

พฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดกลม ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

Behaviors and Compressive Strength of Circular Concrete Specimens Preconfined with Steel Jackets

นันทิกา นามวิจิตร สิทธิชัย แสงอาทิตย์* จักษดา ชำรงวุฒิ ศาสน์ สุขประเสริฐ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Nantika Namvijitr Sittichai Seangatith* Jaksada Thumrongvut Sart Sukprasert

School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Muang, Nakhon Ratchasima 30000
Tel : 0-4422-4420 E-mail: sitichai@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบในการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลม โดยใช้ตัวอย่างจำนวน 90 ตัวอย่าง และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และสูง 300 มิลลิเมตร ตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็ก และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง จากการทดสอบพบว่า กำลังอัดสูงสุด และความเหนียวของตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบอ้างอิงซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรข้างต้น ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมการรับแรงแบบเชิงเส้นในช่วงแรกถึงประมาณ 50-70% ของกำลังรับแรงสูงสุด จากนั้นตัวอย่างทดสอบค่อยเข้าสู่พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นโดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงมากก่อนการวิบัติ โดยพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นถูกแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ strain hardening elastic perfectly plastic และ strain softening จากการทดสอบพบว่าความหนาปลอกเหล็กและหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ในการพัฒนา Tubed column คือความหนาปลอกเหล็ก 4.5 มิลลิเมตร และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ $0.05 f'_{co}$

คำหลัก แรงกดอัดในแนวแกน ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต หน่วยแรงโอบรัดก่อน เสาคอปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต ปลอกเหล็ก

Abstract

This paper presents the experimental results on the compressive behaviors and modes of failure of circular concrete specimens preconfined with steel jackets. A total of 90 specimens were tested in this study. The specimen's dimension were 150 mm in diameters and 300 mm in height. There are 3 main variables i.e. the ultimate compressive strength of concrete, the thickness of steel jacket and the preconfining pressure considered in this study. From the study, it was found that the ultimate compressive strength and ductility of the Tubed concrete specimens are increased significantly compared to the control specimens, depending on the ultimate compressive strength of the concrete, the wall thickness of the steel jacket and the preconfining pressure. Also, the Tubed concrete specimens have

a linear elastic behavior up to 50-70% of their maximum compressive strength. Then, the behavior of the concrete specimen is nonlinear with a very large deformation before failure. The nonlinear behaviors can be classified into 3 types: strain hardening, elastic-perfectly plastic and strain softening. For the result, it was found that thickness of steel jacket was 4.5 mm and the preconfining pressure was $0.05 f'_{co}$ were optimum for development of Tubed column.

Keywords: Axial compression, concrete specimen, preconfinement, tubed column, steel jacket

1. บทนำ

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tubed column) เป็นรูปแบบหนึ่งของเสาคอมโพสิตหรือเสาเชิงประกอบ (composite) ที่ได้จากการนำวัสดุมาใช้ในรูปแบบใหม่เพื่อก่อให้เกิดการใช้ประโยชน์สูงสุดจากวัสดุพื้นฐานได้แก่คอนกรีตและปลอกเหล็ก ในปัจจุบันเสาดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นทั้งในสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และ จีน ทั้งในการเสริมกำลังหรือการซ่อมแซมโครงสร้างเดิม โดยเสาดังกล่าวมีคุณสมบัติที่ดีขึ้นทั้ง ด้านความแข็งแรง กำลัง ความเหนียว และการดูดซับพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็กโครงสร้าง [1,2]

ในปัจจุบัน การออกแบบเสาประเภทนี้ทำได้ตามมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่น Manual of steel construction: Load and Resistance Factor Design (AISC/LRFD) [3] และมาตรฐานการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ. 2538 [4] โดยถูกจำแนกได้ 2 ประเภทได้แก่ 1) CFT column เสาประเภทนี้จะถูกออกแบบให้ท่อปลอกเหล็กรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยตรงร่วมกับคอนกรีต ซึ่งเสาดังกล่าวจะมีความสูงหลายชั้นต่อเนื่องกันหรือสูงตลอดความสูงของอาคาร 2) Tubed column ท่อปลอกเหล็กของเสาประเภทนี้จะไม่ถูกออกแบบรับหน่วยแรงในแนวแกน แต่จะถูกออกแบบให้ท่อเหล็กเป็นเหล็กเสริมเพื่อรองรับแรงกระทำในแนวขวาง

แนวคิดของเสา CFT ประเภทที่ 2 หรือ Tubed column ได้นำเสนอโดย Tomii [5] โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ปลอกเหล็กรองรับแรงกระทำทางขวางและโมเมนต์เนื่องจากแผ่นดินไหว โดยคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นวัสดุในการรับแรงกระทำโดยตรงและปลอกเหล็กจะไม่ได้รับแรงกระทำโดยตรงดังนั้นปลอกเหล็กจะทำหน้าที่ห่อหุ้มแกนคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ และช่วยเพิ่มความสามารถของกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนให้สูงขึ้นและทำให้ความเหนียวของเสาดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้แนวคิดนี้ยังมีการนำไปประยุกต์ในการซ่อมแซมและเสริมกำลังในแกโครงสร้างอีกด้วย สิทธิชัย และจักษดา [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Tubed column หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษาคือ กำลังอัดประลัย และ ความหนาของท่อเหล็กจากการศึกษาพบว่าเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยที่สูงขึ้นทำให้กำลังของ Tubed column มีแนวโน้มลดลงและเมื่อพิจารณาความหนาของปลอกเหล็กพบว่าความหนาปลอกเหล็ก 4.5 มิลลิเมตร (ผ่านข้อกำหนดของ ว.ส.ท. 1008-38) ให้กำลังรับแรงกดอัดของ Tubed column สูงเพิ่มขึ้นมากกว่าปลอกเหล็กขนาด 3.2 มิลลิเมตร (ปลอกเหล็กดังกล่าวไม่ผ่านข้อกำหนดของ ว.ส.ท.) พร้อมทั้งมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นใกล้เคียงกันและเมื่อเปรียบเทียบกับสมการการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ว.ส.ท. ไม่ควรนำกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กมาใช้เนื่องจากทำให้สมการการออกแบบดังกล่าวมีค่าสูงเกินกว่ากำลังของเสาที่ใช้ในการศึกษา (overestimate) ดังนั้นการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ว.ส.ท. ควรได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมในการออกแบบ Tubed column

จากการศึกษาถึงผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีต [7] พบว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างในรูปแบบ active confinement พบว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีหน่วยแรง ความเครียดและความแรงแ้งสูงเพิ่มขึ้นจากเดิม นอกจากนั้นได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการให้หน่วยแรงโอบรัดแบบ passive confinement โดยตัวอย่างทดสอบถูกโอบรัดด้วย continuous steel spiral พบว่าถ้าระยะห่างระหว่าง spiral มีค่าน้อยๆ จะทำให้หน่วยแรงในแนวแกนและค่าความเครียดมีค่าสูงขึ้นซึ่งจากการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างแบบ active confinement และ passive confinement มีผลการ

ทดสอบในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของการให้หน่วยแรงกระทำทางด้านข้างคอนกรีตจะมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเพิ่มขึ้น สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากก่อนการวิบัติและการวิบัติจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป และ Richart และคณะ [7] ได้นำเสนอสมการทำนายกำลังการกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างดังสมการ

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1 \quad (1)$$

เมื่อ f'_{cc} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อมีแรงดันรอบข้าง

f'_{co} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อไม่มีแรงดันรอบข้าง

f_1 คือ ความดันรอบ (confining pressure)

k_1 คือ confining effectiveness coefficient มีค่าเท่ากับ 4.1 สำหรับคอนกรีตกำลังปกติ และ 2.0 สำหรับคอนกรีตกำลังสูง

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า การศึกษาเกี่ยวกับ Tubed column นั้นยังมีไม่มากนัก ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการรับแรงกดอัดของเสาดังกล่าวให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้างให้แก่ตัวอย่างทดสอบแบบ active โดยตรงแก่ปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตโดยใช้ระบบการอัดแรงทางด้านข้าง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและกำลังการรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก เพื่อเป็นแนวทางในการเสริมกำลังอีกรูปแบบหนึ่งให้กับ Tubed column โดยตัวแปรที่สำคัญประกอบด้วยกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็ก และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง

2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

ปลอกเหล็กที่ใช้ในการศึกษานี้เป็น cold-formed steel carbon ที่ได้จากการพับแผ่นเหล็กให้มีหน้าตัดรูปครึ่งวงกลมและคอนกรีตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ ผลิตโดยบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (CPAC) การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุถูกกระทำตามมาตรฐานของ ASTM โดยการทดสอบคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 และการทดสอบเหล็กและ stainless steel ภายใต้แรงดึงตามมาตรฐาน

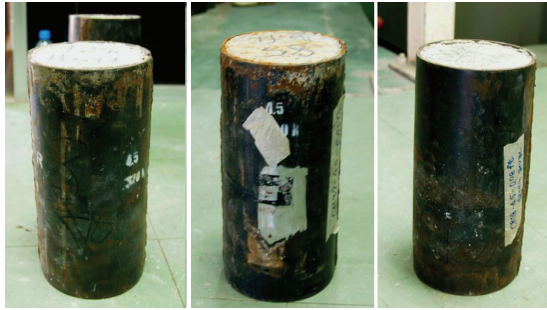
ASTM E8 จากตารางที่ 1 แสดงสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างทดสอบมีรูปร่างทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร โดยมีตัวแปรหลัก 3 ตัวแปร ได้แก่ กำลังรับแรงกดอัดประลัยของคอนกรีต (18 25 และ 32 MPa ที่อายุ 28 วัน) ความหนาของปลอกเหล็ก (3.2, 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ให้แก่ตัวอย่างทดสอบ ($0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$) ซึ่งสามารถจำแนกตัวอย่างทดสอบออกเป็น 4 กลุ่ม สำหรับกลุ่มที่ 1 เป็นตัวอย่างทดสอบอ้างอิง กลุ่มที่ 2 เป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กไม่มีแรงโอบรัดทางด้านข้าง กลุ่มที่ 3 เป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดทางด้านข้าง $0.05 f'_{co}$ และกลุ่มที่ 4 เป็นตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดทางด้านข้าง $0.08 f'_{co}$ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1

ชื่อของตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูป AB-C-D โดยที่อักษร A หมายถึงชนิดของตัวอย่างทดสอบ อักษร B หมายถึงกำลังอัดประลัยของคอนกรีต อักษร C หมายถึงความหนาของปลอกเหล็กที่ห่อหุ้มตัวอย่างทดสอบ และอักษร D หมายถึง หน่วยแรงโอบรัดก่อนยกตัวอย่างเช่น ตัวอย่างทดสอบ CS25-45-0.05 หมายถึง ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดกลมรูปทรงกระบอก ทำด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย $f'_{co} = 25$ MPa ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตร และถูกกระทำโดยหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างขนาด $0.05 f'_{co}$ ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างทดสอบถูกกระทำโดยหน่วยแรงโอบรัดก่อนโดยใช้อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2 เมื่อหน่วยแรง

มีค่าตามที่ต้องการแล้ว ปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบจะถูกเชื่อมติดกันโดยช่างเชื่อมไฟฟ้าที่มีความเชี่ยวชาญ



รูปที่ 2 ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2, 3 และ 4



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะหดตัว (LVDT) กับตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4 อุปกรณ์ Data acquisition system (DAQ)

รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) โดยแรงกดอัดในแนวแกนจะกระทำผ่าน bearing plate ซึ่งมีความหนา 50 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร กระทำโดยตรงสู่แกนคอนกรีต และตัวอย่างทดสอบจะถูก pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังอัดประลัยคอนกรีตและ unloading เพื่อลดแรงเสียดทาน

ระหว่างหัวกดและตัวอย่างทดสอบ หลังจากนั้น ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยแรงอัดในแนวแกนอย่างช้าๆ จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ โดยระยะการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบจะถูกวัดโดยใช้ linear variable differential transducers (LVDT) และข้อมูลต่างๆ จะถูกจัดเก็บแบบ real time ในช่วงทดสอบโดยใช้ data acquisition system (DAQ) ดังแสดงในรูปที่ 4

3. ผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ

ในการศึกษาได้จำกัดการแสดงผลการทดสอบที่ค่าระยะการหดตัว 20 มิลลิเมตร หรือเทียบเท่าค่าความเครียด 0.070 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าสูง และได้นิยามค่า f'_{max} เป็นค่าหน่วยแรงใช้งานสูงสุดที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ และจำกัดการทดสอบไว้ที่ระยะการหดตัวไม่เกิน 40 มิลลิเมตร

จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดดังรูปที่ 5-7 พบว่า พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะถูกแบ่งออกได้ 2 ช่วงคือ ช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรง และช่วงพฤติกรรมไร้เชิงเส้น โดยในช่วงแรกเมื่อพิจารณาตัวอย่างในกลุ่มที่ 1 และ 2 (ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง) พบว่า กราฟในช่วงนี้มีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยจะเป็นเส้นตรงถึงประมาณ 50-60% ของหน่วยแรงสูงสุด เนื่องจากเมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มรับแรงกระทำ แกนคอนกรีตจะเป็นวัสดุหลักในการรับแรงและจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างอันเนื่องมาจาก Poisson's ratio และเนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่ Poisson's ratio ต่ำกว่าเหล็ก ดังนั้นการเกิด confining effect ระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็กจะมีค่าน้อยมาก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3 และ 4 พบว่า พฤติกรรมในช่วงแรกของตัวอย่างทดสอบจะมีความชันสูงมากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 กลุ่มนี้มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างขนาด $0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$ ตามลำดับ ซึ่งจะก่อให้เกิดการโอบรัดแกนคอนกรีตทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 5-7 เมื่อ

พิจารณากำลังอัดประลัยคอนกรีตและความหนาปลอกเหล็กที่เท่ากัน พบว่าค่าความแกร่งหรือค่าความชันของตัวอย่างทดสอบจะมีแนวโน้มสูงเพิ่มขึ้นตามการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยที่เท่ากันและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่เท่ากัน ค่าความแกร่งของตัวอย่างทดสอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาปลอกเหล็กมีความหนาเพิ่มขึ้นโดยที่ความชันของตัวอย่างในกลุ่มที่ 4 มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 1 ตามลำดับ และตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4 นี้จะมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงมีค่าประมาณ 50-70% ของหน่วยแรงสูงสุด ซึ่งสูงกว่าในกรณีของกลุ่มที่ 1 และ 2 เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างแก่ตัวอย่างให้สูงขึ้นทำให้พฤติกรรมในช่วงเส้นตรงของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

หลังจากที่ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่าความชันของกราฟจะเริ่มลดลงเรื่อยๆ เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมไร้เชิงเส้น โดยแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวในอัตราที่เร็วขึ้น ทำให้เกิดการขยายตัวทางด้านข้างและแรงดันทางด้านข้างกระทำต่อนกตของปลอกเหล็กทำให้เกิดการรับแรงกระทำร่วมกันระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง โดยปลอกเหล็กจะทำหน้าที่ช่วยจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าว เป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้สูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนได้สูงขึ้นก่อนการวิบัติ จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบสามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบดังต่อไปนี้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5-7 และตารางที่ 2

แบบที่ 1 พฤติกรรมแบบ strain hardening เกิดขึ้นจากการที่ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำในแนวแกนได้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กความหนาสูง (6.0 มิลลิเมตร) เนื่องจากจากปลอกเหล็กมีความแกร่งมากเพียงพอ สามารถจำกัดการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตหลังจากรับแรงกระทำได้เป็นอย่างดี โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบ CS18-60-0

แบบที่ 2 พฤติกรรมแบบ elastic-perfectly plastic ตัวอย่างทดสอบประเภทนี้จะรับแรงกระทำได้สูงสุด จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะรับแรงกระทำคงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงค่าหนึ่ง โดยค่าความชันของกราฟเป็นศูนย์

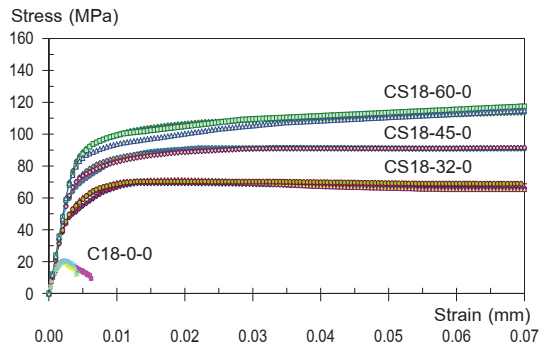
เนื่องจากผนังปลอกเหล็กมีความแกร่งต้านทานขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตได้เพียงพอ โดยส่วนใหญ่จะเกิดกับตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กำลังอัดประลัย โดยมีปลอกเหล็กขนาดความหนา 4.5 มิลลิเมตร และ 6.0 มิลลิเมตร (ปลอกเหล็กความหนาปานกลางและความหนาสูง) CS18-45-0, CS18-45-0.05, CS18-45-0.08, CS18-60-0.05, CS18-60-0.08, CS25-45-0 CS25-45-0.05 CS25-45-0.08, CS25-60-0, CS25-60-0.05, CS25-60-0.08, CS32-45-0, CS32-45-0.05, CS32-45-0.08, CS32-60-0, CS32-60-0.05 และ CS32-60-0.08

แบบที่ 3 พฤติกรรมแบบ strain softening โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 3.2 มิลลิเมตร (ปลอกเหล็กความหนาน้อย) ดังต่อไปนี้ CS18-32-0, CS18-32-0.05, CS18-32-0.08, CS25-32-0, CS25-32-0.05, CS25-32-0.08, CS32-32-0, CS32-32-0.05 และ CS32-32-0.08 เนื่องจากปลอกเหล็กมีความแกร่งไม่เพียงพอที่จะจำกัดการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต ดังนั้นหลังจากตัวอย่างทดสอบรับแรงกดอัดสูงสุด จึงไม่สามารถต้านทานแรงได้อีก และเกิดการโป่งออกทางด้านข้างที่สูงกว่าตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กความหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร โดยการโป่งออกทางด้านข้างเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางสูงของตัวอย่างทดสอบ ดังในรูปที่ 8-10

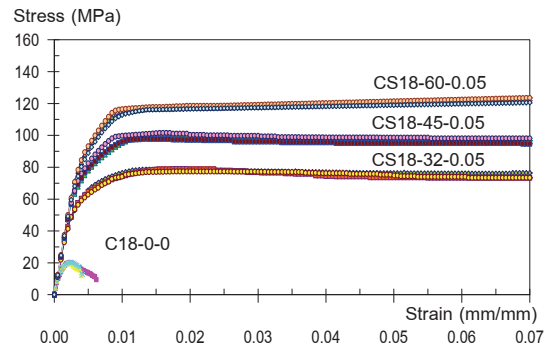
โดยสรุปพบว่า การให้แรงโอบรัดทางด้านข้างต่อตัวอย่างทดสอบไม่มีผลต่อพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น แต่ความหนาของปลอกเหล็กจะมีผลทำให้พฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้น โดยตัวอย่างทดสอบที่มีปลอกเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร จะมีพฤติกรรมแบบ strain hardening และ elastic-perfectly plastic ซึ่งเหมาะสมนำไปใช้งาน เพราะตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการรับแรงกระทำได้สูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนเกิดการวิบัติ

3.2 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

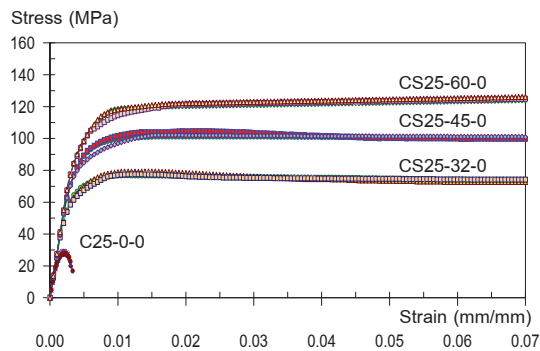
จากการทดสอบลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ ตัวอย่างทดสอบอ้างอิง (กลุ่มที่ 1) และตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและถูกให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง (กลุ่มที่ 2-4)



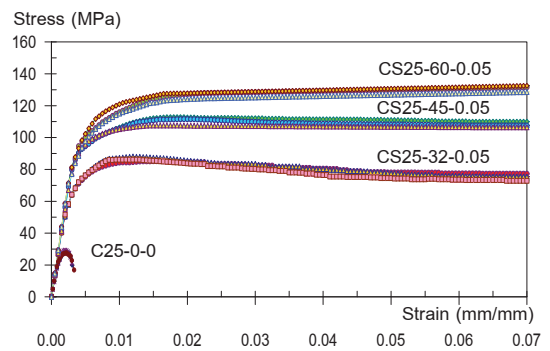
a) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa



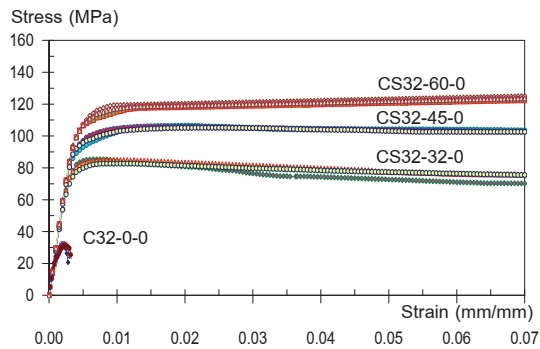
a) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa



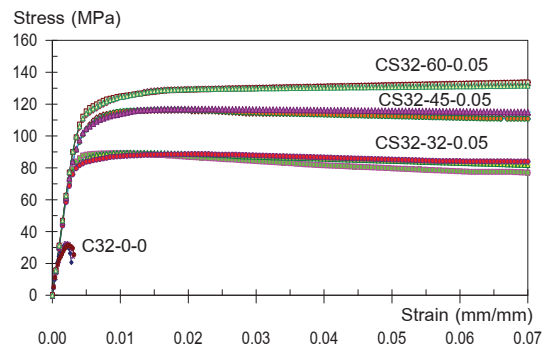
b) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa



b) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa



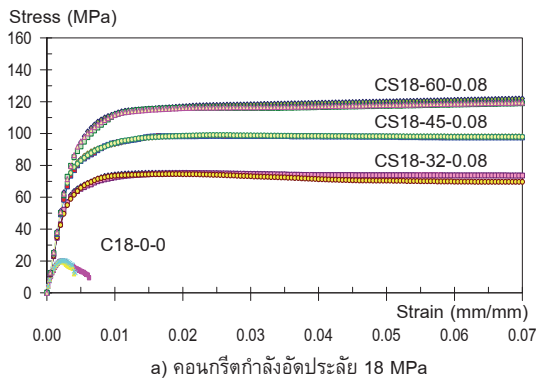
c) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa



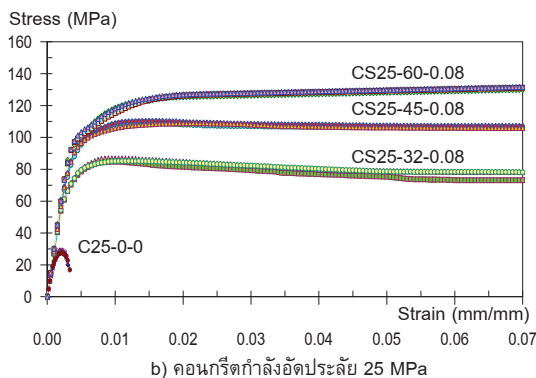
c) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของ
ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีแรงโอบรัดทางด้านข้าง
(ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2)

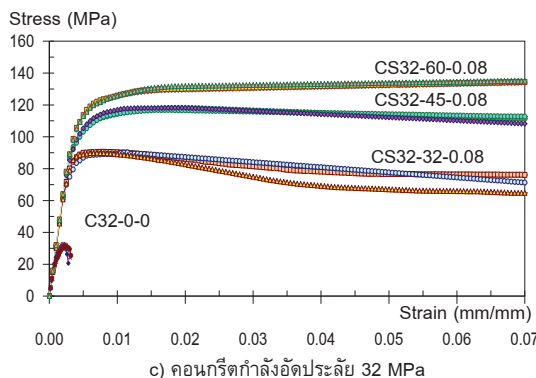
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของ
ตัวอย่างทดสอบ มีแรงโอบรัดทางด้านข้าง $0.05 f'_{co}$
(ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3)



รูปที่ 8 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1



รูปที่ 9 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2



รูปที่ 10 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของ
ตัวอย่างทดสอบ มีแรงโอบรัดทางด้านข้าง $0.08 f'_{co}$
(ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 4)

การวิบัติของตัวอย่างอ้างอิง(กลุ่มที่ 1) มีลักษณะคล้ายกับการวิบัติคอนกรีตกำลังอัดปกติทั่วไป ซึ่งเกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนและแรงกดอัดร่วมกัน โดยมีรอยแตกทำมุมประมาณ 50 องศากับแกนของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8

สำหรับการวิบัติของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 3 และ 4 มีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน โดยเกิดจากการแตกร้าวของแกนคอนกรีตซึ่งดันผนังปลอกเหล็กให้เกิดการโป่งตัวออกทางด้านข้างโดย เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10

โดยสรุปพบว่า ตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2-4 เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนการวิบัติและมีความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิงและตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหนา

4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร เกิดการโป่งตัวทางด้านข้างน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่หล่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหนา 3.2 มิลลิเมตร เนื่องจากปลอกเหล็กดังกล่าวมีความแข็งแรงเพียงพอในการจำกัดการขยายตัวของแกนคอนกรีตและมีปริมาณเหล็กเพียงพอตามมาตรฐานการออกแบบความหนาต่ำสุดของ ว.ส.ท. และ AISC/LRFD โดยที่ความหนาปลอกเหล็กทั้ง 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร

3.3 หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ

จาก column ที่ 4 ดังแสดงในตารางที่ 2 ได้แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนของ $f'_{\max} / f'_{co}$ โดยเมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยที่เท่ากัน พบว่า ตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กความหนา 3.2 มิลลิเมตร จะมีค่าอัตราส่วนของกำลังที่เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 2.48-3.37 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ในช่วง 3.03-4.25 และ 3.41-4.95 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความหนาและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เท่ากัน พบว่า อัตราส่วนของ $f'_{\max} / f'_{co}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่สูงขึ้น เนื่องจากได้ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างแก่ตัวอย่างทดสอบทำให้ปลอกเหล็กชิดกับแกนคอนกรีตมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง ดังนั้นจึงเกิดการโอบรัดระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะเริ่มรับแรงกระทำ และเมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มรับแรงกระทำจึงสามารถรับแรงกดอัดในแนวแกนสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เท่ากัน พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ $f'_{\max} / f'_{co}$ จากความหนา 3.2 มิลลิเมตร ไปความหนา 4.5 มิลลิเมตร มีการเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 45-90% ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของปลอกเหล็กความหนา 4.5 มิลลิเมตรไปยัง 6.0 มิลลิเมตร มีการเพิ่มขึ้นค่าในช่วง 21-82%

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ $f'_{\max} / f'_{co}$ ของตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงทางด้านและตัวอย่างทดสอบที่ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ $0.05 f'_{co}$ และ $0.08 f'_{co}$ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ $f'_{\max} / f'_{co}$ จากไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดที่ $0.05 f'_{co}$ มีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 3-42% ซึ่งมีค่าสูงกว่า

อัตราการเพิ่มขึ้นของ $f'_{\max} / f'_{co}$ จากตัวอย่างทดสอบที่ให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง $0.05 f'_{co}$ ไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง $0.08 f'_{co}$ มีอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6-13%

โดยสรุปพบว่า ปลอกเหล็กที่มีความหนาเพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่สูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และตัวอย่างทดสอบจะมีความสามารถรับแรงกระทำลดลงเมื่อตัวอย่างทดสอบทำด้วยคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยที่สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตกำลังอัดประลัยค่าสูงมีค่า poisson's ratio ต่ำ ทำให้การกระจายแรงจากแกนคอนกรีตไปปลอกเหล็กมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตกำลังอัดประลัยค่าน้อย นอกจากนั้นการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างจากไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดไปยังมีการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างเพิ่มขึ้นเป็น $0.05 f'_{co}$ นั้นทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้น มากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มขึ้นจาก $0.05 f'_{co}$ เป็น $0.08 f'_{co}$ ซึ่งการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่ $0.05 f'_{co}$ เป็น $0.08 f'_{co}$ นั้นสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความหนาของปลอกเหล็กและการให้แรงโอบรัดทางด้านข้างที่เพิ่มขึ้น นอกจากจะช่วยให้กำลังรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้น ยังช่วงทำให้ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมในช่วงเส้นตรงสูงขึ้นด้วย

จากรูปที่ 11 และตารางที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังของตัวอย่างที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัด ($f'_{\max} / f'_{\max,0 f'_{co}}$) และอัตราส่วนของหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต เมื่อพิจารณากำลังอัดประลัยของคอนกรีตและความหนาที่เท่ากันพบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนกำลังของตัวอย่างทดสอบที่ถูกให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง $0.05 f'_{co}$ มีแนวโน้มสูงกว่าอัตราส่วนกำลังของตัวอย่างทดสอบที่ให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง $0.08 f'_{co}$ และอัตราส่วนของกำลังดังกล่าวจะมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 11a-11c

เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เท่ากัน พบว่าอย่างตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กขนาด 4.5 มิลลิเมตร มีแนวโน้มของอัตราส่วนกำลังดังก้าวดีกว่าตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้ม

ด้วยปลอกเหล็กขนาดความหนา 3.2 และ 6.0 มิลลิเมตร และอัตราส่วนดังก้าวมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

กลุ่ม	ตัวอย่างทดสอบ	B/t	Confining	$\rho_{sc} =$	สมบัติของคอนกรีต			สมบัติของเหล็ก		
		ratio	pressure (MPa)	A_s/A_g (%)	A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	E_c (GPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
1	C18-0-0	-	-	-	17671	19.9	20.4	-	-	-
	C25-0-0	-	-	-	17671	26.7	24.2	-	-	-
	C32-0-0	-	-	-	17671	31.9	27.5	-	-	-
2	CS18-32-0	46.9	-	8.02	17671	19.9	20.4	1540.1	312.1	201.5
	CS25-32-0	46.9	-	8.02	17671	26.7	24.2	1540.1	312.1	201.5
	CS32-32-0	46.9	-	8.02	17671	31.9	27.5	1540.1	312.1	201.5
	CS18-45-0	33.3	-	11.00	17671	19.9	20.4	2184.2	321.6	205.0
	CS25-45-0	33.3	-	11.00	17671	26.7	24.2	2184.2	321.6	205.0
	CS32-45-0	33.3	-	11.00	17671	31.9	27.5	2184.2	321.6	205.0
	CS18-60-0	25.0	-	14.26	17671	19.9	20.4	2940.5	326.1	197.5
	CS25-60-0	25.0	-	14.26	17671	26.7	24.2	2940.5	326.1	197.5
	CS32-60-0	25.0	-	14.26	17671	31.9	27.5	2940.5	326.1	197.5
3	CS18-32-0.05	46.9	0.90	8.02	17671	19.9	20.4	1540.1	312.1	201.5
	CS25-32-0.05	46.9	1.25	8.02	17671	26.7	24.2	1540.1	312.1	201.5
	CS32-32-0.05	46.9	1.60	8.02	17671	31.9	27.5	1540.1	312.1	201.5
	CS18-45-0.05	33.3	0.90	11.00	17671	19.9	20.4	2184.2	321.6	205.0
	CS25-45-0.05	33.3	1.25	11.00	17671	26.7	24.2	2184.2	321.6	205.0
	CS32-45-0.05	33.3	1.60	11.00	17671	31.9	27.5	2184.2	321.6	205.0
	CS18-60-0.05	25.0	0.90	14.26	17671	19.9	20.4	2940.5	326.1	197.5
	CS25-60-0.05	25.0	1.25	14.26	17671	26.7	24.2	2940.5	326.1	197.5
	CS32-60-0.05	25.0	1.60	14.26	17671	31.9	27.5	2940.5	326.1	197.5
4	CS18-32-0.08	46.9	1.44	8.02	17671	19.9	20.4	1540.1	312.1	201.5
	CS25-32-0.08	46.9	2.00	8.02	17671	26.7	24.2	1540.1	312.1	201.5
	CS32-32-0.08	46.9	2.56	8.02	17671	31.9	27.5	1540.1	312.1	201.5
	CS18-45-0.08	33.3	1.44	11.00	17671	19.9	20.4	2184.2	321.6	205.0
	CS25-45-0.08	33.3	2.00	11.00	17671	26.7	24.2	2184.2	321.6	205.0
	CS32-45-0.08	33.3	2.56	11.00	17671	31.9	27.5	2184.2	321.6	205.0
	CS18-60-0.08	25.0	1.44	14.26	17671	19.9	20.4	2940.5	326.1	197.5
	CS25-60-0.08	25.0	2.00	14.26	17671	26.7	24.2	2940.5	326.1	197.5
	CS32-60-0.08	25.0	2.56	14.26	17671	31.9	27.5	2940.5	326.1	197.5

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ				ค่าความแกร่ง (GPa)	พฤติกรรม การรับแรง
		$f'_{\max}$ (MPa)	$\frac{f'_{\max}}{f'_{co}}$	$\varepsilon'_{\max}$ (% ε)	$\frac{\varepsilon'_{\max}}{\varepsilon_u}$		
1	C18-0-0	19.9	-	0.22	-	-	crushing
	C25-0-0	26.7	-	0.21	-	-	crushing
	C32-0-0	31.9	-	0.21	-	-	crushing
2	CS18-32-0	58.4	2.93	0.44	2.00	21.5	แบบที่ 3
	CS25-32-0	69.2	2.60	0.45	2.14	25.4	แบบที่ 3
	CS32-32-0	82.2	2.58	0.48	2.29	27.9	แบบที่ 3
	CS18-45-0	74.0	3.72	0.51	2.32	22.6	แบบที่ 2
	CS25-45-0	86.1	3.22	0.49	2.33	26.5	แบบที่ 3
	CS32-45-0	96.7	3.03	0.51	2.43	28.9	แบบที่ 3
	CS18-60-0	90.3	4.54	0.56	2.55	23.8	แบบที่ 1
	CS25-60-0	100.9	3.78	0.54	2.57	27.5	แบบที่ 1
	CS32-60-0	108.7	3.41	0.53	2.52	29.7	แบบที่ 1
3	CS18-32-0.05	64.4	3.24	0.50	2.27	22.7	แบบที่ 3
	CS25-32-0.05	74.1	2.82	0.48	2.29	27.0	แบบที่ 3
	CS32-32-0.05	85.6	2.68	0.49	2.33	29.6	แบบที่ 3
	CS18-45-0.05	83.4	4.14	0.55	2.50	23.9	แบบที่ 3
	CS25-45-0.05	96.8	3.60	0.53	2.52	27.9	แบบที่ 3
	CS32-45-0.05	104.8	3.29	0.53	2.52	30.4	แบบที่ 3
	CS18-60-0.05	97.1	4.88	0.58	2.64	24.8	แบบที่ 1
	CS25-60-0.05	104.5	3.81	0.53	2.52	29.3	แบบที่ 1
	CS32-60-0.05	115.6	3.62	0.54	2.57	31.3	แบบที่ 1
4	CS18-32-0.08	67.0	3.37	0.51	2.32	23.1	แบบที่ 3
	CS25-32-0.08	76.5	2.94	0.48	2.29	27.1	แบบที่ 3
	CS32-32-0.08	88.4	2.77	0.49	2.33	30.6	แบบที่ 3
	CS18-45-0.08	85.6	4.25	0.54	2.45	24.8	แบบที่ 2
	CS25-45-0.08	98.4	3.65	0.52	2.48	28.5	แบบที่ 2
	CS32-45-0.08	107.0	3.35	0.53	2.52	31.6	แบบที่ 3
	CS18-60-0.08	98.4	4.94	0.56	2.55	25.7	แบบที่ 1
	CS25-60-0.08	106.6	3.87	0.53	2.52	30.1	แบบที่ 1
	CS32-60-0.08	117.5	3.68	0.55	2.62	32.0	แบบที่ 1

หมายเหตุ: พฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้น

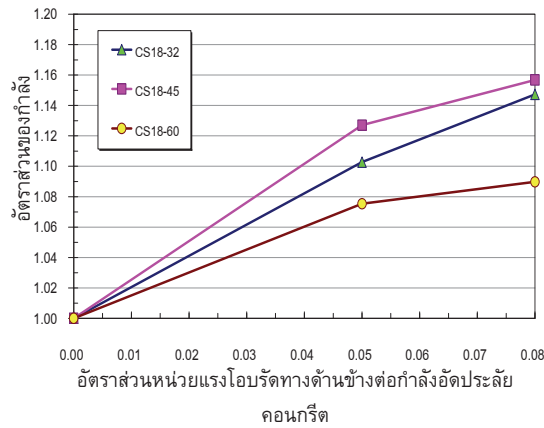
แบบที่ 1 คือ พฤติกรรมแบบ Strain hardening

แบบที่ 2 คือ พฤติกรรมแบบ Elastic perfectly plastic

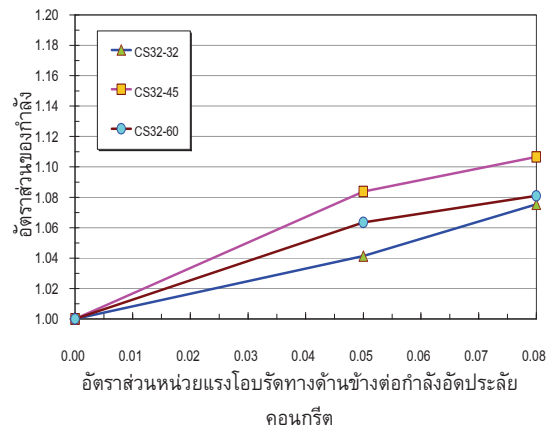
แบบที่ 3 คือ พฤติกรรมแบบ Strain softening

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบกำลังของตัวอย่างทดสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างกับตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง

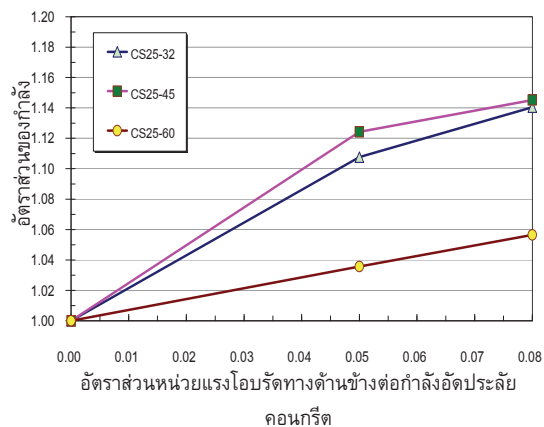
ตัวอย่างทดสอบ	f'_{max}			$\frac{f'_{max,0.05 f'_{co}}}{f'_{max,0 f'_{co}}}$	$\frac{f'_{max,0.08 f'_{co}}}{f'_{max,0 f'_{co}}}$
	$f'_{max,0 f'_{co}}$ (MPa)	$f'_{max,0.05 f'_{co}}$ (MPa)	$f'_{max,0.08 f'_{co}}$ (MPa)		
CS18-32	58.4	64.4	67.0	1.10	1.15
CS25-32	69.2	74.1	76.5	1.07	1.10
CS32-32	82.2	85.6	88.4	1.04	1.08
CS18-45	74.0	83.4	85.6	1.13	1.16
CS25-45	86.1	96.8	98.4	1.12	1.14
CS32-45	96.7	104.8	107.0	1.08	1.11
CS18-60	90.3	97.1	98.4	1.08	1.09
CS25-60	100.9	104.5	106.6	1.04	1.06
CS32-60	108.7	115.6	117.5	1.06	1.08



a) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 18 MPa



c) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 32 MPa



b) คอนกรีตกำลังอัดประลัย 25 MPa

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังของตัวอย่างที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดเทียบกับตัวอย่างที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดและอัตราส่วนของหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างต่อกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

3.4 ผลของหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีต

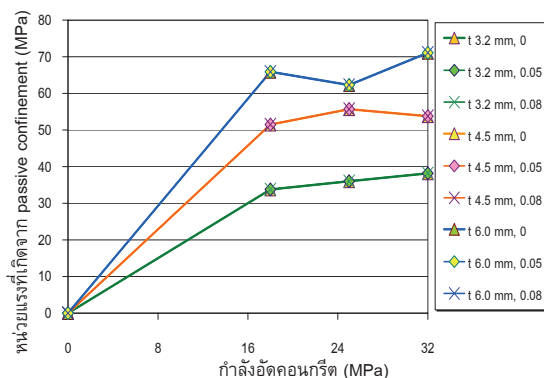
จากสมการทำนายกำลังแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้าง ที่ถูกนำเสนอโดย Richart และคณะ. ดังนี้

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1$$

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาถึงผลของการเพิ่มหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างให้แก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 4 จากค่า f'_{max} ที่ได้จากการทดสอบ

นั้นเกิดจากผลรวมของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและผลของ passive confinement และ active confinement ซึ่งจะมีค่าอยู่ในรูปของ $k_1 f_1$ ดังสมการข้างต้น เมื่อพิจารณาผลของ passive confinement จะขึ้นอยู่กับความแกร่งของปลอกเหล็กที่นำมาห่อหุ้มตัวอย่างทดสอบ และผลของ active confinement จะเกิดจากการให้หน่วยแรงกระทำทางด้านข้างก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาถึงผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตของนิยาม $f'_{max,conc}$ คือหน่วยแรงใช้งานที่เกิดขึ้นของคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากการนำค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กหักออกจากค่า f'_{max} ดังแสดงในตารางที่ 4

นิยามให้ $f'_{max,pass}$ เป็นหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ passive confinement สามารถคำนวณได้จากสมการ $f'_{max,pass} = 2\sigma_j t / D$ โดยที่ σ_j คือ hoop stress ของปลอกเหล็ก ในงานวิจัยใช้ค่าเท่ากับ f_y ของปลอกเหล็ก D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ และ t คือ ความหนาของปลอกเหล็ก



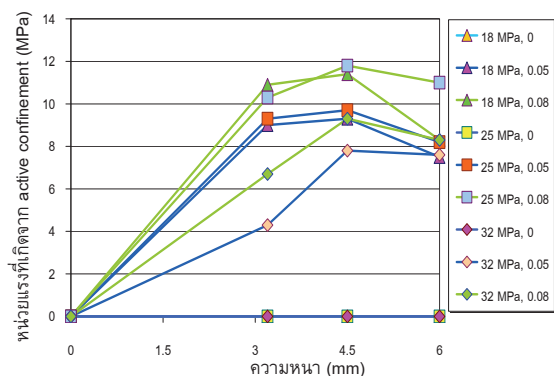
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ passive confinement

และนิยามให้ $f'_{max,ac}$ เป็นหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement สามารถคำนวณได้จากสมการ $f'_{max,ac} = f'_{max,conc} - f'_{co} - f'_{max,pass}$ ดังแสดงในตารางที่ 4

จากรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยของตัวอย่างทดสอบกับค่าหน่วยแรงซึ่งเกิดจากผล passive confinement และเมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เท่ากันพบว่า ค่าหน่วยแรง

ดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นตามความหนาของปลอกเหล็กที่หนาขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ความหนาเท่ากัน พบว่าค่าหน่วยแรงดังกล่าวจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ passive confinement นี้จะขึ้นอยู่กับกำลังของปลอกเหล็กที่นำมาห่อหุ้มตัวอย่างทดสอบ

จากตารางที่ 4 เมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างหรือ active confinement แก่ตัวอย่างทดสอบ ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความสามารถในการรองรับหน่วยแรงกระทำในแนวแกนได้สูงเพิ่มขึ้น และสามารถแยกหน่วยแรงดังกล่าวเป็นหน่วยแรงที่เกิดจาก passive confinement ($f'_{max,pass}$) และหน่วยแรงที่เกิดจาก active confinement ($f'_{max,ac}$) และเมื่อเปรียบเทียบหน่วยแรง $f'_{max,ac}$ ที่เพิ่มขึ้นจาก $f'_{max,pass}$ มีค่าสูงเพิ่มขึ้นประมาณ 10.6-32.4% และเมื่อพิจารณารูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ โดยความหนาปลอกเหล็กที่ทำให้ $f'_{max,ac}$ มีค่าสูงสุดคือความหนา 4.5 มิลลิเมตร และเมื่อความหนาปลอกเหล็ก 6.0 มิลลิเมตร ค่า $f'_{max,ac}$ จะมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาที่ความหนาปลอกเหล็กและการให้หน่วยโอบรัดทางด้านข้างที่เท่ากันพบว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่มีกำลังน้อยและปานกลาง (18 MPa และ 25 MPa) ค่า $f'_{max,ac}$ มีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตกำลังสูง (32 MPa)



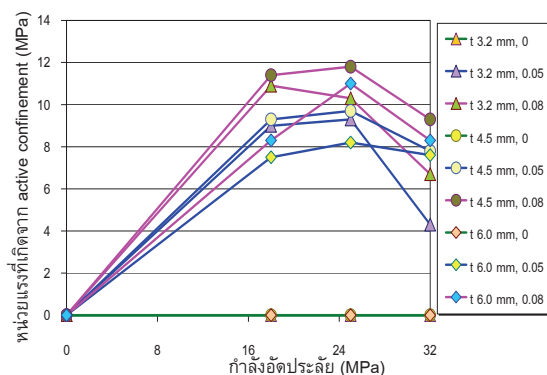
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก passive confinement และ active confinement

		ผลการทดสอบ								
กลุ่ม	ตัวอย่าง	$f'_{\max}$ (MPa)	$P'_{\max}$ (kN)	ε_{steel} (microstrain)	P_{steel} (kN)	P'_{conc} (kN)	$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1$			
							$f'_{\max,conc}$ (MPa)	f'_{co} (MPa)	$f'_{\max,pass}$ (MPa)	$f'_{\max,ac}$ (MPa)
1	C18-0-0	19.9	-	-	-	-	-	-	-	-
	C25-0-0	26.7	-	-	-	-	-	-	-	-
	C32-0-0	31.9	-	-	-	-	-	-	-	-
2	CS18-32-0	58.4	898	231.6	71.9	826	53.7	19.9	33.8	0.0
	CS25-32-0	66.2	1018	171.1	53.1	965	62.7	26.7	36.0	0.0
	CS32-32-0	82.2	1266	603.9	187.5	1079	70.1	31.9	38.2	0.0
	CS18-45-0	74.0	1145	103	45.9	1099	71.4	19.9	51.5	0.0
	CS25-45-0	86.1	1325	127.6	56.8	1268	82.4	26.7	55.7	0.0
	CS32-45-0	96.7	1487	375.6	167.3	1320	85.7	31.9	53.8	0.0
	CS18-60-0	90.3	1390	120.4	69.9	1320	85.8	19.9	65.9	0.0
	CS25-60-0	100.9	1496	216	125.5	1370	89.0	26.7	62.3	0.0
	CS32-60-0	108.7	1673	149.3	86.7	1586	103.0	31.9	71.1	0.0
3	CS18-32-0.05	64.4	991	81	25.1	966	62.7	19.9	33.8	9.1
	CS25-32-0.05	74.1	1141	143.9	44.7	1096	71.2	26.7	36.0	8.5
	CS32-32-0.05	85.6	1310	530.6	164.7	1145	74.4	31.9	38.2	4.3
	CS18-45-0.05	83.4	1284	94.5	42.1	1242	80.7	19.9	51.5	9.3
	CS25-45-0.05	96.8	1490	163.2	72.7	1417	92.1	26.7	55.7	9.7
	CS32-45-0.05	104.8	1613	390.3	173.9	1439	93.5	31.9	53.8	7.8
	CS18-60-0.05	97.1	1495	101.5	58.9	1436	93.3	19.9	65.9	7.5
	CS25-60-0.05	104.5	1609	192.5	111.8	1497	97.3	26.7	62.3	8.2
	CS32-60-0.05	115.6	1780	134.2	77.9	1702	110.6	31.9	71.1	7.5
4	CS18-32-0.08	67.0	1031	117	36.3	995	64.6	19.9	33.8	11.0
	CS25-32-0.08	76.5	1178	175	54.3	1124	73.0	26.7	36.0	10.3
	CS32-32-0.08	88.4	1361	576.6	179.0	1182	76.8	31.9	38.2	6.7
	CS18-45-0.08	85.6	1318	97.8	43.6	1274	82.8	19.9	51.5	11.4
	CS25-45-0.08	98.4	1515	145.4	64.8	1450	94.2	26.7	55.7	11.8
	CS32-45-0.08	107.0	1646	412	183.6	1462	95.0	31.9	53.8	9.3
	CS18-60-0.08	98.4	1515	113.7	66.0	1449	94.1	19.9	65.9	8.4
	CS25-60-0.08	106.6	1641	176.2	102.3	1539	100.0	26.7	62.3	10.9
	CS32-60-0.08	117.5	1803	155.6	90.3	1713	111.3	31.9	71.1	8.2

จากรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของกำลังอัดประลัยคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement โดยที่ลักษณะกราฟมีรูปร่างแบบโค้งคว่ำเช่นเดียวกันกับรูปที่ 13 พบว่าหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement จะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตจากกำลังต่ำ (18 MPa) ไปยังกำลังปานกลาง (25 MPa) และจะมีค่าลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยค่าสูง (32 MPa)

ดังนั้นค่าความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เหมาะสมในการศึกษาคือค่าความหนา 4.5 มิลลิเมตร และหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่ $0.05 f'_{co}$ เพราะว่าตัวแปรดังกล่าวนั้นสามารถเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดในช่วงเส้นตรงได้เพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 50-70% ของหน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ นอกจากนั้นตัวอย่างทดสอบดังกล่าวยังมีพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นแบบ elastic-perfectly plastic ซึ่งทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความเหนียวสูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนการวิบัติ ซึ่งพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นลักษณะนี้มีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน เมื่อพิจารณาแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบนี้ พบว่าจะเกิดการโป่งออกทางด้านข้างมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาที่ 3.2 มิลลิเมตร เนื่องจากปลอกเหล็กขนาด 4.5 มิลลิเมตรนี้ มีความแข็งแรงเพียงพอในการต้านทานและจำกัดแกนคอนกรีต พร้อมทั้งผ่านมาตรฐานการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD และ ว.ส.ท.



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ active confinement

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและมีการให้แรงกระทำทางด้านข้างภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนสามารถสรุปได้ดังนี้

1) เมื่อตัวอย่างทดสอบถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างทำให้พฤติกรรมในช่วงเส้นตรงของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้นจากพฤติกรรมดังกล่าวของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิงเป็นอย่างมาก โดยพฤติกรรมในช่วงดังกล่าวมีค่าประมาณ 50-70% ของหน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวแปรที่ผลต่อพฤติกรรมในช่วงนี้คือ ความหนาของปลอกเหล็ก กำลังอัดประลัยของคอนกรีตและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง จากนั้น ตัวอย่างทดสอบจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นโดยมีความชันของเส้นกราฟลดลงอย่างต่อเนื่อง และพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบ สามารถถูกจำแนกออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังนี้ strain hardening elastic-perfectly plastic และ strain softening โดยขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักคือ ความหนาปลอกเหล็กและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง การวิบัติของตัวอย่างทดสอบถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก โดยเฉพาะที่มีความหนาที่ผ่านมาตรฐานของการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD และ ว.ส.ท. จะเกิดขึ้นที่ค่าการหดรัดตัวที่สูงมากและมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งแสดงว่าตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีความเหนียวในแนวแกนที่สูงมาก

2) เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยค่าหนึ่งแล้ว การเพิ่มขึ้นของความหนาของปลอกเหล็กและการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างมีผลทำให้กำลังรับแรงกดอัดและความเหนียวในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง โดยความหนาของปลอกเหล็กมีอิทธิพลมากกว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง โดยเฉพาะเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดประลัยต่ำ และภายใต้ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเสา Tubed column ต่อไป คือ ปลอกเหล็กความหนา 4.5 มิลลิเมตรและหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่ $0.05 f'_{co}$

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน”

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

A_c	=	พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต
A_g	=	พื้นที่หน้าตัดรวมของตัวอย่างทดสอบ
A_s	=	พื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก
B	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีต
E_c	=	modulus of elasticity ของคอนกรีต
E_s	=	modulus of elasticity ของปลอกเหล็ก
f_Y	=	หน่วยแรงครากของปลอกเหล็ก
f'_{co}	=	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต
f'_{max}	=	ค่าหน่วยแรงใช้งานสูงสุดที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ
$f'_{max,ac}$	=	ค่าหน่วยแรงใช้งานที่เกิดจากผลของ active confinement
$f'_{max,conc}$	=	ค่าหน่วยแรงใช้งานที่เกิดขึ้นของคอนกรีต
$f'_{max,pass}$	=	ค่าหน่วยแรงใช้งานที่เกิดจากผลของ passive confinement
L	=	ความสูงของตัวอย่างทดสอบ
t	=	ความหนาของปลอกเหล็ก
ϵ'_{max}	=	ความเครียดใช้งานสูงสุดที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] Xiao, Y., He, W. and Choi, K. 2005. Confined concrete filled tubular columns. Journal of Structural Engineering, ASCE. 131(3): 488-497.

[2] Saw, H.S. and Liew, J.Y.R. 2000. Assessment of current methods for the design of composite columns in buildings. Journal of Constructional Steel Research, 53: 121-147.

[3] American Institute of Steel Construction. 1994. Manual of steel construction load and resistance factor design (LRFD). 2nd Ed. Chicago.

[4] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. 2538. มาตรฐานสำหรับการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพมหานคร.

[5] Tomii, M., Sakino, K., Watanabe, K. and Xiao, Y. 1985. Lateral load capacity of reinforced concrete short columns confined by steel tube. Proceeding of International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin. China. 19-26.

[6] สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักรดา ชำรงวุฒิ. 2551. การตรวจสอบ TUBED CONCRETE COLUMN หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน. วิศวกรรมสาร มท., ปีที่ 35, ฉบับที่ 1, มกราคม-กุมภาพันธ์ 2551: 81-99.

[7] Richart, F.E, Brandtzaeg, A. and Brown, R.L. 1928. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. University of Illinois Engineering Experimental Station Bulletin 185.