บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความนำ

โดยทั่วไปการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรหรือแรงลม เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงอิลาสติกเชิงเส้น และในการออกแบบจะไม่ยอมให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้าง แต่สำหรับการออกแบบโครงสร้างเพื่อรับแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวขนาดปานกลางถึงรุนแรง จะยอมให้มีความเสียหายเกิดขึ้นได้แต่โครงสร้างต้องไม่พังทลาย ดังนั้นจึงเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งในช่วงที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติกเชิงเส้นและช่วงอินอิลาสติก โดยที่จะต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของส่วนโครงสร้างเนื่องจากความเสียหายของโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวจะออกแบบโดยใช้ความเข้มของแผ่นดินไหวที่มีรอบ (Return period) อยู่ในช่วง 100-500 ปี การที่จะออกแบบให้โครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติกเชิงเส้นจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่เป็นการไม่ประหยัด ดังนั้นจึงยอมให้โครงสร้างมีพฤติกรรมถึงช่วงอินอิลาสติก คือโครงสร้างจะเกิดความเสียหายโดยไม่พังทลายลงมา

การวิเคราะห์เพื่อใช้ในออกแบบและประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารตามหลักการดังกล่าวในข้างต้น สามารถทำได้ทั้งการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Dynamic analysis) และ การวิเคราะห์ผลักด้านข้าง (Pushover analysis) ข้อแตกต่างของการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีคือ การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์เป็นการวิเคราะห์ที่สามารถทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง เนื่องจากได้มีการพิจารณาการสลายพลังงานในองค์อาคารภายใต้การเคลื่อนตัวแบบเป็นวัฏจักร ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้าง ส่วนการวิเคราะห์ผลักด้านข้างเป็นวิธีวิเคราะห์แบบง่าย ใช้เวลาไม่นาน จึงเป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว ผลการวิเคราะห์ที่ได้ทำให้ทราบถึงความสามารถในการรับแรงด้านข้าง รูปแบบความเสียหายและการวิบัติของอาคารในระดับหนึ่ง เนื่องจากข้อจำกัดบางประการคือ การมีสมมติฐานของการสั่นของอาคารอยู่ในโหมดพื้นฐาน และการไม่พิจารณาผลการกระทำซ้ำกลับไปกลับมาของแรงซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายแก่อาคารมากขึ้น สิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ทั้งการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์และการวิเคราะห์ผลักด้านข้างคือ การจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นขององค์อาคารที่เกิดขึ้นพร้อมความเสียหายให้สอดคล้องกับความเป็นจริง โดยแบบจำลองอาคารที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นขององค์อาคารสามารถแบ่งกว้างๆ ได้เป็น 3 ประเภท คือ

1) Lumped model เป็นแบบจำลองที่ใช้จำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นขององค์อาคารเช่น คาน หรือเสา โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนตัว หรือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับความโค้ง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวของแบบจำลองจะได้มาจากการทดสอบองค์อาคารภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร แบบจำลองนี้สามารถใช้วิเคราะห์อาคารในระดับโครงสร้างได้รวดเร็ว แต่ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระดับวัสดุขององค์อาคารได้

2) Fiber model เป็นแบบจำลองที่ใช้จำลองพฤติกรรมไม่แชิงเส้นขององค์อาคารโดยการแบ่งองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กออกเป็นไฟเบอร์ (fiber) ย่อยๆ ในแต่ละไฟเบอร์ย่อยจะจำลองพฤติกรรมของวัสดุเช่น คอนกรีตที่มีการโอบรัด คอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด และเหล็กเส้น โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมในการคำนวณ แบบจำลองนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระดับวัสดุขององค์อาคารได้ แต่การวิเคราะห์อาคารในระดับโครงสร้างของแบบจำลองไฟเบอร์นี้จะใช้เวลามากกว่าการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลอง lumped model

3) Microscopic model เป็นแบบจำลองที่ใช้จำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นขององค์อาคารโดยการแบ่งองค์อาคารออกเป็นชิ้นส่วน (element) ย่อยๆ และในแต่ละชิ้นส่วนจะจำลองพฤติกรรมของวัสดุเช่น คอนกรีต เหล็กเส้น และเหล็กปลอก ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระดับวัสดุขององค์อาคารได้ละเอียด แต่การวิเคราะห์อาคารในระดับโครงสร้างจะใช้เวลานานมาก หรืออาจทำไม่ได้เลย

จากการเปรียบเทียบทั้งสามวิธีข้างต้น ผู้วิจัยเห็นว่าการจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์เป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะอธิบายพฤติกรรมและความเสียหายที่เกิดขึ้นในระดับวัสดุขององค์อาคาร และพิจารณาผลของแรงตามแนวแกนที่แปรเปลี่ยน โดยไม่มีความซับซ้อนในการคำนวณมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลองไฟเบอร์ในการจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นขององค์อาคาร

เนื่องจากการวิเคราะห์ที่ใช้ในการออกแบบและประเมินความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหว สามารถทำได้ทั้งการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ และการวิเคราะห์ผลักด้านข้าง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์สามารถให้ผลตอบสนองของอาคารได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง เมื่อมีการจำลองโครงสร้างให้สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง ส่วนหนึ่งเป็นเพราะได้มีการพิจารณาการสลายพลังงานในองค์อาคารภายใต้การสั่นไหว

สลับไปมา ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้าง แต่ในการออกแบบอาคารการวิเคราะห์ผลักด้านข้างโดยให้แรงในทิศทางเดียวเป็นที่นิยม แต่ยังขาดความสามารถในการพิจารณาการสลายพลังงานในโครงสร้าง งานวิจัยนี้ได้เสนอการวิเคราะห์ผลักด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่พิจารณาผลของการเคลื่อนที่กระทำสลับกลับไปมา ซึ่งมีการสลายพลังงานภายในองค์อาคาร โดยมีวิธีการในการวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ในการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ผลักด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร กับ การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ และการวิเคราะห์ผลักด้านข้างโดยให้แรงในทิศทางเดียว

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของอาคารที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ และการวิเคราะห์ผลักด้านข้าง โดยวิธีแบ่งหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กออกเป็นส่วนย่อยในการจำลองพฤติกรรมเชิงเส้นขององค์อาคาร และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมในการคำนวณ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตที่เกี่ยวกับ การวิเคราะห์โครงสร้างเสริมเหล็กโดยใช้แรงผลักด้านข้าง, พฤติกรรมและแบบจำลองทางวัสดุของ คอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด คอนกรีตที่มีการโอบรัด และเหล็กเสริม และการวิเคราะห์ชิ้นส่วนองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ ซึ่งสามารถสรุปงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตได้ดังนี้

1.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลักด้านข้าง (Pushover analysis)

ในอดีตที่ผ่านมามีผู้วิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์ผลักด้านข้างเพื่อใช้ในการออกแบบและประเมินอาคาร เช่น Gulkan และ Sozen ในปี ค.ศ. 1974, Saiidi และ Sozen ในปี ค.ศ. 1981 และ Fajfar และ Fischinger ในปี ค.ศ. 1988

นอกจากนี้ ในปี ค.ศ.1983 Kabeyasawa และ Otani ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นผนังรับแรงด้านข้าง (shear wall) ความสูง 7 ชั้น โดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ และการวิเคราะห์แรงผลักด้านข้าง กับผลการทดสอบอาคารของ U.S.-Japan Cooperative Program เพื่อหาความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในการทดสอบได้ใช้วิธี Single-degree-of freedom pseudo dynamic test (SPD) โดยแทนอาคารตัวอย่างด้วยอาคารจำลองที่มีระดับขั้นความเสรีเดียว โดยรูปแบบของการเปลี่ยนตำแหน่ง (mode of deflection shape) หาได้จากการวิเคราะห์แบบสถิตที่มีรูปแบบของแรงเป็นรูปสามเหลี่ยมหัวกลับ ในการทดสอบจะมีการให้แรงกระทำโดย

ควบคุมการเคลื่อนที่ (displacement control) ที่ยอดอาคาร จากการเปรียบเทียบพบว่า การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ส่วนการวิเคราะห์ผลักด้านข้างพบว่าจะให้ค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคารมากกว่าผลการทดสอบสำหรับรูปแบบของแรงกระทำที่เป็นรูปสามเหลี่ยมหัวกลับ

ต่อมามีผู้วิจัยจำนวนมากได้เสนอหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลักด้านข้าง พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงข้อดีและข้อจำกัดในการวิเคราะห์

ในปี ค.ศ.1994 Lawson, Vance และ Krawinkler ได้เสนอหลักการของการวิเคราะห์ผลักด้านข้าง ที่ใช้ในการออกแบบและประเมินอาคาร เพื่อหากำลังต้านทานแรงด้านข้าง และรูปแบบความเสียหายของอาคาร จากการศึกษาพบว่าการวิเคราะห์วิเคราะห์ผลักด้านข้างจะมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์คือ ไม่สามารถทำนายผลการตอบสนองของโครงสร้างในโหมดการเคลื่อนที่สูง (higher mode) ได้ เนื่องจากจะมีผลต่อการกระจายตัวของแรงด้านข้างที่กระทำกับโครงสร้าง ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตามจะสามารถทำนายผลการตอบสนองของโครงสร้างในโหมดพื้นฐาน (fundamental mode)

และหลักการวิเคราะห์ผลักด้านข้างที่ได้กล่าวไว้ใน FEMA-273 (FEMA 1997) ที่มีรูปแบบของแรงผลักด้านข้างกระจายตามแรงเฉื่อยของมวลอาคาร โดยให้แรงกระทำไปในทิศทางเดียวและมีการกระจายของแรงที่ไม่แปรเปลี่ยน (invariant force distribution) จนถึงการกระจัดเป้าหมาย ซึ่งในการศึกษาพบว่ารูปแบบของแรงกระทำดังกล่าวจะใช้ได้ดีกับผลการตอบสนองของโครงสร้างในโหมดพื้นฐาน เนื่องจากถ้าพิจารณาในโหมดการเคลื่อนที่สูง จะไม่สามารถพิจารณาการกระจายแรงเฉื่อยของมวลอาคารขึ้นใหม่ภายหลังจากที่โครงสร้างเกิดการคราก เนื่องจากมีการกระจายของแรงที่คงที่ทำให้ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมของโครงสร้างที่เปลี่ยนไป ดังนั้นจากข้อจำกัดของการวิเคราะห์ผลักด้านข้างที่ได้ศึกษากันมาในอดีต จึงทำให้มีผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอการปรับปรุงการวิเคราะห์ด้านข้าง โดยได้พิจารณารูปแบบของแรงผลักด้านข้างที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นสำคัญ

ในปี ค.ศ.2000 Gupta และ Kunnath ได้เสนอการปรับปรุงการวิเคราะห์ผลักด้านข้างด้วยวิธี Modal site-specificed sprectra – based pushover โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหวในการกำหนดรูปแบบของแรงผลักด้านข้างที่มีการกระจายของแรงแบบแปรเปลี่ยน (variant force distribution) ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างที่เปลี่ยนไป ผลการตอบสนองจะหาได้จากการรวมการตอบสนองสูงสุดในแต่ละโหมดของโครงสร้าง ด้วยวิธี SRSS (Square-root of the Sum of the Square) ในการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบกับการ

วิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ และการวิเคราะห์ผลักด้านข้างวิธีต่างๆ โดยใช้โปรแกรม IDASS (Kunnath 1995) กับอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ความสูง 4, 8, 12, 16 และ 20 ชั้น พบว่า วิธีดังกล่าวสามารถให้ผลการวิเคราะห์ของการเปลี่ยนตำแหน่ง, อัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้น (inter-story drift) และ รูปแบบความเสียหายของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์มากว่าการวิเคราะห์ผลักด้านข้างวิธีอื่นๆ โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาผลของการเคลื่อนที่ในโหมดสูง

ในปี ค.ศ.2001 Chopra และ Goel ได้เสนอการปรับปรุงการวิเคราะห์ผลักด้านข้าง ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis (MPA) โดยใช้แรงสถิตด้านข้างที่มีการกระจายของแรงที่คงที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับแรงเฉื่อยของมวลอาคารในลักษณะการเคลื่อนของแต่ละโหมดกระทำกับแบบจำลองโครงสร้างอาคาร จนถึงการเปลี่ยนตำแหน่งที่ต้องการซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์ระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเดียว (single degree of freedom system) โดยการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมในช่วงอิลาสติก ผลการตอบสนองจะหาได้จากการรวมการตอบสนองสูงสุดของอาคารในแต่ละโหมด ในการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบกับวิธีผลตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นตามเวลา (nonlinear response analysis) และ วิธีผลตอบสนองแบบสเปกตรัม (response spectrum analysis) ของอาคารโครงสร้างเหล็ก ความสูง 9 ชั้น โดยพิจารณาผลการตอบสนองของอาคารจำนวน 3 โหมด พบว่าให้ค่าการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นล่างน้อยกว่า 8% ที่ชั้นบนมากกว่า 14%, อัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นของชั้นล่างน้อยกว่า 13% ที่ชั้นบนมากกว่า 18% และตำแหน่งของการเกิดจุดหมุนพลาสติก (plastic hinge) พบว่า ถ้าพิจารณาผลการตอบสนองในโหมดที่ 1 จะไม่สามารถทำนายตำแหน่งของจุดหมุนพลาสติกในชั้นบนได้ เนื่องจากอาคารมีการตอบสนองในโหมดสูง แต่ถ้าพิจารณาผลการตอบสนองในโหมดที่ 2 และ 3 จะให้ตำแหน่งของจุดหมุนพลาสติกในชั้นบนได้ แต่ยังไม่มีความถูกต้องมากนัก และนอกจากนี้ยังไม่สามารถหาค่าการตอบสนองในองค์อาคารได้อย่างถูกต้อง เช่น มุมหมุนในจุดหมุนพลาสติก เป็นต้น ดังนั้นจากข้อจำกัดของการวิเคราะห์ผลักด้านข้างที่เกี่ยวกับตำแหน่งของการเกิดจุดหมุนพลาสติกและความเสียหายที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร ทำให้ต่อไปในอนาคตข้างหน้าการวิเคราะห์ผลักด้านข้างควรได้มีการพิจารณาค่าของการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้น (story drift) ที่สะท้อนให้เห็นถึงความเสียหาย (damage) ที่เกิดขึ้นจริงในองค์อาคารมากกว่าการเปลี่ยนตำแหน่ง

ดังนั้นจากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่าการวิเคราะห์ผลักด้านข้างโดยให้แรงในทิศทางเดียวเป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบและประเมินอาคาร แต่ยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์อยู่หลายประการดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ที่ทำให้ไม่สามารถทำนายผลตอบสนองของโครงสร้างได้ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ นอกจากนี้ยังขาดความสามารถในการพิจารณาการสลาย

พลังงานในโครงสร้าง งานวิจัยนี้จึงได้เสนอการวิเคราะห์ผลักด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่พิจารณาผลของการเคลื่อนที่กระทำสลับกลับไปมา และมีการพิจารณาการสลายพลังงานภายในองค์อาคาร โดยมีวิธีการในการวิเคราะห์ที่ไม่ซับซ้อนมากนัก ดังที่จะได้กล่าวต่อไป

1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด (unconfined concrete) เมื่อรับแรงกระทำด้านเดียว (monotonic loading)

ในปี ค.ศ.1972 Kent และ Park ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด ดังแสดงในรูปที่ 1.1 พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงขาขึ้น ความเค้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเครียดตามสมการเส้นโค้งพาราโบล่า จนถึงความเค้นสูงสุดที่ความเครียดเท่ากับ 0.002 หลังจากนั้นความเค้นจะมีค่าลดลงตามความเครียดที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามสมการเส้นตรงจนถึงความเครียดเท่ากับ 0.004 ซึ่งจะเห็นว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ภายหลังจากที่ความเครียดของคอนกรีตมีค่าเกินความเครียดที่กำลังรับแรงอัดสูงสุด นอกจากนี้พบว่าความเครียดของคอนกรีตที่จุดประลัยมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเหนียว (ductility) ของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดมีค่าจำกัด

1.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัด (confined concrete) เมื่อรับแรงกระทำด้านเดียว

จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดจากเหล็กปลอก (unconfined concrete) จะมีความเครียดที่จุดประลัยค่อนข้างต่ำ ซึ่งทำให้โครงสร้างมีความเหนียวน้อย เนื่องจากคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวและถึงจุดประลัยก่อน ดังนั้นการเพิ่มความเหนียวให้กับคอนกรีตที่รับแรงอัดสามารถทำได้โดยใส่เหล็กปลอกหรือเหล็กเสริมทางขวางล้อมคอนกรีตไว้ เหล็กเสริมทางขวางจะช่วยให้แรงดันในการโอบรัดด้านข้างกับคอนกรีตที่อยู่ภายในเหล็กเสริมทางขวาง โดยที่เมื่อให้แรงอัดแก่คอนกรีต คอนกรีตจะเกิดการขยายตัวออกเนื่องจากผลของปัวซอง (Poisson's effect) เหล็กเสริมทางขวางจะทำหน้าที่ต้านทานการขยายตัวของคอนกรีต ถ้าเหล็กเสริมทางขวางสามารถโอบรัดคอนกรีตได้สม่ำเสมอก็จะทำให้ความสามารถในการรับแรงมีค่ามากขึ้น เป็นผลให้พฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัดต่างไปจากคอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัด โดยที่คอนกรีตที่มีการโอบรัดจะมีกำลังรับแรงและความเครียดที่จุดประลัยสูงขึ้น

ประสิทธิภาพในการโอบรัดคอนกรีตของเหล็กเสริมทางขวางจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการคือ

1. ขนาดของหน่วยแรงโอบรัดด้านข้างเนื่องจากเหล็กเสริมทางขวาง ซึ่งขึ้นกับปริมาณและกำลังของเหล็กเสริมทางขวาง
2. ประสิทธิภาพในการโอบรัดพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีต ซึ่งขึ้นกับลักษณะการจัดเรียงเหล็กเสริมตามยาว และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทางขวาง

นอกจากปัจจัยหลักทั้ง 2 ประการแล้วนั้น ยังมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อการโอบรัดคอนกรีต เช่น ปริมาณเหล็กเสริมทางยาว ระดับแรงอัดตามแนวแกน ลักษณะการจัดเรียงของเหล็กเสริมทางขวาง เป็นต้น และจากการศึกษาของผู้วิจัยหลายท่านพบว่า เหล็กเสริมทางขวางรูปห่วงวงกลมหรือเกลียววงกลมสามารถให้แรงโอบรัดด้านข้างแก่คอนกรีตที่อยู่ภายในเหล็กเสริมทางขวางได้อย่างสม่ำเสมอ ส่วนเหล็กเสริมทางขวางรูปสี่เหลี่ยมจะสามารถให้แรงโอบรัดด้านข้างได้อย่างมีประสิทธิภาพเฉพาะคอนกรีตที่บริเวณมุมของเหล็กเสริมทางขวางเท่านั้น โดยช่วงกลางของเหล็กเสริมทางขวางที่อยู่ระหว่างเหล็กเสริมตามยาวประสิทธิภาพในการโอบรัดจะลดลงตามลำดับ

พฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัดสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต ที่ได้จากการทดสอบให้รับแรงกระทำด้านเดียว มีผู้วิจัยหลายท่านได้เสนอแบบจำลองพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัดไว้ โดยได้พิจารณาปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการโอบรัดคอนกรีตดังนี้

ในปี ค.ศ.1971 Kent และ Park ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมทางขวาง ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนไม่เยื้องศูนย์ โดยพิจารณาความเหนียวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการโอบรัดคอนกรีตของเหล็กเสริมทางขวางรูปสี่เหลี่ยม ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมทางขวางในช่วงกราฟขาขึ้นพบว่า ความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเครียดตามสมการเส้นโค้งพาราโบล่าจนถึงความเค้นสูงสุด ($f_c^{'}$) ซึ่งตรงกับความเครียดเท่ากับ 0.002 จากนั้นความเค้นจะตกลงมาตามความเครียดที่เพิ่มขึ้น โดยช่วงนี้กราฟความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงจนถึงความเครียดประมาณ 0.02

ในปี ค.ศ.1982 Park และคณะ ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมทางขวางดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งพัฒนามาจากแบบจำลองเดิมของ Kent และ Park ในปี ค.ศ.1971 โดยเพิ่มกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตอันเนื่องมาจากการโอบรัดของเหล็กเสริมทางขวางรูปสี่เหลี่ยมให้สูงขึ้น กำลังรับแรงอัด

ประลัยที่เพิ่มขึ้นมีผลมาจาก อัตราส่วนต่อปริมาตรของเหล็กเสริมทางขวาง กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมทางขวาง และกำลังรับแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมทางขวางในช่วงกราฟขาขึ้นพบว่า ความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเครียดตามสมการเส้นโค้งพาราโบล่าจนถึงความเค้นสูงสุด ($f_c^{'}$) ซึ่งตรงกับความเครียดเท่ากับ $0.002K$ เมื่อ K เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น จากนั้นความเค้นจะมีค่าลดลงมาตามความเครียดที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามสมการเส้นตรงจนถึงความเครียดประมาณ 0.02

ในปี ค.ศ.1982 Sheikh และ Uzumeri ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมทางขวาง ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ที่ได้จากการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงอัดตามแนวแกนไม่เยื้องศูนย์ โดยคอนกรีตจะถูกโอบรัดให้อยู่ภายในเส้นรอบรูปของเหล็กเสริมทางขวางรูปสี่เหลี่ยม พื้นที่ของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดประสิทธิผลจะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนต่อปริมาตรของเหล็กเสริมทางขวาง ลักษณะการจัดเรียงของเหล็กเสริมตามยาว ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทางขวาง และลักษณะการจัดเรียงของเหล็กเสริมทางขวาง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมทางขวางที่ได้ในช่วงกราฟขาขึ้นพบว่า ความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเครียดตามสมการเส้นโค้งพาราโบล่าจนถึงความเค้นสูงสุด จากนั้นความเค้นจะมีค่าคงที่และมีค่าลดลงตามความเครียดที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามสมการเส้นตรงจนถึงความเค้นเท่ากับ 30% ของความเค้นสูงสุด

ในปี ค.ศ.1984 Mander และคณะ ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมทางขวางรูปสี่เหลี่ยม รูปห่วงวงกลมหรือรูปเกลียววงกลม ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนไม่เยื้องศูนย์ โดยควบคุมให้อัตราเร็วในการหดตัวเป็นไปอย่างช้าๆ (slow strain rate) หน่วยแรงโอบรัดด้านข้างเนื่องจากเหล็กเสริมทางขวางที่มีลักษณะแตกต่างกันจะถูกกำหนดโดยหน่วยแรงโอบรัดประสิทธิผล (effective lateral confining pressure) ที่ต้านทานการขยายตัวออกของคอนกรีตซึ่งขึ้นอยู่กับ ลักษณะการจัดเรียงเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมทางขวาง จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดพบว่า ความเครียดอัดประลัยตามแนวแกน (ε_{cu}) สามารถหาได้จากหลักการความสมดุลของพลังงานความเครียดที่เกิดขึ้น เมื่อเหล็กปลอกตัวแรกเกิดการฉีกขาดกับพลังงานความเครียดที่สะสมอยู่ในแกนคอนกรีต ซึ่งสามารถแทนด้วยพื้นที่ส่วนที่แรงเงาของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต

ในปี ค.ศ.1992 Sheikh และ Yeh ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมทางขวาง ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ซึ่งพัฒนามาจากแบบจำลองเดิมของ Sheikh และ Uzumeri ในปี ค.ศ.1982 ที่พิจารณาผลของการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของความเครียด (strain gradient) และระดับการให้แรงอัดตามแนวแกนเพิ่มเข้าไปในแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองอื่นๆ พร้อมกับผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงตามแนวแกนเยื้องศูนย์ที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัด และแรงอัดตามแนวแกนคงที่ พบว่า แบบจำลองอันใหม่ให้ความถูกต้องและสอดคล้องกับผลการทดสอบมากกว่าแบบจำลองเดิมและแบบจำลองอื่นๆ เนื่องมาจากผลของการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของความเครียดที่มีต่อความเหนียวขององค์อาคารและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ขึ้นอยู่กับระดับการให้แรงตามแนวแกน

ในปี ค.ศ.1997 Hoshikuma และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของการโอบรัดคอนกรีตโดยเหล็กเสริมทางขวางที่มีต่อแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีต โดยทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีรูปแบบในการจัดเรียงของเหล็กเสริมทางขวางที่แตกต่างกัน ให้แรงอัดตามแนวแกนไม่เยื้องศูนย์ โดยพิจารณาปัจจัยที่ผลต่อการโอบรัดคอนกรีต คือ อัตราส่วนต่อปริมาตรของเหล็กเสริมทางขวาง ระยะห่างระหว่างเสริมทางขวาง ลักษณะของงอ (hook) อัตราส่วนของหน้าตัดเสา และลักษณะของเหล็กยึดทางขวาง(crosstie) และได้เสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กเสริมทางขวาง ดังแสดงในรูปที่ 1.6 ที่สมมุติให้ความเค้นที่จุดประลัยมีค่าเป็น 50% ของความเค้นสูงสุด เมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองนี้ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ พร้อมกับผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบในขั้นต้น พบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองนี้ให้ความถูกต้องและสอดคล้องกับผลการทดสอบมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ เนื่องมาจากปัจจัยที่มีผลต่อการโอบรัดคอนกรีตที่นำมาพิจารณาเพิ่มขึ้นในแบบจำลอง

1.2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร

ในปี ค.ศ.1973 Menegotto และ Pinto ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร ดังแสดงในรูปที่ 1.7 ที่ไม่พิจารณาผลของการโก่งเดาะของเหล็กเสริม และได้รับการพัฒนาต่อมาโดย Filippou และคณะ ในปี ค.ศ.1983 ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบเป็นอย่างดี ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมที่ได้ประกอบด้วย ช่วงของการให้แรงกระทำเพิ่มขึ้น (reloading) และช่วงของการให้แรงกระทำลดลง (unloading) โดยค่าสติฟเนส

ของเหล็กเสริมเมื่อเริ่มให้แรงกระทำลดลงจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้น และมีพารามิเตอร์ที่มีผลต่อส่วนโค้งของเส้นกราฟ (Bauschinger effects) เมื่อเกิดพฤติกรรมไม่เชิงเส้น

ในปี ค.ศ.1988 Papia ได้เสนอวิธีการในการหาความยาวและน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาว โดยพบว่าความยาวของการโก่งเดาะจะพิจารณาจากลักษณะของเหล็กปลอกที่ยึดเหล็กเสริมตามยาวไว้ และน้ำหนักวิกฤตสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองทางทฤษฎีของเหล็กเส้นที่ถูกยึดด้านข้างด้วยจุดยึดที่มีความยืดหยุ่น โดยมีระยะห่างของจุดยึดเท่ากับระยะห่างของเหล็กปลอก จากผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่า เมื่อเหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะประสิทธิภาพในการโอบรัดคอนกรีตของเหล็กเสริมทางขวาง (confinement) จะมีค่าลดลง

ในปี ค.ศ.1992 Monti และ Nuti ได้เสนอแบบจำลองสำหรับเหล็กเสริมที่รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรซึ่งรวมผลของการโก่งเดาะของเหล็กเสริม โดยทำการทดสอบตัวอย่างเหล็กเส้นเปลือยให้รับแรงในแนวแกนแบบสลับทิศทางทั้งแรงดึงและแรงอัด โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่มีค่า nominal yield strengh เท่ากับ 440 MPa และมีอัตราส่วนความชะลูด L/D (L = ระยะห่างของเหล็กปลอก และ D = เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมตามยาว) ที่แตกต่างกันหลายชุด จากผลการทดสอบที่ได้พบว่า การโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวจะขึ้นอยู่กับระยะห่างของเหล็กปลอกเป็นสำคัญ โดยการโก่งเดาะของเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วนความชะลูด (L/D) มีค่ามากกว่า 5 ภายหลังจากที่เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งเดาะความสามารถในการรับแรงของเหล็กเสริมจะลดลง และส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำด้านเดียวและแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร

ในปี ค.ศ.1996 Suda และคณะ ได้ทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร เพื่อศึกษาผลของการกะเทาะออกของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม และการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ตัววัดความเค้น (stress sensor) วัดความเค้นที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีต จากผลการทดสอบพบว่า การโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวจะเกิดขึ้นที่บริเวณความเครียดเนื่องจากแรงดึงก่อนเกิดความเครียดเนื่องจากแรงอัด และจาการศึกษาพบว่าการโก่งเดาะของเหล็กเสริมตามยาวจะขึ้นอยู่กับกำลังในการแตกออกของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม

ในปี ค.ศ.1997 Gomes และ Appleton ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเดิมของ Menegotto และ Pinto ในปี ค.ศ.1973 โดยเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

ของเหล็กเสริมที่รวมผลของการโก่งเดาะของเหล็กเสริม ที่อาศัยหลักการความสมดุลของกลไกลการวิบัติของเหล็กเสริมที่เกิดการโก่งเดาะ เมื่อคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมเกิดการกะเทาะออก โดยสมมติให้ความยาวของการโก่งเดาะมีค่าเท่ากับระยะห่างของเหล็กเสริมทางขวาง พร้อมกับทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรจำนวน 9 ตัวอย่าง และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์พบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองนี้ให้ความถูกต้องและสอดคล้องกับผลการทดสอบในระดับหนึ่ง

ในปี ค.ศ.1998 วรพงษ์ จีนช้าง ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมรับแรงในแนวแกนแบบเป็นวัฏจักร โดยทำการทดสอบตัวอย่างเหล็กข้ออ้อย ที่มีชั้นคุณภาพ SD30 และ SD40 จำนวน 28 ตัวอย่าง ตามมาตราฐาน มอก.20-2527 ให้รับแรงในแนวแกนแบบเป็นวัฏจักรในหลายๆรูปแบบ โดยควบคุมความเร็วของความเครียดให้อยู่ในระดับอัตราความเครียดกึ่งสถิต พร้อมกับกำหนดขนาดของตัวอย่างทดสอบเพื่อจำกัดมิให้เกิดการโก่งเดาะขึ้นในตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ได้เสนอพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองวัสดุของเหล็กเสริมที่เสนอโดย C. Sittipunt และ S.L. Wood ซึ่งแบบจำลองที่ได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เสนอนี้ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบ

1.2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร

สำหรับการวิเคราะห์องค์อาคารอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์มีสมมติฐานในการวิเคราะห์คือ

1. ระนาบหน้าตัดขององค์อาคารยังคงเป็นระนาบเดิมหลังเกิดการเปลี่ยนรูป และตั้งฉากกับแกนตามยาวขององค์อาคาร
2. การเปลี่ยนรูปของชิ้นส่วนองค์อาคารถือว่ามีค่าน้อย สำหรับวัสดุชนิดเดียวกัน และคุณสมบัติเหมือนกันตลอดความยาว
3. การเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงเฉือนมีค่าน้อยมากไม่นำมาพิจารณา
4. ไม่พิจารณาผลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม

การวิเคราะห์เพื่อหาแรงภายในและสติฟเนสของชิ้นส่วนย่อย (element) ภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรในช่วงแรก จะใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีเฟลกซิบิลิตี (flexibility method) โดยการแบ่งหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กออกเป็นไฟเบอร์ย่อย ดังแสดงในรูปที่ 1.8 และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมในการคำนวณ โดยแรงภายในและสติฟเนสของหน้าตัดหาได้จาก ผลรวมของความเค้นและสติฟเนสของไฟเบอร์ย่อยทุกๆ ไฟเบอร์บนหน้าตัด เมื่อทราบค่าสติฟเนสของหน้าตัดก็นำไปหาเฟลกซิบิลิตีของชิ้นส่วนย่อยได้ตาม

หลักการของแรงสมมุติ และเนื่องจากการวิเคราะห์ตามหลักการดังกล่าวในข้างต้น ยังไม่สามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ ดังนั้นจึงมีผู้วิจัยหลายท่านเสนอการปรับปรุงการวิเคราะห์ชิ้นส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรโดยวิธีแบ่งหน้าตัดออกเป็นไฟเบอร์ย่อยๆ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ดังนี้

ในปี ค.ศ.1984 Kaba และ Mahin ได้เสนอการวิเคราะห์ชิ้นส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีเฟลกซิบิลิตีกับแบบจำลองไฟเบอร์เป็นครั้งแรก โดยเสนอให้ใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าแรงภายในที่มีการกระจายตัวแบบเชิงเส้นในการหาเฟลกซิบิลิตีของชิ้นส่วนย่อย โดยในขั้นตอนของการหาแรงภายในและสติฟเนสของชิ้นส่วนย่อย การเปลี่ยนรูปที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้ของหน้าตัด($\Delta d(x)$) จะนำมาพิจารณาแทนการเปลี่ยนรูปทั้งหมด ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนตำแหน่งที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้ของชิ้นส่วนย่อย (Δq) กับฟังก์ชันการประมาณค่าแรงภายใน ($b(x)$)และการเปลี่ยนตำแหน่ง ($a(x)$) ที่ขึ้นต่อกัน ที่เสนอโดย Mahasuverachai ในปี ค.ศ.1982 ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนองค์อาคารถูกแบ่งเป็นไฟเบอร์ย่อยๆ ความเค้นและสติฟเนสของไฟเบอร์หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมตามสมมติฐานของระนาบหน้าตัด จากนั้นแรงภายในและสติฟเนสของหน้าตัดจะหาได้จากหลักการของงานสมมุติ เมื่อทราบสติฟเนสของหน้าตัดก็ทำให้สามารถหาเฟลกซิบิลิตีของหน้าตัดและชิ้นส่วนย่อยได้ ส่วนแรงภายในที่เปลี่ยนไปจากขั้นก่อนหน้านี้ของชิ้นส่วนย่อย (ΔQ_R) หาได้จากหลักการของการเปลี่ยนตำแหน่งสมมุติ ปัญหาที่พบในการวิเคราะห์คือ คำตอบที่ได้จะไม่ลู่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริงและไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมของชิ้นส่วนอาคารเมื่อมีพฤติกรรมอ่อนตัวลง (softening behavior) ได้ เนื่องจากเกิดความไม่สอดคล้องกันในขั้นตอนการหาเฟลกซิบิลิตีของชิ้นส่วนย่อยที่อาศัยหลักการของแรงสมมุติ กับการหาแรงภายในที่อาศัยหลักการของการเปลี่ยนตำแหน่งสมมุติ โดยทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงภายในชิ้นส่วนย่อยเนื่องจากการกระจายตัวของแรงไม่เป็นเชิงเส้น

ในปี ค.ศ.1991 Spacone และคณะ ได้เสนอการวิเคราะห์ชิ้นส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีแบ่งหน้าตัดออกเป็นไฟเบอร์ย่อย และใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนรูปของหน้าตัด กับฟังก์ชันการประมาณค่าแรงภายในและการเปลี่ยนตำแหน่งที่ขึ้นต่อกัน (dependent-interpolation function) ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนรูปของชิ้นส่วนย่อย เพื่อนำไปหาแรงภายในและสติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยและระบบโครงสร้างรวม โดยการวิเคราะห์จะต้องคำนึงถึงความสมดุลและความสอดคล้องในตำแหน่งที่โครงสร้างเกิดการเคลื่อนตัวไป ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การพิจารณาสถานะของชิ้นส่วนย่อย (Element state determination) เป็นการหาแรงต้านทานภายในและสติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยเมื่อทราบการเปลี่ยนรูปของชิ้นส่วนย่อย การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้จะใช้วิธีการวนซ้ำแบบนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson iteration) ในการปรับความสมดุลของการเปลี่ยนรูปของชิ้นส่วนย่อย การเปลี่ยนรูปที่ไม่สมดุลของชิ้นส่วนย่อยคำนวณได้จากการเปลี่ยนรูปที่ไม่สมดุลของหน้าตัด ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีแบ่งหน้าตัดออกเป็นไฟเบอร์ย่อย พฤติกรรมของหน้าตัดจะได้จากการรวมพฤติกรรมของไฟเบอร์ย่อยทุกๆไฟเบอร์บนหน้าตัดนั้น โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริม

2. การพิจารณาสถานะของโครงสร้าง (Structure state determination) เป็นการหาแรงภายในและสติฟเนสของโครงสร้างรวม ที่ได้จากการรวมแรงภายในและสติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยที่ได้จากขั้นตอนของการพิจารณาสถานะของชิ้นส่วนย่อย การวิเคราะห์จะใช้วิธีการวนซ้ำแบบนิวตัน-ราฟสัน ในการปรับความสมดุลระหว่างแรงภายนอกที่มากระทำกับโครงสร้างกับแรงภายในที่เกิดขึ้น

ในปี ค.ศ.2002 Nakazawa และคณะ ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร โดยใช้การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์กับแบบจำลองไฟเบอร์ ในการจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นขององค์อาคาร พร้อมทั้งศึกษาผลของระยะเวลาแต่ละขั้น (time step) ความเร่งในแนวดิ่ง และแรงตามแนวแกน ที่มีการแปรเปลี่ยนต่อผลตอบสนองของโครงสร้าง ในขั้นตอนการวิเคราะห์สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยจะหาได้จากวิธีสติฟเนส (stiffness method) โดยการแบ่งหน้าตัดของชิ้นส่วนอาคารออกเป็นไฟเบอร์ย่อยๆ และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมในการคำนวณ แรงภายในของหน้าตัดหาได้จากผลรวมของความเค้นของไฟเบอร์ทุกๆไฟเบอร์บนหน้าตัด เมื่อได้แรงภายในของหน้าตัดก็นำไปหาแรงภายในของชิ้นส่วนย่อย โดยจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนตำแหน่งก็จะได้สติฟเนสของชิ้นส่วนย่อยออกมา

1.2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ กับ ผลการทดสอบชิ้นส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร

ในปี ค.ศ.1996 Spacone และคณะ ได้เปรียบเทียบผลการทดสอบคานยื่นคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับโมเมนต์ดัดในทิศทางเดียว กับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีโดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ ที่เสนอโดย Kent ในปี ค.ศ.1969 เพื่อศึกษาผลของระดับแรงอัดตามแนวแกนที่มีต่อพฤติกรรมการ

รับแรงดัดของชิ้นส่วนอาคาร การวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม FEDAS โดยกำหนดให้ชิ้นส่วนอาคารเป็นแบบ hinge และแบ่งหน้าตัดออกเป็นไฟเบอร์ย่อย จำนวน 15 ไฟเบอร์ โดยใช้แบบจำลองทางวัสดุของคอนกรีตที่มีการโอบรัดที่เสนอโดย Park และคณะ ในปี ค.ศ.1982 แบบจำลองคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดที่เสนอโดย Kent ในปี ค.ศ.1971 และ แบบจำลองเหล็กเสริมที่เสนอโดย Menegotto-Pinto ในปี ค.ศ.1973 ผลการเปรียบเทียบที่ได้พบว่าผลการวิเคราะห์โดยใช้จากแบบจำลองไฟเบอร์มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบในระดับหนึ่ง และเมื่อเพิ่มระดับแรงอัดตามแนวแกนให้สูงขึ้นจะทำให้ความเหนียวของหน้าตัดมีค่าลดลง

ในปี ค.ศ.2001 Sakai และ Kawashima ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กให้รับแรงอัดตามแนวแกนไม่คงที่และแรงกระทำด้านข้างแบบสลับทิศทาง และทำการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ เพื่อศึกษาผลของแรงตามแนวแกนทั้งแรงดึงและแรงอัดที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก การวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม TDAP3 โดยแบบจำลองทางวัสดุของคอนกรีตในส่วนเส้นโค้งโอบคลุมจะใช้แบบจำลองที่เสนอโดย Hoshikuma และคณะ ในปี ค.ศ.1997 คอนกรีตที่ได้รับแรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรจะใช้แบบจำลองที่เสนอโดย Sakai และคณะ ในปี ค.ศ.2000 และเหล็กเสริมจะใช้แบบจำลองที่เสนอโดย Menegotto และ Pinto ในปี ค.ศ.1973 ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความถูกต้องและสอดคล้องกับผลการทดสอบ ถ้าเลือกระยะของจุดหมุนพลาสติกได้เหมาะสมใกล้เคียงกับสภาพจริง

1.3 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการโดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาพฤติกรรมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์, การวิเคราะห์ผลักด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร และ การวิเคราะห์ผลักด้านข้างโดยให้แรงในทิศทางเดียววิธีต่างๆ
2. วิเคราะห์หารูปแบบความเสียหายและพฤติกรรมการพังทลายของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของของการวิเคราะห์ผลักด้านข้างแบบเป็นวัฏจักร กับ การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ และ การวิเคราะห์ผลักด้านข้างโดยให้แรงในทิศทางเดียววิธีต่างๆ

1.4 ขอบเขตการศึกษา

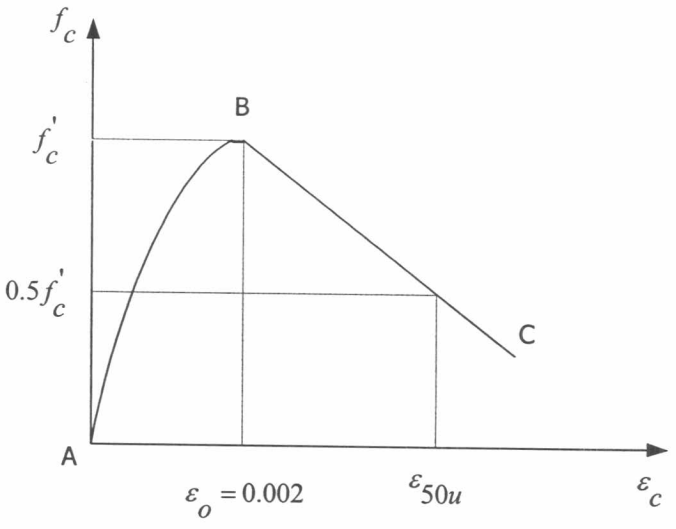
งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการอยู่ภายในขอบเขตดังต่อไปนี้

1. ศึกษาพฤติกรรมของอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ความสูง 5 ชั้น ซึ่งพิจารณาเป็นโครงข้อแข็ง 2 มิติ ที่ไม่คิดผลของการบิดของโครงสร้าง ไม่คิดว่ามีการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเกิดขึ้นในอาคาร และไม่พิจารณาผลของกำแพงก่ออิฐและฐานราก
2. ศึกษาผลการตอบสนองของโครงสร้างโดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่วัดได้ที่ฐานอาคารใบหยก 1 กรุงเทพมหานคร ปี 1995 , คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ที่วัดได้ที่สถานี Imperial Valley Irrigation District ปี 1940 และ คลื่นแผ่นดินไหวที่วัดได้ที่กรุงเม็กซิโก ปี 1985

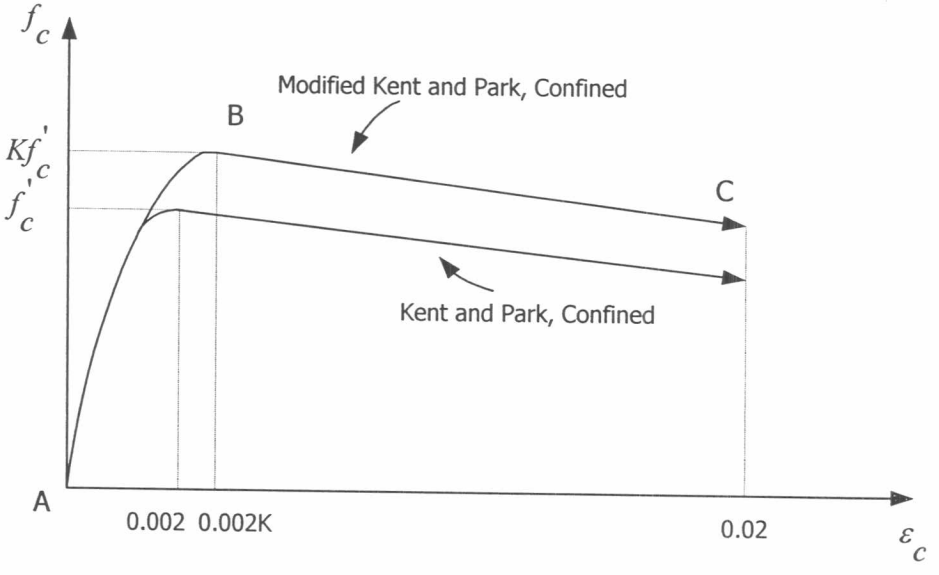
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวิธีดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

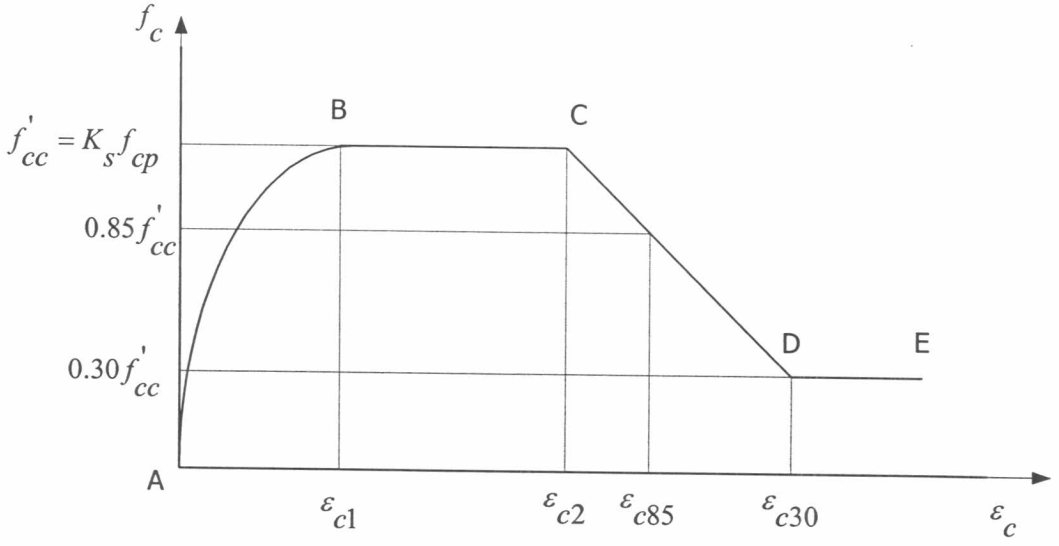
1. ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับ แบบจำลอง พฤติกรรมของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด, คอนกรีตที่มีการโอบรัด และเหล็กเสริมที่จะใช้ในแบบจำลองไฟเบอร์ หลักการการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไฟเบอร์ และ การวิเคราะห์ผลักด้านข้าง
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB และ โปรแกรม TDAP version 3
3. ปรับค่าพารามิเตอร์โดยการสอบเทียบผลการวิเคราะห์องค์อาคารเดี่ยว (คาน และ เสา) กับผลการทดสอบองค์อาคารภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร
4. สร้างแบบจำลองโครงสร้างอาคาร
5. ทำการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์
6. ทำการวิเคราะห์ผลักด้านข้างวิธีต่างๆ
7. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์อาคารระหว่างการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ กับ การวิเคราะห์ผลักด้านข้างวิธีต่างๆ
8. อภิปรายผลที่ได้และสรุป
9. เขียนวิทยานิพนธ์



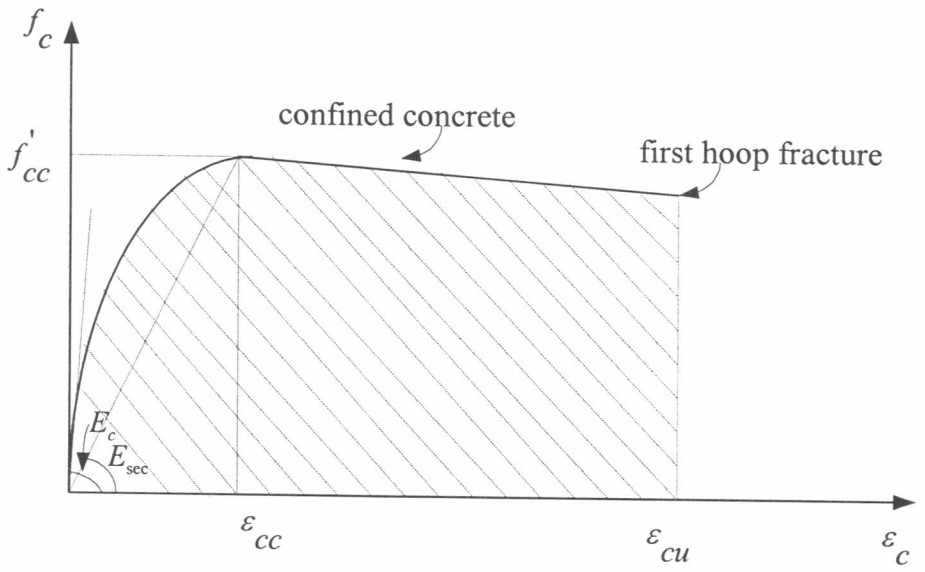
รูปที่ 1.1 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดของ Kent และ Park



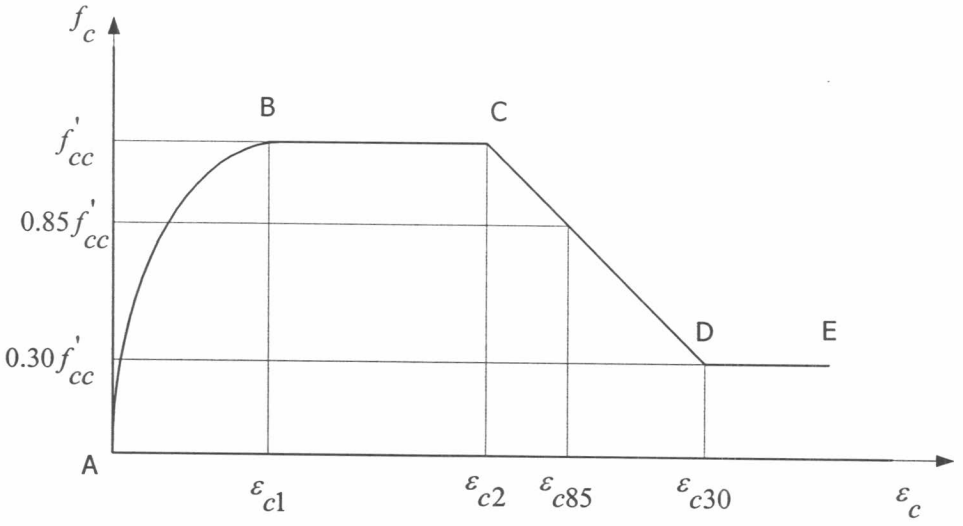
รูปที่ 1.2 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดจากเหล็กเสริมทางขวางของ Park และคณะ



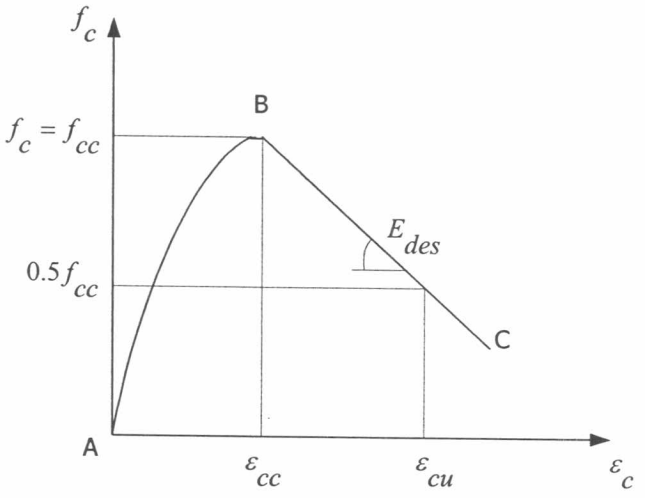
รูปที่ 1.3 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดของ Sheikh และ Uzumeri



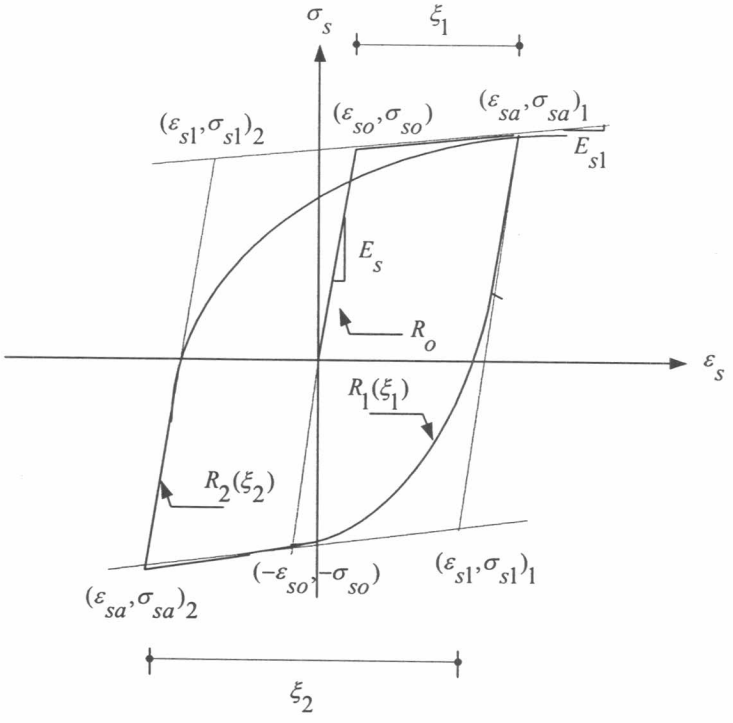
รูปที่ 1.4 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดของ Mander และคณะ



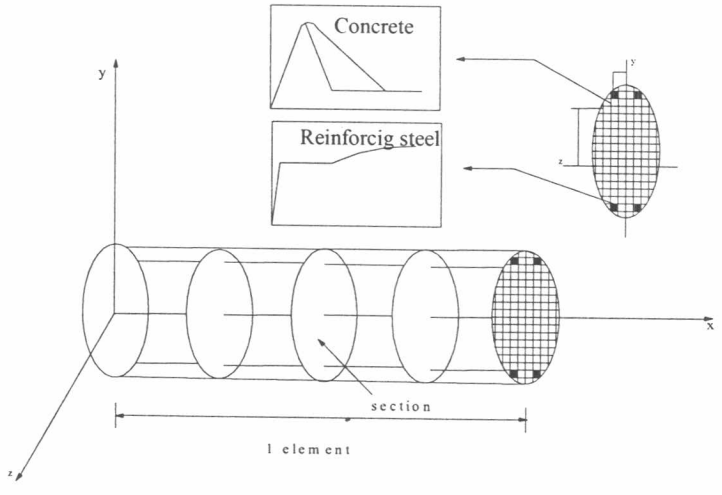
รูปที่ 1.5 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดของ Sheikh และ Yeh



รูปที่ 1.6 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดของ Hoshikuma และคณะ



รูปที่ 1.7 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรของ Menegotto และ Pinto



รูปที่ 1.8 แบบจำลองไฟเบอร์