



พฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบโดยวิธีโครงข้อหมุนแบบจำลอง

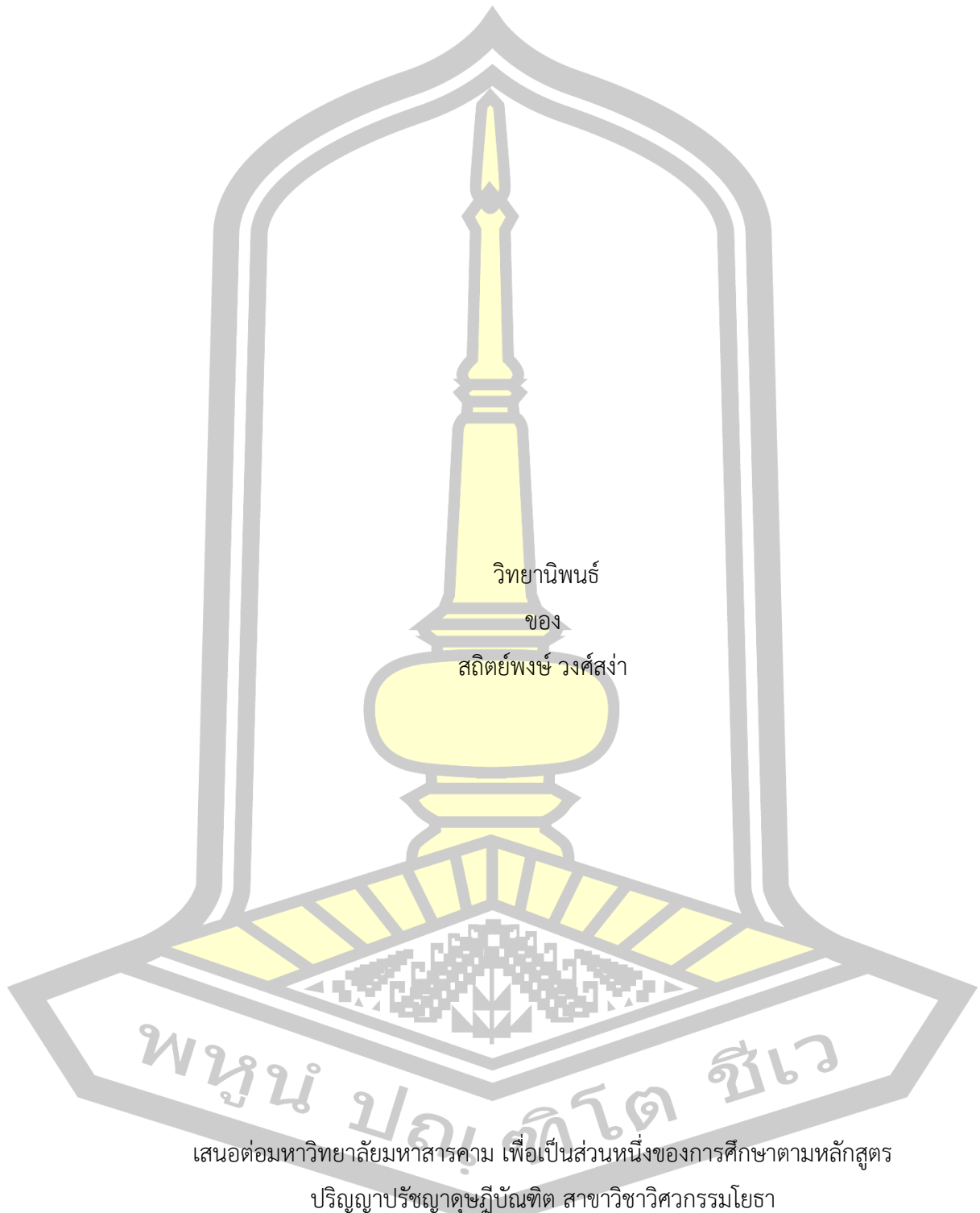
วิทยานิพนธ์
ของ
สฤติย์พงษ์ วงศ์สง่า

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สิงหาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

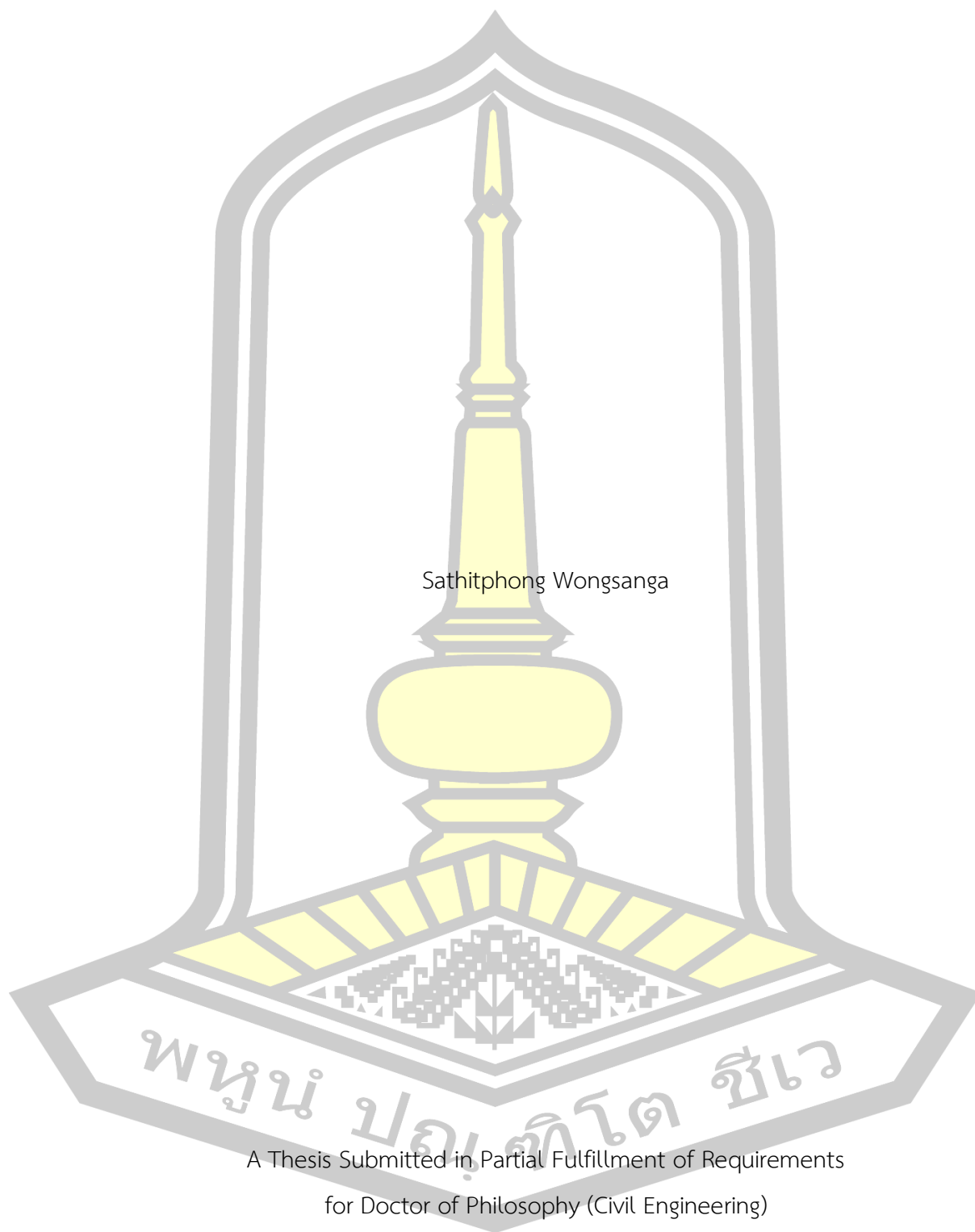
พฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบโดยวิธีโครงข้อหมุนแบบจำลอง



สิงหาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Behavior of Reinforced Concrete Pile Caps Designed by Strut-and-Tie Models Method



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Civil Engineering)

August 2024

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายสถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศ. ดร. วันชัย สะตะ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยชาญ โชติถนอม)

.....กรรมการ

(ศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เลาหวนิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

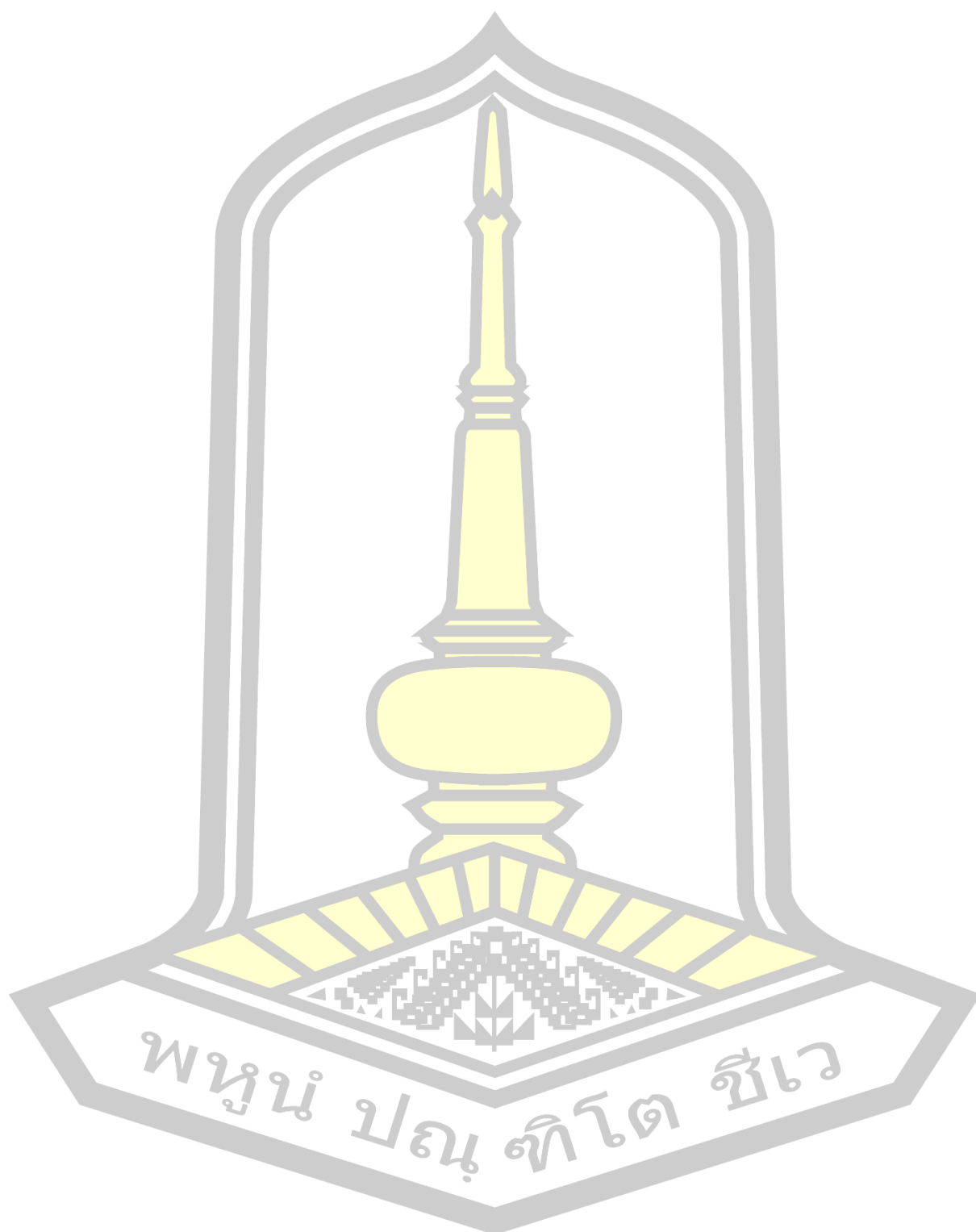
ชื่อเรื่อง	พฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบโดยวิธีโครงข้อหมุนแบบจำลอง		
ผู้วิจัย	สถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการวิบัติของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก จำนวน 2 ต้น และ 4 ต้น ที่ออกแบบด้วยวิธีโครงข้อหมุนแบบจำลอง หรือวิธี STM โดยมีการศึกษาถึงผลกระทบจาก 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1) ช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล 2) การออกแบบจุดยึดรั้ง และ 3) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อม่อและเสาเข็ม โดยในการทดลอง จะจำลองการออกแบบฐานรากในห้องปฏิบัติการให้มีขนาดมาตราส่วน 1 : 2 ของขนาดโครงสร้างจริง จากผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วน a/d ที่น้อย (0.75) ช่วยลดการแอ่นตัวของฐานราก เนื่องจากการกระจายแรงที่ดีกว่า ในขณะที่อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น (จาก 1.00 ถึง 1.50) ทำให้ระยะช่วงแรงเฉือนยาวขึ้นส่งผลให้การแอ่นตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราส่วน c/p ที่เพิ่มขึ้นช่วยให้การกระจายแรง ส่งผลให้การแอ่นตัวของฐานรากลดลง ส่วนผลของการออกแบบจุดยึดรั้งที่แตกต่างกันส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและความมั่นคงมากขึ้น การแตกร้าวของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีจำนวน 2 ต้นและ 4 ต้นที่ได้รับการเสริมเหล็กแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G) มีแนวโน้มแสดงพฤติกรรมการแตกร้าวประเภท Shear Failure ในทุกรูปแบบ สำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น แสดงการแตกร้าวเล็กน้อยที่ระดับกำลังรับน้ำหนักประมาณร้อยละ 11.3 ของกำลังสูงสุด และการแตกร้าวที่จุดยึดหยุนสูงสุด (Yield Crack) ร้อยละ 58 ของกำลังสูงสุด ในขณะที่ฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น แสดงการแตกร้าวเล็กน้อยที่ระดับกำลังรับน้ำหนักประมาณร้อยละ 11.0 และการแตกร้าวที่จุดยึดหยุนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 56.66 ของกำลังสูงสุด และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของท่อนแรงอัดและท่อนแรงดึงจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและการออกแบบตาม ACI318M-14 พบว่าในหลายกรณี ค่ากำลังของท่อนแรงอัดและท่อนแรงดึงจากการทดลองมีค่าสูงกว่าที่คำนวณตามทฤษฎีการออกแบบ

คำสำคัญ : ฐานรากเสาเข็ม, โครงข้อหมุนแบบจำลอง, อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม, บริเวณจุดยึดรั้ง

, อัตราส่วนความยาวแรงเหวี่ยงต่อความลึก



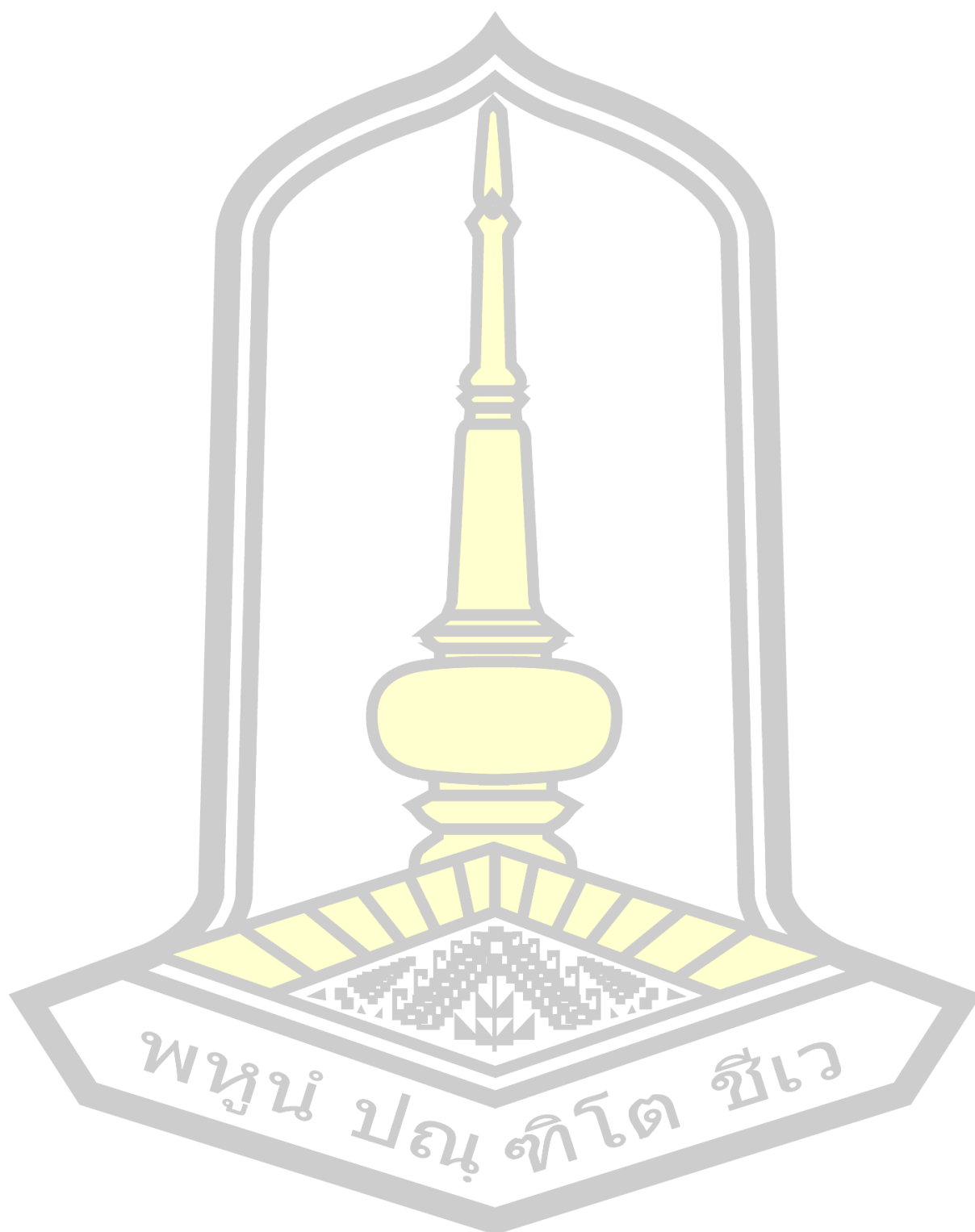
TITLE	Behavior of Reinforced Concrete Pile Caps Designed by Strut-and-Tie Models Method		
AUTHOR	Sathitphong Wongsanga		
ADVISORS	Associate Professor Raungrut Cheerarot , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Civil Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2024

ABSTRACT

The research aimed to investigate the behavior of reinforced concrete pile foundations, specifically those designed using the strut and tie model (STM), with 2 and 4 piles. Three main factors were studied: 1) the length-to-depth ratio of effective moment arm, 2) the design of anchorage zones, and 3) the ratio of the cross-sectional area of the cap to that of the pile. Scaled laboratory experiments were conducted to simulate foundation designs at a 1:2 scale. Findings revealed that a lower ratio of a/d (0.75) reduced foundation settlement due to better force distribution. Conversely, higher ratios (from 1.00 to 1.50) increased settlement by elongating the lever arm. Increasing the ratio c/p aided force distribution, thus reducing settlement. Diverse anchorage zone designs resulted in varied structural stiffness and stability. Both 2 and 4-pile reinforced concrete foundations, whether reinforced with bundled (B) or distributed (G) reinforcement, exhibited tendencies towards shear failure. For 2-pile foundations, slight cracking occurred at approximately 11.3% of the ultimate load, with yield crack at 58% of the ultimate load. Similarly, 4-pile foundations experienced minimal cracking at around 11.0% of the ultimate load, with yield crack at 56.66% of the ultimate load. Experimental and ACI318M-14 design comparisons showed higher experimental compressive and tensile strengths in many cases, indicating conservative design practices.

Keyword : Pile Caps, Strut and Tie Model, Pile Cross Sectional Area Ratio, Anchorage

Zones, Shear Span to Depth Ratio



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร.เรือง รุขดี ชีระโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนช่วยแก้ปัญหาต่างๆ เป็นอย่างดี ตลอดเวลาที่ดำเนินการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กริสน์ ชัยมูล ศาสตราจารย์ ดร.อนงฤทธิ์ แข็งแรง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยชาญ โชติถนอม และศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ อีกทั้งให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้ และผู้วิจัยขอขอบคุณ รุ่งพีและรุ่งน้องของห้องวิจัย คอนกรีตและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้คำปรึกษาและแก้ปัญหาต่างๆ ให้ลุล่วงไปด้วยดี และขอรำลึกในพระคุณของคุณพ่อโอภาส วงศ์สง่า และคุณแม่ทองทิพย์ วงศ์สง่า ซึ่งได้คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

สถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ฐานรากและประเภทของฐานราก.....	6
2.2 งานเสาเข็มและประเภทของเสาเข็ม.....	9
2.3 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	11
2.4 การออกแบบฐานรากเสาเข็มโดยวิธีกำลัง.....	15
2.5 พฤติกรรมในการรับน้ำหนักและการวิบัติของฐานรากเสาเข็ม.....	15
2.6 ทฤษฎีแบบจำลองโครงข้อมุม.....	19
2.7 องค์ประกอบของแบบจำลองโครงข้อมุม.....	20
2.8 การวิบัติในวิธีแบบจำลองโครงข้อมุม.....	23
2.9 เงื่อนไขและข้อกำหนดในการสร้างและออกแบบด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อมุม.....	23

2.10 ขั้นตอนการออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน	26
2.11 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน	30
2.12 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อฐานรากเสาเข็มที่ออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนที่เลือกศึกษา	34
2.13 รูปแบบการวิบัติของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแรงเฉือน	41
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	46
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	46
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	47
3.3 การเตรียมตัวอย่างฐานรากในการทดลอง	48
3.4 ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่าง	52
บทที่ 4 การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง	54
4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก	54
4.2 ผลการวิเคราะห์ออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่รองรับด้วยเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น	56
4.3 การแอ่นตัวของฐานรากภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำที่สภาวะแรงกระทำสูงสุด	60
4.4 การแตกร้าวและการวิบัติภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำที่สภาวะต่างๆ	67
4.5 ลักษณะการแตกร้าวในฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ต้น และ 4 ต้น ที่ได้รับการเสริมเหล็กรูปแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G)	71
4.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการออกแบบด้วยข้อกำหนด ACI318M-14	81
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	89
บรรณานุกรม	93
ประวัติผู้เขียน	97

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ทำให้ราคาของฐานรากน้อยที่สุด	11
ตาราง 2 ค่าตัวคูณสำหรับการจำกัดค่าหน่วยแรงในวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก	12
ตาราง 3 ค่าตัวคูณสำหรับการจำกัดค่าหน่วยแรงในวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก	13
ตาราง 4 ข้อเปรียบเทียบสำหรับวิธีการออกแบบระหว่างวิธีหน่วยแรงใช้งานและวิธีกำลัง	13
ตาราง 5 ตัวคูณลดกำลังของท่อนรับแรงอัด (β_s)	25
ตาราง 6 ค่าตัวคูณลดกำลัง β_n ของจุดต่อ (Node) ตัวคูณลดกำลังของจุดต่อ ACI318-14	26
ตาราง 7 แสดงขนาดแผ่นเพลท	40
ตาราง 8 ตัวอย่างทดสอบ กลุ่มที่ 1 อัตราส่วนความยาวช่วงแรงเฉือนต่อความลึก (a/d) เท่ากับ 0.75 1.00 1.25 และ 1.50	49
ตาราง 9 ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 อัตราส่วนหน้าตัดเสาตอม่อและเสาเข็ม (A_c/A_p)	50
ตาราง 10 ตัวอย่างฐานทดสอบ กลุ่มที่ 3 ออกแบบจุดยึดตั้งแตกต่างกัน 3 รูปแบบ	51
ตาราง 11 ผลการทดสอบแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ออกแบบกำลังอัด 210 กก./ซม. ²	54
ตาราง 12 ผลการทดสอบคุณสมบัติค่าเฉลี่ยกำลังดึงของเหล็กเสริมชนิดข้ออ้อย DB10 SD40	55
ตาราง 13 ผลการออกแบบกลุ่มที่ 1 อัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d) ต่อฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น	57
ตาราง 14 ผลการออกแบบกลุ่มที่ 2 อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาตอม่อต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม(c/p) ต่อ ฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น	58
ตาราง 15 ผลการออกแบบกลุ่ม 3 ออกแบบจุดยึดตั้งที่แตกต่างกันต่อฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น	59
ตาราง 16 ผลการออกแบบกลุ่ม 4 ฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น โดยวิธีทั่วไป	60

ตาราง 17 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 2 ต้น กลุ่ม 1 (a/d) แตกต่างกัน.....	73
ตาราง 18 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 4 ต้น กลุ่ม 1 (a/d) แตกต่างกัน	74
ตาราง 19 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 2 ต้น กลุ่ม 2 (c/p) แตกต่างกัน.....	76
ตาราง 20 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 4 ต้น กลุ่ม 2 (c/p) แตกต่างกัน.....	77
ตาราง 21 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 2 ต้น กลุ่ม 3 ออกแบบจุดยึดรั้งแตกต่างกัน.....	79
ตาราง 22 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 4 ต้น กลุ่ม 3 ออกแบบจุดยึดรั้งแตกต่างกัน.....	79
ตาราง 23 แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในท่อน Strut, Tie และบริเวณจุดต่อ Node ในโครงสร้างฐานราก เสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้นที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50.....	82
ตาราง 24 แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในท่อน Strut, Tie และบริเวณจุดต่อ Node ที่มีอัตราส่วน c/p แตกต่างกันสำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น.....	83
ตาราง 25 แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในท่อน Strut, Tie และบริเวณจุดต่อ Node ที่มีจุดยึดรั้งที่ปลายเหล็ก เสริมแตกต่างกันสำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น	85
ตาราง 26 ผลการทดสอบกำลังของท่อนแรงอัด (strut) และท่อนแรงดึง (Tie) ในกลุ่ม 1	85
ตาราง 27 ผลการทดสอบกำลังของท่อนแรงอัด (strut) และท่อนแรงดึง (Tie) ในกลุ่ม 2	86
ตาราง 28 ผลการทดสอบกำลังของท่อนแรงอัด (strut) และท่อนแรงดึง (Tie) ในกลุ่ม 3	87

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 พฤติกรรมการถ่ายแรงของฐานรากลึก	2
ภาพประกอบ 2 ลักษณะและชนิดของฐานรากวางบนดิน	7
ภาพประกอบ 3 ตัวอย่างการจัดรูปแบบฐานเสาเข็มหลายต้น	10
ภาพประกอบ 4 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มในฐานราก	10
ภาพประกอบ 5 ฐานรากเสาเข็ม	15
ภาพประกอบ 6 ขั้นตอนออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง	18
ภาพประกอบ 7 อาณาบริเวณ D-region ของคานที่เปลี่ยนหน้าตัดกะทันหัน	20
ภาพประกอบ 8 องค์ประกอบของโครงข้อหมุนแบบจำลอง	21
ภาพประกอบ 9 ลักษณะของท่อนรับแรงอัด	21
ภาพประกอบ 10 ลักษณะของแรงที่กระทำต่อจุดต่อในโครงข้อหมุน	23
ภาพประกอบ 11 ท่อนรับแรงอัดซ้อนทับกันทำให้เกิด Over stress	24
ภาพประกอบ 12 การแบ่งอาณาบริเวณ D- region โครงสร้าง	27
ภาพประกอบ 13 รูปแบบของแบบจำลองที่เหมาะสมในคานลึก	28
ภาพประกอบ 14 การรวมแรงของท่อนรับแรงอัดที่บริเวณจุดต่อ	29
ภาพประกอบ 15 ตรวจสอบท่อนอัดตำแหน่งใต้เสา(Upper nodes zone)	30
ภาพประกอบ 16 แสดงการขยายพื้นที่ได้เสาทอม่อเสาเข็ม 2 ต้น	31
ภาพประกอบ 17 แสดงการขยายพื้นที่ได้เสาทอม่อเสาเข็มมากกว่า 2 ต้น	32
ภาพประกอบ 18 แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กในฐานรากทั้งสองรูปแบบ	34
ภาพประกอบ 19 ลักษณะของโครงข้อหมุนแบบจำลอง	35
ภาพประกอบ 20 ระยะแขนของแรงท่อนรับแรงอัดในแนวนอน C และ แรงดึง T	36
ภาพประกอบ 21 การคำนวณท่อนแรงอัดทะแยง	37

ภาพประกอบ 22 ระยะยึดรั้งที่จุดต่อ.....	38
ภาพประกอบ 23 การงอเหล็กแบบ 90 องศา.....	39
ภาพประกอบ 24 การเสริมเหล็กแบบเชื่อมติดกับแผ่นเพลท.....	40
ภาพประกอบ 25 การเสริมเหล็กแบบเชื่อมติดกับแผ่นฉาก.....	40
ภาพประกอบ 26 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบรอยเชื่อมแผ่นเหล็กเพลท.....	47
ภาพประกอบ 27 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบฐานราก.....	53
ภาพประกอบ 28 กำลังรับแรงอัดคอนกรีต รูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม.	55
ภาพประกอบ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและระยะแอนตัวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้นและ 4 ที่อัตราส่วน a/d เท่ากับ 0.75-1.50.....	61
ภาพประกอบ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำกับระยะแอนตัวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ที่อัตราส่วน c/p แตกต่างกัน	63
ภาพประกอบ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำกับระยะแอนตัวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ที่จุดยึดรั้งที่ปลายเหล็กเสริมแตกต่างกัน.....	65
ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและรูปแบบการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ที่ a/d แตกต่างกัน	67
ภาพประกอบ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและรูปแบบการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้นที่ c/p แตกต่างกัน	69
ภาพประกอบ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและรูปแบบการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ที่จุดยึดรั้งแตกต่างกัน.....	70
ภาพประกอบ 35 แสดงทิศทางการแตกร้าวของฐานที่ใช้การทดสอบของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น	71
ภาพประกอบ 36 แสดงทิศทางการแตกร้าวของฐานที่ใช้การทดสอบของฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น	72
ภาพประกอบ 37 แสดงตำแหน่งท่อน Strut และ Tie ในฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเสาเข็ม รองรับ 2 ต้น และ 4 ต้น	81

บทที่ 1

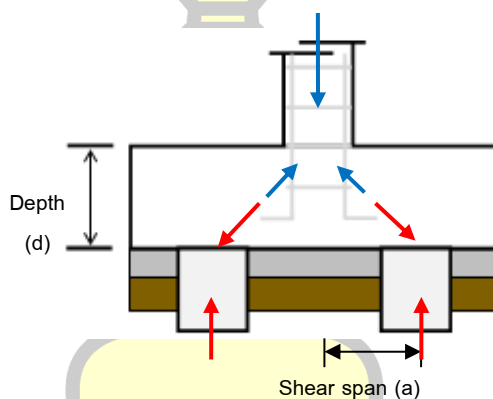
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการก่อสร้างในประเทศไทย และยังคงเป็นโครงสร้างนิยมมากที่สุดทั่วโลก โดยปัจจัยสำคัญที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับความนิยม คือ ความแข็งแรง คงทนต่อการสึกกร่อนได้หลายสิบปี สามารถรับน้ำหนักได้มาก ทำงานง่าย (อัฐพล เตละรัตน์ประเสริฐ, 2557) รวมทั้งยังเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อย และยังสามารถออกแบบให้โครงสร้างมีรูปร่างต่าง ๆ ได้ตามความต้องการ และยังมีราคาก่อสร้างต่ำเมื่อเทียบกับโครงสร้างประเภทอื่นๆ (จักษดา อ่างวุฒิ, 2548) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุ 2 ชนิด ทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างสมบูรณ์โดยการยึดเกาะทางเคมี โดยคอนกรีตทำหน้าที่ต้านทานแรงอัด ส่วนเหล็กเสริมจะทำหน้าที่ต้านทานแรงดึง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวใกล้เคียงกัน จึงไม่ทำให้เกิดปัญหาเมื่อคอนกรีตเกิดการยึดหดตัวและโดยทั่วไปเราจะพบว่า โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบส่วนใหญ่จะเป็นองค์ประกอบของอาคาร เช่น พื้น คาน เสา ฐานรากและโครงสร้างพิเศษอื่นได้แก่ โครงสร้างสะพาน ทางลอด อุโมงค์ เป็นต้น ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างที่รับน้ำหนักมาก ๆ ในการก่อสร้างจะต้องดำเนินการก่อสร้างฐานรากก่อนทุกครั้งเสมอ ดังนั้นฐานรากจึงเป็นโครงสร้างที่สำคัญที่สุดที่จะช่วยรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดของเพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติหรือทรุดตัวของโครงสร้าง

ฐานรากเสาเข็ม (Pile Caps) เป็นองค์อาคารในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสำคัญ ซึ่งทำหน้าที่รับแรงจากส่วนบนของโครงสร้างผ่านเสาตอม่อ ลงสู่ฐานรากไปยังกลุ่มเสาเข็ม (Salem & Maekawa, 2006) หรือพื้นดินแข็งในลำดับสุดท้าย โดยในการออกแบบต้องคำนึงถึงการรับแรงได้อย่างปลอดภัย ดินหรือเสาเข็มจะต้องไม่ทรุด หรือเสียรูปมากเกินไป (อมร พิมานเมศ, 2558) ดังนั้นเพื่อให้โครงสร้างมีเสถียรภาพและความแข็งแรงวิศวกรออกแบบจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องออกแบบฐานรากให้มีความปลอดภัยแข็งแรงและใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงมากที่สุด ซึ่งปัจจุบันมาตรฐาน ACI318-14 ได้กำหนดวิธีการออกไว้ 2 วิธี โดยวิธีแรกเรียกว่า ทฤษฎีคาน (Beam Theory) หรือโครงสร้างที่มีอาณาบริเวณ B (B-Region) สัญลักษณ์ B หมายถึง “Beam” หรือ “Bernoulli” จะใช้วิธีที่คล้ายกับการออกแบบคาน โดยอาศัยพฤติกรรมแรงดัดเป็นตัวควบคุม โดยใช้สมมุติฐานที่ว่า ความเครียดแปรผันอย่างเป็นเส้นตรงตลอดความลึกของหน้าตัด Nagarajan et al. (2010) โดยกำหนดให้ฐานรากมีสติฟเนส (Stiffness) สูง และสามารถกระจายแรงลงสู่เสาเข็มได้อย่างสม่ำเสมอ หรือมีการกระจายแรงแบบเชิงเส้น ส่วนการคำนวณแรงเฉือนนิยมใช้สูตรคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนของคาน ที่กำหนดในมาตรฐาน ACI318 โดยพิจารณาทั้งการวิบัติแรงเฉือนทางเดียว (One-Way Shear) หรือการวิบัติแรงเฉือนในคาน (Beam Shear) และการวิบัติแรงเฉือนสองทาง (Two-Way Shear) หรือการวิบัติด้วยแรงเฉือนทะลุ (Punching Shear) โดยกำลังรับแรงเฉือนของฐานรากจะขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยทฤษฎีดังกล่าวนี้ใช้ได้กับองค์อาคารที่มีความยาว ส่วนวิธีที่สองเรียกว่า วิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน หรือ วิธี

แบบจำลองสตรัทแอนด์ไทด์ (Strut-and-Tie Model) ซึ่งเรียกว่า “STM” เหมาะสำหรับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความลึกมาก ๆ โครงสร้างที่ขาดความต่อเนื่องขององค์อาคาร ซึ่งเรียกว่า อาณาบริเวณ D (D-region) สัญลักษณ์ D หมายถึง “Discontinuity” นั่นคือความเครียดไม่ได้แปรผันเป็นเส้นตรงตามความลึก (อมร พิมานเมศ, 2558) เช่น บริเวณที่มีแรงกระทำแบบจุด บริเวณใกล้ช่องเปิด หรือเปลี่ยนหน้าตัดกระทันหัน เช่น คานลึก คานถ่ายแรงในอาคารสูง กำแพงรับแรงเฉือน กำแพงรับน้ำหนัก แป้นหุ้ม คานบากบ่า คานปลายบาก ฐานรากลึก คานขวางบนเสา ตอม่อสะพาน สำหรับฐานรากเสาเข็มที่มีความลึก (d) มากๆ และมีระยะระหว่างเสาตอม่อกับเสาเข็ม (a) น้อยๆ โดยในทางปฏิบัติหากอัตราส่วน a/d มีค่าน้อยกว่า 1.0 พฤติกรรมของฐานรากจะถ่ายแรงแบบคานลึก (Deep Beam) มากกว่าพฤติกรรมที่คล้ายกับคานยาว (Long Beam) ซึ่งแรงที่กระทำจากเสาตอม่อจะถ่ายลงสู่เสาเข็มโดยตรงในรูปแบบแรงอัดทแยง ดังแสดงในภาพประกอบ 1 โดยทฤษฎีคานไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการถ่ายแรงในโครงสร้างเหล่านี้ได้อย่างถูกต้องตามความเป็นจริง



ภาพประกอบ 1 พฤติกรรมการถ่ายแรงของฐานรากลึก

จุดเริ่มต้นของวิธี STM เริ่มแรกถูกนำเสนอโดย Ritter ในปี ค.ศ. 1899 และ Mensch ในปี ค.ศ. 1909 ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นในปี ค.ศ. 1900 (Yun, 2000) และต่อมาโดย Schlaich et al. (1987) ในปี ค.ศ. 1987 ได้นำแนวคิดวิธี STM มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเหล็กเสริมรับแรงดัด และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนหรือเหล็กปลอกในคราวเดียวกัน โดยไม่จำเป็นต้องแยกพิจารณาเป็นการออกแบบรับโมเมนต์ดัดและการออกแบบรับแรงเฉือน โดยได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศยุโรปมาเป็นเวลานานแล้ว และได้เข้ามาเป็นหนึ่งในวิธีออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในข้อกำหนดของมาตรฐาน ACI318-02 ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 จนถึงปัจจุบัน โดยหลักการออกแบบด้วยวิธี STM เป็นวิธีที่อาศัยการจำลองโครงข้อหมุน (Truss Model) เสมือนมีโครงข้อหมุนขึ้นหนึ่งอยู่ภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อแสดงทิศทางภาพการไหลของแรง (Load Path) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง (Broms, 2018) ประกอบด้วยชิ้นส่วน 2 ประเภท คือ ชิ้นส่วนรับแรงอัด เรียกว่าท่อนแรงอัด (Strut) และชิ้นส่วนรับแรงดึง เรียกว่าท่อนรับแรงดึง (Tie) โดยชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงข้อหมุนจะมาบรรจบหรือพบกันที่ จุดต่อ (Node) ในการวิเคราะห์เพื่อหาแรงที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนต่างๆ ต้องอาศัยสมการสมดุลของแรงที่กระทำที่จุดต่อ และถ่ายแรงตามชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงข้อหมุนลงสู่ฐานรองรับ (Kumar et al., 2018) โครงข้อหมุนที่

เกิดขึ้นนี้เป็นแบบตีเทอมิเน็ต หรืออินตีเทอมิเน็ตก็ได้ โดยสามารถสร้างโครงข้อหมุนเพื่อการวิเคราะห์ได้ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิต น้ำหนัก หรือแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง และความซับซ้อนของโครงสร้าง ซึ่งการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ เหมาะสำหรับ คานสลัก คานปลายบากป่า คานบากป่า แป้นหูช้าง ฯลฯ และสำหรับการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ เหมาะสำหรับคานสะพานที่รับโมเมนต์ดัดหลายแกน ฐานราก และคานรับแรงบิด เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่การออกแบบด้วยวิธี STM จะเกี่ยวกับโครงสร้างคานสลัก แป้นหูช้าง แต่การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของฐานรากยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเกี่ยวกับการวิบัติของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบด้วยวิธี STM โดยกำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการรับกำลังของฐานรากที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จะทำให้สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างได้ โดยในทางปฏิบัติใช้การจำลองโครงสร้างตัวอย่างฐานรากในห้องปฏิบัติการขนาดมาตราส่วน 1 : 2 ของขนาดโครงสร้างจริง เนื่องจากในการปฏิบัติมาตราส่วน 1:1 ตัวอย่างมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้มีข้อจำกัดของเครื่องมือในการทดสอบ ทำให้การทดสอบปฏิบัติได้ยาก และมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งอ้างอิงจากแนวปฏิบัติที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Gajanan M. et al, 1984) และ (Gaurav R. et al, 2015) การทดสอบตัวอย่างฐานรากทั้งหมดถูกออกแบบให้เกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือน และทดสอบการแตกร้าว ตั้งแต่การแตกร้าวเริ่มต้น (Frist Crack) การแตกร้าวที่จุดคราก (Yield Crack) จนกระทั่งฐานรากเกิดการรับน้ำหนักที่กระทำสูงสุด (Ultimate Load) และเกิดการวิบัติ (Failure Load) ซึ่งทำการวัดระยะการแอ่นตัว และสังเกตพร้อมทั้งวิเคราะห์รูปแบบการแตกร้าวของฐานรากในลักษณะต่าง ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d) ต่อพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มที่ออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (Ac/AP) ต่อพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มที่ออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของรูปแบบจุดยึดรั้งที่แตกต่างกันต่อพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มที่ออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กจำลองย่อขนาดในมาตราส่วน 1:2 ของขนาดฐานรากจริง โดยออกแบบฐานรากเสาเข็มจำนวน 2 ต้น และ 4 ต้น ด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน และเลือกศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการวิบัติของฐานรากแตกต่างกันจากหลาย ๆ งานวิจัยที่ผ่านมา โดยมีขอบเขตของตัวอย่างฐานรากเสาเข็ม วัสดุที่ใช้ในงานทดลอง และวิธีการทดสอบดังมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

1.3.1 ออกแบบช่วงความยาวของแรงเฉือน (a) ต่อความลึกประสิทธิภาพ (d) หรือ Shear Span to Depth Ratio (a/d) ของฐานรากเสาเข็มแตกต่างกัน 4 อัตราส่วน เท่ากับ 1.50, 1.25, 1.00 และ 0.75 หรือมีความหนาเท่ากับ 10, 12, 15, และ 20 ซม. ตามลำดับ

1.3.2 ออกแบบอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาตอม่อ (c) ต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (p) เท่ากับ 1.0 1.5 และ 2.0 โดยมีขนาดเสาตอม่อ 3 ขนาด ได้แก่ 10x10, 15x15 และ 20x20 ซม. และมีขนาดเสาเข็ม 10x10 ซม.

1.3.3 ออกแบบจุดยึดตั้งในตำแหน่งบริเวณจุดต่อของฐานรากแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ ข้อง 90 องศา แผ่นเพลทขนาด 30x30 มม. หนา 3 มม. และแผ่นเหล็กฉาก L-30x30x30 มม. หนา 3 มม.

1.3.4 ขนาดตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ คือ ฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ขนาด 30 x 50 ซม. หนา 10, 12, 15 และ 20 ซม. และฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ขนาด 50x50 ซม. หนา 10, 12, 15 และ 20 ซม. กำหนดระยะหุ้มคอนกรีตของฐานรากเท่ากับ 2.5 ซม.

1.3.5 กำหนดรูปแบบการเสริมเหล็ก 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบกระจุกที่หัวเสาเข็ม (Bunched Square) และแบบตาราง (Grid)

1.3.6 ขนาดเสาเข็มและเสาตอม่อที่เลือกในงานวิจัยนี้ ใช้เสาเข็มเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้างxยาว 10x10 ซม. สูง 10 ซม. ภายในหล่อด้วยคอนกรีตแล้วเชื่อมเพลทขนาด 10x10 ซม. หนา 3 มม. เชื่อมปิดหัวท้าย และเสาตอม่อขนาด (กว้าง x ยาว) ประกอบด้วย 3 ขนาด ได้แก่ 10x10 ซม. 15x15 ซม. และ 20x20 ซม. มีความสูงเท่ากับ 5 ซม.

1.3.7 ออกแบบกำลังอัดประลัยเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 210 กก./ซม.²

1.3.8 เหล็กเสริมหลักใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด DB10 ชั้นคุณภาพ SD40 กำลังดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า $f_y = 4,000$ กก./ซม.² และเหล็กเสริมรองใช้เหล็กเส้นกลม RB6 ชั้นคุณภาพ SR24 กำลังดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า $f_y = 2,400$ กก./ซม.²

1.3.9 ขนาดมวลรวมหยาบใช้หินปูนขนาดโตสุดอยู่ในช่วง 3/10 – 3/8 หรือ 8 -10 มม.

1.3.10 กำหนดมุมระหว่างท่อนรับแรงอัดและท่อนรับแรงดึง อยู่ในช่วง 25 องศา – 53.3 องศา ตามคำแนะนำของข้อกำหนดของมาตรฐาน ACI (ACI Committee, 2008)

1.3.11 ทดสอบกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. และตัวอย่างฐานรากที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109 สำหรับตัวอย่างฐานรากบ่มด้วยกระสอบป่านชุ่มน้ำรดน้ำเข้าเย็น

1.3.12 ทดสอบตัวอย่างฐานรากด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ 300 ต้น

1.3.13 วัดค่าระยะการแอ่นตัวในระหว่างการทดสอบตัวอย่าง ด้วยอุปกรณ์ Dial Gauge และ LDVTs

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1 สามารถอธิบายถึงผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการออกแบบฐานรากเสาเข็ม โดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน

1.4.2 สามารถประยุกต์ใช้และเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กได้โดยใช้วิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ เบื้องต้นเพื่อที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม (Pile Cap) คอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนซึ่งประกอบด้วยหัวข้อดังนี้

- 2.1 ฐานรากและประเภทของฐานราก
- 2.2 งานเสาเข็มและประเภทของของเสาเข็ม
- 2.3 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 2.4 การออกแบบฐานรากเสาเข็มโดยวิธีกำลัง
- 2.5 พฤติกรรมในการรับน้ำหนักและการวิบัติของฐานรากเสาเข็ม
- 2.6 ทฤษฎีแบบจำลองโครงข้อหมุน
- 2.7 องค์ประกอบของแบบจำลองโครงข้อหมุน
- 2.8 การวิบัติในวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน
- 2.9 เงื่อนไขและข้อกำหนดในการสร้างและออกแบบด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน
- 2.10 ขั้นตอนการออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน
- 2.11 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน
- 2.12 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อฐานรากเสาเข็มที่ออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนที่เลือกศึกษา
- 2.13 รูปแบบการวิบัติของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแรงเฉือน
- 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฐานรากและประเภทของฐานราก

ฐานราก (Footing) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ใต้ผิวดิน ซึ่งมีหน้าที่หลักในการรับและกระจายน้ำหนักของโครงสร้างอาคารลงสู่ดินหรือสู่กลุ่มเสาเข็ม เพื่อความมั่นคงและเสถียรภาพของอาคาร ในปัจจุบัน ฐานรากที่ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในงานก่อสร้าง เนื่องจากสามารถก่อสร้างได้ง่าย รวดเร็ว และมีความแข็งแรงสูง นอกจากนี้ยังสามารถต้านทานต่อสภาพอากาศและปัจจัยภายนอกได้ดี ฐานรากสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ฐานรากแผ่ (Spread Footing) และฐานรากเสาเข็ม โดยสามารถอธิบายลักษณะของฐานรากแต่ละประเภทพอสังเขปดังนี้

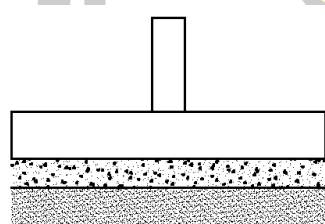
2.1.1 ฐานรากวางบนดิน

ฐานรากวางบนดิน หรือเรียกว่า ฐานรากแผ่ คือฐานรากที่ถ่ายน้ำหนักลงสู่ดินด้านล่างโดยตรงเพื่อให้ดินเป็นตัวรับน้ำหนักเหมาะกับสิ่งก่อสร้างที่ปลูกบนพื้นที่ ที่มีดินชั้นบนแข็ง ยากต่อการขุดเจาะ หรือเหมาะกับสิ่งก่อสร้างที่มีน้ำหนักไม่มาก โดยวางบนดินทรายที่บดอัดแน่น เช่น รั้ว หลังคา โรงจอดรถ (วัสดุหลังคาเบา) ซึ่งอาจมีการทรุดตัวได้ตามสภาพดินและน้ำหนักของสิ่งปลูกสร้าง โดยฐานรากวางบนดินสามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ ฐานรากแผ่เดี่ยว (Isolate Spread Footing) ฐานรากแผ่ร่วม (Combines Footings) และฐานรากแผ่ปูพรม (Mat or Raft Foundation) ดังภาพประกอบ 2(ก)

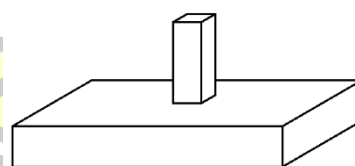
1) ฐานรากแผ่เดี่ยว เป็นฐานรากที่รับน้ำหนักของเสาหรือตอม่อเพียงต้น เดียว แล้วถ่ายน้ำหนักลงสู่ดิน ระยะห่างของเสาแต่ละต้นจะห่างกันไม่มากนัก สามารถออกแบบได้หลายรูปร่าง แต่ที่นิยมคือสี่เหลี่ยมจัตุรัสและผืนผ้า ดังภาพประกอบ 2(ข)

2) ฐานรากแผ่ร่วม ฐานรากแผ่ร่วม คือฐานรากที่มีตอม่อมากกว่า 2 ต้นขึ้นไปอยู่รวมในฐานรากเดียวกัน มักใช้ในกรณีที่ไม่สามารถทำฐานรากแผ่เดี่ยวแยกกันได้ เช่น อาคารที่มีช่วงเสาห่างกันประมาณ 1.5 – 2 เมตร ดังภาพประกอบ 2(ค)

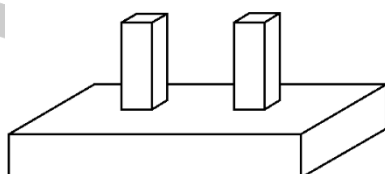
3) ฐานรากแผ่ปูพรม มีลักษณะเป็นฐานแผ่ร่วมขนาดใหญ่เป็นผืนเดียวกันทั้งหมด เสาทุกต้นจะวางอยู่บนฐานรากนี้ มักใช้ในกรณีที่ดินมีความสามารถในการรับแรงน้อย ซึ่ง ส่งผลให้ต้องมีเสาคั่นข้างถี่ การทำฐานรากร่วมกันจึงทำได้ง่ายกว่า และเพิ่มความแข็งแรงในการรับน้ำหนักได้มากขึ้น ดังภาพประกอบ 2(ง)



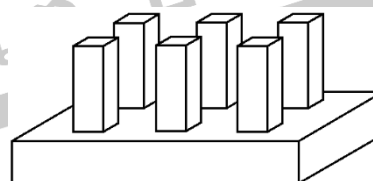
ก. ฐานรากวางบนดิน



ข. ฐานรากแผ่เดี่ยว



ค. ฐานรากแผ่ร่วม



ง. ฐานรากแผ่ปูพรม

ภาพประกอบ 2 ลักษณะและชนิดของฐานรากวางบนดิน

2.1.2 ฐานรากที่มีเสาเข็มรองรับ

ฐานรากที่มีเสาเข็มรองรับ (Pile Caps) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างสำหรับรับน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อแล้วส่งถ่ายไปยังเสาเข็มและสู่ชั้นดินแข็ง หรือชั้นหินที่มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้ โดยเหมาะกับสิ่งก่อสร้างที่ปลูกบนพื้นที่ที่มีชั้นดินอ่อน ต้องอาศัยเสาเข็มในการถ่ายน้ำหนักไปยังชั้นดินแข็งที่อยู่ลึกลงไปในแต่ละพื้นที่ ซึ่งมีระยะความลึกของชั้นดินแข็งไม่เท่ากัน เช่น ในพื้นที่กรุงเทพฯ ฐานรากเสาเข็มรองรับ ยังแบ่งประเภทของเสาเข็มที่มารับน้ำหนักได้อีก 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1) ฐานรากเสาเข็มสั้น (Friction Pile) เป็นฐานรากที่แบกรับน้ำหนักไม่มากนัก และก่อสร้างอยู่บนชั้นดินอ่อน เช่น อาคารบ้านพักอาศัยทั่วไปที่ปลูกสร้างในเขตภาคกลาง การแบกรับน้ำหนักของเสาเข็ม จะอาศัยความเสียดทาน (Friction) ของดินที่มาเกาะรอบๆ ตัวเสาเข็มเท่านั้น ความยาวของเสาเข็มสั้นที่สะดวกต่อการปฏิบัติงานโดยทั่วไป จะมีความยาวประมาณ 6-16 เมตร ถ้าความยาวไม่เกิน 6 เมตร ก็สามารถใช้แรงงานคนและสามเกลอตกลงไปได้ แต่ถ้ายาวมากกว่า 6 เมตรขึ้นไป จะต้องใช้ปั้นจั่นเป็นเครื่องตอก

2) ฐานรากเสาเข็มยาว (Bearing Pile) เป็นฐานรากที่ต้องแบกรับน้ำหนักมาก และก่อสร้างอยู่บนชั้นดินอ่อน เช่น อาคารสำนักงาน โรงงานอุตสาหกรรม โรงแรม ห้างสรรพสินค้า ฯลฯ การแบกรับน้ำหนักของเสาเข็มยาวนี้ จะต้องอาศัยทั้งความเสียดทานของดิน และการแบกรับน้ำหนักที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) และยังสามารถแบ่งย่อยออกไปอีกตามลักษณะของน้ำหนักบรรทุกและสภาพสถานที่ก่อสร้างอีกด้วย

2.1) ฐานต่อเนื่องรับกำแพง (Continuous Footing for Wall หรือ Wall footing)

2.2) ฐานเดี่ยวเป็นฐานรองรับน้ำหนักจากเสาเป็นจุด ๆ แยกห่างจากกัน

2.3) ฐานร่วม (Combined Footing) เป็นฐานรองรับน้ำหนักจากเสาหลาย ๆ ต้น มีตำแหน่งอยู่ใกล้กัน

2.4) ฐานรากแบบแพ (Raft Foundation) เป็นฐานที่แผ่กระจายบนพื้นที่กว้างมาก ๆ บางครั้งอาจกระจายเต็มพื้นที่อาคาร

2.5) ฐานชนิดมีคานรัด (Strap Footing) ในบางกรณีเสาอาคารอาจอยู่ชิดเขตที่ดินจึงไม่สามารถจะให้น้ำหนักถ่ายลงศูนย์กลางของฐานได้กรณีนี้อาจทำฐานเป็นรูปตีนเป็ดแล้วใช้คานยึดรั้ง (Strap Beam) ยึดกับฐานในส่วนกลางของอาคาร

2.1.3 ฐานรากแผ่ (Spread Footing) คือ ฐานรากที่แบกรับน้ำหนักจากตัวอาคารแล้วถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินโดยตรง ดังนั้นในการเลือกใช้ฐานรากประเภทนี้ จึงต้องคำนึงถึงปัจจัยทางด้านขนาดของน้ำหนักที่บรรทุก และกลสมบัติของดินที่สามารถรับน้ำหนักได้ในท้องถิ่นนั้น ๆ เช่น บริเวณภาคกลาง และเขตกรุงเทพมหานคร กำหนดให้ดินมีความสามารถในการรับน้ำหนักปลอดภัยได้

ประมาณ 2 ตัน/ตารางเมตร ในขณะที่ภาคเหนือ ภาคอีสาน และภาคใต้ ดินจะมีความสามารถรับน้ำหนักปลอดภัยได้ประมาณ 8-15 ตันต่อตารางเมตร และบริเวณที่อยู่ใกล้เชิงเขาหรือหาดทราย จะสามารถรับน้ำหนักปลอดภัยได้โดยประมาณ 15-30 ตันต่อตารางเมตร

2.2 งานเสาเข็มและประเภทของของเสาเข็ม

2.2.1 งานเสาเข็ม

เสาเข็ม (Pile) เป็นส่วนประกอบของฐานรากในการถ่ายน้ำหนักของฐานรากลงสู่ดิน เนื่องจากต้องการลดขนาดของฐานราก จากกรณีที่ฐานรากรับน้ำหนักบรรทุกจากเสาตอม่อมาก และกำลังรับน้ำหนักของดินในพื้นที่มีคุณสมบัติการรับน้ำหนักได้น้อย เช่น ดินเหนียว เป็นต้น เสาเข็มที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือเสาเข็มตอก และเสาเข็มเจาะ

1) เสาเข็มตอก (Driven Pile)

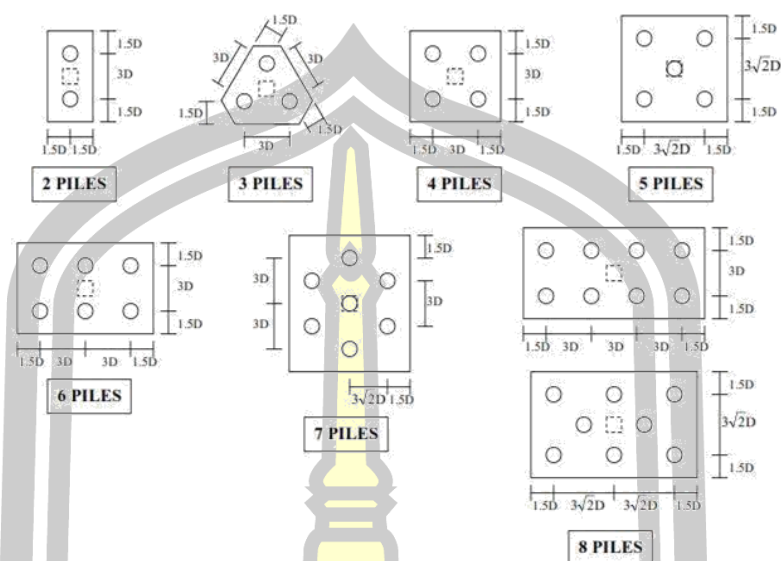
เสาเข็มประเภทนี้ติดตั้งโดยการใช้ปั้นจั่นตอกเสาเข็มลงไปในดินจนได้ความลึกที่ต้องการ เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากวิธีการก่อสร้างไม่ซับซ้อนและค่าใช้จ่ายไม่สูง เหมาะสำหรับพื้นที่การก่อสร้างอาคารที่ไม่มีอาคารข้างเคียง เนื่องจากแรงสั่นสะเทือนในการตอกและการเคลื่อนตัวของดินที่ถูกแทนที่ อาจทำให้อาคารข้างเคียงเกิดความเสียหาย

2) เสาเข็มเจาะหล่อในที่ (Bored Pile)

เสาเข็มประเภทนี้ติดตั้งโดยหล่อคอนกรีตลงไปในดินที่ถูกเจาะเป็นหลุมไว้ล่วงหน้าให้เต็ม เป็นวิธีการก่อสร้างที่ช่วยแก้ปัญหาที่ พบในการใช้เสาเข็มตอก ทั้งการขนย้ายเสาเข็มเข้าพื้นที่ก่อสร้าง การรบกวนอาคารรอบข้างเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนจากการตอก รวมทั้งการควบคุมตำแหน่งและแนวของเสาเข็ม

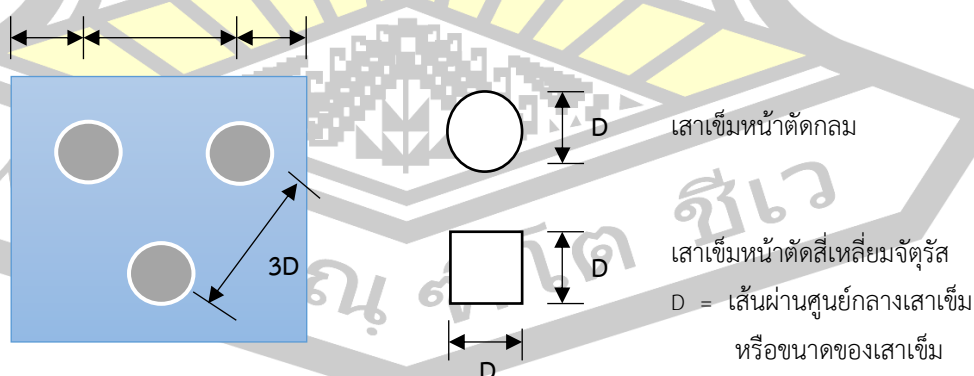
2.2.2 เสาเข็มกลุ่ม (Pile Group)

การใช้เสาเข็มสำหรับงานฐานรากของโครงสร้าง หากมีน้ำหนักกระทำลงสู่ฐานรากมากกว่าความสามารถของเสาเข็มเดียวที่จะรับได้ จำเป็นที่จะต้องออกแบบเสาเข็มหลายๆ ต้น เพื่อรับน้ำหนักจากเสาตอม่อ โดยมีการจัดรูปแบบของเสาเข็มเมื่อใช้เสาเข็มหลายๆ ต้น เพื่อให้เกิดโมเมนต์ที่ฐานรากน้อยที่สุด ดังภาพประกอบ 3 และการใช้เสาเข็มเดียวอาจเกิดปัญหาเนื่องจากโมเมนต์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเอียงศูนย์ของเสาเข็ม หรืออาจแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการพยายามจัดให้กลุ่มเสาเข็มอยู่ใกล้กับเสาตอม่อมากที่สุด หรือจัดฐานรากให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือใกล้เคียงกับรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมากที่สุดหรืออาจใช้คานยึดหัวเสาเข็ม เพื่อทำหน้าที่กระจายโมเมนต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเอียงศูนย์หรือใช้เสาเข็ม 2 ต้นต่อฐานราก หรือใช้เข็ม 3 ต้น หรือมากกว่านี้รับเสาเข็มอาคารที่เกิดการเอียงศูนย์ของเสาเข็มกลุ่ม



ภาพประกอบ 3 ตัวอย่างการจัดรูปแบบฐานเสาเข็มหลายต้น

ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม ในการก่อสร้างฐานรากเสาเข็ม สิ่งที่ต้องคำนึงถึงที่จะทำให้เสาเข็มมีประสิทธิภาพและใช้งานได้อย่างเต็มที่ คือ ระยะห่างที่เหมาะสมของเสาเข็ม เนื่องจากถ้าเสาเข็มมีระยะห่างมากเกินไปจะทำให้เกิดโมเมนต์คดในฐานรากคูลุมหัวเสาเข็มเพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นจะต้องเพิ่มขนาดและเหล็กเสริมในฐานราก โดยในการคำนวณและเลือกระยะห่างระหว่างเสาเข็ม มีแนวทางและข้อกำหนดดังนี้ จะต้องจัดเสาเข็มให้มีระยะห่างระหว่างเสาเข็มอยู่ในช่วง 2 -3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม และจัดให้มีระยะจากศูนย์กลางเสาเข็มถึงขอบฐานรากประมาณ 1 – 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มในฐานราก

ในกรณีของเสาเข็มกลุ่มแบบที่มีแรงเสียดทานเป็นหลัก ถ้าเสาเข็มมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มมาก จะทำให้มีการซ้อนทับของหน่วยแรง (Stress Overlap) เกิดขึ้นน้อย และในทางกลับกัน ถ้าระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อย จะทำให้เสาเข็มอยู่ใกล้กันจะทำให้เกิดการซ้อนทับของหน่วยแรง ซึ่งส่งผลให้มีผลกระทบต่อการรับกำลังของเสาเข็มทำให้มีกำลังลดน้อยลง สำหรับในตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ทำให้ราคาคานรากน้อยที่สุด โดยคำนึงถึงหน้าที่ของเสาเข็มในลักษณะแตกต่างกันดังนี้

ตาราง 1 ระยะห่างระหว่างเสาเข็มที่ทำให้ราคาของฐานรากน้อยที่สุด

หน้าที่ของเสาเข็ม	ระยะห่างของจุดศูนย์กลางเสาเข็ม
ปลายเข็มวางอยู่บนชั้นดินแข็ง (กำลังส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็ม)	2D – 2.5D
ปลายเข็มวางอยู่บนชั้นหิน (กำลังส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ปลายเสาเข็ม)	2D
เสาเข็มที่มีกำลังส่วนใหญ่จากแรงเสียดทานที่ผิว	3D – 5D

*** D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย ในการปฏิบัติงานทั้งการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุ ซึ่งต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ฯ (วสท.) สำหรับหน่วยงานที่ดูแลในการควบคุมเกี่ยวกับกฎหมายด้านงานก่อสร้างเพื่อให้โครงสร้างมีความคงทนแข็งแรง ได้แก่ กรมโยธาธิการและผังเมือง สังกัดกระทรวงมหาดไทย มาตรฐานฉบับแรกของ วสท. มีเนื้อหาส่วนใหญ่เป็นไปตามวิธีหน่วยแรงใช้งาน หรือ Working Stress Design (WSD) ของ American Concrete Institute (ACI318-63) และส่วนหนึ่งเป็นไปตามวิธีกำลังประลัย Ultimate Strength Design (USD) ของ American Concrete Institute (ACI318-71) (อเนก ศิริพานิชกร, 2562) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กปัจจุบันนิยมใช้ในประเทศไทยมีอยู่ 2 วิธี คือ 1) วิธีหน่วยแรงใช้งาน และ 2) วิธีกำลัง ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ จากงานวิจัยของ กฤตินี เมฆอรุณกมล (2545) กล่าวโดยสรุปว่า โครงสร้างที่ออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน สามารถรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้มากกว่าการออกแบบด้วยวิธีกำลัง ซึ่งถือว่าปลอดภัยกว่า แต่ถ้าพิจารณาในแง่ของความปลอดภัยขณะใช้งานแล้ว พบว่าการวิบัติของโครงสร้างตัวอย่าง ซึ่งคำนวณออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานเป็นการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคาน ซึ่งเป็นการวิบัติอย่าง

ฉบับพิมพ์ ซึ่งถือว่าเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน โดยสามารถอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบทั้งสองวิธีได้ดังนี้

2.3.1 การออกแบบด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน

วิธีหน่วยแรงใช้งาน ใช้พื้นฐานของ “ทฤษฎียืดหยุ่น (Elastic Theory)” เนื่องจากตั้งสมมุติฐานว่า “โครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่น” วิธีนี้จะจำกัดไม่ให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็กเสริมเกินค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ เช่น

$$\text{หน่วยแรงในคอนกรีต} \quad (f_c) \leq \alpha_c f'_c \quad (2.1)$$

$$\text{หน่วยแรงในเหล็กเสริม} \quad (f_s) \leq \alpha_s f_y \quad (2.2)$$

เมื่อ $\alpha_c f'_c$ คือ หน่วยแรงที่ยอมให้ในคอนกรีตและ $\alpha_s f_y$ คือหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ในเหล็กเสริม และค่า α_c , α_s ดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ค่าตัวคูณสำหรับการจำกัดค่าหน่วยแรงในวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตัวคูณ	วสท.	กฎกระทรวงฯ
α_c ,	0.45	0.375
α_s	0.50	0.50

ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าตลอดชีวิตของโครงสร้างจะไม่เกิดการแตกร้าวและมีการเคลื่อนตัวที่ต่ำ ในสหรัฐอเมริกาวิธีนี้นิยมในช่วง ค.ศ.1900 - ค.ศ.1963 โดยในปัจจุบันเลิกใช้แล้ว แต่สำหรับเมืองไทยยังนิยมใช้อยู่ วิธีนี้วิเคราะห์โครงสร้างใน “ช่วงใช้งาน (Service Stage)” ดังนั้นน้ำหนักที่ใช้ออกแบบจึงเป็นน้ำหนักใช้งาน (Working Load) คือ การรวมแรงเพื่อกออกแบบ (W) : น้ำหนักคงที่ (DL) + น้ำหนักจร (LL) ดังสมการ 2.3

$$W = W_{DL} + W_{LL} \quad (2.3)$$

2.3.2 การออกแบบด้วยวิธีกำลัง

วิธีกำลังในอดีตตามมาตรฐาน วสท. และยังคงใช้ตามกฎกระทรวงฯ เรียกว่า “วิธีกำลังประลัย” เนื่องจากพิจารณากำลังของโครงสร้าง ณ ภาวะประลัย (Ultimate Stage) ซึ่งจะกำหนดให้ “กำลังระบุขององค์อาคาร (Nominal Strength, R_n)” ซึ่งลดค่าแล้ว มีค่ามากกว่า “น้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้ว (Overload, Q_u)” ดังสมการ 2.4

$$\phi R_n > Q_u \quad (2.4)$$

เมื่อ ϕ คือ ตัวคูณลดค่าเนื่องจากความไม่แน่นอน ซึ่งมาจากความไม่แน่นอนของวัสดุและการก่อสร้าง (มีค่าน้อยกว่า 1.0) เนื่องจากวิธีนี้เป็นการวิเคราะห์ในภาวะประลัย ดังนั้นน้ำหนักที่ใช้ออกแบบจึงเป็น น้ำหนัก ประลัย (Ultimate Load, W_u) ซึ่งคำนวณจากการเพิ่มค่า (Overload) ให้กับน้ำหนักบรรทุกในช่วงปกติ ดังสมการ 2.5

$$W_u = \gamma_{DL} W_{DL} + \gamma_{LL} W_{LL} \quad (2.5)$$

เมื่อ γ_{DL} คือ ตัวคูณเพิ่มค่ากรณีน้ำหนักบรรทุกคงที่ และ γ_{LL} คือ ตัวคูณเพิ่มค่ากรณีน้ำหนักบรรทุกจร ทั้งนี้ค่า γ_{DL} และ γ_{LL} เป็นไปตามตาราง 3

ตาราง 3 ค่าตัวคูณสำหรับการจำกัดค่าหน่วยแรงในวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก

มาตรฐาน	γ_{DL}	γ_{LL}
วสท.	1.4	1.7
กฎกระทรวงฯ	1.7	2.0
ACI318-14	1.2	1.6

ตาราง 4 ข้อเปรียบเทียบสำหรับวิธีการออกแบบระหว่างวิธีหน่วยแรงใช้งานและวิธีกำลัง

วิธีหน่วยแรงใช้งาน	วิธีกำลัง
ควบคุมไม่ให้อายุการใช้งานที่เกิดขึ้นเกินกว่า หน่วยแรงที่ยอมให้ทำให้ ไม่สามารถคำนวณกำลังที่แท้จริง ของโครงสร้างได้	สามารถคำนวณกำลังที่แท้จริงของ โครงสร้าง ทำให้สามารถกำหนด สัดส่วนความปลอดภัย (F.S.) รวมถึง สามารถวางแผนทางการเสริมกำลัง โครงสร้างได้อย่างถูกต้อง

การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลังได้ถูกพัฒนาขึ้นมาแทนที่การออกแบบโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ซึ่งมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

1) วิธีหน่วยแรงใช้งาน ซึ่งไม่สามารถระบุถึงกำลังที่แท้จริงของโครงสร้างได้ เนื่องจากในการออกแบบนั้นจะควบคุมไม่ให้อายุการใช้งานที่เกิดขึ้นเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ ในขณะที่วิธีกำลังสามารถคำนวณกำลังที่แท้จริงของโครงสร้าง ทำให้ทราบถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่โครงสร้างจะรับได้

2) ความปลอดภัยของวิธีกำลัง กำหนดความปลอดภัยไว้แล้วถึงสองชั้น โดยผ่านทาง
 1) ตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก (γ) และ 2) ตัวคูณลดกำลัง (ϕ) ตัวคูณทั้งสองสร้างมาจากการวิจัยและวิธีทาง
 สถิติที่มีความสมเหตุสมผลกว่าวิธีหน่วยแรงใช้งาน (สามารถเปลี่ยนแปลงได้แล้วแต่ดุลยพินิจของ
 ผู้ออกแบบ) เห็นได้จาก γ_{DL} มีค่ามากกว่า γ_{LL} เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจรมีความไม่แน่นอนมากกว่า
 น้ำหนักบรรทุกคงที่

3) วิธีหน่วยแรงใช้งานไม่ได้พิจารณาอิทธิพลจากการคืบ (Creep) และการหดตัว
 (Shrinkage) ของคอนกรีต ในภาวะที่โครงสร้างรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน คอนกรีตจะเกิดการคืบและ
 การหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำ ทำให้ค่าสถิติพเนของคอนกรีตลดลง เป็นผลให้หน่วยแรงในเหล็ก
 เสริมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานจึงมีความไม่แม่นยำ แต่ในขณะที่การ
 ออกแบบด้วยวิธีกำลังจะพิจารณาหน้าตัดที่ภาวะวิบัติซึ่งไม่มีอิทธิพลของ การคืบและการหดตัวของ
 คอนกรีตแต่อย่างใด

4) วิธีกำลังสามารถคำนวณความเหนียวของหน้าตัด ซึ่งจำเป็นต่อการออกแบบเพื่อ
 ด้านแรงแผ่นดินไหว

5) อีกทั้งวิธีกำลังสามารถออกแบบหน้าตัดให้มีความประหยัดเนื่องจากใช้กำลังของ
 หน้าตัด อย่างเต็มที่ ซึ่งทำให้ได้หน้าตัดที่เล็กกว่าหน่วยแรงใช้งาน เนื่องจากความปลอดภัยที่สามารถ
 กำหนดได้

ในการคำนวณส่วนต่างๆ ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามทฤษฎีกำลังประลัยให้ใช้
 น้ำหนัก บรรทุกประลัยดังต่อไปนี้

สำหรับส่วนของอาคารที่ไม่คิดแรงลม ให้ใช้น้ำหนักบรรทุกประลัย ดังสมการ 2.6

$$W_u = 1.7DL + 2.0LL \quad (2.6)$$

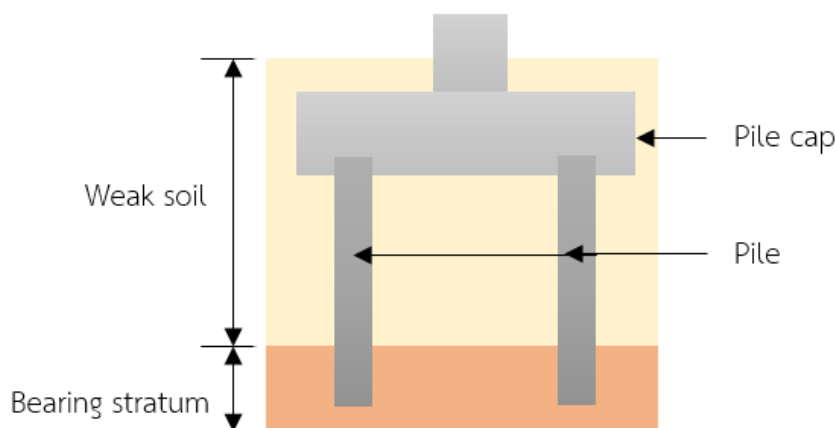
สำหรับส่วนของอาคารที่คิดแรงลม (WL) ด้วย ให้ใช้น้ำหนักบรรทุกประลัยดังสมการ
 2.7 และสมการ 2.8

$$W_u = 0.75(1.7DL + 2.0LL + 2.0WL) \quad (2.7)$$

$$W_u = 0.9DL + 1.3WL \quad (2.8)$$

2.4 การออกแบบฐานรากเสาเข็มโดยวิธีกำลัง

จากที่กล่าวมาแล้วเบื้องต้น ฐานรากเสาเข็มเหมาะสำหรับการก่อสร้างในบริเวณพื้นที่ ซึ่งมีชั้นดินอ่อนรับน้ำหนักได้น้อย โดยฐานรากเสาเข็มจะทำหน้าที่ส่งผ่านแรงจากเสาตอม่อลงสู่เสาเข็ม ดังนั้นจึงเรียกว่า ฐานรากเสาเข็ม โดยมีลักษณะดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ฐานรากเสาเข็ม

โดยกำลังของเสาเข็มแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ ความฝืดหรือแรงฝืด (Skin Friction) ที่ผิวเสาเข็มโดยรอบ กำลังในส่วนนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และส่วนที่สองกำลังได้จากแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing) ซึ่งปลายเสาเข็มจะอยู่บนชั้นดินแข็งหรือหิน กำลังส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับชั้นดินที่รองรับและขนาดพื้นที่ของเสาเข็ม

2.5 พฤติกรรมในการรับน้ำหนักและการวิบัติของฐานรากเสาเข็ม

2.5.1 การกระจายน้ำหนักของฐานรากลงบนเสาเข็ม

1) ฐานรากรับน้ำหนักตรงศูนย์ จำนวนเสาเข็มที่ใช้ในแต่ละฐานรากหาได้จาก น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากเสาตอม่อถ่ายลงสู่ฐานรากหารด้วยน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม ซึ่งปกติทั่วไปจะมีตัวคูณค่าความปลอดภัยไม่น้อยกว่า 2.5 (Factor of Safety) โดยการออกแบบฐานรากบนหัวเสาเข็มจะคล้ายกับการออกแบบฐานรากเสาเดี่ยว ซึ่งจะได้น้ำหนักประลัยที่รับโดยเสาเข็มแต่ละต้น ดังแสดงในสมการ 2.9

$$q = \frac{P}{n} < q_a \quad (2.9)$$

เมื่อ P คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (1.4DL+1.7LL) q คือ กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละต้น
 q_a คือ กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม และ n คือ จำนวนเสาเข็มที่ต้องการ

2) ฐานรากรับน้ำหนักเยื้องศูนย์ ในกรณีฐานรากเสาเข็มรับน้ำหนักเยื้องศูนย์ เมื่อมีโมเมนต์ถ่ายผ่านลงมาจากตอม่อ เช่น เมื่อโครงสร้างรับแรงด้านข้าง ได้แก่ แรงแผ่นดินไหว แรงลม และความคลาดเคลื่อนในการตอกหรือติดตั้งเสาเข็มไม่สามารถตอกหรือติดตั้งเสาเข็มได้ตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้ เสาเข็มแต่ละต้นจะรับน้ำหนักไม่เท่ากันโดย เสาเข็มทางด้านหนึ่งจะรับน้ำหนักมากกว่าอีกด้านหนึ่ง สามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.10

$$q = \frac{P}{n} \pm \frac{M d_n}{M d_n^2} \quad (2.10)$$

เมื่อ P คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (1.4DL+1.7LL) q คือ กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มแต่ละต้น
 q_a คือ กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็ม n คือ จำนวนเสาเข็มที่ต้องการ และ d_n คือ ระยะระหว่างศูนย์กลางเสาเข็มเข็มไปยังจุดหมุน

2.5.2 พฤติกรรมการวิบัติของฐานรากเสาเข็ม

1) การวิบัติเนื่องจากโมเมนต์ดัด

ในการคำนวณออกแบบฐานรากจะสมมุติว่าส่วนของฐานรากกับเสาตอม่อยึดกันเป็นโครงข้อแข็ง ดังนั้นตรงระยะที่ตัดผ่านฐานรากและใกล้กับขอบเสาตอม่อจะถือเป็นตำแหน่งที่ฐานราก ต้องรับโมเมนต์ดัดมากที่สุด นั่นคือที่ตำแหน่งนี้มีลักษณะเหมือนเป็นแบบยึดแน่น และเรียกตรงตำแหน่งนี้ว่า หน้าตัดวิกฤติสำหรับการพิจารณาหาโมเมนต์ดัด เนื่องจากแรงเฉือนค่ามากที่สุด ดังนั้นจึงเป็นหน้าตัดวิกฤติ

2) การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน

ในฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กมีการวิบัติด้วยแรงเฉือน 2 แบบ ดังนี้

2.1) การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในคาน (Beam Shear) หรือ แรงเฉือนทางเดียว (One-Way Shear) เมื่อพิจารณาฐานรากเสมือนหนึ่ง เป็นคานกว้าง (Wide Beam) การวิบัติจะเกิดตรงระยะที่ห่างจากขอบเสาตอม่อเป็นระยะเท่ากับความลึกประสิทธิภาพ (d) โดยจะปรากฏรอยร้าวเป็นแนวทแยงเฉียงทำมุมประมาณ 45 องศา ซึ่งในทางปฏิบัติจะออกแบบให้ฐานรากมีความหนา

พอเพียงโดยให้คอนกรีตทำหน้าที่ต้านทานแรงเฉือนแต่เพียงอย่างเดียว (แต่ในกรณีที่ฐานรากมีความหนามากกว่า 25 ซม. อาจพิจารณาเสริมเหล็กรับแรงเฉือนด้วยก็ได้) ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักจะให้ $V_n = V_c$ โดยที่ V_c เป็นกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตสำหรับแรงเฉือนทางเดียวหาได้จาก สมการ 2.11

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2.11)$$

เมื่อ b_w คือ ความกว้างของฐานราก (ซม.) และ d คือ ความลึกประสิทธิภาพ (ซม.)

2.2) การวิบัติด้วยแรงเฉือนทะลุ (Punching Shear) หรือ แรงเฉือนสองทาง (Two Way Shear) วิบัติโดยเสาเจาะทะลุตามแนวรอยร้าวทแยงมุมเอียงประมาณ 45 องศา ผ่านฐานราก เป็นรูปปิรามิดหรือกรวยเหลี่ยมสำหรับเสาที่มีรูปตัดสี่เหลี่ยม และอาจเป็นกรวยกลมสำหรับเสาที่มีรูปตัดกลม ซึ่งหน้าตัดวิกฤติของแรงเฉือนทะลุจะพิจารณาตามแนวของเส้นขอบที่ห่างจากขอบเสาต่อม่อ เป็นระยะครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิภาพ ($d/2$) สำหรับวิธีกำลังข้อกำหนดของ ACI ยอมให้ใช้ค่ากำลังเฉือนสองทาง V_c ในฐานราก โดยเลือกค่าน้อยที่สุดจากสมการ ต่อไปนี้

$$\text{สูตรทั่วไป} \quad V_c = 1.06 \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.12)$$

$$\text{สำหรับเสาที่มีด้านยาวไม่เท่ากัน} \quad V_c = 0.27 \left(2 + \frac{4}{\beta_c} \right) \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.13)$$

$$\text{ในกรณีอัตราส่วน } b_0/d \text{ มีค่ามาก} \quad V_c = 0.27 \left(\frac{\alpha_s d}{b_0} + 2 \right) \sqrt{f'_c} b_0 d \quad (2.14)$$

เมื่อ β_c คือ อัตราส่วนระหว่างด้านยาวต่อด้านสั้นของเสา (a/b) b_0 คือ ความยาวเส้นรอบรูปที่ระยะ $d/2$ จากผิวเสา และ α_s เท่ากับ 40, 30 และ 20 สำหรับภายในเสา เสาริม และเสามุมตามลำดับ

2.5.3 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากเสาเข็ม

โดยขั้นตอนการออกแบบฐานด้วยวิธีกำลัง มีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

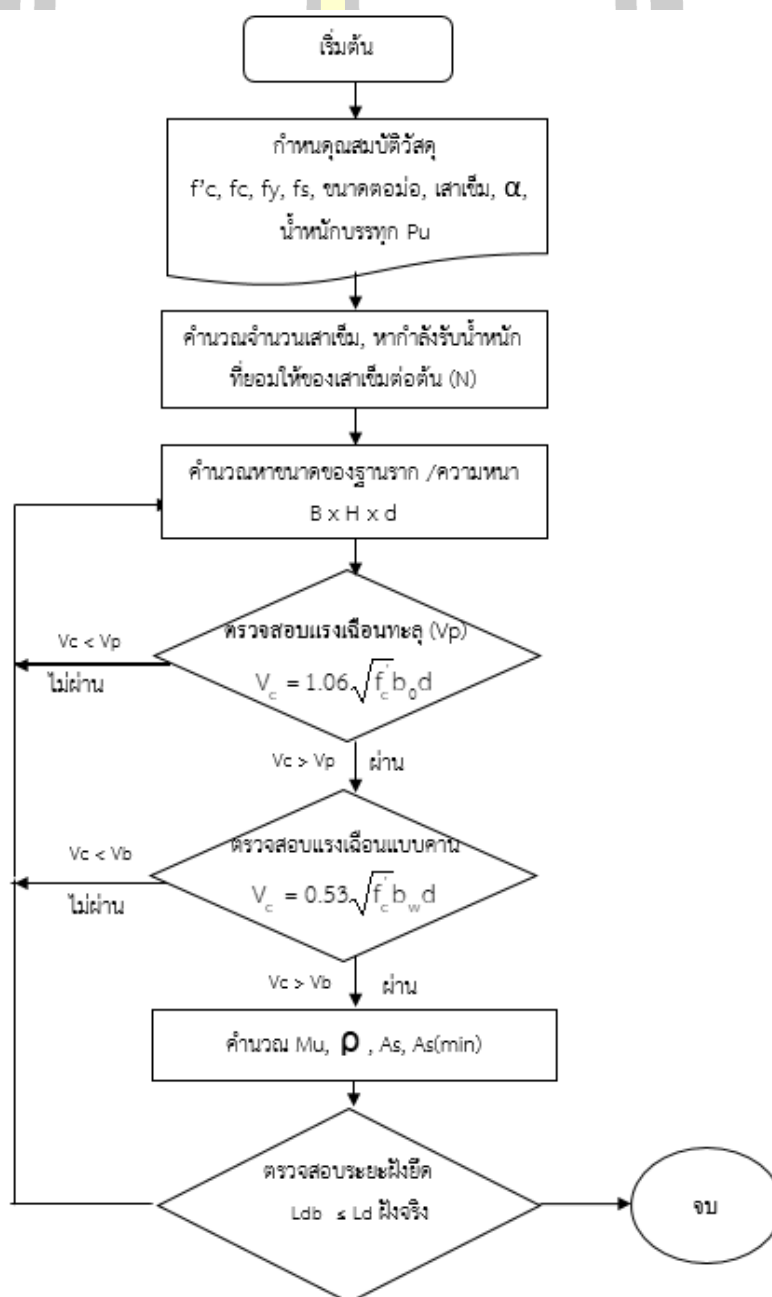
- 1) หากำลังรับน้ำหนักที่ยอมให้ของเสาเข็ม
- 2) คำนวณหาแรงและโมเมนต์ดัด เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานกระทำ
- 3) คำนวณหาขนาดพื้นที่ ของฐานรากที่ต้องการ
- 4) คำนวณหาแรงและโมเมนต์ดัดที่เพิ่มค่าแล้ว ด้วยตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก

5) หาความลึกประสิทธิภาพ (d) ของฐานราก โดยพิจารณาจากกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตทั้งแบบแรงเฉือนทางเดียว และแบบแรงเฉือนสองทาง

6) คำนวณหาโมเมนต์ดัด (M_u) ที่หน้าตัดวิกฤตของแต่ละทิศทาง และหาปริมาณเหล็กเสริมฐานรากที่ต้องการใช้ในทิศทางนั้น ๆ

7) เลือกขนาดของเหล็กเสริม และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมในแต่ละทิศทาง

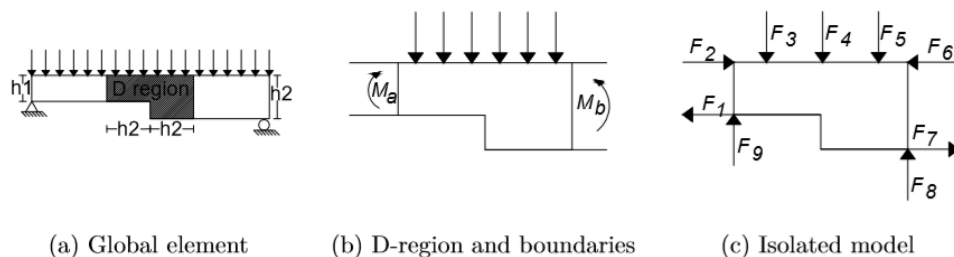
8) ตรวจสอบเกี่ยวกับแรงกดอัด และที่ฐานรากตลอดจนระยะฝังยึด



ภาพประกอบ 6 ขั้นตอนออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง

2.6 ทฤษฎีแบบจำลองโครงข้อหมุน

วิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน (Strut and Tie Model) หรือ วิธี STM สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นวิธีการที่อาศัยการจำลองโครงข้อหมุน (Truss) เพื่อแสดงทิศทางการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อนและโครงสร้างทั่วไป โดยแนวคิดในการใช้โครงข้อหมุนในการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กถูกนำเสนอโดย Schlaich และคณะในปีค. ศ. 1987 โดย (Schlaich et al., 1987) ได้ประยุกต์วิธีโครงข้อหมุนจำลอง (Truss Analogy) ของ (Ritter, 1899) มาเป็นแนวคิดเริ่มแรก การใช้โครงข้อหมุนแบบจำลองในการวิเคราะห์โครงสร้าง สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเหล็กเสริมรับแรงดัด และเหล็กเสริมรับแรงเฉือน หรือเหล็กปลอกในคราวเดียวกัน (Collins & Mitchell, 1980) โดยไม่จำเป็นต้องแยกพิจารณาเป็นการออกแบบรับโมเมนต์ดัดและการออกแบบรับแรงเฉือน ซึ่งในการออกแบบโครงสร้างโดยทั่วไป กำหนดวิธีการออกแบบไว้ 2 วิธี โดยวิธีที่หนึ่งเรียกว่า ทฤษฎีคาน (Beam Theory) หรือโครงสร้างที่มีอาณาบริเวณ B (B-region) สัญลักษณ์ B หมายถึง “Beam” หรือ “Bernoulli” โดยหลักการของเบอร์นูลลี กล่าวว่าความเครียดแปรผันเป็นเส้นตรงตลอดความลึกของหน้าตัด เป็นผลให้ระนาบก่อนรับแรงดัดยังคงความเป็นระนาบหลังจากได้รับแรงดัด (Plane Section Remains Plans) และตรวจสอบแรงเฉือน (Shear) เช่นเดียวกันกับคานที่มีช่วงความยาวเท่ากับระยะห่างระหว่างเสาเข็ม และวิธีที่สอง เรียกว่า วิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยการจำลองโครงข้อหมุน (Truss) เพื่อแสดงทิศทางการไหลของแรงภายใน (Load Path) ที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้าง เหมาะสำหรับการวิเคราะห์บริเวณ โครงสร้างที่ขาดความต่อเนื่องขององค์อาคาร ซึ่งเรียกว่า อาณาบริเวณ D (D-Region) สัญลักษณ์ D หมายถึง “Discontinuity” เป็นบริเวณที่มีการแปรผันของความเครียดไม่เป็นเส้นตรง (Schlaich et al, 1987) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของน้ำหนักบรรทุกหรือรูปทรงทางเรขาคณิตของโครงสร้าง (Thompson, 2002) ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในหลาย ๆ ตำแหน่งภายในโครงสร้าง เช่น ฐานรองรับ บริเวณช่องเปิด บริเวณที่รับแรงกระทำเป็นจุด บริเวณโครงสร้างที่เปลี่ยนหน้าตัดกะทันหัน ดังแสดงในภาพประกอบ 7 และโครงสร้างทั่วไปที่มีความลึกมากๆ เช่น คานลึก (Deep Beam) ฐานรากเสาเข็ม (Pile Caps) คานหูก้าง (Corbels) คานต่อเนื่องมีช่องเปิด คานปลายบากรับแรงกระทำแบบจุด และโครงสร้างที่มีหน้าตัดคงที่หรือไม่แน่นอน (Non Prismatic Sections) เป็นต้น



ภาพประกอบ 7 อาณาบริเวณ D-region ของคานที่เปลี่ยนหน้าตัดกะทันหัน

โครงข้อหมุนประกอบด้วยชิ้นส่วนสองประเภท คือ ชิ้นส่วนรับแรงอัด (Strut) และชิ้นส่วนรับแรงดึง (Tie) โดยชิ้นส่วนของโครงข้อหมุนจะมาบรรจบกันหรือพบกัน ที่จุดต่อ (Node) ซึ่งในการวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนต้องใช้หลักการสมดุล โดยให้แรงภายนอกกระทำที่จุดต่อและถ่ายแรงไปตามชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงข้อหมุนลงสู่ฐานรองรับ โดยโครงข้อหมุนอาจเป็นแบบดีเทอมีเนตหรืออินดีเทอมีเนตก็ได้ แต่ถ้าหากเป็นแบบดีเทอมีเนต จะเรียกว่า โครงข้อหมุนอย่างง่าย ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยใช้สมการสมดุลของแรงเท่านั้น การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีโครงข้อหมุนได้ทั้งแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิต น้ำหนักหรือแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง และความซับซ้อนของโครงสร้างดังนี้

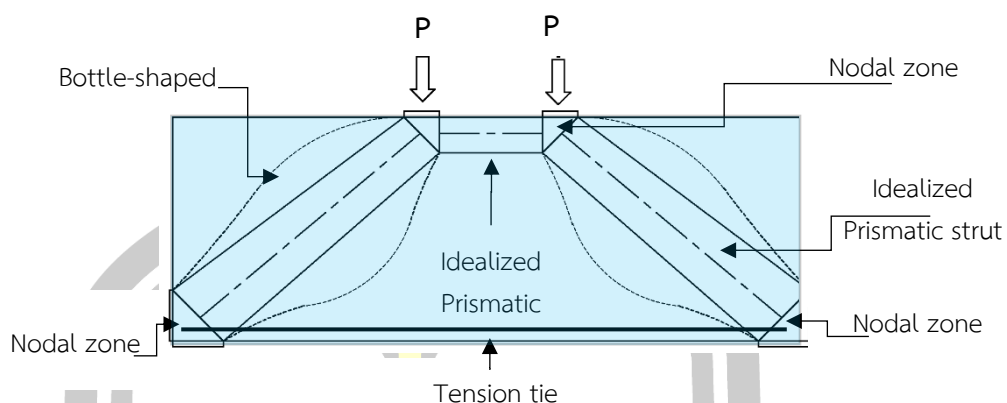
2.6.1 การวิเคราะห์แบบ 2 มิติ เหมาะสำหรับ คานลิก คานปลายบากป้า คานบากป้าแป้นหูช้าง เป็นต้น

2.6.2 การวิเคราะห์แบบ 3 มิติ เหมาะสำหรับคานสะพานที่รับโมเมนต์ดัดหลายแกน ฐานรากและคานรับแรงบิด เป็นต้น

2.7 องค์ประกอบของแบบจำลองโครงข้อหมุน

แบบจำลองโครงข้อหมุนมีองค์ประกอบ 3 องค์ประกอบ ดังภาพประกอบ 8 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

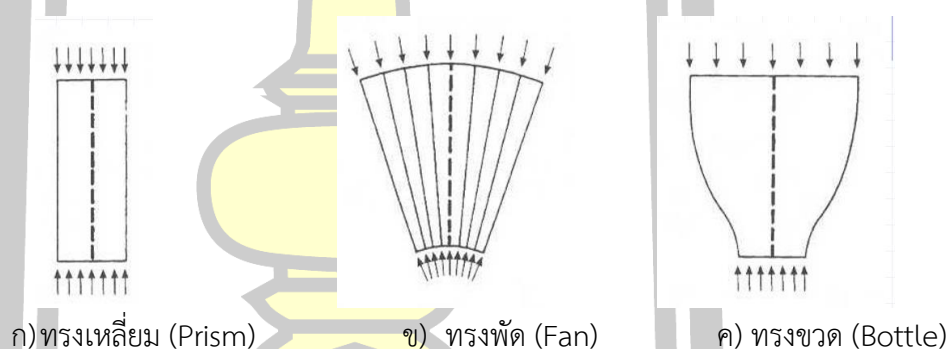
- ท่อนรับแรงอัด หรือ Strut ทำหน้าที่รับรับแรงอัดในโครงสร้าง
- ท่อนรับแรงดึง หรือ Tie ทำหน้าที่รับรับแรงดึงในโครงสร้าง
- บริเวณจุดต่อ หรือ Nodal Zone ทำหน้าที่เป็นจุดรวมแรง หรือจุดที่ท่อนรับแรงอัดและแรงดึงมาบรรจบกัน



ภาพประกอบ 8 องค์ประกอบของโครงข้อหมุนแบบจำลอง

2.7.1 ท่อนรับแรงอัด

สามารถจำแนกได้ 3 ประเภท ได้แก่ ก) ทรงเหลี่ยม (Prism) ข) ทรงพัด (Fan) และ ค) ทรงขวด (Bottle) ดังแสดงในภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ลักษณะของท่อนรับแรงอัด

1) ท่อนรับแรงอัดทรงพัด (Fan-Shaped Strut) เกิดขึ้นในกรณีที่มีการรวมแรงกระทำแบบแผ่เข้าสู่ฐานรองรับ ดังนั้นลักษณะของท่อนรับแรงอัดจะเป็นแบบการลู่เข้าของแรงลงสู่ฐานรองรับ คล้ายรูปทรงของพัดในการวิเคราะห์สามารถแทนท่อนรับแรงอัดรูปพัดด้วยท่อนรับแรงอัดทรงเหลี่ยมหลายๆท่อน โดยจะรวมแรงกระจายและเฉลี่ยเป็นจุดๆ ซึ่งตำแหน่งของจุดถ่ายแรงจะมาก หรือน้อย นั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดในการวิเคราะห์

2) ท่อนรับแรงอัดทรงขวด (Bottle-Shaped Strut) เกิดขึ้นเมื่อมีการถ่ายแรงกระทำแบบจุดจากตำแหน่งหนึ่งไปสู่อีกตำแหน่งหนึ่ง กล่าวคือ ปลายทั้งสองด้านของแนวแรงอัดจะเป็นน้ำหนักที่กระทำแบบจุด โดยที่แนวของแรงอัดจะสามารถแผ่ออกทางด้านข้างได้อย่างอิสระที่บริเวณ

ตรงกลางของท่อนรับแรงอัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในองค์อาคารที่ไม่ได้ถูกจำกัดทางด้านขนาดและรูปร่างขององค์อาคาร เมื่อมีการแผ่ขยายทางด้านข้างของแนวแรงอัดในท่อนรับแรงอัดจะทำให้เกิดแรงดึงในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแรงอัดและทำให้เกิดรอยแตกกว้างปริชนานกับแนวแรงอัด และทำให้กำลังแรงอัดของท่อนรับแรงอัดลดลงดังนั้นในการออกแบบด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนจึงนิยามวงเหล็กตะแกรงเพื่อต้านทานการแตกร้าวที่เกิดขึ้นหรือมีฉะนั้นจะต้องทำการวิเคราะห์อย่างละเอียดเพื่อหาแรงดึงตั้งฉากที่เกิดขึ้นแล้วคำนวณปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการต่อไป Bircher et al. (2009) กล่าวว่า การวิเคราะห์อย่างละเอียดเพื่อหาแรงดึงที่เกิดขึ้น นั้นมีความยุ่งยากและไม่สะดวกดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมแทนท่อนรับแรงอัดทรงขวดด้วยท่อนรับแรงอัดทรงเหลี่ยม แล้วพิจารณากำลังรับน้ำหนักที่ลดลงเนื่องจากรอยแตกร้าวปริที่เกิดขึ้นและต้องการเสริมเหล็กตะแกรงกันร้าวเพิ่มเติมด้วย

2.7.2 ท่อนรับแรงดึง

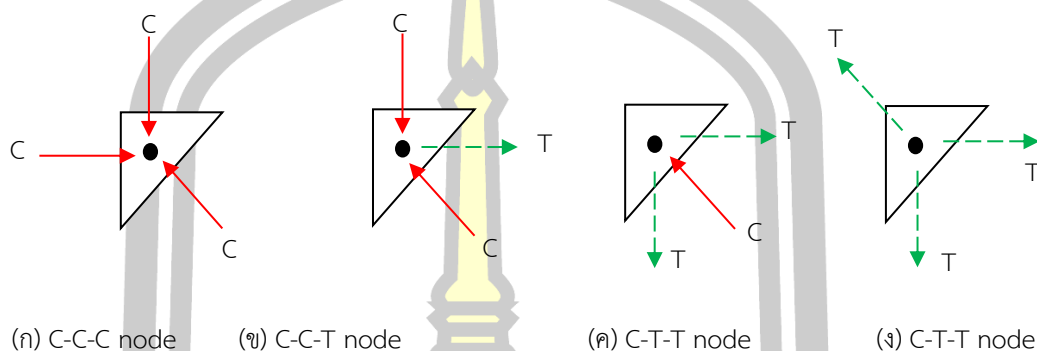
ส่วนที่รับแรงดึงของโครงข้อหมุนแบบจำลอง ซึ่งได้แก่เหล็กเสริมธรรมดาหรือลวดอัดแรงซึ่งจะวางอยู่ในตำแหน่งและในแนวเดียวกับท่อนรับแรงดึง ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนจะต้องคำนวณแรงดึงที่เกิดขึ้นในท่อนรับแรงดึงแล้วนำไปคำนวณปริมาณเหล็กเสริมต้านแรงดึงที่เกิดขึ้น ในการออกแบบจะพิจารณาขนาดของท่อนรับแรงดึงโดยรวมพื้นที่ของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมด้วยเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณพื้นที่ของจุดต่อ แต่การคำนวณกำลังรับแรงดึงของท่อนรับแรงดึงจะไม่พิจารณาคอนกรีตในการรับแรงดึง เนื่องจากกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าน้อย ในทางกลับกันคอนกรีตจะช่วยเพิ่มสติเฟโนสให้กับท่อนรับแรงดึงและช่วยลดการเสียรูปของโครงสร้างลงได้ ดังนั้นกำลังของท่อนรับแรงดึงจะขึ้นอยู่กับกำลังครากของเหล็กเสริม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (A_s) คูณหน่วยแรงที่จุดคราก (f_y) ดังแสดงในสมการ (2.15)

$$F_y = A_s f_y \quad (2.15)$$

2.7.3 จุดต่อ หรือ โหนด (Node)

เป็นบริเวณที่จุดบรรจบกันของท่อนรับแรงต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นท่อนรับแรงอัดหรือท่อนรับแรงดึง ดังนั้นจุดต่อจึงเป็นบริเวณที่มีความสำคัญสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนเนื่องจากเป็นจุดรวมของแรงที่มาบรรจบกันและทำหน้าที่ถ่ายแรงระหว่างชิ้นส่วนต่างๆเพื่อสร้างความสมดุลให้เกิดขึ้นจุดต่อยังมีความสำคัญในการออกแบบอีกประการหนึ่งคือการวิเคราะห์หาแรงในท่อนรับแรงต่างๆจะอาศัยสมการสมดุลของแรงที่จุดต่อโดยจะพิจารณาทั้งสมดุลของแรงในแนวแกน X และในแนวแกน y (หากวิเคราะห์ใน 3 มิติจะพิจารณาสมดุลของแรงในแนวแกน 2 ด้วย) โดยจุดต่อในโครงข้อหมุนสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังภาพประกอบ 10 ซึ่งจุดต่อแต่ละประเภทมีความ

แข็งแรงไม่เท่ากัน จุดต่อประเภท C-C-C- จะมีความแข็งแรงมากที่สุด เนื่องจากมีแรงอัดกระทำทุกทิศทาง ส่วนจุดต่อ T-T-T จะมีความแข็งแรงน้อยที่สุด เนื่องจากมีแรงดึงกระทำทุกทิศทางและแรงดึงทำให้เกิดความเครียด ซึ่งมีผลต่อการรับน้ำหนักของจุดต่อลดลง



ภาพประกอบ 10 ลักษณะของแรงที่กระทำต่อจุดต่อในโครงข้อหมุน

2.8 การวิบัติในวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน

การวิบัติสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามองค์ประกอบของโครงข้อหมุนแบบจำลอง ได้แก่ ท่อนรับแรงดึง ท่อนรับแรงอัด และจุดต่อ

2.8.1 การวิบัติแบบอัดแตกของท่อนรับแรงอัด (Crushing of Strut) ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายเสารับแรงอัด

2.8.2 การวิบัติเนื่องจากเหล็กเสริมคราก หรือการวิบัติเนื่องจากการรูดไถลของเหล็กเสริมที่มีการยึดรั้งไม่เพียงพอ (Yielding หรือ Bond Pull-Out Failure of Tie)

2.8.3 การวิบัติที่บริเวณจุดต่อ หรือพื้นที่จุดต่อ

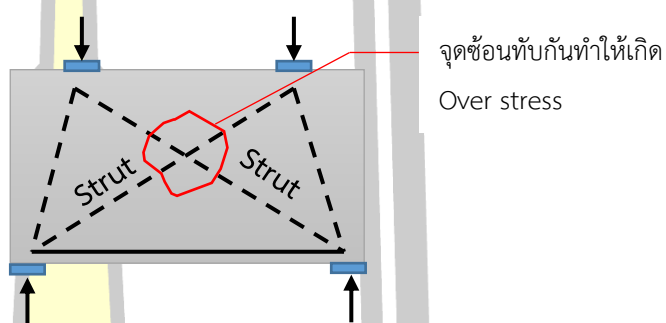
2.9 เงื่อนไขและข้อกำหนดในการสร้างและออกแบบด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน

ข้อกำหนดการออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กตาม มาตรฐาน ACI318-14 ได้กำหนดเงื่อนไขและข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนให้มีความปลอดภัยไว้ดังนี้

2.9.1 แรงกระทำภายนอกและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต้องเป็นไปตามหลักการสมดุล

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0 \quad (2.16)$$

2.9.2 การวางท่อนรับแรงอัดต้องไม่ซ้อนทับกัน เพื่อป้องกันหน่วยแรงในจุดที่ทับกันมากเกินไป (Over stress) และสำหรับการวางท่อนรับแรงดึงสามารถจัดวางให้ซ้อนทับกันและไขว้ผ่านแนวท่อนรับแรงอัดได้ ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 ท่อนรับแรงอัดซ้อนทับกันทำให้เกิด Over stress

2.9.3 มุมระหว่างท่อนรับแรงอัดและท่อนรับแรงดึงที่พบกันที่จุดต่อต้องสัมพันธ์กับ $\tan \theta \geq \frac{1}{2}$ หรือ $\theta \geq 26.6^\circ$ และตามมาตรฐาน ACI318-14 กำหนดให้ $\theta \geq 25^\circ$

2.9.4 กำลังของท่อนรับแรงอัด ท่อนรับแรงดึง และจุดต่อ ต้องผกผันเงื่อนไขต่อไปนี้

$$F_c \leq \phi F_n \quad (2.17)$$

เมื่อ F_n คือ กำลังของท่อนรับแรงอัด ท่อนรับแรงดึงและจุดต่อ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังเท่ากับ 0.85 (ทั้งท่อนรับแรงอัด ท่อนรับแรงดึงและจุดต่อ) และ F_c คือ แรงที่เกิดขึ้นในท่อนรับแรงอัด ท่อนรับแรงดึงและจุดต่อที่สภาวะประลัย

2.9.5 กำลังของท่อนรับแรงอัด (F_{ns})

$$F_{ns} = A_{cs} f_{ce} \quad (2.18)$$

เมื่อ A_{cs} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อนรับแรงอัดที่น้อยกว่าระหว่างหน้าตัดที่ปลายทั้งสองด้านของท่อนรับแรงอัด และ f_{ce} คือ กำลังรับแรงอัดประสิทธิภาพคำนวณจากสมการ 2.19

$$f_{ce} = 0.85 \beta_s f'_c \quad (2.19)$$

เมื่อ β_s คือ ค่าตัวคูณลดกำลังของท่อนรับแรงอัดซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างและการเสริมเหล็กในท่อนรับแรงอัด ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ตัวคูณลดกำลังของท่อนรับแรงอัด (β_s)

ชนิดของท่อนรับแรงอัด		(β_s)
ทรงเหลี่ยม (Prism)		1.00
ทรงขวด (Bottle)	มีการเสริมเหล็กพิเศษเป็นไปตาม ACI318 A3.3	0.75
	ไม่มีการเสริมเหล็ก ACI318 A3.3	$0.60 \lambda^*$
ท่อนรับแรงอัดที่อยู่ในชั้นส่วนที่รับแรงดึง หรืออยู่ในชั้นส่วนของปีกที่รับแรงดึง		0.40
กรณีอื่นๆ		0.60

λ^* เป็นตัวคูณปรับแก้เท่ากับ 1.00 สำหรับคอนกรีตปกติ 0.85 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ทรายมวลเบาในการผสมคอนกรีต และ 0.75 สำหรับคอนกรีตมวลเบาทุกประเภท

2.9.6 กำลังของท่อนรับแรงดึง (F_{nt})

$$F_{nt} = A_{st} f_y \quad (2.20)$$

เมื่อ A_{st} คือ พื้นที่ของเหล็กเสริม และ f_y คือ หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม

2.9.7 กำลังของจุดต่อ (F_{nn})

$$F_{nn} = f_{cu} A_n \quad (2.21)$$

เมื่อ f_{cu} คือ กำลังรับแรงอัดประสิทธิผลของจุดต่อที่คำนวณได้จากสมการ 2.22 และ A_n คือ พื้นที่ของจุดต่อในทิศทางที่ตั้งฉากกับท่อนรับแรงอัดหรือท่อนรับแรงดึงที่มาบรรจบ หรือ พื้นที่ของจุดตัดในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแรงอัดลัพท์ (ในกรณีที่มีแรงอัดมากกว่า 1 แรงกระทำที่หน้าจุดต่อ)

$$f_{cu} = 0.85\beta_n f_c \quad (2.22)$$

โดยค่า β_n เป็นตัวคูณที่แสดงถึงระดับของความยุ่งเหยิง (Degree of disruption) ที่จุดต่อ ซึ่งเกิดความไม่สอดคล้องกันของหน่วยแรงในท่อนรับแรงอัดและท่อนรับแรงดึงที่มาบรรจบกันที่จุดต่อ ดังแสดงในตาราง 2.6

ตาราง 6 ค่าตัวคูณลดกำลัง β_n ของจุดต่อ (Node) ตัวคูณลดกำลังของจุดต่อ ACI318-14

ชนิดของจุดต่อ	β_n
รับแรงอัด – รับแรงอัด – รับแรงอัด C-C-C	1.0
รับแรงอัด – รับแรงอัด – รับแรงดึง C-C-T	0.8
รับแรงดึงสองแนว หรือมากกว่า C-T-T หรือ T-T-T	0.6

2.10 ขั้นตอนการออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน

โดยหลักการออกแบบด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนมีหลักสำคัญ 2 ข้อหลักๆ คือ ข้อแรก แรงปฏิกิริยาของแบบจำลอง (R ต้องสมดุลกับแรงภายนอกที่กระทำ และข้อสอง คือ โครงสร้างของคอนกรีต (Concrete Element) ต้องมีความสามารถมากพอที่จะรับกำลังกระจายในโครงสร้าง (Schlaich et al., 1987) และเพื่อให้โครงสร้างสามารถรับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพและสมดุลแรงเกิดขึ้นที่จุดต่อ (Node) ต้องมีความยาวของสมอยึด (Anchorage) หรือระยะฝังยึดเพียงพอ และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างต้องไม่เกินค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่คูณแฟคเตอร์ตัวคูณลดแล้ว (Williams, 2011)

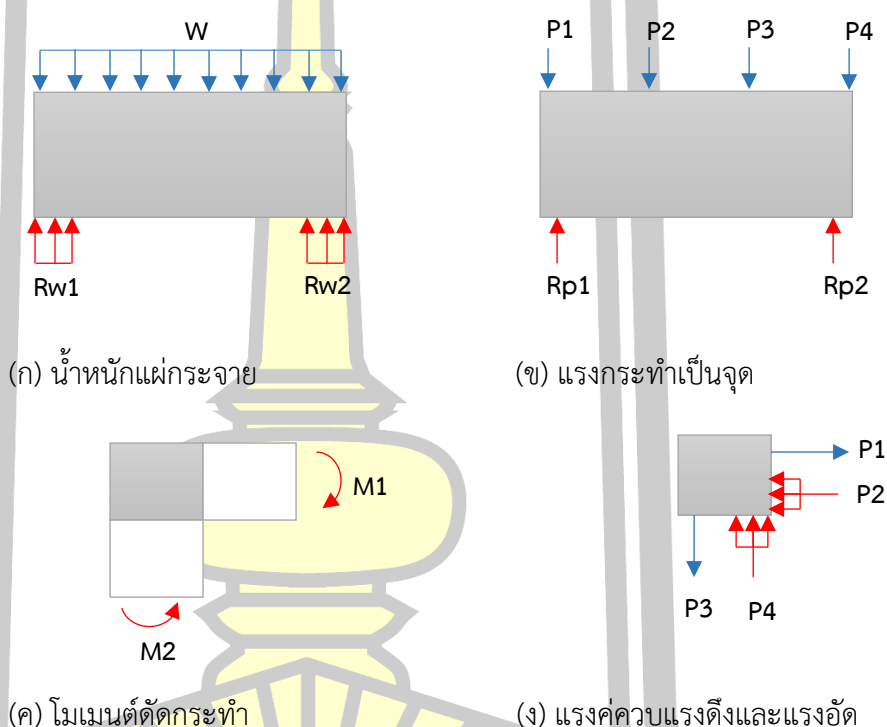
2.10.1 หลักการออกแบบโดยทั่วไปมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1) เลือกรูปแบบของโครงสร้าง (Region Discrimination)

กำหนดรูปแบบและแบ่งบริเวณโครงสร้างออกเป็น 2 อาณาบริเวณ คือ B-Region และ D-Region เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์สำหรับออกแบบด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน

2) กำหนดกรณีโหลด (Defining Load Case)

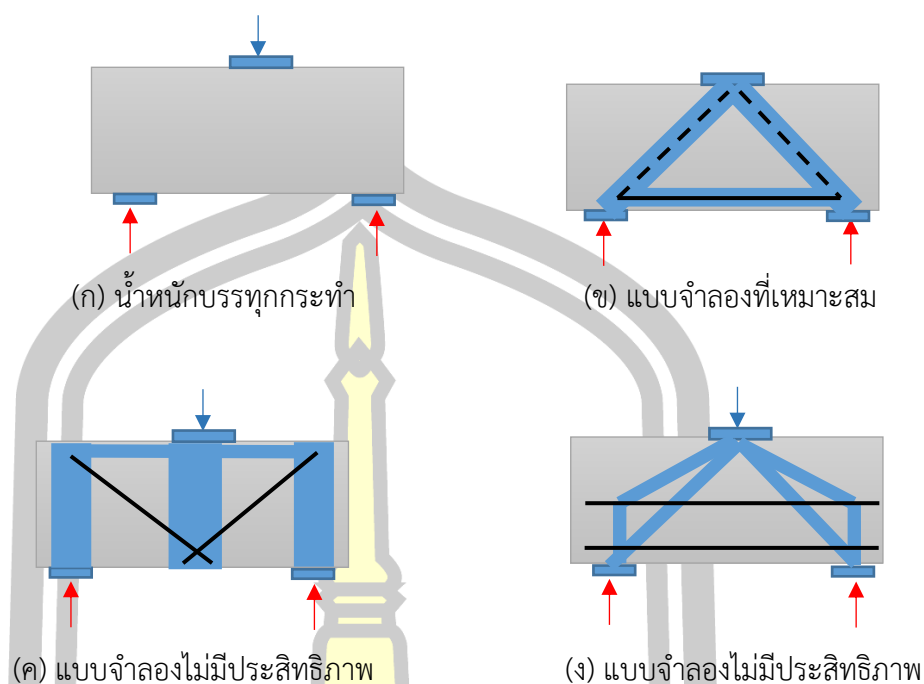
ขั้นตอนนี้จะเป็นการคำนวณแรงปฏิกิริยาบนขอบเขตของโครงสร้าง D-Region โดยพิจารณาขนาด ตำแหน่ง และทิศทางของแรงปฏิกิริยาที่กระทำบนขอบเขต D-Region หลังจากนั้นเริ่มสร้างแบบจำลองโครงข้อหมุน โดยแบ่งขอบเขตของโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อยตามท่อนรับแรงอัดหรือท่อนรับแรงดึง และคำนวณแรงลัพธ์ในแต่ละส่วนย่อย ดังภาพประกอบ 12 ซึ่งจะแบ่งโครงสร้างรับแรงสองกรณี ได้แก่ ภาพประกอบ 12(ก) น้ำหนักแผ่กระทำต่อคานสีกแทนด้วยแรงกระทำเป็นจุด (Point load) สี่จุด และภาพประกอบ 12(ข) โมเมนต์ที่ผิวของจุดต่อคานกับเสาถูกแทนที่ด้วยแรงคู่ควบของแรงดึงและแรงอัดที่รอยต่อระหว่างองค์อาคารและจุดต่อ



ภาพประกอบ 12 การแบ่งอาณาบริเวณ D-region โครงสร้าง

3) เลือกรูปแบบของแบบจำลองที่เหมาะสม

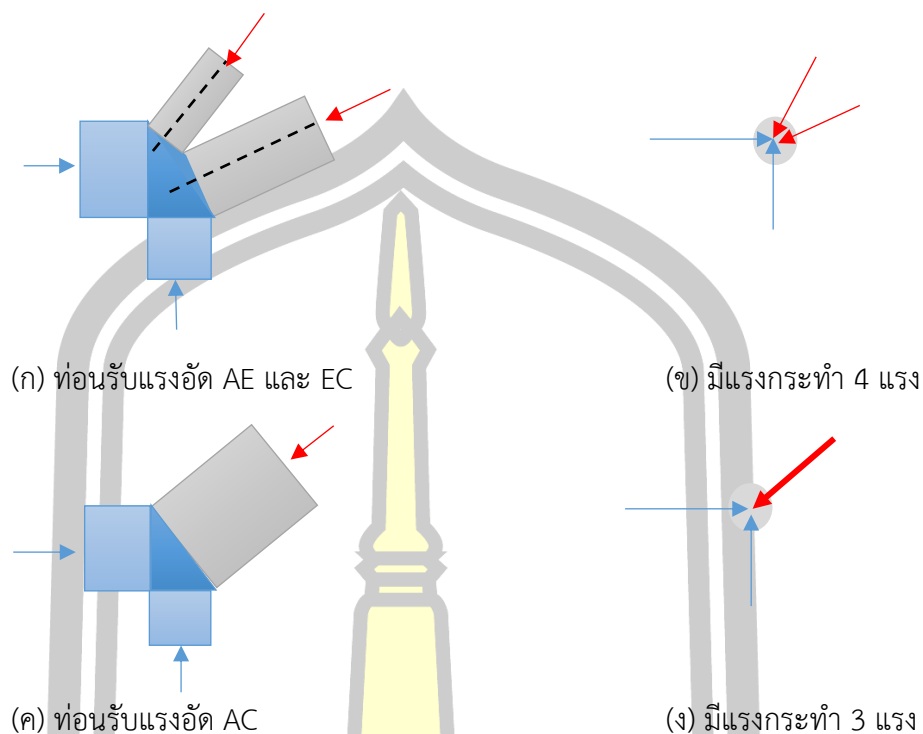
แบบจำลองสามารถเป็นได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ออกแบบโดยแกนของโครงข้อหมุนจะตรงกับศูนย์ถ่วงของโซนแรงอัด แรงดึง และขนาดของชิ้นส่วนสำหรับการคำนวณองค์อาคาร โคนท่อนรับแรงอัดและแรงดึง หรือแรงอัดกับแรงอัดจะมาบรรจบกันที่บริเวณจุดต่อสำหรับแบบจำลองโครงข้อหมุนที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะกำหนดให้ท่อนรับแรงดึงน้อยที่สุด เนื่องท่อนรับแรงอัดที่มีค่าสถิติเอนสมาที่สุด ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นในแบบจำลองควรกำหนดไปในทิศทางที่สถิติเอนสมาที่สุด โดยทางเลือกแบบจำลองโครงข้อหมุนสามารถอธิบายได้ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 รูปแบบของแบบจำลองที่เหมาะสมในคานลึก

4) คำนวณขนาดความกว้างท่อนรับแรงอัด ท่อนรับแรงดึง

โดยขนาดความกว้างท่อนรับแรงอัด ท่อนรับแรงดึง และบริเวณจุดต่อขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่มากกระทำและขนาดของชิ้นส่วน ที่มาต่อกัน และขึ้นอยู่กับแผ่นแรงแบกทาน (Bearing Plate) หรือขนาดเสาที่จุดรองรับ กรณีถ้าพื้นที่แรงแบกทานน้อยจะทำให้เกิดแรงสูงมาก อาจทำให้ท่อนรับแรงอัดหรือบริเวณจุดต่อรับน้ำหนักบรรทุกไม่เพียงพอ ดังนั้นอาจแก้ไขโดยการเพิ่มพื้นที่แรงแบกทาน หรือเพิ่มมุมระหว่างท่อนรับแรงดึงกับท่อนรับแรงอัดมากกว่า 25 องศา ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดของ ACI318 เพื่อลดการเกิดการแตกร้าวที่มุม และถ้าหากมีท่อนรับแรงอัดมากกว่าสองท่อนมาเจอกันที่ผิวหน้าของบริเวณจุดต่อเดียวกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 14(ก) และ 14(ข) กรณีนี้ต้องรวมแรงทั้งสองให้ตั้งฉากกับแรงกับบริเวณจุดต่อดังแสดงในภาพประกอบ 14(ค) และ 14(ง) หรือบางครั้งขนาดของบริเวณจุดต่ออาจขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นแรงแบกทาน ดังแสดงในภาพประกอบ 14(จ)



ภาพประกอบ 14 การรวมแรงของท่อนรับแรงอัดที่บริเวณจุดต่อ

5) ตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของบริเวณจุดต่อและท่อนรับแรงอัด

บริเวณจุดต่อคือ บริเวณที่มีหน่วยแรงสูงมากของโครงสร้าง ซึ่งเป็นจุดมาบรรจบของท่อนรับแรงอัดหรือแรงดึง ซึ่งในระนาบสองมิติจะมีอย่างน้อยสามแรงมาบรรจบกันเพื่อให้โครงสร้างอยู่ในสมดุล ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบให้สามารถต้านทานแรงกระทำจากภายนอกได้ ถ้าท่อนรับแรงอัดมีกำลังต้านไม่เพียงพอ ผู้ออกแบบสามารถแก้ไขโดยการเสริมเหล็กรับแรงอัดหรือโดยการเพิ่มขนาดของบริเวณจุดต่อ

5.1) คำนวณปริมาณเหล็กเสริมจากแรงดึงในท่อนรับแรงดึง

5.2) ตรวจสอบระยะฝั่งยึดรั้งเหล็กเสริมที่บริเวณจุดต่อ

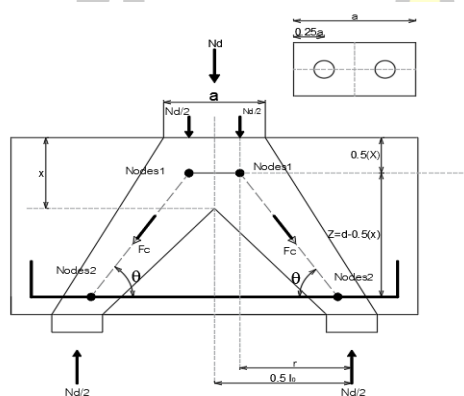
5.3) ออกแบบรายละเอียดเหล็กเสริมและตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริมกันรั่ว

พูน ปณ จิต ชีเว

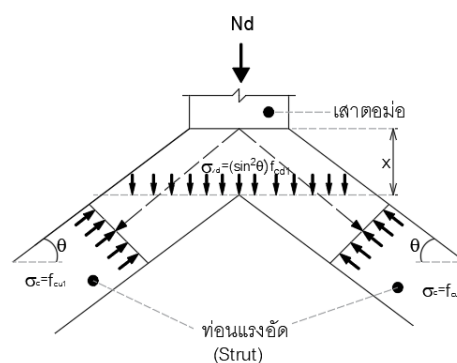
2.11 ขั้นตอนการออกแบบฐานรากด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน

สำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็มด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน วิศวกรผู้ออกแบบจำเป็นต้องเลือกรูปแบบที่เหมาะสมจะเป็นรูปแบบมาตรฐานทั่วไป ซึ่งเน้นการคำนวณด้วยมือ โดยมีขั้นตอนการออกแบบรายละเอียดดังนี้

2.11.1 วิเคราะห์โมเดลแบบโครงข้อหมุนเพื่อส่งผ่านแรงในโครงสร้าง และกำหนดตำแหน่งแรง (N_d) ในโครงข้อหมุนที่กึ่งกลางเสาแบ่งเป็นสองส่วนกระทำกึ่งกลางของครึ่งหน้าตัดเสา ดังแสดงในภาพประกอบ 15(ก)



(ก) ตำแหน่งแรงที่เกิดในโครงข้อหมุน



(ข) แรงที่เกิดในโครงข้อหมุน

ภาพประกอบ 15 ตรวจสอบท่อนอัดตำแหน่งใต้เสา(Upper nodes zone)

จากภาพประกอบ 2.14 แนวแรงอัดที่เอียงสามารถหาได้จาก $\tan \theta = d/r$ โดยที่ $r = 0.5l_0 - 0.25a$ ดังแสดงในภาพประกอบ 15(ก) ดังนั้นแนวโน้มเอียงของแรงอัดกับแรงอัดที่เกิดขึ้นที่จุดบนของฐานรากเสาเข็มมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.23

$$\tan \theta = \tan \theta_0 \left(1 - \frac{0.5x}{d}\right) \quad (2.23)$$

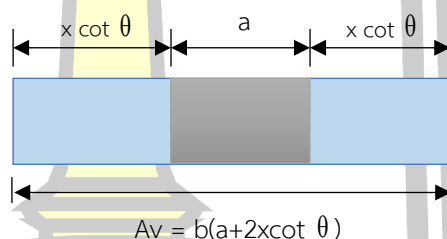
มาตรฐาน Euro code EC2, (2014) ให้สูตรคำนวณกำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ

$$f_{cd1} = 1.0 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) f_{cd} \quad (2.24)$$

เมื่อ f_{ck} คือ ลักษณะความแข็งแรง (กก/ซม.²) และ f_{cd} คือ กำลังอัดแบบแกนเดียวของคอนกรีตตามสมการจะพบว่า $f_{cd1} \geq 0.85f_{cd}$ ถ้า $f_{ck} \leq 380$ กก./ ซม.² ข้อจำกัดค่า $0.85 f_{cd}$ ตาม ACI (2014), JSCE (2010) และ CSA(2014) ของแคนาดาสำหรับจุดต่อที่ถูกแรงบีบอัดแบบแนวสามแกนค่าของ f_{cd1} สามารถเพิ่มขึ้นได้จาก

$$f_{cd1} = 0.85f_{cd} \quad (2.18)$$

สำหรับเสาเข็ม 2 ต้น และ $f_{cd1} = f_{cd}$ สำหรับฐานรากเสาเข็มที่มากกว่า 2 ต้น ให้ค่า x เป็นไปได้ที่จะคำนวณความโน้มเอียงของแรงอัดและพื้นที่ขยาย A_v ได้เสาต่อม่อ Stress ในแนวแกนตั้งในพื้นที่ขยายจะหาได้จาก $\sigma_{vd} = Nd/A_v$ และฟังก์ชันของ x มีการกำหนดเงื่อนไข $\sigma_{vd} = \sin^2 \theta f_{cd1}$



ภาพประกอบ 16 แสดงการขยายพื้นที่ได้เสาต่อม่อเสาเข็ม 2 ต้น

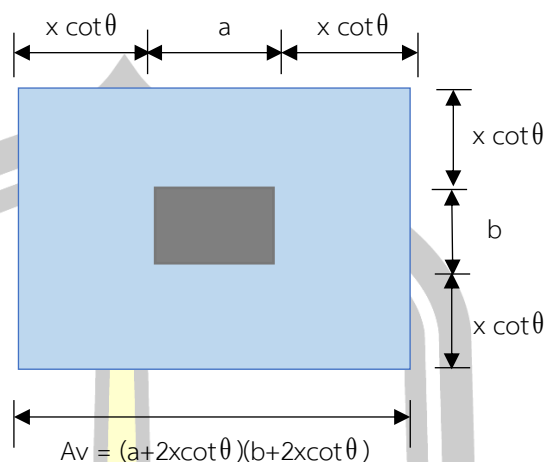
เสาเข็ม 2 ต้น $f_{cd1} = 0.85f_{cd}$ สามารถหาหน่วยแรง ที่เกิดขึ้นได้จากสมการดังนี้

$$\sigma_{vd} = \frac{(v - abf_{cd})}{b(a + 2xcot \theta)} \quad (2.19)$$

สามารถคำนวณหา x จาก

$$\frac{x}{a} = \frac{v - 0.85 \sin^2 \theta}{1.7 \sin \theta \cos \theta} \quad (2.20)$$

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 17 แสดงการขยายพื้นที่ได้เสาคอม่อเสาคีมมากกว่า 2 ต้น

เสาคีมมากกว่า 2 ต้น $f_{cd1} = f_{cd}$ สามารถหา Stress ที่เกิดขึ้นได้จากสมการดังนี้
สามารถคำนวณหา x จาก

$$\frac{x}{a} = \frac{-(1+h) \sin \theta + \sqrt{(1+h)^2 \sin^2 \theta + 4\lambda(v - \sin^2 \theta)}}{4 \cos \theta} \quad (2.21)$$

โดยที่ $\lambda = \frac{b}{a}$ คือ อัตราส่วนระหว่างทั้งสองด้านของหน้าตัดเสาคอม่อ

2.11.2 เลือกขนาดบริเวณจุดต่อของแบบจำลองโครงข้อหมุนมักจะพิจารณาจากพื้นที่สัมผัสของน้ำหนักรับรทุกของแต่ละตำแหน่ง โดยพิจารณาความเค้นในท่อนรับแรงอัด (σ_{c1}) ที่ตำแหน่งพื้นที่ (A_c) ภายใต้เสาคอม่อ (C-C-C) และความเค้นในท่อนรับแรงอัด (σ_{c2}) ที่ตำแหน่งพื้นที่ (A_p) บนหัวเสาคีม (C-C-T) ดังแสดงในรูป 2.14 (ข) โดย

$$\sigma_{c1} = \frac{Nd}{A_c \sin^2 \theta_o} \quad (2.22)$$

$$\sigma_{c2} = \frac{Nd}{2A_p \sin^2 \theta_o} \quad (2.23)$$

การเสริมแรงในแต่ละทิศทางควรคำนึงในการจัดเรียงตำแหน่งของเสาเข็มและอาจจะต้องเสริมแรงเพิ่มเติมระหว่างเสาเข็ม Stress บนหัวเสาเข็มหาได้จาก

$$\sigma_{c_2} = \frac{F_{de}}{A_{amp} \sin^2 \theta_o} \quad (2.24)$$

เมื่อ $A_{amp} = kA_p$

โดยถ้าฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น มีการกระจายแรงเกิดขึ้นแรงจะมีทิศทางไปยังเสาเข็มและมีค่า $k = 1 + \frac{2d'}{\phi_p}$ และถ้าสมมติความเครียดสองด้านในเสาเข็มส่งถ่ายแรงกระจายเป็นมุม 45 องศา ตามมาตรฐาน

$$EC_2 (2014) ; k = \left(1 + \frac{2d'}{\phi_p}\right)^2 \quad (2.25)$$

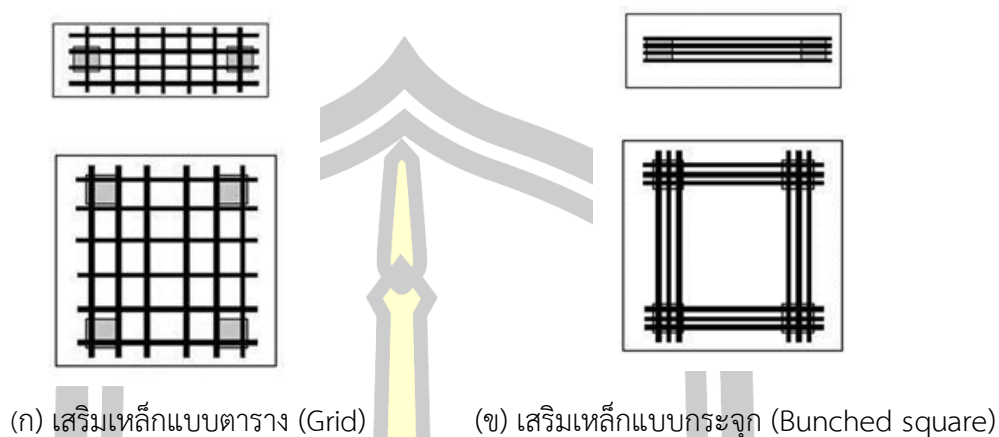
2.11.3 ตรวจสอบกำลังของโหนด (Nodes) และท่อนรับแรงอัด (Strut) ($\sigma_{c1} < f_{cd1}$) สำหรับกำลังโหนดประเภท (C-C-T) และ ($\sigma_{c2} < f_{cd2}$) สำหรับกำลังโหนด (C-C-C) เมื่อ $f_{cd2} = 0.68f_{cd}$ ตามมาตรฐาน ACI 318-14 (2014)

2.11.4 คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริม (A_s) จากแรงดึงของท่อนรับแรงดึง (Tie)

$$\text{เหล็กรับแรง} \quad A_s = \frac{0.5N_{dr}}{Zf_{yd}} \quad \text{เมื่อ } (Z=d-0.5X) \quad (2.26)$$

$$\text{เหล็กกันร้าว} \quad A_{st} = \frac{0.25F_{de}}{f_{yd}} \quad (2.27)$$

2.11.5 เขียนรายละเอียดการเสริมเหล็กในฐานรากเสาเข็ม ซึ่งค่าแรงดึงที่คำนวณได้เป็นแรงที่เกิดขึ้นระหว่างหัวเสาเข็ม ดังนั้นการเสริมเหล็กจึงควรเป็นกระจุก หรือ แบบ Bunched Square เหล็กเสริมให้อยู่ในแนวหัวเสาเข็ม แต่มาตรฐาน ACI318 อนุญาตให้กระจาย หรือ แบบ Gird เหล็กเสริมออกไว้อย่างสม่ำเสมอในฐานราก



ภาพประกอบ 18 แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กในฐานรากทั้งสองรูปแบบ

2.12 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อฐานรากเสาเข็มที่ออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนที่เลือกศึกษา

2.12.1 อัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ

การศึกษาการอัตราส่วนของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพในฐานรากเสาเข็มด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนพบว่ามีศึกษาน้อยมาก โดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคานที่มีความลึกมาก ๆ หรือคานหุ้ม ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการอธิบายเกี่ยวกับ (a/d) ของฐานราก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

จากงานวิจัยของ Naik and Kute (2013) กล่าวว่าในมาตรฐานข้อกำหนด ACI318 หัวข้อที่ 11.7.1 กำหนดเกี่ยวกับคานลึกออกเป็นสองเงื่อนไข คือ คานที่มีช่วงความยาว (Length) ต่อความลึก (Depth) น้อยกว่า 4 ($L/D < 4$) และคานที่มีอัตราช่วงความยาวของแรงเฉือน (a) ต่อความลึก (d) น้อยกว่า 2 ($a/d < 2$) แต่สำหรับ ACI-ASCE 426 ได้จัดประเภทของคานลึกเพิ่มเติมว่าต้องมีอัตราส่วน ($a/d < 1.0$) และถ้าอัตราส่วน ($a/d > 2.5$) จัดให้อยู่ในประเภทคานธรรมดาตามทฤษฎีการออกแบบคาน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ (Dhahir, 2018) ที่ระบุว่าคานที่มีลักษณะเรียวยาว (Slender beam) ต้องมีอัตราส่วนของช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) มากกว่า 2 และคานลึก (a/d) น้อยกว่า 2 สำหรับ Sagaseta and Vollum (2010) ได้กล่าวว่าใน 50 ปีที่ผ่านมา โดยส่วนใหญ่จะเน้นศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกมากกว่า 2 ($a/d > 2$) และคานลึกถูกกำหนดที่ช่วงของแรงเฉือนต่อความลึกน้อยกว่า 1 ($a/d < 1$) แต่สำหรับคานที่มีช่วงแรงเฉือนต่อความลึกอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 2 ยังมีการศึกษาน้อยมาก ซึ่งพบว่าช่วงดังกล่าวทำให้พฤติกรรมของคานมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ คือ แนวแตกร้าวทแยง (Diagonal Crack) เป็นอิสระต่อกันกับรอยแตกแบบยืดหยุ่น (Flexible

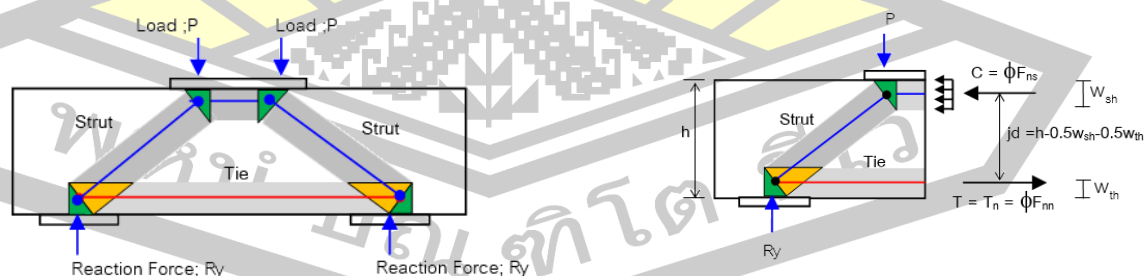
Crack) หรือการแตกร้าวจากการแอ่นตัว หลังจากนั้นจะคงที่เมื่อเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยง ซึ่งเราสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนหรือเหล็กปลอก และ Kong et al. (1970) ได้อธิบายเพิ่มเติมว่าเหล็กรับแรงเฉือนหรือเหล็กปลอกมีประสิทธิภาพมากสำหรับคานที่มีอัตราส่วน ($a/d > 1$) และ Hu and Wu (2018) ได้อธิบายเพิ่มเติมอีกว่าอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึก (a/d) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากต่อชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งปัจจัยดังกล่าวยังมีการศึกษาน้อยมาก ดังนั้นเราจึงทำการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึก (a/d) ในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเริ่มต้น หรือ First Diagonal Cracking (V_{cr}) กับแรงเฉือนของคอนกรีต หรือ Shear Strength Concrete (V_c) และสำหรับในงานฐานรากเสาเข็มยังไม่ค่อยมีการศึกษา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกอัตราส่วนของแรงเฉือนต่อความลึกอยู่ในช่วงระหว่าง 0.75 -1.50 ซึ่งเป็นช่วงที่ยังมีการศึกษาน้อยมากสำหรับมาประยุกต์ใช้ในฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.12.2 อัตราส่วนหน้าตัดเสาต่อหน้าตัดเข็ม

ในการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าอัตราส่วนหน้าตัดเสาต่อหน้าตัดเสาเข็ม ซึ่งทำให้ขนาดหรือพื้นที่ของท่อนรับแรงอัด และท่อนรับแรงดึง เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดขององค์อาคาร และส่งผลต่อกำลังการรับแรงของท่อนรับแรงอัด (F_{ns}) และกำลังของท่อนรับแรงดึง (F_{nt}) ลดลง ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของแรงเฉือนที่ทำให้ฐานรากเกิดการวิบัติได้ โดยเมื่อทราบขนาดของท่อนรับแรงอัด ท่อนรับแรงดึง หรือขนาดของฐานรองรับก็จะสามารถคำนวณแรงที่กระทำบนบริเวณจุดต่อได้

1) การคำนวณแรงกระทำบริเวณจุดต่อ

การออกแบบจุดต่อจุดต่อจะต้องทราบถึงส่วนประกอบขนาดของท่อนแขนแรงก่อน คือ ท่อนแรงที่กระทำต่อจุดนั้น จะได้ความกว้างของท่อนรับแรงอัดในแนวนอน ความกว้างของท่อนแรงอันในแนวทแยง และความกว้างของท่อนรับแรงดึง ดังภาพประกอบ 19



(ก) ลักษณะการถ่ายแรง

(ข) ขนาดของท่อนแรง

ภาพประกอบ 19 ลักษณะของโครงข้อหมุนแบบจำลอง

2) การคำนวณความกว้างท่อนแรงอัดในแนวนอน

แรงอัดที่เกิดขึ้นในท่อนของแรงอัด จะได้ว่า $C = \phi F_{ns}$ เมื่อ $F_{ns} = A_{cs} f_{ce}$ โดย $f_{ce} = 0.85 \beta_n f'_c$ กำลังรับแรงอัดของท่อนรับแรงอัดในแนวนอน จะได้

$$C = \phi (0.85 \beta_n f'_c) b_{wsh} \quad (2.28)$$

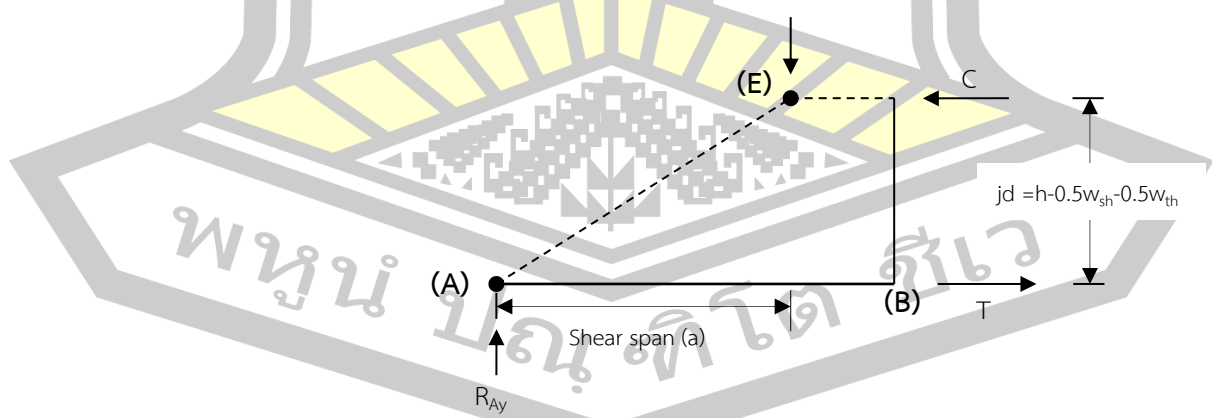
ส่วนแรงดึง T จะมีค่ากำลังของจุดต่อต้านจึงฉากกับแรงดึง $T = \phi F_{nn}$ เมื่อ $F_{nn} = \phi F_{cu} A_n$ และ $f_{cu} = 0.85 \beta_n f'_c$ จะได้

$$T = \phi (0.85 \beta_n f'_c) b_{wth} \quad (2.29)$$

จากสมดุลแรงในสมการที่ (2.28) = (2.29) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของท่อนแรงอัดในแนวนอนและความกว้างของท่อนแรงดึง คือ $W_{th} = 1.125 W_{sh}$ และความกว้างของท่อนแรงอัดในแนวนอนหาได้การนำสมการที่ 2.30 แทนลงสมการระยะระหว่างแขนทั้งสอง เท่ากับ $jd = h - 0.5W_{sh} - 0.5W_{th}$ จะได้สมการที่ 2.31 และทำการแก้สมการก็จะได้ค่า W_{sh} ออกมา

$$P_u(a) - C(jd) = 0 \quad (2.30)$$

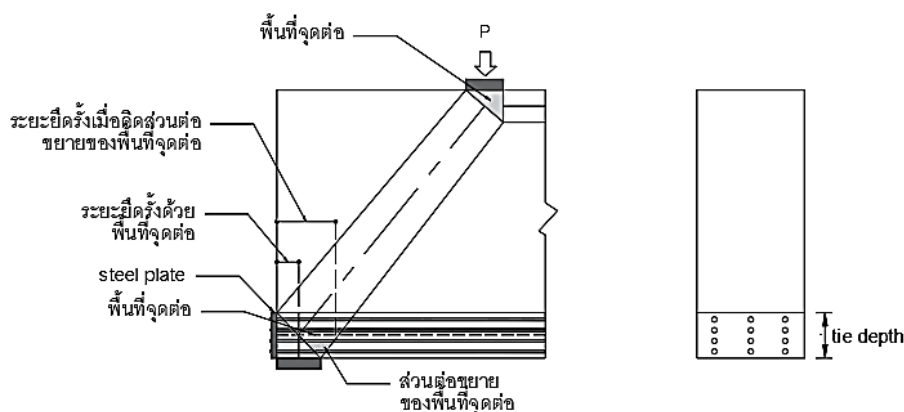
$$P_u(a) - \frac{\phi(0.85\beta_n f'_c)bw_{sh}}{1000}(jd) = 0 \quad (2.31)$$



ภาพประกอบ 20 ระยะแขนของแรงท่อนรับแรงอัดในแนวนอน C และ แรงดึง T

2.12.4 จุดยึดที่จอตอ

จุดยึดที่จอตอ (Anchorage at Nodal Zone) หมายถึง การยึดของเหล็กเสริมรับแรงดึงในท่อนรับแรงดึงที่จอตอเพื่อให้สามารถพัฒนาแรงดึงได้ตามต้องการ แต่บางครั้งจอตอจะมีพื้นที่ไม่เพียงพอที่จะยึดเหล็กเสริมได้ ในกรณีดังกล่าวอาจจะต้องเสริมแผ่นเหล็ก (Bearing Plate) ที่ปลายของเหล็กเสริมเพื่อเพิ่มการยึดให้แก่เหล็กเสริม แต่หากต้องการใช้แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมอย่างเดียวในการยึดก็สามารถทำได้ โดยมาตรฐานของ ACI อนุญาตให้พิจารณาพื้นที่ที่เรียกว่า จุดต่อส่วนขยาย (Extended Nodal Zone) ซึ่งพื้นที่นี้เกิดจากการตัดกันของท่อนรับแรงอัดแผ่นรองที่ฐานรองรับและความลึกของแนวแรงดึง โดยมีสมมติฐานว่าแรงอัดเกิดจากแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับและท่อนรับแรงอัดจะช่วยเพิ่มกำลังโอบรัด (Confining Pressure) ให้แก่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตและส่งผลให้ระยะยึดของเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 22 ระยะยึดที่จอตอ

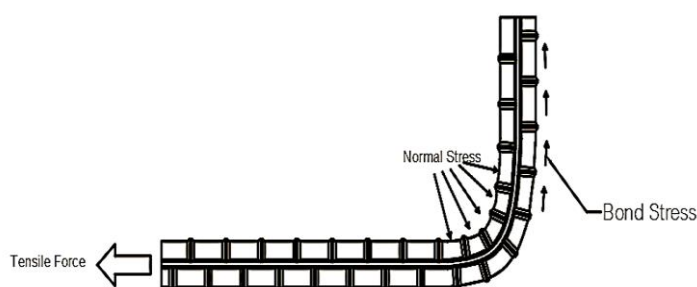
หากคิดระยะยึดจากส่วนต่อขยายของพื้นที่จอตอดังกล่าวแล้ว ยังไม่เพียงพอที่จะยึดเหล็กเสริมได้ก็จำเป็นต้องทำของอ (Hook Anchorage) หรือใช้เหล็กเสริมที่มีขนาดเล็กลงเพื่อลดระยะฝังยึดที่ต้องการ ในกรณีที่ทำของอที่ปลายเหล็กเสริม สามารถคำนวณระยะฝังยึดได้จากสมการที่ 2.35 ซึ่งระยะที่คำนวณได้ต้องไม่น้อยกว่า 8 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมและไม่น้อยกว่า 15 ซม.

$$\text{ระยะฝังยึดที่ต้องการ } (l_{nb}) = \max (8d_b, 15 \text{ ซม}, \lambda (l_{dh})) \quad (2.35)$$

$$\text{เมื่อ } l_{dh} = \frac{0.08f_y d_b}{\sqrt{f'_c}}$$

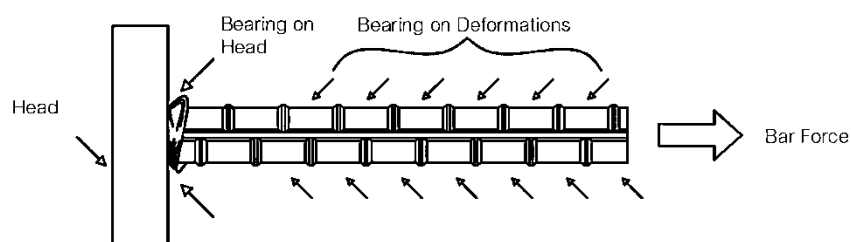
ลักษณะจุดยึดรั้งของฐานราก ในโครงสร้างคอนกรีต ข้อกำหนดสำหรับการยึดรั้งของแท่งเหล็กและข้ออบางครั้งอาจทำให้เกิดปัญหา เนื่องจากการตัดหรืออเหล็กทำให้เกิดความยาวของเหล็กเพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้นรอบรูปของเหล็ก โดยเฉพาะเมื่อใช้เหล็กที่มีขนาดใหญ่ ในข้อกำหนดของจุดยึดรั้งหรือข้ออไม่สามารถทำได้ในโครงสร้างบางอย่าง จำเป็นต้องย่นขนาดของข้ออแต่ในหลายกรณีไม่สามารถทำข้ออได้ในโครงสร้างที่มีเหล็กมากเกินไป จึงทำให้เกิดความยากในการสร้างโครงสร้างนั้นๆ เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานการตัดของเหล็กทั่วไป จึงได้พัฒนาการทำยึดรั้งแบบใหม่ขึ้นเพื่อใช้ในการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างที่อเหล็กยาก โดยที่จะนำเหล็กมาเปลี่ยนจากการอเป็นการเสริมแผ่นเพลทแทนการอที่บริเวณหัวท้ายของเหล็ก การเสริมเหล็กดังกล่าวจะถูกยึดด้วยแผ่นเพลทที่หัวท้ายของเหล็ก ทั้ง 2 แนว จึงทำให้เหล็กมีขนาดสั้นลง และไม่ทำให้เหล็กอัดแน่นมากเกินไป

โดยลักษณะของจุดต่อทั่วไปนั้นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน จะเป็นการอเหล็กที่ 90 องศา ซึ่งจะมีลักษณะดังภาพประกอบ 23 ที่เห็นและมีมาตรฐานงานก่อสร้างทั่วไป

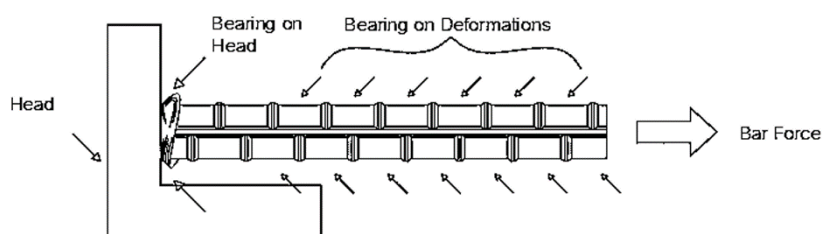


ภาพประกอบ 23 การอเหล็กแบบ 90 องศา

ซึ่งลักษณะที่เราเลือกใช้ในการออกแบบเพื่อเปรียบเทียบในการทำฐานรากที่ออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน ลักษณะจุดต่อที่เปลี่ยนไปโดยเราเลือกใช้ การเสริมเหล็กที่เชื่อมติดกับแผ่นเพลท เพื่อที่จะตรวจสอบพฤติกรรมที่แตกต่างไปจากการอแบบธรรมดา การเลือกแผ่นเพลทที่มาเชื่อมติดหัวท้ายของเหล็กนั้นมีสมการดังต่อไปนี้ โดยจะกล่าวถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กในการหาพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลทที่ใช้ในการเชื่อมติดหัวท้ายของเหล็กเสริม



ภาพประกอบ 24 การเสริมเหล็กแบบเชื่อมติดกับแผ่นเพลท



ภาพประกอบ 25 การเสริมเหล็กแบบเชื่อมติดกับแผ่นฉาก

$$\text{Relative head area} = \frac{A_{nh}}{A_b} = \frac{A_{gh} - A_b}{A_b} \quad (2.36)$$

เมื่อ A_{nh} = พื้นที่ของแผ่นเพลท (มม.²) A_{gh} = พื้นที่ของหน้าตัดเหล็ก (มม.²) และ A_b = พื้นที่ความหนา (มม.²) ตามมาตรฐาน ASTM A 615

ตาราง 7 แสดงขนาดแผ่นเพลท

ขนาดเหล็ก	ขนาดหัว สี่เหลี่ยม จัตุรัส	พื้นที่หน้าตัด A_{gh} , (in ²)	$\frac{A_{nh}}{A_b}$	ขนาดหัว สี่เหลี่ยมผืนผ้า	พื้นที่หน้าตัด A_{gh} , (in ²)	$\frac{A_{nh}}{A_b}$
# 5	2" x 2"	4.00	11.90	1 ¼ " x 1 ½ "	3.13	9.08
# 6	2 ¼ " x 2 ¼ "	5.06	10.51	1 ½ " x 3"	4.50	9.23
# 7	2 ½ " x 2	6.25	9.42	1 ½ " x 4"	6.00	9.00

	$\frac{1}{2}$ "					
# 8	3" x 3"	9.00	10.39	2" x 4"	8.00	9.13
# 9	3 $\frac{1}{4}$ " x 3 $\frac{1}{4}$ "	10.56	9.56	2" x 5"	10.00	9.00
# 10	3 $\frac{1}{2}$ " x 3 $\frac{1}{2}$ "	12.25	8.65	2 $\frac{1}{2}$ " x 5"	12.50	8.84
# 11	4" x 4"	16.00	9.26	2 $\frac{1}{2}$ " x 6"	15.00	8.62
# 14	5" x 5"	25.00	10.11	3" x 7 $\frac{1}{2}$ "	22.50	9.00

2.13 รูปแบบการวิบัติของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแรงเฉือน

การวิบัติด้วยแรงเฉือนสามารถจำแนกประเภทออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ

2.13.1 การแตกในแนวทแยง (Diagonal Shear Failure)

ซึ่งโดยมากการวิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นในโครงสร้างคานหรือโครงสร้างทั่วไป ซึ่งจะมีพฤติกรรมการเกิดที่ค่อนข้างจะมีความตรงไปตรงมา โดยการวิบัติในลักษณะแบบนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทย่อยๆ คือ

1) การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนร่วมแรงดัด (Flexural Shear Failure)

ลักษณะของการเกิดการวิบัติแบบนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจาก ณ ตำแหน่งที่เกิดการวิบัตินั้นขาดการเสริมเหล็กต้านทานแรงเฉือนนั้นน้อยจนเกินไป และจะเกิดจากการที่โครงสร้างต้องรับแรงดัดเป็นหลักโดยที่รอยร้าวชนิดนี้จะเกิดขึ้นในแนวทแยง และจะเกิดขึ้นภายหลังที่โครงสร้างเกิดรอยร้าว เนื่องจากแรงดัดซึ่งรอยร้าวในลักษณะนี้จะเป็รอยร้าวในแนวดิ่ง เนื่องจากว่าหน้าตัดนั้นไม่สามารถรับแรงดัดที่เกิดเนื่องจากแรงดัดได้

2) การวิบัติเนื่องจากเหล็กรับแรงเฉือน (Web Shear Failure)

ลักษณะของการเกิดการวิบัติแบบนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจาก แรงเฉือน และ แรงดัด ร่วมกันนั้นมีค่าที่สูงกว่าค่าหน่วยแรงดัดที่คอนกรีตสามารถที่จะรับได้ ในการออกแบบค่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตเสริมเหล็ก เรามักที่จะต้องทำการคำนวณหาออกมาก่อนว่าหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะสามารถรับแรงเฉือนในแต่ละประเภทว่าออกมามีค่าเป็นเท่าใด และเลือกใช้ค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนที่มีค่าน้อยให้เป็นตัวควบคุมในการออกแบบ

2.13.2) การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Direct Shear Failure)

การวิบัติในลักษณะนี้จะค่อนข้างมีความสลับซับซ้อน เพราะการวิบัติในลักษณะนี้จะเกิดเนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างที่มีสัดส่วนผิวดันไปจากรูปแบบทั่ว ๆ ไปเป็นส่วนใหญ่

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Abdul-Razzaq and Farhood (2017) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก ในส่วนของการทบทวนวรรณกรรม ซึ่งเขาพบว่า ฐานรากเสาเข็มที่ออกแบบด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน ส่วนใหญ่จะมีอัตราส่วนช่วงของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลหรือ a/d น้อยกว่า 1.0 และครึ่งหนึ่งของความลึก โดยข้อกำหนดของมาตรฐานทั่วไปไม่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบลักษณะฐานรากประเภทนี้ เนื่องจากการออกแบบคล้ายกับการออกแบบคาน โดยอาศัยพฤติกรรมแรงดัดเป็นตัวควบคุม โดยเขาสามารถสรุปได้ว่าวิธีการดั้งเดิมหรือสมมติฐานทฤษฎีเบอร์นูลลี (Bernoulli's Theorem) หรือโครงสร้าง B-Region เหมาะสำหรับการออกแบบองค์อาคารที่มีอัตราส่วน (a/d) มากกว่า 2 และสำหรับโครงสร้างที่ขาดความต่อเนื่อง หรือโครงสร้าง D-Region ส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างที่มีลึกลึกมาก ๆ หรือเปลี่ยนหน้าตัดกะทันหัน ซึ่งหากใช้วิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนจะสามารถให้ความแม่นยำมากกว่าวิธีแบบดั้งเดิม ทำให้การวิบัติที่เหนียวมาก (Ductile Failures) ซึ่งสามารถดูดซับพลังงานจำนวนมากและแพร่กระจายช้า ๆ ก่อนเกิดการวิบัติ

Dhahir (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน สำหรับการเสริมต้านทานแรงเฉือนในคานเหล็กด้วยวัสดุ FRP (Fiber Reinforced Polymers) ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่จะอธิบายถึงพฤติกรรมของ FRP ที่เสริมต้านทานในคานที่มีความยาวปกติ ดังนั้นเขาจึงเลือกทำการศึกษาการเสริมวัสดุ FRP ในคานที่มีความลึก ด้วยการออกแบบด้วยวิธี STM ซึ่งมีการศึกษาน้อยมาก โดยผลลัพธ์ที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากงานวิจัยอื่นๆ จำนวน 46 ตัวอย่างที่เสริมด้วยวัสดุ FRP ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้อง และมีค่าเฉลี่ยของการทำนายต่อค่าของการทดลองเท่ากับ 0.99 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.13 และมีผลของการทดลองเทียบกับค่าทางทฤษฎีเท่ากับ 0.85 R Folić (1992) ได้นำเสนอการทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน การออกแบบโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม โดยพวกเขาได้กล่าวว่าวิธีการออกแบบโดยทั่วไป หรือทฤษฎีคาน ไม่เหมาะสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็มที่มีความลึกลึกมาก ๆ หรือโครงสร้างที่ขาดความต่อเนื่อง (D-Region) โดยศึกษาฐานรากที่มีจำนวนของเสาเข็มแตกต่างกัน ได้แก่ 2 ต้น 3 ต้น และ 4 ต้น และเสริมเหล็กในฐานรากแบบกระจุก ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดระหว่างหัวเสาเข็มมาก และจากผลการทดลองเขาอธิบายว่าแบบจำลองโครงข้อหมุน เป็นวิธีการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ

สำหรับโครงสร้างที่มีความเค้นซับซ้อน (Complex Stress) และช่วยให้วิศวกรสามารถออกแบบฐานรากเสาเข็มที่แตกต่างกัน หรือมีแรงเยื้องศูนย์ได้

Park et al. (2008) ได้แสดงผลการเปรียบเทียบการทำนายกำลังรับน้ำหนักของฐานรากเสาเข็มโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน ใช้รูปแบบการแตกร้าว (Crack) และผลของความสัมพันธ์ของความเครียด (Compatibility of Strain) จากตัวอย่างฐานรากที่ทดสอบการวิบัติในห้องปฏิบัติการจำนวน 116 ตัวอย่าง เพื่อแสดงให้เห็นถึงค่าความแม่นยำของพฤติกรรมและประสิทธิภาพของฐานรากจากการทำนายที่แม่นยำกว่า ข้อกำหนด American Concrete Institute (ACI) ปี ค.ศ. 1999 CRSI design handbook ปี ค.ศ. 2002 ซึ่งวิธี STM ได้อ้างอิงตามมาตรฐาน ACI ปี ค.ศ. 2005 หรือ Canadian Standards Association (CSA) ปี ค.ศ. 2004 โดยจากผลการศึกษาพบว่า วิธีที่นำเสนอสามารถทำนายความแข็งแรงของฐานรากเสาเข็มได้อย่างแม่นยำกว่าวิธีดั้งเดิม (Conservative Strength Predictions) ที่ช่วงอัตราส่วนความยาวของแรงเฉือนต่อความลึก (a/d) เท่ากับ 0.49 ถึง 1.8 และมีกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตน้อยกว่า 41 เมกะปาสกาล (400 กก./ซม.^2) ซึ่งแบบจำลองโครงข้อหมุน มีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็ม

de ARAÚJO (2017) นำเสนอการวิเคราะห์ความเชื่อมั่น (Reliability Analysis) ของฐานรากเสาเข็มแกร่ง (Rigid Pile Paps) ด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน โดยใช้แนวคิดการออกแบบพื้นที่ใต้เสาตอม่อ โดยการขยายความเค้นอัดในระดับความสูงของระยะที่ลดลงเพื่อที่จะไม่ให้เกิดการวิบัติแตกที่เสา ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการตรวจสอบด้วยอัลกอริทึมแบบวนซ้ำเพื่อหาระยะดังกล่าว โดยการประเมินความปลอดภัยของโครงสร้างด้วยค่าดัชนีความเชื่อมั่นกับข้อมูลจากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาจำนวน 186 ตัวอย่างประกอบด้วยฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น จำนวน 37 ตัวอย่าง ฐานรากเสาเข็ม 3 ต้น จำนวน 21 ตัวอย่าง และฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น จำนวน 128 ตัวอย่าง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอสามารถวิเคราะห์ความเชื่อมั่นในระดับที่ทำให้โครงสร้างมีความปลอดภัย

Yun (2006) กล่าวว่าวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน เหมาะสำหรับการออกแบบโครงสร้าง ในบริเวณที่มีความเข้มข้นของความเค้นสูง (Disturbed Region) เนื่องจากมีความสามารถในการวิเคราะห์และแสดงทิศทางในการถ่ายแรงในโครงสร้างตามจริง และสามารถทำให้การเสริมเหล็กในตำแหน่งที่ถูกต้อง แต่เพื่อให้ระบบการถ่ายแรงภายในมีความสมดุลและมีประสิทธิภาพจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบจุดต่อ (Node) หรือ บริเวณจุดต่อ (Zone Node) โดยในการศึกษาครั้งนี้เขาได้อธิบายเกี่ยวกับขีดจำกัดของความแข็งแรงของจุดต่อประเภท CCT และ CTT และนำเสนอวิธีการตรวจสอบความแข็งแรงของบริเวณจุดต่อในสองมิติโดยประเมินจากการวิบัติในการทดสอบของโครงสร้าง พบว่ากลไกการวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อรอยร้าวแพร่กระจายอีกด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของบริเวณจุดต่อและจุดยึดรั้งจะวิบัติเมื่อรอยแตกตั้งฉากกับความยาวของเหล็กเสริมที่ฝังในบริเวณจุดต่อ

ส่วนการแตกร้าวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นอัดเกิดขึ้นสองแกน (Biaxial Compression) หรือ ความเค้นดึงสองแกน (Biaxial Tension) สูงสุดจนเกิดการวิบัติ

Geevar and Menon (2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับกำลังของเสาตอม่อ (Pier Caps) คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้วิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน เนื่องจากโครงสร้างกระจายความเครียดไม่เป็นแบบเชิงเส้น (Nonlinear Strain Distribution) ซึ่งวิธีแบบดั้งเดิม (Traditional Method) ด้วยหลักการของแรงเฉือน (Shear) และแรงดัด (Flexural) ไม่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบได้ โดยออกแบบตัวอย่างในการทดลองให้มีช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึก (a/d) น้อยกว่า 1 และมีมาตราส่วนของตัวอย่างเทียบกับขนาดจริงเท่ากับ 1: 3.5 และ 1: 5.6 โดยมีแรงกดกระทำ 4 จุด โดยค่าพารามิเตอร์และข้อกำหนดต่าง ๆ อ้างอิงตามมาตรฐาน ACI 318 และ AASHTO ซึ่งผลการทดลองจะทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทฤษฎี (V_{STM}) และค่าที่ได้จากการทดลองด้วยวิธี (V_{EXP}) จากการศึกษาพบว่า ตัวอย่างทั้งหมดวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนแนวทแยง (Diagonal strut failure) ซึ่งเป็นรูปแบบของการวิบัติโดยทั่วไป โดยแรงกดที่ทำให้เกิดการวิบัติของตัวอย่างในการทดลองอยู่ในช่วง 211 – 956 กิโลนิวตัน (21×10^3 กิโลกรัม – 97.45×10^3 กิโลกรัม) และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าทฤษฎี (V_{EXP}/V_{STM}) โดยแสดงออกมาในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (COV) ในมาตรฐานต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้ ACI, ACI with conf, ACI w/o CCT และ AASHTO เท่ากับ 0.17, 0.15, 0.15 และ 0.12 ตามลำดับ และมีค่าความสอดคล้องของมาตรฐานทั้งหมดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (V_{EXP}/V_{STM}) ทั้งหมดเท่ากับ 0.08 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงกับค่าทฤษฎี

Guo (2018) ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของแรงเฉือนทะเลของฐานรากเสาเข็มภายใต้เสา คอนกรีตเสริมเหล็กและใช้วิธีการเสริมหน้าตัดเหล็กแบบโครงข้อหมุน (Section Steel Truss) ในการเสริมแรง ซึ่งมีการศึกษาน้อยมาก และการใช้วิธีการเสริมเหล็กเพื่อด้านทานแรงเฉือนลักษณะนี้ยังไม่พบเห็นโดยทั่วไป โดยตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดแรก ฐานรากเสาเข็ม 6 ต้น จำนวน 4 ตัวอย่าง โดยมีขนาดกว้างคูณยาวเท่ากับ 1435 x 2160 มม หน้า 380 และ 180 มม และชุดที่สอง 4 ต้น จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยมีขนาดกว้างคูณยาวเท่ากับ 600 x 600 มม หน้า 320 และ 394 มม และใช้การเสริมแรงในแนวทแยงทิศทางเดียวกันกับท่อนรับแรงอัด (Strut) และท่อนรับแรงดึง (Tie) ด้วยแผ่นเหล็กฉาก (Welded Angle sSteel) ขนาด เท่ากับ $\angle 70 \times 7$ มม หน้า 7 มม เท่ากับ $\angle 63 \times 5$ มม หน้า 5 มม และ ขนาด $\angle 70 \times 5$ มม หน้า 5 มม โดยผลการศึกษาพบว่า การเสริมเหล็กเป็นองค์ประกอบของท่อนรับแรงอัดด้วยแผ่นเหล็กฉาก ทำให้ฐานรากสูญเสียกำลังในการรับน้ำหนักของแรงเฉือนทะเล

Kumar et al. (2018) ได้ทำการศึกษาข้อได้เปรียบของวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนสำหรับ คานลิก โดยใช้แบบจำลองอย่างง่ายในการเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างและรายละเอียด การเสริมเหล็กของฐานรากเสาเข็ม 3 ต้น และ 4 ต้น โดยพิจารณาแรงที่กระทำในแนวดิ่งตามแกน แตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ 10,000 15,000 และ 20,000 กิโลนิวตัน ส่วนแรงลม และแรงแผ่นดินไหว จะพิจารณาร่วมกับแรงในแนวก้นที่กระทำจากการทดลอง ในห้องปฏิบัติการ พบว่าแรงที่สูงสุดใน ท่อนรับแรงอัด ในฐานรากเสาเข็ม 3 ต้น มีค่าสูงกว่าฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ร้อยละ 17-18 เนื่องจาก มีเสาค้ำยันของท่อนอัดลดลง และในท่อนรับแรงดึง สูงกว่าร้อยละ 4 เพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวนเสาเข็ม ลดลง และมีปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าร้อยละ 12 25 และ 16.3 สำหรับแรงในแนวก้น 10,000 15,000 และ 20,000 กิโลนิวตัน ตามลำดับ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัยนี้ ซึ่งจะอธิบายเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และตัวอย่างในการทดสอบ รวมทั้งมาตรฐานอ้างอิงที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย โดยมีเนื้อหาสรุปได้ดังนี้

- 3.1 วัสดุและมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง
- 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
- 3.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบฐานราก
- 3.4 ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างฐานราก

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุในงานคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ วัสดุคอนกรีต และเหล็กเสริมรับแรงดึง และแผ่นเหล็กเพลท ที่จุดยึดรั้ง โดยมีรายละเอียดของวัสดุดังนี้

3.1.1 คอนกรีต

ดำเนินการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ที่กำลังอัด f'_c เท่ากับ 210 กก./ซม.² และบ่มในน้ำจนกระทั่งอายุ 28 วัน ก่อนทดสอบกำลังอัดตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C 109 ซึ่งตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้จัดเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1) มาตรฐานการทดสอบ

ใช้มาตรฐานฐาน ASTM C109 (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars)

2) ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม ความสูง 30 ซม ที่ได้รับการบ่ม (Curing) ในน้ำ จนครบอายุการบ่มที่อายุ 28 วัน จำนวน 10 ตัวอย่าง

3.1.2 เหล็กเสริม

ในการศึกษานี้ใช้เหล็กเสริม ซึ่งมีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและพฤติกรรมการรับแรงอัดที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากเหล็กเสริมเป็นวัสดุแบบ Isotropic Materials แต่ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบแรงดึงซึ่งสามารถทำได้ง่ายกว่าการทดสอบแรงกดอัด สำหรับหาจุดคราก (Yield Point) กำลังรับแรงดึงสูงสุด ค่าการยืดตัวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายใต้แรงดึง เพื่อนำคุณสมบัติของเหล็กเสริมไปใช้ในการออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก

1) มาตรฐานการทดสอบ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 20-2543) เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กเส้นกลม (Standard for Steel Bars for Reinforced Concrete : Round Bars)

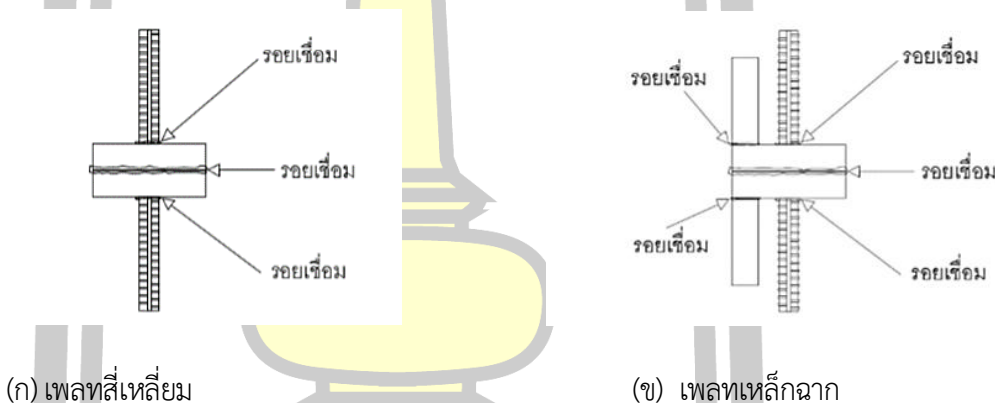
มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 24-2536) เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย(Standard for Steel Bars for Reinforced Concrete: Deformed Bars) Concrete Compressive Strength of Test Specimens)

2) ตัวอย่างทดสอบ

เหล็กเสริมชนิดเส้นกลมขนาด 6 มม RB6 (SR24) จำนวน 5 ตัวอย่าง และเหล็กเสริมชนิดข้ออ้อยขนาด 10 มม DB10 (SD40) จำนวน 5 ตัวอย่าง

3.1.3 แผ่นเหล็กเพลท

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุแผ่นเหล็กเพลท หนา 10 มม สำหรับติดตั้งจุดยึดรั้งที่จุดต่อ (Node) ของฐานราก 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 เหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง x ยาว เท่ากับ 30 x 30 มม. หนา 3 มม. และรูปแบบที่ 2 เหล็กฉาก (Equal Angle Steel) รูปตัวแอล (L) ระยะ 30 x 30 x 30 มม. หนา 3 มม. ทำการทดสอบรอยเชื่อมโดยการเชื่อมเหล็กข้ออ้อยขนาด DB10 (SD40) เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กเพลท ดังภาพประกอบ 26 (ก) และ 26 (ข) โดยกำหนดให้เหล็กเสริมวิบัติขาดก่อนรอยเชื่อมในแผ่นเหล็กเพลท (Plate)



ภาพประกอบ 26 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบรอยเชื่อมแผ่นเหล็กเพลท

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ทดสอบวัสดุและตัวอย่างคอนกรีต

- 1) ชุดทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C143
- 2) ชุดทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C-109 และแรงดึงของเหล็กเสริม ชนิดเส้นกลม และชนิดข้ออ้อย ตามมาตรฐาน มอก. 20-2543 และ มอก. 24-2536 ตามลำดับ
- 3) ชุดทดสอบรอยเชื่อมของแผ่นเหล็กเพลท เพื่อทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยวในรอยเชื่อม โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้วิบัติที่เหล็กเสริม โดยที่ไม่ให้วิบัติที่รอยเชื่อมต่อกับแผ่นเหล็กเพลท

3.2.2 ทดสอบตัวอย่างฐานราก

- 1) เครื่องทดสอบเนกประสงค์ หรือ Universal Testing Machine กำลังทดสอบสูงสุด 300 ตัน
- 2) Dial Gauge (Scale 0.01 มม) จำนวน 2 ชุด
- 3) Liner Variable Differential Transducers (LVDTs) Capacity 100 มม. และ อุปกรณ์จับแท่งคอนกรีต จำนวน 2 ชุด
- 4) แผ่นวัดความเครียด (Strain Gauge) สำหรับวัดการยึดตัวของคอนกรีต และเหล็กเสริม
- 5) กาว Adhesive (CN, Cyanoacrylate) สำหรับติด Strain gauge
- 6) ชุดประมวลผล คือ เครื่องบันทึกข้อมูลดิจิทัล (Data Logger) รับส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์
- 7) เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับต่อเข้ากับชุด Data Logger พร้อมบันทึก
- 8) ตลับเมตรวัดระยะ
- 9) เครื่องตัดอเหล็กเสริม
- 10) อุปกรณ์เชื่อมติดตั้งจุดยึดรั้ง (เหล็กเพลท)

3.3 การเตรียมตัวอย่างฐานรากในการทดลอง

ในการเตรียมตัวอย่างฐานรากในการทดสอบ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งกลุ่มตัวอย่างการทดสอบตามปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการออกแบบฐานรากด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน 3 กลุ่ม ได้แก่

- กลุ่มที่ 1 ออกแบบระยะความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกแตกต่างกัน
- กลุ่มที่ 2 ออกแบบอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาตอม่อและเสาเข็มแตกต่างกัน
- กลุ่มที่ 3 ออกแบบจุดยึดรั้งแตกต่างกัน

โดยมีรายละเอียดการเตรียมตัวอย่างดังนี้

3.3.1 เตรียมตัวอย่างฐานรากกลุ่มที่ 1

ออกแบบอัตราส่วนของช่วงความยาวแรงเฉือนต่อความลึกแตกต่างกัน ที่ใช้ในการศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและการวิบัติของฐานรากที่ออกแบบด้วยวิธีโครงข้อหมุนแบบจำลอง ได้แก่ หน่วยแรงสูงสุด โมดูลัสยืดหยุ่น และลักษณะการวิบัติ (Failure Mode) จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า ระยะความยาวช่วงแรงเฉือนต่อความลึกของฐานรากมีผลต่อพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและลักษณะของการวิบัติของฐานราก

- 1) ขอบเขตของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1

เลือกใช้ฐานรากเสาเข็ม 2 ตัน จำนวน 10 ตัวอย่าง และ 4 ตัน จำนวน 10 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด จำนวน 20 ตัวอย่าง โดยออกแบบระยะความยาวของแรงเฉือนต่อความลึก หรือ Shear Span Depth Ratio (a/d) แตกต่างกัน 4 ระยะ (a/d) เท่ากับ 0.75 , 1.00, 1.25 และ 1.50 หรือความลึก 10 12 15 และ 20 ซม ตามลำดับ โดยฐานรากทั้งหมดนี้ได้รับการออกแบบโดยวิธี

แบบจำลองโครงข้อหมุนและเสริมเหล็ก 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบกระจุก (Bunched Square) และแบบกระจาย (Grid) ตามมาตรฐาน ACI318-14

2) การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

2.1) เตรียมแบบหล่อฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้ตามตาราง 8 พร้อมเตรียมเหล็กเสริมที่ติดตั้ง ตามขนาดของฐานรากแล้ว โดยกำหนดระยะหุ้มคอนกรีตของตัวอย่างฐานราก เพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 2.5 ซม

2.2) ตรวจสอบความสะอาดของแบบหล่อ ทาน้ำมันที่ผิวไม้แบบ หนุนลูกปูนและวางเหล็กเสริมลงในแบบหล่อ หลังจากนั้นเทคอนกรีตใช้เครื่องจี้คอนกรีตทำให้แน่น ไล่ฟองอากาศ พร้อมเก็บตัวอย่างคอนกรีต 5 ตัวอย่าง

2.3) หลังจากครบ 24 ชั่วโมง ถอดแบบหล่อแล้วนำไปบ่มด้วยกระสอบเปียก และทำการทดสอบเมื่อครบ 28 วัน

ตาราง 8 ตัวอย่างทดสอบ กลุ่มที่ 1 อัตราส่วนความยาวช่วงแรงเฉือนต่อความลึก (a/d) เท่ากับ 0.75 1.00 1.25 และ 1.50

กลุ่ม ตัวอย่าง	ขนาดฐานราก กว้าง x ยาว (ซม.)	ขนาดฐานราก กว้าง x ยาว (ซม.)	ขนาดเสาตอม่อ กว้าง x ยาว (ซม.)	(a/d)	ความลึก (ซม.)	รูปแบบ การ เสริมเหล็ก	จำนวน ตัวอย่าง (ฐาน)
F2A-0.75G (a/d)	30x50	10x10	20x20	0.75	20	G	2
F2A-0.75B (a/d)	30x50	10x10	20x20	0.75	20	B	2
F2A-1.00G (a/d)	30x50	10x10	20x20	1.00	15	G	2
F2A-1.25G (a/d)	30x50	10x10	20x20	1.25	12	G	2
F2A-1.50G (a/d)	30x50	10x10	20x20	1.50	10	G	2
F4A-0.75B (a/d)	50x50	10x10	20x20	0.75	20	B	2
F4A-0.75G (a/d)	50x50	10x10	20x20	1.00	20	G	2
F4A-1.00G (a/d)	50x50	10x10	20x20	1.25	15	G	2
F4A-1.25G (a/d)	50x50	10x10	20x20	1.50	12	G	2
F4A-1.50G (a/d)	50x50	10x10	20x20	0.75	10	G	2
Total of Pile caps							20

3.3.2 เตรียมตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2

ออกแบบอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาตอม่อและหน้าตัดเสาเข็มแตกต่างกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการออกแบบพื้นที่หน้าตัดเสาตอม่อและหน้าตัดเสาเข็มที่แตกต่างกัน ที่มีผลต่อพฤติกรรมและการวิบัติของฐานรากที่ออกแบบด้วยวิธีโครงข้อหมุน และ จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า เมื่อพื้นที่หน้าตัดขององค์อาคารใหญ่ขึ้นจะทำให้พื้นที่รับแรงของโหนดหรือจุด

3.3.3 เตรียมตัวอย่างฐานรากกลุ่มที่ 3

ออกแบบจุดยึดตั้งแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ ข้องอ 90 แผ่นเหล็กเพลท ขนาด 30 x 30 มม.หนา 3 มม. และ แผ่นเหล็กฉากขนาด L 30x30x30มม. หนา 3 มม. โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการออกแบบจุดยึดตั้งที่มีผลต่อพฤติกรรมและการวิบัติของฐานรากที่ออกแบบด้วยวิธีโครงข้อหมุน และจากการทบทวนงานวิจัยพบว่า จุดต่อเป็นสิ่งที่สำคัญมากกับวิธีการออกแบบด้วยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน เพราะจุดยึดตั้งที่แข็งแรงจะทำให้จุดต่อ หรือโหนดมีความแข็งแรงมากๆ ทำให้การถ่ายแรงในโครงสร้างมีความสมดุลมากขึ้น

1) ขอบเขตของตัวอย่างกลุ่มที่ 3

เลือกใช้ฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น จำนวน 6 ตัวอย่าง และ 4 ต้น จำนวน 12 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด จำนวน 18 ตัวอย่าง ออกแบบจุดยึดตั้งแตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ ข้องอ 90 แผ่นเหล็กเพลทขนาด 30 x 30 มม. หนา 3 มม. และ แผ่นเหล็กฉากขนาด L 30x30x30 มม. หนา 3 มม. แทนด้วยสัญลักษณ์ A, B และ C ตามลำดับ และวางเสริมเหล็กแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบกระจุก (Bunched Square) และแบบกระจาย (Grid) แทนด้วยสัญลักษณ์ B และ G ตามลำดับ

2) การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

2.1) เตรียมแบบหล่อฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้ตามตารางที่ 3.3 พร้อมเตรียมเหล็กเสริมที่ติดตั้ง ตามขนาดของฐานราก โดยกำหนดระยะหุ้มคอนกรีตของตัวอย่างฐานราก เพื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 2.5 ซม.

2.2) ตรวจสอบความสะอาดของแบบหล่อ ทาน้ำมันที่ผิวไม้แบบ หนูนูกปูน และวางเหล็กเสริมลงในแบบหล่อ หลังจากนั้นเทคอนกรีตใช้เครื่องจี้คอนกรีตทำให้แน่น ไล่ฟองอากาศ พร้อมเก็บตัวอย่างคอนกรีต 3 ตัวอย่าง

2.3) หลังจากครบ 24 ชั่วโมง ถอดแบบหล่อแล้วนำไปบ่มด้วยกระสอบเปียก และทำการทดสอบเมื่อครบ 28 วัน

ตาราง 10 ตัวอย่างฐานทดสอบ กลุ่มที่ 3 ออกแบบจุดยึดตั้งแตกต่างกัน 3 รูปแบบ

กลุ่ม ตัวอย่าง	ขนาดฐานราก กว้าง x ยาว (ซม.)	ขนาดเสาเข็ม กว้าง x ยาว (ซม.)	ขนาดเสาตอม่อ กว้าง x ยาว (ซม.)	รูปแบบจุดยึดตั้ง	ความ ลึก (ซม.)	รูปแบบ การ เสริมเหล็ก	จำนวน ตัวอย่าง (ฐาน)
F2C-AB	30x50	10x10	20x20	ข้องอ 90 องศา	20	B	2
F2C-BB	30x50	10x10	20x20	แผ่นเหล็กเพลท สี่เหลี่ยม	20	B	2
F2C-CB	30x50	10x10	20x20	แผ่นเหล็กฉาก L	20	B	2
F4C-AB	50x50	10x10	20x20	ข้องอ 90 องศา	20	G	2
F4C-BB	50x50	10x10	20x20	แผ่นเหล็กเพลท สี่เหลี่ยม	20	G	2
F4C-CB	50x50	10x10	20x20	แผ่นเหล็กฉาก L	20	G	2
F4C-AG	50x50	10x10	20x20	ข้องอ 90 องศา	20	B	2

F4C-BG	50x50	10x10	20x20	แผ่นเหล็กเพลท สี่เหลี่ยม	20	B	2
F4C-CG	50x50	10x10	20x20	แผ่นเหล็กฉาก L	20	B	2
Total of Pile caps							18

*** สัญลักษณ์ A, B และ C ตามลำดับ คือ ช่อง 90 องศา แผ่นเหล็กเพลท สี่เหลี่ยม และ แผ่นเหล็กฉาก L ตามลำดับ

3.4 ขั้นตอนการทดสอบตัวอย่าง

ขั้นตอนการทดสอบฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 2 ต้น และ 4 ต้นโดยออกแบบฐานรากเสาเข็มจำลองให้มีขนาด 1 : 2 หรือครึ่งหนึ่ง (1/2) ของขนาดฐานรากเสาเข็มจริงและออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักกระทำแบบจุด (Point Load) เท่ากับ 10 ตัน โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.4.1 ทำการติดตั้งตัวอย่างฐานรากทั้ง 3 กลุ่มทดสอบ สำหรับเพื่อทำการทดสอบเข้ากับแท่นทดสอบดังแสดงในรูป 3.2 โดยกำหนดให้ทั้งเสาเข็มและเสาตอม่อไม่ให้ขยับก่อนฐานราก

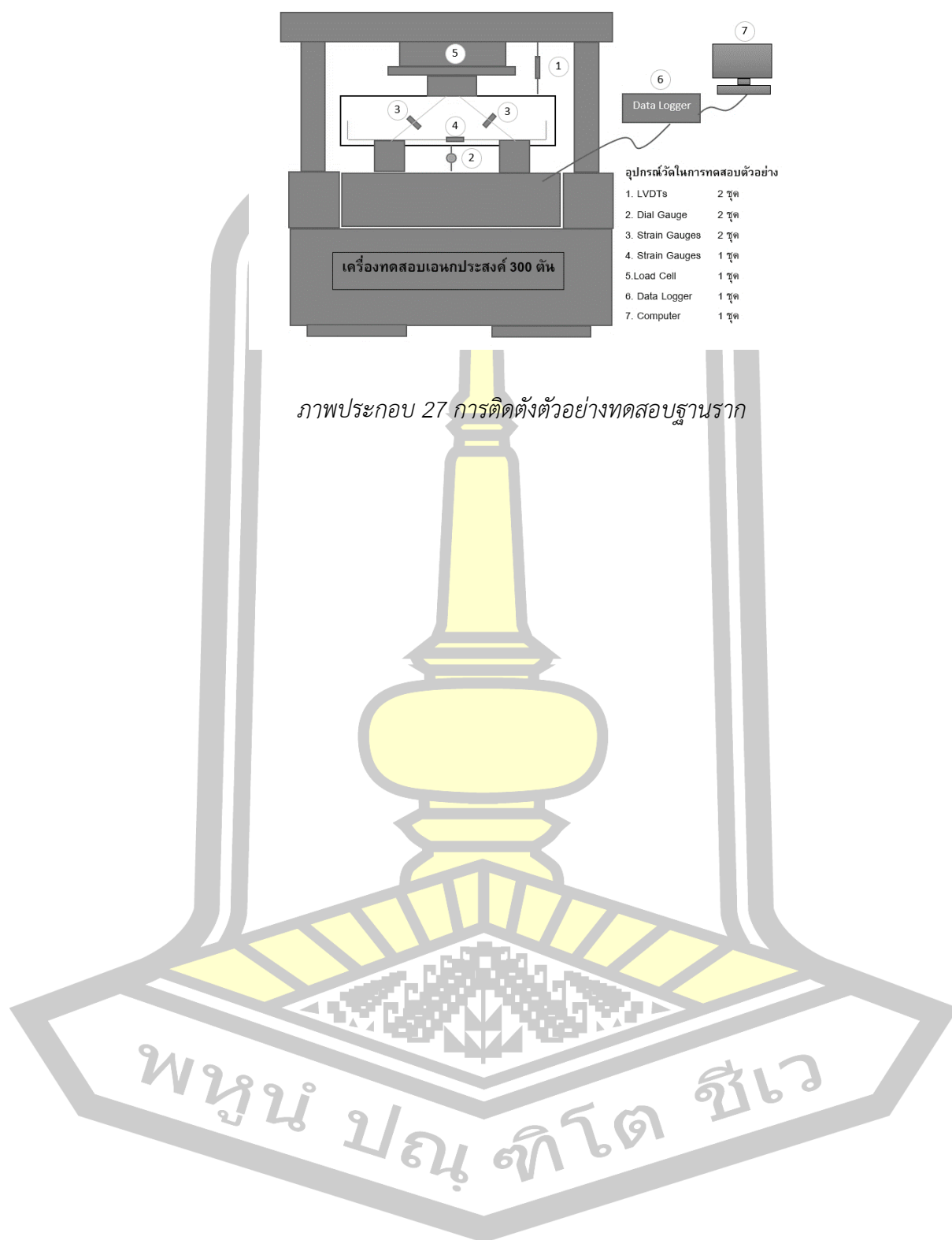
3.4.2 ติดตั้ง Dial Gauge และ LVDTs เพื่อวัดระยะการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบที่ตำแหน่งกึ่งกลางฐานราก 2 ตัวในทิศทางด้านแกน X และแกน Y ด้านละ 1 ตัวและชุด LVDT ด้านบนถึงกลางของฐานรากเพื่อให้ระยะแอ่นตัวที่สัมพันธ์กับ Dial Gauge ด้านล่างตัวอย่างทดสอบและทำการตั้งค่าศูนย์แก่ Dial และ LVDT ดังแสดงในภาพประกอบ 27

3.4.3 ทำการต่อสายไฟจาก Strain Gauge ที่ติดไว้ที่เหล็กเสริมรับแรงดึงของฐานรากตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger

3.4.4 ดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่อง UTM 300 ตัน บันทึกค่าแรงต่าง ๆ ค่าการแอ่นตัวของตัวอย่างทดสอบจาก Dial Gauge และ LVDT ทั้งหมด 2 ตัว และลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบโดยติดตั้งกล้องบันทึกการทดสอบ

3.4.5 ทำการทดสอบและเก็บบันทึกในเครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger ในกระทั่งระยะการแอ่นตัวสูงสุดที่กึ่งกลางของฐานรากเท่ากับความยาวประสิทธิภาพด้านยาวของฐานรากหารด้วย 100 ซึ่งมีค่าประมาณ 2.4 เท่าของระยะการแอ่นตัวที่ยอมให้ในมาตรฐานจากการออกแบบจากนั้นถอด Dial gauge ทั้งหมดออกเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับ Dial Gauge

3.7.6 ทำการเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์เพื่อสังเกตและบันทึกลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ



บทที่ 4

การวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอถึง ผลการทดสอบวัสดุเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบ ได้แก่ คอนกรีต เหล็กเสริมคอนกรีต นอกจากนั้นได้นำเสนอเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของตัวอย่างฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบด้วยวิธีโครงข้อหมุนแบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วย 1) อัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d) 2) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (c/p) และ 3) รูปแบบจุดยึดรั้งที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก

4.2 ผลการวิเคราะห์ออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่รองรับด้วยเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น

4.3 การแอ่นตัวของฐานรากภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำที่สภาวะแรงกระทำสูงสุด

4.4 การแตกร้าวและการวิบัติภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำที่สภาวะต่างๆ

4.5 ลักษณะการแตกร้าวในฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ต้น และ 4 ต้น ที่ได้รับการเสริมเหล็กรูปแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G)

4.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการออกแบบด้วยข้อกำหนด ACI318M-14

4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ และตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก

4.1.1 การทดสอบแรงอัดของคอนกรีต

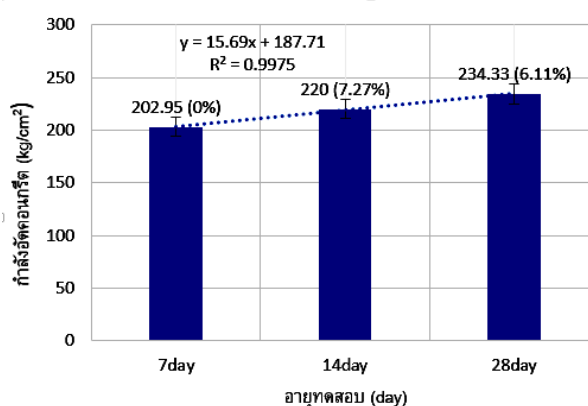
ในการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. และความสูง 30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C39 ได้มีการทดสอบแรงอัดสูงสุด โดยคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบได้ออกแบบสัดส่วนผสมกำลังอัดแสดงในบทที่ 3 ซึ่งเป็นคอนกรีตทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. และสูง 30 ซม. จำนวน 9 ตัวอย่าง ทดสอบที่อายุ 7 14 และ 28 วัน โดยมีรายละเอียดค่าที่ได้จากการทดสอบแสดงในตาราง 11

ตาราง 11 ผลการทดสอบแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ออกแบบกำลังอัด 210 กก./ซม.²

ชื่อตัวอย่าง คอนกรีต	น้ำหนักกิโลกรัม (kg)	ความหนาแน่น (kg/cm. ³)	กำลังอัด P/A (kg/cm. ²)
C210-7d	12.26	2,313.75	202.95
C210-14d	12.15	2,290.99	220.00

C210-28d	12.13	2,290.47	234.33
----------	-------	----------	--------

จากผลการวิเคราะห์ในตาราง 11 พบว่าค่ากำลังอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุของการทดสอบ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 202.95 – 234.33 กก./ชม.² โดยที่อายุ 7 14 และ 28 วัน มีค่าเฉลี่ยตามลำดับเป็น 202.95, 220.00 และ 243.33 กก./ชม.² ตามลำดับ โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างต่อเนื่องที่อายุ 7 – 28 วัน อยู่ในช่วงร้อยละ 0 – 6.11 และมีสมการการพัฒนากำลังอัด เท่ากับ $y = 15.69x + 187.71$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.995 ดังแสดงในภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 กำลังรับแรงอัดคอนกรีต รูปทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม.

สูง 30 ซม. ที่อายุ 7 วัน , 14 วัน , 28 วัน

4.1.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้เสริมในตัวอย่างฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นชนิดเหล็กข้ออ้อย DB10 ขนาด 10 มม. ที่มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากอยู่ที่ 4,000 กก./ชม.² โดยได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงดึงตามมาตรฐาน มอก 24-2536 เกี่ยวกับเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (เหล็กข้ออ้อย) โดยใช้เครื่อง UTM ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดในแนวก้นตามที่ได้แสดงไว้ในตาราง 12 อย่างถูกต้องและเป็นไปตามเนื้อหาของมาตรฐานที่ระบุ

ตาราง 12 ผลการทดสอบคุณสมบัติค่าเฉลี่ยกำลังดึงของเหล็กเสริมชนิดข้ออ้อย DB10 SD40

Nominal bar diameter (mm.)	Surface texture	Yield stress (kg/cm. ²)	Ultimate stress (kg/cm. ²)	Modulus of elasticity; Es (kg/cm. ²)	Elongation (%)
10	Deformed	4.28×10^2	5.01×10^2	2.01×10^6	27.48

จากการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงดึงในเหล็กเสริมที่จุดครากมีค่าเท่ากับ 42,789.06 กก./ชม.² และค่าแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 50,101.54 กก./ชม.² โมดูลัสยืดหยุ่นอยู่ที่ประมาณ 201,00,00 กก./ชม.² รวมถึงมีการยืดหดประมาณร้อยละ 27.48 โดยที่คุณสมบัติของเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ สอดคล้องกับมาตรฐาน มอก 24-2536 ของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (เหล็กข้ออ้อย) โดยที่ค่าต้านทานแรงดึงที่จุดคราก แรงดึงสูงสุด และการยืดหดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มาตรฐานเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (เหล็กข้ออ้อย) โดยภายใต้เงื่อนไขทดสอบที่สอดคล้องกับมาตรฐาน มอก 24-2536 ของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต(เหล็กข้ออ้อย)จึงสรุปได้ว่าเหล็กเสริมที่นำมาใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติตามมาตรฐานอย่างเห็นได้ชัด

4.2 ผลการวิเคราะห์ห่ออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่รองรับด้วยเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น

หัวข้อนี้เป็นการอธิบายผลการวิเคราะห์ห่ออกแบบฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเสาเข็มรองรับจำนวน 2 ต้น และ 4 ต้น โดยได้กำหนดปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการรับกำลังของฐานราก แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 ผลของอัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) ใช้ชื่อย่อ F2A และ F4A สำหรับเสาเข็ม 2 ต้นและ 4 ต้น ตามลำดับ

กลุ่มที่ 2 ผลของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อม่อ ต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (c/p) ใช้ชื่อย่อ F2B และ F4B สำหรับเสาเข็ม 2 ต้นและ 4 ต้น ตามลำดับ

กลุ่มที่ 3 ผลของรูปแบบจุดยึดรั้ง ใช้ชื่อย่อ F2C และ F4C สำหรับเสาเข็ม 2 ต้นและ 4 ต้น ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์แบบจำลองโครงข้อหมุนของโครงการนี้ กลุ่มที่ 1 กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 จะศึกษาผลที่เกิดขึ้นตามองค์ประกอบของแบบจำลองโครงข้อหมุนที่ได้มาจากการออกแบบตามทฤษฎีแบบจำลองโครงข้อหมุน เช่น แรงในท่อนแรงอัด (Strut) แรงในท่อนแรงดึง (Tie) และแรงในบริเวณจุดต่อ (Node) รวมถึงปริมาณเหล็กเสริมที่คำนวณได้จากท่อนแรงดึง โดยมีรายละเอียดของการวิเคราะห์ห่ออกแบบแสดงในตาราง 13 – 16 โดยกลุ่มที่ 1 ถึงกลุ่มที่ 3 ได้เริ่มการวิเคราะห์ด้วยการศึกษาแรงในท่อนแรงอัด (Strut) และแรงในท่อนแรงดึง (Tie) และแรงในบริเวณจุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในโครงข้อหมุน ทำให้เข้าใจถึงการกระจายแรงและการปรับตัวของโครงสร้างได้อย่างชัดเจน ซึ่งรายละเอียดของการวิเคราะห์ห่ออกแบบถูกแสดงในตาราง 13- 16 ดังนี้

ตาราง 13 ผลการออกแบบกลุ่มที่ 1 อัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) ต่อฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น

	Load Design (ton)	Pile Load reaction (ton)	Angle (°)	Member Forces			Steel reinforcement	
				Strut (ton)	Tie		Main	Temp.
					Force (ton)	Asreq (cm ²)	AS (cm ²)	Ast (cm ²)
F2A - 0.75B (a/d)	15	7.5	56.5	8.99	4.96	1.43	#2DB10 (1.57)	#2DB10 (1.57)
F2A - 0.75G (a/d)	15	7.5	56.5	8.99	4.96	1.43	#2DB10 (1.57)	#2DB10 (1.57)
F2A - 1.00G (a/d)	15	7.5	46.8	10.28	7.04	2.02	#3DB10 (2.34)	#2DB10 (1.57)
F2A - 1.25G (a/d)	15	7.5	37.6	12.02	9.04	2.79	#4DB10 (3.12)	#2DB10 (1.57)
F2A - 1.50G (a/d)	15	7.5	29.1	14.19	12.05	3.86	#5DB10 (3.90)	#2DB10 (1.57)
F4A - 0.75G (a/d)	42	10.5	44.7	14.93	14.85	2.41	#4DB10 (3.12)	#4DB10 (3.12)
F4A - 0.75B (a/d)	42	10.5	44.7	14.93	14.85	2.41	#4DB10 (3.12)	#4DB10 (3.12)
F4A - 1.00G (a/d)	30	7.5	34.8	13.14	14.85	2.19	#3DB10 (2.34)	#3DB10 (2.34)
F4A - 1.25G (a/d)	20	5.0	28.1	10.62	10.60	1.91	#3DB10 (2.34)	#3DB10 (2.34)
F4A - 1.50G (a/d)	15	3.75	21.3	10.32	7.07	1.96	#3DB10 (2.34)	#3DB10 (2.34)

*** F2A และ F4A คือ ฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น กลุ่มที่ 1 ตามลำดับ
a/d คือ ความยาวช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ
B และ G คือ การเสริมเหล็กแบบกระจุกและแบบตาราง ตามลำดับ

ในตาราง 13 สำหรับกลุ่มที่ 1 อัตราส่วนระหว่างช่วงความยาวของแรงเฉือน (a) และความลึกประสิทธิภาพ (d) หรือ a/d ได้รับการกำหนดในการออกแบบฐานรากเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกของ 15 ต้น และ 42 ต้น สำหรับเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น โดยมีการกำหนดช่วงของ a/d ที่ใช้ในการออกแบบตั้งแต่ 0.75 ถึง 1.50 และมีความหนาของฐานรากในช่วง 10 – 20 เซนติเมตร จากการทดลอง พบว่ามุมของท่อนแรงอัด (Strut) และท่อนแรงดึง (Tie) มีการลดลงอย่างต่อเนื่องตามอัตราส่วน a/d ที่เพิ่มขึ้น สำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น มีค่าอยู่ในช่วง 31.9 ถึง 56.5 องศา และ สำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น มีค่า 3.7 ถึง

10.5 องศา ทั้งนี้ฐานรากทั้งสองประเภทมีค่ากำลังอัดใน Strut และค่าแรงดึงใน Tie เพิ่มขึ้นตามค่าองศาที่ลดลง ซึ่งนำไปสู่ความจำเป็นในการออกแบบเหล็กเสริมด้วยค่าที่เพิ่มขึ้นตามที่ระบุในตาราง 13

ตาราง 14 ผลการออกแบบกลุ่มที่ 2 อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม(c/p) ต่อฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น

Pile caps No.	Load Design (ton)	Pile Load reaction (ton)	Angle (- °)	Member Forces			Steel reinforcement	
				Strut (ton)	Tie		Main	Temp.
					Force (ton)	Asreq (cm ²)	AS (cm ²)	Ast (cm ²)
F2B- 1.13B (c/p)	15	7.5	56.50	8.99	4.96	1.43	#2DB10 (1.57)	#2DB10 (1.57)
F2B- 1.13G (c/p)	15	7.5	56.50	8.99	4.96	1.43	#2DB10 (1.57)	#2DB10 (1.57)
F2B- 1.53G (c/p)	15	7.5	57.99	8.85	4.68	1.35	#2DB10 (1.57)	#2DB10 (1.57)
F2B- 2.00G (c/p)	15	7.5	59.53	8.70	4.41	1.27	#2DB10 (1.57)	#2DB10 (1.57)
F4B- 1.00B (c/p)	42	10.5	44.79	14.90	14.85	1.76	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)
F4B- 1.00G (c/p)	42	10.5	44.79	14.90	14.85	1.76	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)
F4B- 1.27B (c/p)	42	10.5	50.57	13.59	14.85	1.76	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)
F4B- 1.27G (c/p)	42	10.5	50.57	13.59	14.85	1.76	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)
F4B- 1.56B (c/p)	42	10.5	53.95	12.98	14.85	1.55	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)
F4B- 1.56G (c/p)	42	10.5	53.95	12.98	14.85	1.55	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)

*** F2B และ F4B คือ ฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น กลุ่มที่ 2 ตามลำดับ

(c/p) คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อเสาเข็ม

B และ G คือ การเสริมเหล็กแบบกระจุกและแบบตาราง ตามลำดับ

ตาราง 14 นำเสนอผลการออกแบบของกลุ่มที่ 2 โดยมีการกำหนดอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเสาต่อเสาเข็ม (c) ต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (p) ต่อฐานรากเสาเข็ม 2 ต้นและ 4 ต้น เพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกของ 15 ต้นและ 42 ต้น ตามลำดับ โดยกำหนดอัตราส่วน (c/p) เท่ากับ 1.13, 1.53 และ 2.00 สำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และค่า 1.00, 1.27 และ 1.56 สำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น กำหนดความหนา

ของฐานรากคงที่เท่ากับ 20 ซม. จากการศึกษาทดลอง พบว่าเมื่ออัตราส่วน (c/p) เพิ่มขึ้น แรงในท่อนแรงอัด (Strut) และแรงในท่อนแรงดึง (Tie) ในฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น จะลดลง ในขณะที่ฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ท่อนแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นและท่อนแรงดึงมีค่าลดลง ผลการทดลองนี้ ชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการเลือกใช้เหล็กเสริมที่ใกล้เคียงกันในฐานราก ดังแสดงในตาราง 14

ตาราง 15 ผลการออกแบบกลุ่ม 3 ออกแบบจุดยึดรั้งที่ต่างกันต่อฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น

Pile caps No.	Load Design (ton)	Pile Load reaction (Ton)	Angle (- °)	Member Forces			Steel reinforcement	
				Strut	Ties		Main	Temp.
					Force (Ton)	$A_{s_{req}}$ (cm ²)	AS (cm ²)	Ast (cm ²)
F2C-AG	15	7.5	56.50	8.99	4.96	1.43	#2DB10 (1.57)	#2DB10 (1.57)
F2C-BG	15	7.5	56.50	8.99	4.96	1.43	#2DB10 (1.57)	#2DB10 (1.57)
F2C-CG	15	7.5	56.50	8.99	4.96	1.43	#2DB10 (1.57)	#2DB10 (1.57)
F4C-AB	42	10.5	44.79	14.90	14.85	1.76	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)
F4C-BB	42	10.5	44.79	14.90	14.85	1.76	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)
F4C-CB	42	10.5	44.79	14.90	14.85	1.76	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)
F4C-AG	42	10.5	44.79	14.90	14.85	1.76	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)
F4C-BG	42	10.5	44.79	14.90	14.85	1.76	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)
F4C-CG	42	10.5	44.79	14.90	14.85	1.76	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)

*** F2C และ F4C คือ ฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น กลุ่มที่ 3 ตามลำดับ

A, B, C คือ, งอฉากเหล็กเสริมงอ 90 องศา แผ่นเพลท 30x30 มม.หนา 3 มม และ เหล็กฉาก L 30x30x30 มม.

หนา 3 มม

B และ G คือ การเสริมเหล็กแบบกระจุกและแบบกระจาย ตามลำดับ

และในตาราง 15 นำเสนอผลการออกแบบของกลุ่มที่ 3 ออกแบบจุดยึดรั้งที่แตกต่างกันต่อฐานรากเสาเข็ม 2 ต้นและ 4 ต้น ได้แก่ (AG, BG) การงอฉากเหล็กเสริม 90 องศา (BG, BB) การเชื่อมยึดแผ่นเพลท 30x30 มม.หนา 3 มม. และ(CG, CB) เหล็กฉาก L 30x30x30 มม. หนา 3 มม. โดยออกแบบฐานรากให้มีความหนา 20 ซม. และออกแบบน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ 15 ตัน สำหรับเสาเข็ม 2 ต้น และ 42 ตัน สำหรับเสาเข็ม 4 ต้น โดยจากการทดลอง พบว่าการเสริมจุดยึดรั้งทั้ง 3 รูปแบบไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงในท่อนแรงอัด และแรงดึงในฐานราก เนื่องจากฐานที่ใช้ในการออกแบบมีมุมมองคงที่ จึงทำให้แรงในท่อนแรงอัดและแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงแต่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมการแตกร้าวได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากฐานรากมีจุดยึดรั้งที่ปลายเหล็กเสริมแตกต่างกัน โดยในฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น มีค่าแรงในท่อนแรงอัด (Strut) เท่ากับ 8.99 กก./ซม.² และในท่อนแรงดึง (Tie) เท่ากับ 4.96 กก./ซม.² สำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น มีค่าแรงในท่อนแรงอัด (Strut) เท่ากับ 14.85 กก./ซม.² และในท่อนแรงดึง (Tie) เท่ากับ 1.76 กก./ซม.²

ตาราง 16 ผลการออกแบบกลุ่ม 4 ฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น โดยวิธีทั่วไป

Pile caps No.	Load Design (ton)	Pile Load reaction (Ton)	Steel reinforcement	
			Main	Temp..
			AS (cm ²)	Ast (cm ²)
F2 - USD	15	7.5	#3DB10 (2.35)	#3DB10(2.35)
F4 - USD	42	7.5	#4DB10 (3.14)	#4DB10 (3.14)

*** F2 และ F4 คือ ฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น

USD วิธีกำลัง

ตาราง 16 คือผลการออกแบบฐานรากโดยวิธีทั่วไปโดยออกแบบฐานรากเสาเข็ม 2 ต้นให้รับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำได้ 15 ตัน และ ฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น รับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเท่ากับ 42 ตัน เพื่อนำไปศึกษาเปรียบกับการออกแบบพฤติกรรมการรับแรงในฐานรากกับวิธีการออกแบบฐานรากโดยใช้วิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน

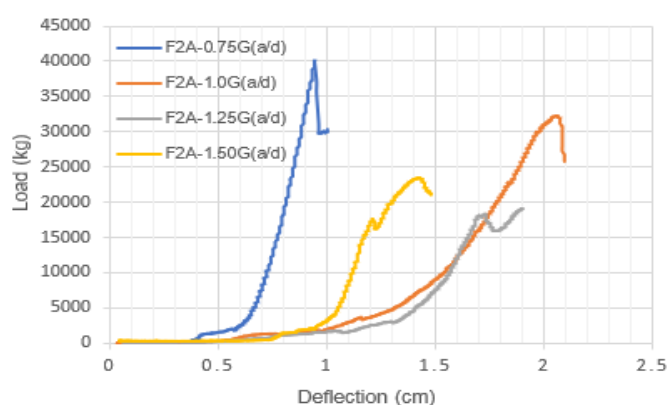
4.3 การแอ่นตัวของฐานรากภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำที่สภาวะแรงกระทำสูงสุด

ในรายงานงานวิจัยของ Kumar (2014) ได้ทำการวัดระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก พบว่าการแอ่นตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเส้นตรงและมีช่วงระยะค่อนข้างน้อยมากอยู่ในช่วงไม่เกิน 5 – 15 มม. สำหรับในงานวิจัยนี้จะแสดงความสัมพันธ์

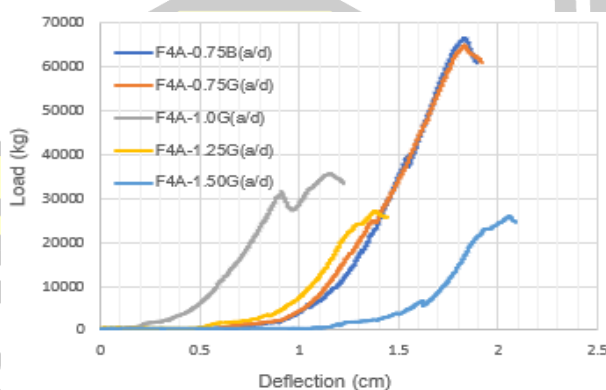
ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำกับระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของฐานรากในสถานะแรงกระทำสูงสุด (Ultimate Crack) โดยสามารถอธิบายดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำกับระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของฐานรากในสถานะแรงกระทำสูงสุดของฐานรากเสาเข็มที่มีอัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d) เท่ากับ 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 ของฐานรากเสาเข็ม 2 ตัน และ 4 ตัน

ภาพประกอบ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการรับน้ำหนักบรรทุกที่จุดกึ่งกลางช่วง (Mid-Span) กับระยะการแอ่นตัว (Deflection) ของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเสาเข็มรองรับ 2 ตัน และ 4 ตัน ที่สถานะแรงกระทำสูงสุด (Ultimate Compressive Strength) โดย



(a) ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของฐานรากเสาเข็ม 2 ตัน



(b) ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของฐานรากเสาเข็ม 4 ตัน

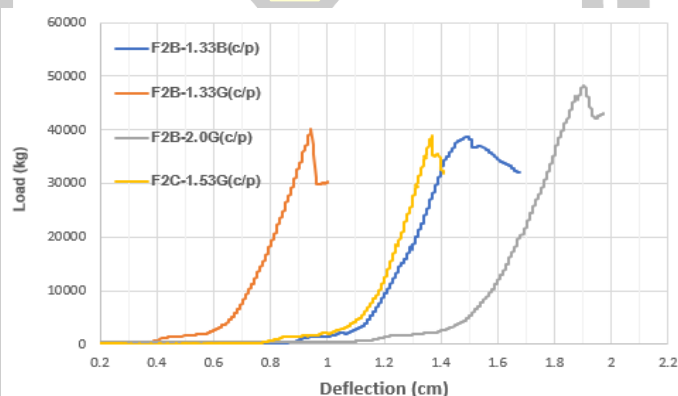
ภาพประกอบ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและระยะแอ่นตัวของฐานรากเสาเข็ม 2 ตันและ 4 ที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 0.75-1.50

ภาพประกอบ 29(a) เป็นผลการทดสอบระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกกระทำของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ได้แก่ F2A-0.75G, F2A-1.0G, F2A-1.25G และ F2A-1.50G โดยเส้นกราฟในช่วงแรกมีความชันขึ้นตรงไปเรื่อยๆ กระทั่งน้ำหนักบรรทุกกระทำเกิดการโก่งตัวเล็กน้อยที่ได้ฐานรากซึ่งจะมีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น สังเกตจากเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันโดยจะเรียงลำดับจากการรับน้ำหนักกระทำสูงสุดไปหาน้อยสุด ซึ่งมีระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วงตามทีน้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุดเท่ากับดังนี้ ฐานราก F2A-0.75G(a/d) รับน้ำหนักได้สูงสุดเท่ากับ 40,141.8 กก. ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 0.96 ซม. F2A-1.0G(a/d) เท่ากับ 3,225.6 กก. ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 2.06 ซม. F2A-1.25G(a/d) เท่ากับ 23,570.7 กก. ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 1.43 ซม. และรับน้ำหนักได้น้อยสุดคือ F2A-1.50G(a/d) เท่ากับ 19,026.7 กก. มีค่าระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 1.90 ซม. หลังจากนั้นฐานรากจะรับน้ำหนักไปจนกระทั่งเกิดการวิบัติโดยตัวอย่างฐานรากที่ทำการทดสอบส่วนใหญ่จะวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนมีรอยแตกร้าวทำมุมเอียง 45 องศา จากจุดรองรับโดยเสาเข็มไปจนถึงจุดกดรับน้ำหนักหลังจากนั้นส่งผลให้น้ำหนักบรรทุกกระทำลดลงอย่างรวดเร็ว

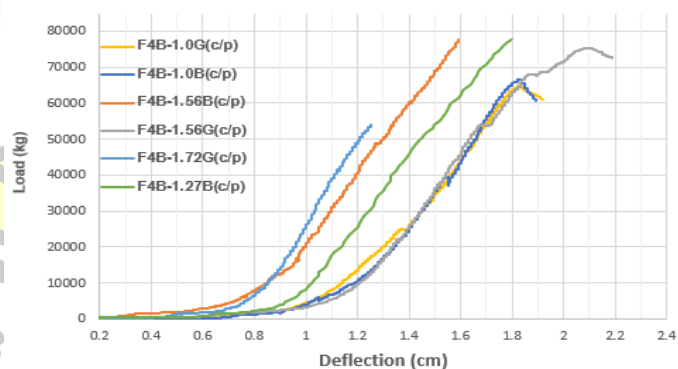
สำหรับภาพประกอบ 29(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกกระทำกับระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วงของฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ได้แก่ F4A-0.75B(a/d), F4A-0.75G(a/d), F4A-1.0G(a/d), F4A-1.25G(a/d) และ F4A-1.50G(a/d) โดยเปรียบเทียบการเสริมเหล็กในโครงสร้างฐานรากแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G) โดยใช้ตัวอย่างฐานราก F4A-0.75B(a/d) และ F4A-0.75G(a/d) เนื่องจากมีความลึก 20 ซม. ซึ่งมีความลึกของฐานรากสอดคล้องกับตัวอย่างฐานรากในกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 เพื่อใช้สำหรับใช้เปรียบเทียบพฤติกรรมฐานรากกับปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบต่อฐานราก โดยจากการทดสอบพบว่า ฐานราก F4A-0.75B(a/d) มีความแข็งแรงในการรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 66,554.9 กก. และมีระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 1.89 ซม. ซึ่งมากกว่าฐานรากที่มีการเสริมเหล็กแบบกระจาย F4A-0.75G(a/d) มีค่าเท่ากับ 65,143.4 กก. ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 1.92 ซม. โดยคิดเป็นร้อยละ 2.12 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ช่วยยืนยันความสามารถในการรับแรงบรรทุกที่เพิ่มขึ้นของฐานรากเสาเข็มเสริมเหล็กแบบกระจุก แสดงให้เห็นว่าการจัดวางเหล็กเสริมในลักษณะกระจุกช่วยให้แรงกระจายได้ดีขึ้นภายในโครงสร้างฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กและเมื่อเรียงลำดับความแข็งแรงในการรับน้ำหนักจากมากที่สุดไปหาน้อยสุดดังนี้ ฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก F4A-0.75B(a/d), F4A-0.75G(a/d), F4A-1.0G(a/d), F4A-1.25G(a/d) และ F4A-1.50G(a/d) โดยมีค่ารับกำลังน้ำหนักบรรทุกกระทำและระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 66,554.9 กก.(1.89 ซม.) 65,143.4 กก.(1.92 ซม.) 35,771.8 กก.(1.22 ซม.) 25,156.3 กก.(1.44 ซม.) และ 26,954.6 กก.(2.09 ซม.) ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วนความยาวช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ต่อความลึกประสิทธิภาพ (Effective Depth) หรือค่า (a/d) มีผลต่อความสามารถใน

การรับน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวของฐานราก โดยเมื่อระยะความยาวช่วงแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับความลึกของฐานรากส่งผลทำให้แรงเฉือนกระทำอยู่ใกล้กับจุดรองรับมากขึ้น เมื่อเทียบกับ การที่มีการกระจายแรงทั้งช่วง ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักที่จุดกึ่งกลางช่วงจะลดลง เนื่องจากว่ามีความลึกที่ใช้ในการรับแรงน้อยลงและสำหรับค่าการแอ่นตัวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ที่ ระยะ (a/d) เท่ากับ 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50 มีระยะค่าการแอ่นตัวอยู่ในช่วง 0.94 – 1.90 ซม. สำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น มีระยะค่าการแอ่นตัวอยู่ในช่วง 1.22 - 2.09 ซม.

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำกับระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางในสภาวะ แรงกระทำสูงสุดของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ที่มีผลของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อม่อต่อ พื้นที่หน้าตัดเสาเสาเข็ม (c/p)



(a) ระยะแอ่นตัวฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ที่อัตราส่วน c/p ในช่วง 1.33 - 1.53



(b) ระยะแอ่นตัวฐานรากเสาเข็ม 4 ต้นที่อัตราส่วน c/p ในช่วง 1.00 - 1.56

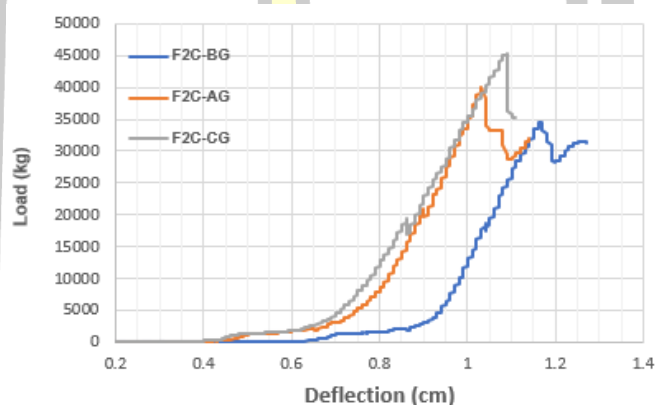
ภาพประกอบ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำกับระยะการแอ่นตัวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ที่อัตราส่วน c/p ต่างกัน

ภาพประกอบ 30 (a) เป็นการทดสอบค่าการรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ที่มีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดเสาต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (c/p) มีค่าเท่ากับ 1.13, 1.53 และ 2.00 โดยมีการเสริมเหล็กทั้งหมดสองรูปแบบคือ แบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G) โดยมีตัวอย่างฐานรากในการทดสอบครั้งนี้เรียงลำดับการรับมากที่สุดไปหาน้อยสุดดังนี้ฐานราก F2B-2.0G (c/p), F2B-1.33G, F2B-1.33B (c/p) และ F2B-1.53G (c/p) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 48,340.29 กก., 40,141.8 กก., 38,885 กก. และ 38,711 กก. และระยะการแอนตัวที่จุดกึ่งกลางช่วงเท่ากับ 1.97 ซม., 1.00 ซม., 1.41 ซม., และ 1.68 ซม. ตามลำดับ

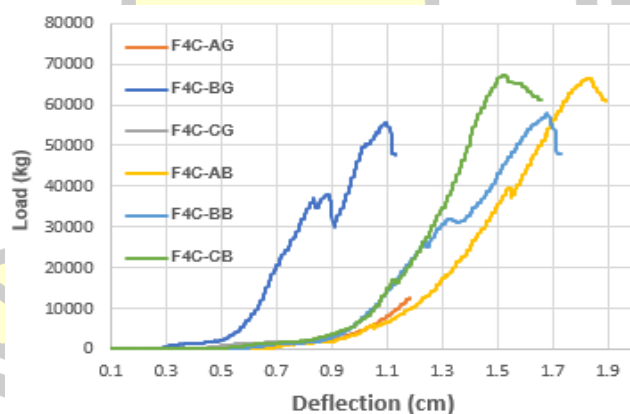
สำหรับภาพประกอบ 30(b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำกับระยะการแอนตัวที่จุดกึ่งกลางช่วงของฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ได้แก่ F4B-1.0G(c/p), F4B-1.0B(c/p), F4B-1.27G(c/p), F4B-1.27B(c/p), F4B-1.56G(c/p) และ F4B-1.56B(c/p) โดยทุกอัตราส่วน c/p ได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของฐานรากด้วยการเสริมเหล็กในโครงสร้างฐานรากแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G) จากผลการทดลอง พบว่ามีค่ารับน้ำหนักบรรทุกกระทำเท่ากับ 65,143.4 กก., 66,554.9 กก., 76,340.7 กก., 76,340.7 กก., 75,294.8 กก. และ 77,731.2 กก. ตามลำดับของฐานราก และมีข้อสังเกตพบว่าฐานรากเสาเข็มที่ได้รับการเสริมเหล็กแบบกระจุก (B) มีค่าการรับน้ำหนักบรรทุกกระทำมากกว่าฐานรากที่เสริมเหล็กแบบกระจาย (G) อาจเนื่องจากการเสริมเหล็กแบบกระจายอาจช่วยลดการเกิดรอยแตกโดยการกระจายแรงไปทั่วโครงสร้าง แต่การเสริมเหล็กแบบกระจุกอาจช่วยเพิ่มความแข็งแรงในจุดที่ต้องการรับน้ำหนักหรือแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นและการเสริมเหล็กแบบกระจุกอาจจะช่วยให้เสาเข็มแต่ละต้นสามารถรองรับแรงอัดได้มากขึ้นด้วย และสำหรับค่าระยะการแอนตัวในฐานรากที่น้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุดโดยสามารถเรียงลำดับความแข็งแรงในด้านทานน้ำหนักจากมากที่สุดไปหาน้อยสุดดังนี้ ฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก F4B-1.56B(c/p), F4B-1.56G(c/p), F4B-1.27B(c/p), F4B-1.27G(c/p), F4B-1.0B(c/p) และ F4B-1.0G(c/p) โดยมีค่ารับกำลังน้ำหนักบรรทุกกระทำกับระยะการแอนตัวสูงสุดเท่ากับ 77,731.2 กก.(1.59 ซม.), 75,294.8 กก. (2.19 ซม.), 77,885.9 กก.(1.80 ซม.), 76,340.7 กก.(1.82 ซม.), 66,554.9 กก.(1.89 ซม.) และ 65,143.3 กก.(1.92 ซม.) ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (c/p) ในช่วง 1.00 -1.56 ของฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น มีระยะการแอนตัวของฐานรากเท่ากับ 1.59 -2.19 ซม. และสามารถรับน้ำหนักบรรทุกกระทำระหว่าง 65,143.3 กก. – 77,885.9 กก.

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำกับระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของฐานรากในสภาวะแรงกระทำสูงสุดของฐานรากเสาเข็มที่ออกแบบจุดยึดตั้งแตกต่างกัน

สำหรับรูปที่ 4.4 แสดงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและระยะการแอ่นตัวของฐานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รองรับด้วยเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น โดยเสริมจุดยึดตั้งด้วยการงอฉาก เหล็กเสริมงอ 90 องศา การเชื่อมยึดแผ่นเพลท 30x30 มม.หนา 3 มม. และ เหล็กฉาก L 30x30x30 มม. หนา 3 มม.



(a) ระยะแอ่นตัวฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ที่จุดยึดตั้งที่ปลายเหล็กเสริม AG (งอฉาก 90 องศา) BG (แผ่นเพลท) และ CG (เหล็กฉาก)



(a) ระยะแอ่นตัวฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ที่จุดยึดตั้งที่ปลายเหล็กเสริม AG,BG (งอฉาก 90 องศา) BG,BB (แผ่นเพลท) และ CG,CB (เหล็กฉาก)

ภาพประกอบ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำกับระยะการแอ่นตัวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ที่จุดยึดตั้งที่ปลายเหล็กเสริมแตกต่างกัน

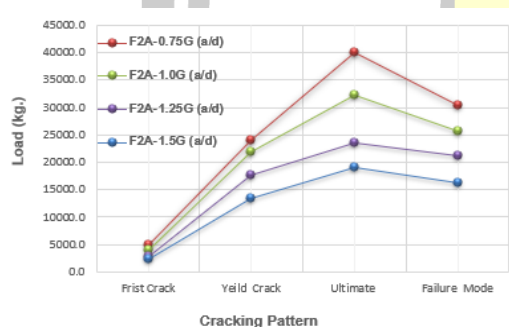
ภาพประกอบ 31(a) เป็นผลการทดสอบระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกกระทำของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ที่จุดยึดซึ่งที่ปลายเหล็กเสริมแตกต่างกันและมีรูปแบบการเสริมเหล็กแบบกระจาย (G) โดยมีรูปแบบการเสริมเหล็ก 3 รูปแบบ ได้แก่ AG (งอฉาก 90 องศา) BG (แผ่นเพลท) และ CG (เหล็กฉาก) และทำการวิเคราะห์ฐานรากดังนี้ F2C-AG, F2C-BG และ F2C-CG โดยเส้นกราฟในช่วงแรกมีความชันขึ้นตรงไปเรื่อยๆ และมีการเปลี่ยนแปลงความชันเส้นกราฟของตัวอย่างฐานรากทั้ง 3 ตัวอย่างที่น้ำหนักบรรทุกประมาณ 35,000 กก. กระทั่งน้ำหนักบรรทุกกระทำเกิดการโก่งตัวเล็กน้อยที่ได้ฐานรากซึ่งจะมีรอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้น โดยจะเรียงลำดับจากการรับน้ำหนักกระทำสูงสุดไปหาน้อยสุด ซึ่งมีระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วงตามน้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุดเท่ากับดังนี้ ฐานราก F2C-CG รับน้ำหนักได้สูงสุดเท่ากับ 45,265.8 กก. ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 1.11 ซม. F2C-BG เท่ากับ 34,534.3 กก. ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 1.27 ซม. F2C-AG เท่ากับ 40,045.1 กก. ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 1.14 ซม. หลังจากนั้นฐานรากจะรับน้ำหนักไปจนกระทั่งเกิดการวิบัติ จากผลการทดลองกล่าวได้ว่า การเสริมเหล็กในรูปแบบต่างๆ ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและระยะการแอ่นตัวของฐานรากเสาเข็ม โดยที่รูปแบบ CG แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดและระยะการแอ่นตัวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ AG และ BG ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการกระจายแรงที่ดีและความสามารถในการรับแรงที่มีประสิทธิภาพสูง

สำหรับภาพประกอบ 31 (b) ผลการทดสอบระยะการแอ่นตัวกับน้ำหนักบรรทุกกระทำของฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ได้แก่ ฐานราก F4C-AG, F4C-AB, F4C-BG, F4C-BB, F4C-CG, และ F4C-CB สามารถสังเกตได้ว่าในช่วงต้นของกราฟการต้านกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทั้ง 6 ตัวอย่าง การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกในช่วงต้นทำให้เกิดการแอ่นตัวเล็กน้อยในฐานรากเสาเข็มซึ่งแสดงถึงความยืดหยุ่นของฐานรากในการรับน้ำหนักและจุดที่ความชันของกราฟเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนอาจบ่งบอกได้ว่าฐานรากเริ่มเข้าสู่สภาวะที่เกิดการแตกร้าวและเกิดความเสียหาย และเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำเพิ่มขึ้น ระยะการแอ่นตัวก็เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและเกิดรอยร้าวหรือความเสียหายในฐานราก โดยสามารถเรียงลำดับการต้านทานการรับน้ำหนักจากสูงสุดไปหาลดต่ำสุดก่อนที่จะเกิดการวิบัติและระยะการแอ่นตัว ดังนี้ ฐานราก F4C-CG, F4C-CB, F4C-AB, F4C-AG, F4C-BB และ F4C-BG มีค่าเท่ากับ 74,444.1 กก.(1.95 ซม.), 67,096.3 กก.(1.66 ซม.), 66,554.9 กก.(1.89 ซม.), 65,143.4 กก.(1.92 ซม.), 57,834.3 กก.(1.73 ซม.), และ 55,436.7 กก.(1.13 ซม.) ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงว่าฐานรากเสาเข็ม F4C-CG รับน้ำหนักได้มากที่สุดก่อนการวิบัติ ตามด้วย F4C-CB และ F4C-AB, ในขณะที่ F4C-AG และ F4C-BB มีความสามารถในการรับน้ำหนักน้อยกว่า และ F4C-BG รับน้ำหนักน้อยที่สุดก่อนเกิดวิบัติ

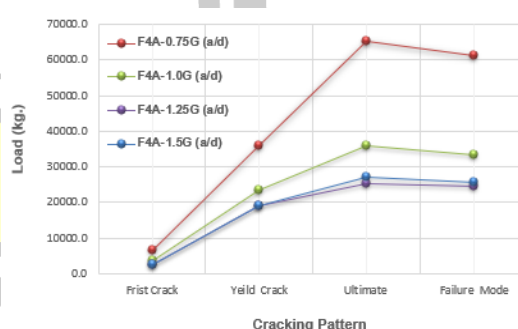
4.4 การแตกร้าวและการวิบัติภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำที่สถานะต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบตัวอย่างฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดการแตกร้าวในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ แรงดัด (Flexible Cracking Load) และแรงเฉือน (Diagonal Shear Cracking Load) ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำในสถานะที่มีความแตกต่างกันที่จุดต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงการแตกร้าวเริ่มต้น (First Crack) เป็นจุดที่เริ่มเกิดการแตกร้าวครั้งแรกในฐานราก ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อถูกกระทำด้วยแรงที่เพียงพอในการทำให้วัสดุเกิดการแตกร้าวเพียงเล็กน้อย ส่วนการแตกร้าวที่จุดคราก (Yield Crack) เป็นจุดที่เกิดการแตกร้าวต่อเนื่องของวัสดุในฐานรากโดยไม่สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้ และการแตกร้าวที่แรงกระทำสูงสุด (Ultimate Crack) เป็นจุดที่เกิดการแตกร้าวที่มีแรงกระทำสูงสุดต่อวัสดุในฐานราก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความเสถียรของโครงสร้างในระยะยาว เพื่อให้เข้าใจและการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการทดสอบจึงขออธิบายด้วยภาพกราฟผลการทดสอบดังนี้

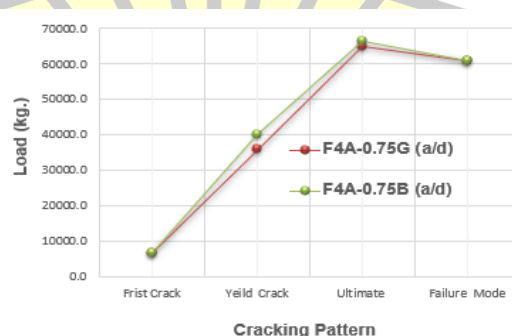
4.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและรูปแบบการแตกร้าวฐานรากเสาเข็มที่มีอัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล a/d ในช่วง 0.75-1.5 ต่อฐานรากเสาเข็ม 2 ตัน และ 4 ตัน



F2A 0.75 - 1.50G



(b) F4A 0.75 - 1.50G

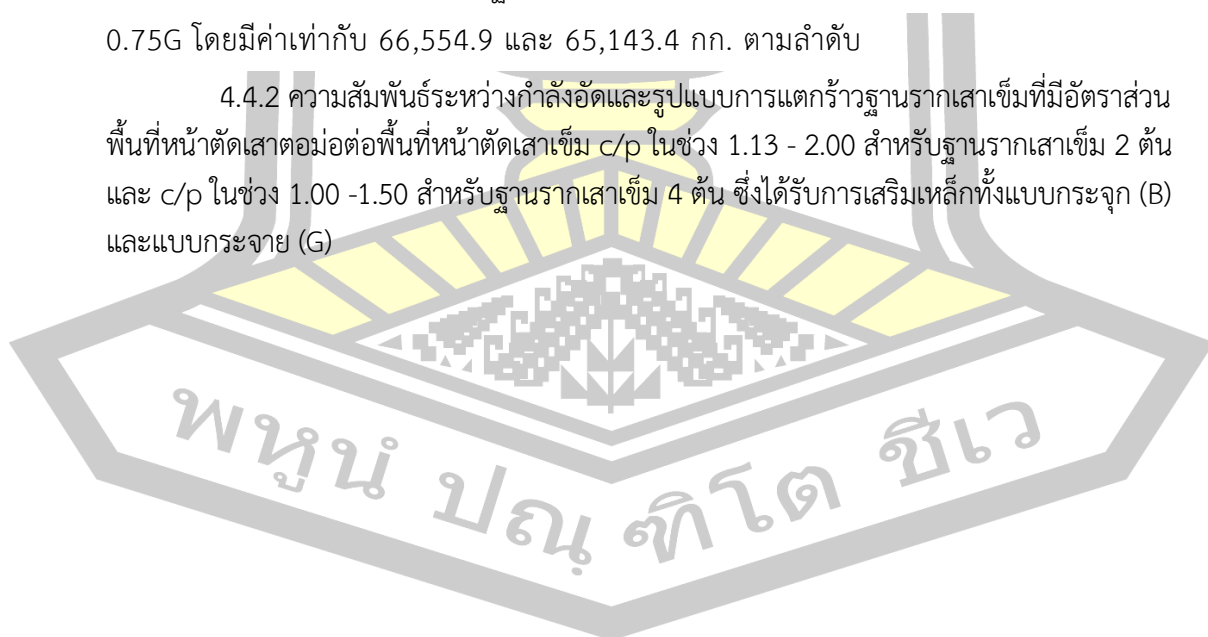


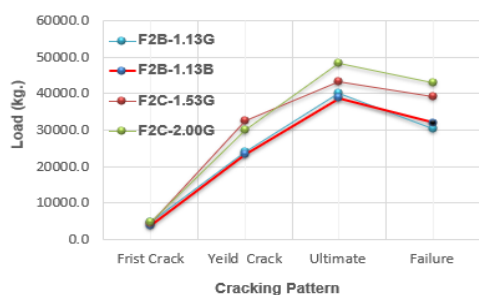
(c) F4A 0.75G - 0.75B

ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและรูปแบบการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็ม 2 ตัน และ 4 ตัน ที่ a/d แตกต่างกัน

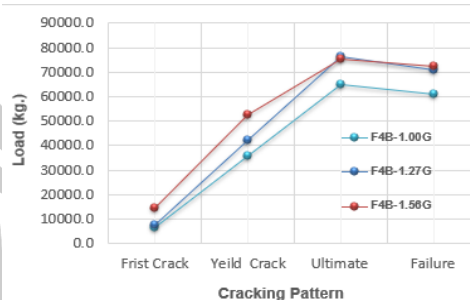
ในภาพประกอบ 32(a) อธิบายถึงกำลังอัดของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ได้แก่ F2A-0.75G, F2A-1.0G, F2A-1.25G และ F2A-1.5G เมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงต่างๆ กับกำลังรับน้ำหนักที่กระสูงสุดพบว่าช่วงเริ่มต้นจากการแตกร้าวครั้งแรก (First Crack) มีค่ากำลังรับน้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเล็กน้อยเฉลี่ยในช่วงร้อยละ 12 และการแตกร้าวเมื่อถึงจุดยืดหยุ่นสูงสุด (Yield Crack) เท่ากับมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 68.25 เมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะสูงสุด (Ultimate) ที่มีค่ากำลังในช่วง 19,026.7 กก. – 40,141.8 กก. และกำลังลดลงหลังจากการวิบัติที่ทำให้ฐานรากเกิดความเสียหายอย่างมากคือ โหมดล้มเหลว (Failure Mode) อยู่ในช่วงเท่ากับ 16,172.7 กก. – 30,396.4 กก. และในภาพประกอบ 32(b) สำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ที่มีอัตราส่วน a/d ในช่วง 0.75 - 1.50 โดยเสริมเหล็กแบบกระจาย G พบว่ามีแนวโน้มการรับน้ำหนักบรรทุกกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยโดยมีค่ากำลังที่ทำให้เกิด First Crack ประมาณร้อยละ 11.8 ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยกราฟมีความชันตรงขึ้นไปจนกระทั่งรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดโดยฐานรากที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.0 – 1.50 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 25,156.29 กก. – 33,412.8 กก. สำหรับภาพประกอบ 4.5(c) แสดงพฤติกรรมฐานราก F4A-0.75B ที่เสริมเหล็กแบบกระจุก (B) และ F4A-0.75G เสริมเหล็กแบบกระจาย (G) โดยอัตราส่วน a/d เท่ากับ 0.75 จะเกิด First Crack ในร้อยละ 13.5 ของน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดเท่ากับ 65,143.4 กก. และสำหรับฐานรากที่เสริมเหล็กแบบกระจุก F4A-0.75B มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับฐานรากที่นำมาเปรียบเทียบที่เสริมเหล็กแบบกระจาย F4A-0.75G โดยมีค่าเท่ากับ 66,554.9 และ 65,143.4 กก. ตามลำดับ

4.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและรูปแบบการแตกร้าวฐานรากเสาเข็มที่มีอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม c/p ในช่วง 1.13 - 2.00 สำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ c/p ในช่วง 1.00 - 1.50 สำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ซึ่งได้รับการเสริมเหล็กทั้งแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G)

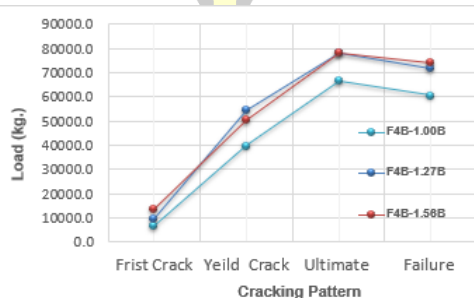




(a) F2B-1.13B และ 1.13G - 2.00G



(b) F4B -1.00G - 1.56G

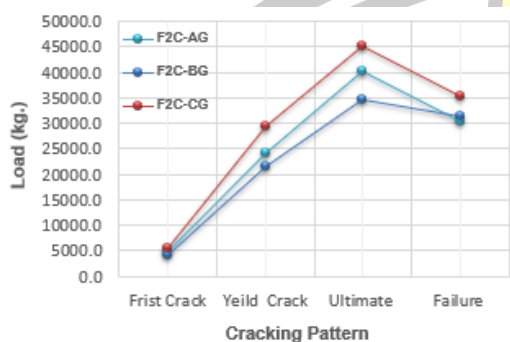


(c) F4B -1.00B - 1.56B

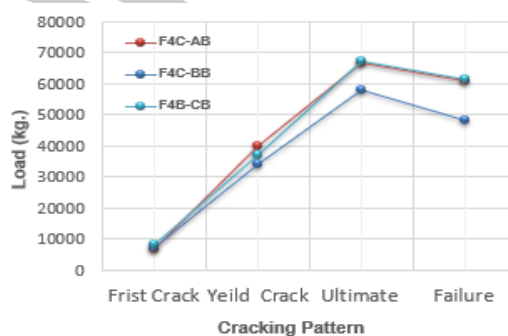
ภาพประกอบ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและรูปแบบการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้นที่ c/p แตกต่างกัน

จากความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการแตกร้าวและน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นในฐานราก โดยในภาพประกอบ 33(a)- 33(c) อธิบายถึงพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มทั้ง 2 ต้น ได้แก่ F2B-1.13B, F2B-1.13G, F2B-1.53G และ F2B-2.00G และ สำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้นที่เสริมเหล็กแบบกระจุก (B) ได้แก่ F4B-1.00G, F4B-1.27G, F4B-1.50G, และเสริมแบบกระจายได้แก่ F4B-1.00B, F4B-1.27B และ F4B-1.50B เมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกในทุกช่วงต่างๆ พบว่าฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น พบว่าช่วงเริ่มต้นจากการแตกร้าวครั้งแรก (First Crack) มีค่ากำลังรับน้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเล็กน้อยมีค่าเฉลี่ยในช่วงร้อยละ 10.5 และการแตกร้าวเมื่อถึงจุดยืดหยุ่นสูงสุด (Yield Crack) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 64.25 เมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะสูงสุด (Ultimate) ที่มีค่ากำลังในช่วง 38,710.91 กก. - 48,340.29 กก. และสำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้นที่เสริมเหล็กแบบกระจุก (B) ได้แก่ F4B-1.00B, F4B-1.27B และ F4B-1.50B มีค่าเฉลี่ยการแตกร้าวครั้งแรก (First Crack) ในช่วงร้อยละ 13.0 เมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะสูงสุด (Ultimate) ที่มีค่ากำลังในช่วง 66,554.9 กก. - 77,731.2 กก. ส่วนฐานรากเสาเข็ม 4 ต้นที่เสริมเหล็กแบบกระจาย (G) ได้แก่ F4B-1.00G, F4B-1.27G และ F4B-1.50G มีค่าเฉลี่ยการแตกร้าวครั้งแรก (First Crack) ในช่วงร้อยละ 13.0 เมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะ

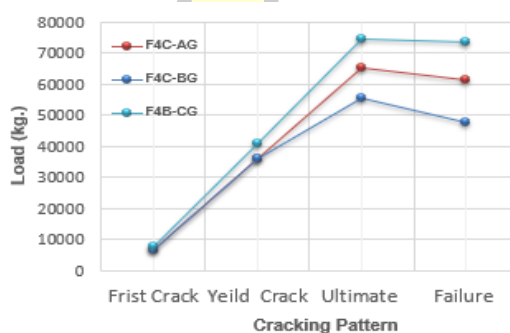
สูงสุด (Ultimate) ที่มีค่ากำลังในช่วง 65,143.4 กก. – 75,294.8 กก. และ ฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ทั้ง 2 รูปแบบการเสริมเหล็ก พบว่าการแตกร้าวเมื่อถึงจุดยึดหยุ่นสูงสุด (Yield Crack) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 61 เมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่สภาวะสูงสุด (Ultimate)



(a) F2C-AG, BG, CG



(b) F4C-AB, BB, CB



(c) F4C-AG, BG, CG

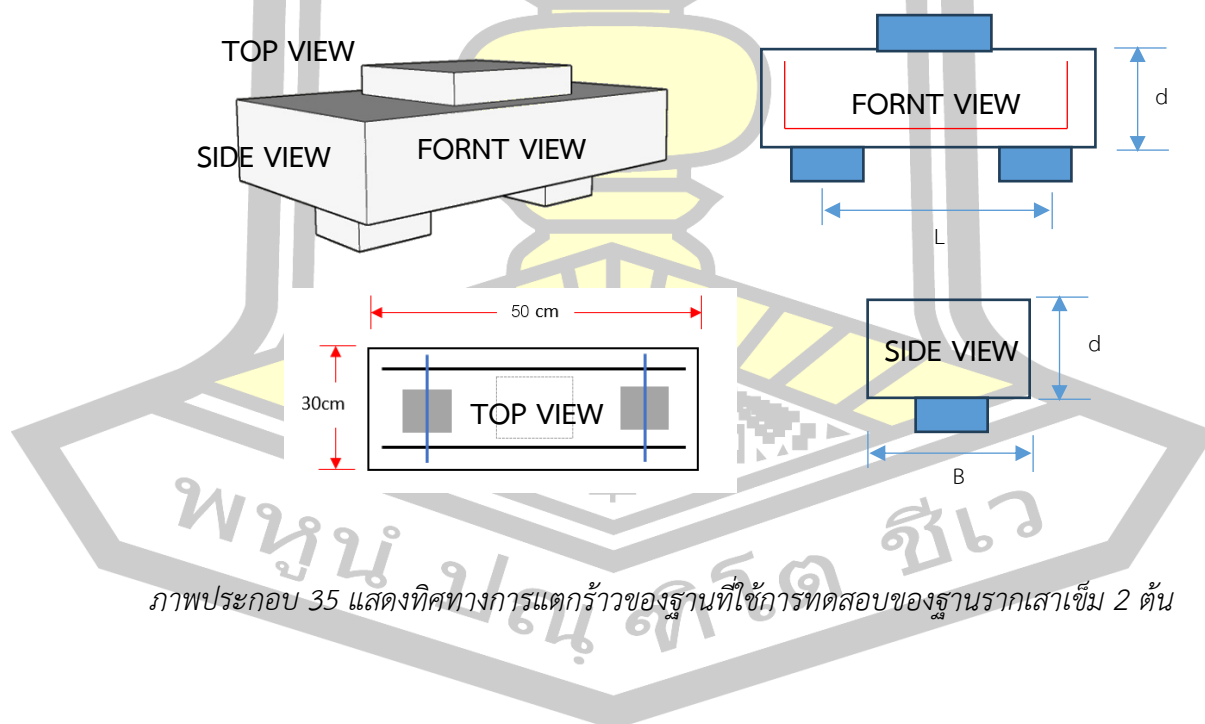
ภาพประกอบ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและรูปแบบการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ที่จุดยึดตั้งแตกต่างกัน

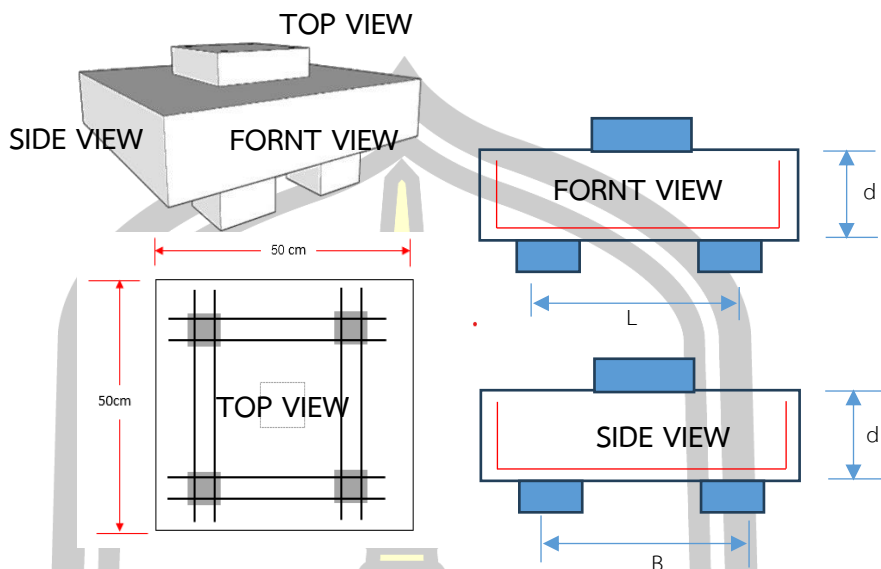
ในภาพประกอบ 34(a) - 34(c) อธิบายถึงกำลังอัดของฐานราก เสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ที่ได้รับการเสริมเหล็กแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G) ของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ได้แก่ F2C-AG, F2C-BG และ F2C-CG และฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ได้แก่ การเสริมเหล็กแบบกระจุก (B) F4C-AB, F4C-BB และ F4C-CB ส่วนการเสริมเหล็กแบบกระจาย (G) ได้แก่ F4C-AG, F4C-BG และ F4C-CG เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปแบบการแตกร้าวกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกในช่วงต่างๆ สำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น พบว่าช่วงเริ่มต้นจากการแตกร้าวครั้งแรก (First Crack) มีค่ากำลังรับน้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเล็กน้อยในช่วงร้อยละ 11.3 และการแตกร้าวเมื่อถึงจุดยึดหยุ่นสูงสุด (Yield Crack) เท่ากับร้อยละ 58.0 เมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่สภาวะสูงสุด (Ultimate) ที่มีค่ากำลังในช่วง 57,834.3 กก. – 67,096.3 กก. และกำลังลดลงหลังจากการวิบัติที่

ทำให้ฐานรากเกิดความเสียหายอย่างมากคือโหมดล้มเหลว (Failure Mode) อยู่ในช่วงเท่ากับ 48,030.9 กก. – 61,044.1 กก. ส่วนฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น พบว่า ช่วงเริ่มต้นจากการแตกร้าวครั้งแรก (First Crack) มีค่ากำลังรับน้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเล็กน้อยในช่วงร้อยละ 11.0 และการแตกร้าวเมื่อถึงจุดยืดหยุ่นสูงสุด (Yield Crack) เท่ากับร้อยละ 56.66 เมื่อเทียบกับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่สภาวะสูงสุด(Ultimate) ที่มีค่ากำลังในช่วง 55,436.7 กก. – 74,444.1 กก. และกำลังลดลงหลังจากการวิบัติที่ทำให้ฐานรากเกิดความเสียหายอย่างมากคือโหมดล้มเหลว (Failure Mode) อยู่ในช่วงเท่ากับ 47,663.5 กก. – 73,225.9 กก.

4.5 ลักษณะการแตกร้าวในฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ต้น และ 4 ต้น ที่ได้รับการเสริมเหล็กในรูปแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G)

ในหัวข้อนี้เราจะพิจารณาถึงลักษณะการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีจำนวน 2 และ 4 ต้น โดยมีการเสริมเหล็กในรูปแบบกระจุก (B) และกระจาย (G) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อความแข็งแรงและความคงทนของโครงสร้าง เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลจากการวิบัติในฐานรากโดยประกอบ 35 และ 36 แสดงภาพทิศทางการแตกร้าวในฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ต้น และ 4 ต้น ตามลำดับ



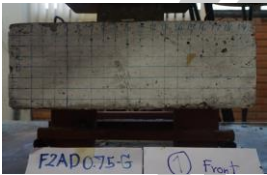
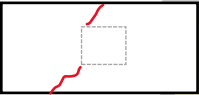
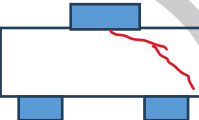
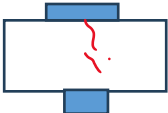
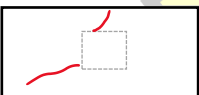
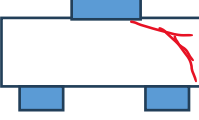
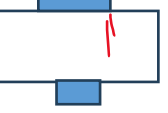
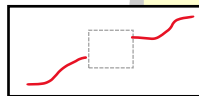
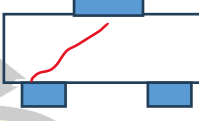
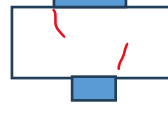
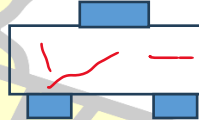
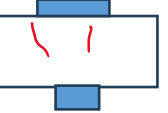
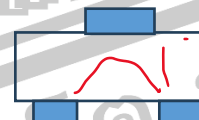
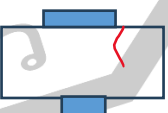


ภาพประกอบ 36 แสดงทิศทางการแตกร้าวของฐานที่ใช้การทดสอบของฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น

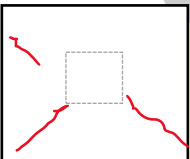
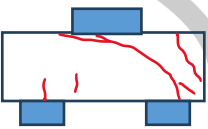
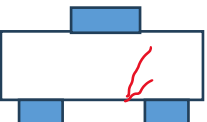
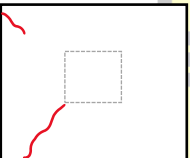
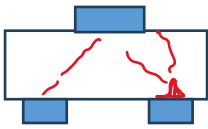
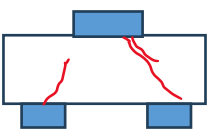
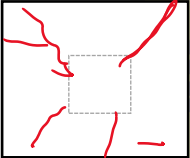
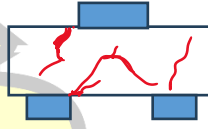
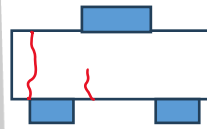
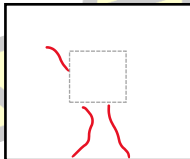
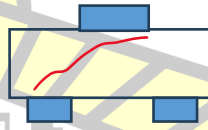
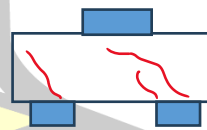
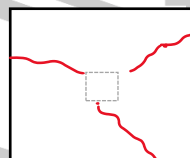
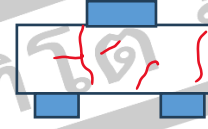
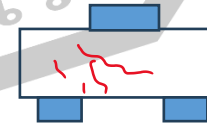
สำหรับเนื้อหาลำดับต่อไปจะอธิบายถึงลักษณะการแตกร้าวในฐานรากจากปัจจัยต่างๆ ที่ได้นำมาศึกษาที่อาจส่งผลกระทบต่อการวิบัติในฐานราก ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ผลของอัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) กลุ่มที่ 2 ผลของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาตอม่อ ต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (c/p) และกลุ่มที่ 3 ผลของการออกแบบจุกยึดตั้งในเหล็กเสริมที่แตกต่างกันในฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น สำหรับลักษณะการแตกร้าวได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ซึ่งสามารถอธิบายพอเข้าใจได้ดังนี้ การวิบัติด้วยแรงเฉือนสามารถจำแนกประเภทออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนร่วมแรงดัด (Flexural Shear Failure) และการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Direct Shear Failure)

4.5.1 ลักษณะการแตกร้าวในกลุ่ม 1 ผลของอัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพฐานของรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ที่ได้รับการเสริมเหล็กแบบกระจุกและแบบกระจาย (G) ได้แก่ F2A-0.75(a/d), F2A-1.0(a/d) และ F2A-1.50(a/d) และฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ได้แก่ F4A-0.75(a/d), F4A-1.0(a/d), F4A-1.25(a/d) และ F4A-1.5(a/d) ดังแสดงในตาราง 17 และตาราง 18

ตาราง 17 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 2 ต้น
กลุ่ม 1 (a/d) แตกต่างกัน

ตัวอย่าง Pile Caps จริง	ด้านบน Top Veiw	ทิศทางด้านหน้า Front View	ทิศทางด้านข้าง Side View
F2A-0.75G (a/d) 		 Shear Failure	
F2A-0.75B (a/d) 		 Shear Failure	
F2A-1.0G (a/d) 		 Shear Failure	
F2A-1.25G (a/d) 		 Flexible Failure	
F2A-1.50G (a/d) 		 Flexible Failure	

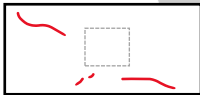
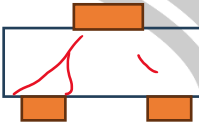
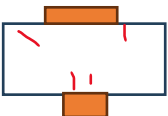
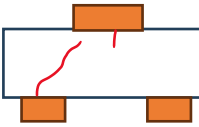
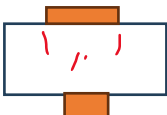
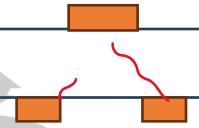
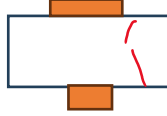
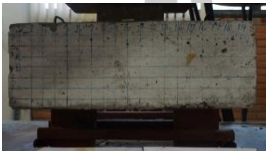
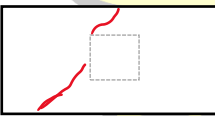
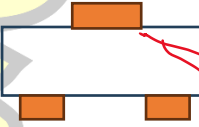
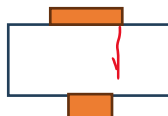
ตาราง 18 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 4
 ต้น กลุ่ม 1 (a/d) แตกต่างกัน

ตัวอย่าง Pile Caps จริง	ด้านบน Top Veiw	ทิศทางด้านหน้า Front View	ทิศทางด้านข้าง Side View
F4A-0.75G (a/d) 		 Shear Failure	 Shear Failure
F4A-0.75B (a/d) 		 Shear Failure	 Shear Failure
F4A-1.0G (a/d) 		 Shear Failure	 Flexible Failure
F4A-1.25G (a/d) 		 Shear Failure	 Shear Failure
F4A-1.50G (a/d) 		 Flexible Failure	 Flexible Failure

จากตาราง 17 และ 18 แสดงพฤติกรรมของการแตกร้าวในฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ต้น และ 4 ต้น พบว่า อัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) มีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการแตกร้าวและประสิทธิภาพโดยรวมของฐานรากในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อาจกล่าวว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมพฤติกรรมการต้านทานแรงเฉือนในฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยค่า a/d ที่มีค่าต่ำบ่งชี้ว่าฐานรากมีความลึกมากขึ้นจะมีแนวโน้มเกิดการแตกร้าวแบบแรงเฉือน (Shear Failure) ส่วนฐานรากที่มีค่า a/d เพิ่มขึ้นจะทำให้ฐานรากมีความหนา ลดลงพฤติกรรมการแตกร้าวจะมีแนวโน้มเป็นแบบ (Flexible Failure) โดยจากตาราง 17 จะสังเกตเห็นว่าฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ที่มีอัตราส่วน (a/d) ในช่วง 0.75 -1.00 ได้แก่ F2A-0.75B (a/d), F2A-0.75G (a/d) และฐานราก F2A-1.0G (a/d) ทั้งแบบเสริมเหล็กกระจุและกระจายจะมีพฤติกรรมการแตกร้าวในลักษณะ Shear Failure ส่วนฐานรากที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.50 มีพฤติกรรมการแตกร้าวในลักษณะ Flexible Failure ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าอัตราส่วน a/d มีผลต่อการกระจายแรงเฉือนในโครงสร้างฐานราก ซึ่งกระจายได้น้อยลงทำให้เกิดการแตกร้าวที่เกิดจากการตัดที่ด้านล่างและกระจายไปยังด้านบนในแนวตั้งและจนกระทั่งเกิดการวิบัติ และในตาราง 18 แสดงการแตกร้าวของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 4 ต้นที่มีอัตราส่วน a/d ในช่วง 0.75 – 1.00 พบว่าลักษณะการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็มโดยส่วนใหญ่มีแนวโน้มเป็นแบบแรงเฉือน (Shear Failure) ได้แก่ F4A-0.75B(a/d), F4A-0.75G(a/d), F4A-1.0G(a/d), F4A-1.25G(a/d) ยกเว้นฐานราก F4A-1.5G (a/d) ที่มีลักษณะการแตกร้าวแบบ Flexible Failure เนื่องจากมีความหนาของฐานรากน้อย จึงทำให้แสดงพฤติกรรมแบบคานจึงทำให้เกิดการแตกร้าวที่เกิดจากการตัดที่ผิวด้านล่างของฐานราก ดังนั้นจากพฤติกรรมการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตในตารางที่ 17 และ 18 อาจกล่าวได้ว่าอัตราส่วน a/d มีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ที่มี a/d ต่ำมีโอกาสเกิดการแตกร้าวแบบแรงเฉือน ในขณะที่เสาเข็มที่มี a/d สูงจะแสดงพฤติกรรมการแตกร้าวแบบคานหรือ Flexible Failure สำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น แนวโน้มการแตกร้าวมีลักษณะเป็นแบบแรงเฉือน ยกเว้นในกรณีที่ a/d สูงซึ่งจะเกิดการแตกร้าวแบบ Flexible Failure เนื่องจากความหนาของฐานรากที่ลดลง สำหรับการทดสอบอัตราส่วน a/d เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการกระจายแรงเฉือนและอาจส่งผลต่อความเสถียรของโครงสร้างในระยะยาว

4.5.2 ลักษณะการแตกร้าวใน กลุ่ม 2 ผลของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อมอดต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (c/p) ในฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับการเสริมเหล็กแบบกระจุ(B) และแบบกระจาย(G) ที่รองรับด้วยเสาเข็ม 2 ต้น ได้แก่ F2B-1.13B (c/p) , F2B-1.13G (c/p), F2B-1.53G (c/p) และ F2B- 2.00G (c/p) และรองรับด้วยเสาเข็ม 4 ต้น ได้แก่ F4B- 1.00B (c/p), F4B-1.00G (c/p), F4B- 1.27B (c/p), F4B- 1.27G (c/p), F4B- 1.56B (c/p) และ F4B- 1.56G (c/p)

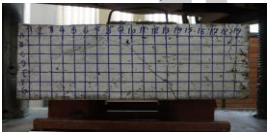
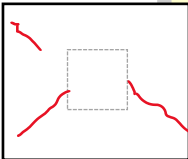
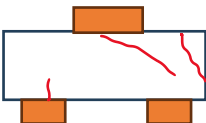
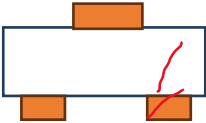
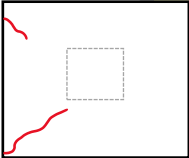
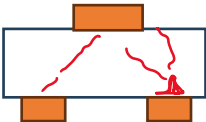
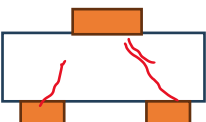
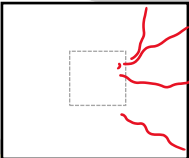
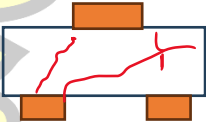
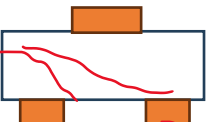
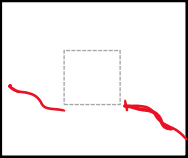
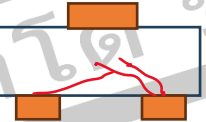
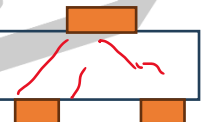
ตาราง 19 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 2 ต้น
กลุ่ม 2 (c/p) แตกต่างกัน

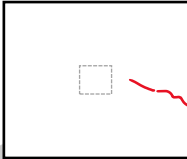
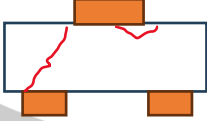
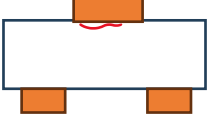
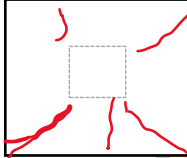
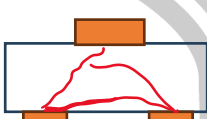
ตัวอย่าง Pile Caps จริง	ด้านบน Top Veiw	ทิศทางด้านหน้า Front View	ทิศทางด้านข้าง Side View
F2B- 1.13B (c/p) 		 Shear Failure	
F2B- 1.13G (c/p) 		 Shear Failure	
F2B- 1.53G (c/p) 		 Shear Failure	
F2B- 2.00G (c/p) 		 Shear Failure	

จากตาราง 19 สังเกตเห็นว่าฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น มีพฤติกรรมการแตกร้าวในลักษณะ Shear Failure ได้แก่ F2B- 1.13B (c/p), F2B- 1.13G (c/p), F2B- 1.53G (c/p), F2B- 1.53G (c/p) และ F2B- 2.00G (c/p) เนื่องจากฐานรากมีความหนาและมีช่วงระหว่างจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำและจุดรองรับด้วยเสาเข็มน้อยทำให้แรงเฉือนมีผลกระทบมากขึ้นและการกระจายแรงน้อยลงจึงทำให้การแตกร้าวในโครงสร้างเกิดเนื่องจากแรงเฉือนมีค่าสูงจึงทำให้แตกร้าวแบบแรงเฉือนโดยตรง และขนาดของพื้นที่หน้าตัดต่อม่อที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถกระจายแรงเฉือนไปยังเสาเข็มในพื้นที่ที่กว้างขึ้นจึงทำให้เกิดแนวแรงเฉือนแบบทแยงในลักษณะ Shear Failure และในตาราง 20 ผลของอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อม่อต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็มในฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ที่เสริมเหล็กแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G)

ได้แก่ F4B- 1.00B (c/p), F4B- 1.00G (c/p), F4B- 1.27B (c/p), F4B- 1.27G (c/p), F4B- 1.56B (c/p) และ F4B- 1.56G (c/p) มีลักษณะการแตกร้าวแบบ Shear Failur

ตาราง 20 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 4 ต้น กลุ่ม 2 (c/p) แตกต่างกัน

ตัวอย่าง Pile Caps จีริง	ด้านบน Top Veiw	ทิศทางด้านหน้า Front View	ทิศทางด้านข้าง Side View
F4B- 1.00G (c/p) 		 Shear Failure	 Shear Failure
F4B- 1.00B(c/p) 		 Shear Failure	 Shear Failure
F4B- 1.27B (c/p) 		 Shear Failure	 Shear Failure
F4B- 1.27G (c/p) 		 Shear Failure	 Shear Failure

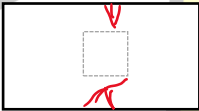
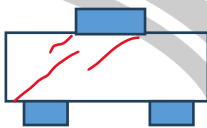
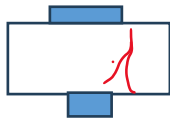
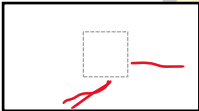
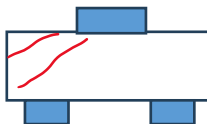
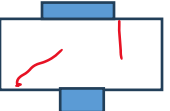
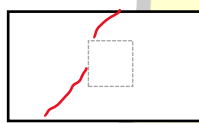
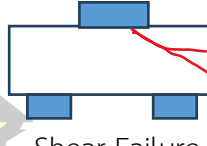
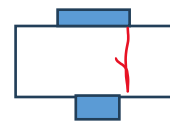
F4B- 1.56B (c/p) 		 Shear Failure	
F4B- 1.56G (c/p) 		 Shear Failure	 Shear Failure

ดังนั้นพฤติกรรมการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 2 ต้น มีพฤติกรรมการแตกร้าวแบบ Shear Failure ในหลายกรณีที่มีอัตราส่วน c/p ต่างๆ การแตกร้าวนี้เกิดขึ้นเมื่อมีช่วงระหว่างจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำและจุดรองรับที่เสาเข็มน้อย ซึ่งส่งผลให้แรงเฉือนมีผลกระทบมากขึ้นและการกระจายแรงน้อยลง ทำให้เกิดการแตกร้าวจากแรงเฉือนที่มีค่าสูง และสำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น พบว่าการเสริมเหล็กแบบกระจุก (B) และกระจ่าย (G) ไม่ได้ส่งผลต่อลักษณะการแตกร้าว เนื่องจากฐานรากเหล่านี้มีพฤติกรรมการแตกร้าวแบบ Shear Failure ซึ่งเกิดจากความสามารถในการกระจายแรงเฉือนไปยังเสาเข็มในพื้นที่ที่กว้างขึ้น นำไปสู่การเกิดแรงเฉือนแบบทแยง

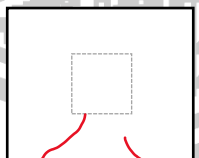
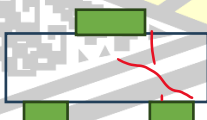
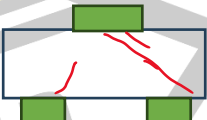
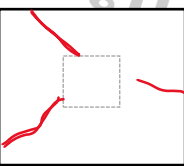
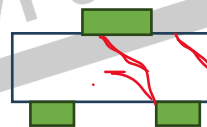
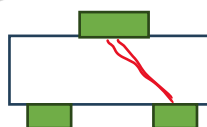
4.5.3 ลักษณะการแตกร้าวใน กลุ่ม 3 ผลของรูปแบบจุดยึดตั้งในฐานรากเสาเข็มในฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ที่ได้รับการเสริมเหล็กแบบกระจุก (B) และแบบกระจ่าย (G) ของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ได้แก่ F2C-AG, F2C-BG และ F2C-CG และฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ได้แก่ การเสริมเหล็กแบบกระจุก (B) F4C-AB, F4C-BB และ F4C-CB ส่วนการเสริมเหล็กแบบกระจ่าย (G) ได้แก่ F4C-AG, F4C-BG และ F4C-CG

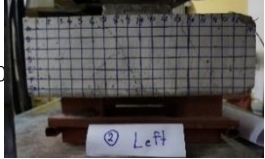
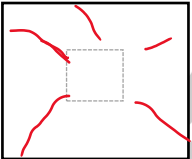
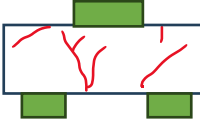
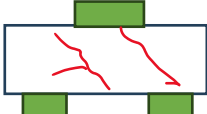
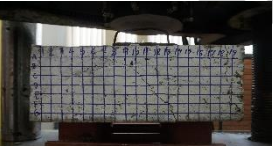
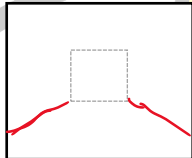
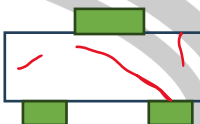
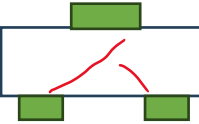
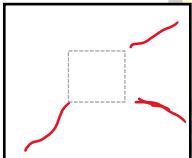
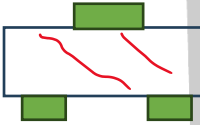
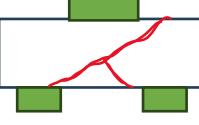
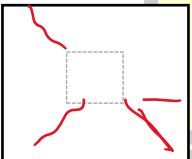
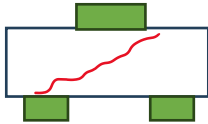
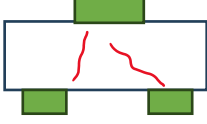
พูน ปณ ทิโต ชีเว

ตาราง 21 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 2 ต้น
กลุ่ม 3 ออกแบบจุดยึดรั้งแตกต่างกัน

ตัวอย่าง Pile Caps จริง	ด้านบน Top Veiw	ทิศทางด้านหน้า Front View	ทิศทางด้านข้าง Side View
F2C-AG 		 Shear Failure	
F2C-BG 		 Shear Failure	
F2C-CG 		 Shear Failure	

ตาราง 22 แสดงภาพการแตกร้าวด้านหน้าและด้านข้างของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กเสาเข็ม 4 ต้น
กลุ่ม 3 ออกแบบจุดยึดรั้งแตกต่างกัน

ตัวอย่าง Pile Caps จริง	ด้านบน Top Veiw	ทิศทางด้านหน้า Front View	ทิศทางด้านข้าง Side View
F4C-AB 		 Shear Failure	 Shear Failure
F4C-BB 		 Shear Failure	 Shear Failure

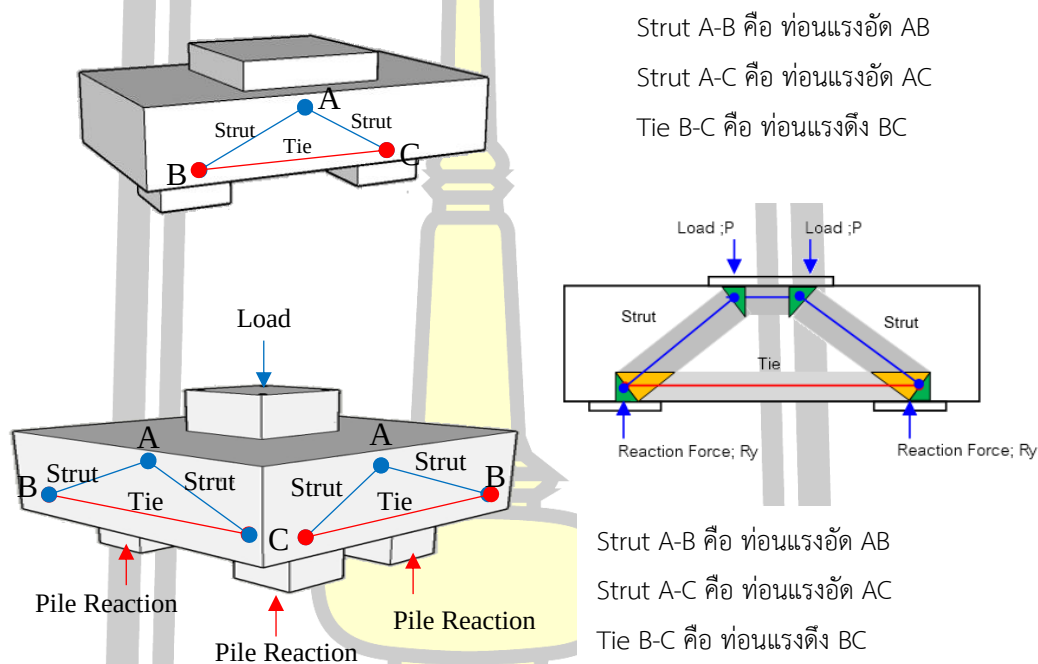
F4C-CB 		 Shear Failure	 Shear Failure
F4C-AG 		 Shear Failure	 Shear Failure
F4C-BG 		 Shear Failure	 Shear Failure
F4C-CG 		 Shear Failure	 Shear Failure

ในตารางที่ 21 และ 22 แสดงพฤติกรรมการแตกร้าวของฐานรากที่มีรูปแบบจุดยึดตั้งแตกต่างกัน ในฐานรากเสาเข็มในฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ที่ได้รับการเสริมเหล็กแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G) ของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ได้แก่ F2C-AG, F2C-BG และ F2C-CG และฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น ได้แก่ การเสริมเหล็กแบบกระจุก (B) F4C-AB, F4C-BB และ F4C-CB และการเสริมเหล็กแบบกระจาย (G) ได้แก่ F4C-AG, F4C-BG และ F4C-CG จากผลการศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวในฐานรากพบว่า ฐานรากที่ออกแบบจุดยึดตั้งในรูปแบบทั้งหมด 3 รูปแบบ และเสริมเหล็กแบบกระจุกและกระจายมีลักษณะพฤติกรรมการแตกร้าวเป็นแบบ Shear Failure

4.6 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการออกแบบด้วยข้อกำหนด ACI318M-14

4.6.1 กำลังท่อนแรงอัดและท่อนแรงดึง

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของท่อนแรงอัด (Strut) และท่อนแรงดึง (Tie) จากผลการทดลองโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อมูล ACI318M-14 ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ในกลุ่ม 1, 2 และ 3



ภาพประกอบ 37 แสดงตำแหน่งท่อน Strut และ Tie ในฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเสาเข็มรองรับ 2 ต้น และ 4 ต้น

จากภาพประกอบ 37 เป็นองค์ประกอบของโครงข้อมูลแบบจำลองในฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ช่วยให้สามารถออกแบบโครงสร้างคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคำนึงถึงแรงต่างๆ ที่กระทำกับโครงสร้างได้อย่างชัดเจนและเข้าใจง่าย ทำให้สามารถประเมินการกระจายแรงและขนาดส่วนต่างๆ ของโครงสร้างได้ดีขึ้น โดยองค์ประกอบที่ใช้ในการประเมินแรงในท่อนแรงอัด (Strut) และท่อนแรงดึง (Tie) และบริเวณเชื่อมต่อของท่อนแรงอัดและแรงดึงด้วยบริเวณจุดต่อ (Node) สามารถอธิบายองค์ประกอบได้ดังนี้

Strut เป็นส่วนของโมเดลที่ส่งผ่านแรงอัดในโครงสร้างเชื่อมระหว่างจุด A และ B และเชื่อมระหว่าง A และ C

Tie เป็นส่วนที่รับแรงดึงอยู่ระหว่างจุด B และ C

Node จุดที่ Strut และ Tie มาบรรจบกัน จุด B, C และจุด A

4.6.2 แรงในชิ้นส่วนองค์ประกอบของแบบจำลองโครงข้อหมุนในฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น

จากผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้พบว่า เมื่อฐานรากเสาเข็ม 2 ต้นรับแรงกระทำเท่ากับ 15 ตันแรงนี้จะถูกถ่ายแรงลงสู่เสาเข็มโดยเฉลี่ยเป็น 7.5 ตันต่อต้น การเพิ่มอัตราส่วน c/p จะทำให้มุมในการออกแบบระหว่างท่อนแรงอัด (Strut) กับท่อนแรงดึง (Tie) เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งทำให้แรงในองค์ประกอบของวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุนเพิ่มสูงขึ้นตามมุมที่สูงขึ้น และพบว่าในท่อนแรงอัดมีค่าในช่วง 8.70 - 8.99 ตัน ในขณะที่ท่อนแรงดึงมีค่าในช่วง 4.41 - 4.96 ตัน และที่จุดต่อมีค่าในช่วง 8.70 - 8.99 ตัน สำหรับฐานรากที่มีอัตราส่วน c/p เท่ากับ 2.00 คือฐานราก F2-A 2.00G แรงในท่อนแรงอัดและท่อนแรงดึงที่วัดได้จากห้องปฏิบัติการมีค่าใกล้เคียงกับที่คาดการณ์จากทฤษฎีการออกแบบตามมาตรฐาน ACI318M

4.6.3 กำลังสูงสุดในท่อน Strut, Tie และ Node ในโครงสร้างฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบโดยวิธีโครงข้อหมุนแบบจำลอง

1) กำลังของท่อนแรงอัด (strut) และท่อนแรงดึง (Tie) และจุดต่อ (Node) ในโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ที่มีอัตราส่วนความยาวของแรงเฉือน (a) ต่อความลึกประสิทธิภาพ (d) หรือ a/d ช่วง 0.75 - 1.50 โดยออกแบบกำลังอัดคอนกรีต (f'_c) เท่ากับ 210 กก./ซม.² และค่ากำลังดึงของเหล็ก (f_y) เท่ากับ 4,000 กก./ซม.²

ตาราง 23 แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในท่อน Strut, Tie และบริเวณจุดต่อ Node ในโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้นที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 0.75, 1.00, 1.25 และ 1.50

Pile Caps	$\phi_{f_{cu(1-2)}} (ksc)$	Strut (ton)	Tie (ton)	Node (ton)	
	$0.85 \cdot \beta_s \cdot f_c$	$\phi_{f_{cu} W_s \cdot b_w}$	$\phi_{A_s \cdot f_y}$	$\phi_{f_{cu} W_s \cdot b_w}$	
		A-B, A-C	B-C	A (ใต้เสาตอม่อ)	B, C (บนหัวเสาเข็ม)
F2A-0.75G (a/d)	178.50	19.56	5.024	34.18	18.41
F2A-1.00G (a/d)	178.50	17.33	7.539	30.15	16.31
F2A-1.25G (a/d)	178.50	14.75	10.053	25.53	13.88
F2A-1.50G (a/d)	178.50	12.02	12.566	20.67	11.32
F4A-0.75B (a/d)	178.50	24.03	10.048	53.42	22.61

F4A-0.75G (a/d)	178.50	24.03	10.048	53.42	22.61
F4A-1.00G (a/d)	178.50	20.41	7.539	44.42	19.21
F4A-1.25G (a/d)	178.50	17.58	7.539	37.48	16.54
F4A-1.50G (a/d)	178.50	14.50	7.539	30.02	13.64

จากตาราง 23 สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน a/d มีผลต่อการลดลงของความสามารถในการกระจายแรงอัดในฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ทำให้กำลังรับแรงอัดประสิทธิผล ซึ่งคำนวณจากสูตร $f_{cu}=0.85\times\beta_s\times f_c$ นั้นลดลง ส่งผลให้กำลังในท่อน Strut และ Node ลดตามไปด้วย โดยท่อน Strut AB และ Strut AC มีกำลังรับแรงในช่วง 19.56 – 12.02 ตัน ส่วน Node A ที่อยู่ใต้เสาตอม่อมีกำลังอยู่ในช่วง 34.18 – 20.67 ตัน และ Node B และ C ที่หัวเสาเข็มมีกำลังอยู่ในช่วง 11.32 - 18.41 ตัน

สำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือลดลง เมื่อค่า a/d เพิ่มขึ้น ความสามารถในการกระจายแรงอัดและกำลังในท่อน Strut และ Node ก็ลดลง ท่อน Strut AB และ Strut AC มีกำลังรับแรงอยู่ในช่วง 24.03 -14.50 ตัน ส่วน Node A ที่อยู่ใต้เสาตอม่อมีกำลังอยู่ในช่วง 53.42- 30.02 ตัน และ Node B และ C ที่หัวเสาเข็มมีกำลังอยู่ในช่วง 22.61- 13.64 ตัน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นของ a/d มีผลสำคัญต่อการกระจายแรงในโครงสร้างฐานรากเสาเข็มทั้งสำหรับเสาเข็ม 2 ต้นและ 4 ต้น จึงจำเป็นที่ต้องพิจารณาอัตราส่วนนี้ในการออกแบบเพื่อความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้าง.

2) กำลังของท่อนแรงอัด (Strut) และท่อนแรงดึง (Tie) และจุดต่อ (Node) ในโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ที่อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาตอม่อต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม c/p เท่ากับ 1.13, 1.53 และ 2.00 และฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น อัตราส่วน c/p เท่ากับ 1.00, 1.27, 1.56 โดยออกแบบกำลังอัดคอนกรีต (f'_c) เท่ากับ 210 กก./ซม.² และค่ากำลังดึงของเหล็ก (f_y) เท่ากับ 4,000 กก./ซม.²

ตาราง 24 แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในท่อน Strut, Tie และบริเวณจุดต่อ Node ที่มีอัตราส่วน c/p แตกต่างกันสำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น

Pile Caps	$\phi f_{cu(1-2)}(ksc)$ $0.85.\beta_s.f_c$	Strut (ton)	Tie (ton)	Node (ton)	
		$\phi f_{cu} W_s.b_w$ A-B, A-C	$\phi A_s.f_y$ B-C	$\phi f_{cu} W_s.b_w$ A (ใต้เสาตอม่อ)	$\phi f_{cu} W_s.b_w$ B, C (บนหัวเสาเข็ม)
F2B-1.13B (c/p)	178.50	19.56	5.024	34.18	18.41
F2B-1.13G (c/p)	178.50	19.56	5.024	34.18	18.41
F2B-1.53G (c/p)	178.50	23.04	5.024	46.98	21.69

F2B-2.00G (c/p)	178.50	26.63	5.024	62.10	25.06
F4B- 1.00B (c/p)	178.50	24.02	7.539	53.42	22.61
F4B- 1.00G (c/p)	178.50	24.02	7.539	53.42	22.61
F4B- 1.27B (c/p)	178.50	28.59	7.539	72.41	26.91
F4B- 1.27G (c/p)	178.50	28.59	7.539	72.41	26.91
F4B- 1.56B (c/p)	178.50	32.59	7.539	92.46	30.67
F4B- 1.56G (c/p)	178.50	32.59	7.539	92.46	30.67

การใช้วิธี Strut and Tie Model เป็นวิธีการที่เชื่อถือได้ในการออกแบบฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีการวิเคราะห์ผลกระทบของอัตราส่วน c/p ต่อพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างฐานราก ผลการวิเคราะห์จากตาราง 24 สามารถสรุปดังนี้

สำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น ค่ากำลังใน Strut มีการเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน c/p เพิ่มขึ้นจาก 1.13 ถึง 2.00, โดยมีค่าตั้งแต่ 19.56 ถึง 26.63 ตัน ในขณะที่กำลังใน Tie คงที่ที่ 5.02 ตัน ไม่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของฐานรากที่กำหนดไว้กำลังที่ Node A ซึ่งอยู่ใต้เสาตอม่อมีการเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน c/p มีค่าตั้งแต่ 34.18 ถึง 62.10 ตัน ส่วนที่ Node B และ C บนหัวเสาเข็มมีค่าตั้งแต่ 18.41 ถึง 25.06 ตัน แนวโน้มสำหรับฐานรากเสาเข็ม 4 ต้นนั้นคล้ายคลึงกัน กำลังใน Strut AB และ AC เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 24.02 ถึง 32.59 ตัน และกำลังที่ Node A อยู่ระหว่าง 53.42 ถึง 92.46 ตัน ในขณะที่กำลังใน Tie คงที่เท่ากับ 7.53 ตัน และ Node B และ C มีค่าตั้งแต่ 22.61 ถึง 30.67 ตัน การทดสอบเหล่านี้ยืนยันว่าอัตราส่วน c/p มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการกระจายแรงภายในโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม ซึ่งควรถูกพิจารณาอย่างละเอียดในกระบวนการออกแบบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความปลอดภัย

3) กำลังของท่อนแรงอัด (Strut) และท่อนแรงดึง (Tie) และจุดต่อ (Node) ในโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ที่มีจุดยึดรั้งที่ปลายเหล็กเสริมแตกต่างกัน ได้แก่ งามากเหล็กเสริมงอ 90 องศา แผ่นเพลท 30x30 มม. หนา 3 มม. และ เหล็กฉาก L 30x30x30 มม. หนา 3 มม. โดยออกแบบกำลังอัดคอนกรีต (f'_c) เท่ากับ 210 กก./ซม.² และค่ากำลังดึงของเหล็ก (f_y) เท่ากับ 4,000 กก./ซม.²

ตาราง 25 แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในท่อน Strut, Tie และบริเวณจุดต่อ Node ที่มีจุดยึดรั้งที่ปลายเหล็กเสริมแตกต่างกันสำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น

Pile Caps	$\phi_{f_{cu(1-2)}}(ksc)$ $0.85 \cdot \beta_s \cdot f_c$	Strut (ton)	Tie (ton)	Node (ton)	
		$\phi_{f_{cu} W_s \cdot b_w}$	$\phi A_s \cdot f_y$	$\phi_{f_{cu} W_s \cdot b_w}$	
		A-B, A-C	B-C	A (ใต้เสาตอม่อ)	B, C (บนหัวเสาเข็ม)
F2C-AB	178.50	19.56	6.28	29.05	15.64
F2C-BB	178.50	19.56	6.28	29.05	15.64
F2C-CB	178.50	19.56	6.28	29.05	15.64
F4C-AB	178.50	23.48	12.56	44.86	18.78
F4C-BB	178.50	23.48	12.56	44.86	18.78
F4C-CB	178.50	23.48	12.56	44.86	18.78
F4C-AG	178.50	23.48	12.56	44.86	18.78
F4C-BG	178.50	23.48	12.56	44.86	18.78
F4C-CG	178.50	23.48	12.56	44.86	18.78

สำหรับตาราง 25 สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการออกแบบจุดยึดรั้งที่แตกต่างกัน พบว่าในการออกแบบโครงสร้างฐานราก จุดยึดรั้งที่แตกต่างกันมีค่ากำลังในท่อนกำลังรับแรงอัด Strut ท่อนแรงดึง Tie และบริเวณจุดต่อ Node สำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น โดย Strut มีค่ากำลังคงที่ที่ 19.56 ตัน ในขณะที่ Tie มีค่ากำลังคงที่ที่ 6.28 ตัน และ Node A บริเวณใต้เสาตอม่อมีค่ากำลังรับแรงอยู่ระหว่าง 15.64 ตัน และ Node B, C บริเวณบนหัวเสาเข็มมีค่าอยู่ในช่วง 18.78 ตัน และส่วนฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น มีค่ากำลังแรงอัดในท่อน Strut AB, และ Strut AC เท่ากับ 23.48 ตัน ส่วนแรงใน Tie มีค่าคงที่เท่ากับ 12.56 ตัน และค่ากำลังที่ Node A บริเวณใต้เสาตอม่อมีค่าเท่ากับ 44.86 ตัน และ Node B และ C บริเวณบนหัวเสาเข็มมีกำลังรับแรงเท่ากับ 18.78 ตัน

4.6.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบให้ห้องปฏิบัติการและทฤษฎีการออกแบบ

ตาราง 26 ผลการทดสอบกำลังของท่อนแรงอัด (strut) และท่อนแรงดึง (Tie) ในกลุ่ม 1

Pile Caps	Experimental load (Ton)			ACI318M-14 Design by code			PC _{-exp} / PC _{-code}	PS _{-exp} / PS _{-code}
	PC _{-exp}	PS _{-exp}	(PC/ PS) _{exp}	PC _{-code}	PS _{-code}	(PC/PS) _{code}		
F2A-0.75G (a/d)	24.07	13.28	1.81	19.56	5.024	3.89	1.23	2.64

F2A-1.00G (a/d)	22.12	15.14	1.46	17.33	7.539	2.30	1.28	2.01
F2A-1.25G (a/d)	18.89	14.76	1.28	14.75	10.053	1.47	1.28	1.47
F2A-1.50G (a/d)	18.00	15.28	1.18	12.02	12.566	0.96	1.50	1.22
F4A-0.75B (a/d)	6.19	6.73	0.92	24.03	14.85	1.62	0.26	0.45
F4A-0.75G (a/d)	21.64	23.53	0.92	24.03	14.85	1.62	0.90	1.58
F4A-1.00G (a/d)	20.65	23.03	0.90	20.41	14.85	1.37	1.01	1.55
F4A-1.25G (a/d)	11.34	12.65	0.90	17.58	14.85	1.18	0.65	0.85
F4A-1.50G (a/d)	7.78	8.89	0.88	14.5	14.85	0.98	0.54	0.60

ในตาราง 26 แสดงผลการทดลองฐานรากที่มีอัตราส่วน a/d ในช่วง 0.75 -1.50 พบว่ากำลังท่อน Strut (P_c) และ Tie (P_s) จากห้องปฏิบัติการมีอัตราส่วน $(P_c/P_s)_{exp}$ มีค่าอยู่ในช่วง 0.88 – 1.81 และสำหรับจากค่าทฤษฎีการออกแบบตาม ACI318M-14 code ค่าอัตราส่วน $(P_c/P_s)_{code}$ เท่ากับอยู่ในช่วง 0.98 -3.89 และเมื่อนำอัตราส่วน และเมื่อนำค่ากำลังท่อน Strut จากห้องปฏิบัติการเทียบกับ Strut จากทฤษฎีการออกแบบพบว่าอัตราส่วน $P_{c_{ext}} / P_{c_{code}}$ ในช่วง 0.54 -1.50 และสำหรับ $P_{c_{ext}} / P_{c_{code}}$ ในช่วง 0.45- 2.64 โดยสังเกตพบว่าฐานรากที่มีอัตราส่วน a/d ที่มีค่ามากจะทำให้สัดส่วนท่อนแรงอัดในห้องปฏิบัติการและทฤษฎีแตกต่างกันมาก

ตาราง 27 ผลการทดสอบกำลังของท่อนแรงอัด (strut) และท่อนแรงดึง (Tie) ในกลุ่ม 2

Pile Caps	Experimental load (Ton)			ACI318M-14 Design by code			$P_{c_{exp}} / P_{c_{code}}$	$P_{s_{exp}} / P_{s_{code}}$
	$P_{c_{exp}}$	$P_{s_{exp}}$	$(P_c / P_s)_{exp}$	$P_{c_{code}}$	$P_{s_{code}}$	$(P_c/P_s)_{code}$		
F2B- 1.13B (c/p)	24.07	13.28	1.81	8.99	4.96	1.81	2.68	2.68
F2B- 1.13G (c/p)	23.21	12.81	1.81	8.99	4.96	1.81	2.58	2.58
F2B- 1.53G (c/p)	25.56	13.55	1.89	8.84	4.69	1.89	2.89	2.89
F2B- 2.00G (c/p)	28.04	14.22	1.97	8.70	4.41	1.97	3.22	3.22
F4B- 1.00B (c/p)	13.66	14.85	0.92	13.66	14.85	0.92	1.00	1.00
F4B- 1.00G (c/p)	21.64	23.53	0.92	13.66	14.85	0.92	1.58	1.58
F4B- 1.27B (c/p)	13.32	14.85	0.90	13.32	14.85	0.90	1.00	1.00
F4B- 1.27G (c/p)	24.69	27.54	0.90	13.32	14.85	0.90	1.85	1.85
F4B- 1.56B (c/p)	23.28	26.62	0.87	12.99	14.85	0.87	1.79	1.79
F4B- 1.56G (c/p)	24.04	27.48	0.87	12.99	14.85	0.87	1.85	1.85

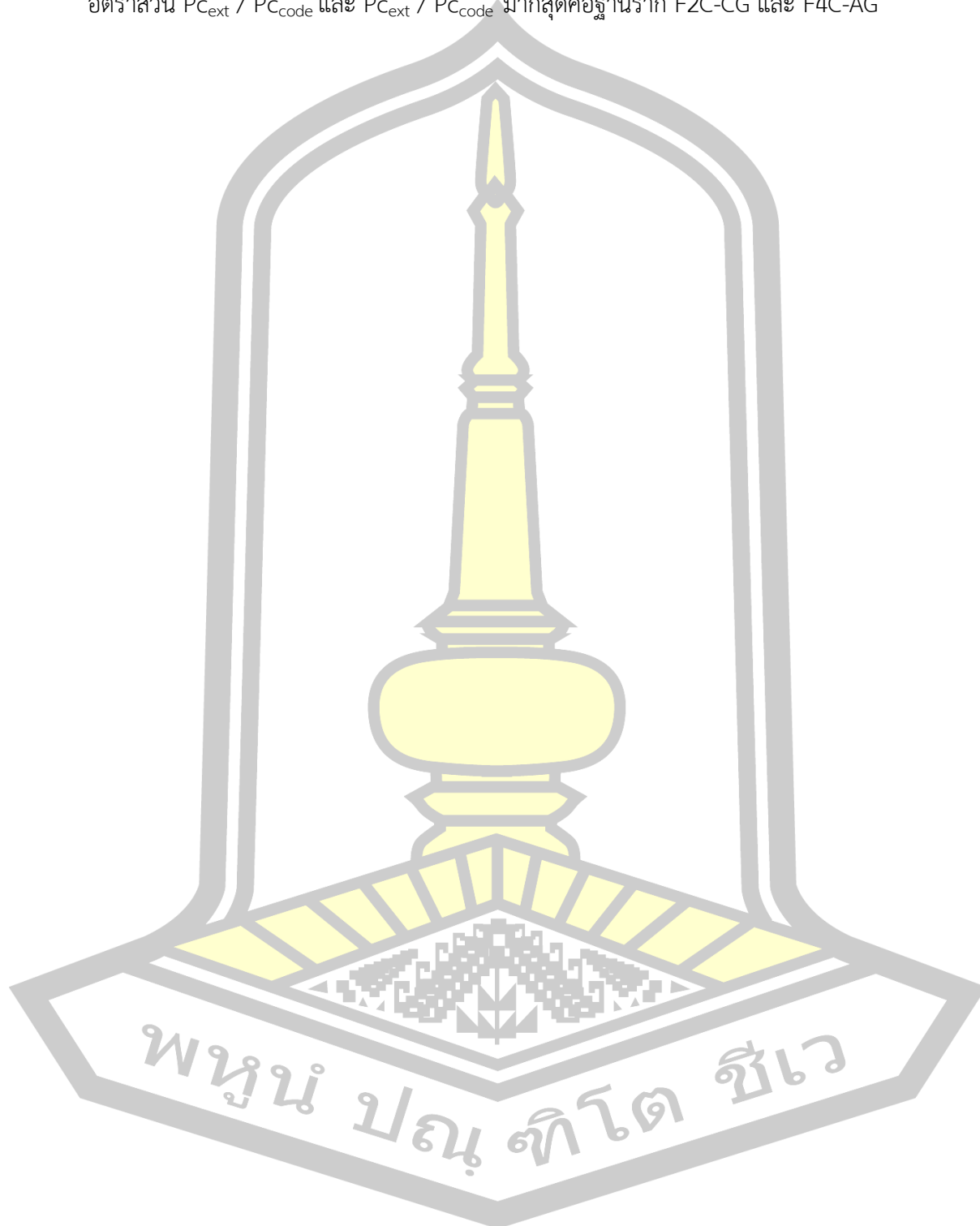
สำหรับตาราง 27 แสดงผลการทดลองฐานรากที่มีอัตราส่วน c/p ในช่วง 1.13 -2.00 สำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น พบว่ากำลังท่อน Strut (P_c) และ Tie (P_s) จากห้องปฏิบัติการมีอัตราส่วน $(P_c/P_s)_{Exp}$ มีค่าอยู่ในช่วง 1.81 -1.97 และสำหรับจากค่าทฤษฎีการออกแบบตาม ACI318M-14 code ค่าอัตราส่วน $(P_c/P_s)_{code}$ เท่ากับอยู่ในช่วง 0.98 -3.89 และเมื่อนำอัตราส่วนและเมื่อนำค่ากำลังท่อน Strut จากห้องปฏิบัติการเทียบกับ Strut จากทฤษฎีการออกแบบพบว่าอัตราส่วน $P_{c_{ext}} / P_{c_{code}}$ ในช่วง 0.54 -1.50 และสำหรับ $P_{c_{ext}} / P_{c_{code}}$ ในช่วง 0.45-2.64 โดยสังเกตพบว่าฐานรากที่มีอัตราส่วน a/d ที่มีค่ามากจะทำให้สัดส่วนท่อนแรงอัดในห้องปฏิบัติการและทฤษฎีแตกต่างกันมาก

ตาราง 28 ผลการทดสอบกำลังของท่อนแรงอัด (Strut) และท่อนแรงดึง (Tie) ในกลุ่ม 3

Pile Caps	Experimental load (Ton)			ACI318M-14 Design by code			$P_{c_{exp}} / P_{c_{code}}$	$P_{s_{exp}} / P_{s_{code}}$
	$P_{c_{exp}}$	$P_{s_{exp}}$	$(P_c / P_s)_{exp}$	$P_{c_{code}}$	$P_{s_{code}}$	$(P_c / P_s)_{code}$		
F2C-AG	24.07	13.28	1.81	8.99	4.96	1.81	2.68	2.68
F2C-BG	20.71	11.43	1.81	8.99	4.96	1.81	2.30	2.30
F2C-CG	26.69	14.15	1.89	8.84	4.69	1.89	3.02	3.02
F4C-AB	21.64	23.53	0.92	13.66	14.85	0.92	1.58	1.58
F4C-BB	18.81	20.45	0.92	13.66	14.85	0.92	1.38	1.38
F4C-CB	21.27	23.72	0.90	13.32	14.85	0.90	1.60	1.60
F4C-AG	23.60	26.32	0.90	13.32	14.85	0.90	1.77	1.77
F4C-BG	17.14	19.60	0.87	12.99	14.85	0.87	1.32	1.32
F4C-CG	20.14	23.03	0.87	12.99	14.85	0.87	1.55	1.55

และสำหรับตาราง 28 แสดงผลการทดลองกลุ่มที่ 3 ผลของรูปแบบจุดยึดตั้งในฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น และ 4 ต้น ออกแบบฐานรากให้มีความหนา 20 ซม. โดยเสริมจุดยึดตั้งด้วยการงอฉากเหล็กเสริมอง 90 องศา การเชื่อมยึดแผ่นเพลท 30x30 หนา 3 มม และ เหล็กฉาก L 30x30x30 หนา 3 มม พบว่ากำลังท่อน Strut (P_c) และ Tie (P_s) จากห้องปฏิบัติการมีอัตราส่วน $(P_c/P_s)_{Exp}$ มีค่าอยู่ในช่วง 0.87-1.81 และสำหรับจากค่าทฤษฎีการออกแบบตาม ACI318M-14 code ค่าอัตราส่วน $(P_c/P_s)_{code}$ เท่ากับอยู่ในช่วง 0.87-1.81 และเมื่อนำอัตราส่วนและเมื่อนำค่ากำลังท่อน Strut จากห้องปฏิบัติการเทียบกับ Strut จากทฤษฎีการออกแบบพบว่าอัตราส่วน $P_{c_{ext}} / P_{c_{code}}$

ในช่วง 1.32-3.02 และสำหรับ $P_{c_{ext}} / P_{c_{code}}$ ในช่วง 1.32-2.30 โดยสังเกตพบว่าฐานรากที่มีอัตราส่วน $P_{c_{ext}} / P_{c_{code}}$ และ $P_{c_{ext}} / P_{c_{code}}$ มากสุดคือฐานราก F2C-CG และ F4C-AG



บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาเกี่ยวกับ อัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อมอดต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (c/p) และจุดยึดรั้งที่แตกต่างกันที่มีผลต่อพฤติกรรมของฐานรากเสาเข็มที่ออกแบบโดยวิธีแบบจำลองโครงข้อหมุน โดยสามารถสรุปออกมาได้ดังนี้

จากการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ในการออกแบบฐานรากที่สามารถรองรับแรงอัดสูงสุดได้ดี สำหรับการออกแบบด้วยวิธีโครงข้อหมุนแบบจำลองได้ให้ค่าที่สอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและเป็นไปตามข้อกำหนดของ ACI318-14 โดยวิเคราะห์ตามปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d), อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อมอดต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (c/p) และรูปแบบจุดยึดรั้งที่แตกต่างกัน ซึ่งการออกแบบฐานรากจึงควรพิจารณาถึงอัตราส่วน a/d และ c/p และจุดยึดรั้งที่ปลายเหล็กเสริมเพื่อความสามารถในการรับน้ำหนักที่ดีขึ้นและการแอ่นตัวที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวที่อาจเกิดจากแรงเฉือน

5.1 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. และความสูง 30 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C39 ได้ทำการวัดแรงอัดสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ ผลการทดสอบจากตัวอย่างคอนกรีตที่อายุการรักษาคือ 7, 14 และ 28 วัน ได้แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุของการทดสอบ ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7 วัน คือ 202.95 กก./ซม.² ที่อายุ 14 วัน เป็น 220.00 กก./ซม.² และที่อายุ 28 วัน เป็น 234.33 กก./ซม.² ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดอย่างต่อเนื่องในช่วงอายุ 7 – 28 วัน และเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบคือเหล็กข้ออ้อยชนิด DB10 มีขนาด 10 มิลลิเมตร โดยทดสอบความต้านทานแรงดึงที่จุดครากอยู่ที่ประมาณ 4,000 กก./ซม.² ตามมาตรฐาน มอก 24-2536 เกี่ยวกับเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต (เหล็กข้ออ้อย) การทดสอบดำเนินการโดยใช้เครื่อง UTM (Universal Testing Machine) เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและความเครียดในแนวแกน จากผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยของแรงดึงในเหล็กเสริมที่จุดครากมีค่าเท่ากับ 42,789.06 กก./ซม.² และค่าแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 50,101.54 กก./ซม.² โมดูลัสยืดหยุ่นประมาณ 2,010,000 กก./ซม.² และมีความยืดหยุ่นประมาณร้อยละ 27.48 คุณสมบัติเหล่านี้สอดคล้องกับมาตรฐานที่กำหนดไว้ใน มอก 24-2536

5.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็กที่รองรับด้วยเสาเข็ม 2 ต้นและ 4 ต้น งานวิจัยนี้ได้พิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการรับกำลังของฐานราก ได้แก่ อัตราส่วนช่วงความยาวของแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d), อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดเสาต่อมอดต่อพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (c/p), และรูปแบบจุดยึดรั้งที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์ใช้โมเดลโครงข้อหมุน

แบบจำลองเพื่อประเมินแรงในส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง ได้แก่ ท่อนแรงอัด (Strut), ท่อนแรงดึง (Tie), และจุดต่อ (Node), พร้อมทั้งปริมาณเหล็กเสริมที่คำนวณได้จากท่อนแรงดึง เพื่อนำไปสู่การออกแบบที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูงสุด.

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและระยะการแอ่นตัวของฐานราก
เสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยพิจารณาที่จุดกึ่งกลางของฐานรากภายใต้สภาวะแรงกระทำสูงสุด (Ultimate Compressive Strength) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการแอ่นตัวของฐานรากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นลักษณะเส้นตรง และมีช่วงระยะค่อนข้างน้อย อยู่ในช่วงไม่เกิน 5 – 15 มิลลิเมตร สอดคล้องกับ รายงานงานวิจัยของ (A. Kumar, 2013:1-9) ผลของปัจจัยเหล่านี้ต่อระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของฐานรากสามารถสรุปได้ดังนี้

5.3.1 ผลของอัตราส่วน a/d อัตราส่วน a/d ที่ 0.75 ฐานรากเสาเข็มที่มีอัตราส่วน a/d น้อยแสดงถึงการมีระยะช่วงแรงเฉือนที่สั้นลงเมื่อเทียบกับความลึกประสิทธิภาพของฐาน ซึ่งทำให้การแอ่นตัวมีน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ เนื่องจากมีการกระจายแรงที่ดีกว่าอัตราส่วน a/d เพิ่มขึ้นจาก 1.00 ถึง 1.50 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนนี้ส่งผลให้ระยะช่วงแรงเฉือนมีความยาวมากขึ้น เมื่อเทียบกับความลึกประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางของฐานรากมากขึ้น เนื่องจากแรงกระทำมีโอกาสกระจายไปในระยะทางที่ไกลกว่า ทำให้เกิดการยืดหยุ่นและแอ่นตัวได้มากขึ้น

5.3.2 ผลของอัตราส่วน c/p มีผลต่อการแอ่นตัวของฐานรากโดยตรงสำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น (c/p 1.33-2.00) อัตราส่วน c/p ที่เพิ่มขึ้นช่วยให้การกระจายแรงเป็นไปอย่างเท่าเทียม และมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การแอ่นตัวของฐานรากลดลง เนื่องจากความสามารถในการกระจายแรงของโครงสร้างได้ดีขึ้น ความแข็งแกร่งทางโครงสร้างเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้น และฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น (c/p 1.00-1.56) การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน c/p ในฐานรากเสาเข็ม 4 ต้น นั้นยังช่วยให้การกระจายแรงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งช่วยลดการแอ่นตัวของโครงสร้างได้ แต่เนื่องจากมีจำนวนเสาเข็มมากกว่า จึงมีพื้นที่ในการกระจายแรงมากขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงบรรทุกของโครงสร้างได้ดีกว่า และฐานรากที่มีอัตราส่วน c/p สูงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ดีขึ้น เนื่องจากการกระจายแรงที่ดีขึ้นและลดการเข้มข้นของแรงในจุดใดจุดหนึ่งของโครงสร้าง

5.3.3 ผลของการออกแบบจุดยึดรั้งที่แตกต่างกับการออกแบบเหล็กเสริม 90 องศา, การเชื่อมยึดแผ่นเพลท, และเหล็กฉาก L การใช้วิธีเหล่านี้ในการเสริมจุดยึดรั้งส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและความมั่นคงมากขึ้น ช่วยลดการเคลื่อนที่หรือการแอ่นตัวของฐานรากภายใต้แรงกระทำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะแรงกระทำสูงสุด การเชื่อมยึดแผ่นเพลทและการใช้เหล็กฉาก L ช่วยให้การเชื่อมต่อระหว่างฐานรากและเสาเข็มมีความเหนียวและความสามารถในการรับแรงดีขึ้น

5.3.4 ลักษณะการแตกร้าวในฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ต้น และ 4 ต้น การแตกร้าวของฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีจำนวน 2 ต้นและ 4 ต้นที่ได้รับการเสริมเหล็กแบบกระจุก (B) และแบบกระจาย (G) มีแนวโน้มแสดงพฤติกรรมการแตกร้าวประเภท Shear Failure ในทุกรูปแบบ สำหรับฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น แสดงการแตกร้าวเล็กน้อยที่ระดับกำลังรับน้ำหนักประมาณร้อยละ 11.3 ของกำลังสูงสุด และการแตกร้าวที่จุดยึดหยุนสูงสุด (Yield Crack) ร้อยละ 58 ของกำลังสูงสุด, ในขณะที่ฐานรากเสาเข็ม 4 ต้นแสดงการแตกร้าวเล็กน้อยที่ระดับกำลังรับน้ำหนักประมาณร้อยละ 11.0 และการแตกร้าวที่จุดยึดหยุนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 56.66 ของกำลังสูงสุด

จากการทดลองพบว่ารูปแบบการเสริมเหล็กมีผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและระยะการแอ่นตัวของฐานราก, โดยเฉพาะอย่างยิ่งรูปแบบ CG (เหล็กฉาก) ซึ่งแสดงความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดและระยะการแอ่นตัวน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ AG (งอฉาก 90 องศา) และ BG (แผ่นเพลท) ลักษณะการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็มส่วนใหญ่มีแนวโน้มเป็นแบบ Shear Failure ยกเว้นฐานราก F4A-1.5G (a/d) ที่มีลักษณะการแตกร้าวแบบ Flexible Failure เนื่องจากมีความหนาของฐานรากน้อย จึงแสดงพฤติกรรมแบบคานซึ่งนำไปสู่การแตกร้าวที่เกิดจากการดัดที่ผิวด้านล่างของฐานราก และพฤติกรรมการแตกร้าวของฐานรากที่อัตราส่วน a/d มีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมการแตกร้าวของฐานรากเสาเข็ม 2 ต้น โดยฐานรากที่มี a/d ต่ำมีโอกาสเกิดการแตกร้าวแบบ Shear Failure ในขณะที่เสาเข็มที่มี a/d สูงจะแสดงพฤติกรรมการแตกร้าวแบบคานหรือ Flexible Failure

5.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการออกแบบด้วยวิธีโครงข้อหมุนแบบจำลอง

ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของท่อนแรงอัดและท่อนแรงดึงจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและการออกแบบตาม ACI318M-14 พบว่าในหลายกรณี ค่ากำลังของท่อนแรงอัดและท่อนแรงดึงจากการทดลองมีค่าสูงกว่าที่คำนวณตามทฤษฎีการออกแบบ

อัตราส่วนกำลังท่อน Strut (Pc) และ Tie (Ps) ผลการทดลองแสดงว่าอัตราส่วน (Pc/Ps)_{Exp} มีค่าในช่วงที่แตกต่างจากที่คำนวณโดยใช้ ACI318M-14 Code ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างในสัดส่วนท่อนแรงอัดที่สำคัญเมื่อเทียบกับทฤษฎีการออกแบบ.

ฐานรากที่มีอัตราส่วน a/d มากพบว่าฐานรากที่มีอัตราส่วน a/d มากทำให้สัดส่วนท่อนแรงอัดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการและทฤษฎีการออกแบบมีความแตกต่างกันอย่างมาก

สรุปได้ว่าผลการทดลองในห้องปฏิบัติการจะแสดงกำลังของท่อนแรงอัดและท่อนแรงดึงที่สูงกว่าการคำนวณทางทฤษฎีตามข้อกำหนด ACI318M-14 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาจากอัตราส่วน a/d ที่มาก ความแตกต่างนี้อาจมีความสำคัญต่อการออกแบบและการวิเคราะห์ความแข็งแรงของฐานรากในโครงสร้างจริง

ข้อเสนอแนะจากการวิจัยนี้คือการออกแบบฐานรากเสาเข็มคอนกรีตเสริมเหล็กควรพิจารณาถึงความหนาของฐานรากเพื่อการกระจายแรงที่เหมาะสม และการจัดวางเหล็กเสริมที่สอดคล้องกับการรับน้ำหนักที่จะเกิดขึ้น เพื่อความมั่นคงและความปลอดภัยของโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม การทดสอบเพิ่มเติมควรจะดำเนินการเพื่อประเมินพฤติกรรมภายใต้สภาวะโหลดที่แตกต่างกัน และการทดสอบในสภาวะจริงที่อาจช่วยให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำยิ่งขึ้นเพื่อการออกแบบที่เหมาะสมและเพื่อการปรับปรุงแบบจำลองการออกแบบในอนาคต

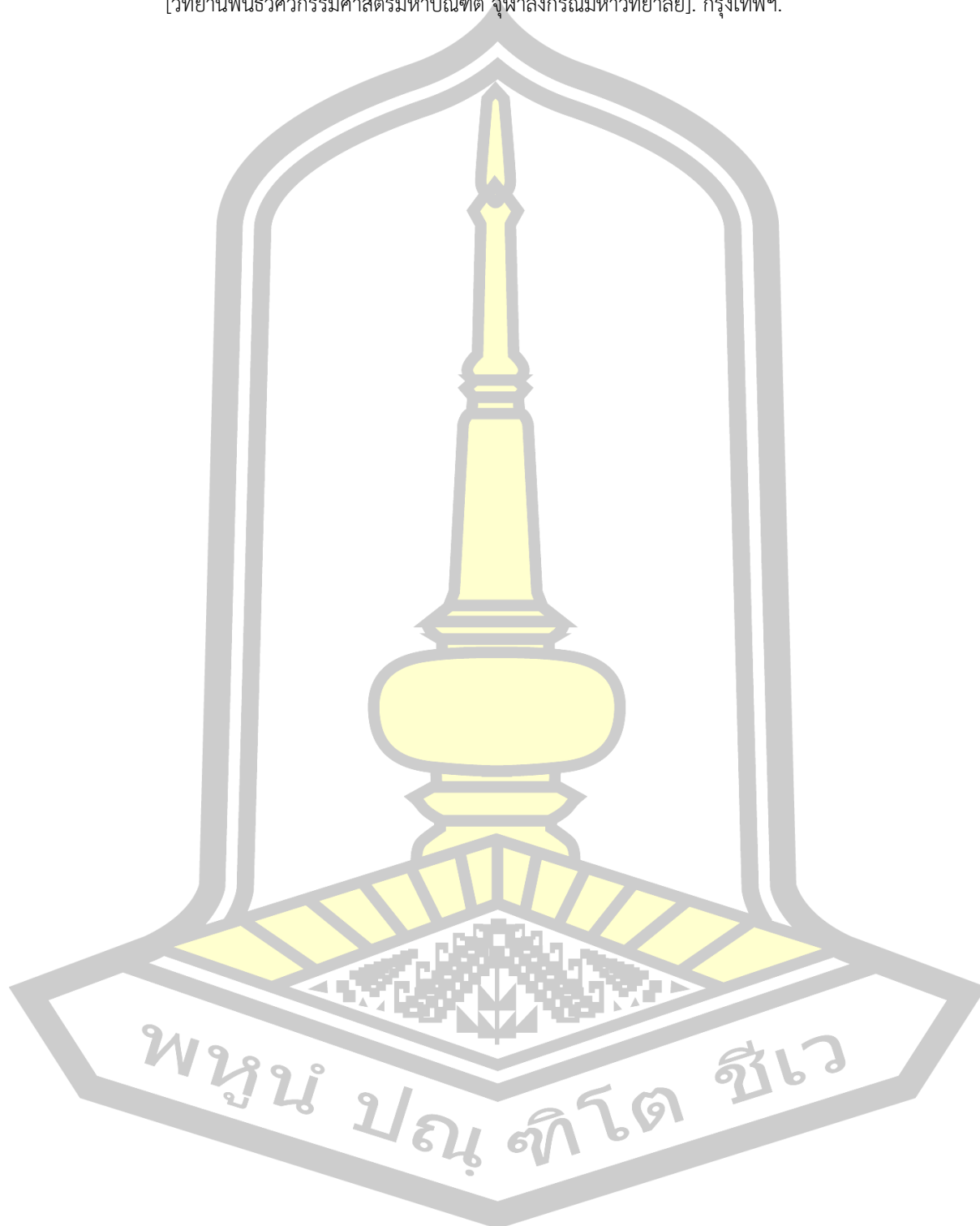


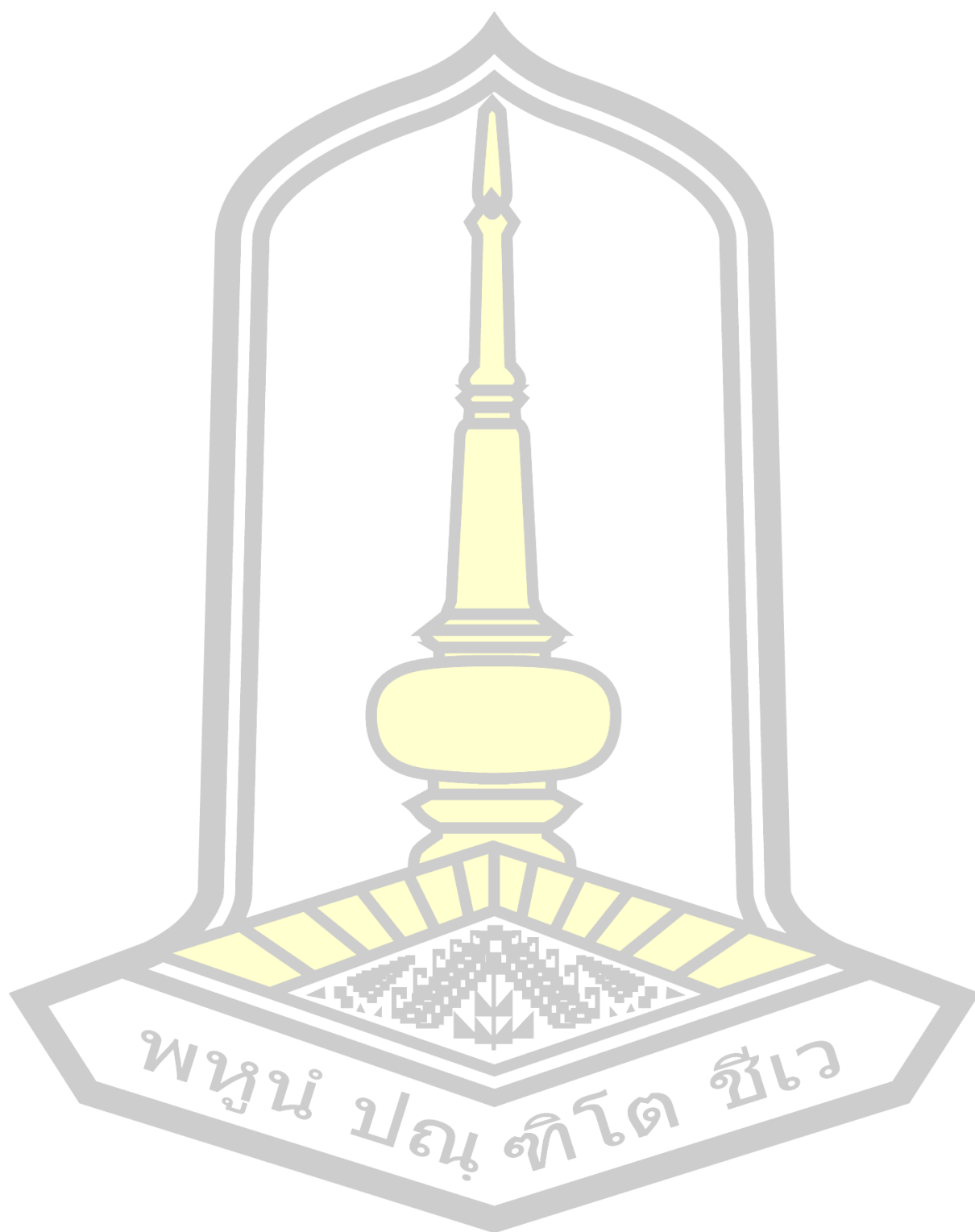
บรรณานุกรม

- Abdul-Razzaq, K. S., & Farhood, M. A. (2017). Design and behavior of reinforced concrete pile caps: a literature review. *International Journal of Engineering Research and science & Technology (IJERST)*, 6(4), 1-9.
- ACI Committee. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary.
- Bircher, D., Tuchscherer, R., Huizinga, M., Bayrak, O., Wood, S. L., & Jirsa, J. O. (2009). *Strength and serviceability design of reinforced concrete deep beams*.
- Broms, C. E. (2018). Strut-and-tie model for punching failure of column footings and pile caps. *ACI Structural Journal*, 115(3), 689-698.
- Collins, M. P., & Mitchell, D. (1980). Shear and torsion design of prestressed and non-prestressed concrete beams. *PCI journal*, 25(5), 32-100.
- de ARAÚJO, J. M. (2017). Reliability analysis of rigid pile caps using an iterative strut-and-tie model. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 10(1), 65-75.
- Dhahir, M. K. (2018). Strut and tie modeling of deep beams shear strengthened with FRP laminates. *Composite Structures*, 193, 247-259.
- Geevar, I., & Menon, D. (2019). Strength of Reinforced Concrete Pier Caps-Experimental Validation of Strut-and-Tie Method. *ACI Structural Journal*, 116(1).
- Guo, H. (2018). Investigation on punching behavior of pile cap under column reinforced by section steel truss. *ACI Structural Journal*, 115(2), 379-390.
- Hu, B., & Wu, Y.-F. (2018). Effect of shear span-to-depth ratio on shear strength components of RC beams. *Engineering Structures*, 168, 770-783.
- Kumar, A. (2014). Study on the behavior of pile cap model with various type failure of concrete cap. *Global J*, 1(1), 2349-2283.
- Kumar, P., Shetty, K. K., & Renganayagi, B. (2018). Influence of strut and tie model approach for pile cap. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(6), 1304-1309.
- Nagarajan, P., Jayadeep, U., & Pillai, T. M. (2010). Application of micro truss and strut and tie model for analysis and design of reinforced concrete structural

- elements. *Sonklanakarin Journal of Science and Technology*, 31(6), 647.
- Naik, U., & Kute, S. (2013). Span-to-depth ratio effect on shear strength of steel fiber-reinforced high-strength concrete deep beams using ANN model. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5(1), 29.
- Park, J., Kuchma, D., & Souza, R. (2008). Strength predictions of pile caps by a strut-and-tie model approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(12), 1399-1413.
- R Folić, B Folić,, IM Miličić. (1992). TRUT-AND-TIE MODEL FOR ANALYSIS OF PILES CAP. In. Contemporary achievements in civil engineering 20: Subotica, SERBIA.
- Ritter, W. (1899). Die bauweise hennebique (hennebiques construction method).
- Sagasetta, J., & Vollum, R. (2010). Shear design of short-span beams. *Magazine of Concrete Research*, 62(4), 267-282.
- Salem, H. M., & Maekawa, K. (2006). Computer-aided analysis of reinforced concrete using a refined nonlinear strut and tie model approach. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(2), 325-336.
- Schlaich, J., Schäfer, K., & Jennewein, M. (1987). Toward a consistent design of structural concrete. *PCI journal*, 32(3), 74-150.
- Thompson, M. K. (2002). *The anchorage behavior of headed reinforcement in CCT nodes and lap splices*. The University of Texas at Austin.
- Williams, C. S. (2011). Strut-and-tie model design examples for bridge.
- Yun, Y. M. (2000). Computer graphics for nonlinear strut-tie model approach. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14(2), 127-133.
- Yun, Y. M. (2006). Strength of Two-Dimensional Nodal Zones in Strut-Tie Models. *Journal of structural engineering*, 132(11), 1764-1783.
- กฤติน เมฆอรุณกมล, วัฒนชัย สมิตชากร. (2545). การเปรียบเทียบการคำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งานและวิธีกำลัง [โครงการทางวิศวกรรมโยธา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].
- จักษดา อารังวุฒิ. (2548). การตรวจสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับมีเหล็กวางนำฝั่งที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดตามขวาง [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี]. นครราชสีมา.
- อเนก ศิริพานิชกร. (2562, 24 ตุลาคม 2562). เรื่องเล่ามาตรฐานงานออกแบบโครงสร้างคอนกรีตในประเทศไทย.
- อมร พิมานเมศ. (2558). การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีแบบจำลอง *Strut-and-Tie*. (Vol. ฉบับที่ 2). พิมพ์ครั้งที่ 2.

อัฐพล เตะรัตนประเสริฐ. (2557). การออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีอาร์โมนีเสริม
[วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. กรุงเทพฯ.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า
วันเกิด	14 ธันวาคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดมหาสารคาม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	2 หมู่ 2 ต.นาเชือก อ.นาเชือก จ.มหาสารคาม
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาวิชาวิศวกรรมการก่อสร้าง ขนส่งและโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2555 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2567 ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผลงานวิจัย	สถิตย์พงษ์ วงศ์สง่า และเรืองรุชดี ชีระโรจน์. (2562) "การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบบจำลองการอบเหนียวในการออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็มโดยวิธีโครงซ้อนแบบจำลอง". การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24. (หน้า STR038). จังหวัดอุดรธานี.

พูน ปณ ทัต ชีเว