

การเปรียบเทียบรูปแบบการเสริมกำลังเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้แรงแบบวัฏจักร

เธียรชัย แสนวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีการศึกษา 2562 ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



COMPARISON OF STRENGTHENING METHODS OF CONCRETE BRIDGE COLUMNS UNDER CYCLIC LOAD

THEANCHAI SANWONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING MAJOR IN CIVIL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING UBON RATCHATHANI UNIVERSITY ACADEMIC YEAR 2019 COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การเปรียบเทียบรูปแบบการเสริมกำลังเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงแบบวัฏจักร

ผู้วิจัย นายเธียรชัย แสนวงศ์

คณะกรรมการสอบ

ดร.สุรศักดิ์ นิยมพานิชพัฒนา ป รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย ก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย ก

ประธานกรรมการ กรรมการ กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย)

masta

(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์) รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล ปุษยตานนท์) คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีการศึกษา 2562

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาและช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและแนะแนว ทางแก้ไขปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด รวมทั้งยังให้คำตักเตือน และให้คำสอนที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

กราบขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทุกท่าน ที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการ ตั้งแต่การศึกษาระดับปริญญาตรีจนถึงระดับบัณฑิตศึกษา

้สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

เธียรชัย แสนวงศ์ ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

: การเปรียบเทียบรูปแบบการเสริมกำลังเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก
ภายใต้แรงแบบวัฏจักร
: เธียรชัย แสนวงศ์
: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
: วิศวกรรมโยธา
: รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ขันติยวิชัย
: การเสริมกำลังเสาสะพาน, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, แรงแบบวัฏจักร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้แรงแบบวัฏจักร โดยวิธีการเสริมกำลังกับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง ้โดยใช้โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์งานทางวิศวกรรมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขั้นตอนการศึกษาเริ่มจาก การตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยเทียบอิงกับผล การทดสอบในห้องปฏิบัติการของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดหน้าตัดของเสารูปสี่เหลี่ยม กว้าง 0.4 เมตร ยาว 0.4 เมตร และมีความสูง 1.35 เมตร เหล็กเสริมตามยาวเป็นเหล็กข้ออ้อย ้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร 16 เส้น เหล็กเสริมตามขวางเป็นเหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร มีระยะห่างทุก ๆ 50 มิลลิเมตร ตามแนวขวางของเสา เมื่อผลการวิเคราะห์ ้ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้ว ได้นำ แบบจำลองดังกล่าวไปปรับระยะเรียงเหล็กเสริมตามขวางให้เป็นเสาปกติทั่วไป หลังจากนั้นจึงทำการ เสริมกำลังใน 4 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลังเสา ด้วยแผ่นเหล็ก การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และการเสริมกำลังเสา ้ด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองพบว่าการเสริมกำลังเสา ้มีผลให้เสาสามารถรับแรงด้านข้างได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเสริมกำลังเสาด้วยวิธีที่ต่างกัน ้จะให้ค่ากำลังรับแรงต่างกัน โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ วิธีการเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก ้วิธีการเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน วิธีการเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีต ้เสริมเหล็ก และวิธีการเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก โดยเสาที่เสริมกำลังด้วย แผ่นเหล็กรับแรงได้มากสุด 165.74 กิโลนิวตัน ซึ่งประสิทธิภาพการเสริมกำลังเพิ่มขึ้นถึง 61.35 % เทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลัง

ABSTRACT

TITLE : COMPARISON OF STRENGTHENING METHODS OF CONCRETE E		
	COLUMNS UNDER CYCLIC LOAD	
AUTHOR	: THEANCHAI SANWONG	
DEGREE	: MASTER OF ENGINEERING	
MAJOR	: CIVIL ENGINEERING	
ADVISOR	: ASSOC. PROF. KITTISAK KUNTIYAWICHAI, Ph.D.	
KEYWORDS	: CONCRETE BRIDGE, COLUMN STRENGTHENING, FINITE ELEMENT	
	METHOD, CYCLIC LOAD	

The objective of this research was to compare the strengthening methods on the efficiency of columns under cyclic load using the finite element technique. First, the model validation was carried out by comparing test results obtained from literature on reinforced concrete bridge columns with the cross section of the square columns of 0.4 meters, width of 0.4 meters and height of 1.35 meters, 16 strands of deformed bar of longitudinal reinforcing steel with a diameter of 13 mm., diameter of 6 mm. and spaced every 50 mm. across the column. When the analysis results with the finite element model were consistent with the results of the laboratory tests, the aforementioned model was used to adjust the cross-sectional reinforcing distance to form a normal column. After that, the power of column strengthening was reinforced in 4 forms including concrete jacketing, steel jacketing, CFRP strengthening, and reducing stirrup spacing. From the strengthening of columns, it was found that the lateral resistibility of columns increased. In addition, the different strengthening methods resulted in a different lateral resistibility arranged in a descending order as steel jacketing, CFRP strengthening, reinforced concrete jacketing and reducing stirrup spacing, respectively. Strengthening by steel jacketing showed the highest increase of lateral resistibility about 61.35%.

สารบัญ

กิตติก	ຽວມ	าประ	กาศ	ก
บทคัด	າຍ່ອ	ภาษา	าไทย	ข
บทคัด	າຍ່ອ	ภาษา	าอังกฤษ	ค
สารบั	ູ່ຄູ			ຈ
สารบั	ญต	าราง		જ
สารบั	ູ່ຄູກ	าพ		ណ
คำอธิ	บาย	ปสัญส	า ักษณ์และอักษรย่อ	ป
บทที	1	บทน์	n'	
		1.1	ที่มาและความสาคัญของปัญหา	1
		1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
		1.3	ขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที	2	ทฤษ	ฏีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
		2.1	กล่าวนำ	3
		2.2	หลักการและทฤษฎีพื้นฐานด้านแผ่นดินไหว	3
		2.3	เหตุการณ์และความเสียหายจากแผ่นดินไหวครั้งสำคัญในต่างประเทศ	9
		2.4	ลักษณะการวิบัติของเสาสะพานจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว	10
		2.5	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว	11
		2.6	วิธีการเสริมกำลังของโครงสร้าง	14
		2.7	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์	19
		2.8	การวิเคราะห์ความเสียหาย	22
		2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
		2.10) สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่	3	วิธีดำ	าเนินการวิจัย	
		3.1	กล่าวนำ	27
		3.2	การใช้งานซอฟแวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์	29
		3.3	วิธีดำเนินการวิจัย	33
		3.4	สรุปวิธีดำเนินการวิจัย	51
บทที่	4	ผลก	ารศึกษา	
		4.1	กล่าวนำ	52
		4.2	ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรง	
			แบบวัฏจักร (Cyclic Load)	52
		4.3	ผลจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสามาตรฐานปกติทั่วไป	
			ที่มีการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ	57

จ

สารบัญ

		4.4 4.5	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเสริมกำลังวิธีต่าง ๆ การวิเคราะห์เปรียบเทียบความคุ้มค่าในการเสริมกำลังของเสาสะพาน	70
			คอนกรตเสรมเหลกเน 4 รูบแบบ	72
		4.6	สรุป	73
บทที่	1่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ			
		5.1	สรุปผลการศึกษา	74
		5.2	สรุปผล	75
เอกสา	ารอ้	างอิง		76
ภาคผ	นว	ก		80
ประวัต	ติผู้ว่	ີ່າຈັຍ		84

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การจำแนกขนาดแผ่นดินไหวผลการจำลองการวางอุปกรณ์แยกสัญญาณ	7
2.2	มาตราความรุนแรงเมอร์คัลลีมี 12 ระดับ	7
2.3	การเปรียบเที่ยบขนาดแผ่นดินไหว ความรุนแรง และอัตราเร่งของคลื่น	
	แผ่นดินไหว	8
3.1	คุณสมบัติของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ	
	อัตราร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้าง	33
3.2	ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาสะพาน	35
3.3	คอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อสอบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	37
3.4	การเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุในแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อสอบ	
	เทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ	37
3.5	คุณสมบัติของแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปรับระยะเรียงเหล็ก	
	เสริมตามขวางให้เป็นเสาปกติทั่วไป	39
3.6	คุณสมบัติของแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก	40
3.7	ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลัง	
	ด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก	41
3.8	การเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีต	
	เสริมเหล็ก	42
3.9	คุณสมบัติของแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	43
3.10	ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลัง	
	ด้วยแผ่นเหล็ก	43
3.11	การเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	44
3.12	คุณสมบัติของแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	46
3.13	ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลัง	
	ด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	46
3.14	การเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริม	
	เส้นใยคาร์บอน	47
3.15	คุณสมบัติของแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก	48
3.16	ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลัง	
	ด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก	48
3.17	การเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่	
	เหล็กปลอก	49
3.18	คุณสมบัติของแบบจำลองเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลังและเสาที่มี	
	การเสริมกำลังทั้งสี่รูปแบบที่จะนำมาวิเคราะห์	50

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.1	อัตราร้อยละการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง	53
4.2	สอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง	55
4.3	คุณสมบัติของแบ [้] บจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาที่มีเหล็กเสริมตามขวาง	
	ี้ ตามมาตรฐานปกติทั่วไปภายใต้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load)	56
4.4	ตำแหน่งและขนาดของหน่วยแรง Von Mises Stress ที่เกิดขึ้นของวัสดุ	
	จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก	60
4.5	เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลัง	
	ด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็กกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	61
4.6	ตำแหน่งและขนาดของหน่วยแรง Von Mises Stress ที่เกิดขึ้นของวัสดุ	
	จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	63
4.7	เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลัง	
	ด้วยแผ่นเหล็กกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	64
4.8	ตำแหน่งและขนาดของหน่วยแรง Von Mises Stress ที่เกิดขึ้นของวัสดุ	
	จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	66
4.9	เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลัง	
	ด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	67
4.10	ตำแหน่งและขนาดหน่วยแรง Von Mises Stress ที่เกิดขึ้นของวัสดุ	
	้ จากแบบจำลองที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก	69
4.11	เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลัง	
	ด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอกกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	70
4.12	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลังของแบบจำลองทั้ง 4 รูปแบบ	71
4.13	ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ	72
ก.1	ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก	81
ก.2	ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	82
ก.3	ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	82
ก.4	ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก	83

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	เสาสะพานที่วิบัติจากแผ่นดินไหวโลมาพรีตา ในซานฟรานซิสโก	1
2.1	การเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก	3
2.2	การเกิดระเบิดของภูเขไฟ	4
2.3	การเกิดระเบิดหินท่ำเหมืองแร่	4
2.4	จุดศูนย์การเกิดแผ่นดินไหว	6
2.5	์ เสาสะพานทางต่างระดับวิบัติจากแผ่นดินไหวนอร์ทริดจ์	
	รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา	9
2.6	ภาพเสาสะพานทางต่างระดับวิบัติจากแผ่นดินไหวฮันชินในโกเบ	
	ประเทศญี่ปุ่น	10
2.7	ตัวอย่างการวิบัติของเสาสะพานที่บริเวณโคนเสา	10
2.8	ตัวอย่างการวิบัติของเสาสะพานที่บริเวณหัวเสา	11
2.9	ความเหนียวขององค์อาคาร	11
2.10	ผลกระทบ P- Δ	13
2.11	การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก	14
2.12	บริเวณที่ควรทำการเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก	15
2.13	การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก	16
2.14	กราฟ Stress-Strain Curve ของวัสดุชนิดต่าง ๆ	17
2.15	เสาเสริมกำลังเสาด้วย CFRP	18
2.16	รายละเอียดการเสริมเหล็กในเสา	19
2.17	ชนิดเอเลเมนต์แบบต่าง ๆ	21
2.18	ความเค้นบนเอลิเมนต์ 3 มิติ	23
3.1	ผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	28
3.2	การเลือกหมวดใช้งาน	29
3.3	การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ	30
3.4	การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	30
3.5	การสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนของวัสดุ	31
3.6	การจับยึดของชิ้นส่วน	32
3.7	การกำหนดแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์	32
3.8	ลักษณะเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ	34
3.9	การทดสอบเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ	34
3.10	กราฟ Displacement – Time	35
3.11	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับระยะการเคลื่อนที่	
	ทางด้านข้างของเสา	36

ณ

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.12	ลักษณะแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก	38
3.13	ลักษณะแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปรับระยะเรียงเหล็กเสริม	39
3.14	ลักษณะแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก	42
3.15	ลักษณะแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	45
3.16	ลักษณะแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	47
3.17	ลักษณะแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก	50
4.1	กราฟ Displacement-Time	53
4.2	ความเสียหายของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังการทดสอบในห้อง ปริงัฐิวารแปรีแบบรีเนารับกรรมกรรมเรียงกรรมกระบบการ์การ ปลป้อบในห้อง	
	บฏบตการเบรยบเทยบกบภาพความเสยหายของแบบจาลองเพเนตเอลเมนต เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก	54
4.3	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement	
	ที่เต้ง ก็แบบง โดยงเส เสะพานค่อนก่อนเสอมเทสกกับผลการศกษาของ	
1 1	Palboon, I. and Kazuniko, K. (2007)	22
4.4	ทำรเบรยบเทยบศวามสมพนธระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 5 เซนติเมตร กับเสาที่มีระยะ	
	เรียงเหล็กปลอก 20 เซนติเมตร	57
4.5	บริเวณที่เกิดการวิบัติจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีต	
	เสริมเหล็กภายใต้แรงแบบวัฏจักร	58
4.6	บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress ของคอนกรีต เหล็กเสริมและวัสดุ	
	เสริมกำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก	
	ภายใต้แรงแบบวัฏจักร	58
4.7	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement	
	ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็กกับ	
	เสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	60
4.8	บริเวณที่เกิดการวิบัติจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	
	ภายใต้แรงแบบวัฏจักร	61
4.9	บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress คอนกรีตเหล็กเสริม และวัสดุ	
	เสริมกำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	
	ภายใต้แรงแบบวัฏจักร	62
4.10	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement	
	ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กกับเสาปกติ	
	ที่ไม่มีการเสริมกำลัง	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.11	บริเวณที่เกิดการวิบัติจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์ เสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงแบบวัฏจักร	65
4.12	บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress คอนกรีตเหล็กเสริม และวัสดุเสริม กำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใย	
4.13	คาร์บอนภายไต้แรงแบบวิฏจักร การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	65
	กับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	67
4.14	บริเวณที่เกิดการวิบัติจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่	
	เหล็กปลอกภายใต้แรงแบบวัฏจักร	68
4.15	บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress คอนกรีตเหล็กเสริม และวัสดุ เสริมกำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่	
	เหล็กปลอกภายใต้แรงแบบวัฏจักร	68
4.16	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก	
	กับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	70
4.17	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มี	
	การเสริมกำลังทั้ง 4 รูปแบบ กับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลัง	71
4.18	การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ	72

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
М	ขนาดแผ่นดินไหว (Richter)
A	ความสูงของคลื่นสูงสุด (mm)
A ₀	ความสู [้] งของคลื่นที่ระดับศูนย์ (mm)
μ	ความเหนียวขององค์อาคาร
$\Delta_{_{U}}$	ระยะการเสียรูปที่จุดวิบัติ (mm)
Δ_y	ระยะการเสียรูปที่จุดคราก (mm)
μ_{ϕ}	ความเหนียวของหน้าตัด
ϕ_m	ความโค้งของหน้าตัดตอนที่เกิดการวิบัติ
ϕ_y	ความโค้งของหน้าตัดตอนที่เหล็กเสริมเริ่มคราก
l_p	ความยาวของ Plastic hinge (m)
l	ความยาวขององค์อาคาร (m)
d_b	เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาว (m)
$f_{\mathcal{Y}}$	จุดครากของเหล็กเสริมตามยาว (MPa)
θ_i	ค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพ
P_i	น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรของโครงสร้าง
	ที่ระดับชั้น i และที่อยู่เหนือขึ้นไปรวมกัน (kN)
V_i	แรงเฉือนด้านข้างที่คำนวณได้ทั้งหมดในทิศทางที่พิจารณา
	เนื่องจากการตอบสนองของแผ่นดินไหว (kN)
H_i	ความสูงของชั้น i กับ ชั้น i-1 (m)
$\boldsymbol{\partial}_i$	ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ระดับชั้น i ที่เกิดจาก
	แผ่นดินไหว (m)
A_{v}	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (cm2) *
C_1	ความกว้างของเสา (cm)
S	ระยะเรียงเหล็กปลอก (cm)
$\sigma_{_{\chi}}$	ความเคนหลักทัศทางแกน x
$\sigma_{_{Y}}$	ความเค้นหลักทิศทางแกน y
σ_{z}	ความเค้นหลักทิศทางแกน z
$ au_{_{X\!Y}}$	ความเค้นเฉือนในระนาบ xy

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$ au_{_{yz}}$	ความเค้นเฉือนในระนาบ yz
$ au_{_{Z\!X}}$	ความเค้นเฉือนในระนาบ zx
$\sigma_{_{\!VON}}$	ความเค้นฟอนมิสเซส (MPa)
Drift	อัตราการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง (%)
Х	ระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง (cm)
Н	ระยะความสูงของเสา (cm)
kN	กิโลนิวตัน
MPa	เมกะปาสคาล
m	เมตร
mm	มิลลิเมตร
cm	เซนติเมตร
kg/m ³	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
g/cm ³	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เสา คือ องค์อาคารที่ทำหน้าที่รับแรงอัดเป็นหลัก โดยรับน้ำหนักที่ถ่ายเทจากระบบพื้นชั้นบนสุด ลงมาสู่ชั้นต่ำสุด ไม่ว่าจะเป็นเสาอาคารหรือเสาสะพานล้วนเป็นโครงสร้างที่แบกรับน้ำหนัก เพื่อถ่ายเท น้ำหนักลงสู่ฐานรากเช่นเดียวกัน ในบางกรณีเสารับแรงกระทำทั้งแรงอัดตามแนวแกนและแรงกระทำ ด้านข้าง เช่น แรงลมและแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว สำหรับกรณีนี้ต้องพิจารณาผลร่วมของแรง กระทำทั้งแรงอัดตามแนวแกนโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนร่วมด้วย เสาจึงเป็นชิ้นส่วนโครงสร้าง ที่มีความสำคัญมาก เพราะหากต้นใดต้นหนึ่งเกิดการวิบัติจะทำให้เสถียรภาพโดยรวมของโครงสร้าง ได้รับผลกระทบไปด้วย และอาจทำให้เกิดการวิบัติของโครงสร้างทั้งหมด ในปัจจุบันได้เกิดแผ่นดินไหว ขึ้นบ่อยครั้งในต่างประเทศและประเทศไทย และการออกแบบที่ผ่านมาไม่ได้คำนึงถึงแรงสั่นสะเทือน จากแผ่นดินไหวในระดับสูงได้ ย่อมส่งผลทำให้เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับความเสียหาย จนเกิดการวิบัติดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 เสาสะพานที่วิบัติจากแผ่นดินไหวโลมาพรีตาในซานฟรานซิสโก รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา [1]

หากโครงสร้างได้มีการตรวจสอบประเมินและบำรุงรักษาก็จะเป็นการป้องกันการวิบัติที่จะเกิดขึ้น ในอนาคตได้ สำหรับการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเสานั้นสามารถทำได้ โดยการเสริมกำลัง เสาด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การเสริมความแข็งแรงในข้อต่อคานเสา และการเสริมกำลังด้วยการพอก ซึ่งในแต่ละวิธีนั้นมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างที่ต้องคำนึงถึง เช่น การประเมินขนาดของแรงกระทำ ระยะเวลาในการทำงาน และงบประมาณในการซ่อมแซม ซึ่งต้องใช้ ดุลยพินิจพิจารณาจากเหตุผลหลายอย่างข้างต้นประกอบกัน จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมานั้นพบว่า ได้เคยมีการใช้วัสดุแบบต่าง ๆ นำมาเสริมกำลังให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งผลที่ได้จาก การทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลที่ได้จากแบบจำลองในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ทำให้ผู้ที่ทำการวิจัย ทราบถึงประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นหลังจากการเสริมกำลังให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะผลที่ได้ จากการสร้างแบบจำลองในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถตรวจสอบพฤติกรรมการวิบัติของคอนกรีตและ หน่วยแรงของเหล็กเสริมที่อยู่ภายในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กได้ ซึ่งปกติไม่สามารถวัดค่าได้ อย่างละเอียดจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การสร้างแบบจำลองในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษา จึงเป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมที่จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการวิบัติและหน่วยแรงของวัสดุ ที่อยู่ภายในหลังจากที่ได้มีการเสริมกำลังแล้ว

ดังนั้นการศึกษาของวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการทดสอบเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยสร้าง แบบจำลองไฟในต์เอลิเมนต์ ในโปรแกรม ANSYS โดยนำองค์ความรู้จากการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ คือ (1) การเสริมกำลังเสาด้วยแจ้กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก (2) การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (3) การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (4) การเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่ม ความถี่เหล็กปลอก นำมาเสริมกำลังตรงบริเวณโคนเสาซึ่งเป็นจุดเสี่ยงที่เสาจะเกิดการวิบัติ เพื่อศึกษา ถึงพฤติกรรมการวิบัติที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลังในแต่ละรูปแบบ รวมถึง เปรียบเทียบความคุ้มค่าในการเสริมกำลังของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง ด้วยวิธีการ แบบต่าง ๆ กับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลังภายใต้แรงแบบวัฏจักรให้ผลแตกต่าง กันอย่างไร

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีการเสริมกำลัง ภายใต้แรงแบบวัฏจักร

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงแบบวัฏจักร โดยวิธีการเสริมกำลังกับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการเสริมกำลังของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ในแต่ละรูปแบบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

 1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงแบบวัฏจักรใน
 4 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่ เหล็กปลอก

 1.3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงแบบวัฏจักรใน
 4 รูปแบบ คือ การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็ก ปลอกกับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กปกติที่ไม่ได้เสริมกำลัง

1.3.3 วิเคราะห์พฤติกรรมโดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS

1.3.4 วัสดุที่ใช้เป็นเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ ภายใต้แรง แบบวัฏจักร

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

บทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานด้านแผ่นดินไหว เหตุการณ์และความเสียหายจาก แผ่นดินไหวครั้งสำคัญในต่างประเทศ ลักษณะการวิบัติของเสาสะพานจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว วิธีการเสริมกำลังของโครงสร้าง ระเบียบวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานด้านแผ่นดินไหว

แผ่นดินไหว เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดิน อันเนื่องมาจากการ ปลดปล่อยพลังงานเพื่อลดความเครียดที่สะสมไว้ภายในโลกออกมาเพื่อปรับสมดุลของเปลือกโลกให้ คงที่ ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถทำนายเวลา สถานที่ และความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่จะ เกิดขึ้นในอนาคตได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นถ้ามีความเข้าใจถึงกระบวนการเกิดของแผ่นดินไหวที่แท้จริง และการออกแบบอาคารโดยมีความเข้าใจถึงผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของอาคารจะทำ ให้ลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชีวิตและทรัพย์สินได้

2.2.1 สาเหตุการเกิดแผ่นดินไหว [2]

2.2.1.1 เกิดจากการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก เปลือกโลกเป็นของแข็งที่เคลื่อนที่บน หินหนืดร้อน เมื่อแผ่นเปลือกโลกแต่ละแผ่นมาชนกันจะทำให้เกิดรอยคดโค้งบนเปลือกโลก แล้วปลด ปล่อยพลังงานที่เหลือออกมาในรูปคลื่นแผ่นดินไหวสู่พื้นโลก ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก [3]

2.2.1.2 เกิดจากภูเขาไฟระเบิด การเคลื่อนตัวของหินหนืดร้อนใต้ผิวโลกไปตามปล่อง ภูเขาไฟทำให้เกิดแผ่นดินสั่นสะเทือนก่อนที่จะระเบิดออกมาเป็นลาวาและเถ้าถ่านภูเขาไฟ ดังแสดง ในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การเกิดระเบิดของภูเขาไฟ [4]



2.2.1.3 เกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การทดลองระเบิดปรมาณู หรือแรงระเบิด จากการทำเหมืองแร่ ดังแสดงในภาพที่ 2.3

ภาพที่ 2.3 การเกิดระเบิดหินทำเหมืองแร่ [5]

2.2.2 การตรวจวัดคลื่นแผ่นดินไหว [2]

คลื่นแผ่นดินไหว (Seismic wave) หรือคลื่นที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว ที่ส่งผ่านมายังผิวโลกสามารถบันทึกไว้ได้ด้วยเครื่องวัดแผ่นดินไหว (Seismometer or seismograph) ในรูปของกราฟแผ่นดินไหว (Seismograph) กราฟแผ่นดินไหวเป็นเส้นขึ้นลงสลับกันแสดงถึง การสั่นสะเทือนของพื้นดินใต้เครื่องวัดแผ่นดินไหวนั้น

ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวทั่วโลก ได้จากการติดตั้งเครือข่ายของเครื่องมือวัดแผ่นดินไหว ที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้สามารถทราบถึงขนาดและตำแหน่งโดยเครื่องมือวัดแผ่นดินไหว ประกอบด้วย เครื่องรับความสั่นสะเทือน เครื่องแปลงสัญญาณความสั่นสะเทือนเป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นถูกขยายด้วยระบบขยายสัญญาณและแปลงกลับมาเป็นการสั่นไหวแล้วบันทึกลงกระดาษตลอด 24 ชั่วโมง พร้อมมีการบันทึกเวลาอย่างต่อเนื่องดังเช่น เครื่องอนาลอก ในอดีตหรือบันทึกเป็นเชิง ตัวเลขลงในเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) อย่างเช่นเครื่องในปัจจุบันทำให้ทราบว่าคลื่น แผ่นดินไหวเดินทางมาถึงสถานีเมื่อไหร่ รัศมีการตรวจรับคลื่นแผ่นดินไหวสามารถตรวจรับคลื่น แผ่นดินไหวได้ทั่วโลก แต่ส่วนใหญ่การคำนวณตำแหน่ง เวลาการเกิด และขนาดแผ่นดินไหว จะคำนวณเฉพาะคลื่นที่อยู่ห่างจากสถานีไม่เกิน 1,000 กิโลเมตร

เครื่องมือวัดแผ่นดินไหวที่ใช้ในปัจจุบันมี 2 แบบ

2.2.2.1 แบบวัดความเร็วของคลื่นสั่นสะเทือน (Velocity Seismometer) เป็นเครื่องมือ ที่ออกแบบเพื่อตรวจวัดความเร็วของคลื่นสั่นสะเทือนของพื้นโลก ซึ่งมีทั้งระบบช่วงคลื่นสั้น (Short Period Seismometer: SPS) และช่วงคลื่นยาว (Long-Period Seismometer: LPS) เครื่องมือวัด ระบบช่วงคลื่นสั้นสามารถตรวจวัดแผ่นดินไหวในรัศมี 500 กิโลเมตร ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับช่วงคลื่นยาวนั้นเป็นระบบที่สามารถตรวจวัดคลื่นแผ่นดินไหวระยะไกลได้ดี (Telesis Station)

2.2.2.2 แบบวัดอัตราเร่งของคลื่นสั่นสะเทือน (Strong Motion Accelerometer: SMA) เป็นเครื่องมือที่ออกแบบเพื่อใช้วัดหาค่าอัตราเร่งของพื้นดินในบริเวณนั้นที่เกิดแผ่นดินไหว ซึ่งสามารถนำค่าอัตราเร่งนี้ไปใช้ในการออกแบบสิ่งก่อสร้างโดยตรง เพื่อให้มีความปลอดภัยจาก ภัยพิบัติแผ่นดินไหว

2.2.3 จุดศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหว [2]

ตำแหน่งที่เกิดแผ่นดินไหวจริงๆ ใต้ผิวโลกลึกลงไปเรียกว่า จุดศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (Earthquake Focus หรือ Hypocenter) และเรียกตำแหน่งบนพื้นผิวโลกที่คลื่นแผ่นดินไหวเดินทาง มาถึงก่อนว่า จุดเหนือศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (Epicenter) ซึ่งเป็นตำแหน่งบนผิวโลกเหนือจุดศูนย์ เกิดแผ่นดินไหวจริง ๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 จุดศูนย์การเกิดแผ่นดินไหว [6]

2.2.3.1 ในทางธรณีวิทยาสามารถแบ่งจุดกำเนิดแผ่นดินไหว หรือการเกิดแผ่นดินไหว ตามความลึกได้ 3 แบบ คือ

 แผ่นดินไหวลึก (Deep-focus earthquake) เป็นแผ่นดินไหวที่อยู่ลึกกว่า
 100 กิโลเมตร มักพบในบริเวณที่แผ่นเปลือกโลกมุดลงใต้อีกแผ่นหนึ่ง พบแนวใกล้กับแนวร่องทะเล และแนวภูเขาไฟ

 แผ่นดินไหวลึกปานกลาง (Intermediate earthquake) เป็นแผ่นดินไหว ที่เกิดอยู่ที่ความลึกระหว่าง 70-100 กิโลเมตร มักพบในบริเวณแผ่นเปลือกโลกแยกตัว หรือเคลื่อนที่ ผ่านกัน เช่น สันกลางมหาสมุทรแอตแลนติก

 แผ่นดินไหวตื้น (Shallow earthquake) เป็นแผ่นดินไหวที่เกิดที่ความลึก น้อยกว่า 70 กิโลเมตร มักพบในบริเวณเดียวกันกับแผ่นดินไหวระดับปานกลาง

2.2.4 ขนาดแผ่นดินไหว ความรุนแรง และอัตราเร่งของพื้นดิน [2]

ความร้ายแรงของการเกิดแผ่นดินไหวสามารถบอกในรูปของความรุนแรง(Intensity) ขนาดของแผ่นดินไหว (Magnitude) โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

2.2.4.1 ขนาดแผ่นดินไหว เกี่ยวข้องกับปริมาณของพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา ณ ตำแหน่งจุดกำเนิดแผ่นดินไหว ขนาดแผ่นดินไหวขึ้นอยู่กับความสูงของคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ ด้วยเครื่องวัดแผ่นดินไหว มาตราวัดขนาดแผ่นดินไหวคือ มาตราริกเตอร์เสนอโดย ชาร์ล เอฟ ริกเตอร์ (Charles F. Richter นักวิทยาศาสตร์ด้านแผ่นดินไหวชาวอเมริกัน) ขนาดแผ่นดินไหวเป็นตัวเลขทาง คณิตศาสตร์ที่บ่งชี้ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้น ที่ระดับเป็นศูนย์ โดยกำหนดให้แผ่นดินไหวที่เกิดที่ระดับศูนย์มีค่าความสูงของคลื่น 0.001 มิลลิเมตร ที่ระยะทาง 100 กิโลเมตร จากจุดศูนย์เกิดแผ่นดินไหว (Epicenter) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังแสดง ในสมการที่ 2.1

$$M = \log A - \log A_0 \tag{2.1}$$

เมื่อ	М	คือ	ขนาดแผ่นดินไหว หน่วยริกเตอร์
	А	คือ	ความสูงของคลื่นสูงสุด หน่วยมิลลิเมตร
	A ₀	คือ	ความสู่งของคลื่นที่ระดับศูนย์ หน่วยมิลลิเมตร

ขนาดแผ่นดินไหวที่คำนวณได้ในมาตราริกเตอร์นี้ จะบอกได้เป็นตัวเลขจำนวน เต็มหรือทศนิยม ซึ่งสามารถแบ่งระดับขนาดการเกิดแผ่นดินไหวจากขนาดเล็กมาก ไปจนถึง แผ่นดินไหวขนาดใหญ่มาก ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ขนาด (ตามมาตราริกเตอร์)	ระดับแผ่นดินไหว
น้อยกว่า 3.0	แผ่นดินไหวขนาดเล็กมาก (Micro)
3.0 – 4.9	แผ่นดินไหวขนาดเล็ก (Minor)
5.0 – 5.9	แผ่นดินไหวขนาดปานกลาง (Moderate)
6.0 – 7.9	แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ (Major)
มากกว่า 8.0	แผ่นดินไหวขนาดใหญ่มาก (Great)

ตารางที่ 2.1 การจำแนกขนาดแผ่นดินไหว [2]

2.2.4.2 มาตราวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหว เป็นผลกระทบของแผ่นดินไหวที่มีผล ต่อความรู้สึกของคน การสั่นไหวของอาคาร ความเสียหายของสิ่งปลูกสร้างในระดับเสียหายน้อย ถึงเสียหายมาก หรือเกิดรอยแยกบนพื้นดินจนถึงขั้นที่ทุกอย่างพังพินาศ มาตราวัดความรุนแรงของ แผ่นดินไหวเรียกว่า มาตราเมอร์คัลลี่ (Mercalli) โดยกวีเซปเป เมอร์คัลลี (Guiseppe Mercalli) นักวิทยาศาสตร์ด้านแผ่นดินไหวและภูเขาไฟชาวอิตาเลียน มาตราวัดความรุนแรงของเมอร์คัลลีมี 12 ระดับจากระดับความรุนแรงน้อยจนไม่สามารถรู้สึกได้ จนถึงระดับขั้นรุนแรงที่สุดจนทุกสิ่งทุกอย่าง บนโลกพังพินาศ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ความรุนแรง	สภาพของแผ่นดินไหว ความรุนแรง
I	คนธรรมดาจะไม่รู้สึกแต่เครื่องวัดสามารถตรวจจับได้
II	คนที่มีความรู้สึกไว จะรู้สึกว่าแผ่นดินไหวเล็กน้อย
Ш	คนที่อยู่กับที่รู้สึกว่าพื้นที่สั่น
IV	คนที่สัญจรไปมารู้สึกได้
V	คนที่นอนหลับตกใจตื่น
VI	ต้นไม้สั้น บ้านแกว่ง สิ่งปลูกสร้างบางชนิดพัง
VII	ฝาห้องแยกร้าว กรุเพดานร่วง
VIII	ต้องหยุดขับรถยนต์ ตึกร้าว ปล่องไฟพัง
IX	บ้านพังตามแถบรอยแยกของแผ่นดิน ท่อน้ำ ท่อแก๊ส ขาดเป็นตอนๆ
Х	แผ่นดิบแยก ตึกแข็งแรงพัง รางรถไฟคดโค้งดินลาดเขาเคลื่อนตัวหรือถล่ม

ตารางที่ 2.2 มาตราความรุนแรงเมอร์คัลลีมี 12 ระดับ [2]

ความรุนแรง	สภาพของแผ่นดินไหว ความรุนแรง	
XI	ตึกถล่ม สะพานขาด ทางรถไฟ ท่อน้ำและสายไฟใต้ดินเสียหาย แผ่นดินถล่ม น้ำท่วม	
XII	ทุกสิ่งทุกอย่างบนพื้นดินเสียหายโดยสิ้นเชิง พื้นดินเคลื่อนตัวเป็นลูกคลื่น	

ตารางที่ 2.2 มาตราความรุนแรงเมอร์คัลลีมี 12 ระดับ (ต่อ) [2]

มาตราวัดขนาดแผ่นดินไหวของริกเตอร์ใช้บอกขนาดแผ่นดินไหวในรูปของ

พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมา ณ ตำแหน่งจุดกำเนิดแผ่นดินไหว ส่วนมาตราวัดความรุ่นแรง แผ่นดินไหวของเมอร์คัลลี ใช้บอกความรุนแรงของแผ่นดินไหวได้ แต่ก็เป็นเพียงการบอกขนาด ของความรู้สึกหรือความรุนแรงที่คนรับรู้ได้ ซึ่งทั้งสองมาตราวัดนั้นไม่สามารถนำไปใช้ออกแบบอาคาร หรือโครงสร้างต่าง ๆ ได้ ในการออกแบบจะต้องทราบแรงที่จะมากระทำต่อโครงสร้างนั่นคืออัตราเร่ง ของพื้นดิน อัตราเร่งนี้สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราเร่ง ปกติอัตราเร่งมีหน่วยเป็น g ซึ่ง g หมายถึง แรงโน้มถ่วงหรือ Gravity อัตราเร่งเป็นตัวเลขที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงที่มากระทำ ต่อโครงสร้าง หากโครงสร้างมีอัตราเร่งมากเท่าไรก็ยิ่งมีแรงผลักมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นในการออกแบบ โครงสร้างผู้ออกแบบจะใช้อัตราเร่งในการออกแบบโครงสร้าง ไม่ได้ใช้มาตราวัดของริกเตอร์หรือ เมอร์คัลลีแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามสามารถเปรียบเทียบขนาดแผ่นดินไหว ความรุนแรงและอัตราเร่งได้ อย่างคร่าว ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบขนาดแผ่นดินไหว ความรุนแรง และอัตราเร่งของคลื่น แผ่นดินไหว [2]

ขนาด แผ่นดินไหว (Magnitude)	ความรุนแรงตามมาตราเมอร์คัลลี่ (Mercalli Intensity)	อัตราเร่งพื้นดิน (Acceleration, %g)
น้อยกว่า 3.0	1-2 ประชาชนไม่รู้สึก แต่เครื่องตรวจวัดได้	น้อยกว่า 0.19
3.0 - 3.9	3 ประชาชนอยู่ในบ้านรู้สึกได้	0.2 – 0.49
4.0 - 4.9	4-5 ประชาชนส่วนใหญ่รู้สึกได้	0.5 – 1.90
5.0 – 5.9	6-7 ประชาชนทุกคนรู้สึกได้ อาคารเสียหายบ้าง	2.00 - 9.90
6.0 – 6.9	7-8 ประชาชนตื่นตกใจและอาคารเสียหายปานกลาง	10.00 - 19.90
7.0 – 7.9	9-10 อาคารเสียหายเกือบทั้งหมด	20.00 - 99.00
มากกว่า 8.0	11-12 ทุกอย่างถูกทำลายเกือบหมด	มากกว่า 100

2.2.4.3 ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration: PGA) [7] เป็นค่าที่มีความสำคัญในการออกแบบเชิงวิศวกรรมของอาคารในบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว มีหน่วยเป็นค่าอัตราเร่ง (ฟุต/วินาที² หรือ เซนติเมตร/วินาที²) หรือเป็นสัดส่วนของค่าอัตราเร่งหรือ แรงโน้มถ่วงของโลก (% ของค่า g) ค่า PGA สามารถหาได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือ จากการวิเคราะห์จากคลื่นความสั่นสะเทือนที่ตรวจวัด

2.3 เหตุการณ์และความเสียหายจากแผ่นดินไหวครั้งสำคัญในต่างประเทศ [1]2.3.1 แผ่นดินไหวนอร์ทริดจ์ (1994 Northridge Earthquake)

เมื่อ 17 มกราคม พ.ศ. 2537 ขนาด 7 ตามมาตราริกเตอร์ ในนอร์ทริดจ์ (Northridge) รัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำให้มีผู้เสียชีวิต 60 ราย และความเสียหายมูลค่าประมาณ 44 ล้านล้านเหรียญดอลลาร์สหรัฐ แรงสั่นสะเทือนทำลายอาคารมากว่า 40,000 หลัง ในเมือง เศรษฐกิจที่มีผู้คนอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น ได้แก่ ลอสแองเจอลิส ออเรนจ์ เว็นทูรา และซานเบอร์ นาดิโน และสะพานทางต่างระดับเสียหายหลายแห่ง ซึ่งลักษณะการวิบัติจะเกิดแรงเฉือนขึ้นในเสา ทำให้คอนกรีตที่โอบรัดเสาโดยรอบแตกออก ทำให้เห็นเหล็กเสริมภายในโค้งงอจนเสียรูปไม่สามารถ ใช้งานได้อีก ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 เสาสะพานทางต่างระดับวิบัติจากแผ่นดินไหวนอร์ทริดจ์ รัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา [1]

2.3.2 แผ่นดินไหวฮันชิน (1995 Great Hanshin Earthquake) [1]

เมื่อ 17 มกราคม พ.ศ. 2538 เป็นแผ่นดินไหวขนาด 9 ตามมาตราริกเตอร์ ในโกเบ ประเทศญี่ปุ่น เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่นี้คร่าชีวิตผู้คนกว่า 5,000 ราย และสร้างความเสียหาย มากกว่า 100 ล้านล้านเหรียญดอลลาร์สหรัฐ มีอาคารมากกว่า 200,000 แห่งที่ถล่มและเสียหาย ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงทำให้เกิดแรงเฉือนกระทำต่อเสา สะพานทำให้คอนกรีตที่หุ้มเสาแตกออก เหล็กปลอกหลุดออกเหล็กยืนดุ้งและขาดออกจากกัน เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กล้มลงทางด้านข้างเกือบทั้งหมด ซึ่งมักจะเกิดการวิบัติตรงบริเวณโคนเสา



ภาพที่ 2.6 ภาพเสาสะพานทางต่างระดับวิบัติจากแผ่นดินไหวฮันชินในโกเบ ประเทศญี่ปุ่น [1]

2.4 ลักษณะการวิบัติของเสาสะพานจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว

จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ผ่านมาจะพบว่าการวิบัติที่เกิดขึ้นกับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก มักจะเกิดขึ้นที่บริเวณโคนเสา ซึ่งเสาสะพานปกติหากออกแบบและก่อสร้างอย่างถูกต้องตามมาตรฐาน ทางวิศวกรรมแล้ว จะสามารถรับแรงเฉือนจากการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้ในระดับที่ไม่รุนแรง มากนัก แต่หากเกิดแผ่นดินไหวในระดับที่รุนแรงมาก แรงเฉือนจะส่งผลให้คอนกรีตที่หุ้มเสาเกิดการ แตกร้าวหลุดลอกออกจากโคนเสาเป็นชิ้น ๆ จนเห็นเหล็กเส้นที่เสริมเป็นโครงอยู่ด้านใน และสภาพ เหล็กเสริมภายในเกิดการโก่งเดาะเสียรูปไม่เป็นเส้นตรง หรือฉีกขาดออกจากกันทำให้เสาไม่อาจ ต้านทานแรงได้อีกต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างการวิบัติของเสาสะพานที่บริเวณโคนเสา [1]



ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างการวิบัติของเสาสะพานที่บริเวณหัวเสา [1]

จากภาพที่ 2.7 และ 2.8 จะพบว่าบริเวณที่ต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษกับเสาคือปลายด้านบน และด้านล่างของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงต้องมีการเสริมกำลังในบริเวณดังกล่าวเพราะหาก เกิดแผ่นดินไหวเสาที่เสริมเหล็กปลอกที่มีความถี่มากขึ้นหรือทำการเสริมกำลังให้กับเสาสะพาน ในบริเวณดังกล่าวก็จะเป็นการเพิ่มการโอบรัดบริเวณโคนเสาจะช่วยป้องกันการแตกระเบิดและ กะเทาะหลุดของคอนกรีตเมื่อมีแรงแผ่นดินไหวมากระทำ และช่วยประคองเหล็กแกนไม่ให้คดงอ เสียรูป รวมถึงทำให้เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กมีความเหนียวกล่าวคือมีพฤติกรรมที่ดีเมื่อถูกสั่นไหว กลับไปกลับมาจากแผ่นดินไหวโดยที่กำลังรับแรงกระทำของเสาไม่สูญเสียไป

2.5 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว

2.5.1 ความเหนียว (Ductility)

ความเหนียวของโครงสร้าง หมายถึง ความสามารถที่โครงสร้างจะเปลี่ยนรูปได้มาก โดยไม่สูญเสียกำลังรับน้ำหนัก ความเหนียวของโครงสร้างวัดได้จากอัตราส่วนความเหนียว (Ductility Ratio) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 และสมการที่ 2.2 [8]



ภาพที่ 2.9 ความเหนียวขององค์อาคาร [8]

$$\mu = \Delta_{u} / \Delta_{y} \tag{2.2}$$

เมื่อ	μ	คือ	ความเหนียวขององค์อาคาร
	$\Delta_{_{U}}$	คือ	ระยะการเสียรูปที่จุดวิบัติ
	Δ_y	คือ	ระยะการเสียรูปที่จุดคราก

ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กพฤติกรรมขององค์อาคารที่มีความเหนียว จะเกิดจาก การครากของเหล็กเสริมในลักษณะการดัด (Flexural mode) เมื่อมีโมเมนต์กระทำต่อหน้าตัดเท่ากับ กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดก็จะเกิด Plastic hing ที่หน้าตัดนั้น จากจุดนี้ไปโมเมนต์ที่หน้าตัดจะไม่ เพิ่มขึ้นมากนัก แต่จะมีการหมุนตัวของหน้าตัดอย่างมาก ความสามารถที่จะหมุนตัวของหน้าตัดมาก น้อยเพียงใดขึ้นกับความเหนียวของหน้าตัดนั้น จากภาพที่ 2.9 จะเห็นว่าความเหนียวขององค์อาคาร ได้มาจากการหมุนตัวของ Plastic hinge ซึ่งเกิดที่บริเวณด้านล่างขององค์อาคาร โดยสามารถเขียน สมการความเหนียวของหน้าตัด (Curvature ductility) ได้ดังสมการที่ 2.3 [9]

$$\mu_{\phi} = \phi_m / \phi_{y} \tag{2.3}$$

โดยที่ ϕ_m คือ ความโค้งของหน้าตัดตอนที่เกิดการวิบัติ (ความโค้งสูงสุด) และ ϕ_y เป็นความโค้งของหน้าตัดตอนที่เหล็กเสริมเริ่มคราก ความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวขององค์อาคาร ดังสมการที่ 2.2 [9] และความเหนียวของหน้าตัดดังสมการที่ 2.3 [9] สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังสมการที่ 2.4 [9]

$$\mu_{\phi} = 1 + \frac{\mu - 1}{3(\ell_{\rho} / \ell) \left[1 - 0.5(\ell_{\rho} / \ell)\right]}$$
(2.4)

โดย lp เป็นความยาวของ Plastic hinge และ **l** เป็นความยาวขององค์อาคาร ความยาวของ Plastic hinge สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5 [9]

$$l_{p} = 0.08l + 0.15d_{b}f_{y} \tag{2.5}$$

โดย	1	ลื่อ	annumental Plactic hing (mas)
PLIC	Чp	no	HARDIAUUN I CASUC HIIIY (GAPIA)
	fy	คือ	กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (เมกะปาสคาล)
	db	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาว (เมตร)
	l	คือ	ความยาวเหล็ก (เมตร)

จากสมการที่ 2.5 [9] ในการออกแบบโครงสร้างให้ต้านทานแผ่นดินไหวจึงมีความจำเป็น ที่จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติทางด้านความเหนียวร่วมด้วย ผู้ออกแบบสามารถที่จะออกแบบ ให้โครงสร้างมีความเหนียวได้ โดยการเลือกใช้วัสดุที่มีความเหนียวซึ่งจะช่วยให้โครงสร้าง มีความสามารถในการเสียรูปได้มากขึ้น โดยไม่สูญเสียกำลังการต้านทานแรงที่เกิดขึ้น เช่น การออกแบบให้มีรายละเอียดเหล็กเสริมที่มีความเหมาะสม รวมถึงการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างด้วย

2.5.2 ผลของ P- Δ Effect

เมื่อโครงสร้างรับแรงกระทำด้านข้างซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนตัวในแนวราบ จากสาเหตุดังกล่าวมีผลทำให้เกิดค่าโมเมนต์ลำดับสอง (Secondary moment) เนื่องจากน้ำหนัก ในแนวดิ่งที่กระทำอยู่ก่อนแล้วเกิดการผลักจากแรงกระทำด้านข้าง ส่งผลให้เกิดน้ำหนักเยื้องศูนย์ เกิดขึ้นเรียกว่าผลกระทบ P-A [10] ได้แสดงดังในภาพที่ 2.10 และดังสมการที่ 2.6



ภาพที่ **2.10** ผลกระทบ P- Δ [11]

$$\theta_{i} = \frac{\rho_{i} \delta_{i}}{v_{i} h_{i}}$$
(2.6)

โดย

 θ_i

 P_i

 V_{I}

 H_i δ_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์เสถียรภาพ

คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรของโครงสร้าง
 ที่ระดับชั้น i และที่อยู่เหนือขึ้นไปรวมกัน หน่วยกิโลนิวตัน
 คือ แรงเฉือนด้านข้างที่คำนวณได้ทั้งหมดในทิศทางที่พิจารณา
 เนื่องจากการตอบสนองของแผ่นดินไหว หน่วยกิโลนิวตัน
 คือ ความสูงของชั้น i กับ ชั้น i-1 หน่วยเมตร

คือ ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ระดับชั้น *i* ที่เกิดจาก แผ่นดินไหว หน่วยเมตร เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ θ_i ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า 0.1 ผลกระทบ P- Δ Effect ไม่มีความ จำเป็นต้องนำมาพิจารณา หากว่าค่าสัมประสิทธิ์ θ_i อยู่ระหว่าง 0.1 และ 0.33 จะต้องพิจารณา เพิ่มค่าการเคลื่อนตัวด้วยการใช้ตัวคูณ 1/(1- θ_i) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ θ_i เกิน 0.33 โครงสร้างจะถือว่า ไม่มีเสถียรภาพ จะต้องได้รับการออกแบบปรับเปลี่ยนใหม่เพื่อลดค่าการเคลื่อนที่ด้านข้าง เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดนี้ [12]

2.6 วิธีการเสริมกำลังของโครงสร้าง (Structural Strengthening)

การเสริมกำลังของโครงสร้าง เป็นกระบวนการปรับปรุงเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน แรงดัด การโอบรัด ความสามารถในการเคลื่อนที่หรือความเหนียวให้กับโครงสร้างเพื่อต้านทานแรง จากแผ่นดินไหว โดยใช้เทคนิควิธีการต่าง ๆ เลือกใช้วัสดุนำมาเสริมกำลังโครงสร้าง ได้แก่ คอนกรีต แผ่นเหล็ก และแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งการเสริมกำลังให้กับชิ้นส่วนโครงสร้างใด ๆ นั้น ต้องคำนึงถึงสภาพพฤติกรรมและคุณสมบัติของโครงสร้างร่วมด้วย สำหรับการเสริมกำลังนั้นสามารถ ทำได้ 4 ลักษณะดังนี้

2.6.1 การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Jacketing) [13]

การเสริมกำลังด้วยวิธีนี้เหมาะสำหรับอาคารขนาดเล็ก บ้านเดี่ยว ตึกแถว การหุ้มด้วย คอนกรีตเสริมเหล็ก ให้เสริมเหล็กด้วยพื้นที่หน้าตัดของเหล็กยืนอยู่ระหว่าง 1%-4% ของพื้นที่ทั้งหมด ที่พอก โดยให้ใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 12 มิลลิเมตร ขึ้นไปบริเวณมุมเสา จากนั้น พันรอบเหล็กยืนด้วยเหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 9 มิลลิเมตร ขึ้นไป และดาดปิด ทับด้วยคอนกรีตตามภาพที่ 2.11 โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่จะนำมาพอกดาดทับชั้นเหล็กเสริม ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หล่อเสาเดิม



ภาพที่ 2.11 การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก [13]

ในการเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก ผู้ออกแบบอาจใช้ข้อมูลที่ปรากฏ ในเอกสารวิชาการที่ได้รับการยอมรับหรืออ้างอิงจากผลการทดสอบที่เป็นที่น่าเชื่อถือ หรือมาตรฐาน การประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือน ของแผ่นดินไหว (มยผ.1303-57) [14] การเสริมกำลังเสาให้ทำตลอดปลายความสูงด้านบนและด้านล่างเป็นระยะ L_o ดังแสดงใน ภาพที่ 2.12 โดย L_o ให้ใช้ค่ามากที่สุดระหว่าง

- (1) H/6 เมื่อ H คือ ความสูงของเสา
- (2) ด้านกว้างของหน้าตัดเสา
- (3) 50 เซนติเมตร

ความถี่หรือระยะห่างของเหล็กปลอกในบริเวณ L₀ จะต้องไม่เกิน

- (1) 8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กยืน
- (2) 24 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก
- (3) ครึ่งหนึ่งของด้านแคบ
- (4) 300 มิลลิเมตร



ภาพที่ 2.12 บริเวณที่ควรทำการเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.6.2 การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) [15]

การเสริมกำลังเสาด้วยการหุ้มด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) เป็นการเสริมกำลังให้ ชิ้นส่วนมีกำลังต้านทานแรงจากแผ่นดินไหวหรือมีความเหนียวของหน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้น เหมาะกับ อาคารขนาดใหญ่ เสาสะพาน อาคารสูง คอนโด โดยหุ้มเสาด้วยแผ่นเหล็กพับเหล็กเป็นรูปตัวแอล ความหนาของแผ่นเหล็กที่ติดตั้งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 4.5 มิลลิเมตร และไม่เกิดการเสียรูปนอกระนาบ เข้ามุมด้านตรงกันข้ามของเสา จากนั้นเชื่อมแผ่นเหล็กทั้งสองติดกันที่ตรงมุม โดยปล่อยให้มีช่องว่าง ระหว่างแผ่นเหล็กกับเสาเดิม จากนั้นเทปูนซีเมนต์หรือมอร์ตาร์ลงไปในช่องนี้เพื่อยึดติดแผ่นเหล็ก ให้ติดแน่นกับเสาเดิมตามภาพที่ 2.13 โดยค่ากำลังอัดของปูนซีเมนต์หรือมอร์ตาร์ต้องไม่น้อยกว่า 21 เมกะปาสคาล (MPa) และไม่น้อยกว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตเดิมของโครงสร้าง ข้อดีคือมีราคาถูก และช่างก่อสร้างโดยทั่วไปทำได้ง่ายไม่ต้องใช้ความชำนาญมาก แต่มีข้อเสียคือเป็นการเพิ่มน้ำหนัก บรรทุกคงที่ให้กับชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นการรบกวนโครงสร้างเดิมมาก และการทำงานค่อนข้างยาก เนื่องจากต้องใช้แรงงานในการพับและเชื่อมติดแผ่นเหล็กเข้าด้วยกัน



ภาพที่ 2.13 การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) [15]

ในการเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก ผู้ออกแบบอาจใช้ข้อมูลที่ปรากฏในเอกสารวิชาการ ที่ได้รับการยอมรับหรืออ้างอิงจากผลการทดสอบที่เป็นที่น่าเชื่อถือ หรือมาตรฐานการประเมินและ เสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1303-57 [14] การเสริมกำลังเสาให้ทำตลอดปลายความสูงด้านล่างเสาเป็นระยะ L_o ดังภาพที่ 2.12

2.6.3 การเสริมกำลังเสาด้วยวัสดุประเภทโพลิเมอร์เสริมเส้นใย [16]

แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นวัสดุใหม่ที่ได้นำมาใช้ในงานทางวิศวกรรมโยธา เมื่อไม่นาน มานี้ โดยนำมาใช้ในงานเสริมกำลังโครงสร้างเดิม แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยทำขึ้นจากเส้นใยที่มีกำลัง รับแรงดึงสูงฝังตัวอยู่ในโพลิเมอร์เรซิน ซึ่งทำหน้าที่ประสานเส้นใยให้ทำงานร่วมกัน เส้นใยที่นำมาใช้ ในแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยมีหลายประเภท โดยเส้นใยหลักที่ใช้ในท้องตลาดสำหรับงานด้านวิศวกรรม โยธา ได้แก่ เส้นใยแก้ว เส้นใยอรามิด เส้นใยคาร์บอน ซึ่งเส้นใยทั้งสามมีความแตกต่างกันในด้านกำลัง รับน้ำหนัก ความคงทน และราคา ข้อดีของแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใย คือเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนกำลัง ต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานต่อการผุกร่อน มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถ ในการดูดซับ พลังงานได้สูง จึงเหมาะสำหรับการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่มีข้อเสียคือมีราคาแพง สำหรับรายละเอียดของวัสดุทั้งสามชนิดจะได้แสดงในลำดับถัดไป

2.6.3.1 เส้นใยแก้ว (Glass fibers) เป็นเส้นใยแก้วที่ใช้ในงานด้านวิศวกรรมโยธา เนื่องด้วยมีความเหมาะสมด้านราคาและกำลังรับน้ำหนักที่ต้องการ เส้นใยแก้วมีคุณสมบัติกำลังรับแรง ดึงสูง ราคาต่ำ แต่มีข้อควรพิจารณาอย่างอื่นเกี่ยวกับเส้นใยแก้ว เช่น เส้นใยแก้วมีผิวที่ไวต่อการดูดซึม น้ำ (Hydrophilic) กำลังของเส้นใยแก้วจะลดลงได้ถ้าไม่มีการป้องกันเส้นใยจากความชื้นและ การสัมผัสอากาศโดยตรงหรือสัมผัสกับสิ่งปนเปื้อน

2.6.3.2 เส้นใยอรามิด (Aramid fibers) เป็นเส้นใยอินทรีย์ที่นิยมใช้กันมาก เส้นใย อรามิดมีคุณสมบัติเด่นคือ มีความทนทานต่อการคืบและการล้าได้ดี อัตราการล้า (Creep rate) มีค่า น้อยเช่นเดียวกับเส้นใยแก้ว ซึ่งไม่ไวต่อความเสียหายเนื่องจากการล้า 2.6.3.3 เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibers) โดยแผ่นเส้นใยคาร์บอนมีจุดเด่นคือมีกำลัง รับน้ำหนักที่สูงและมีความบางสามารถนำไปพันรอบเสาได้โดยใช้กาวอีพอกซี่เป็นตัวประสานให้แผ่น ยึดติดกับเสาเพื่อทำการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์กับโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลังปัจจุบันมีการใช้ CFRP ในงานปรับปรุงซ่อมแซมแก้ไข และเสริมกำลังโครงสร้างอาคารประเภทต่างๆ อย่างแพร่หลาย หากเปรียบเทียบกำลังรับแรงดึงระหว่างแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

โพลิเมอร์ เสริมเส้นใยแก้ว และเหล็กเส้นทั่วไป จะได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในด้านกำลังรับแรงดึงโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมีกำลังสูงที่สุด รองลงมาคือโพลิเมอร์เสริม เส้นใยแก้ว และเหล็กเส้น ตามลำดับ



ภาพที่ 2.14 กราฟ Stress-Strain Curve ของวัสดุชนิดต่าง ๆ [16]

1) ประเภทของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

 1.1) แบบเพลทหรือลามิเนต (FRP Plate หรือ FRP Laminate) เป็นแผ่น ที่มีความหนาประมาณ 1.0-1.5 มิลลิเมตร เหมาะสำหรับการเสริมกำลังพื้นและคานโดยการติดแผ่น เข้ากับโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลัง

 แบบซีทหรือฟาบริค (FRP Sheet หรือ FRP Fabric) เป็นแผ่นที่มี ความหนาประมาณ 0.1-0.2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นแผ่นบาง จึงสามารถนำไปพันรอบโครงสร้างที่ต้องการ เสริมกำลังได้

1.3) แบบแท่ง (FRP Rod) มีลักษณะเป็นแท่งกลมคล้ายเหล็กเส้นแต่มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่าเหล็กเส้นทั่วไป

2) การติดตั้ง

ในการเสริมกำลังของเสาด้วยโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เริ่มจาก การฉาบกาวอีพอกซี่บนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ให้แทรกเข้าไปในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ จนชุ่มแล้วทำการ พันแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์รอบเสาในบริเวณโคนเสา ตามภาพที่ 2.15 หรือตำแหน่งอื่น ๆ ที่คาดว่าจะ เกิดความเสียหาย



ภาพที่ 2.15 เสาเสริมกำลังด้วย CFRP [17]

สำหรับการพันแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) นั้นขึ้นกับ วัตถุประสงค์ในการใช้งาน เช่น การรับแรงเฉือนจะทำการเสริมกำลังด้วยการพันรอบเสา เพื่อทำหน้าที่ รับแรงอัดในแนวแกนของเสาเพิ่มขึ้น และทำหน้าที่เสมือนเป็นเหล็กปลอกในเสาทำให้กำลังรับแรง เฉือนของเสาเพิ่มมากขึ้น ส่วนการเสริมกำลังรับแรงดัดจะทำการเสริมกำลังในทิศทางตามแนวความสูง ของเสา ซึ่งจะทำให้กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น การพันแผ่น CFRP ในแต่ละทิศทางนั้น จะทำหน้าที่เสริมกำลังแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน

2.6.4 การเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก [18]

การเสริมกำลังเสาในวิธีนี้เป็นการเสริมกำลังที่แตกต่างจาก 3 รูปแบบข้างต้น ซึ่งทำการ การพอกวัสดุเสริมกำลังบนโครงสร้างเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเดิม ในวิธีนี้จะเป็นการออกแบบ เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กใหม่โดยการให้รายละเอียดการเสริมเหล็กปลอก เพราะเมื่อเกิด แรงสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงของแผ่นดินไหวจะเกิดแรงเฉือนกับเสาสะพาน ทำให้เสาสะพานปกติ ที่มีความเหนียวจำกัด ปรากฏรอยแตกร้าวคอนรีตที่หุ้มเสาหลุดลอกออกเหล็กเสริมคดงอเสียรูป จนวิบัติ การเพิ่มความถี่เหล็กปลอกจะช่วยต้านทานการแตกของคอนกรีตภายในเสาไม่ให้แตกระเบิด แต่ค่อย ๆ โก่งตัวจนกระทั่งเกิดการวิบัติในที่สุด เหล็กปลอกเสาที่รัดรอบเหล็กแกนเสาแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เหล็กปลอกเดี่ยว (Ties) และเหล็กปลอกเกลียว (Spirals) โดยบริเวณที่ต้องทำการเสริม กำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก แสดงในภาพที่ 2.16

2.6.4.1 ข้อกำหนดในการเสริมเหล็กปลอกในเสา มีดังนี้

 เหล็กปลอกในเสาจะต้องเสริมมากเป็นพิเศษที่บริเวณปลายเสาโดยให้มี ระยะเรียง ไม่มากกว่า 8 เท่าเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยืน หรือ 24 เท่าเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก หรือครึ่งหนึ่งของด้านแคบของเสา หรือ 30 เซนติเมตร

 2) ระยะ L₀ ต้องไม่น้อยกว่า H/6 (H คือ ความสูงของเสา) หรือด้านกว้าง ของเสา หรือ 50 เซนติเมตร

- 3) การทาบเหล็กเสาให้ทำที่บริเวณช่วงกลางเสา
- ต้องใส่เหล็กปลอกในข้อต่ออย่างน้อย A_v <u>1 C S</u>

- A, คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (ตารางเซนติเมตร)
- C1 คือ ความกว้างของเสา (เซนติเมตร)
- S คือ ระยะเรียงเหล็กปลอก (เซนติเมตร)
- f_y คือ กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริม (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)





2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) [19]

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์โดยประมาณ สำหรับปัญหา ที่ประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบ คือ สมการเชิงอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างปัญหาได้ โดยครบถ้วน เนื่องจากปัญหาทางวิศวกรรม วิทยาศาสตร์ รวมทั้งศาสตร์อื่น ๆ มักถูกครอบคลุม ด้วยองค์ประกอบทั้งสามนี้ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกประยุกต์นำไปใช้แก้ปัญหาได้หลากหลายทำให้ นิยมใช้กันแพร่หลาย

หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์คือการแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ จากนั้น จึงสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับเอลิเมนต์เหล่านี้ ก่อนนำสมการไฟไนต์ เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์มารวมกันเข้า เพื่อก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไข ขอบเขตลงบนระบบสมการใหญ่นี้เพื่อแก้หาผลลัพธ์

2.7.1 ขั้นตอนในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เรียงลำดับดังนี้ คือ

2.7.1.1 ขั้นตอนแรกเริ่มจากการสร้างโดเมนรูปร่างของปัญหา ประกอบด้วยพื้นผิวขอบ ตรงขอบโค้ง ฯลฯ

2.7.1.2 เอลิเมนต์ย่อย ๆ เกิดขึ้นอาจเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าหากเป็น ปัญหาใน 2 มิติ เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมอาจประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มุมทั้งสาม หรือ 6 จุดต่อ คือที่มุม ทั้งสามและที่จุดกึ่งกลางของด้านทั้งสามด้วย จำนวนจุดต่อเหล่านี้มีผลโดยตรงสู่ลักษณะการกระจาย ของผลลัพธ์บนเอลิเมนต์นั้น ๆ ที่เราเรียกว่าฟังก์ชั่นการประมาณการภายใน (Interpolation function) เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบ 6 จุดต่อ มีฟังก์ชั่นการประมาณภายในเอลิเมนต์ที่ซับซ้อนกว่า เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบ 3 จุดต่อ ดังนั้นจึงให้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรงมากกว่า แต่ในทางตรงกันข้ามก็จะใช้ เวลาในการคำนวณมากขึ้นเพราะจำนวนจุดต่อบ่งบอกจำนวนตัวไม่รู้ค่าของปัญหานั้นมีมากขึ้น ในทำนองเดียวกันโดเมนของปัญหาใน 3 มิติ อาจถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์ทรงตันย่อย ๆ เช่น รูปทรง ลูกบาศก์แต่ละด้านไม่ขนานกัน เอลิเมนต์แบบ 3 มิตินี้ อาจประกอบด้วย 8 จุดต่อที่มุมทั้งแปด หรือ 20 จุดต่อ หากมีจุดต่อที่กึ่งกลางของสันขอบด้วย

2.7.1.3 ประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ขั้นตอนนี้ เกี่ยวกับคณิตศาสตร์ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกิดขึ้นเป็นสมการทางพีชคณิต ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการบวก ลบ คูณ หารตัวเลขจำนวนมาก จึงสามารถนำไปประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรม คอมพิวเตอร์ได้ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์เหล่านี้ยังขึ้นกับชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้ ซึ่งมีฟังก์ชั่น การประมาณการภายในที่แตกต่างกัน

2.7.1.4 การนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากทุกเอลิเมนต์มารวมกันขึ้นเป็นระบบสมการ ทางพีชคณิต (System of algebraic equations) ขนาดใหญ่การรวมสมการจากเอลิเมนต์ย่อย เข้าด้วยกันต้องทำอย่างเหมาะสม เปรียบเสมือนการประกอบตัวต่อ (Jigsaw puzzle) ขึ้นเป็นรูปภาพ ใหญ่ตัวต่อแต่ละตัว จำเป็นต้องอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง จึงนำมาสู่ภาพใหญ่ที่ถูกต้อง

2.7.1.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเข้ากับสมการทางพีชคณิตขนาดใหญ่นี้ แล้วจึงแก้เพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดต่อต่าง ๆ ขั้นตอนนี้จัดว่าใช้เวลาในการคำนวณมาก โดยเฉพาะหากเป็น ปัญหาใหญ่ ซึ่งอาจประกอบไปด้วยหลายแสนหรือหลายล้านสมการ หรือเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งระบบสมการทางพีชคณิตขนาดใหญ่เช่นนี้ ต้องถูกแก้ซ้ำแล้วซ้ำอีกหลายครั้ง

2.7.1.6 เมื่อได้ผลลัพธ์ที่จุดต่อจากขั้นตอนที่ 5 แล้ว ค่าอื่น ๆ ที่มีความสำคัญเช่นกัน จึงสามารถหาตามมาได้ ทำให้การแก้ปัญหานั้นเสร็จสิ้นโดยสมบูรณ์

จาก 6 ขั้นตอนที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าวิธีไฟในต์์เอลิเมนต์มีกระบวนการที่เป็นลำดับ ขั้นตอนอย่างชัดเจนให้ผลลัพธ์ที่สมบูรณ์ และสามารถประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาโดยทั่วไปได้ โดยองค์ประกอบที่สำคัญของปัญหาคือ สมการอนุพันธ์ เงื่อนไขขอบเขต และรูปร่างปัญหา ได้ถูก จัดการดูแลโดยครบถ้วนในขั้นตอนที่ (3), (5) และ (1) ของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.7.2 ชนิดของเอลิเมนต์

เอลิเมนต์ในสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับชนิดที่เลือกใช้สำหรับในระบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เอลิเมนต์เหล่านี้อาจประกอบไปด้วยจุดต่อที่มุมเท่านั้นหรืออาจมีจุดต่อที่กึ่งกลางก็ได้ ดังแสดงใน ภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 ชนิดเอลิเมนต์แบบต่าง ๆ [19]

2.7.3 ซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีประโยชน์อย่างมากในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมในหลาย ๆ ด้าน เช่น การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคาร วิเคราะห์ความแข็งแรง ของชิ้นส่วนรถยนต์และเครื่องบิน วิเคราะห์การไหลของลมผ่านอาคารสูงไปจนถึงการทดลอง ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ซึ่งไม่สามารถทดลองจริงได้

ในการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของการเสริมกำลังเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ในแต่ละรูปแบบจะมีลักษณะรูปร่างและคุณสมบัติของวัสดุหลายชนิดประกอบกัน เป็นวัสดุคอมโพสิต (Composite Material) คือ คอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุเสริมกำลัง ซึ่งมีความซับซ้อนจึงมี ความจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ โดยการสร้างแบบจำลองไฟในต์ เอลิเมนต์ในระบบสามมิติขึ้นมา เพื่อให้มีสภาพใกล้เคียงกับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทดสอบ ในห้องปฏิบัติการของผู้วิจัยในอดีตที่ผ่านมา ซึ่งจะนำมาใช้ในการสอบเทียบเพื่อยืนยันความถูกต้อง ของแบบจำลองด้วยซอฟต์แวร์ไฟในต์เอลิเมนต์ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยและใช้ในงานออกแบบ ทางวิศวกรรมที่พบโดยทั่วไป คือ ANSYS ABAQUS และ LS-DYNA โดยโปรแกรมที่กล่าวถึงนั้น เป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพสูงในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม สามารถคำนวณวิเคราะห์พฤติกรรม แบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นของแบบจำลอง การวิเคราะห์ทำได้ตั้งแต่ชิ้นส่วนย่อยไปจนถึงระบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ซับซ้อนภายใต้สภาวะของแรงกระทำในหลากหลายรูปแบบ ทำให้ทราบถึงผล การตอบสนองต่อแรงกระทำเหล่านั้นทั้งการเสียรูป แรงปฏิกิริยา ความเค้นและความเครียด เป็นต้น

โดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กล่าวถึงข้างต้นนั้นมีความเหมาะสมในการใช้งาน ที่แตกต่างกันกล่าวคือโปแกรม LS-DYNA เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองที่ต้องการ ศึกษาผลการตอบสนองของวัสดุที่เกิดจากการกระแทก การชน และการระเบิด เช่น การชนกันของ รถยนต์หรือการกระแทกของรถยนต์ต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหรือโครงสร้างอื่น ๆ เป็นต้น ส่วนโปรแกรม ANSYS และ ABAQUS เป็นโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีความคล้ายคลึงกัน
ในหลายด้าน เช่น การแก้ปัญหาเรื่องความแข็งแรงทางฟิสิกส์ การดึงดูดแม่เหล็กไฟฟ้า การคำนวณ ความล้า ความร้อนอุทกพลศาสตร์ และในด้านอื่น ๆ สำหรับการใช้งานโปรแกรม ANSYS จะมีการ ใช้งานง่ายกว่า ABAQUS ซึ่งในการให้ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุในตัวโปรแกรมนั้น ABAQUS จะไม่รับรู้ ถึงหน่วย และหวังว่าผู้ใช้งานจะให้ข้อมูลหน่วยในลักษณะที่สอดคล้องกัน ส่วนในโปรแกรม ANSYS รับรู้ถึงหน่วยต่าง ๆ จึงเหมาะสำหรับผู้ที่เริ่มต้นใช้งานโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มากกว่า

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์ เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์และประมวลผล โดยโปรแกรม ANSYS มีศักยภาพครอบคลุมการแก้ปัญหา ในหลากหลายสาขา และสามารถคำนวณวิเคราะห์พฤติกรรมแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ของแบบจำลองได้เช่นกัน ทำให้เห็นผลลัพธ์ที่มีความหมายสื่อภาพได้ชัดเจนกล่าวคือสามารถเห็นภาพ การแบ่งโทนสีบนชิ้นงานได้อย่างชัดเจนบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ประกอบกับเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวาง และใช้งานง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับซอฟท์แวร์อื่น ๆ

2.7.4 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การจำลองปัญหาในการวิเคราะห์เป็นโครงสร้างแบบสถิต ซึ่งมีลำดับ ขั้นตอนในการดำเนินงานของโปรแกรมดังนี้ คือ

- 2.7.4.1 Static Structural แสดงถึงหมวดปัญหาของโครงสร้าง
- 2.7.4.2 Engineering Data เป็นขั้นตอนการกำหนดข้อมูลวัสดุ
- 2.7.4.3 Geometry เป็นขั้นตอนการสร้างรูปร่างของปัญหา
- 2.7.4.4 Model เป็นขั้นตอนการกำหนดเมชให้กับชิ้นงาน
- 2.7.4.5 Setup เป็นขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต เช่น แรงกระทำ การจับยึดฯลฯ
- 2.7.4.6 Solution เป็นขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์
- 2.7.4.7 Results เป็นขั้นตอนการแสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

เมื่อได้ดำเนินการครบขั้นตอนแล้ว โปรแกรมจะแสดงผลลัพธ์ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ทำให้ทราบถึงผลการตอบสนองต่อสภาวะของแรงที่กระทำในหลากหลายรูปแบบ เช่น การเสียรูป แรงปฏิกิริยา ความเค้นและความเครียด เป็นต้น

2.8 การวิเคราะห์ความเสียหาย [20]

การวิเคราะห์ความเสียหาย (Failure Analysis) มีความสำคัญต่อการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ของโครงสร้างต่างๆเช่น สะพานเหล็ก คอนกรีตเสริมเหล็ก ชิ้นส่วนรถยนต์ เพราะเมื่อโครงสร้างเหล่านี้ ถูกแรงกระทำซ้ำ ๆ จะเกิดการแตกร้าวและความเสียหายตามมาได้ ซึ่งสามารถทำนายการเกิด ความเสียหายนั้น เกิดจากการครากแล้วหรือแตกหักของวัสดุได้ด้วยทฤษฎีพลังงานแปรรูป (Distortion Energy Theory) ทฤษฎีนี้สมมุติใหพลังงานความเครียดรวมสามารถแบงออกเปน 2 สวน คือ volumetric (hydrostatic) strain energy และ shape(distortion or shear)strain energy ดังนั้น พลังงานที่ทำใหเกิดการครากจะมาจากส่วนหลัง ทฤษฎีจึงกลาวไววา การครากจะเกิดขึ้นเมื่อ distortion energy มีคามากกวาความเคนแรงดึงสูงสุด ทฤษฎีนี้เปนที่รูจักกันดีในนาม Von Mises criterion ประกอบไปด้วยความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือนได้แก่ $\sigma_x; \sigma_y; \sigma_z; \tau_{xy}; \tau_{xz}; \tau_{yz}$ ดังแสดงในภาพที่ 2.18 [21]



ภาพที่ 2.18 ความเค้นบนเอลิเมนต์ 3 มิติ [21]

้โดยความเค้นตั้งฉากและความเค้นเฉือน สามารถแสดงไดดังสมการที่ 2.7 [20]

$$\sigma_{von} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\left(\sigma_{x} - \sigma_{y} \right)^{2} + \left(\sigma_{y} - \sigma_{z} \right)^{2} + \left(\sigma_{z} - \sigma_{x} \right)^{2} + 6 \left(\tau_{xy}^{2} + \tau_{yz}^{2} + \tau_{zx}^{2} \right) \right]^{1/2}$$
(2.7)

โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ความเค้นฟอนมิสเซส (Von Mises Stress) ในการวิเคราะห์หาหน่วยแรงรวม ของความเค้นตั้งฉาก และความเค้นเฉือนทั้งสามแนวแกนที่เกิดขึ้นของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ ภายใต้แรงแบบวัฏจักร เพื่อศึกษา ถึงพฤติกรรมของ คอนกรีต เหล็กเสริมตามยาว และเหล็กเสริมตามขวาง รวมถึงวัสดุเสริมกำลัง แบบต่าง ๆ ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไปในบทที่ 4

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับการเสริมกำลังในอดีต สามารถทำการทดสอบจากในห้องปฏิบัติการและ การสร้างแบบจำลองในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 กรณีนั้นทำให้ทราบว่า การเสริมกำลังทำให้ประสิทธิภาพของเสาดียิ่งขึ้น ซึ่งสามารถนำผลที่ได้จากการศึกษาไปเป็นความรู้ พื้นฐานและแนวทางในการพัฒนางานวิจัยในครั้งนี้ โดยสามารถสรุปรายละเอียดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ งานวิจัยนี้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมกำลังในห้องปฏิบัติการ

งานวิจัยของ อลงกรณ์ เพชรดี (2555) [22] ได้ทำการศึกษาโดยใช้วัสดุประเภท โพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer หรือ CFRP) เสริมกำลังให้กับ เสาทดสอบภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าเสาที่ได้รับการเสริมกำลัง ด้วยเส้นใยคาร์บอนมีประสิทธิภาพความเหนียวของเสาเพิ่มมากขึ้น และยังเพิ่มความสามารถในการรับ แรงด้านข้างของเสาให้สูงมากขึ้นอีกด้วย เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปกติที่ไม่ได้เสริมกำลัง แต่เนื่องจาก CFRP มีราคาที่สูงมากทำให้การก่อสร้างมีต้นทุนที่สูงขึ้นด้วย จึงได้มีงานวิจัยของ

จิรภัทร แย้มทิม (2556) [23] ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้งานโดยใช้วัสดุประเภทโพลิเมอร์ เสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer: GFRP) ซึ่งมีราคาถูกกว่า CFRP ทำการเสริม ้กำลังให้กับเสาจำนวน 4 ต้น มีรูปแบบเหมือนกันแต่มีความสูงต่างกันและมีแรงแบบวัฏจักรด้านข้าง เสาที่ความสูงต่างกัน ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าเสาที่ได้รับการเสริมกำลังด้วย GFRP ทำให้กำลัง ้รับแรงเฉือนของเสาและประสิทธิภาพความเหนียวของเสาเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย หลังจากนั้น ใน ค.ศ. 2015 ได้มีการศึกษาเสาที่มีอยู่เดิมและเสาที่ได้รับความเสียหายมาทำการเสริมกำลังโดย Zaman- Khan et al. (2015) [24] ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 3 ต้น คือ ้เสาเดิม เสาเดิมที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP) และเสาที่ได้รับความเสียหายที่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP ทำการทดสอบโดย ให้แรงด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Load) ผลที่ได้พบว่าเสาที่เสริมกำลังด้วย CFRP มีความเหนียว เพิ่มขึ้นกว่าเสาที่ไม่ได้เสริมกำลัง และเสาที่ได้รับความเสียหายเมื่อได้รับการเสริมกำลังแล้วยังคงมีการ ต้านทานแรงด้านข้างได้ดีดังเดิมอีกด้วย ต่อมาใน ค.ศ. 2017 Bhowmik et al. (2017) [25] ทำการศึกษาพฤติกรรมการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรูปแคปซูล งานวิจัยนี้ได้ทำการเสริมกำลัง ้โดยใช้เทคนิคการปรับรูปร่าง โดยการเพิ่มส่วนวงกลมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งสองข้างและทำให้ เป็นรูปแคปซูลขึ้น โดยมีการกำหนดขนาดตัวอย่างเป็น 3 กลุ่ม 9 ตัวอย่าง ที่มีขนาดอัตราส่วนของ การเพิ่มส่วนโค้งต่อความกว้างเสา โดยให้แรงทดสอบด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Load) ผลที่ได้จาก การทดสอบสรุปได้ว่าเทคนิคการปรับเปลี่ยนรูปร่างให้ผลการโอบรัดที่ดีขึ้นกับเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้าเดิม ้จึงสามารถปรับปรุงลักษณะการเสียรูปได้ และสังเกตได้ว่ากลุ่มที่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP กับกลุ่มที่ ้มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP สามารถป้องกันการวิบัติจากแรงเฉือนของเสาและเพิ่มความเหนียว ให้กับเสามากขึ้นกว่าเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลังโดยกลุ่มตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วย CFRP ให้ประสิทธิภาพความเหนียวสูงสุด

นอกจากผลการทดสอบที่ได้จากการนำวัสดุประเภทโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน มาทำการเสริมกำลังให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว ยังมีผู้วิจัยที่ได้ทำการศึกษาการเพิ่ม ประสิทธิภาพของเสา โดยการให้รายละเอียดเหล็กปลอกในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใน ค.ศ. 2014 Sung Eom et al. (2014) [26] ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเหล็ก ปลอกแบบ Crossties และแบบ Polygonal hoop โดยการให้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load) เพื่อทดสอบเสาจำนวน 4 ต้น โดยมีการให้รายละเอียดเหล็กปลอกที่แตกต่างกัน คือ รูปทรงของเหล็ก ปลอก ระยะเรียง เส้นผ่านศูนย์กลางของปลอกเหล็ก และระยะห่างระหว่างเหล็กยืน นำมาศึกษา ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ความสามารถในการเสียรูปและการวิบัติของเสาและ เปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละแบบ ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าในตัวอย่างเสาที่มีการเรียงเหล็ก ปลอกต่อเนื่องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแบบง่ายและมัดรวมเหล็กยืนไว้เป็นกลุ่มจะมีประสิทธิภาพในการรับ น้ำหนักมากกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ส่วนตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กปลอกแบบ crossties จะมีประสิทธิภาพ ในเรื่องการเคลื่อนที่ด้านข้างได้มากกว่าตัวอย่างอื่น ๆ

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมกำลังในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ธนกฤต เตรียมไชย และคณะ (2559) [27] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการรับ แรงด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Load) ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยสร้างแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS เปรียบเทียบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้มีการเสริมกำลัง ้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง 3 ลักษณะ ได้แก่ การเพิ่มความถี่เหล็กปลอก การเสริมกำลัง ด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก และการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังทั้ง 3 วิธี สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงด้านข้างแบบวัภจักรให้แก่เสาได้ดีขึ้น มากกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง โดยการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ้จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากที่สุดต่อมา Pawar et al. (2016) [28] ได้ทำการการวิเคราะห์ ้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบ Non Linear โดยวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS โดยใช้คอนกรีต เอลิเมนต์ชนิด Solid65 และเหล็กเสริมเอลิเมนต์ชนิด Link180 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ้ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 2 ต้น ขนาดกว้าง 0.25 เมตร ยาว 0.25เมตร ที่มีความสูง 1.25 เมตร และ 4.8 เมตร มีแรงในแนวแกนและแรงเยื้องศูนย์ 50 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร เพื่อศึกษา พฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีต โดยผลที่ได้ทำให้ทราบถึงสภาพการวิบัติที่เกิดขึ้นเมื่อให้ภาระแรง กระทำที่มีเงื่อนไขแตกต่างกัน และใน ค.ศ. 2017 Li et al. (2017) [29] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพ ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบ Precast ภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic Load) โดยสร้าง แบบจำลองในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ABAQUS ของเสาสองต้นที่มีอัตราส่วนต่างกัน โดยเสา ทั้งสองต้นนี้ได้รับการตรวจสอบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้ว การศึกษาจะดำเนินการสร้าง ้เงื่อนไขแตกต่าง คือ อัตราส่วนแรงในแนวแกน ความหนาแผ่นเหล็กและเส้น Tendon ที่อาจมีผล ้ต่อประสิทธิภาพของเสา โดยผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ ในรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าการวิเคราะห์ในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นเครื่องมือที่เชื่อถือได้และมีประสิทธิภาพ และแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงให้เห็นว่าเส้นแนว Tendon ที่มีอยู่ภายในเสาสามารถเพิ่มความแข็งแรงด้านข้างของเสาได้แต่ก็ยังส่งผลให้เกิด strain ในเส้น Tendon ด้วยและความเหนียวของเสาจะลดลงเมื่อเทียบกับเสาที่ไม่มีเส้น Tendon อยู่และ การเพิ่มของ Steel Jacketing ระหว่างส่วนต่าง ๆ ในเสาจะเพิ่มการกระจายพลังงานของเสาในแต่ละ segmental ของเสาด้วย นอกจากทดสอบประสิทธิภาพการเสริมกำลังให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ปกติและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบ Precast แล้ว ใน ค.ศ. 2018 Peng et al. (2018) [30] ได้ทำ การวิจัยเชิงทดลองและการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ABAQUS เพื่อศึกษาพฤติกรรม การเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP) ้ของเสาประกอบเหล็ก-คอนกรีต โดยได้ทำการทดสอบเสาตัวอย่างจำนวน 4 ต้นที่มีเงื่อนไข ความเสียหายแตกต่างกัน โดยให้แรงทางด้านข้างแบบวัฏจักร (Cyclic Load) และมีน้ำหนักบรรทุก ในแนวแกนคงที่ ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าเสาที่เสริมกำลังแล้วมีประสิทธิภาพด้านความเหนียว ้ที่ดีขึ้นมากกว่าเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง ส่วนเสาตัวอย่างที่เสียหายปานกลางและเสียหายมาก หลังจากการเสริมกำลังแล้วมีความเหนียวที่ดีขึ้นเท่าเสาปกติและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมด้วย CFRP ได้ถูกสร้างแบบจำลองในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ทำการเปรียบเทียบแล้วพบว่า ผลการศึกษาวิเคราะห์ที่ได้กับผลการทดสอบมีความสอดคล้องกัน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นนั้น จะทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีการเสริมกำลังจากในห้องปฏิบัติการและการสร้างแบบจำลองในวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง ซึ่งจะ สังเกตเห็นว่ายังไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริม เหล็กพร้อมกันในหลายรูปแบบ และงานวิจัยที่ผ่านมาบางส่วนที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้น อาจมีข้อจำกัดในการทดสอบอยู่บ้างบางประการ เช่น ไม่สามารถตรวจดูลักษณะการกระจาย หน่วยแรงที่ชัดเจนของคอนกรีต และหน่วยแรงของเหล็กเสริมภายหลังจากที่ได้ทำการเสริมกำลัง ให้กับเสาที่ทำการทดสอบแล้ว ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่มุ่งศึกษา ถึงพฤติกรรมการวิบัติของการเสริมกำลังเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละรูปแบบ พร้อมเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความคุ้มค่าสำหรับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละรูปแบบ จึงได้ใช้วิธีไฟในต์เอลิเมนต์ในการศึกษา โดยสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการเสริมกำลังให้กับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กใน 4 รูปแบบ คือ (1) การ เสริมกำลังเสาด้วยแจ็กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก (2) การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (3) การเสริมกำลัง เสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและ (4) การเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

2.10 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

้จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในต่างประเทศในหลาย ๆ ปีที่ผ่านมาได้ก่อให้เกิด ้ความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินอย่างมหาศาลต่อผู้ใช้ประโยชน์ในตัวอาคารและระบบโครงสร้าง ้พื้นฐานอื่น ๆ เพราะโดยส่วนมากไม่ได้คำนึงถึงการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงสั่นสะเทือน จากแผ่นดินไหวในระดับสูงได้ หากในอนาคตได้มีการออกแบบโดยคำนึงถึงการออกแบบโครงสร้าง ต้านทานต่อแรงแผ่นดินไหวย่อมที่จะลดผลกระทบและความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากภัยพิบัตินี้ได้ โดยเฉพาะโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญในการคมนาคมของประเทศ เช่น สะพานและ ้ทางต่างระดับนั้นเป็นสาธารณูปโภคที่มีประชาชนเป็นจำนวนมากใช้ประโยชน์ร่วมกัน จากตัวอย่าง ้เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่กล่าวถึงข้างต้นในต่างประเทศนั้น จะสังเกตได้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเสา เมื่อได้รับแรงสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงของแผ่นดินไหวจะเกิดแรงเฉือนกับเสาสะพานทำให้เสาปกติ ้ที่มีความเหนียวจำกัดเกิดการวิบัติ ส่วนมากมักจะเกิดบริเวณโคนเสาซึ่งการวิบัติที่เกิดขึ้นกับเสานี้ สามารถป้องกันได้โดยใช้ความรู้เกี่ยวกับวัสดุต่าง ๆ มาทำการเสริมกำลังให้กับเสา จากการศึกษา ้งานวิจัยที่ผ่านมาทราบว่าเคยมีการใช้คอนกรีต เหล็กรูปพรรณ และวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยมาทำ การเสริมกำลังให้กับเสาตัวอย่าง ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าทำให้เสามีประสิทธิภาพความเหนียว ้สูงขึ้น และยังเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างของเสาให้สูงขึ้นอีกด้วย แต่งานวิจัย ้ที่ผ่านมาบางส่วนอาจมีข้อจำกัดจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ งานวิจัยนี้จึงได้ใช้วิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์มาใช้ในการศึกษาโดยใช้โปรแกรม ANSYS สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อทำการศึกษา ้สำหรับขั้นตอนการศึกษา และรายละเอียดรูปแบบวิธีการเสริมกำลังในแต่ละรูปแบบนั้นจะได้กล่าว ต่อไปในบทที่ 3

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

้ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการดำเนินงานวิจัย การเตรียมข้อมูล ศึกษาการใช้งานซอฟแวร์ ้ไฟในต์เอลิเมนต์ การกำหนดลักษณะและคุณสมบัติของเสาที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง ้ไฟในต์เอลิเมนต์ของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังในแต่ละรูปแบบ โดยทำการ ้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากศึกษาการใช้งานโปรแกรม ANSYS การค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาที่มีผลการทดสอบเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้เป็นเสาอ้างอิ่งในการสอบเทียบแบบจำลองเชิงตัวเลขกับเสาสะพานคอนกรีต เสริมเหล็กที่ผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการของนักวิจัยในอดีต เพื่อยืนยันความถูกต้อง ของแบบจำลอง เมื่อทดสอบแบบจำลองไฟในต์เอลิเมนต์ได้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผล การทดสอบในห้องปฏิบัติการของนักวิจัยในอดีตแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำแบบจำลองนี้ไปสร้าง แบบจำลองที่มีเหล็กเสริมตามขวางตามมาตรฐานเสาปกติทั่วไป หลังจากนั้นจึงทำการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ ดังที่กล่าวไปแล้วใน บทที่ 2 โดยมีการกำหนดลักษณะรูปแบบการเสริมกำลัง ได้แก่ ขนาด ้ความสูง รายละเอียดเหล็กเสริม ความหนา คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลังที่ใช้ เช่น กำลังคอนกรีต ้กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม หลังจากนั้นจึงให้แรงด้านข้างเสาแบบวัฏจักร (Cyclic Load) กับเสา ที่ทดสอบเพื่อจะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการวิบัติ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเสาสะพาน คอนกรีตเสริมเหล็กแบบเสริมกำลังกับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลังให้ผลแตกต่าง กันอย่างไร โดยภาพที่ 3.1 แสดงผังขั้นตอนการดำเนินการศึกษาทั้งหมดในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 3.1 ผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การใช้งานซอฟแวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์

การศึกษาในงานวิจัยนี้ได้ใช้ซอฟแวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือในการศึกษาโดยใช้โปรแกรม ANSYS ซึ่งมีลำดับขั้นตอนในการเตรียมแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ก่อนที่จะนำไป วิเคราะห์ โดยขั้นแรกเริ่มจากกำหนดชิ้นส่วนแบบจำลอง การให้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลอง การสร้างรูปแบบจำลอง และการกำหนดเงื่อนไขให้กับแบบจำลอง เช่น การเชื่อมต่อวัสดุ การจับยึด และการให้แรงกระทำ หลังจากนั้นโปรแกรมจึงจะทำการวิเคราะห์และแสดงผลการตอบสนองต่อแรง กระทำ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จะศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นจากการรับแรงด้านข้างสูงสุด ของเสา และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นภายในเสา เพราะฉะนั้นหมวดของปัญหาที่สอดคล้องควรจะเป็น Static Structural เมื่อเลือกหมวดของปัญหาแล้วจะเห็นว่ามีขั้นตอนการให้ข้อมูล 7 หัวข้อซึ่งวิธีการ วิเคราะห์ของโปรแกรมจะดำเนินการตามลำดับซึ่งต้องกำหนดข้อมูลต่าง ๆ ตามขั้นตอนดังแสดง ในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การเลือกหมวดใช้งาน

เมื่อได้ทำการเลือกหมวดของปัญหาที่จะใช้งานแล้วในขั้นต้นจะเป็นขั้นตอนของ Data ซึ่งจะเป็น การกำหนดชิ้นส่วนวัสดุของแบบจำลอง และจะต้องมีการให้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่นของวัสดุ (Density) ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น(Isotropic Elasticity) และค่ามอดูลัส ช่วงพลาสติก (Multilinear Isotropic Hardening) ในชิ้นส่วนวัสดุของแบบจำลองตามที่ผู้ใช้งานได้ กำหนดไว้แล้วโดยในโปรแกรมสามารถที่จะเลือกใช้หน่วยต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้ ดังในภาพที่ 3.3

M Unsaved Project - Workbench										
File View Tools Units Extensions Jo	obs He	lp .								
🚹 😂 🛃 🕢 🕞 Project 🥔 A2:Eng	ineerin	Data x								
🍸 Filter Engineering Data 🎬 Engineering Data S	ources									
Toolbox 👻 🕂 🗙	Outline o	Schematic A2: Engineering Data							• ą	×
Physical Properties A		A		в	с	D		E		
🔀 Density	1	Contents of Engineering Data	j.	0	8	Sour	ce	Description	1	
Isouropic Secant Conficient of T	2	□ Material								
 Orthotropic Secant Coefficient of Isotropic Instantane us Coefficie Orthotropic Instantal eous Coefficient Linear Elastic 	3	🗞 Structural Steel				⊊ General_Materials.xml		Fatigue Data at ze mean stress comes 1998 ASME BPV Co Section 8, Div 2, T -110.1	ero s from ode, Table S	1 5
🔀 Isotropic Elasticity .	4	2 Sourcete								
An sotropic Elasticity		Click here to add a new material								
Shear est Data Volume ric Test Data Simple Siar Test Data Uniaxal Car Test Data Uniaxal Comb ession Test Data Hyperelastic Chaboche Test Data Uniaxal Alastic Strain Test Data Uniaxal Plastic Strain Test Data									_	
Plasticity	Propertie	s of Ourine Row 4: concrete							• •	×
Rilinear Isotronic Hardening		A		_	_	В	С		D	E
Hillinear Kinematic Hardening	1	Property		_	_	Value	Unit		8	φ.
🛛 Multilinear Kinemao Hardening	2	21/2 Density	V				kg m^-3	-		
Chaboche Kinematic Hardening	3	Derive from	×	ou no d'a	Madul	kus and Daisson's Datio				_
Anand Viscoplasticity	5	Yound's Modulus		oungs	Houu	ius aliu Poissoll's Rauo	Pa	•		m
E Creep	6	Poisson's Ratio								Ē
Strain Hardening	7	Daix Modulas					Pa			
🔁 Time Hardening	8	Chase Middle					Pa			
Generalized Exponential	9	2 Multilnear Isotropic Hardening		Tal	oular					

ภาพที่ 3.3 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

ในลำดับถัดไปเป็นขั้นตอน Geometry จะเป็นการสร้างชิ้นส่วนต่าง ๆ ของแบบจำลอง เช่น คอนกรีตเหล็กเสริมตามขวาง เหล็กเสริมตามยาว เพื่อประกอบขึ้นเป็นแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีต เสริมเหล็กโดยมีลักษณะรูปร่างของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองไฟในต์เอลิเมนต์ของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กแล้ว ต่อไปเป็น ขั้นตอนของ Model จะเป็นการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนของวัสดุ เงื่อนไขการจับยึด ของเสา และเงื่อนไขของการให้แรงกระทำเพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ โดยเริ่มจากการกำหนดเงื่อนไข ของการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนของวัสดุเพื่อให้ทราบว่าชิ้นส่วนนั้นมีการสัมผัสกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ใดบ้าง ของแบบจำลอง ซึ่งจะทำให้มีการส่งผ่านพฤติกรรมไปยังชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่เชื่อมติดกัน โดยจะ ยกตัวอย่าง เช่น กรณีของการเชื่อมเนื้อคอนกรีตและเหล็กเสริมเข้าด้วยกันโดยใช้คำสั่ง Connections เพื่อเชื่อมวัสดุ ซึ่งกรณีนี้ได้ทำการเชื่อมคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นชนิด Bonded เป็นต้น ดังแสดง ในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 การสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนของวัสดุ

หลังจากได้กำหนดเงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนของวัสดุแล้วลำดับถัดไปจะเป็นการกำหนด เงื่อนไขการจับยึดเพื่อกำหนด Support ของแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยแบบจำลองดังกล่าวจะกำหนดเป็นชนิด Fixed Support โดยกำหนดการจับยึดไม่ให้มีการเคลื่อนที่ ทุกทิศทางบริเวณพื้นด้านล่างของแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อให้มีความสอดคล้อง กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 การจับยึดของชิ้นส่วน

เมื่อกำหนดเงื่อนไขการจับยึดแล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการให้เลือกใช้ชนิดของแรงกระทำเพื่อทำการ วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการศึกษาของงานวิจัยนี้ได้ใช้แรงกระทำแบบวัฏจักร กับแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับโปรแกรม ANSYS จะดำเนินการทดสอบ โดยให้แรงด้านข้างเสาในรูป Cyclic Load โดยกำหนดค่าระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Control) ด้วยอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างเป็น %Drift ที่ปลายเสาในแบบจำลองเปรียบเสมือนกับแรง ที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 การกำหนดแรงที่ใช้ในการวิเคราะห์

ขั้นตอนสุดท้ายคือ การเลือกรูปแบบการวิเคราะห์ที่ต้องการทราบค่าโดยโปรแกรมมีเมนูคำสั่ง Solution เพื่อเลือกรูปแบบการวิเคราะห์ เช่น ความเค้น (Von-Mises Stress) แรงปฏิกิริยา (Force Reaction) เป็นต้น หลังจากที่ได้ดำเนินการครบทุกขั้นตอนแล้ว โปรแกรมจึงจะทำการ Solve เพื่อเริ่ม การวิเคราะห์ประมวลผลโดยโปรแกรมจะแสดงผลลัพธ์ตามที่ผู้ใช้งานต้องการ ทำให้ทราบถึงผล การตอบสนองต่อสภาวะของแรงที่กระทำในรูปแบบต่าง ๆ

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการศึกษางานวิจัยนี้ได้เริ่มจากการค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยในอดีตที่มีผู้ศึกษามาแล้วในเรื่อง COMBINE CYCLIC BENDING-TORSIONAL LOADING TEST OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE COLUMNS [31] เพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการสอบเทียบกับแบบจำลองเซิงตัวเลข เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าว โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 ข้อมูลเสาที่ใช้ในการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง

เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการในงานวิจัยดังกล่าว มีข้อมูล รายละเอียดเหล็กเสริมตามยาว เหล็กเสริมตามขวาง ขนาดของเสาที่ทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และภาพที่ 3.8 โดยเสาที่ทดสอบเป็นเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการออกแบบตามโครงการ ออกแบบทางหลวงของประเทศญี่ปุ่น พ.ศ. 2539 (Japan Road Association 1996) มีขนาดหน้าตัด ของเสารูปสี่เหลี่ยมกว้าง 0.40 เมตร ยาว 0.40 เมตร มีความสูง 1.35 เมตร เหล็กเสริมที่ใช้ในเสา สะพานเป็นชั้นมาตรฐาน SD295A (JIS Japanese Industrial Standards) เหล็กเสริมตามยาวเป็น เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร 16 เส้น เหล็กเสริมตามขวางเป็นเหล็กข้ออ้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร มีระยะห่างทุก ๆ 50 มิลลิเมตร ตามแนวขวางของเสา กำลังรับ แรงดึงที่จุดคราก (f_y) ของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวางเท่ากับ 353.7 เมกะปาสคาล และ 328 เมกะปาสคาล ตามลำดับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบกระบอก คอนกรีตเท่ากับ 30.0 เมกะปาสคาล

ความสูงเสา (เมตร: m)	1.35 m	1.35 m					
	ความกว้าง (m)	0.4					
ขนาดเลา	ความยาว (m)	0.4					
กำลังอัดประลัยของคอนก	30.0						
	จำนวนเหล็ก	16-D13 mm					
เพยบเยวทด.เทก.เว	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	353.7					
ي م	จำนวนเหล็ก	D6@50 mm					
เหลกเสรมตามขวาง	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	328					

ตารางที่ 3.1 คณสมบัติของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ทดสอบในห้องปภิบัติการ [มเหล็กที่ใช้ทดสอบในห้องปภิบัติการ [31]
--	--



ภาพที่ 3.8 ลักษณะเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ [31]

สำหรับขั้นตอนในการทดสอบนั้นหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งเสากับเครื่องมือที่ทำการทดสอบแล้ว จะมีการให้แรงทดสอบเป็นแรงด้านข้างเสาแบบวัฏจักร (Cyclic Load) ที่ระยะความสูงวัดจากโคนเสา ถึงจุดที่แรงกระทำที่ระยะ 1.35 เมตร และมีแรงกดคงที่ด้านบนของเสาขนาด 160 กิโลนิวตัน ตลอดการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การทดสอบเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ [31]

การทดสอบจะดำเนินการให้แรงอัดในแนวแกนคงที่ด้านบนเสาตลอดการทดสอบ และจะให้แรง ด้านข้างเสาแบบวัฏจักร (Cyclic Load) ที่ปลายด้านบนของหัวเสา โดยควบคุมระยะการเคลื่อนที่ ด้านข้างของเสา (Displacement Control) ด้วยอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างเป็น %Drift ดังแสดงใน ตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.10 พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลตลอดการทดสอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ เช่น การให้แรงกระทำด้านข้าง ระยะการเคลื่อนที่ของเสา รอยแตกร้าว เป็นต้น

step				1		2	3	3		4		5		6		7		8		9	1	10	1	.1	
Time (s	ec)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
%Drit	ft	0	0	.25	0	.50	1.	00	1.	.50	2	.00	2.	50	3.	.00	3.	50	4.	00	4.	.50	5.	00	-
displacement	positive	0	3.37	7	6.75		13.50		20.25		27.00		33.8		40.5		47.3		54.0		60.8		67.5		0
(mm)	negative			-3.37		-6.75		-13.5		-20.25		-27.00		-33.75		-40.50		-47.25		-54.00		-60.74		-67.50	0

ตารางที่ 3.2 อัตราร้อยละการเคลื่อนที่ด้านข้าง



ภาพ 3.10 กราฟ Displacement-Time [31]

การเคลื่อนที่ด้านข้างของเสาถูกกำหนดให้การผลักเสาไปด้านทิศตะวันออก (East side) เป็นทิศ ทางบวก และดึงกลับมาด้านทิศตะวันตก (West side) เป็นทิศทางลบ โดยเครื่องทดสอบสามารถ กำหนดค่าระยะการเคลื่อนที่ด้วยอัตราการเคลื่อนที่ทางด้านข้างเป็น %Drift ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังในสมการที่ 3.1

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้ว พบว่าเมื่อเริ่มต้นให้แรงทางด้านข้างกับเสา ที่การเคลื่อนตัว 0.25% เสาจะเริ่มเกิดความเสียหายขึ้นเรื่อย ๆ โดยเริ่มจากคอนกรีตด้านนอกหลุด ลอกออกก่อน หลังจากนั้นเหล็กเสริมตามยาวโก่งงอบิดเสียรูปที่ 4% และความเสียหายของเสาจะหยุด ลงที่ 4.5% โดยรับแรงด้านข้างได้สูงสุดในทิศทางบวกที่ 125.9 กิโลนิวตัน และในทิศทางลบที่ 125.2 กิโลนิวตัน หรือมีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 125.6 กิโลนิวตัน เมื่อทำการทดสอบไปจนเสร็จสิ้นที่ 5% ซึ่งมี ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับระยะการเคลื่อนที่ด้านข้างเสา ดังแสดงในภาพที่ 3.11 และบริเวณความเสียหายที่เกิดขึ้นจะเกิดบริเวณโคนเสาดานลางที่ความสูงจากฐานเสาขึ้นมาจนถึง ที่ระยะความสูง 250 มิลลิเมตร



ภาพที่ **3.11** ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำทางด้านข้างกับระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง เสา [31]

3.3.2 การสร้างแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อสอบเทียบกับผลการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการ

หลังจากที่ได้ค้นคว้างานวิจัยในอดีตที่มีผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้ว ในขั้นตอน ต่อไปจะดำเนินการสร้างแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และคุณสมบัติของวัสดุเหมือนกับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จากงานวิจัยในอดีตที่ได้ค้นคว้ามาตามตารางที่ 3.1 และเพื่อให้แบบจำลองเสามีสภาพใกล้เคียงกับ เสาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในโปรแกรม ANSYS ได้กำหนดให้เสาสมมุติวัสดุเป็นแบบ Multilinear Isotropic Hardening โดยมีข้อมูลตามตารางที่ 3.3 และเงื่อนไขการเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุของแบบจำลอง เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กตามตารางที่ 3.4 ซึ่งหลังจากทำการสอบเทียบความถูกต้อง ของแบบจำลอง แล้วจะได้นำแบบจำลองดังกล่าวไปปรับเหล็กเสริมตามขวาง เพื่อให้เป็นเสาปกติทั่วไป แล้วจึงทำการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบต่อไป โดยมีลักษณะของแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีต เสริมเหล็กดังแสดงในภาพที่ 3.12 ในโปรแกรมจะดำเนินการทดสอบโดยให้แรงด้านข้างเสาในรูป Cyclic Load โดยใส่ระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Control) ด้วยอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง เป็น %Drift ที่ปลายเสา ทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาเปรียบเสมือนกับแรงที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ เริ่มจาก 0% ไปจนถึง 5% เช่นเดียวกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังตารางที่ 3.2 ส่วนผล การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองกับเสาที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้น จะได้กล่าวต่อไป ในบทที่ 4

สถาสิ่าเสื่อเหตุอาการการการการการการการการการการการการการ	Multilinear Isotro	opic Hardening
อหผอหยารถองแกกง เยอง	Plastic Strain (mm ⁻¹)	Stress (MPa)
	0	0.00000001
	0.0015	2.4
หยนาวต	0.002	2.6
	0.01	3.3
	0	0.000001
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	0.0017	353.7
	0.0034	459.81
	0	0.000001
เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	0.0017	328
	0.0034	426.4

ตารางที่ 3.3 ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาสะพาน คอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อสอบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.4 การเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุในแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อสอบเทียบ กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ชิ้นส่วนที่ 1	ชิ้นส่วนที่ 2	ลักษณะการสัมผัส		
00410 ⁴ m	เหล็กเสริมตามยาว (D13)	Boned		
คอนบวท	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Boned		
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Boned		



ภาพที่ 3.12 ลักษณะแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ก) มิติของแบบจำลองของ เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ข) หน้าตัดของแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีต เสริมเหล็ก

3.3.3 การสร้างแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปรับระยะเรียงเหล็กเสริม ตามขวางให้เป็นเสาปกติทั่วไป

เมื่อสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองแล้ว หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองเสาสะพาน คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีมิติและคุณสมบัติของวัสดุตามหัวข้อที่ 3.3.1 ที่ได้ทำการสอบเทียบความถูกต้อง ของแบบจำลองมาปรับรายละเอียดเหล็กเสริมตามขวาง จากเหล็กเสริมตามขวางที่ระยะเรียง 5 เซนติเมตร เป็นระยะเรียงที่ 20 เซนติเมตร โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีต เสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน วสท.1007-34 [32] และมาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีต เสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง วสท 1008-38 [33] ซึ่งมาตรฐานทั้ง 2 แบบ ได้ระบุไว้ว่าในเสาปลอกเดี่ยวให้ใช้ ค่าน้อยที่สุดระหว่าง

3.3.3.1 ให้มีระยะเรียงเหล็กปลอกไม่ห่างกว่า 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็ก ตามยาว

3.3.3.2 ให้มีระยะเรียงเหล็กปลอกไม่ห่างกว่า 48 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก

3.3.3.3 มิติที่เล็กที่สุดของเสานั้น

เพื่อให้เป็นเสาปกติทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ซึ่งมีลักษณะของแบบจำลองเสาสะพาน คอนกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 3.13

ตามขวางให้	เป็นเสาปกติทั่วไป	
ความสูงเสา (เมตร: m)	1.35 m	
114 10 0 1 d 0	ความกว้าง (m)	0.4
ขนาทเลา	ความยาว (m)	0.4
กำลังอัดประลัยของคอนก	30.0	

กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa)

กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa)

จำนวนเหล็ก

จำนวนเหล็ก

เหล็กเสริมตามยาว

ชั้นคุณภาพ SD295A

เหล็กเสริมตามขวาง

ชั้นคุณภาพ SD295A

ตารางที่ 3.5	คุณสมบัติของแบบจำลองเสาสะพานคอน	กรีตเ	สริมเห	ล็กที	ปรับร	ะยะเรียง	งเหล็ก	เสริม
	ตามขวางให้เป็นเสาปกติทั่วไป							



ภาพที่ 3.13 ลักษณะแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปรับระยะเรียงเหล็กเสริม ตามขวางให้เป็นเสาปกติทั่วไป (ก) มิติของแบบจำลองของเสาสะพานคอนกรีต เสริมเหล็กที่ปรับระยะเรียงเหล็กเสริมตามขวางให้เป็นเสาปกติทั่วไป (ข) หน้าตัดของแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปรับระยะเรียงเหล็ก เสริมตามขวางให้เป็นเสาปกติทั่วไป

เมื่อได้สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะเหล็ก เสริมตามขวางตามมาตรฐานเสาปกติทั่วไปแล้ว หลังจากนั้นจึงทำการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ คือ (1) การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Jacketting) (2) การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) (3) การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์ เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer) (4) การเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่ม ความถี่เหล็กปลอก แล้วนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมการวิบัติของรูปแบบการเสริมกำลังเสาสะพาน

16-D13 mm

353.7

D6@200 mm

328

คอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละรูปแบบ พร้อมเปรียบเทียบประสิทธิภาพสำหรับเสาสะพานคอนกรีตเสริม เหล็กที่มีการเสริมกำลังและที่ไม่ได้เสริมกำลัง

3.3.4 แบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลัง

ในข้อนี้จะกล่าวถึงลักษณะรูปแบบและคุณสมบัติวัสดุเสริมกำลังของแบบจำลอง เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ ดังนี้

3.3.4.1 การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Jacketting)

ในวิธีการเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้สร้างแบบจำลองเสา ที่มีการเสริมกำลังโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุตามตารางที่ 3.6 ข้อมูลค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุและเงื่อนไขการเชื่อมซิ้นส่วนวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองตามตารางที่ 3.7 และ ตารางที่ 3.8 ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบการเสริมกำลังได้อ้างอิงตามมาตรฐานการประเมินและ เสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ 1303-57) [14] โดยใช้วัสดุหุ้มที่ความหนา 0.10 เมตร เหล็กเสริม ที่ใช้เป็นชั้นมาตรฐาน SD295A (JIS Japanese Industrial Standards) เหล็กเสริมตามยาวเป็นเหล็ก ข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร และเหล็กเสริมตามขวางเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และความสูงของวัสดุเสริมกำลังได้อ้างอิงจากบทความ ทางวรรณกรรมเรื่องแจ็คเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็กหุ้มเสาต้านแผ่นดินไหว [13] โดยทำการเสริมกำลังเสา ที่บริเวณโคนเสาด้านล่างความสูงวัดจากโคนเสาขึ้นมาเป็นระยะ 0.50 เมตร โดยมีรายละเอียดลักษณะ ของแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 3.14

คุณสมบัติ	คอนกรีต	เหล็กเสริมตามยาว	เหล็กเสริมตามขวาง		
เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเดิม					
Density กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m³)	2,300	7,850	7,850		
Young's modulus เมกะปาสคาล (MPa)	20,000	200,000	200,000		
Poisson's ratio	0.18	0.30	0.30		
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก (MPa)	-	353.7	328		
ชนิดเอลิเมนต์		Solid Eleme	ent		
ชนิด Support		Fixed Supp	ort		
วัสดุเสริมกำลัง					
ความหนาของวัสดุคอนกรีตเสริมกำลัง (m)		0.10			
ความสูงของวัสดุเสริมกำลังจากฐาน (m)	0.50				
กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (MPa)	30.0				
เหล็กเสริมตามยาว จำนวนเหล็ก		20-D13			

4	20	0	4 4	ໍ່	ຍ ຄ	ಷ	a	9	ಷ
ตารางท 3.6	คุณสมบตของแห	บบจาลอง	แสาทเสรม	งกาลง	เดวยแจก	าเกตคอ	นกรตเ	สรมเห	าลก

d	20	0	4 6	0 <i>2 2</i>	ബ ഒ	a e	ಷ	
ตารางที่ 3.6	คณสมาเตของเ	แบบจาลองเ	เสาท์เสร่ม	<u>ุ่ เกาลงด้วย</u>	แเจ็กเกตคร	านกรดเสรมเ	หลก	(ตอ)
							,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	(,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,

ຄຸດເສຍາຍິສ	ควาเกรีต	เหล็กเสริม	เหล็กเสริม	
ทุ้ธนถมบท	NGRUIM	ตามยาว	ตามขวาง	
วัสดุเสริมกำลัง				
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กตามยาว (MPa)	-	353.7	-	
เหล็กเสริมตามขวาง	D10@ 100 mm			
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กตามขวาง (MPa)	-		295	

ตารางที่ 3.7 ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลัง ด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก

	Multilinear Isotropic Hardening		
ขนดขนสวนของแบบงาสอง	Plastic Strain (mm ⁻¹)	Stress (MPa)	
	0	0.00000001	
	0.0015	2.4	
คยนกวด	0.002	2.6	
	0.01	3.3	
	0	0.000001	
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	0.0017	353.7	
	0.0034	459.81	
	0	0.000001	
เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	0.0017	328	
	0.0034	426.4	
	0	0.000001	
เหล็กเสริมตามขวาง (D10)	0.0017	328	
	0.0034	295	

ชิ้นส่วนที่ 1	ชิ้นส่วนที่ 2	ลักษณะการสัมผัส
00105	เหล็กเสริมตามยาว (D13)	Bonded
คอนบวด	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Bonded
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Bonded
วัสดุเสริมกำลัง		
คอนกรีต	คอนกรีตเสริมกำลัง	Bonded
คอนกรีตเสริมกำลัง	เหล็กเสริมตามยาว (D13)	Bonded
	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Bonded
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Bonded

ตารางที่ 3.8 การเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 3.14 ลักษณะแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก (ก) มิติของ แบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก (ข) หน้าตัดของ แบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.3.4.2 การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing)

ในวิธีการเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) ได้สร้างแบบจำลอง เสาที่มีการเสริมกำลัง โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุตามตารางที่ 3.9 ข้อมูลค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุและเงื่อนไขการเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองตามตารางที่ 3.10 และ ตารางที่ 3.11 ตามลำดับ ซึ่งรูปแบบการเสริมกำลังได้อ้างอิงตามมาตรฐานการประเมินและเสริม ความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ 1303-57) [14] โดยใช้วัสดุหุ้มที่ความหนา 0.025 เมตร แผ่นเหล็ก ที่ใช้เสริมกำลังเป็นชั้นมาตรฐาน SS400 (JIS Japanese Industrial Standards) มีความหนา 6 มิลลิเมตร กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ 30.0 เมกะปาสคาล และความสูงของวัสดุเสริมกำลังได้อ้างอิง จากบทความทางวรรณกรรมของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เรื่องการเสริมกำลังเสาด้วยการหุ้ม ด้วยแผ่นเหล็ก [15] โดยทำการเสริมกำลังเสาที่บริเวณโคนเสาด้านล่างความสูง วัดจากโคนเสาขึ้นมา เป็นระยะ 0.50 เมตร โดยมีรายละเอียดลักษณะของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.15

คุณสมบัติ	คอนกรีต	เหล็กเสริม ตามยาว	เหล็กเสริม ตามขาวง
เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเดิม			
Density (kg/m³)	2,300	7,850	7,850
Young's modulus (MPa)	20,000	200,000	200,000
Poisson's ratio	0.18	0.30	0.30
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก (MPa)		353.7	328
ชนิดเอลิเมนต์	Solid Element		t
ชนิด Support	Fixed Support		
วัสดุเสริมกำลัง			
กำลังอัดของมอร์ตาร์ (MPa)		30.00	
ความหนาของวัสดุเสริมกำลัง (m)	0.025		
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของแผ่นเหล็ก (MPa)	245		
ความหนาของแผ่นเหล็ก (mm)	6		
ความสูงของวัสดุเสริมกำลังจากฐาน (m)		0.50	

ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติของแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 3.10 ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริม กำลังด้วยแผ่นเหล็ก

	Multilinear Isotropic Hardening		
ู่ ภาพงาย ารถุดงตุกุกง เยอง	Plastic Strain (mm ⁻¹)	Stress (MPa)	
	0	0.00000001	
คอนกรีต	0.0015	2.4	
	0.002	2.6	
	0.01	3.3	
	0	0.000001	
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	0.0017	353.7	
	0.0034	459.81	

	Multilinear Isotropic Hardening		
ชนดชนลวนของแบบจาลอง	Plastic Strain (mm ⁻¹)	Stress (MPa)	
	0	0.000001	
เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	0.0017	328	
	0.0034	426.4	
มอร์ตาร์	0	0.00000001	
	0.0015	2.4	
	0.002	2.6	
	0.01	3.3	
แผ่นเหล็ก	0	0.000001	
	0.0017	245	
	0.0034	400	

ตารางที่ 3.10 ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริม กำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ต่อ)

ตารางที่ 3.11 การเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

ชิ้นส่วนที่ 1	ชิ้นส่วนที่ 2	ลักษณะการสัมผัส
000000	เหล็กเสริมตามยาว (D13)	Bonded
คอนบวด	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Bonded
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Bonded
วัสดุเสริมกำลัง		
มอร์ตาร์	แผ่นเหล็ก	Bonded
คอนกรีต	มอร์ตาร์	Bonded



ภาพที่ 3.15 ลักษณะแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ก) มิติของแบบจำลองเสา ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (ข) หน้าตัดของแบบจำลองเสาที่เสริมกำลัง ด้วยแผ่นเหล็ก

3.3.4.3 การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

ในวิธีการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ได้สร้างแบบจำลองเสาที่มี การเสริมกำลังโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุดังตารางที่ 3.12 ข้อมูลค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุและเงื่อนไขการเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองดังตารางที่ 3.13 และตารางที่ 3.14 ตามลำดับ ซึ่งการเสริมกำลังจะใช้แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) แบบแผ่น (Sheet) ความหนา 0.167 มิลลิเมตร พันรอบโคนเสาด้านล่างจำนวน 1 รอบ และความสูงของวัสดุเสริมกำลัง ได้อ้างอิงจากบทความทางวรรณกรรม การเสริมความแข็งแรงอาคารเก่าต้านแผ่นดินไหว ตอนที่ 1 [16] โดยพันรอบเสาที่ปลายด้านล่างความสูงวัดจากโคนเสาขึ้นมาเป็นระยะ 0.50 เมตร โดยมี รายละเอียดลักษณะของแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 3.16

ຄຸດເຊຍະມີສື	ควาเกรีต	เหล็กเสริม	เหล็กเสริมตาม
មុខធេសបម	1011190	ตามยาว	ขวาง
เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเดิม			
Density (kg/m³)	2,300	7,850	7,850
Young's modulus (MPa)	20,000	200,000	200,000
Poisson's ratio	0.18	0.30	0.30
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก (MPa)		353.7	328
ชนิดเอลิเมนต์	Solid Element		
ชนิด Support	Fixed Support		
วัสดุเสริมกำลัง			
ความหนาแผ่น CFRP (mm)	0.167		
ความสูงของวัสดุเสริมกำลังจากฐาน (m)	0.50		
กำลังรับแรงดึง (MPa)	3,433.5		
Density (g/cm ³)	1.80		

ตารางที่ 3.12 คุณสมบัติของแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

ตารางที่ 3.13 ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลัง ด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

ตเบิดซึ้นส่วนของแบบเว้าออง	Multilinear Isotropic Hardening		
0 KM 0 KG 1 K 00 160 U 160 V	Plastic Strain (mm ⁻¹)	Stress (MPa)	
คอนกรีต	0	0.00000001	
	0.0015	2.4	
	0.002	2.6	
	0.01	3.3	
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	0	0.000001	
	0.0017	353.7	
	0.0034	459.81	
	0	0.000001	
เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	0.0017	328	
	0.0034	426.4	

ตารางที่ 3.14 การเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใย คาร์บอน

ชิ้นส่วนที่ 1	ชิ้นส่วนที่ 2	ลักษณะการสัมผัส
00103	เหล็กเสริมตามยาว (D13)	Bonded
หยนาวท	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Bonded
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	เหล็กเสริมตามขวาง (D6) Bonde	
วัสดุเสริมกำลัง		
แผ่น CFRP	Epoxy Resin	Bonded
คอนกรีต	Epoxy Resin	Bonded





3.3.4.4 การเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

ในวิธีการเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก ได้สร้างแบบจำลองเสา ที่มีการเสริมกำลังโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุตามตารางที่ 3.15 และข้อมูลค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุและเงื่อนไขการเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองตามตารางที่ 3.16 และ ตารางที่ 3.17 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการเสริมกำลังโดยให้รายละเอียดการเสริมเหล็กตามขวาง เหล็กเสริม ที่ใช้ในเสาสะพานเป็นชั้นมาตรฐาน SD295A (JIS Japanese Industrial Standards) โดยจะใช้เหล็ก เสริมตามขวางเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ระยะเรียงเหล็กเสริมตามขวาง ทุก ๆ ระยะ 50 มิลลิติเมตร และความสูงของวัสดุเสริมกำลังได้อ้างอิงจากมาตรฐานประกอบ การออกแบบอาคาร เพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (ปรับปรุงครั้งที่ 1) มยผ.1301-54 [18] โดยทำการเสริมกำลังเสาตลอดความสูงเสาเป็นระยะ 0.5 เมตร โดยมีรายละเอียดลักษณะ ของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.17

คุณสมบัติ	คอนกรีต	เหล็กเสริม ตามยาว	เหล็กเสริม ตามขวาง
Density (kg/m³)	2,300	7,850	7,850
Young's modulus (MPa)	20,000	200,000	200,000
Poisson's ratio	0.18	0.30	0.30
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก (MPa)		353.7	328
ชนิดเอลิเมนต์	Solid Element		
ชนิด Support	Fixed Support		
วัสดุเสริมกำลัง			
ความสูงของการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก (m)	0.5		
เหล็กเสริมตามขวาง	D6@ 100 mm		
กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก (MPa)	-	-	328

ตารางที่ 3.15 คุณสมบัติของแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

ตารางที่ 3.16 ค่า Multilinear Isotropic Hardening ของวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลัง ด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

สมิจสิ้นส่อนขอ ขนขยาอ๊อออ ข	Multilinear Isotropic Hardening		
อหลอหยารกองแกกง เยอง	Plastic Strain(mm ⁻¹)	Stress (MPa)	
คอนกรีต	0	0.00000001	
	0.0015	2.4	
	0.002	2.6	
	0.01	3.3	
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	0	0.000001	
	0.0017	353.7	
	0.0034	459.81	
	0	0.000001	
เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	0.0017	328	
	0.0034	426.4	

ตารางที่ 3.17	การเชื่อมชิ้นส่วนวัสดุในแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถึ่
	เหล็กปลอก

ชิ้นส่วนที่ 1	ชิ้นส่วนที่ 2	ลักษณะการสัมผัส
	เหล็กเสริมตามยาว (D13)	Bonded
คอนกวด	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Bonded
เหล็กเสริมตามยาว (D13)	เหล็กเสริมตามขวาง (D6)	Bonded



ภาพที่ 3.17 ลักษณะแบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก (ก) มิติของ แบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก (ข) หน้าตัดของ แบบจำลองเสาที่เสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

จากการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลังเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองเสาสะพาน คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบข้างต้น ซึ่งมีการกำหนดลักษณะตามที่ได้กล่าว รายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3.4.1 ถึงหัวข้อ 3.3.4.4 นั้นสามารถสรุปคุณสมบัติของรูปร่างวัสดุที่ใช้ ในการเสริมกำลัง เช่น ความสูง ความหนา และกำลังของวัสดุที่ใช้ ดังตารางที่ 3.18

ตารางที่ 3.18	คุณสมบัติของแบบจำส	ลองเสาปกติที่ไม่มีก	าารเสริมกำลังแล	ะเสาที่มีการเ	เสริมกำลัง
	ทั้ง 4 รูปแบบ ที่จะนำ:	มาวิเคราะห์			

ตัวอย่าง เสา	วัสดุที่ใช้ เสริม ความแข็งแรง	ความสูง ของวัสดุ เสริมกำลัง (cm)	ความหนา ของวัสดุ เสริมกำลัง (cm)	หมายเหตุ
1	-	-	-	เสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง
2	คอนกรีตเสริม เหล็ก	50	10	เหล็ก D10@ 100 mm คอนกรีตกำลังอัด 30.0 MPa
3	แผ่นเหล็กหนา 6 mm	50	2.5	มอร์ตาร์กำลังอัด 30.0 MPa กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก 245 MPa
4	CFRP	50	0.0167	CFRP ประเภท Sheet ขนาด 0.167 mm พันรอบเสาจำนวน 1 รอบ
5	_	50	_	ระยะเรียงเหล็กปลอก 100 mm

3.4 สรุปวิธีดำเนินการวิจัย

ในขั้นตอนการศึกษาจะเริ่มจากค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยในอดีตที่มีการทดสอบเสาสะพานคอนกรีต เสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงและสอบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อยืนยัน ความถูกต้องของแบบจำลอง เมื่อผลการวิเคราะห์แบบจำลองกับผลการทดสอบเสาในห้องปฏิบัติการ มีผลที่สอดคล้องกัน ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำแบบจำลองนี้ไปสร้างแบบจำลองที่มีเหล็กเสริม ตามขวางตามมาตรฐานเสาปกติทั่วไป หลังจากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองที่มีการเสริมกำลัง ใน 4 รูปแบบ คือ

(1) การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Jacketting)

(2) การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing)

(3) การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

(4) การเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

โดยให้แรงด้านข้างเสาในรูปแบบ Cyclic Load โดยใส่ค่าระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Control) ด้วยอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างเป็น %Drift ที่ปลายเสา เพื่อวิเคราะห์การวิบัติโดยใช้ โปรแกรม ANSYS โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่พฤติกรรมการวิบัติของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบดังกล่าว และนำผลการวิเคราะห์เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้ง 4 รูปแบบ มาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับแรงด้านข้างเสา รวมถึงเปรียบเทียบ ความคุ้มค่าในด้านราคาค่าใช้จ่ายสำหรับการเสริมกำลังในแต่ละรูปแบบ เพื่อเป็นแนวทางในการ ตัดสินใจในการเลือกใช้วิธีการเสริมกำลังให้มีความเหมาะสมกับวัสดุที่มีจำหน่ายในแต่ละพื้นที่ต่อไป สำหรับผลการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองและการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพ การเสริมกำลังในแต่ละรูปแบบจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4

บทที่ 4 ผลการศึกษา

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาที่ได้จากวิธีการดำเนินการวิจัยในบทที่ 3 โดยนำข้อมูลที่ได้ จากการศึกษามาวิเคราะห์ผล สำหรับผลการศึกษาที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ (1) ผลจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load) สอบเทียบผลแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (2) ผลจากการสร้าง แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาที่มีการเสริมเหล็กตามขวางตามมาตรฐานปกติทั่วไปภายใต้แรง แบบวัฏจักร (Cyclic Load) (3) ผลจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสามาตรฐานปกติทั่วไป ที่มีการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ ดังที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ภายใต้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load) หลังจากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลังและทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความ คุ้มค่าในการเสริมกำลังของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในแต่ละรูปแบบ

4.2 ผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load)

4.2.1 ผลจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load) สอบเทียบผลแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การเสริมกำลังของเสาสะพานภายใต้แรงแบบ วัฏจักร (Cyclic Load) ได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการอ้างอิงจากข้อมูล งานวิจัยในอดีตที่มีผู้ศึกษามาในเรื่อง COMBINE CYCLIC BENDING-TORSIONAL LOADING TEST OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE COLUMNS [31] เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการสอบเทียบ กับแบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองดังกล่าว โดยดำเนินการสร้าง แบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในโปรแกรม ANSYS ที่มีรูปร่างและคุณสมบัติของวัสดุ เหมือนกับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จากงานวิจัยในอดีต ที่ได้ค้นคว้ามาตามตารางที่ 3.1 และในภาพที่ 3.12 ในบทที่ 3 สำหรับโปรแกรม ANSYS จะดำเนินการ ทดสอบโดยให้แรงด้านข้างเสาในรูป Cyclic Load โดยใส่ค่าระยะการเคลื่อนที่ (Displacement Control) ด้วยอัตราการเคลื่อนที่ด้านข้างเป็น %Drift ที่ปลายเสาทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาเปรียบเสมือน กับแรงที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการเริ่มจาก 0% ไปจนถึง 5% เช่นเดียวกับการทดสอบ ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีข้อมูลดังตารางที่ 4.1 โดยในโปรแกรม ANSYS จะแสดงกราฟ Displacement Time ดังแสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 กราฟ Displacement-Time

step			:	1		2	3	3		4		5		6		7	1	8		9	1	10	1	1	
Time (s	ec)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
%Drif	ť	0	0.	25	0.	.50	1.0	00	1.	.50	2.	.00	2	50	3.	.00	3.	50	4.	00	4.	.50	5.	.00	-
displacement	positive	0	3.37		6.75		13.50		20.25		27.00		33.8		40.5		47.3		54.0		60.8		67.5		0
(mm)	negative			-3.37		-6.75		-13.5		-20.25		-27.00		-33.75		-40.50		-47.25		-54.00		-60.74		-67.50	0

ตารางที่ 4.1 อัตราร้อยละการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง

เมื่อทำการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเห็นว่าการวิบัติ จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความเสียหายที่เกิดขึ้นของเสาสะพาน คอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการพบว่าการวิบัติเกิดขึ้นที่บริเวณโคนเสาเช่นเดียวกันดังแสดงใน ภาพที่ 4.2 และลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จาก แบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การกระทำของแรงแบบวัฏจักรมีลักษณะใกล้เคียง กับผลที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรมดังแสดงในภาพที่ 4.3 โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาผล ของคุณสมบัติคอนกรีตภายใต้สภาวะ Unloading ร่วมด้วย ซึ่งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนของ แรงกระทำด้านข้างเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 15.98% ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สร้างโดยใช้โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์งาน ทางวิศวกรรมด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของงานวิจัยข้างต้น





ภาพที่ 4.2 ความเสียหายของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังการทดสอบในห้อง ปฏิบัติการ [27] เปรียบเทียบกับภาพความเสียหายของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ก) ด้านทิศตะวันออก (ข) ด้านทิศตะวันตก (ค) ด้านทิศเหนือ (ง) ด้านทิศใต้

หมายเหตุ:	LAB	หมายถึง	ภาพความเสียหายของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังการทดสอบ
			ให้ห้องปฏิบัติการ
	FEM	หมายถึง	ภาพความเสียหายของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาสะพาน
			คอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 4.3 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จากแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กกับผลการศึกษาของ Paiboon, T. and Kazuhiko, K. (2007) [31]

	a	ע	0
ตารางท 4 2	สถาแทยบดว	ามถกตองขอ	งแบบเลาลอง
	810 0 6 M 0 0 M 8	199 8111410 4 0 6	1400001010104

columnud o		Lateral Force (kN)			0/ 5	
ູ່ລູບແບບເສົາ	% Drift	Positive	Negative	Average	% Error	
เสาสะพานคอนกรีตเสริเหล็ก ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ	5	125.9	125.2	125.60	15.98	
เสาสะพานคอนกรีต เสริมเหล็กวิเคราะห์ด้วย ไฟไนต์เอเลเมนต์	5	108.5	108.08	108.29		

หมายเหตุ: % Error คือ ความคลาดเคลื่อนของการรับแรงด้านข้างเฉลี่ยสูงสุดของเสา โดยไม่ได้พิจารณาผลของคุณสมบัติคอนกรีตภายใต้สภาวะ Unloading

4.2.2 ผลจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาที่มีเหล็กเสริมตามขวางตามมาตรฐาน ปกติทั่วไปภายใต้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Load)

หลังจากที่ได้ทำการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก แล้ว ในลำดับต่อไปนำแบบจำลองเดิมที่ได้ทำการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองมาปรับ รายละเอียดเหล็กเสริมตามขวางให้เป็นเสาตามมาตรฐานปกติทั่วไป เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวนั้น เป็นเสาที่ให้รายละเอียดเหล็กเสริมตามขวางสำหรับต้านทานแรงแผ่นดินไหวแล้ว การปรับแบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ใช้คุณสมบัติของวัสดุตามตารางที่ 4.3 ซึ่งรูปแบบการให้รายละเอียดเหล็กเสริมตามขวางจากระยะเรียง 5 เซนติเมตร เป็นระยะเรียง 20 เซนติเมตร ได้อ้างอิงตามมาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน วสท.1007-34 [32] และมาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง วสท 1008-38 [33] ซึ่งได้กล่าวให้ทราบแล้วตามหัวข้อที่ 3.3.3 การสร้างแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีต เสริมเหล็กที่ปรับระยะเรียงเหล็กเสริมตามขวางให้เป็นเสาปกติทั่วไปในบทที่ 3

ความสูงเสา (m)	1.35 m	
11100100	ความกว้าง (m)	0.4
ขนาดเสา	ความยาว (m)	0.4
กำลังอัดประลัยของคอนก	30.0	
เหล็กเสริมตามยาว	จำนวนเหล็ก	16-D13 mm
ชั้นคุณภาพ SD295A	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	353.7
เหล็กเสริมตามขวาง	จำนวนเหล็ก	D6@200 mm
ชั้นคุณภาพ SD295A	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	328

4	20	0	ਕੁੱਕ ਵ	9		1.5	⊾ ປ່ ທ ,
ตารางท 4 3	คณสมาเตของแ	าทาลาลอง	แสาทมเหลก	เสรมตาม	แขเวางตามมาต	ເຮສານາໄກຜ	າທວໄປ
	1,000,000,000,000,000	000100					111000

ภายหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และทำการเปรียบเทียบผล การวิเคราะห์กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 5 เซนติเมตร พบว่ามีกำลัง รับแรงด้านข้างเฉลี่ยสูงสุดที่ 102.72 กิโลนิวตัน ลดลงจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาที่มีระยะ เรียงเหล็กปลอก 5 เซนติเมตร 5.42% ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีระยะเรียงเหล็กปลอก 5 เซนติเมตร กับเสาที่มีระยะ เรียงเหล็กปลอก 20 เซนติเมตร

4.3 ผลจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสามาตรฐานปกติทั่วไปที่มีการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ

เมื่อสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองแล้วหลังจากนั้นจะนำแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีต เสริมเหล็กที่มีมิติและคุณสมบัติของวัสดุตามหัวข้อที่ 3.3.1 ที่ได้ทำการสอบเทียบความถูกต้อง ของแบบจำลองมาปรับรายละเอียดเหล็กปลอกจากระยะเรียง 5 เซนติเมตร เป็นระยะเรียง 20 เซนติเมตร เพื่อให้เป็นเสาปกติทั่วไป หลังจากนั้นจึงทำการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ คือ

4.3.1 การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Jacketing)

4.3.2 การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing)

4.3.3 การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

4.3.4 การเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก โดยมีรายละเอียด ดังนี้

4.3.1 การเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Jacketing)

ในวิธีการเสริมกำลังเสาด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็กได้สร้างแบบจำลองเสาที่มี การเสริมกำลังโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุตามหัวข้อที่ 3.3.4.1 และมีรายละเอียดลักษณะของ แบบจำลองดังภาพที่ 3.14 ในบทที่ 3 ซึ่งรูปแบบการเสริมกำลังได้อ้างอิงตามมาตรฐานการประเมิน และเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว
กรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ 1303-57) [14] และความสูงของวัสดุเสริมกำลังได้อ้างอิง จากบทความทางวรรณกรรมเรื่องแจ็คเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็กหุ้มเสาต้านแผ่นดินไหว [13] ภายหลัง จากที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS พบว่าเมื่อเริ่มให้การเคลื่อนที่ ด้านข้างจนถึง 0.5% คอนกรีตจะเริ่มเกิดการวิบัติ และเหล็กเสริมตามยาวเกิดการวิบัติที่อัตราการ เคลื่อนที่ด้านข้าง 0.25% จะเห็นได้ว่าบริเวณการวิบัติเกิดขึ้นเหนือวัสดุที่ทำการเสริมกำลัง ส่วนวัสดุ เสริมกำลังที่เป็นคอนกรีตเกิดและเหล็กเสริมเกิดการวิบัติที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 5% ดังภาพที่ 4.5 ส่วนบริเวณที่เกิดหน่วยแรงได้แสดงผลความเค้น Von Mises Stress ของคอนกรีต เหล็กเสริมตามยาว เหล็กเสริมตามขวาง และวัสดุเสริมกำลังดังแสดงในภาพที่ 4.6 และสรุปดังตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.5 บริเวณที่เกิดการวิบัติจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีต เสริมเหล็กภายใต้แรงแบบวัฏจักร



ภาพที่ 4.6 บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress ของคอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุ เสริมกำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้แรงแบบวัฏจักร (ก) หน่วยแรงสูงสุดคอนกรีต (ข) หน่วยแรงสูงสุดเหล็กเสริม ตามยาว



ภาพที่ 4.6 บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress ของคอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุ เสริมกำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้แรงแบบวัฏจักร (ค) หน่วยแรงสูงสุดเหล็กปลอก (ง) หน่วยแรงสูงสุดคอนกรีต เสริมกำลัง (จ) หน่วยแรงสูงสุดเหล็กเสริมตามยาวที่ใช้เสริมกำลัง (ฉ) หน่วยแรง สูงสุดเหล็กปลอกที่ใช้เสริมกำลัง (ต่อ)

วัสดุ	% Drift	Time (s)	Von Mises	บริเวณที่เกิด
			Stress (MPa)	หน่วยแรง
คอนกรีต	0.5	4.20	3.2998	เหนือวัสดุเสริมกำลัง
เหล็กตามยาว D13 mm	0.25	2.70	226.00	บริเวณโคนเสา
เหล็กตามขวาง D6 mm	4	18.0	426.05	บริเวณโคนเสา
วัสดุเสริมกำลัง				
คอนกรีต	5	21.08	3.300	มุมเสาด้านล่าง
เหล็กตามยาว D13 mm	5	23.00	4.98×10 ⁻¹¹	มุมแจ็คเก็ตเสาด้านบน
เหล็กตามขวาง D6 mm	5	23.00	6.55×10 ⁻¹¹	บริเวณโคนเสาด้านล่าง

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งและขนาดของหน่วยแรง Von Mises Stress ที่เกิดขึ้นของวัสดุจาก แบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็กมีกำลังรับแรงด้านข้างเฉลี่ยสูงสุด 137.75 กิโลนิวตัน ที่ 5% Drift เมื่อเปรียบเทียบกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลังมีประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้น 34.10% ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก กับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง

% Drift		Lat	ค่าที่เพิ่มขึ้น		
ູ່ ວິນແນນເສົາ		Positive	Negative	Average	(%)
เสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	5	102.84	-102.6	102.72	
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วย แจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก	5	137.66	-137.83	137.75	34.10

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วย แจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็กกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง

4.3.2 การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing)

ในวิธีการเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) ได้สร้างแบบจำลองเสาที่มี การเสริมกำลังโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุตามหัวข้อที่ 3.3.4.2 และมีรายละเอียดลักษณะ ของแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 3.15 ในบทที่ 3 ซึ่งรูปแบบการเสริมกำลังได้อ้างอิงตาม มาตรฐานการประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับ แรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว กรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ 1303-57) [14] และความสูง ของวัสดุเสริมกำลังได้อ้างอิงจากบทความทางวรรณกรรมของ สำนักงานกองทุนสนับสนุน การวิจัยเรื่อง การเสริมกำลังเสาด้วยการหุ้มด้วยแผ่นเหล็ก [15] ภายหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ ด้วยวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS พบว่าเมื่อเริ่มให้การเคลื่อนที่ด้านข้างจนถึง 1% คอนกรีตจะเริ่มเกิดการวิบัติ และเหล็กเสริมตามยาวเกิดการวิบัติที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง 1% จะเห็นว่าบริเวณการวิบัติ และเหล็กเสริมตามยาวเกิดการวิบัติที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง ในภาพที่ 4.8 ส่วนบริเวณที่เกิดหน่วยแรงได้แสดงผลความเค้น Von Mises Stress ของคอนกรีต เหล็กเสริมตามยาว เหล็กเสริมตามขวาง และวัสดุเสริมกำลังดังแสดงในภาพ ที่ 4.9 และสรุป ดังตารางที่ 4.6



ภาพที่ 4.8 บริเวณที่เกิดการวิบัติจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นเหล็ก ภายใต้แรงแบบวัฏจักร



ภาพที่ 4.9 บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress คอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุเสริม กำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กภายใต้แรงแบบวัฏจักร (ก) หน่วยแรงสูงสุดคอนกรีต (ข) หน่วยแรงสูงสุดเหล็กเสริมตามยาว (ค) หน่วยแรง สูงสุดเหล็กปลอก (ง) หน่วยแรงสูงสุดมอร์ตาร์



- ภาพที่ 4.9 บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress คอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุ เสริมกำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กภายใต้แรงแบบ วัฏจักร (จ) หน่วยแรงสูงสุดแผ่นเหล็ก (ต่อ)
- ตารางที่ 4.6 ตำแหน่งและขนาดของหน่วยแรง Von Mises Stress ที่เกิดขึ้นของวัสดุจาก แบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก

Šco			Von Mises	บริเวณที่เกิด
ายผู	% Drift	Time(s)	Stress (MPa)	หน่วยแรง
คอนกรีต	1	6.20	3.2981	เหนือวัสดุเสริมกำลัง
เหล็กตามยาว D13 mm	1	6.00	402.61	บริเวณโคนเสา
เหล็กตามขวาง D6 mm	1	5.0	416.63	บริเวณโคนเสา
วัสดุเสริมกำลัง				
มอร์ตาร์	1	6.70	3.2997	บริเวณโคนเสา ด้านล่าง
แผ่นเหล็กหนา 6 mm	4.5	20.00	398.24	มุมแผ่นเหล็กด้านบน

เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กมีกำลังรับแรงด้านข้างเฉลี่ยสูงสุด 165.74 กิโลนิวตัน ที่ 5% Drift เมื่อเปรียบเทียบกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลังมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 61.35% ดังแสดง ในภาพที่ 4.10 และตารางที่ 4.7



- ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กกับเสาปกติที่ไม่มี การเสริมกำลัง
- ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น เหล็กกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง

<u>an lun in tran</u>		Lat	ค่าที่เพิ่มขึ้น		
ູ່ ວິດແກກເພ.	% Drift	Positive	Negative	Average	(%)
เสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	5	102.84	-102.6	102.72	
เสาที่มีการเสริมกำลัง ด้วยแผ่นเหล็ก	5	165.80	-165.68	165.74	61.35

4.3.3 การเสริมกำลังเสาด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

ในวิธีการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ได้สร้างแบบจำลองเสา ที่มีการเสริมกำลังโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุตามหัวข้อที่ 3.3.4.3 และรายละเอียดลักษณะ ของแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 3.16 ในบทที่ 3 ซึ่งการเสริมกำลังจะใช้แผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใย คาร์บอน (CFRP) แบบแผ่น (Sheet) พันรอบโคนเสาด้านล่างของเสาและความสูงของวัสดุเสริมกำลัง ได้อ้างอิงจากบทความทางวรรณกรรมการเสริมความแข็งแรงอาคารเก่าต้านแผ่นดินไหว ตอนที่ 1 [16] ภายหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS พบว่าเมื่อเริ่มให้การ เคลื่อนที่ด้านข้างจนถึง 0.5% คอนกรีตจะเริ่มเกิดการวิบัติ และเหล็กเสริมตามยาวเกิดการวิบัติที่อัตรา การเคลื่อนที่ด้านข้าง 0.25% จะเห็นได้ว่าบริเวณการวิบัติเกิดขึ้นเหนือวัสดุที่ทำการเสริมกำลัง ส่วนวัสดุเสริมกำลังเกิดการวิบัติที่การเคลื่อนที่ด้านข้าง 3% ดังแสดงในภาพที่ 4.11 ส่วนบริเวณที่เกิด หน่วยแรงได้แสดงผลความเค้น Von Mises Stress ของคอนกรีตเหล็กเสริมตามยาว เหล็กเสริม ตามขวาง และวัสดุเสริมกำลัง ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และสรุปดังตารางที่ 4.8



ภาพที่ 4.11 บริเวณที่เกิดการวิบัติจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์ เสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงแบบวัฏจักร



ภาพที่ 4.12 บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress คอนกรีตเหล็กเสริม และวัสดุเสริม กำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ภายใต้แรงแบบวัฏจักร (ก) หน่วยแรงสูงสุดคอนกรีต (ข) หน่วยแรงสูงสุดเหล็ก เสริมตามยาว

Equivalent Stress 5	Equivalent Stress 6
Type: Equivalent (von-Mises) Stress	Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa	Unit: MPa
Time: 23	Time: 23
Max: 426.07	Max: 6281.1
Min: 0.0053646	Min: 1.4894
426.07	6281.1
378.73	5583.4
331.39	4885.6
284.05	4187.9
236.71	3490.2
189.37	2792.4
142.03	2094.7
94.687	1397
47.346	699.23
0.0053646	1.4894
(ค)	(٩)

- ภาพที่ 4.12 บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress คอนกรีตเหล็กเสริม และวัสดุเสริม กำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ภายใต้แรงแบบวัฏจักร (ค) หน่วยแรงสูงสุดเหล็กปลอก (ง) หน่วยแรงสูงสุดแผ่น โพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน
- ตารางที่ 4.8 ตำแหน่งและขนาดของหน่วยแรง Von Mises Stress ที่เกิดขึ้นของวัสดุจาก แบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

วัสด	% Drift	Time	Von Mises	บริเวณที่เกิดหน่วยแรง
9		(s)	Stress (MPa)	
คอนกรีต	0.5	4.20	3.2999	เหนือวัสดุเสริมกำลัง
เหล็กตามยาว D13 mm	0.25	2.70	224.18	บริเวณโคนเสา
เหล็กตามขวาง D6 mm	3.00	14.0	426.07	บริเวณโคนเสา
วัสดุเสริมกำลัง				
แผ่นโพลิเมอร์เสริม	3.00	13.00	3,692.8	มุมแผ่นโพลิเมอร์เสริม
เส้นใยคาร์บอนหนา				เส้นใยคาร์บอนด้านบน
0.167 มม				

เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมีกำลังรับแรงด้านข้างเฉลี่ย สูงสุด 138.06 กิโลนิวตัน ที่ 5% Drift เมื่อเปรียบเทียบกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลังมีประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้น 34.40% ดังแสดงในภาพที่ 4.13 และตารางที่ 4.9



- ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน กับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง
- ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น โพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง

59 JUNIO	% Drift	Lat	Lateral Force (kN)			
່າງກະບຸກາຍ ເ		Positive	Negative	Average	(%)	
เสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	5	102.84	-102.6	102.72		
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่น โพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	5	137.71	-138.40	138.06	34.40	

4.3.4 การเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

ในวิธีการเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก ได้สร้างแบบจำลองเสา ที่มีการเสริมกำลังโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุตามหัวข้อที่ 3.3.4.4 และมีรายละเอียดลักษณะ ของแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.17 ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการเสริมกำลังโดยให้รายละเอียดการเสริม เหล็กตามขวางโดยได้อ้างอิงจากมาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือน ของแผ่นดินไหว (ปรับปรุงครั้งที่ 1) มยผ.1301-54 [18] ภายหลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี ไฟในต์เอลิเมนต์ในโปรแกรม ANSYS พบว่าเมื่อเริ่มให้การเคลื่อนที่ด้านข้างจนถึง 1% คอนกรีตจะเริ่ม เกิดการวิบัติ และเหล็กเสริมตามยาวเกิดการวิบัติที่อัตราการเคลื่อนที่ด้านข้าง 1.5% จะเห็นได้ว่า บริเวณการวิบัติเกิดขึ้นบริเวณโคนเสา ดังแสดงในภาพที่ 4.14 ส่วนบริเวณที่เกิดหน่วยแรงได้แสดงผล ความเค้น Von Mises Stress ของคอนกรีตเหล็กเสริมตามยาว และเหล็กเสริมตามขวางดังแสดง ในภาพที่ 4.15 และสรุปดังตารางที่ 4.10



ภาพที่ 4.14 บริเวณที่เกิดการวิบัติจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่ เหล็กปลอกภายใต้แรงแบบวัฏจักร



ภาพที่ 4.15 บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress คอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุ เสริมกำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก ภายใต้แรงแบบวัฏจักร (ก) หน่วยแรงสูงสุดคอนกรีต (ข) หน่วยแรงสูงสุดเหล็ก เสริมตามยาว



- ภาพที่ 4.15 บริเวณที่เกิดหน่วยแรง Von Mises Stress คอนกรีต เหล็กเสริม และวัสดุ เสริมกำลังจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก ภายใต้แรงแบบวัฏจักร (ค) หน่วยแรงสูงสุดเหล็กปลอก (ต่อ)
- ตารางที่ 4.10 ตำแหน่งและขนาดของหน่วยแรง Von Mises Stress ที่เกิดขึ้นของวัสดุจาก แบบจำลองที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

วัสดุ	% Drift	Time(s)	Von Mises Stress (MPa)	บริเวณที่เกิด หน่วยแรง
คอนกรีต	1	5.20	3.2996	บริเวณโคนเสา ด้านล่าง
เหล็กตามยาว D13 mm	1.5	7.00	332.85	บริเวณโคนเสา
เหล็กตามขวาง D6 mm	1.5	8.00	426.08	บริเวณโคนเสา

เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอกมีกำลังรับแรงด้านข้างเฉลี่ยสูงสุด 103.17 กิโลนิวตัน ที่ 5% Drift เมื่อเปรียบเทียบกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลังมีประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้น 0.43% ดังแสดงในภาพที่ 4.16 และตารางที่ 4.11



- ภาพที่ 4.16 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอกกับเสาปกติ ที่ไม่มีการเสริมกำลัง
- ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลัง ด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอกกับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง

columnud o	%	Lat	Lateral Force (kN)			
ູ່ຈິກແກກເພ.ເ	Drift	Positive	Negative	Average	(%)	
เสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	5	102.84	-102.6	102.72		
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการ เพิ่มความถี่เหล็กปลอก	5	103.36	-102.97	103.17	0.43	

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการเสริมกำลังวิธีต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ จะเห็นได้ว่าการเสริมกำลังสามารถเพิ่มกำลังรับแรงให้เสาได้มากขึ้นเรียงจากประสิทธิภาพสูงสุดคือ วิธีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก การเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การเสริมกำลัง ด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก และการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก โดยมีรายละเอียด คือ เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กรับแรงเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 165.74 กิโลนิวตัน ประสิทธิภาพ เพิ่มขึ้น 61.35% เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนรับแรงเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 138.06 กิโลนิวตัน ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 34.40% เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีต เสริมเหล็กรับแรงเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 137.75 กิโลนิวตัน ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 34.10% เสาที่มีการเสริม กำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอกรับแรงเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 103.17 กิโลนิวตัน ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 0.43% โดยวิธีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กมีประสิทธิภาพการรับแรงได้มากกว่าการเสริมกำลังด้วย แจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และการเสริมกำลัง เสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และเมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ ระหว่าง Lateral Force และ Displacement ที่ได้จากแบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ กับเสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลังแสดงในภาพที่ 4.17

	ประสิทธิภาพในการรับกำลังของเสา				
รูปแบบเสา	ก่อนเสริมกำลัง (kN)	หลังเสริมกำลัง (kN)	ค่าที่เพิ่มขึ้น (%)		
เสาปกติที่ไม่มีการเสริมกำลัง	102.72	-	-		
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีต เสริมเหล็ก	102.72	137.75	34.10		
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	102.72	165.74	61.35		
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์ เสริมเส้นใยคาร์บอน	102.72	138.06	34.40		
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่ เหล็กปลอก	102.72	103.17	0.43		

4	a a		• • • • •	<u>م</u> گ		
ตารางที่ 1 12	การเปรียบแทียบบ	ไระสีทธิกาพก	าารเสริบก้ำลังของเ	เบบอ้าลองพื	ís 4	59 119 191
VI 10 INVI 4.12	111000000000000000000000000000000000000		1 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 1 0 1 0 0 0 0		т и	"0"00



ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีการเสริมกำลังทั้ง 4 รูปแบบกับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลัง

4.5 การวิเคราะห์เปรียบเทียบความคุ้มค่าในการเสริมกำลังของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ใน 4 รูปแบบ

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริม กำลังใน 4 รูปแบบ และได้ทราบถึงประสิทธิภาพของการเสริมกำลังในแต่ละรูปแบบแล้ว ในขั้นตอน ต่อไปของงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความคุ้มค่าในการเสริมกำลังของเสาสะพาน คอนกรีตเสริมเหล็กใน 4 รูปแบบ และเมื่อได้ทำการวิเคราะห์ประมาณราคาแล้วจะเห็นว่าค่าใช้จ่ายใน การเสริมกำลังเรียงจากมากไปหาน้อยดังนี้ คือ การเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก การเสริมกำลังด้วยแจ้กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก และการเสริมกำลังด้วย การเพิ่มความถี่เหล็กปลอก โดยการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมีค่าใช้จ่ายสูงสุด รายละเอียดสรุปตามตารางที่ 4.13 และทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายแสดงในภาพที่ 4.18

ตารางที่ 4.13 ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ

รูปแบบเสา	ค่าใช้จ่าย (บาท)
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก	2,364.4
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก	2,575.59
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	41,216
เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก	1,823.07

หมายเหตุ: (1) การวิเคราะห์และประมาณราคาคิดค่าใช้จ่ายต่อหน่วยของวัสดุเสริมกำลังที่ความสูง 1 เมตร.ของจำนวนเสา 1 ต้น



(2) ราคาดังกล่าวไม่รวม ค่าดำเนินการ กำไร และภาษี



หมายเหตุ: A เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก

- B เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก
- C เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน
- D เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

4.6 สรุป

ผลการศึกษาที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟในต์เอลิเมนต์เริ่มจากการสอบเทียบความถูกต้อง ของแบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของงานวิจัยในอดีต เมื่อผลที่ได้จากแบบจำลอง ที่สร้างโดยใช้โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์งานทางวิศวกรรมด้วยวิธีไฟในต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับ ผลการทดสอบของงานวิจัยในอดีตแล้ว ได้นำแบบจำลองเดิมมาปรับรายละเอียดเหล็กเสริมตามขวาง ให้เป็นเสาตามมาตรฐานปกติทั่วไป และได้นำไปสร้างแบบจำลองที่มีการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่า การเสริมกำลังสามารถเพิ่มกำลังรับแรงให้เสาได้มากขึ้นเรียงจาก ประสิทธิภาพสูงสุดคือ วิธีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก การเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริม เส้นใยคาร์บอน การเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก และการเสริมกำลังด้วยการเพิ่ม ความถี่เหล็กปลอก โดยเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กรับแรงได้มากสุด 165.74 กิโลนิวตัน ซึ่งประสิทธิภาพการเสริมกำลังเพิ่มขึ้นถึง 61.35% เทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริม กำลัง หลังจากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบราคาค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ แล้วพบว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมีค่าใช้จ่ายสูงสุด ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ ความคุ้มค่าดังกล่าวข้างต้นนั้นจะเป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้วิธีการเสริมกำลัง ในแต่ละรูปแบบให้มีความเหมาะสมกับลักษณะงานต่อไป

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลการศึกษา

เมื่อวิเคราะห์ผลการศึกษาแล้วสามารถสรุปผลการศึกษาทั้งหมดได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการเสริ่มกำลังให้แก่เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรง แบบวัฏจักรโดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวในรูปแบบ Cyclic Load ทำการวิเคราะห์เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบปกติทั่วไปเปรียบเทียบกับเสาสะพานคอนกรีต เสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ้กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก การเสริม กำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก รวมจำนวน 4 แบบจำลอง ภายใต้การกระทำของแรงแบบวัฏจักร ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพเสา โดยการเสริมกำลังนี้ได้ใช้การรับแรงด้านข้างสูงสุดเป็นตัววัดประสิทธิภาพการรับแรงกระทำว่าแต่ละวิธี มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปกติที่ไม่ได้ออกแบบเพื่อการรับแรงแผ่นดินไหว จากการศึกษาพบว่าเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแจ้กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็กมีประสิทธิภาพการรับแรง ด้านข้างเพิ่มขึ้น 34.10% เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมีประสิทธิภาพ การรับแรงด้านข้างเพิ่มขึ้น 34.40% เสาที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก มีประสิทธิภาพการรับแรงด้านข้างเพิ่มขึ้น 0.43% โดยวิธีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก การเสริมกำลังด้วยแผ่น โพลิเมอร์เสริมเส้นใยการ่างเข้มขึ้น 0.43% โดยวิธีการเสริมกำลังก้อยแผ่นเหล็ก การเสริมกำลังด้วยแผ่น โพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และการเสริมกำลังด้วยแจ็กเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลังด้วยแผ่น โพลิเมอร์เสริมเส้นใยการ์บอน และการเสริมกำลังเสาด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟในต์เอลิเมนต์ที่มีการเสริมกำลังภายใต้แรงแบบวัฏจักรพบว่า แบบจำลองแต่ละแบบแสดงบริเวณที่เกิดการวิบัติต่างกันโดย แบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลัง ด้วยแจ๊คเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงการวิบัติที่บริเวณโคนเสาด้านบนเหนือวัสดุเสริมกำลัง แบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก แสดงการเกิดการวิบัติที่โคนเสาเหนือวัสดุเสริมกำลัง แบบจำลองเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแสดงการเกิดการวิบัติ ที่โคนเสาเหนือวัสดุเสริมกำลัง และคอนกรีตด้านในแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแสดงการเกิดการวิบัติ ที่โคนเสาเหนือวัสดุเสริมกำลัง และคอนกรีตด้านในแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแบบจำลองเสา ที่มีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก แสดงการเกิดการวิบัติที่บริเวณโคนเสา ซึ่งบริเวณ ที่เกิดการวิบัติเป็นบริเวณที่เสาไม่ได้มีการเสริมกำลัง แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังสามารถเพิ่ม ประสิทธิภาพในการรับแรงเฉือนได้มากขึ้น และป้องกันบริเวณโคนเสาซึ่งเป็นจุดวิกฤติที่มักจะเกิด การวิบัติจากการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงของแผ่นดินไหวได้

5.1.3 การเสริมกำลังใน 4 รูปแบบ มีค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่า ในการเสริมกำลังของเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังใน 4 รูปแบบแล้ว ค่าใช้จ่ายในการ เสริมกำลังให้กับเสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อเรียงจากมากไปหาน้อยดังนี้คือ การเสริมกำลัง ด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก การเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ต คอนกรีตเสริมเหล็ก และการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มความถี่เหล็กปลอก

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบการเปรียบเทียบรูปแบบการเสริมกำลังให้แก่เสาสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้แรงแบบวัฏจักร โดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวในรูปแบบ Cyclic Load และการเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการเสริมกำลัง ผลการวิเคราะห์ที่ได้อาจไม่ครอบคลุม เงื่อนไขอื่น ๆ นอกเหนือจากขอบเขตการศึกษา จึงมีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการศึกษาค้นคว้า ในอนาคตเพื่อให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับที่ใช้งานจริงดังนี้

5.2.1 ควรแบ่ง Mesh ให้ละเอียดมากขึ้นเพื่อความชัดเจนในการวิเคราะห์

5.2.2 ตัวอย่างแบบจำลองควรมีการพัฒนาให้มีความใกล้เคียงกับสภาพจริงเพิ่มมากขึ้น เพราะ การก่อสร้างทั่วไปเหล็กปลอกมีการงอขอที่ปลายเหล็ก ดังนั้นควรสร้างแบบจำลองเหล็กปลอก ให้เหมือนการก่อสร้างจริง

5.2.3 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังใน 4 รูปแบบนั้น ราคาวัสดุก่อสร้างอาจมีความ ผันผวนจากที่ได้ทำการวิเคราะห์และประมาณราคาไว้ ควรติดตามราคาของวัสดุก่อสร้างในแต่ละพื้นที่ อีกครั้งก่อนที่จะนำมาใช้งาน เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว). "ความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหวในต่างประเทศ", รูปแบบความเสียหายในต่างประเทศ. http://www.thaiseismic.com/ inter damage/. 19 มกราคม, 2563.
- [2] กรมทรัพยากรธรณี. แผ่นดินไหวกับประเทศไทย. ธุรการเจริญกิจ: สำนักธรณีวิทยา สิ่งแวดล้อม, 2555.
- [3] Wikiwand. "การเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก", การแปรสัณฐานแผ่นธรณีภาค. https://www.wikiwand.com/th/. 19 มกราคม, 2563.
- [4] Google Sites. "ภูเขาไฟปะทุ", **ภัยธรรมชาติ**. https://sites.google.com/site/ phaythrrmchati10/phukheafi-pathu. 19 มกราคม, 2563.
- [5] Geo Noi. "สาเหตุของการเกิดแผ่นดินไหว", ธรณีภัยพิบัติ.
 https://geonoi.wordpress.com/2015/12/14/. 19 มกราคม, 2563.
- [6] Blogger. "ปรากฏการณ์ทางธรณีวิทยา", **Astronomy**. http://mobill-33.blogspot.com/ p/4.html. 19 มกราคม, 2563.
- [7] บุรินทร์ เวชบรรเทิง. "ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน", ความรู้พื้นฐานทั่วไปเกี่ยวกับ แผ่นดินไหว. http://www.earthquake.tmd.go.th/file_downloads/. 19 มกราคม, 2563.
- [8] อมร พิมานมาศ, ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด และปรีดา ไชยมาวัน. "พฤติกรรมของโครงข้อแข็ง คอนกรีตภายใต้แรงแผ่นดินไหวและแนวทางการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว", องค์ความรู้เลื่อนระดับ สภาวิศวกร. http://www.coe.or.th/http_public/ download/Articles/Amorn/Earthquake Design/ch1.pdf. 19 มกราคม, 2563.
- [9] Pauley, T. and Priesley, M.J.N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. New Jersey: John Wiley and Sons Inc., 1992.
- [10] ชยานนท์ หรรษภิญโญ. "บทที่ 4 แผ่นดินไหว", องค์ความรู้เลื่อนระดับ สภาวิศวกร. http://www.coe.or.th/http_public/main/choice_1/cpd/menu_101.php. 19 มกราคม, 2563.
- [11] Sekhar, R. (2016). "What is the equation to evaluate the P-Delta effect?",Quora. https://www.quora. com/What-is-the-equation-to-evaluate-the-P-Delta-effect. January 19, 2020.
- [12] Federal Emergency Management Agency. "Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings", https://www.fema.gov/medialibrary-data/20130726-1444-20490-5925/fema_356.pdf. January 19, 2020
- [13] อมร พิมานมาศ. "แจ็คเก็ตคอนกรีตเสริมเหล็กหุ้มเสาต้านแผ่นดินไหว", คอลัมน์น่ารู้
 งานก่อสร้าง. https://engfanatic.tumcivil.com/engfanatic/article/807.
 19 มกราคม, 2563.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานการประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของ โครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. กรุงเทพฯ: สหมิตรพริ้นติ้งแอนด์พับลิสซิ่ง, 2557.
- [15] อมร พิมานมาศ. "การเสริมกำลังเสาด้วยการหุ้มด้วยแผ่นเหล็ก", สำนักงานกองทุนสนับสนุน การวิจัย (สกว). http://www.thaiseismic.com/fin_research5/. 19 มกราคม, 2563.
- [16] อมร พิมานมาศ. (2015). "การเสริมความแข็งแรงอาคารเก่าต้านแผ่นดินไหว ตอนที่ 1", วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

http://www.thaiengineering.com/2015/index.php/technology/item/762strengthen-the-building-against-earthquakes. 19 มกราคม, 2563.

- [17] SMART&BRIGHT. "Carbon Fiber (CFRP.)", **ผลงาน**. http://www.smartcoating.com. 19 มกราคม, 2563.
- [18] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มยผ. 1301-54 มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคาร เพื่อ ต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (ปรับปรุงครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักควบคุม และตรวจสอบอาคาร, 2554.
- [19] ปราโมทย์ เดชะอำไพ และเสฏวรรธ สุจริตภวัตสกุล. **การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโต๊ะ** ช่างแอนซีส. กรุงเทพา: แคด-ไอที คอนซัลแท้นท์ (เอเชีย) พีทีอี ลิมิเต็ด, 2560.
- [20] มนต์ศักดิ์ พิมสาร. "เอกสารและสื่อประกอบการเรียน", ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. http://eng.sut.ac.th/me/box/2_54/435301/IntroductionFEM.pdf. 5 เมษายน, 2563.
- [21] VDOCUMENTS. "3D Stress Components", **Documents**. https://vdocuments.mx/ 3d-stress- components-stress-components-normal- stresses-stresses- oninclined.html. 5 เมษายน, 2563.
- [22] อลงกรณ์ เพชรดี. การเสริมกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวจำกัดเพื่อ รับแรงแผ่นดินไหวโดยใช้วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2555.
- [23] จิรภัทร แย้มทิม. การเสริมกำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวจำกัดภายใต้ การวิบัติจากแรงเฉือนโดยใช้วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2556.
 [24] Qaiser-Uz-Zaman Khan et al. "Seismic Evaluation of Repaired and Retrofitted Circular Bridge Piers of Low-Strength Concrete", Arabian Journal for Science and Engineering. 40: 3057-3066; July, 2015.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] Bhowmik, T., Tan, K.H. and Balendra, T. "Lateral load-displacement response of low strength CFRP-confined capsule-shaped columns", Engineering Structures. 150(1): 64-75; November, 2017.
- [26] Tae-Sung Eom. "Cyclic loading test for reinforced concrete columns with continuous rectangular and polygonal hoops", Engineering Structures. 67: 39-49; May, 2014.
- [27] ธนกฤต เตรียมไชย, มนธิวา ผจงศิลป์ และรชพล พุ่มจันทร์. การเพิ่มประสิทธิภาพการรับ แรงด้านข้างแบบวัฏจักรของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก. รายงานโครงการวิศวกรรม ศาสตรบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2559.
- [28] Pawar, V.S. and Pawar, P.M. "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Column with ANSYS", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 3(6): 2290-2296; June, 2016.
- [29] Li, C., Hao, H. and Bi, K. "Numerical study on the seismic performance of precast segmental concrete column under cyclic loading", Engineering Structures. 148: 373-386; October, 2017.
- [30] Peng, S. et al. "Experimental research and finite element analysis on seismic behavior of CFRP-strengthened seismic-damaged composite steel-concrete frame columns", Engineering Structures. 155: 50-60; January, 2017.
- [31] ResearchGate. "Combined Cyclic Bending-Torsional Loading Test Of Reinforced Concrete Bridge Columns", Publication. https://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/ tc/g/pdf/21/21-8-4kawashima.pdf. 19 January, 2563.
- [32] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีต เสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ: โกลบอล กราฟฟิค, 2553.
- [33] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีต เสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: โกลบอล กราฟฟิค, 2558.

ภาคผนวก

รายละเอียดประมาณค่าใช้จ่ายการเสริมกำลัง มีดังนี้

30° 00	-80 -80			ราคาวัสเ	ดุ (บาท)	ค่าแรง	(
ยามา	61.1101.¢	ลๆ.ฑน	<u>ุ</u> นเ.นา.ง	ต่อหน่วย	RLL	ต่อหน่วย	2JN
1	เตรียมผิวคอนกรีต	ທ 5.3⊔.	1.6			70.00	112.0

าารางที่ ก.1 ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอนกรีตเสริม	ช	เหลก
าารางที่ ก.1 ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังด้วยแจ็กเก็ตคอนกรีต	٥	តេรឯ
าารางที่ ก.1 ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังด้วยแจ๊กเก็ตคอ	đ	นกรต
าารางที่ ก.1 ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังด้วยแจ็ก	ช	ເກຫຼຄວ'
าารางที่ ก.1 ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังด้วย	ŝ	ແຈກ
าารางที่ ก.1 ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลัง	9	າ໑ຉຏ
าารางที่ ก.1 ค่าใช้จ่ายการเสริมกำ	9	ລັ
าารางที่ ก.1 ค่าใช้จ่ายการเสริมเ	•	ຂ
ารางที่ ก.1 ค่าใช้จ่ายกา	٥	ភ តេវារា
ารางที่ ก.1	- 9 6 -	คาเชจายกา
_	-a	เารางท ก.1

80- 00 00 00	2001802			ราคาวัสเ	ดุ (บาท)	ค่าแรง	(ทาท)		
ดเพบท		ทนิเย	<u>ุ</u> ชา น เ	ต่อหน่วย	รวม	ต่อหน่วย	53N	Rb ۲	หม เยเทพ
1	เตรียมผิวคอนกรีต	ທ 5.31.	1.6			70.00	112.00	112.00	
2	คอนกรีต	ลบ.ม.	0.2	2,196.26	439.25	498	09.66	538.85	
	เหล็กเสริมโครงสร้าง:								
%	เหล็กเส้น dia 10 มม.	ກກ.	13.44	16.85	226.46	3.3	44.35	270.82	
	เหล็กเส้น dia 13 มม.	ກກ.	19.9	18.76	373.32	3.30	65.67	438.99	
4	ฉาบปู่นเรียบ	ທ ຽ. ນ .	1.80	80.00	144.00	100.00	180.00	324.00	
5	ลวดผูกเหล็ก	ກກ.	1	23.37	23.37			23.37	
9	ไม้แบบพัวไป	ທ ິ 5.31.	1.60	268.00	428.80			428.80	
7	ค่าแรงไม้แบบทั่วไป	ທ ຽ. ນ .	1.60			133	212.80	212.80	
8	ຸ ສະປຸ	ກກ.	0.40	36.92	14.77			14.77	
	รวมข้อ 1-8				1,649.98		714.42	2,364.40	

Ē
หลื
ทใ
- <u></u> 2
ព
ຈິ
ອີເ
J,
ฐม
ອີ
۱۶
È
2.
్లిస్త్ర
ן <u></u> ר
هـ
2
⊐
٦Ĵ
ູ
6

้งมาถเหม ตะร		112.00	114.51	,341.44	7.65	,575.59
(พาพ)	รวม	112.00	21.17	904.32 2	4.25	1,041.74 2
ค่าแรง	ต่อหน่วย	70.00	498.00	12.00	100.00	
ดุ (บาท)	ราม		93.34	1,437.12	3.40	1,533.86
ราคาวัสเ	ต่อหน่วย		2,196.26	19.07	80.00	
จำนวน		1.6	0.0425	75.36	0.0425	
หน่วย		ທ ຽ.ນ.	ສບ.ນ.	ກກ.	ທ ຽ.ນ.	
รายการ		เตรียมผิวคอนกรีต	คอนกรีต	เหล็กแผ่นหนา 6 มม.	ฉาบปู่นเรียบ	รวมข้อ 1-4
-000 000	6 INUVI	1	2	3	4	

ตารางที่ ก.3 ค่าใช้จ่ายการเสริมกำลังด้วยแผ่นโพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

	ทมายเทพ							
- - - - - 	Rb G	112.00	2,240.00		864.00	38,000.00		41,216.00
(พ.บ)	ราม	112.00				38,000		38,112.00
ค่าแรง	ต่อหน่วย	70.00				38,000		
ดุ (บาท)	ราม		2,240.00		864.00			3,104.00
ราคาวัสเ	ต่อหน่วย		1,400		540.00			
	ุ ทุ ทุ . ท	1.6	1.6		1.6	1.0		
	ละทุน	ທ ຽ.ນ.	ທ 5.ນ.		นเร	ทเร		
2001002		เตรียมผิวคอนกรีต	แผ่นคารณ์บอนไฟเบอร์	sheet รุ่น UT70-30	Epoxy Resin	ค่าแรงติดตั้งการเสริมกำลัง	ด้วย CFRP ที่เสา 1 ต้น	รวมช้อ 1-4
0000 0000	ดาหาบท	1	2		3	4		

	Ē
	ര
	<u>_</u>
	ے
	Ξ
v	ച്ച
	چ
-7	2
4	ĩ
	ະ
	ò
	È
	ਙ
-0	Ξ
	5
	ሮ
	۲
	š
	ະ
a	ີ
	5
9	ລັ
	÷
•	È
	공
1	r
	ລ
	ີ່
	Ċ
	f
	ລ
-	\subseteq
~	۶
9	్ల
6	2
-	è
	_
,	4
	2
	<u>ر</u>
-0	S
	ማ
	Ξ
	ሮ
	٢.
	<u> </u>

900 900 100	2000			ราคาวัสดุ	(นาห)	ค่าแรง	(นาบ)		W 00 110 CT 000
6 INUVI		<u>ค</u> .ฑม	אר או ה	ต่อหน่วย	57N	ต่อหน่วย	ราม	۲۴ <u>۴</u>	หมายเหตุ
1	คอนกรีต	.ທ.ນຄ	0.16	2,196.26	351.40	498.00	79.68	431.08	
	ເหລິກເສรີນໂครงสร้าง:								
2	เหล็กเส้น dia 6 มม.	. ມມ	3.90	17.89	69.77	3.30	12.87	82.64	
	เหล็กเส้น dia 13 มม.	.กก.	15.92	18.76	298.66	3.30	52.54	351.20	
3	ฉาบปู่นเรียบ	M.7N.	1.60	80.00	128.00	100.00	160.00	288.00	
4	ຄ ວ໑ຢູ _ິ ກເ ກ ໍຄົກ	.กก.	0.59	23.37	13.78			13.78	
5	່ໄນ້ແບບທັ່ວໄປ	M.7N.	1.60	268.00	428.80			428.80	
6	ค่าแรงไม้แบบทั่วไป	ທ5. ນ .	1.60			133.00	212.80	212.80	
7	ตะปุ	ຄຄ.	0.40	36.92	14.77			14.77	
	รวมข้อ 1-7				1,305.18		517.89	1,823.07	

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายเธียรชัย แสนวงศ์
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2545-2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2551-2556 การประปาส่วนภูมิภาคเขต 9
	กระทรวงมหาดไทย จังหวัดเชียงใหม่
	พ.ศ. 2557-ปัจจุบัน การประปาส่วนภูมิภาคเขต 8
	กระทรวงมหาดไทย จังหวัดอุบลราชธานี
ตำแหน่ง	หัวหน้างานแหล่งน้ำ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	การประปาส่วนภูมิภาคเขต 8 จังหวัดอุบลราชธานี
	กระทรวงมหาดไทย อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี
เบอร์โทรติดต่อ	045-311432-4