

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

บทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ของคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สร้างแบบจำลองจำนวน 4 ตัวอย่าง (CN1 CN2 CN3 และ CN4) ทั้งนี้แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นตามลักษณะและข้อกำหนดที่นำเสนอในบทที่ 3 โดยแบบจำลองทั้ง 4 นั้นมีความยาวของคานและเสา ขนาดหน้าตัด จำนวนเหล็กเสริมและเหล็กปลอก รวมถึงคุณสมบัติของวัสดุต่างๆเหมือนกันทุกประการ สิ่งที่แตกต่างกันคือรายละเอียดเหล็กเสริมในบริเวณข้อต่อ จุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมต่างๆ ของแบบจำลองข้อต่อ เช่น ลักษณะการกระจายตัวของความเค้น ลักษณะการกระจายแรงกระทำจากคานสู่เสา สิ่งเหล่านี้สามารถนำมาพิจารณาประกอบการประเมินศักยภาพการรับแรงของข้อต่อ และลักษณะการพังของข้อต่อได้

4.1 แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อเกิดแผ่นดินไหวแผ่นดินจะมีการเคลื่อนตัวในลักษณะคลื่น (Wave) ทำให้เกิดแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งมีลักษณะเป็นวัฏจักร (Cyclic Load) โดยมีลักษณะไป-กลับ (ซ้าย-ขวา) เมื่อโครงข้อแข็งเหล็กรับแรงแผ่นดินไหว จึงเสมือนว่าถูกแรงกระทำด้านข้างกระทำ ดังแสดงในรูป 4.1ก และ 4.1ข ส่วนรูป 4.1ค แสดงไดอะแกรมโมเมนต์ดัดของโครงข้อแข็งเหล็ก เมื่อรับแรงด้านข้าง จะเห็นว่าที่บริเวณกึ่งกลางเสาชั้นบน-ล่าง และจุดกึ่งกลางช่วงคาน จะเป็นจุดที่โมเมนต์ดัด เป็นศูนย์ (จุดดัดกลับของโมเมนต์ดัด) นั้นหมายความว่า ชิ้นส่วนคาน-เสาตรงบริเวณนี้ ซึ่งเป็นบริเวณข้อต่อระหว่างคานกับเสา สามารถจำลองสภาพการใส่แรง และเงื่อนไขการยึดรั้งได้ดังรูปที่ 4.1ง กล่าวโดยสรุป ข้อต่อคาน-เสาแบบถ่ายโมเมนต์ของเสาดันริม เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว สามารถจำลองลักษณะการใส่แรงได้ โดยใส่แรงวัฏจักรที่บริเวณกึ่งกลางของช่วงคาน โดยที่ปลายเสาทั้งบนและล่างจะมีเงื่อนไขของการยึดรั้งเป็นแบบสลัก (Pin Support)

ขนาดตัวอย่างคาน-เสา หน้าตัด และรายละเอียดการเสริมเหล็กของแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์ CN1 CN2 CN3 และ CN4 แสดงในรูปที่ 4.2-4.5 ส่วนตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงคุณสมบัติคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้กับแบบจำลองชุดนี้ แบบจำลอง CN1 เหล็กเสริมหลักในคานถูกยื่นเข้าไปในเสาและหยุดที่เหล็กยื่นด้านหลังเสา แบบจำลอง CN2 เหล็กเสริมหลักในคานถูกยื่นเข้าไปในเสาและงอปลาย 50 มิลลิเมตรทั้งบนและล่างตามความยาวเหล็กยื่นด้านหลังเสา แบบจำลอง CN3 เหล็กเสริมหลักในคานถูกยื่นเข้าไปในเสาและงอปลายเท่าขนาดความลึกของคานทั้งบนและล่างตามความยาวเหล็กยื่นด้านหลังเสา ส่วนแบบจำลอง CN4 นำเอาแบบจำลอง CN3 มาทำการปรับปรุงบริเวณรอยต่อโดยเสริมเหล็กปลอกเพิ่มเติมให้มีระยะเป็นไปตามมาตรฐาน ACI 318-99 รายละเอียดเหล็กเสริมของแบบจำลองทั้ง 4 แสดงไว้

ในตารางที่ 4.3 รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งรองรับในเสาบริเวณปลายเสาด้านล่างและบน ส่วนแรงกระทำถูกใส่ที่บริเวณปลายคานตามรูป

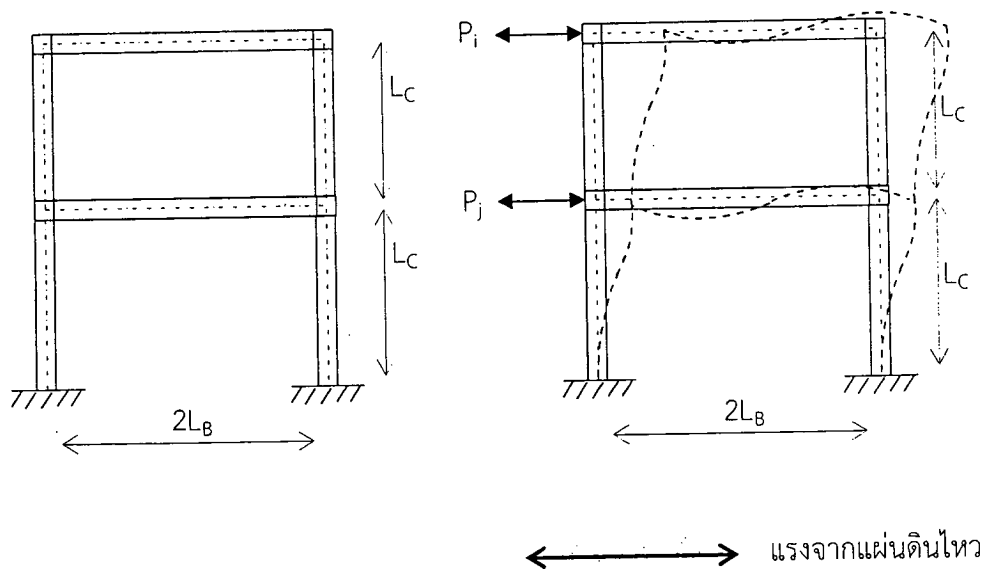
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้กับแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คาน-เสา (CN1, CN2, CN3, CN4)

แบบจำลอง	สมการคอนกรีต	f'_c ksc.	E_c ksc.	f_r ksc.	ν	β_1	
						ราบเรียบ	รุนแรง
CN1	Desayi & Krishnan	300	265,862	40.0	0.2	0.3	0.7
CN2	Desayi & Krishnan	300	265,862	40.0	0.2	0.3	0.7
CN3	Desayi & Krishnan	300	265,862	40.0	0.2	0.3	0.7
CN4	Desayi & Krishnan	300	265,862	40.0	0.2	0.3	0.7

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเหล็กที่ใช้กับแบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คาน-เสา (CN1, CN2, CN3, CN4)

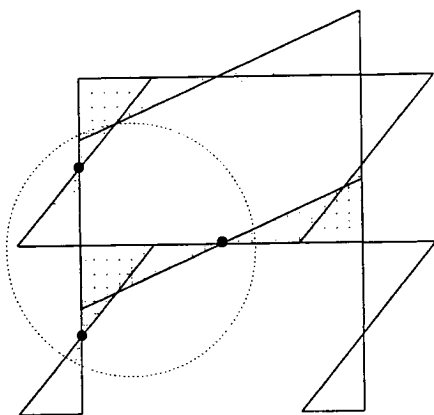
แบบจำลอง	DB16 (เหล็กยื่น) ksc.		RB6 (เหล็กปลอก) ksc.	
	f_y^*	E_s^*	f_y^*	E_s^*
CN1	5,885	2,111,000	3,175	2,159,000
CN2	5,885	2,111,000	3,175	2,159,000
CN3	5,885	2,111,000	3,175	2,159,000
CN4	5,885	2,111,000	3,175	2,159,000

* ผลจากการทดสอบ

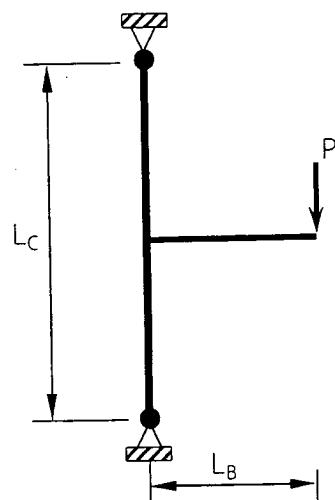


(ก) การจำลองโครงข้อแข็งเพื่อวิเคราะห์การรับแรงด้านข้าง

(ข) การจำลองการเสียรูปของโครงข้อแข็งเมื่อรับแรงด้านข้าง

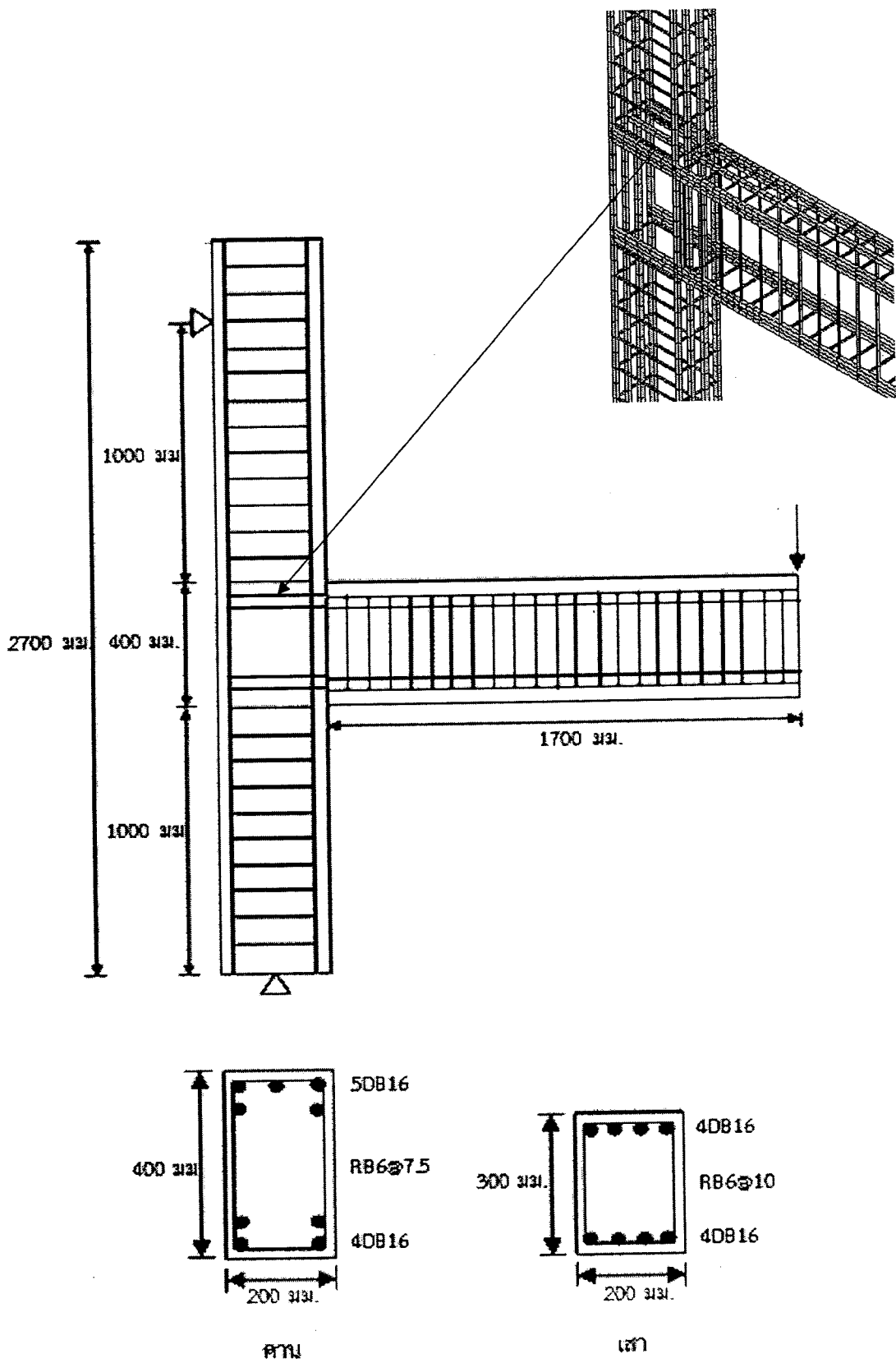


(ค) แผนภาพแสดงโมเมนต์ภายในของโครงสร้าง

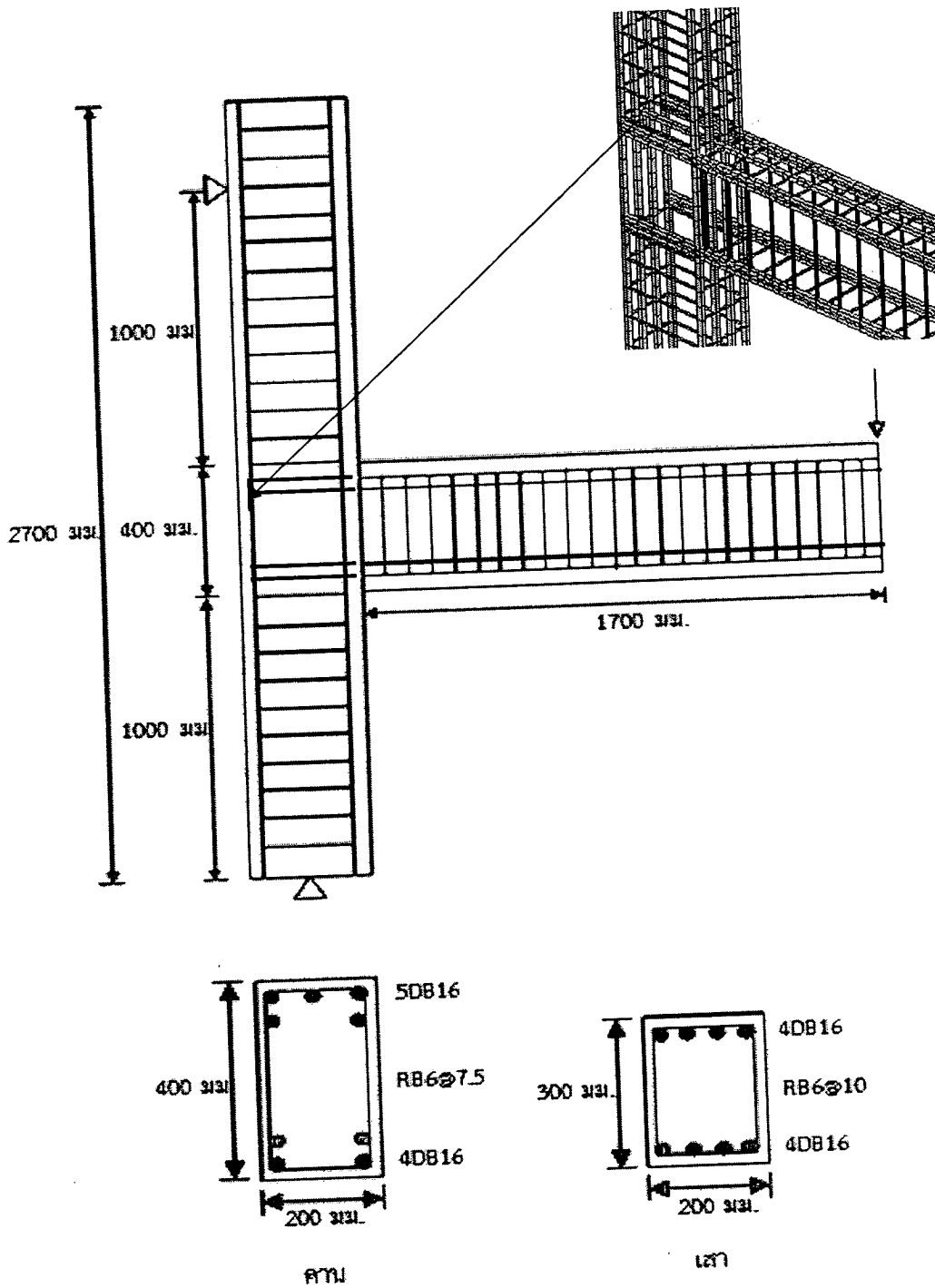


(ง) ขยายบริเวณข้อต่อ

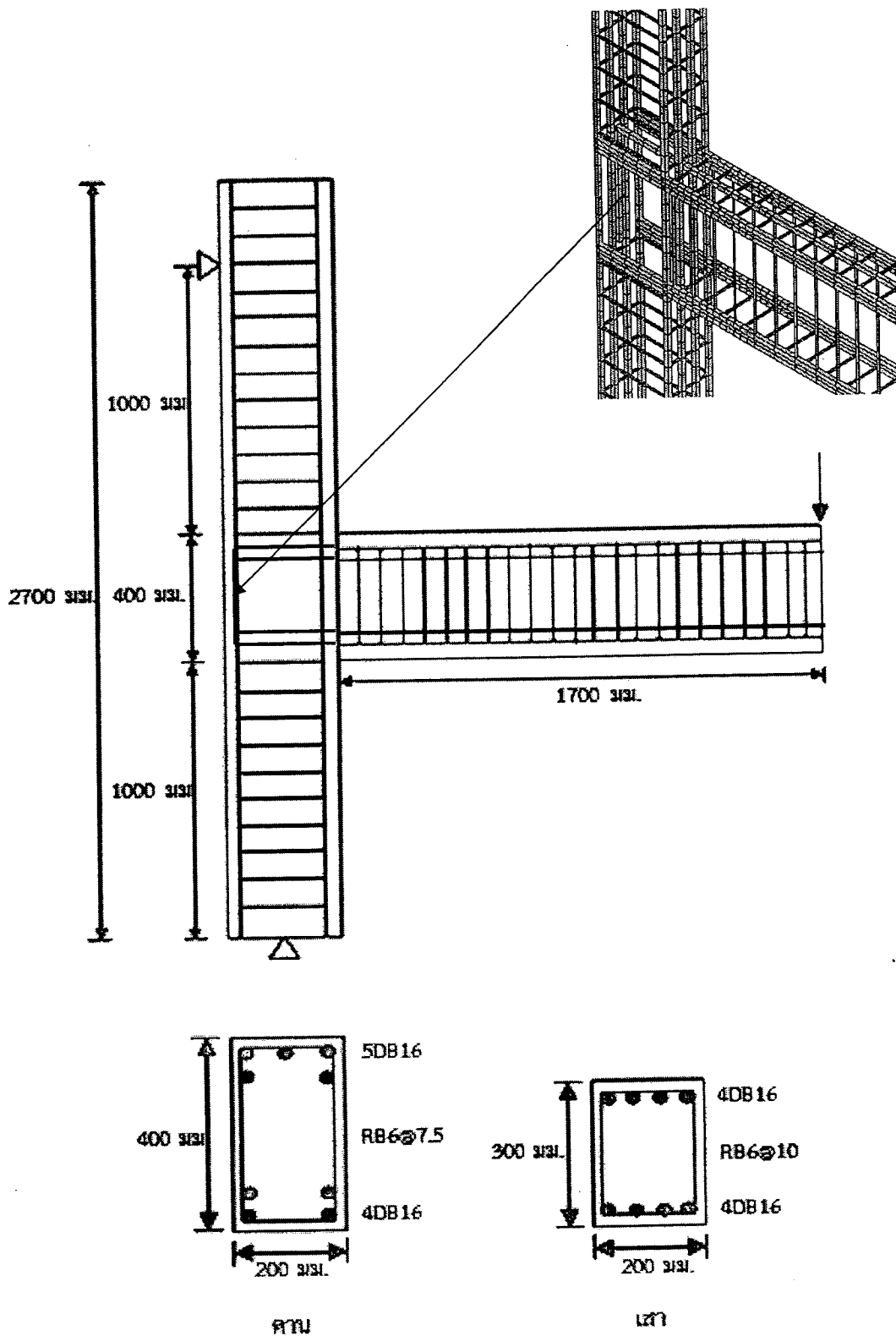
รูปที่ 4.1 โครงข้อแข็งเมื่อมีการรับแรงแผ่นดินไหว



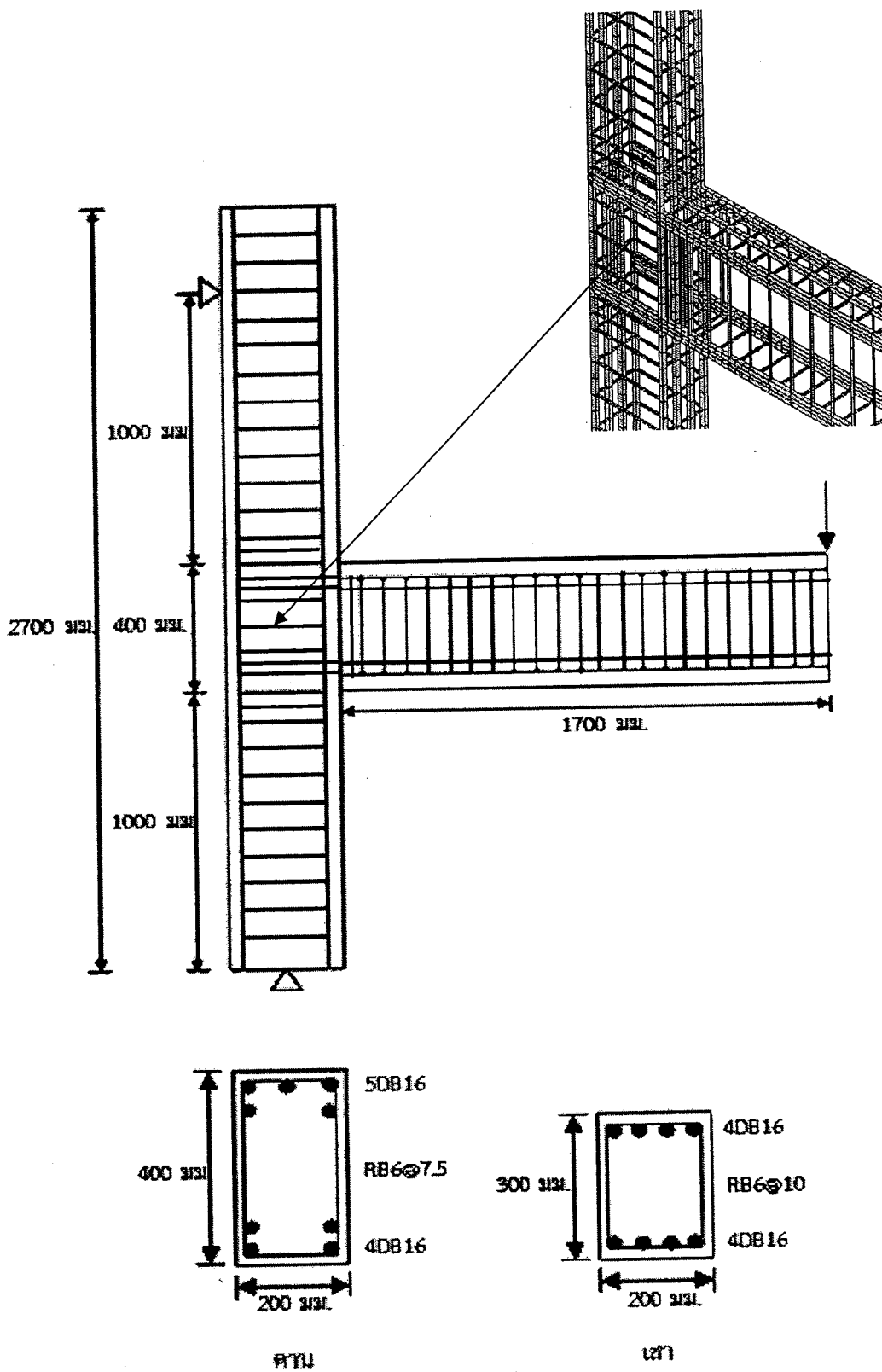
รูปที่ 4.2 ขนาดเสาและคาน ขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กแบบจำลอง CN1



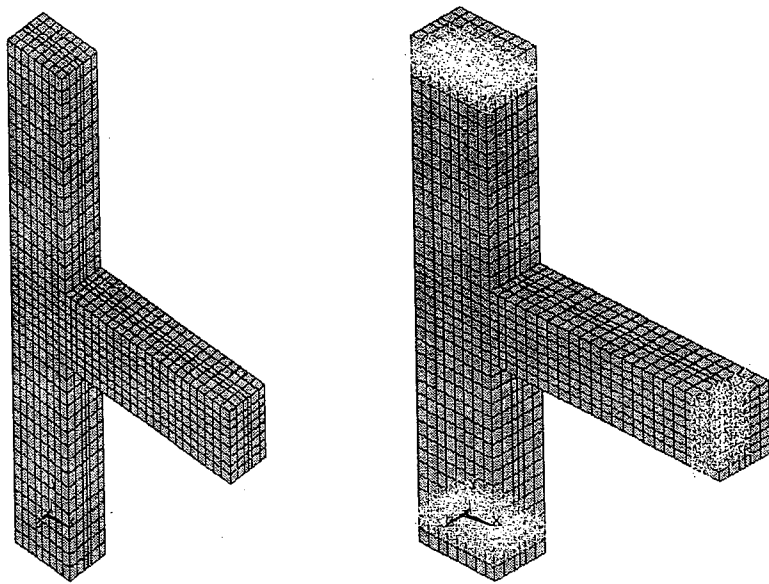
รูปที่ 4.3 ขนาดเสาและคาน ขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กแบบจำลอง CN2



รูปที่ 4.4 ขนาดเสาและคาน ขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กแบบจำลอง CN3



รูปที่ 4.5 ขนาดเสาและคาน ขนาดหน้าตัดและการเสริมเหล็กแบบจำลอง CN4

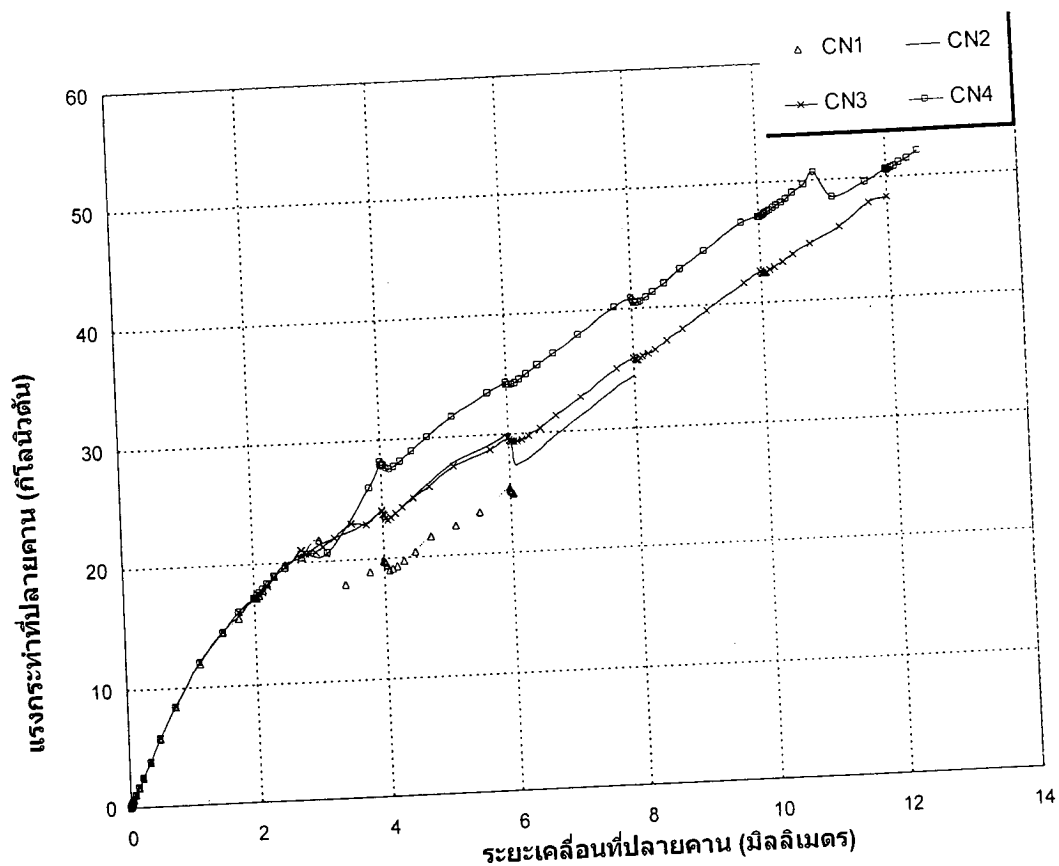


รูปที่ 4.6 ตำแหน่งรองรับในเสาและแรงกระทำที่ปลายคานของแบบจำลอง CN1 CN2 CN3 และ CN4

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดบริเวณจุดต่อของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ CN1 CN2 CN3 และ CN4

แบบจำลอง	รูปแบบการเสริมเหล็กที่จุดต่อ	รายละเอียดของโครงสร้าง
CN1		เหล็กเสริมหลักจากคานยื่นเข้ามาไปเสา หยุดที่เหล็กยื่นด้านหลังเสา
CN2		เหล็กเสริมหลักจากคานยื่นเข้ามาไปเสา งอปลายเท่ากับ 50 มม. ทั้งบนและล่าง ตามความยาวเหล็กยื่นด้านหลังเสา
CN3		เหล็กเสริมหลักในคานถูกยื่นเข้าไปใน เสาและงอปลายเท่าขนาดความลึกของ คานทั้งบนและล่างตามความยาวเหล็ก ยื่นด้านหลังเสา
CN4		นำแบบจำลอง CN3 มาทำการปรับปรุง บริเวณรอยต่อโดยเสริมเหล็กปลอก เพิ่มเติมให้มีระยะเป็นไปตามมาตรฐาน ACI 318-99

4.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟในอิลิเมนต์คาน-เสา CN1 CN2 CN3 และ CN4

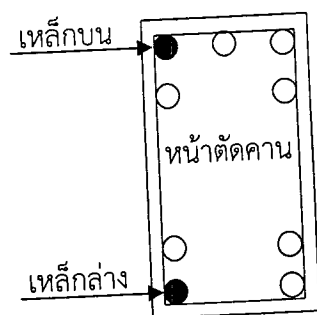


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานและระยะเคลื่อนที่ปลายคานของแบบจำลอง CN1 CN2 CN3 และ CN4

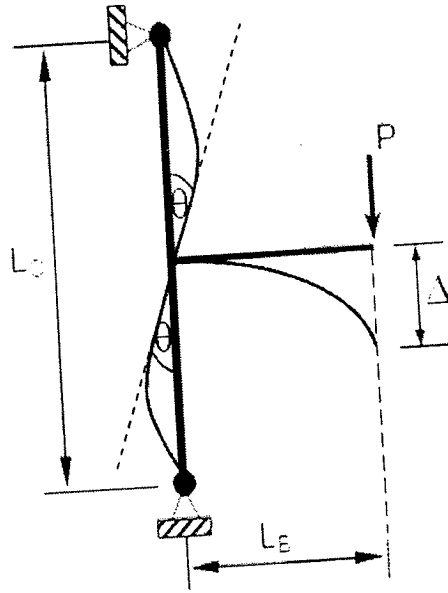
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำที่ปลายคานและระยะเคลื่อนที่ปลายคาน จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทั้ง 4 ตัวอย่าง แรงกระทำและการเคลื่อนที่ที่ปลายคานมีค่าเท่ากันทั้ง 4 แบบจำลอง โดยมีแรงกระทำในช่วงพิกัดยืดหยุ่น (Elastic) อยู่ระหว่าง 0-20 กิโลนิวตัน และมีระยะเคลื่อนที่ที่ปลายคานประมาณ 3 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อคานเริ่มมีรอยร้าวที่บริเวณหลังคานตำแหน่งใกล้หน้าเสา กราฟของแต่ละแบบจำลองจะมีการเปลี่ยนความชัน จากรูปพบว่าแบบจำลอง CN4 สามารถรับแรงได้สูงสุดประมาณ 52 กิโลนิวตัน CN3 รับแรงได้ 48 กิโลนิวตัน CN2 รับแรงได้ 34 กิโลนิวตัน และ CN1 รับแรงได้น้อยสุดเท่ากับประมาณ 25 กิโลนิวตัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานพบว่า แบบจำลอง CN4 มีค่าการเคลื่อนที่ที่ปลายคานสูงสุดเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร CN3 มีค่าการเคลื่อนที่ที่ปลายคานสูงสุดเท่ากับ 12 มิลลิเมตร CN2 มีค่าการเคลื่อนที่ที่ปลายคานสูงสุดเท่ากับ 8

มิลลิเมตร และ CN1 มีค่าการเคลื่อนที่ที่ปลายคานสูงสุดเท่ากับ 4 มิลลิเมตร สอดคล้องกับแรงกระทำ ดังนั้นจึงสรุปว่าเมื่อมีการยื่นเหล็กจากคานเข้าไปในเสาและมีระยะงอปลายเพิ่มมากขึ้น สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงและเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานได้ และเมื่อมีการเพิ่มเหล็กปลอกที่บริเวณจุดต่อให้มากขึ้นตามคำแนะนำของ ACI 318-99 สามารถช่วยเพิ่มกำลังและเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ที่ปลายคานได้ ช่วยให้พฤติกรรมการพังของข้อต่อดีขึ้น เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าเหล็กเสริมที่ยื่นจากคานเข้าไปในเสามีพฤติกรรมอย่างไร สามารถแสดงได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมที่ตำแหน่งต่างๆ โดยให้แกน Y เป็นสัดส่วนความเครียดที่เกิดขึ้นของเหล็กเสริมต่อด้วย

ความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม $\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_y} \right)$ และแกน X เป็นค่าตำแหน่งของเหล็กเสริมวัดจากหน้าเสาที่ติดกับคาน ค่าบวกแสดงระยะที่วัดไปตามแนวกาน ค่าลบแสดงระยะที่วัดเข้าไปในเสา เหล็กเสริมที่เลือกมาคือเหล็กเสริมในคานเส้นบนและล่างสุด แสดงดังรูปที่ 4.8 ค่าความเครียดถูกนำเสนอเมื่อแบบจำลองหมุนไปด้วยเปอร์เซ็นต์ drift ratio ต่างๆกัน 4 ค่า สมการคำนวณเปอร์เซ็นต์ drift ratio แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.4 แสดงค่าที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 4.8 เหล็กเสริมในคานที่ใช้ในการอ่านค่าความเครียด



รูปที่ 4.9 ลักษณะการเสียรูปของแบบจำลองคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$\text{drift ratio (\%)} \quad \theta = \left(\frac{\Delta}{L_B} \right) \times 100$$

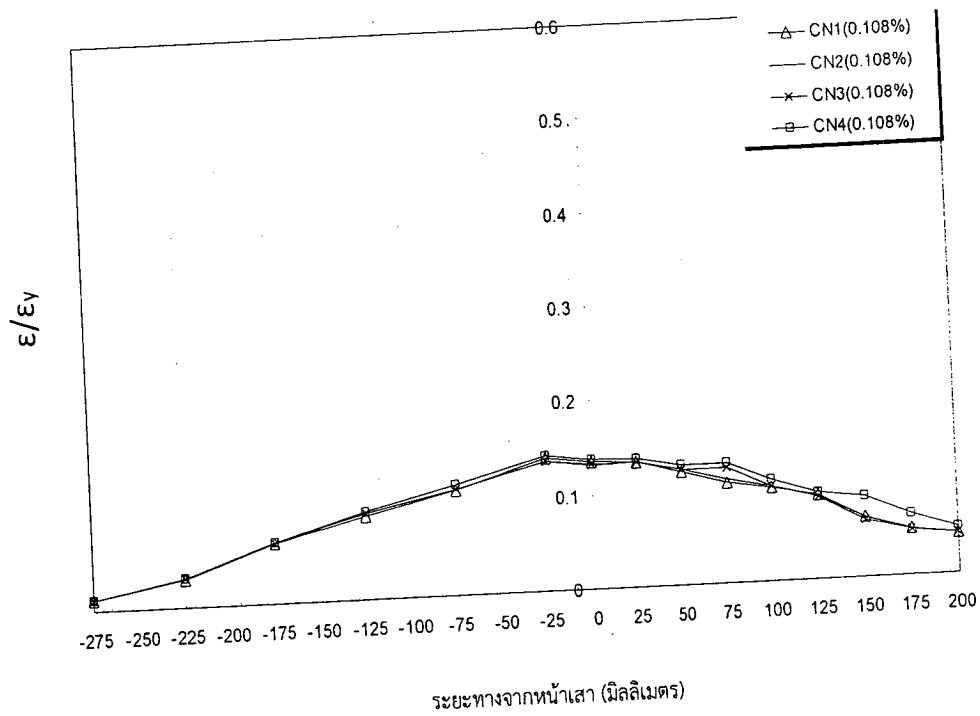
ตารางที่ 4.4 ค่า drift ratio (%) ที่ใช้เปรียบเทียบความเครียดในเหล็กเสริมของแบบจำลอง

Δ (มิลลิเมตร)	L _B (มิลลิเมตร)	θ (%)
2	1850	0.108
4	1850	0.216
8	1850	0.432
12	1850	0.649

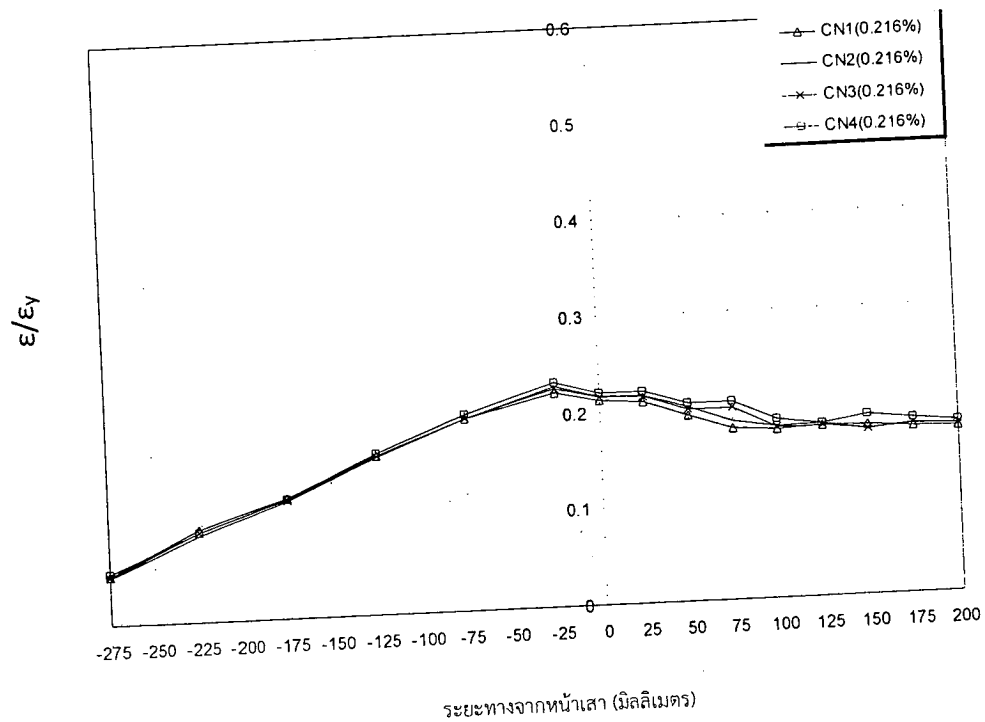
ค่าสัดส่วนความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมบนที่เปอร์เซ็นต์ drift ratio ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.10-4.13 จากรูปพบว่าลักษณะกราฟของแบบจำลองทั้ง 4 มีลักษณะใกล้เคียงกันกล่าวคือ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นค่าบวกซึ่งสอดคล้องกับทิศทางการให้แรงกระทำ และมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งวัดจากหน้าเสาเข้าไปในเสาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร และมีค่าลดลงเมื่อระยะทางออกมาจากตำแหน่งนี้ ทั้งด้านบวกคือด้านตามแนวนานและด้านลบคือด้านเข้าไปในเสา ทั้งนี้ค่าสัดส่วนความเครียดในส่วนคานจะมีค่า

มากกว่าค่าความเครียดในเสา เมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าเหล็กบนเส้นนี้ยังไม่เกิดการคราก ค่าความเครียดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.53 หรือ 53% ของค่าความเครียดที่จุดครากที่เปอร์เซ็นต์ drift ratio เท่ากับ 0.649 ซึ่งเป็นค่าการหมุนสูงสุดที่ทำให้ข้อต่อเกิดการวิบัติ ส่วนรูปที่ 4.14-4.17 แสดงค่าสัดส่วนความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมล่างเกิดขึ้นที่เปอร์เซ็นต์ drift ratio ต่างๆ เนื่องจากเป็นเหล็กล่างค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจึงมีค่าติดลบ ลักษณะกราฟของแบบจำลองทั้ง 4 ก็มีค่าสอดคล้องกับค่าความเครียดในเหล็กเสริมบน ค่าความเครียดของเหล็กล่างมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งวัดจากหน้าเสาเข้ามาในคานเท่ากับ 25 มิลลิเมตร เมื่อเปอร์เซ็นต์ drift ratio เท่ากับ 0.108 และ 0.216 จากนั้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ drift ratio เพิ่มขึ้นเป็น 0.432 และ 0.649 ค่าความเครียดสูงสุดของเหล็กล่างเกิดขึ้นที่ตำแหน่งวัดจากหน้าเสาเข้ามาในคานเท่ากับ 50 มิลลิเมตร สำหรับค่าความเครียดสูงสุดของเหล็กล่างนั้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.18 หรือ 18% ของค่าความเครียดที่จุดครากที่เปอร์เซ็นต์ drift ratio เท่ากับ 0.649 แสดงว่าเหล็กบนและเหล็กล่างทั้ง 2 เส้นนี้ยังไม่เกิดการคราก เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง CN1 CN2 CN3 และ CN4 ค่าความเครียดในเหล็กเสริมทั้งบนและล่างแสดงให้เห็นว่า เหล็กเสริมจากแบบจำลอง CN4 มีประสิทธิภาพในการรับแรงได้ดีที่สุด รองลงมาคือ CN3 CN2 และ CN1 ตามลำดับ ผลของค่าความเครียดในเหล็กเสริมนี้สอดคล้องกับผลของแรงกระทำและการเคลื่อนที่ที่ปลายคานดังแสดงไว้ข้างต้น

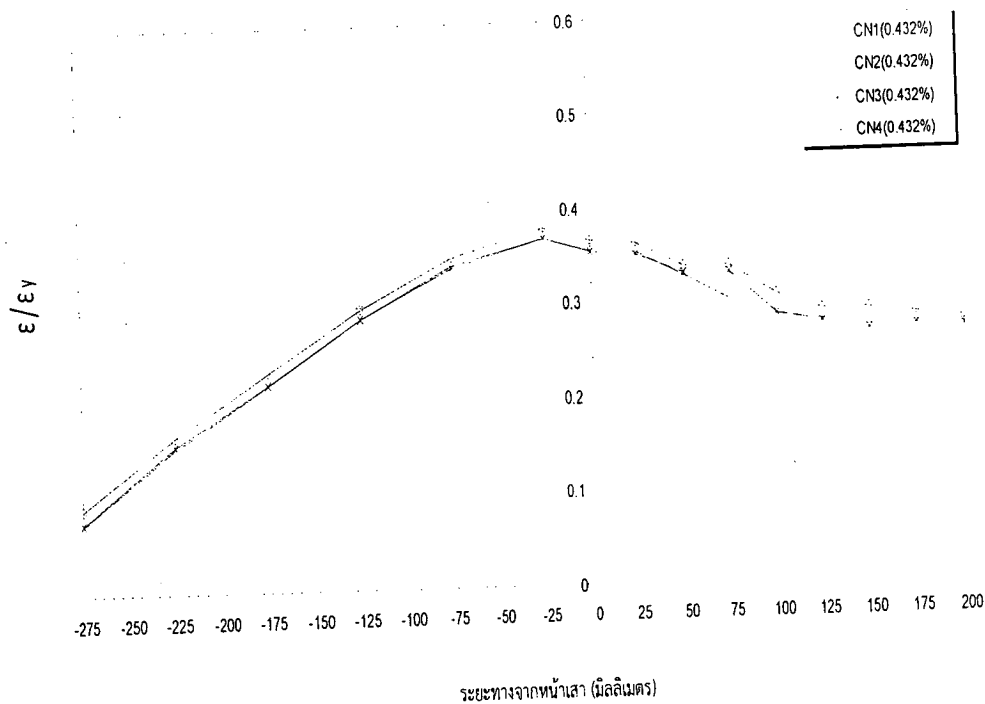
ลักษณะการพังของแบบจำลอง CN1 CN2 CN3 และ CN4 สามารถดูได้จากรูปที่ 4.18 ประกอบกับรูปที่ 4.19 ซึ่งแสดงเส้นชั้นความชันของความเค้นอัดหลักสูงสุดที่เกิดขึ้น ทั้งสี่ตัวอย่างมีลักษณะการพังที่ตำแหน่งต่างกัน กล่าวคือ CN1 เกิดการพังที่บริเวณ panel zone ด้านบนซึ่งเหล็กเสริมที่ตำแหน่งนี้รับแรงดึง ส่วน CN2 การพังเกิดขึ้นที่มุมเสาด้านไกลคานบริเวณการงอปลายเหล็กเสริม CN3 เสียหายที่บริเวณ panel zone ส่วนเหล็กบนเช่นกันกับ CN1 แต่การแตกของคอนกรีตค่อนข้างกระจายตัวและไม่ใหญ่มาก CN4 มีลักษณะการพังที่แตกต่างไปตำแหน่งการพังเกิดขึ้นที่บริเวณหน้าเสาด้านติดกับคานโดยเกิดขึ้นตลอดความลึกคาน



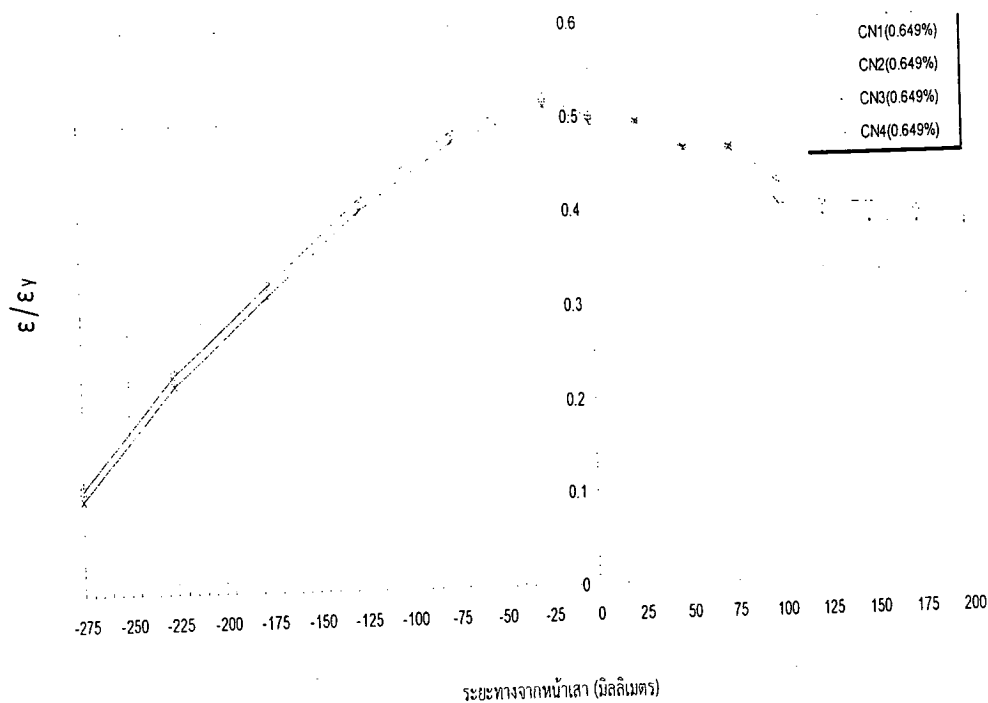
รูปที่ 4.10 สัดส่วนความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมบน ที่ 0.108% drift ratio



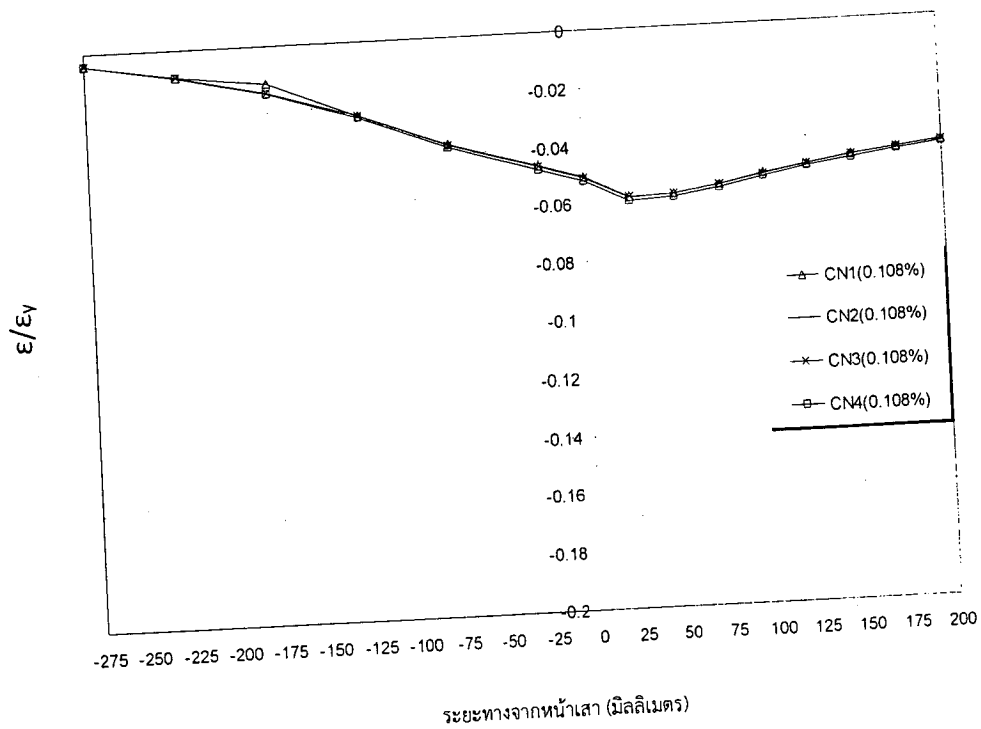
รูปที่ 4.11 สัดส่วนความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมบน ที่ 0.216% drift ratio



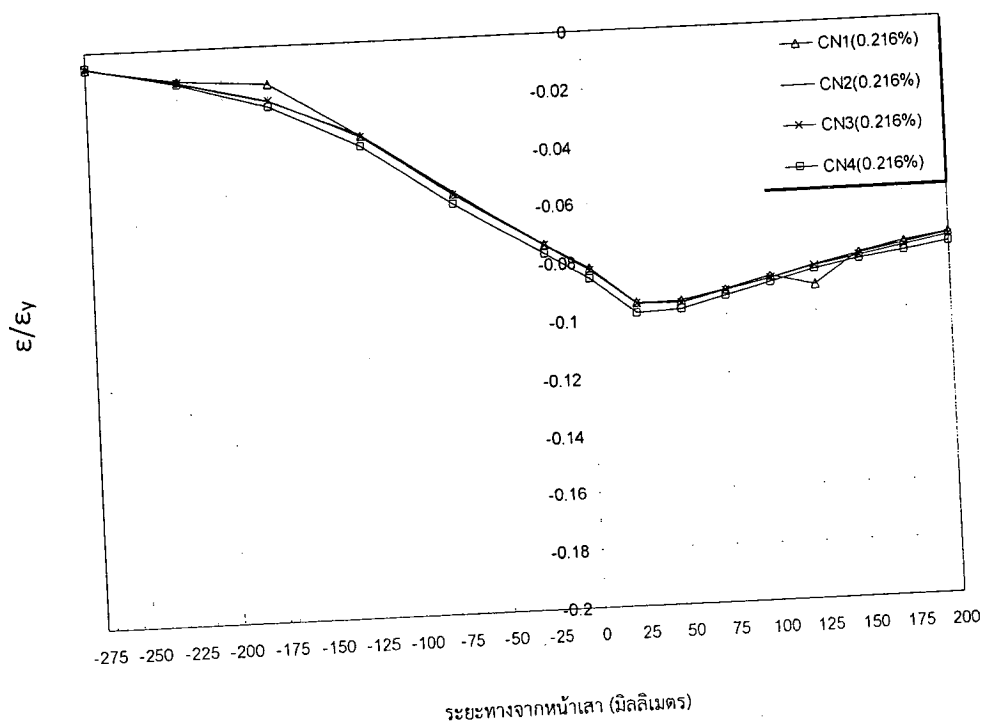
รูปที่ 4.12 สัดส่วนความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมบน ที่ 0.432% drift ratio



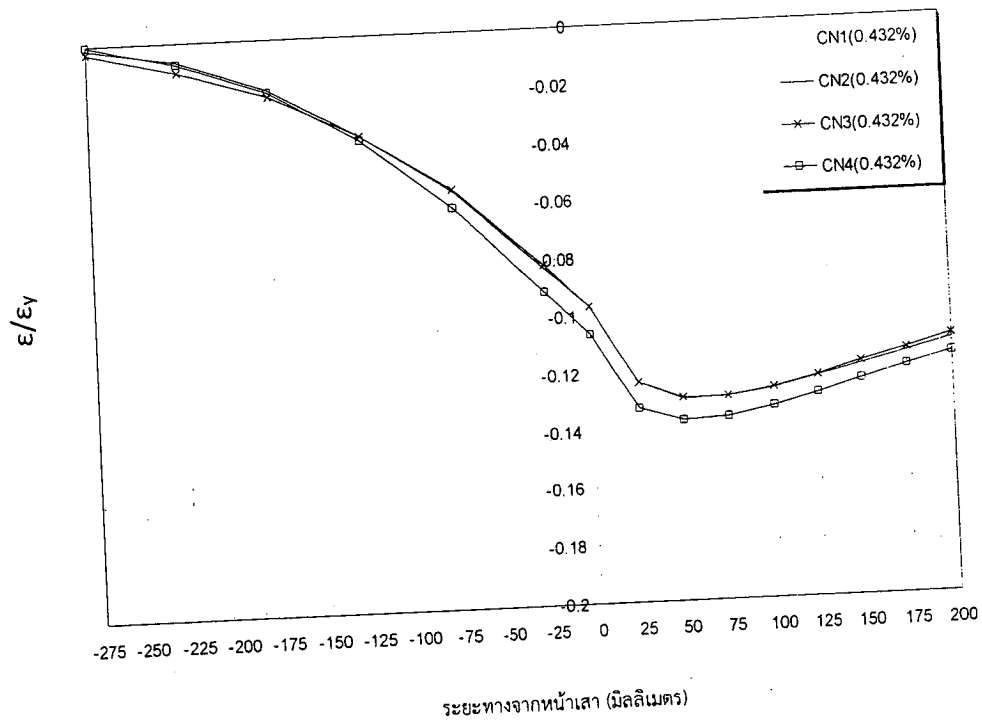
รูปที่ 4.13 สัดส่วนความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมบน ที่ 0.649% drift ratio



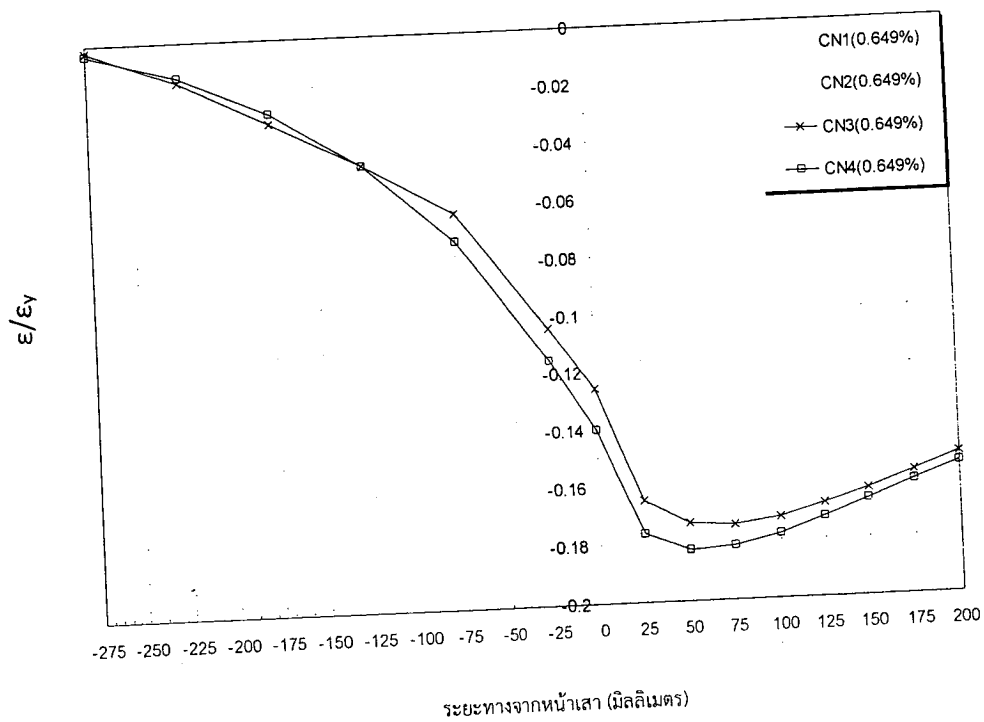
รูปที่ 4.14 สัดส่วนความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมล่าง ที่ 0.108% drift ratio



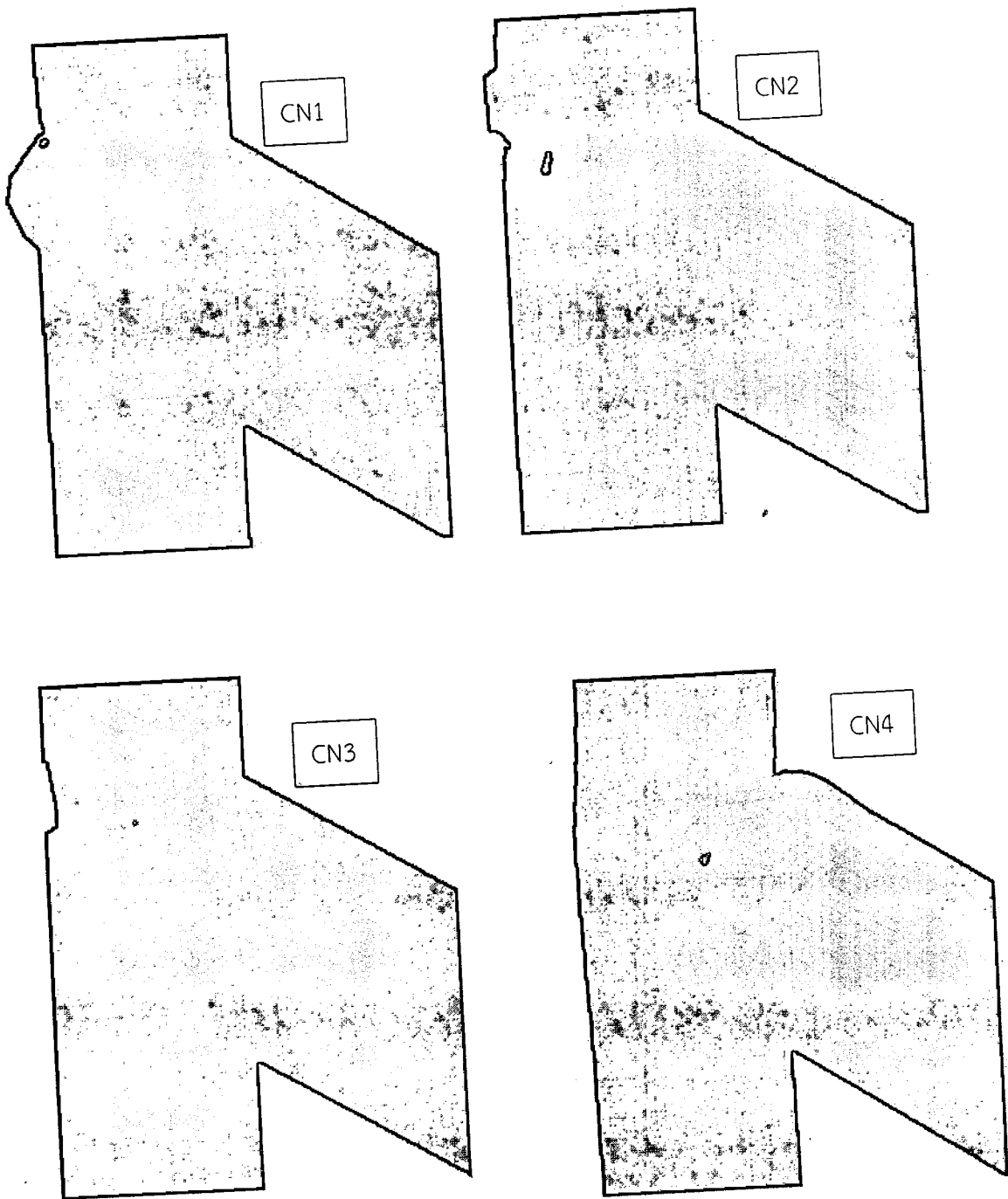
รูปที่ 4.15 สัดส่วนความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมล่าง ที่ 0.216% drift ratio



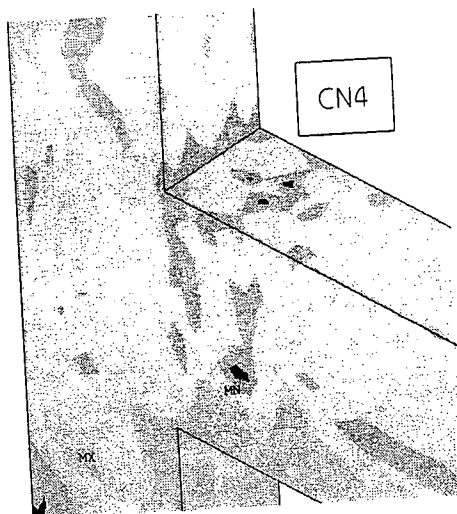
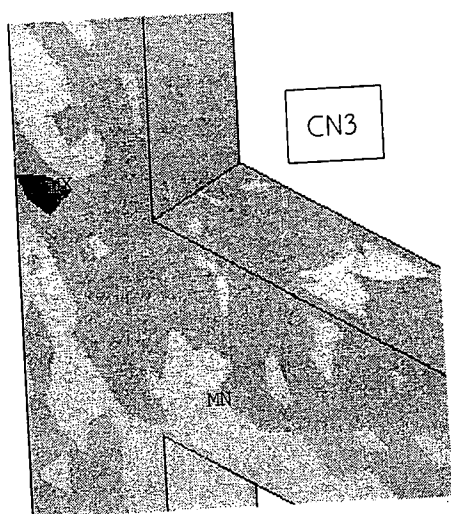
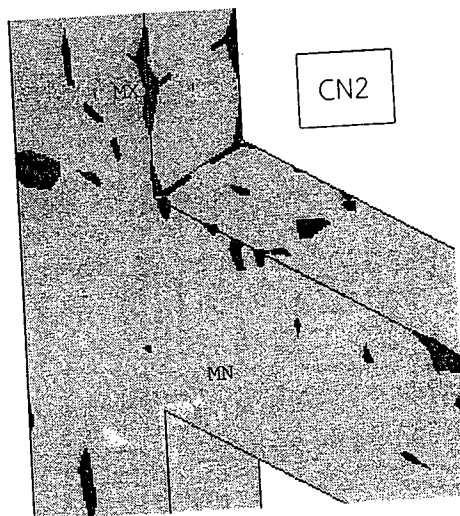
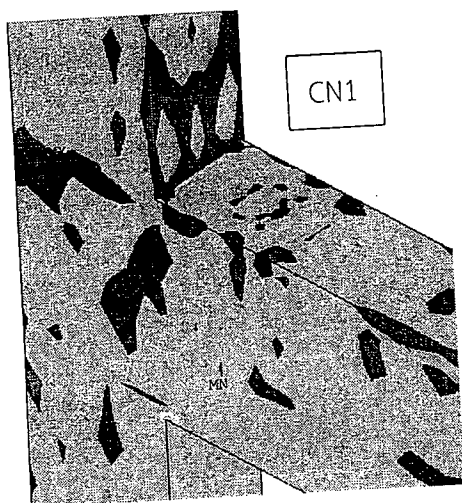
รูปที่ 4.16 สัดส่วนความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมล่าง ที่ 0.432% drift ratio



รูปที่ 4.17 สัดส่วนความเครียดต่อความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมล่าง ที่ 0.649% drift ratio



รูปที่ 4.18 การเสียรูปของแบบจำลอง CN1 CN2 CN3 และ CN4



รูปที่ 4.19 เส้นชั้นความชันของความเค้นอัดหลักสูงสุดที่เกิดขึ้นในแบบจำลอง CN1 CN2 CN3 และ CN4