



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลที่ขุดลอก
บริเวณท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานทาง
Study of compressibility behavior of marine dredged sediments
from Laemchabang harbour, Chonburi as a new material resource
for road construction

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิกม

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2558A10802019

สัญญาเลขที่ 106/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลที่ขุดลอก
บริเวณท่าเรือแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานทาง
Study of compressibility behavior of marine dredged sediments
from Laemchabang harbour, Chonburi as a new material resource
for road construction

นางสาววรรณวรางค์ รัตนานิกม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม 2558

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 106/2558

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากดินตะกอนที่ถูกขุดลอกบริเวณชายฝั่งทะเลเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธาต่างๆ มากมาย เช่น งานดิน งานคอนกรีตและงานทาง เป็นต้น งานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบันส่วนใหญ่มีมุ่งเน้นการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด คุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติการรับกำลังของดินเป็นหลัก แต่กลับพบว่าข้อมูลการศึกษาวิจัยทางด้านคุณสมบัติการยุบอัดตัวของดินที่ขุดลอกและไม่ได้ได้รับความสนใจมากนัก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในงานทางและงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ตลอดจนเพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณดินตะกอนทะเลที่ปนอยู่ในวัสดุมวลรวมต่อค่าพารามิเตอร์การอัดตัวของทรายน้ำต่างๆ โดยทำการแปรผันอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้งระหว่างทรายต่อดินตะกอน ดังนี้ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 40:60 และ 0:100 และทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอน จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อมีปริมาณดินตะกอนเพิ่มขึ้น ค่าพิกัดเหลวและค่าดัชนีพลาสติก รวมถึงค่าพารามิเตอร์การอัดตัวของทรายน้ำ ได้แก่ ดัชนีการยุบอัดตัว ดัชนีการคืนตัว ดัชนีการยุบอัดตัวครั้งที่ 2 และค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวของทรายน้ำ มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

คำสำคัญ: ดินตะกอนทะเล, พฤติกรรมการยุบอัดตัว, การอัดตัวของทรายน้ำ, วัสดุมวลรวม

Abstract

Nowadays the applications of marine dredged sediment as a new materials resource for geotechnical work such as road construction are extensively available. Research topics are usually focused on stress-strain relationship, mechanical properties and strength behavior of soil but the study of compressibility behavior is still not available. The objectives of this research were to study the compressibility behavior of sand-marine sediment samples from Laemchabang harbor used as a new material resource for road construction and civil engineering work and also to study the effect of marine sediment quantity on consolidation parameters. The ratios of sand-marine sediment samples; 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60 and 0:100; were investigated the basic and engineering properties. The results showed that when the amount of marine sediment in soil samples increased, liquid limit and plasticity index and also the consolidation parameters such as compression index, recompression index or swelling index, secondary compression consolidation index and coefficient of consolidation tended to increase.

Keywords: Marine sediment, Compressibility behavior, Consolidation, Aggregate

สารบัญเรื่อง

กิตติกรรมประกาศ

บทคัดย่อ

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1/1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1/2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	1/3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1/3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พฤติกรรมการยุบอัดตัวและการทรุดตัวของดิน (Compressibility behavior and soil settlement)	2/1
2.1 การทรุดตัวทันที (Immediate settlement, δ_i)	2/1
2.2 การทรุดตัวขั้นแรกหรือการทรุดตัวอัดตัวคายน้ำ (Primary or consolidation settlement, δ_c)	2/1
2.2.1 การสร้างสมการการไหลทิศทางเดียว (Derivation of Governing Equation)	2/3
2.2.2 อัตราการอัดตัวการคายน้ำเฉลี่ย (Average Degree of Consolidation)	2/4
2.2.3 คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง	2/6
2.2.4 คำนวณค่าทรุดตัวของชั้นดินเหนียว	2/7
2.2.5 การคำนวณค่าการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำจากกราฟความสัมพันธ์ $e - \log p$	2/7
2.2.6 การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Determination of the Coefficient of Consolidation; C_v)	2/12
2.2.7 การหาค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัว (Coefficient of Compressibility; a_v)	2/15
2.2.8 การหาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of Volume Compressibility; m_v)	2/15
2.2.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำในดิน (Coefficient of Permeability; k)	2/15
2.2.10 ระดับขั้นการยุบตัวของดิน (Degree of Consolidation; U_v)	2/15
2.3 การทรุดตัวขั้นที่สอง (Secondary settlement, δ_s)	2/16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2.17

2.4.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน	2/17
2.4.2 ศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าของดิน	2/18
2.4.3 ผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ	2/19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย	3/1
3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	3/2
3.3 อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ	3/2
3.3. ส่วนที่ 11 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรม ของทรายผสมดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตร์ราชา จังหวัดชลบุรี	3/2
3.3. ส่วนที่ 22 ทำการทดสอบการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเล ในทุกๆ อัตราส่วนผสม (Consolidation test: ASTM D2435-90)	3/6
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	
4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง	4/1
4.1.1 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ	4/2
4.1.2 การทดสอบขนาดคละเม็ดดิน	4/3
4.1.3 การทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลว	4/4
4.1.4 ผลการทดสอบบดอัดดิน	4/6
4.2 ผลการทดสอบหาค่าการยุบอัดตัวของดินตัวอย่าง	4/8
4.2.1 การทดสอบการยุบอัดตัว	4/8
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการวิจัย	5/1
5.2 ข้อเสนอแนะ	5/1
ผลงานตีพิมพ์	
รายงานการเงิน	
บรรณานุกรม	
ประวัตินักวิจัย	

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง \bar{U}_V และ T_V	2/5
ตารางที่ 2.2 การจำแนกดินตามค่าดัชนีการอัดตัวครั้งที่สอง	2/16
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง	4/1
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการยุบอัดตัว	4/8
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการสัมประสิทธิ์การทรุดตัว	4/13

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 แบบจำลองของสปริง	2/2
รูปที่ 2.2 การอัดตัวคายน้ําแนวตั้งในชั้นดิน	2/4
รูปที่ 2.3 อัตราการอัดตัวคายน้ํา (U_v)	2/4
รูปที่ 2.4 ค่าเฉลี่ยอัตราการอัดตัวคายน้ํา (\bar{U}_v) และค่าอัตราการอัดตัวคายน้ํา (U_v) ที่กึ่งกลางชั้นดิน	2/6
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนช่องว่าง	2/6
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนาของดินเนื่องจากการอัดตัวทิศทางเดียว	2/7
รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ $e - \log p$	2/8
รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ $e - \log p$ สำหรับดินเหนียวแบบอัดแน่นปกติ (NCC)	2/9
รูปที่ 2.9 การทรุดตัวสำหรับดินอัดแน่นเกินปกติ กรณี $p_0 + \Delta p < p_c$	2/10
รูปที่ 2.10 การทรุดตัวสำหรับดินอัดแน่นเกินปกติ กรณี $p_0 < p_c < p_0 + \Delta p$	2/11
รูปที่ 2.11 วิธีของแคสซาแกรนด์และฟาตัม	2/12
รูปที่ 2.12 การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ําโดยวิธีของแคสซาแกรนด์และฟาตัม	2/12
รูปที่ 2.13 วิธีของเทลเลอร์	2/13
รูปที่ 2.14 การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ําโดยวิธีของเทลเลอร์	2/14
รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Consolidation Pressure	2/15
รูปที่ 2.16 กราฟ $e - \log t$ เนื่องจากการทรุดตัวแบบอัดตัวครั้งที่สอง	2/17
รูปที่ 3.1 แผนผังการทดสอบ	3/1
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ	4/2
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ดินที่ผ่านตะแกรงกับขนาดของตะแกรงเบอร์ต่างๆ	4/3
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นกับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ	4/4
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเหนียว (Plastic Index, PI) กับค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ของดินตะกอน	4/5
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้น	4/6
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสูงสุดกับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ	4/6
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับตัวอย่างดินทราย	4/7

ผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ	
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างกับความเค้นประสิทธิผล	4/8
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างกับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ	4/9
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการอัดตัวของดินกับกับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ	4/10
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการอัดตัวของดินครั้งที่ 1 กับตัวอย่างดินทราย 2	4/10
ผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ	
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบอัดตัวของดินกับค่าดัชนีความเหนียว	4/11
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการอัดตัวของดินครั้งที่ 2 กับค่าดัชนีความเหนียว	4/12
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวกับค่าความเค้นประสิทธิผล	4/14

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

กระบวนการขุดลอกดินตะกอนทะเลหรือดินที่เกิดจากการสะสมของวัตถุต้นกำเนิดบริเวณชายฝั่งที่ทับถมกันเป็นระยะเวลาอันยาวนานจากอิทธิพลของระดับน้ำทะเลที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ถือเป็นกระบวนการสำคัญที่สามารถแก้ไขปัญหาคาร์บอนในดินบริเวณชายฝั่งทะเลได้ ซึ่งปัญหาเหล่านี้มักพบบ่อยในบริเวณชายฝั่งทะเลที่เทียบเรือ ส่งผลให้เรือบรรทุกสินค้าขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าจอดเทียบเรือเพื่อขนส่งสินค้าได้

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการขุดลอกดินตะกอนทะเลจะสามารถแก้ไขปัญหาคาร์บอนในดินได้ แต่ปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่ตามมาอันเนื่องมาจากการจัดการและกำจัดปริมาณดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอก อันมหาศาลยังคงมีอยู่ ดังนั้นภายหลังจากการขุดลอกดินตะกอนทะเล การจัดการและกำจัดขยะทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการขุดลอกถือเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญเช่นกัน ทั้งนี้เพราะวิธีการกำจัดขยะทางสิ่งแวดล้อมแบบดั้งเดิม เช่น การทิ้งลงในทะเล ปัจจุบันถือว่าไม่สอดคล้องกับกฎหมายทั้งในและระหว่างประเทศส่งผลให้ไม่สามารถทำได้ นอกจากนี้วิธีการกำจัดขยะทางสิ่งแวดล้อมทางเลือกอื่น เช่น การทิ้งบนบก ก็ยังคงมีข้อจำกัดทางด้านราคาดำเนินการ ตลอดจนปัญหาคาร์บอนที่ขนาดใหญ่เพื่อใช้รองรับขยะจำนวนมากเช่นกัน (Dubois et. al., 2009) ดังนั้นการคิดแก้ปัญหาเกี่ยวกับการจัดการขยะทางสิ่งแวดล้อมจึงถือเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องให้ความสนใจเพื่อป้องกันปัญหาทางธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ที่อาจเกิดตามมาในอนาคต

ปัจจุบันเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว นักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจในการนำเอาขยะทางธรรมชาติหรือดินที่ถูกขุดลอกบริเวณชายฝั่งทะเลมาใช้ประโยชน์ทางด้านวิศวกรรมโยธา เกษตรกรรม และอุตสาหกรรมมากขึ้น (Dubois et. al., 2009; Ulbricht, 2002) เช่น การนำดินทรายหรือดินตะกอนที่ถูกขุดลอกบริเวณชายฝั่งทะเลมาใช้เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานดินและงานคอนกรีต เป็นต้น (Dubois et. al., 2009; Zentar et. al., 2008; Kozlova et. al., 2004; Millrath et. al., 2001; Chapman, 1968, Limeira et. al., 2010; Siham et. al., 2008) นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ประโยชน์ดินที่ถูกขุดลอกบริเวณชายฝั่งที่ได้รับความสนใจสูงสุดอีกอย่างหนึ่งในปัจจุบันคือ การนำดินทรายหรือดินตะกอนที่ถูกขุดลอกบริเวณชายฝั่งมาใช้เป็นแหล่งวัสดุรวมรวมทางเลือกใหม่ในการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทางนั่นเอง (Dubois et. al., 2009; Zentar et. al., 2008; Siham et. al., 2008)

จากการประยุกต์ใช้ประโยชน์ดินตะกอนที่ถูกขุดลอกเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกใหม่ในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา งานวิจัยจากอดีตจนถึงปัจจุบันส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติความสัมพันธ์

ระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain relationship) คุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) และคุณสมบัติการรับกำลัง (strength behavior) ของดินเป็นหลัก (Limeira et. al., 2010; Zentar et. al., 2005; Zentar et. al., 2008; Dubois et. al., 2009; Ulbricht, 2002) แต่กลับพบว่า ข้อมูลการศึกษาวิจัยทางด้านคุณสมบัติการยุบอัดตัว (compressibility behavior) ยังคงขาดแคลนและ ไม่ได้รับความสนใจมากนัก (Yin, 1999; Monkul and Ozden, 2005)

จากข้อจำกัดของข้อมูลวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในงานทางและงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ตลอดจนเพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณดินตะกอนทะเลที่ปนอยู่ในวัสดุมวลรวมต่อค่าพารามิเตอร์การอัดตัวคายนํ้า (Consolidation parameters) เช่น ดัชนีการอัดตัว (Compression index) ดัชนีการคีนตัว (Swelling index) และสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้าครั้งที่ 2 (Coefficient of secondary consolidation) เป็นต้น ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบชั้นโครงสร้างทางหรือโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพีต่างๆ เช่น งานเขื่อนดิน คันทาง ที่ประยุกต์ใช้ดินตะกอนทะเลเป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในการก่อสร้างได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในงานทางและงานทางด้านวิศวกรรมโยธา
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณดินตะกอนทะเลที่ปะปนอยู่ในวัสดุมวลรวมต่อค่าพารามิเตอร์การอัดตัวคายนํ้า (Consolidation parameters) ของตัวอย่างดินบดอัด เช่น ดัชนีการอัดตัว (Compression index) ดัชนีการคีนตัว (Swelling index) และสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้าครั้งที่ 2 (Coefficient of secondary consolidation) เป็นต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบชั้นโครงสร้างทางหรือโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพีต่างๆ เช่น งานเขื่อนดิน คันทาง ที่ประยุกต์ใช้ดินตะกอนทะเลเป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในการก่อสร้างได้
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของทรายผสมดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรี

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย ผู้วิจัยจึงออกแบบขอบเขตของโครงการวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในงานทางและงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ตลอดจนเพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณดินตะกอนทะเลที่ปะปนอยู่ในวัสดุมวลรวมต่อค่าพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation parameters) ของตัวอย่างดินบดอัด โดยทำการเตรียมตัวอย่างดินและแปรผันอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้งระหว่างทรายต่อดินตะกอนทะเล คือ 90:10 80:20 70:30 60:50 50:50 และ 40:60 และทดสอบคุณสมบัติและพฤติกรรมต่างๆ ของวัสดุมวลรวมตัวอย่างในทุกๆ อัตราส่วนผสม ดังนี้

1. ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของทรายผสมดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรี ในทุกๆ อัตราส่วนผสม

2. ทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำเพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลในทุกๆ อัตราส่วนผสม โดยมุ่งเน้นการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณดินตะกอนทะเลที่ปะปนอยู่ในวัสดุมวลรวมต่อค่าพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation parameters) ของตัวอย่างดินบดอัด เช่น ดัชนีการอัดตัว (Compression index) ดัชนีการคืบตัว (Swelling index) และสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำครั้งที่ 2 (Coefficient of secondary consolidation) เป็นต้น ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้จะถูกเตรียมโดยจำลองพฤติกรรมเช่นเดียวกับการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง คือการบดอัดแบบสถิตย์ เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีความชื้นบดอัดเหมาะสม (Optimum moisture content, OMC) และมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุด (Maximum dry density, $\gamma_{dry, max}$) ที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงพฤติกรรมการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในงานทางและงานทางด้านวิศวกรรมโยธา

2. สามารถทราบถึงผลกระทบของปริมาณดินตะกอนทะเลที่ปะปนอยู่ในวัสดุมวลรวมต่อค่าพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation parameters) ของตัวอย่างดินบดอัด เช่น ดัชนีการอัดตัว (Compression index) ดัชนีการคืบตัว (Swelling index) และสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำครั้งที่ 2 (Coefficient of secondary consolidation) เป็นต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบชั้นโครงสร้างทางหรือโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพีต่างๆ เช่น งานเขื่อนดิน คันทาง ที่ประยุกต์ใช้ดินตะกอนทะเลเป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในการก่อสร้างได้

3. สามารถทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของทรายผสมดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พฤติกรรมการยุบตัวและการทรุดตัวของดิน (Compressibility behavior and soil settlement)

พฤติกรรมการทรุดตัวของดิน หมายถึง การยุบตัวลงในแนวตั้งของมวลดินอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ดินเกิดการทรุดตัวและอาจส่งผลให้โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนดินเกิดการเคลื่อนตัวเสียหายได้ พฤติกรรมการทรุดตัวของดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.1 การทรุดตัวทันที (Immediate settlement, δ_i) เป็นการทรุดตัวแบบอีลาสติกที่เกิดขึ้นขณะทำการก่อสร้างหรือภายหลังจากการก่อสร้างซึ่งจะเกิดขึ้นและสิ้นสุดลงในเวลาอันสั้น การประมาณค่าการทรุดตัวของดินประเภทนี้สามารถคำนวณได้โดยอาศัยทฤษฎีอีลาสติก (Elastic theory) (Steinbrenner, 1934; Janbu et. al., 1956; Harr, 1966)

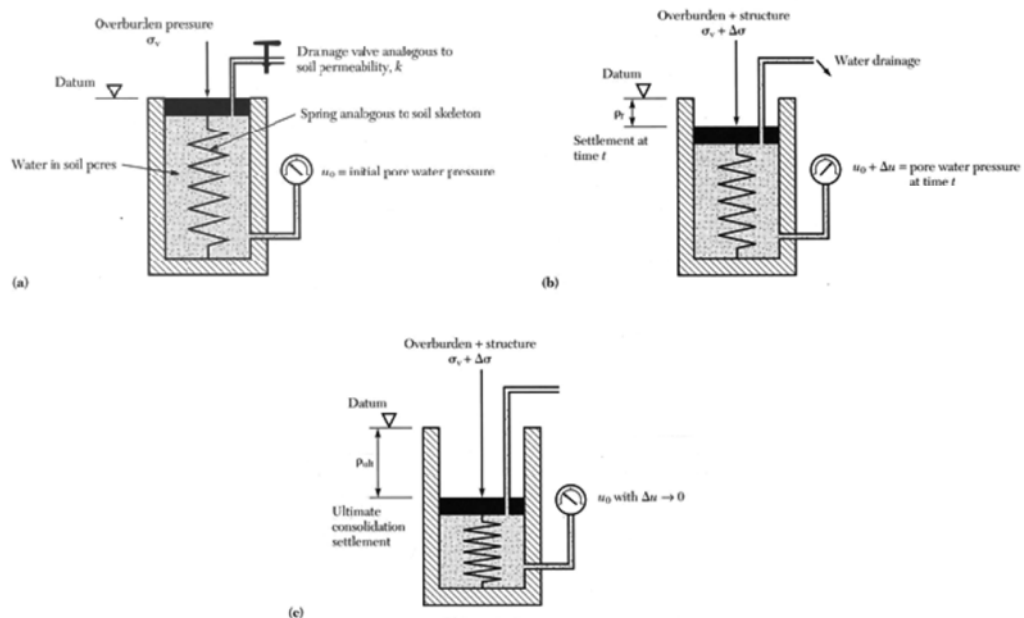
2.2 การทรุดตัวขั้นแรกหรือการทรุดตัวอัดตัวคายน้ำ (Primary or consolidation settlement, δ_c) เป็นการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการอัดตัวคายน้ำของดินภายหลังจากการทรุดตัวทันที คือเมื่อมีแรงมากระทำต่อมวลดิน มวลดินจะพยายามจัดเรียงโครงสร้างให้แน่นขึ้นโดยการบีบอัดช่องว่างระหว่างเม็ดดินให้แคบลง ส่งผลให้น้ำในโพรงดินถูกบีบอัดและระบายออกไปยังที่ที่มีความดันต่ำกว่าและทำให้เกิดการทรุดตัวของมวลดิน กระบวนการการทรุดตัวประเภทนี้จะใช้ระยะเวลายาวนานในการเกิดและสิ้นสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มวลดินมีความสามารถในการระบายน้ำต่ำ เช่น ชั้นดินเหนียว เป็นต้น ดังนั้นการทรุดตัวประเภทนี้จะเป็นฟังก์ชันที่สัมพันธ์กับเวลา

ค่าการทรุดตัวขั้นแรกหรือการทรุดตัวคายน้ำและอัตราการทรุดตัวอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวสามารถคำนวณหาได้โดยอาศัยหลักการการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ (One-dimensional primary consolidation) ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้ (Terzaghi and Peck, 1934)

1. ดินเหนียวทั้งชั้นเป็นดินที่มีเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอตลอดทั้งชั้น (Homogeneous soil)
2. ดินเหนียวอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturated soil)
3. การไหลของน้ำในมวลดินเกิดขึ้นในทิศทางเดียวเท่านั้นคือแนวตั้ง
4. การไหลของน้ำในมวลดินเป็นแบบ Laminar flow ดังนั้นจึงสามารถใช้ Darcy's Law และ Continuity equation ของการไหลของน้ำผ่านมวลดินได้
5. ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมผ่านของน้ำในดินมีค่าคงที่ (Constant coefficient of permeability, k) ระหว่างเกิดการทรุดตัวขั้นแรกหรือการทรุดตัวอัดตัวคายน้ำ
6. การทรุดตัวของมวลดินเกิดจากการไหลออกของน้ำในมวลดินเท่านั้น โดยเนื้อดินหรือเม็ดดินและน้ำจะเป็นวัสดุที่ไม่สามารถกดอัดได้ (Incompressibility behavior)

กลไกการอัดตัวคายนํ้าของเทอร์ซาก็สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองของสปริงดังนี้ รูปที่1(โครงสร้างดินถูกเชื่อมต่อกันด้วยระบบของเม็ดดินที่เปรียบได้กับสปริงภายใต้หน่วยแรงกระทำในแนวตั้ง (Overburden pressure, σ_v) นํ้าในกระกระบอกเปรียบเสมือนนํ้าในช่องว่างระหว่างเม็ดดินที่อยู่ภายใต้สภาวะสถิตย์ (Hydrostatic, u_0) เมื่อมีหน่วยแรงเพิ่มเติม ($\Delta\sigma$) กระทำกับตัวอย่างดินที่จุ่มตัวด้วยนํ้าเริ่มแรกหน่วยแรงที่กระทำดังกล่าวจะถูกส่งถ่ายไปยังส่วนที่เป็นของเหลว คือ นํ้าในมวลดิน ส่งผลให้เกิดแรงดันนํ้าส่วนเกิน (Excess pore water pressure, Δu) ขึ้นทันที (และมีค่าเท่ากับหน่วยแรงกระทำดังกล่าวพอดี ($\Delta u = \Delta\sigma$) เมื่อเวลาผ่านไปนํ้าในมวลดินจะค่อยๆ ถูกระบายออก ทำให้แรงดันนํ้าส่วนเกินค่อยๆ ลดลง (Δu ลดลง) และหน่วยแรงดังกล่าวจะถูกส่งถ่ายไปยังเม็ดดิน เมื่อเวลาผ่านไปจนแรงดันนํ้าส่วนเกินเท่ากับศูนย์ ($\Delta u = 0$) หน่วยแรงกระทำทั้งหมดจะถูกส่งถ่ายไปยังเม็ดดิน นั่นคือเม็ดดินจะรับแรงเค้นไว้ทั้งหมด (Total stress = $\sigma_v + \Delta\sigma$) เรียกสถานะนี้ว่า จุดสิ้นสุดช่วงการทรุดตัวขั้นแรกหรือการทรุดตัวอัดตัวคายนํ้า (Primary Consolidation Stage)

ในทางกลับกันหากหน่วยแรงกระทำในมวลดินเกิดลดลงอาจทำให้เกิดสภาวะแรงดันนํ้าส่วนเกินติดลบ (Negative excess pore water pressure) ส่งผลให้นํ้าค่อยๆ ไหลกลับเข้ามาในมวลดินและปริมาตรดินเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า พฤติกรรมการบวมตัวของดิน (Swelling behavior)



รูปที่ 1 แบบจำลองของสปริง (Piston-spring analog)

จากสมมติฐานและทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติสามารถทดสอบได้โดยใช้เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำของดิน (Oedometer or Consolidometer) ซึ่งมีหลักการในการทดสอบดังนี้ ภายหลังจากเตรียมตัวอย่างดิน วงแหวนพร้อมตัวอย่างดินจะถูกติดตั้งลงในเครื่องทดสอบการอัดตัวคายน้ำ และวางน้ำหนักกดทับให้ได้ความเค้นแนวตั้งตามที่ออกแบบไว้ และปล่อยให้ดินเกิดการยุบอัดตัว บันทึกค่าการทรุดตัวในแนวตั้งกับเวลา ระหว่างการทดสอบตัวอย่างจะต้องใส่น้ำให้ท่วมเพื่อรักษาให้ดินอิ่มตัวอยู่เสมอ การบรรทุกน้ำหนักกดทับแต่ละครั้งจะวางไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้การยุบอัดตัวสิ้นสุดลง และให้เพิ่มน้ำหนักกดทับตามลำดับขั้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการยุบอัดตัวของดินและถอนน้ำหนักกดทับตามลำดับขั้นที่ออกแบบไว้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการคืนตัวหรือบวมตัวของดิน

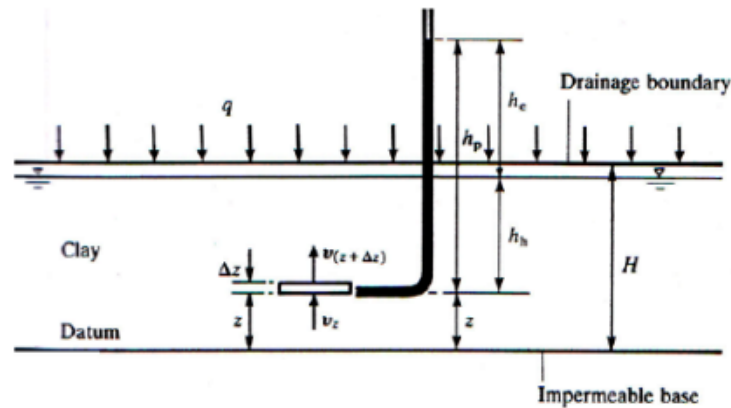
ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ อันได้แก่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างและหน่วยแรงกดทับประสิทธิผล ($e - \log \sigma'_v$) สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์การยุบอัดตัว (Compressibility parameters) ของดิน เพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการยุบอัดตัวตลอดจนเพื่อใช้ในการคำนวณค่าการทรุดตัวขั้นแรกหรือการทรุดตัวคายน้ำและอัตราการทรุดตัวอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว ค่าพารามิเตอร์การยุบอัดตัวของดินที่กล่าวถึงนี้ได้แก่ ดัชนีการยุบอัดตัว (Compression index) ดัชนีการบวมตัว (Swelling index) ดัชนีการอัดตัวซ้ำ (Recompression index) สัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation) สัมประสิทธิ์การยุบอัดตัว (Coefficient of compressibility) และ สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of volume compressibility) เป็นต้น

นิยามของตัวแปร

2.2.1 การสร้างสมการการไหลทิศทางเดียว (Derivation of Governing Equation)

เมื่อพิจารณาดินตะกอนอิ่มตัวที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทางและมีความกว้างไม่จำกัด รับน้ำหนักกระทำสม่ำเสมอ (q) ที่ผิวดินดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อชั้นดินวางอยู่บนชั้นดินที่บีบแน่น และสามารถระบายน้ำได้อย่างอิสระขึ้นไปบนผิวดิน การลดลงของแรงดันน้ำส่วนเกินที่จุดใดๆ จะเกิดขึ้นเฉพาะแนวตั้งตามทิศทางการไหลขึ้นของน้ำไปยังขอบเขตด้านบนซึ่งมีความลาดชันทางชลศาสตร์ในแนวตั้งเท่านั้น ความเครียดจะเกิดขึ้นเฉพาะในแนวตั้ง จากรูปที่ 2.2 จะได้สมการดังนี้ คือ Governing One-Dimensional Consolidation Equation โดย Terzaghi

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (2.1)$$



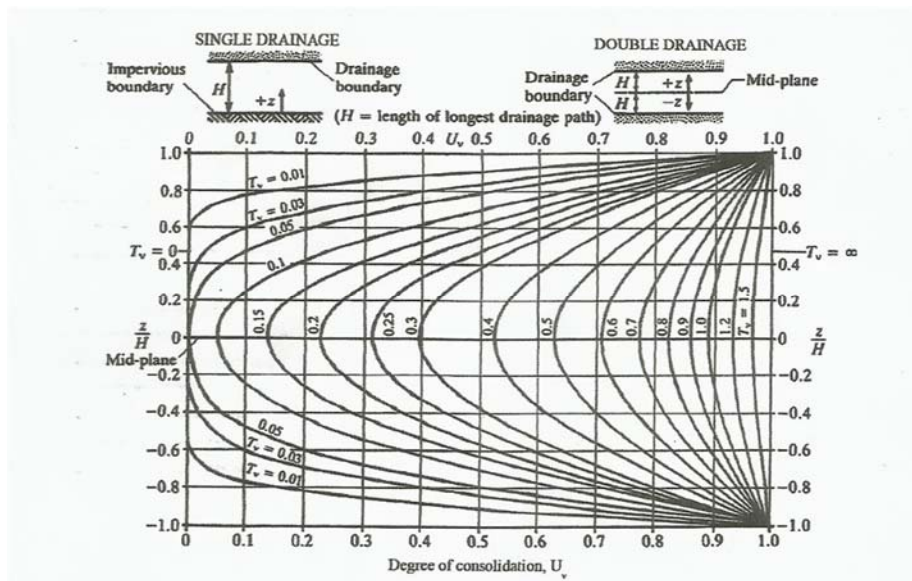
รูปที่ 2.2 การอัดตัวคายน้ำแนวตั้งในชั้นดิน

2.2.2 อัตราการอัดตัวการคายน้ำเฉลี่ย (Average Degree of Consolidation)

โดยทั่วไปเรามักจะไม่สนใจการทรุดตัวใดๆ ในชั้นดิน แต่จะสนใจการทรุดตัวทั้งชั้นดิน ดังนั้นเราจึงต้องการค่าอัตราการอัดตัวการคายน้ำเฉลี่ย (Average Degree of Consolidation; \bar{U}_v) เพื่อใช้สำหรับหาค่าการทรุดตัวของผิวดิน ซึ่งช่วยหาค่าการทรุดตัวของโครงสร้างทางวิศวกรรม ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \bar{U}_v &= 1 - \int_0^H \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} \sin \left[M \left(1 - \frac{z}{H} \right) \right] \exp(-M^2 T_v) dz \\ &= 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} \exp(-M^2 T_v) \end{aligned} \quad (2.2)$$

ดังนั้นสำหรับการหาค่า T_v ใดๆ สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยอัตราการอัดตัวคายน้ำได้จากผลการคำนวณทางทฤษฎีเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง \bar{U}_v และ T_v สามารถแสดงในรูปของเส้นกราฟได้รูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.1 หรือคำนวณจากสมการ (2.3) และสมการ (2.4) ซึ่งใช้สำหรับคำนวณค่าการทรุดตัวของทั้งชั้นดินและการทรุดตัวที่กึ่งกลางชั้นดิน



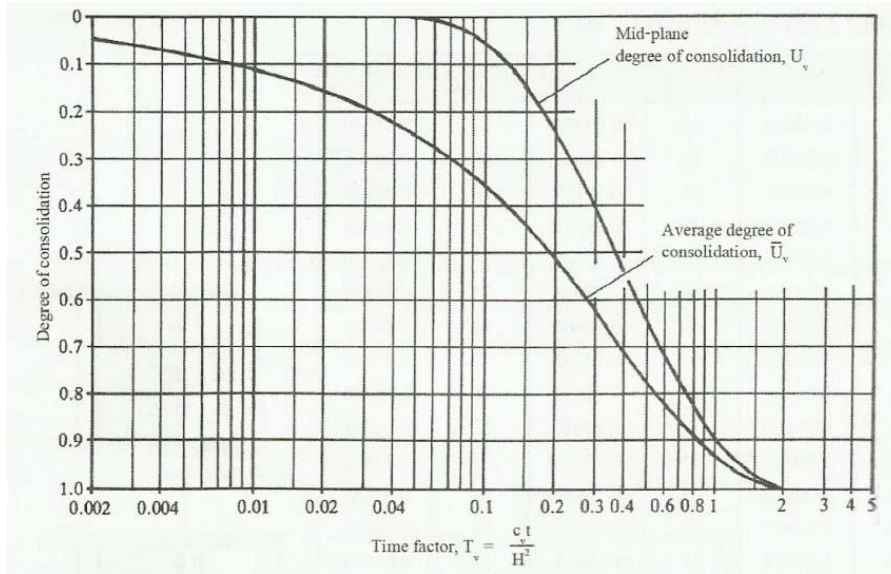
รูปที่ 2.3 อัตราการอัดตัวคายน้ำ (U_v)

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง \bar{U}_v และ T_v

\bar{U}_v (%)	T_v	\bar{U}_v (%)	T_v	\bar{U}_v (%)	T_v
0	0.00000	34	0.09079	68	0.37670
1	0.00008	35	0.09621	69	0.38956
2	0.00031	36	0.10179	70	0.40285
3	0.00071	37	0.10752	71	0.41658
4	0.00126	38	0.11341	72	0.43080
5	0.00196	39	0.11946	73	0.44554
6	0.00283	40	0.12566	74	0.46083
7	0.00385	41	0.13203	75	0.47672
8	0.00503	42	0.13854	76	0.49326
9	0.00636	43	0.14522	77	0.51051
10	0.00785	44	0.15205	78	0.52852
11	0.00950	45	0.15904	79	0.54737
12	0.01131	46	0.16619	80	0.56714
13	0.01327	47	0.17349	81	0.58792
14	0.01539	48	0.18096	82	0.60983
15	0.01767	49	0.18857	83	0.63299
16	0.02011	50	0.19635	84	0.65756
17	0.02270	51	0.20428	85	0.68371
18	0.02545	52	0.21237	86	0.71166
19	0.02835	53	0.22062	87	0.74169
20	0.03142	54	0.22902	88	0.77412
21	0.03464	55	0.23758	89	0.80938
22	0.03801	56	0.24630	90	0.84800
23	0.04155	57	0.25518	91	0.89069
24	0.04524	58	0.26421	92	0.93842
25	0.04909	59	0.27340	93	0.99252
26	0.05309	60	0.28274	94	1.05498
27	0.05726	61	0.29654	95	1.12886
28	0.06158	62	0.30706	96	1.21928
29	0.06605	63	0.31787	97	1.33585
30	0.07069	64	0.32897	98	1.50014
31	0.07548	65	0.34038	99	1.78100
32	0.08042	66	0.35213	100	∞
33	0.08553	67	0.36423		

Different Types of Drainage
with u_0 Constant

u_0 มีค่าคงที่ตามความลึก



รูปที่ 2.4 ค่าเฉลี่ยอัตราการอัดตัวคายนํ้า (\bar{U}_v) และค่าอัตราการอัดตัวคายนํ้า (U_v) ที่กึ่งกลางชั้นดิน

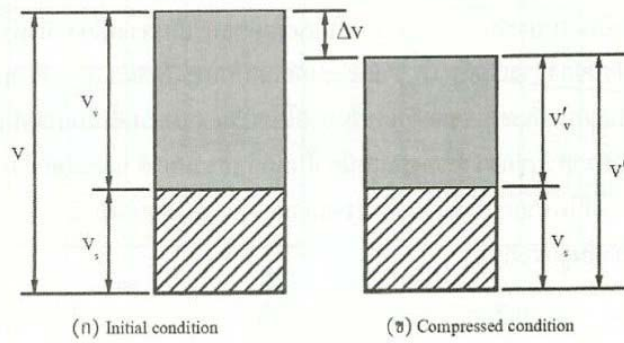
สำหรับ $U = 0\% - 60\%$;

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2 \quad (2.3)$$

สำหรับ $U > 60\%$;

$$T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%) \quad (2.4)$$

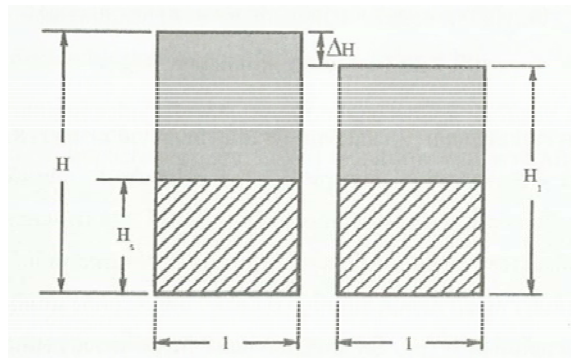
2.2.3 คำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนช่องว่าง



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนช่องว่าง

$$\Delta e = \left(\frac{1+e_0}{H} \right) \Delta H \quad (2.5)$$

2.2.4 คำนวณค่าทรุดตัวของชั้นดินเหนียว



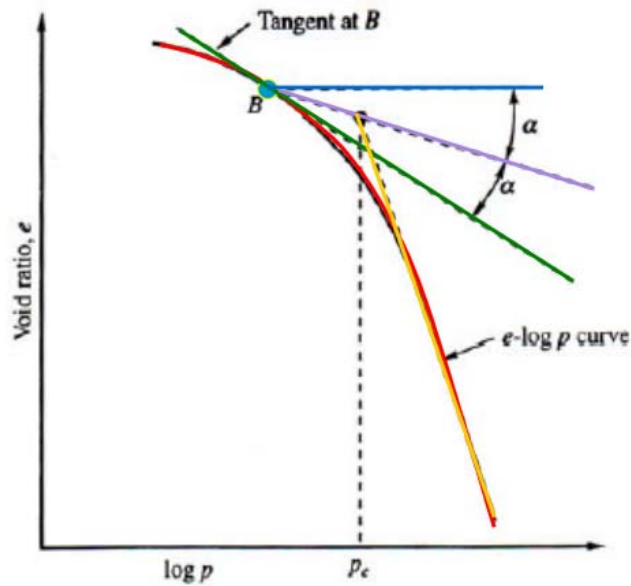
รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความหนาของดินเนื่องจากการอัดตัวทิศทางเดียว

$$\Delta H = H \left(\frac{\Delta e}{1+e_0} \right) \quad (2.6)$$

2.2.5 การคำนวณค่าการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำจากกราฟความสัมพันธ์ $e - \log p$

จากกราฟความสัมพันธ์ $e - \log p$ ตามรูปภาพด้านล่าง เราสามารถหาค่าแรงดันกดทับประสิทธิผลสูงสุดที่เคยรับในอดีต (Pre-Consolidation Pressure or Maximum Past Pressure, p'_c) โดยวิธีการของ Casagrande (1936) โดยวิธีทางกราฟ ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $e - \log p$
2. หาค่าแห่งของจุดที่มีส่วนโค้งสูงสุดหรือจุดที่มีรัศมีความโค้งน้อยที่สุด (B)
3. ลากเส้นสัมผัสผ่านจุด B
4. ลากเส้นแนวราบจากจุด B ออกไป
5. แบ่งครึ่งมุมระหว่างเส้นสัมผัสในข้อที่ 3 กับเส้นแนวราบในข้อที่ 4
6. ลากเส้นตรงของกราฟขึ้นมาตัดกับเส้นแบ่งครึ่งมุมในข้อ 5 จุดที่ตัดกันคือ ค่าแรงดันกดทับสูงสุดในอดีตของดิน, (p'_c)



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ $e - \log p$

ดินเหนียวสามารถแบ่งได้อีก 2 กรณี คือ

1. ดินเหนียวในสภาพอัดแน่นปกติ (Normally Consolidated Clay; NC-Clay)

ดินเหนียวในสภาพอัดแน่นปกติ หมายถึง ดินเหนียวที่รับแรงกดทับประสิทธิผลในปัจจุบัน (Present Effective Overburden Pressure; p'_0) เท่ากับแรงดันกดทับประสิทธิผลสูงสุดที่เคยรับในอดีต (Pre-Consolidation Pressure or Maximum Past Pressure; p'_c)

2. ดินเหนียวในสภาพอัดแน่นเกินปกติ (Overconsolidated Clay; OC-Clay)

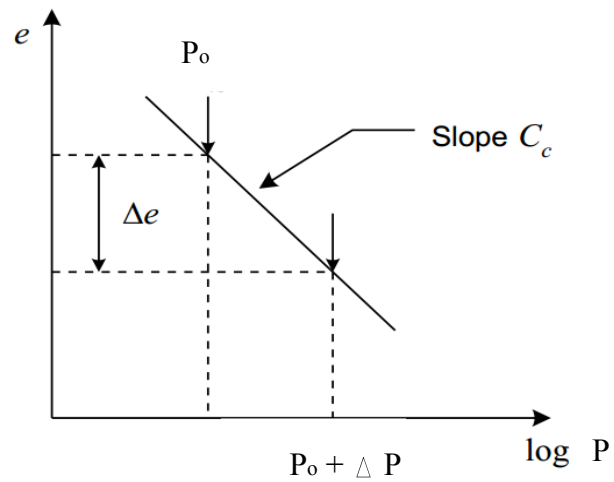
ดินเหนียวในสภาพอัดแน่นเกินปกติ หมายถึง ดินเหนียวที่รับแรงดันกดทับประสิทธิผลในปัจจุบัน (Present Effective Overburden Pressure; p'_0) น้อยกว่าแรงดันกดทับประสิทธิผลที่เคยได้รับในอดีต (Pre-Consolidation Pressure or Maximum Past Pressure; p'_c)

NC-Clay มีค่า $OCR = 1$

OC-Clay มีค่า $OCR > 1$

โดย $OCR =$ อัตราส่วนอัดแน่นเกินปกติ (Overconsolidation Ratio) = $\frac{p'_c}{p'_0}$ (2.7)

กรณีที่ 1 สำหรับดินเหนียวแบบอัดแน่นปกติ (NCC; $p_c \leq p_0$)



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ $e - \log p$ สำหรับดินเหนียวแบบอัดแน่นปกติ (NCC)

แทนค่า Δe จากสมการที่ (2.5) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้

$$s_c = H \frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (2.8)$$

$$s_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{p}{p_0} \quad (2.9)$$

$$s_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (2.10)$$

$$s_c = CR H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (2.11)$$

กรณีมีดินเหนียวมีความหนาหลายแบ่งคิดเป็นชั้นๆ ไม่ควรเกิน 3 เมตร

$$s_c = \frac{C_c}{1+e_0} H_i \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (2.12)$$

เมื่อ

S_c = ค่าการทรุดตัว

C_c = สัมประสิทธิ์การยุบตัวของดิน

H = ความหนาของชั้นดิน

e_0 = ค่าอัตราส่วนช่องว่าง

p = $p_0 + \Delta p$

p_0 = แรงกดอัดเฉลี่ยเริ่มต้นที่ลบบแรงดันน้ำ

Δp = แรงกดอัดในแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นในชั้นดิน

i = ชั้นดินย่อยแต่ละชั้น

(ถ้ากรณีที่ชั้นดินเหนียวถูกคั่นด้วยชั้นดินเม็ดหยาบ ใช้สมการ (2.9) สำหรับหาค่าทรุดตัว)

$$CR = \text{อัตราส่วนการอัดตัว (Compression Ratio)} = \frac{C_c}{1+e_0} \quad (2.13)$$

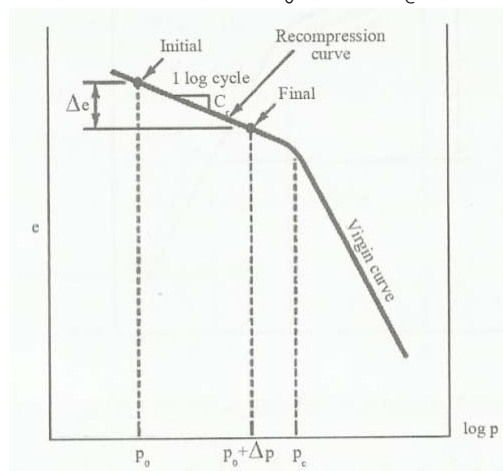
$$C_c = \text{ดัชนีของการกดอัด (Compression Index)} = \frac{e_0 - e}{\log \frac{p}{p_0}} = \frac{\Delta e}{\log \frac{p}{p_0}} \quad (2.14)$$

เมื่อ e_0 = อัตราส่วนช่องว่างที่ความดัน p_0

e = อัตราส่วนช่องว่างที่ความดัน p

กรณีที่ 2 ดินเหนียวในสภาพอัดแน่นเกินปกติ (OC-Clay) มี 2 แบบ คือ

1. ดินเหนียวในสภาพอัดแน่นเกินปกติ (OC-Clay; $p_0 + \Delta p < p_c$)



รูปที่ 2.9 การทรุดตัวสำหรับดินอัดแน่นเกินปกติ กรณี ; $p_0 + \Delta p < p_c$

กรณี $p_0 + \Delta p$ มีค่าไม่เกิน p_c การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำทั้งหมดจะเกิดขึ้นในช่วงเส้นกราฟอัดตัวซ้ำ (Recompression or Rebound) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 การคำนวณค่าการทรุดตัวจะมีลักษณะเดียวกับกรณีของดินอัดแน่นปกติ แต่จะใช้ค่าดัชนีอัดตัวซ้ำ (Recompression Index; c_r หรือ Swelling Index; c_s แทนค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index; c_c) โดยสมการดังนี้

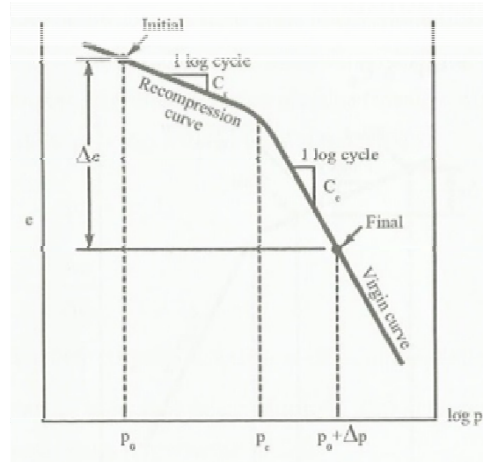
$$s_c = \frac{C_r}{1+e_0} H_i \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (2.15)$$

$$s_c = RR H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (2.16)$$

$$\text{เมื่อ } C_r = \frac{\Delta e}{\log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}} \quad (2.17)$$

$$RR = \text{อัตราส่วนการอัดตัวซ้ำ (Recompression ratio)} = \frac{C_r}{1+e_0} \quad (2.18)$$

3. ดินเหนียวในสภาพอัดแน่นเกินปกติ (OC-Clay; $p_0 < p_c < p_0 + \Delta p$)



รูปที่ 2.10 การทรุดตัวสำหรับดินอัดแน่นเกินปกติ กรณี ; $p_0 < p_c < p_0 + \Delta p$

ถ้ากระบวนการอัดตัวคายน้ำเริ่มจากเส้นการอัดตัวซ้ำและไปสิ้นสุดบนเส้นดั้งเดิม (Virgin Curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ต้องใช้ทั้งค่าดัชนีการอัดตัว (Compression Index; c_c) และค่าดัชนีอัดตัวซ้ำ (Recompression Index; c_r หรือ Swelling Index; c_s) โดยมีสมการดังนี้

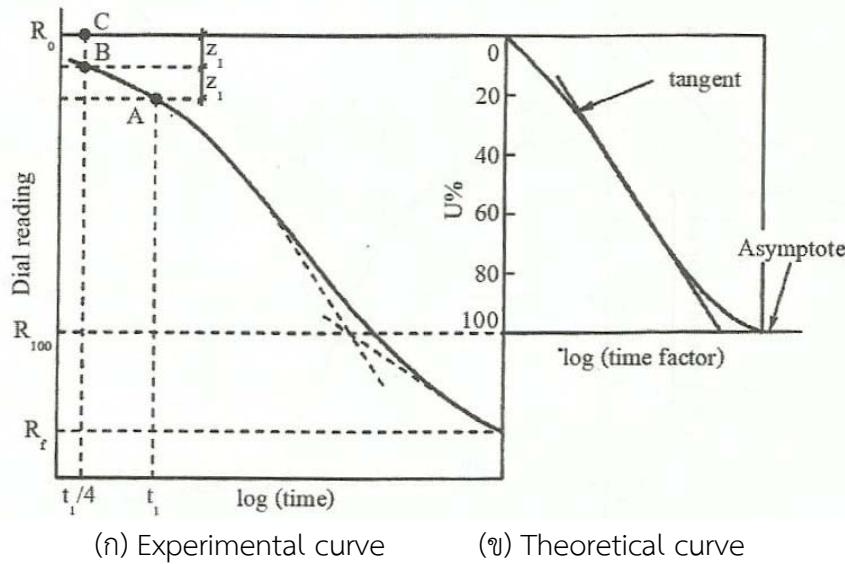
$$s_c = \frac{C_r}{1+e_0} H \log \frac{p_c}{p_0} + \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_c} \quad (2.19)$$

$$\text{หรือ } s_c = RR H \log \frac{p_c}{p_0} + CR H \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_c} \quad (2.20)$$

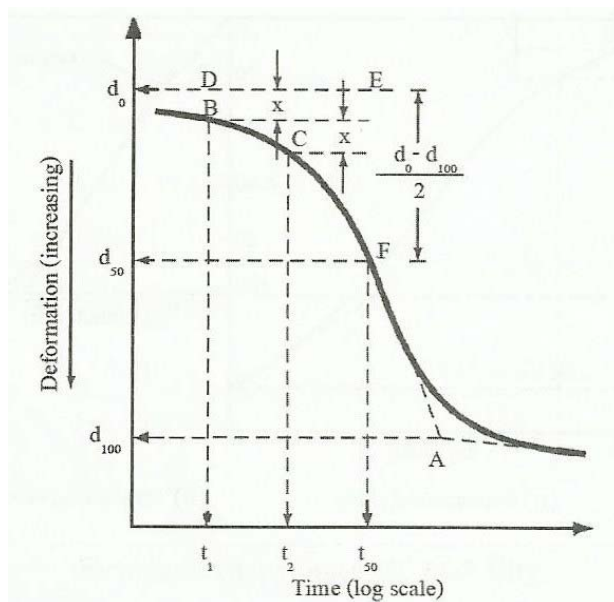
2.2.6 การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (Determination of the Coefficient of Consolidation; C_v)

สามารถหาได้ 2 วิธี คือ

2.2.6.1 วิธีของแคสซาแกรนด์และฟาตัม (Casagrande and Fadum Method)



รูปที่ 2.11 วิธีของแคสซาแกรนด์และฟาตัม



รูปที่ 2.12 การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำโดยวิธีของแคสซาแกรนด์และฟาตัม

การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำโดยวิธีของแคสซาแกรนด์และฟาตัมดังรูปที่ 2.12 มีขั้นตอนดังนี้

1. ลากเส้นตรงซึ่งเป็นเส้นสัมผัสกับกราฟส่วนแรกและส่วนที่สอง โดยมีจุดตัดที่จุด A ซึ่งแทนด้วย d_{100} ซึ่งเป็นจุดที่แทนการสิ้นสุดของการยุบตัวแบบอัดตัวคายน้ำแบบปฏรมภูมิ

2. พิจารณากราฟส่วนแรกซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นโค้งพาราโบลา ให้เลือกจุด t_1 และ t_2 บนเส้นโค้งพาราโบลา โดยมีอัตราส่วนเป็น 1:4 หมายถึง $t_2 = 4 t_1$ และผลต่าง t_2 และ $t_1(t_2-t_1)$ เท่ากับ X
3. เขียนเส้นแนวนอน DE โดยมีระยะทาง BD เท่ากับ X ซึ่งตำแหน่งของเส้น DE แทนด้วย d_0 ซึ่งเป็นจุดที่การยุบตัวแบบอัดตัวคายน้ำเท่ากับศูนย์
4. ตำแหน่งของจุด F บนเส้นการอัดตัวคายน้ำจะแทนค่าการยุบตัวที่ 50 ของการยุบตัวแบบอัดตัวคายน้ำแบบปฐมภูมิ ซึ่งจะตรงกับเวลาที่ t_{50}
5. สำหรับค่าระดับการอัดตัวคายน้ำ (Degree of Consolidation; $U\%$) เท่ากับ 50% จะใช้ค่าแฟกเตอร์เวลา (Time Factor; T_v) เท่ากับ 0.197
6. สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_{50} = \frac{c_v t_{50}}{(H_{dr})^2} \quad)2.21($$

ดังนั้น $c_v = \frac{0.197(H_{dr})^2}{t_{50}}$

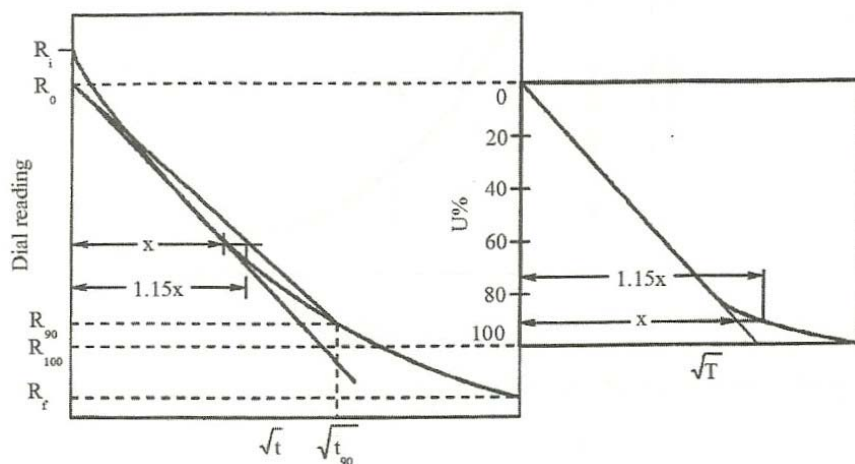
เมื่อ T_{50} = แฟกเตอร์เวลาที่ระดับการอัดตัวคายน้ำ 50%

t_{50} = เวลาที่ระดับการอัดตัวคายน้ำ 50%

H_{dr} = ระยะทางของการระบายน้ำระหว่างการอัดตัวคายน้ำ

สำหรับตัวอย่างที่สามารถระบายน้ำทั้งด้านบนและด้านล่าง จะมีค่า H_{dr} เท่ากับครึ่งหนึ่งของความหนาเฉลี่ยของตัวอย่างดินระหว่างการอัดตัวคายน้ำ และสำหรับตัวอย่างดินที่สามารถระบายน้ำได้ทิศทางเดียว ค่า H_{dr} จะเท่ากับความหนาเฉลี่ยของตัวอย่างดินระหว่างการอัดตัวคายน้ำ

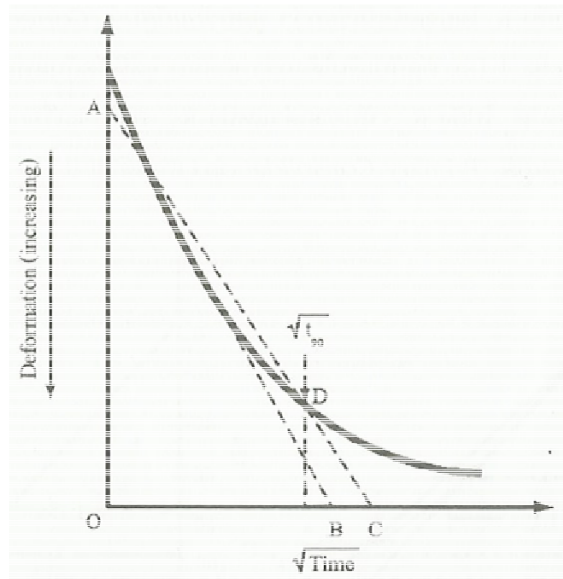
2.2.6.2) วิธีของเทเลอร์ (Taylor Method)



(ก) Experimental curve

(ข) Theoretical curve

รูปที่ 2.13 วิธีของเทเลอร์



รูปที่ 2.14 การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำโดยวิธีของเทเลอร์

การหาค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำโดยวิธีของเทเลอร์ดังรูปที่ 2.14 มีขั้นตอนดังนี้

1. ลากเส้น AB ซึ่งเป็นเส้นสัมผัสกับเส้นโค้งจากการทดสอบในช่วงแรก
2. เขียนเส้น AC โดยมีระยะของ OC เท่ากับ $1.15OB$ ไปตัดกับเส้นโค้งการทดสอบที่จุด D ซึ่งแทนค่าการยุบตัวที่ 90% ของการยุบตัวแบบอัดตัวคายน้ำแบบปฐมภูมิ ซึ่งจะตรงกันกับตำแหน่งรากที่สองของระยะเวลาที่การอัดตัวคายน้ำเท่ากับ 90% ($\sqrt{t_{90}}$)
3. สำหรับค่าระดับการอัดตัวคายน้ำ (Degree of Consolidation; U_6) เท่ากับ 90% จะให้ค่าแฟกเตอร์เวลา (Time Factor; T_v) เท่ากับ 0.848 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$T_{90} = \frac{c_v t_{90}}{(H_{dr})^2} \quad (2.22)$$

ดังนั้น $c_v = \frac{0.848(H_{dr})^2}{t_{90}}$

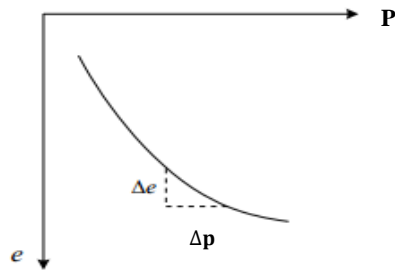
เมื่อ T_{90} = แฟกเตอร์เวลาที่ระดับการอัดตัวคายน้ำ 90%

t_{90} = เวลาที่ระดับการอัดตัวคายน้ำ 90%

H_{dr} = ระยะทางของการระบายน้ำระหว่างการอัดตัวคายน้ำ

*** ค่าของ H_{dr} สามารถหาได้เหมือนกับวิธีของแควินตันและฟาตัม

2.2.7 การหาค่าสัมประสิทธิ์การยุบตัว (Coefficient of Compressibility; a_v)



รูปที่ 2.15 คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Void Ratio และ Consolidation Pressure

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} \quad (2.23)$$

2.2.8 การหาค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Coefficient of Volume Compressibility; m_v) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดิน สามารถหาได้จาก

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0} \quad (2.24)$$

2.2.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมได้ของน้ำในดิน (Coefficient of Permeability; k)

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (2.25)$$

2.2.10 ระดับขั้นการยุบตัวของดิน (Degree of Consolidation; U_v) เป็นการหาเปอร์เซ็นต์การทรุดตัวทั้งหมดในช่วงเวลา t หาได้จาก

$$U_v = \frac{s_t}{s_c} \times 100\% = \frac{\text{การทรุดตัวในช่วงเวลา } t}{\text{การทรุดตัวทั้งหมด}} \times 100\% \quad (2.26)$$

2.3 การทรุดตัวขั้นที่สอง (Secondary settlement, δ_s)

ทฤษฎีของ Terzaghi ได้กล่าวไว้ว่า ถ้าความเค้นประสิทธิผลมีค่าคงที่ อัตราส่วนช่องว่างของดินเหนียวจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่สำหรับดินบางชนิดหลังจากการทรุดตัวครั้งแรกเสร็จสิ้นไปแล้ว ความดันในช่องว่างได้หายไปด้วยและความเค้นประสิทธิผลมีค่าคงที่ ดังนั้นอัตราส่วนช่องว่างจะลดลงไปอีกและการทรุดตัวก็ยังคงเกิดต่อไปแต่มีอัตราเวลาช้าลง การทรุดตัวหลังจากนี้เรียกว่า “การทรุดตัวครั้งที่สอง (Secondary Consolidation)” ระหว่างการเกิดการทรุดตัวครั้งที่สองนี้สามารถนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและ Log ของเวลาได้ดังรูปที่ 2.16

การทรุดตัวครั้งที่สองนี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลักคือ สัมประสิทธิ์การทรุดตัวครั้งที่สอง (Secondary Consolidation) ซึ่งหาได้จาก

$$c_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log \frac{t_2}{t_1}} \quad (2.27)$$

เมื่อ c_{α} = สัมประสิทธิ์การทรุดตัวครั้งที่สอง

Δe = อัตราส่วนช่องว่างที่เปลี่ยนไป

t_1, t_2 = เวลา (นาที)

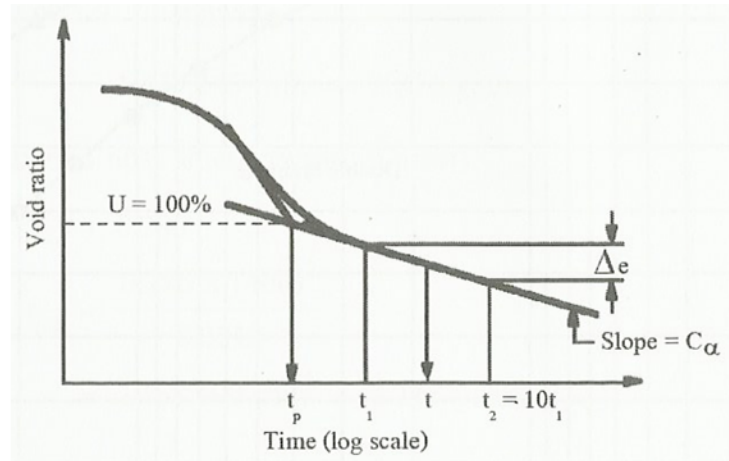
ค่า c_{α} จะขึ้นอยู่กับดัชนีกดอัด (c_c) ด้วยนั่นคือ ดินที่ถูกอัดตัวได้มากจะมีค่า (c_c) มาก จะส่งผลให้ค่า " c_{α} " สูงมากด้วย การอัดตัวครั้งที่สองจะสำคัญมากในกรณีเป็นดินมีสารอินทรีย์อยู่มาก และมีความไวสูง ค่าการยุบตัวครั้งที่สองสามารถหาได้จากสมการ (2.28) และ (2.29) ค่า c_{α} ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและสามารถประมาณค่า c_{α} ได้จากตารางที่ 2.2

$$s_s = c_{\alpha} H \log \frac{t_2}{t_1} \quad (2.28)$$

$$c_{\alpha} = \frac{c_c}{1 + e_0} \quad (2.29)$$

ตารางที่ 2.2 การจำแนกดินตามค่าดัชนีการอัดตัวครั้งที่สอง (Terzaghi และคณะ 1996)

สัมประสิทธิ์ของการทรุดตัวครั้งที่สอง (c_{α})	การอัดตัวครั้งที่สอง
0.002	ต่ำมาก
0.004	ต่ำ
0.008	ปานกลาง
0.016	สูง
0.032	สูงมาก
0.064	สูงมากๆ



รูปที่ 2.16 กราฟ $e - \log t$ เนื่องจากการทรุดตัวแบบอัดตัวครั้งที่สอง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการศึกษา ค้นคว้า และวิจัย ในเรื่องของ การทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายนํ้า มีการศึกษามากแล้วในดินเหนียว ตัวอย่างเช่น การใช้วัสดุอื่น ๆ ผสมเข้ากับดินเหนียวเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพของดินเหนียวแล้วนำมาศึกษาการทรุดตัว และในการศึกษาการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายนํ้า ส่วนใหญ่จะเน้นการศึกษาพฤติกรรมของการทรุดตัว แต่ก็มีอยู่บางงานวิจัยที่มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบจากปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลกระทบต่อการทรุดตัวเนื่องจากการอัดตัวคายนํ้า

2.4.1 การปรับปรุงคุณภาพดิน

ไตรภพ คนชมและ ก่อโชค จันทรวงูร (2547) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของการอัดตัวคายนํ้า แต่ต่างจากการศึกษาความสัมพันธ์ของการอัดตัวคายนํ้าแบบปกติตรงที่ แบบปกติจะทำการศึกษาในแนวตั้ง แต่วิจัยดังกล่าวตั้งทำการศึกษาความสัมพันธ์ของการอัดตัวคายนํ้าในแนวราบ แนวรัศมี และแนวรัศมีร่วมกับแนวตั้ง ทำการศึกษาเปรียบเทียบร่วมกับทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายนํ้าในแนวตั้ง โดยทำการศึกษาดินเหนียวอ่อนของกรุงเทพฯ โดยการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ด้วยระบบ Sand Drain (SD) หรือ Prefabricated Vertical Drain (PVD) ผลจากการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายนํ้าในแนวราบ แนวรัศมี และแนวรัศมีร่วมแนวตั้ง จะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายนํ้ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายนํ้าในแนวตั้ง เนื่องจากทิศทางและแรงที่กระทำและทิศทางของการระบายน้ำมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการอัดตัวคายนํ้า และจากการศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวโดยการปรับปรุงดินแบบ PVD พบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้าในแนวรัศมีมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมทรุดตัวในสนาม

สูงศักดิ์ ศรีสุวรรณ, พานิช วุฒิพฤษ, ชัยรัตน์ ธีระวัฒน์สุข และสันชัย อินทพิชัย (2551) เป็นการศึกษาพฤติกรรมทรุดตัวคายนํ้าของดินเม็ดละเอียดที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการผสมปูนซีเมนต์ และทดสอบการอัดตัวคายนํ้าที่อายุบ่ม 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณของสัดส่วนดินเหนียวมีอิทธิพลต่อ

พฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าของดินเม็ดละเอียดผสมซีเมนต์ กล่าวคือตัวอย่างดินผสมมีสัดส่วนทรายแบ่งเพิ่มขึ้น กำลังครากมีค่าเพิ่มขึ้น ดัชนีการอัดตัว ดัชนีการบวมตัวมีค่าลดลงและสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้าลดลง

2.4.2 ศึกษาพฤติกรรมการอัดตัวคายนํ้าของดิน

สุขสันต์ หอพิบูลสุขและ วรรัชย์ เกษกัน (2548) เป็นการศึกษาการอัดตัวคายนํ้า เพื่อหาคำนวณหาการทรุดตัวของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ แต่การวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอถึงวิธีการทดลองแบบการอัดตัวคายนํ้าอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะใช้เวลาน้อยกว่าการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบปกติ โดย Terzaghi วิธีการคือจะวางนํ้าหนักบรรทุกทุกทันทีที่ระดับการอัดตัวคายนํ้าอยู่ระหว่าง 60 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ โดยจะใช้วิธีไฮเปอร์บอลิกของ Sridharan et al. (1991) ในการประมาณสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายนํ้า และใช้วิธีของ Terzaghi ในการคำนวณความเค้นประสิทธิผลที่เวลาใดๆ โดยดินเหนียวกรุงเทพฯที่นำมาใช้จะเป็นดินที่ไร้พันธะเชื่อมประสานและมีพันธะเชื่อมประสาน ผลจากการศึกษาพบว่า วิธีการอัดตัวคายนํ้าอย่างรวดเร็ว มีกราฟการอัดตัวคายนํ้าและค่าพารามิเตอร์ของการทรุดตัวอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกับการทดสอบการอัดตัวคายนํ้าแบบเดิมของ Terzaghi แต่ผลที่ได้จากการอัดตัวคายนํ้าอย่างรวดเร็วใช้ระยะเวลาในการทดสอบที่น้อยลง

พรสวรรค์ วงศ์วิวัฒน์และ วรากร ไม้เรียง (2548) เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติการยุบอัดตัวคายนํ้า ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯและปริมาตรที่ระดับความลึก 70 – 600 เมตร วิธีการคือเจาะเก็บดินตัวอย่างที่ระดับลึกเพื่อให้ทราบถึงชนิดของดินทางกายภาพ และการทดสอบการยุบอัดตัวคายนํ้าใช้ดินความลึกสูงสุดที่ 600 เมตร ผลจากการศึกษาพบว่า คุณสมบัติทางกายภาพที่ระดับลึกมีค่าความชื้นตามธรรมชาติที่ต่ำ จะมีค่า Liquid Limit, Plastic Limit, Shrinkage Limit และ Plastic Index ลดลงตามความลึก และจัดเป็นดินพวก Low Plasticity Clay (CL) คุณสมบัติด้านการยุบอัดตัวคายนํ้าของดินเหนียวที่ระดับลึกมีค่า Compression Index (Cc) ค่อนข้างสูง และมีค่า Initial Void Ratio (e_0) ลดลงตามความลึก จัดดินเหนียวเป็นดินเหนียวพวก NCC ซึ่งดิน NCC มีค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวในช่วงที่ต่ำมาก ดังนั้นจะพบว่าการทรุดตัวในดินระดับลึกเนื่องจากแรงกระทำเพิ่มมากขึ้นจะเกิดขึ้นได้ช้ามาก

คมกริช เวชสิทธิ์และ อติสรณ์ สนิทนวล (2548) เป็นการศึกษาพฤติกรรมการทรุดตัวและหาค่าสัมประสิทธิ์อัดตัวคายนํ้าในบริเวณก่อสร้างบอคกตะกอนซึ่ง ได้สร้างคันดินถมเพื่อเร่งการทรุดตัว โดยใช้เครื่องมือวัดทางธรณีอ่านค่าการทรุดตามระยะเวลาและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว เพื่อเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวทางทฤษฎีของดินโดยใช้ทฤษฎีของ Asaoka, Magman and Mieussens และ Terzaghi ผลการศึกษาพบว่า ค่าการทรุดของดินในสนามและค่าทางทฤษฎีมีความใกล้เคียงกัน และค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว

อนุชิต อุชายภิชาติ (2549) เป็นการศึกษาการทดสอบการยุบอัดตัวเมื่อดินทราย (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) ถูกทำให้อิ่มตัวด้วยนํ้า โดยการ ทำการบดอัดดินทรายแบบมาตรฐาน จากนั้นจะได้ค่าหน่วยนํ้าหนักแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม แล้วนำตัวอย่างดินทรายที่บดอัดที่อิ่มตัวด้วยนํ้าแล้วมาให้ความเค้นในแนวตั้งคงที่ในช่วง 25 ถึง 800 kPa ผลจากการศึกษาพบ ตัวอย่างดินที่ถูกทำให้อิ่มตัว

ด้วยน้ำจะเกิดการยุบอัดตัวทันทีทันใดสำหรับตัวอย่างดินที่มีปริมาณดินเหนียวปนอยู่น้อย และสำหรับตัวอย่างดินที่มีปริมาณดินเหนียวปนอยู่มากการยุบอัดตัวจะขึ้นอยู่กับเวลา นอกจากนี้ยังพบว่าการที่ดินอึ้มตัวด้วยน้ำจะมีการยุบอัดตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีดินเหนียวปนอยู่น้อยและมีความเค้นแนวตั้งมากระทำเพิ่มขึ้น

ณรงค์เดช ยังสุขเกษม และสุขสันต์ หอพิบูลสุข (2551) เป็นการศึกษาพิกัดอัตราเตอร์เบอร์กและพฤติกรรมกราฟการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียว 3 ชนิด ที่มีลักษณะการบวมตัวต่างกัน ได้แก่ ดินคาโอลิไนท์ ดินเบนโทไนท์ และดินเหนียวกรุงเทพฯ ดินเหนียวตัวอย่างทั้งสามจะถูกนำมาปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมและแคลเซียม จากผลการทดสอบพบว่าพิกัดเหลวของดินเหนียวกรุงเทพฯมีค่าเพิ่มขึ้นและดินเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรงที่สูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นและความแรงของประจุบวกเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบของดินคาโอลิไนท์ การเพิ่มความเข้มข้นและความแรงของประจุบวกจะทำให้ดินเกิดการจัดเรียงตัวแบบกระจัดกระจาย (Flocculation) มากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินสูงขึ้น จากผลทดสอบการอัดตัวคายน้ำของทั้งดินบวมตัวต่ำและบวมตัวสูง ผู้วิจัยได้สร้างเส้นสถานะเนื้อแท้สำหรับดินเหนียวทั่วไป ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการทำนายเส้นกราฟการอัดตัวของดินเหนียวบั้นใหม่

2.4.3 ผลกระทบจากปัจจัยอื่นๆ

กฤษณพงศ์ ฟองสินธุ์และ สุเทพ นิมมวล (2550) เป็นการศึกษาการอัดตัวระบายน้ำของดินที่มีความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความเครียดที่มากภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มเชิงเส้นจนถึงค่าสูงสุดและน้ำสามารถระบายออกได้เพียงทิศทางเดียว เพื่อวิเคราะห์หาค่าเปอร์เซ็นต์การอัดตัวระบายน้ำเฉลี่ยและความดันส่วนเกิน โดยอาศัยทฤษฎีการอัดตัวระบายน้ำความเครียดของ Mesri and Rokhsar ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์ความเครียดมีค่ามากขึ้น เปอร์เซ็นต์การอัดตัวระบายน้ำเฉลี่ยมีค่ามากขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์อัตราส่วนความดันน้ำส่วนเกินมีค่าลดลง ถ้าเปอร์เซ็นต์ความเครียดไม่เกิน 20% ถือว่ามีความเครียดน้อยสามารถใช้ทฤษฎีของ Mesri and Rokhsar โดยไม่คิดการอัดตัวคืบคลานภายใต้ความเครียดที่น้อย เพื่อหาเปอร์เซ็นต์การอัดตัวระบายน้ำเฉลี่ย และเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนความดันน้ำส่วนเกินได้

อภิศักดิ์ ยิ้มซ้อยและ ดร.สมชาย ประยงค์พันธ์ (2555) เป็นการศึกษาหาผลกระทบของแรงเสียดทานระหว่างวงแหวนสำหรับการทดสอบการยุบตัวแบบอัดตัวคายน้ำและตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบในการศึกษานี้จะเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการทดสอบการยุบตัวแบบอัดตัวคายน้ำในกรณีคิดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวงแหวนในการทดสอบการยุบตัวแบบอัดตัวคายน้ำกับตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ และในกรณีที่ไม่คิดแรงเสียดระหว่างวงแหวนในการทดสอบการยุบตัวแบบอัดตัวคายน้ำกับตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งจากผลการวิจัยทำให้เห็นว่าแรงเสียดทานระหว่างวงแหวนในการทดสอบการยุบตัวแบบอัดตัวคายน้ำ กับตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนั้นส่งผลต่อค่า Maximum Past Pressure (P_c) และค่า Coefficient of Consolidation (C_v) ซึ่งถ้านำพารามิเตอร์ดังกล่าวมาใช้ในการทำนายปริมาณการทรุดและระยะเวลาที่ 90% ของปริมาณการทรุดตัวทั้งหมด พบว่ากรณีที่ไม่พิจารณาแรงเสียดทาน ปริมาณ

การทรุดตัวและระยะเวลาในการทรุดตัวเท่ากับ 0.068 m และ 13.08 วัน ตามลำดับ และกรณีที่พิจารณาแรงเสียดทาน ปริมาณการทรุดตัวและระยะเวลาในการทรุดตัว เท่ากับ 0.102 m และ 44.17 วัน ตามลำดับ

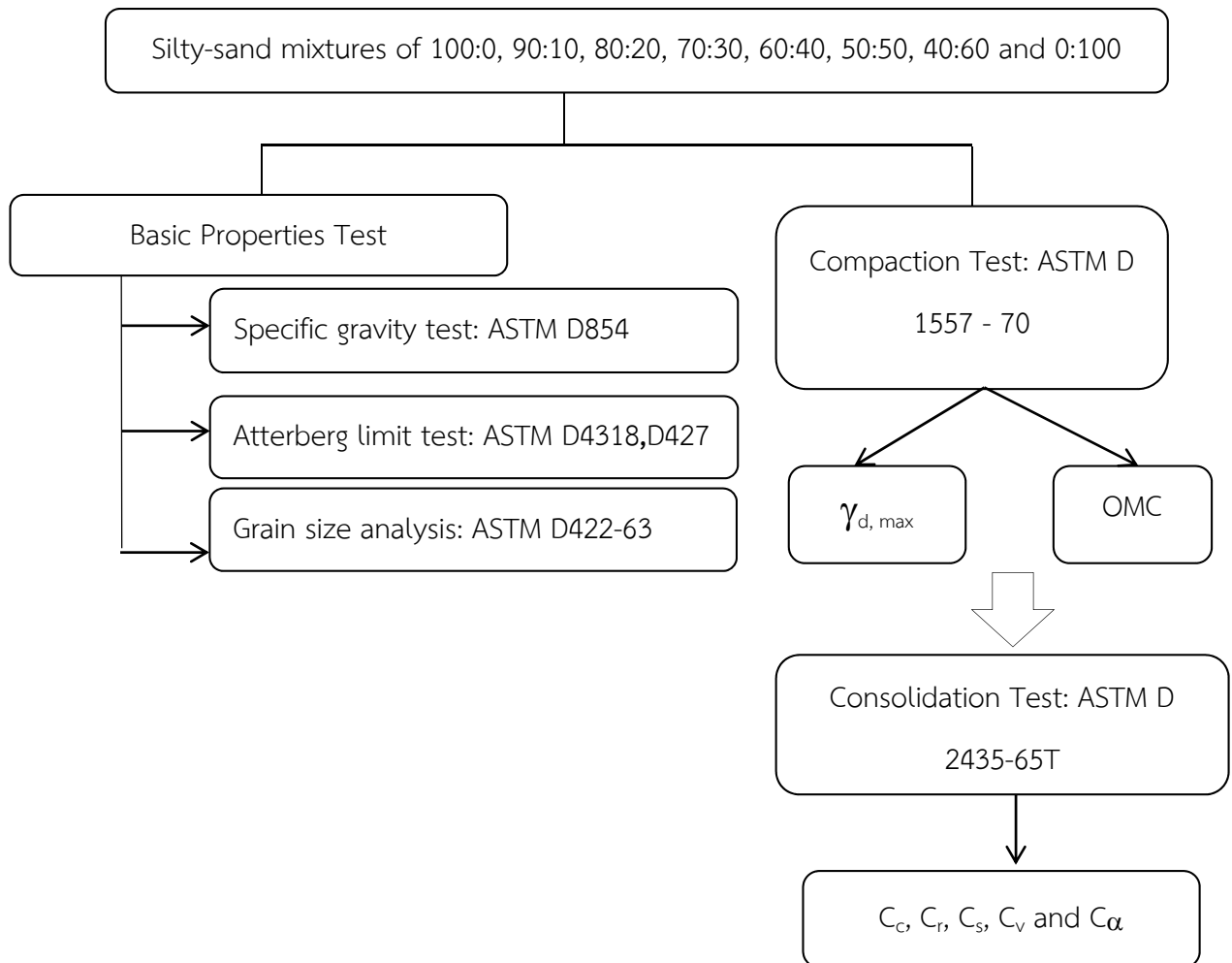
อภิศักดิ์ ยิ้มซ้อยและ ดร.สมชาย ประยงค์พันธ์ (2556) เป็นการศึกษาผลของแรงเสียดทานในการทดสอบการอัดตัวแบบคายน้ำต่อการคาดการณ์ปริมาณและเวลาของการทรุดตัว ในการศึกษานี้จะทำการพิจารณากรณีศึกษาเป็น 2 กรณี คือกรณีไม่ลดแรงเสียดทานและกรณีลดแรงเสียดทานโดยการทาซิลิโคนกรีสภายในวงแหวนที่ทำการทดสอบ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเมื่อทาซิลิโคนกรีส แรงเสียดทานระหว่างตัวอย่างดินและวงแหวนจะลดลงเหลือเพียง 9% ในขณะที่เมื่อไม่มีการใช้ซิลิโคนกรีสแรงเสียดทานจะอยู่ระหว่าง 20-25% แรงเสียดทานดังกล่าวจะส่งผลทำให้ค่า Maximum Past Pressure และ ค่า Coefficient of Consolidation ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนและส่งผลต่อการคำนวณอัตราการทรุดตัวและระยะเวลาในการทรุดตัวของโครงสร้างอีกด้วย

ธนาภรณ์และพัสดา (2555) เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำทรายผสมดินตะกอนมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมเพื่อเพิ่มความแน่นและความแข็งแรงในชั้นรองพื้นทาง ตัวอย่างของดินตะกอนที่นำมาใช้ในการทดสอบนี้ นำมาจากชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิรา จังหวัดชลบุรี โดยแปรผันอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักแห่งระหว่างทรายต่อดินตะกอน ดังนี้ 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20 และ 70:30 จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าทรายผสมดินตะกอนมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการเพิ่มความแน่นและความแข็งแรงในชั้นรองพื้นทางได้เมื่อผสมในอัตราส่วน ดังนี้ 100:0, 95:5, 90:10, 85:15

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย เพื่อการศึกษาพฤติกรรมการยุบตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุมวลรวมทางเลือกใหม่ในงานทางและงานทางด้านวิศวกรรมโยธา ตลอดจนเพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณดินตะกอนทะเลที่ปนอยู่ในวัสดุมวลรวมต่อพารามิเตอร์การอัดตัวคาน้ำ (consolidation parameters) ของตัวอย่างดินบดอัด ซึ่งแปรผันอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้งระหว่างทรายต่อดินตะกอนทะเลคือ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60 และ 0:100 โดยทดสอบคุณสมบัติและพฤติกรรมต่างๆของวัสดุมวลรวมตัวอย่างในทุกๆอัตราส่วนผสม



รูปที่ 3.1 แผนผังการทดสอบ

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ดินตะกอนจากชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี
2. ทราย

3.3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.3.1) ส่วนที่ 1 ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของทรายผสมดินตะกอนทะเลบริเวณชายฝั่งท่าเทียบเรือแหลมฉบัง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยทำการทดสอบดังนี้

3.3.1.1) ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity test: ASTM D854)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ขวดแก้วฟลาซกันแบน ขนาดความจุ 500 cm³
2. ตามบุนเซ็น หรือ เต้าผ่นร้อน
3. สามขา (Tripod) และแผ่นตะแกรงแอสเบสโตส (Asbestos Gauze) ใช้กับเต้าบุนเซ็น
4. พรอท 0-100°C อ่านละเอียด 0.5-1.0°C
5. แท่งแก้วคน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มม.ยาว 30 cm.
6. กรวย ขนาดปากประมาณ 10 cm.แบบรูกว้าง
7. ตู้อบ
8. อ่างแก้วดูความร้อน
9. เครื่องชั่งอ่านละเอียด
10. ภาชนะ – ชั้นอลูมิเนียม

วิธีการทดลอง

(ก) การหากราฟสำหรับหาน้ำหนักน้ำและขวดที่อุณหภูมิต่างๆ

1. ล้างขวด ถ.พ. ให้สะอาดเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดที่คอขวด (อ่านที่ระดับท้องน้ำ)
2. ต้มไล่ฟองอากาศหรือดูดโดยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาที จนฟองอากาศหมด
3. เติมน้ำปรับระดับน้ำจนเสมอระดับที่คอขวดพอดี เช็ดภายนอกขวดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
4. วัดอุณหภูมิของน้ำภายในขวดให้ละเอียด โดยวัดที่หลายระดับ ถ้าอุณหภูมิต่างกันมาก ให้ตะแคงขวด แล้วกลิ้งไปมาเพื่อให้ผสมเข้ากันดีทำให้อุณหภูมิสม่ำเสมอแล้วจึงบันทึกอุณหภูมิที่ถูกต้อง
5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 3 และ 4 โดยให้ความร้อนหรือทำให้เย็นลงในช่วงอุณหภูมิที่ใช้งาน (20 ถึง 40°C) ประมาณ 4-5 จุด เช่นที่ 20, 25, 30, 35 และ 40°C เป็นต้น
6. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักขวดที่มีน้ำเต็ม และอุณหภูมิ

(ข) การทดลองหาความถ่วงจำเพาะของดิน

1. นำดินตัวอย่างที่แห้งประมาณ 50 กรัม (ถ้าเป็นดินชื้นต้องเผื่อน้ำหนักความชื้น) ผสมน้ำกลั่นแล้วกวนให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องปั่น (Mixer Machine) โดยให้ส่วนผสมไม่เกิน 200 ลบ.ซม.
2. เทส่วนผสมน้ำดินลงในขวดหา ถ.พ. ขนาด 250 ลบ.ซม. แล้วใช้น้ำกลั่นล้างดินที่ติดในภาชนะผสมลงในขวด ถ.พ. ให้หมดระวังอย่าให้ระดับน้ำเกินขีดวัดปริมาตรที่คอขวด
3. ใส่ฟองอากาศโดยการต้มหรือดูดด้วยปั๊มสุญญากาศประมาณ 10 นาที จนฟองอากาศหมดแล้วเติมน้ำกลั่นให้ถึงระดับขีดที่คอขวด แล้วปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องทดลอง
4. ถ้าระดับน้ำลดลงอีก ให้เติมให้เต็มถึงขีด แล้วนำไปชั่งให้ละเอียดถึง 0.1 กรัม แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำดินในขวด
5. เทแล้วล้างส่วนผสมในขวด ถ ลงในภาชนะ .พ. นำไปอบให้แห้งเพื่อชั่งหาน้ำหนักดินที่แน่นอนอีกครั้ง

3.3.1.2) ทดสอบหาค่าพิกัดชั้นเหลว (Atterberg limit test: ASTM D4318, D427)

3.3.1.2.1) ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องเคาะดิน) Casagande'cup)
2. มีดปาดร่องดิน)Grooving Tool)
3. ถ้วยผสมดิน
4. มีดปาดร่อง)Spatula ขนาด 10 ซม.
5. ขวดบีบน้ำ)Wash Bottle) ขนาด 500 ซม³
6. กระจกตวงขนาด 100 ซม³
7. ตะแกรงร่อนเบอร์ 40
8. น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

1. ร่อนตัวอย่างดินแห้งผ่านตะแกรงเบอร์ 40 ประมาณ 200 กรัม (ถ้าเป็นดินเหนียวเนื้อละเอียด เช่น ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯสามารถใช้ดินในสภาพธรรมชาติได้ อาจใช้ตัวอย่างดินแบ่งดินดังกล่าวประมาณ 50 กรัม ไว้ทำ Shrinkage limit ส่วนที่เหลือใช้ทดสอบ Liquid Limit และ Plastic Limit)
2. นำตัวอย่างดินมาผสมน้ำโดยให้น้ำเข้าไปในเนื้อดินอย่างทั่วถึงในบางกรณีอาจจะต้องแช่ดินที่ผสมดังกล่าวทิ้งไว้ 1 คืนใช้มีดปาด (Spatula) ตักดินปาดลงบนถ้วยทองเหลือง (Casagande Cup) โดยความหนาของดินตรงกลางประมาณ 1 ซม. แล้วบากโดยเครื่องมือบาก (Grooving Tool) ให้เป็นร่องตรงกลาง

3. เคาะถ้วยทองเหลืองด้วยความเร็วสม่ำเสมอ 2 ครั้งต่อวินาที จนกระทั่งดินตอนล่างของรอยบากเคลื่อนเข้าบรรจบกัน 1 ซม. ดังรูป แล้วจดบันทึกจำนวนครั้งของการเคาะไว้
4. ปาดแต่งดินอีกครั้ง ทำรอยบากแล้วเคาะซ้ำ ถ้าจำนวนการเคาะเท่ากันหรือต่างกันไม่เกิน 2 ครั้งให้ใช้ค่าเฉลี่ยเป็นจำนวนการเคาะ (N) ที่ถูกต้อง นำดินบริเวณรอยบากไปหาปริมาณความชื้น (การเคาะครั้งแรก จำนวนครั้งควรประมาณ 40 - 50 ครั้ง ถ้ามากกว่าให้เพิ่มน้ำอีก แต่ถ้าน้อยกว่ามากให้ทำให้แห้งลง)
5. ผสมน้ำในดินแล้วทำตามข้อ 3 และ 4 โดยให้มีจำนวนครั้งของการเคาะน้อยลงประมาณ 10 ครั้ง แล้วนำดินไปหาความชื้น ทำเช่นนี้จนได้จำนวนครั้งของการเคาะอย่างน้อย 4 ค่า (จำนวนการเคาะครั้งสุดท้ายควรอยู่ราว 5 ถึง 10 ครั้ง)
6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการเคาะ (N) และความชื้นโดยให้จำนวนการเคาะอยู่ในรูปของ log scale
7. ความสัมพันธ์ดังกล่าวควรจะเป็นเส้นตรง ค่าความชื้นที่จำนวนการเคาะ 25 ครั้ง เรียกว่า "Liquid Limit" (W_L หรือ LL)

3.3.1.2.2) ค่าขีดจำกัดพลาสติก (Plastic limit)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แผ่นกระจกขนาด 30 x 30 ซม.หนา 1 ซม.
2. ท่อนโลหะ ขนาด 3.2 มม (1/8 นิ้ว)

วิธีการทดลอง

1. นำดินที่เหลือจากการทดลอง Liquid Limit มาผึ่งให้หมาดๆ แล้วนำมาปั้นคลึงเป็นแท่งยาวขนาดประมาณ 1 ซม. แล้วค่อย ๆ คลึงให้ดินเล็กลงจนมีขนาดเท่ากับ 1 หุน (1/8 นิ้ว) แล้วคลึงต่อไปเรื่อยๆ โดยพยายามรักษาขนาดดังกล่าวจนดินเริ่มแตกปริออก
2. เมื่อดินเริ่มแตก นำดินไปอบหาความชื้น ความชื้นดังกล่าวเรียกว่า Plastic Limit (W_p หรือ PL)
3. ทำซ้ำอีกครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

3.3.1.3 ทดสอบหาขนาดคละของเม็ดดิน (Grain size analysis test: ASTM D422-63)

อุปกรณ์ในการทดลอง

1. ถาดใส่ตัวอย่าง (Mixing Pan)
2. ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม.
3. เครื่องเขย่าตะแกรง (Sieve Shaker)
4. เครื่องชั่ง ขนาด 2 กก.อ่านละเอียด 0.1 กรัม
5. แปลงทำความสะอาดตะแกรง
6. ช้อนตักดิน (Soil Scoop)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตะแกรงทุกๆ ขนาดที่ใช้ โดยตาชั่งอ่านได้ถึง 0.1 กรัม โดยตะแกรงชุดหนึ่งไม่ควรเกิน 7 ใบ โดยมีขนาดละเอียดถึงเบอร์ 200 อยู่ด้วยทุกครั้ง
2. ในกรณีที่ตัวอย่างดินเกาะเป็นก้อนใหญ่ให้ทุบ แยกดินออกเป็นเม็ดอิสระด้วยค้อนยาง แต่ต้องระวังอย่าให้แรงมากจนเม็ดดินแตก
3. นำตัวอย่างดินที่อบซึ่งน้ำหนักแล้วใส่ลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปหาละเอียด โดยมีฝาปิดด้าน บนและมีถาด (PAN) รองด้านล่าง รวมเป็นถาดของตะแกรงนำไปเข้าเครื่องเขย่า (Sieve Shaker) เขย่านานอย่างน้อย 10 นาที
4. ชั่งทั้งดินที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงรวมทั้งน้ำหนักตะแกรง แล้วนำไปคำนวณหาค่า %F

3.3.2) ส่วนที่ 2 ทำการทดสอบการยุบตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลในทุกๆ อัตราส่วนผสม (Consolidation test: ASTM D2435-90)

เมื่อตัวอย่างดินถูกทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำโดยใช้เครื่องมือทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Oedometer) ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้จะถูกเตรียมโดยจำลองพฤติกรรมเช่นเดียวกับการก่อสร้างชั้นโครงสร้างทาง คือการบดอัดแบบสถิตย์ เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีความชื้นบดอัดเหมาะสมและมีค่าหน่วยน้ำหนักแห้งสูงสุดที่ได้จากการทดสอบการบดอัดแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction Test: ASTM D1557-91)

3.3.2.1) การทดลอง Compaction Test แบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified compaction Test: ASTM D1557-91)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แบบ (Mold) ลักษณะทรงกระบอกกลวงมี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 นิ้ว พร้อมฐานที่บีบ
2. แท่งโลหะรอง (Spacer Disc)
3. ค้อน
4. เครื่องดันตัวอย่าง (Sample Extruder)
5. ตาชั่ง ชั่งได้ละเอียด 0.1 กรัม
6. เตาอบ สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ที่ 110 ± 5 องศาเซลเซียส สำหรับอบดินตัวอย่าง
7. เหล็กปาด (Straight Edge)
8. ตะแกรงร่อนดินเบอร์ 200 และตะแกรงเบอร์ 16
9. เครื่องผสม ใช้ผสมตัวอย่างกับน้ำ ได้แก่ ถาด, ช้อน, พลั่ว เกรียง, ค้อนยาง, ถ้วยตวงวัดปริมาตรน้ำ
10. กระจบอบดิน

การเตรียมตัวอย่าง

1. ร่อนทรายผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และดินตะกอนผ่านตะแกรงเบอร์ 200
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างตามอัตราส่วนระหว่างทรายต่อดินตะกอนดังนี้ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60 และ 0:100

วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้แล้วมาคลุกเคล้าจนเข้ากัน
2. เติมน้ำปริมาณหนึ่ง โดยปกติมักเริ่มต้นที่ประมาณ 4% ต่ำกว่าปริมาณน้ำที่ให้ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum Moisture Content) คลุกเคล้าตัวอย่างที่เติมน้ำแล้ว หรือนำเข้าเครื่องผสมจนเข้ากันดี
3. แบ่งตัวอย่างใส่ลงในแบบซึ่งมีปลอกสวมเรียบร้อย โดยประมาณให้ดินแต่ละชั้นเมื่อบดอัดแล้วมีความสูงประมาณ 1 ใน 5
4. ทำการบดอัดโดยใช้ค้อน จำนวน 25 ครั้ง สำหรับแบบ (Mold) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 นิ้ว
5. ดำเนินการบดทับจนได้ตัวอย่างที่ทำการบดทับแล้วเป็นชั้นๆ จำนวน 5 ชั้น โดยให้สูงกว่าแบบประมาณ 10 มิลลิเมตร
6. ถอดปลอกออก ใช้เหล็กปาดแต่งหน้าให้เรียบเท่าระดับของตอนบนของแบบ นำไปซึ่งจะได้มวลของดินตัวอย่างและมวลของแบบ หักมวลของแบบออกจะได้มวลดินตัวอย่างเปียก (A)
7. นำดินที่ได้จากการบดทับตัวอย่างในแบบใส่กระป๋องอบดิน เพื่อนำไปทดลองหาปริมาณน้ำในดิน
8. คำนวณหาค่าความแน่นเปียก (Wet Density; ρ_t) และความแน่นแห้ง (Dry Density; ρ_d) เมื่อทราบปริมาณน้ำในดิน w (Moisture Content; w)
9. ดำเนินการตามข้อ 1. ถึงข้อ 8. โดยเติมน้ำขึ้นอีกครั้งละ 2 % จนกว่าจะได้ความแน่นลดลงจึงหยุดการทดลอง หรืออาจลดน้ำที่ผสม ในกรณีที่เติมน้ำแล้วได้ความแน่นลดลง เพื่อให้เขียน Curve ได้
10. เขียน Curve ระหว่างความแน่นแห้งและปริมาณน้ำในดินเป็นร้อยละ w ก็จะทราบค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density; Max. ρ_d) และปริมาณน้ำในดินที่ให้ความแน่นแห้งสูงสุด OMC (Optimum Moisture Content; OMC)

3.3.2.2) การทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation test: ASTM D2435-90)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่อง Oedometer
2. แผ่นน้ำหนก
3. ที่บรรจุตัวอย่าง (Consolidation cell) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว สูง 0.75 นิ้ว และ
ส่วนประกอบดังนี้ -แผ่นหินพรุน (Porous Stone) 2 แผ่น
- วงแหวนตัวอย่าง (Sample Ring)
- ฝาปิดน้ำหนก
4. อุปกรณ์แต่งตัวอย่าง
5. จาระบี, กระดาษกรอง
6. เวอร์เนียคาลิเปอร์
7. นาฬิกาจับเวลา
8. อุปกรณ์หาความชื้น ได้แก่
- เครื่องชั่ง
- เตาอบ
- กระจงเก็บตัวอย่าง
9. Dial gauge
10. น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างดินมาตัดแต่งลงใน Consolidation ring ขนาดตัวอย่างมาตรฐานที่มักใช้ทดลองคือ
เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว และหนา 1 นิ้ว
2. วัดขนาดตัวอย่าง และชั่งน้ำหนักเพื่อจะคำนวณหาความหนาแน่นและ Initial void ratio
ต่อไป ส่วนดินที่เหลือจากการตัดแต่งให้นำไปหาความชื้น ซึ่งเป็นความชื้นของตัวอย่างก่อน
ทดลอง
3. นำตัวอย่างดินติดตั้งใน Consolidation cell ซึ่งมักจะมีหินพรุน ประกอบทั้งบนและล่าง
ตัวอย่าง เพื่อให้ น้ำภายในไหลได้สะดวก
4. นำ consolidometer เข้าติดตั้งใน Loading frame ติด Dial gauge สำหรับวัดการทรุดของ
ตัวอย่าง (อ่านได้ละเอียดถึง 0.0001 นิ้ว) แล้วหล่อ น้ำใน Consolidometer ให้ระดับน้ำอยู่เหนือ
ระดับดินตัวอย่าง

การบรรจุน้ำหนักและบันทึกข้อมูล

1. ก่อนเริ่มบรรจุน้ำหนักบนตัวอย่างต้องเตรียมอุปกรณ์เหล่านี้ให้พร้อม เช่น แบบบันทึกข้อมูล, นาฬิกาจับเวลา, ตูมน้ำหนัก
2. ใช้น้ำหนักบรรจุทุกดังนี้ 1, 2, 4, 8, 16,...กก.
3. วางน้ำหนักชุดแรกแล้วเริ่มบันทึกเวลาพร้อมกับ Dial gauge จะหมุนไปด้วยจะอ่าน ณ เวลาต่างๆดังนี้ 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4, 8, 15, 30 นาที และ 1, 2, 4,...ชม. นับจากเริ่มต้น
4. หลังจากทิ้งไว้ประมาณ 24 ชม. จะต้องเพิ่มน้ำหนักชุดที่ 2 โดยปฏิบัติเช่นเดียวกันกับข้อ 3 จนครบชุดน้ำหนักที่จะต้องใส่
5. ถ้าต้องการทราบคุณสมบัติของดินในการยึดตัวจากการลดน้ำหนัก ก็ให้ทำ เช่นเดียวกันโดยเอา ตูมน้ำหนักออกแล้วทิ้งไว้ 24 ชม.
6. หลังจากเสร็จการทดลองต้องนำตัวอย่างดินไปหาความชื้นด้วย
7. เขียนกราฟต่างๆที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

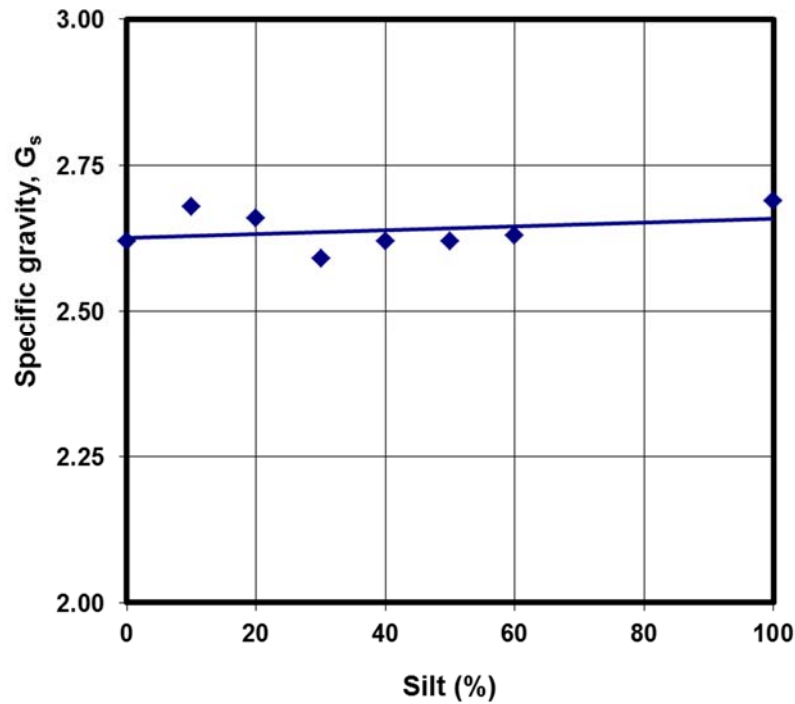
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการยุบตัวของทรายผสมดินตะกอนทะเลที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมรวมในงานทางด้านวิศวกรรมโยธา โดยแปรผันอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักแห้งระหว่างทรายต่อดินตะกอนดังนี้ คือ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60 และ 0:100 ซึ่งผลการทดสอบประกอบไปด้วย คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติการยุบตัวของดินตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ผลการทดสอบหาการหาค่าขนาดผลของทราย ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าพิกัดชั้นเหลว รวมถึงผลการทดสอบคุณสมบัติการยุบตัวของดินตะกอน โดยใช้การทดสอบการบดอัดดินในการเตรียมตัวอย่าง

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตัวอย่าง

Sand:Silt	LL (%)	PL (%)	PI (%)	G_s	OMC (%)	$\gamma_{dry,max}$ (g/cm ³)
100:0	-	-	-	2.62	9.04	2.03
90:10	16.09	-	-	2.68	8.04	2.10
80:20	18.13	-	-	2.66	8.20	2.06
70:30	24.93	14.04	10.89	2.59	10.00	2.02
60:40	29.67	14.79	14.88	2.62	10.72	2.03
50:50	36.5	14.44	22.06	2.62	14.12	2.07
40:60	40.55	15.85	24.70	2.63	14.20	1.85
0:100	53.65	28.13	25.58	2.69	23.00	1.47

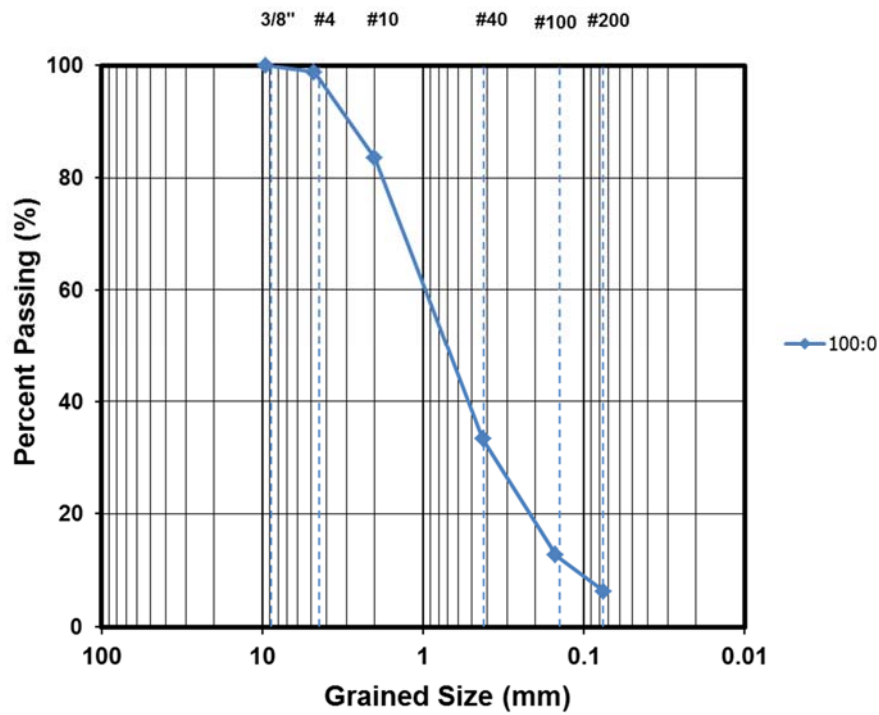
4.1.1 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะกับปริมาณดินตะกอน พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะ มีค่าค่อนข้างคงที่ในทุกอัตราส่วนของปริมาณดินตะกอน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 2.59-2.69 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าปริมาณดินตะกอนที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างดินมากนัก เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของทรายและดินตะกอนมีค่าใกล้เคียงกัน

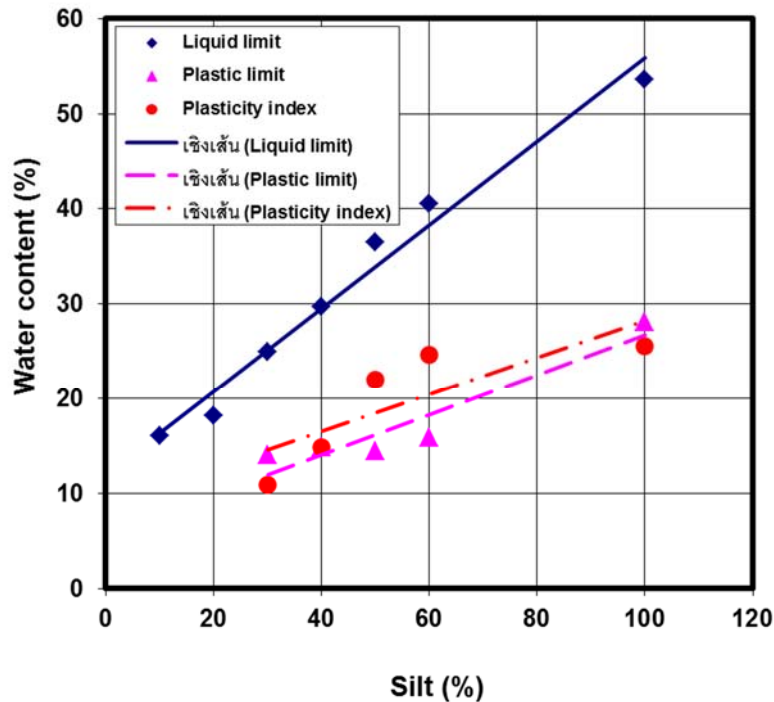
4.1.2 ผลการทดสอบค่าขนาดผลของเม็ดดิน



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ดินที่ผ่านตะแกรงกับขนาดของตะแกรงเบอร์ต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ดินที่ผ่านตะแกรงกับขนาดของตะแกรงเบอร์ต่างๆ พบว่าค่า Coefficient of uniformity (Cu) และค่า Coefficient of curvature (Cc) มีค่าเท่ากับ 8.33 และ 1.02 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าดังกล่าวแสดงว่าทรายมีขนาดผลที่ดี

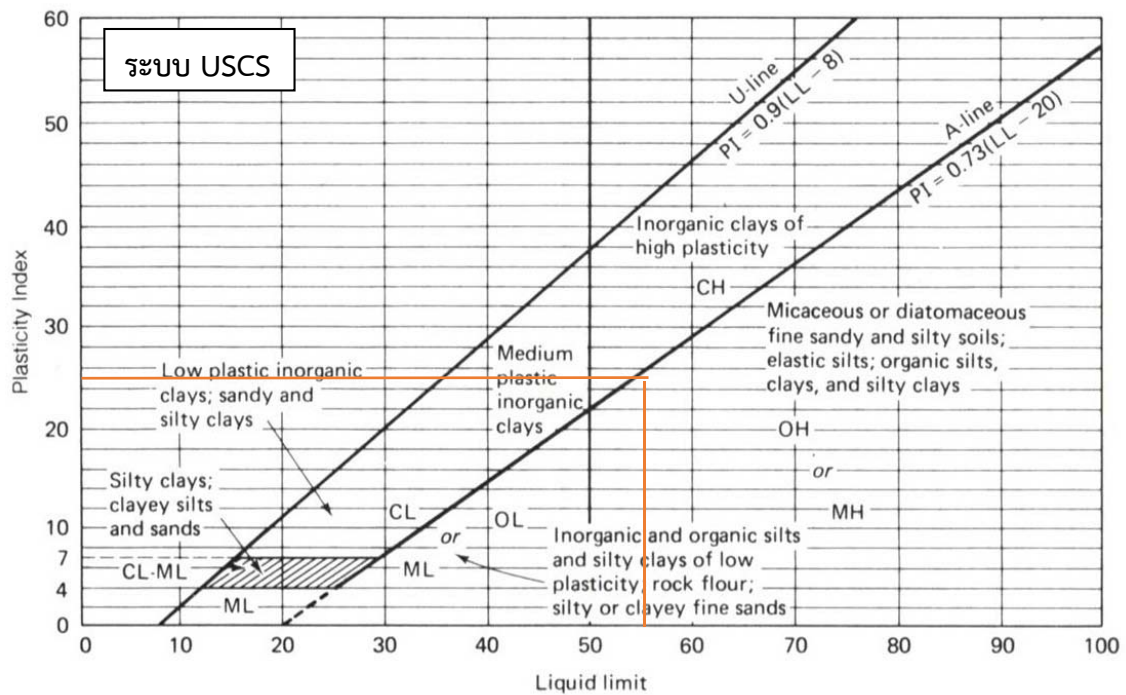
4.1.3 ผลการทดสอบค่าพิกัดชั้นเหลว



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณความชื้นกับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ

จากการทดสอบ Atterberg's Limits ผลการทดลองถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพิกัดชั้นเหลวและปริมาณดินตะกอนที่เพิ่มขึ้น พบว่า ค่าพิกัดชั้นเหลว ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณความชื้นที่ทำให้ดินเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นสภาพพลาสติก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของปริมาณดินตะกอนที่เพิ่มขึ้น แต่กลับพบว่าค่าพิกัดพลาสติก เป็นค่าที่แสดงปริมาณความชื้นที่ทำให้ดินเปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นกึ่งของแข็ง พบว่าค่าพิกัดพลาสติก มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่

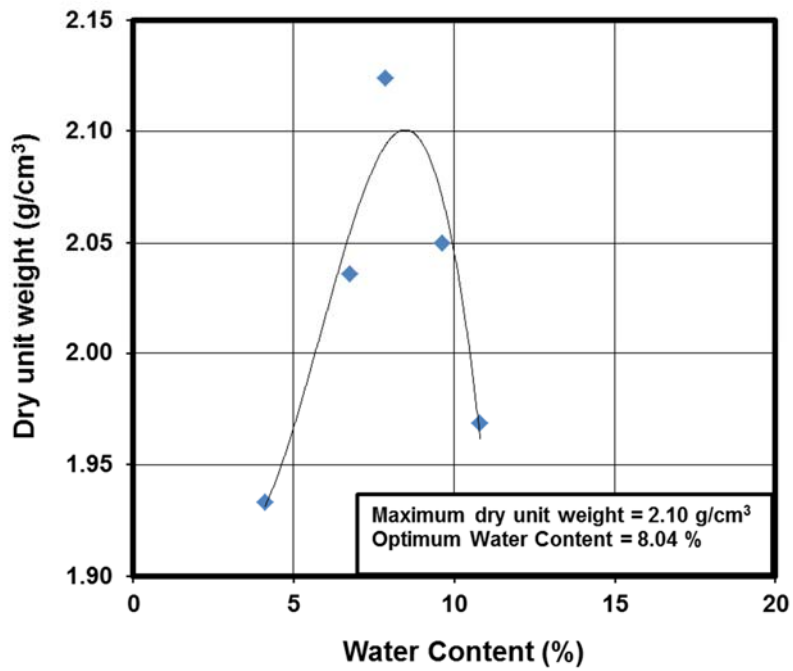
จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น สามารถคำนวณหาค่าดัชนีความเหนียว ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความแตกต่างระหว่างค่าพิกัดชั้นเหลวและพิกัดพลาสติก พบว่าค่าดัชนีความเหนียว มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณดินตะกอนเพิ่มขึ้น และมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 10-30 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณดินตะกอนปะปนในตัวอย่างดิน 30-40% ค่าดัชนีความเหนียวอยู่ในช่วงปานกลาง และที่ 50-100% ค่าดัชนีความเหนียวอยู่ในช่วงสูง ทั้งนี้เนื่องจากค่าพิกัดชั้นเหลว คือค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติของมวลดินเม็ดละเอียดดั่งนั้น เมื่อมีปริมาณดินตะกอนปะปนอยู่ในตัวอย่างดินเพิ่มมากขึ้น ย่อมส่งผลให้ค่าพิกัดชั้นเหลวของตัวอย่างดินสูงขึ้นตามไปด้วย



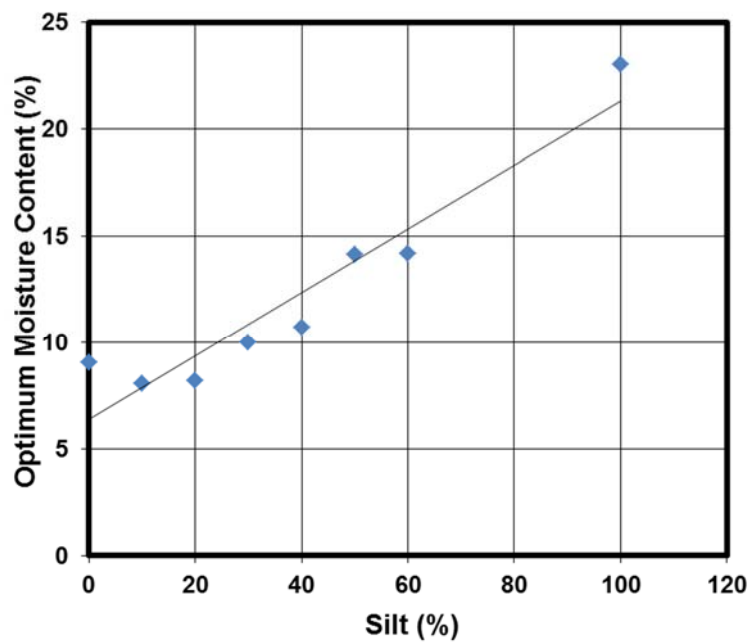
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเหนียว (Plastic Index, PI) กับค่าพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ของดินตะกอน

จากการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดินตะกอน เมื่อนำค่าดัชนีความเหนียว (PI) และค่าพิกัดเหลว (LL) มาพล็อตหาความสัมพันธ์ พบว่า ในแผนภูมิพลาสติกซิติ ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบอยู่ใต้เส้นเอ (A-Line) นั่นคือ ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบเป็นดินตะกอนที่มีความเป็นพลาสติกสูง (High plasticity silt, MH)

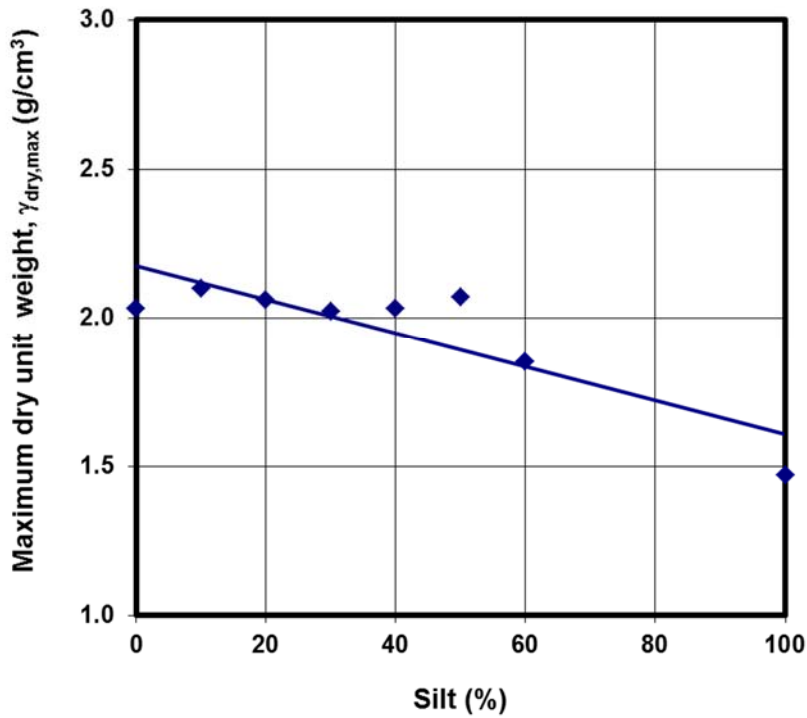
4.1.4 ผลการทดสอบการบดอัดดิน



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้น



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสูงสุดกับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดกับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ

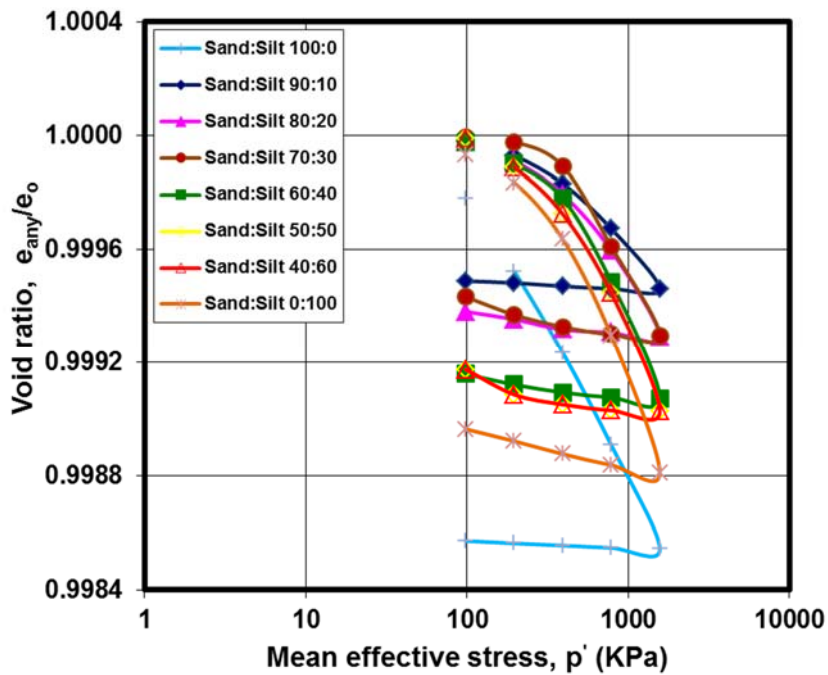
จากรูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับปริมาณความชื้นที่ได้จากการทดสอบบดอัดดินของตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วน 90:10 ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมตัวอย่างดินก่อนทำการทดสอบการอัดยุบอัดตัว จากกราฟจะสามารถหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดได้ และนำสร้างกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของตัวอย่างดินที่มีปริมาณดินตะกอน 0-50% มีค่าค่อนข้างคงที่ระหว่าง 2.02-2.10 g/cm³ แต่เมื่อมีปริมาณดินตะกอนเพิ่มมากขึ้นเป็น 60-100% จะส่งผลให้ความหนาแน่นของดินต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากเมื่อปริมาณดินตะกอนเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยดังรูปที่ 4.7 ซึ่งความชื้นยิ่งมากก็จะยิ่งส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลงด้วย

4.2 ผลการทดสอบการยุบอัดตัวของดินตัวอย่าง

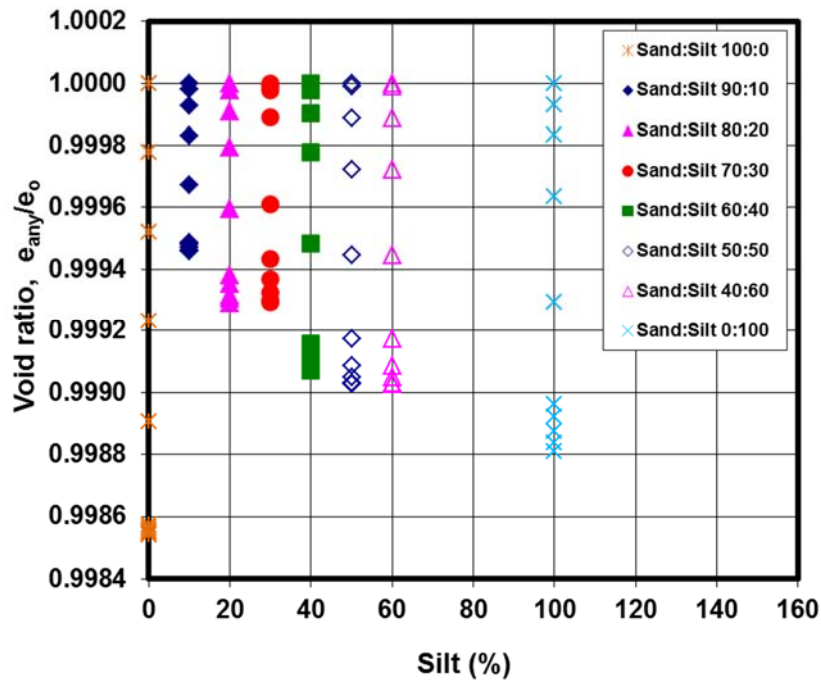
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการยุบอัดตัว

Sand:Silt	e_0	C_c	C_s	C_α
100:0	0.6992	-	-	-
90:10	0.5123	0.000249	1.91E-05	0.00199
80:20	0.3161	0.000256	3.33E-05	0.00205
70:30	0.2583	0.000278	3.82E-05	0.00208
60:40	0.3887	0.000323	4.15E-05	0.00427
50:50	0.5145	0.000541	0.000116	0.00503
40:60	0.5145	0.000646	0.000166	0.00604
0:100	1.0115	0.000676	0.006270	-

4.2.1 ผลการทดสอบการยุบอัดตัว



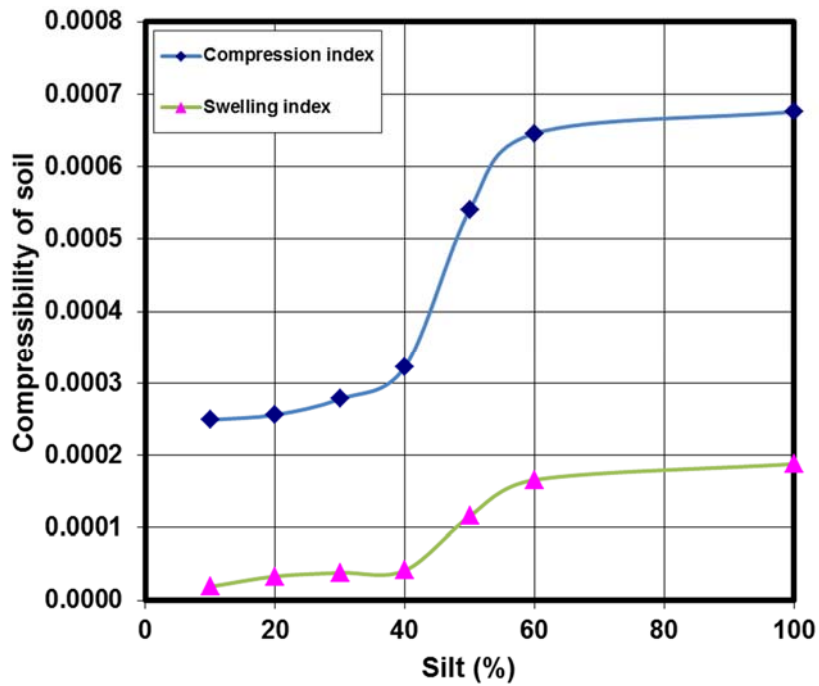
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างกับความเค้น
ประสิทธิผล



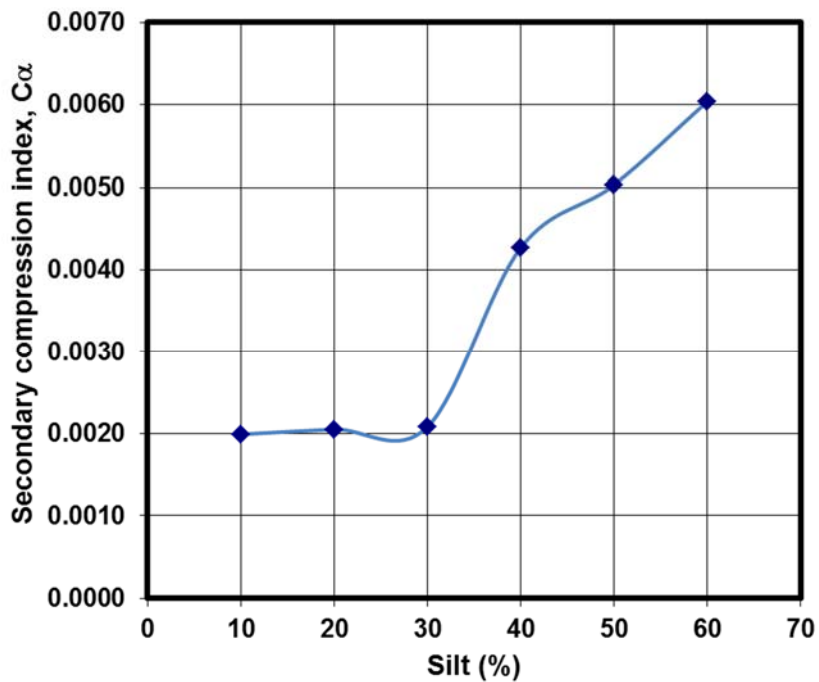
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างกับตัวอย่างดินทรายผสม ดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 ที่ได้จากการทดสอบการอัดยัดตัว พบว่าในอัตราส่วนที่มีปริมาณดินตะกอนปะปนอยู่มาก จะส่งผลให้อัตราส่วนช่องว่างมีค่าลดลงมากกว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณดินตะกอนปะปนอยู่น้อย ซึ่งค่าดังกล่าวจะแสดงถึงค่าการทรุดตัว จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีปริมาณดินตะกอนเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าการทรุดตัวมากขึ้น

ในอัตราส่วนที่เป็นทราย 100% มีค่าการทรุดตัวที่มากที่สุด น่าจะเกิดจากกระบวนการการทรุดตัวแบบทันทีทันใด ไม่ใช่กระบวนการการยุบอัดตัวคายน้ำ เพราะกระบวนการการยุบอัดตัวคายน้ำจะเกิดขึ้นในดินเม็ดละเอียดเท่านั้น

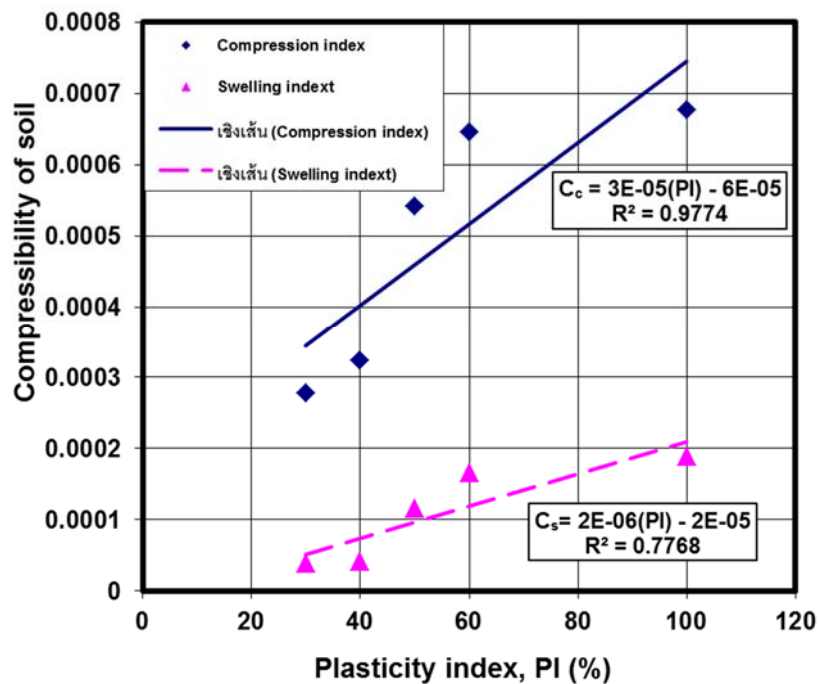


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการอัดตัวของดินกับกับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ

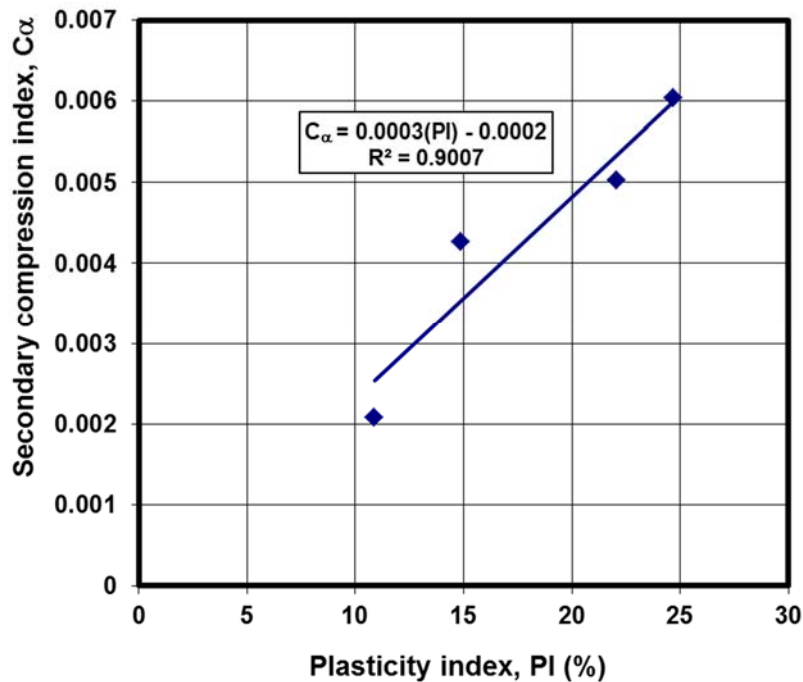


รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการอัดตัวของดินครั้งที่ 2 กับตัวอย่างดินทรายผสมดินตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.2 นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อปริมาณดินตะกอนเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณการทรุดตัวและบวมตัวที่มากขึ้น เนื่องจากกระบวนการยุบอัดตัวจะเกิดในดินตะกอน และคุณสมบัติของดินตะกอนนั้นเป็นดินที่มีความยืดหยุ่น ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของดินตะกอนจะส่งผลต่อค่าการทรุดตัวให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย และจากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนที่มีความเป็นไปได้ที่จะนำดินตัวอย่างไปใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธา คือ อัตราส่วนที่มีปริมาณดินตะกอนปะปนอยู่ 10 – 30% เพราะมีค่าการทรุดตัวที่น้อย ซึ่งจากความเป็นไปได้ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาดังนี้ ธนาภรณ์และพัสดา (2555) เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำทรายผสมดินตะกอนมาใช้เป็นวัสดุมวลรวม เพื่อเพิ่มความเชื่อมแน่นและความแข็งแรงในชั้นรองพื้นทาง จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าทรายผสมดินตะกอนมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้ในการเพิ่มความเชื่อมแน่นและความแข็งแรงในชั้นรองพื้นทางได้คือ ช่วงที่มีปริมาณดินตะกอนปะปนอยู่ไม่เกิน 15%



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบอัดตัวของดินกับค่าดัชนีความเหนียว



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการอัดตัวของดินครั้งที่ 2 กับค่าดัชนีความเหนียว

จากรูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบอัดตัวของดินกับดัชนีความเหนียว และจากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการยุบอัดตัวครั้งที่สองกับค่าดัชนีความเหนียว พบว่าค่าดัชนีการยุบอัดตัว ดัชนีการคืนตัวและดัชนีการยุบอัดตัวครั้งที่สอง แปรผันตรงกับค่าดัชนีความเหนียว เมื่อนำมาสร้างสมการจะได้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น โดยมีสมการคือ

$$C_c = [3.0 \times 10^{-5}(PI)] - 6.0 \times 10^{-5}$$

$$C_s = [2.0 \times 10^{-6}(PI)] - 2.0 \times 10^{-5}$$

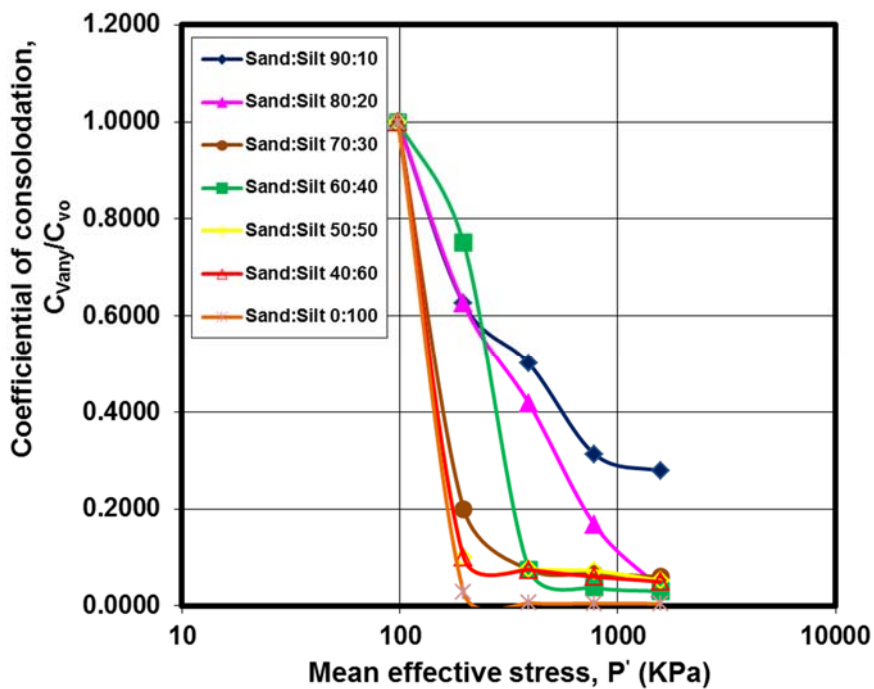
$$C_{\alpha} = [3 \times 10^{-4}(PI)] - 2 \times 10^{-4}$$

A. Sridharan and H.B. Nagaraj (2000) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของดินมวลละเอียดกับ index properties ซึ่งพบว่าค่าดัชนีการอัดตัวของดินมีความแปรผันตรงกับค่าดัชนีความเหนียว และได้สร้างสมการแบบเชิงเส้นดังนี้

$$C_c = 0.014 (PI) + 0.0504 \quad R^2=0.91$$

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการสัมประสิทธิ์การทรุดตัว (Coefficient of consolidation, C_v)

ค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว (C_v)					
% Silt	Load (KPa)				
	98	196	392	784	1568
10	6.17×10^{-7}	3.86×10^{-7}	3.09×10^{-7}	1.93×10^{-7}	1.71×10^{-7}
20	6.17×10^{-7}	3.86×10^{-7}	2.57×10^{-7}	1.03×10^{-7}	2.20×10^{-8}
30	2.57×10^{-6}	5.14×10^{-7}	1.93×10^{-7}	1.71×10^{-7}	1.54×10^{-7}
40	1.03×10^{-5}	7.72×10^{-6}	7.72×10^{-7}	3.86×10^{-7}	3.09×10^{-7}
50	1.19×10^{-6}	1.19×10^{-7}	9.08×10^{-8}	8.57×10^{-8}	6.17×10^{-8}
60	1.03×10^{-6}	1.03×10^{-7}	7.72×10^{-8}	6.17×10^{-8}	5.14×10^{-8}
100	9.26×10^{-5}	2.57×10^{-6}	5.48×10^{-7}	4.72×10^{-7}	4.11×10^{-7}



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวกับค่าความเค้นประสิทธิผล

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัว กับความเค้นประสิทธิผล (Mean Effective stress, p') พบว่าเมื่อปริมาณดินตะกอนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้น

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมการยุบอัดตัวของทรายผสมดินตะกอนที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรี สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ค่าพิกัดเหลว (Liquid limit) และค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity index) มีค่าแปรผันตามปริมาณดินตะกอนที่ปะปนในตัวอย่างดิน นั่นคือเมื่อมีปริมาณดินตะกอนเพิ่มขึ้น ค่าพิกัดเหลวและค่าดัชนีความเหนียวจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

5.1.2 เมื่อปริมาณดินตะกอนที่ปะปนในตัวอย่างดินเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าดัชนีการยุบอัดตัว (C_c), ดัชนีการคืนตัว (C_r or C_s), ดัชนีการอัดตัวครั้งที่ 2 (C_{α}), ค่าสัมประสิทธิ์การทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ (C_v) มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย จากค่าพารามิเตอร์การอัดตัวคายน้ำดังกล่าว สามารถนำไปคำนวณหาค่าการทรุดตัวได้ ซึ่งถ้าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่ามาก ค่าการทรุดตัวก็จะมากตามไปด้วย

5.1.3 งานวิจัยนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่ามีความเป็นไปได้ในการนำทรายผสมดินตะกอนมาใช้ในการงานด้านวิศวกรรมโยธาที่อัตราส่วน 90:10 80:20 และ 70:30 เนื่องจากมีค่าการยุบอัดตัวในปริมาณน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบการยุบอัดตัว พบว่าดินตะกอนที่ถูกขุดลอกบริเวณท่าเรือแหลมฉบัง อำเภอสัตหิราชา จังหวัดชลบุรีสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ยังมีดินตะกอนที่ถูกขุดลอกจากท่าเรืออื่นๆอีกมาก จึงควรทำการทดสอบดินตะกอนที่มาจากแหล่งอื่นๆเพิ่มเติม ว่ามีคุณสมบัติและสามารถนำว่าใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธาได้หรือไม่

บรรณานุกรม

- ผศ.คู่มือปฏิบัติการทดสอบดิน.สรารูจ จริตงาม.พิมพ์ครั้งที่1.สงขลา:ซานเมืองการพิมพ์,2548.
- ผศ.สรารูจ จริตงาม.กลศาสตร์ของดินพิมพ์ครั้งที่.1.สงขลา:ซานเมืองการพิมพ์,2545.
- ผศพิมพ์ครั้งที่.ปฐพีกลศาสตร์.ชูศักดิ์ ศิริรัตน์.1.กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ท็อป,2554.
- ผศ.วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนาพิมพ์ครั้งที่.ปฐพีกลศาสตร์.2.กรุงเทพฯสำนักพิมพ์โพธิ์เพชร:,2549.
- ธนาภรณ์ ทองรูปพรรณ และพัสดา ปัดชุมมี.การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของทรายผสมดินตะกอนเพื่อ
ใช้ในงานทาง.โครงการทางวิศวกรรม ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
บูรพา, 2555.
- วรรณวรงค์ รัตนานิคม, พัสดา ปัดชุมมี และธนาภรณ์ ทองรูปพรรณ, 2557. การประยุกต์ใช้ดินตะกอน
ทะเลเป็นวัสดุมวลรวมชั้นรองพื้น ทาง. การประชุมวิชาการระดับชาติ “มศว. วิจัย” ครั้งที่ 8. ณ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 26-27 พฤศจิกายน 2557. หน้า 455-462.
- Chapman G.P. (1968), “The sea dredged sand gravel industry of Great Britain”. Sea-dredged
aggregates for concrete. In: Proceeding of Symposium. Sand anf gravel association of
great Britiain. Buckunghamshire.
- Dubois V., Abriak NE., Zentar R. and Ballivy G. (2009), “The used of marine sediments as a
pavement base material”. Waste Management 29, 774-782.
- Kozlova S., Shimanovich S. and Meyer C. (2004), “Method of treatment of dredged material
for benefit use”. United States Patent Application Publication. Pub. No.: US
2004/0158114A1. August, 12th.
- Limeira J., Agullo L. and Etxeberrir M. (2010), “Dredged marine sand on concrete: an
experimental section of a harbor pavement”. Construction Build Material 24, 863-870.
- Millrath K., Kozlova S., Sjimannovich S. and Meyer C. (2001), “Benefit use of dredged
materials I and II progress report prepared for Echo Environmental”. Inc., Columbia Unive
rnsity, New York, NY.
- Monkul M.M. and Ozden, G. (2005), “Effect of intergranular void ratio on one-dimensional
compression behavior”. Proceedings of International Conference on Problematic Soils,
International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Famagusta,
Tukkish Republic of Noethern Cyprus, 3, 1203-1209.

- Siham K. Fabrice B., Edine A.N. (2008), "Marine dredge sediments as new material resource for road construction". Waste Management 28, 919-928.
- Sridharan A. and Nagaraj H.B. (2000), "Compressibility behavior of remoulded, fine-grained soils and correction with index properties". Canadian Geotechnical Journal 37 (3), 712-722.
- Ulbricht J.P. (2002), "Contaminated sediments: raw materials for brick". Symposium Dradged, Dunkerque, France, October.
- Yin J.H. (1999), "Properties and behaviour of Hong Kong marine deposits with different clay contents". Canadian Geotechnical Journal 36 (6), 1085-1095.
- Zentar R., Dubois V. and Abriak NE. (2005), "Physical and machanical behaviour dredged marine sediments". In: Proceeding of the Third international Conference on Remediation of Contaminated Sediments, New Orleans, Etats-Unis (LA). 24-27 January 2005.
- Zentar R., Dubois V. and Abriak N.E. (2008), "Mechanical behaviour and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments". Resources Conservation and Recycling 52, 947-954.
-