



ผลกระทบของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลต่อพฤติกรรมทางกลของคานหูก้างรี  
แฉักทีพีเพาเตอร์คอนกรีต

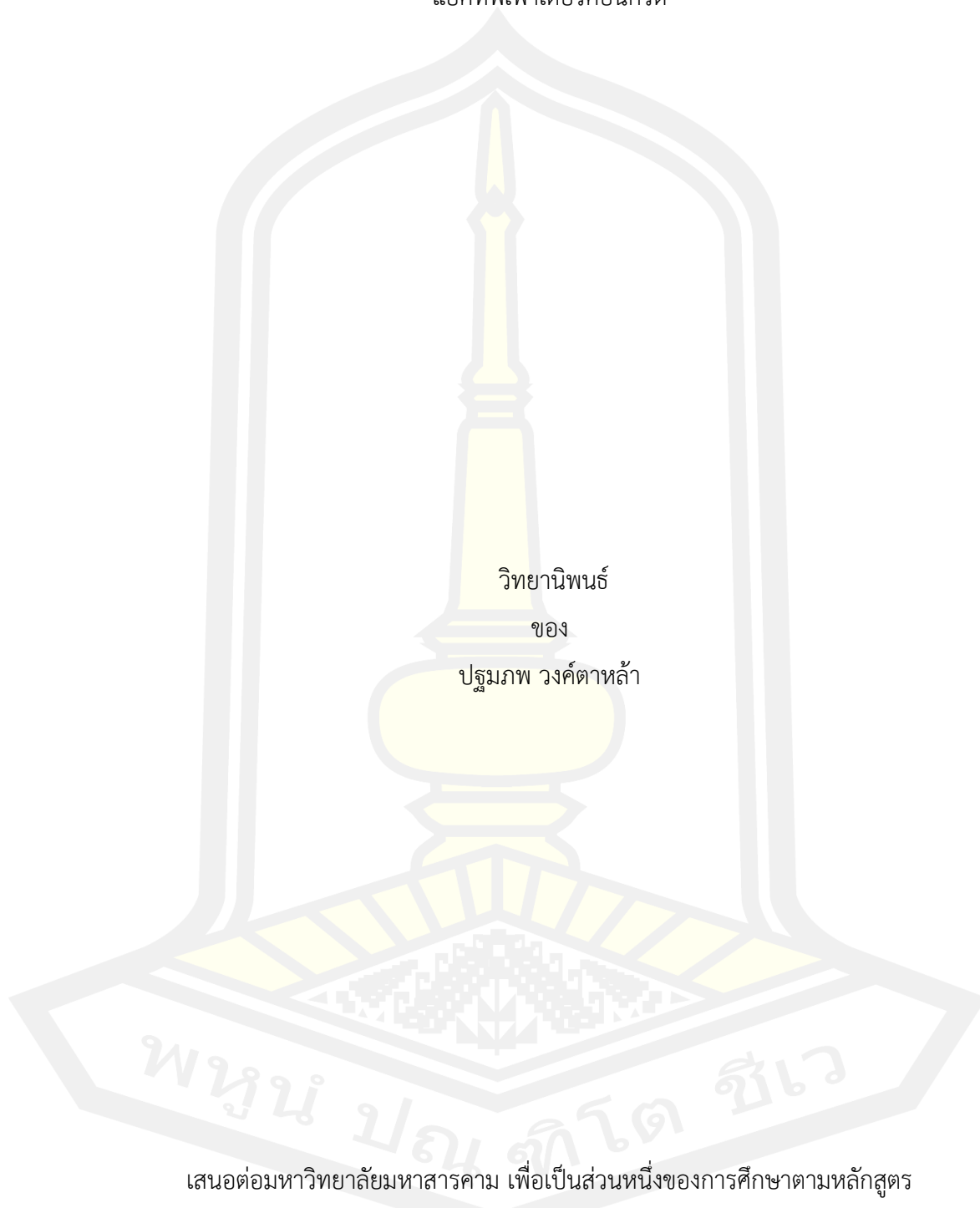
วิทยานิพนธ์  
ของ  
ปฐมภพ วงศ์ตาห้ำ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

กุมภาพันธ์ 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผลกระทบของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลต่อพฤติกรรมทางกลของคานหูก้างรี  
แฉีกทีเฟพาเตอร์คอนกรีต



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

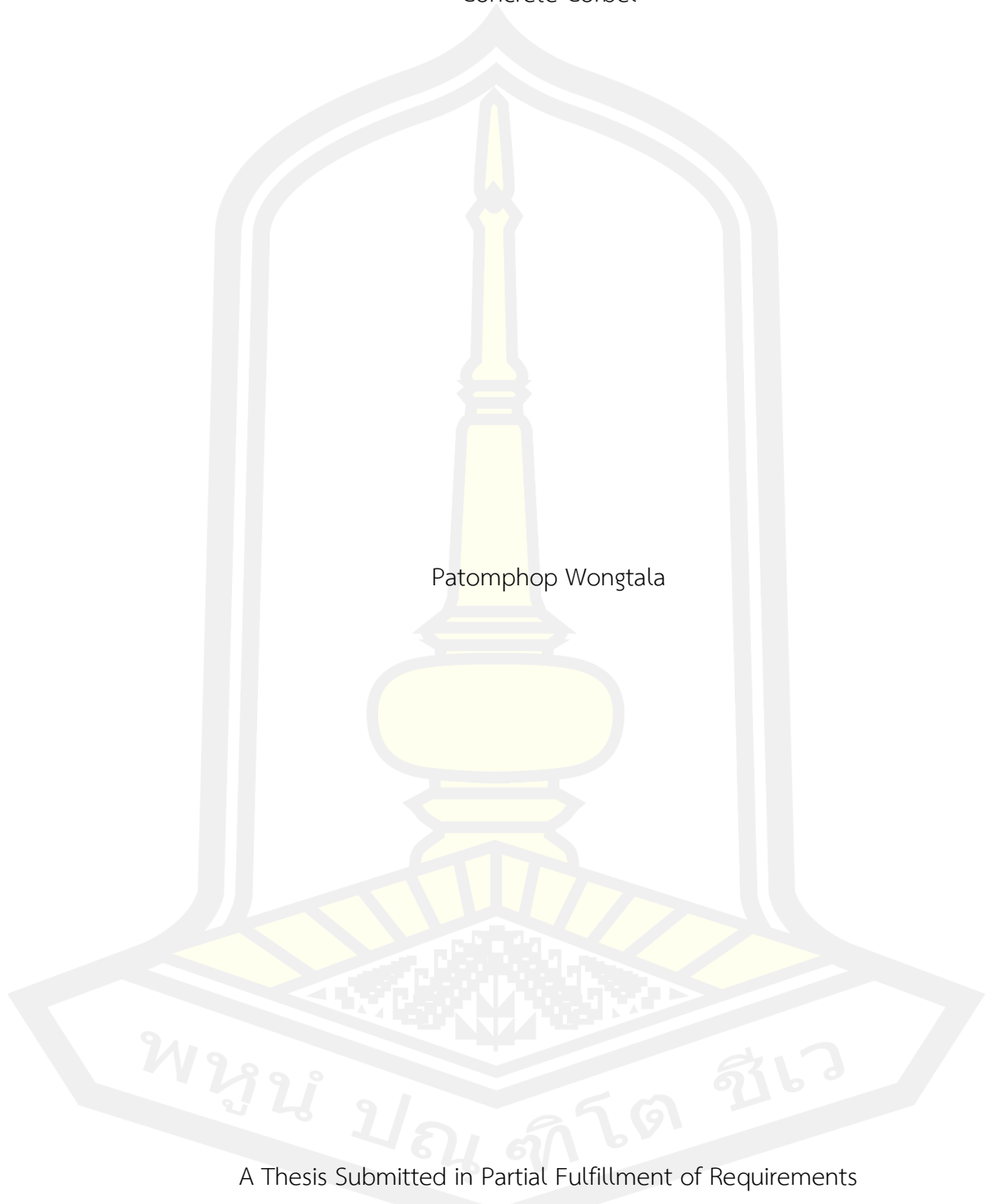
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

กุมภาพันธ์ 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Effect of Shear Span-to-Depth Ratio on Mechanical Behavior of Reactive Powder  
Concrete Corbel

Patomphop Wongtala



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

February 2023

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายปฐมภพ วงศ์ตาห้ำ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. วัจนวงศ์ กรีพละ )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. กริสัน ชัยมูล )

กรรมการ

(รศ. ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์ )

กรรมการ

(รศ. ดร. สหलग หอมวุฒิวังศ์ )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป )

(รศ. ดร. กริสัน ชัยมูล )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	ผลกระทบของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลต่อพฤติกรรมทางกลของคานหูก้างรีแอคทีฟเพาเตอร์คอนกรีต		
ผู้วิจัย	ปฐมภพ วงศ์ตาหล้า		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. กริสน์ ชัยมูล		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2566

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของคานหูก้างรีแอคทีฟเพาเตอร์คอนกรีต (Reactive Powder Concrete, RPC) ที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก และเพื่อวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของคานหูก้างโดยใช้แบบจำลองสตรัทและไท (Strut and Tie Model, STM) และการวิเคราะห์พฤติกรรมด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis, FEA) คานหูก้างที่ศึกษามีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (Shear Span-to-Depth Ratio,  $av/d$ ) เท่ากับ 0.6, 1.1 และ 1.6 โดยมีความลึกประสิทธิผล ( $d$ ) คงที่เท่ากับ 20 เซนติเมตร กำลังต้านแรงอัดของ RPC มีค่ามากกว่า 1,600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากการศึกษาพบว่า พฤติกรรมทางกลของคานหูก้างรีแอคทีฟเพาเตอร์คอนกรีตขึ้นกับอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลอย่างมีนัยสำคัญ แต่แตกต่างจากคานหูก้างที่ใช้คอนกรีตทั่วไป

คำสำคัญ : รีแอคทีฟเพาเตอร์คอนกรีต, คานหูก้าง, แบบจำลองสตรัทและไท, ไฟไนต์เอลิเมนต์

พหุณ ปณุ ทิโต ชีเว

**TITLE** Effect of Shear Span-to-Depth Ratio on Mechanical Behavior of Reactive Powder Concrete Corbel

**AUTHOR** Patomphop Wongtala

**ADVISORS** Associate Professor Krit Chaimoon , Ph.D.

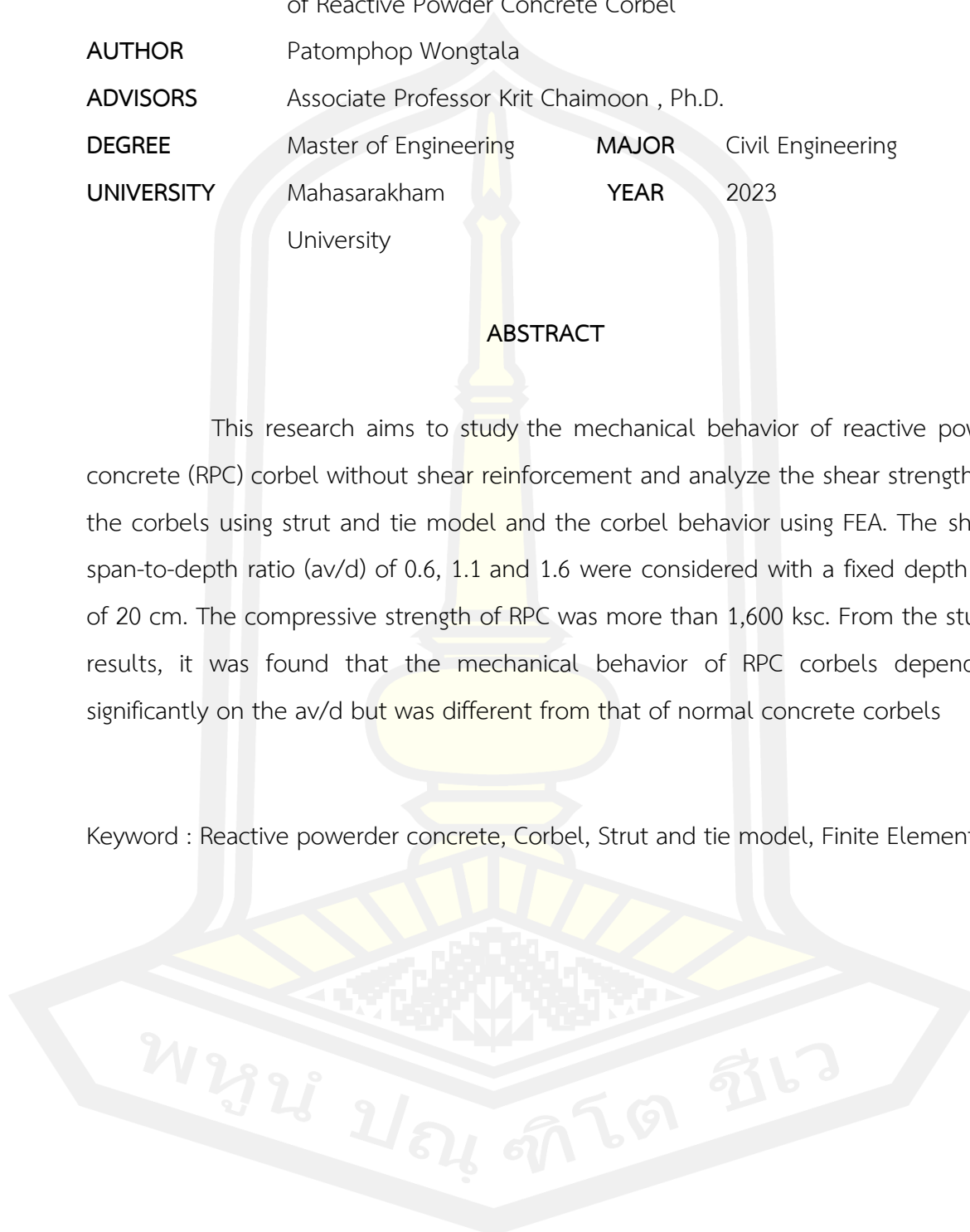
**DEGREE** Master of Engineering      **MAJOR** Civil Engineering

**UNIVERSITY** Mahasarakham      **YEAR** 2023  
University

### ABSTRACT

This research aims to study the mechanical behavior of reactive power concrete (RPC) corbel without shear reinforcement and analyze the shear strength of the corbels using strut and tie model and the corbel behavior using FEA. The shear span-to-depth ratio ( $a_v/d$ ) of 0.6, 1.1 and 1.6 were considered with a fixed depth ( $d$ ) of 20 cm. The compressive strength of RPC was more than 1,600 ksc. From the study results, it was found that the mechanical behavior of RPC corbels depended significantly on the  $a_v/d$  but was different from that of normal concrete corbels

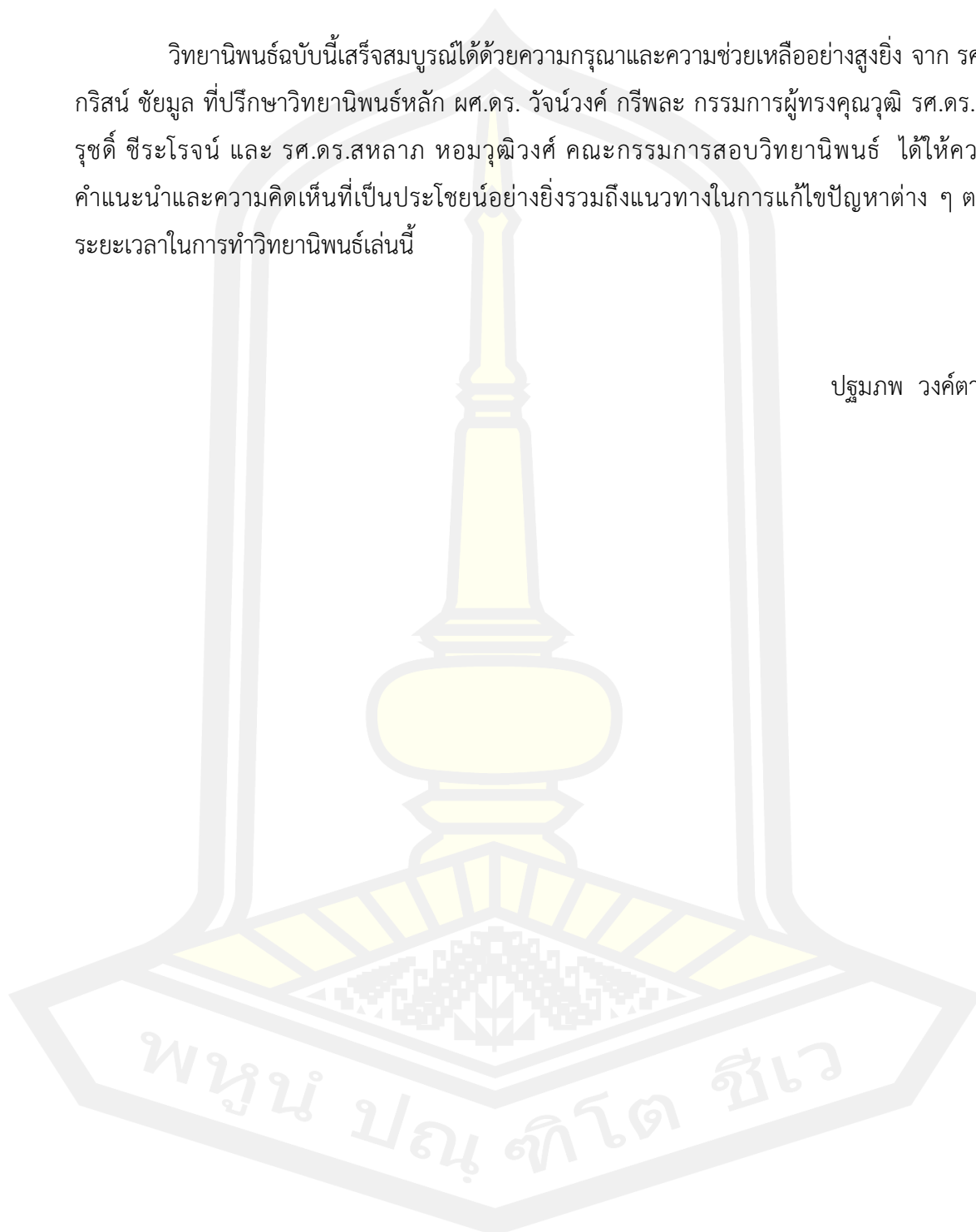
Keyword : Reactive powder concrete, Corbel, Strut and tie model, Finite Element



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่ง จาก รศ.ดร. กริสน์ ชัยมูล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผศ.ดร. วัจนวงศ์ กรีพละ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ รศ.ดร.เรือง รุชดี ชีระโรจน์ และ รศ.ดร.สพลาภ หอมวุฒิมวงค์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้ให้ความรู้ คำแนะนำและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งรวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ปฐมภพ วงศ์ตาหล้า

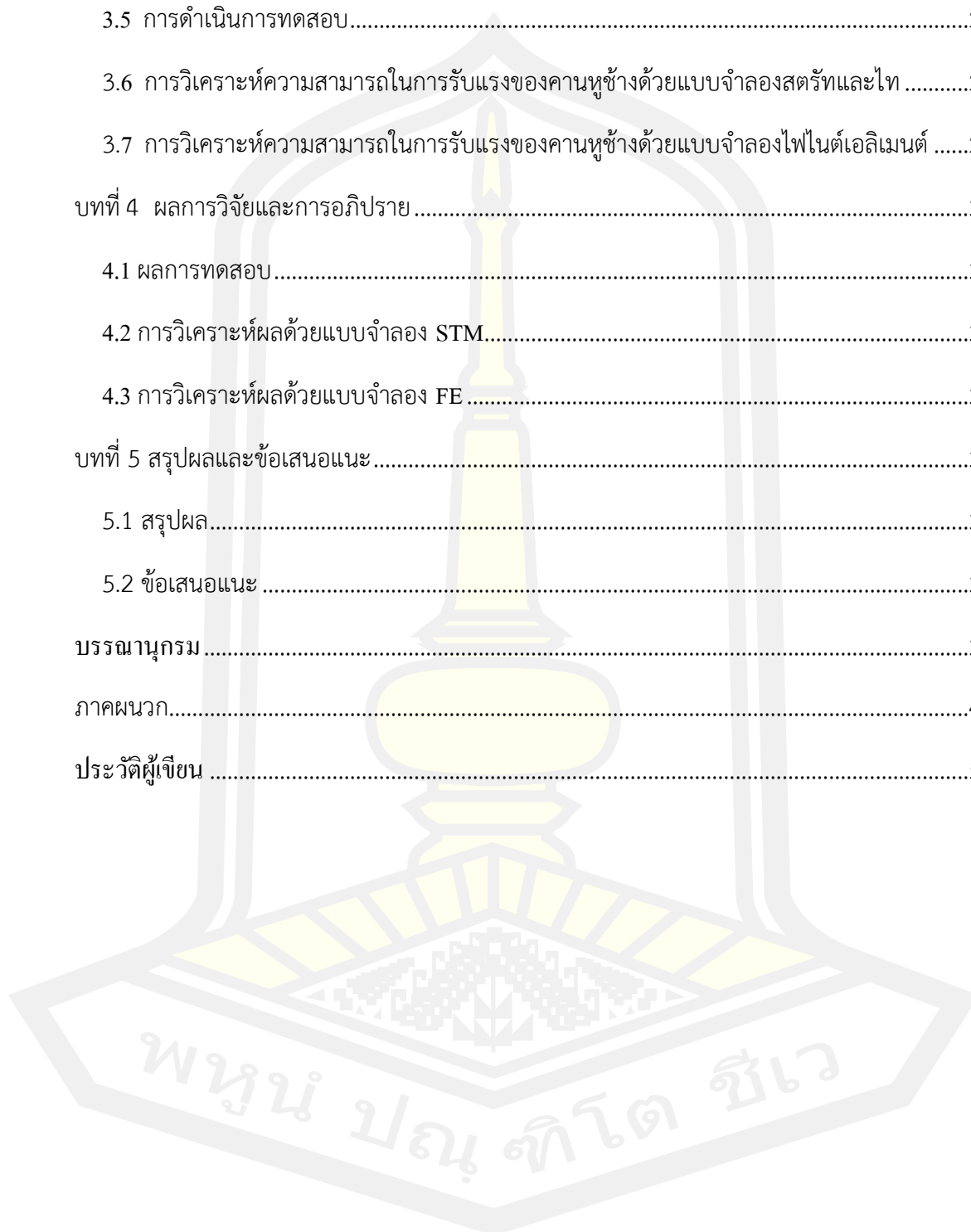


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพประกอบ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ที่ใช้ในการศึกษา .....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 คานหุซัง.....	4
2.2 รีแอคทีฟเพาเตอร์คอนกรีต .....	12
2.3 คานหุซังรีแอคทีฟเพาเตอร์คอนกรีต.....	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3 วิธีและแผนการดำเนินการศึกษา .....	17
3.1 ตัวอย่างคานหุซัง RPC.....	17
3.2 วัสดุที่ใช้ในอัตราส่วนผสม .....	18
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ .....	19



3.4	วิธีการผสมวัสดุและการเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	19
3.5	การดำเนินการทดสอบ.....	23
3.6	การวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของคานหูก้างด้วยแบบจำลองสตรัทและไท่ .....	25
3.7	การวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของคานหูก้างด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	26
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการอภิปราย.....	30
4.1	ผลการทดสอบ.....	30
4.2	การวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลอง STM.....	33
4.3	การวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลอง FE .....	34
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1	สรุปผล.....	38
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	38
บรรณานุกรม	.....	39
ภาคผนวก.....	.....	42
ประวัติผู้เขียน .....	.....	53



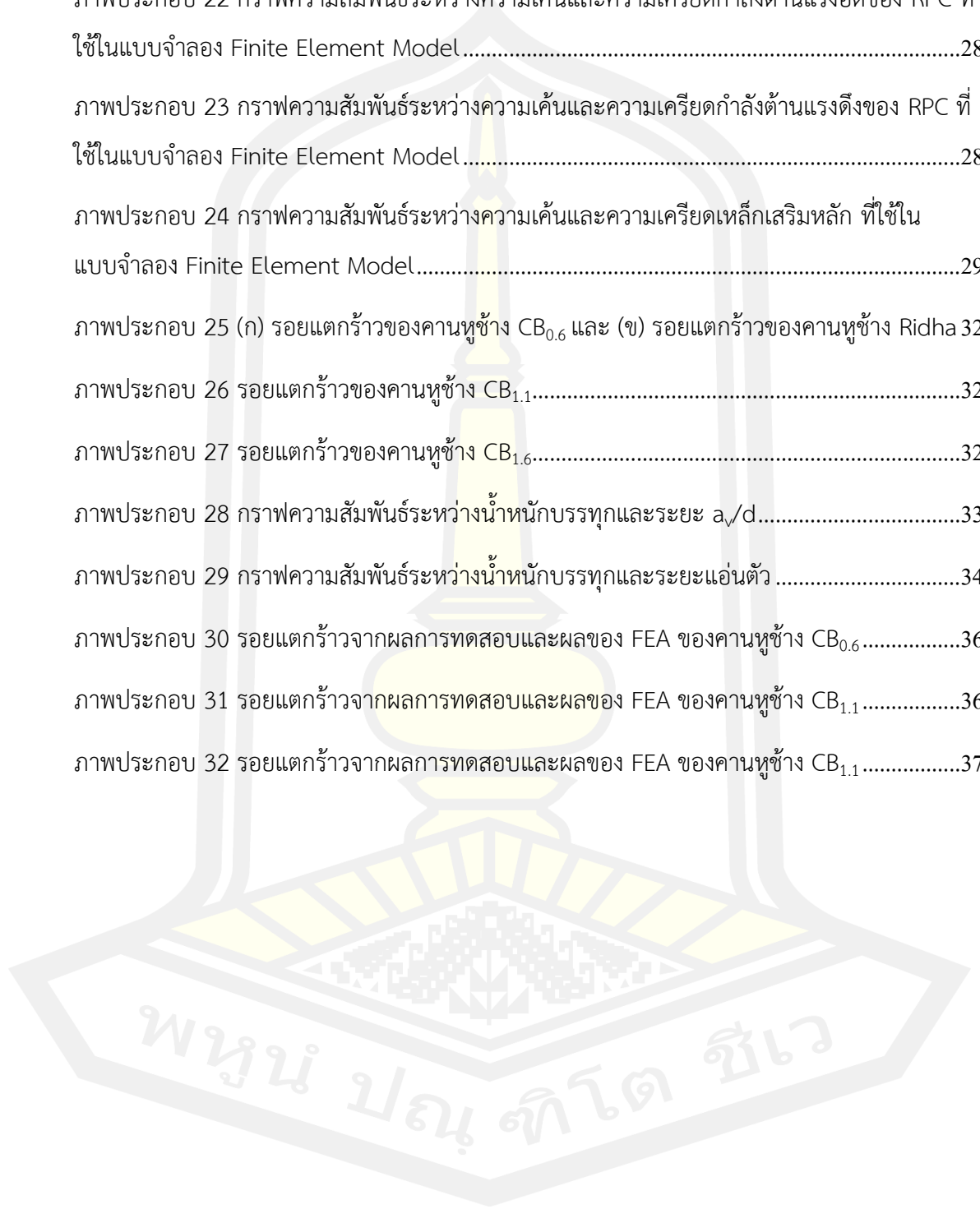
## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 สัดส่วนผสมของ RPC โดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์ [11].....	14
ตาราง 2 รายละเอียดของคานหูก้าง RPC.....	18
ตาราง 3 อัตราส่วนผสมของ RPC ที่ใช้ในการทดสอบ .....	19
ตาราง 4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง Finite Element Model.....	29
ตาราง 5 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของคานหูก้าง RPC.....	30
ตาราง 6 ผลการทดสอบของคานหูก้าง RPC.....	31
ตาราง 7 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างคานหูก้าง.....	33
ตาราง 8 ผลการทดสอบเทียบกับผลจาก FEA.....	35
ตาราง 9 ผลเพิ่มเติมจาก FEA .....	37

## สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ลักษณะของคานหูก้าง [7], [8].....	4
ภาพประกอบ 2 ลักษณะการวิบัติของคานหูก้าง [6].....	5
ภาพประกอบ 3 บริเวณความไม่ต่อเนื่องของคาน [9].....	6
ภาพประกอบ 4 แบบจำลอง STM สำหรับคานลิก [10].....	7
ภาพประกอบ 5 ท่อนแรงอัดรูปทรงต่างๆ [6].....	8
ภาพประกอบ 6 ความกว้างของท่อนแรงอัดในแนวเอียง [10].....	9
ภาพประกอบ 7 ลักษณะแรงภายในพื้นที่จุดต่อ [10].....	11
ภาพประกอบ 8 แรงที่กระทำต่อจุดต่อในแต่ละกรณี [10].....	12
ภาพประกอบ 9 หน้าตัดของคาน RPC อัดแรงเทียบกับคานเหล็กที่มีกำลังรับแรงดัด ....	13
ภาพประกอบ 10 รูปแบบการทดสอบคานหูก้างเชิงคู้ [4].....	15
ภาพประกอบ 11 ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็ก .....	17
ภาพประกอบ 12 เตรียมแบบหล่อคานหูก้าง .....	20
ภาพประกอบ 13 การเสริมเหล็กของคานหูก้าง RPC.....	20
ภาพประกอบ 14 การผสมปูนซีเมนต์กับซิลิกาฟูมและผสมน้ำกับสารลดน้ำยิ่งยวด .....	21
ภาพประกอบ 15 การนำปูนซีเมนต์ที่ผสมกับซิลิกาฟูมเทเข้าเครื่องผสม .....	21
ภาพประกอบ 16 การผสม RPC ในเครื่องผสม.....	22
ภาพประกอบ 17 คานหูก้าง RPC ที่ผสมเสร็จแล้ว .....	22
ภาพประกอบ 18 การบ่มคานหูก้าง RPC .....	23
ภาพประกอบ 19 การติดตั้งคานหูก้าง .....	24
ภาพประกอบ 20 รายละเอียดการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของคานหูก้าง .....	25

ภาพประกอบ 21 แบบจำลอง Finite Element Model ของคานหูก้าง RPC .....	26
ภาพประกอบ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกำลังต้านแรงอัดของ RPC ที่ใช้ในแบบจำลอง Finite Element Model.....	28
ภาพประกอบ 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกำลังต้านแรงดึงของ RPC ที่ใช้ในแบบจำลอง Finite Element Model.....	28
ภาพประกอบ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดหลักเสริมหลัก ที่ใช้ในแบบจำลอง Finite Element Model.....	29
ภาพประกอบ 25 (ก) รอยแตกร้าวของคานหูก้าง $CB_{0.6}$ และ (ข) รอยแตกร้าวของคานหูก้าง Ridha 32	
ภาพประกอบ 26 รอยแตกร้าวของคานหูก้าง $CB_{1.1}$ .....	32
ภาพประกอบ 27 รอยแตกร้าวของคานหูก้าง $CB_{1.6}$ .....	32
ภาพประกอบ 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะ $a/d$ .....	33
ภาพประกอบ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะแอนตัว .....	34
ภาพประกอบ 30 รอยแตกร้าวจากผลการทดสอบและผลของ FEA ของคานหูก้าง $CB_{0.6}$ .....	36
ภาพประกอบ 31 รอยแตกร้าวจากผลการทดสอบและผลของ FEA ของคานหูก้าง $CB_{1.1}$ .....	36
ภาพประกอบ 32 รอยแตกร้าวจากผลการทดสอบและผลของ FEA ของคานหูก้าง $CB_{1.1}$ .....	37



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

คานหูก้าง (Corbels) หรือเชิงยื่น (Brackets) คือคานยื่นออกจากเสา จากผนัง หรือจาก กำแพง โดยทั่วไปนิยมใช้สำหรับรองรับโครงสร้างคานเหล็กรูปพรรณ คานสำเร็จรูป หรือรองรับราง เลื่อนเหล็กของเครนยก [1] ซึ่งก่อให้เกิดแรงกระทำแบบจุดที่มีขนาดสูงมากกระทำต่อคานหูก้าง เมื่อ พิจารณาคานหูก้างแล้วพบว่า มีลักษณะคล้ายคานปลายยื่นช่วงสั้นๆ แต่คานหูก้างถูกจำแนกเป็นคาน กลุ่มบริเวณไม่ต่อเนื่อง (Discontinued Region, D-region) เนื่องจากมีการกระจายความเครียดไม่ เป็นเส้นตรงตั้งแต่ในช่วงอิลาสติก ทำให้ทฤษฎีคานไม่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ [2] คานหูก้าง โดยทั่วไปจะมีการเสริมเหล็กปลอกเพื่อเพิ่มความแข็งแรง แต่ถ้าเสริมมากไปก็จะทำให้เทคอนกรีตยาก

ACI 318-11 [3] นิยามคานหูก้างว่าเป็นคานยื่นที่มีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึก ประสิทธิภาพ (Shear Span-to-Depth Ratio,  $a_v/d$ ) น้อยกว่า 2 และแนะนำหลักการในการออกแบบ คานหูก้างซึ่งจัดเป็นคานกลุ่มบริเวณไม่ต่อเนื่องนั้นไว้ 2 กรณีคือ กรณีที่หนึ่งถ้าอัตราส่วน  $a_v/d$  น้อย กว่า 1 ให้ออกแบบโดยใช้แบบจำลองสตรัทและไท (Strut and Tie Model, STM) หรือโดยใช้ หลักการแรงเฉือน-เสียดทาน (Shear-Friction) และกรณีที่สองถ้าอัตราส่วน  $a_v/d$  มากกว่า 1 ให้ ออกแบบโดยใช้แบบจำลอง STM เท่านั้น [4]

รีแอคทีฟพาวเวอร์คอนกรีต (Reactive Powder Concrete, RPC) เป็นหนึ่งในชนิดของ คอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ และเป็นคอนกรีตที่ไม่ใช้มวลรวมหยาบในส่วนผสมเพื่อกำจัดจุดอ่อนของ คอนกรีตทั่วไปที่การวิบัติจะเกิดจากรอยต่อระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ต้าและอาจมีการผสมเส้นใย เหล็ก (Steel Fiber) เพื่อเพิ่มความเหนียว RPC ที่ผสมเส้นใยเหล็กสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คาน หูก้างและช่วยลดปริมาณเหล็กปลอกทำให้ลดความแออัดของเหล็กเสริมในคานหูก้าง [4], [5] อย่างไรก็ตาม Ridha et al. [4] ศึกษาคานหูก้าง RPC ที่มีอัตราส่วน  $a_v/d$  เท่ากับ 0.4 0.6 และ 0.8 และ ออกแบบโดยใช้แบบจำลอง STM ส่วนปฐมภพ และ ฤทธิรงค์ [5] ศึกษาคานหูก้าง RPC ที่มี อัตราส่วน  $a_v/d$  เท่ากับ 1.0 เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมทางกลของคานหูก้าง RPC ที่ครอบคลุมตามนิยาม ของ ACI 318-11 งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาคานหูก้างที่มีอัตราส่วน  $a_v/d$  มากกว่า 1.0 ด้วยรวมทั้ง ผลกระทบของอัตราส่วน  $a_v/d$  ต่อพฤติกรรมทางกลของคานหูก้าง RPC

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกลับประสิทธิภาพต่อพฤติกรรมทางกลของคานหูกึ่งรีแอนด์ทีฟเพาเวอร์คอนกรีต
2. เพื่อวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนของคานหูกึ่งรีแอนด์ทีฟเพาเวอร์คอนกรีตด้วยแบบจำลองสตรัทและไท (Strut and Tie Model)
3. เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของคานหูกึ่งรีแอนด์ทีฟเพาเวอร์คอนกรีตด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. คานหูกึ่ง RPC ไม่เสริมเหล็กปลอก
2. กำลังต้านแรงอัดของ RPC ไม่น้อยกว่า 1400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
3. อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกลับประสิทธิภาพ ( $a_v/d$ ) เท่ากับ 0.6 1.1 และ 1.6
4. เหล็กเสริมใช้เหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD 30 ตามมาตรฐาน มอก. 24-2548
5. ใช้คานหูกึ่งเชิงคู่ในการทดสอบ
6. เหล็กเสริมหลักใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 16 มิลลิเมตร จำนวน 3 เส้น
7. ขนาดของคานหูกึ่ง
  - 1) ขนาดหน้าตัดคานและเสาเท่ากับ 15 เซนติเมตร
  - 2) ความลึกลับของปลายคานเท่ากับ 12.5 เซนติเมตร
  - 3) ความลึกลับทั้งหมดของคานของที่ขอบเสาเท่ากับ 25 เซนติเมตร
  - 4) ความลึกลับประสิทธิภาพ ( $d$ ) เท่ากับ 20 เซนติเมตร
  - 5) ระยะจากขอบเสาถึงปลายคานเท่ากับ 15 25 และ 35 เซนติเมตร
8. พฤติกรรมทางกลของคานหูกึ่งที่จะศึกษา
  - 1) ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ
  - 2) การแตกร้าวแรกเริ่ม
  - 3) ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกต่อระยะการแอ่นตัว

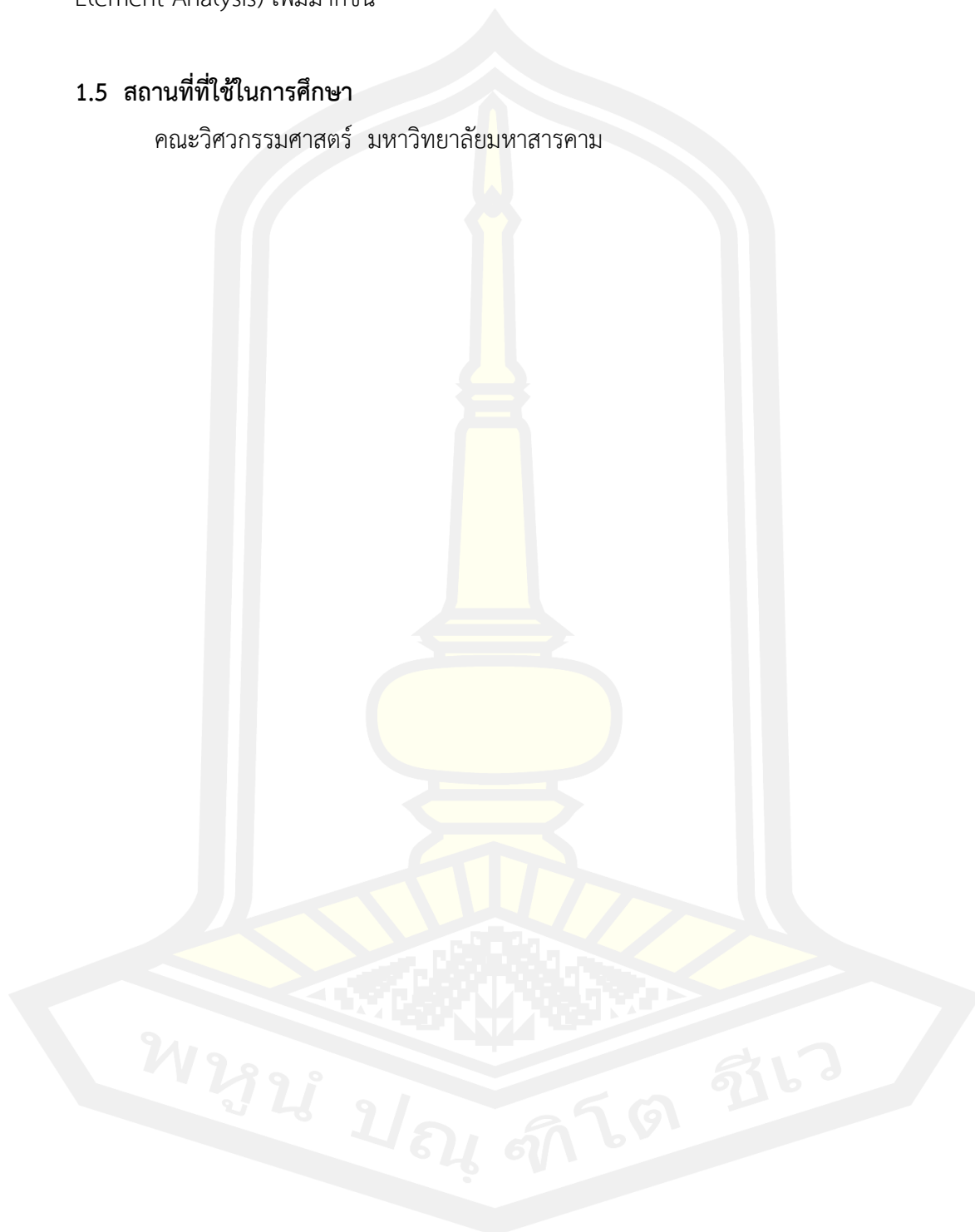
## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ทราบถึงผลกระทบของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกลับประสิทธิภาพต่อพฤติกรรมทางกลของคานหูกึ่งรีแอนด์ทีฟเพาเวอร์คอนกรีต

2. ทราบถึงพฤติกรรมของคานหูล้ำรีแอนด์ทีฟเพอร์เคอร์คอนกรีตด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เพิ่มมากขึ้น

### 1.5 สถานที่ที่ใช้ในการศึกษา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



## บทที่ 2

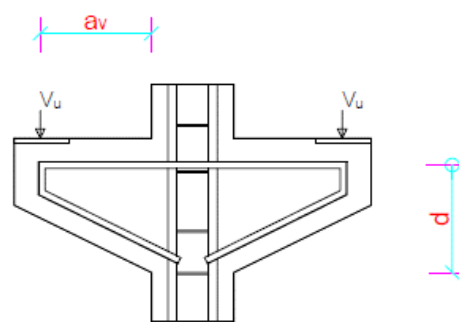
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คานหูก้าง

คานหูก้าง (Corbels) หรือเชิงยื่น (Brackets) คือคานยื่นออกจากเสา จากผนัง หรือจาก กำแพง โดยทั่วไปจะใช้เพื่อเป็นฐานรองรับคานหรือชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูปขนาดใหญ่ ซึ่งก่อให้เกิด แรงกระทำแบบจุดที่มีขนาดสูงมากกระทำต่อคานหูก้าง ในแง่ของรูปทรงคานหูก้างสามารถจำแนกได้ เป็น 2 ประเภท คือ คานหูก้างเชิงเดี่ยว ดังภาพประกอบ 1(ก) และคานหูก้างเชิงคู่ ดังภาพประกอบ 1(ข) ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งาน เมื่อพิจารณาคานหูก้างแล้วพบว่า มีลักษณะคล้ายคานปลายยื่น ช่วงสั้นๆ ซึ่งจะมีโมเมนต์และแรงเฉือนเกิดขึ้นที่ปลายด้านที่ยึดติดกับเสาหรือกำแพง แต่โดยทั่วไปแล้ว โมเมนต์ดัด ที่เกิดขึ้นจะมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับแรงเฉือน [6]



(ก) คานหูก้างเชิงเดี่ยว



(ข) คานหูก้างเชิงคู่

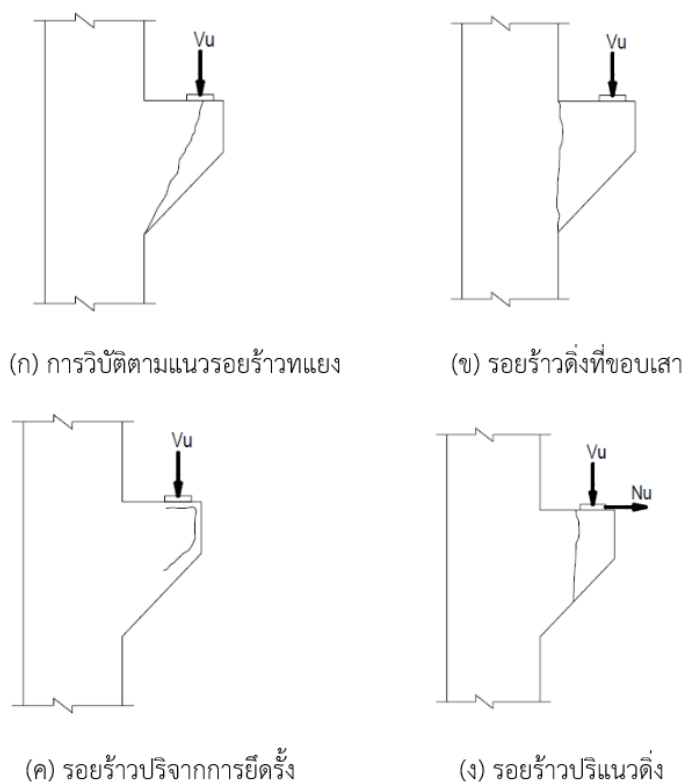
ภาพประกอบ 1 ลักษณะของคานหูก้าง [7], [8]

##### 2.1.1 พฤติกรรมทางกลของคานหูก้าง

พฤติกรรมของคานหูก้างจะแปรผันตามอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (Shear Span-to-Depth ratio,  $a_v/d$ ) กล่าวคือคือถ้าระยะ  $a_v/d$  มากขึ้นโมเมนต์ดัดก็จะมากขึ้น เพราะคานหูก้างมีลักษณะคล้าย ๆ คานยื่นดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยทั่วไปพฤติกรรมของคานหูก้างจะสังเกตได้จากลักษณะการวิบัติเนื่องจากรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น ในกรณีของรอยร้าวทแยง (ภาพประกอบ 2(ก)) รอยร้าวจะเริ่มจากตำแหน่งที่น้ำหนักแบบจุดมากระทำแล้วมีทิศทางลาดเอียงไป



ที่มุมของรอยต่อระหว่างคานหูกึ่งกับหน้าเสา ส่วนรอยแตกร้าวแนวตั้งมักเกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่างคานหูกึ่งและผิวของเสา (ภาพประกอบ 2(ข)) นอกจากนี้ยังอาจเกิดรอยแตกร้าวอื่น ๆ (ภาพประกอบ 2(ค)) และ (ภาพประกอบ 2(ง)) และนอกจากการวิบัติเนื่องจากรอยแตกร้าวแล้ว ยังอาจเกิดการวิบัติจากแรงแบกทาน (Bearing Failure) ของคอนกรีตที่อยู่ใต้แผ่นรอง (Bearing Plate) โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากพื้นที่รับแรงแบกทานไม่เพียงพอ ก็มีโอกาสสูงที่อาจจะเกิดการวิบัติแบบแรงแบกทานได้เช่นกัน [6]



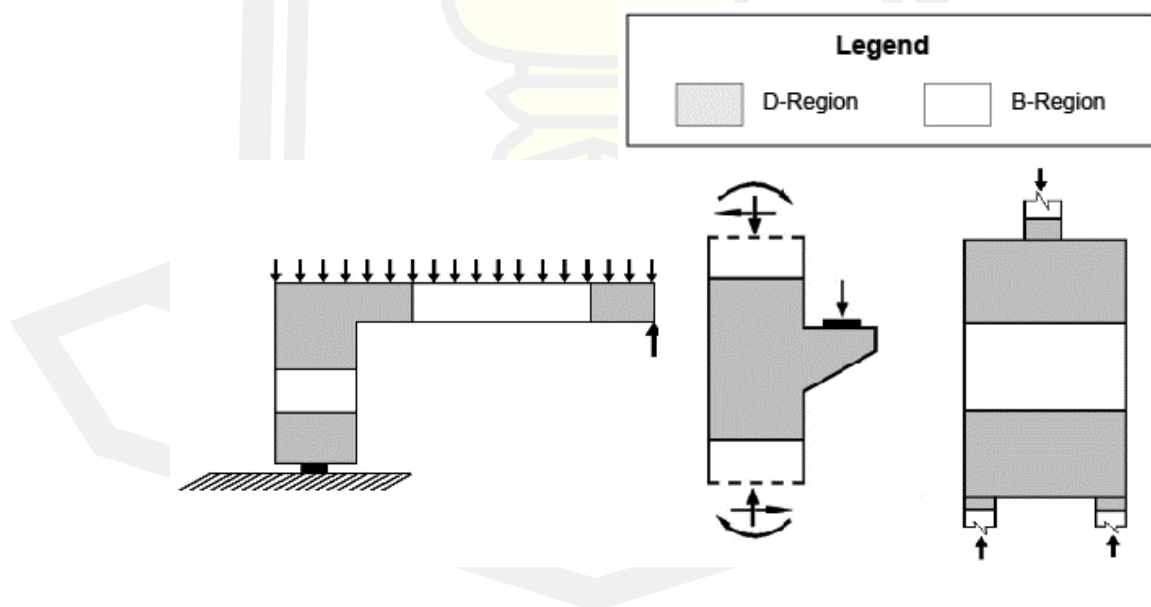
ภาพประกอบ 2 ลักษณะการวิบัติของคานหูกึ่ง [6]

### 2.1.2 การออกแบบคานหูกึ่ง

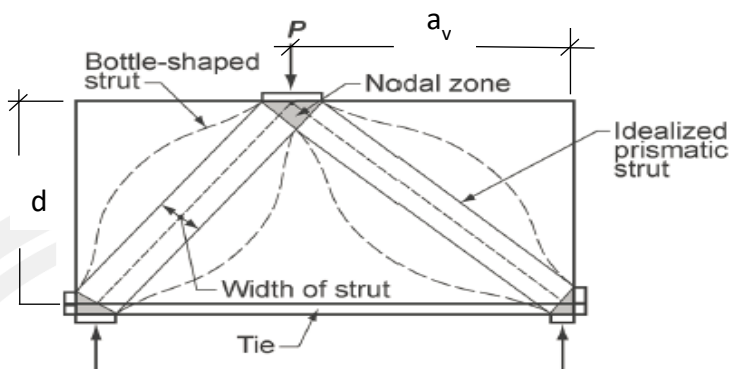
โครงสร้างโดยทั่วไปของคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กลุ่มบริเวณที่มีความต่อเนื่อง (Beam Region, B-Regions) และ กลุ่มบริเวณที่ไม่มีความต่อเนื่อง (Discontinued Region, D-Regions) โดยกลุ่มคาน B-Regions เป็นกลุ่มที่มีการกระจายความเครียด

เป็นเส้นตรงจึงสามารถประยุกต์ใช้กับทฤษฎีคาน (Beam Theory) ได้ แต่คานกลุ่ม D-Regions เป็นกลุ่มที่มีการกระจายความเค้นไม่มีความต่อเนื่อง อาจเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับแรงกระทำแบบจุด บริเวณที่มีการเปลี่ยนแรงที่เข้มข้นอย่างเฉียบพลันบริเวณจุดรองรับ หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปร่างทางเรขาคณิต (ดังภาพประกอบ 3) ในบริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่องการกระจายความเค้นจะไม่เป็นเส้นตรง ทำให้ทฤษฎีคานไม่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้

คานหูก้างถูกจำแนกเป็นคานกลุ่ม D-region ซึ่งเป็นการกระจายความเค้นไม่เป็นเส้นตรง ในช่วงอิลาสติก [2] ACI 318-11 นิยามคานหูก้างว่าเป็นคานยื่นที่มีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (Shear Span-to-Depth Ratio,  $a_v/d$ ) น้อยกว่า 2 และแนะนำหลักการในการออกแบบคานหูก้างซึ่งจัดเป็นคานกลุ่มบริเวณไม่ต่อเนื่องนั้นไว้ 2 กรณีคือ กรณีที่หนึ่งถ้าอัตราส่วน  $a_v/d$  น้อยกว่า 1 ให้ออกแบบโดยใช้แบบจำลองสตรัทและไท (Strut and Tie Model, STM) หรือโดยใช้หลักการแรงเฉือน-เสียดทาน (Shear-Friction) และกรณีที่สองถ้าอัตราส่วน  $a_v/d$  มากกว่า 1 แต่ไม่เกิน 2 ให้ออกแบบโดยใช้แบบจำลอง STM [8] โดยแบบจำลองเป็นสมมุติฐานโครงข้อหมุน (Trusses) ประกอบด้วยท่อน Struts และท่อนแรงดึง (Tie) เชื่อมต่อกันที่จุดต่อเรียกว่าโหนด (Nodes) แบบจำลองของคานค้ำเมื่อมีแรง  $P$  มากจะทำให้เกิดแนวท่อน Tie และท่อน Struts ลักษณะของท่อน Struts จะเกิดการขยายตัวเนื่องจากการบีบอัดทำให้เกิดแรงดึงภายในลักษณะคล้ายขวด (Bottle Shaped) และทั้งสามจุดเชื่อมต่อกันที่ Nodes จะถูกล้อมรอบด้วยบริเวณจุดต่อ (Nodal Zone) ดังแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 3 บริเวณความไม่ต่อเนื่องของคาน [9]



ภาพประกอบ 4 แบบจำลอง STM สำหรับคานลึกลับ [10]

#### 2.1.2.1 ข้อกำหนดในการสร้างแบบจำลอง STM

ในการพัฒนาแบบจำลอง STM จะต้องมีข้อกำหนดในการสร้างหลัก ๆ ดังนี้

- 1) แบบจำลองต้องมีความสมดุลในแรงกระทำทั้งภายในและภายนอก
- 2) กำลังของท่อนแรงอัด ท่อนแรงดึง และบริเวณจุดต่อต้องเท่ากับหรือเกินกว่าแรงที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง
- 3) เพื่อป้องกัน ความเค้นในท่อนแรงอัดมากกว่าไป (Overstress) ต้องไม่วางท่อนแรงอัดให้ซ้อนทับกัน
- 4) มุมระหว่างท่อนแรงอัดและแรงดึงที่พบกันที่จุดต่อต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 25 องศา
- 5) ท่อแรงดึงอนุญาตให้สามารถตัดกับท่อนแรงอัดและท่อนแรงดึงอื่น ๆ ได้
- 6) กำลังของท่อนแรงอัด ท่อนแรงดึงและจุดต่อ ต้องผ่านเงื่อนไข ดังนี้

$$F_u \leq \phi F_n \quad (2.1)$$

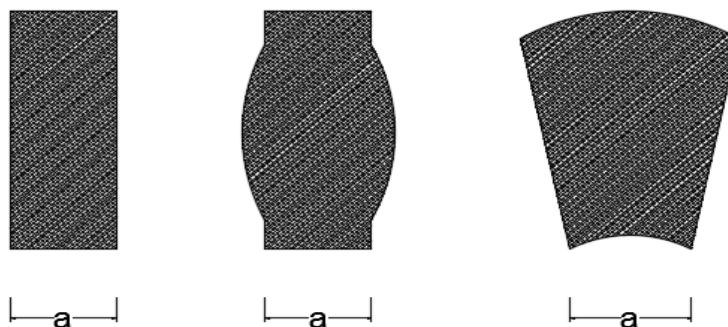
เมื่อ  $F_n$  คือ กำลังระบุของท่อนแรงอัด หรือท่อนแรงดึง หรือจุดต่อ

$\phi$  คือ ตัวคูณลดกำลัง = 0.75

$F_u$  คือ แรงประลัยในท่อนแรงอัด หรือท่อนแรงดึง หรือจุดต่อ

#### 2.1.2.2 การออกแบบท่อนแรงอัด (Strut)

ท่อนแรงอัดสามารถจำแนกได้เป็น 3 แบบ คือ รูปทรงเหลี่ยม (Prism) รูปทรงขวด (Bottle) และรูปทรงพัด (Fan) ดังภาพประกอบ 5



(ก) รูปทรงเหลี่ยม

(ข) รูปทรงขวด

(ค) รูปทรงพัด

ภาพประกอบ 5 ท่อนแรงอัดรูปทรงต่างๆ [6]

ในมาตรฐานการออกแบบ ACI 318-14 [10] ได้กำหนดให้กำลังออกแบบจะต้องมีความเพียงพอ ดังต่อไปนี้

$$\phi F_{ns} \geq F_{us} \quad (2.2)$$

กำลังอัดของท่อนแรงอัด ACI 318-14 ได้กำหนดกำลังอัดระบุ (Nominal Compressive Strength,  $F_{ns}$ ) ของท่อนแรงอัดดังต่อไปนี้

สำหรับท่อนแรงอัดที่ไม่มีเหล็กเสริมตามยาว

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs} \quad (2.3)$$

สำหรับท่อนแรงอัดที่มีเหล็กเสริมตามยาว

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs} + A_s' f_s' \quad (2.4)$$

เมื่อ  $A_{sc}$  คือ หน้าตัดตามขวางที่ปลายของท่อนแรงอัด  $A_{cs} = w_s b$

$w_s$  คือ ความกว้างของท่อนแรงอัด

$f_{ce}$  คือ กำลังอัดประสิทธิผล  $f_{ce} = 0.85 \beta_s f_c'$

$\beta_s$  คือ สัมประสิทธิ์ท่อนแรงอัดสำหรับท่อนแรงอัด

- ท่อนแรงอัดที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอเท่ากับ 1
- ท่อนแรงอัดทรงขวดและเสริมเหล็กด้านแรงดึงเพียงพอตามสมการ (2.6) เท่ากับ 0.75

- และท่อนแรงอัดในองค์อาคารรับแรงดึงหรือในบริเวณรับแรงดึงเท่ากับ 0.4

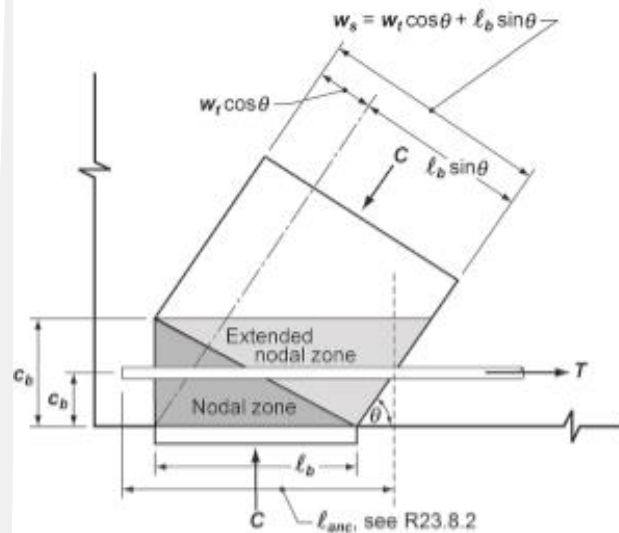
$f_c'$  คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

การคำนวณความกว้างของท่อนแรงอัด ( $w_s$ ) ที่ตั้งฉากกับท่อนแรงอัดดังแสดงในภาพประกอบ 6 สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$w_s = l_b \sin \theta + w_t \cos \theta \quad (2.5)$$

เมื่อ  $l_b$  คือ ความกว้างของแผ่นเหล็กที่กระจายน้ำหนัก

$w_t$  คือ ระยะหุ้มคอนกรีต



ภาพประกอบ 6 ความกว้างของท่อนแรงอัดในแนวเอียง [10]

เหล็กเสริมตามขวางของท่อนแรงอัดตรงขวด สำหรับท่อนแรงอัดที่ออกแบบสมมุติเป็นท่อนแรงอัดตรงขวดโดยใช้ค่า  $\beta_s = 0.75$  การเสริมเหล็กตามขวางเพื่อต้านแรงดึงที่เป็นผลมาจากการกระจายแรงอัดในท่อนแรงอัด เหล็กเสริมต้องมีความเพียงพอ โดย  $f_c'$  น้อยกว่าหรือเท่ากับ 422 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ksc) ให้ใช้ สมการ 2.6 (สำหรับ RPC กำลังเกินกว่าที่กำหนดและเส้นใยเหล็กกระจายทั่วทั้งท่อนแรงอัด)

$$\sum \frac{A_{si}}{b_s s_i} \sin \alpha_i \geq 0.003 \quad (2.6)$$

เมื่อ  $A_{si}$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่เหล็กเสริมที่พิจารณา

$B_s$  คือ ความหนาขององค์อาคารที่พิจารณา

$s_i$  คือ ระยะเรียงเหล็กเสริมที่พิจารณา

$\alpha_i$  คือ มุมระหว่างท่อนแรงอัดและเหล็กเสริมที่พิจารณา

### 2.1.2.3 การออกแบบท่อนแรงดึง (Tie)

ท่อนแรงดึงเป็นตัวแทนของวัสดุรับแรงดึง (ทั้งที่เป็นเหล็กเสริมธรรมดาและลวดอัดแรง) พื้นที่หน้าตัดของท่อนแรงดึงจะเป็นพื้นที่ของคอนกรีตรอบ ๆ เหล็กเสริม ในการออกแบบคอนกรีตที่อยู่ในท่อนแรงดึงจะสมมุติไม่ได้รับแรงดึง อย่างไรก็ตามใต้น้ำหนักใช้งาน (Service Load) กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตในส่วนนี้จะช่วยลดการเสีรูปร่างของท่อนแรงดึงลงได้

ในมาตรฐานการออกแบบ ACI 318 - 14 ได้กำหนดให้กำลังออกแบบจะต้องมีความเพียงพอ ดังต่อไปนี้

$$\phi F_{nt} \geq F_{ut} \quad (2.7)$$

กำลังระบุ (Nominal Tensile Strength,  $F_{nt}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการกำลังดึงได้ จากเหล็กเสริมและลวดอัดแรง

$$F_{nt} = A_{st}f_y + A_{ps}(f_{se} + \Delta f_p) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $A_{st}$  คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม

$A_{ps}$  คือ พื้นที่หน้าตัดลวดอัดแรง

$F_y$  คือ กำลังครากของเหล็กเสริม

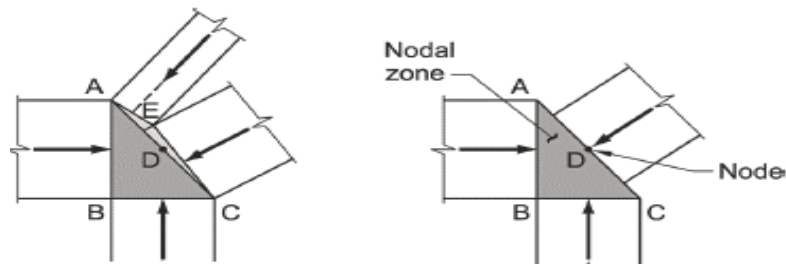
$f_{pe}$  คือ หน่วยแรงประสิทธิผลของลวดอัดแรง

$\Delta f_p$  ACI 318 - 14 อนุญาตให้ใช้เท่ากับ 4218 ksc สำหรับลวดอัดแรงที่มีแรงยึดเหนี่ยวและ 703 ksc สำหรับลวดอัดแรงที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว หากไม่มีลวดอัดแรงสมการ (2.14) สามารถเขียนใหม่เป็นสมการ (2.8)

$$F_{nt} = A_{st}f_y \quad (2.9)$$

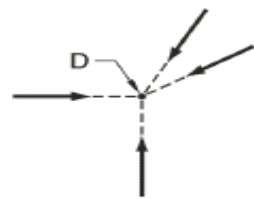
#### 2.1.2.4 การออกแบบพื้นที่จุดต่อ (Nodal Zone)

พื้นที่จุดต่อเป็นพื้นที่ที่เกิดจากการตัดกันของท่อนแรงอัดและท่อนแรงดึงมีความสำคัญเนื่องจากเป็นจุดรวมของแรงและที่ทำหน้าที่ถ่ายแรงระหว่าง ท่อนแรงอัดและท่อนแรงดึง เพื่อให้เกิดความสมดุลจะต้องมีแรงผ่านจุดนี้อย่างน้อย 3 แรง ดังภาพประกอบ 7

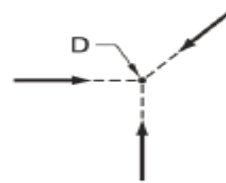


(ก) ท่อนแรงอัด 4 แรง

(ข) ท่อนแรงอัด 3 แรง



(ค) แรง 4 แรงที่กระทำต่อพื้นที่จุดต่อ



(ง) แรง 3 แรงที่กระทำต่อพื้นที่จุดต่อ

ภาพประกอบ 7 ลักษณะแรงภายในพื้นที่จุดต่อ [10]

พื้นที่บริเวณรอบ ๆ จุดต่อเรียกว่าบริเวณจุดต่อจะใช้ค่านวณกำลังระบุของบริเวณจุดต่อ (Nominal Compressive Strength,  $F_{nn}$ ) สามารถคำนวณในสมการ (2.16)

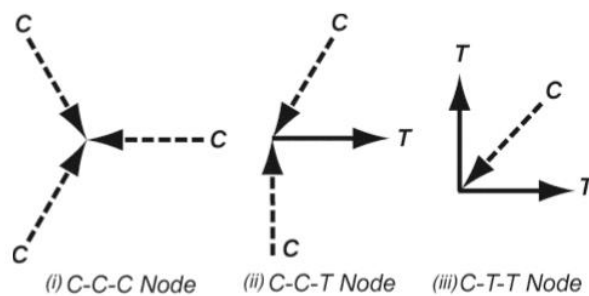
$$F_{nn} = f_{ce} A_{nz} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $f_{ce}$  คือ กำลังอัดประสิทธิผลที่ผิวหน้าบริเวณจุดต่อและคำนวณจากสมการ (2.11)

$$f_{ce} = 0.85 \beta_n f_c' \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\beta_n$  คือ สัมประสิทธิ์บริเวณจุดต่อสำหรับบริเวณที่เกิดแรงอัดทุกทิศทาง  $\beta_n = 1$  สำหรับ บริเวณจุดต่อที่มีแรงดึงเกิดขึ้นเพียงหนึ่งทิศทาง  $\beta_n = 0.8$ , สำหรับบริเวณจุดต่อที่เกิดแรงดึงมากกว่าหนึ่งทิศทาง  $\beta_n = 0.6$

$A_{nz}$  คือ พื้นที่ผิวหน้าของบริเวณจุดต่อที่พิจารณาในทิศทางตั้งฉากกับท่อนแรงอัดหรือท่อนแรงดึง ในกรณีที่มีแรงลัพท์มากกว่า 2 ทิศทางจะใช้พื้นที่ผิวหน้าของบริเวณจุดต่อที่ตั้งฉากกับแรงลัพท์ ประเภทของจุดต่อขึ้นอยู่กับแรงลักษณะของแรงที่มากระทำต่อจุดต่อ ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แรงที่กระทำต่อจุดต่อในแต่ละกรณี [10]

#### 2.1.2.5 ข้อกำหนดและปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำ

เหล็กเสริมตามขวางขั้นต่ำของคานหูกวางคอนกรีตเสริมเหล็กกระจายในช่วง  $(2/3)d$

$$A_v = 0.5(A_{st} - (N_u/\phi F_y)) \quad (2.12)$$

ตามมาตรฐาน ACI 318-14 ได้ระบุไว้สำหรับการออกแบบด้วยวิธีแบบจำลอง STM ให้ใช้ตัวคูณลดกำลัง  $\phi = 0.75$

## 2.2 รีแอคทีฟเพาเวอร์คอนกรีต

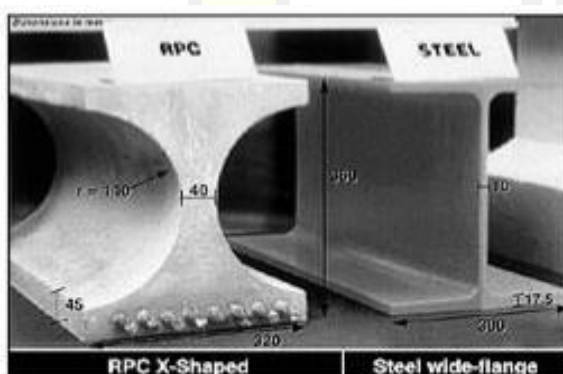
รีแอคทีฟเพาเวอร์คอนกรีต (Reactive Powder Concrete, RPC) เป็นหนึ่งในชนิดของคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษ ได้พัฒนามาจากการที่นักวิจัยพบว่าการวิบัติของคอนกรีตทั่วไปเกิดจากช่วงรอยต่อระหว่างมวลรวมหยาบกับมอร์ต้า จึงได้ไม่ใช้มวลรวมหยาบในการผสมแต่คอนกรีตมีคุณสมบัติทางกลคือมีความเปราะ นักวิจัยจึงได้มีการผสมเส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) เพื่อเพิ่มความเหนียวในคอนกรีต โดย RPC เป็นวัสดุที่มีซีเมนต์เป็นตัวประสานมวลรวมต่าง ๆ



โดยใช้องค์ความรู้ทางด้านโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตร่วมกับความรู้ทางด้านเคมีของปูนซีเมนต์และคอนกรีตโดยหลักการของ RPC คือ

- 1) ทำให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุดโดยไม่ใช้มวลรวมหยาบ
- 2) ปรับปรุงความหนาแน่นโดยการจัดสัดส่วนผสมให้แน่นที่สุดโดยใช้วิธีการออกแบบคอนกรีตแบบใหม่
- 3) ปรับปรุงโครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อเพิ่มความคงทนในระยะยาว โดยการให้ความร้อนหลังการก่อตัวซึ่งช่วยทำให้การหดตัวน้อยลง
- 4) ปรับปรุงความเหนียวให้ดีขึ้นโดยการผสมเส้นใยเหล็กขนาดเล็ก

Dauriac (1997) ได้เปรียบเทียบคานคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ RPC ที่สามารถรับแรงดัดเทียบเท่าเหล็กที่มีความลึกเท่ากัน ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 หน้าตัดของคาน RPC อัดแรงเทียบกับคานเหล็กที่มีกำลังรับแรงดัดเท่า ๆ กัน [12]

### 2.3 คานหุ้มรีแอนด์ทีฟเพาเตอร์คอนกรีต

คานหุ้มรีแอนด์ทีฟได้พัฒนามาจากการนักรวิจัยพบว่าการเสริมเหล็กปลอกในคานหุ้มรีแอนด์ทีฟคอนกรีตสามารถเพิ่มความแข็งแรง แต่ก็ยังลดคุณสมบัติและความแข็งแรงของคอนกรีตเนื่องจากความแออัดของเหล็กเสริม นักวิจัยจึงหาทางแก้ไขโดยใช้เส้นใยเหล็กเพื่อมาปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตและลดปริมาณในการเสริมเหล็กของคานหุ้มรีแอนด์ทีฟ โดย RPC ก็เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงโครงสร้างของคานหุ้มรีแอนด์ทีฟคอนกรีต เนื่องจากการที่ RPC มีการผสมเส้นใยเหล็กและปรับปรุงความหนาแน่น ทำให้ RPC มีความเหนียวและกำลังรับแรงอัดสูง จึงสามารถทดแทนการเสริมเหล็กปลอกได้

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Richard และ M. Cheyrezy [11] ผู้คิดค้นวิจัยเกี่ยวกับ RPC เป็นคณะแรกคือคณะวิจัยของ HDR Engineer Inc โดยเริ่มทำการศึกษาดังแต่ช่วงต้น ค.ศ. 1990 และปี ค.ศ. 1995 ได้รายงานผลการพัฒนา RPC ดั้งมีอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์โดยส่วนผสมใช้ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 สัดส่วนผสมของ RPC โดยน้ำหนักเทียบกับปูนซีเมนต์ [11]

ส่วนประกอบ	RPC 200				RPC 800	
	ไม่ใส่เส้นใย		ใส่เส้นใย		ไม่ใช้ผงเหล็ก	ผงเหล็ก
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	1	1	1	1	1	1
ซิลิกาฟุ่ม	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
ทรายขนาด 150 - 600 ไมโครเมตร	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	-
ทรายควอตซ์ $d_{50} = 10$ ไมโครเมตร	-	0.39	-	0.39	0.39	0.39
สารลดน้ำยิ่งยวด	0.016	0.016	0.019	0.019	0.019	0.019
เส้นใยเหล็ก ยาว=12 มม.	-	-	0.175	0.175	-	-
เส้นใยเหล็ก ยาว=3 มม.	-	-	-	-	0.63	0.63
ผงเหล็ก = 800 ไมโครเมตร	-	-	-	-	-	1.49
น้ำ	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
ความดันอัดแน่น	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
อุณหภูมิ	20°C	90°C	20°C	90°C	250-400 °C	250-400 °C

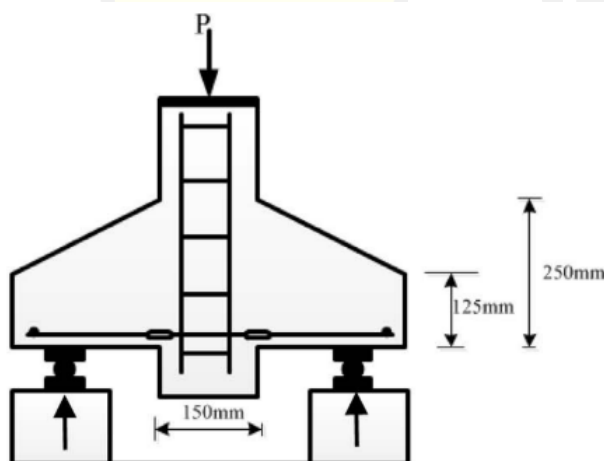
จากตาราง 2.1 พบว่า RPC 200 มีกำลังต้านแรงอัดอยู่ระหว่าง 1700-2300 กก.ต่อตร.ซม กำลังต้านแรงดัดอยู่ที่ 300-600 กก.ต่อตร.ซม ในขณะที่ RPC 800 ที่ไม่ใช้ผงเหล็กเป็นส่วนผสมมีกำลังต้านแรงอัดอยู่ระหว่าง 4900-8100 กก.ต่อตร.ซม ส่วน RPC 800 ที่ใช้ผงเหล็กเป็นส่วนผสมมีกำลังต้านแรงอัดอยู่ระหว่าง 6500-8100 กก.ต่อตร.ซม

สุนันทา และ รินทร์ณภัทร [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผสม RPC โดยใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซิลิกาฟุ่มชนิดไม่ควบแน่น สารลดน้ำยิ่งยวดประเภทโพลีคาร์บอกซิเลต (Polycarboxylate) ทรายแม่น้ำคัดขนาด และเส้นใยเหล็กยาว 6 มิลลิเมตร โดยมีอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร คือ ใช้อัตราส่วนซิลิกาฟุ่มต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 อัตราส่วนสารลดน้ำยิ่งยวดต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.0 2.25 และ 2.50 ใช้อัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 18 20 และ 22 พบว่าอัตราส่วนผสมสารลดน้ำยิ่งยวดต่อปูนซีเมนต์และเส้นใยเหล็กต่อปูนซีเมนต์ที่ดีที่สุด

คือร้อยละ 2.0 และ ร้อยละ 20 ตามลำดับ โดยกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน เท่ากับ 1,611 1,457 และ 2,019 กก.ต่อตร.ซม ตามลำดับ

W. Kasem [1] ได้เสนอวิธีการใช้แบบจำลองสตรัทและไทในการออกแบบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของคานหูกึ่งคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) โดยประเมินจากการวิบัติอันเนื่องมาจากการครากของเหล็กเสริมในแนวยาว รวมถึงการบดอัดหรือแตกหักแบบทแยง จากผลการทดสอบ 455 ตัวอย่าง ที่วิเคราะห์โดยแบบจำลองสตรัทและไท ได้คาดการณ์ความสามารถในการรับน้ำหนักและพฤติกรรมของคานหูกึ่งได้อย่างแม่นยำมากกว่าวิธีแรงเฉือนเสียดทาน (Shear-Friction)

Ridha et al. [4] ได้ศึกษาคานหูกึ่งที่ทำจากคอนกรีตสมรรถนะสูงพิเศษที่ผสมเส้นใยเหล็ก (Ultra-High Performance Steel Fibers Concrete, UHPSFC) โดยไม่ผสมมวลรวมหยาบเป็นชนิดเดียวกันกับ RPC และคานหูกึ่งไม่เสริมเหล็กปลอก กำลังอัดเท่ากับ 1,500 กก.ต่อตร.ซม ที่มีอัตราส่วน  $a_v/d = 0.4$  0.6 และ 0.8 จากผลการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วน  $a_v/d = 0.4$  และ 0.6 เกิดการวิบัติจากแรงเฉือน ส่วนอัตราส่วน  $a_v/d = 0.8$  เกิดการวิบัติบริเวณท่อนแรงอัด ในขณะที่ความสามารถในการรับน้ำหนักจากการที่ไม่เสริมเหล็กปลอกมาจาก UHPSFC ผลการทดลองได้รับการเปรียบเทียบกับวิธีการคาดการณ์ที่หลากหลาย และแบบ STM สามารถให้การคาดการณ์กำลังได้อย่างถูกต้องเมื่อเทียบกับ ACI 318-14 ดังภาพประกอบ 10 แสดงการทดสอบคานหูกึ่งเชิงคู้



ภาพประกอบ 10 รูปแบบการทดสอบคานหูกึ่งเชิงคู้ [4]

ปฐมภพ และ ฤทธิรงค์ [5] ได้เปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักของคานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพาเตอร์คอนกรีตและคานหูกึ่งคอนกรีต โดยคานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพาเตอร์คอนกรีตไม่เสริมเหล็กปลอก ออกแบบให้รับน้ำหนักเท่ากัน อัตราส่วน  $a_v/d = 1$  และใช้แบบจำลอง STM ในการ

ออกแบบ พบว่าพฤติกรรมของคานหุข้างคอนกรีตมีลักษณะการแตกร้าวตามแนวทแยงตรงบริเวณตำแหน่งที่แรงกระทำแบบจุดไปถึงบริเวณขอบเสา หรือเป็นการวิบัติเนื่องจากท่อนแรงอัดรับแรงอัดไม่เพียงพอ ส่วนคานหุข้างรีแอนด์ทีฟพาเตอร์คอนกรีตจะเกิดรอยร้าวบริเวณขอบเสาซึ่งเป็นลักษณะของการวิบัติที่เกิดจากโมเมนต์ดัด แต่ไม่เกิดการวิบัติจากแรงเฉือน แสดงให้เห็นว่ารีแอนด์ทีฟพาเตอร์คอนกรีตช่วยเพิ่มความสามารถของคานหุข้างได้

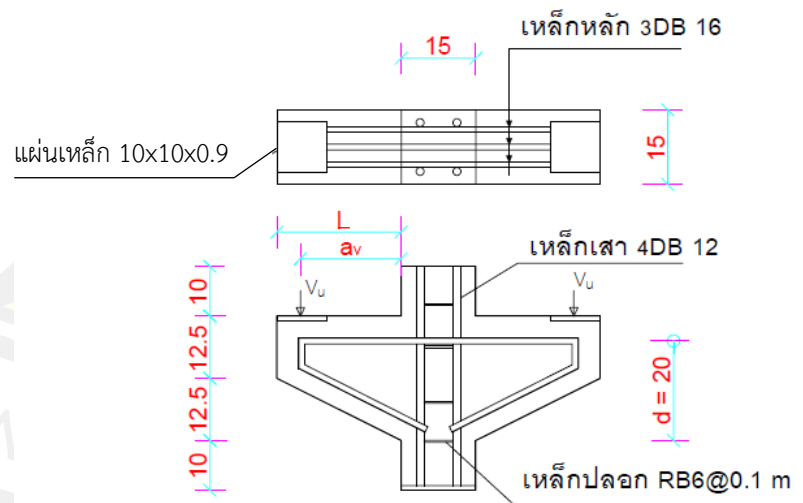


## บทที่ 3

## วิธีและแผนการดำเนินการศึกษา

## 3.1 ตัวอย่างคานหูก้าง RPC

ในการศึกษาเพื่อทราบถึงผลกระทบของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (Shear Span-to-Depth Ratio,  $a_v/d$ ) ต่อพฤติกรรมทางกลของคานหูก้างรีแอคทีฟพาวเดอร์คอนกรีต (Reactive Powder Concrete, RPC) ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการพิจารณา คือ อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ และความยาวคานยื่นจากเสา (Cantilever Beam Length,  $L$ ) โดยค่า  $a_v$  กำหนดให้มีค่าที่แตกต่างกันคือ  $a_v$  เท่ากับ 12 22 และ 32 เซนติเมตร ส่วนค่า  $d$  ใช้ค่าเดียวคือ  $d$  เท่ากับ 20 เซนติเมตร และค่า  $L$  กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 15 25 และ 35 เซนติเมตร การเสริมเหล็กหลักจะใช้เหล็กข้ออ้อย ขึ้นมาตรฐานคุณภาพ SD30 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 16 มิลลิเมตร จำนวน 3 เส้น (3-DB16) และคานหูก้าง RPC ทุกตัวอย่างไม่มีการเสริมเหล็กปลอก สำหรับเสามีหน้าตัดขนาด 15x15 เซนติเมตร เสริมเหล็ก DB12 จำนวน 4 เส้น เสริมเหล็กปลอก RB6 ระยะห่างกัน 0.1 เมตร ดังภาพประกอบ 11 ผู้วิจัยจึงได้แบ่งกลุ่มตัวอย่างการทดสอบเป็น 3 กลุ่ม โดยให้ระยะ  $a_v/d$  เป็นค่าควบคุมคือ 0.6 1.1 และ 1.6 ดังแสดงในตาราง 2



ภาพประกอบ 11 ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็ก

ตาราง 2 รายละเอียดของคานหูก้าง RPC

ตัวอย่าง	L (cm)	$a_v$ (cm)	$a_v/d$	เหล็กเสริมหลัก	อัตราส่วนเหล็กเสริม (%)
CB <sub>0.6</sub>	15	12	0.6	3-DB16	2.01
CB <sub>1.1</sub>	25	22	1.1	3-DB16	2.01
CB <sub>1.6</sub>	35	32	1.6	3-DB16	2.01

### 3.2 วัสดุที่ใช้ในอัตราส่วนผสม

#### 3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) ปูนซีเมนต์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I)
- 2) สารลดน้ำยิ่งยวดใช้สารลดน้ำประเภทโพลีคาร์บอกซิเลต (Polycarboxylate Superplasticizer) ซึ่งจัดเป็นสารผสมเพิ่มประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494
- 3) ซิลิกาฟูมใช้ซิลิกาฟูมแบบไม่ควบแน่น
- 4) มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำซีโดยทำการคัดขนาด ซึ่งทรายที่ได้จะมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.15 ถึง 0.60 มิลลิเมตร
- 5) น้ำ ใช้น้ำประปา
- 6) เส้นใยเหล็กเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ย 0.16 มิลลิเมตร ความยาว 6 มิลลิเมตร
- 7) เหล็กข้ออ้อย ใช้ชั้นมาตรฐานคุณภาพ SD30
- 8) เหล็กเส้นกลม ใช้ชั้นมาตรฐานคุณภาพ SR24

#### 3.2.2 อัตราส่วนผสม

อัตราส่วนผสมใช้อัตราส่วนผสมของ สุนันทา และ รินทร์ณภัทร [13] เป็นแนวทาง คือ อัตราส่วนสารลดน้ำยิ่งยวดต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.0 ใช้อัตราส่วนซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 ใช้อัตราส่วนเส้นใยเหล็กต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.1 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.23 ดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 อัตราส่วนผสมของ RPC ที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุ	ปริมาณที่ใช้ต่อลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)	อัตราส่วนต่อปูนซีเมนต์
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	935	1
สารลดน้ำยิ่งยวด	18.87	0.02
ซิลิกาฟูม	234.00	0.25
เส้นใยเหล็ก	187.00	0.2
ทราย	1030.00	1.1
น้ำ	215.00	0.23

### 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องผสมคอนกรีต
- 2) เครื่องทดสอบ UTM (Universal Testing Machine) ขนาด 300 ตัน
- 3) ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน
- 4) แบบหล่อรูปลูกบาศก์ ขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 5) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 6) นาฬิกาจับเวลา
- 7) ตลับเมตร

### 3.4 วิธีการผสมวัสดุและการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- 1) เตรียมแบบหล่อคานหุ้ม RPC โดยใช้ไม้อัดในการทำแบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 12

พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบ 12 เตรียมแบบหล่อคานหูกข้าง

2) นำเหล็กเสริมมาตัดตามขนาดที่ได้นำมาจัดเรียงลงในแบบคานหูกข้าง ดังแสดงในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 การเสริมเหล็กของคานหูกข้าง RPC

3) เตรียมส่วนผสมของ RPC โดยผสมปูนซีเมนต์กับซิลิกาฟุ่มเข้าด้วยกันในถาดและผสมน้ำกับสารลดน้ำยิ่งยวดก่อนนำไปเข้าเครื่องผสม ดังแสดงในภาพประกอบ 14





ภาพประกอบ 14 การผสมปูนซีเมนต์กับซิลิกาฟุ่มและผสมน้ำกับสารลดน้ำยิ่งยวด

4) นำปูนซีเมนต์ที่ผสมกับซิลิกาฟุ่มเทเข้าเครื่องผสมแล้วเดินเครื่องปั่นใช้เวลา 2 นาที แล้วจึงเติมน้ำผสมสารลดน้ำยิ่งยวดลงไปร้อยละ 80 ดังแสดงในภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 การนำปูนซีเมนต์ที่ผสมกับซิลิกาฟุ่มเทเข้าเครื่องผสม

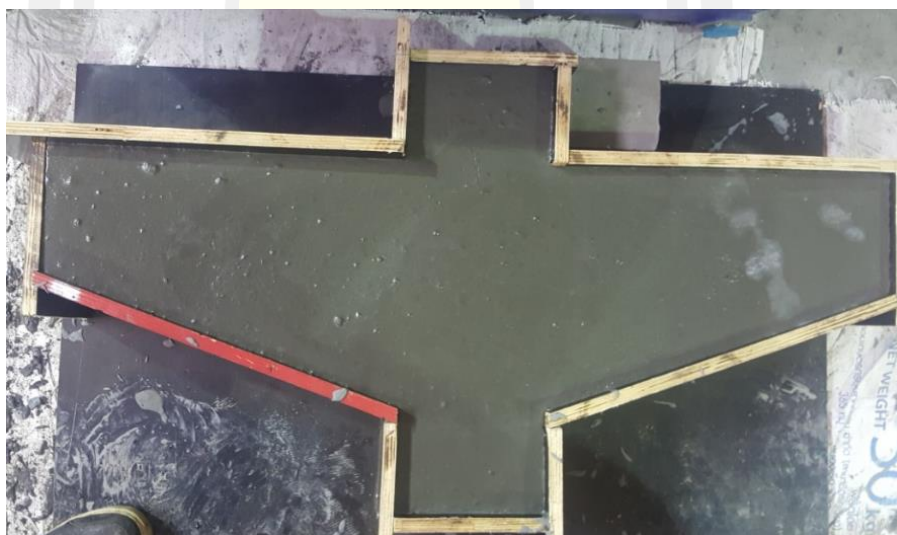
5) ใช้เวลาในการปั่นส่วนผสมที่เพิ่งเติมลง 5 นาที โดยการปั่นในช่วงเวลา 5 นาทีนั้น จะมีการใช้เหล็กฉากช่วยในการผสมให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีขึ้น เว้นช่วงครึ่งละ 1 นาที ดังแสดงในภาพประกอบ



ภาพประกอบ 16 การผสม RPC ในเครื่องผสม

6) เมื่อครบเวลา 5 นาทีแล้วจึงเติมทรายและสารลดน้ำยิ่งยวดอีก ร้อยละ 20 ที่เหลือ โดยเติมทรายก่อน จากนั้นปั่นส่วนผสมโดยใช้เวลา 3 นาที

7) เมื่อครบเวลา 3 นาทีแล้วจึงเติมเส้นใยเหล็ก ลงไป จากนั้นปั่นส่วนผสมโดยใช้เวลา 6 นาที เมื่อเสร็จแล้วจึงเทส่วนผสม RPC เทลงแบบที่เตรียมไว้ รอให้คอนกรีตแข็งตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 คานหุ้มข้าง RPC ที่ผสมเสร็จแล้ว

8) จากนั้นนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปา ใช้เวลาในการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในภาพประกอบ



ภาพประกอบ 18 การบ่มคานหุซ้าง RPC

### 3.5 การดำเนินการทดสอบ

#### 3.5.1 การทดสอบกำลังต้านแรงอัดของ RPC

การทดสอบกำลังต้านแรงอัดของ RPC ทำตามมาตรฐานการทดสอบมอร์ต้า ASTM C109/C109M [14] โดยใช้แบบหล่อขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความเร็วในการกดก้อนตัวอย่างอยู่ระหว่าง 900-1800 นิวตัน/วินาที

#### 3.5.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเส้น

การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็ก ทำตามมาตรฐาน มอก. 24-2548 สำหรับเหล็กข้ออ้อย [16]

##### 3.4.2.1 การคำนวณสำหรับเหล็กข้ออ้อย

###### 1) กำลังรับแรงดึง

$$R_m = \frac{F_m}{S_N}$$

เมื่อ  $R_m$  คือ กำลังรับแรงดึง

$F_m$  คือ แรงดึงสูงสุด

$S_m$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวางระบุ

###### 2) กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก

$$R_e = \frac{F_e}{S_N}$$

เมื่อ  $R_e$  คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก

$F_e$  คือ แรงดึงที่จุดคราก

$S_n$  คือ พื้นที่ภาคตัดขวางระบุ

### 3.5.3 การทดสอบคานหูก้าง RPC

ติดตั้งคานหูก้าง RPC บนเครื่องทดสอบ UTM (Universal Testing Machine) ขนาด 300 ตัน จุดรองรับเป็นเหล็กเส้นกลมเพื่อให้แรงที่กระทำเป็นแรงกระทำแบบจุด (Point Load) และในการบันทึกภาพ ติดตั้งกล้องในแนวตั้งฉากกับคานหูก้าง ดังภาพประกอบ 19 การทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของคานหูก้าง ทดสอบด้วยอัตรา 1 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ โดยในการทดสอบนี้กำหนดการวิบัติของคานหูก้าง เมื่อแรงที่กระทำลดลงเหลือเท่ากับร้อยละ 50 ของแรงสูงสุด



ภาพประกอบ 19 การติดตั้งคานหูก้าง

### 3.5.4 การเก็บข้อมูล

1. ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก
2. การแตกร้าวแรกเริ่ม (First Crack) โดยได้จากการใช้กล้องบันทึกภาพ
3. ลักษณะการวิบัติของคานหูก้าง RPC

### 3.6 การวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของคานหูก้างด้วยแบบจำลองสตรัทและไท

การวิเคราะห์คานหูก้างด้วยแบบจำลองสตรัทและไท (Strut and Tie Model, STM) เพื่อคาดการณ์ความสามารถในการรับแรงและลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นของคานหูก้าง ดังแสดงในภาพประกอบ 20 สามารถวิเคราะห์จากสมการ (3.1) ถึง (3.5) ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 1 หาความสามารถในการรับแรงอัดที่โหนด A (Node) จากสมการ

$$V_{n1,STM} = f_{ce} A_p = 0.85 \beta_n f'_c A_p = 0.85(0.8) f'_c A_p \quad (3.1)$$

ขั้นตอนที่ 2 หาความสามารถในการรับแรงที่โหนด B (Node) จากสมการ

$$V_{n2,STM} = f_{ce} b w_{s,CB} = 0.85 f'_c b w_{s,CB} \quad (3.2)$$

ขั้นตอนที่ 3 หาความสามารถในการรับแรงเนื่องจากท่อนแรงดึง (Tie) AD จากสมการ

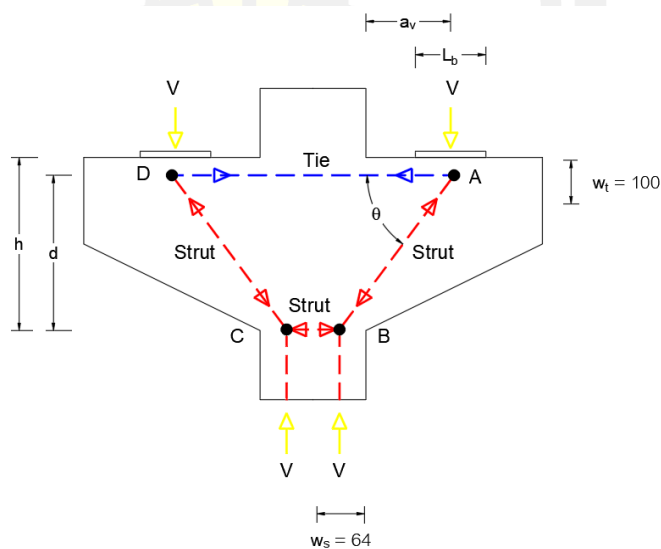
$$V_{n3,STM} = A_s f_y \tan \theta; \quad \theta = \tan^{-1} \left[ d / (a_v + 0.5 w_{s,CB}) \right] \quad (3.3)$$

ขั้นตอนที่ 4 หาความสามารถในการรับแรงดึงที่โหนด A (Node) จากสมการ

$$V_{n4,STM} = f_{ce} b w_t \tan \theta = 0.85 \beta_n f'_c b w_t \tan \theta = 0.85(0.8) f'_c b w_t \tan \theta \quad (3.4)$$

ขั้นตอนที่ 5 หาความสามารถในการรับแรงเนื่องจากท่อนแรงอัด (Strut) AB or DC จากสมการ ( $\beta_s = 0.6\lambda = 0.6$  สำหรับคอนกรีตทั่วไป)

$$V_{n5,STM} = 0.85 \beta_s f'_c b w_s \sin^2 \theta = 0.85(0.6) f'_c b w_s \sin^2 \theta \quad (3.5)$$

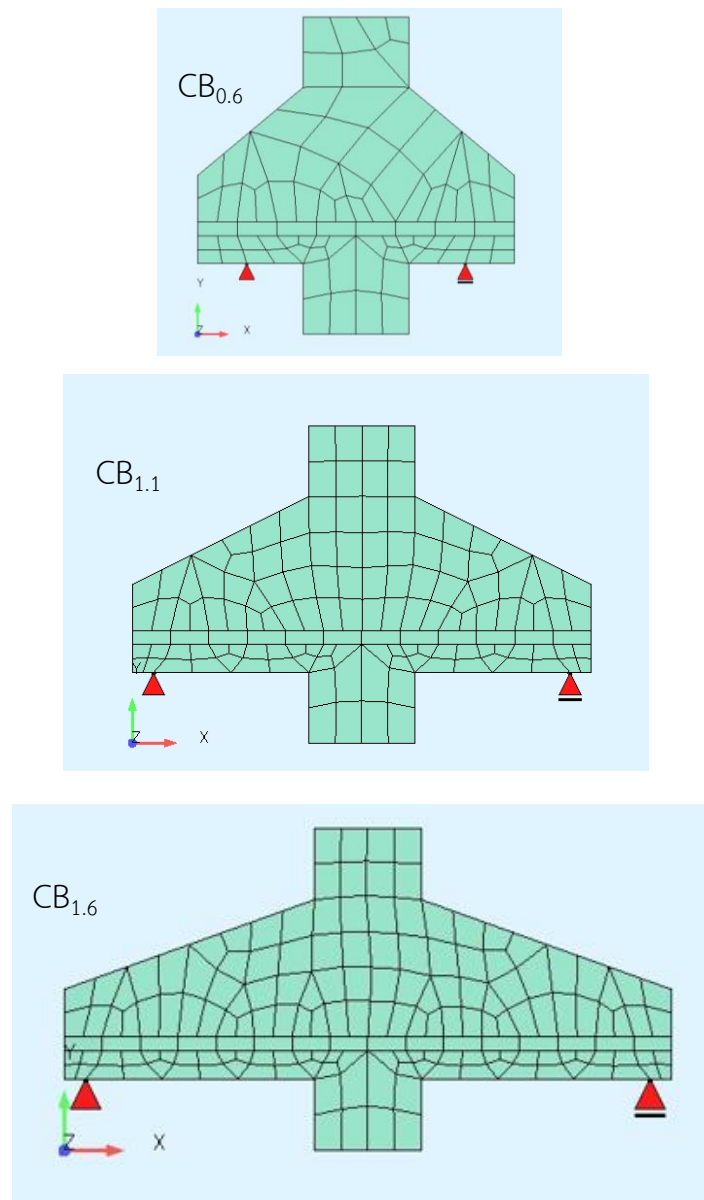


ภาพประกอบ 20 รายละเอียดการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของคานหูก้าง

### 3.7 การวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของคานหูก้างด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์คานหูก้างด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model, FEM) เพื่อคาดการณ์ความสามารถในการรับแรงและลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นของคานหูก้าง RPC โดยใช้โค้ด SOFISTIK FEM [16] โปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์การแตกร้าวของคอนกรีต

สำหรับแบบจำลองคานหูก้าง RPC สร้างโดยใช้การเชื่อมแบบอัตโนมัติของอิเลเมนต์ที่มีขนาดสูงสุดเท่ากับ 0.05 ม. ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 แบบจำลอง Finite Element Model ของคานหูก้าง RPC

ในการศึกษานี้ พฤติกรรมไม่เชิงเส้นของวัสดุถูกแสดงโดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในรูปแบบ 2 มิติ เพื่อกำหนดความแข็งแรงของวัสดุ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกำลังต้านแรงอัด เป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของ RPC ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ดังแสดงภาพประกอบ 22 ในขณะที่กำลังต้านแรงดึงของ RPC ใช้สมมติฐานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ UHPFRC (Ultra High Performance Fiber reinforced Concrete) ในโปรแกรม ดังแสดงในภาพประกอบ 23 จากกราฟความสัมพันธ์ได้กำลังต้านแรงดึงสูงสุด ( $f_{tu}$ ) เท่ากับ 99 กก.ต่อตร.ซม กำลังต้านแรงดึงที่ยอมให้ ( $f_{tr} = 0.62f_{tu}$ ) เท่ากับ 61 กก.ต่อตร.ซม และ ค่าเฉลี่ยของมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity ;  $E_c$ ) เท่ากับ  $4.29 \times 10^5$  กก.ต่อตร.ซม ได้จากการทดสอบกำลังต้านแรงอัด ความเครียด ( $\epsilon_c$ ) เท่ากับ 0.23 มม.ต่อ.ม ที่สอดคล้องกับ  $f_{tu}$  ที่เกิดการแตกร้าวแรกเริ่ม  $\epsilon_{0.3}$  เท่ากับ 2.03 มม.ต่อ.ม เมื่อความกว้างของรอยร้าวเท่ากับ 0.3 มม. และ  $\epsilon_{1\%}$  เท่ากับ 15.23 มม.ต่อ.ม. เมื่อความกว้างของรอยร้าวเท่ากับ 1% ของความสูงของตัวอย่างได้จากสมการ (3.6) ถึง (3.9) ตามลำดับ

$$\epsilon_c = \frac{f_{tu}}{E_c} \times 1000 \text{ (mm/m)} \quad (3.6)$$

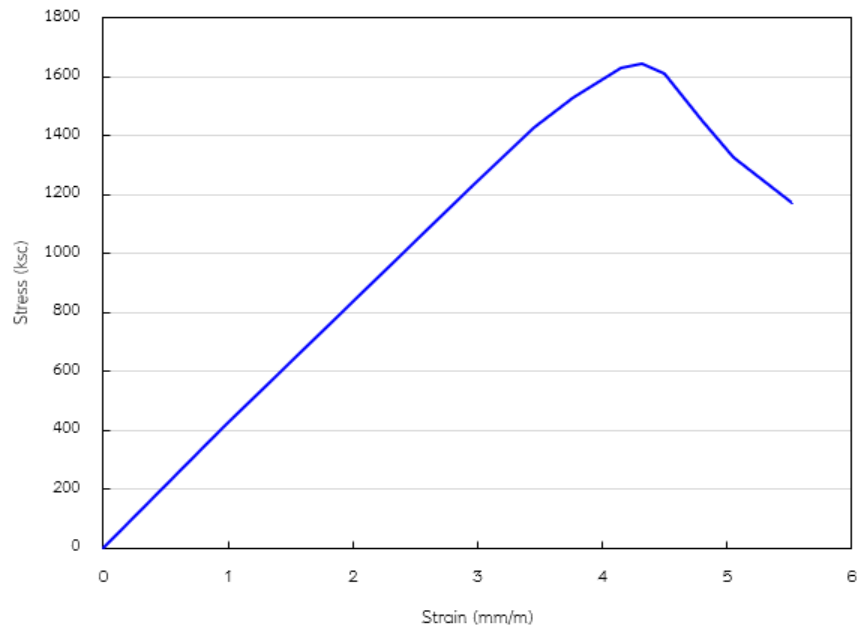
$$\epsilon_{0.3} = \left[ \frac{0.3}{\frac{2}{3}h} + \frac{f_{tu}}{E_c} \right] \times 1000 \text{ (mm/m)} \quad (3.7)$$

$$\epsilon_{1\%} = \left[ \frac{0.01h}{\frac{2}{3}h} + \frac{f_{tu}}{E_c} \right] \times 1000 \text{ (mm/m)} \quad (3.8)$$

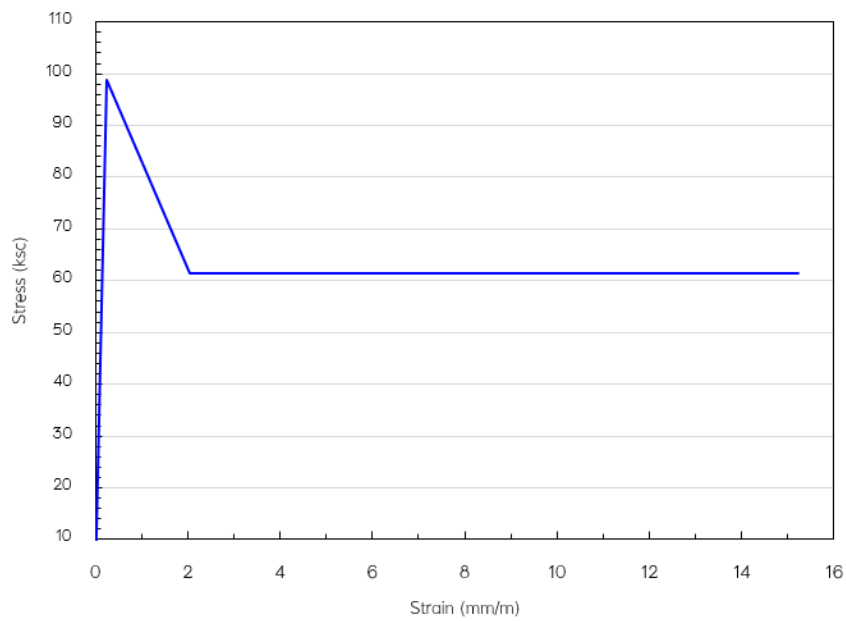
ความต้านทานการแตกหัก ( $G_f$ ) ของ RPC เท่ากับความกว้างของรอยแตกร้าวส่วนด้วยความยาวคานยื่นคำนวณโดยใช้สมการ (3.5) ตามคำแนะนำของ [17]

$$G_f = \frac{w_{0.3}}{l_c} \quad (3.9)$$

เมื่อ  $w_{0.3}$  คือรอยแตกร้าวที่มีความกว้างเท่ากับ 0.3 มม. และ  $l_c$  คือความยาวคานยื่นเท่ากับ  $\frac{2}{3}h$  กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของกำลังต้านแรงดึงและกำลังต้านแรงอัดของเหล็กเสริมหลักใช้สมมติฐานจากความสัมพันธ์แบบยืดหยุ่น-พลาสติกสมบูรณ์ (Elastic-Perfectly Plastic) ดังแสดงในภาพประกอบ 24 สรุปคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง Finite Element Model ดังแสดงตารางที่ 4

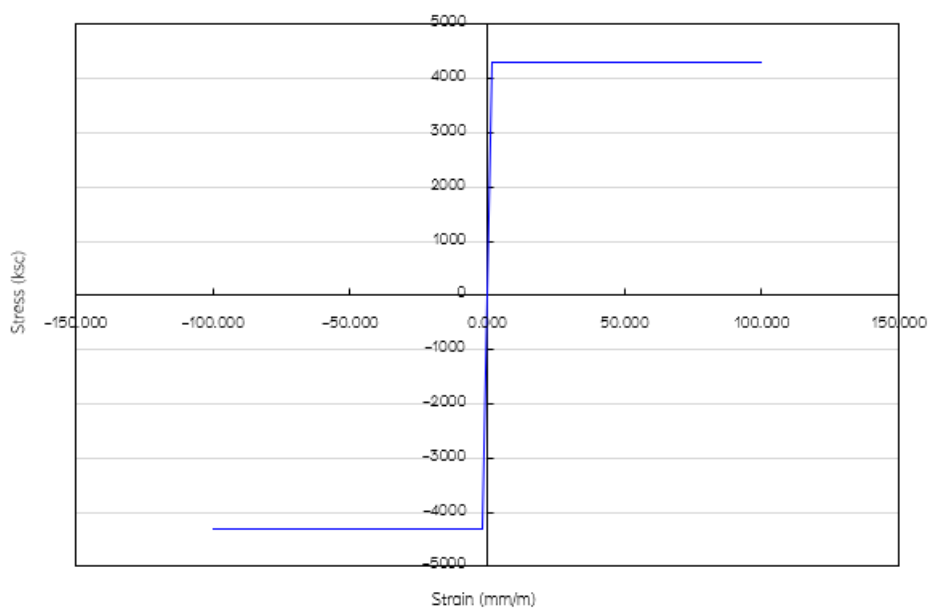


ภาพประกอบ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกำลังต้านแรงอัดของ RPC ที่ใช้ในแบบจำลอง Finite Element Model



ภาพประกอบ 23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดกำลังต้านแรงดึงของ RPC ที่ใช้ในแบบจำลอง Finite Element Model





ภาพประกอบ 24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเหล็กเสริมหลัก ที่ใช้ในแบบจำลอง Finite Element Model

ตาราง 4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในแบบจำลอง Finite Element Model

วัสดุ	การทดสอบ	จำนวน	หมายเหตุ
RPC	กำลังต้านแรงอัด ( $f'_c$ , กก.ต่อตร.ซม.)	1,646	
	กำลังต้านแรงดึง ( $f_m$ , กก.ต่อตร.ซม.)	99	
	มอดูลัสยืดหยุ่น ( $E_c$ , กก.ต่อตร.ซม.)	$4.29 \times 10^5$	
	อัตราส่วนของปัวซอง	0.19	
	ความต้านทานการแตกหัก ( $G_f$ , กก.ต่อ ซม.)	0.1835	
Steel	กำลังต้านแรงดึงของเหล็ก ณ จุดคราก	4,305	
	มอดูลัสยืดหยุ่น ( $E_c$ , กก.ต่อตร.ซม.)	$2.141 \times 10^6$	
	อัตราส่วนของปัวซอง	0.30	

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปราย

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลของคานหูก้างรีแอคทีฟเพาเวอร์เตอร์คอนกรีต (Reactive Powder Concrete, RPC) ที่ควบคุมด้วยระยะช่วงแรกเฉือน (Shear Span,  $a_v$ ) และระยะความยาวของคานยื่นจากเสา (Cantilever Beam Length,  $L$ ) ซึ่งออกแบบและผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองสตรัทและไท (Strut and Tie Model, STM)

#### 4.1 ผลการทดสอบ

##### 4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของคานหูก้าง RPC กำลังต้านแรงอัดเฉลี่ยของก้อนตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด  $5 \times 5 \times 5$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 1,646 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (กก.ต่อตร.ซม) ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของเหล็กใช้เหล็กเหล็กข้ออ้อย ชั้นมาตรฐานคุณภาพ SD30 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 16 มิลลิเมตร ณ จุดครากเท่ากับ 4,305 กก.ต่อตร.ซม ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของคานหูก้าง RPC

วัสดุ	การทดสอบ	ค่าเฉลี่ย (กก.ต่อตร.ซม)	หมายเหตุ
RPC	กำลังต้านแรงอัด 28 วัน	1,646	
Steel	กำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็ก	5,600	
	กำลังรับแรงดึงของเหล็ก ณ จุดคราก	4,305	

##### 4.1.2 ผลการทดสอบคานหูก้าง RPC

ผลทดสอบคานหูก้าง RPC ดังแสดงในตาราง 6 พบว่าคานหูก้าง  $CB_{0.6}$  มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ( $P_u$ ) เท่ากับ 88,049 กก. ระยะการแอ่นตัว ณ ตำแหน่ง  $P_u$  ( $\Delta_u$ ) เท่ากับ 0.888 มม. ลักษณะการวิบัติเป็นแบบแนวทแยง ดังแสดงในภาพประกอบ 25 (ก) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคานหูก้าง C8G3 ของ Ridha at al. [4] ที่ระยะ  $a_v/d$  เท่ากับ 0.6 เท่ากัน มีอัตราส่วนเหล็กเสริมเท่ากับ 1.32% น้อยกว่าอัตราส่วนเหล็กเสริมของตัวอย่างงานวิจัยนี้ ปรากฏว่า

คานหูก้าง C8G3 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าคานหูก้าง CB<sub>0.6</sub> ถึง 1.63 เท่า แต่ยังมีลักษณะการวิบัติและรอยแตกร้าวเป็นแบบแนวทแยงและมีรอยแตกร้าวบริเวณขอบเสาที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 25 (ข)

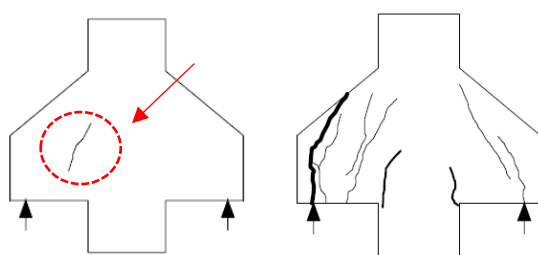
คานหูก้าง CB<sub>1.1</sub> มี  $P_u$  เท่ากับ 63,346 กก.  $\Delta_u$  เท่ากับ 1.824 มม. และ ลักษณะการวิบัติเป็นแบบแนวทแยง ดังแสดงในภาพประกอบ 26

คานหูก้าง CB<sub>1.6</sub>  $P_u$  เท่ากับ 52,611 กก. ตามลำดับ  $\Delta_u$  เท่ากับ 5.064 มม. ลักษณะการวิบัติเป็นแบบแรงดัด ดังแสดงในภาพประกอบ 27

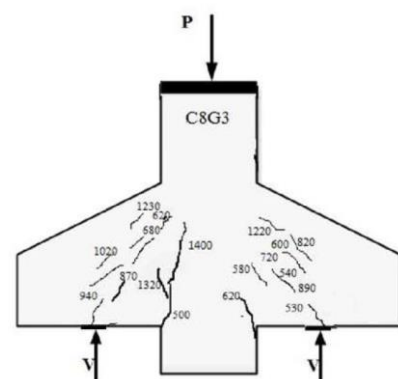
ตาราง 6 ผลการทดสอบของคานหูก้าง RPC

คานหูก้าง	a/d	$P_{cr}$ (กก.)	$P_u$ (กก.)	$\Delta_u$ (มม.)	ลักษณะการวิบัติ
CB <sub>0.6</sub>	0.6	32,678	88,049	0.888	แนวทแยง
CB <sub>1.1</sub>	1.1	43,526	63,346	1.824	แนวทแยง
CB <sub>1.6</sub>	1.6	20,283	52,611	5.064	แรงดัด

หมายเหตุ  $P_{cr}$  ได้จากการสังเกตระหว่างทำการทดสอบเท่านั้น เมื่อได้ยินเสียงการแตกร้าวหรือเห็นรอยแตกร้าวปรากฏขึ้น จึงอาจไม่ใช่ค่าจริง และ คือระยะการแอนตัว



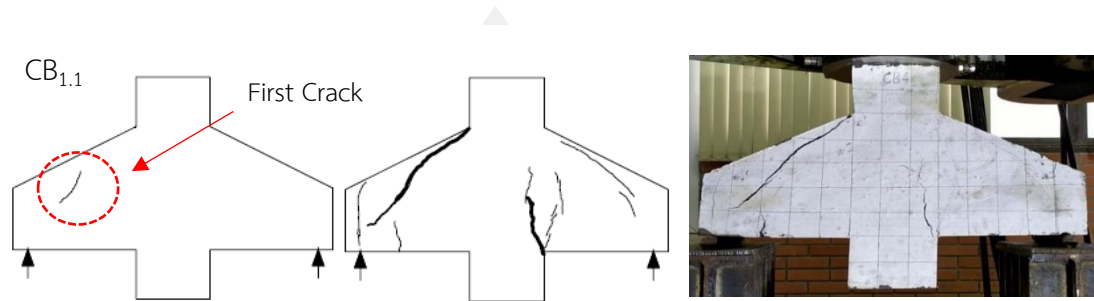
(ก)



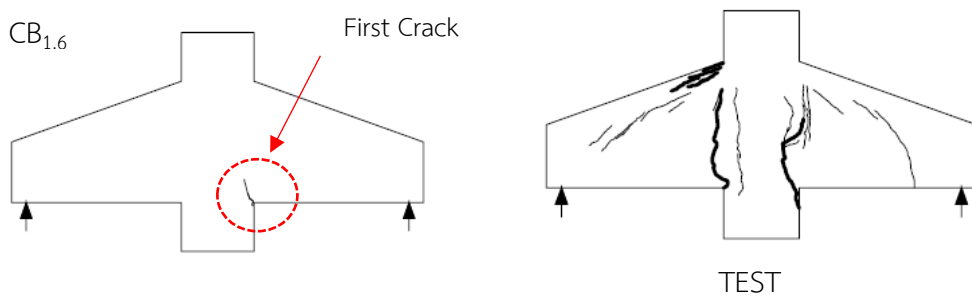
Ridha a/d=0.6

(ข)

ภาพประกอบ 25 (ก) รอยแตกร้าวของคานหูก้าง  $CB_{0.6}$  และ (ข) รอยแตกร้าวของคานหูก้าง Ridha

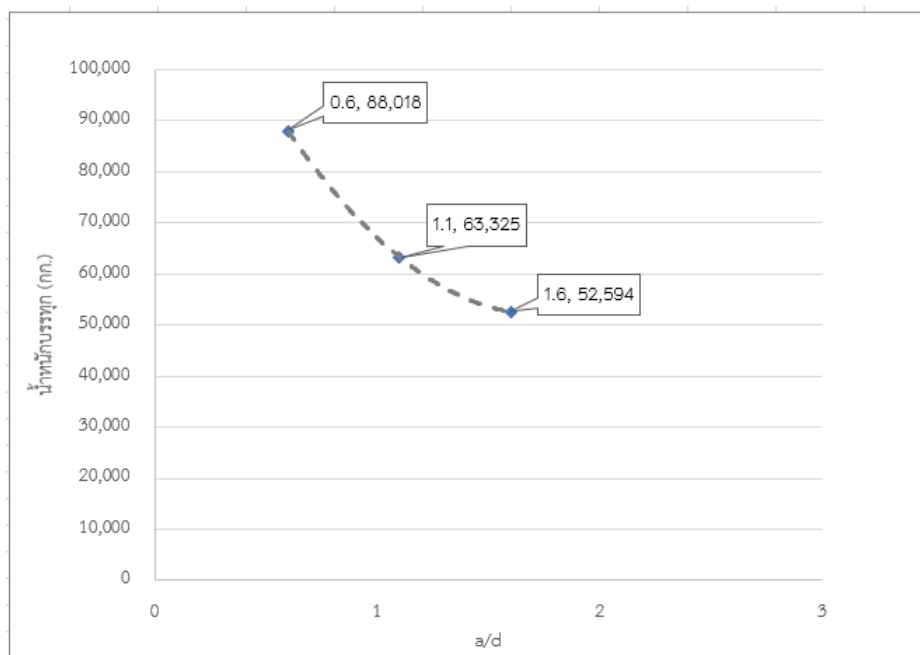


ภาพประกอบ 26 รอยแตกร้าวของคานหูก้าง  $CB_{1.1}$



ภาพประกอบ 27 รอยแตกร้าวของคานหูก้าง  $CB_{1.6}$

จากผลการทดสอบแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะ  $a_v/d$  พบว่ารูปแบบความสัมพันธ์มีความโค้งโดยความชันลดลงเมื่อระยะ  $a_v/d$  เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 28 คาดว่าเกิดจากที่คานหูก้างซึ่งถูกจำแนกเป็นคานกลุ่ม D-region ซึ่งเป็นการกระจายความเค้นไม่เป็นเส้นตรง ในช่วงอิลาสติก



ภาพประกอบ 28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะ  $a/d$

#### 4.2 การวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลอง STM

การวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลอง STM ได้คาดการณ์ไว้ว่าจะเกิดวิบัติแบบแรงดัดของตัวอย่างทั้งหมด เนื่องจากเหล็กเสริมหลักของคานหุ้มข้าง RPC มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณที่ต้องการสำหรับความสามารถในการรับน้ำหนัก ลักษณะการวิบัติของคานหุ้มข้าง  $CB_{0.6}$  และ  $CB_{1.1}$  ไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบเนื่องรอยแตกกว้างในแนวทแยงเกิดขึ้นมากกว่ารอยแตกย่อยที่เกิดจากแรงดัด จึงอธิบายได้ว่า RPC มีส่วนช่วยในการรับแรงดัดอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตาราง 7

ตาราง 7 ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงของตัวอย่างคานหุ้มข้าง

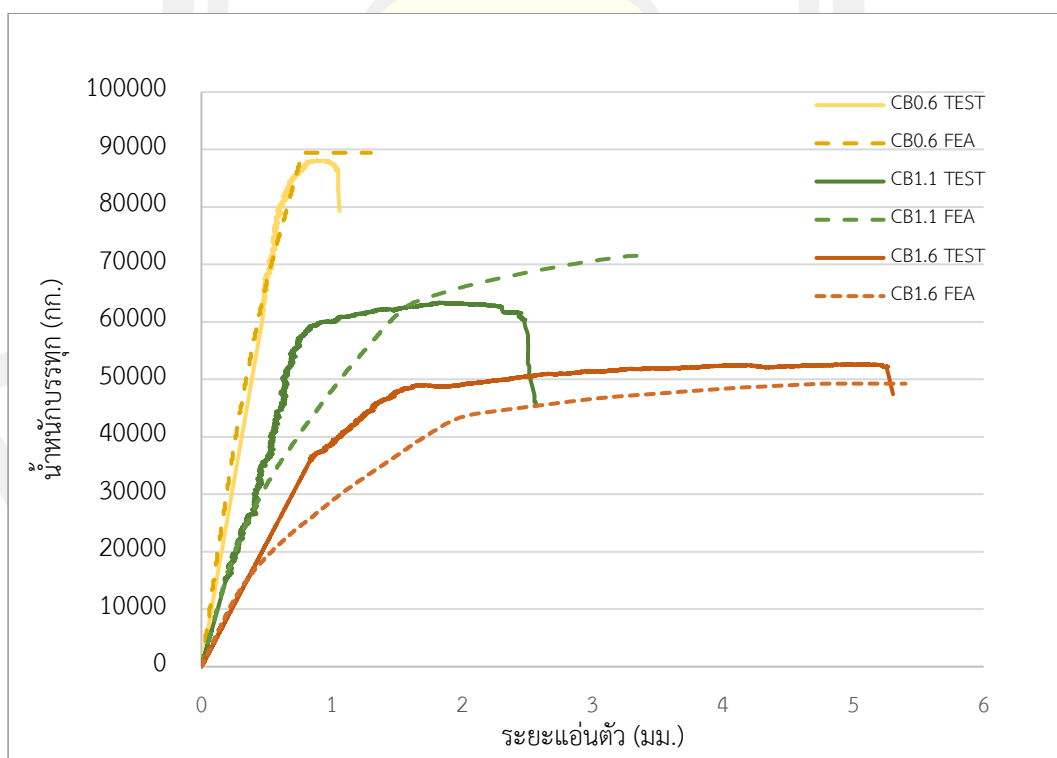
ตัวอย่าง	STM					การวิบัติ	TEST	
	$V_1$ (ตัน)	$V_2$ (ตัน)	$V_3$ (ตัน)	$V_4$ (ตัน)	$V_5$ (ตัน)		$V_n = P_u/2$ (ตัน)	การวิบัติ
$CB_{0.6}$	111.96	134.40	<b>34.15</b>	221.07	51.09	แรงดัด	44.02	แนวทแยง
$CB_{1.1}$	111.96	134.40	<b>20.60</b>	133.38	31.20	แรงดัด	31.67	แนวทแยง
$CB_{1.6}$	111.96	134.40	<b>14.75</b>	95.45	19.68	แรงดัด	26.31	แรงดัด

### 4.3 การวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลอง FE

#### 4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะแอนตัว

จากผลทดสอบได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวของคานหูก้าง RPC ดังแสดงในภาพประกอบ 29 พบว่าเมื่อระยะ  $a/d$  เพิ่มขึ้น ระยะการแอนตัวก็จะเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง คานหูก้าง  $CB_{0.6}$  ซึ่งมีระยะ  $a/d$  น้อยกว่า 1.0 เกิดการวิบัติแบบกะทันหันหลังจากได้รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับการวิบัติแบบแนวทแยง ดังแสดงในภาพประกอบ 25 คานหูก้าง  $CB_{1.1}$  ซึ่งมีระยะ  $a/d$  ใกล้เคียง 1.0 มีระยะการแอนตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแตกร้าวที่เกิดแรงดัด แสดงในภาพประกอบ 26 คานหูก้าง 1.6 ซึ่งมีระยะ  $a/d$  มากกว่า 1.0 แสดงพฤติกรรมแบบเหนียวเหมือนคานยื่นที่มีการวิบัติเนื่องจากแรงดัด แสดงในภาพประกอบ 27

ผลการของ FEA พบว่า  $P_u$  ของคานหูก้าง  $CB_{0.6}, CB_{1.1}, CB_{1.6}$  มีค่าประมาณ 102% 113% และ 94% ตามลำดับของผลการทดสอบ ดังแสดงในตาราง 8 ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากคานหูก้าง  $CB_{0.6}$  ใกล้เคียงกับผลการทดสอบเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามแบบจำลอง FE ไม่สามารถคาดการณ์ผลการทดสอบของคานหูก้าง  $CB_{1.1}$  และ  $CB_{1.6}$  ได้บางประการ



ภาพประกอบ 29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะแอนตัว

ตาราง 8 ผลการทดสอบเทียบกับผลจาก FEA

คานหูก้าง	$a_v/d$	$P_u$ (กก.)		ลักษณะการวิบัติ	
		TEST	FEA	TEST	FEA
CB <sub>0.6</sub>	0.6	88,049	89,429 (102%)	แนวทแยง	แนวทแยง
CB <sub>1.1</sub>	1.1	63,346	71,480 (113%)	แนวทแยง	แรงดัด
CB <sub>1.6</sub>	1.6	52,611	49,251 (94%)	แรงดัด	แรงดัด

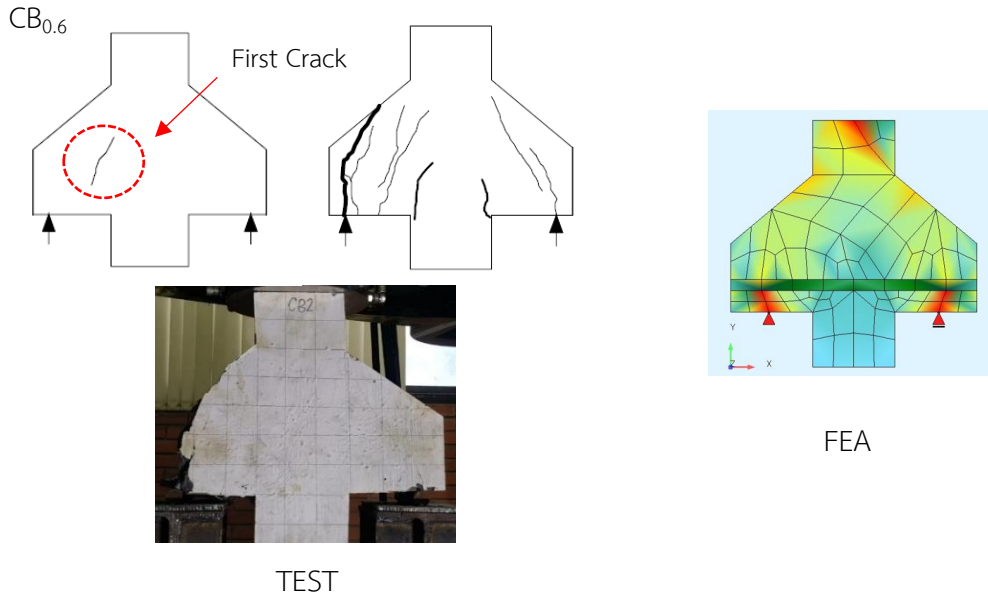
#### 4.2.2 รอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติ

คานหูก้าง CB<sub>0.6</sub> เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรกตรงแนวทแยงด้านซ้ายและขยายกว้างขึ้นจนเกิดการวิบัติ ดังแสดงในภาพประกอบ 30

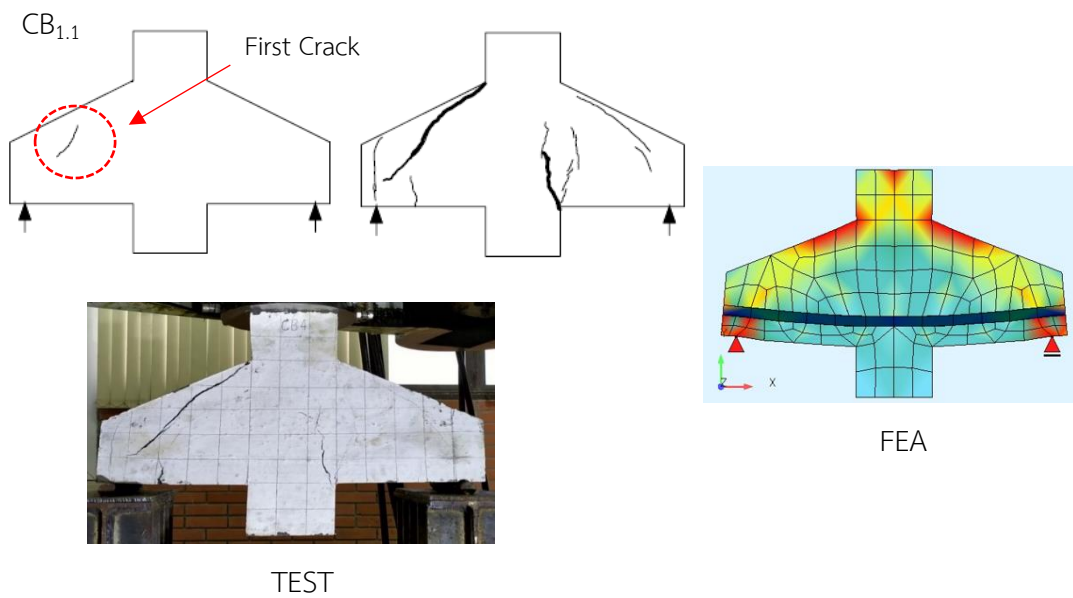
คานหูก้าง CB<sub>1.1</sub> เกิดรอยแตกร้าวเริ่มตรงแนวทแยงด้านซ้าย ในระหว่างที่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณขอบเสาซึ่งเกิดจากแรงดัด แต่การวิบัติของตัวอย่างเกิดขึ้นจากการบดอัดของคอนกรีตบริเวณแนวทแยงด้านซ้ายบนตรงขอบเสา ดังแสดงในภาพประกอบ 31

คานหูก้าง CB<sub>1.6</sub> เกิดรอยแตกร้าวเริ่มตรงขอบเสาด้านล่างขวา เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นก็ได้มีรอยแตกร้าวเกิดตรงขอบเสาด้านล่างซ้าย จนกระทั่งวิบัติของตัวอย่างเกิดจากการบดอัดของคอนกรีตบริเวณแนวทแยงด้านซ้ายบนตรงขอบเสา ดังแสดงในภาพประกอบ 32

รอยแตกร้าวเริ่มแรก การครากของเหล็กเสริมและกำลังต้านแรงอัดของ RPC ของคานหูก้าง ได้ผลจาก FEA ดังแสดงในตาราง 9 พบว่า คานหูก้าง CB<sub>0.6</sub> มีการแตกร้าวเริ่มแรกที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 16,315 กก. ไม่มีการครากของเหล็กเสริมและเข้าถึงกำลังต้านแรงอัดที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 88,815 กก. ก่อนที่จะวิบัติที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 89,429 กก. ใกล้เคียงกับการวิบัติแบบแนวทแยงที่ได้จากการทดสอบ คานหูก้าง CB<sub>1.1</sub> มีการแตกร้าวเริ่มแรกที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 10,910 กก. เข้าถึงกำลังต้านแรงอัดที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 71,480 กก. ก่อนที่จะวิบัติแบบแนวทแยง พบการครากของเหล็กเสริมหลังจากที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด เริ่มที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 59,958 กก. สอดคล้องกับการทดสอบที่มีรอยแตกร้าวจากแรงดัดก่อนที่จะวิบัติแบบแนวทแยง คานหูก้าง CB<sub>1.6</sub> มีการแตกร้าวเริ่มแรกที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 7,851 กก. พบการครากของเหล็กเสริมเริ่มที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 42,317 กก. จนถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 483 กก. ในเวลาเดียวกันก็เกิดการบดอัดจนทำให้วิบัติเนื่องจากแรงดัดสอดคล้องกับการทดสอบ

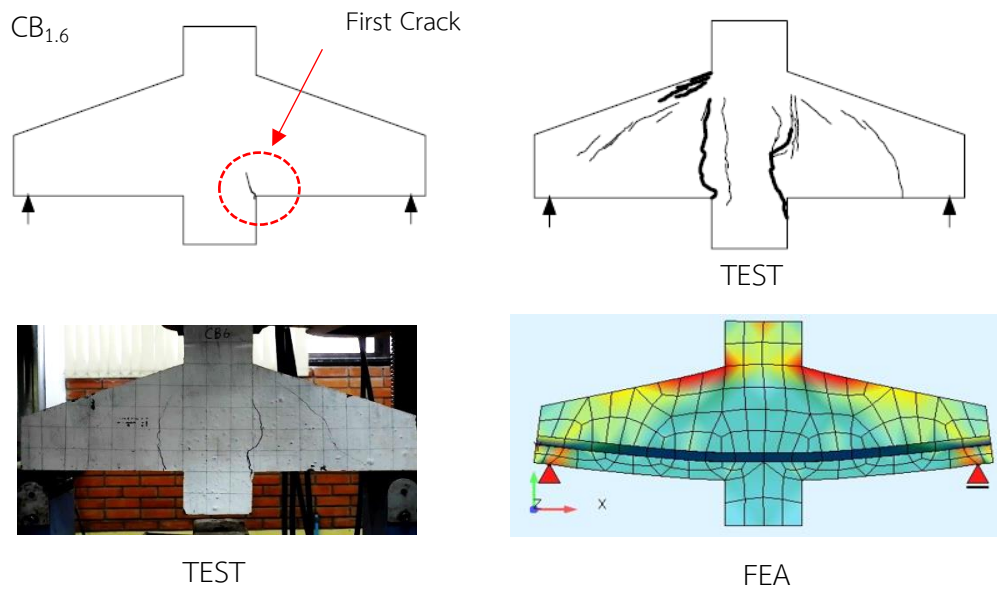


ภาพประกอบ 30 รอยแตกริ้วจากผลการทดสอบและผลของ FEA ของคานหูก้าง CB<sub>0.6</sub>



ภาพประกอบ 31 รอยแตกริ้วจากผลการทดสอบและผลของ FEA ของคานหูก้าง CB<sub>1.1</sub>





ภาพประกอบ 32 รอยแตกร้าวจากผลการทดสอบและผลของ FEA ของคานหูช้าง CB<sub>1.1</sub>

ตาราง 9 ผลเพิ่มเติมจาก FEA

Corbel	$P_{cr}$ (กก)	$P$ เมื่อเหล็กเสริม	$P$ ถึงกำลังต้าน	หมายเหตุ	
		คราก (กก.)	แรงอัด (กก.)	$P_u$ (กก.)	อื่น ๆ
CB <sub>0.6</sub>	16,315	-	88,815	89,429	$f_{s,max} = 3,817$ (กก.ต่อตร.ซม)
CB <sub>1.1</sub>	10,910	59,958	71,480	71,480	-
CB <sub>1.6</sub>	7,851	42,317	49,251	49,251	-

หมายเหตุ Cr คือ การแตกร้าวเริ่มแรก , P คือ น้ำหนักบรรทุก ,  $P_u$  น้ำหนักบรรทุกสูงสุด

พหุบัณฑิต ชีวะ

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากผลการทดสอบพบว่าผลกระทบของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลต่อพฤติกรรมทางกลของคานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพอร์เตอร์คอนกรีตสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกดลลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของระยะ  $a_v/d$  และพฤติกรรมของคานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพอร์เตอร์คอนกรีตสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้  
คานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพอร์เตอร์คอนกรีตที่ระยะ  $a_v/d$  น้อยกว่า 1.0 จะมีแนวโน้มเกิดการวิบัติแบบแนวทแยงคานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพอร์เตอร์คอนกรีตที่ระยะ  $a_v/d$  ใกล้เคียง 1.0 เกิดการวิบัติแบบแนวทแยงแต่ยังไม่สามารถรับแรงดัดได้เต็มที่ ส่วนคานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพอร์เตอร์คอนกรีตที่ระยะ  $a_v/d$  มากกว่า 1.0 เกิดการวิบัติแบบแรงดัด

2. การคาดการณ์พฤติกรรมของคานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพอร์เตอร์คอนกรีตที่ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ในการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลการทดสอบมากกว่าแบบจำลองสตรัทและไท (STM)

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาคานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพอร์เตอร์คอนกรีตในอนาคต

1. ศึกษาคานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพอร์เตอร์คอนกรีตที่ใช้ RPC ที่มีกำลังต้านแรงอัดหรืออัตราส่วนผสมอื่นๆ
2. ศึกษาและหาข้อเสนอแนะให้ STM สามารถประมาณกำลังเฉือนของคานหูกึ่งรีแอนด์ทีพีเพอร์เตอร์คอนกรีตได้แม่นยำขึ้น
3. ศึกษาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของ RPC ที่ง่ายและเหมาะสมสำหรับ FEA

พหุบัณฑิต ชีวะ

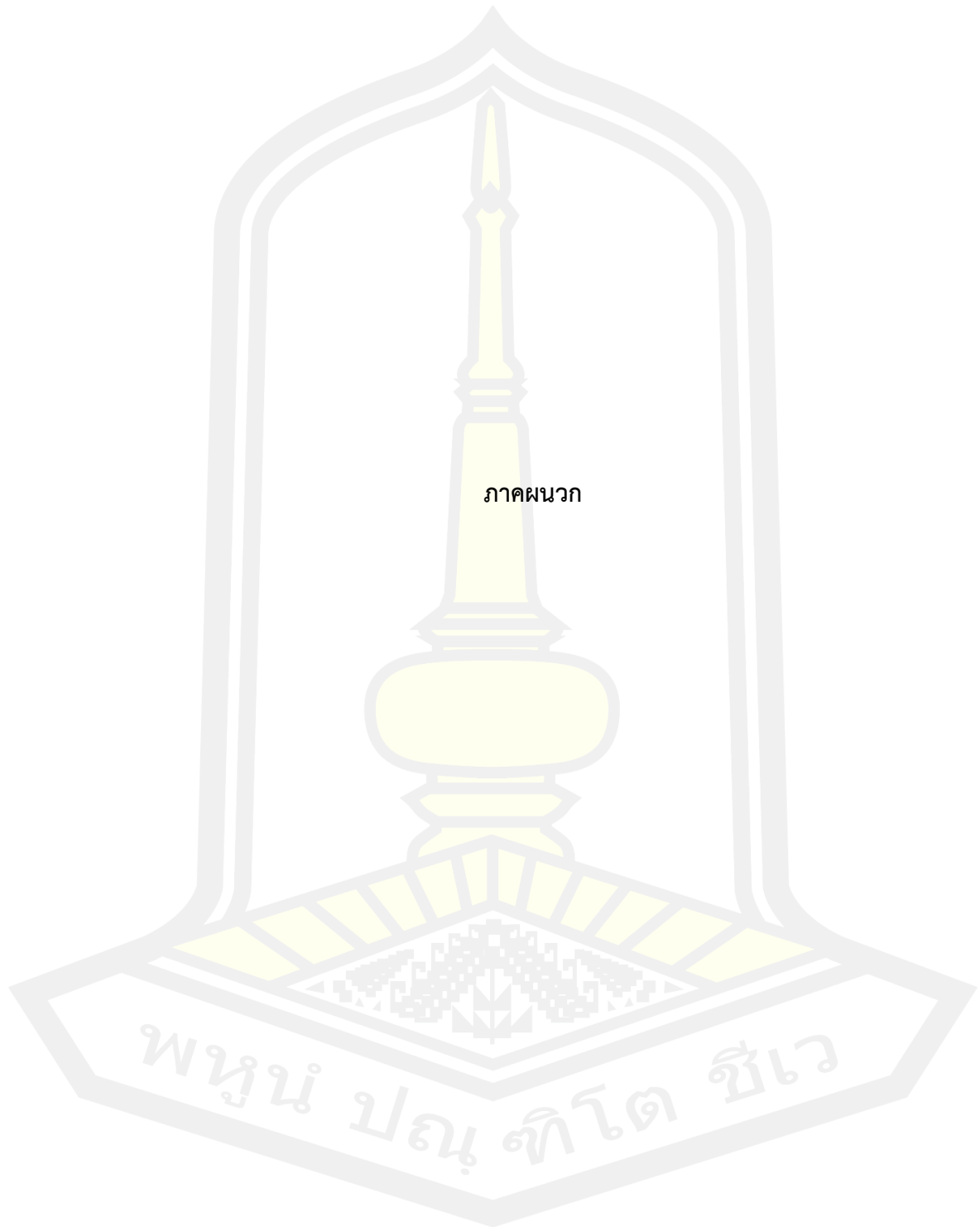
บรรณานุกรม

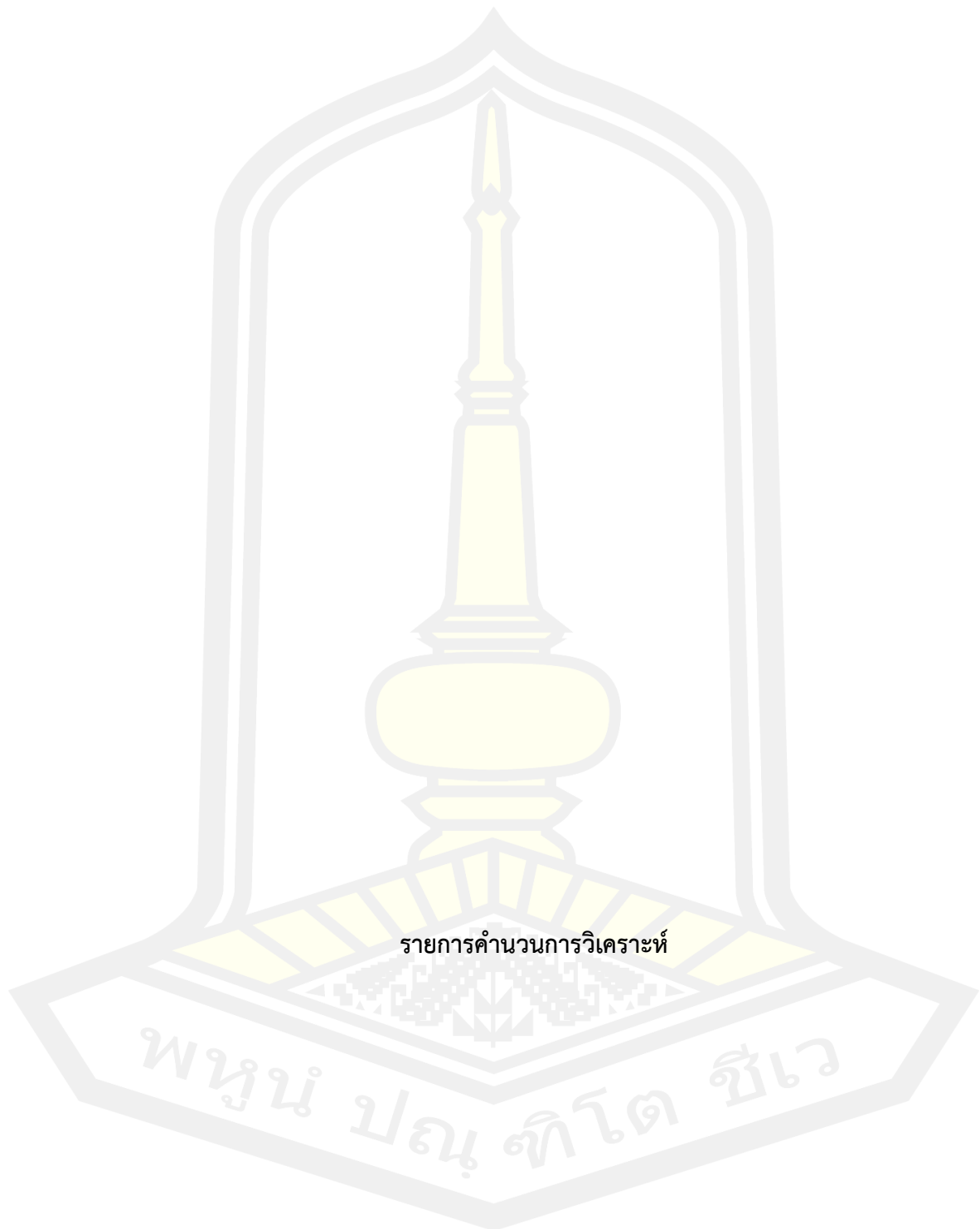


## บรรณานุกรม

- [1] W. Kassem, "Strength Prediction of Corbels Using Strut-and-Tie Model Analysis," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 9, no. 2, pp. 255–266, 2015.
- [2] J. G. MacGregor and J. K. Wight, "Reinforced concrete mechanics and design," 5th ed., Upper Saddle River, N.J Prentice Hall, 2009.
- [3] ACI 318-11, *Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary*. 2011.
- [4] M. M. S. Ridha, N. T. H. Al-sha, and M. M. Hasan, "Case Studies in Construction Materials Ultra-high performance steel fibers concrete corbels : Experimental investigation," vol. 7, no. June, pp. 180–190, 2017.
- [5] ปฐมภพ วงศ์ตาหล้า และ ฤทธิรงค์ สมมา, "การเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักของคานหูกึ่งคอนกรีตเสริมเหล็กและคานหูกึ่งรีแอนด์คิฟเพาเวอร์คอนกรีต," *ปริญา นินพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 2559.
- [6] อมร พิมาณมาศ, *การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีแบบจำลอง Strut-and-Tie*, 2nd ed. บริษัทซีวิลเอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์แอนด์ เทรนนิ่ง จำกัด, 2555.
- [7] WCJ, "Corbel failure," 2014. [Online]. Available: <https://civilmax.blogspot.com/2014/11/corbel-failure.html>.
- [8] Enjiner, "Corbel Design," 2013. [Online]. Available: <https://enjiner.wordpress.com/2013/06/15/corbel-design/>.
- [9] L. Justin, "B-region and D-region," 2016. [Online]. Available: <http://astruttie.road.co.kr/index.php/2016/03/17/b-region-and-d-region/>.

- [10] ACI 318-14, *Building code requirements for structural concrete and commentary*, vol. 11. 2014.
- [11] P. Richard and M. Cheyrezy, "Composition of reactive powder concretes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 7, pp. 1501–1511, 1995.
- [12] C. Dauriac, "Special concrete may give steel stiff competition," 1997. [Online]. Available: <https://www.djc.com/special/concrete97/10024304.htm>.
- [13] สุนันทา โสตาคำ และ รินทร์ณภัทร์ เทียมเทศแก้ว, "ผลกระทบของเส้นใยเหล็กและสารลดน้ำตอกำลังของ RPC," *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 2559.
- [14] ASTM C109/109M, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars ( Using 2-in . or [ 50-mm ] Cube Specimens ) 1," *Chem. Anal.*, no. C, pp. 1–9, 2010.
- [15] มอก. 24, "เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย," 2548, pp. 1–14.
- [16] SOFiSTiK-FEM-Software-Educational-Version. (2022). "Analysis programmes." SOFiSTiK AG, berschleissheim.
- [17] Dominique, C. and Stefan, M. Implementation of Ductal as a Material inside SOFiSTiK. [cited 2022 August, 1]; Available from: [https://sofistik-sonar.ams3.digitaloceanspaces.com/pub/infoline/SOFiSTiK-Seminar/2010/v04\\_ductal.pdf](https://sofistik-sonar.ams3.digitaloceanspaces.com/pub/infoline/SOFiSTiK-Seminar/2010/v04_ductal.pdf).





วิเคราะห์คานหูก้าง RPC ที่ระยะ  $a_v/d = 0.6$ 

## ขนาดหน้าตัดเสา

ความกว้าง (b)	0.15	m
ความยาว (t)	0.15	m
คุณสมบัติของวัสดุ		
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ( $f_c$ )	1,646.00	ksc
กำลังรับแรงดึงของเหล็ก ( $f_y$ )	4,305.00	ksc
$\phi =$	0.75	
คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก		
ร้อยโดยปริมาณของเส้นใยเหล็ก ( $r_f$ )	2.40	%
โมดูลัสความยืดหยุ่นของเส้นใยเหล็ก ( $E_s$ )	2,040,000.00	ksc
ความยาวของเส้นใยเหล็ก (l)	6.00	mm
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเส้นใยเหล็ก ( $d_f$ )	0.16	mm
อัตราส่วนแอสเพคของเส้นใยเหล็ก ( $l/d_f$ )	37.50	

## ขนาดของคานหูก้าง

ระยะช่วงแรงเฉือน ( $a_v$ )	0.12	m
ความกว้างของคานหูก้างเท่ากับความกว้างเสา (b)	0.15	m
ความยาวของคานถึงขอบเสา (L)	0.15	m
ความลึกของคานด้านติดเสา ( $h_1$ )	0.25	m
ระยะระหว่างของผิวบนคานถึง c.g. ของเหล็กเสริมหลัก ( $c_2$ )	0.05	m
ความลึกประสิทธิภาพ (d)	0.20	m
ความลึกของคานด้านปลายเสา ( $h_2$ )	0.13	m
อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ ( $a_v/d$ )	0.60	

## STEP 1 Find node dimension

$w_t = 2*(h_1-d)$	0.10	m
-------------------	------	---



$w_s = 0.8 \cdot w_t$	0.80	m
$jd = h - 0.5 \cdot w_t - 0.5 \cdot w_s$	0.16	m
Lb = length of load bearing block	0.10	m
Ls = length of support bearing block	0.07	m
$\theta = \tan^{-1}(jd / (a + L_s / 2))$	0.80	m
$w_{sb} = L_s \sin \theta + w_t \cos \theta$	0.112	m
$w_{st} = L_b \sin \theta + w_s \cos \theta$	0.13	m

#### STEP 2 Find shear force at nodal zone A

$\beta_s =$	0.8	
$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_s f_c$	1,119.28	kg
$V_{n,A1} = f_{ce} \cdot L_s \cdot b$	117,524.40	kg
$V_{n,A2} = f_{ce} \cdot w_b \cdot b \cdot \tan \theta$	173,307.87	kg
$V_{n,A3} = f_{ce} \cdot w_{sb} \cdot b \cdot \sin \theta$	144,530.91	kg

#### STEP 3 Find shear force at nodal zone B

$\beta_s =$	1.0	
$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_s f_c$	1,399.10	kg
$V_{n,B1} = f_{ce} \cdot L_b \cdot b$	209,865.00	kg
$V_{n,B2} = f_{ce} \cdot w_s \cdot b \cdot \tan \theta$	173,307.87	kg
$V_{n,B3} = f_{ce} \cdot w_{st} \cdot b \cdot \sin \theta$	192,166.56	kg

#### STEP 4 Find shear force at Strut AB ,BC bottle shaped

##### force at Strut AB

$\beta_s =$	0.75	
$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_s f_c$	1,049.33	ksc
$w_{eff} = \min(w_{st}; w_{sb})$	0.12	m
$V_{n,AB} = f_{ce} \cdot w_{eff} \cdot b \cdot \tan \theta$	129,980.90	kg

##### force at Strut C=BC

$\beta_s =$	1.0	
$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_s \cdot f'_c$	1,189.24	ksc
$V_{n,BC} = f_{ce} \cdot w_s \cdot b \cdot \tan \theta$	147.311.69	kg

#### STEP 5 Find shear force at Tie AD

เหล็ก DB 16 mm	3	เส้น
$A_s$	6.03	cm <sup>2</sup>
$F_{n,AD} = A_s f_y$	25,977.60	kg
$V_{n,AD} = F_{n,AD} \cdot \tan \theta$	26,815.59	kg

วิเคราะห์คานหูก้าง RPC ที่ระยะ  $a_v/d = 1.1$

#### ขนาดหน้าตัดเสา

ความกว้าง (b)	0.15	m
ความยาว (t)	0.15	m
คุณสมบัติของวัสดุ		
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ( $f'_c$ )	1,646.00	ksc
กำลังรับแรงดึงของเหล็ก ( $f_y$ )	4,305.00	ksc
$\phi =$	0.75	
คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก		
ร้อยละโดยปริมาตรของเส้นใยเหล็ก ( $r_f$ )	2.40	%
โมดูลัสความยืดหยุ่นของเส้นใยเหล็ก ( $E_s$ )	2,040,000.00	ksc
ความยาวของเส้นใยเหล็ก (l)	6.00	mm
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเส้นใยเหล็ก ( $d_f$ )	0.16	mm
อัตราส่วนแอสเพคของเส้นใยเหล็ก ( $l/d_f$ )	37.50	
ขนาดของคานหูก้าง		
ระยะช่วงแรงเฉือน ( $a_v$ )	0.22	m
ความกว้างของคานหูก้างเท่ากับความกว้างเสา (b)	0.15	m
ความยาวของคานถึงขอบเสา (L)	0.15	m

ความลึกของคานด้านติดเสา ( $h_1$ )	0.25	m
ระยะระหว่างของผิวบนคานถึง c.g. ของเหล็กเสริมหลัก ( $c_2$ )	0.05	m
ความลึกประสิทธิภาพ ( $d$ )	0.20	m
ความลึกของคานด้านปลายเสา ( $h_2$ )	0.13	m
อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ ( $a_v/d$ )	1.10	

#### STEP 1 Find node dimension

$w_t = 2*(h_1-d)$	0.10	m
$w_s = 0.8*w_t$	0.08	m
$jd = h-0.5*w_t-0.5*w_s$	0.16	m
$L_b = \text{length of load bearing block}$	0.10	m
$L_s = \text{length of support bearing block}$	0.07	m
$\theta = \tan^{-1}(jd/(a+L_s/2))$	0.80	m
$w_{sb} = L_s \sin \theta + w_t \cos \theta$	0.112	m
$w_{st} = L_b \sin \theta + w_s \cos \theta$	0.13	m

#### STEP 2 Find shear force at nodal zone A

$\beta_s =$	0.8	
$f_{ce} = 0.85*\beta_s f_c$	1,119.28	kg
$V_{n,A1} = f_{ce} * L_s * b$	117,524.40	kg
$V_{n,A2} = f_{ce} * w_b * b * \tan \theta$	105,344.00	kg
$V_{n,A3} = f_{ce} * w_{sb} * b * \sin \theta$	108,784.75	kg

#### STEP 3 Find shear force at nodal zone B

$\beta_s =$	1.0	
$f_{ce} = 0.85*\beta_s f_c$	1,399.10	kg
$V_{n,B1} = f_{ce} * L_b * b$	209,865.00	kg
$V_{n,B2} = f_{ce} * w_s * b * \tan \theta$	105.344.00	kg
$V_{n,B3} = f_{ce} * w_{st} * b * \sin \theta$	134,869.38	kg

#### STEP 4 Find shear force at Strut AB ,BC bottle shaped

## force at Strut AB

$\beta_s =$	0.75	
$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_s \cdot f'_c$	1,049.33	ksc
$w_{eff} = \min(w_{st}; w_{sb})$	0.12	m
$V_{n,AB} = f_{ce} \cdot w_{eff} \cdot b \cdot \tan\theta$	101,152.04	kg

## force at Strut C=BC

$\beta_s =$	1.0	
$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_s \cdot f'_c$	1,189.24	ksc
$V_{n,BC} = f_{ce} \cdot w_s \cdot b \cdot \tan\theta$	79,008.00	kg

## STEP 5 Find shear force at Tie AD

เหล็ก DB 16 mm	3	เส้น
$A_s$	6.03	cm <sup>2</sup>
$F_{n,AD} = A_s f_y$	25,977.60	kg
$V_{n,AD} = F_{n,AD} \cdot \tan\theta$	16,299.67	kg

วิเคราะห์คานาหูก้าง RPC ที่ระยะ  $a_v/d = 1.1$

## ขนาดหน้าตัดเสา

ความกว้าง (b)	0.15	m
ความยาว (t)	0.15	m
คุณสมบัติของวัสดุ		
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ( $f'_c$ )	1,646.00	ksc
กำลังรับแรงดึงของเหล็ก ( $f_y$ )	4,305.00	ksc
$\phi =$	0.75	
คุณสมบัติของเส้นใยเหล็ก		
ร้อยละโดยปริมาตรของเส้นใยเหล็ก ( $r_f$ )	2.40	%

โมดูลัสความยืดหยุ่นของเส้นใยเหล็ก ( $E_s$ )	2,040,000.00	ksc
ความยาวของเส้นใยเหล็ก ( $l$ )	6.00	mm
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเส้นใยเหล็ก ( $d_f$ )	0.16	mm
อัตราส่วนแอสเพคของเส้นใยเหล็ก ( $l/d_f$ )	37.50	

#### ขนาดของคานหูก้าง

ระยะช่วงแรงเฉือน ( $a_v$ )	0.32	m
ความกว้างของคานหูก้างเท่ากับความกว้างเสา ( $b$ )	0.15	m
ความยาวของคานถึงขอบเสา ( $L$ )	0.35	m
ความลึกของคานด้านติดเสา ( $h_1$ )	0.25	m
ระยะระหว่างของผิวบนคานถึง c.g. ของเหล็กเสริมหลัก ( $c_2$ )	0.05	m
ความลึกประสิทธิภาพ ( $d$ )	0.20	m
ความลึกของคานด้านปลายเสา ( $h_2$ )	0.125	m
อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ ( $a_v/d$ )	1.60	

#### STEP 1 Find node dimension

$w_t = 2*(h_1-d)$	0.10	m
$w_s = 0.8*w_t$	0.08	m
$jd = h-0.5*w_t-0.5*w_s$	0.16	m
$L_b = \text{length of load bearing block}$	0.10	m
$L_s = \text{length of support bearing block}$	0.07	m
$\theta = \tan^{-1} (jd/(a+L_s/2))$	0.42	m
$w_{sb} = L_s \sin \theta + w_t \cos \theta$	0.112	m
$w_{st} = L_b \sin \theta + w_s \cos \theta$	0.11	m

#### STEP 2 Find shear force at nodal zone A

$\beta_s =$	0.8	
$f_{ce} = 0.85*\beta_s f'_c$	1,119.28	kg
$V_{n,A1} = f_{ce} * L_s * b$	117,524.40	kg
$V_{n,A2} = f_{ce} * w_b * b * \tan \theta$	75,669.63	kg
$V_{n,A3} = f_{ce} * w_{sb} * b * \sin \theta$	82,736.29	kg

**STEP 3 Find shear force at nodal zone B**

$\beta_s =$	1.0	
$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_s f'_c$	1,399.10	kg
$V_{n,B1} = f_{ce} \cdot L_b \cdot b$	209,865.00	kg
$V_{n,B2} = f_{ce} \cdot w_s \cdot b \cdot \tan \theta$	75,669.63	kg
$V_{n,B3} = f_{ce} \cdot w_{st} \cdot b \cdot \sin \theta$	98,326.86	kg

**STEP 4 Find shear force at Strut AB ,BC bottle shaped****force at Strut AB**

$\beta_s =$	0.75	
$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_s f'_c$	1,049.33	ksc
$w_{eff} = \min(w_{st}; w_{sb})$	0.11	m
$V_{n,AB} = f_{ce} \cdot w_{eff} \cdot b \cdot \tan \theta$	73,745.14	kg

**force at Strut C=BC**

$\beta_s =$	1.0	
$f_{ce} = 0.85 \cdot \beta_s f'_c$	1,399.10	ksc
$V_{n,BC} = f_{ce} \cdot w_s \cdot b \cdot \tan \theta$	75,669.63	kg

**STEP 5 Find shear force at Tie AD**

เหล็ก DB 16 mm	3	เส้น
$A_s$	6.03	cm <sup>2</sup>
$F_{n,AD} = A_s f_y$	25,977.60	kg
$V_{n,AD} = F_{n,AD} \cdot \tan \theta$	11,708.21	kg

### ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

ผลการทดสอบกำลังต้านแรงอัดของ RPC จะใช้ตามมาตรฐานการทดสอบมอร์ต้า ASTM C109/C109M [14] โดยใช้แบบหล่อขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความเร็วในการกดก้อนตัวอย่างอยู่ระหว่าง 900-1800 นิวตัน/วินาที และ การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็ก จะใช้ตามมาตรฐาน มอก. 24-2548 สำหรับเหล็กข้ออ้อย [16]

ตารางแสดงผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

การทดสอบ	ตัวอย่างทดสอบ	ผลทดสอบ	ค่าเฉลี่ย	หมายเหตุ
การทดสอบกำลังต้านแรงอัดที่อายุ 28 วัน	1	1,690.79	1,646.30	
	2	1,664.48		
	3	1,583.63		
การทดสอบกำลังต้านแรงอัด ณ วันที่ทดสอบ	1	1,437.33	1,757.84	ใช้ผลทดสอบ 2 ตัวอย่างในการคิดค่าเฉลี่ย
	2	1,746.61		
	3	1,769.07		
กำลังรับแรงดึงสูงสุดของเหล็ก	1	5,448.90	5,600.60	
	2	5,485.80		
	3	5,867.10		
กำลังรับแรงดึงของเหล็ก ณ จุดคราก	1	4,261.95	4,305.00	ใช้ผลทดสอบ 2 ตัวอย่างในการคิดค่าเฉลี่ย
	2	4,348.05		
	3	3,868.35		

พหุบัณฑิต ชีวะ

ภาพประกอบแสดงลักษณะการวิบัติของคานหูก้าง



คานหูก้าง CB<sub>0.6</sub>



คานหูก้าง CB<sub>1.1</sub>



คานหูก้าง CB<sub>1.6</sub>



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ปฐมภพ วงศ์ตาหล้า
วันเกิด	วันที่ 7 เมษายน พ.ศ. 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลนครพนม อำเภอ เมือง จังหวัดนครพนม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	ท่าอากาศยานบุรีรัมย์ บ้านเลขที่ 143 หมู่ 12 ตำบล ร่อนทาง อำเภอสตึก จังหวัดบุรีรัมย์ 31150
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	วิศวกรรมโยธา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ท่าอากาศยานบุรีรัมย์ บ้านเลขที่ 143 หมู่ 12 ตำบล ร่อนทาง อำเภอสตึก จังหวัดบุรีรัมย์ 31150
ประวัติการศึกษา	2556 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
	2556 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	-
ผลงานวิจัย	-

พหุจน์ ปณฺ ทิโต ชีเว