



การศึกษาพฤติกรรมรอยต่อชิ้นส่วนโครงสร้างคานเสาสำเร็จรูปภายใต้แรงสถิต
โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย

นาย อรรถพล อติชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

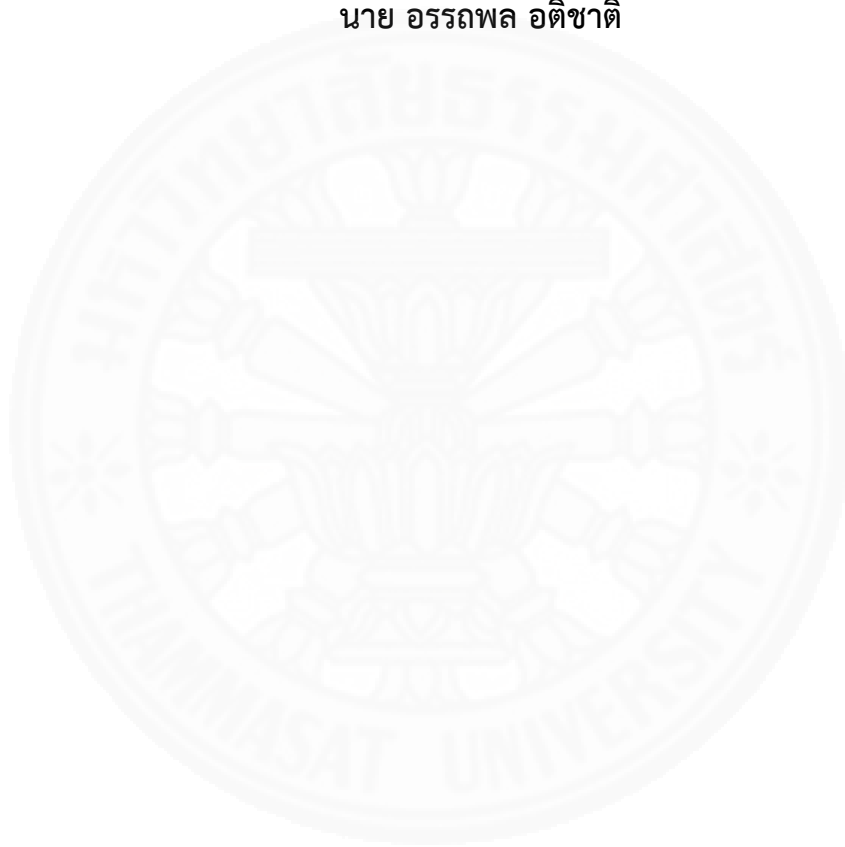
ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การศึกษาพฤติกรรมรอยต่อชิ้นส่วนโครงสร้างคานเสาสำเร็จรูปภายใต้แรงสถิต
โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

โดย

นาย อรรถพล อติชาติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

BEHAVIORS OF CONCRETE BEAM TO COLUMN CONNECTIONS
UNDER STATIC LOAD USING FINITE ELEMENT METHOD

BY

MR. ATTHAPHON ATICHAT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

THAMMASAT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2017

COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายอรรถพล อติชาติ

เรื่อง

การศึกษาพฤติกรรมรอยต่อชั้นส่วนโครงสร้างคานเสาสำเร็จรูปภายใต้แรงสถิตโดย
วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมโยธา)

เมื่อ วันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2561

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตายุทธ์ ชมภูมิ่ง)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก



(รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร.จวิฑ์ ธีระวงษ์)

คณบดี



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร เจียศิริพงษ์กุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพฤติกรรมรอยต่อชิ้นส่วนโครงสร้างคานเสาสำเร็จรูปภายใต้แรงสถิต โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์
ชื่อผู้เขียน	นาย อรรถพล อติชาติ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สายันต์ ศิริมนตรี
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

ระบบโครงสร้างอาคารชิ้นส่วนสำเร็จรูปนิยมใช้งานกันแพร่หลาย โดยการก่อสร้างด้วยระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปสามารถลดระยะเวลาในการก่อสร้าง อีกทั้งยังสามารถควบคุมคุณภาพได้ดีกว่าการหล่อโครงสร้างในที่ ในการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อในระบบคาน-เสา ของอาคารที่ก่อสร้างด้วยระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปสามารถทำได้ โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการแต่การหล่อแบบเพื่อทำการทดสอบนั้นยังคงต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายที่สูงดังนั้นจึงมีวิธีการอื่นๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์หนึ่งในนั้นคือวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างคาน-เสา 3 รูปแบบ โดยแบ่งเป็นรอยต่อคาน-เสา ที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน (CJ-1) และรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป (PJ-1, PJ-2) ซึ่งได้มีผู้ทำการทดสอบแล้วด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ABAQUS สร้างแบบจำลองรอยต่อคาน-เสา รูปแบบต่างๆ และทำการสอบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการเมื่อแบบจำลองที่ได้ให้ผลเฉลยสอดคล้องกับผลการทดสอบแล้วจึงจะนำมาวิเคราะห์ในกรณีอื่นที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ของรอยต่อที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกันและรอยต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูประหว่างคาน-เสา ที่ได้มีความใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบแต่มีความแตกต่างกันในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามกำลังสูงสุดของรอยต่อคาน-เสา ในรูปแบบต่างๆ ให้ผลที่ไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับผลการทดสอบ

คำสำคัญ: อาบาคัส, รอยต่อคาน-เสา , คอนกรีตเสริมเหล็ก, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Thesis Title	BEHAVIORS OF CONCRETE BEAM TO COLUMN CONNECTIONS UNDER STATIC LOAD USING FINITE ELEMENT METHOD
Author	MR. Atthaphon Atichat
Degree	Master of Engineering
Major Field/Faculty/University	Department of Civil Engineering Faculty of Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Sayan Sirimontree
Academic Years	2017

ABSTRACT

Precast Building System become popular due to several advantages. This system can reduce construction time and can control quality. Behavior of beam-column Joints in the precast concrete building can be studied by experiments. The preparation and testing process still take time and high cost. Finite Element method is the approximate analysis method which can be applied in the analysis to reduce the problems in experimental works. This paper study behavior of beam-column Joints by the nonlinear finite Element method. ABAQUS software is utilized in the analysis. Analytical results were verified to experimental results. Verified Model is used in a parametric study.

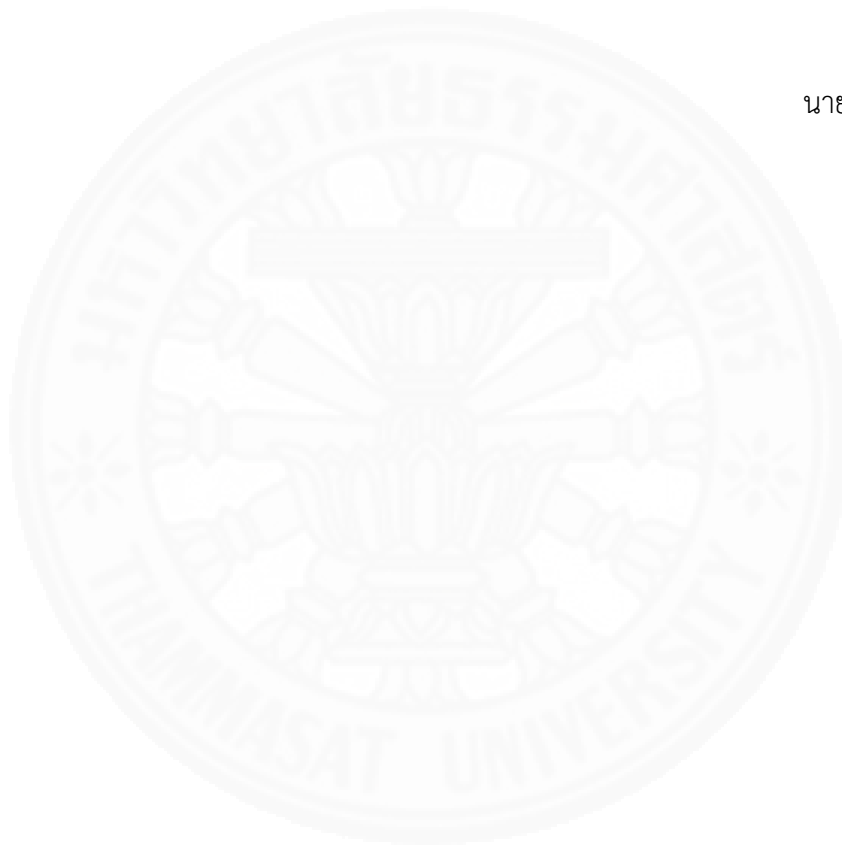
The analytical results by nonlinear finite Element show that load-displacement relationship are close to experiment, especially in the elastic region, but the relationship is not significantly different in the inelastic region. The maximum analytical loading capacity of beam-column Joints is not different that comparison with experiment. The results from this work may be a useful reference for analyzing the reinforced concrete beam-column in a different manner by the finite Element method.

Keywords: ABAQUS, Beam-Column Joint, Reinforce Concrete, Finite Element

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.สายันต์ ศิริมนตรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งอบรมสั่งสอนตลอดจนให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ รวมถึงประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตยาฤทธิ์ ชมภูมิ่ง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.จารึก ถิระวงษ์ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะแนวทางการทำวิทยานิพนธ์

นายอรรถพล อติชาติ



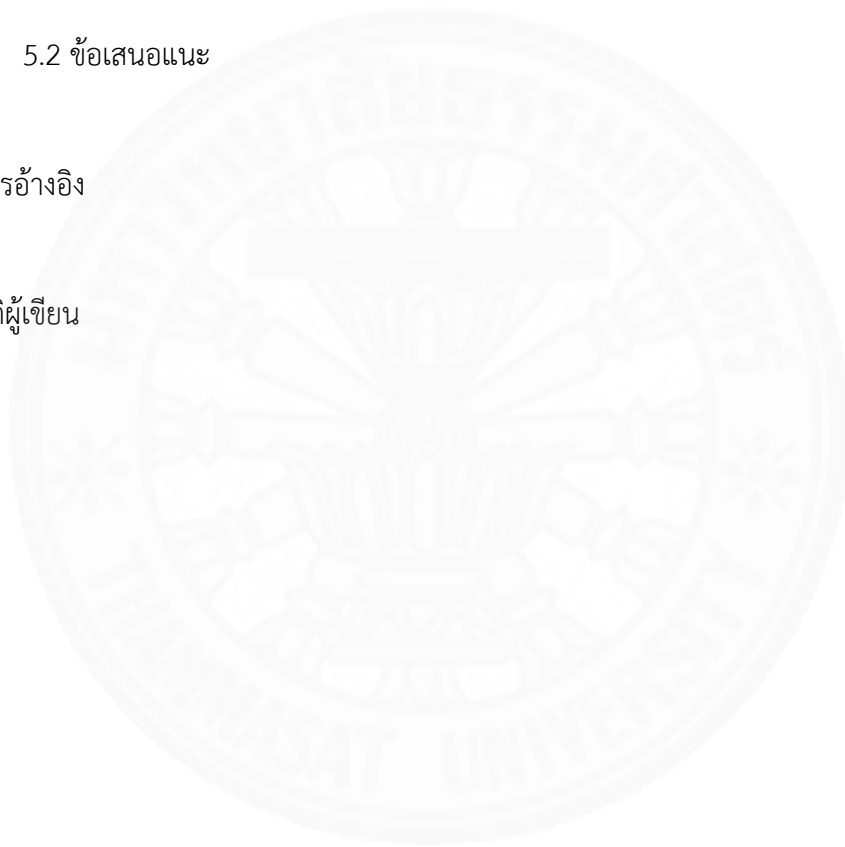
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 คอนกรีต	3
2.1.1 กำลังของคอนกรีต	4
2.1.2 โมดูลัสยืดหยุ่น	5
2.1.3 อัตราส่วนปัวซอง	6
2.2 เหล็กเสริม	7
2.3 รอยต่อหรือจุดต่อโครงสร้าง	8
2.3.1 นิยามของรอยต่อและการเชื่อมต่อ	8
2.3.2 จุดต่อยึดหมุน	10

2.4	พฤติกรรมรอยต่อของโครงสร้าง	11
2.4.1	พฤติกรรมกึ่งยึดแน่น	12
2.4.2	พฤติกรรมการรับแรงของรอยต่อคาน-เสา	12
2.5	พื้นฐานวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์	13
2.5.1	การสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์	13
2.5.2	เอลิเมนต์มิติเดียว	13
2.5.3	เอลิเมนต์สองมิติ	14
2.5.4	เอลิเมนต์สามมิติ	15
2.5.5	การแบ่งชิ้นส่วนเอลิเมนต์	17
2.6	แบบจำลองการแตกร้าวของคอนกรีต	17
2.7	แบบจำลองเหล็กเสริม	19
2.8	การแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น	20
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการทดสอบ	21
2.10	งานวิจัยทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์	27
บทที่ 3	วิธีการวิจัย	39
3.1	แนวทางและขั้นตอนการวิจัย	39
3.2	รายละเอียดตัวอย่างรอยต่อคาน-เสา	39
3.3	แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	41
3.3.1	Concrete Material Model	42
3.3.1.1	Tension Stiffening Relationship	43
3.3.1.2	Compressive Stiffening Relationship	44
3.3.2	ชนิดของเอลิเมนต์	44
3.3.2.1	Solid Element C3D8	44
3.3.2.2	Truss Element T3D2	45
3.3.3	คุณสมบัติของคอนกรีต โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	46
3.3.3.1	พฤติกรรมการรับแรงดึงของคอนกรีต	46

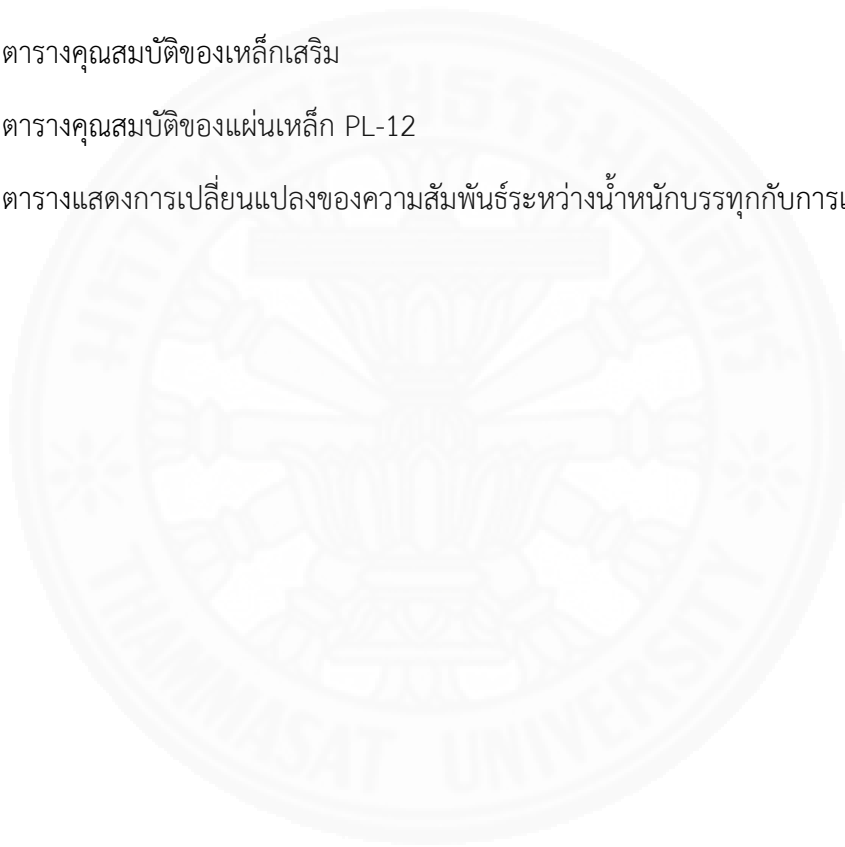
3.3.3.2	พฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีต	48
3.3.3.3	ตัวแปรอื่นๆ	51
3.3.4	คุณสมบัติของเหล็กเสริม โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	54
3.3.5	คุณสมบัติของแผ่นเหล็ก PL-12	55
3.4	การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	56
บทที่ 4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	67
4.1	พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา CJ-1	67
4.1.1	ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของรอยต่อคาน-เสา CJ-1	67
4.1.2	ผลการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา CJ-1 ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	68
4.2	พฤติกรรมรอยต่อคาน-เสา PJ-1	71
4.2.1	ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของรอยต่อคาน-เสา PJ-1	71
4.2.2	ผลการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา PJ-1 ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	72
4.3	พฤติกรรมรอยต่อคาน-เสา PJ-2	76
4.3.1	ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของรอยต่อคาน-เสา PJ-1	76
4.3.2	ผลการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา PJ-1 ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	77
4.4	การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์	82
4.4.1	การเปรียบเทียบ Load-Deflection	82
4.4.2	การเปรียบเทียบด้านกำลัง	84
4.5	Parametric study	85
4.5.1	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลอง CJ-1	85
4.5.2	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลอง PJ-1	86
4.5.3	ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลอง PJ-2	89

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	94
5.1 สรุปผลการศึกษา	94
5.1.1 พฤติกรรมรอยต่อคาน-เสา	94
5.1.2 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จากการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	95
รายการอ้างอิง	96
ประวัติผู้เขียน	98



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางแสดงความเค้นดึงกับความเครียดตามแนวแกนของคอนกรีต	47
3.2 ตารางแสดง Compressive Stress กับ Strain ตามแนวแกนของคอนกรีต	50
3.3 ตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องสำหรับ Concrete Damaged Plasticity	51
3.4 ตารางคุณสมบัติของเหล็กเสริม	54
3.5 ตารางคุณสมบัติของแผ่นเหล็ก PL-12	55
4.1 ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่	93



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด	4
2.2	Typical Concrete Stress-Strain Curves in Compression	5
2.3	Tangent and Secant Modulus of Elasticity	6
2.4	Stress-Strain Curves for Steel in Tension	7
2.5	Stress-Strain Curves for Reinforcements	8
2.6	รอยต่อและการเชื่อมต่อ	9
2.7	จุดต่อยึดหมุนในระบบโครงสร้างคาน-เสา	10
2.8	ลักษณะจำกัดความของโมเมนต์กับมุมหมุน	11
2.9	เอลิเมนต์มิติเดียว	14
2.10	เอลิเมนต์สองมิติ	14
2.11	เอลิเมนต์สามมิติ (ก)	15
2.12	เอลิเมนต์สามมิติ (ข)	16
2.13	Discrete Crack Model	18
2.14	Smeared Crack Model	19
2.15	Formulation for Reinforced or PreStressed Concrete	20
2.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกกับระยะเวลาเคลื่อนที่ของกิตติยา	22
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกกับการเคลื่อนที่ปลายคานส่วนยื่น CJ-1	23
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกกับการเคลื่อนที่ปลายคานส่วนยื่น PJ-1	24
2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกกับการเคลื่อนที่ปลายคานส่วนยื่น PJ-2/1	25
2.20	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกกับการเคลื่อนที่ปลายคานส่วนยื่น PJ-2/2	26
2.21	กราฟเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองของ T.Tejaswini	27
2.22	รายละเอียดขนาดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ Hamid Sinaei	28
2.23	แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ Hamid Sinaei	29
2.24	กราฟเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองของ Hamid Sinaei	29
2.25	Geometric of the knee Joint ของ Hamid Sinaei	30
2.26	Geometric of the interior Joint ของ Hamid Sinaei	30
2.27	Geometric of the Exterior Joint ของ Hamid Sinaei	31

2.28	กราฟเปรียบเทียบผลของแบบจำลองในลักษณะต่างๆ กับผลการทดลอง	32
2.29	กราฟเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองของ Aydin Demir	33
2.30	กราฟเปรียบเทียบผลของแบบจำลองแรกกับผลการทดลองของ Hamid Sinaei	34
2.31	แบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ของ Hamid Sinaei	34
2.32	กราฟแห่งแสดงการเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดของ Hamid Sinaei	35
2.33	กราฟเปรียบเทียบผลของแบบจำลองในแต่ละแบบจำลองของ Hamid Sinaei	36
2.34	แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ Deng Sihua	37.
2.35	กราฟเปรียบเทียบผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของ Deng Sihua	38
3.1	รอยต่อคาน-เสา หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน CJ-1	39
3.2	รอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป PJ-1	40
3.3	รอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป PJ-2	41
3.4	Term of Tension Stiffening Model	43
3.5	Terms of Compressive Model	44
3.6	Solid Element C3D8	45
3.7	3-D Truss Element	45
3.8	Tension Stiffening Model by Nayal and Rasheed's	46
3.9	Tension Stiffening Model for ABAQUS by Wahalathantri	47
3.10	Tension Stiffening Model for ABAQUS	48
3.11	Compressive Stress-Strain Relationship for ABAQUS by Wahalathantri	49
3.12	Compressive Stress-Strain Relationship for ABAQUS	51
3.13	Hyperbolic Plastic Flow Rule	52
3.14	Yield surfaces in the deviatoric plane	53
3.15	Stress-Strain Relationship for Reinforcement	54
3.16	Stress-Strain Relationship for PL-12	55
3.17	Part Beam-Column	56
3.18	Part ของเหล็กเสริม CJ-1	57
3.19	Part ของแผ่นเหล็กรับแรงกด	57
3.20	Assembly ของรอยต่อคาน-เสา CJ-1	58
3.21	เงื่อนไขขอบเขต	59
3.22	การแบ่งเอลิเมนต์ของคอนกรีต CJ-1	60

3.23	การแบ่งเอลิเมนต์ของเหล็กเสริม CJ-1	60
3.24	Part ของเหล็กเสริม PJ-1	61
3.25	Part ของแผ่นเหล็ก PL-12	62
3.26	Assembly ของรอยต่อคาน-เสา PJ-1	62
3.27	การแบ่งเอลิเมนต์ของรอยต่อคาน-เสา PJ-1	63
3.28	Part ของเหล็กเสริม PJ-2	64
3.29	Part ของแผ่นเหล็ก PL-9	64
3.30	Assembly ของรอยต่อคาน-เสา PJ-2	65
3.31	การแบ่งเอลิเมนต์ของรอยต่อคาน-เสา PJ-2	66
4.1	กราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของรอยต่อคาน-เสา CJ-1	67
4.2	การเสียรูปของคอนกรีตในแบบจำลอง CJ-1	68
4.3	การเสียรูปของเหล็กเสริมในแบบจำลอง CJ-1	69
4.4	ความเค้นของคอนกรีตในแบบจำลอง CJ-1	69
4.5	ความเค้นของเหล็กเสริมในแบบจำลอง CJ-1	70
4.6	เปรียบเทียบผลของความแตกต่างจากจำนวนเอลิเมนต์	70
4.7	แสดงการลู่เข้าของคำตอบของแบบจำลอง CJ-1	71
4.8	กราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของรอยต่อคาน-เสา PJ-1	72
4.9	การเสียรูปของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-1	73
4.10	การเสียรูปของเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-1	73
4.11	การเสียรูปของเหล็ก PL-12 ในแบบจำลอง PJ-1	74
4.12	ความเค้นของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-1	74
4.13	ความเค้นบนเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-1	75
4.14	เปรียบเทียบผลของความแตกต่างจากจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลอง PJ-1	75
4.15	แสดงการลู่เข้าของคำตอบของแบบจำลอง PJ-1	76
4.16	กราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของรอยต่อคาน-เสา PJ-2	77
4.17	การเสียรูปของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-2	78
4.18	การเสียรูปของเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-2	78

4.19	การเสีรูบของเหล็ก PL-9 ในแบบจำลอง PJ-2	79
4.20	ความเค้นของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-2	79
4.21	ความเค้นบนเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-2	80
4.22	เปรียบเทียบผลของความแตกต่างจากจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลอง PJ-2	81
4.23	แสดงการลู่เข้าของคำตอบของแบบจำลอง PJ-2	81
4.24	เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดสอบของรอยต่อคาน-เสา CJ-1	82
4.25	เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดสอบของรอยต่อคาน-เสา PJ-1	83
4.26	เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดสอบของรอยต่อคาน-เสา PJ-2	83
4.27	เปรียบเทียบด้านกำลังของรอยต่อคาน-เสา จากแบบจำลองกับผลการทดสอบ	84
4.28	เปรียบเทียบกำลังของเหล็กเสริมในแบบจำลอง CJ-1	86
4.29	เปรียบเทียบกำลังของคอนกรีตในแบบจำลอง CJ-1	86
4.30	เปรียบเทียบกำลังของเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-1	87
4.31	เปรียบเทียบกำลังของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-1	88
4.32	เปรียบเทียบกำลังของแผ่นเหล็ก PL-12 ในแบบจำลอง PJ-1	88
4.33	เปรียบเทียบความหนาของแผ่นเหล็ก PL-12 ในแบบจำลอง PJ-1	89
4.34	เปรียบเทียบความสูงของแผ่นเหล็ก PL-12 ในแบบจำลอง PJ-1	89
4.35	เปรียบเทียบกำลังของเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-2	90
4.36	เปรียบเทียบกำลังของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-2	91
4.37	เปรียบเทียบกำลังของแผ่นเหล็ก PL-9 ในแบบจำลอง PJ-2	91
4.38	เปรียบเทียบความหนาของแผ่นเหล็ก PL-9 ในแบบจำลอง PJ-2	92
4.39	เปรียบเทียบความยาวของแผ่นเหล็ก PL-12 ในแบบจำลอง PJ-2	92

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบโครงสร้างอาคารขึ้นส่วนสำเร็จรูป (Precast Building System) เข้ามามีบทบาทในงานก่อสร้างมากขึ้น ระบบนี้นิยมใช้งานกันแพร่หลายอันเนื่องมาจากข้อดีหลายประการ การก่อสร้างด้วยระบบขึ้นส่วนสำเร็จรูปไม่ว่าจะเป็น ผนัง คาน เสา สามารถลดระยะเวลาการก่อสร้าง อีกทั้งยังสามารถควบคุมคุณภาพแต่ละชิ้นได้ดีกว่าการหล่อโครงสร้างในที่เนื่องจากการทำงานส่วนใหญ่เป็นการผลิตในโรงงานมีการตรวจสอบคุณภาพในทุกขั้นตอน ทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างมีมาตรฐานตามความต้องการ การก่อสร้างขึ้นส่วนสำเร็จจะประกอบขึ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างเข้าด้วยกัน ดังนั้นรอยต่อของชิ้นส่วนโครงสร้างจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบอาคารขึ้นส่วนสำเร็จรูป เพื่อให้ชิ้นส่วนต่างๆ สามารถประกอบกันได้สมบูรณ์ รอยต่อจะต้องคำนึงถึงความแข็งแรงและต้านทานการเสียดรูปได้ รอยต่อของคานและเสาสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือ 1.แบบยึดหมุน 2.แบบยึดแน่น 3.แบบกึ่งยึดแน่น ซึ่งรอยต่อแต่ละประเภทมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้การเชื่อมต่อของชิ้นส่วนสมบูรณ์จึงควรทราบถึงพฤติกรรมของรอยต่อ

วิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งวิธีการที่น่าเชื่อถือที่สุดคือการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่การทดสอบนั้นยังคงมีต้นทุนที่สูงอีกทั้งสิ้นเปลืองทรัพยากรและแรงงาน จึงมีวิธีการอื่นๆ เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ หนึ่งในนั้นคือการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ปัจจุบันวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีความก้าวหน้าอย่างมากและได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างแพร่หลาย การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นต้องอาศัยตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ผลเฉลยถูกต้องและสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงแบบจำลองที่ถูกต้องจะสามารถนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างได้ โดยสามารถลดการทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งจะช่วยลดต้นทุนและการสิ้นเปลืองทรัพยากร

ผู้จัดทำงานวิจัยเล่มนี้เล็งเห็นถึงความสำคัญของปัญหาที่ได้กล่าวไปข้างต้นจึงได้ทำงานวิจัย “พฤติกรรมรอยต่อขึ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูปภายใต้แรงสถิต โดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์” เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมรอยต่อ โดยทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หากแบบจำลองมีความสอดคล้องและเหมาะสมจะสามารถนำไปประยุกต์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อรูปแบบอื่นๆ ได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) รอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูปภายใต้แรงสถิต

1.2.2 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองพร้อมปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้แบบจำลองที่เหมาะสม

1.2.3 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป โดยลดการทดลองในห้องปฏิบัติการ

1.2.4 เพื่อใช้ในการทำนายพฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูปทั้งในช่วงอิลาสติกและช่วงอินอิลาสติก

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) โดยใช้โปรแกรม ABAQUS

1.3.2 แบบจำลองรอยต่อคาน-เสา กำหนดให้คอนกรีตมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน

1.3.3 ในการวิเคราะห์จะทำการเทียบเคียงผลการทดสอบรอยต่อคาน-เสา จำนวน 3 แบบในงานวิจัยของทวีศักดิ์ โสภณธนาพร (2558)

1.3.4 ทำการศึกษาพารามิเตอร์อื่นๆ (Parametric Study) ที่ยังไม่ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อระหว่างคาน-เสา สำเร็จรูป

1.4.2 แบบจำลองที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อโครงสร้างชิ้นส่วนหล่อสำเร็จในรูปแบบอื่นๆ ได้

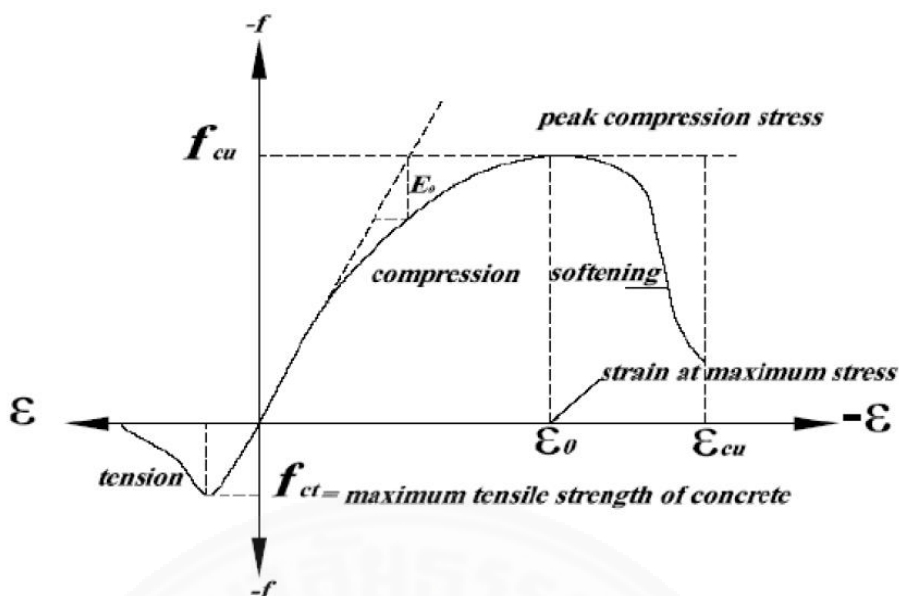
บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รอยต่อของคาน-เสา เป็นสิ่งที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานชิ้นส่วนโครงสร้างคาน-เสาสำเร็จรูป (Precast Concrete Structure) เพราะที่จุดต่อของโครงสร้างนั้นมีหน้าที่ทั้งรับและส่งถ่ายแรงและโมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกภายนอก การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อที่จะวิเคราะห์พฤติกรรมรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูปนั้น ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับรอยต่อและการเชื่อมต่อประเภทต่างๆ คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุประกอบทั้งนี้ทั้งนั้นเพื่อนำมาเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการกำหนดค่าต่างๆ ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เช่น กำลังของคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งจะทำให้แบบจำลองนั้นมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับคุณสมบัติจริง ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับรอยต่อและทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ อีกทั้งจะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งเป็น 2 ประเภทคืองานวิจัยทางการทดสอบและงานวิจัยทางด้านแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

2.1 คอนกรีต

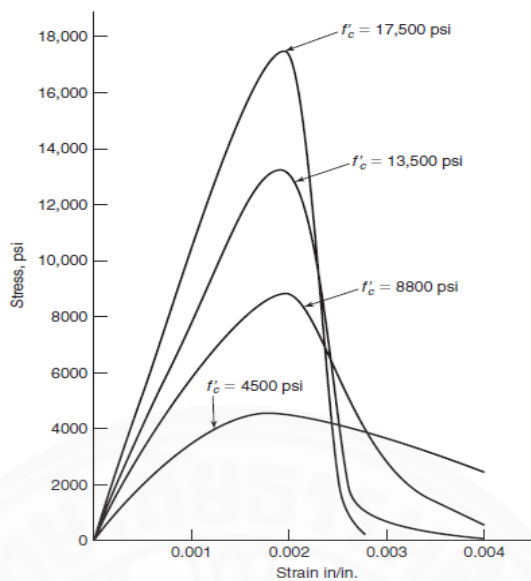
คอนกรีตคือวัสดุผสมซึ่งจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ ปูนซีเมนต์ วัสดุผสม (เช่น หินทราย หรือ กรวด) และ น้ำ โดยอาจจะมีสารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านอื่นๆ เมื่อนำวัสดุเหล่านี้มาผสมกันจะมีสภาพเป็นของเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง พอที่จะนำไปเทลงในแบบหล่อ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็งซึ่งหลังจากแข็งตัวแล้ว 28 วัน กำลังของคอนกรีตจึงจะเริ่มคงที่ คอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้สูงแต่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ โดยทั่วไปแล้วคอนกรีตจะรับแรงดึงได้ประมาณ 8-15% ของกำลังอัด หากต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มมากขึ้นจึงต้องเสริมวัสดุอื่นเพิ่มเข้าไปในคอนกรีต เมื่อคอนกรีตรับแรงอัดจนถึงครึ่งหนึ่งของกำลังอัดประลัยพฤติกรรมในช่วงนี้จะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น หลังจากนั้นคอนกรีตจะมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นแสดงดังภาพที่ 2.1 โดยช่วงอินอิลาสติกค่าความเค้นจะมีค่าลดลงในขณะที่ค่าความเครียดเพิ่มขึ้นความสัมพันธ์ในลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตมีพฤติกรรมแบบ Softening



ภาพที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Bangash, 1989)

2.1.1 กำลังของคอนกรีต

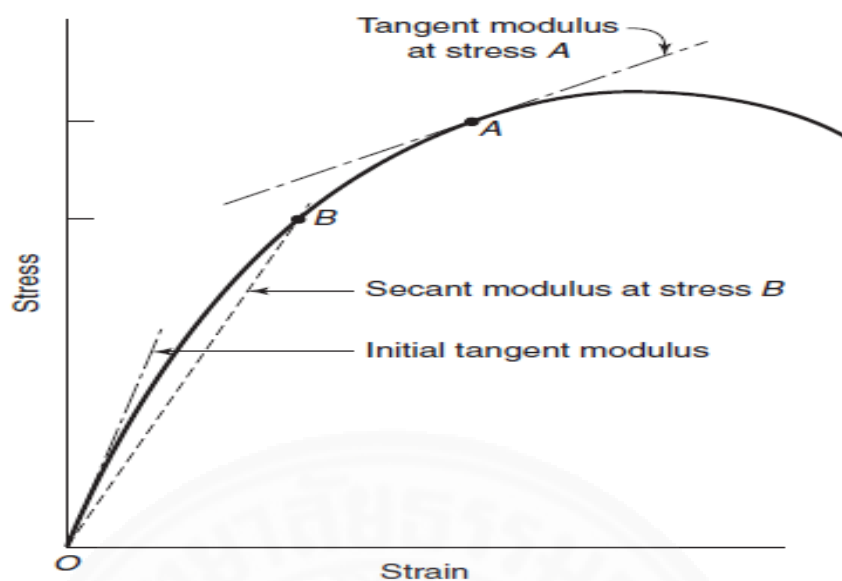
กำลังของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของคอนกรีต ซึ่งกำลังของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่นำไปใช้ โดยตรงแต่คุณสมบัติอย่างอื่น เช่น ความคงทนต่อการกัดกร่อน อาจมีความสำคัญกว่ากำลังอัดของคอนกรีตในบางกรณี โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนต่อคอนกรีตรุนแรง แต่ในทางปฏิบัติแล้วคอนกรีตที่สามารถรับกำลังสูงจะมีคุณสมบัติด้านอื่นๆ ดีตามไปด้วย ซึ่งจากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm ยาว 300 mm ที่ระยะเวลา 28 วัน ได้ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 2.2 โดยที่แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ส่วนกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะมีค่าประมาณ 8-15% ของกำลังรับแรงอัด



ภาพที่ 2.2 Typical Concrete Stress-Strain Curves in Compression (MacGregor, 2005)

2.1.2 โมดูลัสยืดหยุ่น

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตคือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตในช่วงที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงซึ่งเป็นเส้นสัมผัสของความเค้นและความเครียดแสดงดังภาพที่ 2.3 ซึ่งโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นตัวบ่งชี้ถึงความแข็งแกร่งของวัสดุ หากวัสดุที่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมากจะมีความสามารถในการต้านทานการโก่งตัวได้ดี ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นสามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด



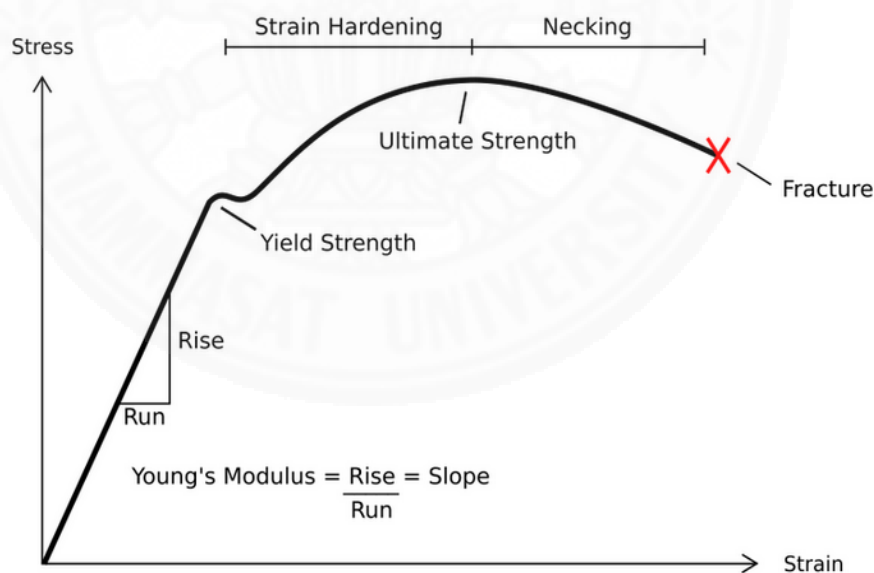
ภาพที่ 2.3 Tangent and Secant Modulus of Elasticity (MacGregor, 2005)

2.1.3 อัตราส่วนปัวซอง

อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) คืออัตราส่วนความเครียดในทิศทางตั้งฉากกับแรงที่กระทำต่อความเครียดในทิศทางของแรงกระทำ โดยทั่วไปแล้วความเครียดเนื่องจากการรับแรงอัดของคอนกรีตจะเกิดในแนวตั้ง ขณะที่ความเครียดในทิศทางตั้งฉากจะเกิดขึ้นในแนวขวางและทำให้เกิดแรงดึงในทิศทางนั้น อัตราส่วนปัวซองของวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันและเป็นวัสดุยืดหยุ่นจะมีค่าคงที่ แต่เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันจึงทำให้มีค่าไม่คงที่ ค่าอัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตมีค่าระหว่าง 0.15 ถึง 0.20 คอนกรีตที่มีกำลังสูงชันจะทำให้ Poisson's Ratio มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

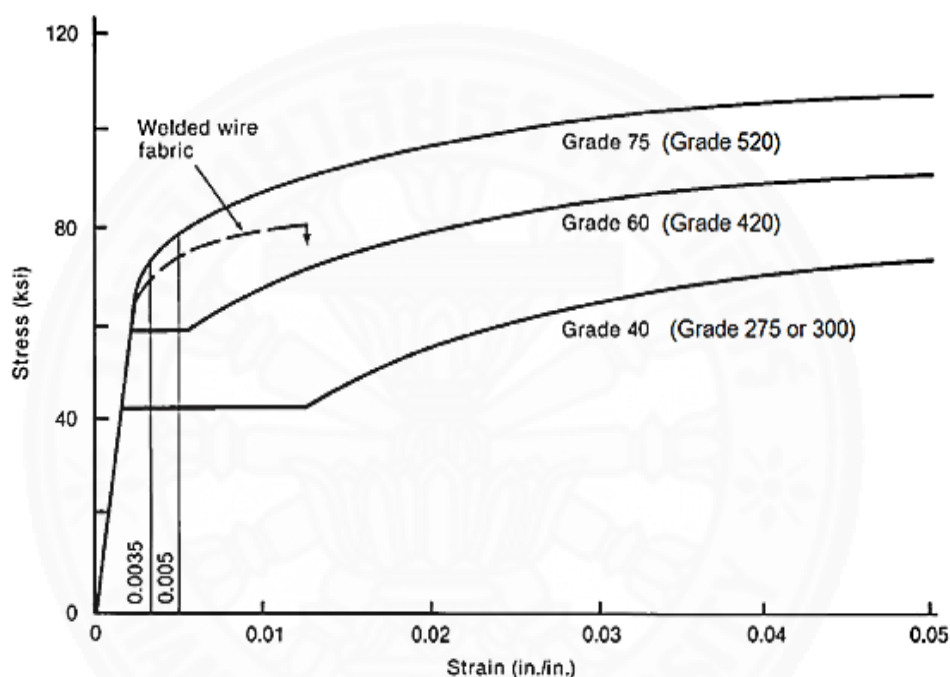
2.2 เหล็กเสริม

คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้สูงแต่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ ดังนั้นการนำเอาเหล็กซึ่งมีคุณสมบัติในการรับแรงดึงได้สูงมาใช้ร่วมกันทำให้วัสดุทั้งสองจะช่วยกันรับและถ่ายแรง กล่าวคือ เหล็กจะทำหน้าที่ในการรับแรงดึงในขณะที่คอนกรีตจะทำหน้าที่ในการรับแรงอัดทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กนั้นสามารถรับแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ดีและมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปเหล็กเสริมจะมีกำลังต้านทานแรงอัดและแรงดึงใกล้เคียงกัน พฤติกรรมของเหล็กเสริมแบ่งออกเป็น 4 ช่วงดัง ภาพที่ 2.4 โดยช่วงแรกกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมเป็นเส้นตรงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงยืดหยุ่น (Elastic Zone) เมื่อแรงดึงกระทำมากขึ้นจนเกินช่วงยืดหยุ่นจะเข้าสู่ช่วงที่สอง คือ ช่วงพลาสติก (Plastic Zone) ช่วงนี้เหล็กเสริมจะครากและความเครียดจะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเค้นเริ่มคงที่ จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่สาม โดยเหล็กเสริมยังสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้นและการยืดตัวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยและเมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงจนกระทั่งถึงกำลังดึงสูงสุดเหล็กเสริมจะเข้าสู่ช่วงสุดท้ายคือช่วงวิบัติซึ่งความเค้นจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเหล็กเสริมขาดออกจากกัน



ภาพที่ 2.4 Stress-Strain Curves for Steel in Tension

เหล็กเสริมจะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เหล็กกลมผิวเรียบ (Round Bar) และเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar) เหล็กกลมผิวเรียบจะมีชั้นคุณภาพเดียว คือ SR24 ซึ่งจะมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 24 MPa ส่วนเหล็กข้ออ้อยมี 3 ชั้นคุณภาพ คือ SD30 SD40 และ SD50 ซึ่งจะมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 30 40 50 MPa ตามลำดับ ความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมแต่ละชนิดแสดงได้ดังภาพที่ 2.5 ซึ่งนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อที่จะกำหนดคุณสมบัติของเหล็กเสริมในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 2.5 Stress-Strain Curves for Reinforcements (MacGregor, 2005)

2.3 รอยต่อและจุดต่อของโครงสร้าง

2.3.1 นิยามของรอยต่อ (Joint) และการเชื่อมต่อ (Connection)

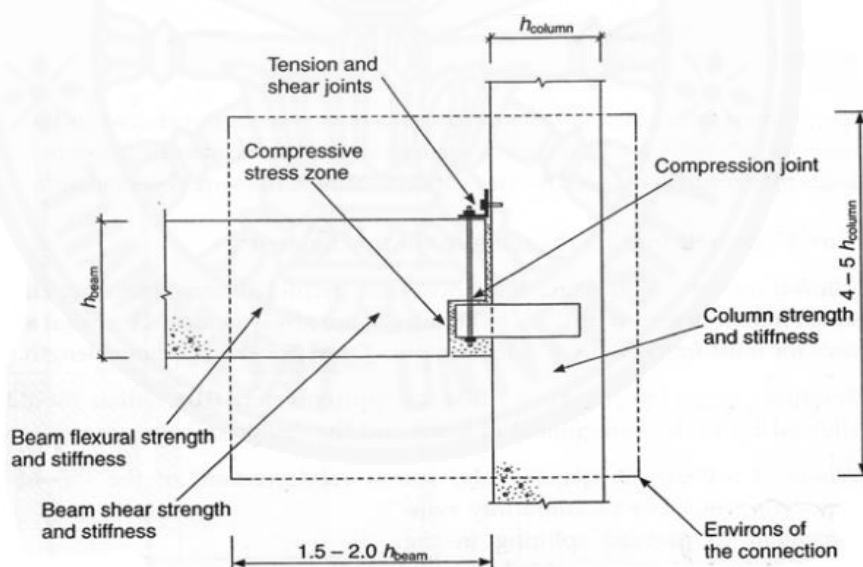
รอยต่อ (Joint) คือบริเวณที่เกิดความไม่ต่อเนื่องกันภายในโครงสร้าง อยู่ระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้าง 2 ชิ้นขึ้นไป โดยอยู่ภายใต้การกระทำของแรงต่างๆ เช่น แรงเฉือน แรงดึง แรงดัด เป็นต้น รอยต่อที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อความจำเป็นทางการก่อสร้างสามารถแบ่งประเภทของรอยต่อออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้

1. รอยต่อหดตัว (Contraction Joint) เป็นรอยต่อที่ถูกสร้างมาเพื่อควบคุมรอยแตกร้าวไม่ให้เกิดกระจายทั่วพื้นคอนกรีต ซึ่งจะบังคับให้รอยแตกร้าวที่นั่นเกิดขึ้นในตำแหน่งที่เตรียมไว้

2. รอยต่อตัดแยกหรือรอยต่อขยายตัว (Isolation หรือ Expansion Joint) รอยต่อแยกตัวเป็นรอยต่อที่สร้างขึ้นเพื่อตัดการยึดรั้งระหว่างโครงสร้างใดๆ ออกจากกันทำให้ไม่เกิดการถ่ายเทแรงระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้าง

3. รอยต่อก่อสร้าง หมายถึงรอยต่อที่เกิดจากการเทคอนกรีตที่ไม่ต่อเนื่องกัน เช่นจบการทำงานใน 1 วัน แล้วเทคอนกรีตไม่เสร็จต้องเทต่อในวันถัดไป ก็จะทำให้เกิดเป็นรอยต่อก่อสร้าง ขึ้น รวมไปถึงรอยต่อจากชิ้นส่วนสำเร็จรูป

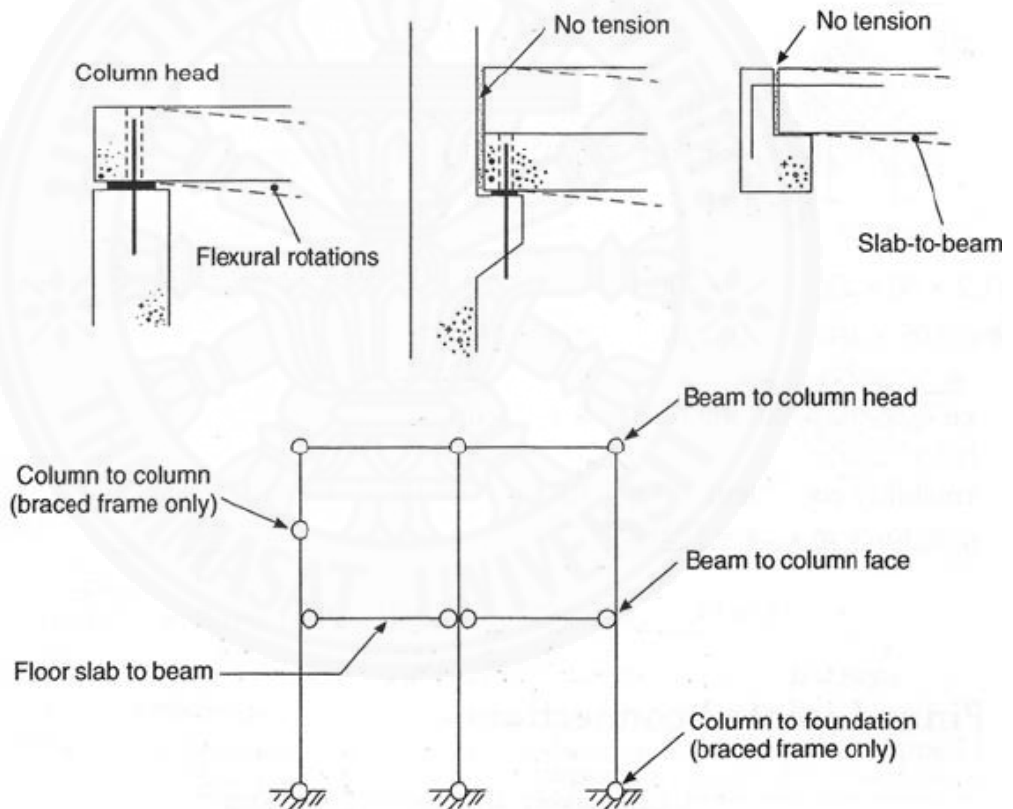
การเชื่อมต่อ (Connection) เป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาในโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป ซึ่งมีหน้าที่ส่งถ่ายแรงระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างและต้องมีความแข็งแรง มีเสถียรภาพ การเชื่อมต่ออาจจะมีวิธีที่แตกต่างกันเช่น การยึดด้วยสลักเกลียว การเชื่อม เป็นต้น ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมต่อแบบใดควรง่ายต่อการปฏิบัติ การเชื่อมต่อจะครอบคลุมพื้นที่ประมาณ ประมาณ 1.5 ถึง 2.0 เท่าของความลึกคาน และ 4 ถึง 5 เท่าของความลึกเสา (Connection Zone) ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งจะประกอบด้วยรอยต่อ (Joint) ที่รับแรงต่างๆ ที่เกิดจากแรงปฏิกิริยาภายนอกและเกิดการส่งถ่ายแรงต่างๆ บริเวณปลายคานและเสา



ภาพที่ 2.6 รอยต่อและการเชื่อมต่อ (Elliott, 2002)

2.3.2 จุดต่อยึดหมุน (Pinned-Connections)

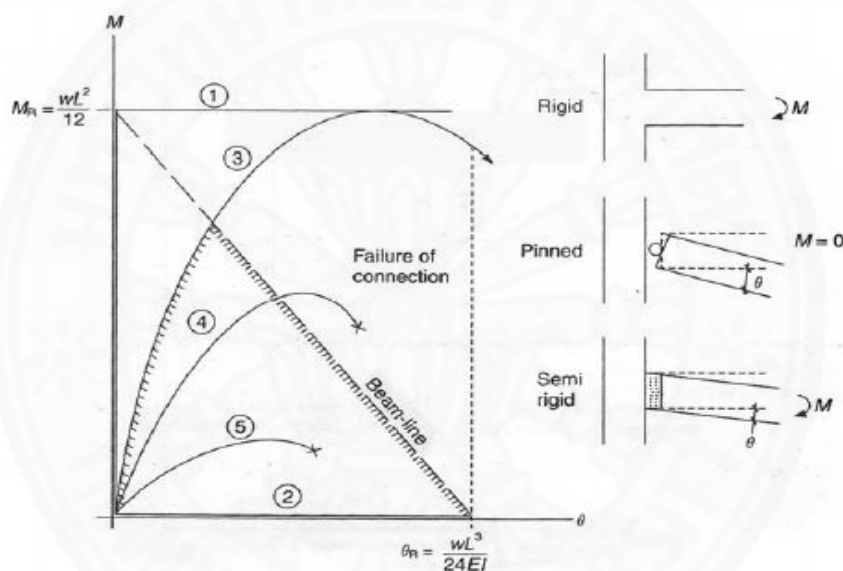
จุดต่อแบบยึดหมุนเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายของชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูปสำหรับถ่ายเทแรงเฉือน (Shear Force) และแรงตามแนวแกน (Axial Load) ทั้งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงหรือแรงจากการติดตั้งชิ้นงาน โดยจุดต่อชนิดนี้ไม่สามารถส่งถ่ายโมเมนต์ตัดหรือโมเมนต์บิดได้ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงจุดต่อสามารถรับโมเมนต์ตัดได้ก็ตามแต่กำลังของจุดต่อที่ได้จากแรงเฉือนและแรงตามแนวแกนนั้นจะสร้างความเสียหายแบบฉับพลันเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกเกินช่วงอิลาสติก ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลให้พิจารณาเป็นจุดต่อยึดหมุน (Pinned) แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 จุดต่อยึดหมุนในระบบโครงสร้างคาน-เสา (Elliott, 2002)

2.4 พฤติกรรมรอยต่อของโครงสร้าง

พฤติกรรมรอยต่อของโครงสร้างสามารถอธิบายด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเสี้ยวรูป ซึ่งรอยต่อจะต้องมีคุณสมบัติทั้งทางด้านกำลัง (Strength) ความแข็งแรงแรง (Stiffness) และความเหนียว (Ductility) ความแตกต่างของชนิดรอยต่อนั้นจะส่งผลต่อพฤติกรรมของรอยต่อนั้นๆ ด้วย พฤติกรรมของรอยต่อจะไม่ใช่เป็นลักษณะการเชื่อมต่อแบบยึดแน่น (Rigid Connection) หรือแบบยึดหมุน (Pinned Connection) แบบสมบูรณ์ทีเดียว โดยหลังจากเกิดรอยร้าวแล้วรอยต่อของโครงสร้างสำเร็จจะมีพฤติกรรมเป็นแบบกึ่งยึดแน่น (Semi-Rigid) แสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ลักษณะจำกัดความของโมเมนต์กับมุมหมุน (Elliott, 2002)

2.4.1 พฤติกรรมกึ่งยืดหยุ่น (Semi-Rigid Behavior)

พฤติกรรมกึ่งยืดหยุ่น โดยทั่วไปของรอยต่อคาน-เสา อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของการก่อสร้าง หรืออาจเกิดจากความตั้งใจของผู้ออกแบบเพื่อจุดประสงค์ด้านการใช้งาน เช่น เพื่อลดค่าความเค้นและความเครียดบริเวณจุดต่อ เป็นต้น แต่สำหรับอาคารสูงหรืออาคารที่ต้องรับแรงทางด้านข้างจากแรงลมหรือแรงแผ่นดินไหวนั้นรอยต่อคาน-เสา ที่มีพฤติกรรมแบบกึ่งยืดหยุ่นจะส่งผลทำให้การโยกตัวทางด้านข้างของอาคารมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าการโยกตัวทางด้านข้างที่มากเกินไปจะส่งผลทำให้รอยต่อเกิดรอยแตกร้าว

2.4.2 พฤติกรรมการรับแรงของรอยต่อคาน-เสา

พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา เป็นสิ่งที่มีความซับซ้อนเนื่องจากมีตัวแปรหลายตัวแปรที่มีผลทำให้กระทบต่อการรับแรงของรอยต่อคาน-เสา ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อรอยต่อคาน-เสา ได้แก่ กำลังของคอนกรีต เหล็กเสริมภายในรอยต่อ เป็นต้น การวิบัติของรอยต่อจะเกิดขึ้นเมื่อตัวอย่างรอยต่อคาน-เสา ไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้อีกซึ่งกลไกการวิบัติมี 2 ลักษณะ คือ ถ้าคานต้านทานแรงกระทำถึงค่าโมเมนต์สูงสุดแล้วเกิดจุดพลาสติกขึ้นในคานบริเวณหน้าเสาเรียกว่า การวิบัติแบบคานพัง ถ้าเกิดรอยแยกเนื่องจากแรงเฉือนในบริเวณส่วนของรอยต่อก่อนที่คานจะถึงค่าโมเมนต์สูงสุด จะเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนที่จุดต่อ

2.5 พื้นฐานวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปแบบของงานที่เกี่ยวกับด้านวิศวกรรมมักจะมีรูปร่างที่ซับซ้อน ดังนั้นวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงเข้ามามีบทบาทเพื่อนำมาใช้ในการประยุกต์และวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ในการวิเคราะห์ปัญหาจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งผลเฉลยจะประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่างๆ โดยมีหลักการคือทำให้ค่าที่มีจำนวนอนันต์นั้นลดลงมาเป็นค่าที่สามารถนับได้ โดยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ ซึ่งผลเฉลยในแต่ละเอลิเมนต์จำเป็นจะต้องมีความสอดคล้องกันกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขต กล่าวคือหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะต้องเริ่มด้วยการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการในแต่ละเอลิเมนต์ให้มีความสอดคล้องกันกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันทำให้เกิดระบบสมการรวมคล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันทำให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตกำหนดลงไปในระบบสมการรวม โดยที่ความแม่นยำของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย

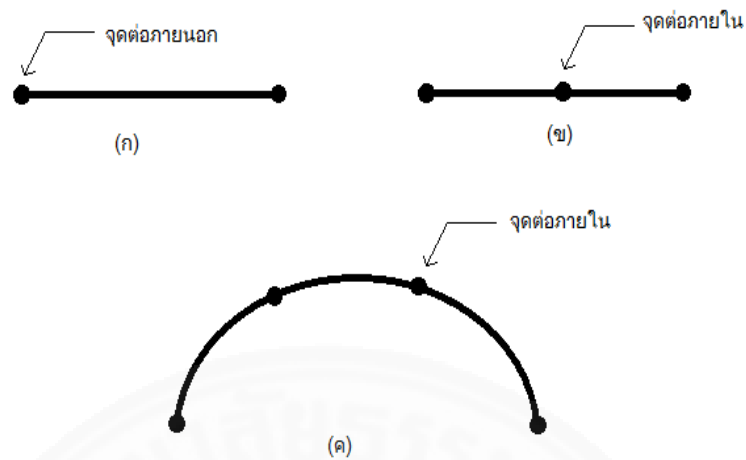
2.5.1 การสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นขึ้นส่วนของโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ ทำให้มีจำนวนของเอลิเมนต์หลายอันแต่มีจำนวนที่จำกัด และสามารถนับได้ ซึ่งขนาดของเอลิเมนต์จะถูกกำหนด โดยอัตโนมัติหรือแล้วแต่ผู้ออกแบบจะกำหนดเองก็ได้ ผู้ออกแบบควรจะทำให้ความสำคัญในการสร้างรูปร่างของชิ้นส่วนเนื่องจากจะมีผลต่อความถูกต้องในการคำนวณ

การสร้างรูปแบบทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้ด้วย CAD และอาจจะต้องมีการปรับปรุงชิ้นส่วนตามระดับความจำเป็น 3 ระดับได้แก่ Defeaturing Idealization และ Clean-Up ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้ Defeaturing คือการพิจารณาขั้นตอนของการสร้างชิ้นส่วน โดยอาจจะปรับรูปทรงของชิ้นส่วนเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ เช่น การลบมุมรอบๆ ชิ้นส่วน การลบตราสัญลักษณ์บนชิ้นส่วน เป็นต้น ส่วน Idealization คือการพิจารณารูปร่างของชิ้นส่วน โดยที่ลดความยุ่งยากของชิ้นงานจาก CAD ซึ่งอาจจะทำการลดความหนาให้มีค่าคงที่ตลอดชิ้นงาน ตัวอย่างเช่นการคำนวณชิ้นงานผนังหนาด้วยโหมดพื้นผิว เป็นการจำกัดบริเวณของการสร้างเอลิเมนต์ โดยพื้นที่ที่ไม่มีผลการทบจากการกระทำของแรงในพื้นที่หรือจุดที่ต้องการพิจารณา สรุปได้ว่าการเลือกบริเวณพื้นที่ที่จะสร้างเอลิเมนต์ตามความสำคัญ การปรับปรุงชิ้นงานให้มีความเหมาะสมต่อการวิเคราะห์ จะช่วยลดเวลาในการคำนวณได้

2.5.2 เอลิเมนต์มิติเดียว

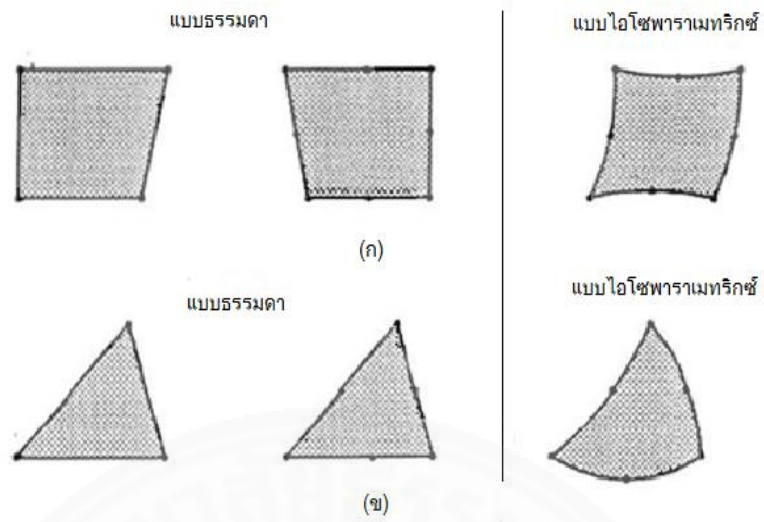
เอลิเมนต์มิติเดียวคือเอลิเมนต์ที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหามิติเดียวเช่น ชิ้นส่วนที่มีแรงกระทำในแนวแกน ชิ้นส่วนที่รับแรงบิด การโก่งของคาน เป็นต้น ภาพที่ 2.9 (ก) เป็นเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยจุดต่อที่ปลายทั้งสองด้านของแต่ละเอลิเมนต์เรียกว่าจุดต่อภายนอก ส่วนภาพที่ 2.9 (ข) เป็นเอลิเมนต์มิติเดียวที่ประกอบด้วยสามจุดต่อคือจุดต่อภายนอกสองจุดและจุดต่อภายในหนึ่งจุด ส่วนภาพที่ 2.9 (ค) คือเอลิเมนต์มิติเดียวที่เป็นส่วนโค้งที่ประกอบด้วยสี่จุดต่อคือ จุดต่อภายนอกสองจุดต่อ และจุดต่อภายในสองจุดต่อ ซึ่งจะเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาของโครงสร้างหรือชิ้นงานที่มีการยึดตัวไม่เป็นเส้นตรง



ภาพที่ 2.9 เอลิเมนต์มิติเดียว

2.5.3 เอลิเมนต์สองมิติ

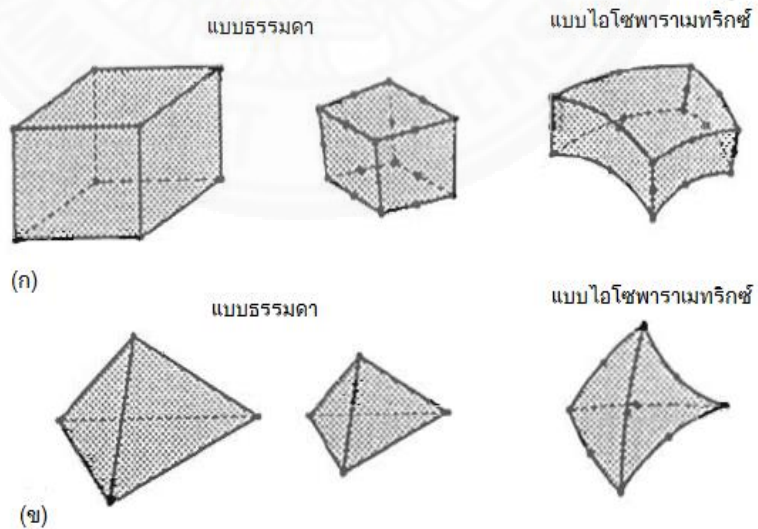
เอลิเมนต์สองมิติมักจะใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาความเค้นและความเครียดในระนาบ โดยทั่วไปเอลิเมนต์แบบสองมิติจะมีลักษณะรูปร่างเป็นแบบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมซึ่งจะประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งแสดงดังภาพที่ 2.10 ซึ่งเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยสี่จุดต่อและแปดจุดต่อที่มีด้านตรงและด้านโค้งแบบไอโซพารามेटริกซ์ โดยทั่วไปแล้วเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมจะมีผลเฉลยที่ถูกต้องและแม่นยำกว่า ส่วนจะเลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมด้านตรงหรือด้านโค้งขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน



ภาพที่ 2.10 เอลิเมนต์สองมิติ

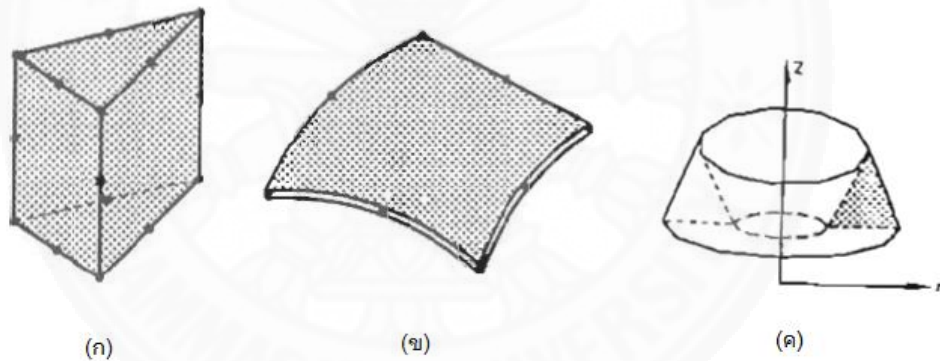
2.5.4 เอลิเมนต์สามมิติ

เอลิเมนต์สามมิติจะใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาสามมิติทั่วไป ลักษณะของเอลิเมนต์จะเป็นสี่เหลี่ยมปริซึมหรือกรวยรูปสามเหลี่ยมแสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 เอลิเมนต์สามมิติ (ก)

ภาพที่ 2.11 (ก) เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรงหกหน้า (Hexahedron) ชนิดหน้าตรง (Linear) แปดจุดต่อ ชนิดเส้นตรงกำลังสอง (Straight-Line Quadratic) ยี่สิบจุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสอง (Quadratic With Curved Faces) ยี่สิบจุดต่อ ส่วนภาพที่ 2.11 (ข) เป็นเอลิเมนต์สามมิติทรงสี่หน้า (Tetrahedra) ชนิดด้านตรงสี่จุดต่อ ชนิดเส้นตรงกำลังสองสิบจุดต่อ และชนิดเส้นโค้งกำลังสองสิบจุดต่อตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีเอลิเมนต์อีกกลุ่มหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะรูปทรงกระบอกแสดงดังภาพที่ 2.12 (ก) ปัญหาในลักษณะแผ่นโค้งแสดงดังภาพที่ 2.12 (ข) และเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหารูปกรวยสมมาตรซึ่งอาจจะใช้เป็นเอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมหมุนรอบแกนสมมาตรแสดงดังภาพที่ 2.12 (ค) โดยทั่วไปเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจำนวนจุดต่อมากๆ จะส่งผลให้ผลเฉลยมีค่าใกล้เคียงกับค่าแม่นยำมากกว่าเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจุดต่อน้อยๆ แต่จะเพิ่มความยุ่งยากในการแก้สมการและใช้เวลาในการคำนวณมาก



ภาพที่ 2.12 เอลิเมนต์สามมิติ (ข)

2.5.5 การแบ่งชิ้นส่วนเอลิเมนต์ (Element Discretization)

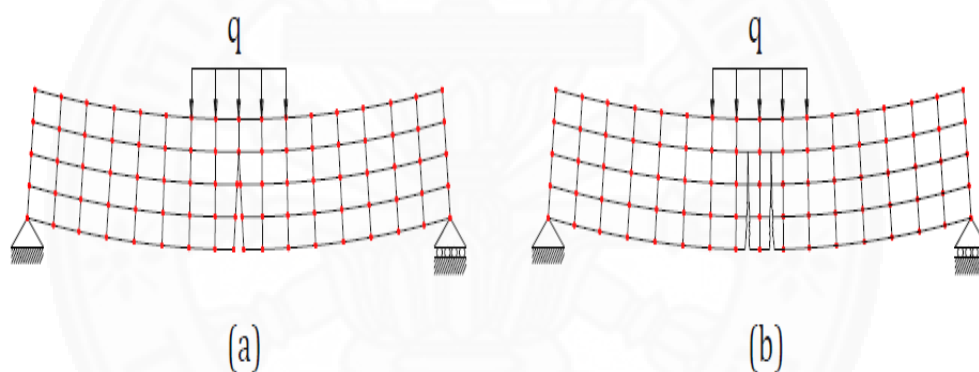
การวิเคราะห์ชิ้นส่วนด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องแบ่งชิ้นส่วนของเอลิเมนต์ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ที่เชื่อมโยงกันหลายจุดต่อ โดยที่การแบ่งชิ้นส่วนเอลิเมนต์นั้นอาจจะเริ่มแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่ๆ ก่อนแล้วจึงแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมย่อยอีกครั้ง โดยที่ตำแหน่งของจุดต่อ (Node) ภายนอกของเอลิเมนต์ย่อยควรจะอยู่ในตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นส่วน ตำแหน่งที่มีโหลดมากกระทำหรือตำแหน่งที่วัสดุต่างกัน ในการแบ่งเอลิเมนต์ออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมนั้นเอลิเมนต์สามเหลี่ยมด้านเท่าจะให้ผลเฉลยที่ดีที่สุด แต่ถ้าจำเป็นต้องใช้สามเหลี่ยมใดๆ มุมภายในของสามเหลี่ยมควรจะอยู่ระหว่าง 30 ถึง 120 องศา ซึ่งการเลือกรูปแบบ ขนาด และจำนวนของเอลิเมนต์นั้นยังขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของวัสดุ (Material Behavior) โดยจะส่งผลต่อการคำนวณ โดยตรงกล่าวคือหากวัสดุมีพฤติกรรมเชิงเส้น การคำนวณจะเป็นไปได้ โดยง่าย ข้อควรระวังในการแบ่งชิ้นส่วนนั้นคือการแบ่งชิ้นส่วนให้ละเอียดในส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค้นและความเครียดแบบฉับพลันหรือในกรณีที่มีการคำนวณเกิดผิดพลาดจากการแบ่งชิ้นส่วนก็อาจจะต้องทำการแบ่งชิ้นส่วนให้มีความละเอียดมากขึ้น

2.6 แบบจำลองการแตกร้าวของคอนกรีต

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ทาง Numerical ที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมช่วงไม่เชิงเส้นของโครงสร้าง เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ประเมินผลพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีต วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ควรจะจำลองการแตกร้าวของคอนกรีตได้ ซึ่งแบบจำลองการแตกร้าวของคอนกรีต โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถแบ่งรูปแบบการแตกร้าวออกได้ 2 ประเภท คือแบบจำลองแบบ Discrete Crack และ Smear Crack ซึ่งแต่ละรูปแบบนั้นจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นๆ เช่น การวิเคราะห์พฤติกรรมการแตกร้าวเฉพาะจุดหรือการวิเคราะห์ความเค้นของหน่วยแรงเฉพาะที่ (Stress Concentration) ควรใช้แบบจำลองแบบ Discrete Crack แต่ถ้าทำการวิเคราะห์สิ่งที่ให้ความสำคัญกับรูปแบบการแตกร้าวเป็นอันดับรองควรใช้แบบจำลอง Smeared Crack ซึ่งผลการวิเคราะห์จะมีความแตกต่างกัน

การแตกร้าวของคอนกรีตแบบ Discrete Crack ถูกพัฒนาขึ้นมา โดย Ngo & Scordelij (1967) ซึ่งจะอยู่บนพื้นฐานของความไม่ต่อเนื่องกันในโครงสร้างกับการแตกร้าวภายในเอลิเมนต์ (Inter-Element Crack) แสดงดังภาพที่ 2.13 จะเห็นว่าแบบจำลองการแตกร้าวนี้จะไม่มีการเชื่อมต่อกันที่ขอบเอลิเมนต์ ซึ่งจะมีข้อเสียเปรียบเนื่องจากเมื่อเกิดรอยแตกร้าวขึ้นเอลิเมนต์จะแยก

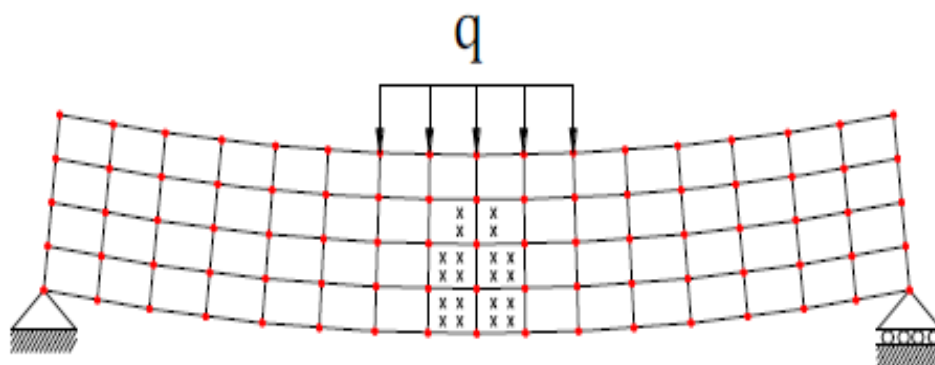
นอกจากนี้ทำให้เกิดจำนวน Degree of Freedom เพิ่มขึ้นซึ่งจำทำให้เกิดความซับซ้อนและเพิ่มเวลาในการคำนวณมากขึ้นหรือจะอยู่บนพื้นฐานของความไม่ต่อเนื่องกันในโครงสร้างกับการแตกร้าวระหว่างเอลิเมนต์(Intra-Element Crack) แสดงดังภาพที่ 2.13 วิธีการนี้มีอยู่ 2 แบบคือ Embedded discontinuity ซึ่งมักจะถูกใช้ในปัญหาที่เกิดความเครียดขึ้นเฉพาะที่และแบบที่สองจะอยู่บนพื้นฐานของส่วนเอกภาพ (Partition-of-Unity) ที่ใช้ความไม่ต่อเนื่องกันของรูปร่างฟังก์ชัน ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้สามารถจำลองพฤติกรรมของการแตกร้าวที่คล้ายพฤติกรรมจริงๆ ของโครงสร้างได้ดีเนื่องจากสามารถแสดงหน่วยความเครียด (Strain) ของโครงสร้างแบบไม่ต่อเนื่องกัน (Discontinuities)



ภาพที่ 2.13 (a) Discrete Inter-Element Crack, (b) Discrete Intra-Element Crack

โดย Rasoul Nilforoush Hamedani (2012)

การแตกร้าวของคอนกรีตแบบ Smeared Crack คิดค้น โดย Rashid (1968) โดยมีแนวคิดให้การแตกร้าวของคอนกรีตอยู่ในปริมาตรของวัสดุแสดงดังภาพที่ 2.14 โดยที่ทำการลด Material Stiffness ในทิศทางของระนาบความเค้นทำให้เมื่อเกิดรอยแตกร้าวขึ้นจะไม่ทำการแบ่งเอลิเมนต์ใหม่ซึ่งทำให้การวิเคราะห์นั้นเร็วขึ้น



ภาพที่ 2.14 Smeared Crack Model โดย Rasoul Nilforoush Hamedani (2012)

อย่างไรก็ตามแบบจำลองการแตกร้าวนี้ยังมีข้อจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการแตกร้าวของคอนกรีตเฉพาะที่ ซึ่งการแตกร้าวนั้นจะเกิดขึ้นเป็นแนวเดียวกับเอลิเมนต์ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้อาจจะไม่เหมาะสม แต่รูปแบบการแตกร้าวนี้อาจจะใช้วิเคราะห์รูปแบบและทิศทางการแตกร้าวแบบโดยรวมของโครงสร้างที่ให้ความสำคัญกับรูปแบบการแตกร้าวเป็นอันดับรอง

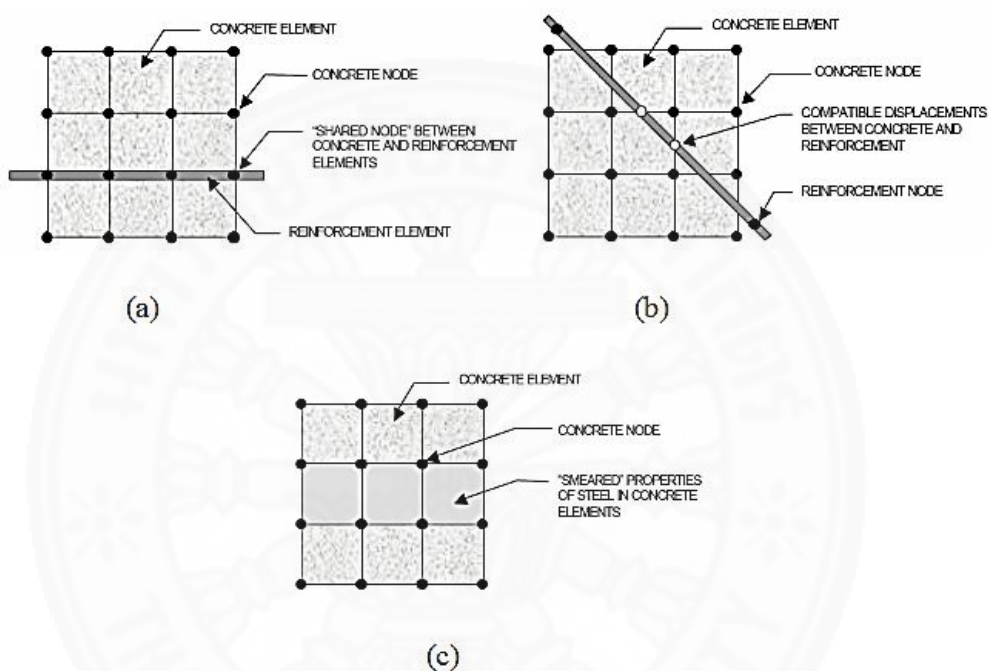
2.7 แบบจำลองเหล็กเสริม

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของเหล็กเสริมธรรมดาและเหล็กเสริมอัดแรงนั้น แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่ Discrete Model, Embedded Model และ Smeared Model ดังภาพที่ 2.15 ซึ่งรูปแบบต่างๆ จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นๆ

แบบจำลอง Discrete Model นั้นเป็นจะเชื่อมเอลิเมนต์ของเหล็กเสริมเข้ากับกับจุดต่อ (Node) ของเอลิเมนต์คอนกรีต ซึ่งจะทำให้เกิดการ Shared Node ขึ้นระหว่างเอลิเมนต์ของคอนกรีตและเอลิเมนต์ของเหล็กเสริม ทำให้เอลิเมนต์ของคอนกรีตจะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งของเหล็กเสริม แสดงดังภาพที่ 2.15 (a)

แบบจำลอง Embedded Model นั้นจะแยกเอลิเมนต์ของเหล็กเสริมออกจากเอลิเมนต์ของคอนกรีตดังแสดงภาพที่ 2.15 (b) ทำให้ค่าสติเฟนสแยกออกจากเอลิเมนต์ของคอนกรีตด้วย วิธีนี้สามารถที่จะกำหนดตำแหน่งของเหล็กเสริมได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งเอลิเมนต์ของคอนกรีตจะมีจุดที่ซ้อนทับกันกับเอลิเมนต์เหล็กเสริม โดยที่จุดนี้จะมี Node ใหม่เกิดขึ้นทำให้เกิดจำนวนตัวแปรอิสระ (Degree of Freedom, DOF) เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

แบบจำลอง Smeared Model นั้นจะกำหนดคุณสมบัติของเหล็กเสริมให้กระจายตัวอยู่ในเอลิเมนต์ของคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 2.15 (c) ทำให้การสร้างแบบจำลอง Smeared Model ส่วนใหญ่จะนำไปใช้กับการจำลองโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ๆ โดยที่รายละเอียดของเหล็กเสริมไม่มีค่อมีความสำคัญกับโครงสร้าง



ภาพที่ 2.15 Formulation for Reinforced or PreStressed Concrete

(Federico A.Tavarez, 2001)

2.8 การแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น

พฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกสามารถแบ่งได้ออกเป็นสองช่วงคือ ก่อนที่จะเกิดการแตกร้าวนั้นจะมีพฤติกรรมตอบสนองของโครงสร้างแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) และหลังจากการแตกร้าวจนถึงจุดที่เหล็กเสริมครากจนกระทั่งวิบัตินั้นพฤติกรรมตอบสนองจะเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งการแก้ปัญหาจะมีความแตกต่างกัน

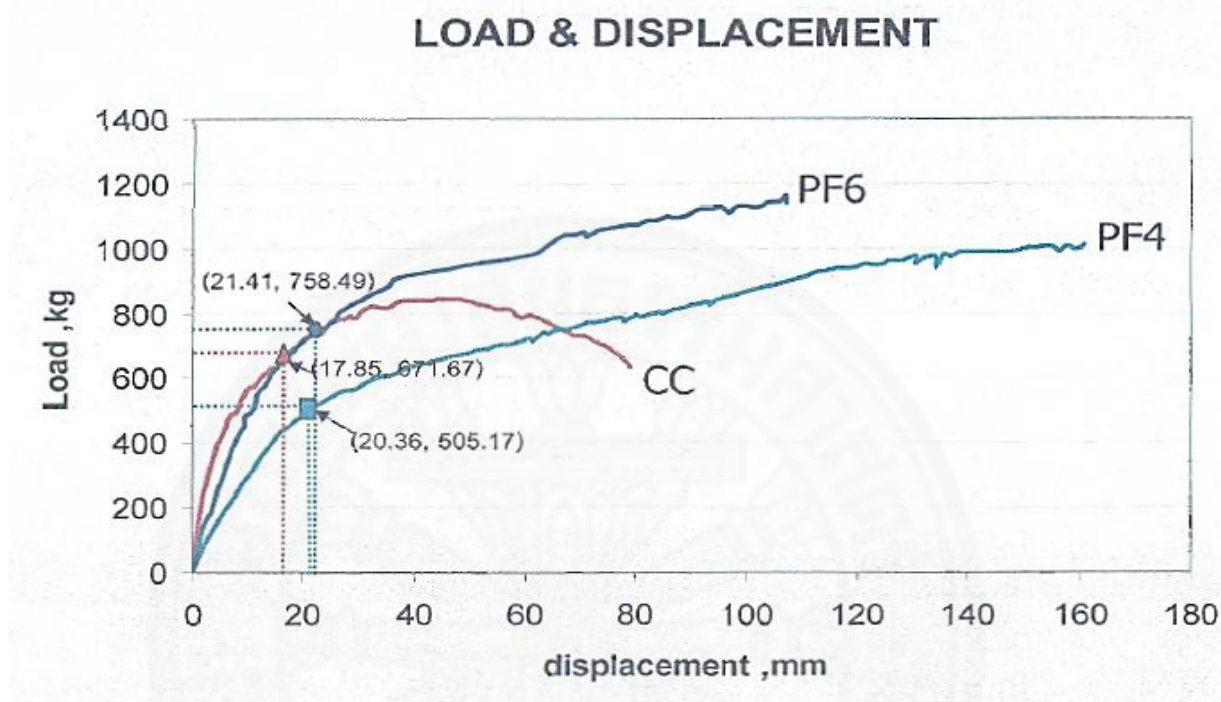
การแก้ปัญหาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นค่าสติเฟนสมเมทริกซ์ $[K]$ จะขึ้นอยู่กับเวกเตอร์การกระจัด (Displacement Vector) $\{d\}$ ซึ่งระบบการแก้สมการแบบไม่เชิงเส้นนั้นจะใช้วิธีทำซ้ำๆ (Iterative Method) โดยเวกเตอร์น้ำหนักบรรทุก (Load Vector) $\{R\}$ จะถูกแบ่งย่อยออกเป็นหลายๆ ส่วน โดยที่ในแต่ละส่วนของน้ำหนักบรรทุกนั้นค่าสติเฟนสมเมทริกซ์จะทำการประมาณค่าแบบเชิงเส้นเพื่อใช้หาค่าการกระจัด (Displacement) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับขนาดน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นด้วยเมื่อสติเฟนสมเมทริกซ์มีการเปลี่ยนแปลงภายใต้การกระจัดที่เพิ่มขึ้น แรงต้านทานของโครงสร้างจึงไม่สมดุลกับน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ (Unbalanced Load) จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าการกระจัดที่เพิ่มขึ้น โดยวิธีการทำซ้ำๆ จนกระทั่งสอดคล้องกับเงื่อนไขการลู่เข้าของคำตอบ

วิธีการแก้ปัญหาไม่เชิงเส้นนิยมใช้วิธีการกระทำซ้ำๆ ของ นิวตัน ราฟสัน (Newton-Raphson Iteration Method) ในการแก้ปัญหาและตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบ ซึ่งการวิเคราะห์วิธีนี้จะมีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียว (Single Degree of Freedom) โดยที่เริ่มจากการประมาณค่าสติเฟนสมเมทริกซ์แล้วใช้สมการสมดุลเชิงเส้นคำนวณหาค่าการกระจัด (Displacement) ที่เพิ่มขึ้น และเนื่องจากค่าสติเฟนสมเมทริกซ์มีการเปลี่ยนแปลงจากการเพิ่มขึ้นของค่าการกระจัดทำให้แรงภายในของโครงสร้างจะไม่สมดุลกับแรงภายนอก วิธีการทำซ้ำนี้จะเป็นการตรวจสอบและปรับปรุงผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่างแรงภายในและแรงภายนอกจนทำให้มีผลของคำตอบมีค่าที่ถูกต้อง โดยมีขั้นตอนสำคัญในการแก้ปัญหาแบบไม่เชิงเส้นดังต่อไปนี้ 1. การคำนวณหาค่าสติเฟนสมเมทริกซ์ 2. แก้ปัญหาจากสมการสมดุลในขณะที่การกระจัดมีค่าเพิ่มขึ้น 3. คำนวณหาผลเฉลยของแบบจำลอง 4. ตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางด้านการศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างคานกับเสา

กิตติยา สอนเผือก (2548) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมโครงสร้างของรอยต่อระหว่างคานสำเร็จรูปกับเสาสำเร็จรูป โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดเท่าของจริงและกำหนดให้ความหนาของแผ่นเพลทเหล็กเป็นตัวแปรหลัก สำหรับตัวอย่างคาน-เสา สำเร็จรูปมีความหนา 4 และ 6 มิลลิเมตร สรุปได้ว่า จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของตัวอย่างทดสอบแสดงดังภาพที่ 2.16 จะเห็นว่ากราฟของตัวอย่างคาน-เสา ที่เป็นเนื้อเดียว (CC) ก็มีลักษณะแตกต่างจากกราฟคาน-เสา สำเร็จรูป (PF4, PF6) อย่างชัดเจน โดยในช่วงแรกกราฟของทั้ง 3 ตัวอย่าง มีลักษณะเชิงเส้นและมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) และหลังจากจุด Yield Point ของทั้ง 3 ตัวอย่าง ค่าสติเฟนสมจะลดลงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ปลายคานจนกระทั่งเกิดการ Crushing ของคอนกรีตในตัวอย่าง (PF4, PF6) ซึ่งเกิดการวิบัติแบบ Tension Failure ส่วนตัวอย่าง

(CC) เมื่อรับน้ำหนักได้ช่วงหนึ่งก็เกิดการวิบัติก่อน โดยรอยต่อของคาน-เสา สำเร็จรูปของ กิตติยา สอนเผือกจะมีลักษณะรอยต่อแบบเหนียว ส่วนตัวอย่างคาน-เสา ที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกันจะมีลักษณะ รอยต่อแบบเปราะ



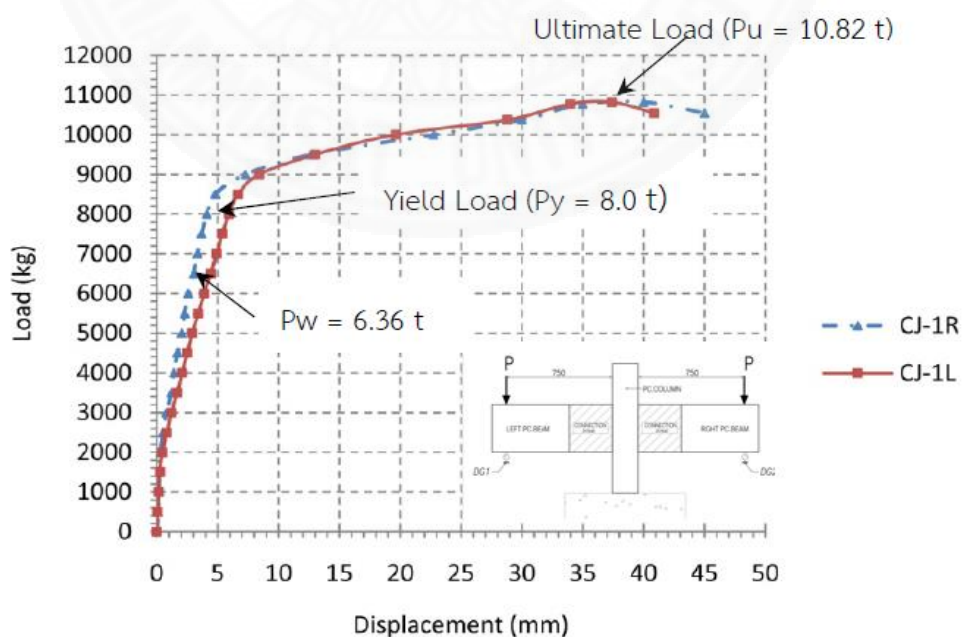
ภาพที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการเคลื่อนที่ของ กิตติยา สอนเผือก (2548)

จากรูว์ฉน์ ถาวรไพศาลชีวะ(2549) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างเพื่อ เสนอสมการออกแบบรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูปสรุปได้ว่า สามารถแยกพฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูปออกเป็น 2 แบบ คือ รอยต่อที่มีพฤติกรรมแบบเปราะ (Brittle) และรอยต่อที่มีพฤติกรรม แบบเหนียว (Ductility) ซึ่งการวิบัติของรอยต่อที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกันจะเกิดรอยร้าวเฉียงๆ ที่ ตำแหน่งกึ่งกลางเสาเรียกลักษณะรอยร้าวว่า Joint Crack โดยพฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างเกิด จากการถ่ายแรงภายในจุดต่อ (Internal Force Transfer Mechanisms) ขนาดความกว้างของรอย แตกร้าวกับอิทธิพลของระยะฝังเหล็ก การดัดโค้งปลายเหล็ก และขนาดของแรงกระทำ ส่วนการวิบัติ ของรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูปนั้นจะเกิดขึ้นกับเหล็กเสริม แผ่นเหล็ก และคอนกรีต สามารถแบ่งออก ได้ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกจะเกิดการแยกตัวระหว่างคอนกรีตกับแผ่นเหล็ก ช่วงที่สองจะเกิดการยึดตัวใน

ลักษณะรูปกรวยที่แผ่นเหล็กและปรากฏรอยแตกกว้างขึ้นที่ตำแหน่งรับแรงดึง-แรงอัด ซึ่งรอยแตกกว้างจะมาบรรจบกันในลักษณะระนาบเอียงที่กึ่งกลางของรอยต่อ ช่วงสุดท้ายจะมีลักษณะการแตกกว้างที่ผิวบนของคานคอนกรีตจะหลุดร่อนลักษณะการแตกแบบนี้เรียกว่า Crushing Failure ซึ่งความหนาของแผ่นเหล็กนั้นส่งผลต่อการเสียรูปและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นกับรอยต่อคาน-เสา งานวิจัยชิ้นนี้ได้เสนอรูปแบบสมการกำลังสี่ตัวแปรสำหรับความสัมพันธ์โมเมนต์-มุมหมุน ซึ่งเป็นรูปแบบสมการแบบไร้เชิงเส้น

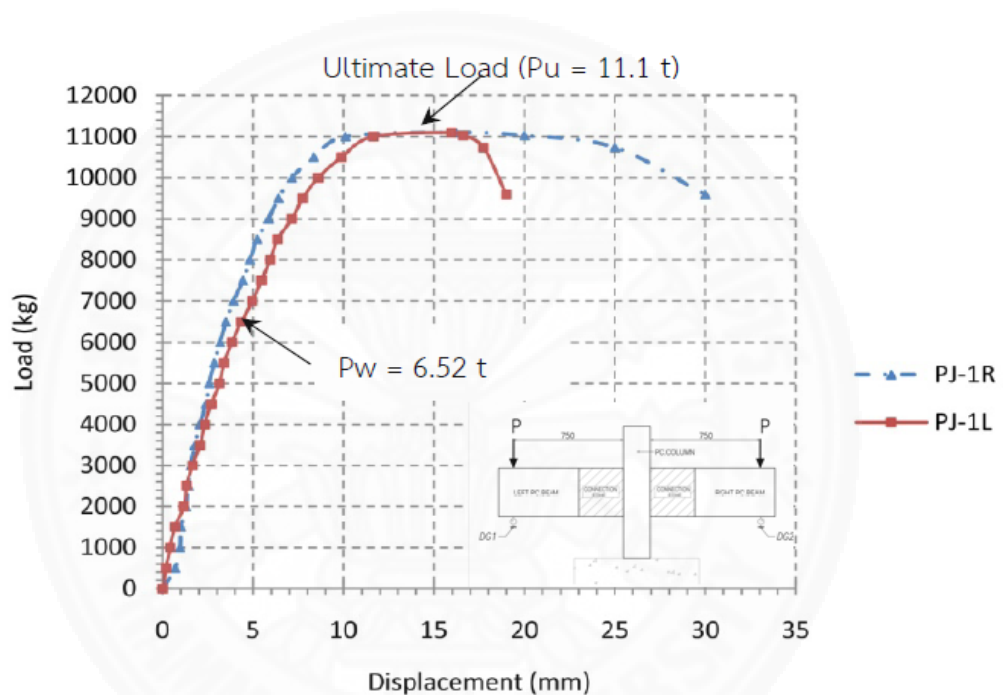
ทวีศักดิ์ โสภณธนาพร (2558) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมรอยต่อขึ้นส่วนโครงสร้างคาน-เสา สำเร็จรูปภายใต้แรงสถิต โดยทำการทดสอบคาน-เสา สำเร็จรูป 3 ตัวอย่างได้แก่ PJ-1, PJ-2, PJ-2/2 และตัวอย่างคาน-เสา ที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน 1 ตัวอย่างได้แก่ CJ-1 โดยตัวอย่างทดสอบทั้งหมดถูกออกแบบ โดยวิธีกำลังและทำการทดสอบ โดยให้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิตกระทำที่ปลายคานทั้งสอง โดยมีระยะห่างจากขอบเสา 75 ซม. ซึ่งรูปแบบทั้งหมดนี้จะนำไปใช้ในการสอบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

ตัวอย่างทดสอบ CJ-1 คือคาน-เสา ที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (Displacement) ของตัวอย่างทดสอบ CJ-1 แสดงดังภาพที่ 2.17 เป็นพฤติกรรมแบบเชิงเส้นในช่วงอีลาสติค (Elastic) เมื่อเหล็กเสริมถึงจุดครากค่าสติฟเนสจะเริ่มลดลง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ปลายคานมากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นที่เล็กน้อยเพราะเข้าสู่พฤติกรรมช่วงอินอีลาสติค (Inelastic)



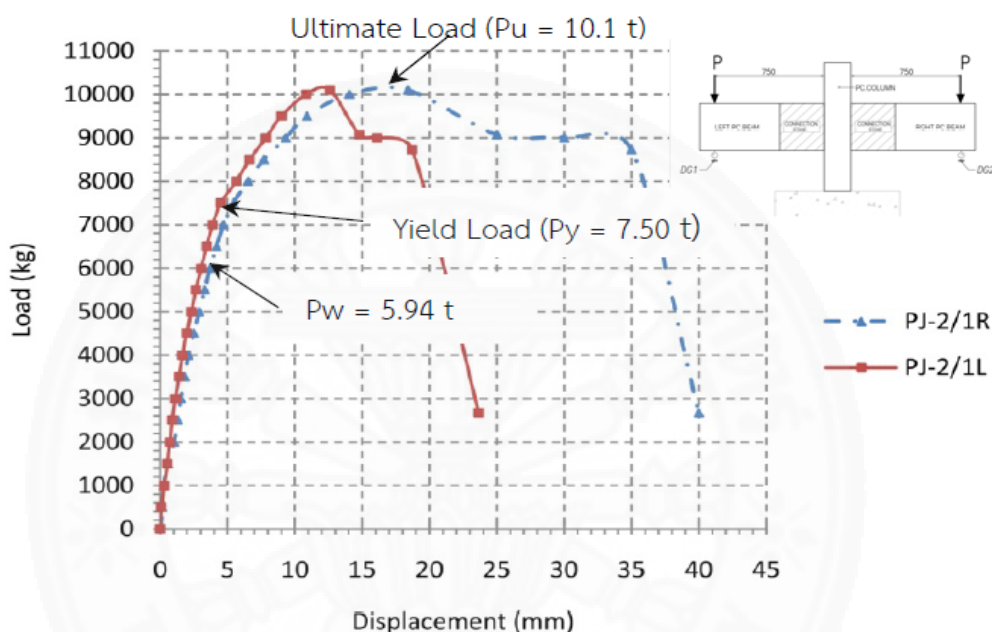
ภาพที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคานส่วนยื่น CJ-1

ตัวอย่างทดสอบ PJ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (Displacement) ของตัวอย่างทดสอบ PJ-1 แสดงดังภาพที่ 2.18 เป็นพฤติกรรมแบบเชิงเส้นในช่วงอีลาสติก (Elastic) เกิดรอยร้าวแรกที่ข้อต่อคาน-เสา เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกประมาณ 9.5 ตัน เหล็กเสริมจะถึงจุดคราก หลังจากนั้นค่าสติเฟนสจะเริ่มลดลง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ปลายคานเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นที่ละน้อย เพราะเข้าสู่พฤติกรรมช่วงอินอีลาสติก (Inelastic)



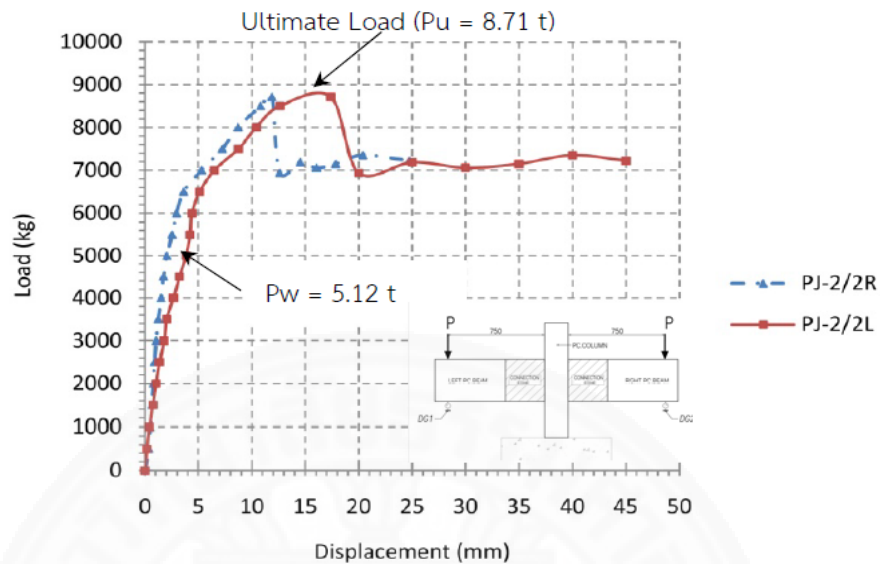
ภาพที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคานส่วนยื่น PJ-1

ตัวอย่างทดสอบ PJ-2/1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน(Displacement) ของตัวอย่างทดสอบ PJ-2/1 แสดงดังภาพที่ 2.19 เป็นพฤติกรรมแบบเชิงเส้นในช่วงอีลาสติก (Elastic) รอยร้าวแรกเกิดขึ้นที่ข้อต่อคาน-เสา เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกสังเกตได้ว่า เหล็กเสริมถึงจุดคราก จากนั้นค่าสติฟเนสก็จะเริ่มลดลงและเริ่มเข้าสู่พฤติกรรมช่วงอินอีลาสติก (Inelastic)



ภาพที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคานส่วนยื่น PJ-2/1

ตัวอย่างทดสอบ PJ-2/2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน(Displacement) ของตัวอย่างทดสอบ PJ-2/2 แสดงดังภาพที่ 2.20 มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นในช่วงอีลาสติก (Elastic) เมื่อเกิดรอยร้าวแรกที่ข้อต่อคาน-เสา และเมื่อการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกสังเกตได้ว่า เหล็กเสริมถึงจุดคราก ค่าสติฟเนสก็จะเริ่มลดลง และเริ่มเข้าสู่พฤติกรรมช่วงอินอีลาสติก (Inelastic)

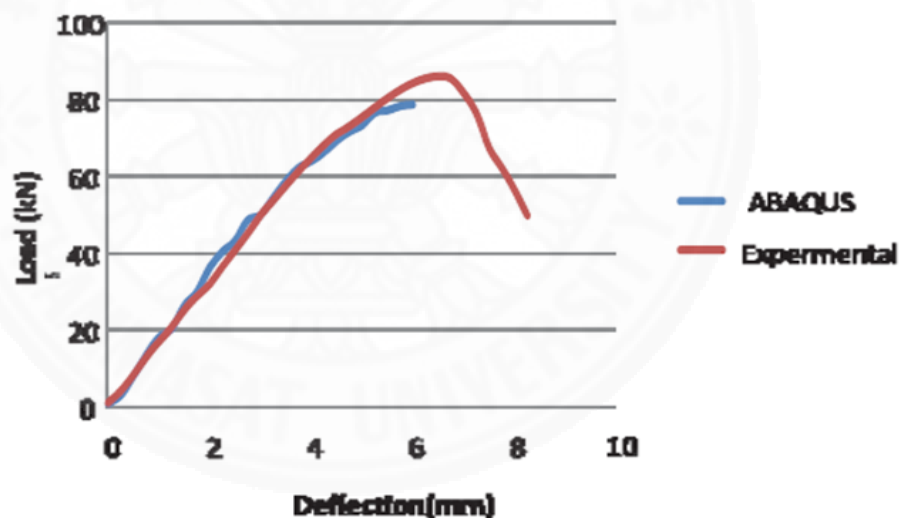


ภาพที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ปลายคานส่วนยื่น PJ-2/2

พฤติกรรมของรอยต่อในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือช่วงก่อนเกิดการแตกร้าว ได้ผลของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและสอดคล้องกัน ส่วนช่วงหลังจากการแตกร้าวรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูปจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันออกไป สำหรับรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป PJ-1 หลังจากรับน้ำหนักบรรทุกถึงจุดสูงสุดแล้วจะเห็นว่าไม่นานก็เกิดการวิบัตินั้นเนื่องจากเหล็กเสริมขาดความต่อเนื่อง สำหรับรอยต่อคาน-เสา PJ-2/1 และ PJ-2/2 เมื่อเหล็กเสริมด้านรับแรงดึงเกิดครูด หรือ เลื่อนหลุด (Slip) ทำให้สลักเกลียว (Bolt) ที่ยึดจับแผ่นเพลทเหล็กทำหน้าที่ยึดรับแรงดึงในรูปแบบของแรงเฉือนเพียงลำพังจนวิบัติ ส่วนรูปแบบของการแตกร้าวและการวิบัติของตัวอย่างทดสอบทั้งสี่ตัวอย่างนั้นจะวิบัติด้วยโมเมนต์ดัดทั้งหมดและมีพฤติกรรมการวิบัติแบบ Flexural Failure ซึ่งเป็นการวิบัติที่ปลอดภัยเนื่องจากเหล็กเสริมถึงจุดครากก่อนคอนกรีตแตก

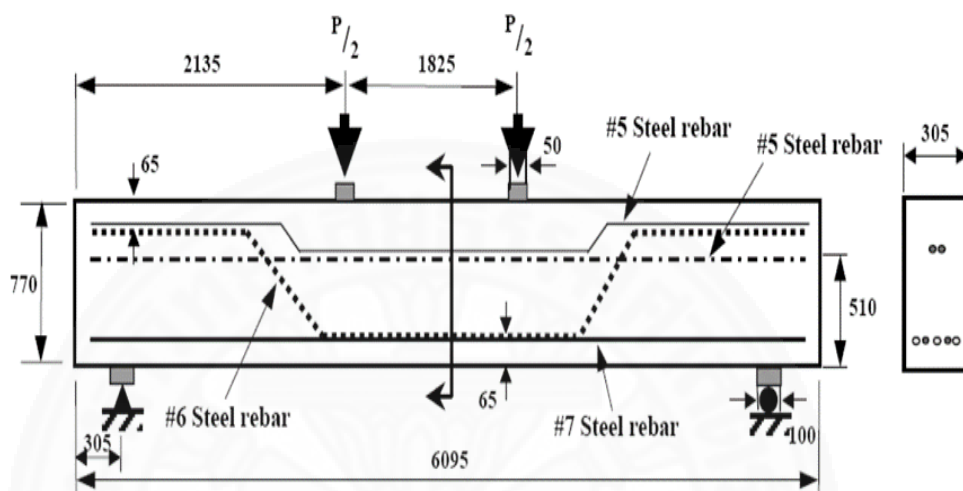
2.10 งานวิจัยทางการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

T. Tejaswini (2015) ได้ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทำการสอบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งใช้คานคอนกรีตหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ลึก 20 เซนติเมตร และคานมีความยาว 1.2 เมตร การศึกษานี้สร้างแบบจำลอง 3 มิติด้วยโปรแกรม ABAQUS ที่มีขนาดเท่ากับของจริง ซึ่งในการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะต้องจำลองคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ เช่น คอนกรีต เหล็กเสริม เป็นต้น ในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุจะกำหนดทั้งคุณสมบัติในช่วงอิลาสติกและช่วงอินอิลาสติก สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ใช้เอลิเมนต์ C3D8 ในการจำลองวัสดุคอนกรีตซึ่งมี 8 โหนดและตัวแปรที่ใช้อธิบายการเสียรูป 3 ตัวแปร และในการจำลองเหล็กเสริมใช้เอลิเมนต์แบบคาน 2 โหนด ซึ่งผลจากวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังภาพที่ 2.21 นั้นให้ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันกับผลการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กได้



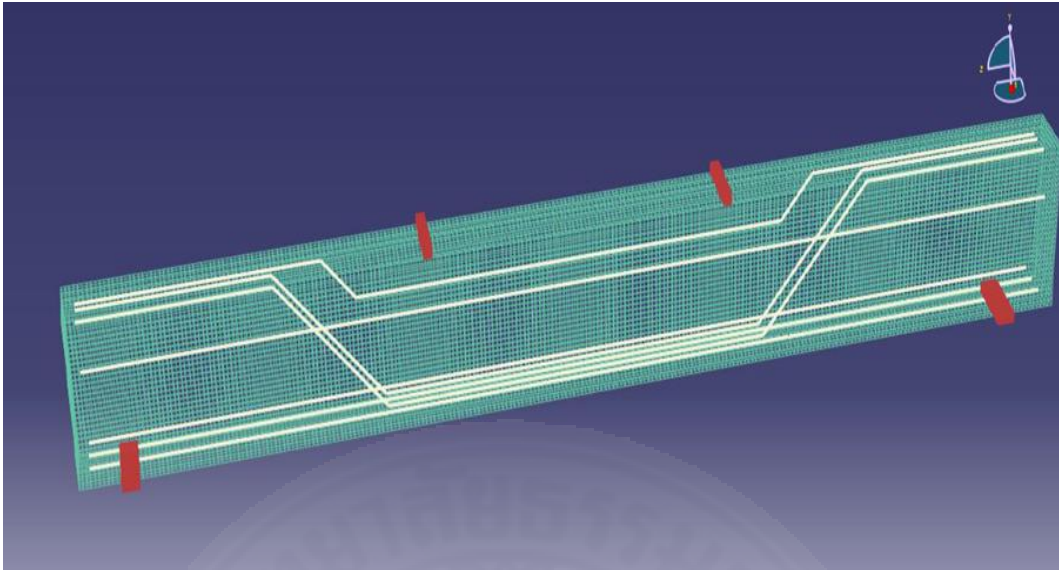
ภาพที่ 2.21 กราฟเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองของ T. Tejaswini (2015)

Hamid Sinaei (2012) ได้ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยที่ทำการสอบเทียบกับผลการทดลองของ Kachlakev (2001) โดยขนาดของแบบจำลองนั้นมีขนาดเท่ากับของจริงแสดงดังภาพที่ 2.22

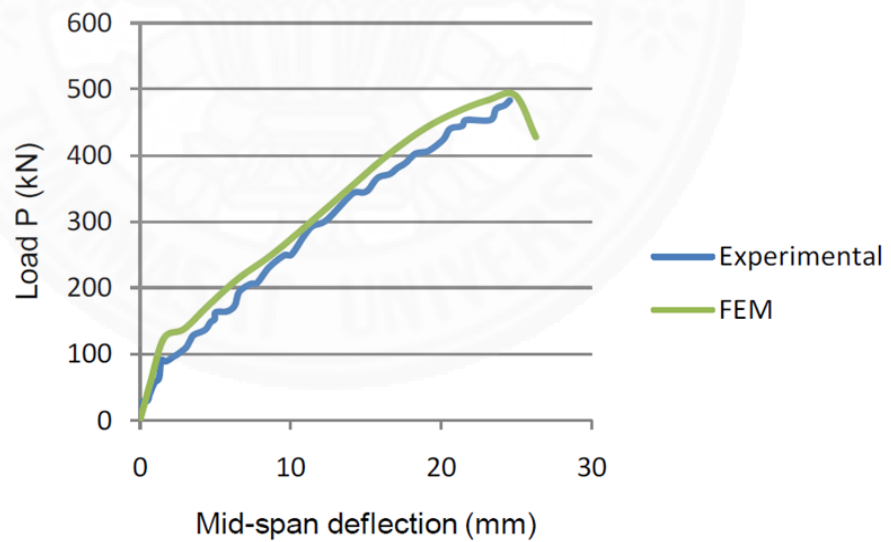


ภาพที่ 2.22 รายละเอียดขนาดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในหน่วยมิลลิเมตรของ Hamid Sinaei (2012)

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติแสดงดังภาพที่ 2.23 โดยใช้โปรแกรม ABAQUS เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับการจำลองรูปแบบการแตกร้าวของคอนกรีต ในโปรแกรมนั้นมีด้วยกันทั้งหมด 3 แบบ โดยมีรายละเอียดดังบทที่ 3 ในงานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบการแตกร้าวแบบ Concrete Damaged Plasticity และการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุจะกำหนดทั้งคุณสมบัติในช่วงอีลาสติกและช่วงพลาสติกแบบจำลองในงานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์ C3D8R เพื่อจำลองวัสดุคอนกรีต และเอลิเมนต์ T3D2 เพื่อจำลองเหล็กเสริม จากสอบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง โดยทำการเปรียบเทียบแรงกับการเคลื่อนที่ที่กลางคานแสดงดังภาพที่ 2.24 แสดงให้เห็นว่าผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมจริง

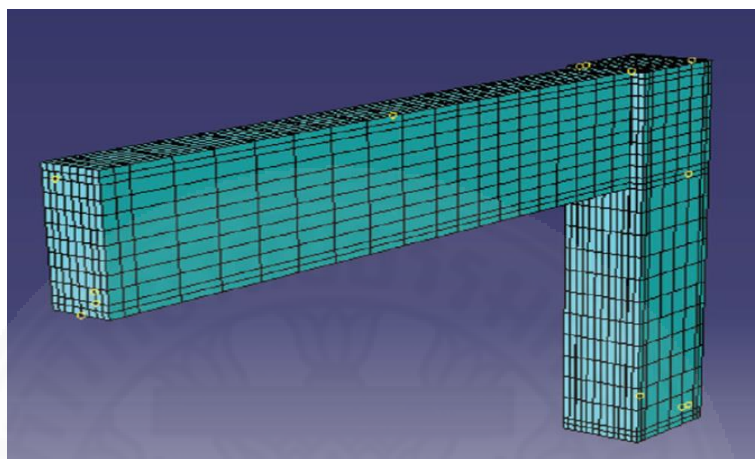


ภาพที่ 2.23 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ Hamid Sinaei (2012)

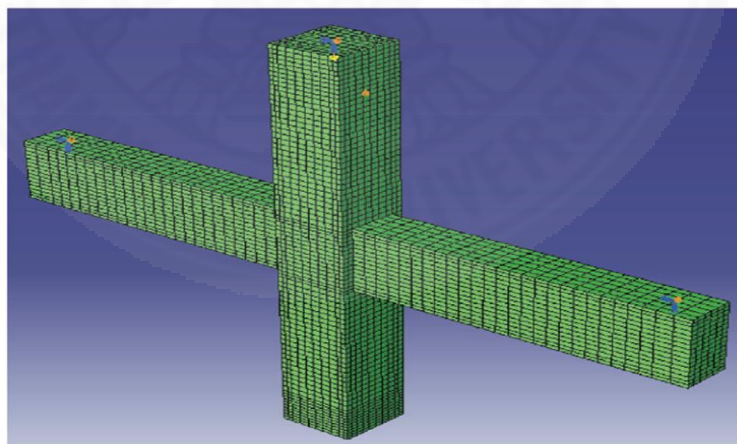


ภาพที่ 2.24 กราฟเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดลองของ Hamid Sinaei (2012)

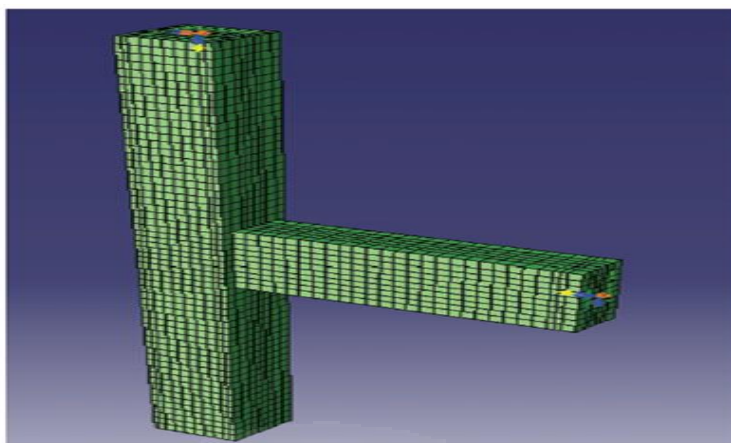
X Long (2014) ได้ศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา ภายใต้แรงสถิตด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์และสร้างแบบจำลอง 3 มิติด้วยโปรแกรม ABAQUS ซึ่งรูปแบบของรอยต่อคาน-เสา ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 แบบด้วยกันแสดงดังภาพที่ 2.25 ภาพที่ 2.26 และภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.25 Geometric of the knee Joint ของ Hamid Sinaei (2012)

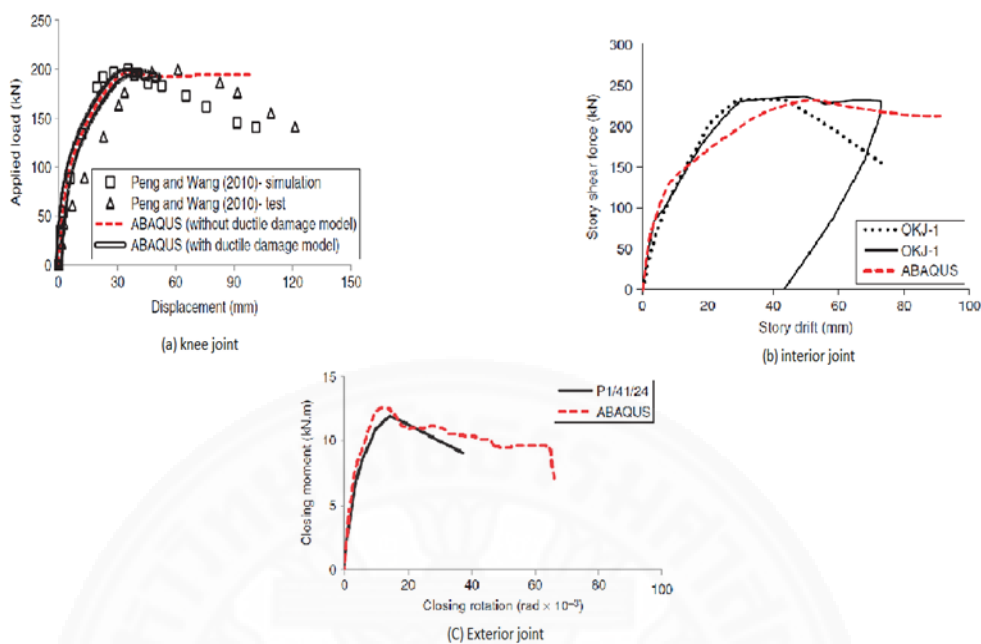


ภาพที่ 2.26 Geometric of the interior Joint ของ Hamid Sinaei (2012)



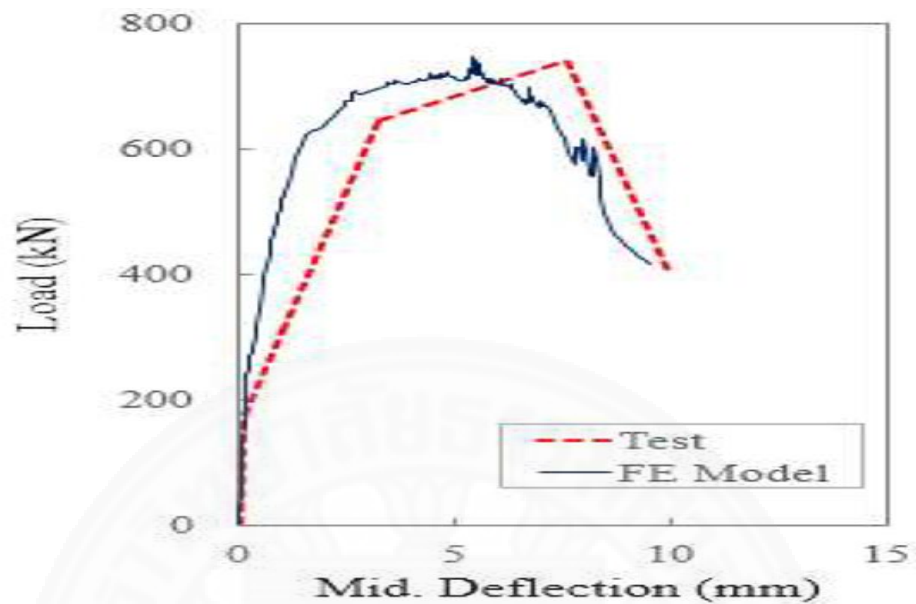
ภาพที่ 2.27 Geometric of the Exterior Joint ของ Hamid Sinaei (2012)

แบบจำลองทั้ง 3 นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Peng and Wang (2010) เพื่อให้การจำลองรอยต่อคาน-เสา ให้มีความสอดคล้องกับของจริง แบบจำลองจะต้องสามารถจำลองพฤติกรรมของวัสดุในช่วงอีลาสติกและอินอีลาสติก สำหรับการจำลองรูปแบบการแตกร้าวของคอนกรีตในโปรแกรมนี้มีด้วยกันทั้งหมด 3 แบบ โดยมีรายละเอียดดังที่กล่าวในบทที่ 3 ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบการแตกร้าวแบบ Concrete Damaged Plasticity แบบจำลองในงานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์ C3D8R เพื่อจำลองวัสดุคอนกรีต และเอลิเมนต์ T3D2 เพื่อจำลองเหล็กเสริม แบบจำลองทั้ง 3 แบบมีรูปแบบของรูปร่างและการใส่แรงกระทำภายนอกไม่เหมือนกัน Knee Joint จะทำการใส่แรงกระทำในทิศทางขนานกับแกน x ที่ปลายคาน รอยต่อคาน-เสา แบบ Interior Joint นั้นจะทำการใส่แรงกระทำในทิศทางขนานกับแกน y โดยแรงกระทำทั้งสองจะมีลักษณะตรงข้ามกันกล่าวคือฝั่งซ้ายแรงกระทำในทิศทางลงส่วนฝั่งขวาแรงกระทำในทิศทางขึ้นและรอยต่อคาน-เสา แบบ Exterior Joint นั้นทำการใส่แรงกระทำในทิศทางขนานแกน y ที่ตำแหน่งปลายคาน จากการสอบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของรูปแบบรอยต่อคาน-เสา ทั้ง 3 แบบ แสดงดังภาพที่ 2.28 ซึ่งในแต่ละแบบมีการเทียบผลในลักษณะที่ต่างต่างกัน จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทั้ง 3 แบบ มีความสอดคล้องกับผลการทดลอง



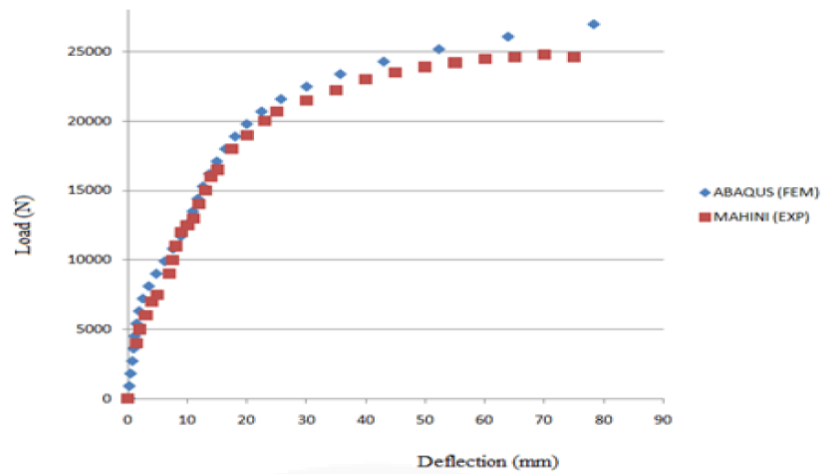
ภาพที่ 2.28 กราฟเปรียบเทียบผลในลักษณะต่างๆ ของแบบจำลอง (a) Knee Joint, (b) Interior Joint, (c) Exterior Joint ของ Hamid Sinaei (2012)

Aydin Demir (2016) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมในช่วงที่ไม่เป็นเส้นตรงของคานกลีคคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์และทำการสอบเทียบกับผลการทดลองของ Roy and Brena (2008) คานคอนกรีตหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 15.2 เซนติเมตร ลึก 40.5 เซนติเมตร และคานมีความยาว 1.75 เมตร โดยการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยโปรแกรม ABAQUS การสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะจำลองคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ เช่น คอนกรีต เหล็กเสริม เป็นต้น ในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุจะกำหนดทั้งคุณสมบัติในช่วงอีลาสติกและช่วงอินอีลาสติก สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ใช้เอลิเมนต์ C3D8 ในการจำลองวัสดุคอนกรีตซึ่งมี 8 โหนดซึ่งมีตัวแปรที่ใช้อธิบายการเสียรูป 3 ตัวแปร และในการจำลองเหล็กเสริมใช้เอลิเมนต์ T3D2 ซึ่งประกอบด้วย 2 โหนดและตัวแปรที่ใช้อธิบายการเสียรูป 3 ตัวแปรคือการเคลื่อนที่ในทิศทาง x y z สำหรับการแตกร้าวของคอนกรีตนั้นใช้รูปแบบการแตกร้าวแบบ Concrete Damaged Plasticity ที่มีอยู่ในโปรแกรม ABAQUS ซึ่งผลจากวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังภาพที่ 2.29 นั้นให้ผลที่ได้มีความสอดคล้องกันกับผลการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ได้



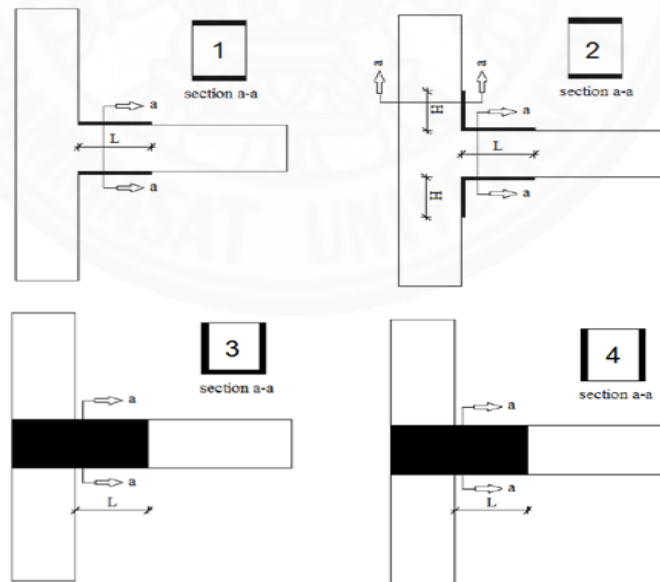
ภาพที่ 2.29 กราฟเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดลองของ Aydin Demir (2016)

Hamid Sinaei (2011) ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา ที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS ในการวิเคราะห์ การศึกษานี้ทำการพิสูจน์และยืนยันความสามารถของโปรแกรมในการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา ก่อน โดยทำการสอบเทียบผลของการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของ Mahini and Ronagh (2007) พบว่าการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีความสอดคล้องกันกับผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2.30 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา ได้



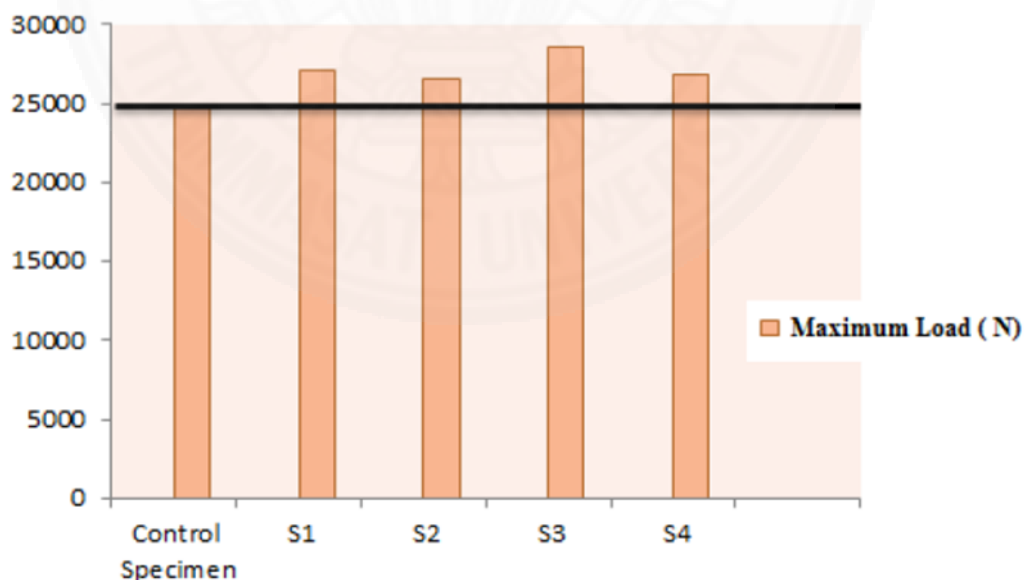
ภาพที่ 2.30 กราฟเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองแรกกับผลการทดลองของ Hamid Sinaei (2011)

หลังจากยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของ Mahini and Ronagh (2007) แล้วจึงนำไปพัฒนาเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา ที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์จำนวนทั้งหมด 4 แบบแสดงดังภาพที่ 2.31



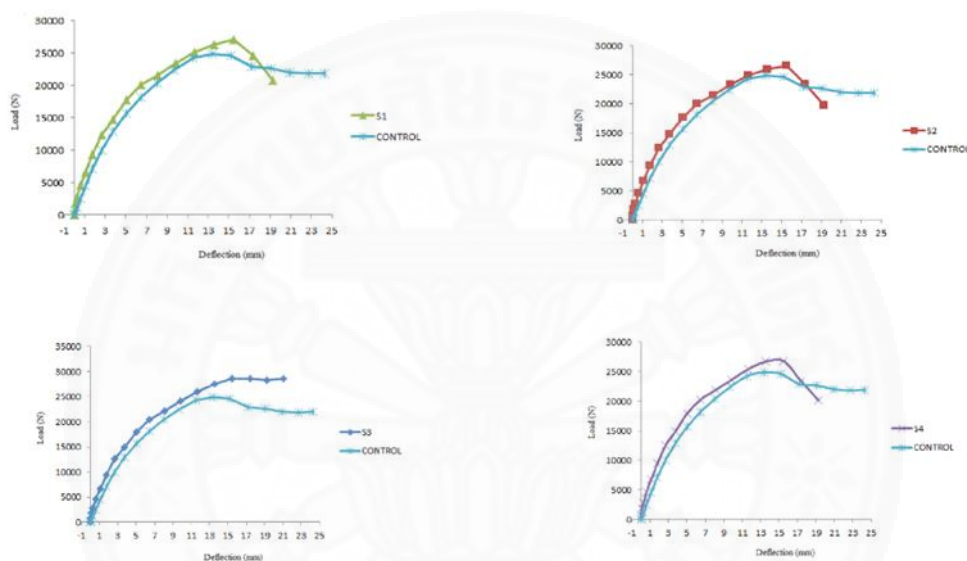
ภาพที่ 2.31 แบบจำลองที่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ของ Hamid Sinaei (2011)

จากภาพที่ 2.31 แสดงการเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ด้วยโปรแกรม ABAQUS จำนวน 6 แบบ ซึ่งแบบที่หนึ่งจะนำไปสอบเทียบกับการทดลองของ Mahini and Ronagh (2007) ดังที่กล่าวข้างต้น แบบที่สอง (ไม่มีการเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์) จะเป็นตัวเปรียบเทียบกับ 4 แบบ ที่ทำการเสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ โดยที่แบบแรกและแบบที่สองจะเป็นรอยต่อคาน-เสา ที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ซึ่งในการสร้างแบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะต้องจำลองคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ เช่น คอนกรีต เหล็กเสริม เป็นต้น ในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุจะกำหนดทั้งคุณสมบัติในช่วงอิลาสติกและช่วงพลาสติก สำหรับในการศึกษานี้ใช้เอลิเมนต์ C3D8 ในการจำลองวัสดุคอนกรีตซึ่งมี 8 โหนดและตัวแปรที่ใช้อธิบายการเสียรูป 3 ตัวแปร ส่วนเหล็กเสริมจำลองให้เป็นวัสดุแบบ Elastic-Perfectly Plastic Material และเหล็กเสริมมีการยึดเหนี่ยวกันกับคอนกรีตแบบสมบูรณ์ โดยที่จำลองให้เหล็กเสริมเชื่อมต่อกับคอนกรีตแบบ Embedded สำหรับการจำลองคาร์บอนไฟเบอร์จะจำลองให้วัสดุเป็นแบบ Orthotropic การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตนั้น (Boundary Condition) จะทำการยึดที่ด้านล่างของเสาในลักษณะยึดตรึงและด้านบนของเสาจะเป็นลักษณะการยึดแบบลื่น ซึ่งจากการเทียบกำลังทั้ง 5 แบบพบว่าแบบจำลองที่มีการเสริมคาร์บอนไฟเบอร์นั้นสามารถรับแรงได้มากกว่าแสดงดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดของ Hamid Sinaei (2011)

และเมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของทั้ง 4 แบบ โดยมีตัวเปรียบเทียบหลักคือรอยต่อคาน-เสา ที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ดังแสดงดังภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่าลักษณะการใส่เสริมกำลังด้วยคาร์บอนไฟเบอร์แบบที่ 3 นั้นให้กำลังที่มากกว่าแบบไม่มีการเสริมคาร์บอนไฟเบอร์และเมื่อถึงกำลังสูงสุดแล้วแรงกระทำยังคงสม่ำเสมอไม่ลดลงแบบฉับพลันแสดงถึงความเหนียวที่มากกว่าทั้ง 3 แบบ



ภาพที่ 2.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ในแต่ละแบบจำลองของ Hamid Sinaei (2011)

Sudhakar A. Kulkarni (2006) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมรอยต่อ โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมรอยต่อระหว่างเสากับคานภายใต้โหลดที่กระทำซ้ำๆ แล้วทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในห้องปฏิบัติการกับโมเดลเพื่อพิจารณาความถูกต้องของโมเดล จนสามารถทำนายพฤติกรรมของรอยต่อได้อย่างแม่นยำ เพื่อให้แบบจำลองมีความแม่นยำจึงต้องคำนึงถึงคุณสมบัติวัสดุ การแบ่งจำนวนของเอลิเมนต์ รูปแบบของผิวสัมผัสและเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ซึ่งแบบจำลองในงานวิจัยนี้มีให้ผลคำตอบที่เข้าผลทดสอบจริงเป็นอย่างดี

Josef Hegger (2004) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของรอยต่อคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบไม่เชิงเส้นนั้นจะใช้ในการตรวจสอบพฤติกรรมของรอยต่อคานกับเสาด้านนอกและภายในเพื่อทำการสอบเทียบกับการทดสอบกับแบบจำลอง พฤติกรรมของรอยต่อคานกับเสาด้านนอกจะแตกต่างจากการเชื่อมต่อภายใน การเชื่อมต่อแต่ละประเภทจะมีความแข็งแรงและพฤติกรรมที่ไม่เหมือนกันซึ่งการศึกษาพารามิเตอร์ได้ดำเนินการ โดยใช้รูปแบบการตรวจสอบโมเดลเพื่อศึกษาพฤติกรรมและความสำคัญของพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อแรงเฉือนของการเชื่อมต่อภายนอกและการเชื่อมต่อภายในของคาน-เสา ปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงเฉือนของรอยต่อคานกับเสาคือกำลังของคอนกรีตและปริมาณของเหล็กปลอกภายใน และเมื่อทำการเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลองนั้นมีความสอดคล้องกันอย่างดี

Deng Sihua (2015) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษานี้สร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS โดยที่จะนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นไปสอบเทียบกับการทดลองซึ่งแบบจำลองมีลักษณะแสดงดังภาพที่ 2.34

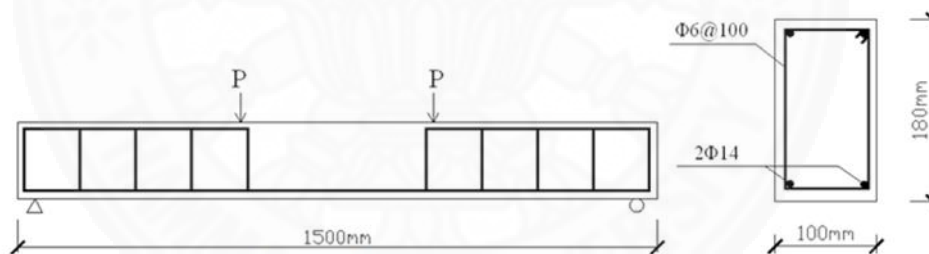
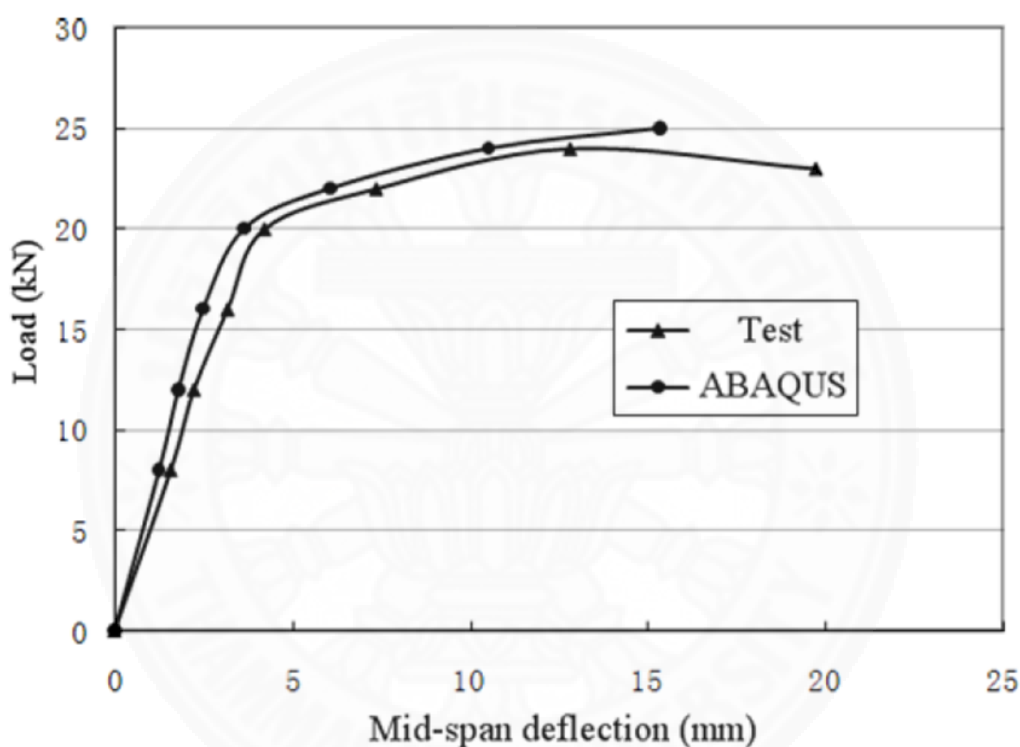


Figure 1 bar arrangement drawing



ภาพที่ 2.34 แบบจำลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ Deng Sihua (2015)

แบบจำลองในงานวิจัยนี้ใช้เอลิเมนต์ C3D8R เพื่อจำลองวัสดุคอนกรีตและเอลิเมนต์ T3D2 เพื่อจำลองเหล็กเสริมและแรงกระทำภายนอก 2 จุดดังภาพที่ 2 สำหรับเหล็กเสริมนั้นจำลองให้มีการยึดเหนี่ยวกันกับคอนกรีตแบบสมบูรณ์ โดยที่จำลองให้เหล็กเสริมนั้นเชื่อมต่อกับคอนกรีตแบบ Embedded จากกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 2.35



ภาพที่ 2.35 กราฟเปรียบเทียบผลจากไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของ Deng Sihua (2015)

แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS นั้นมีผลเฉลยที่สอดคล้องกันกับผลการทดลองเป็นอย่างดี แสดงว่าสามารถใช้โปรแกรม ABAQUS ในการวิเคราะห์พฤติกรรมช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีตเสริมเหล็กได้

บทที่ 3 วิธีการวิจัย

3.1 แนวทางและขั้นตอนการวิจัย

3.1.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมา

ศึกษาทฤษฎีแบบจำลองของวัสดุ คอนกรีต เหล็กเสริม ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

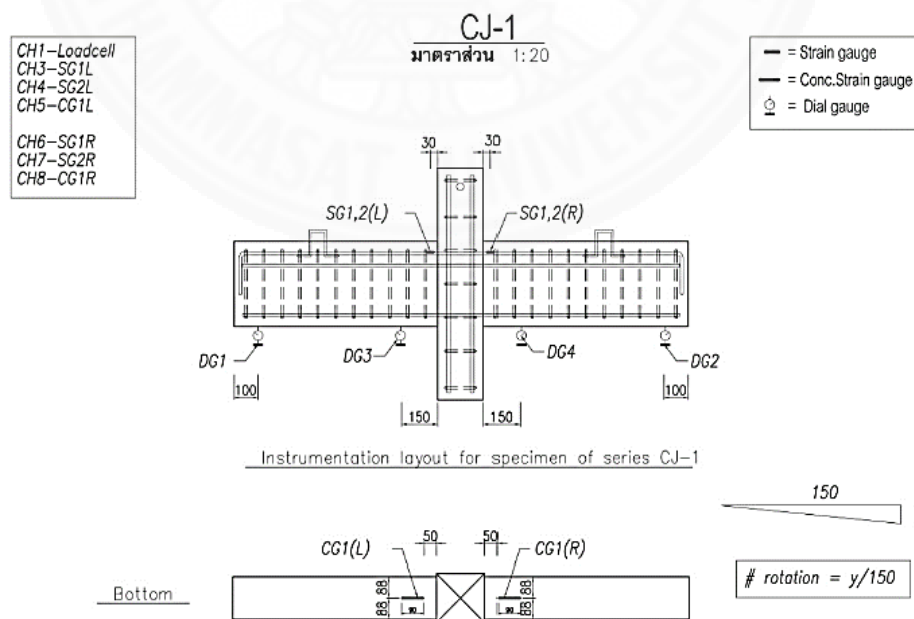
3.1.2 สร้างแบบจำลอง

สร้างแบบจำลองรอยต่อคาน-เสา จำนวน 3 ตัวอย่างและทำการเปรียบเทียบผลจากการทดสอบของ ทวีศักดิ์ โสภณธานาพร (2558)

3.2 รายละเอียดรอยต่อคาน-เสา

3.2.1 ตัวอย่างคาน-เสา (CJ-1)

คือรอยต่อคาน-เสา ที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน (CJ-1) ใช้เหล็กเสริมบนเท่ากับ 5-DB12 เหล็กเสริมล่างเท่ากับ 2-DB12 และเหล็กปลอกเท่ากับ 1-RB9@75 มม. แสดงดังภาพที่ 3.1 คานขนาด 175*350 มม. และเสามีขนาด 200*200 มม.

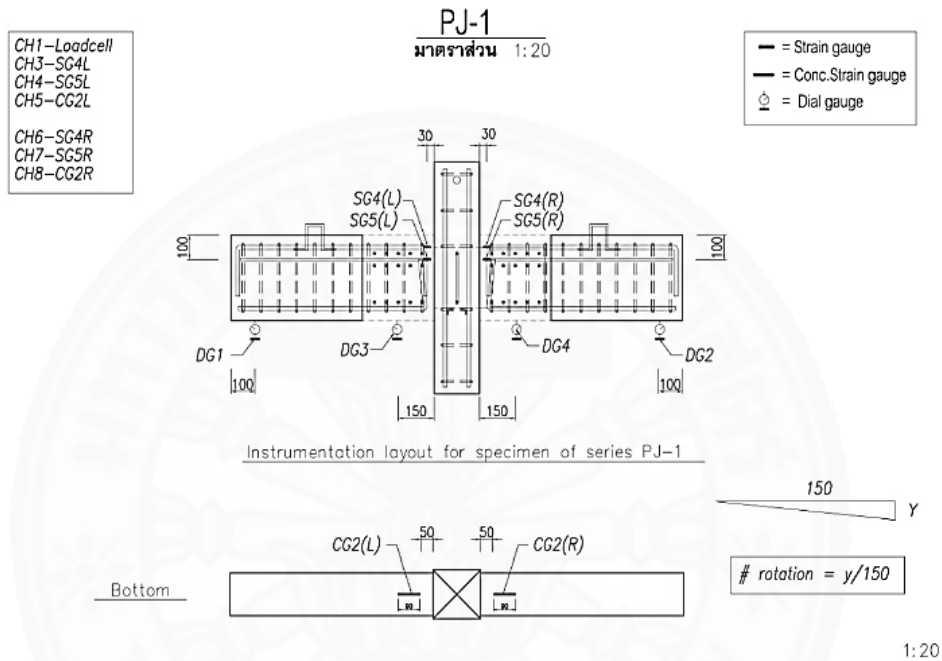


1:20

ภาพที่ 3.1 รอยต่อคาน-เสา หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน (CJ-1)

3.2.2 ตัวอย่างคาน-เสา (PJ-1)

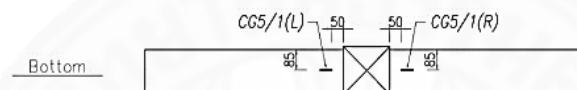
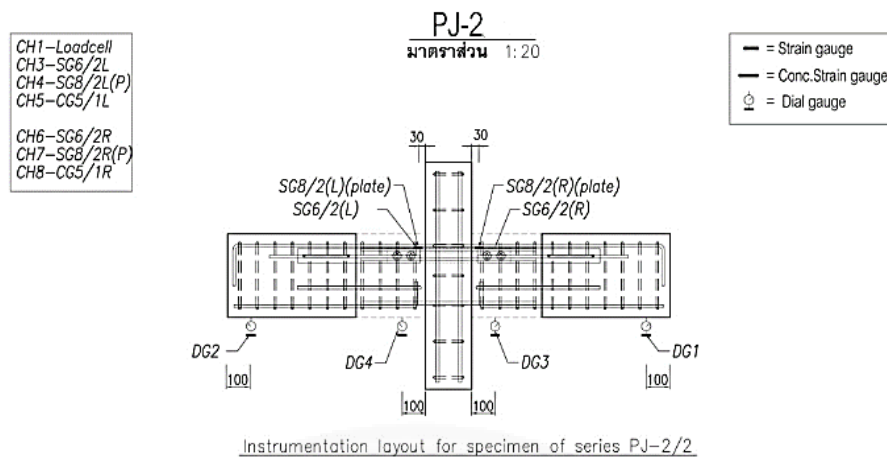
รอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป (PJ-1) มีลักษณะฝังแผ่นเพลทเหล็กขนาด 250 x 750 มม. หนา 12 มม. ไว้ที่เสาคอนกรีต โดยทำการยื่นปลายออกทั้ง 2 ข้าง ยาวข้างละเท่ากันแล้วทำการเทคอนกรีตห่อหุ้มเพื่อเชื่อมต่อมีรายละเอียดดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 รอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป (PJ-1)

3.2.3 ตัวอย่างคาน-เสา (PJ-2)

รอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป (PJ-2) แสดงดังภาพที่ 3.3 ที่รอยต่อคาน-เสา ใช้ลักษณะการต่อทาบเหล็กเสริมบนเท่ากับ 4-DB12 และทาบแผ่นเหล็กขนาด 9 x 60 มม. และยึดด้วยสลักเกลียวขนาด 2-M16(8.8) ที่แผ่นเหล็กแล้วทำการเทคอนกรีตห่อหุ้มเพื่อเชื่อมต่อ



1:20

ภาพที่ 3.3 รอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป (PJ-2)

3.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีที่น่าเชื่อถือที่สุดในการประเมินผลหรือวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างนั้นคือการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่เนื่องจากการทำการทดลองนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน ดังนั้นจึงมีกระบวนการหรือวิธีการอื่นๆ เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของคอนกรีตรวมไปถึงผลกระทบของรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงดึงได้ในวิธีการนั้นคือวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) ซึ่งใช้เวลาและค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต่างก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นในหลายปีที่ผ่านมา หนึ่งในนั้นคือโปรแกรม ABAQUS ซึ่งได้ใช้ในงานวิจัยนี้

โปรแกรม ABAQUS คือโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและวัสดุต่างๆ ภายใต้แรงกระทำภายนอก โปรแกรมนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแรงกระทำแบบสถิตและแบบไดนามิกอีกทั้งยังสามารถจำลองรูปทรงได้ทั้ง 2D และ 3D รวมไปถึงการเชื่อมต่อระหว่างวัสดุที่ต่างกันไป โปรแกรม ABAQUS เป็นหนึ่งในโปรแกรมที่น่าเชื่อถือที่สุดโปรแกรมหนึ่งซึ่งโปรแกรมนี้ถูกใช้ในอุตสาหกรรมการบิน การผลิตรถยนต์รวมถึงตามสถาบันต่างๆ เช่น มหาวิทยาลัย สถาบันวิจัย เป็นต้น โปรแกรม ABAQUS ถูกพัฒนาขึ้น โดย Hibbitt, Karlsson และ Sorensen, Inc. (HKS)

3.3.1 Concrete Material Model ใน ABAQUS

โปรแกรม ABAQUS มีรูปแบบการวิเคราะห์คอนกรีตด้วยกัน 3 แบบคือ Concrete Smearred Cracking, Concrete Damaged Plasticity และแบบ Brittle Cracking ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบ Concrete Damaged Plasticity เนื่องจากสามารถใช้ได้ในทุกโครงสร้างและทุกๆ แรงกระทำไม่ว่าจะเป็นแรงกระทำแบบสถิตหรือแบบไดนามิก

3.3.1.1 Tension Stiffening Relationship

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายใต้แรงดึงของคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 3.4 ซึ่งการใส่ค่าความสัมพันธ์นี้ในโปรแกรม ABAQUS นั้นต้องทราบค่า Young's Modulus (E_0), ความเค้นดึง (σ_t), Cracking Strain (ϵ_t^{ck}) ซึ่งจะต้องแปลงค่าจากความเครียดเดิมเป็น Cracking Strain (ϵ_t^{ck}) เพื่อที่นำไปใส่ในโปรแกรม ABAQUS โดยที่ Cracking Strain (ϵ_t^{ck}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\epsilon_t^{ck} = \epsilon_t - \epsilon_{ot}^{el} \quad (3.1)$$

โดยที่ $\epsilon_{ot}^{el} = \sigma_t/E_0$

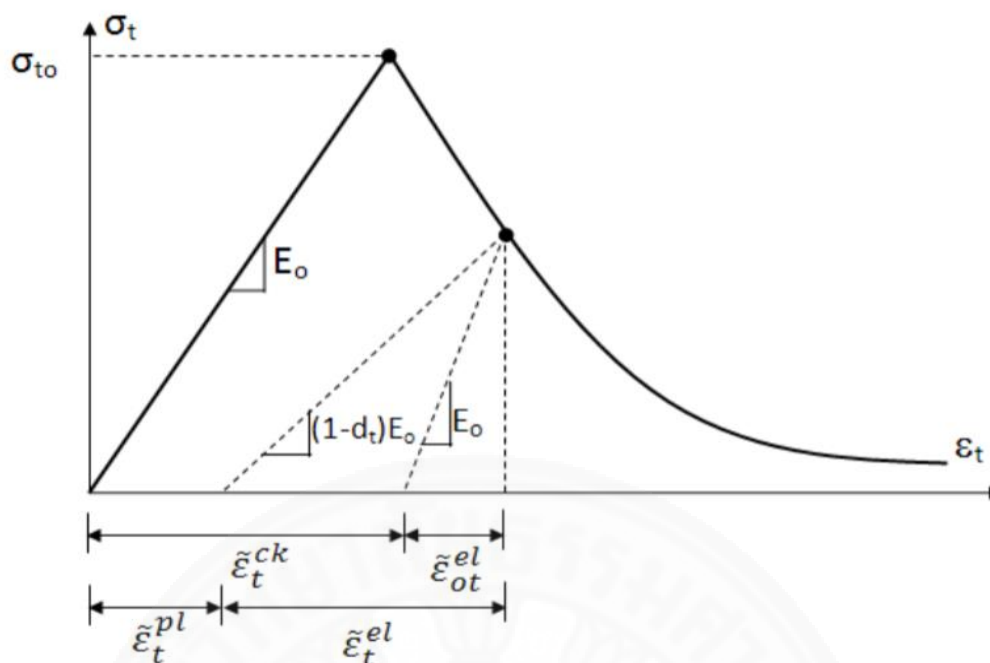
ϵ_t^{ck} คือ Cracking Strain

ϵ_t คือ ค่าความเครียด ณ จุดใดๆ

ϵ_{ot}^{el} คือ ค่าความเครียดอีลาสติก

σ_t คือ ค่าความเค้น ณ จุดใดๆ

E_0 คือ ค่า Young's Modulus



ภาพที่ 3.4 Terms of Tension Stiffening Model (ABAQUS Manual, 2008)

3.3.1.2 Compressive Stress-Strain Relationship

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดกับความเครียดของคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 3.5 ควรทราบค่าความเค้นอัด (σ_c), Inelastic Strain (ϵ_c^{in}) ซึ่งในการใส่ค่าของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดนั้นจะต้องทำการแปลงค่าจากความเครียดเดิมเป็น Inelastic Strain (ϵ_c^{in}) เพื่อที่ในโปรแกรม ABAQUS โดยที่ Inelastic Strain (ϵ_c^{in}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\epsilon_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_{oc}^{el} \quad (3.2)$$

โดยที่ $\epsilon_{oc}^{el} = \sigma_c / E_0$

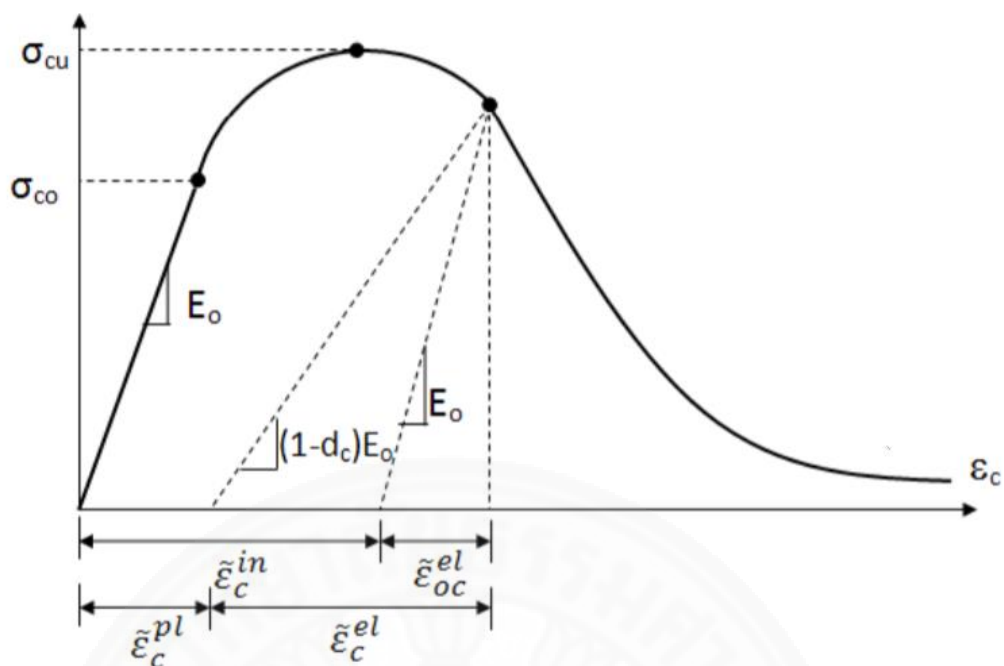
ϵ_c^{in} คือ ค่าความเครียดอินเอลาสติก

ϵ_c คือ ค่าความเครียด ณ จุดใด

ϵ_{oc}^{el} คือ ค่าความเครียดอีลาสติก

σ_c คือ ค่าความเค้น ณ จุดใดๆ

E_0 คือ ค่า Young's Modulus

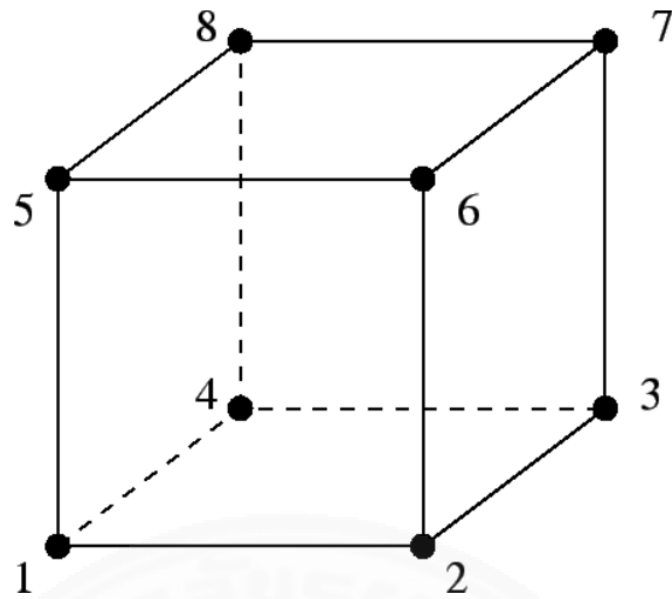


ภาพที่ 3.5 Terms of Compressive Model (ABAQUS Manual, 2008)

3.3.2 ชนิดของเอลิเมนต์

3.3.2.1 Solid Element C3D8

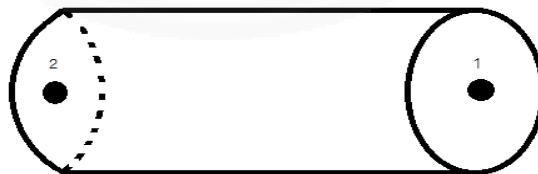
ในการสร้างแบบจำลองคอนกรีตด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสร้างแบบจำลองเป็น 3 มิติ โดยใช้เอลิเมนต์เป็นแบบจำลองแทนส่วนของคอนกรีตด้วยเอลิเมนต์ชนิดเอลิเมนต์ C3D8 แสดงดังภาพที่ 3.6 มีลักษณะทรงลูกบาศก์ซึ่งจะประกอบด้วยโหนดทั้งหมด 8 โหนด และในแต่ละโหนดจะมีตัวแปรที่ใช้อธิบายการเสียรูป (Degrees of Freedom) 3 ตัวแปร คือทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน X Y และ Z เอลิเมนต์นี้เป็นเอลิเมนต์ปริมาตรทั่วไปในโปรแกรม ABAQUS เอลิเมนต์ชนิดนี้สามารถใช้ได้ทั้งวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมือนกันหรือวัสดุที่มีความแตกต่างกันในแต่ละชั้นได้ และสามารถวิเคราะห์ความเค้น การเสียรูป ทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น โดยทั่วไปแล้วการแบ่งเอลิเมนต์เป็นสี่เหลี่ยมจะให้ผลเฉลยที่ดีกว่าการแบ่งเอลิเมนต์เป็นสามเหลี่ยม



ภาพที่ 3.6 Solid Element C3D8 (ABAQUS, 2008)

3.3.2.2 3-D Truss Element T3D2

ในการสร้างแบบจำลองของเหล็กเสริมนั้นจะสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้เอลิเมนต์เป็นแบบจำลองแทนส่วนของเหล็กเสริมด้วยเอลิเมนต์ T3D2 แสดงดังภาพที่ 3.7 ประกอบไปด้วยโหนดทั้งหมด 2 โหนดและในแต่ละโหนดจะมีตัวแปรที่ใช้อธิบายการเสียรูป (Degrees of Freedom) 3 ตัวแปร คือทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน X Y และ Z และสามารถรับแรงได้เฉพาะในแนวแกน



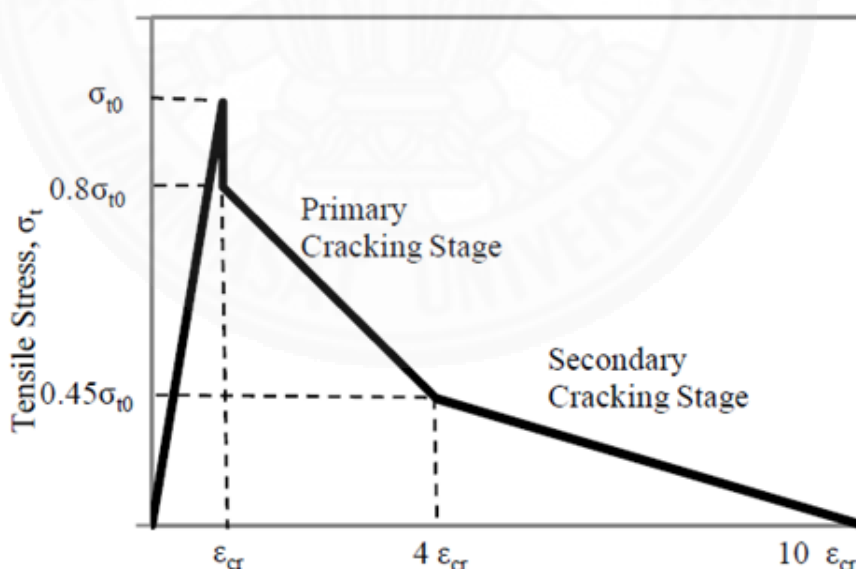
ภาพที่ 3.7 3-D Truss Element T3D2 (ABAQUS, 2008)

3.3.3 คุณสมบัติของคอนกรีต โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

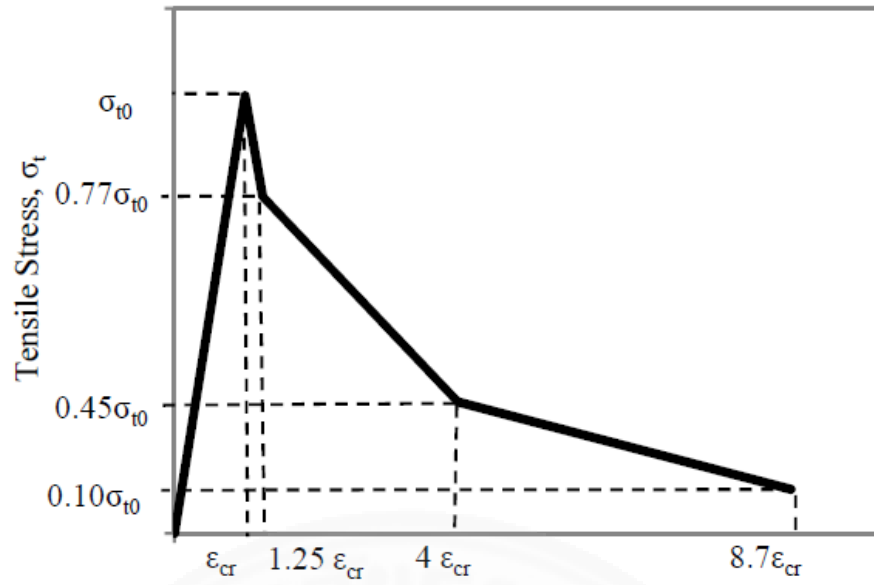
คอนกรีตมีคุณสมบัติสามารถรับแรงอัดได้ดีแต่สามารถรับแรงดึงได้ต่ำ โดยทั่วไปแล้วกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าประมาณประมาณ 10% ของกำลังรับแรงอัด แบบจำลองใช้คอนกรีตที่มีกำลังประลัย 210 ksc โดยมีค่า E_0 เท่ากับ 25246.8 MPa และ Poisson's Ratio เท่ากับ 0.2

3.3.3.1 พฤติกรรมการรับแรงดึงของคอนกรีต

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและความเครียดนั้นมียู่หลากหลายรูปแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงกับความเครียดที่ถูกพัฒนา โดย Noyal and Rasheed (2006) เนื่องจากสามารถใช้ได้ทั้งคอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตที่เสริมแรงด้วยวัสดุอื่นๆ รูปแบบนี้แสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกันในแบบจำลอง Tension Stiffening ที่จำเป็นสำหรับรูปแบบการแตกร้าวของคอนกรีตแบบ Concrete Damaged Plasticity ในโปรแกรม ABAQUS กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและความเครียดของ Noyal and Rasheed (2006) แสดงดังภาพที่ 3.8 และกราฟความสัมพันธ์ที่มีการปรับเปลี่ยนสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 3.9 ซึ่งเสนอ โดย Wahalathantri (2011) เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความผิดพลาดระหว่างการวิเคราะห์ในโปรแกรม ABAQUS



ภาพที่ 3.8 Tension Stiffening Model by Noyal and Rasheed's (2006)

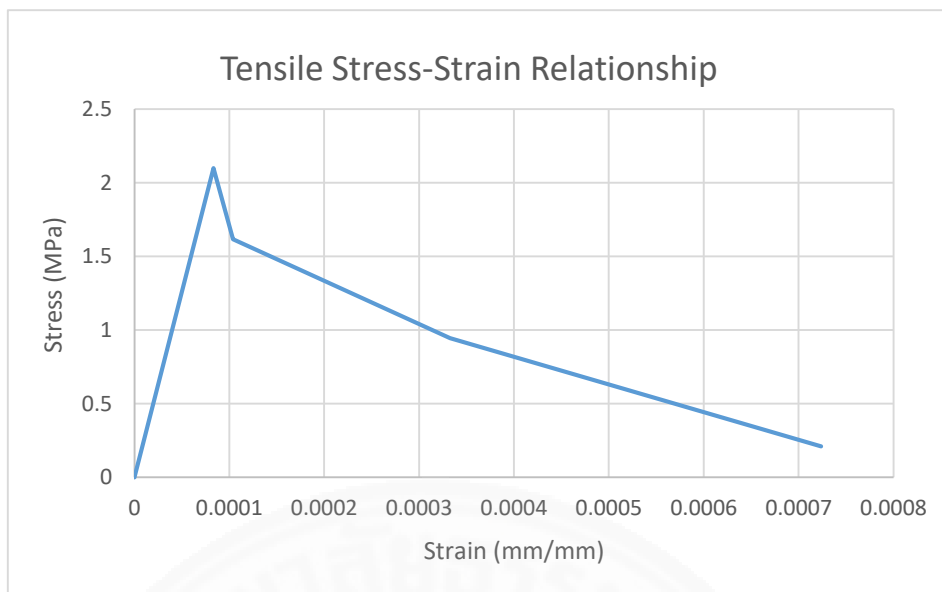


ภาพที่ 3.9 Tension Stiffening Model for ABAQUS by Wahalathantri (2011)

Point	Stress (MPa)	Strain
1	0	0
2	2.1	8.32E-05
3	1.617	1.04E-04
4	0.945	3.33E-04
5	0.21	7.24E-04

ตารางที่ 3.1

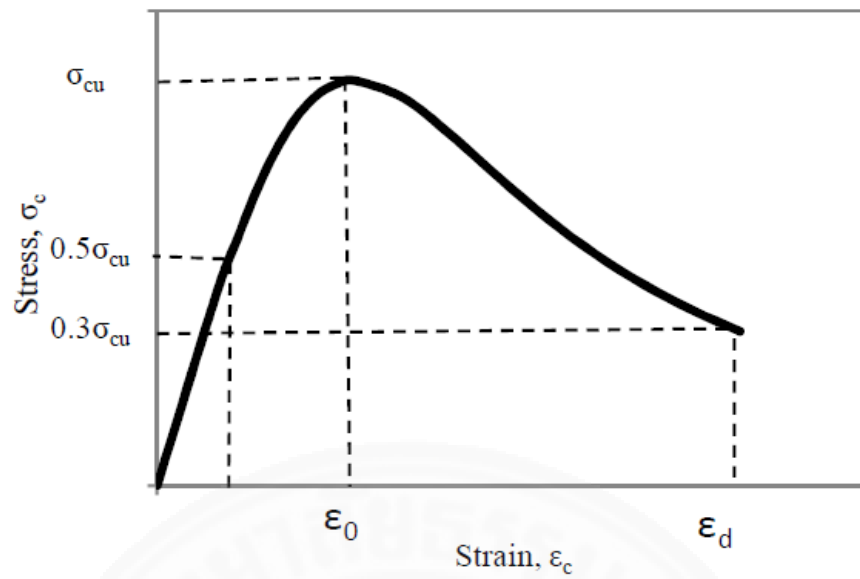
ตารางแสดงความเค้นดิ่งกับความเครียดตามแนวแกนของคอนกรีต



ภาพที่ 3.10 Tension Stiffening Model for ABAQUS

3.3.3.2 พฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีต

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายใต้แรงอัดที่ใช้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดลองนั้นเสนอ โดย Hsu and Hsu (1994) ซึ่งต้องการค่าความเค้นอัดสูงสุด (Maximum Compressive Strength) ในการวาดกราฟความสัมพันธ์ อีกทั้งยังสามารถรองรับคอนกรีตที่มีความเค้นอัด (Maximum Compressive Strength) สูงถึง 62 MPa สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังสูงเกินจากนี้ควรจะต้องศึกษาจากบทความเดิมของ Hsu and Hsu (1994, p.308) ภาพที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ซึ่งตาม Hooke's Law นิยามให้ช่วงอีลาสติกประมาณ 50% ของความเค้นอัดสูงสุด (Ultimate Compressive Strength) ส่วนช่วง Inelastic สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 ซึ่งเสนอโดย Hsu and Hsu (1994)



ภาพที่ 3.11 Compressive Stress-Strain Relationship for ABAQUS (Wahalathantri, 2011)

$$\sigma_c = \left(\frac{\beta \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^\beta} \right) \sigma_{cu} \quad (3.3)$$

$$\beta = \frac{1}{1 - [\sigma_{cu}/(\epsilon_0 E_0)]} \quad (3.4)$$

$$\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-5} \sigma_{cu} + 2.114 \times 10^{-3} \quad (3.5)$$

$$E_0 = 1.2431 \times 10^2 \sigma_{cu} + 3.28312 \times 10^3 \quad (3.6)$$

โดยที่ σ_c คือ ค่าความเค้น ณ จุดใดๆ

ϵ_c คือ ค่าความเครียด ณ จุดใดๆ

σ_{cu} คือ ความเค้นอัดสูงสุด

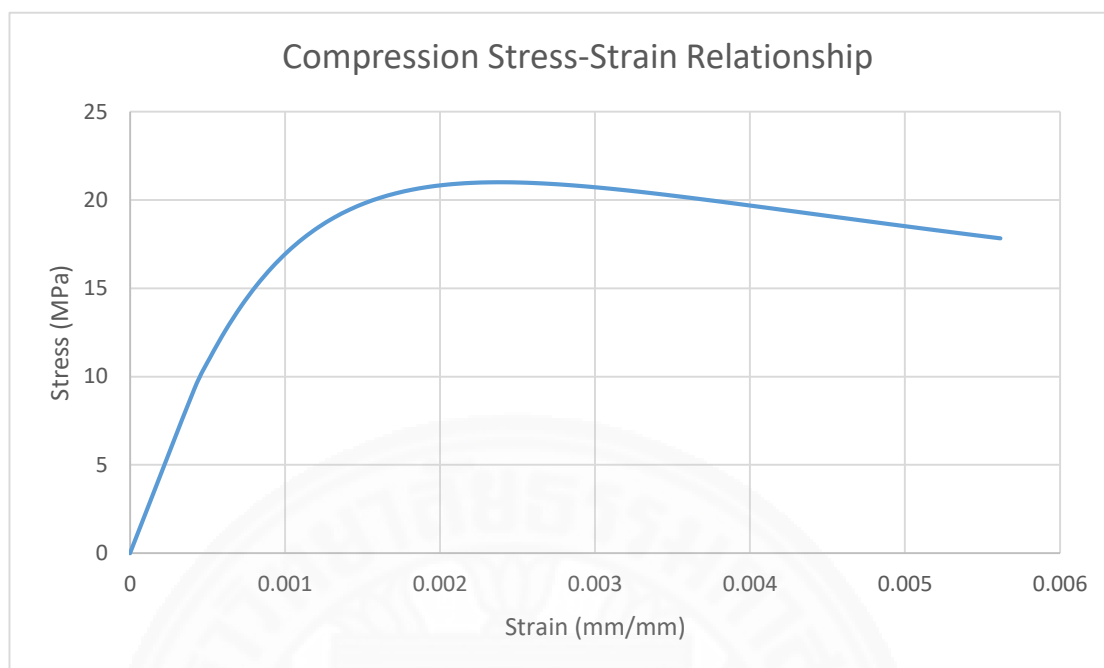
E_0 คือ ค่า Young's Modulus

สำหรับ ϵ_d สามารถคำนวณได้ โดยใช้ค่า $0.85\epsilon_c$ ซึ่งสมการข้างต้นอยู่ในหน่วย kip/in² (1 MPa = 0.145037743 kip/in²)

Point	Stress (MPa)	Strain	Point	Stress (MPa)	Strain
1	0.00E+00	0.00E+00	24	20.62048	3.12E-03
2	10.50000	4.16E-04	25	20.52946	3.22E-03
3	12.60955	6.16E-04	26	20.43296	3.32E-03
4	13.96889	7.16E-04	27	20.33183	3.42E-03
5	15.15348	8.16E-04	28	20.22684	3.52E-03
6	16.17875	9.16E-04	29	20.11866	3.62E-03
7	17.06048	1.02E-03	30	20.00788	3.72E-03
8	17.81403	1.12E-03	31	19.895	3.82E-03
9	18.45393	1.22E-03	32	19.78048	3.92E-03
10	18.99357	1.32E-03	33	19.66471	4.02E-03
11	19.44512	1.42E-03	34	19.54802	4.12E-03
12	19.81952	1.52E-03	35	19.43073	4.22E-03
13	20.12651	1.62E-03	36	19.31309	4.32E-03
14	20.37472	1.72E-03	37	19.19533	4.42E-03
15	20.57174	1.82E-03	38	19.07765	4.52E-03
16	20.72423	1.92E-03	39	18.96023	4.62E-03
17	20.83803	2.02E-03	40	18.84322	4.72E-03
18	20.91824	2.12E-03	41	18.72675	4.82E-03
19	20.96931	2.22E-03	42	18.61093	4.92E-03
20	20.99512	2.32E-03	43	18.49587	5.02E-03
21	20.99907	2.42E-03	44	18.38164	5.12E-03
22	20.98411	2.52E-03	45	18.26832	5.22E-03
23	20.9528	2.62E-03	46	17.82522	5.62E-03

ตารางที่ 3.2

Compressive Stress กับ Strain ตามแนวแกนของคอนกรีต (Compression Behavior of Concrete)



ภาพที่ 3.12 Compression Stress-Strain Relationship for ABAQUS

3.3.3.3 ตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องสำหรับ Concrete Damaged Plasticity

Dilation Angle (ψ)	Flow Potential Accentricity (ϵ)	Compression Plastic Strain Ratio (f_{b0}/f_{c0})	Invariant Stress Ratio (K_C)	Viscosity (μ)
31°	0.1	1.16	0.6667	0

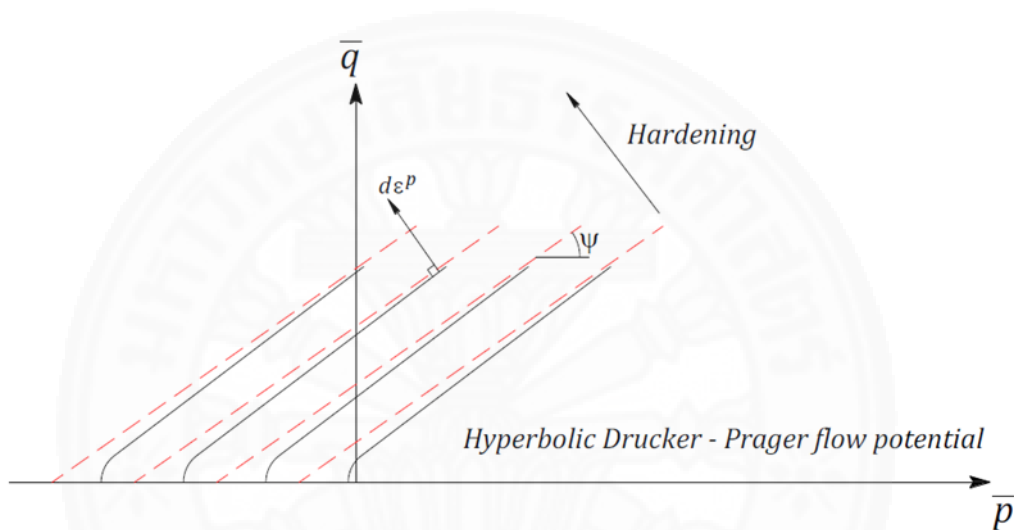
ตารางที่ 3.3

ตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องสำหรับ Concrete Damaged Plasticity

หมายเหตุ จาก (Chiruta George,2015)

ความหมายและรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ

1. Dilation Angle (Ψ) คือ มุมด้านกว้างในระนาบ p-q แสดงดังภาพที่ 3.13 โดยค่าของมุมด้านกว้าง (Ψ) จะแปรผันตามกันกับกำลังของคอนกรีตกล่าวคือมุมด้านกว้างจะเพิ่มขึ้นตามกำลังของคอนกรีต หรือมุมด้านกว้างจะลดลงตามกำลังของคอนกรีตซึ่งค่ามุมกว้างสูงสุดที่เป็นไปได้คือ 56° และมีค่าน้อยสุดที่ใกล้ 0° แต่ในสำหรับคอนกรีตกำลังทั่วไปสามารถประมาณค่าของมุมกว้างเท่ากับ 30° ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้

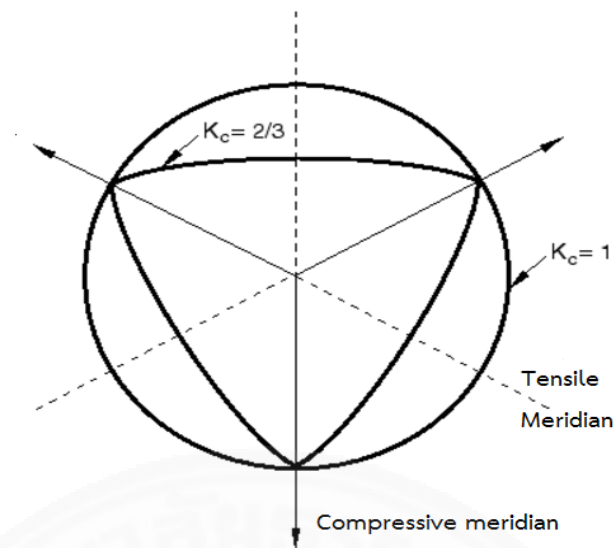


ภาพที่ 3.13 Hyperbolic Plastic Flow Rule (Rasoul Nilforoush Hamedani, 2012)

2. Flow Potential Eccentricity (ϵ) คือ ศักยภาพการไหลที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงในระนาบความเค้นเฉือนซึ่งเป็นความเยื้องศูนย์กลางของเส้นเมริเดียนที่มีแนวโน้มเข้าใกล้ศูนย์ ค่ามาตรฐานในโปรแกรม ABAQUS เท่ากับ 0.1

3. Compression Plastic Strain Ratio (f_{b0}/f_{c0}) คือ ตัวแปรที่เป็นอัตราส่วนระหว่าง Initial Equibiaxial Compressive Yield Stress กับ Initial Uniaxial Compressive Yield Stress ซึ่งค่ามาตรฐานในโปรแกรม ABAQUS เท่ากับ 1.16

4. Invariant Stress Ratio (K_c) คือ อัตราส่วน Stress Invariant ลำดับที่สองของ Tensile Meridian กับ Compressive meridian แสดงดังภาพที่ 3.14 สำหรับในคอนกรีตจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1 ซึ่งค่ามาตรฐานในโปรแกรม ABAQUS เท่ากับ 2/3



ภาพที่ 3.14 Yield Surfaces in the Deviatoric Plane (ABAQUS Manual, 2008)

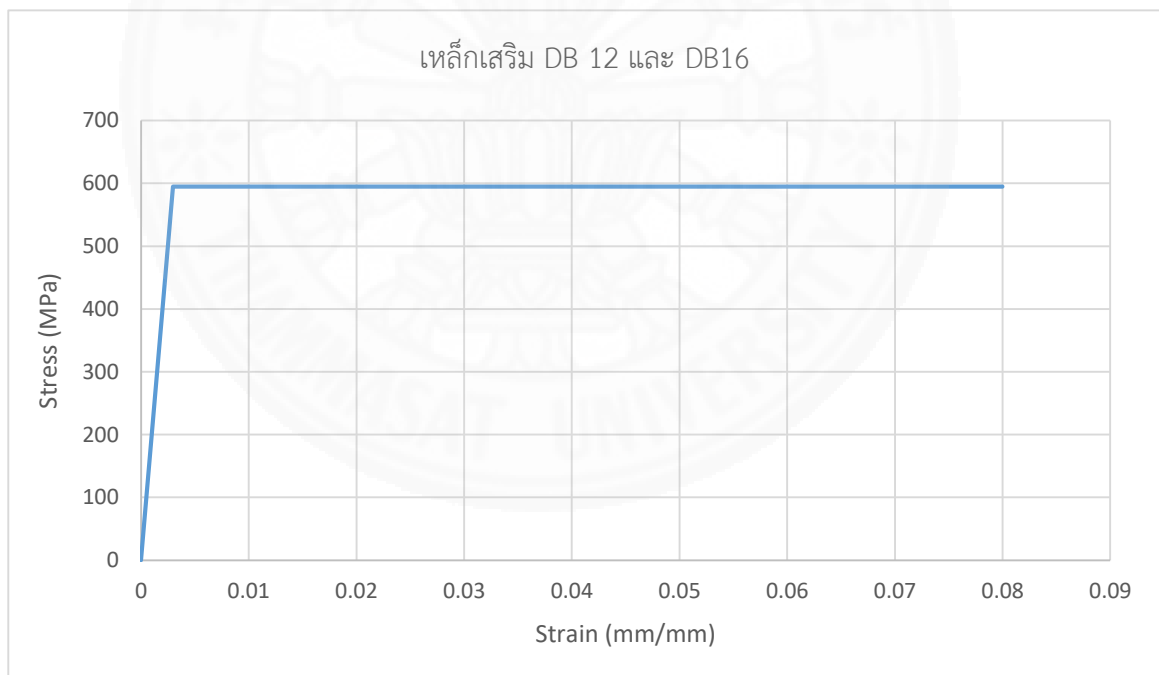
5. Viscosity (μ) คือ ตัวแปรเกี่ยวกับความเหนียว ซึ่งควรจะมีค่าน้อยๆ เข้าใกล้ 0 หรือเท่ากับ 0

3.3.4 คุณสมบัติของเหล็กเสริม โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วัสดุ	Diameter (mm)	ชั้นคุณภาพ	กำลังครากเฉื่อย (f_y) MPa	กำลังประลัยเฉื่อย (f_u) MPa	โมดูลัสยืดหยุ่น MPa	อัตราส่วนปัวซอง (ν)
เหล็กเสริม	12 , 16	SD40	595	760	200000	0.3

ตารางที่ 3.4

ตารางคุณสมบัติของเหล็กเสริม



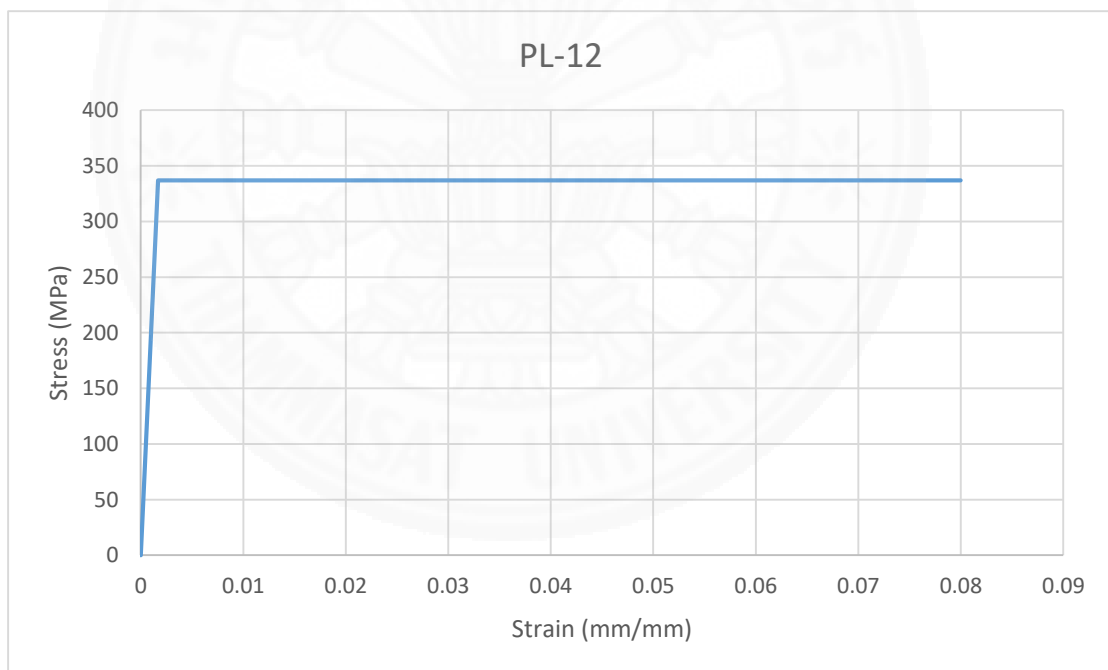
ภาพที่ 3.15 Stress-Strain Relationship for Reinforcement

3.3.5 คุณสมบัติของแผ่นเหล็ก PL-12(SM490YA)

วัสดุ	ความหนา (mm)	ชั้นคุณภาพ	กำลังคราก เฉลี่ย (f_y) MPa	โมดูลัส ยืดหยุ่น MPa	อัตราส่วนปลิว ของ (v)
PL-12	12	SM490YA	337	200000	0.3

ตารางที่ 3.5

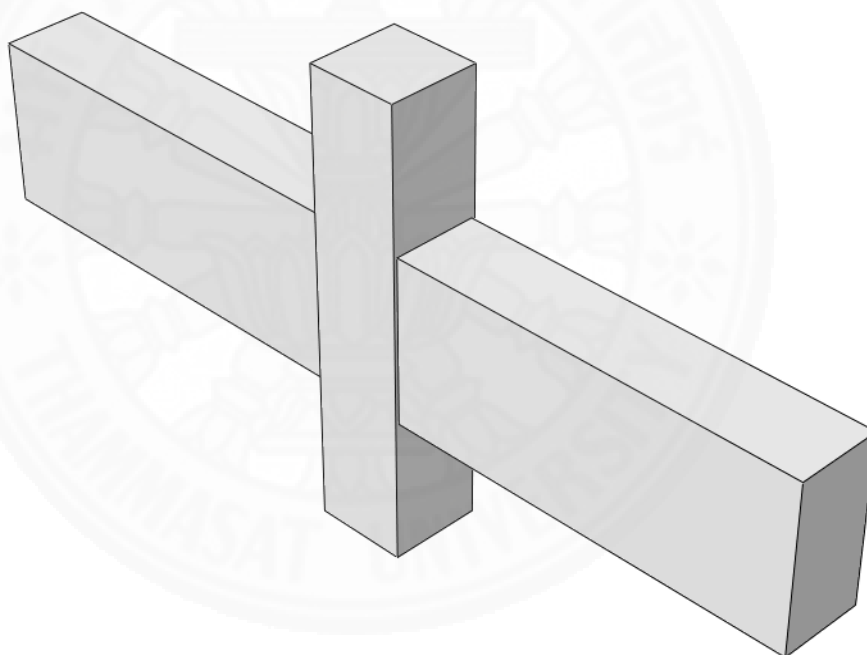
ตารางคุณสมบัติของแผ่นเหล็ก PL-12



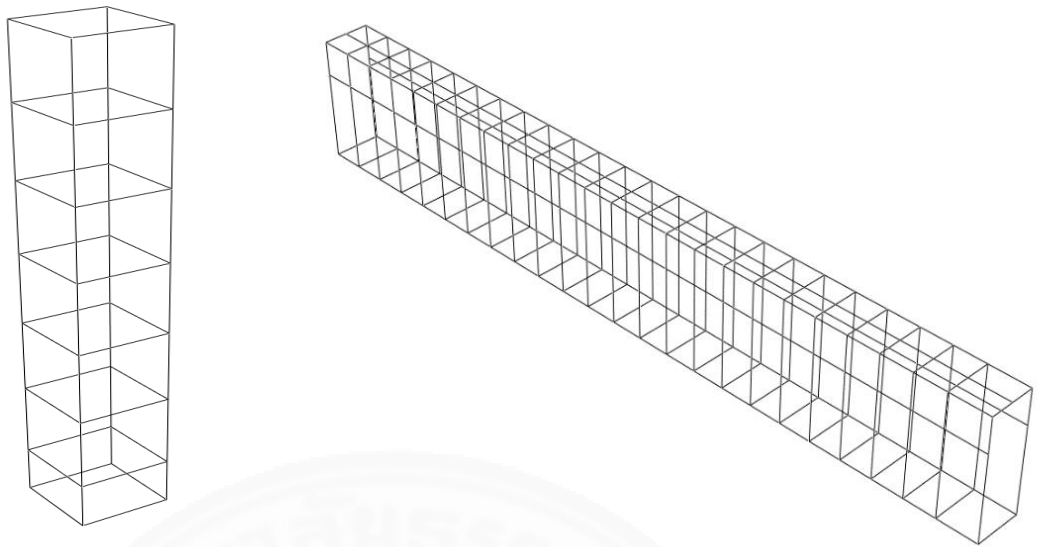
ภาพที่ 3.16 Stress-Strain Relationship for PL-12

3.4 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ CJ-1

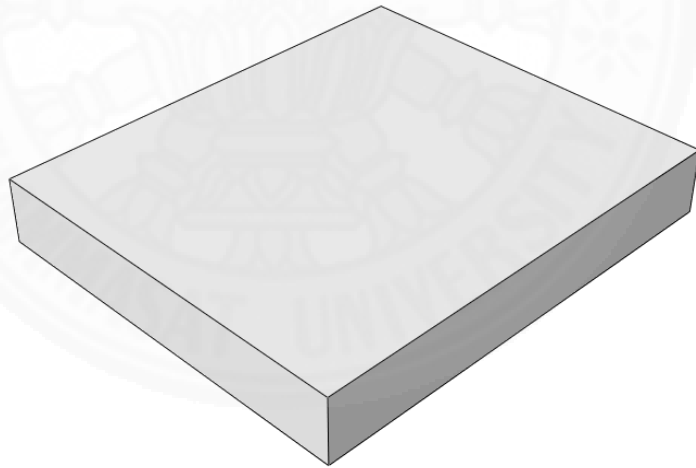
การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อคาน-เสา CJ-1 นั้นเริ่ม โดยการสร้าง ส่วนต่างๆ คือ ส่วนที่เป็นคอนกรีตคานและเสา แผ่นเหล็กที่รับแรงกด และเหล็กเสริมขนาดต่างๆ ภาพที่ 3.17 คือภาพส่วนประกอบคอนกรีตคาน-เสา ที่มีขนาดเท่ากับของจริง โดยคานจะมีขนาดกว้าง 175 เซนติเมตร ลึก 350 เซนติเมตรและคานมีความยาว 1.9 เมตร ส่วนเสามีด้านยาวและด้านกว้าง ขนาด 200 เซนติเมตร ภาพที่ 3.18 คือภาพส่วนประกอบของเหล็กเสริมของคานและเสาจะ ประกอบด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และ 16 มิลลิเมตร เหล็กเส้นกลม ขนาด 9 มิลลิเมตร สำหรับเหล็กปลอก และภาพที่ 3.19 คือส่วนประกอบที่เป็นแผ่นเหล็กรับแรงกด



ภาพที่ 3.17 Part Beam-Column

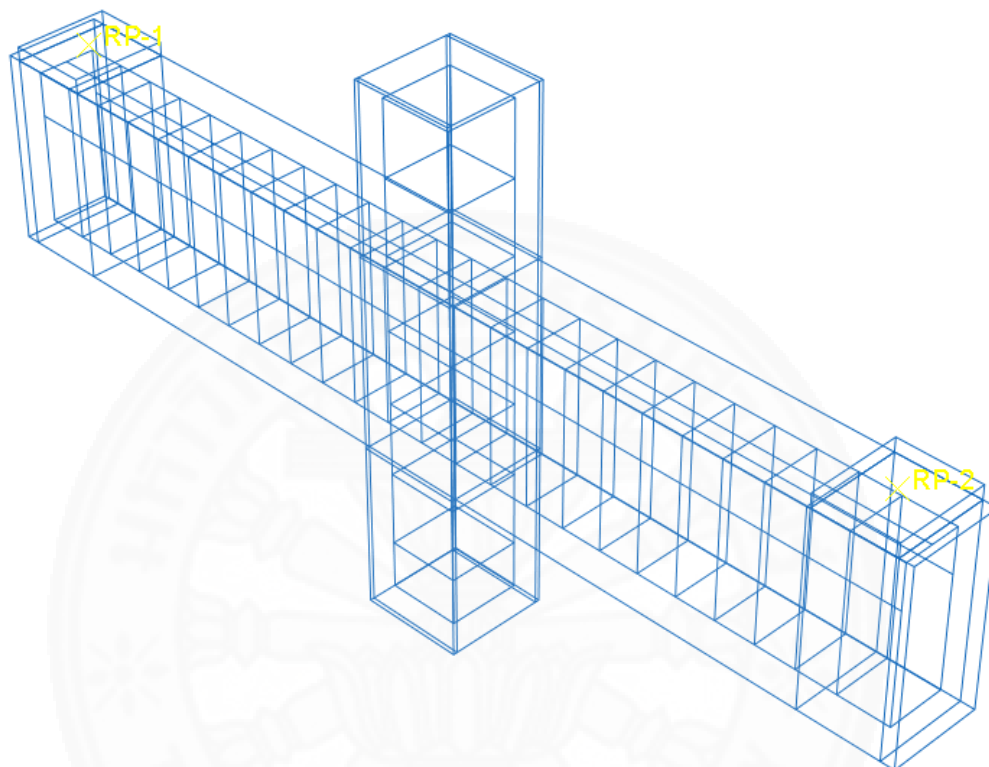


ภาพที่ 3.18 Part ของเหล็กเสริม CJ-1



ภาพที่ 3.19 Part ของแผ่นเหล็กรับแรงกด

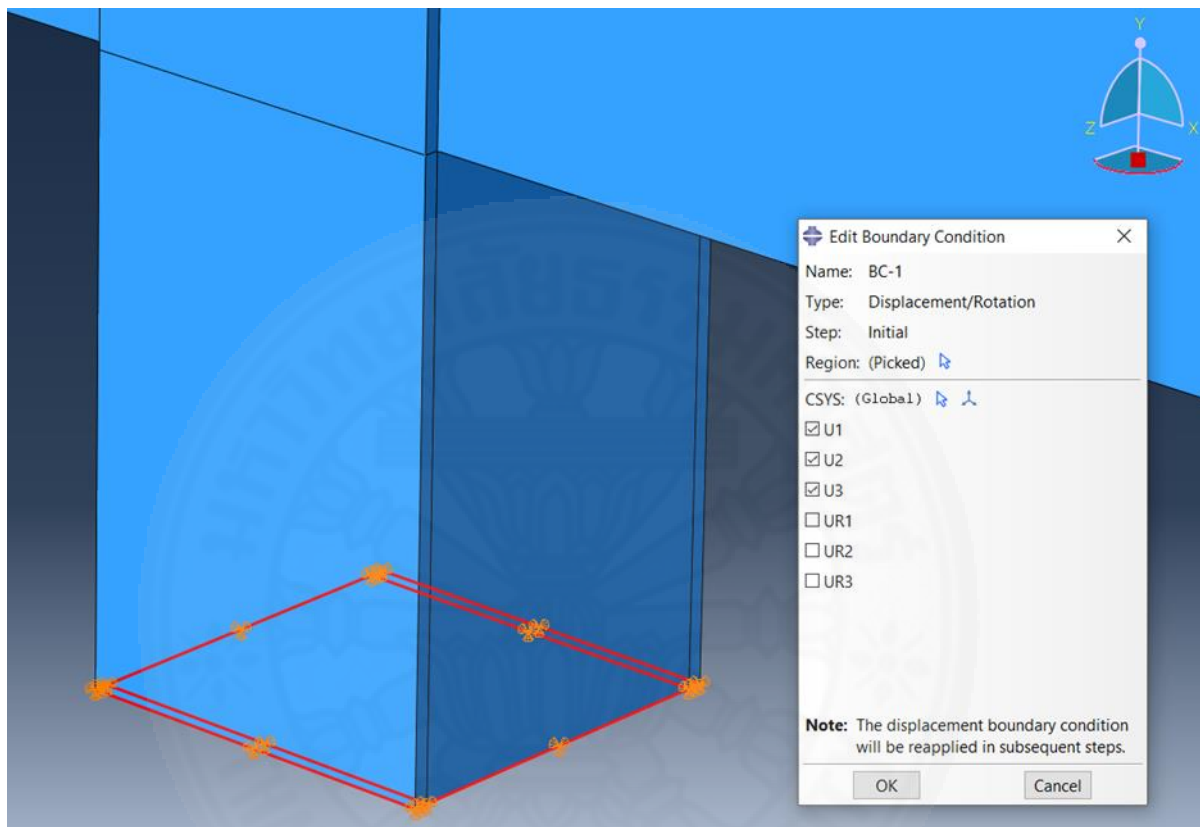
จากนั้นกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับส่วนประกอบต่างๆ โดยมีรายละเอียดของคุณสมบัติวัสดุ ดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อกำหนดคุณสมบัติให้กับชิ้นส่วนต่างๆ แล้วจึงนำแต่ละส่วนมาประกอบเข้าด้วยกัน ดังแสดงดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 Assembly ของรอยต่อคาน-เสา CJ-1

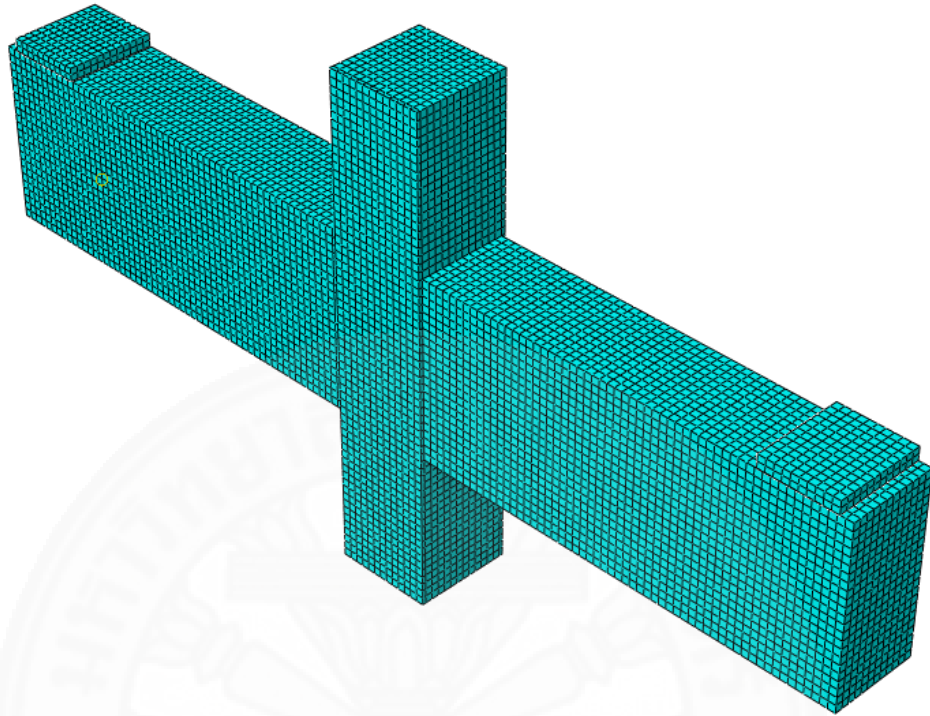
หลังจากประกอบส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันแล้วจะต้องกำหนดการเชื่อมต่อในส่วนต่างๆ ด้วย กล่าวคือ การเชื่อมต่อของเหล็กเสริมกับคอนกรีตนั้นจะกำหนดให้มีการยึดเหนี่ยวแบบสมบูรณ โดยให้เหล็กเสริมกับคอนกรีตเชื่อมต่อแบบ Embedded Region โดยให้คอนกรีตเป็นขอบเขตหลักส่วนเหล็กเสริมเป็นของเขตรอง และสำหรับการเชื่อมต่อของแผ่นเหล็กรับแรงกดกับคอนกรีตจะจำลองให้มีคุณสมบัติคล้ายกับของจริงมากที่สุด ซึ่งจะใช้การเชื่อมต่อในลักษณะแผ่นเหล็กวางอยู่บนคอนกรีต (Interaction) ซึ่งมีแรงต้านเป็นแรงเสียดทาน ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับแบบจำลองต่างๆ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองนี้จำลองให้มีลักษณะใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุดเนื่องจากแบบจริงนั้นจะไม่มีรอยยึดที่ปลายเสาด้านบน ในแบบจำลองจึงกำหนดเงื่อนไขขอบเขต โดยที่จะยึดเหมือนกับของจริงซึ่งยึดเพียงหนึ่งด้านที่ปลายเสาด้านล่าง และกำหนดให้มีการ

ยึดรั้งแบบยึดหมุน โดยที่กำหนดไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x ($U_1=0$) y ($U_2=0$) และ z ($U_3=0$) แสดงดังภาพที่ 3.21 ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตนี้จะกระจายไปยังโหนดต่างๆ ของพื้นผิวที่กำหนดไว้ โดยอัตโนมัติ

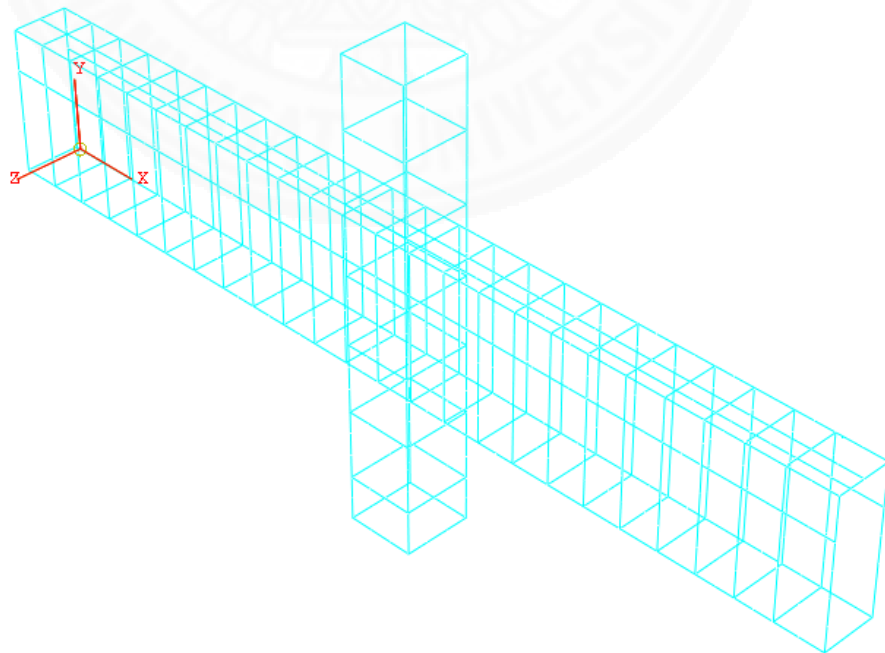


ภาพที่ 3.21 เงื่อนไขขอบเขตที่ปลายเสาด้านล่าง

ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการกำหนดชนิดของเอลิเมนต์และแบ่งเอลิเมนต์ สำหรับเหล็กเสริมนั้นใช้เอลิเมนต์ T3D2 สำหรับคอนกรีตและแผ่นเหล็กรับแรงกดใช้เอลิเมนต์ C3D8 โดยมีรายละเอียดคุณสมบัติของชนิดเอลิเมนต์ต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น จากนั้นทำการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh) แสดงดังภาพที่ 3.22 และ 3.23 โดยสามารถแบ่งเอลิเมนต์ของเหล็กเสริมและคอนกรีตพร้อมกันได้ ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการสร้างแบบจำลอง



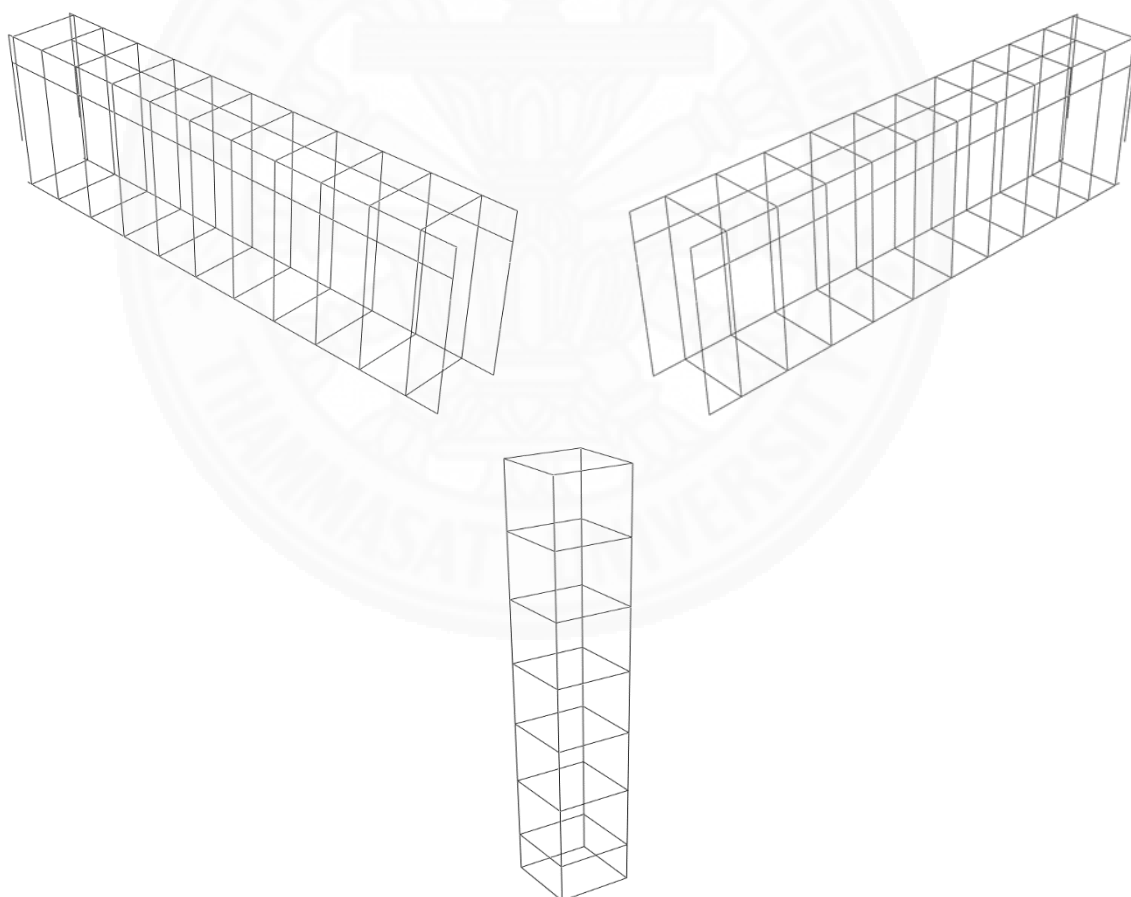
ภาพที่ 3.22 การแบ่งเอลิเมนต์ของคอนกรีต



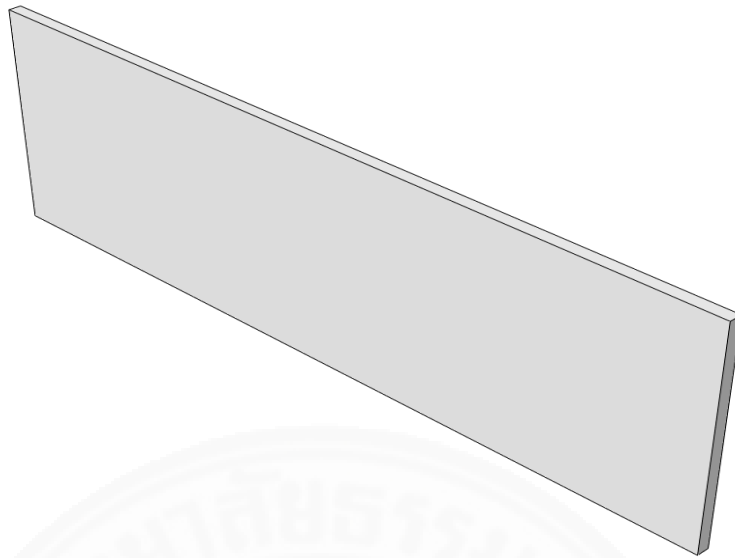
ภาพที่ 3.23 การแบ่งเอลิเมนต์ของเหล็กเสริม

3.5 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ PJ-1

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อคาน-เสา PJ-1 ซึ่งเป็นรอยต่อคาน-เสาสำเร็จรูป เริ่ม โดยการสร้างส่วนต่างๆ คือ ส่วนที่เป็นคอนกรีตคานและเสา แผ่นเหล็กที่รับแรงกดเหล็กเสริมขนาดต่างๆ และแผ่นเหล็ก PL-12 ความหนา 12 มิลลิเมตร สำหรับส่วนประกอบคอนกรีตคาน-เสา ที่มีขนาดเท่ากับของจริงเช่นเดียวกับรอยต่อคาน-เสา CJ-1 ภาพที่ 3.24 คือภาพส่วนประกอบของเหล็กเสริมของคานและเสาจะประกอบด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และ 16 มิลลิเมตร เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตรสำหรับเหล็กปลอก และภาพที่ 3.25 คือส่วนประกอบของแผ่นเหล็ก PL-12 สำหรับส่วนประกอบของแผ่นเหล็กรับแรงกดมีลักษณะแบบเดียวกันกับของแบบจำลอง CJ-1

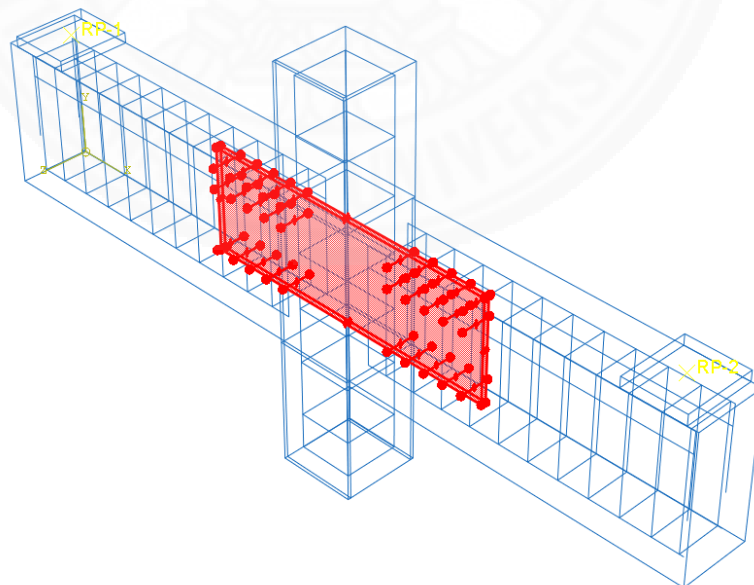


ภาพที่ 3.24 Part ของเหล็กเสริม PJ-1



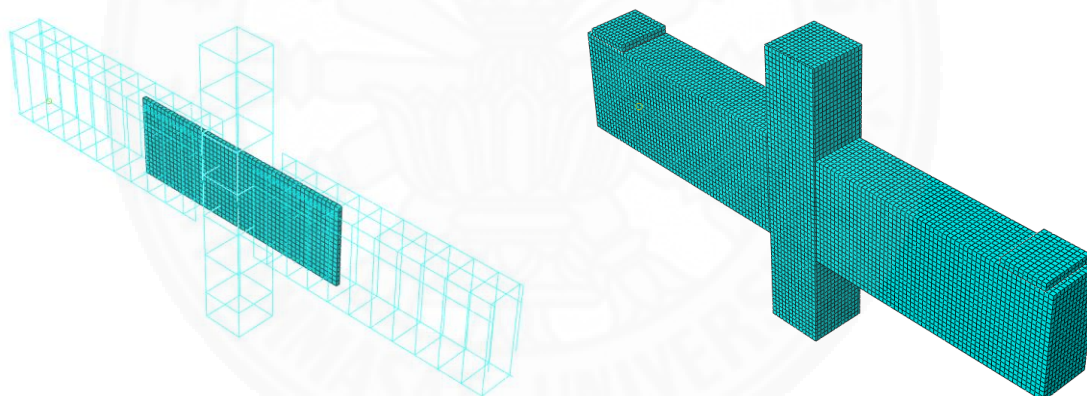
ภาพที่ 3.25 Part ของแผ่นเหล็ก PL-12

จากนั้นกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับส่วนประกอบต่างๆ โดยมีรายละเอียดของคุณสมบัติวัสดุดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อกำหนดคุณสมบัติให้กับชิ้นส่วนต่างๆ แล้วจึงนำแต่ละส่วนมาประกอบเข้าด้วยกัน ดังแสดงดังภาพที่ 3.26



ภาพที่ 3.26 Assembly ของรอยต่อคาน-เสา PJ-1

การกำหนดลักษณะการเชื่อมต่อในส่วนต่างๆ นั้นเหมือนกับแบบจำลอง CJ-1 กล่าวคือกำหนดให้เหล็กเสริมและแผ่นเหล็ก PL-12 เชื่อมต่อกับคอนกรีตแบบ Embedded Region โดยให้คอนกรีตเป็นขอบเขตหลักส่วนเหล็กเสริมเป็นของเขตรองและสำหรับการเชื่อมต่อของแผ่นเหล็กกับแรงกดกับคอนกรีตใช้การเชื่อมต่อในลักษณะแผ่นเหล็กวางอยู่บนคอนกรีต (Interaction) ซึ่งมีแรงต้านเป็นแรงเสียดทาน สำหรับเงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลอง PJ-1 นั้นยังคงกำหนดเหมือนกันกับแบบจำลอง CJ-1 ซึ่งยึดเพียงหนึ่งด้านที่ปลายเสาด้านล่างและกำหนดให้มีการยึดรั้งแบบยึดหมุน โดยที่กำหนดไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x ($U_1=0$) y ($U_2=0$) และ z ($U_3=0$) ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการกำหนดชนิดของเอลิเมนต์และแบ่งเอลิเมนต์ สำหรับเหล็กเสริมนั้นใช้เอลิเมนต์ T3D2 สำหรับคอนกรีตเหล็ก PL-12 และแผ่นเหล็กกับแรงกดใช้เอลิเมนต์ C3D8 โดยมีรายละเอียดคุณสมบัติของชนิดเอลิเมนต์ต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น จากนั้นทำการแบ่งเอลิเมนต์(Mesh)ของรอยต่อคาน-เสา PJ-1 แสดงดังภาพที่ 3.27 ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการสร้างแบบจำลอง

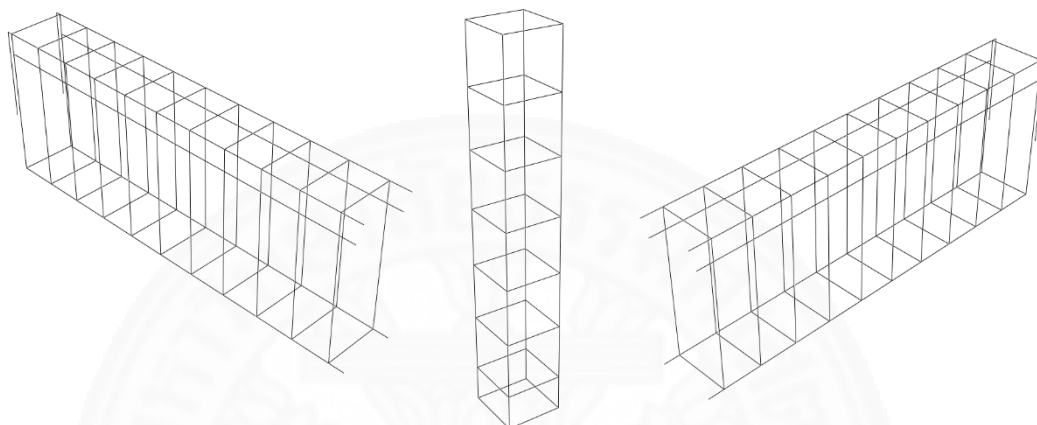


ภาพที่ 3.27 การแบ่งเอลิเมนต์ของรอยต่อคาน-เสา PJ-1

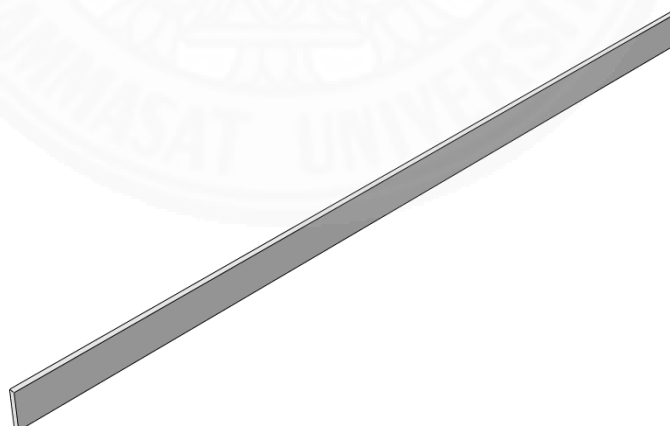
3.6 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ PJ-2

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อคาน-เสา PJ-2 ซึ่งเป็นรอยต่อคาน-เสาสำเร็จรูป เริ่ม โดยการสร้างส่วนประกอบต่างๆ คือ ส่วนที่เป็นคอนกรีตคานและเสา แผ่นเหล็กที่รับแรงกด เหล็กเสริมขนาดต่างๆ และแผ่นเหล็ก PL-9 สำหรับส่วนประกอบคอนกรีตคาน-เสา PJ-2 มีขนาดเท่ากับของจริงเช่นเดียวกับรอยต่อคาน-เสา CJ-1 ภาพที่ 3.28 คือภาพส่วนประกอบของเหล็ก

เสริมของคานและเสาจะประกอบด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และ 16 มิลลิเมตร เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร สำหรับเหล็กปลอก และภาพที่ 3.29 คือส่วนประกอบของแผ่นเหล็ก PL-9 ความหนา 9 มิลลิเมตร สำหรับส่วนประกอบของแผ่นเหล็กรับแรงกตมีลักษณะแบบเดียวกันกับของแบบจำลอง CJ-1

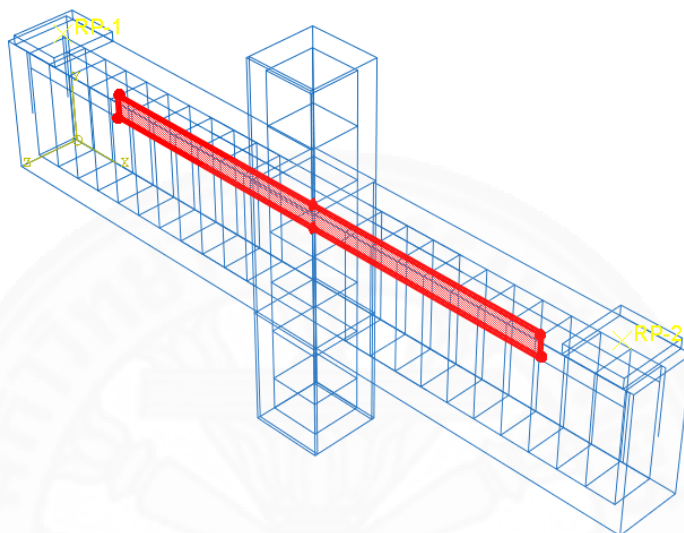


ภาพที่ 3.28 Part ของเหล็กเสริม PJ-2



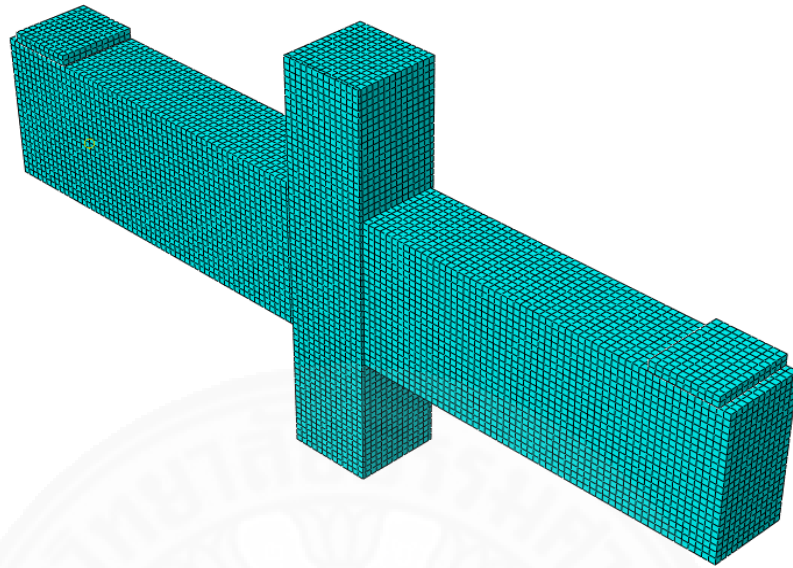
ภาพที่ 3.29 Part แผ่นเหล็ก PL-9

จากนั้นกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับส่วนประกอบต่างๆ โดยมีรายละเอียดของคุณสมบัติวัสดุที่ตั้งกล่าวมาข้างต้น เมื่อกำหนดคุณสมบัติให้กับส่วนประกอบต่างๆ แล้วจึงนำแต่ละส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันดังแสดงดังภาพที่ 3.30



ภาพที่ 3.30 Assembly ของรอยต่อคาน-เสา PJ-2

การกำหนดลักษณะการเชื่อมต่อในส่วนประกอบต่างๆ นั้นเหมือนกับแบบจำลอง CJ-1 และ PJ-1 ซึ่งกำหนดให้เหล็กเสริมและแผ่นเหล็ก PL-9 เชื่อมต่อกับคอนกรีตแบบ Embedded Region โดยให้คอนกรีตเป็นขอบเขตหลัก ส่วนเหล็กเสริมเป็นของเซตรองและสำหรับการเชื่อมต่อของแผ่นเหล็กกับแรงกดกับคอนกรีตใช้การเชื่อมต่อในลักษณะแผ่นเหล็กวางอยู่บนคอนกรีต (Interaction) ซึ่งมีแรงต้านเป็นแรงเสียดทาน สำหรับเงื่อนไขขอบเขตในแบบจำลอง PJ-2 นั้นยังคงกำหนดเหมือนกันกับแบบจำลอง CJ-1 และ PJ-1 ซึ่งยึดเพียงหนึ่งด้านที่ปลายเสาด้านล่างและกำหนดให้มีการยึดรั้งแบบยึดหมุน โดยที่กำหนดไม่ให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x ($U_1=0$) y ($U_2=0$) และ z ($U_3=0$) ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการกำหนดชนิดของเอลิเมนต์และแบ่งเอลิเมนต์ สำหรับเหล็กเสริมนั้นใช้เอลิเมนต์ T3D2 สำหรับคอนกรีต เหล็ก PL-12 และแผ่นเหล็กกับแรงกดนั้นใช้เอลิเมนต์ C3D8 โดยมีรายละเอียดคุณสมบัติของชนิดเอลิเมนต์ต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น จากนั้นทำการแบ่งเอลิเมนต์ (Mesh) ของรอยต่อคาน-เสา PJ-2 แสดงดังภาพที่ 3.31 ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการสร้างแบบจำลอง



ภาพที่ 3.31 การแบ่งเอลิเมนต์ของรอยต่อคาน-เสา PJ-2

บทที่ 4

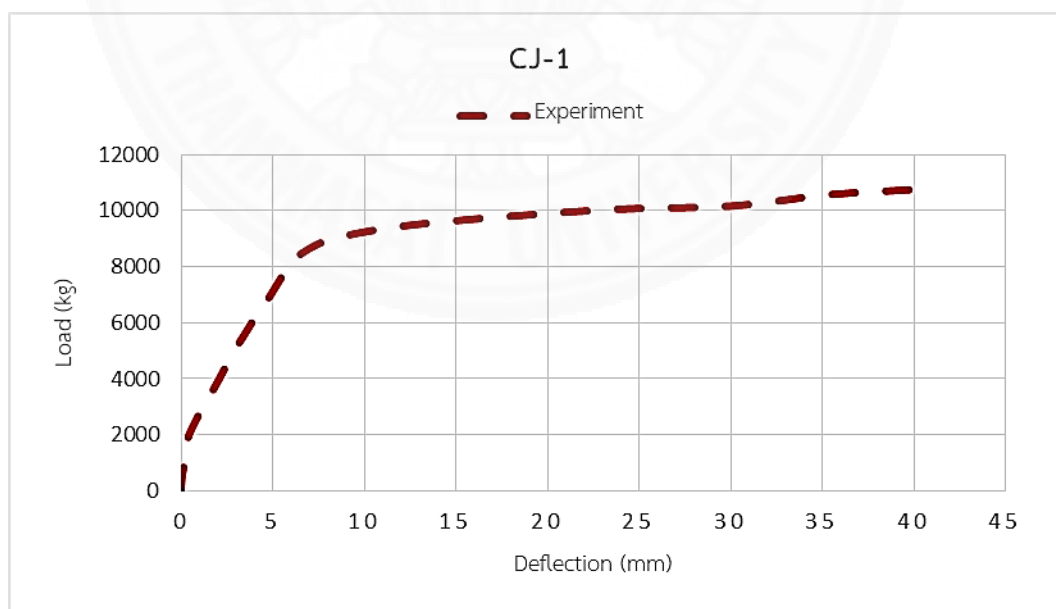
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เกี่ยวกับพฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา คอนกรีตเสริมเหล็กในลักษณะต่างๆ โดยนำเสนอในรูปแบบของความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกภายนอกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน รวมไปถึงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยจะทำการเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลของการทดสอบที่ได้ในห้องปฏิบัติการ และทำการเปรียบเทียบผลของความแตกต่างในจำนวนเอลิเมนต์ที่แตกต่างกัน

4.1 พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา CJ-1

4.1.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของรอยต่อคาน-เสา CJ-1

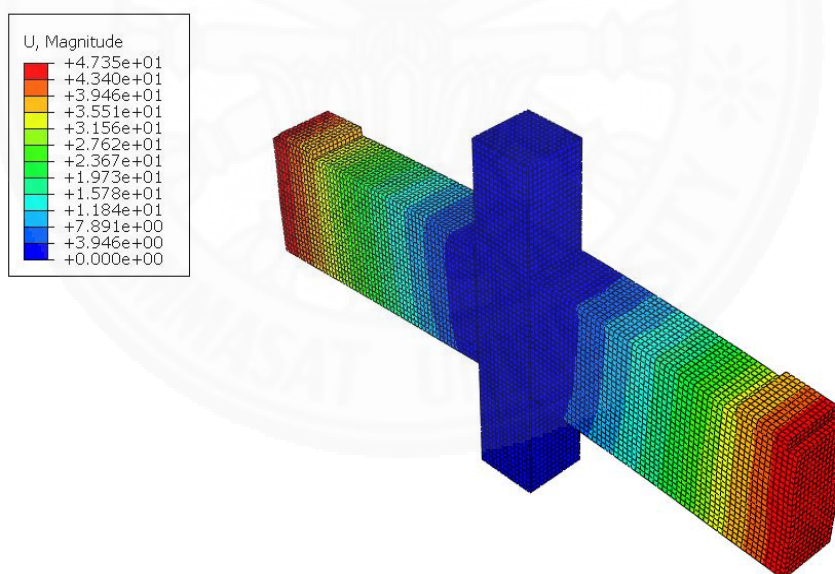
ผลของการทดสอบทางด้านกำลังของรอยต่อคาน-เสา CJ-1 ในงานวิจัยของ ทวีศักดิ์ โสภณธานาพร (2558) นั้นจะแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุก (Load) กับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (Deflection) แสดงดังภาพที่ 4.1



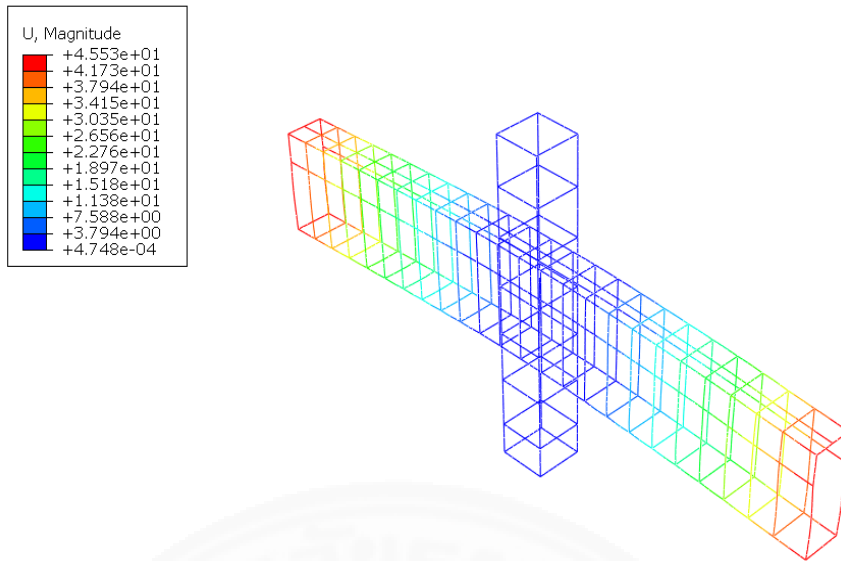
ภาพที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของรอยต่อคาน-เสา CJ-1

4.1.2 ผลการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา CJ-1 ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

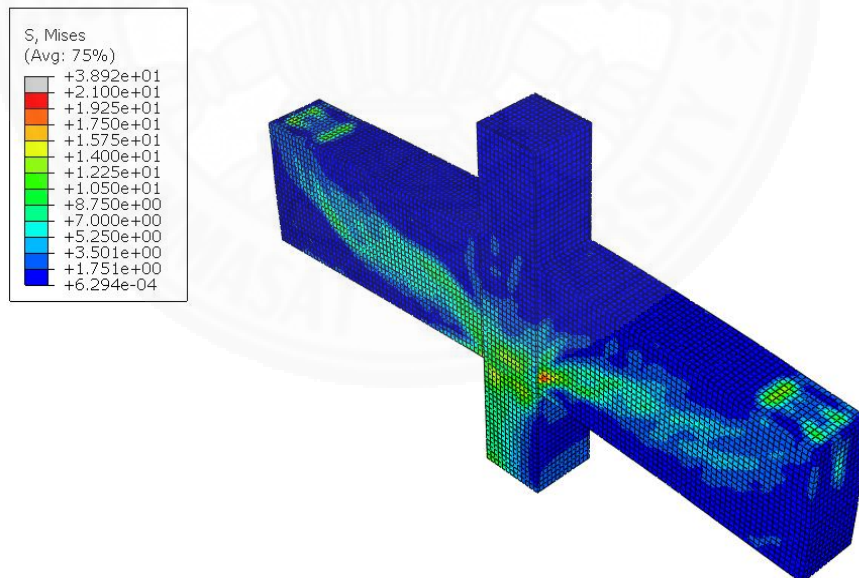
ผลของการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา CJ-1 ด้วยโปรแกรม ABAQUS จะแสดงด้วยการเสียรูปและความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง CJ-1 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานรวมไปถึงการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดสอบ การเสียรูปของรอยต่อคาน-เสา CJ-1 แสดงดังภาพที่ 4.2 ซึ่งจะแสดงการเสียรูปของคอนกรีต ที่ปลายสุดของแบบจำลองมีระยะการเคลื่อนที่ 47.35 mm แต่การวัดค่าจากแบบทดสอบนั้นทำการวัดที่ระยะ 100 mm จากปลายสุดซึ่งจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของแผ่นเหล็กรับแรงกดซึ่งจะมีระยะการเคลื่อนที่ 41.9 mm สำหรับการเสียรูปของเหล็กเสริมในแบบจำลอง CJ-1 แสดงดังภาพที่ 4.3 มีค่าสูงสุดที่ 45.5 mm อยู่ที่บริเวณปลายสุดซึ่งมีค่าน้อยกว่าระยะการเสียรูปของคอนกรีตแสดงว่าเหล็กเสริมกับคอนกรีตนั้นเกิดการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กันกล่าวคือมีการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม โดยสมบูรณ์ สำหรับความเค้นที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 4.4 และความเค้นที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมแสดงดังภาพที่ 4.5



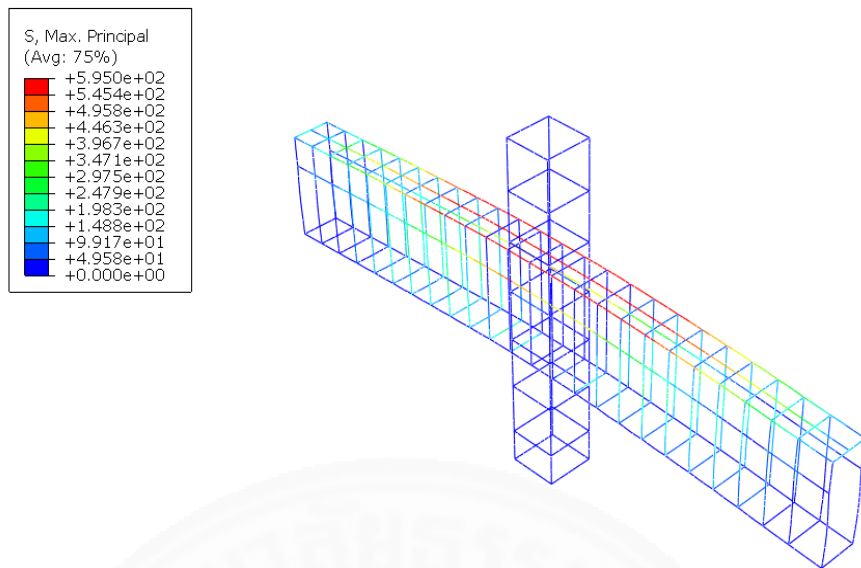
ภาพที่ 4.2 การเสียรูปของคอนกรีตในแบบจำลอง CJ-1



ภาพที่ 4.3 การเสียรูปของเหล็กเสริมในแบบจำลอง CJ-1

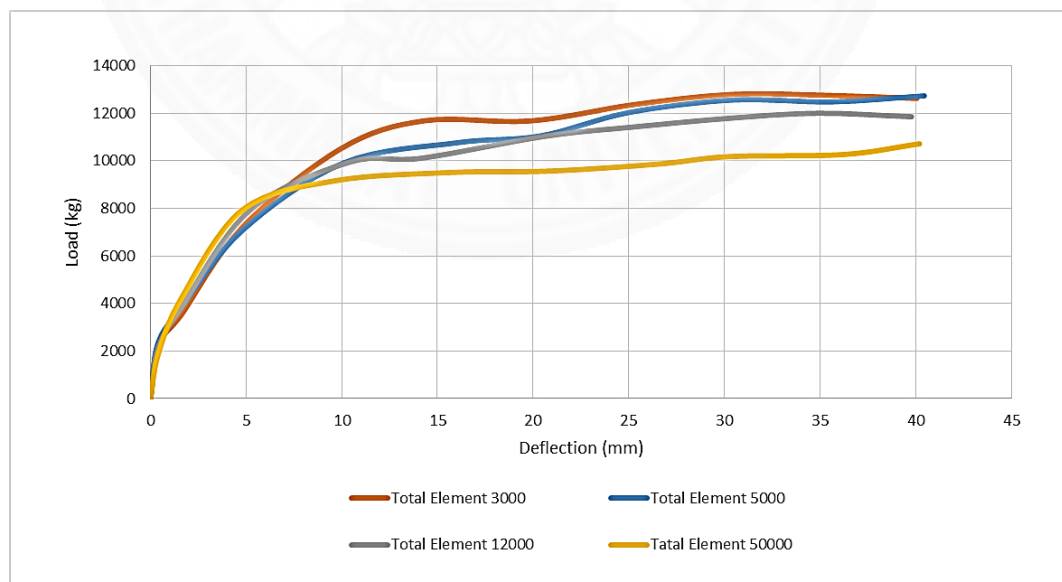


ภาพที่ 4.4 ความเค้นของคอนกรีตในแบบจำลอง CJ-1



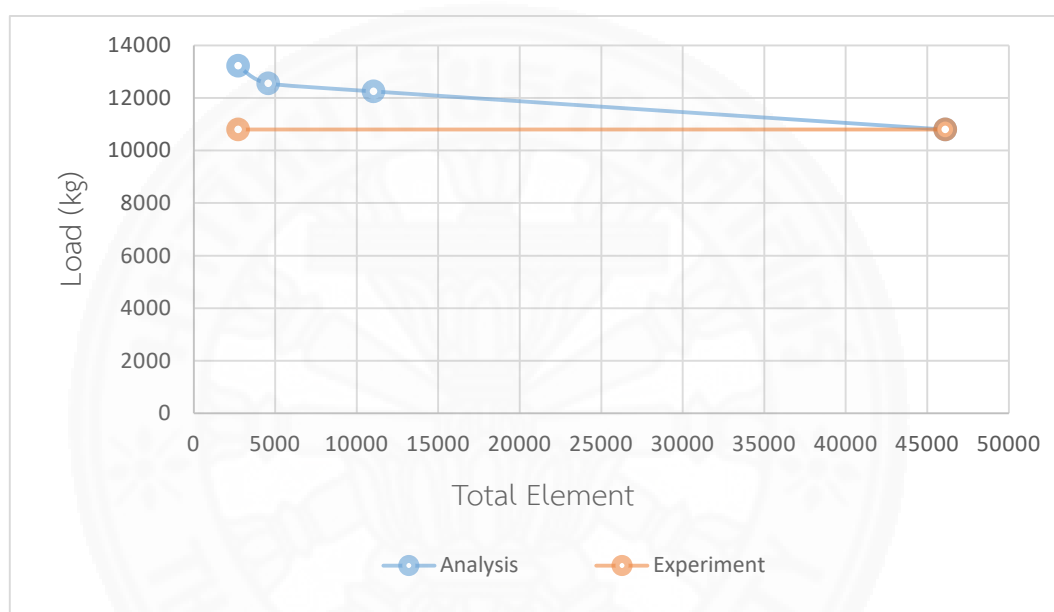
ภาพที่ 4.5 ความเค้นของเหล็กเสริมในแบบจำลอง CJ-1

ผลของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง CJ-1 ที่มีจำนวนของเอลิเมนต์แตกต่างกันทำให้ผลเฉลยที่ได้มีความแตกต่างกันซึ่งจะแสดงด้วยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่ปลายคานากับน้ำหนักบรรทุก แสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบผลของความแตกต่างจากจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลอง CJ-1

จากกราฟแสดงให้เห็นถึงผลของการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันเมื่อทำการแบ่งจำนวนเอลิเมนต์แตกต่างกัน แสดงว่าจำนวนของเอลิเมนต์นั้นมีผลต่อการลู่เข้าของคำตอบ เมื่อทำการเปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบ ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดของจำนวนเอลิเมนต์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.7 เห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์นั้นทำให้ผลเฉลยเข้าใกล้ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์นั้นจะทำให้ผลเฉลยมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

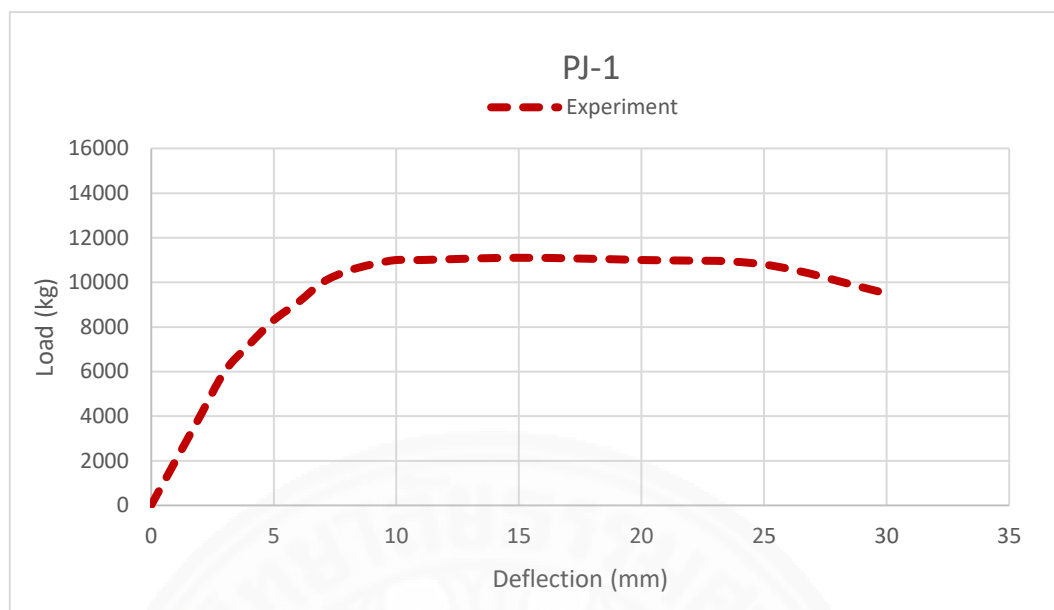


ภาพที่ 4.7 แสดงการลู่เข้าของคำตอบของแบบจำลอง CJ-1

4.2 พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา PJ-1

4.2.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของรอยต่อคาน-เสา PJ-1

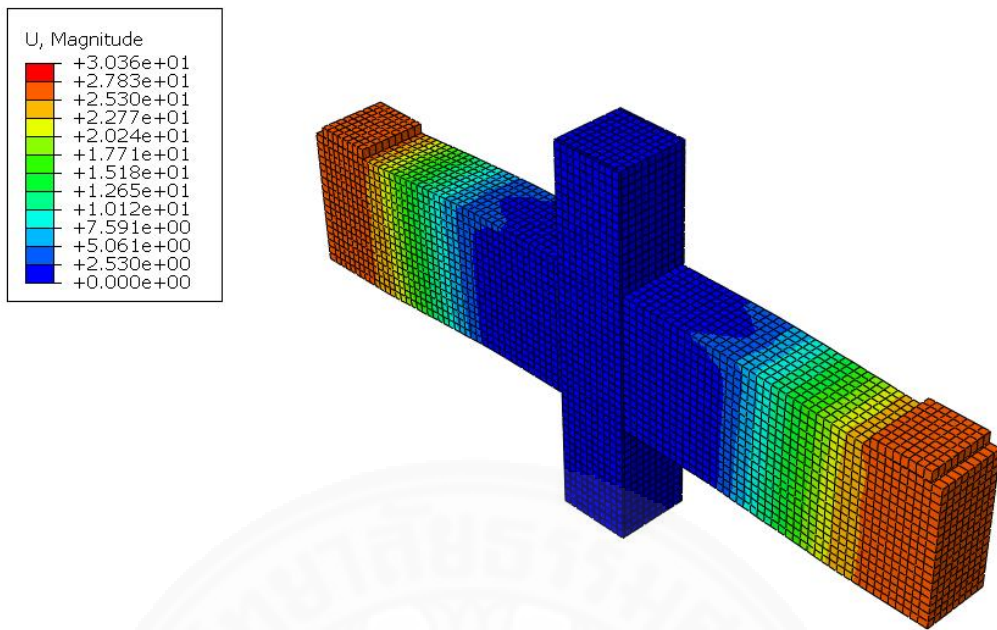
ผลของการทดสอบทางด้านกำลังของรอยต่อคาน-เสา PJ-1 ในงานวิจัยของ ทวีศักดิ์ โสภณธนาพร (2558) นั้นจะแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุก (Load) กับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (Deflection) แสดงดังภาพที่ 4.8



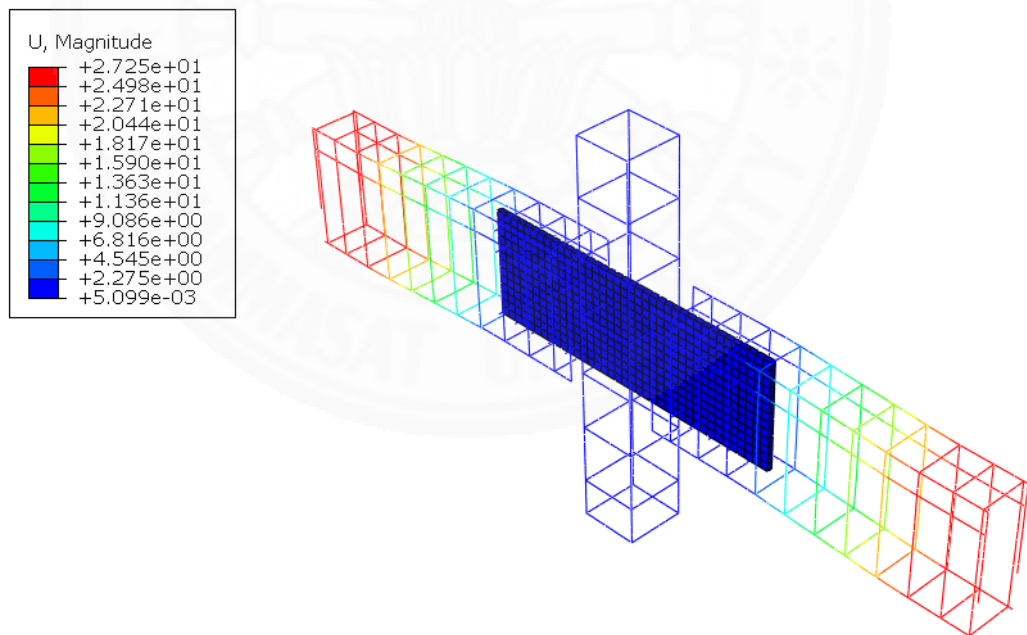
ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของรอยต่อคาน-เสา PJ-1

4.2.2 ผลการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา PJ-1 ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

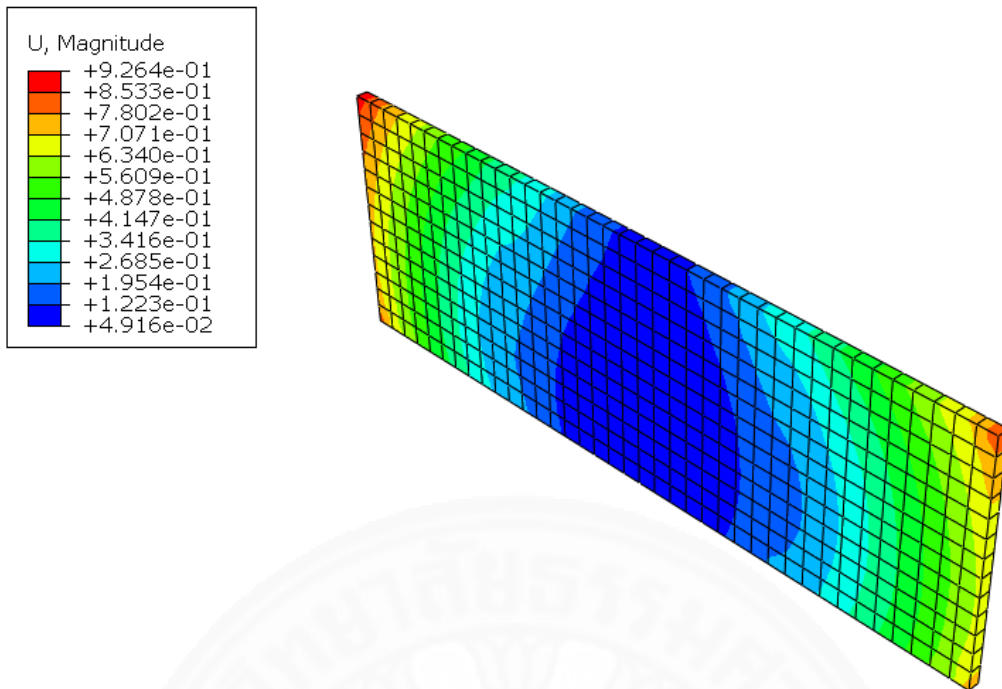
ผลของการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา PJ-1 ด้วยโปรแกรม ABAQUS จะแสดงด้วยการเสียรูปและความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง PJ-1 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานรวมไปถึงการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดสอบ การเสียรูปของรอยต่อคาน-เสา PJ-1 แสดงดังภาพที่ 4.9 ซึ่งจะแสดงการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง มีระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 30.36 mm แต่การวัดค่าจากแบบทดสอบนั้นทำการวัดที่ระยะ 100 mm จากปลายสุดซึ่งจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของแผ่นเหล็กรับแรงกดซึ่งจะมีระยะการเคลื่อนที่ 30.30 mm สำหรับการเสียรูปของเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-1 แสดงดังภาพที่ 4.10 มีค่าสูงสุดที่ 27.25 mm อยู่ที่บริเวณปลายสุดซึ่งมีค่าน้อยกว่าระยะการเสียรูปของคอนกรีตแสดงถึงเหล็กเสริมกับคอนกรีตนั้นเกิดการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กัน และการเคลื่อนที่ที่เกิดบนแผ่นเหล็ก PL-12 นั้นมีค่า 0.926 mm ซึ่งเกิดการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยแสดงดังภาพที่ 4.11 สำหรับความเค้นที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 4.12 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมแสดงดังภาพที่ 4.14



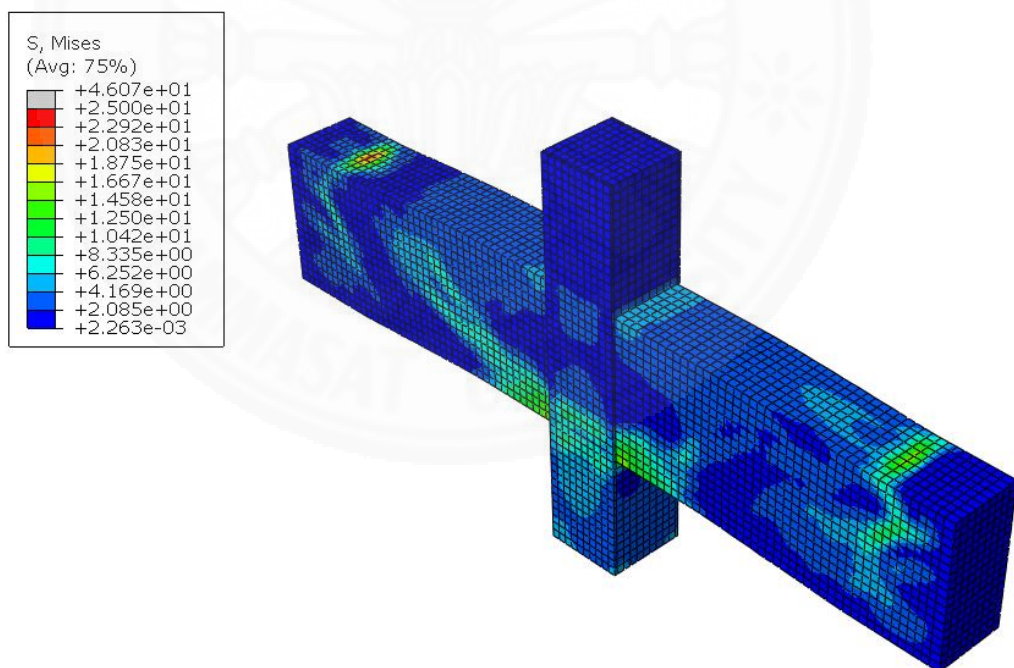
ภาพที่ 4.9 การเสียรูปของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-1



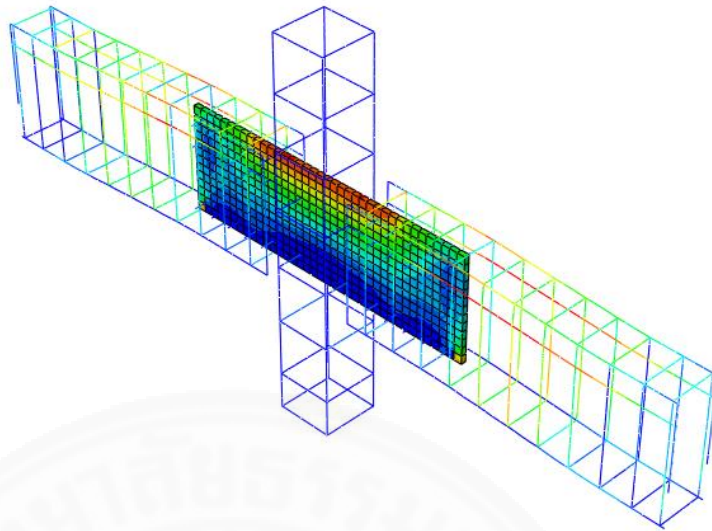
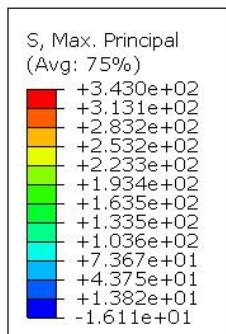
ภาพที่ 4.10 การเสียรูปของเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-1



ภาพที่ 4.11 การเสียรูปของเหล็ก PL-12 ในแบบจำลอง PJ-1

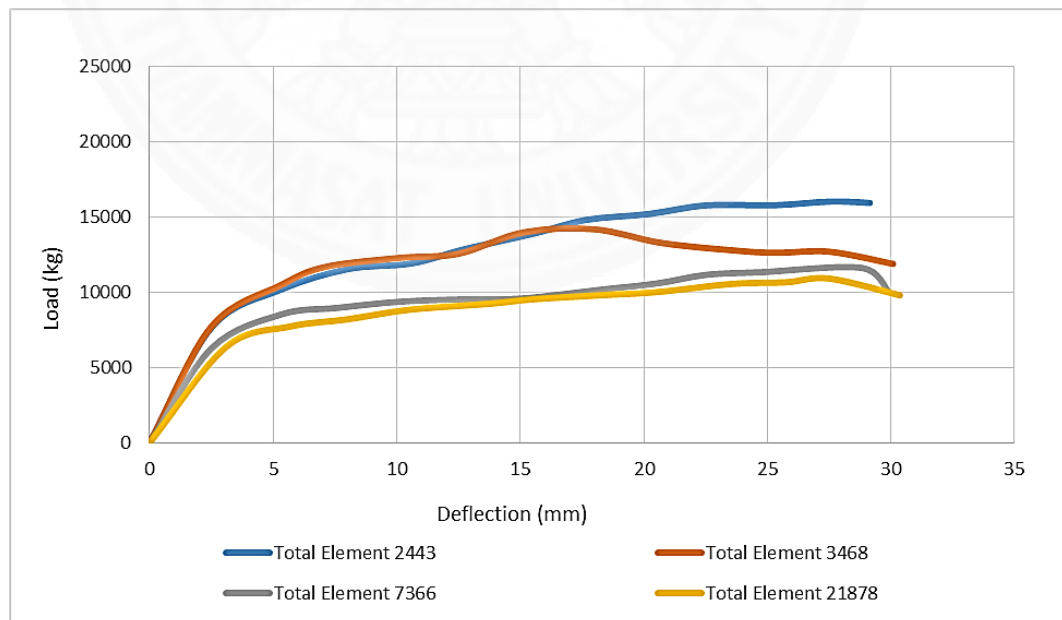


ภาพที่ 4.12 ความเค้นของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-1



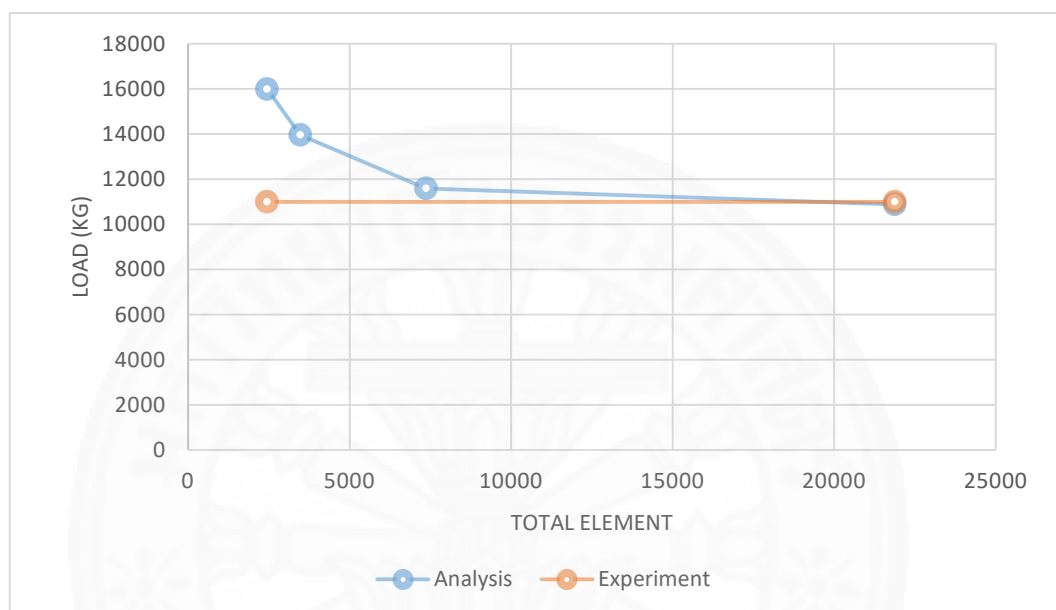
ภาพที่ 4.13 ความเค้นบนเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-1

ผลของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง PJ-1 ที่มีจำนวนของเอลิเมนต์แตกต่างกันทำให้ผลเฉลยที่ได้มีความแตกต่างกันซึ่งจะแสดงด้วยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่ปลายคานากับน้ำหนักบรรทุกทุกแสดงดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบผลของความแตกต่างจากจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลอง PJ-1

จากกราฟแสดงให้เห็นถึงผลของการวิเคราะห์ที่มีความแตกต่างกัน โดยเป็นผลมาจากจำนวนเอลิเมนต์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบ โดยจะทำการเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดของจำนวนเอลิเมนต์ที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.15 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนเอลิเมนต์นั้นทำให้ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองมีผลเฉลยที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

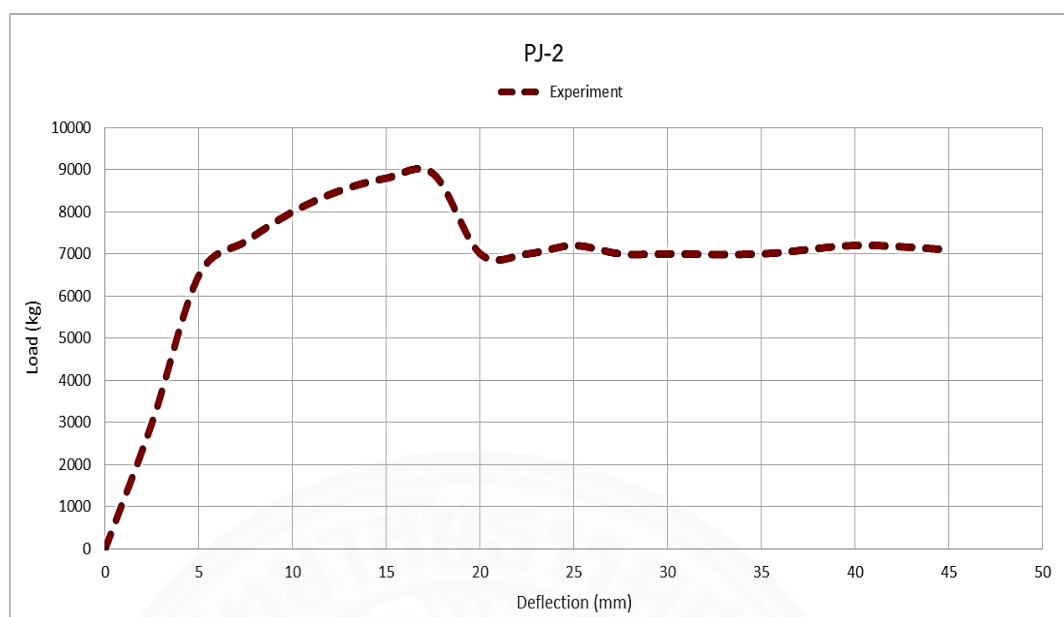


ภาพที่ 4.15 แสดงการลู่เข้าของคำตอบของแบบจำลอง PJ-1

4.3 พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา PJ-2

4.3.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของรอยต่อคาน-เสา PJ-2

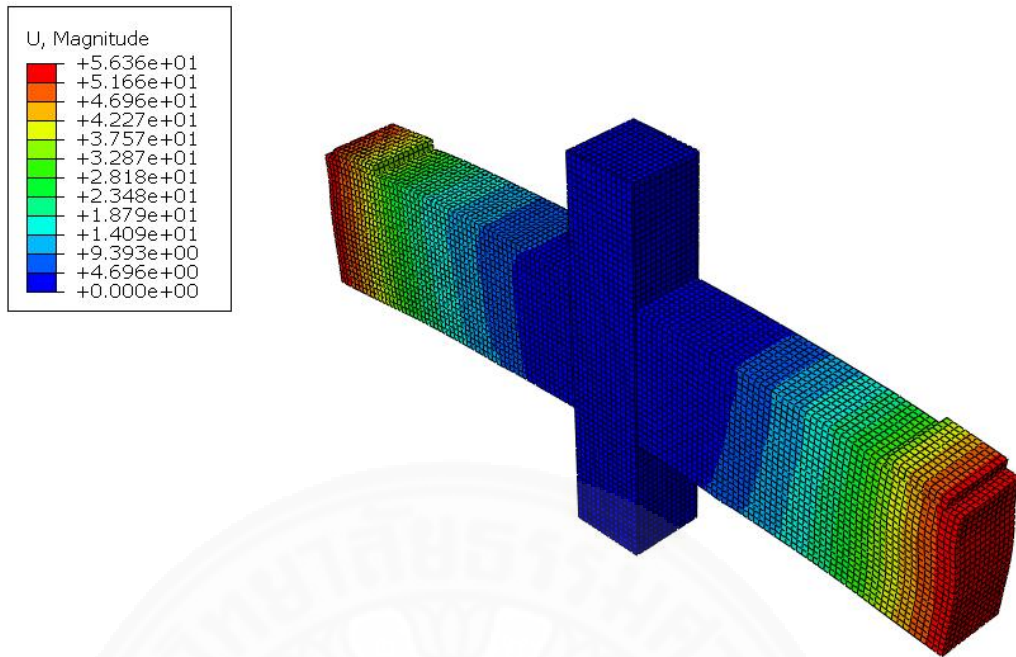
ผลของการทดสอบทางด้านกำลังของรอยต่อคาน-เสา PJ-2 ในงานวิจัยของ ทวีศักดิ์ โสภณธนาพร (2558) นั้นจะแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (Load) กับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (Deflection) แสดงดังภาพที่ 4.16



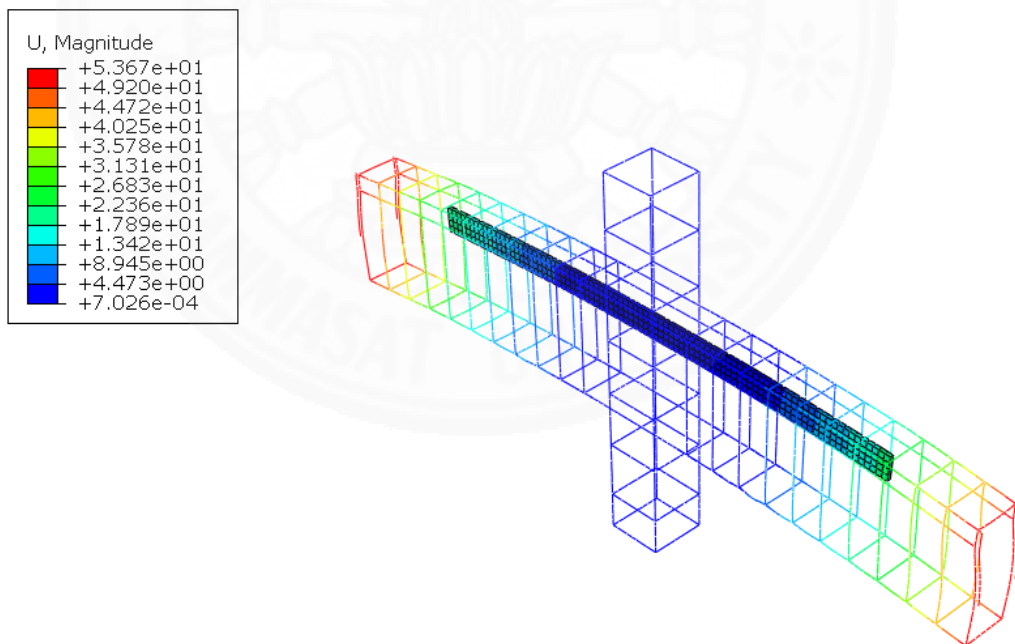
ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของรอยต่อคาน-เสา PJ-2

4.3.2 ผลการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา PJ-2 ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

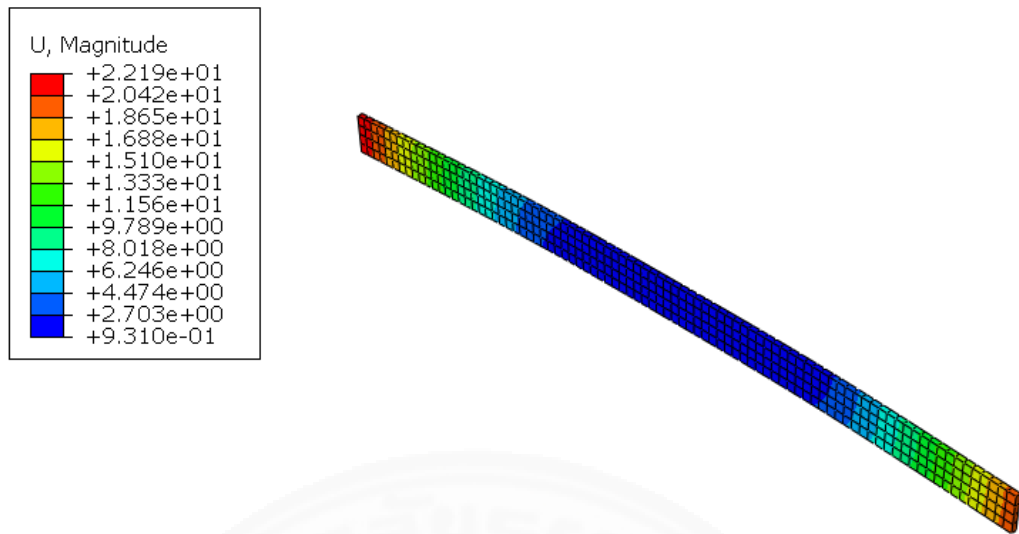
ผลการวิเคราะห์รอยต่อคาน-เสา PJ-2 ด้วยโปรแกรม ABAQUS จะแสดงด้วยการเสียรูปและความเค้นที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง PJ-2 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานรวมไปถึงการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลการทดสอบ การเสียรูปของรอยต่อคาน-เสา PJ-2 แสดงดังภาพที่ 4.17 มีระยะการเคลื่อนที่สูงสุด 56.36 mm และการเคลื่อนที่ที่บริเวณกึ่งกลางของแผ่นเหล็กรับแรงกดมีระยะการเคลื่อนที่ 45 mm สำหรับการเสียรูปของเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-1 แสดงดังภาพที่ 4.18 มีค่าสูงสุดที่ 53.67 mm อยู่บริเวณปลายสุดซึ่งมีค่าน้อยกว่าระยะการเสียรูปของคอนกรีตแสดงถึงเหล็กเสริมกับคอนกรีตนั้นเกิดการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กัน การเคลื่อนที่ที่เกิดบนแผ่นเหล็ก PL-9 นั้นมีค่า 22.9 mm แสดงดังภาพที่ 4.19 สำหรับความเค้นที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตแสดงดังภาพที่ 4.20 ความเค้นที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมแสดงดังภาพที่ 4.21



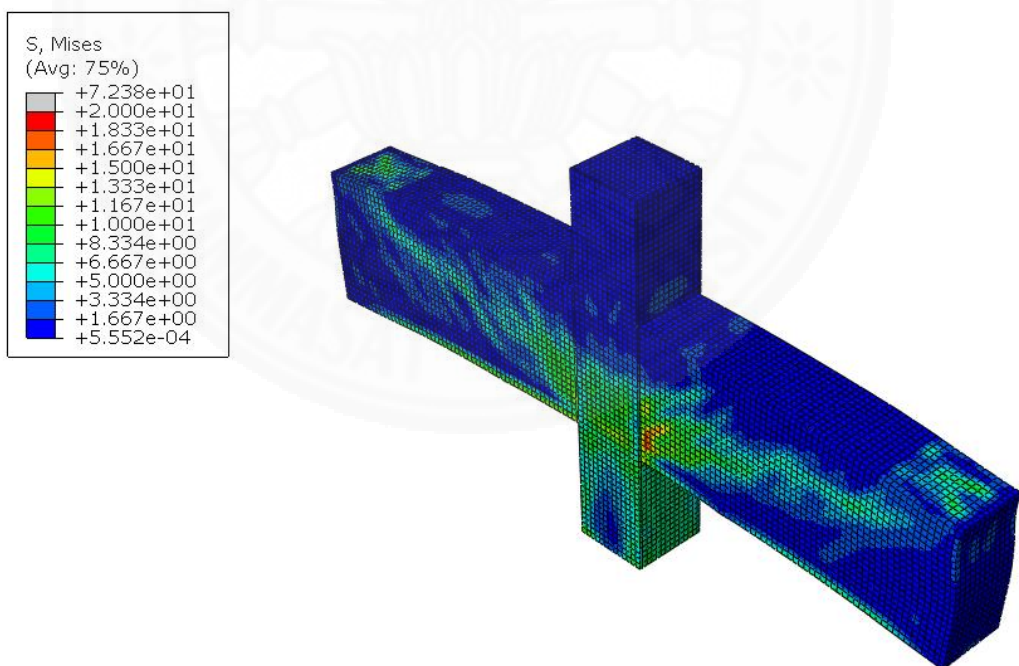
ภาพที่ 4.17 การเสีรูปของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-2



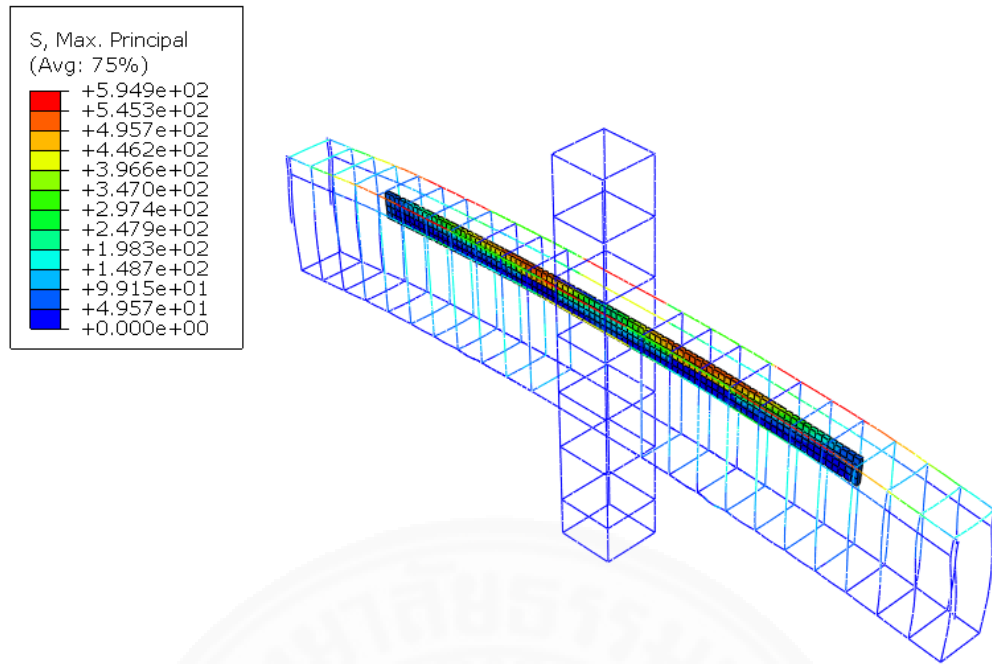
ภาพที่ 4.18 การเสีรูปของดเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-2



ภาพที่ 4.19 การเสียรูปของแผ่นเหล็ก PL-9 ในแบบจำลอง PJ-2

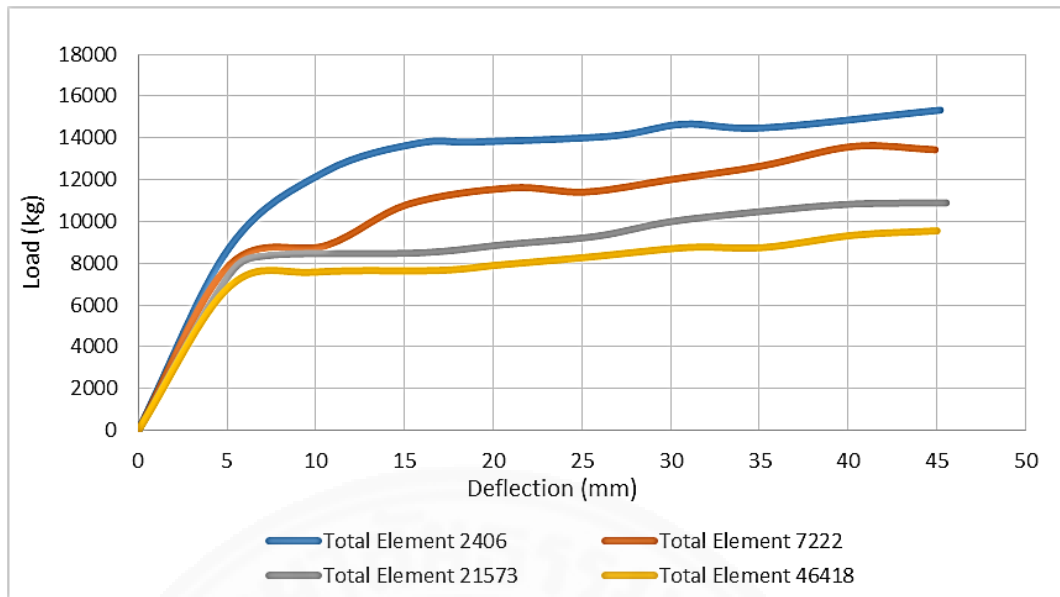


ภาพที่ 4.20 ความเค้นของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-2



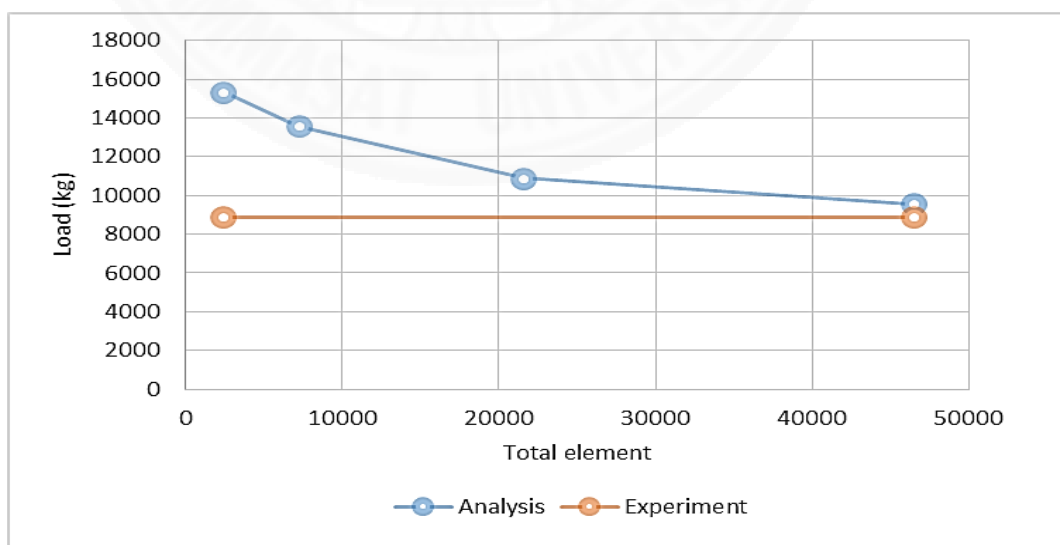
ภาพที่ 4.21 ความเค้นของเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-2

ผลของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง PJ-2 ที่มีจำนวนของเอลิเมนต์แตกต่างกันทำให้ผลเฉลยที่ได้มีความแตกต่างกันซึ่งจะแสดงด้วยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่ปลายคานากับน้ำหนักบรรทุกทุกแสดงดังภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 เปรียบเทียบผลของความแตกต่างจากจำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลอง PJ-2

จากกราฟแสดงให้เห็นถึงผลของการวิเคราะห์ที่มีความแตกต่างกัน โดยเป็นผลมาจากจำนวนเอลิเมนต์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบการลู่เข้าของคำตอบ โดยจะทำการเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดของจำนวนเอลิเมนต์ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.23 แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนเอลิเมนต์นั้นทำให้ผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองมีผลเฉลยที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

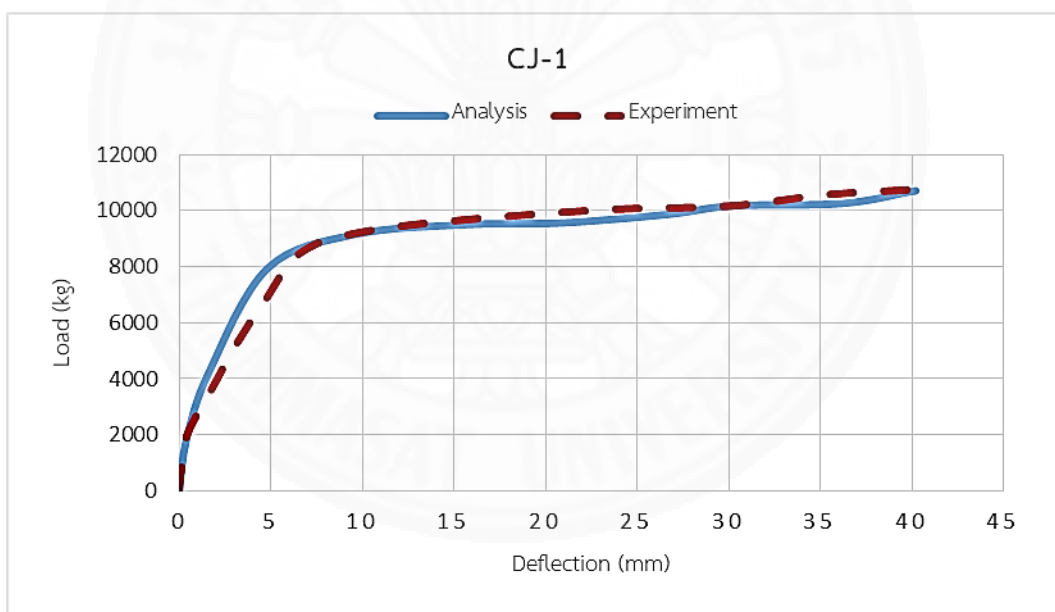


ภาพที่ 4.23 แสดงการลู่เข้าของคำตอบของแบบจำลอง PJ-2

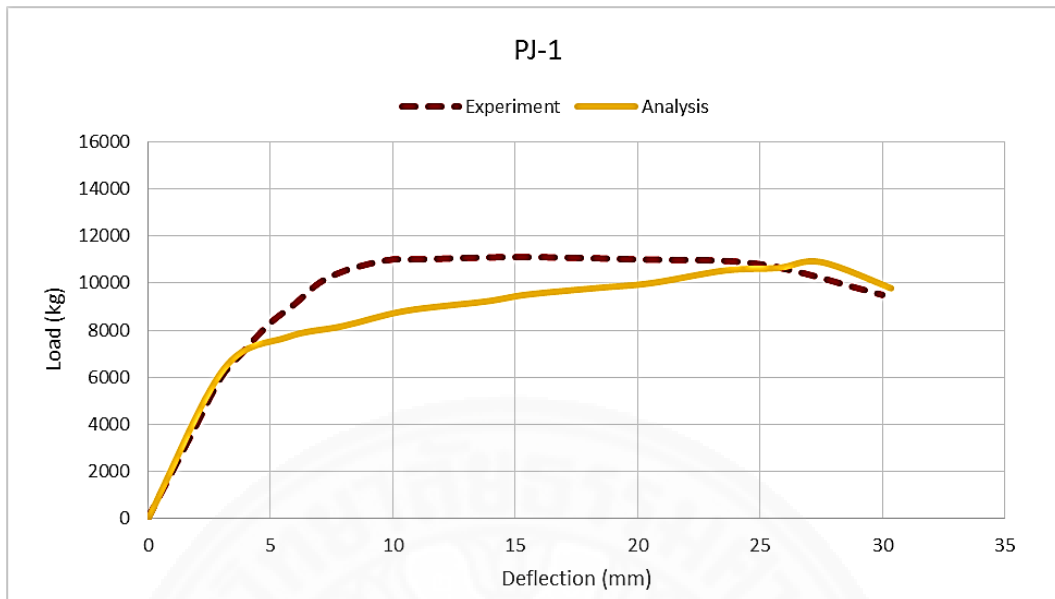
4.4 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

4.4.1 การเปรียบเทียบ Load-deflection

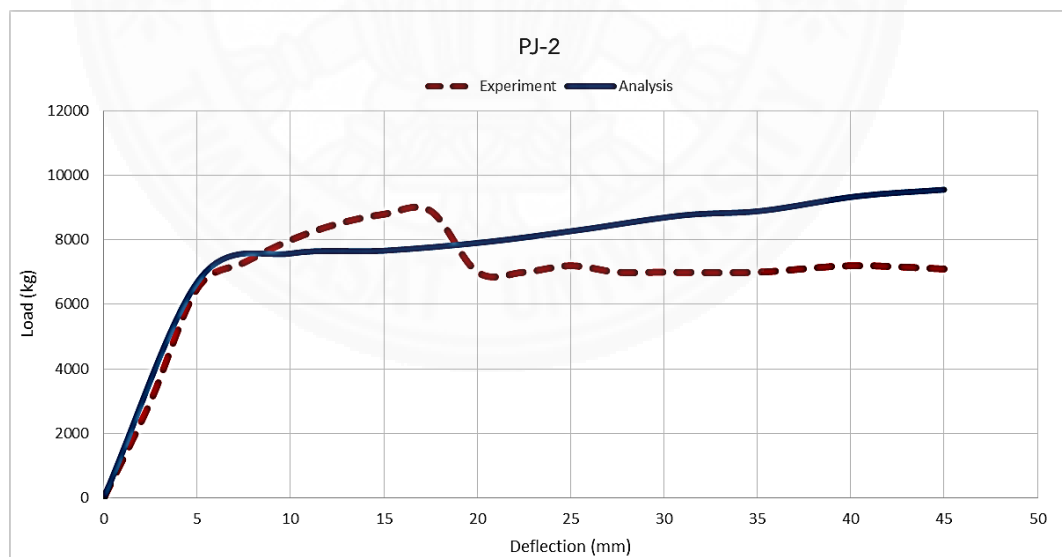
ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของรอยต่อคาน-เสา ทั้งสามรูปแบบดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เมื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อคาน-เสา CJ-1 PJ-1 และ PJ-2 มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงดังภาพที่ 4.24, 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อคาน-เสา ทั้ง 3 รูปแบบดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยช่วง linearity ของรอยต่อคาน-เสา ทั้ง 3 รูปแบบจะให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับผลการทดสอบ สำหรับช่วง non-linearity ของรอยต่อคาน-เสา CJ-1 นั้นจะให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าของรอยต่อคาน-เสา PJ-1 และ PJ-2



ภาพที่ 4.24 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดสอบของรอยต่อคาน-เสา CJ-1



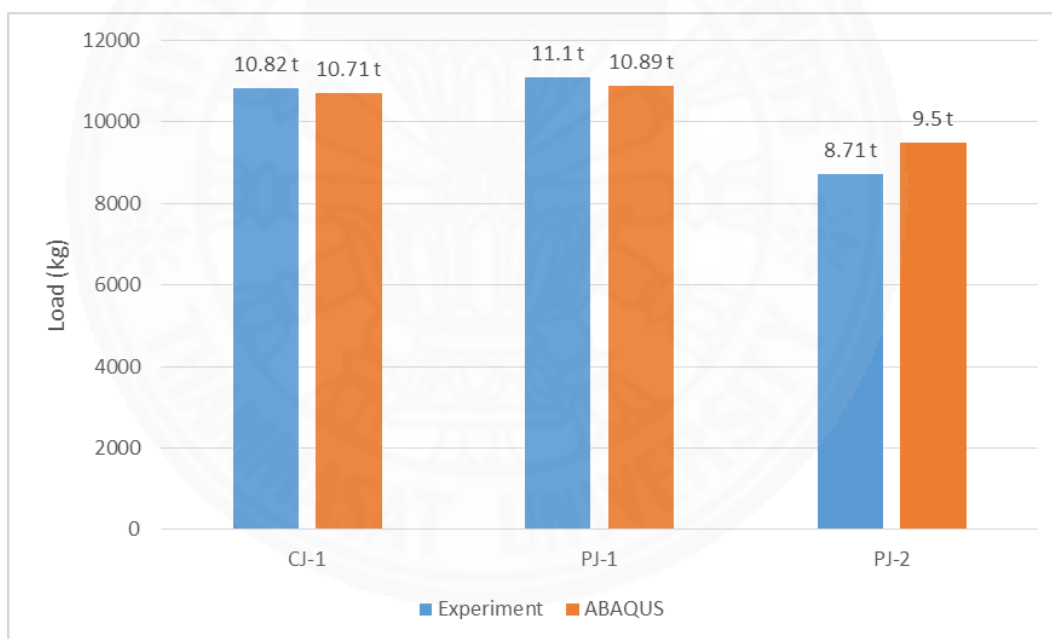
ภาพที่ 4.25 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดสอบของรอยต่อคาน-เสา PJ-1



ภาพที่ 4.26 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลการทดสอบของรอยต่อคาน-เสา PJ-2

4.4.2 การเปรียบเทียบด้านกำลัง (Strength)

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของรอยต่อคาน-เสาดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันในรูปแบบของแผนภูมิกราฟแท่งแสดงดังภาพที่ 4.27 โดยจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของรอยต่อคาน-เสา CJ-1, PJ-1 และ PJ-2 มีกำลัง 10.82, 11.1 และ 8.71 ตันตามลำดับ ซึ่งรอยต่อคาน-เสา PJ-1 นั้นให้กำลังมากที่สุด สำหรับรอยต่อคาน-เสา CJ-1, PJ-1 และ PJ-2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีกำลัง 10.71, 10.89 และ 9.5 ตันตามลำดับ ผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของ CJ-1 และ PJ-1 นั้นมีกำลังต่ำกว่าผลการทดสอบคิดเป็นร้อยละ 1.02 และ 1.92 สำหรับผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ PJ-2 นั้นมีกำลังสูงกว่าผลการทดสอบคิดเป็นร้อยละ 8.31



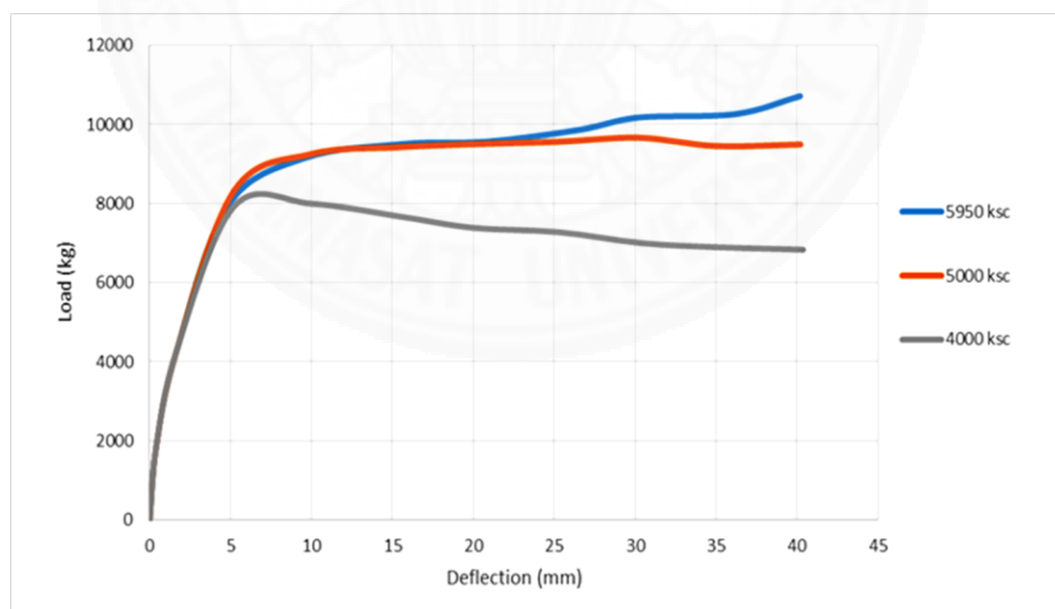
ภาพที่ 4.27 เปรียบเทียบด้านกำลังของรอยต่อคาน-เสา จากแบบจำลองกับผลการทดสอบ

4.5 Parametric study

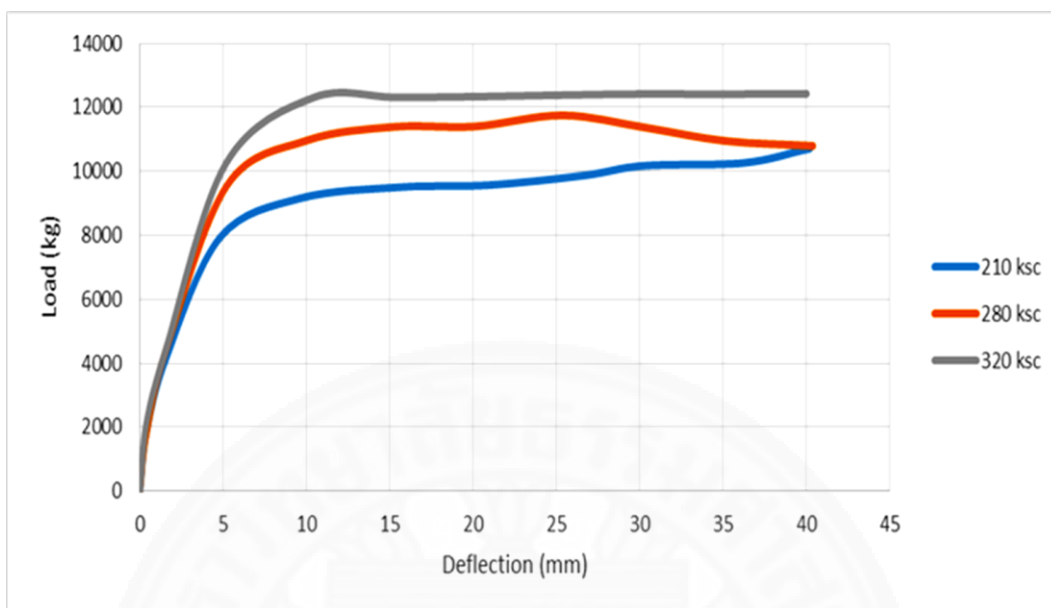
เมื่อพิจารณาความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการเคลื่อนที่แล้วจึงนำแบบจำลองที่ได้มาปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ กำลังของเหล็กเสริม กำลังของคอนกรีตและขนาดของแผ่นเหล็กเสริม แบบจำลองรอยต่อของคาน-เสา ทั้ง 3 แบบ นั้นจะแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการเคลื่อนที่

4.5.1 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองรอยต่อคาน-เสา CJ-1

เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้วจึงนำมาปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยจะแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน แบบจำลอง CJ-1 นั้นปรับแก้ค่าพารามิเตอร์จำนวน 2 ประเภทคือ 1.กำลังของเหล็กเสริม โดยแบ่งเป็น 3000 และ 5000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 2.กำลังของคอนกรีต โดยแบ่งเป็น 280 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



ภาพที่ 4.28 เปรียบเทียบกำลังของเหล็กเสริมในแบบจำลอง CJ-1



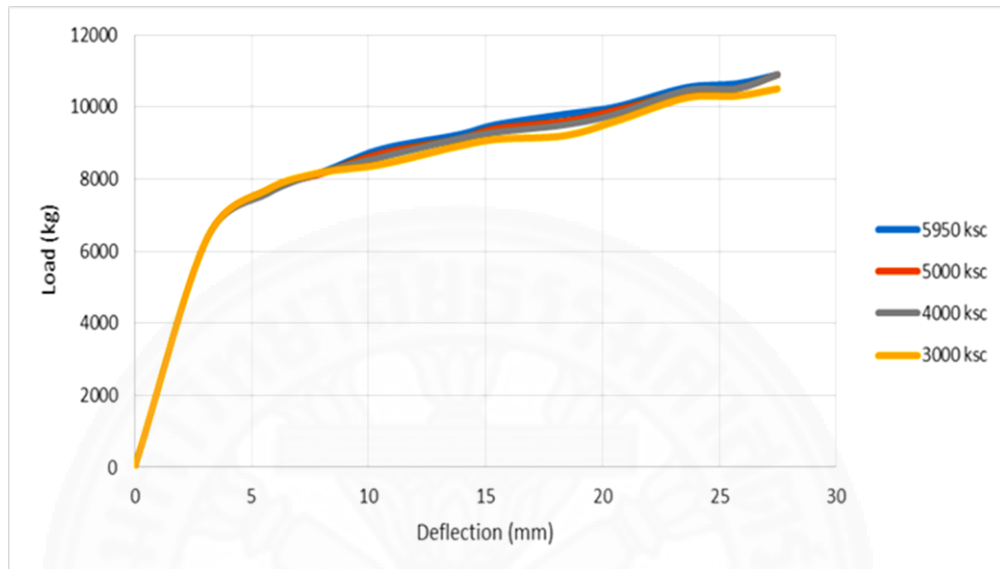
ภาพที่ 4.29 เปรียบเทียบกำลังของคอนกรีตในแบบจำลอง CJ-1

ภาพที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของพารามิเตอร์กำลังเหล็กเสริม จากกราฟเมื่อลดกำลังของเหล็กเสริมที่ 5000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรนั้นยังคงมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกใกล้เคียงแบบจำลองอ้างอิงและเมื่อลดกำลังของเหล็กเสริมที่ 4000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรนั้นทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกลดลงอย่างเห็นได้ชัด ภาพที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของพารามิเตอร์กำลังคอนกรีต เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มกำลังของคอนกรีตนั้นทำให้มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

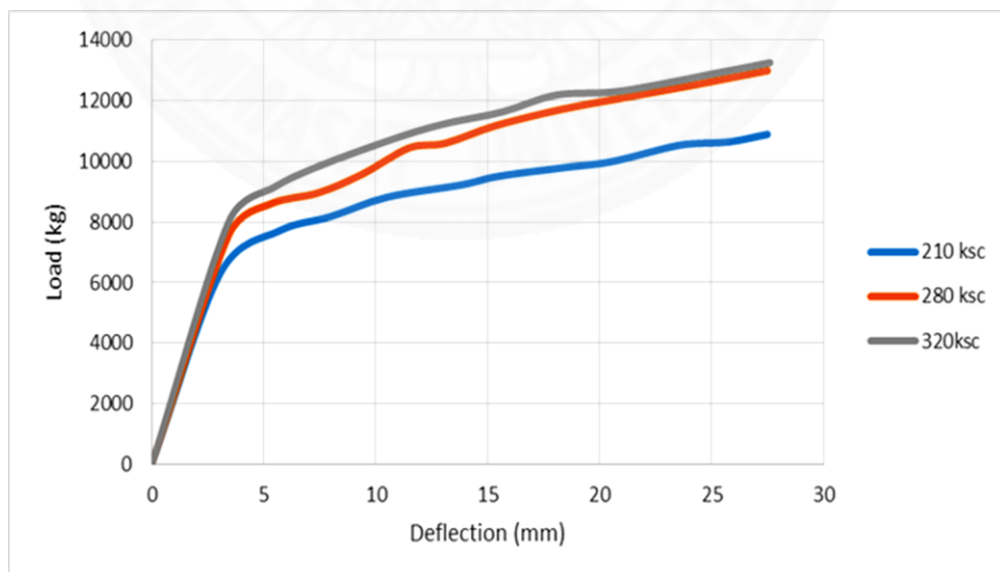
4.5.2 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองรอยต่อคาน-เสา PJ-1

เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้วจึงนำมาปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยจะแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน แบบจำลอง PJ-1 นั้นปรับแก้ค่าพารามิเตอร์จำนวน 5 ประเภทคือ 1.กำลังของเหล็กเสริม โดยแบ่งเป็น 3000, 4000 และ 5000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 2.กำลังของคอนกรีต โดยแบ่งเป็น 280 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 3.กำลังของแผ่นเหล็ก PL-12 โดยแบ่งเป็น 3000, 4000 และ 5000

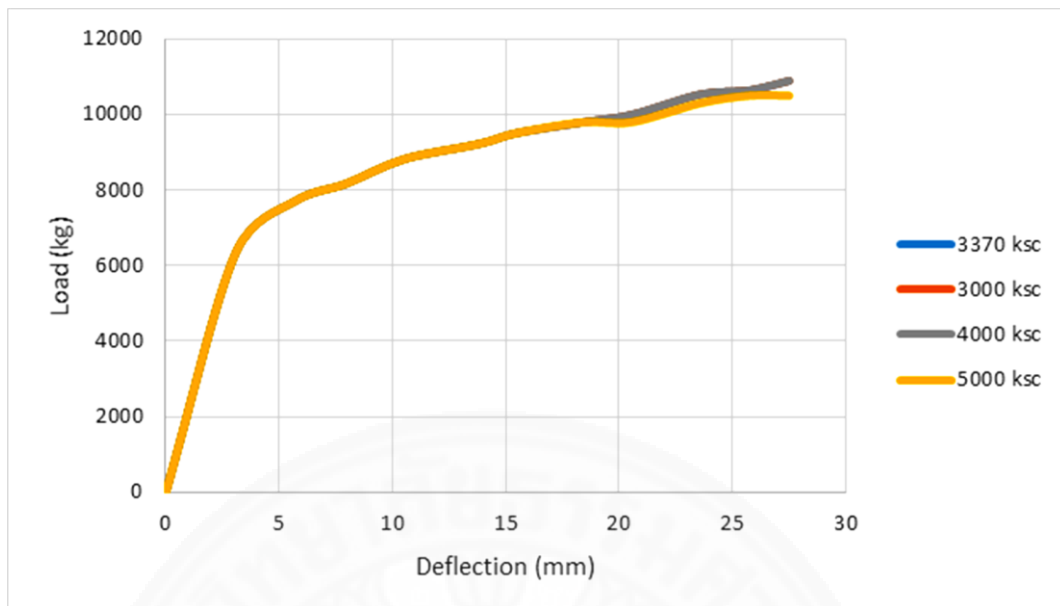
กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 4.ความหนาของแผ่นเหล็ก PL-12 โดยแบ่งเป็น 9 และ 6 มิลลิเมตร 5. ความสูงของแผ่นเหล็ก โดยแบ่งเป็น 200 และ 150 มิลลิเมตร



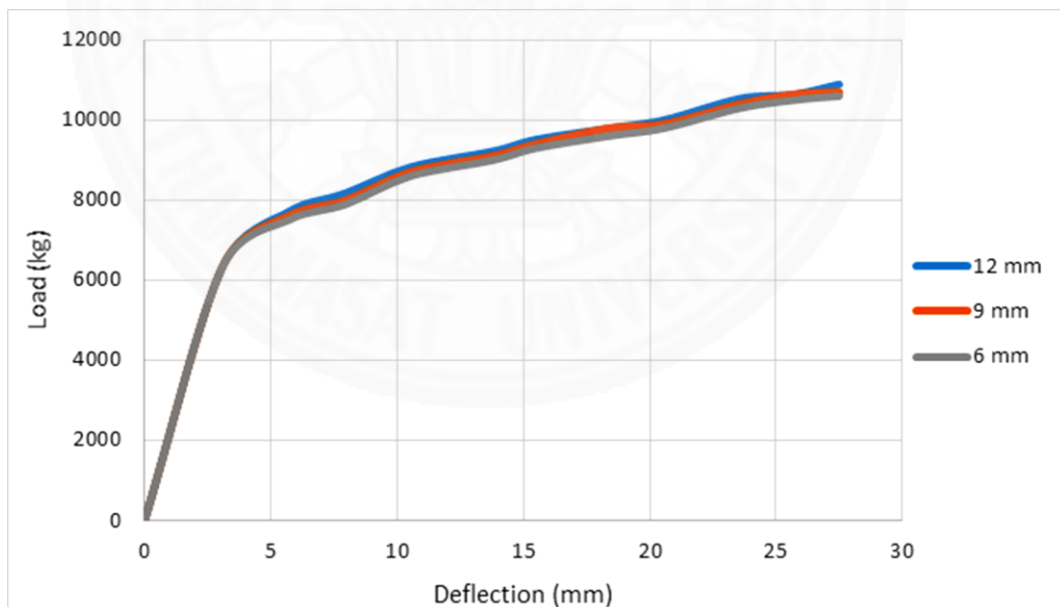
ภาพที่ 4.30 เปรียบเทียบกำลังของเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-1



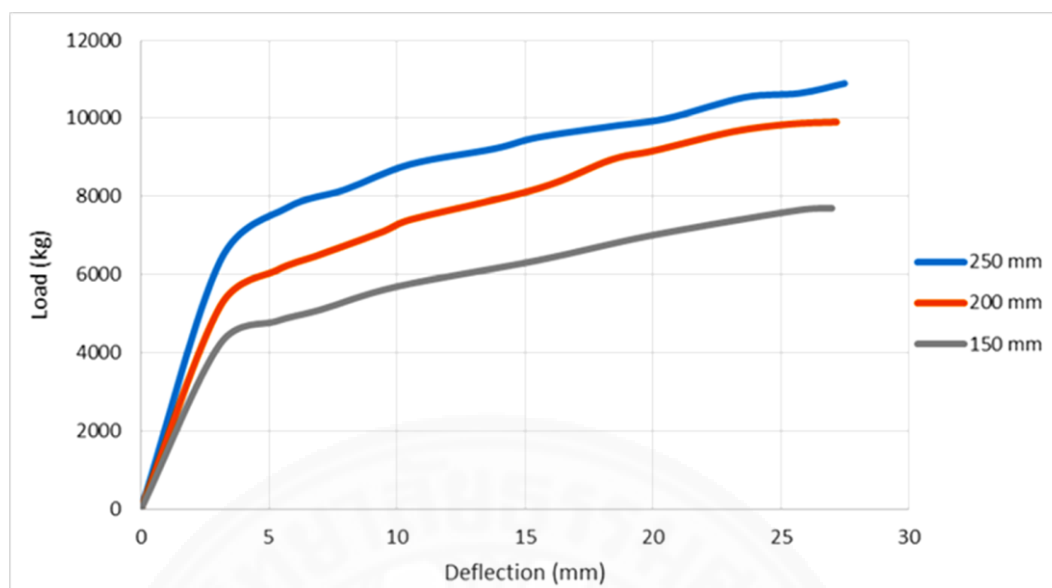
ภาพที่ 4.31 เปรียบเทียบกำลังของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-1



ภาพที่ 4.32 เปรียบเทียบกำลังของแผ่นเหล็ก PL-12 ในแบบจำลอง PJ-1



ภาพที่ 4.33 เปรียบเทียบความหนาของแผ่นเหล็ก PL-12 ในแบบจำลอง PJ-1



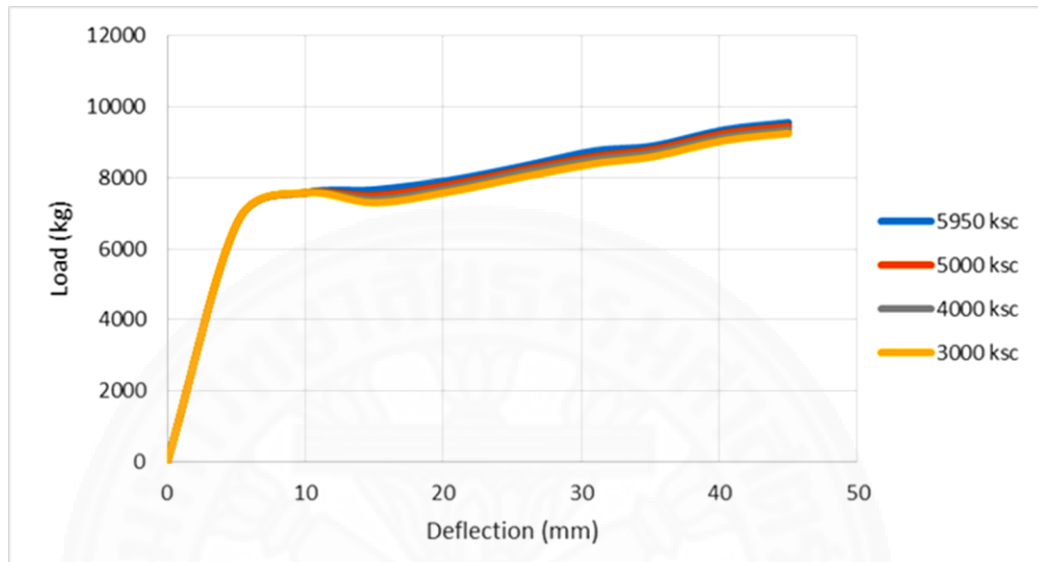
ภาพที่ 4.34 เปรียบเทียบความสูงของแผ่นเหล็ก PL-12 ในแบบจำลอง PJ-1

ภาพที่ 4.30, 4.32 และ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของพารามิเตอร์กำลังเหล็กเสริม กำลังของแผ่นเหล็ก PL-12 และ ความหนาของแผ่นเหล็กตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มลดกำลังของเหล็กและลดขนาดความหนายังคงทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกไม่ต่างกัน ภาพที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของพารามิเตอร์กำลังคอนกรีตเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มกำลังของคอนกรีตนั้นทำให้มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และภาพที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของพารามิเตอร์ความสูงของแผ่นเหล็กจะเห็นได้ว่าหากทำการลดความสูงของแผ่นเหล็กนั้นจะทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกน้อยลงตามไปด้วย

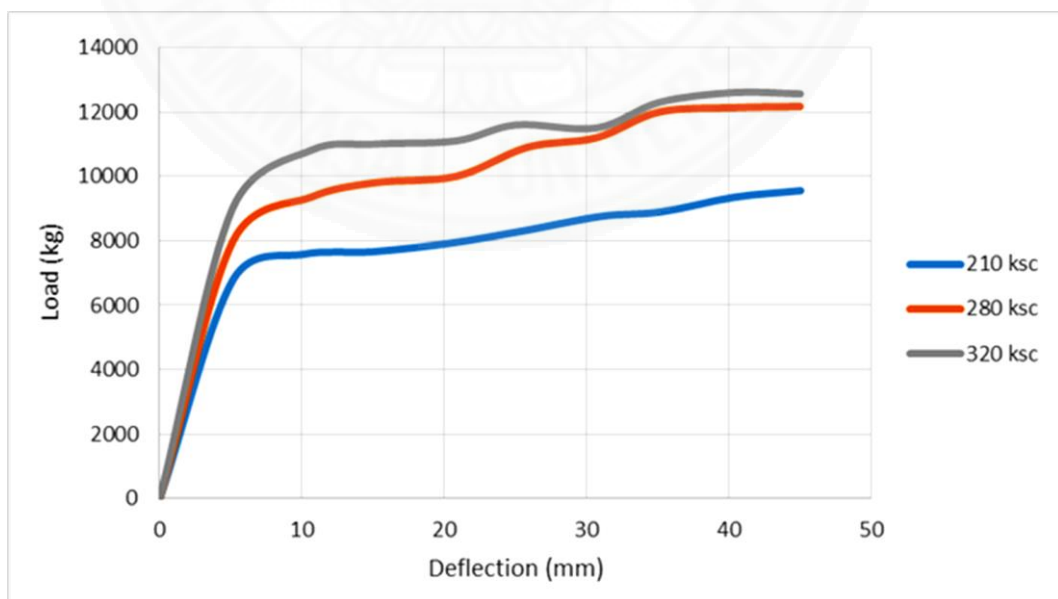
4.5.3 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองรอยต่อคาน-เสา PJ-2

เมื่อได้แบบจำลองที่เหมาะสมแล้วจึงนำมาปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยจะแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ที่ปลายคาน แบบจำลอง PJ-2 นั้นปรับแก้ค่าพารามิเตอร์จำนวน 5 ประเภทคือ 1.กำลังของเหล็กเสริม โดยแบ่งเป็น 3000, 4000 และ 5000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 2.กำลังของคอนกรีต โดยแบ่งเป็น 280 และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 3.กำลังของแผ่นเหล็ก PL-9 โดยแบ่งเป็น 3000, 4000 และ 5000

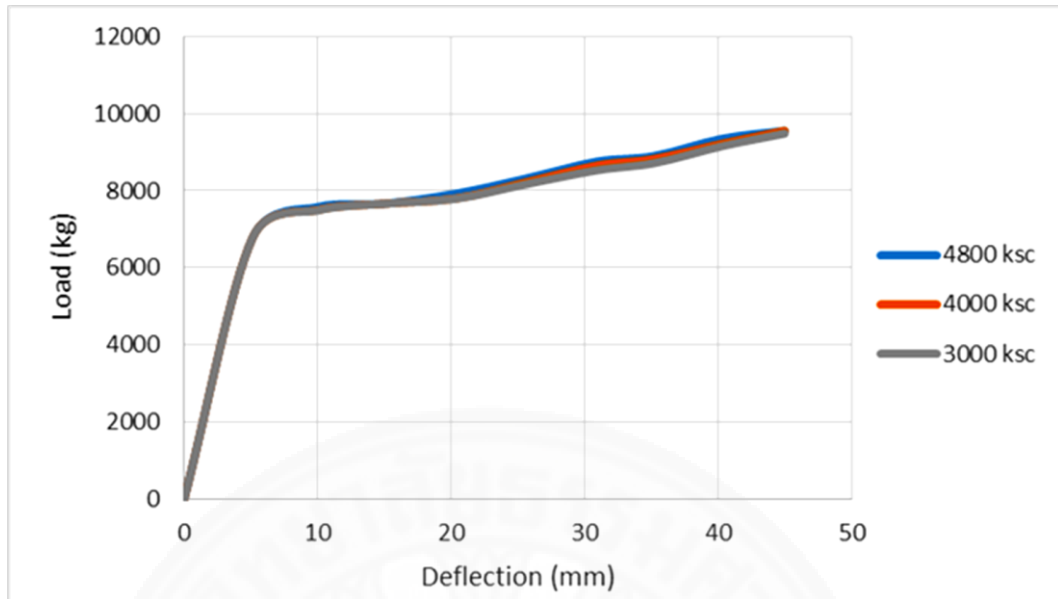
กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร 4.ความหนาของแผ่นเหล็ก PL-12 โดยแบ่งเป็น 9 และ 6 มิลลิเมตร 5. ความยาวของแผ่นเหล็ก โดยแบ่งเป็น 1000 และ 800 มิลลิเมตร



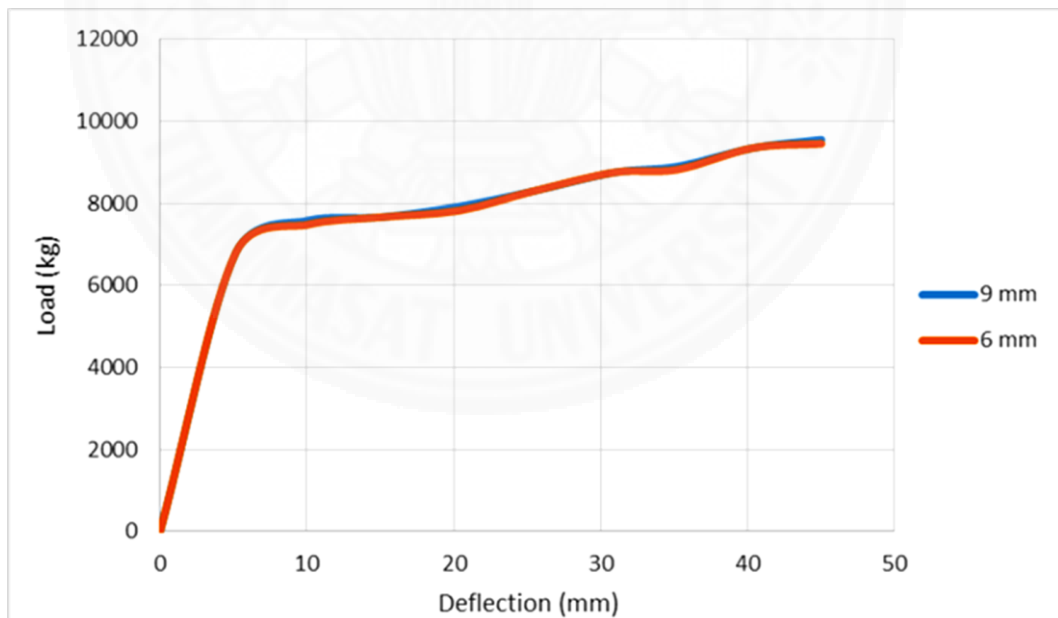
ภาพที่ 4.35 เปรียบเทียบกำลังของเหล็กเสริมในแบบจำลอง PJ-2



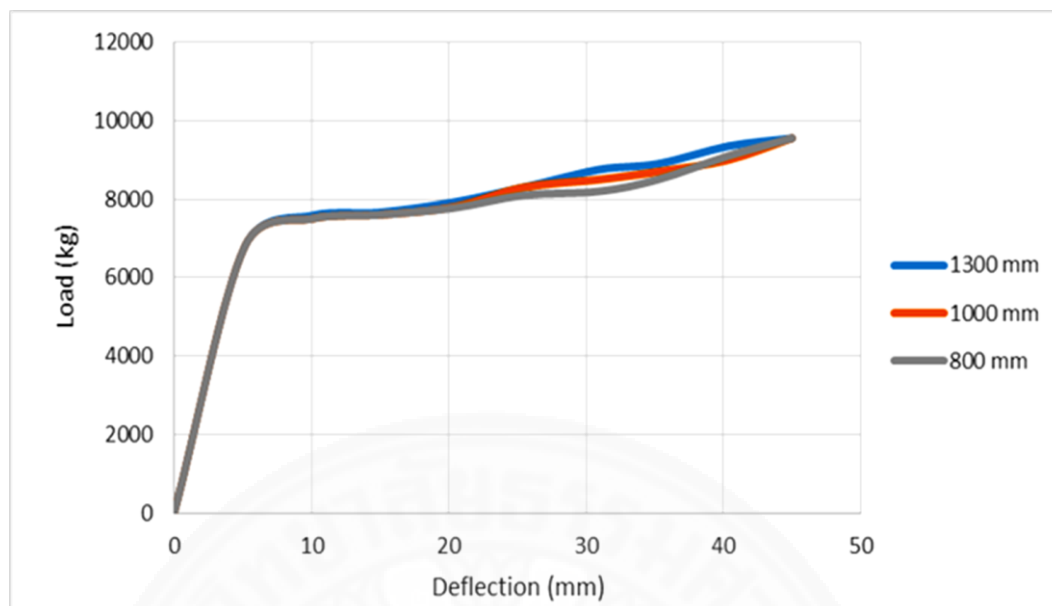
ภาพที่ 4.36 เปรียบเทียบกำลังของคอนกรีตในแบบจำลอง PJ-2



ภาพที่ 4.37 เปรียบเทียบกำลังของแผ่นเหล็ก PL-9 ในแบบจำลอง PJ-2



ภาพที่ 4.38 เปรียบเทียบความหนาของแผ่นเหล็ก PL-9 ในแบบจำลอง PJ-2



ภาพที่ 4.39 เปรียบเทียบความยาวของแผ่นเหล็ก PL-9 ในแบบจำลอง PJ-2

ภาพที่ 4.35, 4.37, 4.38 และ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของพารามิเตอร์กำลังเหล็กเสริม กำลังของแผ่นเหล็ก PL-19 ความหนาของแผ่นเหล็กและความยาวของแผ่นเหล็ก ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มลดกำลังของเหล็กและลดขนาดความหนารวมไปถึงความยาวของแผ่นเหล็กยังคงทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกไม่ต่างกัน ภาพที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานของพารามิเตอร์กำลังคอนกรีตเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มกำลังของคอนกรีตนั้นทำให้มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของรอยต่อคาน-เสา ทั้ง 3 แบบนั้นสามารถสรุปความเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่ดังตารางที่ 4.1

NO.	Parametric study	การเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่	
		มาก	น้อย
CJ-1	กำลังของคอนกรีต	✓	
	กำลังของเหล็กเสริม	✓	
PJ-1	กำลังของคอนกรีต	✓	
	กำลังของเหล็กเสริม		✓
	กำลังของแผ่นเหล็ก PL-12		✓
	ความหนาของแผ่น เหล็ก PL-12		✓
	ความสูงของแผ่นเหล็ก PL-12	✓	
PJ-2	กำลังของคอนกรีต	✓	
	กำลังของเหล็กเสริม		✓
	กำลังของแผ่นเหล็ก PL-9		✓
	ความหนาของแผ่น เหล็ก PL-9		✓
	ความยาวของแผ่น เหล็ก PL-9		✓

ตารางที่ 4.1

การเปลี่ยนแปลงของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเคลื่อนที่

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าการวิเคราะห์พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูปภายใต้แรงสถิตด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะต้องเข้าใจพื้นฐานและความหมายของพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้แบบจำลองนั้นมีผลเฉลยที่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริง การศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ABAQUS เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ โดยได้พิจารณาความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งได้ดำเนินการ โดย ทวีศักดิ์, 2558 สำหรับการสร้างแบบจำลองรอยต่อคาน-เสา ทั้งสามรูปแบบนั้นจะเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิด Solid C3D8 แทนวัสดุที่เป็นคอนกรีตและเอลิเมนต์ชนิด Truss T3D2 แทนวัสดุเหล็กเสริม การจำลองเหล็กเสริมกำลังในคอนกรีตนั้นจะกำหนดให้วัสดุเสริมกำลังในคอนกรีตเป็นแบบ Embedded ซึ่งจะกำหนดให้คอนกรีตเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนเหล็กเสริมกำลังในคอนกรีตนั้นเป็นองค์ประกอบรอง เมื่อแบบจำลองเหมาะสมแล้วจึงนำไปปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากการปรับพารามิเตอร์ ผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมของรอยต่อคาน-เสา

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อคาน-เสา ที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกัน (CJ-1) และรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป (PJ-1) นั้นให้ผลเฉลยที่มีความสอดคล้องกันกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยช่วงเชิงเส้น ของรอยต่อคาน-เสา ทั้ง 3 รูปแบบจะให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับผลการทดสอบและสำหรับช่วงไร้เชิงเส้น ของรอยต่อคาน-เสา CJ-1 นั้นจะให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าของรอยต่อคาน-เสา PJ-1 และ PJ-2 และเมื่อนำผลทางด้านกำลังที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นพบว่าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของรอยต่อคาน-เสา CJ-1, PJ-1 และ PJ-2 มีกำลัง 10.82, 11.1 และ 8.71 ตันตามลำดับ ซึ่งรอยต่อคาน-เสา PJ-1 นั้นให้กำลังมากที่สุด สำหรับรอยต่อคาน-เสา CJ-1, PJ-1 และ PJ-2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีกำลัง 10.71, 10.89 และ 9.5 ตันตามลำดับ ผลเฉลยที่ได้จากการ

วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของ CJ-1 และ PJ-1 นั้นมีกำลังต่ำกว่าผลการทดสอบคิดเป็นร้อยละ 1.02 และ 1.92 สำหรับผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ PJ-2 นั้นมีกำลังสูงกว่าผลการทดสอบคิดเป็นร้อยละ 8.31 จากผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นพบว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของรอยต่อคาน-เสา ในรูปแบบต่างๆ ยังคงให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป (PJ-1) นั้นจะมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกมากที่สุด สำหรับรอยต่อคาน-เสา CJ-1 และ PJ-1 มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกรองลงมาตามลำดับ

5.1.2 ผลวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์จากการปรับค่าพารามิเตอร์

การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแบบจำลองนั้นแบ่งเป็นกำลังของเหล็กเสริม กำลังของคอนกรีตและขนาดของแผ่นเหล็กเสริม โดยมีรายละเอียดดังที่กล่าวมาข้างต้น ผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จะแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานพบว่าผลจากการปรับแก้กำลังของเหล็กเสริมในแบบจำลองรอยต่อคาน-เสา หล่อในที่ (CJ-1) นั้นเมื่อลดกำลังของเหล็กเสริมลงทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกลดลง แต่สำหรับรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป (PJ-1, PJ-2) นั้นไม่ทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกลดลง การปรับแก้กำลังของคอนกรีตในแบบจำลองรอยต่อคาน-เสา ทั้งสามรูปแบบพบว่ากำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้กำลังรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และสำหรับการปรับแก้ขนาดของแผ่นเหล็กในแบบจำลองรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูปพบว่าความหนาและความยาวของแผ่นเหล็กนั้นไม่ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกขณะที่ความสูงของแผ่นเหล็กนั้นส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกอย่างเห็นได้ชัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) การวิเคราะห์พฤติกรรมรอยต่อคาน-เสา สำเร็จรูป (PJ-2) ควรพิจารณาในส่วนของแรงอัดภายใน Bolt และผลของการ Slip ของแผ่นเหล็ก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้แผ่นเหล็ก Bond ไปกับคอนกรีต

(2) หลักการสมมาตรควรนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อประหยัดเวลาและขนาดของไฟล์ภายหลังการวิเคราะห์

(3) ในงานวิจัยต่อไปอาจพิจารณาโครงสร้างทั้งระบบ เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- ABAQUS User's Manual (2008). ABAQUS, Inc., Pawtucket, Rhode Island, USA.
- Bangash, M.Y.H. (1989). Concrete and Concrete Structures: Numerical Modeling and Applications. London: Elsevier Science Publishers Ltd.
- Elliott, K. S. (2002). Precast Concrete Structures. Great Britain: Antony Rowe Ltd.
- Macgregor, J.G. (2005). Reinforced Concrete Mechanics and Design. Englewood Cliff New Jersey: Prentice Hall, Inc
- เดช พุทธเจริญทอง.,(1998). การวิเคราะห์ห้ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : บริษัทพิมพ์ดีจำกัด

บทความวารสาร

- Aydin Demir, (2016). 3D Numerical Modeling of RC Deep Beam Behavior by Nonlinear Finite Element Analysis. Disaster Science and Engineering p. 13-18, 2(1), 2016
- Deng Sihua (2015). Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Beam Bending Failure Experimentation Based on ABAQUS, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing China
- Hamid Sinaei (2011). Numerical investigation on exterior reinforced concrete Beam-Column Joint strengthened by composite fiber reinforced polymer (CFRP), Department of Civil Engineering, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia.
- Hamid Sinaei (2012). Evaluation of reinforced concrete beam behaviour using finite Element analysis by ABAQUS, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Sirjan, Iran
- T. Tejaswini (2015). Analysis of RCC Beams using ABAQUS, Hyderabad, Telangana, India

- Wahalathantri, B. Thambiratnam, D., Chan, T. and Fawzia, S. (2011). A material Model for flexural Crack simulation in reinforced concrete Elements using ABAQUS, Proceedings of the First International Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing, pp. 260–264.
- X. Long (2014). Modelling of Two Dimensional Reinforced Concrete Beam-Column Joints Subjected to Monotonic Loading, School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

วิทยานิพนธ์

- Rasoul Nilforoush Hamedani (2012). Numerical Evaluation of Structural Behavior of the Simply Supported FRP-RC Beams. Master of Science Thesis, Stockholm, Sweden
- กิตติยา สอนเฟือก. (2548). พฤติกรรมโครงสร้างของรอยต่อระหว่างคานและเสาสำหรับบ้านสำเร็จรูป. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา.
- จารุวัฒน์ ถาวรไพศาลชิวะ. (2549). พฤติกรรมโครงสร้างเพื่อเสนอสมการออกแบบรอยต่อคาน-เสาสำเร็จรูป. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา.
- ทวีศักดิ์ โสภณธนาพร. (2558). พฤติกรรมรอยต่อชิ้นส่วนโครงสร้างคาน-เสา สำเร็จรูปภายใต้แรงสถิต. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย อรรถพล อติชาติ
วันเดือนปีเกิด	12 กรกฎาคม 2536
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554-2557: ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมโยธาและบริหารการก่อสร้าง คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

