



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
ทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2557

การประเมินเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนต
ด้วยแบบจำลองไฟไนต์อิเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด
Evaluation of Reinforced Concrete Columns Strengthened with FRP Laminates by
Detailed Finite Element Models

โดย

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีไฟในอิลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาแรงอัดและพฤติกรรมการรับแรงของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเริ่มจากการพัฒนาแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์วัสดุคอนกรีต (Exp.1, Exp.2) ทรงกระบอกขนาด 15x30 ซม. และแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC1) หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 20x20 ซม. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองกับผลการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ ทำการศึกษาผลของขนาดหน้าตัดเสาต่อการรับแรงอัดและความยืดหยุ่นด้วยแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ (SC1-SC4) หน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 15x15, 20x20, 30x30, และ 40x40 ซม. ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Exp.1 และ Exp.2 เทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างพบว่าแบบจำลองมีความถูกต้องแม่นยำสูง สามารถทำนายกำลังอัดของคอนกรีตได้ดีมาก โดยเฉพาะเมื่อใช้ข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีตจากผลการทดสอบคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ แบบจำลองเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก RC1 สามารถทำนายแรงอัดสูงสุดของเสาได้ค่อนข้างดีมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบเท่ากับ 2.09% และ 11.15% แต่ทำนายค่าการคายการยุบตัว ณ ตำแหน่งแรงอัดสูงสุดได้น้อยกว่าผลการทดสอบพอสมควร นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าการใช้สมการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีตโดย Desayi & Krishnan [4] กับแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถทำนายค่าแรงอัดสูงสุดได้ดีมาก แต่อาจไม่สามารถทำนายค่าการยุบตัวได้ดีเท่าที่ควร ในส่วนของแบบจำลอง SC1-SC4 นั้นสรุปว่าแบบจำลองเสาให้ค่าแรงอัดสูงสุดใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากสมการการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตาม ACI ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณความเค้นอัดสูงสุดของคอนกรีต (C) เท่ากับ 1.0 และเมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเหล็กยื่นของเสาที่มีหน้าตัดขนาดเล็กมีส่วนร่วมในการรับแรงอัดได้ดีกว่าเหล็กยื่นในเสาหน้าตัดขนาดใหญ่ และเมื่อเสาคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์จะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของแผ่นไฟเบอร์ที่เสริมกำลัง นอกจากนี้ยังมีการหาค่าหลังรับแรงอัดสูงสุดได้มากกว่าเสาที่ไม่เสริมกำลังแผ่นไฟเบอร์

คำสำคัญ: เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก, แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์, ค่าแรงอัด, ค่าการยุบตัว, แผ่นไฟเบอร์

Abstract

This study presents Finite Element (FE) Analysis of reinforced concrete columns. First, the finite element models (FEM) of concrete materials with cylindrical shape of 15x30 centimeters (Exp.1 and Exp.2) were created and analyzed. The results show that FEMs of concretes have high accuracy to predict almost the entire stress-strain curves especially when using the compressive stress-strain diagram from the experiments. After verification of the concrete models, then, the FEMs of reinforced concrete columns with a square section of 20x20 centimeters (RC1) were developed. Both FE models show a very good comparison of maximum compressive forces with results tested in the laboratory by the discrepancy of 2.09% and 11.15%, respectively. However, the models are not quite accurate in computing the specimen deformations. By using the concrete model proposed by Desayi and Krishnan [4], the FE models of reinforced concrete columns show excellent results on calculating the maximum compressive forces but not the maximum deformations of columns. The FE models of four square reinforced concrete columns with cross sections of SC1:15x15, SC2:20x20, SC3:30x30, and SC4:40x40 centimeters were analyzed. The results indicate that maximum compressive forces computed by ACI equation for column design are well comparable with the values from the FE analysis, when the compressive strength coefficient of concrete (C) is taken as 1.0 rather than 0.85. Finally, the FE models show that after the cracking of concrete occurred, the main reinforced steel of smaller cross section columns can more actively participate in a compressive action than those in bigger cross section columns.

Keywords: Reinforced Concrete Column, Finite Element Model, Compressive Force, Deformation, Fiber Reinforce Paper (FRP)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง การประเมินเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ลามิเนต ด้วยแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด ประจำปีงบประมาณ 2557 จาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พฤติกรรมของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว	4
2.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังรับแรงอัดตามแนวแกน	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 3 การพัฒนาแบบจำลองไฟไนลิเมนต์เสาคอนกรีตและ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์	
3.1 บทนำ	9

3.2 ชนิดของชั้นส่วนย่อยวัสดุ	11
3.3 คุณสมบัติของวัสดุ	13
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนลิเมนต์เสาคอนกรีต	
4.1 บทนำ	22
4.2 การศึกษาผลกระทบของค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของคอนกรีตต่อการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนลิเมนต์คอนกรีตทรงกระบอก	22
4.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนลิเมนต์ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส	29
4.4 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดต่างๆ เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์	32
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	38
เอกสารอ้างอิง	39
ภาคผนวก บทความทางวิชาการ	40

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คอนกรีตทรงกระบอก	26
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสา RC1	29
ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติเหล็กที่ใช้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสา RC1	29
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองและผลทดสอบเสา RC1	31
ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสา (SC1-SC4)	33
ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติเหล็กที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสา (SC1-SC4)	34
ตารางที่ 4.7 ค่าผลการวิเคราะห์แบบจำลอง SC1, SC2, SC3, และ SC4	35

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยวและเสาปลอกเกลียว	5
รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังสรุปการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	11
รูปที่ 3.2 ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID65) - 3มิติ ที่ใช้สำหรับคอนกรีต	12
รูปที่ 3.3 ชิ้นส่วนย่อยแบบแท่ง (LINK8) - 3มิติ ที่ใช้สำหรับเหล็ก	12
รูปที่ 3.4 อีลิเมนต์ SOLID46 -3 มิติที่ใช้สำหรับแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง	13
รูปที่ 3.5 กราฟเส้นโค้งความเค้นและความเครียดทั่วไปสำหรับคอนกรีต ที่น้ำหนักปกติ (Bangash 1989)	14
รูปที่ 3.6 ลักษณะเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัด ของคอนกรีต Desayi และ Krishnan (1964)	16
รูปที่ 3.7 ลักษณะการพังของคอนกรีตที่เป็นแบบสามมิติ (William และ Warnke 1975)	18
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับ ความเครียด ของเหล็กเสริม	18
รูปที่ 3.9 แผนภาพชิ้นส่วนแผ่นไฟเบอร์	21
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับแผ่นไฟเบอร์ ในทิศทางของเส้นใย	21
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีต ตามแบบจำลองของ Desayi and Krishnan	23
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีต ตามแบบจำลองของ Maekawa	24

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตตาม แบบจำลองของ Propovics	25
รูปที่ 4.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คอนกรีตทรงกระบอก	27
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดอัดของแบบจำลองคอนกรีต กับผลการทดสอบ	28
รูปที่ 4.6 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก RC1	30
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นของเหล็กยึนในเสา RC1	31
รูปที่ 4.8 หน้าตัดและรายละเอียดที่ใช้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ SC1-SC4	32
รูปที่ 4.9 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์	33
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของ เสา SC1, SC2, SC3, และ SC4	35
รูปที่ 4.11 ค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของเสาชุด SC1 และที่ติดแผ่นไฟเบอร์	36
รูปที่ 4.12 ค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของเสาชุด SC2 และที่ติดแผ่นไฟเบอร์	36
รูปที่ 4.13 ค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของเสาชุด SC3 และที่ติดแผ่นไฟเบอร์	37
รูปที่ 4.14 ค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของเสาชุด SC4 และที่ติดแผ่นไฟเบอร์	37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย

สิ่งก่อสร้างภายในประเทศไทยส่วนใหญ่นิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Structures) ทั้งโครงสร้างขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เช่น งานก่อสร้าง งานก่อสร้างอาคารบ้านพักอาศัย เป็นต้น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่างๆข้างต้นได้จากการนำคอนกรีตและเหล็กเสริมมาหล่อรวมกันในแบบหล่อคอนกรีตในลักษณะที่ทำให้ได้ส่วนของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมร่วมกันรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความแข็งแรง ทนทานต่อสถานะดินฟ้าอากาศได้ดีกว่าโครงสร้างประเภทอื่น เสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยกว่า เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่อยู่ในแนวตั้งทำหน้าที่รับแรงอัด หรือทั้งแรงอัดและแรงดัดร่วมกันซึ่งได้มาจากการถ่ายน้ำหนักบรรทุกของคานหรือแผ่นพื้นรับคานในชั้นต่างๆ แล้วจึงถ่ายน้ำหนักบรรทุกนั้นลงสู่ดินโดยฐานราก หากเสาต้นใดต้นหนึ่งวิบัติก็จะทำให้ส่วนโครงสร้างที่ยึดต่อเนื่องเกิดการชำรุดเสียหาย จนอาจทำให้โครงสร้างทั้งหมดถึงกับพังลงมาได้ เสา(ค.ส.ล.) อาจมีรูปตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีเหล็กเสริมชนิดเหล็กยื่นใช้ช่วยคอนกรีตรับน้ำหนัก และมีเหล็กเสริมทางช้างชนิดปลอกเกลียวซึ่งพันต่อเนื่องกันรอบเหล็กยื่นที่อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลม เรียกว่าเสาปลอกเกลียว (Spiral Column) เหล็กเสริมทางด้านข้างอาจเป็นชนิดปลอกเดี่ยว พันรอบเหล็กยื่นที่วางในตำแหน่งขอบของรูปสี่เหลี่ยมและเว้นเป็นระยะๆ เรียกว่า เสาปลอกเดี่ยว (Tied Column) เหล็กเสริมทางช้างช่วยให้เสา ค.ส.ล. รับน้ำหนักได้มากขึ้น และทำให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนเกิดการวิบัติ โดยผู้ออกแบบ ได้พิจารณาการออกแบบเสาให้สามารถรับแรงดัดงอได้ตามหลักการวิเคราะห์โครงสร้างและมาตรฐานที่มีอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปจุดประสงค์การใช้งานของโครงสร้างนั้นๆ อาจเปลี่ยนไปเช่น ต้องการให้มีความสามารถในการรับกำลังเพิ่มขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้าง จึงต้องทำการเสริมกำลัง (Strengthening) แทนการทำลายทิ้งแล้วสร้างใหม่ทั้งหมด หรือเมื่อเวลาผ่านไปความแข็งแรง ความคงทน ตลอดจนความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุที่ใช้สร้างโครงสร้างนั้นลดลง จึงต้องมีการปรับปรุงกำลังของโครงสร้าง หรือทำการซ่อมแซม (Repairing) โครงสร้างนั้นๆ ให้มีความสามารถในการรับแรงประเภทต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ตั้งแต่ต้น

ประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศแรกที่มีการใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังกับโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา จากนั้นได้มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังในงานวิศวกรรมโยธาอย่างกว้างขวางทั่วโลก เช่น การเสริมกำลังของเสา คาน ข้อต่อ ในโครงสร้าง สะพาน อาคารสูง อาคารสำนักงานหรือ บ้านพักเพื่อเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่น (Ductility) ของโครงสร้างเมื่อรับแรงด้านข้าง เช่น แรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว เป็นต้น สำหรับประเทศไทย การใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง

กับงานวิศวกรรมโยธายังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการรับเอาเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้งาน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการขาดข้อมูลพื้นฐานและการศึกษาในเชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์ของการใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังในการเสริมกำลังหรือการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตอย่างเพียงพอ นอกจากนี้การเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ยังต้องดำเนินการด้วยผู้เชี่ยวชาญและช่างผู้ชำนาญการ จึงทำให้การนำแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังมาใช้ยังไม่แพร่หลายมากนักสำหรับงานวิศวกรรมโยธาในประเทศมากนัก

การศึกษาพฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ จะกระทำโดยการทดสอบตัวอย่างเสาจริงที่หล่อในห้องปฏิบัติการ แบบเท่าของจริงหรือลดขนาดลงตามความเหมาะสมของเครื่องทดสอบ วัตถุประสงค์ของการทดสอบการรับแรงอัดตามแนวแกน (Compressive Test) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำการบันทึกค่าน้ำหนักทดสอบ ค่าการหดตัว รอยร้าวที่เกิดขึ้น และพฤติกรรมการพังของเสาเหล่านั้น อย่างไรก็ตามการทดสอบในห้องปฏิบัติการทำได้ค่อนข้างยาก สิ้นเปลืองเวลาและงบประมาณในการทดสอบมาก การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นักวิจัยส่วนใหญ่นิยม และเป็นที่ยอมรับ ทั้งนี้เนื่องจากประหยัดค่าใช้จ่าย และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์มากกว่าการทดสอบตัวอย่างเสาจริงเป็นอย่างมาก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะประเมินความสามารถและศึกษาพฤติกรรมการรับแรงและลักษณะการพังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด ของโครงสร้างดังกล่าว โดยคำนึงถึงความเป็น nonhomogenous และ anisotropic ของวัสดุคอนกรีต โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์อีเลเมนต์สำเร็จรูป ANSYS จากนั้นจะทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ (Parametric Study) ที่มีต่อพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก(ค.ส.ล.) และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ เพื่อให้เข้าใจและใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงพฤติกรรมเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก(ค.ส.ล.) เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ เพื่อให้เกิดการใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังที่เหมาะสม เกิดประโยชน์และประหยัดสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด (Detailed Finite Element Model) ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของเสา ค.ส.ล.

- 2) พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด (Detailed Finite Element Model) ที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ ประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของเสา ค.ส.ล. ที่ถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์
- 3) ศึกษาเชิงตัวแปร (Parametric Study) เพื่อหาผลกระทบของตัวแปรที่สำคัญต่อพฤติกรรม การรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของเสา ค.ส.ล. และเสา ค.ส.ล.เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ มุ่งเน้นที่การประเมินพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของเสา ค.ส.ล.และเสา ค.ส.ล.เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบโครงสร้างดังกล่าวในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ดัชนีวัดคือ กำลัง, การยืดหยุ่น (Ductility) และลักษณะการพังของชิ้นงาน นอกจากนี้จะทำการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่สำคัญต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุก และลักษณะการพังของเสา ค.ส.ล.และเสา ค.ส.ล.เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ เช่น กำลังอัดคอนกรีต รายละเอียดเหล็กเสริม จำนวนชั้นของแผ่นไฟเบอร์ และลักษณะการติดแผ่นไฟเบอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ประเภทแสดงรายละเอียด (Detailed Finite Element Model) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างเสา ค.ส.ล. เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างประเภทนี้เมื่อน้ำหนักบรรทุก ซึ่งเป็นองค์ความรู้ใหม่ และเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างคอนกรีตชนิดอื่นๆ
- 2) ข้อมูลจากการวิเคราะห์เชิงตัวแปร (Parametric Study) ด้วยเทคนิค Finite Element Analysis จะทำให้เข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้างประเภทนี้มากขึ้น และจะนำไปสู่การปรับปรุงและพัฒนาโครงสร้างเหล่านี้ ต่อไป
- 3) เพื่อแนะนำวิธีการใช้แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังที่เหมาะสม เกิดประโยชน์และประหยัดสูงสุดในการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เสาเป็นโครงสร้างที่ส่วนมากจะรับแรงอัดหรือแรงอัดร่วมแรงดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกผ่านพื้น บันได คาน โครงหลังคา หรือแรงลม แผ่นดินไหว เสาจะถ่ายน้ำหนักลงสู่ฐานรากฐานรากถ่ายน้ำหนักลงสู่ดินโดยอาจจะผ่านเสาเข็มหรือลงดินโดยตรงเมื่อเสารับแรงอัดหรือมีแรงดัดร่วมด้วยจนวิบัติเพียงต้นเดียวก็อาจจะทำให้เสาดันอื่นๆ วิบัติตามไปด้วยเพราะต้องไปแบกรับน้ำหนักของต้นที่หักไป ดังนั้นการออกแบบเสาจึงต้องระวังอย่างมาก รูปตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอาจจะมีรูปตัดกลมสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปตัดตัว L เหล็กเสริมหลักหรือเหล็กยื่นช่วยคอนกรีตรับแรงอัดหรือแรงดัด ส่วนเหล็กปลอกจะรัดให้เหล็กยื่นและคอนกรีตภายในแข็งแรง ไม่เกิดการคู้งของเหล็กยื่นและแกนคอนกรีตไม่ระเบิดออก หากเหล็กปลอกพันเป็นเกลียวคล้ายสปริงเรียกว่า เสาปลอกเกลียวรับแรงได้ดีกว่าเสาที่ทำเหล็กปลอกเป็นชุดๆ ไม่พันต่อกันเรียกว่า เสาปลอกเดี่ยวเสาที่ต้องรับแรงมากแต่หน้าตัดบังคับให้มีขนาดไม่โตพอ อาจจะใส่เหล็กรูปพรรณเป็นแกนช่วยได้ เรียกว่าเสาคอนกรีตเชิงประกอบ ส่วนการแยกเสาสั้น เสายาว จะแบ่งตามความขะลุค เสาที่มีความขะลุคน้อยจะไม่วิบัติด้วยการโก่งเดาะจึงเรียกว่า เสาสั้น แต่ถ้าความขะลุคมากจะเกิดการโก่งเดาะมากกว่าผลของแรงตามแนวแกนจึงเรียกว่า เสายาว

2.1 พฤติกรรมของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว

ในการทดลองเสาคอนกรีตล้วนที่ไม่มีเหล็กเสริมเลย เสาจะหดรตัวเมื่อรับแรงอัดแล้วไปงออกด้านข้างเพราะผลของอัตราส่วนปัวซองส์ การแตกจะฉีกทางข้างหรือในระนาบเอียง หน่วยแรงอัดสูงสุดจะอยู่ระหว่าง $0.7 - 1.0$ ของหน่วยรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (f'_c) ค่าเฉลี่ยประมาณ $0.85 f'_c$ เพราะฉะนั้นเมื่ออยากทราบค่ารับแรงอัดสูงสุดของเสาหน้าตัดใดๆ นั้น ก็มีสมการดังต่อไปนี้

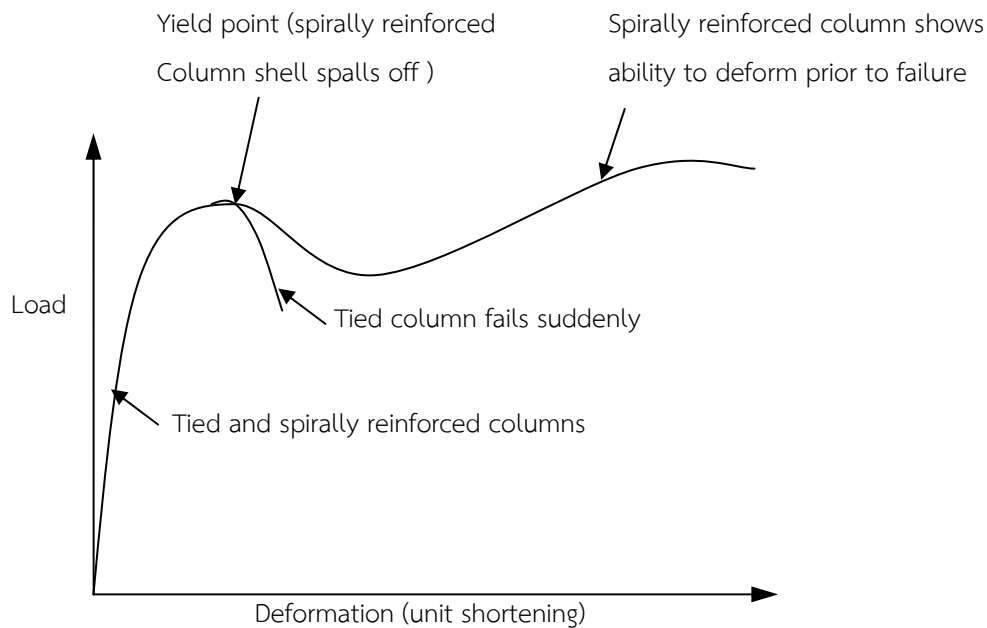
$$P_n = 0.85 f'_c A_e$$

เมื่อ

$$A_e = \text{หน้าตัดเสาคอนกรีต}$$

ซึ่งเสาคอนกรีตในทางปฏิบัติทั่วไปจะไม่นำมาใช้ในตัวโครงสร้างอาคาร เพราะเสาถือเป็นชิ้นส่วนที่รับน้ำหนักที่ถ่ายลงมาจกตัวโครงสร้างอาคารโดยตรง รับทั้งแรงอัดและแรงเฉือน เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการออกแบบเสาที่มีเหล็กเสริมและเหล็กปลอก เสาคอนกรีตที่มีเฉพาะเสริมเหล็กยื่นไม่มีเหล็กปลอกจะรับน้ำหนักได้ไม่มาก เทียบจะเท่ากับเสาคอนกรีตล้วน เพราะคอนกรีตด้านนอกที่หุ้มเหล็กยื่นจะแตกก่อน เหล็กยื่นจะดุ้งโก่งออกทางด้านข้างแล้วแกนคอนกรีตจะแตกตามมา แต่หากมี

การเสริมเหล็กปลอกรัดเหล็กยื่นเอาไว้ เหล็กปลอกจะรัดทั้งเหล็กยื่นและคอนกรีตไว้ทำให้คอนกรีตภายในเหล็กปลอกแตกซ้าลง เหล็กปลอกเกลียวตาม การรัดเหล็กปลอกมีสองลักษณะคือเหล็กปลอกเดี่ยวรัดเป็นช่วงๆและเหล็กปลอกเกลียว ซึ่งจะทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีพฤติกรรมต่างกัน กล่าวคือเสาที่มีเหล็กปลอกเกลียวจะมีการเสียรูปได้มากกว่าเสาที่รัดด้วยเหล็กปลอกเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยวและเสาปลอกเกลียว

2.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังรับแรงอัดตามแนวแกน

การหุ้มเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง (FRP) นั้นทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาเพิ่มขึ้นและไม่เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด โดยการพันหุ้มวัสดุเสริมเส้นใยจะพันให้ทิศทางการวางตัวของเส้นใยขวางกับแนวแกนของเสาซึ่งพันหุ้มลักษณะเช่นนี้จะทำให้การโอบรัดของเส้นใยมีพฤติกรรมการโอบรัดแกนเสาเช่นเดียวกับเหล็กปลอกในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก พฤติกรรมการโอบรัดเสาคอนกรีตของเส้นใยจะเริ่มขึ้นต่อเมื่อเสาได้รับแรงอัดจนกระทั่งเสาเกิดการหดตัวและมีการแบ่งขยายออกทางด้านข้างทำให้เส้นใยมีพฤติกรรมคล้ายกับบ่วงที่โอบรัดแกนเสาเพื่อไม่ให้คอนกรีตหลุดร่อนและแตกกระเป็ด เมื่อให้แรงอัดแก่เสาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ก็จะทำให้หน่วยแรงดึงในเส้นใยเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงหน่วยแรงดึงประลัยจนทำให้เส้นใยแตกขาดและเสาก็จะเกิดการวิบัติในที่สุด ตามเอกสาร ACI 440.2R-02 (บทที่ 11) [2] ได้เสนอสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวิธีพันด้วยแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง แสดงดังสมการที่ 1-ไว้ต่อจากสมการ

$$\phi P_n = 0.80\phi [0.85\psi_f f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (1)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left[\left[2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.25 \right] \right] \quad (2)$$

$$f_l = \frac{\kappa_a \rho_f f_{fe}}{2} \quad (3)$$

$$\rho_f = \frac{2n t_f (b + h)}{bh} \quad (4)$$

- A_c = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตเสาค้นแบบ
 A_{st} = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม ยืน
 f'_c = กำลังอัดประลัยคอนกรีตเสาค้นแบบ
 f_y = กำลังรับแรงดึงที่จุดครากเหล็กเสริมยืน
 f'_{cc} = กำลังรับแรงอัดปรากฏของคอนกรีตที่ถูกพันด้วยแผ่นไฟเบอร์
 f_l = ค่าหน่วยแรงโอบรัดเนื่องจากการพันแผ่นไฟเบอร์
 f_{fe} = ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของแผ่นไฟเบอร์ ณ จุดที่แผ่นไฟเบอร์ฉีกขาด
 κ_a = ค่าตัวคูณสำหรับรูปหน้าตัด ในกรณีหน้าตัดสี่เหลี่ยมไม่มีการกำหนดค่า κ_a ไว้สำหรับการคำนวณหาค่าแรงอัด แต่ระบุสมการคำนวณค่า κ_a ไว้สำหรับการคำนวณด้านความเหนียวเท่านั้น ดังนั้นสำหรับการศึกษานี้จึงใช้ค่า κ_a เท่ากับ 1.0
 ψ_f = ค่าตัวคูณลดกำลังแนะนำให้ใช้เท่ากับ 0.95
 ρ_f = อัตราส่วนการเสริมแผ่นไฟเบอร์
 n = จำนวนชั้นแผ่นไฟเบอร์
 t_f = ความหนาแผ่นไฟเบอร์
 b = ความกว้างของหน้าตัดเสา
 h = ความยาวของหน้าตัดเสา
 n = จำนวนชั้นแผ่นไฟเบอร์
 t_f = ความหนาแผ่นไฟเบอร์
 b = ความกว้างของหน้าตัดเสา
 h = ความยาวของหน้าตัดเสา

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2002 ACI (American Concrete Institute) ได้จัดทำ ACI 440.2R-02 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures [2] ซึ่งนับว่าเป็นความก้าวหน้าครั้งสำคัญสำหรับการทำให้แผ่นไฟเบอร์ FRP ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยมีเนื้อหาที่เกี่ยวกับการเสริมกำลังคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ FRP และสมการการออกแบบคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ FRP

Tarek H. Almusallam (2007) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่แตกต่างกัน ที่มีการเสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) ภายใต้แรงอัดแกนเดียวโดยการดำเนินงานใช้ตัวอย่างเสาคอนกรีตทั้งหมด 54 ตัวอย่าง โดยถูกแบ่งออกเป็นหกกลุ่มซึ่งแต่ละกลุ่มมีการโอบรัดด้วย GFRP จำนวน 1 ชั้น และ 3 ชั้น ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การโอบรัดด้วย GFRP เพิ่มค่ากำลังอัดของเสาคอนกรีตทรงกระบอกที่มีกำลังอัดต่ำได้มากกว่าเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง ตัวอย่างเช่น เสาคอนกรีต M1 ที่โอบรัดด้วย GFRP 3 ชั้นสามารถเพิ่มกำลังได้ถึง 110 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ เสาคอนกรีต M2 ที่มีกำลังอัดสูงกว่าสามารถเพิ่มกำลังได้เพียง 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อโอบรัดด้วย GFRP จำนวน 3 ชั้นเท่ากัน แนวโน้มเช่นนี้สามารถนำมาประกอบกับความจริงที่ว่า คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่แตกต่างกัน คอนกรีตที่มีกำลังสูงจะมีความแข็ง (Stiffness) ที่เพิ่มขึ้นทั้งในทิศทางตามแนวแกนและตั้งฉากกับแนวแกน ส่งผลให้เสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากกว่าเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงตามแนวตั้งฉากกับแนวแกนของคอนกรีตทรงกระบอก อาจก่อให้เกิดการวิบัติของเสาคอนกรีตเนื่องจากการฉีกขาดของแผ่น GFRP กับคอนกรีตที่ถูกอัดแตก (Crushing) นอกจากนี้รูปแบบการวิบัติพบว่าในกลุ่มเสาตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดปานกลางประมาณ 600-800 กก./ตร.ซม. ลักษณะของการวิบัติจะเกิดเนื่องจากแผ่น GFRP ฉีกขาดก่อน แต่สำหรับคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงประมาณ 1000 กก./ตร.ซม. ขึ้นไปการวิบัติจะเกิดจากคอนกรีตถูกอัดแตก (Crushing) ของแกนคอนกรีต ก่อนที่แผ่น GFRP จะเกิดการฉีกขาด

อานนท์ วงษ์แก้ว และคณะ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา และทำการวิเคราะห์แบบจำลอง เทียบผลการรับน้ำหนัก ค่าการแอ่นตัว และลักษณะการพังของแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องในระดับที่ดีมาก สามารถทำนายค่าโมเมนต์แตกร้าว ค่าโมเมนต์ที่สภาวะเหล็กเสริมเริ่มคราก

และค่าโมเมนต์ที่จุดสูงสุดได้ใกล้เคียงผลการทดสอบ โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้แบบจำลองไฟไนต์อีเลเมนต์ยังแสดงลักษณะการพังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้แม่นยำใกล้เคียงกับผลการทดสอบอีกด้วย สามารถนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนอื่นๆได้ต่อไป

บทที่ 3

การพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาคอนกรีต และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์

3.1 บทนำ

แนวความคิดที่เอาไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์โครงสร้างครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1940 ต่อมาในปี ค.ศ.1943 ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณหาค่าความเค้นในปัญหามิติเดียว เช่นความเค้นที่เกิดขึ้นในคาน ในช่วงนั้นยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย ปี ค.ศ. 1956 Turner, Clough, Martins และ Topp ได้วิเคราะห์ปัญหาสองมิติด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นครั้งแรก และได้แสดงวิธีหาสทิงเฟนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์ของโครงข้อหมุนของเอลิเมนต์คาน และหาสทิงเฟนสมของเอลิเมนต์สองมิติของเอลิเมนต์ระนาบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมโดยการสมมติฟังก์ชันการกระจัด ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่าวิธีสทิงเฟนสมโดยตรง (direct stiffness method) และรวมสทิงเฟนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์เหล่านั้นเข้าด้วยกันเป็นสทิงเฟนสมเมทริกซ์ของโครงสร้างทั้งระบบ ในช่วงปี ค.ศ. 1954 ถึงปี ค.ศ. 1960 เครื่องคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การวิเคราะห์โครงสร้างจึงนิยมใช้วิธีเมทริกซ์ และการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ได้รับความนิยมมากขึ้น คำว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ได้ถูกแนะนำขึ้นเป็นครั้งแรกในผลงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเค้นระนาบ โดยใช้เอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมมุมฉากของ Clough ในปี ค.ศ. 1960 ต่อมาในปี ค.ศ. 1963 Grafton และ Strome ได้เสนอวิธีหาสทิงเฟนสมเมทริกซ์ของแผ่นโลหะโค้ง (curved-shell) ที่มีแกนสมมาตร

ทฤษฎีของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้รับความสนใจมากขึ้นในปี ค.ศ.1961 Melosh แสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีพื้นฐานมาจากวิธีของเรย์ไลซ์-ริทซ์ (Rayleigh-Ritz method) ที่ใช้หลังของสมมติ (principle of virtual work) หรือหลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด (principle of minimum potential energy) และได้เริ่มในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับเพลลา, การนำความร้อน และในช่วงปี ค.ศ.1961 ถึงปี ค.ศ. 1965 ได้มีผู้พยายามใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แก้ปัญหาสามมิติ เช่น ในปี ค.ศ. 1961 Martins ได้เสนอวิธีหาสทิงเฟนสมเมทริกซ์ของเอลิเมนต์สามมิติทรงสี่หน้า (tetrahedral) ปี ค.ศ. 1965 Clough , Wilson และ Rishid วิเคราะห์ปัญหาทรงกระบอกตันแกนสมมาตรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาที่การกระจัดมีค่ามากและวัสดุอยู่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น (non-linearities)

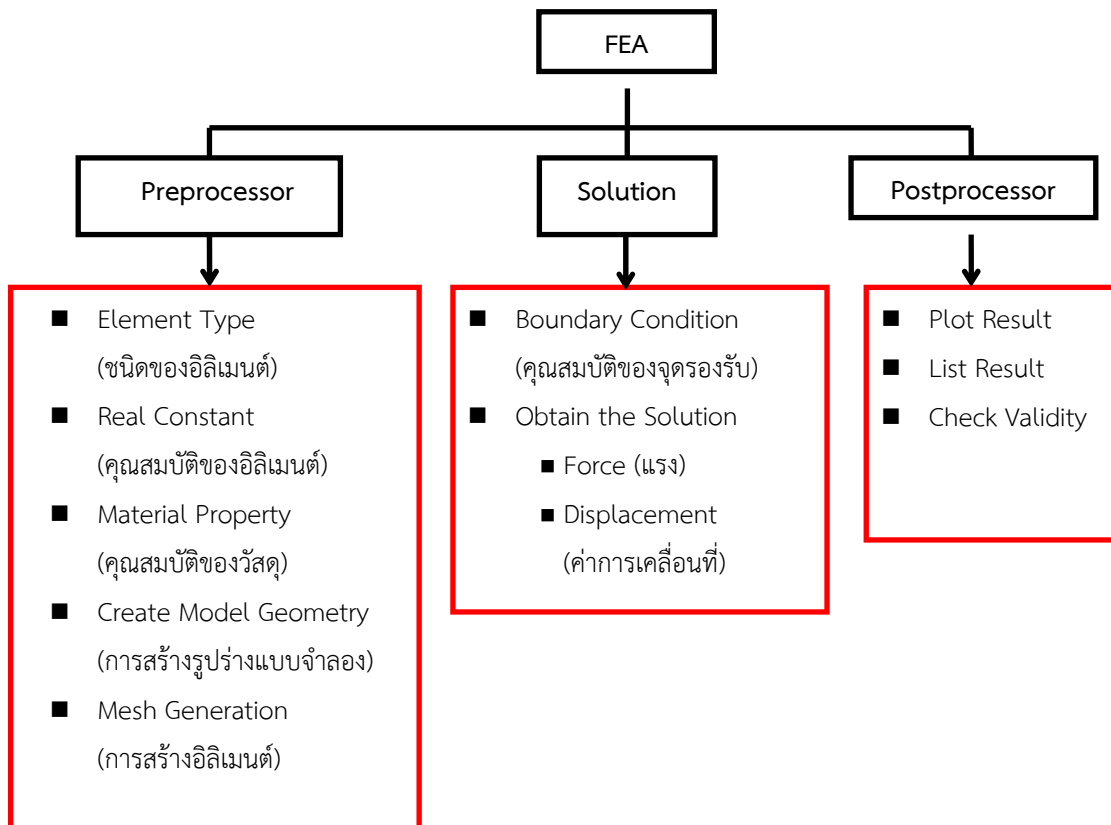
ในปี ค.ศ. 1965 Archer ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์การสั่นสะเทือนและการตอบสนองของระบบโครงสร้าง โดยใช้เมทริกซ์ของมวลแบบแนบแนย (consistent mass matrix) ของท่อนโลหะ และคานที่ประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างหนังสือไฟไนต์เอลิเมนต์สองเล่มแรกได้จัดพิมพ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1965 และปี ค.ศ. 1966 โดย Zienkiewicz , Cheung , Wilson และโดย Nickell ตาลำดับ หนังสือดังกล่าวได้แสดงวิธีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาต่างๆ เช่น การวิเคราะห์คุณสมบัติทาง

กลของดิน ,การนำความร้อน ,การไหลของของไหล เป็นต้น ส่วนหนังสือของ Oden ,1972 ได้เน้นการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับวัสดุที่ไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น (nonlinear materials)

การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ขยายตัวกว้างขึ้น ในปี ค.ศ. 1969 Szabo และ Lee แสดงให้เห็นว่าสามารถจะหาสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างได้โดยวิธีเวทเรซิดิว (weighted-resident method) เช่นวิธีการกาเลอร์คิน (Galerkin's method) จากแนวคิดดังกล่าวทำให้สามารถใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structure) ได้สะดวกขึ้น เช่นในปี ค.ศ. 1977 Lyness ,Owen และ Zienkiewicz ได้ใช้วิธีเวทเรซิดิว วิเคราะห์ปัญหาของสนามแม่เหล็ก (magnetic field) นอกจากนี้มีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขยายไปในสาขาอื่นๆ อีก เช่น สาขาชีววิศวกรรม ปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมศาสตร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้าน CAD ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมมากขึ้นทั้งในสถาบันการศึกษา และอุตสาหกรรมขนาดเล็กทั่วไป ทั้งนี้เพราะขีดความสามารถของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ และโปรแกรมมาตรฐานสำหรับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กได้พัฒนาขึ้นอย่างมาก และกว้างขวางยิ่งขึ้นการใช้งานจึงทำได้สะดวกรวดเร็ว ถูกต้องแม่นยำสูง และเสียค่าใช้จ่ายไม่มาก

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับในการแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมโครงสร้างที่ได้รับความนิยม มีประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยวัสดุหลายชนิดที่แตกต่างกัน โดยไม่ต้องทำการทำการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องอาศัยองค์ความรู้เฉพาะทางซึ่งมีความซับซ้อน สำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างคานคองกรีตเสริมเหล็กและคานคองกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS ในบทนี้จะนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ชนิดเอลิเมนต์ที่ใช้กับโครงสร้างคานคองกรีตเสริมเหล็ก

กระบวนการแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ 3 ขั้นตอน คือ 1) กระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) เป็นขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้มีรูปร่างเหมือนกับรูปร่างโครงสร้าง และกำหนดเงื่อนไขจุดรองรับและขอบเขตต่างๆ จำเป็นต้องเหมือนหรือใกล้เคียงกับปัญหาจริงให้มากที่สุดจึงจะนำไปสู่การจำลองพฤติกรรมโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับความ เป็นจริงมากที่สุด 2) กระบวนการวิเคราะห์ (Solution) ข้อมูลต่างๆ ของในขั้นตอนแรก จะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ และ 3) กระบวนการอ่านผลการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 2) จะประกอบด้วยผลเป็นจำนวนมาก ผู้ใช้สามารถสั่งให้โปรแกรมแสดงผลต่างๆเช่น แรง ความเค้น ความเครียด ระยะการเคลื่อนตัว และอื่นๆ บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง แสดงสรุปได้ตามรูปที่ 3.1

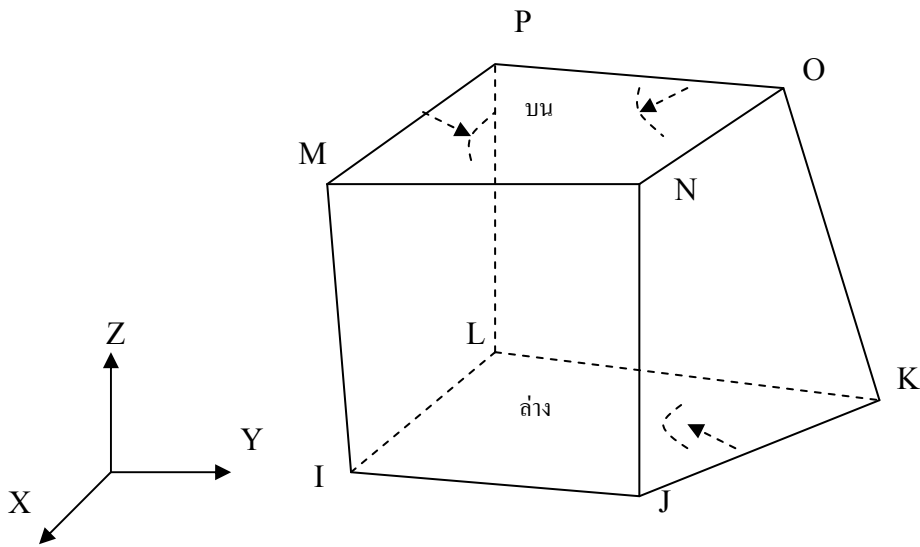


รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังสรุปการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

3.2 ชนิดของชิ้นส่วนย่อยวัสดุ

3.2.1 คอนกรีต

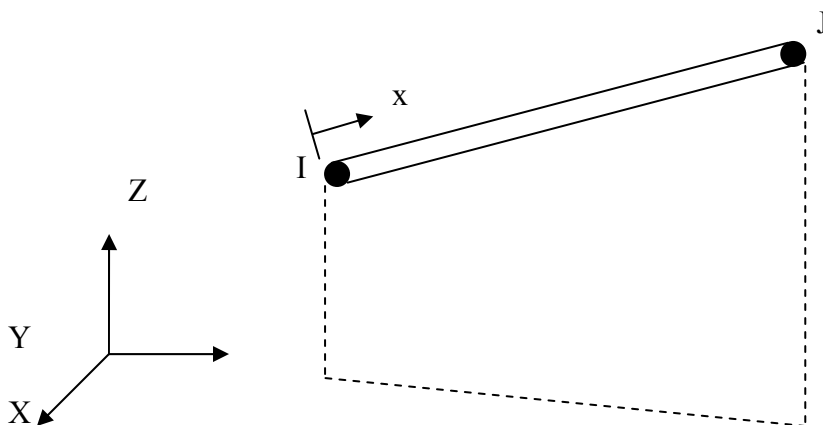
ชนิดของชิ้นส่วนย่อย (Element Type) ที่ใช้สำหรับคอนกรีตคือ ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID65) แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 แต่ละชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีตจะถูกกำหนดขนาดด้วยความกว้าง ยาว และสูง ด้วยคำสั่งที่ใช้ในการสร้างจุดต่อจุด (Node) ทั้งหมด 8 จุด ที่ระบุเป็นตัวเลขทรงสี่เหลี่ยม และอ้างอิงทิศทางของจุดต่อตามแกน X Y และ Z ตามลำดับ แต่ละจุดมีดีกรีความอิสระ (Degree of Freedom) เท่ากับ 3 ดีกรี คือ มีการเคลื่อนที่อิสระ (Translation) ในทิศทางตามแนวแกน X Y และ Z



รูปที่ 3.2 ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID65) - 3มิติ ที่ใช้สำหรับคอนกรีต

3.2.2 เหล็กเสริมและเหล็กปลอก

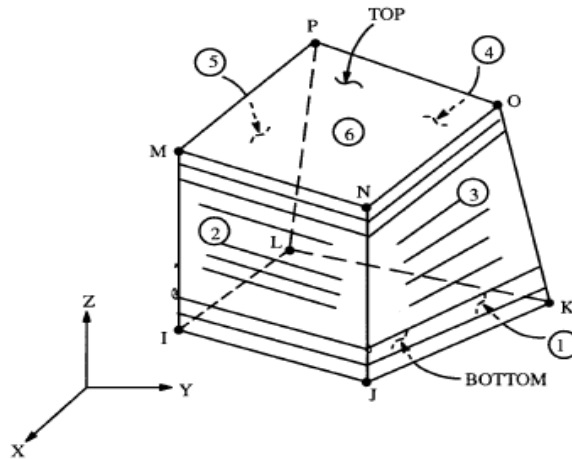
ชนิดของชิ้นส่วนย่อย (Element Type) ที่ใช้สำหรับเหล็กคือ ชิ้นส่วนย่อยแบบแท่ง (LINK8) แต่ละชิ้นส่วนย่อย (Element) ของเหล็กจะใช้ จุดเชื่อมจุด (Node) อ้างอิงพิกัดของจุดต่อตามแกน X Y และ Z ในการสร้างชิ้นส่วนย่อยของเหล็กจะสร้างร่วมกับจุดที่สร้างชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีต เป็นการใช้อ้างอิงจุดร่วมกัน แต่ละจุดมีดีกรีความอิสระ (Degree of Freedom) เท่ากับ 3 ดีกรีคือ มีการเคลื่อนที่อิสระ (Translation) ในทิศทางตามแนวแกน X Y และ Z แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชิ้นส่วนย่อยแบบแท่ง (LINK8) - 3มิติ ที่ใช้สำหรับเหล็ก

3.2.3 แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง

อิเลิเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองของแผ่นไฟเบอร์นั้นจะใช้ SOLID46 สำหรับการขึ้นอิเลิเมนต์ชนิดนี้มีวัสดุความหนาต่างกันขึ้นอยู่กับข้อกำหนดความหนาของวัสดุ จุดแต่ละจุดของอิเลิเมนต์ชนิดนี้สามารถเคลื่อนที่แบบอิสระได้ 3 ทิศทางในแนวแกน x, y และ z ตำแหน่งจุดและทิศทางของแผ่นไฟเบอร์แสดงในรูปที่ 3.4

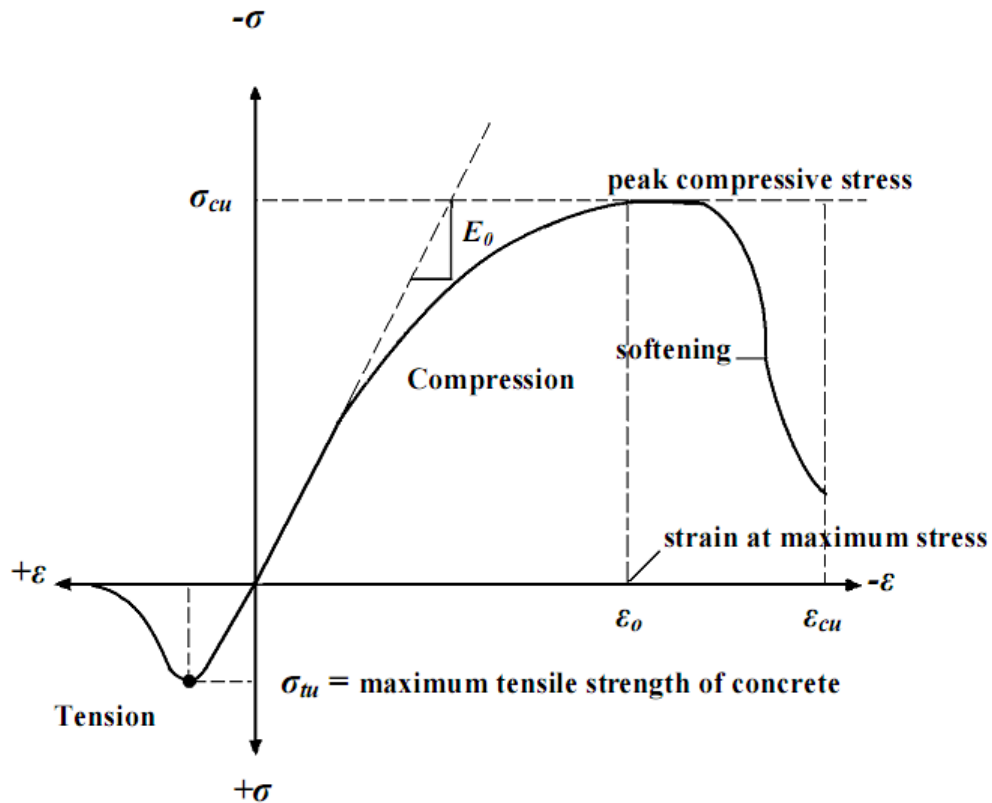


รูปที่ 3.4 อิเลิเมนต์ SOLID46 -3 มิติที่ใช้สำหรับแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง

3.3 คุณสมบัติของวัสดุ

3.3.1 คอนกรีต

ในการพัฒนาแบบจำลองไฟเบอร์เสริมคอนกรีต คุณสมบัติของคอนกรีตในการรับแรงอัดเป็นเรื่องยุ่งยากและซับซ้อนอย่างมาก นอกจากนี้ค่าคุณสมบัติของคอนกรีตยังเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงของแบบจำลองไฟเบอร์เสริมคอนกรีต คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่กึ่งเปราะและมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน เมื่อรับแรงอัดและรับแรงดึง ความต้านทานแรงดึงของคอนกรีตปกติจะมีค่าประมาณ 8-15% ของกำลังแรงอัด (Shah, et al. 1995) ค่าหน่วยแรงอัด- ความเครียดอัด (Compressive Stress- Compressive Strain) เป็นปัจจัยสำคัญที่เป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงเส้นโค้งความเค้นและความเครียดทั่วไปสำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ (Bangash 1989)



รูปที่ 3.5 กราฟเส้นโค้งความเค้นและความเครียดทั่วไปสำหรับคอนกรีตที่น้ำหนักปกติ (Bangash 1989)

เมื่อ

E_0 = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

σ_{cu} = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

σ_{tu} = กำลังรับดึงสูงสุดของคอนกรีต

σ = หน่วยแรงอัดของคอนกรีต

ϵ_0 = ความเครียดอัด ณ จุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ϵ = ความเครียดอัดของคอนกรีต

ϵ_{cu} = ความเครียดอัดสูงสุดของคอนกรีต

ในช่วงการรับแรงอัดของคอนกรีต กราฟเส้นโค้งความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจะมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงถึงประมาณร้อยละ 30 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด จากนั้นค่าความเค้นและค่าความเครียดของคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง จนถึงกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (σ_{cu}) เส้นโค้งความเค้นของคอนกรีตจะมีค่าลดลง ซึ่งแสดงกำลังรับอัดของคอนกรีตจะ

ลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความเครียดของคอนกรีตจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ส่วนความเค้นและความเครียดของคอนกรีตเมื่อรับแรงดึง กราฟเส้นโค้งความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจะมีความยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงถึงความต้านทานแรงดึงสูงสุด หลังจากจุดนี้ คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวและเกิดการพังในที่สุด จนกำลังรับแรงอัดค่อยๆ ลดลงเป็นศูนย์ (Bangash 1989)

3.3.1.1 การใส่ค่าคุณสมบัติของคอนกรีต

ค่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสา มี ดังต่อไปนี้

- 1) หน่วยรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (Uniaxial compressive Strength, f'_c) เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถการรับแรงอัดของคอนกรีต
- 2) ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Elastic Modulus, E_c) เป็นค่าความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นกับค่าความเครียดในช่วงยืดหยุ่น
- 3) ค่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต (Uniaxial tensile cracking stress, f_r) คอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงดึงต่ำมาก เฉลี่ยประมาณ 10% ของกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเท่านั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ ACI-318 ดังนี้

$$f_r = 0.623\sqrt{f'_c} \quad \text{เมกะปาสคาล (MPa)}$$

กำหนดให้

$$f_r = \text{ค่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต}$$

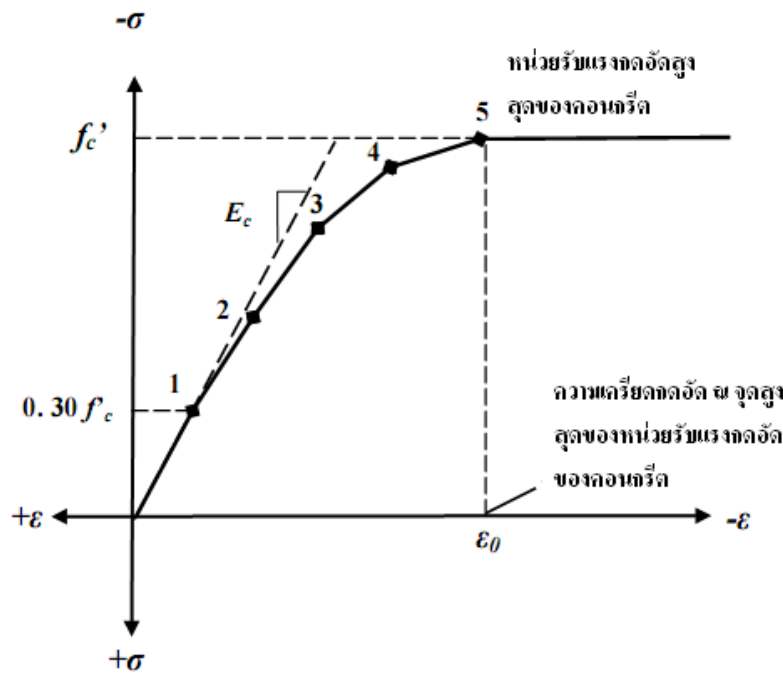
$$f'_c = \text{หน่วยรับแรงอัดสูงสุดคอนกรีต}$$

- 4) ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีต (Poisson's ratio, ν) เป็นค่าแสดงสัดส่วนระหว่างความเครียดในแนวราบของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกต่อด้วยความเครียดในแนวแกนของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกรับรับแรงอัด จากการทดสอบ คอนกรีตธรรมดา มีค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 0.15-0.25 ในการศึกษานี้ กำหนดค่าอัตราส่วนปัวซองส์ของคอนกรีตที่ 0.2 ในการใส่ค่าคุณสมบัติคอนกรีตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

- 5) ค่าสัมประสิทธิ์กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (Shear transfer coefficient, B_f) ในการใส่ค่าคุณสมบัติสัมประสิทธิ์การพังด้วยแรงเฉือนของคอนกรีตจะแบ่งการใส่ค่าเป็น 2 แบบ คือ การใส่ค่าแรงเฉือนเพื่อให้เกิดการพังของคอนกรีตให้พังแบบราบเรียบ (Shear transfer coefficients for an open crack (smooth crack)) และ การใส่ค่าแรงเฉือนเพื่อให้เกิดการพังของคอนกรีตให้พังแบบรุนแรง (Shear transfer coefficients for a closed crack (rough crack)) ซึ่งเป็นค่าแสดงลักษณะการพังของคอนกรีตด้วยแรงเฉือนโดยในโปรแกรม ANSYS กำหนดค่าตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 ซึ่งมีความหมาย ดังนี้ เมื่อใส่ค่าเข้าใกล้ 0.0 จะเป็นการพังแบบราบเรียบ (smooth crack) กล่าวคือเป็นการพังของคอนกรีตที่สมบูรณ์ที่มีการถ่ายแรงเฉือนแบบสมบูรณ์ ส่วนใส่ค่าเข้าใกล้ 1.0 เป็นการพัง

แบบระเบิดรุนแรง (rough crack) กล่าวคือเป็นการพังของคอนกรีตที่ไม่มีการถ่ายแรงเฉือนภายในคอนกรีต

6) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับความเครียดอัด ของคอนกรีต (Compressive Stress- Compressive Strain) เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีต ในการใส่ค่าลงไปของคุณสมบัติคอนกรีตของแบบจำลองเสา สร้างจาก 6 จุดเชื่อมต่อกัน โดยใช้สมการความสัมพันธ์ค่าความเค้นและค่าความเครียดของคอนกรีตตามการศึกษาของ Desayi และ Krishnan (1964) แสดงไว้ในสมการที่ 3.1-3.3 ค่าแรกจะเริ่มที่ศูนย์ของหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีต แล้วมายังจุดที่ 1 ที่คำนวณจาก $0.3f'_c$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีตในช่วงเชิงเส้น และจุดที่ 2 3 4 และจุดที่ 5 เป็นจุดสูงสุดของหน่วยแรงอัดของคอนกรีตพ่วงจุดที่ 5 ไปคอนกรีตจะเกิดการวิบัติของคอนกรีต แสดงไว้ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด-ความเครียดอัดของคอนกรีต Desayi และ Krishnan (1964)

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2} \quad 3.1$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad 3.2$$

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} \quad 3.3$$

กำหนดให้

f'_c = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

E_c = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

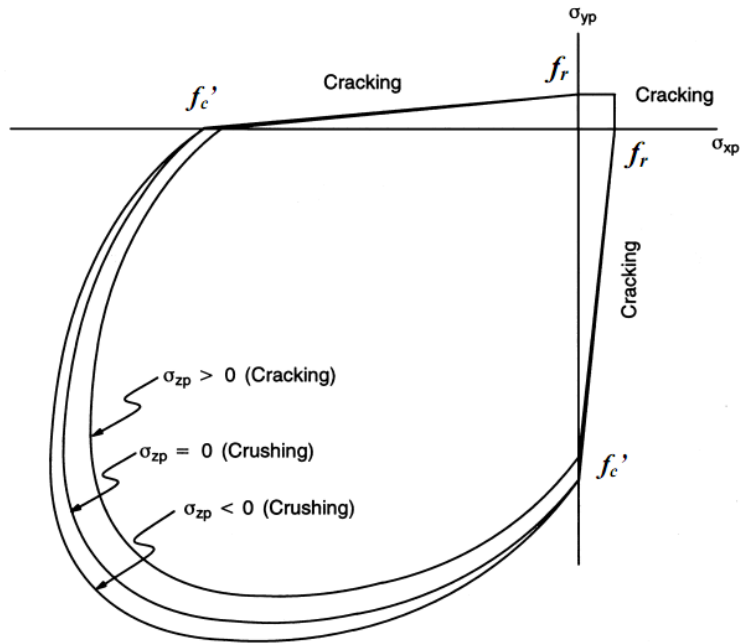
ε_0 = ความเครียดอัด ณ จุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

σ_c = หน่วยแรงอัดของคอนกรีต

ε_c = ความเครียดอัดของคอนกรีต

7) เกณฑ์การพังของคอนกรีต

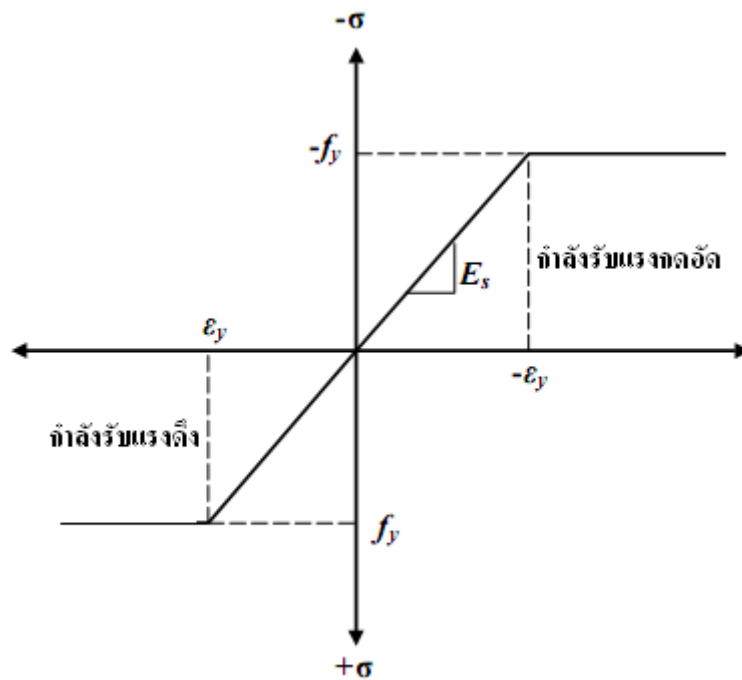
ชิ้นส่วนย่อยแบบกล่อง (SOLID 65) เมื่อนำมาสร้างแบบจำลองของวัสดุคอนกรีตนั้น ต้องทำการกำหนดลักษณะการพังของคอนกรีตด้วย ซึ่งลักษณะการพังของคอนกรีตมี 2 แบบ คือ ฉีกขาด (cracking) หรือแตกหัก (crushing) ด้วยแรงอัดเมื่อคอนกรีตได้รับในแนวแกน เกณฑ์การพังของคอนกรีตเนื่องจากหน่วยแรงอัดของคอนกรีต สามารถคำนวณได้ (William และ Warnke 1975) ลักษณะการพังของคอนกรีตที่เป็นแบบสามมิติที่แสดงดังรูป 3.7 มีความสำคัญในการกระจายตัวของหน่วยแรงอัดในทิศทางแนวแกน x และ y โดยอธิบายแนวแกนด้วยสัญลักษณ์ σ_{xp} และ σ_{yp} ตามลำดับในเนื้อวัสดุที่เป็นคอนกรีต การแตกร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อมีการกระจายตัวของหน่วยแรงดึง ในทิศทางเดียวกันกับการพังที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของคอนกรีต หลังจากที่เกิดการแตกร้าวของเนื้อวัสดุที่เป็นคอนกรีตแล้ว ความยืดหยุ่นของเนื้อวัสดุที่เป็นคอนกรีต จะกำหนดเป็นศูนย์ในทิศทางขนานกับทิศทางของหน่วยแรงดึง การเกิดการแตกร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงอัดกระจายตัวและจะเกิดการพังที่ผิวด้านนอกของคอนกรีต ในการศึกษาครั้งนี้ การใส่ค่าควบคุมการพังของคอนกรีตสำหรับชิ้นส่วนย่อย (Element) ของคอนกรีต (Concrete controlled the failure of the concrete element) โดยเปิดค่า การพังแบบฉีกขาด (Cracking) และปิดค่าการพังแบบแตกหัก (Crushing)



รูปที่ 3.7 ลักษณะการพังของคอนกรีตที่เป็นแบบสามมิติ (William และ Warnke 1975)

3.3.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ชนิดของเหล็กเสริม การใส่ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมเป็นแบบอิลาสติก-พลาสติกโดยสมบูรณ์ (โดยละทิ้งพฤติกรรมการแข่งขันตัวเพิ่ม) ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับ ความเครียด ของเหล็กเสริม

กำหนดให้

σ = ความเค้นของเหล็กเสริม

ε = ความเครียดของเหล็กเสริม

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

f_y = ความเค้นที่จุดครากของเหล็กเสริม

ε_y = ความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม

3.3.2.1 การใส่ค่าคุณสมบัติของเหล็กเสริม ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ประกอบด้วย

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก (Elastic Modulus, E_s)
- ค่าอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio, ν) ของเหล็กเสริม
- ขนาดพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก (A_s)
- กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength)
- กำลังรับแรงดึงที่จุดสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)
- ค่าความเค้น-ความเครียดดึง (Stress-Strain Curve) ของเหล็กเสริม

3.3.3 แผ่นไฟเบอร์

แผ่นไฟเบอร์เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ซึ่งองค์ประกอบนี้ไม่ได้ผสมรวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน องค์ประกอบหนึ่งคือเส้นใยคาร์บอนหรือเส้นใยแก้วซึ่งแข็งแรงและแกร่งกว่าจะถูกเสริมอยู่ในองค์ประกอบที่สองคือโพลีเมอร์อย่างต่อเนื่องที่เรียกว่าเมทริกซ์

ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับแผ่นไฟเบอร์ ในรูปแบบเอลิเมนต์ มีดังนี้

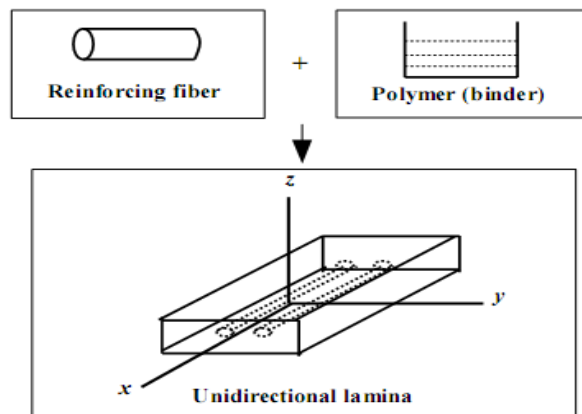
- จำนวนชั้น
- ความหนาของแต่ละชั้น
- การกำหนดทิศทางของแผ่นไฟเบอร์สำหรับแต่ละชั้น
- โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นไฟเบอร์ทั้ง 3 ทิศทาง (E_x , E_y และ E_z)
- โมดูลัสเฉือน (Shear modulus) จากแผ่นไฟเบอร์สำหรับทั้ง 3 ระนาบ (G_{xy} , G_{xz} และ G_{yz})
- อัตราส่วนปัวซองส์ของทั้ง 3 ระนาบ (ν_{xy} , ν_{yz} และ ν_{xz})

หมายเหตุ ระบบพิกัดเฉพาะที่สำหรับแผ่นไฟเบอร์ในแต่ละชั้น มีการกำหนดทิศทางในแนวแกน x เป็นทิศทางเดียวกับทิศทางของเส้นใย ในขณะที่แนวแกน y และแนวแกน z มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกน x

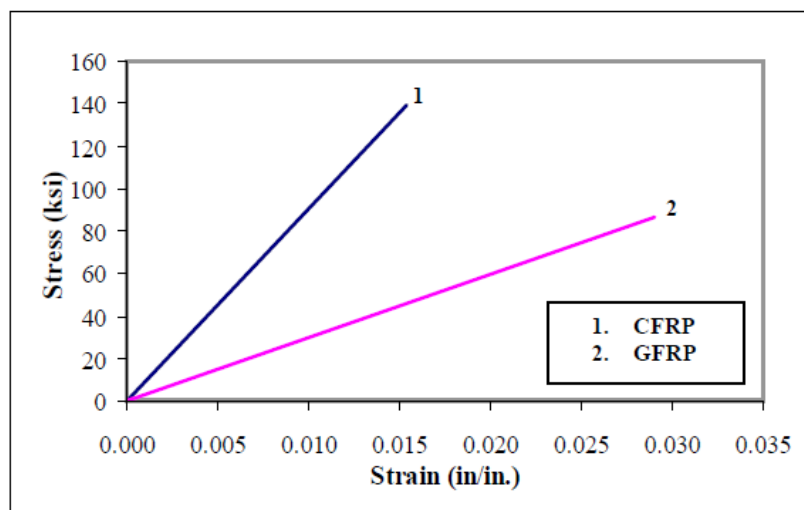
คุณสมบัติของ Isotropic materials เช่นโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) และอัตราส่วนปัวซองส์เหมือนกันในทุกทิศทาง กรณีนี้ไม่ใช้กับ orthotropic materials พิเศษที่จำเป็นในการกำหนดคุณสมบัติในทิศทางต่างๆ ตัวอย่างเช่น $E_x \neq E_y$ และ $\nu_{xy} \neq \nu_{yz}$ โดย E_x เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทางเส้นใย และ E_y เป็นโมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทางตั้งฉากกับในแนวแกน y ใช้อัตราส่วนปัวซองส์สำหรับวัสดุ orthotropic materials เป็นสาเหตุทำให้เกิดความสับสน ดังนั้นข้อมูลของ orthotropic material data ปรากฏใน ν_{yz} หรือรูปแบบปัวซองส์จากโปรแกรม ANSYS อัตราส่วนปัวซองส์ที่สำคัญคืออัตราส่วนของความเครียดในทิศทาง y ความเครียดที่ตั้งฉากกับทิศทาง x เมื่อความเครียดถูกดึงไปใช้เป็นในทิศทาง x ปริมาณ ν_{yx} ใช้ในการแทนอัตราส่วนว่า minor Poisson's ratio และมีขนาดเล็กกว่า ν_{xy} ขณะที่ขนาดใหญ่กว่า E_y สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ν_{xy} และ ν_{yx}

$$\nu_{yx} = \frac{E_y}{E_x} \nu_{xy}$$

- ν_{yx} = อัตราส่วนย่อยของปัวซองส์ (Minor Poisson's ratio)
- E_x = โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง x ทิศทางเส้นใย (Elastic modulus in the x direction, fiber direction)
- E_y = โมดูลัสยืดหยุ่นในทิศทาง y (Elastic modulus in the y direction)



รูปที่ 3.9 แผนภาพชิ้นส่วนแผ่นไฟเบอร์



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับแผ่นไฟเบอร์ในทิศทางของเส้นใย

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์เสาคอนกรีต

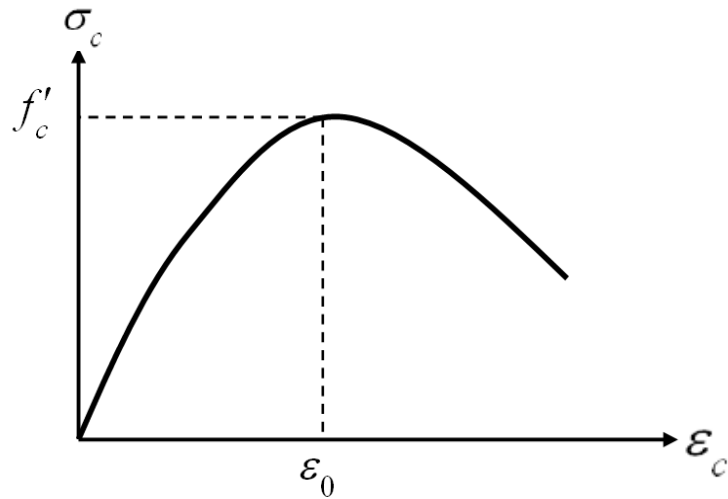
4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คอนกรีตทรงกระบอกแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์เสริมกำลัง โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นตามลักษณะและข้อกำหนดที่นำเสนอในบทที่ 3 จุดประสงค์ของการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์กับค่าที่ได้จากผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบจริง เพื่อนำสรุปถึงความเที่ยงตรงของแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายพฤติกรรมต่างๆ ของแบบจำลองข้อต่อ เช่น ลักษณะการกระจายตัวของความเค้น ลักษณะการกระจายแรงกระทำจากคานสู่เสา สิ่งเหล่านี้สามารถนำมาพิจารณาประกอบการประเมินศักยภาพการรับแรงของข้อต่อ และลักษณะการพังของข้อต่อได้ เมื่อได้แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว ก็สามารถที่จะประยุกต์ใช้สร้างแบบจำลองเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ต่อไป

4.2 การศึกษาผลกระทบของค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตต่อการวิเคราะห์แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คอนกรีตทรงกระบอก

ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คอนกรีตทรงกระบอก ค่าตัวแปรสำคัญที่จำเป็นต้องใช้ในแบบจำลองคือค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีต สำหรับงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกสมการที่เป็นที่นิยมในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตจำนวน 3 สมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตและทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยทำการสร้างแบบจำลองคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ขนาด 1 ใน 4 ส่วนแสดงดังรูปที่ 4.4 ข้อมูลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการมี 2 ตัวอย่าง ข้อมูลวัสดุคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

4.2.1) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Desayi and Krishnan กราฟความสัมพันธ์ตามแบบจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าแสดงไว้ตามสมการที่ 4.1-4.3



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตตามแบบจำลองของ Desayi and Krishnan

$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (4.2)$$

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} \quad (4.3)$$

กำหนดให้

f'_c = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

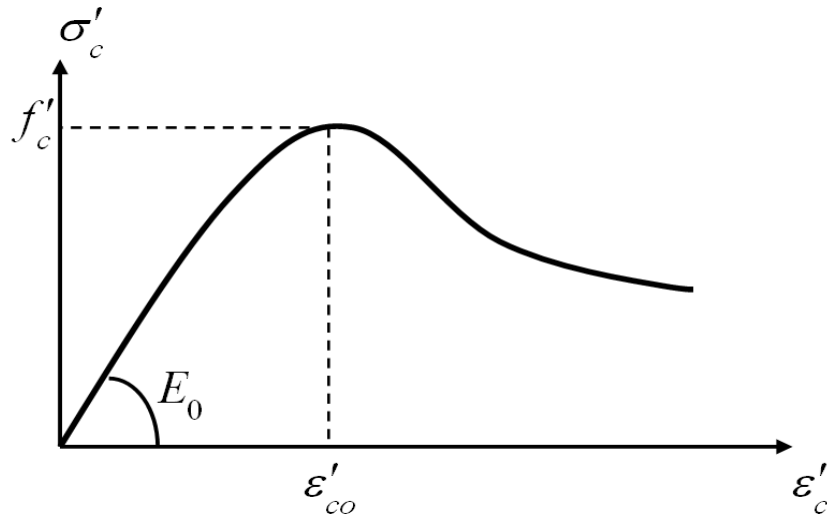
E_c = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ε_0 = ความเครียดอัด ณ จุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

σ_c = หน่วยแรงอัดของคอนกรีต

ε_c = ความเครียดอัดของคอนกรีต

4.2.2) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Maekawa กราฟความสัมพันธ์ตามแบบจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าแสดงไว้ตามสมการที่ 4.4-4.7



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตตามแบบจำลองของ Maekawa

$$\sigma' = E_0 K (\varepsilon'_c - \varepsilon'_p) \quad (4.4)$$

$$E_0 = \frac{2f'_c}{\varepsilon'_{co}} \quad (4.5)$$

$$K = \exp \left[-0.73 \left(\frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{co}} \right) \left\{ 1 - \exp \left(-1.25 \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{co}} \right) \right\} \right] \quad (4.6)$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_c - \varepsilon'_{co} \left(\frac{20}{7} \right) \left[1 - \exp \left\{ -0.35 \frac{\varepsilon'_c}{\varepsilon'_{co}} \right\} \right] \quad (4.7)$$

กำหนดให้

f'_c = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

σ' = หน่วยแรงอัดของคอนกรีต

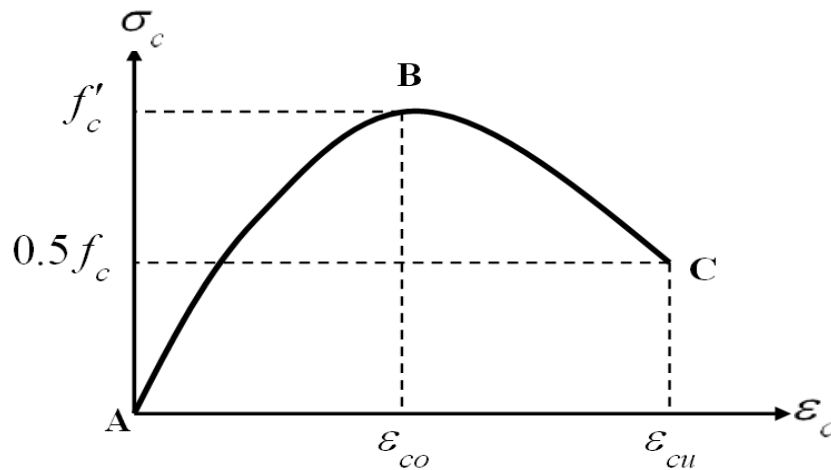
ε'_c = ความเครียดอัดของคอนกรีต

E_0 = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

ϵ'_{co} = ความเครียดอัด ณ จุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

K = ตัวกำหนดการแตกร้าวของคอนกรีต

4.2.3) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Propovics กราฟความสัมพันธ์ตามแบบจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าแสดงไว้ตามสมการที่ 4.8-4.13



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตตามแบบจำลองของ Propovics

$$f_c = \frac{nf_{co} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)}{n-1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^{nk}} \quad (4.8)$$

สำหรับช่วง AB ($0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{co}$),

$$k = 1 \quad \text{ถ้า} \quad \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \leq 1 \quad (4.9)$$

สำหรับช่วง BC ($\epsilon_c > \epsilon_{co}$),

$$k = 0.67 + \frac{f'_c}{62} \text{ MPa} \quad \text{ถ้า} \quad \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} > 1 \quad (4.10)$$

$$E_c = 3320\sqrt{f'_c} + 6900 \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{co} = \frac{f'_c}{E_c} \frac{n}{n-1} \quad (4.12)$$

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{17} \text{ MPa} \quad (4.13)$$

กำหนดให้

f'_c = กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

f_c = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

ε_c = ความเครียดอัดของคอนกรีต

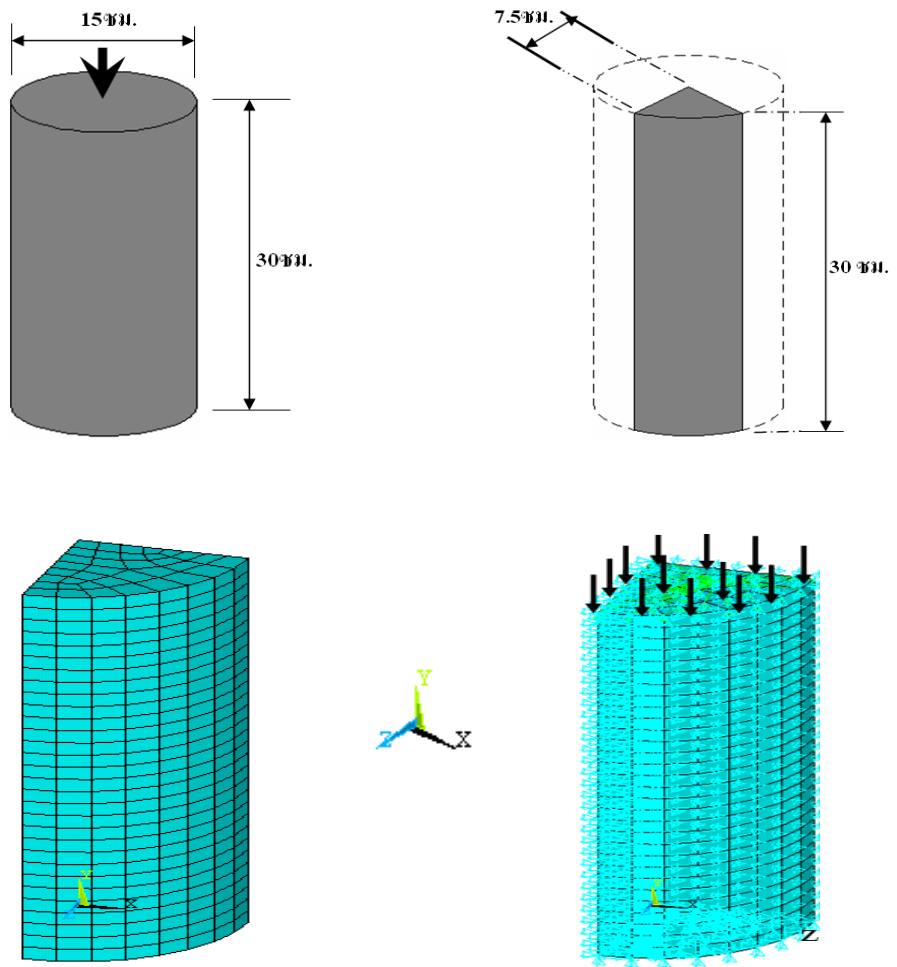
ε_{co} = ความเครียดอัด ณ จุดสูงสุดของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

E_c = ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

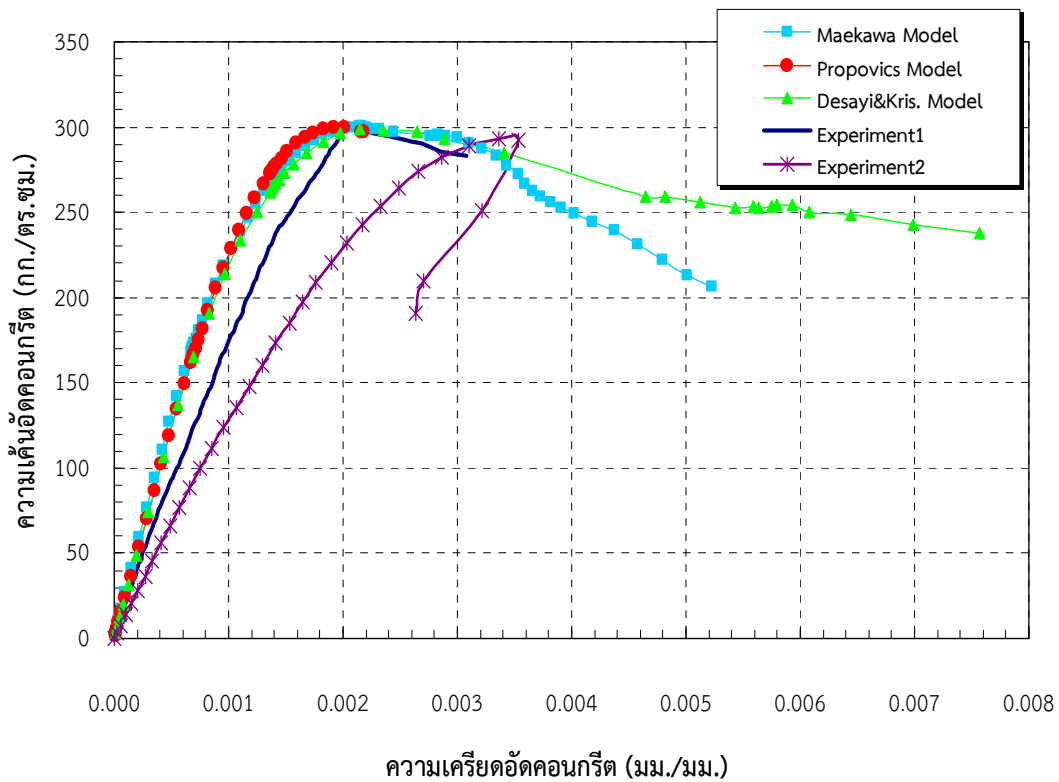
k = ตัวกำหนดการแตกร้าวของคอนกรีต

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คอนกรีตทรงกระบอก

แบบจำลองค่าความ เค้น&ความเครียด คอนกรีต	f'_c ksc.	E_c ksc.	$\varepsilon_0,$ $\varepsilon'_{co},$ ε_{co}	f_r ksc.	ν	β_t	
						ราบเรียบ	รุนแรง
Desayi&Krishnan	300	259,237.1	0.0021	34	0.2	0.3	0.9
Maekawa	300	275,714.3	0.0021	34	0.2	0.3	0.9
Propovics	300	250,843.9	0.0021	34	0.2	0.3	0.9



รูปที่ 4.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์คอนกรีตทรงกระบอก



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดอัดของแบบจำลองคอนกรีตกับผลการทดสอบ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Desayi & Krishnan Maekawa และ Propovics ทำนายค่าความเค้นอัดสูงสุดได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก แต่ให้ค่าความเครียดอัดแตกต่างจากผลการทดสอบพอสมควร ทั้งนี้เป็นเพราะค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีตที่คำนวณจากสมการให้ค่าแตกต่างจากผลการทดสอบ นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Desayi & Krishnan Maekawa และ Propovics มีลักษณะกราฟในช่วงพิกัดยืดหยุ่นใกล้เคียงกันมาก เมื่อเกินจุดนี้ไปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ค่าตามแบบจำลองของ Propovics ไม่สามารถประมวลผลต่อได้และหยุดการวิเคราะห์ ส่วนอีก 2 แบบจำลองยังคงให้ค่าใกล้เคียงกันจนถึงค่าความเครียดประมาณ 0.0034 จากนั้นค่าความเค้นของแบบจำลอง Maekawa จะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนแบบจำลองของ Desayi & Krishnan ยังคงให้ค่าความเค้นที่ค่อยๆ ลดลง เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองที่ใช้ข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Desayi & Krishnan เหมาะสมที่

จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์มากกว่าแบบจำลองของ Maekawa ทั้งนี้เนื่องจากในตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อคอนกรีตมีสถานะที่เกินพิกัดยืดหยุ่นไปแล้ว คอนกรีตยังคงมีค่าความเค้นโอบรัด (Confined Stress) เหลืออยู่ของคอนกรีตเนื่องจากเหล็กปลอกที่ใช้ ดังนั้นการลดลงของค่าความเค้นอัดของคอนกรีตจะเป็นไปในลักษณะค่อยๆลดลง จนกว่าเหล็กยืงจะเกิดการโก่งเดาะ

4.3 การวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลองไฟในอิเลเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส

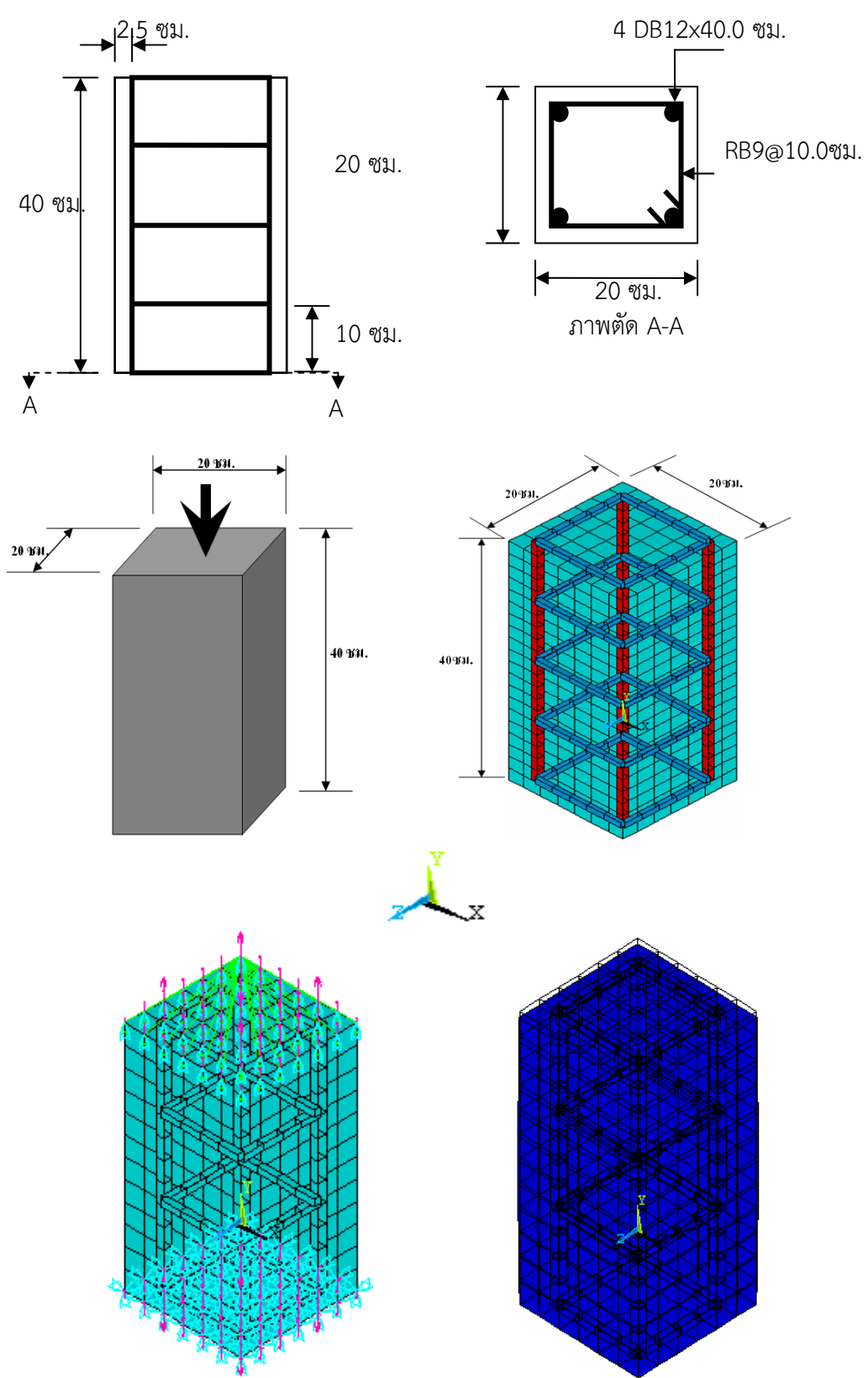
แบบจำลองไฟในอิเลเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กถูกพัฒนาขึ้นจากแบบจำลองคอนกรีตที่มีความแม่นยำจากขั้นตอนที่แล้ว และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟในอิเลเมนต์เสา คอนกรีตเสริมเหล็ก ข้อมูลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์แบบจำลอง รูปที่ 4.6 แสดงขนาดหน้าตัด รายละเอียดเหล็กเสริม การใส่แรงอัด ภาพแบบจำลอง และลักษณะการเสียรูปของแบบจำลอง ส่วนตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงคุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้กับแบบจำลองชุดนี้

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้กับแบบจำลองไฟในอิเลเมนต์เสา RC1

เสา	สมการคอนกรีต	f'_c ksc.	E_c ksc.	f_r ksc.	ν	β_t	
						ราบเรียบ	รุนแรง
RC1	Desayi & Krishnan	300	259,237.1	34	0.2	0.3	0.9

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติเหล็กที่ใช้กับแบบจำลองไฟในอิเลเมนต์เสา RC1

เสา	สมการความเค้น-เครียด ของเหล็กเสริม	f_y (เหล็กยืง) ksc.	f_y (เหล็กปลอก) ksc.
RC1	ทดสอบ	3,000	2,400



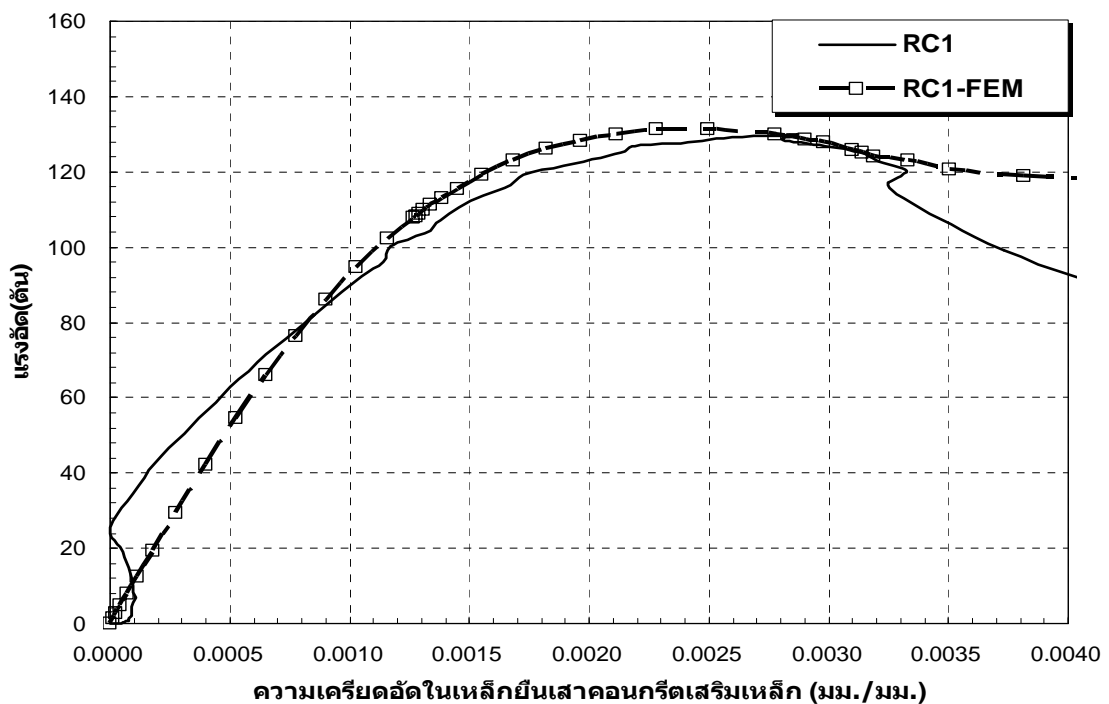
รูปที่ 4.6 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก RC1

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองและผลทดสอบเสา RC1

เสา	แรงอัดสูงสุด (ตัน)		Diff. (%)	ค่าการยุบตัว ณ แรงอัดสูงสุด (มม.)		Diff. (%)	ค่าความเครียดอัด ณ แรงอัดสูงสุด (มม./มม.)		Diff. (%)
	Exp.	FEM		Exp.	FEM		Exp.	FEM	
RC1	128	131	2.09	3.1	0.9	-70.97	0.0028	0.0024	-14.29

ค่าบวกแสดงค่าผลการวิเคราะห์ FEM มากกว่าผลการทดสอบ

ค่าลบแสดงค่าผลการวิเคราะห์ FEM น้อยกว่าผลการทดสอบ

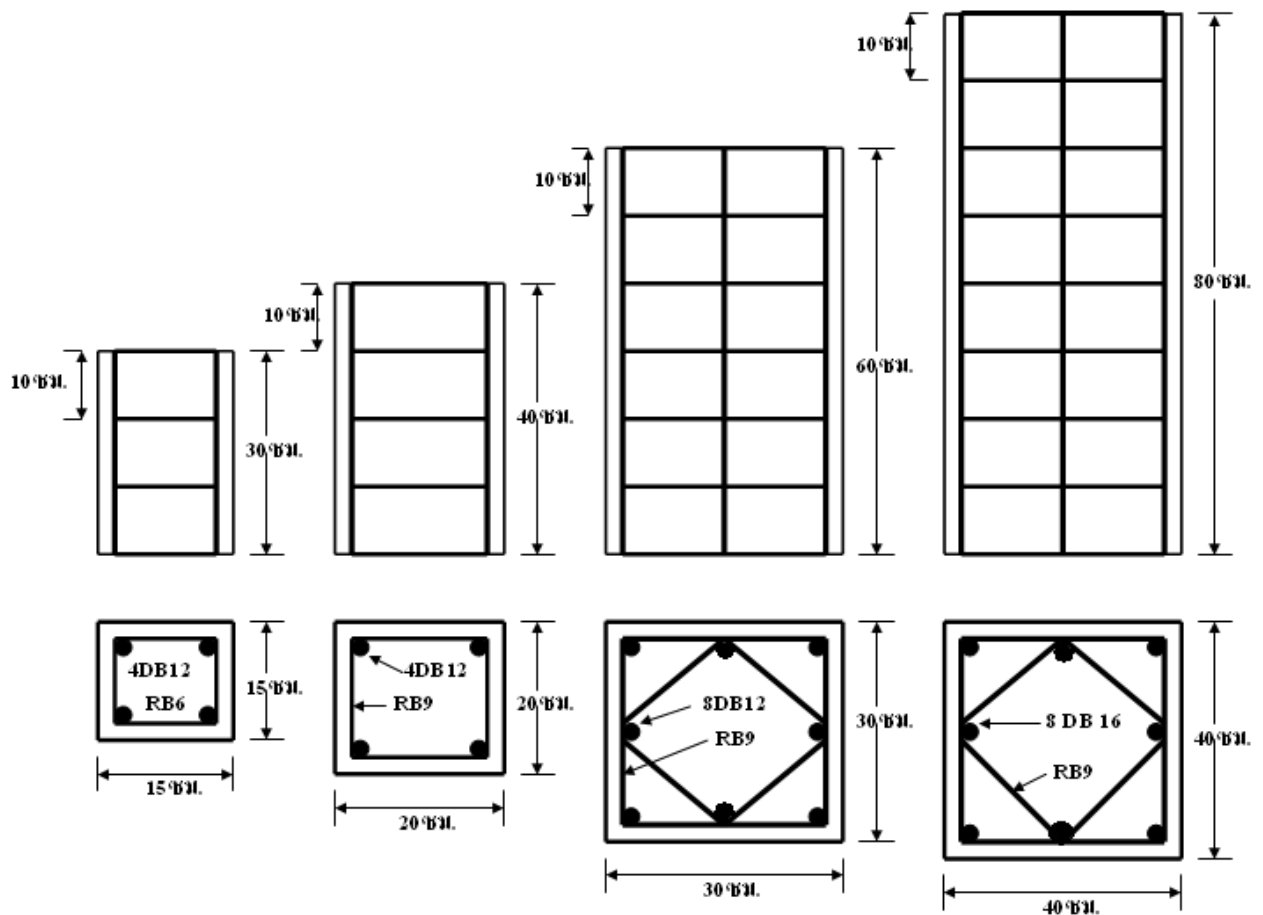


รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นของเหล็กยื่นในเสา RC1

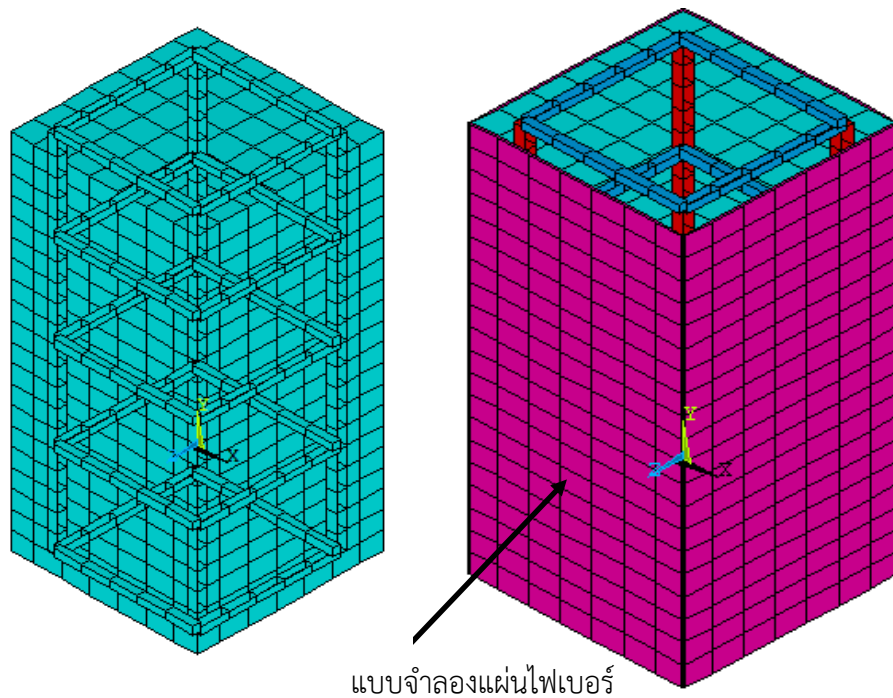
การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง และผลจากการทดสอบสรุปไว้ในตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่าแรงอัดสูงสุดที่ได้จากแบบจำลองพบว่าให้ผลค่อนข้างดีมีค่าคาดเคลื่อนจากการทดสอบเท่ากับ 2.09% อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าการยุบตัว ณ ตำแหน่งแรงอัดสูงสุดพบว่าผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองให้ค่าน้อยกว่าผลการทดสอบ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัยเช่น ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีต และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตในห้องปฏิบัติไม่ถูกต้อง หรืออาจเกิดจากขั้นตอนในการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่าขณะใส่แรงอัดเริ่มต้นจะสังเกตเห็นการยุบตัวของปูนขาวที่ใช้ในการปรับระดับค่อนข้างมากก่อน

เสาเริ่มรับแรงอัด อาจส่งผลต่อการบันทึกค่าการยุบตัวของเสาทดสอบ เพื่อเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์แบบจำลอง ผลการวิเคราะห์ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กยื่นในเสา RC1 และ RC2 ถูกนำมาเสนอเพิ่มเติมแสดงดังรูปที่ 4.7 จากรูปพบว่าค่าความเครียดของเหล็กยื่นมีลักษณะใกล้เคียงกัน ค่าความเครียด ณ ตำแหน่งแรงอัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.0028 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ส่วนค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองแสดงแนวโน้มเหมือนกับผลการทดสอบแต่ยังแสดงค่าที่ผันผวนพอสมควร สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีตมีความสำคัญต่อการทำนายค่าการยุบตัวของเสาเป็นอย่างยิ่ง การใช้สมการของ Desayi & Krishnan ในการหาค่าความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีตนั้นให้ผลการทำนายค่าแรงอัดสูงสุดได้ดีมาก แต่อาจจะไม่สามารถทำนายค่าการยุบตัวได้ดีเท่าที่ควร

4.4 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนติเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดต่างๆ เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์



รูปที่ 4.8 หน้าตัดและรายละเอียดที่ใช้สร้างแบบจำลองไฟไนติเมนต์ SC1-SC4



แบบจำลองแผ่นไฟเบอร์

รูปที่ 4.9 แบบจำลองไฟไนลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์

ในส่วนนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ไฟไนลิเมนต์ในการศึกษากำลังรับแรงอัดและพฤติกรรมต่างๆของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อเสามีขนาดหน้าตัดเพิ่มขึ้นจำนวน 4 หน้าตัด (SC1, SC2, SC3, และ SC4) ขนาดหน้าตัดและรายละเอียดเหล็กเสริมแสดงในรูปที่ 4.8 โดยให้เหล็กปลอกมีระยะห่างเท่ากัน แบบจำลองไฟไนลิเมนต์ทั้ง 4 หน้าตัดมีคุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริมแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนลิเมนต์เสา (SC1-SC4)

เสา	สมการคอนกรีต	f'_c ksc.	E_c ksc.	f_r ksc.	ν	β_t	
						ราบเรียบ	รูนแรง
SC1	Desayi	300	259,237.1	34	0.2	0.3	0.9
SC2	Desayi	300	259,237.1	34	0.2	0.3	0.9
SC3	Desayi	300	259,237.1	34	0.2	0.3	0.9
SC4	Desayi	300	259,237.1	34	0.2	0.3	0.9

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติเหล็กที่ใช้ในแบบจำลองไฟโนลิเมนต์เสา (SC1-SC4)

เสา	สมการ ความเค้น-เครียดเหล็ก	f_y (เหล็กยื่น) ksc.	f_y (เหล็กปลอก) ksc.	ν
SC1	ทดสอบ	3,000	2,400	0.3
SC2	ทดสอบ	3,000	2,400	0.3
SC3	ทดสอบ	3,000	2,400	0.3
SC4	ทดสอบ	4,000	2,400	0.3

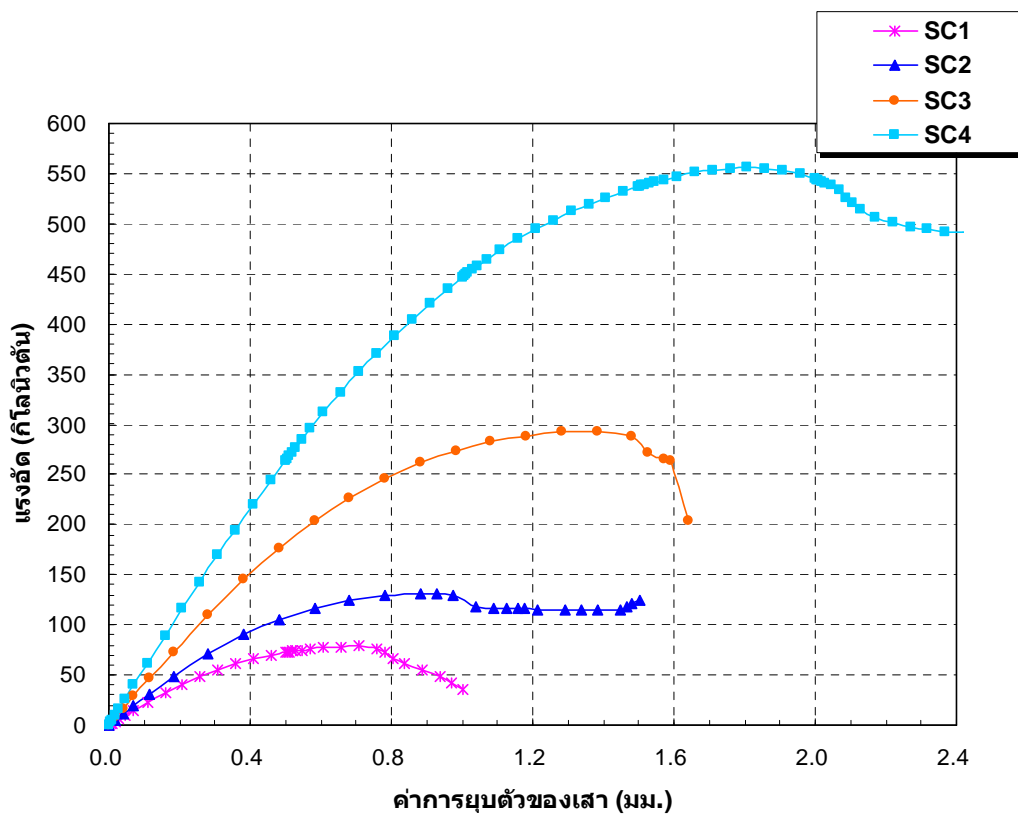
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของเสา SC1, SC2, SC3, และ SC4 จากรูปพบว่าแบบจำลองทั้ง 4 เป็นไปตามทฤษฎีการรับแรงของเสา เสา SC1 รับแรงอัดได้ต่ำสุด และเสา SC4 รับแรงอัดได้สูงสุด อย่างไรก็ตามเสา SC1 มีค่าสัดส่วนการยุบตัวหลังจากค่าแรงอัดสูงสุดเมื่อคิดเทียบกับค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งแรงอัดสูงสุด ($\frac{\Delta_{max} - \Delta_y}{\Delta_y}$) โดยมีค่ามากที่สุดคิดเป็น 43% และเมื่อหน้าตัดใหญ่ขึ้นค่านี้น่าจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากแบบจำลองกำหนดให้ระยะห่างของเหล็กปลอกคงที่ ดังนั้นผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสรุปว่าเสาที่มีขนาดหน้าตัดเล็กกว่ามีความยืดหยุ่นมากกว่าเสาที่มีขนาดหน้าตัดใหญ่ อย่างไรก็ตามเสา SC4 ให้ค่านี้นสูงกว่าเสา SC2 และ SC3 ถึงแม้ว่าเสา SC4 มีขนาดใหญ่กว่าอาจเป็นเพราะปริมาณเหล็กยื่นที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าความยืดหยุ่นของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กปลอกและระยะห่าง ส่วนการเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าจากการคำนวณตามสมการ ACI [1] ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณความเค้นอัดสูงสุดของคอนกรีต (C) เท่ากับ 1.0 พบว่าให้ค่าใกล้เคียงกันมาก หมายความว่าค่าแรงอัดสูงสุดคำนวณตามสมการของ ACI เมื่อใช้ค่า C เท่ากับ 0.85 จะได้ค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการรับกำลังอัดสูงสุดของเสา ทั้งนี้แสดงว่าสมการการออกแบบของ ACI ให้ค่าที่มีส่วนปลอดภัยรวมอยู่ด้วย ค่าผลการวิเคราะห์แบบจำลอง ณ ตำแหน่งต่างๆ สรุปไว้ในตารางที่ 7

$$P_n = C f'_c A_c + f_y A_{st} \dots\dots\dots(4.14)$$

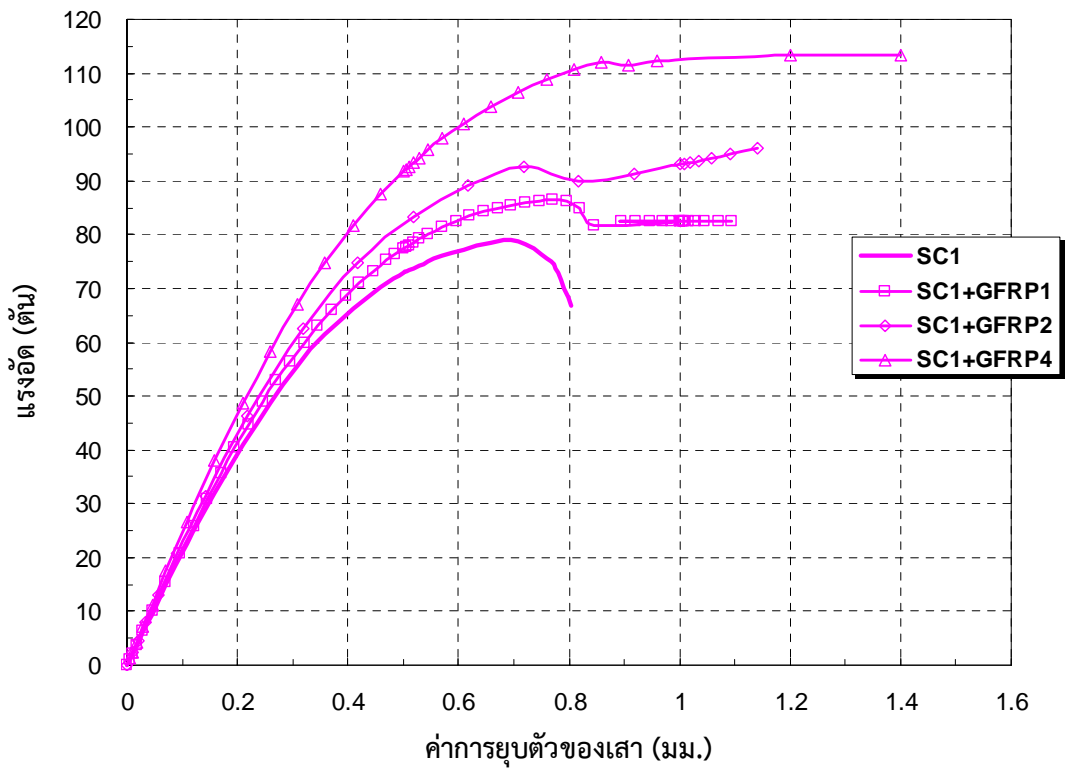
จากรูปพบว่าเมื่อเสาคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์จะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของแผ่นไฟเบอร์ที่เสริมกำลัง นอกจากนี้ยังมีการหดตัวหลังรับแรงอัดสูงสุดได้มากกว่าเสาที่ไม่เสริมกำลังแผ่นไฟเบอร์

ตารางที่ 4.7 ค่าผลการวิเคราะห์แบบจำลอง SC1, SC2, SC3, และ SC4

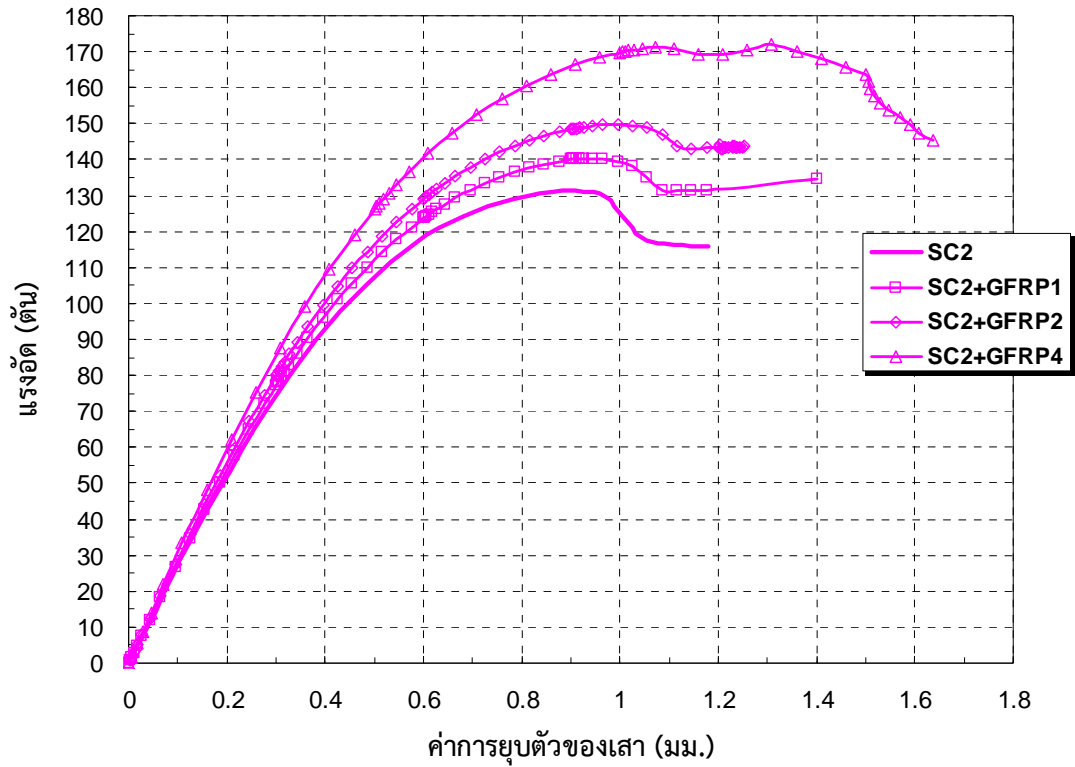
เสา	แรงอัด สูงสุด สมการ ACI (ตัน)	แรงอัด สูงสุด FEM (ตัน)	การยุบตัว ณ แรงอัดสูงสุด Δ_y (มม.)	การยุบตัว สูงสุด Δ_{max} (มม.)	$\frac{\Delta_{max} - \Delta_y}{\Delta_y}$ (%)
SC1	79.7	78.9	0.7	1.0	43
SC2	132.2	131.2	0.9	1.12	24
SC3	294.4	292.9	1.4	1.60	14
SC4	555.6	555.8	1.9	2.45	29



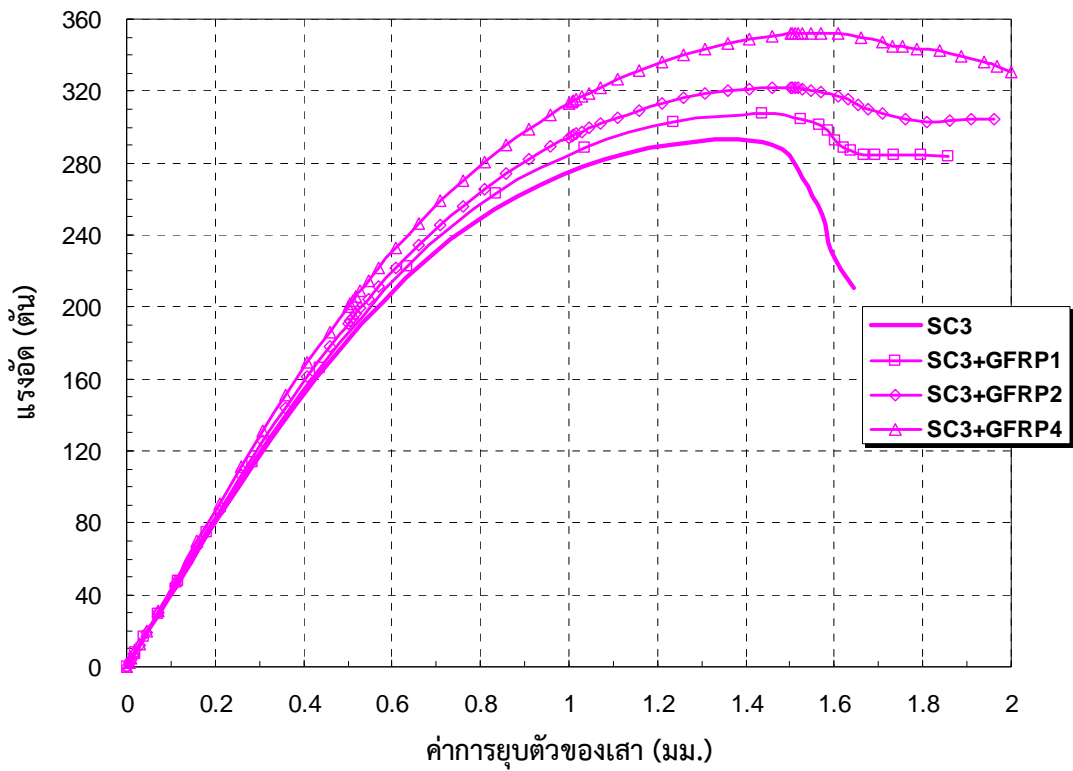
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของเสา SC1, SC2, SC3, และ SC4



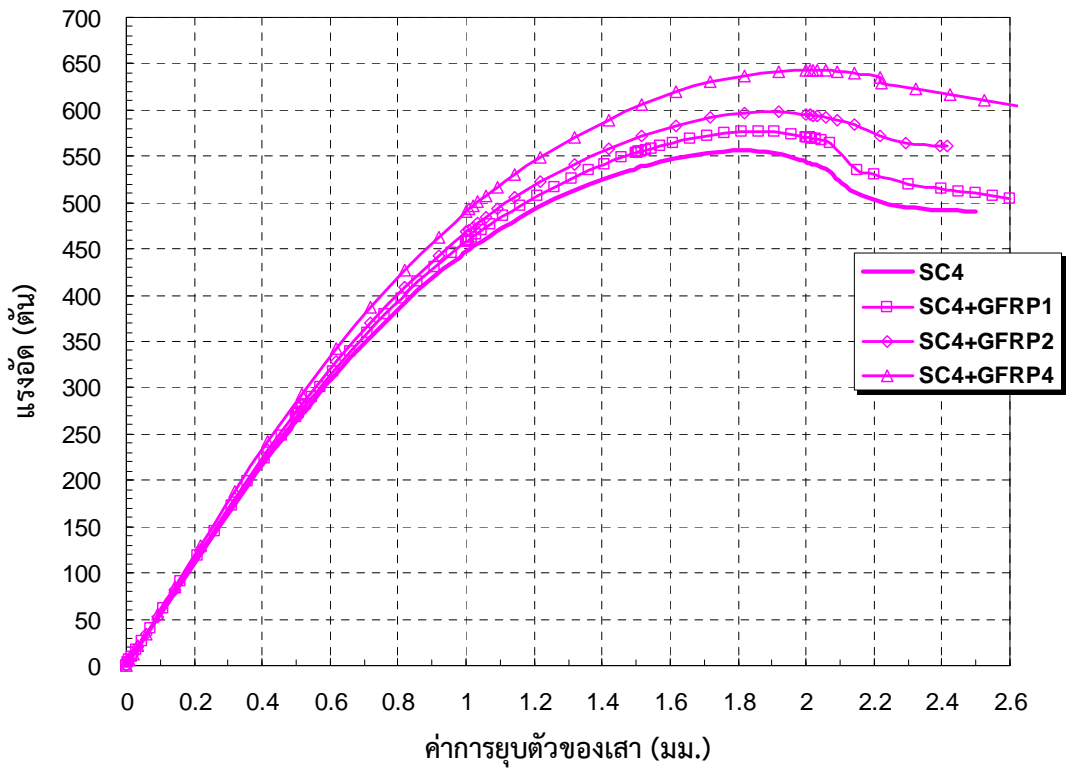
รูปที่ 4.11 ค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของเสาชุด SC1 และที่ติดแผ่นไฟเบอร์



รูปที่ 4.12 ค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของเสาชุด SC2 และที่ติดแผ่นไฟเบอร์



รูปที่ 4.13 ค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของเสาชุด SC3 และที่ติดแผ่นไฟเบอร์



รูปที่ 4.14 ค่าแรงอัดและค่าการยุบตัวของเสาชุด SC4 และที่ติดแผ่นไฟเบอร์

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา

งานศึกษานี้ทำการพัฒนาแบบจำลองไฟโนอิลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมแผ่นไฟเบอร์เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของเสา โดยเริ่มจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟโนอิลิเมนต์วัสดุคอนกรีต (Exp.1, Exp.2) และเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC1) เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองกับผลการทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และทำการศึกษาผลของขนาดหน้าตัดเสาต่อการรับแรงอัดและความยืดหยุ่นด้วยแบบจำลองไฟโนอิลิเมนต์ (SC1-SC4) และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) แบบจำลองไฟโนอิลิเมนต์วัสดุคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องแม่นยำสูง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่าง โดยเฉพาะเมื่อใช้ข้อมูลค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีต (Compressive Stress-Strain Diagram) จากผลการทดสอบคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ

2) แบบจำลองไฟโนอิลิเมนต์เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก RC1 สามารถทำนายแรงอัดสูงสุดของเสาได้ค่อนข้างดีมีค่าคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบเท่ากับ 2.09% และ 11.15% ตามลำดับ

3) ค่าการค่าการยุบตัว ณ ตำแหน่งแรงอัดสูงสุดจากการวิเคราะห์แบบจำลอง RC1 และ RC2 ให้ค่าน้อยกว่าผลการทดสอบทั้งสองตัวอย่าง

4) การใช้สมการของ Desayi & Krishnan [3] ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดอัดของคอนกรีตนั้น ให้ผลการทำนายค่าแรงอัดสูงสุดได้ดีมาก แต่อาจจะไม่สามารถทำนายค่าการยุบตัวได้ดีเท่าที่ควร

5) แบบจำลองเสา SC1, SC2, SC3, และ SC4 ให้ค่าแรงอัดสูงสุดใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากสมการการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตาม ACI ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณความเค้นอัดสูงสุดของคอนกรีต (C) เท่ากับ 1.0

6) แบบจำลองเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์สามารถใช้ทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาได้ดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI 318-99, American Concrete Institute, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete,” American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.
- [2] ACI 440.2R-02, American Concrete Institute, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures,” American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000.
- [3] ANSYS, ANSYS User’s Manual Revision 9, ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 2009.
- [4] Desayi, P. and Krishnan, S., “Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete,” Journal of the American Concrete Institute, 61, pp. 345-350, March 1964.
- [5] Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., Mechanics of Materials, PWS Publishing Company, Boston, Massachusetts, 1997.
- [6] Jame G. MacGregor, and James K. Wight, “Reinforced Concrete Mechanics & Design”, 4th Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2005
- [7] Kachlakev, D.I. and Miller, T., “Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, Final Report, SP316, Oregon Department of Transportation, Salem, Oregon, May 2001.
- [8] Nilson, A. H., “Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method,” Journal of the American Concrete Institute, 65(9), pp. 757-766, 1968.
- [9] กรීติ กงแก้ว และ วิศิษฐ์ บุญครอบ, การศึกษาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้วด้วยวิธีไฟโนอีลิเมนต์, โครงการงานชั้นปี 4, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2553

ภาคผนวก

บทความทางวิชาการ

การศึกษาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

A Study of Reinforced Concrete Columns using Finite Element Analysis