วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
Engineering Journal of Research and Development
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage
ปีที่ 30 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2562
Volume 30 Issue 1 January-March 2019
Received 29 March 2018
Revised 10 May 2018
Accepted 19 May 2018
Physical Sciences

# การวิบัติของคานหูช้างรีแอ็คทีฟเพาเดอร์คอนกรีตไม่เสริมเหล็กปลอก

# FAILURE OF REACTIVE POWDER CONCRETE CORBELS WITHOUT STIRRUPS

สุรศักดิ์ งามสนิท[1], นันทวัฒน์ ขมหวาน[2] และ กริสน์ ชัยมูล[3*]
[1] นิสิตระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
[3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ หน่วยวิจัยทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150 *E-mail: k.chaimoon@msu.ac.th

**บทคัดย่อ**

*คานหูช้างเป็นองค์อาคารที่พบเห็นทั่วไปและนิยมใช้ในงานก่อสร้างโดยเฉพาะโครงสร้างสำเร็จรูป รีแอ็คทีฟเพาว์เดอร์คอนกรีตเป็นคอนกรีตกำลังสูงพิเศษใหม่ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติทางกลและความคงทนที่สูงมากและยังไม่มีมาตรฐานในการออกแบบ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของคานหูช้างรีแอ็คทีฟเพาว์เดอร์คอนกรีตที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก ด้วยการทดสอบภายใต้แรงกระทำที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ โดยมีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ($a_v/d$) เท่ากับ 1.0 จากผลการศึกษาพบว่า คานหูช้างที่ศึกษาสามารถรับน้ำหนักได้โดยไม่เกิดการวิบัติแบบฉับพลันเนื่องจากการไม่เสริมเหล็กปลอก นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้รายงานลักษณะการวิบัติ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธี strut-and-tie model*

**คำสำคัญ**: คานหูช้าง, รีแอ็คทีฟเพาว์เดอร์คอนกรีต, strut-and-tie model, เหล็กปลอก

**ABSTRACT**

*Corbel is a structural member which is generally used in building construction especially in precast systems. Reactive powder concrete (RPC) is a new type of ultra-high strength concrete having high mechanical properties and durability and no design standard. This research aims to study the behavior of RPC corbels without stirrups under increasing vertical loading until failure. The shear span-to-depth ratio ($a_v/d$) of the corbels was 1.0. From the test results, it was found that the load carrying capacity of the RPC corbels exhibit ductile behavior. No sudden failure occurred even though the corbels had no stirrups. In addition, the failure characteristics of the corbels and the analysis of the test results using strut-and-tie model are also reported in this paper.*

**KEYWORDS**: corbel, reactive powder concrete, strut-and-tie model, stirrup

Surasak Ngamsanit[1], Nantawat Khomwan[2] and Krit Chaimoon[3*]
[1]Master's Degree Student, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus
[3] Assistant Professor, Structural Engineering Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University
Kantarawichai District, Maha Sarakham 44150

## 1. บทนำ

คานหูช้าง (corbel) นิยามตามมาตรฐาน ACI 318-14 [1] ว่าเป็นคานยื่นช่วงสั้นชนิดหนึ่งที่มีพฤติกรรมคล้ายกับคานลึก (deep beam) หรือโครงถักอย่างง่าย (simple truss) มากกว่าที่จะเป็นองค์อาคารรับแรงดัด (flexural member) ที่ออกแบบให้รับแรงเฉือนทั่วไป

โดยทั่วไปคานหูช้างมักจะก่อสร้างเป็นคานยื่นจากเสาเพื่อใช้ในการรับคานคอนกรีตหล่อสำเร็จหรือคานเหล็ก รูปแบบการวิบัติของคานหูช้างมี 4 ลักษณะใหญ่ๆ คือ (1) การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนตามแนวผิวหน้าระหว่างเสากับคานหูช้าง (2) การวิบัติเนื่องจากการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง (3) การวิบัติเนื่องจากการอัดแตกหรือการดึงแยกของคอนกรีตบริเวณรับแรงอัด และ (4) การวิบัติเนื่องจากการแบกทานหรือแรงเฉือนภายใต้แผ่นเหล็กรับน้ำหนัก [1]

การออกแบบคานหูช้างตามมาตรฐาน ACI 318-14 [1] มี 2 วิธี โดยวิธีที่หนึ่งใช้หลักการที่เรียกว่า “shear-friction” [2] สำหรับคานหูช้างมีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (shear span-to-depth ratio, $a_v/d$) ไม่มากกว่า 1.0 และวิธีที่สองใช้แบบจำลองที่เรียกว่า “strut-and-tie model” สำหรับคานหูช้างที่มี $a_v/d$ ใดๆ ทั้งนี้ทั้งสองวิธีระบุให้เสริมเหล็กปลอก (stirrup) ขนานกับเหล็กรับแรงดึงหลัก (primary tension reinforcement) โดยในวิธี shear-friction อธิบายว่าเพื่อป้องกันการวิบัติด้วยแรงดึงในแนวทแยงของคานหูช้าง และในวิธี strut-and-tie model อธิบายว่าเพื่อต้านแรงดึงในแนวขวางที่เกิดจากการกระจายแรงอัดในท่อนรับแรงอัดทรงขวด (bottle-shaped strut) และในมาตรฐานระบุกำลังอัดของคอนกรีตไว้ไม่เกิน 6,000 ปอนด์ต่อตร.นิ้ว (psi) หรือประมาณ 422 กก.ต่อตร.ซม. (ksc)

รีแอ็คทีฟเพาเดอร์คอนกรีต (reactive powder concrete, RPC) เป็นคอนกรีตกำลังสูงพิเศษ (ultra-high strength concrete) ใหม่ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติทางกลและความคงทนที่สูงมาก [3, 4] ตามทฤษฎีแล้ว RPC จะมีความต้านแรงอัดสูงสุด (compressive strength) ระหว่าง 2,000-8,000 กก.ต่อตร.ซม. [5] การที่ RPC มีความต้านแรงอัดสูงได้เป็นผลมาจากหลักการที่สำคัญคือการไม่ใส่มวลรวมหยาบหรือหินในส่วนผสม อันเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความต้านแรงอัดของคอนกรีตเนื่องจากการวิบัติของคอนกรีตมักจะเกิดจากรอยร้าวระหว่างหินกับมอร์ต้า ดังนั้น RPC จึงเป็นเพียงมอร์ต้าไม่ใช่คอนกรีต แต่ใช้งานแทนคอนกรีตจึงยังคงใช้คำว่าคอนกรีต และมีความแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเส้นใย (steel fiber reinforced concrete, SFRC) โดยเฉพาะความต้านแรงอัดที่สูงกว่ามากและยังไม่มีมาตรฐานในการออกแบบ สำหรับการออกแบบ SFRC มีคำแนะนำในมาตรฐาน ACI 544.4R-88 [6] แต่ไม่ใช่สำหรับองค์อาคารที่มีพฤติกรรมเหมือนคานหูช้าง Khalifa [7] เสนอแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์คานหูช้าง SFRC บนหลักการของ shear-friction โดยในการประมาณ shear-friction strength ประยุกต์ใช้หลักการ strut-and-tie model ทั้ง SFRC และ RPC มีผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แทนเหล็กปลอกได้ สำหรับ RPC นั้นมีการศึกษาการรับน้ำหนักของคานสะพานอัดแรง RPC ที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก พบว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยเหล็กทำให้คานมีความสามารถในการรับน้ำหนักมากขึ้น [8]

ในปัจจุบันการประยุกต์ใช้ RPC ยังมีจำนวนจำกัด บทความนี้รายงานผลการทดสอบการรับน้ำหนักของคานหูช้าง RPC ที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก พร้อมทั้งลักษณะการวิบัติของคานหูช้าง และการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธี strut-and-tie model

## 2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

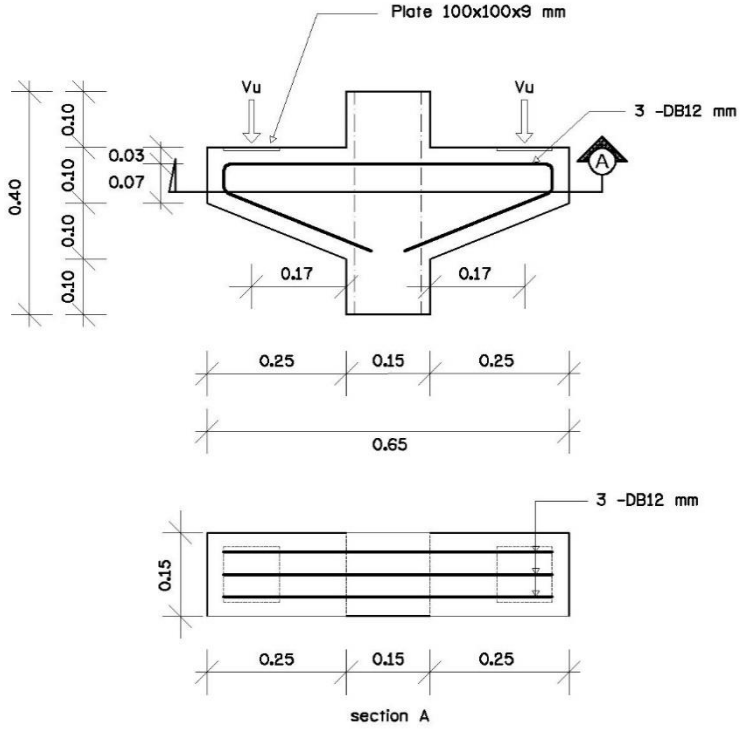
คานหูช้าง RPC ที่ศึกษามีขนาดและการเสริมเหล็กดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นคานหูช้างเชิงคู่ (double corbel) ยื่นจากขอบเสาข้างละ 0.25 ม. มีความลึกด้านติดเสา 0.20 ม. และความลึกด้านปลายยื่น 0.10 ม. โดยเสามีหน้าตัด 150 มม. × 150 มม. เสริมเหล็กเฉพาะเหล็กเสริมหลักด้วยเหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. จำนวน 3 เส้น มีความลึกประสิทธิผล (d) 0.17 ม. และใช้แผ่นเหล็กแบกทาน (bearing plate) ขนาด 100 มม. × 100 มม. × 9 มม. โดยความต้านแรงดึงที่จุดคราก (yield strength) ของเหล็กเสริมหลักทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 244 เล่ม 4 [9]

อัตราส่วนผสมของ RPC ที่ใช้แสดงในตารางที่ 1 ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายแม่น้ำคัดขนาด (ขนาดระหว่าง 0.15-0.60 มม.) ซิลิกาฟูมควบแน่น (densified silica fume) สารลดน้ำยิ่งยวดประเภทโพลีคาร์บอกซิเลต (polycarboxylate) น้ำประปา และเส้นใยเหล็ก (ความยาวประมาณ 13 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.19 มม.) โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัสดุคือ ทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.1 ซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.25 สารลดน้ำยิ่งยวดต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.035 น้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 และเส้นใยเหล็กต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.20 การทดสอบคุณสมบัติของ RPC ประกอบด้วยการทดสอบการไหล (flow test) ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [10] และการทดสอบความต้านแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/ C109M [11]

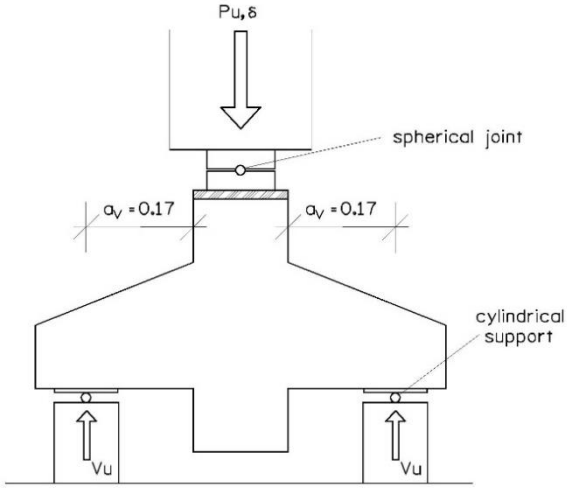
ในการทดสอบใช้คานหูช้าง RPC ที่มีส่วนผสมเดียวกันจำนวน 2 ตัวอย่าง หล่อแล้วบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงวันทำการทดสอบ ทั้งนี้ความต้านแรงอัดของ RPC ทดสอบวันเดียวกันกับการทดสอบคานหูช้างด้วยตัวอย่างขนาด 50 มม. × 50 มม. × 50 มม. ในการทดสอบคานหูช้างใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ขนาด 300 ตัน การติดตั้งคานหูช้างแสดงดังรูปที่ 2 คานหูช้างวางคว่ำลงและวางบนจุดรองรับ 2 จุดที่ระยะ 0.17 ม. จากขอบเสา เพื่อให้แรงปฏิกิริยากระทำต่อคานหูช้างและมีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ($a_v/d$) เท่ากับ 1.0 การให้แรงกระทำ $P_u$ ให้ที่ปลายเสาจุดเดียวดังรูป ด้วยอัตราคงที่ 960 กก.ต่อวินาที จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ

**ตารางที่ 1** อัตราส่วนผสมของ RPC

| วัสดุ | อัตราส่วนโดยน้ำหนัก | หมายเหตุ |
|---|---|---|
| ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 | 1.0 | |
| ทรายแม่น้ำ | 1.1 | ขนาดระหว่าง 0.15-0.60 มม.สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง |
| ซิลิกาฟูมควบแน่น | 0.25 | |
| สารลดน้ำยิ่งยวด | 0.035 | ประเภทโพลีคาร์บอกซิเลต |
| น้ำ | 0.23 | ไม่รวมน้ำในสารลดน้ำยิ่งยวดและในทรายสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง |
| เส้นใยเหล็ก | 0.20 | ความยาวประมาณ 13 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.19 มม. |




**รูปที่ 1** ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็ก

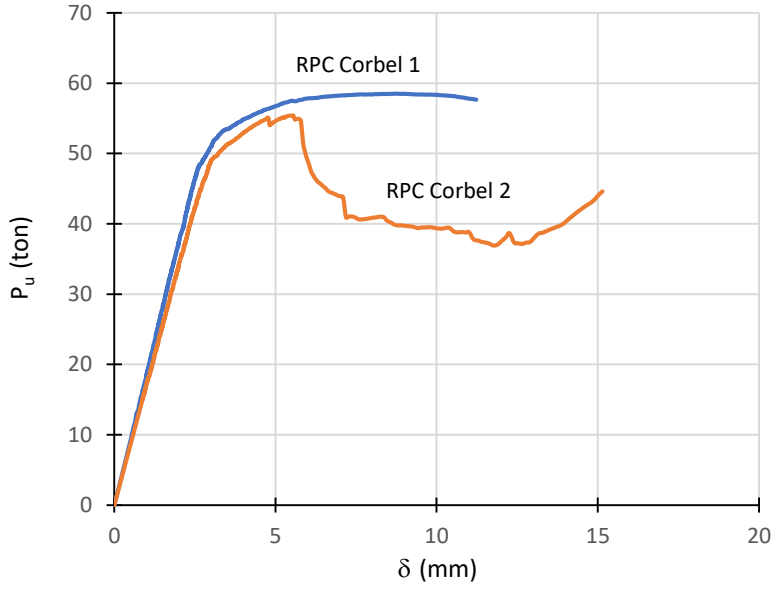



**รูปที่ 2** การติดตั้งตัวอย่างในการทดสอบ

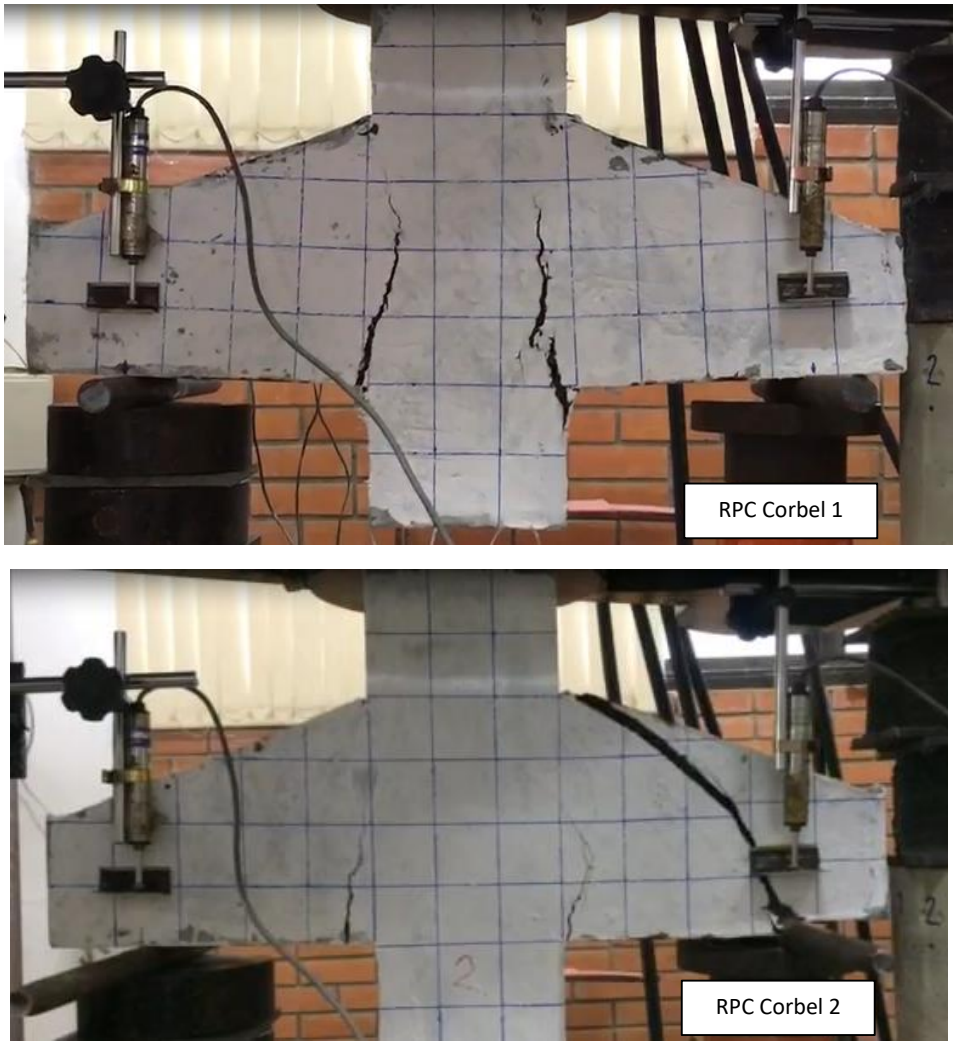
### 3. ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบ RPC และเหล็กเสริม พบว่า RPC มีค่าการไหลประมาณร้อยละ 116 และมีความต้านแรงอัดที่อายุ 28 วัน โดยเฉลี่ย 1,480 กก.ต่อตร.ซม. ส่วนเหล็กเสริมมีความต้านแรงดึงที่จุดครากประมาณ 5,500 กก.ต่อตร.ซม.

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ $P_u$ กับระยะการแอ่นตัว $\delta$ ที่ตำแหน่งแรงกระทำจากผลการทดสอบคานหูช้าง ระยะการแอ่นตัวดังกล่าวเทียบเท่ากับระยะการแอ่นตัวโดยเฉลี่ยของคานหูช้างทั้งสองข้าง และรูปที่ 4 แสดงลักษณะการแตกร้าวของคานหูช้างภายหลังการทดสอบ จากรูปพบว่าคานหูช้างตัวอย่างที่ 1 สามารถรับน้ำหนักสูงสุดได้ประมาณ 58.5 ตัน และสามารถรับน้ำหนักได้ต่อเนื่องจนกระทั่งวิบัติบ่งบอกถึงการมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบบเหนียว (ductile behavior) อันเป็นพฤติกรรมทั่วไปของคอนกรีตเสริมเส้นใยที่เส้นใยจะช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับคอนกรีต โดยมีลักษณะการแตกร้าวคือ แตกร้าวที่บริเวณขอบเสาทั้งสองด้าน ณ ตำแหน่งที่เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดอันเป็นลักษณะการวิบัติเนื่องจากการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง และรอยแตกร้าวมีลักษณะที่ค่อนข้างสมมาตร ในขณะที่คานหูช้างตัวอย่างที่ 2 รับน้ำหนักสูงสุดได้ประมาณ 55.4 ตัน แต่หลังจากนั้นรับน้ำหนักได้น้อยลงและยังคงมีพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบบเหนียว โดยมีลักษณะการวิบัติอันเกิดจากการแบกทานหรือแรงเฉือนภายใต้แผ่นเหล็กรับน้ำหนักคือ เกิดการเฉือนขาดในแนวทแยงใต้แผ่นเหล็กรับน้ำหนักของคานหูช้างด้านหนึ่งเนื่องจากเกิดจากการยุบตัวของแผ่นเหล็กรับน้ำหนักซึ่งน่าจะเกิดจากการมีโพรงใต้แผ่นเหล็ก จึงอาจเป็นสาเหตุให้ความสามารถในการรับน้ำหนักลดลงหลังน้ำหนักสูงสุด ทั้งนี้ที่สำคัญคือ คานหูช้างทั้งสองไม่เกิดการวิบัติเนื่องจากการอัดแตกหรือการดึงแยกของคอนกรีตบริเวณรับแรงอัดแม้จะไม่มีการเสริมเหล็กปลอกในแนวนอนเพื่อป้องกันการวิบัติดังกล่าว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า RPC สามารถทดแทนการเสริมเหล็กปลอกในคานหูช้างได้




**รูปที่ 3** ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ $P_u$ กับระยะการแอ่นตัว $\delta$



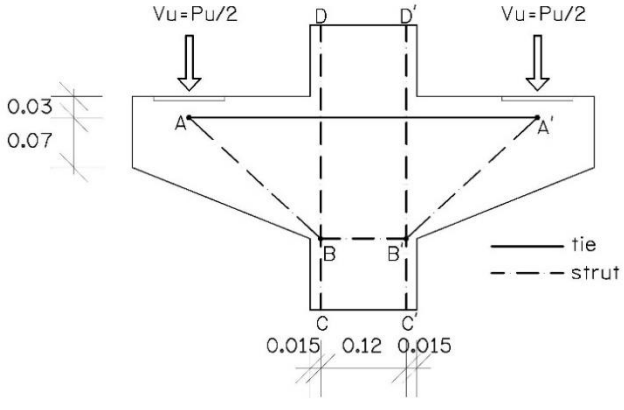

**รูปที่ 4** ลักษณะการแตกร้าวของคานหูช้างภายหลังการทดสอบ

**4. การวิเคราะห์ผลด้วยวิธี strut-and-tie model**

เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมการรับน้ำหนักมากขึ้น ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบของคานหูช้างตัวอย่างที่ 1 ด้วยวิธี strut-and-tie model โดยใช้คุณสมบัติวัสดุที่ได้จากผลการทดสอบ (ความต้านแรงอัดสูงสุดของ RPC เท่ากับ 1,480 กก.ต่อตร.ซม. และความต้านแรงดึงที่จุดดรากของเหล็กเสริมเท่ากับ 5,500 กก.ต่อตร.ซม.) และใช้แบบจำลองของ strut-and-tie อย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 5 ทั้งนี้ใช้ค่าตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor, $\phi$) เท่ากับ 0.75 ทุกกรณีตามมาตรฐาน ACI 318-14 [1] โดยในการวิเคราะห์นั้นวิเคราะห์ที่แรงกระทำเท่ากับ 40.95 ตัน และ 58.5 ตัน (ประมาณ 0.7 และ 1.0 เท่าของแรงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ) เพื่อศึกษาในสภาวะก่อนเกิดการแตกร้าวและที่แรงสูงสุดตามลำดับ ค่าที่สำคัญจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี strut-and-tie model แสดงในตารางที่ 2

จากผลการวิเคราะห์พบว่าที่แรงกระทำเท่ากับ 40.95 ตัน ท่อนแรงอัด (strut) AB มีแรงเกิดขึ้น ($F_{u,AB}$) เท่ากับ 30,260 กก. แต่มีความสามารถในการรับแรงอัด ($F_{ns,AB}$) เพียง 28,728 กก. ดังนั้นท่อนแรงอัด AB จะต้องเกิดการแตกร้าวแล้ว แต่จากผลการทดสอบยังไม่มี

การแตกร้าวใดๆ เกิดขึ้น บ่งบอกอย่างชัดเจนว่า RPC ช่วยรับแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในท่อนแรงดึง (tie) AA′ ยังพบว่ามีแรงเกิดขึ้นเท่ากับ 22,282 กก. และต้องการเหล็กเสริมเพื่อรับแรงดึงดังกล่าวเท่ากับ 5.40 ตร.ซม. แต่คานหูช้างมีการเสริมเหล็กเพียง 3.39 ตร.ซม. เท่านั้น น้อยกว่าที่ต้องการถึงร้อยละ 37.2 ซึ่งจะต้องเกิดการแตกร้าวแล้ว ก็บ่งบอกอย่างชัดเจนว่า RPC ต้องมีส่วนช่วยเหล็กเสริมในการรับแรงดึงที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และควรนำมาคิดในการออกแบบด้วย สอดคล้องกับแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์คานหูช้าง SFRC ที่เสนอโดย Khalifa [7] แม้ตามมาตรฐาน ACI 318-14 [1] คอนกรีตจะไม่นำมาคิดในการช่วยรับแรงดึง




**รูปที่ 5** แบบจำลอง strut-and-tie ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

**ตารางที่ 2** ผลการวิเคราะห์คานหูช้างด้วยแบบจำลอง strut-and-tie

| แรงกระทำ / ผลการวิเคราะห์ | $P_u$ = 40.95 ตัน | $P_u$ = 58.5 ตัน |
|---|---|---|
| <u>strut AB</u> | | |
| $F_{u,AB}$ | 30,260 กก. | 43,229 กก. |
| $F_{ns,AB}$ | 28,728 กก. | |
| <u>tie AA′</u> | | |
| $F_{u,AA'}$ | 22,282 กก. | 31,831 กก. |
| $A_{st}$ ที่ต้องการ | 5.40 ตร.ซม. | 7.72 ตร.ซม. |
| $A_{st}$ ที่ใช้ | 3.39 ตร.ซม. | |

## 5. สรุปผล

บทความนี้ศึกษาการรับน้ำหนักของคานหูช้างเชิงคู่ RPC ที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก ด้วยการทดสอบภายใต้แรงกระทำที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติ โดยมีอัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ($a_v/d$) เท่ากับ 1.0 และวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธี strut-and-tie model ตามมาตรฐาน ACI 318-14 [1] จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า คานหูช้าง RPC ที่ศึกษามีพฤติกรรมการรับน้ำหนักแบบเหนียว (ductile behavior) โดยสามารถรับน้ำหนักได้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งวิบัติ และลักษณะการวิบัติมีแนวโน้มเป็นการวิบัติเนื่องจากการคราก ของเหล็กเสริมรับแรงดึง ทั้งนี้ไม่เกิดการวิบัติเนื่องจากการอัดแตกหรือการดึงแยกของคอนกรีตบริเวณรับแรงอัดแม้จะไม่มีการเสริมเหล็กปลอก ดังนั้น RPC สามารถทดแทนการเสริมเหล็กปลอกในคานหูช้างได้

(2) ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี strut-and-tie model ที่แรงกระทำ 0.7 เท่าของแรงสูงสุดที่ได้จากการทดสอบซึ่งเป็นสภาวะก่อนการแตกร้าวบ่งบอกว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธี strut-and-เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานหูช้าง RPC มากขึ้น ควรมีการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ($a_v/d$) อื่นๆ ด้วย และควรศึกษาอิทธิพลของเส้นใย เช่น ปริมาณเส้นใย ชนิดของเส้นใย ขนาดและความยาวของเส้นใย เป็นต้น tie model ตามมาตรฐาน ACI 318-14 [1] ประเมินความสามารถการรับน้ำหนักของคานหูช้าง RPC ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง (underestimation) โดยควรปรับการประมาณกำลังของท่อนรับแรงอัด (strength of strut) และท่อนรับแรงดึง (strength of tie) ซึ่งควรคิด RPC ให้ช่วยในการรับแรงดึงด้วย

**กิตติกรรมประกาศ**

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

**เอกสารอ้างอิง**

[1] ACI Committee 318. (2014). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary." American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

[2] ACI Committee 318. (2011). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary." American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

[3] Cheyrezy Marcel, Vincent Maret,and Laurent Frouin. (1995). "Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete) " Cement and Concrete Research, 25(7), 1491-1500.

[4] Chatchawan Phatthanayothakul, Niphan Yaiaroon, Nida Chaimoon,and Krit Chaimoon. (2017). "Compressive Strength of Densified-Silica Fume-Based Reactive Powder Concrete without Steel Fiber." SWU Engineering Journal, 12(1), 106-113. (in Thai).

[5] Richard Pierre,and Cheyrezy Marcel. (1995). "Composition of reactive powder concretes." Cement and Concrete Research, 25(7), 1501-1511.

[6] ACI Committee 544. (1988 ). "Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4 R-88)." American Concrete Institute.

[7] Khalifa E.S. (2012). "Macro-mechanical strut and tie model for analysis of fibrous high-strength concrete corbels." Ain Shams Engineering Journal, 3(4), 359-365.

[8] Jackie Yen Lei Voo. (2006). "Shear strength of 160 MPa steel fibre reinforced reactive powder concrete bridge girders without stirrups." Journal - The Institution of Engineers, Malaysia, 67(2), 41-46.

[9] Thai Industrial Standards Institute. TIS 244 Part 4: 1982. Standard Test Methods of Iron and Steel Part 4 - Tensile Testing of Steel (General). Bangkok: TIS, 1982. (in Thai).

[10] American Society for Testing and Materials. (2001). "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar (ASTM C1437-01)." ASTM International, Philadelphia, USA.

[11] American Society for Testing and Materials. (2002). "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (ASTM C109/ C109M-02)." ASTM International, Philadelphia, USA.