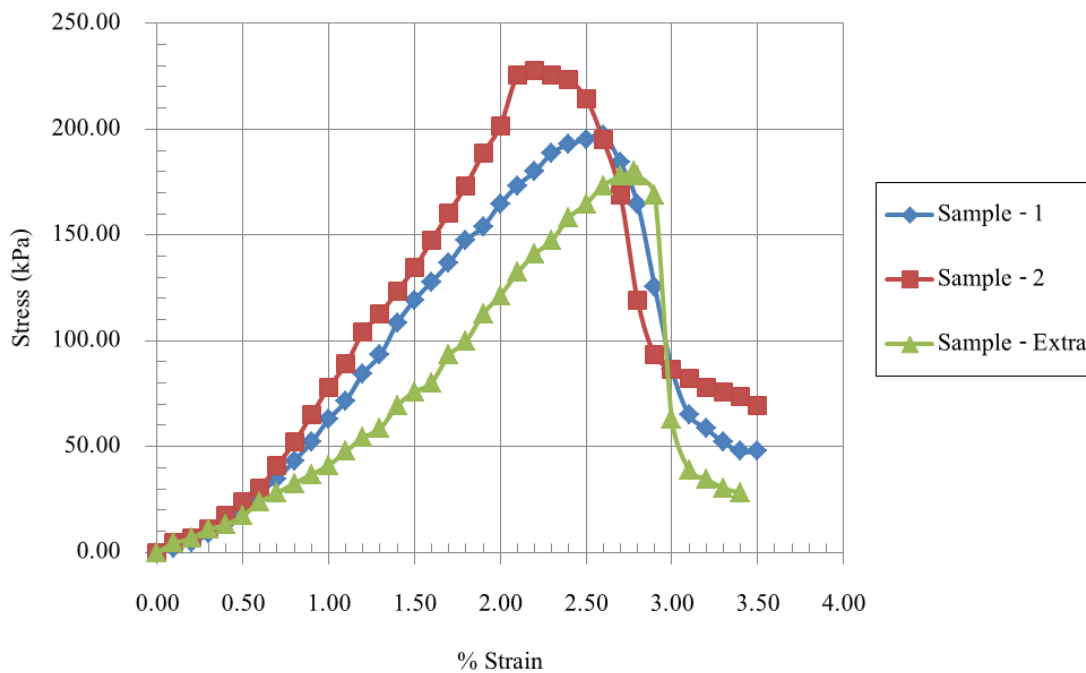
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	613.51	646.03	596.17	618.57
Undrain Shear Stregth (kPa)	306.76	323.01	298.08	309.28
% Strain at Failure	1.30	1.20	1.30	1.27



ภาพภาคผนวก จ-14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-14 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

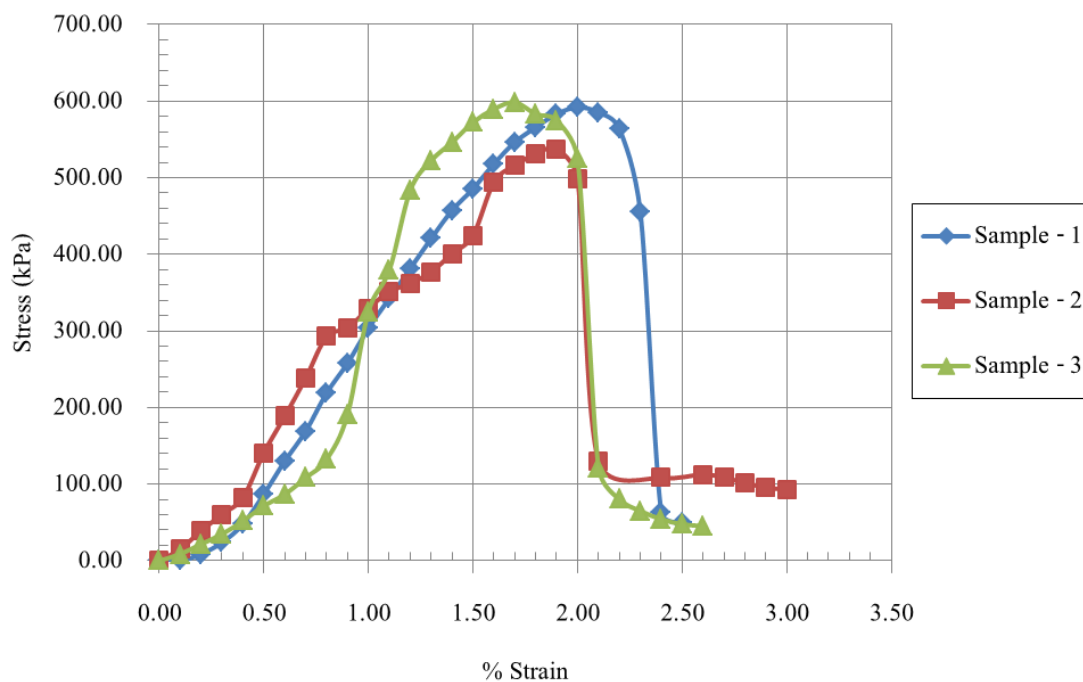
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	286.16	305.67	281.82	291.22
Undrain Shear Stregth (kPa)	143.08	152.84	140.91	145.61
% Strain at Failure	1.20	1.70	1.60	1.50



ภาพภาคผนวก จ-15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 0 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-15 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 0 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

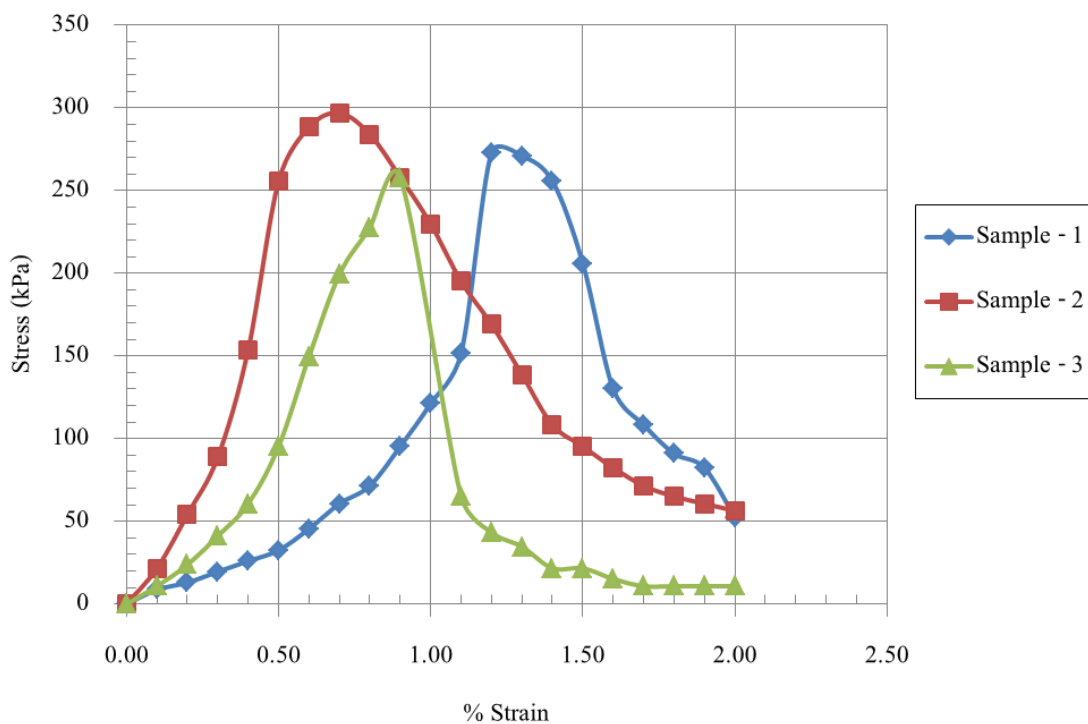
	Sample -1	Sample -2	Sample-Extra	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	197.28	227.63	179.93	201.61
Undrain Shear Stregth (kPa)	98.64	113.81	89.97	100.81
% Strain at Failure	2.60	2.20	2.78	2.53



ภาพภาคผนวก จ-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-16 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

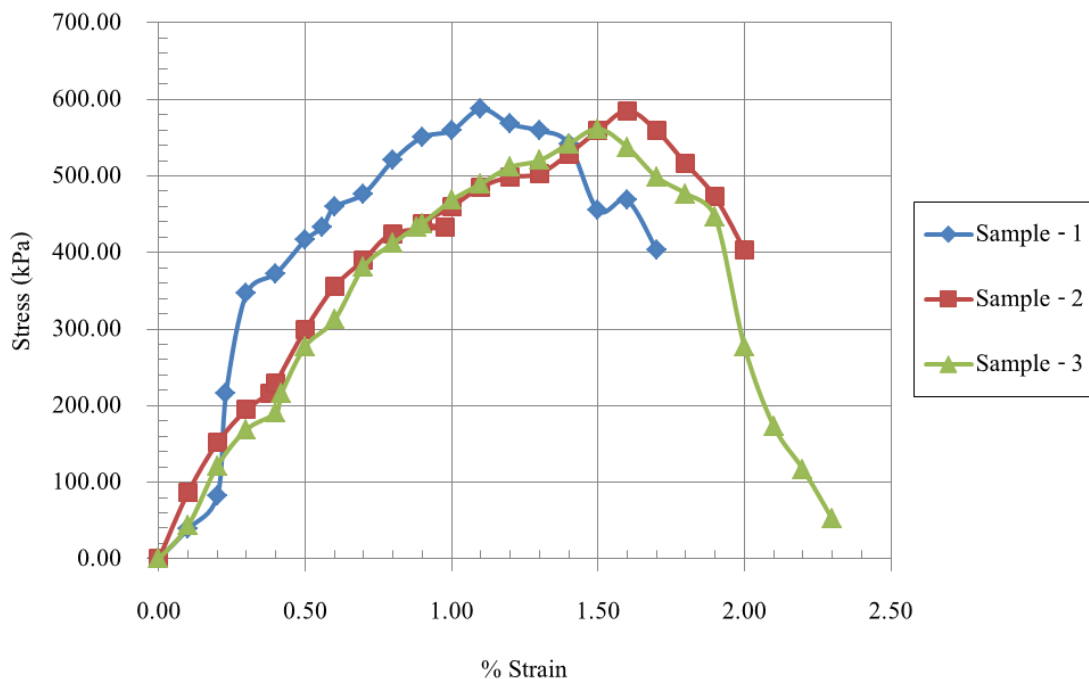
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	591.83	537.64	598.34	575.94
Undrain Shear Strength (kPa)	295.92	268.82	299.17	287.97
% Strain at Failure	2.00	1.90	1.70	1.87



ภาพภาคผนวก จ-17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-17 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

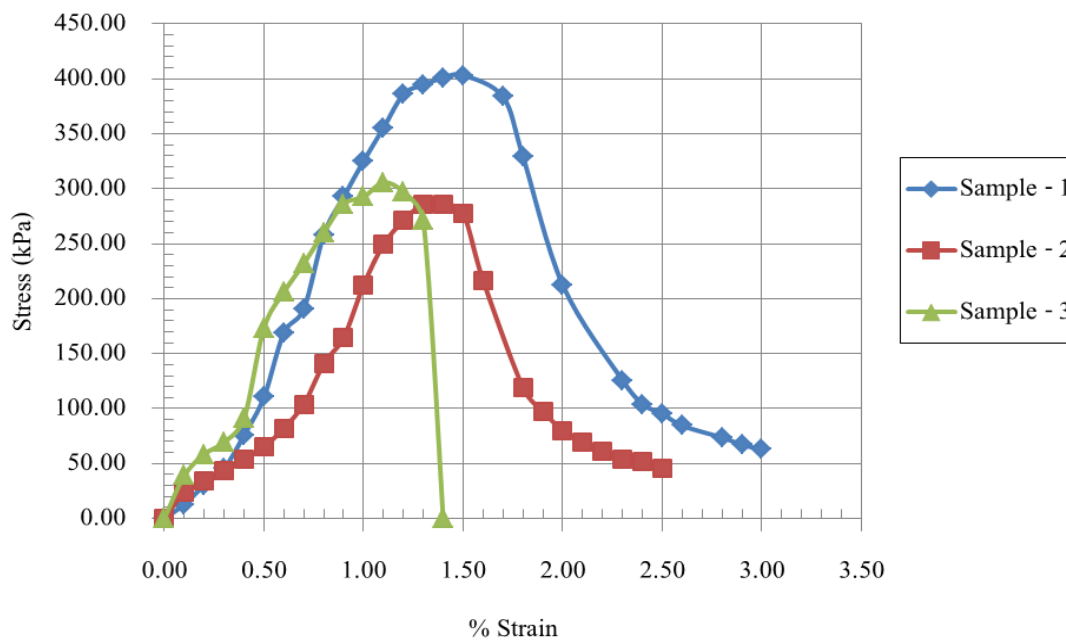
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	273.15	297.00	257.98	276.04
Undrain Shear Strength (kPa)	136.58	148.50	128.99	138.02
% Strain at Failure	1.20	0.70	0.90	0.93



ภาพภาคผนวก จ-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-18 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

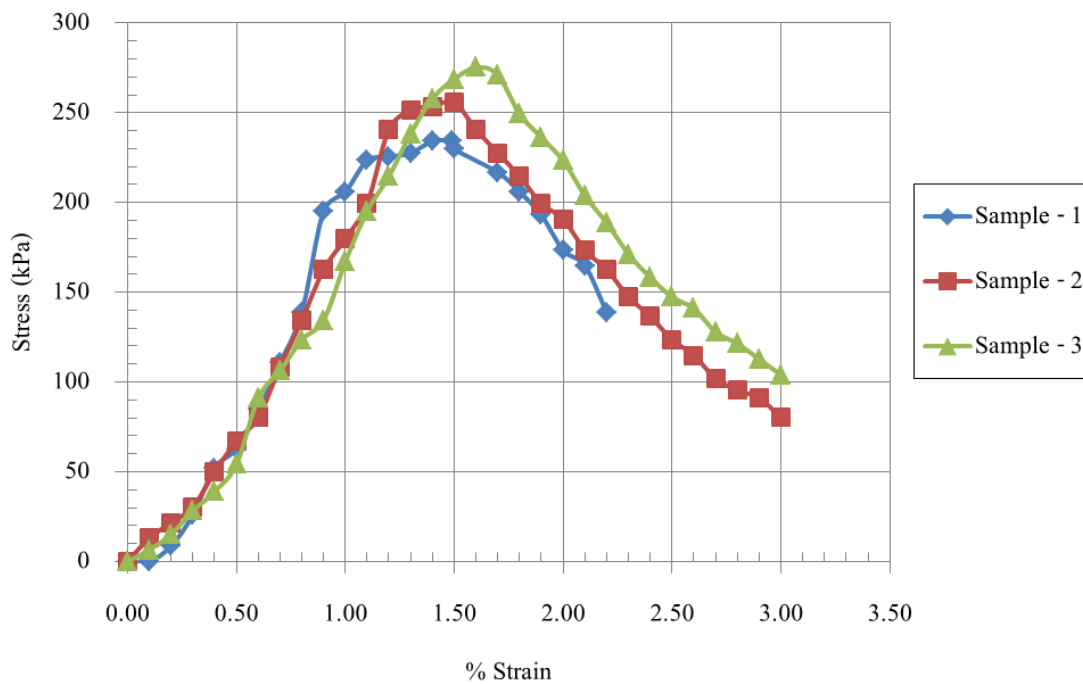
	Sample -1	Sample -2	Sample -3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	587.50	585.33	561.48	578.10
Undrain Shear Strength (kPa)	293.75	292.66	280.74	289.05
% Strain at Failure	1.10	1.60	1.50	1.40



ภาพภาคผนวก จ-19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-19 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

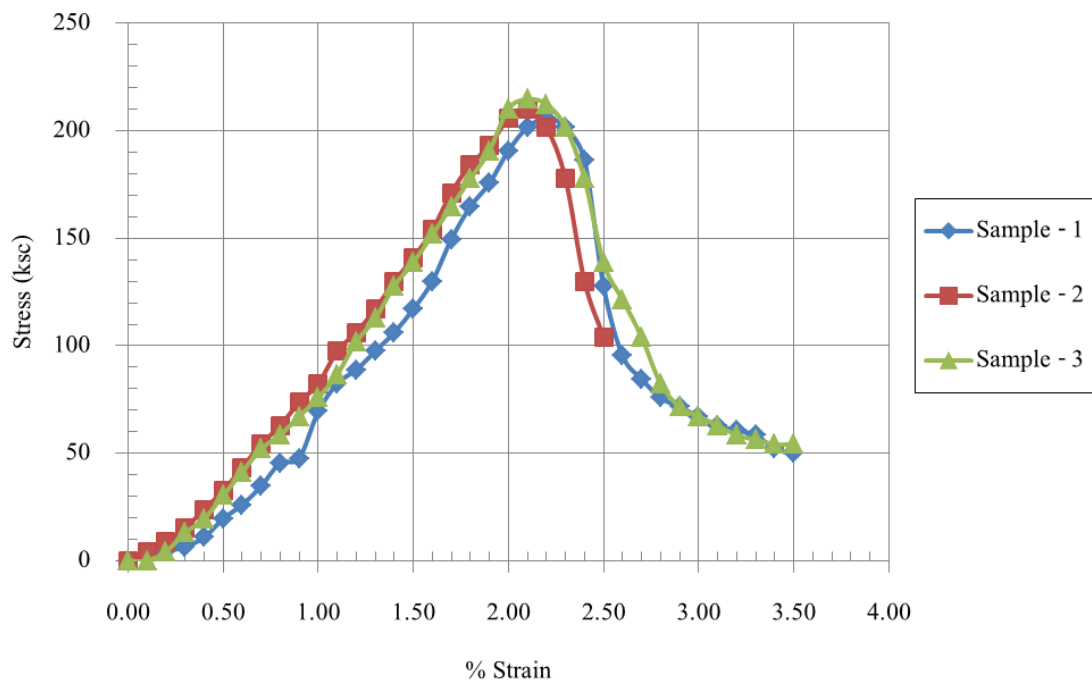
	Sample -1	Sample -2	Sample -3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	403.23	286.16	305.67	331.69
Undrain Shear Strength (kPa)	201.61	143.08	152.84	165.84
% Strain at Failure	1.30	1.30	1.00	1.20



ภาพภาคผนวก จ-20 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
10% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-20 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
10% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

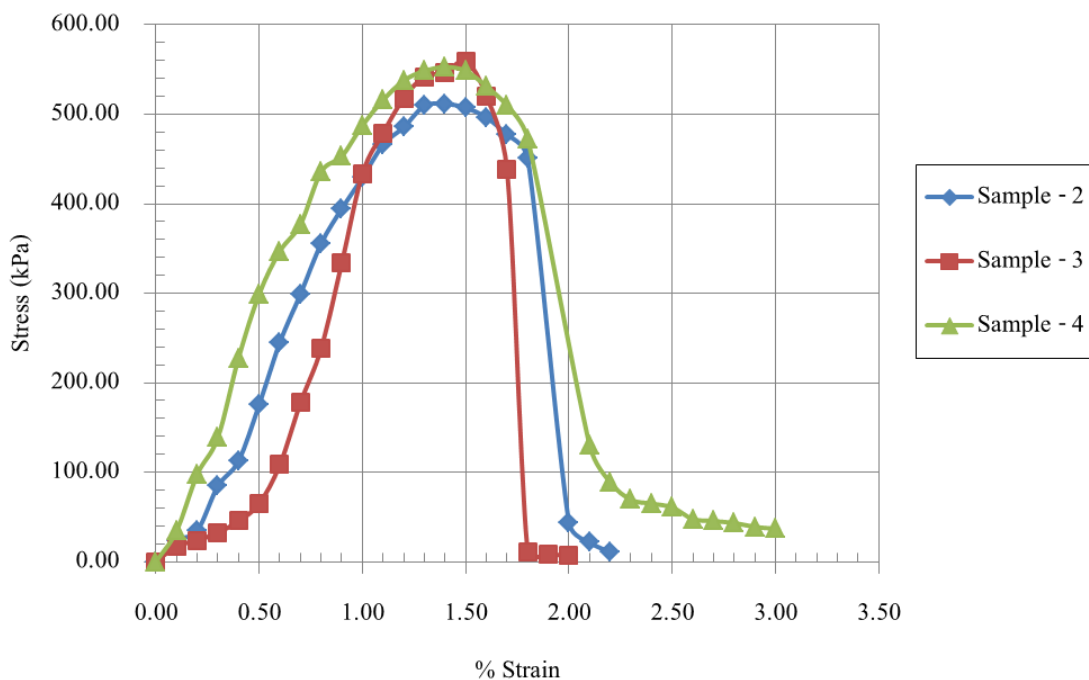
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	234.13	255.81	275.32	255.09
Undrain Shear Strength (kPa)	117.07	127.91	137.66	127.54
% Strain at Failure	1.49	1.50	1.60	1.53



ภาพภาคผนวก จ-21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
10% อายุการบ่ม 0 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-21 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
10% อายุการบ่ม 0 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

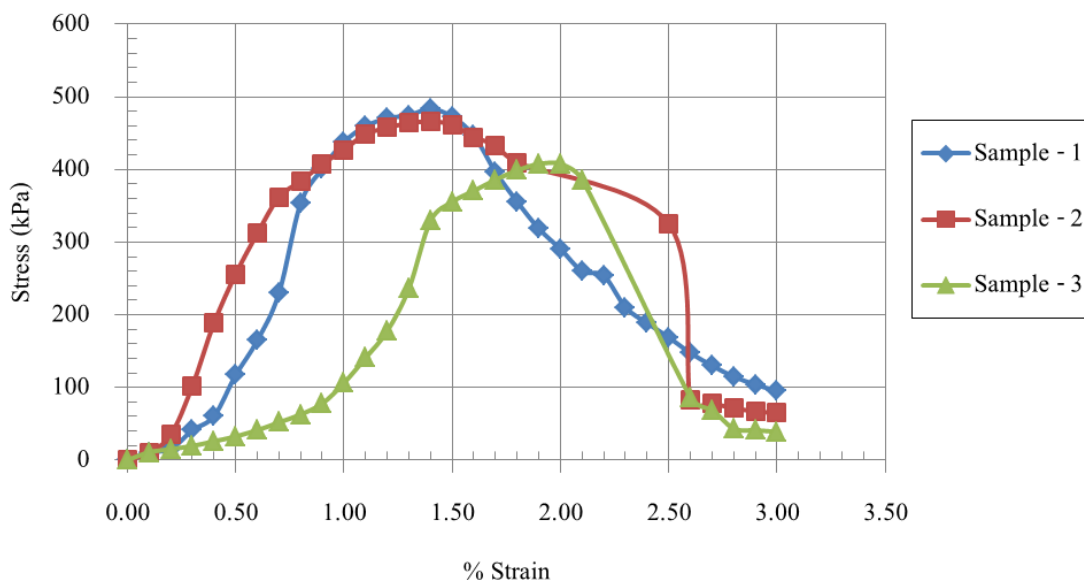
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	205.95	210.28	214.62	210.28
Undrain Shear Stregth (kPa)	102.97	105.14	107.31	105.14
% Strain at Failure	2.20	2.10	2.10	2.13



ภาพภาคผนวก จ-22 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-22 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

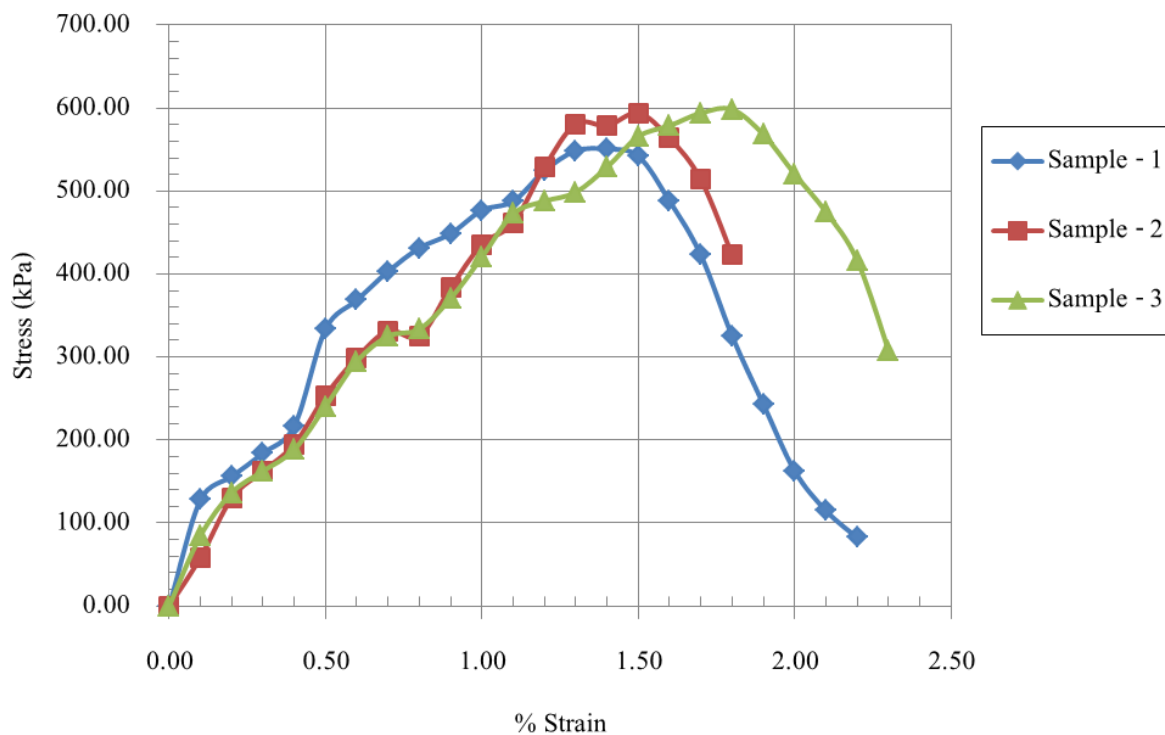
	Sample-2	Sample-3	Sample-4	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	511.62	559.31	552.81	541.25
Undrain Shear Strength (kPa)	255.81	279.66	276.41	270.62
% Strain at Failure	1.40	1.50	1.40	1.43



ภาพภาคผนวก จ-23 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
10% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-23 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
10% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

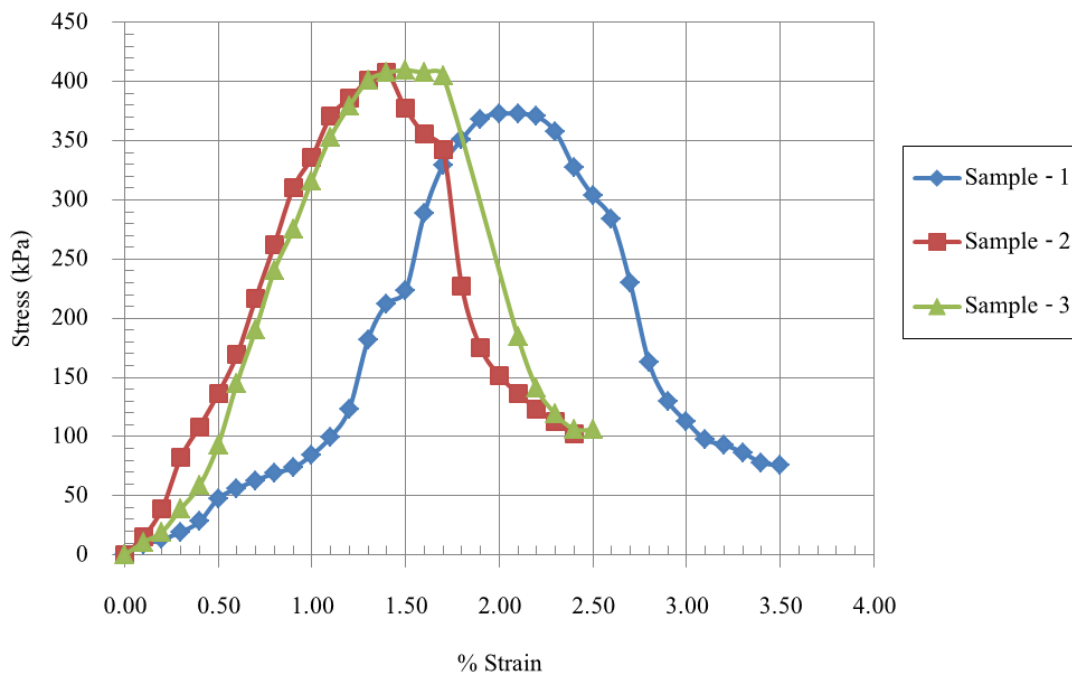
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	483.44	466.10	407.56	452.36
Undrain Shear Strength (kPa)	241.72	233.05	203.78	226.18
% Strain at Failure	1.40	1.40	2.00	1.60



ภาพภาคผนวก จ-24 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-24 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

	Sample -1	Sample -2	Sample -3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	550.64	594.00	598.34	580.99
Undrain Shear Strength (kPa)	275.32	297.00	299.17	290.50
% Strain at Failure	1.40	1.50	1.80	1.567



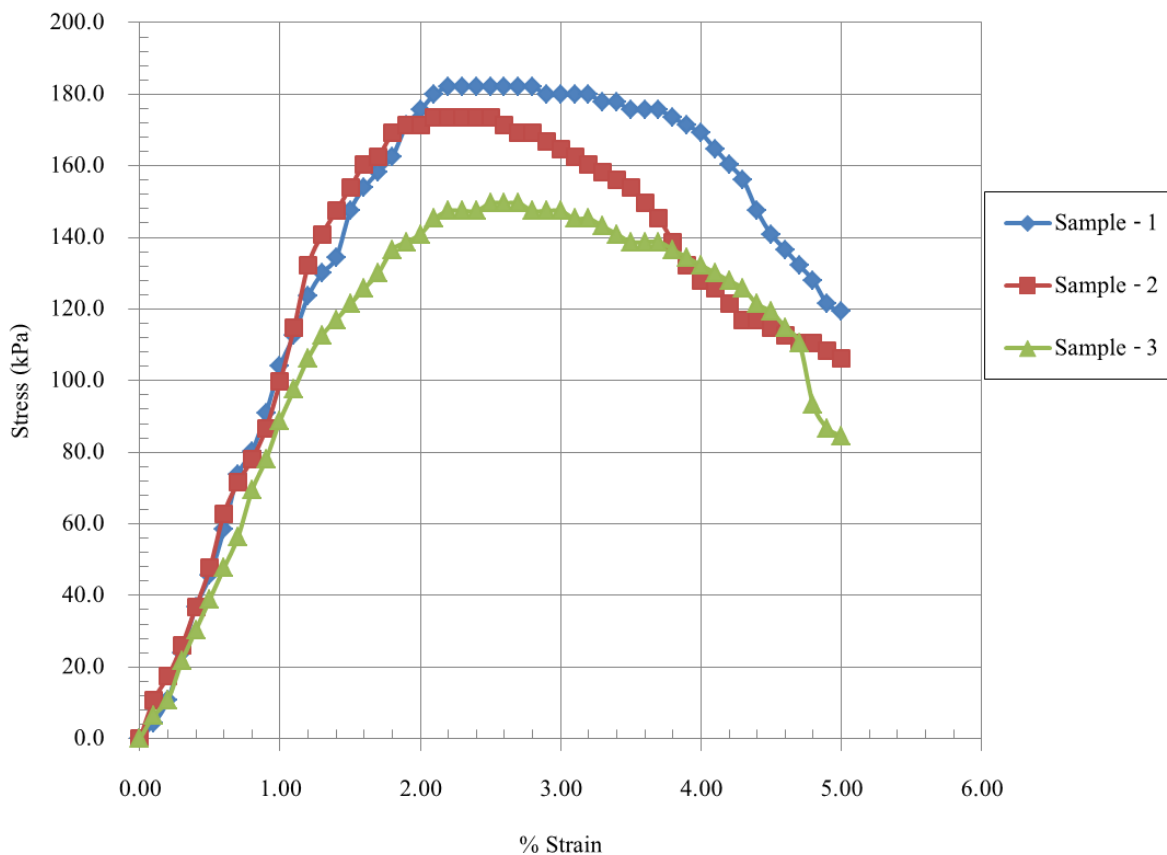
ภาพภาคผนวก จ-25 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
10% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-25 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์
10% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

	Sample -1	Sample -2	Sample -3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	372.88	407.56	409.73	396.72
Undrain Shear Stregh (kPa)	186.44	203.78	204.87	198.36
% Strain at Failure	2.10	1.40	1.50	1.67

ภาคผนวก จ

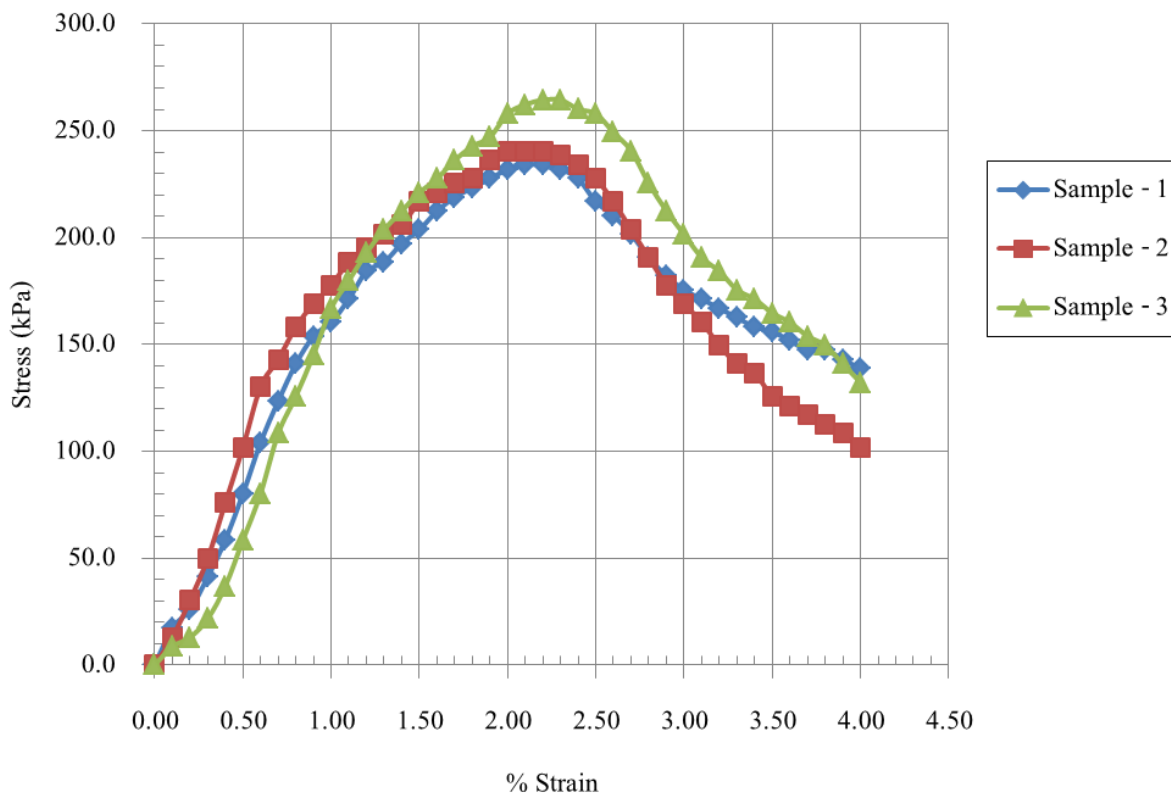
ผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH



ภาพภาคผนวก ฉ-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก ฉ-1 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ที่ไม่ได้ผสมปูนซีเมนต์แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

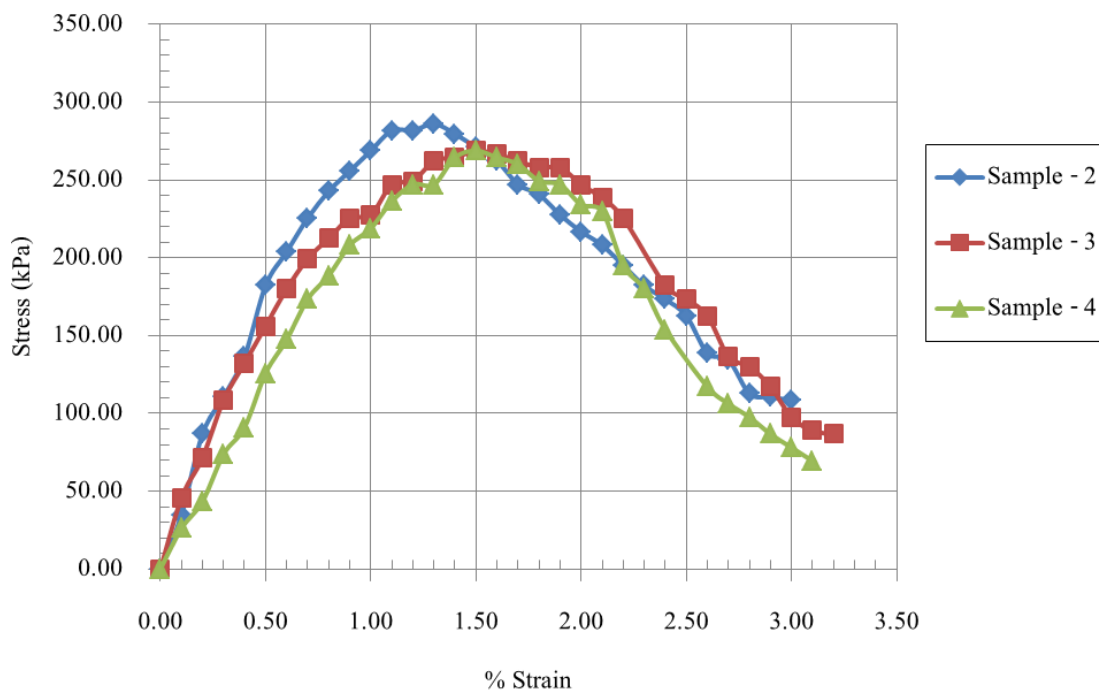
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	182.10	173.43	149.58	168.37
Undrain Shear Strength (kPa)	91.05	86.72	74.79	84.18
% Strain at Failure	2.80	2.50	2.60	2.63



ภาพภาคผนวก จ-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-2 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

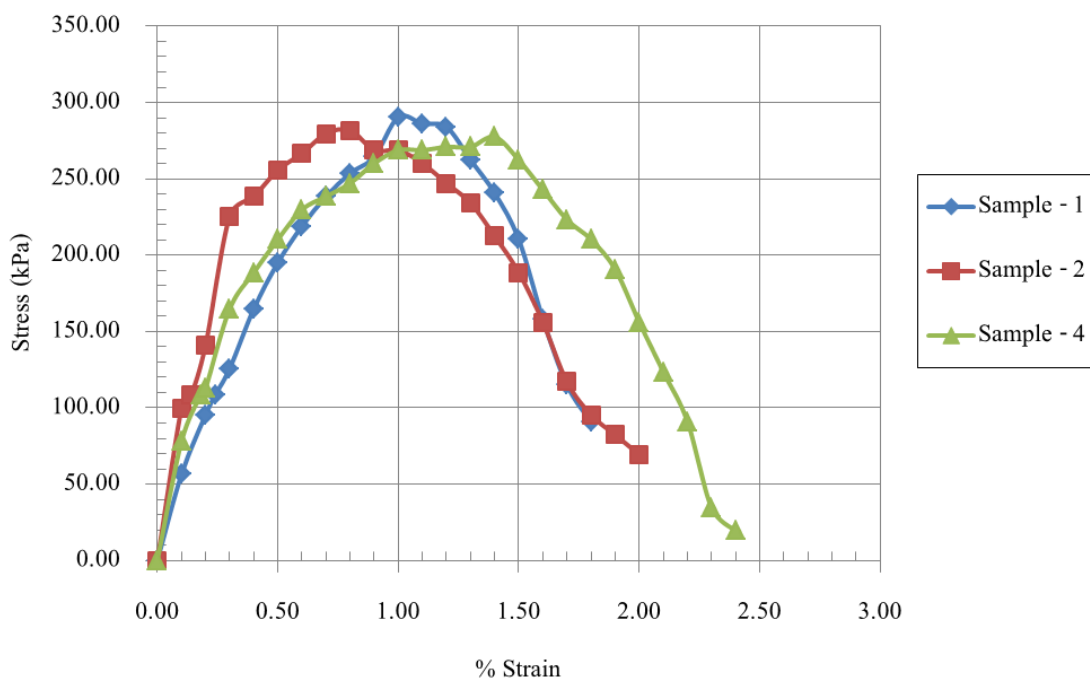
	Sample-1	Sample-2	Sample 3	Average
Unconfined Compressive Strength (ksc)	2.39	2.45	2.70	2.513
Undrain Shear Strength (ksc)	1.19	1.23	1.35	1.256
Unconfined Compressive Strength (kPa)	234.13	240.64	264.48	246.42
Undrain Shear Strength (kPa)	117.07	120.32	132.24	123.21
% Strain at Failure	2.20	2.20	2.20	2.20



ภาพภาคผนวก ฉ-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก ฉ-3 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์
2% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

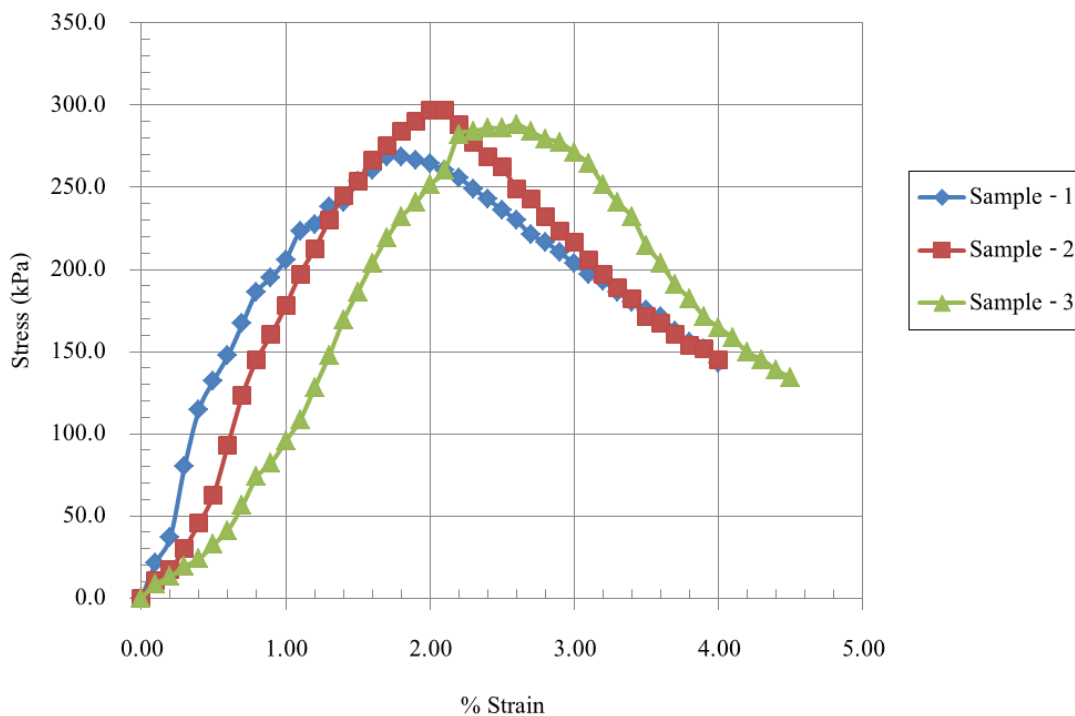
	Sample -1	Sample -3	Sample-4	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	286.16	268.82	268.82	274.60
Undrain Shear Stregth (kPa)	143.08	134.41	134.41	137.30
% Strain at Failure	1.30	1.50	1.50	1.43



ภาพภาคผนวก จ-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 2% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-4 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 2% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

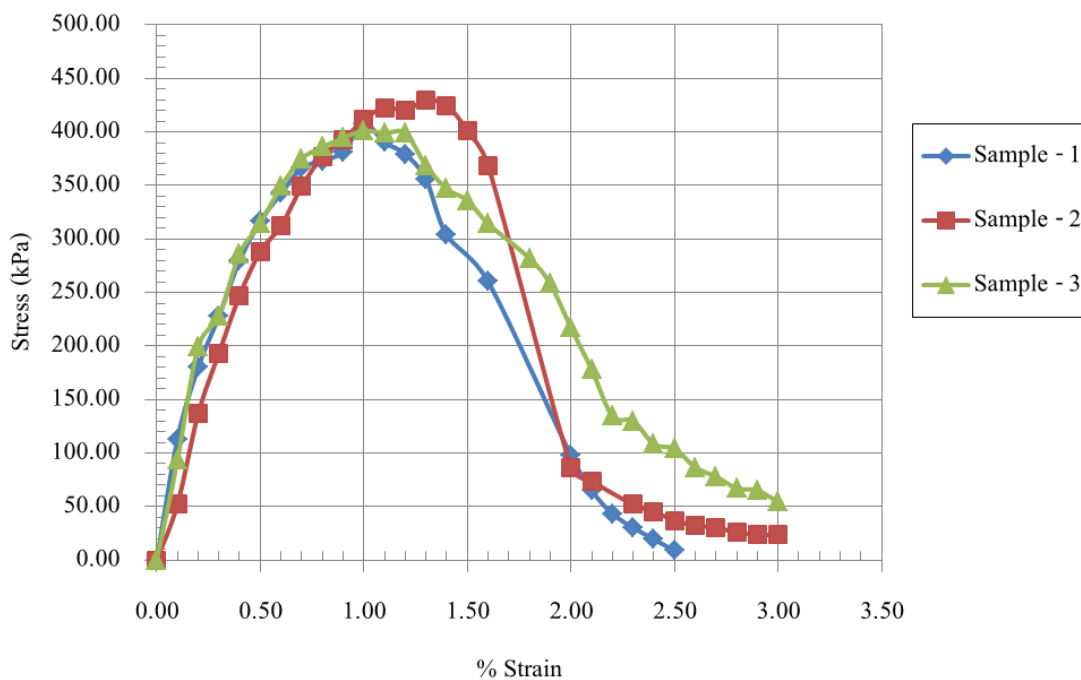
	Sample -1	Sample -2	Sample-4	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	290.50	281.82	277.49	283.27
Undrain Shear Strength (kPa)	145.25	140.91	138.74	141.64
% Strain at Failure	1.00	0.80	1.40	1.067



ภาพภาคผนวก จ-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-5 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

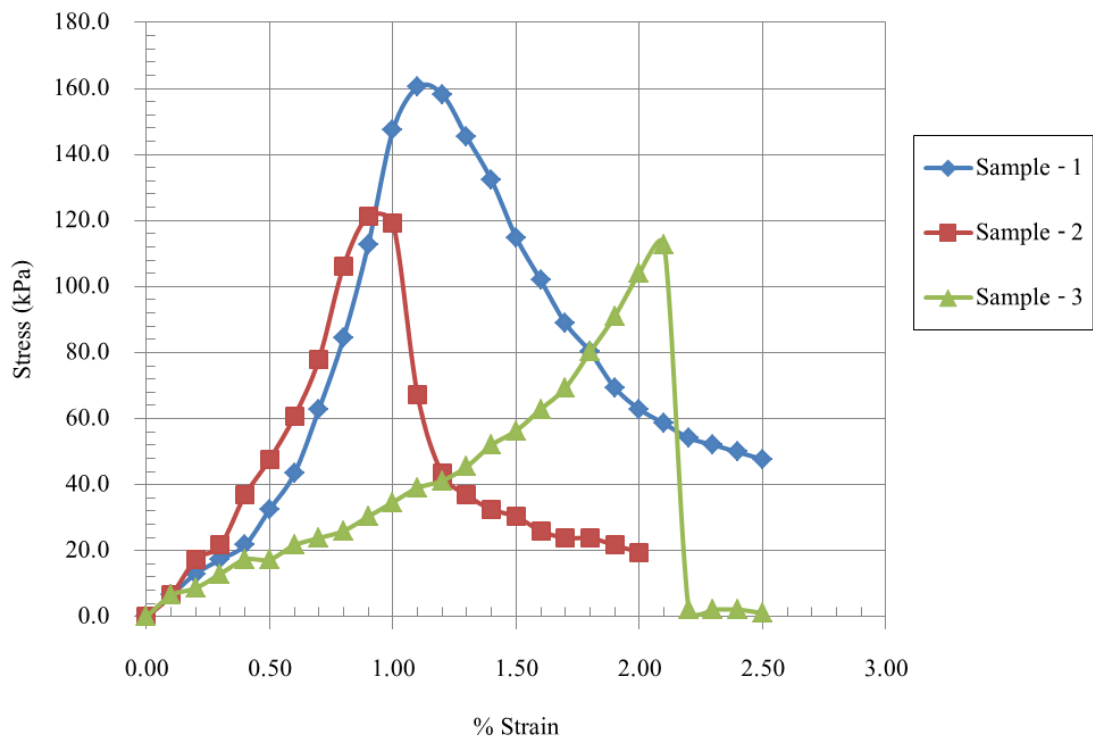
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	268.82	297.00	288.33	284.72
Undrain Shear Stregth (kPa)	134.41	148.50	144.16	142.36
% Strain at Failure	1.70	2.10	2.60	2.13



ภาพภาคผนวก ฉ-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก ฉ-6 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

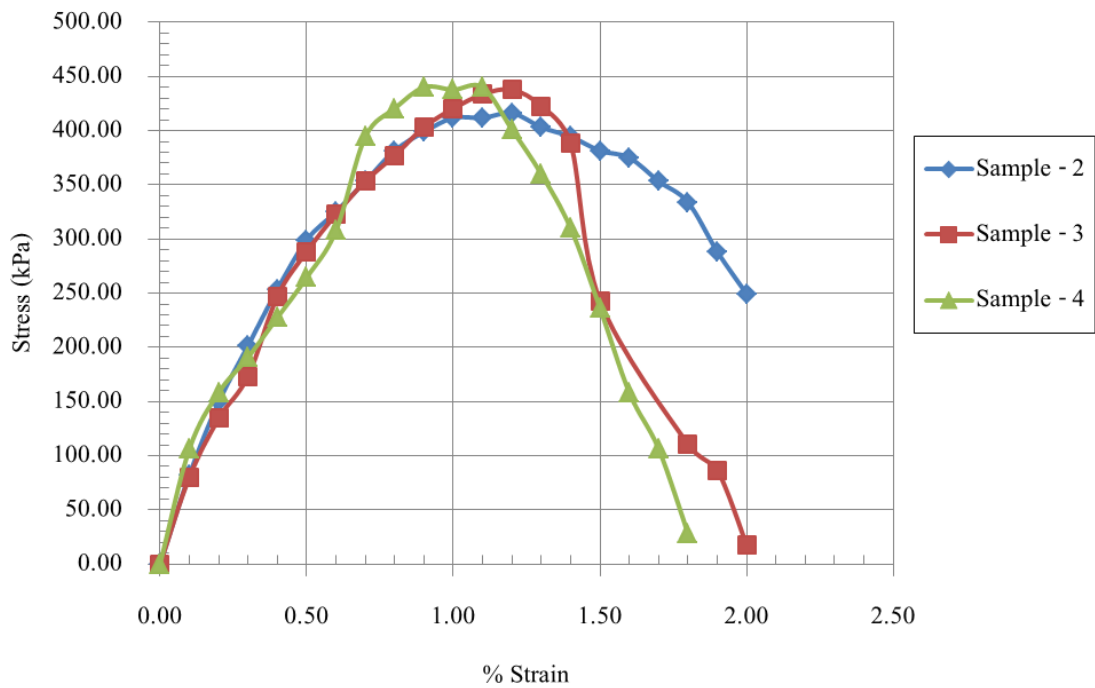
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	407.56	429.24	401.06	412.62
Undrain Shear Stregth (kPa)	203.78	214.62	200.53	206.31
% Strain at Failure	1.00	1.30	1.00	1.10



ภาพภาคผนวก ฉ-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก ฉ-7 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

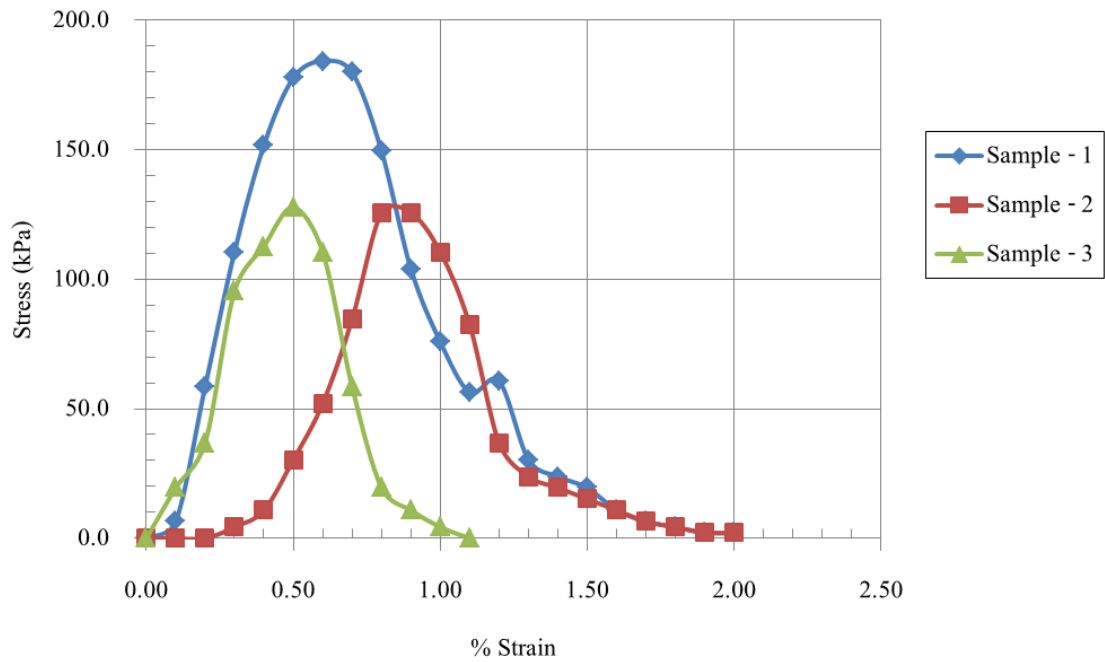
	Sample -1	Sample -2	Sample -3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	160.42	121.40	112.73	131.52
Undrain Shear Stregth (kPa)	80.21	60.70	56.36	65.76
% Strain at Failure	1.10	0.90	2.10	1.37



ภาพภาคผนวก จ-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-8 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

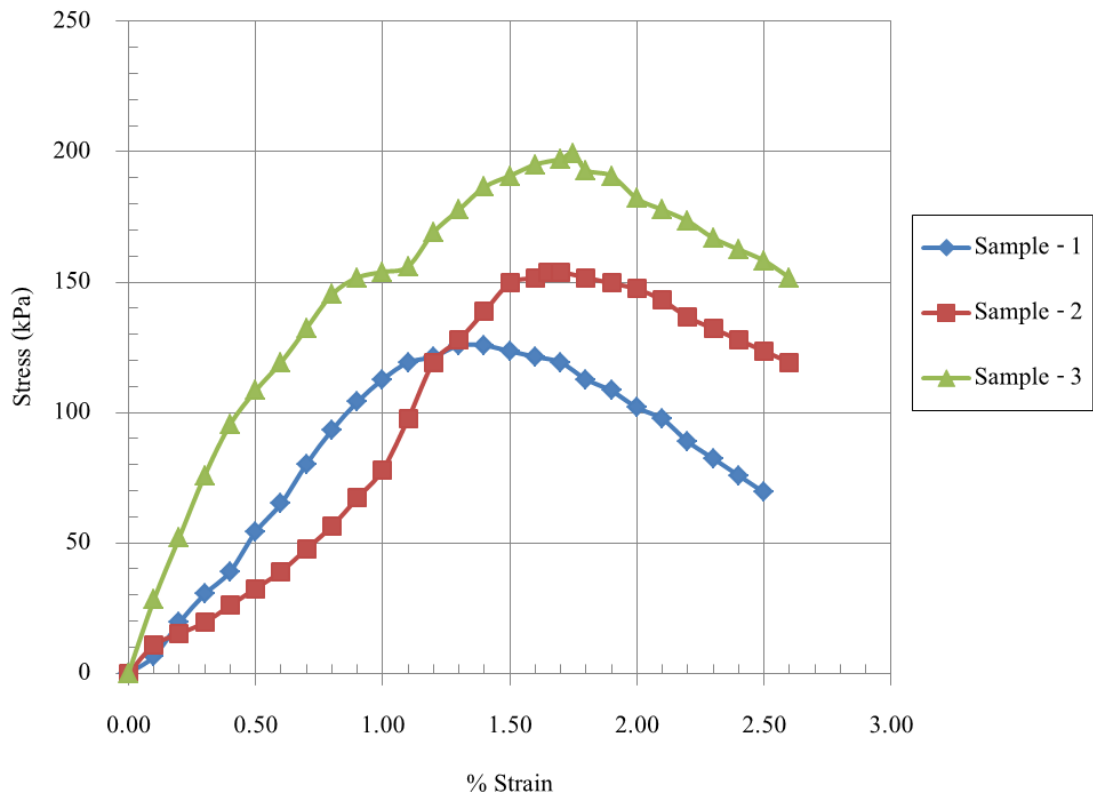
	Sample -2	Sample -3	Sample-4	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	416.23	437.91	440.08	431.41
Undrain Shear Stregth (kPa)	208.12	218.96	220.04	215.70
% Strain at Failure	1.20	1.20	1.10	1.17



ภาพภาคผนวก ฉ-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก ฉ-9 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

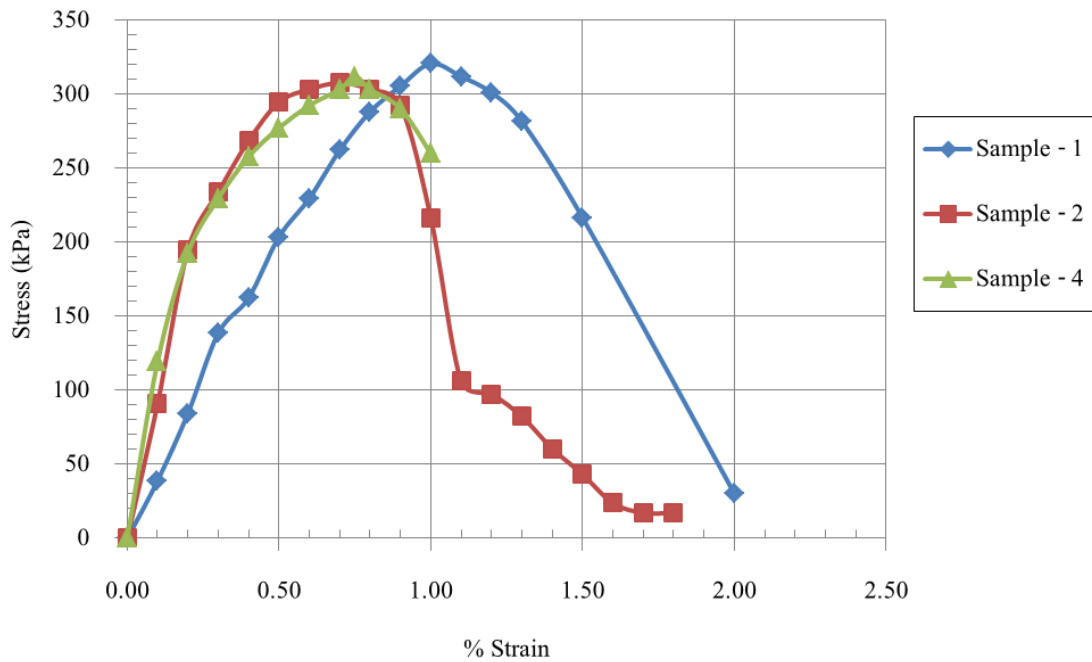
	Sample -1	Sample -2	Sample -3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	184.27	125.74	127.91	145.97
Undrain Shear Strength (kPa)	92.14	62.87	63.95	72.98
% Strain at Failure	0.60	0.50	0.50	0.53



ภาพภาคผนวก จ-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-10 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

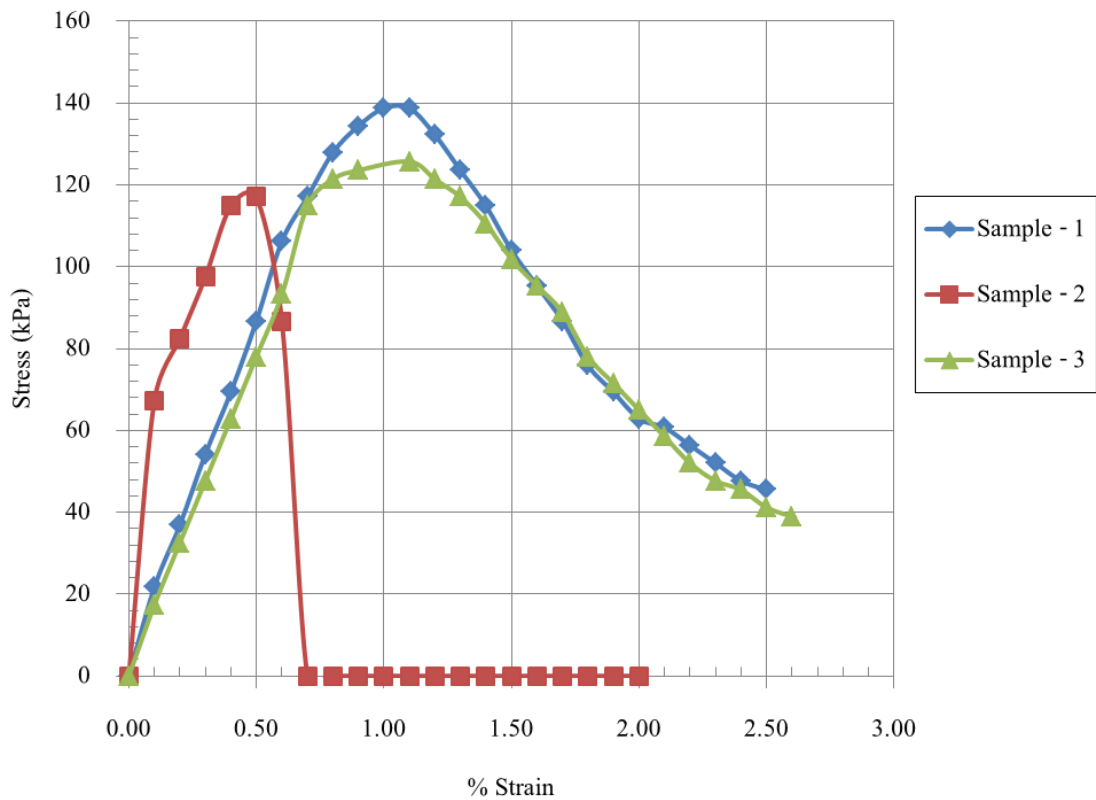
	Sample -1	Sample -2	Sample -3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	125.74	153.92	199.45	159.70
Undrain Shear Stregth (kPa)	62.87	76.96	99.72	79.85
% Strain at Failure	1.40	1.70	1.75	1.62



ภาพภาคผนวก ฉ-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก ฉ-11 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

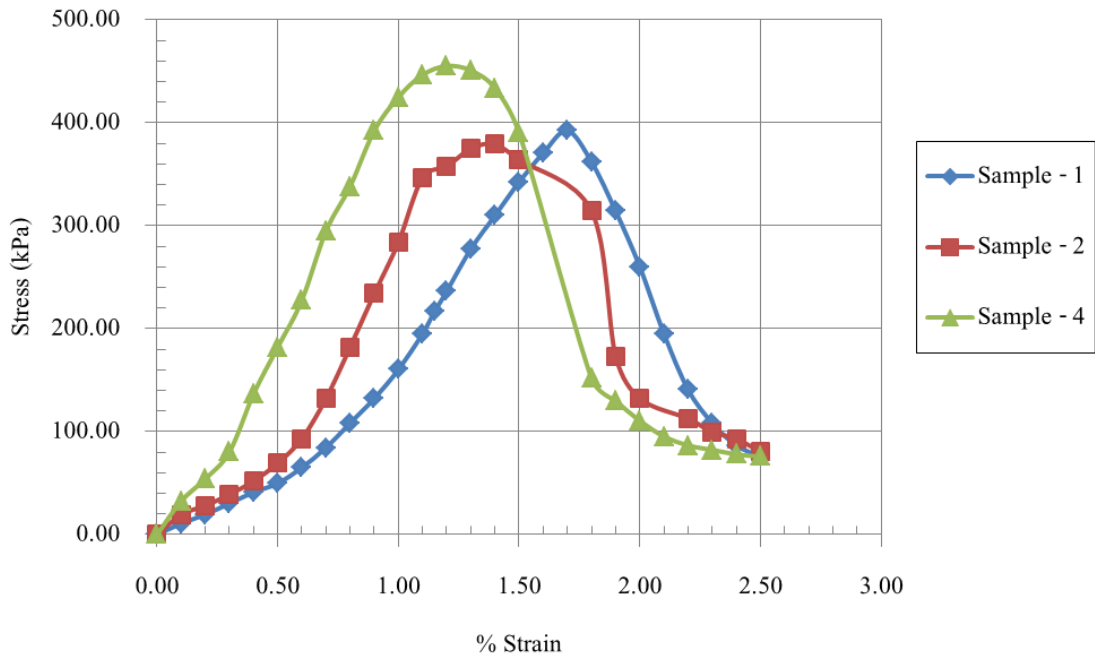
	Sample-1	Sample-2	Sample-4	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	320.85	307.84	312.18	313.62
Undrain Shear Strength (kPa)	160.42	153.92	156.09	156.81
% Strain at Failure	1.00	0.70	0.75	0.82



ภาพภาคผนวก จ-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-12 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

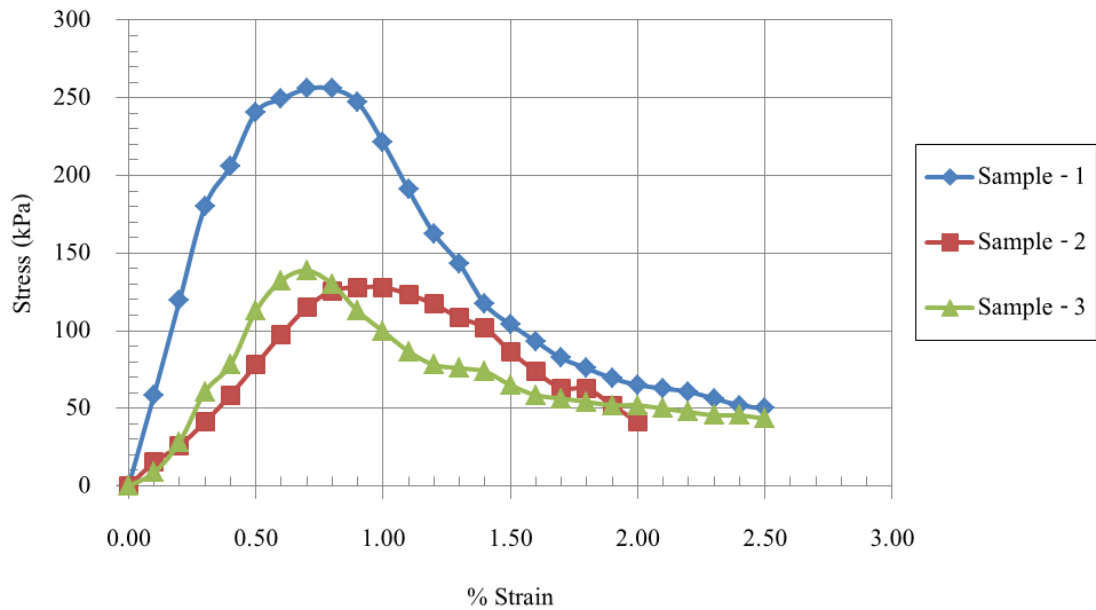
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	138.74	117.07	125.74	127.18
Undrain Shear Stregh (kPa)	69.37	58.53	62.87	63.59
% Strain at Failure	1.10	0.50	1.10	0.90



ภาพภาคผนวก จ-13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-13 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

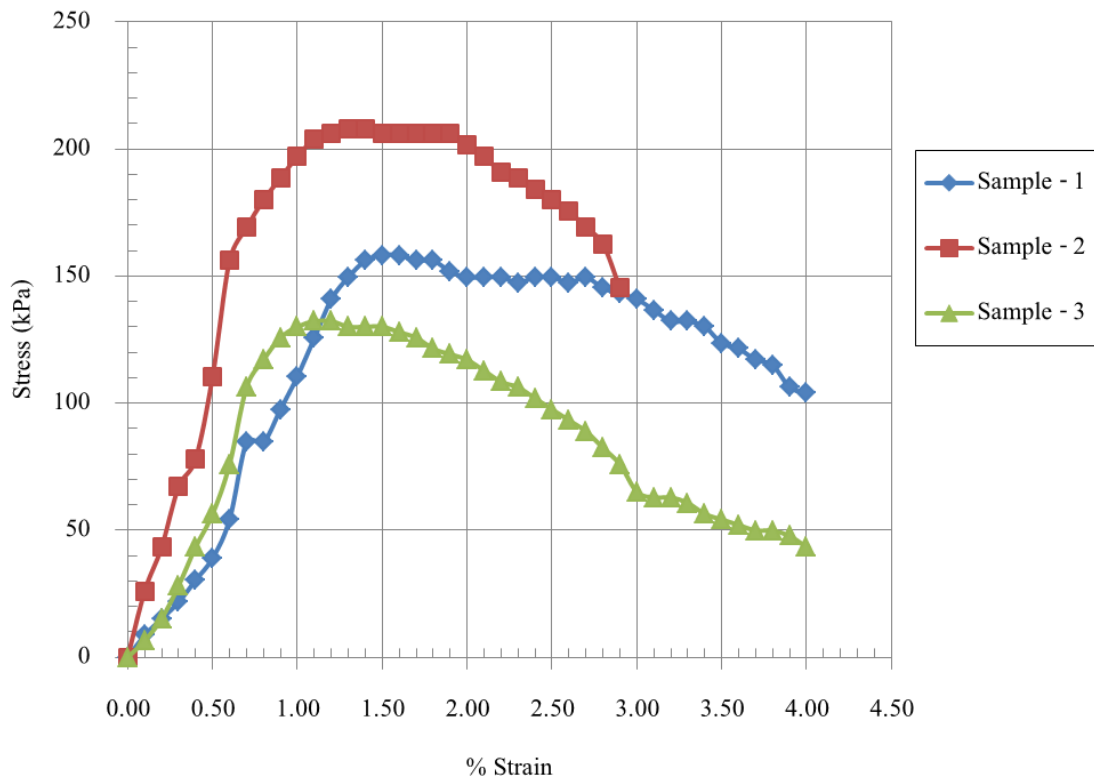
	Sample-1	Sample-2	Sample- 4	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	392.39	379.38	455.26	409.00
Undrain Shear Stregth (kPa)	196.19	189.69	227.63	204.50
% Strain at Failure	1.20	1.20	1.10	1.17



ภาพภาคผนวก ฉ-14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก ฉ-14 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 8% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

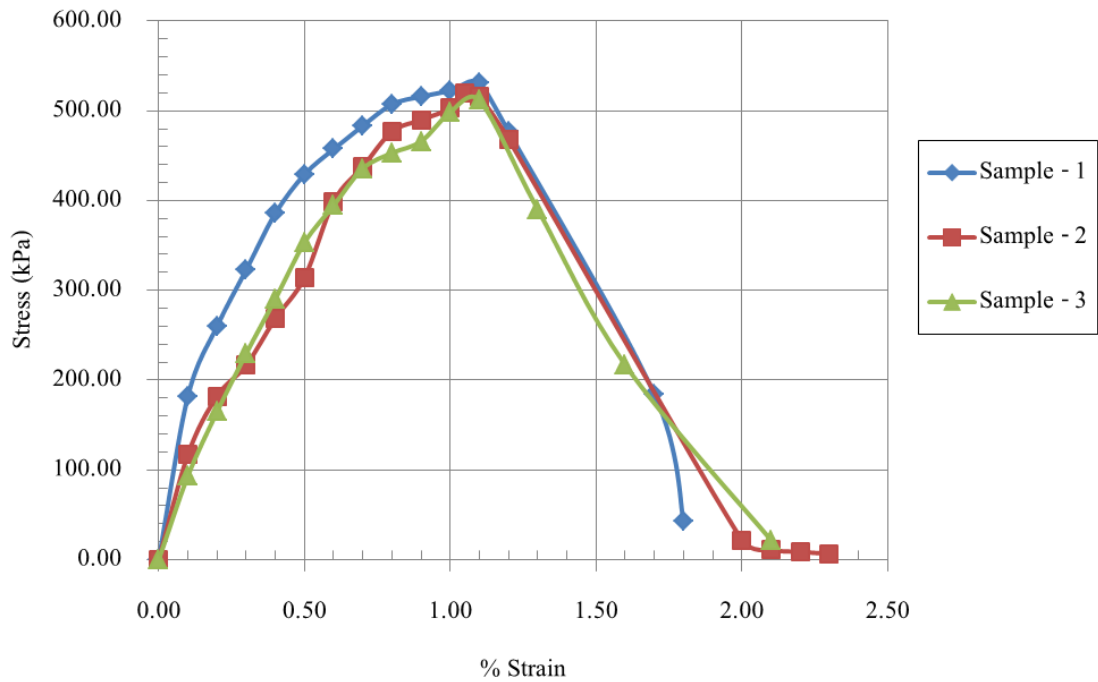
	Sample -1	Sample -2	Sample -3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	255.81	127.91	138.74	174.15
Undrain Shear Stregth (kPa)	127.91	63.95	69.37	87.08
% Strain at Failure	0.80	1.00	0.70	0.83



ภาพภาคผนวก จ-15 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-15 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 0 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

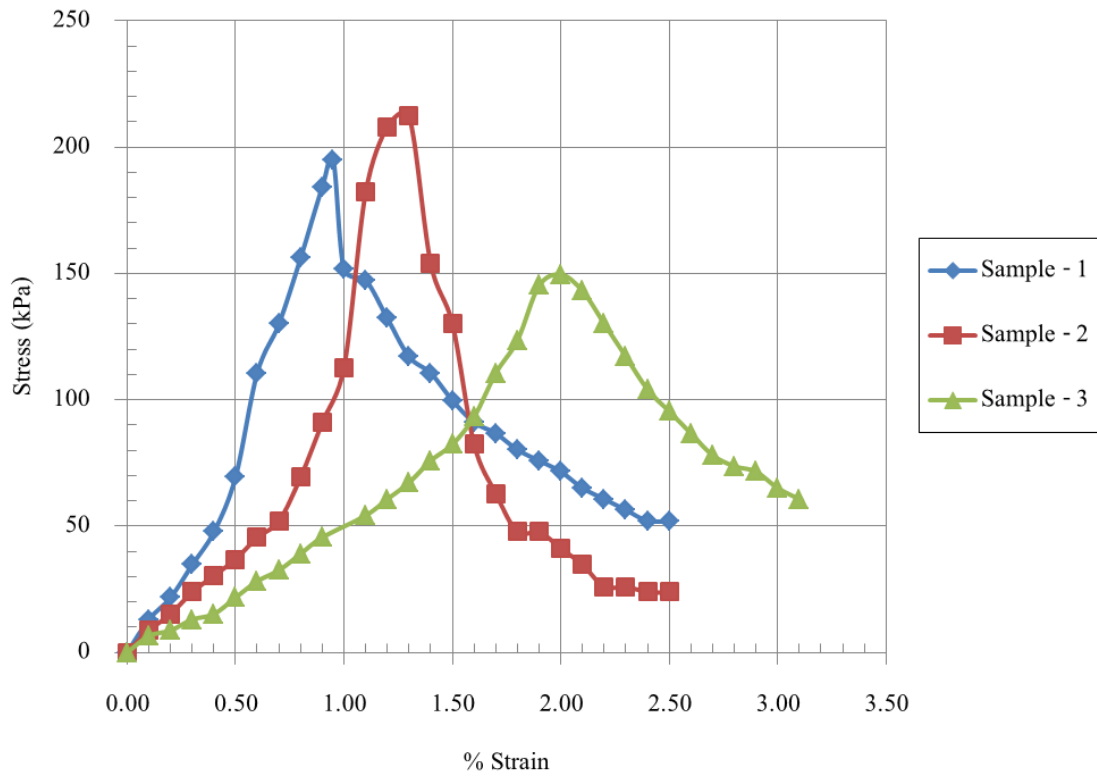
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	158.26	208.12	132.24	166.20
Undrain Shear Strength (kPa)	79.13	104.06	66.12	83.10
% Strain at Failure	1.60	1.40	1.20	1.40



ภาพภาคผนวก จ-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก จ-16 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 7 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

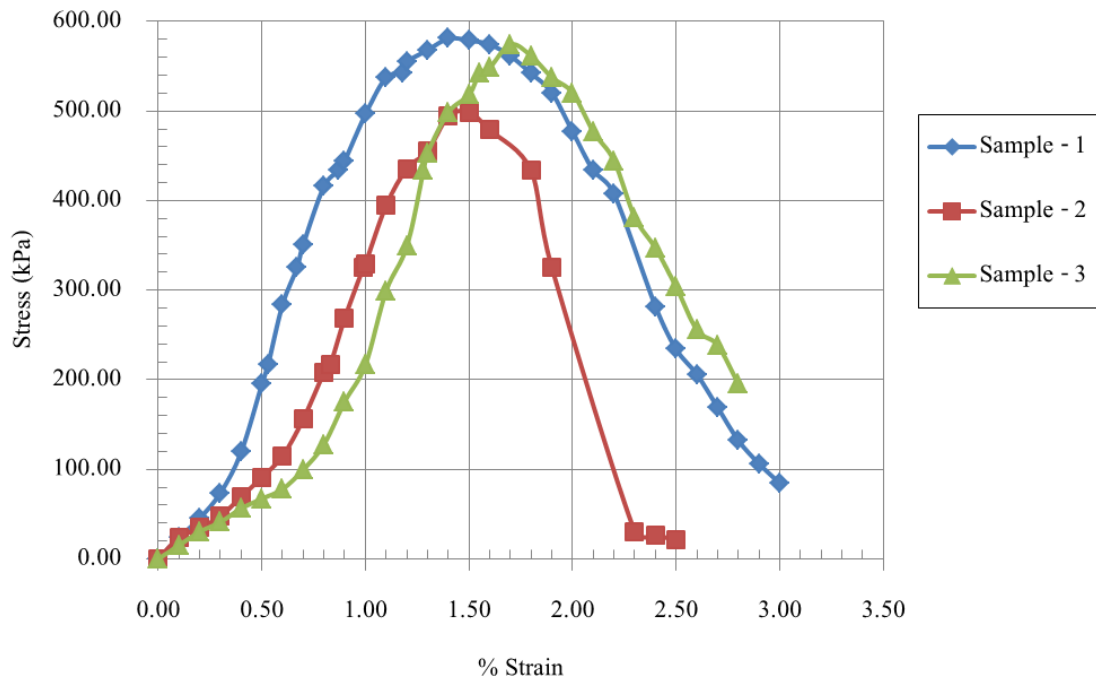
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	531.13	520.29	511.62	521.02
Undrain Shear Stregth (kPa)	265.57	260.15	255.81	260.51
% Strain at Failure	1.10	1.05	1.10	1.08



ภาพภาคผนวก จ-17 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-17 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 7 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

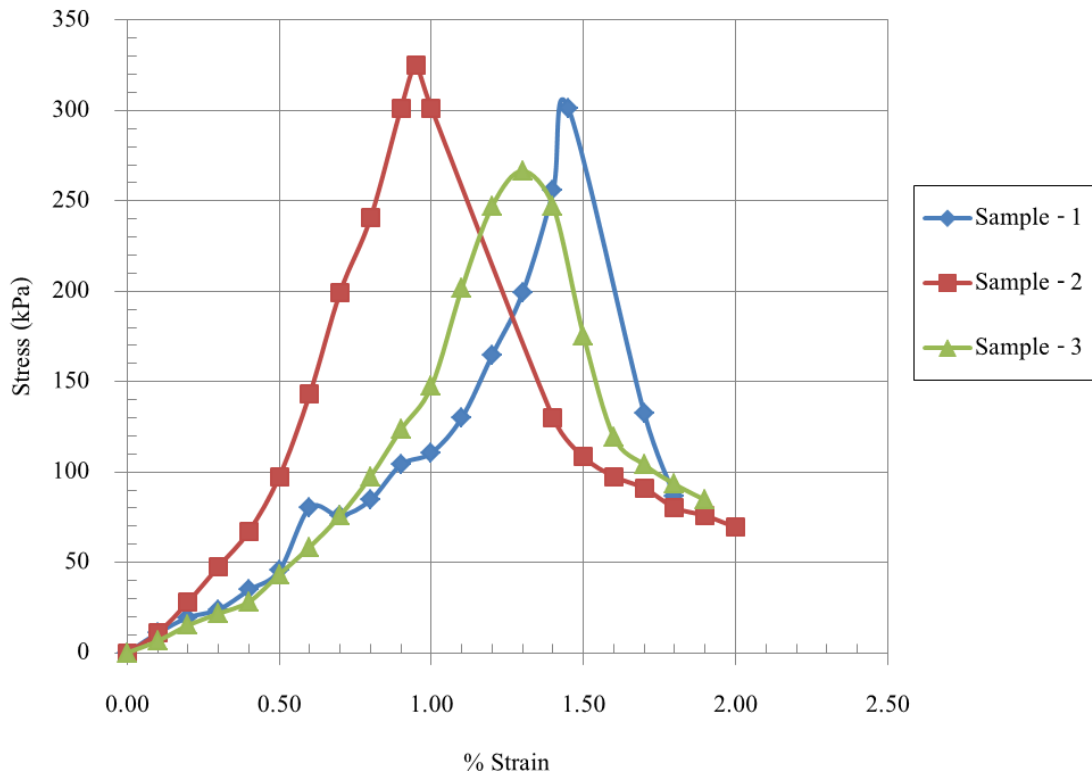
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	195.11	212.45	149.58	185.72
Undrain Shear Strength (kPa)	97.55	106.23	74.79	92.86
% Strain at Failure	0.95	1.30	2.00	1.42



ภาพภาคผนวก ฉ-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

ตารางภาคผนวก ฉ-18 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 28 วัน แบบไม่แช่น้ำ (Unsoak)

	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	580.99	498.61	574.49	551.36
Undrain Shear Strength (kPa)	290.50	249.31	287.24	275.68
% Strain at Failure	1.40	1.50	1.70	1.53



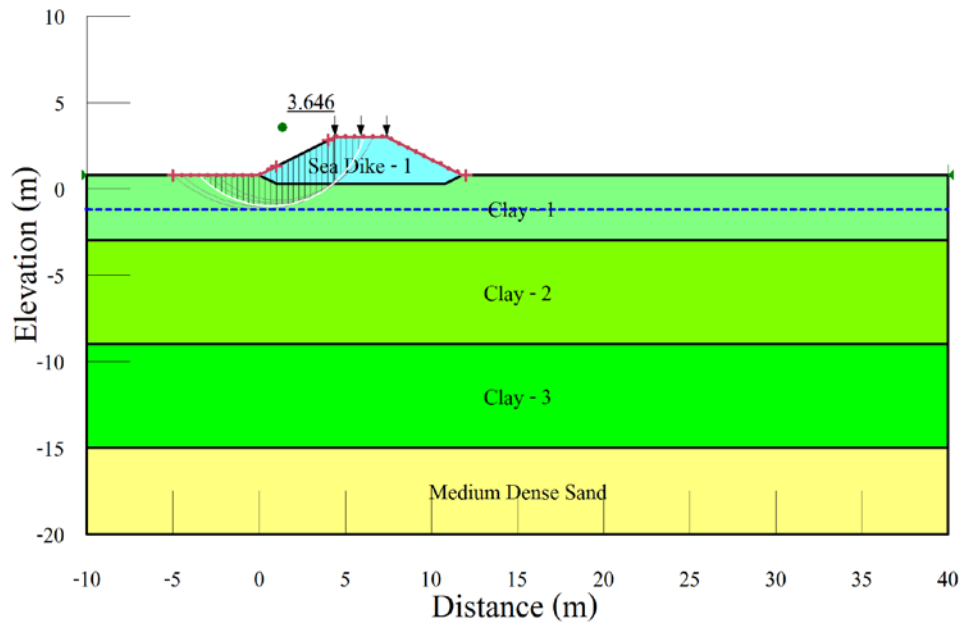
ภาพภาคผนวก จ-19 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

ตารางภาคผนวก จ-19 สรุปผลการทดสอบการอัดตัวแบบอิสระของดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 10% อายุการบ่ม 28 วัน แบบแช่น้ำ (Soak)

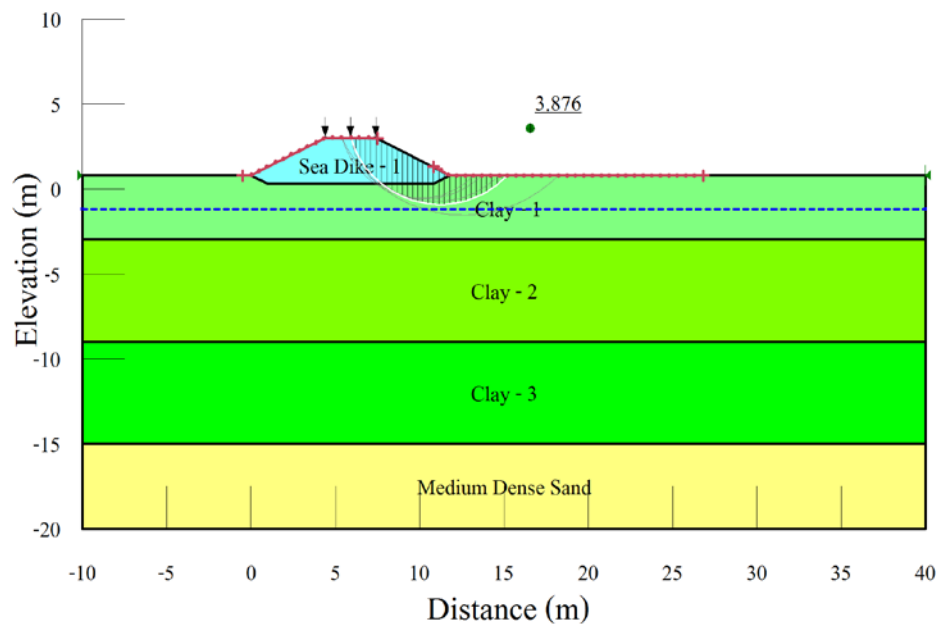
	Sample-1	Sample-2	Sample-3	Average
Unconfined Compressive Strength (kPa)	301.34	325.18	266.65	297.72
Undrain Shear Strength (kPa)	150.67	162.59	133.32	148.86
% Strain at Failure	1.45	0.95	1.30	1.23

ภาคผนวก ข

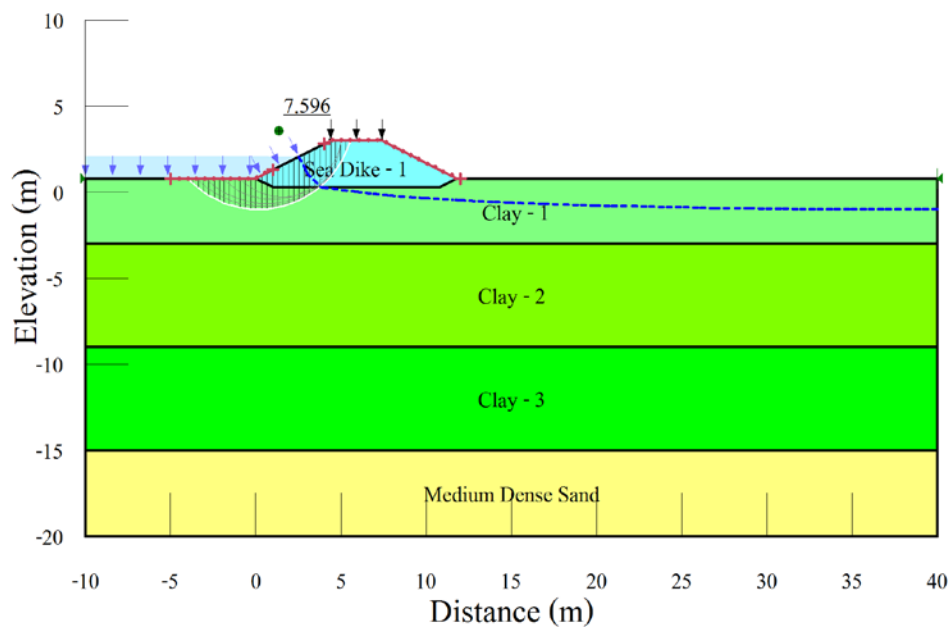
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-1



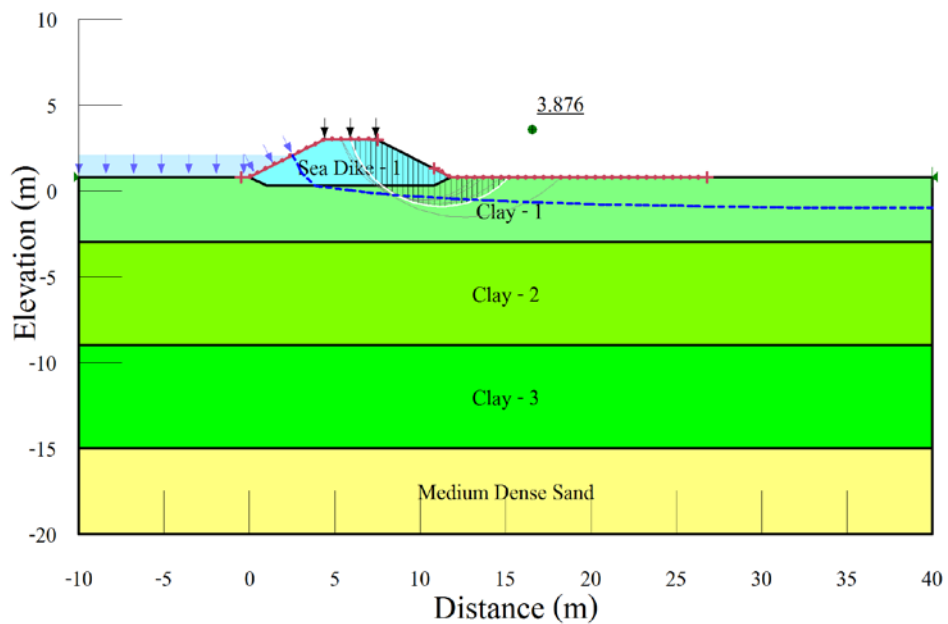
ภาพภาคผนวก ช-1 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



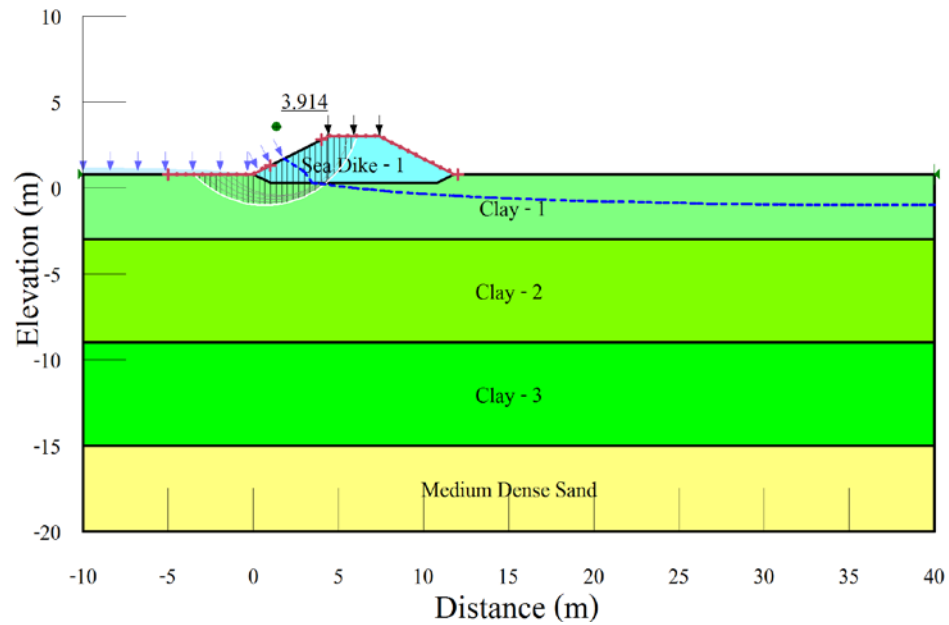
ภาพภาคผนวก ช-2 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



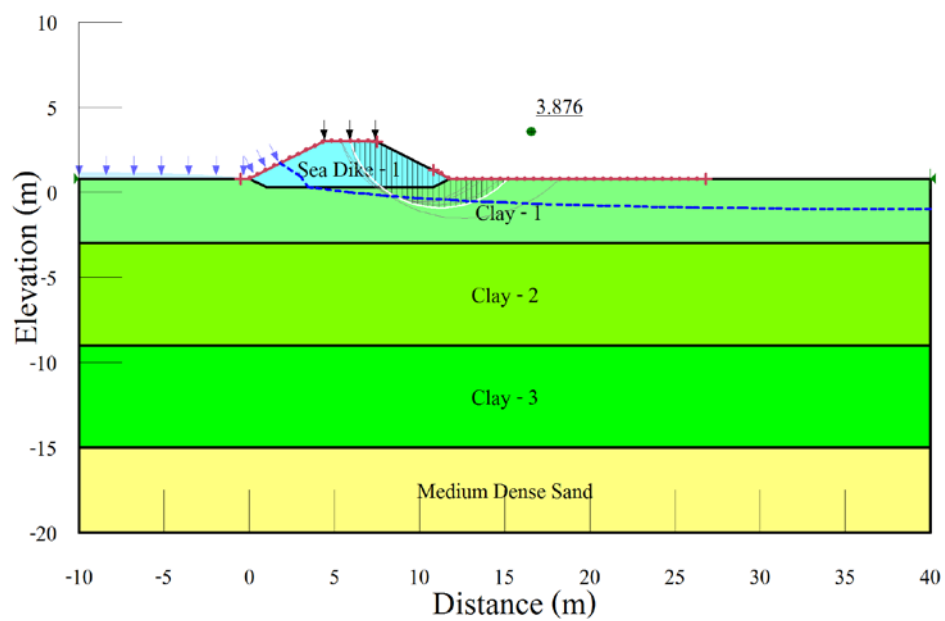
ภาพภาคผนวก ข-3 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



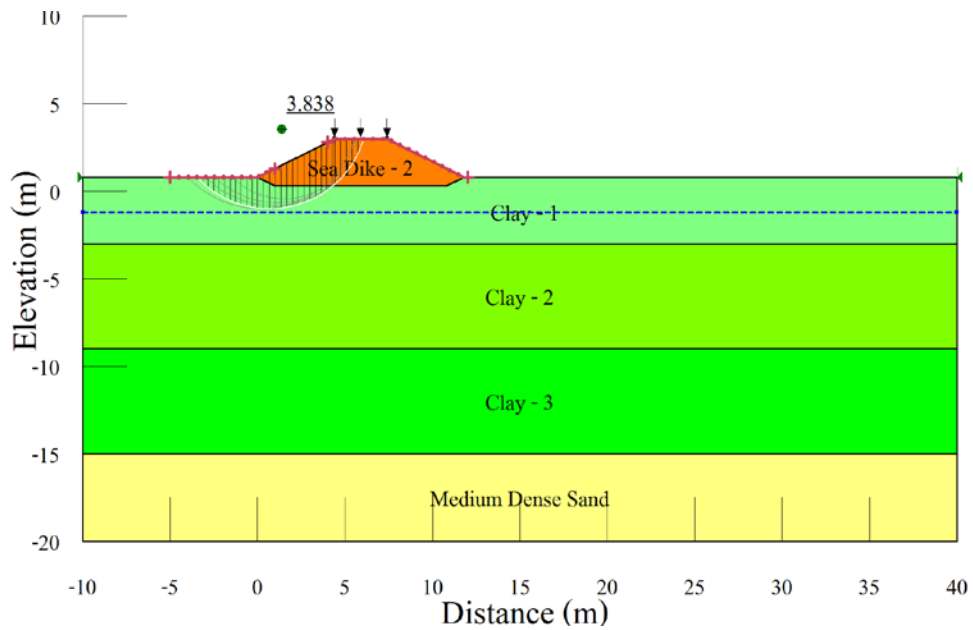
ภาพภาคผนวก ข-4 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



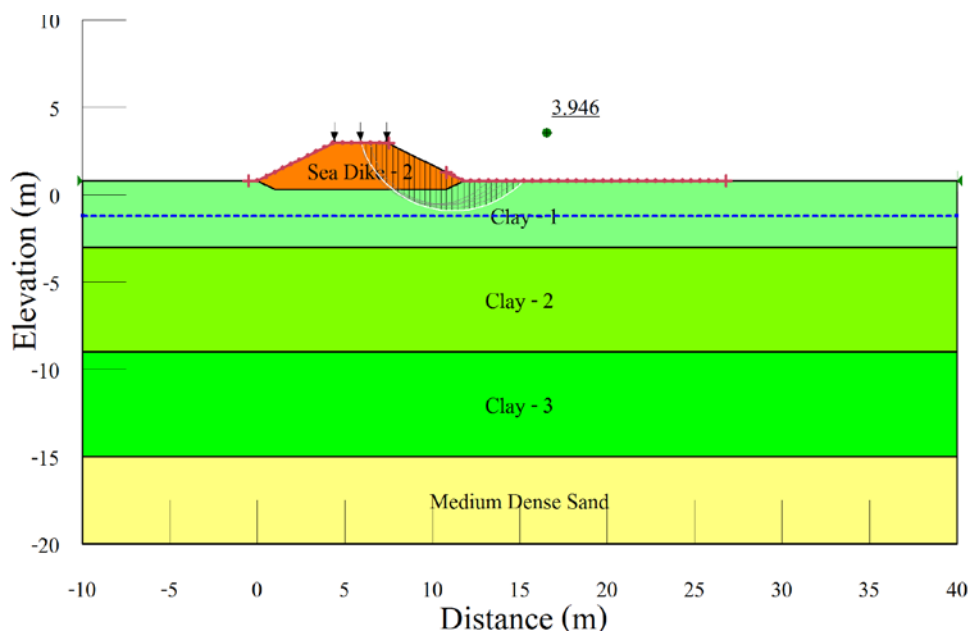
ภาพภาคผนวก ช-5 การวัดตัวของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



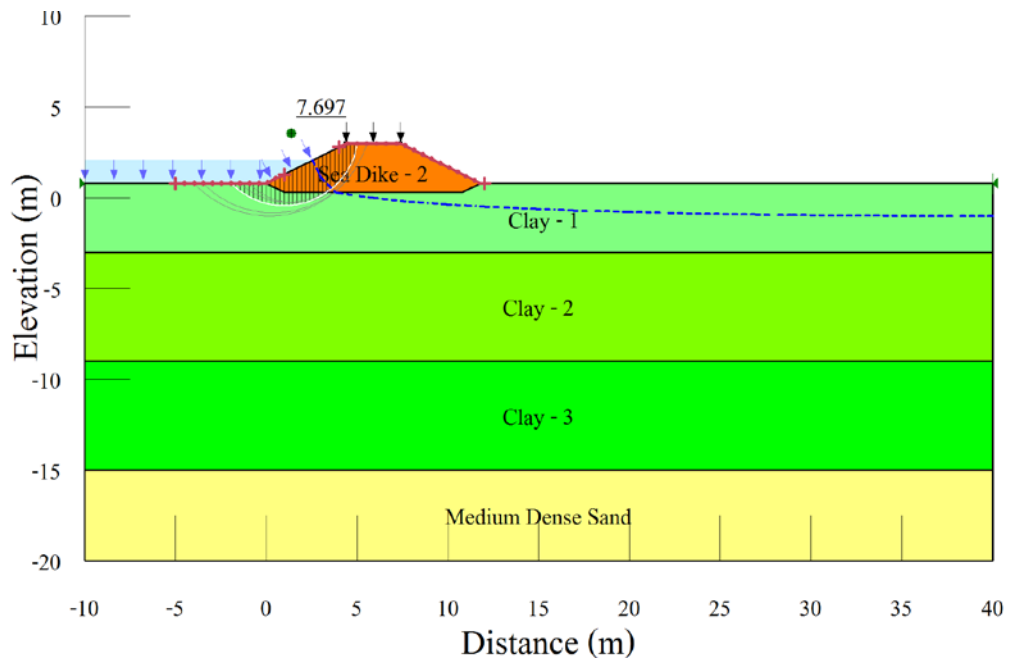
ภาพภาคผนวก ช-6 การวัดตัวของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



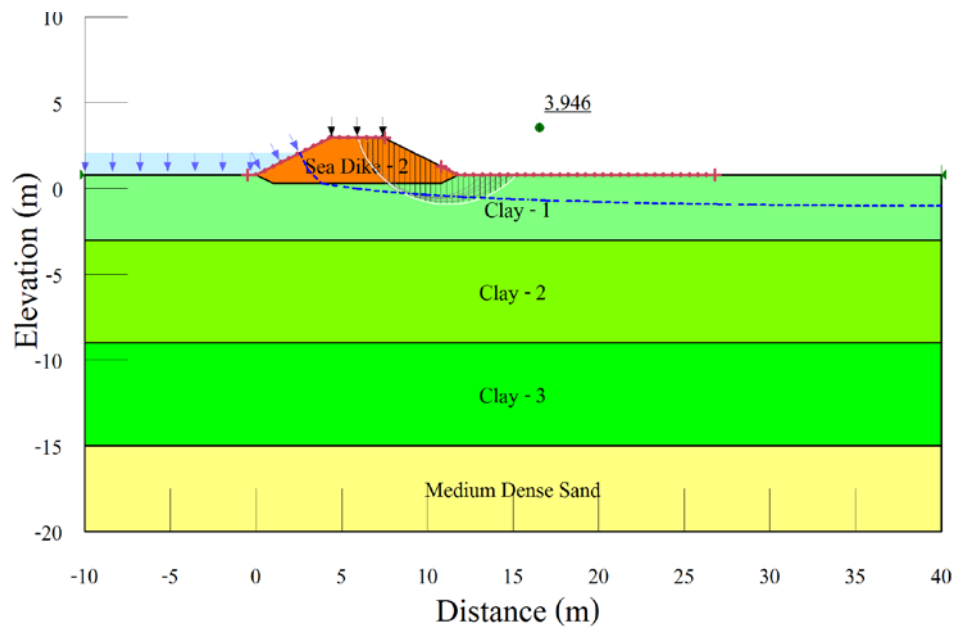
ภาพภาคผนวก ข-7 การวัดตัวของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



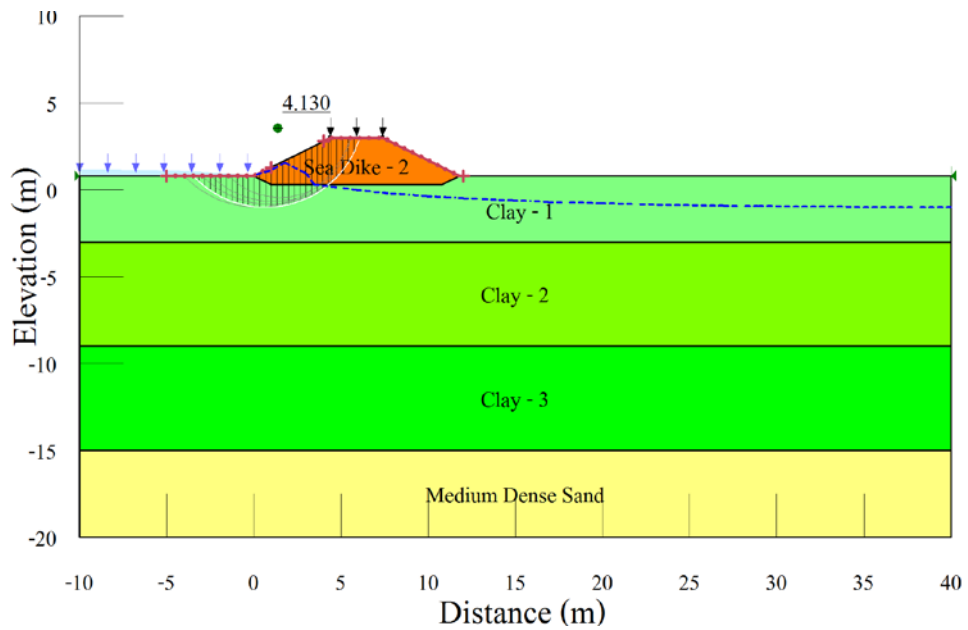
ภาพภาคผนวก ข-8 การวัดตัวของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



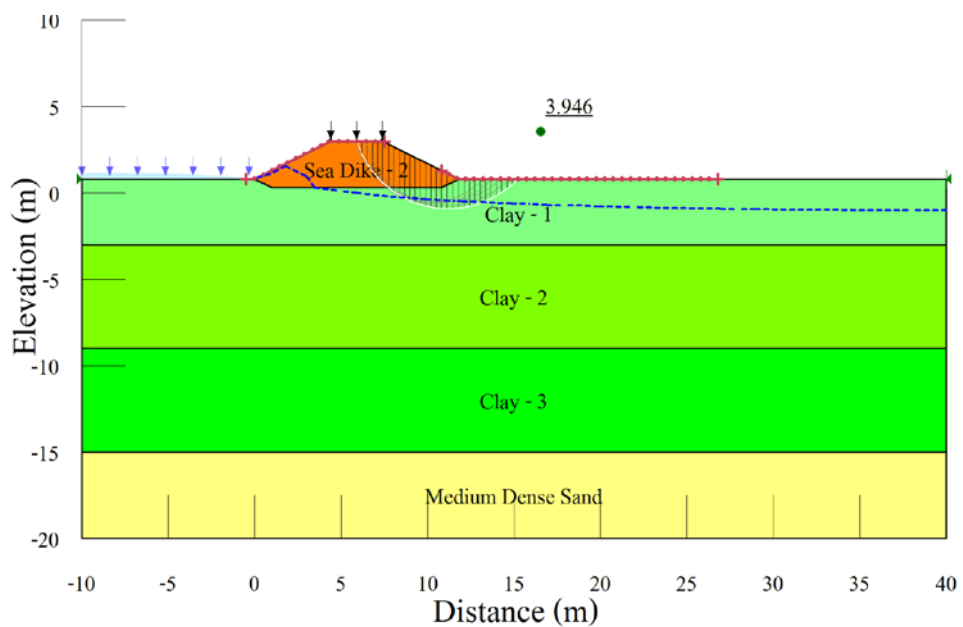
ภาพภาคผนวก ข-9 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



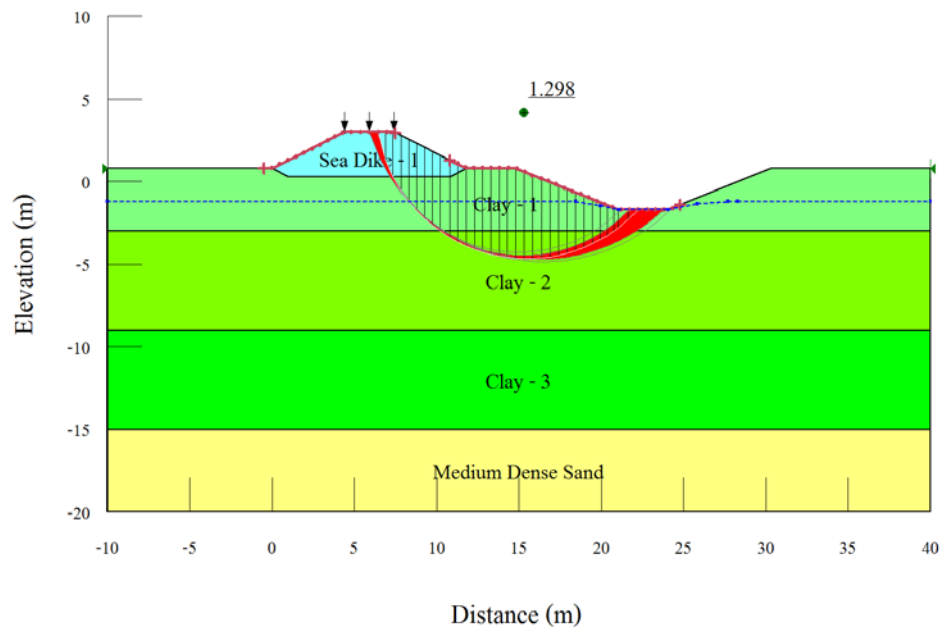
ภาพภาคผนวก ข-10 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



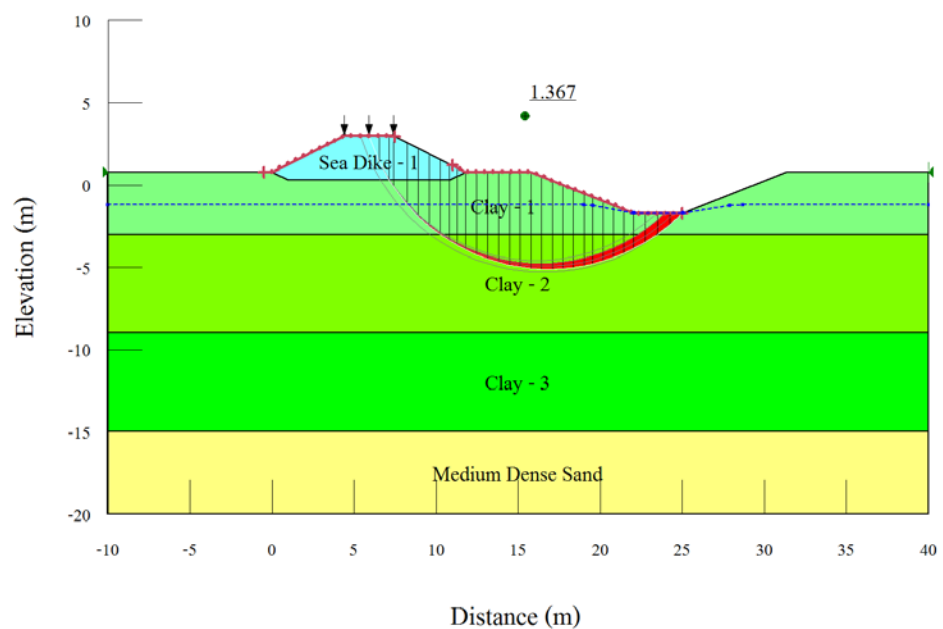
ภาพภาคผนวก ข-11 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



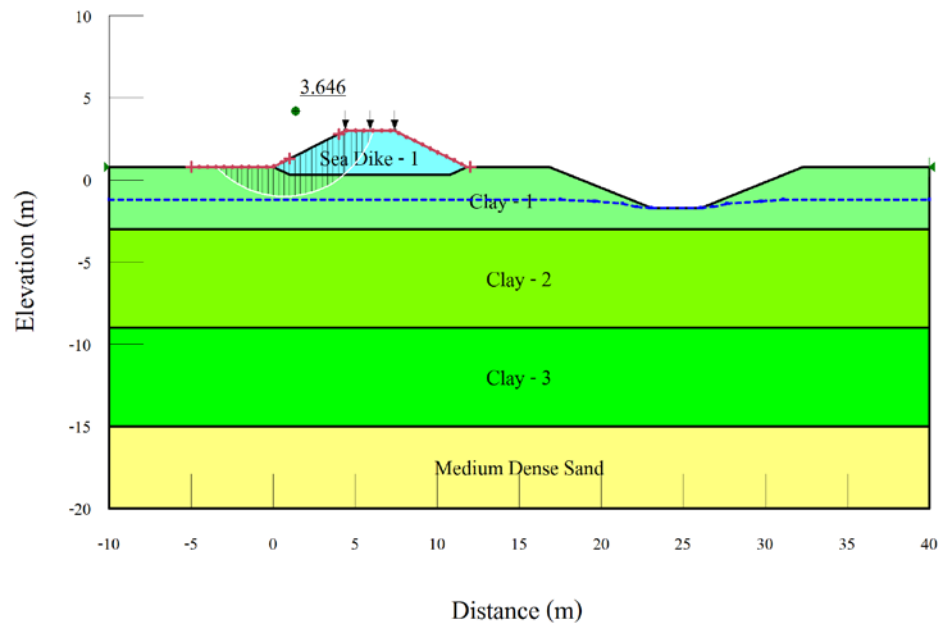
ภาพภาคผนวก ข-12 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



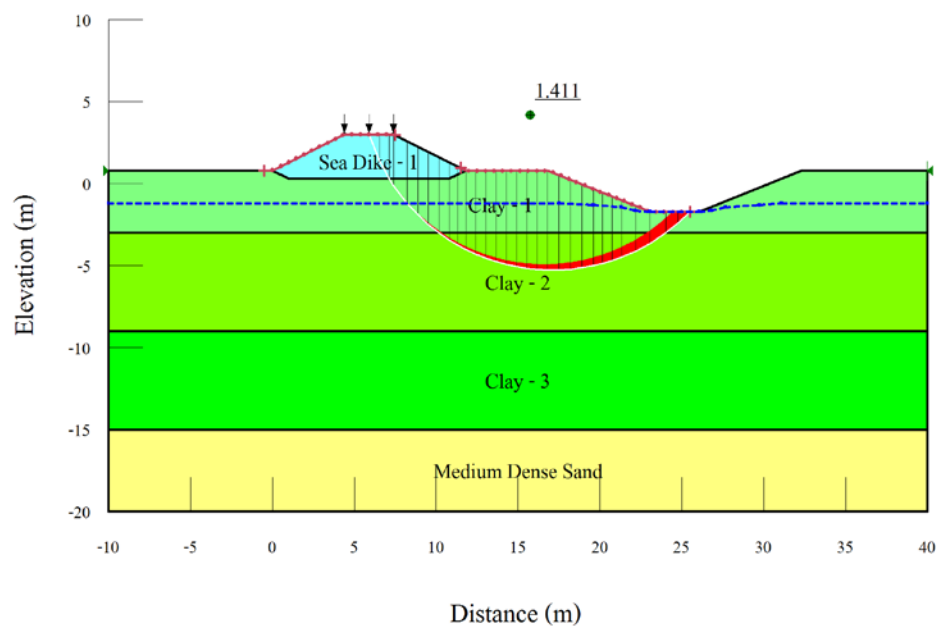
ภาพภาคผนวก ข-13 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 3 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



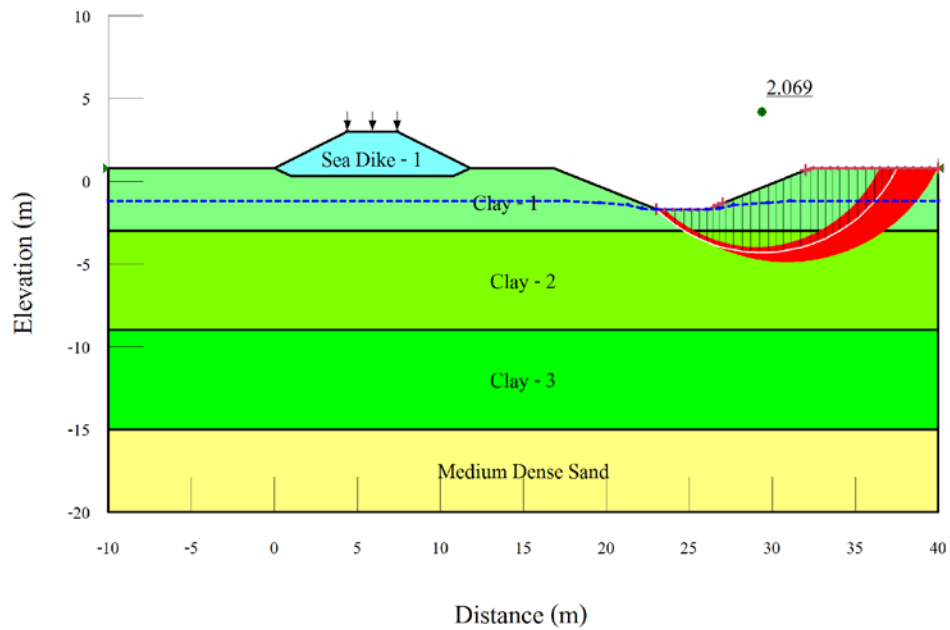
ภาพภาคผนวก ข-14 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 4 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



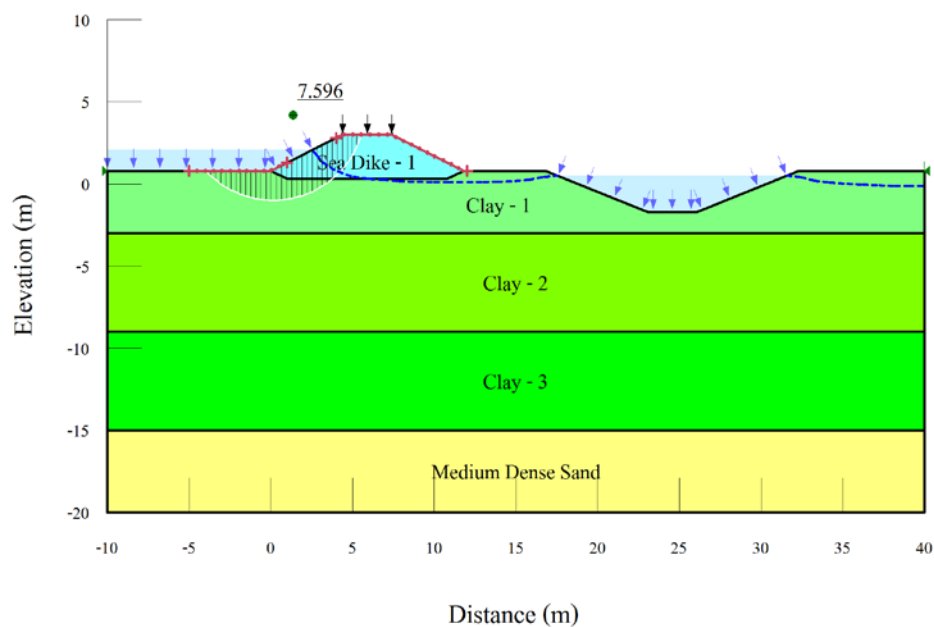
ภาพภาคผนวก ข-15 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



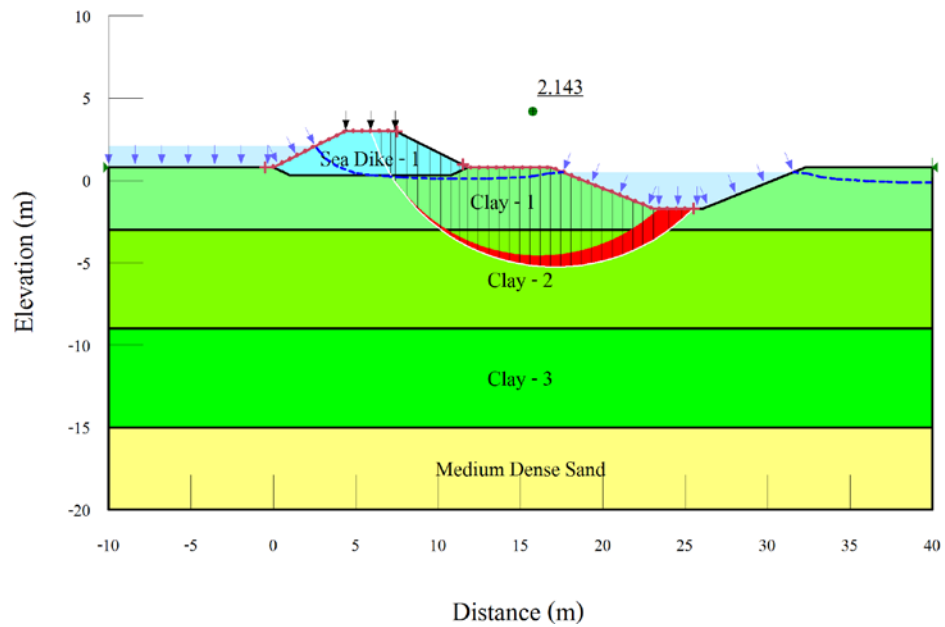
ภาพภาคผนวก ข-16 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



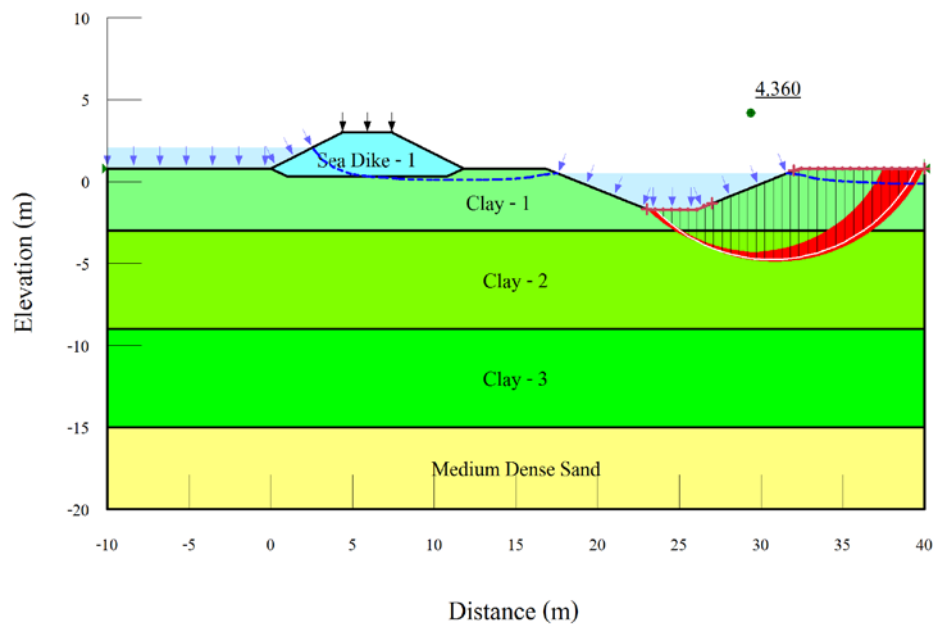
ภาพภาคผนวก ข-17 การวิบัติของคันดินบริเวณตลิ่งของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



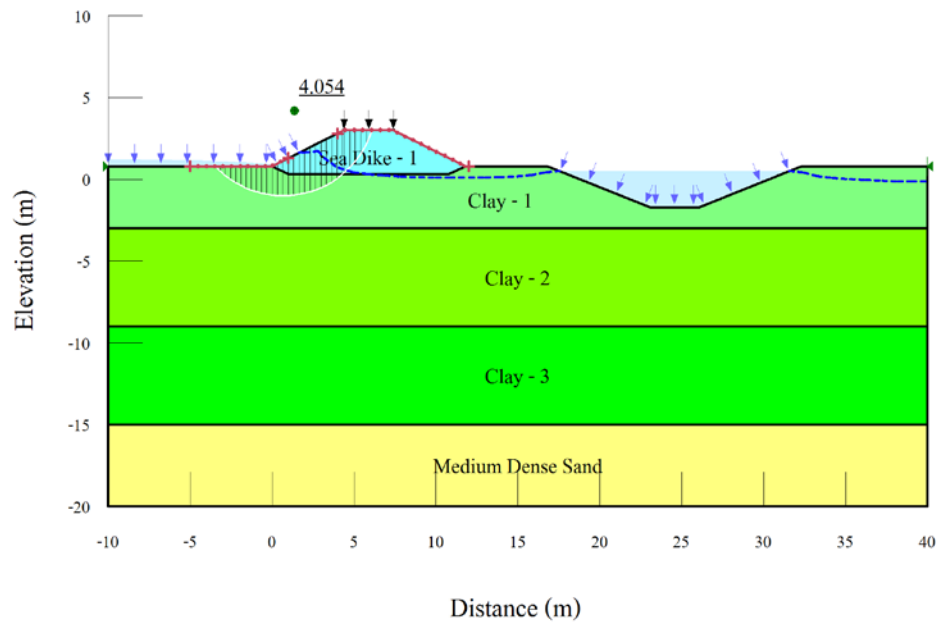
ภาพภาคผนวก ข-18 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



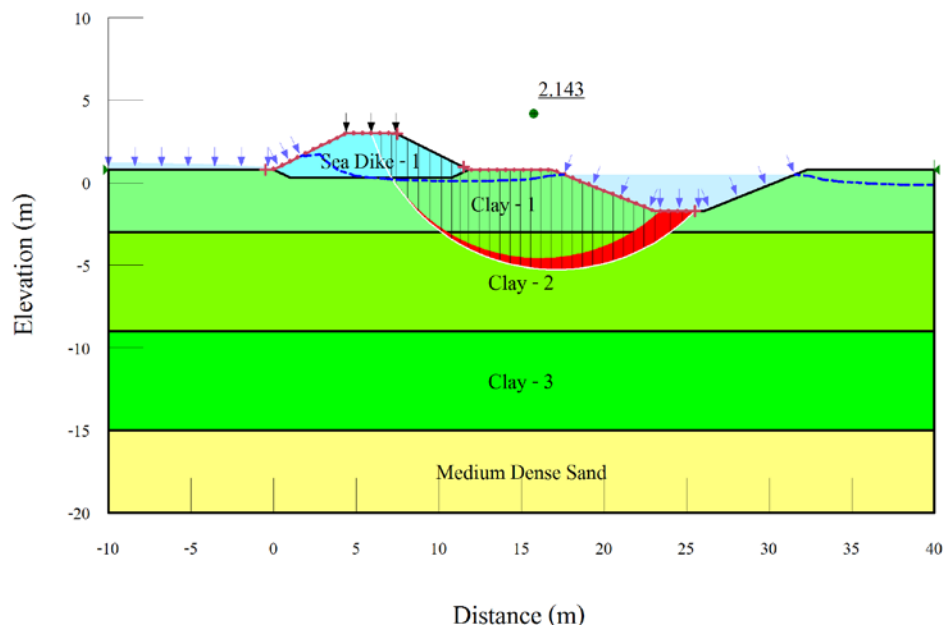
ภาพภาคผนวก ข-19 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



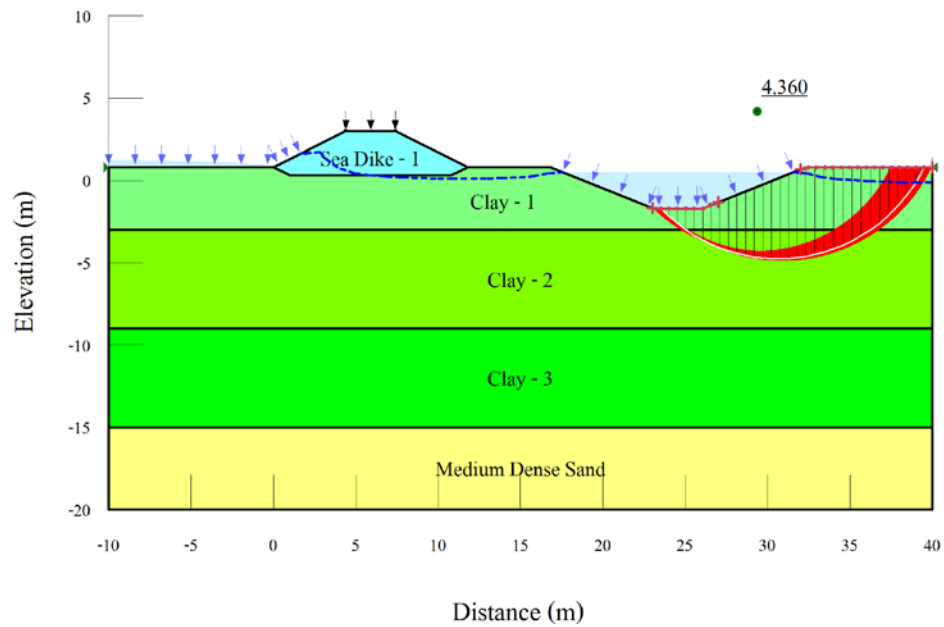
ภาพภาคผนวก ข-20 การวิบัติของคันดินบริเวณตลิ่งของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



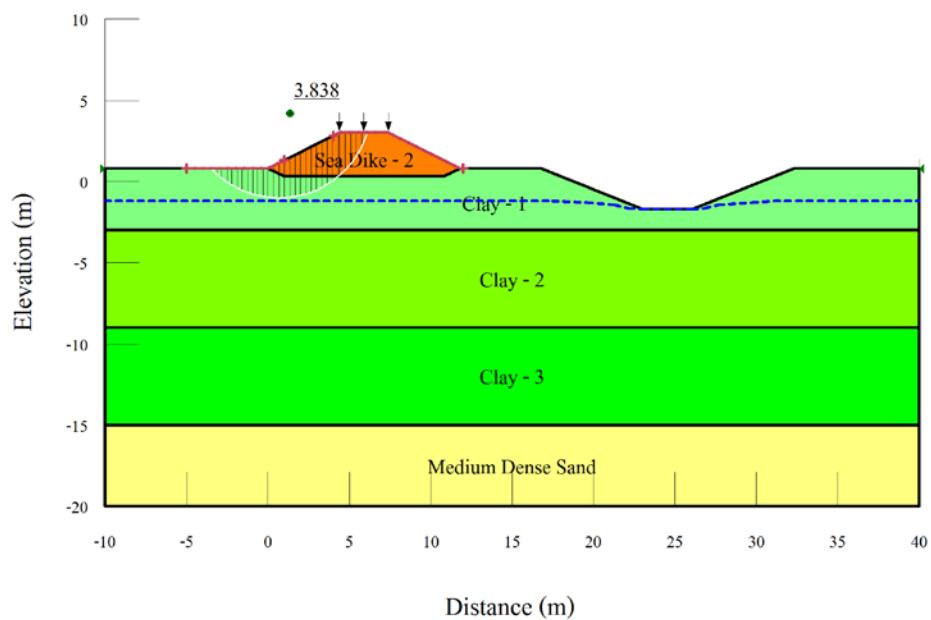
ภาพภาคผนวก ข-21 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



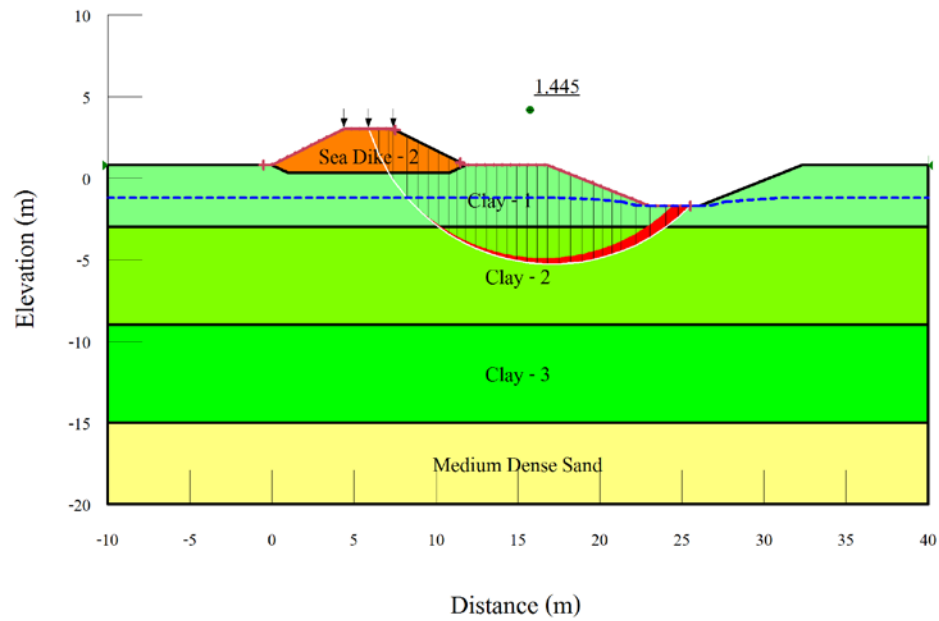
ภาพภาคผนวก ข-22 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



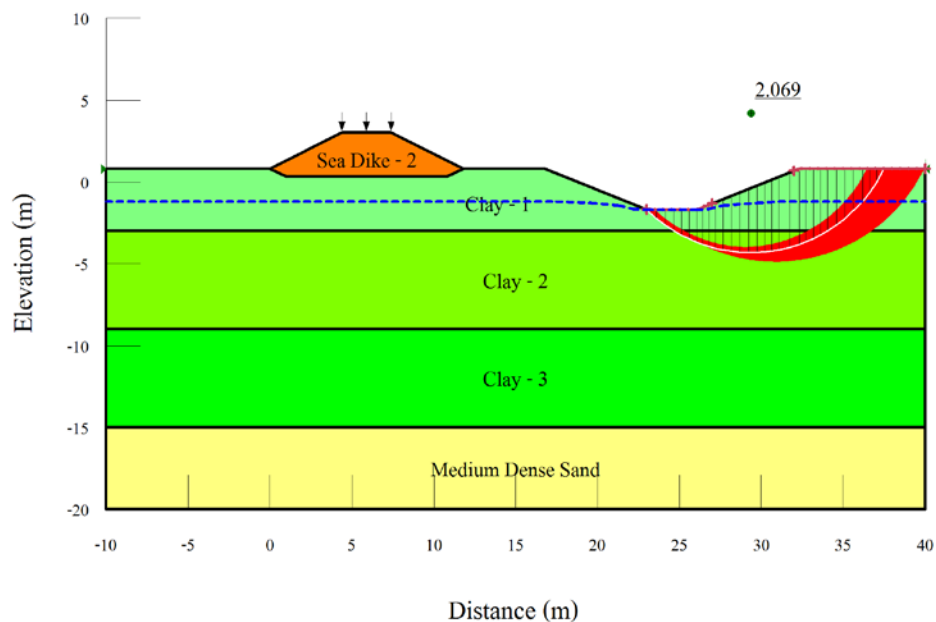
ภาพภาคผนวก ข-23 การวัดของคันดินบริเวณที่ตั้งของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



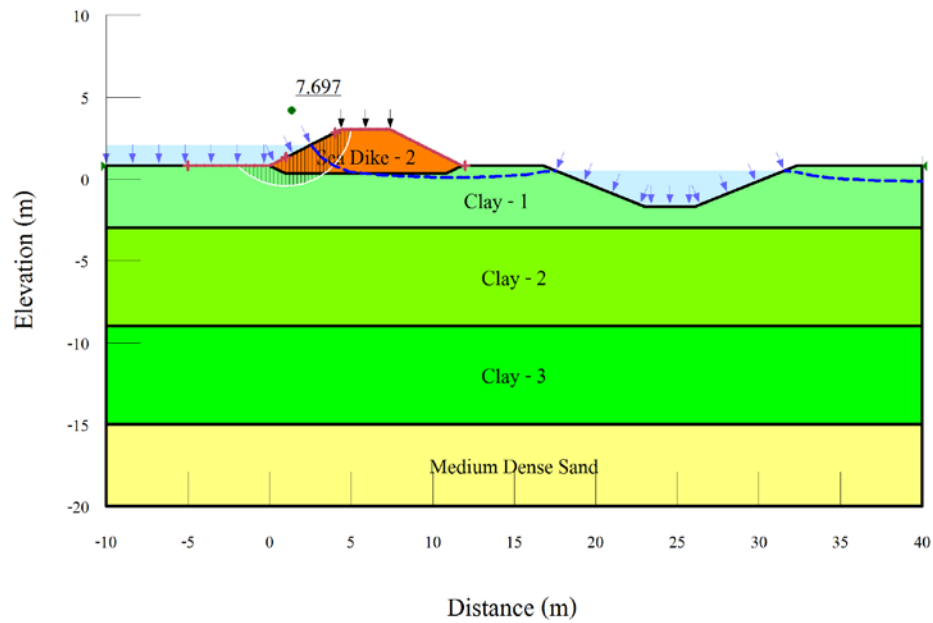
ภาพภาคผนวก ข-24 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



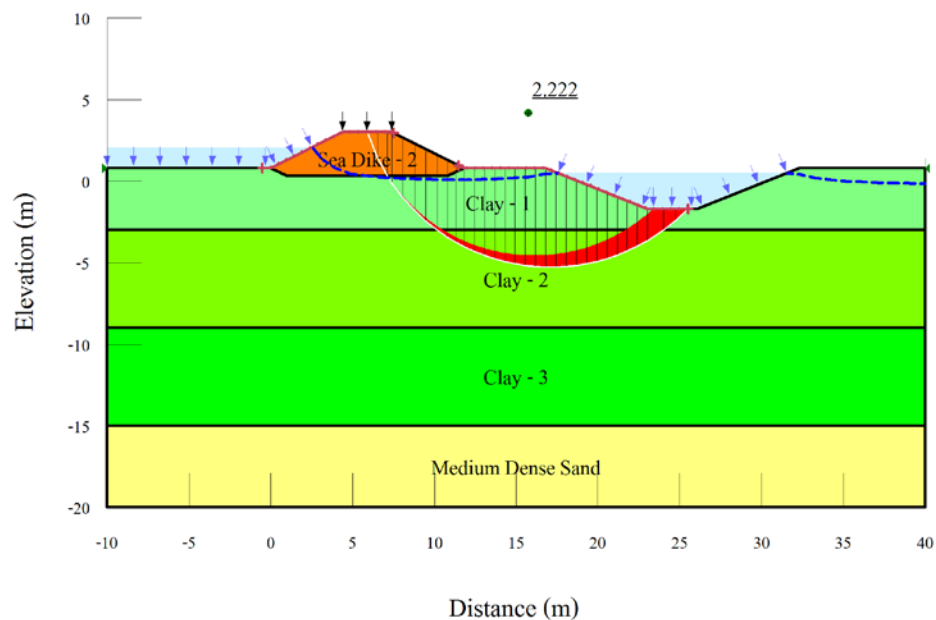
ภาพภาคผนวก ข-25 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



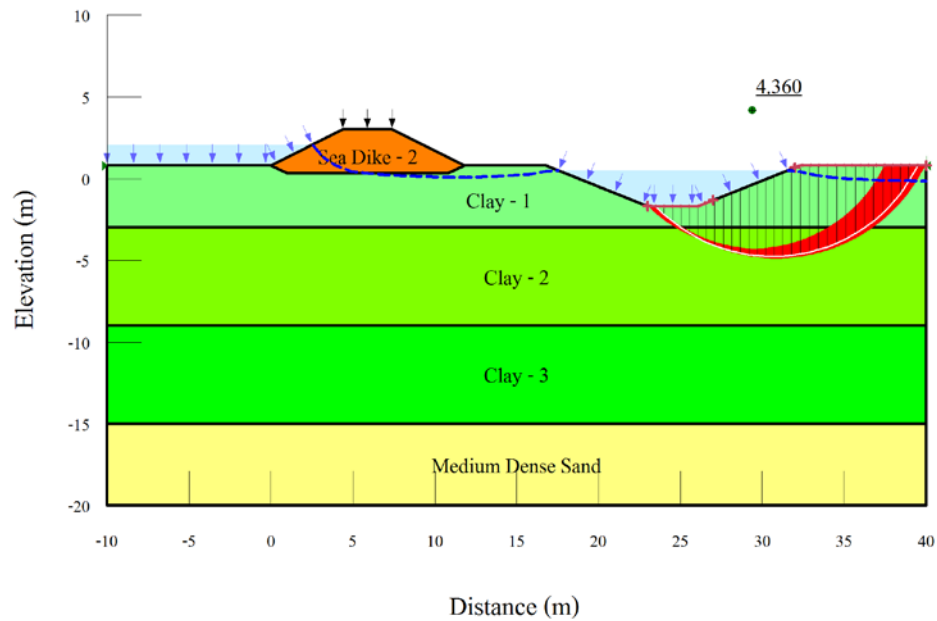
ภาพภาคผนวก ข-26 การวัดของคันดินบริเวณตลิ่งของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



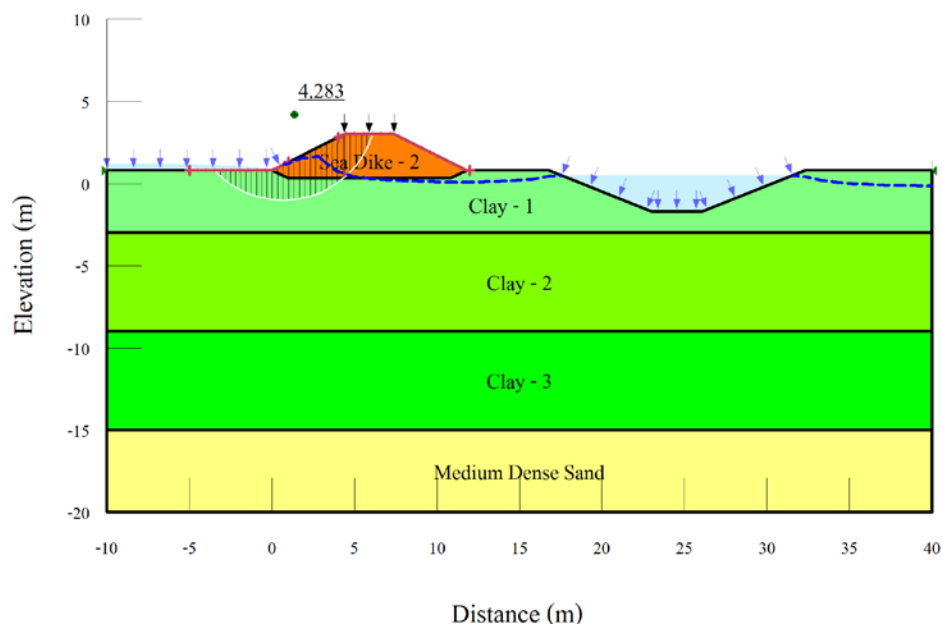
ภาพภาคผนวก ข-27 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



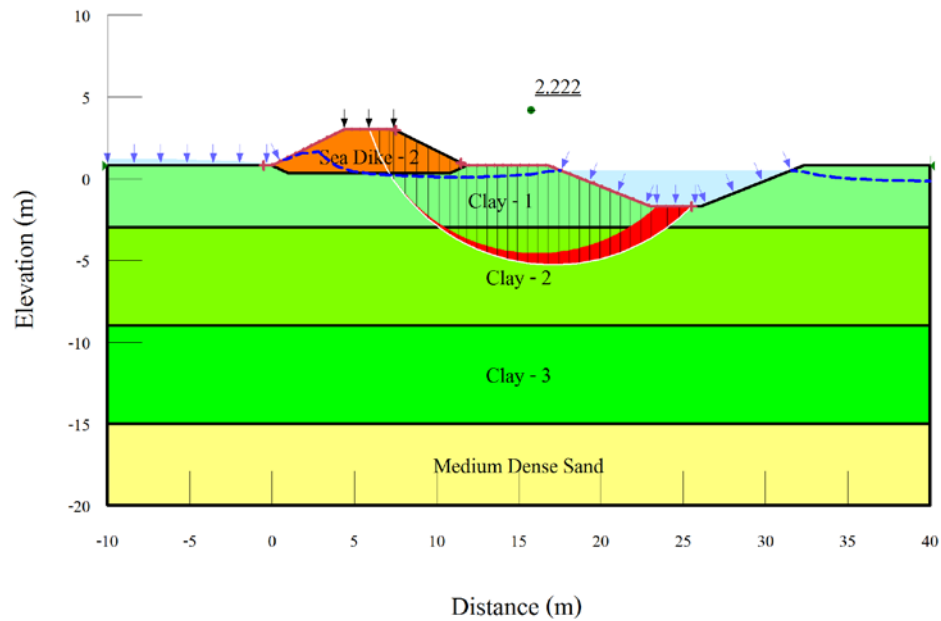
ภาพภาคผนวก ข-28 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



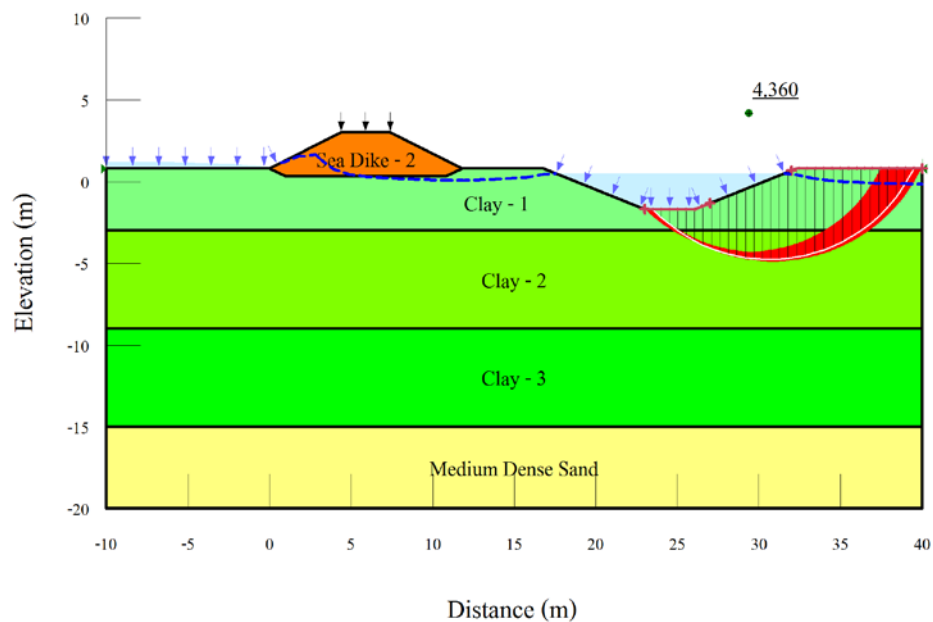
ภาพภาคผนวก ข-29 การวิบัติของคันดินบริเวณคลังของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



ภาพภาคผนวก ข-30 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



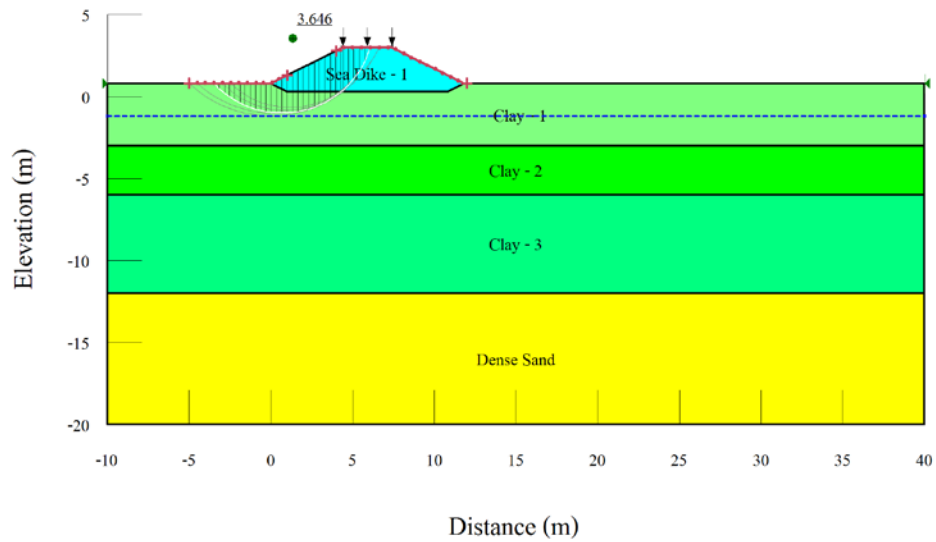
ภาพภาคผนวก ข-31 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



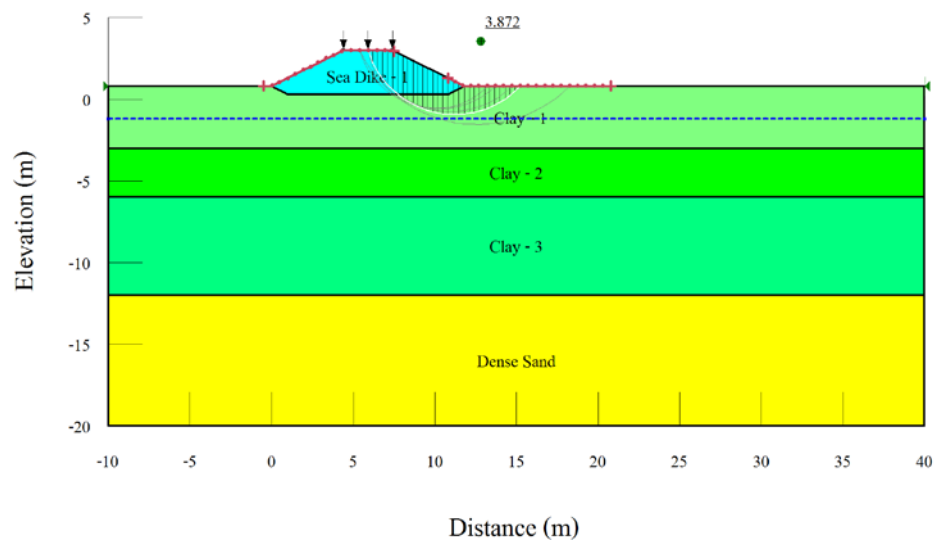
ภาพภาคผนวก ข-32 การวิบัติของคันดินบริเวณตลิ่งของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-1 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ภาคผนวก ข

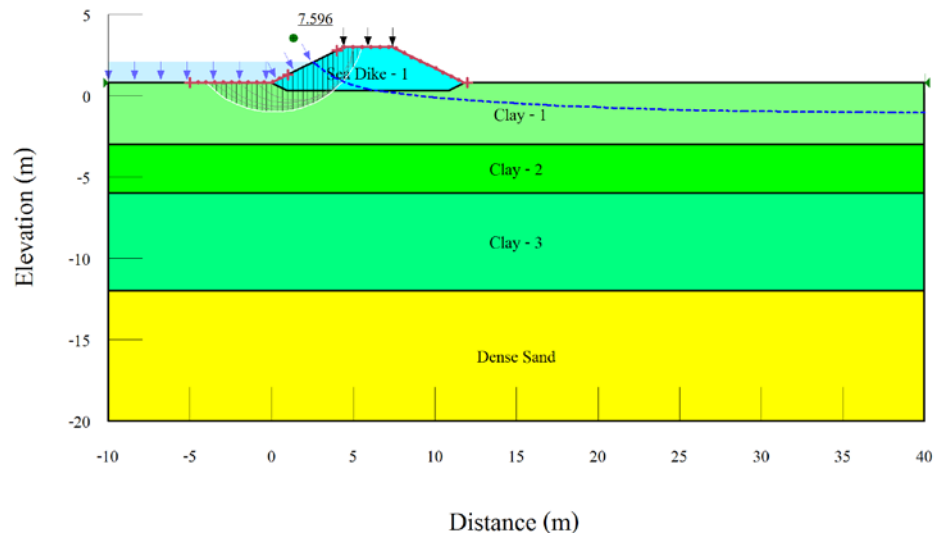
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเสถียรภาพคันดินและทางน้ำในช่วงพื้นที่ BH-2



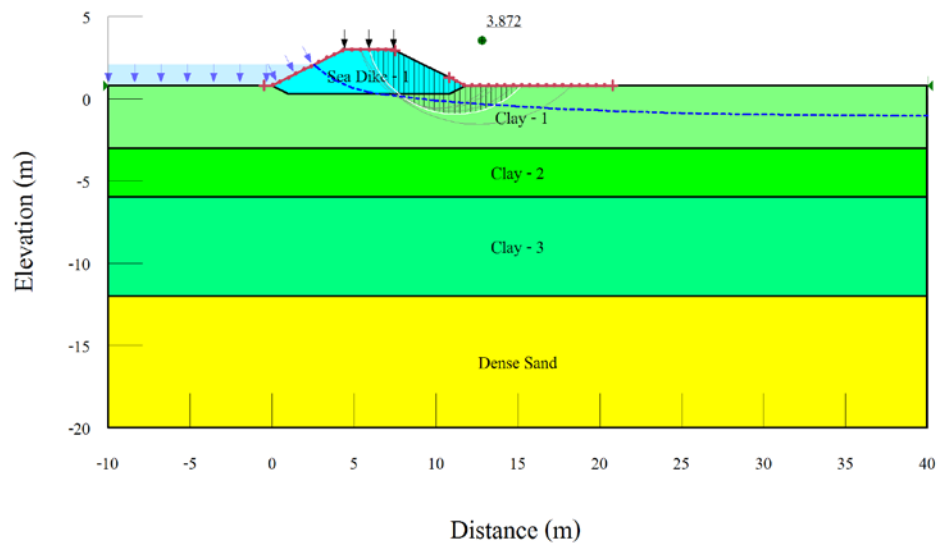
ภาพภาคผนวก ซ-1 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



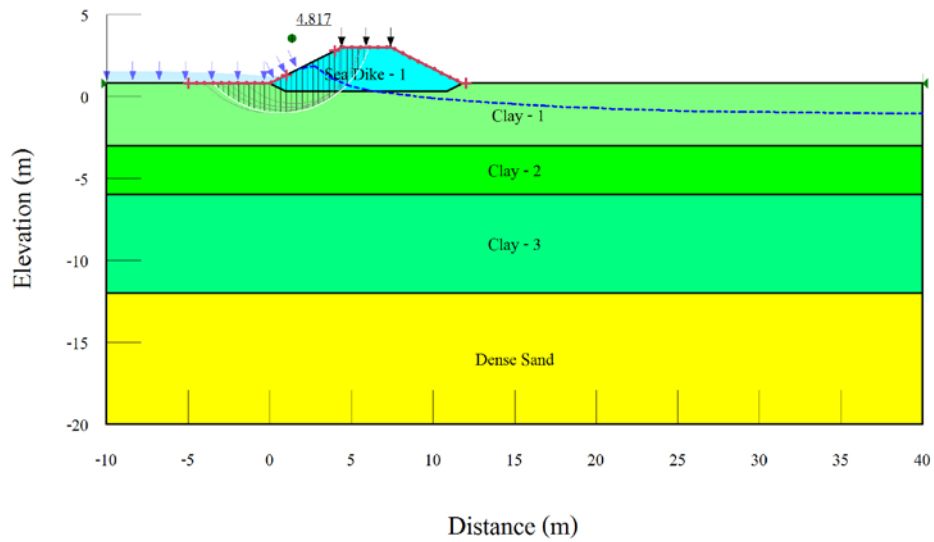
ภาพภาคผนวก ซ-2 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



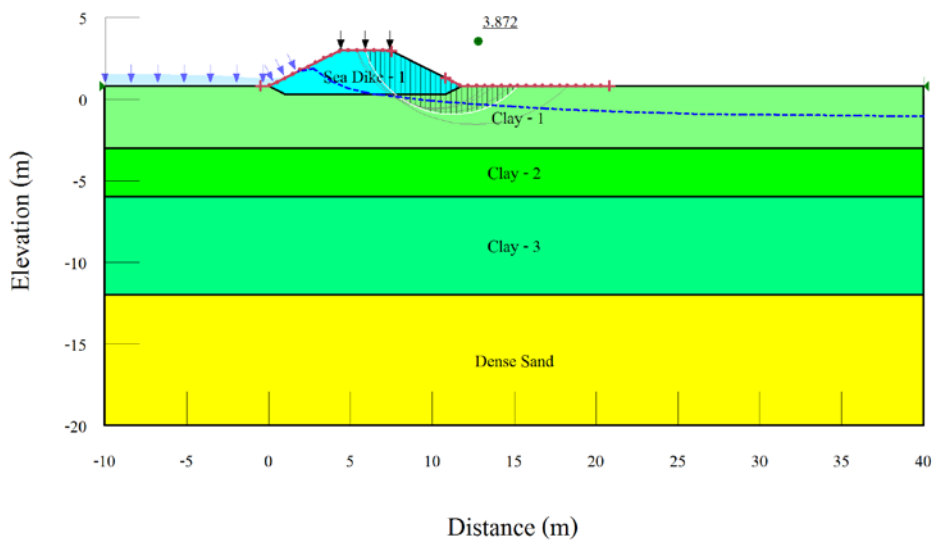
ภาพภาคผนวก ซ-3 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



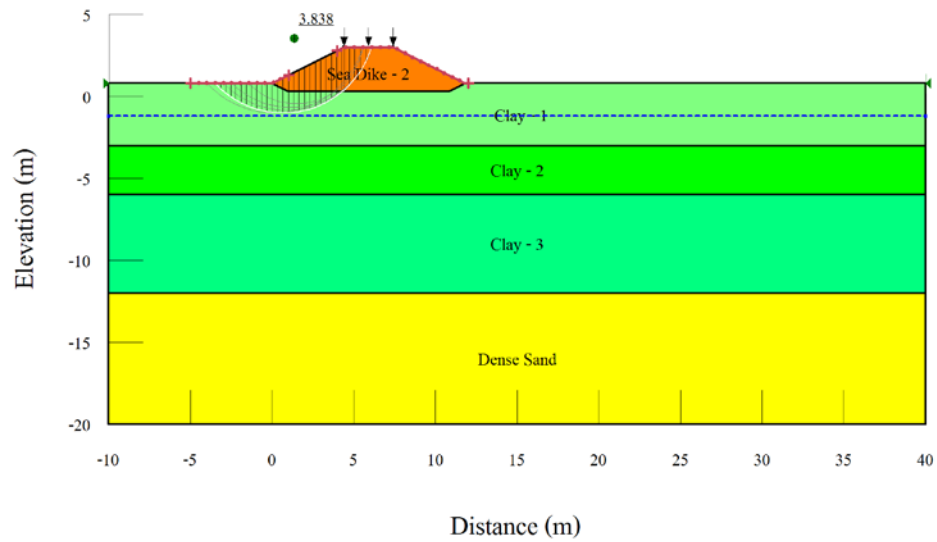
ภาพภาคผนวก ซ-4 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



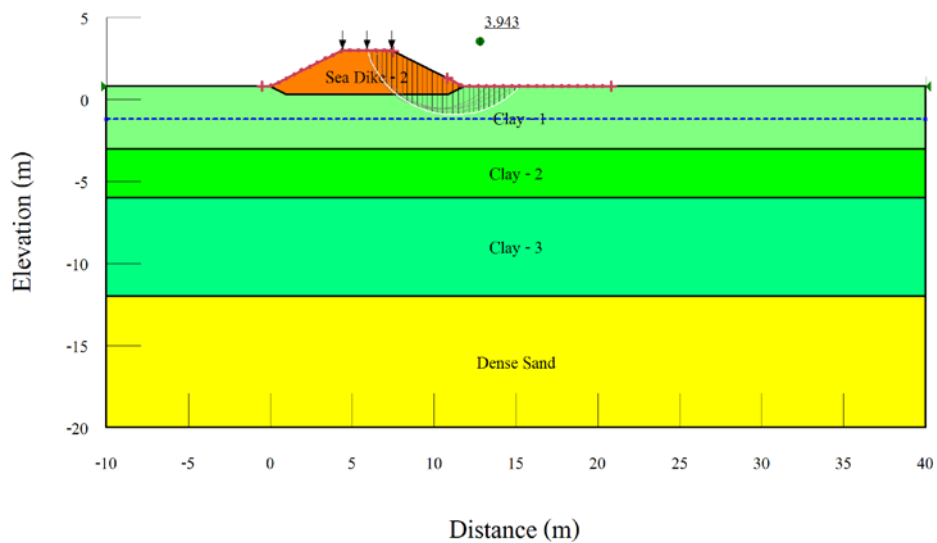
ภาพภาคผนวก ซ-5 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



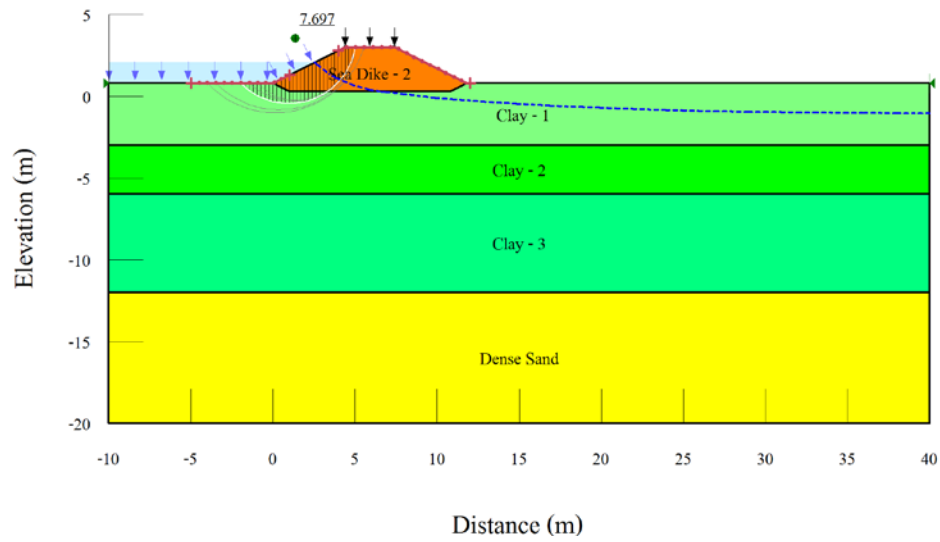
ภาพภาคผนวก ซ-6 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



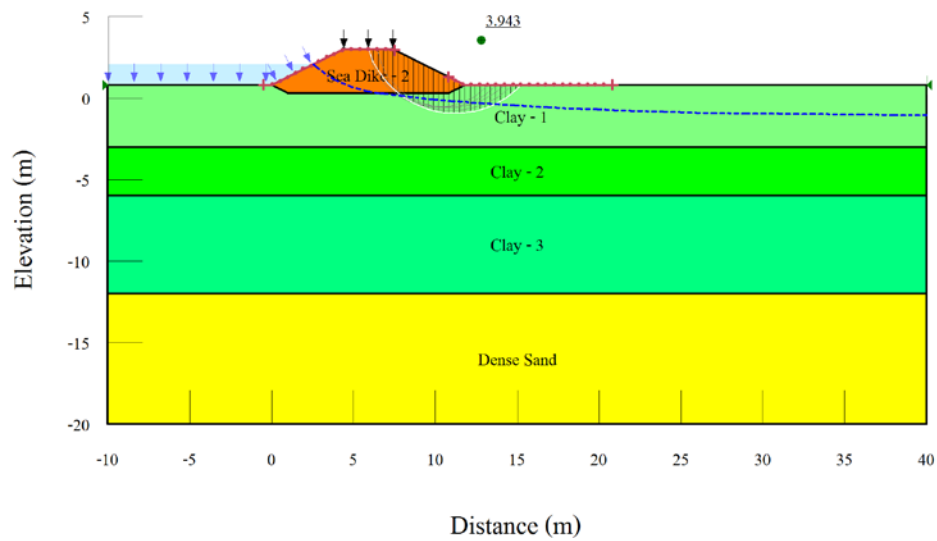
ภาพภาคผนวก ซ-7 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



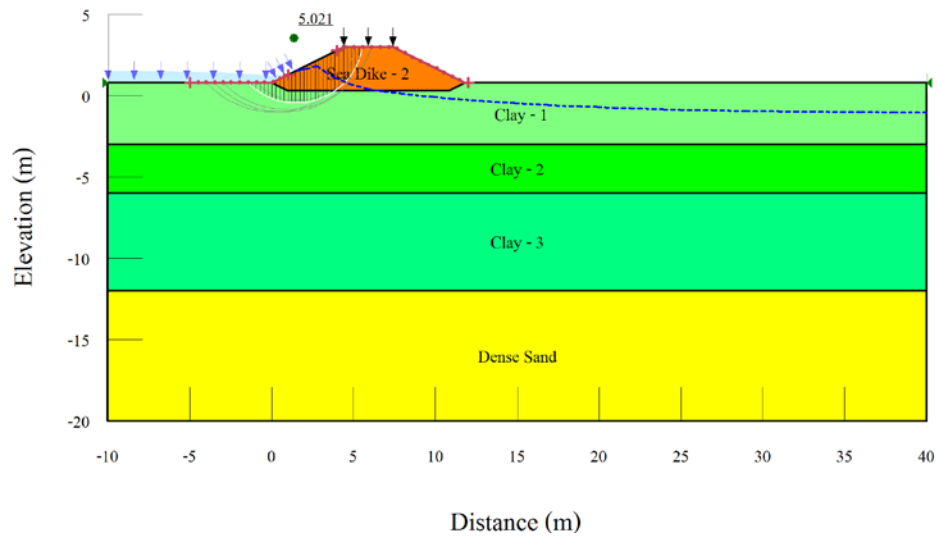
ภาพภาคผนวก ซ-8 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



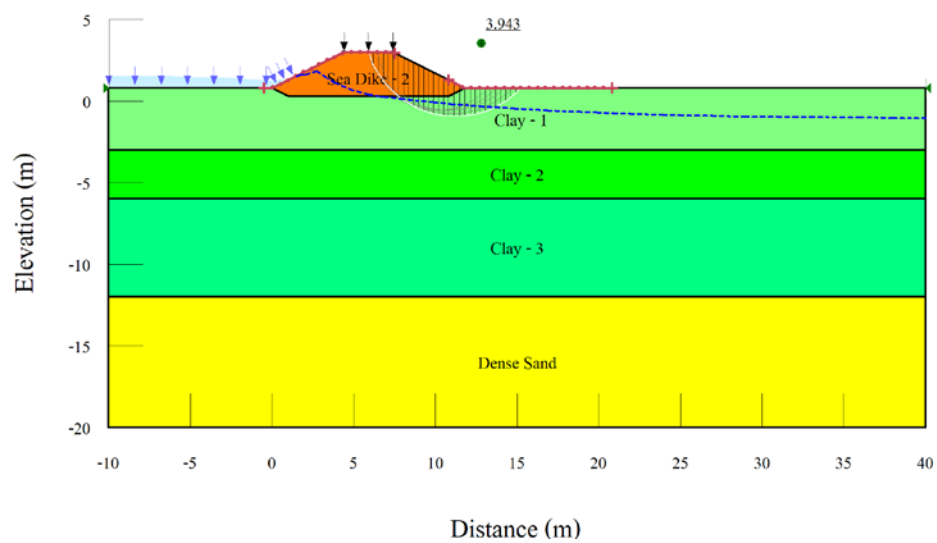
ภาพภาคผนวก ซ-9 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



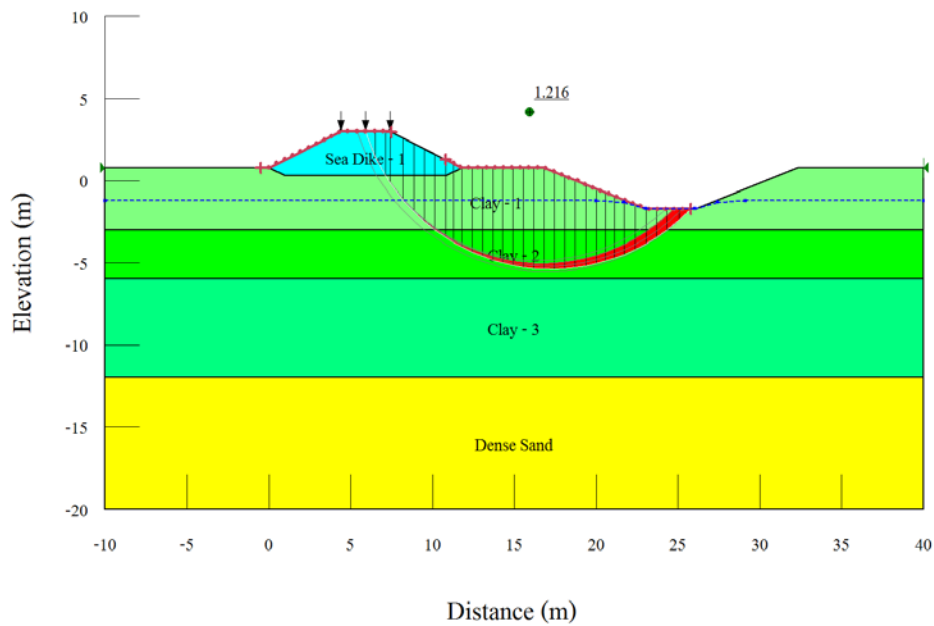
ภาพภาคผนวก ซ-10 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



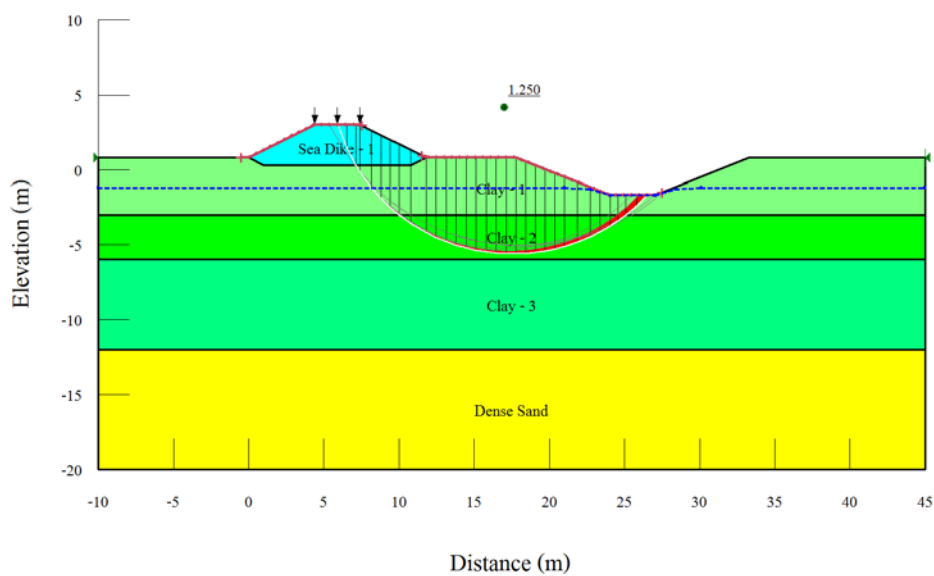
ภาพภาคผนวก ซ-11 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเล ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



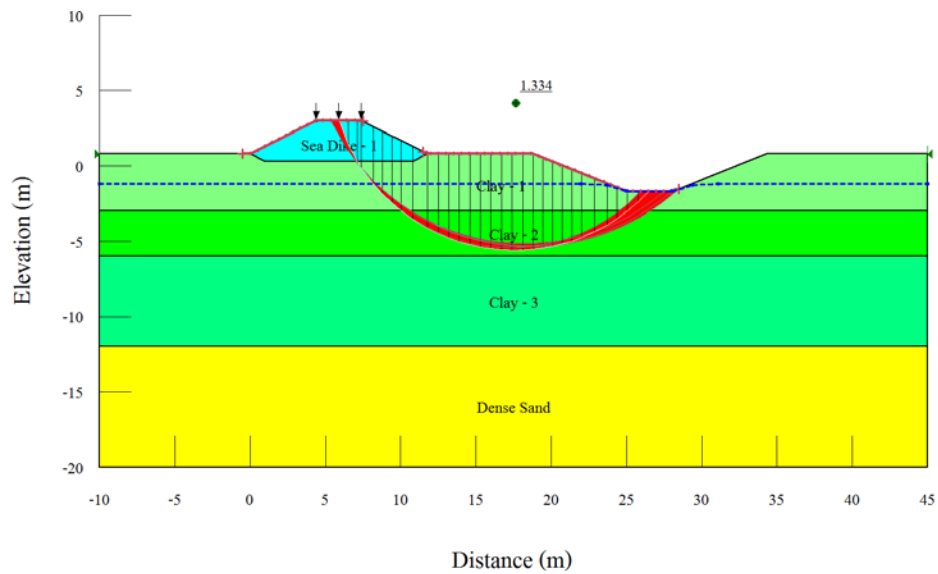
ภาพภาคผนวก ซ-12 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดิน ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



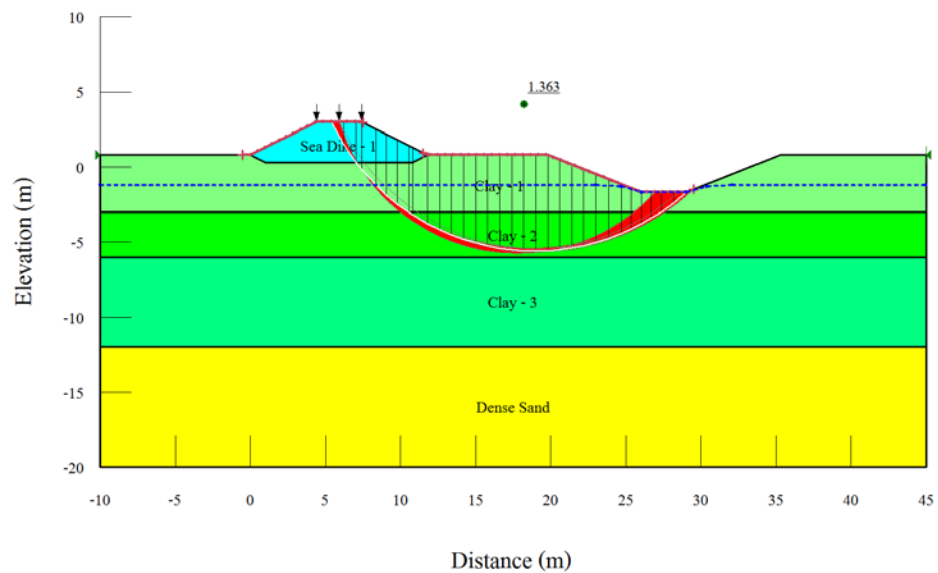
ภาพภาคผนวก ซ-13 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



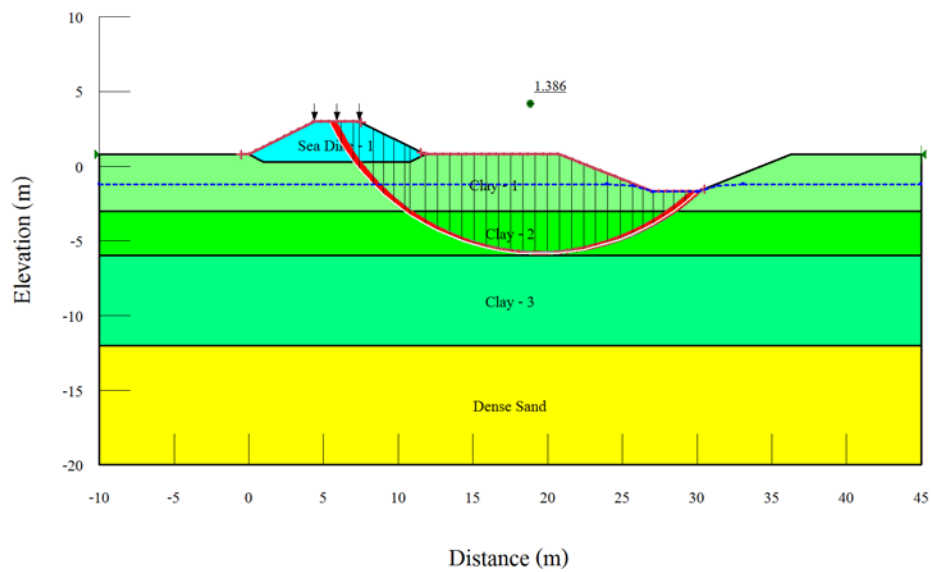
ภาพภาคผนวก ซ-14 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 6 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



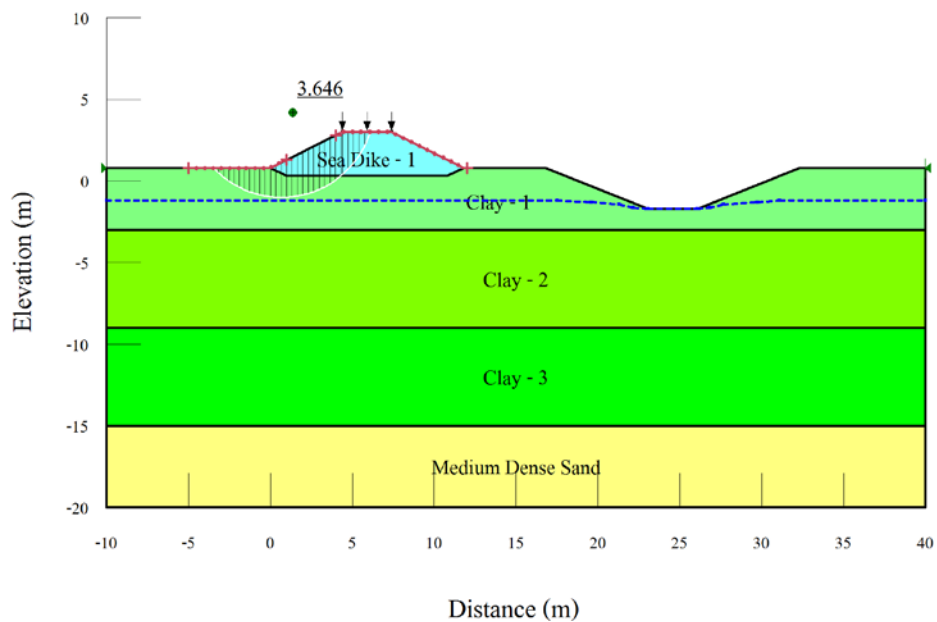
ภาพภาคผนวก ข-15 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 7 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



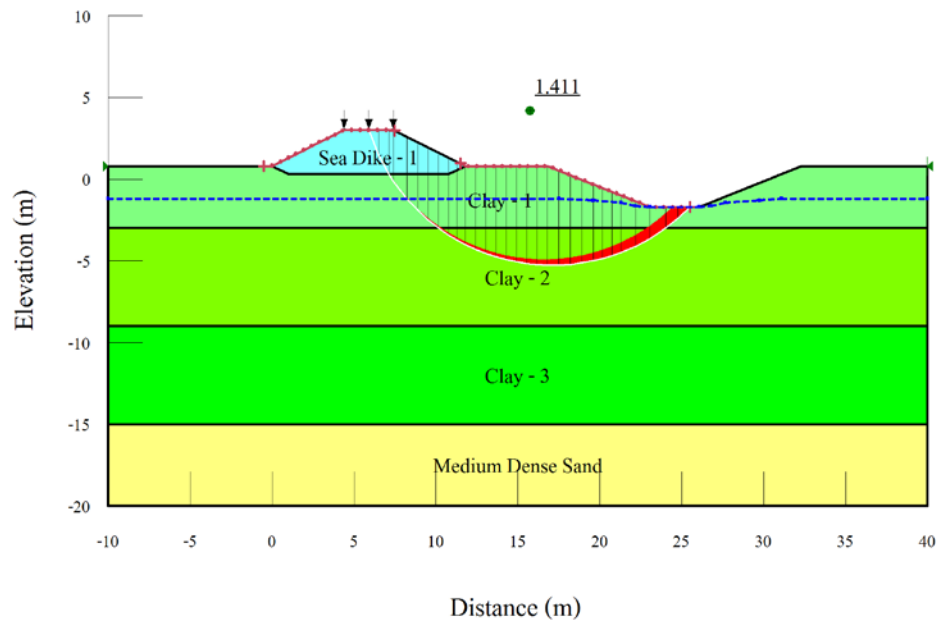
ภาพภาคผนวก ข-16 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 8 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



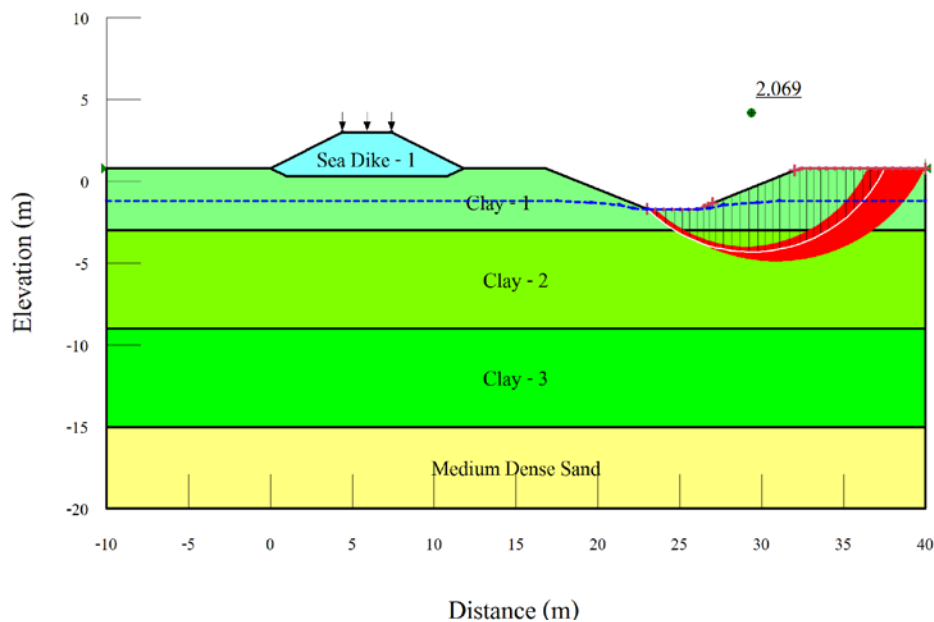
ภาพภาคผนวก ซ-17 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 9 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



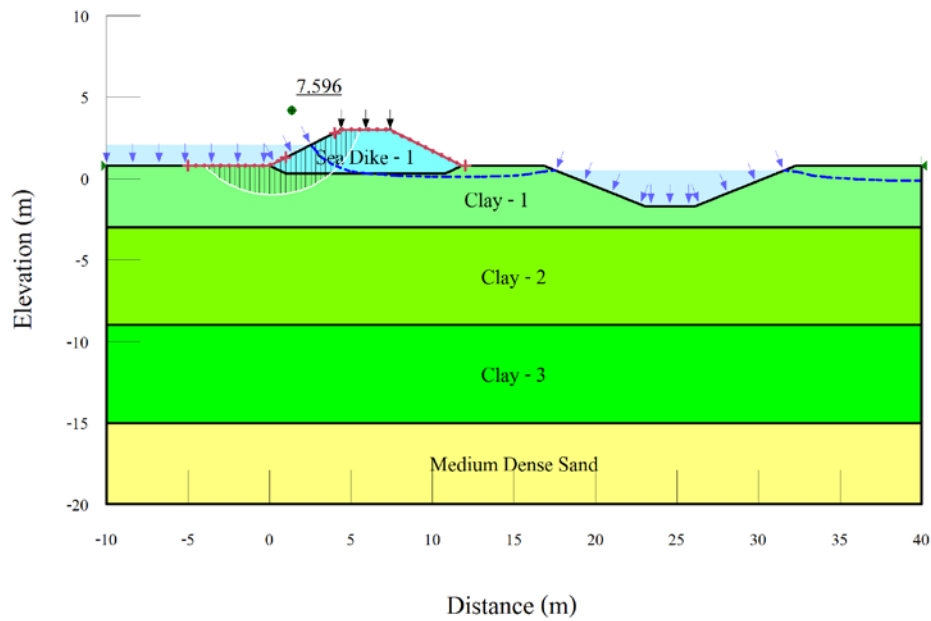
ภาพภาคผนวก ซ-18 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



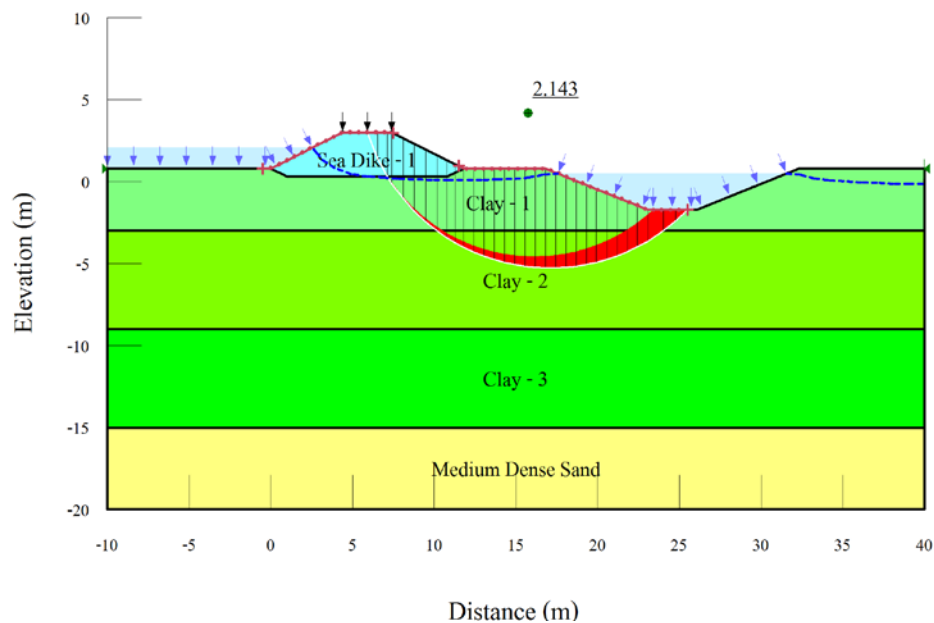
ภาพภาคผนวก ซ-19 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



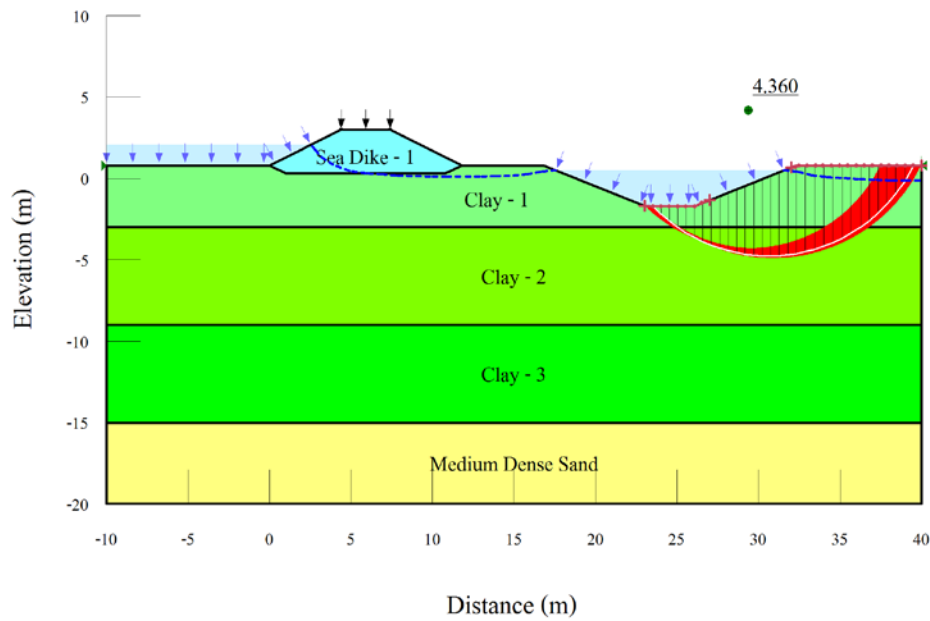
ภาพภาคผนวก ซ-20 การวิบัติของคันดินบริเวณคลังของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



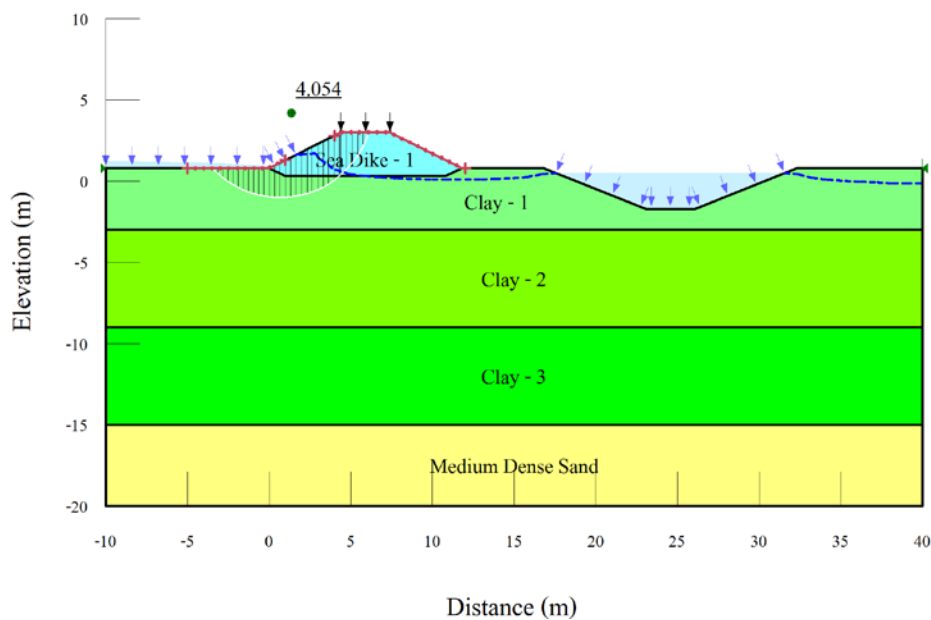
ภาพภาคผนวก ข-21 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



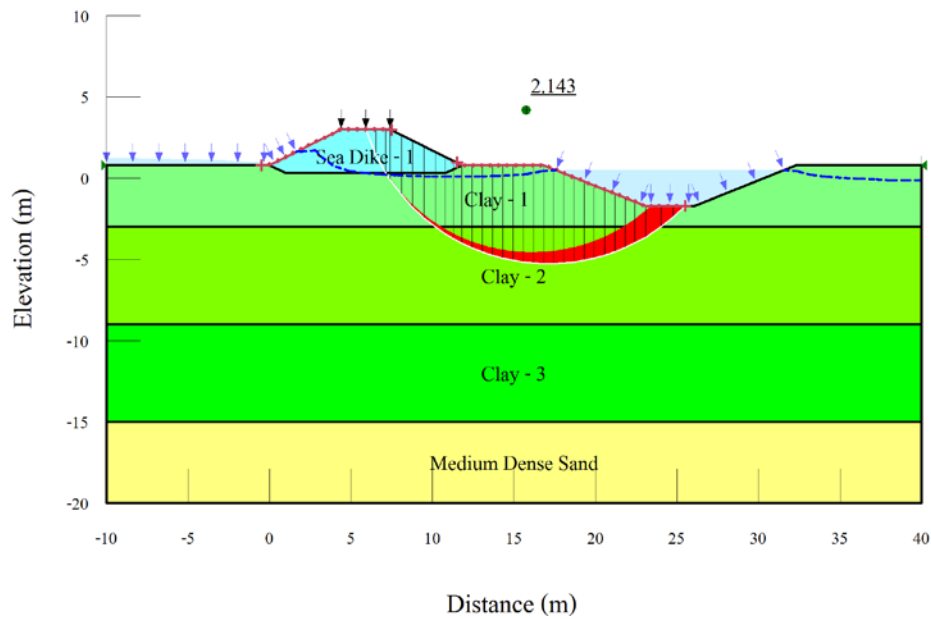
ภาพภาคผนวก ข-22 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



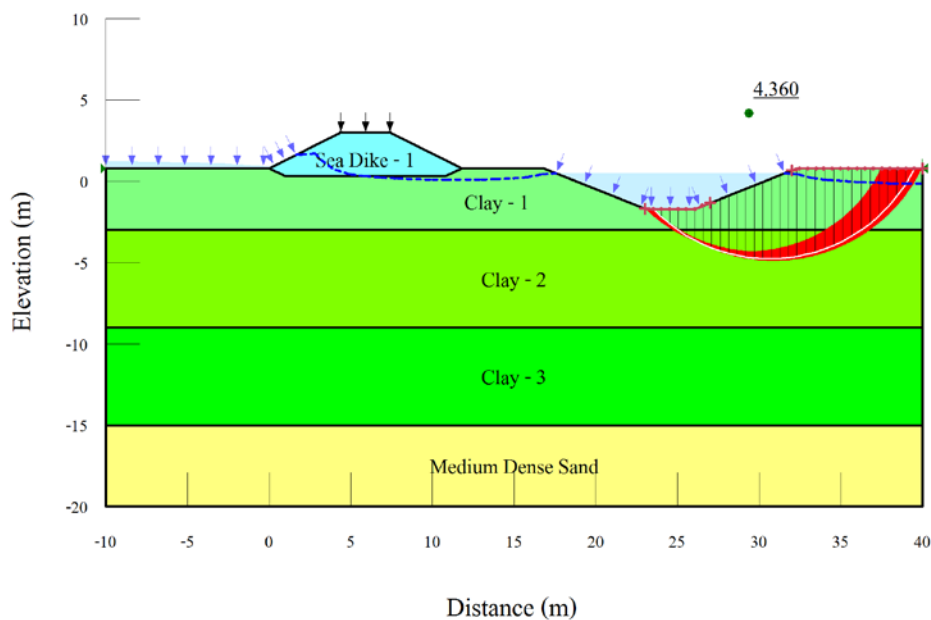
ภาพภาคผนวก ซ-23 การวิบัติของคันดินบริเวณตลิ่งของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



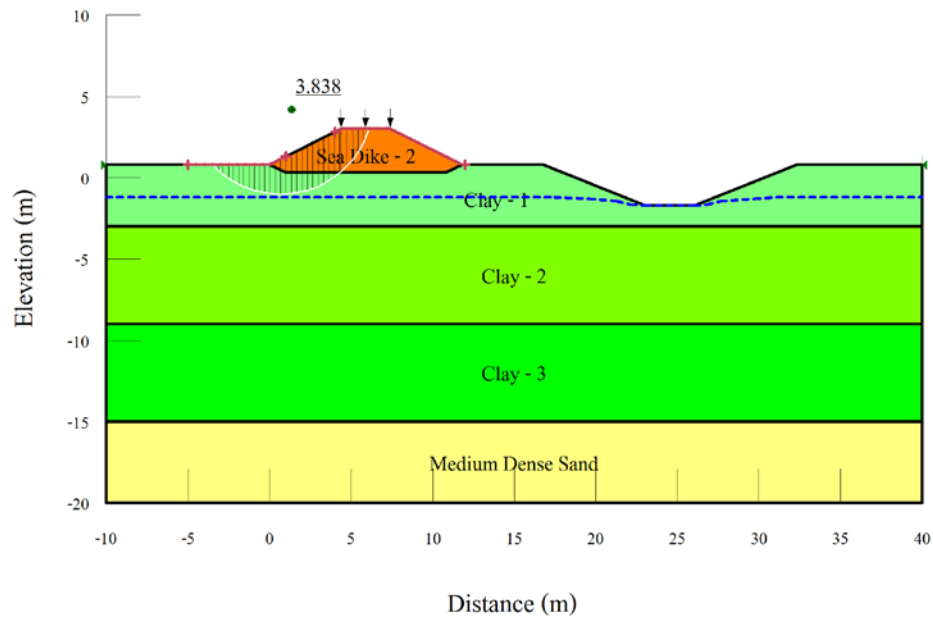
ภาพภาคผนวก ซ-24 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



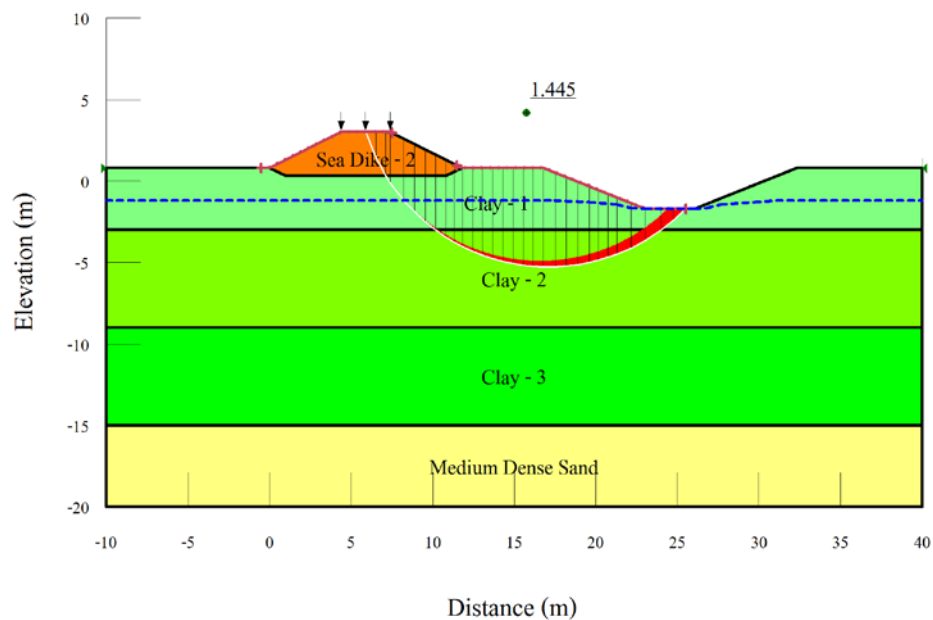
ภาพภาคผนวก ซ-25 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



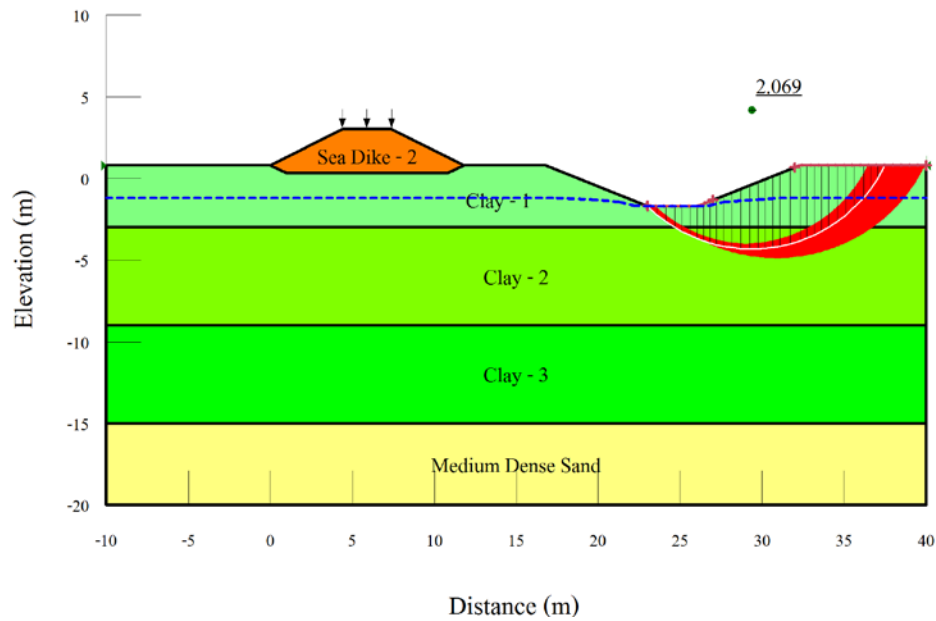
ภาพภาคผนวก ซ-26 การวิบัติของคันดินบริเวณตลิ่งของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-1 ถูกสร้างจากดินเหนียว CL ผสมปูนซีเมนต์ 2% ที่อายุการบ่ม 0 วัน



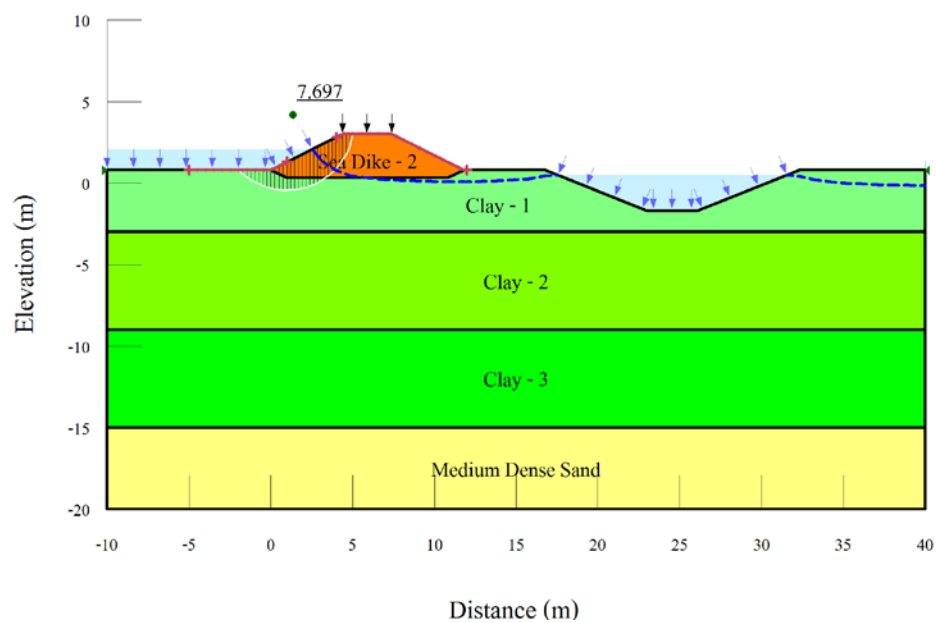
ภาพภาคผนวก ซ-27 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



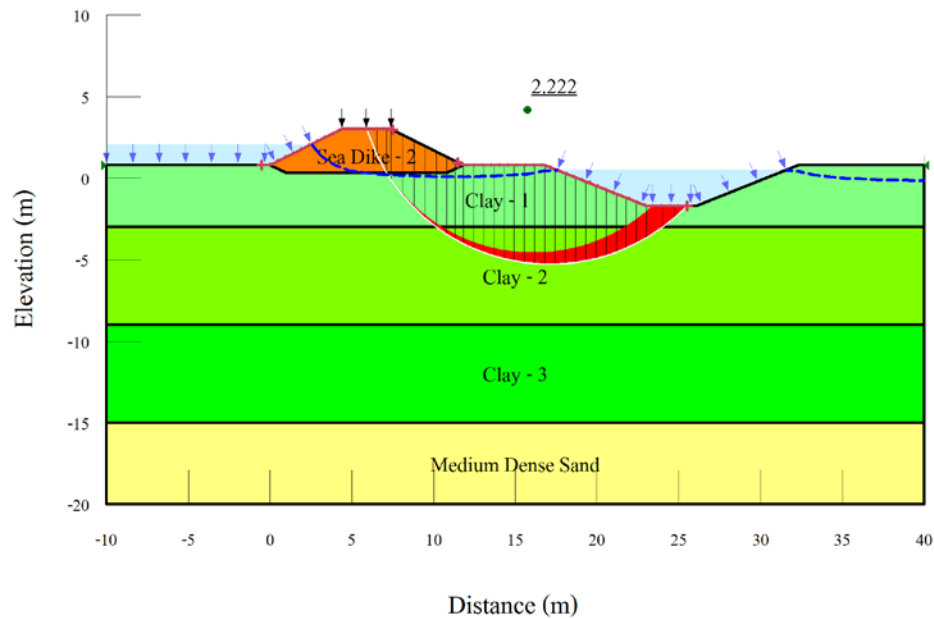
ภาพภาคผนวก ซ-28 การวัดของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



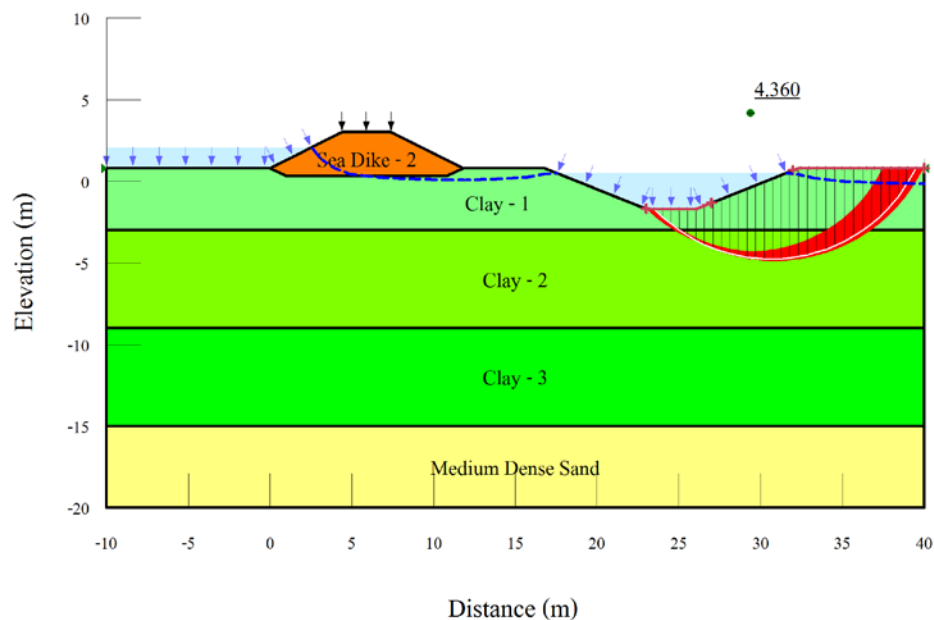
ภาพภาคผนวก ซ-29 การวัดระดับของคันดินบริเวณตลิ่งของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะเมื่อก่อสร้างเสร็จ ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



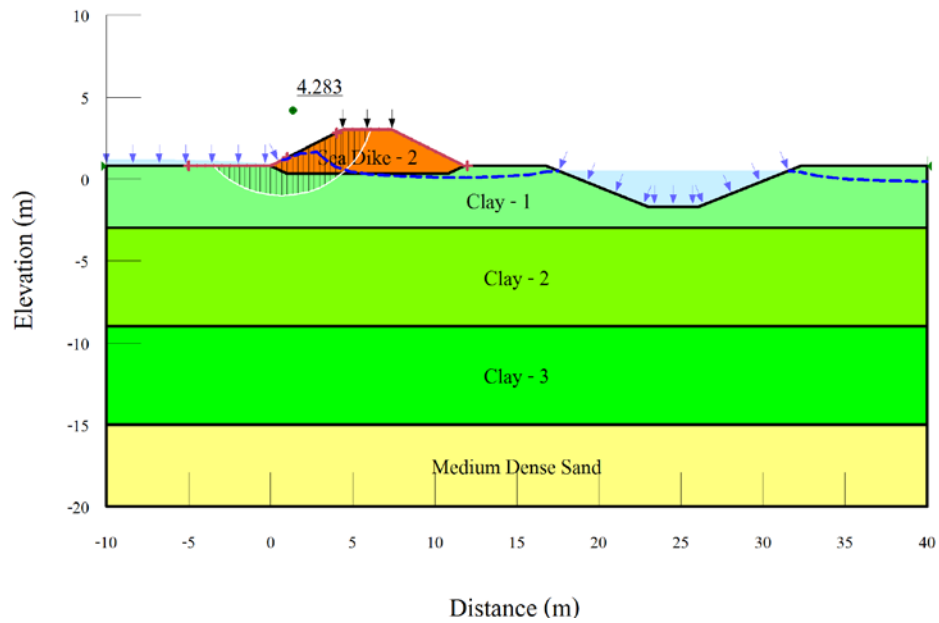
ภาพภาคผนวก ซ-30 การวัดระดับของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



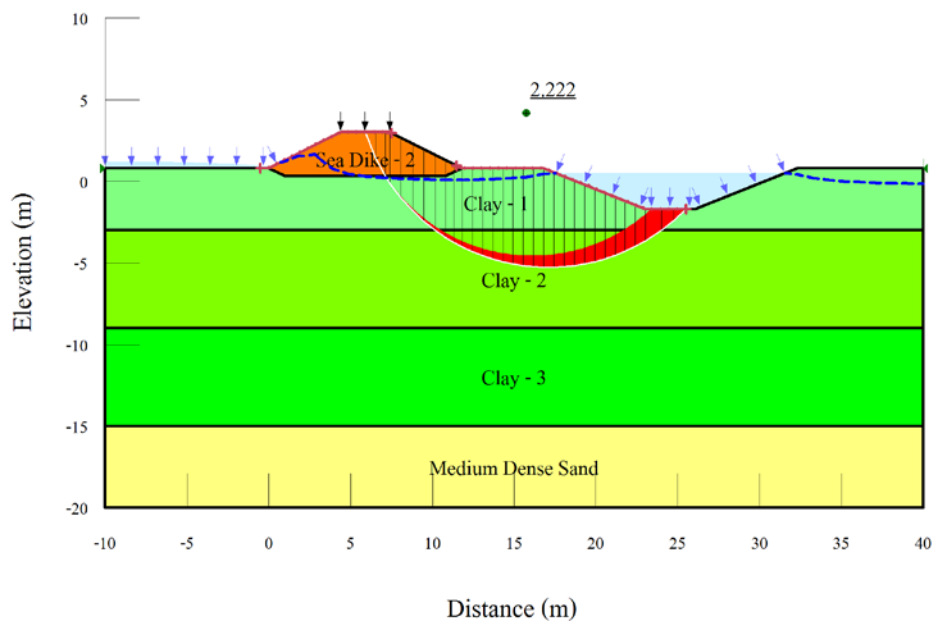
ภาพภาคผนวก ซ-31 การวิบัติของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



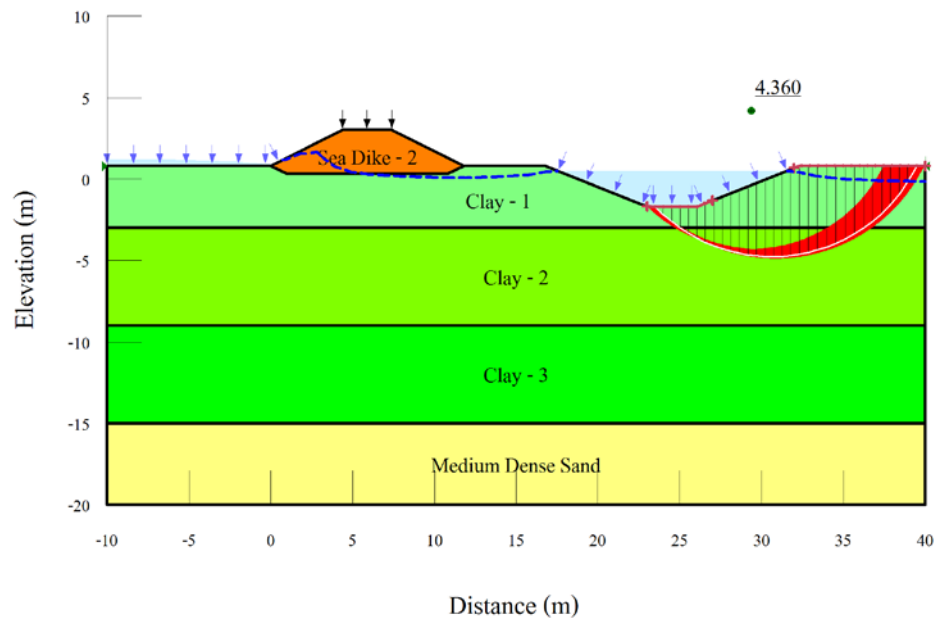
ภาพภาคผนวก ซ-32 การวิบัติของคันดินบริเวณคลังของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะใช้งาน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



ภาพภาคผนวก ซ-33 การวัดค่าของคันดินบริเวณฝั่งทะเลระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



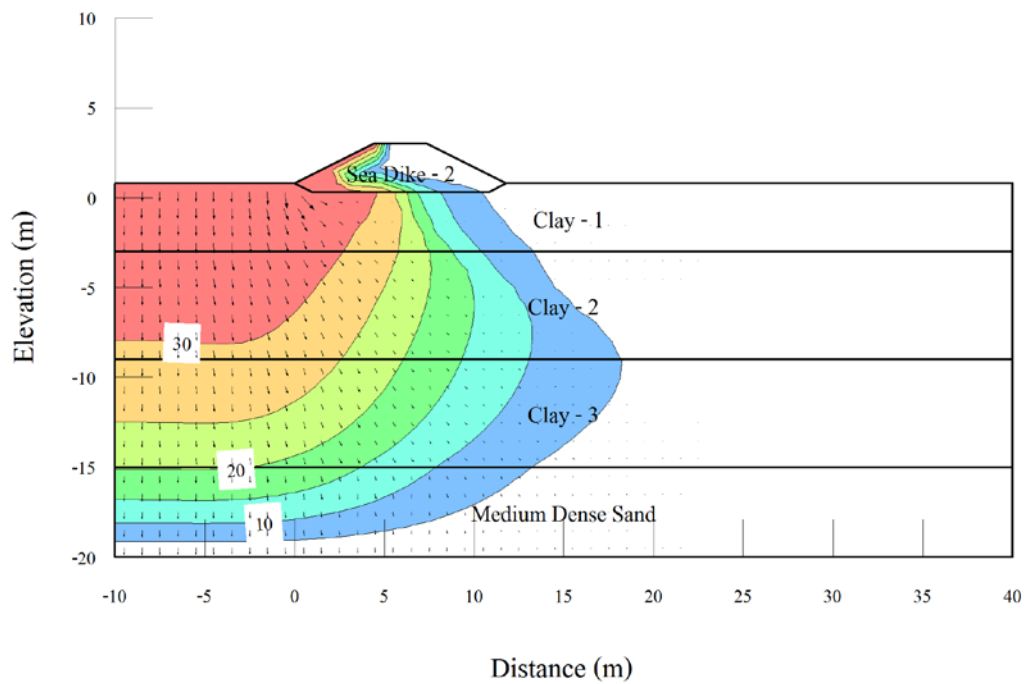
ภาพภาคผนวก ซ-34 การวัดค่าของคันดินบริเวณฝั่งแผ่นดินระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 10 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน



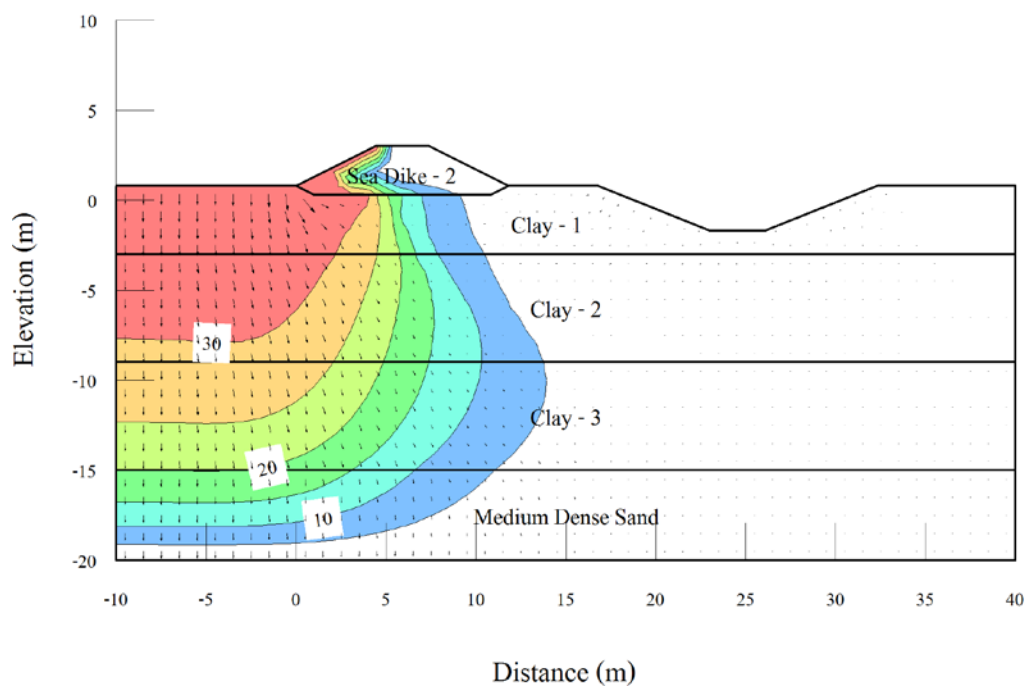
ภาพภาคผนวก ซ-35 การวิบัติของคันดินบริเวณตลิ่งของทางน้ำระยะห่างระหว่างคันดินและทางน้ำ 5 เมตร ขณะระดับน้ำลดลงอย่างกะทันหัน ในช่วงพื้นที่ BH-2 โดยคันดิน Sea Dike-2 ถูกสร้างจากดินเหนียว CH ผสมปูนซีเมนต์ 5% ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ภาคผนวก ฅ

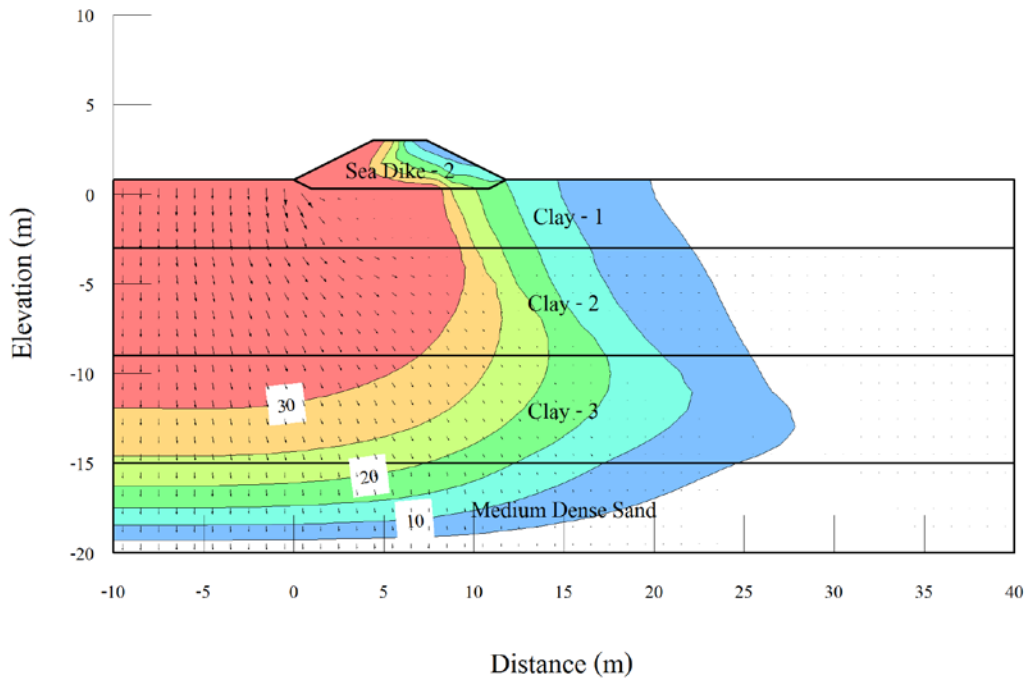
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-1



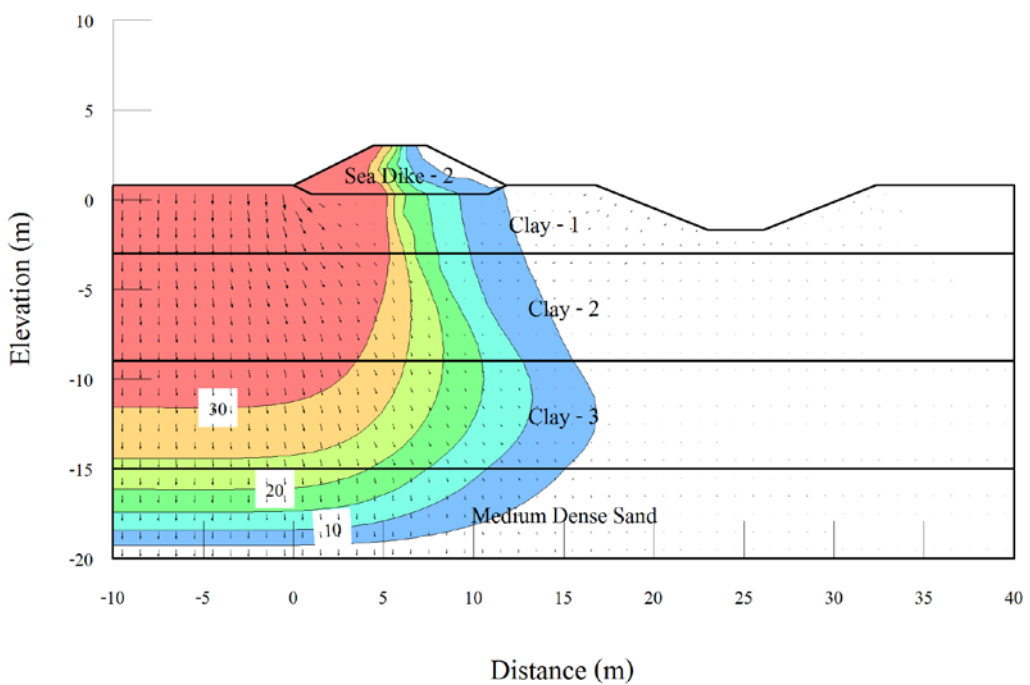
ภาพภาคผนวก ฉ-1 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 1 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



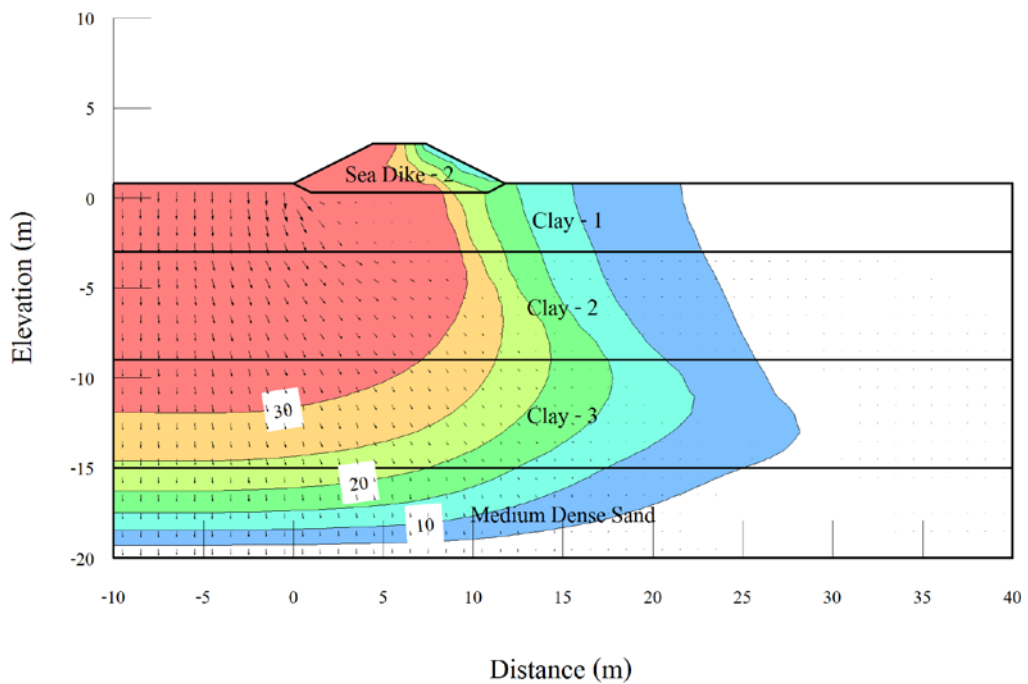
ภาพภาคผนวก ฉ-2 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 1 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



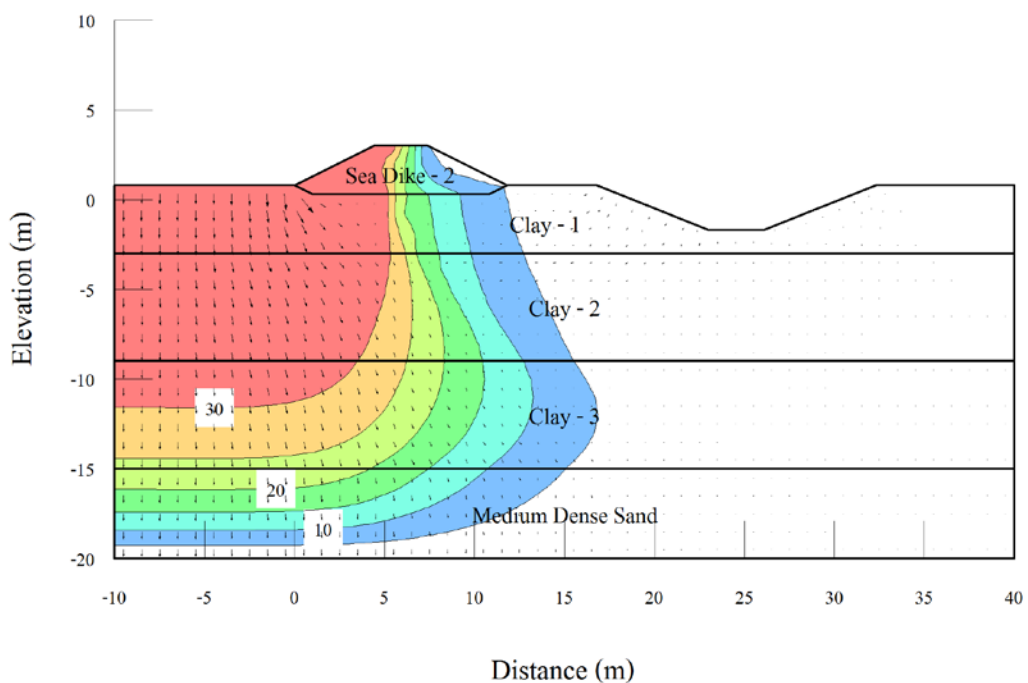
ภาพภาคผนวก ฉ-3 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 10 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



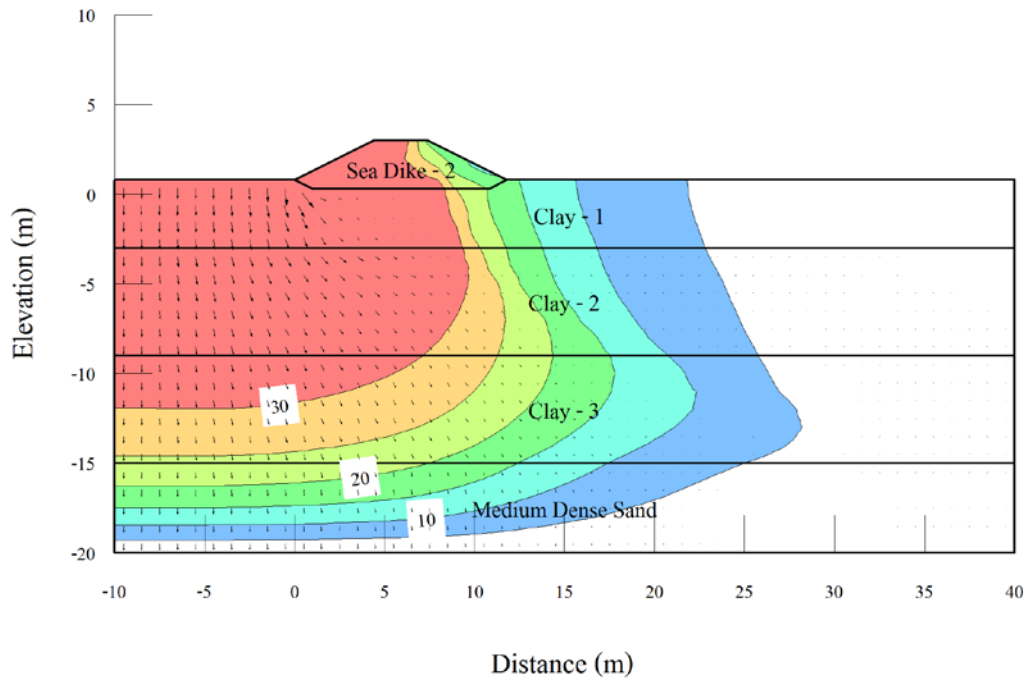
ภาพภาคผนวก ฉ-4 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 10 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



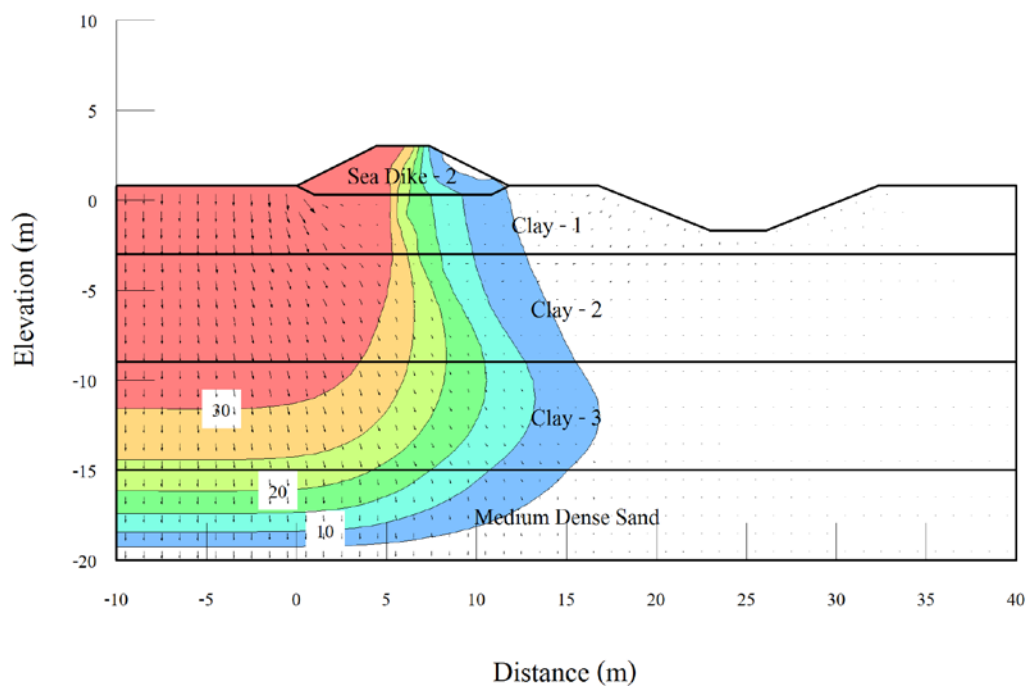
ภาพภาคผนวก ฉ-5 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 20 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



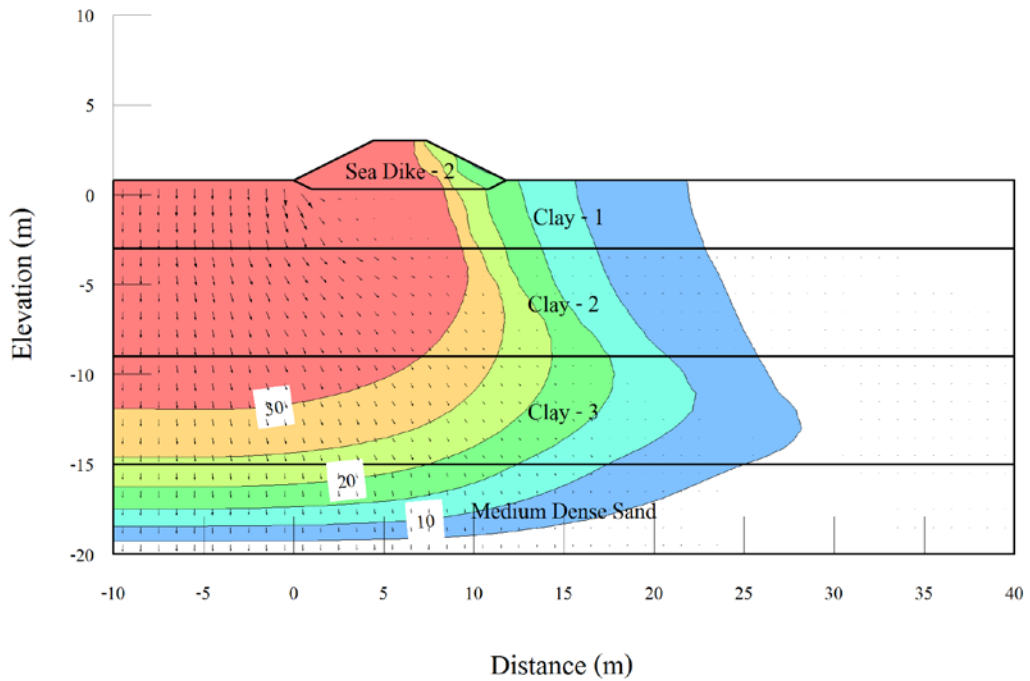
ภาพภาคผนวก ฉ-6 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 20 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



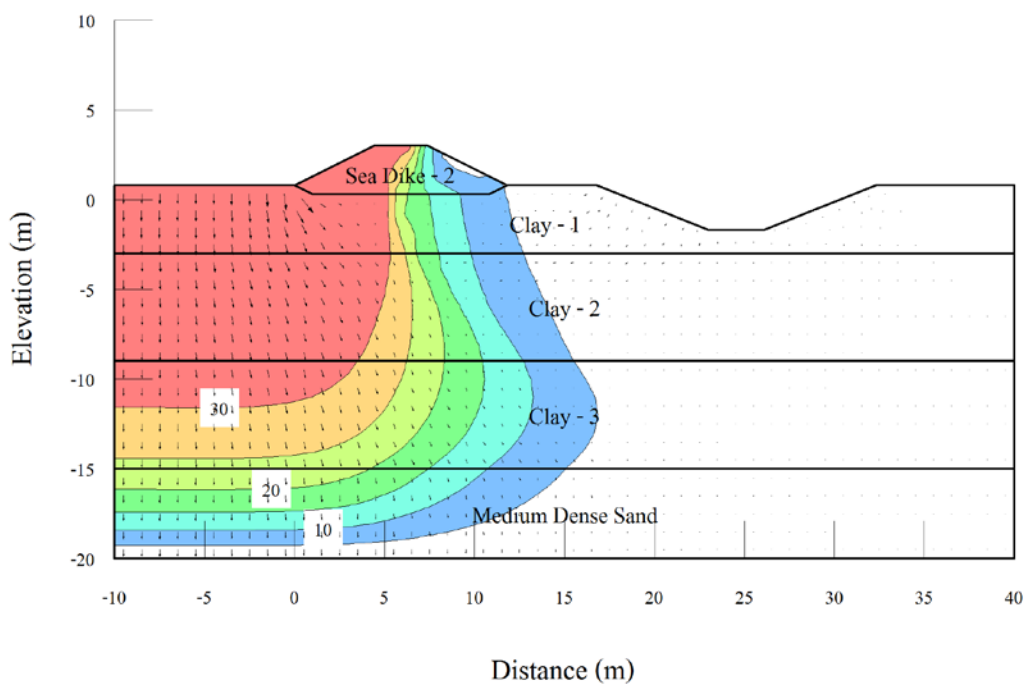
ภาพภาคผนวก ฉ-7 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 30 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



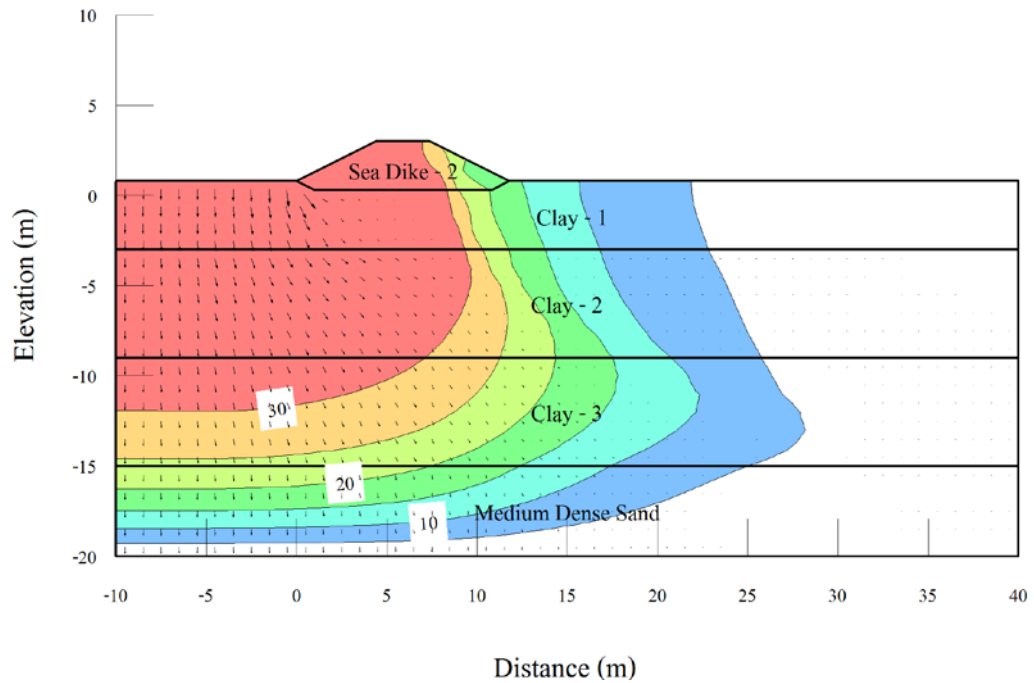
ภาพภาคผนวก ฉ-8 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 30 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



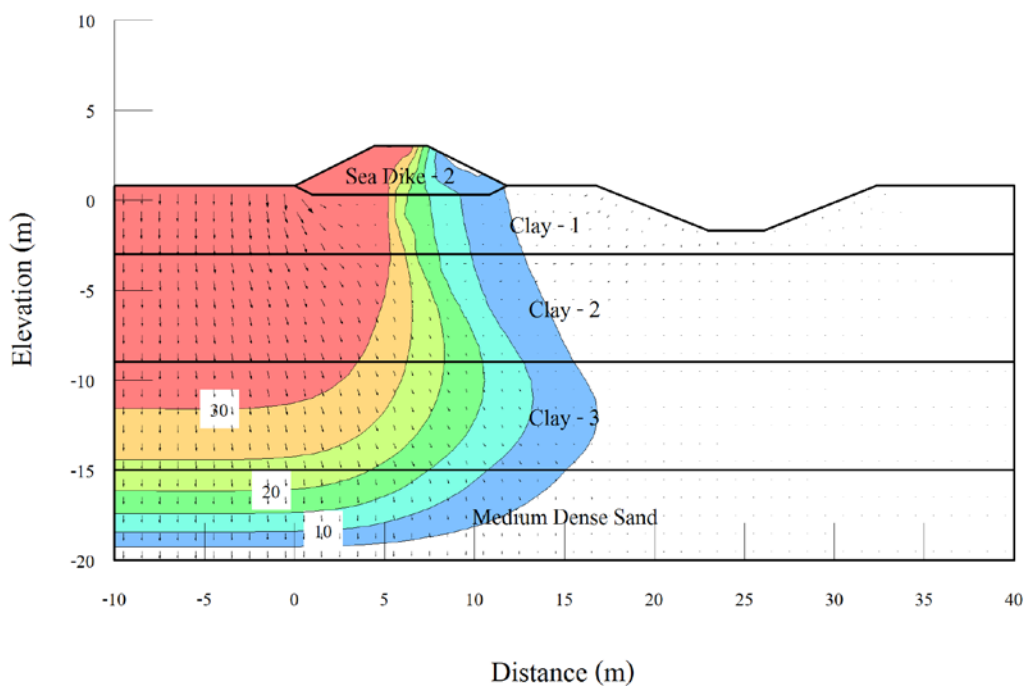
ภาพภาคผนวก ฉ-9 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 40 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



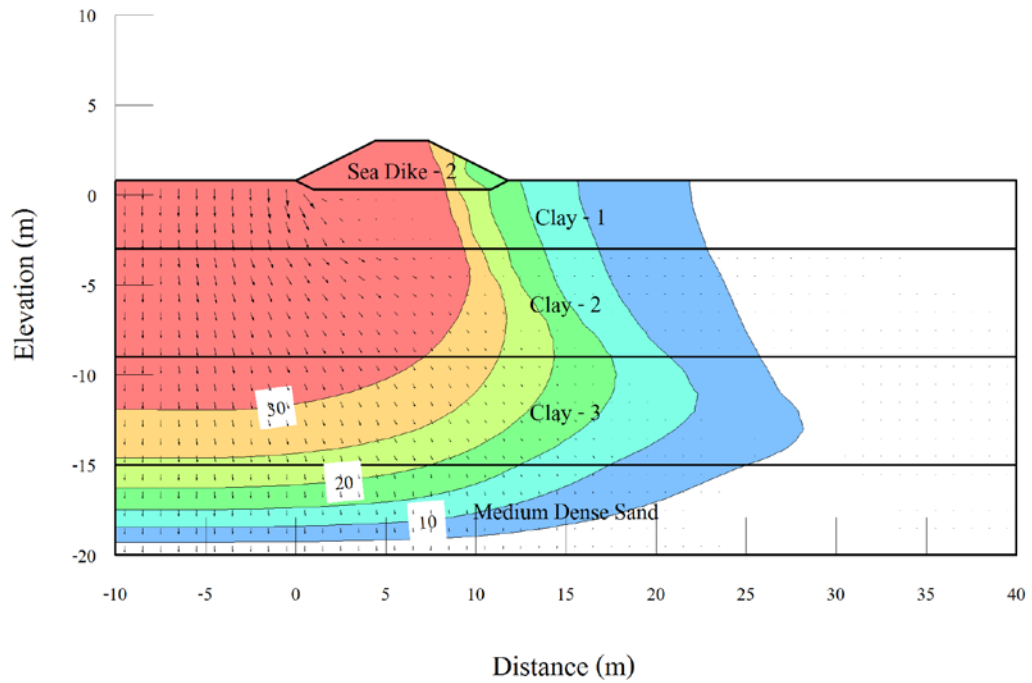
ภาพภาคผนวก ฉ-10 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 40 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



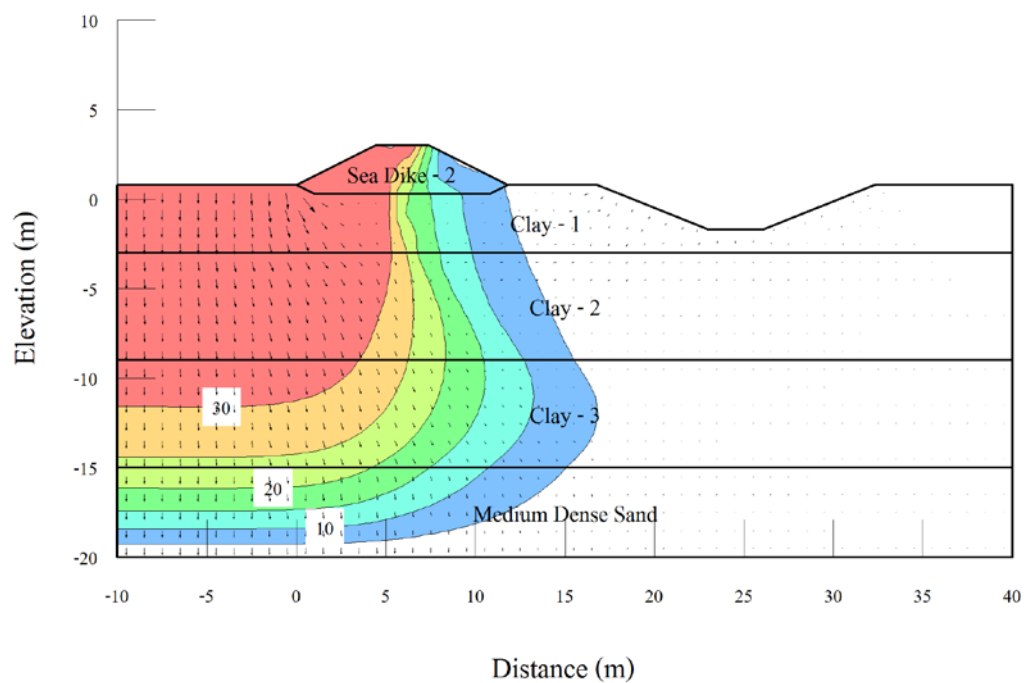
ภาพภาคผนวก ฉ-11 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 50 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



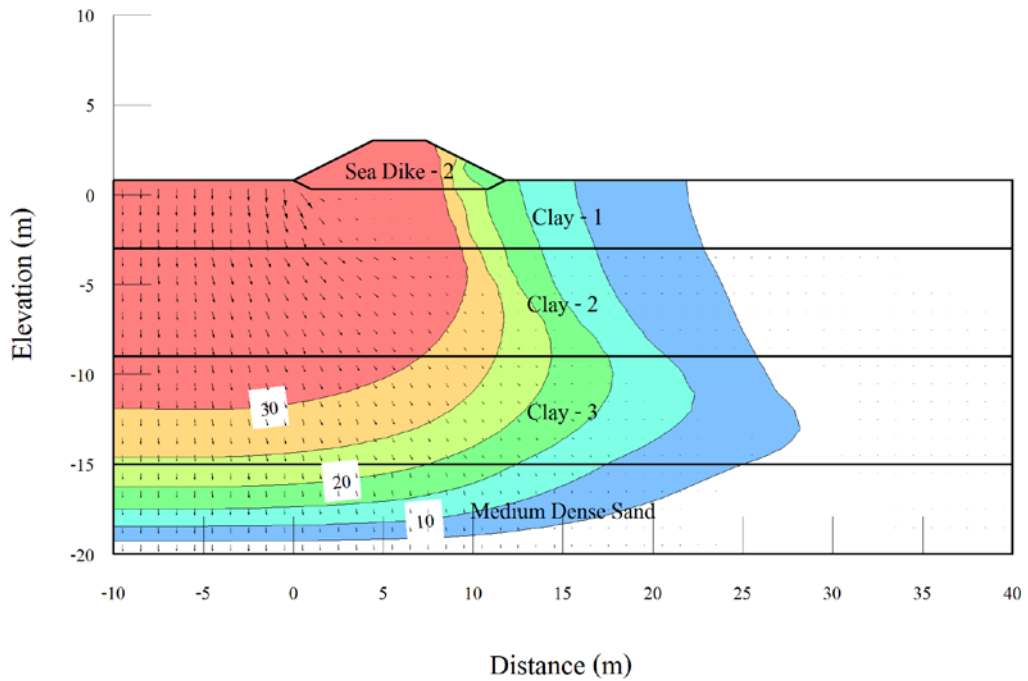
ภาพภาคผนวก ฉ-12 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 50 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



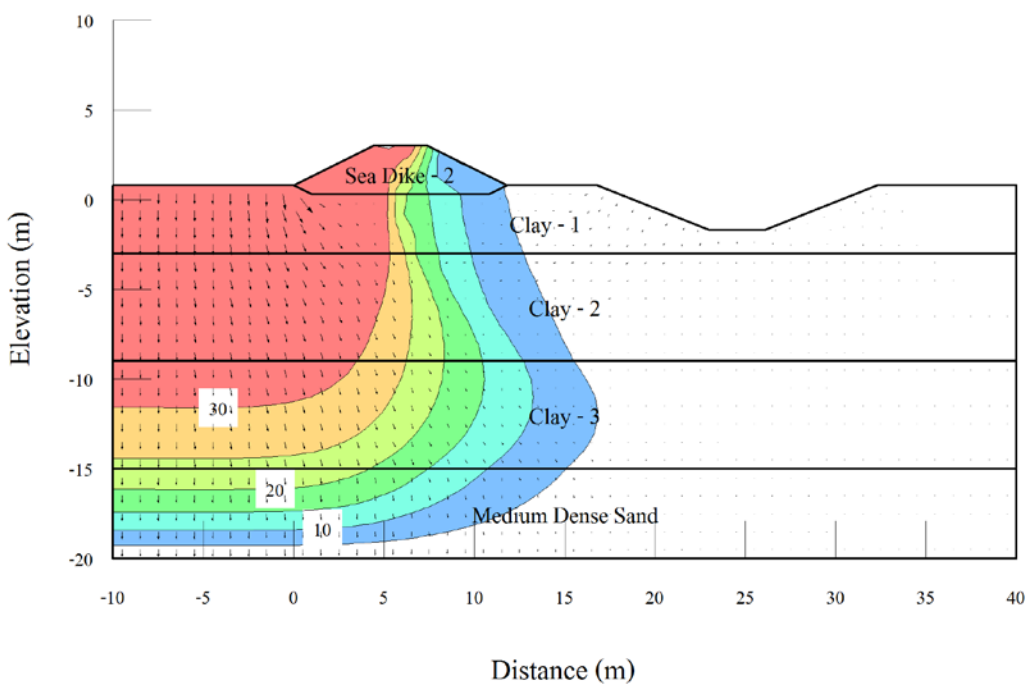
ภาพภาคผนวก ฉ-13 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 60 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



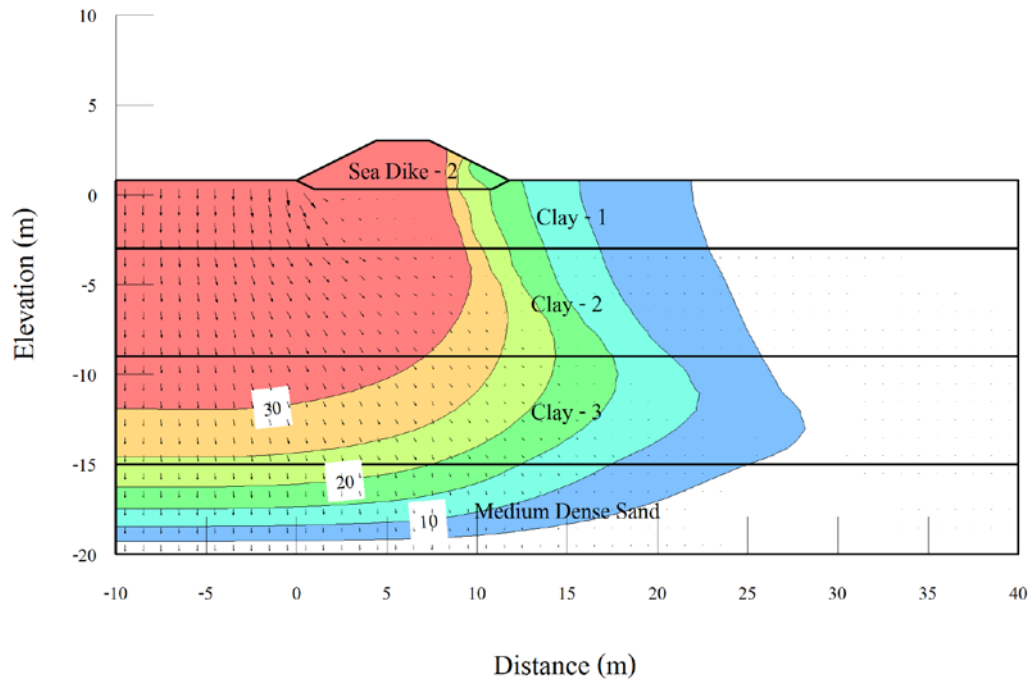
ภาพภาคผนวก ฉ-14 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 60 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



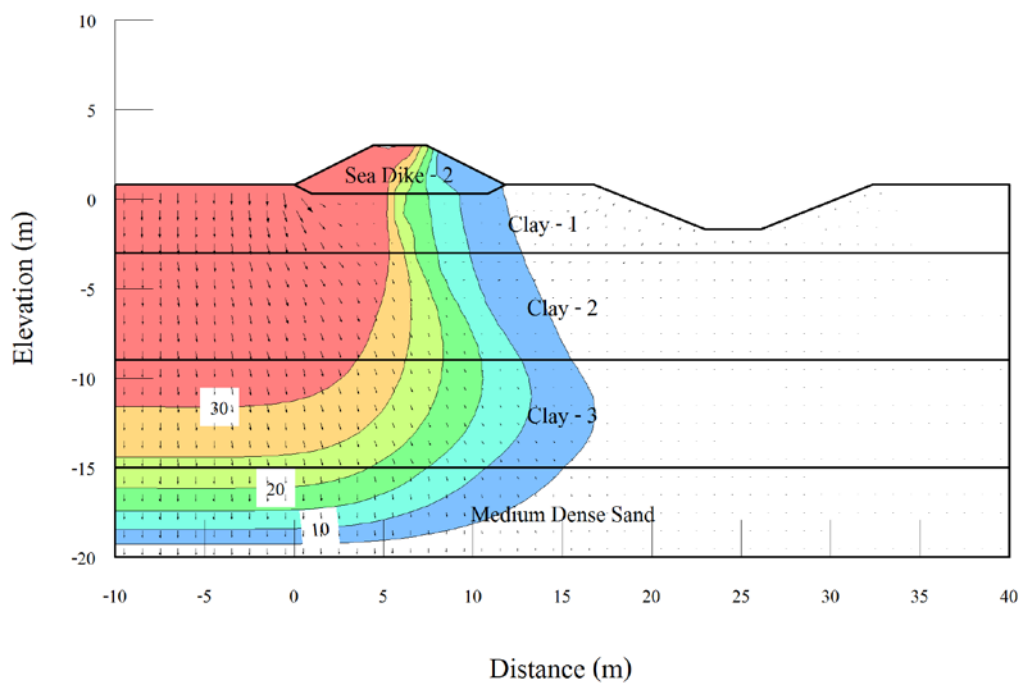
ภาพภาคผนวก ฉ-15 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 70 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



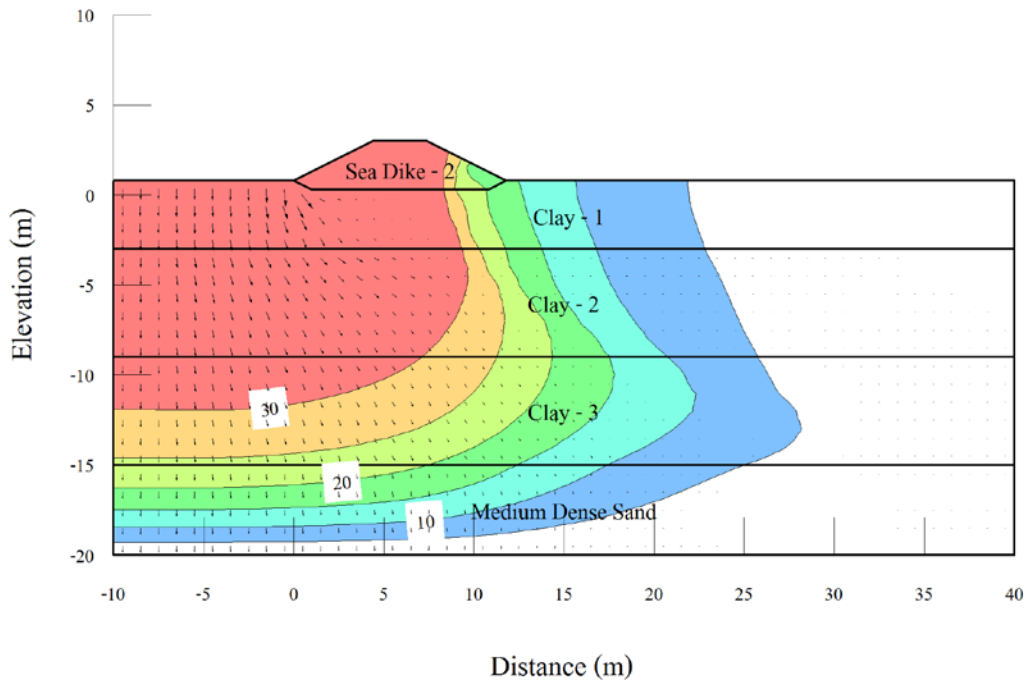
ภาพภาคผนวก ฉ-16 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 70 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



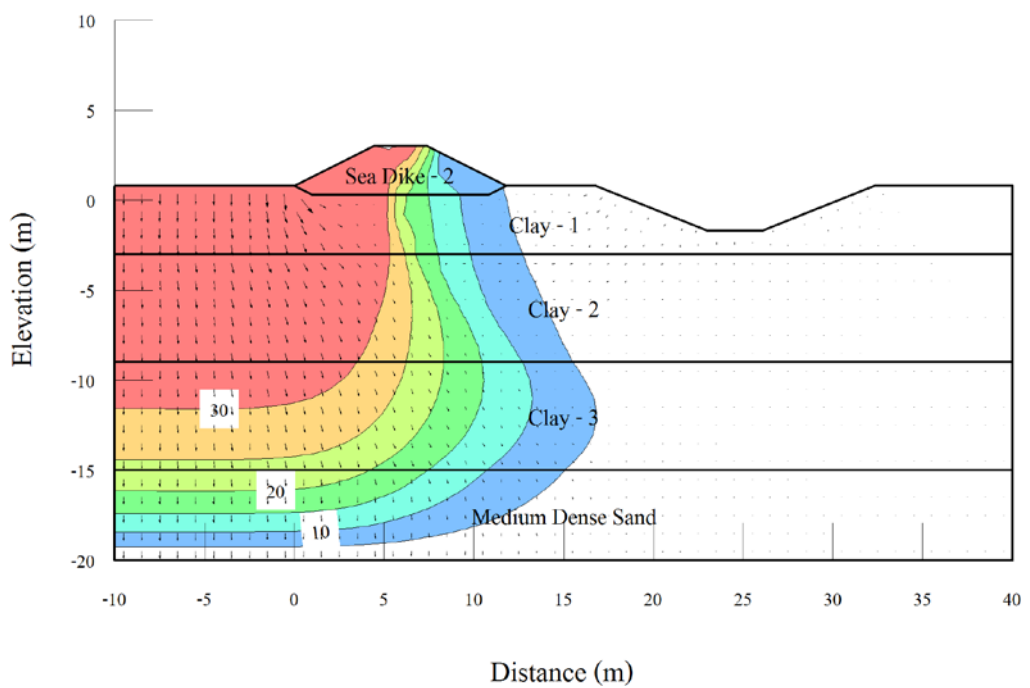
ภาพภาคผนวก ฉ-17 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 80 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



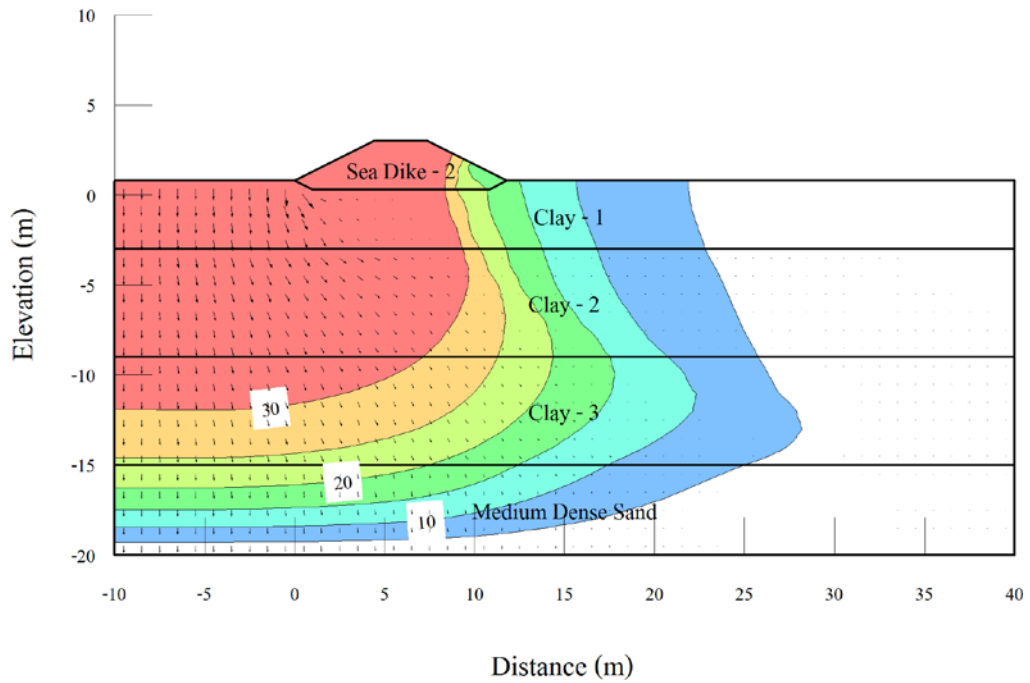
ภาพภาคผนวก ฉ-18 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 80 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



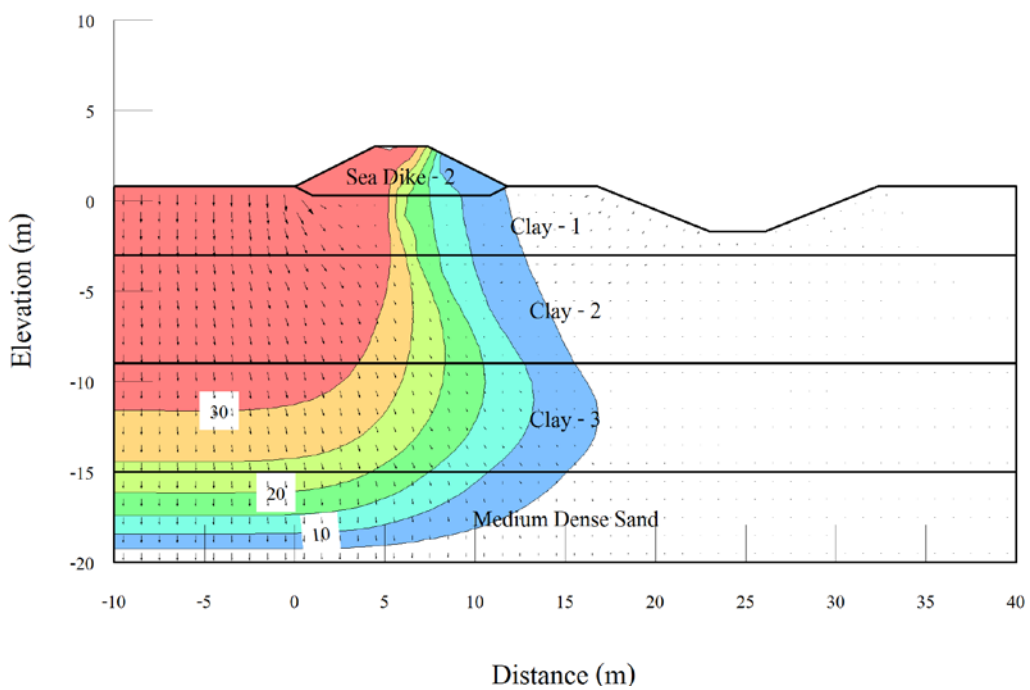
ภาพภาคผนวก ฉ-19 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 90 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



ภาพภาคผนวก ฉ-20 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 90 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



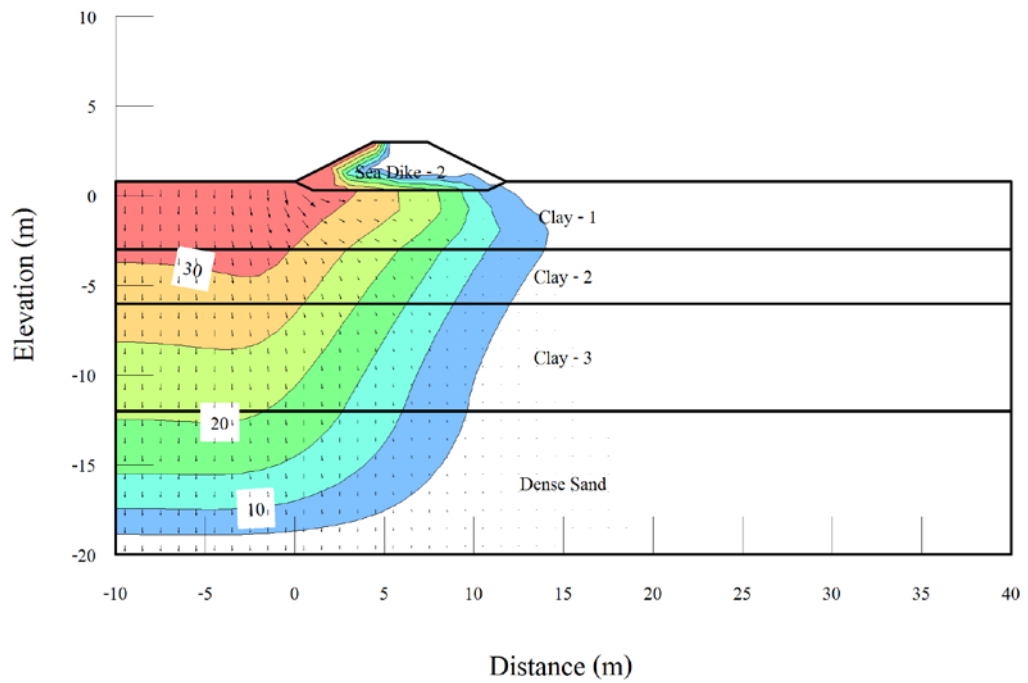
ภาพภาคผนวก ฉ-21 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 100 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



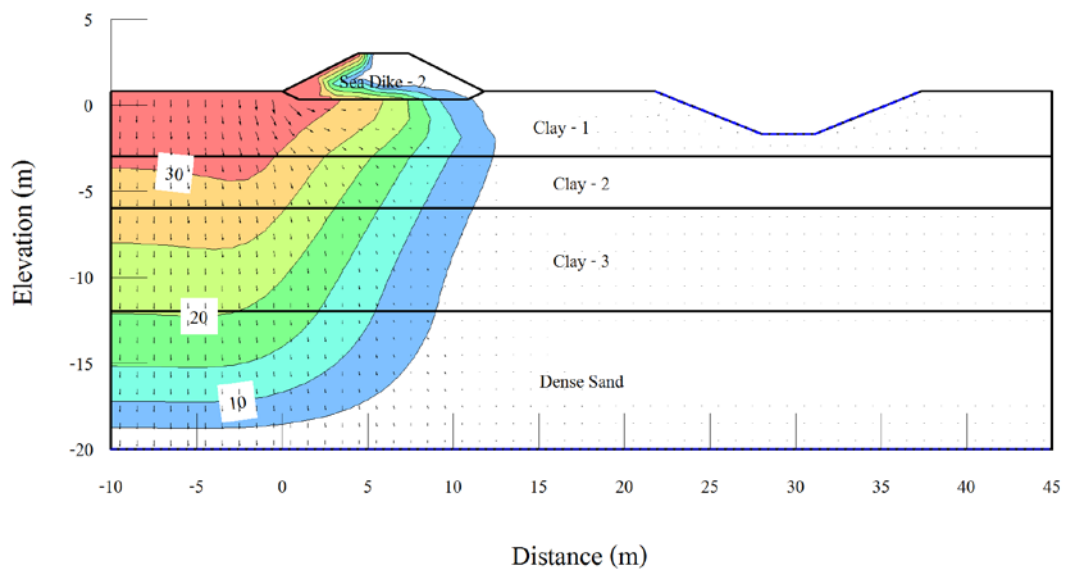
ภาพภาคผนวก ฉ-22 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-1 ที่เวลา 100 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ

ภาคผนวก ญ

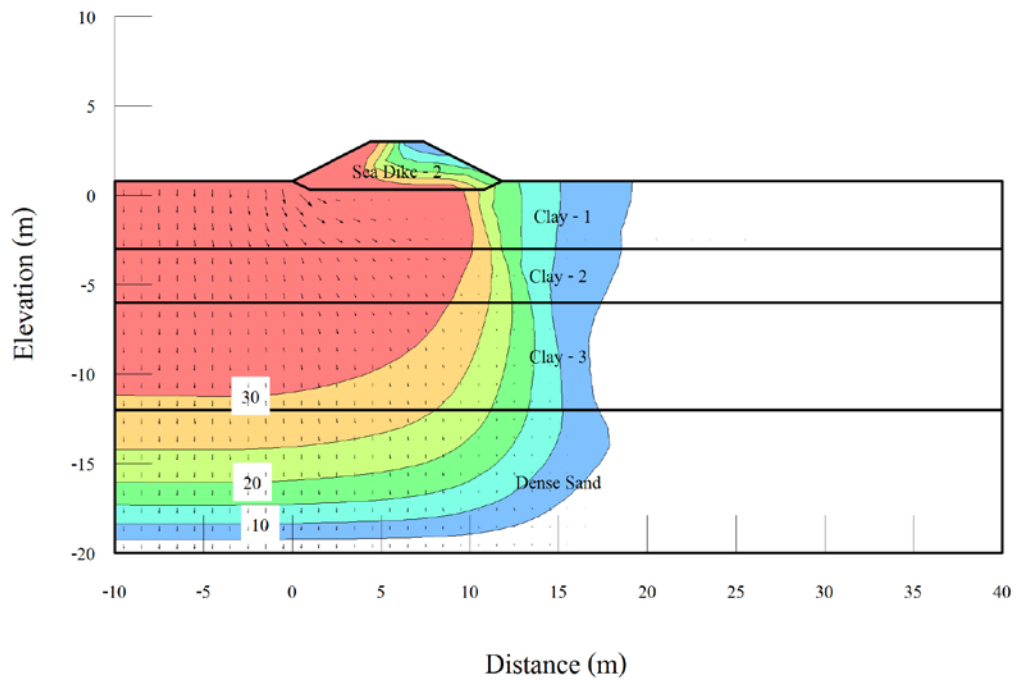
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของน้ำทะเลผ่านคันดินในช่วงพื้นที่ BH-2



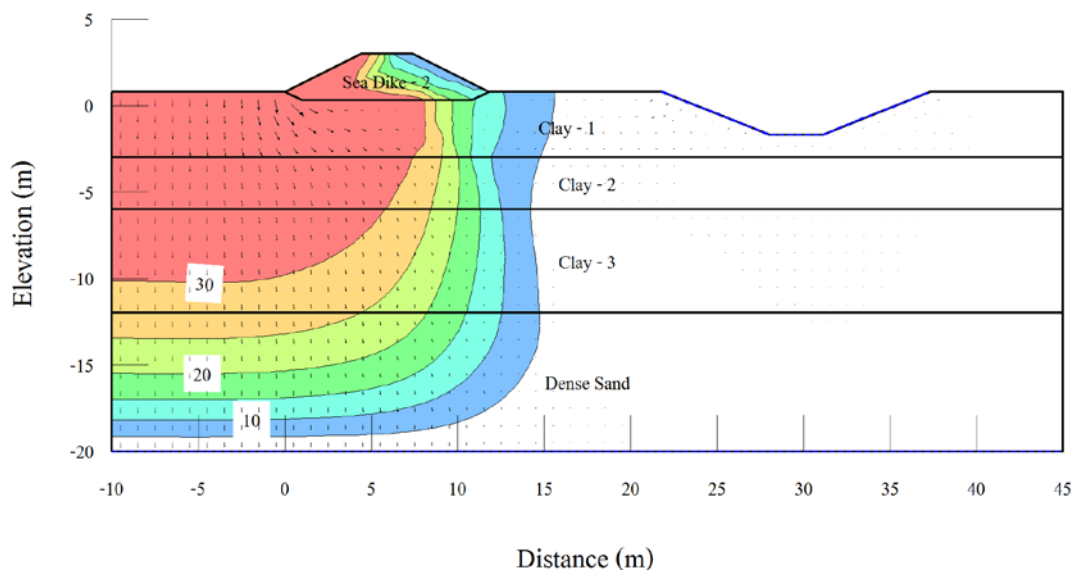
ภาพภาคผนวก ญ-1 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 1 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



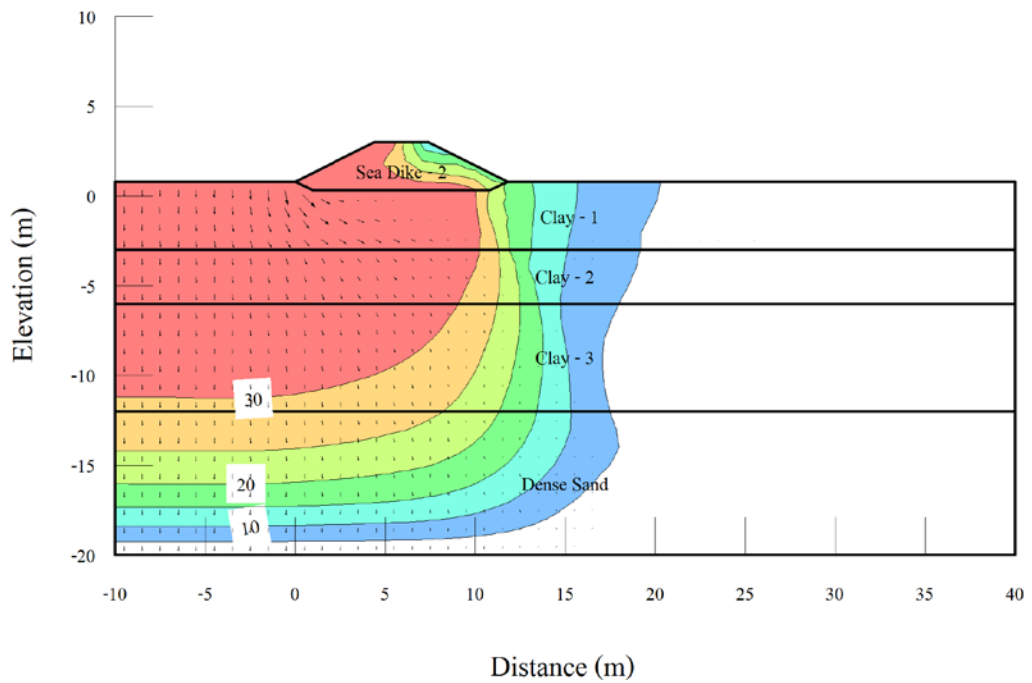
ภาพภาคผนวก ญ-2 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 1 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



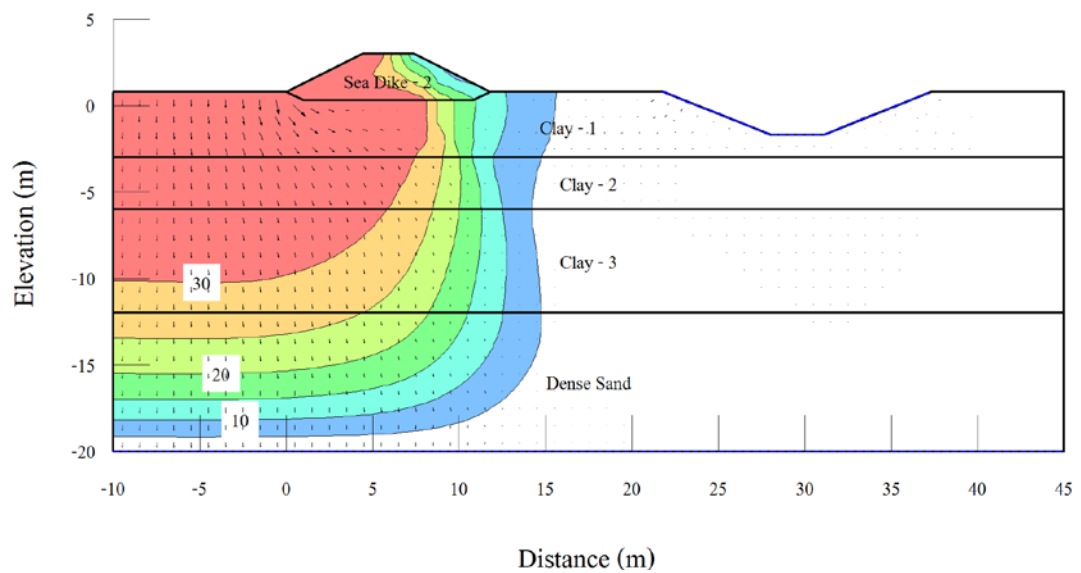
ภาพภาคผนวก ฃ-3 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 10 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



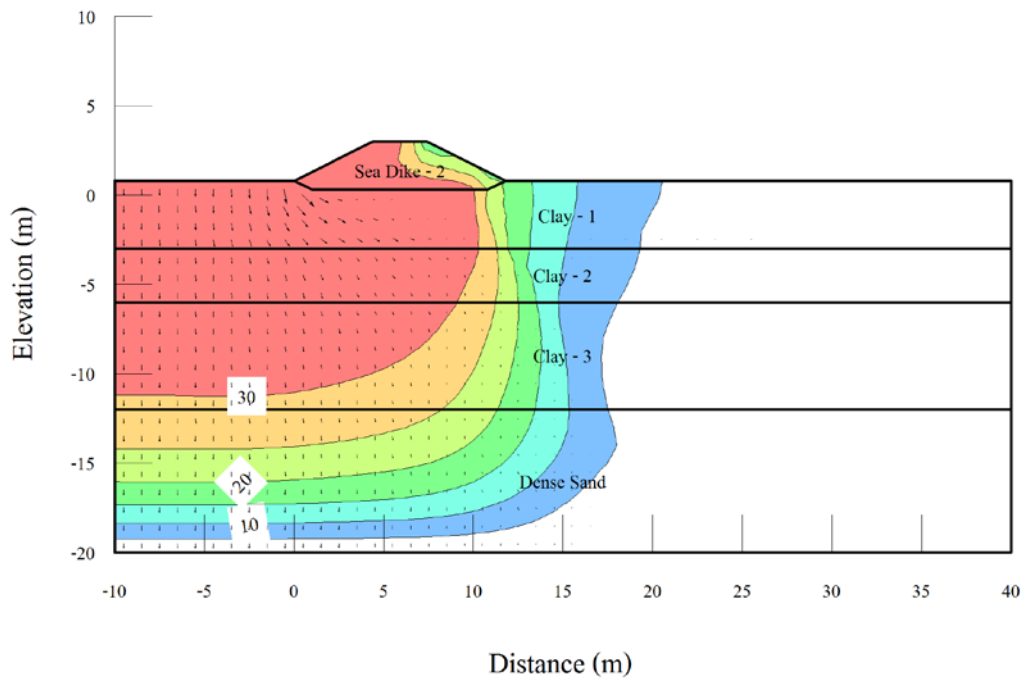
ภาพภาคผนวก ฃ-4 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 10 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



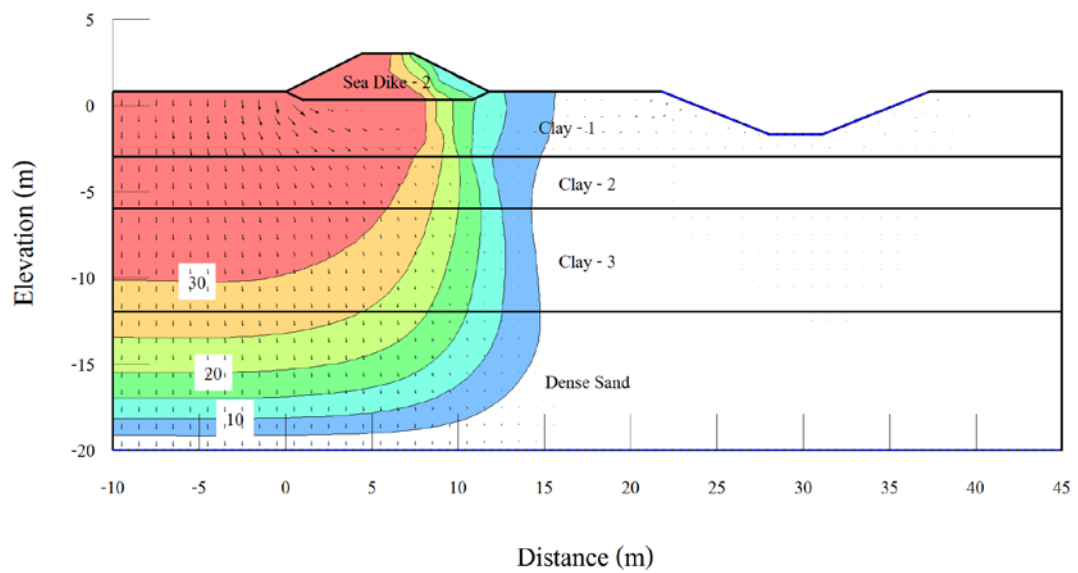
ภาพภาคผนวก ฅ-5 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 20 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



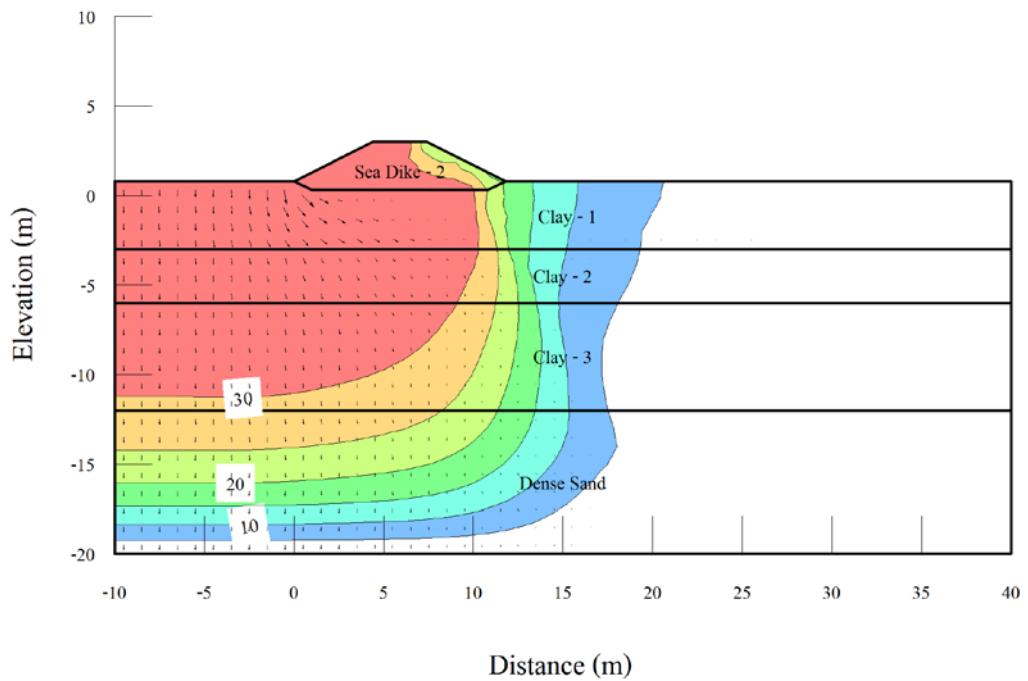
ภาพภาคผนวก ฅ-6 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 20 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



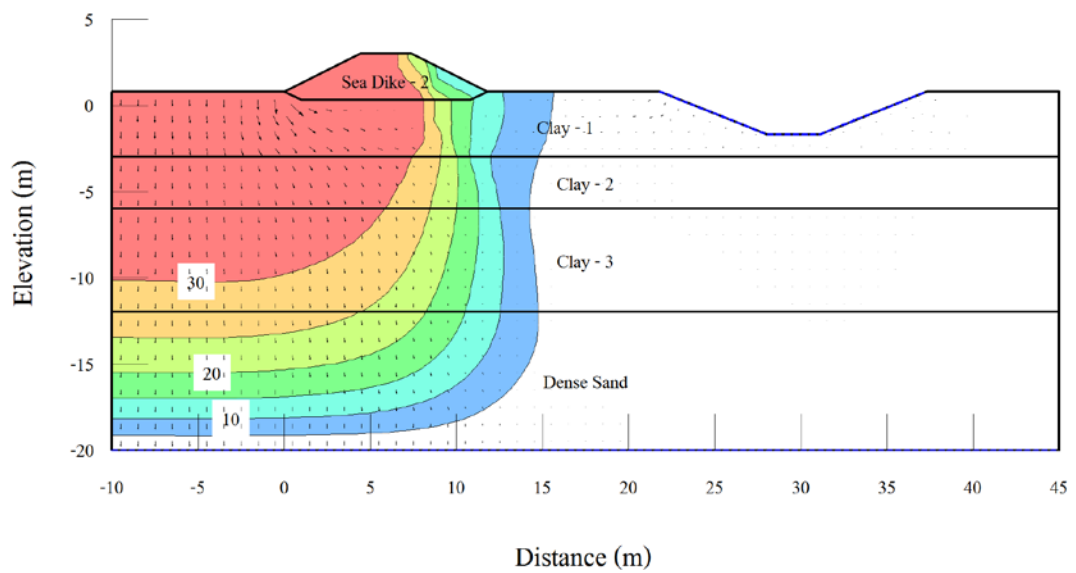
ภาพภาคผนวก ๗-7 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 30 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



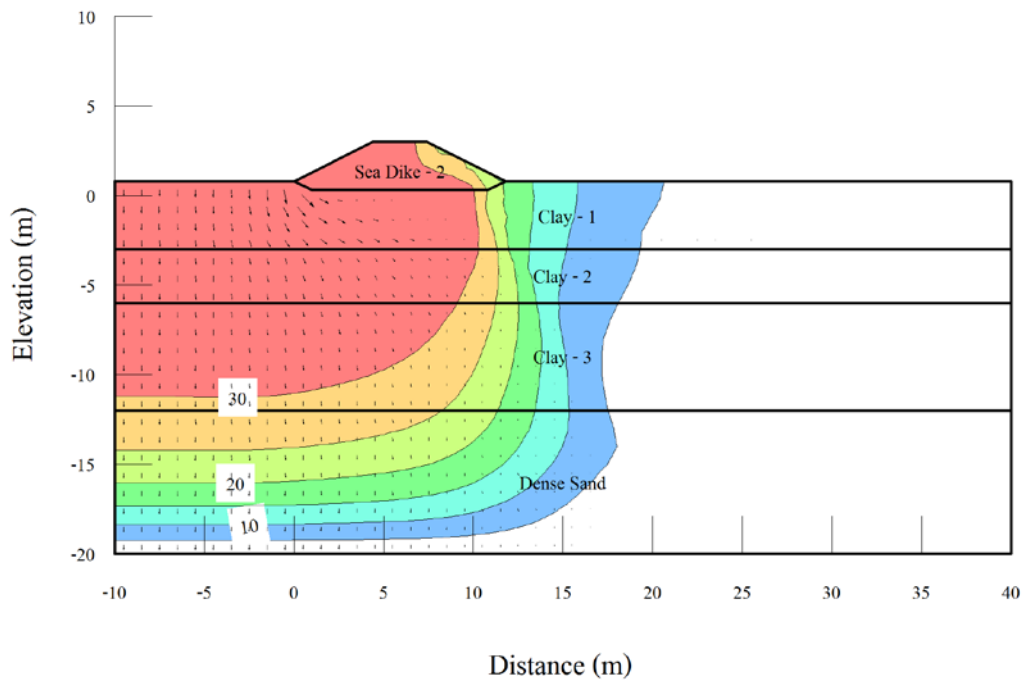
ภาพภาคผนวก ๗-8 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 30 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



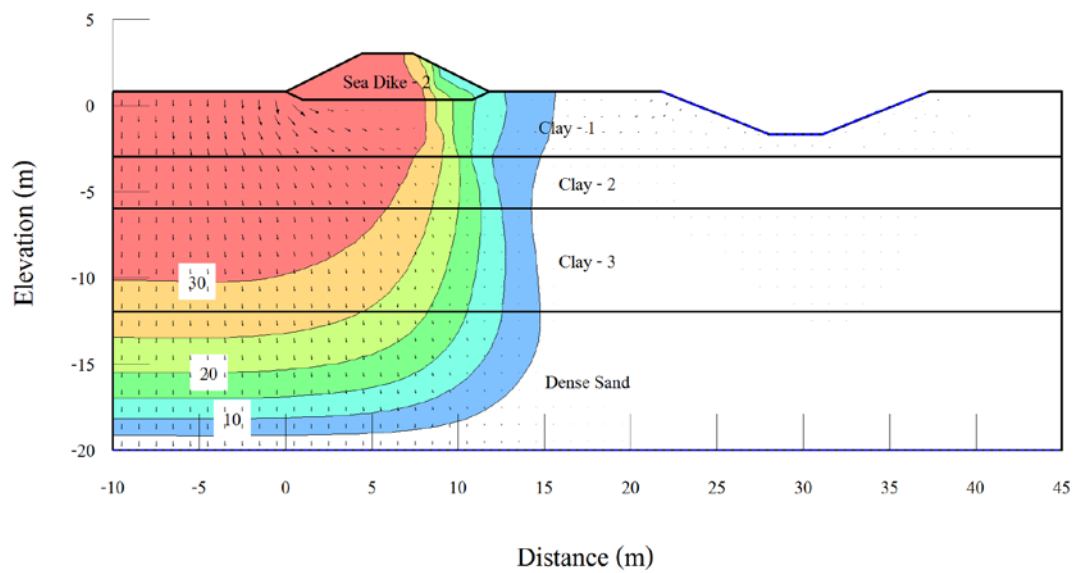
ภาพภาคผนวก ๙-9 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 40 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



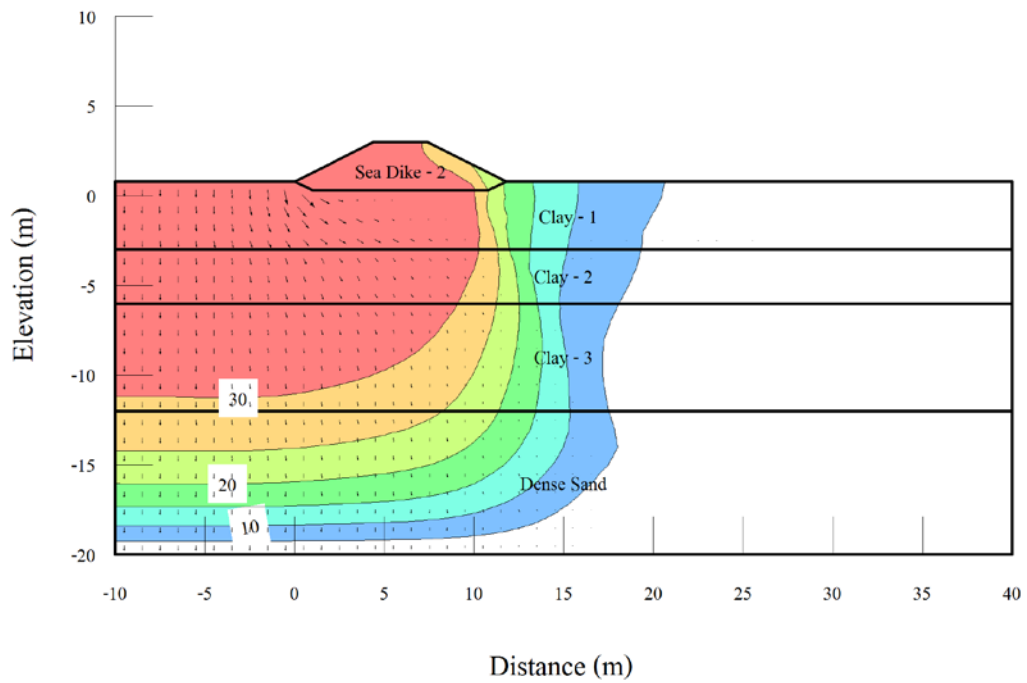
ภาพภาคผนวก ๙-10 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 40 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



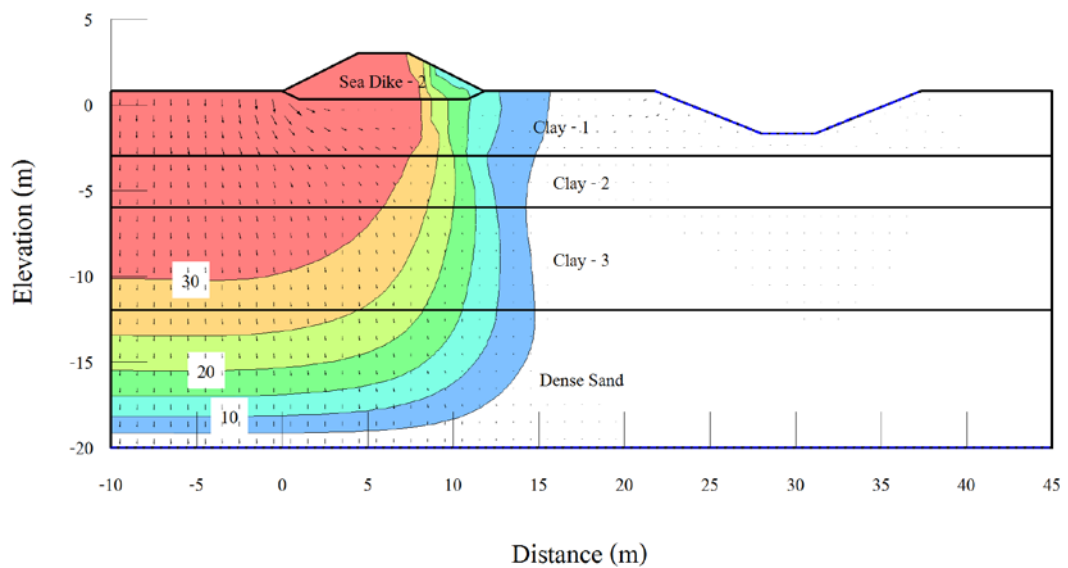
ภาพภาคผนวก ญ-11 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 50 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



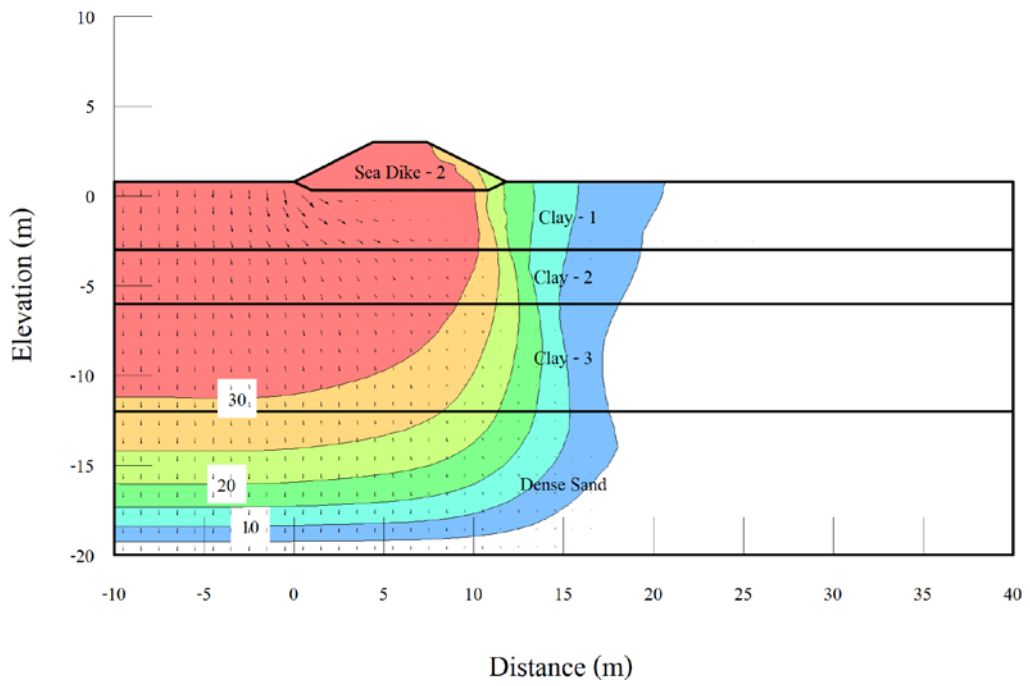
ภาพภาคผนวก ญ-12 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 50 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



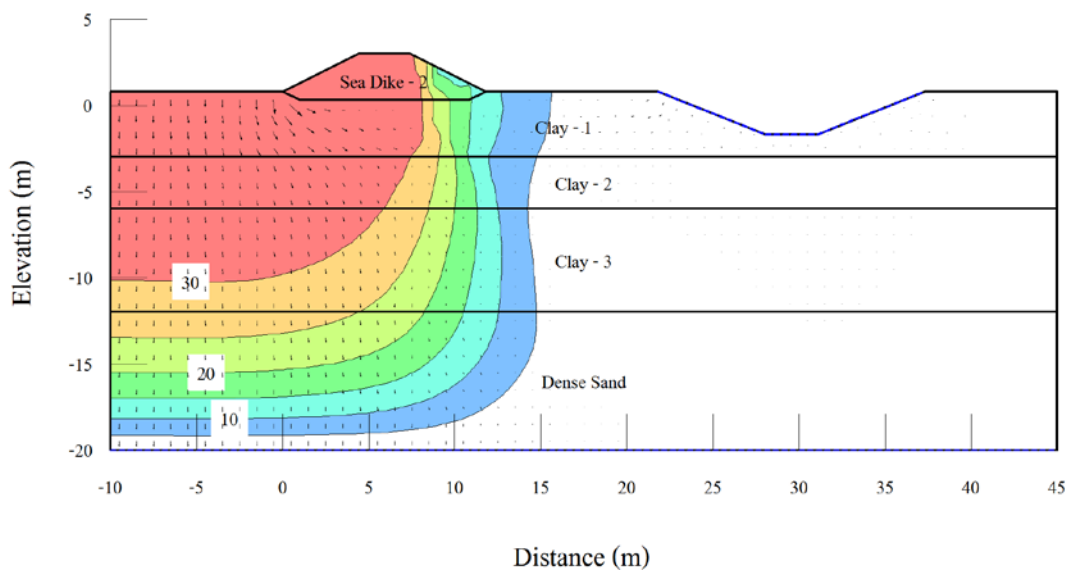
ภาพภาคผนวก ญ-13 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 60 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



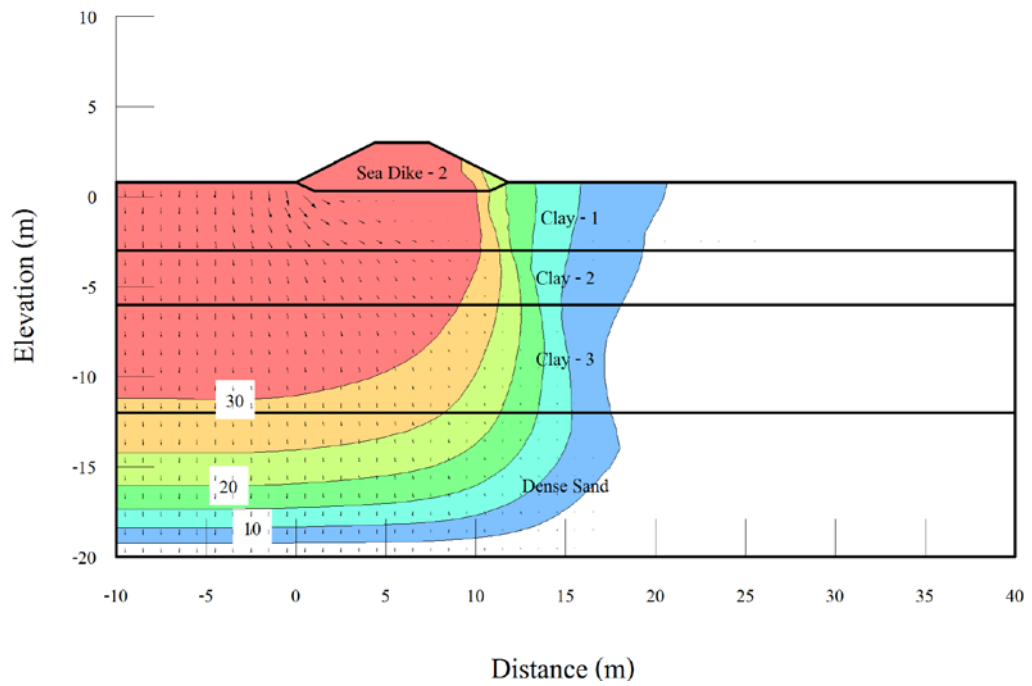
ภาพภาคผนวก ญ-14 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 60 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



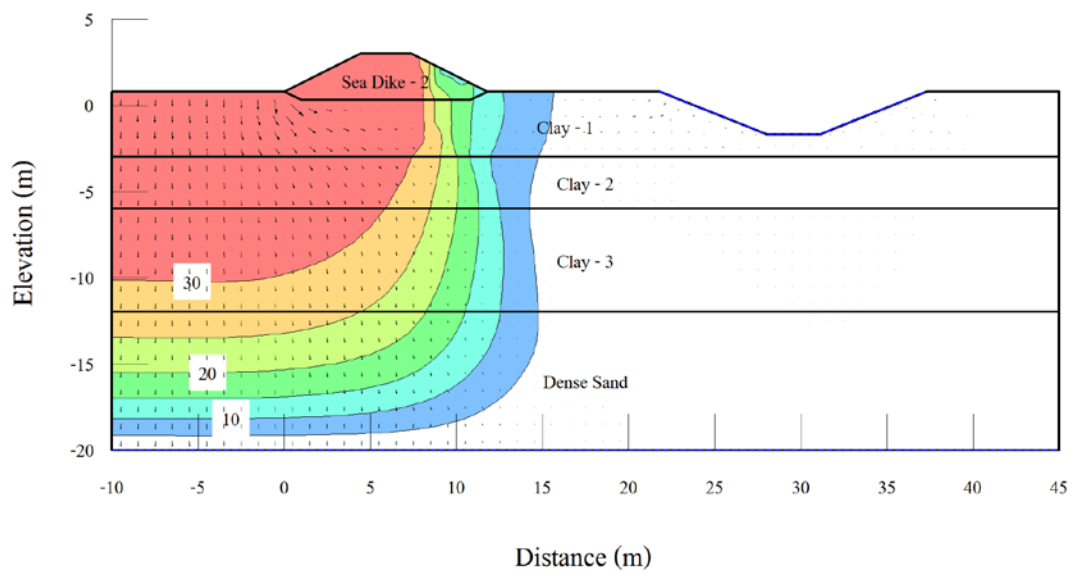
ภาพภาคผนวก ญ-15 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 70 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



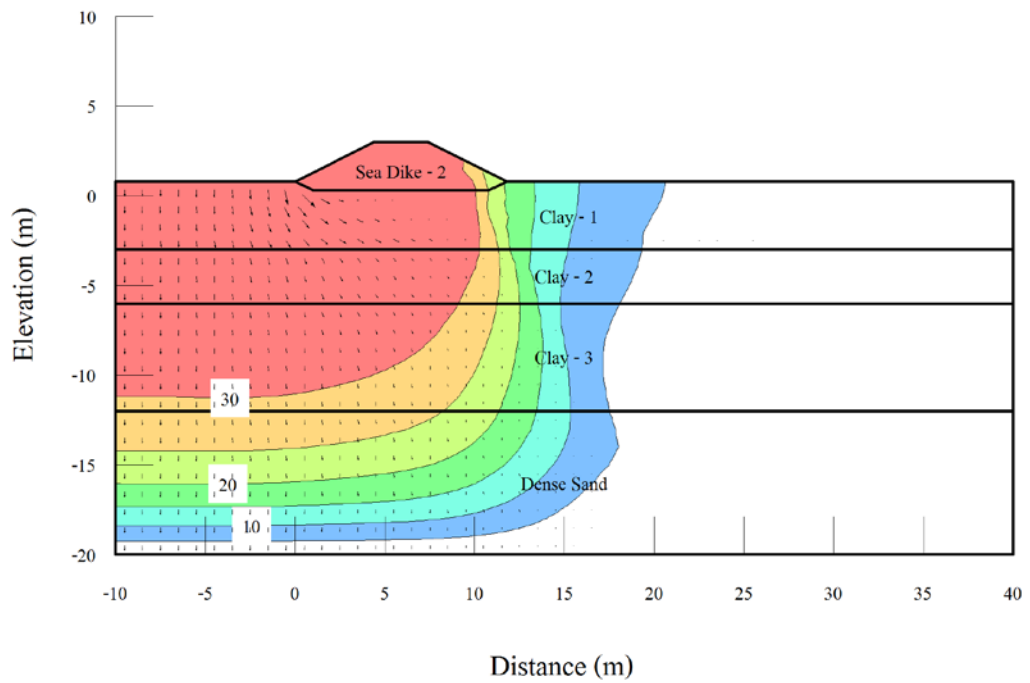
ภาพภาคผนวก ญ-16 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 70 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



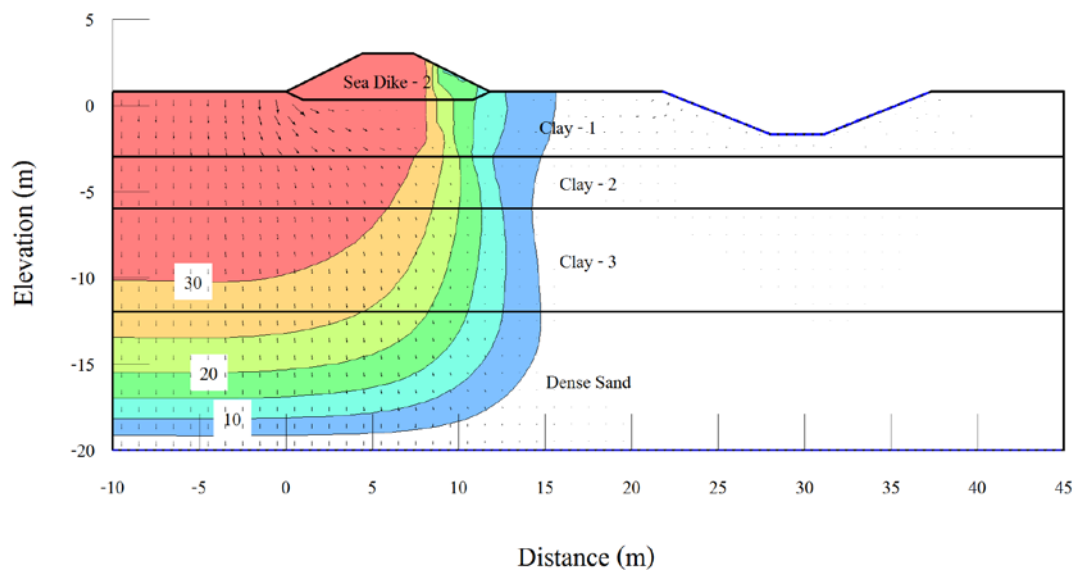
ภาพภาคผนวก ญ-17 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 80 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



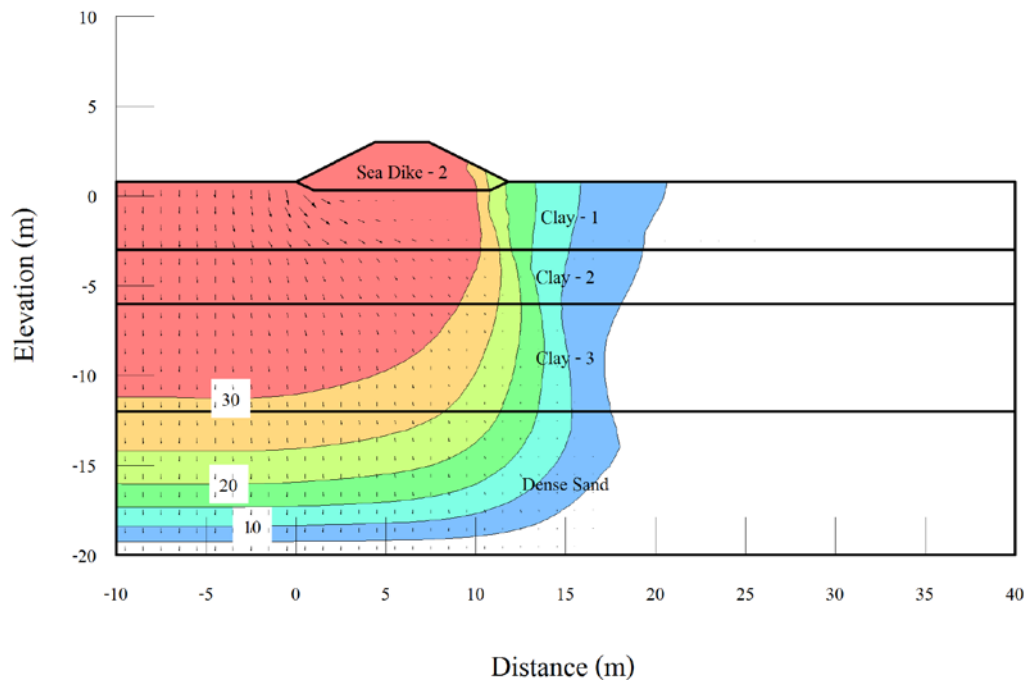
ภาพภาคผนวก ญ-18 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 80 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



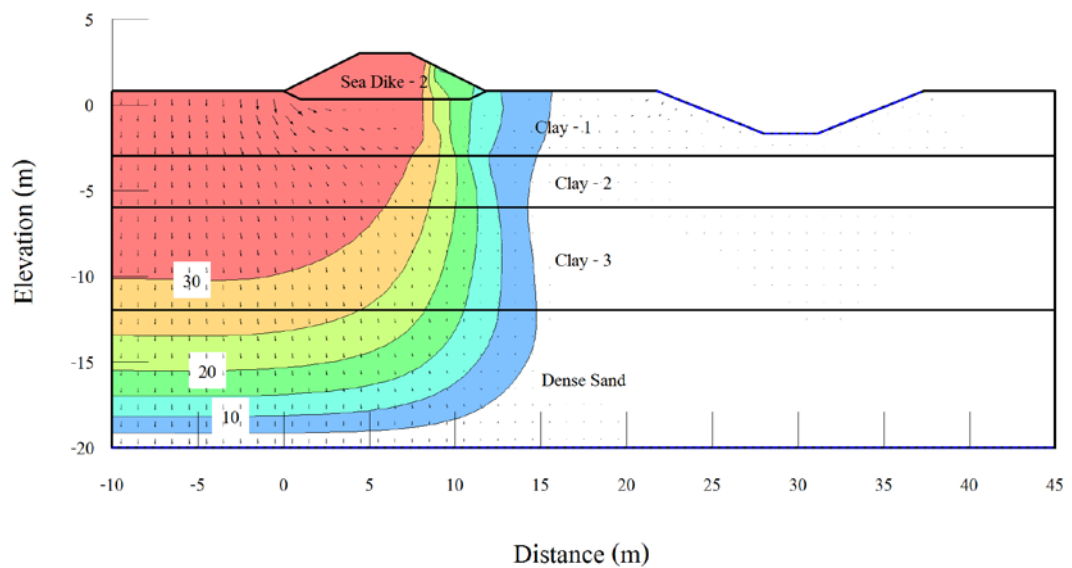
ภาพภาคผนวก ฉ-19 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 90 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



ภาพภาคผนวก ฉ-20 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 90 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ



ภาพภาคผนวก ฉู-21 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 100 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่มีทางน้ำ



ภาพภาคผนวก ฉู-22 ความเข้มข้นของความเค็มที่ไหลเข้าไปในช่วงพื้นที่ BH-2 ที่เวลา 100 ปี โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทางน้ำ