

## งานวิจัยในอดีต

เนื่องจาก พฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัดเป็นสิ่งพึงประสงค์สำหรับการออกแบบโครงสร้างที่ได้รับผลจากแรงกระทำของแผ่นดินไหว ดังนั้น จึงมีผู้วิจัยหลายท่านที่ให้ความสนใจศึกษาในเรื่องพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัด รวมไปถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัดด้วย ในขั้นต้นของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

### 2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัด (confined concrete) ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน (uniaxial loading)

ในปี ค.ศ. 1971 Kent และ Park ได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (stress-strain relationship) ของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากที่มีความเครียดของคอนกรีตมีค่าเกินความเครียดที่ความเค้นสูงสุด (strain at peak stress) นอกจากนี้ยังพบว่าความเครียดของคอนกรีตที่จุดประลัยมีค่าค่อนข้างต่ำ แสดงให้เห็นว่าความเหนียวของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดมีค่าน้อย นอกจากนี้ Kent และ Park ยังได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดจากเหล็กเสริมตามขวาง ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนที่ไม่มีการเยื้องศูนย์ จากผลการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100x150 cm และสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 cm และ 12.8 cm โดยความเค้นสูงสุดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดตรงกับความเครียดเท่ากับ 0.002 ดังแสดงในรูปที่ 2.1

ในปี ค.ศ. 1980 Sheikh และคณะ ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการให้แรงอัดตามแนวแกน (concentric loading) แบบทิศทางเดียว (monotonic loading) กับตัวอย่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส จำนวน 24 ตัวอย่างที่มีลักษณะการจัดเรียงเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวางต่างๆ กันโดยที่ปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างทำการจัดเรียงเหล็กเสริมตามขวางให้มีระยะเรียงน้อยกว่าช่วงกลางซึ่งเป็นช่วงที่พิจารณาให้เกิดการวิบัติ และทำการขยายหน้าตัดในช่วงนี้ให้ใหญ่ขึ้นรวมทั้งมีกล่องเหล็กมาหุ้มอยู่ภายนอกอีกชั้นหนึ่ง เพื่อเป็นการควบคุมให้เกิดการวิบัติในช่วงกลาง ซึ่งจากการทดสอบสามารถคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตได้โดยหักลบ

แรงทั้งหมดด้วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กตามยาวที่ได้จากการทดสอบดึงเหล็ก (ซึ่งสมมติว่าพฤติกรรม เหมือนกับการทดสอบด้วยการอัด) โดยตั้งสมมติฐานที่ว่า ความเครียดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่า เท่ากับความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมตามยาว ณ ตำแหน่งที่ติดกัน และความเครียดมีการ กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงที่พิจารณา ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและ ความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และจากผลการทดสอบสามารถสร้าง แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดขึ้นและได้ เสนอในปี ค.ศ. 1982 โดยใช้สมมติฐานของพื้นที่ที่ถูกโอบรัดประสิทธิผล (effective confined area) เนื่องจากกำลังโอบรัดในกรณีของเหล็กปลอกรูปสี่เหลี่ยมจะมีการกระจายไม่สม่ำเสมอ ตลอดปริมาตรของแกนคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งการประมาณพื้นที่ที่ไม่ถูกโอบรัดสามารถ คำนวณได้จากส่วนโค้งของสมการพาราโบลา

ในปี ค.ศ. 1982 Park และคณะได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม จตุรัส จำนวน 4 ตัวอย่างขนาดหน้าตัด 25 cm สูง 330 cm โดยการให้แรงอัดกระทำตามแนวแกน และแรงกระทำด้านข้างที่บริเวณกลางเสา จากผลการทดสอบได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความ เค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดจากเหล็กเสริมตามขวางที่พัฒนามาจาก แบบจำลองเดิมของ Kent และ Park ในปี ค.ศ. 1971 โดยเพิ่มกำลังรับแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตอัน เนื่องมาจากอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวางต่อปริมาตรของแกนคอนกรีต (core concrete) กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง และกำลังรับแรงอัดประลัยของแท่ง คอนกรีตรูปทรงกระบอก เป็น  $Kf'_c$  ที่ค่าความเครียด  $0.002 K$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ในปี ค.ศ. 1982 Scott และคณะได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัดที่ อัตราความเครียด (strain rate) ต่างๆ กัน โดยทำการทดสอบให้แรงอัดกระทำตามแนวแกนและ แรงอัดเยื้องศูนย์ (eccentric loading) จำนวน 25 ตัวอย่าง ซึ่งสามารถหาพฤติกรรมของความเค้น และความเครียดของแกนคอนกรีตได้จากการหักลบแรงทั้งหมดด้วยแรงที่กระทำในคอนกรีตที่หุ้ม เหล็กปลอกที่ได้จากพฤติกรรมของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด และเหล็กเสริมตามยาวที่ได้จาก พฤติกรรมของเหล็กเปลือย (bare bar) โดยตั้งที่อัตราความเครียดต่างๆ (slow strain rate) ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งผลการทดสอบถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Kent และ Park ในปี ค.ศ. 1971

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่อทำการทดสอบที่อัตราความเครียดสูง ( $0.0167/\text{วินาที}$ ) จะให้ผลของกำลังและความชันของเส้นกราฟขาหลัง (slope of the falling branch) ที่สูงกว่า การ

ทดสอบที่อัตราความเครียดต่ำ (0.0000033/วินาที) ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วนระหว่างระยะเรียงของเหล็กเสริมตามขวางวัดจากจุดศูนย์กลาง (center-to-center spacing) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาวที่เหมาะสมที่จะสามารถป้องกันการโก่งเดาะได้ดี คือ ประมาณ 2.7 ถึง 4.9

ในปี ค.ศ. 1982 Ahmad และ Shah ได้ทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกเกลียว โดยที่ไม่มีคอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอกและเหล็กเสริมตามยาว เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแกนคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมตามขวาง โดยที่พิจารณาถึงผลกระทบของอายุของคอนกรีต กำลังและระยะเรียงของเหล็กเสริม ซึ่งจากการทดสอบสรุปได้ว่าเมื่อจัดเรียงเหล็กปลอกเกลียวให้มีระยะเรียงมากกว่า 1.25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนคอนกรีต ประสิทธิภาพของการโอบรัดของเหล็กปลอกจะไม่เกิดขึ้น

ในปี ค.ศ. 1988 Mander และคณะได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำในแนวแกน แบบทิศทางเดียว โดยทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงอัด โดยใช้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 58 ชุดตัวอย่าง โดยศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของคอนกรีตคือ รูปร่างหน้าตัดของเสา (type of cross section) ปริมาณเหล็กยืน (amount of longitudinal reinforcement) ปริมาณและระยะเรียงของเหล็กเสริมตามขวาง (amount and spacing of hoop) กำลังของเหล็กเสริม (strength of reinforcement) อายุของคอนกรีต ลักษณะการเรียงเหล็กเสริม (arrangement of reinforcement) และอัตราเร็วในการกดตัวอย่าง (rate of loading) จากนั้นได้นำมาเสนอเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมตามขวาง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยใช้หลักการสมดุลย์ของพลังงาน (energy balance approach) เพื่อทำนายความเครียดตามยาวที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเมื่อเกิดการวิบัติของเหล็กปลอกอันแรก (first hoop fracture)

ในปี ค.ศ. 1992 Saatcioglu และคณะได้ทำการเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดขึ้นจากการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยที่ค่าความเค้นสูงสุดและค่าความเครียดที่จุดความเค้นสูงสุดคำนวณมาจาก แรงโอบรัดสมมูลเทียบเท่า (Equivalent Uniform Confinement Pressure) ซึ่งได้จากการเฉลี่ยแรงดันด้านข้างที่เป็นผลมาจากรูปแบบของเหล็กปลอกและคุณสมบัติของวัสดุ และได้ นำแบบจำลองความสัมพันธ์นี้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ซึ่งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

ต่อมาในปี ค.ศ. 1993 Sheikh และคณะ ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดโดยเหล็กปลอกเดี่ยว (hoop) และเหล็กปลอกเกลียว (spiral) จำนวน 27 ตัวอย่าง โดยการให้แรงอัดตามแนวแกนแบบทิศทางเดียวจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ซึ่งพิจารณาจากการวิบัติของเหล็กปลอก การวิบัติของแกนคอนกรีต หรือการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งจากการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดได้ในลักษณะเดียวกันกับที่ Sheikh และคณะ (ค.ศ. 1980) ได้ทำมา แต่พฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาว จะสมมติให้เป็นเหมือนกับพฤติกรรมในการรับแรงดึงในช่วงแรกและเส้นกราฟจะตกลงเป็นเส้นตรงเมื่อเกิดการโก่งเดาะจากการสังเกตในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ในปี ค.ศ. 1994 Cusson และคณะ ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้คอนกรีตกำลังสูงเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัดจากการทดสอบการให้แรงอัดกระทำตามแนวแกน โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ กำลังของคอนกรีต กำลังของเหล็กปลอก รูปแบบของเหล็กปลอก ระยะเรียงและปริมาณเหล็กปลอก และปริมาณของเหล็กยื่น จากการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูงนั้นมีผลกระทบจากการเกาะออกอย่างทันทีทันใดของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก ซึ่งจะส่งผลให้กำลังของคอนกรีตลดลงอย่างรวดเร็ว และหลังจากที่คอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกเกิดการเกาะออกหมดแล้ว กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการโอบรัดของเหล็กปลอก และต่อมาในปี ค.ศ. 1995 ผู้วิจัยได้ทำการเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดขึ้นจากผลการทดสอบที่ได้ โดยการคำนวณกำลังและความเหนียวของคอนกรีตนั้นได้มาจากการคิดผลของแรงดันของการโอบรัดซึ่งขึ้นอยู่กับความเค้นในเหล็กปลอกที่ความเค้นสูงสุดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และพื้นที่การโอบรัดประสิทธิผล

ในปี ค.ศ. 1996 Sun และคณะ ได้ทำการศึกษาค้นคว้าของการโอบรัดของเหล็กปลอกที่มีต่อคอนกรีตกำลังสูง โดยการทดสอบให้แรงอัดกระทำตามแนวแกนกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีเหล็กปลอกต่างกัน 6 รูปแบบ โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณ ขนาด รูปแบบและกำลังของเหล็กปลอก จากผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่มีการโอบรัดโดยเหล็กปลอกที่มีเหล็กยึดตามขวาง (cross tie) หรือมีเหล็กปลอกด้านใน (intermediate hoop) จะมีกำลังและความเหนียวที่ดีกว่าคอนกรีตที่มีการโอบรัดโดยเหล็กปลอกเดี่ยว นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ถูกโอบรัดโดยเหล็กปลอกที่มีกำลังไม่สูง จะมีค่าความเหนียวที่ไม่ดีพอ เว้นแต่จะมีการจัดเรียงเหล็กปลอกให้มีปริมาณที่สูงเพียงพอ

ในปี ค.ศ. 1998 Saatcioglu และคณะได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการโอบรัดโดยเหล็กปลอกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยการทดสอบให้แรงอัดกระทำตามแนวแกน โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ ระยะเรียงและปริมาณเหล็กปลอก รูปแบบของเหล็กปลอก การจัดเรียงเหล็กยี่น กำลังของเหล็กปลอกและกำลังคอนกรีต จากการทดสอบพบว่า พฤติกรรมการโอบรัดของคอนกรีตกำลังสูงจะดีก็ต่อเมื่อ มีการโอบรัดโดยมีปริมาณเหล็กปลอกที่มาก หรือใช้เหล็กปลอกที่มีกำลังสูงขึ้น ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 ได้ทำการเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดขึ้นโดยการพัฒนาจากแบบจำลองเดิมในปี ค.ศ. 1992 เพื่อให้ใช้ได้กับคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังสูงในช่วง 30 - 130 MPa โดยมีการคิดผลของพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ปริมาณ ระยะเรียงกำลังและรูปแบบของเหล็กปลอกรวมถึงกำลังคอนกรีตด้วย

ในปี ค.ศ. 1997 Hoshikuma และคณะได้ทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำในแนวแกนแบบทิศทางเดียว โดยใช้เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก 31 ชุดตัวอย่าง โดยพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการโอบรัดของคอนกรีตคือ รูปร่างหน้าตัดของเสา ขนาดของตัวอย่าง ลักษณะการเรียงเหล็กเสริม ปริมาณและระยะเรียงของเหล็กเสริมตามขวาง และลักษณะของอ (hook) โดยที่ไม่คิดผลของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอก (cover concrete) จากผลที่ได้ถูกนำมาเสนอเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมตามขวางที่ครอบคลุมช่วงของปริมาณเหล็กเสริมตามขวางที่กว้างมากกว่างานวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งในการสร้างแบบจำลองจะคำนึงถึงผลของสภาวะขอบ (boundary conditions) ของเส้นกราฟความสัมพันธ์ของคอนกรีตที่มีการโอบรัดในช่วงขาขึ้น และทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองของงานวิจัยที่ผ่านมา

จากการทดสอบได้พบว่าการอัดแตกของแกนคอนกรีต (crushing of core concrete) และการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวเกิดขึ้นเมื่อความเค้นในการกดอัดมีค่าลดลงต่ำกว่า 50% ของความเค้นสูงสุด ซึ่งเป็นจุดที่เกิดความเครียดสูงสุด

ในปี ค.ศ. 1999 Wehbe และคณะ ได้ศึกษาเพื่อนำข้อมูลไปเป็นแนวทางในการพัฒนาการให้รายละเอียดในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เหล็กปลอกเดี่ยวรูปสี่เหลี่ยมที่อยู่ในบริเวณที่เสี่ยงภัยต่อแผ่นดินไหวระดับปานกลาง (moderate seismicity) ผู้วิจัยได้ทดสอบเสาที่มีปริมาณเหล็กเสริมตามขวางเท่ากับ 59% และ 75% ตามมาตรฐาน ACI 318 สำหรับบริเวณที่มี

แผ่นดินไหวรุนแรง และใช้ระดับแรงอัดตามแนวแกนคงที่มีค่าต่ำ และแรงดันด้านข้าง จากการทดสอบทำให้ผู้วิจัยเสนอสมการที่ใช้หาปริมาณเหล็กเสริมตามขวางที่ต้องการตามค่าความเหนียวเชิงการเคลื่อนที่ (displacement ductility factor ,  $\mu_{\Delta}$ ) ที่กำหนดไว้ด้วย

เป็นที่น่าสังเกตว่า Wehbe และคณะ ได้รายงานความไร้ประสิทธิภาพของเหล็กปลอกขององ 90 องศา เนื่องจากการแอ่อกของของอบบริเวณข้อหมุนพลาสติก (plastic hinge region) ตามด้วยการโก่งเดาะออกของเหล็กเสริมตามยาวเนื่องจากการสูญเสียประสิทธิภาพในการโอบรัด ซึ่งปัญหาการแอ่อกก่อนเวลาอันควรขององ 90 องศาเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการโอบรัดให้ดีขึ้น ในปี ค.ศ. 2000 Lukkunaprasit จึงได้เสนออุปกรณ์ที่เรียกว่า คลิปยึดของ (hook-clips) เพื่อใช้ในการยึดเหล็กปลอก หรือเหล็กยึดทางขวาง (crossties) ขององ 90 องศาขึ้น และได้ทำการทดสอบให้แรงอัดกระทำตามแนวแกนแบบทิศทางเดียวแก่ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส จำนวน 9 ตัวอย่างที่มีลักษณะการจัดเรียงเหล็กเสริมตามขวาง 3 แบบ คือ เหล็กปลอกเดี่ยวขององ 90 องศา เหล็กปลอกเดี่ยวขององ 135 องศา และเหล็กปลอกเดี่ยวขององ 90 องศาที่ใส่คลิปยึดของ และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ตัวอย่างที่มีเหล็กปลอกเดี่ยวขององ 90 องศาที่ใส่คลิปยึดของ จะมีความเหนียวมากกว่า และความชันของเส้นกราฟขาลงน้อยกว่าตัวอย่างที่มีเหล็กปลอกเดี่ยวขององ 90 องศา และจะมีพฤติกรรมคล้ายกับตัวอย่างที่มีเหล็กปลอกเดี่ยวขององ 135 องศา

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา สามารถสรุปแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 และภาคผนวก ก-1 แสดงรายละเอียดของการเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดของงานวิจัยในอดีต

### สรุปปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อกำลังโอบรัดของคอนกรีต

1. อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวางต่อปริมาตรของแกนคอนกรีต ซึ่งถ้ามีมากกำลังและความเหนียวของคอนกรีตที่มีการโอบรัดจะเพิ่มขึ้น
2. กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมตามขวาง ซึ่งถ้ามีมาก กำลังของการโอบรัดอันเนื่องมาจากเหล็กเสริมตามขวางจะเพิ่มขึ้น

3. ระยะเวลาของเหล็กเสริมตามขวาง สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวางต่อปริมาตรของแกนคอนกรีตเท่ากัน เมื่อระยะเวลาของเหล็กเสริมตามขวางลดลงจะทำให้กำลังในการโอบรัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ที่ไม่ได้ถูกโอบรัดจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อีกทั้งการที่ระยะเวลาของเหล็กเสริมตามขวางลดลงจะเป็นการป้องกันการโก่งเดาะก่อนเวลาอันควร (premature buckling) ของเหล็กเสริมตามยาวหลังจากที่เกิดการกะเทาะออกของคอนกรีต ที่หุ้มเหล็กปลอกอีกด้วย
4. ลักษณะการจัดเรียงของเหล็กปลอก เมื่อจัดเรียงเหล็กปลอกให้มีความถี่มากขึ้นโดยการเพิ่มเหล็กยึดตามขวางหรือมีเหล็กปลอกด้านใน จะเป็นการลดพื้นที่ที่ไม่ได้ถูกโอบรัดของคอนกรีต ทำให้กำลังในการโอบรัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น

## 2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบทิศทางเดียว

ในปี ค.ศ. 1989 Papia และคณะ ได้เสนอวิธีการหาค่าน้ำหนักบรรทุกวิกฤต (critical load) ของเหล็กเสริมตามยาวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทำการเสนอแบบจำลองเป็นเหล็กเส้นตรงที่ถูกยึดไว้ที่ปลายทั้งสองข้าง และถูกยึดด้านข้างด้วยจุดรองรับที่มีความยืดหยุ่น (elastic support) ที่ระยะเดียวกับระยะเวลาของเหล็กเสริมตามขวางในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่พิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งจากการวิเคราะห์และนำไปเปรียบเทียบกับ การทดสอบของงานวิจัยอื่น สรุปได้ว่า เมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะ ประสิทธิภาพในการโอบรัดคอนกรีตของเหล็กเสริมตามขวางจะมีค่าลดลง

ในปี ค.ศ. 1989 Mau และคณะ ได้ศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเส้นในช่วงอินอีลาสติกโดยการสร้างแบบจำลองคาน-เสา เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาพฤติกรรมการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสามารถแสดงเป็นแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งได้ให้ข้อสรุปว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อรัศมีจเรชั่น ( $L/r$  ratio) วิกฤต ที่คำนวณได้จากการกำหนดให้น้ำหนักสูงสุด (peak load) ที่รับได้มีค่าเท่ากับน้ำหนักเมื่อเกิดการคราก (yielding load) มีค่าเท่ากับ 10 หรือ 12 เส้นกราฟจะมีลักษณะใกล้เคียงกับเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุในช่วงที่ค่าความเครียดไม่เกิน 0.04 รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะเวลาการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด เมื่อค่า  $L/r$

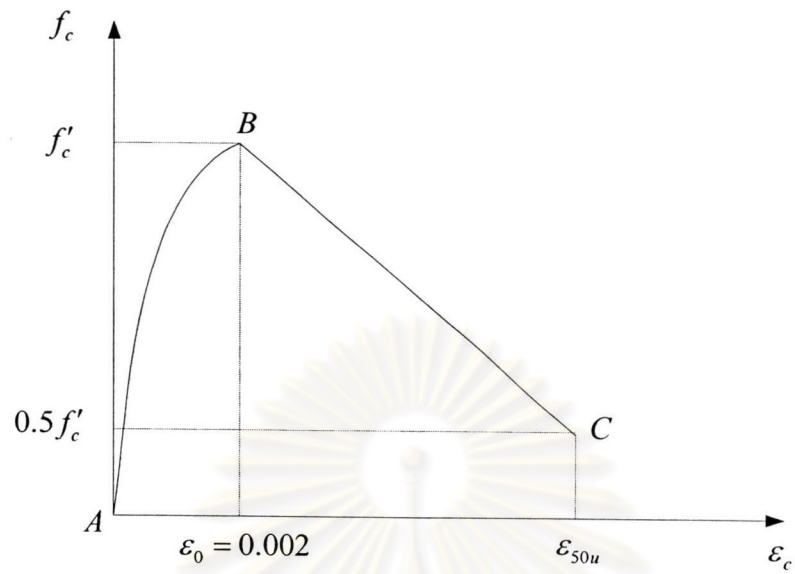
เท่ากับ 10 จะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การตั้งตรง (straightening) ซึ่งเป็นการตั้งตรงอีกครั้งของวัสดุหลังจากที่เกิดการโก่งเดาะเริ่มต้น อันเนื่องมาจาก strain hardening

ในปี ค.ศ. 1992 Monti และ Nuti ได้ศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเส้นเมื่อรับแรงอัดเป็นแบบทิศทางเดียว และแรงสลับทิศทางทั้งแรงอัดและแรงดึง โดยการทดสอบนั้นพิจารณาถึงผลของอัตราส่วนระหว่างความยาวที่ไม่มีการรองรับ (unsupported length) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็ก (L/D ratio) ต่างๆ กันจำนวน 3 ค่า คือ 5 8 และ 11 ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ที่อัตราส่วน L/D เท่ากับ 5 พฤติกรรมของเหล็กเส้นในการทดสอบแรงอัดจะคล้ายกับพฤติกรรมในการทดสอบแรงดึง แต่ถ้าอัตราส่วน L/D มากกว่า 5 เมื่อเหล็กเส้นที่อยู่ในช่วงอินเอลลาสติก ความสามารถในการรับน้ำหนักจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12

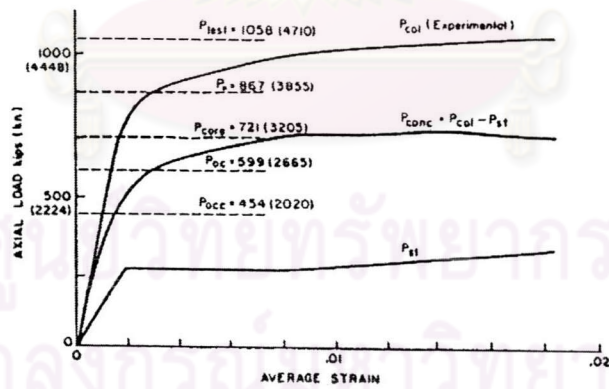
ในปี ค.ศ. 2000 Dhakal ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยพิจารณาพฤติกรรมของวัสดุในช่วงอินเอลลาสติกที่มีผลต่อพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยพฤติกรรมของเหล็กเสริมตามยาวหลังจากเกิดการโก่งเดาะจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความชะลูด (L/D) และกำลังของเหล็กเสริม ( $f_y$ ) จากแบบจำลองจะเห็นว่า ความเค้นจะลดลงหลังจากเกิดการโก่งเดาะเริ่มต้น จุดเริ่มต้นของการลดลงของความเค้นขึ้นอยู่กับพฤติกรรมเฉพาะตัวของเหล็กเสริม (local behavior) และความเค้นจะลดลงจนมีค่าคงที่ที่ค่าเท่ากับ 20% ของกำลังครากของเหล็กเสริม โดยที่การเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดของ Dhakal แสดงในภาคผนวก ก-2

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

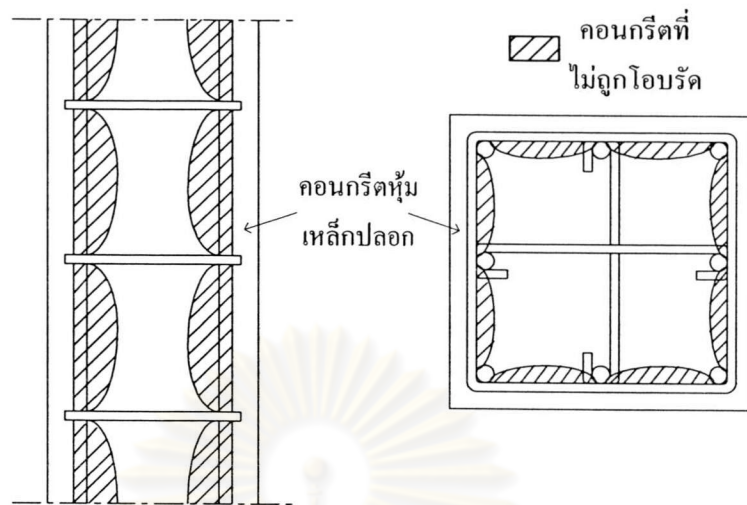




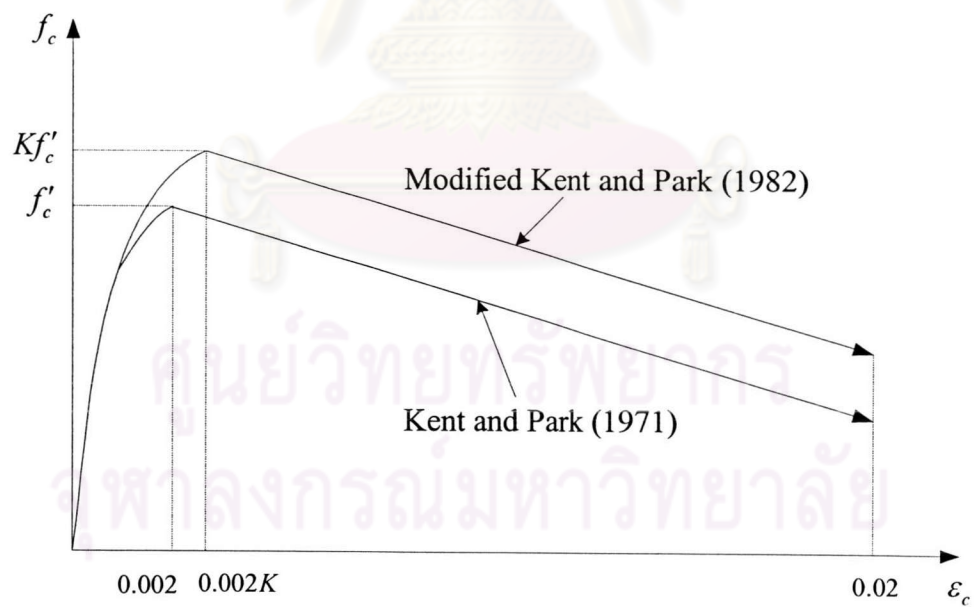
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ไม่มีการไอบรัด  
(จาก Kent และ Park ค.ศ. 1971)



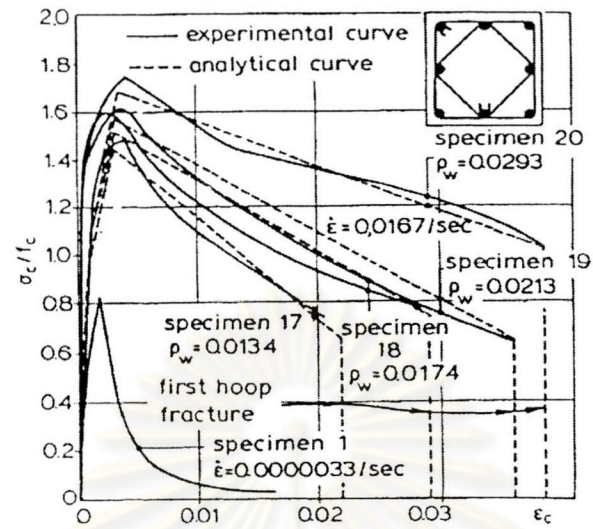
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการไอบรัด  
(จาก Sheikh และคณะ ค.ศ. 1980)



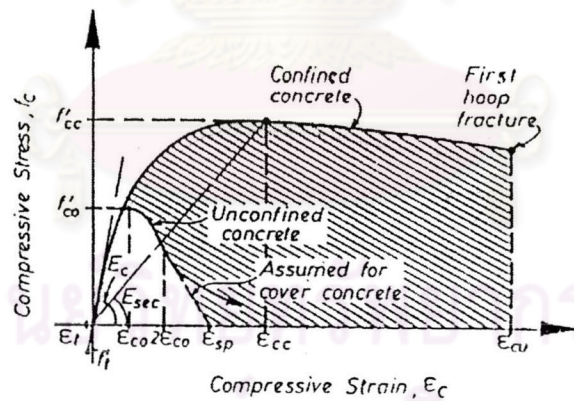
รูปที่ 2.3 ลักษณะของพื้นที่ที่ไม่มีกรโอบรัดโดยเหล็กปลอกจากการโอบรัดอย่างไม่สม่ำเสมอของเหล็กปลอกสี่เหลี่ยม (จาก Sheikh และคณะ ค.ศ. 1980)



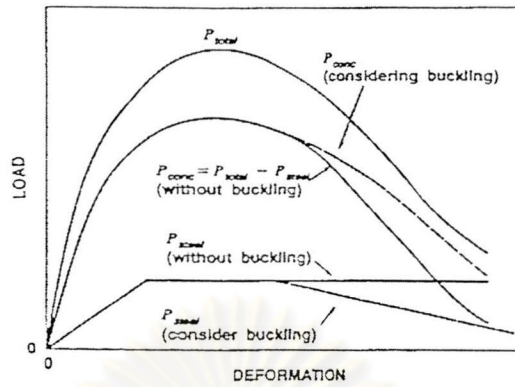
รูปที่ 2.4 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด (จาก Park และคณะ ค.ศ. 1982)



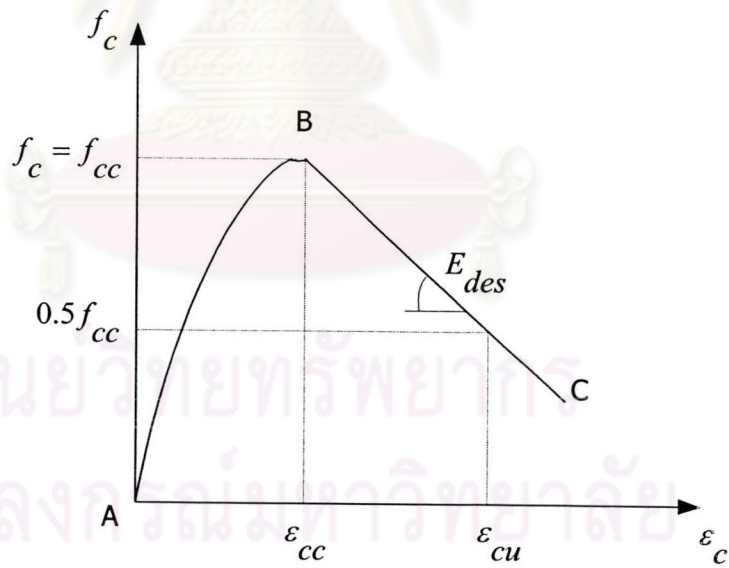
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด  
(จาก Scott และคณะ ค.ศ. 1982)



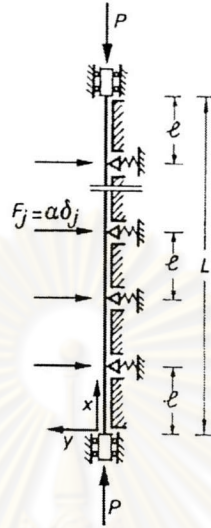
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด  
(จาก Mander และคณะ ค.ศ. 1988)



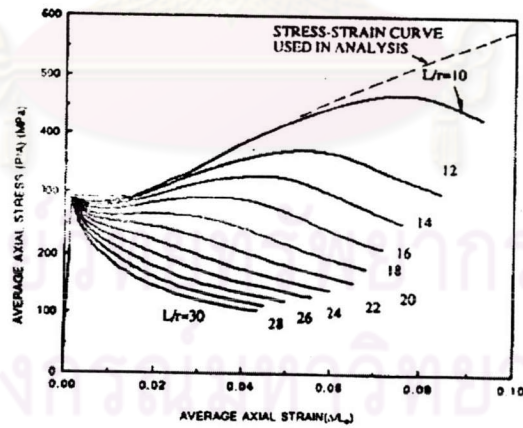
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด  
(จาก Sheikh และคณะ ค.ศ. 1993)



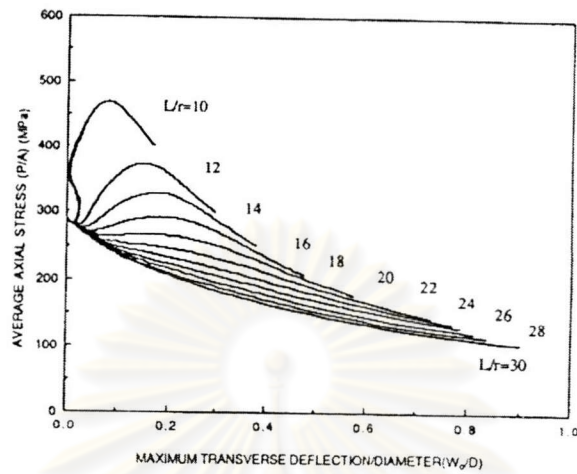
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด  
(จาก Hoshikuma และคณะ ค.ศ. 1997)



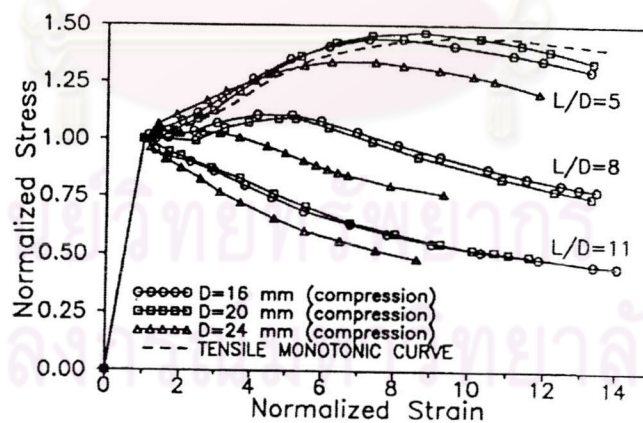
รูปที่ 2.9 แบบจำลอง เหล็กเสริมตามยาวที่ใช้ในการวิเคราะห์ (จาก Papia และคณะ ค.ศ. 1989)



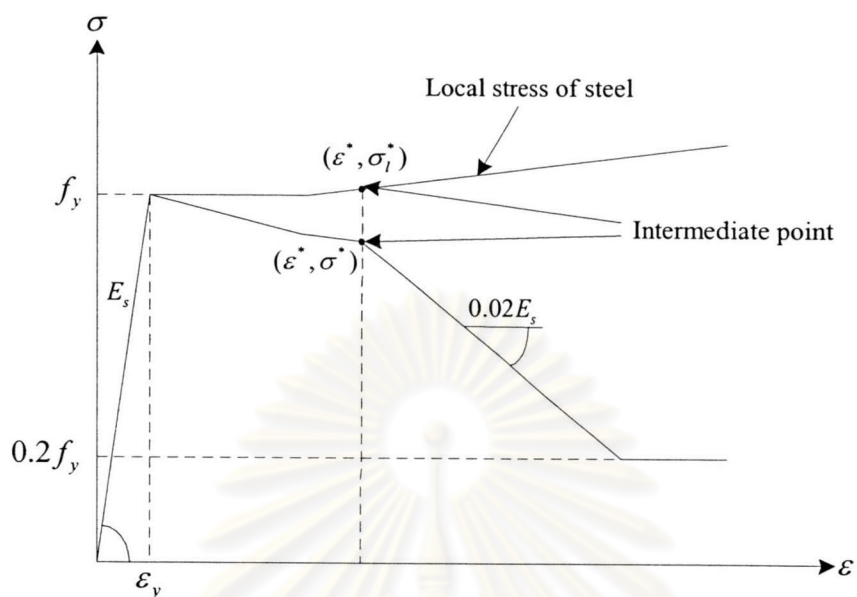
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่อัตราส่วน  $L/r$  ต่างๆ (จาก Mau และคณะ ค.ศ. 1989)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและระยะการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเหล็กเสริม  
(จาก Mau และคณะ ค.ศ. 1989)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่อัตราส่วน L/D ต่างๆ  
(จาก Monti และ Nuti ค.ศ. 1992)



รูปที่ 2.13 แบบจำลองทางทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด  
ของเหล็กเสริมตามยาว (จาก Dhakal ค.ศ. 2000)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ตารางสรุปแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดของงานวิจัยที่ผ่านมา

ผู้วิจัย	เส้นกราฟขาขึ้น	เส้นกราฟขาลง
Kent และ Park (1982)	$f_c = Kf'_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{0.002K} - \left( \frac{\varepsilon_c}{0.002K} \right)^2 \right]$	$f_c = Kf'_c [1 - Z_m(\varepsilon_c - 0.002K)]$
Sheikh และ Uzumeri (1982)	$f_c = f'_{co} \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^2 \right]$	$f_c = f'_c [1 - Z_2(\varepsilon_c - \varepsilon_{c2})]$
Mander และคณะ (1988)	$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r}$	$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r}$
Cusson และคณะ (1995)	$f_c = f_{cc} \left[ \frac{k(\varepsilon_c / \varepsilon_{cc})}{k - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{cc})^k} \right]$	$f_c = f_{cc} \cdot \exp[k_1(\varepsilon_c - \varepsilon_{cc})^{k_2}]$
Hoshikuma และคณะ (1997)	$f_c = E_c \varepsilon_c \left[ 1 - \frac{1}{n} \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right]$	$f_c = f_{cc} - E_{des}(\varepsilon_c - \varepsilon_{co})$
Saatcioglu และคณะ (1999)	$f_{cc} = \frac{f'_c \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^r}{r - 1 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^r}$	$f_{cc} = \frac{f'_c \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^r}{r - 1 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_1} \right)^r}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบของงานวิจัยที่ผ่านมา

ผู้วิจัย	ปี	ลักษณะของหน้าตัด	ขนาดหน้าตัด (mm)	ความสูง (mm)	อัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาว (%)	อัตราส่วนเหล็กเสริมตามขวาง (%) โดยปริมาตร (%)	ระยะเรียงของเหล็กเสริมตามขวาง (mm)	ลักษณะของข้อ
Sheikh และคณะ	1980	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	300x300	1,960	1.72-3.67	0.76-2.40	25.4-101.6	135°
Scott และคณะ	1982	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	450x450	1,200	1.79-1.86	1.34-3.09	64-98	135°
Ahmad และคณะ	1982	วงกลม	75	150	0	ไม่ระบุ	12-38	เหล็กปลอกเกลียว
		วงกลม	75	300	0	ไม่ระบุ	75-100	เหล็กปลอกเกลียว
Mander และคณะ	1988	วงกลม	500	1,500	1.23-3.69	0.6-2.50	41-119	เหล็กปลอกเกลียว
		สี่เหลี่ยมจัตุรัส	450x450	1,200	1.79-1.86	1.86-1.97	64-98	135°
		สี่เหลี่ยมผืนผ้า	150x700	1,900	1.08-3.06	0.94-5.82	25-72	135°
Sun และคณะ	1996	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	200x200	500	1.78-3.56	1.70-4.40	20-100	135°

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบของงานวิจัยที่ผ่านมา (ต่อ)

ผู้วิจัย	ปี	ลักษณะของหน้าตัด	ขนาดหน้าตัด (mm)	ความสูง (mm)	อัตราส่วนเหล็กเสริมตามยาว (%)	อัตราส่วนเหล็กเสริมตามขวางโดยปริมาตร (%)	ระยะเรียงของเหล็กเสริมตามขวาง (mm)	ลักษณะของข้อ
Hoshikuma และคณะ	1997	วงกลม	200	600	0	0.39-4.66	12.5-150	เชื่อม
		วงกลม	500	1,500	1	0.19-1.16	50-300	เชื่อม
		สี่เหลี่ยมจัตุรัส	200x200	600	0	0.39-4.66	12.5-150	เชื่อม
		สี่เหลี่ยมจัตุรัส	500x500	1,000	1	1.73-4.10	40-75	เชื่อม
		สี่เหลี่ยมผืนผ้า	350x700	1,000	1	1.72	65	เชื่อม
		สี่เหลี่ยมผืนผ้า	300x900	1,000	1	1.74	67	เชื่อม
		สี่เหลี่ยมผืนผ้า	250x1,000	1,000	1	1.77-2.45	75	เชื่อม
Lukkunaprasit และคณะ	2000	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	200x200	1,000	3.14	1.2	120	90
		สี่เหลี่ยมจัตุรัส	200x200	1,000	3.14	1.2	120	135
		สี่เหลี่ยมจัตุรัส	200x200	1,000	3.14	1.2	120	90+ผูกคัลิป