บทที่ 3
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูง

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูง (กำลังคอนกรีตประมาณ 55 MPa ขึ้นไป) โดยทำการวิเคราะห์ความถดถอย (regression analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ โดยแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่กับตัวแปรพฤติกรรมอื่นๆ และส่วนของกำลังรับแรงเฉือนของเสา

3.1 ข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ในการวิเคราะห์

ข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูงได้มาจาก 2 แหล่ง คือ จากทางเว็บไซต์ http://maximus.ce.washington.edu/~peera1/ ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงเลข (digital data) คู่ลำดับระหว่างค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (mm) และค่าแรงกระทำด้านข้าง (kN) ที่บันทึกได้ในระหว่างการทดสอบเสา ข้อมูลดังกล่าวถูกรวบรวมขึ้นโดยหน่วยงาน Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) สำหรับข้อมูลแหล่งที่สองได้มาจากเอกสารการวิจัยของนักวิจัยต่างๆ ที่ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูง

อนึ่ง ข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูงที่นำมาวิเคราะห์จะจำกัดเฉพาะเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่เสริมเหล็กปลอกเดี่ยว (tied columns) เท่านั้น และในส่วนของการวิเคราะห์ตัวแปรพฤติกรรมต่างๆ จะพิจารณาเฉพาะเสาที่เกิดการวิบัติโดยการดัด (flexure failure) ซึ่งเป็นรูปแบบการวิบัติที่เหนียวและมีความปลอดภัย

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของหน้าตัดและเหล็กเสริม รวมถึงค่าแรงอัดตามแนวแกนและประวัติการให้แรงกระทำด้านข้างของเสาทดสอบต่างๆ โดยเพื่อความกระชับได้มีการใช้สัญลักษณ์ในตาราง ดังนี้

ก. ชนิดของตัวอย่างทดสอบ (specimen type) แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ ตัวอย่างทดสอบแบบเสายื่น (Cantilever: C) ตัวอย่างทดสอบแบบดัดกลับ (Double

Curvature: DC) และตัวอย่างทดสอบแบบจุดหมุนสองปลาย (Double Ended: DE) ดังแสดงในรูปที่ 3.1

ข. รูปแบบการจัดเรียงเหล็กปลอก (tie configuration) แบ่งออกเป็น 5 แบบ (ดูรูปที่ 3.2) ได้แก่ แบบที่มีเหล็กปลอกล้อมรอบเพียงวงเดียว (Rectangular ties: R) แบบที่มีเหล็กปลอกล้อมรอบหนึ่งวงและมีเหล็กปลอกวงปิดอีกวงเพิ่มเข้าไปในแต่ละทิศทาง (Rectangular and Interlocking ties: RI) แบบที่มีเหล็กปลอกล้อมรอบหนึ่งวงและมีเหล็กยึดทางขวางที่มีของอ 90° ที่ปลายข้างหนึ่งและ 135° ที่ปลายอีกข้างหนึ่งเพิ่มเข้าไป (Rectangular ties with J-hooks: RJ) แบบที่มีเหล็กปลอกล้อมรอบหนึ่งวงและมีเหล็กปลอกวงปิดในแนวทแยงอีกหนึ่งวง (Rectangular and Diagonal ties: RD) และแบบที่มีเหล็กปลอกล้อมรอบหนึ่งวงและมีเหล็กปลอกวงปิดรูป 8 เหลี่ยมอีกหนึ่งวง (Rectangular and Octagonal ties: RO)

อนึ่ง ถ้าเขียนสัญลักษณ์แทนรูปแบบการจัดเรียงเหล็กปลอกโดยไม่มีวงเล็บต่อท้ายจะหมายถึง เหล็กปลอกมีลักษณะของอเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับบริเวณแผ่นดินไหวรุนแรง (seismic detail) เช่น รูปแบบการจัดเรียงแบบ RI หมายถึง เหล็กปลอกทุกวงมีของอ 135° แต่ถ้าเขียนสัญลักษณ์โดยมีวงเล็บต่อท้ายจะหมายถึงเหล็กปลอกมีลักษณะของอผิดไปจากข้อกำหนดในบริเวณแผ่นดินไหวรุนแรง เช่น RI(W) หมายถึง เหล็กปลอกแต่ละวงจะไม่มีของอแต่ใช้การเชื่อมแทน (welded hoops) และ R(90) หมายถึง เหล็กปลอกมีของอ 90°

ค. ประวัติการให้แรงกระทำด้านข้าง (load history type) จะเขียนอยู่ในรูปแบบ : การเพิ่มค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (จำนวนรอบที่กระทำซ้ำ) (displacement increment (repetition)) เช่น 1(2) หมายถึง เพิ่มค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างขึ้นทีละ $1\,\Delta_y$ โดยมีการซ้ำ 2 รอบในแต่ละระดับของการเคลื่อนตัว 0.5%(2) หมายถึง เพิ่มค่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้าง (drift ratio) ขึ้นทีละ 0.5% โดยมีการซ้ำ 2 รอบในแต่ละระดับของการเคลื่อนตัว และ *2(2) หมายถึง เพิ่มค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างขึ้นเป็น 2 เท่าของค่าเดิม โดยมีการซ้ำ 2 รอบในแต่ละระดับของการเคลื่อนตัว

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเหล็กปลอกประสิทธิผลกับค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัว

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าอัตราส่วนเหล็กปลอกประสิทธิผลและค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัว ($\mu_{\Delta,env.}$) ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเลข (digital data) โดยสร้างเส้นโค้งโอบคลุม (envelope curve) คลุมกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างและแรงกระทำด้านข้างตามวิธีการที่เสนอโดย Sheikh และ Khoury [1997] และหาค่าการเคลื่อนตัวจุดคราก (yield displacement, Δ_y) จากการประมาณค่าสติฟเนสเริ่มแรกด้วยสติฟเนสซีแคนต์ที่ระดับแรงกระทำเท่ากับ 30% ของค่าแรงด้านข้างสูงสุด (30% H_{max}) (รูปที่ 2.11) เนื่องจากข้อมูลเชิงเลข (digital data) ที่ใช้วิเคราะห์บางครั้งมีความแปรปรวนในช่วงแรกๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวจุดคราก จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ข้อมูลในช่วงแรกๆ โดยตัดข้อมูลที่เสียทิ้งและปรับให้การเคลื่อนตัวมีค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ ณ จุดที่แรงด้านข้างมีค่าเท่ากับศูนย์ (เปลี่ยนจุดตั้งต้นของแกน Δ หรือย้ายแกน H) ในกรณีที่ข้อมูลเชิงเลขของตัวอย่างเสาทดสอบมีความแปรปรวนสูง จนต้องมีการปรับแก้ข้อมูลอย่างมาก ก็จะไม่นำตัวอย่างเสาทดสอบดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์

รูปที่ 3.3 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเหล็กปลอกประสิทธิผล (ρ_A) กับค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวที่ได้จากการสร้างเส้นโค้งโอบคลุม ($\mu_{\Delta,env}$) โดยมีตัวอย่างทดสอบทั้งสิ้น 37 ตัวอย่าง จะสังเกตเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนเหล็กปลอกประสิทธิผลเพิ่มขึ้นความเหนียวเชิงความโค้งก็จะมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามมีบางจุดข้อมูลที่มีค่าความเหนียวเชิงความโค้งสูงกว่าจุดอื่น ๆ สำหรับค่าอัตราส่วนเหล็กปลอกประสิทธิผลเดียวกัน (จุดที่ถูกวงกลมล้อมรอบ) ทำให้ข้อมูลมีการกระจัดกระจาย (scatter) มาก จากการตรวจสอบพบว่าจุดข้อมูลเหล่านี้เป็นของเสาทดสอบที่รับแรงตามแนวแกนต่ำกว่า 20% P_o โดยประมาณ และสามารถอธิบายเหตุผลได้ว่า เนื่องจากค่าตัวแปรผลของแรงตามแนวแกน Y_p ที่ใช้ในการคำนวณหาค่า ρ_A ซึ่งถูกเสนอโดย Sheikh และคณะ [1997] ได้มาจากผลการทดสอบเสาที่รับแรงอัดตามแนวแกนระดับปานกลางถึงสูงเท่านั้น (35% P_o ขึ้นไป) จึงทำให้ความสัมพันธ์ $Y_p = 1 + 13\ (P/P_o)^5$ (ดูรูปที่ 3.4) ที่เสนอมานั้นอาจไม่สามารถใช้ได้ดีกับเสาที่รับแรงตามแนวแกนระดับต่ำ ดังนั้น ตัวอย่างทดสอบของ Xiao และ Martirossyan [1998] และ Matamoros [1999] จึงไม่นำมาพิจารณา

ในรูปที่ 3.3 จะสังเกตเห็นว่า จุดข้อมูลของ Muguruma et al. [1989] และของ Sakai et al. [1990] มีค่า $\mu_{\Delta,env.}$ ที่สูงกว่าปกติ ที่เป็นเช่นนี้เพราะในการทดสอบเสา Muguruma et al. [1989] ได้ให้แรงกระทำด้านข้างโดยมีการซ้ำ 2 รอบในช่วงแรก แต่ในช่วงหลังของการทดสอบได้ให้แรงกระทำด้านข้างเพียงรอบเดียวในแต่ละระดับของการเคลื่อนตัว และในการทดสอบเสา Sakai et al. [1990] ได้เพิ่มค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาขึ้นอย่างรวดเร็ว (เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของค่าเดิม) ซึ่งรูปแบบการให้แรงกระทำด้านข้างที่ได้กล่าวมานี้ ทำให้เสาเกิดความเสียหาย (damage) น้อยกว่าปกติ ซึ่งส่งผลให้ประเมินค่า $\mu_{\Delta,env.}$ ได้สูงกว่าที่ควรจะเป็น

รูปที่ 3.5 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ρ_A กับ $\mu_{\Delta,env.}$ โดยตัดตัวอย่างทดสอบของ Muguruma et al. [1989] Sakai et al. [1990] Xiao and Martirossyan [1998] และ Matamoros [1999] ทิ้งไปด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จากการวิเคราะห์ความถดถอยแบบพาราโบลาโดยบังคับให้ตัดแกนที่ค่า $\mu_{\Delta,env.}$ เท่ากับ 1 ของข้อมูลทดสอบเสาจำนวน 18 ตัวอย่าง (ไม่รวมจุดข้อมูลของเสาทดสอบที่รับแรงตามแนวแกนระดับต่ำ ซึ่งถูกวงกลมล้อมรอบ) ซึ่งมีกำลังคอนกรีตอยู่ในช่วง 71.3 ถึง 109.5 MPa ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu_{\Delta,env.} = -2.91\ \rho_A^2 + 9.85\ \rho_A + 1 \qquad (3.1)$$

ดังแสดงในกราฟ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (correlation coefficient) R^2 เท่ากับ 0.64

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าอัตราส่วนเหล็กปลอกประสิทธิผลและค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัว ($\mu_{\Delta,rep.}$) ที่ถูกรายงานไว้โดยนักวิจัยที่ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูงในเอกสารการวิจัยต่าง ๆ ซึ่งนักวิจัยที่ผ่านมาใช้วิธีการหาค่าการเคลื่อนตัวจุดคราก (Δ_y) ที่แตกต่างกันอยู่ 4 วิธี (รูปที่ 3.6) ได้แก่ การหาการเคลื่อนตัวจุดครากจากจุดที่เหล็กยืนรับแรงดึงเริ่มคราก (1st steel yielding) การหาการเคลื่อนตัวจุดครากจากเส้นสัมผัส ณ จุดเริ่มต้น (initial tangent) การหาการเคลื่อนตัวจุดครากจากการเทียบการดูดซับพลังงานให้เท่ากัน (equal energy absorption) และการหาการเคลื่อนตัวจุดครากจากจุดที่แรงกระทำมีค่าเท่ากับ 75% ของค่าแรงกระทำสูงสุด (75% secant approach)

รูปที่ 3.7 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนเหล็กปลอกประสิทธิผล (ρ_A) กับค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวที่ถูกรายงานไว้โดยนักวิจัยต่าง ๆ ($\mu_{\Delta,\ rep.}$) โดยมีตัวอย่างทดสอบ ทั้งสิ้น 56 ตัวอย่าง จะสังเกตเห็นว่าข้อมูลมีการกระจัดกระจาย (scatter) มาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะนักวิจัยต่าง ๆ มีวิธีการหาค่าการเคลื่อนตัวจุดครากแตกต่างกัน จากการตรวจสอบพบว่า จุดข้อมูลที่ได้จากการหาการเคลื่อนตัวจุดครากจากจุดที่เหล็กยืนเริ่มคราก และจากเส้นสัมผัส ณ จุดเริ่มต้น (แสดงด้วยจุดทึบในกราฟ) มีการเกาะกลุ่มกันค่อนข้างดี และน่าจะสามารถนำมาวิเคราะห์รวมกันได้ ส่วนจุดข้อมูลที่หาการเคลื่อนตัวจุดครากจากการเทียบการดูดซับพลังงานให้เท่ากัน และจากจุดที่แรงกระทำมีค่าเท่ากับ 75% ของค่าแรงกระทำสูงสุด (แสดงด้วยจุดโปร่งในกราฟ) มีการกระจัดกระจายมาก นอกจากนี้ได้ทำวงกลมล้อมรอบจุดข้อมูลที่รับแรงตามแนวแกนระดับต่ำ เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายในตอนต้น

รูปที่ 3.8 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่าง ρ_A กับ $\mu_{\Delta,rep.}$ ที่มีวิธีการหาค่าการเคลื่อนตัวจุดครากจากจุดที่เหล็กยืนเริ่มคราก และจากเส้นสัมผัส ณ จุดเริ่มต้น โดยตัดตัวอย่างทดสอบของ Ahn et al. [2000] ทิ้งไป เนื่องจากได้ทำการทดสอบเสาโดยให้แรงกระทำด้านข้างซ้ำ 3 รอบในช่วงแรก แต่ในช่วงหลังของการทดสอบได้ให้แรงกระทำด้านข้างเพียงรอบเดียวในแต่ละระดับของการเคลื่อนตัว จากการวิเคราะห์ความถดถอยแบบพาราโบลาโดยบังคับให้ตัดแกนที่ค่า $\mu_{\Delta,rep.}$ เท่ากับ 1 ของข้อมูลทดสอบเสาจำนวน 19 ตัวอย่าง (ไม่รวมจุดข้อมูลของเสาทดสอบที่รับแรงตามแนวแกนระดับต่ำ ซึ่งถูกวงกลมล้อมรอบ) ซึ่งมีกำลังคอนกรีตอยู่ในช่วง 53.6 ถึง 102.2 MPa ทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu_{\Delta,rep.} = -2.37\ \rho_A^2 + 9.49\ \rho_A + 1 \qquad (3.2)$$

ดังแสดงด้วยเส้นทึบในกราฟ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ R^2 เท่ากับ 0.73 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ที่ได้จากการสร้างเส้นโค้งโอบคลุม (แสดงด้วยเส้นประในกราฟ) พบว่า มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกันมากในช่วงแรกจนถึงค่า ρ_A ประมาณ 0.7 ซึ่งแสดงว่าวิธีการหาค่าการเคลื่อนตัวจุดคราก (Δ_y) จากสติฟเนสซีแคนท์ที่แรงด้านข้างมีค่าเท่ากับ 30% ของค่าแรงด้านข้างสูงสุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถใช้ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามเมื่อ ρ_A มีค่าสูง ๆ กราฟความสัมพันธ์ทั้งสองเส้นจะมีความแตกต่างกันมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากขาดข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูงในช่วง ρ_A มากกว่า 0.7 ขึ้นไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Lukkunaprasit และ Thepmangkorn [2004] ได้ทำการวิเคราะห์ความถดถอยของข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังธรรมดาจำนวน 12 ต้น ที่มีกำลังคอนกรีตในช่วง 27.2 ถึง 42.0 MPa และได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (2.38) รูปที่ 3.9(a) แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง ρ_A กับ $\mu_{\Delta,env.}$ ของเสาคอนกรีตกำลังสูงในงานวิจัยนี้ กับความสัมพันธ์ดังกล่าวของเสาคอนกรีตกำลังธรรมดาจากงานวิจัยของ Lukkunaprasit และ Thepmangkorn [2004] ซึ่งแสดงด้วยเส้นทึบในช่วงแรกจนถึงค่า ρ_A เท่ากับ 0.45 และต่อด้วยเส้นประในช่วงหลัง เนื่องจากขาดข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังธรรมดาที่มีค่า ρ_A สูง ๆ จากกราฟทั้งสองเส้นพบว่า สำหรับค่า ρ_A ที่เท่ากัน เสา HSC จะมีค่า $\mu_{\Delta,env.}$ ต่ำกว่าเสา NSC ทั้งนี้เพราะภายใต้ระดับแรงอัดตามแนวแกนที่เท่ากันเสา HSC จะมีการขยายตัวทางด้านข้างต่ำกว่าเสา NSC ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิผลในการโอบรัดของเหล็กปลอกน้อยลง หรืออาจกล่าวได้ว่า สำหรับค่าความต้องการความเหนียว (ductility demand) ที่เท่ากัน เสา HSC จะต้องการเหล็กปลอกปริมาณมากกว่า และ/หรือ มีรูปแบบการจัดเรียงดีกว่าในเสา NSC ซึ่งรับระดับแรงอัดตามแนวแกนเท่ากัน

รูปที่ 3.9(b) แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวเชิงความโค้ง $\mu_\varnothing$ กับตัวแปร $Y_\varnothing$ (ซึ่งแสดงถึงการโอบรัดที่ให้โดยเหล็กปลอก) ของเสาคอนกรีตกำลังสูงจากงานวิจัยของ Bayrak และ Sheikh [1998] กับความสัมพันธ์ดังกล่าวของเสาคอนกรีตกำลังธรรมดาจากงานวิจัยของ Sheikh และ Khoury [1997] (ในที่นี้ค่าความเหนียวเชิงความโค้ง $\mu_\varnothing$ เป็นตัวแปรอิสระ) ซึ่งก็พบว่า ได้ข้อสรุปเช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ข้างต้น

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวกับตัวแปรพฤติกรรมอื่น ๆ

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวและตัวแปรพฤติกรรมอื่น ๆ ซึ่งใช้วิธีการสร้างเส้นโค้งโอบคลุมในการหาค่าการเคลื่อนตัวจุดคราก ของเสาทดสอบ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\mu_{\Delta,env}$ กับตัวแปรพฤติกรรมอื่น ๆ จะใช้เฉพาะข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูงจาก 4 งานวิจัยเช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 3.2 (ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว) ได้แก่ Bayrak and Sheikh [1998] Thomsen and Wallace [1994] Paultre and Legeron [2000] และ Paultre et al. [2001] จำนวน 18 ตัวอย่าง ซึ่งมีกำลังคอนกรีตอยู่ในช่วง 71.3 ถึง 109.5 MPa

รูปที่ 3.10 แสดงผลการวิเคราะห์ความถดถอยแบบยกกำลังของข้อมูลทดสอบเสา HSC สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัว ($\mu_{\Delta,env}$) กับอัตราส่วนการเคลื่อนตัวคงค้าง (δ_r) ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อ $\mu_{\Delta,env}$ เพิ่มขึ้น δ_r ก็จะมีค่ามากขึ้นและได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\delta_r = 0.10\ \mu_{\Delta}^{1.48} \qquad (3.3)$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ R^2 เท่ากับ 0.58

รูปที่ 3.11 แสดงผลการวิเคราะห์ความถดถอยแบบลอการิทึมของข้อมูลทดสอบเสา HSC สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัว ($\mu_{\Delta,env}$) กับอัตราส่วนความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่า (ξ_{eq}) และได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\xi_{eq} = 8.64\, l_n(\mu_{\Delta}) + 7.07 \qquad (3.4)$$

ดังแสดงด้วยเส้นทึบในกราฟ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ R^2 เท่ากับ 0.38

Priestley et al.[1995] ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่าง μ_{Δ} กับ ξ_{eq} ไว้ดังนี้

$$\xi_{eq} = \frac{1-\frac{(1-r)}{\sqrt{\mu_{\Delta}}}-r\sqrt{\mu_{\Delta}}}{\pi} \qquad (3.5)$$

เมื่อ r หมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าสติฟเนสในช่วงไม่ยืดหยุ่นเทียบกับในช่วงยืดหยุ่น (bilinear stiffness ratio) ความสัมพันธ์นี้ (เมื่อ $r = 0$) ถูกแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 3.11 ซึ่งให้ค่า ξ_{eq} ต่ำกว่าความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอยของข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูงเล็กน้อยประมาณ 20 %

รูปที่ 3.12 แสดงผลการวิเคราะห์ความถดถอยแบบยกกำลังของข้อมูลทดสอบเสา HSC สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัว ($\mu_{\Delta,env}$) กับค่าสติฟ

เนสประสิทธิผลนอร์มัลไลซ์ ($k_{eff,N}$) จะเห็นว่าเมื่อ $\mu_{\Delta,env}$ เพิ่มขึ้น $k_{eff,N}$ จะมีค่าลดลง และได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$k_{eff,N} = 1.18\ \mu_{\Delta}^{-1.22} \quad (3.6)$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ R^2 เท่ากับ 0.90

รูปที่ 3.13 แสดงผลการวิเคราะห์ความถดถอยแบบพาราโบลาของข้อมูลทดสอบเสา HSC สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัว ($\mu_{\Delta,env}$) กับค่าการสลายพลังงานนอร์มัลไลซ์ (E_N) โดยบังคับให้ตัดแกนที่ค่า $\mu_{\Delta,env}$ เท่ากับ 1 และได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\mu_{\Delta,env}$ กับ E_N ดังนี้

$$E_N = 0.88\ \mu_{\Delta}^2 - 0.83\ \mu_{\Delta} - 0.05 \quad (3.7)$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ R^2 เท่ากับ 0.73

3.4 ความสามารถของกำลังดัดในการรับแรงด้านข้าง (flexural capacity) ของเสาคอนกรีตกำลังสูง

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าแรงด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ (H_{max}) และความสามารถรับแรงด้านข้างที่คำนวณตาม ACI 318-99 ($M_{n,ACI}/L$) ของเสาทดสอบที่เกิดการวิบัติโดยการดัด (flexural failure) จำนวน 62 ตัวอย่าง ซึ่งมีกำลังคอนกรีตในช่วง 52 ถึง 115.8 MPa

รูปที่ 3.14 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคอนกรีต f_c' กับอัตราส่วน $H_{max}/(M_{n,ACI}/L)$ จะเห็นว่าโดยทั่วไปเมื่อ f_c' เพิ่มขึ้น อัตราส่วน $H_{max}/(M_{n,ACI}/L)$ จะมีค่าลดลง นั่นคือ ค่ากำลังรับแรงดัด (flexural strength) ที่คำนวณตาม ACI 318-99 ($M_{n,ACI}$) จะมีความปลอดภัย (conservatism) ลดลงเมื่อกำลังคอนกรีตสูงขึ้น โดยจะเริ่มไม่ปลอดภัย ($H_{max}/(M_{n,ACI}/L) < 1$) เมื่อกำลังคอนกรีตสูงกว่า 60 MPa และอาจไม่ปลอดภัยมากขึ้นพอสมควรเมื่อกำลังคอนกรีตสูงกว่า 90 MPa โดยค่า $H_{max}/(M_{n,ACI}/L)$ อาจต่ำถึง 0.80 ในบางกรณี

เป็นที่น่าสังเกตว่า สมการคำนวณกำลังรับแรงดัดของ ACI 318-99 ได้มาจากผลการทดสอบเสาที่มีกำลังคอนกรีตต่ำกว่า 55 MPa ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้กับคอนกรีตกำลังสูง ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่า ค่าตัวคูณความเข้ม α_1 (intensity factor) ของหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า (equivalent rectangular stress block) ควรมีค่าต่ำกว่า 0.85 (ตามที่กำหนดใน ACI 318-99) สำหรับคอนกรีตกำลังสูง

โดยอาศัยข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูง NZS 3101:1995 ได้กำหนดค่าตัวคูณความเข้ม α_1 ไว้ดังนี้

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.004\,(f_c' - 55) \quad \text{ระบบหน่วย MPa} \tag{3.8}$$

โดยที่ $0.75 \le \alpha_1 \le 0.85$

ซึ่ง α_1 จะมีค่าลดลงต่ำกว่า 0.85 เมื่อกำลังคอนกรีตมากกว่า 55 MPa และจะมีค่าเท่ากับ 0.75 เมื่อกำลังคอนกรีตมากกว่า 80 MPa ขึ้นไป ดังนั้นข้อกำหนด NZS 3101:1995 จึงมีความเหมาะสมมากกว่าในการคำนวณกำลังรับแรงดัดของเสาคอนกรีตกำลังสูง

3.5 กำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) ของเสาคอนกรีตกำลังสูง

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าแรงด้านข้างสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ (H_{max}) และกำลังรับแรงเฉือนที่คำนวณได้จากสมการของ ASCE–ACI 426 [1973] ข้อกำหนด ACI 318-99 Priestley et al. [2000] และ Xiao et al. [1998] ของเสาทดสอบที่เกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือนจำนวน 10 ตัวอย่าง ที่มีกำลังคอนกรีตในช่วง 52 ถึง 86 MPa

รูปที่ 3.15 แสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัว ($\mu_{\Delta,rep}$) และอัตราส่วนของค่าแรงด้านข้างสูงสุดจากการทดสอบกับค่ากำลังเฉือนที่คำนวณได้จากสมการต่าง ๆ ($H_{max}/V_{eqn.}$) จะเห็นว่า จุดข้อมูลของ ASCE-ACI 426 [1973] และ ACI 318-99 มีค่าใกล้เคียงกัน และมีการกระจายน้อย อย่างไรก็ตามเนื่องจากสมการทั้งสองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบ ดังนั้น การที่จุดข้อมูลหลายจุดมีค่าต่ำกว่า 1 จึงเป็นการไม่

ปลอดภัย และจะไม่ปลอดภัยอย่างยิ่งสำหรับจุดข้อมูลที่มีค่าต่ำกว่าตัวคูณลดกำลังเฉือนเท่ากับ 0.85 สมการคำนวณกำลังเฉือนของ ACI 318-99 จำเป็นต้องมีการปรับปรุงต่อไป โดยมีการคำนึงถึงการเสื่อมลดของกำลังเฉือน (shear strength degradation)ในคอนกรีตตามค่าความเหนียวที่เพิ่มขึ้น และหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในเหล็กปลอก เพื่อให้สามารถใช้ออกแบบเสาคอนกรีตกำลังสูงรับแรงแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัย

สมการของ Xiao et al. [1998] และ Priestley et al. [2000] มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมิน (assessment) กำลังเฉือนของเสา จากรูปที่ 3.15 จะเห็นว่าสมการของ Xiao et al. [1998] ให้ผลการทำนายดีกว่าของ Priestley et al. [2000] เนื่องจากได้ถูกปรับปรุงเพื่อใช้สำหรับคอนกรีตกำลังสูงโดยเฉพาะ อย่างไรก็ตามการที่สมการของ Xiao et al. [1998] ได้มาโดยขาดผลการทดสอบของเสาคอนกรีตกำลังสูงที่มีค่า μ_Δ ต่ำกว่า 4 ทำให้จุดข้อมูลมีการกระจายมากขึ้นเมื่อค่า μ_Δ น้อยกว่า 2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย