

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

รับแรงกระทำเยื้องศูนย์



นายธนพัฒน์ อ้นถาวร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Finite element analysis of steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns
subjected to eccentric loadings

Mr. Tanapat Onthaworn



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วย
คอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์

โดย

นายธนพัฒน์ อ้นถาวร

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารีย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติตรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารีย์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สายันต์ ศิริมนตรี)

ชนพัฒน อ้นถาวร : การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ (Finite element analysis of steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns subjected to eccentric loadings) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อัครวัชร เล่นวารี, 171 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนองานวิจัยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์ด้วยโปรแกรม ABAQUS งานวิจัยนี้เริ่มจากการพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์ โดยตรวจสอบความเหมาะสมกับผลการทดสอบในอดีตซึ่งพบว่าผลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำ เมื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มาตรวจสอบกับข้อกำหนดการออกแบบ AISC 360-10 พบว่ามีค่าต่างกันอย่างมาก เนื่องจาก AISC 360-10 ไม่มีข้อกำหนดเฉพาะสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ โดยพบว่าเมื่อประยุกต์ข้อกำหนดโดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณจะให้กำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มากที่สุด จากนั้นศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบพบว่าเมื่อเพิ่มกำลังครากของท่อเหล็กและกำลังครากของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณจะทำให้กำลังรับแรงอัดของเสาเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตจะทำให้กำลังรับแรงอัดของเสาเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ในช่วงหลังจากรับกำลังอัดสูงสุดแล้วผลของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตจะมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงของเสาน้อย สำหรับผลกระทบของรูปแบบหน้าตัดของเหล็กรูปพรรณพบว่าหน้าตัดเหล็กรูปพรรณที่เป็นทอวงกลมจะทำให้เสามีกำลังรับแรงกระทำมากที่สุด เนื่องจากสามารถสร้างสภาพการโอบรัดให้แก่คอนกรีตได้ดีที่สุด จากนั้นพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์และตรวจสอบกับผลการทดสอบในอดีต และนำไปสร้างเส้นปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดร่วมกันของเสาวัสดุผสม เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่คำนวณจากข้อกำหนด AISC 360-10 และ Eurocode4 ในกรณีเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์พบว่าเมื่อพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็กจะทำให้ผลการคำนวณตามข้อกำหนดใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการทดสอบมากที่สุดและข้อกำหนดทั้งสองมีความปลอดภัยในการออกแบบ จากการศึกษาตัวแปรศึกษาในกรณีเสาวัสดุผสมรับแรงกระทำเยื้องศูนย์พบว่าเมื่อกำลังของเหล็กรูปพรรณภายใน กำลังของท่อเหล็ก พื้นที่หน้าตัดของเหล็กรูปพรรณภายใน และความหนาของท่อเหล็กจะส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดมากกว่ากำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดมากกว่ากำลังรับแรงดัด

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5770547521 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: FINITE ELEMENT, STEEL – REINFORCE CONCRETE – FILLED STEEL TUBULAR COLUMNS, ECCENTRIC LOADINGS, ABAQUS

TANAPAT ONTHAWORN: Finite element analysis of steel–reinforced concrete–filled steel tubular columns subjected to eccentric loadings. ADVISOR: ASSOC. PROF. AKHRAWAT LENWARI, Ph.D., 171 pp.

This research presents the finite element analysis of steel – reinforced concrete – filled steel tubular columns subjected to eccentric loadings using ABAQUS program. First, the finite element model of steel – reinforced concrete – filled steel tubular columns subjected to concentric loadings was developed and validated with existing test results. A comparison with AISC 360-10 showed that the AISC 360-10 equations can be used to calculate the compressive strength of steel – reinforced concrete – filled steel tubular columns. Assuming the steel – reinforced concrete – filled steel tubular columns as a concrete – filled steel tubular columns combined with steel section predicts compressive strengths closed to the analysis and test results. Then the finite element model was used to study the effects of parameters. It was found that strength of the composite columns will be increased when yield strength of steel section and steel tube increases. Strength of the composite columns will be increased when compressive strength of concrete increases. But the concrete strength has a little effect on the strength of columns after peak load. Shape of steel section also influence the strength of columns. The circular hollow section will give columns the highest strength because it provides the most confinement effect. The finite element model for columns subjected to eccentric loading was developed and used to construct the strength interaction diagram of composite columns. A comparison of the strength interaction curve from the finite element analysis with the strength interaction curve from the AISC 360-10 and Eurocode4 calculations showed that assuming steel – reinforced concrete – filled steel tubular columns as a steel – reinforced columns combined with steel tube provides the strength interaction diagram closed to the analysis and test results. Based on finite element analysis results, AISC 360-10 and Eurocode4 were conservative for design of steel – reinforced concrete – filled steel tubular columns. A parametric study shows that yield strength and cross section area of steel tube and steel section has the more effect on flexural strength than compressive strength, while compressive strength of concrete has more effect on compressive strength has flexural strength.

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านายธนวัฒน์ อ้นถาวร ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวาริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาให้คำปรึกษา ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จนข้าพเจ้าสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ได้จนสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สายัณห์ ศิริมนตรี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องในสาขาโครงสร้างสำหรับคำแนะนำและกำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้กรุณาส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสทางการศึกษา และอบรมสั่งสอนตลอดจนเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดมา รวมทั้งขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าตั้งแต่เริ่มต้นการศึกษาจนถึงปัจจุบัน ท้ายที่สุดนี้ด้วยความช่วยเหลือจากทุกท่านเหล่านี้ ข้าพเจ้าจะจดจำตลอดไป และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษา จุดประกายความคิด และเป็นรากฐานงานวิจัยอื่นเพื่อเป็นประโยชน์ต่อประเทศชาติต่อไป

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 แนวทางการดำเนินงานวิจัย	4
บทที่ 2 การทบทวนงานวิจัย.....	5
2.1 การศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณโดยการทดสอบ.....	5
2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณโดยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์.....	30
2.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFST) ด้วยวิธีไฟเบอร์เอลิเมนต์39	
2.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาวัสดุผสมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	52
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	76
3.1 แบบจำลองความเค้นและความเครียดทางทฤษฎีสำหรับคอนกรีต.....	76
3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว ..76	
3.1.2 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด.....	78
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กรีดร้อน	81

3.3 การออกแบบเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามมาตรฐาน AISC 360-10	85
3.3.1 สำหรับหน้าตัดอัดแน่น.....	86
3.3.2 สำหรับหน้าตัดชะลุ.....	87
3.4 การออกแบบเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามมาตรฐาน Eurocode4	91
บทที่ 4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ	97
4.1 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	97
4.1.1 แบบจำลองวัสดุท่อนเหล็กและแผ่นปิดหัวเสา.....	97
4.1.2 แบบจำลองวัสดุเหล็กรูปพรรณ	97
4.1.3 แบบจำลองวัสดุคอนกรีต	98
4.2 คุณสมบัติของวัสดุ.....	98
4.2.1 คุณสมบัติของท่อนเหล็กและเหล็กรูปพรรณ	98
4.2.2 คุณสมบัติของคอนกรีต	99
4.2.3 คุณสมบัติของแผ่นปิดหัวเสา.....	103
4.3 เงื่อนไขขอบเขต	103
4.4 การจำลองผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อวัสดุ	104
บทที่ 5 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ รับแรงกระทำตรงศูนย์	105
5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบในอดีต.....	105
5.2 พฤติกรรมของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	112
5.3 พฤติกรรมการโอบรัดตัวของคอนกรีตภายในเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์.....	113
5.4 ผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่อพฤติกรรมเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์.....	115

บทที่ 6 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำเอียง ศูนย์	124
6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบในอดีต	124
6.2 พฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์ จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	127
6.2.1 พฤติกรรมการเสียรูปของเสาและวัสดุภายในเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริม เหล็กกรุปพรรณภายใต้แรงกระทำเอียงศูนย์	127
6.2.2 พฤติกรรมการโอบรัดตัวของคอนกรีตภายในเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริม เหล็กกรุปพรรณภายใต้แรงกระทำเอียงศูนย์	128
6.3 การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปพรรณ จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	131
6.4 การศึกษาความเหมาะสมของข้อกำหนด Eurocode4 และ AISC 360-10 ในการ ออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปพรรณ	136
6.5 การศึกษาผลกระทบตัวแปรออกแบบต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วย คอนกรีตเสริมเหล็กกรุปพรรณ	140
6.5.1 ผลกระทบของกำลังครากของหน้าตัดเหล็กกรุปพรรณ	140
6.5.2 ผลกระทบของกำลังครากของท่อเหล็ก	143
6.5.3 ผลกระทบของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต	145
6.5.4 ผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดเหล็กกรุปพรรณ	147
6.5.5 ผลกระทบของความหนาท่อเหล็ก	149
บทที่ 7 สรุป	151
7.1 สรุปผลการวิจัย	151
7.2 ข้อเสนอแนะ	153
รายการอ้างอิง	154
ภาคผนวก	159

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 171



สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1	อัตราส่วนผสมคอนกรีตของเสาตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2004)	5
ตาราง 2.2	คุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2004) (1).....	6
ตาราง 2.3	คุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2004) (2).....	7
ตาราง 2.4	คุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2004) (3).....	8
ตาราง 2.5	คุณสมบัติและผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2010)	14
ตาราง 2.6	ส่วนผสมคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบ (Wang และคณะ 2010).....	15
ตาราง 2.7	คุณสมบัติของเสาตัวอย่างทดสอบ	23
ตาราง 2.8	ขนาดและคุณสมบัติของวัสดุของเสาวัสดุผสม SRCFST หน้าตัดรูปวงกลมที่ใช้ในการศึกษาตัวแปร (Jingming และคณะ 2015).....	37
ตาราง 2.9	ค่าการเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของเสา CFST หน้าตัดวงกลมระหว่างผลการวิเคราะห์และผลจากการทดสอบ [15]	43
ตาราง 2.10	ขนาดหน้าตัด ความสูงของหน้าตัดเสาและเหล็กรูปพรรณ (Chen และ Yeh 1996).....	56
ตาราง 2.11	ขนาดและลักษณะเหล็กเสริมทางยาวและเหล็กปลอก (Chen และ Yeh 1996).....	57
ตาราง 2.12	คุณสมบัติวัสดุ (Chen และ Yeh 1996)	57
ตาราง 2.13	เปรียบเทียบกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต	60
ตาราง 2.14	ขนาดและลักษณะเหล็กเสริมทางยาวและเหล็กปลอก	61
ตาราง 2.15	ขนาดหน้าตัด ความสูงของหน้าตัดเสาและเหล็กรูปพรรณ	62
ตาราง 2.16	คุณสมบัติวัสดุ	63
ตาราง 2.17	เปรียบเทียบกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต	68

ตาราง 3.1 การจำแนกหน้าตัดของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามมาตรฐาน AISC 360-10 (2010) [24]	86
ตาราง 3.2 การสร้างจุดต่างๆ บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดและกำลังแรงดัดของเสาท่อนเหล็กกลมเติมด้วยคอนกรีตรับโมเมนต์กระทำรอบแกนใดๆ [35]	90
ตาราง 5.1 ขนาดหน้าตัด	106
ตาราง 5.2 คุณสมบัติวัสดุ	106
ตาราง 5.3 กำลังรับแรงของเสาสั้นท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ	109
ตาราง 5.4 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงของเสาสั้นท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจากการทดสอบกับข้อกำหนดในการออกแบบ AISC 360-10	110
ตาราง 5.5 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงของเสาสั้นท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนดในการออกแบบ AISC 360-10	110
ตาราง 5.6 ลักษณะหน้าตัดเสาที่ใช้ศึกษา	116
ตาราง 5.7 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ศึกษา	116
ตาราง 5.8 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ	123
ตาราง 6.1 คุณสมบัติของเสาตัวอย่างทดสอบและระยะรับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง	125
ตาราง 6.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในอดีต	126
ตาราง 6.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อนเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ	133
ตาราง 6.4 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อนเหล็กและเหล็กรูปพรรณ	133
ตาราง 6.5 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาตัวอย่างที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ	134
ตาราง 6.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อนเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ	141
ตาราง 6.7 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อนเหล็กและเหล็กรูปพรรณ	141
ตาราง 6.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อนเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ	143

ตาราง 6.9 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ.....	143
ตาราง 6.10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ.....	145
ตาราง 6.11 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ	145
ตาราง 6.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ.....	147
ตาราง 6.13 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ	147
ตาราง 6.14 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ.....	149
ตาราง 6.15 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ	149



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูป 2.1 การเชื่อมต่อตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2004).....	9
รูป 2.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบของ Wang และคณะ (2004).....	9
รูป 2.3 รูปแบบการวิบัติ (Wang และคณะ, 2004).....	10
รูป 2.4 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเครียด (Wang และคณะ, 2004).....	11
รูป 2.5 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดตามแนวแกนและระยะการโก่งตัวที่ กึ่งกลางของเสายาว (Wang และคณะ, 2004).....	12
รูป 2.6 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนักประลัยและปริมาตรของ ตัวอย่างทดสอบ (Wang และคณะ, 2004).....	12
รูป 2.7 ตัวอย่างการทดสอบ (ก) เสาตัวอย่างหน้าตัดเหลี่ยมรูปพรรณรูปกากบาท	14
รูป 2.8 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบของ Wang และคณะ (2010).....	15
รูป 2.9 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดตามแนวแกน ของ ตัวอย่างเสาสั้น (Wang และคณะ 2010).....	16
รูป 2.10 รูปแบบการวิบัติของเสาตัวอย่าง S4H (Wang และคณะ 2010).....	17
รูป 2.11 รูปแบบการวิบัติของเสาตัวอย่าง S4H10 (Wang และคณะ 2010).....	17
รูป 2.12 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างเสา ยาว (Wang และคณะ 2010).....	18
รูป 2.13 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเครียดตามแนวแกน.....	19
รูป 2.14 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง L4L10-6 (Wang และคณะ 2010).....	19
รูป 2.15 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง L4L10-12 (Wang และคณะ 2010).....	20
รูป 2.16 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังประลัย	21
รูป 2.17 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและผลกระทบจากอัตราส่วนความ ยาว	22
รูป 2.18 การติดตั้งอุปกรณ์ในตัวอย่างทดสอบ	24

รูป 2.19 รูปแบบการวิบัติของเสาตัวอย่างจากการทดสอบ	25
รูป 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและระยะการเลื่อนที่ทางด้านข้างของ เสาตัวอย่างทดสอบ	26
รูป 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและระยะการเลื่อนที่ตามแนวแกนของ เสาตัวอย่างทดสอบ	27
รูป 2.22 การเสียรูปทางด้านข้างของเสาตัวอย่างทดสอบ	28
รูป 2.23 ความเค้นและความเครียดที่เกิดบนหน้าตัดเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณ	30
รูป 2.24 เส้นโค้งแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดตาม แนวแกนที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ก) ผลการทดสอบของ Wang และคณะ 2004 (ข) ผลการทดสอบของ Xiao และคณะ (2009)	32
รูป 2.25 รูปแบบการวิบัติของเสาสั้นวัสดุผสม SRCFST (ก) ท่อเหล็ก, (ข) เหล็กรูปพรรณ,	33
รูป 2.26 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดตามแนวแกน ขององค์ประกอบต่างๆ ของเสา SRCFST (Jingming และคณะ 2015)	33
รูป 2.27 รูปแบบการวิบัติของเหล็กรูปพรรณภายในเสาวัสดุผสมโดยไม่คิดความสัมพันธ์กับ องค์ประกอบอื่น (Jingming และคณะ 2015)	35
รูป 2.28 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดของเหล็ก รูปพรรณที่อยู่ในเสาวัสดุผสมและเหล็กรูปพรรณเพียงอย่างเดียว (Jingming และคณะ 2015)	35
รูป 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดของเสาท่อเหล็ก เติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (SRCFST) และเสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFST) เพียงอย่างเดียว (Jingming และคณะ 2015)	36
รูป 2.30 เส้นโค้งเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดตาม แนวแกนเนื่องจากผลกระทบจากตัวแปรต่างๆของเสาวัสดุผสม SRCFST (Jingming และคณะ 2015)	38
รูป 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น — ความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับพฤติกรรมการโอบ รัดในเสาวัสดุผสม (CFST) (Qing Quan Liang และ Fragomeni 2010)	39
รูป 2.32 การแบ่งไฟเบอร์เอลิเมนต์ในหน้าตัดของเสาวัสดุผสม (Liang และคณะ, 2009)	41

รูป 2.33 เปรียบเทียบความสัมพันธ์โมเมนต์-ความโค้ง ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ (Liang และคณะ, 2009).....	44
รูป 2.34 ผลกระทบจากอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009).....	45
รูป 2.35 ผลกระทบจากอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงดัดและอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็ก (Liang และคณะ, 2009).....	45
รูป 2.36 ผลกระทบจากอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009) .	46
รูป 2.37 ผลกระทบจากกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (f_c') ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009).....	47
รูป 2.38 ผลกระทบจากกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (f_c') ต่อกำลังรับแรงดัดของเสาวัสดุผสม (Liang และคณะ, 2009).....	48
รูป 2.39 ผลกระทบจากกำลังรับแรงดัดของคอนกรีต (f_c') ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009)	48
รูป 2.40 ผลกระทบจากกำลังรับครากของท่อเหล็ก (f_{yy}) ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009).....	49
รูป 2.41 ผลกระทบจากกำลังรับครากของท่อเหล็ก (f_{yy}) ต่อกำลังรับแรงดัดของเสาวัสดุผสม (Liang และคณะ, 2009).....	49
รูป 2.42 ผลกระทบจากอัตราส่วนแรงกระทำตามแนวแกนต่อกำลังประลัยที่มีต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009) .	50
รูป 2.43 ผลกระทบจากรูปปร่างหน้าตัดของเสาวัสดุผสม CFST ที่มีต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง (D/t=70) (Liang และคณะ, 2009).....	51
รูป 2.44 ผลกระทบจากรูปปร่างหน้าตัดของเสาวัสดุผสม CFST ที่มีต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง (D/t=25) (Liang และคณะ, 2009)	51

รูป 2.45 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งตามวัสดุ (ก) คอนกรีต (ข) เหล็กรูปพรรณ (ค) เหล็กเสริมทางยาวและทางขวาง (วรการ และคณะ, 2016)	52
รูป 2.46 เอลิเมนต์ Solid185 (ANSYS User's Manual (ver. 14.0), 2012)	53
รูป 2.47 เอลิเมนต์ Solid65 (ANSYS User's Manual (ver. 14.0), 2012).....	53
รูป 2.48 ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของคอนกรีต (Park และ Paulay, 1975)....	54
รูป 2.49 ขอบเขตการวิบัติของคอนกรีต (ANSYS User's Manual (ver. 14.0), 2012).....	55
รูป 2.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก [22].....	55
รูป 2.51 ลักษณะหน้าตัดทดสอบของ Chen และ Yeh (1996)	58
รูป 2.52 เปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบเสา SRC2.....	58
รูป 2.53 เปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบเสา SRC4.....	59
รูป 2.54 เปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบเสา SRC7.....	59
รูป 2.55 ลักษณะหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ศึกษาพฤติกรรม โดยมีหน้าตัดเหล็ก รูปพรรณต่าง ๆ (ก) W300 x 300 x 106 กิโลกรัม/เมตร (ข) W350 x 350 x 106 กิโลกรัม/ เมตร.....	63
รูป 2.56 ผลของระยะห่างเหล็กปลอกต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เหล็ก รูปพรรณ W300 x 300 x 106 กิโลกรัม/เมตร (วรการ และคณะ, 2016)	64
รูป 2.57 ผลของระยะห่างเหล็กปลอกต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เหล็ก รูปพรรณ W350 x 350 x 106 กิโลกรัม/เมตร (วรการ และคณะ, 2016)	64
รูป 2.58 ผลของระยะห่างเหล็กปลอกต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เหล็ก รูปพรรณ W400 x 300 x 107 กิโลกรัม/เมตร (วรการ และคณะ, 2016)	65
รูป 2.59 ผลของระยะเรียงเหล็กปลอกต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เหล็ก รูปพรรณหน้าตัดประกอบขนาด 300 x 390 x 10 x 13.4 มิลลิเมตร (วรการ และคณะ, 2016).....	65
รูป 2.60 ผลของขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ที่ ระยะห่างเหล็กปลอก 60 มิลลิเมตร (วรการ และคณะ, 2016).....	66

รูป 2.61 ผลของขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ที่ระยะห่างเหล็กปลอก 60 มิลลิเมตร (2) (วรการ และคณะ, 2016).....	67
รูป 2.62 ผลของขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ที่ระยะห่างเหล็กปลอก 60 มิลลิเมตร (3) (วรการ และคณะ, 2016).....	67
รูป 2.63 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาคอนกรีตเสริมในท่อเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต.....	69
รูป 2.64 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายนอกที่ถูโกอบรัด ...	70
รูป 2.65 รูปแบบการวิบัติของเสาวัสดุผสมสั้นคอนกรีตเสริมในท่อเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต.....	71
รูป 2.66 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและความเครียดของเสาวัสดุผสมคอนกรีตเสริมลงในท่อเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (Han และ An 2013)	72
รูป 2.67 การกระจายความเค้นของคอนกรีตในหน้าตัดเสาวัสดุผสมรับแรงอัด (Han และ An 2013).....	73
รูป 2.68 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับความเครียด ของเสาวัสดุผสม (Han และ An 2013).....	74
รูป 3.1 ความสัมพันธ์หน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว.....	76
รูป 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว	77
รูป 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูโกอบรัด.....	78
รูป 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูโกอบรัดและไม่ถูโกอบรัด (Mander และคณะ, 1988).....	80
รูป 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กคาร์บอนรีดร้อน	82
รูป 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กรีดร้อน (Yun และคณะ, 2017).....	83
รูป 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองความเค้นและความเครียดของเหล็กรีดร้อน.....	84
รูป 3.8 เส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัด (interaction Diagram) ในการออกแบบคาน-เสาวัสดุผสม [24].....	88
รูป 3.9 ประเภทหน้าตัดของเสาวัสดุผสม [11].....	91
รูป 3.10 ขอบเขตความขรุขระของหน้าตัดเสาวัสดุผสมรูปแบบต่างๆ [11].....	93

รูป 3.11	เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาวัสดุผสมรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดร่วมกัน [11].....	94
รูป 3.12	การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังอย่างง่ายของเสาสั้น [11].....	95
รูป 3.13	ค่า μ_{dy} และ μ_{dy} [11]	96
รูป 4.1	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งตามวัสดุ (ก) คอนกรีต (ข) เหล็กรูปพรรณ (ค) ท่อเหล็ก	97
รูป 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ [1]...99	
รูป 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความกว้างของรอยแตกกว้างของคอนกรีตเมื่อรับแรงดึง (Hillerborg และคณะ)	100
รูป 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว (E.Hognestad,1951).....	101
รูป 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว	101
รูป 5.1	หน้าตัดเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ [1].....	105
รูป 5.2	เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของตัวอย่าง NSA1....	107
รูป 5.3	เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของตัวอย่าง HSA1....	107
รูป 5.4	เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของตัวอย่าง HSB1....	108
รูป 5.5	เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของตัวอย่าง SC1	108
รูป 5.6	เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของตัวอย่าง SC7	109
รูป 5.7	การพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ	111
รูป 5.8	การพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็ก	111
รูป 5.9	การเสียรูปของหน้าตัดคอนกรีตภายในเสารับแรงอัดตรงศูนย์ HSB1.....	112
รูป 5.10	การเสียรูปของหน้าตัดเหล็กภายในเสารับแรงอัดตรงศูนย์ HSB1.....	113
รูป 5.11	ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.001.....	113

รูป 5.12 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.002.....	114
รูป 5.13 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.003.....	114
รูป 5.14 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.004.....	114
รูป 5.15 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.005.....	115
รูป 5.16 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.006.....	115
รูป 5.17 รูปแบบหน้าตัดต่างๆ ที่ศึกษา (ก) C1, (ข) CCS, (ค) CHS และ (ง) SHS.....	117
รูป 5.18 ผลของพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ.....	118
รูป 5.19 ผลของรูปแบบหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ.....	119
รูป 5.20 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา CHS เมื่อรับแรงอัดสูงสุด ที่ความเค้นเท่ากับ 0.004.....	119
รูป 5.21 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา SHS เมื่อรับแรงอัดสูงสุด ที่ความเค้นเท่ากับ 0.003.....	119
รูป 5.22 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา C1 เมื่อรับแรงอัดสูงสุด ที่ความเค้นเท่ากับ 0.003.....	120
รูป 5.23 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา CCS เมื่อรับแรงอัดสูงสุด ที่ความเค้นเท่ากับ 0.001.....	120
รูป 5.24 ผลของกำลังครากของเหล็กรูปพรรณ.....	121
รูป 5.25 ผลของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต.....	121
รูป 5.26 ผลของกำลังครากของท่อเหล็ก.....	122
รูป 6.1 หน้าตัดเสาทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณของ Liu แลคณะ 2015.....	124

รูป 6.2 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเยื้องศูนย์กับระยะโก่งตัวด้านข้างของเสา c-200-25 [7].....	125
รูป 6.3 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเยื้องศูนย์กับระยะโก่งตัวด้านข้างของเสา c-240-25 [7].....	126
รูป 6.4 การเสียรูปของเสารับแรงอัดเยื้องศูนย์ c-200-25	127
รูป 6.5 การเสียรูปของคอนกรีตภายในเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์ c-200-25	127
รูป 6.6 การเสียรูปของเหล็กรูปพรรณภายในเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์ c-200-25	128
รูป 6.7 การเสียรูปของท่อเหล็กเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์ c-200-25.....	128
รูป 6.8 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหดตัวในแนวแกน 0.001 เมตร.....	129
รูป 6.9 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200- 25ที่ตำแหน่งการหดตัวในแนวแกน 0. 003เมตร	129
รูป 6.10 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหดตัวในแนวแกน 0.005 เมตร.....	129
รูป 6.11 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหดตัวในแนวแกน 0.007 เมตร.....	130
รูป 6.12 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหดตัวในแนวแกน 0.009 เมตร.....	130
รูป 6.13 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหดตัวในแนวแกน 0.010 เมตร.....	130
รูป 6.14 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหดตัวในแนวแกน 0.011 เมตร.....	131
รูป 6.15 แบบจำลองเสารับแรงอัดเยื้องศูนย์ที่ระยะเยื้องศูนย์ต่างๆ (ก) $e/D=0$ (ข) $e/D=0.25$	132
รูป 6.16 รูปแบบการให้แรงกระทำ	132
รูป 6.17 ตัวอย่างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาตัวอย่าง c200_25 จากการวิเคราะห์	135

รูป 6.18 ตัวอย่างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาตัวอย่าง c240_25 จากการวิเคราะห์	135
รูป 6.19 ตัวอย่างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาตัวอย่าง C1	136
รูป 6.20 ตัวอย่างการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปรณกับข้อกำหนด Eurocode4.....	137
รูป 6.21 ตัวอย่างการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปรณกับข้อกำหนด AISC360 -10	137
รูป 6.22 วิธีสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของหน้าตัดเหล็กกรุปรณภายใน	138
รูป 6.23 วิธีสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาต่อเหล็กภายนอก	138
รูป 6.24 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปรณจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนด Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว.....	139
รูป 6.25 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปรณจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว.....	140
รูป 6.26 ผลกระทบของกำลังครากของหน้าตัดเหล็กกรุปรณต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว.....	142
รูป 6.27 ผลกระทบของกำลังครากของหน้าตัดเหล็กกรุปรณต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ AISC 360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว.....	142
รูป 6.28 ผลกระทบของกำลังครากของเสาต่อเหล็กต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว	144
รูป 6.29 ผลกระทบของกำลังครากของเสาต่อเหล็กต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ AISC 310-10 ที่ดัดแปลงแล้ว	144
รูป 6.30 ผลกระทบของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว	146

รูป 6.31 ผลกระทบของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสา โดยเปรียบเทียบกับ AISC 360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว	146
รูป 6.32 ผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายในต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสา โดยเปรียบเทียบกับ Eurocode 4 ที่ดัดแปลงแล้ว	148
รูป 6.33 ผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายในต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสา โดยเปรียบเทียบกับ AISC 360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว	148
รูป 6.34 ผลกระทบของความหนาต่อเหล็กต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว.....	150
รูป 6.35 ผลกระทบของความหนาต่อเหล็กต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ AISC 360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว.....	150
รูป ก 1 การสร้าง Part ในโปรแกรม ABAQUS	159
รูป ก 2 การกำหนดขนาดหน้าตัดของเสาในแบบจำลอง	160
รูป ก 3 การกำหนดความยาวของเสาตัวอย่างในแบบจำลอง.....	160
รูป ก 4 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุคอนกรีต	161
รูป ก 5 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุเหล็ก.....	161
รูป ก 6 การสร้าง section ของแบบจำลอง	162
รูป ก 7 การกำหนดค่า section ในแบบจำลอง	162
รูป ก 8 การรวม part ของแบบจำลอง	163
รูป ก 9 การสร้างคุณสมบัติรอยต่อพื้นผิวสัมผัสในแบบจำลอง	163
รูป ก 10 การกำหนดคุณสมบัติรอยต่อพื้นผิวสัมผัสในแบบจำลอง	164
รูป ก 11 การสร้าง embedded ในแบบจำลอง	164
รูป ก 12 การสร้าง tie contact ในแบบจำลอง.....	165
รูป ก 13 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นปิดหัวเสาด้านล่างในแบบจำลอง.....	165
รูป ก 14 การสร้าง step ในการวิเคราะห์ของแบบจำลอง.....	166

รูป ก 15	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นปิดหัวเสาด้านบนในแบบจำลอง.....	166
รูป ก 16	การสังเคราะห์แบบจำลอง	167
รูป ก 17	การดูผลการวิเคราะห์แบบจำลอง	167
รูป ก 18	การเลือกผลการวิเคราะห์ที่ต้องการจากแบบจำลอง (1).....	168
รูป ก 19	การเลือกผลการวิเคราะห์ที่ต้องการจากแบบจำลอง (2).....	168
รูป ก 20	การจัดการกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง (1).....	169
รูป ก 21	การจัดการกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง (2).....	169
รูป ก 22	การบันทึกผลการวิเคราะห์เป็นไฟล์ .xls.....	170



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เสาวัสดุผสมระหว่างเหล็กรูปพรรณและคอนกรีต (Steel-concrete composite column) ถูกใช้แพร่หลายในระยะหลังเนื่องจากเป็นการรวมกันของคุณสมบัติเด่นของวัสดุทั้งสอง โดยคอนกรีตมีคุณสมบัติเด่นคือมีราคาถูก สติฟเนสสูง และสามารถจัดซื้อได้โดยง่าย ส่วนเหล็กรูปพรรณมีคุณสมบัติเด่นคือมีน้ำหนักเบา กำลังสูง มีความเหนียว และสามารถประกอบได้ง่าย เมื่อนำคุณสมบัติเด่นของทั้งสองวัสดุมารวมกันจะทำให้เสาวัสดุผสมมีคุณสมบัติเด่นคือมีความเหนียว (Ductility) และมีกำลังรับแรง (Strength) สูง เสาวัสดุผสม โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เสาวัสดุผสมเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (Steel-reinforced concrete or SRC) และเสาวัสดุผสมท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (Concrete-filled steel tube or CFST) โดยเสาวัสดุผสมเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (SRC) มีคุณสมบัติเด่นคือ สามารถรับแรงเฉือนและทนไฟได้ดี แต่ในการก่อสร้างจำเป็นต้องใช้ไม้แบบและเหล็กเสริมเพื่อป้องกันการหลุดล่อนของคอนกรีตเนื่องจากแรงตามแนวแกน ในขณะที่เสาวัสดุผสมท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFST) ท่อเหล็กสามารถใช้เป็นไม้แบบและเหล็กเสริมได้เลย นอกจากนั้นท่อเหล็กยังสร้างพฤติกรรมการโอบรัดให้แก่คอนกรีตอีกด้วยซึ่งจะทำให้ความเหนียวและกำลังของเสาเพิ่มขึ้น แต่ข้อด้อยคือเสาวัสดุผสมประเภทนี้ทนไฟได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับเสาวัสดุผสมเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต [1] นอกจากนี้ Kodur และ Lie (1996) [2-4] วิจัยพบว่าเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเมื่อเพิ่มเหล็กรูปพรรณด้านในเข้าไปอีกเสาจะสามารถทนไฟได้ดีขึ้น

จากข้อดีและข้อด้อยที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจึงเป็นที่มาของการนำเสาวัสดุผสมทั้งสองประเภทมารวมกันเรียกว่า เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (Steel tubular column filled with steel-reinforced concrete or SRCFST) ข้อดีของเสาประกอบประเภทนี้ได้แก่ ในกรณีที่น้ำหนักเท่ากันจะสามารถลดขนาดหน้าตัดของเสาได้ ทำให้มีพื้นที่ใช้สอยมากขึ้น กำลังและความเหนียวของเสาเพิ่มขึ้น ไม่จำเป็นต้องใช้ไม้แบบและเหล็กเสริมในการก่อสร้างสามารถใช้ในกรณีที่ต้องรับแรงอัดสูงได้ และหน้าตัดเหล็กด้านในจะช่วยเพิ่มการทนไฟของเสาวัสดุผสมได้เมื่อเทียบกับเสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเพียงอย่างเดียว [5]

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณภายใต้แรงอัดกระทำตามแนวแกนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (รายละเอียดจะกล่าวถึงในบทที่ 2) แต่งานวิจัยใดที่ศึกษากำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์ยังมีจำนวนจำกัด การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน รวมถึงยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณ โดยเฉพาะ งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษากำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณภายใต้แรงเยื้องศูนย์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติด้วยโปรแกรม ABAQUS และนำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไปสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณ โดยตัวแปรหลักที่ศึกษาประกอบด้วยกำลังของหน้าตัดเหล็ก รูปพรรณ กำลังของคอนกรีต กำลังของท่อเหล็ก พื้นที่หน้าตัดของเหล็ก รูปพรรณ และความหนาของท่อเหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณที่รับแรงกระทำเยื้องศูนย์
2. สร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณ
3. ศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบที่มีต่อพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณ
4. ศึกษาความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้สมการออกแบบเสาวัสดุผสมที่มีในปัจจุบัน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตและสมมติฐานในการวิเคราะห์ ดังนี้

1. เหล็กgrupพรรณในเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กgrupพรรณไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling)
2. ไม่พิจารณาการลื่นไถล (slip) ระหว่างเหล็กgrupพรรณและคอนกรีตในแบบจำลอง (perfect bond)
3. ไม่พิจารณาผลกระทบของความขรุขระ หน่วยแรงคงค้าง และความไม่สมบูรณ์เบื้องต้น (Imperfection)
4. เสาตัวอย่างศึกษามีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัด (L/D) เท่ากับ 3
5. หน้าตัดต่อเหล็กเป็นรูปวงกลม
6. พฤติกรรมของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กgrupพรรณที่ศึกษาประกอบด้วย
 - กำลังรับแรงตรงศูนย์กลางของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กgrupพรรณ
 - กำลังรับแรงเยื้องศูนย์กลางของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กgrupพรรณ
 - พฤติกรรมการโอบรัดของคอนกรีตของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กgrupพรรณ
 - ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักตามแนวแกนและการเสียรูปของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กgrupพรรณ
7. ตัวแปรออกแบบที่ศึกษาผลกระทบต่อพฤติกรรมของเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กgrupพรรณประกอบด้วย
 - กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต
 - กำลังครากของต่อเหล็ก
 - กำลังครากของหน้าตัดเหล็กgrupพรรณ
 - พื้นที่หน้าตัดเหล็กgrupพรรณ
 - ความหนาของต่อเหล็ก

1.4 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

แนวทางการดำเนินงานวิจัย มีดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตเกี่ยวข้องกับเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงอัดตามแนวแกน
2. ศึกษางานในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงอัดตามแนวแกนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
3. พัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์เสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ABAQUS และตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS กับผลจากการทดสอบในอดีต
4. พัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์เสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ABAQUS และตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS กับผลจากการทดสอบในอดีต
5. ศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบต่างๆ ต่อกำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ
6. พัฒนาเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีต
7. สรุปผลงานวิจัย เขียนบทความงานวิจัยและจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

การทบทวนงานวิจัย

2.1 การศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณโดยการทดสอบ

จากอดีตมีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมต่างๆ ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกน โดยการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมโดยการทดสอบสามารถสรุป ได้ดังนี้

Wang และคณะ (2004) [5] ได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษากำลังและความเหนียวของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปวงกลมภายใต้แรงอัดตามแนวแกน โดย การทดสอบกับตัวอย่างทดสอบ 16 ตัวอย่าง มีตัวแปรศึกษาคือ กำลังของคอนกรีต ดัชนีการโอบรัด (confinement index) ดัชนีโครงสร้างเหล็ก (structural steel index) และอัตราส่วนความยาวต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสา การทดสอบทำโดยทดสอบ 16 ตัวอย่างภายใต้แรงอัดตามแนวแกน โดย 15 ตัวอย่างเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (steel – reinforced concrete – filled steel tubular columns, SRCFST) โดยเหล็กรูปพรรณมีหน้าตัดเป็นรูปกากบาทและ 1 ตัวอย่างเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (concrete-filled steel tube, CFST) คอนกรีตที่ใช้ใน การทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภท คือคอนกรีตธรรมดา (normal concrete, NC) และคอนกรีตกำลัง สูง (high strength concrete, HSC) หน้าตัดท่อเหล็กที่ใช้แบ่งออกเป็น 3 ตัวอย่าง โดยอัตราส่วน เส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาอยู่ระหว่าง 45.4 ถึง 72 หน้าตัดเหล็กรูปพรรณมี 2 ขนาด คือความ สูงของหน้าตัดเท่ากับ 100 และ 120 มิลลิเมตร รวมถึงอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางหน้า ตัด 3 ค่า คือ 2.8, 7 และ 10 อัตราส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตของเสาตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2004)

Mix Type	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Coarse aggregate (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Super plasticizer (kg/m ³)	Water/cement ratio
HSC	470	695	1053	179	14.1	0.38
NC	360	676	1177	197	-	0.547

กำลังรับแรงอัดคอนกรีตชนิดธรรมดาที่ 28 วันเท่ากับ 36.8 เมกะปาสคาล คอนกรีตชนิดกำลังสูงที่ 28 วันมีค่า 65.6 เมกะปาสคาล และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ณ วันทดสอบของคอนกรีตชนิดธรรมดามีค่า 44.2 เมกะปาสคาล และคอนกรีตชนิดกำลังสูงมีค่า 68.9 เมกะปาสคาล ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 33490 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีตชนิดธรรมดาและ 42480 เมกะปาสคาล สำหรับคอนกรีตกำลังสูง f_c มีค่าร้อยละ 67 ของกำลังคอนกรีต ตารางที่ 2.2 ถึงตารางที่ 2.4 ได้แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ ไว้

ตาราง 2.2 คุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2004) (1)

Specimen no.	Length (L, mm)	Diameter (D, mm)	Thickness (t, mm)	D/t ratio	L/D ratio
NS-A1	465	166	2.7	61.5	2.8
NS-A2	465	166	2.7	61.5	2.8
NS-B1	470	168	3.7	45.5	2.8
HS-A1	465	166	2.7	61.5	2.8
HS-A2	465	166	2.7	61.5	2.8
HS-B1	470	168	3.7	45.4	2.8
HS-B2	470	168	3.7	45.4	2.8
HS-C1	605	216	3.0	72.0	2.8
HS-C2	605	216	3.0	72.0	2.8
HS-D1	605	216	3.0	72.0	2.8
HS-D1	605	216	3.0	72.0	2.8
HS-E1	470	168	3.7	45.4	2.8
HM-1	1176	168	3.7	45.4	7.0
HM-2	1176	168	3.7	45.4	7.0
HL-1	1680	168	3.7	45.4	10.0
HL-2	1680	168	3.7	45.4	10.0

ตาราง 2.3 คุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2004) (2)

Specimen no.	f_y^t (MPa)	E_t (MPa)	A_s (mm ²)	f_y^s (MPa)	E_s (MPa)	f_c (MPa)
NS-A1	318	191	2324	288	207	29.6
NS-A2	318	191	2324	288	207	29.6
NS-B1	318	191	2324	288	207	29.6
HS-A1	318	191	2324	288	207	46.2
HS-A2	318	191	2324	288	207	46.2
HS-B1	318	191	2324	288	207	46.2
HS-B2	318	191	2324	288	207	46.2
HS-C1	269	190	2324	288	207	46.2
HS-C2	269	190	2324	288	207	46.2
HS-D1	269	190	3570	314	197	46.2
HS-D1	269	190	3570	314	197	46.2
HS-E1	318	191	-	-	-	46.2
HM-1	318	191	2324	288	207	46.2
HM-2	318	191	2324	288	207	46.2
HL-1	318	191	2324	288	207	46.2
HL-2	318	191	2324	288	207	46.2

เมื่อ f_y^t คือ กำลังครากของท่อเหล็ก

f_y^s คือ กำลังครากของเหล็กรูปพรรณ

E_t คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของท่อเหล็ก

E_s คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ

f_c คือ 67% ของกำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต

ตาราง 2.4 คุณสมบัติของตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2004) (3)

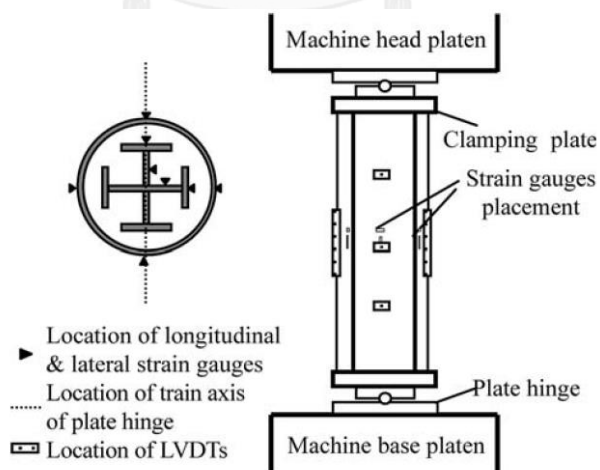
Specimen no.	Loading Method	N_u (kN)
NS-A1	Monotonic	2350
NS-A2	Monotonic	2100
NS-B1	Monotonic	2640
HS-A1	Monotonic	2700
HS-A2	Cyclic	2650
HS-B1	Monotonic	2835
HS-B2	Cyclic	2832
HS-C1	Monotonic	3640
HS-C2	Cyclic	3550
HS-D1	Monotonic	4130
HS-D1	Cyclic	4330
HS-E1	Monotonic	2358
HM-1	Monotonic	2830
HM-2	Monotonic	2735
HL-1	Monotonic	2468
HL-2	Monotonic	2430

สำหรับการเตรียมตัวอย่าง เหล็กท่อและเหล็กรูปพรรณจะถูกนำมาเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่เหลื่อมด้านล่างดังรูปที่ 2.1 ตัวอย่างที่ใช้จะถูกปิดด้วยแผ่นโพลียูรีเทนและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบ



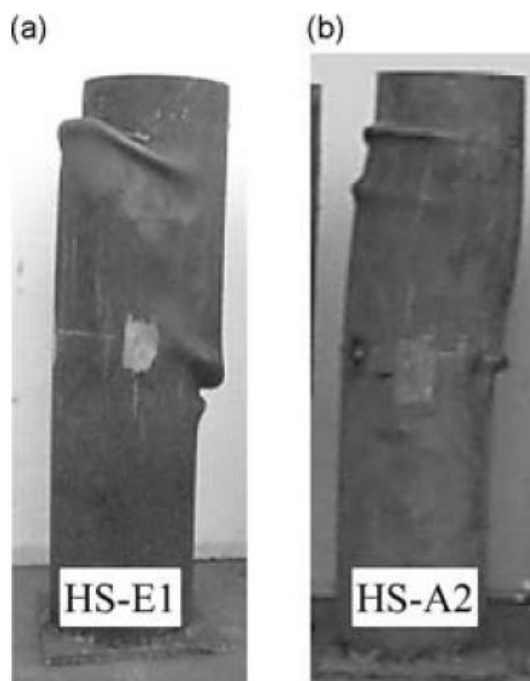
รูป 2.1 การเชื่อมต่อตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2004)

ตัวอย่างทดสอบจะถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบที่มีกำลังสูงสุด 5000 กิโลนิวตัน โดยการติดตั้งจะเป็นตามรูปที่ 2.2 สเตรนเกจ 8 ตัวจะถูกติดตั้งไว้ที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ และอีก 8 ตัวจะถูกติดตั้งไว้ที่ผิวด้านนอกของท่อเหล็กบริเวณกึ่งกลางของความยาวเพื่อวัดการเสียรูปและการขยายตัวทางด้านข้างของผนังท่อเหล็ก วิธีการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือวิธีแรกจะเพิ่มน้ำหนักอัดตามแนวแกนแบบคงที่ (monotonic loading) และในวิธีที่สองจะให้น้ำหนักแบบกระทำซ้ำ (cyclic loading) ตามแนวแกน การเพิ่มน้ำหนักจะเพิ่มในอัตราการเพิ่มที่ต่ำเพื่อให้สามารถสังเกตการโก่งเดาะเฉพาะที่ได้ การทดสอบจะสิ้นสุดเมื่อเกิดการเสียรูปจนถึงค่าที่กำหนดหรือเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่

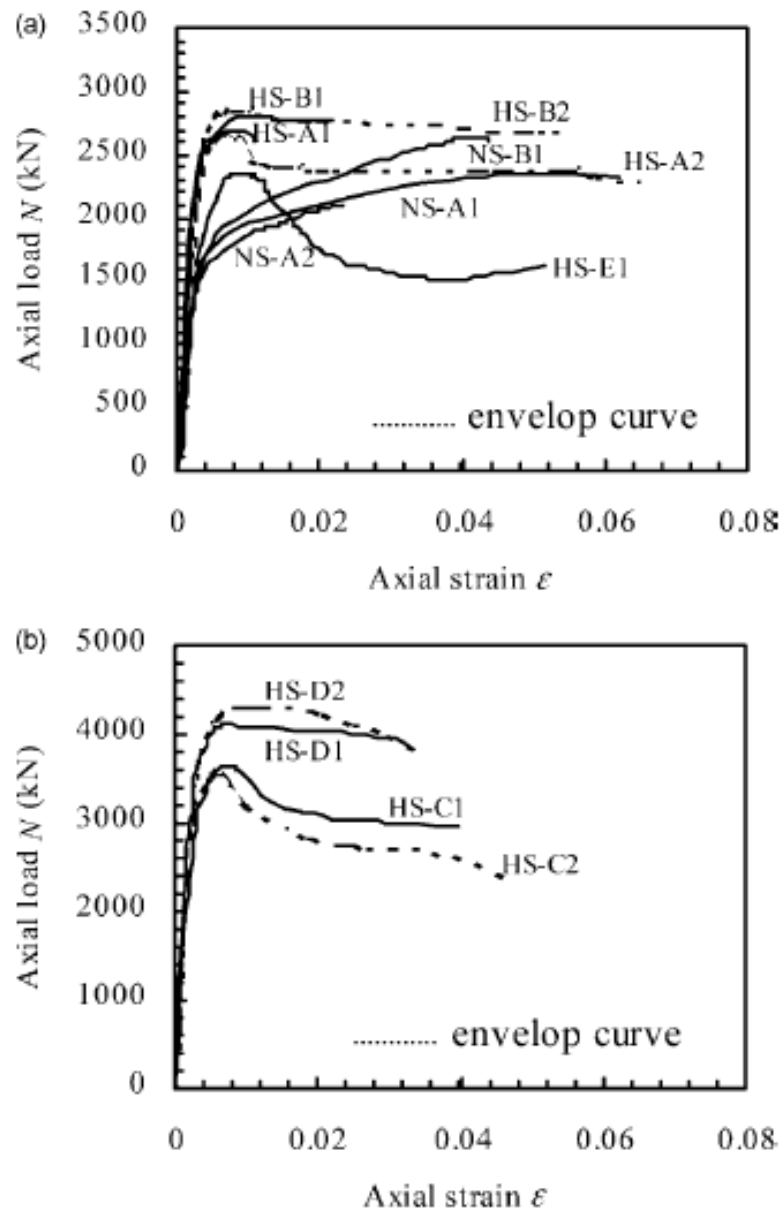


รูป 2.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบของ Wang และคณะ (2004)

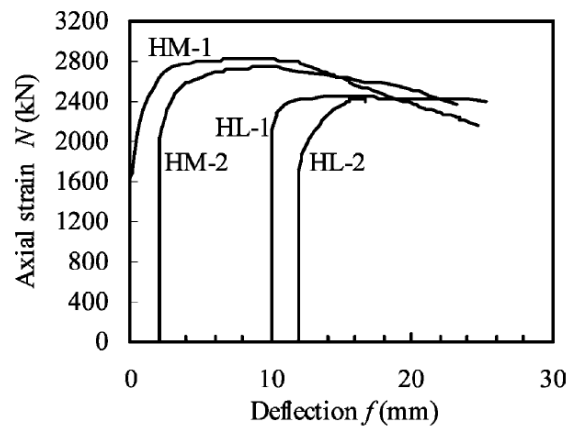
รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบการวิบัติ (failure mode) และผลการทดสอบคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดตามแนวแกนดังรูปที่ 2.4 โดยสรุปได้ว่าโดยปกติความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดจะแปรผันตรงต่อกันจนกระทั่งน้ำหนักถูกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 60 ของน้ำหนักประลัยสำหรับคอนกรีตธรรมดาและร้อยละ 70 ของน้ำหนักประลัยสำหรับคอนกรีตกำลังสูง เมื่อเกินจุดนี้ท่อเหล็กจะเริ่มครากและความสัมพันธ์ของแรงกระทำกับความเครียดจะไม่แปรผันตรงต่อกันเนื่องจากคอนกรีตด้านในจะถูกโอบรัดจากท่อเหล็กด้านนอก รูปที่ 2.5 แสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักตามแนวแกนกับระยะการโก่งตัวทางข้างที่กึ่งกลางเสาสำหรับเสายาว ($L/D > 2.8$) โดยการโก่งตัวจะไม่เกิดขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักตามแนวแกนถึง $0.6 - 0.7$ เท่าของน้ำหนักประลัย การโก่งตัวด้านข้างเกิดจากโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นจากแรงตามแนวแกนจนถึงระยะการโก่งทางด้านข้างของโครงสร้างซึ่งเรียกว่าโมเมนต์ลำดับที่สอง (secondary moment) และจะทำให้เสามีโอกาสวิบัติจากการดัดมากกว่าการอัด



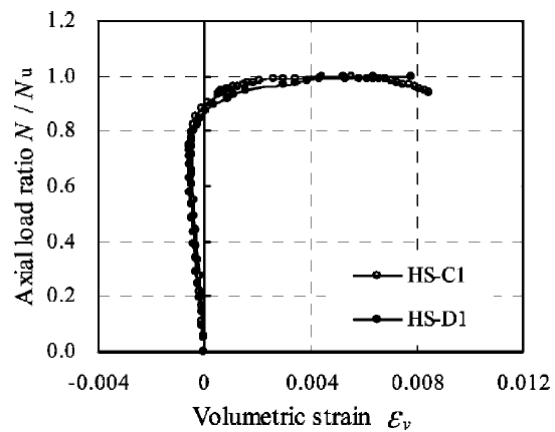
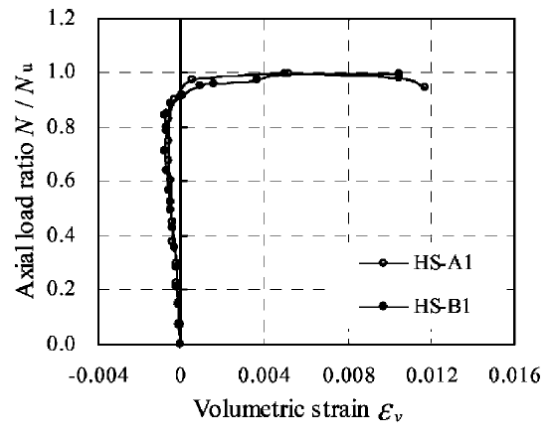
รูป 2.3 รูปแบบการวิบัติ (Wang และคณะ, 2004)



รูป 2.4 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเครียด (Wang และคณะ, 2004)



รูป 2.5 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดตามแนวแกนและระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางของเสายาว (Wang และคณะ, 2004)

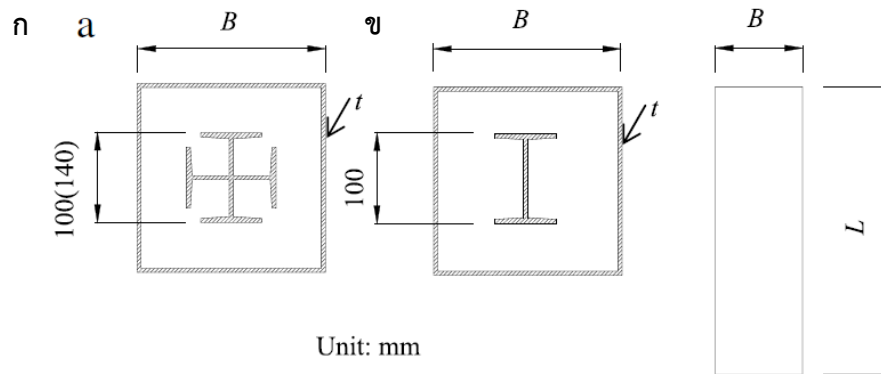


รูป 2.6 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนักประลัยและปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ (Wang และคณะ, 2004)

รูปที่ 2.6 พบว่าปริมาตรของตัวอย่างทดสอบจะลดลงเมื่อน้ำหนักตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจนอัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนักประลัยมีค่าเท่ากับ 0.7 และเมื่ออัตราส่วนน้ำหนักต่อน้ำหนักประลัยมีค่ามากกว่า 0.7 ปริมาตรของตัวอย่างทดสอบจะมากขึ้นตามน้ำหนักที่มากขึ้น

จากการศึกษาผลกระทบจาก 4 ตัวแปร ได้แก่ กำลังของคอนกรีต ดัชนีการโอบรัด (confinement index) ดัชนีโครงสร้างเหล็ก (structural steel index) และผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์เบื้องต้น (initial imperfection) พบว่าเมื่อกำลังของคอนกรีตเพิ่มขึ้น กำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจะเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวจะลดลงในขณะที่ดัชนีการโอบรัดเมื่อเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการโอบรัดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเหนียวและกำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความเหนียวและกำลังของเสาจะเพิ่มขึ้นเมื่อดัชนีโครงสร้างเหล็กเพิ่มขึ้น สำหรับผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์เบื้องต้นของเสาสามารถเทียบได้จากอัตราส่วนความชะลูด (L/D) ของเสา โดยผลกระทบจากความไม่สมบูรณ์เบื้องต้นต่อเสาวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความชะลูดเพิ่มขึ้น

จากนั้น Wang และคณะ (2010) [6] ได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาต่อเหล็กรูปสี่เหลี่ยมเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงอัดตามแนวแกน ตัวอย่างการทดสอบมีตัวแปรศึกษาดังนี้ คือ กำลังของคอนกรีต ($f'_c = 48.4$ เมกะปาสคาล และ 70.8 เมกะปาสคาล) อัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของท่อเหล็ก ($B/t = 35$ และ 43) อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของเสา ($L/B = 3, 6, 9$ และ 12) อัตราส่วนของเหล็กรูปพรรณ ($\rho_{s,s} = 0\%$ ถึง 12.3%) โดยคำนวณได้จากอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด หน้าตัดของเสาตัวอย่างแสดงไว้ดังรูปที่ 2.7 และคุณสมบัติของเสาแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.6 แสดงรายละเอียดส่วนผสมของคอนกรีต



รูป 2.7 ตัวอย่างการทดสอบ (ก) เสาคตัวอย่างหน้าตัดเหลี่ยมรูปพรรณรูปกากบาท
(ข) เสาคตัวอย่างหน้าตัดเหลี่ยมรูปพรรณรูปตัวไอ (Wang และคณะ, 2010)

ตาราง 2.5 คุณสมบัติและผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบของ Wang และคณะ (2010)

Specimen	$B \times t \times L_0$ (mm)	L/B	f_c (MPa)	A_c (mm ²)	f_{yt} (MPa)	A_t (mm ²)	f_{ys} (MPa)	A_s (mm ²)	N_u^{exp} (kN)	N_u^{nom} (kN)	$\frac{N_u^{exp}}{N_u^{nom}}$
S5L10V	195 × 5.5 × 600	3	48.4	30990	288	4169	338	2866	4035	3669	1.10
S5L10	195 × 5.5 × 600	3	48.4	30990	288	4169	338	2866	4050	3669	1.10
S5H10V	195 × 5.5 × 600	3	70.8	30990	288	4169	338	2866	4880	4363	1.12
S5H10	195 × 5.5 × 600	3	70.8	30990	288	4169	338	2866	4880	4363	1.12
S4L10	195 × 4.5 × 600	3	48.4	31730	289	3429	338	2866	3930	3495	1.12
S4H10	195 × 4.5 × 600	3	70.8	31730	289	3429	338	2866	4750	4206	1.13
S4L10I	195 × 4.5 × 600	3	48.4	33163	289	3429	338	1433	3410	3080	1.11
S4H14	195 × 4.5 × 600	3	70.8	30726	289	3429	327	4300	4710	4572	1.03
S5L10I	195 × 5.5 × 600	3	48.4	32423	288	4169	338	1433	3620	3254	1.11
S5L10C	195 × 5.5 × 600	3	48.4	30990	288	4169	338	2866	3860	3669	1.05
S5H10C	195 × 5.5 × 600	3	70.8	30990	288	4169	338	2866	4980	4363	1.14
S4L	195 × 4.5 × 600	3	48.4	34596	289	3429	-	0	2985	2665	1.12
S4H	195 × 4.5 × 600	3	70.8	34596	289	3429	-	0	3900	3440	1.13
L4L10-6	195 × 4.5 × 1200	6	48.4	31730	289	3429	338	2866	3765	3495	1.08
L4L10-9	195 × 4.5 × 1800	9	48.4	31730	289	3429	338	2866	3720	3495	1.06
L4L10-12	195 × 4.5 × 2400	12	48.4	31730	289	3429	338	2866	3410	3495	0.98
L5L10I-9	195 × 5.5 × 1800	9	48.4	32423	288	4169	338	1433	3520	3254	1.08
L5L10I-12	195 × 5.5 × 2400	12	48.4	32423	288	4169	338	1433	3245	3254	1.00

^a—the axial load did not fall to 85% of the maximum load when the test stopped.

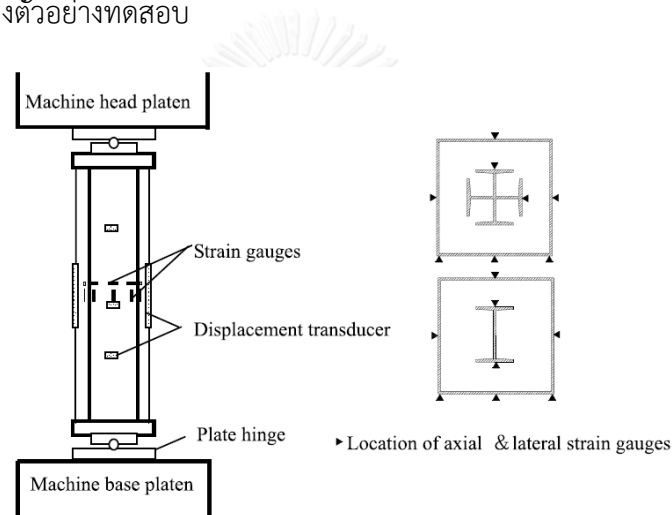
- เมื่อ B คือ ความกว้างของหน้าตัดท่อนเหล็ก
- t คือ ความหนาของท่อนเหล็ก
- L คือ ความยาวของเสาคตัวอย่างทดสอบ
- f_c' คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต
- f_{yt} คือ กำลังครากของท่อนเหล็ก
- f_{ys} คือ กำลังครากของเหล็กรูปพรรณ
- A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต
- A_t คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อนเหล็ก
- A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กรูปพรรณภายใน
- N_u^{exp} คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาจากการทดสอบ
- N_u^{nom} คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาจากการคำนวณ

ตาราง 2.6 ส่วนผสมคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบ (Wang และคณะ 2010)

Mixture proportions (kg/m ³)						$f_{cu,10}$ (MPa)		E_c (MPa)
Cement	Fly ash	Water	Sand	Coarse aggregate	Superplasticizer	28d	81d*	
420	140	185	730	925	11.2	63.7	73.2	38 590
467	155	168	710	900	12.4	86.4	103.8	43 030

* 81d—the day of test.

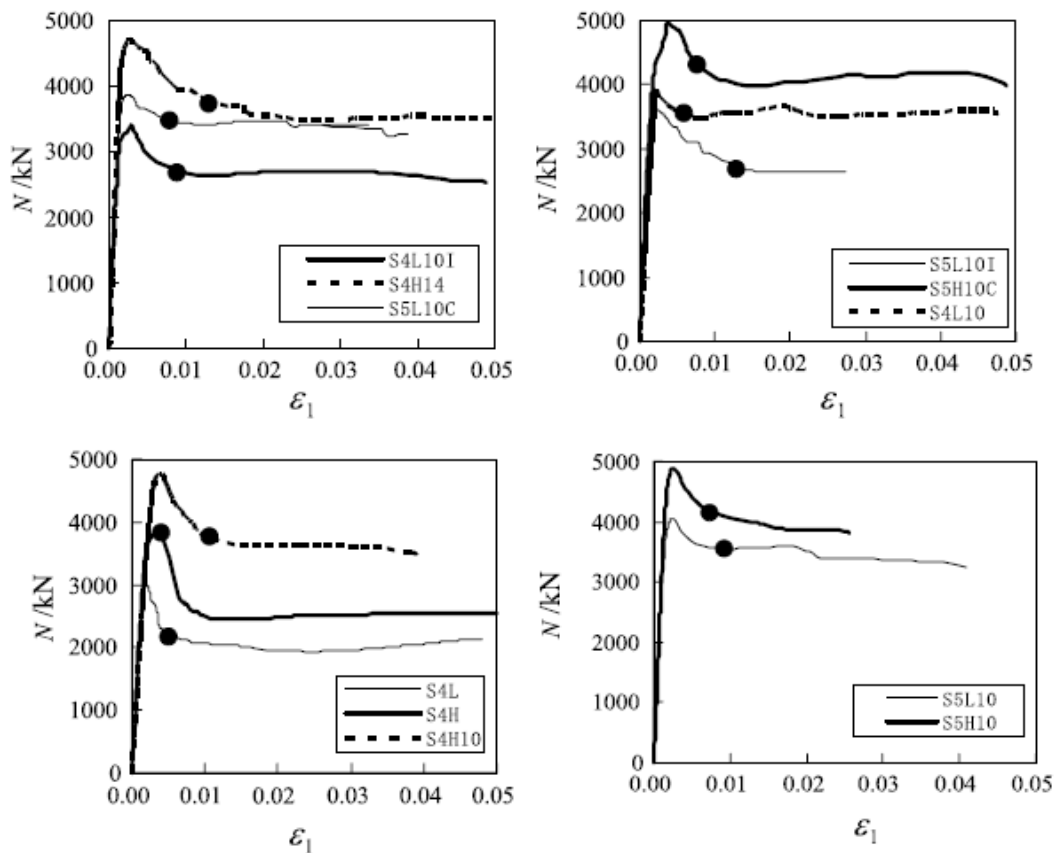
ในการทดสอบจะใช้เครื่องทดสอบขนาด 5000 กิโลนิวตัน ซึ่งการติดตั้งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.8 อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ 2 ตัวที่จะถูกติดตั้งที่ด้านบนและด้านล่างของเสาเพื่อวัดการเสียรูปตามแนวแกน และอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ 3 ตัวจะถูกติดตั้งไว้ที่ $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ และ $\frac{3}{4}$ ของความยาวของเสาเพื่อวัดการโก่งตัวด้านข้างของเสาตัวอย่างที่เป็นเสายาว เครื่องบันทึกจะบันทึกแรงกระทำ การเสียรูป และความเครียดของตัวอย่างทดสอบ



รูป 2.8 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบของ Wang และคณะ (2010)

ในการทดสอบจะให้แรงกระทำในอัตราที่ต่ำเพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตพฤติกรรม การโก่งเดาะเฉพาะที่ได้ การทดสอบเสาสั้นจะสิ้นสุดเมื่อความเครียดตามแนวแกนมีค่าถึง 0.05 หรือ รอยเชื่อมเกิดการวิบัติ สำหรับการทดสอบเสายาว ($L/B = 12$) จะสิ้นสุดเมื่อความสามารถในการ รับแรงลดลงและการโก่งตัวด้านข้างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและรูปแบบการ วิบัติสำหรับเสาสั้น ($L/B = 3$) ในทุกตัวอย่างทดสอบท่อเหล็กด้านนอกจะเกิดการย่น (Crinkled) เมื่อการทดสอบสิ้นสุดลง ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักทดสอบและความเครียดตามแนวแกน ($N - \epsilon_1$) สำหรับ 11 ตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.9

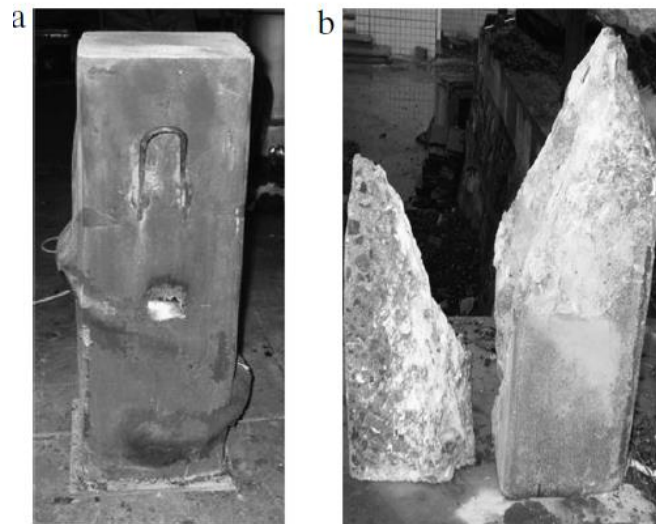


รูป 2.9 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างเสาสั้น (Wang และคณะ 2010)

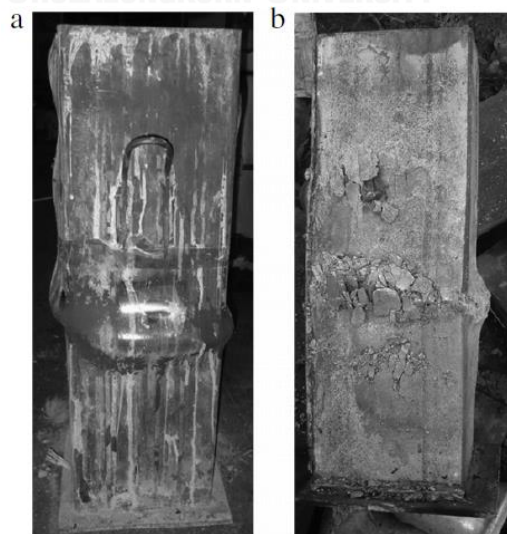
จุดสีดำในเส้นโค้งแสดงถึงตำแหน่งที่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็ก และจากกราฟพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดตามแนวแกนจะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 80 ของน้ำหนักประลัย เมื่อน้ำหนักเกินจากจุดนี้ท่อเหล็กจะเริ่มครากและเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเครียดจะเริ่มเบี่ยงเบนจากเส้นตรงในช่วงแรก หลังจากนั้นน้ำหนักเพิ่มขึ้นจนถึงน้ำหนักประลัย ความสามารถในการรับน้ำหนักตามแนวแกนจะลดลง พฤติกรรมหลังจากการรับแรงประลัยจะขึ้นอยู่กับ f_c , B/t , และ ρ_{ss}

ต่อจากนี้จะเป็นการยกตัวอย่างพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ S4H (ไม่มีเหล็กรูปพรรณด้านใน) และตัวอย่างทดสอบ S4H10 (มีเหล็กรูปพรรณด้านใน) สำหรับ S4H เมื่อน้ำหนักเพิ่มจนถึงน้ำหนักประลัย ความสามารถในการรับแรงจะลดลงและท่อเหล็กเกิดการโก่งเดาะขึ้น 2 ที่ในบริเวณความสูงที่ต่างกันและด้านตรงข้ามกัน สามารถสังเกตระนาบการเลื่อนไถลเนื่องจากแรงเฉือน (shear-sliding plane) ระหว่างบริเวณโก่งเดาะทั้งสองบริเวณได้ดังรูปที่ 2.10 จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อ

อัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความหนาของท่อเหล็กมากเกินไป (เช่นในตัวอย่างนี้ $B/t = 43$) ท่อเหล็กจะไม่สามารถป้องกันการเกิดระนาบการเลื่อนไถลเนื่องจากแรงเฉือนในคอนกรีตได้ สำหรับตัวอย่าง S4H10 กำลังของเสาจะลดลงอย่างราบเรียบและช้ากว่าตัวอย่าง S4H เมื่อการทดสอบสิ้นสุดจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ขึ้นจำนวนมากตลอดความยาวของเสาดังรูปที่ 2.11 และจะไม่ระนาบการเลื่อนไถลเนื่องจากแรงเฉือนขึ้น เมื่อถอดท่อเหล็กออกพบว่าคอนกรีตในบริเวณที่ท่อเหล็กเกิดการโก่งเดาะจะถูกบดอัดแต่เสายังคงสามารถตั้งตรงอยู่ได้ จึงสามารถสรุปได้ว่าเหล็กรูปพรรณด้านในสามารถชะลอการเกิดรอยแตกร้าวจากแรงเฉือนได้ ซึ่งจะทำให้รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนไป



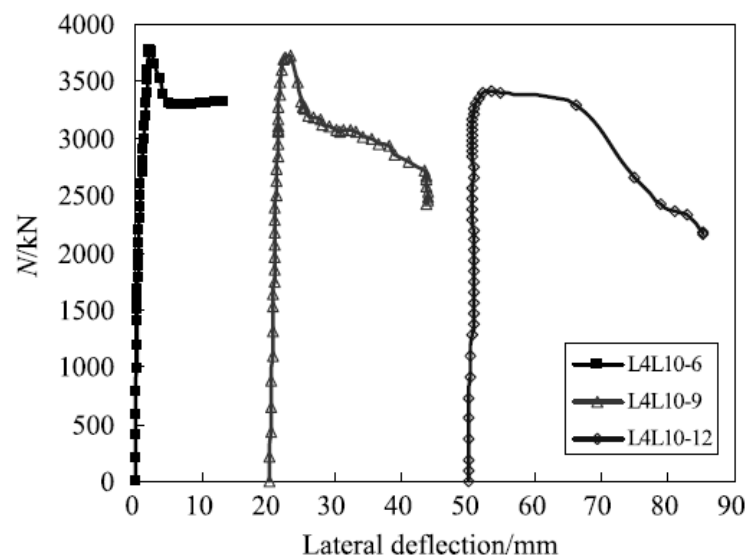
รูป 2.10 รูปแบบการวิบัติของเสาดตัวอย่าง S4H (Wang และคณะ 2010)



รูป 2.11 รูปแบบการวิบัติของเสาดตัวอย่าง S4H10 (Wang และคณะ 2010)

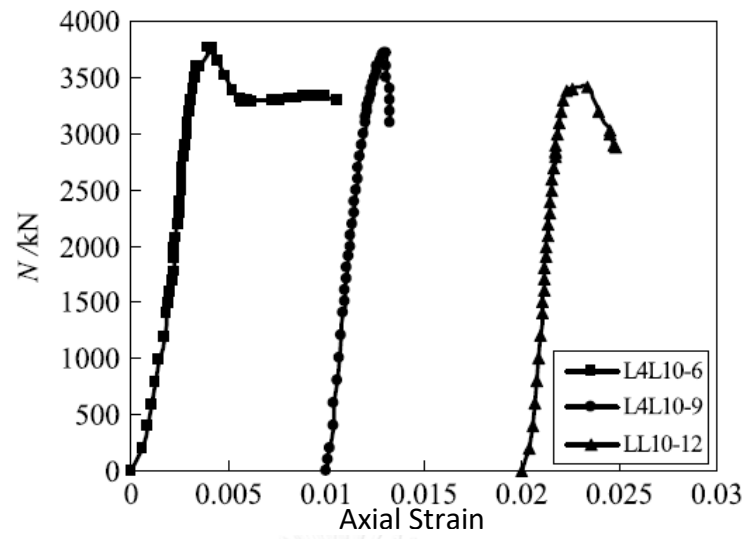
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักตามแนวแกนและระยะการโก่งด้านข้างของเสา ยาว เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มจนถึงน้ำหนักประลัยจะเกิดการโก่งด้านข้างขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ลำดับที่ สอง (secondary moments) ทำให้ความสามารถในการรับแรงของเสาวัสดุผสมลดลงอย่างรวดเร็ว

รูปที่ 2.13 แสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดตามแนวแกน (ϵ) สำหรับตัวอย่าง L4L10-6 ($L/B = 6$) และตัวอย่าง L4L10-9 ($L/B = 9$) เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ จะสามารถสังเกตการโก่งเดาะเฉพาะที่บริเวณผิวของท่อเหล็กได้ รูปแบบการวิบัติจะเหมือนกับการวิบัติ ของเสาสั้น ($L/B = 3$) ดังรูปที่ 2.14 แต่สำหรับตัวอย่าง L4L10-12 ($L/B = 12$) เมื่อแรงกระทำถูก เพิ่มจนถึงกำลังประลัยการโก่งทางด้านข้างจะเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และในท้ายที่สุดเสาจะวิบัติจาก การโก่งตัวด้านข้าง รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง L4L10-12 แสดงไว้ดังรูปที่ 2.15 และการเกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่จะสังเกตเห็นได้เพียงบริเวณที่ถูกแรงอัดสูงเท่านั้น



รูป 2.12 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างเสา ยาว

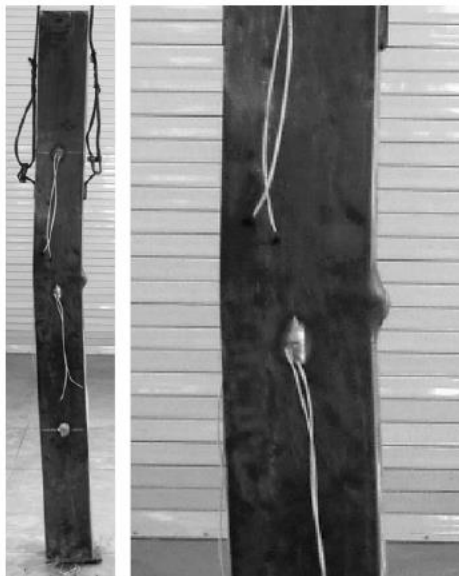
(Wang และคณะ 2010)



รูป 2.13 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างเสายาว (Wang และคณะ 2010)

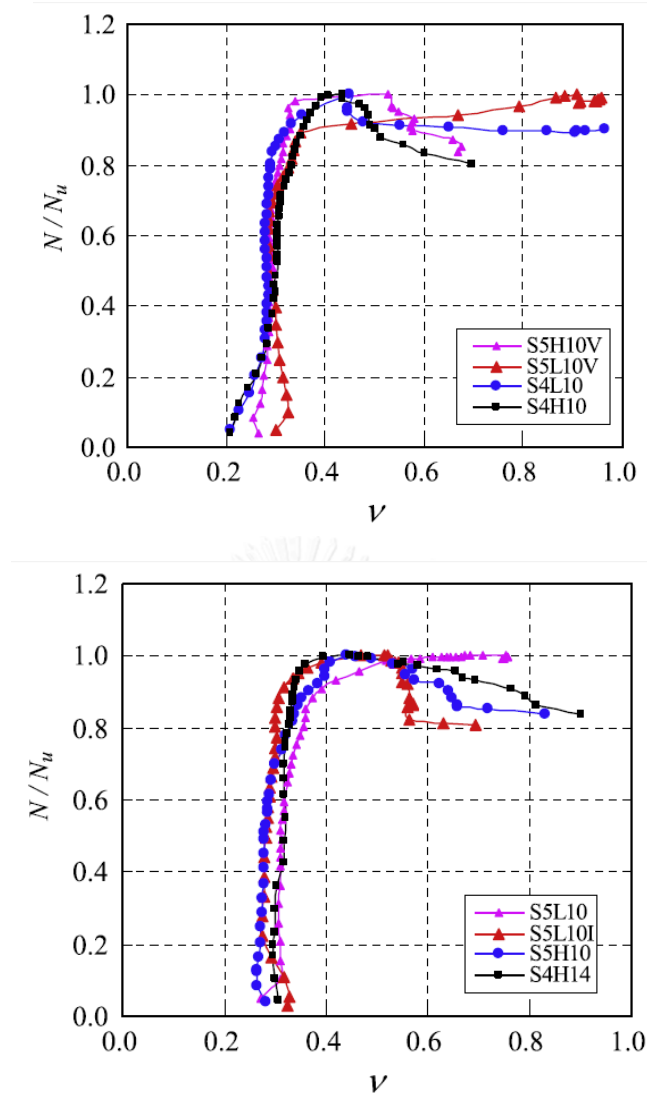


รูป 2.14 รูปแบบการวิบัติของตัวอย่าง L4L10-6 (Wang และคณะ 2010)



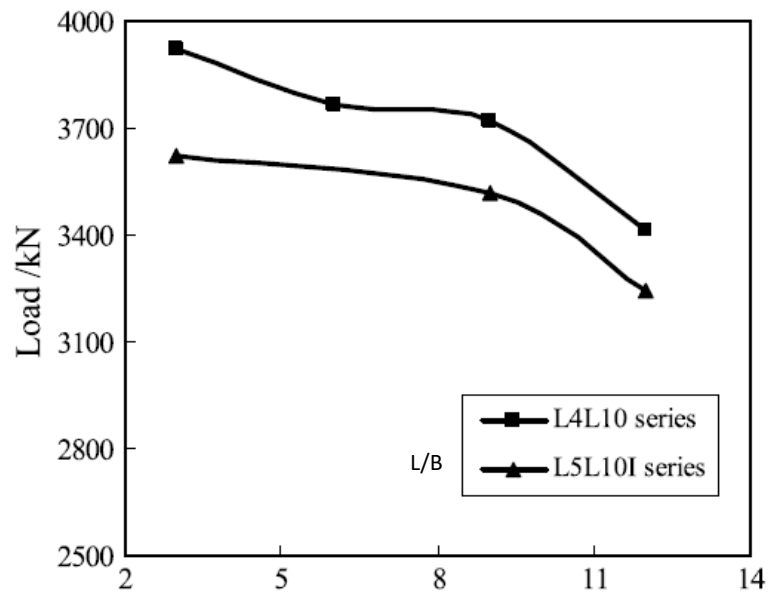
รูป 2.15 รูปแบบการวัดของตัวอย่าง L4L10-12 (Wang และคณะ 2010)

รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและอัตราส่วนปัวซองในการศึกษาของ Wang และคณะ 2010 [6] โดยอัตราส่วนปัวซองคืออัตราส่วนของค่าความเครียดทางด้านข้างต่อความเครียดทางด้านยาว ซึ่งจะเป็นค่าเฉลี่ยจากสเตรนเกจ (strain gauge) ที่ถูกติดตั้งบริเวณกึ่งกลางของความยาวเสา เมื่ออัตราส่วนแรงอัดตามแนวแกนน้อยกว่า 0.8 อัตราส่วนปัวซองจะค่อนข้างคงที่ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปัวซองเกิดเนื่องจากท่อเหล็กเริ่มสร้างพฤติกรรมการโอบรัดแก่คอนกรีต และจากการทดสอบยังสรุปได้ว่าท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณจะถึงจุดครากทั้งคู่เมื่อแรงกระทำถูกเพิ่มจนถึงกำลังประลัย พฤติกรรมการโอบรัดของคอนกรีตที่เกิดจากท่อเหล็กจะช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีตรวมถึงกำลังรวมของเสาด้วย



รูป 2.16 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังประลัย และอัตราส่วนปีวของ (Wang และคณะ 2010)

ผลกระทบจากอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (L/B) ของเสาตัวอย่างที่เป็นเสายาว (L/B=12) การวิบัติของเสาจะเกิดจากการที่เสาเริ่มเสียเสถียรภาพและพฤติกรรมการโอบรัดไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและอัตราส่วนความชะลุด (L/B) ของเสาถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งอาจสามารถสรุปได้ว่าถ้าต้องการให้เกิดพฤติกรรมการโอบรัดแก่คอนกรีตในเสาเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำของเสาเพิ่มขึ้น จำเป็นต้องกำหนดค่าอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (L/B) ของเสาไม่ให้มีค่ามากเกินไป



รูป 2.17 เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและผลกระทบบจากอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Wang และคณะ 2010)

การทดสอบพบว่า f_c , B/t และ ρ_{ss} มีผลต่อความเหนียว (Ductility) ของเสาตัวอย่างทดสอบ โดย ρ_{ss} มีผลอย่างมากในการเพิ่มความเหนียวของเสา

การเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเสาสำหรับทุกตัวอย่างจะเกิดเมื่อท่อเหล็กถึงจุดครากแล้ว และพบว่าคอนกรีตด้านในจะช่วยเพิ่มกำลังในการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็ก นอกจากนั้นเหล็กรูปพรรณภายในยังช่วยชะลอการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็กด้านนอกด้วย เนื่องจากเหล็กรูปพรรณภายในจะช่วยสร้างสภาพโอบรัดให้แก่คอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีกำลังเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบการวิบัติของเสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีตที่มีและไม่มีเหล็กรูปพรรณจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากเหล็กรูปพรรณด้านในจะมีผลต่อการต้านการเกิดรอยแตกจากการเลื่อนที่เนื่องจากแรงเฉือน (shear sliding crack) ของคอนกรีต จากการวัดความเครียดทางด้านข้างของท่อเหล็กพบว่าพฤติกรรมการณ์โอบรัดของท่อเหล็กที่มีต่อคอนกรีตจะไม่เกิดขึ้นจนกระทั่งแรงกระทำตามแนวแกนเพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 80 ของกำลังประลัย ท่อเหล็กจะครากเมื่อแรงกระทำมีค่าถึงกำลังประลัย เสาที่มีค่า L/B มากจะไม่สามารถเกิดพฤติกรรมการณ์โอบรัดได้ และท่อเหล็กด้านนอกจะเพิ่มกำลังและความเหนียวให้แก่คอนกรีตภายใน ในขณะที่เหล็กรูปพรรณด้านในจะมีผลต่อพฤติกรรมหลังจากการรับกำลังประลัยของเสาวัสดุผสม

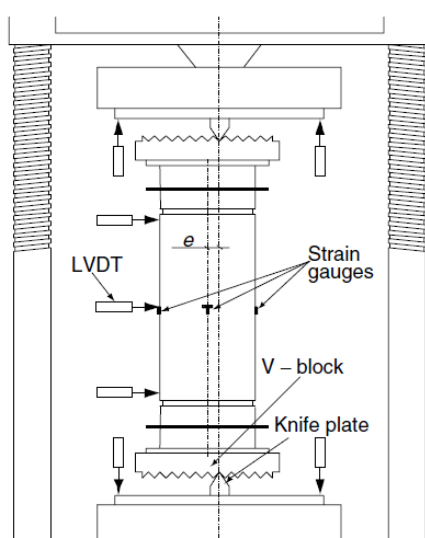
ในปี ค.ศ.2015 Liu และคณะ [7] ได้ทำการทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์และศึกษาแบบจำลองไฟเบอร์เอลิเมนต์ ซึ่งเสาที่ศึกษาทั้งหมดเป็น เสาสั้นมีคุณสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 2.7

ตาราง 2.7 คุณสมบัติของเสาตัวอย่างทดสอบ

Group ⁽¹⁾	Specimen label label ⁽²⁾	H ⁽³⁾ (mm)	e ⁽³⁾ (mm)	Steel tube ⁽³⁾	Shaped steel ⁽³⁾	Concrete ⁽³⁾	N _u ⁽³⁾ (kN)
C-200-0	c-200-0-n	600	0	D/t = 200/1.5 mm = 133.3 mm	HW100 $\alpha_s = 7.6\%$		3421
	c-200-0-s1						3411
	c-200-0-s2						3423
C-200-25	c-200-25-n	600	25	$\alpha_t = 3.2\%$ $f_{yt} = 324$ MPa	$f_{ys} = 285$ MPa		2084
	c-200-25-s1						2166
	c-200-25-s2						
						$f_{cu} = 81$ MPa $f_{co} = 62$ MPa	2090 4408
	c-240-0-n	720	0	D/t = 240/2.0 mm = 120.0	HW100 $\alpha_s = 5.1\%$		4400
	c-240-0-s1						4275
	c-240-0-s2						
	c-240-25-n	720	25	$\alpha_t = 3.5\%$ $f_{yt} = 290$ MPa	$f_{ys} = 285$ MPa		3040
	c-240-25-s1						2736
	c-240-25-s2						2946

- เมื่อ H คือ ความสูงของเสาตัวอย่าง
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเหล็ก
- t คือ ความหนาของท่อเหล็ก
- e คือ ระยะเยื้องศูนย์
- f_{ys} คือ กำลังครากของเหล็กรูปพรรณ
- f_{yt} คือ กำลังครากของท่อเหล็ก
- α_s คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อพื้นที่หน้าตัดเสา
- α_t คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดท่อเหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดเสา
- f_{cu} คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์
- f_{co} คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตทรงกระบอก

รูปที่ 2.18 แสดงการติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบ โดยในการวัดการเคลื่อนที่ในด้านข้างจะใช้อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ด้านข้าง (Linear variable displacement transducers, LVDTs) จำนวน 3 ตัว โดย 1 ตัวจะถูกติดตั้งอยู่ที่ตรงกึ่งกลางความสูงของเสา และอีก 2 ตัวจะอยู่ระหว่างช่องว่างของท่อเหล็กด้านบนและด้านล่าง อุปกรณ์การวัดการเคลื่อนที่ด้านข้างอีก 4 ตัวจะถูกติดตั้งไว้ในแนวตั้งที่บริเวณด้านบนและด้านล่างเครื่องให้แรงกระทำเพื่อวัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง สเตรนเกจที่ติดเพื่อวัดในแนวระดับและแนวตั้ง 4 คู่จะถูกติดตั้งไว้รอบบริเวณกึ่งกลางความสูงของท่อภายนอกเพื่อศึกษาความเครียดที่เกิดภายในท่อ



รูป 2.18 การติดตั้งอุปกรณ์ในตัวอย่างทดสอบ

ผลการทดสอบพบว่าเสาตัวอย่างในกลุ่ม c-200-25 และ c-200-0 ไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ในบริเวณท่อเหล็กด้านนอก คอนกรีตด้านที่รับแรงอัดเกิดการแตกอัดและด้านที่รับแรงดึงเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด เสาตัวอย่างที่รับแรงตามแนวแกนเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน แต่เมื่อเพิ่มระยะเยื้องศูนย์รูปแบบการวิบัติของเสาจะเปลี่ยนเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงดัดแทน โดยรูปที่ 2.19 แสดงรูปแบบการวิบัติของเสาตัวอย่าง

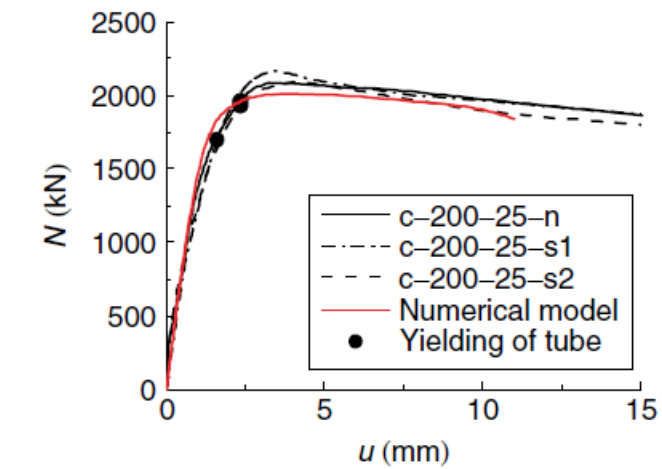


รูป 2.19 รูปแบบการวิบัติของเสาตัวอย่างจากการทดสอบ

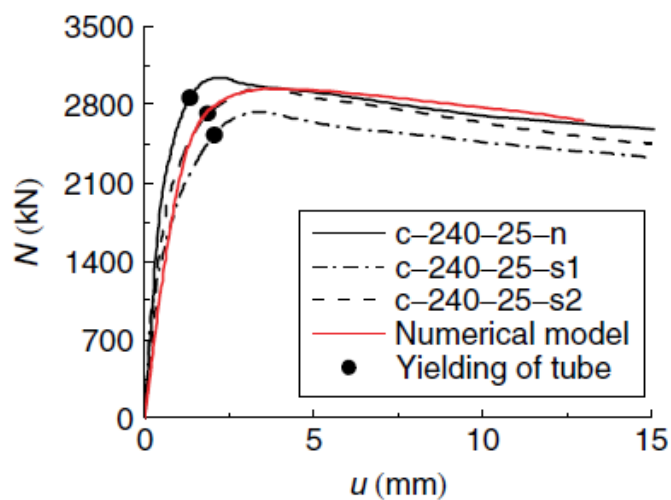
รูปที่ 2.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและระยะการเลื่อนที่ด้านข้างของเสาตัวอย่างกลุ่ม c-200-25 และ c-240-25 ซึ่งพบว่าท่อเหล็กจะเกิดการครากเมื่อแรงกระทำถึงประมาณร้อยละ 90 ของกำลังสูงสุดที่เสารับได้ และการหาจุดครากของท่อเหล็กสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$\sigma_h^2 + \sigma_v^2 - \sigma_h \sigma_v = f_y^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ σ_v และ σ_h ความเค้นของท่อเหล็กตามแนวตั้งและแนวราบตามลำดับ



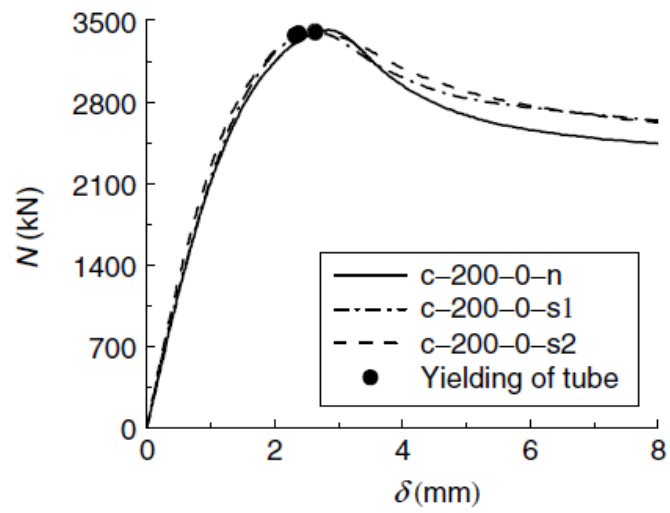
(a) C-200-25



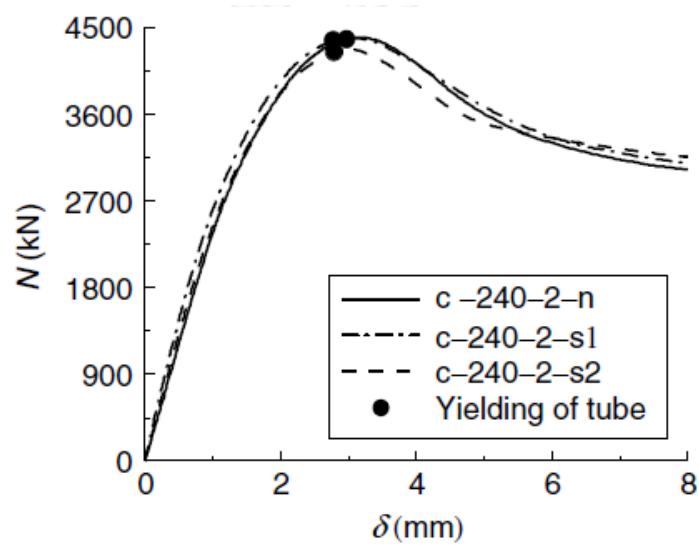
(b) C-240-25

รูป 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของเสา
ตัวอย่างทดสอบ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและการเคลื่อนที่การแนวแกนสามารถแสดงได้
ดังรูปที่ 2.21 โดยต่อเหล็กจะครากขณะรับแรงกระทำสูงสุด การเคลื่อนที่ด้านข้างแสดงได้ดังรูปที่
2.22 โดยเครื่องหมายบวก (+) และเครื่องหมายลบ (-) แสดงถึงเวลาก่อนและหลังขณะเสาตัวอย่าง
รับแรงกระทำสูงสุด N_u คือกำลังสูงสุดที่เสาตัวอย่างรับได้ และ h คือระยะด้านข้างที่วัดได้

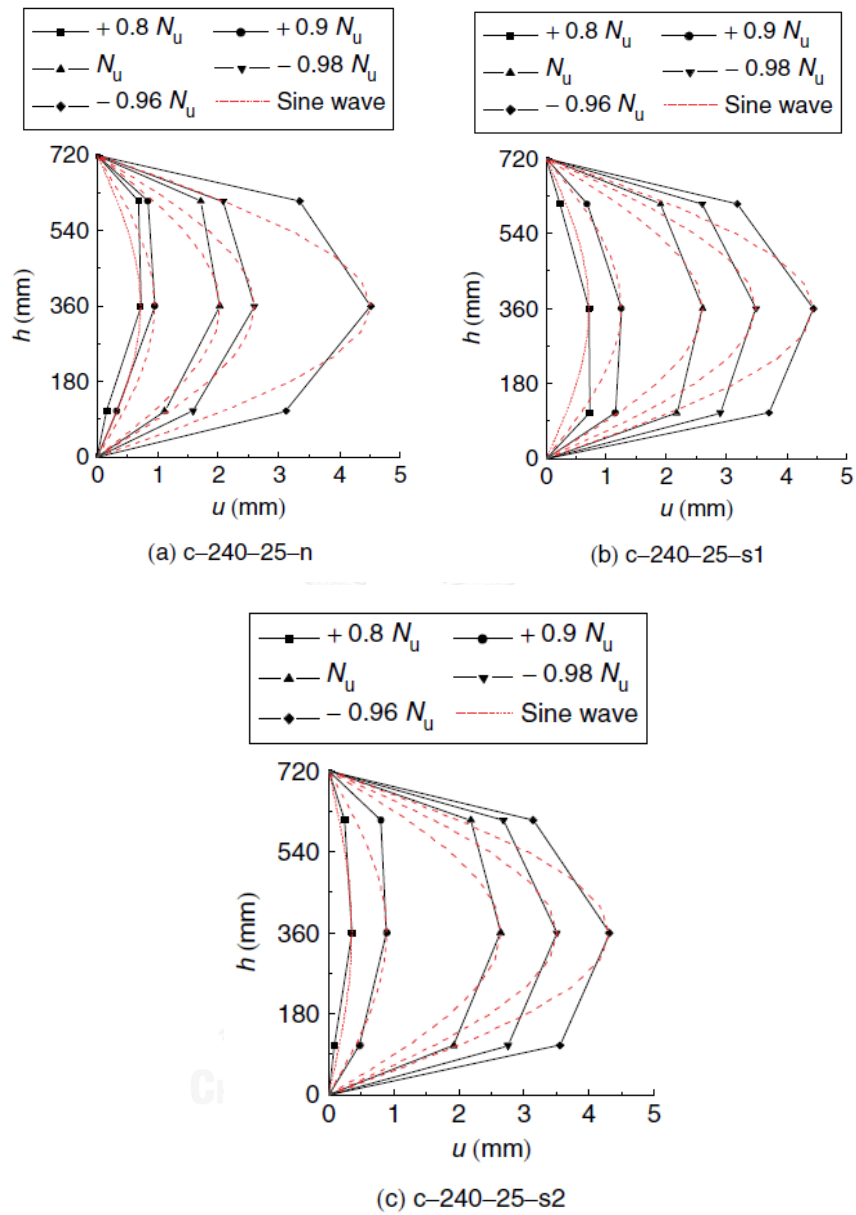


(a) C-200-0



(b) C-240-0

รูป 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและระยะการเลื่อนที่ตามแนวแกนของเสา
ตัวอย่างทดสอบ



รูป 2.22 การเสียรูปทางด้านข้างของเสาตัวอย่างทดสอบ

การวิเคราะห์โดยวิธีไฟเบอร์เอลิเมนต์ คุณสมบัติของท่อเหล็กและหน้าตัดเหล็กรูปพรรณจะ ถูกสมมติให้มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบอิลาสติก - พลาสติกโดยสมบูรณ์ (elastic-perfectly plastic stress-strain relationship) คอนกรีตที่ถูกโอบรัดใช้ความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เสนอโดย Mander และคณะ [8] และ Li และคณะ [9] ซึ่งเป็นไป ดังสมการที่ 2.2 ถึงสมการที่ 2.7

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c + \frac{(f_{co} - E_c \varepsilon_{co})}{\varepsilon_{co}^2} \varepsilon_c^2 & 0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} \\ f_{cc} + \frac{(f_{cc} - f_{co})}{(\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{co})} (\varepsilon_c - \varepsilon_{co})^2 & \varepsilon_{co} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cc} \\ f_{cc} + \beta \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} (\varepsilon_c - \varepsilon_{cc}) \geq 0.2 f_{cc} & \varepsilon_{cc} < \varepsilon_c \end{cases} \quad (2.2)$$

เมื่อ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

f_{co} คือ ความเค้นสูงสุดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

ε_{co} คือ ความเครียดขณะที่คอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดมีความเค้นสูงสุด

f_{cc} คือ ความเค้นสูงสุดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

ε_{cc} คือ ความเครียดขณะที่คอนกรีตที่ถูกโอบรัดมีความเค้นสูงสุด

β คือ ตัวประกอบการคูณเพื่อควบคุมความชันของกราฟ มีค่าเท่ากับ 0.01

$$E_c = 4730 \sqrt{f_{co}} \quad (2.3)$$

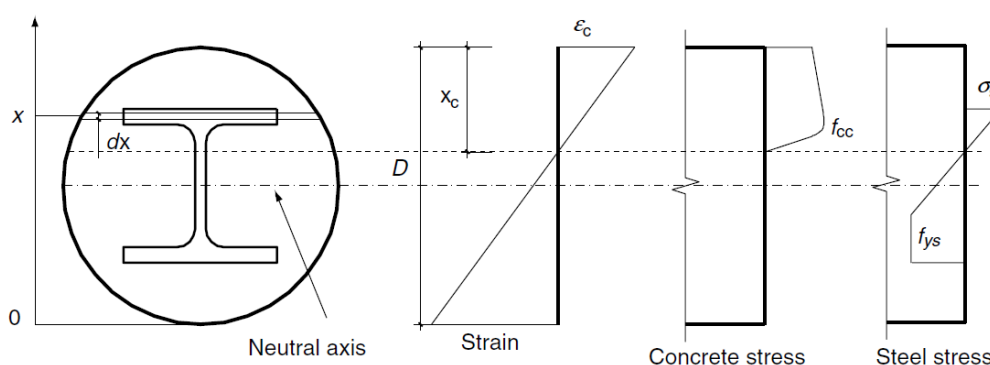
$$\varepsilon_{co} = \begin{cases} 0.002 & f_{co} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0.00078 f_{co}^{1/4} & f_{co} > 50 \text{ MPa} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$f_{cc} = \begin{cases} f_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_r}{f_{co}}} - 2 \frac{f_r}{f_{co}} \right) & f_{co} \leq 50 \\ f_{co} \left(-0.413 + 1.413 \sqrt{1 + 11.4 \frac{f_r}{f_{co}}} - 2 \frac{f_r}{f_{co}} \right) & f_{co} > 50 \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_{co}} - 1 \right) \right] \quad (2.6)$$

$$f_r = \frac{2t f_{ty}}{D - 2t} \quad (2.7)$$

ในการวิเคราะห์ไฟเบอร์เอลิเมนต์สมมติให้การเสียรูปของเสาเป็นรูปแบบเดียวกับครึ่งของคลื่นไซน์ (half-sine wave) โมเมนต์ดัดแปรผันตรงกับแรงกระทำตามแนวแกน จากนั้นคำนวณแรงภายในตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดที่กึ่งกลางความสูงของเสา ทำการคำนวณซ้ำจนกว่าจะเกิดสมดุลของแรงภายในและแรงภายนอก ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งของการเพิ่มแรงกระทำแสดงได้ดังรูปที่ 2.23 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ไฟเบอร์เอลิเมนต์ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21



รูป 2.23 ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก
รูปพรรณ

2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปี ค.ศ.2015 Jingming Cai และคณะ [1] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปวงกลมภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ABAQUS

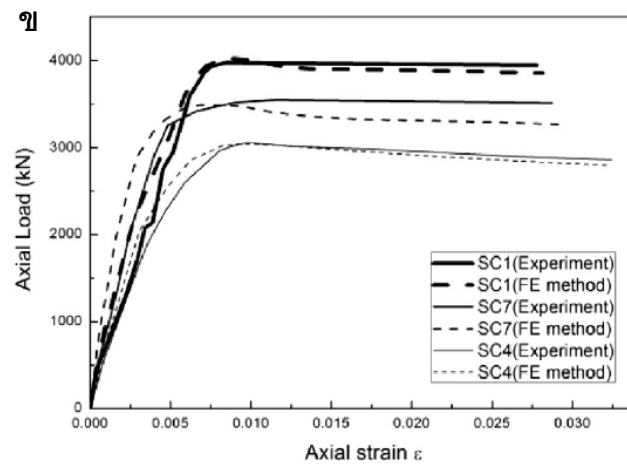
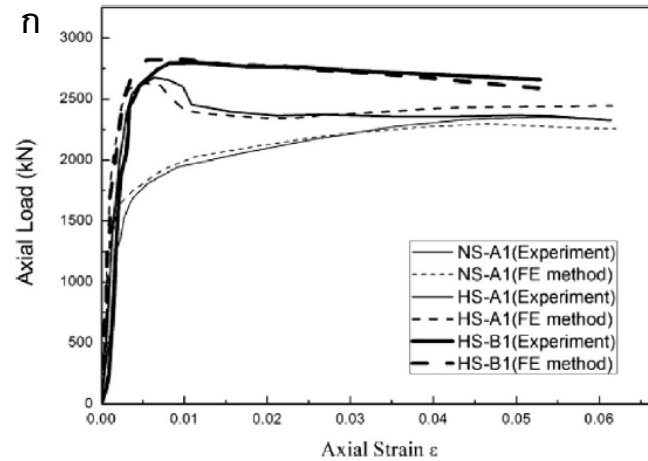
ที่มาของงานวิจัยนี้คือจากเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณมีคุณสมบัติพิเศษคือท่อเหล็กจะสร้างพฤติกรรมการโอบรัดให้กับคอนกรีตภายใน และไม่จำเป็นต้องใช้เหล็กเส้นในการก่อสร้างโดย Wang และคณะ (2004) [5] ได้ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับกำลังและความเหนียวของเสาเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ และพบว่าเสาท่อนเหล็กด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจะให้กำลังและความเหนียวที่สูงขึ้นมากเนื่องจากพฤติกรรมร่วมกันระหว่างท่อเหล็ก คอนกรีต และเหล็กรูปพรรณ Ding (2012) [10] วิเคราะห์เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและการเสียรูปของเสาท่อนเหล็กสันเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติและวิธีพลาสติกยืดหยุ่น (Elastic-Plastic) โดยผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งท่อเหล็กและ

เหล็กรูปพรรณจะสร้างพฤติกรรมโอบรัดให้แก่คอนกรีตด้านใน ซึ่งตาม Eurocode4 [11] จะไม่คิดพฤติกรรมการโอบรัดจากท่อเหล็ก โดยในงานวิจัยจะใช้โปรแกรม ABAQUS วิเคราะห์พฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงอัดตามแนวแกนเทียบกับผลการทดสอบของ Wang และคณะ (2004) [5] โดยพิจารณาตัวแปรดังนี้ คือ อัตราส่วนท่อเหล็ก (α_v) อัตราส่วนหน้าตัดเหล็ก (α_s) กำลังของคอนกรีต (f_c) กำลังของท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ (f_y^t, f_y^s)

การตรวจสอบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาวัสดุผสมเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ คุณสมบัติของวัสดุในการสร้างแบบจำลองจะกำหนดให้ท่อเหล็กและหน้าตัดเหล็กมีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิก อีลาสติก-พลาสติก (isotropic elastic-plastic) และแบ่งความความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็น 5 ช่วง คุณสมบัติของคอนกรีตถูกเสนอโดย Han และคณะ (2007) [12] พฤติกรรมแบบกำลังถดถอย (softening) ของคอนกรีตภายใต้แรงดึงถูกนำเสนอโดย Hillerborg และคณะ(1976) [13]

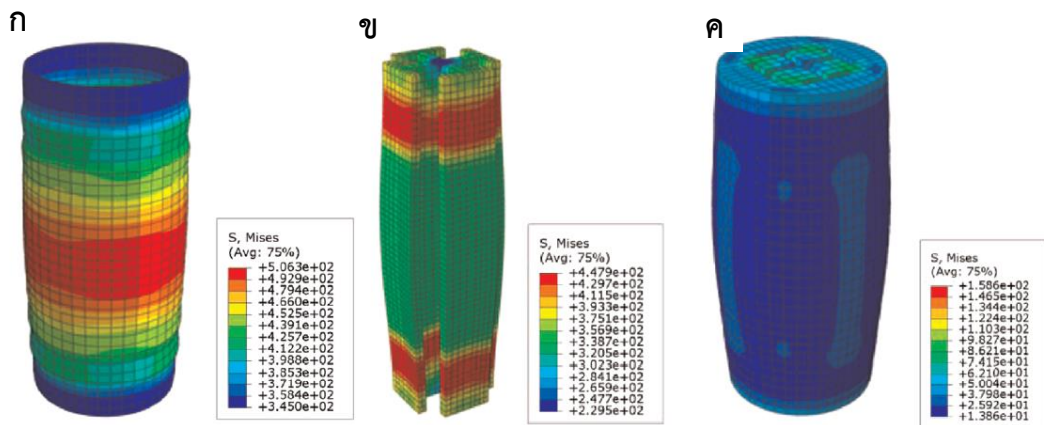
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบไปด้วย 5 องค์ประกอบ คือ ท่อเหล็กด้านนอก เหล็กรูปพรรณ คอนกรีต แผ่นเหล็กด้านบนและแผ่นเหล็กด้านล่าง แรงเสียดทานระหว่างคอนกรีตและท่อเหล็กด้านนอกใช้แบบจำลองแรงเสียดทานจำลองมอร์ – คูลอมบ์ (Mohr – Coulomb friction model) โดยถูกตั้งให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.25 และการลื่นไถลระหว่างคอนกรีตและเหล็กรูปพรรณภายในจะไม่ถูกพิจารณา ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาวัสดุผสม เอลิเมนต์ของท่อเหล็กจะพิจารณาเป็น 4-จุดเชื่อมต่อ (SR4) เอลิเมนต์ของเหล็กรูปพรรณและคอนกรีตพิจารณาเป็น 8-จุดเชื่อมต่อ (C3D8R)

การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Wang และคณะ (2004) [5] และ Xiao และคณะ (2009) [14] โดยผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งจากผลการทดสอบและการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างดี



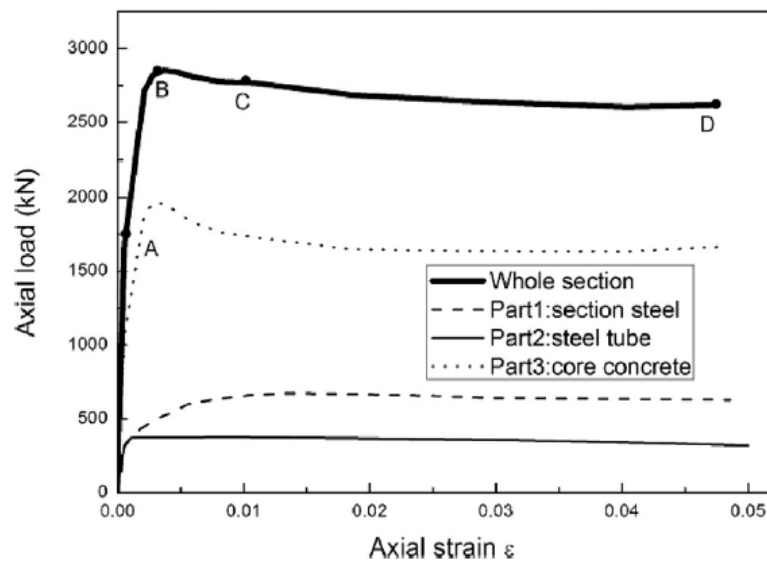
รูป 2.24 เส้นโค้งแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียดตาม
แนวแกนที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
(ก) ผลการทดสอบของ Wang และคณะ 2004 (ข) ผลการทดสอบของ Xiao และคณะ (2009)

พฤติกรรมเชิงกลของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงอัดตามแนวแกนจะมีรูปแบบการวิบัติของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณแสดงไว้ในรูปที่ 25.2 ซึ่งจะคล้ายคลึงกับเสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีตธรรมดา โดยในสภาวะสุดท้ายจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของท่อเหล็กด้านนอกบริเวณตรงกลางของความยาวเสา และเหล็กรูปพรรณด้านในจะไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่เนื่องจากพฤติกรรมการโอบรัดจากคอนกรีตที่ห่อหุ้ม



รูป 2.25 รูปแบบการวิบัติของเสาสั้นวัสดุผสม SRCFST (ก) ท่อเหล็ก, (ข) เหล็กรูปพรรณ, (ค) คอนกรีต (Jingming และคณะ 2015)

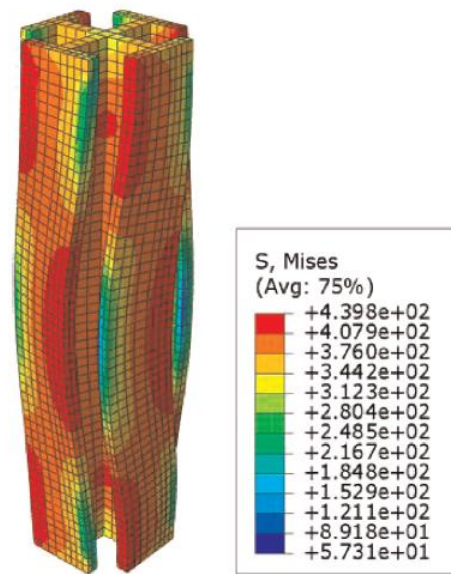
รูปที่ 2.26 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและความเครียดตามแนวแกนโดยจะแบ่งเป็น 4 พฤติกรรมตามจุดที่ทำเครื่องหมายบนเส้นโค้งดังนี้



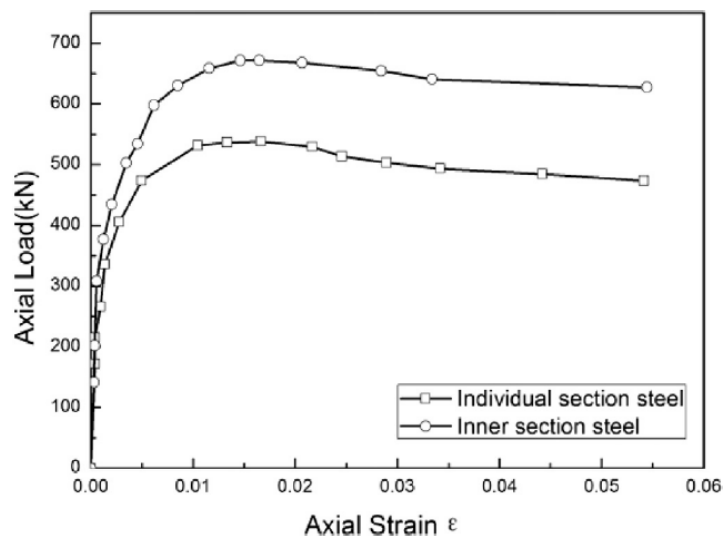
รูป 2.26 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดตามแนวแกนขององค์ประกอบต่างๆ ของเสา SRCFST (Jingming และคณะ 2015)

จุด A เป็นจุดที่ท่อเหล็กเริ่มคราก จุด B เป็นจุดที่กำลังคอนกรีตถึงจุดสูงสุด จุด C เป็นจุดที่กำลังของเหล็กรูปพรรณถึงจุดสูงสุด และจุด D เป็นจุดสุดท้ายที่เสาวีบัติเนื่องจากการเสียรูปสามารถสรุปได้ว่าคอนกรีตจะรับกำลังประมาณ 70% ของกำลังเสาวีสดุผสม ในขณะที่เหล็กรูปพรรณและท่อเหล็กรับกำลังประมาณ 30% ของเสาวีสดุผสม ในที่สุดเสาวีจะวิบัติด้วยการเสียรูปทางด้านข้าง (transverse deformation) ภายหลังจากท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณถึงจุดคราก และการเสียรูปแบบไม่เชิงเส้นของคอนกรีต

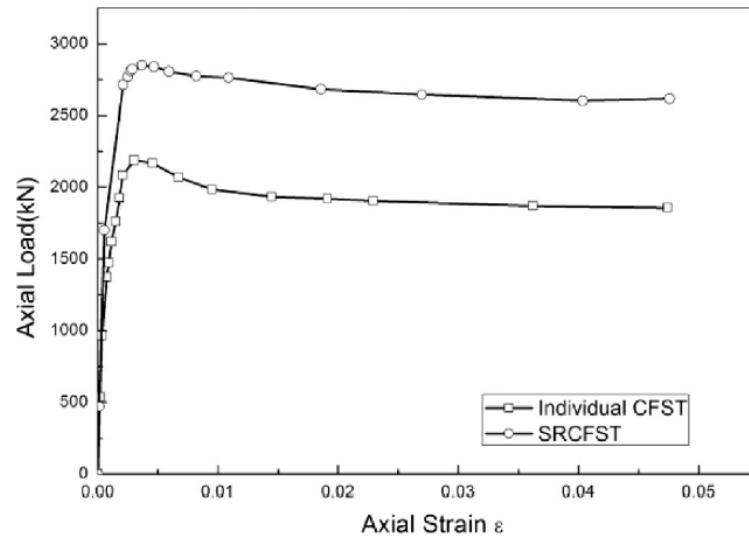
การเปรียบเทียบพฤติกรรมเชิงกลของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ และส่วนประกอบต่างๆของเสापพบว่า การโก่งเดาะเฉพาะที่ของเหล็กรูปพรรณจะเกิดขึ้นเมื่อพิจารณาพฤติกรรมของเหล็กรูปพรรณอย่างเดียวโดยไม่คิดความสัมพันธ์กับองค์ประกอบอื่นของเสาเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกนดังรูปที่ 2.27 ซึ่งจะมีรูปแบบการวิบัติที่ต่างจากรูปที่ 2.25 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดของเหล็กรูปพรรณที่อยู่ในเสาวีสดุผสมและเหล็กรูปพรรณเพียงอย่างเดียวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.28 และรูปที่ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (SRCFST) และเสาวีสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFST) เพียงอย่างเดียว หลังจากรับกำลังสูงสุดแล้วความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (SRCFST) จะเป็นไปได้ในลักษณะค่อยเป็นค่อยไปมากกว่าเสาวีสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFST) เนื่องจากเหล็กรูปพรรณสามารถให้กำลังย้อนกลับ (strength reverse) แก่เสาวีสดุผสมได้ นอกจากนั้นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณยังไม่จำเป็นต้องพิจารณาการโก่งเดาะเฉพาะที่ของเหล็กรูปพรรณด้วย เนื่องจากเหล็กรูปพรรณจะแบ่งคอนกรีตออกเป็น 4 บริเวณตามรูปแบบหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ และในแต่ละบริเวณเหล็กรูปพรรณจะสามารถสร้างพฤติกรรมโอบรัดให้แก่คอนกรีตได้



รูป 2.27 รูปแบบการวิบัติของเหล็กรูปพรรณภายในเสาวัสดุผสมโดยไม่คิดความสัมพันธ์กับองค์ประกอบอื่น (Jingming และคณะ 2015)



รูป 2.28 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดของเหล็กรูปพรรณที่อยู่ในเสาวัสดุผสมและเหล็กรูปพรรณเพียงอย่างเดียว (Jingming และคณะ 2015)



รูป 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (SRCFST) และเสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFST) เพียงอย่างเดียว (Jingming และคณะ 2015)

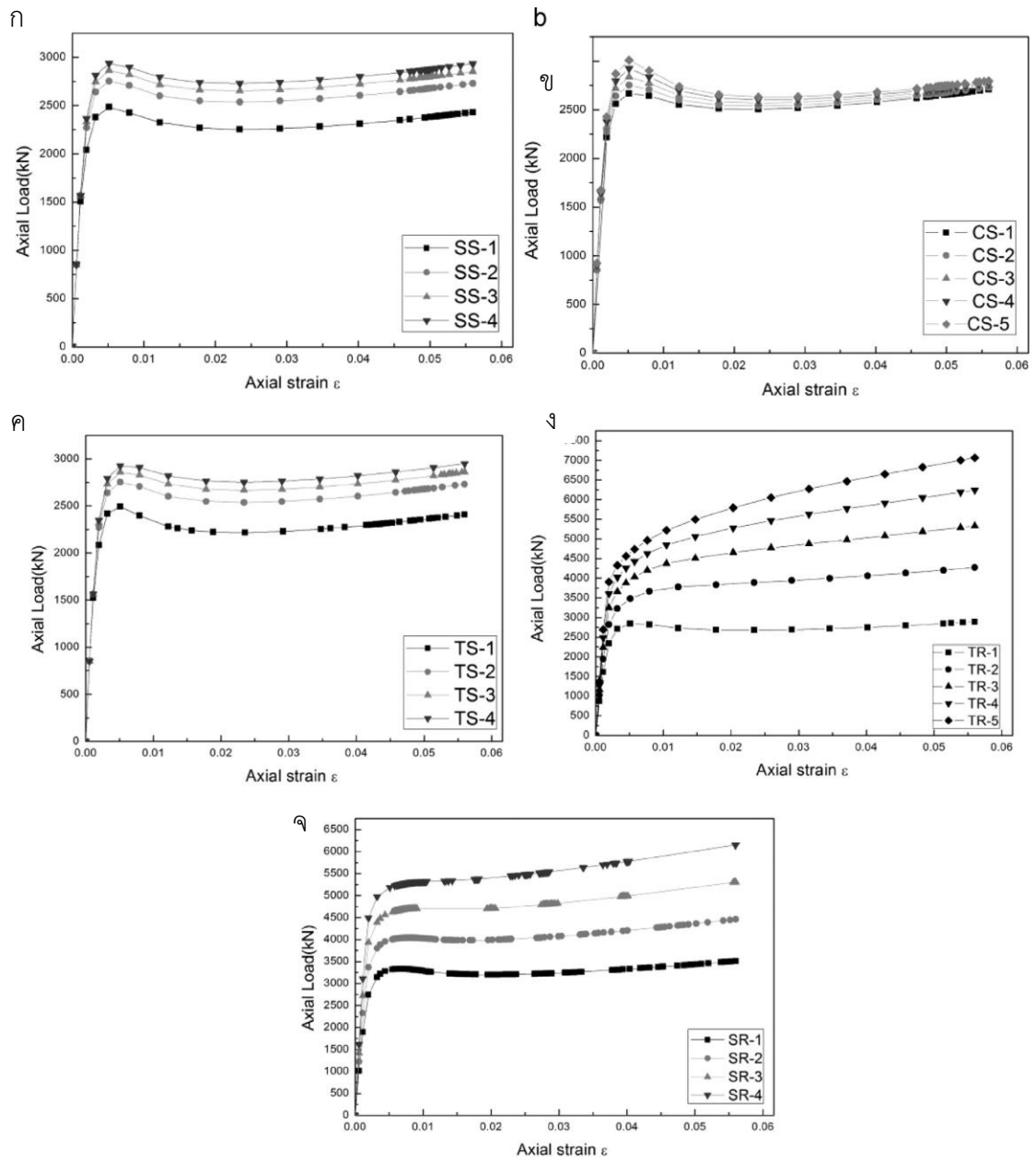
การศึกษาตัวแปรออกแบบในงานวิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจำนวน 22 เสา คุณสมบัติของเสาทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 2.8 เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณถูกโอบรัดจากทั้งท่อเหล็กด้านนอกและเหล็กรูปพรรณด้านใน ซึ่งจะได้พฤติกรรมการโอบรัดดีกว่าเสาวัสดุผสมเหล็กเติมด้วยคอนกรีตธรรมดา ทำให้สามารถละเว้นการพิจารณาผลกระทบจากขนาดของเสาวัสดุผสมได้ ซึ่งในงานวิจัยจะไม่พิจารณาผลกระทบจากขนาดของเสาวัสดุผสม

ตาราง 2.8 ขนาดและคุณสมบัติของวัสดุของเสาวัสดุผสม SRCFST หน้าตัดรูปวงกลมที่ใช้ในการศึกษาตัวแปร (Jingming และคณะ 2015)

Group	Specimens	Dimensions					Material properties			
		L_0 (mm)	D (mm)	t (mm)	D/t	L/D	A_{ss} (mm ²)	f_{ck} (MPa)	f_y^s (MPa)	f_y^t (MPa)
1 (SS)	SS-1	500	180	3	60	2.8	2400	27.5	235	345
	SS-2	500	180	3	60	2.8	2400	27.5	345	345
	SS-3	500	180	3	60	2.8	2400	27.5	390	345
	SS-4	500	180	3	60	2.8	2400	27.5	420	345
2 (CS)	CS-1	500	180	3	60	2.8	2400	25.3	345	345
	CS-2	500	180	3	60	2.8	2400	27.5	345	345
	CS-3	500	180	3	60	2.8	2400	29.7	345	345
	CS-4	500	180	3	60	2.8	2400	31.8	345	345
	CS-5	500	180	3	60	2.8	2400	33.8	345	345
3 (TS)	TS-1	500	180	3	60	2.8	2400	27.5	345	235
	TS-2	500	180	3	60	2.8	2400	27.5	345	345
	TS-3	500	180	3	60	2.8	2400	27.5	345	390
	TS-4	500	180	3	60	2.8	2400	27.5	345	420
4 (TR)	TR-1	500	180	3.4	60	2.8	2400	27.5	345	345
	TR-2	500	180	6.6	60	2.8	2400	27.5	345	345
	TR-3	500	180	9.7	60	2.8	2400	27.5	345	345
	TR-4	500	180	12.6	60	2.8	2400	27.5	345	345
	TR-5	500	180	15.3	60	2.8	2400	27.5	345	345
5 (SR)	SR-1	500	180	3	60	2.8	3783	27.5	345	345
	SR-2	500	180	3	60	2.8	5568	27.5	345	345
	SR-3	500	180	3	60	2.8	7286	27.5	345	345
	SR-4	500	180	3	60	2.8	8943	27.5	345	345

จากการศึกษาผลกระทบของกำลังของเหล็กรูปพรรณพบว่า เมื่อเพิ่มกำลังของเหล็กรูปพรรณ (f_y^s) จะทำให้กำลังและสติเฟนเริ่มต้นของเสาเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป และไม่มีผลต่อความเหนียวของเสา ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดตามแนวแกนมีลักษณะดังรูปที่ 2.30ก รูปที่ 2.30ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดตามแนวแกนของเสาที่มีกำลังของคอนกรีตต่างกัน โดยพบว่ากำลังของคอนกรีตมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อกำลังของเสาวัสดุผสม ผลกระทบของกำลังต่อเหล็กต่อกำลังเสาวัสดุผสมรูปที่ 2.30ค แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มกำลังของท่อเหล็กจะทำให้กำลังของเสาวัสดุผสมเพิ่มขึ้น และเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดตามแนวแกนจะราบเรียบ (smooth) ขึ้นเนื่องจากเมื่อเพิ่มกำลังของท่อเหล็กกำลังในการรับแรงของเสาจะเพิ่มขึ้น และอีกนัยหนึ่งเมื่อเพิ่มกำลังของท่อเหล็กจะเพิ่มพฤติกรรมการโอบรัดแก่เสาวัสดุผสมได้ รูปที่ 2.30ง แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดตามแนวแกนของเสาวัสดุผสมเมื่ออัตราส่วนท่อเหล็ก (α_t) ต่างๆกัน พบว่าอัตราส่วนท่อเหล็กมีผลต่อพฤติกรรมแบบอ่อนตัว (Softening) และพฤติกรรมแบบแข็งตัว (Hardening) ในสภาวะหลังจากรับกำลังสูงสุด (post-peak) เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของท่อเหล็กจะเพิ่มพฤติกรรมการโอบรัดให้แก่คอนกรีตและพฤติกรรมแบบอ่อนตัวหลังจากจุดที่รับแรงสูงสุดจะเปลี่ยนเป็นพฤติกรรมแบบแข็งตัวแทน ผลกระทบจากอัตราส่วนของเหล็กรูปพรรณ (α_s) แสดงตามรูปที่ 2.25จ จากเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดตามแนวแกนและความเครียดตามแนวแกนพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเหล็กรูปพรรณจะไม่

เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหลังจากจุดที่รับแรงสูงสุด แต่กำลังของเสาวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของของเหล็กรูปพรรณที่เพิ่มขึ้น

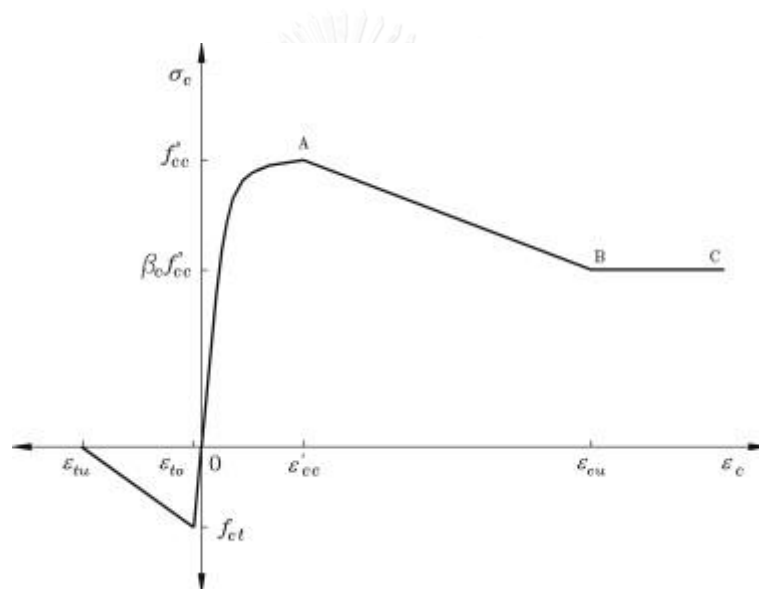


รูป 2.30 เส้นโค้งเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและความเครียดตามแนวแกน เนื่องจากผลกระทบจากตัวแปรต่างๆของเสาวัสดุผสม SRCFST (Jingming และคณะ 2015)

2.3 การวิเคราะห์พฤติกรรมของท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFST) ด้วยวิธีไฟเบอร์เอลิเมนต์

Qing Quan Liang และ Fragomeni (2010) [15] ทำการวิเคราะห์ที่ไร้เชิงเส้นของเสาวัสดุผสมเส้นเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรับแรงเยื้องศูนย์ โดยเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดสอบในอดีต เพื่อให้ได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง ตัวแปรศึกษาได้แก่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็ก กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต กำลังครากของท่อเหล็ก แรงกระทำที่กระทำ และรูปร่างของหน้าตัด

รูปที่ 2.31 แสดงแบบจำลองของคอนกรีตที่ได้รับพฤติกรรมการโอบรัดมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด



รูป 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับพฤติกรรมการโอบรัดในเสาวัสดุผสม (CFST) (Qing Quan Liang และ Fragomeni 2010)

ระหว่างจุด O ถึงจุด A สามารถแสดงได้โดยสมการ

$$\sigma_c = \frac{f'_{cc} \lambda \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc0}} \right)}{\lambda - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc0}} \right)} \quad (2.1)$$

$$\lambda = \frac{E_c}{E_c - (f'_{cc} / \varepsilon'_{cc})} \quad (2.2)$$

เมื่อค่า E_c เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ซึ่งอ้างอิงจาก ACI [16]

$$E_c = 3320 \sqrt{\gamma_c f'_c} + 6900 \quad (2.3)$$

โดย γ_c คือตัวคูณลดค่ากำลังของคอนกรีตเมื่อคิดผลกระทบจากขนาดของเสา

$$\gamma_c = 1.85 D_c^{-0.135} \quad (0.85 < \gamma_c < 1.0) \quad (2.4)$$

$$f'_{cc} = \gamma_c f'_c + k_1 f_{rp} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c \left(1 + k_2 \frac{f_{rp}}{\gamma_c f'_c} \right) \quad (2.6)$$

ซึ่ง k_1 และ k_2 มีค่า 4.1 และ 20.5 ตามลำดับ และจากงานวิจัยโดย Richart และคณะ [17] จะได้ค่าความเครียดดังนี้

$$\varepsilon'_c = \begin{cases} 0.002 & \gamma_c f'_c \leq 28 \text{ (MPa)} \\ 0.002 + \frac{\gamma_c f'_c - 28}{5400} & 28 < \gamma_c f'_c \leq 82 \text{ (MPa)} \\ 0.003 & \gamma_c f'_c > 82 \text{ (MPa)} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$f_{rp} = \begin{cases} 0.7 (v_e - v_s) \frac{2t}{D - 2t} f_{sy} & \frac{D}{t} \leq 47 \\ \left(0.006241 - 0.0000357 \frac{D}{t} \right) f_{sy} & 47 < \frac{D}{t} \leq 150 \end{cases} \quad (2.8)$$

สำหรับค่า v_e และ v_s เป็นค่าอัตราส่วนปัวซองของเหล็กที่มีและไม่มีคอนกรีตด้านในตามลำดับ

โดย v_s จะมีค่าเท่ากับ 0.5 ที่กำลังสูงสุด และค่าของ v_e ถูกเสนอโดย Tang และคณะ [18]

$$v_e = 0.2312 + 0.3582 v'_e - 0.1524 \left(\frac{f'_c}{f_{sy}} \right) + 4.843 v'_e \left(\frac{f'_c}{f_{sy}} \right) - 9.169 \left(\frac{f'_c}{f_{sy}} \right) \quad (2.9)$$

$$v'_e = 0.881 \times 10^{-6} \left(\frac{D}{t} \right)^3 - 2.58 \times 10^{-4} \left(\frac{D}{t} \right)^2 + 1.953 \times 10^{-2} \left(\frac{D}{t} \right) + 0.4011 \quad (2.10)$$

ระหว่างเส้น AB และ BC แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดได้ดังสมการ

$$\sigma_c = \begin{cases} \beta_c f'_{cc} + \left(\frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_c}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon'_{cc}} \right) (f'_{cc} - \beta_c f'_{cc}) & \text{for } \varepsilon'_{cc} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \\ \beta_c f'_{cc} & \text{for } \varepsilon_c > \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (2.11)$$

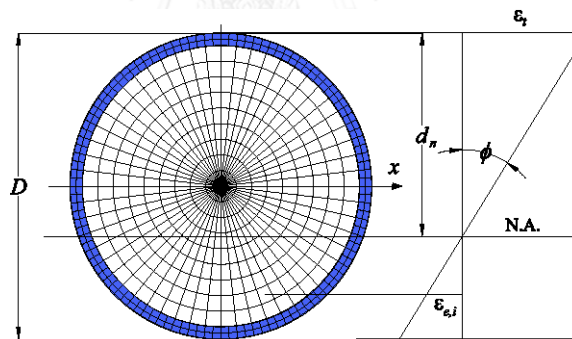
เมื่อ ε_{cu} มีค่า 0.02 จากการทดสอบ และ β_c คือผลกระทบจากพฤติกรรมการโอบรัดที่สร้างโดยท่อคอนกรีต ซึ่งถูกวิจัยโดย Hu และคณะ [19] และมีสมการดังนี้

$$\sigma_c = \begin{cases} \beta_c f'_{cc} + \left(\frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_c}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon'_{cc}} \right) (f'_{cc} - \beta_c f'_{cc}) & \text{for } \varepsilon'_{cc} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \\ \beta_c f'_{cc} & \text{for } \varepsilon_c > \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (2.12)$$

แบบจำลองของเหล็กมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดดังสมการของ Liang [20] ดังนี้

$$\sigma_s = f_{st} \left(\frac{\varepsilon_s - 0.9\varepsilon_{sy}}{\varepsilon_{st} - 0.9\varepsilon_{sy}} \right)^{\frac{1}{45}} \quad (0.9\varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st}) \quad (2.13)$$

การสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้ใช้วิธีไฟเบอร์เอลิเมนต์ดังรูปที่ 2.32



รูป 2.32 การแบ่งไฟเบอร์เอลิเมนต์ในหน้าตัดของเสาวัสดุผสม (Liang และคณะ, 2009)

แรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดสามารถระบุได้ในรูปของความเค้นลัพธ์ในหน้าตัดดังสมการ

$$P = \sum_{i=1}^{ns} \sigma_{s,i} A_{s,i} + \sum_{j=1}^{nc} \sigma_{c,j} A_{c,j} \quad (2.14)$$

$$M = \sum_{i=1}^{ns} \sigma_{s,i} A_{s,i} y_i + \sum_{j=1}^{nc} \sigma_{c,j} A_{c,j} y_j \quad (2.15)$$

เมื่อเพิ่มแรงตามแนวแกน ความสามารถในการรับโมเมนต์ของเสาวัสดุผสมจะสามารถระบุได้จากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ - ความโค้งที่คำนวณได้จากการค่อยๆ เพิ่มขึ้นของความโค้ง เมื่อความโค้งเพิ่มขึ้นในแต่ละครั้ง จะต้องควบคุมให้แรงในแนวแกนเท่ากับแรงที่กระทำ แกนสะเทิน

(neutral-axis) ในหน้าตัดของแบบจำลองจะเลื่อนตำแหน่งจนกระทั่งสอดคล้องเงื่อนไขความสมดุลแรงวิบัติตามแนวแกนของหน้าตัดเสาวัสดุผสมจะถูกกระทำโดยไม่คิดการตัดในตอนแรกจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและความเครียด สำหรับการเพิ่มขึ้นของแรงตามแนวแกน ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งจะถูกคำนวณโดยความสัมพันธ์ของความโค้งที่ค่อยเพิ่มขึ้นกับค่าของโมเมนต์จากการค่อยๆ เพิ่มขึ้นของแรงกระทำตามแนวแกนจาก 0 จนถึง P_0 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาวัสดุผสมจะสามารถสร้างขึ้นได้

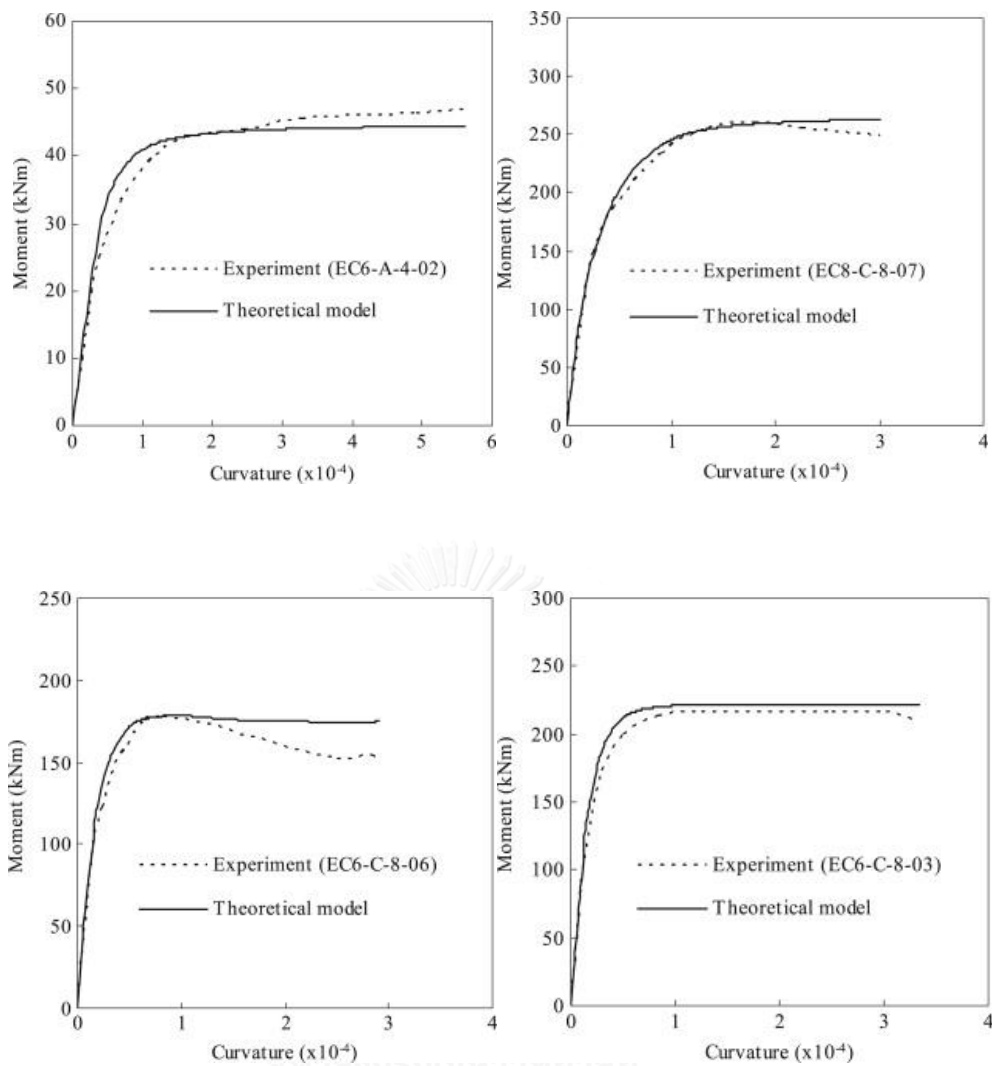
ผลการเปรียบเทียบของกำลังรับแรงดัดและความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ โดยใช้ตัวแปรศึกษาคือ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็ก คอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตธรรมดา และเหล็กกำลังสูงและเหล็กธรรมดา สำหรับกำลังรับแรงดัดผลการวิเคราะห์จะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Fujimoto และคณะ [21] อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ของตัวอย่างเท่ากับ 3.0 อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) ของท่อเหล็กมีค่าระหว่าง 26.9 ถึง 101.4 กำลังครากของท่อเหล็กมีค่า 283, 579 และ 834 เมกะปาสคาล และคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัด 25.4, 40.7 และ 78.1 เมกะปาสคาล ซึ่งแรงที่กระทำตามแนวแกนจะมีค่าตั้งแต่ร้อยละ 13 ถึงร้อยละ 25 ของแรงอัดประลัย (P_0) ผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ดังตารางที่ 2.6 โดยจากผลลัพธ์ของการวิเคราะห์พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบประมาณร้อยละ 99

ตาราง 2.9 ค่าการเปรียบเทียบกำลังรับแรงดัดของเสา CFST หน้าตัดวงกลมระหว่างผลการวิเคราะห์และผลจากการทดสอบ [15]

Specimen	D (mm)	t (mm)	D/t	f_{sy} (MPa)	f_{su} (MPa)	E_s (GPa)	f'_c (MPa)	P_n (kN)	M_u exp (kN-m)	Mu.fib (kN-m)	Mu.fib M_u exp
EC4-A-4-03	150	2.96	50.7	283	408	224	40.7	359	32	29.3	0.92
EC4-C-2-035	300	2.96	101.4	283	408	224	25.4	840	128.3	123.6	0.96
EC4-C-2-06	300	2.96	101.4	283	408	224	25.4	1442	109.7	103.2	0.94
EC4-C-4-03	300	2.96	101.4	283	408	224	40.7	1060	150	149.1	0.99
EC4-C-4-04	300	2.96	101.4	283	408	224	40.7	1413	156.6	148.6	0.95
EC4-C-4-06	300	2.96	101.4	283	408	224	40.7	2120	130.5	120.2	0.92
EC4-C-8-045	300	2.96	101.4	283	408	224	78.1	2720	194.1	208.9	1.08
EC4-C-8-06	300	2.96	101.4	283	408	224	78.1	3627	160.8	171.2	1.06
EC6-A-4-02	122	4.54	26.9	579	646	228	40.7	273	46.9	44.7	0.95
EC6-A-4-06	122	4.54	26.9	579	646	228	40.7	817	42.2	38.5	0.91
EC6-C-2-06	239	4.54	52.6	579	646	228	25.4	1761	132.3	140.7	1.06
EC6-C-4-03	239	4.54	52.6	579	646	228	40.7	1077	177.6	189.2	1.06
EC6-C-4-06	239	4.54	52.6	579	646	228	40.7	2153	155.4	151.9	0.98
EC6-C-8-03	239	4.54	52.6	579	646	228	78.1	1556	217.3	221	1.02
EC6-C-8-06	239	4.54	52.6	579	646	228	78.1	3113	178.2	178.4	1
EC6-D-4-03	360	4.54	79.3	579	646	228	40.7	2050	460.5	473.3	1.03
EC6-D-4-06	360	4.54	79.3	579	646	228	40.7	4099	399.6	371.2	0.93
EC8-C-2-06	222	6.47	34.3	834	879	218	25.4	2684	219.8	217.7	0.99
EC8-C-2-08	222	6.47	34.3	834	879	218	25.4	3579	149.3	149.6	1
EC8-C-4-015	222	6.47	34.3	834	879	218	40.7	753	301.7	297.1	0.98
EC8-C-4-03	222	6.47	34.3	834	879	218	40.7	1506	282.3	292	1.03
EC8-C-4-06	222	6.47	34.3	834	879	218	40.7	3016	261.3	243.5	0.93
EC8-C-8-07	222	6.47	34.3	834	879	218	78.1	4421	262	264.4	1
EC8-D-4-045	336	6.47	51.9	834	879	218	40.7	3984	648.1	653.8	1.01
Mean											0.99
Standard deviation (SD)											0.049
Coefficient of variation (COV)											0.050

เมื่อ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อเหล็ก, t คือความหนาของท่อเหล็ก, f_{sy} คือความเค้นครากของท่อเหล็ก, f_{su} คือความเค้นวิบัติของท่อเหล็ก, E_s คือค่า Young's Modulus ของท่อเหล็ก, f'_c คือกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต, P_n คือแรงกระทำตามแนวแกน, M_u คือโมเมนต์วิบัติ

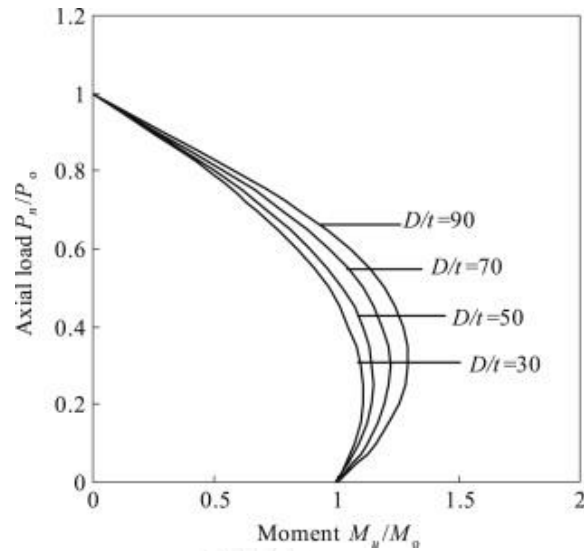
จากผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบใช้ 4 ตัวอย่างทดสอบ คือ EC6-A-4-02, EC6-C-8-03, EC6-C-8-06 และ EC8-C-8-07 ซึ่งทดสอบโดย Fujimoto และคณะ [21] เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง โดยให้ผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 2.33



รูป 2.33 เปรียบเทียบความสัมพันธ์โมเมนต์ความโค้ง- ระหว่างผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบ (Liang และคณะ, 2009)

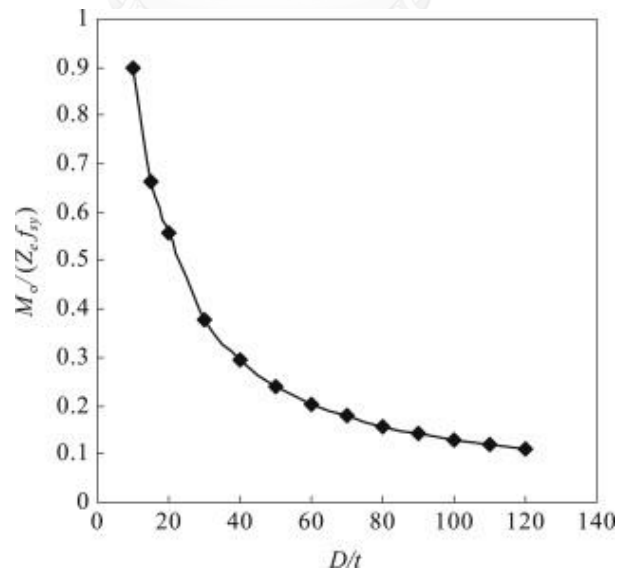
จากการเปรียบเทียบพบว่าผลการทดสอบแสดงพฤติกรรมแบบอ่อนตัวมากกว่า แต่โดยรวมสามารถสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์สามารถสร้างเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาวัสดุผสมภายใต้แรงอัดตามแนวแกนและแรงดัดได้เป็นอย่างดี

ในการศึกษาผลกระทบจากอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) ของท่อเหล็ก ศึกษาโดยใช้อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) อยู่ระหว่าง 10 ถึง 120 โดยการกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่และเปลี่ยนความหนา จะได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 2.34



รูป 2.34 ผลกระทบจากอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009)

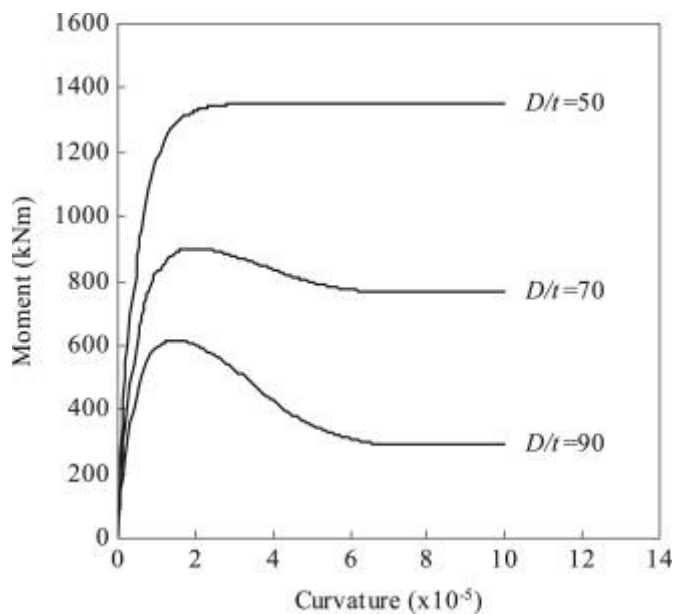
จากรูปที่ 2.34 พบว่าเมื่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) ของท่อเหล็กเพิ่มขึ้น เส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์จะมีความกว้างมากขึ้น และจากรูปที่ 2.35 พบว่าเมื่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) ลดลง ความสามารถในการรับแรงดัดของเสาจะลดลง



รูป 2.35 ผลกระทบจากอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงดัดและอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็ก

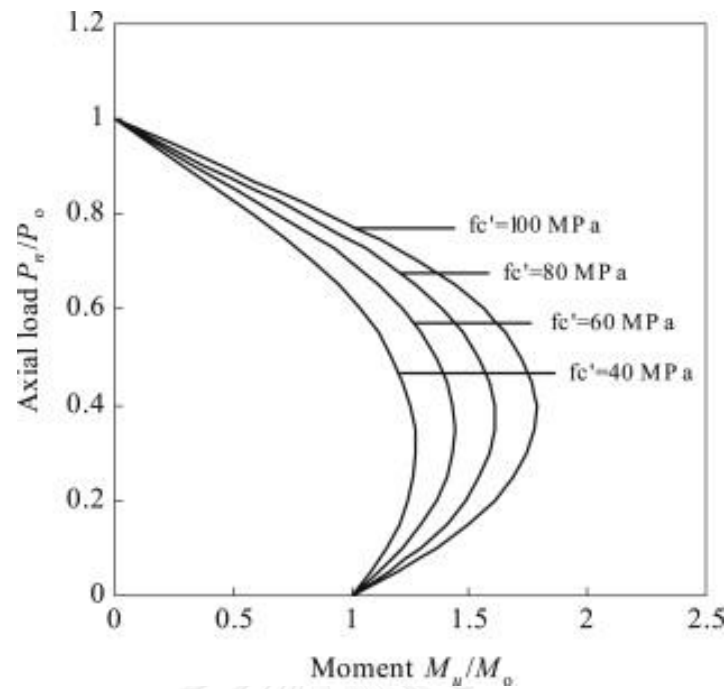
(Liang และคณะ, 2009)

จากรูปที่ 2.36 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็กกำลัง และสติฟเนสการดัด (flexural stiffness) ของเสาจะลดลง



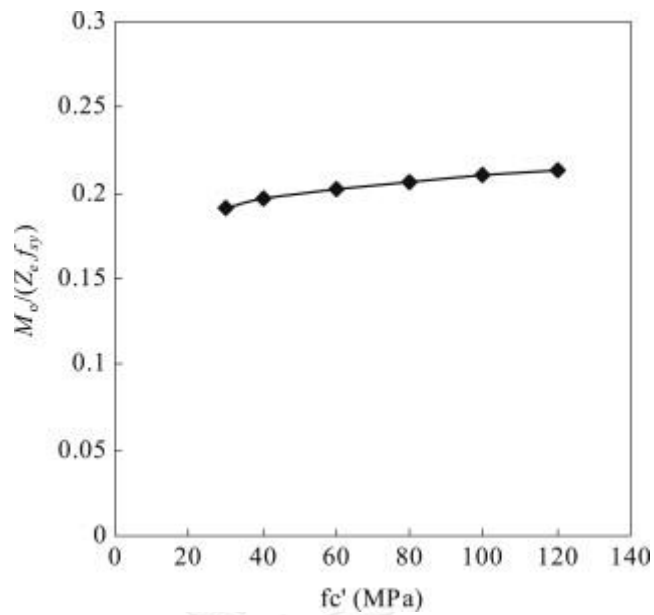
รูป 2.36 ผลกระทบจากอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009)

การศึกษาผลกระทบของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c) ศึกษาโดยใช้เสาวัสดุผสมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตรเติมด้วยคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดต่างกัน ความหนาของท่อเหล็กเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่า 40, 60, 80 และ 100 เมกะปาสคาล กำลังครากของท่อเหล็กมีค่า 300 เมกะปาสคาล และกำลังรับแรงดึง 410 เมกะปาสคาล ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กกำหนดให้มีค่า 200 จิกะปาสคาล รูปที่ 2.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อคอนกรีตมี f_c สูงขึ้น

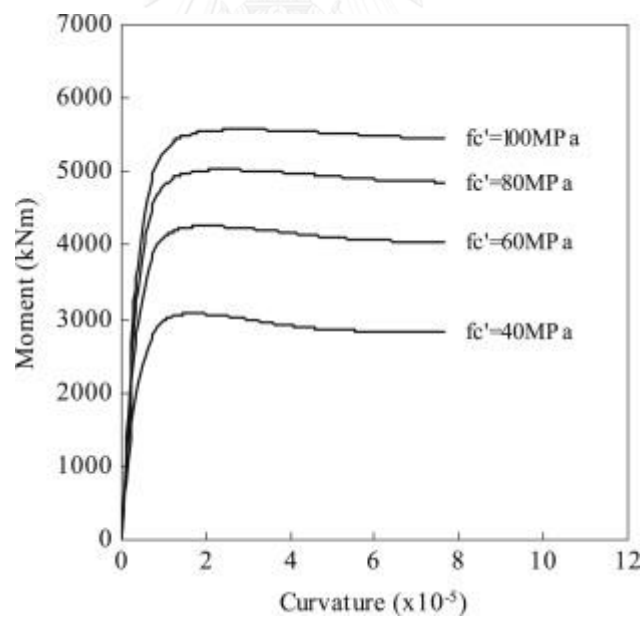


รูป 2.37 ผลกระทบจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c') ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009)

รูปที่ 2.38 แสดงผลกระทบจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่อกำลังรับแรงดัดของเสาวัสดุผสม โดยพบว่าเมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงดัดของเสาวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้น และรูปที่ 2.39 แสดงให้เห็นว่าสติฟเนสการดัด (flexural stiffness) และกำลังของเสาวัสดุผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



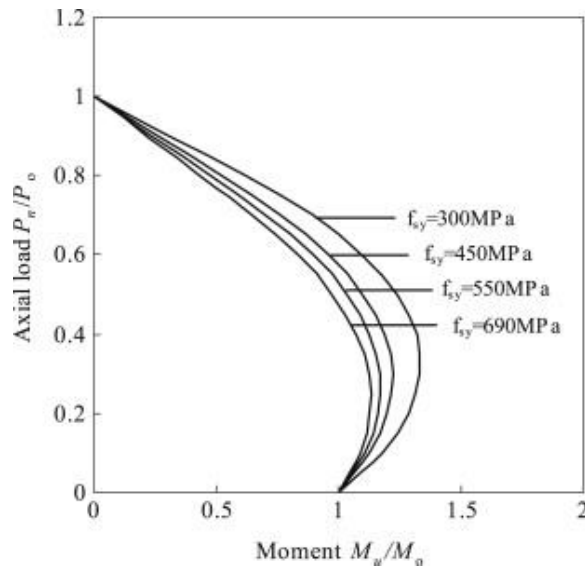
รูป 2.38 ผลกระทบจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c') ต่อกำลังรับแรงดัดของเสาวัสดุผสม (Liang และคณะ, 2009)



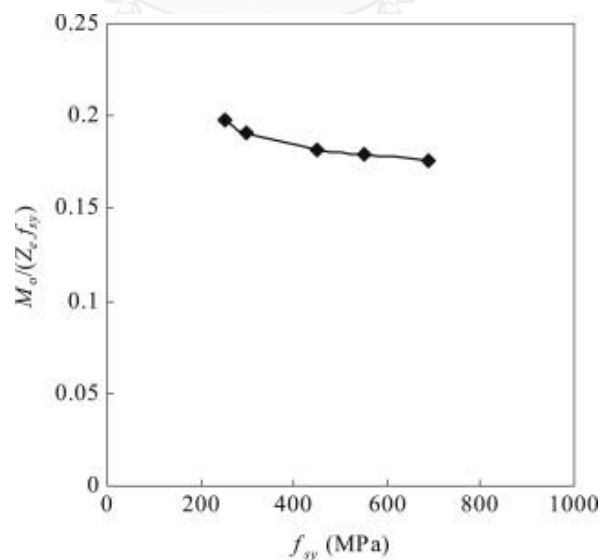
รูป 2.39 ผลกระทบจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c') ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009)

ผลกระทบจากกำลังครากของท่อเหล็ก (f_{sy}) ศึกษาโดยกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กเท่ากับ 1000 มิลลิเมตร และความหนาของท่อเหล็กเท่ากับ 15 มิลลิเมตร โดยกำลังครากของท่อเหล็กมีค่าต่างๆ กัน คือ 300, 450, 550, และ 690 เมกะปาสคาล และกำลังรับแรงดัดมีค่า 410,

500, 630, 790 เมกะปาสคาล ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่า 200 จิกะปาสคาล และคอนกรีตมีกำลัง 45 เมกะปาสคาล จากรูปที่ 2.40 พบว่าความกว้างของเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตามแนวแกนและโมเมนต์จะลดลงเมื่อกำลังครากของท่อเหล็กเพิ่มขึ้น และกำลังรับแรงดัดของเสาวัสดุผสมจะน้อยลงเมื่อกำลังครากของท่อเหล็กมีเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.41

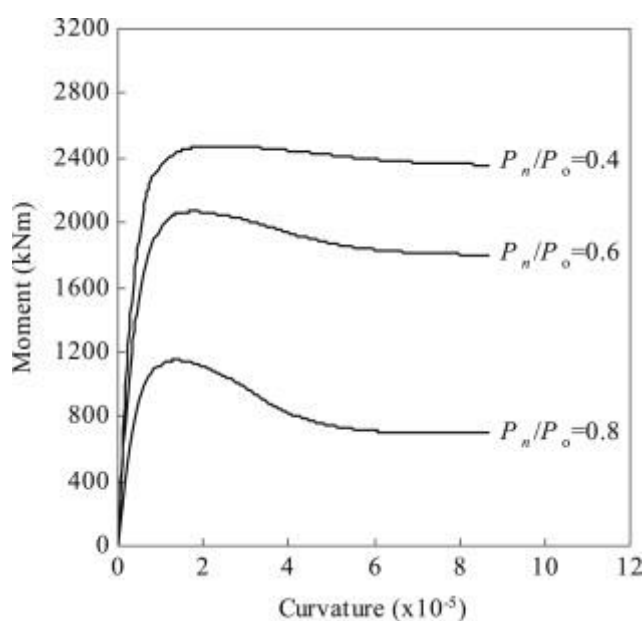


รูป 2.40 ผลกระทบจากกำลังรับครากของท่อเหล็ก (f_{sy}) ต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009)



รูป 2.41 ผลกระทบจากกำลังรับครากของท่อเหล็ก (f_{sy}) ต่อกำลังรับแรงดัดของเสาวัสดุผสม (Liang และคณะ, 2009)

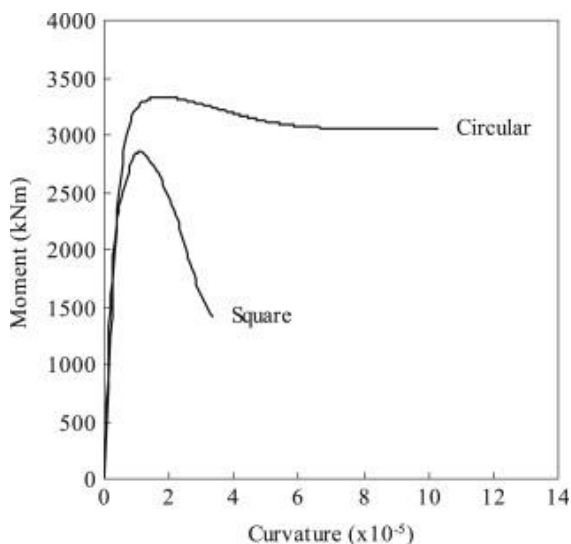
การศึกษาผลกระทบจากผลของแรงที่กระทำต่อเสาวัสดุผสมศึกษาโดยกำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเหล็กเท่ากับ 700 มิลลิเมตร อัตราส่วนเส้นรอบวงต่อความหนาของท่อเหล็กเท่ากับ 70 กำลังครากของท่อเหล็กเท่ากับ 300 เมกะปาสคาล กำลังรับแรงดึง 410 เมกะปาสคาล ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 200 จิกะปาสคาล และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต 45 เมกะปาสคาล โดยอัตราส่วนแรงกระทำที่ให้ตามแนวแกนต่อกำลังประลัยมีค่าต่างๆ กัน คือ 0.4, 0.6 และ 0.8 รูปที่ 2.42 พบว่าเมื่อเพิ่มแรงกระทำตามแนวแกนจะทำให้ค่าสติฟเนสการดัดและกำลังของเสาวัสดุผสมลดลง



รูป 2.42 ผลกระทบจากอัตราส่วนแรงกระทำตามแนวแกนต่อกำลังประลัยที่มีต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาวัสดุผสม CFST (Liang และคณะ, 2009)

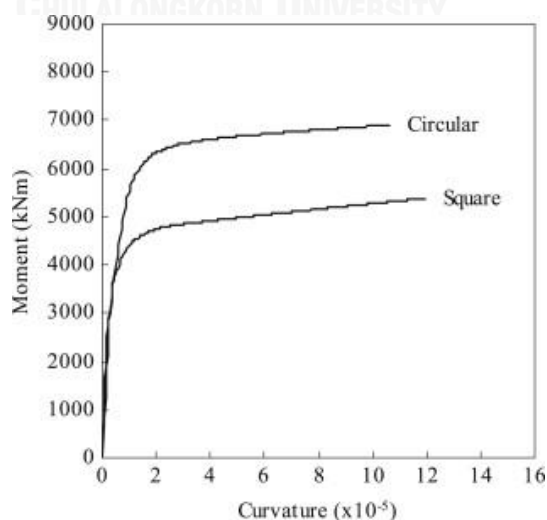
ผลกระทบจากรูปร่างของหน้าตัดศึกษาโดยใช้หน้าตัดที่เป็นรูปวงกลมและสี่เหลี่ยม หน้าตัดวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 789.86 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็กเท่ากับ 70 ส่วนหน้าตัดสี่เหลี่ยมให้มีขนาด 700x700 มิลลิเมตร ค่ากำลังครากของท่อเหล็กเท่ากับ 300 เมกะปาสคาล กำลังรับแรงดึงของท่อเหล็กเท่ากับ 410 เมกะปาสคาล ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 200 จิกะปาสคาล กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 45 เมกะปาสคาล และให้แรงกระทำตามแนวแกน 14221 กิโลนิวตัน ผลเปรียบเทียบเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของเสาวัสดุผสมที่มีหน้าตัดวงกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยมเป็นดังรูปที่ 2.43 พบว่าทั้งเสาวัสดุ

ผสม CFST หน้าตัดวงกลมและสี่เหลี่ยมจะมีพฤติกรรมแบบอ่อนตัว หลังจากรับกำลังประลัย แต่เสาวัสดุผสม CFST หน้าตัดวงกลมมีกำลังรับแรงดัดประลัยมากกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูป 2.43 ผลกระทบจากรูปร่างหน้าตัดของเสาวัสดุผสม CFST ที่มีต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง ($D/t=70$) (Liang และคณะ, 2009)

จากนั้นอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็กของทั้งหน้าตัดวงกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกเปลี่ยนเป็น 25 ซึ่งพิจารณาเป็นหน้าตัดอัดแน่น จากรูปที่ 2.44 พบว่าหน้าตัดทั้งสองหลังจากรับกำลังประลัยจะมีพฤติกรรมแบบแข็งตัว โดยหน้าตัดวงกลมยังคงให้กำลังรับแรงอัดมากกว่าหน้าตัดสี่เหลี่ยม

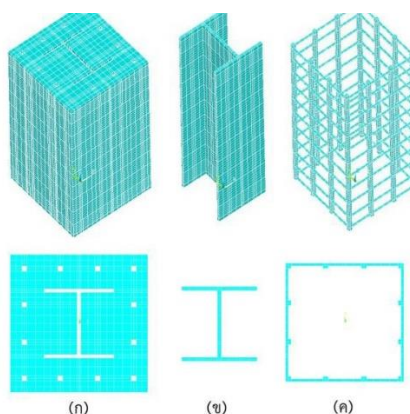


รูป 2.44 ผลกระทบจากรูปร่างหน้าตัดของเสาวัสดุผสม CFST ที่มีต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง ($D/t=25$) (Liang และคณะ, 2009)

2.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาวัสดุผสมโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

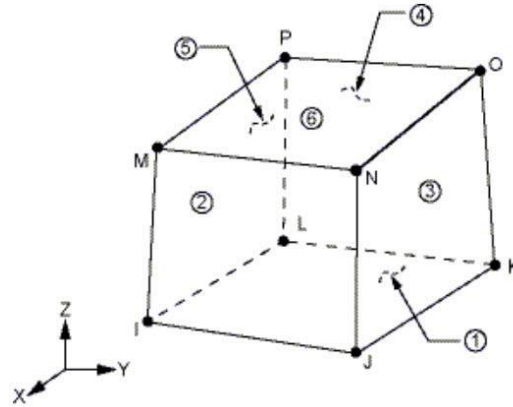
วรการ และคณะ (2016) [22] ทำการวิเคราะห์เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงอัดตามแนวแกนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิเคราะห์เป็นเอลิเมนต์ 3 มิติแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear 3D Finite Element) ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงในแนวแกนโดยพิจารณาผลของการถูกโอบรัดของคอนกรีตแบบไม่กำหนดพื้นที่ถูกโอบรัด การวิเคราะห์ใช้โปรแกรม ANSYS และตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดสอบในอดีตของ Chen และ Yeh (1996) [23] ผลกระทบของตัวแปรที่พิจารณาประกอบด้วยขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณและระยะห่างเหล็กปลอกพร้อมทั้งเปรียบเทียบกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกับมาตรฐาน AISC 360-10 [24]

ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจะประกอบด้วยวัสดุทั้งหมด 3 ประเภท คือ คอนกรีต เหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริม แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS คอนกรีตจะใช้เอลิเมนต์ SOLID65 เหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมใช้เอลิเมนต์ SOLID185 โดยลักษณะหน้าตัดของเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองจะสมมติให้เป็นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมจริง ไม่พิจารณาการลื่นไถลระหว่างวัสดุในแบบจำลอง (Perfect bond) การโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling) ของเหล็กรูปพรรณและการโก่งเดาะ (Buckling) ของเหล็กเสริม ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดประมาณ 50,000 เอลิเมนต์ โดยแบ่งเป็นเอลิเมนต์ของเหล็กรูปพรรณประมาณ 6,000 เอลิเมนต์ เอลิเมนต์ของเหล็กเสริมประมาณ 4,000 เอลิเมนต์ และเอลิเมนต์คอนกรีตประมาณ 40,000 เอลิเมนต์



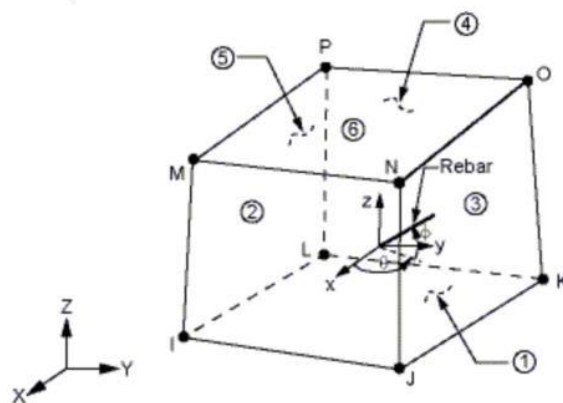
รูป 2.45 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งตามวัสดุ (ก) คอนกรีต (ข) เหล็กรูปพรรณ (ค) เหล็กเสริม
ทางยาวและทางขวาง (วรการ และคณะ, 2016)

รูปที่ 2.46 แสดงเอลิเมนต์ SOLID185 ซึ่งมี 8 จุดเชื่อมต่อ (node) แต่ละจุดเชื่อมต่อมี 3 ระดับขั้นความเสรี (Degree of Freedom) และเป็นเอลิเมนต์ที่สามารถใช้กับวัสดุที่มีคุณสมบัติในช่วงพลาสติกได้ (Plasticity)



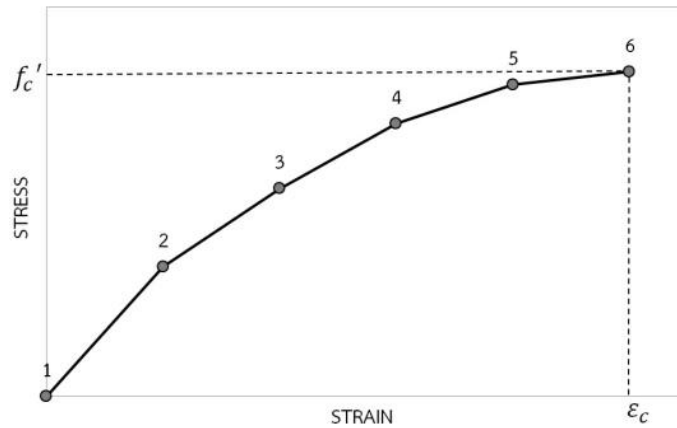
รูป 2.46 เอลิเมนต์ Solid185 (ANSYS User's Manual (ver. 14.0), 2012)

รูปที่ 2.47 แสดงเอลิเมนต์ Solid65 ซึ่งมี 8 จุดเชื่อมต่อ แต่ละจุดเชื่อมต่อมี 3 ระดับขั้นความเสรีและเป็นเอลิเมนต์ที่ใช้เฉพาะสำหรับคอนกรีตเพราะสามารถทำนายการวิบัติจากความเปราะของวัสดุได้



รูป 2.47 เอลิเมนต์ Solid65 (ANSYS User's Manual (ver. 14.0), 2012)

คอนกรีตในแบบจำลองมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็น Multi-linear Isotropic ดังรูปที่ 2.48 และมีความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดตามสมการที่ 2.16 ถึง 2.18



รูป 2.48 ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของคอนกรีต (Park และ Paulay, 1975)

$$f_c = f'_c \left(\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2 f'_c}{E_c} \quad (2.17)$$

$$E_c = 4730 \sqrt{f'_c} \quad (2.18)$$

เมื่อ f'_c คือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

ε_0 คือ ความเครียดของจุดที่มีความเค้นอัดสูงสุด

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

การวิบัติจากคุณสมบัติความเปราะของคอนกรีตใจแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กำหนดด้วยเกณฑ์การวิบัติของคอนกรีต (criterion for failure of concrete) ในสภาวะความเค้นอัดหลายแกน (Multi-axial stress state) ของ William และ Warnke [25] ดังสมการที่ 2.19

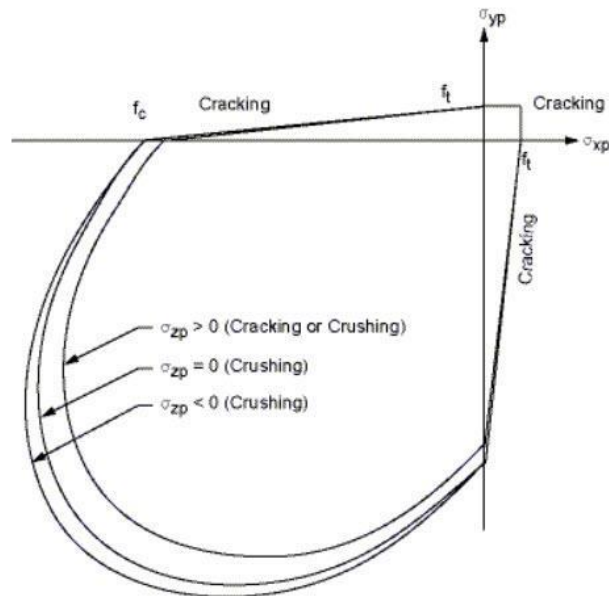
$$\frac{F}{f_c} - s \geq 0 \quad (2.19)$$

เมื่อ F คือ ฟังก์ชันขึ้นกับสภาวะความเค้นหลัก (principle stress)

f_c คือ กำลังรับแรงอัดแตกแกนเดียว (uniaxial crushing strength)

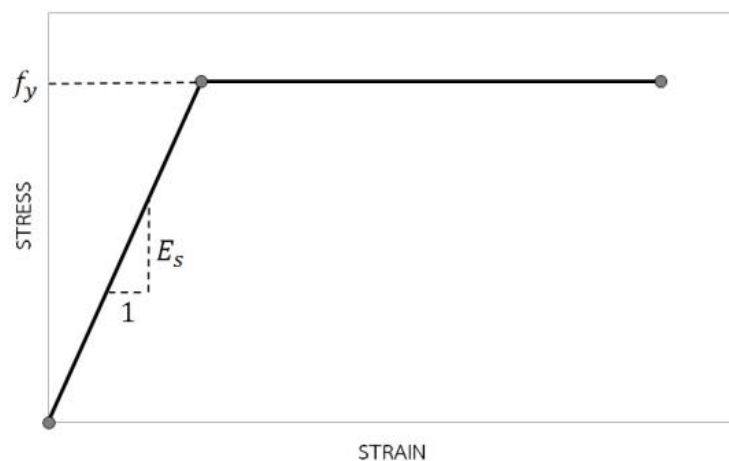
s คือ ขอบเขตการวิบัติ (failure surface) ซึ่งเป็นฟังก์ชันขึ้นกับกำลังรับแรงของคอนกรีต

รูปที่ 2.49 แสดงตัวอย่างขอบเขตการวิบัติของคอนกรีตที่สภาวะความเค้นอัด 2 แกน (biaxial stress) ซึ่งพิจารณาการวิบัติจากการแตกร้าว (cracking) และการแตกอัด (crushing) ของคอนกรีต



รูป 2.49 ขอบเขตการวิบัติของคอนกรีต (ANSYS User's Manual (ver. 14.0), 2012)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองกำหนดให้เป็น Bi-linear Isotropic โดยความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเส้นตรง 2 ช่วง ดังรูปที่ 2.50



รูป 2.50 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็ก [22]

ลักษณะแรงกระทำในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองเป็นระยะหัดตัว (Displacement) ของเสาบริเวณด้านบนของเสาและหากำลังรับแรงของเสาจากแรงปฏิกิริยา (Reaction) ที่บริเวณจุดรองรับด้านล่างของเสา สภาพรองรับของเสาในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองเป็นเสาที่มีปลายทั้งสองข้างเป็นแบบยึดหมุน (pin-end column) โดยเสาจะสามารถขยายตัวออกด้านข้างได้อย่างอิสระเมื่อมีแรงกระทำตามแนวแกนของเสา

Chen และ Yeh [23] ได้ทดสอบตัวอย่างเสาสั้นเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงอัดในแนวแกน ดังรูปที่ 2.51 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.10 ถึง 2.12

ตาราง 2.10 ขนาดหน้าตัด ความสูงของหน้าตัดเสาและเหล็กรูปพรรณ (Chen และ Yeh 1996)

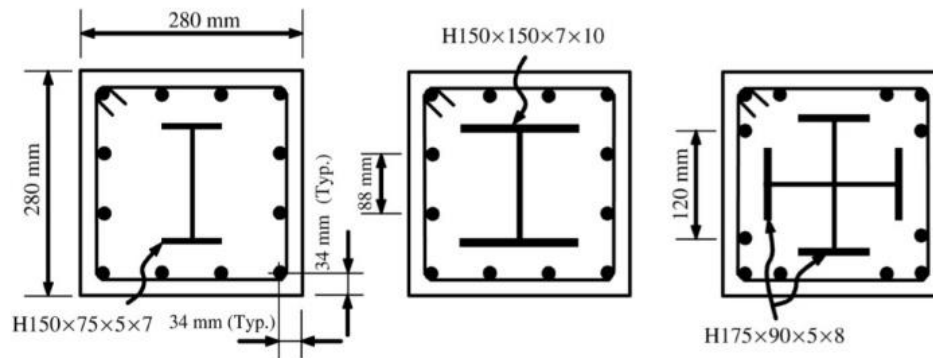
หน้าตัด	ขนาดหน้าตัด	สูง (มิลลิเมตร)	เหล็กรูปพรรณ	
	กว้าง x ยาว (มิลลิเมตร)		รูปทรง	ขนาดหน้าตัด (มิลลิเมตร)
SRC1	280 x 280	1,200	H-Shape	150 x 150 x 7 x 10
SRC2	280 x 280	1,200	H-Shape	150 x 150 x 7 x 10
SRC3	280 x 280	1,200	H-Shape	150 x 150 x 7 x 10
SRC4	280 x 280	1,200	Cross	2(175 x 90 x 5 x 8)
SRC5	280 x 280	1,200	Cross	2(175 x 90 x 5 x 8)
SRC6	280 x 280	1,200	Cross	2(175 x 90 x 5 x 8)
SRC7	280 x 280	1,200	I-Shape	150 x 75 x 5 x 7
SRC8	280 x 280	1,200	I-Shape	150 x 75 x 5 x 7
SRC9	280 x 280	1,200	I-Shape	150 x 75 x 5 x 7
SRC10	280 x 280	1,200	I-Shape	150 x 75 x 5 x 7

ตาราง 2.11 ขนาดและลักษณะเหล็กเสริมทางยาวและเหล็กปลอก (Chen และ Yeh 1996)

หน้าตัด	เหล็กเสริมทางยาว		เหล็กปลอก	
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	จำนวน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	จำนวน
SRC1	15.9	12	8	140
SRC2	15.9	12	8	75
SRC3	15.9	12	8	35
SRC4	15.9	12	8	140
SRC5	15.9	12	8	75
SRC6	15.9	12	8	35
SRC7	15.9	12	8	140
SRC8	15.9	12	8	75
SRC9	15.9	12	8	140
SRC10	15.9	12	8	75

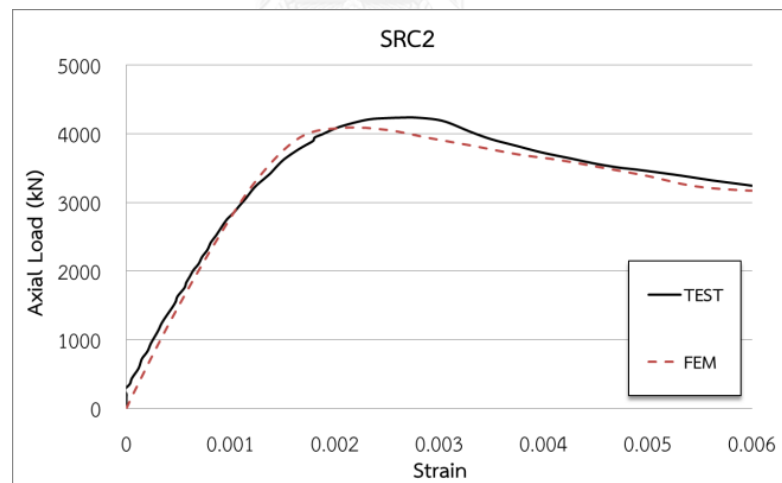
ตาราง 2.12 คุณสมบัติวัสดุ (Chen และ Yeh 1996)

หน้าตัด	คอนกรีต	เหล็กเสริมทางยาว	เหล็กปลอก
	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (MPa)	กำลังรับแรงที่จุดคราก (MPa)	กำลังรับแรงที่จุดคราก (MPa)
SRC1	29.5	296	350
SRC2	28.1	296	350
SRC3	29.8	296	350
SRC4	29.8	345	350
SRC5	29.8	345	350
SRC6	29.5	345	350
SRC7	28.1	303	350
SRC8	26.4	303	350
SRC9	28.1	303	350
SRC10	29.8	303	350



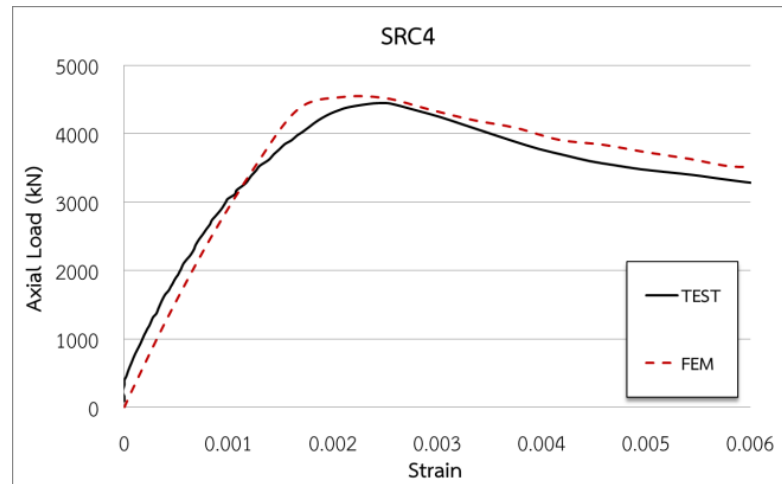
รูป 2.51 ลักษณะหน้าตัดทดสอบของ Chen และ Yeh (1996)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบโดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงในแนวแกนกับความเครียดในแนวแกนแสดงไว้ดังรูปที่ 2.52 ถึง 2.54 และตารางที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดในแนวแกนสูงสุด พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตได้อย่างเหมาะสม โดยอัตราส่วนความแตกต่างเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดสูงสุดจากผลการทดสอบต่อผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 1.03

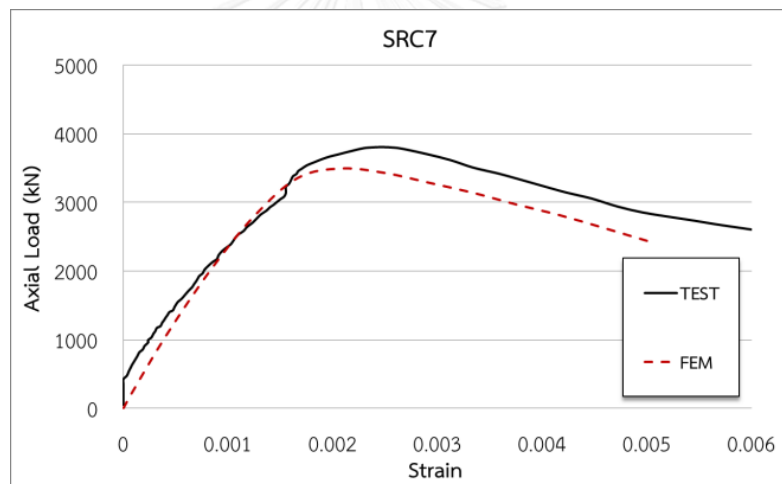


รูป 2.52 เปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบเสา SRC2

(วรการ และคณะ, 2016)



รูป 2.53 เปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบเสา SRC4
(วรการ และคณะ, 2016)



รูป 2.54 เปรียบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบเสา SRC7
(วรการ และคณะ, 2016)

ตาราง 2.13 เปรียบเทียบกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดในแนวแกน (kN)			อัตราส่วน		
	I Test	II FEM	III AISC	I/II	I/III	II/III
SRC1	4,220	4,167	3,833	1.01	1.1	1.09
SRC2	4,228	4,085	3,748	1.04	1.13	1.09
SRC3	4,399	4,335	3,852	1.01	1.14	1.13
SRC4	4,441	4,535	4,231	0.98	1.05	1.07
SRC5	4,519	4,547	4,231	0.99	1.07	1.07
SRC6	4,527	4,670	4,213	0.97	1.07	1.11
SRC7	3,788	3,492	3,153	1.08	1.2	1.11
SRC8	3,683	3,412	3,046	1.08	1.21	1.12
SRC9	3,630	3,492	3,153	1.04	1.15	1.11
SRC10	3,893	3,625	3,261	1.07	1.19	1.11
ค่าเฉลี่ย (Mean)				1.03	1.13	1.10

การคำนวณกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนตามมาตรฐาน AISC 360-10 [24] จากข้อมูลเสาทดสอบพบว่ามีความปลอดภัย โดยมีอัตราส่วนต่างเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดสูงสุดจากผลการทดสอบต่อการคำนวณตามมาตรฐาน AISC 360-10 [24] เท่ากับ 1.13 และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างกำลังรับแรงอัดสูงสุดจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อการคำนวณตามมาตรฐาน AISC 360-10 [24] เท่ากับ 1.10

ตัวแปรที่ใช้ศึกษาผลกระทบที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในงานวิจัยนี้ได้แก่ขนาดหน้าตัดของเหล็กรูปพรรณและระยะห่างของเหล็กปลอก โดยจะเลือกใช้หน้าตัดเหล็กของรูปพรรณและขนาดเหล็กเสริมที่มีจำหน่ายภายในประเทศไทย ได้แก่ หน้าตัดเหล็กรูปพรรณขนาด 300 x 300 x 106 กิโลกรัม/เมตร 350 x 350 x 106 กิโลกรัม/เมตร 400 x 300 x 107 กิโลกรัม/เมตร และหน้าตัดประกอบขนาด 300 x 390 x 10 x 13.9 มิลลิเมตร โดยมีรายละเอียดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติวัสดุตั้งตารางที่ 2.14 ถึง 2.16 และลักษณะหน้าตัด ดังรูปที่ 2.55

ตาราง 2.14 ขนาดและลักษณะเหล็กเสริมทางยาวและเหล็กปลอก

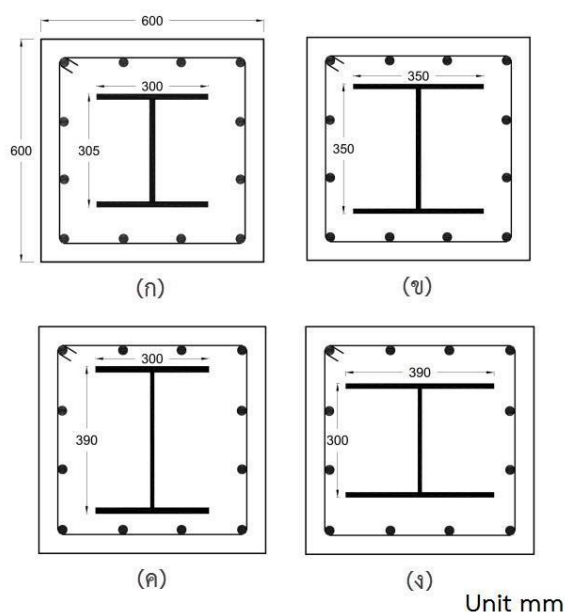
หน้าตัด	เหล็กเสริมทางยาว		เหล็กปลอก	
	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	จำนวน	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ระยะห่าง (มิลลิเมตร)
C1	25	12	12	200
C2	25	12	12	120
C3	25	12	12	60
C4	25	12	12	200
C5	25	12	12	120
C6	25	12	12	60
C7	25	12	12	200
C8	25	12	12	120
C9	25	12	12	60
C10	25	12	12	200
C11	25	12	12	120
C12	25	12	12	60

ตาราง 2.15 ขนาดหน้าตัด ความสูงของหน้าตัดเสาและเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	ขนาดหน้าตัด	สูง (มิลลิเมตร)	เหล็กรูปพรรณ	
	กว้าง x ยาว (มิลลิเมตร)		รูปทรง	ขนาดหน้าตัด (มิลลิเมตร)
C1	600 x 600	1,200	H-Shape	300 x 305 x 15 x 15 (W300 x 300 x 106 kg/m)
C2	600 x 600	1,200	H-Shape	300 x 305 x 15 x 15 (W300 x 300 x 106 kg/m)
C3	600 x 600	1,200	H-Shape	300 x 305 x 15 x 15 (W300 x 300 x 106 kg/m)
C4	600 x 600	1,200	H-Shape	338 x 351 x 13 x 13 (W350 x 350 x 106 kg/m)
C5	600 x 600	1,200	H-Shape	338 x 351 x 13 x 13 (W350 x 350 x 106 kg/m)
C6	600 x 600	1,200	H-Shape	338 x 351 x 13 x 13 (W350 x 350 x 106 kg/m)
C7	600 x 600	1,200	H-Shape	390 x 300 x 10 x 16 (W400 x 300 x 107 kg/m)
C8	600 x 600	1,200	H-Shape	390 x 300 x 10 x 16 (W400 x 300 x 107 kg/m)
C9	600 x 600	1,200	H-Shape	390 x 300 x 10 x 16 (W400 x 300 x 107 kg/m)
C10	600 x 600	1,200	H-Shape	300 x 390 x 10 x 13.4 (หน้าตัดประกอบ)
C11	600 x 600	1,200	H-Shape	300 x 390 x 10 x 13.4 (หน้าตัดประกอบ)
C12	600 x 600	1,200	H-Shape	300 x 390 x 10 x 13.4 (หน้าตัดประกอบ)

ตาราง 2.16 คุณสมบัติวัสดุ

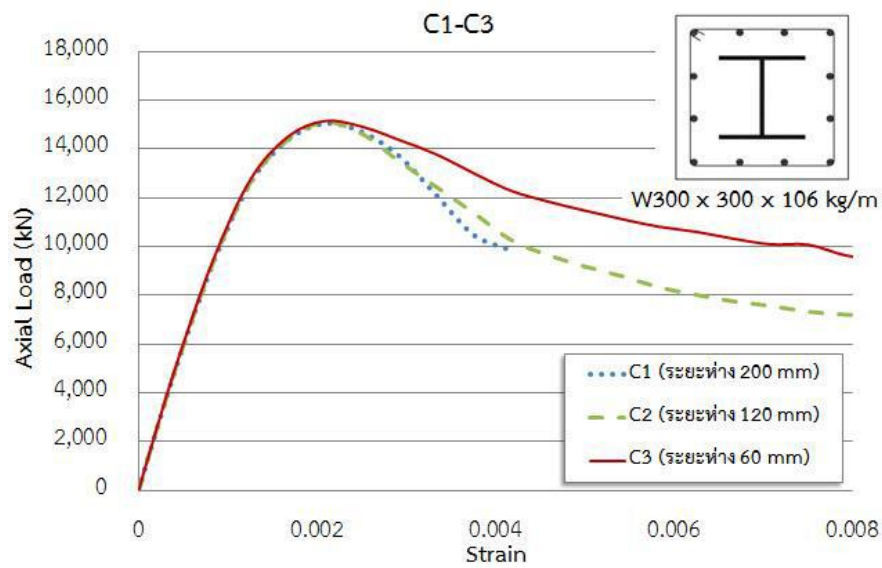
หน้าตัด	คอนกรีต		เหล็กเสริมทางยาว		เหล็กปลอก	
	กำลังรับแรงอัดสูงสุด		กำลังรับแรงที่จุดคราก			
	ksc	MPa	ksc	MPa	ksc	MPa
C1-C12	280	27.47	2,400	235.36	4,000	392.27



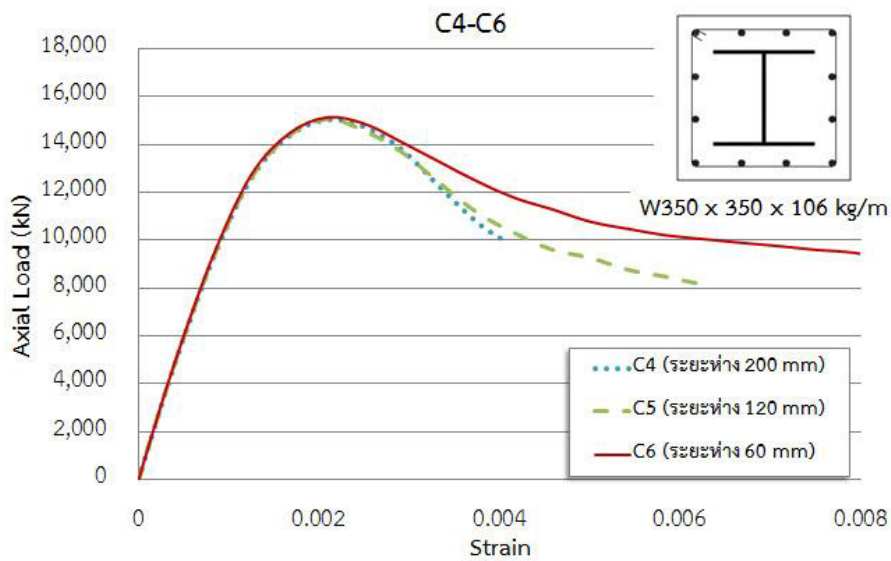
รูป 2.55 ลักษณะหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ศึกษาพฤติกรรม โดยมีหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่าง ๆ (ก) W300 x 300 x 106 กิโลกรัม/เมตร (ข) W350 x 350 x 106 กิโลกรัม/เมตร (ค) W400 x 300 x 107 กิโลกรัม/เมตร

(ง) หน้าตัดประกอบขนาด 300 x 390 x 10 x 13.4 มิลลิเมตร (วรการ และคณะ, 2016)

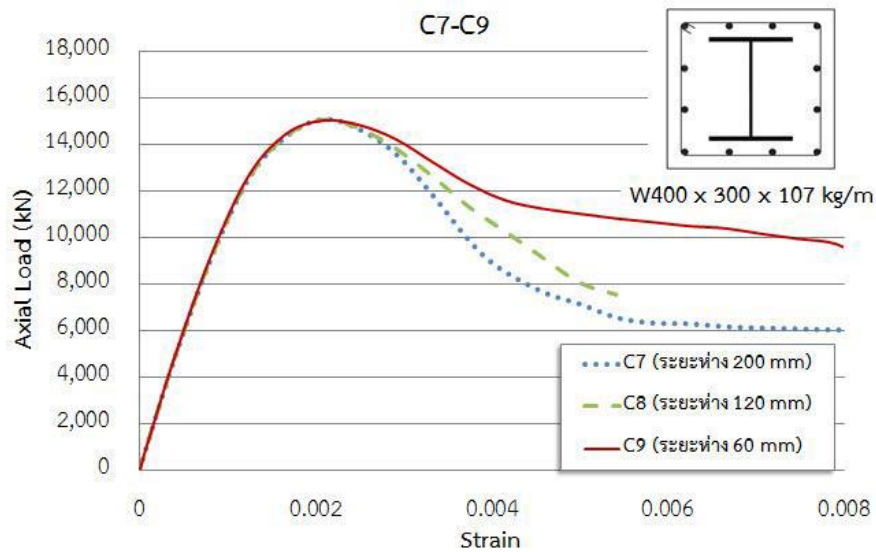
ระยะของเหล็กปลอกมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตน้อย แต่มีผลกระทบต่ออายุเสียดังกล่าวในช่วงหลังกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา โดยเสาที่ระยะห่างเหล็กปลอกน้อยจะสูญเสียกำลังน้อยกว่าเสาที่มีระยะห่างเหล็กปลอกเสริมมากและเสาที่มีระยะห่างเหล็กปลอกมากจะมีความเหนียวน้อย ดังรูปที่ 2.56-2.59



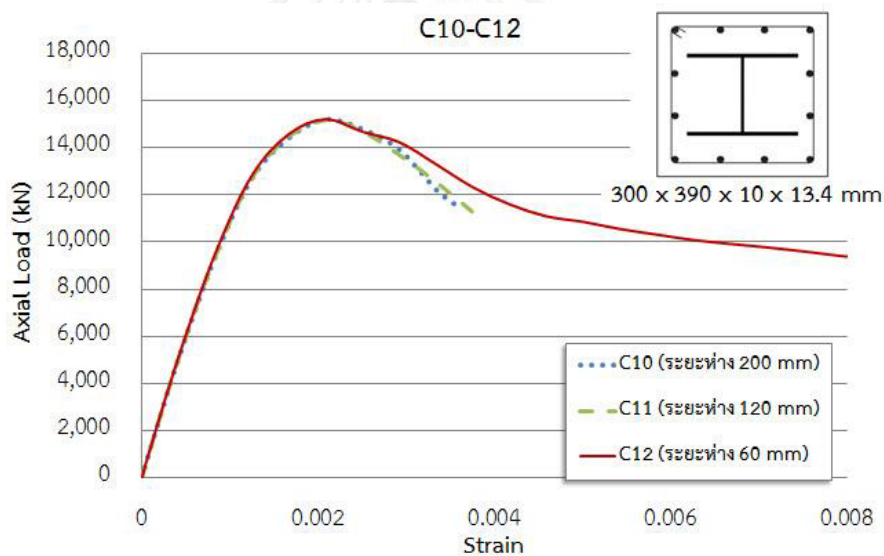
รูป 2.56 ผลของระยะห่างเหล็กปลอกต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ W300 x 300 x 106 กิโลกรัม/เมตร (วรการ และคณะ, 2016)



รูป 2.57 ผลของระยะห่างเหล็กปลอกต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ W350 x 350 x 106 กิโลกรัม/เมตร (วรการ และคณะ, 2016)



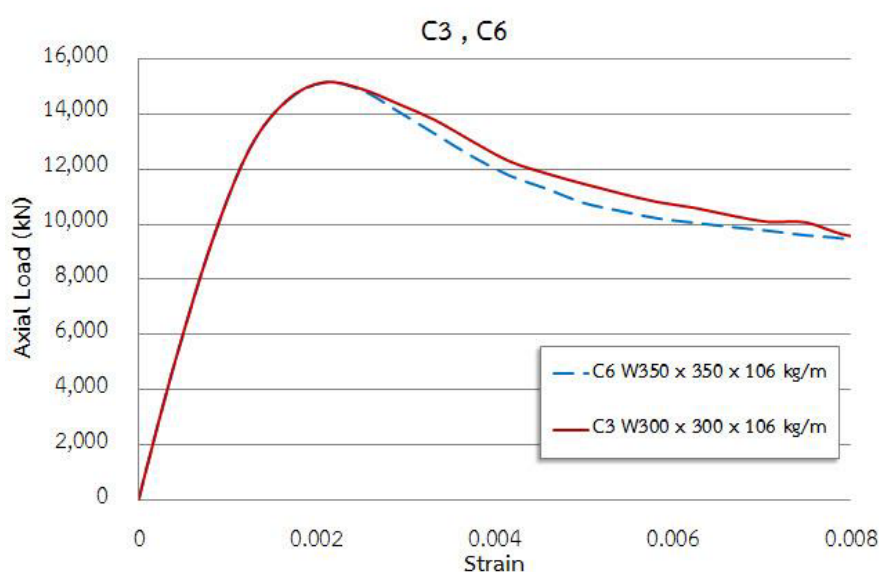
รูป 2.58 ผลของระยะห่างเหล็กปลอกต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ W400 x 300 x 107 กิโลกรัม/เมตร (วรการ และคณะ, 2016)



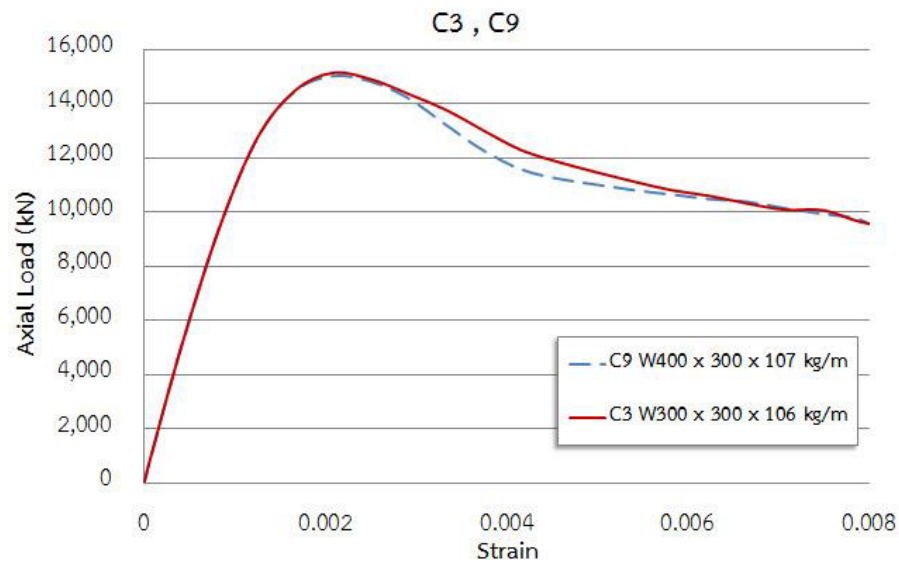
รูป 2.59 ผลของระยะเรียงเหล็กปลอกต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ หน้าตัดประกอบขนาด 300 x 390 x 10 x 13.4 มิลลิเมตร (วรการ และคณะ, 2016)

จากการศึกษาผลกระทบของขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ เมื่อกำหนดให้เสาเหล็กหุ้มคอนกรีตมีขนาด 60 x 60 เซนติเมตร เหล็กเสริมทางยาวขนาด 25 มิลลิเมตร จำนวน 12 เส้น เหล็กปลอกขนาด 12 มิลลิเมตร ระยะห่าง 60 มิลลิเมตร พบว่าการใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดขนาด W300 x 300 x 106 กิโลกรัม/เมตร จะทำให้เสาสูญเสียกำลังช่วงหลังกำลังรับแรงอัดสูงสุดน้อยกว่าหน้าตัดเหล็กรูปพรรณขนาด W350 x 350 x 106 กิโลกรัม/เมตร, W400 x 300 x 107 กิโลกรัม/เมตร และหน้าตัดประกอบขนาด 300 x 390 x 10 x 13.4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.54 ถึง 2.56 แต่

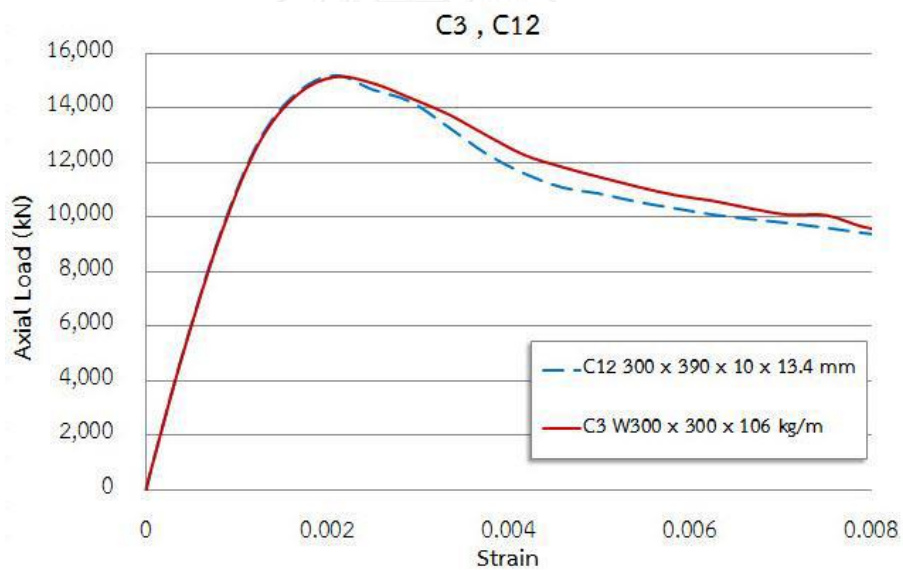
การใช้หน้าตัดประกอบขนาด 300 x 390 x 10 x 13.4 มิลลิเมตร เสาจะมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดมากกว่าการใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดขนาด W300 x 300 x 106 กิโลกรัม/เมตรเล็กน้อย ดังตารางที่ 2.17 ทำให้สามารถสรุปได้ในเบื้องต้นว่า เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่หน้าตัดรูปพรรณมีความกว้างแผ่นปีกเท่ากัน เสาที่หน้าตัดมีความลึกของแผ่นเอวมากกว่าจะทำให้เสาสูญเสียกำลังในช่วงหลังกำลังรับแรงอัดสูงสุดมากกว่าเสาที่หน้าตัดมีความลึกของแผ่นเอวน้อยกว่าและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตหน้าตัดเหล็กรูปพรรณมีความลึกของแผ่นเอวเท่ากันในช่วงความกว้างของแผ่นปีกที่ศึกษาพบว่าความกว้างของแผ่นปีกไม่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา



รูป 2.60 ผลของขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ที่ระยะห่างเหล็กปลอก 60 มิลลิเมตร (วรการ และคณะ, 2016)



รูป 2.61 ผลของขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ที่ระยะห่างเหล็กปลอก 60 มิลลิเมตร (2) (วรการ และคณะ, 2016)

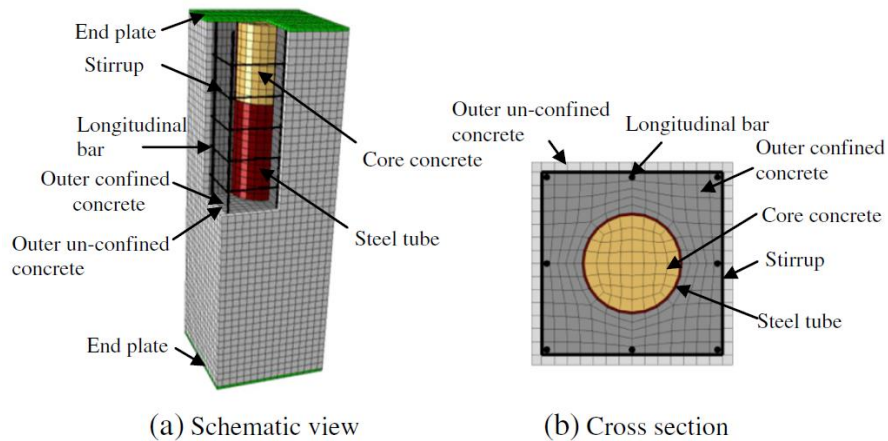


รูป 2.62 ผลของขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ที่ระยะห่างเหล็กปลอก 60 มิลลิเมตร (3) (วรการ และคณะ, 2016)

ตาราง 2.17 เปรียบเทียบกำลังรับแรงของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดในแนวแกน		อัตราส่วน
	I FEM (kN)	II AISC (kN)	
C1	15,043	13,379	1.12
C2	15,094	13,379	1.13
C3	15,143	13,379	1.13
C4	15,035	13,375	1.12
C5	15,057	13,375	1.13
C6	15,133	13,375	1.13
C7	15,080	13,374	1.13
C8	15,060	13,374	1.13
C9	15,026	13,374	1.12
C10	15,192	13,375	1.14
C11	15,171	13,375	1.13
C12	15,201	13,375	1.14

ในปี 2014 Han และ An [26] ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษาประสิทธิภาพของเสาวัสดุผสมเส้นคอนกรีตเติมในท่อเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (Concrete – encased CFST stub column) ในการรับแรงกระทำแบบแรงอัดโดยโปรแกรม ABAQUS เพื่อพิจารณากำลังของเสาในช่วงไม่เป็นเชิงเส้นและปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตกับเหล็ก โดยคอนกรีตจะถูกแบ่งเป็น คอนกรีตภายนอกไม่ถูกโอบรัด คอนกรีตภายนอกถูกโอบรัด คอนกรีตภายในท่อเหล็ก ท่อเหล็ก เหล็กเสริมตามยาว เหล็กเสริมตามขวาง และแผ่นปิดหัวเสาดังรูปที่ 2.63



รูป 2.63 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาคอนกรีตเสริมในท่อเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

(Han และ An 2013)

คุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ในแบบจำลองอีลาสติก - พลาสติก (elastic - plastic model) มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น $206,000 \text{ N/mm}^2$ และมีอัตราส่วนปัวซอง 0.3 สำหรับคอนกรีตกำหนดให้มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น $4730\sqrt{f'_c}$ และมีอัตราส่วนปัวซอง 0.2 คอนกรีตในหน้าตัดของเสาวัสดุผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนตามเงื่อนไขการถูกโอบรัดที่ต่างกัน คือ คอนกรีตภายนอกไม่ถูกโอบรัด คอนกรีตภายนอกถูกโอบรัด และคอนกรีตภายในท่อเหล็กดังรูปที่ 2.61 กำลังรับแรงและพฤติกรรมช่วงพลาสติกของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด ในแบบจำลองคอนกรีตที่เสียหายในช่วงพลาสติกจะมีกำลังรับแรงเพิ่มขึ้นเมื่อถึงสถานะที่คอนกรีตรับแรงในสามทิศทาง (triaxial loading) ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดเทียบเท่ารับแรงแกนเดียว สำหรับคอนกรีตในท่อเหล็กจะมีพฤติกรรมในช่วงพลาสติกขึ้นอยู่กับตัวแปรการถูกโอบรัดของเสาวัสดุผสมท่อเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (Confinement factor of CFST) สำหรับคอนกรีตภายนอกที่ถูกโอบรัดเนื่องจากเหล็กเสริมตามขวาง การเพิ่มขึ้นของช่วงพฤติกรรมพลาสติกจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนปริมาตรเหล็กเสริมตามขวาง กำลังครากของเหล็กเสริมตามขวาง และกำลังรับแรงของคอนกรีตดังสมการที่ 2.31

$$\sigma = \begin{cases} f'_c \frac{k(\varepsilon / \varepsilon_0)}{k - 1 + (\varepsilon / \varepsilon_0)^k} & \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ f'_c - E_{des} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) & \varepsilon > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (2.20)$$

โดย
$$k = \frac{E_c}{E_c - (f'_c / \epsilon_0)}$$

$$\epsilon_0 = 0.00245 + 0.0122 \frac{\rho_v f_{yh}}{f'_c}$$

$$E_{des} = \frac{0.15 \sigma_0}{\epsilon_{0.85} - \epsilon_0}$$

$$\epsilon_{0.85} = 0.225 \rho_v \sqrt{\frac{B_c}{s}} + \epsilon_0$$

$$\rho_v = \frac{A_h l_h}{A_0 s}$$

A_h คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก

l_h คือ ความยาวทั้งหมดของเหล็กเสริมทางขวาง

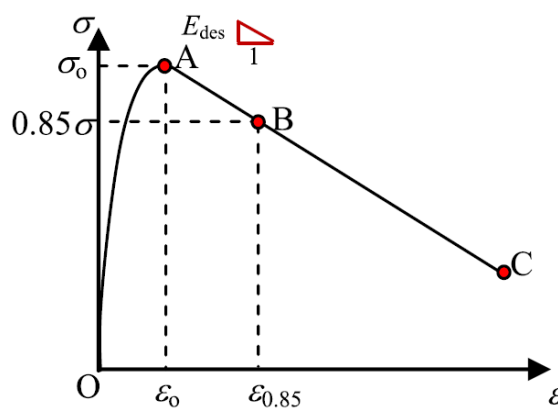
A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก

f_{yh} คือ ความเค้นที่จุดครากของเหล็กปลอก

B_c คือ ความกว้างหน้าตัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายนอกที่ถูกโอบรัดเป็นไปดังรูปที่ 2.64



รูป 2.64 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายนอกที่ถูกโอบรัด

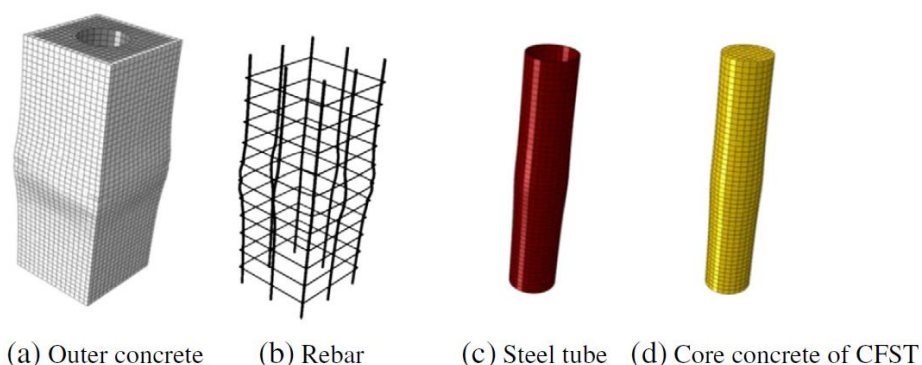
(Han และ An 2013)

คอนกรีตภายนอกไม่ถูกโอบรัด คอนกรีตภายนอกถูกโอบรัด และคอนกรีตภายในท่อเหล็ก จะถูกเลือกใช้เป็นเอลิเมนต์ที่มี 8 จุดเชื่อมต่อ (eight-node 3-D solid element) ท่อเหล็กจะใช้เป็นเอลิเมนต์ 4 จุดเชื่อมต่อ (four-node convectonal shell element) และเหล็กเสริมจะใช้เป็นเอลิเมนต์ 2 จุดเชื่อมต่อ (2-node truss element) การใส่ชิ้นส่วนเหล็กเสริมในคอนกรีตภายนอกใช้เทคนิคการฝังชิ้นส่วนโดยไม่พิจารณาระดับชั้นความเสรีในการเคลื่อนที่ (displacement) ของเหล็กเสริม

แผ่นปิดหัวเสาจะถูกพิจารณาเป็นของแข็งยึดหยุ่นและมีค่าสติเฟนสมากพอที่จะสามารถไม่พิจารณาการเสียรูปได้ กำหนดให้ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นปิดหัวเสาและคอนกรีตเป็นผิวสัมผัสแข็ง (hard contact) รอยต่อระหว่างแผ่นปิดหัวเสาและท่อเหล็กจะถูกกำหนดให้เป็นผิวสัมผัสแบบผูก (tie) เพื่อทำให้แน่ใจว่าการเคลื่อนที่และการหมุนของจุดต่อเป็นค่าเดียวกัน

ผิวสัมผัสแข็ง (hard contact) ถูกใช้ในทิศทางตั้งฉาก (normal direction) กับท่อเหล็ก คอนกรีตในท่อเหล็ก และคอนกรีตภายนอก ทำให้ความเค้นระหว่างพื้นผิวถูกส่งผ่านได้ และใช้แบบจำลองความเสียดทานมอร์ - คูลอมบ์ (Mohr - Coulomb friction) สำหรับรอยต่อในทิศทางผิวสัมผัส (tangent direction) ของรอยต่อพื้นผิว แบบจำลองพันธะระหว่างจุดต่อของท่อเหล็กกับคอนกรีตภายนอกถูกกำหนดให้เหมือนกับจุดต่อระหว่างท่อเหล็กกับคอนกรีตด้านใน

การวิบัติของเสาเริ่มจากการวิบัติของคอนกรีตภายนอกและการโก่งเดาะของเหล็กเสริมทงยาว หลังจากนั้นคอนกรีตภายนอกที่ถูกโอบรัดจะเกิดการวิบัติ ท่อเหล็กภายในเกิดการโก่งเดาะและคอนกรีตภายในจะเกิดการวิบัติในที่สุด โดยรูปแบบการวิบัติจะเป็นไปดังรูปที่ 2.65



รูป 2.65 รูปแบบการวิบัติของเสาวัสดุผสมเส้นคอนกรีตเต็มในท่อเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

(Han และ An 2013)

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเสาในชั้นต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.66 ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ชั้น คือ

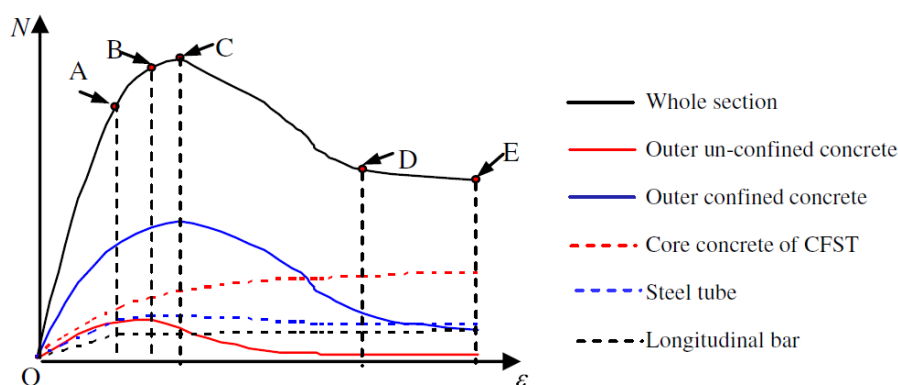
ชั้นที่ 1 : (OA) เสาจะแสดงพฤติกรรมยืดหยุ่นในชั้นนี้ ความเค้นของคอนกรีตภายนอกที่ไม่ถูกโอบรัดและคอนกรีตที่ถูกโอบรัดมีค่าประมาณร้อยละ 80 และร้อยละ 65 ของกำลังรับแรงสูงสุดตามลำดับ ส่วนความเค้นของคอนกรีตภายในท่อเหล็กมีค่าประมาณร้อยละ 50 ของกำลังรับแรงสูงสุด ท่อเหล็กและเหล็กเสริมตามยาวจะเริ่มมีพฤติกรรมพลาสติกยืดหยุ่นที่จุด A

ชั้นที่ 2 : (AB) ในชั้นนี้ความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มแรงกระทำตามแนวแกนที่จุด B กำลังรับแรงของคอนกรีตภายนอกที่ไม่ถูกโอบรัดจะถึงค่ากำลังรับแรงสูงสุดและคอนกรีตภายนอกเริ่มเกิดรอยแตกกว้างขึ้นที่มุม ความเค้นของคอนกรีตภายนอกที่ถูกโอบรัดและคอนกรีตที่อยู่ภายในท่อเหล็กจะมีค่าประมาณร้อยละ 95 และร้อยละ 70 ของกำลังรับแรงสูงสุดตามลำดับ

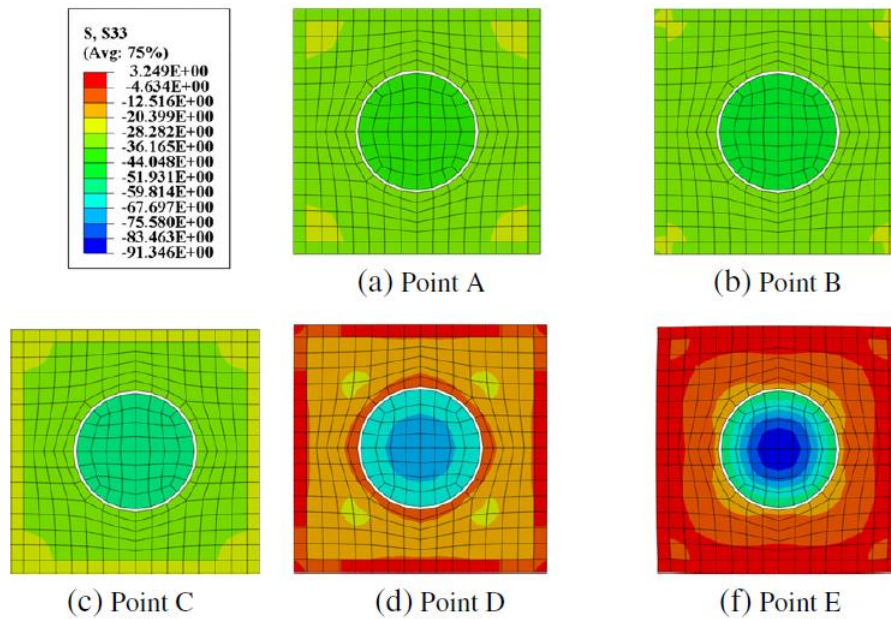
ชั้นที่ 3 : (BC) กำลังรับแรงของคอนกรีตไม่ถูกโอบรัดภายนอกจะลดลงแต่กำลังรับแรงของเสาจะเพิ่มขึ้น ที่จุด C กำลังรับแรงของคอนกรีตภายนอกที่ถูกโอบรัดจะเพิ่มขึ้นจนถึงกำลังรับแรงสูงสุด

ชั้นที่ 4 : (CD) ความเครียดตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กำลังรับแรงของคอนกรีตภายนอกจะลดลงจนไม่สามารถรับแรงได้ แต่ความเค้นของคอนกรีตในท่อเหล็กจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนเริ่มคงที่ที่จุด D

ชั้นที่ 5 : (DE) เป็นช่วงที่แรงกระทำบรรทุทุกครั้งที่ กำลังของเสาประมาณร้อยละ 50 จะขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตแกนกลาง

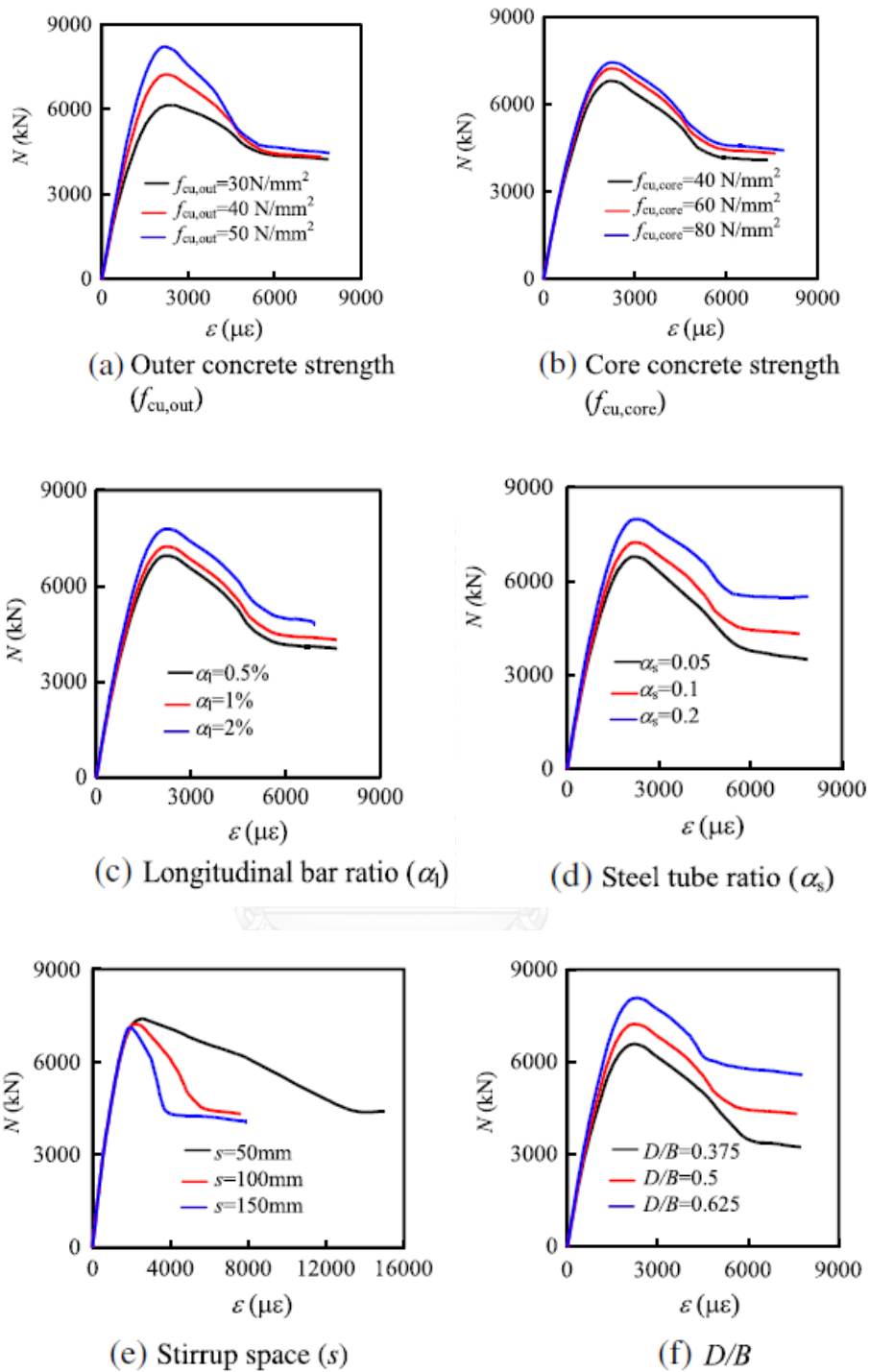


รูป 2.66 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและความเครียดของเสาวัสดุผสมคอนกรีตเสริมลงในท่อเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (Han และ An 2013)



รูป 2.67 การกระจายความเค้นของคอนกรีตในหน้าตัดเสาวัสดุผสมรับแรงอัด (Han และ An 2013)

ตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาผลกระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกน (N) กับความเครียดตามแนวแกน (ϵ) ได้แก่ กำลังรับแรงของคอนกรีตภายนอก ($f_{cu,out}$) คอนกรีตภายในท่อเหล็ก ($f_{cu,core}$) อัตราส่วนเหล็กเสริมตามแนวยาว (α_l) อัตราส่วนท่อเหล็ก (α_s) ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม (s) และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อต่อความกว้างหน้าตัดเสา (D/B) ผลกระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกน (N) กับความเครียดตามแนวแกน (ϵ) แสดงไว้ดังรูปที่ 2.68



รูป 2.68 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับความเครียดของเสาวัสดุผสม (Han และ An 2013)

โดยสามารถสรุปได้ว่าเมื่อกำลังของคอนกรีตด้านนอกเพิ่มขึ้น กำลังวิบัติของเสาจะเพิ่มขึ้นตาม แต่ความเหนียวของเสาจะลดลง ดังรูปที่ 2.68(a) และเมื่อกำลังของคอนกรีตภายในท่อเหล็กมีกำลังสูงขึ้น กำลังวิบัติของเสาจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่การเพิ่มกำลังของคอนกรีตภายในท่อเหล็กจะไม่มีผลต่อความเหนียวของเสา ดังแสดงในรูปที่ 2.68(b) อัตราส่วนพื้นที่เหล็กเสริมทางยาวต่อพื้นที่หน้าตัดเสายังคงมีผลต่อกำลังวิบัติของเสาดังแสดงในรูปที่ 2.68(c) คือเมื่ออัตราพื้นที่เหล็กเสริมทางยาวต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังของเสาเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดต่อเหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (CFST) มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังวิบัติของเสามีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อความเหนียวของเสาดังแสดงในรูปที่ 2.68(d) ระยะห่างของเหล็กเสริมทางขวางไม่มีผลกระทบต่อกำลังวิบัติของเสาดังแสดงในรูปที่ 2.68(e) และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อต่อความกว้างหน้าตัดเสา (D/B) มีผลต่อกำลังวิบัติของเสาโดยเมื่ออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อต่อความกว้างหน้าตัดเสา (D/B) มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังวิบัติของเสามีค่าเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีผลต่อความเหนียวของเสา

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

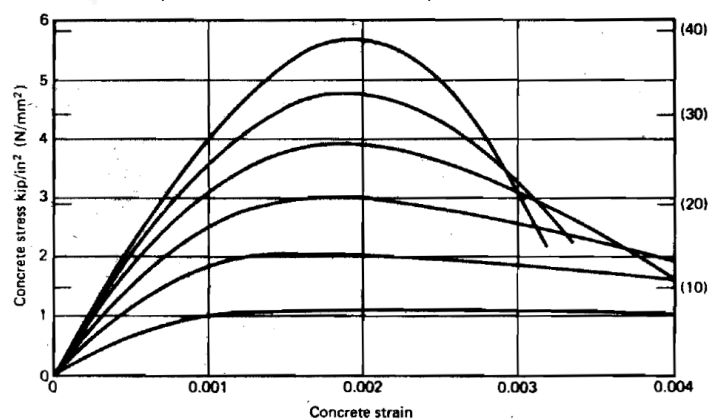
3.1 แบบจำลองความเค้นและความเครียดทางทฤษฎีสำหรับคอนกรีต

การถูกโอบรัดตัวของคอนกรีตเกิดจากคอนกรีตที่อยู่ภายในท่อเหล็กเกิดการขยายตัวด้านข้าง เมื่อมีการหดตัวทางแนวแกนแต่ไม่สามารถขยายตัวได้เนื่องจากการโอบรัดของท่อเหล็ก จึงทำให้คอนกรีตในบริเวณดังกล่าวมีความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกนสูงกว่าคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว

จากการศึกษาของ Park และ Paulay [27] ในปี 1975 ซึ่งทำนายพฤติกรรมรับแรงอัดตามแนวแกนของคอนกรีตจากตัวอย่างทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 โดยแท่งทรงกระบอกจะได้รับแรงอัดอย่างช้าๆ จนกระทั่งเวลาผ่านไป 2 ถึง 3 นาที แท่งทรงกระบอกมาตรฐานที่ใช้มีความสูง 305 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 152 มิลลิเมตร โดยสามารถรับแรงอัดได้ประมาณ 13.8 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ถึง 55.2 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรที่เวลา 28 วัน

รูปที่ 3.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากแท่งคอนกรีตทรงกระบอกที่รับแรงอัดตามแนวแกนจากการทดสอบ เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งถึงครึ่งหนึ่งของน้ำกำลังรับแรงอัด ที่บริเวณจุดสูงสุดของเส้นกราฟสำหรับคอนกรีตกำลังสูงจะมีความชันมากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังต่ำ ความเค้นของจุดที่มีความเครียดมากที่สุดมีค่าประมาณ 0.002



รูป 3.1 ความสัมพันธ์หน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว

(Park และ Paulay, 1975)

แบบจำลองความเค้นและความเครียดของคอนกรีตแรงอัดทางเดียวถูกนำเสนอโดย E.Hognestad (1951) [28] ดังรูปที่ 3.2 และสามารถคำนวณความเค้นอัดทางเดียวของคอนกรีต ได้ ดังสมการที่ 3.1 - 3.3

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1.3)$$

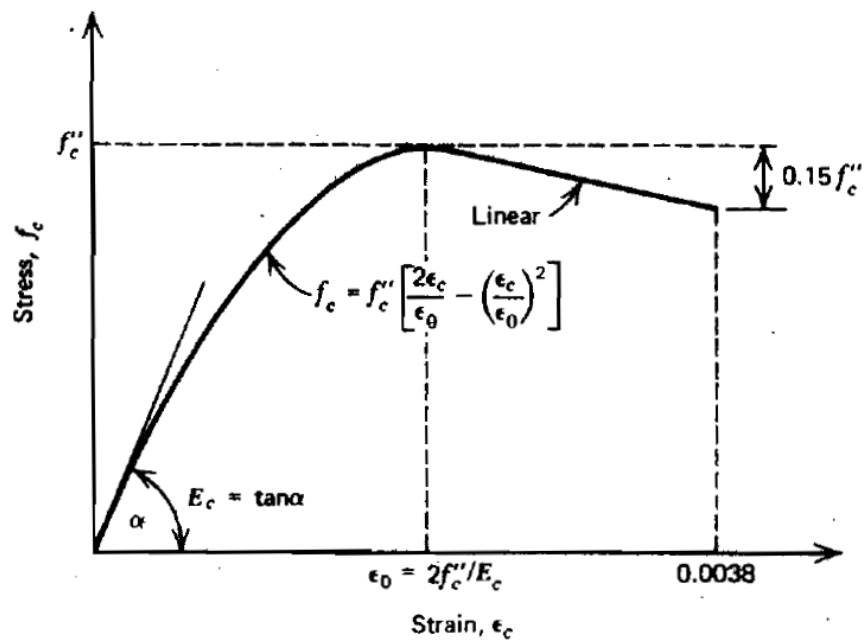
$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (3.2)$$

$$E_c = 4730\sqrt{f'_c} \quad (3.3)$$

โดย f'_c คือ กำลังรับแรงอัดทางเดียวสูงสุดที่คอนกรีตรับได้

ε_0 คือ ความเครียดที่คอนกรีตมีความเค้นสูงสุด

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

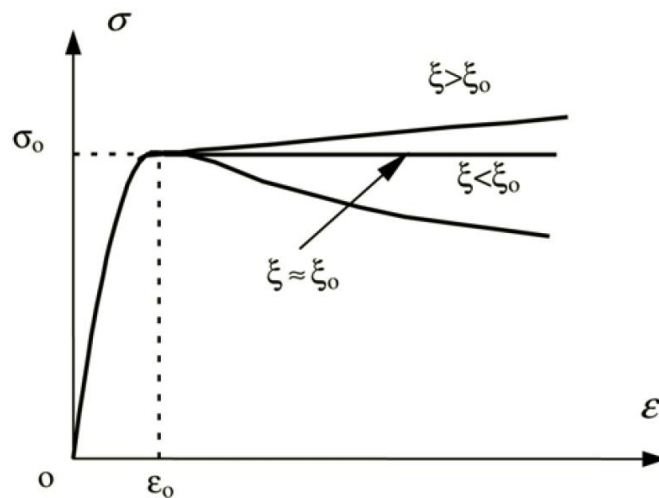


รูป 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว

(Park และ Paulay, 1975)

3.1.2 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

คอนกรีตที่ถูกโอบรัดจะได้รับแรงอัดในสามทิศทาง (Triaxial Compression) (Han และคณะ 2005, [29]) ซึ่งจะมีกำลังรับแรงอัดในทิศทางหลักสูงกว่าคอนกรีตรับแรงอัดในทิศทางเดียว (Uniaxial Compression) เนื่องจากความดันด้านข้าง (Lateral Pressure) จะช่วยลดการเกิดรอยแตกร้าวภายในคอนกรีต เรียกคอนกรีตประเภทนี้ว่า คอนกรีตที่ถูกโอบรัด (Confined Concrete) โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูป 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด
(Han และคณะ ,2005)

โดยตัวประกอบการโอบรัด(confinement factor, ξ) สามารถคำนวณได้จาก

$$\xi = \frac{A_s f_{sy}}{A_c f_{ck}} = \alpha \cdot \frac{f_{sy}}{f_{ck}} \quad (3.4)$$

เมื่อ A_s คือพื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็ก , A_c คือพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต , f_{sy} คือความเครียดที่จุดครากของท่อเหล็ก และ f_{ck} คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยมีค่าเท่ากับ 67% ของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าเมื่อตัวประกอบการโอบรัดมีค่ามากขึ้น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่ามากขึ้นตาม และยังสามารถเห็นได้อีกว่าเมื่อตัวประกอบการโอบรัดมีค่ามากขึ้น ความเหนียวของคอนกรีตก็จะมีค่ามากขึ้นตาม โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยท่อกลมสามารถสรุปได้ตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 y &= 2x - x^2 & (x \leq 1) \\
 y &= \begin{cases} 1 + q \cdot (x^{0.1\xi} - 1) & (\xi \geq 1.12) \\ \frac{x}{\beta \cdot (x-1)^2 + x} & (\xi < 1.12) \end{cases} & (x > 1) \quad (3.5)
 \end{aligned}$$

เมื่อ

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

$$y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

$$\sigma_0 = \left[1 + (-0.054 \cdot \xi^2 + 0.4 \cdot \xi) \cdot \left(\frac{24}{f'_c} \right)^{0.45} \right] \cdot f'_c$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{cc} + \left[1400 + 800 \cdot \left(\frac{f'_c}{24} - 1 \right) \right] \cdot \xi^{0.2} (\mu\varepsilon)$$

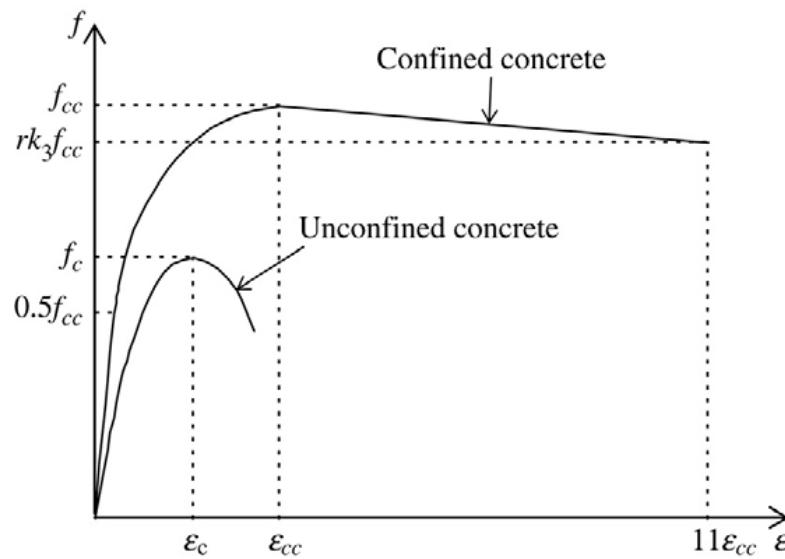
$$\varepsilon_{cc} = 1300 + 12.5 \cdot f'_c (\mu\varepsilon)$$

$$q = \frac{\xi^{0.745}}{2 + \xi}$$

$$\beta = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)]^7} \cdot f'_c{}^2 \cdot 3.51 \times 10^{-4}$$

ใช้หน่วยของความเค้นเป็นนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (N/mm^2) และใช้หน่วยของความเครียดเป็นไมโครสเตรน ($\mu\varepsilon$)

ในปี 2006 Ellobody และคณะ [30] ได้ศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดในเสาท่อเหล็ก เต็มด้วยคอนกรีตและพบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อ (D/t) มีค่ามากจะไม่สามารถสร้างการโอบรัดให้แก่คอนกรีตได้และจะทำให้เสาวิบัติเนื่องจากการโก่งเดาะ เฉพาะที่ของท่อเหล็ก ในทางกลับกันเมื่ออัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อ (D/t) มีค่าน้อยจะสามารถสร้างการโอบรัดให้แก่คอนกรีต รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดและคอนกรีตที่ถูกโอบรัด



รูป 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและไม่ถูกโอบรัด
(Mander และคณะ, 1988)

โดย f_c คือกำลังของคอนกรีตทรงกระบอกที่ไม่ถูกโอบรัด มีค่าเท่ากับ $0.8(f_{cu})$ เมื่อ f_{cu} คือกำลังของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่ไม่ถูกโอบรัด ความเค้นของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (ϵ_c) มีค่าเท่ากับ 0.003 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด (f_{cc}) และความเครียด (ϵ_{cc}) สามารถระบุได้จากสมการที่ 3.6 และ 3.7 ซึ่งถูกเสนอโดย Mander และคณะ [8]

$$f_{cc} = f_c + k_1 f_t \quad (3.6)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_c \left(1 + k_2 \frac{f_t}{f_c} \right) \quad (3.7)$$

เมื่อ f_t คือแรงดันด้านข้างจากท่อเหล็ก ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนา (D/t) และความเค้นคราก (f_t) ค่าโดยประมาณของ f_t สามารถหาได้จากสมการของ Hu และคณะ [19] โดยสมการสามารถใช้ได้สำหรับท่อเหล็กที่มี D/t ระหว่าง 21.7 ถึง 150 ค่า k_1 และ k_2 ถูกเสนอโดย Richart และคณะ [17] มีค่า 4.1 และ 20.5 ตามลำดับ

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดตามที่แสดงในรูปที่ 3.4 จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นจนถึงขีดจำกัดการแปรผันตรง (Proportional Limit) ซึ่งมีค่า $0.5(f_{cc})$ ในขณะที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด (E_{cc}) จะเป็นไปตามสมการที่ 3.8 ที่ถูกเสนอโดยมาตรฐาน ACI [16] และอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดมีค่า 0.2

$$E_{cc} = 4700 \sqrt{f_{cc}} \text{ MPa} \quad (3.8)$$

ในช่วงที่สองเป็นส่วนที่ไม่เป็นเส้นตรง ค่า f_{cc} สามารถระบุได้ตามสมการที่ 3.9 ซึ่งนำเสนอโดย Saenz [31] ความเครียด (ε) ในช่วงนี้มีค่าตั้งแต่ $(0.5 f_{cc} / E_{cc})$ จนถึงความเครียดที่ถูกโอบรัด (ε_{cc}) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด ความเค้น (f) สามารถระบุได้จากสมการ 3.9

$$f = \frac{E_{cc}\varepsilon}{1 + (R + R_E - 2)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right) - (2R - 1)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right)^2 + R\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right)^3} \quad (3.9)$$

เมื่อ $R_E = \frac{E_{cc}\varepsilon_{cc}}{f_{cc}} \quad (3.10)$

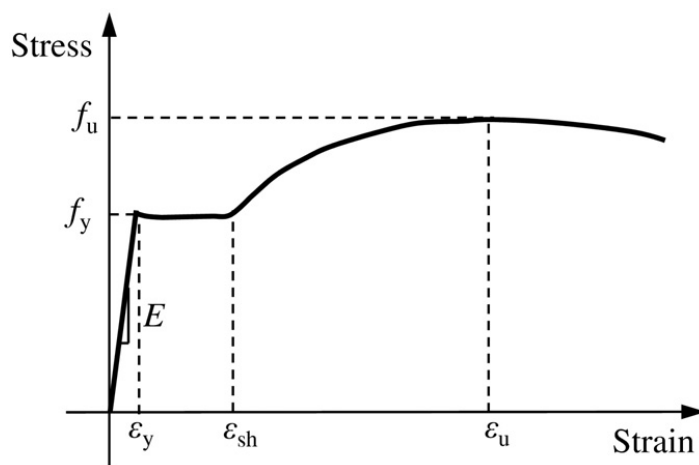
$$R = \frac{R_E (R_\sigma - 1)}{(R_\sigma - 1)^2} - \frac{1}{R_\sigma} \quad (3.11)$$

R_σ และ R_ε มีค่าเท่ากับ 4 ตามที่ Hu และ Schnobrich [32] นำเสนอ

ช่วงที่สามเป็นช่วงที่ความเค้นลดลงจากกำลังของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด (f_{cc}) จนถึงค่าที่ต่ำกว่าซึ่งเท่ากับ $rk_3 f_{cc}$ ที่จุดที่มีความเครียดเท่ากับ $11\varepsilon_{cc}$ โดยค่าตัวคูณลดค่า k_3 จะขึ้นอยู่กับ D/t และความเค้นคราก (f_y) โดยสามารถระบุได้จากสมการที่เสนอโดย Hu และคณะ [19] ซึ่งสามารถใช้สำหรับท่อเหล็กที่มีค่า D/t ระหว่าง 21.7 ถึง 150 และกำลังของคอนกรีตสูงสุดมีค่าไม่มากกว่า 31.2 เมกะปาสคาล ตัวคูณลดค่า r เป็นผลกระทบมาจากกำลังของคอนกรีต เมื่อกำลังของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ มีค่าไม่เกิน 30 เมกะปาสคาล จะมีค่าเท่ากับ 1.0 แต่เมื่อกำลังของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ (f_{cu}) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 100 เมกะปาสคาล r จะมีค่าเท่ากับ 0.5 ค่าของ r ของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ (f_{cu}) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 30 และ 100 เมกะปาสคาล สามารถระบุได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าเชิงเส้น (Linear interpolation)

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กรีดร้อน

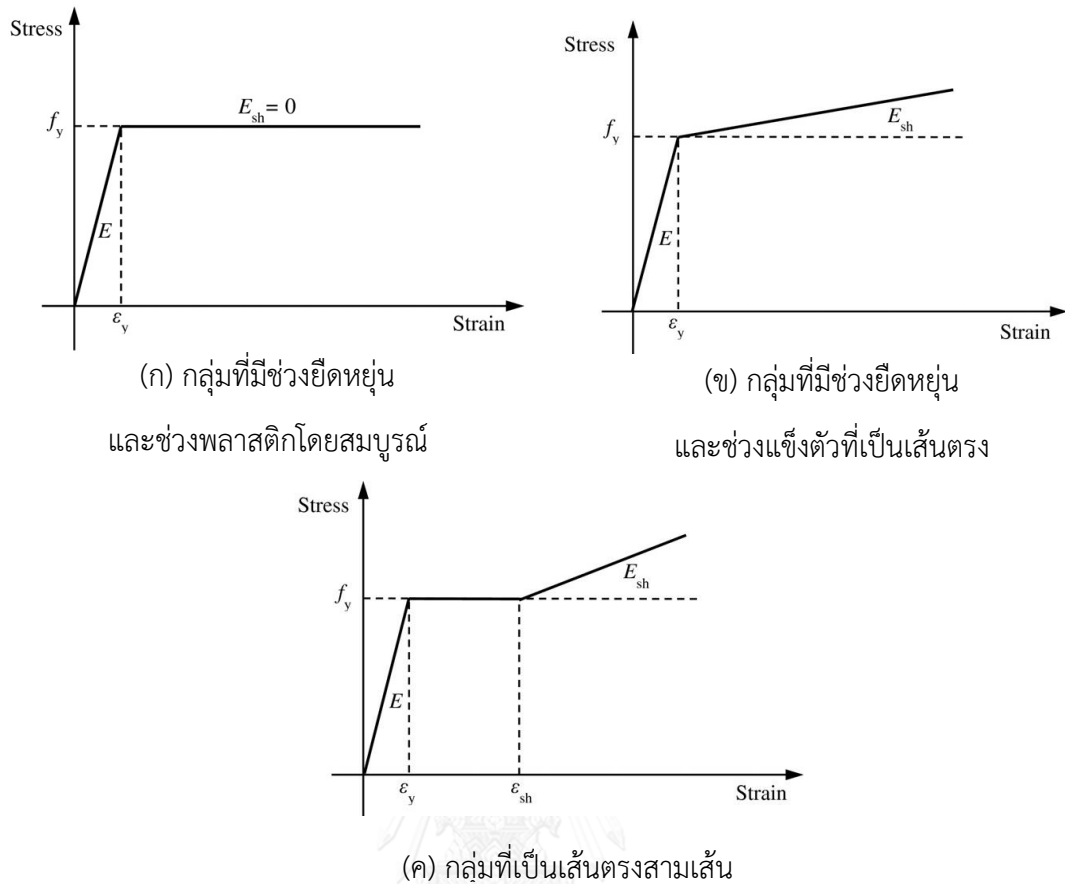
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กคาร์บอนรีดร้อนในช่วงยืดหยุ่น (elastic range) จะเป็นเส้นตรงความชันคงที่และระบุได้จากความสัมพันธ์ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นโดยมีค่าประมาณ 210,000 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตรตามมาตรฐาน EN-1993-1-1 [33] ช่วงนี้จะสิ้นสุดเมื่อความเค้นมีค่าเท่ากับความเค้นคราก (yield stress, f_y) หลังจากช่วงนี้ความเค้นจะมีค่าคงที่จนกระทั่งถึงจุดความเครียดแข็งตัว (strain hardening, ε_{sh}) จากจุดนี้ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงจนกระทั่งถึงความเค้นประลัย (ultimate tensile stress, f_u) [34] ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูป 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กคาร์บอนรีดร้อน

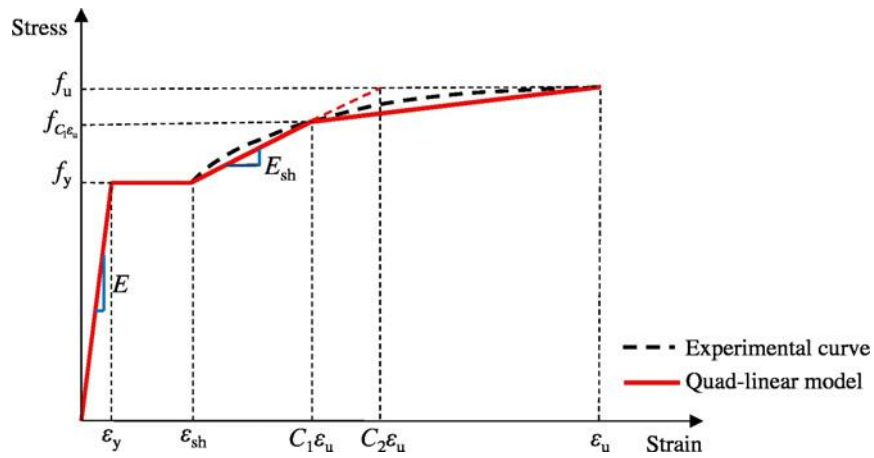
(Yun และคณะ, 2017)

ในอดีตที่ผ่านมาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กรีดร้อน ถูกนำเสนอไว้อย่างหลากหลาย โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบที่มีช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกโดยสมบูรณ์ (elastic, perfect-plastic), แบบที่มีช่วงยืดหยุ่นและช่วงแข็งตัวที่เป็นเส้นตรง (elastic, linear-hardening) และแบบที่เป็นเส้นตรงสามเส้น (tri-linear) โดยแบบที่มีช่วงยืดหยุ่นและช่วงพลาสติกโดยสมบูรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 (ก) และถูกใช้ในมาตรฐานการออกแบบ EN 1993-1-1 [33] โดยช่วงที่แข็งตัว (hardening) จะไม่ถูกพิจารณา แบบที่มีช่วงยืดหยุ่นและช่วงแข็งตัวที่เป็นเส้นตรงแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 (ข) โดยแบบนี้จะพิจารณาการแข็งตัวด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ทั้งสองกลุ่มที่กล่าวมายังไม่เหมาะสมที่จะใช้กับเหล็กรีดร้อน จึงมีการพัฒนามาเป็นกลุ่มที่เป็นเส้นตรงสามเส้น (tri-linear) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ค)

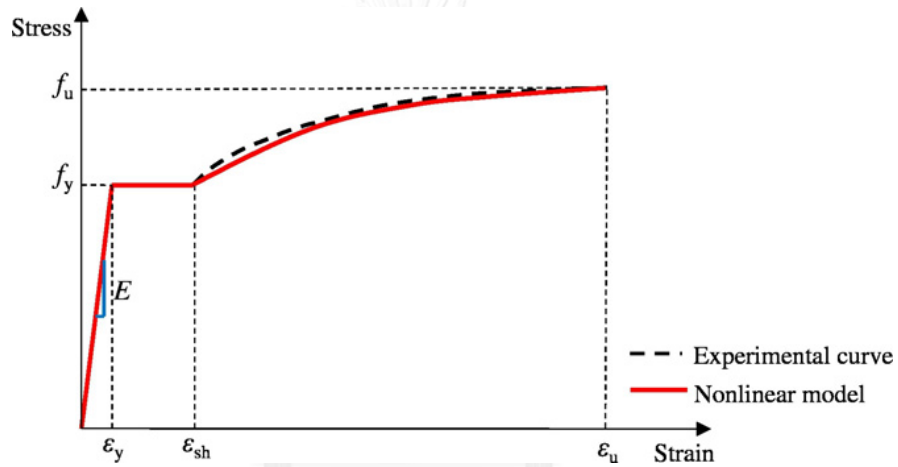


รูป 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กรีดร้อน (Yun และคณะ, 2017)

ในการศึกษาในช่วงหลังที่ผ่านมาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กรีดร้อนที่ได้มาตรฐานได้ถูกเสนอขึ้นมา 2 แบบจำลอง แบบจำลองแบบแรกแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 (ก) โดยประกอบด้วยเส้นตรงสี่เส้น และแบบจำลองแบบที่สองประกอบด้วยเส้นตรงสองเส้น และเส้นโค้งในช่วงแข็งตัวแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 (ข)



(ก)



(ข)

รูป 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองความเค้นและความเครียดของเหล็กรีดร้อน

(Yun และคณะ, 2017)

แบบจำลองแบบแรกสามารถอธิบายได้จากสมการดังนี้

$$f_y = \begin{cases} E \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh} (\varepsilon - \varepsilon_{sh}) & \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq C_1 \varepsilon_u \\ f_{C_1 \varepsilon_u} + \frac{f_u - f_{C_1 \varepsilon_u}}{\varepsilon_u - C_1 \varepsilon_u} (\varepsilon - C_1 \varepsilon_u) & C_1 \varepsilon_u < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\text{เมื่อ } \varepsilon_u = 0.6 \left(1 - \frac{f_y}{f_u} \right) \text{ และ } \varepsilon_u \geq 0.06 \text{ สำหรับเหล็กรีดร้อน}$$

$$\varepsilon_{sh} = 0.1 \frac{f_y}{f_u} - 0.055 \text{ และ } 0.015 \leq \varepsilon_{sh} \leq 0.03$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0.25(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u}$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0.4(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}$$

โดยแบบจำลองนี้ช่วงสามขั้นตอนแรกเหมาะสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบที่พิจารณาช่วงแข็งตัวของเหล็กรีดร้อนด้วย ส่วนแบบจำลองที่สองประกอบด้วยเส้นตรงสองเส้นและช่วงแข็งตัวที่เป็นเส้นโค้ง ที่แสดงได้ดังสมการที่ 3.13 เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ขั้นสูง โดยช่วงที่เป็นเส้นโค้ง นำมาจากแบบจำลองที่นำเสนอโดย Mander [8] และค่าคงที่ต่างๆ นำมาจากการทดสอบ

$$f(\varepsilon) = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + (f_u - f_y) \left\{ K_1 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right) + K_2 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right) / \left[1 + K_3 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)^{K_4} \right]^{1/K_4} \right\} & \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases} \quad (3.13)$$

3.3 การออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามมาตรฐาน AISC 360-10

จากการศึกษาข้อกำหนด AISC 360-10 ค.ศ.2010 [24] พบว่าข้อกำหนดได้แนะนำการออกแบบเสาวัสดุผสมท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตไว้ดังนี้

1. คอนกรีตน้ำหนักปกติ (normal weight concrete) มีหน่วยแรงอัดไม่น้อยกว่า 210 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และไม่เกิน 700 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร คอนกรีตน้ำหนักเบา (light weight concrete) มีหน่วยแรงอัดไม่เกิน 420 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

มาตรฐาน AISC 360-10 (2010) [24] กำหนดค่ากำลังรับแรงอัดตามแนวแกนระบุของหน้าตัดเสา โดยการพิจารณาการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local Buckling) จะพิจารณาจากอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็ก ดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 การจำแนกหน้าตัดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามมาตรฐาน AISC 360-10 (2010) [24]

คำอธิบาย	อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา	λ_p หน้าตัดอัดแน่น / ไม่อัดแน่น	λ_r หน้าตัดไม่อัดแน่น / หน้าตัดชะลูด	ค่าสูงสุด
หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม	$\frac{b}{t}$	$2.26 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$3.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.00 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
หน้าตัดท่อดวงกลม	$\frac{D}{t}$	$\frac{0.15 E}{F_y}$	$\frac{0.19 E}{F_y}$	$\frac{0.31 E}{F_y}$

3.3.1 สำหรับหน้าตัดอัดแน่น

$$P_{no} = P_p \quad (3.14)$$

$$P_p = F_y A_s + C_2 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (3.15)$$

โดย C_2 เท่ากับ 0.85 สำหรับหน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม และ 0.95 สำหรับหน้าตัดวงกลม, F_y คือกำลังรับแรงที่จุดคราก, f'_c คือกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต, A_s คือพื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็ก, A_{sr} คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม, A_c คือพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต, E_s คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก, E_c คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

สำหรับหน้าตัดไม่อัดแน่น

$$P_{no} = P_p - \frac{P_p - P_y}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (3.16)$$

$$P_y = F_y A_s + 0.7 f'_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (3.17)$$

โดย λ , λ_p และ λ_r ะมีค่าจากตารางที่ 1 และ P_p มีค่าจากสมการที่ 3.15

3.3.2 สำหรับหน้าตัดชะลูด

$$P_{no} = F_{cr} A_s + 0.7 f_c \left(A_c + A_{sr} \frac{E_s}{E_c} \right) \quad (3.18)$$

สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยม

$$F_{cr} = \frac{9 E_s}{\left(\frac{b}{t} \right)^2} \quad (3.19)$$

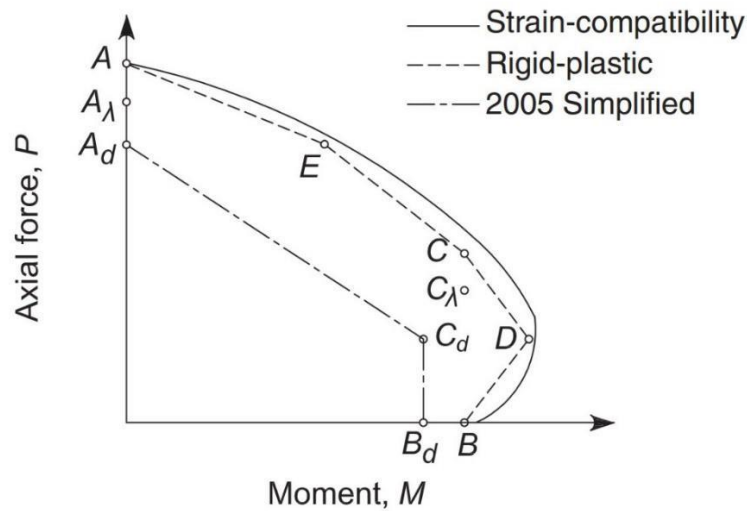
สำหรับหน้าตัดวงกลม

$$F_{cr} = \frac{0.72 F_y}{\left(\left(\frac{D}{t} \right) \frac{F_y}{E_s} \right)^{0.2}} \quad (3.20)$$

การสร้างเส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัด สามารถใช้ได้ 2 วิธีคือวิธีความสอดคล้องของความเครียด และวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก เพื่อความง่ายต่อการออกแบบ มาตรฐาน AISC 360-10 [24] ได้เสนอแนวทางสร้างเส้นสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัด ดังนี้

1. ในคาน - เสาวัดผสมที่มีความสมมาตรทั้ง 2 แกน ซึ่งส่วนมากเป็นหน้าตัดไม่อัดแน่นหรือหน้าตัดชะลูด ทำให้การออกแบบโดยใช้เส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดจากหน้าตัดคานเหล็กเพียงลำพังได้ แต่การใช้วิธีนี้จะเป็นการสิ้นเปลืองเนื่องจากไม่ได้คิดกำลังจากคอนกรีต

2. ในคาน - เสาวัดผสมที่เป็นหน้าตัดอัดแน่นสามารถวิเคราะห์โดยวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติก หรือวิธีความสอดคล้องของความเครียด



รูป 3.8 เส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัด (interaction Diagram) ในการออกแบบคานเสาวัสดุผสม- [24]

การสร้างเส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดทำได้โดยการลากเส้นตรงเชื่อม 5 จุด (จุด A ถึง E) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 กำลังแรงของหน้าตัดที่จุดต่างๆ สามารถหาได้โดย

จุด A : จุดที่แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของหน้าตัดที่ไม่คำนึงถึงความชะลูดของเสา เมื่อโมเมนต์เป็นศูนย์

จุด B : จุดที่แสดงค่ากำลังรับแรงดัดระบุของหน้าตัด (M_n) เมื่อกำลังรับแรงอัดเป็นศูนย์

จุด C : จุดที่แสดงค่ากำลังรับแรงดัดระบุของหน้าตัด (M_n) ที่จุด B และมีแรงอัดร่วมด้วย

จุด D : จุดที่แสดงค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงอัดที่จุด C และมีแรงดัดร่วมด้วย

จุด E : จุดใด ๆ ที่เพิ่มขึ้น มักใช้กรณีหน้าตัดเหล็กรูปพรรณหุ้มด้วยคอนกรีตรับโมเมนต์รอบแกนรอง

เมื่อพิจารณาผลของความชะลูดขององค์อาคาร กำลังรับแรงอัดจะมีค่าลดลง ดังแสดงด้วยจุด A_λ และ C_λ เป็นต้น

3. วิธีเส้นตรงสองเส้นอย่างง่ายเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีที่ 2 กล่าวคือ เส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดัดเพื่อใช้ในการออกแบบจะได้แก่ เส้นตรงเชื่อม 3 จุด คือ A_d , C_d , B_d ดังรูปที่ 3.8 และสมการเส้นตรงทั้งสองเส้นเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } P_r < P_c \text{ (จุด } C_d \text{) : } \quad \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \leq 1 \quad (3.21)$$

$$\text{เมื่อ } P_r \geq P_C \text{ (จุด } C_d \text{) : } \quad \frac{P_r - P_C}{P_A - P_C} + \frac{M_{rx}}{M_{Cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{Cy}} \leq 1 \quad (3.22)$$

โดยที่ P_r = กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่ต้องการ (กก.)

M_{rx} = กำลังแรงดัดรอบแกน x (แกนหลัก) ที่ต้องการ (กก.ชม.)

M_{ry} = กำลังแรงดัดรอบแกน y (แกนรอง) ที่ต้องการ (กก.ชม.)

P_A = กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้ (จุด A_d) (กก.)

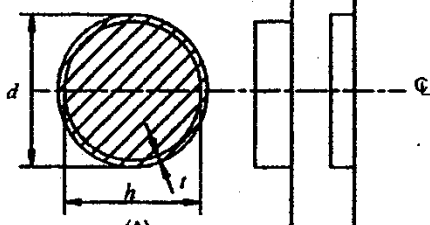
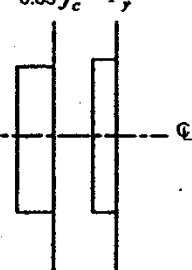
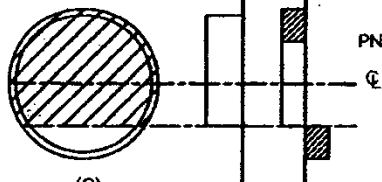
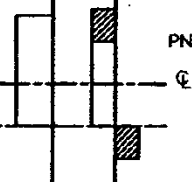
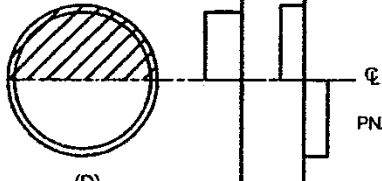
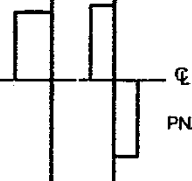
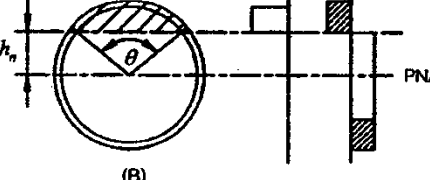
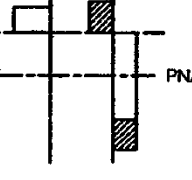
P_C = กำลังแรงอัดตามแนวแกนที่สามารถรับได้ (จุด C_d) (กก.)

M_{Cx} = กำลังแรงดัดรอบแกน x (แกนหลัก) ที่สามารถรับได้ (กก.ชม.)

M_{Cy} = กำลังแรงดัดรอบแกน y (แกนรอง) ที่สามารถรับได้ (กก.ชม.)

ตารางที่ 3.2 แสดงสมการที่ใช้ในการสร้างจุดต่าง ๆ บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและแรงดัดด้วยวิธีการกระจายหน่วยแรงแบบพลาสติกของคาน – เสาว์สตุผสมต่างๆ ที่มีหน้าตัดประเภทอัดแน่นภายใต้การดัดรอบแกนหลักหรือแกนรอง

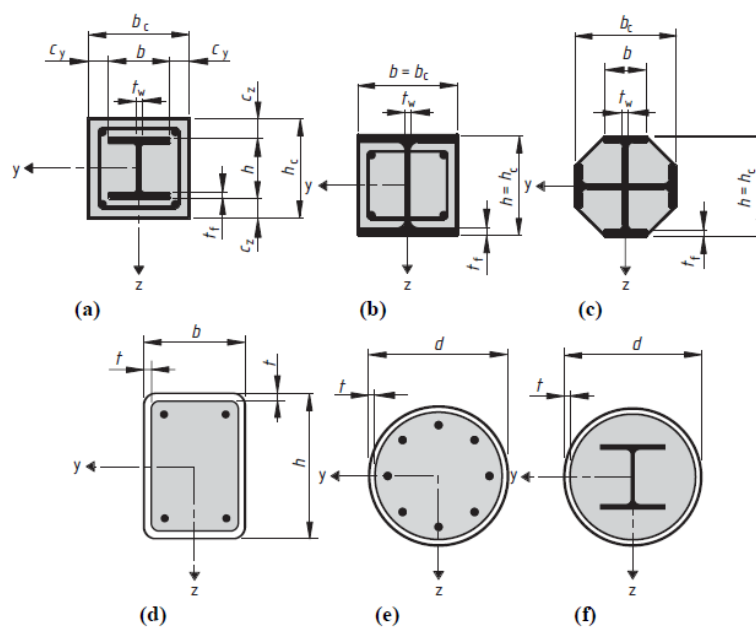
ตาราง 3.2 การสร้างจุดต่างๆ บนเส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดและกำลังแรงดัดของเสาท่อเหล็กกลมเต็มด้วยคอนกรีตรับโมเมนต์กระทำรอบแกนใดๆ [35]

หน้าตัด	การกระจายของหน่วยแรง	จุด	สมการ
 <p>(A)</p>		A	$P_A = A_c F_y + 0.85 f_c' A_c$ $M_A = 0$ $A_c = \pi (dt - t^2)$ $A_c = \frac{\pi h^2}{4}$
		C	$P_C = 0.85 f_c' A_c$ $M_C = M_B$
 <p>(C)</p>		D	$P_D = 0.85 f_c' A_c / 2$ $M_D = Z_c F_y + Z_c (0.85 f_c') / 2$ $Z_c = \text{โมเมนต์พลัสติกของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ}$ $= \frac{d^3}{6} - Z_c$ $Z_c = \frac{h^3}{6}$
 <p>(D)</p>			B
 <p>(B)</p>			

3.4 การออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามมาตรฐาน Eurocode4

Eurocode4 [11] นำเสนอการออกแบบเสาวัสดุผสมโดยมีขอบเขตทั่วไปดังนี้

- เสาวัสดุผสมมีทั้งหมด 3 ประเภท คือ แบบหน้าตัดเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (concrete encased section), แบบหน้าตัดเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน (partially encased section), และหน้าตัดท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต (concrete filled rectangular and circular tube) ดังรูปที่ 3.9



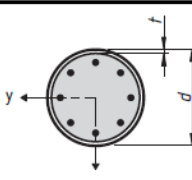
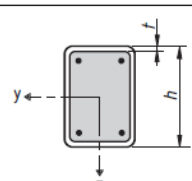
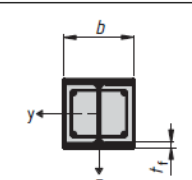
รูป 3.9 ประเภทหน้าตัดของเสาวัสดุผสม [11]

- เสาและชิ้นส่วนรับแรงอัดทำด้วยเหล็กชนิด S235 ถึง S460 และคอนกรีตชนิด C20/25 ถึง C50/60
- มาตรฐานนี้ใช้สำหรับการออกแบบเสาเดี่ยวหรือเสาชิ้นส่วนในโครงข้อแข็งที่ชิ้นส่วนอื่นเป็นวัสดุผสมหรือเหล็กเท่านั้น
- อัตราส่วนเหล็กรูปพรรณ (steel contribution ratio, s) เป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ 3.23 และต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.9

$$\delta = \frac{A_a f_{yd}}{N_{pl,Rd}} \quad (3.23)$$

โดย A_a คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ และ f_{yd} คือกำลังครากของเหล็กรูปพรรณ

- ข้อกำหนดที่ต้องตรวจสอบสำหรับเสาหรือชิ้นส่วนวัสดุผสมมีดังนี้
 - กำลังต้านทานของเสา
 - กำลังต้านทานการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่
 - น้ำหนักบรรทุก
 - กำลังต้านทานแรงเฉือนระหว่างเหล็กและคอนกรีต
- การออกแบบเสาวัสดุผสมแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ
 - วิธีทั่วไป (general method)
 - วิธีแบบง่าย (simplified method)
- ในเสาที่รับทั้งแรงดัดและแรงในแนวแกนจากแรงที่เป็นอิสระต่อกัน กำลังต้านทานของชิ้นส่วนจะต้องคูณด้วยค่าคงที่ (partial factor, γ_F) ซึ่งจะทำให้กำลังต้านทานมีค่าลดลงร้อยละ 20
- ต้องพิจารณาผลจากการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่
- ความขรุขระของหน้าตัดที่ไม่จำเป็นต้องพิจารณาการโก่งเดาะเฉพาะที่เป็นไปตามรูปที่ 3.10

Cross-section	Max (d/t), max (h/t) and max (b/t)
Circular hollow steel sections 	$\max (d/t) = 90 \frac{235}{f_y}$
Rectangular hollow steel sections 	$\max (h/t) = 52 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
Partially encased I-sections 	$\max (b/t_f) = 44 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

รูป 3.10 ขอบเขตความชะลุดของหน้าตัดเสาวัสดุผสมรูปแบบต่างๆ [11]
วิธีการออกแบบอย่างง่าย (Simplified method) มีขอบเขตในการใช้ดังนี้

- ใช้ได้เฉพาะหน้าตัดที่มีความสมมาตรตามทั้ง 2 แนวแกน (doubly symmetric) และเป็นหน้าตัดคงที่ตลอดความยาวนั้น ใช้ได้กับทั้งเหล็กรีดร้อน (rolled section) ขึ้นรูปเย็น (cold form) และแบบเชื่อม (welded section) โดยความชะลุดสัมพันธ์ (relative slenderness, λ) ต้องมีค่าไม่เกิน 2.0 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.24

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \quad (3.24)$$

โดย N_{cr} คือแรงในแนวแกนวิกฤติแบบยืดหยุ่นที่สัมพันธ์กับรูปแบบการพังของเสา สามารถคำนวณได้จากสติฟเนสการดัดประสิทธิผล (effective flexural stiffness, $(EI)_{eff}$)

$N_{pl,Rk}$ คือค่าลักษณะเฉพาะของค่ากำลังต้านทานแรงอัดในช่วงพลาสติก ($N_{pl,Rd}$) ที่ใช้ในการออกแบบ

- อัตราส่วนของเหล็กเสริมตามยาวต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 6 ของพื้นที่หน้าตัดคอนกรีต
- อัตราส่วนความลึกต่อความกว้างของหน้าตัดวัสดุผสมต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.5

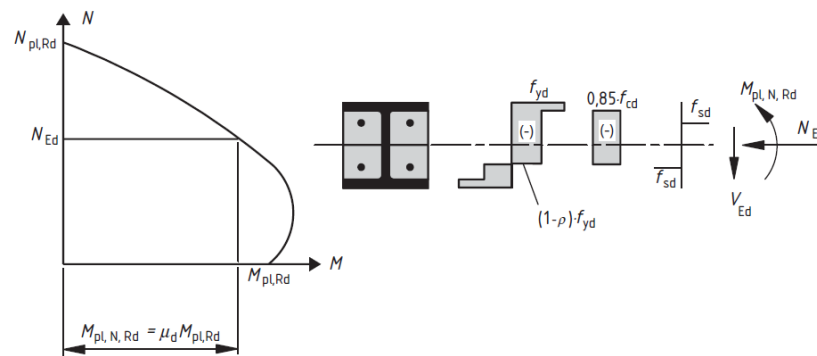
การคำนวณกำลังรับแรงของหน้าตัด (resistance of cross section) ด้วยวิธีการแบบง่าย สามารถคำนวณได้จากแรงอัดในช่วงพลาสติก ดังสมการที่ 3.25

$$N_{pl,Rd} = A_c f_{yd} + 0.85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \quad (3.25)$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต
 A_s คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมทางยาว
 f_{cd} คือ กำลังรับแรงของคอนกรีต
 f_{sd} คือ กำลังครากของเหล็ก

โดยสมการที่ 3.25 ใช้สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทุกส่วน (fully encased steel section) และหน้าตัดเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน (partially encased steel section) สำหรับหน้าตัดท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจะเปลี่ยนค่าคงที่จาก 0.85 เป็น 1.00

การคำนวณกำลังรับแรงของหน้าตัดสำหรับการรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดร่วมกันสามารถหาได้จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ (interaction curve) ที่สมมติให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.11 ซึ่งไม่คิดกำลังรับแรงดิ่งของคอนกรีต สำหรับแรงเฉือนทางด้านข้าง (transverse shear force) จะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดร่วมกันของหน้าตัดในเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์เมื่อแรงเฉือนในหน้าตัดเหล็ก ($V_{pl,Ed}$) มีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ของกำลังรับแรงเฉือนออกแบบของหน้าตัดเหล็ก ($V_{pl,a,Rd}$)



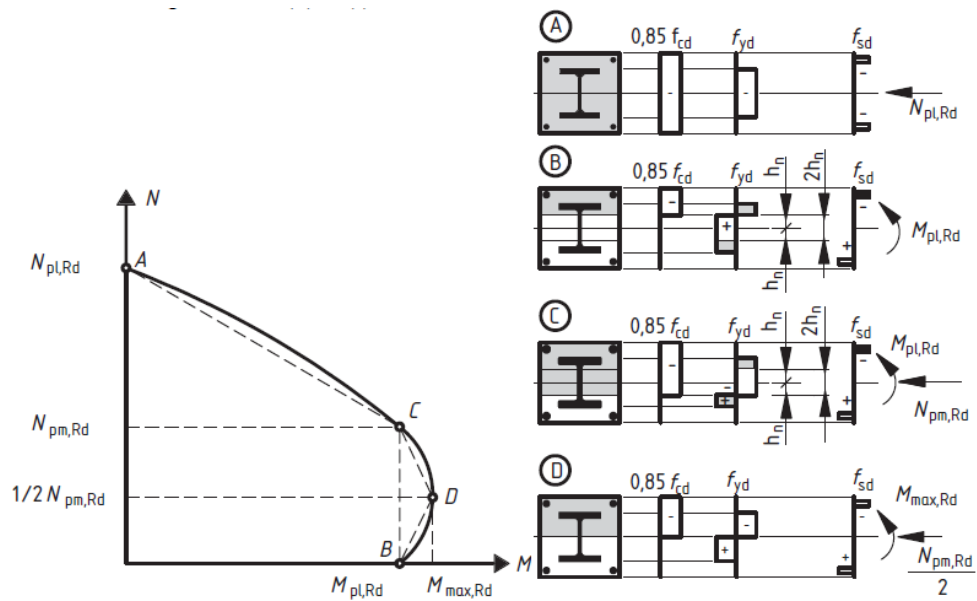
รูป 3.11 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับเสาวัสดุผสมรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดร่วมกัน [11]

โมเมนต์ดัดร่วมกัน[11]แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดสามารถแบ่งเป็นแรงเฉือนที่กระทำต่อเหล็กและแรงเฉือนที่กระทำต่อคอนกรีตได้ดังสมการที่ 3.26 และสมการที่ 3.27 ตามลำดับ หรือเพื่อความสะดวกในการคำนวณสามารถสมมติให้แรงเฉือนทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด (V_{Ed}) กระทำต่อเหล็กเท่านั้น

$$V_{a,Ed} = V_{Ed} \frac{M_{pl,a,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (3.26)$$

$$V_{c,Ed} = V_{Ed} - V_{a,Ed} \quad (3.27)$$

สำหรับการคำนวณอย่างง่ายเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังสามารถใช้รูปหลายเหลี่ยมที่เกิดจากการลากเส้นต่อจุดตั้งเส้นประที่แสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งแสดงตัวอย่างการกระจายของหน่วยแรงในหน้าตัดเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทุกส่วนจากจุด A ถึงจุด D โดย $N_{pm,Rd}$ จะใช้ค่าเท่ากับ $0.85 f_{cd} A_c$ สำหรับหน้าตัดเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทุกส่วนและหน้าตัดเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน และใช้ค่าเท่ากับ $f_{cd} A_c$ สำหรับหน้าตัดท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต



รูป 3.12 การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังอย่างง่ายของเสาสั้น [11]

สำหรับหน้าตัดท่อเหล็กรูปวงกลมเติมด้วยคอนกรีต กำลังของคอนกรีตภายในจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากได้รับการโอบรัดจากท่อเหล็กซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความชะลูดสัมพันธ์ (relative slenderness, $\bar{\lambda}$) ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (3.24) โดยความชะลูดสัมพันธ์ ($\bar{\lambda}$) ต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 และ e/d ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.1 เมื่อ e คือระยะเยื้องศูนย์กลาง, d คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อเหล็ก

ในการระบุค่าความชะลูดสัมพันธ์และแรงในแนวแกนวิกฤติแบบยืดหยุ่นที่สัมพันธ์รูปแบบการพังของเสา (N_{cr}) จำเป็นจะต้องใช้ค่าที่คำนวณได้จากสติเฟเนสการดัดประสิทธิ์ผล (effective flexural stiffness, $(EI)_{eff}$) ซึ่งเป็นไปดังสมการที่ 3.28

$$(EI)_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + K_e E_{cm} I_c \quad (3.28)$$

เมื่อ K_e คือ ตัวประกอบการแก้ไขซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.6

I_a คือ พื้นที่โมเมนต์ลำดับที่สองของเหล็กรูปพรรณ

I_c คือ พื้นที่โมเมนต์ลำดับที่สองของคอนกรีต

I_s คือ พื้นที่โมเมนต์ลำดับที่สองของเหล็กเสริม

กำลังต้านทานแรงอัดของชิ้นส่วนวัสดุผสมสามารถตรวจสอบได้จากสมการที่ 3.29

$$\frac{N_{Ed}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1.0 \quad (3.29)$$

โดย $N_{pl,Rd}$ คือ กำลังต้านแรงในแนวแกนในช่วงพลาสติกของหน้าตัด

χ คือ ตัวประกอบลดค่าตามรูปแบบการพังของเสา ซึ่งขึ้นอยู่กับความชะลูดสัมพันธ์ ($\bar{\lambda}$)

กำลังต้านทานแรงอัดและโมเมนต์ดัดร่วมกันของชิ้นส่วนสามารถหาได้จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ ซึ่งสามารถตรวจสอบกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดได้ดังสมการที่ 3.30

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,N,Rd}} = \frac{M_{Ed}}{\mu_d M_{pl,Rd}} \leq \alpha_M \quad (3.30)$$

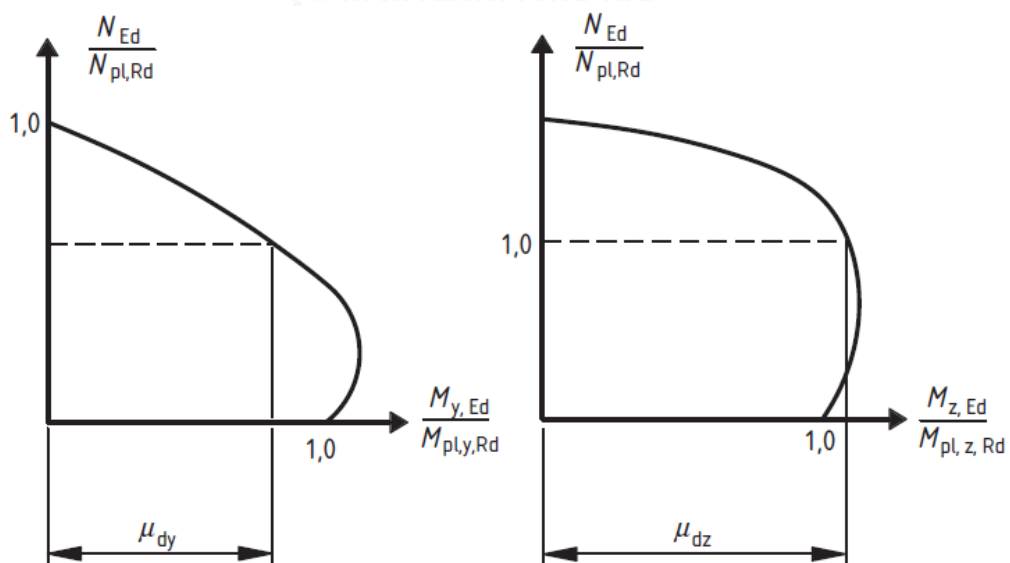
โดย M_{Ed} คือ ค่าสูงสุดของโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในเสาโดยคิดผลจากความไม่สมบูรณ์ของชิ้นส่วน และผลจากการวิเคราะห้ลำดับที่สอง

$M_{pl,N,Rd}$ คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดในช่วงพลาสติกที่รวมผลของแรงในแนวแกน N_{Ed}

$M_{pl,Rd}$ คือ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่จุด B ดังรูปที่ 3.12

μ_d มีค่าเท่ากับ μ_{dy} หรือ μ_{dz} ซึ่งสามารถหาได้จากรูปที่ 3.13

$\alpha_M = 0.9$ สำหรับเหล็กชั้นคุณภาพ S235 ถึง S355 และ $\alpha_M = 0.8$ สำหรับเหล็กชั้นคุณภาพ S420 ถึง S460



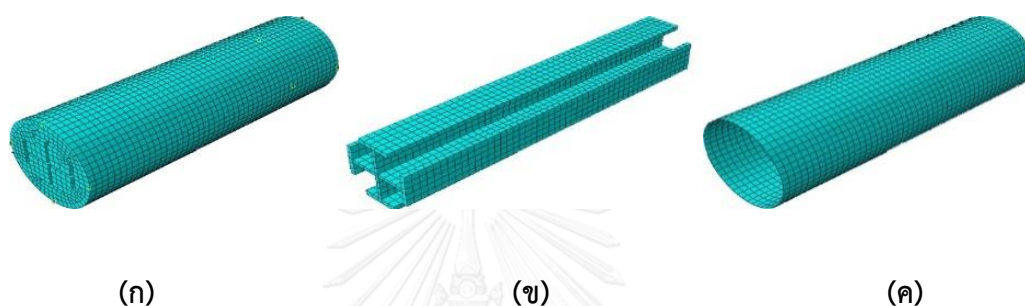
รูป 3.13 ค่า μ_{dy} และ μ_{dz} [11]

บทที่ 4

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

4.1 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรม ABAQUS ซึ่งในแต่ละตัวอย่างแบบจำลองประกอบด้วย 5 องค์ประกอบที่เป็นอิสระจากกัน [1] คือ ท่อเหล็ก หน้าตัดเหล็กด้านใน คอนกรีตภายในท่อ แผ่นปิดด้านบนและด้านล่าง ดังรูปที่ 4.1



รูป 4.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบ่งตามวัสดุ (ก) คอนกรีต (ข) เหล็กรูปพรรณ (ค) ท่อเหล็ก

4.1.1 แบบจำลองวัสดุท่อเหล็กและแผ่นปิดหัวเสา

แบบจำลองวัสดุท่อเหล็กและแผ่นปิดหัวเสาในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เลือกใช้เอลิเมนต์ที่มี 4 จุดเชื่อมต่อ และเป็นเอลิเมนต์ชนิด “shell element (SR4)” ซึ่งในแต่ละจุดเชื่อมต่อมี 6 ระดับขั้นความอิสระ (degree of freedom) สามารถกำหนดคุณสมบัติเป็นแบบ isotropic hardening ได้ ซึ่งคุณสมบัตินี้จะสามารถทำนายการเสียรูปของวัสดุในช่วงพลาสติก (plastic deformation) ซึ่งเกิดจากการขยายตัวของพื้นผิวคราก (yield surface) ที่หน่วยแรงคราก (yield stress) กำหนดตามเกณฑ์การครากของ Von Mises ซึ่งเป็นเกณฑ์การครากที่เหมาะสมสำหรับวัสดุโลหะ การเลือกใช้พฤติกรรมแบบ “plastic” ในโปรแกรม ABAQUS จะอนุญาตให้ใช้พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดได้

4.1.2 แบบจำลองวัสดุเหล็กรูปพรรณ

แบบจำลองวัสดุเหล็กรูปพรรณในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้เอลิเมนต์ชนิด “solid element (C3D8R)” ซึ่งมีทั้งหมด 8 จุดเชื่อมต่อ และในแต่ละจุดเชื่อมต่อมี 3 ดีกรีความอิสระ สามารถกำหนดคุณสมบัติเป็นแบบ isotropic hardening ได้เช่นเดียวกับเอลิเมนต์ชนิด “shell element (SR4)”

4.1.3 แบบจำลองวัสดุคอนกรีต

แบบจำลองวัสดุคอนกรีตในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้เอลิเมนต์ชนิด “solid element (C3D8R) เช่นเดียวกับเหล็กรูปพรรณ แต่ในแบบจำลองคอนกรีตจะใช้คำสั่ง “damaged plasticity model” ในโปรแกรม ABAQUS ซึ่งสามารถกำหนดคุณสมบัติเป็นแบบ “isotropic damaged elasticity” ซึ่งเป็นการรวมกันของ isotropic tensile plasticity และ isotropic compressive plasticity เพื่อให้มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับคอนกรีตจริงในช่วงไม่ยืดหยุ่น

4.2 คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะจำลองคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุด ยกเว้นคุณสมบัติของแผ่นเหล็กปิดหัวเสาจะจำลองให้มีค่าความแข็งแรงจริง เพื่อป้องกันการเสียรูป

4.2.1 คุณสมบัติของท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ

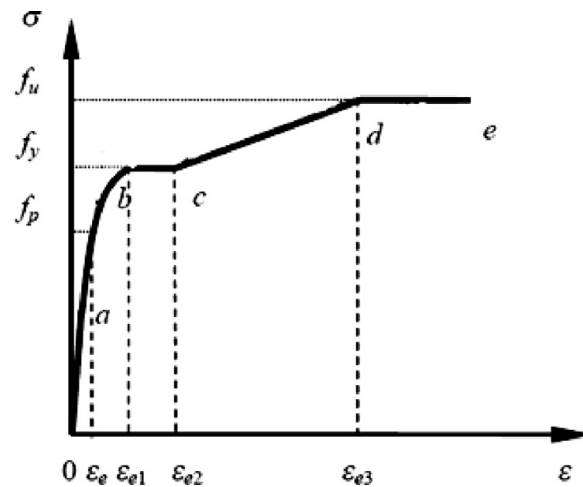
คุณสมบัติของท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณจะจำลองเป็นวัสดุแบบ isotropic elastic-plastic ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังสมการ 4.1 และแสดงได้ดังรูปที่ 4.2

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s < \varepsilon_e \\ -A\varepsilon_s^2 + B\varepsilon_s + C & \varepsilon_e < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e1} \\ f_y & \varepsilon_{e1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e2} \\ f_y \left[1 + 0.6 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}} \right] & \varepsilon_{e2} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{e3} \\ 1.6 f_y & \varepsilon_s > \varepsilon_{e3} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\text{โดย } \varepsilon_e = \frac{0.8 f_y}{E_s}, \quad \varepsilon_{e1} = 1.5 \varepsilon_e, \quad \varepsilon_{e2} = 10 \varepsilon_{e1}, \quad \varepsilon_{e3} = 100 \varepsilon_{e1}, \quad A = \frac{0.2 f_y}{(\varepsilon_{e1} - \varepsilon_e)^2},$$

$$B = 2 A \varepsilon_{e1} \text{ และ } C = 0.8 f_y + A \varepsilon_e^2 - B \varepsilon_e$$

เมื่อ E_s คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก, ε_s คือ ความเครียดของเหล็ก และ f_y คือ ความเค้นครากของเหล็ก



รูป 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ [1]

4.2.2 คุณสมบัติของคอนกรีต

ในส่วนของคอนกรีตภายในท่อภายใต้แรงกด ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่แนะนำเสนอโดย Han และคณะ [29] และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่แนะนำโดย E.Hognestad [28] และ Mander [8]

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่แนะนำเสนอโดย Han และคณะ [29] เป็นไปดังสมการ 4.2

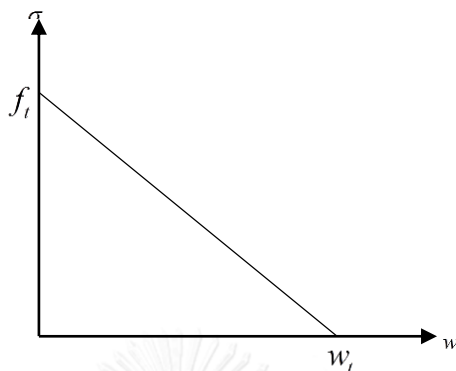
$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & (x \leq 1) \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^2 + x} & (x > 1) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\text{โดย } x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad y = \frac{\sigma}{\sigma_0}, \quad \sigma_0 = f'_c, \quad \xi = \frac{A_s f'_y}{A_c f_{ck}}, \quad \varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\varepsilon^{0.2} 10^{-6},$$

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5 f'_c) 10^{-6} \quad \text{และ} \quad \beta_0 = (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]}$$

เมื่อ A_s และ A_c คือพื้นที่หน้าตัดของท่อเหล็กและคอนกรีตตามลำดับ, f'_c คือกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต, f_{ck} คือกำลังค่าแรงคเตอร์สติก (characteristic strength) ของคอนกรีตซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.67 f_{cu}$, E_s คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของท่อเหล็ก, F'_y คือกำลังครากของท่อเหล็ก, E_c คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต และกำหนดให้มีอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.2

แบบจำลองพลังงานจากการแตกร้าวถูกเสนอโดย Hillerborg และคณะ [13] ซึ่งจะใช้หาพฤติกรรมของคอนกรีตเมื่อถูกแรงดึง โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความกว้างของรอยแตกร้าวของคอนกรีตเมื่อรับแรงดึงจะเป็นไปตามรูปที่ 4.3



รูป 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความกว้างของรอยแตกร้าวของคอนกรีตเมื่อรับแรงดึง (Hillerborg และคณะ)

สำหรับคอนกรีตทั่วไปรอยแตกร้าวจะมีความกว้างประมาณ 0.01 – 0.02 มิลลิเมตร และสมมติให้คอนกรีตมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic)

แบบจำลองความเค้นและความเครียดของคอนกรีตแรงอัดทางเดียวถูกนำเสนอโดย E.Hognestad (1951) [27] ดังรูปที่ 4.4 สามารถคำนวณความเค้นอัดทางเดียว (uniaxial-stress) ของคอนกรีต ได้ดังสมการที่ 4.3 ถึงสมการที่ 4.5

$$f_c = f_c' \left(\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \quad (3.4)$$

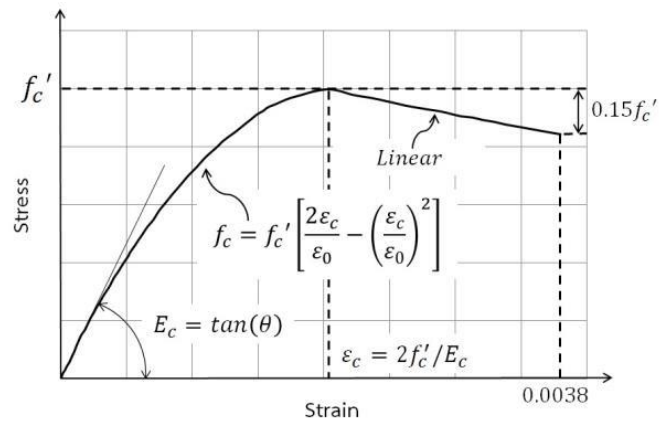
$$\varepsilon_0 = \frac{2f_c'}{E_c} \quad (4.4)$$

$$E_c = 4730 \sqrt{f_c'} \quad (4.5)$$

โดย f_c' คือ กำลังรับแรงอัดทางเดียวสูงสุดที่คอนกรีตรับได้

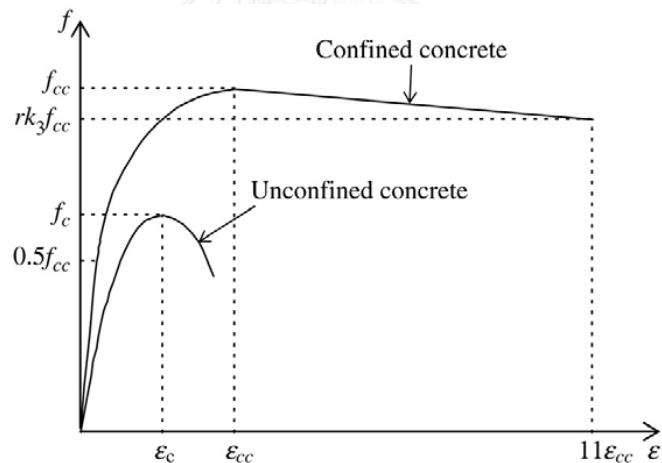
ε_0 คือ ความเครียดที่คอนกรีตมีความเค้นสูงสุด

E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต



รูป 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว (E.Hognestad,1951)

สำหรับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยท่อเหล็กมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดดังรูปที่ 4.5 และเป็นไปตามสมการที่ 4.6 ถึงสมการที่ 4.7 ที่ถูกเสนอโดย Mander และคณะ [8]



รูป 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตรับแรงอัดทางเดียว (Mander และคณะ)

$$f_{cc} = f_c + k_1 f_l \quad (4.6)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_c \left(1 + k_2 \frac{f_l}{f_c} \right) \quad (4.7)$$

เมื่อ f_c คือกำลังรับแรงของคอนกรีตทรงกระบอกที่ไม่ถูกโอบรัด มีค่าเท่ากับ $0.8(f_{cu})$

f_{cu} คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่ไม่ถูกโอบรัด

ϵ_c คือความเครียดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด มีค่าเท่ากับ 0.003

f_{cc} คือกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

ε_{cc} คือความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

f_t คือแรงดันด้านข้างของคอนกรีตที่ได้จากท่อเหล็กหน้าตัดวงกลม

k_1 และ k_2 คือสัมประสิทธิ์มีค่าเท่ากับ 4.20 และ 1.0 ตามลำดับตามที่ Richart และ

คณะ [17] นำเสนอ

โดยแรงโอบรัดด้านข้างของคอนกรีตที่ได้จากท่อเหล็กจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาของท่อเหล็ก (D/t ratio) และสามารถคำนวณได้จากสมการของ Hu และคณะ [19] ดังนี้

$$\frac{f_t}{f_y} = 0.043646 - 0.000832 \left(\frac{D}{t} \right) \quad \left(21.7 \leq \frac{D}{t} \leq 47 \right) \quad (4.8)$$

$$\frac{f_t}{f_y} = 0.006241 - 0.0000357 \left(\frac{D}{t} \right) \quad \left(47 \leq \frac{D}{t} \leq 150 \right)$$

เมื่อ f_t คือแรงดันด้านข้างจากท่อเหล็ก ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนา (D/t) และความเค้นคราก (f_y) ค่าโดยประมาณของ f_t สามารถหาได้จากสมการของ Hu และคณะ [19] โดยสมการสามารถใช้ได้สำหรับท่อเหล็กที่มี D/t ระหว่าง 21.7 ถึง 150 ค่า k_1 และ k_2 ถูกเสนอโดย Richart และคณะ [17] มีค่า 4.1 และ 20.5 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นจนถึงขีดจำกัดการแปรผันตรง (proportional Limit) ซึ่งมีค่า $0.5(f_{cc})$ ในขณะที่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด (E_{cc}) จะเป็นไปตามสมการที่ 4.9 ที่ถูกเสนอโดยมาตรฐาน ACI [16] และอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดมีค่า 0.2

$$E_{cc} = 4700 \sqrt{f_{cc}} \text{ MPa} \quad (4.9)$$

ในช่วงที่สองเป็นส่วนที่ไม่เป็นเส้นตรง ค่า f_{cc} สามารถระบุได้ตามสมการที่ 4.10 ถึงสมการที่ 4.12 ซึ่งนำเสนอโดย Saenz [31] ความเครียด (ε) ในช่วงนี้มีค่าตั้งแต่ $(0.5 f_{cc} / E_{cc})$ จนถึงความเครียดที่ถูกโอบรัด (ε_{cc}) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด ความเค้น (f) สามารถระบุได้จากสมการ 4.10

$$f = \frac{E_{cc} \varepsilon}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right) - (2R - 1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}} \right)^3} \quad (4.10)$$

$$\text{เมื่อ } R_E = \frac{E_{cc} \varepsilon_{cc}}{f_{cc}} \quad (4.11)$$

$$R = \frac{R_E (R_\sigma - 1)}{(R_\varepsilon - 1)^2} - \frac{1}{R_\varepsilon} \quad (4.12)$$

R_σ และ R_ε มีค่าเท่ากับ 4 ตามที่ Hu และ Schnobrich [32] นำเสนอ

ช่วงที่สามเป็นช่วงที่ความเค้นลดลงจากกำลังของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด (f_{cc}) จนถึงค่าที่ต่ำกว่าซึ่งเท่ากับ $rk_3 f_{cc}$ ที่จุดที่มีความเครียดเท่ากับ $11\varepsilon_{cc}$ โดยค่าตัวคูณลดค่า k_3 จะขึ้นอยู่กับ D/r และความเค้นคราก (f_y) โดยสามารถระบุได้จากสมการที่ถูกเสนอโดย Hu และคณะ [19] ซึ่งสามารถใช้สำหรับท่อเหล็กที่มีค่า D/r ระหว่าง 21.7 ถึง 150 และกำลังของคอนกรีตสูงสุดมีค่าไม่มากกว่า 31.2 เมกะปาสกาล ตัวคูณลดค่า r เป็นผลกระทบมาจากกำลังของคอนกรีต เมื่อกำลังของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ (f_{cu}) มีค่าไม่เกิน 30 เมกะปาสกาล r จะมีค่าเท่ากับ 1.0 แต่เมื่อเมื่อกำลังของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ (f_{cu}) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 100 เมกะปาสกาล r จะมีค่าเท่ากับ 0.5 ค่าของ r ของคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ (f_{cu}) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 30 และ 100 เมกะปาสกาล สามารถระบุได้โดยใช้วิธีการประมาณค่าเชิงเส้น (linear interpolation)

4.2.3 คุณสมบัติของแผ่นปิดหัวเสา

คุณสมบัติของแผ่นปิดหัวเสาในแบบจำลองกำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติคล้ายแผ่นเหล็กแต่ให้มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กโดยทั่วไปเพื่อป้องกันการเสียรูปขณะถ่ายแรง เลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด “shell element (SR4)”

สรุปคุณสมบัติของวัสดุแผ่นปิดหัวเสาที่ใช้แบบจำลอง

1. โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity, $E = 10,000 E_s$)
2. อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, $\nu = 0.3$)
3. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น

4.3 เงื่อนไขขอบเขต

ในแบบจำลองกำหนดลักษณะจุดรองรับที่ด้านบนและด้านล่างของเสาเป็นแบบยึดหมุน (pin-end) และการให้น้ำหนักกับตัวอย่างจะทำการกำหนดระยะหดตัวของเสาทดสอบ (displacement control) โดยกำหนดการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของแผ่นปิดหัวเสาด้านบน และวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจากแรงปฏิกิริยาที่บริเวณแผ่นปิดหัวเสาด้านล่าง

4.4 การจำลองผิวสัมผัสระหว่างรอยต่อวัสดุ

รอยต่อระหว่างท่อเหล็กกับคอนกรีตและระหว่างแผ่นปิดหัวเสากับคอนกรีตในแบบจำลองจะใช้คำสั่ง CONTACT PAIR ในโปรแกรม ABAQUS ซึ่งกำหนดสำหรับรอยต่อระหว่างท่อเหล็กกับคอนกรีตจะใช้การจำลองผิวสัมผัสทั้งในทิศตั้งฉาก (normal contact) และในทิศสัมผัส (tangential contact) โดยกำหนดให้ท่อเหล็กเป็น master surface และคอนกรีตเป็น slave surface ในขณะที่วัสดุทั้งสองยังติดกันอยู่คอนกรีตจะสามารถเคลื่อนที่แบบสัมผัสกับท่อเหล็กได้ ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.25 และแรงในทิศตั้งฉากของท่อเหล็กสามารถส่งผ่านไปมาระหว่างสองวัสดุได้ เมื่อผิวสัมผัสทั้งสองแยกกันแรงก็จะไม่สามารถส่งผ่านกันได้อีกต่อไป

รอยต่อระหว่างแผ่นปิดหัวเสากับคอนกรีตจะใช้คำสั่ง CONTACT PAIR เช่นเดียวกันกับรอยต่อระหว่างท่อเหล็กและคอนกรีต โดยกำหนดให้แผ่นปิดหัวเสาเป็น master surface และคอนกรีตเป็น slave surface

รอยต่อระหว่างเหล็กเสริมด้านในกับคอนกรีตจะใช้คำสั่ง EMBEDDED ในโปรแกรม ABAQUS เพื่อไม่พิจารณาการลื่นไถลสมองระหว่างผิวสัมผัสของทั้งสองวัสดุ

รอยต่อระหว่างแผ่นปิดหัวเสากับท่อเหล็กจะกำหนดให้เป็นรอยต่อแบบสมบูรณ์ คือมีทั้งการเคลื่อนที่ (translation) และการหมุน (rotation) ของแต่ละจุดเชื่อมต่อไปด้วยกัน โดยจะใช้เป็นคำสั่ง TIE CONTACT ในโปรแกรม ABAQUS

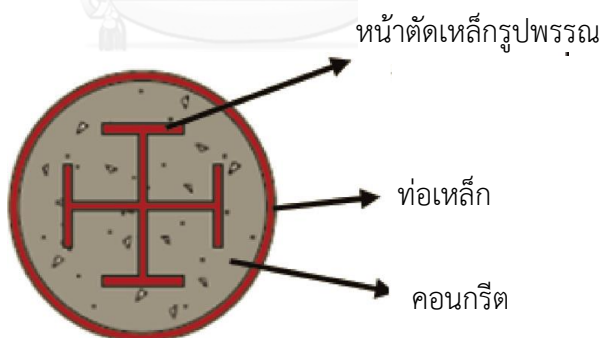
บทที่ 5

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ รับแรงกระทำตรงศูนย์

ในบทนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์ และการศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบ โดยตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบในอดีต พฤติกรรมของเสาที่รับแรงตรงศูนย์ที่ศึกษาคือ กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา ตัวแปรออกแบบที่ศึกษาประกอบด้วย กำลังรับแรงที่จุดครากของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณและท่อเหล็ก กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต พื้นที่ของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ และรูปแบบหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ

5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบในอดีต

ผลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Wang และคณะ (2004) [5] และ Xiao และคณะ (2009) [36] ซึ่งทั้งหมดเป็นเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ (SRCFST column) ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งมีข้อมูลหน้าตัดและคุณสมบัติวัสดุตั้งตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2



รูป 5.1 หน้าตัดเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ [1]

ตาราง 5.1 ขนาดหน้าตัด

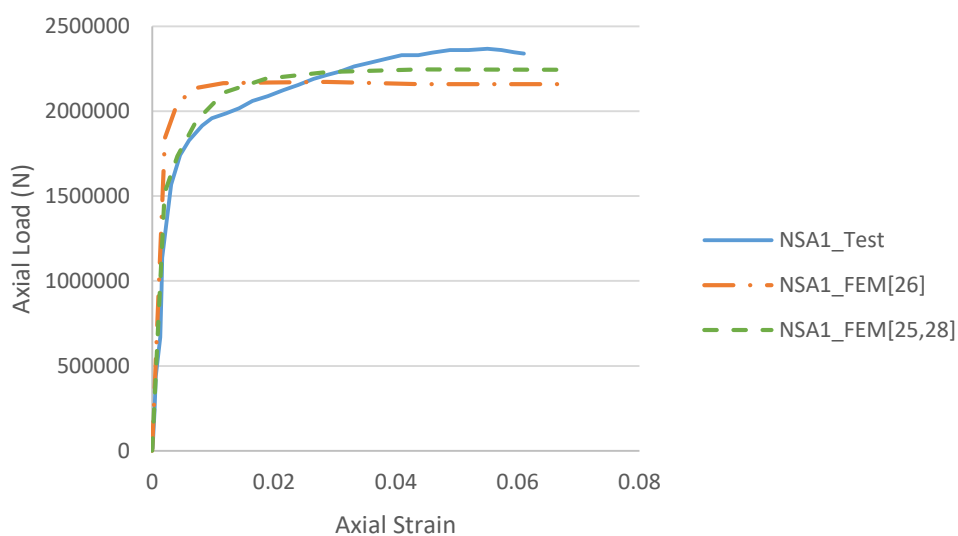
หน้าตัด	ขนาดหน้าตัด			
	ความยาว (มิลลิเมตร)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความหนาต่อ เหล็ก (มิลลิเมตร)	พื้นที่เหล็ก รูปพรรณ (ตารางมิลลิเมตร)
NSA1	465	166	2.7	2324
HSA1	465	166	2.7	2324
HSB1	470	168	3.7	2324
SC1	876	219	4	2996
SC7	876	219	4	1810

ตาราง 5.2 คุณสมบัติวัสดุ

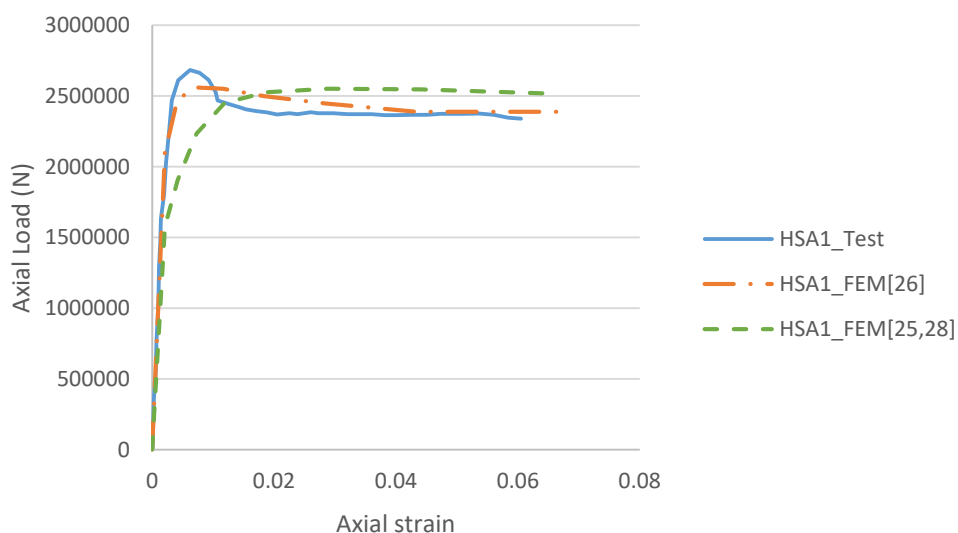
หน้าตัด	ขนาดหน้าตัด		
	คอนกรีต	เหล็กรูปพรรณ	ต่อเหล็ก
	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (เมกะปาสคาล)	กำลังรับแรงที่จุดคราก (เมกะปาสคาล)	กำลังรับแรงที่จุดคราก (เมกะปาสคาล)
NSA1	35.34	288	318
HSA1	55.16	288	318
HSB1	55.16	288	318
SC1	52.10	318	337
SC7	52.10	318	337

ผลจากการเปรียบเทียบกำลังรับแรงจากผลการทดสอบในอดีตกับผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.6 และตารางที่ 5.3 พบว่าการเลือกใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่เสนอโดย Han และคณะ [29] สามารถทำนายพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาวิเศษผสมได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าว่าการเลือกใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่เสนอโดย E.Hognestad

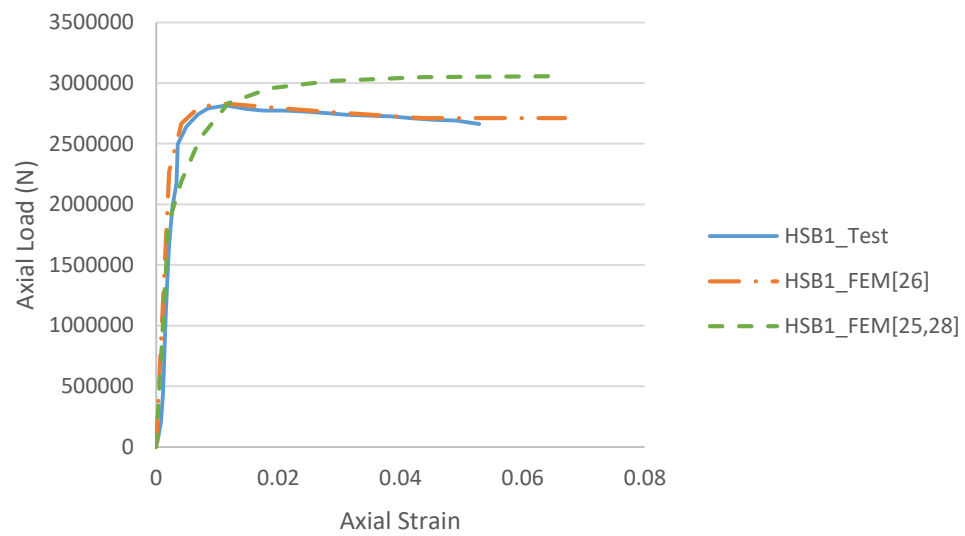
[28] และ Mander [8] โดยอัตราส่วนความแตกต่างเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนจากผลทดสอบ (Test) ต่อผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) มีค่าเท่ากับ 1.015 และ 0.982 ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 5.3 โดยทั้งสองแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10 ดังนั้นในส่วนต่อไปของงานวิจัยจึงจะใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ Han และคณะ [29] ทั้งหมด



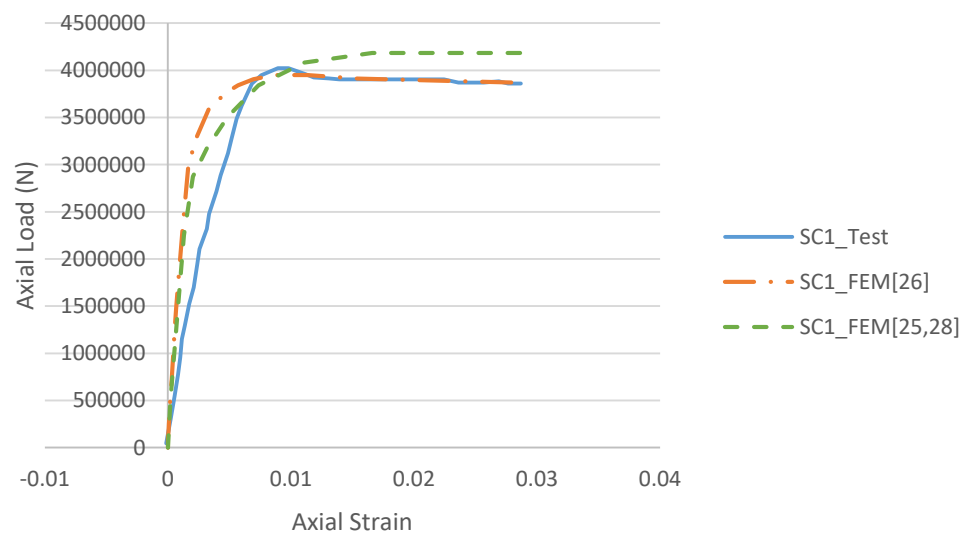
รูป 5.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของตัวอย่าง NSA1



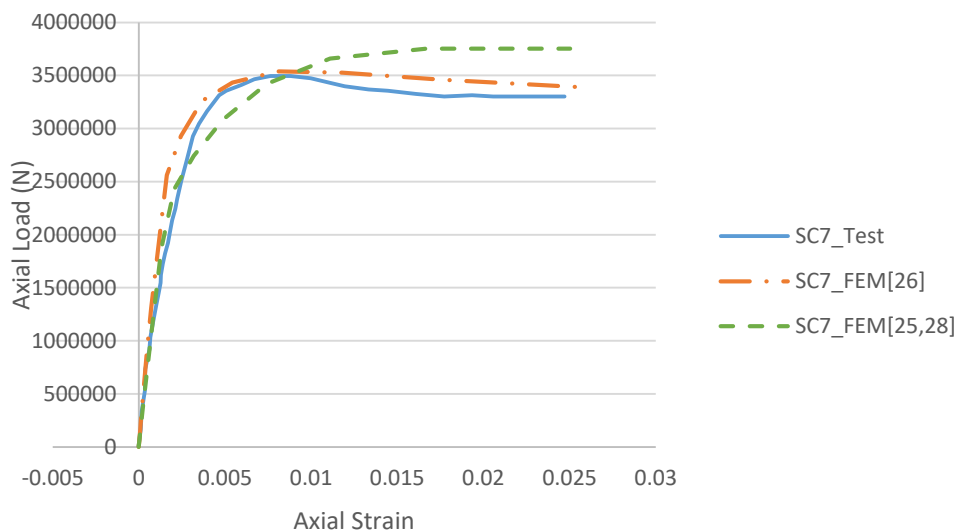
รูป 5.3 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของตัวอย่าง HSA1



รูป 5.4 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของตัวอย่าง HSB1



รูป 5.5 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของตัวอย่าง SC1



รูป 5.6 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลทดสอบของตัวอย่าง SC7

ตาราง 5.3 กำลังรับแรงของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	กำลังรับแรงในแนวแกน (กิโลนิวตัน)						
	A.Test	B.FEM*	C.FEM**	D.AISC CFST	E.AISC SRC	F.AISC CFST+ steel section	G.AISC SRC+ steeltube
NSA1	2350	2174	2246	1149	1327	1874	1767
HSA1	2700	2561	2551	1768	1836	2493	2277
HSB1	2835	2831	3058	1894	1808	2619	2408
SC1	4021	3949	4184	2274	2075	3198	2557
SC7	3496	3799	3819	2640	1783	3218	2694

*B.FEM ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่เสนอโดย Han และคณะ [29]

**C.FEM ใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่เสนอโดย E.Hognestad[28] และMander[8]

ตาราง 5.4 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก
รูปพรรณจากการทดสอบกับข้อกำหนดในการออกแบบ AISC 360-10

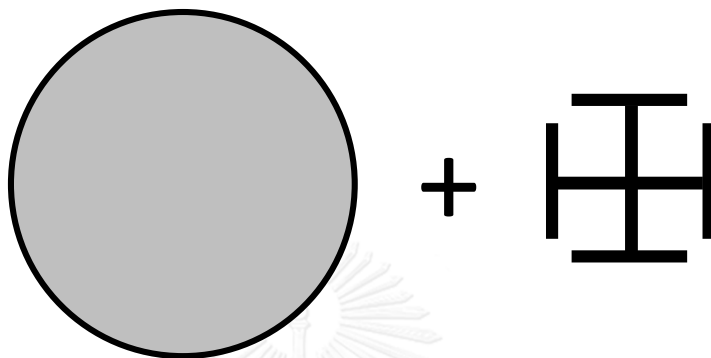
หน้าตัด	อัตราส่วน					
	A/B	A/C	A/D	A/E	A/F	A/G
NSA1	1.08	1.05	2.05	1.77	1.25	1.33
HSA1	1.05	1.06	1.53	1.47	1.08	1.19
HSB1	1.00	0.93	1.5	1.57	1.08	1.18
SC1	1.02	0.96	1.77	1.94	1.26	1.57
SC7	0.92	0.92	1.32	1.96	1.09	1.30
ค่าเฉลี่ย	1.02	0.982	1.63	1.74	1.15	1.31

ตาราง 5.5 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังรับแรงของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก
รูปพรรณจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนดในการออกแบบ AISC 360-10

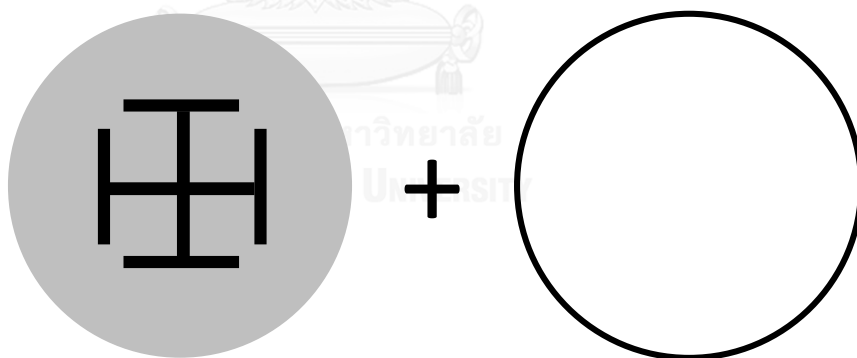
หน้าตัด	อัตราส่วน			
	B/D	B/E	B/F	B/G
NSA1	1.89	1.64	1.16	1.23
HSA1	1.45	1.39	1.03	1.12
HSB1	1.49	1.57	1.08	1.18
SC1	1.74	1.90	1.23	1.54
SC7	1.44	2.13	1.18	1.41
ค่าเฉลี่ย	1.602	1.73	1.14	1.30

เนื่องจากตามมาตรฐาน AISC 360-10 (2010) [24] ยังไม่มีมาตรฐานการออกแบบของเสา
ท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณโดยตรง ในงานวิจัยนี้จึงได้เปรียบเทียบโดยใช้
มาตรฐานออกแบบของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและมาตรฐานออกแบบเสาเหล็กหุ้มด้วย
คอนกรีตมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบและผลจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ดังตารางที่
5.4 ถึงตารางที่ 5.5 ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีความต่าง
กับผลที่คำนวณมาจากมาตรฐานเป็นอย่างมาก ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนข้อกำหนดโดย
แยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ

1. พิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ ดังแสดงในรูปที่ 5.7
2. พิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อนเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูป 5.7 การพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ



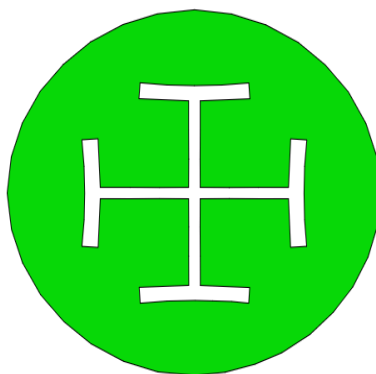
รูป 5.8 การพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อนเหล็ก

จากการเปรียบเทียบตามตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 พบว่าการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 [24] โดยพิจารณาเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่าการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 [24] โดยพิจารณาเสาท่อน

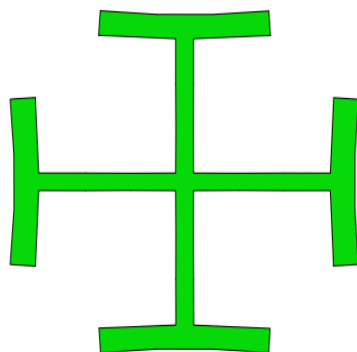
เหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็ก โดยอัตราส่วนความแตกต่างของการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 [24] โดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณเทียบกับผลการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.15 และอัตราส่วนความแตกต่างของการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 [24] โดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็กมีเทียบกับผลการทดสอบค่าเท่ากับ 1.31 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์กับการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 [24] โดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณมีอัตราส่วนความแตกต่างเท่ากับ 1.14 และการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 [24] โดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับท่อเหล็กเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์มีอัตราส่วนความแตกต่างเท่ากับ 1.30 ดังนั้นการคำนวณข้อกำหนด AISC 360-10 [24] ในการศึกษาต่อไปในบทนี้จะพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณทั้งหมด

5.2 พฤติกรรมของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์กลางการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสารับแรงอัดพบว่าแบบจำลองมีการเสียรูปของคอนกรีต ท่อเหล็ก และเหล็กรูปพรรณดังรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.10 โดยเป็นการเสียรูปของเสาขณะรับแรงอัดสูงสุดและมีการขยายอัตราส่วน 5 เท่าของรูปจริงเพื่อให้สังเกตการเสียรูปได้ง่ายขึ้น



รูป 5.9 การเสียรูปของหน้าตัดคอนกรีตภายในเสารับแรงอัดตรงศูนย์กลาง HSB1

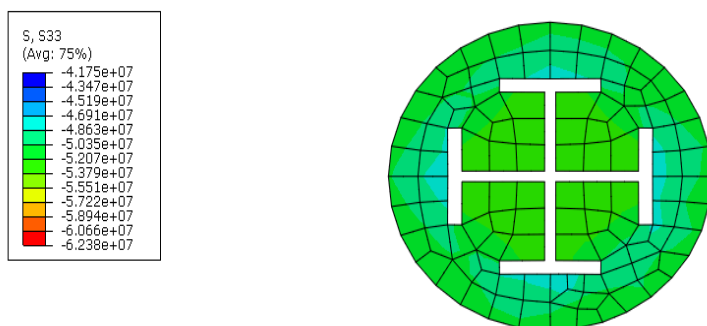


รูป 5.10 การเสียรูปของหน้าตัดเหล็กภายในเสารับแรงอัดตรงศูนย์ HSB1

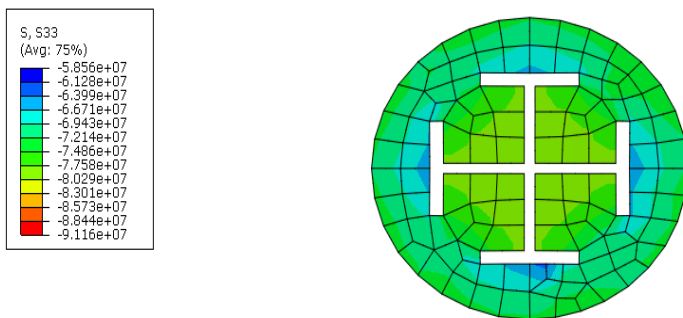
จากการศึกษาการเสียรูปของเสาและวัสดุภายในเสารับแรงอัดพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมการเสียรูปของเสาและวัสดุภายในเสาได้อย่างเหมาะสม โดยหน้าตัดเหล็กรูปพรรณและท่อเหล็กมีการขยายตัวออกทางด้านข้างของคอนกรีตทำให้เห็นว่าคอนกรีตได้การโอบรัดจากเหล็กรูปพรรณและท่อเหล็ก

5.3 พฤติกรรมการโอบรัดตัวของคอนกรีตภายในเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์

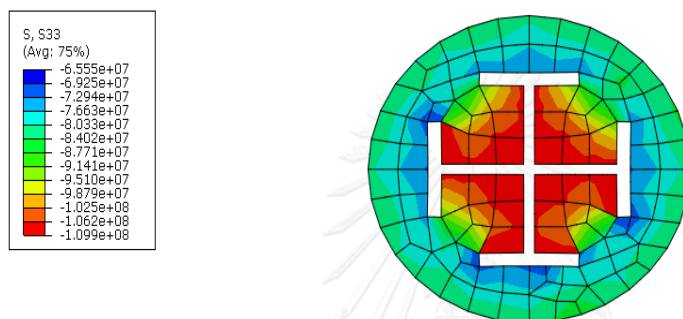
พฤติกรรมการโอบรัดตัวของคอนกรีตภายในเสาท่อเหล็กเกิดจากการที่คอนกรีตหดตัวตามแนวแกนแล้วขยายตัวออกตามด้านข้าง หน้าตัดเหล็กรูปพรรณด้านในและท่อเหล็กจะทำหน้าที่ป้องกันการขยายตัวด้านข้างของคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตสามารถรับแรงในแนวแกนได้เพิ่มขึ้นมากกว่ากำลังอัดทางเดียวของคอนกรีต (f_c') ซึ่งพฤติกรรมการถูกโอบรัดไม่สามารถศึกษาได้จริงจากการทดสอบ แต่สามารถศึกษาได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษาพฤติกรรมการโอบรัดของคอนกรีตจะศึกษาที่ตำแหน่งความเครียดต่างๆ กันของเสาดังรูปที่ 5.11 ถึงรูปที่ 5.16 ซึ่งเป็นเสาตัวอย่าง HSB1 เนื่องจากมีผลวิเคราะห์ไฟต์เอลิเมนต์ตรงกับผลการทดสอบที่สุด



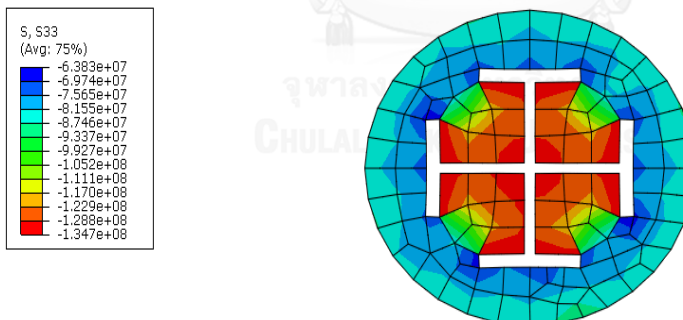
รูป 5.11 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.001



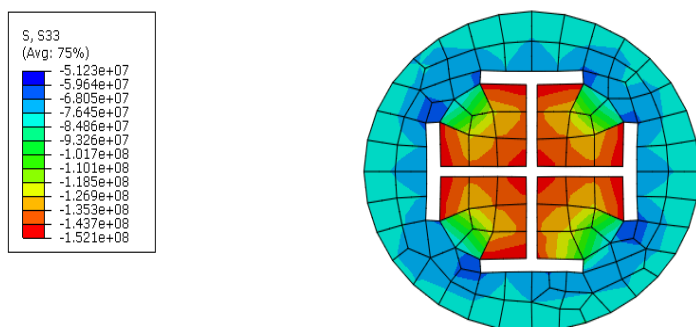
รูป 5.12 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.002



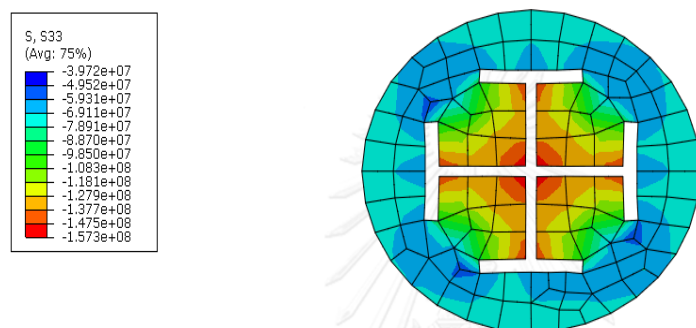
รูป 5.13 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.003



รูป 5.14 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.004



รูป 5.15 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.005



รูป 5.16 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตภายในเสา HSB1 ที่มีความเครียดเท่ากับ 0.006

จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการโอบรัดตัวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางของหน้าตัดภายในแผ่นปีกของเหล็กรูปพรรณทั้ง 4 แผ่น และขนาดพื้นที่การโอบรัดจะขยายขึ้นเมื่อน้ำหนักตามแนวแกนมากขึ้น

5.4 ผลกระทบของตัวแปรรูปแบบต่อพฤติกรรมเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์

การศึกษาผลกระทบของตัวแปรรูปแบบต่อพฤติกรรมเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจะศึกษาทั้งทางด้านลักษณะหน้าตัดเสาและคุณสมบัติวัสดุ ในการศึกษาทางด้านลักษณะหน้าตัดเสาจะควบคุมให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต 24.5 เมกะปาสคาล กำลังรับแรงที่จุดครากของเหล็กรูปพรรณและท่อเหล็ก 365 เมกะปาสคาล ส่วนการศึกษาทางด้านคุณสมบัติวัสดุจะควบคุมให้หน้าตัดมีลักษณะที่เหมือนกันคือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อเหล็ก 165.2 มิลลิเมตร ความหนาของท่อเหล็ก 3 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัดของเหล็กรูปพรรณ 2370 ตารางมิลลิเมตร และเสาทดสอบทุกต้นมีความยาว 500 มิลลิเมตร ตัวแปรรูปแบบต่อพฤติกรรมเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต

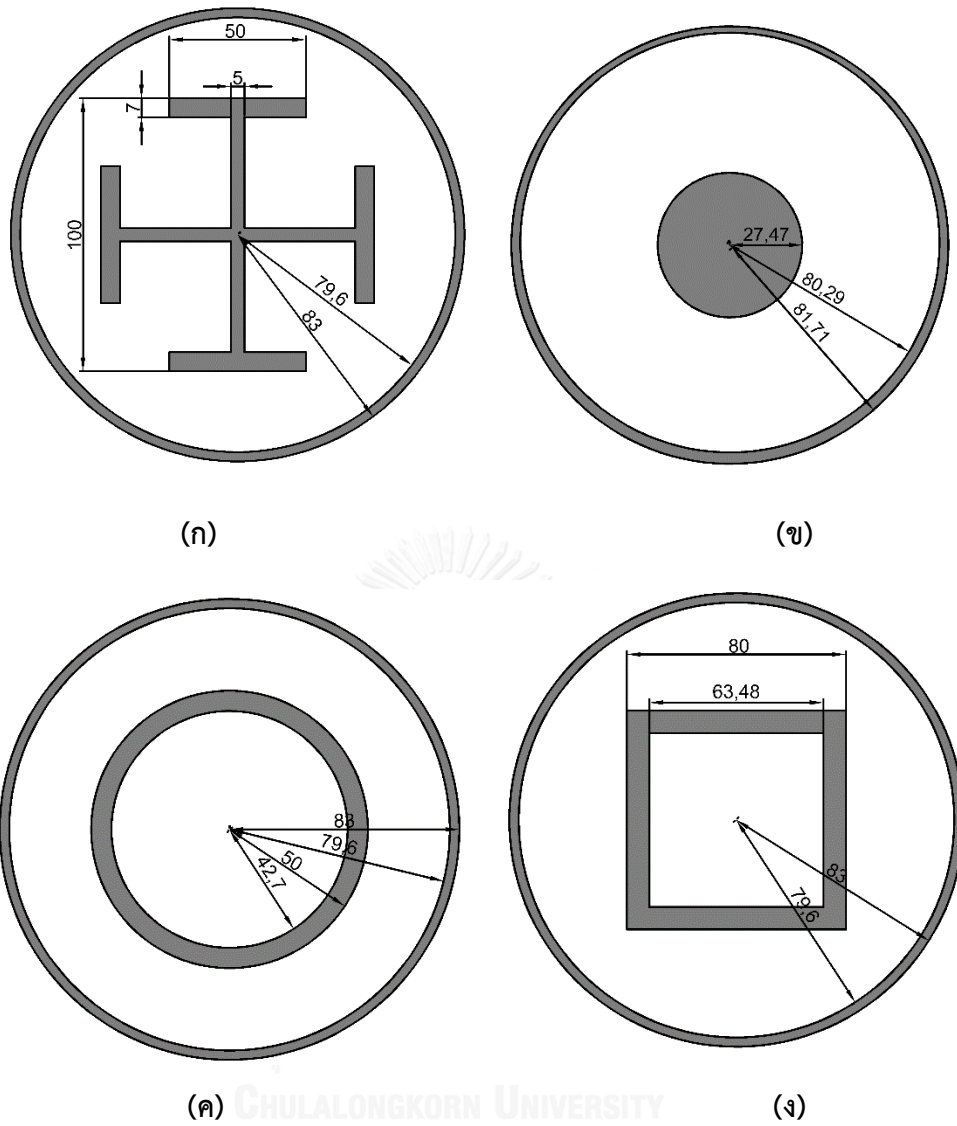
เสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์ที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 5.6 ถึงตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.17

ตาราง 5.6 ลักษณะหน้าตัดเสาที่ใช้ศึกษา

ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด			
	ความยาว (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก (มิลลิเมตร)	ความหนาต่อ เหล็ก (มิลลิเมตร)	พื้นที่เหล็ก รูปพรรณ (ตารางมิลลิเมตร)
C1	500	165.2	3	2370
SR1	500	165.2	3	4380
SR2	500	165.2	3	6062
CHS	500	165.2	3	2370
SHS	500	165.2	3	2370
CCS	500	165.2	3	2370

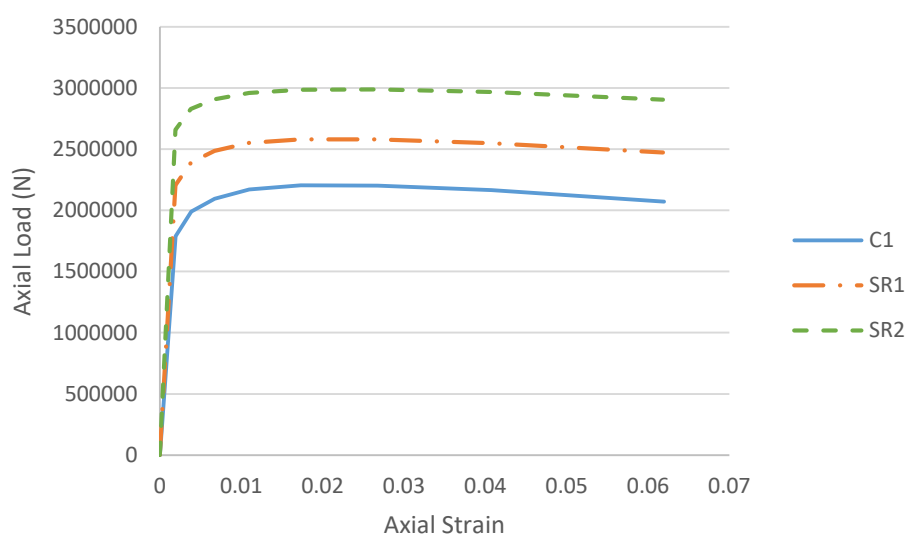
ตาราง 5.7 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ศึกษา

ตัวอย่าง	ขนาดหน้าตัด		
	คอนกรีต	เหล็กรูปพรรณ	ท่อเหล็ก
	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (เมกะปาสคาล)	กำลังรับแรงที่จุดคราก (เมกะปาสคาล)	กำลังรับแรงที่จุดคราก (เมกะปาสคาล)
C1	24.5	365	365
SS1	24.5	245	365
SS2	24.5	460	365
CS1	34.3	365	365
CS2	49.0	365	365
TS1	24.5	365	245
TS2	24.5	365	460



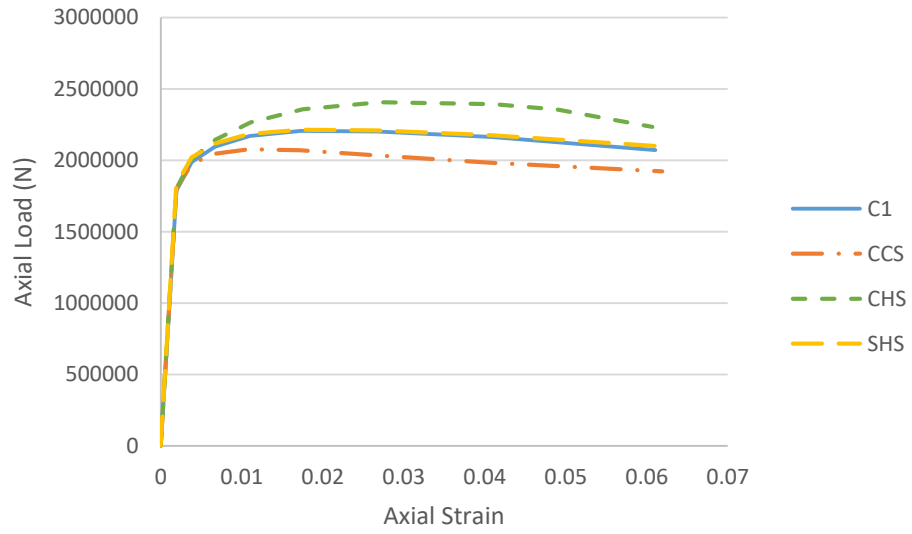
รูป 5.17 รูปแบบหน้าตัดต่างๆ ที่ศึกษา (ก) C1, (ข) CCS, (ค) CHS และ (ง) SHS

รูปที่ 5.18 แสดงผลกระทบบของตัวแปรรูปแบบพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณพบว่าพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของเสา โดยเมื่อพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดของเสาจะเพิ่มขึ้นตาม

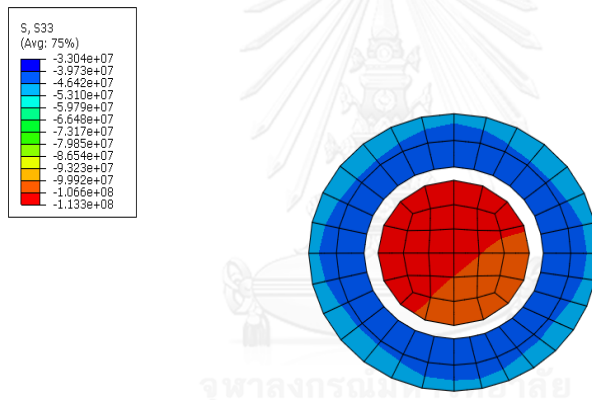


รูป 5.18 ผลของพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ

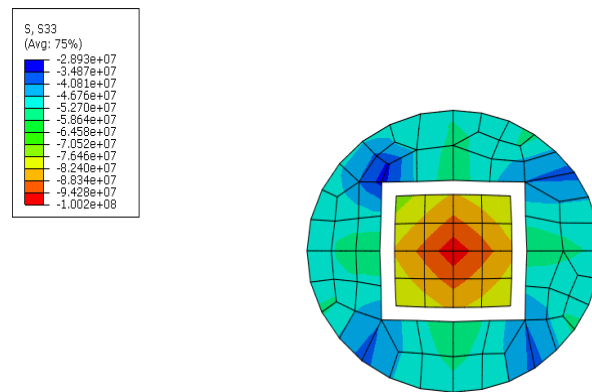
รูปที่ 5.19 แสดงผลกระทบบของรูปแบบหน้าตัดเหล็กรูปพรรณโดยพบว่าหน้าตัดรูปวงกลมกลวง (CHS) ทำให้เสามีกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนสูงสุดเนื่องจากหน้าตัดเหล็กรูปวงกลมกลวงสามารถให้สภาพโอบรัดแก่คอนกรีตได้ดีที่สุดดังแสดงในรูปที่ 5.20 รองลงมาคือหน้าตัดรูปกากบาท (C1) และหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมกลวง (SHS) ทำให้เสามีกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนเท่ากันและให้สภาพการโอบรัดดังแสดงในรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.22 ส่วนหน้าตัดรูปวงกลมตัน (CCS) ทำให้เสามีกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนน้อยที่สุดโดยมีสภาพการโอบรัดดังแสดงในรูปที่ 5.23



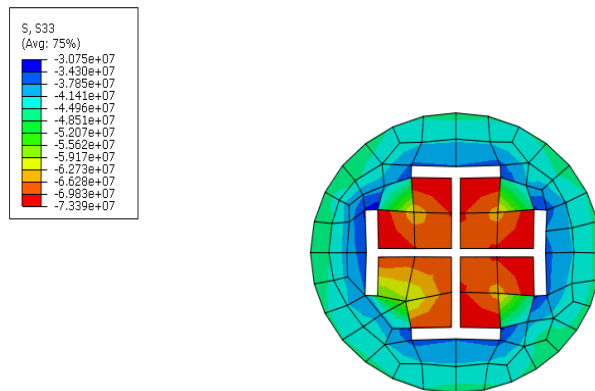
รูป 5.19 ผลของรูปแบบหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ



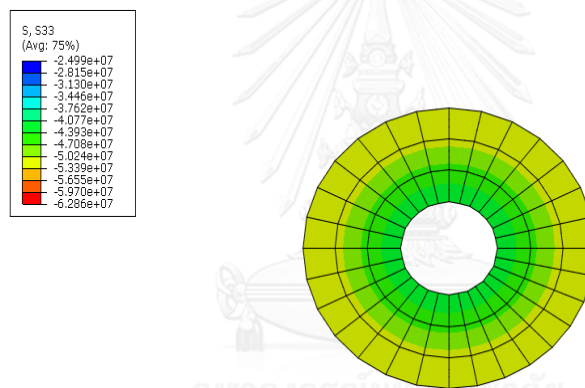
รูป 5.20 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา CHS เมื่อรับแรงอัดสูงสุด ที่ความเค้นเท่ากับ 0.004



รูป 5.21 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา SHS เมื่อรับแรงอัดสูงสุด ที่ความเค้นเท่ากับ 0.003

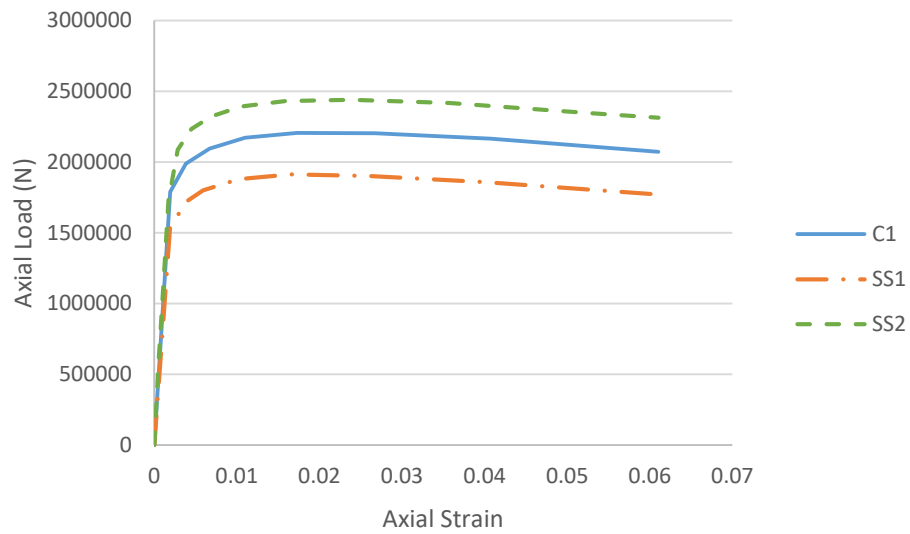


รูป 5.22 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา C1 เมื่อรับแรงอัดสูงสุด
ที่ความเค้นเท่ากับ 0.003



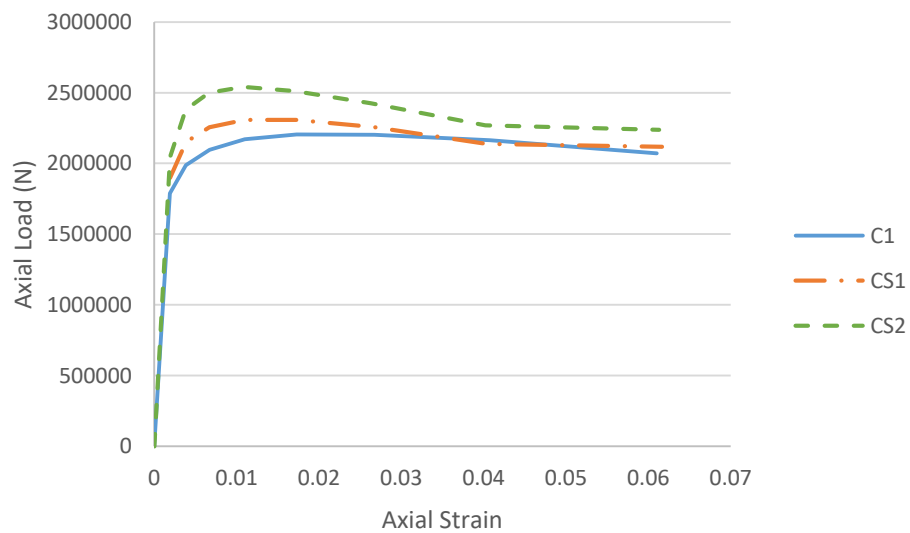
รูป 5.23 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา CCS เมื่อรับแรงอัดสูงสุด
ที่ความเค้นเท่ากับ 0.001

รูปที่ 5.24 แสดงผลกระทบตัวแปรออกแบบกำลังครากของเหล็กรูปพรรณ พบว่าเมื่อกำลังครากของเหล็กรูปพรรณเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาจะมีค่าเพิ่มขึ้น



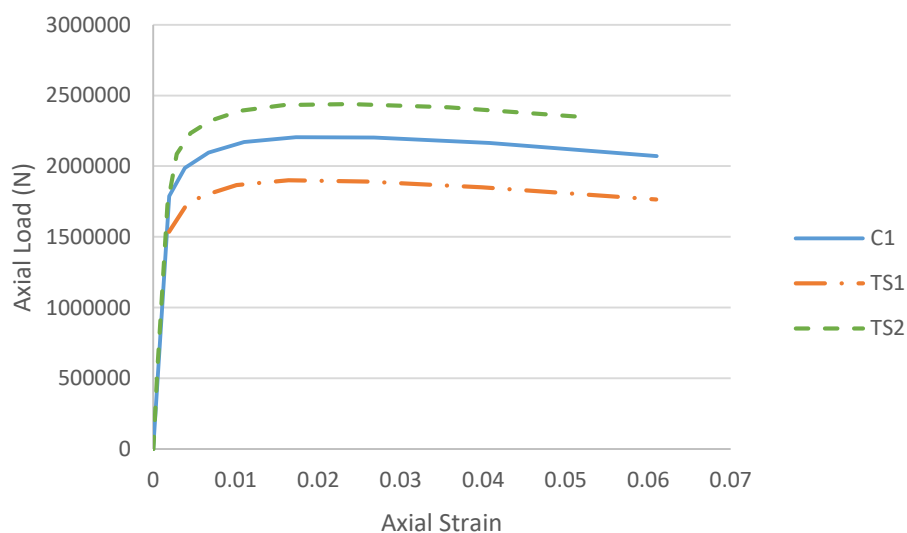
รูป 5.24 ผลของกำลังครากของเหล็กรูปพรรณ

รูปที่ 5.25 แสดงให้เห็นว่าเมื่อกำลังแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนของเสาเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในช่วงหลังจุดที่รับกำลังสูงสุดแล้วผลของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตจะมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของเสาน้อยลง



รูป 5.25 ผลของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

ตัวแปรศึกษาสุดท้ายคือกำลังครากของท่อเหล็ก ให้ผลใกล้เคียงกับตัวแปรศึกษากำลังครากของเหล็กรูปพรรณทั้งในปริมาณเชิงตัวเลขและพฤติกรรมที่เมื่อเพิ่มกำลังครากของท่อเหล็กขึ้น กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.26



รูป 5.26 ผลของกำลังครากของท่อเหล็ก

การเปรียบเทียบกำลังรับแรงของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจากตัวแปรศึกษาแต่ละตัวแสดงไว้ในตารางที่ 5.8

ตาราง 5.8 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดในแนวแกน		อัตราส่วน A/B
	A. FEM (kN)	B. AISC_Modified*	
C1	2205.47	2548.48	1.01
SR1	2580.65	3097.81	0.96
SR2	2986.25	1873.88	1.28
CHS	2405.39	1873.88	1.18
SHS	2214.06	1873.88	1.11
CCS	2077.34	1593.03	1.20
SS1	1910.98	2078.19	1.17
SS2	2439.28	2050.76	1.13
CS1	2308.83	2328.93	1.09
CS2	2541.77	1682.00	1.13
TS1	1900.53	2010.67	1.21
TS2	2439.28	2548.48	1.01

*เมื่อ AISC_Modified คือ การคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 [24] โดยพิจารณาเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก
รูปพรรณเป็นเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเหล็กรูปพรรณ

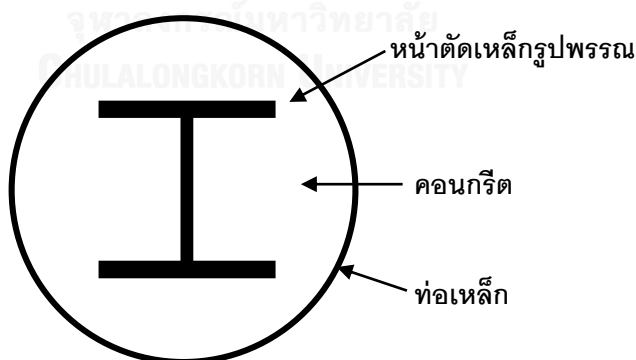
บทที่ 6

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำเยื้องศูนย์

ในบทนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ และการศึกษาผลกระทบของตัวแปรออกแบบ โดยตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบในอดีต จากนั้นนำแบบจำลองไปศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดเยื้องศูนย์และสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสา ตัวแปรออกแบบที่ศึกษาประกอบด้วย กำลังของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณและท่อเหล็ก กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต พื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ และความหนาท่อเหล็ก

6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบในอดีต

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ทำโดยการนำไปตรวจสอบกับผลการทดสอบในอดีตของ Liu และคณะ [7] ซึ่งเป็นผลการทดสอบเสารับแรงอัดเยื้องศูนย์โดยมีเสา 2 ขนาด คือ เสาหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร ความหนาท่อเหล็ก 1.5 มิลลิเมตร ยาว 600 มิลลิเมตร และเสาหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 240 มิลลิเมตร ความหนาท่อเหล็ก 2.0 มิลลิเมตร ยาว 720 มิลลิเมตร โดยมีรายละเอียดของเสาทดสอบ ดังรูปที่ 6.1 และตารางที่ 6.1

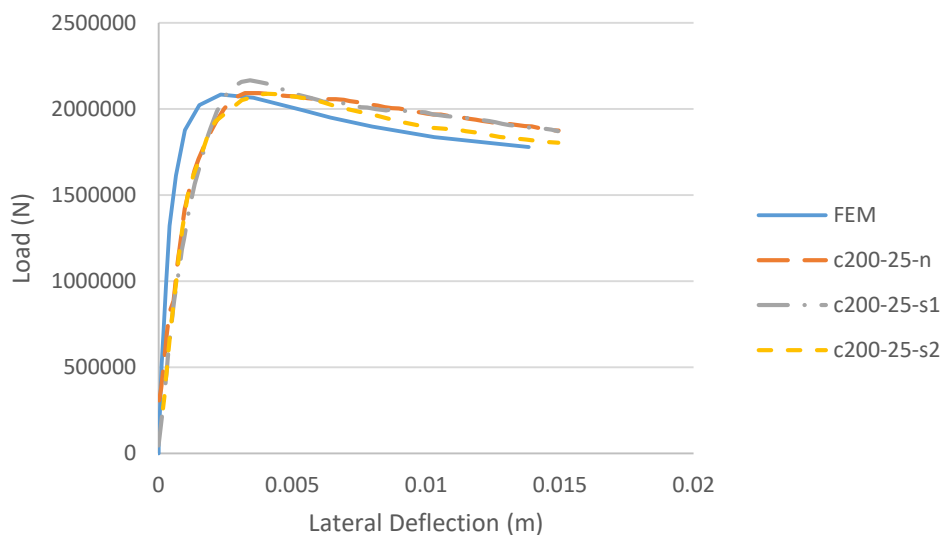


รูป 6.1 หน้าตัดเสาทดสอบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณของ Liu และคณะ 2015

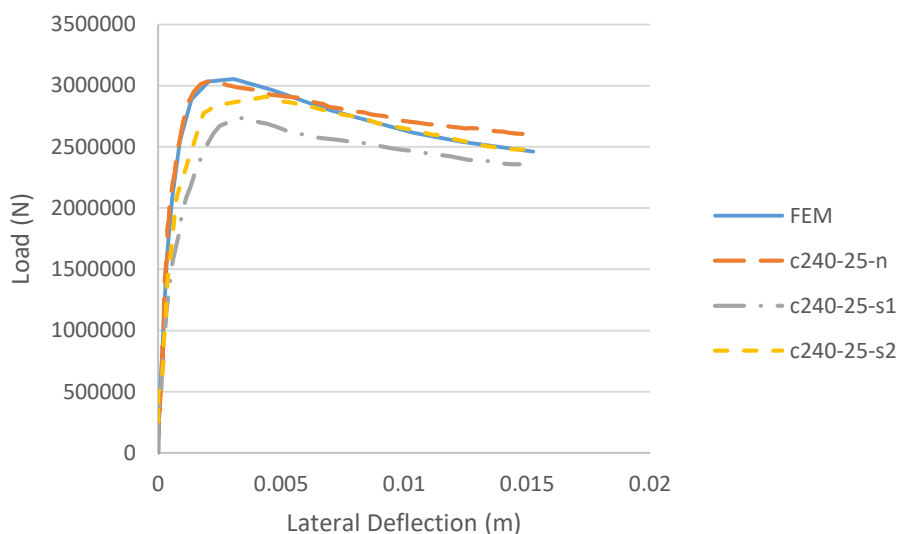
ตาราง 6.1 คุณสมบัติของเสาตัวอย่างทดสอบและระยะรับแรงกระทำเอียงศูนย์

ชื่อตัวอย่าง	ความยาว (mm)	ครึ่งองศา (mm)	ท่อเหล็ก		หน้าตัดเหล็ก รูปพรรณ		ของคอนกรีต คู่กับท่อเหล็ก (MPa)	กำลังรับแรง คู่กับท่อเหล็ก (kN)
			D/t	fy (MPa)	รูปแบบ หน้าตัด	fy (MPa)		
c-200-25-n	600	25	133.3	324	HW100	285	81	2084
c-200-25-s1								2166
c-200-25-s2								2090
c-240-25-n	720	25	120	290	HW100	285	62	3040
c-242-25-s1								2736
c-240-25-s2								2946

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบของเสาทำโดยการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเอียงศูนย์ของเสากับระยะการโก่งตัวด้านข้าง (Lateral deflection) ที่กึ่งกลางของเสาดังรูปที่ 6.2 และรูปที่ 6.3 และเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเอียงศูนย์สูงสุดของเสาดังตารางที่ 6.2



รูป 6.2 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเอียงศูนย์กับระยะโก่งตัวด้านข้างของเสา c-200-25 [7]



รูป 6.3 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดเอียงศูนย์กับระยะโก่งตัวด้านข้างของเสา c-240-25 [7]

ตาราง 6.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในอดีต

หน้าตัด	กำลังรับแรงอันในแนวแกน (kN)		อัตราส่วน
	A test	B FEM	
c-200-25-n	2084	2083.18	1.00
c-200-25-s1	2166		1.04
c-200-25-s2	2090		1.00
c-240-25-n	3040	3054.84	1.00
c-240-25-s1	2736		0.90
c-240-25-s2	2946		0.96
ค่าเฉลี่ย			0.98

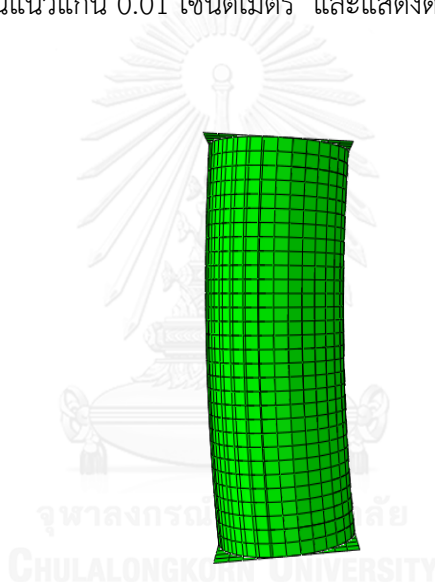
การตรวจความถูกต้องของแบบจำลองพบว่าแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดเอียงศูนย์ของเสาได้อย่างเหมาะสม โดยมีอัตราส่วนความแตกต่างเฉลี่ยกำลังแรงอัดสูงสุดจากผลทดสอบ (Test) ต่อผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เท่ากับ 0.98

6.2 พฤติกรรมของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

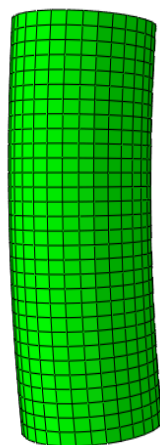
ในส่วนนี้จะนำแบบจำลองไปศึกษาพฤติกรรมของเสารับแรงอัดเยื้องศูนย์โดยพฤติกรรมที่ศึกษาในเบื้องต้นคือการเสีรูปของเสาและการโอบรัดตัวของคอนกรีตภายในท่อนเหล็ก

6.2.1 พฤติกรรมการเสีรูปของเสาและวัสดุภายในเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปพรรณภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์

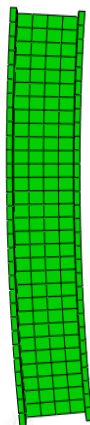
การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าแบบจำลองของเสาและวัสดุภายในเสาซึ่งประกอบด้วยคอนกรีต ท่อนเหล็ก และเหล็กกรุปพรรณแสดงได้ดังรูปที่ 6.4 ถึงรูปที่ 6.7 ซึ่งแสดงการเสีรูปของเสาที่ระยะการเคลื่อนที่หัดตัวในแนวแกน 0.01 เซนติเมตร และแสดงด้วยกำลังขยาย 500 เท่าของการเสีรูปจริง



รูป 6.4 การเสีรูปของเสารับแรงอัดเยื้องศูนย์ c-200-25



รูป 6.5 การเสีรูปของคอนกรีตภายในเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์ c-200-25



รูป 6.6 การเสีयरูปร่างของเปลือกรูปพรรณภายในเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง c-200-25



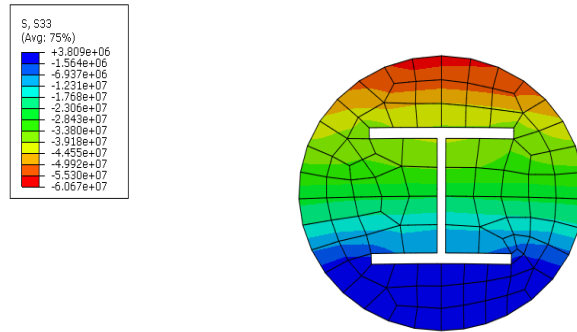
รูป 6.7 การเสีयरูปร่างของท่อเหล็กเสารับแรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง c-200-25

6.2.2 พฤติกรรมการโอบรัดตัวของคอนกรีตภายในเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์กลาง

การศึกษาพฤติกรรมการโอบรัดตัวของคอนกรีตภายในเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงกระทำเยื้องศูนย์กลางจะศึกษาการโอบรัดตัวของคอนกรีตที่ระยะการหดตัวในแนวแกนที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อให้เห็นการเพิ่มขึ้นของกำลังของแรงตามแนวแกนของคอนกรีตดังรูปที่ 6.8 ถึง รูปที่ 6.15

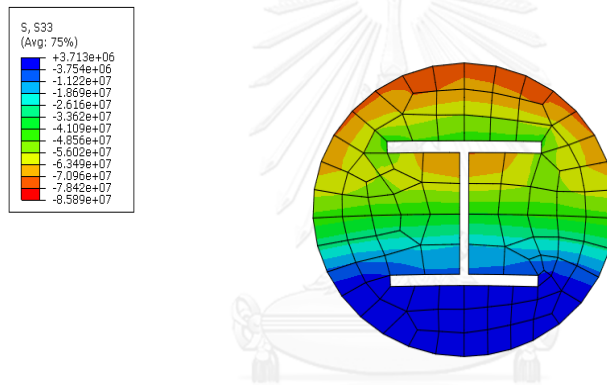
จากการศึกษาพบว่าพื้นที่การโอบรัดตัวของคอนกรีตซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นมากที่สุด จะอยู่ในบริเวณที่เสารับแรงอัด โดยพื้นที่คอนกรีตถูกโอบรัดจะอยู่บริเวณด้านในของแผ่นปีกหน้าตัด

เหลือรูปพรรณ จนกระทั่งถึงจุดที่เสารับกำลังสูงสุดดังรูปที่ 6.11 จากนั้นกำลังของเสาจะลดลงโดยพื้นที่คอนกรีตที่ถูกโอบรัดจะยังคงเดิม



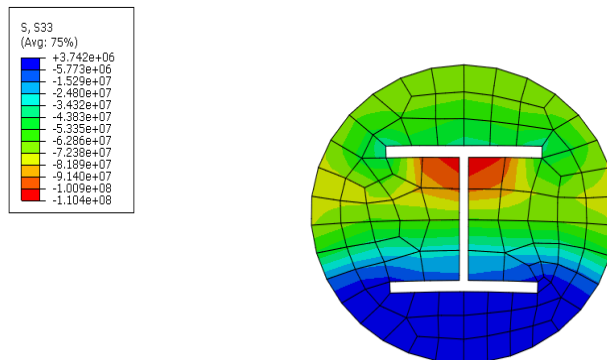
รูป 6.8 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหัดตัวในแนวแกน

0.001 เมตร



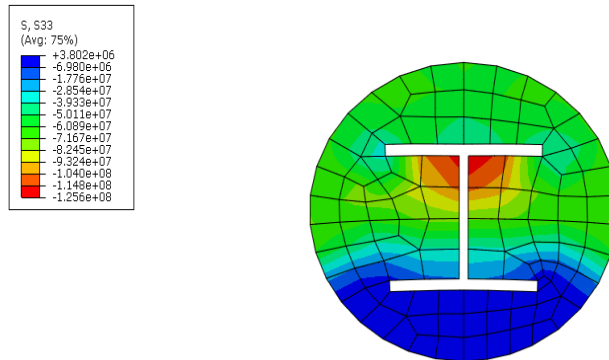
รูป 6.9 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-ที่ตำแหน่งการหัดตัวในแนวแกน 25

0.เมตร 003

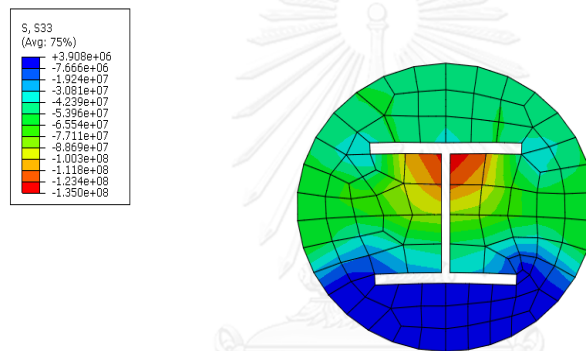


รูป 6.10 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหัดตัวในแนวแกน

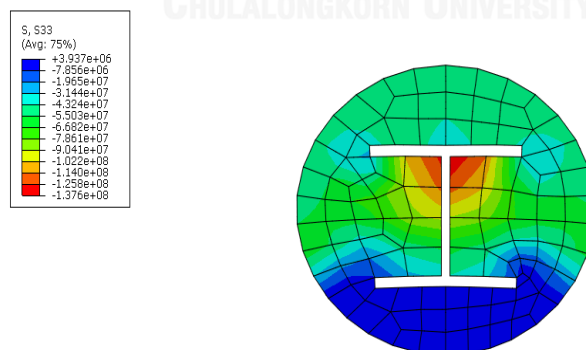
0.005 เมตร



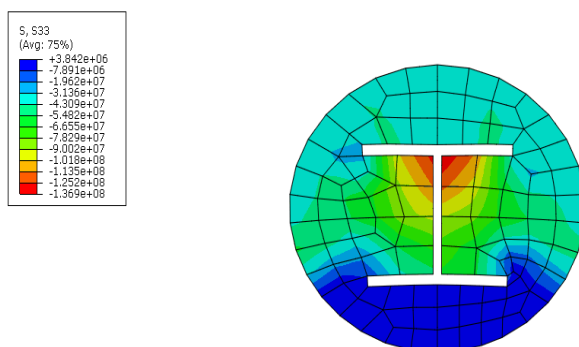
รูป 6.11 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหัดตัวในแนวแกน 0.007 เมตร



รูป 6.12 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหัดตัวในแนวแกน 0.009 เมตร



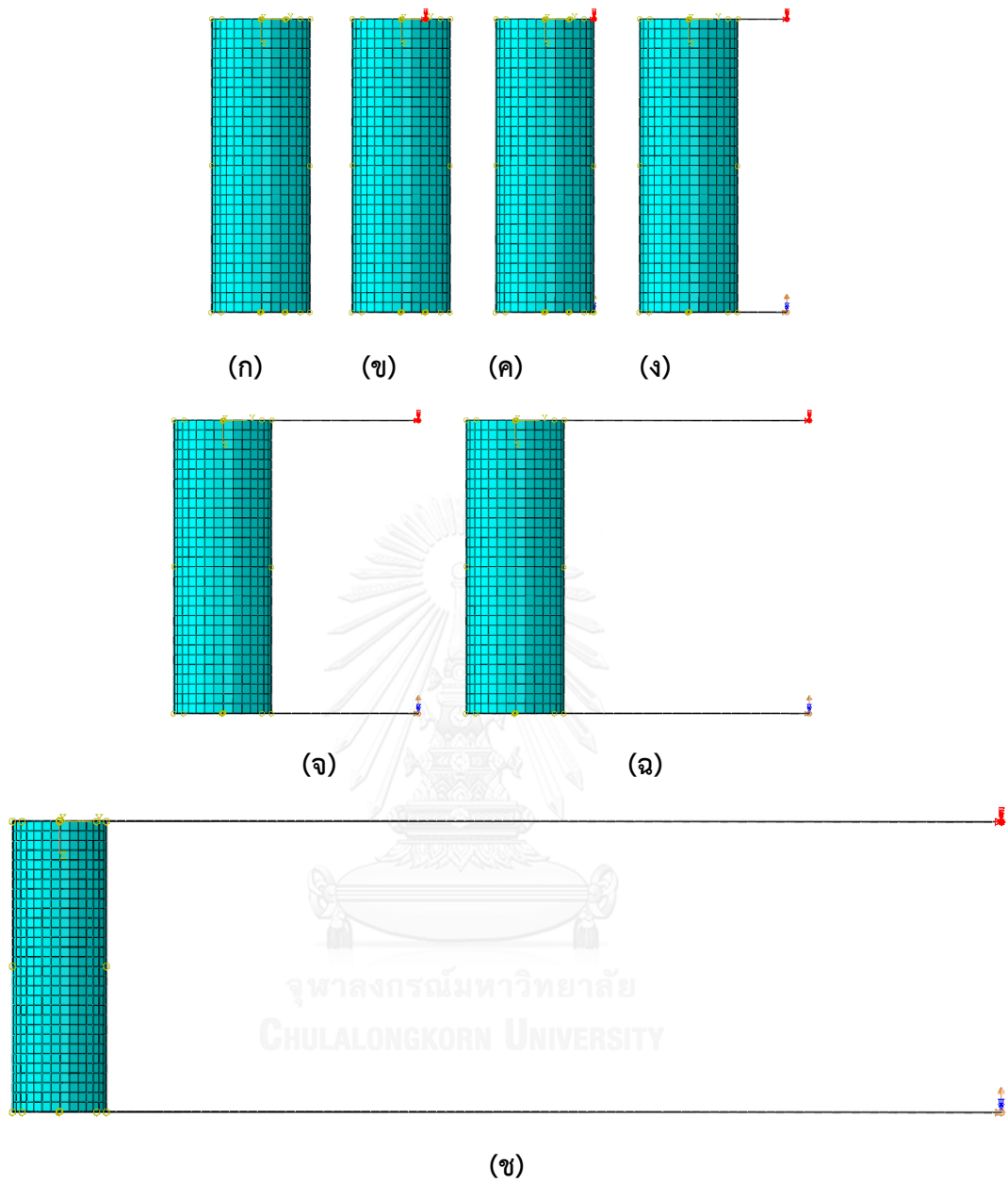
รูป 6.13 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหัดตัวในแนวแกน 0.010 เมตร



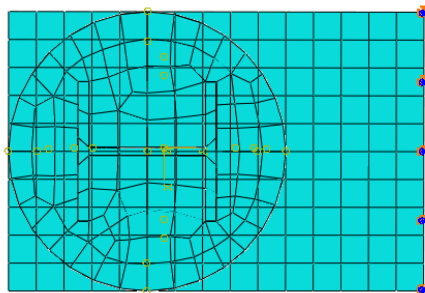
รูป 6.14 ความเค้นตามแนวแกนของคอนกรีตในเสา c-200-25 ที่ตำแหน่งการหดตัวในแนวแกน 0.011 เมตร

6.3 การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จะวิเคราะห์เฉพาะโมเมนต์ดัดรอบแรกหลักเท่านั้น โดยเริ่มจากสร้างแบบจำลองที่มีระยะแรงกระทำ (load) และจุดรองรับ (support) ที่ห่างจากจุดกึ่งกลางของหน้าตัดเสาที่ระยะต่าง ๆ กันดังรูปที่ 6.15 โดย e คือระยะเยื้องศูนย์กลางของน้ำหนักบรรทุกและจุดรองรับ และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของหน้าตัดเสา



รูป 6.15 แบบจำลองเสารับแรงอัดเอียงศูนย์กลางที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ (ก) $e/D=0$ (ข) $e/D=0.25$
 (ค) $e/D=0.50$ (ง) $e/D=1.00$ (จ) $e/D=2.00$ (ฉ) $e/D=3.00$ (ช) $e/D=20.00$



รูป 6.16 รูปแบบการให้แรงกระทำ

เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณที่ใช้ในการศึกษาการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์คือเสาตัวอย่าง c-200-25, c-240-25 และเสาแบบจำลอง C1 ซึ่งมีลักษณะหน้าตัดคล้ายกันกับเสาตัวอย่าง c-200-25 เนื่องจากมีผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แม่นยำที่สุด และเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุเป็นคุณสมบัติวัสดุที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปภายในประเทศไทย โดยตารางที่ 6.3 ถึงตารางที่ 6.4 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเสาตัวอย่าง

ตาราง 6.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ความสูง (มม.)	ความหนาท่อเหล็ก (มม.)	เหล็กรูปพรรณ	
				รูปทรง	ขนาดหน้าตัด (มม.)
c-200_FEM	200	600	1.5	H-Shape	100x100
c-240_FEM	240	720	2.0	H-Shape	100x100
C1	200	600	3	H-Shape	100x100

ตาราง 6.4 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ

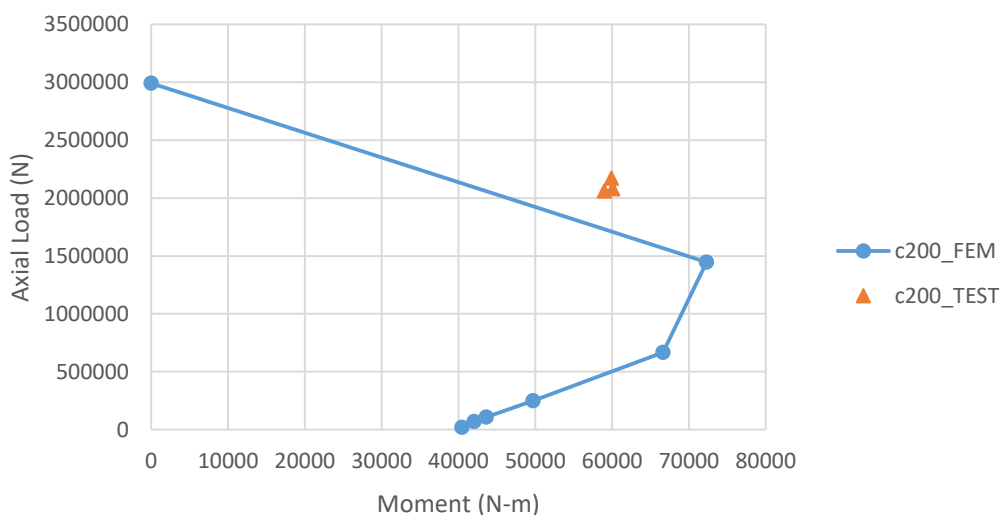
หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (MPa)	กำลังครากของท่อเหล็ก (MPa)	กำลังครากของเหล็กรูปพรรณ (MPa)
c-200_FEM	62.0	324	285
c-240_FEM	62.0	290	285
C1	24.5	365	365

จากการศึกษาพบว่าเมื่อระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจะทำให้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาลดลง แต่โมเมนต์ที่เกิดขึ้นภายในเสามีขนาดเพิ่มขึ้น โดยโมเมนต์สามารถหาได้จากการนำน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในแนวแกนคูณกับระยะเยื้องศูนย์กลางของน้ำหนักบรรทุก ดังตารางที่ 6.5

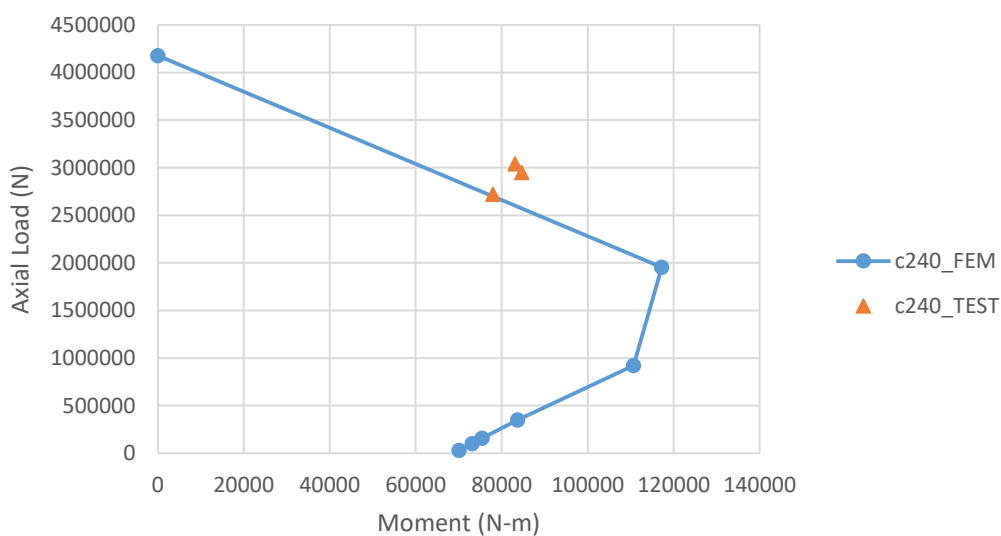
ตาราง 6.5 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาตัวอย่างที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ

ตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุก สูงสุด (N)	อัตราส่วนระยะ เยื้องศูนย์กลาง (e/D)	ระยะเยื้องศูนย์กลาง (m)	โมเมนต์ (kN-m)
c-200_FEM	2991510	0.00	0.00	0
	1446280	0.25	0.05	72314
	666165	0.50	0.10	66617
	248633	1.00	0.20	49727
	109061	2.00	0.40	43624
	70050.8	3.00	0.60	42030
	20229.5	10.00	2.00	40459
c-240_FEM	4176060	0.00	0.00	0
	1954060	0.25	0.06	117244
	922506	0.50	0.12	110701
	348739	1.00	0.24	83697
	157193	2.00	0.48	75453
	101625	3.00	0.72	73170
	29201.3	10.00	2.40	70083
C1	2633820	0.00	0.00	0
	1423310	0.25	0.05	71166
	909007	0.50	0.10	90901
	481174	1.00	0.20	96235
	237810	2.00	0.40	95124
	156777	3.00	0.60	94066
	46220.9	10.00	2.00	0

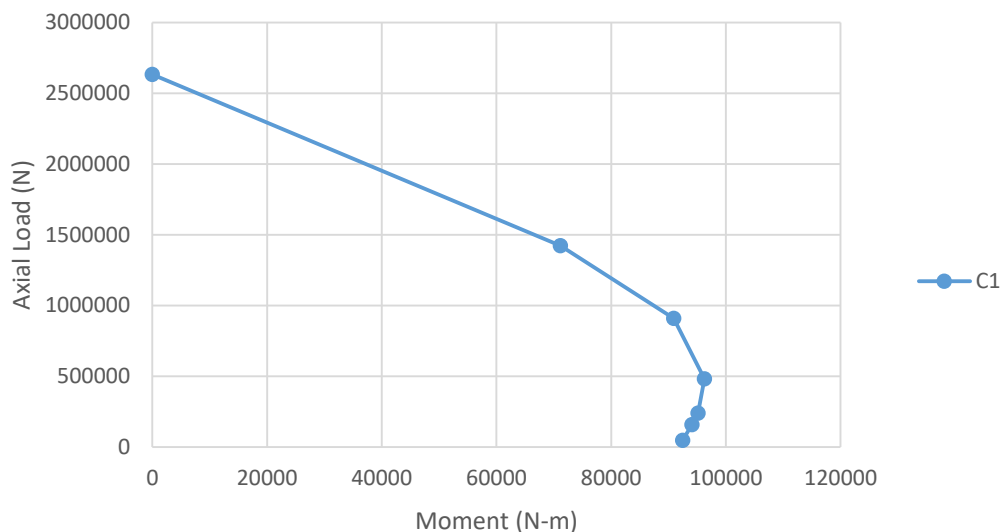
การสร้างกราฟปฏิสัมพันธ์กำลังทำได้โดยการลากเส้นเชื่อมระหว่างจุดน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวแกนกับโมเมนต์ของเสาที่ระยะเยื้องศูนย์กลางต่างๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งกราฟเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังดังรูปที่ 6.17 ถึงรูปที่ 6.19



รูป 6.17 ตัวอย่างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาตัวอย่าง c200_25 จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดสอบ



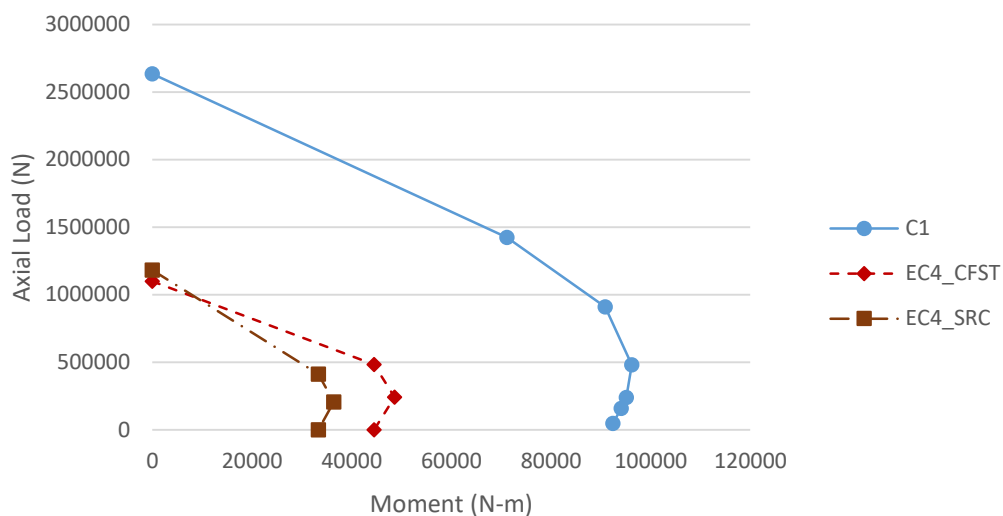
รูป 6.18 ตัวอย่างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาตัวอย่าง c240_25 จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดสอบ



รูป 6.19 ตัวอย่างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาตัวอย่าง C1

6.4 การศึกษาความเหมาะสมของข้อกำหนด Eurocode4 และ AISC 360-10 ในการออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

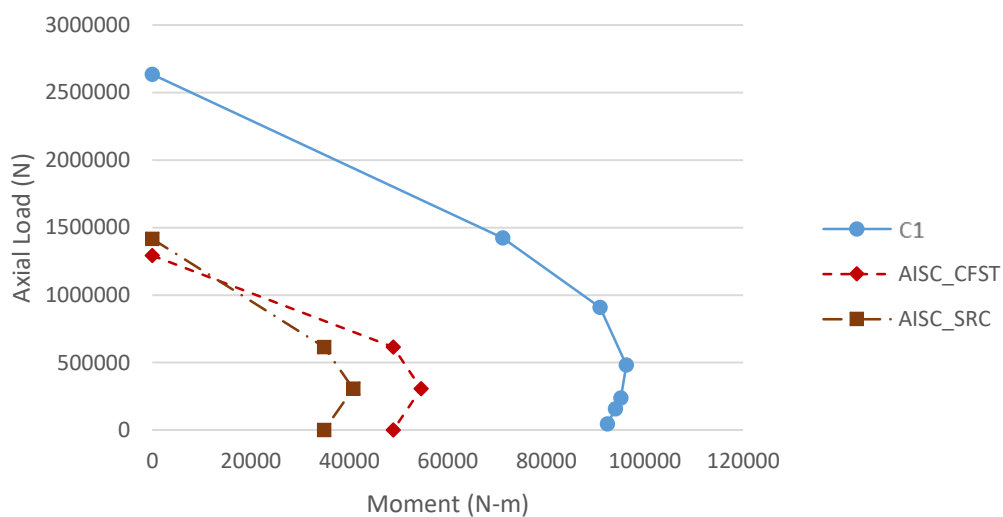
การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังตามข้อกำหนด Eurocode4 [11] และ AISC 360-10 [24] ของเสาตัวอย่าง C1 โดยเปรียบเทียบเสาตามข้อกำหนดประเภทเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต และเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต พบว่ากำลังรับแรงของเสาตัวอย่าง C1 ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าสูงกว่าการคำนวณกำลังรับแรงตามข้อกำหนดตลอดกราฟเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์และมีความต่างกันอย่างมากดังรูปที่ 6.20 และรูปที่ 6.21 ซึ่ง โดยการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 [24] มีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า Eurocode4 [11]



*EC4_CFST คือเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างตามข้อกำหนดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามข้อกำหนด Eurocode4

** EC4_SRC คือเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างตามข้อกำหนดของเสาน้ำตดเหล็กด้วยคอนกรีตตามข้อกำหนด Eurocode4

รูป 6.20 ตัวอย่างการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณกับข้อกำหนด Eurocode4



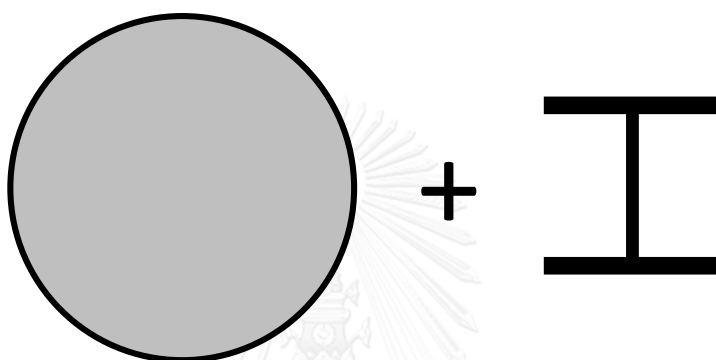
*AISC_CFST คือเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างตามข้อกำหนดของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตตามข้อกำหนด AISC 360-10

** AISC_SRC คือเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างตามข้อกำหนดของเสาน้ำตดเหล็กด้วยคอนกรีตตามข้อกำหนด AISC 360-10

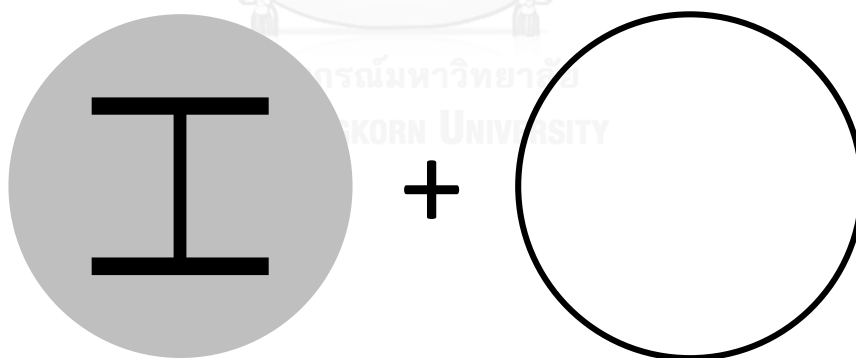
รูป 6.21 ตัวอย่างการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณกับข้อกำหนด AISC360 -10

เพื่อพัฒนาความเหมาะสมในการใช้ข้อกำหนดทั้งสองในการออกแบบท่าโดยการสมมติให้เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณคำนวณจากวิธีดังนี้

1. เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังกำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรวมกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายใน ดังรูปที่ 6.22
2. เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรวมกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของต่อเหล็กภายนอก ดังรูปที่ 6.23

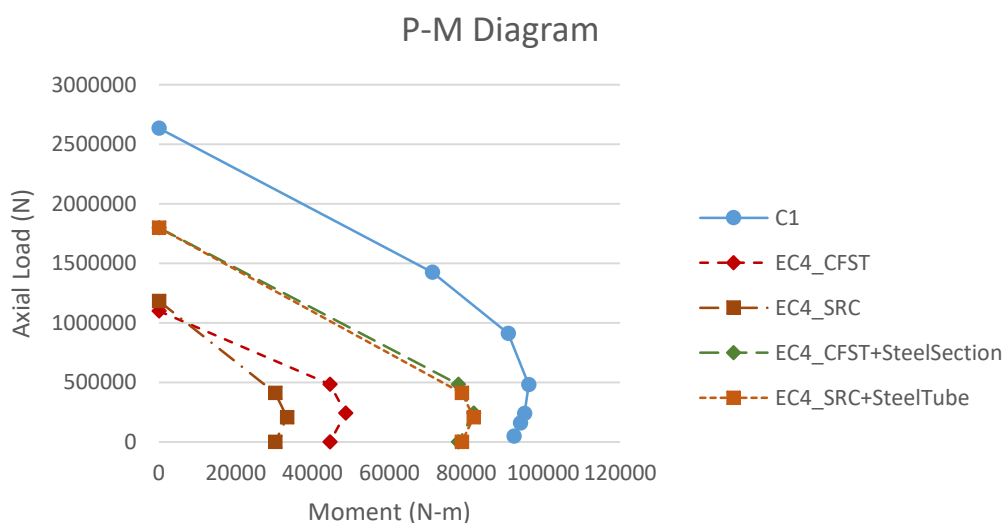


รูป 6.22 วิธีสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายใน



รูป 6.23 วิธีสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของต่อเหล็กภายนอก

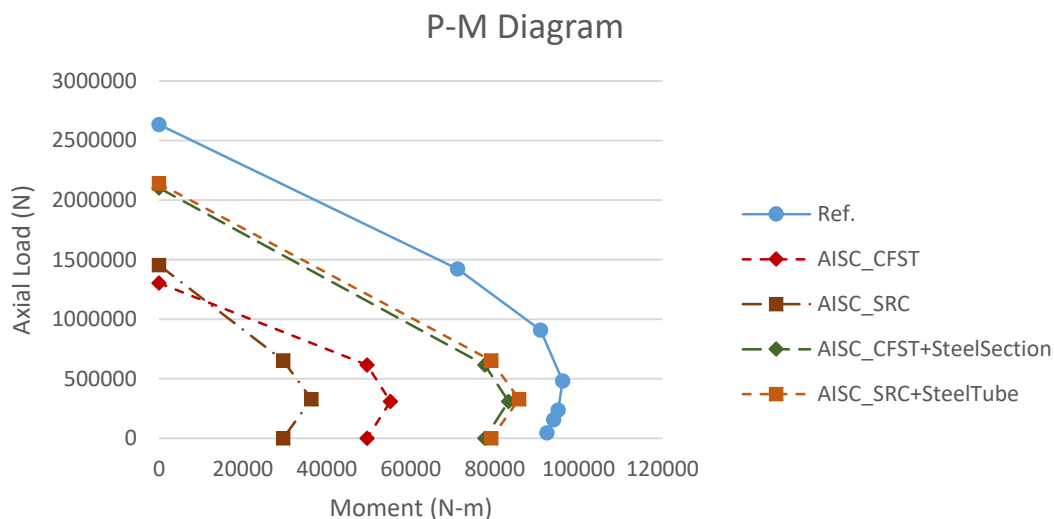
เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างได้จะเป็นดังรูปที่ 6.24 และรูปที่ 6.25 ซึ่งพบว่าเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของท่อเหล็กภายนอกมีผลใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า โดยการคำนวณตามข้อกำหนด AISC 360-10 [24] ยังคงมีความใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า Eurocode4 [11]



*EC4_CFST+Steelsection คือ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายในตามมาตรฐาน Eurocode4

**EC4_SRC+SteelTube คือ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของท่อเหล็กภายนอกตามมาตรฐาน Eurocode4

รูป 6.24 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนด Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว



*AISC_CFST+Steelsection คือ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายในตามมาตรฐาน AISC 360-10

**AISC_SRC+SteelTube คือ เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่สร้างจากการรวมเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของท่อเหล็กภายนอกตามมาตรฐาน AISC 360-100

รูป 6.25 การเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก รูปพรรณจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับข้อกำหนด AISC 360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว

6.5 การศึกษาผลกระทบตัวแปรออกแบบต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

ผลกระทบของตัวแปรออกแบบกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตและกำลังครากของท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แต่ละกรณีกับข้อกำหนด Eurocode4 [11] และ AISC 360-10 [24] ที่คำนวณจากการรวมของเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตกับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของท่อเหล็กภายนอกที่ได้ศึกษาในหัวข้อก่อนหน้านี้ เพื่อวิเคราะห์ความปลอดภัยในการออกแบบเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ

6.5.1 ผลกระทบของกำลังครากของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ

เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณที่ใช้เป็นตัวอย่างศึกษาผลกระทบของกำลังครากของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังเลือกใช้เสาตัวอย่าง C1 ซึ่งมีหน้าตัดคล้ายกับเสาตัวอย่าง c-200-25 เนื่องจากผลการวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำสูงและเป็นเสาสั้นเสามีขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติวัสดุตั้งตารางที่ 6.6 ถึงตารางที่ 6.7

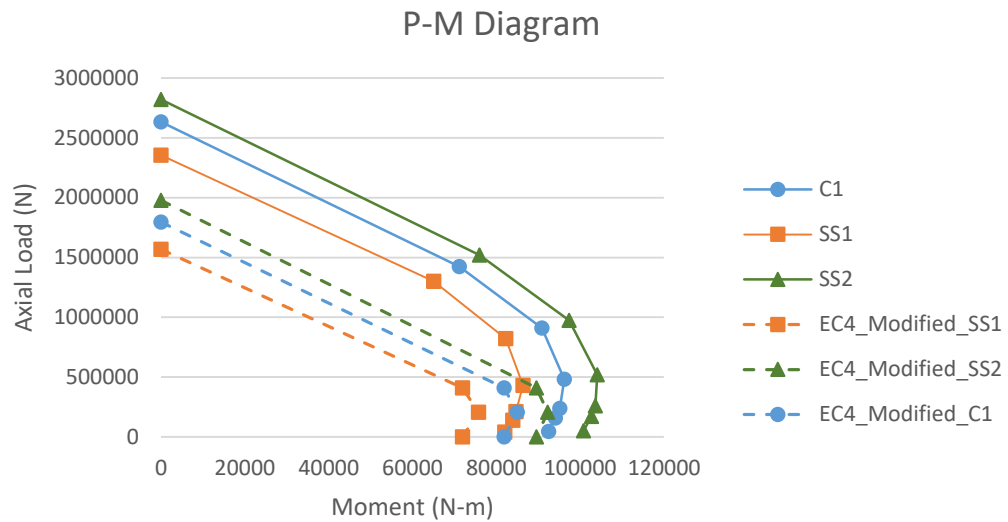
ตาราง 6.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อเหล็กและขนาดหน้าตัด เหล็กกรุปพรรณ

หน้าตัด	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ความสูง (มม.)	ความหนาท่อ เหล็ก (มม.)	เหล็กกรุปพรรณ	
				รูปทรง	ขนาดหน้าตัด (มม.)
C1, SS1, SS2	200	600	1.5	H-Shape	100x100

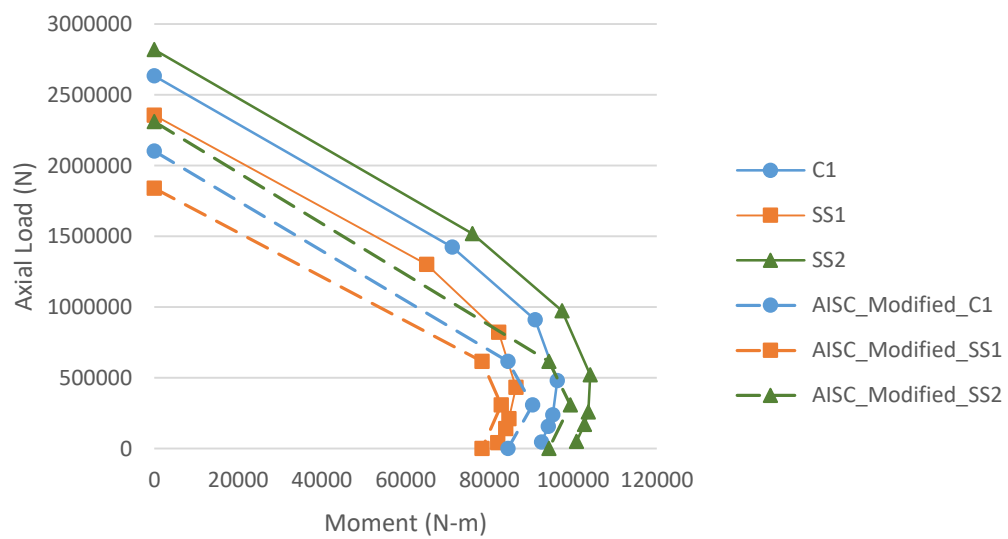
ตาราง 6.7 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อเหล็กและเหล็กกรุปพรรณ

หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดสูงสุด ของคอนกรีต (MPa)	กำลังครากของท่อ เหล็ก (MPa)	กำลังครากของเหล็ก กรุปพรรณ (MPa)
C1	24.5	365	365
SS1	24.5	365	245
SS2	24.5	365	460

การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ากำลังครากของเหล็กกรุปพรรณมีผลกระทบต่อเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปพรรณ โดยเมื่อกำลังครากของเหล็กกรุปพรรณเพิ่มขึ้นเสาจะสามารถรับแรงได้เพิ่มขึ้นทั้งน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดและโมเมนต์ดัด และเนื่องจากข้อกำหนด Eurocode4 [11] และ AISC 360-10 [24] ยังไม่มีข้อกำหนดเฉพาะสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กกรุปพรรณโดยเฉพาะ จึงเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ที่ทำการดัดแปลงแล้วตั้งหัวข้อก่อนหน้า พบว่าการออกแบบตามข้อกำหนดทั้งสองมีความปลอดภัย (conservative) ดังรูปที่ 6.26 และรูปที่ 6.27



รูป 6.26 ผลกระทบของกำลังครากของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว



รูป 6.27 ผลกระทบของกำลังครากของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ AISC 360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว

6.5.2 ผลกระทบของกำลังครากของท่อเหล็ก

เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณที่ใช้เป็นตัวอย่างศึกษาผลกระทบของกำลังครากของท่อเหล็กต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังเลือกใช้เสาตัวอย่าง C1 เช่นเดิม เนื่องจากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำสูงและเป็นเสาสั้น เสามีขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติวัสดุดังตารางที่ 6.8 ถึงตารางที่ 6.9

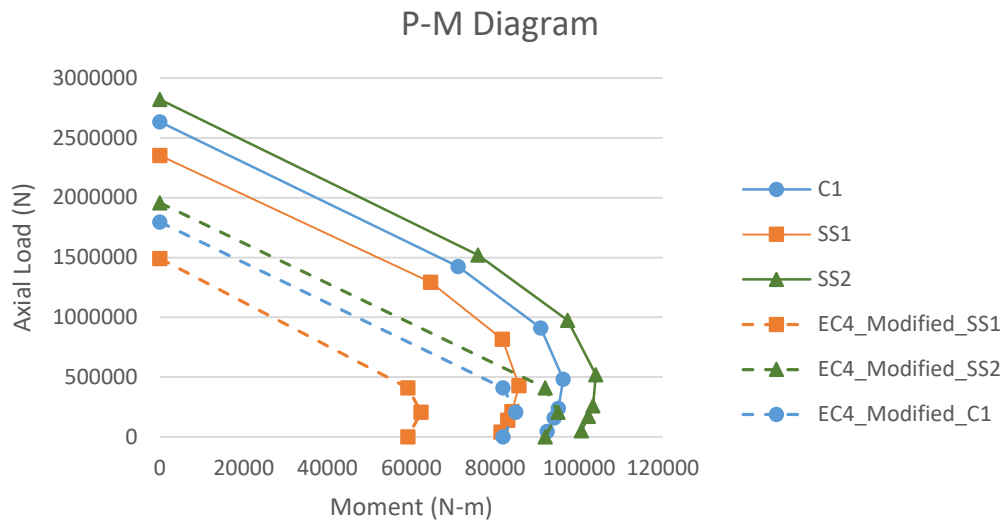
ตาราง 6.8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ความสูง (มม.)	ความหนาท่อเหล็ก (มม.)	เหล็กรูปพรรณ	
				รูปทรง	ขนาดหน้าตัด (มม.)
C1, TS1, TS2	200	600	3	H-Shape	100x100

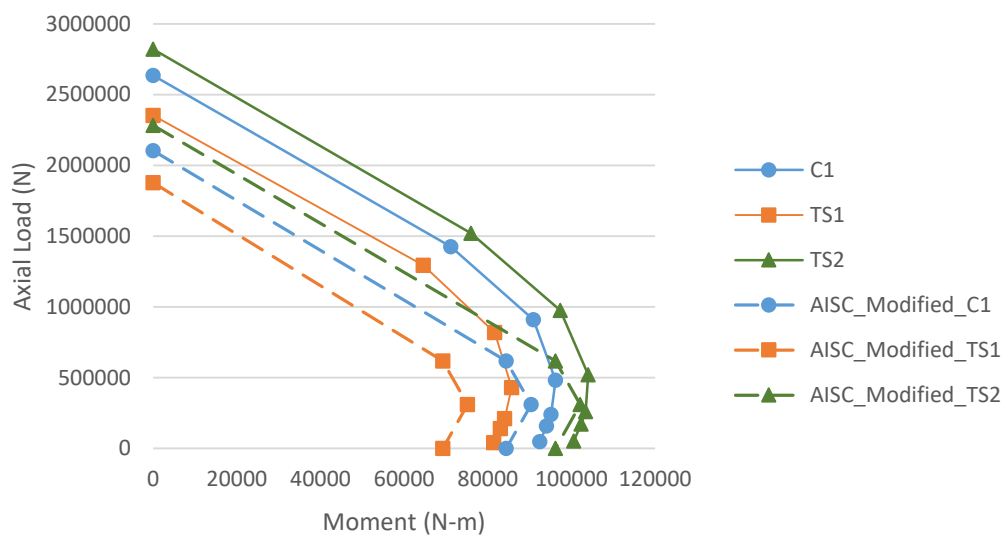
ตาราง 6.9 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (MPa)	กำลังครากของท่อเหล็ก (MPa)	กำลังครากของเหล็กรูปพรรณ (MPa)
C1	24.5	365	365
TS1	24.5	245	365
TS2	24.5	460	365

จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเมื่อเพิ่มกำลังครากของท่อเหล็กจะทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกและกำลังรับแรงดัดของเสาเพิ่มขึ้น โดยจะมีผลต่อกำลังรับแรงดัดมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนด Eurocode4 [11] และ AISC 360-10 [24] ที่ดัดแปลงแล้ว ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.28 และรูปที่ 6.29 พบว่าข้อกำหนดสามารถใช้ออกแบบได้อย่างปลอดภัย โดยจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของข้อกำหนดพบว่ากำลังครากของท่อเหล็กจะส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดของเสามากกว่าเช่นกัน



รูป 6.28 ผลกระทบของกำลังครากของท่อเหล็กต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว



รูป 6.29 ผลกระทบของกำลังครากของท่อเหล็กต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ AISC 310-10 ที่ดัดแปลงแล้ว

6.5.3 ผลกระทบของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต

เสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณที่ใช้เป็นตัวอย่างศึกษาผลกระทบของกำลังครากของท่อนเหล็กต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังยังคงเลือกใช้เสาตัวอย่าง C1 เนื่องจากผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแม่นยำสูงและเป็นเสาสั้น เสามีขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติวัสดุตั้งตารางที่ 6.10 ถึงตารางที่ 6.11

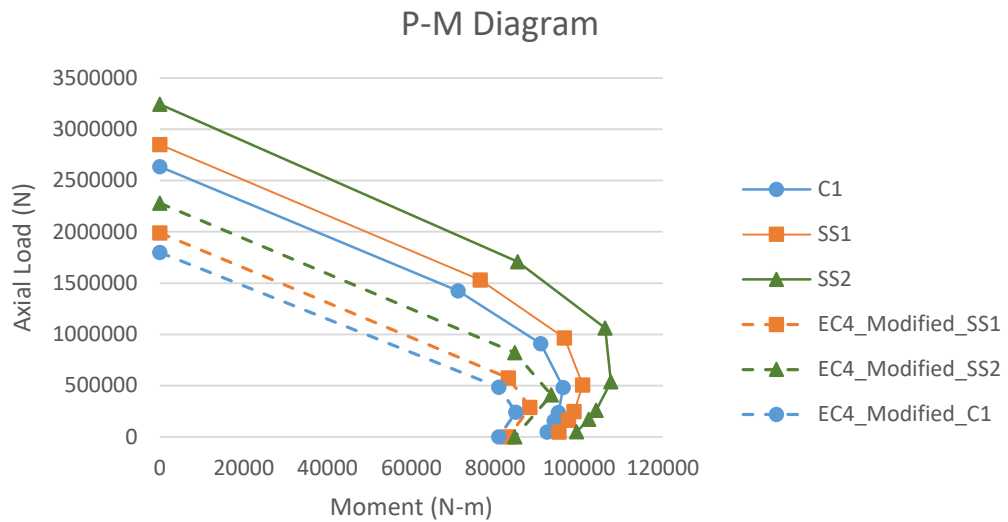
ตาราง 6.10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อนเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ความสูง (มม.)	ความหนาต่อเหล็ก (มม.)	เหล็กรูปพรรณ	
				รูปทรง	ขนาดหน้าตัด (มม.)
C1, CS1, CS2	200	600	1.5	H-Shape	100x100

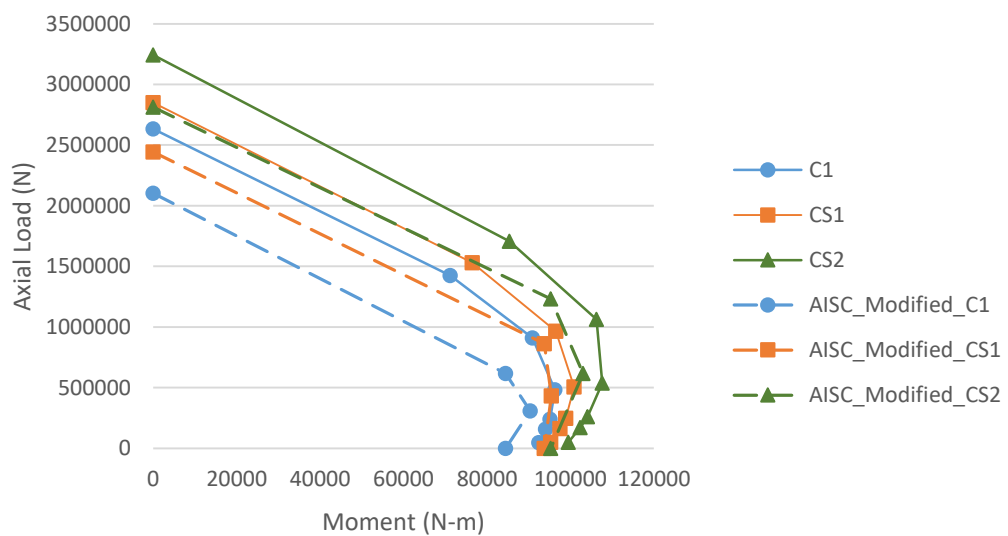
ตาราง 6.11 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อนเหล็กและเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (MPa)	กำลังครากของท่อนเหล็ก (MPa)	กำลังครากของเหล็กรูปพรรณ (MPa)
C1	24.5	365	365
CS1	34.3	365	365
CS2	49.0	365	365

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตมีผลกระทบต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังโดยเมื่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาจะเพิ่มขึ้น โดยกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตมีผลต่อกำลังรับแรงอัดมากกว่ากำลังรับแรงดัดของเสาดังรูปที่ 6.30 และรูปที่ 6.31 จากการเปรียบเทียบเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์กับเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังจากข้อกำหนด Eurocode4 [11] และ AISC 360-10 [24] ที่ดัดแปลงแล้ว พบว่าข้อกำหนดทั้งสองสามารถใช้ออกแบบได้อย่างปลอดภัย



รูป 6.30 ผลกระทบของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว



รูป 6.31 ผลกระทบของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ AISC 360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว

6.5.4 ผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ

เสาท่อนเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณที่ใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรรูปแบบพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์เลือกใช้เสาตัวอย่าง C1 แต่จะเปลี่ยนแปลงความกว้างปีกของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายใน โดยเสามีขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติดังตารางที่ 6.12 ถึงตารางที่ 6.13

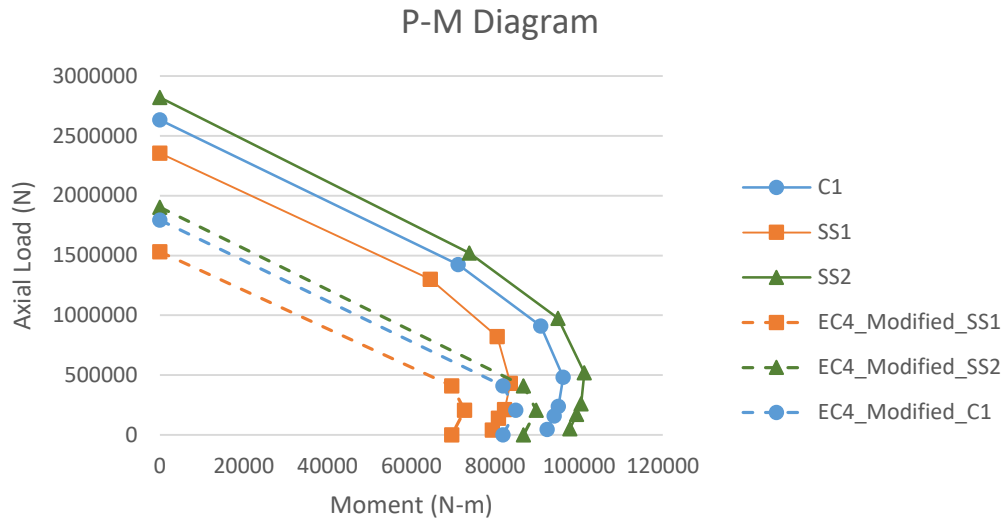
ตาราง 6.12 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดท่อนเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ความสูง (มม.)	ความหนาต่อเหล็ก (มม.)	เหล็กรูปพรรณ	
				รูปทรง	ขนาดหน้าตัด (มม.)
C1	200	600	3	H-Shape	100x100
SR1	200	600	3	H-Shape	100x50
SR2	200	600	3	H-Shape	100x120

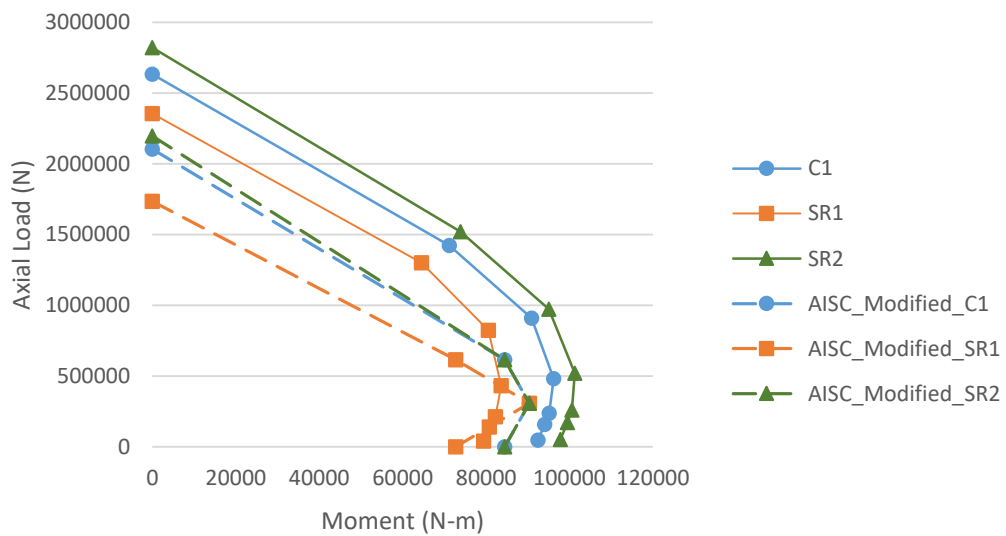
ตาราง 6.13 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (MPa)	กำลังครากของท่อเหล็ก (MPa)	กำลังครากของเหล็กรูปพรรณ (MPa)
C1, SR1, SR2	24.5	365	365

จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายในจะทำให้เสามีกำลังรับแรงอัดและแรงดัดเพิ่มขึ้น โดยมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงดัดมากกว่า ซึ่งเป็นไปตามรูปที่ 6.32 และรูปที่ 6.33 และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดทั้ง Eurocode4 [11] และ AISC 360-10 [24] ที่ดัดแปลงแล้วพบว่าสามารถใช้ข้อกำหนดทั้งสองออกแบบได้อย่างปลอดภัย



รูป 6.32 ผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายในต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ Eurocode 4 ที่ดัดแปลงแล้ว



รูป 6.33 ผลกระทบของพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณภายในต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ AISC 360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว

6.5.5 ผลกระทบของความหนาต่อเหล็ก

เสาต่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณที่ใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรรูปแบบพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์เลือกใช้เสา C1 เช่นเดียวกับการศึกษาผลกระทบก่อนหน้า แต่จะเปลี่ยนแปลงความหนาของต่อเหล็ก โดยเสามีขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติดังตารางที่ 6.14 ถึงตารางที่ 6.15

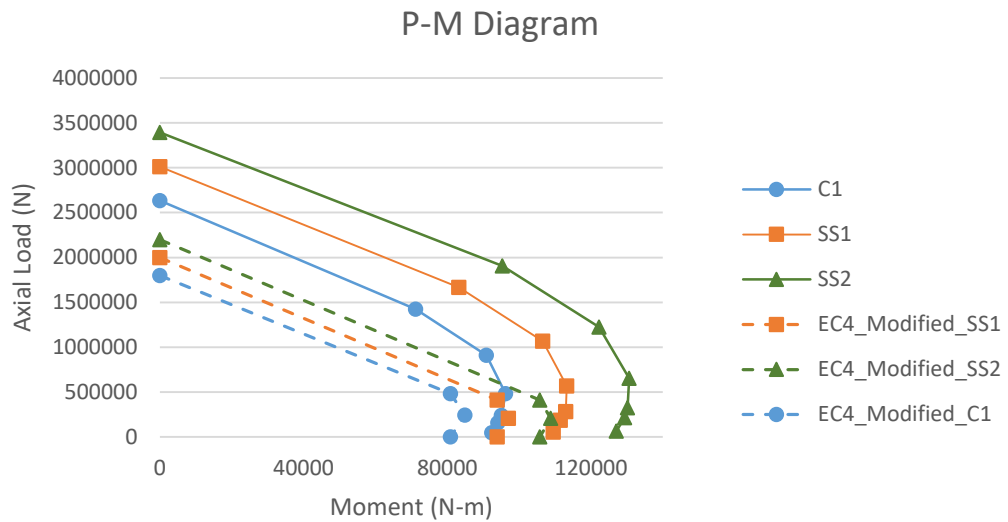
ตาราง 6.14 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางของหน้าตัด ความยาวของเสา ขนาดต่อเหล็กและขนาดหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ความสูง (มม.)	ความหนาต่อเหล็ก (มม.)	เหล็กรูปพรรณ	
				รูปทรง	ขนาดหน้าตัด (มม.)
C1	200	600	3	H-Shape	100x100
TR1	200	600	4	H-Shape	100x100
TR2	200	600	5	H-Shape	100x100

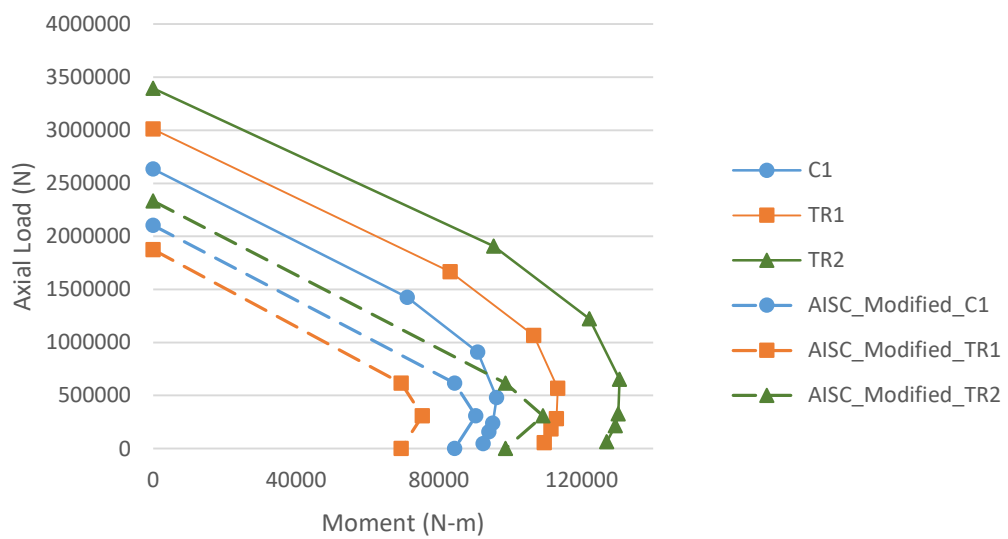
ตาราง 6.15 คุณสมบัติวัสดุคอนกรีต ต่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ

หน้าตัด	กำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต (MPa)	กำลังครากของต่อเหล็ก (MPa)	กำลังครากของเหล็กรูปพรรณ (MPa)
C1, TR1, TR2	24.5	365	365

การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าความหนาของต่อเหล็กส่งผลกระทบต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลัง โดยจะมีผลต่อกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงอัดดังรูปที่ 6.34 และรูปที่ 6.35 ซึ่งจะมีผลต่อกำลังรับแรงดัดมากกว่า และจากการเปรียบเทียบกับข้อกำหนด Eurocode4 [11] และ AISC 360-10 [24] ที่ดัดแปลงแล้ว พบว่าการออกแบบด้วยข้อกำหนดมีความปลอดภัย โดยจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของข้อกำหนดพบว่าการเพิ่มความหนาของต่อเหล็กมีผลต่อกำลังรับแรงดัดมากกว่ากำลังรับแรงอัดเช่นกัน



รูป 6.34 ผลกระทบของความหนาต่อเหล็กต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ Eurocode4 ที่ดัดแปลงแล้ว



รูป 6.35 ผลกระทบของความหนาต่อเหล็กต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาโดยเปรียบเทียบกับ AISC 360-10 ที่ดัดแปลงแล้ว

บทที่ 7

สรุป

7.1 สรุปผลการวิจัย

เสาวัสดุผสมท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นการรวมคุณสมบัติเด่นของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ซึ่งจะทำให้เสาวัสดุผสมมีกำลังและความเหนียวมากขึ้น แต่ในปัจจุบันจำนวนงานวิจัยที่ศึกษากำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์ยังมีจำนวนอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณภายใต้แรงกระทำเอียงศูนย์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติด้วยโปรแกรม ABAQUS และนำแบบจำลองไปสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังแรงอัดและแรงดัดร่วมกัน จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับข้อกำหนด AISC 316-10 และ Eurocode4 เพื่อหาความเหมาะสมในการใช้ข้อกำหนดในการออกแบบพร้อมทั้งปรับปรุงข้อกำหนดเพื่อให้มีความใกล้เคียงความจริงมากขึ้น ตัวแปรหลักที่ศึกษาประกอบด้วยกำลังของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ กำลังของคอนกรีต กำลังของท่อเหล็ก พื้นที่หน้าตัดของรูปพรรณ และความหนาของท่อเหล็ก

ในงานวิจัยนี้ศึกษา 2 กรณีคือกรณีที่เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์ และกรณีที่เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเอียงศูนย์ โดยแบบจำลองคุณสมบัติวัสดุที่ใช้จะแบ่งเป็นคุณสมบัติวัสดุคอนกรีต คุณสมบัติเหล็กรีดร้อน และคุณสมบัติแผ่นปิดหัวเสา คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากงานวิจัยของ Han และคณะ (2005) เนื่องจากทำให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ตรงกับผลการทดสอบมากที่สุด คุณสมบัติของเหล็กรีดร้อนจะกำหนดให้เป็นวัสดุแบบ isotropic elastic-plastic และคุณสมบัติของแผ่นปิดหัวเสาจะกำหนดให้มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กโดยทั่วไปเพื่อป้องกันการเสียรูปขณะถ่ายแรง

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าผลการวิเคราะห์ที่ให้ผลอย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ผ่านมาในอดีตทั้งกรณีที่เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์และรับแรงกระทำเอียงศูนย์ แต่เนื่องจากข้อกำหนดทั้ง AISC 360-10 และ Eurocode4 ไม่มีข้อกำหนดสำหรับการออกแบบสำหรับเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณโดยเฉพาะทำให้เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และผลจากการทดสอบมีความแตกต่างจากการคำนวณจากข้อกำหนดอย่างมาก ในงานวิจัยนี้จึงทำการ

ปรับปรุงโดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณออกเป็น 2 กรณี คือ พิจารณาสองเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ และพิจารณาเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งกรณีที่เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำตรงศูนย์เมื่อคำนวณตามข้อกำหนดโดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณจะให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงมากกว่า แต่ในกรณีที่เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ การคำนวณตามข้อกำหนดโดยพิจารณาเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณเป็นเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงมากกว่า โดยข้อกำหนดที่ปรับปรุงแล้วสามารถใช้ในการออกแบบได้อย่างปลอดภัย

จากการศึกษาได้พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณโดยพิจารณาพฤติกรรมการโอบรัดของคอนกรีตคือบริเวณที่มีความเค้นสูงที่สุดในหน้าตัด โดยพฤติกรรมการโอบรัดของคอนกรีตจะเกิดบริเวณกึ่งกลางหน้าตัดเสาทั้งในแผ่นปีกทั้ง 4 แผ่น เมื่อเสารับแรงกระทำตามแนวแกน และพฤติกรรมการโอบรัดของคอนกรีตจะเกิดบริเวณด้านในแผ่นปีกของด้านที่รับแรงอัดเมื่อเสารับแรงเยื้องศูนย์ จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ไปศึกษาผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณซึ่งมีผลสรุปดังนี้พื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณมีผลกระทบต่อทั้งกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีต โดยเมื่อพื้นที่หน้าตัดเหล็กรูปพรรณเพิ่มขึ้นทั้งกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น

1. สำหรับเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ รูปร่างของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของเสา เนื่องจากแต่ละรูปร่างจะสร้างพฤติกรรมการโอบรัดที่ต่างกัน โดยหน้าตัดเหล็กรูปพรรณรูปวงกลมกลวงจะให้กำลังมากที่สุด เนื่องจากสามารถสร้างพื้นที่การโอบรัดได้มากที่สุด และหน้าตัดเหล็กรูปพรรณรูปวงกลมตันจะให้กำลังที่น้อยที่สุด
2. ความหนาของท่อเหล็กมีผลกระทบต่อทั้งกำลังรับอัดและกำลังรับแรงดัดของเสา โดยจากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์จะสังเกตได้ว่ามีผลกระทบต่อกำลังรับแรงดัดของเสามากกว่า เมื่อเพิ่มความหนาของท่อเหล็กกำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาสั้นท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตจะเสริมเหล็กรูปพรรณเพิ่มขึ้น

3. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดมากกว่ากำลังรับแรงดัดซึ่งสามารถสังเกตได้จากเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาสั้นท่อนเหลี่ยมเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ ในกรณีที่เสารับแรงกระทำตรงศูนย์ เมื่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนของเสาเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในช่วงหลังจุดที่รับกำลังสูงสุดแล้วผลของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตจะมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของเสาน้อยลง
4. กำลังครากของหน้าตัดเหลี่ยมรูปพรรณและท่อนเหลี่ยมมีผลกระทำต่อทั้งกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของเสาสั้นท่อนเหลี่ยมเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณ โดยจะมีผลต่อกำลังรับแรงดัดมากกว่า

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดสอบเพิ่มเติมเนื่องจากผลการทดสอบในอดีตยังมีจำนวนจำกัด
2. นำไปประยุกต์ศึกษาพฤติกรรมกำลังของเสาวัสดุผสมรูปแบบหน้าตัดอื่นๆ เช่น เสาวัสดุผสมท่อนเหลี่ยมเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กรูปพรรณหน้าตัดสี่เหลี่ยม

รายการอ้างอิง

- [1] Cai, J., Pan, J., and Wu, Y. Mechanical behavior of steel-reinforced concrete-filled steel tubular (SRCFST) columns under uniaxial compressive loading. Thin-Walled Structures 97 (2015): 1-10.
- [2] Lie, T. and Kodur, V. Fire resistance of steel columns filled with bar-reinforced concrete. Journal of structural Engineering 122(1) (1996): 30-36.
- [3] Kodur, V. and Lie, T. Fire resistance of circular steel columns filled with fiber-reinforced concrete. Journal of structural engineering 122(7) (1996): 776-782.
- [4] Kodur, V. Performance-based fire resistance design of concrete-filled steel columns. Journal of Constructional Steel Research 51(1) (1999): 21-36.
- [5] Wang, Q., Zhao, D., and Guan, P. Experimental study on the strength and ductility of steel tubular columns filled with steel-reinforced concrete. Engineering Structures 26(7) (2004): 907-915.
- [6] Zhu, M., Liu, J., Wang, Q., and Feng, X. Experimental research on square steel tubular columns filled with steel-reinforced self-consolidating high-strength concrete under axial load. Engineering Structures 32(8) (2010): 2278-2286.
- [7] Liu, J., Wang, X., Qi, H., and Zhang, S. Behavior and Strength of Circular Tubed Steel-Reinforced-Concrete Short Columns under Eccentric Loading. Advances in Structural Engineering 18(10) (2015): 1587-1595.
- [8] Mander, J.B., Priestley, M.J., and Park, R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of structural engineering 114(8) (1988): 1804-1826.
- [9] Li, B., Park, R., and Tanaka, H. Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high-and normal-strength transverse reinforcements. (2001).
- [10] DING, F.-x., LI, G., GONG, Y.-z., and YU, Z.-w. Behavior of tubular stub columns of axially loaded steel-reinforced concrete-filled circular steel [J]. Journal of Central South University (Science and Technology) 9 (2012): 045.
- [11] de Normalisation, C.E. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design. CEN ENV (1994).

- [12] Han, L.-H., Yao, G.-H., and Tao, Z. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. Thin-Walled Structures 45(1) (2007): 24-36.
- [13] Hillerborg, A., Modéer, M., and Petersson, P.-E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and concrete research 6(6) (1976): 773-781.
- [14] A.L.Xiao. Behavior and Design Method of Steel-Reinforced High- Performance Concrete Filled Steel Tubular Columns Under Axial Load,. (2009).
- [15] Liang, Q.Q. and Fragomeni, S. Nonlinear analysis of circular concrete-filled steel tubular short columns under eccentric loading. Journal of Constructional Steel Research 66(2) (2010): 159-169.
- [16] ACi, I. 318-Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute International (2005).
- [17] Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R.L. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. 1928, University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- [18] Jialin, T., HINO, S.-i., and KURODA, I. Modeling of stress-strain relationships for steel and concrete in concrete filled circular steel tubular columns. Kou kouzou rombunshuu 3(11) (1996): 35-46.
- [19] Hu, H.-T., Huang, C.-S., Wu, M.-H., and Wu, Y.-M. Nonlinear analysis of axially loaded concrete-filled tube columns with confinement effect. Journal of Structural Engineering 129(10) (2003): 1322-1329.
- [20] Liang, Q.Q. Performance-based analysis of concrete-filled steel tubular beam-columns, Part I: Theory and algorithms. Journal of Constructional Steel Research 65(2) (2009): 363-372.
- [21] Fujimoto, T., Mukai, A., Nishiyama, I., and Sakino, K. Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns. Journal of Structural Engineering 130(2) (2004): 203-212.
- [22] วรการ อนันตเสนาม อัครวัชร เล่นวารี และทักษิณ เทพชาติรี. การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงอัดตามแนวแกน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21 (2016).

- [23] Chen, C. and Yeh, S. Ultimate strength of concrete encased steel composite columns. in Proceedings of the third national conference on structural engineering, pp. 2197-206, 1996.
- [24] AISC-ANSI, A. 360-10, "Specification for Structural Steel". Chicago (IL): American Institute of Steel Construction. 2010, Inc.
- [25] William, K. and Warnke, E. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. (1975).
- [26] Han, L.-H. and An, Y.-F. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression. Journal of Constructional Steel Research 93 (2014): 62-76.
- [27] Park, R. and Paulay, T. Reinforced concrete structures. John Wiley & Sons, 1975.
- [28] Hognestad, E. Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. 1951, University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. Engineering Experiment Station.
- [29] Han, L.-H., Yao, G.-H., Chen, Z.-B., and Yu, Q. Experimental behaviours of steel tube confined concrete (STCC) columns. Steel and Composite Structures 5(6) (2005): 459-484.
- [30] Ellobody, E., Young, B., and Lam, D. Behaviour of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns. Journal of Constructional Steel Research 62(7) (2006): 706-715.
- [31] Tulin, L.G. and Gerstle, K.H. Discussion of "Equation for the stress-strain curve of concrete" by P. Desayi and S. Krishnan. in ACI Journal Proceedings, pp. 1236-1238, 1964.
- [32] Hu, H.-T. and Schnobrich, W.C. Constitutive modeling of concrete by using nonassociated plasticity. Journal of Materials in Civil Engineering 1(4) (1989): 199-216.
- [33] y Certificación, A.E.d.N. Eurocode 3: Design of steel structures–Part 1-1: General rules and rules for buildings. UNE-EN (1993): 1-1.
- [34] Yun, X. and Gardner, L. Stress-strain curves for hot-rolled steels. Journal of Constructional Steel Research 133 (2017): 36-46.

- [35] ทักษิณ เทพชาตรี และอัศวรัช เล่นวารี. พฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก, ed. 3. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [36] A.L.Xiao. Research on Behavior and Design Method of Steel-Reinforced High-Performance Concrete Filled Steel Tubular Columns Under Axial Load. Hunan University China (2009).





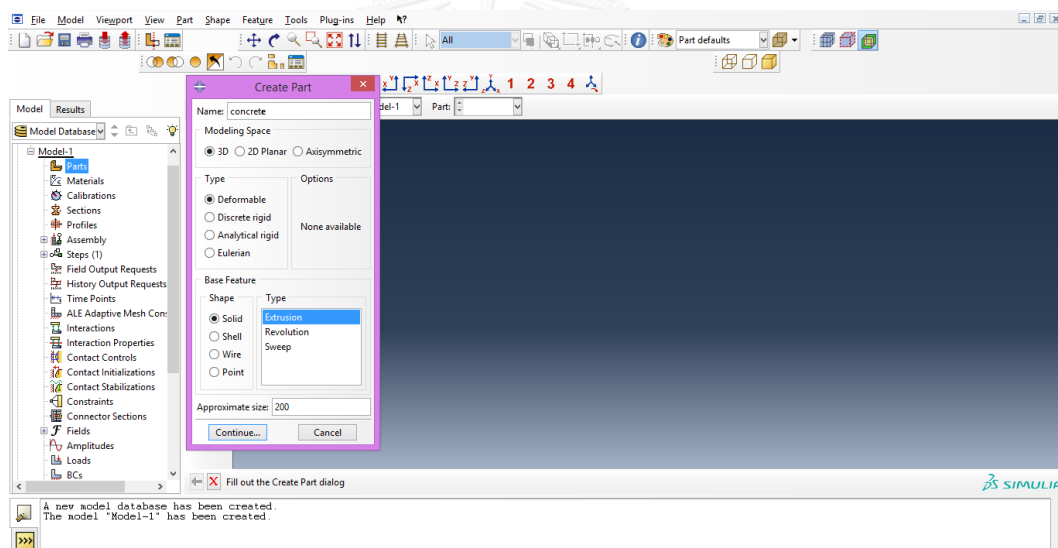
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

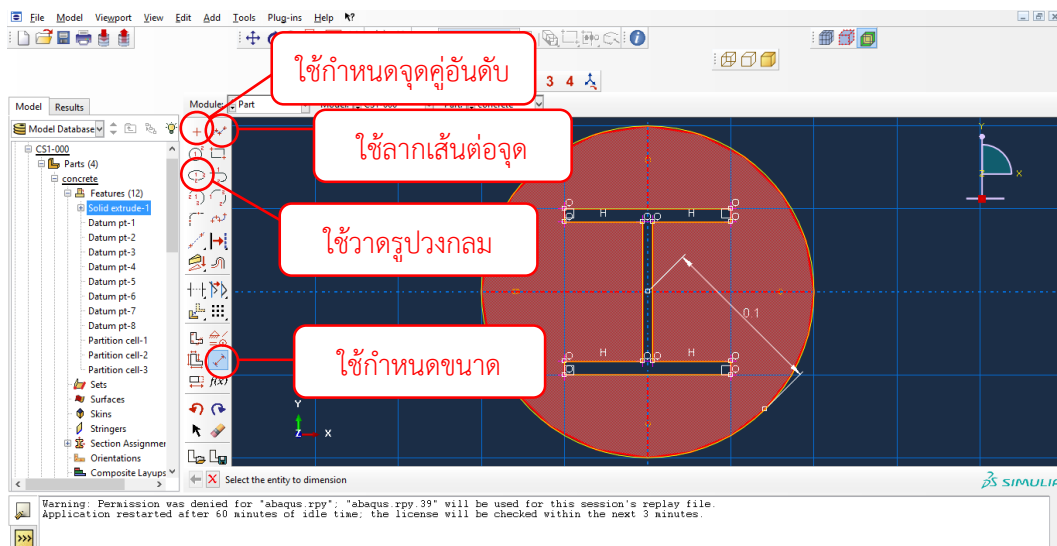
ตัวอย่างการใช้โปรแกรม ABAQUS ในการวิเคราะห์เสาท่อเหล็กเติมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก
รูปพรรณที่ใช้ในงานวิจัย

1. สร้าง Part แต่ละชิ้นส่วนของเสาวัสดุผสม โดยในตัวอย่างนี้ประกอบด้วย คอนกรีต หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ ท่อเหล็ก และแผ่นปิดหัวเสา
2. โดยตัวอย่างการกรอกข้อมูลในโปรแกรมสำหรับ Part คอนกรีต จะกำหนดค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ ก1
 - 2.1. Modelling Space กำหนดเป็น 3D
 - 2.2. Type กำหนดเป็น Deformable
 - 2.3. Shape กำหนดเป็น Solid
 - 2.4. Type กำหนดเป็น Extrusion



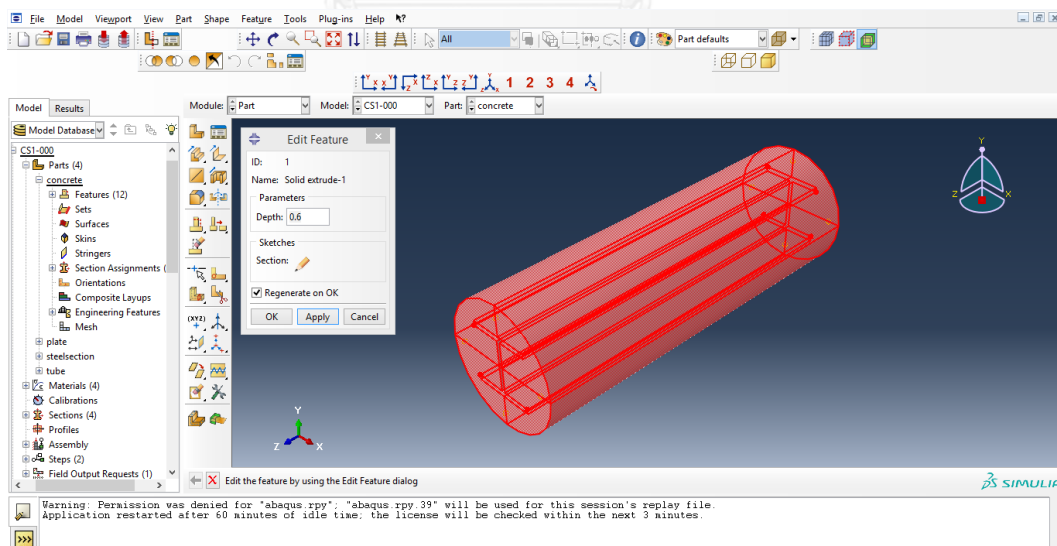
รูป ก 1 การสร้าง Part ในโปรแกรม ABAQUS

3. คลิก continue และวาดรูปหน้าตัดและกำหนดอัตราส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ ก2 โดยในโปรแกรม ABAQUS จะไม่มีหน่วย ผู้ใช้จึงต้องกำหนดหน่วยด้วยตัวเองและใช้หน่วยเดิมตลอดการสร้างแบบจำลอง



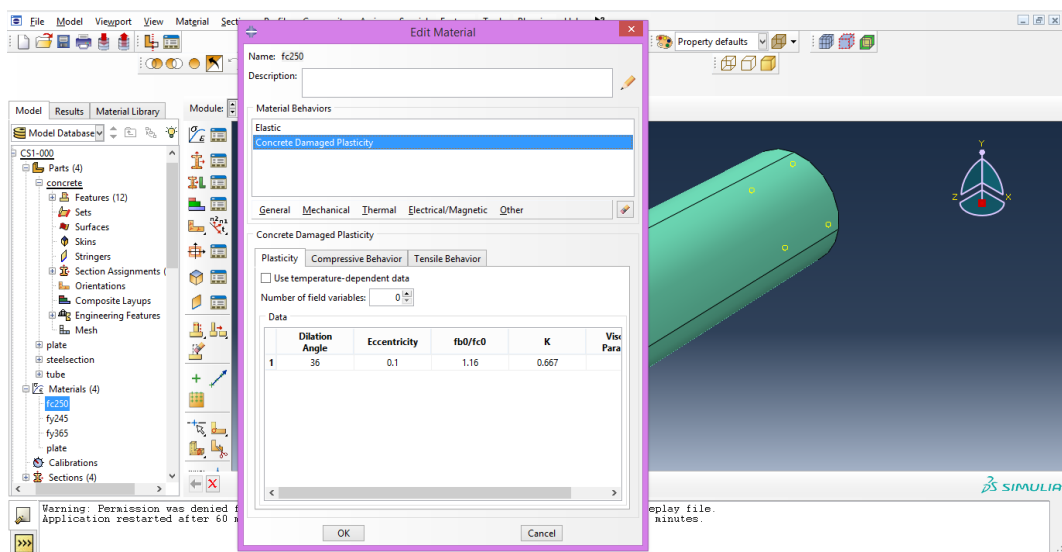
รูป ก 2 การกำหนดขนาดหน้าตัดของเสาในแบบจำลอง

4. เมื่อวาดรูปหน้าตัดเสร็จให้กำหนดความยาวของแบบจำลองจะได้หน้าตัดดังรูปที่ ก3



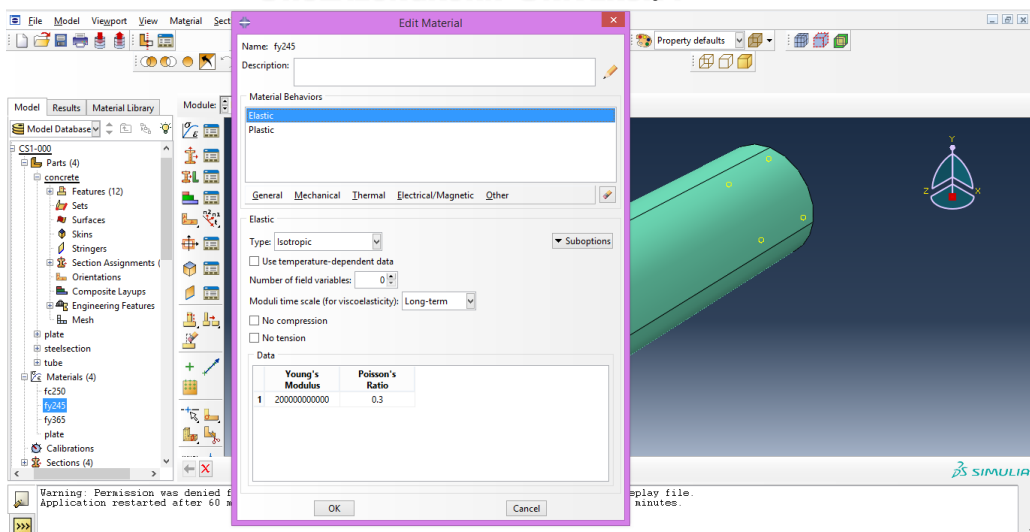
รูป ก 3 การกำหนดความยาวของเสาตัวอย่างในแบบจำลอง

5. หน้าตัดเหล็กรูปพรรณทำวิธีการเดียวกับคอนกรีต แต่ท่อเหล็กและแผ่นปิดหัวเสาจะกำหนด Shape เป็น Shell และแผ่นปิดหัวเสากำหนด Type เป็น Planar
6. จากนั้นกำหนดคุณสมบัติวัสดุที่ Material
 - 6.1. สำหรับวัสดุคอนกรีตกำหนดค่า Elastic และ Concrete Damaged Plasticity โดยสำหรับ Concrete Damaged plasticity กำหนดค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ ก4
 - 6.2. ค่า Compressive Behavior และ Tensile Behavior กำหนดได้โดยกรอกค่าความเค้นและความเครียดลงในโปรแกรม



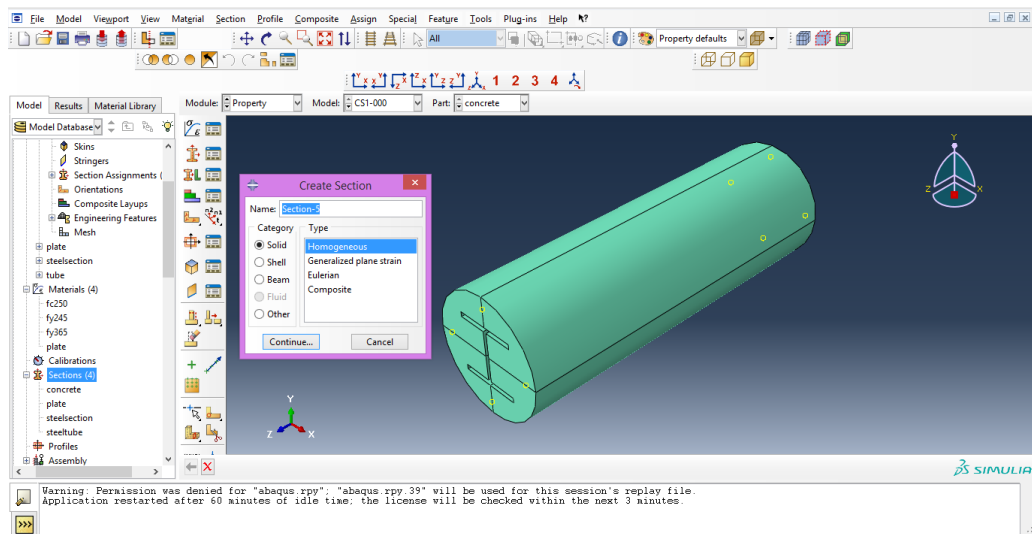
รูป ก 4 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุคอนกรีต

- 6.3. สำหรับวัสดุเหล็กกำหนดค่า Elastic และ Plastic ดังรูปที่ ก5



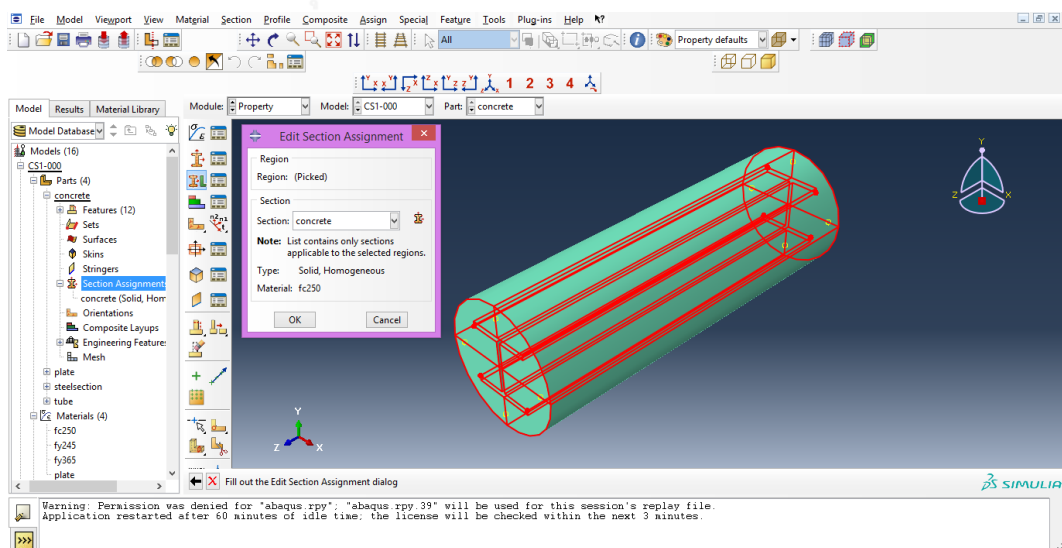
รูป ก 5 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุเหล็ก

7. จากนั้นสร้างค่า section ของชิ้นส่วน ได้แก่ คอนกรีต หน้าตัดเหล็กรูปพรรณ ท่อเหล็ก และ แผ่นปิดหัวเสา ดังรูปที่ 6
- 7.1. คอนกรีตและหน้าตัดเหล็กรูปพรรณกำหนด Category เป็น Solid และ Type เป็น Homogeneous
- 7.2. ท่อเหล็กและแผ่นปิดหัวเสากำหนด Category เป็น Shell และ Type เป็น Homogeneous



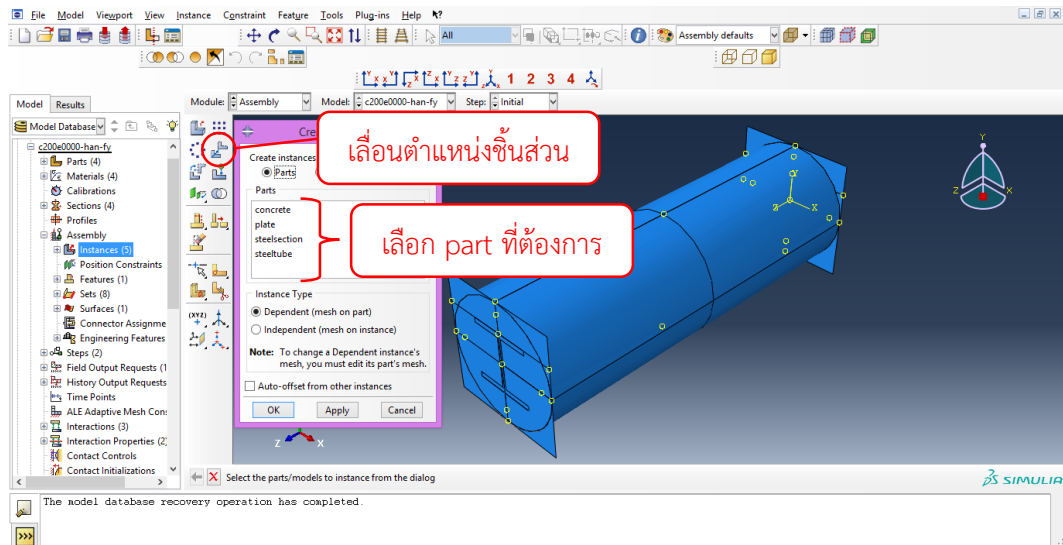
รูป ก 6 การสร้าง section ของแบบจำลอง

8. กำหนดค่า section ในแต่ละ part ที่สร้างมา ดังรูปที่ 7



รูป ก 7 การกำหนดค่า section ในแบบจำลอง

9. กำหนดค่า Instances ใน Assembly เพื่อเลือกชิ้นส่วนใน part ต่างๆ ดังรูปที่ ก8

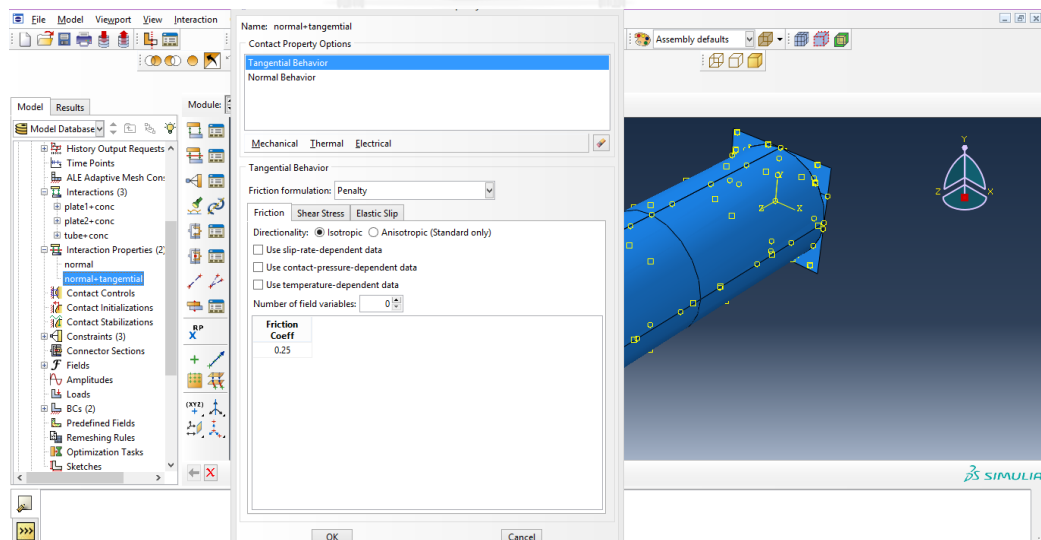


รูป ก 8 การรวม part ของแบบจำลอง

10. สร้างความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละพื้นผิวสัมผัสที่ Interaction Properties ซึ่งในตัวอย่างนี้ใช้ 2 ชนิด คือ Normal Behavior และ Tangential Behavior ดังรูปที่ ก9

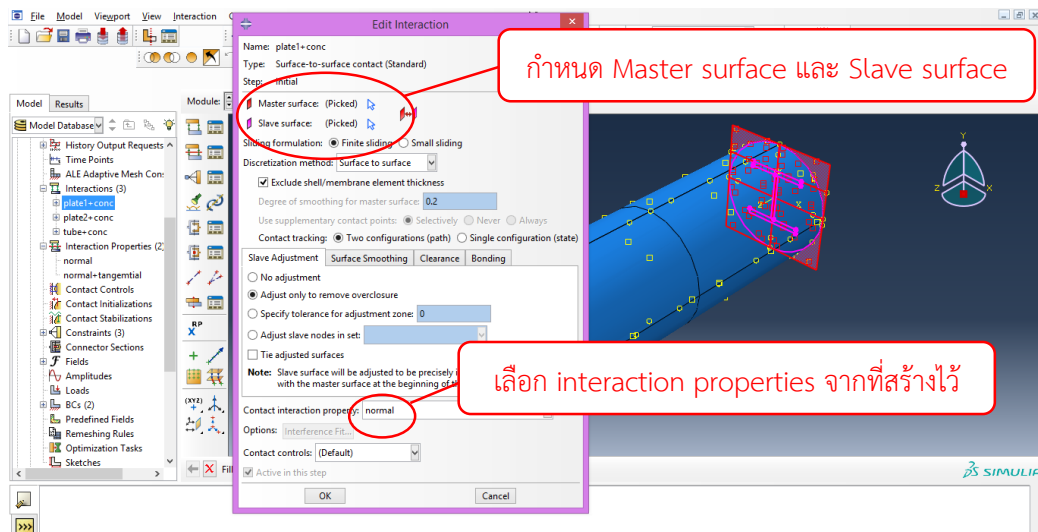
10.1. Normal Behavior กำหนดเป็น Hard Contact

10.2. Tangential Behavior กำหนด Friction formulation เป็น Penalty โดยกำหนดค่า Friction Coeff. เท่ากับ 0.25



รูป ก 9 การสร้างคุณสมบัติรอยต่อพื้นผิวสัมผัสในแบบจำลอง

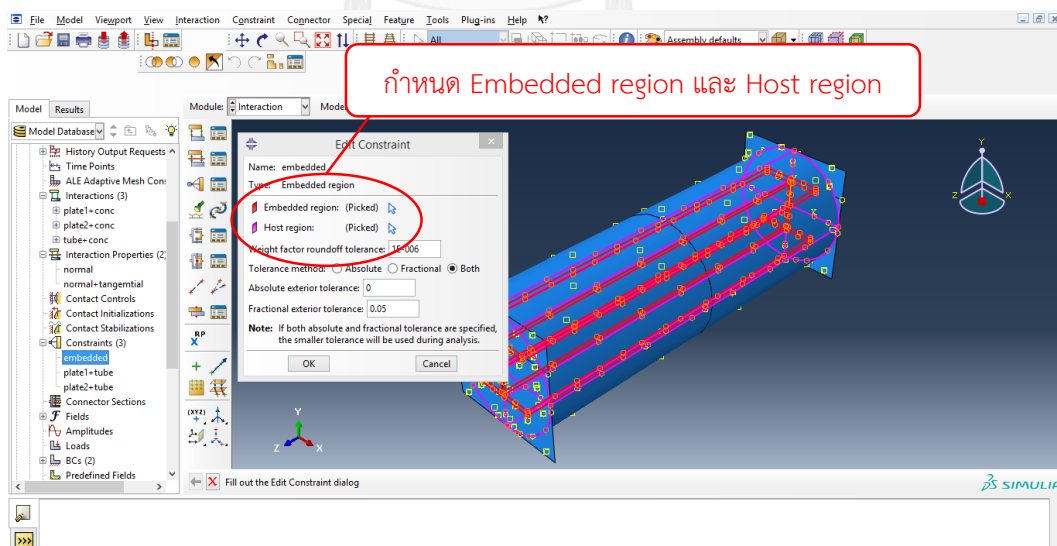
11. กำหนดค่า Interaction Properties ให้แต่ละรอยต่อผิวสัมผัสที่ Interactions โดยต้องกำหนดชิ้นส่วนให้เป็น Master Surface หรือ Slave Surface ดังรูปที่ ก10



รูป ก 10 การกำหนดคุณสมบัติรอยต่อพื้นผิวสัมผัสในแบบจำลอง

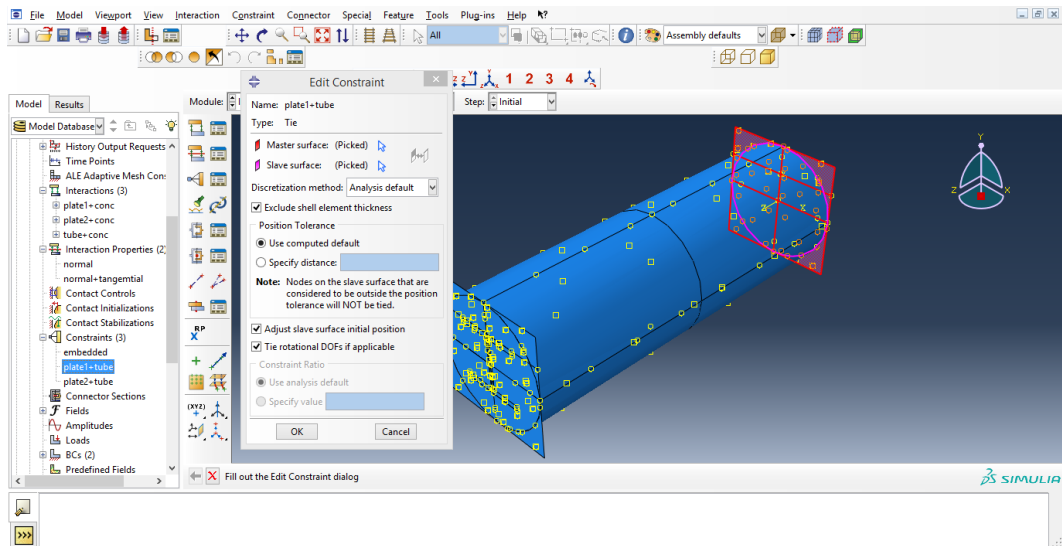
12. กำหนดค่า Constrains โดยในตัวอย่างแบบจำลองนี้กำหนดดังนี้

12.1. กำหนดให้ Constrains ระหว่างเหล็กgrupพรรณด้านในและคอนกรีตเป็นแบบ embedded โดยให้เหล็กgrupพรรณเป็น embedded regions และคอนกรีตเป็น host regions ดังรูปที่ ก11



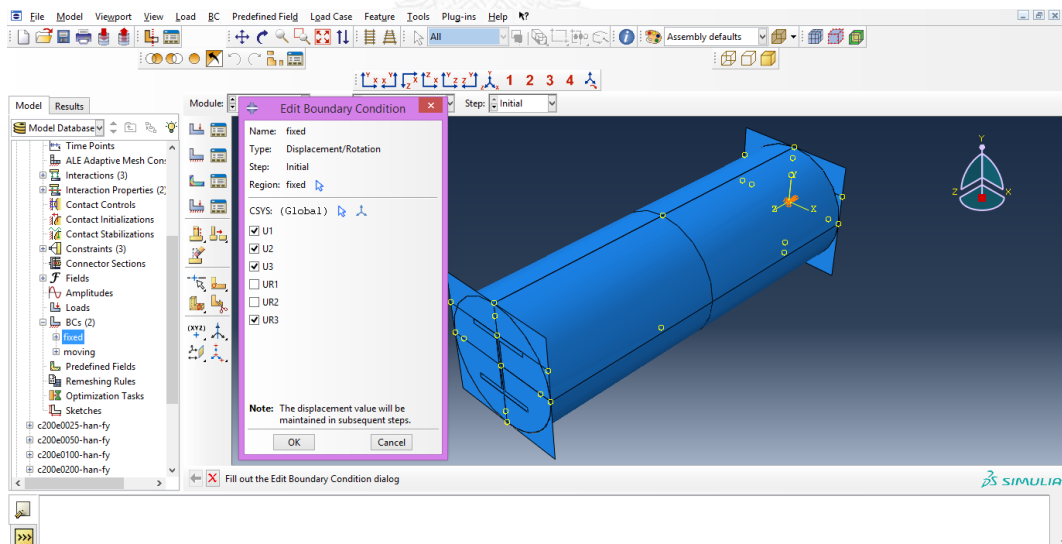
รูป ก 11 การสร้าง embedded ในแบบจำลอง

12.2. กำหนดให้ Constrains ระหว่างท่อเหล็กและแผ่นปิดหัวเสาเป็นแบบ tie contact โดยให้แผ่นปิดหัวเสาเป็น master surface และท่อเหล็กเป็น slave surface ดังรูปที่ ก12



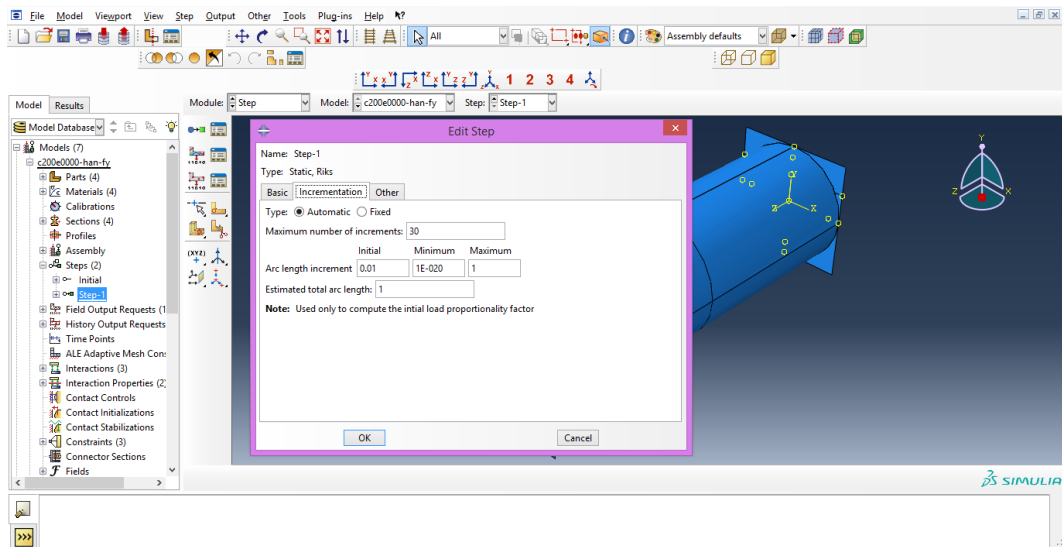
รูป ก 12 การสร้าง tie contact ในแบบจำลอง

13. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตแผ่นปิดหัวเสาด้านล่างที่ BCs โดยเลือกจุดเชื่อมต่อ (node) และเงื่อนไขต่างๆ ดังรูปที่ ก13



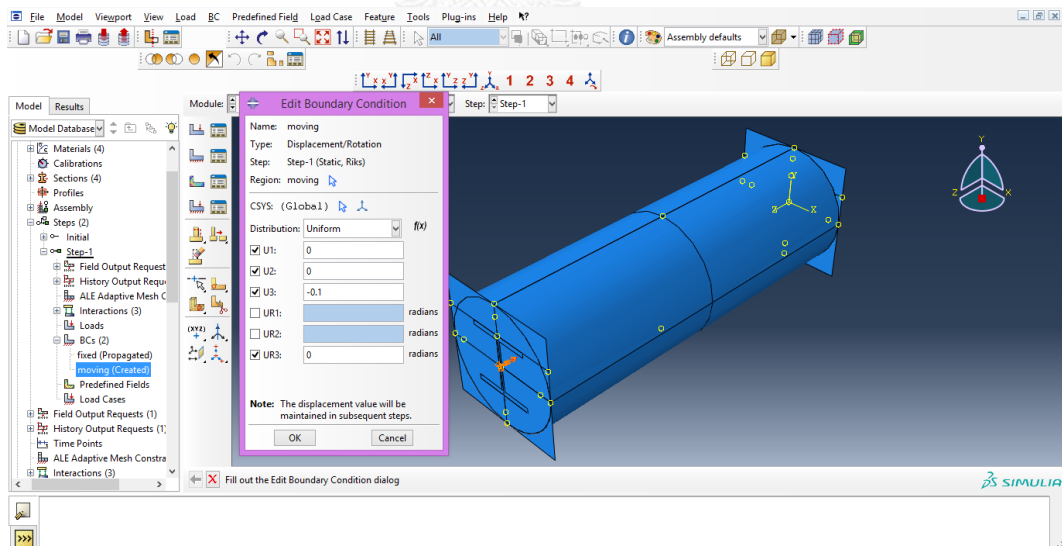
รูป ก 13 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นปิดหัวเสาด้านล่างในแบบจำลอง

14. กำหนด Step โดยกรอกค่า increments และเงื่อนไขต่างๆ ดังรูปที่ ก14



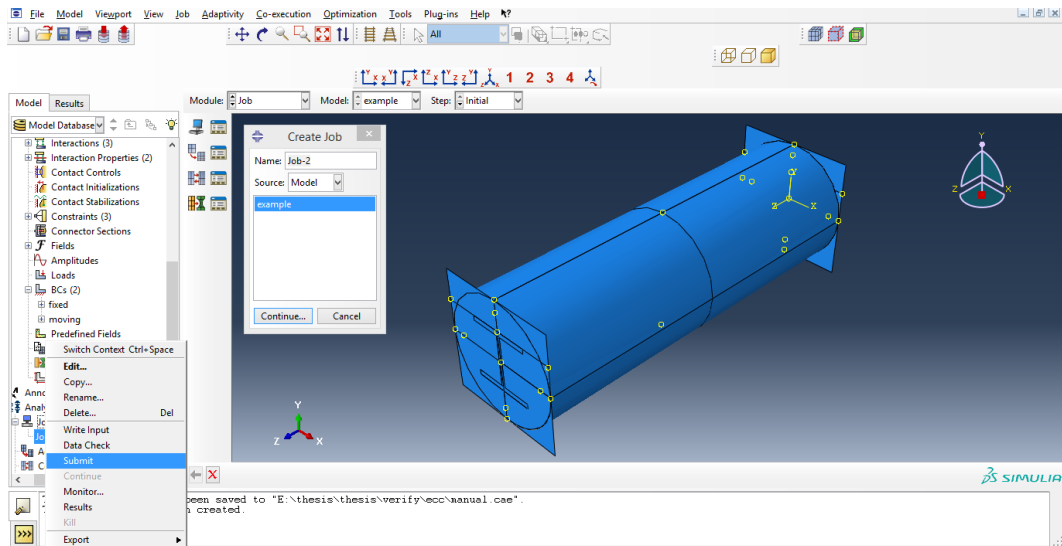
รูป ก 14 การสร้าง step ในการวิเคราะห์ของแบบจำลอง

15. จากนั้นกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นปิดหัวเสาต้านบนโดยการเลือกจุดเชื่อมต่อและเงื่อนไขต่างๆ ดังรูปที่ ก15 เนื่องจากในตัวอย่างแบบจำลองนี้ใช้การให้แรงโดยการกำหนดการเคลื่อนที่ของแผ่นปิดหัวเสาต้านบนลงมาตามแนวแกน



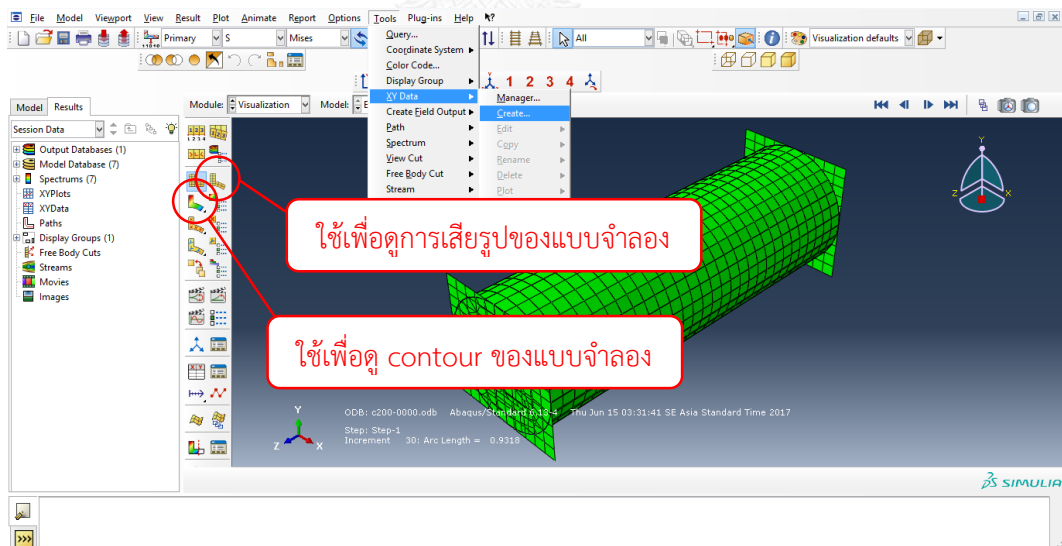
รูป ก 15 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแผ่นปิดหัวเสาต้านบนในแบบจำลอง

16. สร้าง Jobs สำหรับงานวิเคราะห์จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นดังรูปที่ ก16 จากนั้นคลิกขวาเลือก submit เพื่อส่งแบบจำลองไปวิเคราะห์



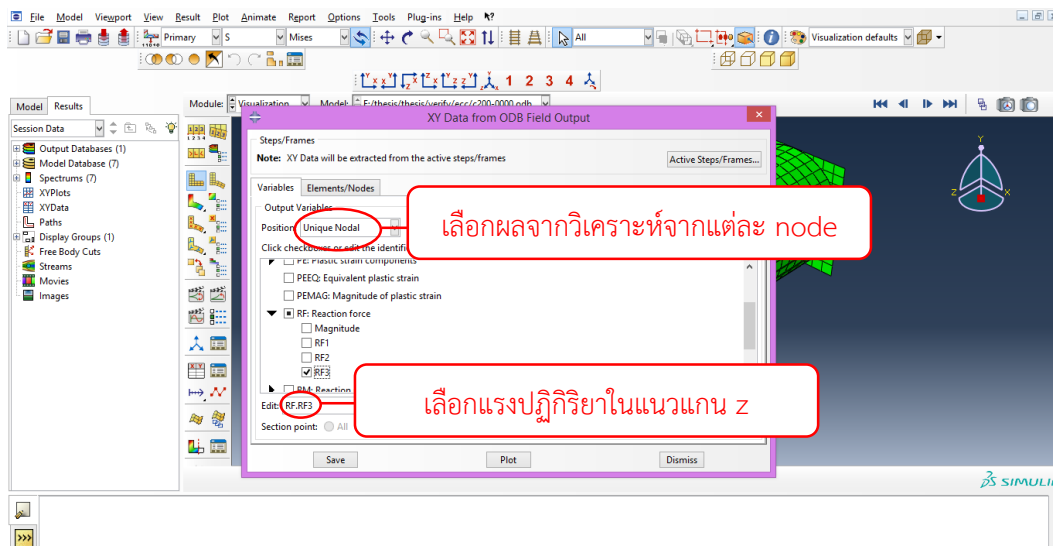
รูป ก 16 การสร้างวิเคราะห์แบบจำลอง

17. เมื่อวิเคราะห์เสร็จให้คลิกขวาที่ Job ที่สร้างขึ้นเลือก Results และดูผลการวิเคราะห์ที่ต้องการ โดยการโดยการเลือกแถบ Tool จากนั้นเลือก XY Data และ Create ดังรูปที่ ก17

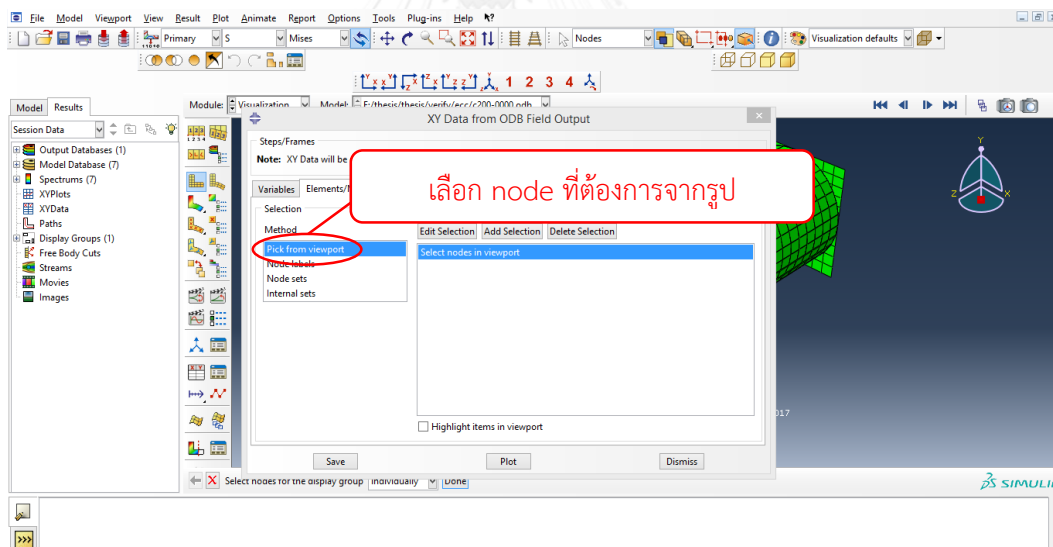


รูป ก 17 การดูผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

18. ในแบบจำลองตัวอย่างดูผลของแรงที่กระทำจากแรงปฏิกิริยาที่แผ่นปิดหัวเสาต้านล่าง โดยการเลือกค่าต่างๆ ดังรูปที่ ก18 และรูปที่ ก19 จากนั้นคลิก save

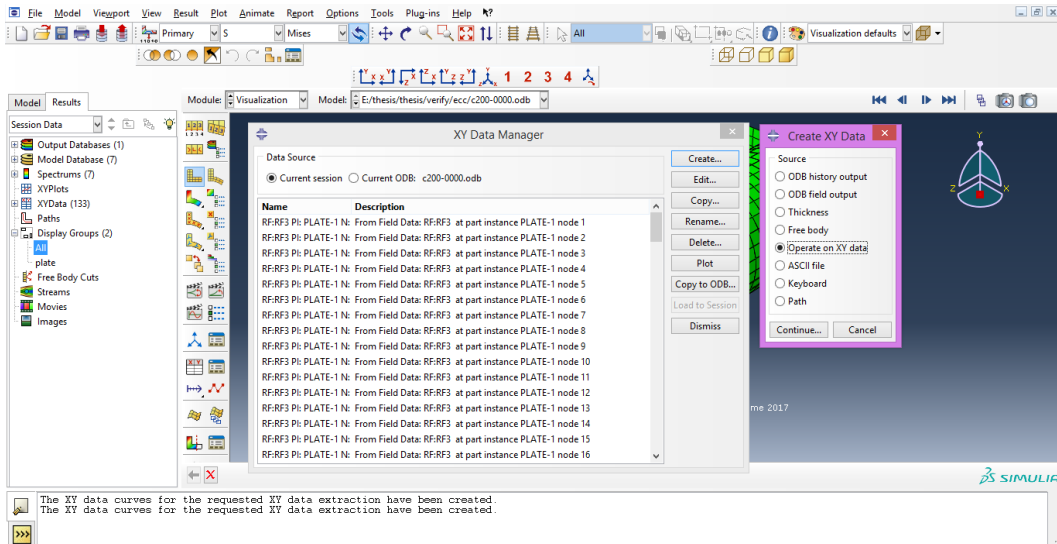


รูป ก 18 การเลือกผลการวิเคราะห์ที่ต้องการจากแบบจำลอง (1)



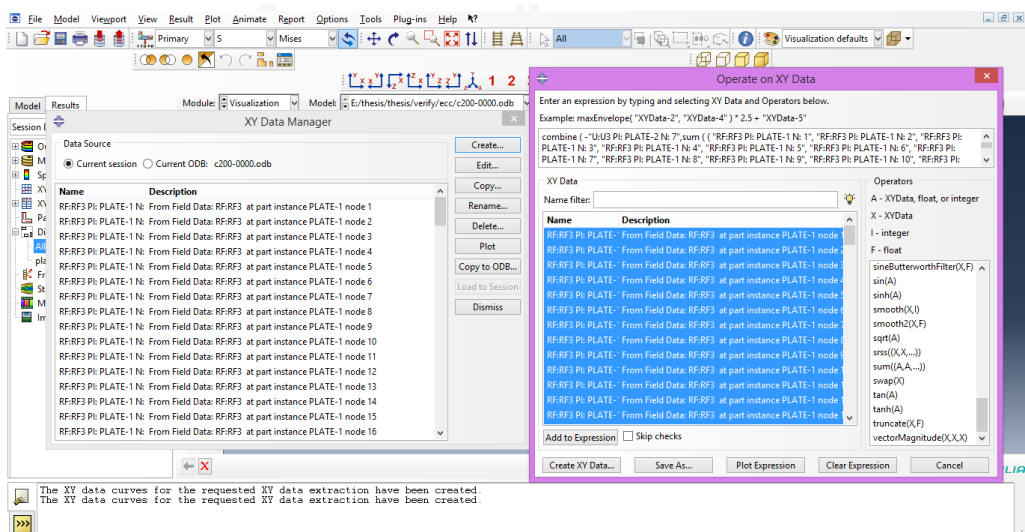
รูป ก 19 การเลือกผลการวิเคราะห์ที่ต้องการจากแบบจำลอง (2)

19. คลิก tool เลือก XY Data และ Manager จากนั้นเลือก create และ Operate on XY Data เพื่อจัดการผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูป ก20



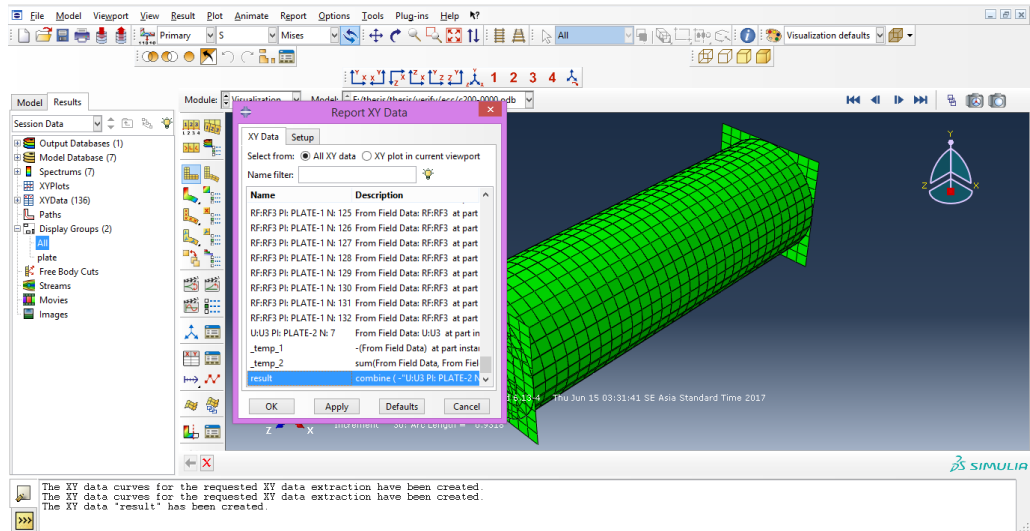
รูป ก 20 การจัดการกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง (1)

20. เลือกคำสั่ง combine(X,X) เพื่อวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ ซึ่งในตัวอย่างต้องการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการเลื่อนที่ของแผ่นปิดหัวเสาด้านบน จึงใช้คำสั่ง combine(ระยะการเลื่อนที่ของจุดเชื่อมต่อที่แผ่นปิดหัวเสาด้านบน, ผลรวมของแรงปฏิกิริยาในแต่ละจุดเชื่อมต่อที่แผ่นปิดหัวเสาด้านล่าง) จากนั้นคลิก plot เพื่อดูกราฟและ save as เพื่อบันทึกข้อมูลเชิงตัวเลขจากกราฟ ดังรูปที่ ก21



รูป ก 21 การจัดการกับผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง (2)

21. สามารถบันทึกข้อมูลออกมาเป็นไฟล์ .xls เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปโดยคลิกที่ Report และ XY จากนั้นเลือกข้อมูลที่ต้องการบันทึกและไฟล์เตอร์ที่ต้องการดังรูปที่ ก22



รูป ก 22 การบันทึกผลการวิเคราะห์เป็นไฟล์ .xls

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนพัฒน์ อ้นถาวร เกิดวันที่ 10 เมษายน พ.ศ.2533 เป็นบุตรชายของนายปรีดา อ้นถาวร และนางอุไรวรรณ อ้นถาวร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554 และเข้ารับการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่ปีการศึกษา 2557 จนถึงปัจจุบัน

