



TUBED CONCRETE COLUMN หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าและสมการออกแบบของเสาเชิงประกอบ SQUARE TUBED CONCRETE COLUMNS AND COMPOSITE COLUMN DESIGN EQUATIONS

จักษดา ชำรงวุฒิ (Jaksada Thumrongvut)¹

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (Sittichai Seangatith)²

หวังแก้ว บุญสวน (Whangkaew Boonsuan)³

¹ผู้ช่วยวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี jaksada@g.sut.ac.th

²รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี sitichai@sut.ac.th

³นักศึกษานิเทศศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี whangkaew@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ : บทความนี้กล่าวถึงผลการทดสอบ Tubed concrete column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงและการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของเสาที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมในการใช้งาน จากการศึกษาพบว่า เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับของเสาคอนกรีตอ้างอิง Tubed concrete column มีกำลังรับแรงสูงสุดและความเหนียวเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังของคอนกรีตและความหนาของท่อเหล็ก แต่กำลังรับแรงในแนวแกนของเสาที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ทำนายโดยสมการออกแบบเสาเชิงประกอบที่เกี่ยวข้อง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาสมการที่ใช้ในการออกแบบเสา CFT ประเภทนี้ต่อไป

ABSTRACT : This paper presents the results of the experimental study on the square Tubed concrete columns subjected to concentrically axial loads applied directly to the concrete core and the comparison of the test results with those calculated from existing standard design equations in order to study the adequacy of the design equations. It was found that the Tubed concrete column has a much higher compressive strength and ductility than those of the reference concrete column, depending on the ultimate compressive strengths of the concrete and the wall thicknesses of the steel jacket. But, the obtained axial compressive strength of the Tubed concrete columns is significantly lower than those calculated from existing standard design equations. Thus, there is a need to develop the design equation for this type of column.

KEYWORDS : Tubed concrete column, Axial compression, Composite action

1. บทนำ

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) หรือเสา CFT เป็นเสาที่ถูกก่อสร้างโดยใช้ท่อเหล็กกลวง ซึ่งมีหน้าตัดทรงกลมหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยม เป็นแบบหล่อถาวรและเทคอนกรีตลงในช่องว่างของท่อเหล็กเพื่อใช้เป็นแกนของเสา โดยท่อเหล็กได้ถูกออกแบบให้ทำงานร่วมกับคอนกรีตในลักษณะเสา

คอมโพสิท (composite column) โดยท่อเหล็กอาจจะถูกออกแบบให้ทำหน้าที่หลักในการรองรับหน่วยแรงในที่เกิดจากแรงกดอัดและโมเมนต์ และอาจถูกออกแบบรองรับหน่วยแรงตามขวาง (transverse stress) ที่เกิดจากแรงเฉือน หรืออาจถูกออกแบบรองรับแรงดันเนื่องจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด ซึ่งทำให้เกิดผลการโอบรัด (confining effect) ต่อแกน

คอนกรีต ในขณะที่เดียวกัน แกนคอนกรีตทำหน้าที่ช่วยท้อเหล็กในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกนบางส่วนและยังช่วยให้ท้อเหล็กมีความต้านทานต่อการเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) เพิ่มขึ้น ซึ่งผลของ composite action ข้างต้นทำให้เสา CFT มีข้อดีเหนือกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็กโครงสร้าง ทั้งในด้านความแกร่ง (stiffness) กำลัง (strength) ความเหนียว (ductility) และการดูดซับพลังงาน (energy absorption) และเป็นผลส่งต่อให้เสา CFT เป็นเสาที่ใช้ปริมาณเหล็กลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเสาเหล็กโครงสร้าง และท้อเหล็กยังทำหน้าที่เป็นแบบหล่อถาวรและค้ำยัน ซึ่งทำให้การก่อสร้างดำเนินการได้โดยง่ายและทำให้ราคาค่าก่อสร้างโครงสร้างลดลง ดังนั้น จากข้อดีดังกล่าวทำให้ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เสา CFT จึงได้รับความนิยมและประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ทั้งประเทศใน สหรัฐอเมริกา จีน และ ญี่ปุ่น [1-3] โดยใน สหรัฐอเมริกา เสา CFT ที่ใช้อาคารเดี่ยวและอาคารสูงปานกลาง มักมีอัตราส่วนของความกว้างของเสาคือความหนาของท้อเหล็ก (B/t) อยู่ในช่วง 26 ถึง 48 และมีอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างของเสา (L/B) อยู่ในช่วง 5 ถึง 9 [4]

ในปัจจุบันเสาประเภทนี้ถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่น มาตรฐานสำหรับออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท.1008-38 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย [5] และข้อกำหนดของ AISC/LRFD 1994 ใน Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD) ของ AISC [6] อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนมาตรฐานการออกแบบและข้อกำหนดดังกล่าว พบว่าสมการที่ใช้หาความหนาค่าสุดของท้อเหล็กที่ต้องใช้ในเสาเชิงประกอบแตกต่างกัน โดยข้อกำหนดของ AISC/LRFD ($\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{2E_s}{F_y}}$) จะให้ค่าความหนาที่สูงกว่ามาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. ($\frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{3E_s}{F_y}}$) 1.225 เท่า

เสา CFT ถูกแบ่งตามลักษณะการออกแบบให้ท้อเหล็กรองรับหน่วยแรงเป็น 2 แบบคือ 1) ทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กแกนรองรับหน่วยแรงในแนวแกน ซึ่งเสา CFT แบบนี้จะรองรับแรงที่กระทำผ่านท้อเหล็กและคอนกรีตร่วมกัน และ 2) ทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กเสริมในแนวขวาง แนวคิดของเสา CFT แบบที่สองได้ถูกนำเสนอโดย Tomii *et al.* [7] โดยมีวัตถุประสงค์หลักให้ท้อเหล็กรองรับแรงกระทำตามขวางและโมเมนต์เนื่องจาก

แผ่นดินไหว ซึ่งเสาประเภทนี้มักถูกเรียกว่า Tubed column ซึ่งท้อเหล็กของเสา CFT ประเภทนี้ถูกออกแบบมาให้รองรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยตรง โดยการเว้นช่องว่างระหว่างท้อเหล็กกับท้องคานที่ปลายบนของเสา ดังนั้น ภายใต้แรงกระทำ ท้อเหล็กจะทำหน้าที่เป็นปลอก (jacket) โอบรัดต่อแกนเสาคอนกรีต ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังรับหน่วยแรงในแนวแกนและความเหนียวของเสาให้สูงขึ้น ซึ่งการก่อสร้างลักษณะนี้สอดคล้องกับมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ข้อที่ 4314 ที่กำหนดให้ “กำลังในการรับแรงตามแนวแกนใดๆ ที่กำหนดให้รับโดยคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องถ่ายผ่านเข้าไปในคอนกรีตโดยองค์อาคารหรือเป็นหูช้างในลักษณะแบกทานโดยตรงลงบนคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบนั้น”

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า Tubed column เป็นเสาที่มีข้อดีหลายข้อและประยุกต์ใช้ได้ทั้งในโครงสร้างที่ก่อสร้างใหม่ แต่การศึกษาเกี่ยวกับ Tubed column มีค่อนข้างน้อยและมุ่งประเด็นในกรณีเสาน้ำดีดกลม และถูกกระทำโดยแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน และลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตและ Tubed concrete column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า เพื่อนำค่ากำลังของเสาที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. และสมการตามข้อกำหนดของ AISC/LRFD เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมของสมการดังกล่าวในการทำนายกำลังของเสา

2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

2.1 ตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยถูกกระทำตามมาตรฐานของ ASTM โดยสมบัติทางกลเฉลี่ยของวัสดุที่ทดสอบได้ถูกนำเสนออยู่ในตารางที่ 1

เสาตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าขนาด 150×150 mm และสูง 750 mm เช่นเดียวกับขนาดของท้อเหล็ก โดยมีจำนวนทั้งสิ้น 33 ตัวอย่าง และถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 เป็นเสาคอนกรีตอ้างอิงและเสากลุ่มที่ 2 ถึง 4 เป็นเสา Tubed concrete column ชื่อเสาตัวอย่างในตารางที่ 1 ถูกกำหนดในรูปแบบ X-Y-Z ซึ่ง X หมายถึง ประเภทของเสา โดย C แทนเสาคอนกรีตอ้างอิง S แทน Tubed concrete column แบบท้อเหล็ก และ SL แทน Tubed concrete column แบบท้อ stainless

steel ชนิด 304 (โครเมียม 18% และนิกเกิล 8%) โดย stainless steel ถูกนำมาศึกษาด้วยเนื่องจากมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อมสูง Y หมายถึง ค่า f'_{co} ของคอนกรีต และ Z หมายถึง ความหนาของท่อเหล็ก (t) โดยสรุปแล้วตัวอย่างทดสอบมีความกว้างของเสาต่อความหนาของท่อ (B/t) และความยาวต่อความกว้างของเสา (L/B) อยู่ในช่วงที่ใช้ในเสา CFT

ของอาคารเดี่ยวและอาคารสูงปานกลางในสหรัฐอเมริกา และมี $\rho_{sc} > 4\%$ ตามที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบ AISC/LRFD ขอให้ทราบด้วยว่า ท่อเหล็กที่หนา 4.5 mm ผ่านข้อกำหนดที่ 4314 ของ ว.ส.ท. 1008-38 และท่อเหล็กที่หนา 3.2 mm และไม่ผ่านข้อกำหนดของ AISC/LRFD ทั้งสองกรณี

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของวัสดุ

Group	Sample	t (mm)	B/t ratio	L/B ratio	ρ_{sc} (%)	Concrete			Steel tube		
						A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	E_c (GPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
1	C-18-0	-	-	-	-	22500	18.7	20.7	-	-	-
	C-25-0	-	-	-	-	22500	26.3	24.2	-	-	-
	C-32-0	-	-	-	-	22500	31.9	28.0	-	-	-
2	S-18-3.2	3.2	46.9	5.0	8.2	20632	18.7	20.7	1833	312	205
	S-25-3.2	3.2	46.9	5.0	8.2	20632	26.3	24.2	1833	312	205
	S-32-3.2	3.2	46.9	5.0	8.2	20632	31.9	28.0	1833	312	205
3	S-18-4.5	4.5	33.3	5.0	11.4	19863	18.7	20.7	2567	422	188
	S-25-4.5	4.5	33.3	5.0	11.4	19863	26.3	24.2	2567	422	188
	S-32-4.5	4.5	33.3	5.0	11.4	19863	31.9	28.0	2567	422	188
4	SL-18-4.5	4.5	33.3	5.0	11.4	19863	18.7	20.7	2567	264	203
	SL-25-4.5	4.5	33.3	5.0	11.4	19863	26.3	24.2	2567	264	203
	SL-32-4.5	4.5	33.3	5.0	11.4	19863	31.9	28.0	2567	264	203

2.2 การทดสอบตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ 1 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งเสาตัวอย่างเข้ากับเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 2000 kN โดยแรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อเสาที่ปลายของเสาผ่าน steel bearing plate หนา 50 mm ลงสู่คอนกรีตโดยตรง การหัดตัวในแนวแกนของเสาถูกวัดโดย Linear Variable Differential Transducers (LVDT) ที่ติดตั้งที่ปลายด้านบนบริเวณหัวคของเครื่อง UTM เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว เสาตัวอย่างจะถูก pre-loading 50 kN และ unloading เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวคและตัวอย่างทดสอบ จากนั้น ทำการทดสอบโดยเพิ่มแรงกระทำอย่างช้าๆ และใช้ Data Acquisition System (DAQ) เก็บข้อมูลของแรงกดอัด

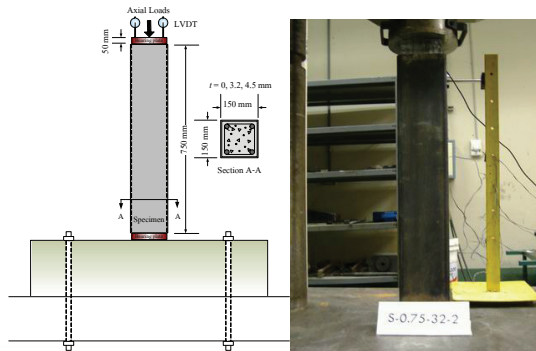
3. ผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัด

ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหัดตัวในแนวแกนของเสา โดยจัดกลุ่มตามค่า f'_{co} และจำกัดการ

แสดงผลที่ค่าการหัดตัว 20 mm หรือ axial strain ในคอนกรีต 0.0267 mm/mm ซึ่งเป็นค่า strain ที่สูงกว่า ultimate compressive strain ของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า โดยในการศึกษานี้ได้นิยามให้ค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก (first maximum load) ที่เกิดขึ้นในเสาหรือค่าแรงที่จุดที่ผนังท่อเหล็กเกิดการโก่งคเวเฉพาะที่สามารถสังเกตเห็นได้เป็น “ค่ากำลังรับแรงสูงสุดใช้งาน” หรือ P'_{max} ของเสา จากภาพพบว่า ในช่วงแรก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหัดตัวของเสาคอนกรีตอ้างอิงและ Tubed concrete column มี slope และลักษณะเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเกิดจากการที่คอนกรีตถูกกระทำโดยแรงกดอัดโดยตรงและคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่า Poisson's ratio ต่ำ ดังนั้นคอนกรีตจึงมีการขยายตัวทางด้านข้างที่น้อยมากในช่วงแรกและเป็นวัสดุหลักในการรับแรงกดอัด โดยท่อเหล็กร่วมรับแรงกดอัดได้บ้าง โดยอาศัยการถ่ายแรงบางส่วนจากแกนคอนกรีตโดยอาศัย micro-interlocking และแรงเสียดทานระหว่างผิวแกนคอนกรีตและผิวในของท่อเหล็ก [8] โดยพฤติกรรมของเสาในช่วงนี้มี

ลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนถึงจุดที่เสารับแรงกดอัดประมาณ 50-70 % ของแรง P_{max}^I จากนั้น ในช่วงที่สอง เมื่อแกนคอนกรีตถูกแรงกระทำเพิ่มขึ้นอีก คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก (microcracking) ในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น เนื่องจาก Poisson's effect ดังนั้น slope ของกราฟความสัมพันธ์จึงเริ่มมีค่าลดลงและพฤติกรรมของ Tubed column ค่อยๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง (nonlinear) มากขึ้น



ภาพที่ 1 การติดตั้งเสาตัวอย่างทดสอบ

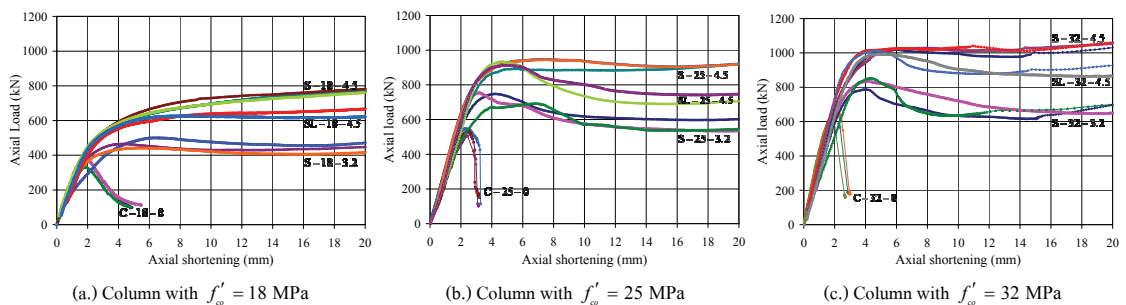
จากภาพที่ 2 ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของ Tubed concrete column ในช่วงที่สองขึ้นอยู่กับ f'_{co} ของคอนกรีตและความหนาของท่อเหล็ก (t) โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบคือ

แบบที่ 1 เสารองรับแรงกดอัดในแนวแกนได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดวิบัติหรือ strain hardening โดยพฤติกรรมลักษณะนี้เกิดขึ้นในตัวอย่างเสา S-18-4.5 และ SL-18-4.5 ซึ่งเป็นเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังต่ำ (18 MPa) และท่อเหล็กหนา (4.5 mm) โดยในกรณีนี้ เมื่อแรงกดอัดทำให้แกนคอนกรีตในบริเวณที่แรงกดอัดกระทำเกิดการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของท่อเหล็กจะสามารถต้านทานต่อ

แรงดันทางด้านข้างได้เป็นอย่างดี และท่อเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้รับแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง โดยแรงกดอัดในแกนคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่ผนังของท่อเหล็กมีการโค้งเดาะเฉพาะที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทไปยังท่อเหล็กในบริเวณกึ่งกลางความสูงของเสา โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างผิวของแกนคอนกรีตและผิวด้านในของท่อเหล็ก

แบบที่ 2 เสารองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่ง จากนั้น เสามีความแข็งแรงประมาณศูนย์หรือ elastic-perfectly plastic ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างเสา S-25-4.5 และ S-32-4.5 ซึ่งเป็นเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังปานกลาง 25 MPa และท่อเหล็กหนา 4.5 mm โดยในกรณีนี้ เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าถึง P_{max}^I และแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของท่อเหล็กมีความแข็งแรงต่อการดัดในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของท่อเหล็กจะเกิดการโค้งเดาะเฉพาะที่และท่อเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงกดอัดที่คงที่ได้อย่างต่อเนื่อง

แบบที่ 3 เสารองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว เสามีความแข็งแรงลดลงหรือ strain-softening ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างเสา S-18-3.2, S-25-3.2, S-32-3.2 ซึ่งเป็นเสาที่มีผนังของท่อเหล็กบาง 3.2 mm โดยในกรณีนี้ เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าถึง P_{max}^I และแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของท่อเหล็กไม่มีความแข็งแรงต่อการดัดเพียงพอในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต จากนั้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของท่อเหล็กจะเกิดการโค้งเดาะเฉพาะที่และท่อเหล็กจะไม่สามารถจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกดอัดได้เพิ่มขึ้น



(a.) Column with $f'_{co} = 18$ MPa

(b.) Column with $f'_{co} = 25$ MPa

(c.) Column with $f'_{co} = 32$ MPa

ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของ Tubed concrete column

3.2 ลักษณะการวิบัติ

จากผลการทดสอบพบว่า Tubed concrete column เกิดการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยเสาส่วนใหญ่ (ยกเว้นเสา SL-32-4.5-1 และ SL-32-4.5-2 ที่วิบัติเนื่องจากการปริแตกของรอยเชื่อมก่อนเวลาอันควร) เกิดการวิบัติที่ค่าการหดตัวเกินกว่า 70 mm หรือที่ค่าความเครียดเฉลี่ยมากกว่า 0.093 mm/mm (9.3% strain) ซึ่งแสดงว่า เสาที่ศึกษานี้เป็นเสาที่มีความเหนียวในแนวแกน (axial ductility) ที่สูงมาก เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตอ้างอิงเกิดการวิบัติโดยการแตกร้าวของคอนกรีตอย่างรวดเร็วที่ค่าการหดตัวประมาณ 2-3 mm โดย Tubed concrete column เกิดการวิบัติโดยผนังของท่อเหล็กเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ที่ปลายด้านบนและล่างที่ตำแหน่งประมาณ 100-150 mm วัดจากปลายทั้งสองด้านของเสา ดังที่แสดงในภาพที่ 3(a) ดังนั้น ท่อเหล็กจึงไม่มีความสามารถโอบรัดคอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้นได้ แต่ท่อเหล็กดังกล่าวจะทำหน้าที่ช่วยจำกัด (contain) แกนคอนกรีตให้อัดตัวเข้าด้วยกันและทำให้การ crushing ของแกนคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตยังคงมีความสามารถในการรับแรงกดอัดในแนวแกนได้อย่างต่อเนื่อง และทำให้แรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นถ่ายไปยังท่อเหล็ก และเป็นผลทำให้เสามีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมาก ก่อนที่เสาจะเกิดการวิบัติโดยรวม โดยลักษณะการวิบัตินี้แตกต่างจากการวิบัติของเสาคอนกรีตอ้างอิงที่เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตในแนวทแยงและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (abrupt failure) ดังที่แสดงในภาพที่ 3(b)



ภาพที่ 3 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของเสา

4. การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed concrete column กับสมการออกแบบของเสาเชิงประกอบ

เมื่อสมมุติให้เสาเชิงประกอบ (composite column) มี full interaction เกิดขึ้นระหว่างแกนคอนกรีตและท่อเหล็กภายใต้การกระทำของแรงแล้ว กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดเชิงทฤษฎีของเสาดังกล่าวจะหาได้จากสมการ

$$P_{u,cal} = P_{s,cal} + P_{c,cal} \quad (1)$$

โดยที่ $P_{s,cal} = f_y A_s$ คือกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่จุดครากของท่อเหล็ก $P_{c,cal} = f_{co}' A_c$ คือกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต ขอให้ทราบด้วยว่า สมการนี้เป็นสมการเดียวกับสมการที่ใช้หา nominal axial strength ของเสาเชิงประกอบที่กำหนดอยู่ใน Eurocode 4 ENV 1994-1-1 ของ British Standard Institute

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^I ที่ทดสอบได้กับกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาเชิงประกอบในทางทฤษฎี จากตารางพบว่า ค่า $P_{max}^I / P_{u,cal}$ ของ Tubed concrete column ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 0.49-0.77 ซึ่งน้อยกว่า 1.0 เป็นอย่างมาก ดังนั้น เสาตัวอย่างทดสอบไม่มี full interaction เกิดขึ้นระหว่างแกนคอนกรีตและท่อเหล็กและทำให้ไม่เกิด confining effect ต่อแกนคอนกรีต ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ตัวอย่าง Tubed concrete column ที่ศึกษานี้เกิดการวิบัติโดยการ crushing ของคอนกรีต และ local tube wall buckling ของผนังท่อเหล็กที่ปลายด้านบนและล่างของปลายทั้งสองด้านของเสา ซึ่งเป็นการวิบัติแบบ localized failure โดยมีสาเหตุหลักมาจากท่อเหล็กมีความหนาไม่เพียงพอที่จะช่วยโอบรัดแกนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และขอให้สังเกตด้วยว่า ค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของแกนคอนกรีตมีค่าอยู่ในช่วง 0.85-0.89 ของ $P_{c,cal}$ ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ 0.85 ที่ใช้ในการลดกำลังของคอนกรีตในสมการของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 อย่างไรก็ตาม หากเปรียบเทียบ ค่า $P_{max}^I / P_{c,cal}$ พบว่า การเสริมท่อเหล็กให้กับแกนคอนกรีตสามารถเพิ่มกำลังของเสาเพิ่มขึ้นในช่วง 1.21-1.95 เท่าของแกนคอนกรีต

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^I ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 และสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD และขอให้ทราบด้วยว่า เนื่องจากมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ตามข้อกำหนดที่ 4314 กำหนดให้ทำการคำนวณหากำลังของเสาเชิงประกอบโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I และค่ากำลังรับแรงกอดัดสูงสุดเชิงทฤษฎี

Sample	P_{max}^I (kN)	$P_{max}^I / P_{s,cal}^I$	$P_{max}^I / P_{c,cal}^I$	$P_{max}^I / P_{u,cal}^I$
C-18-0	359	-	0.85	0.85
C-25-0	528	-	0.89	0.89
C-32-0	640	-	0.89	0.89
S-18-3.2	469	0.82	1.21	0.49
S-25-3.2	731	1.28	1.35	0.66
S-32-3.2	824	1.44	1.25	0.67
S-18-4.5	727	0.67	1.95	0.50
S-25-4.5	922	0.85	1.76	0.57
S-32-4.5	1033	0.95	1.63	0.60
SL-18-4.5	626	0.92	1.68	0.60
SL-25-4.5	923	1.36	1.77	0.77
SL-32-4.5	1002	1.48	1.58	0.76

จากตารางพบว่า ค่า P_{max}^I / P_{EIT}^I ของ Tubed concrete column ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 0.54-0.87 ซึ่งน้อยกว่า 1.0 เป็นอย่างมาก เช่นเดียวกับในกรณีกำลังรับแรงกอดัดสูงสุดเชิงทฤษฎีข้างต้น ดังนั้น การรวมกำลังรับแรงกอดัดของท่อเหล็กเข้ากับสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำให้สมการดังกล่าว

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I กับค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ว.ส.ท. และ AISC/LRFD

Sample	P_{max}^I (kN)	P_{EIT}^I (kN)	P_{max}^I / P_{EIT}^I	P_{AISC}^I (kN)	P_{max}^I / P_{AISC}^I
C-18-0	359	358.0	1.00	-	-
C-25-0	528	502.8	1.05	-	-
C-32-0	640	609.7	1.05	-	-
S-18-3.2	469	871.2	0.54	786.0	0.60
S-25-3.2	731	992.2	0.74	896.6	0.82
S-32-3.2	824	1081.5	0.76	979.0	0.84
S-18-4.5	727	1358.1	0.54	1195.3	0.61
S-25-4.5	922	1469.6	0.63	1300.1	0.71
S-32-4.5	1033	1552.0	0.67	1378.8	0.75
SL-18-4.5	626	953.4	0.66	874.1	0.72
SL-25-4.5	923	1064.9	0.87	981.4	0.94
SL-32-4.5	1002	1147.2	0.87	1061.3	0.94

เมื่อ $\lambda_c = \sqrt{\frac{F_{my}}{F_E}} = \left(\frac{KL}{r_m \pi}\right) \sqrt{\frac{F_{my}}{E_m}}$ คือ column slenderness parameter F_E คือ Euler buckling stress ของเสา r_m คือ radius of gyration ของปลอกเหล็ก KL คือ ความยาวประสิทธิผลของเสา

overestimate กำลังของ Tubed concrete column ซึ่งไม่ปลอดภัยในการใช้งาน

ในส่วนของการคำนวณกำลังรับแรงกอดัดในแนวแกนของเสาเชิงประกอบ AISC/LRFD 1994 กำหนดให้คำนวณหาโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองค์อาคารเหล็ก โครงสร้างทั่วไป ยกเว้น ค่ากำลังและความแกร่งของวัสดุจะถูกแปลงเพื่อพิจารณาผลของ composite action ระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็ก โดย AISC/LRFD ได้กำหนดให้สมการในการคำนวณกำลังรับแรงกอดัดในแนวแกนของเสาเชิงประกอบจากหน่วยแรงวิกฤติ (critical stress, F_{cr}) ซึ่งอยู่ในรูป

$$P_{cr} = A_s F_{cr} \quad (2)$$

เมื่อ A_s คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของปลอกเหล็กและ F_{cr} หาได้จากสมการ

$$F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_{my} \quad \text{สำหรับ } \lambda_c \leq 1.5 \quad (3)$$

$$F_{cr} = (0.877 / \lambda_c^2) F_{my} \quad \text{สำหรับ } \lambda_c > 1.5 \quad (4)$$

นอกจากนี้แล้ว ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกอดัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^I ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD จากตารางพบว่า ค่า P_{max}^I / P_{AISC}^I ของ Tubed concrete column

