



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การเปรียบเทียบกำลังอัดของเสาสั่นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกต่างกัน
โดย นายธนปกรณ์ สังข์ทอง

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาโยธา

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสฤติวงศ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ เขียวศิริพัฒน์)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรกานต์ ศรีทองอ่อน)

กรรมการ

(อาจารย์ชำนาญ ดวงจรัส)

การเปรียบเทียบกำลังอัดของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกต่างกัน

นายธนปกรณ์ สังข์ทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตร
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชาโยธา ภาควิชาครุศาสตร์โยธา
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายธนปกรณ์ สังข์ทอง
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การเปรียบเทียบกำลังอัดของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็ก
ปลอกต่างกัน
สาขาวิชา : โยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ เขียวศิริพิพัฒน์
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลการวิจัยเชิงทดลอง เพื่อเปรียบเทียบกำลังอัดของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกเดี่ยวขนาด ชนิด และระยะห่างต่างกันโดยอาศัย มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. เสาทดสอบมีขนาด 15x15 ซม. สูง 80 ซม. เหล็กเสริมยืนขนาด DB12 มม. จำนวน 4 เส้น แบ่งชนิด ขนาดเหล็กปลอก เป็น 3 กลุ่มตัวอย่าง คือ กลุ่ม A (RB6) จำนวน 16 ตัวอย่าง กลุ่ม B (RB9) จำนวน 22 ตัวอย่าง และกลุ่ม C (DB10) จำนวน 24 ตัวอย่าง ระยะห่างของเหล็กปลอกมีค่าระหว่าง 9.6 – 62.4 ซม. จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของเสาทดสอบมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎี โดยเสาในกลุ่ม A มีกำลังอัดเฉลี่ย 59% - 71% ของกำลังอัดจากทฤษฎี เสาในกลุ่ม B 59% - 69 % และเสาในกลุ่ม C 31% - 52% เสาเริ่มเกิดการแตกร้าวที่ส่วนบนหรือส่วนล่างก่อน ทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอกหลุดร่อนออกมา เสาที่มีเหล็กปลอกห่างมีกำลังอัดน้อยกว่าเสาที่มีเหล็กปลอกชิดกว่า เพียงเล็กน้อย การวิเคราะห์ผลทดสอบทางสถิติด้วยวิธีการทดสอบความแตกต่างไคสแควร์ พบว่าขนาด ชนิด และระยะห่างที่แตกต่างของเหล็กปลอก ในเสาทดสอบ ให้ค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกัน ณ ระดับความเชื่อมั่น 95%

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 149 หน้า)

คำสำคัญ : เสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็ก,เหล็กปลอก,กำลังอัด,การทดสอบไคสแควร์



อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

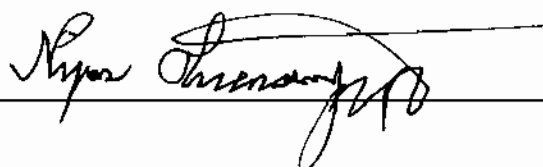
Name : Mr. Tanapakorn Sungthong
Thesis Title : A Comparison of the Compressive Strengths of Short Reinforced Concrete
Columns with Different Ties
Major Field : Civil Technology
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor Dr. Nipon Thiensiripipat
Academic Year : 2006

Abstract

This thesis presents the results of an experimental research on a comparison of the compressive strengths of short concrete columns with ties of different types, sizes, and spacing, based on ACI and Engineering Institute of Thailand standards. The columns used for testing were 15 x 15 x 80 cm., having four DB12 mm. as main bars and three groups of ties : group A (RB6) - 16 samples, group B (RB9) - 22 samples, and group C (DB10) - 24 samples. Tie spacing varied from 9.6 - 62.4 cm. Test results showed that the compressive strengths of the columns were smaller than theoretical strengths. Group A had average compressive strengths ranging from 59 – 71 % of the average theoretical strength, while those of group B ranging from 59 – 69 %, and group C 31 – 52 %. All columns started to crack at the top or bottom of the columns, resulting in spalling of concrete covers of the columns. Columns with larger tie spacing had slightly less compressive strength than those with closer tie spacing. A statistical study of the test results using χ^2 tests showed that the differences in types, sizes, and spacing of the ties used in this study did not significantly affect the compressive strengths of the columns; the level of confidence was 95 %.

(Total 149 pages)

Keywords : Short reinforced concrete columns, ties, compressive strengths, χ^2 tests.



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือที่ดีอย่างยิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ เชียรศิริพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ ของการทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาครู ศาสตร์ โยธา ที่ช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณอาจารย์ชำนาญ คงจรัส ที่ช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในเรื่องของเครื่องมือและการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ ขอขอบพระคุณ คุณโอภาส เริ่มกิจการ ที่คอยสนับสนุนและให้โอกาสเรื่องเวลาในการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ ซึ่งท่านเป็นผู้มีพระคุณ ได้ช่วยให้ผู้เขียนประสบความสำเร็จในการศึกษาจนถึงปัจจุบัน

ธนปกรณ์ สังข์ทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ค
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานในการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	4
1.6 ระเบียบวิธีวิจัย	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 การค้นคว้าเอกสาร	11
2.1 พฤติกรรมและกำลังต้านทานของเสาสั้นที่รับแรงอัดตามแนวแกน	11
2.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว	16
2.3 ข้อกำหนดของเหล็กเสริมตามขวางสำหรับเหล็กปลอกเดี่ยวตามมาตรฐาน ว.ส.ท.	17
2.4 ข้อกำหนดของเหล็กเสริมตามขวางสำหรับเสาปลอกเดี่ยวตามมาตรฐาน ACI	18
2.5 การรื้อครอบ ในองค์อาคารต้านทานแรงอัดที่เสริมเหล็กปลอก	19
2.6 การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ	21
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การเตรียมการทดสอบ	27
3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	27
3.2 การเตรียมตัวอย่างเสาทดสอบ	29
3.3 การเทคอนกรีต	32
3.4 การทดสอบและการเก็บข้อมูล	32
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์	37
4.1 ผลการทดสอบเสา	37
4.2 ผลการทดสอบเสากลุ่ม A เหล็กปลอก RB 6 มม.	41
4.3 ผลการทดสอบเสากลุ่ม B เหล็กปลอก RB 9 มม.	49
4.4 ผลการทดสอบเสากลุ่ม C เหล็กปลอก DB 10 มม.	60
บทที่ 5 สรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ	73
5.1 สรุปผลการทดสอบเสากลุ่ม A	73
5.2 สรุปผลการทดสอบเสากลุ่ม B	74
5.3 สรุปผลการทดสอบเสากลุ่ม C	74
5.4 สรุปผลการทดสอบกลุ่มเสาทั้งหมด	75
5.5 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	79
ภาคผนวก ก	81
ภาคผนวก ข	97
ภาคผนวก ค	105
ภาคผนวก ง	119
ภาคผนวก จ	127
ภาคผนวก ฉ	129
ภาคผนวก ช	137
ภาคผนวก ซ	143
ประวัติผู้วิจัย	149

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	แสดงขนาดรายละเอียดและจำนวนตัวอย่างเสาทดสอบ	6
3-1	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต	28
3-2	กำลังดึงของเหล็กเสริม	28
3-3	ตารางแสดงขนาดหน้าตัดเสาคอนกรีต	34
4-1	ผลการทดสอบกับผลการคำนวณของเสา	37
4-2	ผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกสูงสุดกับค่าความเครียดของเหล็กยื่นเหล็กปลอก และที่ผิวคอนกรีต	40

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 แสดงรายละเอียดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	3
1-2 การเสริมเหล็กเสากลุ่ม A	8
1-3 การเสริมเหล็กเสากลุ่ม B	9
1-4 การเสริมเหล็กเสากลุ่ม C	10
2-1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักตามแกนของเสา	13
2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับการหดตัว (Stress-Strain Curves)	13
2-3 ผลของระยะเรียงเหล็กกร็กรอบ หรือเหล็กปลอกที่ต้านทานการพังทลาย ด้านข้าง	19
2-4 การร็กรอบโดยเหล็กกร็กรอบหรือเหล็กปลอก สีเหลี่ยมจัตุรัส และกลม	20
2-5 ความเค้น และความเครียดของคอนกรีตที่ถูกร็กรอบ โดยเหล็กกร็กรอบ หรือ เหล็กปลอกรูปสี่เหลี่ยม	21
3-1 การเก็บตัวอย่างทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต	27
3-2 รายละเอียดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	29
3-3 เหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ	29
3-4 การติดตั้ง Strain Gauges บนเหล็กเสริมเสาทดสอบ	30
3-5 การติดตั้ง Strain Gauges บนผิวคอนกรีต	30
3-6 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauges	31
3-7 การหุ้ม Coating Material	31
3-8 การจี้คอนกรีต	32
3-9 การต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่อง Data Logger	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-1	การวัดตัวของเสา A10/1	41
4-2	การวัดตัวของเสา A10/2	41
4-3	การวัดตัวของเสา A14/1	42
4-4	การวัดตัวของเสา A14/2	42
4-5	การวัดตัวของเสา A19/1	43
4-6	การวัดตัวของเสา A19/2	43
4-7	การวัดตัวของเสา A24/1	44
4-8	การวัดตัวของเสา A24/2	44
4-9	การวัดตัวของเสา A29/1	45
4-10	การวัดตัวของเสา A29/2	45
4-11	การวัดตัวของเสา A34/1	46
4-12	การวัดตัวของเสา A34/2	46
4-13	การวัดตัวของเสา A38/1	47
4-14	การวัดตัวของเสา A38/2	47
4-15	การวัดตัวของเสา A43/1	48
4-16	การวัดตัวของเสา A43/2	48
4-17	การวัดตัวของเสา B10/1	49
4-18	การวัดตัวของเสา B10/2	49
4-19	การวัดตัวของเสา B14/1	50
4-20	การวัดตัวของเสา B14/2	50
4-21	การวัดตัวของเสา B19/1	51
4-22	การวัดตัวของเสา B19/2	51
4-23	การวัดตัวของเสา B24/1	52
4-24	การวัดตัวของเสา B24/2	52
4-25	การวัดตัวของเสา B29/1	53
4-26	การวัดตัวของเสา B29/2	53
4-27	การวัดตัวของเสา B34/1	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-28	การวัดตัวของเสา B34/2	54
4-29	การวัดตัวของเสา B38/1	55
4-30	การวัดตัวของเสา B38/2	55
4-31	การวัดตัวของเสา B43/1	56
4-32	การวัดตัวของเสา B43/2	57
4-33	การวัดตัวของเสา B48/1	57
4-34	การวัดตัวของเสา B48/2	57
4-35	การวัดตัวของเสา B53/1	58
4-36	การวัดตัวของเสา B53/2	58
4-37	การวัดตัวของเสา B58/1	59
4-38	การวัดตัวของเสา B58/2	59
4-39	การวัดตัวของเสา C10/1	60
4-40	การวัดตัวของเสา C10/2	60
4-41	การวัดตัวของเสา C14/1	61
4-42	การวัดตัวของเสา C14/2	61
4-43	การวัดตัวของเสา C19/1	62
4-44	การวัดตัวของเสา C19/2	62
4-45	การวัดตัวของเสา C24/1	63
4-46	การวัดตัวของเสา C24/2	63
4-47	การวัดตัวของเสา C29/1	64
4-48	การวัดตัวของเสา C29/2	64
4-49	การวัดตัวของเสา C34/1	65
4-50	การวัดตัวของเสา C34/2	65
4-51	การวัดตัวของเสา C38/1	66
4-52	การวัดตัวของเสา C38/2	66
4-53	การวัดตัวของเสา C43/1	67
4-54	การวัดตัวของเสา C43/2	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-55	การวัดคิของเสา C48/1	68
4-56	การวัดคิของเสา C48/2	68
4-57	การวัดคิของเสา C53/1	69
4-58	การวัดคิของเสา C53/2	69
4-59	การวัดคิของเสา C58/1	70
4-60	การวัดคิของเสา C58/2	70
4-61	การวัดคิของเสา C62/1	71
4-62	การวัดคิของเสา C62/2	71
5-1	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดตามทฤษฎีกับแรงอัดประลัยจากการทดสอบเสากลุ่ม A	73
5-2	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดตามทฤษฎีกับแรงอัดประลัยจากการทดสอบเสากลุ่ม B	74
5-3	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดตามทฤษฎีกับแรงอัดประลัยจากการทดสอบเสากลุ่ม C	75
5-4	การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของเสาทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง	76
ก-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบเสา A10/1 และ A10/2	82
ก-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบเสา A14/1 และ A19/1	82
ก-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบเสา A24/1 และ A29/1	83
ก-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบเสา A34/1 และ A34/2	83
ก-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบเสา A38/1 และ A38/2	84
ก-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบเสา A43/1 และ A43/2	84

สารบัญภาพ (ต่อ)[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
	91
ก-21	92
ก-22	92
ก-23	93
ก-24	93
ก-25	94
ก-26	94
ก-27	95
ข-1	98
ข-2	98
ข-3	99
ข-4	99
ข-5	100
ข-6	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ข-7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักรรทุกกับความเครียดของเหล็ก ยื่น เหล็กปลอกและที่ผิวคอนกรีต ของเสา B24/2	101
ข-8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักรรทุกกับความเครียดของเหล็ก ยื่น เหล็กปลอกและที่ผิวคอนกรีต ของเสา B43/2	101
ข-9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักรรทุกกับความเครียดของเหล็ก ยื่น เหล็กปลอกและที่ผิวคอนกรีต ของเสา C14/2	102
ข-10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักรรทุกกับความเครียดของเหล็ก ยื่น เหล็กปลอกและที่ผิวคอนกรีต ของเสา C19/2	102
ข-11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักรรทุกกับความเครียดของเหล็ก ยื่น เหล็กปลอกและที่ผิวคอนกรีต ของเสา C24/1	103
ข-12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักรรทุกกับความเครียดของเหล็ก ยื่น เหล็กปลอกและที่ผิวคอนกรีต ของเสา C48/2	103
ง-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและความเครียดที่ผิว คอนกรีต A14/2	120
ง-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและความเครียดที่ผิว คอนกรีต A19/2	120
ง-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและความเครียดที่ผิว คอนกรีต A24/2	121
ง-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและความเครียดที่ผิว คอนกรีต A29/2	121
ง-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและความเครียดที่ผิว คอนกรีต B14/2	122
ง-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและความเครียดที่ผิว คอนกรีต B19/2	122
ง-7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและความเครียดที่ผิว คอนกรีต B24/2	123
ง-8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและความเครียดที่ผิว	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
	123
ง-9	124
ง-10	124
ง-11	125
ง-12	125
ฉ-1	130
ฉ-2	130
ฉ-3	131
ฉ-4	131
ฉ-5	132
ฉ-6	132
ฉ-7	133
ฉ-8	133
ฉ-9	134

สารบัญญภาพ (ต่อ)[illegible]

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ซ-4	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรทุกและความเครียดที่เหล็กขึ้น B14/2	145
ซ-5	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรทุกและความเครียดที่เหล็กขึ้น B24/2	146
ซ-6	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรทุกและความเครียดที่เหล็กขึ้น B43/2	146
ซ-7	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรทุกและความเครียดที่เหล็กขึ้น C14/2	147
ซ-8	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรทุกและความเครียดที่เหล็กขึ้น C24/2	147
ซ-9	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรทุกและความเครียดที่เหล็กขึ้น C48/2	148

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	ด้านกว้างของเสา
b	=	ด้านแคบของเสา
c	=	ด้านลึกของเสา
ACI	=	American Concrete Institute
A_c	=	เนื้อที่หน้าตัดสุทธิของคอนกรีต
A_g	=	เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา
A_{st}	=	เป็นเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กยื่นในเสา
D	=	ขนาดเหล็กยื่น
d_s	=	เหล็กปลอก
E_c	=	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_s	=	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม
$\mathcal{E}_c$	=	หน่วยการหดตัวของคอนกรีต
$\mathcal{E}_s$	=	หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมรับแรงดึง
f_s	=	หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมรับแรงดึง
f_y	=	หน่วยแรงดึงหรือหน่วยแรงอัดที่จุดครากของเหล็กเสริม
f_c	=	หน่วยแรงอัดในคอนกรีต
f'_c	=	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต
k	=	ประสิทธิภาพของเหล็กปลอกเกลียว
M_o	=	โมเมนต์คดที่หาได้ตามทฤษฎี
M_u	=	โมเมนต์คดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้วด้วยตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก
n	=	อัตราส่วน โมดูลัส
O	=	ค่าความจริง
P	=	กำลังด้านทานแรงอัดของเสาในสภาวะใช้งาน
P_u	=	กำลังด้านทานแรงอัด
P_o	=	ค่าการคำนวณแรงอัดประลัยตามทฤษฎี
$P_{o,av}$	=	ค่าเฉลี่ยการคำนวณแรงอัดประลัยตามทฤษฎี
P_{cr}	=	แรงอัดที่ทำให้เสาทดสอบเริ่มแตกร้าว
$P_{cr,av}$	=	แรงอัดเฉลี่ยที่ทำให้เสาทดสอบเริ่มแตกร้าว

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P_s	=	กำลังรับแรงอัดของเสาตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
P_{test}	=	ค่าแรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบเสา
$P_{test,av}$	=	ค่าแรงอัดประลัยเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบเสา
P_o	=	แรงอัดตามแนวแกน
s	=	ระยะห่างเหล็กปลอก
μ	=	อัตราส่วนปัวซองส์
χ^2	=	ไคสแควร์
ϕ	=	ตัวคูณลดกำลัง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ข้อกำหนดมาตรฐานทั่วไปสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวของ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ศ.ท.) กำหนดให้เหล็กปลอกของเสาปลอกเดี่ยวต้องใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 6 มม. สำหรับเหล็กขึ้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่โตกว่า 20 มม. และใช้ขนาดเหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 9 มม. สำหรับเหล็กขึ้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 25 ถึง 32 มม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 12 มม. สำหรับเหล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางโตกว่า 32 มม. ขึ้นไป โดยมีระยะห่างไม่เกิน 16 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กขึ้น หรือ 48 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก หรือไม่เกินกว่าด้านแคบของเสาและต้องจัดให้มุมของเหล็กปลอกยึดกับเหล็กขึ้นตามมุมทุกมุม และเส้นอื่น ๆ สลับเส้นเว้นเส้น โดยมุมของเหล็กปลอกนั้นต้องไม่เกินกว่า 135 องศา เหล็กขึ้นที่วันต้องห่างจากเหล็กขึ้นที่ถูกยึดไว้ไม่เกิน 15 ซม. (ว.ศ.ท. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง , 2548)

ข้อกำหนดมาตรฐานทั่วไปสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวของ American Concrete Institute (ACI) กำหนดว่าเสาปลอกเดี่ยวต้องใช้เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 10 มม. สำหรับเหล็กขึ้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่โตกว่า 32 มม. และใช้เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 13 มม. สำหรับเหล็กขึ้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 36 มม. โดยมีระยะห่างไม่เกิน 16 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กขึ้น หรือ 48 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก (ACI Committee 318, 1999)

มาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและ American Concrete Institute มีข้อแตกต่างกันอยู่คือขนาดของเหล็กปลอก การวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบว่าขนาดที่ต่างกันของเหล็กปลอกซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน ว.ศ.ท. และ ACI ทำให้กำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแตกต่างกันหรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรม การเสียรูป การวิบัติ และกำลังอัดของเสาต้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปลอกเดี่ยว ชนิด ขนาด และระยะห่างต่างกัน โดยการเปรียบเทียบตามมาตรฐาน วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยกับ American Concrete Institute

1.3 สมมุติฐานในการวิจัย

1.3.1 การเสริมเหล็กปลอกทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ RB 6, RB 9, DB 10 โดยใช้เหล็กขึ้นขนาด DB 12 มม. ในเสาเท่ากันทุกต้น ในเสาคอนกรีตปลอกเดี่ยว ให้ค่ากำลังอัดที่ต่างกัน โดย

H_0 = กำลังอัดของเสาต้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ใช้เหล็กปลอก ชนิด ขนาด และระยะห่างต่างกัน ไม่ทำให้ค่ากำลังอัดของเสาต่างกัน

H_1 = กำลังอัดของเสาต้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ใช้เหล็กปลอก ชนิด ขนาด และระยะห่างต่างกัน ทำให้ค่ากำลังอัดของเสาต่างกัน

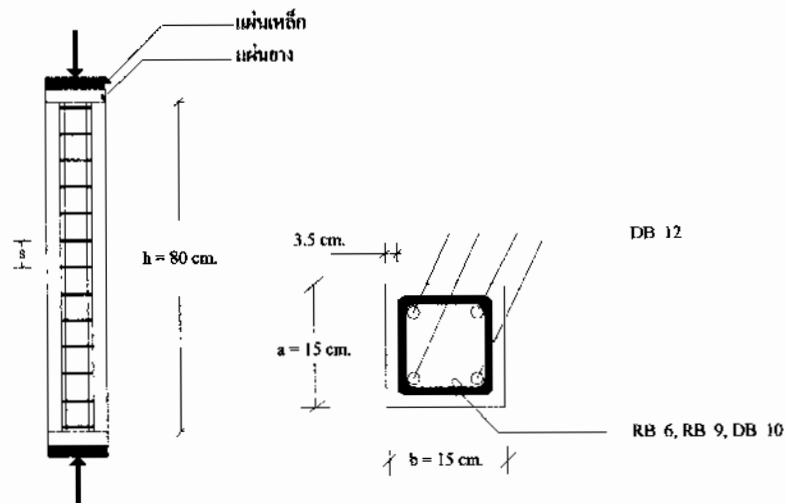
1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ข้อกำหนดคุณสมบัติของชิ้นงานทดสอบ

- การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กใช้ทฤษฎีกำลัง ในการออกแบบเสาต้น
- เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีขนาดหน้าตัด 15 x 15 ซม. ความสูง 80 ซม. (ภาพที่ 1-1)
- เสริมเหล็ก เหล็กแกนเสาเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. (SD 30) จำนวน 4 เส้น เหล็กปลอกเสาเป็นเหล็กกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม., 9 มม. (SR 24) และ 10 มม. (SD 30)

- ระยะคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม 3.5 ซม.
- ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตทำการศึกษา ในช่วงกำลังอัดออกแบบ

210 กก./ ตร.ซม.



ภาพที่ 1-1 แสดงรายละเอียดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.4.2 ตรวจสอบคุณสมบัติด้านวิศวกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

- กำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
- ศึกษาพฤติกรรมการพังทลายและลักษณะการวิบัติ

1.4.3 ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 15x15 ซม. ความสูง 80 ซม. แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ (A = เหล็กปลอก RB 6), (B = เหล็กปลอก RB 9), (C = เหล็กปลอก DB 10) ดังตารางที่ 1-1

- เสากลุ่ม A (RB 6) มีจำนวน 16 ต้น ได้แก่ A10/1 และ A10/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 9.60 ซม. A14/1 และ A14/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 14.40 ซม. A19/1 และ A19/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 19.20 ซม. A24/1 และ A24/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 24.00 ซม. A29/1 และ A29/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 28.80 ซม. A34/1 และ A34/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 33.60 ซม. A38/1 และ A38/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 38.40 ซม. A43/1 และ A43/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 43.20 ซม. โดยทำการติดอุปกรณ์วัดความเครียดในเสา A14/2, A19/2, A24/2, A29/2 ภาพที่ 1-2

- เสากลุ่ม B (RB 9) มีจำนวน 22 ต้น ได้แก่ B10/1 และ B10/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 9.60 ซม. B14/1 และ B14/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 14.40 ซม. B19/1 และ B19/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 19.20 ซม. B24/1 และ B24/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 24.00 ซม. B29/1 และ B29/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 28.80 ซม. B34/1 และ B34/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 33.60 ซม. B38/1 และ B38/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 38.40 ซม. B43/1 และ B43/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 43.20 ซม. B48/1 และ B48/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 48.00 ซม. B53/1 และ B53/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก

52.80 ซม. B58/1 และ B58/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 57.60 ซม. โดยทำการติดอุปกรณ์วัดความเครียดในเสา B14/2', B19/2', B24/2', B29/2' ภาพที่ 1-3

- เสากลุ่ม C (DB 10) มีจำนวน 24 ต้น ได้แก่ C10/1 และ C10/2 มีระยะห่างเหล็กปลอก 9.60 ซม. C14/1 และ C14/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 14.40 ซม. C19/1 และ C19/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 19.20 ซม. C24/1 และ C24/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 24.00 ซม. C29/1 และ C29/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 28.80 ซม. C34/1 และ C34/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 33.60 ซม. C38/1 และ C38/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 38.40 ซม. C43/1 และ C43/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 43.20 ซม. C48/1 และ C48/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 48.00 ซม. C53/1 และ C53/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 52.80 ซม. C58/1 และ C58/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 57.60 ซม. C62/1 และ C62/2' มีระยะห่างเหล็กปลอก 62.40 ซม. โดยทำการติดอุปกรณ์วัดความเครียดในเสา C14/2', C19/2', C24/2', C48/2' ภาพที่ 1-4

1.4.4 ทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของเสาโดยการทดสอบความแตกต่างของความถี่ด้วยวิธีโคสแควร์

1.5 เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.5.1 Universal Testing Machine ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UH 100 A [100 ตัน]

1.5.2 Data logger เป็นชุดแปลงสัญญาณความเครียด และน้ำหนักบรรทุก ส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูลการทดสอบ

1.5.3 เครื่องคอมพิวเตอร์ Notebook Intel Pentium M1500 Mhz. Ram 256 Mb ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows XP.

1.5.4 Enhanced Software R.6.01.01 ของ Yokogawa Darwin ซึ่งใช้ควบคุม Data logger

1.5.5 Electrical Strain Gauges ยี่ห้อ TML เป็นอุปกรณ์วัดความเครียดชนิดไฟฟ้าสำหรับติดที่ผิวเหล็กขนาด ความยาว 5 มม. และที่ผิวคอนกรีตขนาดความกว้าง 5 มม. x ความยาว 60 มม.

1.6 ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปฏิบัติ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1.6.1 ศึกษาและวิเคราะห์รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องจากอดีตถึงปัจจุบัน

1.6.2 ทำการออกแบบจัดเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการทดสอบ

1.6.3 ทำการทดลองและเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการ โดยนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับระยะห่างเหล็กปลอกกับขนาดของเหล็กเสริมยื่น และระยะห่างเหล็กปลอกต่อเหล็กปลอก และระยะห่างเหล็กปลอกคอด้านแคบสุดของเสา

1.6.4 สรุปและเปรียบเทียบพฤติกรรม และค่ากำลังรับแรงอัดของเสาปลอกเดี่ยวตามมาตรฐาน ACI กับ ว.ศ.ท.

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ว่าเหล็กปลอกในกรณีใดรับกำลังได้เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบ

1.7.2 เพื่อทราบขนาดของเหล็ก และระยะ และขนาดของเหล็กปลอกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวที่ประหยัดและปลอดภัย

1.7.3 เพื่อทราบพฤติกรรมการแตกร้าวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

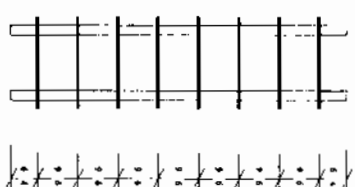
1.7.4 เพื่อเปรียบเทียบการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจากการออกแบบและการทดสอบ

ตารางที่ 1-1 แสดงขนาดรายละเอียดและจำนวนตัวอย่างสาทศสอบ

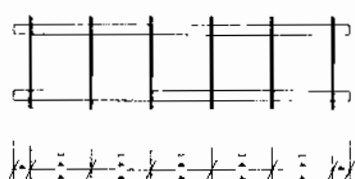
กลุ่ม	เสา แบบที่	ชื่อ เสาทดสอบ	เหล็กปลอก		ระยะห่างเหล็กปลอก (s)	ระยะห่างเหล็กปลอก (s)	ระยะห่างเหล็กปลอก (s)
			ขนาดและขนาด d_s (มม.)	ระยะห่างเหล็กปลอก (s) (ซม.)	ขนาดเหล็กขึ้น (D)	ขนาดเหล็กปลอก (d_s)	ส่วนแคบสุดของเสา (b)
A	1	A10/1 A10/2	RB 6	9.6	8	16	0.64
	2	A14/1 A14/2	RB 6	14.4	12	24	0.96
	3	A19/1 A19/2	RB 6	19.2	16	32	1.28
	4	A24/1 A24/2	RB 6	24	20	40	1.6
	5	A29/1 A29/2	RB 6	28.8	24	48	1.92
	6	A34/1 A34/2	RB 6	33.6	28	56	2.24
	7	A38/1 A38/2	RB 6	38.4	32	64	2.56
	8	A43/1 A43/2	RB 6	43.2	36	72	2.88
B	9	B10/1 B10/2	RB 9	9.6	8	10.67	0.64
	10	B14/1 B14/2	RB 9	14.4	12	16	0.96
	11	B19/1 B19/2	RB 9	19.2	16	21.33	1.28
	12	B24/1 B24/2	RB 9	24	20	26.67	1.6
	13	B29/1 B29/2	RB 9	28.8	24	32.00	1.92
	14	B34/1 B34/2	RB 9	33.6	28	37.33	2.24
	15	B38/1 B38/2	RB 9	38.4	32	42.67	2.56
	16	B43/1 B43/2	RB 9	43.2	36	48.00	2.88
	17	B48/1 B48/2	RB 9	48	40	53.33	3.2
	18	B53/1 B53/2	RB 9	52.8	44	58.67	3.52
	19	B58/1 B58/2	RB 9	57.6	48	64.00	3.84

ตารางที่ 1-1 (ต่อ)

กลุ่ม	เสา แบบที่	ชื่อ เสาทดสอบ	เหล็กปลอก		ระยะห่างเหล็กปลอก (s)	ระยะห่างเหล็กปลอก (s)	ระยะห่างเหล็กปลอก (s)
			ขนาดและขนาด d_s (มม.)	ระยะห่างเหล็กปลอก (s) (มม.)	ขนาดเหล็กขึ้น (D)	ขนาดเหล็กปลอก (d_s)	ส่วนเคลือบของเสา (b)
C	20	C10/1 C10/2	DB 10	9.6	8	9.6	0.64
	21	C14/1 C14/2	DB 10	14.4	12	14.4	0.96
	22	C19/1 C19/2	DB 10	19.2	16	19.2	1.28
	23	C24/1 C24/2	DB 10	24	20	24	1.6
	24	C29/1 C29/2	DB 10	28.8	24	28.8	1.92
	25	C34/1 C34/2	DB 10	33.6	28	33.6	2.24
	26	C38/1 C38/2	DB 10	38.4	32	38.4	2.56
	27	C43/1 C43/2	DB 10	43.2	36	43.2	2.88
	28	C48/1 C48/2	DB 10	48	40	48	3.2
	29	C53/1 C53/2	DB 10	52.8	44	52.8	3.52
	30	C58/1 C58/2	DB 10	57.6	48	57.6	3.84
	31	C62/1 C62/2	DB 10	62.4	52	62.4	4.16



A 10/1
A 10/2



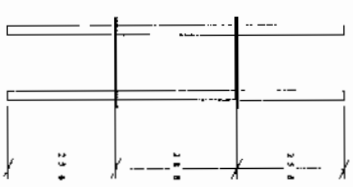
A 14/1
A 14/2



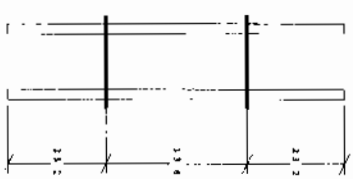
A 19/1
A 19/2



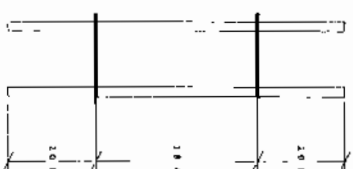
A 24/1
A 24/2



A 29/1
A 29/2



A 34/1
A 34/2

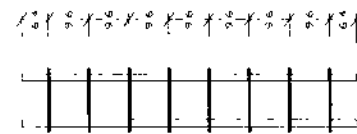


A 38/1
A 38/2

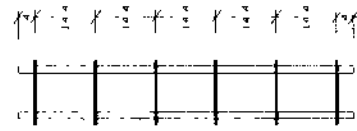


A 43/1
A 43/2

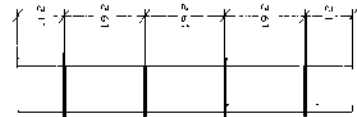
ภาพที่ 1-2 การเสริมเหล็กเสาเข็ม A



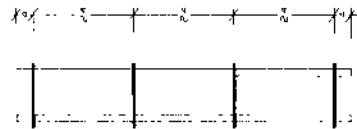
B10/1
B10/2



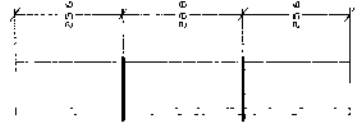
B14/1
B14/2



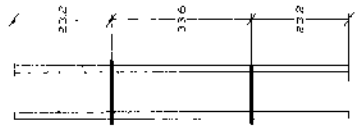
B19/1
B19/2



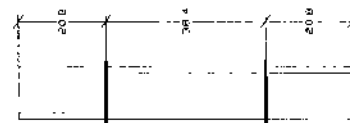
B24/1
B24/2



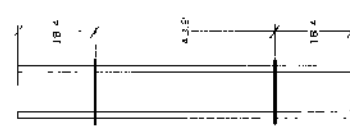
B29/1
B29/2



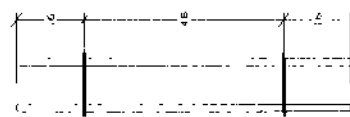
B34/1
B34/2



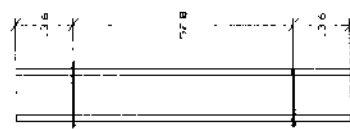
B38/1
B38/2



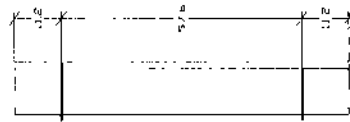
B43/1
B43/2



B48/1
B48/2



B52/1
B52/2



B58/1
B58/2

ภาพที่ 1-3 การเสริมเหล็กเสาเข็ม B

บทที่ 2

การค้นคว้าเอกสาร

2.1 พฤติกรรมและกำลังต้านทานของเสาเอ็นที่รับแรงอัดตามแนวแกน

2.1.1 เสาคอนกรีตล้วน

การทดลองเสาคอนกรีตล้วนที่ปราศจากเหล็กเสริม ซึ่งได้พิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักของเสา เช่น ขนาดรูปร่างของเสา คุณภาพของคอนกรีต อัตราการให้แรงกดอัด ความชื้นของเสา ตลอดจนลักษณะของการหล่อเสาตัวอย่างที่อาจหล่อในแนวตั้งหรือในแนวนอน พบว่าพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตล้วนคล้ายกับพฤติกรรมการรับน้ำหนักของแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก กล่าวคือ ขณะที่มีการกดตัวในแนวตั้งที่รับแรงอัดก็จะเกิดการเบ่งตัวออกทางด้านข้างด้วย ทั้งนี้เป็นผลจากอัตราส่วนปัวซอง μ ของคอนกรีต ลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตล้วนเป็นการปริแยกหรือฉีกออก (Splitting) ตามแนวยาวของเสาหรือเป็นแบบเฉือนขาดในระนาบเอียง ซึ่งหน่วยแรงอัดสูงสุดในเสาคอนกรีตล้วนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7 ถึง 1.0 ของกำลังประลัยของแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก f'_c และมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ $0.85f'_c$ ทั้งนี้เนื่องจาก

ก. เสาคอนกรีตต้องรับน้ำหนักบรรทุกคงค้าง (Sustained load) ซึ่งต่างไปจากการรับน้ำหนักของแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก

ข. การหล่อเสาคอนกรีตกระทำไม่ได้เต็มที่เท่าการหล่อแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก

ค. เสาคอนกรีตมีการคายน้ำมากกว่าแท่งคอนกรีตตัวอย่าง ทำให้คอนกรีตคอนบนของเสามีกำลังน้อยกว่าคอนล่าง

ง. เสาคอนกรีตมีจุดเปราะบาง (Weak spot) มากกว่าแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก

ดังนั้น ถ้าเสาคอนกรีตล้วนมีเนื้อที่หน้าตัดสุทธิเท่ากับ A_c (ในที่นี้คือ A_g ซึ่งเป็นเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาคอนกรีต) และมีกำลังอัดสูงสุดของแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอกเท่ากับ f'_c จะได้ กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนของเสาคอนกรีตล้วน

$$P_u = 0.85 f'_c A_c \quad (2-1)$$

เมื่อ P_u = กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตล้วน

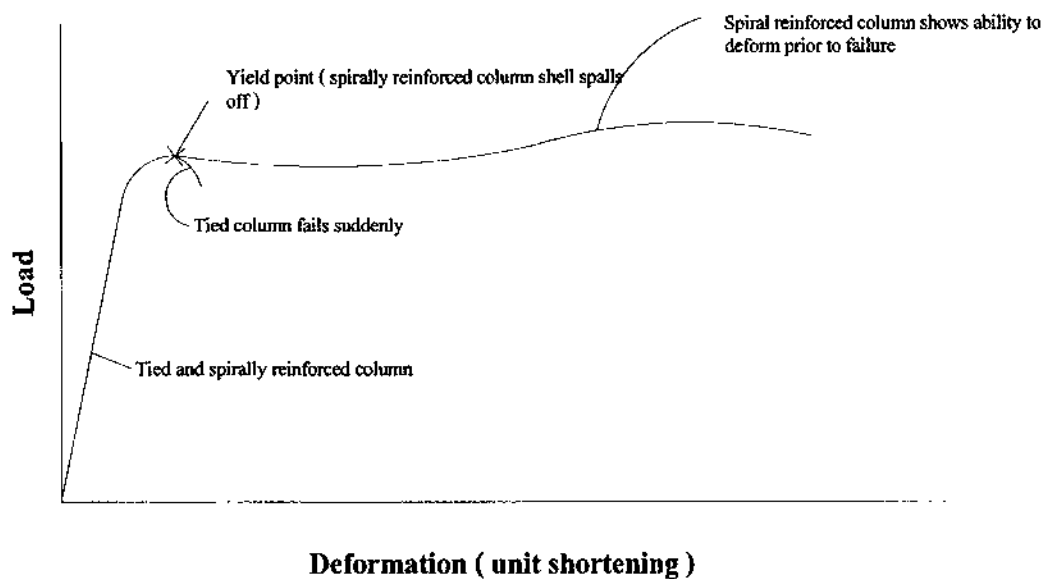
f'_c = กำลังอัดสูงสุดของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน

A_c = พื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีต

2.1.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว

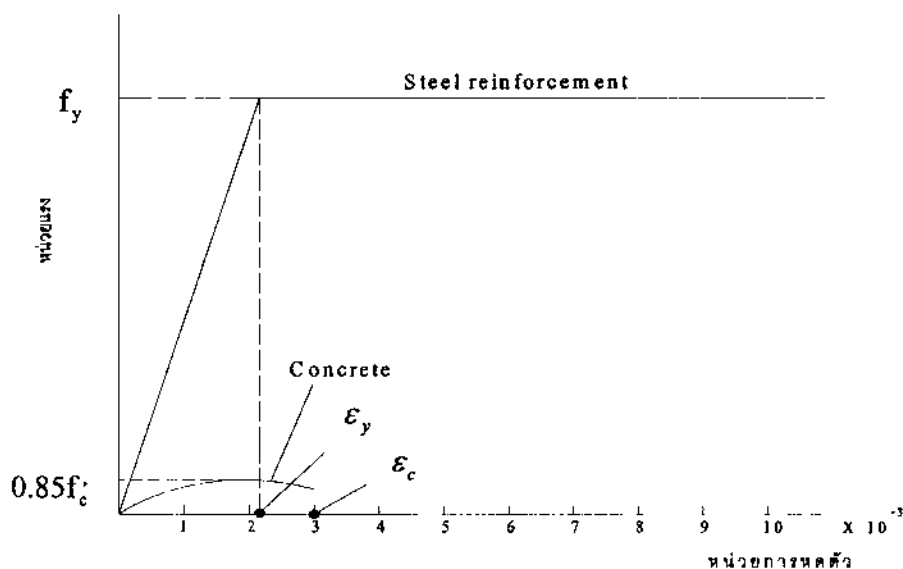
เสาคอนกรีตที่เสริมเฉพาะเหล็กชั้นนอกอย่างเดียวจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ (Brittle) และการวิบัติค่อนข้างคล้ายกับการวิบัติของเสาคอนกรีตล้วน กล่าวคือ ทันที่ที่คอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กถูกอัดแตก หลุดและร่อนออก ซึ่งจะเหลือให้เห็นแต่เหล็กชั้นนอก เหล็กชั้นนอกจะถูกอัดและวิบัติจากการโก่งเคาะ เหล็กปลอกจะช่วยโอบรัดแกนคอนกรีตภายในไว้หลังจากที่คอนกรีตหุ้มถูกอัดแตก ทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีกำลังรับน้ำหนักหรือแรงอัดเพิ่มขึ้นอีกบ้าง และช่วยให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนที่จะเกิดการวิบัติ อนึ่ง นอกจากเหล็กปลอกจะช่วยให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก มีพฤติกรรมแบบเหนียวแล้วยังช่วยยึดเหล็กชั้นในให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการขณะหล่อเสาคอนกรีตอีกด้วย

พฤติกรรมการรับแรงอัดที่กระทำตามแนวแกนร่วมศูนย์ของเสาเหล็กปลอกเดี่ยวแสดงไว้ในภาพที่ 2-1 ถ้าเสาปลอกเดี่ยวมีขนาดเนื้อที่หน้าตัดของคอนกรีตและเหล็กเสริมยื่นด้วยปริมาณเท่ากัน และสมมติว่าเหล็กชั้นนอกมีกำลังจุดครากไม่สูงเกินไป จะพบว่าก่อนที่คอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมจะถูกอัดแตก ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักหรือแรงอัดที่กระทำกับการเปลี่ยนรูป (Deformation) หรือการหดตัวตามแกนของเสาปลอกเดี่ยว เป็นเส้นตรงในช่วงที่แรงอัดน้อยๆ ซึ่งทั้งหน่วยแรงอัดในคอนกรีตและในเหล็กเสริมมีค่าอยู่ในช่วงยืดหยุ่น แต่เมื่อเสารับแรงอัดมากขึ้น โดยทำให้หน่วยแรงอัดในคอนกรีตมีค่าสูงเกินกว่า $0.5f'_c$ (โดยประมาณ) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง เนื่องจากความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเริ่มไม่เป็นสัดส่วนกันนั่นเอง เมื่อแรงอัดกระทำมากขึ้นจนกระทั่งหน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมถึงจุดครากซึ่งค่อนข้างจะพอดีกับหน่วยแรงอัดในคอนกรีตมีค่าสูงสุด (เท่ากับ $0.85f'_c$ ที่หน่วยการหดตัวเท่ากับ 0.002 มม./มม.) คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะเริ่มถูกอัดแตก หลุดร่อนออกโดยแรงเฉือนในรูปของแรงดึงทแยง



ภาพที่ 2-1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักตามแกนของเสา

การวิเคราะห์หาค่ากำลังต้านทานแรงอัดตามแกนของเสาสั้นจะพิจารณาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัว (Stress – Strain Curves) ทั้งของคอนกรีตและเหล็กเสริม ดังในภาพที่ 2-2 โดยกำหนดให้คอนกรีตมีหน่วยแรงอัดสูงสุดเท่ากับ $0.85f_c$ ที่หน่วยการหดตัวเท่ากับ 0.002 มม./มม. และให้คอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดก่อนการวิบัติเท่ากับ 0.003 มม./มม.



ภาพที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับการหดตัว (Stress-Strain Curves)

ในช่วงอิลาสติกหรือเมื่อหน่วยแรงกดตัวในเสา $\mathcal{E}$ มีค่าน้อยๆ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการกดตัวทั้งของคอนกรีตและเหล็กเสริมจะเป็นเส้นตรง นั่นคือ

หน่วยแรงอัดในเหล็กเสริม $f_s = E_s \mathcal{E}_s$ และหน่วยแรงอัดในคอนกรีต $f_c = E_c \mathcal{E}_c$ ถ้าสมมติว่าคอนกรีตและเหล็กเสริมมีการยืดเหมือนกันดี นั่นคือ $\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_c$ หรือ $f_s = E_s f_c / E_c = n f_c$ ในเมื่อ $n = E_s / E_c$ เรียกกันว่า Modular ratio

นั่นหมายความว่า สามารถแทนหรือแปลงหน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริม A_s ในเสาได้ด้วยหน้าตัดของคอนกรีต ซึ่งมีค่าเท่ากับ nA_s ดังนั้นเสารูปตัดใดๆ มีเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดเท่ากับ A_g และเสริมเหล็กขึ้นทั้งหมดเป็นปริมาณเท่ากับ A_{ss} เนื้อที่หน้าตัดแปลงของเสาจะมีค่าเท่ากับ $(A_g - A_{ss}) + nA_{ss}$ หรือเท่ากับ $A_g + (n - 1)A_{ss}$

ฉะนั้น ถ้าให้ f_c เป็นหน่วยแรงอัดของเสาคอนกรีตในสภาวะใช้งาน จะได้กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาในสภาวะใช้งาน

$$P = f_c [A_g + (n - 1) A_{ss}] \quad (2-2)$$

อนึ่ง ค่าที่วิเคราะห์ได้ข้างต้นยังมิได้พิจารณา รวมถึงการดัดและการกดตัวของคอนกรีต (Creep และ Shrinkage) เมื่อเสาดังรับน้ำหนักบรรทุกคงค้าง ซึ่งค่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต E_c จะลดน้อยลงตามระยะเวลาที่มีน้ำหนักบรรทุกคงค้างเมื่อหน่วยแรงอัดมีค่าสูงสุด ซึ่งทำให้มีอัตราส่วนโมดูลัส (Modular ratio : n) เพิ่มขึ้นกว่าปกติ ผลของการดัดของคอนกรีตทำให้คอนกรีตในเสารับหน่วยแรงอัดน้อยลงแต่เหล็กเสริมในเสาดังรับหน่วยแรงอัดเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม นั่นคือการดัดของคอนกรีตทำให้เกิดการถ่ายแรงจากคอนกรีตให้กับเหล็กขึ้นในเสา พฤติกรรมดังกล่าวข้างต้นค่อนข้างยุ่งยากในการวิเคราะห์หาหน่วยแรงที่แท้จริง หรือในการที่จะกำหนดอัตราส่วนปลอดภัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อต้องรับน้ำหนักบรรทุกในสภาวะใช้งาน

สำหรับกำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ปกติจะและปกติจะถือว่าก่อนที่คอนกรีตจะแตก จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากคอนกรีตและเหล็กขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการกดตัว (Stress-strain curves) ทั้งของคอนกรีตและเหล็กเสริม จะเห็นว่าเมื่อใช้เหล็กเสริมที่มีกำลังจุดครากอยู่ระหว่าง 3,000 ถึง 4,000 กก./ซม.² เหล็กเสริมนั้นจะมีหน่วยการกดตัวที่จุดคราก ($\mathcal{E}_y$) เท่ากับ 0.001,5 ถึง 0.002 มม./มม. (โดยประมาณ) นั่นหมายความว่า เหล็กเสริมในเสาจะถูกอัดถึงจุดครากก่อนที่คอนกรีตจะถูกอัดจนถึงหน่วยแรงอัดสูงสุดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้น ก่อนที่

คอนกรีตหุ้มจะถูกอัดแตก หน่วยแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ $0.85f'_c$ และหน่วยแรงอัดของเหล็กเสริมจะมีค่าเท่ากับกำลังที่จุดคราก f_y นั่นคือ

$$\text{กำลังต้านทานแรงอัดที่สภาวะนี้} = 0.85f'_c A_c + f_y A_{st} \quad (2-3)$$

โดยที่ A_c เป็นเนื้อที่หน้าตัดสุทธิของคอนกรีต $= (A_g - A_{st})$ ซึ่ง A_g เป็นเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา และ A_{st} เป็นเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กยื่นในเสา

อย่างไรก็ดี หากเหล็กเสริมไม่มีความสัมพันธ์ดังในภาพที่ 2-2 หรือเมื่อเหล็กยื่นมีกำลังจุดครากสูงมาก (High-strength steel) การวิเคราะห์หากำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาจะต้องพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัวจริงของคอนกรีต และของเหล็กเสริม ซึ่งกำลังรับน้ำหนักของเสาจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นได้ต่อเมื่อกำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากเหล็กเสริมมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่มีกำลังลดต่ำลง

ปกติ ถือว่าสมการ (2-3) เป็นกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว เพราะเมื่อคอนกรีตหุ้มถูกอัดแตกจะถือว่าเสานั้นไม่เหมาะสมกับการใช้งานอีกต่อไป ส่วนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเกลียวซึ่งให้เหล็กปลอกเกลียวพันต่อเนื่องรอบแกนเสาตลอดความยาวจะมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่า และมีพฤติกรรมแบบเหนียวมากกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว เพราะเหล็กปลอกเกลียวจะเข้ามาช่วยทดแทนกำลังต้านทานแรงอัดของส่วนคอนกรีตหุ้มที่สูญเสียไป

ผลของการทดสอบ พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดตามแกนของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเกลียว ประกอบด้วยแรงต้านทานจากคอนกรีต เหล็กยื่นและเหล็กปลอกเกลียว นั่นคือ

ในเมื่อ k = ประสิทธิภาพของเหล็กปลอกเกลียว มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.5 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.95 ถึง 2.0

อย่างไรก็ตามมาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ให้ถือว่าเสาปลอกเกลียวมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนเท่ากับเสาปลอกเดี่ยว แต่จะใช้ตัวคูณลดกำลังของเสาปลอกเกลียวน้อยกว่าเสาปลอกเดี่ยวเนื่องจากเสาปลอกเกลียวมีความเหนียวมากกว่า

สรุป กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$P_o = 0.85f'_c A_c + f_y A_{st} \quad (2-4)$$

แต่ถ้าไม่คิดเนื้อที่ของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยเหล็กยื่น จะใช้ $A_c = A_g$ นั่นคือ

$$P_0 = 0.85f'_c A_g + f_y A_{st} \quad (2-5)$$

2.2 การคำนวณออกแบบเสาสั้น

หลักเกณฑ์ของการคำนวณออกแบบเสาโดยวิธีกำลัง

$$P_u \leq \phi P_n \text{ และ } M_u \leq \phi M_n$$

โดยที่ P_n และ M_n = แรงอัดตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มค่าแล้ว
ด้วยตัวคูณเพิ่มน้ำหนัก

$$\phi = \text{ตัวคูณลดกำลัง (เสาปลอกเดี่ยว} = 0.7, \text{ เสาปลอกเกลียว} = 0.75)$$

P_n และ M_n = กำลังต้านทานแรงอัดและโมเมนต์ดัดที่หาได้ตามทฤษฎี

เสาสั้นรับน้ำหนักตามแกน

มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดให้ เสาสั้น คสล. ปลอกเกลียวและปลอกเดี่ยวมีกำลังต้านทานแรงอัดตามแกนได้สูงสุดเท่ากัน โดยพิจารณาให้กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนของเสาสั้นเป็นผลรวมของกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต และกำลังต้านทานแรงอัดของเหล็กยื่น นั่นคือ

กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาสั้น P_0

$$P_0 = 0.85f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (2-6)$$

แต่ในสถานะของการก่อสร้างจริง เสาแต่ละต้นจะไม่รับแรงอัดตามแนวแกนเสียทีเดียว อาจมีแรงกระทำเอียงศูนย์บ้าง ดังนั้น ในการคำนวณออกแบบจึงควรเผื่อระยะเอียงศูนย์ไว้อีกอย่างน้อยเท่ากับ $0.10h$ สำหรับเสาปลอกเดี่ยวและ เท่ากับ $0.05h$ สำหรับเสาปลอกเกลียว ทั้งนี้ต้องไม่น้อยกว่า 2.5 ซม. ตามที่มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ได้เคยบัญญัติไว้ โดยที่ h เป็นความลึกของเสาด้านที่พิจารณาให้รับแรงโมเมนต์ดัด

ปัจจุบัน มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. ได้พิจารณาเรื่องศูนย์กลางข้างต้นโดยการลดกำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนอย่างเฉียวของเสาปลอกเดี่ยว และเสาปลอกเกลียวให้เหลือเพียง 80 % และ 85% ตามลำดับ ดังนั้น จะได้กำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกน ϕP_n ดังนี้

กำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนเสาปลอกเดี่ยว

$$\phi P_{n(max)} = 0.80\phi[0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (2-7)$$

กำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนเสาปลอกเกลียว

$$\phi P_{n(max)} = 0.85\phi[0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (2-8)$$

อนึ่ง ในการคำนวณออกแบบเสา คสล. อาจพิจารณาแทนค่าของ $(A_g - A_{st})$ ดังที่ปรากฏในสมการข้างต้นด้วยค่า A_g นั่นคือ ไม่คิดเนื้อที่ของคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยเหล็กขึ้น ทั้งนี้ไม่ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดผิดพลาดมากนัก

2.3 ข้อกำหนดของเหล็กเสริมตามขวางสำหรับเสาปลอกเดี่ยวตามมาตรฐาน ว.ส.ท.

เหล็กปลอกเดี่ยวสำหรับองค์อาคารรับแรงอัด ต้องเป็นไปตามข้อกำหนด(ว.ส.ท. 3410 (จ)) ต่อไปนี้

2.3.1 เหล็กเส้นทุกเส้นต้องรัดไว้ด้วยเหล็กปลอกเดี่ยว โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังนี้

- ขนาดอย่างน้อย 6 มม. สำหรับเหล็กเส้นตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.

หรือเล็กกว่า

- ขนาดอย่างน้อย 9 มม. สำหรับเหล็กเส้นตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ตั้งแต่ 25 ถึง 32 มม.

- ขนาดอย่างน้อย 12 มม. สำหรับเหล็กเส้นตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 32 มม. ขึ้นไป และสำหรับเหล็กเส้นตามยาวมัดรวมกันเป็นกำ

2.3.2 ระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยวต้องไม่มากกว่าค่าต่อไปนี้

- 16 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นตามยาว
- 48 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอกเดี่ยว
- มิติที่แคบสุดขององค์อาคารรับแรงอัด

2.3.3 ต้องจัดให้มุมของเหล็กปลอกเคียวชิดเหล็กเส้นตามมุมยาวทุกมุม ขณะเคียวกันต้องจัดให้เหล็กปลอกเคียวชิดเหล็กเส้นตามยาวเส้นเว้นเส้น โดยมุมของเหล็กปลอกนั้นต้องไม่มากกว่า 135 องศา สำหรับเหล็กเส้นที่ไม่มีมุมของเหล็กปลอกเคียวชิดระยะช่องว่างของเหล็กเส้นนั้นกับเหล็กเส้นที่มีเหล็กปลอกเคียวชิดมุมข้างเคียงต้องไม่เกิน 15 ซม. ถ้าเหล็กเส้นตามยาวเรียงกันเป็นวงกลม อาจใช้เหล็กปลอกเคียวครอบเป็นวงกลมได้

2.3.4 เหล็กปลอกเคียวต้องอยู่เหนือส่วนบนของฐานราก หรือพื้นของชั้นใดๆ ไม่มากกว่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างของเหล็กปลอกเคียว และต้องอยู่ใต้เหล็กเสริมตามแนวนอนล่างสุดของแผ่นพื้นหรือแป้นหัวเสาที่อยู่เหนือขึ้นไป ไม่มากกว่าครึ่งหนึ่งของระยะห่างของเหล็กปลอกเคียวชั้นนั้น

2.3.5 ในกรณีเสามีคานหรือแป้นหัวข้างมาต่อทั้ง 4 ด้าน เหล็กปลอกเคียวอาจหุบคอดูใต้เหล็กเสริมล่างสุดของคานหรือแป้นหัวข้างที่คั่นสุด ไม่มากกว่า 7.5 ซม.

2.4 ข้อกำหนดของเหล็กเสริมตามขวางสำหรับเสาปลอกเคียวตามมาตรฐาน ACI

มาตรฐาน ACI กำหนดเกี่ยวกับเหล็กปลอกเคียวในเสาดังนี้

2.4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กสุดของเหล็กปลอกเคียว

ACI 7.10.5 ระบุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอกเคียว ซึ่งขึ้นกับขนาดของเหล็กชั้นดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 การเสริมเหล็กปลอกตามมาตรฐาน ACI

เส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กชั้น	เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอกเคียว
- ไม่ต่ำกว่า No.32	No. 10 หรือต่ำกว่า
- No. 36 , 43 , 57	No. 13 หรือต่ำกว่า
- เหล็กที่มัดรวมกันเป็นกำ (Bundle)	Deformed wire or Welded Fabric

2.4.2 ระยะเรียงของเหล็กปลอกเคียว

ระยะเรียงของเหล็กปลอกเคียวในเสา จะต้องไม่เกินค่าต่อไปนี้ (ACI 7.10.5.2)

- 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง
- 48 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอกเคียว
- ด้านแคบสุด (Least dimension) ของหน้าตัดเสา

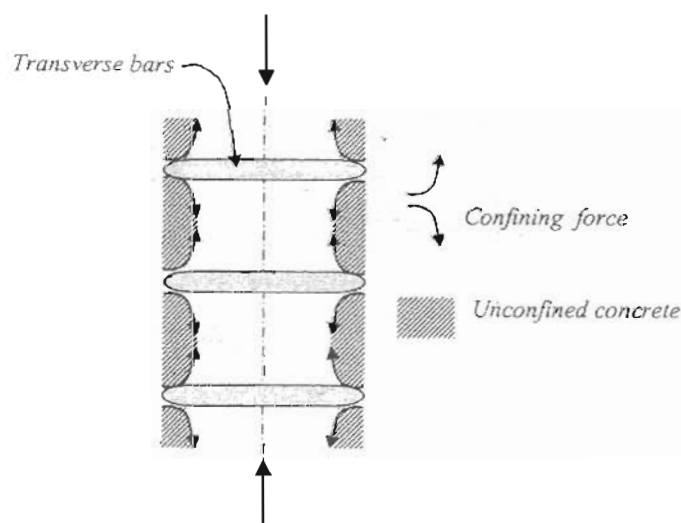
2.4.3 การจัดเรียงเหล็กขึ้นและเหล็กปลอกเดี่ยว

ACI 7.10.5.2 ระบุให้มุมของเหล็กปลอกยึดเหล็กตามยาวทุกมุม ขณะเดียวกันต้องจัดให้มุมของเหล็กปลอกเดี่ยวยึดเหล็กเส้นตามยาวเส้นเว้นเส้น โดยมุมของเหล็กปลอกนั้นต้องไม่โตเกิน 135 องศา อนึ่ง เหล็กเส้นที่เว้นต้องห่างจากเส้นที่ถูกยึดไว้ไม่เกิน 150 มิลลิเมตร

2.5 การรัดรอบในองค์อาคารต้านทานแรงอัดที่เสริมเหล็กปลอก

ในองค์อาคารต้านทานแรงอัดที่เสริมเหล็กทางด้นข้างชนิดต่างๆ เช่น เหล็กรัดรอบหรือเหล็กปลอกเดี่ยว (Hoop or Tie) เหล็กปลอกเกลียว (Spiral) กล่าวได้ว่าเหล็กรัดรอบ หรือ เหล็กปลอกเหล่านี้นมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดน้อยมาก ยกเว้นในกรณีที่หน่วยแรง หรือความเค้นมีค่าสูง หรือเข้าใกล้กำลังอัดตามแกนสูงสุด (Uniaxial strength) อย่างไรก็ตามปัจจัย หรือผลเนื่องจากเหล็กรัดรอบ หรือเหล็กปลอกต่อกำลังต้านทานแรงอัดตามแกนของคอนกรีต มีดังนี้

2.5.1 อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กรัดรอบ หรือเหล็กปลอกต่อปริมาตรของแกนคอนกรีต ($\frac{V_s}{V_c}$) เมื่อ V_s และ V_c เป็นปริมาตรของเหล็กรัดรอบ หรือปลอก และปริมาตรของแกนคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 2-3

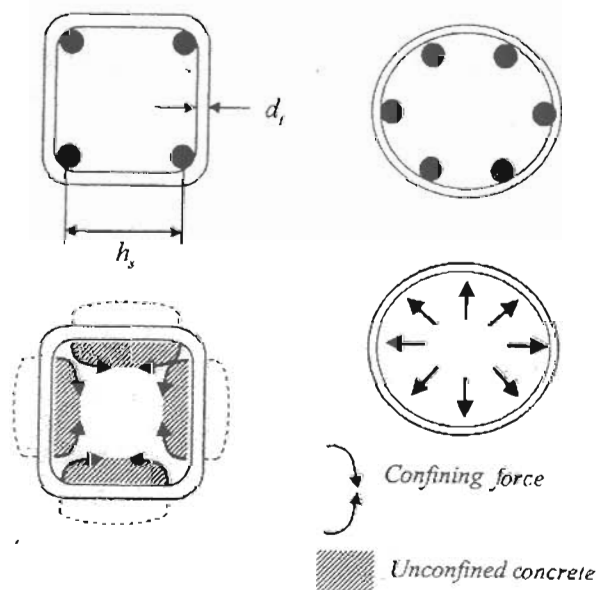


ภาพที่ 2-3 ผลของระยะเรียงเหล็กรัดรอบ หรือเหล็กปลอกที่ต้านทานการพังทลายด้านข้าง

2.5.2 หากกำลังครากของเหล็กรัศรอบ หรือเหล็กปลอกสูงขึ้น จะทำให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตสูงขึ้นด้วย หรือกลับกัน

2.5.3 อัตราส่วนระหว่างระยะเรียงของเหล็กรัศรอบ หรือเหล็กปลอก (s) ต่อความกว้างของแกนคอนกรีต (d) หากระยะเรียงดี ประสิทธิภาพต้านทานการพังทลายทางด้านข้างจะเพิ่มขึ้น

2.5.4 อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กรัศรอบ หรือเหล็กปลอก ต่อระยะห่างระหว่างจุดยึดของเหล็กรัศรอบ หรือเหล็กปลอก $\left(\frac{d_t}{h_s}\right)$ สำหรับกรณีเหล็กรัศรอบ เหล็กปลอกรูปสี่เหลี่ยม หากเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กรัศรอบหรือเหล็กปลอกมีขนาดโตขึ้น ก็จะมีประสิทธิภาพในการรัศรอบ ดังแสดงในภาพที่ 2-4 หากอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กรัศรอบ หรือเหล็กปลอกต่อระยะห่างจุดยึดมีค่ามากขึ้น พื้นที่คอนกรีตที่ถูกรัศรอบ จะมีค่ามากขึ้น ส่วนกรณีเหล็กรัศรอบกลมหรือเหล็กปลอกเกลียว จะไม่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพต้านทาน การรัศรอบนัก เนื่องจากหน่วยแรง หรือความเค้นกระจายได้สม่ำเสมอทุกทิศทาง



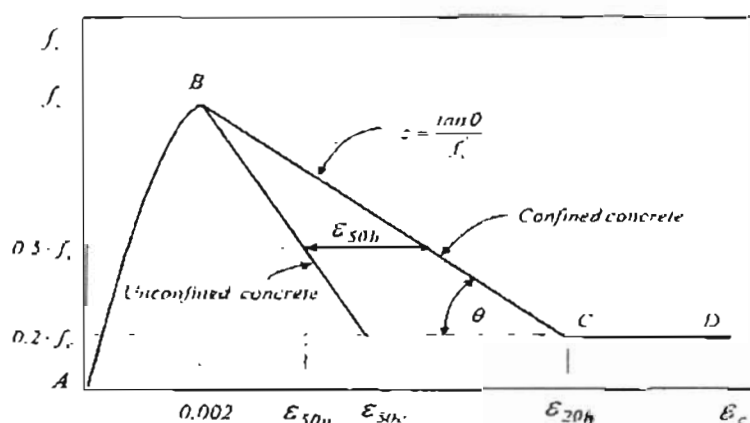
ภาพที่ 2-4 การรัศรอบโดยเหล็กรัศรอบหรือเหล็กปลอก สี่เหลี่ยมจัตุรัส และกลม

2.5.5 ขนาดและจำนวนเหล็กตามแนวยาวที่จะช่วยยึดเหล็กปลอกมีผลต่อการรัศรอบ โดยเฉพาะหากเหล็กตามยาวมีขนาดใหญ่ และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กตามยาว ต่อระยะระหว่างจุดยึดมีค่ามากก็จะยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพในการรัศรอบ คอนกรีตมากยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้

เหล็กตามแนวยาวจะต้องยึดแน่นกับเหล็กตามขวางซึ่งได้แก่เหล็กรักรอบหรือเหล็กปลอกเพื่อประสิทธิภาพต่อการรักรอบ ของเหล็กรักรอบ หรือเหล็กปลอก

หนึ่งในองค์อาคารที่มีเหล็กรักรอบ หรือเหล็กปลอก คอนกรีตที่อยู่บริเวณภายนอกของเหล็กรักรอบ หรือเหล็กปลอก หรือเรียกเปลือกนอก (ระยะหุ้ม หรือ Shell Concrete) ไม่ได้ถูกรักรอบด้วยเหล็กรักรอบ หรือเหล็กปลอก ดังนั้น ณ ตำแหน่งที่ความเค้นเข้าใกล้ภาวะไม่ถูกรักรอบ คอนกรีตนี้จะหลุดออกมา โดยเฉพาะปริมาณเหล็กเสริมทางด้านข้างหรือเหล็กปลอกยิ่งมาก ความแข็งแรงของคอนกรีตบริเวณเปลือกนอกก็ยิ่งน้อยลง หรืออีกนัยหนึ่งหากปริมาณเหล็กปลอกสูง การคำนวณกำลังต้านทานแรงอัด ณ ค่าความเครียดสูงๆ ควรละเลยคอนกรีตส่วนเปลือกนอก

กรณีเหล็กรักรอบ หรือเหล็กปลอกรูปสี่เหลี่ยม ความสัมพันธ์ของความเค้น และความเครียดของคอนกรีตที่ถูกรักรอบ ด้วยเหล็กรักรอบ หรือเหล็กปลอกรูปสี่เหลี่ยม โดยปกติทั่วไปมีลักษณะคล้ายคลึงกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตภายใต้แรงอัดแบบแกนเดียว ภาพที่ 2-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียด ของคอนกรีตที่ถูกรักรอบ ด้วยเหล็กรักรอบหรือเหล็กปลอกรูปสี่เหลี่ยม



ภาพที่ 2-5 ความเค้น และความเครียดของคอนกรีตที่ถูกรักรอบ โดยเหล็กรักรอบ หรือเหล็กปลอกรูปสี่เหลี่ยม

2.6 การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ

การทดสอบความแตกต่างของความถี่ ไคสแควร์ (Chi-square test)

ในทางทฤษฎีแล้ว ไคสแควร์ (Chi-square) ซึ่งมีลักษณะ χ^2 เมื่อ $df = 1$ มีค่าเท่ากับค่า Z^2 ค่าจึงเป็นขวกเสมอ หรือพูดว่า $\chi^2 \geq 0$ ก็ได้

การทดสอบโดยวิธีการนี้ ก็เพื่อจะหาว่าความถี่ของสิ่งที่ได้ศึกษามา จะอยู่ในรูปหรือขนาดเดียวกันกับความถี่ที่หวังไว้โดยทางทฤษฎีหรือไม่

$$\text{สูตรทั่วไป } \chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E}$$

เมื่อให้ χ^2 คือค่าของการแจกแจง Chi-square

O คือค่าความถี่ที่ได้มาจริงๆ

E คือค่าความถี่ที่ได้มาตามทฤษฎีหรือที่คาดหวัง

ในการคำนวณ χ^2 เป็นการหาค่าความแตกต่างระหว่างค่าความถี่ที่เป็นจริงกับค่าความถี่ตามทฤษฎี จะเห็นว่าถ้า $O = E$ ค่าของ χ^2 จะเป็น 0 สิ่งที่ต้องการรู้ในที่นี้คือ χ^2 จะมากหรือน้อยพอจะชี้ให้เห็นว่ามีความแตกต่างกันระหว่าง O และ E เชื่อมั่นได้หรือไม่

การทดสอบ χ^2 แบบนี้ไม่ต้องมีข้อตกลง (Assumption) ว่าการแจกแจงของข้อมูลโค้งปกติ แต่ข้อมูลจะแบ่งเป็นกลุ่มหรือพวก (Categories) เช่น ชายหรือหญิง หรือตลาดปานกลาง อ่อนหรือด้านความคิดเห็นอาจแบ่งเป็น ชอบ ไม่ชอบ หรือเห็นด้วย เฉยๆ ไม่เห็นด้วย ดังนี้เป็นต้น การคำนวณ χ^2 ค่าจะมีนัยสำคัญขนาดใดขึ้นอยู่กับ df และระดับนัยสำคัญด้วย

2.6.1 การทดสอบที่มีกลุ่มตัวแปรเดียว (Single Classification)

การทดสอบลักษณะนี้กลุ่มของตัวแปรมีเพียงด้านเดียวเท่านั้น ถ้าตัวแปรมี K ตัว $df = K - 1$ นั่นคือถ้าตัวแปรมีเพียงหัวกับท้าย ค่าของ $df = 2 - 1$ การทดสอบ χ^2 แบบนี้เพื่อตรวจสอบว่า O กับ E จะแตกต่างกันจริงหรือไม่ E จะต้องได้ตามทฤษฎี ถ้าเป็นสิ่งที่สมมูลการเกิด O กับ E ควรจะเท่ากัน แต่การวางเงื่อนไขของทฤษฎีอาจจะไม่เหมือนกันดังนั้นการทดสอบ O ที่ได้มาทุกครั้งก็เพื่อยืนยันว่าเท่ากับ E ตามทฤษฎีกำหนดไว้หรือไม่นั่นเอง

2.6.2 การทดสอบความเป็นอิสระ (Test of independence)

การทดสอบแบบนี้บางทีเรียกว่า Two-way Classification ความมุ่งมั่นในการทดสอบ ไทสรแควร์โดยวิธีนี้ เพื่อจะดูว่าความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะหรือสิ่งเร้าที่สามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่ม (Categories) จากบุคคลหรือวัตถุกลุ่มเดียวกันว่าเป็นอย่างไรแต่ละกลุ่มสามารถแยกออกเป็นหลายอย่าง ตัวอย่างเช่น บุคคลกลุ่มเดียวกัน อาจหาความสัมพันธ์ของสี (แดง, ดำ, ขาว) กับสีของตา (ดำ, น้ำตาล, ฟ้า) ว่าสัมพันธ์กันหรือไม่

การตั้งสมมุติฐาน $H_0 = \rho = 0$

$H_1 = \rho \neq 0$

การยอมรับสมมติฐาน H_0 (Accepted H_0) แปลว่า ตัวแปร 2 กลุ่มไม่สัมพันธ์หรือเกี่ยวข้องกัน แต่ถ้าไม่ยอมรับ H_0 (Rejected H_0) ก็ไปยอมรับ H_1 แปลว่า ตัวแปร 2 กลุ่มมีความสัมพันธ์กันหรือเกี่ยวข้องกัน

การหา df ของการทดสอบ χ^2 แบบนี้ จะต้องพิจารณาตัวแปรด้านแถวตั้ง (Column) และตัวแปรด้านแนวนอน (Row)

ดังนั้น $df = (C-1)(R-1)$ เช่นถ้า $C = 3, R = 4$

ค่าของ $df = (3 - 1)(4 - 1) = 6$ ดังนั้นเป็นต้น

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จักขดา และสิทธิชัย [9] ได้ทดสอบเสาคอนกรีต และเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดหรือรัดรอบโดยปลอกเหล็ก (ไม่ใช่เหล็กปลอก) ภายใต้การรับน้ำหนักกดอัดตามแนวแกนตรงศูนย์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัด ลักษณะการวิบัติ และผลของการโอบรัดที่มีต่อเสาซึ่งมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 150×150 มม. และยาว 750 มม. จำนวน 27 ตัวอย่าง และใช้ปลอกเหล็กขนาด 150×150 ยาว 750 มม. ความหนา 3.2 และ 4.5 มม. ผลการทดสอบพบว่า เสาที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กทั้งสองความหนา มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกัน ในช่วงแรกเสามีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น จนกระทั่งแรงกระทำมีค่าประมาณร้อยละ 80 – 90 ของกำลังสูงสุด จากนั้นการหดตัว และการขยายตัวด้านข้างของเสาจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ปลอกเหล็กที่โอบรัดเกิดการโก่งตัวออกด้านข้าง จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ที่กำลังรับแรงสูงสุด โดยเสาที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็ก มีกำลังสูงกว่าเสาคอนกรีตร้อยละ 42 – 218 นอกจากนั้นแล้ว การโอบรัดด้วยปลอกดังกกล่าว ส่งผลให้เสามีความเหนียวเพิ่มขึ้น

พรเทพ [10] ได้นำลวดค้ำยันที่มีทั่วไปและมีได้ผลิดมาเพื่อใช้ในการงาน โครงสร้างมาประยุกต์ใช้ในการโอบรัดแกนคอนกรีตร่วมกับการใช้เหล็กปลอกในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการโอบรัดและปรับปรุงความเหนียวของแกนคอนกรีต และพบว่าการใช้ลวดค้ำยันร่วมกับเหล็กปลอกในการโอบรัดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการโอบรัดแกนคอนกรีตได้ โดยทำให้ความเหนียวของแกนคอนกรีตเพิ่มขึ้นมากกว่า 26 % เมื่อเทียบกับการโอบรัดโดยใช้เหล็กปลอกอย่างเดียว นอกจากนี้การศึกษายังพบว่า การวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยลวดค้ำยันยังมีลักษณะที่ปลอดภัยยิ่งขึ้น

ตระกูล และสกล [11] เสาเหล็กกลวงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบรรจุคอนกรีตเป็นเสาประกอบชนิดหนึ่ง ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับโครงสร้าง มีการศึกษามากมายเกี่ยวกับการรับแรงของเสาประเภทนี้ แต่การศึกษาเกี่ยวกับการรับแรงเชิงศูนย์สองทางของเสาประเภทนี้ยังมีอยู่น้อย งานวิจัย

นี้จึงได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ และผลการทดสอบของเสาเหล็กกลวงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบรรจุคอนกรีตกำลังสูงภายใต้แรงเยื้องศูนย์สองทาง โดยตัวแปรหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ ความชะงืดของเสา และระยะเยื้องศูนย์ ผลจากการทดสอบเสาตัวอย่างจำนวน 18 ต้น ภายใต้แรงเยื้องศูนย์สองทางถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีของ Rangan กับ Joyce และวิธีของ ACI แต่เนื่องจากทั้งสองวิธีใช้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของหน่วยแรง และความเครียดในหน้าตัดของเสา การคำนวณจึงอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการลองผิดลองถูก ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าวิธีทั้งสองสามารถใช้ในการทำนายกำลังรับประลัยของเสาเหล็กกลวงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบรรจุคอนกรีตภายใต้แรงเยื้องศูนย์สองทาง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลของการโอברัดคอนกรีตต่อกำลังประลัยของเสา

ต่อศักดิ์ [12] ได้ทดลองเกี่ยวกับการวิบัติเฉพาะที่ (Localized failure) ของแท่งคอนกรีตตัวอย่างที่ถูกแรงอัดในแนวแกนกระทำ (Uniaxial compression) โดยทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดไว้เป็นระยะตลอดแนวแกนภายในแท่งคอนกรีต เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเฉพาะที่เมื่อถูกแรงกระทำ ตัวแปรในการทดสอบได้แก่ คุณสมบัติทางเรขาคณิต และคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในการผสมคอนกรีตตัวอย่าง และทำการวัดความสัมพันธ์ของความเค้น – ความเครียดเฉพาะที่ และโดยรวมถึงถึงเกิดรูปแบบการวิบัติ ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราส่วนความชะงืดของชิ้นตัวอย่างมีค่ามากในระดับหนึ่ง การวิบัติของแท่งคอนกรีตตัวอย่าง จะเกิดขึ้นเฉพาะที่ โดยความยาวของบริเวณที่เกิดการวิบัติด้วยแรงอัด (Localized compressive failure length) มีความสัมพันธ์กับขนาดหน้าตัดของชิ้นตัวอย่าง ในขณะที่พลังงานของการแตกหักด้วยแรงอัด (Fracture energy in compression) มีความสัมพันธ์กับกำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต

พงษ์สุร และชัชชาติ [13] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงในแนวแกนและแรงกระทำด้านข้างแบบเป็นวัฏจักรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ข้อมูลการทดสอบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 ตัวอย่างที่มีรูปแบบการเสริมเหล็กปลอก และระดับแรงในแนวแกนต่าง ๆ กัน จะถูกใช้ในการตรวจสอบยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งแต่ละตัวอย่างมีขนาดหน้าตัด 400 x 400 มม. ความสูง 1500 มม. ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว 3.14 % สำหรับแบบจำลองวัสดุของคอนกรีต และเหล็กเสริมที่เสนอในงานวิจัยนี้รวมพฤติกรรมทั้งหมดที่มีความสำคัญต่อการตอบสนองของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับกำลังกระทำแบบวัฏจักร พฤติกรรมที่สำคัญเมื่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการเคลื่อนที่ทางด้านข้างมากๆ เมื่อใกล้จุดวิบัติคือ การหลุดร่อนของคอนกรีตผิวนอกและการดุ้งของเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อการลดกำลังของเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแล้วพบว่าการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแสดงพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำ

แบบจำลองได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ทั้งขนาดของแรงกระทำทางด้านข้าง ความสามารถในการสลายพลังงาน และตำแหน่งที่เกิดการวิบัติ นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถทำให้ทราบถึงข้อมูลที่ได้ไม่สมบูรณ์จากการทดสอบ เช่น หน่วยแรง และความเครียดของเหล็กเสริมตลอดประวัติการรับแรง เป็นต้น ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถนำมาใช้ร่วมกับผลการทดสอบ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับแรงกระทำแบบวัฏจักรในรูปแบบต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หัตถชัย และคณะ [14] ได้ศึกษาค้นคว้าหาแนวทางในการเสริมกำลังโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากปัจจุบันการเสริมกำลังโครงสร้างเป็นสิ่งที่มีความต้องการสูง และวิธีการเสริมกำลังด้วยวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ซึ่งมีความสะดวกในการติดตั้ง กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจมาก การศึกษานี้นำตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาหุ้มด้วยคาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบต่าง ๆ กัน คือ หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ตลอดทั้งเสา หุ้มเป็นช่วงในแนวนอนและแนวตั้ง หุ้มเฉพาะแนวนอนเป็นช่วง ๆ และหุ้มคลุมไม่หุ้มคาร์บอนไฟเบอร์ จากการศึกษาพบว่าการหุ้มคาร์บอนไฟเบอร์บางส่วนในแนวราบทำหน้าที่โอบรัดคอนกรีต ทำให้กำลังรับแรงอัดของเสาสูงขึ้นประมาณ 14 % และเสามีความเหนียวมากขึ้น

บทที่ 3

การเตรียมการทดสอบ

3.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 กำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength of Concrete)

กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หล่อเสาทดสอบมีค่าเฉลี่ย 212 ksc ที่อายุ 28 วัน (ดังตารางที่ 3-1) โดยใช้คอนกรีตผสมเสร็จ (Ready Mixed Concrete) เทลงในเสาคอนกรีตตัวอย่างที่เตรียมไว้ในครั้งเดียวจำนวน 62 ชิ้น เพื่อจำกัดตัวแปรการทดลองในเรื่องกำลังของคอนกรีต และคอนกรีตที่ใช้หล่อเสาทดสอบถูกเก็บตัวอย่างในแบบหล่อทรงกระบอกซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่างดังแสดงในภาพที่ 3-1 เพื่อทดสอบหาค่ากำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C39-94



ภาพที่ 3 -1 การเก็บตัวอย่างทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 3-1 ค่ากำลังอัดของคอนกรีต

ตัวอย่าง	1	2	3	เฉลี่ย
อายุคอนกรีต (วัน)	28	28	28	28
กำลังอัด (ksc)	216	209	212	212

3.1.2 กำลังดึงของเหล็ก (Tensile Strength of Steel)

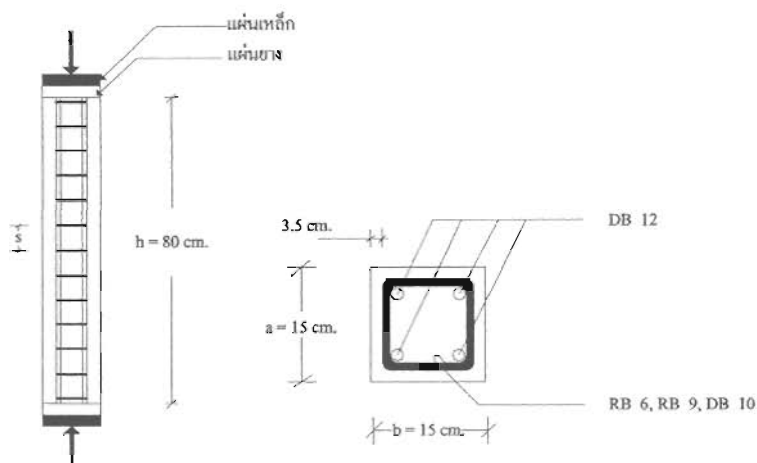
การทดสอบกำลังดึงของเหล็กเสริมเสาตัวอย่างซึ่งใช้เหล็กกลม (Round Bar) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 และ 9 มม. ชั้นคุณภาพ SR 24 และเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 และ 12 มม. ชั้นคุณภาพ SD 30 ทำโดยการเก็บตัวอย่างเหล็กเส้นเดียวกันกับที่ใช้เสริมเสาทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่างต่อเหล็กหนึ่งขนาด ในการทดสอบแรงดึงประลัยเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8 ได้ผลการทดสอบตามตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 กำลังดึงของเหล็กเสริม

ชนิดของ เหล็ก เสริม (มม.)	กำลังดึงที่จุดคราก (ksc)				กำลังดึงประลัย (ksc)			
	1	2	3	เฉลี่ย	1	2	3	เฉลี่ย
RB6	3,621	3,421	3,673	3,572	5,041	4,786	4,907	4,911
RB9	3,040	3,012	3,057	3,036	4,489	4,470	4,488	4,482
DB10	3,074	3,197	3,085	3,119	4,211	4,276	4,226	4,238
DB12	2,901	3,005	2,965	2,957	4,173	4,335	4,350	4,286

3.2 การเตรียมตัวอย่างเสาทดสอบ

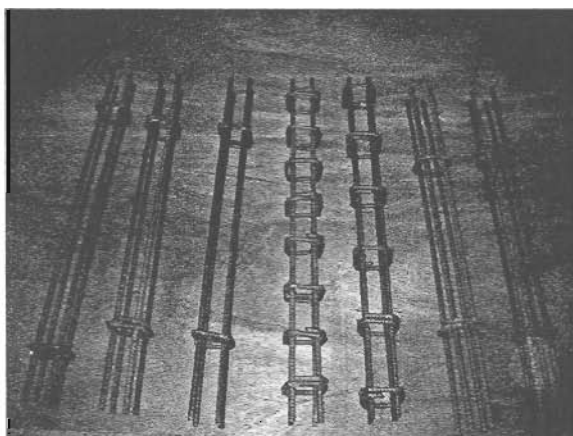
3.2.1 รูปแบบ และจำนวนเสาที่ใช้ในการทดสอบเป็นเสานาคหน้าตัด 15 x 15 ซม. ความสูง 80 ซม. จำนวนเสาทดสอบ 3 กลุ่มตัวอย่าง 62 ต้น



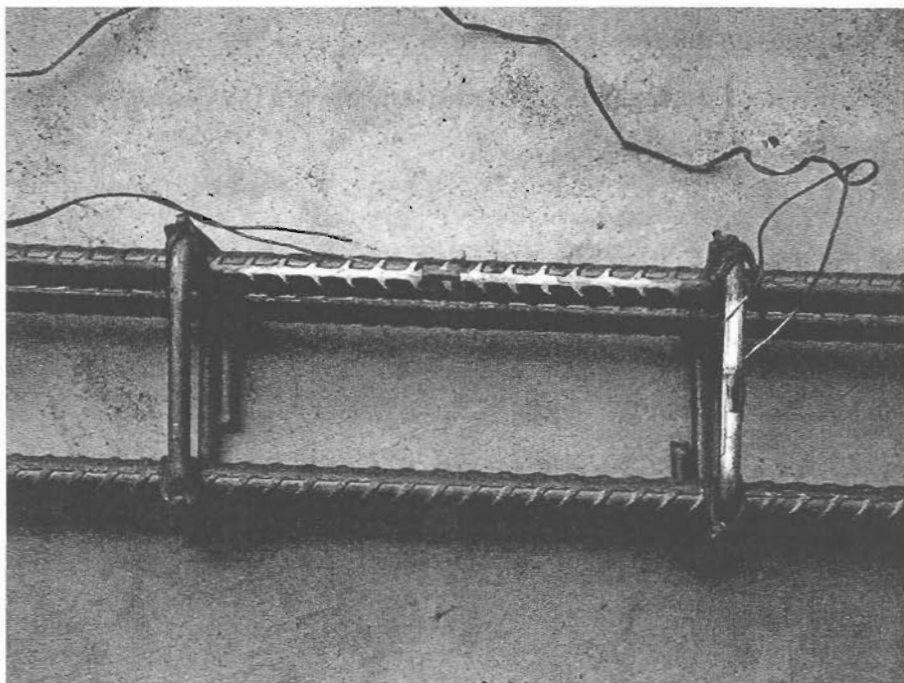
ภาพที่ 3-2 รายละเอียดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.2.2 ทำการผูกเหล็กแกนและเหล็กปลอก ดังภาพที่ 3-3

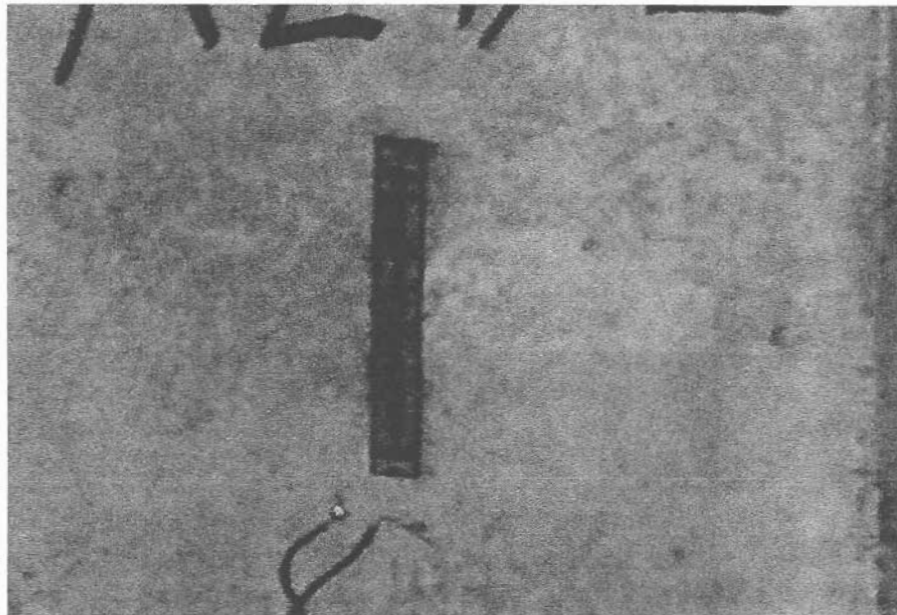
3.2.3 ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain Gauges) ที่เหล็กแกน เหล็กปลอกและผิวคอนกรีต ในเสาทดสอบกลุ่ม A (RB6) 4 ตัวอย่าง A14/2', A19/2', A24/2', A29/2' กลุ่ม B (RB 9) 4 ตัวอย่าง B14/2', B19/2', B24/2', B29/2' กลุ่ม C (DB 10) 4 ตัวอย่าง C14/2', C19/2', C24/2', C48/2' ดังภาพที่ 3-4 และภาพที่ 3-5 จากนั้นตรวจสอบตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauges ดังภาพที่ 3-6



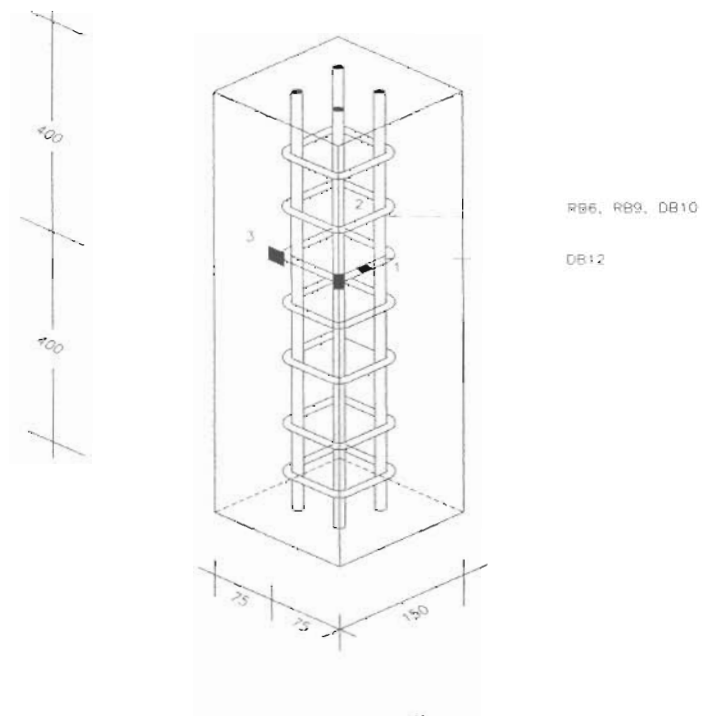
ภาพที่ 3-3 เหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 3-4 การติดตั้ง Strain Gauges บนเหล็กเสริมเสาทดสอบ

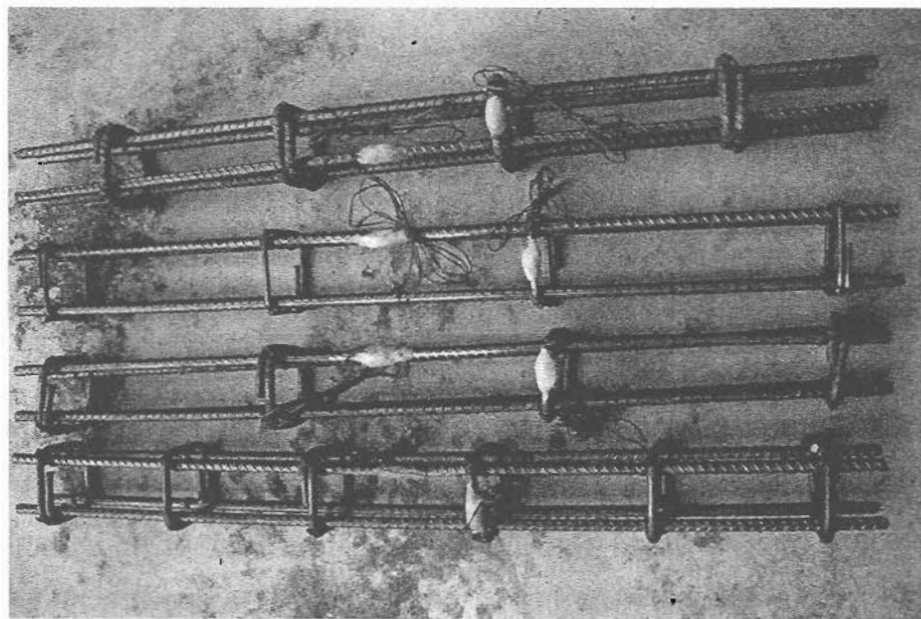


ภาพที่ 3-5 การติดตั้ง Strain Gauges บนผิวคอนกรีต



ภาพที่ 3-6 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain Gauges

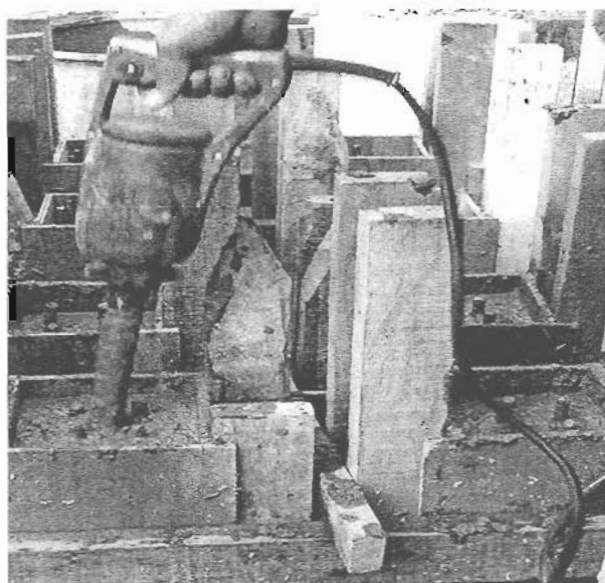
3.2.4 ทำการหุ้ม Coating Material บริเวณที่ติดตั้ง Strain Gauges เพื่อป้องกันความชื้นที่จะเกิดขึ้น ดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3-7 การหุ้ม Coating Material

3.3 การเทคอนกรีต

ใช้คอนกรีตแบบผสมเสร็จ (Ready Mixed Concrete) ของ CPAC ขณะเทคอนกรีตต้องระมัดระวังในเรื่องของ Strain Gauges และสายสัญญาณของ Strain Gauges ต้องตรวจสอบว่าไม่เสียหาย ดังภาพที่ 3-8



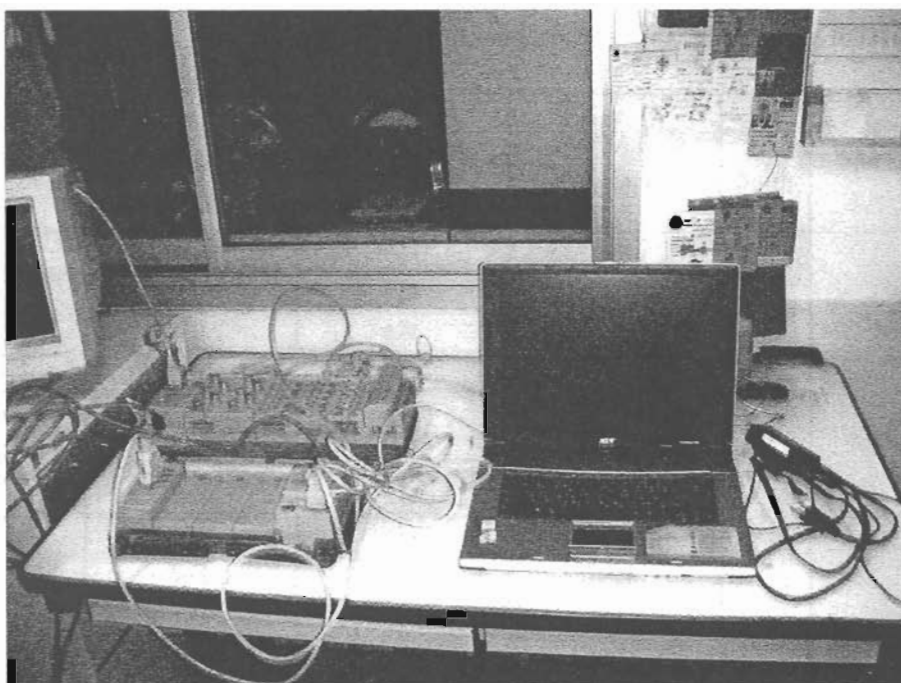
ภาพที่ 3-8 การจี้คอนกรีต

3.4 การทดสอบและการเก็บข้อมูล

3.4.1 วัดขนาดหน้าตัดเสา โดย a = ด้านกว้างของเสา c = ด้านลึกของเสา ดังตาราง 3-3

3.4.2 ในการทดสอบเสาตัวอย่าง ใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ทำการบันทึกแรงอัดที่กระทำกับเสาและค่าการเสียรูปโดยเสาที่ติดตั้ง Strain Gauges ทำการต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่องจัดเก็บข้อมูล (Data Logger) โดยให้น้ำหนักที่กระทำกับเสาอยู่ระหว่าง 15 – 25 วินาที/ตัน ดังภาพที่ 3-9

หลังเสร็จการทดสอบ นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปประมวลผลในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการหดตัวของเสา (Load – Deflection Relationship) และความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเครียดของเสา (Load – Strain Relationship) เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลทั่วไปทางสถิติด้วยวิธีการทดสอบความแตกต่างของความถี่ ไคสแควร์และพฤติกรรมของการวิบัติของเสาต่อไป



ภาพที่ 3-9 การต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่อง Data Logger

ตารางที่ 3-3 ตารางแสดงขนาดหน้าตัดเสาคอนกรีต

กลุ่ม	เสา แบบที่	ชื่อ เสาทดสอบ	a cm.	b cm.	Area(A_g) = a x c cm. ²
A	1	A10/1	15.9	14.6	232.1
		A10/2	15.2	15.0	228.0
	2	A14/1	15.8	15.3	241.7
		A14/2	15.0	14.9	223.5
	3	A19/1	15.6	15.4	240.2
		A19/2	15.4	14.7	226.4
	4	A24/1	15.2	15.3	232.6
		A24/2	15.5	15.5	240.3
	5	A29/1	15.5	15.6	241.8
		A29/2	14.9	15.1	225.0
	6	A34/1	15.2	15.4	234.1
		A34/2	14.7	15.1	222.0
	7	A38/1	15.3	15.9	243.3
		A38/2	15.6	15.7	244.9
	8	A43/1	15.1	15.1	228.0
		A43/2	15.2	15.4	234.1
B	9	B10/1	15.0	14.9	223.5
		B10/2	15.3	14.9	228.0
	10	B14/1	15.5	15.9	246.5
		B14/2	14.7	15.2	223.4
	11	B19/1	15.0	15.5	232.5
		B19/2	15.4	15.4	237.2
	12	B24/1	15.4	15.7	241.8
		B24/2	15.1	15.2	229.5
	13	B29/1	15.2	15.2	231.0
		B29/2	15.3	15.8	241.7
	14	B34/1	15.5	14.7	227.9
		B34/2	15.5	15.1	234.1
	15	B38/1	15.9	15.4	244.9
		B38/2	15.0	15.1	226.5
	16	B43/1	15.2	15.1	229.5
		B43/2	15.2	15.2	231.0
	17	B48/1	15.5	15.5	240.3
		B48/2	15.5	15.6	241.8
	18	B53/1	15.2	15.7	238.6
		B53/2	14.6	15.6	227.8
	19	B58/1	15.2	15.0	228.0
		B58/2	15.1	15.2	229.5

ตารางที่ 3-3 (ต่อ)

กลุ่ม	เสา แบบที่	ชื่อ เสาทดสอบ	a cm.	b cm.	Area(A_g) = a x b cm. ²
C	20	C10/1	15.1	15.2	229.5
		C10/2	15.1	15.2	229.5
	21	C14/1	15.2	16.0	243.2
		C14/2	14.7	15.2	223.4
	22	C19/1	15.4	15.3	235.6
		C19/2	15.1	15.2	229.5
	23	C24/1	15.3	15.0	229.5
		C24/2	15.1	15.2	229.5
	24	C29/1	15.1	15.0	226.5
		C29/2	14.7	15.2	223.4
	25	C34/1	15.7	15.7	246.5
		C34/2	15.4	15.4	237.2
	26	C38/1	15.5	15.2	235.6
		C38/2	15.6	15.7	244.9
	27	C43/1	15.7	15.5	243.4
		C43/2	15.3	15.3	234.1
	28	C48/1	15.5	15.6	241.8
		C48/2	15.3	15.4	235.6
	29	C53/1	15.2	15.2	231.0
		C53/2	15.4	15.6	240.2
	30	C58/1	15.4	15.6	240.2
		C58/2	15.1	15.4	232.5
	31	C62/1	15.1	15.8	238.6
		C62/2	15.2	15.1	229.5

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบเสา

ผลการทดสอบและวิเคราะห์เสา 3 กลุ่ม กลุ่ม A เหล็กปลอกขนาด RB 6 16 ตัวอย่าง กลุ่ม B เหล็กปลอกขนาด RB 9 22 ตัวอย่าง กลุ่ม C เหล็กปลอกขนาด DB 10 24 ตัวอย่าง ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4-1 โดย P_0 = ค่าการคำนวณแรงอัดประลัยตามทฤษฎี (สมการ 2-4), P_{cr} = แรงอัดที่ทำให้เสาทดสอบเริ่มแตกร้าว P_{test} = ค่าแรงอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบเสา

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบกับผลการคำนวณของเสา

ชื่อเสา ทดสอบ	$\frac{s}{D}$	$\frac{s}{d_s}$	$\frac{s}{c}$	P_0 (ตัน)	$P_{0,av}$ (ตัน)	P_{cr} (ตัน)	$P_{cr,av}$ (ตัน)	P_{test} (ตัน)	$P_{test,av}$ (ตัน)	$\frac{P_{test,av}}{P_{0,av}}$
A10/1	8	16	0.64	53.20	52.8	28.50	24.8	38.00	35.0	0.66
A10/2				52.40		21.00		32.00		
A14/1	12	24	0.96	54.90	53.3	25.50	23.3	43.50	37.8	0.71
A14/2				51.60		21.00		32.00		
A19/1	16	32	1.28	54.60	53.4	26.00	25.0	40.00	36.0	0.67
A19/2				52.10		24.00		32.00		
A24/1	20	40	1.6	53.20	53.9	22.00	23.5	37.00	36.0	0.67
A24/2				54.60		25.00		35.00		
A29/1	24	48	1.92	54.90	53.4	25.00	24.5	39.00	33.0	0.62
A29/2				51.90		24.00		27.00		
A34/1	28	56	2.24	53.50	52.4	17.50	16.8	32.20	30.6	0.58
A34/2				51.30		16.00		29.00		
A38/1	32	64	2.56	55.20	55.4	22.50	24.5	35.27	33.3	0.60
A38/2				55.50		26.50		31.27		
A43/1	36	72	2.88	52.40	53.0	11.00	11.5	27.50	31.3	0.59
A43/2				53.50		12.00		35.00		

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

ชื่อเสา ทดสอบ	$\frac{s}{D}$	$\frac{s}{d_s}$	$\frac{s}{c}$	P_0 (ตัน)	$P_{0,av}$ (ตัน)	P_{cr} (ตัน)	$P_{cr,av}$ (ตัน)	P_{test} (ตัน)	$P_{test,av}$ (ตัน)	$\frac{P_{test,av}}{P_{0,av}}$
B10/1	8	10.67	0.64	51.60	52.0	22.00	22.5	34.62	32.7	0.63
B10/2				52.40		23.00		30.87		
B14/1	12	16	0.96	55.70	53.7	15.00	18.5	38.62	34.6	0.64
B14/2				51.60		22.00		30.65		
B19/1	16	21.33	1.28	53.20	53.7	23.00	22.5	37.00	35.2	0.66
B19/2				54.10		22.00		33.47		
B24/1	20	26.67	1.6	54.90	53.8	24.00	23.0	36.87	34.5	0.64
B24/2				52.70		22.00		32.21		
B29/1	24	32.00	1.92	53.00	54.0	19.00	20.5	28.07	31.7	0.59
B29/2				54.90		22.00		35.32		
B34/1	28	37.33	2.24	52.40	53.0	14.00	15.5	35.00	35.3	0.67
B34/2				53.50		17.00		35.57		
B38/1	32	42.67	2.56	55.50	53.8	15.00	16.5	32.35	34.2	0.64
B38/2				52.10		18.00		36.12		
B43/1	36	48.00	2.88	52.70	52.9	18.00	17.0	32.05	32.6	0.62
B43/2				53.00		16.00		33.14		
B48/1	40	53.33	3.2	54.60	54.8	25.00	22.0	29.42	32.9	0.60
B48/2				54.90		19.00		36.40		
B53/1	44	58.67	3.52	54.30	53.4	22.00	24.0	31.20	32.0	0.60
B53/2				52.40		26.00		32.85		
B58/1	48	64.00	3.84	52.40	52.6	23.00	20.3	35.15	36.1	0.69
B58/2				52.70		17.50		36.95		

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

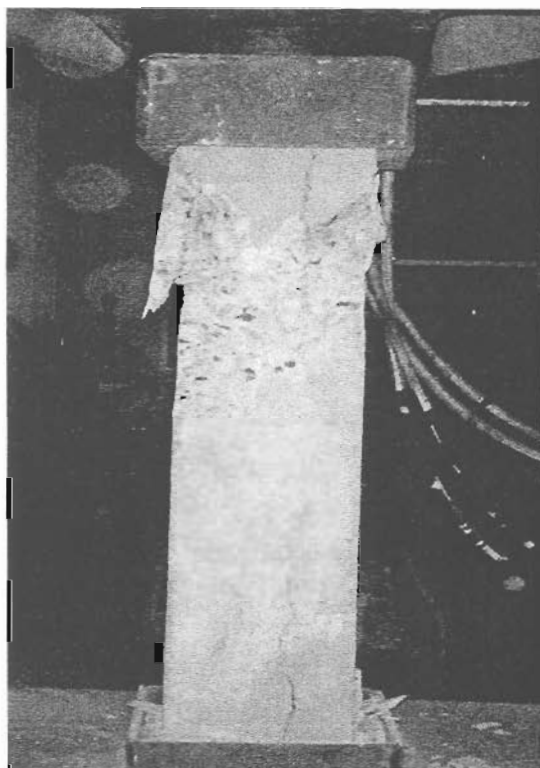
ชื่อเสา ทดสอบ	$\frac{s}{D}$	$\frac{s}{d_s}$	$\frac{s}{c}$	P_0 (ตัน)	$P_{0,av}$ (ตัน)	P_{cr} (ตัน)	$P_{cr,av}$ (ตัน)	P_{test} (ตัน)	$P_{test,av}$ (ตัน)	$\frac{P_{test,av}}{P_{0,av}}$
C10/1	8	9.6	0.64	52.70	52.7	26.00	26.0	36.37	34.1	0.65
C10/2				52.70		26.00		31.80		
C14/1	12	14.4	0.96	55.20	53.4	30.00	29.0	32.15	33.6	0.63
C14/2				51.60		28.00		34.96		
C19/1	16	19.2	1.28	53.80	53.3	20.00	19.5	28.70	28.2	0.53
C19/2				52.70		19.00		27.65		
C24/1	20	24	1.6	52.70	52.7	28.00	29.0	33.90	36.6	0.69
C24/2				52.70		30.00		39.29		
C29/1	24	28.8	1.92	52.10	51.9	17.00	23.5	32.77	35.2	0.68
C29/2				51.60		30.00		37.57		
C34/1	28	33.6	2.24	55.70	54.9	24.00	26.0	33.42	34.0	0.62
C34/2				54.10		28.00		34.50		
C38/1	32	38.4	2.56	53.80	54.7	27.00	23.5	35.00	32.0	0.59
C38/2				55.50		20.00		29.00		
C43/1	36	43.2	2.88	55.20	54.4	20.00	20.0	33.27	31.1	0.57
C43/2				53.50		20.00		29.00		
C48/1	40	48	3.2	54.90	54.4	20.00	19.0	33.47	32.2	0.59
C48/2				53.80		18.00		30.92		
C53/1	44	52.8	3.52	53.00	53.8	22.00	21.0	30.77	31.8	0.59
C53/2				54.60		20.00		32.85		
C58/1	48	57.6	3.84	54.60	53.9	15.00	16.0	29.52	28.1	0.52
C58/2				53.20		17.00		26.62		
C62/1	52	62.4	4.16	54.30	53.5	24.00	22.5	35.72	36.3	0.68
C62/2				52.70		21.00		36.82		

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบน้ำหนักรรทุกสูงสุดกับค่าความเครียดของเหล็กยื่น เหล็กปลอก และ
ที่ผิวคอนกรีต

กลุ่ม	เสา แบบที่	ชื่อเสา ทดสอบ	น้ำหนักบรรทุก สูงสุด (ตัน)	ค่าความเครียด (10^{-6} ม./ม.)		
				เหล็กยื่น	เหล็กปลอก	ผิวคอนกรีต
A	2	A14/2*	32.00	492.00	1,410.00	593.70
	3	A19/2*	32.00	-	1,157.00	548.00
	4	A24/2*	35.00	748.90	-	1,352.00
	5	A29/2*	27.00	427.00	742.00	461.00
B	10	B14/2*	30.65	1,320.00	-	1,309.80
	11	B19/2*	33.47	-	228.80	960.00
	12	B24/2*	32.21	219.00	1,986.00	655.70
	16	B43/2*	33.14	458.00	359.00	1,052.00
C	21	C14/2*	34.96	764.00	-	724.00
	22	C19/2*	27.65	-	1,759.40	949.00
	23	C24/2*	39.29	1,795.30	-	893.00
	28	C48/2*	30.92	1,285.00	1,062.00	603.00

4.2 ผลการทดสอบเสากลุ่ม A เหล็กปลอก RB 6 ม.ม.

4.2.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์เสา A10/1 และ A10/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต A10/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 28.50 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 38 ตัน โดยเสาเกิดการเสียหายมากที่ส่วนบนโดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา และเสามีรอยร้าวเป็นเส้นตรงที่ส่วนบนและส่วนล่าง การเสียรูปของเสาไม่มากนักเมื่อเทียบกับต้นอื่นๆ ส่วนเสา A10/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 21 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 32 ตัน โดยการเสียรูปคล้ายกับ A10/1 แต่มีความเสียหายที่ส่วนบนมากกว่า ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-1 และ 4-2

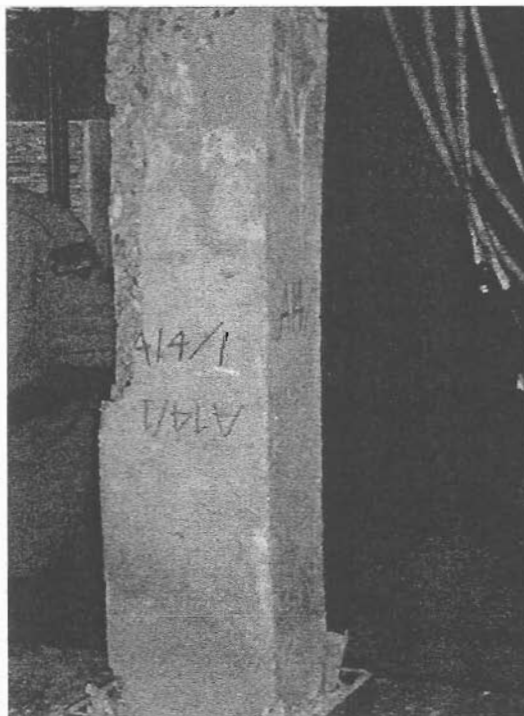


ภาพที่ 4-1 การวิบัติของเสา A10/1

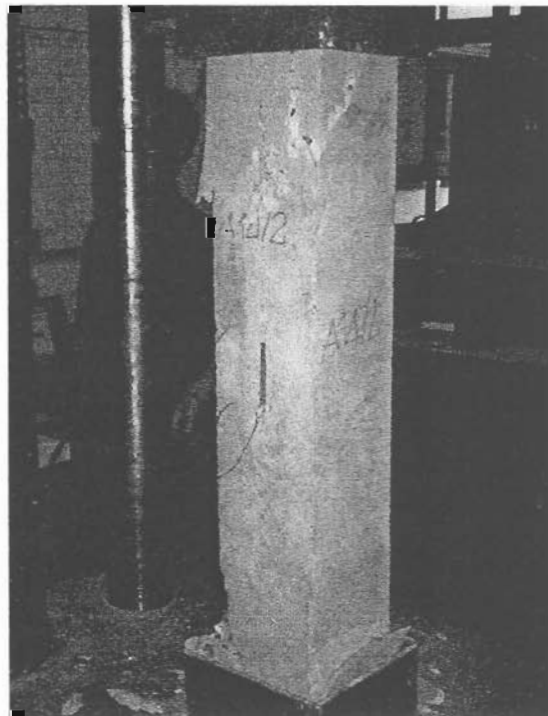


ภาพที่ 4-2 การวิบัติของเสา A10/2

4.2.2 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา A14/1 และ A14/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต A14/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 22.50 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 43.50 ตัน โดยเสาเกิดการเสียหายมากที่ส่วนบนลงถึงกลางเสาบริเวณมุมเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา และเสามีรอยร้าวเป็นเส้นตรงที่ส่วนบน การเสียรูปของเสาไม่มากนักเมื่อเทียบกับคันอื่นๆ ส่วนเสา A14/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 21 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 32 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่ส่วนบน โดยการเสียรูปคล้ายกับ A14/1 จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กยื่นคำนวณได้ 1,004 ksc ค่าความเค้นครากของเหล็กปลอกคำนวณได้ 2,876 ksc แสดงว่าเหล็กยื่นและเหล็กปลอกยังไม่ถึงจุดคราก การหาค่าที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 0.47 มม. ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-3 และ 4-4



ภาพที่ 4-3 การวิบัติของเสา A14/1



ภาพที่ 4-4 การวิบัติของเสา A14/2

4.2.3 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา A19/1 และ A19/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต A19/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 26 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 40 ตัน โดยเสาเริ่มแตกร้าวที่ด้านบนและเกิดการวิบัติทันทีเมื่อรับน้ำหนักที่ 40 ตัน โดยผิวคอนกรีตจากด้านบนจนถึงด้านล่างเกิดการระเบิดออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา A19/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 24 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 32 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่ส่วนบน โดยการเสียรูปคล้ายกับ A19/1 และเสามีรอยร้าวเป็นเส้นตรงที่ส่วนบนลงมาถึงบริเวณกลางเสา จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กปลอกคำนวณได้ 2,360 ksc แสดงว่าเหล็กปลอกยังไม่ถึงจุดคราก การหัดตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 0.44 มม. ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-5 และ 4-6

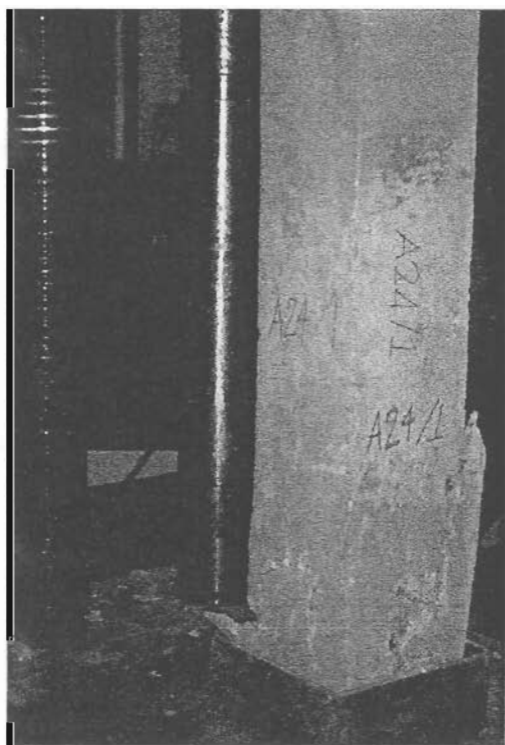


ภาพที่ 4-5 การวิบัติของเสา A19/1



ภาพที่ 4-6 การวิบัติของเสา A19/2

4.2.4 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา A24/1 และ A24/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต A24/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 22 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 37 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากที่บริเวณส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา A24/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 25 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 35 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่ส่วนบน โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กขึ้นคำนวณได้ 1,526 ksc แสดงว่าเหล็กยังไม่ถึงจุดคราก การหัดตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 1.08 มม. ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-7 และ 4-8



ภาพที่ 4-7 การวิบัติของเสา A24/1



ภาพที่ 4-8 การวิบัติของเสา A24/2

4.2.5 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา A29/1 และ A29/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต A29/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 25 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 39 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนบนลงมาถึงด้านล่าง โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา A29/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 24 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 27 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่ส่วนบน โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กขึ้นคำนวณได้ 871 ksc ค่าความเค้นของเหล็กปลอกคำนวณได้ 1,514 ksc แสดงว่าเหล็กขึ้นและเหล็กปลอกยังไม่ถึงจุดคราก การหัดตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 0.37 มม.ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-9 และ 4-10

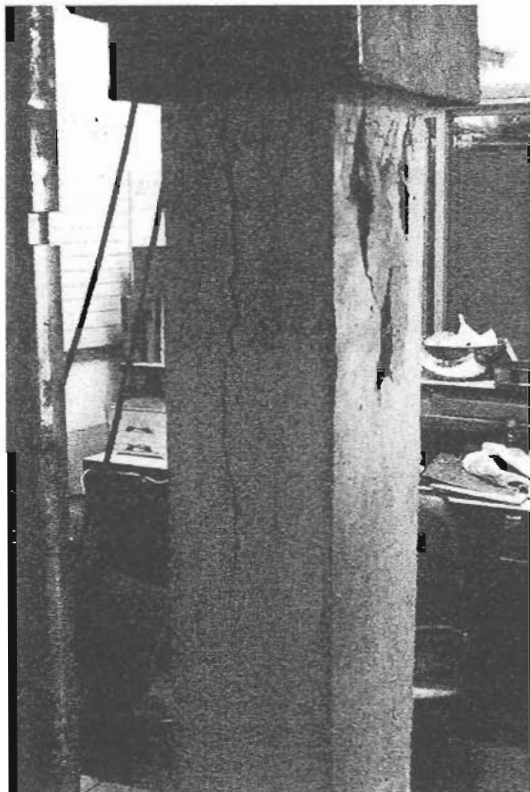


ภาพที่ 4-9 การวิบัติของเสา A29/1



ภาพที่ 4-10 การวิบัติของเสา A29/2

4.2.6 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา A34/1 และ A34/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต A34/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 17.50 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 31.20 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนบนและมีรอยร้าวเป็นเส้นตรงลงมาจากส่วนบนจนถึงกลางเสา ส่วนเสา A34/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 16 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 29 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่ส่วนบน โดยที่ผิวคอนกรีตที่หูลุร่อนออกมา ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-11 และ 4-12

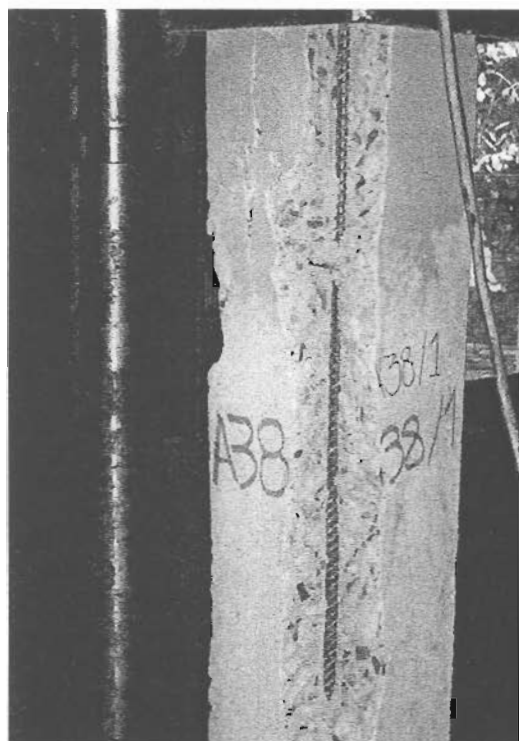


ภาพที่ 4-11 การวิบัติของเสา A34/1

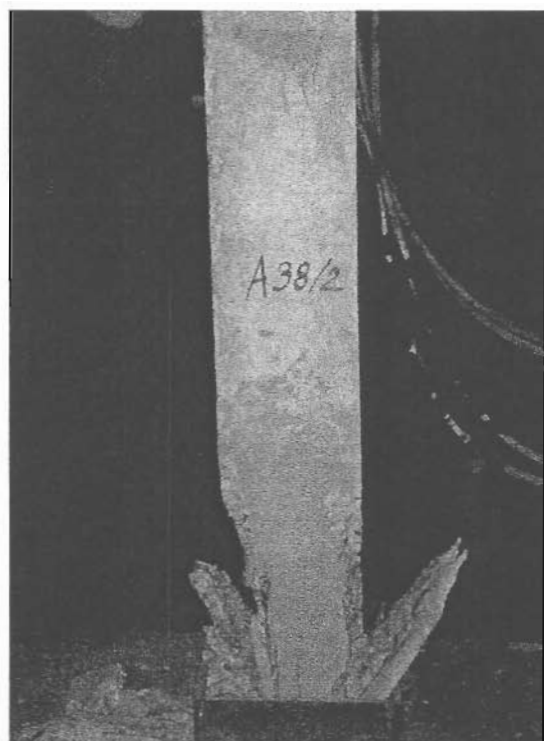


ภาพที่ 4-12 การวิบัติของเสา A34/2

4.2.7 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา A38/1 และ A38/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต A38/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 22.50 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 35.27 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนบนลงมาถึงส่วนล่างบริเวณมุมเสา โดยที่ผิวคอนกรีตที่หลุดล่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา A38/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 26.50 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 31.27 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่ส่วนล่าง โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-13 และ 4-14



ภาพที่ 4-13 การวิบัติของเสา A38/1



ภาพที่ 4-14 การวิบัติของเสา A38/2

4.2.8 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา A43/1 และ A43/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต A43/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 11 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 27.50 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนบนลงมาถึงกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตที่หลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา A43/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 12 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 35 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่ส่วนล่างถึงบริเวณกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-15 และ 4-16



ภาพที่ 4-15 การวิบัติของเสา A43/1



ภาพที่ 4-16 การวิบัติของเสา A43/2

4.3 ผลการทดสอบเสาเข็ม B เหล็กปลอก RB 9 น.ม.

4.3.1 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B10/1 และ B10/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B10/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 22 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 34.62 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนบนลงมาถึงกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตที่หลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา B10/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 23 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 30.87 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่ส่วนล่างถึงบริเวณกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-17 และ 4-18

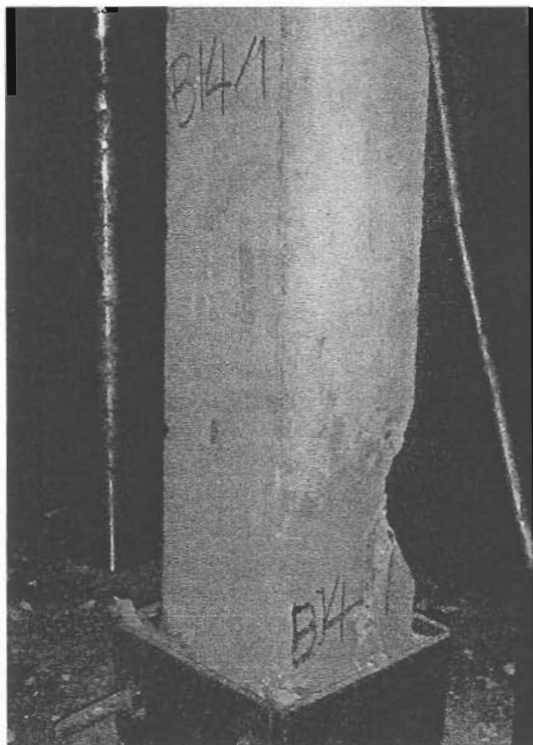


ภาพที่ 4-17 การวิบัติของเสา B10/1



ภาพที่ 4-18 การวิบัติของเสา B10/2

4.3.2 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B14/1 และ B14/2* เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B14/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 15 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 38.62 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนล่างและมีรอยร้าวเป็นเส้นตรงขึ้นมาจนถึงบริเวณกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตที่หลุดร่อนออกมา ส่วนเสา B14/2* เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 22 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 30.65 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากทั้งส่วนบนและส่วนล่างและมีรอยร้าวเป็นเส้นตรงจากด้านล่างถึงด้านบน โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กขึ้นคำนวณได้ 2,656 ksc แสดงว่าเหล็กยังไม่ถึงจุดคราก การหาคัดตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 1.05 มม. ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-19 และ 4-20



ภาพที่ 4-19 การวิบัติของเสา B14/1



ภาพที่ 4-20 การวิบัติของเสา B14/2

4.3.3 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B19/1 และ B19/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B19/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 23 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 37 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากตลอดทั้งต้น โดยที่ผิวคอนกรีตที่หุลูร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา B19/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 22 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 33.47 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากบริเวณส่วนบนและมีรอยร้าวเป็นเส้นตรงจากด้านล่างถึงกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหุลูร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กปลอกคำนวณได้ 467 ksc แสดงว่าเหล็กปลอกยังไม่ถึงจุดคราก การหาคัดตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 0.77 มม. ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-21 และ 4-22

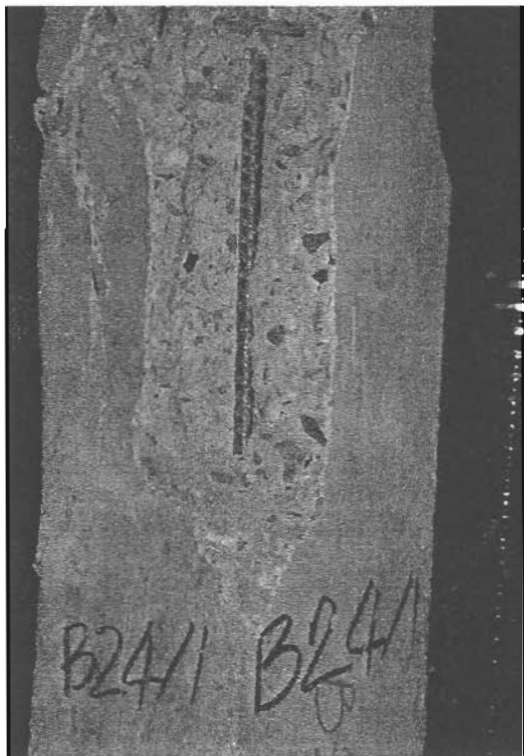


ภาพที่ 4-21. การวิบัติของเสา B19/1



ภาพที่ 4-22. การวิบัติของเสา B19/2

4.3.4 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B24/1 และ B24/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B24/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 24 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 36.87 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณหัวเสา โดยที่ผิวคอนกรีตที่หตุร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา B24/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 22 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 32.21 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากทั้งส่วนบนและส่วนล่าง โดยที่ผิวคอนกรีตหตุร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กขึ้นวัดได้ 447 ksc ค่าความเค้นครากของเหล็กปลอกคำนวณได้ 4,051 ksc แสดงว่าเหล็กขึ้นยังไม่ถึงจุดครากส่วนเหล็กปลอกถึงจุดคราก การหัดตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 0.52 มม. ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-23 และ 4-24



ภาพที่ 4-23 การวิบัติของเสา B24/1

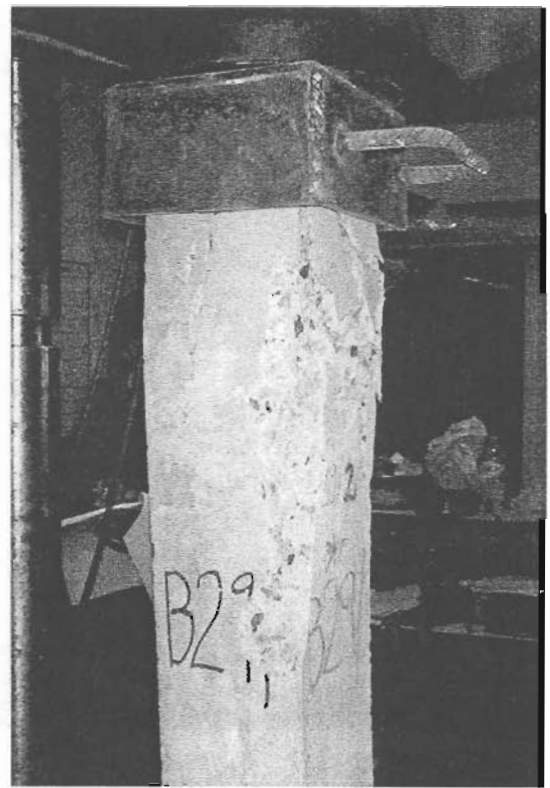


ภาพที่ 4-24 การวิบัติของเสา B24/2'

4.3.5 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B29/1 และ B29/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B29/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 19 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 28.07 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณหัวเสาและมีรอยร้าวเป็นเส้นตรงที่ด้านบนลงมาถึงกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตที่หลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา B29/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 22 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 35.32 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากบริเวณ โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-25 และ 4-26

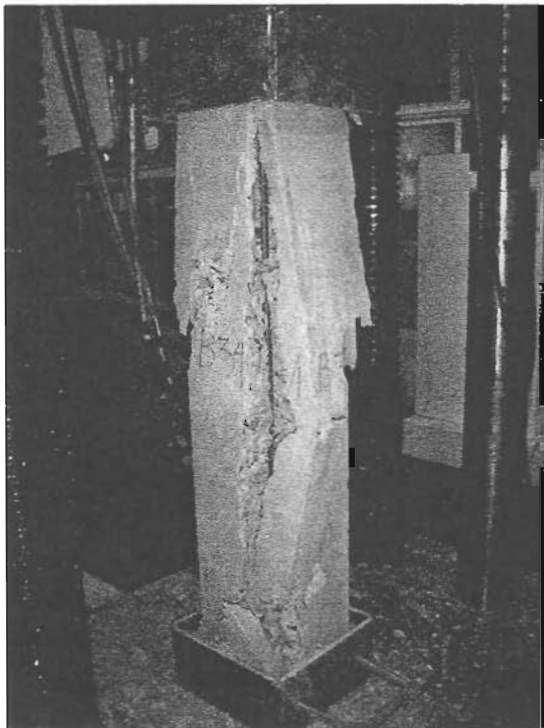


ภาพที่ 4-25 การวิบัติของเสา B29/1



ภาพที่ 4-26 การวิบัติของเสา B29/2

4.3.6 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B34/1 และ B34/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B34/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 14 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 35 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนล่างของเสา และแตกออกตลอดแนวเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา B34/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 17 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 35.57 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากบริเวณส่วนบนของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-27 และ 4-28

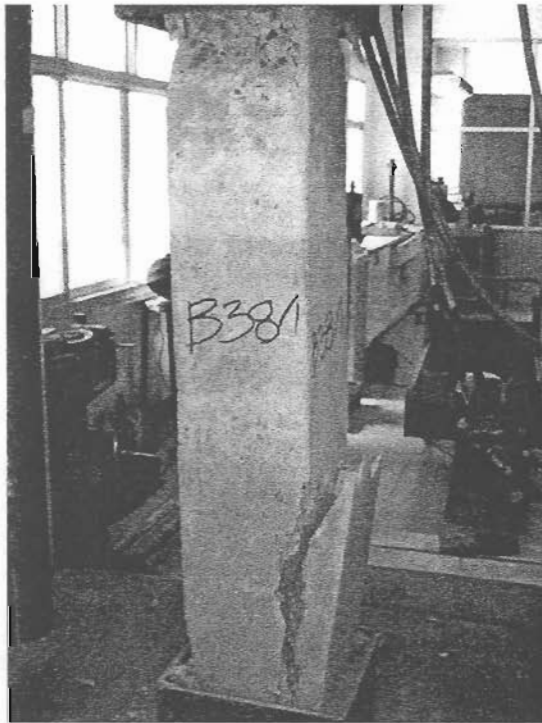


ภาพที่ 4-27 การวิบัติของเสา B34/1

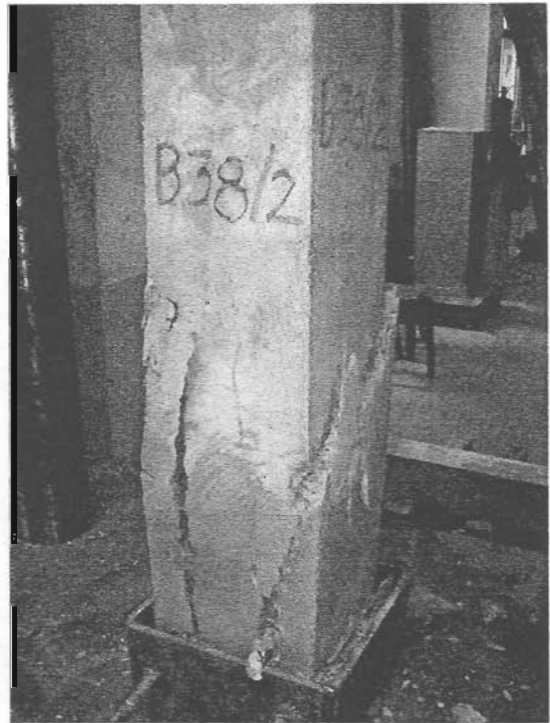


ภาพที่ 4-28 การวิบัติของเสา B34/2

4.3.7 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B38/1 และ B38/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B38/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 15 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 32.35 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา ส่วนเสา B38/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 18 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 36.12 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากบริเวณส่วนล่างของเสา ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-29 และ 4-30

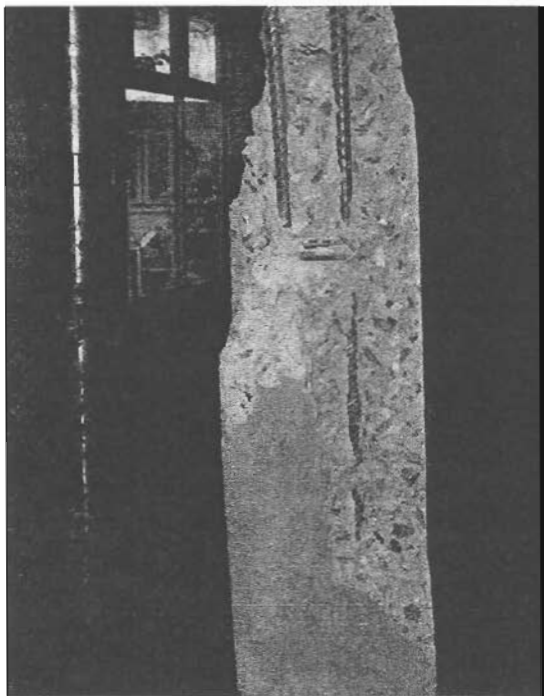


ภาพที่ 4-29 การวิบัติของเสา B38/1

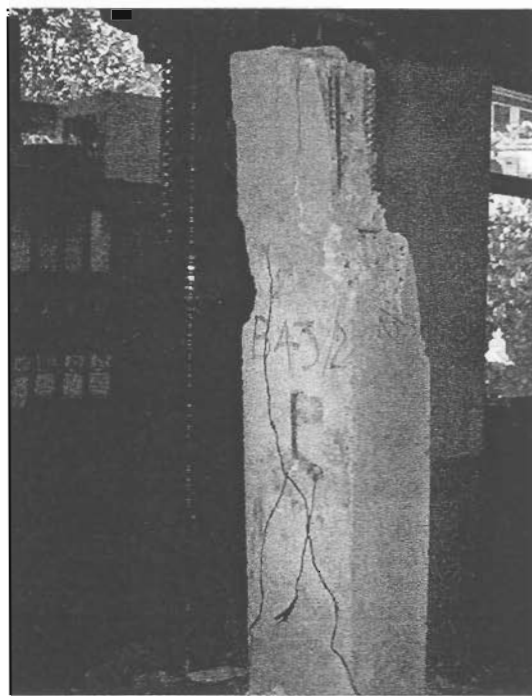


ภาพที่ 4-30 การวิบัติของเสา B38/2

4.3.8 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B43/1 และ B43/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B43/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 18 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 32.05 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนบนถึงส่วนกลางของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา B43/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 16 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 33.14 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากบริเวณส่วนบนของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กขึ้นคำนวณได้ 934 ksc ค่าความเค้นครากของเหล็กปลอกคำนวณได้ 732 ksc แสดงว่าเหล็กขึ้นและเหล็กปลอกยังไม่ถึงจุดคราก การหัดตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 0.84 มม. ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-31 และ 4-32

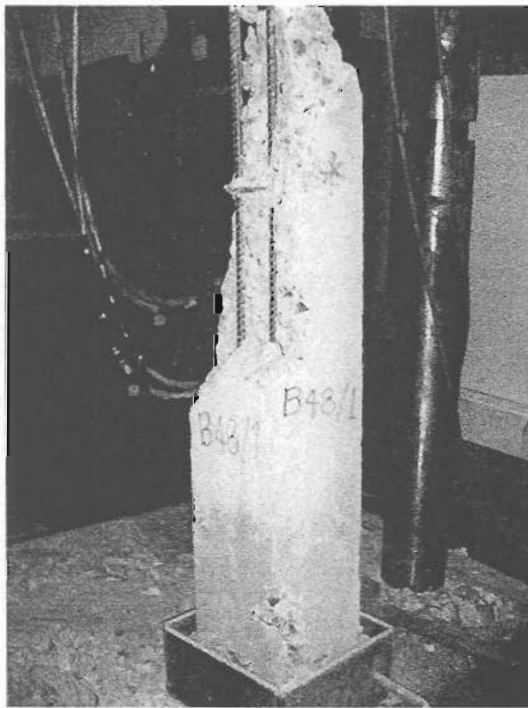


ภาพที่ 4-31 การวิบัติของเสา B43/1

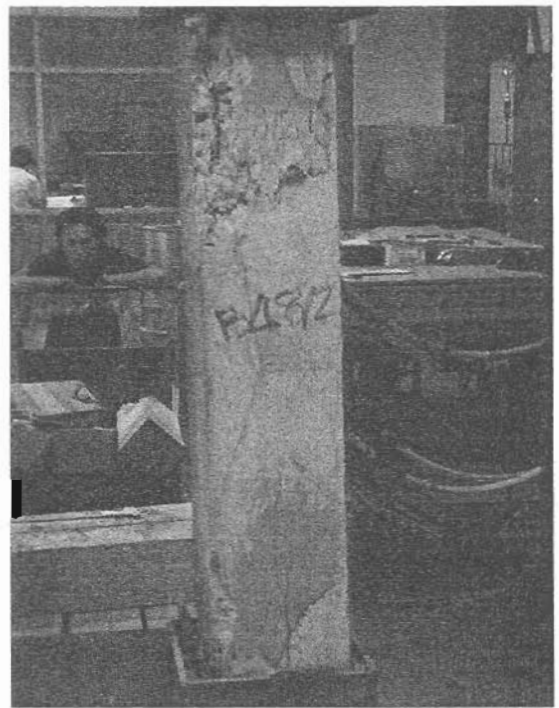


ภาพที่ 4-32 การวิบัติของเสา B43/2

4.3.9 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B48/1 และ B48/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B48/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 25 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 29.42 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนบนถึงส่วนกลางของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา B48/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 19 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 36.40 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากบริเวณส่วนบนของเสา และเกิดรอยร้าวเป็นแนวยาวตลอดเสาภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-33 และ 4-34

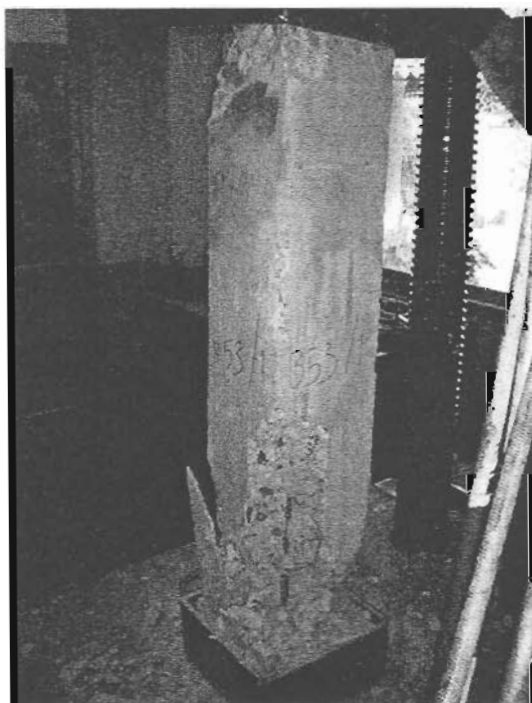


ภาพที่ 4-33 การวิบัติของเสา B48/1



ภาพที่ 4-34 การวิบัติของเสา B48/2

4.3.10 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B53/1 และ B53/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B53/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 22 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 31.20 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา B53/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 26 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 32.85 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากบริเวณส่วนล่างของเสา และเกิดรอยร้าวเป็นแนวยาวถึงช่วงกลางเสา ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-35 และ 4-36



ภาพที่ 4-35 การวิบัติของเสา B53/1



ภาพที่ 4-36 การวิบัติของเสา B53/2

4.3.11 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา B58/1 และ B58/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต B58/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 23 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 35.15 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนบนของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา และเกิดรอยร้าวเป็นแนวยาวถึงช่วงกลางเสา ส่วนเสา B58/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 17.50 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 36.95 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนถึงส่วนกลางของเสา ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-37 และ 4-38



ภาพที่ 4-37 การวิบัติของเสา B58/1



ภาพที่ 4-38 การวิบัติของเสา B58/2

4.4 ผลการทดสอบเสากลุ่ม C เหล็กปลอก DB 10 มม.

4.4.1 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C10/1 และ C10/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C10/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 26 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 36.37 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนบนลงมาถึงกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา C10/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 26 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 31.80 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนบนลงมาถึงกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-39 และ 4-40



ภาพที่ 4-39 การวิบัติของเสา C10/1

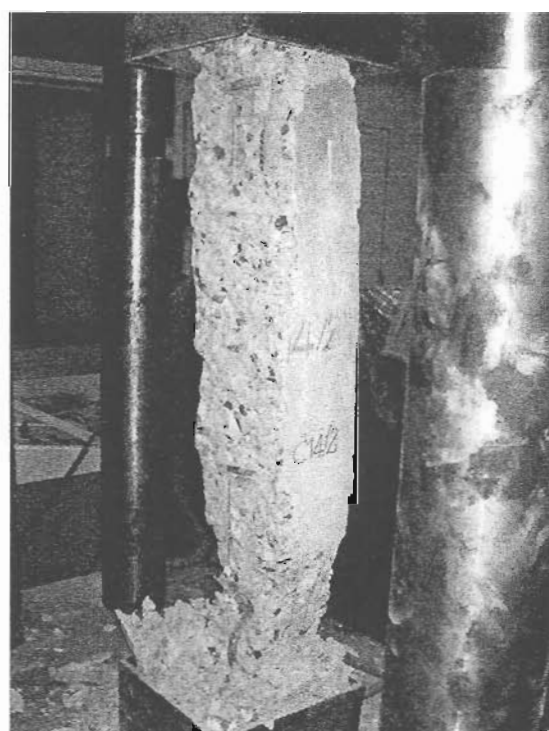


ภาพที่ 4-40 การวิบัติของเสา C10/2

4.4.2 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C14/1 และ C14/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C14/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 30 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 32.15 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากบริเวณส่วนบนลงมาถึงกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา C14/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 28 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 34.96 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนบนลงมาถึงส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กขึ้นคำนวณได้ 1,559 ksc แสดงว่าเหล็กขึ้นยังไม่ถึงจุดคราก การหัดตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 0.58 มม.ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-41 และ 4-42



ภาพที่ 4-41 การวิบัติของเสา C14/1



ภาพที่ 4-42 การวิบัติของเสา C14/2

4.4.3 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C19/1 และ C19/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C19/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 20 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 28.70 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายบริเวณส่วนบนหัวเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา และเกิดรอยร้าวเป็นแนวยาวถึงบริเวณกลางเสา ส่วนเสา C19/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 19 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 27.65 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา จากมาตรการวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กปลอกคำนวณได้ 3,589 ksc แสดงว่าเหล็กปลอกถึงจุดคราก การหาค่าตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรการวัดความเครียดคำนวณได้ 0.76 มม.ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-43 และ 4-44



ภาพที่ 4-43 การวิบัติของเสา C19/1

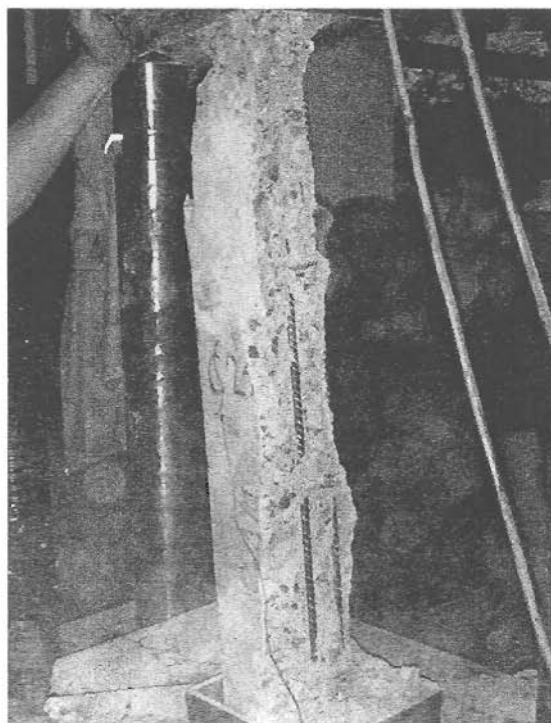


ภาพที่ 4-44 การวิบัติของเสา C19/2

4.4.4 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C24/1 และ C24/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C24/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 28 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 33.90 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายบริเวณส่วนล่างถึงบริเวณกลางเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา และเกิดรอยร้าวเป็นแนวยาวถึงบริเวณกลางเสา ส่วนเสา C24/2' เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 30 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 39.29 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนหัวถึงส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กชั้นคำนวณได้ 3,662 ksc แสดงว่าเหล็กชั้นถึงจุดคราก การหัดตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 0.71 มม. ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-45 และ 4-46

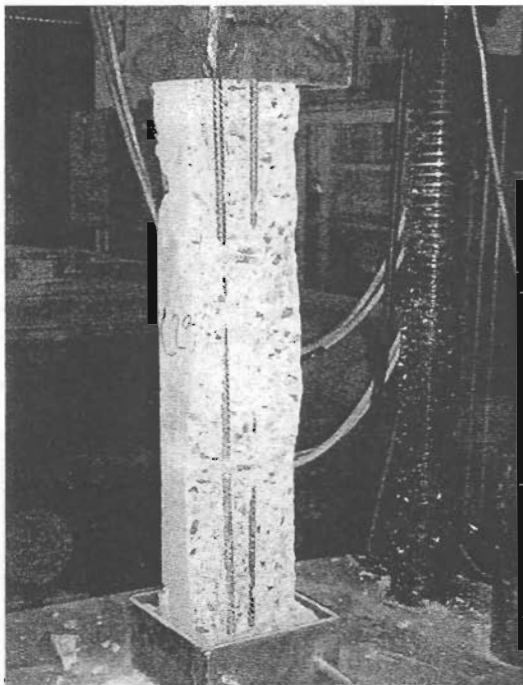


ภาพที่ 4-45 การวิบัติของเสา C24/1



ภาพที่ 4-46 การวิบัติของเสา C24/2

4.4.5 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C29/1 และ C29/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C29/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 17 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 32.77 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายบริเวณส่วนบนถึงส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา C29/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 30 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 37.57 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นที่บริเวณส่วนล่างถึงส่วนกลางของเสา และเกิดรอยร้าวเป็นแนวยาวถึงบริเวณกลางเสา ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-47 และ 4-48



ภาพที่ 4-47 การวิบัติของเสา C29/1

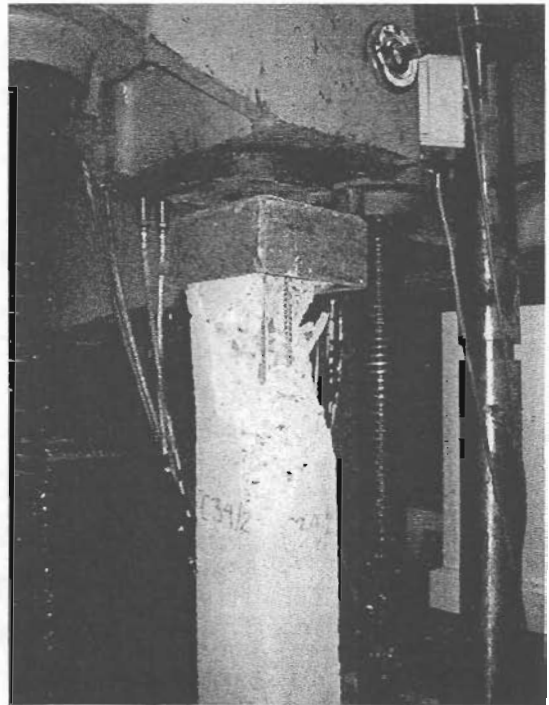


ภาพที่ 4-48 การวิบัติของเสา C29/2

4.4.6 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C34/1 และ C34/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C34/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 24 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 33.42 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายบริเวณส่วนบนถึงส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน และเกิดรอยร้าวเป็นแนวยาว ส่วนเสา C34/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 28 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 34.50 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนบนถึงส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-49 และ 4-50



ภาพที่ 4-49 การวิบัติของเสา C34/1



ภาพที่ 4-50 การวิบัติของเสา C34/2

4.4.7 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C38/1 และ C38/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C38/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 27 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 35 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายบริเวณส่วนบนถึงส่วนกลางของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา C38/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 20 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 29 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนบนถึงส่วนกลางของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน และเกิดรอยร้าวเป็นแนวยาว ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-51 และ 4-52



ภาพที่ 4-51 การวิบัติของเสา C38/1



ภาพที่ 4-52 การวิบัติของเสา C38/2

4.4.8 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C43/1 และ C43/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C43/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 20 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 33.27 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา ส่วนเสา C43/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 20 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 29 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนล่างถึงส่วนกลางของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-53 และ 4-54



ภาพที่ 4-53 การวิบัติของเสา C43/1



ภาพที่ 4-54 การวิบัติของเสา C43/2

4.4.9 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C48/1 และ C48/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C48/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 20 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 33.47 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายบริเวณส่วนบนถึงส่วนกลางของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา C48/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 18 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 30.92 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนบนของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน จากมาตรวัดความเครียด ค่าความเค้นครากของเหล็กขึ้นคำนวณได้ 2,621 ksc ค่าความเค้นครากของเหล็กปลอกคำนวณได้ 2,166 ksc แสดงว่าเหล็กขึ้นและเหล็กปลอกยังไม่ถึงจุดคราก การหัดตัวที่ผิวคอนกรีตจากมาตรวัดความเครียดคำนวณได้ 0.48 มม. ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-55 และ 4-56



ภาพที่ 4-55 การวิบัติของเสา C48/1



ภาพที่ 4-56 การวิบัติของเสา C48/2

4.4.10 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C53/1 และ C53/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C53/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 22 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 30.77 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายบริเวณส่วนบนของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา พร้อมทั้งมีรอยร้าวเกิดขึ้น ส่วนเสา C53/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 20 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 32.85 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนบนของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-57 และ 4-58

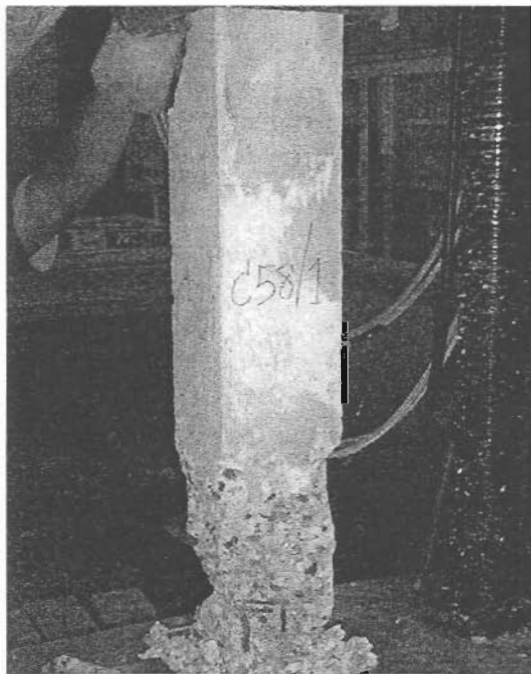


ภาพที่ 4-57 การวิบัติของเสา C53/1

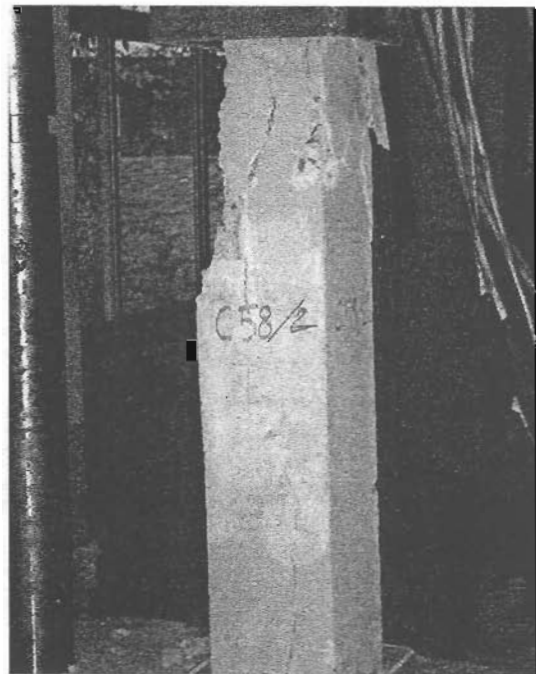


ภาพที่ 4-58 การวิบัติของเสา C53/2

4.4.11 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C58/1 และ C58/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C58/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 15 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 29.52 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากที่บริเวณส่วนล่างของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา C58/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 17 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 26.62 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนบนถึงส่วนกลางของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา และเกิดรอยร้าวเป็นแนวยาวตลอดเสา ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-59 และ 4-60



ภาพที่ 4-59 การวิบัติของเสา C58/1

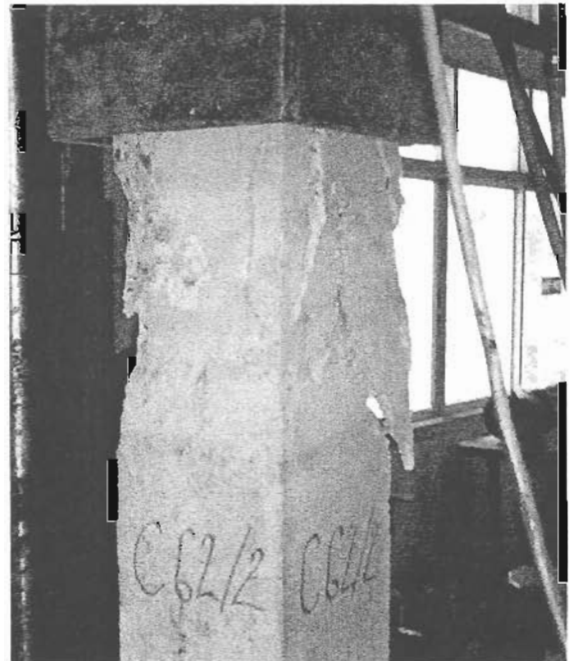


ภาพที่ 4-60 การวิบัติของเสา C58/2

4.4.12 ผลการทดสอบเสาและวิเคราะห์เสา C62/1 และ C62/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ เสาคอนกรีต C62/1 การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 24 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 35.72 ตัน โดยเสาเกิดความเสียหายมากที่บริเวณส่วนบนถึงส่วนกลางของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจนถึงเหล็กแกน ส่วนเสา C62/2 เมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อเสาอย่างสม่ำเสมอ การแตกร้าวเริ่มที่น้ำหนักประมาณ 21 ตัน และเริ่มแตกไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสาคอนกรีตวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 36.82 ตัน โดยการเสียรูปเกิดขึ้นมากที่บริเวณส่วนบนของเสา โดยที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อนออกมา ภาพการวิบัติของเสาแสดงในภาพที่ 4-61 และ 4-62



ภาพที่ 4-61 การวิบัติของเสา C62/1



ภาพที่ 4-62 การวิบัติของเสา C62/2

บทที่ 5

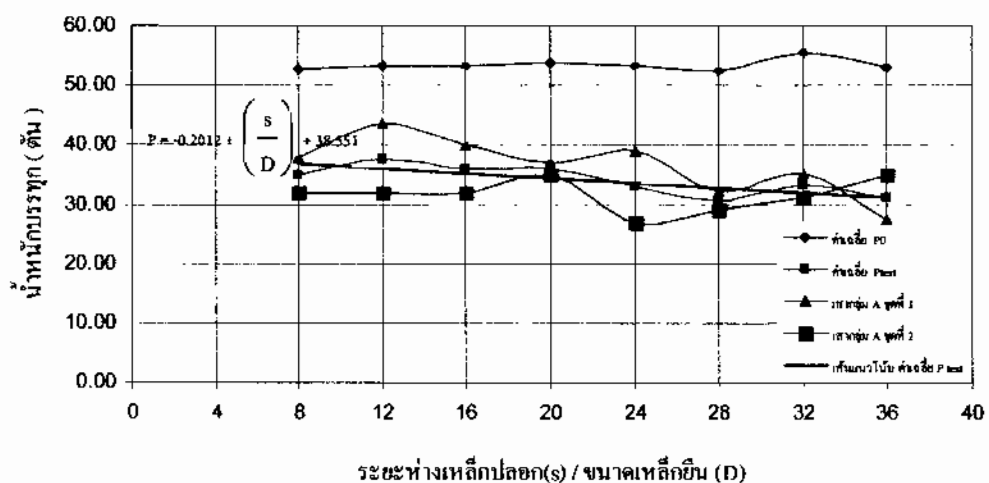
สรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การทดสอบเสาแบ่งเสาออกเป็น 3 กลุ่ม ดังกล่าวไว้ในบทที่ 1 โดยผลที่ได้จากการทดสอบทำให้ทราบว่า เหล็กปลอกที่มีขนาดและระยะห่างต่างกันมีผลต่อการรับแรงอัดของเสาหรือไม่

5.1 สรุปผลการทดสอบเสากลุ่ม A

เสากลุ่ม A เป็นเสาที่เสริมเหล็กปลอก RB 6 มม. การวิบัติของเสาเริ่มแตกร้าวที่ส่วนบนหรือส่วนล่างของเสา ก่อน โดยเสาที่มีระยะเหล็กปลอกถี่การแตกร้าวของเสาเกิดที่บริเวณส่วนบนและส่วนล่างของเสา ส่วนเสาที่มีระยะเหล็กปลอกห่างการแตกร้าวจะมีความรุนแรงมากกว่าเสาที่มีระยะเหล็กปลอกถี่ โดยผิวคอนกรีตแตกจนถึงเหล็กแกน (พฤติกรรมและการวิเคราะห์การวิบัติ กล่าวไว้ในบทที่ 4) กำลังอัดเฉลี่ยเสากลุ่ม A ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 53.45 ตัน ส่วนกำลังอัดเฉลี่ยของเสากลุ่มนี้ ที่ได้จากการทดสอบมีค่า 34.13 ตัน กำลังอัดของเสากลุ่ม A ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ ว.ส.ท. และ ACI คือเสามีระยะห่างเหล็กปลอกไม่เกิน 15 ซม. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 36.4 ตัน และค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดมีค่า 33.37 ตัน แสดงว่าเมื่อเหล็กปลอกมีค่า (s/D) มากขึ้นการรับกำลังอัดของเสามีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ตามสมการ

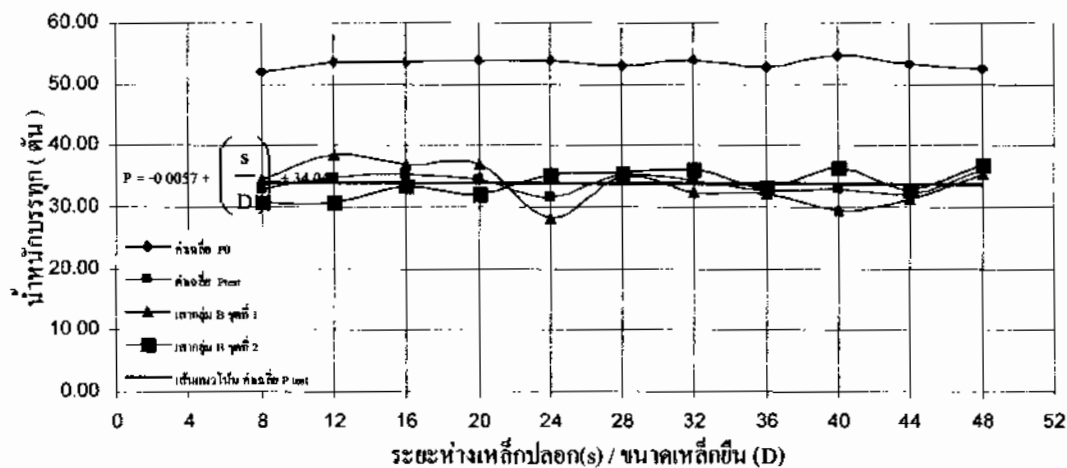
$$P = -0.2012 \left(\frac{s}{D} \right) + 38.551 \text{ ดังภาพที่ 5-1}$$



ภาพที่ 5-1 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดตามทฤษฎีกับแรงอัดเฉลี่ยจากการทดสอบเสา
กลุ่ม A

5.2 สรุปผลการทดสอบเสากลุ่ม B

เสากลุ่ม B เป็นเสาที่เสริมเหล็กปลอก RB 9 มม. การวิบัติของเสาเริ่มแตกร้าวที่ส่วนบนหรือส่วนล่างของเสาก่อน โดยเสาที่มีระยะเหล็กปลอกถี่การแตกร้าวของเสาเกิดที่บริเวณส่วนบนและส่วนล่างของเสา ส่วนเสาที่มีระยะเหล็กปลอกห่างการแตกร้าวจะมีความรุนแรงมากกว่าเสาที่มีระยะเหล็กปลอกถี่ โดยผิวคอนกรีตแตกจนถึงเหล็กแกน กำลังอัดเฉลี่ยเสากลุ่ม B ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 53.43 ตัน ส่วนกำลังอัดเฉลี่ยของเสากลุ่มนี้ ที่ได้จากการทดสอบมีค่า 33.8 ตัน กำลังอัดของเสากลุ่ม B ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ ว.ส.ท. และ ACI คือเสามีระยะห่างเหล็กปลอกไม่เกิน 15 ซม. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 33.65 ตัน และค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดมีค่า 33.83 ตัน แสดงว่าเมื่อเหล็กปลอกมีค่า (s/D) มากขึ้นการรับกำลังอัดของเสามีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ตามสมการ $P = -0.0057 \left(\frac{s}{D} \right) + 34.014$ ดังภาพที่ 5-2

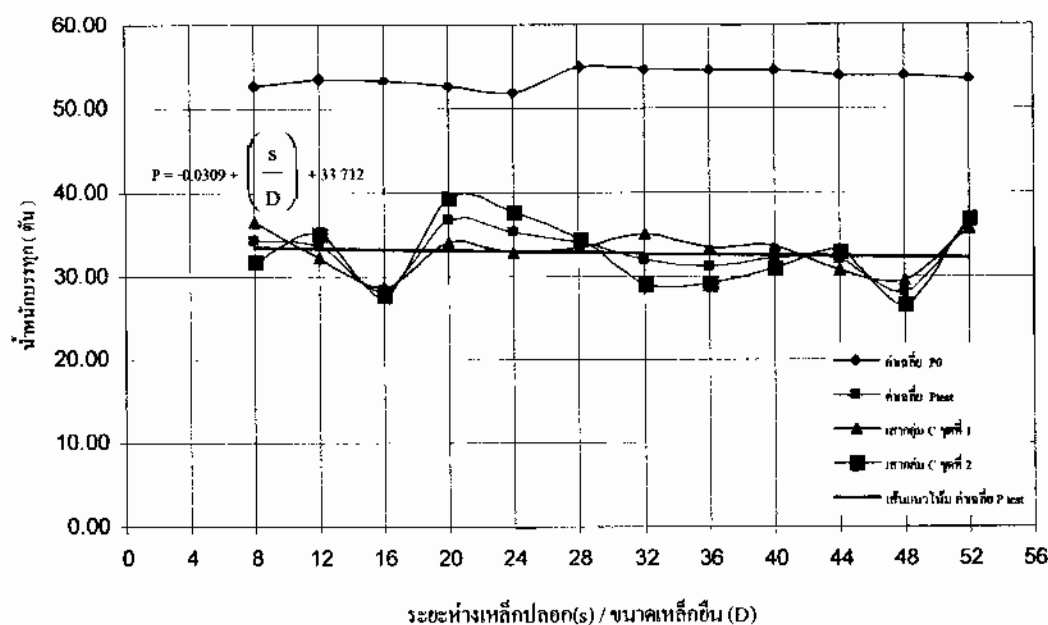


ภาพที่ 5-2 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดตามทฤษฎีกับแรงอัดเฉลี่ยจากการทดสอบเสา
กลุ่ม B

5.3 สรุปผลการทดสอบเสากลุ่ม C

เสากลุ่ม C เป็นเสาที่เสริมเหล็กปลอก DB 10 มม. การวิบัติของเสาเริ่มแตกร้าวที่ส่วนบนหรือส่วนล่างของเสาก่อน โดยเสาที่มีระยะเหล็กปลอกถี่การแตกร้าวของเสาเกิดที่บริเวณส่วนบนและส่วนล่างของเสา ส่วนเสาที่มีระยะเหล็กปลอกห่างการแตกร้าวจะมีความรุนแรงมากกว่าเสาที่มีระยะเหล็กปลอกถี่ โดยผิวคอนกรีตแตกจนถึงเหล็กแกน กำลังอัดเฉลี่ยเสากลุ่ม C ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 53.63 ตัน ส่วนกำลังอัดเฉลี่ยของเสากลุ่มนี้ ที่ได้จากการทดสอบมีค่า 32.77 ตัน กำลังอัดของเสากลุ่ม C ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ ว.ส.ท. และ ACI คือเสามีระยะห่างเหล็ก

ปลอกไม่เกิน 15 ซม. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 33.85 ดัน และค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดมีค่า 32.55 ดัน แสดงว่าเมื่อเหล็กปลอกมีค่า (s/D) มากขึ้นการรับกำลังอัดของเสามีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย ตามสมการ $P = -0.0309 \left(\frac{s}{D} \right) + 33.712$ ดังภาพที่ 5-3

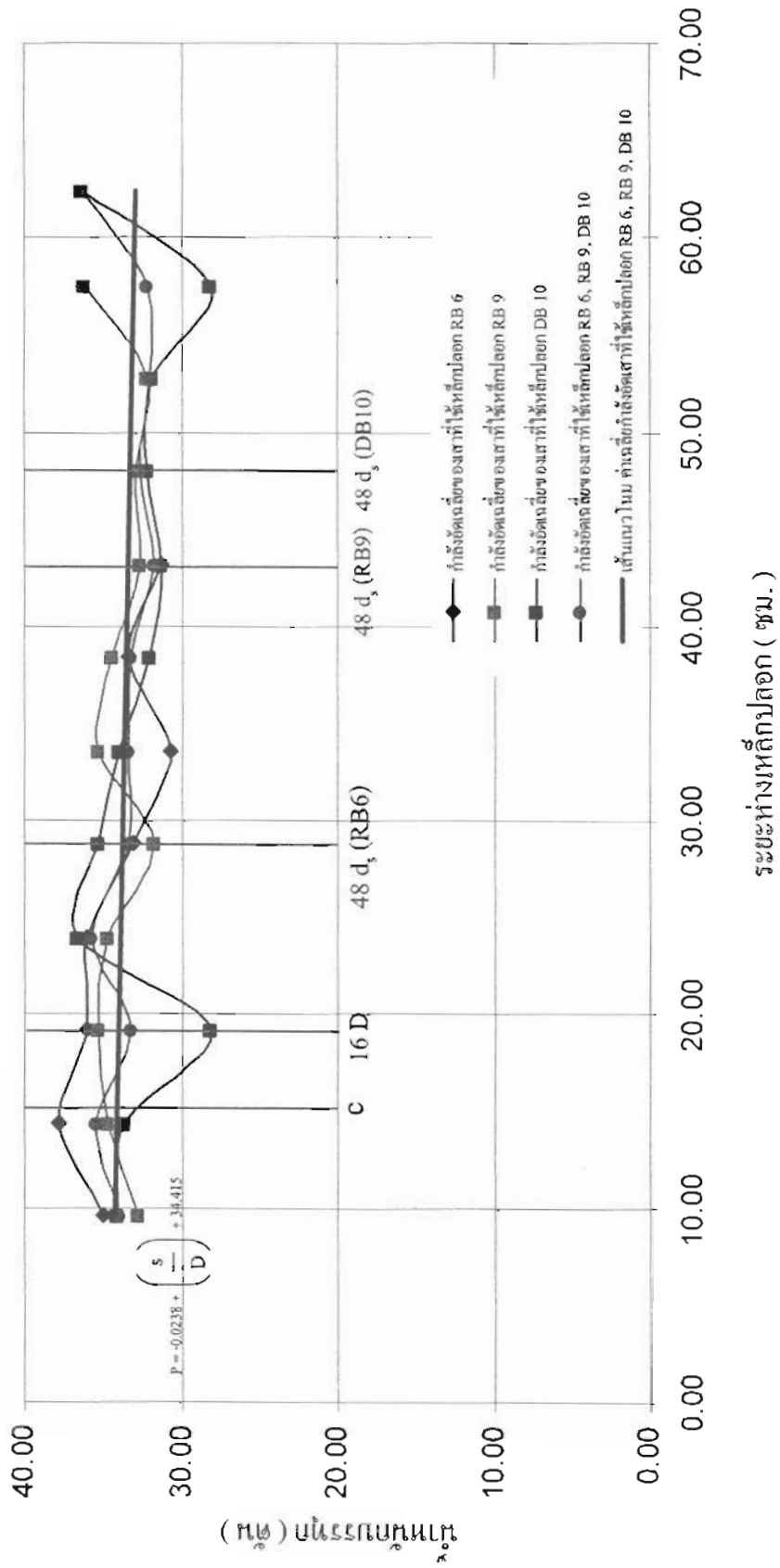


ภาพที่ 5-3 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดตามทฤษฎีกับแรงอัดเฉลี่ยจากการทดสอบเสา
กลุ่ม C

5.4 สรุปผลการทดสอบกลุ่มเสาทั้งหมด

จากการทดสอบเสาทั้ง 3 กลุ่ม กำลังรับแรงอัดของเสา ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี โดยเสากลุ่ม A มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 59 เปอร์เซ็นต์ ถึง 71 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดที่คำนวณได้จากทฤษฎี เสากลุ่ม B มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 59 เปอร์เซ็นต์ ถึง 69 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดที่คำนวณได้จากทฤษฎี และเสากลุ่ม C มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 52 เปอร์เซ็นต์ ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ของกำลังอัดที่คำนวณได้จากทฤษฎี จากการทดสอบเสาเริ่มแตกร้าวที่บริเวณส่วนบนหรือส่วนล่างก่อน ทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอกหลุดร่อนออกมา โดยส่วนมากจะหลุดร่อนออกมาสองด้าน (ภาคผนวก จ) ทำให้เนื้อที่คอนกรีตที่รับแรงบริเวณส่วนบนหรือส่วนล่างของเสาลดลง จึงทำให้เสารับกำลังอัดได้น้อยลง กำลังอัดเฉลี่ยเสาทั้ง 3 กลุ่ม ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 53.5 ดัน ส่วนกำลังอัดเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบมีค่า 33.57 ดัน กำลังอัดของเสาทั้ง 3 กลุ่ม ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของ ว.ส.ท. และ ACI คือเสามีระยะห่างเหล็กปลอกไม่เกิน 15 ซม. มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 34.63 ดัน และค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดมีค่า 32.25 ดัน

แสดงว่าเมื่อเหล็กปลอกมีค่า (s) เพิ่มขึ้นการรับกำลังอัดของเสามีค่าลดลง ตามสมการ $P = -0.0238(s) + 34.415$ ดังภาพที่ 5-3 และนำผลการทดสอบที่ได้ของเสากลุ่ม A , เสากลุ่ม B และ เสากลุ่ม C มาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการทดสอบความแตกต่างไคสแควร์ พบว่าขนาดที่แตกต่างกันของเหล็กปลอกทั้ง 3 ชนิด ในเสาทดสอบให้ค่าการรับกำลังไม่แตกต่างกัน ณ ระดับความมั่นใจ 95% (ภาคผนวก ค)



ภาพที่ 5-4 การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของเสาทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่าง

5.5 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย

5.5.1 ควรเปลี่ยนขนาดหน้าตัด ความสูงของเสาให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

5.5.2 ควรติดมาตรวัดความเครียดในส่วนบน และส่วนล่างของเสา

5.5.3 ควรมีการทดสอบเสาเบื้องต้นเพื่อหาข้อผิดพลาดต่างๆ ก่อนการทดสอบจริง ทั้งนี้เพื่อ

กำจัดตัวแปรที่อาจเกิดขึ้นในการทดสอบจริง ค่าที่ได้จะเที่ยงตรงกว่า

5.5.4 ควรใส่เหล็กปลอกที่บริเวณส่วนบน และส่วนล่างของเสาให้ถี่ขึ้น

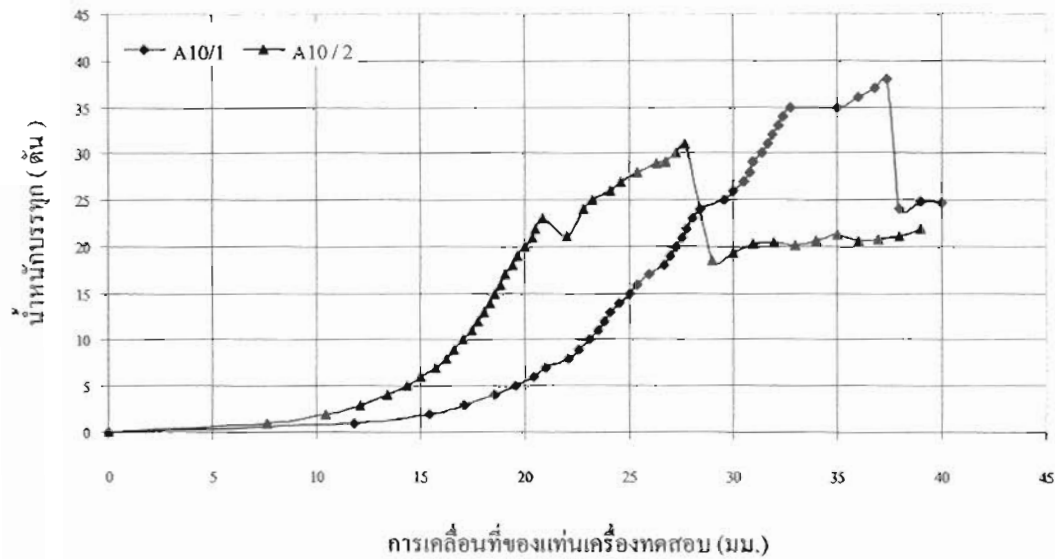
เอกสารอ้างอิง

1. จักษุภา ชำรงวุฒิ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์. การทดสอบเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดย
ปลอกเหล็กภายใต้การรับน้ำหนักกดตามแนวตรงศูนย์. งานวิจัยมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10, 2548.
2. วินิต ช่อวิเชียร คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร : ป.สัมพันธ์พานิชย์, 2519.
3. สถาพร โกลา. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กวิธีกำลัง. กรุงเทพมหานคร : ไลบรารี
นาย, 2545.
4. ตระกูล อร่ามรักษ์ และสกล เตศิริเวช. กำลังประลัยของเสาเหล็กกลวงรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส
บรรจุคอนกรีตกำลังสูงภายใต้แรงค้ำสองทาง. งานวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
กรุงเทพมหานคร : การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 7, 2544.
5. ต่อศักดิ์ เลิศศรีสกุลรัตน์ และ Niva junichiro. การวิบัติเฉพาะที่ของคอนกรีตภายใต้การ
กระทำของแรงอัดในแนวแกน. บทความมหาวิทยาลัยสยาม, การประชุมวิชาการ
วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 9, 2547.
6. เขียร พันธุ์พิทยะแพทย์. พฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังภายใต้แรงเยื้องศูนย์.
วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาโยธา ภาควิชาโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
7. นพพร จิตรบุตร. พฤติกรรมการรับน้ำหนักตามแนวแกนภายหลังอยู่ใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้น
ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต
สาขาวิชาโยธา ภาควิชาโยธา บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ, 2542.
8. พงษ์สุร อังคนานุชาติ และชัชชาติ สิทธิพันธ์. การศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริม
เหล็กที่รับแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรด้วยวิธีไฟในเอเลเมนต์. วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
9. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีต
เสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง. คณะกรรมการวิชาการวิศวกรรมโยธา, 2540.
10. สนั่น เจริญเผ่า และวินิต ช่อวิเชียร. การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
โดยวิธีกำลัง. กรุงเทพมหานคร : ป.สัมพันธ์พานิชย์, 2542.

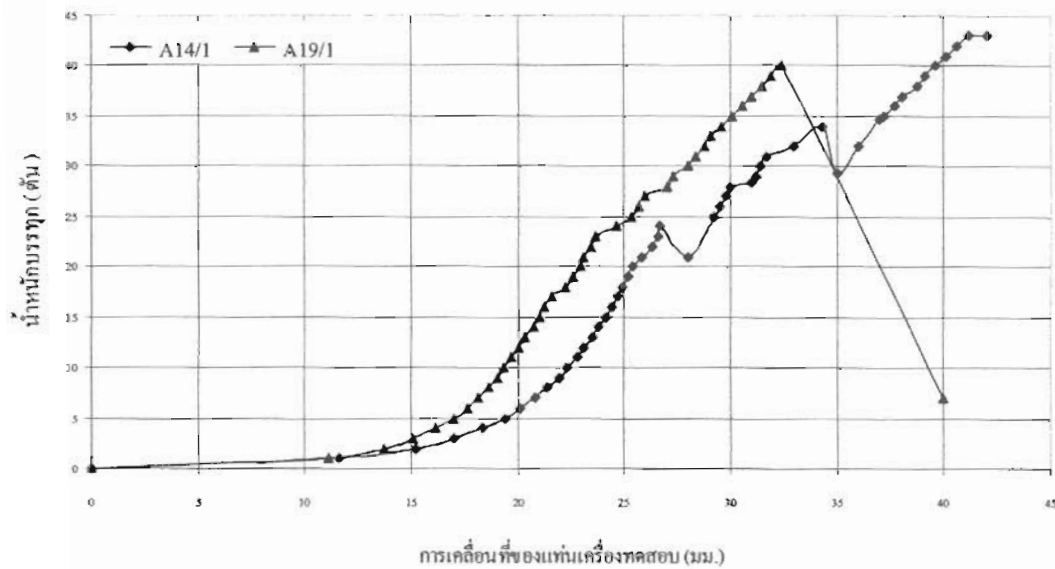
11. ศิริวัฒน์ ไชยชนะ. คอนกรีตเสริมเหล็ก ทฤษฎีกำลังประลัย. กรุงเทพมหานคร : พาราการพิมพ์, 2539.
12. สันติชัย พิทักษ์. การซ่อมแซมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยซีเมนต์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมสารลดน้ำพิเศษ. วิทยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิตสาขาสถาปัตยกรรมมหาบัณฑิตสาขาวิชาโยธา ภาควิชาโยธา บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.
13. หัตถชัย สวัสดิ์สุข, อมรรัตน์ เมปริญญา, สายัณห์ บริพิศ, วรภัทร รั้วไทรทอง, และวิรัช เลิศไพฑูรพันธ์. การศึกษาการเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคาร์บอนไฟเบอร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม, IRPUS, 2547.
14. อำนาจ พานิชกุล, สมนึก กุลประภา, และวินิต ช่อวิเชียร. การวิเคราะห์โครงสร้าง. กรุงเทพมหานคร : ป.สัมพันธ์พานิชย์, 2528.
15. ACI Committee 318. Building Code Requirement for Structural Concrete (318M-99) and Commentary, (318RM-99).
16. FERGUSON, P.M., Reinforced Concrete Fundamentals. 4th Ed., John Wiley & Sons, New York., 1981.
17. MaCGREGOR J.G., Reinforced Concrete; Mechanics and Design. 3rd Ed., Prentice Hall, New York., 1997.
18. McCORMAC J.C., Design of Reinforced Concrete. 5th Ed., Pergamon Press, Oxford., 2001.
19. Meyer, C., Design of concrete structures. Prentice-Hall, Inc., 1996.
20. Nilson, A.H., and Winter, G., Design of concrete structures. 11th Ed., McGraw-Hill Book Co., 1991.
21. PARK R. and PAULAY T., Reinforced Concrete Structure. John Wiley & Son, New York., 1975.
22. WANG C.K. and SALMON C.G., Reinforced Concrete Design. Harper & Rows Inc., New York., 1985.

ภาคผนวก ก.

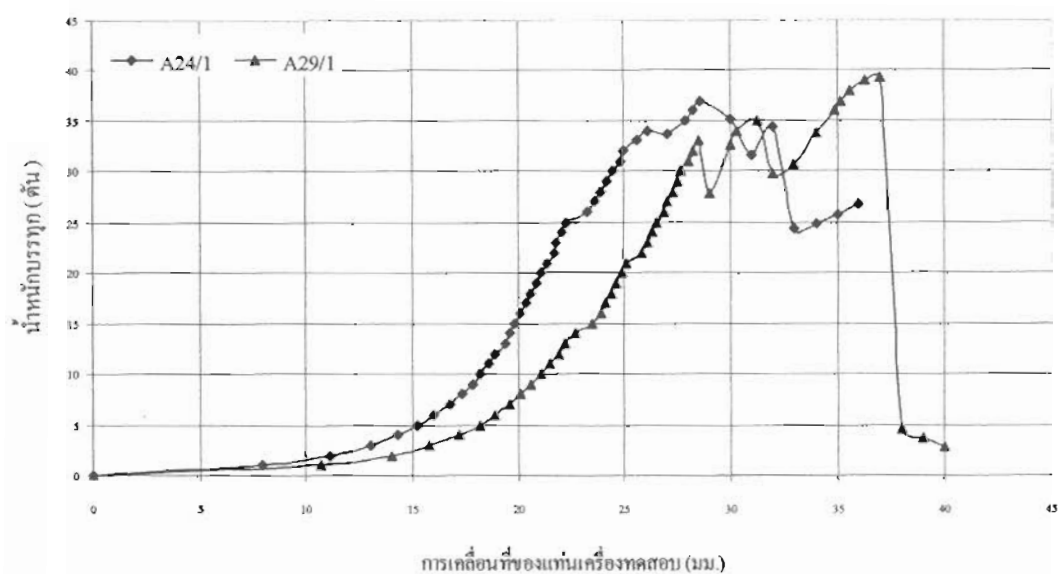
ก. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องทดสอบที่ทดสอบ



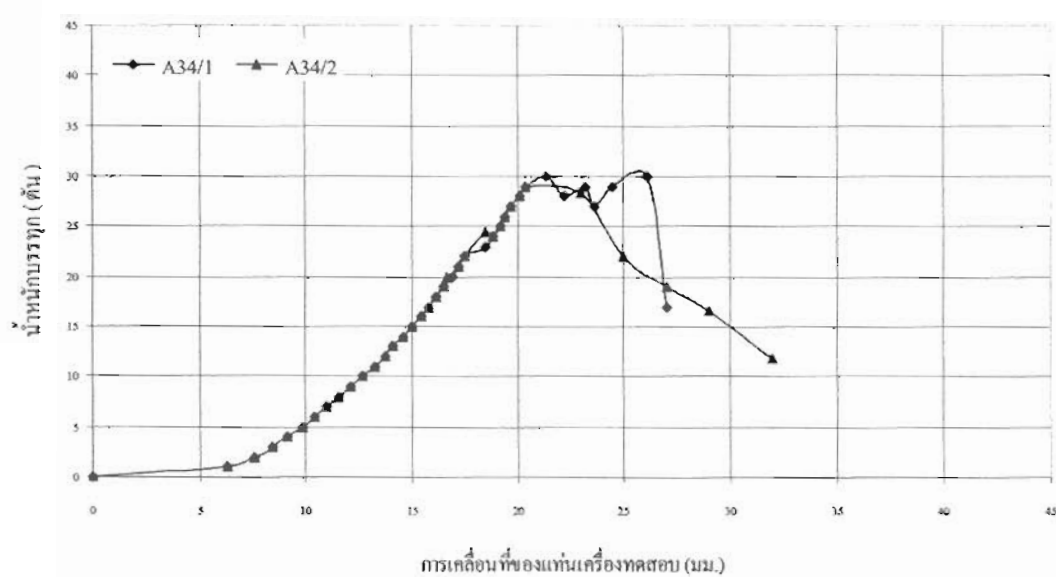
ภาพที่ ก-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ A10/1 และ A10/2



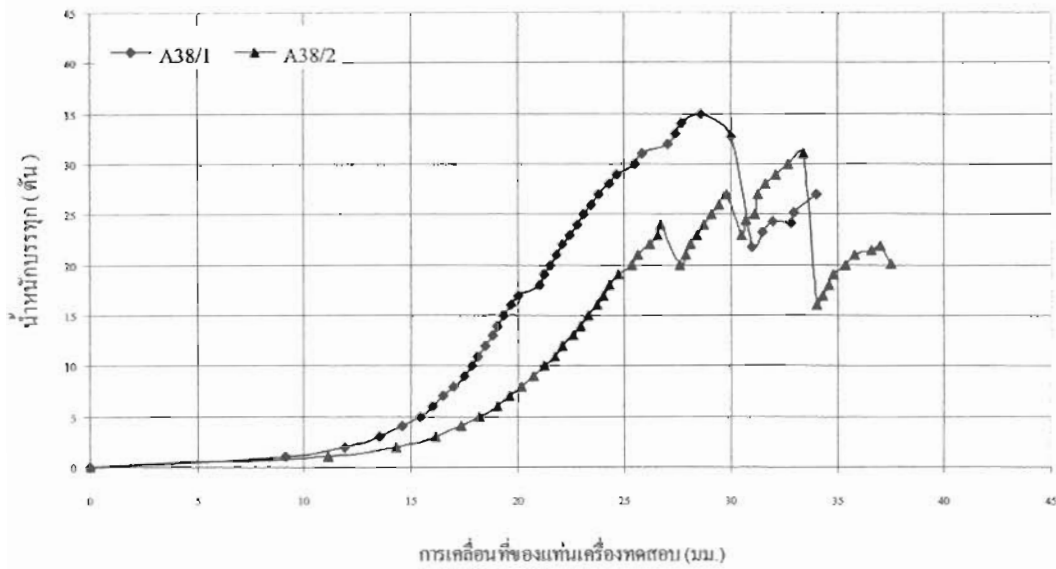
ภาพที่ ก-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ A14/1 และ A19/1



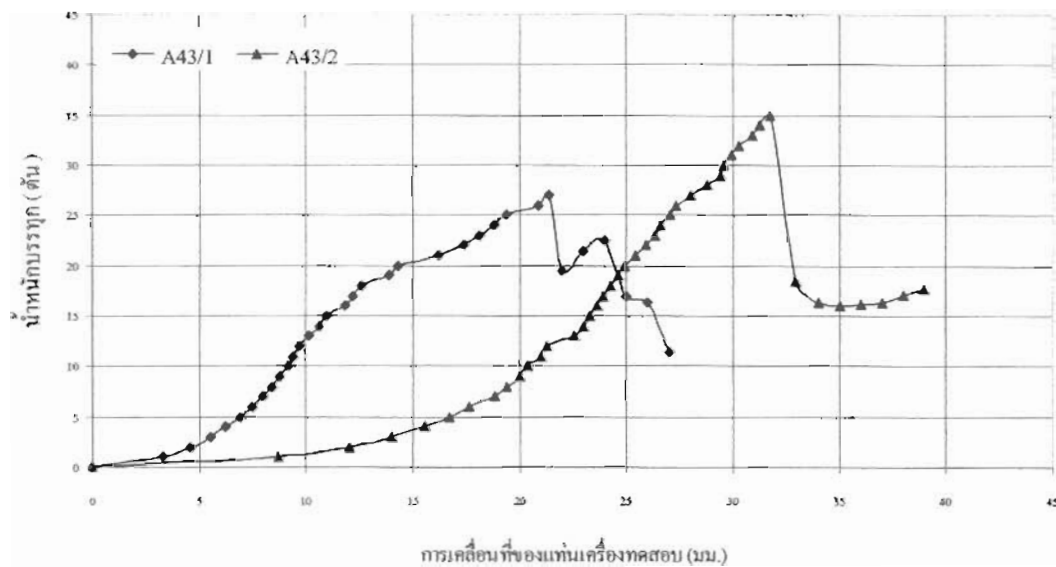
ภาพที่ ก-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ A24/1 และ A29/1



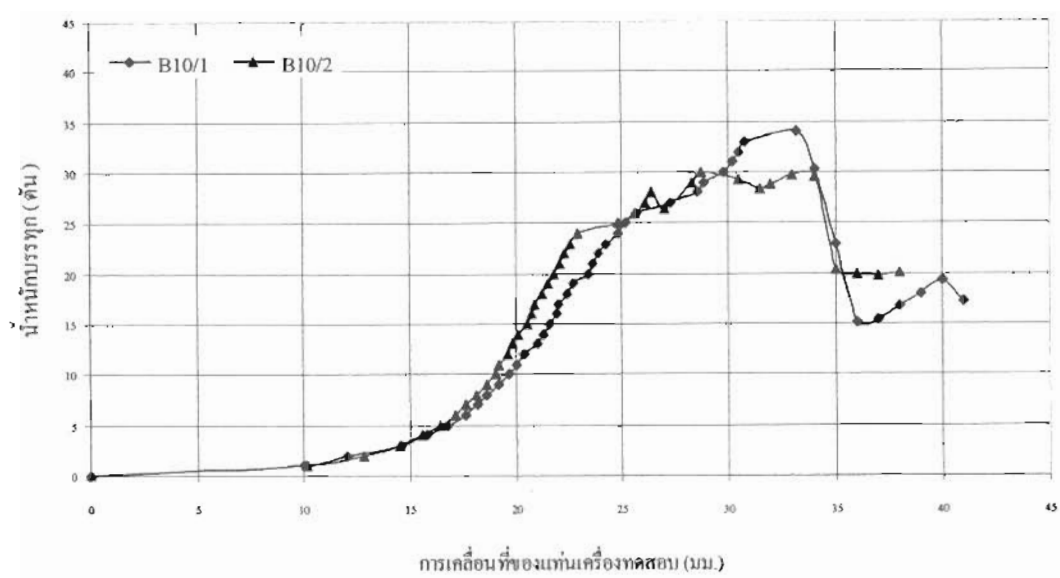
ภาพที่ ก-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ A34/1 และ A34/2



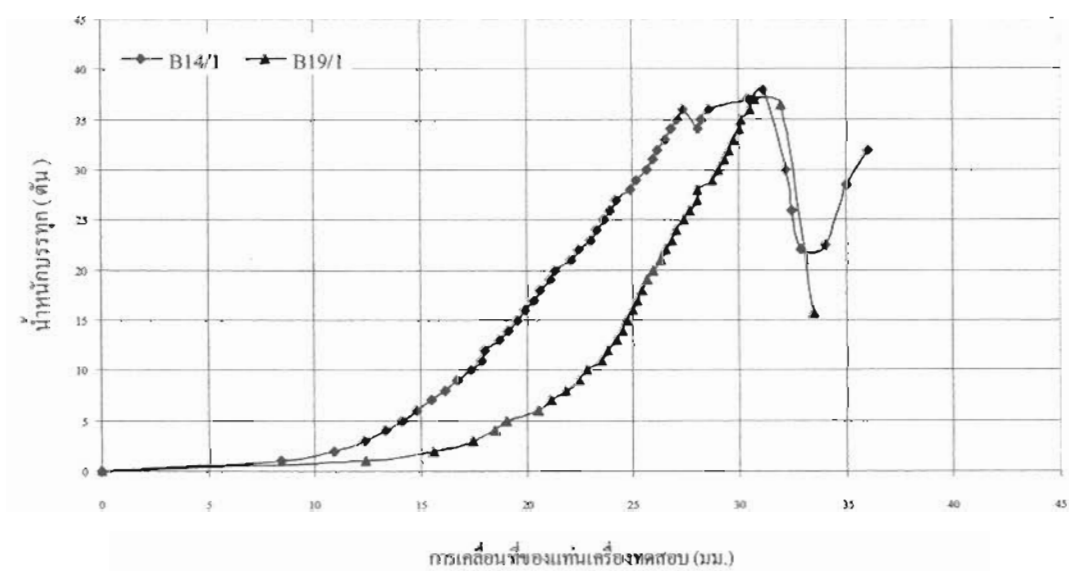
ภาพที่ ก-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ A38/1 และ A38/2



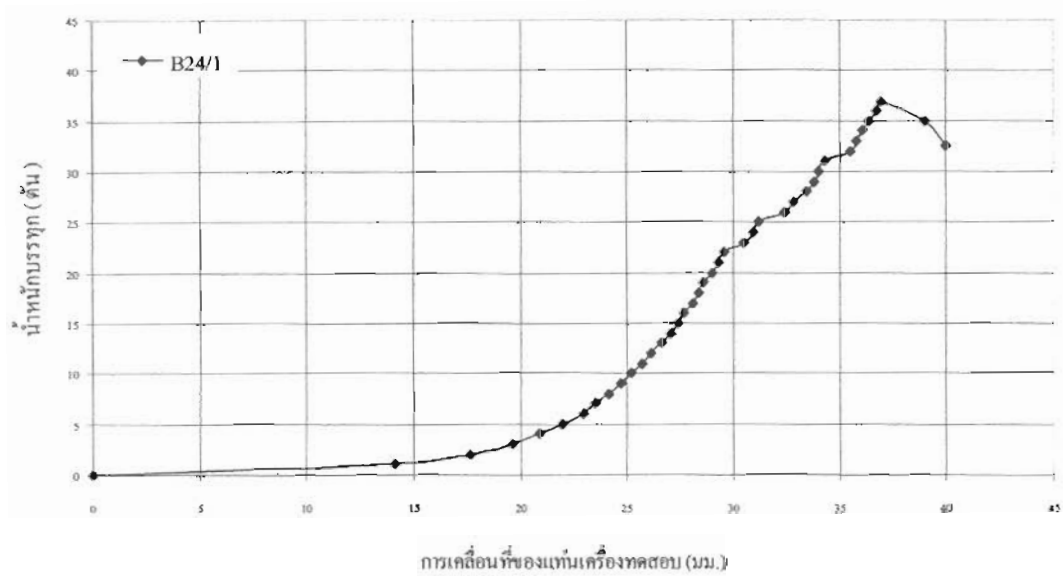
ภาพที่ ก-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ A43/1 และ A43/2



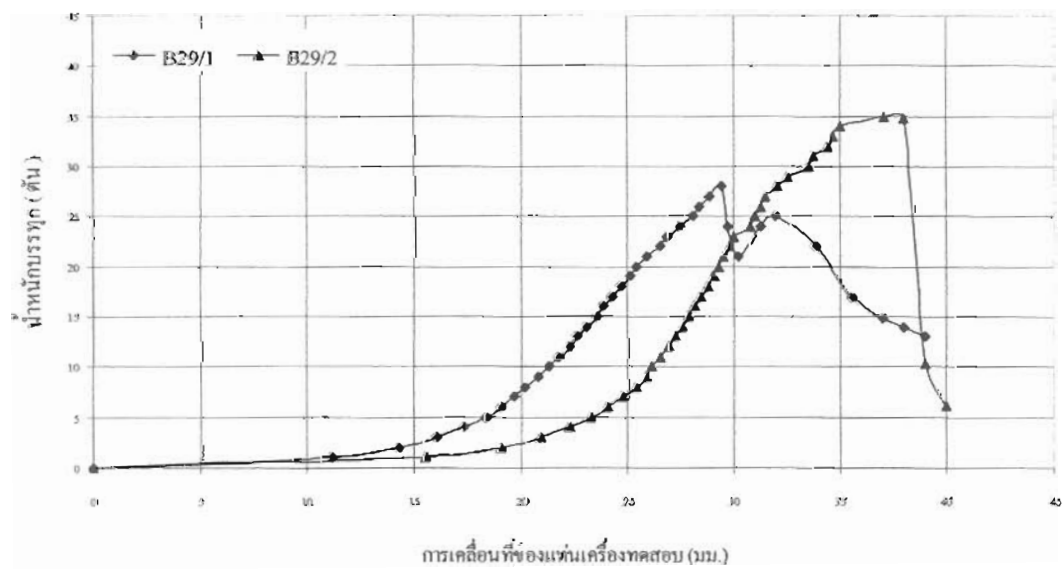
ภาพที่ ก-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและการเคลื่อนที่ของแท่งเครื่องที่กด
เสา B10/1 และ B10/2



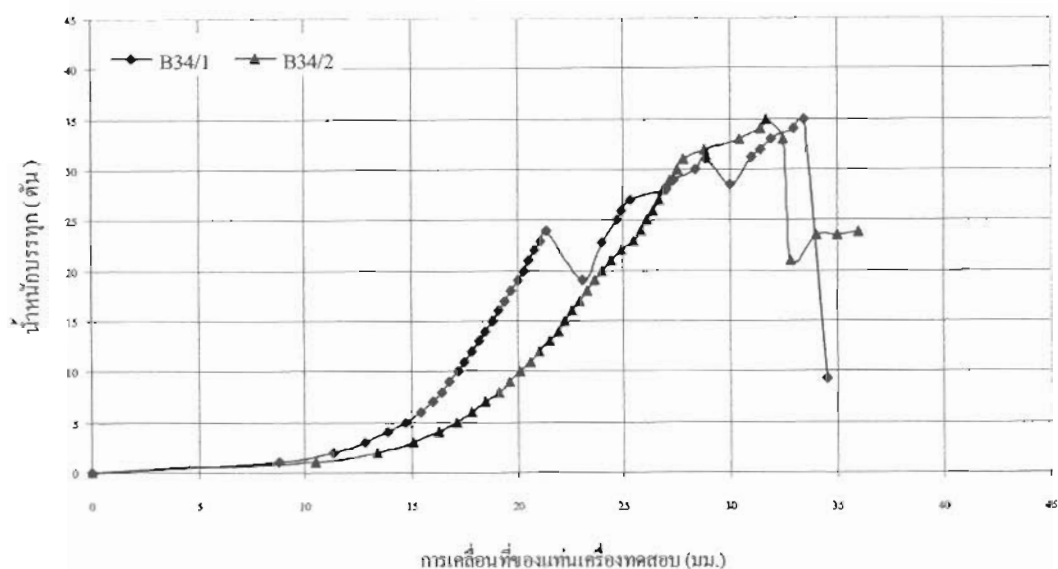
ภาพที่ ก-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและการเคลื่อนที่ของแท่งเครื่องที่กด
เสา B14/1 และ B19/1



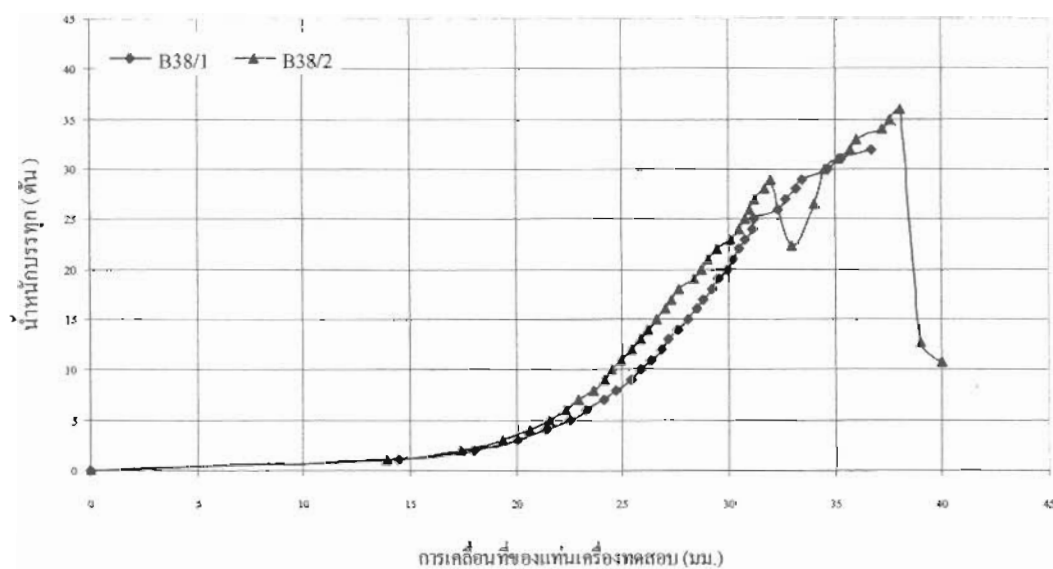
ภาพที่ ก-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่งเครื่องที่ทดสอบ B24/1



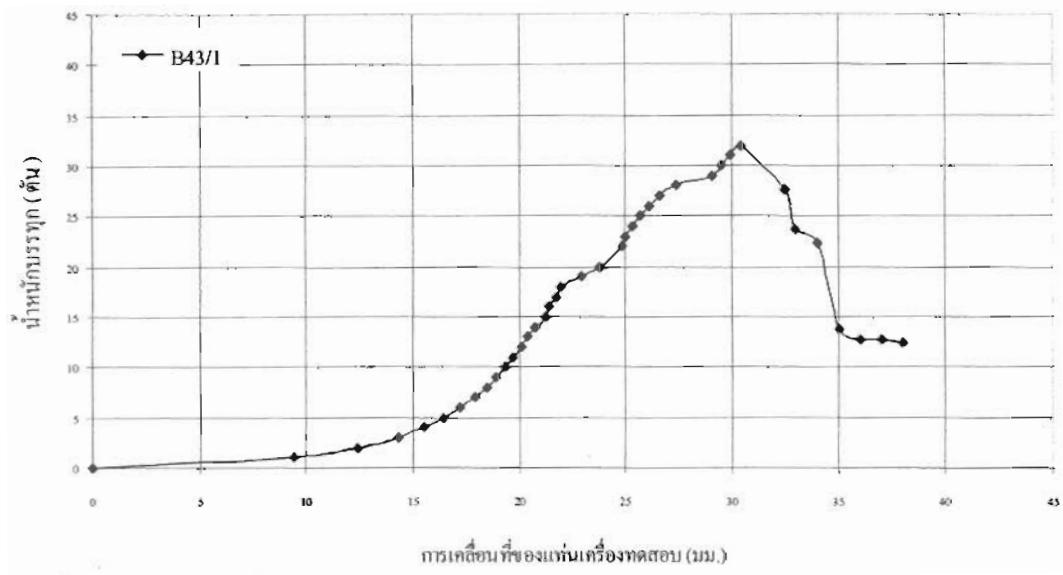
ภาพที่ ก-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่งเครื่องที่ทดสอบ B29/1 และ B29/2



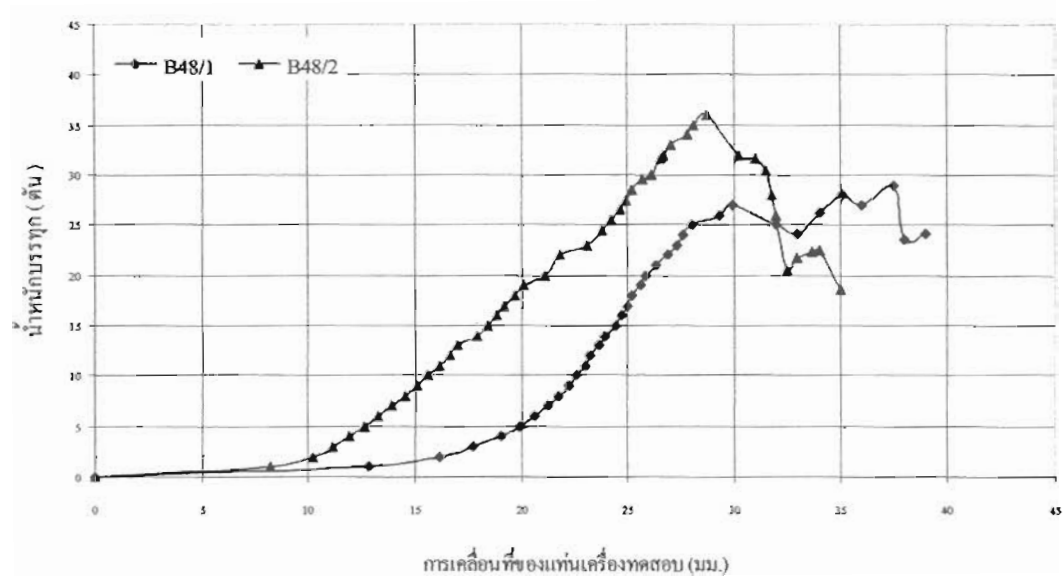
ภาพที่ ก-กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่ดูดซึมและการเคลื่อนที่ของแท่งเครื่องที่ทดสอบ B34/1 และ B34/2



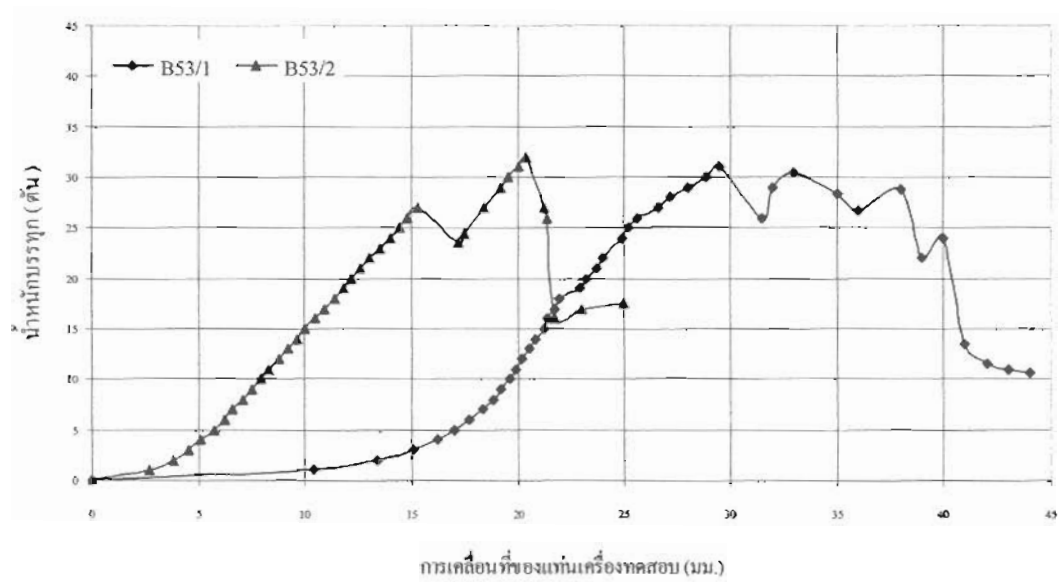
ภาพที่ ก-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่ดูดซึมและการเคลื่อนที่ของแท่งเครื่องที่ทดสอบ B38/1 และ B38/2



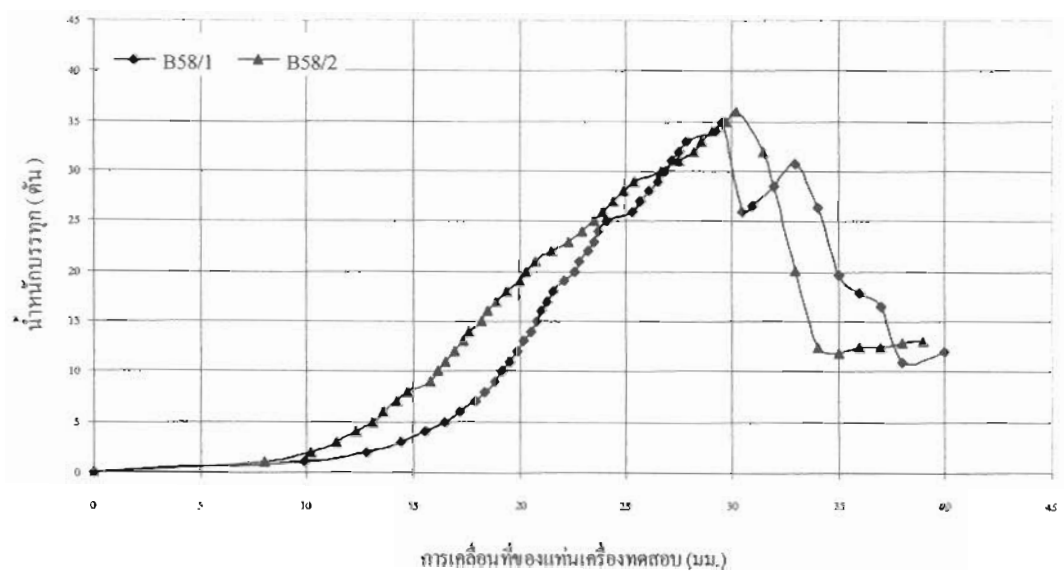
ภาพที่ ก-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ B43/1



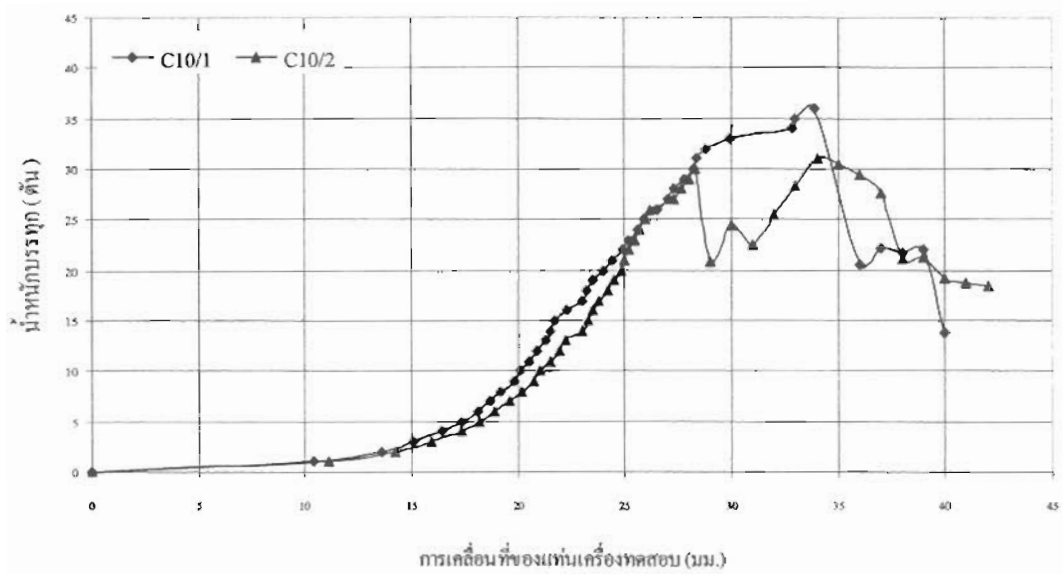
ภาพที่ ก-กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ B48/1 และ B48/2



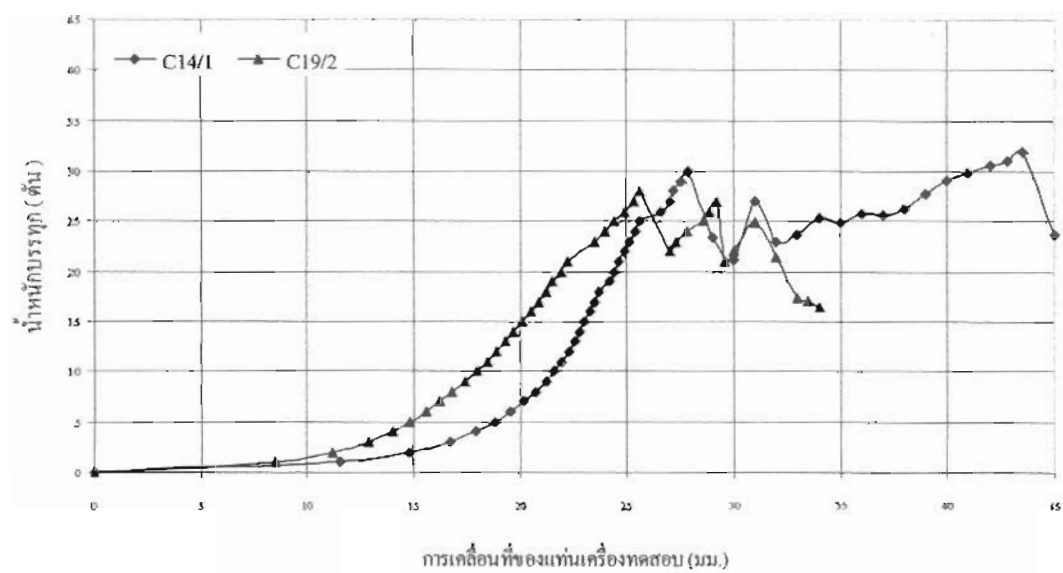
ภาพที่ ก-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและการเคลื่อนที่ของแท่งเครื่องที่กด
เสา B53/1 และ B53/2



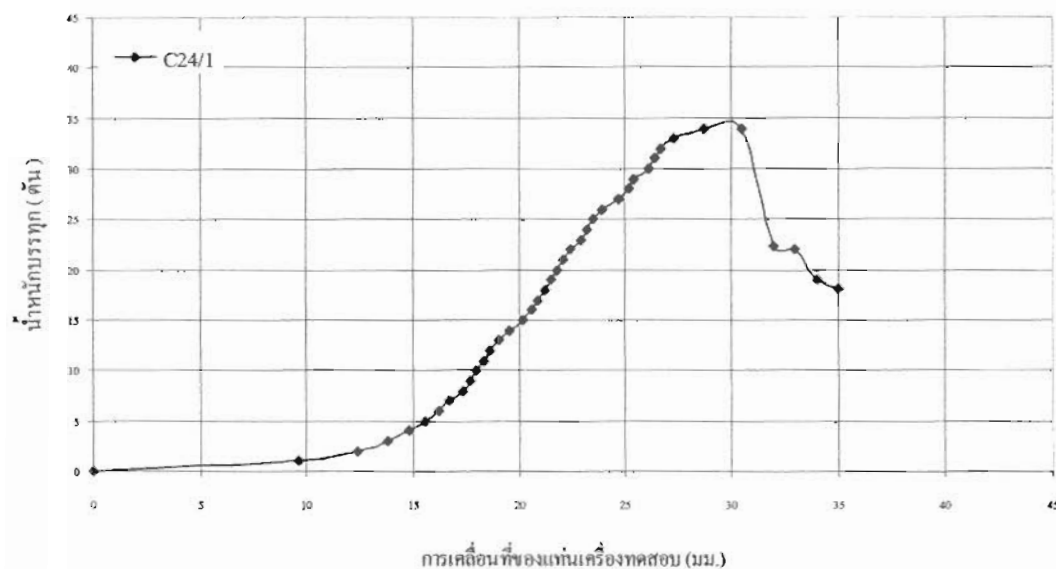
ภาพที่ ก-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและการเคลื่อนที่ของแท่งเครื่องที่กด
เสา B58/1 และ B58/2



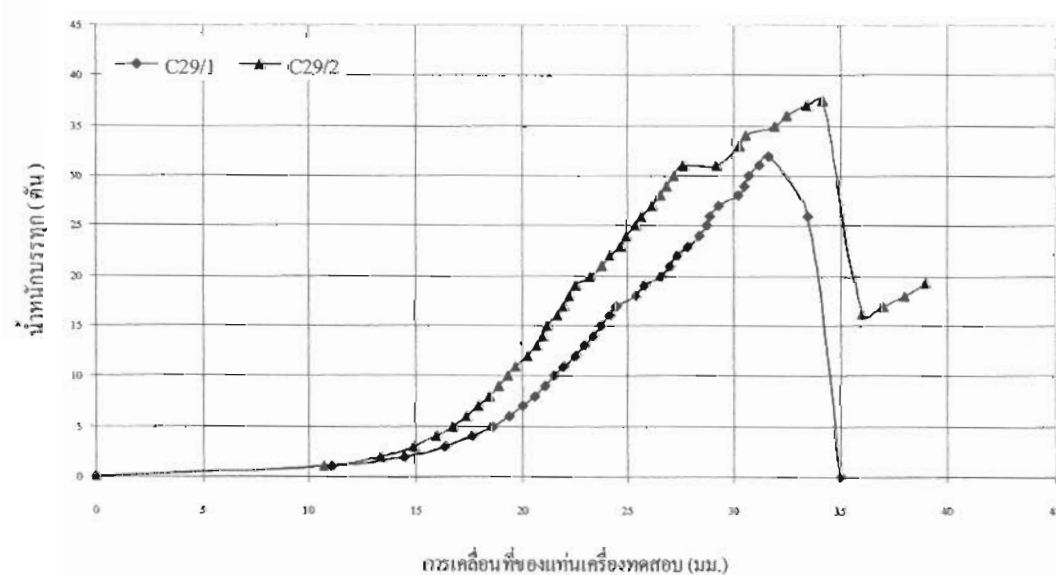
ภาพที่ ก-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ C10/1 และ C10/2



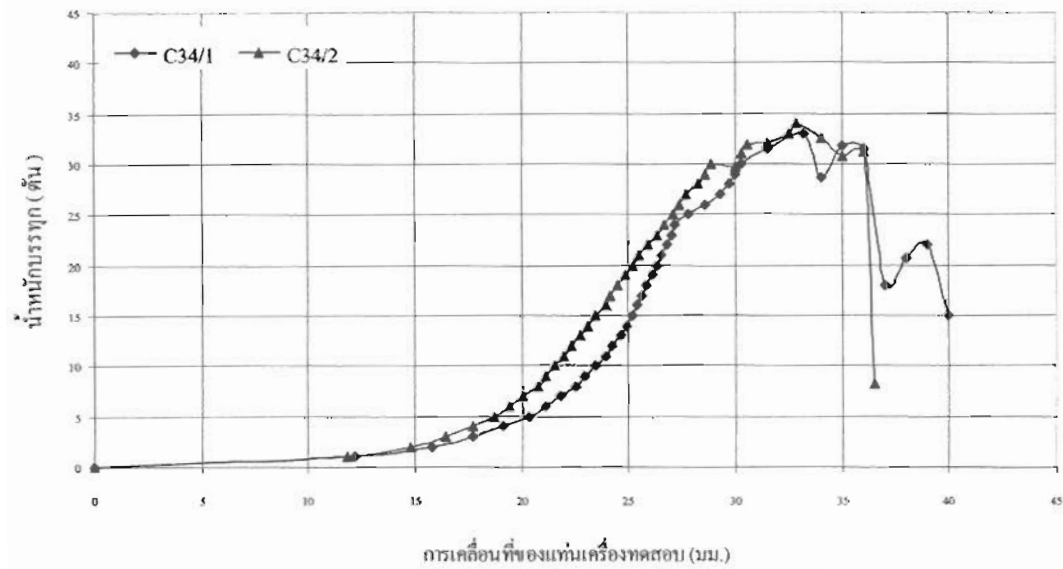
ภาพที่ ก-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ C14/1 และ C19/2



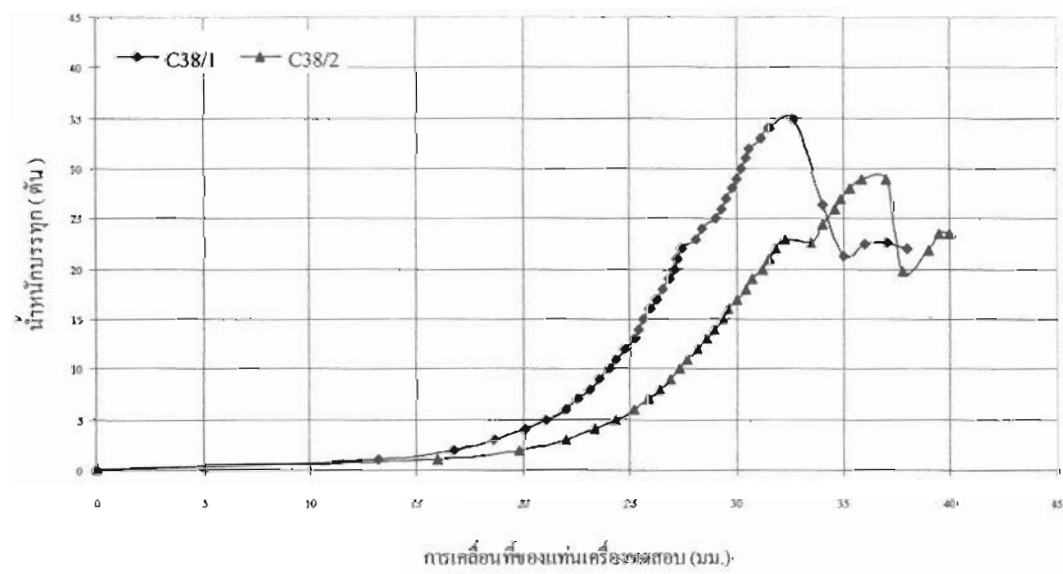
ภาพที่ ก-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่กักเก็บและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ C24/1



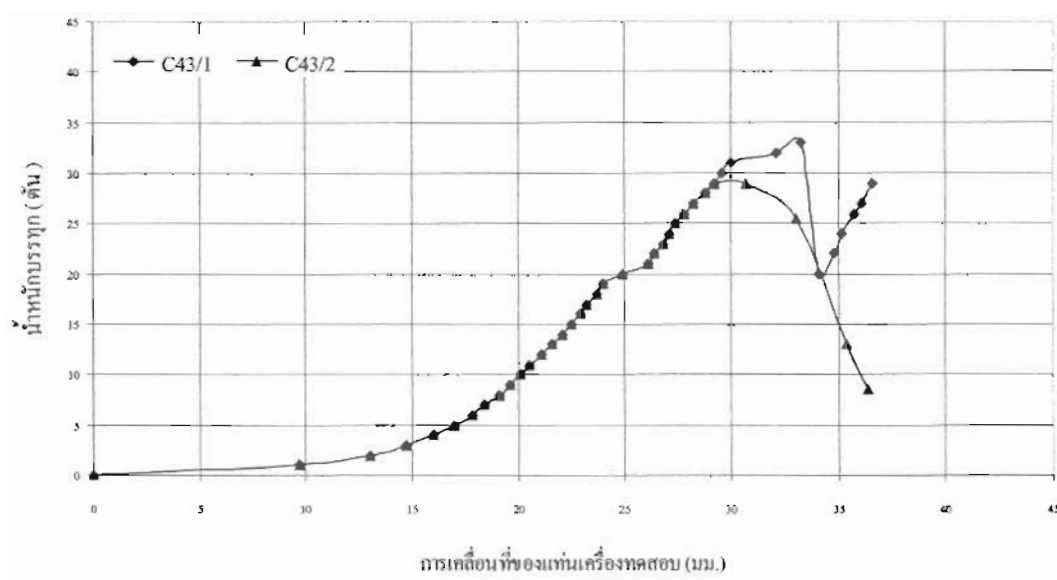
ภาพที่ ก-20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่กักเก็บและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ C29/1 และ C29/2



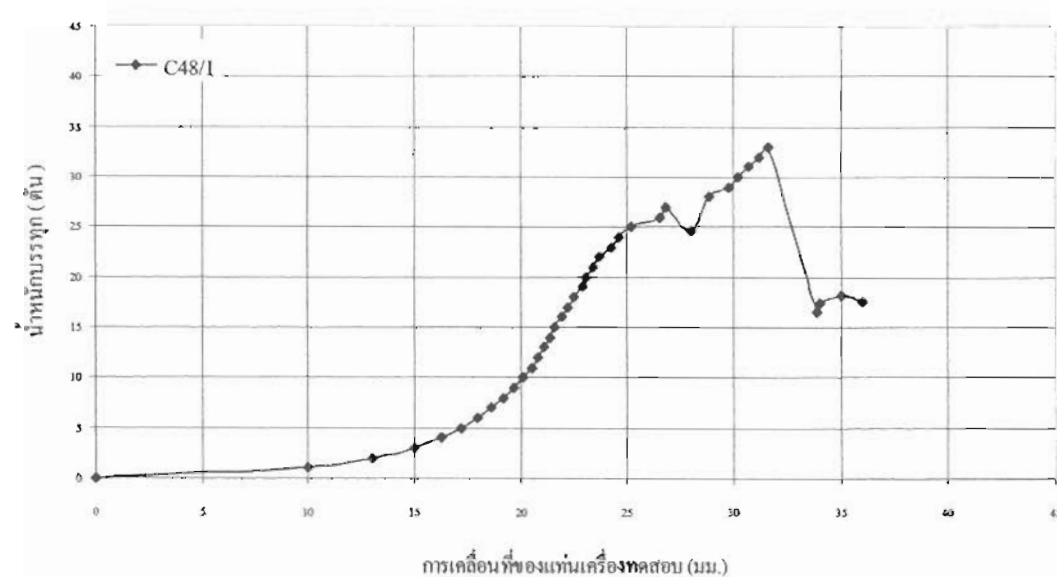
ภาพที่ ก-21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ C34/1 และ C34/2



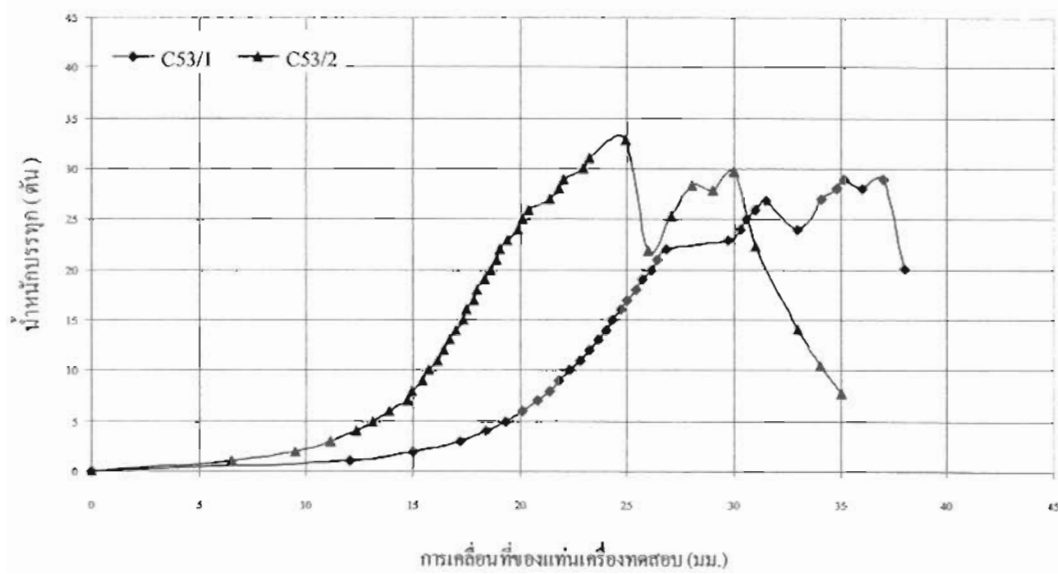
ภาพที่ ก-22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ C38/1 และ C38/2



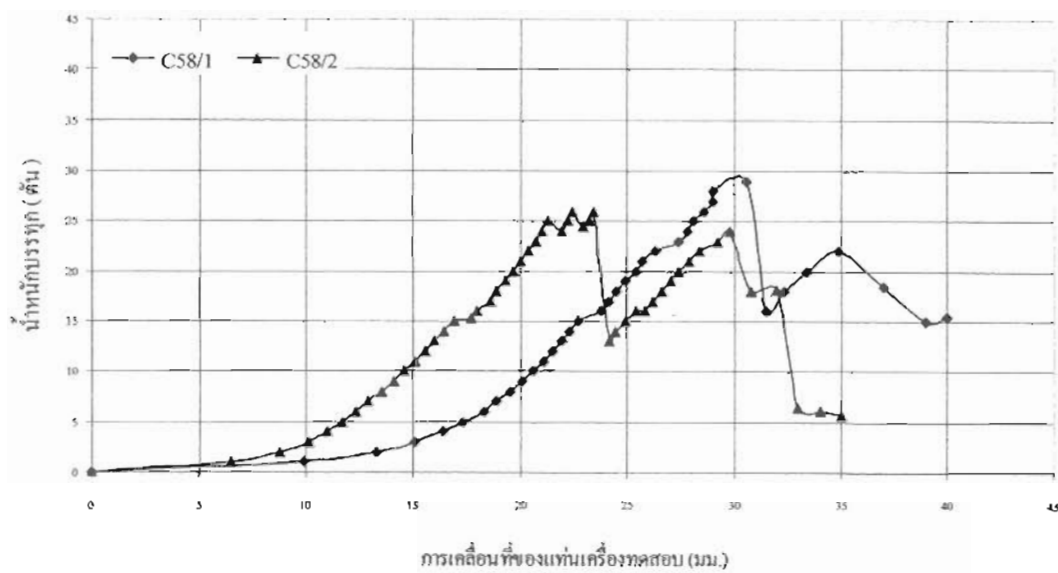
ภาพที่ ก-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่กด
เสา C43/1 และ C43/2



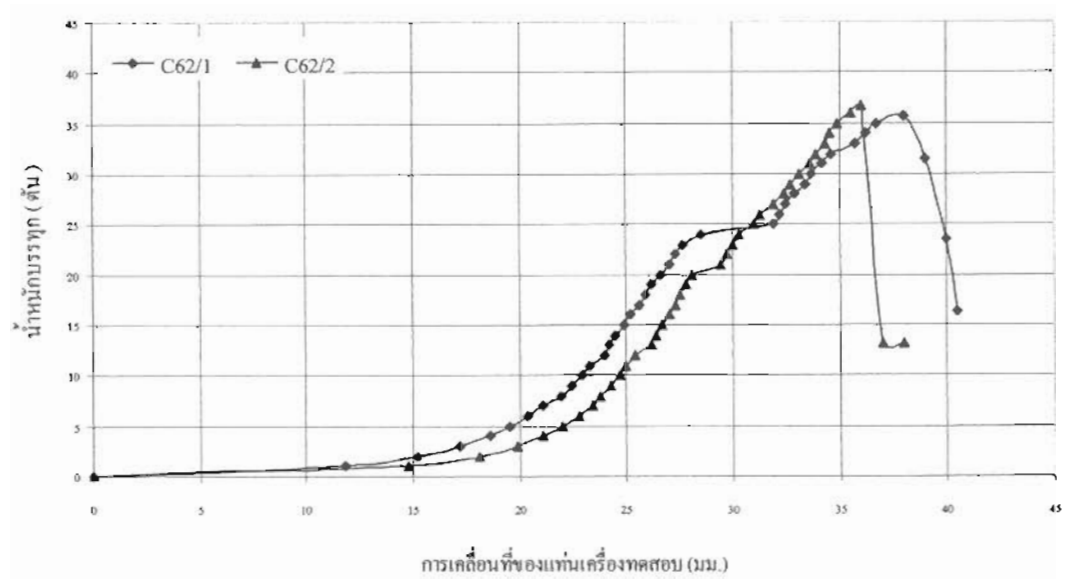
ภาพที่ ก-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่กด
เสา C48/1



ภาพที่ ก-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ C53/1 และ C53/2



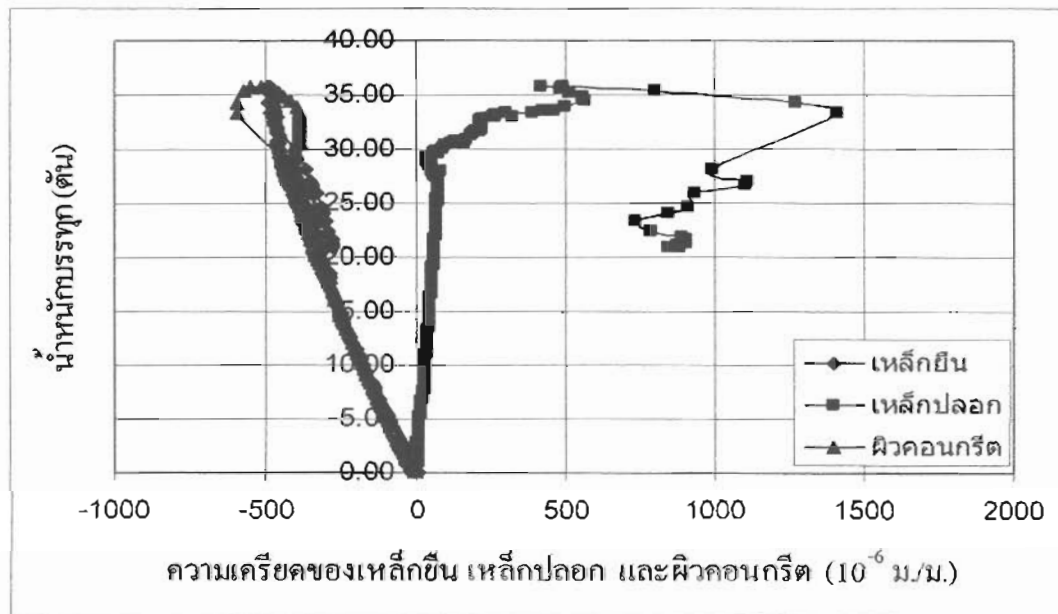
ภาพที่ ก-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ C58/1 และ C58/2



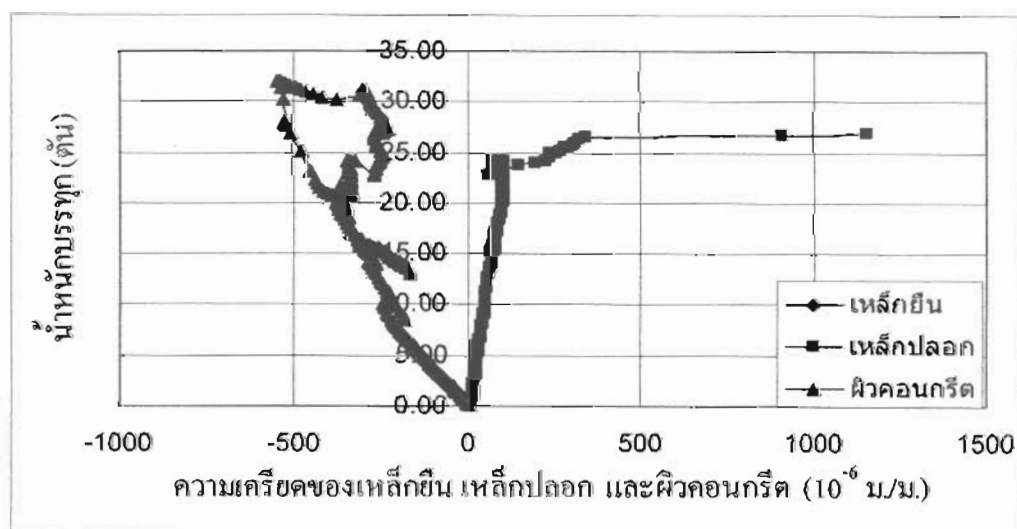
ภาพที่ ก-27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่ดูดซึมและการเคลื่อนที่ของแท่นเครื่องที่ทดสอบ C62/1 และ C62/2

ภาคผนวก ข.

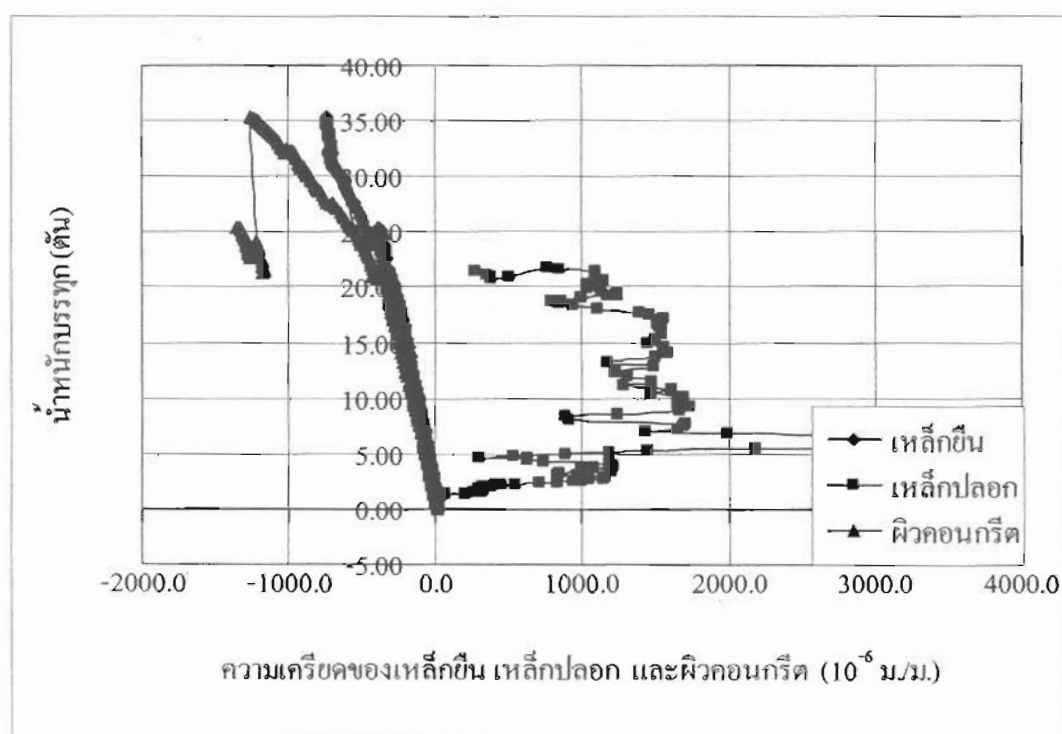
ข. ผลการทดสอบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปของเสาตามแนวแกน ของเสากลุ่ม A



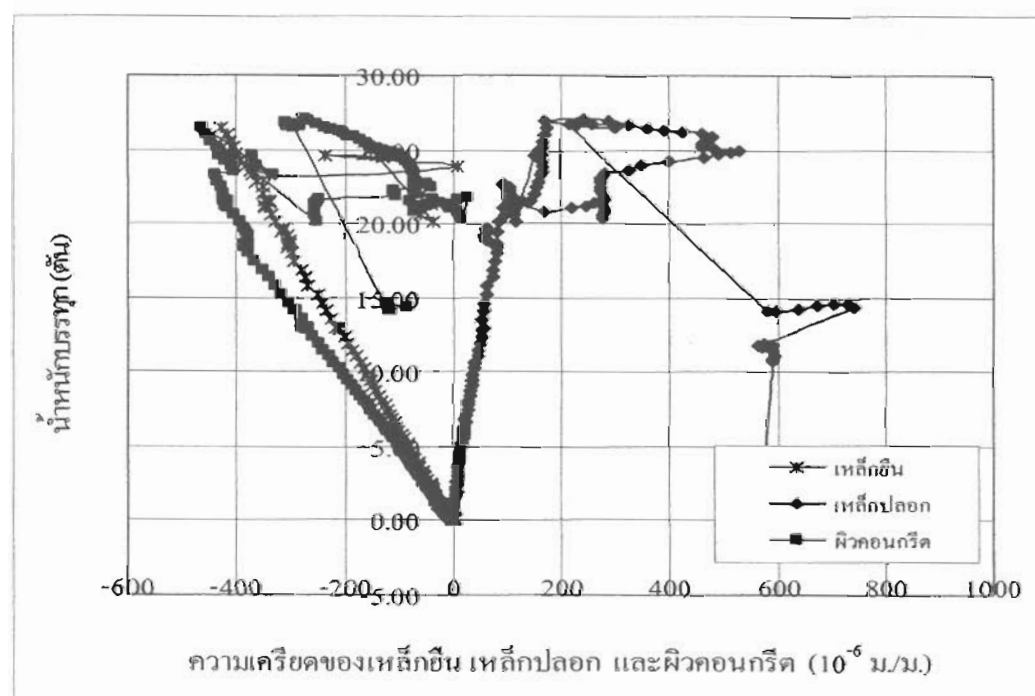
ภาพที่ ข-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กขี้ เหล็กปลอก และที่ผิวคอนกรีต ของเสา A14/2



ภาพที่ ข-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กขี้ เหล็กปลอก และที่ผิวคอนกรีต ของเสา A19/2

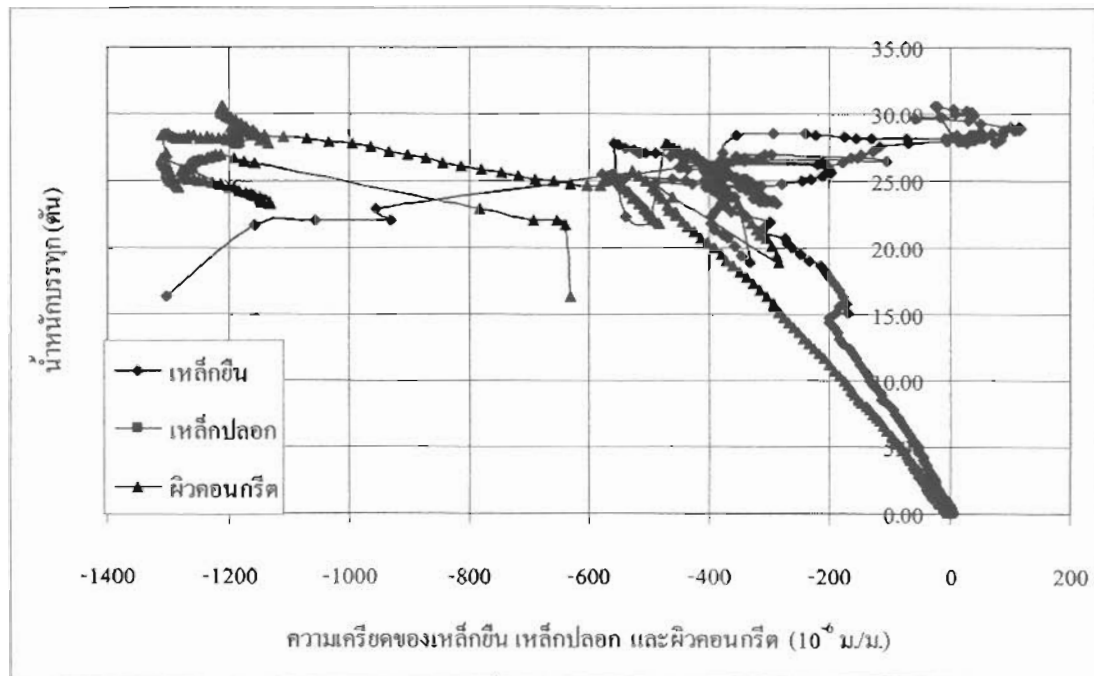


ภาพที่ ข-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหน้กบรรทุกกับความเค็รยคของเหล็กขััน เหล็กลลอก และที่ฝัวคองกรัรด์ ของเสา A24/2

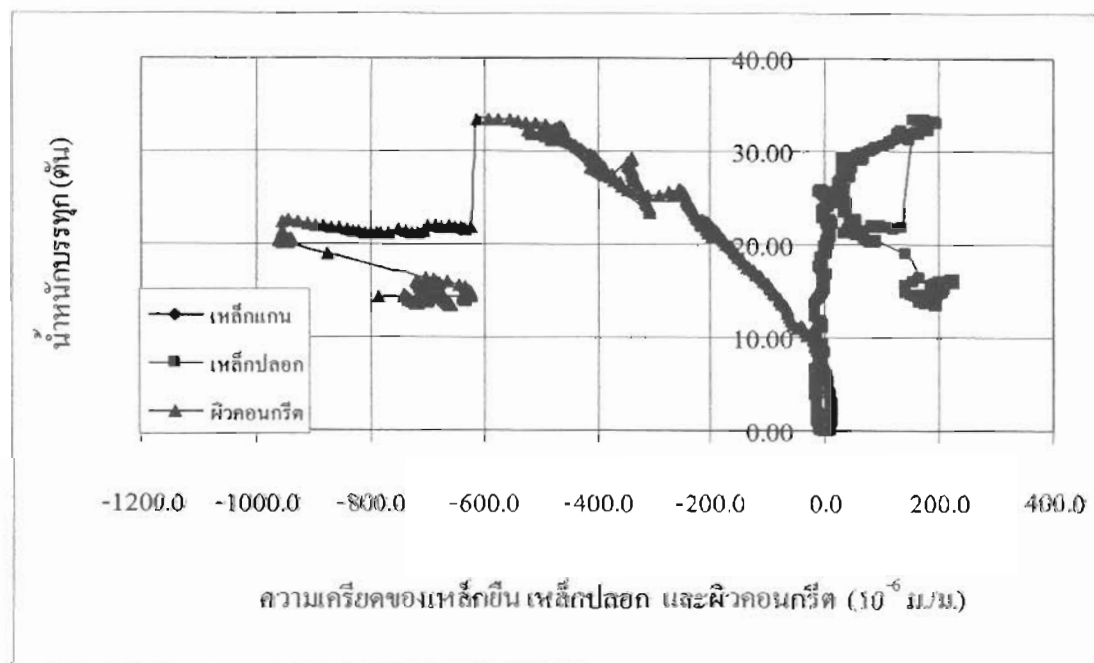


ภาพที่ ข-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหน้กบรรทุกกับความเค็รยคของเหล็กขััน เหล็กลลอก และที่ฝัวคองกรัรด์ ของเสา A29/2

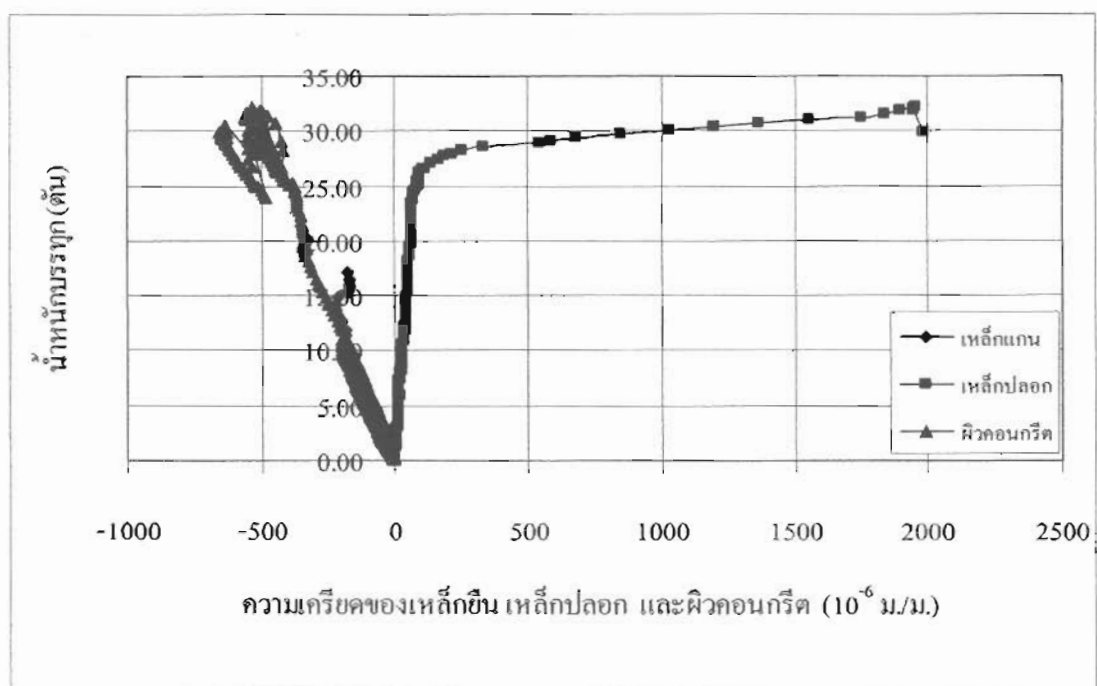
ข2. ผลการทดสอบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปของเสาตามแนวแกน ของเสาในกลุ่ม B



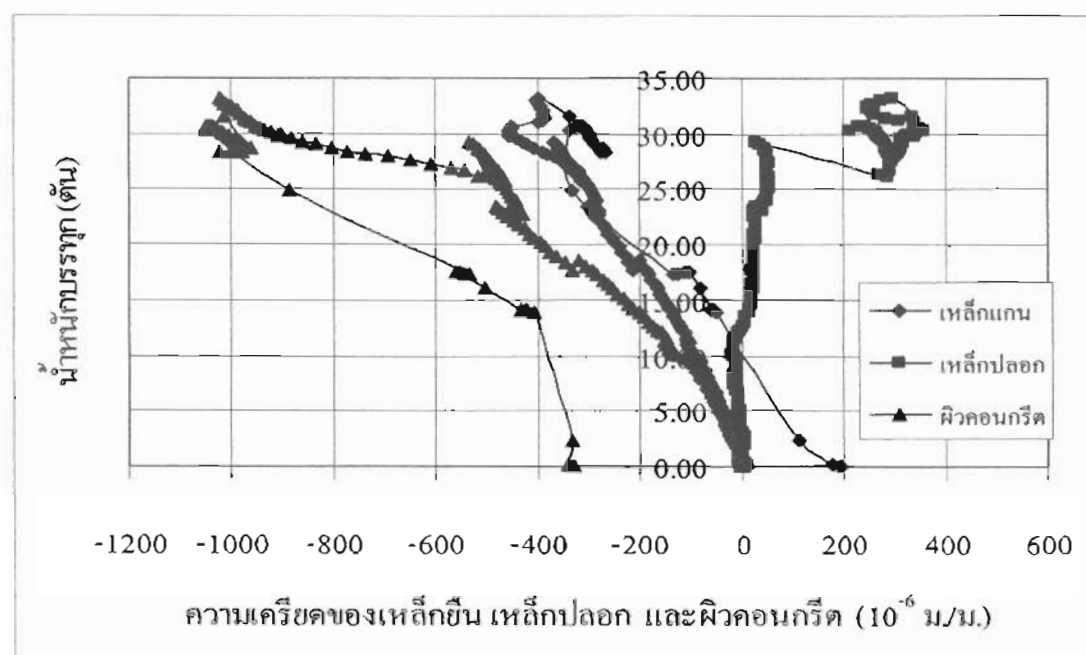
ภาพที่ ข-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กขึ้น เหล็กปลอก และผิวคอนกรีต ของเสา B14/2



ภาพที่ ข-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กขึ้น เหล็กปลอก และผิวคอนกรีต ของเสา B19/2

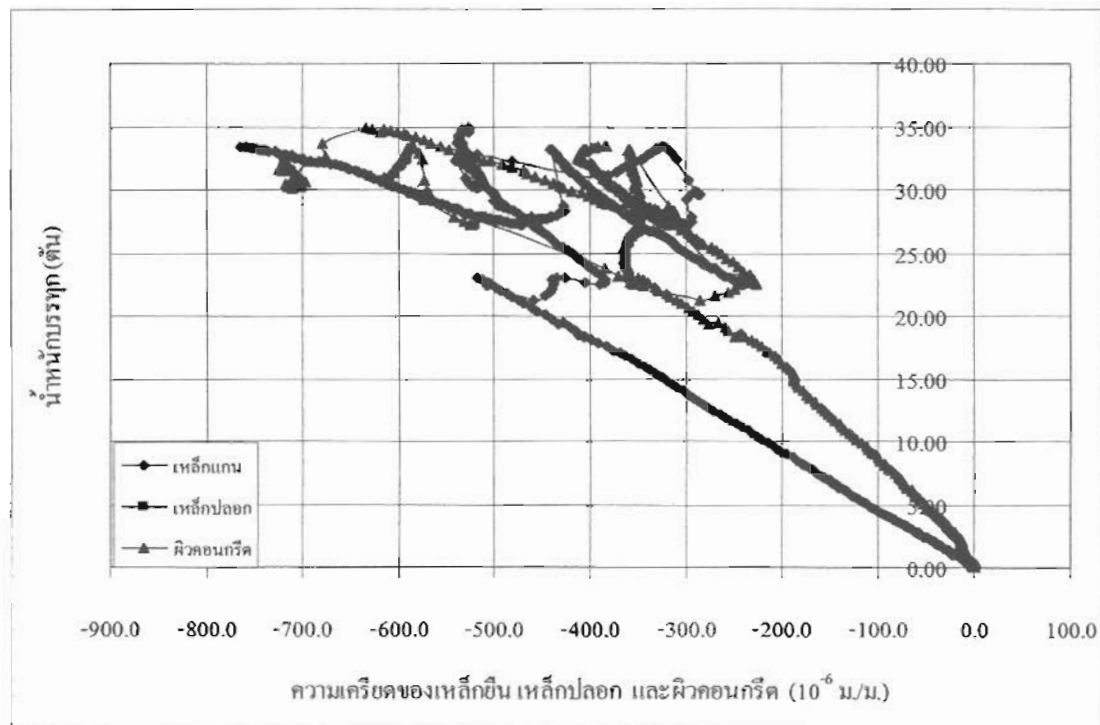


ภาพที่ ข-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักรรทุกกับความเครียดของเหล็กขึ้น เหล็กปลอก และที่ผิวคอนกรีต ของเสา B24/2

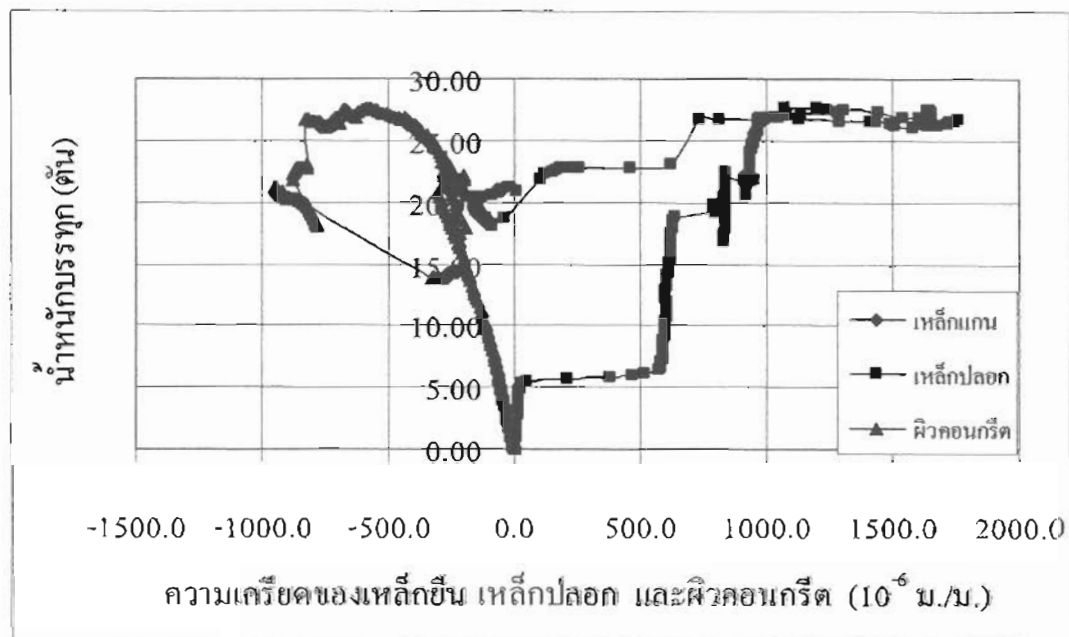


ภาพที่ ข-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักรรทุกกับความเครียดของเหล็กขึ้น เหล็กปลอก และที่ผิวคอนกรีต ของเสา B43/2

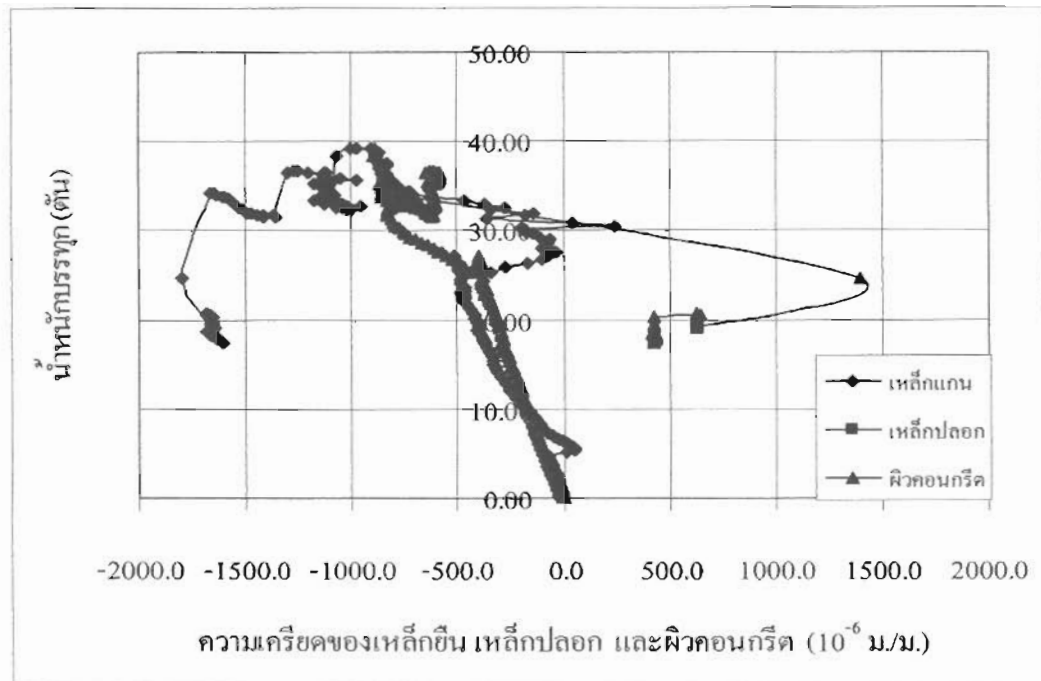
ข.3 ผลการทดสอบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเสียรูปของเสาตามแนวแกน ของเสากลุ่ม C



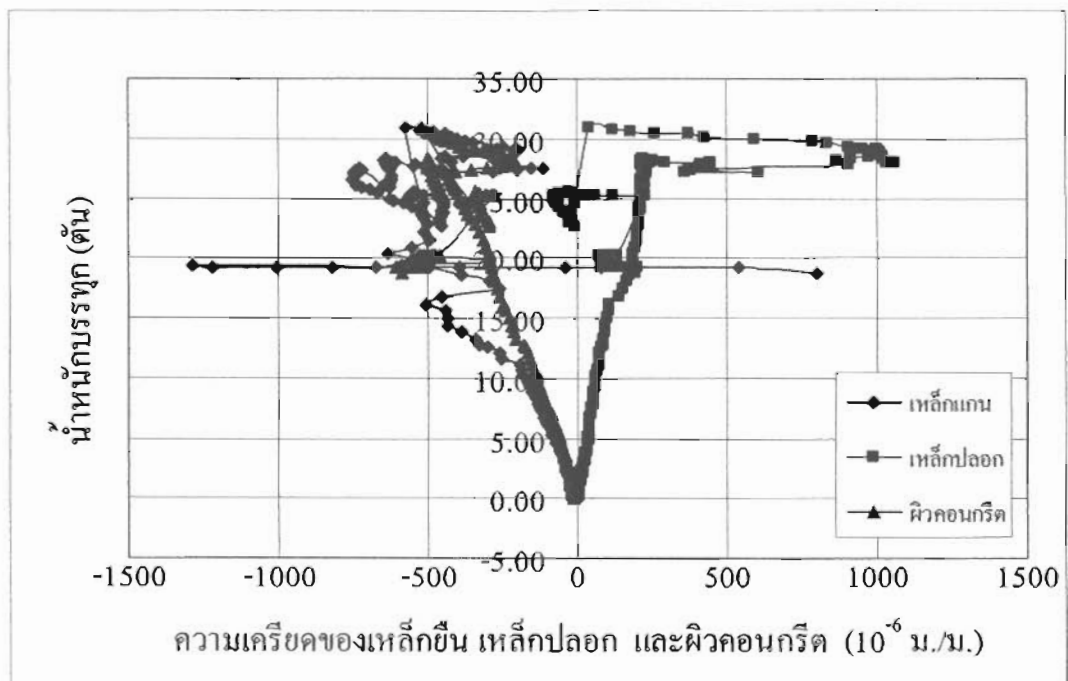
ภาพที่ ข-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กขึ้น เหล็กปลอก และผิวคอนกรีต ของเสา C14/2



ภาพที่ ข-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กขึ้น เหล็กปลอก และผิวคอนกรีต ของเสา C19/2



ภาพที่ ข-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหน้กบรรทุกกับความเครียดของเหล็กชั้น เหล็กปลอก และผิวคอนกรีต ของเสา C24/1



ภาพที่ ข-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของน้ำหน้กบรรทุกกับความเครียดของเหล็กชั้น เหล็กปลอก และผิวคอนกรีต ของเสา C48/2

ภาคผนวก ค.

การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis) โดยการทดสอบความแตกต่างของความถี่ ด้วยวิธีไคสแควร์

ก. 1 การเปรียบเทียบระยะห่างของเหล็กปลอก

ก. 1.1 การเปรียบเทียบระยะห่างของเหล็กปลอก RB 6, RB 9, DB 10

H_0 = การเสริมเหล็กปลอก RB 6, RB 9, DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองไม่แตกต่างกัน

H_1 = การเสริมเหล็กปลอก RB 6, RB 9, DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองแตกต่างกัน

ระยะห่างเหล็กปลอก (ซม.)	กลุ่ม A (RB 6)	กลุ่ม B (RB 9)	กลุ่ม C (DB 10)	รวม
9.60	35.00	32.70	34.10	101.80
14.40	37.80	34.60	33.60	106.00
19.20	36.00	35.20	28.20	99.40
24.00	36.00	34.50	36.60	107.10
28.80	33.00	31.70	35.20	99.90
33.60	30.60	35.30	34.00	99.90
38.40	33.30	34.20	32.00	99.50
43.20	31.30	32.60	31.10	95.00
รวม	273.00	270.80	264.80	808.60

คำนวณค่า Expected frequency

$$E_{11} = (101.80 \times 273.00) / 808.60 = 34.37$$

$$E_{12} = (101.80 \times 270.80) / 808.60 = 34.09$$

$$E_{13} = (101.80 \times 264.80) / 808.60 = 33.34$$

$$E_{21} = (106.00 \times 273.00) / 808.60 = 35.79$$

$$E_{22} = (106.00 \times 270.80) / 808.60 = 35.50$$

$$E_{23} = (106.00 \times 264.80) / 808.60 = 34.71$$

$$E_{31} = (99.40 \times 273.00) / 808.60 = 33.56$$

$$E_{32} = (99.40 \times 270.80) / 808.60 = 33.29$$

$$E_{33} = (99.40 \times 264.80) / 808.60 = 32.55$$

$$E41 = (107.10 \times 273.00) / 808.60 = 36.16$$

$$E42 = (107.10 \times 270.80) / 808.60 = 35.87$$

$$E43 = (107.40 \times 264.80) / 808.60 = 35.07$$

$$E51 = (99.90 \times 273.00) / 808.60 = 33.73$$

$$E52 = (99.90 \times 270.80) / 808.60 = 33.46$$

$$E53 = (99.90 \times 264.80) / 808.60 = 32.72$$

$$E61 = (99.90 \times 273.00) / 808.60 = 33.73$$

$$E62 = (99.90 \times 270.80) / 808.60 = 33.46$$

$$E63 = (99.90 \times 264.80) / 808.60 = 32.72$$

$$E71 = (99.50 \times 273.00) / 808.60 = 33.59$$

$$E72 = (99.50 \times 270.80) / 808.60 = 33.32$$

$$E73 = (99.50 \times 264.80) / 808.60 = 32.58$$

$$E81 = (95.00 \times 273.00) / 808.60 = 32.07$$

$$E82 = (95.00 \times 270.80) / 808.60 = 31.82$$

$$E83 = (95.00 \times 264.80) / 808.60 = 31.11$$

ผลรวมค่าวิกฤตจากการคำนวณ $\chi^2 = \sum \frac{(O-E)^2}{E} = 2.06$

จากตาราง df = 14 ณ ระดับความมั่นใจ 95% ($\alpha = 0.05$) ค่าวิกฤต χ^2 เท่ากับ 23.68

เปรียบเทียบค่า χ^2 ที่คำนวณได้เท่ากับ 2.06 กับค่าวิกฤตของ χ^2 ค่าที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าวิกฤต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจึงยอมรับ H_0 ที่ว่าการเสริมเหล็กปลอก RB 6, RB 9, DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองไม่แตกต่างกัน

ก. 1.2 การเปรียบเทียบระยะห่างของเหล็กปลอก RB 6 และ RB 9

H_0 = การเสริมเหล็กปลอก RB 6 และ RB 9 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองไม่แตกต่างกัน

H_1 = การเสริมเหล็กปลอก RB 6 และ RB 9 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองแตกต่างกัน

ระยะห่างเหล็กปลอก (ซม.)	กลุ่ม A (RB 6)	กลุ่ม C (RB 9)	รวม
9.60	35.00	32.70	67.70
14.40	37.80	34.60	72.40
19.20	36.00	35.20	71.20
24.00	36.00	34.50	70.50
28.80	33.00	31.70	64.70
33.60	30.60	35.30	65.90
38.40	33.30	34.20	67.50
43.20	31.30	32.60	63.90
รวม	273.00	270.80	543.80

คำนวณหา Expected frequency

$$E_{11} = (67.70 \times 273.00) / 543.80 = 33.99$$

$$E_{12} = (67.70 \times 270.80) / 543.80 = 33.71$$

$$E_{21} = (72.40 \times 273.00) / 543.80 = 36.35$$

$$E_{22} = (72.40 \times 270.80) / 543.80 = 36.05$$

$$E_{31} = (71.20 \times 273.00) / 543.80 = 35.74$$

$$E_{32} = (71.20 \times 270.80) / 543.80 = 35.46$$

$$E_{41} = (70.50 \times 273.00) / 543.80 = 35.39$$

$$E_{42} = (70.50 \times 270.80) / 543.80 = 35.11$$

$$E_{51} = (64.70 \times 273.00) / 543.80 = 32.48$$

$$E_{52} = (64.70 \times 270.80) / 543.80 = 32.22$$

$$E_{61} = (65.90 \times 273.00) / 543.80 = 33.08$$

$$E_{62} = (65.90 \times 270.80) / 543.80 = 32.82$$

$$E_{71} = (65.90 \times 273.00) / 543.80 = 33.89$$

$$E_{72} = (67.50 \times 270.80) / 543.80 = 33.61$$

$$E_{81} = (63.90 \times 273.00) / 543.80 = 32.08$$

$$E_{82} = (63.90 \times 270.80) / 543.80 = 31.82$$

ผลรวมค่าวิกฤตจากการคำนวณ $\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E} = 0.67$

จากตาราง df = 7 ณ ระดับความมั่นใจ 95% ($\alpha = 0.05$) ค่าวิกฤต χ^2 เท่ากับ 14.07

เปรียบเทียบค่า χ^2 ที่คำนวณได้เท่ากับ 0.67 กับค่าวิกฤตของ χ^2 ค่าที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าวิกฤต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจึงยอมรับ H_0 ที่ว่าการเสริมเหล็กปลอก RB 6 และ RB 9 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดสอบไม่แตกต่างกัน

ค. 1.3 การเปรียบเทียบระยะห่างของเหล็กปลอก RB 6 และ DB 10

H_0 = การเสริมเหล็กปลอก RB 6 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองไม่แตกต่างกัน

H_1 = การเสริมเหล็กปลอก RB 6 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองแตกต่างกัน

ระยะห่างเหล็กปลอก (ซม.)	กลุ่ม A (RB 6)	กลุ่ม C (DB 10)	รวม
9.60	35.00	34.10	69.10
14.40	37.80	33.60	71.40
19.20	36.00	28.20	64.20
24.00	36.00	36.60	72.60
28.80	33.00	35.20	68.20
33.60	30.60	34.00	64.60
38.40	33.30	32.00	65.30
43.20	31.30	31.10	62.40
รวม	273.00	264.80	537.80

คำนวณค่า Expected frequency

$$E_{11} = (69.10 \times 273.00) / 537.80 = 35.08$$

$$E_{12} = (69.10 \times 264.80) / 537.80 = 34.02$$

$$E_{21} = (71.40 \times 273.00) / 537.80 = 36.24$$

$$E_{22} = (71.40 \times 264.80) / 537.80 = 35.16$$

$$E_{31} = (64.20 \times 273.00) / 537.80 = 32.59$$

$$E_{32} = (64.20 \times 264.80) / 537.80 = 31.61$$

$$E_{41} = (72.60 \times 273.00) / 537.80 = 36.85$$

$$E_{42} = (72.60 \times 264.80) / 537.80 = 35.75$$

$$E_{51} = (68.20 \times 273.00) / 537.80 = 34.62$$

$$E_{52} = (68.20 \times 264.80) / 537.80 = 33.58$$

$$E_{61} = (64.60 \times 273.00) / 543.80 = 32.79$$

$$E_{62} = (64.60 \times 264.80) / 543.80 = 31.81$$

$$E_{71} = (65.30 \times 273.00) / 543.80 = 33.15$$

$$E_{72} = (65.30 \times 264.80) / 543.80 = 32.15$$

$$E_{81} = (62.40 \times 273.00) / 543.80 = 31.68$$

$$E_{82} = (62.40 \times 264.80) / 543.80 = 30.72$$

ผลรวมค่าวิกฤตจากการคำนวณ $\chi^2 = \sum \frac{(O-E)^2}{E} = 1.36$

จากตาราง df = 7 ณ ระดับความมั่นใจ 95% ($\alpha = 0.05$) ค่าวิกฤต χ^2 เท่ากับ 14.07

เปรียบเทียบค่า χ^2 ที่คำนวณได้เท่ากับ 1.36 กับค่าวิกฤตของ χ^2 ค่าที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าวิกฤต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจึงยอมรับ H_0 ที่ว่าการเสริมเหล็กปลอก RB 6 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองไม่แตกต่างกัน

ก. 1.4 การเปรียบเทียบระยะห่างของเหล็กปลอก RB 9 และ DB 10

H_0 = การเสริมเหล็กปลอก RB 9 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองไม่แตกต่างกัน

H_1 = การเสริมเหล็กปลอก RB 9 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองแตกต่างกัน

ระยะห่างเหล็กปลอก (ซม.)	กลุ่ม B (RB 9)	กลุ่ม C (DB 10)	รวม
9.60	32.70	34.10	66.80
14.40	34.60	33.60	68.20
19.20	35.20	28.20	63.20
24.00	34.50	36.60	71.10
28.80	31.70	35.20	66.90
33.60	35.30	34.00	69.30
38.40	34.20	32.00	66.20
43.20	32.60	31.10	63.70
รวม	270.80	264.80	535.60

คำนวณหา Expected frequency

$$E_{11} = (66.80 \times 270.80) / 535.60 = 33.77$$

$$E_{12} = (66.80 \times 264.80) / 535.60 = 33.03$$

$$E_{21} = (68.20 \times 270.80) / 535.60 = 34.48$$

$$E_{22} = (68.20 \times 264.80) / 535.60 = 33.72$$

$$E_{31} = (63.40 \times 270.80) / 535.60 = 32.06$$

$$E_{32} = (63.40 \times 264.80) / 535.60 = 31.34$$

$$E_{41} = (71.10 \times 270.80) / 535.60 = 35.95$$

$$E_{42} = (71.10 \times 264.80) / 535.60 = 35.15$$

$$E_{51} = (66.90 \times 270.80) / 535.60 = 33.82$$

$$E52 = (66.90 \times 264.80) / 543.80 = 33.08$$

$$E61 = (69.30 \times 270.80) / 543.80 = 35.04$$

$$E62 = (69.30 \times 264.80) / 543.80 = 34.26$$

$$E71 = (66.20 \times 270.80) / 543.80 = 33.47$$

$$E72 = (66.20 \times 264.80) / 543.80 = 32.73$$

$$E81 = (63.70 \times 270.80) / 543.80 = 32.21$$

$$E82 = (63.70 \times 264.80) / 543.80 = 31.49$$

ผลรวมค่าวิกฤตจากการคำนวณ $\chi^2 = \sum \frac{(O-E)^2}{E} = 1.13$

จากตาราง df = 7 ณ ระดับความมั่นใจ 95% ($\alpha = 0.05$) ค่าวิกฤต χ^2 เท่ากับ 14.07

เปรียบเทียบค่า χ^2 ที่คำนวณได้เท่ากับ 1.13 กับค่าวิกฤตของ χ^2 ค่าที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าวิกฤต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจึงยอมรับ H_0 ที่ว่าการเสริมเหล็กปลอก RB 9 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองไม่แตกต่างกัน

ก. 2 การเปรียบเทียบชนิดของเหล็กปลอก

ก. 2.1 การเปรียบเทียบชนิดของเหล็กปลอกระหว่าง RB 6 และ DB 10

H_0 = การเสริมเหล็กปลอก RB 6 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองไม่แตกต่างกัน

H_1 = การเสริมเหล็กปลอก RB 6 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองแตกต่างกัน

ระยะห่างเหล็กปลอก (ซม.)	กลุ่ม A (RB 6)	กลุ่ม C (DB 10)	รวม
9.60	35.00	34.10	69.10
14.40	37.80	33.60	71.40
19.20	36.00	28.20	64.20
24.00	36.00	36.60	72.60
28.80	33.00	35.20	68.20
33.60	30.60	34.00	64.60
38.40	33.30	32.00	65.30
43.20	31.30	31.10	62.40
รวม	273.00	264.80	537.80

คำนวณค่า Expected frequency

$$E_{11} = (69.10 \times 273.00) / 537.80 = 35.08$$

$$E_{12} = (69.10 \times 264.80) / 537.80 = 34.02$$

$$E_{21} = (71.40 \times 273.00) / 537.80 = 36.24$$

$$E_{22} = (71.40 \times 264.80) / 537.80 = 35.16$$

$$E_{31} = (64.20 \times 273.00) / 537.80 = 32.59$$

$$E_{32} = (64.20 \times 264.80) / 537.80 = 31.61$$

$$E_{41} = (72.60 \times 273.00) / 537.80 = 36.85$$

$$E_{42} = (72.60 \times 264.80) / 537.80 = 35.75$$

$$E_{51} = (68.20 \times 273.00) / 537.80 = 34.62$$

$$E_{52} = (68.20 \times 264.80) / 543.80 = 33.58$$

$$E_{61} = (64.60 \times 273.00) / 543.80 = 32.79$$

$$E_{62} = (64.60 \times 264.80) / 543.80 = 31.81$$

$$E_{71} = (65.30 \times 273.00) / 543.80 = 33.15$$

$$E_{72} = (65.30 \times 264.80) / 543.80 = 32.15$$

$$E_{81} = (62.40 \times 273.00) / 543.80 = 31.68$$

$$E_{82} = (62.40 \times 264.80) / 543.80 = 30.72$$

ผลรวมค่าวิกฤตจากการคำนวณ $\chi^2 = \sum \frac{(O-E)^2}{E} = 1.36$

จากตาราง df = 7 ณ ระดับความมั่นใจ 95% ($\alpha = 0.05$) ค่าวิกฤต χ^2 เท่ากับ 14.07

เปรียบเทียบค่า χ^2 ที่คำนวณได้เท่ากับ 1.36 กับค่าวิกฤตของ χ^2 ค่าที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าวิกฤต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจึงยอมรับ H_0 ที่ว่าการเสริมเหล็กปลอก RB 6 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดสอบไม่แตกต่างกัน

ก. 2.2 การเปรียบเทียบชนิดของเหล็กปลอกระหว่าง RB 9 และ DB 10

H_0 = การเสริมเหล็กปลอก RB 9 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองไม่แตกต่างกัน

H_1 = การเสริมเหล็กปลอก RB 9 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองแตกต่างกัน

ระยะห่างเหล็กปลอก (ซม.)	กลุ่ม B (RB 9)	กลุ่ม C (DB 10)	รวม
9.60	32.70	34.10	66.80
14.40	34.60	33.60	68.20
19.20	35.20	28.20	63.20
24.00	34.50	36.60	71.10
28.80	31.70	35.20	66.90
33.60	35.30	34.00	69.30
38.40	34.20	32.00	66.20
43.20	32.60	31.10	63.70
รวม	270.80	264.80	535.60

คำนวณหา Expected frequency

$$E_{11} = (66.80 \times 270.80) / 535.60 = 33.77$$

$$E_{12} = (66.80 \times 264.80) / 535.60 = 33.03$$

$$E_{21} = (68.20 \times 270.80) / 535.60 = 34.48$$

$$E_{22} = (68.20 \times 264.80) / 535.60 = 33.72$$

$$E_{31} = (63.40 \times 270.80) / 535.60 = 32.06$$

$$E_{32} = (63.40 \times 264.80) / 535.60 = 31.34$$

$$E_{41} = (71.10 \times 270.80) / 535.60 = 35.95$$

$$E_{42} = (71.10 \times 264.80) / 535.60 = 35.15$$

$$E_{51} = (66.90 \times 270.80) / 535.60 = 33.82$$

$$E52 = (66.90 \times 264.80) / 543.80 = 33.08$$

$$E61 = (69.30 \times 270.80) / 543.80 = 35.04$$

$$E62 = (69.30 \times 264.80) / 543.80 = 34.26$$

$$E71 = (66.20 \times 270.80) / 543.80 = 33.47$$

$$E72 = (66.20 \times 264.80) / 543.80 = 32.73$$

$$E81 = (63.70 \times 270.80) / 543.80 = 32.21$$

$$E82 = (63.70 \times 264.80) / 543.80 = 31.49$$

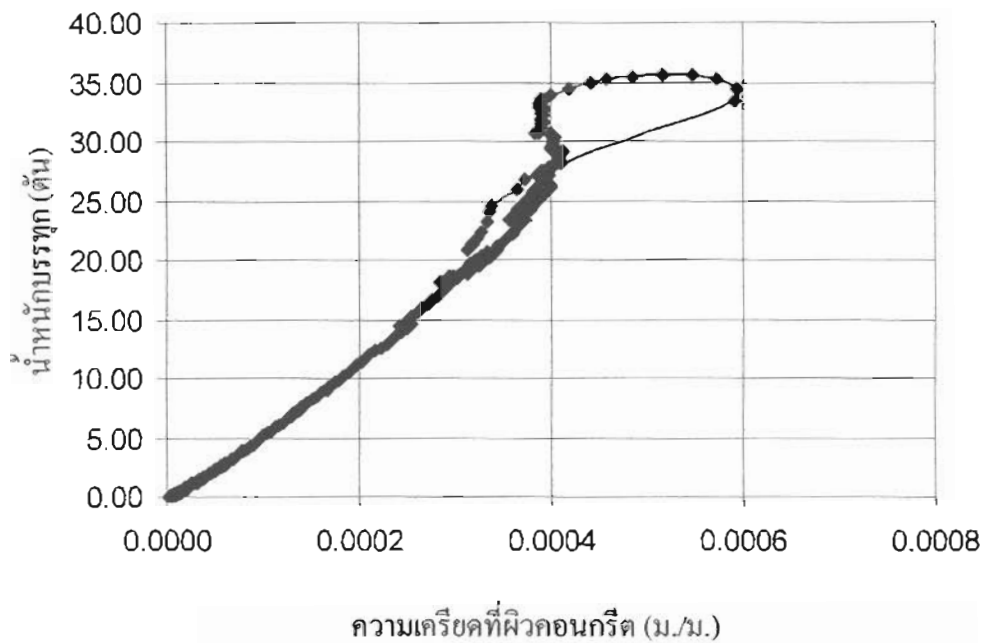
ผลรวมค่าวิกฤตจากการคำนวณ $\chi^2 = \sum \frac{(O-E)^2}{E} = 1.13$

จากตาราง df = 7 ณ ระดับความมั่นใจ 95% ($\alpha = 0.05$) ค่าวิกฤต χ^2 เท่ากับ 14.07

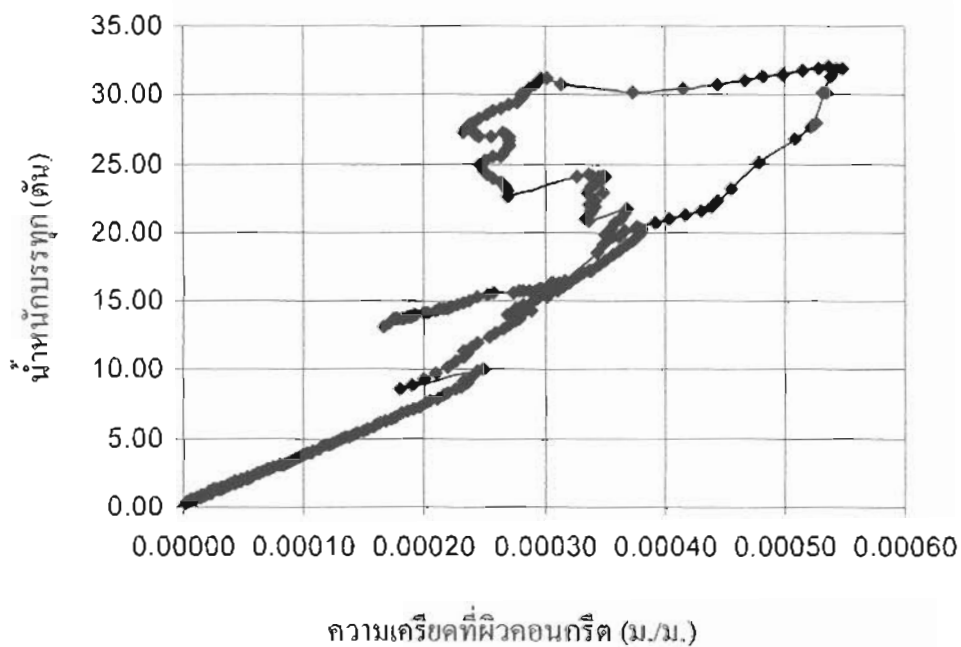
เปรียบเทียบค่า χ^2 ที่คำนวณได้เท่ากับ 1.13 กับค่าวิกฤตของ χ^2 ค่าที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าวิกฤต อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจึงยอมรับ H_0 ที่ว่าการเสริมเหล็กปลอก RB 9 และ DB 10 ในเสาคอนกรีตให้ค่ากำลังอัดในการทดลองไม่แตกต่างกัน

ภาคผนวก ง.

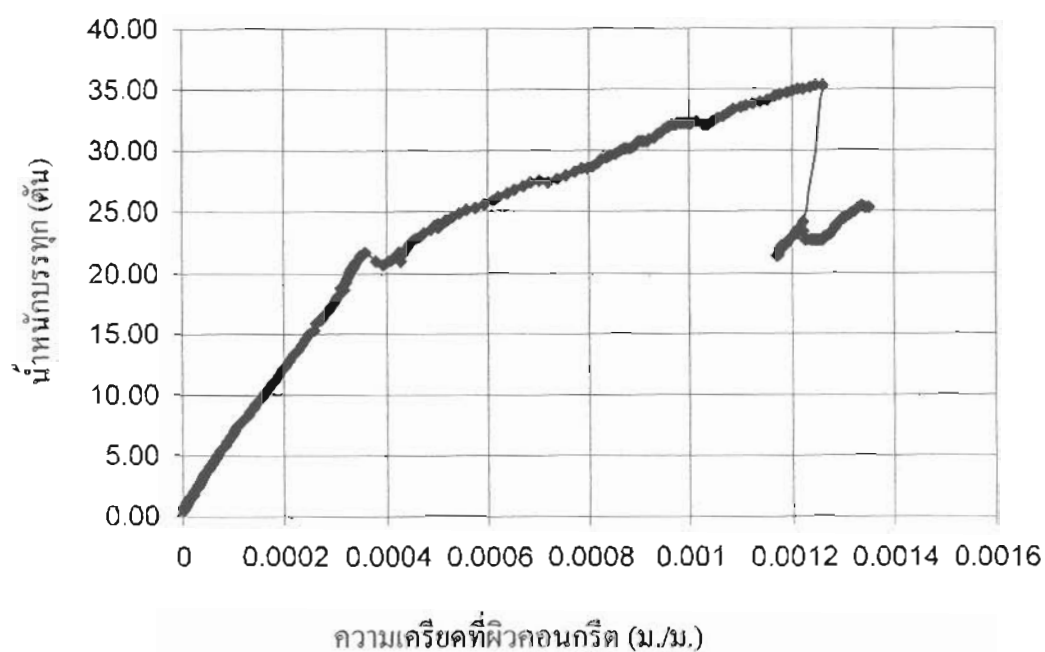
ง. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่ผิวคอนกรีต



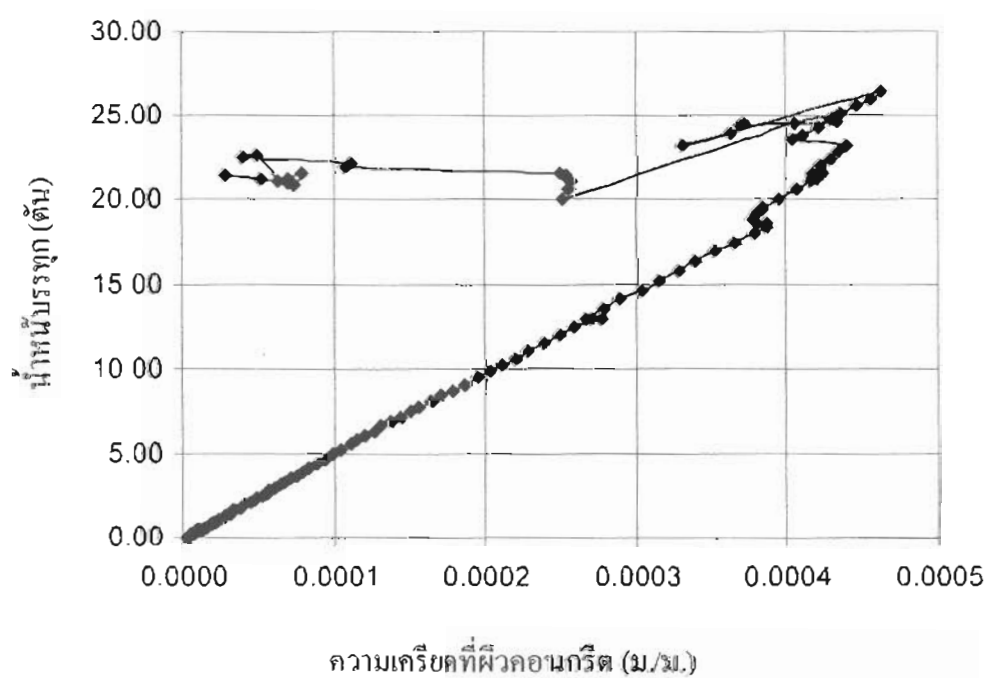
ภาพที่ ง-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่ผิวคอนกรีต A14/2



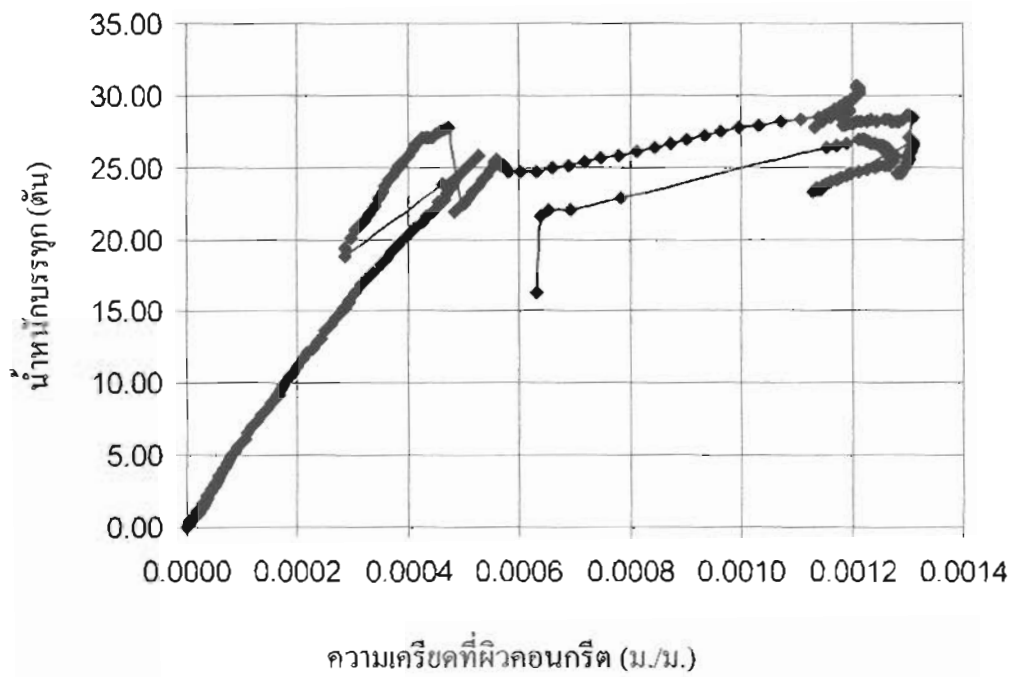
ภาพที่ ง-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่ผิวคอนกรีต A19/2



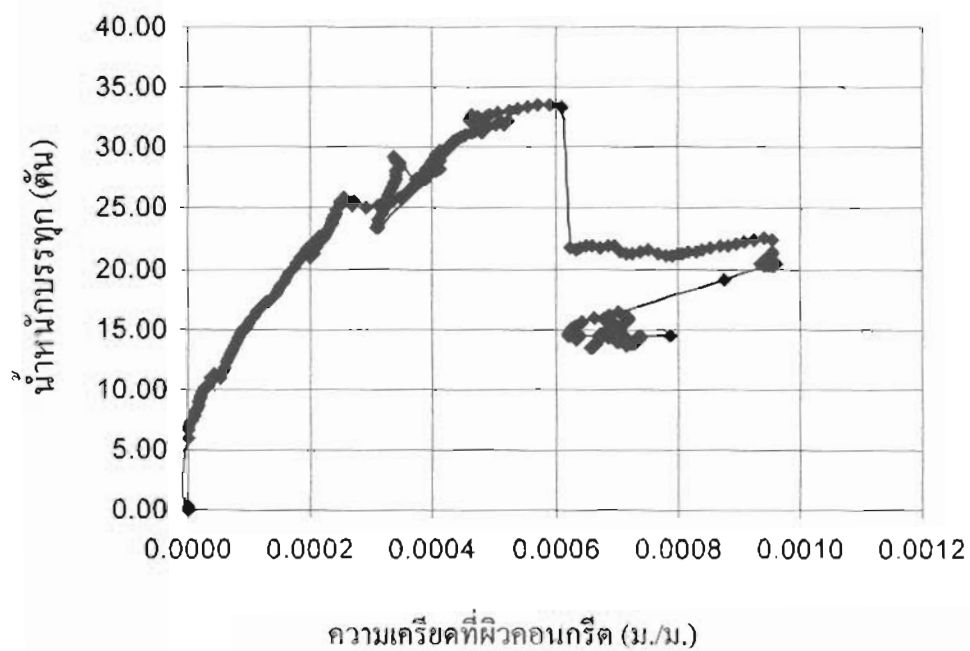
ภาพที่ ง-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและความเครียดที่ผิวคอนกรีต A24/2



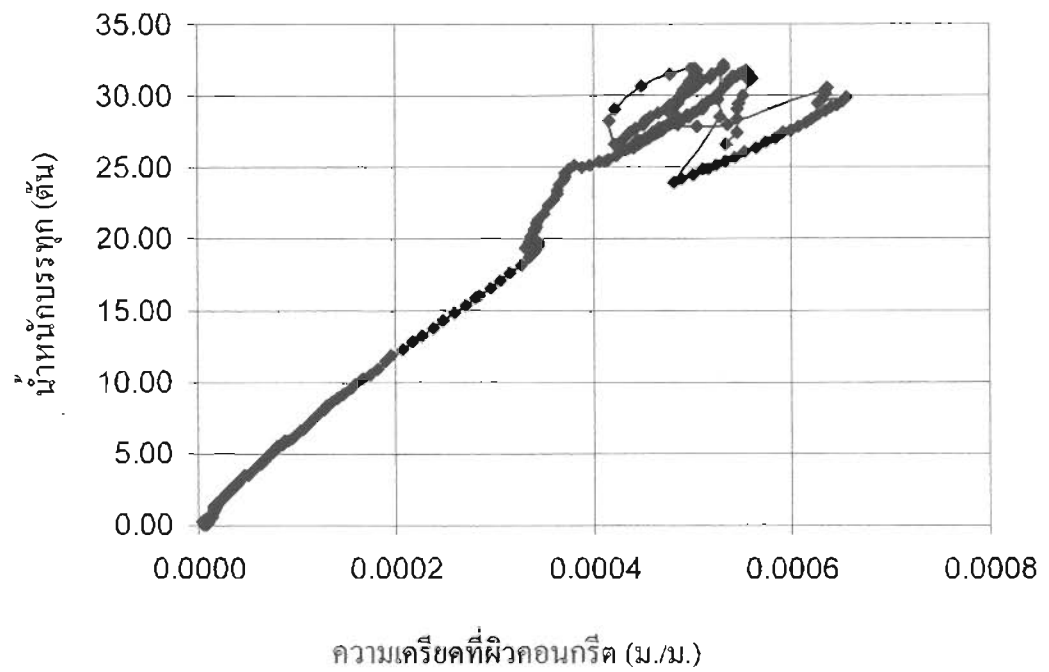
ภาพที่ ง-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและความเครียดที่ผิวคอนกรีต A29/2



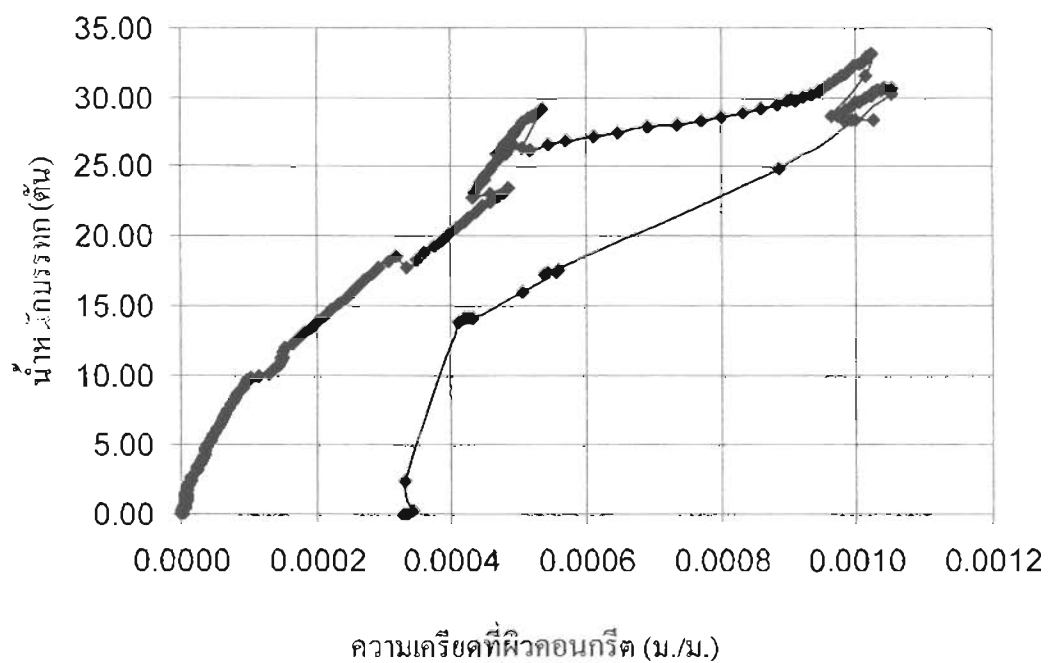
ภาพที่ ง-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและความเครียดที่ผิวคอนกรีต B14/2



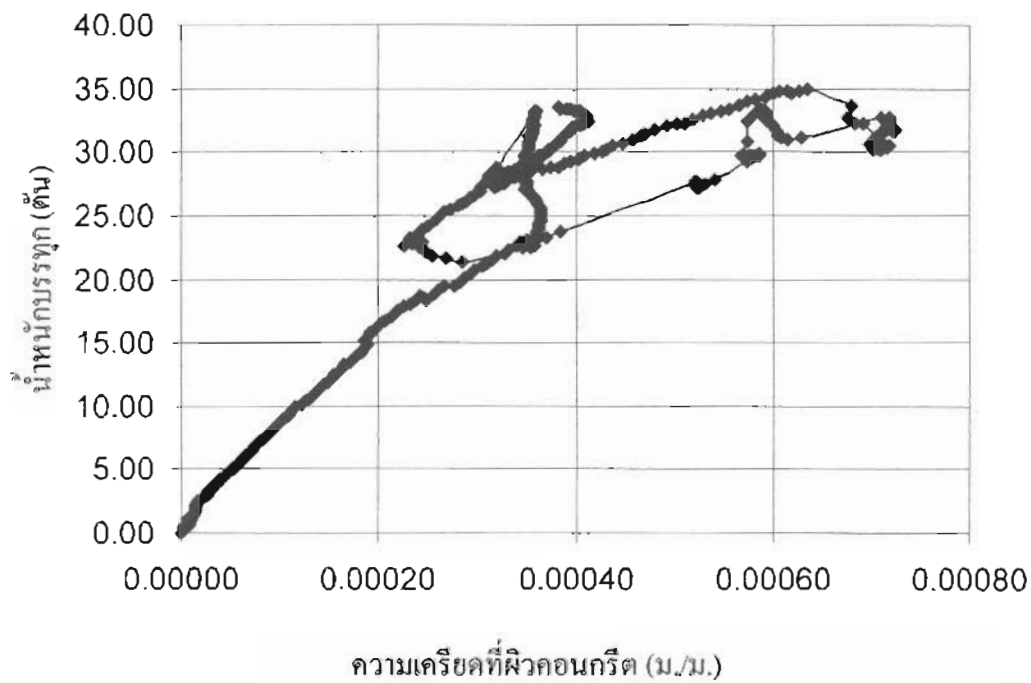
ภาพที่ ง-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและความเครียดที่ผิวคอนกรีต B19/2



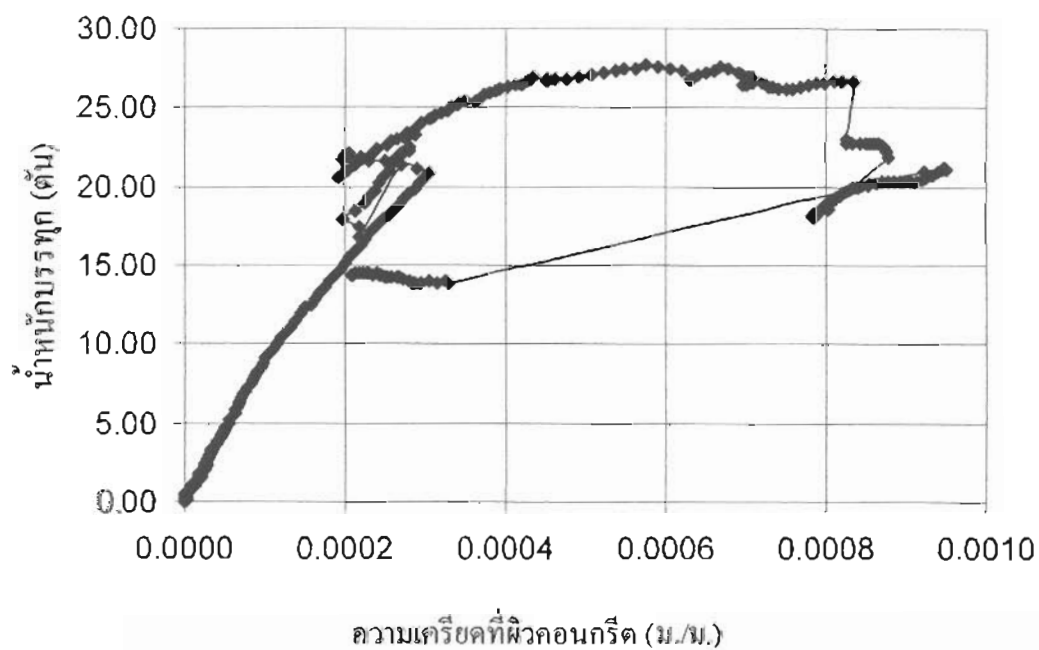
ภาพที่ ง-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักปรอทและความเครียดที่ผิวคอนกรีต B24/2



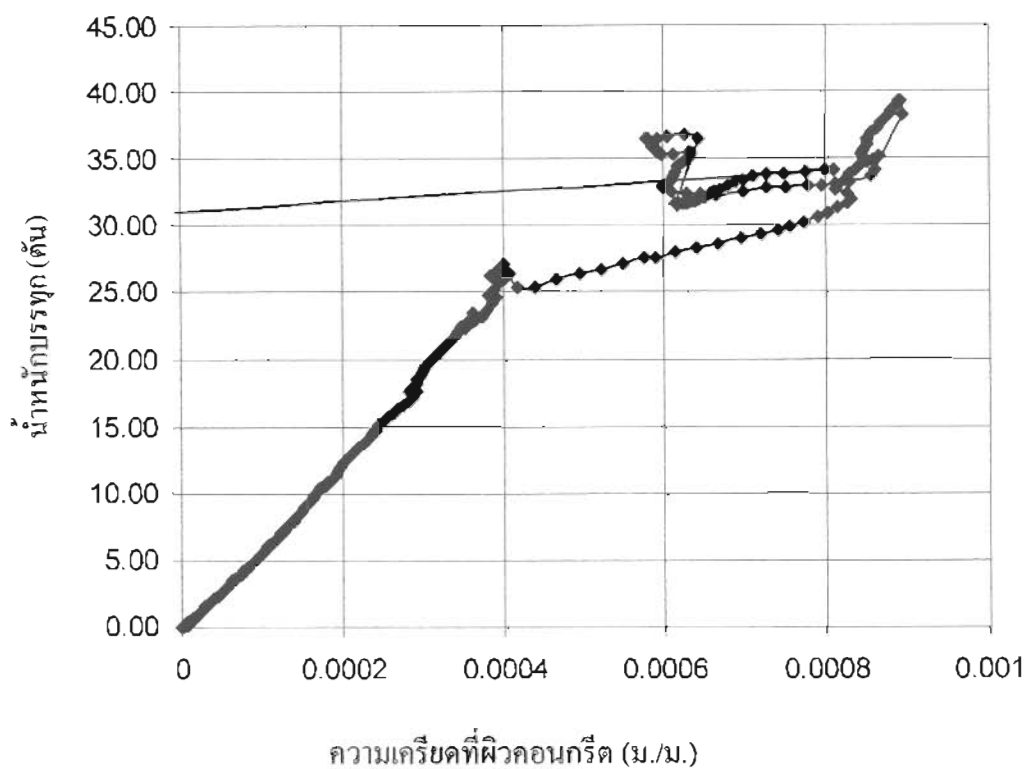
ภาพที่ ง-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรวมและความเครียดที่ผิวคอนกรีต B43/2



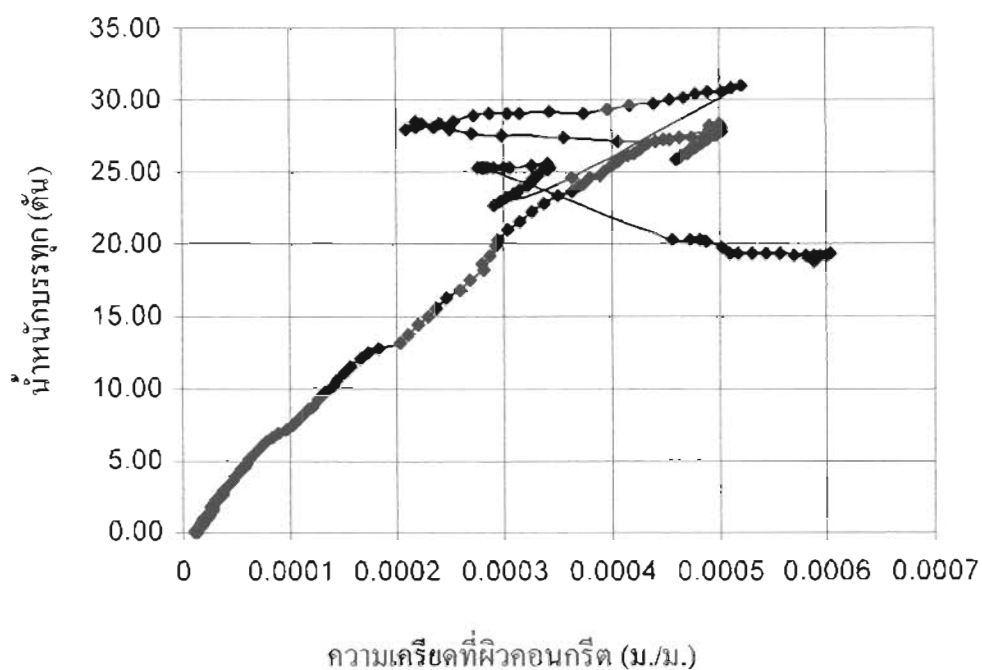
ภาพที่ 3-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรวมและความเคี้ยวที่ผิวคอนกรีต C14/2



ภาพที่ 3-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรวมและความเคี้ยวที่ผิวคอนกรีต C19/2



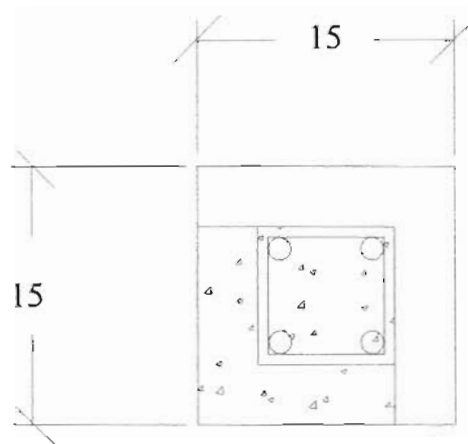
ภาพที่ ง-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและความเครียดที่ผิวคอนกรีต C24/2



ภาพที่ ง-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและความเครียดที่ผิวคอนกรีต C48/2

ภาคผนวก จ.

จ. การคำนวณกำลังรับแรงอัดของเสาตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก



เสาคอนกรีตขนาด 15 x 15 ซม. เสริมเหล็กชั้น 4-DB 12 มม.

$$P_s = 0.85f'_c A_c + f_s A_{st}$$

P_s = กำลังรับแรงอัดของเสาตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

f'_c = 212 ksc (ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีต)

A_c = เนื้อที่แกนคอนกรีตที่รับแรงกดจากเครื่องทดสอบ

f_s = ความเค้นครากของเหล็กเสริม

A_{st} = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามแนวแกนทั้งหมด

$$\begin{aligned} A_c &= (15 \times 15) - (3.50 \times 15) - (3.50 \times 11.50) \\ &= 132.25 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

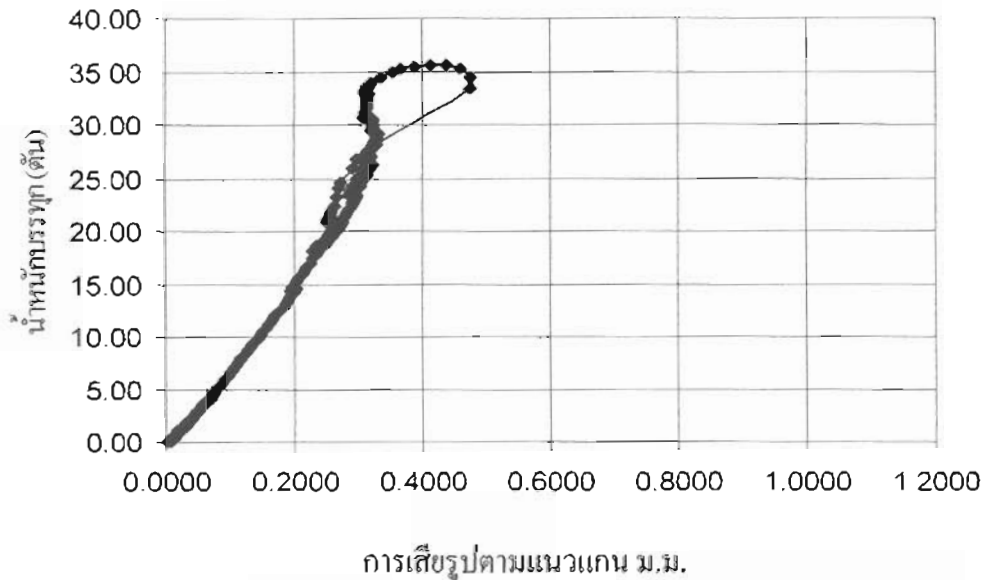
$$\begin{aligned} f_s &= \epsilon E_s \\ &= (834.35 \times 10^{-6}) \times (2.04 \times 10^6) \\ &= 1,702 \text{ ksc} \end{aligned}$$

$$P_s = 0.85 \times 212 \times 132.25 + 1,702 \times 4.08$$

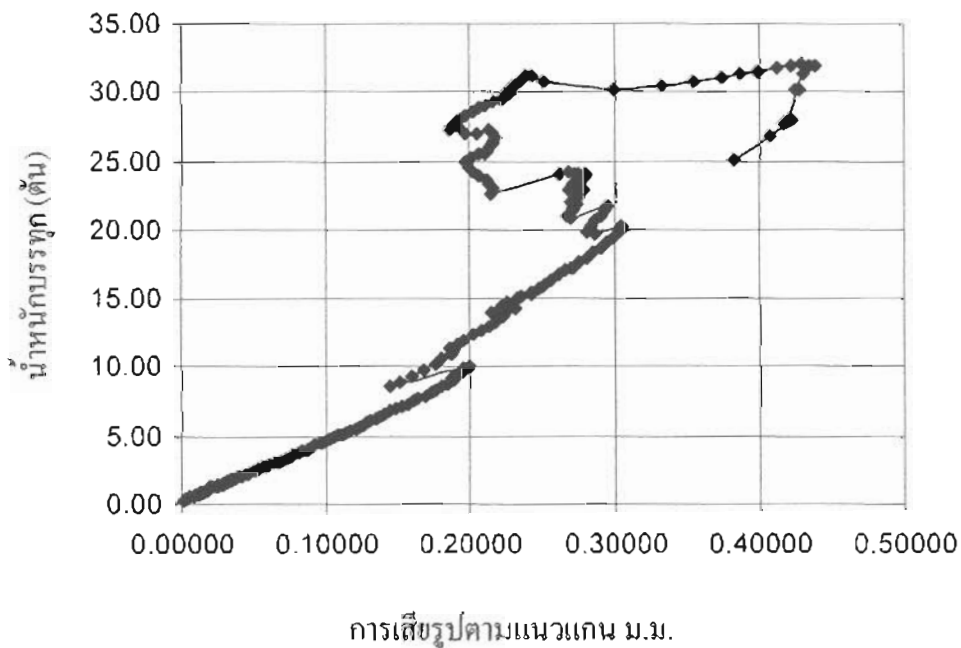
$$P_s = 30.78 \text{ ตัน}$$

ภาคผนวก จ.

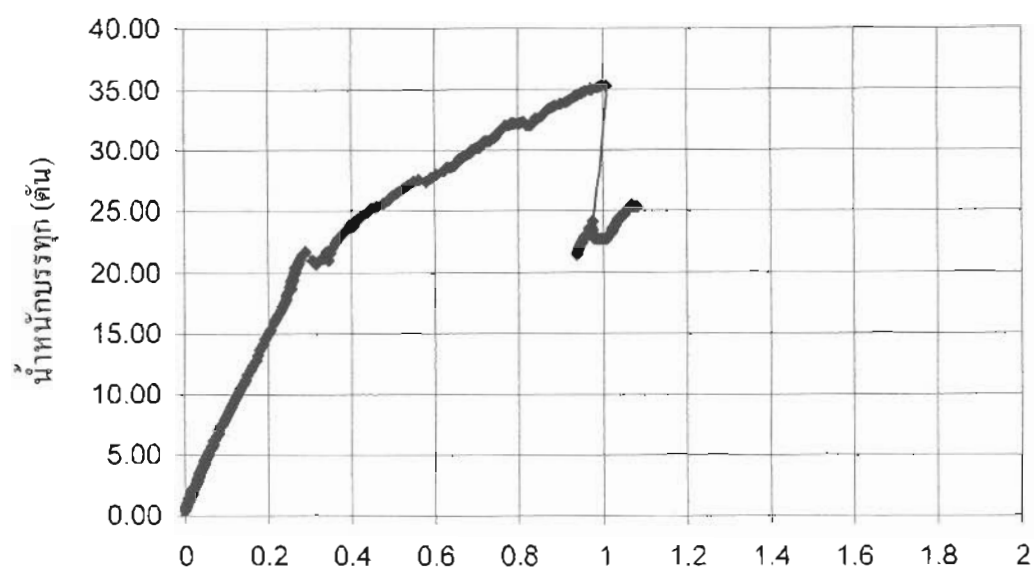
ด. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับบรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัดความเครียดที่ผิวคอนกรีต



ภาพที่ จ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับบรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัดความเครียดที่ผิวคอนกรีต A14/2

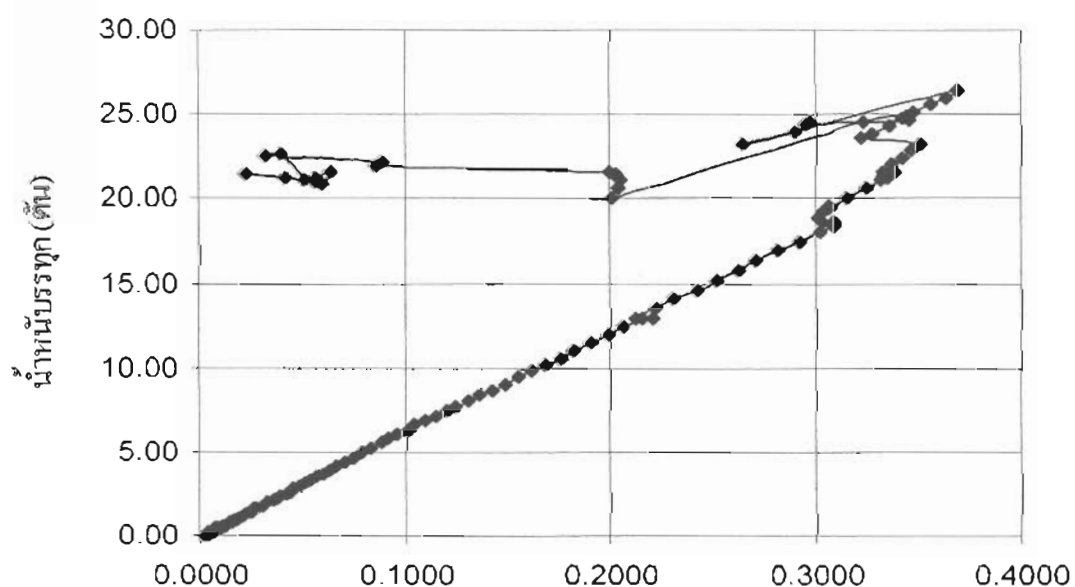


ภาพที่ จ-2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับบรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัดความเครียดที่ผิวคอนกรีต A19/2



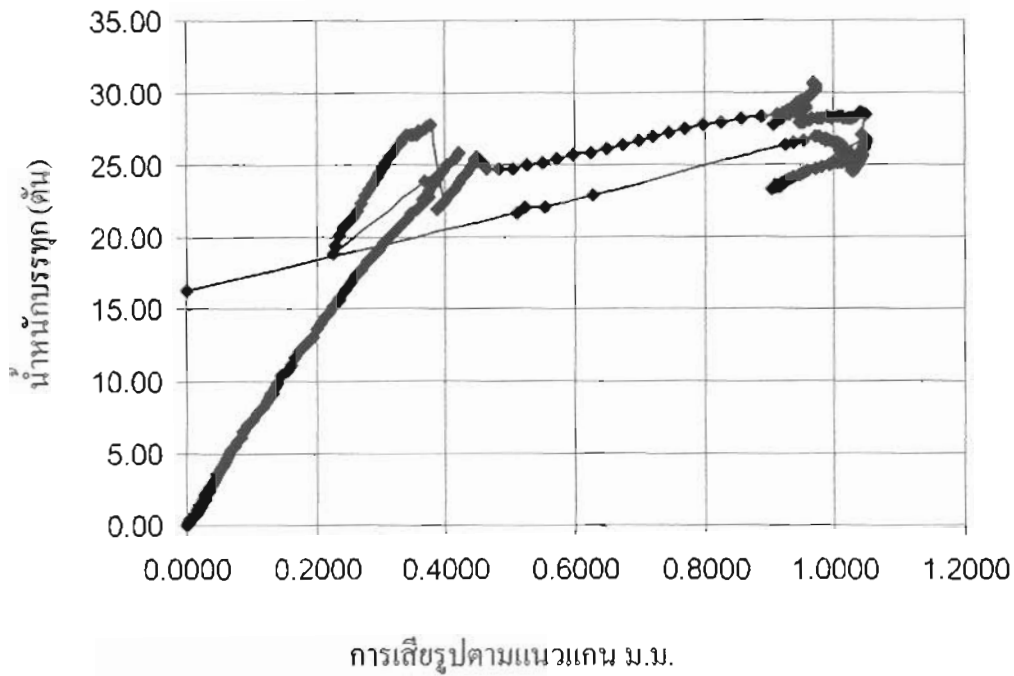
การเลี้ยวตามแนวแกน ม.ม.

ภาพที่ จ-3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำขึ้นบกและการเลี้ยวตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเค็มที่ผิวคอนกรีต A24/2

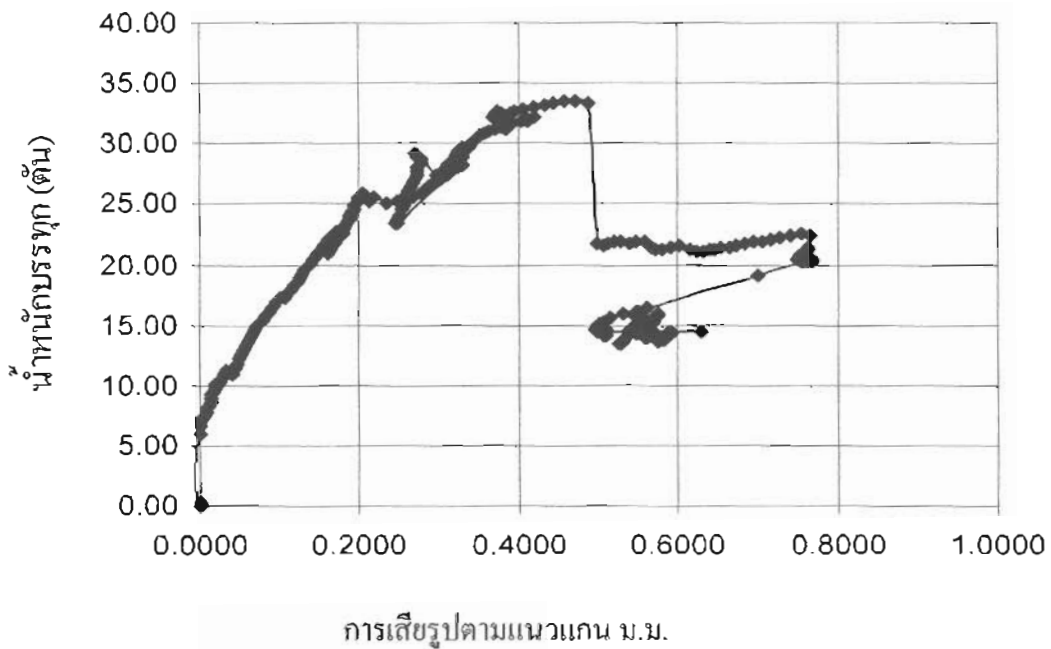


การเลี้ยวตามแนวแกน ม.ม.

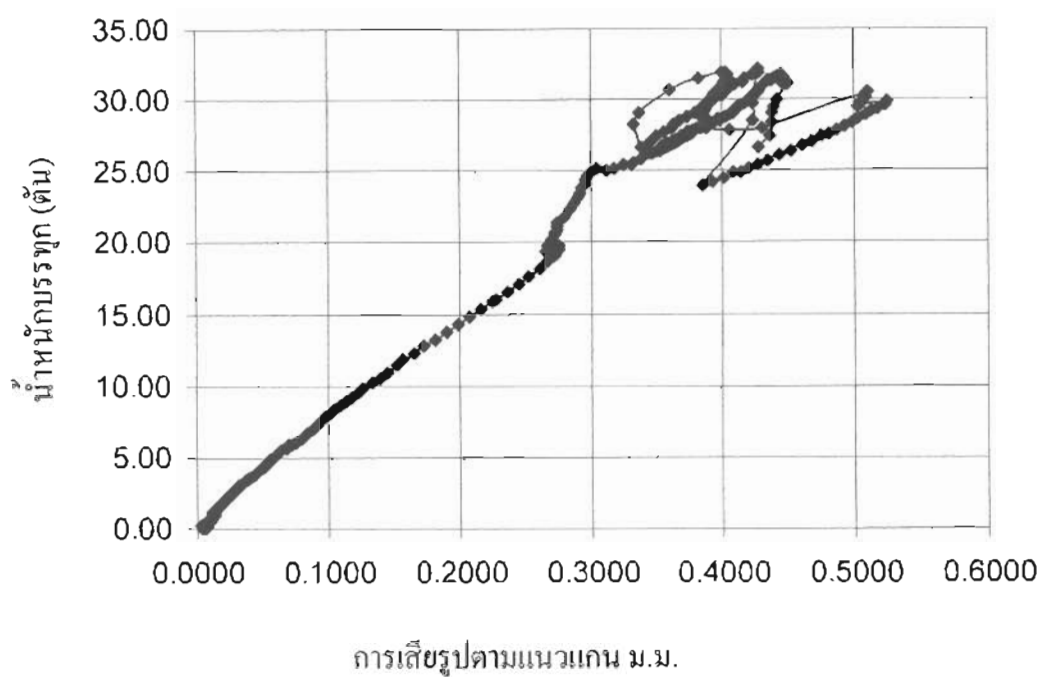
ภาพที่ จ-4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำขึ้นบกและการเลี้ยวตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเค็มที่ผิวคอนกรีต A29/2



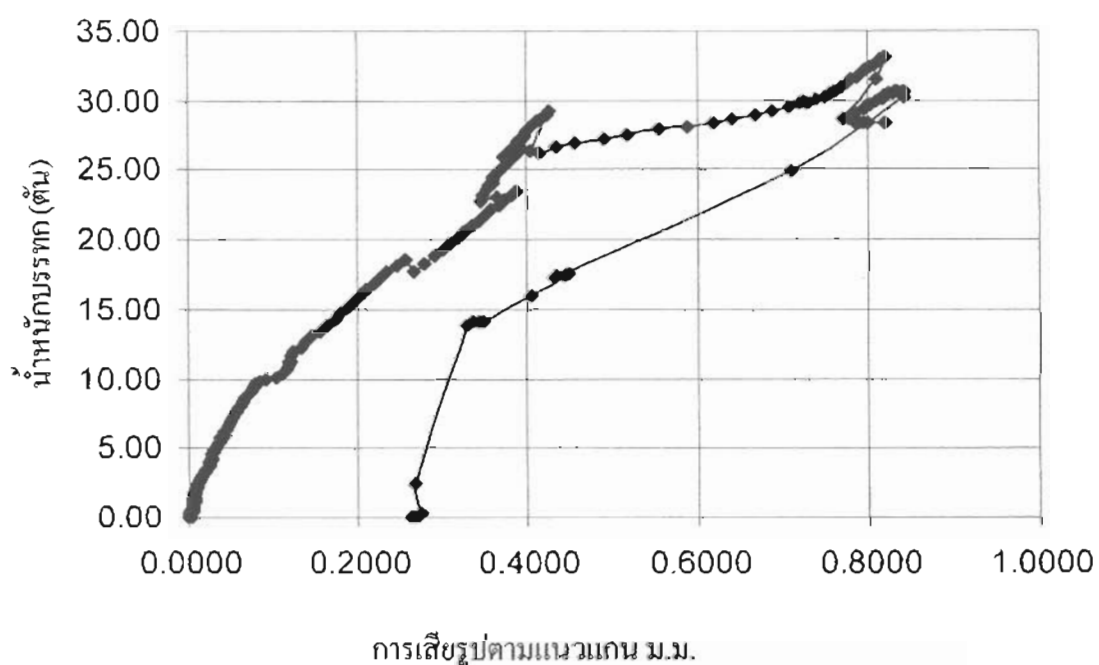
ภาพที่ ๑-5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหน้กบรทุกและการเติบรูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเค็รียดที่ผิวคอนกรีต B14/2



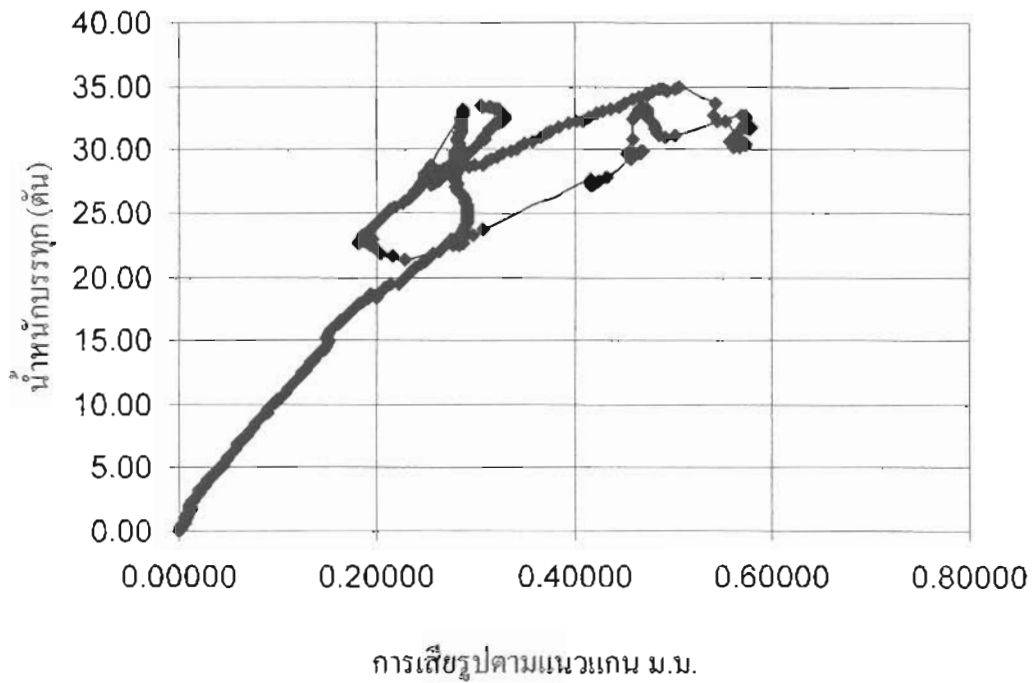
ภาพที่ ๑-6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหน้กบรทุกและการเติบรูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเค็รียดที่ผิวคอนกรีต B19/2



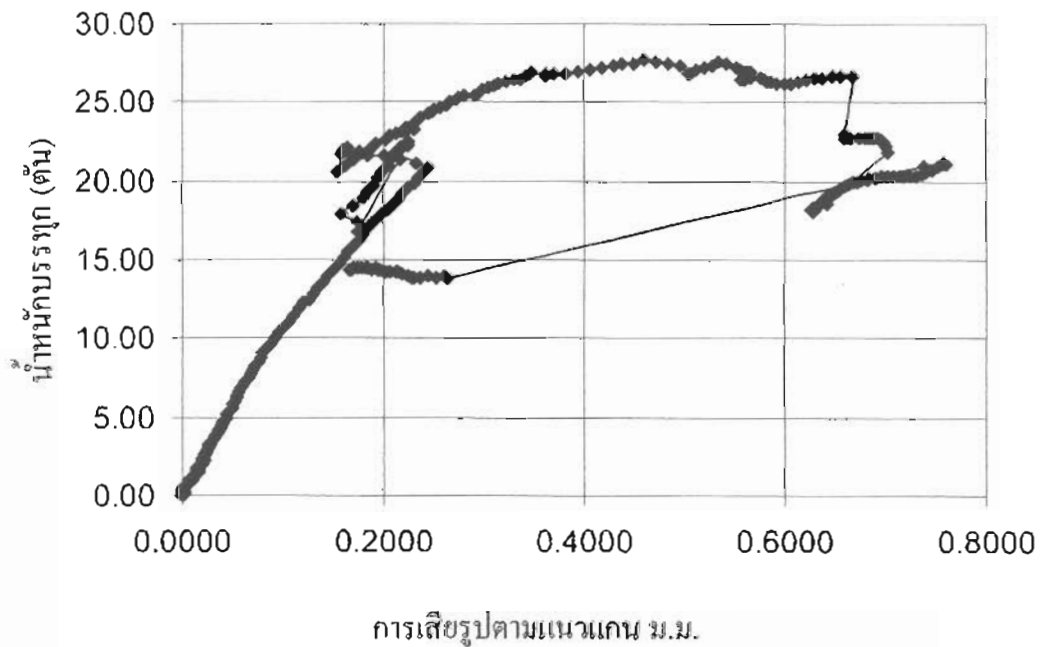
ภาพที่ จ-7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรรพทุกและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเครียดที่ผิวคอนกรีต B24/2



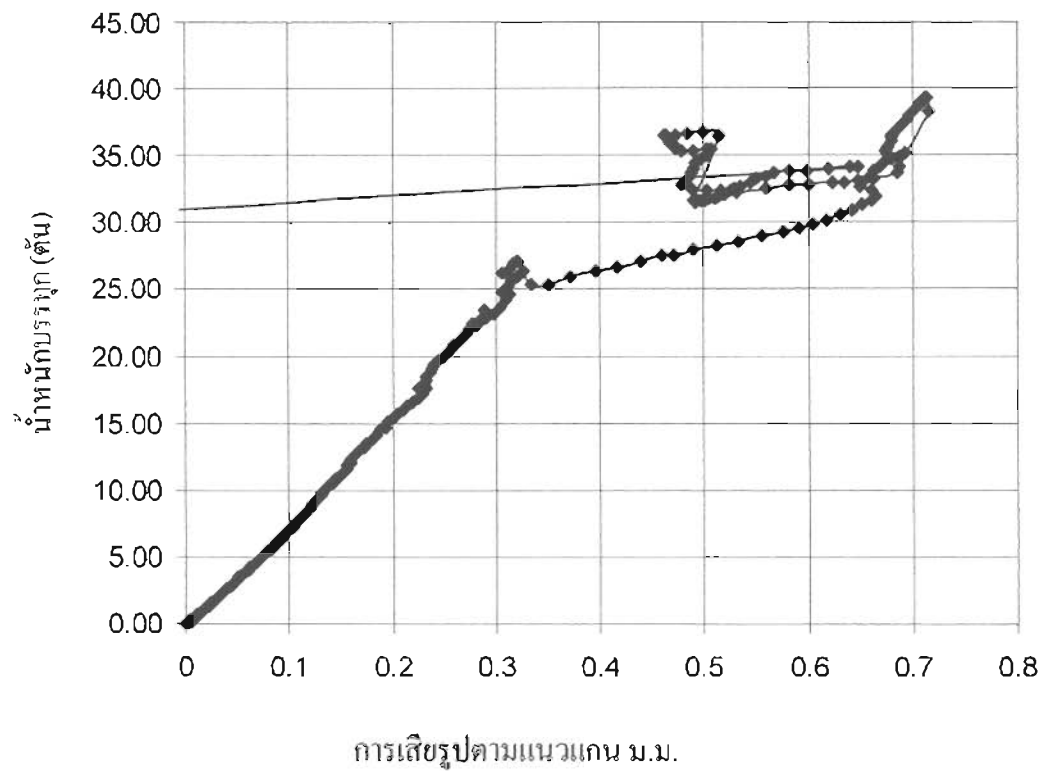
ภาพที่ จ-8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรรพทุกและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเครียดที่ผิวคอนกรีต B43/2



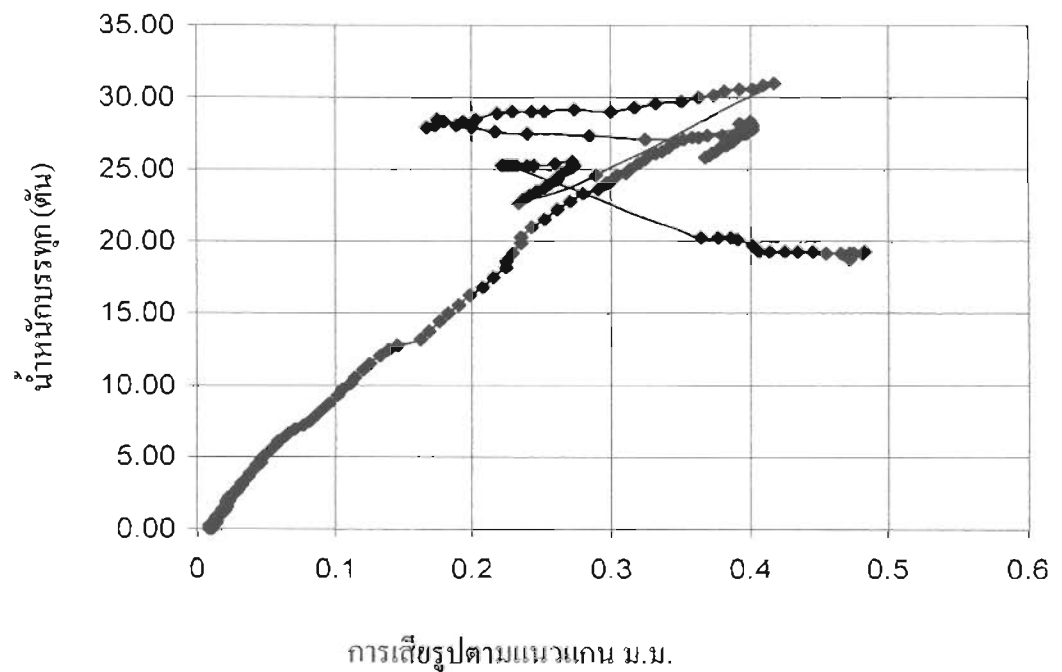
ภาพที่ ฉ-9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรวมและการเสียน้ำตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเครียดที่ผิวคอนกรีต C14/2



ภาพที่ ฉ-10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรวมและการเสียน้ำตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเครียดที่ผิวคอนกรีต C19/2



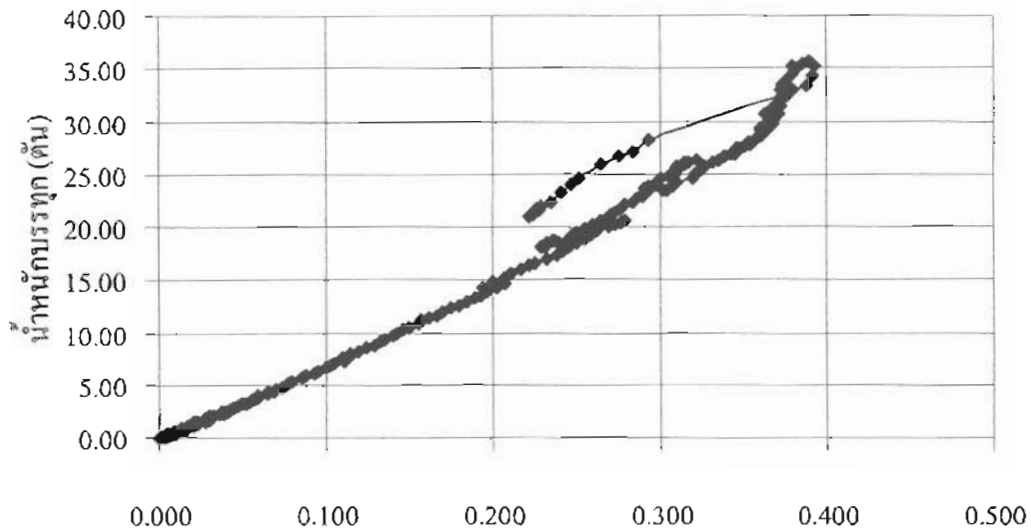
ภาพที่ ๑-11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและการเล็รูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเครียดที่ผิวคอนกรีต C24/2



ภาพที่ ๑-12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและการเล็รูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเครียดที่ผิวคอนกรีต C48/2

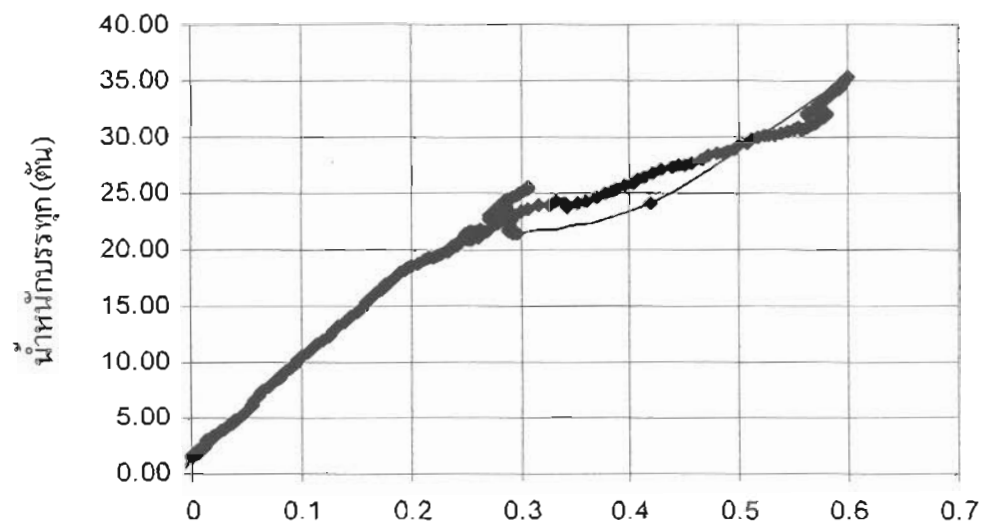
ภาคผนวก ข.

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัดความเครียดที่เหล็กขึ้น



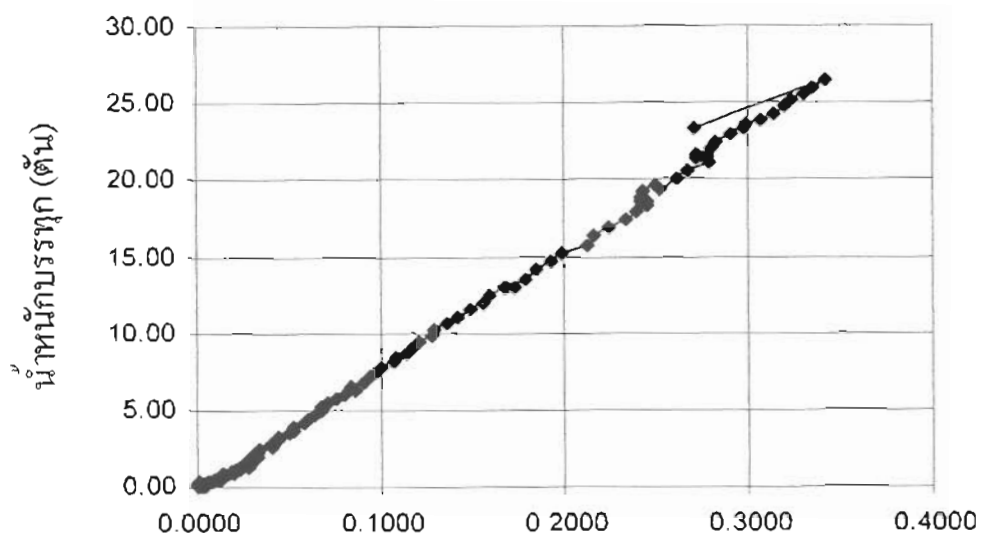
การเสียรูปตามแนวแกน ม.ม.

ภาพที่ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัดความเครียดที่เหล็กขึ้น A14/2



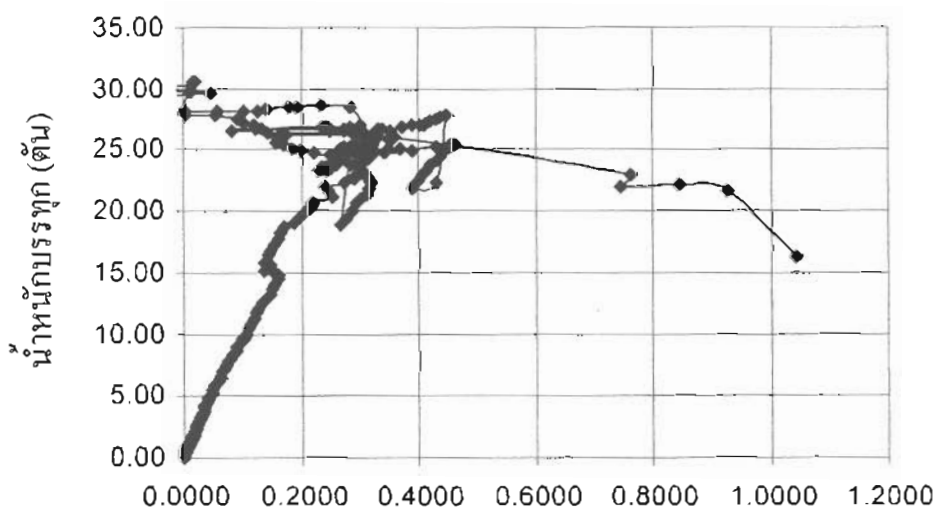
การเสียรูปตามแนวแกน ม.ม.

ภาพที่ ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำนักบรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัดความเครียดที่เหล็กขึ้น A24/2



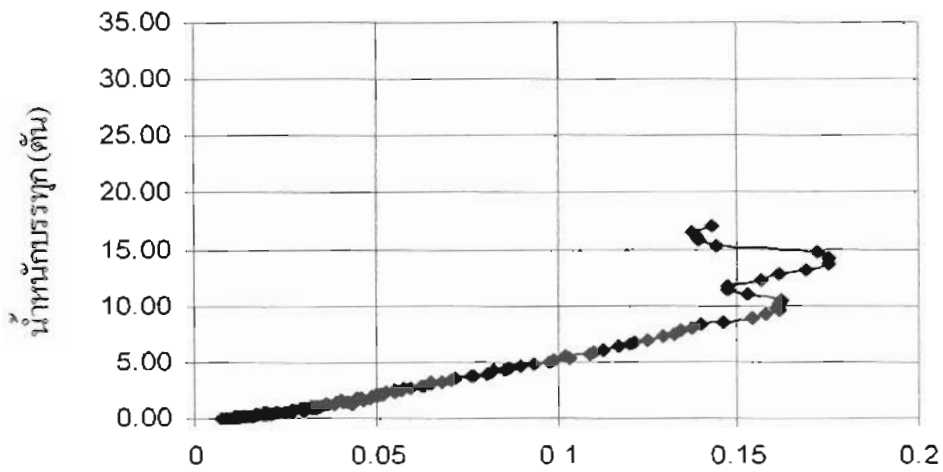
การเสัรูปตามแนวแกน ม.ม.

ภาพที่ ช-3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหน้กบรทุกและการเสัรูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเค็ชดที่เหล็กยััน A29/2



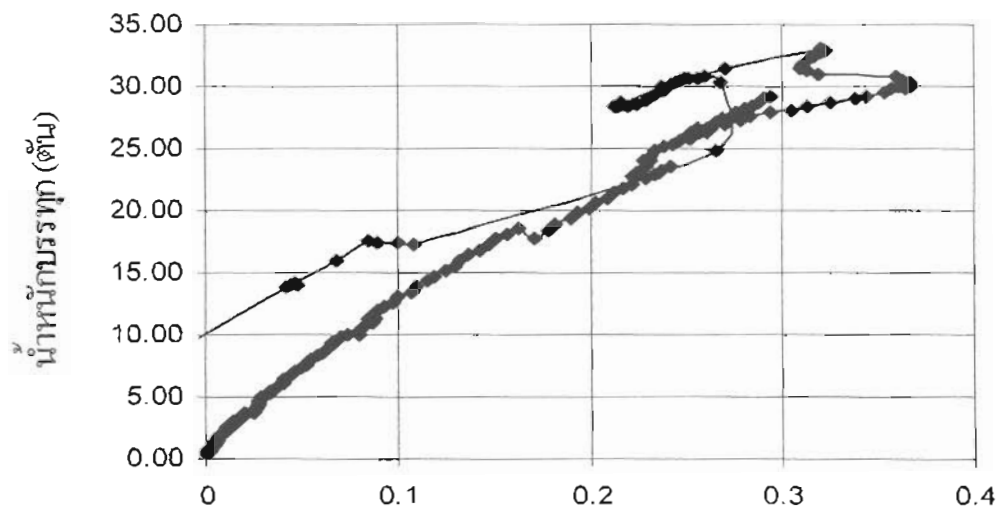
การเสัรูปตามแนวแกน ม.ม.

ภาพที่ ช-4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหน้กบรทุกและการเสัรูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเค็ชดที่เหล็กยััน B14/2



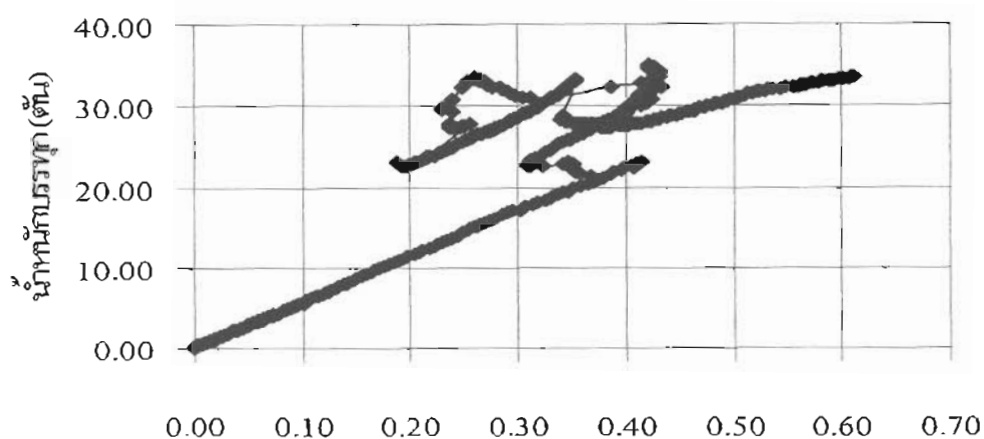
การเสียรูปตามแนวแกน ม.ม.

ภาพที่ ข-5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเครียดที่เหล็กขึ้น B24/2



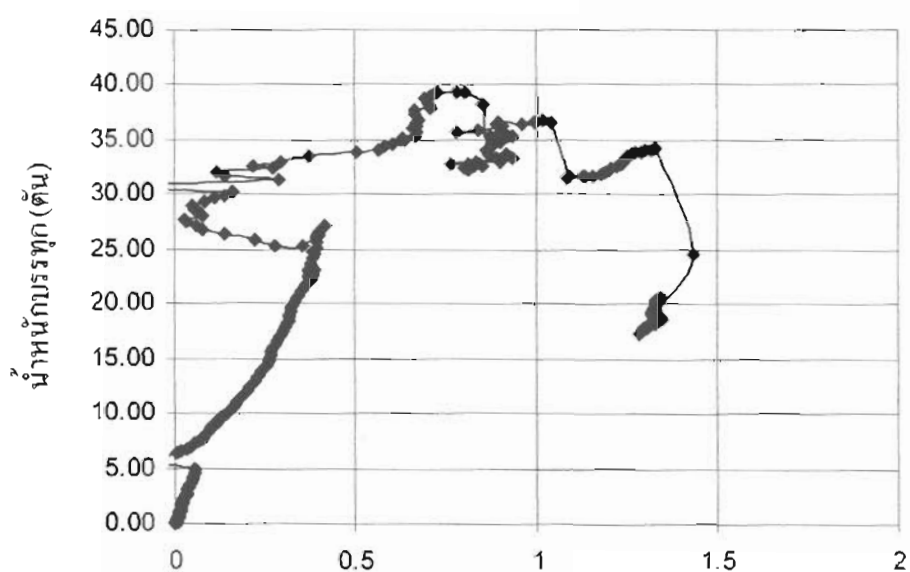
การเสียรูปตามแนวแกน ม.ม.

ภาพที่ ข-6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเครียดที่เหล็กขึ้น B43/2



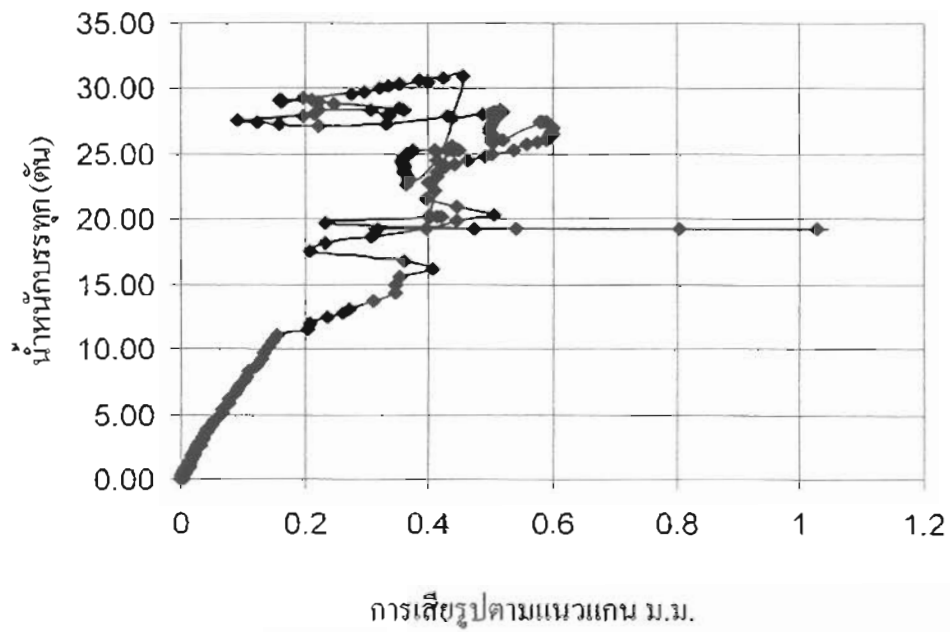
การเสีรูปตามแนวแกน ม.ม.

ภาพที่ ข-7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเสีรูปตามแนวแกนจากมาตรวัดความเครียดที่เหล็กขึ้น C14/2



การเสีรูปตามแนวแกน ม.ม.

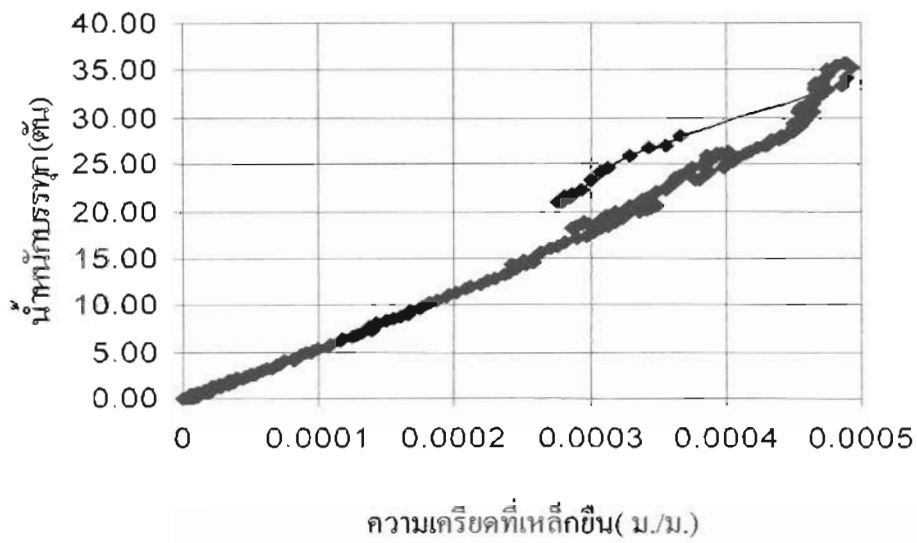
ภาพที่ ข-8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกและการเสีรูปตามแนวแกนจากมาตรวัดความเครียดที่เหล็กขึ้น C24/2



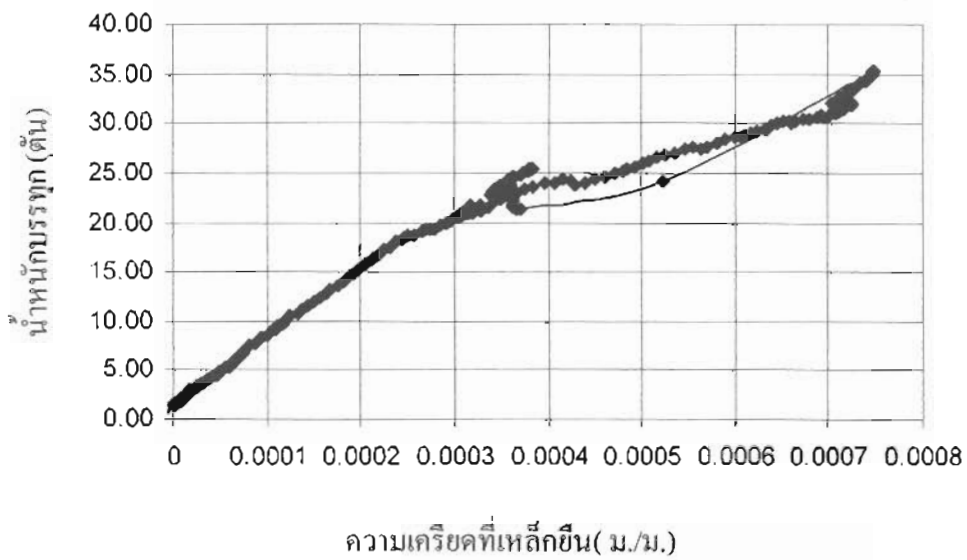
ภาพที่ ช-9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่ดูดซับและการเสียรูปตามแนวแกนจากมาตรวัด
ความเครียดที่เหล็กขึ้น C48/2

ភាគដំណាក់ ២.

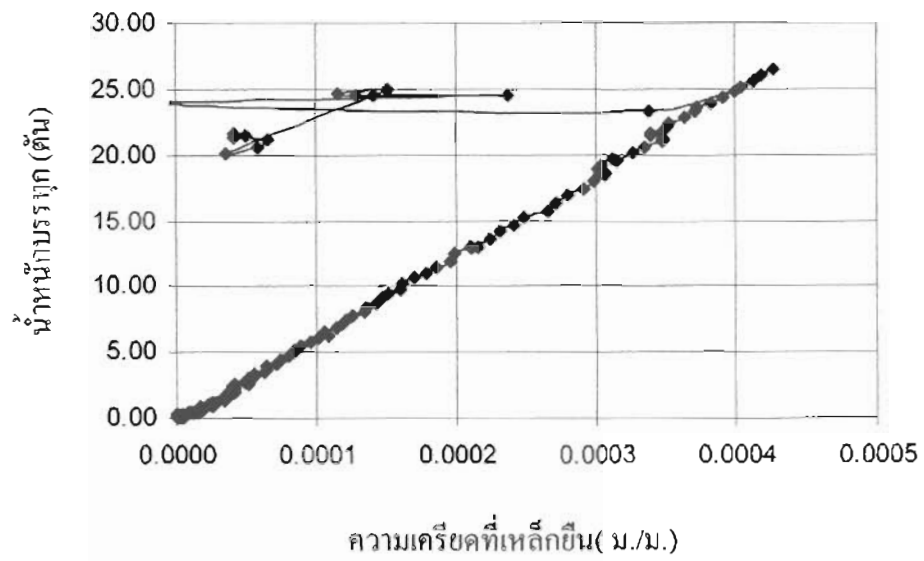
ข. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่เหลือยืน



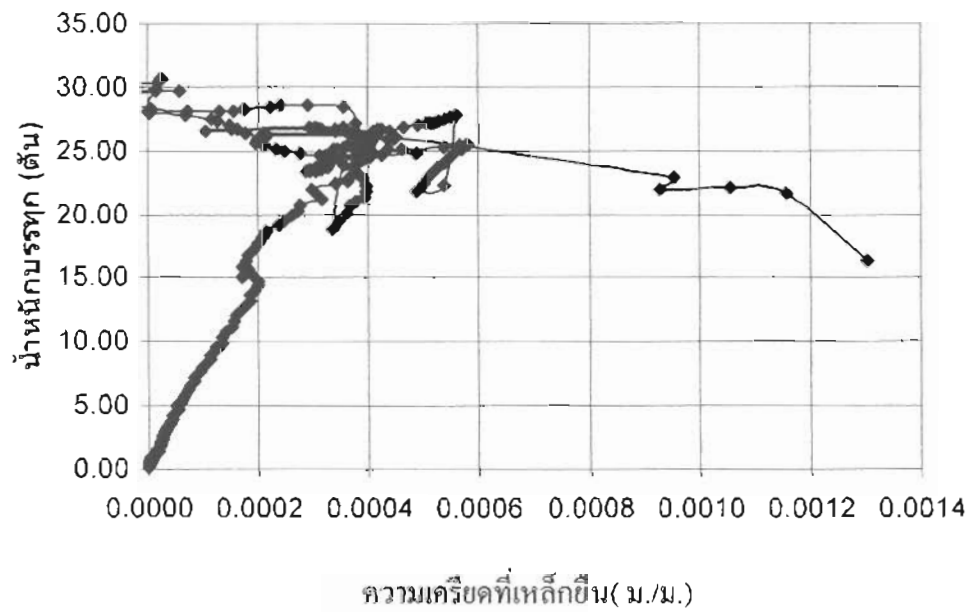
ภาพที่ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่เหลือยืน A14/2



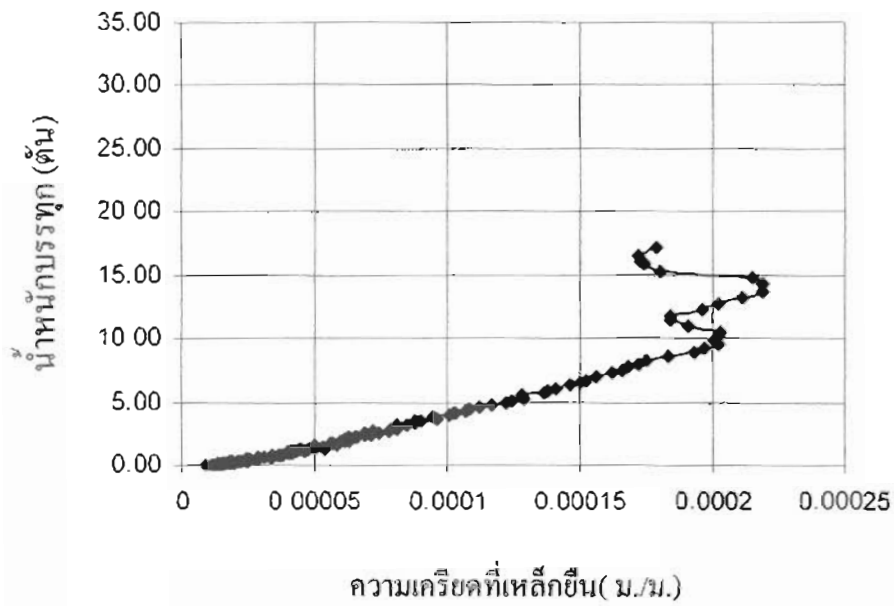
ภาพที่ ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่เหลือยืน A24/2



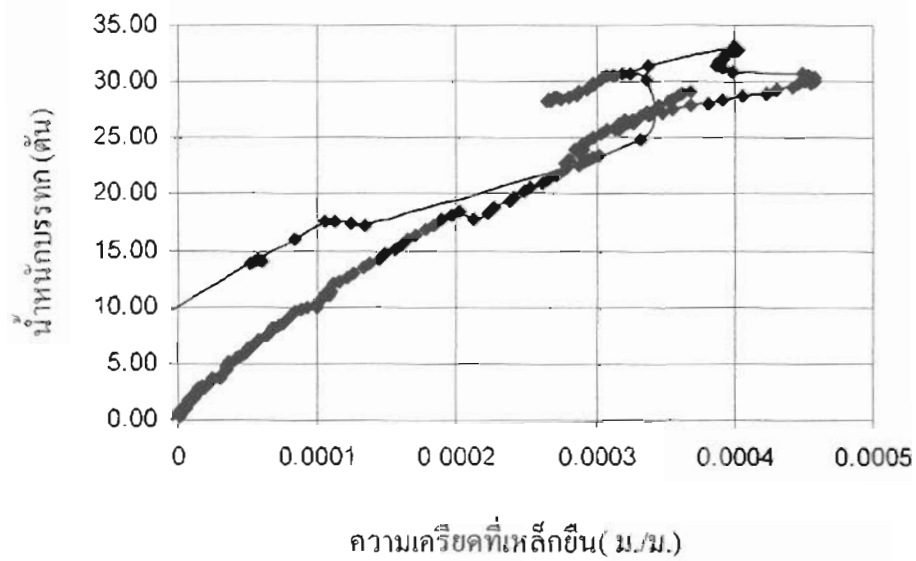
ภาพที่ ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรวมและความเคี้ยวที่เหลืกขึ้น A29/2



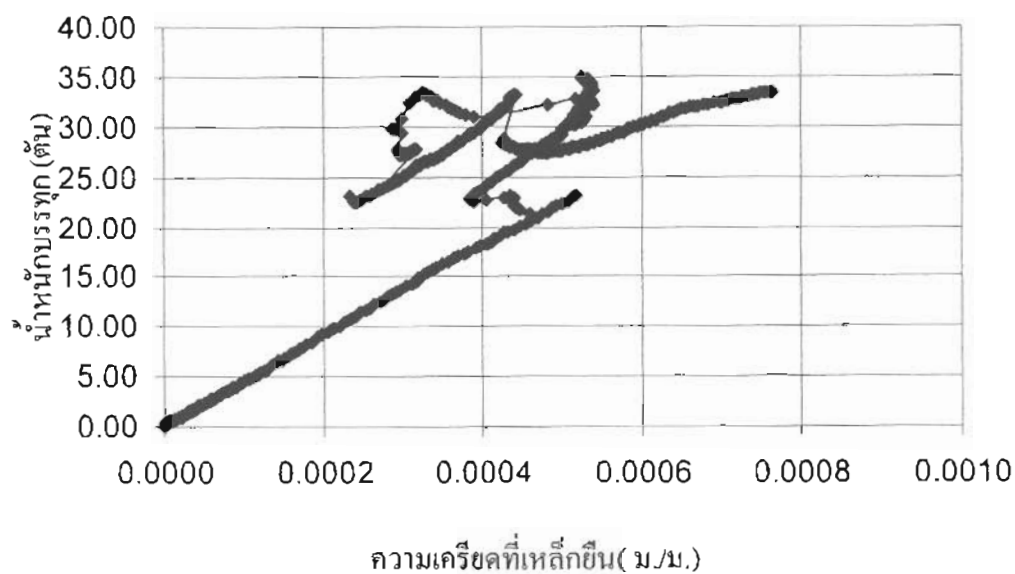
ภาพที่ ข-4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรวมและความเคี้ยวที่เหลืกขึ้น B14/2



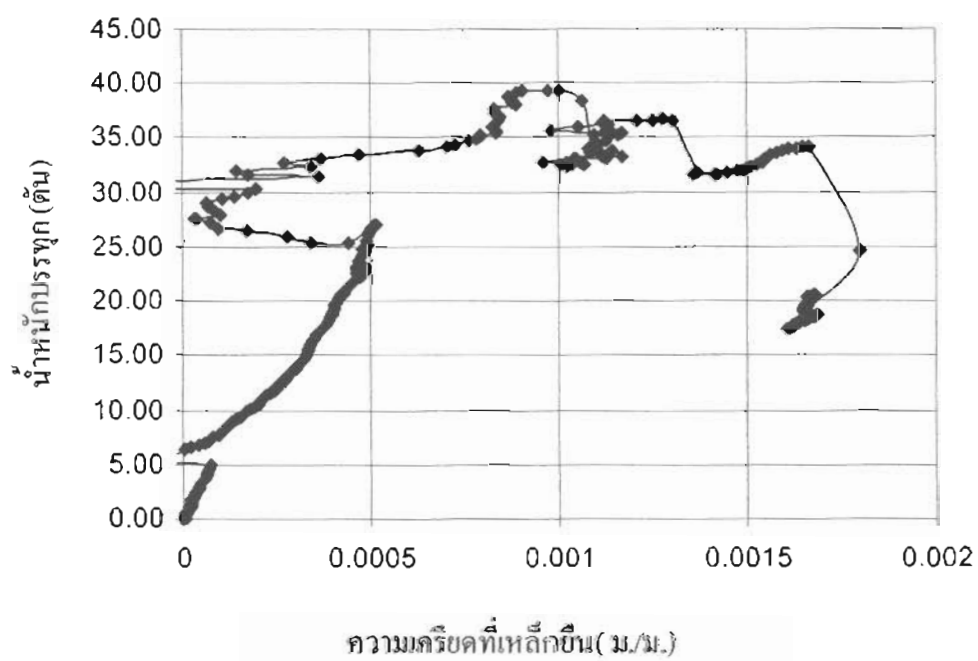
ภาพที่ ข-5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรับและความเครียดที่เหล็กล้วน B24/2



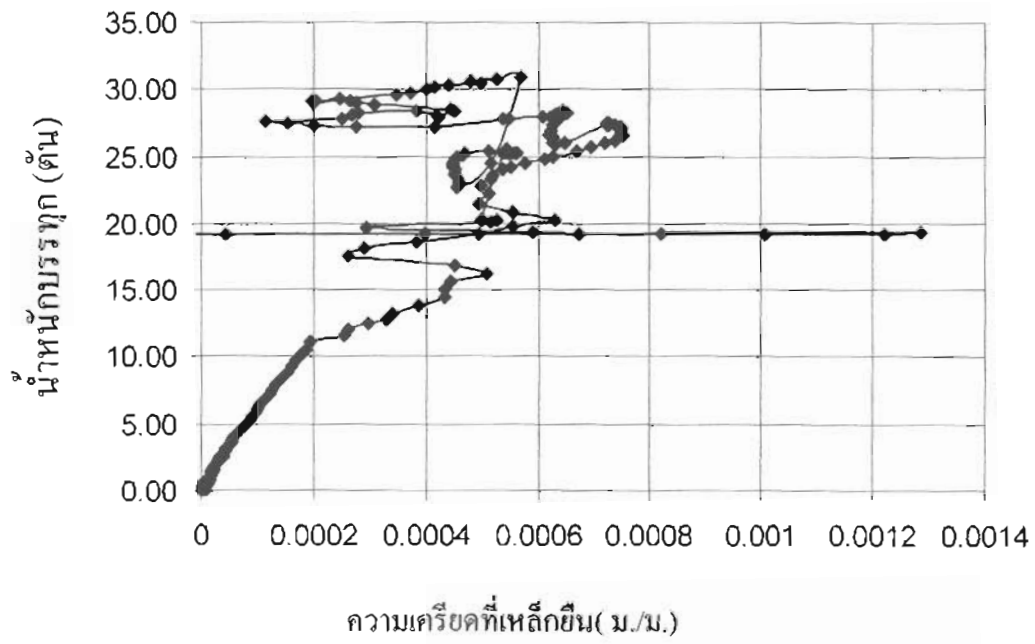
ภาพที่ ข-6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรับและความเครียดที่เหล็กล้วน B43/2



ภาพที่ ซ-7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำในดินและค่าความเคี้ยวที่เหลืกขึ้น C14/2



ภาพที่ ซ-8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำในดินและค่าความเคี้ยวที่เหลืกขึ้น C24/2



ภาพที่ ข-9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรจุและความเครียดที่เหลักยื่น C48/2

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	: นายธนปกรณ์ สังข์ทอง
ชื่อวิทยานิพนธ์	: การเปรียบเทียบกำลังอัดของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็ก ปลอกต่างกัน
สาขา	: โยธา
ประวัติ	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม พ.ศ.2542 ปัจจุบันทำงานที่บริษัท ไมวาน (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่ง หัวหน้าวิศวกรรม วางแผนและควบคุมต้นทุน