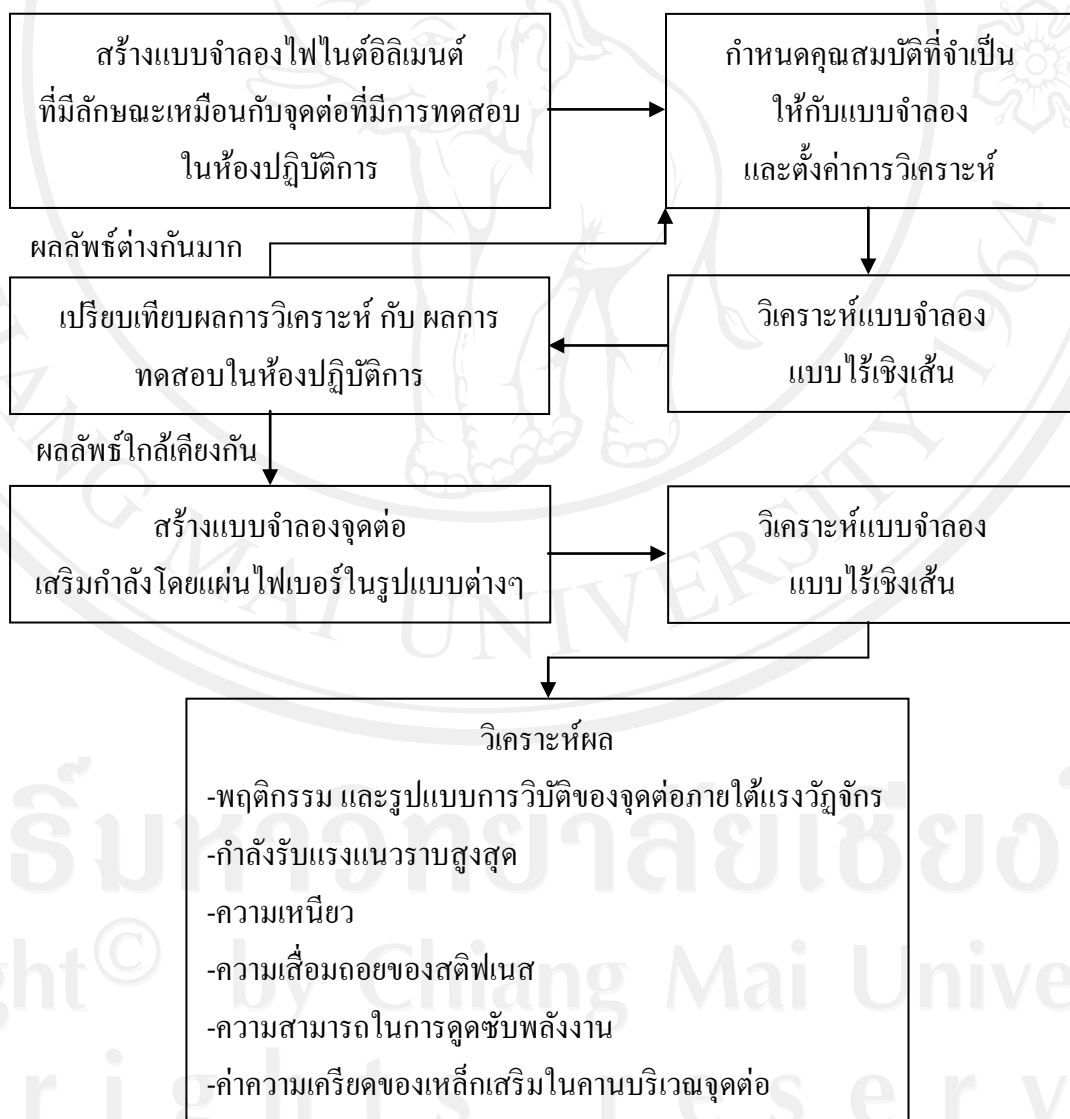


บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็นสองขั้นตอนหลัก คือขั้นตอนสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ และเมื่อได้รับผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์จุดต่ออาคารเสริมกำลังโดยการหุ้มแผ่นไฟเบอร์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน โดยสามารถแสดงลำดับของการวิจัยได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนของงานวิจัย

3.1 การวิเคราะห์จุดต่ออาคารเสริมกำลังโดยการหุ้มแผ่นไฟเบอร์


การเสริมกำลังชิ้นส่วน โครงสร้าง โดยการหุ้มแผ่นไฟเบอร์ของอาคารที่ก่อสร้างไปแล้ว เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวกำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีการติดตั้งง่าย และไม่ต้องค้ำอาคารระหว่างติดตั้ง แต่แผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ในงานวิศวกรรมมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นการนำแผ่นไฟเบอร์มาใช้จึงควรมีแนวทางในการเลือกใช้ที่เหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์แบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์ จำนวน 10 ตัวอย่าง โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือแบบจำลองจุดต่ออาคาร และแบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร ซึ่งแต่ละกลุ่มมีการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์ลักษณะต่างกัน 5 รูปแบบ ประกอบด้วย

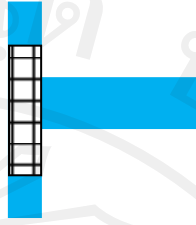
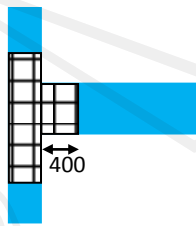
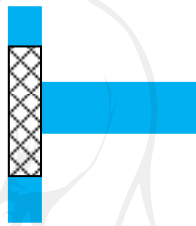
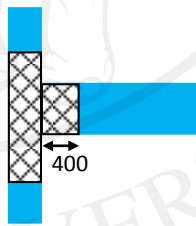

- จุดต่อไม่เสริมกำลัง
- จุดต่อเสริมกำลังที่เสาโดยใช้แผ่น Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)
- จุดต่อเสริมกำลังที่เสาและคานโดยใช้แผ่น Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)
- จุดต่อเสริมกำลังที่เสาโดยใช้แผ่น Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)
- จุดต่อเสริมกำลังที่เสาและคานโดยใช้แผ่น Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

ขนาดและรายละเอียดของแบบจำลองจะใช้เหมือนจุดต่อที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ และติดตั้งแผ่นไฟเบอร์แบบการหุ้มทั้งหน้าตัด (Complete Wrap) ที่จุดต่อและเสาเป็นระยะไม่น้อยกว่า 20% ของความสูงระหว่างชั้น ส่วนที่คานจะหุ้มแผ่นไฟเบอร์ระยะออกจากหน้าเสาเท่ากับความลึกของคาน เพื่อให้ครอบคลุมตำแหน่งที่จะเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) โดยทั่วไปเสา และคานจะเกิดจุดหมุนพลาสติกที่ตำแหน่งไม่เกิน 0.5 เท่า ของความลึกหน้าตัด จำนวนชั้นของแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้เท่ากับ 2 ชั้น เพื่อให้เพียงพอต่อแรงเฉือนส่วนเกินที่เกิดขึ้นในการที่จะย้ายการวิบัติจากจุดต่อให้ไปเกิดการวิบัติที่คานตามพฤติกรรมคานอ่อน-เสาแข็ง โดยแบบจำลองทั้งหมดที่ทำการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

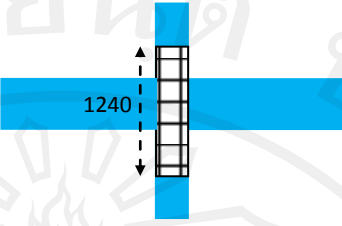
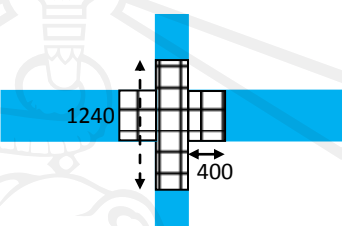
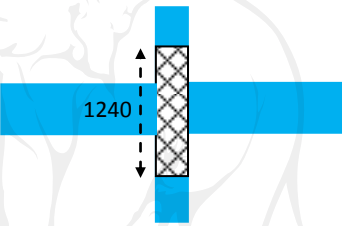
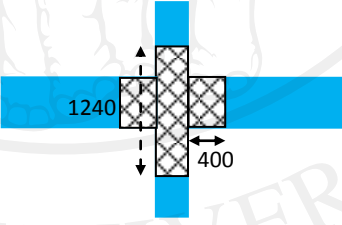
ตารางที่ 3.1 แบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์ที่ทำการวิเคราะห์ (carbon, glass)

ลำดับ	ชื่อแบบจำลอง	รูปแบบ	การเสริมกำลัง
1	J1		ไม่มีการเสริมกำลัง

ตารางที่ 3.1(ต่อ) แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ทำการวิเคราะห์ (☐ carbon, ☒ glass)

2	J1-CFRP1		เสริม Carbon fiber ที่เสา
3	J1-CFRP2		เสริม Carbon fiber ที่เสาและคาน
4	J1-GFRP1		เสริม Glass fiber ที่เสา
5	J1-GFRP2		เสริม Glass fiber ที่เสาและคาน
6	J2		ไม่มีการเสริมกำลัง

ตารางที่ 3.1(ต่อ) แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ทำการวิเคราะห์ (☐ carbon, ☒ glass)

7	J2-CFRP1		เสริม Carbon fiber ที่เสา
8	J2-CFRP2		เสริม Carbon fiber ที่เสาและคาน
9	J2-GFRP1		เสริม Glass fiber ที่เสา
10	J2-GFRP2		เสริม Glass fiber ที่เสาและคาน

หมายเหตุ : หน่วยที่ระบุในตาราง คือ มิลลิเมตร

การหุ้มแผ่นไฟเบอร์ในทุกแบบจำลองมีระยะเท่ากันทุกรูปแบบ คือหุ้มเสารวมจุดต่อ ระยะเท่ากับ 1240 mm. และหุ้มที่คานระยะออกจากหน้าเสาเท่ากับ 400 mm.

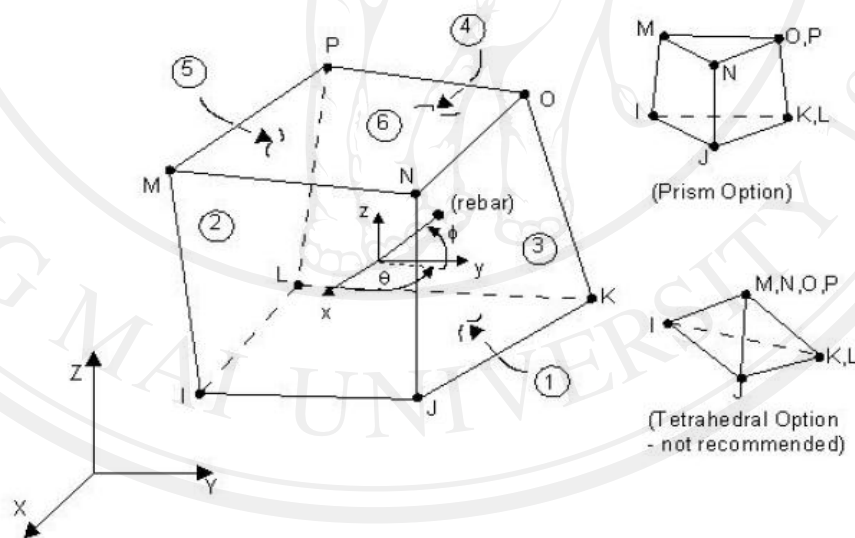
การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำโปรแกรม ANSYS มาใช้สร้างแบบจำลอง โดยจำเป็นต้องกำหนดขนาดและคุณสมบัติวัสดุของแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการมากที่สุด และใช้วิธีการสร้างแบบจำลองแบบสมมาตร (Symmetry) เพื่อช่วยลดระยะเวลาและพื้นที่ใช้เก็บข้อมูลการวิเคราะห์

ขั้นตอนต่อไปเป็นการอธิบายวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีขั้นตอนที่สำคัญประกอบด้วย การกำหนด Element Type, Real Constant, Material Property, Modeling, และ Meshing ซึ่งหน่วยที่ใช้จะต้องเป็นหน่วยเดียวกันตลอดจนเสร็จสิ้นการสร้างแบบจำลอง

3.1.1 Element Type

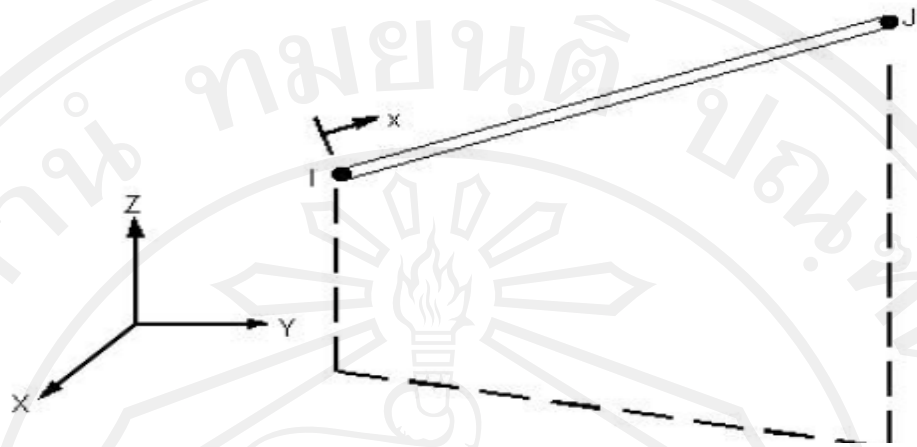
ชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้สร้างแบบจำลองจุดต่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ประกอบด้วย Solid65, Link8, Solid45 และ Solid46 ใช้แทนคอนกรีต, เหล็กเสริม, แผ่นเหล็กรองรับ และแผ่นไฟเบอร์ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละเอลิเมนต์จะมีคุณสมบัติเฉพาะแตกต่างกัน

เอลิเมนต์ Solid65 ใช้แทนคอนกรีต เนื่องจากสามารถกำหนดให้มีคุณสมบัติของเหล็กเสริมกระจายเข้าไปในเอลิเมนต์ได้ และสามารถแสดงรอยร้าวเนื่องจากแรงอัด, แรงดึง ตลอดจนการเสียดรูปแบบพลาสติก โดยเอลิเมนต์ชนิดนี้เป็นชนิด 3 มิติ จำนวน 8 โหนด ในแต่ละโหนดเคลื่อนที่ได้ในทิศทาง x, y, z ซึ่งรูปแบบของเอลิเมนต์ชนิดนี้ได้แสดงดังรูปที่ 3.2



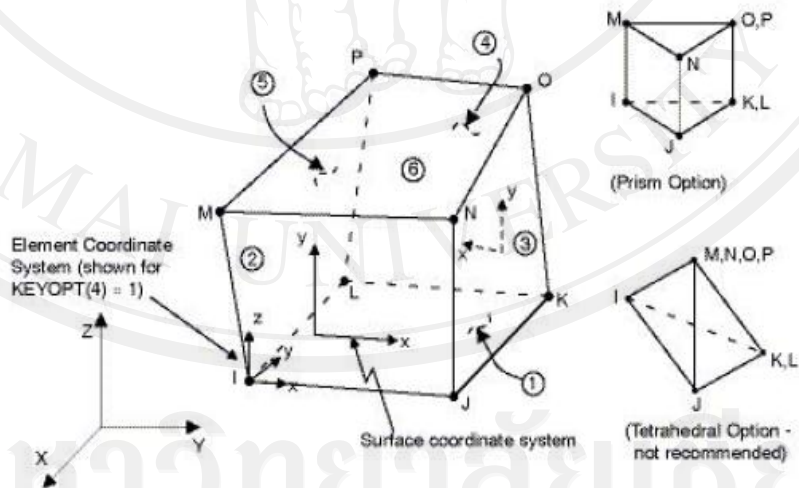
รูปที่ 3.2 เอลิเมนต์ Solid65 (ANSYS, 2005)

เอลิเมนต์ Link8 ดังรูปที่ 3.3 ใช้สร้างแบบจำลองเหล็กเสริม เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นตรงที่สามารถกำหนดขนาดหน้าตัด และแสดงพฤติกรรมการเสียดรูปแบบพลาสติกได้ เอลิเมนต์นี้เป็นชนิด 3 มิติ แบบเส้น ประกอบด้วย 2 โหนด แต่ละโหนดเคลื่อนที่ได้ในทิศทาง x, y, z



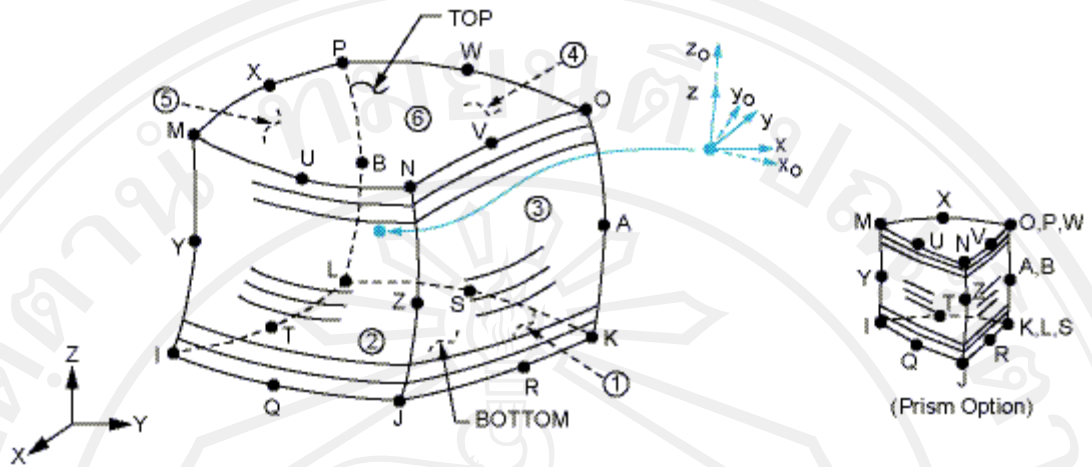
รูปที่ 3.3 อีลิเมนต์ Link8 (ANSYS, 2005)

อีลิเมนต์ Solid45 ใช้สร้างแผ่นเหล็กรองรับบริเวณตำแหน่งที่ควบคุมระยะเคลื่อนที่ เพื่อช่วยกระจายแรงลงในตัวอย่างทดสอบให้ทั่วบริเวณ และลดการเกิดความเสียหายเฉพาะจุดซึ่งเป็นเหตุผลให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติก่อนที่ควรจะเป็น อีลิเมนต์นี้เป็นชนิด 3 มิติ 8 โหนด แต่ละโหนดเคลื่อนที่ได้ในทิศทาง x, y, z โดยรูปแบบของอีลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 อีลิเมนต์ Solid45 (ANSYS, 2005)

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อีลิเมนต์ Solid46 แทนแผ่นไฟเบอร์ เนื่องจากมีคุณสมบัติสามารถกำหนดจำนวนชั้นและแนวเรียงตัวของเส้นใยได้ อีลิเมนต์ชนิดนี้เป็นอีลิเมนต์ 3 มิติ 8 โหนด และแต่ละโหนดเคลื่อนที่ได้ในทิศทาง x, y, z โดยรูปร่างของอีลิเมนต์ดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 3.5



x_0 = Element x-axis if ESYS is not supplied.

x = Element x-axis if ESYS is supplied.

รูปที่ 3.5 อิลิเมนต์ Solid46 (ANSYS, 2005)

3.1.2 Real Constant

คือ ค่าคงที่เฉพาะของอิลิเมนต์ โดยในแต่ละอิลิเมนต์จะมีการกำหนดค่าคงที่นี้แตกต่างกัน เช่นอิลิเมนต์ Solid65 จะต้องกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องกับการกระจายคุณสมบัติของเหล็กเสริมเข้าไปในอิลิเมนต์คอนกรีต ประกอบด้วย

-Material Number คือ การกำหนดชนิดของอิลิเมนต์ (ในงานวิจัยนี้หมายถึงเหล็กเสริม) ที่ใช้ในการกระจายเข้าไปในคอนกรีต

-Volume Ratio คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณเหล็กเสริมต่อปริมาณของคอนกรีต

-Orientation Angle คือ การจัดเรียงทิศทางของเหล็กเสริมภายในคอนกรีต

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนด Real Constant ของคอนกรีตเท่ากับศูนย์ทั้งหมด เนื่องจากได้สร้างแบบจำลองโดยมีอิลิเมนต์ของเหล็กเสริมแยกออกมาจากอิลิเมนต์ของคอนกรีตและถ่ายเทพลังการร่วมกันผ่านโหนด

Real Constant ของอิลิเมนต์ Link8 เป็นการกำหนดขนาดของหน้าตัดเหล็กเสริมที่ใช้ตลอดจนการกำหนดคุณสมบัติของลวดอัดแรง (Prestress) โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขนาดหน้าตัดเหล็กเสริมเท่ากับ 28.3 ตารางมิลลิเมตร และ 201.1 ตารางมิลลิเมตร แทนเหล็กเส้นกลมขนาด 6 mm. และเหล็กข้ออ้อยขนาด 16 mm. ตามลำดับ ส่วนอิลิเมนต์ Solid45 และ Solid46 ไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า Real Constant จากที่กล่าวมาสามารถสรุปค่าดังกล่าวที่ใช้ในงานวิจัยได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า Real Constant ของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์

Real Constant	Element Type	Constant			
1	Solid65		Rebar1	Rebar2	Rebar3
		Material Number	0	0	0
		Volume Ratio	0	0	0
		Orientation Angle	0	0	0
2	Link8	Section Area	28.3		
		Initial Strain	0		
3	Link8	Section Area	201.1		
		Initial Strain	0		

3.1.3 Material Properties

คุณสมบัติวัสดุที่ใช้สร้างแบบจำลองควรมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบวัสดุโดยแต่ละอิลิเมนต์ได้กำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ถึง 3.7

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติวัสดุของอิลิเมนต์ Solid65

Material Number	Element Type	Material Property		
1	Solid65	Linear Isotropic		
		EX	25,733 MPa	
		PRXY	0.2	
		Multi-linear Kinematic		
		Point	Strain	Stress (MPa)
		1	0.000034	8.86
		2	0.00006	14.45
		3	0.00013	25.32
		4	0.00019	29.00
		5	0.00023	29.53
6	0.003	29.53		

ตารางที่ 3.3(ต่อ) คุณสมบัติวัสดุของอิเลิเมนต์ Solid65

1	Solid65	Concrete	
		ShCf-Op	0.3
		ShCf-Cl	0.9
		UnTensSt	3.92 MPa
		UnCompSt	29.53 MPa
		BiCompSt	0
		HydroPrs	0
		UnTensSt	0
		TenCrFac	0

คุณสมบัติวัสดุหมายเลข 1 ใช้แทนอิเลิเมนต์ Solid65 โดยต้องกำหนดคุณสมบัติวัสดุเชิงเส้นตรง, คุณสมบัติวัสดุช่วงไร้เชิงเส้น และคุณสมบัติเฉพาะของคอนกรีต โดย EX และ PRXY คือ Modulus of Elasticity และ Poisson's Ratio ของวัสดุนั้น

สมการที่ใช้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของกำลังอัดคอนกรีตในงานวิจัยครั้งนี้ แสดงดังสมการที่ 3.1 ถึง 3.3 (MacGregor, J.G., 1992)

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

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

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

เมื่อ

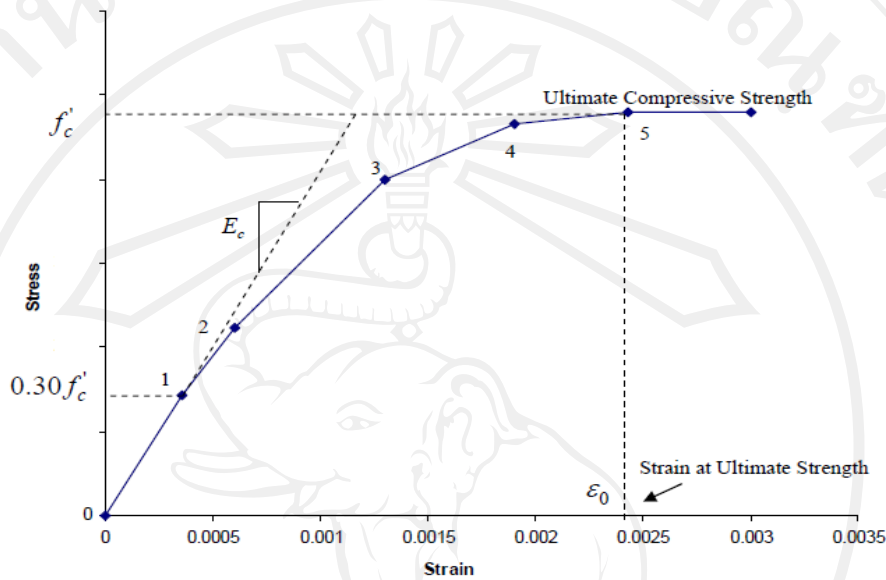
f คือ ความเค้น

ε คือ ความเครียด

ε_0 คือ ความเครียดที่กำลังอัดสูงสุด (f'_c)

E_c คือ มอดูลัสของคอนกรีต

เมื่อนำสมการดังกล่าวมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของกำลังอัดคอนกรีตจะได้กราฟดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น กับ ความเครียดของคอนกรีต

จุดที่ 1 ของกราฟ คือจุดสิ้นสุดช่วงเชิงเส้น มีค่าเท่ากับ $0.3 f'_c$ จุดที่ 2, 3, 4 คำนวณได้จากสมการ 3.1 ส่วนในจุดที่ 5 คือจุดที่มีกำลังอัดสูงสุด และมีความเครียดเท่ากับ ϵ_0 คำนวณได้จากสมการ 3.2 และจุดที่ 6 กำหนดให้เท่ากับค่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตเมื่อรับแรงอัด คือ 0.003 คุณสมบัติเฉพาะของคอนกรีตที่แสดงในตารางที่ 3.3 ประกอบด้วย

- Shear Transfer Coefficients for an Open Crack
- Shear Transfer Coefficients for an Close Crack
- Uniaxial Tensile Cracking Stress
- Uniaxial Crushing Stress
- Biaxial Crushing Stress
- Ambient Hydrostatic Stress State
- Biaxial Crushing Stress Under the Ambient Hydrostatic Stress
- Uniaxial Crushing Stress Under the Ambient Hydrostatic Stress
- Stiffness Multiplier for Cracked Tensile Condition

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติวัสดุของอิลิเมนต์ Link8 (เหล็กเส้นกลม RB6)

Material Number	Element Type	Material Property	
2	Link8	Linear Isotropic	
		EX	211,798 MPa
		PRXY	0.3
		Bilinear Isotropic	
		Yield Stss	311.47 MPa
	Tang Mod	0	

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติวัสดุของอิลิเมนต์ Link8 (เหล็กข้ออ้อย DB16)

Material Number	Element Type	Material Property	
3	Link8	Linear Isotropic	
		EX	207,089 MPa
		PRXY	0.3
		Bilinear Isotropic	
		Yield Stss	577.32 MPa
	Tang Mod	0	

คุณสมบัติวัสดุหมายเลข 2 และ 3 ในอิลิเมนต์ Link8 ใช้แทนวัสดุเหล็กเส้นกลม และเหล็กข้ออ้อยตามลำดับ โดยอิลิเมนต์ชนิดนี้จำเป็นต้องกำหนดค่า Modulus of Elasticity, Poisson's Ratio, กำลังคราก และสมมุติให้คุณสมบัติของเหล็กเส้นทั้งสองชนิดเป็นแบบ Fully Plastic ซึ่งมีค่า Tangent Modulus เท่ากับศูนย์ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติวัสดุของอิลิเมนต์ Solid45

Material Number	Element Type	Material Property	
4	Solid45	Linear Isotropic	
		EX	200,124 MPa
		PRXY	0.3

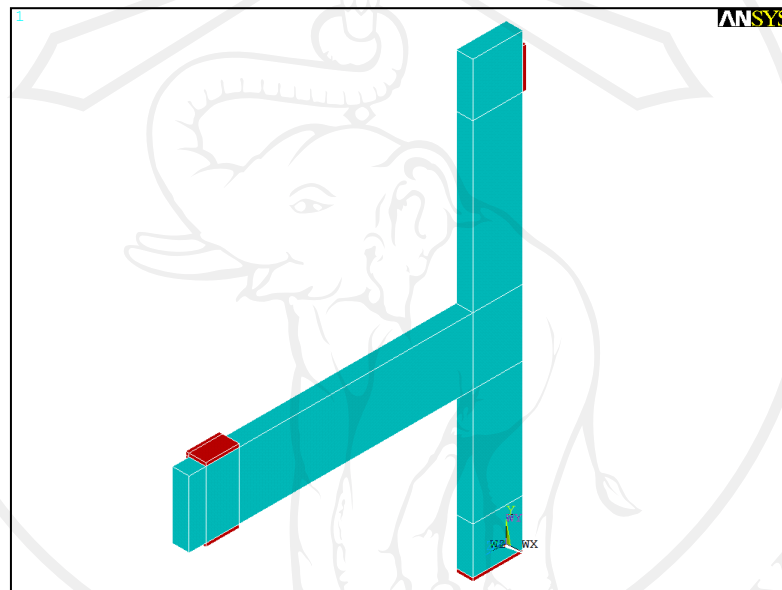
ส่วนในคุณสมบัติวัสดุหมายเลข 4 ที่กำหนดให้กับอิลิเมนต์ Solid45 นั้นได้กำหนดเฉพาะคุณสมบัติในช่วงเชิงเส้น คือ Modulus of Elasticity และ Poisson's Ratio ดังในตารางที่ 3.6 คุณสมบัติวัสดุหมายเลข 5 และ 6 ของอิลิเมนต์ Solid46 ใช้แทนแผ่น Carbon Fiber และ Glass Fiber ที่ใช้มีความหนาของแผ่นไฟเบอร์เท่ากับ 2.5 mm. โดยในแต่ละแผ่นมีการวางเส้นใยระหว่างชั้นให้มีทิศทางเส้นใยตั้งฉากกัน และเนื่องจากมีการซ้อนกันของเส้นใยไฟเบอร์นี้จึงสมมุติให้แผ่นไฟเบอร์ในงานวิจัยรับแรงดึงเท่ากันทุกทิศทาง โดยจำเป็นต้องกำหนดคุณสมบัติพื้นฐาน คือ Modulus of Elasticity และ Poisson's Ratio ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติในช่วงเชิงเส้นของวัสดุ ส่วนการกำหนดคุณสมบัติวัสดุในช่วงไร้เชิงเส้นนั้น เนื่องจากพฤติกรรมการวิบัติของแผ่นไฟเบอร์เป็นแบบเปราะจึงไม่กำหนดคุณสมบัติหลังจากแผ่นไฟเบอร์ก็ขาดดังแสดงในตารางที่ 3.7 โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้คุณสมบัติของแผ่นไฟเบอร์ตาม มยศ.1508-51 ซึ่งกำลังรับแรงดึงของแผ่นไฟเบอร์นี้ได้คำนวณตามข้อแนะนำของ ACI 440.2R-02 (Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures)

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติวัสดุของแผ่นไฟเบอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

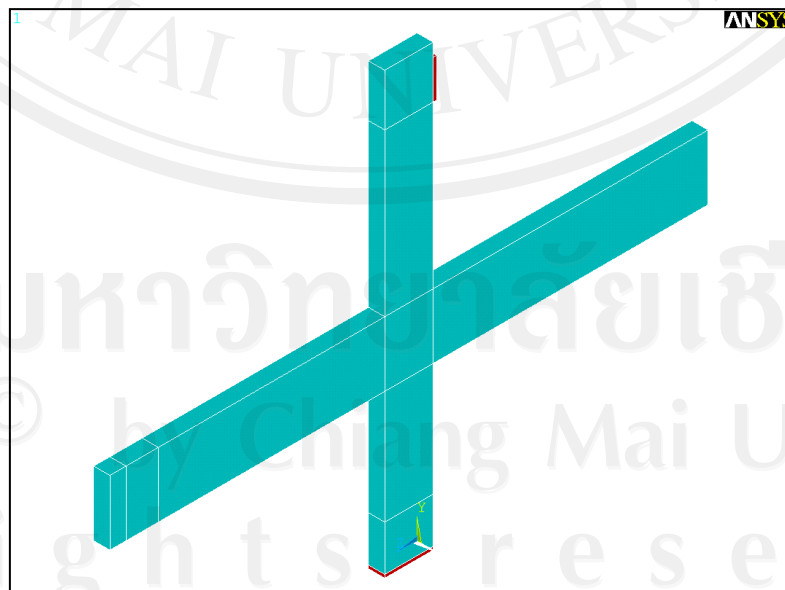
Material Number	Element Type	Material Property
5	Solid46 แผ่น Carbon Fiber	<u>Linear Isotropic</u> EX = 140,047 MPa PRXY = 0.3 <u>Multilinear Kinematic</u> Point 1 Strain = 0.0146 Stress = 2,080 MPa
6	Solid46 แผ่น Glass Fiber	<u>Linear Isotropic</u> EX= 40,014 MPa PRXY = 0.3 <u>Multilinear Kinematic</u> Point 1 Strain = 0.035 Stress = 1,400 MPa

3.1.3 Modeling

การวิเคราะห์แบบจำลองในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือแบบจำลองจุดต่อริมอาคาร และจุดต่อภายในอาคาร โดยแบบจำลองประกอบด้วยชิ้นส่วนของคอนกรีต, เหล็กเสริม, แผ่นเหล็กรองรับ และแผ่นไฟเบอร์ และใช้คุณสมบัติสมมาตร (Symmetry) ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อลดระยะเวลาและพื้นที่ในการวิเคราะห์ข้อมูล แบบจำลองที่สร้างขึ้นจึงมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของตัวอย่างทดสอบจริงดังรูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8

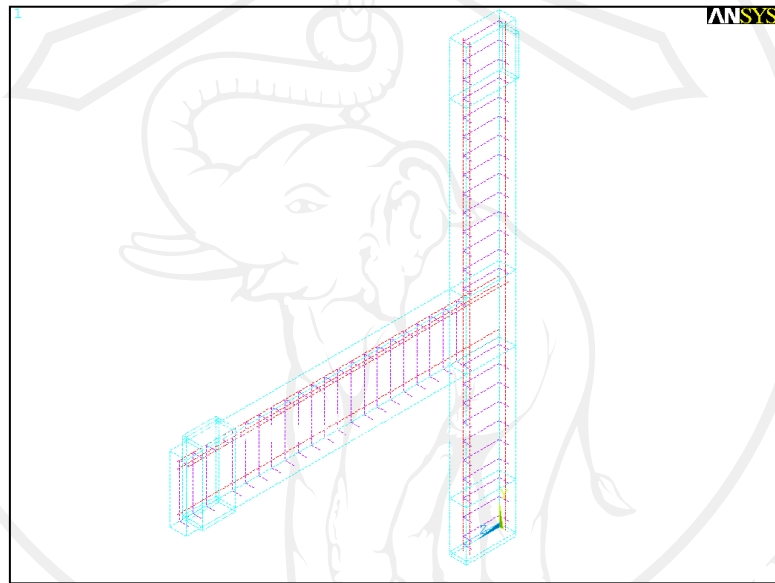


รูปที่ 3.7 แบบจำลองจุดต่อริมอาคาร J1

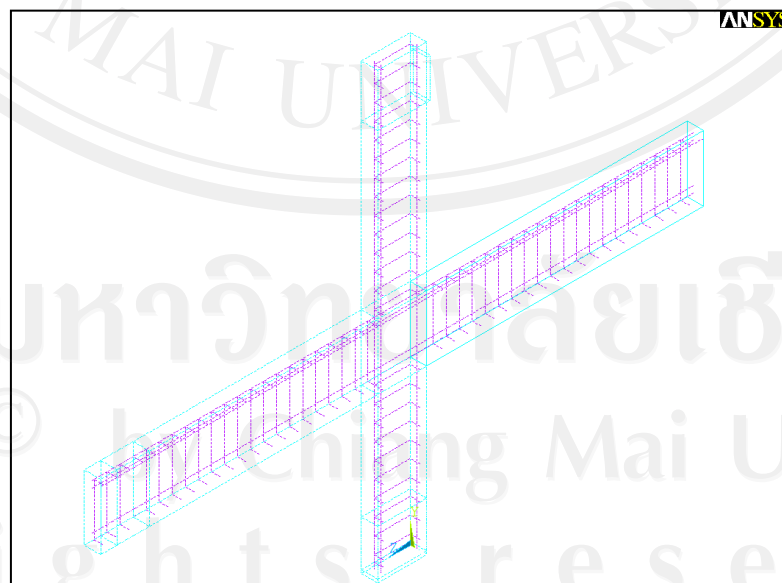


รูปที่ 3.8 แบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร J2

แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ถูกสร้างโดยใช้รูปทรงปริมาตรประกอบเป็นจุดต่ออาคารที่มีความสมมาตรในแกน x โดยมีขนาดเสา 100x300x2720 mm. และคานขนาด 100x400x1700 mm. ใช้แผ่นเหล็ก 100x200x20 mm. ที่จุดรองรับและจุดให้ระยะเคลื่อนที่เพื่อช่วยกระจายแรงลงในแบบจำลอง ส่วนการสร้างแบบจำลองเหล็กเสริมในคอนกรีต สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 โดยเหล็กเสริมนั้นมีระยะหุ้มของคอนกรีตเท่ากับ 40 mm. และมีระยะห่างระหว่างชั้นของเหล็กเสริมเท่ากับ 20 mm.



รูปที่ 3.9 แบบจำลองเหล็กเสริมในจุดต่ออิมอาคาร J1



รูปที่ 3.10 แบบจำลองเหล็กเสริมในจุดต่อภายในอาคาร J2

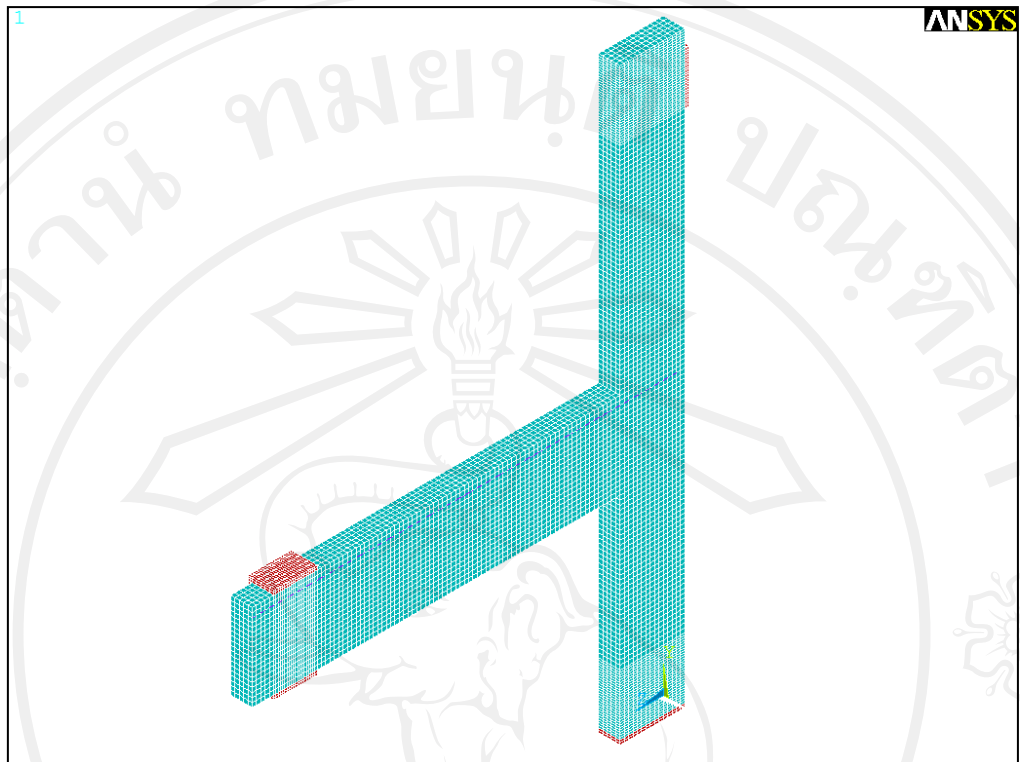
3.1.4 Meshing

การแบ่งแบบจำลองออกเป็นอิเลเมนต์ย่อยเป็นขั้นตอนสำคัญมากในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อิเลเมนต์ เนื่องจากมีผลกับความแม่นยำและความละเอียดของผลลัพธ์ ถ้าแบ่งแบบจำลองให้ละเอียดมาก (อิเลเมนต์ย่อยมีขนาดเล็ก) ก็จะได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ แต่จะใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลและระยะเวลาในการวิเคราะห์มากขึ้น ตรงกันข้ามถ้าแบ่งแบบจำลองให้มีความละเอียดน้อย (อิเลเมนต์ย่อยมีขนาดใหญ่) ผลลัพธ์ที่ได้จะมีความแม่นยำน้อยแต่ก็ใช้พื้นที่ในการเก็บข้อมูลและระยะเวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่าในวิธีแรก และสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการแบ่งอิเลเมนต์ย่อยคือต้องให้อิเลเมนต์ย่อยที่แบ่งออกมามีโหนดที่เชื่อมต่อกัน เนื่องจากการวิเคราะห์ไฟไนต์อิเลเมนต์มีการถ่ายเทพลังการผ่านโหนดที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งก่อนที่จะทำการแบ่งแบบจำลองออกเป็นอิเลเมนต์ย่อย ต้องกำหนดคุณสมบัติของอิเลเมนต์ย่อยนั้นเสียก่อน โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดคุณสมบัติของอิเลเมนต์ย่อยดังตารางที่ 3.8

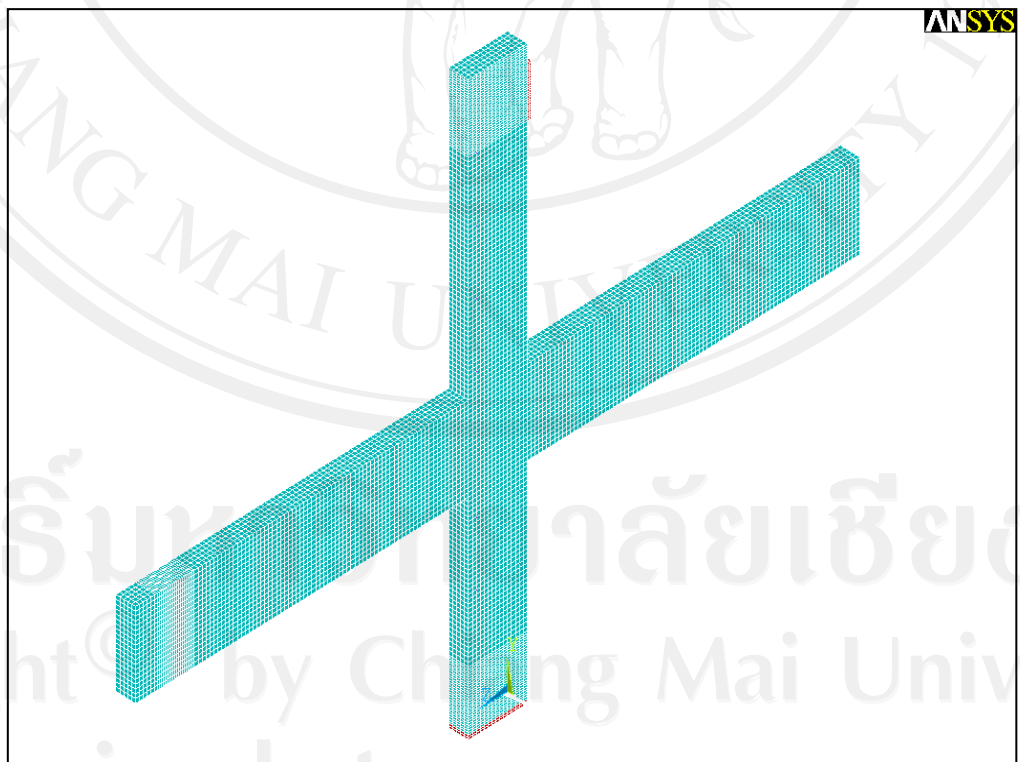
ตารางที่ 3.8 การกำหนดคุณสมบัติของอิเลเมนต์ย่อย

ชิ้นส่วนแบบจำลอง	Element Type	Material Number	Real Constant
คอนกรีต	1	1	1
เหล็กเสริม RB6	2	2	2
เหล็กเสริม DB16	2	3	3
แผ่นเหล็กรองรับ	3	4	-
แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	4	5	-
แผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว	4	6	-

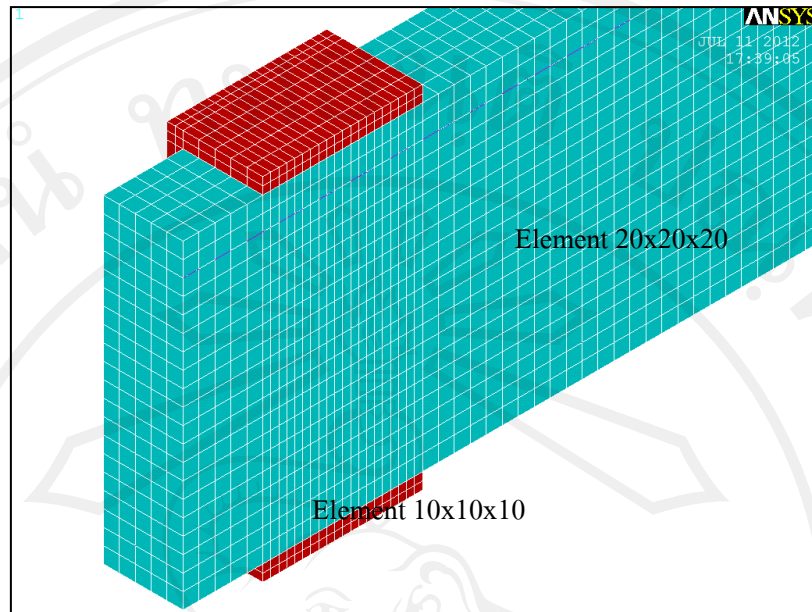
เมื่อกำหนดคุณสมบัติของอิเลเมนต์ย่อยเรียบร้อยแล้วจึงทำการแบ่งแบบจำลองดังรูปที่ 3.11 และ รูปที่ 3.12 โดยใช้ขนาดอิเลเมนต์ย่อยเท่ากับ 20x20x20 mm. แต่ในบริเวณจุดรองรับและบริเวณให้ระยะเคลื่อนที่จะทำการแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยขนาด 10x10x10 mm. ดังรูปที่ 3.13 เพื่อช่วยลดการเสียหายเฉพาะจุดที่อาจเกิดขึ้น



รูปที่ 3.11 การแบ่งอิเลิเมนต์ย่อยของแบบจำลองจุดต่อริมอาคาร J1



รูปที่ 3.12 การแบ่งอิเลิเมนต์ย่อยของแบบจำลองจุดต่อภายในอาคาร J2



รูปที่ 3.13 การแบ่งอิลิเมนต์ย่อยบริเวณจุดรองรับ

หลังจากทำการแบ่งอิลิเมนต์ย่อยแล้วสามารถสรุปจำนวนอิลิเมนต์ของแบบจำลองจุดต่อเสริมกำลังในรูปแบบต่างๆได้ดัง ตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 จำนวนอิลิเมนต์ในแบบจำลองจุดต่อ

แบบจำลอง	Solid65 (ชิ้น)	Link8 (ชิ้น)	Solid45 (ชิ้น)	Solid46 (ชิ้น)	รวม (ชิ้น)
J1	21,875	2,093	1,750	-	25,718
J1-CFRP1	21,875	2,093	1,750	2,600	28,318
J1-CFRP2	21,875	2,093	1,750	1,250	26,968
J1-GFRP1	21,875	2,093	1,750	2,600	28,318
J1-GFRP2	21,875	2,093	1,750	1,250	26,968
J2	29,375	3,821	690	-	33,886
J2-CFRP1	29,375	3,821	690	2,600	36,486
J2-CFRP2	29,375	3,821	690	5,100	38,986
J2-GFRP1	29,375	3,821	690	2,600	36,486
J2-GFRP2	29,375	3,821	690	5,100	38,986

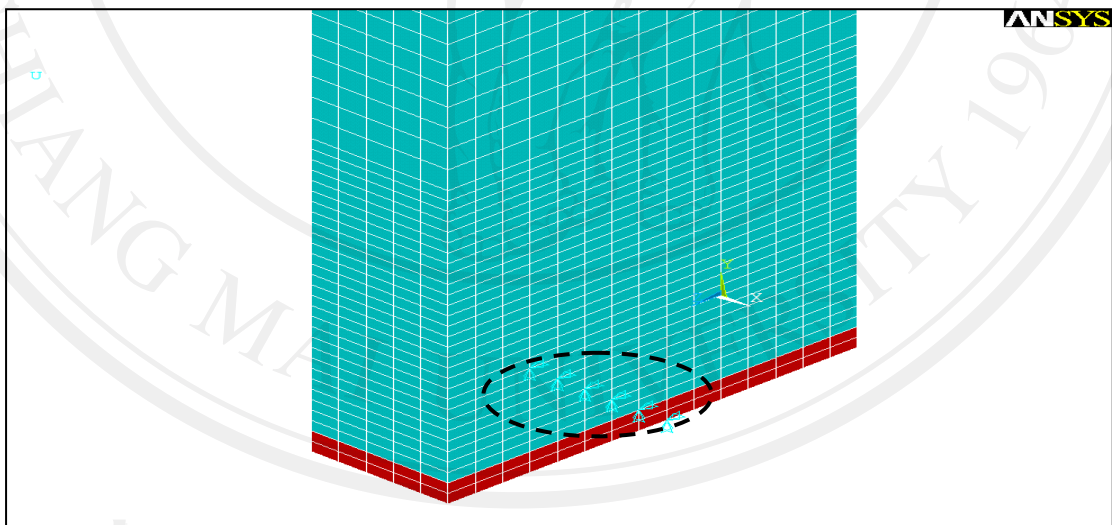
จากที่กล่าวมาในขั้นต้นแล้วว่าจำนวนของอิเลเมนต์ย่อยจะมีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งจากการแบ่งอิเลเมนต์ย่อยดังตารางที่ 3.9 ทำให้แบบจำลองจุดต่อที่สร้างขึ้นใช้ระยะเวลาในการตั้งค่าและวิเคราะห์ผลประมาณ 4 วันต่อ 1 ตัวอย่าง

3.1.5 Numbering Controls

คือ การรวมจำนวน Degree of Freedom ของโหนดที่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันให้มีพฤติกรรมร่วมกัน ถ้าไม่ได้ทำการตั้งค่าในส่วนนี้จะทำให้ชิ้นส่วนของแบบจำลองไม่ติดกัน

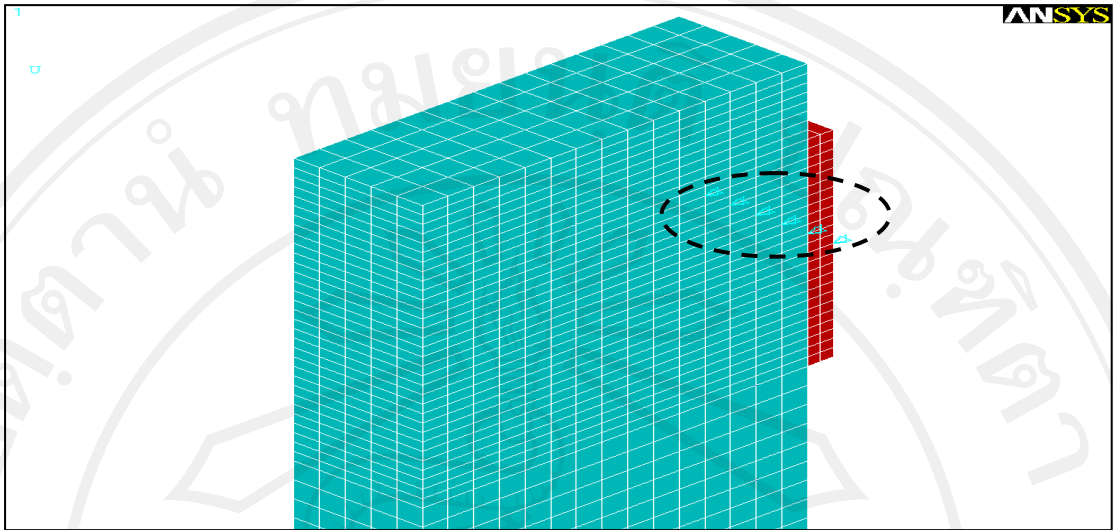
3.1.6 Loads and Boundary Conditions

การกำหนดสถานะจุดรองรับของจุดต่ออิมอาคาร ต้องกำหนดให้ใกล้เคียงกับตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้แบบจำลองมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับการทดสอบจริง โดยจุดรองรับที่โคนเสาของตัวอย่างทดสอบเป็นแบบ Pin Support จึงกำหนดให้จุดรองรับบริเวณโคนเสาของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ในทิศทาง UZ และ UY ดังรูปที่ 3.14



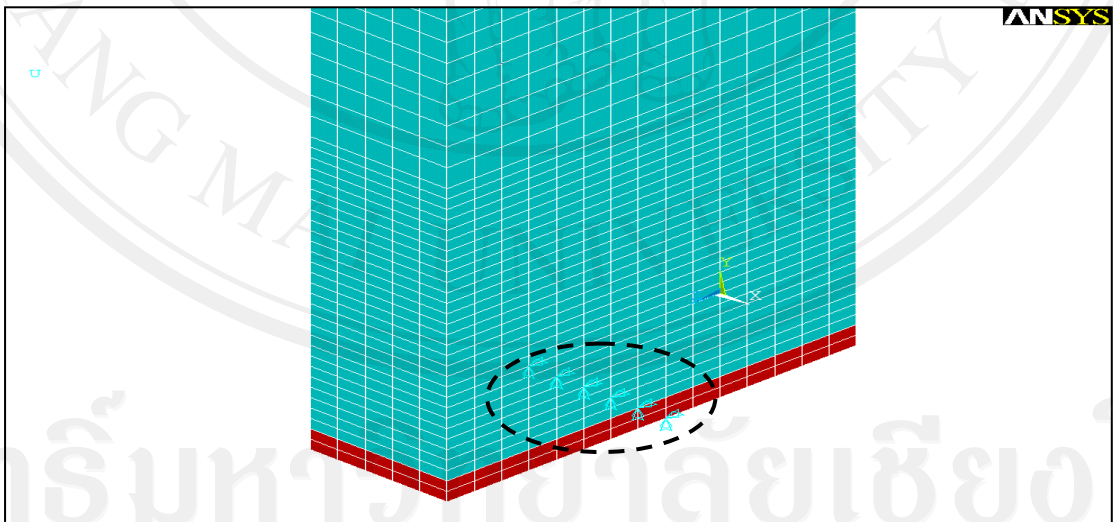
รูปที่ 3.14 สถานะจุดรองรับที่โคนเสาแบบ Pin Support ของจุดต่ออิมอาคาร J1

ส่วนจุดรองรับที่เสาชั้นบนนั้นการทดสอบในห้องปฏิบัติการกำหนดให้เป็นแบบ Roller Support ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง ดังนั้นในแบบจำลองจึงกำหนดให้ระยะเคลื่อนที่ในทิศทาง UZ ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 3.15

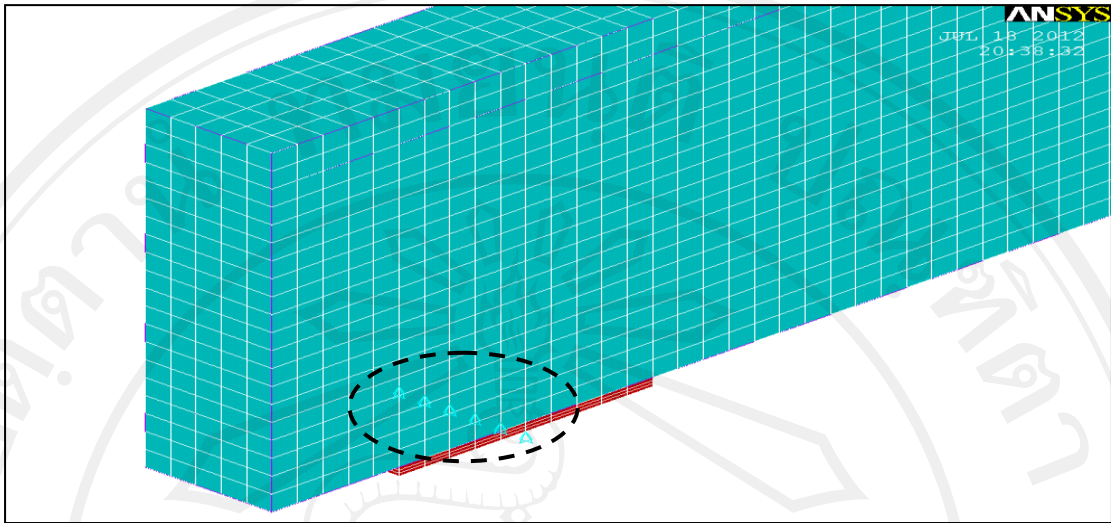


รูปที่ 3.15 สภาวะของจตุรรองรับที่ขอดเสาแบบ Roller Support ของจุดต่อริมอาคาร J1

การให้ระยะเคลื่อนที่ของแบบจำลองจุดต่อภายในอาคารแตกต่างกับจุดต่อริมอาคาร เนื่องจากให้ระยะเคลื่อนที่แนวราบที่ขอดเสา ซึ่งการกำหนดสภาวะของจตุรรองรับที่โคนเสาเป็น Pin Support ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ UX และ UY ดังรูปที่ 3.16 และที่ปลายคานทั้งสองข้างกำหนดให้เป็น Roller Support โดยกำหนดการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน UY ไม่มีการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.17

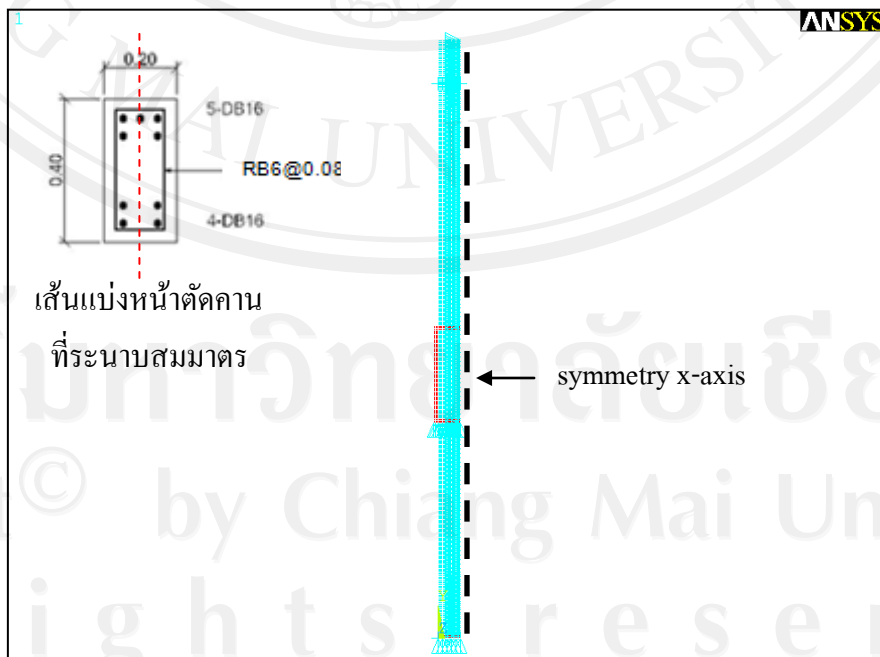


รูปที่ 3.16 สภาวะจตุรรองรับที่โคนเสาแบบ Pin Support ของจุดต่อภายในอาคาร J2



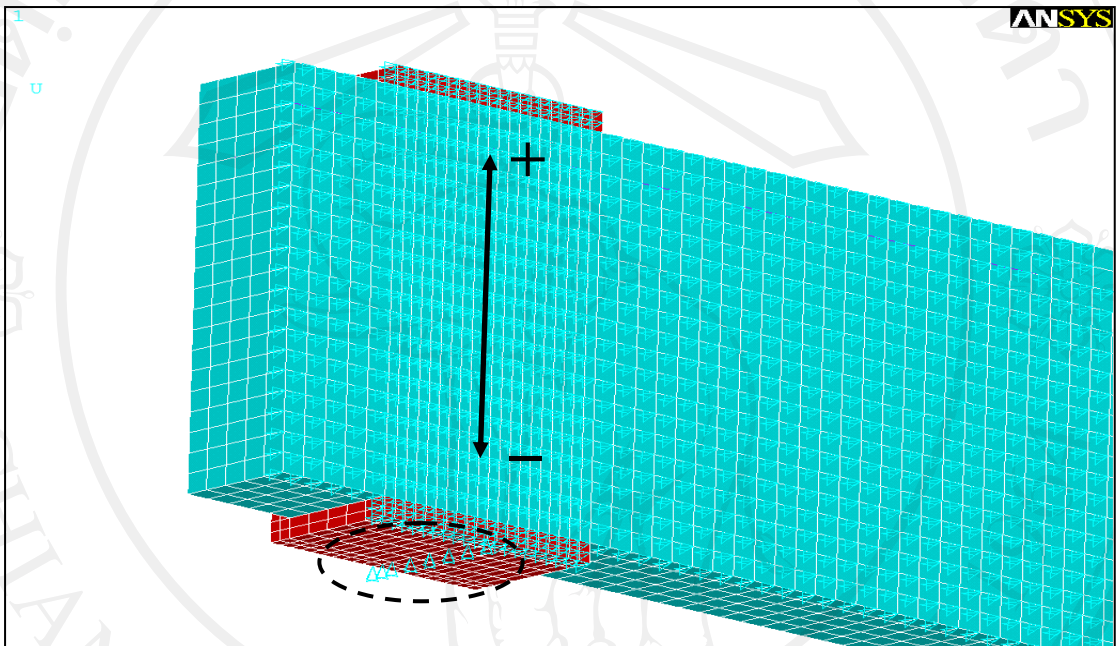
รูปที่ 3.17 สถานะของจตุรรองรับที่ปลายคานแบบ Roller Support ของจุดต่อภายในอาคาร J2

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์โดยใช้คุณสมบัติความสมมาตรต้องกำหนดระยะเคลื่อนที่ในทิศทาง $UX=0$ ให้กับระนาบที่ถูกแบ่งครึ่งจากจุดศูนย์กลางมวล (Centroid) ดังรูปที่ 3.18 เพื่อให้แบบจำลองนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ในระนาบดังกล่าว แต่ยังคงมีพฤติกรรมใกล้เคียงการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คุณสมบัติความสมมาตรของแบบจำลองจะช่วยลดพื้นที่ในการเก็บข้อมูลและระยะเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลได้ถึงสองเท่าซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการวิจัย แต่แบบจำลองจะรับน้ำหนักได้น้อยลงตามขนาดที่ลดลงไปด้วย

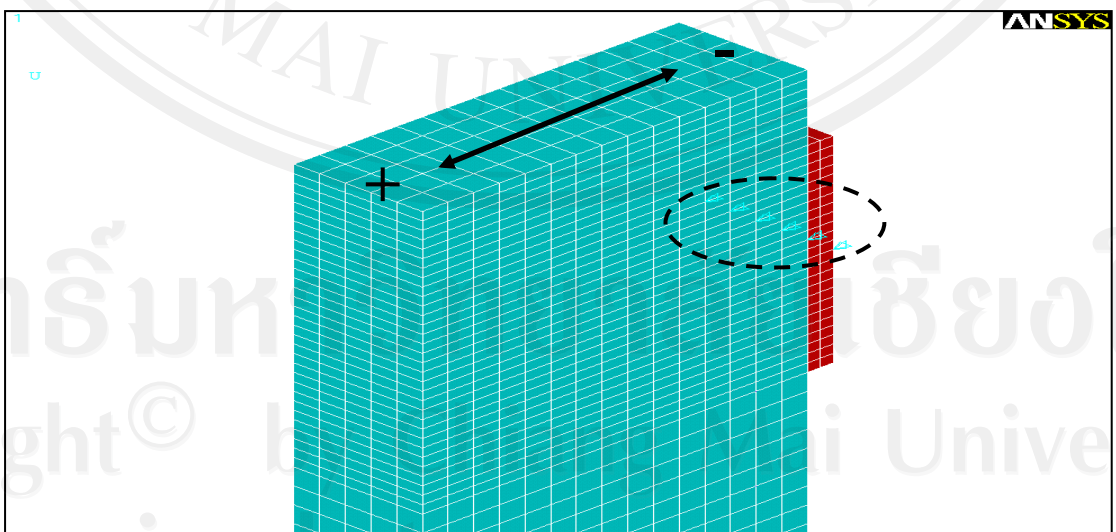


รูปที่ 3.18 ระนาบสมมาตร (Symmetry) ของแบบจำลอง

การให้ระยะเคลื่อนที่ตามข้อแนะนำของ ACI T1.1-01 โดยให้ระยะเคลื่อนที่แนวตั้ง (แกน y) บริเวณปลายคานบนแผ่นเหล็กรองรับของจุดต่อริมอาคาร ดังรูปที่ 3.19 และให้ระยะเคลื่อนที่แนวราบ (แกน z) บนแผ่นเหล็กรองรับที่เสาชั้นบนของจุดต่อภายในอาคาร ดังรูปที่ 3.20 แทนการให้แรงกระทำเนื่องจากสามารถควบคุมระยะเคลื่อนที่ได้ง่าย และควรให้ระยะเคลื่อนที่กระจายบนจุดรองรับเพื่อลดการเกิดความเสียหายเฉพาะจุดในบริเวณที่ให้ระยะเคลื่อนที่



รูปที่ 3.19 การให้ระยะเคลื่อนที่แนวตั้งบริเวณปลายคานของจุดต่อริมอาคาร



รูปที่ 3.20 การให้ระยะเคลื่อนที่แนวราบบริเวณเสาชั้นบนของจุดต่อภายในอาคาร

3.2 การสอบเทียบแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

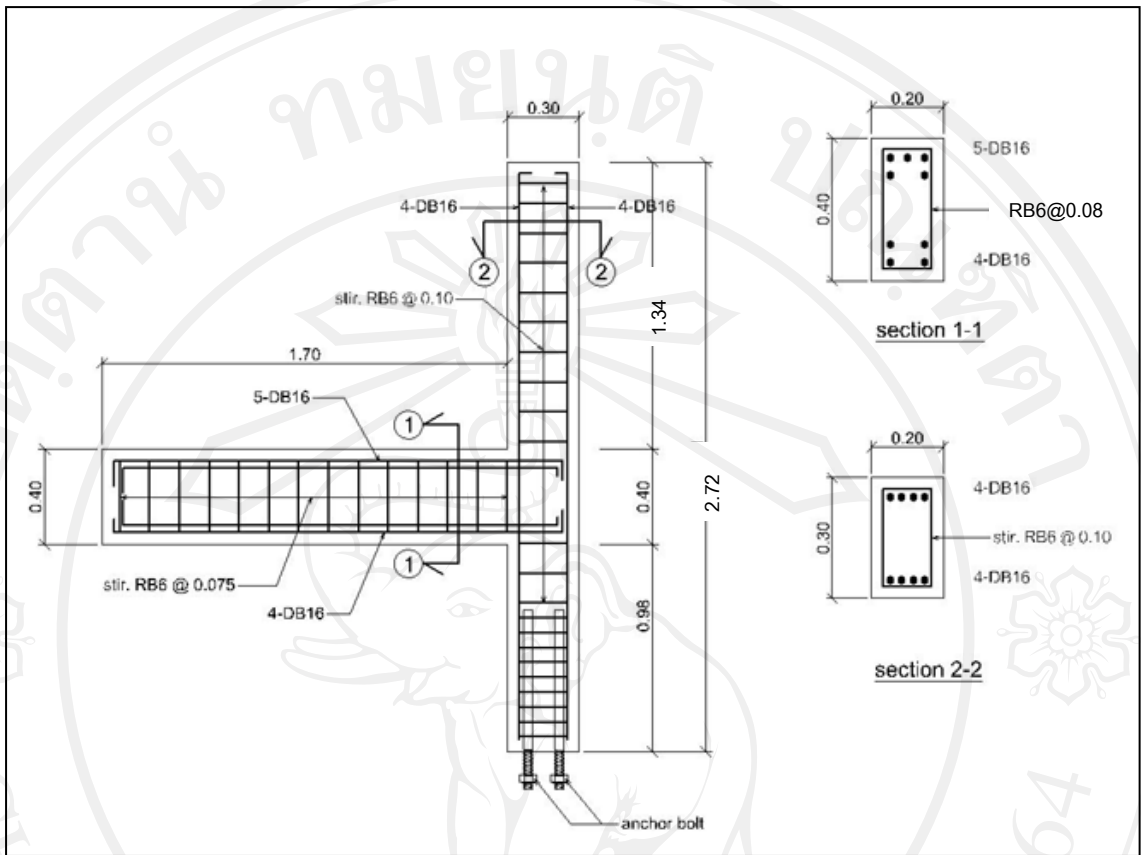
ในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์จุดต่อระหว่างคานกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากวิธีนี้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการทดสอบจริง แต่ก่อนที่จะนำวิธีวิเคราะห์นี้มาใช้นั้นควรมีการสอบเทียบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการเสียก่อน หลังจากได้รับผลวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำเพียงพอแล้วจึงนำวิธีการนี้มาวิเคราะห์จุดต่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์ในรูปแบบที่แตกต่างกันต่อไป

ชยานนท์ (2553) ได้ทำการทดสอบจุดต่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงอัดจักร ดังรูปที่ 3.21 โดยตัวอย่างทดสอบประกอบด้วยเสาสูง 2720 mm. และคานยาว 1700 mm. ติดตั้ง Roller Support ที่ระดับต่ำจากหัวเสา เป็นระยะ 200 mm. และตำแหน่งให้ระยะเคลื่อนที่เข้ามาจากปลายคานเป็นระยะ 200 mm.



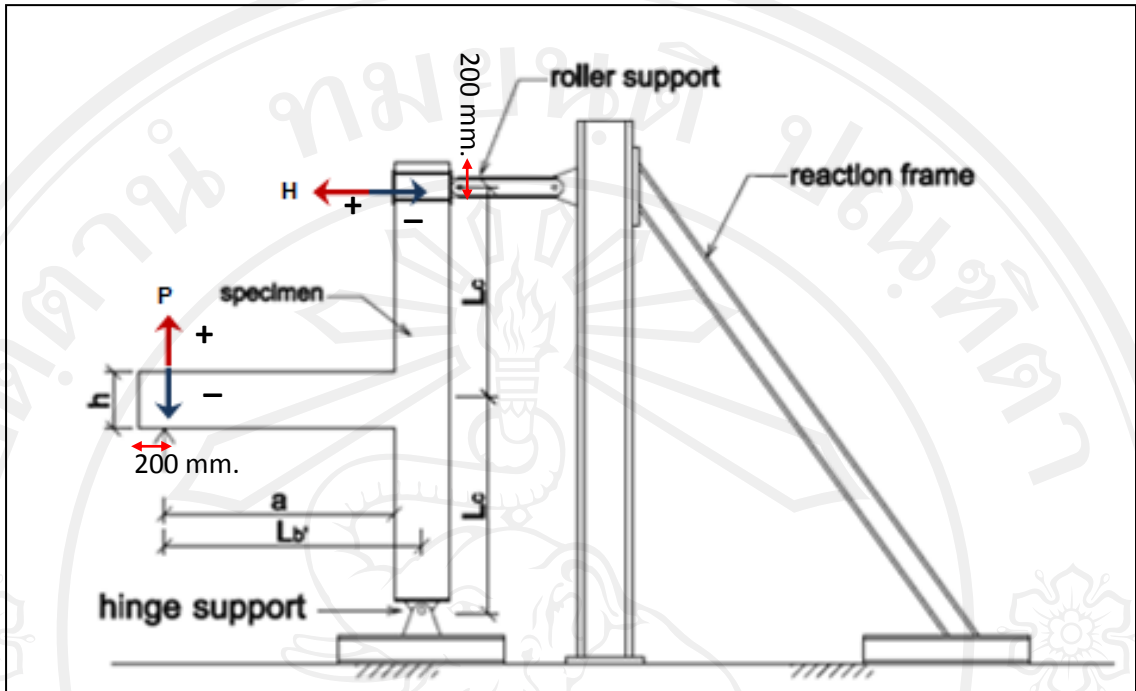
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างทดสอบจุดต่อคอนกรีตเสริมเหล็ก (ชยานนท์, 2553)

เสาของตัวอย่างทดสอบนี้มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 200x300 mm. ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 16 mm. จำนวน 8 เส้น เป็นเหล็กแกน และใช้เหล็กเส้นกลมขนาด 6 mm. เป็นเหล็กปลอก ส่วนคานมีขนาดเท่ากับ 200x400 mm. ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 16 mm. จำนวน 9 เส้น เป็นเหล็กตามยาว และใช้เหล็กเส้นกลมขนาด 6 mm. เป็นเหล็กปลอกดังแสดงในรูปที่ 3.22



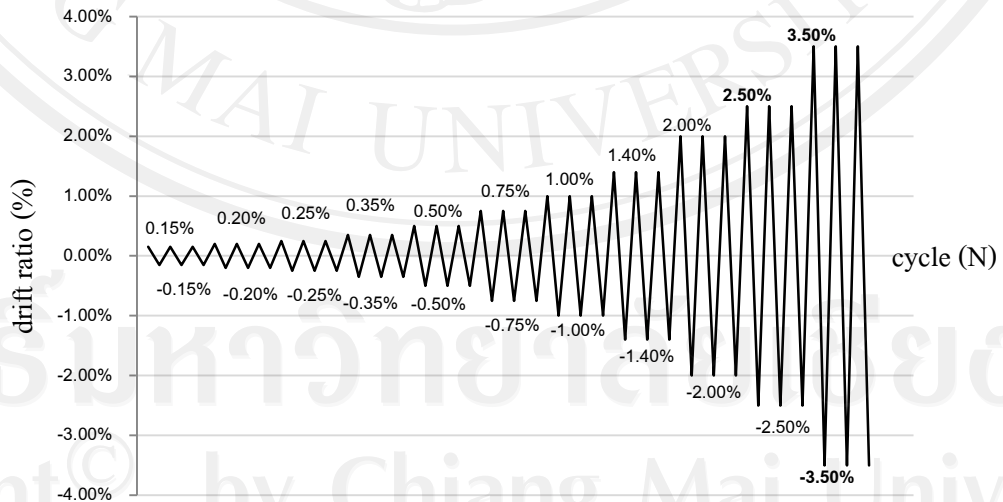
รูปที่ 3.22 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ (ชยานนท์, 2553)

ทำการทดสอบตัวอย่างโดยติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิกบริเวณปลายคานห่างจากหน้าเสาเป็นระยะเท่ากับ 1500 mm. เพื่อให้ระยะเคลื่อนที่ขึ้นและลงในรูปแบบคล้ายมีแรงวัฏจักรกระทำกับตัวอย่างทดสอบ และมีการติดตั้งโครงเหล็กเพื่อยึดรั้งตัวอย่างทดสอบเพื่อให้มีลักษณะของจุดรองรับ โดยให้ด้านล่างเสามีลักษณะเป็น Pin Support ส่วนด้านบนของเสากำหนดให้สามารถเคลื่อนที่ในทิศทางขึ้นลงได้ลักษณะคล้ายจุดรองรับแบบ Roller Support และปลายคานกำหนดให้เคลื่อนที่ได้แบบอิสระ โดยรูปแบบการติดตั้งตัวอย่างทดสอบและลักษณะการให้ระยะเคลื่อนที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การติดตั้งและการให้ระยะเคลื่อนที่ของตัวอย่างทดสอบ (ชยานนท์, 2553)

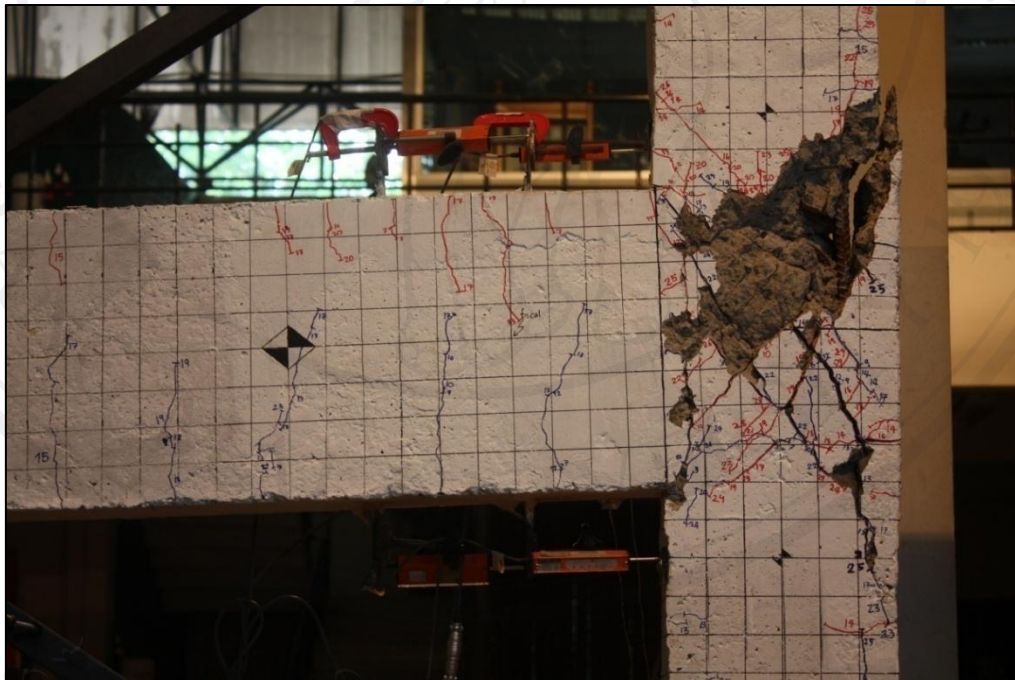
รูปแบบของการให้ระยะเคลื่อนที่ที่ปลายคานเป็นลักษณะกึ่งสถิตแบบสลับทิศทาง
 ข้อกำหนดของ ACI T1.1-01 ดังรูปที่ 3.24 ซึ่งจะทดสอบจนกว่าตัวอย่างจะเกิดการวิบัติหรือเมื่อ
 Drift Ratio เท่ากับ 3.5%



รูปที่ 3.24 การให้ระยะเคลื่อนที่ที่ปลายคาน (ACI T1.1-01, 2001)

ก่อนนำคุณสมบัติวัสดุมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้มีการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ ประกอบด้วยคอนกรีต ที่มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 29.53 MPa. ส่วนเหล็กเสริมมีกำลังครากของเหล็กกลมและเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ 311.47 MPa. และ 577.32 MPa. ตามลำดับ

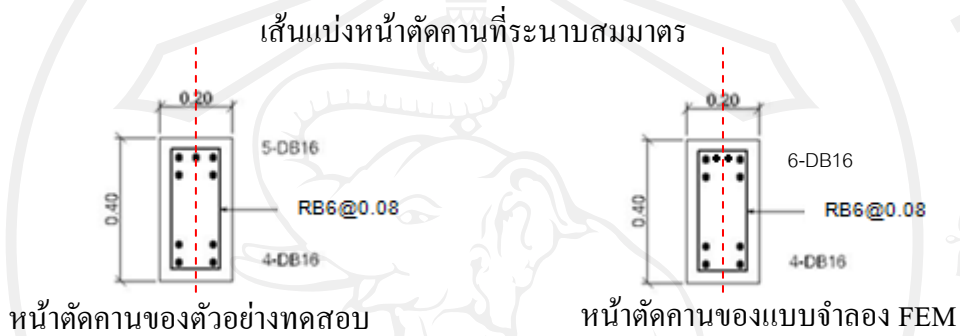
หลังจากทำการทดสอบโดยการดันปลายคานด้วยแม่แรงไฮดรอลิก พบว่าเกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นตามการให้ระยะเคลื่อนที่กระจายไปตามชิ้นส่วน โดยที่ Drift Ratio เท่ากับ 0.15% เริ่มเกิดรอยร้าวบริเวณเสา และคาน หลังจากนั้นเมื่อให้ Drift Ratio เท่ากับ 0.25% พบรอยร้าวทแยงเกิดขึ้นบริเวณจุดต่อ และเกิดรอยแยกระหว่างเสากับคานบริเวณหน้าเสาที่ Drift Ratio เท่ากับ 0.35% หลังจาก Drift Ratio ถึง 2.0% พบว่าตัวอย่างทดสอบเริ่มเสียหาย โดยมีคอนกรีตหลุดร่อนออกจากจุดต่อ และวิบัติเมื่อ Drift Ratio เท่ากับ 3.5% โดยมีแรงแนวราบสูงสุดเมื่อดันปลายคานขึ้น (ทิศ +) เท่ากับ 33.08 kN. (3,373 kg.) ส่วนในทิศทางกดปลายคานลง (ทิศ -) เท่ากับ 29.10 kN. (2,967 kg.) ซึ่งรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบได้แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ (ชยานนท์, 2553)

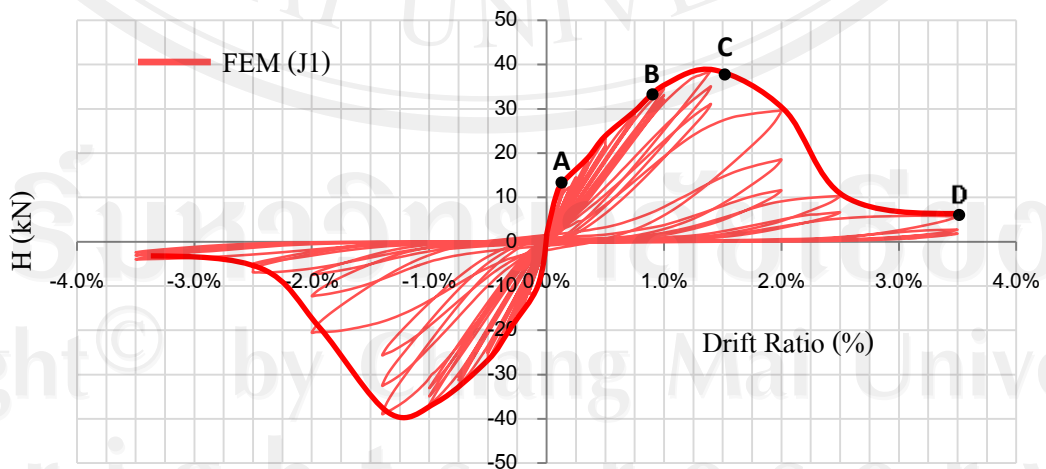
สร้างแบบจำลองจุดต่อที่มีลักษณะคล้ายกับจุดต่อที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ (แบบจำลอง J1) ด้วยโปรแกรมไฟไนต์อิเลเมนต์เพื่อใช้ในการสอบเทียบวิธีการสร้างแบบจำลอง และใช้คุณสมบัติของความสมมาตร (Symmetry) เพื่อช่วยลดระยะเวลาและพื้นที่ใช้เก็บข้อมูลการวิเคราะห์ แต่ในเหล็กเสริมนั้นไม่สามารถใช้คุณสมบัติของความสมมาตรได้เนื่องจากการรับแรง

ของเหล็กเสริมขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดจึงทำให้ความสามารถในการรับแรงของเหล็กที่ถูกแบ่งครึ่งลดลงไปด้วย ทำให้เหล็กเสริมภายในคานนั้นมีพฤติกรรมที่ต่างกันเนื่องจากเหล็กที่ถูกแบ่งครึ่งจะครากก่อนเส้นอื่น เป็นผลให้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์มีกำลังต่ำกว่าความเป็นจริง และการวิเคราะห์เกี่ยวกับความเค้น, ความเครียดอาจมีความผิดพลาดได้ เพราะฉะนั้นในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้มีเหล็กเสริมในคานมีมากกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการอยู่หนึ่งเส้น เพื่อให้หน้าตัดของแบบจำลองมีคุณสมบัติสมมาตรอย่างสมบูรณ์

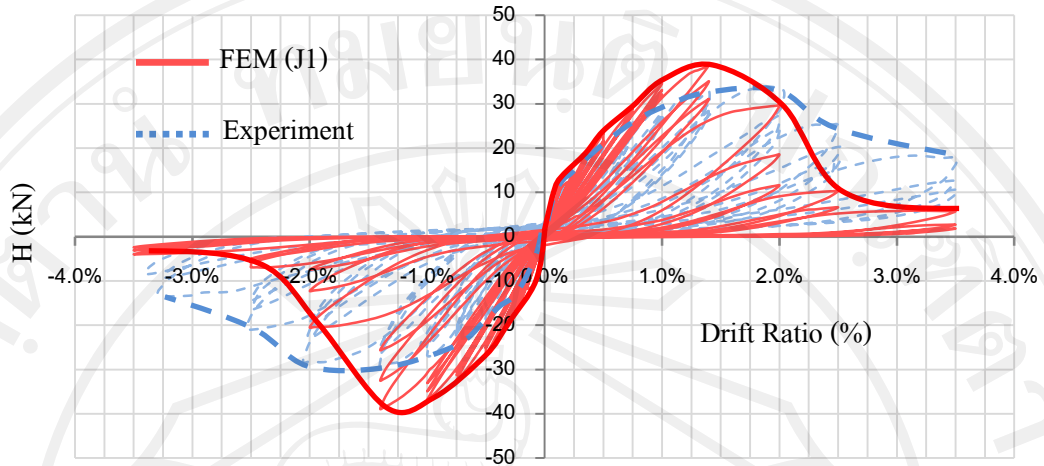


รูปที่ 3.26 ความแตกต่างของหน้าตัดคานตัวอย่างทดสอบกับแบบจำลอง FEM

จากวิเคราะห์แบบจำลองสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Drift Ratio กับ แรงแนวราบที่เสาชั้นบน (H) ของแบบจำลอง J1 และการทดสอบในห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกันพบว่าผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ในรูปที่ 3.27 มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีค่ากำลังสูงสุด และ Drift Ratio ที่พบว่าจะเกิดกำลังสูงสุดใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.27 กราฟแรงแนวราบ (H) กับ Drift Ratio ของแบบจำลอง J1

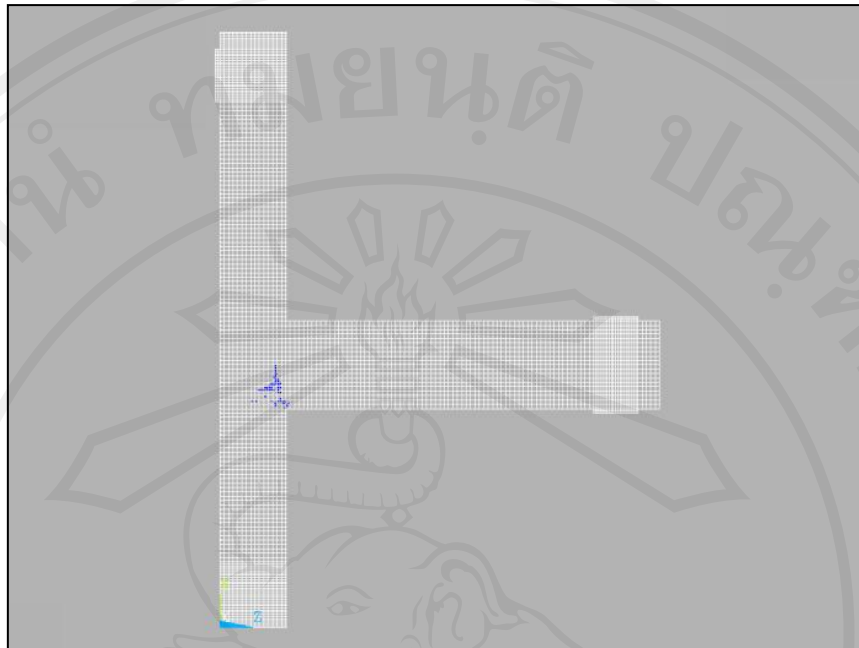


รูปที่ 3.28 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลอง J1 กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

พิจารณารูปความสัมพันธ์ของแบบจำลอง J1 ที่จุดคอนกรีตเริ่มเกิดการแตกร้าว (จุด A), จุดก่อนที่จะถึงกำลังสูงสุด (จุด B), จุดที่มีกำลังสูงสุด (จุด C), และจุดที่เกิดการวิบัติ (จุด D), เมื่อเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ในช่วงก่อนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าว นั้นพบว่ามีพฤติกรรมใกล้เคียงกันระหว่างการวิเคราะห์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่หลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าวพบว่ามีแนวโน้มที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น

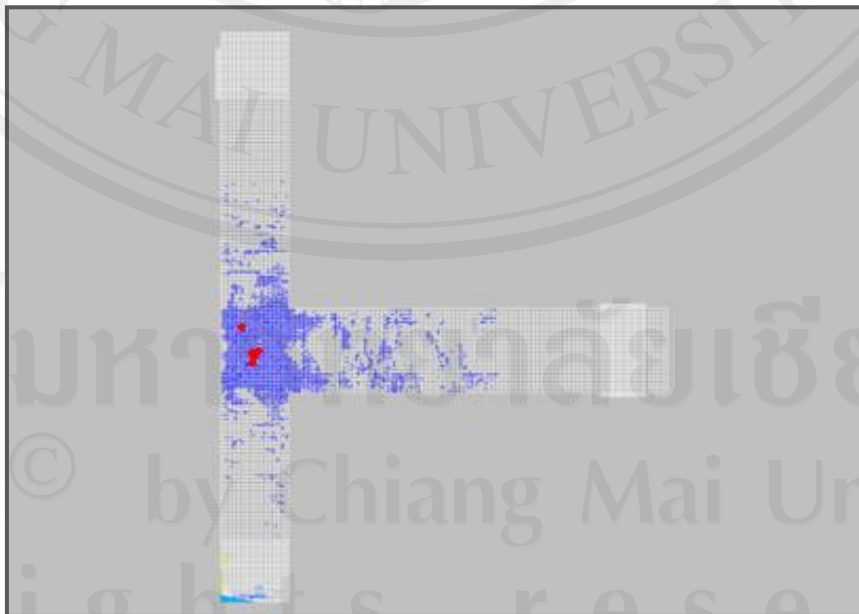
อิทธิพลของคอนกรีตในแบบจำลองไฟในตัดอิทธิพลแสดงรอยแตกร้าวในระนาบตั้งฉากกับ Principal Stress ใน Principal Direction ตามแกน x, y, z โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเฉพาะรอยร้าวที่เกิดในระนาบตั้งฉากกับแกน z (รอยร้าวสีน้ำเงิน) เนื่องจากเป็นรอยร้าวที่เกิดขึ้นหลังสุดจึงพิจารณาว่าเป็นรอยร้าวที่มีความรุนแรงมากที่สุด และเมื่ออิทธิพลของคอนกรีตเสียหายอย่างรุนแรงจนคล้ายกับการหลุดร่อนออกจากแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้ได้แสดงบริเวณที่เกิดความเสียหายดังกล่าวเป็นสีแดงเพื่อให้สังเกตเห็นความเสียหายได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

จุดที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟ (จุด A) ที่ Drift Ratio 0.13% ของแบบจำลอง J1 คือจุดที่แบบจำลองเริ่มเกิดความเสียหาย โดยโปรแกรมนี้ได้แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณคานหน้าเสา ดังรูปที่ 3.29 ซึ่งสอดคล้องกับรอยร้าวของทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.29 รอยแตกร้าวในแบบจำลอง J1 ที่จุด A (Drift Ratio 0.13%)

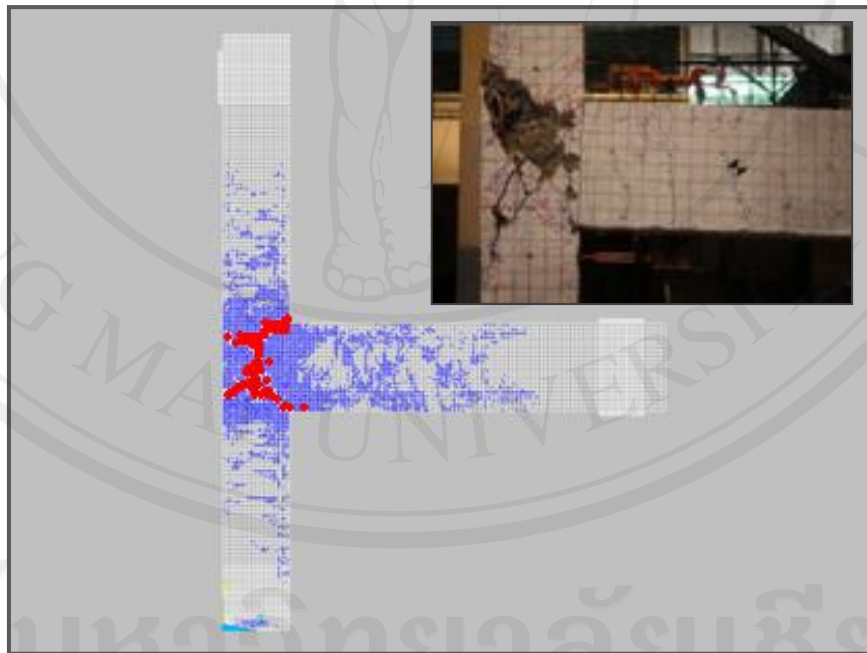
เมื่อพิจารณาที่จุด B (Drift Ratio 0.91%), จุด C (Drift Ratio 1.40%) และจุด D (Drift Ratio 3.50%) พบว่าเกิดรอยแตกร้าว และอิทธิพลที่เสียหายในจุดต่อเนื่องจากแรงเฉือนมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3.30 ถึง 3.32 แสดงว่าแบบจำลองนี้เกิดการวิบัติที่จุดต่อเนื่องจากแรงเฉือนในลักษณะทแยงเป็นมุม 45 องศา สอดคล้องกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.30 รอยแตกร้าวในแบบจำลอง J1 ที่จุด B (Drift Ratio 0.91%)



รูปที่ 3.31 รอยแตกร้าวในแบบจำลอง J1 ที่จุด C (Drift Ratio 1.40%)



รูปที่ 3.32 รอยแตกร้าวในแบบจำลอง J1 ที่จุด D (Drift Ratio 3.50%)

จากการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงแนวราบ (H) พบว่าแบบจำลอง J1 มีความสามารถในการต้านทานแรงแนวราบได้สูงสุด 38.76 kN. และ 38.88 kN. ในการดันปลายคานขึ้นที่ Drift Ratio 1.40% และการดันปลายคานลงที่ Drift Ratio -1.40% ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ย 38.82

kN ส่วนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ มีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำแนวราบเมื่อดันปลายคานขึ้นเท่ากับ 33.08 kN ที่ Drift Ratio 1.50% และ การกดปลายคานลงเท่ากับ 29.10 kN ที่ Drift Ratio 1.25% และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 31.09 kN ดังแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 แรงแนวราบ (H) สูงสุดของแบบจำลอง J1 กับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ชนิดของแบบจำลอง	ทิศทางการเคลื่อนที่ของคาน	กำลังสูงสุด (kN)	กำลังสูงสุดเฉลี่ย (kN)	Drift Ratio ที่กำลังสูงสุด (%)
FEM (J1)	ขึ้น	38.76	38.82	1.40
	ลง	-38.88		-1.40
ทดสอบในห้องปฏิบัติการ	ขึ้น	33.08	31.09	1.50
	ลง	-29.10		-1.25
การคำนวณ	ขึ้น	38.90	38.90	-
	ลง	38.90		-

จะเห็นว่าความสามารถในการรับแรงแนวราบสูงสุดของแบบจำลอง J1 มีมากกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากแบบจำลอง J1 มีความสมบูรณ์และความเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุมากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงแนวราบสูงสุดระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับค่าที่ได้จากการคำนวณพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

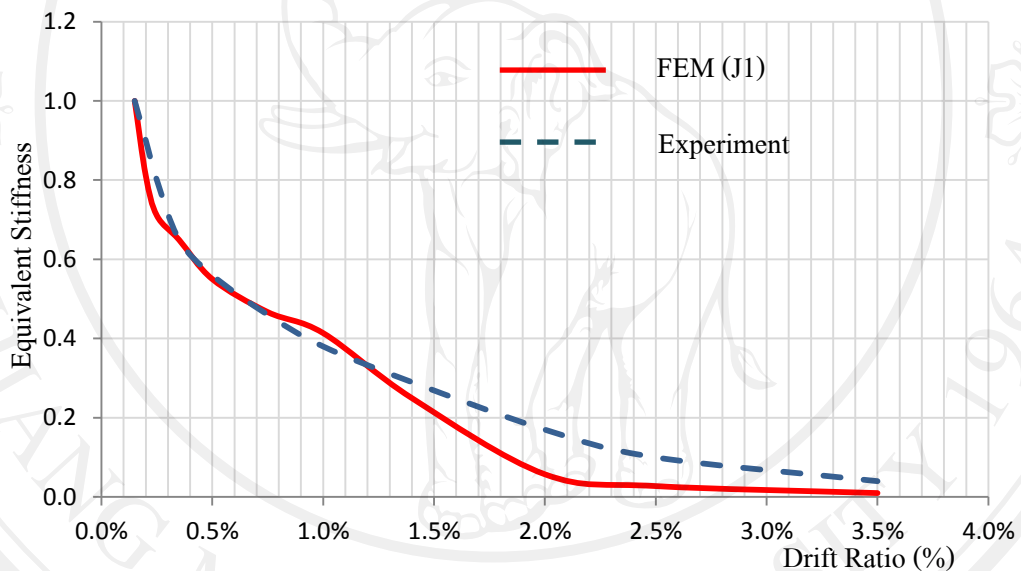
จากการวิเคราะห์ความเหนียวของแบบจำลอง J1 พบว่ามีค่าความเหนียวเมื่อดันปลายคานขึ้นและในการดันปลายคานลงเท่ากับ 1.97 และ 2.17 ตามลำดับ โดยมีความเหนียวเฉลี่ย 2.07 ส่วนการทดสอบในห้องปฏิบัติการค่าความเหนียวเมื่อดันปลายคานขึ้นและดันปลายคานลงเท่ากับ 2.42 และ 2.94 ตามลำดับ และมีความเหนียวเฉลี่ย 2.68 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ความเหนียวของแบบจำลอง J1 กับ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ชนิดของแบบจำลอง	ทิศทางการเคลื่อนที่ของคาน	ความเหนียว	ความเหนียวเฉลี่ย
FEM (J1)	ขึ้น	1.97	2.07
	ลง	2.17	
ทดสอบในห้องปฏิบัติการ	ขึ้น	2.42	2.68
	ลง	2.92	

จากการเปรียบเทียบพบว่าความเหนียวของแบบจำลอง J1 มีค่าน้อยกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากแบบจำลอง J1 เกิดการวิบัติของคอนกรีตบริเวณจุดต่อ และอิฐอิฐเมนต์คอนกรีตสามารถถ่ายแรงผ่านโหนดได้เท่านั้น โดยไม่มีแรงเสียดทานระหว่างอิฐอิฐเมนต์หลังจากริฐอิฐเมนต์เสียหาย จึงเป็นสาเหตุให้ความเหนียวมีค่าน้อยกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การพิจารณาความเสื่อมถอยของสติฟเนสเพื่อสังเกตพฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างจุดต่ออาคาร โดยตัวอย่างที่ดีควรมีค่าสติฟเนสลดลงทีละน้อย และจากการวิเคราะห์แบบจำลอง J1 สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Drift Ratio กับ Equivalent Stiffness มาเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการได้ดังรูปที่ 3.33

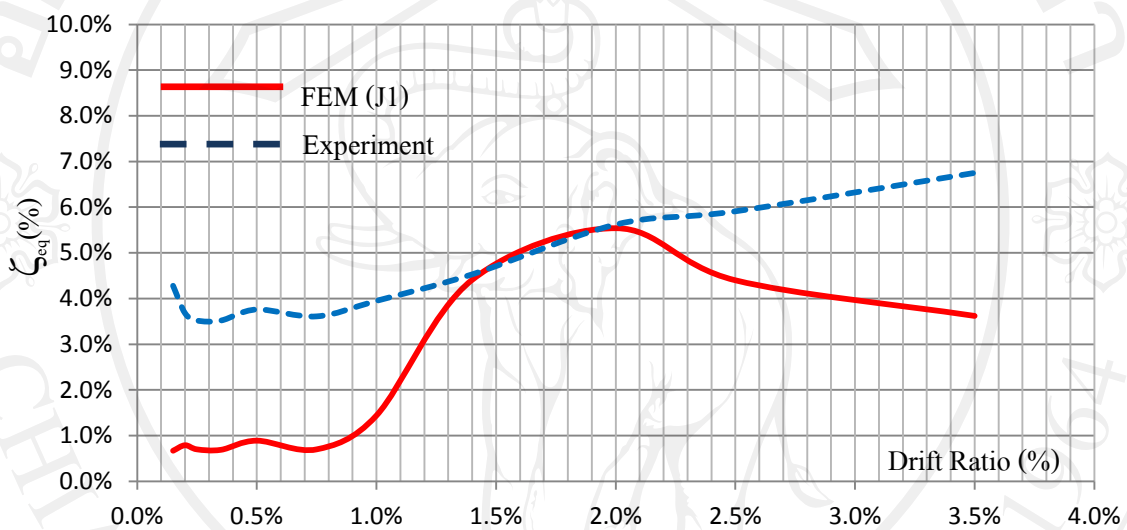


รูปที่ 3.33 ความเสื่อมถอยของสติฟเนสในแบบจำลอง J1 กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลอง J1 มีระดับความเสื่อมถอยของสติฟเนสใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยในช่วงแรกมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่หลังจาก Drift Ratio 1.40% ซึ่งเป็นช่วงที่แบบจำลอง J1 ถึงจุดวิบัติจะพบว่าสติฟเนสลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการวิบัติของแบบจำลองไม่มีแรงเสียดทานระหว่างอิฐอิฐเมนต์ เหมือนกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่เมื่อเกิดการวิบัติจะมีแรงเสียดทานภายในคอนกรีตเกิดขึ้น

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมด้านการดูดซับพลังงานจากอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า (Equivalent Viscous Damping Ratio, ζ_{eq}) โดยใช้การวนซ้ำในรอบที่สามของแต่ละ Drift Ratio มาวิเคราะห์

จากการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานของแบบจำลอง J1 พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยในช่วง Drift Ratio 0.00% ถึง 1.00% แบบจำลอง J1 จะมีความสามารถดูดซับพลังงานต่ำกว่าการตัวอย่างทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดที่ Drift Ratio 1.40% ถึง 2.00% ซึ่งเป็นช่วงที่แบบจำลองมีกำลังสูงสุดและกำลังเริ่มตก หลังจากนั้นแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์จะมีความสามารถดูดซับพลังงานต่ำกว่าการตัวอย่างทดสอบทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 การดูดซับพลังงานของแบบจำลอง J1 และ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 3.34 ทำให้ทราบว่าในช่วงที่แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ยังไม่เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตนั้นมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้ต่ำมาก แต่เมื่อแบบจำลองถึงจุดที่มีกำลังสูงสุดและช่วงที่กำลังเริ่มจะตกนั้น (Drift Ratio 1.40% ถึง 2.00%) แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์จะมีความแม่นยำในการคาดการณ์ความสามารถในการดูดซับพลังงานมากที่สุด