

พฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกนและสมการออกแบบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ท่อซีเมนต์ไยหินเป็นแบบหล่อถาวร

สิทธิชัย แสงอาทิตย์^{1*} และศรัณย์ กำจัดโรค์²

Sittichai Seangattith¹ and Saran Kumjadrok². (2006). Axially Compressive Behaviors and Design Equation of Reinforced Concrete Columns Having Asbestos Cement Pipe as Permanent Formwork. *Suranaree J. Sci. and Technol.* 13(4):351-362.

Received:

Abstract

The objectives of this research work are to study the behaviors and modes of failure of reinforced concrete columns using asbestos cement pipes as permanent formwork and to compare the test results with a modified EIT's design equation. The test specimens with diameters of 0.15 and 0.20 m, height of 0.75, 2.30 and 2.80 m, and steel reinforcements of 1.5, 2.0, 2.15, 2.64, 3.53 and 3.84% of the column's cross sectional area were used. The total of 46 specimens was tested under axial compression with pinned-pinned supports. From the test, it was found that the columns exhibited a linear behavior up to approximately 80 to 90% of the ultimate compressive loads. Then, the behavior of columns was nonlinear and the longitudinal cracks at both ends of the columns started to increase drastically. All of the columns were failed by the yielding of the steel reinforcement and the crushing of the asbestos cement pipe and concrete at the end of the columns. In addition, the column's strength increased as the steel reinforcement increased and decreased as the slenderness ratio increased. Finally, the factors of safety between the test results and the modified EIT's design equation were obtained in the range of 3.20 to 4.48.

Keywords: Reinforced concrete column, asbestos cement pipe, compressive load

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ท่อซีเมนต์ไยหินเป็นแบบหล่อถาวรภายใต้แรงอัดในแนวแกนและเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบเสาของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ศ.ท.) ที่ดัดแปลง ตัวอย่างที่ใช้

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 E-mail: sitichai@sut.ac.th

² มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตตาก อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

* ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

ในการทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 และ 0.20 เมตร ความสูง 0.75, 2.30 และ 2.80 เมตร โดยมีปริมาณเหล็กเสริมร้อยละ 1.5, 2.0, 2.15, 2.64, 3.53 และ 3.84 ของพื้นที่หน้าตัดเสา โดยมีจำนวนทดสอบทั้งสิ้น 46 ตัวอย่าง และทดสอบภายใต้แรงอัดในแนวแกน โดยมีจตุรรองรับแบบหมุดที่ปลายทั้งสองด้านของเสา จากผลการทดสอบ พบว่า เสาโดยส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการรับแรงอัดและการหดตัวเป็นแบบเชิงเส้นตรงถึงประมาณร้อยละ 80 ถึง 90 เปอร์เซนต์ ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด จากนั้น พฤติกรรม การรับแรงจะเป็นแบบไร้เชิงเส้น และเกิดรอยแตกร้าวในแนวแกนบริเวณปลายเสาทั้งสองข้างอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเกิดการวิบัติในที่สุดโดยเสาทั้งหมดมีการวิบัติเนื่องจากการครากของเหล็กเสริมและเกิดการอัดแตกของท่อซีเมนต์ไยหินและคอนกรีตที่ปลายทั้งสองด้าน นอกจากนั้นยังพบอีกว่า กำลังรับแรงอัดของเสามีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเหล็กเสริมและมีค่าลดลงเมื่อเสามีอัตราส่วนความชะลุดเพิ่มขึ้น สุดท้ายเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของเสาที่คำนวณโดยใช้สมการออกแบบเสาของ ว.ส.ท. ที่ตัดแปลงกับ ผลทดสอบพบว่า สมการดังกล่าวให้ส่วนความปลอดภัยอยู่ในช่วง 3.20 ถึง 4.48

บทนำ

ในประเทศไทย โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็น โครงสร้างที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากเป็น โครงสร้างที่มีความคงทน แข็งแรง ประหยัด ดูแล รักษาง่าย และสามารถหล่อให้เป็นรูปแบบใด ๆ ได้ง่าย โดยทั่วไปแล้วการก่อสร้าง โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำเป็นต้องมีแบบหล่อเพื่อเป็นแบบ สำหรับเทคอนกรีตให้เป็นรูปทรงตามที่ต้องการ แต่ ถ้าองค์อาคารของโครงสร้างมีรูปร่างหน้าตัดพิเศษ เช่น เสาหน้าตัดรูปร่างทรงกลม การทำแบบหล่อ จะต้องใช้ช่างที่มีความชำนาญสูงและ/หรือใช้เวลา ในการทำแบบหล่อมามาก ส่งผลให้ค่าก่อสร้างมีราคา สูงขึ้น แบบหล่อเหล็กสำเร็จรูปเป็นทางเลือกหนึ่ง ที่นำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวในโครงการก่อสร้าง ขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ เนื่องจากแบบหล่อเหล็ก สามารถนำมาใช้ซ้ำได้หลายครั้ง ทำให้คุ้มค่าทางด้าน ต้นทุน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแบบหล่อเหล็กมักมี ราคาค่อนข้างสูง จึงไม่เหมาะในการใช้งานใน โครงการก่อสร้างอาคารขนาดเล็ก เช่น บ้านพักเดี่ยว และอาคารพาณิชย์ เป็นต้น ในปัจจุบัน อาคาร คอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็กที่มีลักษณะข้างต้นได้ ถูกก่อสร้างโดยใช้ท่อซีเมนต์ไยหินเป็นแบบหล่อ ถาวรของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังตัวอย่างที่แสดง ในรูปที่ 1 ซึ่งพบอย่างแพร่หลายตามภูมิภาคต่าง ๆ

ของประเทศไทย โดยมีข้อดีคือ มีความสะดวกและ รวดเร็วในการก่อสร้าง มีความสวยงาม และมีราคา ถูก เนื่องจากไม่ต้องเสียค่าจัดทำแบบหล่อเสา โดย เสาในลักษณะนี้มักจะถูกทาสีพลาสติกทึบผิวหน้าที่ หนาเพียงพอ เพื่อป้องกันฝุ่นซีเมนต์ไยหินที่อาจจะ หลุดลอยในอากาศและทำให้เกิดมะเร็งในปอด แก่ผู้หายใจนำฝุ่นดังกล่าวเข้าไป

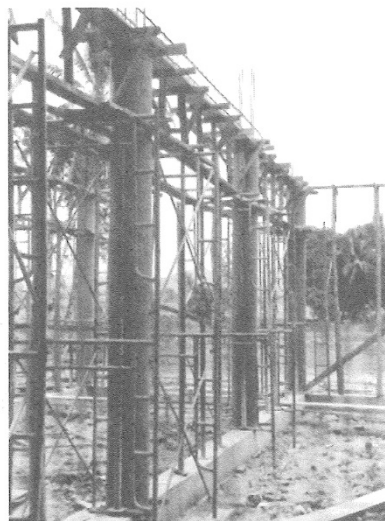


Figure 1. Example of reinforced concrete columns having asbestos cement pipe as permanent formwork

จากการค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดได้กล่าวถึงพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดในแนวแกน และลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในลักษณะดังกล่าวเลย มีเพียงกฤษณะ เฝือกะ และคณะ (2544) ที่ได้ทำการทดสอบท่อซีเมนต์ไยหินที่กรอกคอนกรีตภายใต้แรงอัดในแนวแกน ซึ่งพบว่า ซีเมนต์ไยหินเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมกรรมการรับแรงแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนกระทั่งถึงจุดรับแรงอัดประลัย จากนั้นวัสดุจะเกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle) แบบทันทีทันใด โดยมีค่าหน่วยแรงอัดประลัย (ultimate compressive stress) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่ต่ำกว่าค่าของคอนกรีต และจากการทดสอบแรงอัดในแนวแกนของท่อซีเมนต์ไยหินที่กรอกคอนกรีต ซึ่งมีความสูง 0.30 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 และ 0.20 เมตร พบว่า ท่อซีเมนต์ไยหินดังกล่าวมีกำลังรับแรงอัดต่ำกว่าแท่งคอนกรีตที่มีลักษณะเดียวกันประมาณร้อยละ 15 ถึง 20 และมีค่าความแกร่งอยู่ระหว่างความแกร่งของคอนกรีตและวัสดุซีเมนต์ไยหิน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การห่อหุ้มคอนกรีตด้วยท่อซีเมนต์ไยหินดังกล่าวไม่ก่อให้เกิดการโอบรัด (confinement) ต่อคอนกรีตเช่นในกรณีของการห่อหุ้มด้วยท่อเหล็ก (Chung *et al.*, 1999) หรือแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย (Mirmiran and Shahawy, 1997)

ในทางปฏิบัติ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ท่อซีเมนต์ไยหินเป็นแบบหล่อเสาแบบถาวรในลักษณะดังกล่าวมักจะถูกออกแบบโดยใช้สมการออกแบบตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (working stress design) ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) หรือมาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34 [2540] โดยกำหนดให้น้ำหนักปลอดภัยในแนวแกนของเสาต้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เหล็กปลอกเดี่ยวและรับแรงในแนวแกนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = 0.2125 f'_c A_g + 0.85 f_y A_s \quad (1)$$

โดยที่ P คือ น้ำหนักปลอดภัยในแนวแกนของเสา f'_c คือ กำลังอัดของคอนกรีต A_g คือ พื้นที่หน้าตัดเสาทั้งหมด f_y คือ หน่วยแรงที่ยอมให้ในเหล็กเสริมตามแนวแกนของเสามีค่าเท่ากับ 0.4 เท่าของหน่วยแรงคราก (yielding stress) ของเหล็กเสริม และ A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

การใช้สมการที่ (1) ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ท่อซีเมนต์ไยหินเป็นแบบหล่อเสาแบบถาวรนั้น เทอม A_g มักถูกพิจารณาให้เป็นพื้นที่หน้าตัดของเสาส่วนที่เป็นคอนกรีต เหล็ก และท่อซีเมนต์ไยหิน แต่เนื่องจากหน่วยแรงอัดประลัยของวัสดุซีเมนต์ไยหินมีค่าต่ำเพียงแค่ครึ่งหนึ่งของหน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต ดังนั้น การใช้สมการที่ (1) ดังกล่าวอาจนำไปสู่การออกแบบเสาคอนกรีตดังกล่าวที่ไม่ปลอดภัยได้ โดยเฉพาะในกรณีที่เสามีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของท่อซีเมนต์ไยหินต่อพื้นที่หน้าตัดเสาทั้งหมดที่ค่อนข้างสูง ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของท่อซีเมนต์ไยหินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 และ 0.20 เมตร ที่ใช้ในการศึกษานี้ที่มีความหนา 12 และ 15 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อซีเมนต์ไยหินมีค่าประมาณร้อยละ 30 ของพื้นที่หน้าตัดเสาทั้งหมด และจะทำให้กำลังใช้งานของเสาที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) มีค่าสูงกว่าค่าที่ควรจะเป็นถึง $0.2125(0.5f'_c)(0.30A_g)$ ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 15 ของกำลังของเสาที่ได้จากกำลังของคอนกรีต นอกจากนั้นแล้ว วิศวกรผู้ออกแบบยังขาดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมกรรมการรับแรงและลักษณะการวิบัติของเสาดังกล่าว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมกรรมการรับแรงอัดในแนวแกน และลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดรูปทรงกลมที่ใช้ท่อซีเมนต์ไยหินเป็นแบบหล่อถาวร และเพื่อเปรียบเทียบ กำลังรับแรงอัดของเสาที่ทดสอบได้กับสมการการออกแบบเสาของ ว.ส.ท. โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ที่ถูกดัดแปลงให้เหมาะสมกับเสาที่ศึกษา

สมการออกแบบเสาของ ว.ส.ท. ที่ถูกดัดแปลง

จากข้อมูลข้างต้นและเพื่อให้การออกแบบเสา มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากขึ้นและมีความปลอดภัยที่เหมาะสม สมการที่ (1) จึงควรถูกดัดแปลงโดยการเพิ่มเทอมที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการต้านแรงกระทำของท่อซีเมนต์ไยห็น โดยแบ่งเทอมพื้นที่หน้าตัดรวม (A_g) ออกเป็นพื้นที่เสาที่เป็นคอนกรีต (A_c) และเหล็กเสริม (A_s) และพื้นที่หน้าตัดของท่อซีเมนต์ไยห็น (A_{abs}) และจากการทดสอบวัสดุซีเมนต์ไยห็นภายใต้แรงอัดพบว่า วัสดุดังกล่าวมีพฤติกรรมการรับแรงแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ เกิดการวิบัติแบบเปราะ และมีค่าความเครียดประลัย (ultimate strain) ที่ใกล้เคียงกับค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตคือ ประมาณ 0.003 มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร ดังนั้น เทอมที่เกี่ยวข้องกับกำลังของท่อซีเมนต์ไยห็นจึงควรถูกคูณด้วยสัมประสิทธิ์ลดกำลังที่มีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์ลดกำลังของคอนกรีต ซึ่งมีค่า 0.2125 และเทียบได้กับส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 4.70 ซึ่งอาจจะสูงไปบ้างเมื่อเทียบกับส่วนความปลอดภัยของคอนกรีต เนื่องจากวัสดุซีเมนต์ไยห็นเป็นวัสดุที่ผลิตในโรงงาน และมีความแปรปรวนของกระบวนการผลิตต่ำเมื่อเทียบกับคอนกรีต แต่ส่วนต่างดังกล่าวน่าจะมีความไม่สูงนักและในที่นี่จะพิจารณาให้เป็นส่วนความปลอดภัยสำรองของเสาดังกล่าว ดังนั้น ในสภาวะการใช้งานเมื่อคอนกรีตเหล็กเสริม และท่อซีเมนต์ไยห็นยังคงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงเชิงเส้นตรงและมีการเปลี่ยนรูปร่างน้อยมากแล้ว วัสดุต่าง ๆ ดังกล่าวจะถูกสมมุติให้ร่วมกันรองรับแรงอัดในแนวแกนอย่างสมบูรณ์ โดยเป็นไปตามเงื่อนไขความสอดคล้อง (compatibility condition) ที่กำหนดให้วัสดุทั้งสามชนิดมีค่าการหดตัวเท่ากันแล้ว สมการการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยห็นจะเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2)

$$P = 0.2125(f'_c A_c + f'_{abs} A_{abs}) + 0.85f_s A_s \quad (2)$$

โดยที่ f'_{abs} คือกำลังรับแรงอัดของท่อซีเมนต์ไยห็น ขอให้ทราบด้วยว่า มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดให้เสาสั้นเป็นเสาที่มีอัตราส่วนความสูงของเสาต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาน้ำัดตรงกลมไม่เกิน 15 ซึ่งเทียบได้กับอัตราส่วนความชะลูด (L/r) ไม่เกิน 60 ดังนั้น หากเสาดังกล่าวมีอัตราส่วนความชะลูดเกิน 60 แล้ว เสาจะถูกพิจารณาเป็นเสายาวโดยที่สมการที่ (1) และสมการที่ (2) ต้องถูกคูณด้วยตัวคูณลดกำลัง (strength reduction factor) หรือ R ซึ่งอยู่ในรูป

$$R = 1.07 - 0.008(L/r) \quad (3)$$

การทดสอบวัสดุและเสาด้อย่างทดสอบ

การเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกับสมการออกแบบเสานั้น เราจำเป็นต้องทราบสมบัติทางกลของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทำตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ คอนกรีตถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 [2001] และ C469 [1994] และเหล็กเสริมถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 [2000] ส่วนการทดสอบกำลังรับแรงอัดของวัสดุซีเมนต์ไยห็นนั้น เนื่องจากยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานการทดสอบ ดังนั้น ในการศึกษานี้ตัวอย่างทดสอบจะถูกตัดมาจากท่อซีเมนต์ไยห็นตามความยาวท่อ โดยกำหนดให้มีขนาดกว้าง 30 มิลลิเมตร สูง 60 มิลลิเมตร และหนา 12 และ 15 มิลลิเมตร สำหรับท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 และ 0.20 เมตร ตามลำดับ ตามข้อแนะนำของมาตรฐาน ASTM D 695 [1996] เพื่อป้องกันผลของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดกับตัวอย่างทดสอบและการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ จากนั้น ตัวอย่างทดสอบจะถูกทำการทดสอบโดยการอัดโดยใช้เครื่องทดสอบ UTM (universal testing machine) และทำการวัดค่าแรงและค่าการหดตัวในแนวแกนเพื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียด

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ ตัวอย่างทดสอบเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก หน้าตัดทรงกลมที่ใช้ท่อซีเมนต์ใยหินเป็นแบบหล่อเสาแบบถาวร โดยตัวอย่างเสาจะถูกทดสอบ 2 ตัวอย่างต่อ 1 รูปแบบของตัวอย่างทดสอบ โดยมีความสูง 3 ค่าคือ 0.75, 2.30 และ 2.80 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดตามขนาดของท่อซีเมนต์ใยหิน 2 ค่าคือ 0.15 และ 0.20 เมตร มีเหล็กเสริมในแนวแกนเป็นเหล็กข้ออ้อย SD30 ตามมาตรฐาน มอก. 24-2536 โดยมีปริมาณเหล็กเสริม 6 ค่า คือ ร้อยละ 1.50, 2.00, 2.15, 2.64, 3.53 และ 3.84 ของพื้นที่หน้าตัดเสา และใช้เหล็กปลอกเดี่ยวขนาด RB6 ทุกระยะ 0.120 เมตร ตลอดความยาวของเสา โดยหมายเลข

ตัวอย่างทดสอบเสาเรียงตามเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) - ความสูงของเสา (L) - ร้อยละเหล็กเสริมในแนวแกน เช่น ตัวอย่างทดสอบ 15-75-2.64 คือ เสาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร มีความสูง 0.75 เมตร และมีเหล็กเสริมในแนวแกนร้อยละ 2.64 เป็นต้น โดยจากตารางจะเห็นได้ว่า เสาที่ใช้ในการทดสอบมีค่าอัตราส่วนความชะลุด (L/r) ทั้งสิ้น 6 ค่า ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 15 ถึง 75 รูปที่ 2 แสดงรูปหน้าตัดของเสาที่แสดงการจัดเรียงเหล็กแกนของเสาตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษา

รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame โดยจุกรองรับที่ปลายบนและปลายล่างของเสาเป็นหมุด (pin) เมื่อเสาถูกติดตั้งเข้าจุกรองรับแล้ว แนวตั้งของเสาจะถูกตรวจสอบโดยใช้

Table 1. Details of test specimens

Specimens	d (m)	L (m)	Reinforcement	Percent of reinforcement (%)	L/r
15-75-2.64	0.15	0.75	6DB10	2.64	20
15-75-3.53	0.15	0.75	8DB10	3.53	20
15-75-3.84	0.15	0.75	6DB12	3.84	20
20-75-1.50	0.20	0.75	6DB10	1.50	15
20-75-2.00	0.20	0.75	8DB10	2.00	15
20-75-2.16	0.20	0.75	6DB12	2.16	15
15-175-2.64	0.15	1.75	6DB10	2.64	47
15-175-3.53	0.15	1.75	8DB10	3.53	47
15-175-3.84	0.15	1.75	6DB12	3.84	47
20-175-1.50	0.20	1.75	6DB10	1.50	35
20-175-2.00	0.20	1.75	8DB10	2.00	35
15-230-2.64	0.15	2.30	6DB10	2.64	61
15-230-3.53	0.15	2.30	8DB10	3.53	61
15-230-3.84	0.15	2.30	6DB12	3.84	61
20-230-1.50	0.20	2.30	6DB10	1.50	46
20-230-2.00	0.20	2.30	8DB10	2.00	46
20-230-2.15	0.20	2.30	6DB12	2.15	46
15-280-2.64	0.15	2.80	6DB10	2.64	75
15-280-3.53	0.15	2.80	8DB10	3.53	75
15-280-3.84	0.15	2.80	6DB12	3.84	75
20-280-1.50	0.20	2.80	6DB10	1.50	56
20-280-2.00	0.20	2.80	8DB10	2.00	56
20-280-2.15	0.20	2.80	6DB12	2.15	56

ลูกดิ่งพร้อม ๆ กับการปรับแต่งตำแหน่งของจุดรองรับเพื่อให้แรงกระทำผ่านจุดเซนทรอยด์ (centroid) ของหน้าตัดของเสา จากนั้นทำการ preload ให้แรงกระทำต่อเสาประมาณ 5 กิโลนิวตัน (kN) เพื่อให้เสายู่ในสภาวะพร้อมทดสอบ และทำการติดตั้ง dial gauge ที่ปลายด้านบนบนของเสาและที่จุดกึ่งกลางความยาวของเสาเพื่อวัดค่าการหดตัวในแนว

แกน (axial displacement) และค่าการโก่งตัวทางด้านข้าง (lateral displacement) ของเสา ตามลำดับ สุดท้ายทำการให้แรงกระทำต่อเสาโดยใช้ hydraulic pump ไฟฟ้าอัดน้ำมันไฮดรอลิกไปยัง hydraulic ram อย่างช้า ๆ และอ่านค่าแรงและค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง และทำการทดสอบไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเสาเกิดการวิบัติ

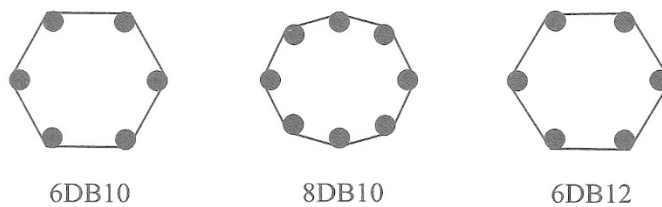


Figure 2. Detail of the specimen's cross-section

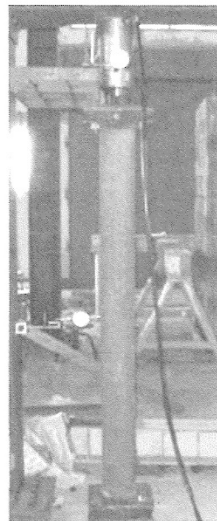
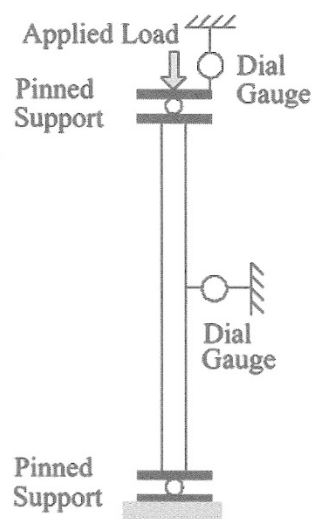


Figure 3. Test set-up for axially compressive loading test

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

จากผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้พบว่า วัสดุต่าง ๆ มีสมบัติทางกล ดังที่แสดงในตารางที่ 2 โดยมีแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต ซีเมนต์ไยหินและเหล็กเสริม SD30 ตามรูปที่ 4 โดยพฤติกรรมการรับแรงและลักษณะการวิบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีลักษณะเหมือนกับที่ทราบโดยทั่วไป

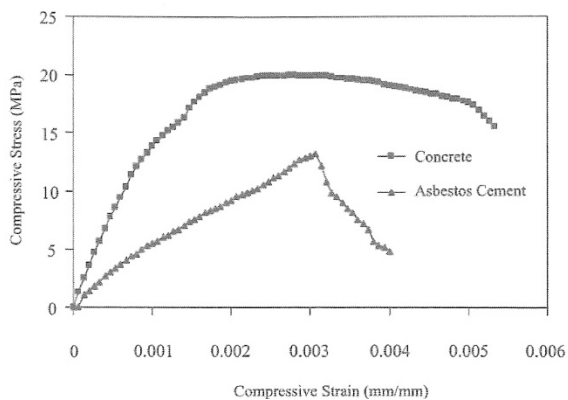
ในส่วนของวัสดุซีเมนต์ไยหิน จากการทดสอบและจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดของซีเมนต์ไยหิน ดังที่แสดงในรูปที่ 4(a) พบว่า พฤติกรรมการรับแรงอัดของซีเมนต์ไยหินค่อนข้างแตกต่างจากคอนกรีต กล่าวคือ ซีเมนต์ไยหินมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนกระทั่งถึงหน่วยแรงประลัย จากนั้นซีเมนต์ไยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างรวดเร็วดังที่เห็นได้จากการที่เส้นกราฟตกลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งลักษณะการวิบัติแบบนี้จะเป็นการวิบัติแบบเปราะ นอกจากนั้นแล้วยังพบอีกด้วยว่า คอนกรีตและซีเมนต์ไยหินที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าความเครียดอัดประลัยที่ใกล้เคียงกันแต่มีลักษณะการวิบัติที่แตกต่างกัน การวิบัติของซีเมนต์ไยหินดังกล่าวจะทำให้สังเกตเห็นการเริ่มต้นของการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ท่อซีเมนต์ไยหินเป็นแบบหล่อदारได้อย่างชัดเจน ดังนั้นการแตกร้าวของท่อซีเมนต์ไยหินดังกล่าวทำหน้าที่เป็นเสมือนเครื่องเตือนการวิบัติของเสา

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและการหดตัวในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

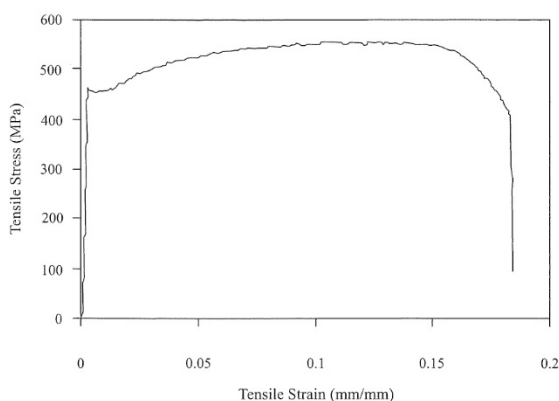
รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างแผนภาพแรงอัดในแนวแกนและการหดตัวในแนวแกน ของเสาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร และมีความสูง 2.30 เมตร ที่มีการเสริมเหล็กในปริมาณที่ต่างกัน จากกราฟจะเห็นได้ว่า ในช่วงแรกพฤติกรรมของเสาจะค่อนข้างเป็นแบบเชิงเส้นตรง โดยเหล็กเสริม คอนกรีต และซีเมนต์ไยหินจะร่วมกันรับแรงอัด จนกระทั่งแรงอัดมีค่าประมาณร้อยละ 80 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา จากนั้น ค่าแรงอัดที่เพิ่มมากขึ้นจะถูกรองรับโดยคอนกรีตและซีเมนต์ไยหินเป็นหลัก เนื่องจากการครากของเหล็กเสริมทำให้เหล็กเสริมไม่สามารถรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นได้ ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4 ว่า เหล็กเสริมมีความเครียดที่จุดครากประมาณ 0.0012 มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร ซึ่งต่ำกว่าค่าความเครียดประลัยของคอนกรีตและซีเมนต์ไยหินที่อยู่ในช่วง 0.0020 และ 0.0030 มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร และพฤติกรรมของเสาจะเริ่มเป็นแบบไร้เชิงเส้น จากนั้น เมื่อแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอีกจนกระทั่งทำให้คอนกรีตและซีเมนต์ไยหินมีความเครียดถึงค่าความเครียดประลัยแล้ว ซีเมนต์ไยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างรวดเร็วที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของเสาเนื่องจากเป็นวัสดุเปราะ แต่คอนกรีตจะมีการแตกร้าวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเนื่องจากมีพฤติกรรมแบบค่อยเป็นค่อยไป เมื่อแรงกระทำต่อเสามีค่าถึงกำลังรับแรงอัดสูงสุดแล้วท่อซีเมนต์ไยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัดจนยิ่งขึ้น หลังจากนั้น แรงกระทำต่อเสาจะมีค่า

Table 2. Mechanical properties of materials used in this study

Materials	Standard test method	Yielding stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
Concrete	ASTM C39 and ASTM C469	NA	21.5	19.7
Steel reinforcement	ASTM E8	412.2	541.1	203.9
Asbestos cement	-	NA	13.2	6.1



(a) Concrete and asbestos cement



(b) Steel reinforcement

Figure 4. Stress-strain diagrams of materials used in this study

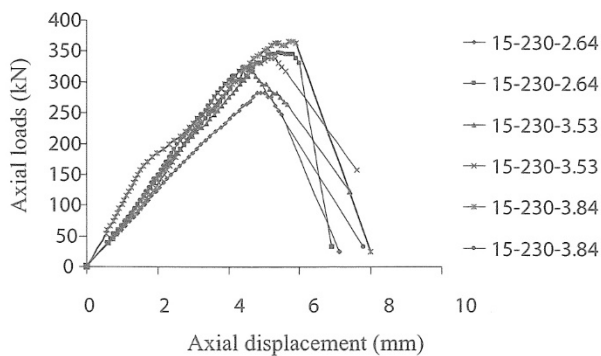


Figure 5. Axial load versus axial displacement diagram of the column specimens having 0.15 m diameter and 2.30 m height

ลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนและรอยแตกกว้างที่เกิดขึ้นในท่อนซีเมนต์ไยหินจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของการวิบัติของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบปลอกเดี่ยว (MacGregor, 1992) โดยมีลักษณะการวิบัติโดยเกิดคราก (yielding) ในเหล็กเสริมและเกิดการอัดแตก (crushing) ในคอนกรีตและท่อนซีเมนต์ไยหินที่บริเวณปลายของตัวอย่างทดสอบ ดังที่แสดงในรูปที่ 6(a) ซึ่งแสดง

ตัวอย่างการวิบัติของเสาที่มีความสูง 0.75 เมตร รูปที่ 6(b) แสดงตัวอย่างการวิบัติของเสาที่มีความสูง 2.80 เมตร

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดในแนวแกนและการโก่งตัวทางด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 7 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดในแนวแกนและการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบ จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อแรงในแนวแกนมีค่า ๆ

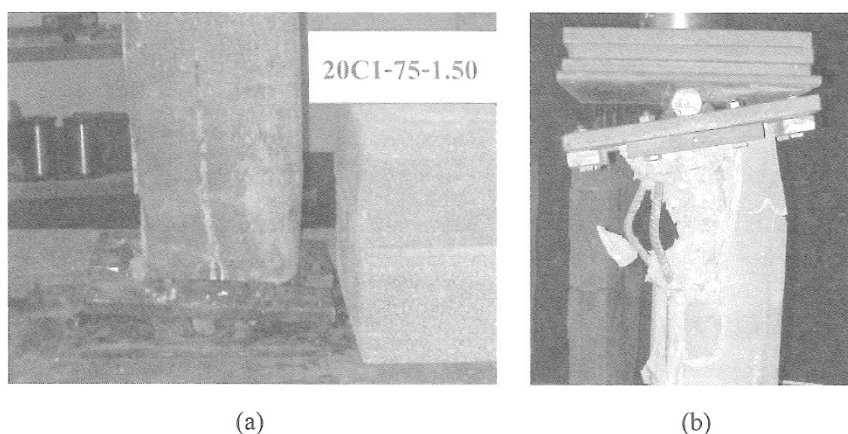


Figure 6. Mode of failure of the columns: (a) column with 0.75 m height and (b) column with 2.80 m height

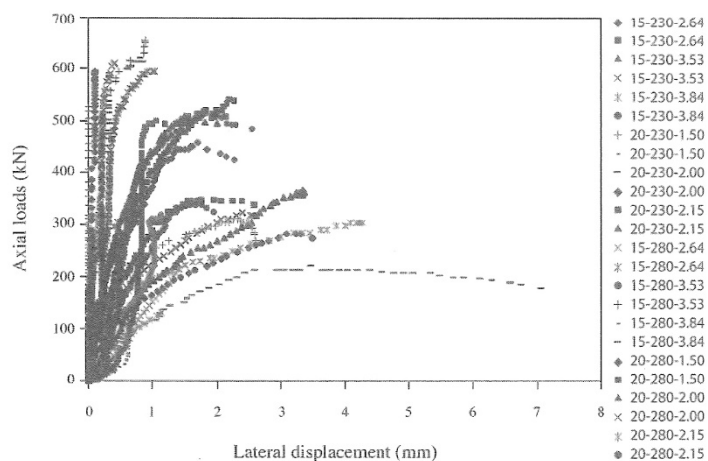


Figure 7. Axial load versus lateral displacement diagram of the column specimens

หนึ่งแล้ว เสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดมากจะมีค่าการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างมากกว่าเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดน้อย โดยค่าการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบที่จุดวิบัติมีค่าค่อนข้างน้อยคือ ไม่เกิน 7 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างมีค่าน้อยมาก และเสาเกิดการวิบัติตามที่ได้กล่าวไปแล้วในทุกอัตราส่วนความชะลูดที่ศึกษา

ส่วนความปลอดภัยของสมการออกแบบเสาที่เสนอ

จากตารางที่ 3 เมื่อนำค่าแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบหารด้วยค่าที่ได้จากสมการออกแบบเสาสมการที่ 2 (และคูณด้วยสมการที่ 3 ในกรณีที่มีอัตราส่วนความชะลูดเกิน 60) โดยใช้ค่าสมบัติทางกลของวัสดุที่ทดสอบได้ในตารางที่ 2 และขนาดหน้าตัดจริงของวัสดุแล้ว พบว่า ส่วนความปลอดภัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงอัดในแนวแกนมีค่า

Table 3. Maximum compressive loads from the test, working compressive loads from the modified design equation and factor of safety

Specimens	L/r	Max. loads from the test (kN)	Working loads from the modified design equation (kN)	Factor of safety
15-75-2.64	20	397	124	3.20
15-75-3.53	20	490	144	3.40
15-75-3.84	20	577	151	3.82
20-75-1.50	15	745	186	4.01
20-75-2.00	15	778	207	3.76
20-75-2.16	15	808	214	3.78
15-175-2.64	47	338	102	3.31
15-175-3.53	47	390	110	3.55
15-175-3.84	47	456	116	3.93
20-175-1.50	35	599	155	3.86
20-175-2.00	35	644	178	3.62
15-230-2.64	61	315	79	3.99
15-230-3.53	61	328	92	3.57
15-230-3.84	61	345	96	3.59
20-230-1.50	46	514	138	3.72
20-230-2.00	46	608	153	3.97
20-230-2.15	46	650	158	4.11
15-280-2.64	75	287	64	4.48
15-280-3.53	75	314	74	4.24
15-280-3.84	75	276	78	3.54
20-280-1.50	56	499	122	4.09
20-280-2.00	56	560	136	4.12
20-280-2.15	56	536	140	3.83

อยู่ระหว่าง 3.20 ถึง 4.48 ซึ่งน่าจะสูงเพียงพอในการใช้งานจริงเมื่อเทียบกับส่วนความปลอดภัยที่ใช้ในสมการที่ 1 ซึ่งในกรณีของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 4.70 และในกรณีของเหล็กที่มีค่าเท่ากับ $1/[(0.40)(0.85)] = 2.94$

สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ในช่วงแรกพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยห็นภายใต้แรงอัดในแนวแกนจะค่อนข้างเป็นแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนกระทั่งกำลังรับแรงอัดของเสามีค่าประมาณร้อยละ 80 - 90 ของกำลังรับแรงอัดสูงสุด จากนั้น พฤติกรรมของเสาเริ่มเป็นแบบไร้เชิงเส้น และเมื่อแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอีกจนกระทั่งทำให้คอนกรีตและซีเมนต์ไยห็นมีค่าความเครียดเท่ากับความเครียดประลัยแล้ว คอนกรีตและซีเมนต์ไยห็นจะเกิดการแตกร้าวอย่างรวดเร็วที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของเสา จากนั้น กำลังรับแรงอัดของเสาจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนและรอยแตกร้าวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดการบิดอย่างทันทีทันใด โดยมีลักษณะการบิดที่เกิดขึ้นจากการคลากในเหล็กเสริมและเกิดการอัดแตกในคอนกรีตและท่อซีเมนต์ไยห็น

2. จากการเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบและค่าแรงอัดที่คำนวณได้จากสมการดัดแปลงของ ว.ส.ท. (สมการที่ 2) ที่นำเสนอพบว่า ค่าส่วนความปลอดภัยของเสาในช่วงอัตราส่วนความชะลุดที่ศึกษามีค่าอยู่ช่วง 3.20 ถึง 4.48 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าส่วนความปลอดภัยของวัสดุที่ใช้ทำเสา ดังนั้น สมการดัดแปลงของ ว.ส.ท. ที่เสนอหรือสมการที่ (2) จึงสามารถนำมาใช้งานได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีอยู่ว่า ซีเมนต์ไยห็นเป็นวัสดุที่สามารถก่อให้เกิดมะเร็งในปอดได้ หากสูดดมเข้าสู่ร่างกายเป็นจำนวนมาก ดังนั้น ต้อง

มีการป้องกันไม่ให้ฝุ่นซีเมนต์ไยห็นที่เกิดจากการตัดต่อเข้าสู่ร่างกาย และควรมีการทาสีพลาสติกทับผิวหน้าของท่อซีเมนต์ไยห็นหลังจากก่อสร้างเสร็จเพื่อป้องกันไม่ให้ซีเมนต์ไยห็นหลุดล่อนมาผสมกับอากาศได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย สถานที่ และเครื่องมือทดสอบ โดยผลการทดสอบและข้อสรุปตามที่ปรากฏในบทความวิจัยนี้เป็นข้อคิดเห็นของผู้วิจัยเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- กฤษณะ เผ่ากคะ, ศุภกิจ สายประเสริฐ, และ ณัฐพล ทองขาว. (2544). เสาท่อซีเมนต์ไยห็นรับแรงอัดตามแนวแกน. รายงานการวิจัยระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 60 หน้า.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย. (2536). มอก. 24-2536. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร, 14 หน้า.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2540). มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร, 120 หน้า.
- Chung, J., Tsuda, K., and Matsui, C. (1999). High-strength concrete filled square tube columns subjected to axial loading. Proceedings of the Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, August 27-29, 1999, Kochi, Japan, p. 955-960.
- MacGregor, J.G. (1992). Reinforced Concrete: Mechanics and Design. 2nd ed. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 848 p.

- Mirmiran, A., and Shahaway, M. (1997). Behavior of concrete columns confined by fiber composites. *ASCE J. of Structural Engineering*, 123(5):583-590.
- Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. (2001). ASTM C39. American Society for Testing and Materials, West Conshohoken, Philadelphia, p. 5.
- Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. (1994). ASTM C469. American Society for Testing and Materials, West Conshohoken, Philadelphia, p. 5.
- Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. (1996). ASTM D695. American Society for Testing and Materials, West Conshohoken, Philadelphia, p. 7.
- Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. (2000). ASTM E8. American Society for Testing and Materials, West Conshohoken, Philadelphia, p. 22.