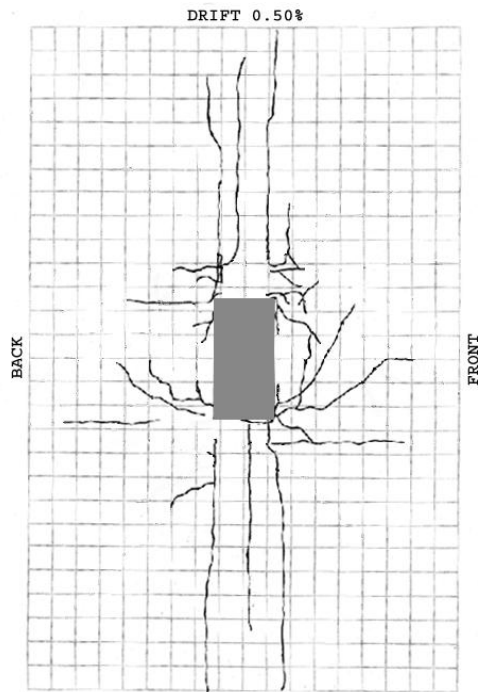


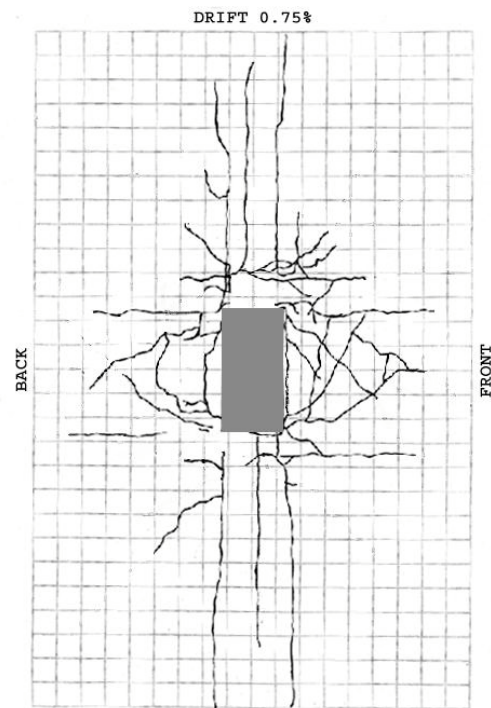
รูป 4.8 เริ่มต้นการทดลอง

รูป 4.9 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว 0.25%



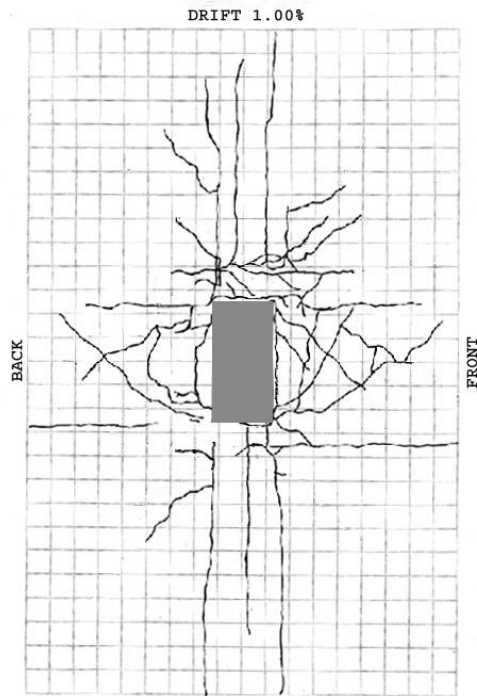
รูป 4.10 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว -0.25%

รูป 4.11 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว 0.50%



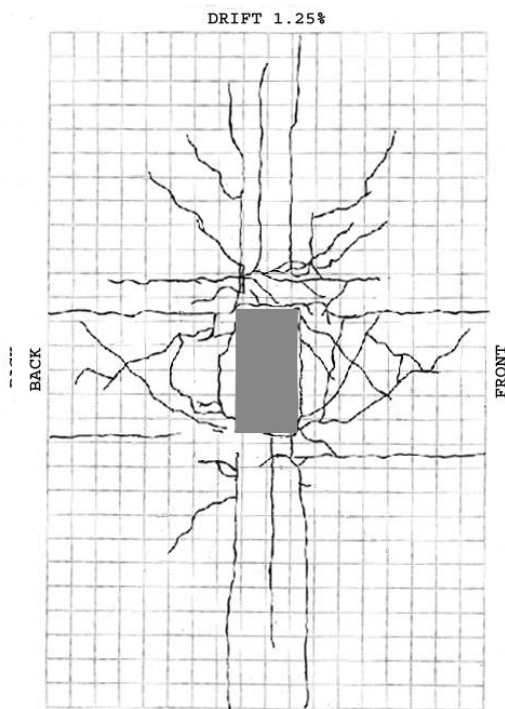
รูป 4.12 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว -0.50%

รูป 4.13 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว 0.75%



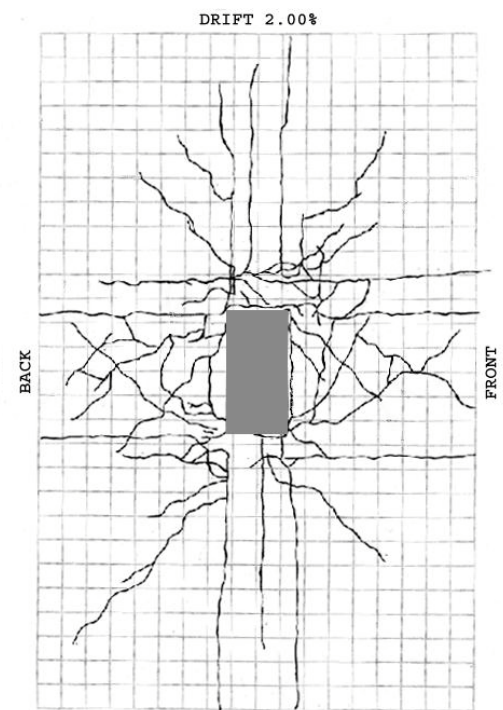
รูป 4.14 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว -0.75%

รูป 4.15 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว 1.00%



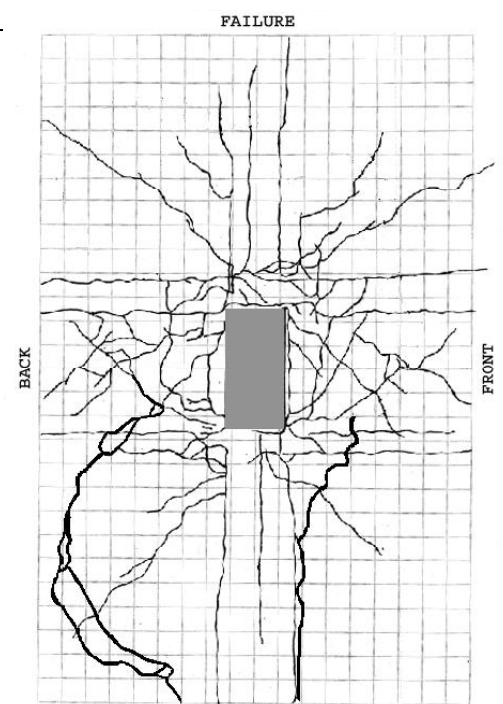
รูป 4.16 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว -1.00%

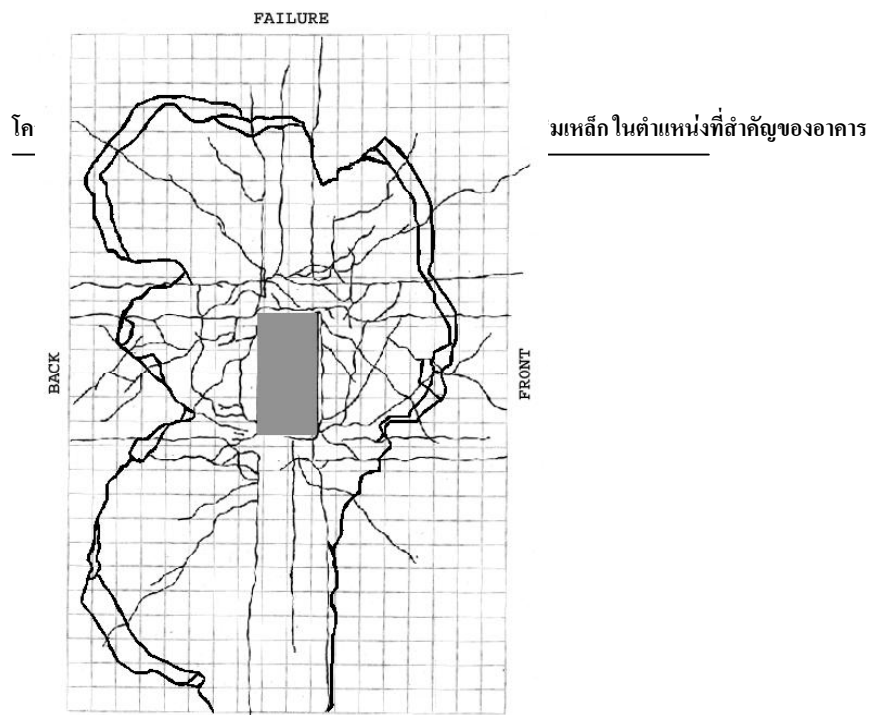
รูป 4.17 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว 1.25%



รูป 4.18 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว -1.50%

รูป 4.19 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว 2.00%





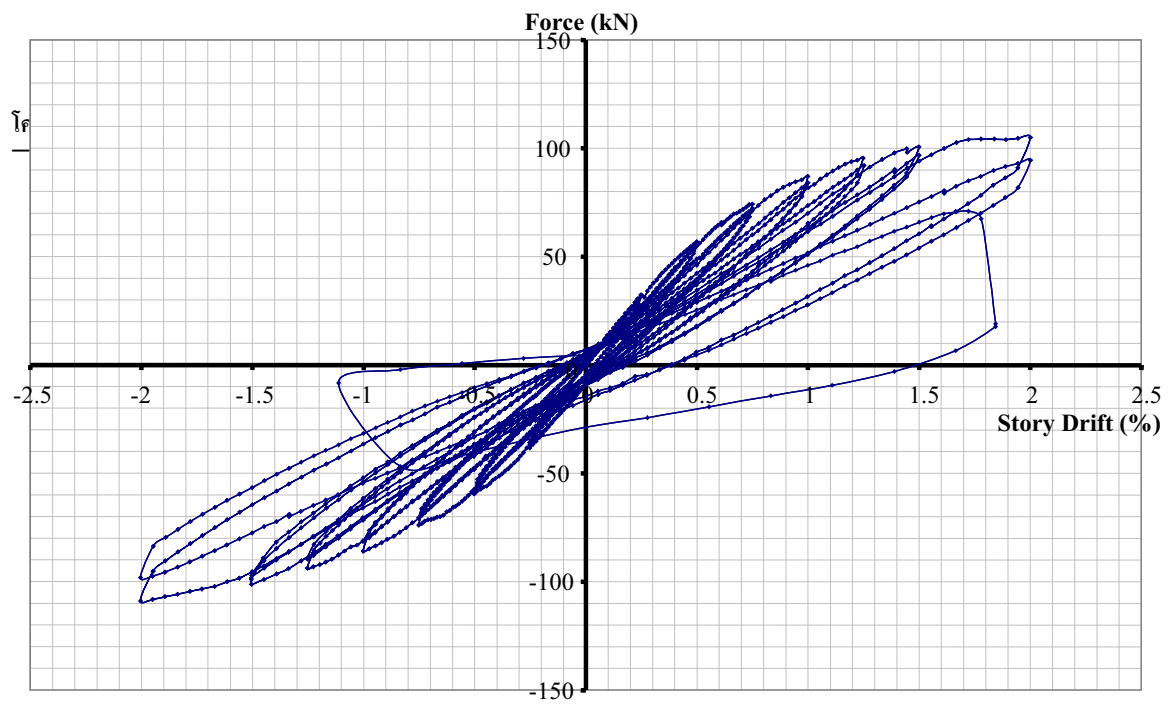
รูป 4.20 รอยร้าวที่รอบการเคลื่อนตัว -2.00%

รูป 4.21 รอยร้าวที่สังเกตได้ตอนเกิดการวิบัติ

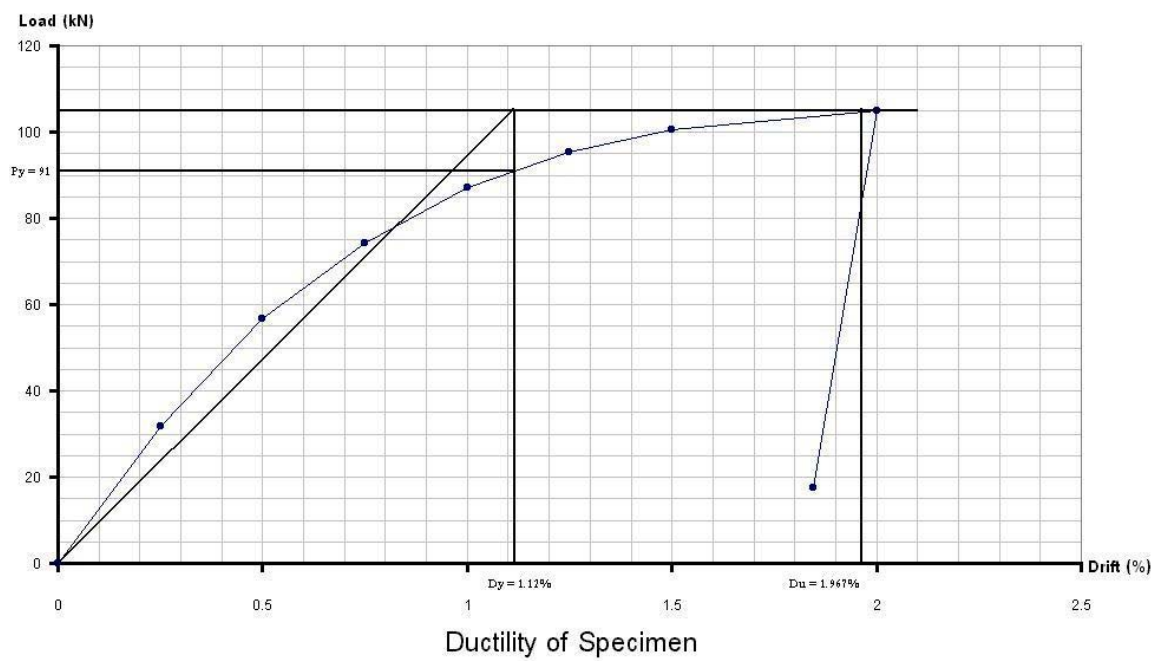
รูป 4.22 รอยร้าวที่สังเกตได้ตอนเกิดการวิบัติ



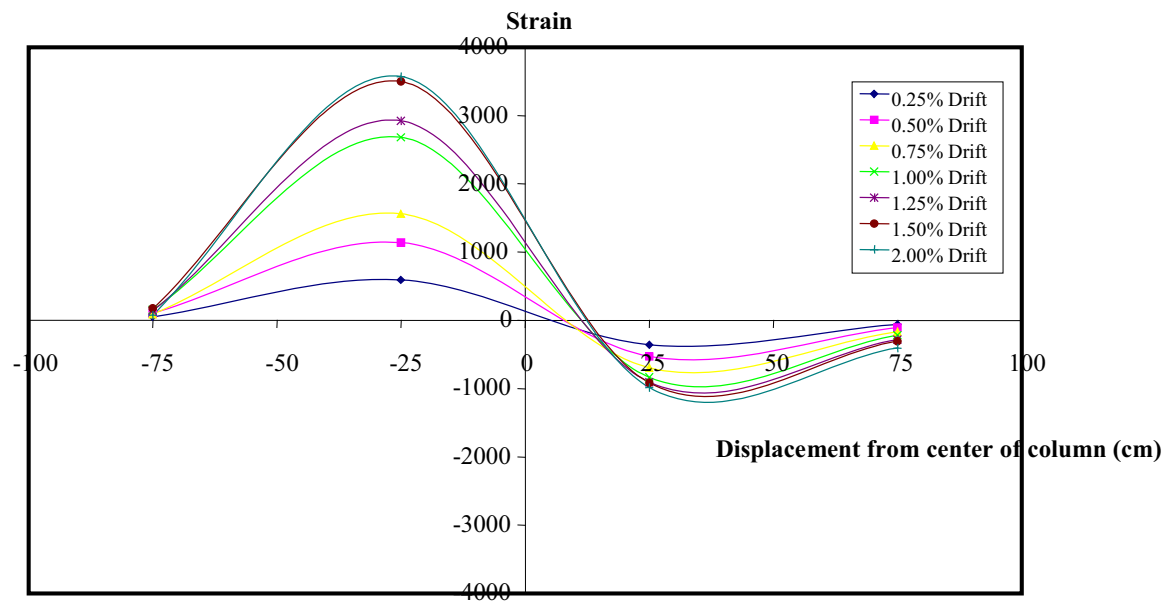
รูป 4.23 ภาพถ่ายการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทะลุ



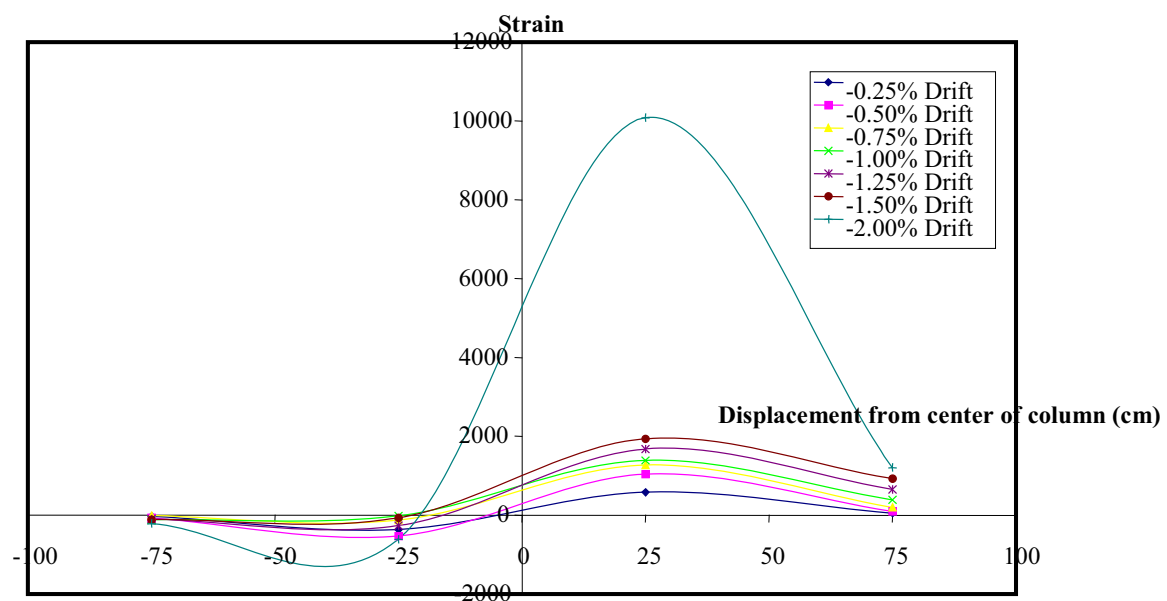
รูป 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัว



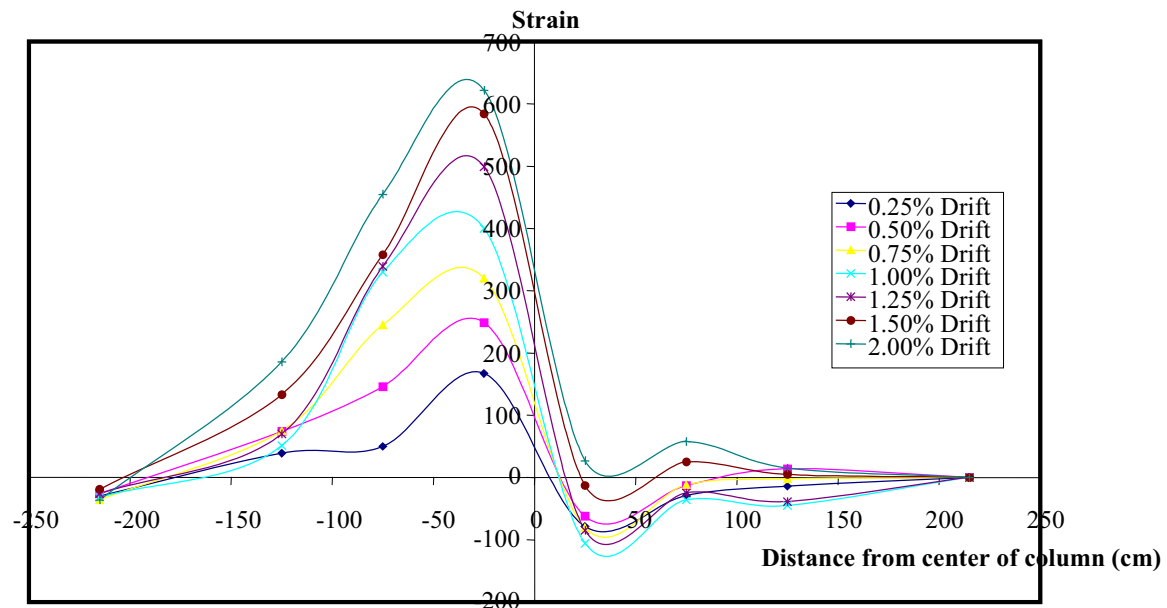
รูป 4.25 การคำนวณหาความเหนียวของชิ้นทดสอบ



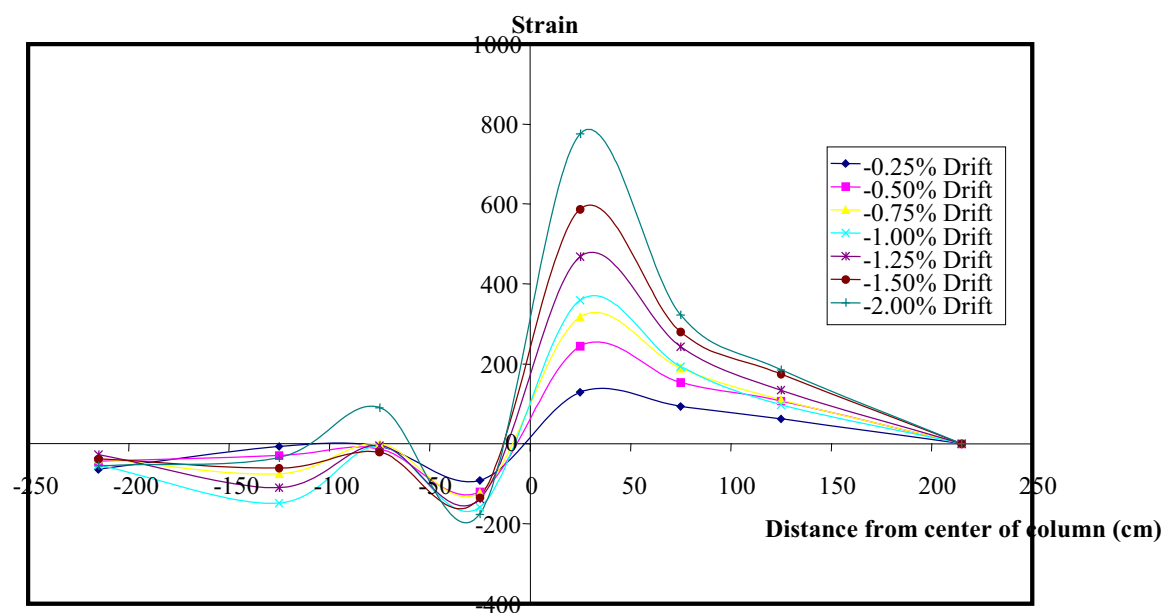
รูป 4.26 การกระจายความเครียดในเหล็กบน



รูป 4.27 การกระจายความเครียดในเหล็กล่าง



รูป 4.28 การกระจายความเครียดของลวดอัดแรงในแนวเหนือ-ใต้ (Positive drift)



รูป 4.29 การกระจายความเครียดของลวดอัดแรงในแนวเหนือ-ใต้ (Negative drift)

4.8 สัญลักษณ์

V_g	= แรงเฉือนที่กระทำต่อน้ำตัดวิกฤติเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งของโครงสร้าง
V_0	= กำลังต้านทานแรงเฉือนทะเล
b_0	= ความยาวเส้นรอบรูปของน้ำตัดวิกฤติ
d	= ความลึกประสิทธิภาพของแผ่นพื้น
b_1	= ความยาวของน้ำตัดวิกฤติในทิศทางที่ให้น้ำหนักบรรทุก
b_2	= ความกว้างของน้ำตัดวิกฤติในทิศทางที่ตั้งฉากกับ b_1
e_r	= อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉือนซึ่งเกิดจากแรงเฉือนหนึ่งหน่วยต่อหน่วยแรงเฉือนสูงสุดที่หน้าตัด $d/2$ จากหน้าเสาซึ่งเกิดจากโมเมนต์ไม่สมดุลหนึ่งหน่วย
M_g	= โมเมนต์ลัพท์ที่จุดต่อพื้น-เสาเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง
f_{pc}	= หน่วยแรงอัดประสิทธิภาพในคอนกรีตเนื่องจากผลของการอัดแรง
ρ_s	= อัตราส่วนเหล็กเสริมต้านทานโมเมนต์ลัพท์บริเวณหัวเสา
f_c	= กำลังรับแรงอัดคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ 28 วัน

4.9 เอกสารอ้างอิง

- ACI-ASCE Committee 352, (1988), "Recommendations for Design of Slab-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures", ACI Structural Journal, ACI, 85, 6:675-696.
- Burns N.H., Roongroj Hemakom, (1985), "Test of Post-Tensioned Flat Plate with Banded Tendons", Journal of the Structural Division, ASCE, 111, 9:1899-1915.
- Durrani A. J., and Du Y. (1992), "Seismic Resistance of Slab-Column Connections in Existing Non-Ductile Flat-Plate Buildings" Report No. NCEER-92-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York.
- Foutch D.A., Gamble W.L., and Sunidja H. (1990), "Tests of Post-Tensioned Concrete Slab-Edge Column Connections", ACI Structural Journal, ACI, 87, 2:167-179.
- Franklin S.O., and Long A.E. (1982), "The Punching Behaviour of Unbonded Post-Tensioned Flat Plate", Proceeding of Institute Civil Engineering, Part2, 1982, 73, Sept., 609-631.

- Hammill N., and Ghali A. (1994), Punching Shear Resistance of Corner Slab-Column Connections, ACI Structural Journal, ACI, 91, 6:697-707.
- Hawkins N.M. (1981), “Lateral Load Resistance of Unbonded Post-Tensioned Flat Plate Construction”, PCI Journal, 94-115.
- Hawkins N.M. (1977), “Seismic Resistance of Prestressed and Precast Concrete Structures”, PCI Journal, 81-110.
- Park R. (1988), “State-of-the Art Report: Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing”, Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam: 6681-6693.
- Robertson I.N., and Durrani A.J. (1992), “Gravity Load Effect on Seismic Behavior of Interior Slab-Column Connections”, ACI Structural Journal, ACI, 89, 1:37-45.

ภาค 2

การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น

การทดลองการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของจุดต่อคาน-เสาและจุดต่อพื้น-เสาในห้องปฏิบัติการตามที่ได้นำเสนอมานั้น มีประโยชน์อย่างมากต่อการเข้าใจพฤติกรรมที่แท้จริงของโครงสร้าง แต่ ก็ต้องใช้ เวลา และ งบประมาณจำนวนมาก และ ยังมีข้อจำกัดอื่นๆอยู่อีกมากเช่นการจำลองสภาวะขอบเขต (Boundary condition) ของชิ้นทดสอบ อาจจะไม่เหมือนกับสภาพจริงได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ ยังมี ข้อจำกัดเรื่องขนาดของชิ้นทดสอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับเนื้อที่ในห้องปฏิบัติการ และ กำลังของหัวผลักไฮดรอลิกส์ (Hydraulic actuator)

การศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อโดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของจุดต่อคาน-เสาและจุดต่อพื้น-เสา วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นการจำลองจุดต่อในคอมพิวเตอร์แล้วทำการวิเคราะห์ซึ่งเปรียบเสมือนการทำการทดลองจุดต่อในคอมพิวเตอร์ (Numerical experiment) วิธีนี้มีข้อดีเหนือกว่าการศึกษาโดยวิธีทดลองอยู่หลายข้อ เช่น ใช้เวลา และ งบประมาณน้อยกว่ามาก และ ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน ทำให้สามารถจำลองจุดต่อขนาดจริง และมีสภาพเงื่อนไขขอบเขตใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงได้มากที่สุด

โปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ที่สามารถใช้งานได้ต้องสามารถพิจารณาผลของความไร้เชิงเส้น (nonlinearity) ของคอนกรีตและเหล็กเสริม ความไร้เชิงเส้นของคอนกรีตเกิดจากรอยร้าว (Cracking) ภายใต้อิทธิพลแรงดึง และ การบดอัด (Crushing) ภายใต้อิทธิพลแรงอัด ส่วนความไร้เชิงเส้นของเหล็กเสริมเกิดจากการครากภายใต้อิทธิพลแรงดึง และ การโก่งเดาะภายใต้อิทธิพลแรงอัด ปัจจุบันโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ที่สามารถพิจารณาความไร้เชิงเส้นของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีอยู่ไม่มากนัก และ ยังถือเป็นเรื่องยากสำหรับวิศวกรที่จะเข้าใจ แต่ในอนาคตโปรแกรมเหล่านี้จะได้รับการพัฒนาให้ดีขึ้น มีราคาถูกลง ใช้งานง่ายขึ้นในงานวิจัยย่อยที่ 3 นี้ คณะผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม WCOMD และ COM3 ซึ่งเป็นโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์ที่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตใน 2 และ 3 มิติตามลำดับ โปรแกรมทั้งสองนี้ ถูกพัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตของมหาวิทยาลัยโตเกียว โดย ศ. มาเอคาว่า และ ศ. โอเคมูระ โปรแกรมดังกล่าวมีความสามารถในการทำนายพฤติกรรมขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อิทธิพลแรงสถิต และ แรงพลศาสตร์ จุดประสงค์หนึ่งของงานวิจัยนี้ คือการพัฒนาโปรแกรมนี้ต่อไปให้สามารถทำนายพฤติกรรมของจุดต่อคาน-เสา และ จุดต่อพื้น-เสาได้อย่างถูกต้องเพียงพอ โดยได้ศึกษาทั้งพฤติกรรมการโยกตัวทีละน้อย (Monotonic Push-over behavior) และ พฤติกรรมการโยกตัวสลับทีละน้อย (Cyclic behavior)

บทที่ 5

การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์จุดต่อภายใต้แรงกระทำสถิต

5.1 แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ของจุดต่อและพฤติกรรมวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริม

คณะผู้วิจัยได้ใช้วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์แบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear finite element) ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของจุดต่อที่ แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ของชิ้นทดสอบแสดงดังใน รูป 5.1 โดยอีลีเมนต์ที่ใช้ได้แก่ อีลีเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กไอโซพารามेटริก 2 มิติชนิด 8 จุดต่อ (8-Node 2D isoparametric RC element) ซึ่งใช้ในส่วนของคาน เสา และ จุดต่อ และ อีลีเมนต์รอยต่อไอโซพารามेटริก 1 มิติชนิด 6 จุดต่อ (6-Node 2D isoparametric joint element) ซึ่งใช้ที่รอยต่อระหว่างคานกับเสาทั้ง 4 ด้าน โดยที่อีลีเมนต์รอยต่อนี้สามารถแสดงพฤติกรรมการรูดไถลของเหล็กเสริมที่จุดต่อได้

องค์ประกอบที่สำคัญของการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์แบบไร้เชิงเส้นคือพฤติกรรมวัสดุหรือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งต้องสามารถแสดงความไร้เชิงเส้นของคอนกรีตและเหล็กเสริม และ ต้องมีทั้ง envelope และ cyclic loop พฤติกรรมวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในอีลีเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็ก 2 มิติ และ ในอีลีเมนต์รอยต่อ 1 มิติใช้แบบจำลองเดียวกัน แต่แตกต่างกันเพียงแค่รูปแบบของตัวแปรที่ใช้แทนการเปลี่ยนรูปของอีลีเมนต์ ในกรณีของอีลีเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กชนิด 2 มิตินั้น พฤติกรรมวัสดุจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ส่วนกรณีของอีลีเมนต์รอยต่อชนิด 1 มิตินั้น พฤติกรรมวัสดุจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและการเคลื่อนตัวของรอยต่อ ในรายงานนี้จะอธิบายพฤติกรรมวัสดุของอีลีเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กชนิด 2 มิติ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม พฤติกรรมวัสดุของคอนกรีตประกอบด้วย 1. แบบจำลองแรงดึงตั้งฉากกับรอยร้าว (tensile stress model) 2. แบบจำลองหน่วยแรงอัดขนานกับรอยร้าว (compressive stress model) และ 3. แบบจำลองหน่วยแรงเฉือนตามแนวรอยร้าว (shear stress model)

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่ใช้สำหรับคำนวณหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัด แสดงใน รูป 5.2 ทางด้านพฤติกรรมการรับแรงดึงนั้นได้พิจารณาการลดลงของหน่วยแรงดึงภายหลังการเกิดรอยร้าว โดยพิจารณาให้การลดลงของหน่วยแรงดึงเป็นไปอย่างช้าหากอีลีเมนต์นั้นมีเหล็กเสริม และ ให้ลดลงอย่างรวดเร็วหากอีลีเมนต์นั้นไม่มีเหล็กเสริม สำหรับคอนกรีตที่รับแรงอัดขนานกับรอยร้าว ใช้แบบจำลอง elasto-plastic fracture model ซึ่งพิจารณาว่าความไร้เชิงเส้นทางด้านพฤติกรรมการรับแรงอัดเกิดจากการเปลี่ยนรูปถาวรแบบพลาสติก (plastic deformation) และ ความเสียหาย

จากการแตกร้าว (continuum fracture) รวมทั้งพิจารณาการลดลงของหน่วยแรงอัดเนื่องมาจากความเครียดดึงทางขวาง โดยพิจารณาให้เป็นตัวคูณปรับแก้แทนความเสียหายจากความเครียดดึงทางขวาง แบบจำลองหน่วยแรงเฉือนตามแนวรอยร้าวแสดงดังใน รูป 5.3 แบบจำลองนี้มีที่มาจาก contact density model ที่พิจารณาว่าการถ่วงหน่วยแรงเฉือนเกิดจากผิวขรุขระของรอยร้าว แบบจำลองของเหล็กเสริมแสดงดังในรูป 5.4 โดยพิจารณาให้แบบจำลองเหล็กเสริมภายใต้แรงดึงต่างจากแบบจำลองของเหล็กเสริมภายใต้แรงอัด ในด้านรับแรงอัดนั้น ใช้แบบจำลองชนิด bilinear ของเหล็กเส้นเปลือย (bare bar) ส่วนแบบจำลองเหล็กภายใต้แรงดึงนั้นได้พิจารณาผลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตด้วย

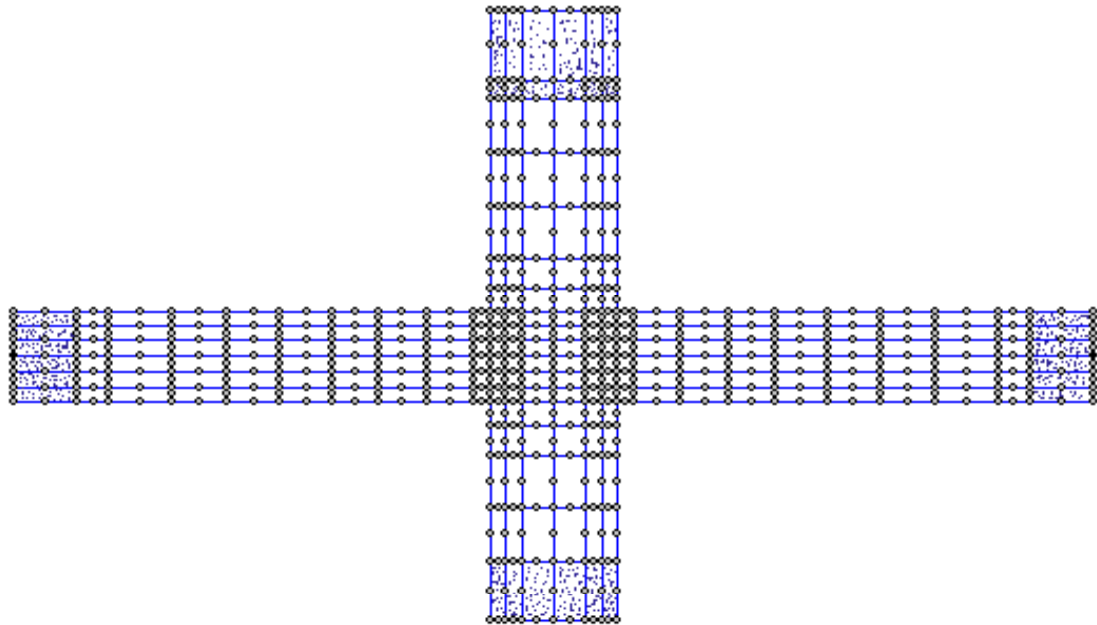
5.2 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำแนวราบกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ และ รอยร้าวและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำแนวราบกับระยะเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ แสดงดังในรูป 5.5-5.7 จะเห็นว่าผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ให้ค่าได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองทั้ง envelope และ cyclic loops รอยร้าว และความเสียหายที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ของชิ้นทดสอบที่ 1 ถึง 3 ได้แสดงไว้ใน รูป 5.8-5.10 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่ารูปแบบการวิบัติที่ได้จากการวิเคราะห์คล้ายคลึงกับการการทดลอง โดยชิ้นทดสอบที่ 1 เกิดการวิบัติที่ปลายคาน เป็นแบบการบดอัดของคอนกรีตส่วนหน้าคานที่รับแรงอัด ส่วนชิ้นทดสอบที่ 2 และ 3 เกิดการวิบัติที่จุดต่อ จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นวิธีที่เชื่อถือได้ อย่างไรก็ตาม ขณะนี้ ยังไม่สามารถยืนยันได้ว่า วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถทำนายการลดลงของแรงเฉือนขึ้นเนื่องจากการเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตรอบๆ ได้ เพราะการเสื่อมลดแรงยึดเหนี่ยวอาจจะเกิดตลอดแนวเหล็กกับคอนกรีตที่ผ่านจุดต่อ แต่ การใช้อีลิเมนต์รอยต่อ (joint element) ที่รอยต่อระหว่างคานกับเสา นั้นสามารถพิจารณาการรูดไถลของเหล็กกับคอนกรีตที่ตรงรอยต่อเท่านั้น แต่ไม่อาจพิจารณาการเสื่อมลดแรงยึดเหนี่ยวตลอดความยาวเหล็กในจุดต่อได้

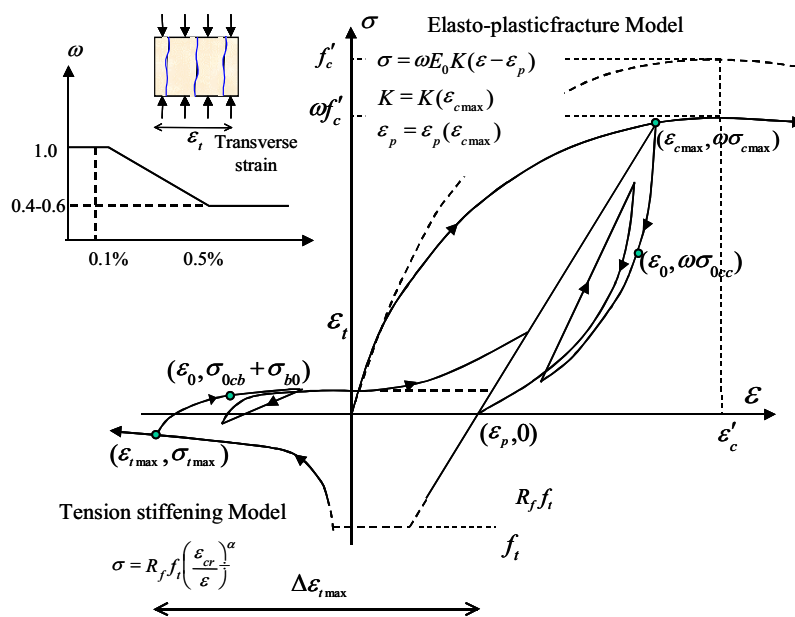
5.3 สรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงแนวราบแบบสลับทิศของจุดต่อเช่นกัน ผลการวิเคราะห์พบว่า วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถทำนายความสัมพันธ์

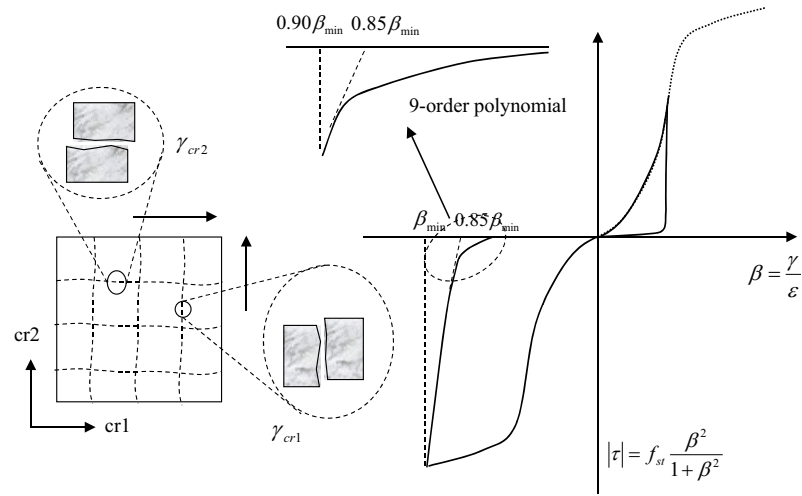
ระหว่างแรงแนวราบและระยะเคลื่อนตัวได้ถูกต้องพอสมควร โดยสามารถทำนายได้ทั้ง envelope และ cyclic loops นอกจากนี้ยังสามารถทำนายการเกิดรอยร้าวและความเสียหายได้แม่นยำพอสมควร



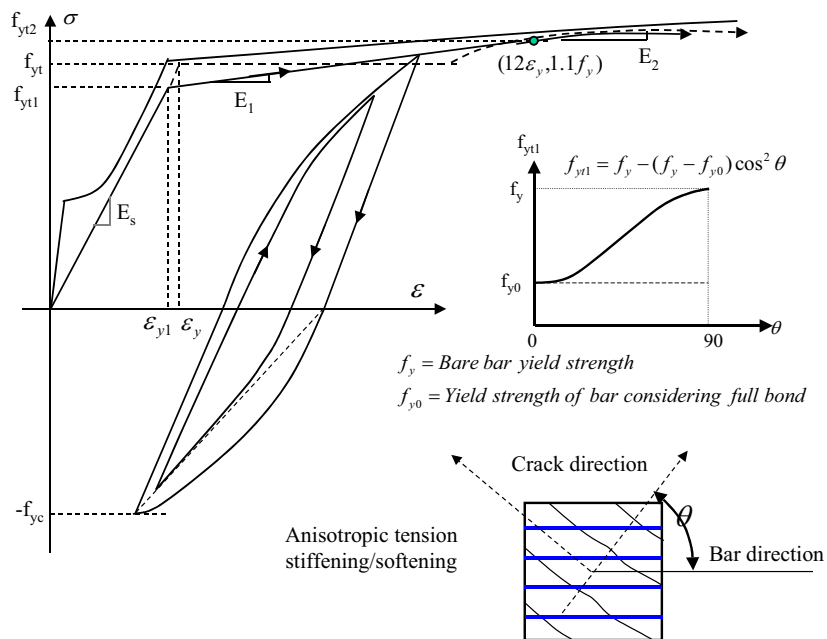
รูป 5.1 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของชิ้นทดสอบจุดต่อคาน-เสา



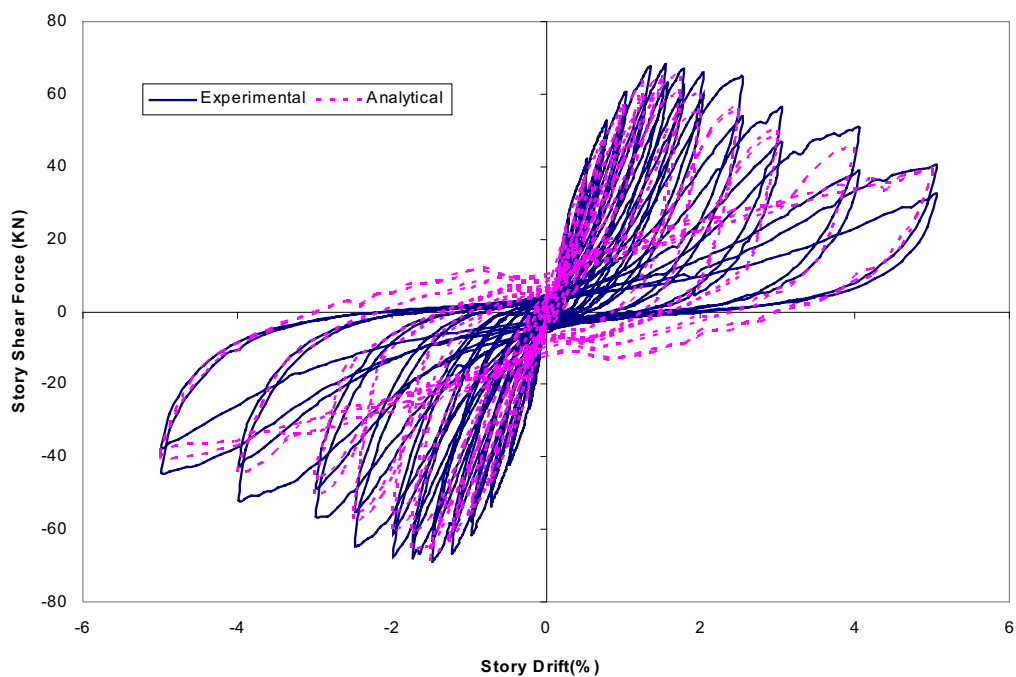
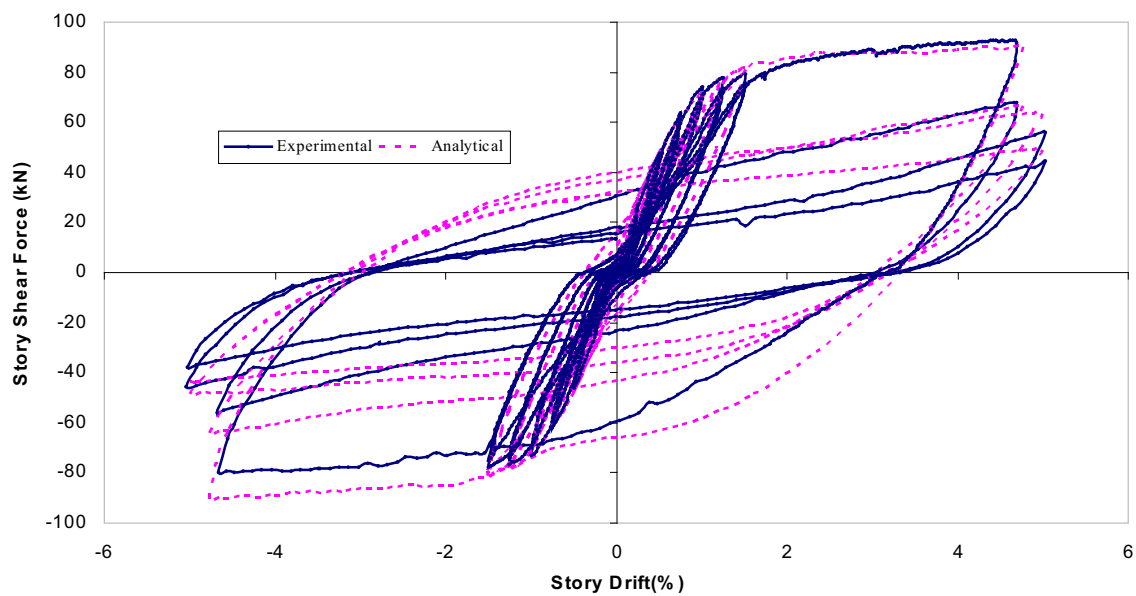
รูป 5.2 แบบจำลองการรับอัด-แรงดึงสำหรับความเค้นตั้งฉากที่ขนานและตั้งฉากกับรอยร้าว



รูป 5.3 แบบจำลองหน่วยแรงเฉือน

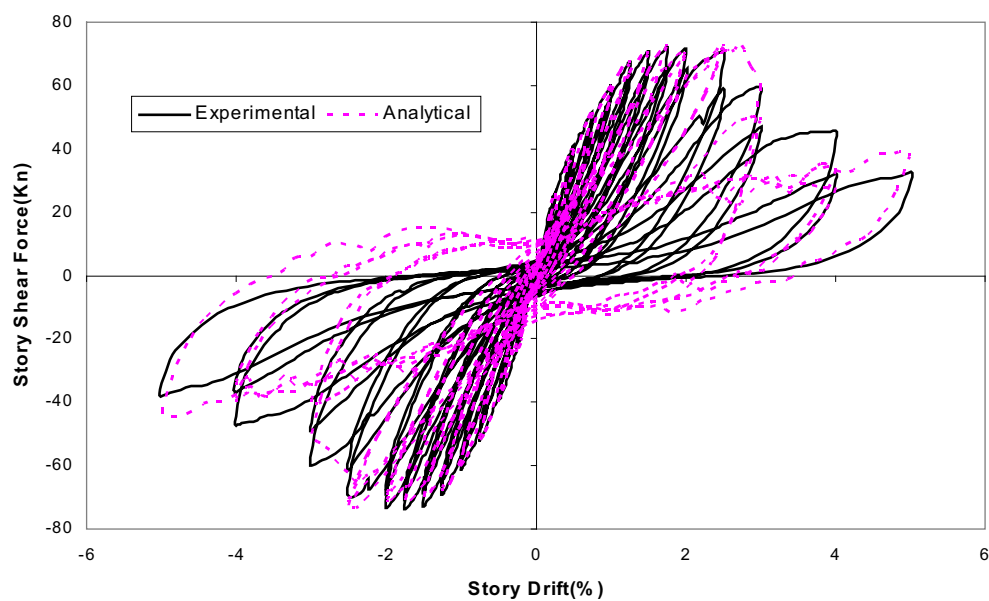


รูป 5.4 แบบจำลองเหล็กเสริม

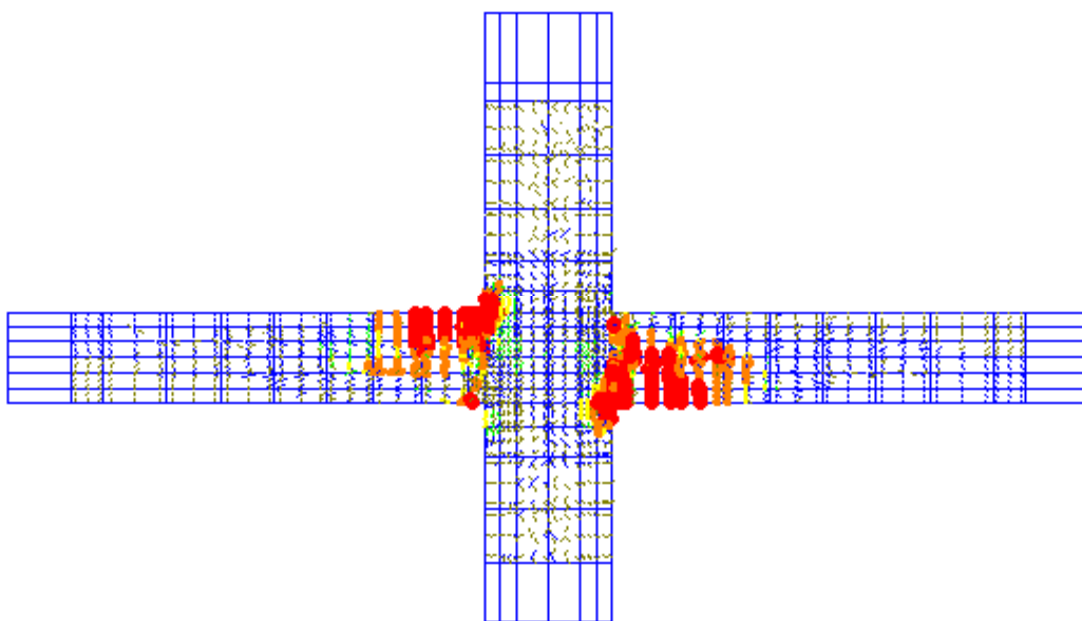


รูป 5.5 ผลการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ชิ้นทดสอบที่ 1

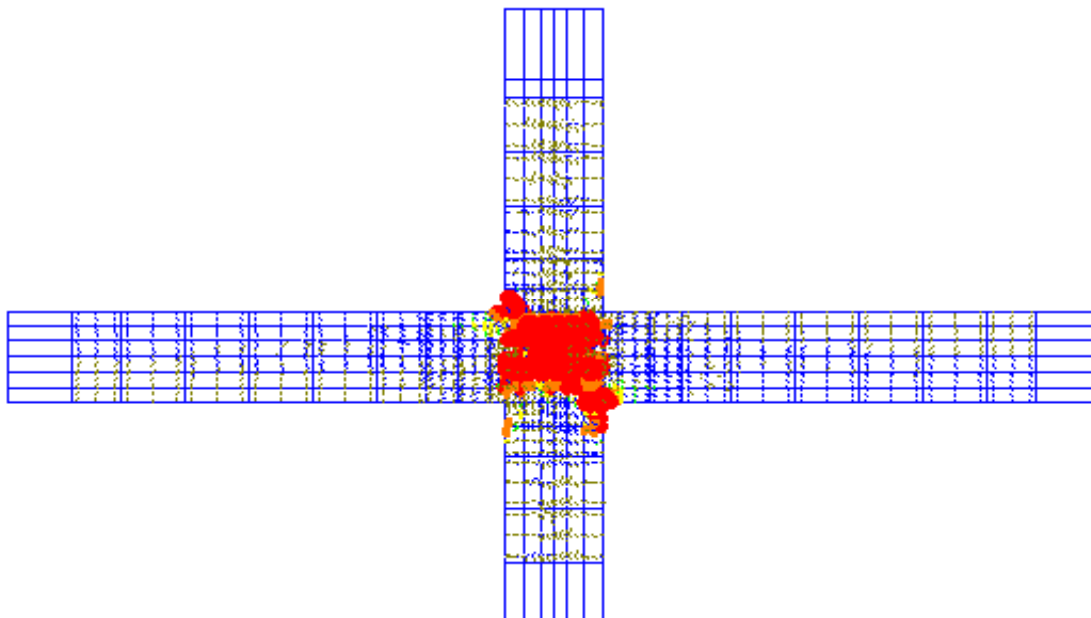
รูป 5.6 ผลการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ชิ้นทดสอบที่ 2



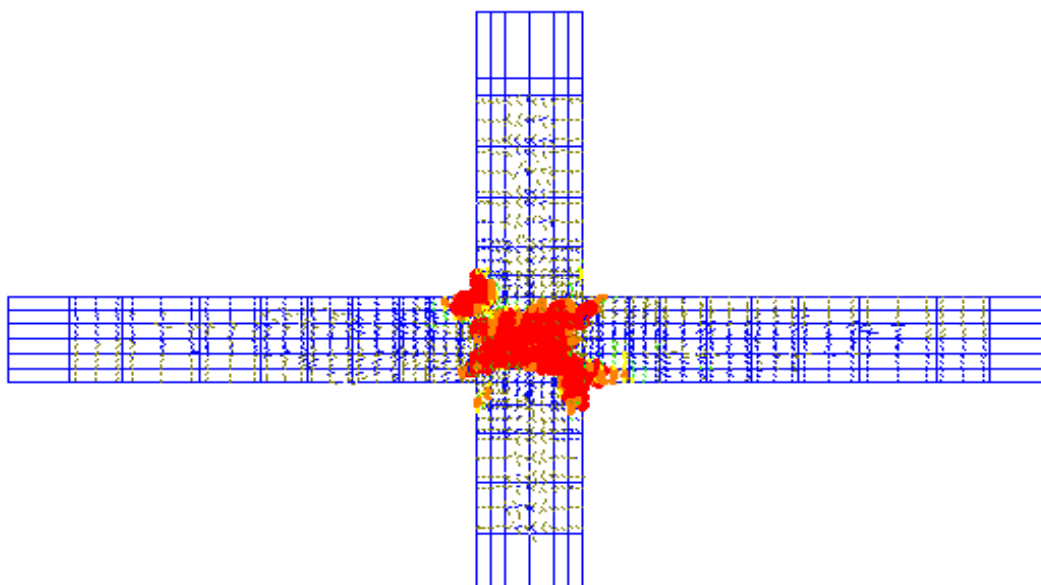
รูป 5.7 ผลการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ชั้นทดสอบที่ 3



รูป 5.8 รอยร้าวของชั้นทดสอบที่ 1 จากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์



รูป 5.9 รอยร้าวของชั้นทดสอบที่ 2 จากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์



รูป 5.10 รอยร้าวของชั้นทดสอบที่ 3 จากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

บทที่ 6

การวิเคราะห์จุดต่อพื้น-เสาด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นของจุดต่อพื้นไร้คาน-เสานั้น ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ทั้งจุดต่อพื้นค.ส.ล. ไร้คานกับเสา และ จุดต่อพื้นคอนกรีตอัดแรงไร้คานกับเสา ในกรณีจุดต่อพื้นค.ส.ล. ไร้คานกับเสานั้น ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบผลของวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับการทดลองในอดีต การทดลองที่เลือกมาได้แก่ การทดลองของ Farhey et al. ส่วนในกรณีจุดต่อพื้นอัดแรงไร้คานกับเสานั้น ผู้วิจัยได้ใช้การทดลองพื้นไร้คาน-เสาในงานวิจัยย่อยที่ 4 ของผู้วิจัยเองเป็นตัวเปรียบเทียบ

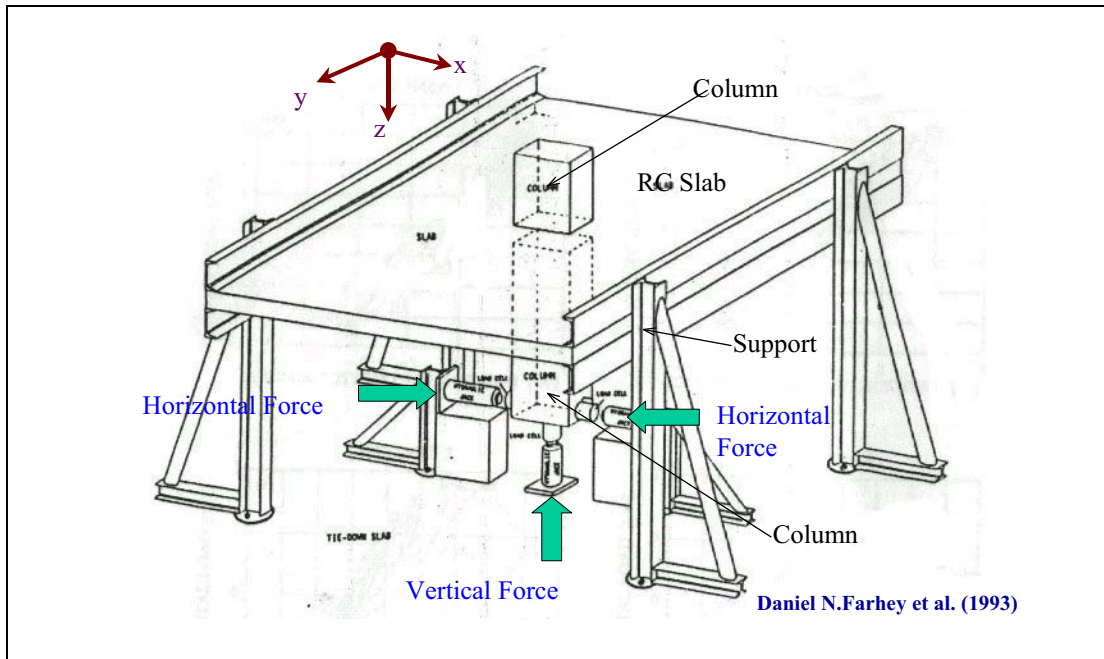
6.1 การวิเคราะห์จุดต่อพื้น ค.ส.ล. ไร้คาน-เสาด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

6.1.1 ที่มา

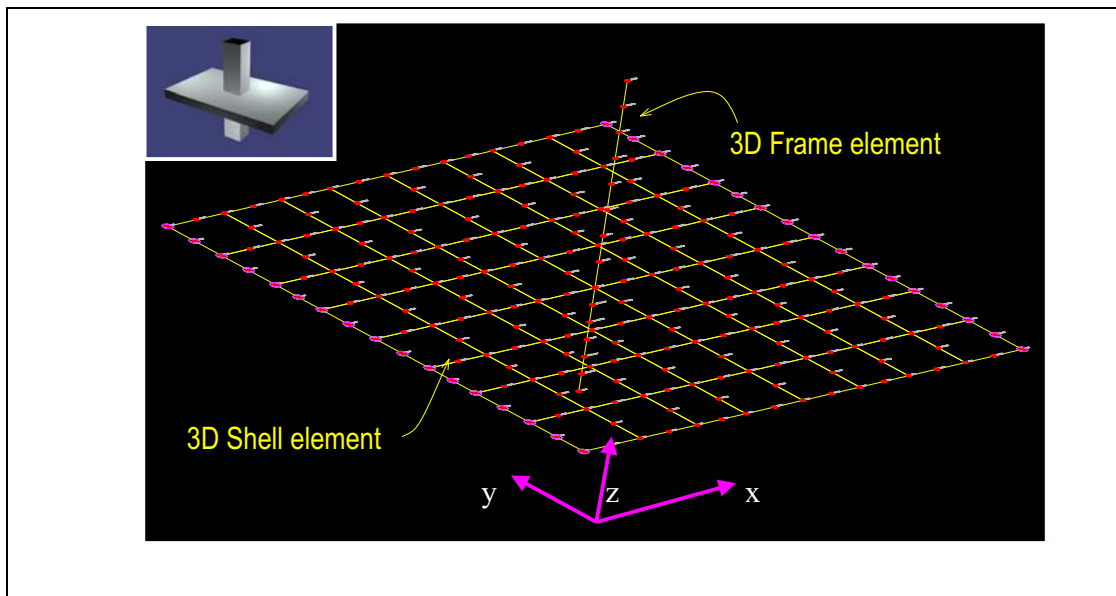
การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ของจุดต่อพื้นค.ส.ล. ไร้คาน-เสานั้น ผู้วิจัยได้ใช้การทดลองของ Farhey et al. เป็นตัวเปรียบเทียบ รูป 6.1 แสดงขนาด และ การจัดวางเหล็กเสริมในชั้นทดสอบ ซึ่งเป็นพื้น ค.ส.ล. รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.69×2.69 ม. มีความหนา 8 ซม. เสามีขนาด 20×30 ซม. เหล็กเสริมมีปริมาณ และ การจัดเรียงเหมือนกันทั้งสองทิศทาง การให้น้ำหนักบรรทุกจะเป็นการผลักเสาที่ปลายด้านล่างไปกลับแบบสลับทิศ คณะผู้วิจัยได้เลือกชั้นทดสอบที่ 1 และ 3 จากการทดลองนี้ โดยชั้นทดสอบทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันทุกประการยกเว้นแต่มีการให้แรงอัดตามแนวแกนขนาด 2.5 ดันแก่เสาของชั้นทดสอบที่ 3 แต่ไม่ให้แรงอัดตามแนวแกนแก่เสาในชั้นทดสอบที่ 1 การจัดชั้นทดสอบ และ การให้น้ำหนักบรรทุกแสดงในรูป 6.1 โดยการให้แรงกระทำทั้งแรงตามแนวแกน และ แรงตามแนวราบ จะกระทำที่ปลายด้านล่างของเสา

6.1.2 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์จุดต่อพื้น ค.ส.ล. ไร้คาน-เสา

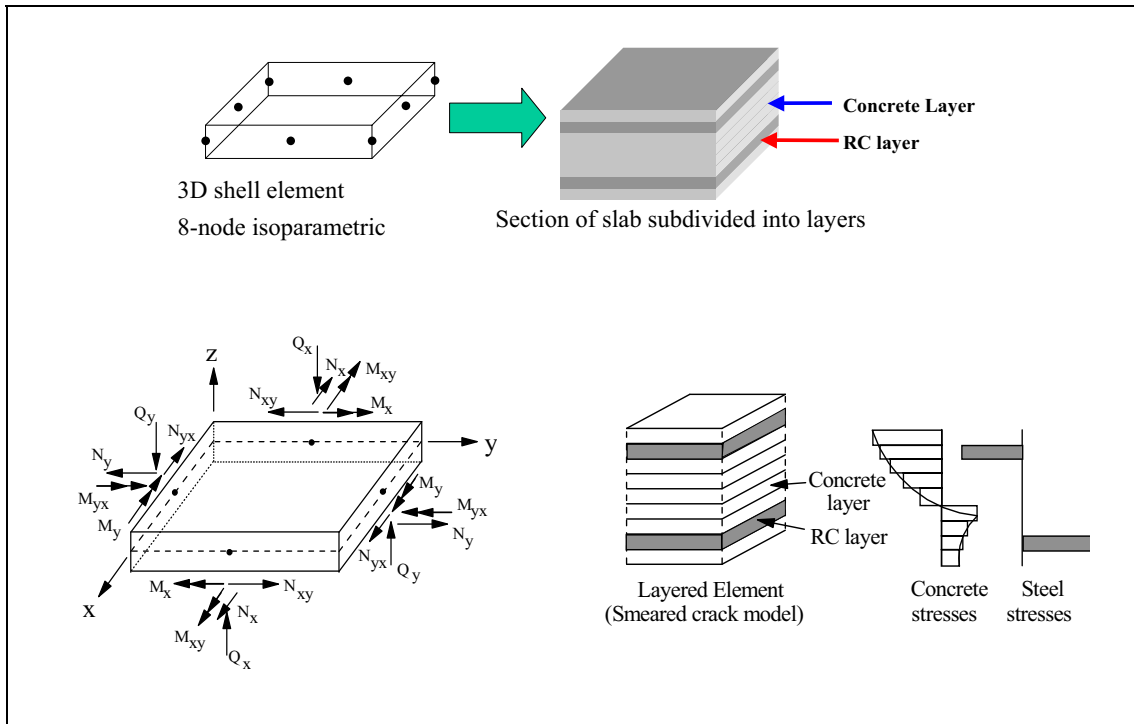
แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของรอยต่อเสา-พื้นแสดงดังในรูป 6.2 การจำลองแผ่นพื้นใช้อีลิเมนต์เปลือกบางไอโซพารามетริกแบบ 8 จุดต่อ ส่วนการจำลองเสาใช้อีลิเมนต์เฟรมไอโซพารามетริกแบบ 3 จุดต่อ อีลิเมนต์เปลือกบางไอโซพารามетริกที่ใช้จำลองพื้นประกอบด้วย 6 ชั้นตามแนวความลึกดังแสดงใน รูป 6.3



รูป 6.1 ขนาด และ การจัดวางเหล็กเสริมในชิ้นทดสอบ

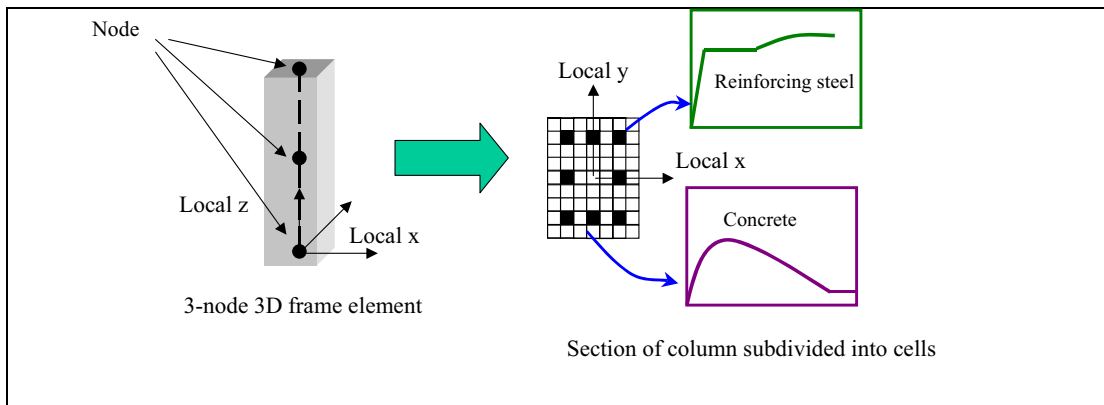


รูป 6.2 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของรอยต่อพื้น-เสา



รูป 6.3 อีลิเมนต์เปลือกบางไอโซพารามตริกชนิด 8 จุดต่อ

แต่ละชั้นสามารถจำแนกเป็น ชั้นคอนกรีต หรือ ชั้นคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นเป็นความเค้นระนาบแบบ 2 มิติ (2D plane stress) ในกรณีที่เป็นชั้นคอนกรีต ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นความเค้นของคอนกรีตโดยลำพัง แต่หากเป็นชั้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ความเค้นที่เกิดขึ้นจะเป็นผลรวมของความเค้นในคอนกรีตและเหล็กเสริม เมื่อรวม (Integrate) ความเค้นที่เกิดขึ้นในทุกชั้นเข้าด้วยกัน จะได้โมเมนต์ และ แรงเฉือนที่กระทำต่อแผ่นพื้น ส่วนอีลิเมนต์เฟรมไอโซพารามตริกชนิด 3 จุดต่อ ใช้หลักการทำนองเดียวกันกล่าวคือหน้าตัดของอีลิเมนต์เฟรมจะถูกแบ่งเป็นเซลล์หลายๆเซลล์ ดังแสดงใน รูป 6.4 โดยแต่ละเซลล์สามารถจำแนกเป็นเซลล์คอนกรีต หรือ เซลล์คอนกรีตเสริมเหล็ก ความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละเซลล์เป็นความเค้น 1 มิติตามแนวแกน ซึ่งอาจเป็นความเค้นดึงหรือความเค้นอัดก็ได้ ขึ้นอยู่กับความเครียดของเซลล์นั้นว่าเป็นความเครียดดึงหรือความเครียดอัด



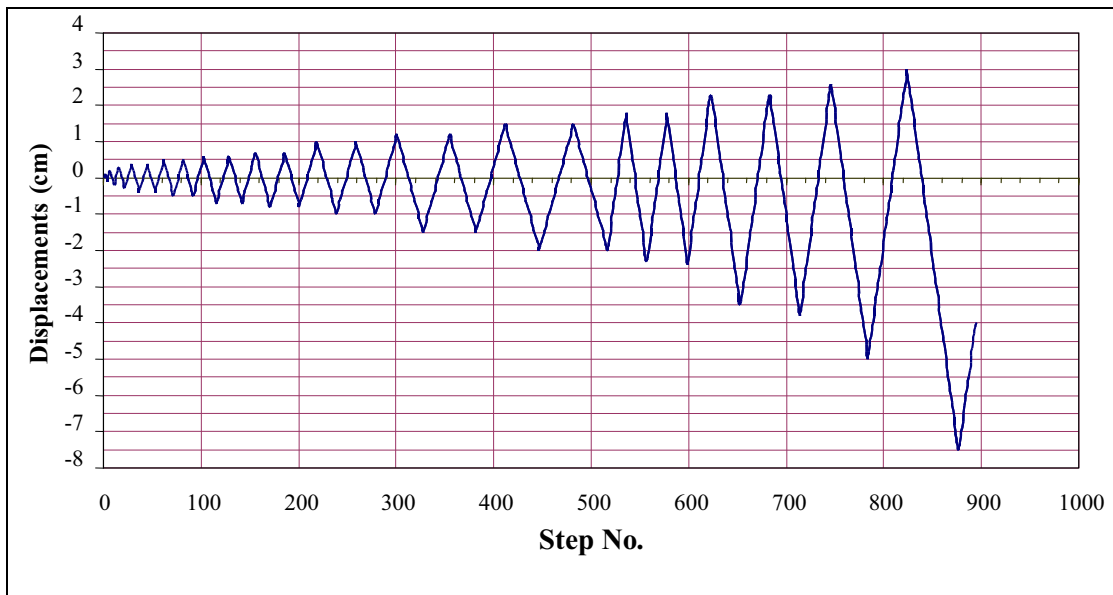
รูป 6.4 อีลิเมนต์เฟรมไอโซพารามตริกชนิด 3 จุดต่อ

หากเป็นเซลล์คอนกรีต ความเค้นของเซลล์ก็เป็นความเค้นของคอนกรีตโดยลำพัง แต่หากเป็นเซลล์คอนกรีตเสริมเหล็ก ความเค้นของเซลล์จะเป็นผลรวมของความเค้นของคอนกรีตและเหล็กเสริม เมื่อรวมความเค้น(Integrate) ความเค้นของทุกเซลล์เข้าด้วยกันจะได้ โมเมนต์ แรงตามแนวแกน และ แรงเฉือนที่กระทำต่อหน้าตัดของเสา ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ใช้ในอีลิเมนต์เปลือกบางและ อีลิเมนต์เฟรม เป็นความสัมพันธ์แบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear) โดยเป็นความสัมพันธ์แบบ 1 มิติ (uniaxial stress-strain relation) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตประกอบด้วย 1. แบบจำลองแรงดึงตั้งฉากกับรอยร้าว (tensile stress model) และ 2. แบบจำลองหน่วยแรงอัดขนานกับรอยร้าว (compressive stress model) และ 3. แบบจำลองหน่วยแรงเฉือนตามแนวรอยร้าว (shear stress model) ดังแสดงใน รูป 5.2-5.3 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมนั้นประกอบด้วยแบบจำลองภายใต้แรงดึงและแรงอัดดังแสดงใน รูป 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบไม่เชิงเส้นดังที่ได้อธิบายมานี้จะทำให้การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถพิจารณาผลของรอยร้าว (Cracking) ในคอนกรีต การบดอัด (Crushing) ในคอนกรีต และการคราก (Yielding) ของเหล็กเสริมได้อย่างถูกต้อง

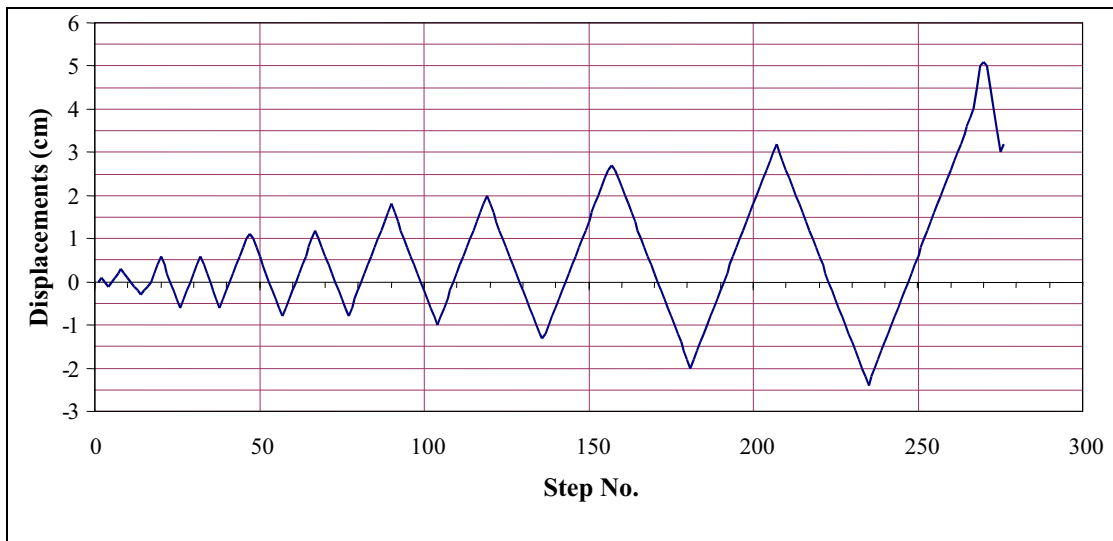
รูปแบบการให้การเคลื่อนตัวของชิ้นทดสอบที่ 1 และ 3 แสดงดังในรูป 6.5 และ 6.6 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการให้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรสลับทิศไปกลับ จากรายงานของการทดลองนี้ ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในชิ้นทดสอบที่ 1 เท่ากับ 357.82 กก./ซม.² ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในชิ้นทดสอบที่ 3 เท่ากับ 153.37 กก./ซม.² ส่วนค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตไม่มีในรายงานการทดลอง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงใช้สมการที่เสนอโดย Okamura และ Maekawa ในการคำนวณกำลังรับแรงดึงจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดังนี้

$$f_t = \alpha(0.58f_c)^{2/3}$$

โดยที่ f_c เป็นค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต, f_t เป็นค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และ α เป็นตัวคูณลดกำลังรับแรงดึงเนื่องจากผลของการบ่มและสถานะแวดล้อม โดย α มีค่าอยู่ระหว่าง 0.65 ถึง 0.9 ในการวิเคราะห์ได้พิจารณาทั้งกรณีที่ใช้ $\alpha = 0.65$ และ 0.9 ซึ่งจะให้ค่าขอบล่างและขอบบนตามลำดับ



รูป 6.5 รูปแบบการให้ระยะเคลื่อนตัวกับขั้นตอนที่ 1

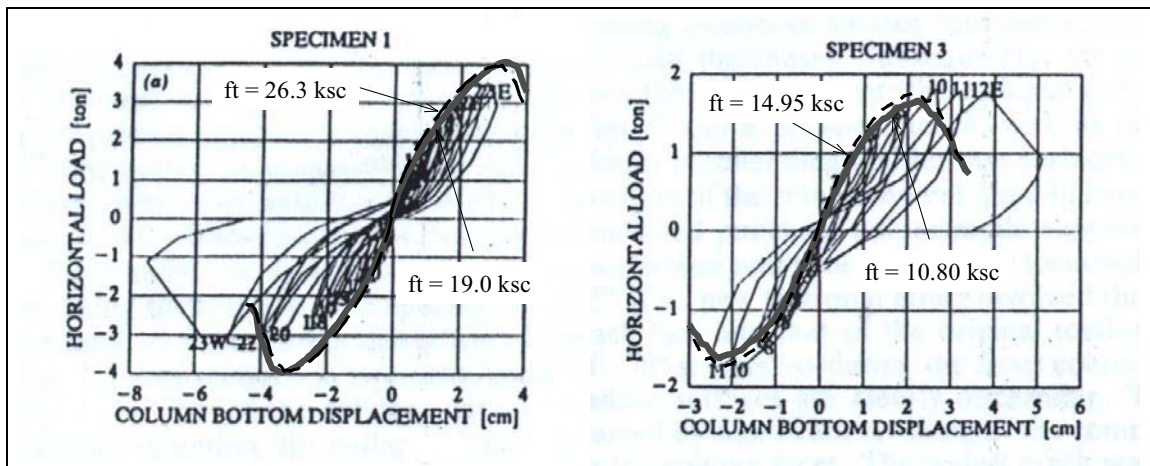


รูป 6.6 รูปแบบการให้ระยะเคลื่อนตัวกับขั้นตอนที่ 3

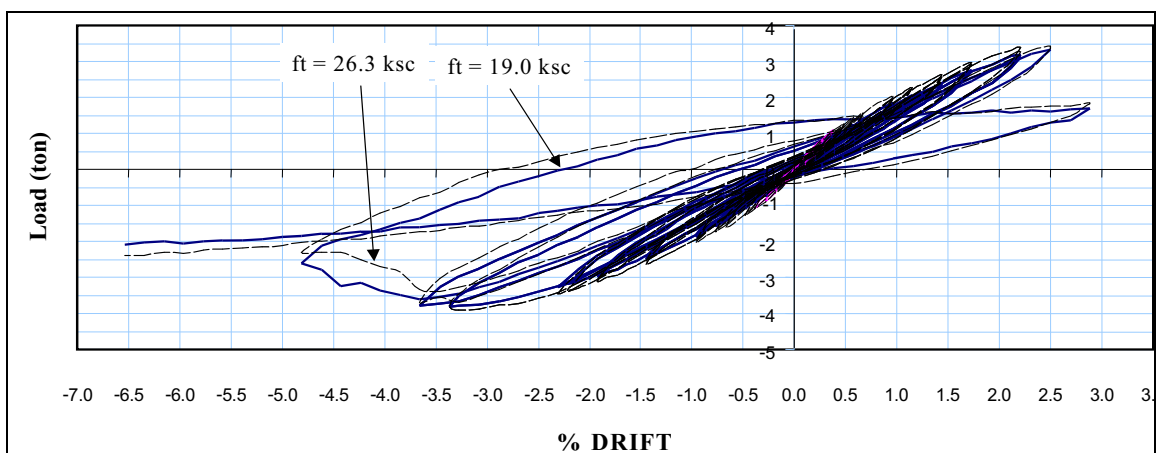
6.1.3 ผลการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ได้ใช้การให้น้ำหนักบรรทุกทั้งในลักษณะโยกตัวไปข้างหน้าอย่างเดียว (Push Over) และ การให้น้ำหนักบรรทุกแบบสลับทิศ (Cyclic) เพื่อดูผลของการวนรอบของระยะเคลื่อนตัวต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง รูป 6.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับผลการทดสอบในกรณีให้น้ำหนักบรรทุกในลักษณะโยกตัวไปข้างหน้าอย่างเดียวสำหรับชิ้นทดสอบที่ 1 และ 3 จากรูปจะเห็นว่า ไฟไนต์อีลีเมนต์ทำนายกำลังที่และความแข็งแกร่งสูงกว่าการทดลองในกรณีของชิ้นทดสอบที่ 1 แต่ทำนายกำลังและความแข็งแกร่งได้ใกล้เคียงกับชิ้นทดสอบที่ 3 ส่วนกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีผลไม่มากนักต่อพฤติกรรมของชิ้นทดสอบ

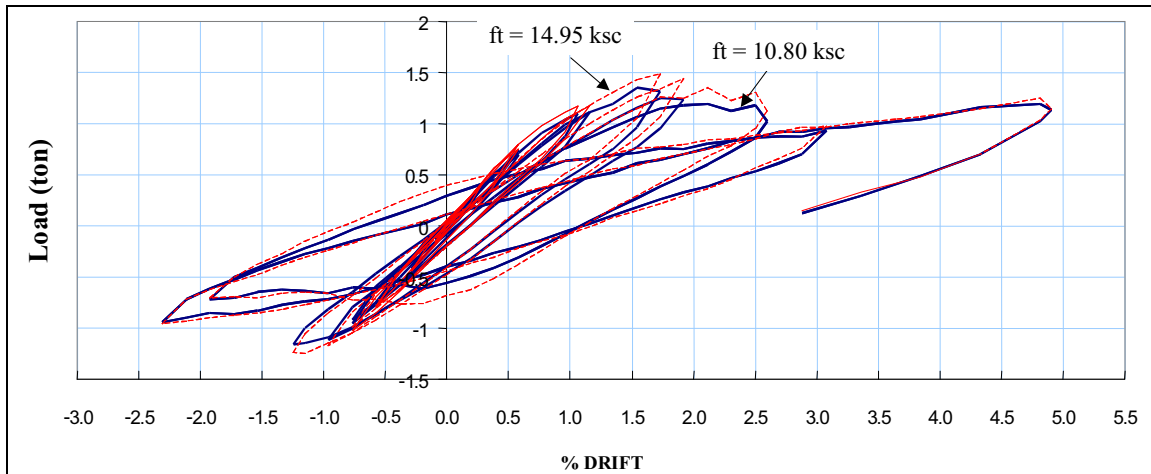
รูป 6.8 และ 6.9 แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในกรณีการให้น้ำหนักบรรทุกไปกลับแบบสลับทิศแก่ชิ้นทดสอบที่ 1 และ ชิ้นทดสอบที่ 3



รูป 6.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์กับผลการทดสอบในกรณี Push Over ของชิ้นทดสอบที่ 1 และ 3



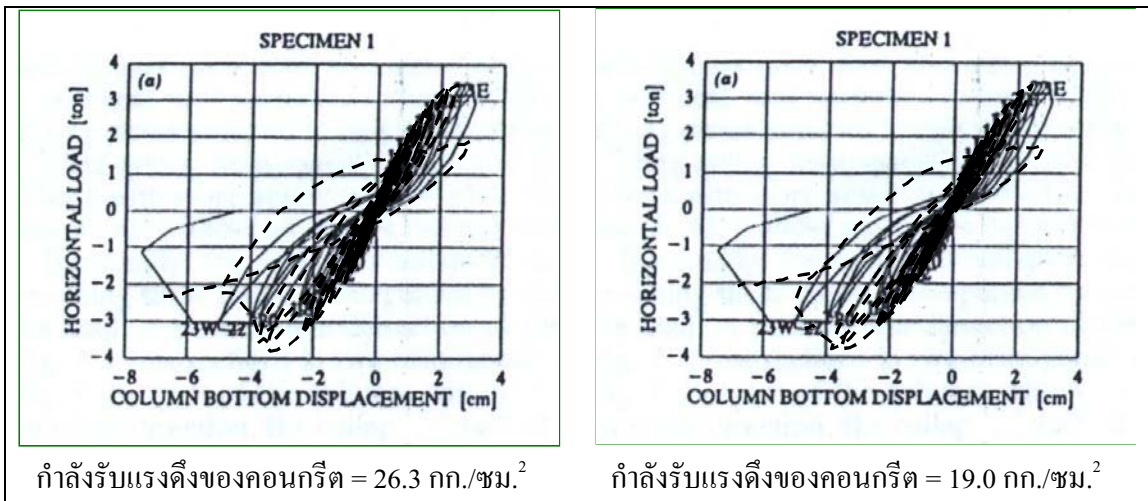
รูป 6.8 เปรียบเทียบการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์ของชิ้นทดสอบที่ 1 ภายใต้แรงกระทำแบบสลับทิศ



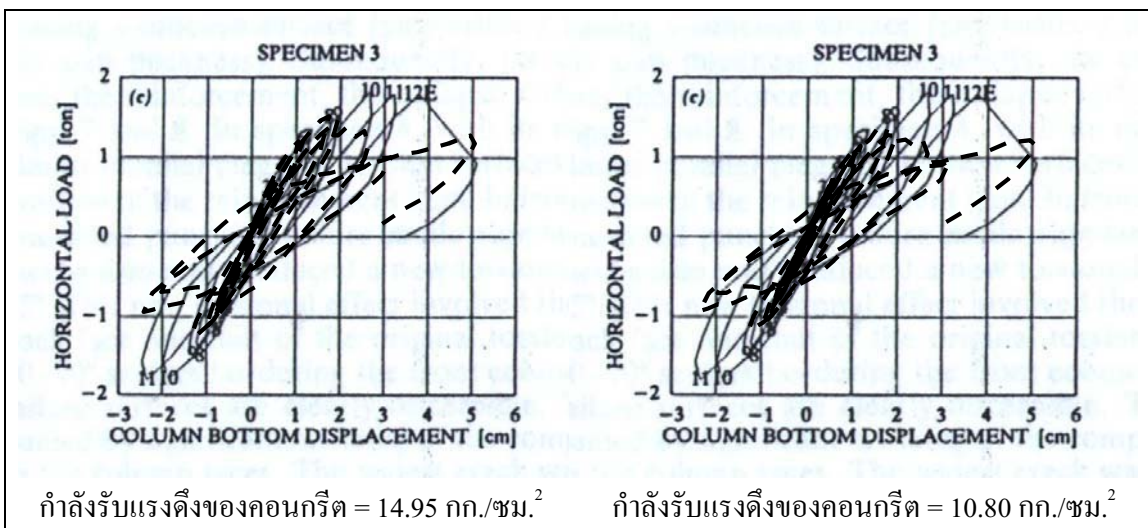
รูป 6.9 เปรียบเทียบการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ของชิ้นทดสอบที่ 3 ภายใต้แรงกระทำแบบสลับทิศ

จากรูปจะเห็นว่าวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถทำนายพฤติกรรมไร้เชิงเส้นของชิ้นทดสอบได้ และสามารถทำนายพฤติกรรมการวนรอบและ การลดลงของความแข็งแรงในแต่ละรอบการเคลื่อนตัวได้ จากรูปจะเห็นได้ว่าค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตขบล่างและขอบบนมีผลต่อพฤติกรรมของชิ้นทดสอบไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่ค่ากำลังรับแรงดึงที่สูงกว่ามีแนวโน้มจะให้กำลังและความแข็งแรงสูงกว่าเล็กน้อย รูป 6.10 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์แบบสลับทิศกับผลการทดสอบของชิ้นทดสอบที่ 1

ส่วนรูป 6.11 เป็นของชิ้นทดสอบที่ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อคิดผลของการวนรอบการเคลื่อนตัววิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถทำนายพฤติกรรมของชิ้นทดสอบที่ 1 ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองทั้งในแง่ของน้ำหนักกระทำสูงสุด ความแข็งแรง และ เส้นวนรอบ แต่ทำนายพฤติกรรมของชิ้นทดสอบที่ 3 ต่ำกว่าความเป็นจริง



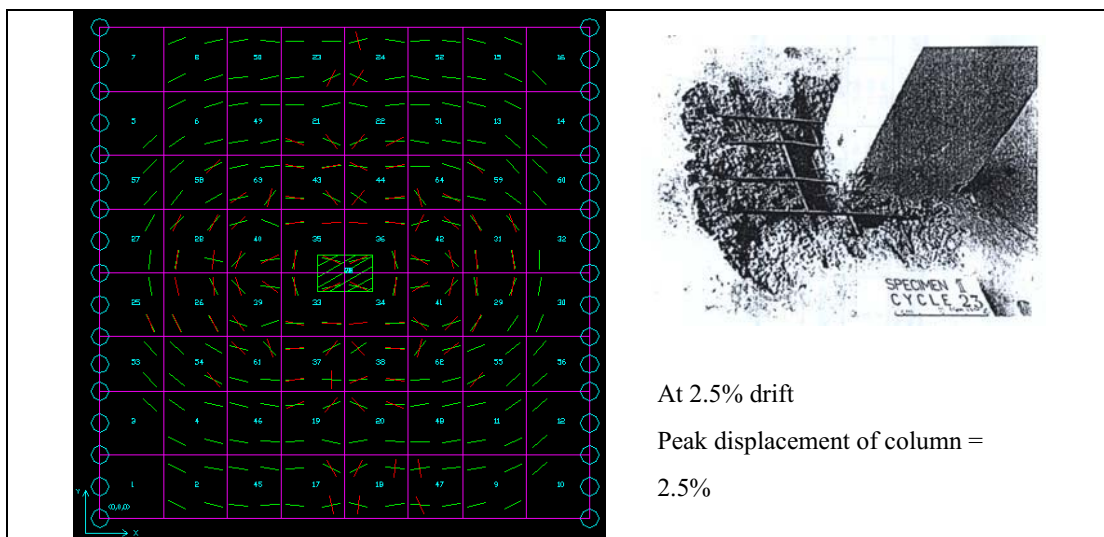
รูป 6.10 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบของชิ้นทดสอบที่ 1



รูป 6.11 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบของชิ้นทดสอบที่ 3

6.1.4 การศึกษาความเสียหายในบริเวณรอยต่อพื้น-เสา

ข้อดีประการหนึ่งของการใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ คือทำให้วิศวกรสามารถสำรวจ ตรวจสอบ รอยร้าว ความเค้น ความเครียด การเคลื่อนตัวและ สภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นกับทุกส่วนของ โครงสร้าง ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากในการปรับปรุงโครงสร้างให้สามารถต้านทานแรงกระทำ จากแผ่นดินไหวได้ รูป 6.12 แสดงรอยร้าวที่ผิวบนของแผ่นพื้นซึ่งได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ลักษณะของรอยร้าวแสดงให้เห็นการเกิดรอยร้าวเอียงวนรอบเสา ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเท โมเมนต์บิดและ โมเมนต์ดัดระหว่างเสาและพื้น การถ่ายเทแรงดังกล่าวนี้ทำให้เกิดรอยร้าวจำนวนมาก บริเวณรอยต่อเสา-พื้น ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเสียหายเป็นอย่างมาก และเป็นบริเวณที่อ่อนแอของ โครงสร้างซึ่งสามารถนำไปสู่การวิบัติแบบแรงเฉือนทะลุได้ จากการทดสอบรอยต่อแผ่นพื้น ไร้คาน-เสา ในงานวิจัยย่อยที่ 2 นั้นพบว่า การวิบัติแบบแรงเฉือนทะลุปรากฏขึ้นเมื่อเหล็กเสริมทางด้านบนของแผ่น พื้นเกิดการคราก



รูป 6.12 รอยร้าวที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเหล็กอยู่ในสภาวะคราก จะมีความสามารถในการยับยั้งการเติบโต ของรอยร้าวได้ไม่ดีเท่าในตอนที่เหล็กยังอยู่ในช่วงอีลาสติก ดังนั้นความเสียหายในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น และ คอนกรีตสูญเสียความเป็นเนื้อเดียวกัน และอ่อนกำลังลงมากขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการวิบัติแบบ แรงเฉือนทะลุได้โดยง่าย

รูป 6.13 แสดงการโก่งตัวของแผ่นพื้นซึ่งคำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ จากรูปจะเห็น ได้ว่าแผ่นพื้นมีการโก่งตัวใน 2 ทิศทางถึงแม้ว่าการให้ระยะเคลื่อนตัวที่ปลายเสาจะให้ในทิศเดียวกันก็ตาม

การโก่งตัวในแนวขวางนี้เป็นผลมาจากการยึดรั้งจากที่รองรับ เมื่อแผ่นพื้นมีการโก่งตัวใน 2 ทิศทาง จึงมีความโค้ง(Curvature) และโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นทั้งสองทิศทาง ซึ่งสังเกตได้จากการเกิดรอยร้าวทั้งตามแนวยาวและแนวขวางบนผิวบนของแผ่นพื้นตามที่ได้อธิบายมาใน งานวิจัยย่อยที่ 4 นอกจากนี้จะเห็นว่า การโก่งตัวมีค่ามากในบริเวณรอยต่อ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความโค้ง และ โมเมนต์ดัดใน 2 ทิศทาง จึงมีค่ามาก เนื่องจากว่าแรงเฉือนคืออัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ต่อหน่วยความยาว ($V = dM/dx$) บริเวณรอยต่อเสา-พื้นมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความโค้งและโมเมนต์มาก จึงมีแรงเฉือนกระทำมาก นำไปสู่การวิบัติแบบแรงเฉือนทะลุที่บริเวณดังกล่าว

6.2 การวิเคราะห์จุดต่อพื้นคอนกรีตอัดแรง ไร้คาน-เสาโดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

6.2.1 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์จุดต่อพื้นคอนกรีตอัดแรงไร้คาน-เสา

ในงานวิจัยย่อยที่ 4 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองจุดต่อพื้นอัดแรงไร้คาน-เสา ขนาด 3/5 ของขนาดจริง (รูป 6.14) ในงานวิจัยย่อยที่ 6.2 นี้ผู้วิจัยได้วิเคราะห์จุดต่อพื้นคอนกรีตอัดแรงไร้คาน-เสา โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ เนื่องจากการอัดแรงให้กับคอนกรีตทำได้โดยการดึงลวดอัดแรง (tendon) ภายหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว การจำลองการอัดแรง (prestressing) ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์กระทำได้โดยการค่าความเครียดเริ่มต้น (prestrain) ให้แก่ลวดอัดแรง แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้มี 3 แบบจำลองได้แก่แบบจำลอง 1-3 เพื่อศึกษาผลของความเกร็งที่รอยต่อระหว่างพื้นและเสา แบบจำลองทั้ง 3 นี้แสดงดังใน รูป 6.15 รายละเอียดแบบจำลองทั้ง 3 มีดังนี้

แบบจำลองที่ 1 จำลองเสาด้วยอีลิเมนต์เฟรมไอโซพารามेटริก และ จำลองแผ่นพื้นด้วยอีลิเมนต์เปลือกบางไอโซพารามेटริก การเชื่อมต่อระหว่างเสาและแผ่นพื้นใช้จุดต่อปลายเสายึดกับจุดต่อของแผ่นพื้นที่ตำแหน่งเดียวกัน โดยมีได้พิจารณาผลของความเกร็ง (rigidity) ของรอยต่อระหว่างเสาและพื้น

แบบจำลองที่ 2 จำลองเสาด้วยอีลิเมนต์เฟรมไอโซพารามेटริก และ จำลองพื้นด้วยอีลิเมนต์เปลือกบางไอโซพารามेटริก การเชื่อมต่อระหว่างเสาและแผ่นพื้นทำโดยใช้เชื่อมจุดต่อปลายเสาเข้ากับอีลิเมนต์เฟรมไอโซพารามेटริกที่มีสตีเฟนสเชิงคดสูงที่ใส่เข้าไปในระนาบของพื้น โดยอีลิเมนต์เฟรมไอโซพารามेटริกนี้มีความยาวเท่ากับมิติของเสา

แบบจำลองที่ 3 จำลองเสาด้วยอีลิเมนต์ทรงตันไอโซพารามेटริก (Isoparametric 3D solid element) และ จำลองพื้นด้วยอีลิเมนต์เปลือกบางไอโซพารามेटริก แบบจำลองนี้สามารถจำลองการเชื่อมต่อระหว่างเสากับพื้นได้ถูกต้องที่สุด แต่ก็ใช้เวลาในการวิเคราะห์มากที่สุด เนื่องจากอีลิเมนต์ทรง

ต้นไอโซพารามетริกที่ใช้มีจุดต่อ 20 จุดต่อ และ มีจำนวนดีกรีความอิสระ (Degree of freedom) มากถึง 60 ต่อ 1 อีลีเมนต์

แบบจำลองที่ 1 นี้เป็นชนิดที่ง่ายที่สุด และ ใช้เวลาน้อยที่สุด ส่วนแบบจำลองที่ 3 นั้นใช้เวลานานเนื่องจากจำลองเสาด้วยอีลีเมนต์ทรงตัน เนื่องจากในการทดลองไม่ปรากฏการวิบัติหรือพฤติกรรมไร้เชิงเส้นที่สำคัญของเสา ดังนั้น ผู้วิจัย จึงกำหนดให้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมในอีลีเมนต์ทรงตันเป็นแบบเชิงเส้น เพื่อเป็นการประหยัดเวลาการคำนวณของคอมพิวเตอร์

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต และ เหล็กเสริม สำหรับอีลีเมนต์เฟรม และ อีลีเมนต์เปลือกบาง เป็นแบบชนิดไร้เชิงเส้น ประกอบด้วยเส้น envelope และ cyclic loop เช่นเดียวกับที่ใช้ในการวิเคราะห์จุดต่อพื้น ค.ส.ล. ไร้คาน-เสา การให้น้ำหนักบรรทุกเป็นทั้งแบบผลักไปในทิศทางเดียว (monotonic push over) กระทำกับทั้ง 3 แบบจำลอง และแบบเป็นวัฏจักร ดังแสดงใน รูป 4.5 ซึ่งกระทำกับแบบจำลองที่ 3 เท่านั้น

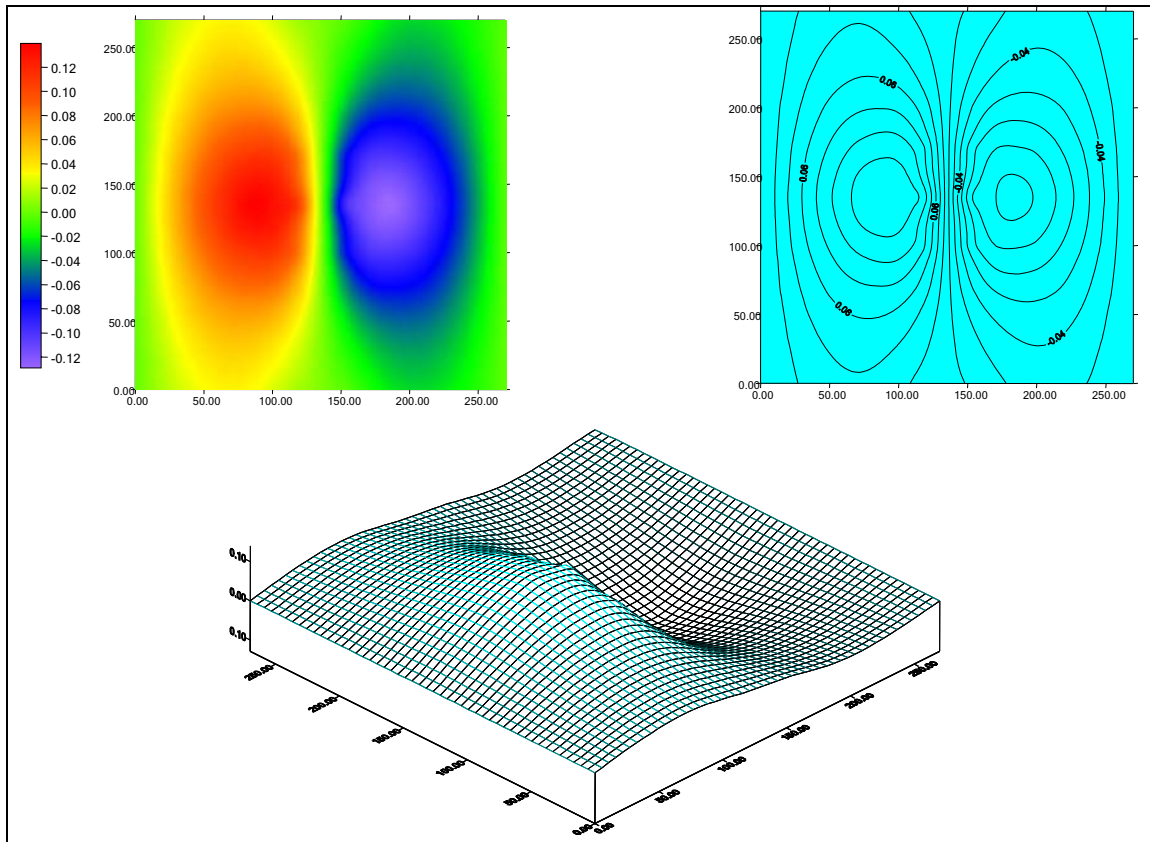
6.2.2 ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 ภายได้แรงกระทำในทิศทางเดียว (monotonic push over) แสดงเปรียบเทียบกันดังใน รูป 6.16 จากรูปจะเห็นว่า แบบจำลองที่ 1 ซึ่งไม่ได้พิจารณาผลของความเกร็งที่รอยต่อระหว่างเสากับแผ่นพื้นให้ค่าสถิติเ็นสและกำลังรับแรงที่ต่ำจากค่าที่ได้จากการทดลองเป็นอย่างมาก ในขณะที่แบบจำลองที่ 2 และ 3 ทำนายสถิติเ็นสเริ่มต้น การลดลงของสถิติเ็นส และ กำลังรับน้ำหนักได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองเป็นอย่างมาก แต่ยังไม่สามารถทำนายการตกลงของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกอื่นเนื่องจากการวิบัติแบบแรงเฉือนทะลุ (punching shear failure) ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าความเกร็งที่รอยต่อระหว่างเสาและพื้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อพฤติกรรมของจุดต่อ และ การจำลองความเกร็งนี้โดยใช้อีลีเมนต์เฟรมที่มีค่าสถิติเ็นสสูงในระนาบของอีลีเมนต์เปลือกบางก็ให้ผลการวิเคราะห์ในระดับที่ต้องใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ 3 อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ 3 ยังไม่สามารถทำนายการลดลงของน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากการวิบัติแบบแรงเฉือนทะลุที่เกิดขึ้นในแผ่นพื้นรอบๆเสาได้ เนื่องจากอีลีเมนต์เปลือกบางไม่สามารถแสดงพฤติกรรมรอยร้าวนอกระนาบ (out-of-plane shear crack) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการวิบัติแบบแรงเฉือนทะลุ แบบจำลองที่สามารถการวิบัติแบบแรงเฉือนทะลุได้นั้น ต้องจำลองแผ่นพื้นด้วยอีลีเมนต์ทรงตัน 3 มิติ ซึ่งสามารถพิจารณาการเกิดรอยร้าวในทิศทางใดๆได้ ผลการวิเคราะห์แผ่นพื้นภายได้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักรแสดงใน รูป 6.17 จากรูปจะเห็นว่าแบบจำลองที่ 3 สามารถแสดงพฤติกรรมแบบเป็นวัฏจักรได้อย่างถูกต้อง ซึ่งรวมทั้งการลดลง

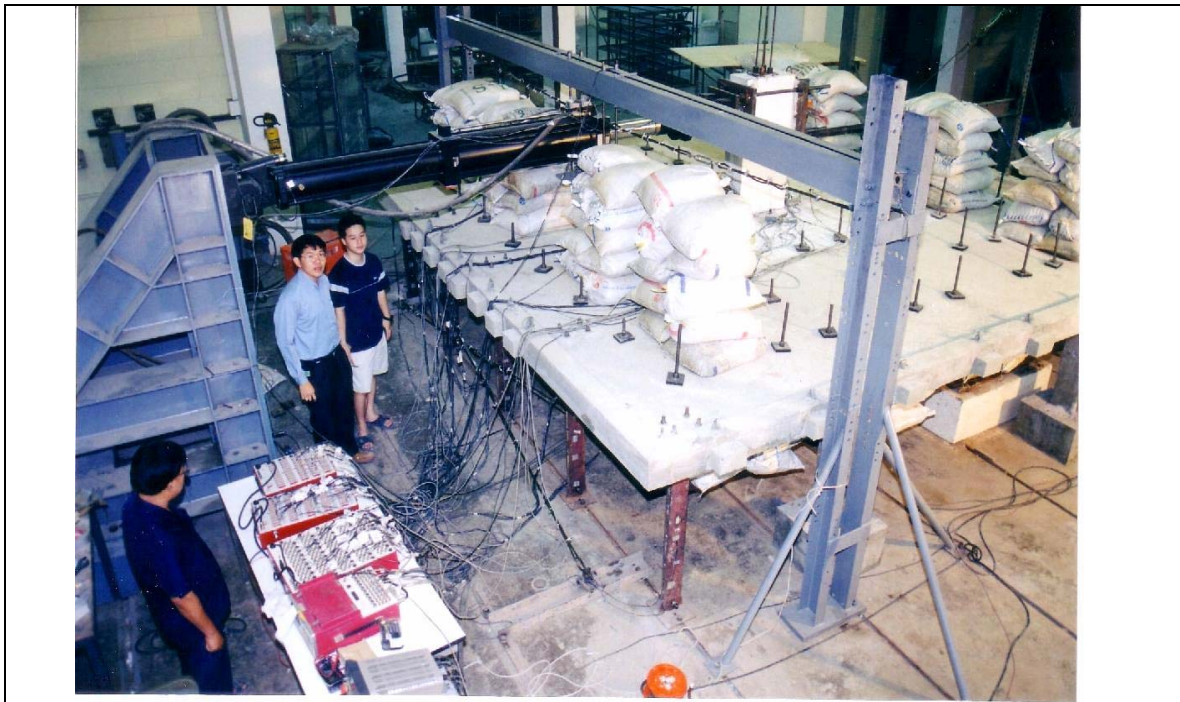
ของสติฟเนสในรอบการเคลื่อนตัว และ การสลายพลังงานในรอบการเคลื่อนตัว รูป 6.18 แสดงการโก่งตัวของแผ่นพื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ที่รอบการเคลื่อนตัว 2.0% จะเห็นว่าแผ่นพื้นฝังตรงข้ามกับทิศที่แรงกระทำมีการยกตัวสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณรอบเสา การยกตัวนี้ก่อให้เกิดความโค้ง (curvature) ในทุกทิศทาง และ ทำให้ความเครียดเฉือนนอกระนาบ (out-of-plane shear strain) ซึ่งนำไปสู่การเกิดแรงเฉือนทะลุ รูป 6.19 6.20 และ 6.21 แสดง ความโค้งในทิศทาง x-x ทิศทาง y-y และ ทิศทาง x-y ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนรูปเหล่านี้มีค่าสูงและกระจุกตัวอยู่ตัวอยู่ในบริเวณพื้นรอบๆเสาเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งตรงกับผลการทดลองที่แสดงให้เห็นถึงความเสียหายและรอยร้าวในบริเวณพื้นรอบๆเสา การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์จึงเป็นวิธีที่ให้ผลที่เชื่อถือได้

6.3 สรุปผลงานวิจัย

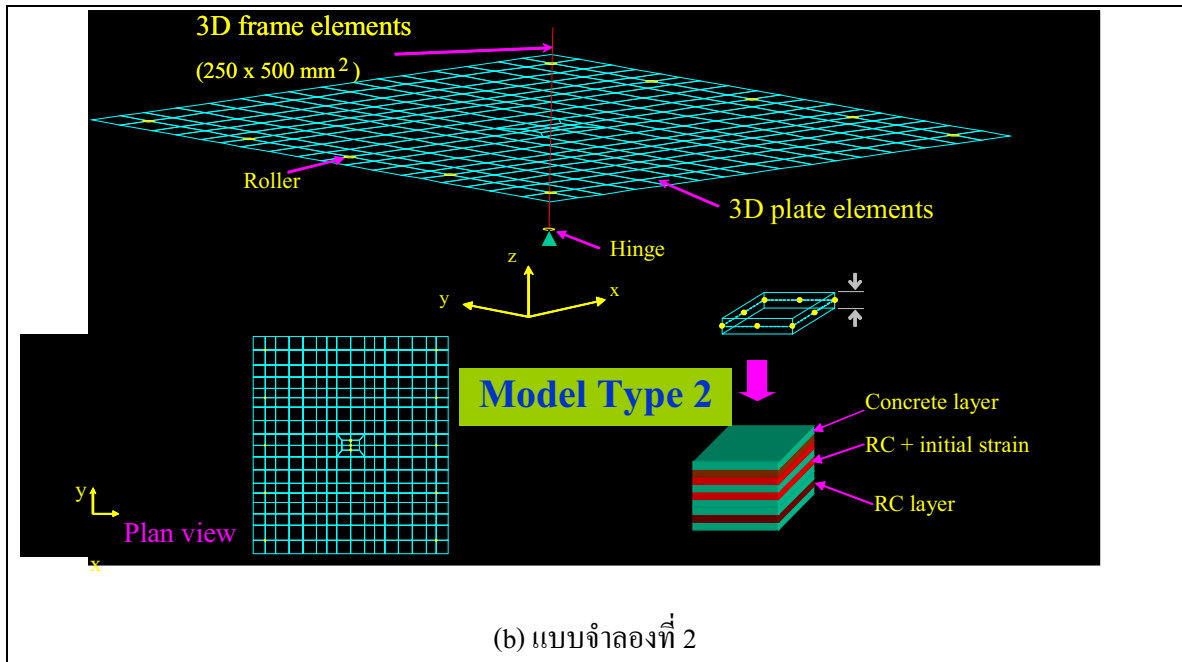
งานวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการนำวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์มาใช้วิเคราะห์หาพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นของจุดต่อพื้นไร้คาน-เสา โดยทำการวิเคราะห์ทั้งพื้นที่เป็นระบบคอนกรีตเสริมเหล็ก และ พื้นคอนกรีตอัดแรง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างเสากับพื้น ซึ่งต้องใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่เหมาะสม จึงจะสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวได้อย่างถูกต้อง โดยทั่วไป พบว่าวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สามารถทำนายพฤติกรรมการเกิดรอยร้าว กำลังของจุดต่อ การลดลงของความแข็งแรง รอบการเคลื่อนตัว ความเสียหายเฉพาะที่ที่จุดต่อพื้น-เสาได้ถูกต้องทั้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัว และ วงรอบวัฏจักร งานวิจัยในขั้นตอนต่อไปจะเน้นการทำนายแรงเฉือนเฉาะทะลุ



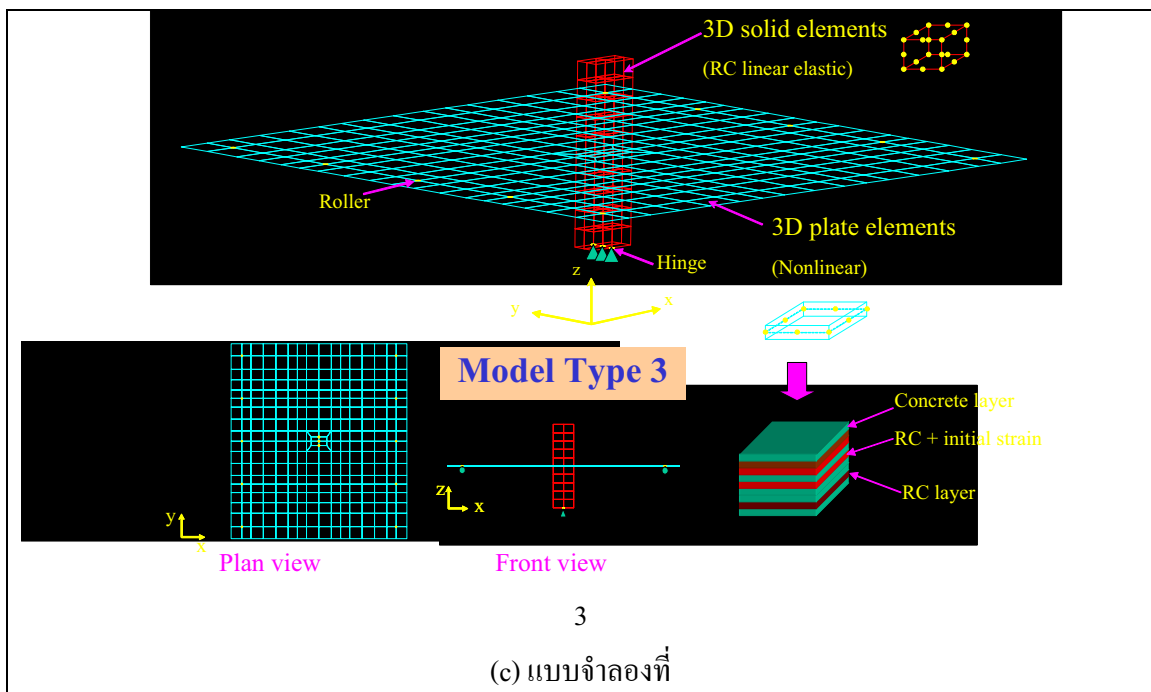
รูป 6.13 การโก่งตัวที่คำนวณได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์



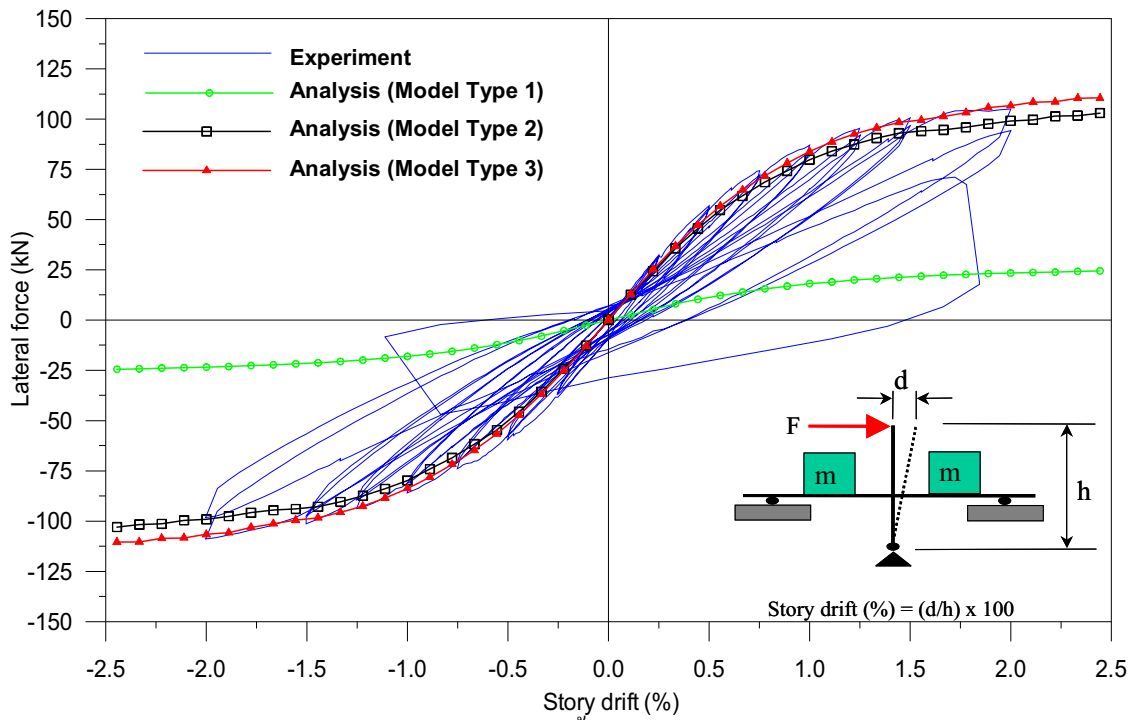
รูป 6.14 การทดลองจุดต่อพื้นคอนกรีตอัดแรงไร้คาน-เสา



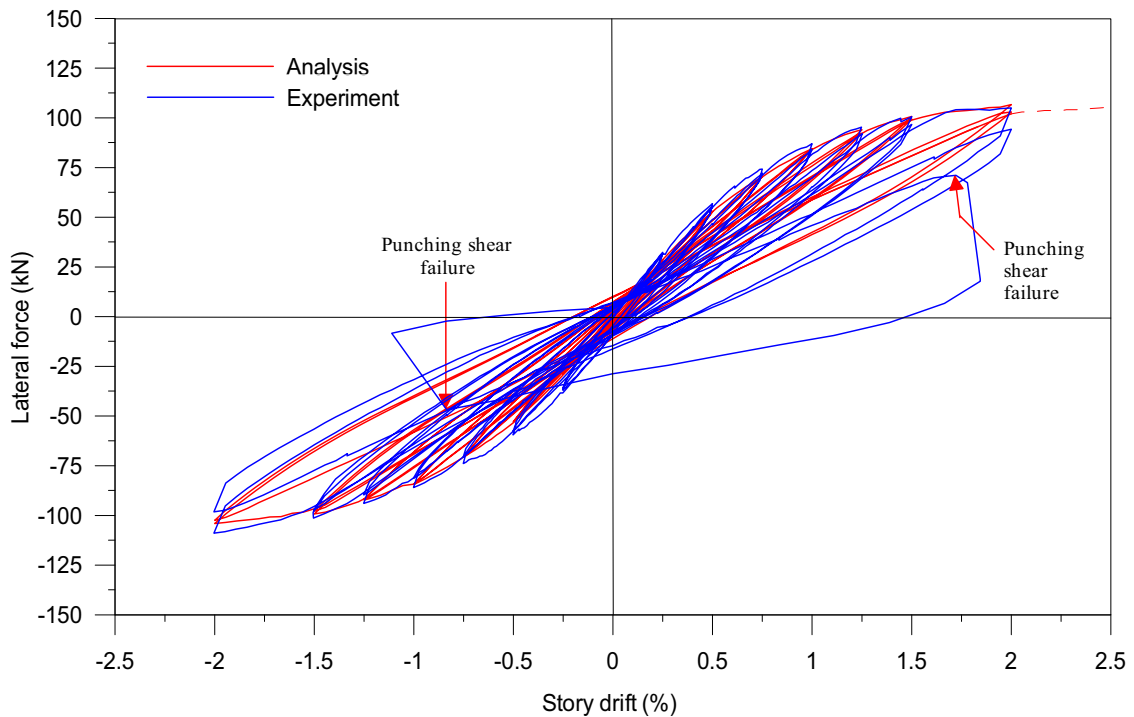
รูป 6.15 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์จุดต่อพื้นไร้คาน-เสาชนิดต่างๆ



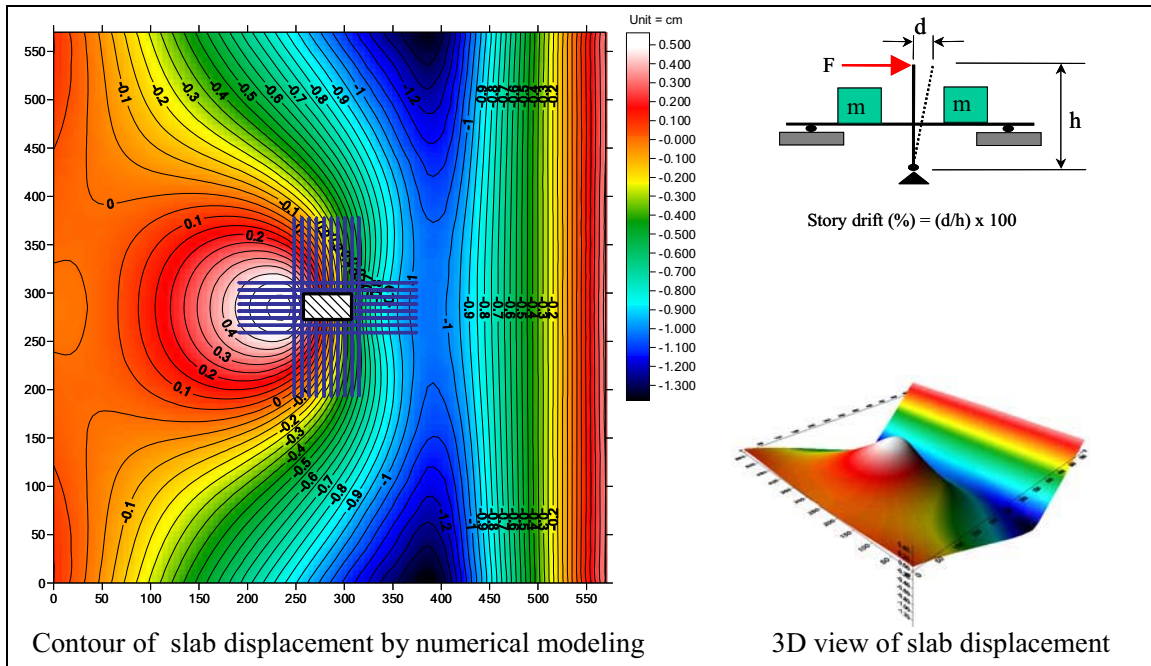
รูป 6.15 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์จุดต่อพื้นไร้คาน-เสาชนิดต่างๆ



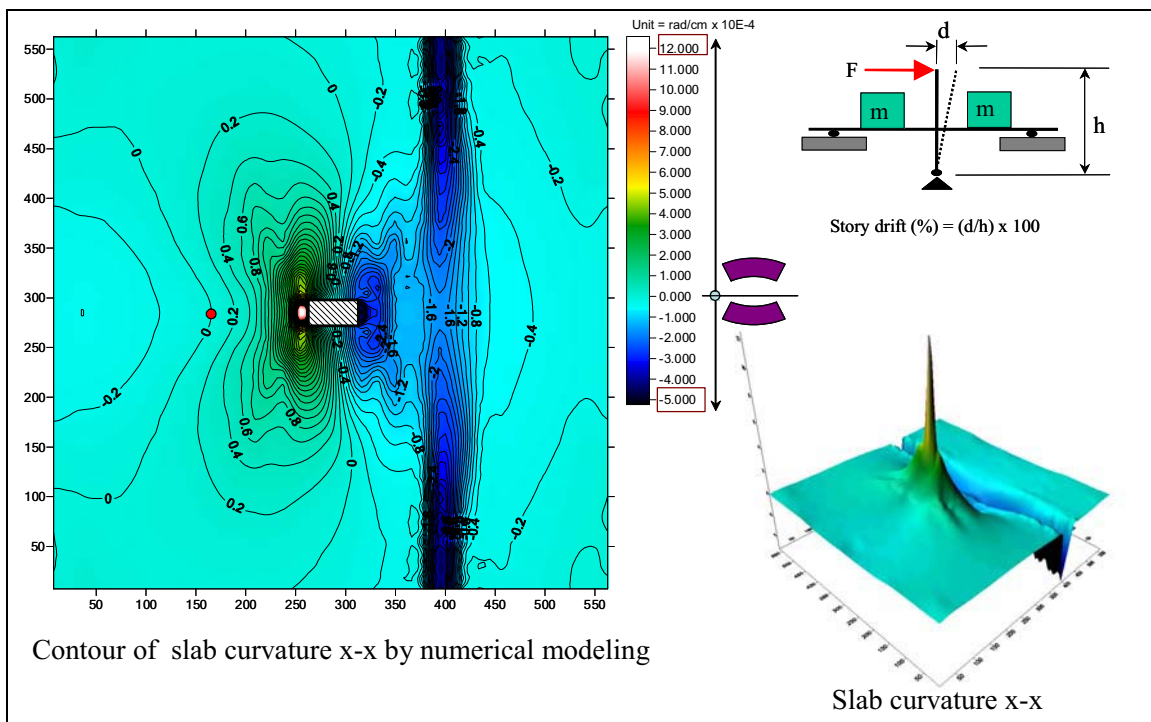
รูป 6.16 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 กับผลการทดลองภายใต้แรงกระทำทิศทางเดียว



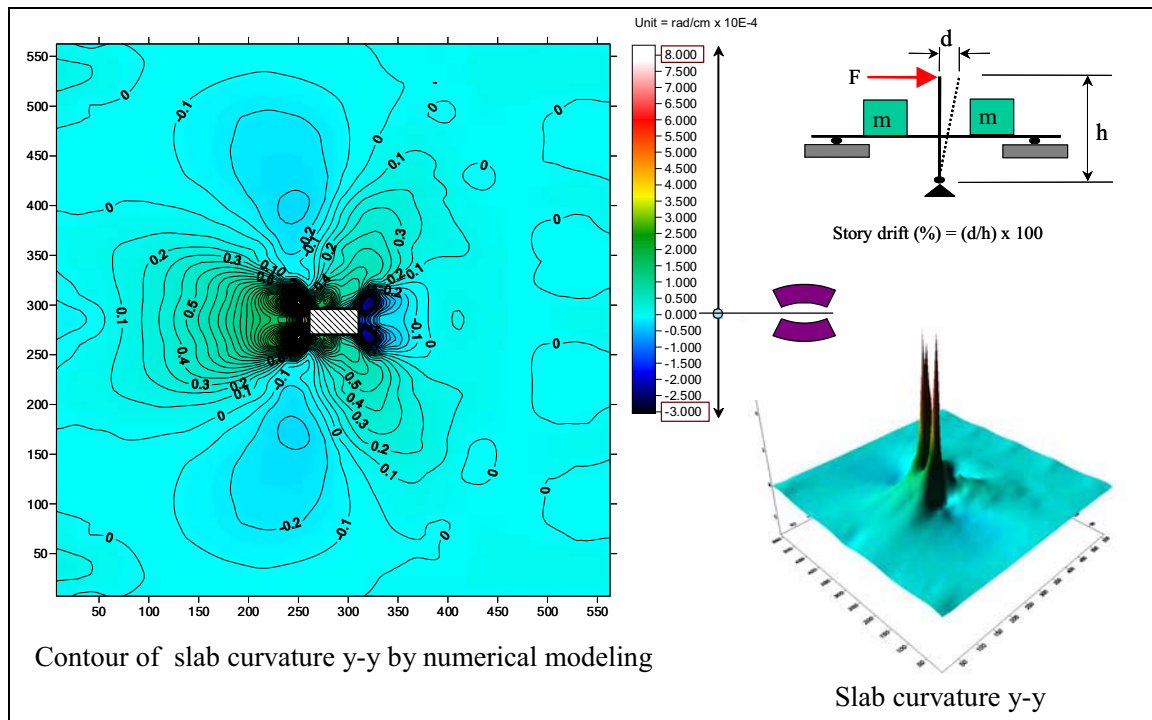
รูป 6.17 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 3 กับผลการทดลองภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร



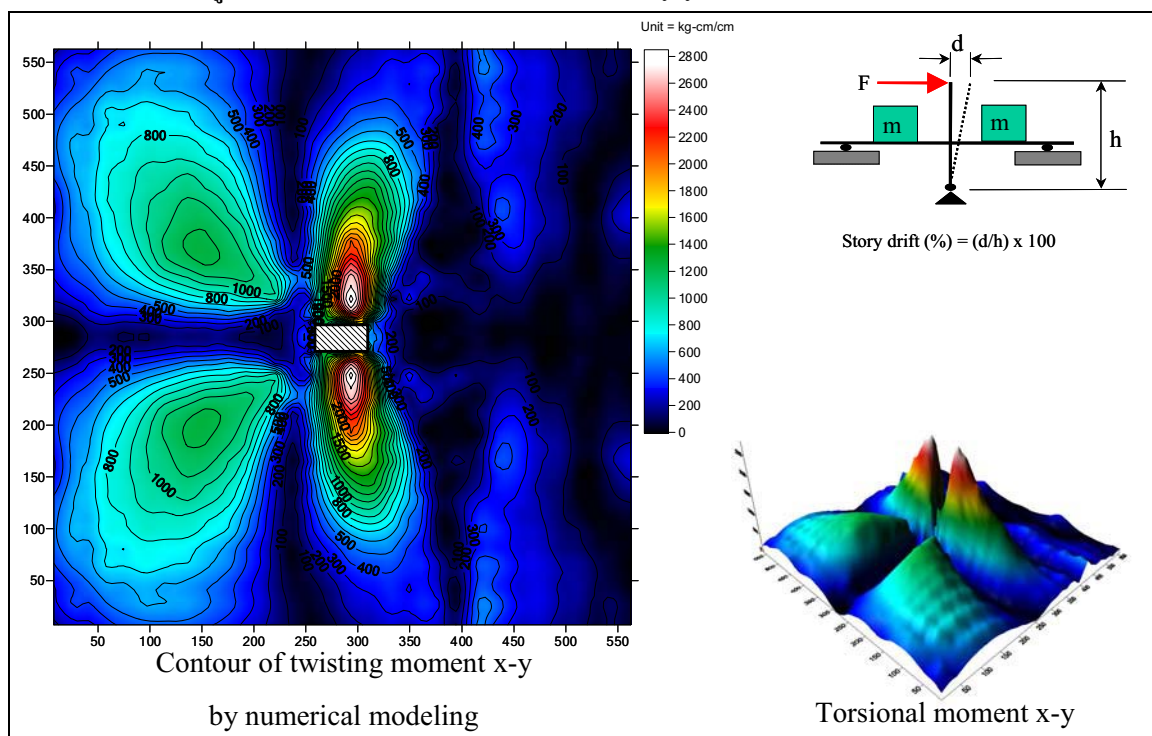
รูป 6.18 การโค้งตัวของแผ่นพื้นจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์



รูป 6.19 ความโค้งของแผ่นพื้นในทิศทาง x-x จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์



รูป 6.20 ความโค้งของแผ่นพื้นในทิศทาง y-y จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์



รูป 6.21 ความโค้งของแผ่นพื้นในทิศทาง x-y จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

6.4 เอกสารอ้างอิง

- Farhey, D. N., Adin, M. A., and Yankelevsky, D.Z. (1993), "RC flat slab-column subassemblages under lateral loading", *Journal of Structural Engineering*, Vol.119, No. 6, pp.1903-1916.
- Okamura, H. and Maekawa, K. (1990), *Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete*
- Hueste, M.B.D., Wight, J.K. (1999), "Nonlinear punching shear failure model for interior slab-column connections", *Journal of Structural Engineering*, Vol.125, No.9, pp.997-1008.
- Hammill, N. and Ghali, A. (1994), "Punching shear resistance of corner slab-column connections", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 6, pp. 697-707.
- Durrani, A. J., Du, Y., and Luo, Y. H., (1995). "Seismic Resistance of Nonductile Slab-Column Connections in Existing Flat-Slab Buildings", *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 4, July-Aug. 1995, pp. 479-487.
- Pan, A., and Moehle, J. P., (1992). "An Experimental Study of Slab-Column Connections", *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 6, Nov.-Dec. 1992, pp. 626-638.
- Robertson, I. N., and Durrani, A. J., (1992). "Seismic Behavior of Slab-Column Connections ", *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 1, Jan.-Feb. 1992, pp. 37-45.