บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลไกการโอบรัดคอนกรีตโดยเหล็กปลอก

2.1.1 อิทธิพลของการโอบรัดที่มีต่อคอนกรีต

ในงานยุคบุกเบิกของ Richart และคณะ [1928] ได้มีการทดสอบแท่งคอนกรีตน้ำหนักปกติรูปทรงกระบอกขนาด 101 x 203 mm (4 x 8 นิ้ว) ภายใต้การกระทำของแรงตามแนวแกนและความดันทางข้างเนื่องจากของเหลวที่มีความเข้มต่าง ๆ กัน ผู้วิจัยได้รายงานว่ากำลังตามแนวแกนและความเหนียวของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นไปกับการเพิ่มความดันทางข้างของของเหลว และได้เสนอสมการต่อไปนี้เพื่อใช้ทำนายกำลังอัดโอบรัด (confined compressive strength) f'_{cc} ของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกภายใต้หน่วยแรงโอบรัดด้านข้าง (lateral confining stress) f_l

$$f'_{cc} = f'_c + 4.1 f_l \qquad (2.1)$$

โดยที่ f_c' เป็นกำลังรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก ในการศึกษาต่อมา Richart และคณะ [1929] ได้ทดสอบเสาคอนกรีตน้ำหนักปกติเสริมเหล็กปลอกเกลียวขนาด 254 x 1016 mm (10 x 40 นิ้ว) รับแรงอัดตามแนวแกน โดยมีกำลังคอนกรีตอยู่ในช่วง 13.8 ถึง 20.7 MPa และพบว่ากำลังอัดของเสาที่ถูกโอบรัดสัมพันธ์กับหน่วยแรงโอบรัดทางข้าง ซึ่งเกิดจากเหล็กปลอกเกลียว เช่นเดียวกับในสมการที่ (2.1) แต่ในกรณีนี้ f_l คือหน่วยแรงทางข้างซึ่งเกิดจากเหล็กปลอกโอบรัด หน่วยแรงโอบรัดนี้คำนวณมาจากการพิจารณาสภาวะสมดุล โดยใช้กฎทางเมคานิคส์ (mechanics) ได้ดังนี้

$$f_l = (2 A_{sp} f_{sp}) / (s d_c) = \rho_c f_{sp} \qquad (2.2)$$

โดยที่ A_{sp} คือเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กปลอกเกลียว f_{sp} คือหน่วยแรงในเหล็กปลอกเกลียวที่น้ำหนักกระทำต่อเสาสูงสุด (ในการคำนวณมักสมมติว่าเท่ากับกำลังครากระบุ f_{yh} ของเหล็ก

ปลอก) s คือช่วงระยะห่างของเหล็กปลอกเกลียววัดตามแนวแกน d_c คือเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนคอนกรีตวัดถึงภายนอกของเหล็กปลอกเกลียว และ ρ_c คือ อัตราส่วนพื้นที่ของเหล็กปลอกที่ตั้งฉากกับพื้นที่แกนคอนกรีตในช่วงระยะเรียง s

สำหรับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าในทางเรขาคณิตสามารถพิสูจน์ได้ว่า อัตราส่วนเชิงปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของแกนคอนกรีต (volumetric ratio, ρ_s) จะมีค่าเท่ากับผลบวกของอัตราส่วนพื้นที่ของเหล็กปลอก (โดยเฉลี่ยตลอดความลึกของหน้าตัด) ในทั้งสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน และสำหรับเสากลมและเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัส อัตราส่วนเชิงปริมาตรจะมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของอัตราส่วนพื้นที่ของเหล็กปลอก จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนทางกล (mechanical ratio, $\rho_s f_{yh} / f_c'$) เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อพฤติกรรมของเสาที่รับแรงตามแนวแกนตรงศูนย์ ดังจะได้กล่าวต่อไป

กำลังและความสามารถในการเสียรูป (ความเหนียว) ของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นพอสมควรเมื่อคอนกรีตรับแรงเป็นแรงอัดสามแกน (รูปที่ 2.1) ในทางปฏิบัติสภาวะเช่นนี้เกิดขึ้นได้เมื่อเสริมเหล็กปลอกซึ่งอยู่ในรูปของเหล็กปลอกวงปิด (closed tie) หรือเหล็กปลอกเกลียวซึ่งจะต้านการพองตัวทางด้านข้างของชิ้นส่วนเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกน คอนกรีตที่ได้รับผลดีจากการกระทำของเหล็กปลอกนี้เรียกว่า "คอนกรีตที่ถูกโอบรัด (confined concrete)" เหล็กยืน (โดยเฉพาะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ และ/ หรือเรียงกันถี่ ๆ) จะมีส่วนช่วยในการโอบรัดในระดับหนึ่ง

พฤติกรรมในช่วงไม่ยืดหยุ่นของคอนกรีตเริ่มต้นโดยการเกิดรอยแตกร้าวของการยึดติดภายในขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลรวมและมอร์ต้า ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่มีอิทธิพลต่อช่วงขาลงของความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด พฤติกรรมของวัสดุจะได้รับผลจากการโอบรัดตั้งแต่เมื่อรอยแตกร้าวภายในทำให้เกิดการเพิ่มของปริมาตรในชิ้นส่วน (การโอบรัดเชิงรับ ซึ่งตรงข้ามกับการโอบรัดเชิงรุกโดยแรงดันน้ำสถิต) ดังนั้นเหล็กปลอกจะไม่ส่งผลต่อส่วนแรกของความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด แต่ผลของมันจะมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นขณะที่เข้าใกล้กำลังสูงสุด และเหล็กปลอกจะเป็นตัวกำหนดผลการตอบสนองในช่วงขาลง

2.1.2 ประโยชน์ของการโอบรัด

การโอบรัดจะให้ประโยชน์หลัก 2 ข้อ ต่อพฤติกรรมภายใต้แผ่นดินไหวของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต

ก. ช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีต ซึ่งจะไปชดเชยกับที่อาจเสียไปจากการกระเทาะ (spalling) หรือการวิบัติของคอนกรีตหุ้มในชิ้นส่วน ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความเครียดอัดตามแนวแกนของคอนกรีตหุ้มมีค่าเกินประมาณ 0.004

ข. ช่วยเพิ่มความสามารถในการเสียรูป (deformability) ของคอนกรีต กล่าวคือ คอนกรีตสามารถเกิดความเครียดได้มากขึ้นเมื่อรับความเค้นเท่ากัน ภายหลังจากคอนกรีตหุ้มกระเทาะออกแล้ว ช่วยลดความชันในช่วงขาลงของความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด หรือกล่าวได้ว่าการโอบรัดช่วยเพิ่มความเหนียวของคอนกรีตขึ้น ซึ่งเป็นผลสำคัญที่สุดของเหล็กปลอกและเป็นกุญแจสำคัญที่จะช่วยให้การออกแบบต้านแผ่นดินไหวเป็นไปตามความต้องการของข้อกำหนดสมัยใหม่ในเรื่องของความเหนียวเฉพาะที่ (local ductility)

2.1.3 ชนิดของการโอบรัด

การศึกษาโดยการทดลองมากมายเกี่ยวกับบทบาทของการโอบรัด (ทบทวนได้ใน Park และ Paulay, 1975; Aoyama และ Noguchi, 1979; Sakai และ Sheikh, 1989) ได้ยืนยันว่าปกติแล้วการโอบรัดโดยเหล็กปลอกเกลียวกลมจะมีประสิทธิภาพมากกว่าโดยเหล็กปลอกวงปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การโอบรัดโดยเหล็กปลอกเกลียวกลมสามารถทำให้ได้พฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับที่ได้จากแรงดันน้ำสถิตปานกลาง ผลอันนี้ก็เนื่องมาจากเหล็กปลอกเกลียวกลมโดยรูปทรงเรขาคณิตจะรับแรงดึงโดยรอบ (ปราศจากโมเมนต์ดัด) เมื่อถูกเบ่งออกโดยแกนคอนกรีต ซึ่งทำให้เกิดหน่วยแรงโอบรัดที่ต่อเนื่องตลอดแนวเส้นรอบวงดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในขณะที่เหล็กปลอกวงปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถให้แรงดันปริมาณมากได้เพียงแต่ที่มุมของมันเท่านั้น จึงเกิดการขยายตัวทางด้านข้างของคอนกรีตที่ถูกล้อมรอบโดยเหล็กปลอกวงปิด ซึ่งทำให้ขาของเหล็กปลอกวงปิดเกิดการแอ่นตัวออกด้านนอก โดยปล่อยให้เหลือบางส่วนของหน้าตัด (ซึ่งมี

รูปร่างเหมือนคันธนู ดังแสดงในรูปที่ 2.2) ที่ปราศจากการโอบรัด ซึ่งส่วนที่ปราศจากการโอบรัดนี้จะยิ่งมีมากขึ้นที่หน้าตัดระหว่างเหล็กปลอกวงปิด ทำให้ประสิทธิภาพของการโอบรัดโดยเหล็กปลอกเดี่ยวลดลง

2.2 พฤติกรรมของเสา HSC ที่รับแรงตามแนวแกนตรงศูนย์

การเข้าใจพฤติกรรมของเสาที่รับแรงตามแนวแกนตรงศูนย์มีความสำคัญในการกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้กับกรณีของแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด ตัวแปรที่สำคัญ ๆ จะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

2.2.1 ผลของคอนกรีตหุ้ม:

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการหดตัวของเสา HSC ภายใต้แรงตามแนวแกนตรงศูนย์ จะเห็นว่าขณะที่เสารับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นช่วงขาขึ้นของกราฟจะใกล้เคียงเส้นตรง โดยทั่วไปจะเกิดการกระเทาะของคอนกรีตหุ้มก่อนที่จะถึงค่ากำลังรับแรงอัดตรงศูนย์ระบุที่คำนวณตาม ACI 318-99 (P_o) ของเสา HSC หลังจากที่คอนกรีตหุ้มกระเทาะออก พฤติกรรมของเสา HSC จะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของเสาต่อพื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีตและขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กปลอก ซึ่งเป็นไปได้ที่จะเพิ่มกำลังตามแนวแกนสูงสุดของเสาและได้พฤติกรรมที่เหนียวโดยการให้เหล็กปลอกอย่างเพียงพอ

กลไกของการกระเทาะของคอนกรีตหุ้มในเสา HSC จะเหมือนกับในเสาคอนกรีตกำลังธรรมดา การที่คอนกรีตหุ้มกระเทาะออกจากแกนคอนกรีตจะต้องอาศัยขบวนการ 2 ขบวนการ ได้แก่

ก. การแตกร้าวระหว่างคอนกรีตหุ้ม และแกนคอนกรีต
ข. กลไกที่จะผลักคอนกรีตหุ้มไปจากหน้าตัด ซึ่งประกอบด้วยการแตกออกของคอนกรีตหุ้ม การขยายปริมาตรของเหล็กยืน และการดัดของเหล็กยืน

การแตกร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตหุ้มและแกนคอนกรีตซึ่งทำให้เกิดการกระเทาะของคอนกรีตหุ้มในเสา HSC เป็นผลลัพธ์โดยตรงของสภาวะหน่วยแรงสามแกน ซึ่งสภาพหน่วยแรงนี้เป็นผลลัพธ์ที่สำคัญของการโอบรัดที่ให้กับแกนคอนกรีตโดยเหล็กปลอก Foster, Liu และ Sheikh [1998] ได้แสดงว่า การแตกร้าวระหว่างคอนกรีตหุ้มและแกนคอนกรีตเป็นผลที่ตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ของการให้การโอบรัดกับแกนคอนกรีตและไม่เป็นฟังก์ชันของกำลังคอนกรีต

การสูญเสียคอนกรีตหุ้มในเสา HSC ก่อนถึงค่าของกำลังรับแรงอัดตรงศูนย์ระบุซึ่งคำนวณได้ตาม ACI นี้จะต่างจากพฤติกรรมของเสา NSC ซึ่ง Collins และคณะได้อธิบายไว้ว่าความสามารถในการซึมผ่านได้ที่ต่ำของ HSC ทำให้เกิดความเครียดเนื่องจากการหดตัวแห้ง (drying shrinkage) ในคอนกรีตหุ้มในขณะที่แกนคอนกรีตยังคงชื้นอยู่ ผลที่ตามมาก็คือจะเกิดหน่วยแรงดึงในคอนกรีตหุ้ม ยิ่งไปกว่านั้นเหล็กยืนยังก่อให้เกิดรอยแตกร้าวเพิ่มเติมอีก พอรวมสองกลไกนี้เข้าด้วยกัน จึงทำให้เกิดรูปแบบของการแตกร้าวซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียคอนกรีตหุ้มก่อนเวลาอันควร ดังแสดงในรูปที่ 2.4

นอกจากนี้การกระเทาะก่อนเวลาอันควร (early spalling) อาจเกิดขึ้นจากระนาบที่อ่อนแอที่สร้างขึ้นโดยโครงเหล็กเสริมถี่ ๆ ซึ่งจะแยกแกนคอนกรีตและคอนกรีตหุ้มออกจากกัน อันทำให้เกิดการวิบัติที่ไม่เสถียรของคอนกรีตหุ้มภายใต้หน่วยแรงอัดสูง ๆ

อย่างไรก็ตาม พบว่าการใส่เส้นใยเหล็ก (steel fibers) ลงในส่วนผสมคอนกรีตสามารถช่วยป้องกันการกระเทาะก่อนเวลาอันควรของคอนกรีตหุ้มและช่วยปรับปรุงความเหนียวได้

2.2.2 <u>ผลของอัตราส่วนปริมาตรของเหล็กปลอก</u> (Volumetric ratio, ρ_s)

ในกรณีของ NSC การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกจะทำให้มีกำลังและความเหนียวเพิ่มขึ้น สำหรับ HSC ก็เช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่าจะอยู่ในระดับที่น้อยกว่า ทั้งนี้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรที่น้อยกว่าระหว่างการแตกร้าวขนาดเล็ก (micro-cracking) ของ HSC ซึ่งทำให้แกนคอนกรีตมีการขยายตัวทางด้านข้างที่น้อยกว่าอันจะเป็นการถ่วงเวลาการใช้ประโยชน์ของ

เหล็กปลอกในการให้หน่วยแรงโอบรัด พบว่าในกรณีของ HSC กำลังและความเหนียวจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนเหล็กปลอกมีค่าน้อย

Razvi และคณะ [1994] พบว่า เสาที่มีกำลังคอนกรีตต่างกัน แต่มีค่าอัตราส่วนทางกล (mechanical ratio, $\rho_s f_{yh} / f_c'$) เท่ากัน ภายใต้แรงตามแนวแกนตรงศูนย์ จะมีความเหนียวตามแนวแกนใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนทางกล และความสามารถรับแรงตามแนวแกนของเสา HSC พบว่าเสาที่มีอัตราส่วนเหล็กปลอกต่ำจะมีกำลังไม่ถึงค่า P_o ที่คำนวณโดย ACI อย่างไรก็ตามเสาที่ถูกโอบรัดอย่างดีจะมีกำลังเกินกว่าค่า P_o ที่คำนวณโดย ACI กำลังที่เกินมาของเสาที่มีปริมาณเหล็กปลอกสูงจะได้มาหลังจากการกระเทาะของคอนกรีตหุ้ม กำลังที่สูงขึ้นนี้เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกำลังของแกนคอนกรีตที่ถูกโอบรัด

2.2.3 <u>ผลของกำลังจุดครากของเหล็กปลอก</u>

กำลังจุดครากของเหล็กปลอกเป็นตัวกำหนดค่าสูงสุด (upper limit) ของหน่วยแรงโอบรัด ยิ่งให้หน่วยแรงโอบรัดต่อแกนคอนกรีตมากขึ้นก็จะทำให้ได้กำลังและความเหนียวสูงขึ้น พบว่าเมื่อ HSC ถูกใช้ในเสาที่มีการโอบรัดอย่างดีกำลังจุดครากของเหล็กปลอกจะถูกใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ ในทางกลับกันสำหรับเสา HSC ที่ถูกโอบรัดไว้ไม่ดี เช่น เสาซึ่งมีเพียงเหล็กปลอกล้อมรอบเพียงวงเดียว หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกจะมีค่าต่ำกว่ากำลังจุดครากแม้แต่ขณะที่เสาเกิดการวิบัติ

2.2.4 <u>ผลของการจัดเรียงเหล็กยืนและการจัดเรียงเหล็กปลอก</u>

เหล็กยืนและเหล็กปลอกที่กระจายตัวอย่างดีจะทำให้ได้พื้นที่ของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดอย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นและมีการกระจายของหน่วยแรงโอบรัดที่สม่ำเสมอมากขึ้น ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเหล็กปลอก การจัดเรียงเหล็กปลอกและเหล็กยืนที่ถูกยึดรั้งทางด้านข้างโดยเหล็กปลอก จะมีอิทธิพลที่สำคัญต่อกำลังและความเหนียวของเสา เหล็กปลอกในรูปแบบของเหล็กปลอกล้อมรอบเพียงวงเดียวจะทำให้ได้กำลังและความเหนียวของ

เสาที่ต่ำมาก และพบว่าอัตราส่วนเหล็กปลอกสามารถลดลงได้สำหรับเสาที่มีการจัดเรียงเหล็กปลอกอย่างมีประสิทธิภาพ

รูปที่ 2.7 แสดงหน่วยแรงโอบรัดซึ่งเกิดจากการจัดเรียงเหล็กปลอกตรงที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าอำนาจการยับยั้งต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตจะมีค่าสูงที่ตำแหน่งซึ่งเหล็กปลอกถูกผูกไว้กับเหล็กยืน ดังนั้นทั้งระยะเรียงเหล็กปลอก (s) และระยะห่างของเหล็กยืนที่ถูกยึดรั้งทางด้านข้างในระนาบของรูปตัด (s_l) จะมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของการจัดเรียงเหล็กเสริม

Saatcioglu และ Razvi [2002] ได้พัฒนาแบบจำลองการโอบรัดของเหล็กปลอกที่มีต่อแกนคอนกรีตขึ้น โดยมีการพิจารณาถึงผลของการจัดเรียงเหล็กเสริมที่มีต่อประสิทธิภาพในการโอบรัด และทำให้ได้สมการที่ใช้กำหนดการเพิ่มของกำลังในแกนคอนกรีตที่ถูกโอบรัดดังนี้

$$f'_{cc} - f'_{co} = k_1 k_e f_l \tag{2.3}$$

$$f_l = \frac{A_{sh}\, f_{yh}}{s h_c} \tag{2.4}$$

$$k_e = 0.15\sqrt{\left(\frac{h_c}{s}\right)\left(\frac{h_c}{s_l}\right)} \le 1.0 \tag{2.5}$$

โดยที่ f'_{co} = กำลังในที่ของคอนกรีตซึ่งไร้การโอบรัดในเสา โดยอาจใช้เท่ากับ 0.85 f'_c ซึ่งเป็นไปตาม ACI 318-99 และสอดคล้องกับข้อมูลทดสอบ การลดลงจากค่า f'_c นี้สะท้อนถึงผลของมาตราส่วน (scale effect) ที่ถูกสังเกตเมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังอัดของแท่งคอนกรีตทดสอบรูปทรงกระบอกกับกำลังอัดของเสาหล่อในที่ขนาดใหญ่

f_l = หน่วยแรงโอบรัดด้านข้างที่ให้โดยเหล็กปลอก ซึ่งหาได้จากการสมมติให้เหล็กปลอกครากและหน่วยแรงที่ทำให้เกิดสมดุลของแกนคอนกรีตมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ (ดูรูปที่ 2.8)

k_1 = สัมประสิทธิ์หน่วยแรงโอบรัดด้านข้าง (lateral pressure coefficient) ซึ่งสามารถหาได้โดยสูตรเอมพิริแคล ที่เสนอโดย Saatcioglu และ Razvi [2002] หรืออื่น ๆ

k_e = สัมประสิทธิ์ประสิทธิผลของการโอบรัด (confinement effectiveness coefficient)

A_{sh} = เนื้อที่หน้าตัดประสิทธิผลทั้งหมดของเหล็กปลอก (รวมเหล็กยึดทางขวางด้วย) ในทิศทางที่พิจารณา ซึ่งตั้งฉากกับความกว้าง h_c ภายในช่วงระยะเรียง s

h_c = ความกว้างของหน้าตัดแกนคอนกรีตด้านที่ตั้งฉากกับเหล็กปลอกที่พิจารณา โดยวัดจากศูนย์ถึงศูนย์ของเหล็กปลอกวงนอก

s_l = ระยะห่างจากศูนย์ถึงศูนย์ ของเหล็กยืนที่ถูกยึดรั้งทางด้านข้างโดยมุมของเหล็กปลอกวงปิดหรือของอของเหล็กยึดทางขวาง

s = ระยะเรียงจากศูนย์ถึงศูนย์ของเหล็กปลอกวงปิด

สัมประสิทธิ์ k_1 สะท้อนถึงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงโอบรัดด้านข้างที่สม่ำเสมอ ($k_e f_l$) กับการเพิ่มของกำลัง $f'_{cc} - f'_{co}$ จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าสัมประสิทธิ์ k_1 จะแปรเปลี่ยนค่าไปกับหน่วยแรงโอบรัดด้านข้างซึ่งแตกต่างอย่างมากจากค่าคงที่เท่ากับ 4.1 ที่ใช้ในการสร้างสมการของ ACI 318-99

สัมประสิทธิ์ k_e ทำหน้าที่แปลงหน่วยแรงโอบรัดด้านข้างเฉลี่ย (f_l) ให้เป็นหน่วยแรงดันสม่ำเสมอเทียบเท่า ($k_e f_l$) และสะท้อนถึงประสิทธิภาพของเหล็กปลอก ประสิทธิภาพจะปรับปรุงขึ้นด้วยความสม่ำเสมอของหน่วยแรงโอบรัดและมีค่าเต็มที่เท่ากับ 1.0 เมื่อหน่วยแรงโอบรัดด้านข้างสม่ำเสมอ ดังเช่นในกรณีของเสากลมเสริมเหล็กปลอกเกลียวถี่ ๆ ตามข้อกำหนด ACI 318-99

รูปที่ 2.7 แสดงหน่วยแรงโอบรัดเชิงรับซึ่งเกิดจากการจัดเรียงเหล็กปลอกตรงที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าอำนาจการยับยั้งต่อการขยายตัวด้านข้าง (lateral expansion) จะมีค่าสูงที่ตำแหน่งเหล็กเสริมตัดกันซึ่งเหล็กปลอกวงปิดที่วางซ้อนกัน เหล็กยึดทางขวางหรือทั้งสองอย่างถูกผูกไว้กับเหล็กยืน ดังนั้นทั้งระยะเรียงเหล็กปลอก s และระยะห่างของเหล็กเสริม

ตัดกันในระนาบของรูปตัด s_t จะมีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพของการจัดเรียงเหล็กเสริม ตัวแปรเหล่านี้ถูกรวมไว้ในสมการที่ (2.5) ซึ่งอยู่ในรูปแบบที่ถูกทำให้ง่ายขึ้น และสามารถใช้ได้กับคอนกรีตที่มีกำลังสูงจนถึง 130 MPa โดยประมาณ

อย่างไรก็ตาม จะสังเกตได้ว่าค่า k_e ในสมการที่ (2.5) ไม่ได้พิจารณาถึงลักษณะการให้รายละเอียดของของออันได้แก่ มุมของของอ (hook bends) และระยะจากผิวสัมผัสเหล็กยืนถึงปลายของอ (hook extensions) จากผลการทดสอบของนักวิจัยหลายท่านในช่วงไม่นานมานี้ พบว่าปัจจัยดังกล่าวมีอิทธิพลอย่างมากต่อประสิทธิผลในการให้การยึดรั้งทางด้านข้างกับเหล็กยืน ถ้าของอมีการอ้าออกจะส่งผลให้เหล็กยืนเกิดการดุ้ง (buckle) และสูญเสียกำลังรับแรงอัดอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิดการวิบัติของโครงสร้างโดยรวมได้

2.3 พฤติกรรมของเสา HSC ที่รับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด

คำถามสองคำถามจะต้องเกิดขึ้นเมื่อมีการออกแบบเสา HSC คำถามแรก คือ จะสามารถใช้หน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเทียบเท่า (equivalent rectangular stress block) ตาม ACI 318-99 กับ HSC ได้หรือไม่ คำถามที่สองคือ ข้อบังคับเรื่องการโอบรัดของ ACI 318-99 มีความเหมาะสมเพียงพอที่จะใช้กับ HSC หรือไม่ ในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหวรุนแรงความสนใจส่วนใหญ่จะอยู่ที่ความเหนียวของเสา HSC จึงส่งผลต่อความไม่เต็มใจที่จะใช้ HSC ในพื้นที่เหล่านี้เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหวไม่รุนแรง ผลที่ตามมาก็คือจุดสนใจของการศึกษาพฤติกรรมของเสา HSC ภายใต้แรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด โดยส่วนใหญ่จะอยู่ที่ความเข้าใจในพฤติกรรมภายใต้แผ่นดินไหวของเสาเหล่านี้ ผลการศึกษาบางชิ้นได้ให้ข้อมูลซึ่งสามารถใช้ในการประเมินความสามารถรับแรงดัดของเสา HSC ภายใต้แรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด

จนถึงวันนี้ การทดลองวิจัยโดยส่วนใหญ่จะเกี่ยวกับการทดสอบเสา รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบทั่วไปของตัวอย่างเสาที่ศึกษา ซึ่งจะใช้แทนครึ่งของเสาบนและครึ่งของเสาล่าง โดยมีติ่งเล็ก ๆ ของคานพื้นติดมาด้วย ปกติแล้วตัวอย่างทดสอบเหล่านี้จะรับแรงตามแนวแกนคงที่และรับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างซ้ำไปซ้ำมาเป็นลำดับที่ต่อเนื่อง (รูปที่ 2.10) เพื่อจำลองผล

ของแผ่นดินไหว ตัวอย่างทดสอบชนิดนี้ถูกออกแบบไว้ไม่ให้มีความเสียหายเกิดขึ้นที่จุดต่อคาน-เสา

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กในโครงข้อแข็งต้านโมเมนต์ที่สร้างในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหวรุนแรง ควรที่จะทำให้มีความโค้งและคุณสมบัติด้านการเคลื่อนตัวที่เพียงพอ ผลการตอบสนองภายใต้แผ่นดินไหวที่รุนแรงของโครงสร้างส่วนใหญ่ที่ถูกออกแบบตามปรัชญาการออกแบบรับแผ่นดินไหวในปัจจุบันไม่ได้ถูกคาดหวังให้อยู่ในช่วงอีลาสติก การยอมให้มีการเสียรูปในช่วงไม่ยืดหยุ่นเกิดขึ้น และใช้ค่าแรงเฉือนที่ฐานที่ลดลง แทนที่จะเป็นค่าแรงเฉือนที่ฐานซึ่งสอดคล้องกับผลการตอบสนองในช่วงยืดหยุ่นนั้นจะเป็นการประหยัดกว่า ดังนั้นความสามารถของโครงสร้างในการต้านทานแผ่นดินไหวที่รุนแรงโดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับการเกิดข้อหมุนพลาสติก (plastic hinge) และความสามารถของข้อหมุนพลาสติกในการดูดซับและสลายพลังงานโดยไม่มีการสูญเสียกำลังไปมากนัก เพื่อให้มั่นใจถึงเสถียรภาพและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่งขณะที่โครงสร้างมีการเคลื่อนตัวด้านข้างไปมาก ข้อกำหนดอาคารส่วนใหญ่จึงพยายามทำให้เกิดการข้อหมุนพลาสติกขึ้นในคานมากกว่าในเสา อีกทั้งการเสียรูปร่างในช่วงไม่ยืดหยุ่นของคานก็สามารถสลายพลังงานแผ่นดินไหวได้ดีกว่าเสา อย่างไรก็ตามจากการสังเกตพฤติกรรมของเสาหลังจากเกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่พบว่าความเสียหายสามารถเกิดขึ้นได้ที่ปลายของเสา (เกิดข้อหมุนพลาสติก) ถึงแม้ว่าการออกแบบจะเป็นไปตามแนวคิดเสาแข็ง-คานอ่อนแล้วก็ตาม มิหนำซ้ำที่ฐานเสาของโครงข้อแข็งหลายชั้นและในสะพานก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการพับหมุนของเสาได้ อันที่จริงควรจะอาศัยมันเพื่อการสลายพลังงาน ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสามารถเพียงพอที่จะให้ผลการตอบสนองในช่วงไม่ยืดหยุ่นโดยไม่มีการสูญเสียความสามารถในการรับแรงไปมากนัก

พฤติกรรมฮิสเทียรีติกของเสา HSC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่

ก. ช่วงแรกที่มีทั้งแกนคอนกรีตที่ถูกโอบรัดและคอนกรีตหุ้ม ซึ่งไร้การโอบรัด

ข. หลังจากสังเกตเห็นการอัดแตก (crushing) และกระเทาะออกของคอนกรีตหุ้มแล้ว จะเข้าสู่ช่วงที่สอง คือ พฤติกรรมที่มีเสถียรภาพ โดยมี

การเสียรูปเนื่องจากการคราดของเหล็กยืนและการเกิดความเครียดของแกนคอนกรีตที่ถูกโอบรัด ซึ่งพฤติกรรมในช่วงนี้ถือว่ามีความสำคัญที่สุดในการออกแบบต้านแผ่นดินไหว และขึ้นอยู่กับทั้งระดับของแรงตามแนวแกนและรายละเอียดของเหล็กปลอก

ค. การวิบัติในที่สุด เช่น เกิดการคุ้งของเหล็กยืนตามด้วยการอัดแตกโดยสิ้นเชิงของแกนคอนกรีต

วิธีการหนึ่งซึ่งข้อกำหนดอาคารใช้เพื่อให้เกิดความมั่นใจในความเหนียวของเสาก็คือการกำหนดปริมาณเหล็กปลอกในบริเวณวิกฤติของเสา แต่อย่างไรก็ตามสมการเหล่านี้เป็นเอมพิริแคล และมีพื้นฐานมาจากหลักเกณฑ์ด้านกำลังแม้ว่ามันมีจุดประสงค์ที่จะให้ความเหนียวก็ตาม จากการทดสอบเสา NSC พบว่า ถึงแม้สมการเหล่านี้มีพื้นฐานมาจากหลักเกณฑ์ด้านกำลัง แต่มันก็ยังให้ความเหนียวที่เพียงพอกับเสา NSC การที่จะใช้สมการเหล่านี้กับกรณีของเสา HSC นั้นยังเป็นคำถามอยู่ ACI 318-99 ไม่ได้จำกัดค่ากำลังคอนกรีตสูงสุดที่ใช้ในการออกแบบต้านแผ่นดินไหว แต่ความต้องการเหล็กปลอกของ ACI 318-99 ได้มาจากผลการทดลองของคอนกรีตกำลังธรรมดาและไม่ได้ดัดแปลงให้เหมาะสมกับเสา HSC ความต้องการเหล็กปลอกของ NZS 3101: 1995 มีความคืบหน้ากว่าของ ACI 318-99 เพราะได้คิดถึงผลของระดับของแรงตามแนวแกน และได้จำกัดกำลังจุดครากของเหล็กปลอกไว้ที่ค่าที่เหมาะสม

จากการศึกษาพบว่า ชนิด ปริมาณ กำลังจุดคราก ระยะเรียง การจัดเรียงเหล็กปลอก ระดับของแรงตามแนวแกน กำลังคอนกรีต อัตราส่วนพื้นที่ของคอนกรีตหุ้มต่อแกนคอนกรีต และอัตราส่วนความชะลูด มีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการเคลื่อนตัวด้านข้าง (ซึ่งแสดงถึงความเหนียว) ในขณะที่อัตราส่วนเหล็กยืนมีบทบาทที่สำคัญรองลงมา นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องศึกษาถึงผลของขนาด (size effect) อีกด้วย อีกทั้งยังต้องมีการทดสอบทางกายภาพเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของแรงตามแนวแกน กำลังจุดครากของเหล็กปลอก การจัดเรียงเหล็กยืนและรูปแบบของเหล็กปลอกที่มีต่อความเหนียว ต่อไปนี้จะกล่าวถึงตัวแปรบางตัวที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสา HSC ภายใต้แรงตามแนวแกนร่วมกับแรงทางด้านข้างแบบวัฏจักร

2.3.1 ผลของกำลังคอนกรีต (f_c') และระดับของแรงตามแนวแกน ($P/f_c'A_g$ หรือ P/P_o) ต่อความเหนียว

การเพิ่มกำลังคอนกรีตมีแนวโน้มทำให้ได้ความเหนียวที่ต่ำลง การเพิ่มแรงตามแนวแกนขึ้นทำให้ความสามารถในการเสียรูปและความเหนียวของเสาลดลง และเป็นการเร่งการเสื่อมของกำลังและสติฟเนสในทุกๆ รอบของแรงกระทำ แต่นั่นก็ไม่ได้หมายความว่าไม่ควรใช้ HSC ในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหวรุนแรง เพื่อเป็นการชดเชยผลอันนี้จะต้องการเหล็กปลอกปริมาณมากขึ้น เนื่องจากการไม่ได้พิจารณาผลของแรงตามแนวแกนทำให้ความต้องการเหล็กปลอกในบริเวณที่มีโอกาสเกิดข้อหมุนพลาสติก (potential plastic hinge regions) ของเสาตาม ACI 318–99 มากเกินความจำเป็นเมื่อระดับของแรงตามแนวแกนมีค่าต่ำ แต่จะมีความปลอดภัยน้อยลงเมื่อระดับของแรงตามแนวแกนสูงขึ้น สมมติว่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 4% ถือว่ามีความเหนียวดีมาก พบว่าเมื่อแรงตามแนวแกนต่ำกว่า 20% P_o (ซึ่งพบในเสาด้านแผ่นดินไหวส่วนใหญ่) ข้อกำหนดเรื่องแผ่นดินไหวของ ACI ให้ความเหนียวที่เพียงพอ ACI-ASCE Committee 441 [1997] ได้สรุปพฤติกรรมภายใต้แผ่นดินไหวของเสา HSC ไว้ดังนี้

ก. เสาที่มี f_c' ไม่เกิน 100 MPa และรับแรงในแนวแกนต่ำกว่า 20% P_o พบว่าข้อกำหนดของ ACI 318-99 ให้ความเหนียวเพียงพอ

ข. เสาที่มี f_c' สูงมาก (เช่น ประมาณ 100 MPa) และรับแรงในแนวแกนเกินกว่า 30% P_o จะต้องการปริมาณเหล็กปลอกมากกว่าข้อกำหนดของ ACI 318-99 และอาจจำเป็นต้องใช้กำลังจุดครากของเหล็กปลอกที่สูงขึ้นเนื่องจากมีความต้องการการโอบรัดที่สูง

2.3.2 ผลของกำลังจุดครากของเหล็กปลอก (f_{yh}) ต่อความเหนียว :

ปริมาณเหล็กปลอกสามารถลดลงได้โดยการใช้เหล็กปลอกที่มีกำลังจุดครากสูงขึ้น การใช้เหล็กปลอกกำลังสูงเป็นผลให้ได้การโอบรัดและความเหนียวที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังของเหล็กปลอกที่สูงขึ้นสามารถช่วยชดเชยผลเสียเนื่องมาจากการเพิ่มระยะเรียงของเหล็กปลอกได้ อย่างไรก็ตามเป็นไปได้ที่เสาที่ถูกโอบรัดโดยเหล็กปลอกกำลังสูงจะมีความ

เหนียวไม่เพียงพอ มีบางกรณีที่กำลังจุดครากที่สูงอาจจะไม่มีประสิทธิภาพ กล่าวคือ เมื่อเสาถูกโอบรัดไว้ไม่ดีพอ หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกจะไม่ถึงกำลังจุดคราก ดังนั้นจะใช้กำลังจุดครากไม่ได้ผลอย่างเต็มที่และไม่สามารถนำกำลังจุดครากเต็มไปใช้ในการคำนวณหน่วยแรงโอบรัดประสิทธิผล

เมื่อเสารับระดับของแรงตามแนวแกนที่สูง ในการที่จะได้มาซึ่งความเหนียวนั้นปริมาณเหล็กปลอกที่สูงเป็นสิ่งจำเป็น แต่อัตราส่วนปริมาตรของเหล็กปลอกที่มากกว่า 4% เป็นการยากที่จะใช้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นการใช้เหล็กปลอกกำลังสูงจึงเป็นวิธีที่ดีที่จะช่วยลดปริมาณเหล็กปลอกที่ต้องการลงได้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นที่จะต้องมีดรรชนีที่พิจารณาถึงเหล็กปลอกกำลังสูงในสมการออกแบบ อย่างไรก็ตามความต้องการเหล็กปลอกตาม ACI และ NZS ไม่สามารถใช้ได้โดยตรงกับเสาที่ใช้เหล็กปลอกกำลังสูง Saatcioglu และคณะ [2002] แนะนำให้จำกัดกำลังจุดครากของเหล็กปลอกไว้ไม่เกิน 600 MPa (ซึ่งเพิ่มขึ้นจากที่จำกัดไว้ 400 MPa ตาม ACI 318-99) เมื่อทำการออกแบบเหล็กปลอกตามสมการที่เขาเสนอ ข้อสรุปเกี่ยวกับการใช้เหล็กปลอกกำลังสูงในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหว มีดังต่อไปนี้

ก. เหล็กปลอกกำลังสูง (f_{yh} เกิน 800 MPa) มีประโยชน์เมื่อ P สูง (เกิน 40% P_o) ยิ่งไปกว่านั้นที่ระดับ P สูงนี้ในการจะได้มาซึ่งความเหนียวที่เพียงพอจะต้องการเหล็กปลอกมากกว่าข้อกำหนดของ ACI ข้อมูลที่มียังไม่เพียงพอที่จะใช้กำหนดระดับของเหล็กปลอกที่ต้องการ

ข. เมื่อ P ต่ำ (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20% P_o) ไม่แนะนำให้ใช้เหล็กปลอกกำลังสูง เพราะจะไม่ช่วยปรับปรุงกำลัง และความเหนียวของเสา HSC ได้แต่อย่างใด เนื่องจากเหล็กปลอกไม่สามารถพัฒนาหน่วยแรงได้อย่างเต็มที่

ค. เหตุผลหนึ่งในการใช้เหล็กปลอกที่มีกำลังสูงขึ้นในเสา HSC ก็เพื่อให้ได้ระยะเรียงที่ห่างขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อ P ต่ำต้องระมัดระวังเป็นพิเศษในการใช้วิธีการนี้ เมื่อ P ต่ำการใช้เหล็กปลอกกำลังสูงสามารถทำให้เป็นไปตามความต้องการเหล็กปลอกของข้อกำหนดได้โดยมีระยะเรียงที่ห่างขึ้น แต่ระยะเรียงที่อนุญาตให้ห่างขึ้นนี้อาจนำไปสู่การโก่งเดาะก่อนเวลาอันควรของเหล็กยืน และทำให้ได้ความเหนียวที่ต่ำกว่าที่ควรจะได้เมื่อใช้เหล็กปลอกที่มีกำลังต่ำกว่า

2.3.3 ผลของการจัดเรียงเหล็กปลอกต่อความเหนียว :

การกระจายตัวที่ดีขึ้นของเหล็กในแกนคอนกรีต และการให้การยึดรั้งทางด้านข้างที่ดีขึ้นกับเหล็กยืนทำให้เสามีผลการตอบสนองที่เหนียวขึ้น เสาที่มีเพียงเหล็กยืนที่มุมทั้งสี่เท่านั้นที่ถูกรอบรับโดยโค้งเหล็กปลอกเดี่ยวไม่สามารถที่จะคงความสามารถในการรับโมเมนต์ไว้ได้เมื่อมีการเสียรูปไปมากหลังจากการกระเทาะของคอนกรีตหุ้ม และมีการเตือนภัยเพียงเล็กน้อยก่อนเกิดการวิบัติ ซึ่งต่างจากเสาที่เหล็กยืนทั้งหมดแปดเส้นถูกยึดรั้งอย่างมีประสิทธิภาพนั้นจะเหนียวมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด Bayrak และคณะ [1998] พบว่าเสา UHSC (ultrahigh-strength concrete) ที่มีกำลังคอนกรีตประมาณ 100 MPa และรับระดับของแรงตามแนวแกนที่สูงสามารถทำให้มีพฤติกรรมแบบเหนียวได้โดยการให้ปริมาณเหล็กปลอกที่เพียงพอ และมีการจัดเรียงเหล็กปลอกอย่างมีประสิทธิภาพ การเพิ่มปริมาณเหล็กปลอก การลดแรงตามแนวแกน และการเพิ่มประสิทธิภาพในการให้การยึดรั้งทางด้านข้างกับเหล็กยืนเป็นผลทำให้ได้การดูดซับพลังงาน ความสามารถในการสลายพลังงาน และความเหนียวเพิ่มมากขึ้น

2.4 วิธีการประเมินพฤติกรรม

เพื่อที่จะประเมินพฤติกรรมของเสาบนพื้นฐานของเหตุผล ในทางทฤษฎีแล้วเป็นการเหมาะสมที่จะใช้วิธีการทั่วไปและเป็นระบบในการกำหนดค่าตัวแปรการตอบสนองต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนตัวจุดคราก การเคลื่อนตัวสูงสุด ฯลฯ ตามวิธีการของ Sheikh และ Khoury [1993] เส้นโค้งโอบคลุม (envelope curve) (ซึ่งได้มาจากค่าเฉลี่ยของค่าทั้งสองทิศทาง) ของวงรอบฮิสเทียรีซิสจะถูกสร้างขึ้นมาก่อนเป็นอันดับแรก (รูปที่ 2.11) ความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัว μ_Δ นิยามไว้ว่า

$$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \qquad (2.6)$$

โดยที่ Δ_u คือ ค่าการเคลื่อนตัวเมื่อความสามารถของตัวอย่างทดสอบลดลงเหลือ 80% ของค่าสูงสุดซึ่งพิจารณาว่าเป็นน้ำหนักวิบัติ และ Δ_y คือ ค่าการเคลื่อนตัวซึ่งได้มาที่แรงด้านข้างสูงสุด H_{max} โดยทำการสมมติค่าสติฟเนสเริ่มต้น K_i ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.11

ในทางคำนวณอาจเป็นการยากที่จะได้ค่าสติฟเนสเริ่มต้นมาอย่างถูกต้องเนื่องจากจะมีการผันแปรของข้อมูลการเคลื่อนตัวที่น้ำหนักกระทำต่ำ ๆ โดยการสมมติว่าผลการตอบสนองเริ่มต้นอยู่ในช่วงอีลาสติก เมื่อแรงด้านข้างมีค่าไม่เกิน 30% ของความสามารถสูงสุดของตัวอย่างทดสอบจะได้ว่าค่าโมดูลัสซีแคนท์ที่น้ำหนักกระทำนี้สามารถใช้เป็นค่าประมาณที่ดีของค่าสติฟเนสเริ่มต้นได้ในทางปฏิบัติ (Lukkunaprasit และ Thepmangkorn [2004])

ค่าพลังงานที่สลายไป E นิยามว่า เป็นค่าพลังงานสะสมที่ถูกสลายไปในแต่ละรอบที่ i ดังแสดงไว้เป็นพื้นที่แรเงา E_i ในรูปที่ 2.11 ดังนั้น

$$E = \sum_{i=1}^{n} E_i \tag{2.7}$$

โดยที่ n คือจำนวนรอบจนเกิดการวิบัติ ค่าการสลายพลังงานนอร์มัลไลซ์ E_N คือ

$$E_N = \frac{1}{H_{max}\Delta_y} \sum_{i=1}^{n} E_i \tag{2.8}$$

แทนที่จะคำนวณค่าพลังงานที่สลายไป Gosain และคณะ [1977] ได้เสนอค่าดรรชนีงานต่อไปนี้ขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงพฤติกรรมได้อีกวิธีหนึ่ง

$$I_w = \sum_{i=1}^{n} [(H_i\Delta_i)/(H_{max}\Delta_y)] \tag{2.9}$$

โดยที่ H_i และ Δ_i คือ ค่าสูงสุดของแรงด้านข้างและค่าสูงสุดของการเคลื่อนตัวในรอบที่ i (โดยเฉลี่ยจากค่าทั้งสองทิศทาง) ตามลำดับ สมการที่ (2.9) ได้ถูกทำให้ง่ายขึ้นไปอีกเป็น

$$N_\Delta = \sum_{i=1}^{n} (\Delta_i / \Delta_y) \tag{2.10}$$

ซึ่งสามารถตีความได้ว่าเป็นค่าความเหนียวสะสม (Sheikh และ Khoury, 1993)

2.4.1 อัตราส่วนความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่า (equivalent viscous damping ratio, ξ_{eq}) และ สติฟเนสประสิทธิผล (effective stiffness, k_{eff})

พจน์ที่สามในสมการทั่วไปของการเคลื่อนที่คือแรงหน่วงเชิงหนืดซึ่งเป็นสัดส่วนกับความเร็ว ($f_d(t) = c\dot{u}_s(t)$) โดยหลักแล้วจะถูกใช้เพื่อความสะดวกและเสถียรภาพในการคำนวณมากกว่าที่จะใช้เพื่อจำลองถึงลักษณะของความหน่วงของโครงสร้างให้ได้ถูกต้องตามความเป็นจริง รูปแบบของความหน่วงหรือการสลายพลังงานในโครงสร้างซึ่งธรรมดาที่สุดและเห็นได้ชัดที่สุดทางกายภาพ จะอยู่ในรูปของฮิสเทียรีซิส (hysteresis) ของการตอบสนองระหว่างแรงและการเสียรูป "ฮิสเทียรีซีส" หมายถึงปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นอย่างมากซึ่งเกิดขึ้นกับระบบไม่ยืดหยุ่นที่มีประวัติการรับแรง

ในการทำให้เข้ากับรูปแบบทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายของสมการการเคลื่อนที่ความหน่วงในรูปอื่น (โดยเฉพาะอย่างยิ่งความหน่วงฮิสเทียรีติก) ซึ่งพบในระบบโครงสร้างจะถูกแสดงได้อย่างสะดวกในรูปของสัมประสิทธิ์ความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่า (equivalent viscous damping coefficient, c_{eq}) โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์ความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่า (c_{eq}) จะถูกแสดงโดยอัตราส่วนความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่า (equivalent viscous damping ratio, ξ_{eq}) และสัมประสิทธิ์ความหน่วงวิกฤติ (critical damping coefficient, c_{cr}) ซึ่งเป็นค่าปริมาณความหน่วงน้อยที่สุดที่ทำให้ไม่มีการสั่นเกิดขึ้นในการตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยอิสระ (Priestley et al. [1996])

$$c_{eq} = \xi_{eq} c_{cr} \tag{2.11}$$

ความหน่วงฮิสเทียรีติกหรือการสูญเสียพลังงานต่อรอบซึ่งแสดงด้วยพื้นที่ A_h ในรูปที่ 2.12 สำหรับหนึ่งวงรอบที่สมบูรณ์ของวงรอบฮิสเทียรีซิสในอุดมคติระหว่างน้ำหนักกระทำและการเคลื่อนตัว สามารถเปลี่ยนให้เป็นอัตราส่วนความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่า สำหรับขนาดการเคลื่อนตัวเดียวกันได้ ดังนี้

$$\xi_{eq} = \frac{A_h}{2\pi V_m \Delta_m} = \frac{A_h}{4\pi A_e} \tag{2.12}$$

เมื่อ V_m และ Δ_m แทนค่าแรงสูงสุดเฉลี่ยและการเคลื่อนตัวสูงสุดเฉลี่ย พื้นที่ A_e แสดงถึงพลังงานความเครียดยืดหยุ่นที่ถูกเก็บสะสมภายใต้สภาวะสถิตอยู่ในระบบยืดหยุ่นเชิงเส้นเทียบเท่าซึ่งมีค่าสติฟเนสประสิทธิผล

$$k_{eff} = \frac{V_m}{\Delta_m} \tag{2.13}$$

ซึ่งเมื่อทำให้อยู่ในรูปไร้มิติจะได้ค่าสติฟเนสประสิทธิผลนอร์มัลไลซ์ ดังนี้

$$k_{eff,N} = \frac{k_{eff}}{\left(H_{max}/\Delta_y\right)} = \frac{V_m \Delta_y}{H_{max}\Delta_m} \tag{2.14}$$

อัตราส่วนความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่า ξ_{eq} สะท้อนถึงความสามารถในการลดขนาดการตอบสนองสูงสุดเนื่องจากการเสียรูปไม่ยืดหยุ่นภายใต้การกระทำจากแผ่นดินไหว วิธีการออกแบบโครงสร้างบนพื้นฐานของการเคลื่อนตัว (displacement-based design) สมัยใหม่พิจารณาค่าอัตราส่วนความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่า และสติฟเนสประสิทธิผลของระบบโครงสร้างไม่ยืดหยุ่น เป็นตัวแปรออกแบบที่สำคัญ

รูปแบบโดยทั่วไปของวงรอบฮีสเทียรีซิสระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวสำหรับส่วนโครงสร้างต่าง ๆ ถูกอธิบายอยู่ในรูปที่ 2.13 เพื่อการประเมินขนาดของความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่าจากความหน่วงฮีสเทียรีติก จากรูปที่ 2.12 เห็นได้ชัดว่าค่าอัตราส่วนความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่ามากที่สุดซึ่งสามารถได้มาโดยสมการ (2.12) คือ $\xi_{eq} = 2/\pi = 0.64$ สำหรับระบบที่มีลักษณะของวัฏจักรระหว่างแรงและการเสียรูปเป็นแบบแข็งเกร็ง-พลาสติกโดยสมบูรณ์ (rigid-perfectly plastic) รูปแบบของวงรอบแบบแข็งเกร็ง-พลาสติกโดยสมบูรณ์นี้ไม่เป็นจริงอย่างยิ่งกับกลไกไม่ยืดหยุ่นเฉพาะแห่งตามธรรมดาในโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 สำหรับหนึ่งรอบตัวอย่าง แม้แต่แบบจำลองการตอบสนองแบบยืดหยุ่น-พลาสติก (elastic-plastic) ซึ่งถูกใช้บ่อย ๆ ในรูปที่ 2.13 (a) ก็ยังใช้ได้กับเพียงไม่กี่กรณี ข้อหมุนในคานที่มีระดับแรงตามแนวแกนที่ต่ำหรือไม่มีเลยสามารถแสดงออกซึ่งการดูดซับพลังงานฮีสเทียรีติกได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงโดยวงรอบขนาดใหญ่ในรูปที่ 2.13 (b) และทำให้ได้ค่าอัตราส่วนความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่า 30% หรือมากกว่านั้น แรงตามแนวแกนที่สูงในเสา

ส่งผลให้รูปแบบของวงรอบฮิสเทียรีติกมีลักษณะคอดตรงกลาง (pinching effect) กล่าวคือ การเสียรูปที่น้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ จะมีค่ามากตอนเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกอีกทิศทางหนึ่งดังรูปที่ 2.13 (d) ซึ่งทำให้พื้นที่ภายในวงรอบหรือการสลายพลังงานน้อยลง และได้ค่าความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่าที่ลดลงในระหว่าง 10 ถึง 25% รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวกับอัตราส่วนความหน่วงเชิงหนืดเทียบเท่าของส่วนโครงสร้างต่าง ๆ

2.5 วิธีการออกแบบเหล็กปลอกโอบรัดตามข้อกำหนด ACI 318-99

ปรัชญาพื้นฐานของความต้องการเหล็กปลอกโอบรัดตามข้อกำหนดของ ACI ในปัจจุบัน คือ การรักษาความสามารถในการรับแรงตามแนวแกนของเสาไว้ได้หลังจากที่คอนกรีตหุ้มได้กระเทาะหลุดไป เห็นได้ชัดว่าปรัชญานี้ยึดค่าการเพิ่มของกำลังเนื่องจากการโอบรัดเป็นหลัก ไม่มีการให้ความสำคัญกับความเหนียวไว้อย่างเหมาะสม ถึงแม้มันจะบอกเป็นนัยว่าเหล็กปลอกช่วยเพิ่มความเหนียวของหน้าตัดและชิ้นส่วนได้ก็ตาม กฎเกณฑ์การออกแบบเหล็กปลอกโอบรัดของ ACI ได้มีการเปลี่ยนแปลงเรื่อยมาผ่านทางข้อกำหนดทั้งสิ้น 8 ฉบับ นับตั้งแต่ฉบับปี ค.ศ. 1956 จนถึงปี ค.ศ. 1999 ซึ่งจะกล่าวเฉพาะฉบับปี ค.ศ. 1999 เท่านั้น

หลักเกณฑ์การออกแบบการโอบรัดของเสาที่ใช้ใน ACI 318-99 มีพื้นฐานมาจากสมมติฐานที่ว่า เสาที่ถูกโอบรัดควรที่จะคงความสามารถในการรับแรงตรงศูนย์ไว้ได้หลังจากเกิดการกระเทาะออกของคอนกรีตหุ้ม นั่นคือ หลักเกณฑ์นี้ต้องการให้ได้ความสามารถรับแรงตรงศูนย์ของแกนเสาที่ถูกโอบรัด อย่างน้อยที่สุดเท่ากับกำลังไร้การโอบรัดของหน้าตัดเสาทั้งหมด ซึ่งทำได้โดยการให้การโอบรัดที่เพียงพอกับแกนคอนกรีตเพื่อให้ได้กำลังและความเหนียวที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนเหล็กปลอกที่ต้องการหาได้จากการเพิ่มของกำลังในแกนคอนกรีต ซึ่งสมมติให้เท่ากับ $(f'_{cc} - f'_{co}) = 4.1 f_l$ เมื่อ f'_{cc} หมายถึง กำลังของแกนคอนกรีตที่ถูกโอบรัด f'_{co} หมายถึง กำลังในที่ (in-place strength) ของคอนกรีต ซึ่ง ACI 318-99 ใช้ เท่ากับ $0.85 f'_c$ และ f_l หมายถึง หน่วยแรงโอบรัดเชิงรับที่สม่ำเสมอ อัตราส่วนเหล็กปลอกที่ต้องการซึ่งเป็นไปตามหลักเกณฑ์ด้านพฤติกรรมของ ACI 318-99 หาได้โดยการกำหนดให้

ความสามารถรับแรงตรงศูนย์ของคอนกรีตหุ้มมีค่าเท่ากับการเพิ่มขึ้นของกำลังในแกนคอนกรีต ดังนี้

กำลังในคอนกรีตหุ้ม	=	การเพิ่มของกำลังในแกนคอนกรีต	
$0.85 f_c'(A_g - A_c)$	=	$4.1 f_l (A_c - A_{st})$	(2.15)

เมื่อ A_c = พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีตโดยวัดถึงขอบนอกของเหล็กปลอกวงนอก

A_g = พื้นที่หน้าตัดเสาทั้งหมด

A_{st} = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กยืน

จากสมดุลของแกนคอนกรีตจะได้ว่า หน่วยแรงโอบรัดด้านข้าง f_l ของเสากลมเสริมเหล็กปลอกเกลียวเมื่อคราก คือ

$$f_l = \frac{2A_{sp} f_{yh}}{sh_c} \qquad (2.16)$$

แทนค่า f_l ลงในสมการที่ (2.15) และจัดสมการให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนปริมาตรของเหล็กปลอก จะได้

$$\rho_s = \frac{4\pi h_c A_{sp}}{\pi h_c^2 s} = \frac{4A_{sp}}{sh_c} = 0.415 \frac{f_c'}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) + \frac{4A_{sp}A_{st}}{sh_c A_c} \qquad (2.17)$$

ACI 318-99 ได้นำสมการที่ (2.17) มาใช้โดยทำการตัดเทอมสุดท้ายทิ้ง และเพิ่มค่า 0.415 เป็น 0.45 สมการของข้อกำหนดแสดงไว้ในสมการที่ (2.18) เพื่อใช้กับเสากลมเสริมเหล็กปลอกเกลียว แรงดึงในเหล็กปลอกเกลียวทำให้ได้หน่วยแรงโอบรัดด้านข้างที่เกือบสม่ำเสมอซึ่งสอดคล้องกับระดับการเพิ่มของกำลังที่พิจารณา

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_{yh}} \qquad (2.18)$$

หรืออาจเขียนในรูปอัตราส่วนพื้นที่ของเหล็กปลอกโอบรัดในแต่ละทิศทางของหน้าตัดได้ดังนี้

$$\rho_c = \frac{2A_{sp}}{sh_c} = \frac{1}{2}\rho_s = 0.225\frac{f_c'}{f_{yh}}\left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right) \qquad (2.19)$$

เนื่องจากการทำให้ง่ายขึ้นดังที่ได้กล่าวมา ทำให้การเพิ่มของกำลังในแกนคอนกรีตกลายเป็น $(f_{cc}' - f_{co}') \approx 3.8 f_l$

สำหรับเสาขนาดใหญ่ อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่ของแกนคอนกรีต (A_g / A_c) อาจจะมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง ในกรณีนี้สมการที่ (2.18) จะให้อัตราส่วนเหล็กปลอกที่น้อยมาก ดังนั้นโดยการกำหนดขอบเขตของอัตราส่วน A_g / A_c ทำให้ได้สมการขอบล่างดังสมการที่ (2.20)

$$\rho_s = 0.12\frac{f_c'}{f_{yh}} \qquad (2.20)$$

ความต้องการเหล็กปลอกในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้มาโดยการประยุกต์กรณีของเสากลมเสริมเหล็กปลอกเกลียว โดยการคำนึงว่าเหล็กปลอกที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงจะไม่มีประสิทธิภาพเท่ากับเหล็กปลอกวงกลม สมการที่ข้อกำหนดใช้คำนวณพื้นที่ของเหล็กปลอกตรงที่ต้องการได้มาจากสมการที่ (2.19) โดยมีสมมติฐานว่า เหล็กปลอกตรงมีประสิทธิภาพเท่ากับ 3/4 เท่าของเหล็กปลอกเกลียว ซึ่งก็หมายความว่า เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะต้องการเหล็กปลอกมากขึ้น 1/3 เท่า เพื่อที่จะมีความสามารถในการเสียรูปตามแนวแกนเท่ากับเสากลมเสริมเหล็กปลอกเกลียว ดังนั้น

$$\rho_c = \frac{A_{sh}}{sh_c} = \frac{4}{3}\times 0.225\frac{f_c'}{f_{yh}}\left(\frac{A_g}{A_c} - 1\right) \qquad (2.21)$$

ความต้องการเหล็กปลอกของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมเมื่อเขียนอยู่ในรูปพื้นที่ของเหล็กปลอกจะได้สมการที่ (2.22) ซึ่งเท่ากับว่าการเพิ่มของกำลังคอนกรีตในสภาวะโอบรัดเป็น $(f_{cc}' - f_{co}') \approx$

2.8 f_l ส่วนค่าขอบล่างซึ่งถูกกำหนดขึ้นมาโดยการบังคับไม่ให้อัตราส่วน A_g / A_c มีค่าต่ำกว่า 1.3 แสดงไว้ในสมการที่ (2.23)

$$A_{sh} = 0.3\, sh_c \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \qquad (2.22)$$

$$A_{sh} = 0.09\, sh_c \frac{f'_c}{f_{yh}} \qquad (2.23)$$

รูปที่ 2.15 แสดงการเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับเสาในโครงข้อแข็งโมเมนต์ระดับพิเศษ (special moment frame) ตามข้อกำหนดของ ACI ปริมาณเหล็กปลอกเดี่ยวที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.22) และ (2.23) จะต้องถูกกระจายตลอดบริเวณที่เป็นไปได้ที่จะเกิดข้อหมุนพลาสติก ซึ่งก็คือ ความยาว l_o วัดจากหน้าตัดวิกฤติ (หน้าตัดเสาที่อยู่ชิดกับข้อต่อคาน-เสา) รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างเหล็กเสริมทางขวางโดยมีเหล็กปลอกวงปิดหนึ่งวง และเหล็กยึดทางขวางสามตัว เหล็กยึดทางขวางที่มีของอ 90 องศา จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเหล็กยึดทางขวางที่มีของอ 135 องศา การโอบรัดที่เพียงพอสามารถได้มาถ้าปลายที่มีของอ 90 องศาของเหล็กยึดทางขวางถูกวางสลับกันในแนวดิ่ง

ระยะเรียงของเหล็กปลอกเดี่ยวภายในช่วงความยาว l_o ต้องมีค่าไม่เกิน ¼ เท่าของด้านที่สั้นที่สุดของหน้าตัดเสา (เพื่อให้ได้การโอบรัดคอนกรีตที่เพียงพอ) 6 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กยืน (เพื่อยับยั้งการคุ้งของเหล็กยืนหลังจากคอนกรีตหุ้มได้กระเทาะออกไป) และ s_x ซึ่งข้อกำหนดยอมผ่อนปรนให้ระยะเรียงสูงสุดของเหล็กปลอกเดี่ยวเพื่อการโอบรัดนี้ มีค่าเพิ่มจาก 4 นิ้ว เป็น 6 นิ้วได้ ถ้าระยะห่างสูงสุดจากศูนย์ถึงศูนย์ของขาของเหล็กยึดทางขวาง หรือเหล็กปลอกวงปิดในระนาบหน้าตัดเสาถูกจำกัดไว้ไม่เกิน 8 นิ้ว

นอกจากบริเวณที่มีโอกาสเกิดข้อหมุนพลาสติกซึ่งจะต้องให้การโอบรัดแล้ว ความยาวส่วนที่เหลือของเสาจะต้องมีระยะเรียงเหล็กปลอกไม่เกินค่าน้อยของ 6 d_b หรือ 6 นิ้ว (152 mm) ทั้งนี้เพื่อให้การป้องกันและความเหนียวที่เหมาะสมกับกึ่งกลางความสูงของเสา การสังเกตหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวพบว่า ได้เกิดความเสียหายอย่างมีนัยสำคัญกับเสาในบริเวณที่ไม่มีการโอบรัดใกล้กึ่งกลางความสูง จึงมีความต้องการเหล็กปลอกขั้นต่ำเพื่อให้

มั่นใจถึงความสามารถในการดูดกลืนพลังงาน (toughness) ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอโดยตลอดความยาวของเสา

2.6 การวิเคราะห์ประเมินความต้องการตามข้อกำหนดของ ACI ในปัจจุบันสำหรับเหล็กปลอกโอบรัดในเสาปลอกเดี่ยว

จากผลการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน (เช่น Sheikh และคณะ [1994, 1998] Azizinamini และคณะ [1994] Paultre และคณะ [2001] และ Xiao และ Yun [2002]) สรุปว่ากฎเกณฑ์ตามข้อกำหนดของ ACI 318-99 สำหรับการออกแบบเหล็กปลอดโอบรัดในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กต้องการการปรับปรุงขึ้นในประเด็นต่อไปนี้ :

ก. ปรัชญาการออกแบบของข้อกำหนด ACI 318-99 ในการคงไว้ซึ่งความสามารถรับแรงอัดตามแนวแกนตรงศูนย์ของหน้าตัดเสาภายหลังการกระเทาะของคอนกรีตหุ้มนั้น ไม่อาจแสดงถึงพฤติกรรมที่แท้จริงของเสาระหว่างการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวได้ เสาของโครงสร้างอาคารและสะพานจะเกิดการโยกตัวด้านข้างเมื่ออยู่ภายใต้การกระตุ้นของแผ่นดินไหว งานวิจัยก่อนหน้าได้แสดงว่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวและการโอบรัดของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กันโดยตรง ดังนั้นเสาที่มีการโยกตัวด้านข้างมากควรจะถูกโอบรัดให้แน่นหนากว่าเสาที่ถูกยึดทางข้างโดยกำแพงโครงสร้างที่แข็ง สมการการโอบรัดเสาใน ACI 318-99 ไม่ได้พิจารณาถึงความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด และควรถูกรวมไว้ในสมการออกแบบเมื่อเสารับแรงตามแนวแกนและแรงดัด แต่ความต้องการการโอบรัดกลับถูกพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของความสามารถในการเสียรูปตามแนวแกน โดยมีความเข้าใจเป็นนัยว่าเสาที่สามารถเสียรูปภายใต้แรงอัดตรงศูนย์ได้ก็จะสามารถเสียรูปภายใต้แรงตามแนวแกนร่วมกับแรงด้านข้างได้ อีกทั้งหลักเกณฑ์นี้ยังไม่เปิดโอกาสให้สามารถใช้ระดับแรงอัดตามแนวแกน และ/หรือความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวเป็นตัวแปรออกแบบได้

ข. สมการของข้อกำหนดปัจจุบันไม่ได้คำนึงถึงประสิทธิภาพของรูปแบบการจัดเรียงเหล็กในเสาปลอกเดี่ยวซึ่งเป็นตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของเสา หลักฐานทางการทดลองจำนวนมากบ่งชี้ว่าความเหนียวและกำลังของหน้าตัดจะ

แปรเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญจากรูปแบบการจัดเรียงหนึ่งสู่อีกรูปแบบหนึ่ง ทั้งสำหรับเสาที่รับแรงตามแนวแกนเพียงอย่างเดียว และเสาที่รับแรงตามแนวแกนร่วมกับโมเมนต์ดัด ดังนั้นสมการของข้อกำหนดจึงควรจะแตกต่างกันสำหรับการจัดเรียงเหล็กที่ต่างกัน หรือควรจะมีตัวแปรซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดเรียงเหล็กเสริมรวมอยู่ด้วย

ค. ระดับแรงตามแนวแกนในเสามีผลกระทบอย่างมากต่อพฤติกรรมของเสา Park และคณะ [1982] ได้รายงานว่ายิ่งแรงตามแนวแกนมีค่าสูงขึ้นความเหนียวก็จะยิ่งลดลงจึงทำให้ต้องการการโอบรัดที่มากขึ้น เนื่องจากข้อกำหนดจำนวนมากอนุญาตให้มีระดับแรงตามแนวแกนที่ค่อนข้างสูงได้สำหรับการออกแบบเสารับแผ่นดินไหว (ACI 318-99 กำหนดค่าแรงตามแนวแกนสูงสุดที่ยอมให้ในเสาปลอกเดี่ยวไว้เท่ากับ $0.8\ \phi P_o = 0.8\ (0.7)\ \ P_o = 0.56\ P_o$) ผลเสียของแรงตามแนวแกนที่สูงขึ้นจึงต้องถูกชดเชยโดยการใช้ปริมาณเหล็กปลอกและรูปแบบการจัดเรียงที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่า สมการการโอบรัดของเหล็กปลอกเดี่ยวในข้อกำหนดของนิวซีแลนด์ (NZS) ปี ค.ศ. 1982 เกือบเหมือนกับสมการของ ACI 318-99 ยกเว้นแต่มีตัวคูณเพิ่มเข้าไปเท่ากับ $0.5 + 1.25\ (P_e / \phi f_c' A_g)$ โดยที่ P_e คือแรงตามแนวแกนของเสา และ ϕ คือตัวคูณลดกำลัง ที่ค่า $P_e/\phi f_c' A_g$ น้อยกว่า 0.4 ข้อกำหนดของ ACI จะปลอดภัยกว่าของ NZS ปี ค.ศ. 1982 และสำหรับแรงตามแนวแกนที่สูงขึ้นข้อกำหนดของ NZS จะต้องการเหล็กปลอกมากกว่าของ ACI จนต้องการมากกว่าถึง 50% เมื่อ $P_e/\phi f_c' A_g$ เท่ากับ 0.80 ข้อกำหนดทั้งสองไม่ได้พยายามทำให้ปริมาณเหล็กปลอกที่ต้องการมีความสัมพันธ์ในเชิงปริมาณกับพฤติกรรมของเสา ในข้อกำหนดของนิวซีแลนด์ฉบับปี ค.ศ. 1995 ปริมาณเหล็กปลอกมีความสัมพันธ์กับระดับแรงตามแนวแกนและถูกมุ่งหมายที่จะทำให้ได้เสาที่เหนียวมาก อย่างไรก็ตามสมการออกแบบที่สมบูรณ์ควรที่จะทำให้ปริมาณเหล็กปลอกมีความสัมพันธ์กับระดับแรงตามแนวแกนและรูปแบบการจัดเรียงเหล็ก เพื่อให้มั่นใจถึงระดับความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัวที่ต้องการ

ง. ถึงแม้ว่า ACI จะไม่ได้จำกัดค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตไว้ แต่การใช้ข้อกำหนดเรื่องการโอบรัดของ ACI กับคอนกรีตกำลังสูงยังคงเป็นที่ไม่แน่ใจเนื่องจากเหตุผลหลายประการ อาทิเช่น ความขาดแคลนของข้อมูลทดสอบเสา

คอนกรีตกำลังสูง พฤติกรรมโดยธรรมชาติที่เปราะของคอนกรีตกำลังสูง อัตราส่วนปัวซองที่ต่ำกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดา และการสูญเสียคอนกรีตหุ้มอย่างทันทีทันใด โดยปกติเราจะสมมติว่าขณะที่การกระเทาะออกของคอนกรีตหุ้มกำลังดำเนินไปเหล็กปลอกก็จะเริ่มแสดงผล และเมื่อคอนกรีตหุ้มกระเทาะออกจนหมด แกนคอนกรีตก็จะถูกโอบรัดได้อย่างเพียงพอที่จะทำให้เสามีความสามารถที่จะเสียรูปไปอย่างมาก สมมติฐานนี้อาจจะเป็นจริงสำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดา แต่ในกรณีของคอนกรีตกำลังสูงนั้นเป็นที่ทราบกันว่าคอนกรีตหุ้มจะกระเทาะออกอย่างทันทีทันใด ซึ่งส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังของหน้าตัดไปอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการให้เวลาที่เพียงพอสำหรับการพัฒนาของการโอบรัด นอกจากนี้การที่อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าต่ำกว่า ยิ่งทำให้การพัฒนาหน่วยแรงโอบรัดด้านข้างในเหล็กปลอกช้าออกไปอีก ณ การเสียรูปน้อย ๆ

จ. คอนกรีตกำลังสูงนั้นเปราะกว่าคอนกรีตกำลังธรรมดา เสาคอนกรีตกำลังสูงเมื่อรับแรงอัดสูง ๆ จะต้องการเหล็กปลอกโอบรัดเป็นปริมาณมากเพื่อให้มั่นใจถึงพฤติกรรมที่เหนียวภายใต้แผ่นดินไหว การใช้เหล็กปลอกโอบรัดที่มีกำลังครากสูงเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยลดความแออัดของเหล็กปลอกลงได้ ดังนั้นการที่ ACI ได้กำหนดกำลังจุดครากสูงสุดของเหล็กเสริมในองค์อาคารต้านแรงแผ่นดินไหวไว้ไม่เกิน 60,000 psi (413.8 MPa) จึงเป็นการจำกัดการใช้ประโยชน์ของเหล็กปลอกกำลังสูง

2.7 สมการออกแบบเหล็กปลอกโอบรัดที่เสนอโดย Watson, Zahn และ Park [1994]

ในปี ค.ศ. 1986 Zahn และคณะได้สร้างผังออกแบบ (design chart) ค่าความเหนียวเชิงความโค้ง จากการวิเคราะห์โมเมนต์-ความโค้งแบบวัฏจักรของเสา ซึ่งได้ใช้ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแบบวัฏจักรทั้งของคอนกรีตที่ถูกโอบรัด คอนกรีตไร้การโอบรัด และของเหล็กยืน ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดแบบวัฏจักรสำหรับคอนกรีตที่ถูกโอบรัดได้คำนึงถึงทั้งปริมาณของเหล็กปลอก และการสะสมของพลังงานความเครียดภายในเหล็กปลอก

ต่อมาในปี ค.ศ. 1989 Watson และ Park ได้ใช้ผังออกแบบดังกล่าวมาสร้างเป็นสมการออกแบบที่ประณีตขึ้น สำหรับปริมาณเหล็กปลอกโอบรัดที่ต้องการในบริเวณที่มีโอกาสเกิดข้อหมุนพลาสติกในเสา โดยผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เสาหน้าตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการจัดเรียงเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 2.17 (a) เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีอัตราส่วนรูปร่าง (aspect ratio) เท่ากับ 1.5 และพิจารณาการดัดรอบทั้งสองแกน

รูปที่ 2.17 (b) แสดงช่วงของตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการวิเคราะห์ ความเหนียวเชิงความโค้ง ϕ_u / ϕ_y ในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 20 ถูกพิจารณาว่าน่าจะครอบคลุมกรณีที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการออกแบบสำหรับความเหนียวจำกัด (limited ductility) และความเหนียวเต็มที่ (full ductility) ระดับแรงตามแนวแกน $P/f_c' A_g$ ต่ำกว่า 0.2 ไม่ได้รับการพิจารณา เพราะว่าเมื่อเสารับแรงอัดน้อย ๆ บทบาทของเหล็กปลอกเพื่อการโอบรัดคอนกรีตจะไม่สำคัญเท่ากับบทบาทของเหล็กปลอกที่ถูกต้องการทั้งเพื่อให้การเหนี่ยวรั้งด้านข้างแก่เหล็กยืน เพื่อการป้องกันการคุ้งก่อนเวลาอันควร และเพื่อความต้านทานแรงเฉือน (ปริมาณเหล็กปลอกเพื่อการโอบรัดไม่ได้เป็นตัวควบคุมการออกแบบ) กำลังอัดของคอนกรีต (f_c') อยู่ในช่วง 20-40 MPa อัตราส่วนทางกลของเหล็กยืน (mechanical reinforcing ratio, $\rho_l f_y / (0.85 f_c')$) และอัตราส่วนคอนกรีตหุ้ม (c/h และ c/D) ที่พิจารณาเป็นค่าที่ใช้กันทั่วไปในการออกแบบ โดยที่ ρ_l = อัตราส่วนเหล็กยืน f_y = กำลังจุดครากของเหล็กยืน c = ความหนาของคอนกรีตหุ้ม h = ขนาดของหน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมผืนผ้าในทิศทางของการดัด และ D = เส้นผ่าศูนย์กลางของเสากลม

กำลังจุดครากของเหล็กเสริมในการศึกษามีค่าคงที่เท่ากับ 275 MPa ในการศึกษาก่อนหน้านี้ Zahn และคณะ [1986] ได้แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงกำลังจุดครากของเหล็กยืนภายในช่วงที่ใช้กันตามปกติจะไม่มีผลกระทบที่สำคัญต่อค่าความเหนียวเชิงความโค้งของเสาที่ได้มาภายใต้เงื่อนไขว่าเส้นสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดมีรูปร่างเหมือนกัน นอกจากนี้ Zahn และคณะ [1986] ยังพบว่าเส้นสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยเหล็กปลอกที่มีกำลังจุดคราก 380 MPa และ 275 MPa เกือบจะเหมือนกัน ถ้าอัตราส่วนของหน่วยแรงโอบรัดทางข้างประสิทธิผลต่อกำลังคอนกรีต ($k_e f_l / f_{co}'$) และระยะเรียงเหล็กปลอกมีค่าเท่ากัน นั่นคือการแปรเปลี่ยนกำลังจุดครากของเหล็กปลอก แต่ยังมีค่าแรงคราก คงที่โดยการ

ปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กปลอกอย่างเหมาะสม จะไม่ทำให้ประสิทธิผลในการโอบรัดเปลี่ยนแปลงไป

ปริมาณเหล็กปลอกโอบรัดที่ต้องการสำหรับหน้าตัดเสากลม สี่เหลี่ยมจัตุรัส และสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งแสดงในรูปที่ 2.17 (a) หาได้จากค่าอัตราส่วน $(k_e f_l / f'_{co})$ ซึ่งได้มาโดยใช้ผังออกแบบดังกล่าวสำหรับช่วงของค่าตัวแปรต่าง ๆ ในรูปที่ 2.17 (b) ค่า k_e ถูกสมมติให้เท่ากับ 0.85 สำหรับเสากลม และเท่ากับ 0.70 สำหรับเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า Watson และ Park [1989] ได้สรุปถึงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ไว้ดังนี้

ก. ปริมาณเหล็กปลอกที่ต้องการสำหรับการโอบรัดเพื่อให้ได้ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ระบุจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับการเพิ่มของอัตราส่วนแรงตามแนวแกน $P / f'_c A_g$ ทั้งนี้เพราะเมื่ออัตราส่วนแรงตามแนวแกนมีค่าสูง กำลังรับแรงดัดของเสาจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต และการกระจายของหน่วยแรงมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ต้องการเหล็กปลอกเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้การโอบรัดที่เพียงพอ

ข. ปริมาณเหล็กปลอกโอบรัดที่ต้องการจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเหล็กยืน ρ_l ลดลง เพราะว่าเมื่อ ρ_l มีค่าน้อย กำลังรับแรงดัดของเสาจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีต และการกระจายของหน่วยแรงมากยิ่งขึ้น

ค. ปริมาณเหล็กปลอกโอบรัดที่ต้องการจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เพราะว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงจะเปราะมากขึ้น

ง. ปริมาณเหล็กปลอกโอบรัดที่ต้องการจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความหนาของคอนกรีตหุ้ม *c/D* หรือ c/h เพิ่มขึ้น เพราะว่าเมื่ออัตราส่วน *c/D* หรือ *c/h* มีค่าสูง เสาจะสูญเสียกำลังรับแรงดัดไปอย่างมากเมื่อเกิดการกระเทาะออกของคอนกรีตหุ้ม

จ. ชนิดของหน้าตัดเสามีผลอย่างมากต่อปริมาณเหล็กปลอกโอบรัดที่ต้องการเพื่อให้ได้ความเหนียวเชิงความโค้งที่เท่ากัน ปริมาณเหล็กปลอกที่ต้องการสำหรับเสาหน้าตัดกลมจะแตกต่างอย่างชัดเจนจากปริมาณเหล็กปลอกที่ต้องการสำหรับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า อย่างไรก็ตามเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะต้องการปริมาณเหล็กปลอกไม่ต่างกันมากนัก

โดยอาศัยการวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุด (least square analysis) ของค่าที่ 95 เปอร์เซ็นไตล์ (95th percentile) สมการออกแบบสำหรับปริมาณเหล็กปลอกโอบรัดที่ต้องการในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้าสามารถได้จากสมการ

$$A_{sh} = \frac{\left(\frac{\phi_u}{\phi_y} - 33\rho_l m + 22\right)}{111} sh_c \frac{A_g}{A_c}\frac{f_c'}{f_{yh}}\frac{P}{\phi f_c' A_g} - 0.006\, sh_c \qquad (2.24)$$

โดยที่ $\frac{\phi_u}{\phi_y}$ = ความเหนียวเชิงความโค้ง

ρ_l = อัตราส่วนของพื้นที่เหล็กยืนทั้งหมด A_{st} ต่อพื้นที่หน้าตัดเสาทั้งหมด

m = กำลังครากของเหล็กยืน f_y หารด้วย 0.85 เท่าของกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก f_c'

P = แรงอัดตามแนวแกนในเสา

ϕ = ตัวคูณลดกำลัง

สมการที่ (2.24) สามารถใช้ได้ทั้งสำหรับหาปริมาณเหล็กปลอกโอบรัดที่ต้องการเพื่อให้ได้มาซึ่งความเหนียวเชิงความโค้งที่ระบุ หรือสำหรับหาความเหนียวเชิงความโค้งที่หน้าตัดรับได้เมื่อทราบรายละเอียดของเหล็กเสริม ความเหนียวเชิงความโค้งเท่ากับ 20 สามารถถูกระบุสำหรับการออกแบบความเหนียวเต็มที่และความเหนียวเชิงความโค้งเท่ากับ 10 สำหรับการออกแบบความเหนียวจำกัดในกรณีที่ไม่มีการคำนวณที่สมบูรณ์เพื่อหาค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ต้องการ

นอกจากนี้ Watson และ Park [1994] ยังได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงด้านข้างแบบวัฏจักร ผู้วิจัยพบว่าค่าความยาวของเสาที่ต้องการการโอบรัดโดยวัดจากหน้าตัดวิกฤติตามที่ระบุใน ACI 318-89 และ NZS 3101 : 1982 นั้นไม่เพียงพอสำหรับเสาที่รับแรงอัดตามแนวแกนสูงมาก ช่วงความยาวของเสาที่ถูกโอบรัดจำเป็นต้องถูกขยายออกไปเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติของเสาขึ้นในบริเวณที่มีการโอบรัดเพียงเล็กน้อยภายนอกบริเวณที่ถูกโอบรัดตามที่ระบุโดยข้อกำหนด

Priestley และ Park [1987] ได้กล่าวว่าช่วงความยาวที่ถูกโอบรัดต้องยาวพอที่จะครอบคลุมบริเวณที่มีความโค้งพลาสติกอยู่มาก และต้องยาวพอที่จะทำให้มั่นใจว่ากำลังรับแรงดัดที่สูงขึ้นของเสาในบริเวณที่ถูกโอบรัดนั้น จะไม่นำไปสู่การวิบัติด้วยแรงดัดของเสาในบริเวณที่มีการโอบรัดเพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ติดต่อกัน ความต้องการข้อที่สองนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับเสาที่รับแรงอัดตามแนวแกนสูง ๆ เนื่องจากในเสาดังกล่าวกำลังรับแรงดัดจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยการโอบรัดของคอนกรีต ดังนั้นการกระจายของโมเมนต์ดัดที่กระทำ และกำลังรับแรงดัดของเสาจึงมีอิทธิพลสำคัญต่อความยาวของเสาที่จะต้องถูกโอบรัด

รูปที่ 2.18 แสดงโมเมนต์ดัดของเสายื่นเนื่องจากแรงด้านข้างกระทำที่ปลายเสา และกำลังรับแรงดัดของเสาในบริเวณที่ถูกโอบรัดและบริเวณที่ถูกโอบรัดเพียงเล็กน้อย เพื่อชดเชยผลของการแพร่ของการคราดเพราะการแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงทแยง (diagonal tension cracking) ที่อาจจะเกิดขึ้น แผนผังโมเมนต์จึงถูกแผ่ออกไปอีก $h/2$ ตามความสูงของเสา เมื่อ h คือความลึกของหน้าตัดเสา ความยาวของบริเวณที่จะต้องถูกโอบรัด l_o สามารถประมาณได้ดังนี้ ที่ฐานเสาในบริเวณที่มีการโอบรัดให้โมเมนต์มีค่าถึงกำลังรับแรงดัดที่เพิ่มขึ้น M_i ภายนอกบริเวณที่ถูกโอบรัดกำลังรับแรงดัดที่ถูกคำนวณตามข้อกำหนด M_{code} สามารถใช้ได้ เพราะฉะนั้นส่วนของเสาที่ต้องถูกโอบรัดสามารถคำนวณจากเรขาคณิตได้เป็น

$$l_o = L\left(1 - \frac{M_{code}}{M_i}\right) + \frac{h}{2} \tag{2.25}$$

โดยที่ l_o = ความยาวของบริเวณที่ถูกโอบรัดในเสา ซึ่งอยู่ติดกับหน้าตัดที่รับโมเมนต์ดัดสูงสุด (หน้าตัดวิกฤติ)

L = ระยะจากหน้าตัดวิกฤติถึงหน้าตัดที่มีโมเมนต์เท่ากับศูนย์

M_{code} = กำลังรับแรงดัดระบุซึ่งคำนวณตามวิธีการของ ACI

M_i = กำลังรับแรงดัดในอุดมคติ ซึ่งคำนวณโดยรวมเอาการเพิ่มขึ้นของกำลังเนื่องจากการโอบรัดคอนกรีต และการแข็งตัวของความเครียด (strain hardening) ในเหล็กยืน

Watson และ Park [1997] ได้ใช้สมการที่ (2.25) วิเคราะห์ข้อมูลทดสอบเสาภายใต้แรงด้านข้างสลับทิศ และพบว่าความยาวที่ถูกโอบรัด l_o ควรจะเพิ่มค่าขึ้นกับระดับแรงตาม

แนวแกน สำหรับตัวแปรอื่น ๆ เช่น อัตราส่วนรูปร่างหน้าตัดและชนิดของหน้าตัดเสานั้นไม่มีผลกระทบที่สำคัญ ผู้วิจัยได้แนะนำสมการสำหรับคำนวณค่าความยาวของบริเวณที่ต้องการการโอบรัดเพื่อใช้ในการออกแบบ ดังนี้

$$\frac{l_o}{h} = 1 + 2.8\frac{P}{\phi f_c' A_g} \tag{2.26}$$

โดยที่ $P/f_c' A_g$ = ระดับแรงอัดตามแนวแกนของเสาเทียบกับความสามารถของหน้าตัดคอนกรีตทั้งหมด

ϕ = ตัวคูณลดกำลัง

สมการที่ (2.26) จะให้ค่า $l_o = h$ เมื่อ $P/\phi f_c' A_g = 0$ และ $l_o = 3h$ เมื่อ $P/\phi f_c' A_g = 0.7$

2.8 วิธีการออกแบบเหล็กปลอกโอบรัดตามข้อกำหนด NZS 3101 : 1995

มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตของนิวซีแลนด์ NZS 3101: 1995 ได้นำเอาสมการออกแบบเหล็กปลอกโอบรัดที่เสนอโดย Watson, Zahn และ Park [1994] มาใช้ โดยมีจุดประสงค์ที่จะกำหนดปริมาณเหล็กปลอกที่ต้องการเพื่อให้ได้ความเหนียวเชิงความโค้ง ϕ_u/ϕ_y ของหน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมเท่ากับ 20 ในบริเวณที่มีโอกาสเกิดข้อหมุนพลาสติกขึ้น เนื้อที่ทั้งหมดของเหล็กปลอก A_{sh} ในแต่ละทิศทางของหน้าตัดภายในระยะเรียง s ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า

$$A_{sh} = \left(\frac{1.3 - \rho_l m}{3.3}\right) sh'' \frac{A_g}{A_c}\frac{f_c'}{f_{yh}}\frac{P}{\phi f_c' A_g} - 0.006\, sh'' \tag{2.27}$$

เมื่อ h'' = ความกว้างของหน้าตัดแกนคอนกรีตที่ตั้งฉากกับทิศทางของเหล็กปลอกที่พิจารณา โดยวัดถึงขอบนอกของเหล็กปลอกวงนอก

P = แรงอัดตามแนวแกนสูงสุดในเสา

A_{sh} ในสมการที่ (2.27) มีค่าขึ้นอยู่กับ $P / f_c' A_g$ เพราะว่าค่า $P / f_c' A_g$ ที่สูงจะเป็นผลให้ความลึกแกนสะเทิน c มากขึ้น ซึ่งหมายถึงหน่วยการหดตัวของคอนกรีต ณ ขอบนอกสุด ε_{cu} ที่สูงขึ้น เพื่อให้ได้ความโค้งประลัย $\phi_u = \varepsilon_{cu} / c$ ที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องการการโอบรัดของคอนกรีตมากขึ้น

ในโครงสร้างที่ค่อนข้างง่าย (ยกตัวอย่างเช่น เสายื่น และเสาสะพาน) สามารถคำนวณค่าแรงอัดตามแนวแกนสูงสุดของเสา P เพื่อใช้ในสมการที่ (2.27) โดยวิธีการตามปกติ อย่างไรก็ดีสำหรับการออกแบบรับแผ่นดินไหวของโครงข้อแข็งต้านโมเมนต์หลายชั้นในอาคารตาม NZS 3101:1995 ค่าแรงอัดตามแนวแกนสูงสุดของเสา P จะไม่หามาจากการวิเคราะห์โครงสร้างแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นสำหรับกรณีของน้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ กัน แต่ NZS 3101:1995 กำหนดให้หา P โดยวิธีการออกแบบกำลังความต้านทาน (capacity design) จากผลรวมของแรงเฉือนที่กระทำกับเสาโดยปลายของคานทุก ๆ ชั้น ซึ่งอยู่เหนือระดับที่พิจารณา โดยสมมติให้คานรับน้ำหนักบรรทุกถึงค่าแรงดัดเกินกำลังระบุ (flexural overstrength) ที่ข้อหมุนพลาสติก และอนุญาตให้คำนึงถึงโอกาสที่คานไม่หมดทุกตัวจะมีค่าถึงแรงดัดเกินกำลังระบุ นั่นคือ $P = R_v \Sigma V_b$ โดยที่ R_v คือตัวคูณปรับลดซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.54 และ 0.97 ขึ้นอยู่กับคาบการสั่นไหวของโครงข้อแข็ง และขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นเหนือระดับที่พิจารณา และ ΣV_b คือผลรวมของแรงเฉือนในคานทั้งหมดซึ่งกระทำที่หน้าเสาเหนือระดับที่พิจารณา ซึ่งคำนวณมาจากโมเมนต์ข้อหมุนพลาสติกในคานเท่ากับ 1.25 ของกำลังรับแรงดัดระบุ (M_n) และน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่งที่มีอยู่

สมการที่ (2.27) ถูกมุ่งหมายให้ได้ความเหนียวเชิงความโค้ง ϕ_u / ϕ_y อย่างน้อยเท่ากับ 20 เพราะ NZS 3101:1995 พิจารณาว่าค่าดังกล่าวเป็นค่าสูงสุดซึ่งอาจต้องการให้พัฒนาขึ้นได้ในเสายื่นที่เหนียว หรือเสาของโครงข้อแข็งอาคารแบบเสาอ่อน-คานแข็งซึ่งสูงหนึ่งหรือสองชั้น หรือเสาชั้นแรกของโครงข้อแข็งอาคารแบบเสาแข็ง-คานอ่อนหลายชั้นที่ต้องการความเหนียวในระหว่างแผ่นดินไหวที่รุนแรง สำหรับกรณีดังกล่าวจะสมมติให้ ϕ = 0.85 ในสมการที่ (2.27) ในชั้นบนของโครงข้อแข็งที่เหนียวซึ่งเสาได้ถูกป้องกันไว้อย่างเพียงพอ เพื่อไม่ให้เกิดข้อหมุนพลาสติกโดยการออกแบบเสาแข็ง-คานอ่อน สามารถใช้ A_{sh} เท่ากับร้อยละ 70 ของค่าในสมการที่ (2.27) และสมมติให้ ϕ= 1.0 ซึ่งจะทำให้มั่นใจได้ถึงความเหนียวเชิงความโค้ง ϕ_u / ϕ_y อย่างน้อยเท่ากับ 10

เดิมทีเดียวสมการที่ (2.27) นั้นได้มาจากผลการวิเคราะห์เสาคอนกรีตซึ่งมีค่า f_c' จนถึง 40 MPa อย่างไรก็ตาม Li และคณะ [1994] ได้ทำการวิเคราะห์โมเมนต์-ความโค้งแบบวัฏจักรโดยใช้แบบจำลองความเค้น-ความเครียดสำหรับคอนกรีตกำลังสูงซึ่งพัฒนาขึ้นโดยผู้วิจัย และพบว่าสมการที่ (2.27) ยังสามารถจะใช้ได้กับเสาคอนกรีตกำลังสูงที่มี f_c' จนถึง 100 MPa อย่างไรก็ดีสำหรับโครงสร้างที่เหนียวอย่างยิ่ง และโครงสร้างที่มีความเหนียวจำกัดซึ่งถูกออกแบบให้ต้านแรงแผ่นดินไหว NZS 3101:1995 ได้จำกัดค่า f_c' ไว้ไม่เกิน 70 MPa นอกจากนี้ NZS 3101:1995 ยังอนุญาตให้ใช้ค่าสูงสุดของกำลังครากของเหล็กปลอก f_{yh} ในการคำนวณออกแบบเหล็กปลอกโอบรัดได้ไม่เกิน 800 MPa ทั้งนี้เพราะเหล็กปลอกกำลังสูงเมื่อถูกใช้ในการโอบรัดเสาคอนกรีตกำลังสูง อาจจะไม่สามารถพัฒนาหน่วยแรงได้ถึงกำลังคราก เนื่องจากการขยายตัวด้านข้างที่ต่ำของคอนกรีตกำลังสูง และประสิทธิภาพที่ลดลงของเหล็กปลอกสี่เหลี่ยมอันเนื่องมาจากการโก่งตัวของขาเหล็กปลอกเมื่อรับแรงดันจากแกนคอนกรีต ทำให้เหล็กปลอกไม่สามารถพัฒนาหน่วยแรงได้มากพอเมื่อทำการโอบรัดคอนกรีตกำลังสูง อย่างไรก็ตามการใช้เหล็กปลอกที่มีกำลังครากเกินกว่า 800 MPa นั้นยังมีประโยชน์ เพราะถึงแม้ข้อกำหนดจะให้ใช้เพียง 800 MPa ได้เท่านั้นในสมการออกแบบ แต่กำลังครากที่สูงขึ้นจะทำให้เหล็กปลอกส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (และไม่ยืดตัวอย่างพลาสติก) ดังนั้นจึงให้การโอบรัดที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ นอกจากนี้การใช้เหล็กปลอกกำลังสูงจะช่วยลดปริมาณเหล็กปลอกลงได้ แต่เพื่อให้มั่นใจถึงการโอบรัดที่มีประสิทธิภาพของแกนคอนกรีตในเสา ระยะเรียงของเหล็กปลอกกำลังสูงไม่ควรเกินค่าที่ยอมให้สำหรับเหล็กปลอกกำลังธรรมดา NZS 3101:1995 กำหนดว่าในถิ่นแผ่นดินไหวรุนแรงภายในบริเวณที่มีโอกาสเกิดข้อหมุนพลาสติกของเสา (ไม่ว่ากำลังคอนกรีตจะเป็นเท่าใดก็ตาม) ระยะเรียงในแนวดิ่งจากศูนย์ถึงศูนย์ของชุดของเหล็กปลอกต้องไม่เกินค่าน้อยของ 1/4 เท่าของขนาดหน้าตัดที่น้อยที่สุด หรือ 6 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กยืน นอกจากนี้ระยะห่างในแนวราบจากศูนย์ถึงศูนย์ระหว่างเหล็กยืนที่ถูกผูกกับขาของเหล็กปลอกวงปิดหรือเหล็กยึดทางขวาง ต้องไม่เกินค่ามากของ 200 mm หรือ 1/4 เท่าของขนาดหน้าตัดด้านที่ขนานกับทิศทางของระยะห่างดังกล่าว

ปริมาณเหล็กปลอกที่ให้ต้องเป็นค่ามากของที่ต้องการสำหรับการโอบรัดคอนกรีต (สมการที่ (2.27)) สำหรับป้องกันการคุ้งก่อนเวลาอันควรของเหล็กยืน และสำหรับแรงเฉือนเมื่ออัตราส่วนแรงตามแนวแกน $P/f_c' A_g$ มีค่าสูง เหล็กปลอกที่ต้องการสำหรับการโอบรัด

คอนกรีตจะควบคุมปริมาณเหล็กปลอก เมื่ออัตราส่วนแรงตามแนวแกนมีค่าต่ำ เหล็กปลอกที่ต้องการเพื่อป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กยืนหรือการวิบัติด้วยแรงเฉือนจะเป็นตัวควบคุมการออกแบบ

2.9 สมการออกแบบเหล็กปลอกเดี่ยวเพื่อการโอบรัดของเสาคอนกรีตกำลังธรรมดาที่เสนอโดย Sheikh และ Khoury [1997]

โดยอาศัยข้อมูลทดสอบของเสาขนาดใหญ่จำนวน 29 ต้นที่มีกำลังคอนกรีตอยู่ในช่วง 26 ถึง 58 MPa ภายใต้แรงอัดคงที่ร่วมกับแรงด้านข้างแบบวัฏจักร และภายใต้แรงดัดทางเดียว (monotonic flexure) Sheikh และ Khoury [1997] ได้พัฒนาวิธีการออกแบบเหล็กปลอกโอบรัดในเสาเหล็กปลอกเดี่ยวตามพฤติกรรมความเหนียวที่ต้องการ โดยมีการพิจารณาผลของรูปแบบการจัดเรียงเหล็กเสริมและระดับแรงตามแนวแกนเพิ่มเติมจากสมการออกแบบของ ACI ดังนี้

$$A_{sh} = (A_{sh,ACI}) \propto Y_p Y_\phi \qquad (2.28)$$

โดยที่ $\propto$ เป็นตัวแปรที่คำนึงถึงประสิทธิภาพของการโอบรัด ซึ่งประกอบด้วยรูปแบบการจัดเรียงและการยึดรั้งทางด้านข้างที่ให้กับเหล็กยืน ตัวแปร Y_p และ Y_ϕ จะพิจารณาผลของระดับแรงตามแนวแกน และความต้องการความเหนียวเชิงความโค้ง μ_ϕ (curvature ductility demand) ของหน้าตัด ตามลำดับ

ตัวแปรรูปแบบการจัดเรียง ($\propto$)

ประสิทธิผลของเหล็กปลอกสะท้อนออกมาด้วยพื้นที่ของคอนกรีตซึ่งถูกโอบรัดอย่างมีประสิทธิภาพและการกระจายของหน่วยแรงโอบรัด ซึ่งก็ได้รับผลอย่างมากจากการกระจายของเหล็กยืนและเหล็กปลอก และจากขนาดของการยึดรั้งทางด้านข้างที่ให้กับเหล็กยืน รูปที่ 2.19 อธิบายแนวคิดของพื้นที่คอนกรีตซึ่งถูกโอบรัดอย่างมีประสิทธิภาพภายในแกนเสาโดยมีรูปแบบการจัดเรียงเหล็กที่แตกต่างกัน รูปแบบการจัดเรียงที่มีจำนวนเหล็กยืนซึ่งถูกยึดรั้งทางด้านข้างโดยของอหรือมุมของเหล็กปลอกเดี่ยวมากขึ้น จะมีพื้นที่คอนกรีตซึ่งถูกโอบรัดอย่าง

มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น และมีประสิทธิภาพของการโอบรัดดีขึ้นค่อนข้างมาก จากรูปแบบการจัดเรียงที่มีเหล็กยืนสี่เส้นไปเป็นรูปแบบการจัดเรียงที่มีเหล็กยืนแปดเส้นนั้น ประสิทธิภาพจะปรับปรุงขึ้นอย่างมาก โดยใช้พื้นฐานจากแนวคิดของ "พื้นที่แกนคอนกรีตซึ่งถูกโอบรัดอย่างมีประสิทธิภาพ" และข้อมูลการทดลองจำนวนมาก Sheikh และ Khoury [1997] ได้แบ่งรูปแบบการจัดเรียงเหล็กออกเป็น 3 ประเภทหลักดังนี้ (ดูรูปที่ 2.20)

ก. ประเภทที่ I : มีเพียงเหล็กปลอกวงปิดวงนอกเพียงวงเดียว (หน้าตัดซึ่งมีเพียงเหล็กยืนที่มุมสี่เส้นเท่านั้น ที่ถูกยึดรั้งทางด้านข้างโดยโค้งเหล็กปลอกเดี่ยว)

ข. ประเภทที่ II : นอกจากเหล็กปลอกวงปิดวงนอกซึ่งให้การยึดรั้งทางด้านข้างกับเหล็กยืนที่มุมสี่เส้นแล้ว เหล็กยืนภายในอย่างน้อยหนึ่งเส้นในแต่ละด้านจะถูกยึดรั้งที่ตำแหน่งที่เลือก โดยของอซึ่งไม่ได้ถูกฝังในแกนคอนกรีต และถูกยึดรั้งที่ตำแหน่งตรงข้ามกับที่เลือกโดยของอซึ่งถูกฝังในแกนคอนกรีต (เหล็กยืนอย่างน้อยสามเส้นในแต่ละด้านของหน้าตัดถูกยึดรั้งทางด้านข้างโดยโค้งเหล็กปลอกเดี่ยว ซึ่งมีของอที่ไม่ได้ฝังในแกนคอนกรีตรวมอยู่ด้วย)

ค. ประเภทที่ III : เหล็กยืนอย่างน้อยสามเส้นในแต่ละด้านของเสาถูกยึดรั้งทางด้านข้างอย่างมีประสิทธิภาพโดยมุมเหล็กปลอกเดี่ยว และฝังของอเข้าไปในแกนคอนกรีต (เหมือนกับประเภทที่ II แต่ของอทั้งหมดถูกฝังในแกนคอนกรีต)

ในการออกแบบตามพฤติกรรมนี้ ได้มีการแบ่งระดับความสามารถในการเสียรูปของหน้าตัดเสาออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับที่เหนียวมากเมื่อความเหนียวเชิงความโค้งมีค่าตั้งแต่ 16 ขึ้นไป ระดับที่เหนียวปานกลางเมื่อ μ_ϕ อยู่ระหว่าง 8 ถึง 16 และความเหนียวระดับต่ำเมื่อ μ_ϕ น้อยกว่า 8 อย่างไรก็ตามสำหรับการออกแบบเสารับแผ่นดินไหวจะพิจารณาเฉพาะความเหนียวระดับสูงและระดับปานกลางเท่านั้น

รูปแบบการจัดเรียงเหล็กประเภทที่ I ไม่แนะนำให้ใช้กับเสาที่ต้องการความเหนียวมาก แต่สามารถใช้ได้กับเสาที่ต้องการความเหนียวปานกลางเมื่อแรงตามแนวแกนที่กระทำมีค่าต่ำกว่าแรงตามแนวแกนสมดุล P_b สำหรับรูปแบบการจัดเรียงประเภทที่ II แนะนำให้ใช้ได้กับเสาที่ต้องการความเหนียวมากในกรณีของแรงตามแนวแกนระดับต่ำ และใช้กับเสาที่เหนียวปานกลางได้ถ้าแรงตามแนวแกนไม่เกิน $0.4P_o$ (รูปที่ 2.20)

สำหรับรูปแบบการจัดเรียงเหล็กประเภทที่ III ซึ่งเหล็กยืนอย่างน้อยสามเส้น ในแต่ละด้านของหน้าตัด ถูกรัดด้วยมุมของเหล็กปลอก และของอเป็นชนิดฝังในแกนคอนกรีตทั้งหมด ให้ผลประสิทธิภาพของการโอบรัดสูงสุด ถือเป็นกรณีอ้างอิงและให้ $\alpha = 1$ สำหรับการจัดเรียงประเภทที่ II ซึ่งมีของอบางตัวไม่ถูกฝังในแกนคอนกรีตภายใต้ระดับแรงตามแนวแกนที่จำกัด อาจสมมติว่า ประสิทธิภาพในการโอบรัดของรูปแบบการจัดเรียงประเภทที่ II ไม่ต่างจากประเภทที่ III ในกรณีที่ไม่มีการอ้าออกของของอเหล่านี้จนถึงค่าความเหนียวที่ต้องการ ดังนั้นรูปแบบการจัดเรียงประเภทที่ II จะมีค่าตัวแปร α เท่ากับ 1 ตราบใดที่การใช้งานเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้จำกัดไว้ข้างต้น สำหรับรูปแบบการจัดเรียงประเภทที่ I ตัวแปร α มีค่าเท่ากับ 2.5 ซึ่งหมายความว่าปริมาณเหล็กปลอกเดี่ยวที่ต้องการในหน้าตัดเสาที่มีรูปแบบการจัดเรียงประเภทที่ I เพื่อที่จะได้มาซึ่งความต้องการความเหนียวที่ระบุ จะเป็น 2.5 เท่าของที่ต้องการสำหรับหน้าตัดเสาที่มีรูปแบบการจัดเรียงประเภทที่ III

ตัวแปร Y_p และ Y_ϕ

จากการวิเคราะห์กำลังสองน้อยที่สุด (least square analysis) ของผลการทดสอบเสากำลังธรรมดาดังกล่าวข้างต้น เพื่อหาค่าคงที่เอมพิริแคลซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ถูกเลือกขึ้นมาสำหรับตัวแปร Y_p และ Y_ϕ ทำให้ได้ว่า

$$Y_p = 1 + 13\left(\frac{P}{P_o}\right)^5 \tag{2.29}$$

และ

$$Y_\phi = \frac{(\mu_\phi)^{1.15}}{29} \tag{2.30}$$

โดยที่ P_o คือกำลังรับแรงอัดตรงศูนย์ระบุคำนวณตาม ACI ดังนี้

$$P_o = 0.85 f_c' (A_g - A_{st}) + A_{st} f_y \tag{2.31}$$

ในสมการของ Y_p จะเห็นว่าระดับแรงตามแนวแกนถูกแสดงด้วยตัวแปร P/P_o แทนที่จะเป็น $P/f_c' A_g$ ทั้งนี้เพราะสำหรับเสาที่มี f_c' ใกล้เคียงกันตัวแปรทั้งสองนี้จะให้ผลการเปรียบเทียบที่คล้ายคลึงกัน แต่สำหรับกรณีของเสาที่มี f_c' แตกต่างกันผลการเปรียบเทียบด้วย

ตัวแปร $P/f_c'A_g$ นั้นอาจจะใช้ไม่ได้ Sheikh และคณะ [1994] ได้สังเกตว่าปริมาณเหล็กปลอกที่ต้องการสำหรับพฤติกรรมของเสาที่กำหนดจะเป็นสัดส่วนกับกำลังของคอนกรีต ถ้าแรงตามแนวแกนถูกวัดในรูปเศษส่วนของ P_o ไม่ใช่ $f_c'A_g$

2.10 สมการออกแบบเหล็กปลอกเดี่ยวเพื่อการโอบรัดของเสาคอนกรีตกำลังสูงที่เสนอโดย Bayrak และ Sheikh [1998]

ในปี ค.ศ. 1998 Bayrak และ Sheikh ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของสมการออกแบบเหล็กปลอกเดี่ยวโอบรัดสำหรับเสากำลังคอนกรีตธรรมดาที่เสนอโดย Sheikh และ Khoury [1997] เมื่อนำมาใช้ทำนายค่าความเหนียวเชิงความโค้งจากการทดลองของเสาคอนกรีตกำลังสูงจำนวน 8 ต้นที่มีกำลังคอนกรีตประมาณ 72 - 102 MPa ผลปรากฏว่าสมการดังกล่าวจำเป็นต้องถูกปรับปรุงขึ้นใหม่เพื่อให้ใช้สำหรับเสาคอนกรีตกำลังสูงได้

ในการปรับปรุงสมการออกแบบเหล็กปลอกสำหรับเสาคอนกรีตกำลังสูง Bayrak และ Sheikh ได้นำข้อมูลทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูงจำนวน 8 ต้นดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์ความถดถอย โดยยังคงใช้รูปแบบของสมการสำหรับตัวแปร Y_p และ Y_ϕ เหมือนเดิม กล่าวคือ

$$Y_p = a_1 + a_2 \cdot \left(\frac{P}{P_o}\right)^{a_3} \tag{2.32}$$

$$Y_\phi = a_4 \cdot (\mu_\phi)^{a_5} \tag{2.33}$$

ผู้วิจัยพบว่าค่าคงที่เอมพิริแคล a_1, a_2 และ a_3 ยังคงเหมือนกับในสมการดั้งเดิม (สมการสำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดา) แต่ค่าคงที่ a_4 และ a_5 มีการเปลี่ยนแปลงไป หรือกล่าวได้ว่าผลของแรงตามแนวแกนที่มีต่อความต้องการเหล็กปลอกไม่ได้รับอิทธิพลจากกำลังคอนกรีตมากนัก ในขณะที่ความต้องการความเหนียวของหน้าตัดซึ่งวัดโดย μ_ϕ นั้นได้รับผลกระทบจากกำลังคอนกรีต ทั้งนี้เพราะเสาที่มีกำลังคอนกรีตสูงกว่าจะมีความสามารถในการเสียรูปและความสามารถในการดูดซับพลังงานในช่วงแรกน้อยกว่าเสาที่มีกำลังคอนกรีตต่ำกว่า แต่คุณสมบัติเหล่านี้จะปรับปรุงขึ้นอย่างมากในช่วงหลังของการเคลื่อนตัว โดยการวิเคราะห์

กำลังสองน้อยที่สุดของผลทดสอบสำหรับเสาคอนกรีตกำลังกำลังสูงได้ $a_4 = 1/8.12$ และ $a_5 = 0.82$ ดังนั้น สมการออกแบบเหล็กปลอกเดี่ยวโอบรัดสำหรับเสาคอนกรีตกำลังสูงที่มีกำลังคอนกรีตในช่วง 55 MPa ถึงประมาณ 100 MPa เป็นดังนี้

$$A_{sh} = (A_{sh,ACI}) \cdot \alpha \cdot \left[1 + 13 \cdot \left(\frac{P}{P_o}\right)^5\right] \cdot \left[\frac{\mu_\phi^{0.82}}{8.12}\right] \qquad (2.34)$$

ตัวแปร α พิจารณาเช่นเดียวกับที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว Bayrak และ Sheikh ได้แนะนำว่าสำหรับเสาคอนกรีตกำลังสูงที่ต้องการให้มีพฤติกรรมที่เหนียวมาก ควรจะใช้รูปแบบการจัดเรียงเหล็กเสริมที่ทำให้ได้ค่า $\alpha = 1$

อย่างไรก็ตามสมการออกแบบเหล็กปลอกโอบรัดที่ถูกเสนอโดย Sheikh และ Khoury [1997] สำหรับคอนกรีตกำลังธรรมดาและที่ถูกเสนอโดย Bayrak และ Sheikh [1998] สำหรับคอนกรีตกำลังสูง ต่างก็ได้มาจากข้อมูลทดสอบเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสภายใต้ระดับแรงตามแนวแกนปานกลางถึงสูง ดังนั้นสมการดังกล่าวจึงจำเป็นต้องถูกตรวจสอบกับข้อมูลทดสอบเสาภายใต้แรงตามแนวแกนระดับที่ต่ำลงไป (โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวแปร Y_p)

2.11 การออกแบบเหล็กปลอกเดี่ยวเพื่อการโอบรัดของเสาคอนกรีตที่เสนอโดย Lukkunaprasit [2000]

ถึงแม้ว่าข้อกำหนดการออกแบบเหล็กปลอกของ ACI ในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหวรุนแรงนั้นจะปลอดภัยเมื่อแรงตามแนวแกนมีค่าต่ำ แต่อาจจะไม่เพียงพอได้เมื่อระดับของแรงตามแนวแกนสูง Watson และ Park [1994] ได้เสนอสมการออกแบบที่พิจารณาถึงพฤติกรรมด้านความเหนียวในรูปของความเหนียวเชิงความโค้ง $\mu_\varnothing$ ซึ่งมีอิทธิพลมาจากระดับของแรงตามแนวแกนและตัวแปรเกี่ยวกับวัสดุและขนาด Sheikh และ Khoury [1997] ได้พัฒนาวิธีการออกแบบเหล็กปลอกโดยพิจารณาถึงระดับของแรงตามแนวแกน การจัดเรียงเหล็กปลอกและพฤติกรรมด้านความเหนียวเชิงความโค้งที่คาดหวัง พฤติกรรมความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ μ_Δ มีความสำคัญในโครงสร้างสะพาน อีกทั้ง μ_Δ เป็นตัวแปรสำคัญซึ่งมีผลต่อ

กำลังรับแรงเฉือนของชิ้นส่วน ดังนั้นจึงเป็นการสมควรที่จะพิจารณาปริมาณเหล็กปลอกโอบรัด เพื่อให้ได้ความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ที่ต้องการ

Lukkunaprasit [2000] และต่อมา Lukkunaprasit และ Thepmangkorn [2004] ได้เสนอวิธีการออกแบบเหล็กปลอก โดยมีพื้นฐานจากแนวคิดของ Sheikh และ Khoury พื้นที่เหล็กปลอกประสิทธิผล $A_{sh}k'_e$ สำหรับความต้องการความเหนียวที่ตั้งเป้าไว้ μ_Δ จะได้มาจากพื้นที่เหล็กปลอกของ ACI ($A_{sh,ACI}$) ที่ถูกปรับปรุงขึ้นโดยฟังก์ชันของระดับแรงตามแนวแกนและความเหนียว นั่นคือ

$$A_{sh}\,k'_e \quad = \quad A_{sh,ACI}\,g(\mu_\Delta)\,Y_p \tag{2.35}$$

โดยที่ k'_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิผลของการโอบรัด k_e ที่ถูกนอร์มัลไลซ์ (normalize) กับ 0.75 (ซึ่งเป็นค่าขอบบนที่ ACI สมมติขึ้นว่าเป็นประสิทธิภาพของเหล็กปลอกเส้นตรง เมื่อเทียบกับเหล็กปลอกเกลียวถี่ ๆ) $g(\mu_\Delta)$ คือ ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของความต้องการความเหนียวเชิงการเคลื่อนตัว และ Y_p คือตัวแปรเกี่ยวกับแรงตามแนวแกน (Sheikh และ Khoury, 1997) ตามสมการที่ (2.29) ค่า k_e นั้น ผู้วิจัยได้ใช้ตามที่ Saatcioglu และ Razvi [2002] เสนอ (สมการที่ 2.5)

สมการที่ (2.35) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\mu_\Delta \quad = \quad f(\rho_A) \tag{2.36}$$

โดยที่ $f(\rho_A)$ คือ ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของอัตราส่วนเหล็กปลอกประสิทธิผล ρ_A ที่จะได้มาจากการวิเคราะห์การถดถอยของผลการทดสอบ อัตราส่วนเหล็กปลอกประสิทธิผล (ρ_A) นิยามว่าเป็น

$$\rho_A \quad = \quad \frac{A_{sh}k'_e}{A_{sh,ACI}Y_p} \tag{2.37}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวแปรสำคัญตัวนี้ทำให้สามารถที่จะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของตัวอย่างเสาที่มีเหล็กปลอกแตกต่างกัน (รวมถึงการจัดเรียงเหล็กปลอกด้วย) และรับระดับของแรงตามแนวแกนแตกต่างกันได้ สำหรับเสา NSC Lukkunaprasit และ Thepmangkorn [2004] ได้เสนอสมการดังนี้

$$\mu_{\Delta,env.} = -12.86\ \rho_A^2 + 15.54\ \rho_A + 1 \qquad (2.38)$$

ถึงแม้ว่าวิธีการที่ผู้วิจัยเสนอไว้จะได้ตรวจสอบกับเสาคอนกรีตกำลังธรรมดาเท่านั้น แต่หลักการที่เสนอสามารถนำไปประยุกต์กับเสาคอนกรีตกำลังสูงได้ ซึ่งจะได้ศึกษาวิเคราะห์ต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย