

พฤติกรรมความต่อเนื่องของระบบแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดกลวง



นายมนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1270-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTINUITY BEHAVIOR OF PRECAST PRESTRESSED HOLLOW CORE SLAB SYSTEM



Mr. Monkiat Chanintonleela

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1270-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ พฤติกรรมความต่อเนื่องของระบบแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดกลวง
โดย นายมนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

มนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา : พฤติกรรมความต่อเนื่องของระบบแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดคดง
(CONTINUITY BEHAVIOR OF PRECAST PRESTRESSED HOLLOW CORE SLAB SYSTEM)

อ. ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ, 138 หน้า ISBN 974-03-1270-5

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงพฤติกรรมความต่อเนื่องของระบบแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดคดง ด้วยการทดสอบแผ่นพื้นตัวอย่างต่อเนื่อง 2 ช่วง จำนวน 8 ตัวอย่างทดสอบ บรรทุกน้ำหนักแบบสถิตจนถึงจุดวิบัติ ใช้ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดคดงหนา 15 ซม. กว้าง 60 ซม. ยาว 400 ซม. แยกตัวแปรเป็น 3 ชุด ชุดแรกใช้ปริมาณเหล็กเสริมเป็นตัวแปร ชุดที่สองให้ระยะห่างของชั้นส่วนสำเร็จรูปเป็นตัวแปร และชุดสุดท้ายเป็นตัวอย่างทดสอบช่วงเดียว ใช้เป็นตัวอย่างการทดสอบอ้างอิง ความยาวช่วงทดสอบกำหนดที่ 375 ซม. บรรทุกน้ำหนักเป็นจุดที่กลางช่วง มีช่วงแรงเฉือน 187.5 ซม. ผลทดสอบจะเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง ให้การกระจายหน่วยแรงอัดในคอนกรีตตาม Hognestad ของหน้าตัดธรรมดา และตาม Popovics ของหน้าตัดที่มีการโอบรัด ส่วนค่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมใช้ผลการทดสอบแรงดึงจากตัวอย่างทดสอบจริง

ผลการทดสอบพบว่ารอยต่อจะมีกำลังสูงตามปริมาณเหล็กที่ใช้ แต่ความโค้งที่จุดวิบัติคำนวณจากค่าการแอ่นตัวจะลดค่าลงตามลำดับ ในตัวอย่างทดสอบที่มีปริมาณเหล็กเสริมมากอาจวิบัติด้วยแรงเฉือนได้ หากค่าหน่วยแรงเฉือนทางราบเกินพิกัด เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์ พฤติกรรมการดัดชี้ชัดว่า กำลังดัดแตกร้าวกำลังดัดที่จุดคราก และค่าสติเฟนส์ก่อนการคราก สอดคล้องกันอย่างมาก โดยค่าความแตกต่างอยู่ในพิกัดไม่เกินร้อยละ 5 การกำหนดค่าดัชนีความเหนียวจากการต่อเนื่องเกินกว่า 3 เพื่อให้เกิดจุดหมุนพลาสติกได้ พบว่าต้องมีปริมาณเหล็กเสริมไม่เกิน 0.41 ของปริมาณที่ภาวะสมดุล และปริมาณเหล็กเสริมขั้นต่ำเพื่อควบคุมการแตกร้าวกและการกระจายซ้ำได้เกินร้อยละ 20 ตาม ACI 318R-99 จะต้องไม่น้อยกว่า 0.23 ของปริมาณที่ภาวะสมดุล ในกรณีที่มีความกว้างรอยต่อเป็นตัวแปรที่ 5, 15 และ 25 ซม. มีผลให้การลดแรงดัดที่ศูนย์กลางแทนรองรับของรอยต่อลดลงร้อยละ 11, 13 และ 15 ตามลำดับ อนึ่งพฤติกรรมการโอบรัดของหน้าตัดรอยต่อ พบว่ามีนัยสำคัญต่อกำลังดัดประลัยน้อยมาก แต่จะมีผลต่อความเหนียวทางโครงสร้างในเชิงอนุรักษ์มากขึ้น แนวทางการออกแบบรอยต่อของแผ่นพื้นสำเร็จรูปหน้าตัดคดงอาจพิจารณาคำนวณโมเมนต์ดัดที่รอยต่อด้วยน้ำหนักบรรทุกจรได้สูงถึง 1.75 ของพื้นที่ช่วงเดียว ทั้งนี้จะต้องตรวจสอบแรงเฉือนทางราบที่ผิวสัมผัสก่อนด้วยค่าประลัยไม่เกิน $0.61 \sqrt{f'_c}$ (กก./ซม.²) การคำนวณออกแบบสามารถใช้วิธีการตามมาตรฐานการออกแบบทั่วไปได้ ที่ต้องตรวจสอบปริมาณเหล็กสูงสุดและปริมาณเหล็กต่ำสุด อีกทั้งจะต้องมีการตรวจสอบการแอ่นตัวด้วยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยแตกร้าวกไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ของหน้าตัดเต็ม เทียบกับพิกัดตามมาตรฐานการออกแบบทั่วไปได้

ภาควิชา _____ วิศวกรรมโยธา _____ ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา _____ วิศวกรรมโยธา _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา _____ 2544 _____

4270490621 : MAJOR STRUCTURAL ENGINEERING

KEY WORD : Continuity / Flexural Behavior / Ductility / Moment Redistribution / Precast / Prestressed Hollow Slab

MONKIAT CHANINTONLEELA : CONTINUITY BEHAVIOR OF PRECAST PRESTRESSED HOLLOW CORE SLAB SYSTEM. THESIS ADVISOR : PROF. EKASIT LIMSUWAN, Ph.D. 138 pp. ISBN 974-03-1270-5

This research has concentrated on continuity behavior of precast prestressed hollow core slab system by means of static loading tests up to failure. The specimens are two span continuous slab with rectangular section of 15x60 cm. and 400 cm. in length. Three test series were carried out of eight specimens; first amount of steel is variable, second space between precast element is variable and the last simply supported slab is tested as the control. Test set-up is arranged for clear span length of 375 cm. with midspan point load and a shear span of 187.5 cm. The test result will be compared with the analysis by means of strain compatibility method, using stress-strain distributions as the Hognestad's model for unconfined section and the Popovics's one for confine sections, Tension responses are conforming to the tensile testing from each test sample.

The results have indicated that the joint strength increases with amount of the reinforcement but the curvature at failure calculated from corresponding deflection are decreased except the one where shear failure has exhibited the mode of failure for high percentage of reinforcement. The test results as compared to the analysis ones have shown moment at cracking, yield and the stiffness before yielding to be very good agreement. The ductility index for continuity of continuous slab is higher than 3, to form the plastic hinged, then the reinforcements should not exceed 0.41 of the amount at balance condition. The minimum reinforcement to control cracks and the redistribution of moment according to ACI 318R-99, is determined at 0.23 of the one at balance condition. Spaces of the precast elements at 5, 15 and 25 cm. are influenced the reduction of bending moment to 11, 13 and 15 % of the moment at center respectively. Confinement behavior of joint subjected to the compression face on the support has no significant effect on the ultimate moment but they are greatly influence its on ductility. The design concept of the joint for continuity of hollow core slab, the action for ultimate capacity can be as high as 1.75 times design live load of simple span, but the horizontal shear must be checked not to exceed $0.61\sqrt{f'_c}$ (ksc.) . The design method can employ the conventional standard considering the maximum and minimum reinforcements. The deflection should also be checked using the effective moment of inertia not less than 25% of the gross one to conformed with the design standard.

Department Civil Engineering Student's signature _____

Field of study Civil Engineering Advisor's signature _____

Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความกรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จและดูล่วงไปอย่างสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณท่านประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี และ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม ซึ่งได้ให้ความกรุณาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

กราบขอบพระคุณ บริษัท ผลิตภัณฑ์คอนกรีตซีแพค จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อวัสดุทดสอบ เจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อนิสิตปริญญาโท และผู้ที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งได้ให้โอกาสในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจผู้เขียนเสมอมา

มนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเดิม.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง.....	6
2.2 พฤติกรรมบริเวณรอยต่อ.....	12
2.3 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดจากผลทดสอบ.....	15
บทที่ 3 การทดสอบ และผลการทดสอบ	
3.1 รายการทดสอบ.....	18
3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	19
3.2.1 วัสดุใช้ทำตัวอย่างทดสอบ.....	19
3.2.2 การหล่อตัวอย่างทดสอบ.....	21
3.3 วิธีการทดสอบ.....	21
3.3.1 การเตรียมแท่นทดสอบ.....	21
3.3.2 การทดสอบ.....	22
3.4 ผลการทดสอบ.....	23
3.4.1 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-9B.....	23
3.4.2 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-19B.....	24
3.4.3 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-28B.....	25

3.4.4	แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-52B.....	26
3.4.5	แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-98B.....	26
3.4.6	แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-25-28B.....	27
3.4.7	แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-45-28B.....	28
3.4.8	แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-SS.....	29
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลทดสอบ และแนวทางการออกแบบ		
4.1	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดจากผลทดสอบ.....	30
4.2	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์	34
4.3	อิทธิพลของปริมาณเหล็กเสริม.....	37
4.4	อิทธิพลของรอยต่อ.....	38
4.5	แนวทางการออกแบบ.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....		
	รายการอ้างอิง.....	45
	รายการตารางประกอบ.....	47
	รายการรูปประกอบ.....	57
ภาคผนวก		
ก.	ผลการทดสอบแผ่นพื้นตัวอย่าง.....	116
ข.	ผลการวิเคราะห์กำลังดัดด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง.....	125
ค.	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง.....	130
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
3.1 รายการทดสอบ และรายละเอียดการทดสอบ.....	48
3.2 อัตราส่วนผสมสำหรับคอนกรีตหล่อในที่เททับหน้า.....	50
3.3 คุณสมบัติลวดเหล็กอัดแรง.....	51
3.4 คุณสมบัติเหล็กเสริมธรรมดา.....	52
4.1 ความเหนียวทางโครงสร้างของรอยต่อที่มีปริมาณเหล็กเสริมต่างกัน.....	53
4.2 การกระจายค่าของโมเมนต์ดัดตามปริมาณเหล็กเสริม.....	54
4.3 เปรียบเทียบกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด ด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธีอีลาสติก.....	55
4.4 เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง	56
ก.1 ผลการทดสอบ และการคำนวณของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-9B.....	117
ก.2 ผลการทดสอบ และการคำนวณของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-19B.....	118
ก.3 ผลการทดสอบ และการคำนวณของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-28B.....	119
ก.4 ผลการทดสอบ และการคำนวณของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-52B.....	120
ก.5 ผลการทดสอบ และการคำนวณของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-98B.....	121
ก.6 ผลการทดสอบ และการคำนวณของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-25-28B.....	122
ก.7 ผลการทดสอบ และการคำนวณของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-45-28B.....	123
ก.8 ผลการทดสอบ และการคำนวณของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-SS.....	124
ข.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งแผ่นพื้น HC-35-9B....	126
ข.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งแผ่นพื้น HC-35-19B...	126
ข.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งแผ่นพื้น HC-35-28B...	127
ข.4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งแผ่นพื้น HC-35-52B...	127
ข.5 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งแผ่นพื้น HC-35-98B...	128
ข.6 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งแผ่นพื้น HC-25-28B...	128
ข.7 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งแผ่นพื้น HC-45-28B...	129
ข.8 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งแผ่นพื้น HC-SS.....	129

สารบัญรูป

รูปที่		หน้าที่
2.1	การกระจายหน่วยแรงอัดในคอนกรีต เมื่อความเครียดในคอนกรีตมีค่าสูงสุด ($\epsilon_c=0.003$) ตามมาตรฐาน ACI.....	58
2.2	การกระจายความเครียดตลอดความลึกของหน้าตัดเป็นเส้นตรง.....	58
2.3	ค่าความโค้งภายหลังหน้าตัดเกิดการแตกร้าว เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างความโค้งสูงสุดที่หน้าตัดแตกร้าว กับความโค้งต่ำสุดที่หน้าตัดซึ่งอยู่ระหว่างรอยแตกร้าว.....	59
2.4	ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับความเครียดคอนกรีตโดย Hognestad, E. ^[11]	59
2.5	หน้าตัดแปลงของแผ่นพื้นตัวอย่าง สำหรับคำนวณหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง.....	60
2.6	การแจกแจงความเครียด และหน่วยแรงภายหลังหน้าตัดเกิดการแตกร้าว.....	61
2.7	พฤติกรรมของการกระจายตัวของโมเมนต์ดัดจากรอยต่อไปสู่จุดวิกฤติที่กลางช่วง.....	62
2.8	การโอบรัดคอนกรีตบริเวณรอยต่อจากแท่นรองรับ.....	63
2.9	แบบจำลองภายใต้การโอบรัดของ Popovics, S ^[15]	63
2.10	หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนเล็กๆ.....	64
2.11	หน่วยแรงเฉือนที่รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า.....	64
2.12	การแปลงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งจากผลการทดสอบ.....	65
2.13	โมเมนต์ไดอะแกรมเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจาย.....	66
3.1 (ก.)	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-35-9B, HC-35-19B, HC-35-28B, HC-25-28B และ HC-45-28B.....	67
3.1 (ข.)	การติดตั้งชุดเครื่องทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-35-9B, HC-35-19B, HC-35-28B, HC-25-28B และ HC-45-28B.....	68
3.2 (ก.)	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-35-52B และ HC-35-98B...	69
3.2 (ข.)	การติดตั้งชุดเครื่องทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-35-52B และ HC-35-98B...	70
3.3 (ก.)	การเตรียมตัวอย่างทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-SS.....	71
3.3 (ข.)	การติดตั้งชุดเครื่องมือทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-SS.....	72
3.4 (ก.)	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของลวดอัดแรง (Dia. 5 มม.)....	73
3.4 (ข.)	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของลวดเกลียวอัดแรง.....	73
3.5 (ก.)	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม DB 12 มม.	74

3.5 (ข.)	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม DB 16 มม.	74
3.6 (ก.)	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตเทพื้นหน้า.....	75
3.6 (ข.)	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของแผ่นพื้นสำเร็จรูป.....	75
3.7	ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-9B.....	76
3.8	ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-19B.....	76
3.9	ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-28B.....	77
3.10	ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-52B.....	77
3.11	ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-98B.....	78
3.12	ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-25-28B.....	78
3.13	ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-45-28B.....	79
3.14	ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-SS.....	79
3.15	ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของตัวอย่าง HC-35-9B.....	80
3.16	ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของตัวอย่าง HC-35-19B...	81
3.17	ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของตัวอย่าง HC-35-28B...	82
3.18	ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของตัวอย่าง HC-35-52B...	83
3.19	ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของตัวอย่าง HC-35-98B...	84
3.20	ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของตัวอย่าง HC-25-28B...	85
3.21	ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของตัวอย่าง HC-45-28B...	86
3.22	ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-9B.....	87
3.23	ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-19B.....	88
3.24	ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-28B.....	89
3.25	ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-25-28B.....	90
3.26	ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-45-28B.....	91
3.27	ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-52B.....	92
3.28	ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-98B.....	93
3.29	ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-SS.....	94
3.30	การเข้าแบบตัวอย่างทดสอบ ก่อนเทคอนกรีตเทพื้นหน้า.....	95
3.31	การติดตั้งวัดความเครียด (Strain gauge) แบบใช้ไฟฟ้าบนเหล็กเสริม.....	95
3.32	การเทคอนกรีตทับหน้า.....	96
3.33	การติดตั้งชุดเครื่องทดสอบ.....	96
3.34	ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-35-9B.....	97

3.35	ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-35-19B.....	97
3.36	ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-35-28B.....	98
3.37	ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-35-52B.....	98
3.38	ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-35-98B.....	99
3.39	ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-25-28B.....	99
3.40	ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-45-28B.....	100
3.41	การวิบัติของตัวอย่างทดสอบโดยแรงเฉือนในทางราบ.....	100
4.1	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-9B..	101
4.2	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-19B	102
4.3	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-28B	103
4.4	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-52B	104
4.5	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-98B	104
4.6	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-25-28B	105
4.7	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-45-28B	106
4.8	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-SS.....	107
4.9	โมดูลัสแตกร้าวบริเวณรอยต่อและที่กลางช่วง กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต สำเร็จรูปและคอนกรีตเททับหน้า.....	108
4.10	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเททับหน้าที่รอยต่อ.....	108
4.11	ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ความเฉื่อย และโมเมนต์ดัดบริเวณรอยต่อ.....	109
4.12	หน่วยแรงเฉือนประลัยที่ผิวแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า.....	110
4.13	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า.....	110
4.14	การเปรียบเทียบกำลังดัดของรอยต่อที่มีปริมาณเหล็กเสริมต่างกัน.....	111
4.15	ความเหนียวทางโครงสร้างของรอยต่อที่มีปริมาณเหล็กเสริมต่างกัน.....	111
4.16	การกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัดตามปริมาณเหล็กเสริม.....	112
4.17	ปริมาณเหล็กเสริมที่รอยต่อ และการลดกำลังดัดตามข้อกำหนดของ ACI.....	112
4.18	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์โดยใช้ระยะถึงศูนย์กลางแท่นรองรับ เป็นความยาวช่วง.....	113
4.19	เปรียบเทียบกำลังดัดของตัวอย่างทดสอบที่มีความกว้างของรอยต่อเป็นตัวแปร...	113
4.20	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ของพื้นตัวอย่าง HC-25-28B.....	114
4.21	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ของพื้นตัวอย่าง HC-35-28B.....	114
4.22	เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ของพื้นตัวอย่าง HC-45-28B.....	115

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเดิม

วิวัฒนาการและเทคโนโลยีในการก่อสร้างในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาไปอย่างมาก แผ่นพื้นสำเร็จรูปหน้าตัดกลวง เป็นชิ้นส่วนโครงสร้างชนิดหนึ่งที่มีความนิยมอย่างแพร่หลายในพื้นที่อาคารและพื้นสะพานเป็นต้น เพราะมีน้ำหนักเบาจากโพรงตามยาว การก่อสร้างทำได้ง่ายและสะดวก ไม่ต้องใช้ไม้แบบและค้ำยันชั่วคราว สามารถประหยัดเวลาและแรงงาน โดยทั่วไปแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดกลวงถูกออกแบบให้ใช้งานในลักษณะแผ่นพื้นช่วงเดียว โดยมีเพียงเหล็กเสริมตะแกรงหรือเหล็กเสริมพิเศษตามแนวรอยต่อ เพื่อป้องกันการแตกร้าวจากการคืบตัว และการหดตัวของคอนกรีตเทในที่ ดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน คือเกิดรอยแตกร้าวตามแนวรอยต่อของแผ่นพื้นบริเวณฐานรองรับ สำหรับแนวทางการแก้ไขสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ตัดแผ่นพื้นให้ขาดจากกันแล้วเจาะร่องหรือตีแนวให้เกิดรอยตัดจากกันโดยสิ้นเชิง หรือการแก้ไขอาจทำได้โดยการเสริมเหล็กในคอนกรีตเททับหน้าให้เพียงพอ เพื่อการกระจายรอยแตกร้าวให้มีขนาดเล็กที่มีอาจมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

สำหรับพฤติกรรมเชิงประกอบของแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า หากออกแบบให้มีการต่อเนื่องด้วยการเสริมเหล็กในคอนกรีตเททับหน้า บริเวณรอยต่อให้แบกรับน้ำหนักบรรทุกด้วยนั้น โมเมนต์ตัดและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของแผ่นพื้นต่อเนื่องมีพฤติกรรมแตกต่างออกไป กล่าวคือ สามารถลดการแอ่นตัวและการตัดที่กึ่งกลางช่วงลง ทำให้สามารถลดปริมาณลวดอัดแรงหรือขนาดของแผ่นพื้นลงได้ หรืออาจจะเพิ่มความยาวช่วงของแผ่นพื้น ทั้งนี้ภายใต้การเสริมเหล็กและการทำรายละเอียดการก่อสร้างให้เกิดการต่อเนื่องได้โดยสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามการลดปริมาณลวดอัดแรงในแผ่นพื้นสำเร็จรูป หรือการเพิ่มความยาวช่วงจะทำให้การโก่งตัวเริ่มต้นลดลงหนึ่งจุดวิกฤติจะเปลี่ยนจากบริเวณกลางช่วงของโมเมนต์บวก ไปเป็นที่จุดรองรับของโมเมนต์ลบแทน ซึ่งหมายถึงจุดวิกฤติของแผ่นพื้นช่วงเดียวจะขึ้นอยู่กับการกำลังดัดประลัยของระบบสำเร็จรูปที่กลางช่วง แต่จุดวิกฤติของแผ่นพื้นต่อเนื่องจะมีจุดวิกฤติที่รอยต่อ และขึ้นอยู่กับการควบคุมพฤติกรรมกระจายตัวของโมเมนต์ และความเหนียวของโครงสร้างที่เพียงพอ ซึ่งการศึกษาวิจัยในรายงานนี้จะเน้นพฤติกรรมต่อเนื่องที่รอยต่อให้มีกำลัง ความเหนียวทางโครงสร้าง และให้การใช้งานได้ด้วยสมรรถนะที่พอเพียงด้วย

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พฤติกรรมการต่อเนื่องของคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวไอศึกษาโดย Kaar, P. H. and et al.^[12] และคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปตัวทีของ Rostasy, F. S.^[17] กำหนดปริมาณเหล็กเสริมธรรมดาในคอนกรีตเททับหน้าที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษากำลังดัดบริเวณจุดต่อ และการกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัด พบว่าหากปริมาณเหล็กเสริมธรรมดาในพื้นที่คอนกรีตเททับหน้ามีค่า 0.5 ถึง 1.5% ของพื้นที่หน้าตัด ปริมาณลวดอัดแรงในคานคอนกรีตสำเร็จรูปจะมีผลต่อกำลังดัดของหน้าตัดบริเวณจุดรองรับน้อยมาก เนื่องจากตำแหน่งของแกนสะเทินจะอยู่ใกล้แนวลวดอัดแรงของชิ้นส่วนสำเร็จรูป การเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมบริเวณจุดต่อทำให้กำลังดัดประลัยของโครงสร้างเพิ่มขึ้น และแรงดึงครากของเหล็กเสริมที่รอยต่อควรมีค่ามากกว่าแรงดึงแตกร้าวของคอนกรีตที่เททับหน้า ซึ่งการป้องกันมิให้เหล็กเสริมต่อเนื่องถึงจุดครากในสภาวะการให้บริการใช้งาน ทำให้ขนาดความกว้างของการแตกร้าวลดลง Rosenthal, I.^[16] ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการแอ่นตัวในแผ่นพื้นสำเร็จรูปหน้าตัดกลวง หน้า 16 ซม. กว้าง 120 ซม. ยาว 300 ซม. ต่อเนื่องกันสองช่วงโดยปราศจากคอนกรีตเททับหน้า ใส่เหล็กเสริมขนาด 12 มม. จำนวน 9 เส้น ไว้ในโพรงตามยาวแล้วเทคอนกรีตปิดทับ พบว่าที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากันการแอ่นตัวและรอยแตกร้าวในพื้นที่ช่วงเดียวจะมีค่ามากกว่า ต่อมา Tang, K. H. and et al.^[21] ได้ศึกษาพฤติกรรมความต่อเนื่องในพื้นที่เชิงประกอบระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดกลวงกับคอนกรีตเททับหน้า กรณีที่หน่วยแรงเฉือนมีค่าวิกฤตกว่าโมเมนต์ดัด ได้มีการเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนด้วยการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนที่รอยต่อระหว่างผิวแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า ผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างที่เสริมเหล็กรับแรงเฉือนสามารถคุมการวิบัติที่เกิดจากโมเมนต์ดัดได้ และได้สร้างกราฟการออกแบบให้มีพฤติกรรมต่อเนื่อง กราฟการออกแบบดังกล่าวได้พิจารณาถึงกำลังดัดที่ลดลงที่กลางช่วงแผ่นพื้นอันเกิดจากการยึดรั้งที่ปลาย การกระจายซ้ำของโมเมนต์ อัตราส่วนความยาวที่เพิ่มขึ้นจากความยาวเดิม และกำลังรับโมเมนต์ดัดที่รอยต่อบริเวณจุดรองรับ

มาตรฐานการออกแบบของประเทศแคนาดากำหนดให้การกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัด โดยคิดจาก $\beta = 30-50c/d$ เมื่อ c/d คือ ความลึกของแกนสะเทินต่อความลึกประสิทธิภาพ ต่อมา Scholz, H.^[18] ได้ประเมินอัตราส่วน c/d ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสติฟเนส (Stiffness, K) และความชะลูด (Slenderness, L/d) ของคาน ทำให้ควบคุมความเหนียวทางโครงสร้าง (Ductility Demand) ได้ตามที่ต้องการ และได้เสนอกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายซ้ำของโมเมนต์ β และอัตราส่วน c/d ในโครงสร้างต่อเนื่องอาจยอมให้เกิดการกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัดได้ ในกรณีที่หน้าตัดมีความเหนียวเพียงพอที่จะทำให้เกิดจุดหมุนพลาสติก ต่อมา Furlong, R.W.^[9] ได้เสนอสูตรกำหนดดัชนีความเหนียวต่ำสุดในคานต่อเนื่องรับน้ำหนักกระทำเป็นจุดเพื่อให้เกิดจุด

หมุนพลาสติก คือ $\sigma_u/\sigma_y = 1 + 0.25L/d$ เมื่อ L คือ ความยาวช่วง และ d คือ ความลึกประสิทธิภาพ โดยที่อัตราส่วน L/d ที่ใช้งานโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 15 ถึง 20 จากสูตรจะให้ค่าดัชนีความเหนียวอยู่ในช่วง 4.75 ถึง 6.00 หากพิจารณาให้หน้าตัดคานต่อเนื่องมีดัชนีความเหนียวอย่างน้อยเท่ากับ 3 อัตราส่วน L/d จะต้องมีค่าเกินกว่า 8 เพื่อให้คานเกิดการหมุนได้พอเพียงที่สามารถให้เกิดการกระจายโมเมนต์ได้ การศึกษาของ Alvarez, M. and et al. [4] พบว่าขนาดของเหล็กเสริม และค่าความเครียดประลัยของเหล็กเสริมจะมีผลต่อความโค้งของหน้าตัด ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบแผ่นพื้นต่อเนื่องสองช่วง ใช้เหล็กขนาด 8 มม. และ 12 มม. ที่มีความเครียดประลัย 3.1% และ 3.3% ตามลำดับ พบว่าแผ่นพื้นตัวอย่างที่ใช้เหล็กเสริมชุดแรกให้ค่าความโค้งลดลง และให้กำลังสูงสุด 76% ของกำลังประลัย ซึ่งอาจเป็นผลจากความเครียดประลัยที่ต่ำกว่า และมีแรงยึดเหนียวจากปริมาณเส้นรอบรูปสูงกว่า

กำลังรับแรงเฉือนทางราบที่รอยต่อระหว่างผิวแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้าจะมีปัจจัยหลายอย่างเช่น ลักษณะของพื้นผิว กำลังของคอนกรีต ความยาวช่วงแรงเฉือน และปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่รอยต่อ เป็นต้น จากการศึกษาวิจัยของ Hanson, N. W. [10] พบว่ากำลังรับแรงเฉือนทางราบมีค่าสูงสุดเมื่อเกิดการเคลื่อนแยกตัวระหว่างผิวสัมผัส 0.13 มม. โดยที่ผิวสัมผัสที่สะอาดปราศจากคราบน้ำปูน และผิวถูกขัดหยาบมีกำลังรับแรงเฉือนทางราบ 21 กก./ซม.² การศึกษาวิจัยของ Saemann, J. C. and Washa, G.W. [20] กำหนดตัวแปรหลักด้วยลักษณะผิวแผ่นพื้น ความยาวพื้นที่รับแรงเฉือน ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่รอยต่อ บากรอยต่อแรงเฉือน (Shear Key) และกำลังอัดของคอนกรีต ทดสอบคานที่ยาว 2.40 และ 3.30 เมตร พบว่ากำลังเฉือนทางราบเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความหยาบและปริมาณเหล็กเสริมที่รอยต่อ แต่กำลังเฉือนจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อทดสอบคานที่มีความยาว 6.00 เมตร และพบว่าถ้าบากรอยต่อแรงเฉือนอยู่ในคอนกรีตเททับหน้า กำลังรับแรงเฉือนจะสูงกว่าอยู่ในส่วนของคานคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป และเมื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตจาก 210 เป็น 380 กก./ซม.² พบว่ากำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น งานวิจัยของ Birkeland, P. W. and Birkeland, H. W. [6] และ Mast, R.F. [14] ใช้แบบจำลองคานเชิงประกอบขณะที่เกิดการแตกร้าว พบว่าการเคลื่อนแยกตัวที่รอยต่อจะต้านด้วยแรงยึดรั้งของเหล็กเสริมที่รับแรงดึงบริเวณรอยต่อนั้น และได้เสนอความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างหน่วยแรงเฉือนทางราบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมที่รอยต่อ $v_u = \rho f_y \tan \theta$ เมื่อ v_u คือ หน่วยแรงเฉือนทางราบที่ผิวรอยต่อ ρ คือปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่หน้าตัด f_y คือ หน่วยแรงครากของเหล็กเสริม และ $\tan \theta$ คือ สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน เมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบของ Hanson, N.W. [10] และ Saemann, J.C. and Washa, G.W. [20] พบว่าให้ผลใกล้เคียงกับการ

ทดสอบกรณีที่มีเหล็กเสริมที่ผิวรอยต่อน้อย แต่กรณีที่มีเหล็กเสริมที่ผิวรอยต่อมากสมการดังกล่าว อาจไม่ปลอดภัยต่อการนำไปใช้ออกแบบ

การออกแบบเหล็กรับแรงเฉือนตาม ACI^[3] มีพื้นฐานจากการทดสอบ พร้อมกับ กำหนดปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่เอว ดังนั้น Becker, R. J. and Buettner, D. R.^[5] ได้ศึกษากำลัง เฉือนในแผ่นพื้นสำเร็จรูปหน้าตัดคดงวที่ใช้คอนกรีตแบบไม่ยุบตัวและไม่เสริมเหล็กกันการแตกร้าว ที่เอว ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วยความยาวช่วงแรงเฉือน ความยาวช่วงของพื้น และ ปริมาณลวดอัดแรง ผลการทดสอบพบว่าสมการหาคำลังเฉือนเสนอโดย ACI^[3] ให้ผลเป็นที่น่าพอใจในช่วงการให้บริการใช้งาน และพฤติกรรมที่สถานะประลัย จากการศึกษาวิจัยของ Ueda, T. and Stitmannaitum, B.^[22] ซึ่งทดสอบแผ่นพื้นเชิงประกอบหน้าตัดคดงวที่มีคอนกรีตเททับหน้า พบว่าแผ่นพื้นที่มีแรงดึงลวดอัดแรงมากจะให้กำลังแรงเฉือนที่เอวสูงกว่า และแผ่นพื้นที่เทคอนกรีต ทับหน้าหนา 158 มม. พบว่าแรงดึงในลวดอัดแรงมีผลต่อแรงเฉือนที่เอวน้อยมาก และในกรณีแรง เฉือนจากการตัดจากการทดสอบแผ่นพื้นเททับหน้าหนา 5 ซม. เท่ากัน พบว่าตัวอย่างทดสอบที่มี แรงดึงในลวดอัดแรงมากกว่าจะให้แรงเฉือนจากการตัดสูงกว่า การเปรียบเทียบแรงเฉือนจากการ ตัดโดยวิธีคำนวณของ ACI และ JSCE พบว่าสมการที่เสนอโดย JSCE ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการ ทดลอง (22) มากกว่าสมการของ ACI เนื่องจากสมการของ JSCE ได้คำนึงถึงปริมาณเหล็กเสริม ตามยาวด้วย

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการต่อเนื่องของระบบแผ่นพื้นอัดแรง สำเร็จรูปหน้าตัดคดงว โดยการกำหนดปริมาณเหล็กเสริมในคอนกรีตหล่อในที่เททับหน้าด้วย ปริมาณที่ต่างกัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมกำลังการตัดในสถานภาพทดสอบจากน้ำหนักบรรทุกทุกแบบ สถิตจนถึงจุดวิบัติ ทั้งนี้จะเน้นพฤติกรรมการตัดที่บริเวณจุดเชื่อมต่อทั้งในแง่กำลัง รอยแตกร้าว ความเหนียวทางโครงสร้าง การให้บริการใช้งาน รวมถึงการกระจายซ้ำของโมเมนต์ตัด การวิจัยยัง กำหนดให้ความกว้างรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปเหนือจุดรองรับเป็นตัวแปร โดยจะมีการ ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบพื้นเชิงประกอบของพฤติกรรมแผ่นพื้นช่วงเดียวเทียบกับ แผ่นพื้นเชิงประกอบที่มีพฤติกรรมต่อเนื่องกันสองช่วง อีกทั้งจะพัฒนาแนวทางเพื่อการออกแบบ อีกด้วย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาพฤติกรรมของโมเมนต์ดัดในพื้นที่เชิงประกอบของแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดกลมกับคอนกรีตเททับหน้าใช้เหล็กเสริมขนาด 12 และ 16 มม. และมีกำลังคราก $4,000 \text{ กก./ซม.}^2$ ตามที่กำหนดในมาตรฐาน มอก. 24-2527 ระยะห่างรอยต่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปจะกำหนดเพียง 5, 15 และ 25 ซม. ตามลำดับ โดยมีปารองรับเพียง 10 ซม. แต่ละข้างจะเสริมเหล็กปลอก RB6 @ 10 ซม. เพื่อป้องกันการแตกร้าวหรือการวิบัติจากแรงเฉือนได้โดยสิ้นเชิง ความยาวช่วงของการทดสอบเท่ากับ 375 ซม. คอนกรีตเททับหน้ามีความหนา 5.0 ซม. โดยการกำหนดความยาวระยะยึดรั้งของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ACI 318R-99 อนึ่งการทดสอบน้ำหนักบรรทุกจะใช้แบบสถิตตลอดการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้คาดว่าจะให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมการกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัด ระหว่างจุดวิกฤติที่โมเมนต์ดัดสูงสุดกับจุดที่โมเมนต์ดัดลดลงไปตามปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ และผลของระยะห่างรอยต่อของแผ่นพื้นสำเร็จรูปเหนือจุดรองรับ นอกจากนี้จะสามารถศึกษาพฤติกรรมเชิงประกอบของระบบสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า ขนาดของรอยแตกร้าว การแอ่นตัว ลักษณะการวิบัติจากแรงหรือกำลังขององค์อาคาร และพฤติกรรมในการให้บริการในช่วงอีลาสติก และช่วงไม่เป็นอีลาสติก ซึ่งยังจะได้พัฒนาแนวทางการออกแบบพื้นที่เชิงประกอบของแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปให้สอดคล้องและเหมาะสมกับคอนกรีตหล่อในที่เททับหน้าได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพสูงสุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงประกอบของพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปและคอนกรีตเทตบหน้าในช่วงการให้บริการใช้งานจนถึงจุดวิบัติ โดยใช้ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งมาอธิบาย ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการดัดที่จุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูป

2.1 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งได้พิจารณาแยกเป็น 2 ส่วน คือ ในช่วงก่อนที่หน้าตัดจะเกิดรอยแตกร้าว ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับความเครียดของวัสดุจะเป็นเส้นตรง การวิเคราะห์จึงสามารถใช้ทฤษฎีอีลาสติกได้ และในช่วงหลังการแตกร้าวพฤติกรรมจะไม่เป็นแบบอีลาสติก การวิเคราะห์กำลังดัดของหน้าตัดจะใช้หลักการด้านความเครียดสอดคล้องของหน้าตัด และคุณสมบัติของวัสดุจากการทดสอบ

2.1.1 การวิเคราะห์หน่วยแรงด้วยทฤษฎีอีลาสติก

ในช่วงก่อนคอนกรีตเกิดรอยแตกร้าว การแจกแจงหน่วยแรงบนหน้าตัดจะเป็นเส้นตรง การวิเคราะห์กำลังดัดของหน้าตัดอาจทำได้โดยทฤษฎีอีลาสติก ด้วยการพิจารณาหน่วยแรงที่เกิดจากสาเหตุต่าง ๆ ทีละอย่าง และกำลังดัดของหน้าตัดจะได้จากการรวมหน่วยแรงเหล่านั้น อื่นๆ หน่วยแรงลัพท์ที่เกิดขึ้นอาจแปลงเป็นความโค้งของหน้าตัด โดยเทียบค่าความเครียดต่อระยะจากแกนสะเทิน

ก.) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากลวดอัดแรงกระทำเยื้องจากศูนย์กลางของหน้าตัด

$$f = -\frac{P_i}{A_p} \pm \frac{P_i e c_p}{I_p} \quad (2.1)$$

ข.) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกกระทำ ก่อนที่คอนกรีตเทตบหน้าแข็งตัว

$$f = \mu \frac{M_D c_p}{l_p} \quad (2.2)$$

ค.) หน่วยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักจรร ภายหลังเกิดกิริยาเชิงประกอบ
ระหว่างแผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปและคอนกรีตเททับหน้า

$$f = \mu \frac{M_L c_c}{l_c} \quad (2.3)$$

โดยที่ P_i = แรงดึงในลวดอัดแรง ทันทีที่ถ่ายแรงจากเหล็กเสริมสู่คอนกรีต

A_p = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นพื้นสำเร็จรูป

e = ระยะเยื้องศูนย์กลางของลวดอัดแรง

l_p, l_c = โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นสำเร็จรูป และพื้นเชิงประกอบ

c_p = ระยะห่างจากศูนย์กลางของหน้าตัดพื้นสำเร็จรูป

c_c = ระยะห่างจากศูนย์กลางของหน้าตัดแปลง

M_D, M_L = โมเมนต์ดัดเนื่องจากน้ำหนักคงที่ และ น้ำหนักจร

2.1.2 การวิเคราะห์กำลังดัดโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง

การวิเคราะห์กำลังดัดของหน้าตัดที่เกิดจากการดัด ที่ทำให้ความเครียดบนหน้าตัดด้านหนึ่งเป็นแรงอัดบนผิวที่ตัดเข้า และอีกด้านหนึ่งเป็นแรงดึงบนผิวที่มีการตัดออก การวิเคราะห์หน้าตัดก่อนการแตกร้าวซึ่งมีพฤติกรรมเป็นอีลาสติก สามารถใช้วิธีการหน้าตัดแปลง (Area Transform) หรือวิธีความเครียดสอดคล้องซึ่งจะให้ผลใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงหลังจากคอนกรีตเกิดการแตกร้าว พฤติกรรมจะไม่เป็นอีลาสติกอีกต่อไป คอนกรีตส่วนที่อยู่ใต้แกนสะเทินไม่สามารถรับแรงดึงได้ แรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดัดกำหนดให้แบกรับโดยเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว การวิเคราะห์กำลังดัดของหน้าตัดโดยใช้หลักการในทฤษฎีว่าด้วยความเครียดสอดคล้องของหน้าตัด โดยแปลงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุในรูปความสัมพันธ์ของความเครียดกับหน่วยแรงอัดหรือดึงตามสภาพการดัดที่เกิดขึ้น ที่มีผลต่อความเครียดบนหน้าตัดที่สามารถแปลงออกมาเป็นแรงภายในที่เป็นแรงอัดในส่วนที่เป็นคอนกรีต และแรงดึงในส่วนของเหล็กกรรมดาหรืออัดแรง แรงทั้งสองส่วนนี้จะต้องเท่ากันหน้าตัดจึงสมดุลย์ เมื่อคูณด้วยระยะห่างระหว่างแรงจะเกิดเป็นโมเมนต์ดัดบนหน้าตัด อนึ่งการกระจายความเครียดตามแนวแกนของคานอาจแปลงเป็นความโค้งได้ โดย

เทียบค่าความเครียดต่อระยะจากแกนสะเทิน อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์กำลังตัดภายในของหน้าตัดจะต้องกำหนดสมมุติฐานในการวิเคราะห์ดังนี้

- 1.) เหล็กเสริมยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตได้โดยสมบูรณ์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความเครียดในเหล็กเสริมและในคอนกรีต ณ จุดเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน
- 2.) การกระจายความเครียดบนหน้าตัดใดๆ กำหนดให้เป็นเส้นตรงตลอดความลึกของหน้าตัด ตามที่แสดงในรูปที่ 2.2
- 3.) ความโค้งที่คำนวณได้เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าสูงสุดที่กับค่าต่ำสุดซึ่งอยู่ระหว่างรอยแตกร้าวดังแสดงในรูปที่ 2.3
- 4.) ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมได้จากการทดสอบ และคอนกรีตใช้ความสัมพันธ์เสนอโดย Hognestad, E.^[11] ดังรูปที่ 2.4
- 5.) คอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้ จนกระทั่งหน่วยแรงที่หน้าตัดวิกฤตมีค่าเท่ากับโมดูลัสแตกร้าว และหลังการแตกร้าวคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้
- 6.) แรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงและแรงอัดลัพท์ในคอนกรีตมีค่าเท่ากัน ตามกฎการสมดุล สำหรับคานที่รับโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว
- 7.) คอนกรีตจะวิบัติเมื่อความเครียดที่ผิวนอกสุดของหน้าตัดเกินกว่า 0.003

แรงอัดลัพท์ในคอนกรีต, C_c และระยะจากแกนสะเทินถึงจุดศูนย์ถ่วงของแรงอัดลัพท์, \bar{x} ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 คำนวณหาได้โดยวิธีการอินทิเกรตความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตตามที่เสนอของ Hognestad, E.^[11]

$$f_c = f_c' \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_o} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

$$f_c(x) = f_c' \left[\frac{2\phi x}{\varepsilon_o} - \left(\frac{\phi x}{\varepsilon_o} \right)^2 \right]$$

แรงอัดลัพท์ $C_c = \int_0^c f_c(x) b dx \quad (2.5)$

$$= b f_c' \int_0^c \left[\frac{2\phi x}{\varepsilon_o} - \frac{\phi^2 x^2}{\varepsilon_o^2} \right] dx$$

$$= bf_c \frac{\phi c^2}{\epsilon_0} \left(1 - \frac{\phi c}{3\epsilon_0}\right)$$

และระยะจากแกนสะเทินถึงจุดศูนย์ถ่วงแรงอัดลัพท์

$$\bar{x} = \left\{ \int_0^c f_c(x) x b dx \right\} / C_c \quad (2.6)$$

$$\bar{x} = c \left(\frac{8\epsilon_0 - 3\phi c}{12\epsilon_0 - 4\phi c} \right)$$

ก.) เมื่อแกนสะเทินอยู่ในส่วนของแผ่นพื้นสำเร็จรูป (Precast)

แรงลัพท์

$$\begin{aligned} C_{c1} &= bf_{c1} \int_0^{c1} \left[\frac{2\phi x}{\epsilon_0} - \left(\frac{\phi x}{\epsilon_0} \right)^2 \right] dx \\ &= bf_{c1} \frac{\phi}{\epsilon_0} c_1^2 \left(1 - \frac{\phi c_1}{3\epsilon_0}\right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} C_{c2} &= bf_{c2} \int_{c1}^{c2} \left[\frac{2\phi x}{\epsilon_0} - \left(\frac{\phi x}{\epsilon_0} \right)^2 \right] dx \\ &= bf_{c2} \frac{\phi}{\epsilon_0} \left[(c_2^2 - c_1^2) - \phi \left(\frac{c_2^3 - c_1^3}{3\epsilon_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (2.8)$$

และ

$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &= \left\{ bf_{c1} \int_0^{c1} \left[\frac{2\phi x^2}{\epsilon_0} - \frac{\phi^2 x^3}{\epsilon_0^2} \right] dx \right\} / C_{c1} \\ &= c_1 \left(\frac{8\epsilon_0 - 3\phi c_1}{12\epsilon_0 - 4\phi c_1} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_2 &= \left\{ bf_{c2} \int_{c1}^{c2} \left[\frac{2\phi x^2}{\epsilon_0} - \frac{\phi^2 x^3}{\epsilon_0^2} \right] dx \right\} / C_{c2} \\ &= \left[\frac{8\epsilon_0(c_2^3 - c_1^3) - 3\phi(c_2^4 - c_1^4)}{12\epsilon_0(c_2^2 - c_1^2) - 4\phi(c_2^3 - c_1^3)} \right] \end{aligned} \quad (2.10)$$

โมเมนต์ดัด

$$M = C_{c1} (d - c + \bar{x}_1) + C_{c2} (d - c + \bar{x}_2) \quad (2.11)$$

ความโค้ง
$$\phi = \frac{\epsilon_o}{c} \quad (2.12)$$

ข.) เมื่อแกนสะเทินอยู่ในส่วนของคอนกรีตเททับหน้า (Topping)

แรงดัดพรี
$$C_{c2} = bf_{c2} \int_0^{c2} \left[\frac{2\phi x}{\epsilon_o} - \left(\frac{\phi x}{\epsilon_o} \right)^2 \right] dx$$

$$= bf_{c2} \frac{\phi}{\epsilon_o} \left[c_2^2 - \frac{\phi c_2^3}{3\epsilon_o} \right] \quad (2.13)$$

และ
$$\bar{x}_2 = \left\{ bf_{c2} \int_0^{c2} \left[\frac{2\phi x^2}{\epsilon_o} - \frac{\phi^2 x^3}{\epsilon_o^2} \right] dx \right\} / C_{c2}$$

$$= c_2 \frac{8\epsilon_o - 3\phi c_2}{12\epsilon_o - 4\phi c_2} \quad (2.14)$$

โมเมนต์ดัด
$$M = C_{c2} (d - c + \bar{x}_2) \quad (2.15)$$

ความโค้ง
$$\phi = \frac{\epsilon_o}{c} \quad (2.16)$$

โดยที่ $C_c = C_{c1} + C_{c2}$

f'_{c1} = กำลังอัดประลัยของแผ่นพื้นสำเร็จรูปหน้าตัดกลวง

f'_{c2} = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเททับหน้า

C_{c1} = แรงดัดพรีส่วนที่อยู่ในพื้นสำเร็จรูปหน้าตัดกลวง

C_{c2} = แรงดัดพรีส่วนที่อยู่ในคอนกรีตเททับหน้า

\bar{x}_1 = ระยะจากแกนสะเทินถึงศูนย์ถ่วงแรงอัดพรีส่วนที่อยู่ในพื้นสำเร็จรูป

\bar{x}_2 = ระยะจากแกนสะเทินถึงศูนย์ถ่วงแรงอัดพรีส่วนที่อยู่ในคอนกรีตเททับหน้า

c_1 = ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวรับแรงอัดนอกสุดของพื้นสำเร็จรูปหน้าตัดกลวง

c_2 = ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวรับแรงอัดนอกสุดของคอนกรีตเททับหน้า

การหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดกับความโค้ง จะพิจารณาที่แรงกระทำต่าง ๆ กัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เมื่อไม่มีแรงจากภายนอกมากระทำ ($M = 0$)

ขั้นตอนที่ 2 เมื่อความเครียดในคอนกรีตที่ระดับลวดอัดแรงเป็นศูนย์

ขั้นตอนที่ 3 ที่จุดเริ่มต้นของการแตกร้าว ($M = M_{cr}$)

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อความเครียดที่ผิวบนคอนกรีต มีค่าระหว่าง 0.001 ถึง 0.003

จากลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ จะเห็นว่าขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 อยู่ในช่วงก่อนที่หน้าตัดเกิดรอยแตกร้าว ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตยังคงเป็นเส้นตรง จึงสามารถใช้ทฤษฎีอีลาสติกวินิจฉัยได้ สำหรับขั้นตอนที่ 4 เกิดขึ้นหลังจากที่หน้าตัดเกิดรอยแตกร้าวพฤติกรรมจะไม่เป็นแบบอีลาสติก การวิเคราะห์จึงต้องใช้คุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- 1.) เริ่มต้นโดยการกำหนดความเครียดที่ผิวบนสุดของหน้าตัด, ϵ_0
- 2.) สมมติตำแหน่งของแกนสะเทิน, c
- 3.) จากค่า ϵ_0 และ c หาแรงอัดลัพท์, C_c และตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของแรง, \bar{x}
- 4.) คำนวณหาความเครียดในเหล็กเสริมธรรมดา, ϵ_s และลวดอัดแรง, ϵ_{ps} จากนั้นหาค่าแรงดึงที่เกิดขึ้น โดยอาศัยความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึงกับความเครียดของเหล็กเสริม
- 5.) ตรวจสอบค่าแรงอัดลัพท์, C_c และแรงดึง T ถ้าไม่เท่ากันให้ย้อนกลับไปเริ่มที่ข้อ 2 ใหม่ กระทำจนกระทั่งค่าแรงอัดลัพท์เท่ากับค่าแรงดึง
- 6.) เมื่อได้ค่า $C_c = T$ จึงสามารถคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัด และความโค้ง

2.2 พฤติกรรมบริเวณรอยต่อ

การศึกษาพฤติกรรมการดัดบริเวณรอยต่อโดยใช้แผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปเททับหน้าให้ต่อเนื่องกันที่บริเวณรอยต่อ มีช่วงคานแต่ละช่วงเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มี

พฤติกรรมเชิงประจักษ์และมีจุดวิกฤติที่รอยต่อซึ่งเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ ซึ่งการศึกษาวิจัยในรายงานนี้จะเน้นพฤติกรรมการต่อเนื่องที่รอยต่อให้มีกำลัง ความเหนียวทางโครงสร้าง และการกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัดจากรอยต่อไปสู่จุดวิกฤติข้างเคียงดังนี้

2.2.1 ดัชนีความเหนียว

ความเหนียวของหน้าตัดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อโครงสร้างทั่วไป ทั้งนี้เนื่องจากหน้าตัดที่มีความเหนียวเพียงพอจะสามารถเสียรูปได้มากกว่าอนวิบัติ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายต่อชีวิต และทรัพย์สินได้ นอกจากนี้การเกิดภาวะพลาสติกบนโครงสร้างจะต้องอาศัยหน้าตัดที่มีความเหนียวเพียงพอจึงจะเกิดขึ้นได้ ค่าดัชนีความเหนียวนิยามโดยอัตราส่วนของความโค้งประลัย, ϕ_u ต่อความโค้งที่จุดคราก, ϕ_y

$$\text{Ductility index} = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (2.17)$$

2.2.2 การกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัด

พิจารณาพื้นต่อเนื่องสองช่วงรับน้ำหนักบรรทุกที่กลางช่วงดังแสดงในรูปที่ 2.7(a) สมมุติให้แผ่นพื้นมีกำลังต้านทานแรงเฉือนอย่างเพียงพอ ดังนั้นการวิบัติจะเกิดจากการดัดเท่านั้น กรณีที่น้ำหนักกระทำต่อพื้นต่อเนื่องมีค่าน้อย กำลังดัดจะให้ค่าที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์แบบอีลาสติกดังแสดงในรูปที่ 2.7(c) เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงเพิ่มขึ้นกระทั่งกำลังดัดบริเวณรอยต่อเท่ากับกำลังดัดประลัย, M_u ดังแสดงในรูปที่ 2.7(d) การรับน้ำหนักของพื้นต่อเนื่องภายหลังรอยต่อเกิดจุดหมุนพลาสติก จะขึ้นอยู่กับค่าความเหนียวของระบบโครงสร้าง ถ้าวรอยต่อมีความเหนียวน้อยกำลังดัดจะลดลงอย่างรวดเร็วภายหลังเหล็กเสริมที่จุดเชื่อมต่องถึงจุดคราก และเกิดการวิบัติแบบฉับพลันโดยไม่สามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกได้ หากรอยต่อมีความเหนียวเพียงพอ โครงสร้างต่อเนื่องดังกล่าวยังคงสามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกได้ จากการกระจายแรงดัดบริเวณรอยต่อไปสู่หน้าตัดข้างเคียง กระทั่งกำลังดัดที่ช่วงกลางมีค่าเท่ากับกำลังดัดประลัย, M_u ดังแสดงในรูปที่ 2.7(e) โดยกำลังดัดบริเวณรอยต่อมีค่าคงเดิมตามที่แสดงในรูปที่ 2.7(f) พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเรียกว่า การกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัด ซึ่งจะมีประโยชน์ในแง่ที่เป็นการปรับค่าโมเมนต์ ณ หน้าตัดต่างๆ ของคานที่ได้จากการวิเคราะห์แบบอีลาสติก ถือเป็นกรนำเอากำลังของวัสดุโครงสร้างมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การวิเคราะห์เพื่อหากำลังดัดภายหลังโครงสร้างเกิดการกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัดเป็นเรื่องยุ่งยากและต้องใช้เวลามาก ดังนั้น ACI 318R-99 กำหนดให้ปรับเพิ่มหรือลดกำลังดัดบริเวณรอยต่อที่วิเคราะห์ด้วยวิธีอีลาสติกไม่เกินร้อยละ $20[1-(\rho-\rho')/\rho_u]$ โดยที่ ρ , ρ'

และ p_0 เป็นอัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงดึง อัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงอัด และอัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่ภาวะสมดุลตามลำดับ

2.2.3 การโอบรัด

พิจารณารอยต่อระหว่างแผ่นพื้นที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ตามที่แสดงในรูปที่ 2.8 คอนกรีตส่วนล่างที่รับแรงอัดอาจได้รับอิทธิพลการโอบรัดจากแท่นรองรับ ส่งผลให้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ผิวรับแรงอัดมีค่าสูงกว่ากำลังอัดประลัยที่ได้จากการทดสอบแท่งตัวอย่างรูปทรงกระบอก ตามที่แสดงในรูปที่ 2.9 เป็นแบบจำลองหน่วยแรงและความเครียดภายใต้การโอบรัดเสนอโดย Popovics, S.^[15] เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$f'_c(x) = \frac{f'_{cc} \times r}{(r - 1 + x^r)} \quad (2.18)$$

โดยที่ $f'_{cc} = f'_c + 4.1f_i$, $x = \epsilon_c / \epsilon_{cc}$ และ $r = E_c / (E_c - E_{sec})$ เมื่อ f'_{cc} คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตภายใต้การโอบรัด, f_i คือ ปฏิกริยาจากแท่นรองรับ, ϵ_c และ E_c คือ ความเครียดและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต, $\epsilon_{cc} = \epsilon_c [1 + 5(f'_{cc}/f'_c - 1)]$ และ $E_{sec} = f'_{cc} / \epsilon_{cc}$ การเปรียบเทียบการวิเคราะห์กำลังดัดของหน้าตัดโดยใช้แบบจำลองที่ไม่มีการโอบรัดตามที่เสนอของ Hognestad, E. กับแบบจำลองภายใต้การโอบรัดของ Popovics, S. จะทำให้เห็นถึงอิทธิพลของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตต่อความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดกับความโค้ง

2.2.4 แรงเฉือนทางราบที่รอยต่อ

พฤติกรรมเชิงประกอบของแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้าจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ก็ต่อเมื่อกำลังรับแรงเฉือนที่รอยต่อระหว่างผิวสัมผัสทั้งสองมีเพียงพอจะไม่เกิดการเคลื่อนแยกตัวที่รอยต่อ หากออกแบบรับแรงเฉือนในแนวราบไม่เพียงพอ เมื่อชิ้นส่วนนี้รับน้ำหนักก็จะเกิดการเคลื่อนแยกตัวที่รอยต่อนั้นและพฤติกรรมเชิงประกอบก็จะไม่เกิดขึ้น การพิจารณาหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้น อาจใช้วิธีแบบอิลาสติกโดยพิจารณาแรงบนชิ้นส่วนยาว dx ซึ่งรับโมเมนต์ดัดที่แตกต่างกันที่ปลายทั้งสอง dM ตามที่แสดงในรูปที่ 2.10 แรงอัดลัพท์บนหน้าตัด 1 และ 2 สามารถหาได้โดยวิธีอินทิเกรตความเค้นดัด แรงทั้งสองมีค่าต่างกันเท่ากับความเค้นดัดที่แตกต่างกันที่ปลายทั้งสอง และมีค่าเท่ากับแรงเฉือนในทางราบ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความเค้นดัดบนหน้าตัด 1 และ 2 ; } \sigma_1 = \frac{My}{I}, \quad \sigma_2 = \frac{(M + dM)y}{I}$$

แรงอัดลัพท์บนหน้าตัด 1 ; $F_1 = \int \sigma_1 dA = \int \frac{My}{I} dA$

แรงอัดลัพท์บนหน้าตัด 2 ; $F_2 = \int \sigma_2 dA = \int \frac{(M + dM)y}{I} dA$

แรงเฉือนทางราบ $F_3 = F_2 - F_1$

$$F_3 = \int \frac{(M + dM)y}{I} dA - \int \frac{My}{I} dA = \int \frac{dMy}{I} dA$$

เมื่อ τ เป็นค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดกว้าง b ยาว dx และมีค่าเท่ากับผลต่างของแรงอัดลัพท์

$$F_3 = \tau b dx$$

แทนค่า F_3 ; $\tau = \frac{dM}{dx} \frac{1}{I} \int y dA$

หน่วยแรงเฉือนประลัพท์ที่เกิดขึ้น ; $\tau = \frac{VQ}{Ib}$ (2.19)

โดยที่ $V =$ แรงเฉือนในแนวตั้งจากน้ำหนักที่มากกระทำ, กก.

$Q =$ โมเมนต์ครั้งแรกของพื้นที่, ซม.³

$I =$ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเชิงประกอบ, ซม.⁴

$b =$ ความกว้างของพื้นที่รับแรงเฉือน, ซม.

2.2.5 ความยาวระยะฝั่งพื้นฐานของเหล็กเสริมรับแรงดึง

เสริมเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องขยายความยาวออกไปเป็นระยะ l_d จากหน้าตัดใดๆ ที่ต้องการให้เกิดการพัฒนากำลังการรับแรงในเหล็กเสริม ซึ่งระยะ l_d ที่ต้องการก็เพื่อที่จะถ่ายแรงจากเหล็กเสริมไปสู่คอนกรีตโดยแรงยึดเหนี่ยว โดยไม่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าว ได้มีการสังเกตว่าการให้ระยะยึดรั้งเพียงพอสำหรับเหล็กเสริมแล้ว การวิบัติที่เกิดจากหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจากการดัดก็จะไม่เกิดขึ้น ดังนั้นระยะพัฒนากำลังของเหล็กเสริมหรือระยะยึดรั้งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_d = \frac{A_b f_y}{U_n} \quad (2.20)$$

โดยที่ U_n = แรงยึดเหนี่ยวต่อความยาวของเหล็กเสริม, กก./ซม.

$$A_b = \text{พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม, ซม.}^2$$

การทดสอบหาขนาดของแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยของหน้าตัดคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมเพียงเส้นเดียว พบว่า $U_n = 25\sqrt{f'_c}$ (กก./ซม.) สำหรับหน้าตัดที่มีเหล็กเสริมหลายเส้นในชั้นเดียวกัน หน่วยแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยจะลดลงประมาณร้อยละ 80 ของแรงยึดเหนี่ยวของหน้าตัดคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมเพียงเส้นเดียว และเพื่อความปลอดภัย ACI 318R-99 กำหนดให้เพิ่มความยาวระยะฝังเพิ่มอีกร้อยละ 15 แทนการใช้ตัวคูณลดกำลัง, ความยาวที่ได้เรียกว่าระยะฝังเพิ่มพื้นฐานของเหล็กรับแรงดึง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_d = \frac{0.06 A_b f_y}{\sqrt{f'_c}} \quad (2.21)$$

2.3 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดจากผลทดสอบ

การทดสอบโครงสร้างโดยให้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตจนถึงจุดวิบัติ จะทำให้เกิดแรงภายในที่เป็นแรงดัดและแรงเฉือนตามสภาพการให้น้ำหนัก จากความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัวที่ช่วงกลาง สามารถแปลงเป็นความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งที่หน้าตัดใดๆ ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณดังนี้

ก. การหาค่าความโค้ง

ในช่วงก่อนและหลังหน้าตัดคอนกรีตเกิดการแตกร้าว สามารถอธิบายพฤติกรรมของโครงสร้างได้ด้วยความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ในรูปของสมการดิฟเฟอเรนเชียลดังนี้

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI_{\text{eff}}} \quad (2.22)$$

โดยที่ y = การแอ่นตัวในแนวดิ่ง

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \text{ความโค้ง (Curvature)}$$

M = โมเมนต์ดัด

EI_{eff} = สติฟเนสประสิทธิภาพ

พิจารณาแบบจำลองของพื้นต่อเนื่องสองช่วงตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 คำนวณหาความโค้งที่กึ่งกลางช่วงและบริเวณรอยต่อ โดยอาศัยหลักการรวมผลของแรงที่กระทำที่ตำแหน่งกึ่งกลางช่วง และแรงดัดที่ปลายของแผ่นพื้น

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{-P_D(x-L)}{2EI_{\text{eff}}} - \frac{(3P_D L^3 + 3P_D L^2 b - P_E L^2 b)x}{16L(L+b)^2 EI_{\text{eff}}} \quad (2.23)$$

คำนวณหาการแอ่นตัวของแผ่นพื้น โดยวิธีอินทิเกรตสมการที่ 2.23 พร้อมกับเงื่อนไขขอบเขต

$$y = \frac{-P_D}{48EI_{\text{eff}}}(4x^3 - 12Lx^2 + 9L^2x - L^3) - \frac{(3P_D L^3 + 3P_D L^2 b - P_E L^2 b)(x^3 - L^2x)}{96L(L+b)^2 EI_{\text{eff}}} \quad (2.24)$$

สติฟเนสประสิทธิภาพ, EI_{eff}

$$EI_{\text{eff}} = \frac{1}{y_D} \left\{ \frac{-P_D}{48}(4x^3 - 12Lx^2 + 9L^2x - L^3) - \frac{(3P_D L^3 + 3P_D L^2 b - P_E L^2 b)(x^3 - L^2x)}{96L(L+b)^2} \right\} \quad (2.25)$$

ความโค้งที่กึ่งกลางช่วงและรอยต่อ ได้จากการแทนค่า EI_{eff} และค่าของ x เท่ากับ $L/2$ และ L ในสมการที่ 2.23

$$\text{ที่ระยะ } x = L/2 ; \quad \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P_D L}{4EI_{\text{eff}}} - \frac{(3P_D L^3 + 3P_D L^2 b - P_E L^2 b)}{32(L+b)^2 EI_{\text{eff}}} \quad (2.26)$$

$$x = L ; \quad \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(3P_D L^3 + 3P_D L^2 b - P_E L^2 b)}{16(L+b)^2 EI_{\text{eff}}} \quad (2.27)$$

ความโค้งที่รอยต่อและช่วงกลางของพื้นช่วงที่สอง อาจคำนวณได้ด้วยวิธีเดียวกัน เริ่ม โดยแทนค่ากำลังดัดในสมการที่ 2.22 จากนั้นจึงคำนวณหาการแอ่นตัว สติฟเนสประสิทธิภาพ และค่าความโค้งดังนี้

$$\text{ที่ระยะ } x = 0 ; \quad \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(P_D L^2 b - 3P_E L^3 - 3P_E L^2 b)}{16(L+b)^2 E_{\text{eff}}} \quad (2.28)$$

$$x = L/2 ; \quad \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P_E L}{4E_{\text{eff}}} + \frac{(P_D L^2 b - 3P_E L^3 - 3P_E L^2 b)}{32(L+b)^2 E_{\text{eff}}} \quad (2.29)$$

โดยที่ L = ความยาวช่วงของการทดสอบ

b = ความกว้างของฐานรองรับคอนกรีต

P_D, P_E = น้ำหนักบรรทุกกระทำที่จุด D, E ตามลำดับ

ข. กำลังดัดบริเวณรอยต่อ

โครงสร้างต่อเนื่องหากต้องรับน้ำหนักเกินกว่าน้ำหนักใช้งาน บริเวณที่วิกฤติกว่าจะเกิดรอยแตกร้าวก่อน ในทำนองเดียวกันค่าสตีเฟนส์ในบริเวณที่เกิดการแตกร้าวจะมีค่าลดลงด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความต่อเนื่องโดยวิธีอีลาสติก พบว่าได้ค่าที่แตกต่างกับกำลังดัดที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากการวิเคราะห์แบบอีลาสติกได้สมมุติให้สตีเฟนส์มีค่าคงที่ ดังนั้นการคำนวณหากำลังดัดที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัวที่ช่วงกลาง จะใช้หลักการสมดุลของโครงสร้างตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ช่วง } AB_1 ; \quad M_{B1} = 2\left(\frac{P_D L}{4} - M_B\right) \quad (2.30)$$

$$\text{และช่วง } B_2C ; \quad M_{B2} = 2\left(\frac{P_E L}{4} - M_E\right) \quad (2.31)$$

โดยที่ P_D, P_E = น้ำหนักที่กลางช่วงแผ่นที่หนึ่งและแผ่นที่สอง

M_D, M_E = กำลังดัดที่กลางช่วง จากการวิเคราะห์ความเครียดสอดคล้องของหน้าตัด

บทที่ 3

การทดสอบ และผลการทดสอบ

การศึกษาวิจัยด้วยการทดสอบแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดกลวง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการต่อเนื่องและพฤติกรรมเชิงประกอบของโครงสร้างแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูป 2 ช่วง เทียบหน้าให้ต่อเนื่องกันที่บริเวณรอยต่อระหว่าง 2 ช่วงนั้น ได้พิจารณาแยกรายละเอียดออกเป็นรายการทดสอบ การเตรียมตัวอย่าง วิธีการทดสอบ และการรายงานผล

3.1 รายการทดสอบ

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดัดของรอยต่อแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดกลวงตามที่แสดงในตารางที่ 3.1 แยกออกเป็น 3 ชุดการทดสอบ ชุดแรกกำหนดให้ปริมาณเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อเป็นตัวแปร โดยให้ระยะห่างระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปคงที่ๆ 15 ซม. ชุดที่ 2 กำหนดให้ระยะห่างระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปเป็นตัวแปร โดยให้ปริมาณเหล็กเสริมคงที่ๆ 0.28 ของปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุล และชุดสุดท้ายเป็นการทดสอบเชิงเปรียบเทียบพฤติกรรมของแผ่นพื้นสำเร็จรูปช่วงเดียวโดยมีคอนกรีตเททับหน้า

ชุดที่ 1 ปริมาณเหล็กเสริมที่รอยต่อเป็นตัวแปร

ตัวอย่างทดสอบในชุดนี้มีทั้งหมด 5 ตัวอย่างทดสอบ คือ HC-35-9B, HC-35-19B, HC-35-28B, HC-35-52B และ HC-35-98B ทำการทดสอบแบบต่อเนื่องสองช่วงและแบบคานยื่น ปริมาณเหล็กที่ใช้จะแตกต่างกันคือ 0.09, 0.20, 0.27, 0.66 และ 0.98 ของปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุล ตามลำดับ วัตถุประสงค์ของการทดสอบชุดนี้เพื่อศึกษากำลังดัด ความเหนียวทางโครงสร้าง การกระจายตัวของโมเมนต์ดัด การแตกร้าว และการกระจายรอยแตกร้าวโดยเฉพาะที่บริเวณรอยต่อ การทดสอบได้ใช้พื้นสำเร็จรูปหน้าตัดกลวงมีความหนา 15 ซม. กว้าง 60 ซม. ยาว 200 และ 400 ซม. เสริมลวดอัดแรงขนาด 5 มม. จำนวน 4 เส้น และลวดเกลียวอัดแรงขนาด 3/8 นิ้ว จำนวน 2 เส้น ตัวอย่างทดสอบวางบนขาข้างละ 10 ซม. รอยต่อกว้าง 15 ซม. รวมความกว้างของแท่นรองรับ 35 ซม. ใช้คอนกรีตเททับหน้าหนา 5 ซม. และเสริมเหล็กปลอก RB6 @ 10 ซม. ป้องกันการวิบัติจากแรงเฉือน

ชุดที่ 2 ความกว้างรอยต่อเป็นตัวแปร

ตัวอย่างทดสอบในชุดนี้คือ HC-25-28B, HC-45-28B และจะใช้เปรียบเทียบพฤติกรรมกรรมการดัดกับพื้น HC-35-28B แผ่นพื้นทดสอบมีความหนา ความกว้าง ความยาว และปริมาณลวดอัดแรงที่เหมือนกับแผ่นพื้นชุดที่ 1 การทดสอบชุดนี้จะศึกษากำลังดัดบริเวณรอยต่อที่มีระยะห่างของชิ้นส่วนสำเร็จรูปต่างกันว่า 5, 15 และ 25 ซม. พื้นสำเร็จวางบนบ่าข้างละ 10 ซม. จึงกำหนดบริเวณรอยต่อกว้าง 25, 35 และ 45 ซม. ตามลำดับ คอนกรีตเททับหน้าหนา 5 ซม. เสริมเหล็กปลอก RB6 @ 10 ซม. ป้องกันการวิบัติจากแรงเฉือน

ชุดที่ 3 ทดสอบกำลังแผ่นพื้นช่วงเดียว

ตัวอย่างทดสอบในชุดนี้มีเพียงตัวอย่างเดียวคือ HC-SS ทดสอบแบบพื้นช่วงเดียว โดยให้ปลายของพื้นสำเร็จวางบนบ่ารองรับที่สามารถหมุนและขยับตัวได้โดยอิสระ แผ่นพื้นทดสอบมีความหนา ความกว้าง ความยาว และปริมาณลวดอัดแรงเหมือนกับพื้นชุดที่ 1 ทุกประการ ใช้คอนกรีตเททับหน้าหนา 5 ซม. เสริมเหล็กป้องกันการวิบัติจากแรงเฉือนด้วย RB6 @ 10 ซม. เป้าหมายของการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมกรรมการดัดที่กลางช่วง ด้วยการบรรทุกน้ำหนักตั้งแต่เริ่มแรกจนเกิดการวิบัติ

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

3.2.1 วัสดุใช้ทำตัวอย่างทดสอบ

ก. แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป

แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปหน้าตัดคดงวงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผลิตจากบริษัท ผลิตภัณฑ์คอนกรีตซีแพค จำกัด มีความหนา 15 ซม. กว้าง 60 ซม. และยาว 2 ขนาดคือ ยาว 200 และ 400 ซม. ตามแต่ที่จะใช้ การผลิตเป็นระบบคอนกรีตอัดแรง เสริมด้วยลวดอัดแรงผิวเรียบขนาด 5 มม. 4 เส้น และลวดเกลียวอัดแรงขนาด 3/8 นิ้ว 2 เส้น น้ำหนักเฉลี่ยต่อความยาว 133 กก./ม. คอนกรีตที่ใช้กำหนดให้มีการยุบตัวเป็นศูนย์ มีกำลังอัดทดสอบที่ 28 วันไม่น้อยกว่า 350 กก./ซม.² และกำลังอัดขณะตัดลวดไม่น้อยกว่า 250 กก./ซม.²

ข. แบบหล่อคอนกรีต

ส่วนประกอบหลักของแบบหล่อคอนกรีต คือ ชั้นส่วนแผ่นผิวที่ประกอบด้วยเคร่าไม้รวมกันเป็นแผงสำเร็จรูปดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก.) แผ่นผิวของแบบหล่อจะใช้แผ่นไม้อัดหนา 10 มม. ยึดด้วยไม้เคร่าขนาด $1\frac{1}{2}$ " x 2" ทุกระยะ 37.5 ซม. การเข้าแบบจะใช้เหล็กรัดรูปตัวที่สอดเข้าในรูของเคร่าแล้วขันน็อตยึดให้ได้ขนาด การเข้าแบบในลักษณะนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ตะปูตอกยึด ทำให้สามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนของความกว้างและความหนาของคอนกรีตเททับหน้าอยู่ที่ ± 0.2 ซม.

ค. ลวดอัดแรงและเหล็กเสริม

ลวดอัดแรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือที่เป็นลวดอัดแรงผิวเรียบขนาด 5 มม. ผลิตตามมาตรฐาน มอก. 95-2534 มีกำลังคราก 16,509 กก./ซม.² กำลังประลัย 19,168 กก./ซม.² ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 2.03×10^6 กก./ซม.² และมีการยืดตัว 0.91 ซม. และลวดเกลียวอัดแรง 7 เส้นขนาด 3/8 นิ้ว ผลิตตามมาตรฐาน มอก. 420-2534 มีกำลังคราก 16,607 กก./ซม.² กำลังประลัย 20,098 กก./ซม.² ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 2.01×10^6 กก./ซม.² และมีการยืดตัว 0.46 ซม. ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 หากำลังครากได้จากความเครียดที่ 0.01 ตามมาตรฐาน ASTM A421

สำหรับเหล็กเสริมธรรมดาที่เสริมบริเวณจุดต่อระหว่างแผ่นพื้นสำเร็จรูป เพื่อเทคอนกรีตทับหน้าให้มีการต่อเนื่องเป็นเหล็กข้ออ้อย SD40 ขนาด 12 มม. และ 16 มม. ผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 24-2527 ได้สุ่มตัวอย่างเพื่อทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เหล็ก DB12 มีกำลังคราก 4,814 กก./ซม.² กำลังประลัย 6,439 กก./ซม.² ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 2.08×10^6 กก./ซม.² และมีอัตราการยืดตัว 19.25% สำหรับเหล็ก DB16 มีกำลังคราก 5,602 กก./ซม.² กำลังประลัย 6,339 กก./ซม.² ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 2.01×10^6 กก./ซม.² และมีอัตราการยืดตัว 17.33%

ง. คอนกรีตเททับหน้า

คอนกรีตเททับหน้ากำหนดค่ากำลังอัดของมาตรฐานตัวอย่างรูปทรงกระบอก 365 กก./ซม.² มีส่วนผสมของคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง) 410 กก. หยาบหยาบ 700 กก. มวลรวมหยาบขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว 1,050 กก. มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.48 ให้การยุบตัวระหว่าง 12.50 ± 2.50 ซม. รายละเอียดต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 3.2 จากการเก็บตัว

อย่างทดสอบรูปทรงกระบอกที่ 28 วัน มีระดับกำลัง 346, 363 และ 375 กก./ซม.² ให้กำลังอัดเฉลี่ย 361 กก./ซม.² ค่า SD. 11.85 หนึ่งได้มีการทดสอบที่ 7, 14 และ 21 วัน พบว่าได้กำลังอัดเฉลี่ย 235, 289 และ 325 กก./ซม.² ตามลำดับ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างทรงกระบอกที่ 28 วัน เท่ากับ 2.82×10^5 , 2.89×10^5 และ 2.94×10^5 กก./ซม.² ตามลำดับ

3.2.2 การหล่อตัวอย่างทดสอบ

ก่อนเทคอนกรีตทับหน้าเชื่อมรอยต่อพื้นทดสอบ ต้องมีการตรวจสอบตำแหน่ง ระยะ และมิติต่างๆ ให้ถูกต้อง อยู่ในขนาดความคลาดเคลื่อนที่กำหนดของแบบตัวอย่างอีกครั้ง เพื่อให้ได้ขนาดตามที่กำหนดไว้ จากนั้นจะทำความสะอาดผิวแผ่นพื้นด้วยการเป่าลมหรือล้างด้วยน้ำ เมื่อเทคอนกรีตจะต้องจี้ให้มวลรวมกระจายสม่ำเสมอทั่วทุกซอกทุกมุมของรอยต่อและรอบเหล็กเสริม มีการเก็บแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 15x30 ซม.² จำนวน 6 แท่งของแต่ละตัวอย่างทดสอบ การเทคอนกรีตต้องระวังเงาวัตความเครียดแบบไฟฟ้าบนเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อแผ่นพื้นสำเร็จรูปเพื่อป้องกันการชำรุดเสียหายได้ แต่งผิวหน้าตัวอย่างทดสอบให้เรียบ จากนั้นจะบ่มคอนกรีตในแบบหล่อภายใต้บรรยากาศประมาณ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกทั้งหมดแล้วจึงบ่มขึ้นโดยใช้กระสอบชุมน้ำคลุมไว้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน จากนั้นจะสามารถเตรียมการเพื่อทดสอบหาพฤติกรรมต่าง ๆ ต่อไป

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การเตรียมแท่นทดสอบ

การทดสอบโดยทั่วไปจะให้ตัวอย่างทดสอบที่หล่อแล้วอยู่กับที่ มีระยะและขนาดตามที่กำหนดในรายการทดสอบ ในการเตรียมแท่นทดสอบทำโดยการตั้งแท่นทดสอบให้ตำแหน่งการบรรจุทุกน้ำหนักตามที่ต้องการ หนึ่งตัวอย่างทดสอบจะต้องทำสี่ปูนขาวเพื่อสามารถตรวจสอบการแตกร้าวได้ง่ายขึ้น ส่วนการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ตามตำแหน่งดังที่แสดงไว้ในรูป 3.1 (ข.), 3.2 (ข.) และ 3.3 (ข.) ซึ่งประกอบด้วย เครื่องวัดการเปลี่ยนระยะในแนวตั้งแบบไฟฟ้า (LVDT's) มีระยะเคลื่อนตัวสูงสุด 40 มม. และมีความละเอียด 0.01 มม. ทั้งนี้มีการตรวจเทียบด้วยเกจวัดการแอนตัว (Dial gauge) การบรรจุทุกน้ำหนักใช้แม่แรงขนาด 30 ตัน ทำหน้าที่ถ่ายแรงจากเฟรม ตรวจวัดน้ำหนักบรรทุกด้วย Load Cell ระบบไฟฟ้าขนาด 25 ตัน มีความละเอียด 0.001 ตัน คานเหล็กที่ใช้เป็นโครงเฟรมถ่ายน้ำหนักลงพื้นวางคร่อมตัวอย่างทดสอบ ในลักษณะที่สมมาตรไม่มีการบิดงอหรือเอียง นอกจากนี้ยังมีการตรวจวัดการยืดและหดตัวเชิงกลของตัวอย่างทดสอบที่

หน้าตัดวิกฤต โดยใช้เม็ตรวดความเครียด (Demec) ณ ตำแหน่งตามที่แสดงในรูป เพื่อเปรียบเทียบกับการวัดแบบไฟฟ้า

3.3.2 การทดสอบ

ก. การทดสอบแผ่นพื้นสำเร็จรูปช่วงเดียว

การทดสอบแผ่นพื้นช่วงเดียวตามรายการทดสอบพื้นฐานชุดที่ 3 ตัวอย่างทดสอบมีขนาดความกว้าง 70 ซม. หนา 20 ซม. และช่วงทดสอบยาว 375 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.3 มีขั้นตอนการให้น้ำหนักบรรทุกดังนี้ ขั้นที่ 1 ให้น้ำหนักกระทำในช่วงยึดหยุนที่กลางช่วงอย่างช้าๆ ครั้งละประมาณ 200 กก. กระทั่งกำลังดัดที่ช่วงกลางมีค่าประมาณ 60% ของกำลังดัดแตกร้าว จากนั้นถอนน้ำหนักทั้งหมดออก ตรวจสอบดูการแอ่นตัวที่สามารถคืนตัวได้ ขั้นตอนที่ 2 ทำการทดสอบจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ เริ่มจากเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงอย่างช้าๆ ครั้งละประมาณ 200 กก. เมื่อเกิดการแตกร้าวที่กลางช่วงของพื้นสำเร็จ การเพิ่มน้ำหนักจะถูกเปลี่ยนเป็นการเพิ่มการแอ่นตัว (Deflection control) ในอัตราครั้งละประมาณ 2.5 มม. โดยที่แต่ละขั้นตอนการเพิ่มน้ำหนักจะมีการตรวจวัดการยึดและหดตัวเชิงกลด้วยเม็ตรวดความเครียด พร้อมกับสังเกตรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นแล้วบันทึกภาพถ่ายไว้

ข. การทดสอบพื้นต่อเนื่องสองช่วง

การทดสอบพื้นต่อเนื่องสองช่วงตามรายการทดสอบของพื้นฐานชุดที่ 1 และ 2 ที่มีปริมาณเหล็กเสริมและความกว้างของรอยต่อเป็นตัวแปร ตัวอย่างทดสอบมีขนาดความกว้าง 70 ซม. หนา 20 ซม. และช่วงทดสอบยาว 375 ซม. การทดสอบจะให้น้ำหนักที่กลางช่วงแผ่นที่หนึ่งและกลางช่วงแผ่นที่สองตามที่แสดงในรูปที่ 3.1 มีขั้นตอนการให้น้ำหนักทั้งหมด 5 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นที่ 1 เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงแผ่นที่หนึ่งประมาณ 60% ของกำลังดัดแตกร้าว จากนั้นถอนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดออก ขั้นตอนที่ 2 เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงแผ่นที่สองประมาณ 60% ของกำลังดัดแตกร้าว ขั้นตอนที่ 3 เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงแผ่นที่หนึ่ง กระทั่งกำลังดัดที่กลางช่วงแผ่นที่หนึ่งมีค่าประมาณ 60% ของกำลังดัดแตกร้าว จากนั้นเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงแผ่นที่สอง กระทั่งที่กลางช่วงของพื้นสำเร็จทั้งสองด้านมีกำลังดัด 60% ของกำลังดัดแตกร้าว แล้วจึงถอนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดออก ขั้นตอนที่ 4 เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงแผ่นที่สองประมาณ 60% ของกำลังดัดแตกร้าว จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงแผ่นที่หนึ่งประมาณ 60% ของกำลังดัดแตกร้าว ขั้นตอนที่ 5 จะให้น้ำหนักที่กลางช่วงทั้งสองด้านพร้อมกันอย่างช้าๆ ครั้งละประมาณ 200 กก. ภายหลังจากที่เกิดรอยแตกร้าวบริเวณกลางช่วงของพื้นสำเร็จ การแอ่นตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วขณะที่เพิ่มน้ำหนัก

บรรทุกในอัตราคงเดิม ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกครั้งละประมาณ 200 กก. จะถูกเปลี่ยนเป็นการเพิ่มการแอ่นตัวในอัตราครั้งละประมาณ 2.5 มม. ในแต่ละขั้นตอนการให้น้ำหนักให้สังเกตรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นแล้วบันทึกภาพถ่ายไว้ พร้อมกับตรวจวัดการยืดและหดตัวเชิงกลด้วยเม็ตระดุมวัดความเครียดจนกระทั่งแผ่นพื้นเกิดวิบัติ

ค. การทดสอบแบบคานยื่น สำหรับชุด 1

การทดสอบแบบคานยื่นตามรายการทดสอบของชุดที่ 1 ตัวอย่างทดสอบมีขนาดความกว้าง 70 ซม. หนา 20 ซม. มีช่วงทดสอบยาว 375 ซม. และปลายคานยื่นจากหน้าแท่นรองรับ 190 ซม. การทดสอบได้ให้น้ำหนักที่กลางช่วงและที่ระยะยื่นจากหน้าแท่นรองรับ 150 ซม. ตามที่แสดงในรูปที่ 3.2 มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ให้น้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นพื้นเพื่อเคลื่อนย้ายแท่นรองรับที่ปลายยื่นออก จากนั้นถอนน้ำหนักที่กลางช่วงออก ขั้นตอนที่ 2 เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงประมาณ 60% ของกำลังดัดแตกร้าว จากนั้นค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่ปลายยื่น กระทั่งบริเวณรอยต่อมีกำลังดัดประมาณ 60% ของกำลังที่จุดคราก ขั้นตอนที่ 3 เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงและปลายยื่น กระทั่งบริเวณรอยต่อวิบัติ สังเกตรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นแล้วบันทึกภาพถ่ายไว้ และวัดการยืดและหดตัวเชิงกลด้วยเม็ตระดุมวัดความเครียด

3.4 ผลการทดสอบ

3.4.1 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-9B

ก่อนทดสอบตรวจดูไม่พบรอยแตกร้าวที่ตัวอย่างทดสอบแต่อย่างใด มีผลการทดสอบแรงกับการแอ่นตัว ตามที่แสดงในรูปที่ 3.7 แยกเป็นขั้นตอนการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่งเท่ากับ 2,009 กก. เกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อ 1 รอย วัดการแอ่นตัวที่ช่วงกลางของแผ่นที่หนึ่งและแผ่นที่สองได้ 0.72 และ -0.30 มม. และความเครียดของเหล็กเสริมที่บริเวณรอยต่อเท่ากับ 40×10^{-6} ตามที่แสดงในรูปที่ 3.15 ขั้นตอนที่ 2 เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สอง 4,000 กก. เกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นอีก 1 รอย การแอ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 0.72 และ -0.30 มม. ความเครียดของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อ 40×10^{-6} ขั้นตอนที่ 3 ให้น้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่งเท่ากับ 4,000 กก. จากนั้นค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สอง จำนวนรอยแตกร้าวที่รอยต่อเท่าเดิม แต่จะมีขนาดความกว้างและความยาวเพิ่มขึ้น ขั้นตอนที่ 4 เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สองเท่ากับ 4,000 กก. และค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่ง จำนวนรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อเท่าเดิม และตรวจดูไม่พบ

รอยแตกร้าวที่กลางช่วงของตัวอย่างทดสอบแต่อย่างใด ขึ้นตอนที่ 5 เมื่อน้ำหนักที่ช่วงกลางของแผ่นที่หนึ่งและแผ่นที่สองเท่ากับ 5,007 และ 4,976 กก. ตรวจสอบดูพบแผ่นพื้นมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่ง การแ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 3.89 และ 3.70 มม. ความเครียดในเหล็กเสริม $2,070 \times 10^{-6}$ เมื่อเพิ่มน้ำหนักเพียงเล็กน้อยการแ่นตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 200 กก. จะถูกเปลี่ยนเป็นการเพิ่มการแ่นตัวในอัตราครั้งละ 2.5 มม. เหล็กเสริมเริ่มครากเมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงเท่ากับ 6,092 และ 6,030 กก. การแ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 10.71 และ 11.00 มม. เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงเท่ากับ 7,202 และ 7,599 กก. ลวดอัดแรงที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่หนึ่งขาดออกจากกัน วัดการแ่นตัวเท่ากับ 54.32 และ 54.70 มม. ความเครียดในเหล็กเสริม $12,600 \times 10^{-6}$ เพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกต่อไปกระทั่งลวดอัดแรงที่ช่วงกลางขาดออกจากกันจนหมด สังเกตลักษณะและขนาดของการแตกร้าวพบว่าแผ่นพื้นวิบัติแบบดัด นับจำนวนของรอยแตกร้าวทั้งหมดได้เท่ากับ 12 รอย มีขนาดโตสุดประมาณ 11 มม. ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.22

3.4.2 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-19B

พื้น HC-35-19B มีความสัมพันธ์ของแรงกับการแ่นตัว และความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง ตามที่แสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.16 ก่อนทดสอบตรวจดูไม่พบรอยแตกร้าวที่ตัวอย่างทดสอบแต่อย่างใด แยกการทดสอบเป็นขั้นตอนดังนี้ ขึ้นตอนที่ 1 เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่งเท่ากับ 2,273 กก. เกิดรอยแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อ 1 รอย ที่ช่วงกลางของแผ่นที่หนึ่งและแผ่นที่สองมีการแ่นตัว 1.50 และ -0.30 มม. ความเครียดในเหล็กเสริมที่บริเวณรอยต่อ 30×10^{-6} ขึ้นตอนที่ 2 เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สอง 4,000 กก. ตรวจดูไม่พบรอยแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด การแ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ -0.40 และ 3.40 มม. ความเครียดของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นเป็น 60×10^{-6} ขึ้นตอนที่ 3 เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่งเท่ากับ 4,000 กก. และค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สอง จำนวนรอยแตกร้าวที่รอยต่อเท่าเดิม แต่จะมีขนาดความกว้างและความยาวเพิ่มขึ้น เมื่อถอนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดออก ที่ช่วงกลางมีการแ่นตัวที่มีสามารถคืนตัวได้เท่ากับ 0.70 และ 0.80 มม. และความเครียดของเหล็กเสริม $1,000 \times 10^{-6}$ ขึ้นตอนที่ 4 เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สองเท่ากับ 4,000 กก. และค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่งจนถึง 4,000 กก. จำนวนรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อเท่าเดิม และตรวจดูไม่พบรอยแตกร้าวที่กลางช่วงของตัวอย่างทดสอบแต่อย่างใด ขึ้นตอนที่ 5 เมื่อน้ำหนักที่ช่วงกลางของแผ่นที่หนึ่งและแผ่นที่สองเท่ากับ 4,929 และ 4,836 กก. ตรวจสอบดูพบแผ่นพื้นมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่ง การแ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 3.70 และ 4.00 มม. ความเครียดในเหล็กเสริม $1,250 \times 10^{-6}$ ที่ภาวะนี้การเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 200 กก. จะถูกเปลี่ยนเป็นการเพิ่มการแ่นตัวในอัตราครั้งละ 2.5 มม. เหล็กเสริมเริ่มครากเมื่อน้ำ

หนักที่กลางช่วงเท่ากับ 7,064 และ 6,849 กก. การแ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 15.70 และ 15.80 มม. เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงเท่ากับ 8,515 และ 8,044 กก. ลวดอัดแรงที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่หนึ่งขาดออกจากกัน วัดการแ่นตัวเท่ากับ 57.90 และ 57.20 มม. ความเครียดในเหล็กเสริม $2,620 \times 10^{-6}$ การทดสอบจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งลวดอัดแรงขาดออกจากกันจนหมด สังเกตลักษณะและขนาดของการแตกร้าวพบว่าแผ่นพื้นวิบัติแบบดัด นับจำนวนของรอยแตกร้าวทั้งหมดได้เท่ากับ 20 รอย มีขนาดโตสุดประมาณ 8 มม. ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.23

3.4.3 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-28B

ก่อนทดสอบตรวจดูไม่พบรอยแตกร้าวที่ตัวอย่างทดสอบแต่อย่างใด พื้น HC-35-28B มีความสัมพันธ์ของแรงกับการแ่นตัว และความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง ตามที่แสดงในรูปที่ 3.9 และ 3.17 แยกการทดสอบเป็นขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 เพิ่มน้ำหนักอย่างช้าๆ ที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่ง 2,303 กก. ตรวจดูพบรอยแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อ 1 รอย ที่ช่วงกลางของแผ่นที่หนึ่งและแผ่นที่สองวัดการแ่นตัวได้ 1.49 และ -0.60 มม. ความเครียดในเหล็กเสริมที่บริเวณรอยต่อ 10×10^{-6} ขั้นตอนที่ 2 เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สอง 4,000 กก. ตรวจดูพบรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่บริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้น 5 รอย การแ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ -0.91 และ 2.40 มม. ความเครียดของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นเป็น 560×10^{-6} ขั้นตอนที่ 3 เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่หนึ่งเท่ากับ 4,000 กก. และค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่สองจนถึง 4,000 กก. มีจำนวนรอยแตกร้าวที่รอยต่อเพิ่มขึ้นอีก 7 รอย การแ่นตัวที่ช่วงกลางเท่ากับ 2.39 และ 2.10 มม. ความเครียดของเหล็กเสริมที่บริเวณรอยต่อ $1,400 \times 10^{-6}$ เมื่อถอนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดออก ที่ช่วงกลางมีการแ่นตัวที่สามารถคืนตัวได้เท่ากับ 0.28 และ 0.20 มม. และความเครียดของเหล็กเสริม 670×10^{-6} ขั้นตอนที่ 4 เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สองเท่ากับ 4,000 กก. และค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่งจนถึง 4,000 กก. จำนวนรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อเท่าเดิม และตรวจดูไม่พบรอยแตกร้าวที่กลางช่วงของตัวอย่างทดสอบแต่อย่างใด การแ่นตัวที่ช่วงกลางเท่ากับ 2.34 และ 2.30 มม. ความเครียดของเหล็กเสริม $1,440 \times 10^{-6}$ ขั้นตอนที่ 5 เมื่อน้ำหนักที่ช่วงกลางของแผ่นที่หนึ่งและแผ่นที่สองเท่ากับ 5,475 และ 5,498 กก. ตรวจสอบดูพบแผ่นพื้นมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่ง การแ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 3.37 และ 3.20 มม. ความเครียดในเหล็กเสริม $1,710 \times 10^{-6}$ ที่ภาวนี้การเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 200 กก. จะถูกเปลี่ยนเป็นการเพิ่มการแ่นตัวในอัตราครั้งละ 2.5 มม. เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงเท่ากับ 8,551 และ 8,713 กก. เหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่องเริ่มคราก วัดการแ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 19.44 และ 19.10 มม. เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงเท่ากับ 9,198 และ 9,623 กก. ลวดอัดแรงที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่หนึ่งขาดออกจากกัน วัดการแ่นตัวได้ 55.00 และ 54.90 มม.

ความเครียดในเหล็กเสริม $3,220 \times 10^{-6}$ สังเกตลักษณะและขนาดของการแตกร้าวพบว่าแผ่นพื้นวิบัติแบบดัด ทำการเพิ่มน้ำหนักต่อไปกระทั่งลวดอัดแรงขาดออกจากกันจนหมด นับจำนวนของรอยแตกร้าวทั้งหมดได้เท่ากับ 33 รอย มีขนาดโตสุดประมาณ 3 มม. ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 3.24

3.4.4 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-52B

พื้น HC-35-52B มีความสัมพันธ์ของแรงกับการแอ่นตัว และความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง ตามที่แสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.18 ลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นดูได้จากรูปที่ 3.25 ผลการทดสอบแยกเป็นขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ให้น้ำหนักกระทำที่กลางช่วงเพื่อเคลื่อนย้ายแท่นรองรับที่ปลายยื่นออก ขั้นตอนที่ 2 เมื่อน้ำหนักที่ช่วงกลางและปลายยื่นเท่ากับ 3,575 และ 929 กก. ตรวจดูพบรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อ 1 รอย วัดการแอ่นตัวที่กลางช่วงและปลายยื่นเท่ากับ 2.60 และ 0.83 มม. ความเครียดในเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อ 370×10^{-6} เพิ่มน้ำหนักมากขึ้นเรื่อยๆ การแอ่นตัวและรอยแตกร้าวมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ถอนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดออก วัดการแอ่นตัวที่ช่วงกลางและปลายยื่นเท่ากับ 0.10 และ 3.85 มม. และเหล็กเสริมมีความเครียด 270×10^{-6} ขั้นตอนที่ 3 เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่ช่วงกลางและปลายยื่นจนถึง 6,792 และ 4,203 กก. ตรวจดูพบรอยแตกร้าวที่กลางช่วง 1 รอย มีการแอ่นตัวที่กลางช่วงและปลายยื่น 3.10 และ 33.98 มม. ความเครียดในเหล็กเสริม $1,810 \times 10^{-6}$ ที่สภาวะนี้การเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 200 กก. จะแทนด้วยการเพิ่มการแอ่นตัวในอัตราครั้งละ 2.5 มม. เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงและปลายยื่นเป็น 7,790 และ 5,103 กก. ตัวอย่างนี้จะวิบัติด้วยแรงเฉือนในทางราบ (Horizontal shear slip) โดยเกิดการเคลื่อนแยกตัวระหว่างพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า เป็นสาเหตุให้น้ำหนักบรรทุกลดลงอย่างรวดเร็ว การแอ่นตัวที่กลางช่วงและปลายยื่นเท่ากับ 6.00 และ 46.14 มม. ความเครียดในเหล็กเสริม $2,360 \times 10^{-6}$ สังเกตลักษณะและขนาดของรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อ พบว่ามีการกระจายของรอยแตกร้าวมากกว่าพื้น HC-35-9B และ HC-35-19B นับจำนวนของรอยแตกร้าวทั้งหมดได้เท่ากับ 37 รอย โดยมีขนาดโตสุดประมาณ 3 มม.

3.4.5 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-98B

พื้น HC-35-98B มีความสัมพันธ์ของแรงกับการแอ่นตัว และความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง ตามที่แสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.19 ผลการทดสอบแยกเป็นขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ให้น้ำหนักที่กลางช่วง 3,000 กก. เพื่อเคลื่อนย้ายแท่นรองรับที่ปลายยื่นออก ขั้นตอนที่ 2 เมื่อน้ำหนักที่ช่วงกลางและปลายยื่นเท่ากับ 3,609 และ 1,001 กก. ตรวจดูพบรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อ 1 รอย การแอ่นตัวที่กลางช่วงและปลายยื่นเท่ากับ 2.47 และ 0.90 มม. ความเครียดของเหล็กเสริม 180×10^{-6} เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่ช่วงกลางและปลายยื่น 4,517 และ 2,500

กก. ตรวจดูพบรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้น 7 รอย ชั้นตอนที่ 3 เพิ่มน้ำหนักที่ช่วงกลางและปลายยื่น 5,940 และ 4,953 กก. ตรวจดูพบรอยแตกร้าวที่กลางช่วง 1 รอย มีการแอนตัวที่กลางช่วงและปลายยื่น 0.88 และ 31.00 มม. ความเครียดในเหล็กเสริม $1,340 \times 10^{-6}$ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงและปลายยื่น 6,052 และ 5,019 กก. ตัวอย่างนี้จะวิบัติด้วยแรงเฉือนในทางราบ เป็นสาเหตุให้น้ำหนักบรรทุกลดลงอย่างรวดเร็ว การแอนตัวที่กลางช่วงและปลายยื่นเท่ากับ 2.75 และ 35.20 มม. ความเครียดของเหล็กเสริม $1,360 \times 10^{-6}$ ตัวอย่างทดสอบมีการกระจายของรอยแตกร้าวมากกว่าพื้น HC-35-9B และ HC-35-19B นับจำนวนของรอยแตกร้าวทั้งหมดได้เท่ากับ 45 รอย โดยมีขนาดโตสุดประมาณ 3 มม. ลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นดูได้จากรูปที่ 3.26

3.4.6 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-25-28B

ก่อนทดสอบตรวจดูไม่พบรอยแตกร้าวที่ตัวอย่างทดสอบแต่อย่างใด พื้น HC-25-28B มีความสัมพันธ์ของแรงกับการแอนตัว และความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง ตามที่แสดงในรูปที่ 3.12 และ 3.20 แยกผลทดสอบเป็นขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ให้น้ำหนักที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่หนึ่ง 2,021 กก. ตรวจดูพบรอยแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อ 1 รอย วัดการแอนตัวที่ช่วงกลางได้ 1.31 และ -0.50 มม. ความเครียดในเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อเท่ากับศูนย์ ขั้นตอนที่ 2 เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สอง 4,000 กก. ตรวจดูไม่พบรอยแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อแต่อย่างใด การแอนตัวที่กลางช่วงเท่ากับ -0.80 และ 3.40 มม. ความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง 130×10^{-6} ขั้นตอนที่ 3 เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่หนึ่งเท่ากับ 4,000 กก. และค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สองจนถึง 4,000 กก. มีจำนวนรอยแตกร้าวที่รอยต่อเพิ่มขึ้นอีก 4 รอย การแอนตัวที่ช่วงกลางเท่ากับ 0.71 และ 2.90 มม. ความเครียดของเหล็กเสริมที่บริเวณรอยต่อ 790×10^{-6} ขั้นตอนที่ 4 เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สองเท่ากับ 4,000 กก. และค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่งจนถึง 4,000 กก. จำนวนรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นอีก 2 รอย แต่ไม่พบรอยแตกร้าวที่กลางช่วงแต่อย่างใด การแอนตัวที่ช่วงกลางเท่ากับ 0.13 และ 3.30 มม. ความเครียดของเหล็กเสริม 840×10^{-6} เมื่อถอนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดออก ที่ช่วงกลางมีการแอนตัวที่สามารถคืนตัวได้เท่ากับ 0.50 และ 0.60 มม. และความเครียดของเหล็กเสริม 250×10^{-6} ขั้นตอนที่ 5 เมื่อให้น้ำหนักที่ช่วงกลางของแผ่นเท่ากับ 5,307 และ 5,346 กก. ตรวจสอบดูพบพื้นมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่กลางช่วงของแผ่นที่สอง การแอนตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 3.62 และ 4.40 มม. ความเครียดในเหล็กเสริม 990×10^{-6} ที่ภาวะนี้การเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 200 กก. จะถูกเปลี่ยนเป็นการเพิ่มการแอนตัวในอัตราครั้งละ 2.5 มม. เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงเท่ากับ 8,503 และ 8,047 กก. เหล็กเสริมที่จุดต่อเริ่มคราก วัดการแอนตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 21.09 และ 20.70 มม. เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงเท่ากับ 8,839 และ 8,709 กก. ตัวอย่างทดสอบวิบัติด้วยแรง

เงื่อนไขทางราบ ทำให้น้ำหนักบรรทุกที่กลางช่วงลดลงอย่างรวดเร็ว สังเกตลักษณะและขนาดของรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อ พบว่ามีการกระจายของรอยแตกร้าวมากกว่าพื้น HC-35-9B และ HC-35-19B นับจำนวนรอยแตกร้าวทั้งหมดได้เท่ากับ 31 รอย มีขนาดโตสุดประมาณ 3 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.27

3.4.7 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-45-28B

พื้น HC-45-28B มีความสัมพันธ์ของแรงกับการแอ่นตัว และความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง ตามที่แสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.21 ลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นได้จากรูปที่ 3.28 ผลทดสอบแยกเป็นขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่หนึ่งเท่ากับ 1,997 กก. ตรวจสอบพบรอยแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อ 1 รอย วัดการแอ่นตัวที่ช่วงกลางได้ 1.55 และ -0.40 มม. ความเครียดในเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อเท่ากับ 30×10^{-6} ขั้นตอนที่ 2 เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สองจนถึง 4,000 กก. ตรวจสอบพบรอยแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้น 2 รอย การแอ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ -0.62 และ 3.70 มม. ความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง 390×10^{-6} ขั้นตอนที่ 3 เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่หนึ่ง 4,000 กก. และค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สองจนถึง 4,000 กก. นับจำนวนรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อได้อีก 7 รอย การแอ่นตัวที่ช่วงกลางเท่ากับ 3.27 และ 3.30 มม. ความเครียดของเหล็กเสริมที่บริเวณรอยต่อ 730×10^{-6} ขั้นตอนที่ 4 เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่สองเท่ากับ 4,000 กก. และค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงของแผ่นที่หนึ่งจนถึง 4,000 กก. จำนวนรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นอีก 3 รอย แต่ไม่พบรอยแตกร้าวที่กลางช่วงแต่อย่างใด การแอ่นตัวที่ช่วงกลางเท่ากับ 3.23 และ 3.50 มม. ความเครียดของเหล็กเสริม 730×10^{-6} เมื่อถอนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดออก ที่ช่วงกลางมีการแอ่นตัวที่สามารถคืนตัวได้เท่ากับ 0.62 และ 0.90 มม. และความเครียดของเหล็กเสริม 150×10^{-6} ขั้นตอนที่ 5 ให้น้ำหนักที่ช่วงกลางของแผ่นพื้นพร้อมๆ กันจนถึง 5,265 และ 5,201 กก. ตรวจสอบพบแผ่นพื้นมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่กลางช่วงของแผ่นที่สอง การแอ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 4.32 และ 4.60 มม. ความเครียดในเหล็กเสริม 890×10^{-6} ที่ภาวะนี้การเพิ่มน้ำหนักจะเปลี่ยนเป็นการเพิ่มการแอ่นตัวในอัตราครั้งละ 2.5 มม. เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงเท่ากับ 8,467 และ 8,238 กก. เหล็กเสริมที่จุดต่อเริ่มร้าว การแอ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 23.63 และ 23.50 มม. เมื่อน้ำหนักที่กลางช่วงเท่ากับ 9,157 และ 8,955 กก. ตัวอย่างทดสอบนี้บีบตีด้วยแรงเงื่อนไขทางราบ ทำให้น้ำหนักบรรทุกที่กลางช่วงลดลงอย่างรวดเร็ว สังเกตลักษณะและขนาดของรอยแตกร้าวบริเวณรอยต่อ พบว่ามีการกระจายของรอยแตกร้าวมากกว่าพื้น HC-35-9B และ HC-35-19B นับจำนวนรอยแตกร้าวทั้งหมดได้เท่ากับ 32 รอย มีขนาดโตสุดประมาณ 3 มม.

3.4.8 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-SS

พื้น HC-SS ทำการทดสอบแบบคานช่วงเดียว มีความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ตามที่แสดงในรูปที่ 3.14 การทดสอบแบ่งเป็นสองขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ให้น้ำหนักที่ช่วงกลางด้วยแม่แรงอย่างช้าๆ ครั้งละประมาณ 200 กก. จนถึง 2,500 กก. วัดการแอ่นตัวที่ช่วงกลางได้ 2.21 มม. เมื่อถอนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดออก ที่ช่วงกลางมีการแอ่นตัวคงเหลือ 0.20 มม. ขั้นตอนที่ 2 เมื่อเพิ่มน้ำหนักที่กลางช่วงจนถึง 4,522 กก. ตรวจสอบดูพบแผ่นพื้นมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่กลางช่วง วัดการแอ่นตัวที่กลางช่วงได้ 4.18 มม. ที่สภาวะนี้การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจะแทนด้วยการเพิ่มการแอ่นตัวในอัตราครั้งละ 2.5 มม. เมื่อน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กลางช่วงเท่ากับ 6,828 กก. และ 64.82 มม. ตัวอย่างทดสอบนี้วิบัติแบบดัด เนื่องจากลวดอัดแรงที่กลางช่วงขาดออกจากกัน การทดสอบจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งลวดอัดแรงขาดออกจากกันจนหมดลักษณะการแตกร้าวของแผ่นพื้นดูได้จากรูปที่ 3.29

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลทดสอบ และแนวทางการออกแบบ

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาพฤติกรรมการตัดของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณรอยต่อแผ่นพื้นสำเร็จรูปเหนือจุดรองรับ โดยให้ปริมาณเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่องและระยะห่างระหว่างชั้นส่วนสำเร็จรูปเป็นตัวแปรหลัก ทำการทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกสถิตตั้งแต่เริ่มจนถึงจุดวิบัติ จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ของแรง การแอ่นตัว ความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง รวมทั้งรอยแตกร้าวต่างๆ นำข้อมูลจากการบันทึกมาคำนวณหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อกำลังดัดซึ่งอธิบายด้วยกำลังดัดแตกร้าว กำลังดัดที่จุดคราก กำลังดัดประลัย และความเหนียว เป็นต้น อนึ่งขนาดความกว้างและลักษณะรอยแตกร้าวพร้อมทั้งลักษณะของการวิบัติ จะสามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องได้ ทั้งรวมไปถึงการกระจายแรงดัดจากจุดวิกฤติไปสู่จุดที่วิกฤติน้อยกว่า ตามขั้นตอนการบรรทุกน้ำหนักต่างๆด้วย

4.1 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดจากผลทดสอบ

งานวิจัยได้นำโมเมนต์ดัดและความโค้งซึ่งคำนวณมาจากน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กลางช่วง มาอธิบายพฤติกรรมการตัดของโครงสร้างที่สถานะภาพต่างๆ การคำนวณเริ่มจากหาความโค้งของหน้าตัดจากสมการเชิงอนุพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งตามสมการที่ 2.22 โดยมีสมมุติฐานให้สติฟเนสในแต่ละชั้นส่วนย่อยๆ มีค่าเท่ากัน และลดลงหลังจากที่หน้าตัดเกิดการแตกร้าว จากนั้นหาการแอ่นตัวโดยแก้สมการเชิงอนุพันธ์พร้อมกับเงื่อนไขขอบเขต จะได้สมการสติฟเนสในรูปของน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางตามสมการที่ 2.25 ขั้นตอนสุดท้ายคำนวณหาความโค้งจากผลทดสอบของหน้าตัดใดๆ โดยแทนค่าน้ำหนักบรรทุก สติฟเนส และระยะจากจุดเริ่มถึงตำแหน่งของหน้าตัดที่พิจารณาในสมการที่ 2.26 และ 2.27 การวิเคราะห์กำลังดัดที่รอยต่อเริ่มจากวิเคราะห์กำลังดัดของหน้าตัดที่ช่วงกลางโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง จากนั้นจึงแทนค่ากำลังดัดของหน้าตัดที่ช่วงกลางและน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบในสมการสมดุลของโครงสร้างตามที่แสดงในสมการที่ 2.30 และ 2.31

4.1.1 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-9B

จากการทดสอบหาความสัมพันธ์ของแรง การแอ่นตัว และความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง คำนวณหาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งดัดแสดงในรูปที่ 4.1 ที่จุดต่อเนื่องมีกำลังดัดแตกร้าวกำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัยเท่ากับ 1,292 , 1,848 และ 2,072 กก.-ม. ความโค้งที่สถานะเดียวกัน 8.37×10^{-6} , 1.32×10^{-4} และ 1.84×10^{-3} เรเดียน/ซม. ตามลำดับ มีความเหนียวบริเวณรอยต่อ 15.03 สำหรับโมเมนต์บวกที่กลางช่วงเมื่อเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อถึงจุดครากเท่ากับ 4,556 กก.-ม. การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นมาอีกหน้าตัดบริเวณรอยต่อก็จะรับแรงดัดเกือบเท่าเดิม เมื่อหน้าตัดบริเวณรอยต่อถึงจุดประลัยโมเมนต์บวกที่กลางช่วงเท่ากับ 5,836 กก.-ม. หรือเพิ่มขึ้น 28.01% ภายหลังหน้าตัดบริเวณรอยต่อเกิดจุดหมุนพลาสติก

4.1.2 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-19B

ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งดัดแสดงในรูปที่ 4.2 ได้จากการแปลงความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัวที่ช่วงกลาง ตัวอย่างทดสอบจะเห็นจุดที่บริเวณรอยต่อเริ่มแตกร้าวกและเหล็กเสริมถึงจุดครากอย่างชัดเจน โดยมีกำลังดัดแตกร้าวกำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัยเท่ากับ 1,462 , 3,343 และ 3,763 กก.-ม. ขณะที่ความโค้งที่สถานะเดียวกันเท่ากับ 1.74×10^{-5} , 1.69×10^{-4} และ 9.53×10^{-4} เรเดียน/ซม. ตามลำดับ และมีความเหนียว 7.14 โมเมนต์บวกที่กลางช่วงเมื่อเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อเริ่มครากและถึงจุดประลัยเท่ากับ 4,702 และ 5,702 กก.-ม. มีความโค้ง 1.72×10^{-4} และ 1.40×10^{-3} เรเดียน/ซม. ดังนั้นโมเมนต์ที่กลางช่วงมีค่าเพิ่มขึ้น 21.28% หลังจากเหล็กเสริมรับแรงดัดที่รอยต่อถึงจุดคราก

4.1.3 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-28B

พิจารณารูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ได้จากการแปลงความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัวที่ช่วงกลาง สามารถเห็นจุดที่บริเวณรอยต่อเริ่มแตกร้าวกและเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่องถึงจุดครากอย่างชัดเจน โดยมีกำลังดัดแตกร้าวกำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัยเท่ากับ 1,481, 5,284 และ 5,540 กก.-ม. ขณะที่ความโค้งที่สถานะเดียวกันเท่ากับ 1.73×10^{-5} , 2.17×10^{-4} และ 7.68×10^{-4} เรเดียน/ซม. ตามลำดับ ที่รอยต่อมีความเหนียว 4.57 สำหรับโมเมนต์บวกที่กลางช่วงเมื่อเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อเริ่มครากและถึงจุดประลัยเท่ากับ 5,284 และ 5,830 กก.-ม. มีความโค้ง 2.17×10^{-4} และ 1.32×10^{-3} เรเดียน/ซม. แสดงว่าเมื่อพื้นต่อเนื่องเกิดจุดหมุนพลาสติกแรกที่บริเวณรอยต่อ โมเมนต์ลบบริเวณรอยต่อมีค่าเกือบเท่าเดิม ขณะที่โมเมนต์บวกที่ช่วงกลางมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 10.34%

4.1.4 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-52B

ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งของตัวอย่างทดสอบแบบคานยื่น ต้องมีการปรับข้อมูล เนื่องจากได้มีแรงที่เกิดก่อนเริ่มทดสอบ คือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของแม่แรงและน้ำหนักคงที่ของแผ่นพื้น การปรับเพิ่มโมเมนต์ดัดและความโค้งเริ่มต้นมีสมมุติฐานว่าพื้นตัวอย่างมีพฤติกรรมเดียวกันกับการคำนวณโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง คำนวณหาโมเมนต์ดัดและความโค้งที่นำไปปรับเพิ่มได้เท่ากับ 587 กก.-ม. และ 3.34×10^{-5} เเรเดียน/ซม. ตามลำดับ ดังนั้นกำลังดัดแตกร้าว กำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัยจากการทดสอบ ซึ่งรวมผลของน้ำหนักบรรทุกตายตัวเท่ากับ 1,981 , 8,241 และ 8,340 กก.-ม. มีความโค้งที่สถานะภาพเดียวกันเท่ากับ 3.89×10^{-5} , 3.41×10^{-4} และ 3.45×10^{-4} เเรเดียน/ซม. ตามลำดับ บริเวณรอยต่อมีความเหนียว 1.01 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 อย่างไรก็ตามความเหนียวที่ได้มีแรงเฉือนเป็นตัวคุมเพราะตัวอย่างทดสอบนี้วิบัติโดยแรงเฉือนในทางราบ หากวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนประลัยที่รอยต่อระหว่างผิวแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้าโดยใช้วิธีอัสติกซึ่งเขียนเป็นสมการ $\tau = VQ/(Ib)$ เมื่อ V คือ แรงเฉือนประลัยจากการทดสอบ, Q คือ โมเมนต์ครั้งแรกของพื้นที่, I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเชิงประกอบ, b คือ ความกว้างของรอยต่อ ตัวอย่างทดสอบมีหน่วยแรงเฉือนประลัย 10.93 กก./ซม.² ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อคำนวณสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่รอยต่อโดยใช้ความสัมพันธ์ $C_c = qL\mu$ เมื่อ C_c คือ แรงอัดลัพท์ส่วนที่อยู่ในคอนกรีตเททับหน้า, q คือ หน่วยแรงเฉือนในแนวราบ, L คือ ความยาวพื้นที่รับแรงเฉือน, μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียหายที่รอยต่อ ที่รอยต่อมีสัมประสิทธิ์ความเสียหาย 0.348 ดังแสดงในรูปที่ 4.13

4.1.5 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-98B

พิจารณาความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งบริเวณรอยต่อตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 ตัวอย่างทดสอบนี้ไม่สามารถหาความเหนียวบริเวณรอยต่อได้ เนื่องจากก่อนที่เหล็กเสริมบริเวณรอยต่อถึงจุดคราก เกิดการวิบัติโดยแรงเฉือนทางราบจากการเคลื่อนแยกตัวระหว่างคอนกรีตเททับหน้ากับแผ่นพื้นสำเร็จรูป จากการทดสอบสามารถแปลงเป็นกำลังดัดแตกร้าวและกำลังดัดที่จุดวิบัติซึ่งรวมผลของน้ำหนักบรรทุกตายตัวเริ่มต้นเท่ากับ 2,089 กก.-ม. และ 8,115 กก.-ม. ขณะที่ความโค้งเท่ากับ 1.18×10^{-5} และ 2.41×10^{-4} เเรเดียน/ซม. ตามลำดับ ที่รอยต่อมีกำลังรับแรงเฉือนประลัย 9.20 กก./ซม.² ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และมีสัมประสิทธิ์ความเสียหาย 0.423 ดังแสดงในรูปที่ 4.13

4.1.6 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-25-28B

พิจารณาความสัมพันธ์ของแรง การแอ่นตัว และความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง สามารถแปลงเป็นกำลังดัดแตกร้าวกำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัยเท่ากับ 1,355 , 5,218 และ 5,338 กก.-ม. ขณะที่ความโค้งเท่ากับ 3.06×10^{-5} , 2.35×10^{-4} และ 3.82×10^{-4} เรเดียน/ซม. ตามลำดับ บริเวณรอยต่อมีความเหนียว 1.59 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 สำหรับกำลังดัดที่กลางช่วงเมื่อเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อเริ่มครากและหน้าตัดถึงจุดประลัยเท่ากับ 5,117 และ 5,515 กก.-ม. และความโค้งที่สถานะเดียวกัน 2.66×10^{-4} และ 4.49×10^{-3} เรเดียน/ซม. แสดงว่ากำลังดัดที่กึ่งกลางช่วงเพิ่มขึ้น 7.79% โดยกำลังดัดบริเวณรอยต่อมีค่าเกือบคงที่ภายหลังเกิดจุดหมุนพลาสติก ตัวอย่างทดสอบมีกำลังรับแรงเฉือนประลัยและสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่รอยต่อระหว่างผิวของพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้าซึ่งคำนวณโดยใช้วิธีอีลาสติกเท่ากับ 7.35 กก./ซม.² และ 0.480 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13

4.1.5 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-45-28B

พิจารณารูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ได้จากการแปลงความสัมพันธ์ของแรง การแอ่นตัวที่ช่วงกลาง และความเครียดของเหล็กเสริมที่จุดต่อเนื่อง สามารถเห็นจุดที่บริเวณรอยต่อเริ่มแตกร้าวกำลังดัดที่จุดครากอย่างชัดเจน โดยมีกำลังดัดแตกร้าวกำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัยเท่ากับ 1,284 , 5,105 และ 5,382 กก.-ม. มีความโค้งที่สถานะเดียวกันเท่ากับ 1.80×10^{-5} , 2.67×10^{-4} และ 7.26×10^{-4} เรเดียน/ซม. ตามลำดับ ที่รอยต่อมีความเหนียว 2.71 มีกำลังดัดที่กลางช่วงเมื่อเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อถึงจุดครากและหน้าตัดถึงจุดประลัย 5,156 และ 5,600 กก.-ม. มีความโค้ง 3.67×10^{-4} และ 1.05×10^{-3} เรเดียน/ซม. แสดงว่าตัวอย่างทดสอบมีการถ่ายแรงดัดบริเวณรอยต่อไปที่ช่วงกลางของแผ่นพื้น โดยกำลังดัดที่กลางช่วงแผ่นพื้นมีค่าเพิ่มขึ้น 8.63% คำนวณหาลำลังรับแรงเฉือนประลัยและสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้าโดยใช้วิธีอีลาสติกได้ 7.69 กก./ซม.² และ 0.465 ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13

4.1.8 แผ่นพื้นตัวอย่าง HC-SS

พิจารณาผลการทดสอบกำลังของแผ่นพื้นช่วงเดียวตามที่แสดงในรูปที่ 4.8 ข้อมูลได้มาจากการทดสอบหาความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัวที่ช่วงกลาง มีกำลังดัดแตกร้าวกำลังดัดประลัยที่กึ่งกลางช่วงแผ่นพื้น 3,953 และ 5,768 กก.-ม. และมีความโค้งที่สถานะเดียวกัน 3.57×10^{-5} และ 1.04×10^{-3} เรเดียน/ซม ตามลำดับ

4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์

ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง โดยนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี โดยวิธีความเครียดสอดคล้องที่พิจารณากราฟความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตตามที่เสนอโดย Hognestad, E.^[11] และผลการทดสอบกำลังของเหล็กเสริม กำลังอัดประลัยของคอนกรีต มีผลการเปรียบเทียบดังนี้

4.2.1 การเปรียบเทียบตัวอย่าง พื้น HC-35-9B

ตัวอย่างทดสอบมีความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ตามที่แสดงในรูปที่ 4.1 เปรียบเทียบผลทดสอบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีความเครียดสอดคล้อง โดยใช้ผลการทดสอบกำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตได้กำลัง 250 กก./ซม.² และใช้หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดครากจากการทดสอบ 4,814 กก./ซม.² มีกำลังดัดแตกร้าว กำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัยบริเวณรอยต่อ เท่ากับ 1,486, 1,746 และ 1,802 กก.-ม. และความโค้ง 1.49×10^{-5} , 1.67×10^{-4} และ 4.90×10^{-3} เรเดียน/ซม. ตามลำดับ บริเวณรอยต่อมีความเหนียว 29.34 จะเห็นว่าก่อนถึงจุดแตกร้าวกราฟความสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบเป็นเส้นเดียวกัน กระทั่งเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อถึงจุดครากกราฟความสัมพันธ์จะเริ่มแตกต่างกัน กำลังดัดประลัยที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าการวิเคราะห์ 13%

4.2.2 การเปรียบเทียบตัวอย่าง พื้น HC-35-19B

เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์โดยวิธีความเครียดสอดคล้อง ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ผลใช้ค่ากำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีต 230 กก./ซม.² และหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดครากจากการทดสอบ 4,814 กก./ซม.² ผลการวิเคราะห์มีกำลังดัดแตกร้าว กำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัยเท่ากับ 1,464 , 3,401 และ 3,546 กก.-ม. และความโค้ง 1.49×10^{-5} , 1.85×10^{-4} และ 2.23×10^{-3} เรเดียน/ซม. ตามลำดับ ที่รอยต่อมีความเหนียวทางโครงสร้าง 12.05 จะเห็นว่าในช่วงก่อนที่หน้าตัดแตกร้าวกราฟความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบเป็นเส้นเดียวกัน ในช่วงหลังการแตกร้าวกราฟความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งยังมีค่าใกล้เคียงกัน การเปรียบเทียบระหว่างสถิติพเนสของผลทดสอบกับผลการวิเคราะห์ พบว่าผลทดสอบได้ค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ 2.6% และภายหลังที่เหล็กเสริมที่รอยต่อถึงจุดครากกราฟความสัมพันธ์จะเริ่มแตกต่างกัน โดยที่ผลทดสอบมีสถิติพเนสสูงกว่าผลการวิเคราะห์ 36%

4.2.3 การเปรียบเทียบตัวอย่าง พื้น HC-35-28B

การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีความเครียดสอดคล้อง ได้แสดงในรูปที่ 4.3 โดยใช้แบบจำลองหน่วยแรงและความเครียดของ Hognestad, E มีผลการทดสอบกำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตและหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดครากจากการทดสอบ 250 และ 4,814 กก./ซม.² มีกำลังดัดแตกร้าว กำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัย 1,542 , 5,132 และ 5,318 กก.-ม. ความโค้ง 1.51×10^{-5} , 1.96×10^{-4} และ 1.43×10^{-3} เรเดียน/ซม. และความเหนียวบริเวณรอยต่อ 7.30 จะเห็นว่าในช่วงก่อนการแตกร้าวกราฟความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดกับความโค้งมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบเป็นเส้นเดียวกัน ภายหลังจากหน้าตัดแตกร้าวกราฟความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ผลการทดสอบมีสติฟเนสสูงกว่าผลการวิเคราะห์ 4.8% และในช่วงหลังจากที่เหล็กเสริมบริเวณรอยต่อถึงจุดครากกราฟความสัมพันธ์จะเริ่มแตกต่างกัน ผลทดสอบมีสติฟเนสสูงกว่าผลการวิเคราะห์ 27%

4.2.4 การเปรียบเทียบตัวอย่าง พื้น HC-35-52B

ตามที่แสดงในรูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง การวิเคราะห์มีสมมุติฐานให้หน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดกระจายแบบ Hognestad, E ใช้ผลการทดสอบกำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีต 190 กก./ซม.² และหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดครากจากการทดสอบ 5,602 กก./ซม.² มีกำลังดัดแตกร้าว กำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัย 1,506 , 8,112 และ 8,328 กก.-ม. ความโค้งเท่ากับ 1.63×10^{-5} , 2.72×10^{-4} และ 6.22×10^{-4} เรเดียน/ซม. ตามลำดับ บริเวณรอยต่อมีความเหนียว 2.29 กำลังดัดประลัยที่ได้จากการวิเคราะห์ได้ค่าที่สูงกว่าผลการทดสอบ ทั้งนี้เพราะแผ่นพื้นตัวอย่างวิบัติโดยแรงเฉือนในทางราบ อย่างไรก็ตามก่อนที่เหล็กเสริมจะถึงจุดครากผลการวิเคราะห์ได้ค่าที่ใกล้เคียงกันมากกับผลการทดสอบ

4.2.5 การเปรียบเทียบตัวอย่าง พื้น HC-35-98B

ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์โดยวิธีความเครียดสอดคล้อง โดยใช้ผลการทดสอบกำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตได้กำลัง 230 กก./ซม.² และใช้หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดครากจากการทดสอบ 5,602 กก./ซม.² จะได้กำลังดัดแตกร้าว กำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัย 1,706 , 11,798 และ 11,843 กก.-ม. ในขณะที่ความโค้ง 1.70×10^{-5} , 2.98×10^{-4} และ 3.61×10^{-4} เรเดียน/ซม. และความเหนียว 1.21 ผลจากการวิเคราะห์ได้ค่ากำลังดัดประลัยที่สูงกว่าผลการทดสอบ ทั้งนี้

เพราะแผ่นพื้นตัวอย่างวิบัติโดยแรงเฉือนในทางราบ อย่างไรก็ตามก่อนที่เหล็กเสริมจะถึงจุดคราก ผลการวิเคราะห์ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ดังนั้นแบบจำลองและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้วิเคราะห์กำลังดัดของหน้าตัดให้ค่าที่สอดคล้องกันมากกับผลการทดสอบ

4.2.6 การเปรียบเทียบตัวอย่าง พื้น HC-25-28B

เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์โดยวิธีความเครียดสอดคล้อง ตามที่แสดงในรูปที่ 4.6 ใช้ผลการทดสอบกำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตได้กำลัง 180 กก./ cm^2 และใช้หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดครากจากการทดสอบ 4,814 กก./ cm^2 มีกำลังดัดแตกร้าว กำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัยเท่ากับ 1,390 , 4,936 และ 5,157 กก.-ม. และค่าความโค้งเท่ากับ 1.49×10^{-5} , 2.06×10^{-4} และ 1.30×10^{-3} เรเดียน/ซม. ตามลำดับ มีความเหนียวบริเวณรอยต่อ 6.31 ดังนั้นในช่วงก่อนการแตกร้าวกราฟความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบเป็นเส้นเดียวกัน ในช่วงหลังการแตกร้าวผลการทดสอบมีสติฟเนส 1.87×10^7 กก.-ซม.² ขณะที่ผลการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 1.85×10^7 กก.-ซม.² ดังนั้นสติฟเนสของผลการทดสอบมีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ 1.1% และภายหลังจากที่เหล็กเสริมที่รอยต่อถึงจุดครากไม่สามารถเปรียบเทียบสติฟเนสของผลการทดสอบกับการวิเคราะห์ได้ เนื่องจากตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติจากแรงเฉือนในทางราบ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกำลังดัดประลัยพบว่าผลการทดสอบมีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์ 3.5%

4.2.7 การเปรียบเทียบตัวอย่าง พื้น HC-45-28B

เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์โดยวิธีความเครียดสอดคล้องตามที่แสดงในรูปที่ 4.7 การวิเคราะห์ใช้แบบจำลองหน่วยแรงและความเครียดของ Hognestad, E ใช้ผลการทดสอบกำลังอัดรูปทรงกระบอกของคอนกรีตได้กำลัง 210 กก./ cm^2 และใช้หน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมที่จุดครากจากการทดสอบ 4,814 กก./ cm^2 มีกำลังดัดแตกร้าว กำลังดัดที่จุดคราก และกำลังดัดประลัยเท่ากับ 1,438 , 4,937 และ 5,159 กก.-ม. และค่าความโค้ง 1.50×10^{-5} , 2.05×10^{-4} และ 1.31×10^{-3} เรเดียน/ซม. ตามลำดับ ที่รอยต่อมีความเหนียวทางโครงสร้าง 6.39 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ ในช่วงก่อนการแตกร้าวกราฟความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งมีค่าใกล้เคียงกันมากจนเกือบเป็นเส้นเดียวกัน ในช่วงหลังการแตกร้าวกราฟความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งจะยังมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ผลการทดสอบมีสติฟเนส 1.80×10^7 กก.-ซม.² ขณะที่ผลการวิเคราะห์มีค่าเท่ากับ 1.84×10^7 กก.-ซม.² ดังนั้นสติฟเนสของผลการทดสอบมีค่าน้อยกว่าผลการวิเคราะห์ 2.2% และภายหลังจากที่เหล็กเสริมที่รอยต่อถึงจุดครากกราฟความสัมพันธ์จะเริ่มแตกต่างกัน ผลการทดสอบมีสติฟเนส 4.47×10^5 กก.-ซม.² ขณะที่

ที่ผลการวิเคราะห์หามีค่าเท่ากับ 3.79×10^5 กก.-ซม.² ดังนั้นผลการทดสอบมีสติฟเนสสูงกว่าผลการวิเคราะห์ 18%

4.3 อิทธิพลของปริมาณเหล็กเสริม

ก. ความเหนียวของโครงสร้าง

การศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณเหล็กเสริมที่มีผลต่อกำลังและความเหนียวทางโครงสร้างของรอยต่อ โดยใช้เหล็กเสริมในปริมาณที่ต่างกันขณะที่ความกว้างรอยต่อและกำลังดัดที่กลางช่วงของระบบพื้นสำเร็จรูปเท่ากันทุกตัวอย่างทดสอบ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.14 เป็นกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของกำลังดัดและความโค้งที่รอยต่อระหว่างการทดสอบและผลการวิเคราะห์ จากกราฟจะเห็นได้ว่ารอยต่อจะมีกำลังสูงตามปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้ และในทำนองเดียวกันความโค้งที่จุดวิบัติจะลดค่าลงตามลำดับ อนึ่งมีข้อควรสังเกตจากรอยต่อที่มีปริมาณเหล็กเกินกว่า 66% ของปริมาณที่ภาวะสมดุล หรือกำลังดัดเกินกว่า 7,528 กก.-ม. ตัวอย่างทดสอบจะวิบัติจากแรงเฉือนถือเป็นพิภักสูงสุดในการปฏิบัติ การเปรียบเทียบระหว่างดัชนีความเหนียว (σ_u/σ_y) ที่ได้จากการทดสอบและได้จากการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 4.15 มีข้อสังเกตคือ ผลจากการวิเคราะห์ได้ค่าที่สูงกว่าทั้งนี้เพราะอยู่ภายใต้สมมุติฐานที่มีความสมบูรณ์ของหน้าตัดเชิงประกอบและไม่มีผลจากแรงเฉือนระหว่างผิวคอนกรีตสำเร็จรูปและคอนกรีตเททับหน้า อย่างไรก็ตามจะถือว่าผลจากการทดสอบจะสนองตอบพฤติกรรมที่แท้จริงได้ดีกว่าผลการวิเคราะห์ หากจะพิจารณาที่ขีดจำกัดสูงสุดของปริมาณเหล็กเสริมที่ยอมให้ โดยที่ดัชนีความเหนียวทางโครงสร้างสอดคล้องกับมาตรฐาน ACI 318R-99 ที่กำหนดให้ดัชนีความเหนียวในคานที่มีความต่อเนื่องเกินกว่า 3 ดังนั้นหากจะให้โครงสร้างมีความเหนียวที่เพียงพอให้เกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic hinge) เพื่อที่สามารถกระจายโมเมนต์จากจุดวิกฤติไปยังส่วนอื่นๆได้ จากผลการทดสอบตามกราฟรูปที่ 4.15 สามารถกำหนดปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดได้ที่ 0.41 ของปริมาณที่ภาวะสมดุล ในทำนองเดียวกันค่าความเหนียวจากการวิเคราะห์จากทฤษฎีความเครียดสอดคล้องอาจให้อัตราส่วนปริมาณเหล็กเสริมถึง 0.56 ของปริมาณที่ภาวะสมดุล

ข. การกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัด

ในโครงสร้างที่มีความเหนียวทางโครงสร้างพอเพียง ย่อมเสริมศักยภาพให้มีการกระจายโมเมนต์จากจุดวิกฤติที่รอยต่อไปสู่จุดที่มีค่าโมเมนต์วิกฤติรองลงไปที่ช่วงกลาง กรณีที่ปริมาณเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อความเหนียวทางโครงสร้างที่ลดลง ซึ่งทำให้การ

กระจายซ้ำของโมเมนต์ดัดมีค่าลดลงด้วย ตามที่แสดงในรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นที่กลางช่วงหลังจากที่เหล็กเสริมที่รอยต่อถึงจุดครากของแผ่นพื้นทดสอบที่มีปริมาณเหล็กเสริมที่รอยต่อต่างกัน เมื่อปริมาณเหล็กเสริมที่รอยต่อเพิ่มขึ้นโครงสร้างจะมีการกระจายโมเมนต์ลบที่รอยต่อไปสู่โมเมนต์บวกที่ช่วงกลางได้น้อยลงและจะมีผลให้ความกว้างของรอยแตกกว้างที่รอยต่อมีขนาดที่ลดลงด้วย อนึ่งหากจะเทียบโมเมนต์ดัดระหว่างผลการทดสอบกับการวิเคราะห์แบบอีลาสติคดังที่แสดงในรูปที่ 4.17 และภายใต้ข้อแนะนำของ ACI ที่กำหนดให้ส่วนต่างระหว่างกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดกับการวิเคราะห์แบบอีลาสติคไม่เกินร้อยละ 20 สามารถกำหนดปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดได้ที่ 0.23 ของปริมาณที่ภาวะสมดุล

4.4 อิทธิพลของรอยต่อ

ก. ความยาวรอยต่อ

การศึกษาถึงอิทธิพลของรอยต่อที่มีผลต่อกำลังดัด ด้วยการทดสอบแผ่นพื้นที่มีระยะห่างระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปต่างกัน ทั้งนี้จะให้ปริมาณเหล็กเสริมที่รอยต่อคงที่และกำลังดัดที่กลางช่วงของระบบพื้นสำเร็จรูปเท่ากันทุกตัวอย่างทดสอบ จากผลการทดสอบวิเคราะห์หากำลังดัดที่เกิดขึ้นโดยใช้ความเครียดของเหล็กเสริมที่รอยต่อและแบบจำลองหน่วยแรงและความเครียดตามที่เสนอของ Hognestad, E ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์โดยใช้ระยะจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางที่รองรับเป็นความยาวช่วง พบว่าความกว้างรอยต่อ 5, 15 และ 25 ซม. ตามลำดับ จะให้ค่าแรงดัดที่ศูนย์กลางลดลงร้อยละ 11, 13 และ 15 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ $\Delta M = 3.63c/d + 10.81$ เมื่อ c คือ ความกว้างรอยต่อ และ d คือ ความหนาของแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า กล่าวโดยรวมเมื่อเพิ่มความกว้างของรอยต่อหรือปารองรับแผ่นพื้น จะทำให้แรงดัดที่จุดเชื่อมต่อมีค่าลด

ข. ผลของการโอบรัด

ด้วยจุดวิกฤติจากการดัดอยู่ที่ปารองรับบริเวณรอยต่อของแผ่นพื้นทดสอบ คอนกรีตส่วนล่างที่รับแรงอัดอาจได้รับอิทธิพลจากการโอบรัดจากแท่นรองรับ ในขณะที่บริเวณกลางช่วงของแผ่นพื้นอาจ不会有ผลจากพฤติกรรมการโอบรัดเลย การวิเคราะห์กำลังดัดของหน้าตัดที่มีการโอบรัดโดยใช้แบบจำลองหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตตามที่เสนอของ Popovics, S.^[15] เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองที่ไม่มีโอบรัดของ Hognestad,

E. เมื่อความยาวรอยต่อเพิ่มขึ้นจาก 5, 15 และ 25 ซม. ตามที่แสดงในรูปที่ 4.19 ถึง 4.22 พบว่ากำลังตัดจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองภายใต้การโอบรัดของ Popovics, S. ให้ค่ากำลังตัดประลัยสูงกว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองที่ไม่มีการโอบรัดของ Hognestad, E. เท่ากับ 0.5%, 0.7% และ 1.0% ตามลำดับ แต่ที่ความโค้งประลัยที่ได้จะมีค่าสูงกว่า 14%, 10% และ 6% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีผลต่อกำลังตัดประลัยของหน้าตัดบริเวณรอยต่อน้อยมาก หรืออาจพิจารณาได้ว่าไม่มีนัยสำคัญต่อกำลังตัด แต่อาจจะถือว่าให้ค่ากำลังเชิงอนุรักษ์มากขึ้น

4.5 แนวทางการออกแบบ

จากการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการตัดบริเวณรอยต่อ เพื่อควบคุมกำลังตัด ความเหนียว รอยแตกร้าว และการแอ่นตัว ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของหน้าตัดหรือปริมาณเหล็กเสริม และการจัดระบบโครงสร้างให้ได้กำลังและให้การให้บริการสอดคล้องตามที่มาตรฐานกำหนด โดยภาพรวมอาจพิจารณารายละเอียดของแต่ละรายการหลักดังนี้

ก. น้ำหนักบรรทุก

โดยทั่วไปแผ่นพื้นสำเร็จรูปจะถูกออกแบบให้ใช้งานในลักษณะของพื้นช่วงเดียว ดังนั้นแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์กำลังจะแทนด้วยพื้นอย่างง่ายช่วงเดียว มีกำลังดัดสูงสุดที่กลางช่วง $M = \omega L^2 / 8$ เมื่อ ω คือน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักคงที่และน้ำหนักจร, L คือความยาวช่วงจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางที่รองรับ ในการออกแบบให้รอยต่อมีความต่อเนื่องโครงสร้างจะเปลี่ยนสภาพเป็นเสมือนคานต่อเนื่อง และโมเมนต์ดัดที่รอยต่อจะต้องพิจารณาจากน้ำหนักบรรทุกเพียงเฉพาะน้ำหนักบรรทุกจรที่เกิดจากการใช้งานในระยะยาว ตามที่แสดงในรูปที่ 2.13 หากพิจารณาให้โมเมนต์ดัดที่ช่วงกลางของพื้นต่อเนื่องและพื้นช่วงเดียวมีค่าเท่ากัน พบว่าพื้นต่อเนื่อง 2 ช่วง จะรับน้ำหนักบรรทุกจรได้สูงกว่าพื้นช่วงเดียว 2 เท่า ทั้งนี้ต้องออกแบบให้รอยต่อมีกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจรได้ $0.25\omega L^2$ และกรณีของพื้นที่มีความต่อเนื่องเกินกว่า 2 ช่วง จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจรได้สูงกว่าพื้นช่วงเดียว 1.75 เท่า และมีโมเมนต์ดัดสูงสุดที่รอยต่อ $0.188\omega L^2$ ดังนั้นน้ำหนักจรในการคำนวณโมเมนต์ดัดที่รอยต่อต้องไม่เกิน 1.75 เท่าของน้ำหนักบรรทุกจรของพื้นช่วงเดียว

ข. การวิเคราะห์กำลังดัดประลัยของหน้าตัด

กำลังต้านทานโมเมนต์ประลัยของหน้าตัด (Ultimate Moment Resistant) อาจทำได้โดยใช้วิธีคิดแรงอัดลัพท์ในคอนกรีตจากพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมของ Whitney ซึ่งต่อมาได้ถูกบรรจุในมาตรฐาน ACI ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การคำนวณโดยวิธีของ ACI 318R-99 ได้กำหนดความเครียดสูงสุดในคอนกรีตที่รับแรงอัด (ϵ_c) เท่ากับ 0.003 ขนาดของหน่วยแรงอัดลัพท์ในคอนกรีตเท่ากับ $0.85f'_c$ และแผ่นสม่ำเสมอบนพื้นที่รับแรงอัด ba ดังนั้นขนาดของแรงอัดลัพท์ในคอนกรีต (C_c) จะเท่ากับ $0.85f'_c ba$ ตำแหน่งของแรงจะอยู่ที่ศูนย์ถ่วงของพื้นที่รับแรงอัด ระยะของ a มีค่าเป็นสัดส่วนกับระยะแกนสะเทิน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\beta_1 c$ ค่าของ β_1 มีค่าเท่ากับ 0.85 สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยน้อยกว่าหรือเท่ากับ 280 กก./ซม.² และจะลดลงในอัตรา 0.05 สำหรับกำลังอัดประลัยที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 70 กก./ซม.² แต่ทั้งนี้ต้องไม่น้อยกว่า 0.65 แรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ดัดทั้งหมดจะถูกรับโดยเหล็กเสริมเพียงอย่างเดียว ขนาดของแรงดึงจะเท่ากับผลคูณของหน่วยแรงดึงที่จุดครากกับพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม และมีค่าเท่ากับแรงอัดในส่วนที่เป็นคอนกรีตหน้าตัดจึงสมดุล กำลังต้านทานโมเมนต์ประลัยของหน้าตัดจะเท่ากับผลคูณของแรงดึงในเหล็กเสริมหรือแรงอัดในส่วนที่เป็นคอนกรีตกับระยะห่างระหว่างแรงทั้งสอง ค่าที่ได้จะต้องมากกว่าโมเมนต์ประลัยต่อตัวคูณลดกำลัง (Ultimate Moment, M_u/ϕ) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_c = T_s$$

$$0.85f'_c ba = \rho b d f_y$$

$$a = \rho \left(\frac{f_y}{0.85f'_c} \right) d \quad (4.1)$$

$$M_r = (C_c \text{ or } T_s) \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= \rho b d f_y \left[d - \frac{\rho}{2} \left(\frac{f_y}{0.85f'_c} \right) d \right]$$

ดังนั้น $M_r = R_n b d^2 \quad (4.2)$

โดยที่ $R_n = \frac{M_r}{b d^2} = \rho f_y \left(1 - \frac{1}{2} \rho m \right) \quad (4.3)$

และ

$$m = \frac{f_y}{0.85f_c} \quad (4.4)$$

ค. ปริมาณเหล็กเสริม

การคำนวณปริมาณเหล็กเสริมที่รอยต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูป จะพิจารณาถึงการวิบัติของหน้าตัดที่เป็นแบบแรงดึงเป็นหลัก ซึ่งจะส่งผลให้โครงสร้างมีการเสียรูปได้มากกว่าก่อนวิบัติ โดยวิธีของ ACI 318R-99 จะต้องออกแบบให้เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากก่อนที่ความเครียดสูงสุดในคอนกรีตที่รับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003 และกำลังต้านทานโมเมนต์ประลัยของรอยต่อที่คูณด้วยตัวลดกำลัง จะต้องมีความเกินกว่าโมเมนต์ประลัยที่เกิดขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ $M_u = 1.7M_L$ เมื่อ M_L คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักจร อัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่รอยต่อจะได้จากการแก้สมการที่ 4.3 ดังนี้

$$\rho = \frac{1}{m} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right) \quad (4.5)$$

ง. หน่วยแรงเฉือนในทางราบ

การวิบัติของโครงสร้างโดยแรงเฉือนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วปราศจากสัญญาณเตือนใดๆ ดังนั้นการออกแบบจึงจำเป็นต้องตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนไม่ให้เกิดตามที่มาตรฐานกำหนด การออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318R-99 โดยวิธีกำลังประลัย (Strength Design) กำหนดให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้น $V = 1.4V_D + 1.7V_L$ เมื่อ V_D คือ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักตายตัว และ V_L คือ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักจร และโครงสร้างจะต้องมีกำลังต้านทานแรงเฉือนประลัย (Nominal Shear Resistant) มากกว่าหน่วยแรงเฉือนประลัย (Ultimate Shear) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\phi v_n \geq v_u \quad (4.6)$$

หน่วยแรงเฉือนในทางราบที่รอยต่อระหว่างผิวแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า อาจคำนวณโดยวิธีอีลาสติก $v_u = VQ/Ib$ เมื่อ V คือ หน่วยแรงเฉือนที่คูณด้วยตัวเพิ่มกำลัง Q คือ โมเมนต์ครั้งแรกของพื้นที่ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดเชิงประกอบ และ b คือ ความกว้างของพื้นที่รับแรงเฉือน ค่าที่ได้จะต้องน้อยกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนประลัยที่รอยต่อระหว่างผิวแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า จากการวิเคราะห์ตัวอย่างทดสอบที่วิบัติโดยแรงเฉือนพบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนประลัยที่ผิวรอยต่อมีค่าอยู่ระหว่าง 7.35 ถึง 10.93 กก./ซม.² มีค่า

เฉลี่ยเท่ากับ 8.79 กก./ซม.^2 เมื่อคูณด้วยตัวลดกำลัง 0.85 จะได้หน่วยแรงเฉือนที่ยอมให้มีค่าเท่ากับ 7.47 กก./ซม.^2 หรืออาจเขียนเป็นสมการตามที่แสดงในรูปที่ 4.12 ได้ค่าหน่วยแรงเฉือนประลัยที่ฝัวยรอยต่อเท่ากับ $0.61 \sqrt{f'_c}$ (กก./ซม.²)

จ. การควบคุมการแอ่นตัว

การแอ่นตัวที่ช่วงกลางของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบและรอยต่อเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ ขึ้นอยู่กับความยาวช่วง แรงกระทำ คุณสมบัติของหน้าตัด และพฤติกรรมการต่อเนื่อง ในช่วงก่อนที่หน้าตัดจะเกิดรอยแตกร้าวการแอ่นตัวของคานอาจคำนวณได้โดยวิธีอีลาสติก แต่เมื่อหน้าตัดเกิดการแตกร้าวการคำนวณระยะการแอ่นตัวที่ช่วงกลางจะต้องใช้โมเมนต์ความเฉื่อยประลัยที่เสนอของ Branson, D. E. ซึ่งต่อมาได้บรรจุในมาตรฐาน ACI 318R-99 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \quad (4.7)$$

งานวิจัยได้เสนอโมเมนต์ความเฉื่อยประลัย โดยใช้ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งที่จุดรองรับ ซึ่งได้จากการแปลงความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัวที่ช่วงกลางโดยคำนวณจากสมการ $I_e = M/(\phi E_{cip})$ เมื่อ M , ϕ คือ โมเมนต์ดัดและความโค้งตั้งแต่เริ่มให้น้ำหนักกระทั่งเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อถึงจุดคราก และ E_{cip} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเทปหน้าผลจากการคำนวณได้ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ความเฉื่อยและโมเมนต์ดัดบริเวณรอยต่อ ของตัวอย่างทดสอบที่มีปริมาณเหล็กเสริมที่รอยต่อเป็นตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{I_e}{I_g} = (130.9\rho + 0.18) \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^{(2.70-338.4\rho)} \quad (4.8)$$

โดยที่ M_{cr} = โมเมนต์แตกร้าวของคาน, กก.-ม.

M_a = โมเมนต์ดัดสูงสุดในขณะที่คำนวณหาระยะการแอ่นตัว, กก.-ม.

I_g = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดทั้งหมด, ซม.³

I_{cr} = โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดภายใต้การเกิดการแตกร้าว, ซม.³

ρ = ปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่ของหน้าตัดบริเวณรอยต่อ

บทที่ 5

บทสรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมการต่อเนื่องของระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดกลวง ด้วยการทดสอบแผ่นพื้นสำเร็จรูปหน้าตัดกลวงหนา 15 ซม. กว้าง 60 ซม. มีช่วงการทดสอบ 375 ซม. เททับหน้าให้ต่อเนื่องกันที่รอยต่อ แยกการทดสอบออกเป็น 3 ชุด ชุดแรกใช้ปริมาณเหล็กเสริมที่รอยต่อเป็นตัวแปร ชุดที่สองให้ระยะห่างของชั้นส่วนสำเร็จรูปที่รอยต่อเป็นตัวแปร และชุดสุดท้ายใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง โดยทดสอบพื้นสำเร็จรูปช่วงเดียวที่มีคอนกรีตเททับหน้า ผลจากการศึกษาวิจัยภายใต้ขอบข่ายการทดสอบ และวิเคราะห์ผลในพฤติกรรมต่างๆ สามารถสรุปได้คือ

1.) พฤติกรรมการดัดของรอยต่อซึ่งเป็นพฤติกรรมร่วมของโครงสร้างคอนกรีตของระบบอัดแรงสำเร็จรูปและระบบเชิงประกอบ แสดงพฤติกรรมการสนองตอบกับน้ำหนักบรรทุกจากแรงภายนอกที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ใช้กำลังอัดของคอนกรีตตามแบบจำลองของ Hognestad และกำลังดึงจากผลการทดสอบของเหล็กเสริม พบว่ากำลังดัดแตก ร้าว กำลังดัดที่จุดคราก และค่าสติฟเนสก่อนการร้าวสอดคล้องกันอย่างมากกับผลการทดสอบ โดยค่าความแตกต่างอยู่ในพิสัยไม่เกินร้อยละ 5 แต่ทั้งนี้เฉพาะตัวอย่างทดสอบที่แสดงพฤติกรรมการดัดได้สมบูรณ์เท่านั้น โดยไม่รวมตัวอย่างทดสอบที่วิบัติด้วยการเฉือน

2.) ด้วยปริมาณเหล็กเสริมของรอยต่อที่มีอิทธิพลต่อความเหนียวทางโครงสร้างในการควบคุมพฤติกรรมการดัดให้เกิดโมเมนต์พลาสติกได้อย่างสมบูรณ์ จากข้อเสนอของ ACI กำหนดให้ดัชนีความเหนียวทางโครงสร้างเกินกว่า 3.0 สำหรับโครงสร้างต่อเนื่อง ซึ่งผลการทดสอบในงานวิจัยนี้สามารถกำหนดปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดได้ที่ 0.41 ของปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุล ในขณะที่ผลจากการวิเคราะห์กำลังดัดด้วยทฤษฎีความเครียดสอดคล้องให้ค่าที่ 0.56 มีความแตกต่างกันอยู่ประมาณร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบ

3.) พฤติกรรมการกระจายโมเมนต์ดัดจากรอยต่อที่เป็นจุดวิกฤติไปสู่จุดที่วิกฤติของบริเวณข้างเคียง ซึ่งตามข้อกำหนดของ ACI 318R-99 ระบุให้การกระจายโมเมนต์ดัดได้ไม่เกินร้อยละ 20 เพื่อควบคุมขนาดรอยแตกร้าวและการแอ่นตัว จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณเหล็กเสริมที่เกินกว่า 0.23 ของปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุล จะทำให้การกระจายค่าของโมเมนต์ดัดเกินกว่าร้อยละ 20 ได้

4.) ความกว้างของรอยต่อแผ่นพื้นสำเร็จรูปที่มีขนาดเกินกว่า 3 เท่าของขนาดมวลรวม จะไม่มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเททับหน้า ซึ่งบ่งว่าการเทคอนกรีตในซอกรอยต่อเป็นได้โดยสมบูรณ์ แต่ความกว้างของรอยต่อจะมีอิทธิพลต่อแรงดัดที่ศูนย์กลางของแท่นรองรับลดลง จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้ระยะถึงศูนย์กลางแท่นรองรับเป็นความยาวช่วง พบว่าความกว้างรอยต่อ 5, 15 และ 25 ซม. จะให้ค่าแรงดัดที่ศูนย์กลาง

กลางแท่นลดลงร้อยละ 11, 13 และ 15 ตามลำดับ และเมื่อตรวจเทียบกับค่าแรงตัดจากความเครียดในเหล็กเสริมพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน

5.) การตัดของรอยต่อในระบบการต่อเนื่องจากแรงดึงของเหล็กเสริมที่ผิวบนในคอนกรีตเททับหน้า และแรงอัดของคอนกรีตในส่วนของรอยต่อที่อยู่ผิวล่างสัมพันธ์กับแท่นรองรับที่แสดงพฤติกรรมการโอบรัด และมีอิทธิพลต่อกำลังดัดและความเหนียวทางโครงสร้าง เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์กำลังดัดโดยพิจารณาผลการโอบรัดตามแบบจำลองของ Popovics พบว่าจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ความเหนียวเพิ่มขึ้นถึง 10% ทั้งนี้อาจถือว่าการโอบรัดไม่มีนัยสำคัญต่อกำลังดัดประลัยของหน้าตัด แต่จะให้ความเหนียวทางโครงสร้างเชิงอนุรักษ์มากขึ้น

6.) แนวทางการออกแบบรอยต่อของระบบพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปหน้าตัดกลมวง จากการศึกษพบว่าน้ำหนักบรรทุกในการวิเคราะห์โครงสร้างของระบบแผ่นพื้นต่อเนื่อง จะสามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจรในการคำนวณโมเมนต์ดัดที่รอยต่อได้ถึง 1.75 เท่าของน้ำหนักบรรทุกจรของพื้นช่วงเดียว แต่การคำนวณออกแบบของปริมาณเหล็กเสริมจะถูกกำหนดไว้ไม่เกิน 0.41 ของปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุลของหน้าตัด ทั้งนี้จะต้องตรวจสอบแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้าด้วยค่าประลัยไม่เกิน $0.61 \sqrt{f'_c}$ (กก./ซม.²) อนึ่งควรตรวจสอบการแอ่นตัวด้วยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำกว่าที่ร้อยละ 25 ของหน้าตัดเต็ม และจะต้องมีปริมาณเหล็กเสริมกันรั้วไม่น้อยกว่า 0.23 ของปริมาณเหล็กเสริมที่ภาวะสมดุล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- 1.) Lin, T. Y. and Burns, N.H. Design of Prestressed Concrete Structures(SI Version). 3rd ed. New York : John Wiley & Sons 1982.
- 2.) Park, R. and Paulay, T. Reinforced Concrete Structures New York : John Wiley & Sons 1975.
- 3.) ACI Committee 318, Building Code Requirements For Reinforced Concrete (ACI 318-99) and Commentary(ACI 318R-99), American Concrete Institute (March 1999) 391 pp.
- 4.) Alvarez, M.; Koppel, S. and Marti, P. Rotation Capacity of Reinforced Concrete Slabs, ACI Structural Journal Vol. 97, No. 2 (March-April 2000) : 235-242.
- 5.) Becker, R. J. and Buettner, D. R. Shear Test of Extruded Hollow-Core Slabs , PCI Journal Vol.30, No.2 (Mar-Apr 1985) : 40-54.
- 6.) Birkeland, P. W. and Birkeland, H. W. Connection in Precast Concrete Construction, ACI Journal Vol. 63, No. 3 (March 1966) : 345-367.
- 7.) Burns, N. H. Moment Curvature Relationships For Partially Prestressed Concrete Beams, PCI Journal Vol.9, No.1 (February 1964) : 52-63.
- 8.) Cohn, M. Z. Inelastic of Reinforced Concrete and Structure Standards, Journal of the Structural Division, ASCE Vol.105, No.ST11 (November 1979) : 2221-2241.
- 9.) Furlong, R. W. Design of Concrete Frames by Assigned Limit Moment, ACI Journal Proceeding Vol. 67, No. 4 (April 1970) : 341-353.
- 10.) Hanson, N. W. Precast - Prestressed Concrete Bridges, 2-Horizontal Shear Connections, Journal of the PCA Research and Development Laboratories Vol. 2, No. 2 (May 1960) : 38-58.
- 11.) Hognestad, E.; Hanson, N. W. and Mchenry, D. Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design, ACI Journal Proceeding Vol. 52, No. 6 (December 1955) : 455-479.
- 12.) Kaar, P. H.; Kriz, L. B.; and Hognestad, E. Precast - Prestressed Concrete Bridges.(1)Pilot Tests of Continuous Girders, Journal of the PCA Research and Development Laboratories Vol. 2, No. 2 (May 1960) : 21-37.

- 13.) Loov, R. E. Horizontal Shear Strength of Composite Concrete Beams With a Rough Interface, PCI Journal, Vol. 39, No. 1 (Jan.-Feb. 1994) : 48-69.
- 14.) Mast, R. F. Auxiliary Reinforced in Concrete Connections, Journal of the Structural Division, Proceedings, ASCE Vol.94, No.ST6 (June 1968) : 1485-1504.
- 15.) Popovic, S., A Review of Stress-Strain Relationships for Concrete, ACI Journal Vol. 67, No. 3 (Mar 1970) : 243-248.
- 16.) Rosenthal, I. Full Scale Test of Continuous Prestressed Hollow-Core Slab, PCI Journal Vol.23, No.3 (May-June 1978) : 74-81.
- 17.) Rostasy, F. S. Connections in Precast Concrete Structures-Continuity in Double-T-Floor Construction, J. Prestressed Conc. Inst., August 1962
- 18.) Scholz, H. Contribution to Redistribution of Moment in Continuous Reinforced Concrete Beam, ACI Structural Journal Vol. 90, No. 2 (March-April 1993) : 150-155.
- 19.) Scott, N. L. Performance of Precast Prestressed Hollow Core Slab with Composite Concrete Topping, PCI Journal Vol.18, No.2 (Mar-Apr 1973) : 64-77.
- 20.) Saemann, J. C. and Washa, G. W. Horizontal Shear Connector Between Precast Beam and Cast-in-Place Slabs, ACI Journal Proceedings Vol. 61, No. 11 (November 1964) : 1383-1408.
- 21.) Tang, K. H.; Zheng, L. X. and Paramasivam, P. Designing Hollow-Core Slabs for Continuity, PCI Journal Vol. 41, No. 1 (Jan.-Feb. 1996) : 82-91.
- 22.) Ueda, T. and Stitmannathum, B. Shear Strength of Precast Prestressed Hollow Slab with Concrete Topping, ACI Structural Journal Vol. 88, No. 4 (July-August 1991) : 402-409.



รายการตารางประกอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 รายการทดสอบ และรายละเอียดการทดสอบ

ก.) ตัวอย่างทดสอบที่มีปริมาณเหล็กเสริมเป็นตัวแปร

Specimen No.	Topping Concrete at Test		Precast Hollow Core at Test		Continuity Steel				Support Width (cm.)
	Ultimate Strength (ksc.)	Young's Modulus ($\times 10^5$ ksc.)	Ultimate Strength (ksc.)	Yong's Modulus ($\times 10^5$ ksc.)	Number and size of bars	Yield strength (ksc.)	ρ	ρ/ρ_b	
HC-35-9B	250	2.40	360	2.84	2DB12	4,814	0.0019	0.09	35.00
HC-35-19B	230	2.31	340	2.77	4DB12	4,814	0.0038	0.20	35.00
HC-35-28B	250	2.37	360	2.85	6DB12	4,814	0.0058	0.27	35.00
HC-35-52B*	190	2.07	340	2.73	5DB16	5,602	0.0085	0.66	35.00
HC-35-98B*	230	2.31	340	2.73	9DB16	5,602	0.0152	0.98	35.00

ρ คือ ปริมาณเหล็กเสริมพื้นฐานรองรับ

ρ/ρ_b คือ ปริมาณเหล็กเสริมพื้นฐานรองรับเทียบกับ ปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล

* ทดสอบแบบคานยื่น

ข.) ตัวอย่างทดสอบที่มีระยะห่างของชั้นส่วนสำเร็จรูปเป็นตัวแปร

Specimen No.	Topping Concrete at Test		Precast Hollow Core at Test		Continuity Steel				Support Width (cm.)
	Ultimate Strength (ksc.)	Young's Modulus ($\times 10^5$ ksc.)	Ultimate Strength (ksc.)	Yong's Modulus ($\times 10^5$ ksc.)	Number and size of bars	Yield strength (ksc.)	ρ	ρ/ρ_b	
HC-25-28B	180	2.04	340	2.75	6DB12	4,814	0.0058	0.38	25.00
HC-35-28B	250	2.37	360	2.85	6DB12	4,814	0.0058	0.27	35.00
HC-45-28B	210	2.17	340	2.76	6DB12	4,814	0.0058	0.33	45.00

ค.) ตัวอย่างทดสอบแผ่นพื้นสำเร็จรูปช่วงเดียว

Specimen No.	Topping Concrete at Test		Precast Hollow Core at Test		Continuity Steel				Support Width (cm.)
	Ultimate Strength (ksc.)	Young's Modulus ($\times 10^5$ ksc.)	Ultimate Strength (ksc.)	Yong's Modulus ($\times 10^5$ ksc.)	Number and size of bars	Yield strength (ksc.)	ρ	ρ/ρ_b	
HC-SS**	230	2.31	380	2.73	-	-	-	-	-

** ทดสอบในลักษณะคานช่วงเดียว

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมสำหรับคอนกรีตหล่อในที่เททับหน้า

คอนกรีต 1 ลบ.เมตร มีปริมาณส่วนผสมต่างๆ ดังนี้

วัสดุ	ปริมาณ (กก./ม. ³)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ประเภทที่ 1)	410
ทราย	700
หิน (3/4 นิ้ว)	1050
น้ำ	200

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติลวดเหล็กอัดแรง (Prestressed Steel)

Specimen No.	Type of Specimen	Size of Specimen	Ultimate Load (kg.)	Length (cm.)	Weigth (gm.)	Area (cm ² .)	Gage per Length (cm.)	Elongation (cm.)
1	PC Wire	5 mm.	3,730	59.60	90.40	0.193	20.00	0.90
2	PC Wire	5 mm.	3,700	60.20	91.60	0.194	20.00	0.90
3	PC Wire	5 mm.	3,690	60.70	92.00	0.193	20.00	0.93
4	7 Wire Strand	3/8 in.	10,950	60.00	256.40	0.544	10.00	0.45
5	7 Wire Strand	3/8 in.	11,000	60.20	256.10	0.542	10.00	0.45
6	7 Wire Strand	3/8 in.	10,900	59.30	255.20	0.548	10.00	0.48

นำข้อมูลมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

$$A_{ps} \text{ (average) for PC Wire} = 0.193 \text{ cm}^2.$$

$$f_{py} \text{ (average) for PC Wire} = 16,509 \text{ ksc.}$$

$$f_{pu} \text{ (average) for PC Wire} = 19,168 \text{ ksc.}$$

$$E_{ps} \text{ (average) for PC Wire} = 2.03 \times 10^6 \text{ ksc.}$$

$$A_{ps} \text{ (average) for 7 Wire Strand} = 0.545 \text{ cm}^2.$$

$$f_{py} \text{ (average) for 7 Wire Strand} = 16,607 \text{ ksc.}$$

$$f_{pu} \text{ (average) for 7 Wire Strand} = 20,098 \text{ ksc.}$$

$$E_{ps} \text{ (average) for 7 Wire Strand} = 2.01 \times 10^6 \text{ ksc.}$$

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติเหล็กเสริมธรรมดา (Rebar)

Specimen No.	Size of Specimen (SD40)	Load		Length (cm.)	Weighth (gm.)	Area (cm ² .)	Gage per Length (cm.)	Elongation (cm.)	Young's Modulus (ksc.)
		Yield (kg.)	Ultimate (kg.)						
1	DB12	5,400	7,200	48.60	432.50	1.13	20.00	4.10	2,157,664
2	DB12	5,500	7,350	48.50	432.80	1.14	20.00	3.70	1,993,021
3	DB12	5,400	7,250	49.75	435.60	1.12	20.00	3.75	2,109,530
4	DB16	11,450	12,500	53.20	834.20	2.00	10.00	1.80	2,104,722
5	DB16	11,100	12,750	52.40	816.30	1.98	10.00	1.80	2,015,631
6	DB16	10,900	12,600	51.70	807.10	1.99	10.00	1.60	1,897,522

นำข้อมูลมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

$$A_s \text{ (average) for DB12} = 1.13 \text{ cm}^2.$$

$$f_y \text{ (average) for DB12} = 4,814 \text{ ksc.}$$

$$f_u \text{ (average) for DB12} = 6,439 \text{ ksc.}$$

$$E_s \text{ (average) for DB12} = 2.08 \times 10^6 \text{ ksc.}$$

$$A_s \text{ (average) for DB16} = 1.99 \text{ cm}^2.$$

$$f_y \text{ (average) for DB16} = 5,602 \text{ ksc.}$$

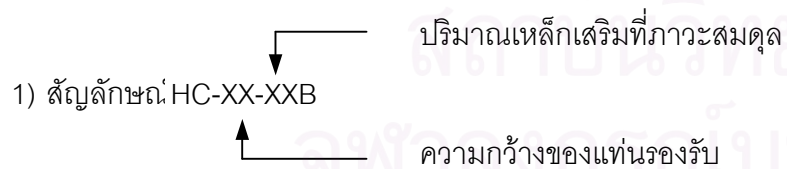
$$f_u \text{ (average) for DB16} = 6,339 \text{ ksc.}$$

$$E_s \text{ (average) for DB16} = 2.01 \times 10^6 \text{ ksc.}$$

ตารางที่ 4.1 ความเหนียวทางโครงสร้างของรอยต่อที่มีปริมาณเหล็กเสริมต่างกัน

Specimen No.	ที่จุดรองรับ B1					ที่จุดรองรับ B2					Average	REMARK
	M_y (kg.-m.)	θ_y (rad./cm.)	M_u (kg.-m.)	θ_u (rad./cm.)	θ_u/θ_y	M_y (kg.-m.)	θ_y (rad./cm.)	M_u (kg.-m.)	θ_u (rad./cm.)	θ_u/θ_y		
HC-35-9B	1,848	1.32E-4	2,072	1.84E-3	14.00	1,848	1.32E-4	1,980	2.11E-3	15.99	15.00	
HC-35-19B	3,406	1.67E-4	3,931	1.00E-3	6.00	3,343	1.69E-4	3,795	1.40E-3	8.28	7.14	
HC-35-28B	5,370	2.13E-4	5,540	7.68E-4	3.61	5,284	2.17E-4	5,567	1.20E-3	5.54	4.57	
HC-35-52B*	-	-	-	-	-	8,241	3.14E-4	8,340	3.18E-4	1.01	1.01	Hor. Shear
HC-35-98B*	-	-	-	-	-	-	-	8,115	2.41E-4	-	-	Hor. Shear
HC-25-28B	5,218	2.35E-4	5,282	3.71E-4	1.58	5,080	2.38E-4	5,338	3.82E-4	1.60	1.59	Hor. Shear
HC-45-28B	5,105	2.67E-4	5,382	7.26E-4	2.72	4,926	2.74E-4	5,226	7.44E-4	2.71	2.71	Hor. Shear
HC-SS**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

หมายเหตุ



- 1) สัญลักษณ์: HC-XX-XXB
- 2) * ทดสอบแบบคานยื่น
- 3) ** ทดสอบแบบคานช่วงเดียว

ตารางที่ 4.2 การกระจายค่าของโมเมนต์ดัดตามปริมาณเหล็กเสริม

Specimen No.	When B1 yield (kg.-m.)		When B1 ultimate (kg.-m.)		When B2 yield (kg.-m.)		When B2 ultimate (kg.-m.)		Red. moment at D, $(M_2-M_1)/M_1$ (%)	Red. moment at E, $(M_2-M_1)/M_1$ (%)
	M_y at B1	M_1 at D	M_u at B1	M_2 at D	M_y at B2	M_1 at E	M_u at B2	M_2 at E		
HC-35-9B	1,848	4,607	2,072	5,757	1,848	4,556	1,980	5,836	24.97	28.10
HC-35-19B	3,406	4,841	3,931	5,832	3,343	4,702	3,795	5,702	20.48	21.28
HC-35-28B	5,370	5,161	5,540	5,673	5,189	5,284	5,567	5,830	9.93	10.34
HC-35-52B	8,241	4,217	8,340	4,189	-	-	-	-	0.66	-
HC-25-28B	5,218	5,227	5,282	5,532	5,080	5,117	5,338	5,515	5.84	7.79
HC-45-28B	5,105	5,185	5,382	5,629	4,926	5,156	5,226	5,600	8.55	8.63

หมายเหตุ

- 1) M_1 หมายถึง กำลังดัดของหน้าตัดที่ช่วงกลาง เมื่อกำลังดัดที่จุดรองรับถึงจุดคราก
- 2) M_2 หมายถึง กำลังดัดของหน้าตัดที่ช่วงกลาง เมื่อกำลังดัดที่จุดรองรับถึงจุดประลัย

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัด กับการวิเคราะห์ด้วยวิธีอีลาสติก

Specimen No.	M _u at D (kg.-m.)			M _u ที่จุดรองรับ B1 (kg.-m.)			M _u ที่จุดรองรับ B2 (kg.-m.)			M _u at E (kg.-m.)		
	Elastic theory	Exp.	Change in moment at D (%)	Elastic theory	Exp.	Change in moment at B1 (%)	Elastic theory	Exp.	Change in moment at B2 (%)	Elastic theory	Exp.	Change in moment at E (%)
HC-35-9B	4,505	5,757	27.78	4,492	2,072	53.87	4,696	1,980	57.83	4,671	5,836	24.95
HC-35-19B	5,308	5,832	9.88	5,317	3,931	26.07	5,150	3,795	26.30	5,117	5,702	11.43
HC-35-28B	5,754	5,673	1.40	5,739	5,540	3.48	6,041	5,567	7.84	6,001	5,830	2.85
HC-25-28B	5,542	5,532	0.18	5,545	5,282	4.74	5,439	5,338	1.86	5,445	5,515	1.29
HC-45-28B	5,722	5,629	1.62	5,725	5,382	5.99	5,592	5,226	6.54	5,600	5,600	0.01

หมายเหตุ

- 1) Elastic theory คือ การวิเคราะห์โมเมนต์ดัดโดยทฤษฎีอีลาสติก
- 2) Exp. คือ โมเมนต์ดัดของหน้าตัด ซึ่งได้จากการแปลงความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว
- 3) $M_{re} = 100(M_{exp} - M_{elas.}) / M_{elas.}$

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง

Specimen No.	f _c ' , topping (ksc.)	100ρ/p _b	Experimental						Strain compatibility	
			f _r (Neg.) (ksc.)	f _r (Pos.) (ksc.)	E _c (x10 ⁵ ksc.)	τ (ksc.)	tan∅	Max. Strain (x10 ⁻⁶)	f _r (ksc.)	E _c (x10 ⁵ ksc.)
HC-35-9B	250	9	27.96	34.95	2.88	-	-	12,600	31.46	2.84
HC-35-19B	230	20	30.71	27.69	2.84	-	-	2,620	30.18	2.77
HC-35-28B	250	27	30.37	26.47	2.86	-	-	3,220	31.46	2.85
HC-35-52B	190	66	27.35	32.44	2.75	10.93	0.348	2,443	27.43	2.58
HC-35-98B	230	98	28.61	-	2.61	9.20	0.423	1,389	30.18	2.58
HC-25-28B	180	38	25.61	30.48	2.52	7.35	0.480	3,980	26.70	2.75
HC-45-28B	210	33	25.88	28.52	2.61	7.69	0.465	5,850	28.84	2.70

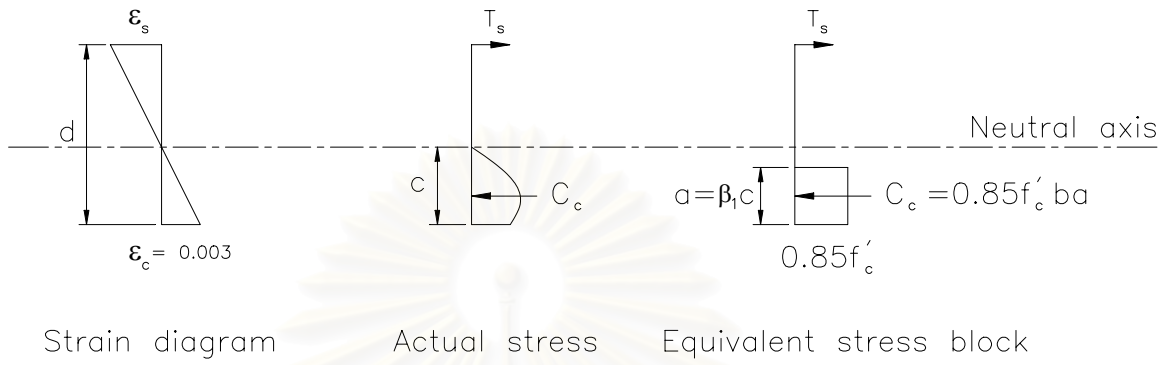
หมายเหตุ

- 1) f_r (Neg.) หมายถึง โมดูลัสแตกร้าวบริเวณรอยต่อเหนือจุดรองรับ
- 2) f_r (Pos.) หมายถึง โมดูลัสแตกร้าวบริเวณกลางช่วง

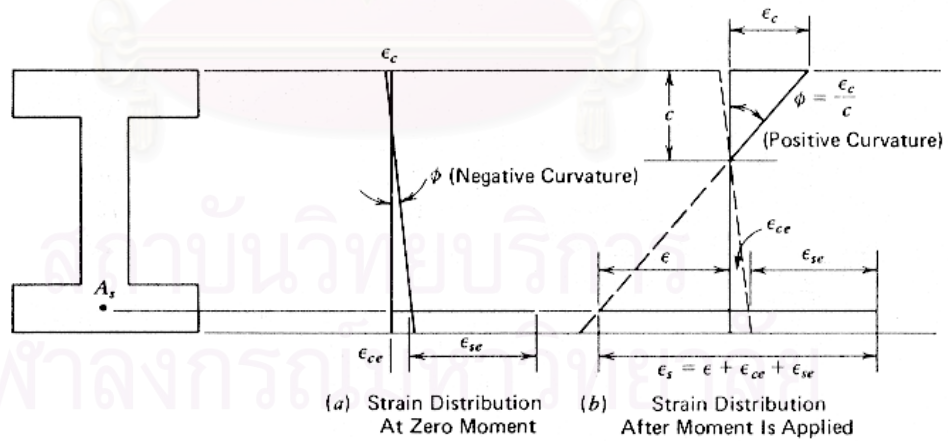


รายการรูปประกอบ

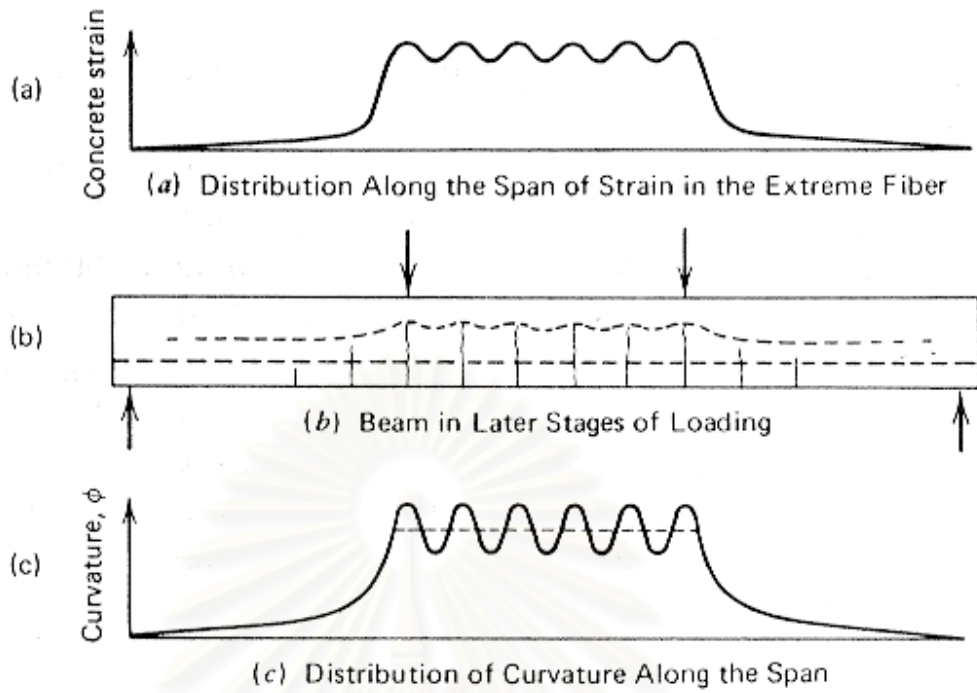
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



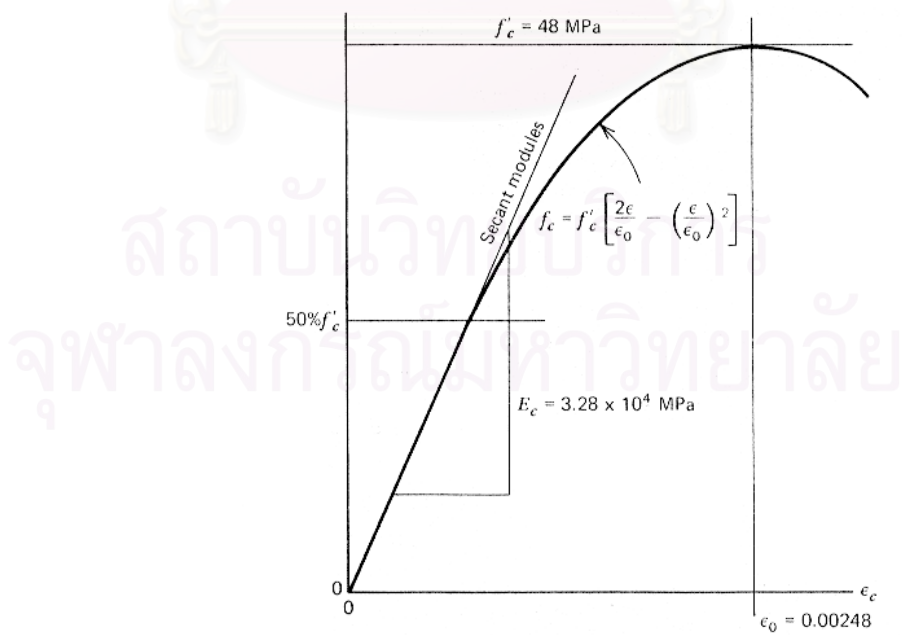
รูปที่ 2.1 การกระจายหน่วยแรงอัดในคอนกรีต เมื่อความเครียดในคอนกรีตมีค่าสูงสุด ($\epsilon_c=0.003$) ตามมาตรฐาน ACI



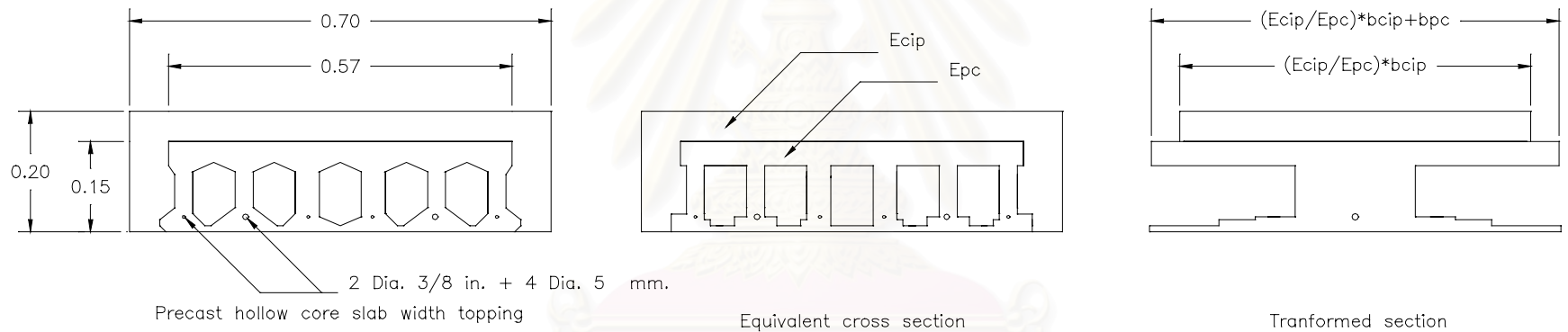
รูปที่ 2.2 การกระจายความเครียดตลอดความลึกของหน้าตัดเป็นเส้นตรง



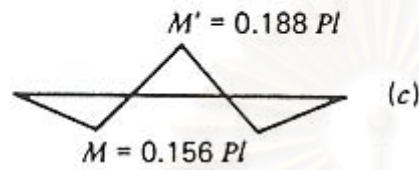
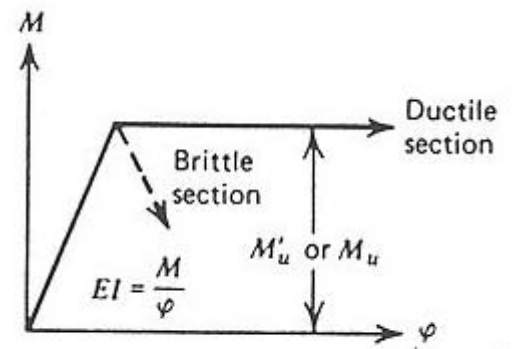
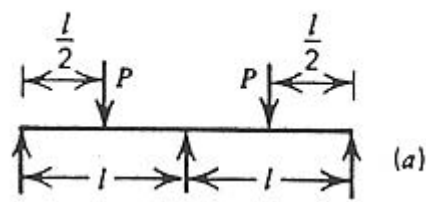
รูปที่ 2.3 ค่าความโค้งภายหลังหน้าตัดเกิดการแตกร้าว เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างความโค้งสูงสุดที่หน้าตัดแตกร้าว กับความโค้งต่ำสุดที่หน้าตัดซึ่งอยู่ระหว่างรอยแตกร้าว



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดคอนกรีต โดย Hognestad, E. ^[11]

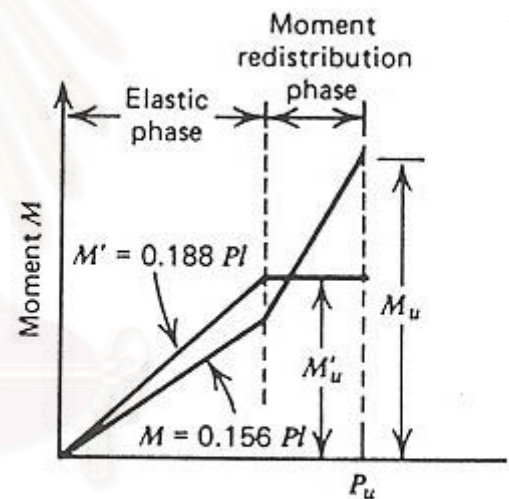
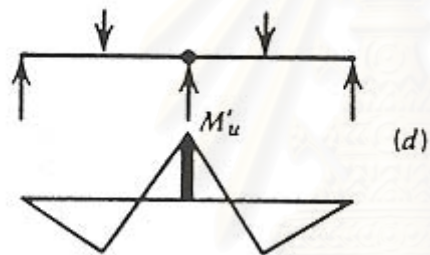


รูปที่ 2.5 หน้าตัดของแผ่นพื้นตัวอย่าง สำหรับคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง



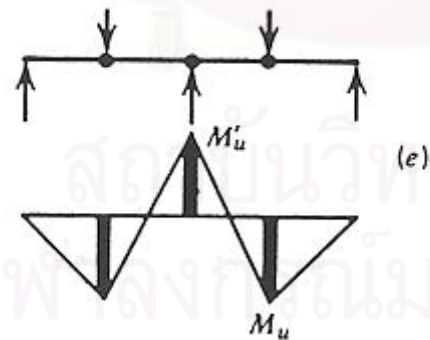
(b)

(c)



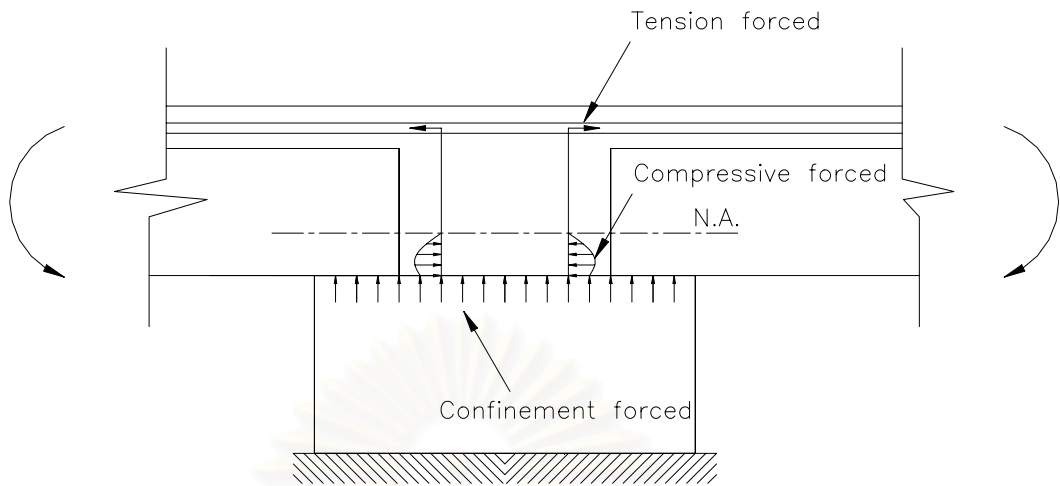
(d)

(f)

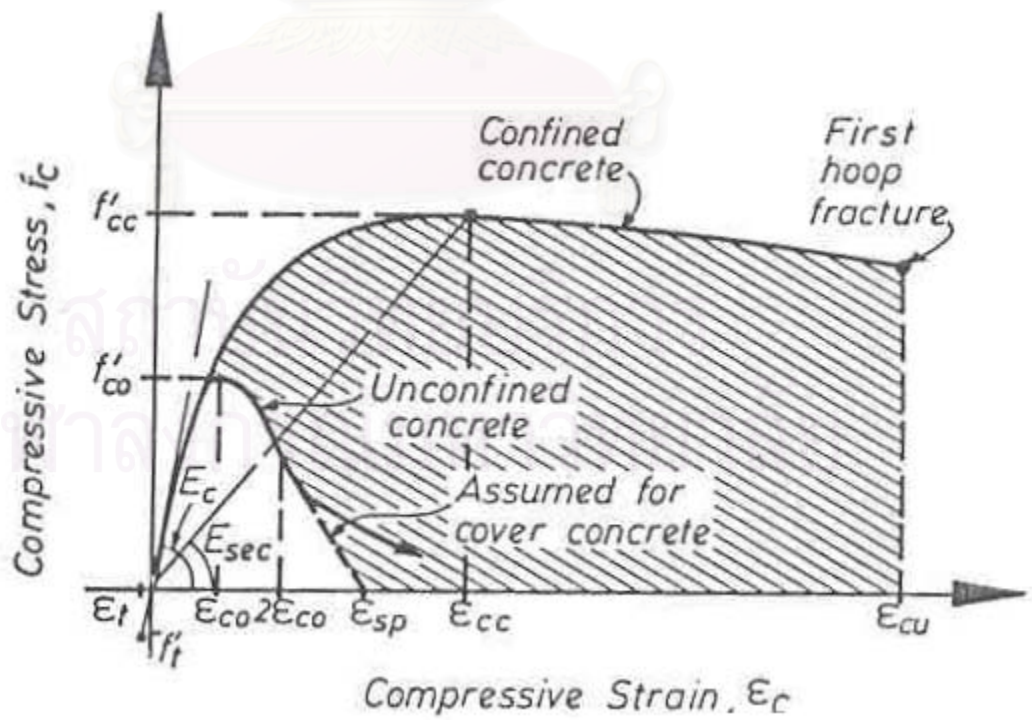


(e)

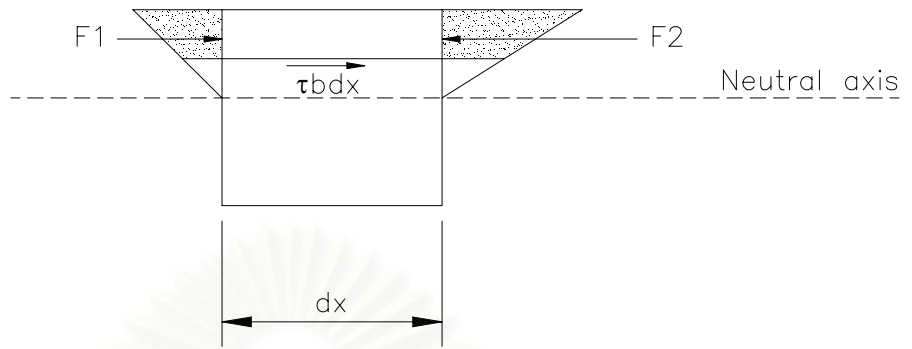
รูปที่ 2.7 พฤติกรรมการกระจายค่าของโมเมนต์ดัดจากรอยต่อไปสู่จุดวิกฤติที่กลางช่วง



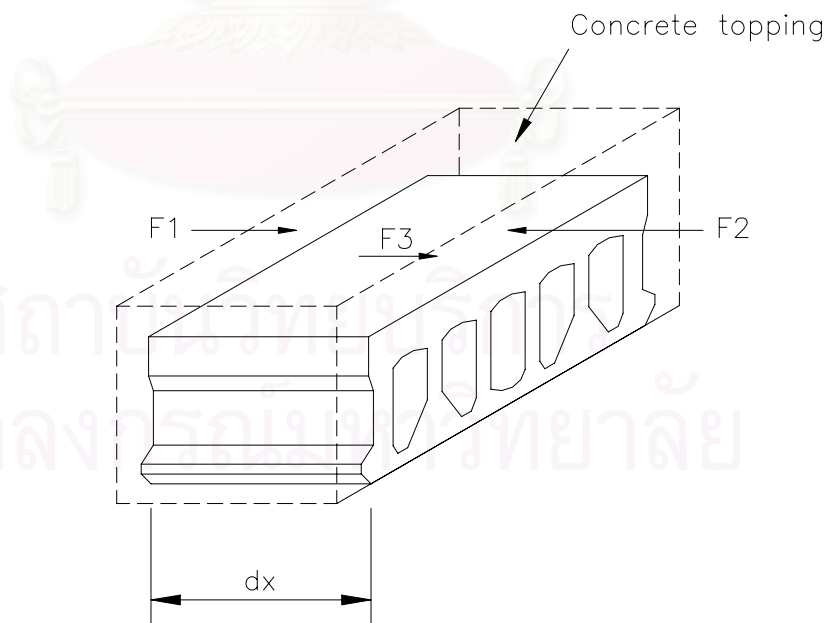
รูปที่ 2.8 การโอบรัดคอนกรีตบริเวณรอยต่อจากแท่นรองรับ



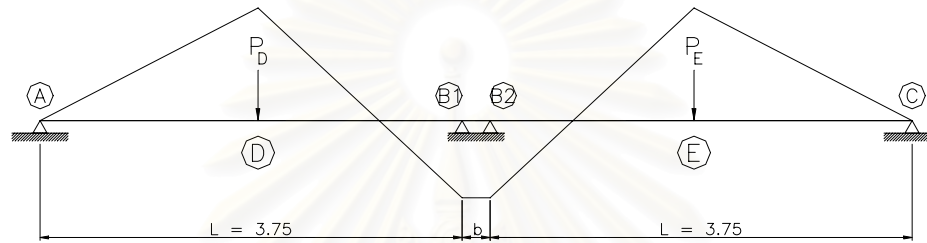
รูปที่ 2.9 แบบจำลองภายใต้การโอบรัดของ Popovics, S.^[15]



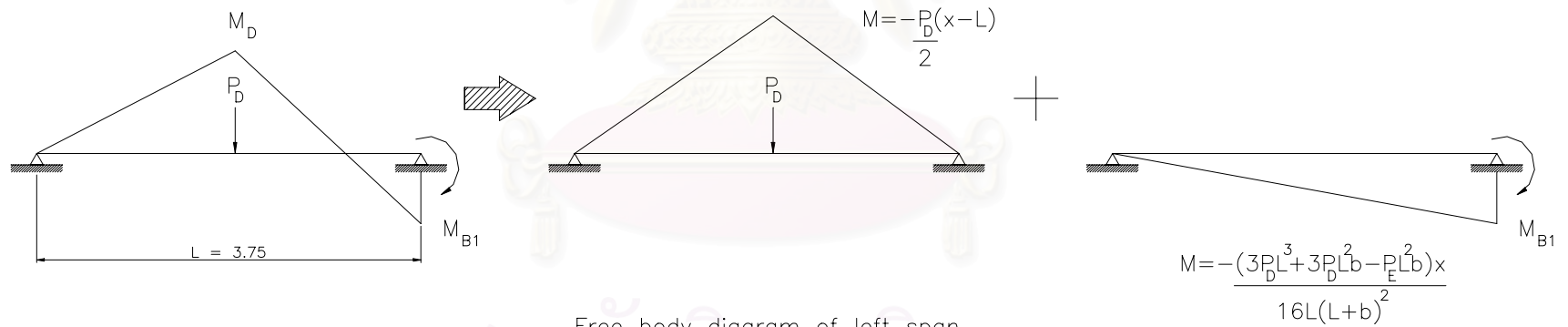
รูปที่ 2.10 หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนเล็กๆ



รูปที่ 2.11 หน่วยแรงเฉือนที่รอยต่อระหว่างผิวของแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า

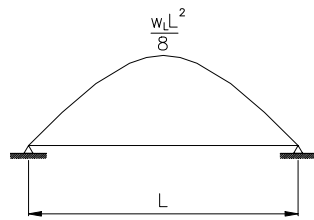


Bending moment diagram



Free body diagram of left span

รูปที่ 2.12 การแปลงความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งจากผลการทดสอบ



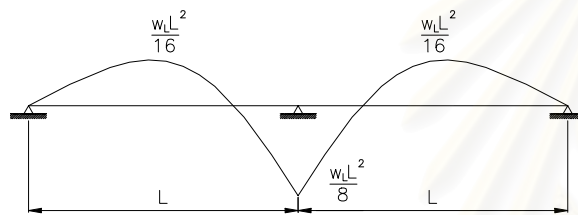
Simple span

$$M_{\text{cont.}}^+ = M_{\text{sim.}}^+$$

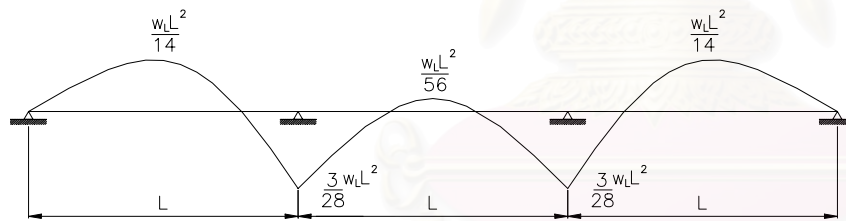
$$\frac{w_0 L^2}{8} + \frac{w L^2}{16} = \frac{w_0 L^2}{8} + \frac{w L^2}{8}$$

$$w = \left(\frac{16}{L^2}\right) \left(\frac{w_0 L^2}{8}\right) = 2 w_0$$

$$\therefore M_{\text{cont.}}^- = \frac{(2w_0)L^2}{8} = 0.25 w_0 L^2$$



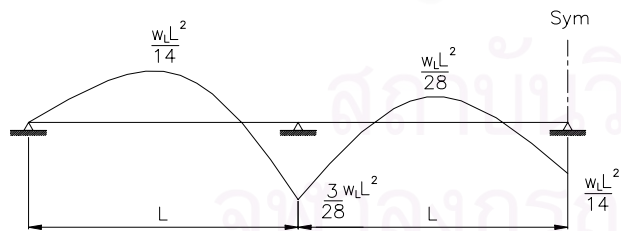
Two span



Three span

$$w = \left(\frac{14}{L^2}\right) \left(\frac{w_0 L^2}{8}\right) = 1.75 w_0$$

$$\therefore M_{\text{cont.}}^- = \frac{3(1.75w_0)L^2}{28} = 0.188 w_0 L^2$$

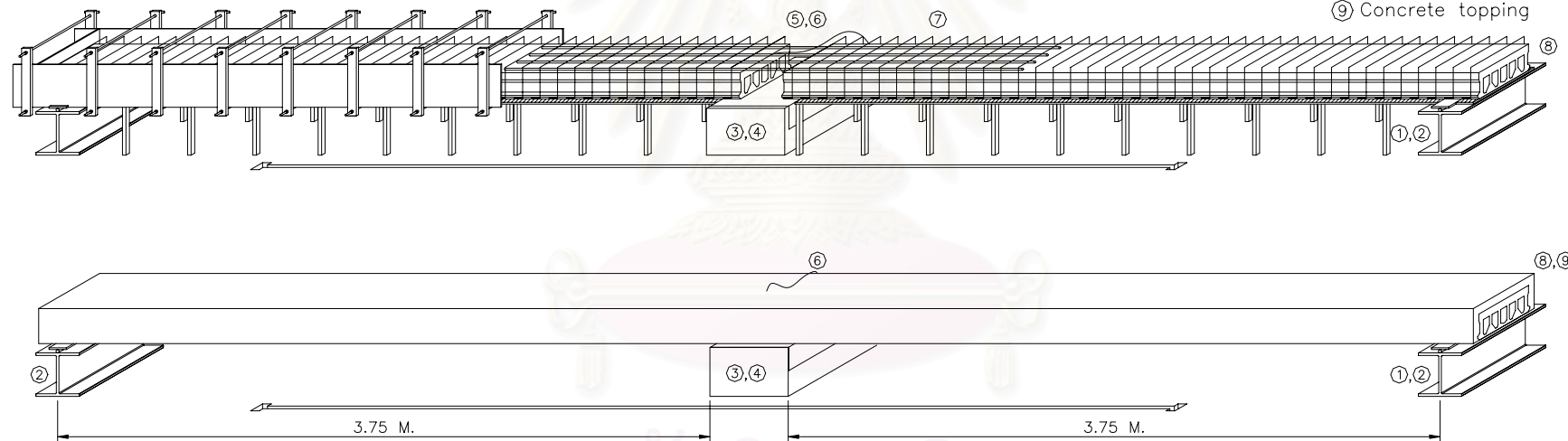


Four span

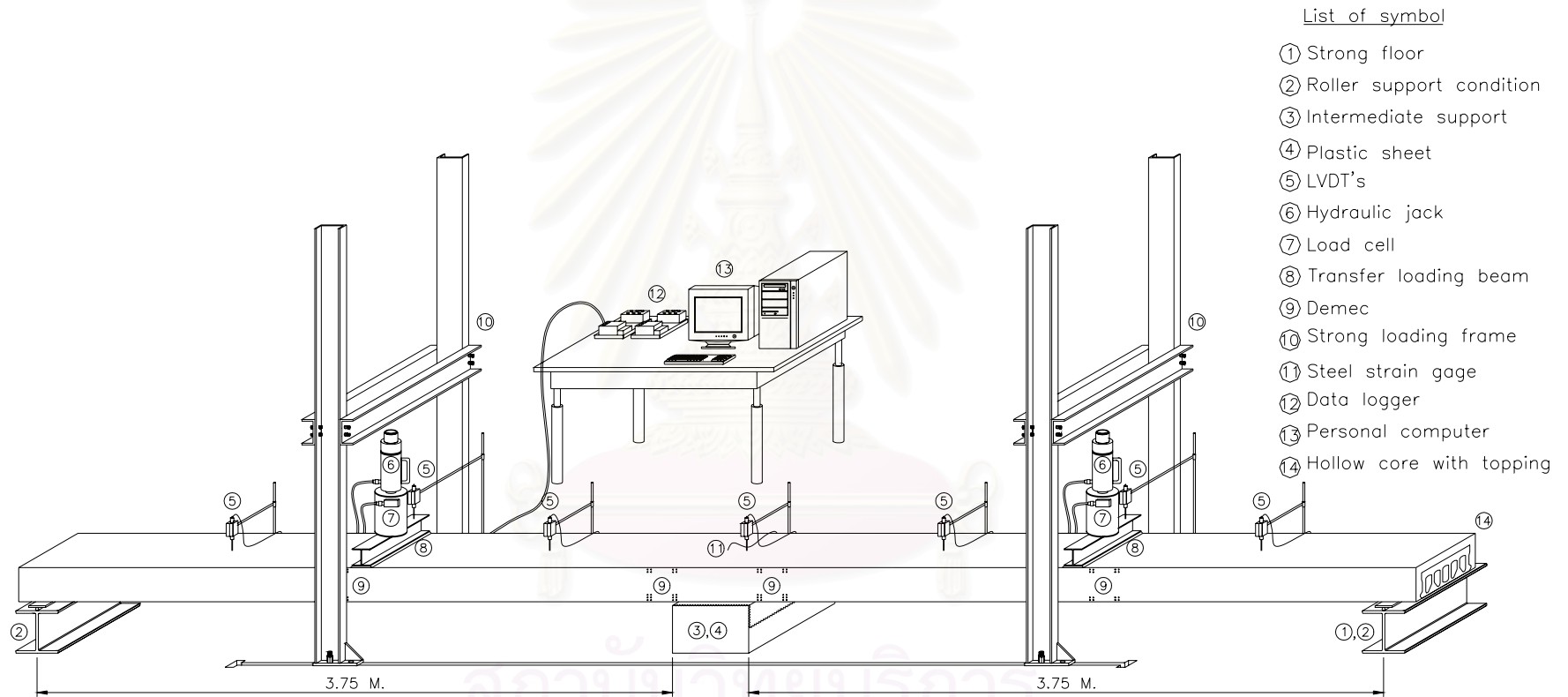
รูปที่ 2.13 โมเมนต์ไดอะแกรมเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจุด

List of symbol

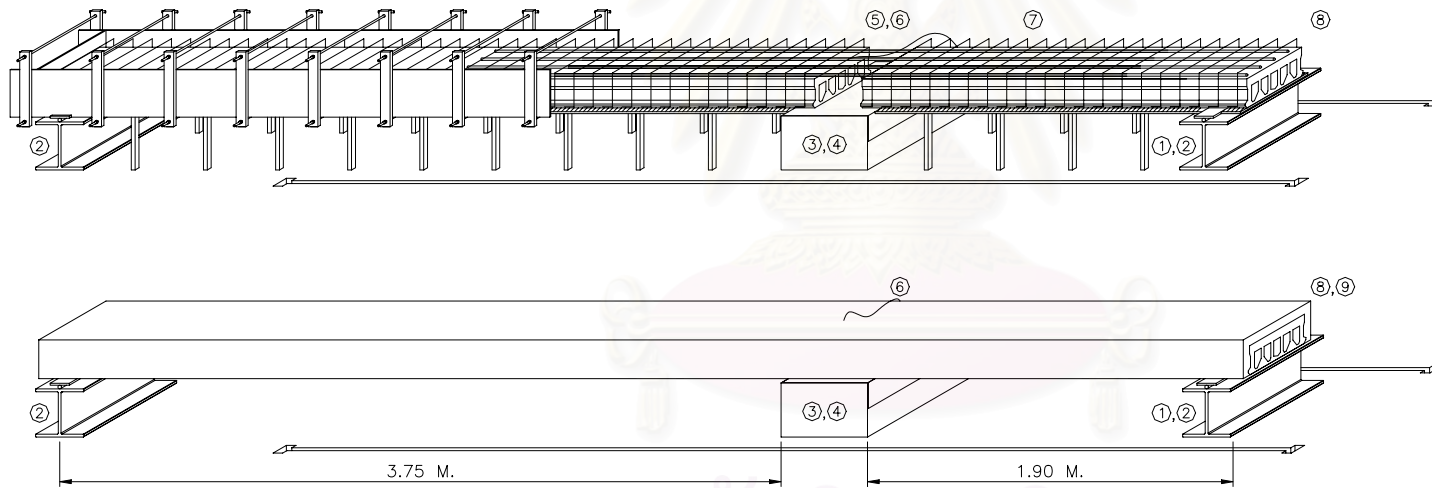
- ① Strong floor
- ② Roller support condition
- ③ Intermediate support
- ④ Plastic sheet
- ⑤ Continuity steel
- ⑥ Strain gauge
- ⑦ Ties bar (RB6 @10 cm.)
- ⑧ Hollow core
- ⑨ Concrete topping



รูปที่ 3.1 (ก.) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-35-9B, HC-35-19B, HC-35-28B, HC-25-28B และ HC-45-28B



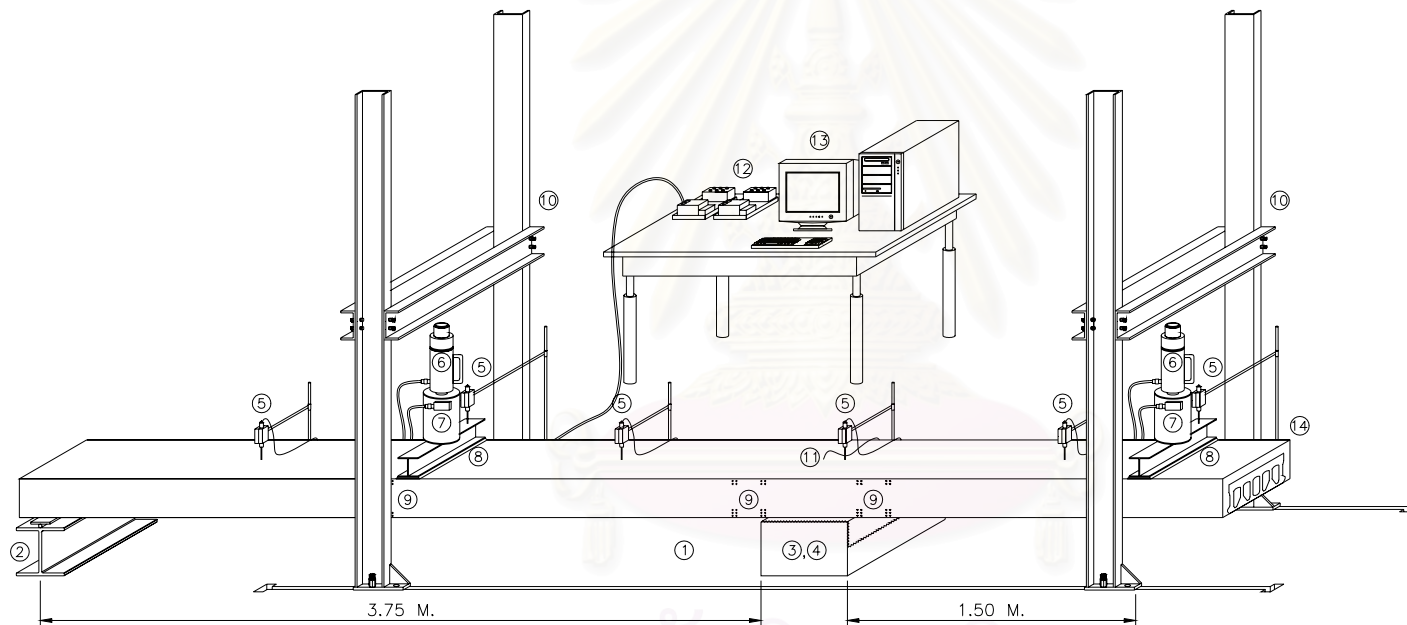
รูปที่ 3.1 (ข.) การติดตั้งชุดเครื่องทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-35-9B, HC-35-19B, HC-35-28B,
 HC-25-28B และ HC-45-28B



List of symbol

- ① Strong floor
- ② Roller support condition
- ③ Intermediate support
- ④ Plastic sheet
- ⑤ Continuity steel
- ⑥ Strain gauge
- ⑦ Ties bar (RB6 @10 cm.)
- ⑧ Hollow core
- ⑨ Concrete topping

รูปที่ 3.2 (ก.) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-35-52B และ HC-35-98B



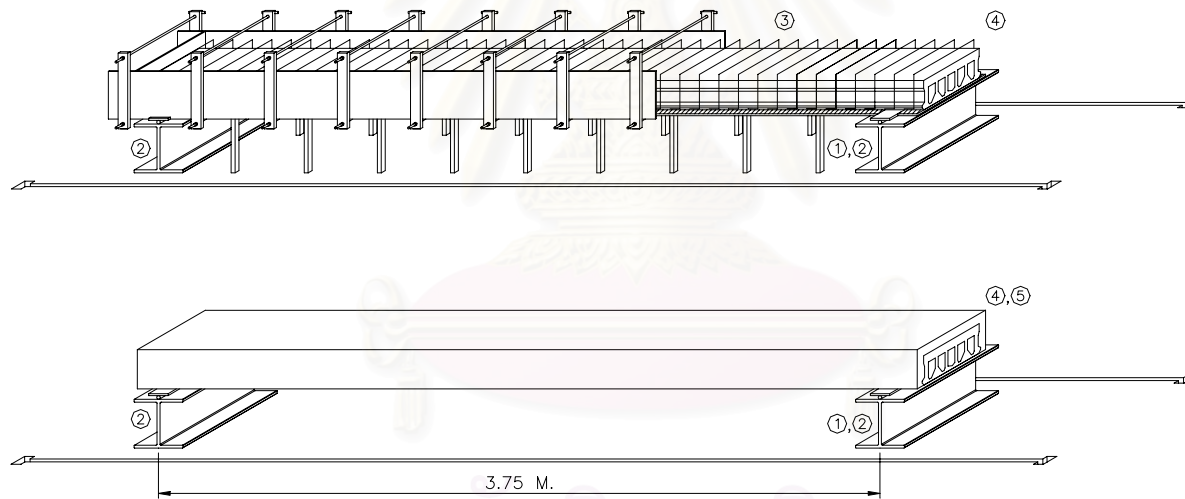
List of symbol

- ① Strong floor
- ② Roller support condition
- ③ Intermediate support
- ④ Plastic sheet
- ⑤ LVDT's
- ⑥ Hydraulic jack
- ⑦ Load cell
- ⑧ Transfer loading beam
- ⑨ Demec
- ⑩ Strong loading frame
- ⑪ Steel strain gage
- ⑫ Data logger
- ⑬ Personal computer
- ⑭ Hollow core with topping

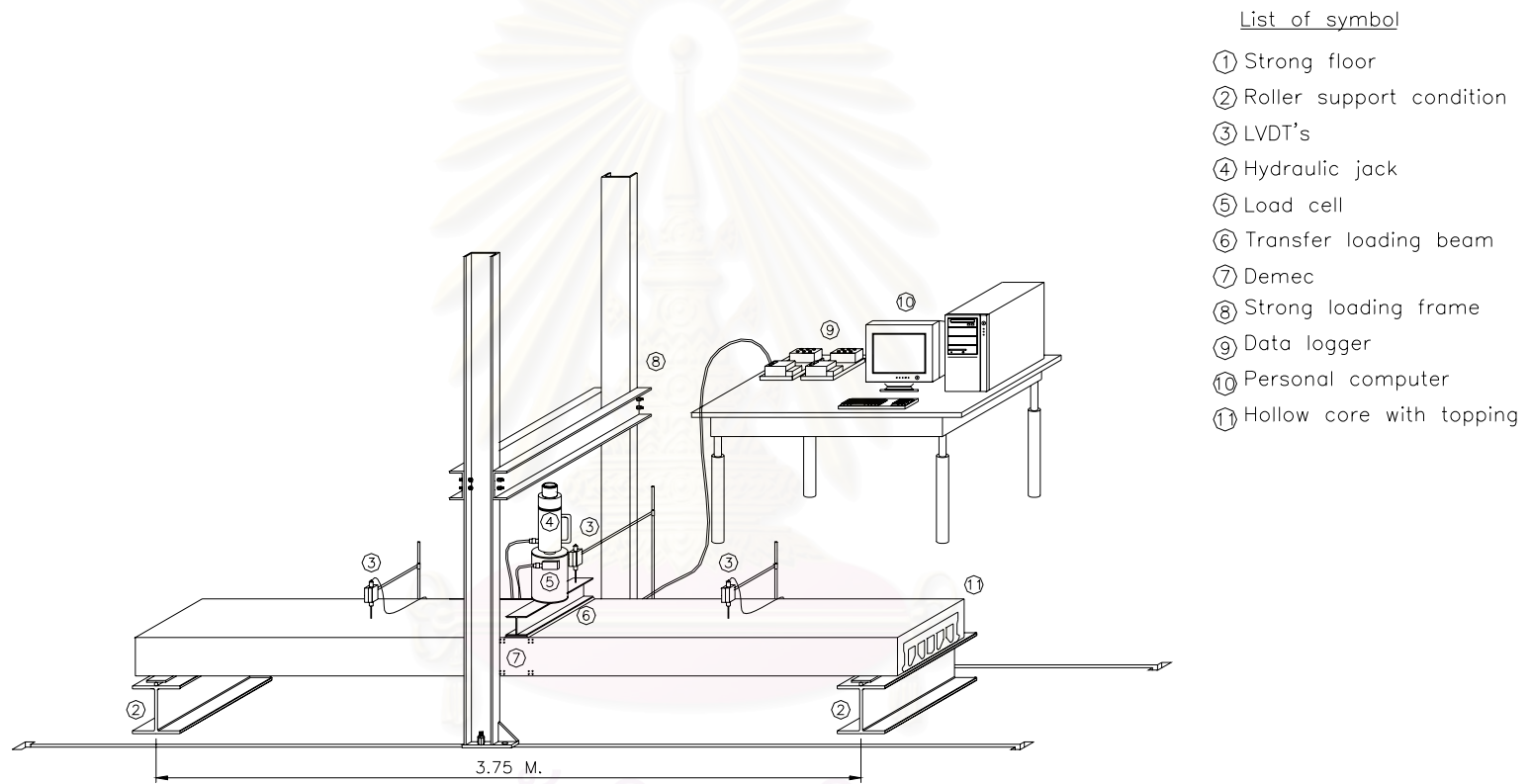
รูปที่ 3.2 (ข.) การติดตั้งชุดเครื่องทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-35-52B และ HC-35-98B

List of symbol

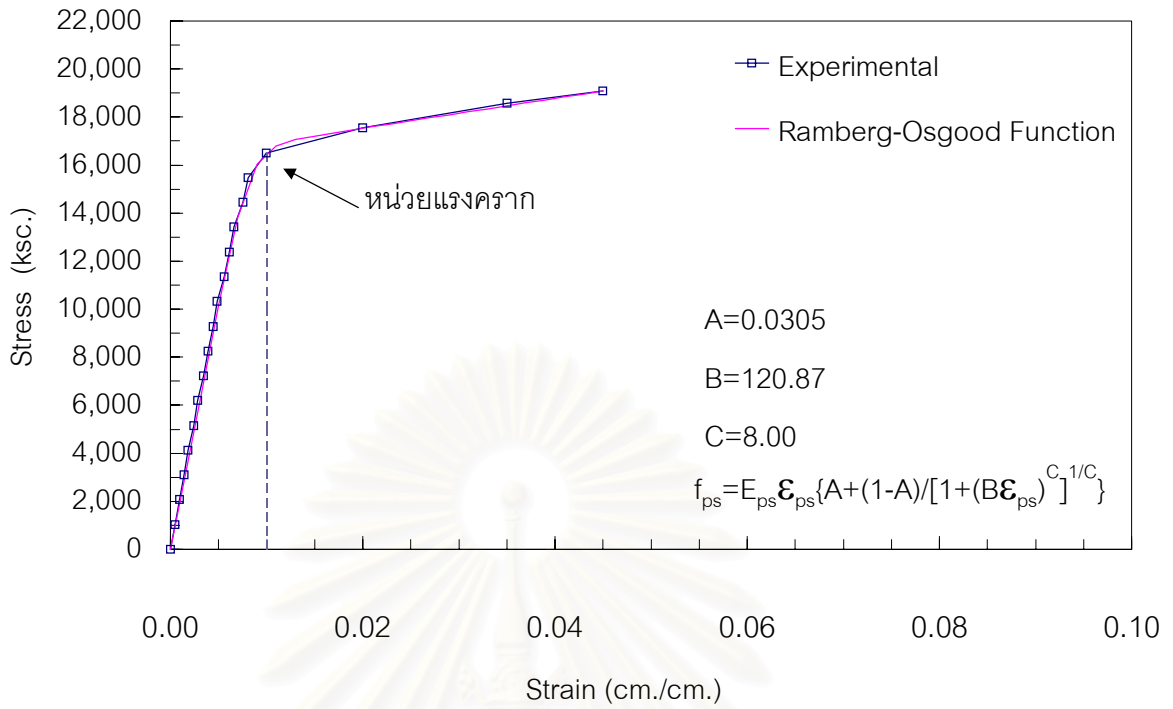
- ① Strong floor
- ② Roller support condition
- ③ Ties bar (RB6 @10 cm.)
- ④ Hollow core
- ⑤ Concrete topping



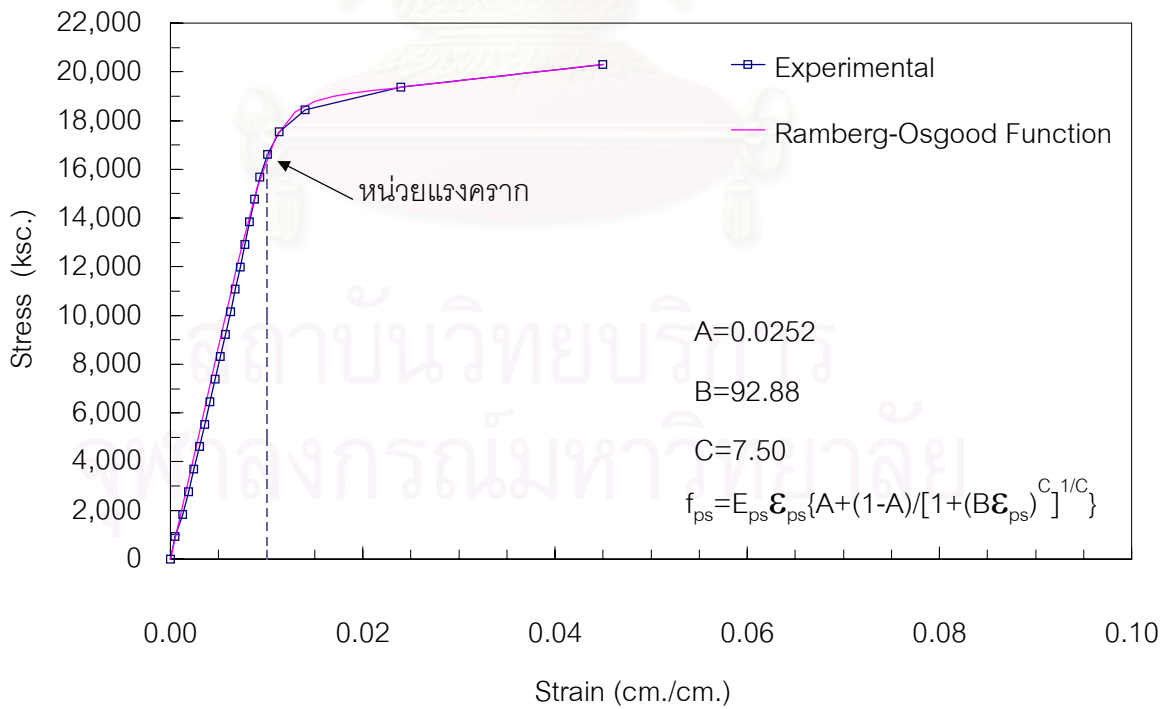
รูปที่ 3.3 (ก.) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-SS



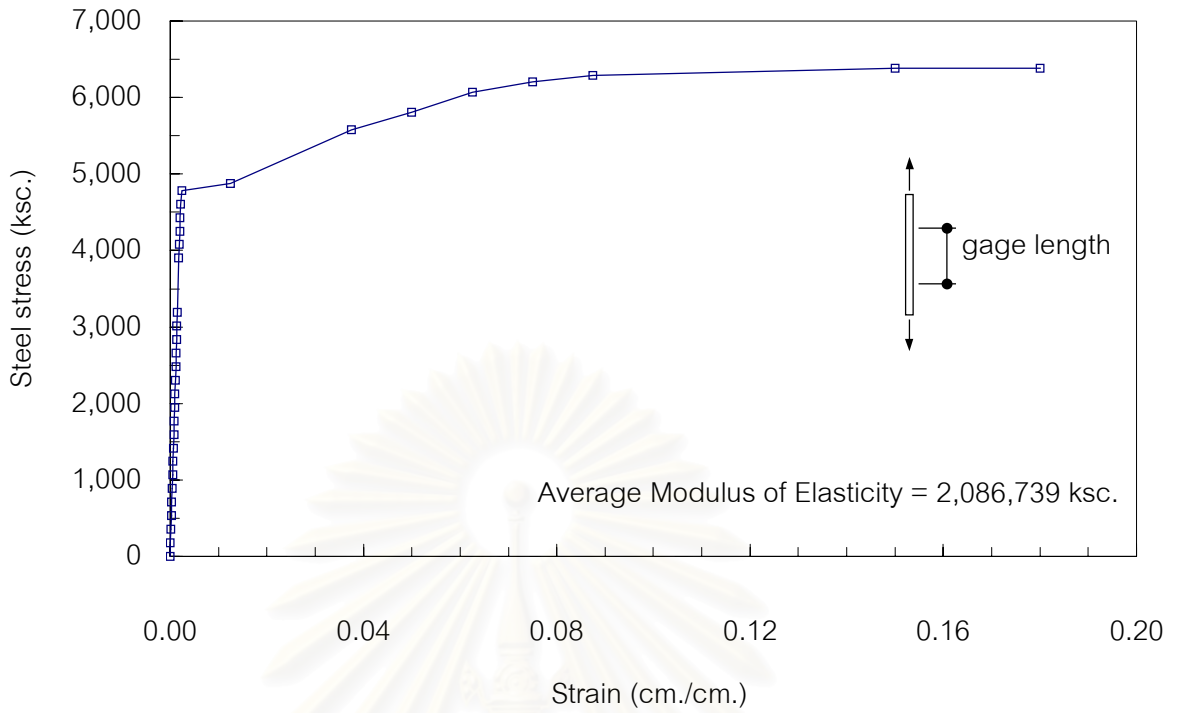
รูปที่ 3.3 (ข.) การติดตั้งชุดเครื่องทดสอบ สำหรับพื้นตัวอย่าง HC-SS



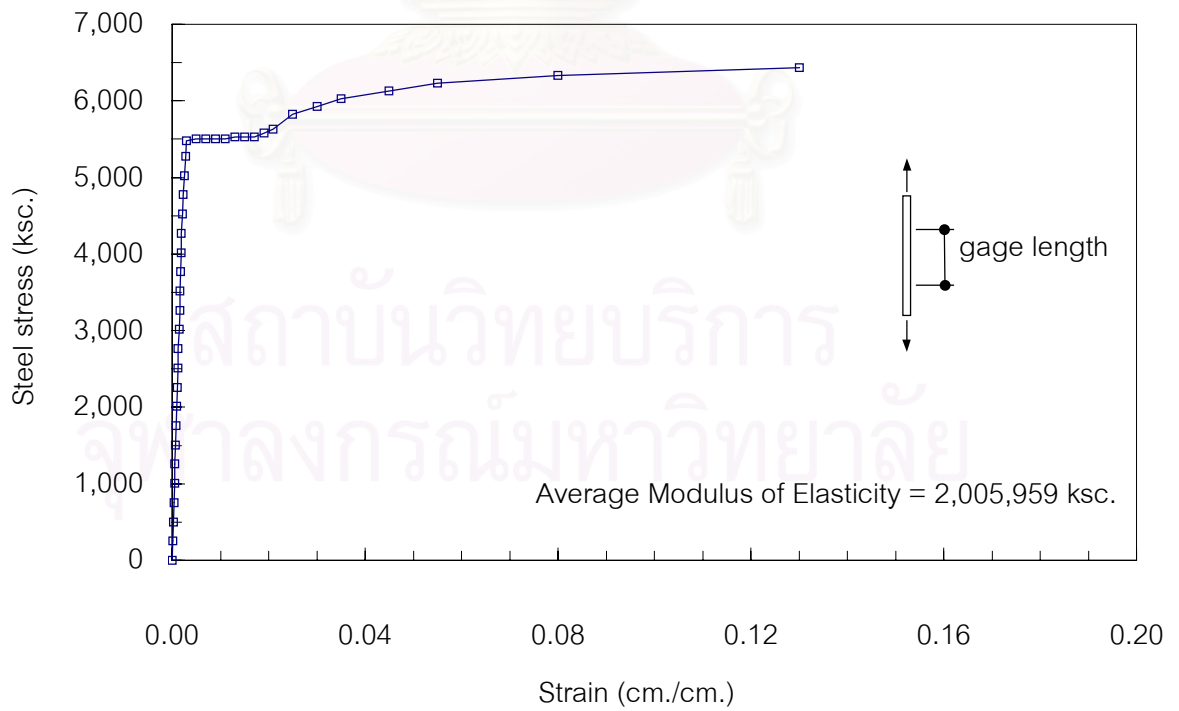
รูปที่ 3.4 (ก.) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของลวดอัดแรง (Dia. 5 มม.)



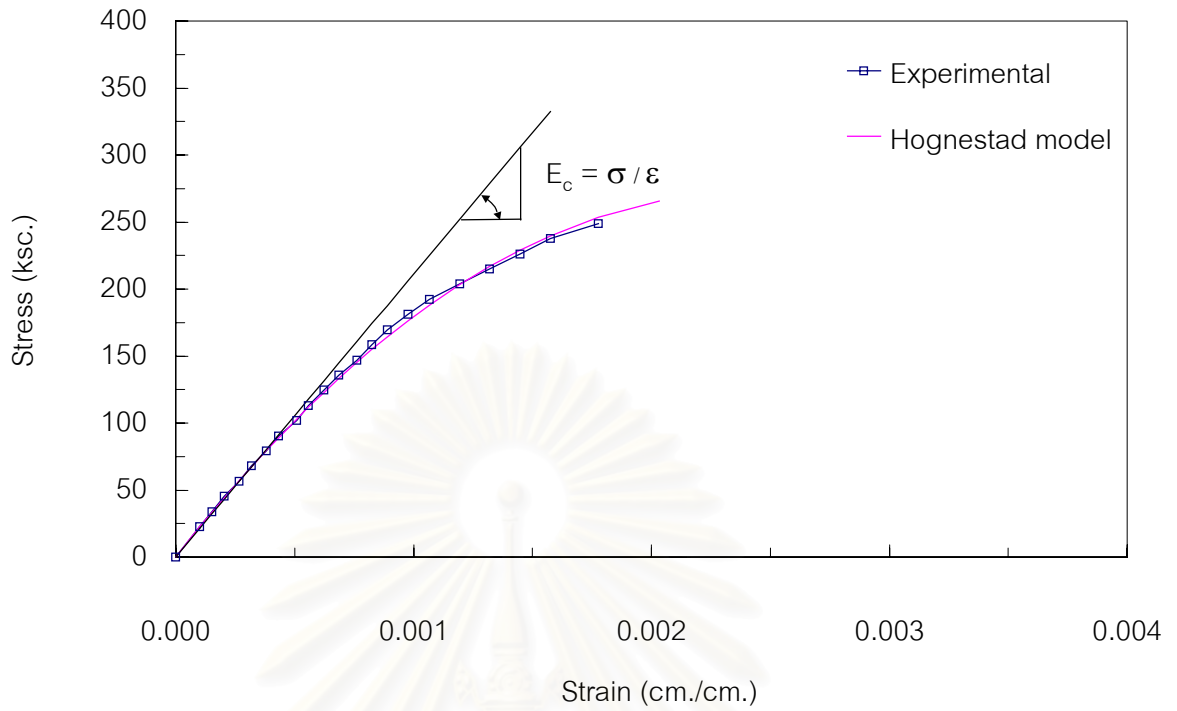
รูปที่ 3.4 (ข.) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของลวดเกลียวอัดแรง (Dia. 3 / 8 นิ้ว)



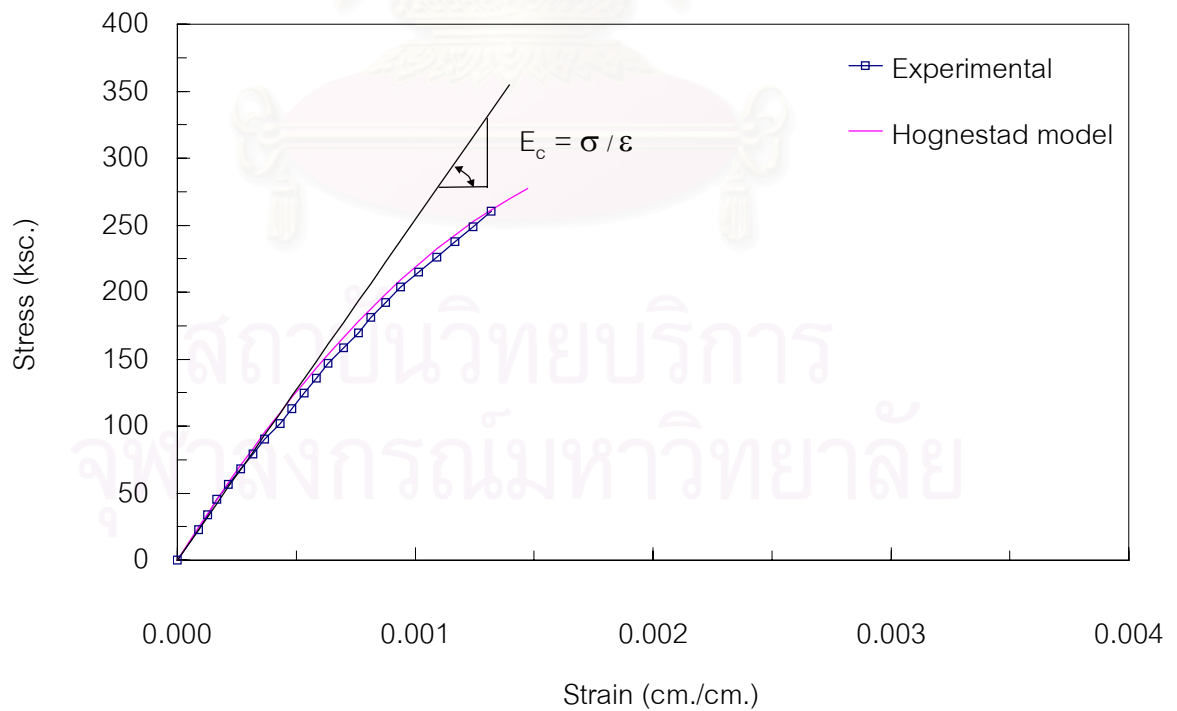
รูปที่ 3.5 (ก.) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม DB 12 มม.



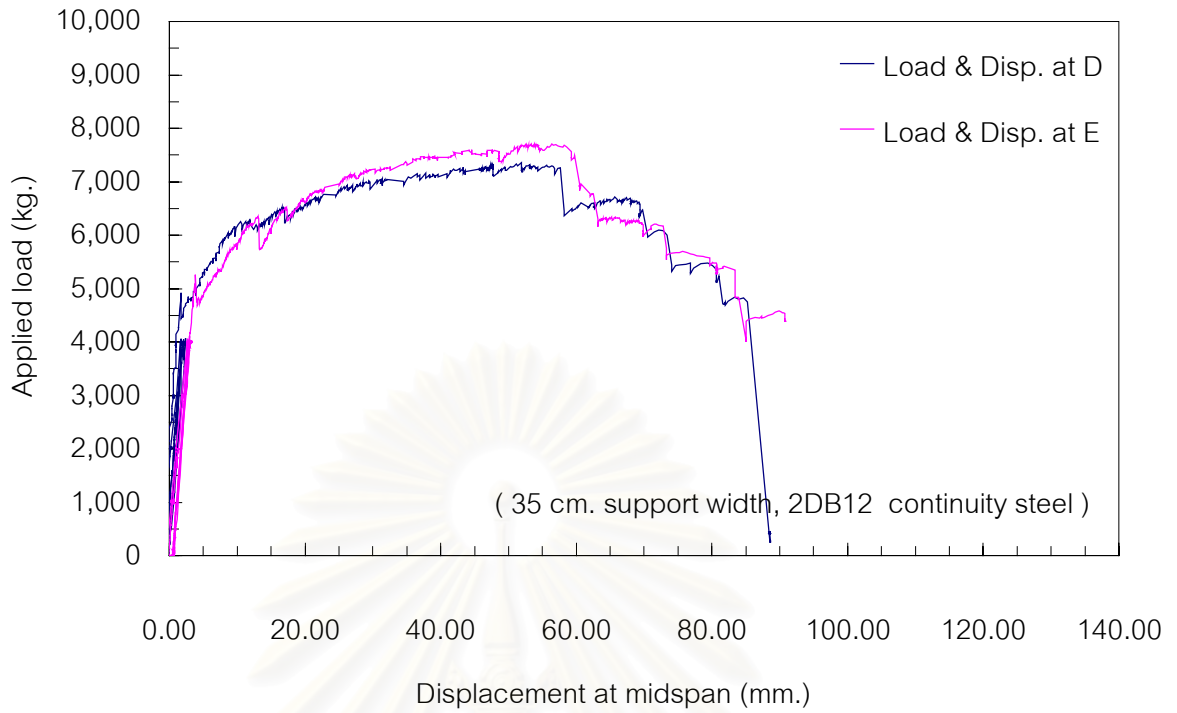
รูปที่ 3.5 (ข.) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม DB 16 มม.



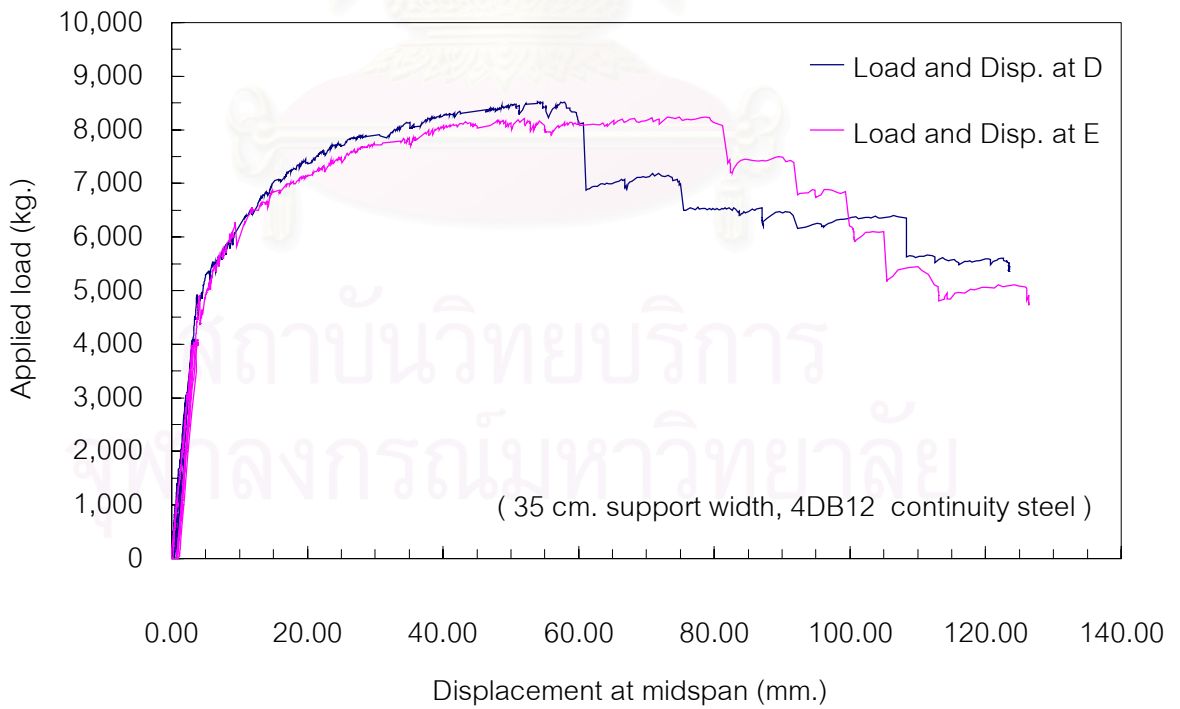
รูปที่ 3.6 (ก.) ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตเททับหน้า (Topping)



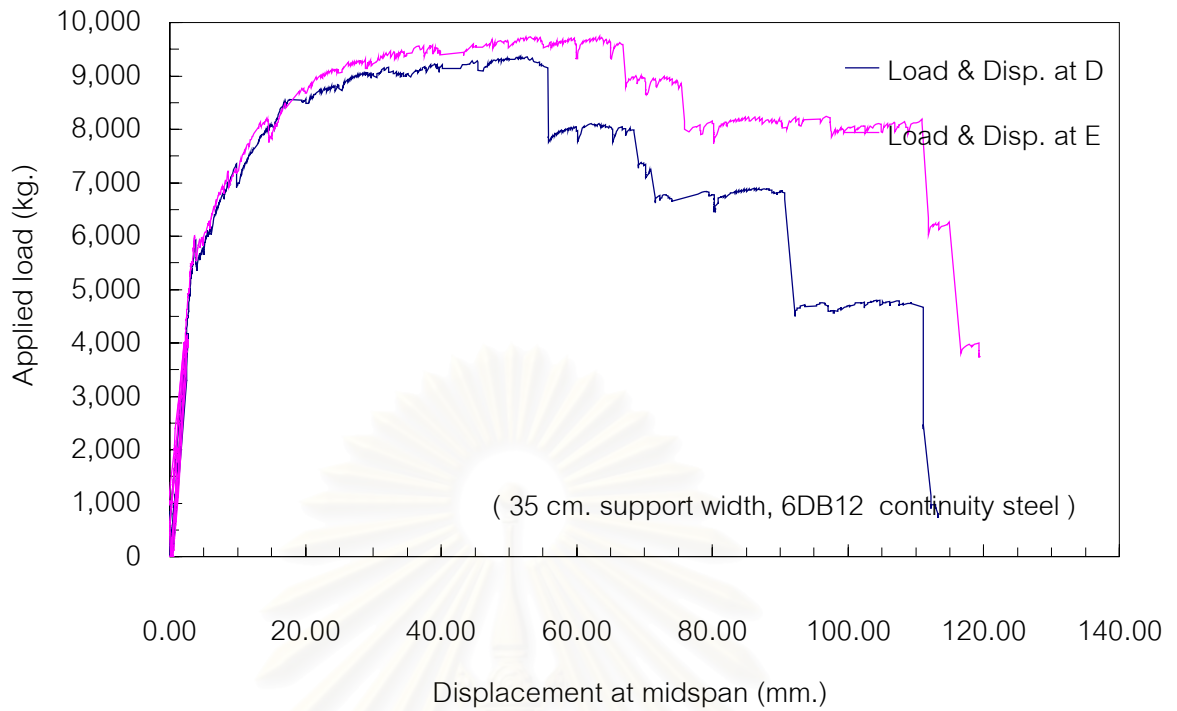
รูปที่ 3.6 (ข.) ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของแผ่นพื้นสำเร็จรูป (Precast)



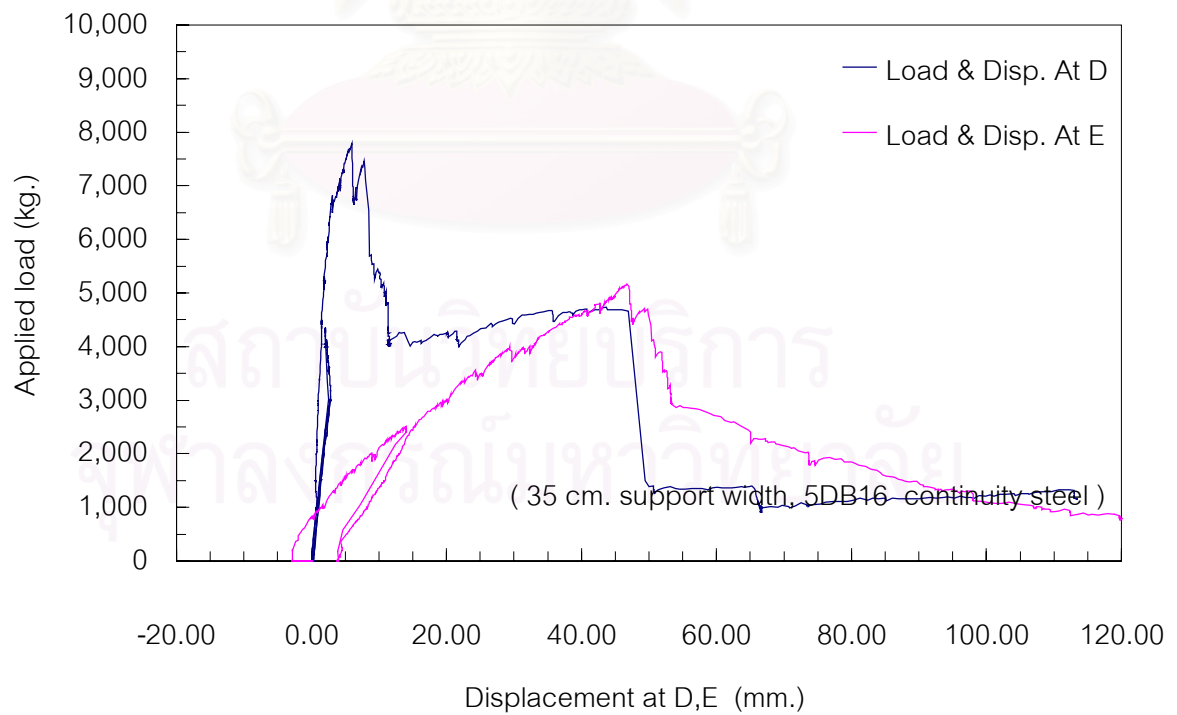
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-9B



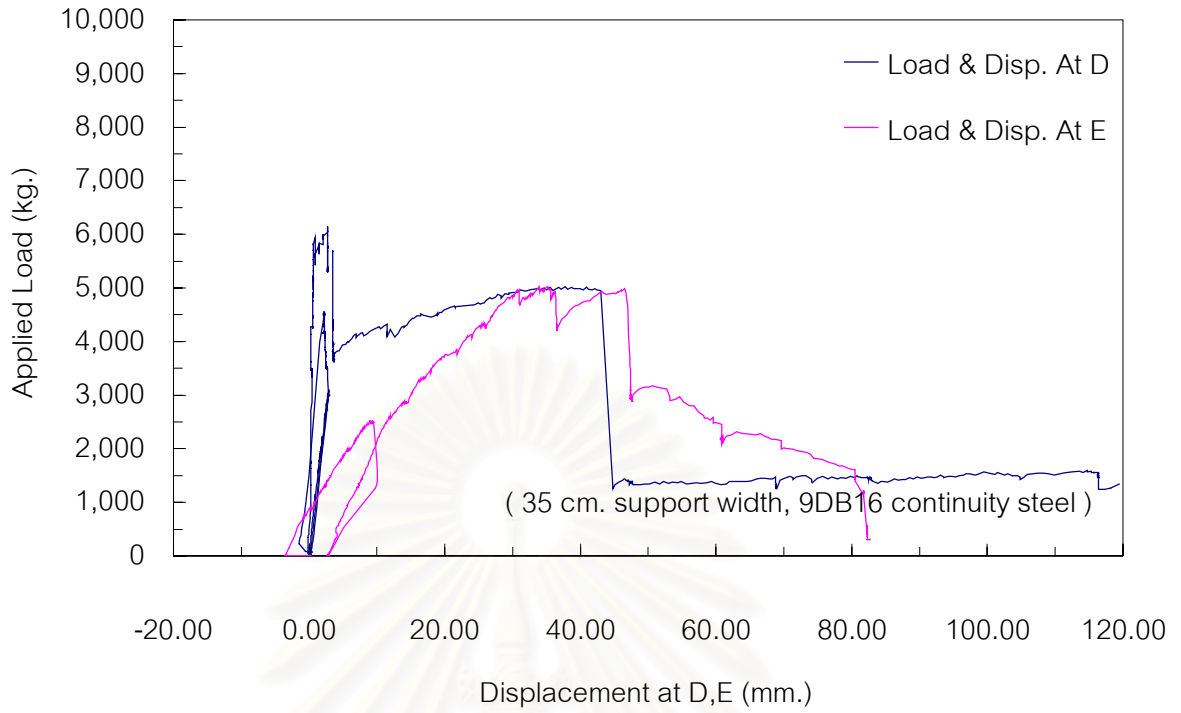
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-19B



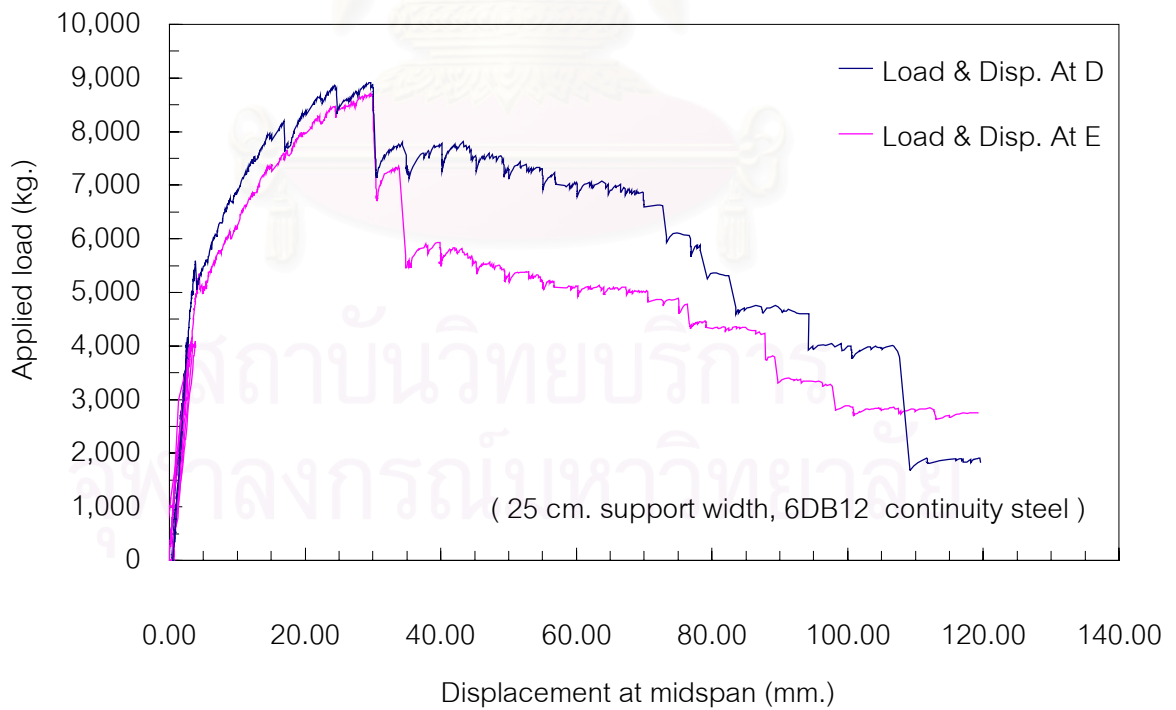
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-28B



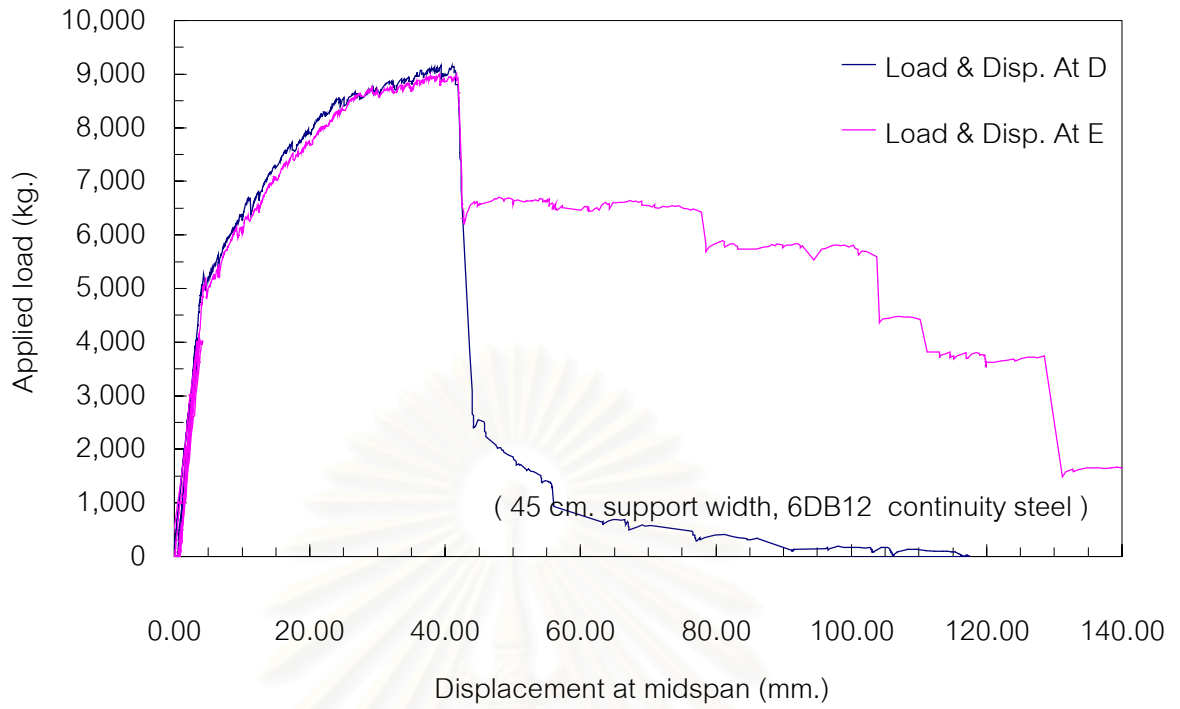
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-52B



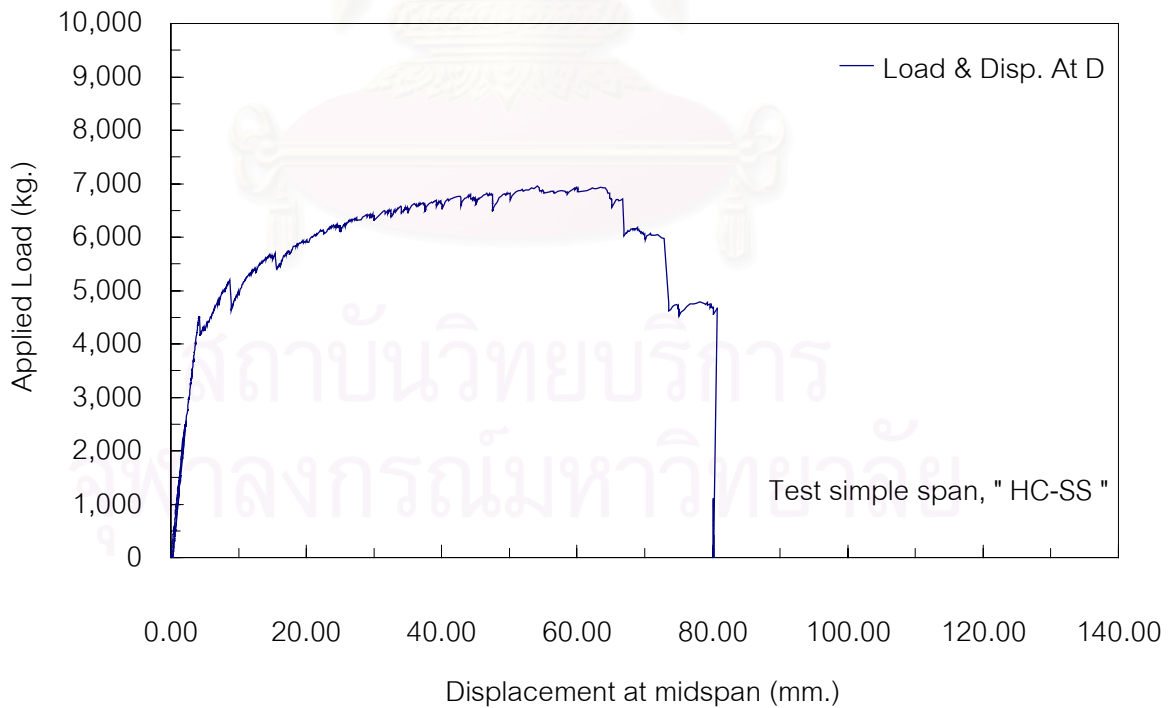
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-98B



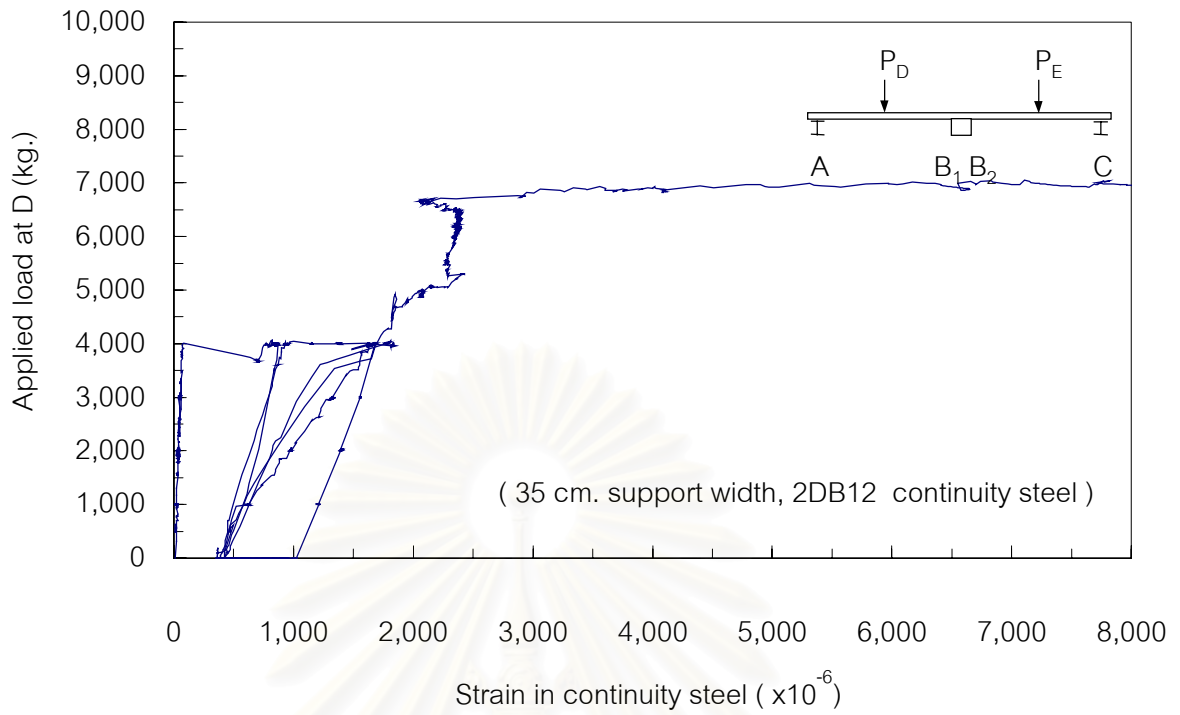
รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-25-28B



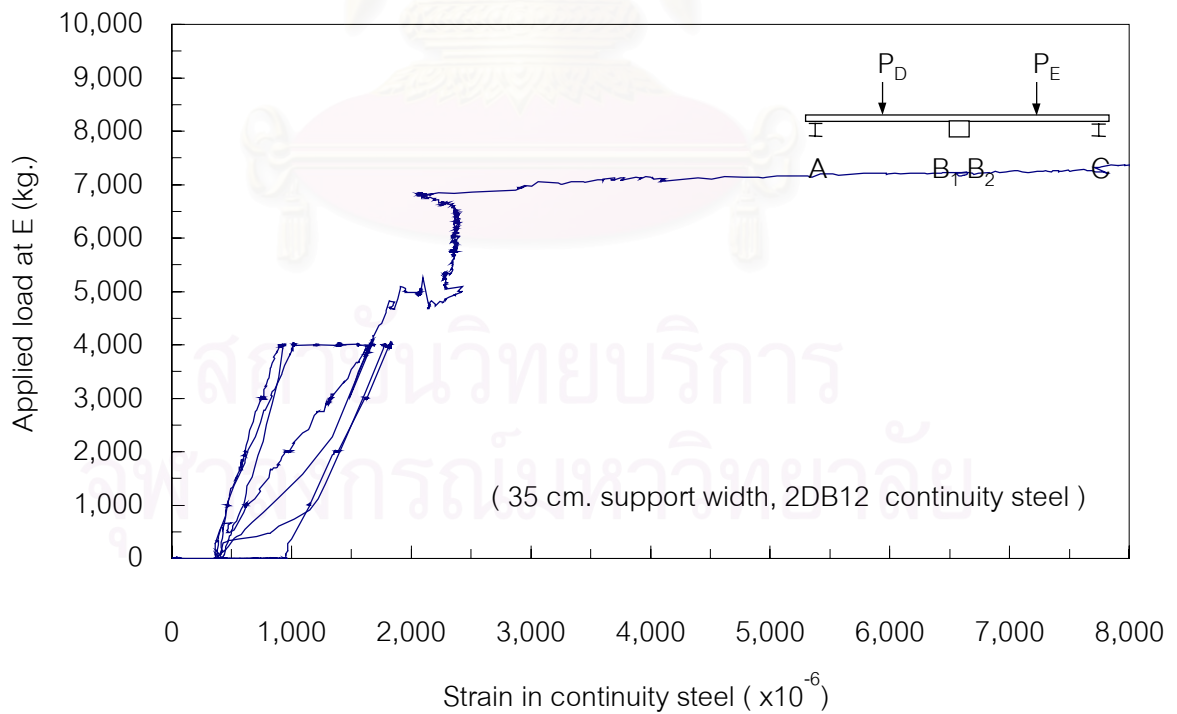
รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-45-28B



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ของแรงและการแอ่นตัว ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-SS

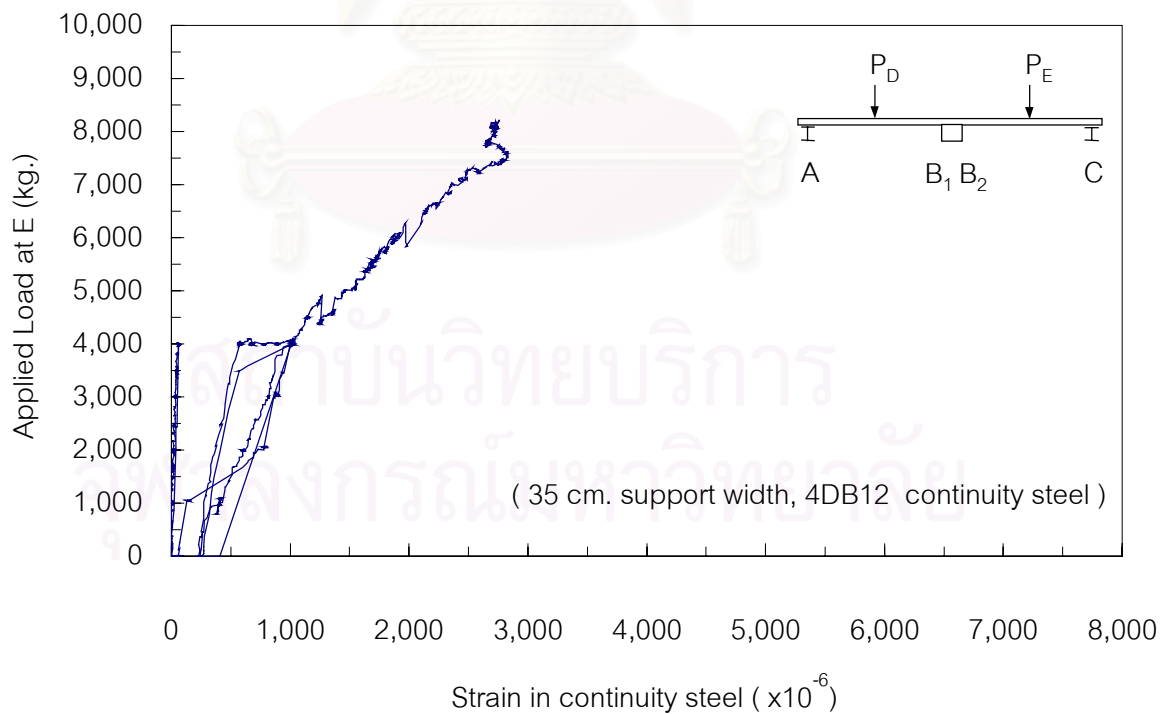
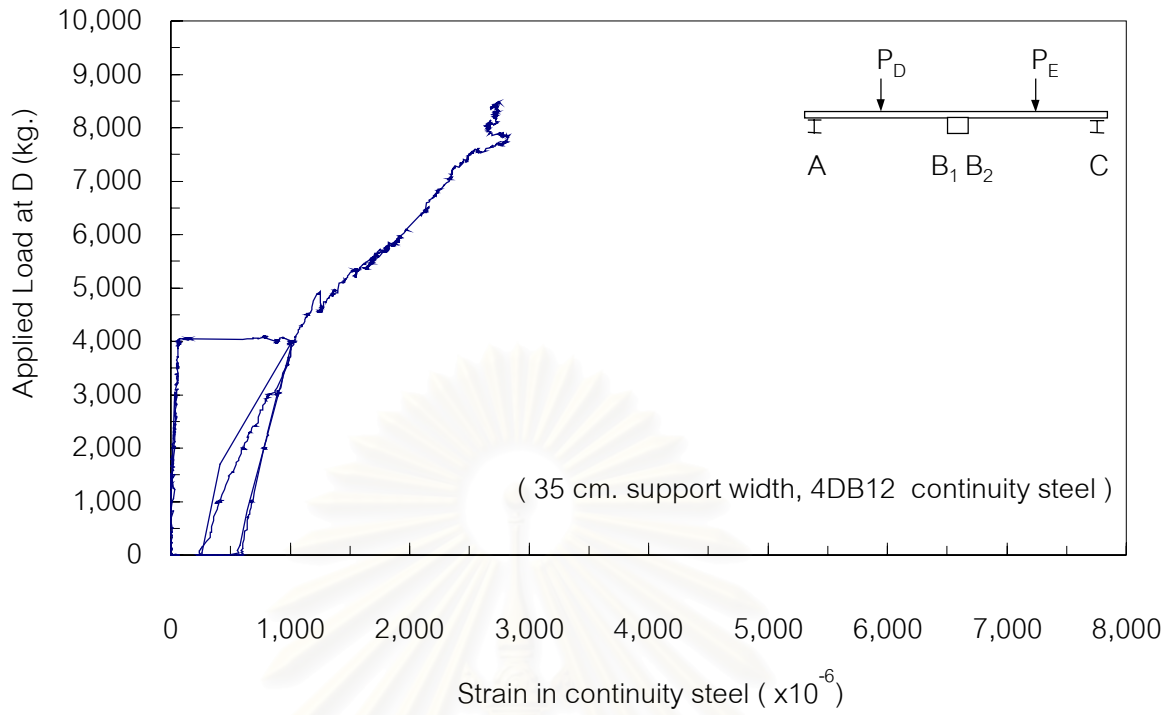


ก.) แรงที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่ 1

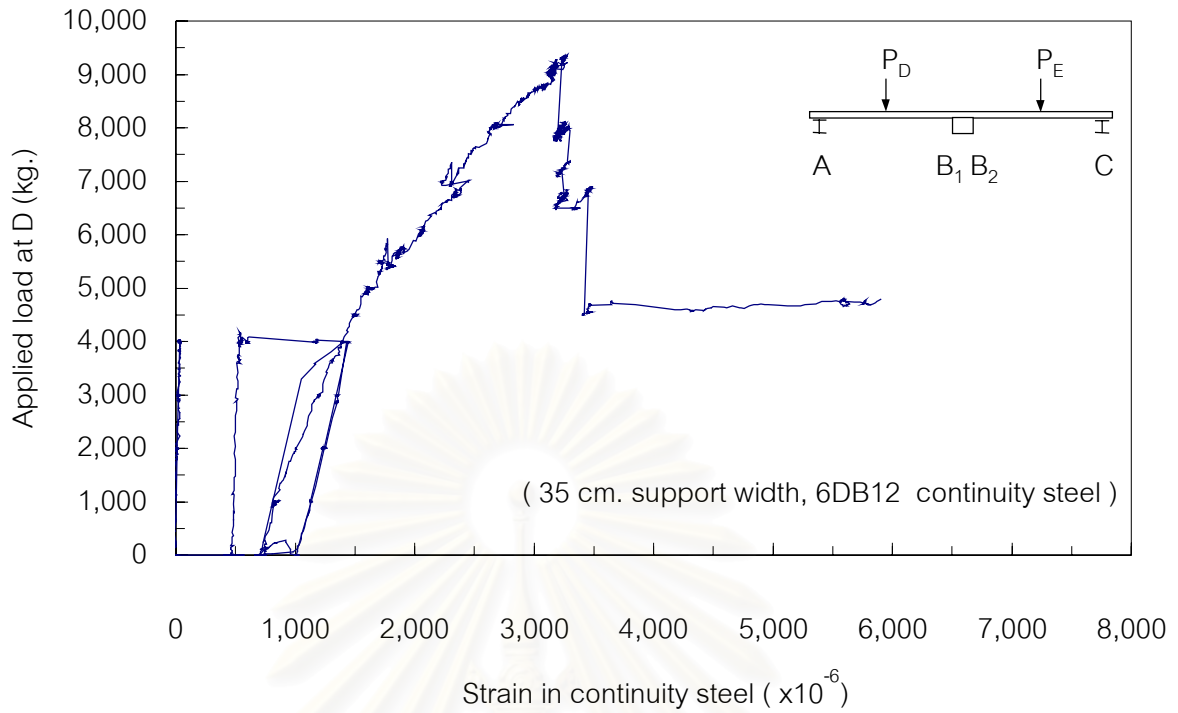


ข.) แรงที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่ 2

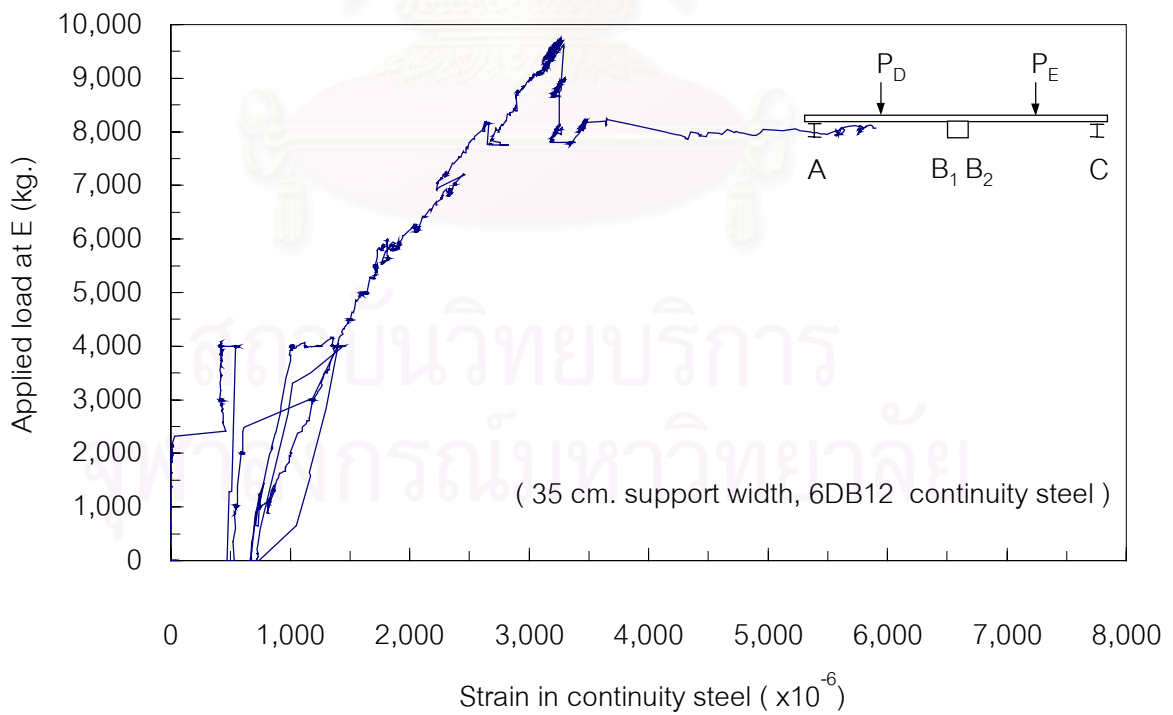
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของพื้นตัวอย่าง HC-35-9B



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของพื้นตัวอย่าง HC-35-19B

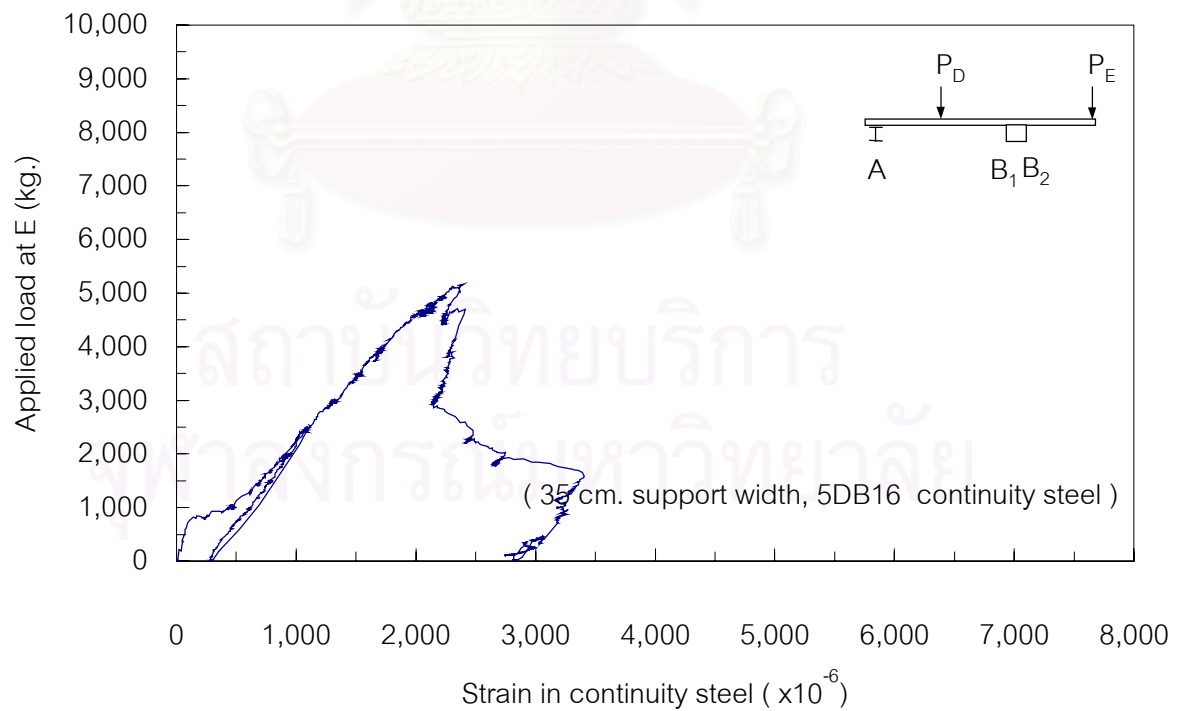
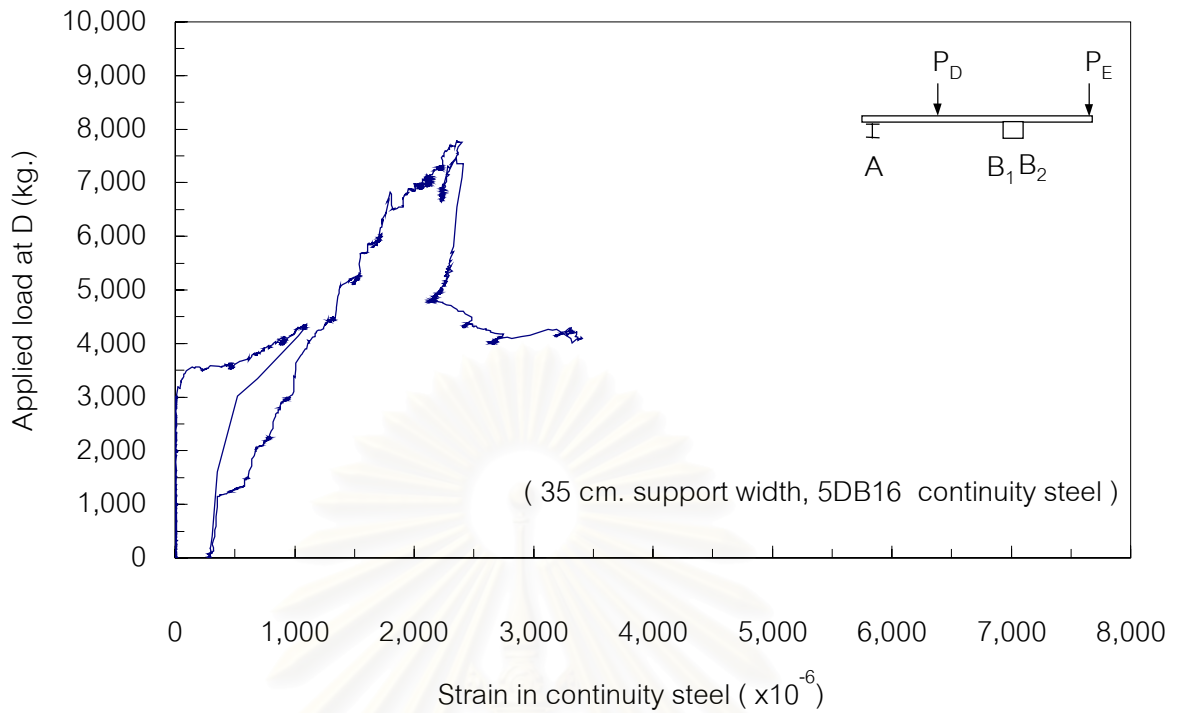


ก.) แรงที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่ 1

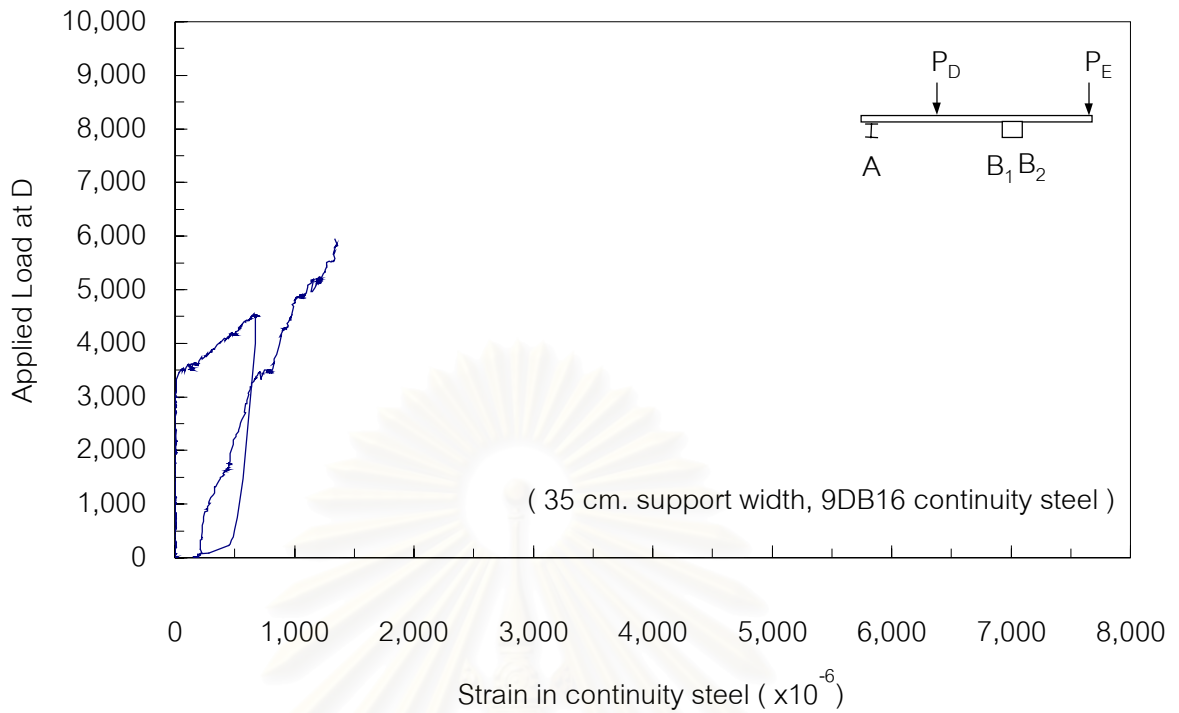


ข.) แรงที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่ 2

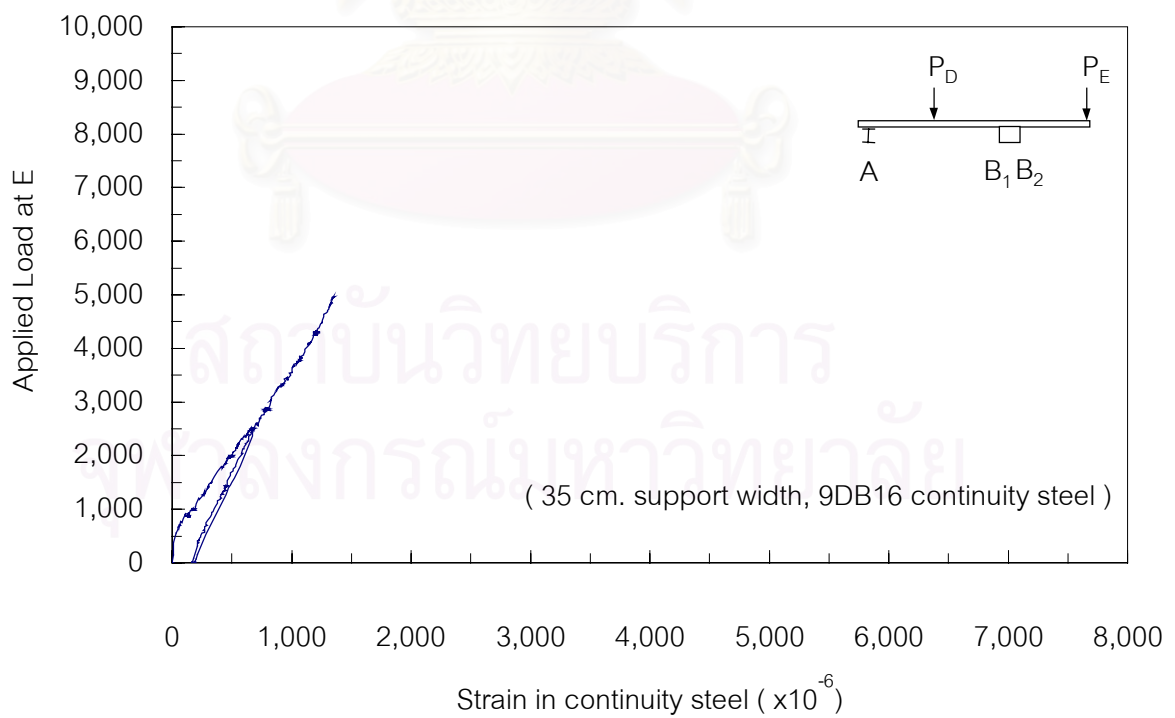
รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของพื้นตัวอย่าง HC-35-28B



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของพื้นตัวอย่าง HC-35-52B

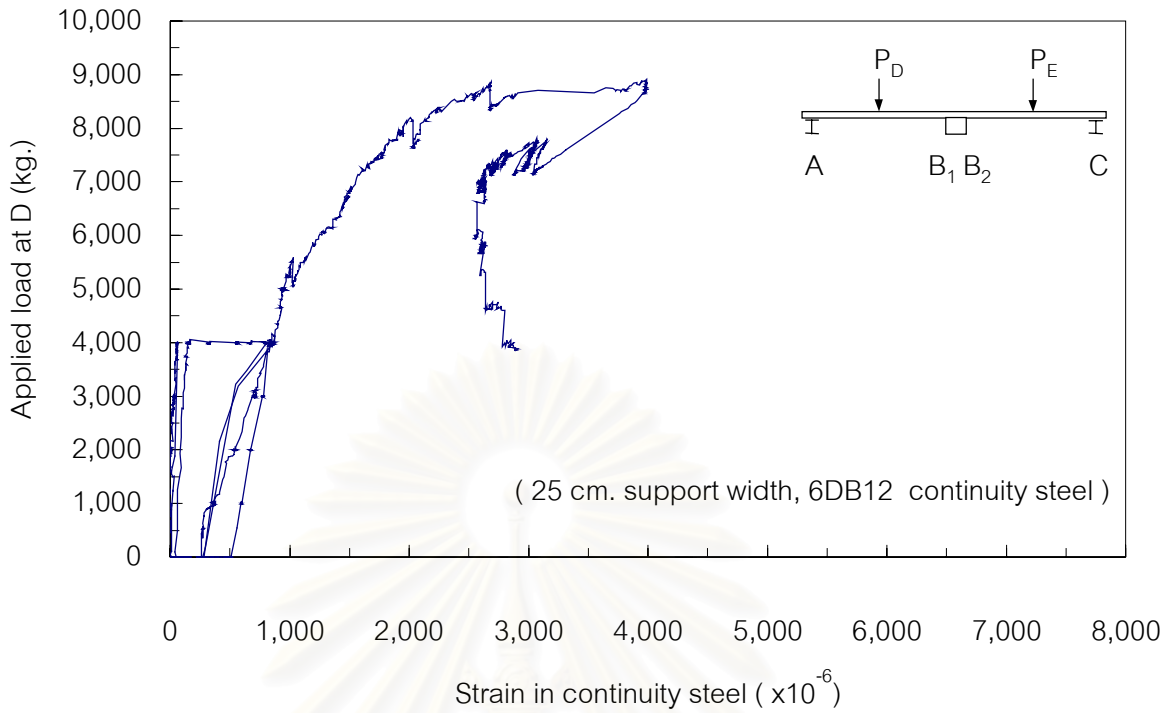


ก.) แรงที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่ 1

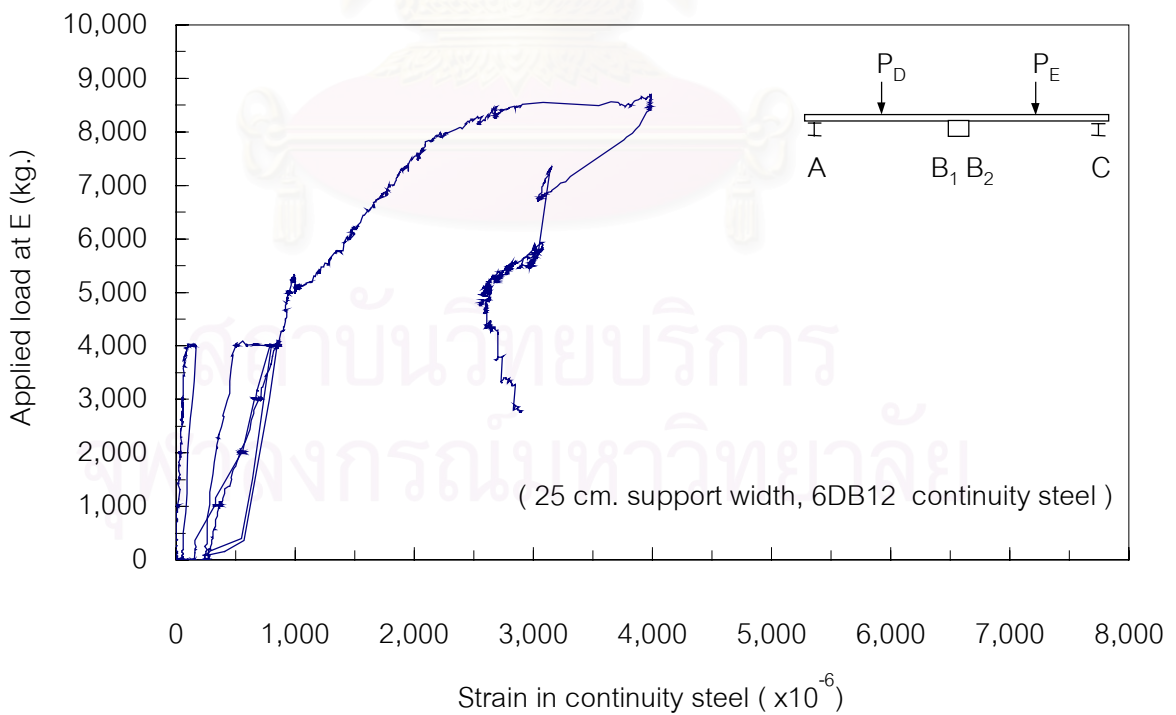


ข.) แรงที่ปลายยื่น

รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของพื้นตัวอย่าง HC-35-98B

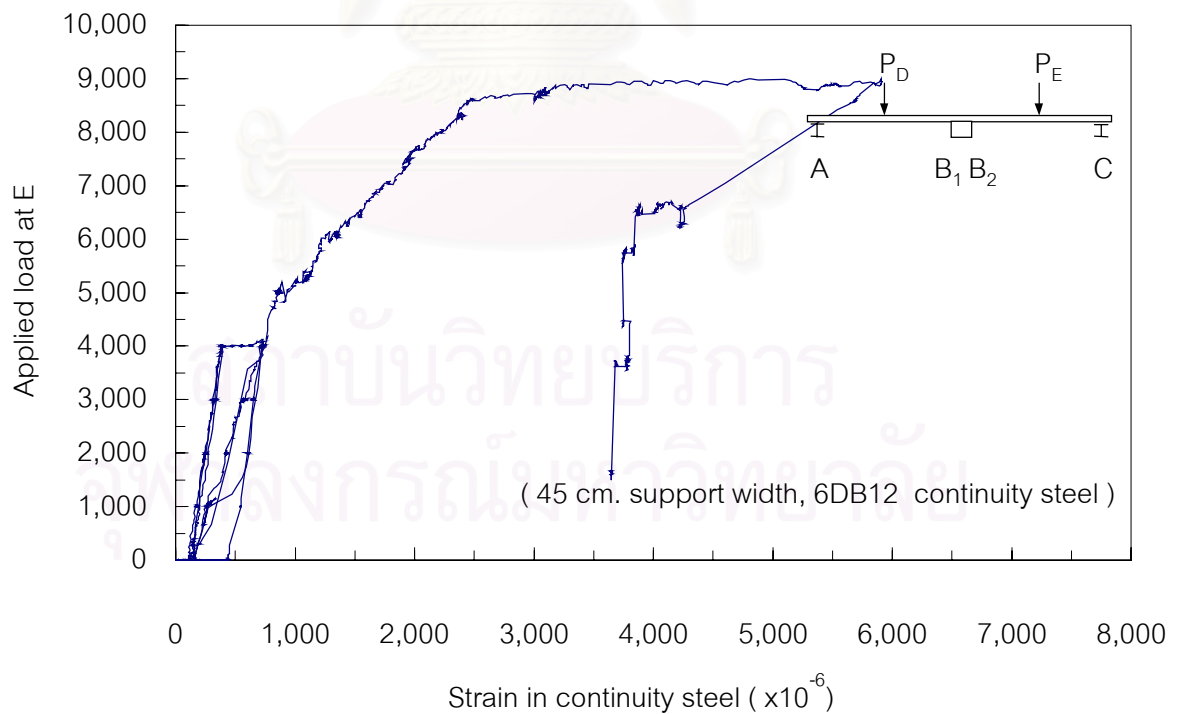
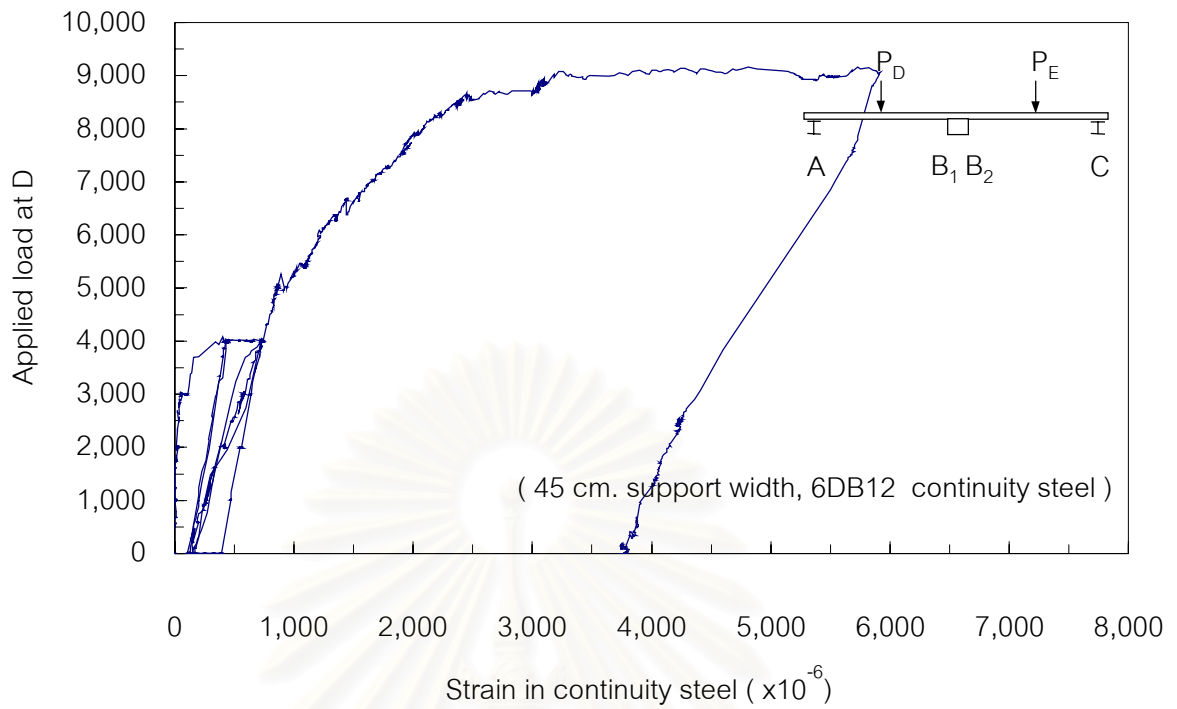


ก.) แรงที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่ 1

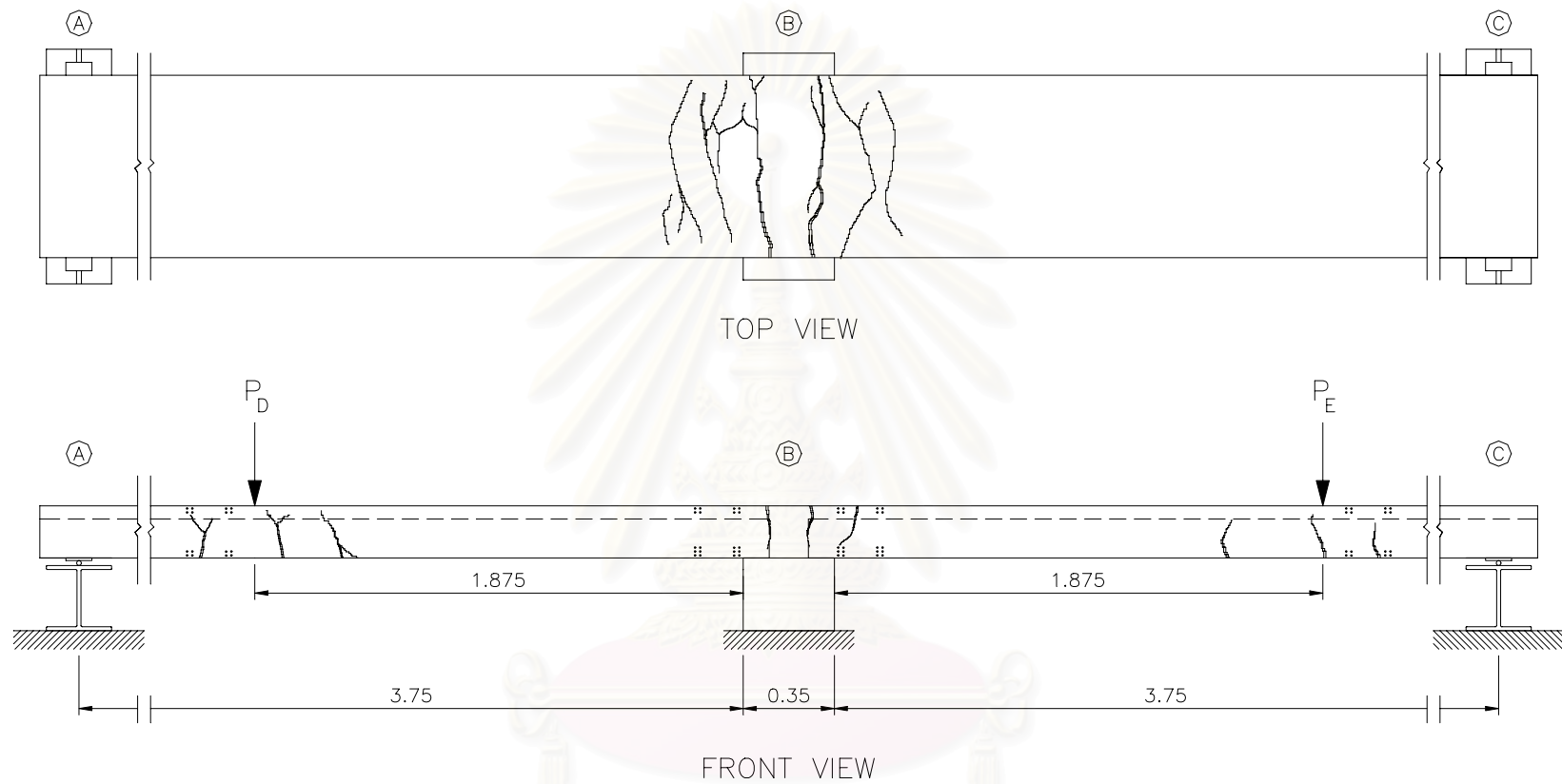


ข.) แรงที่กลางช่วงของพื้นแผ่นที่ 2

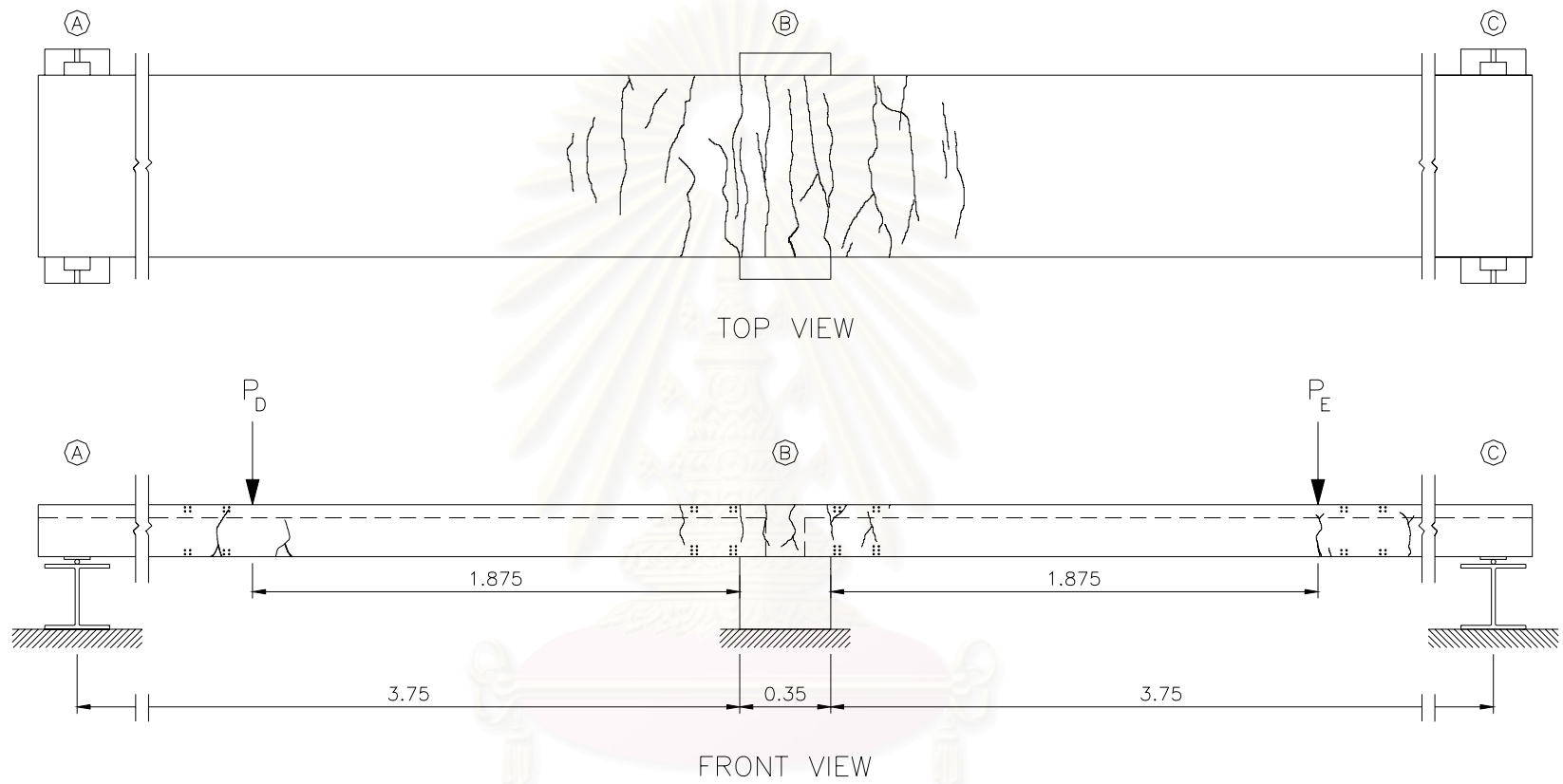
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของพื้นตัวอย่าง HC-25-28B



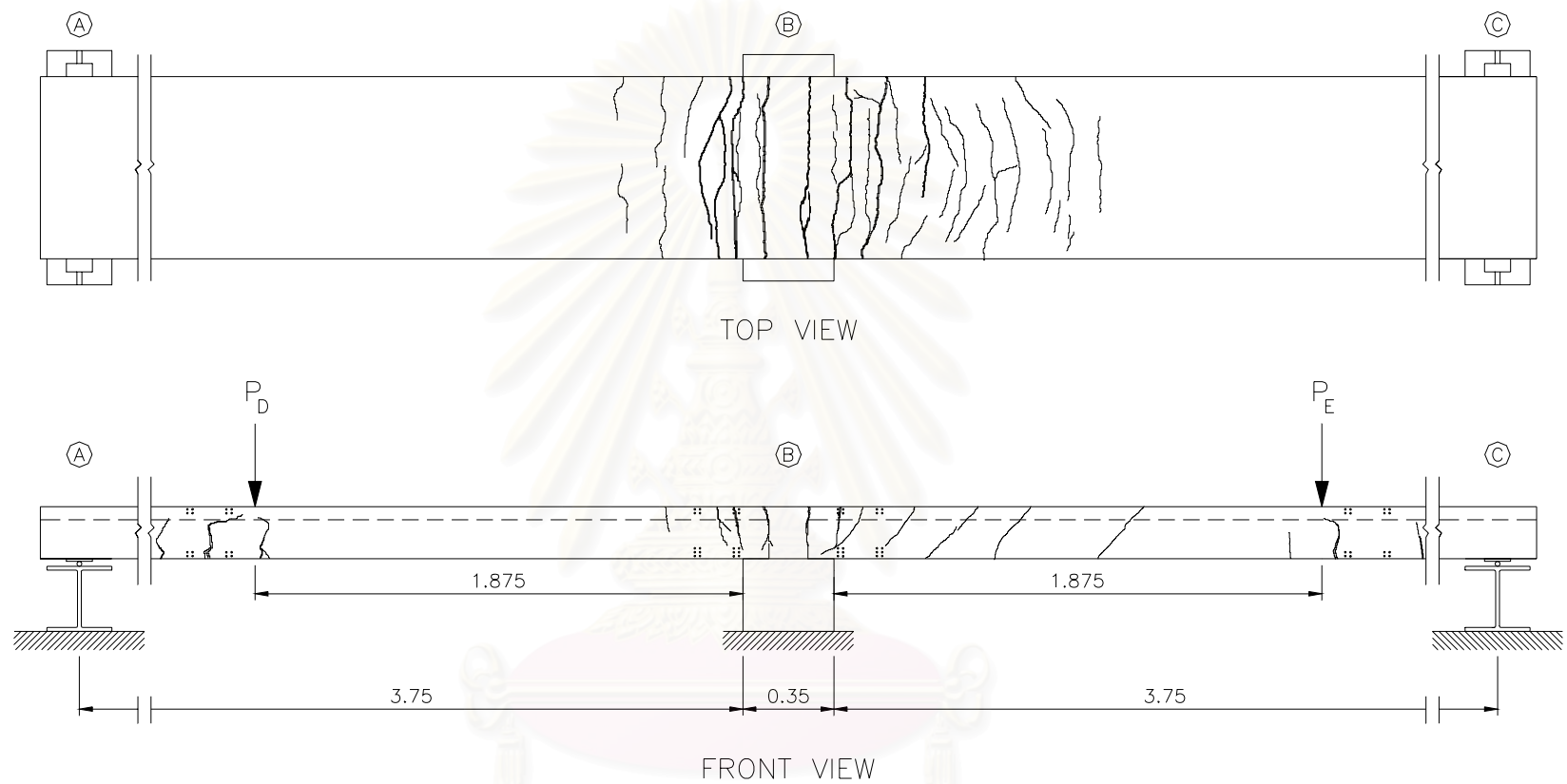
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ของแรงและความเครียดในเหล็กเสริม ของพื้นตัวอย่าง HC-45-28B



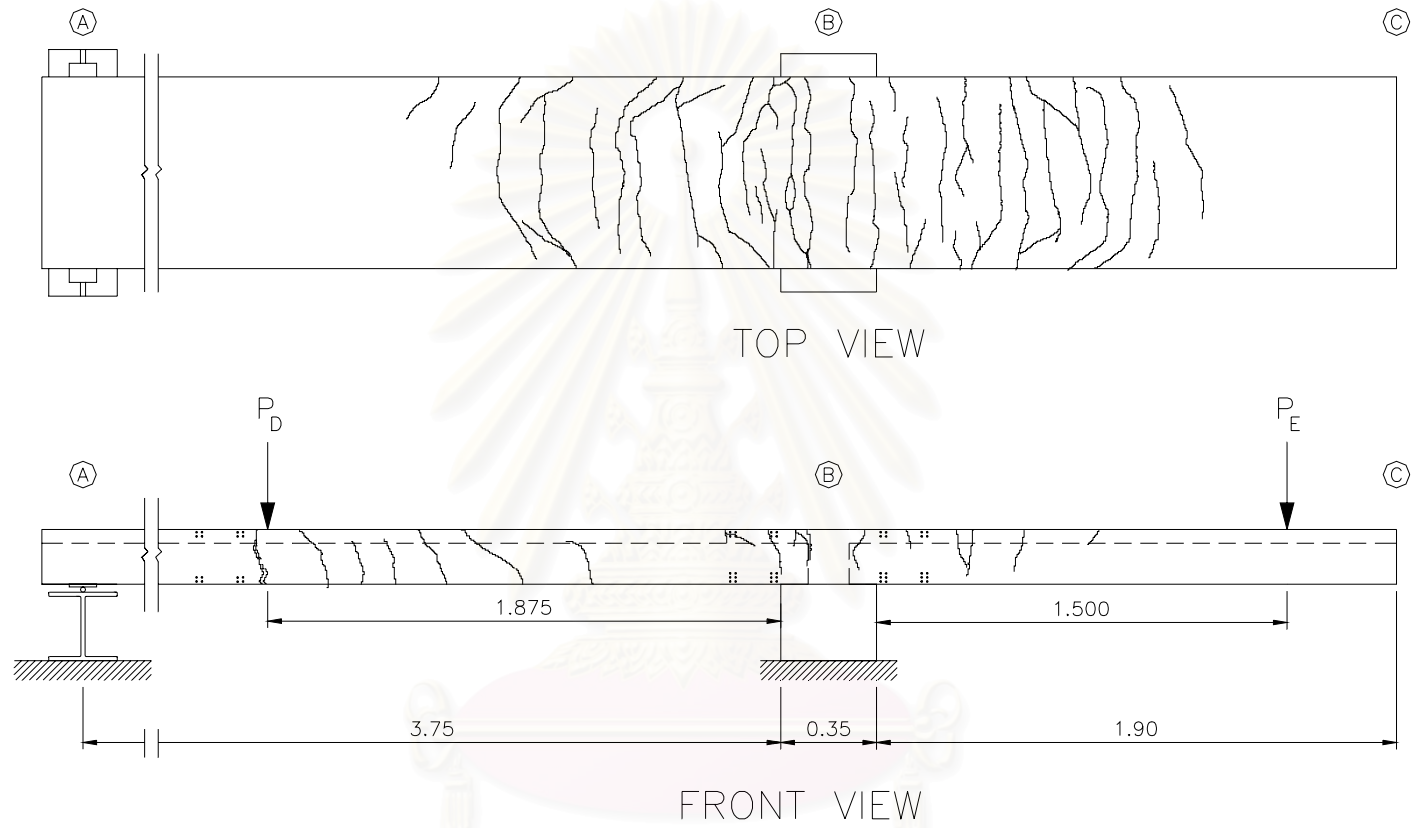
สถาบันวิทยบริการ
 รูปที่ 3.22 ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-9B
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
 รูปที่ 3.23 ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-19B
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

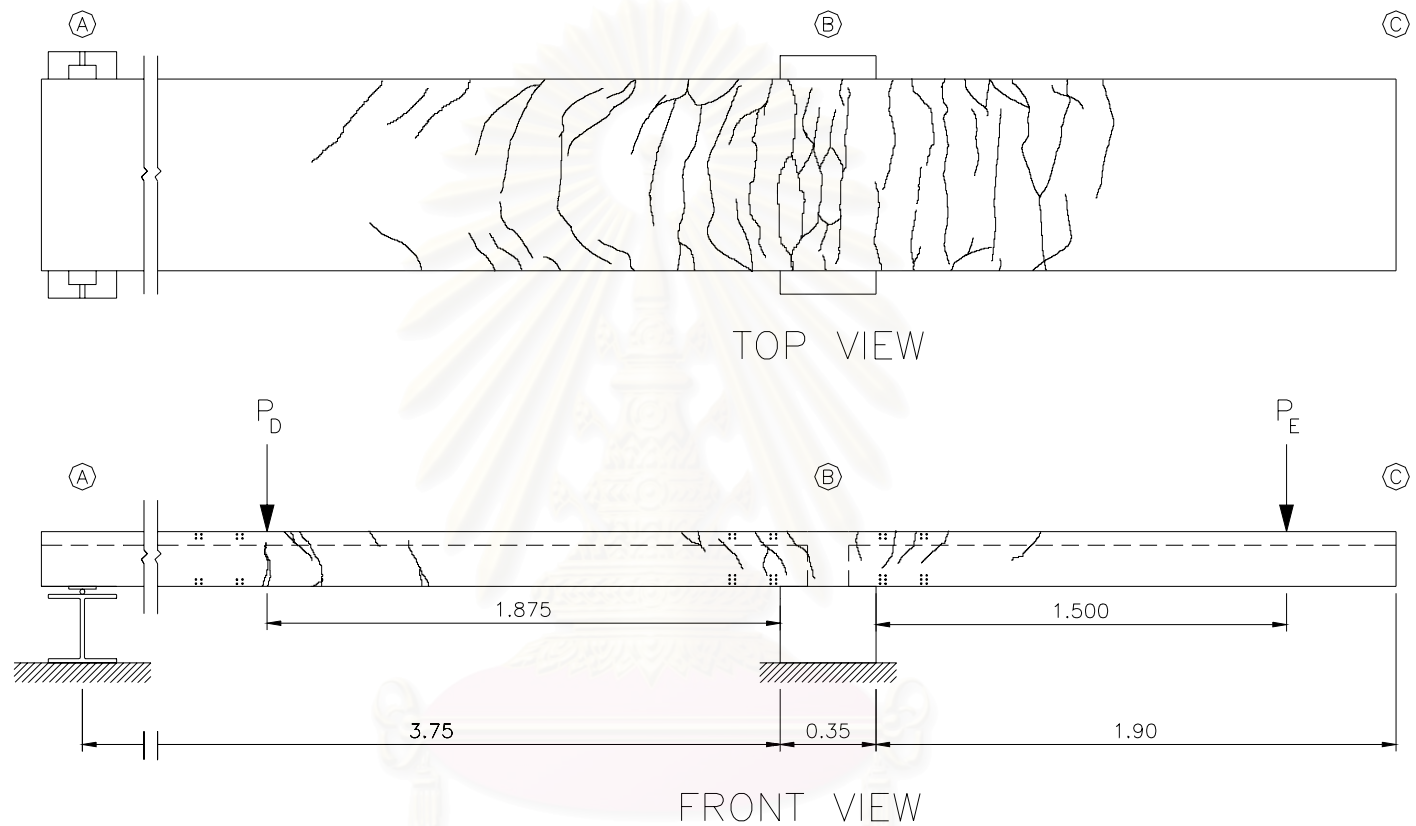


สถาบันวิทยบริการ
 รูปที่ 3.24 ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-28B
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



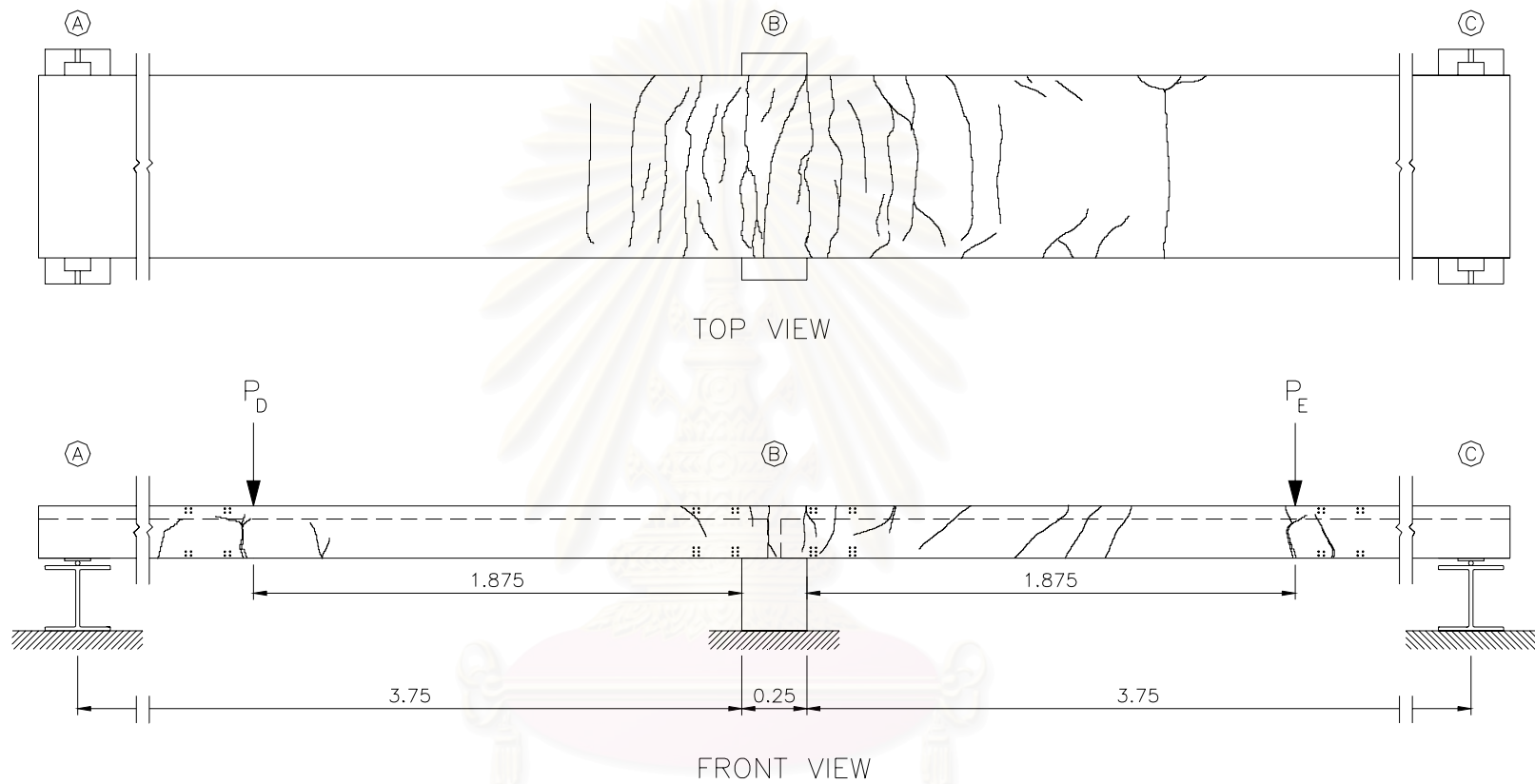
สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.25 ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-52B

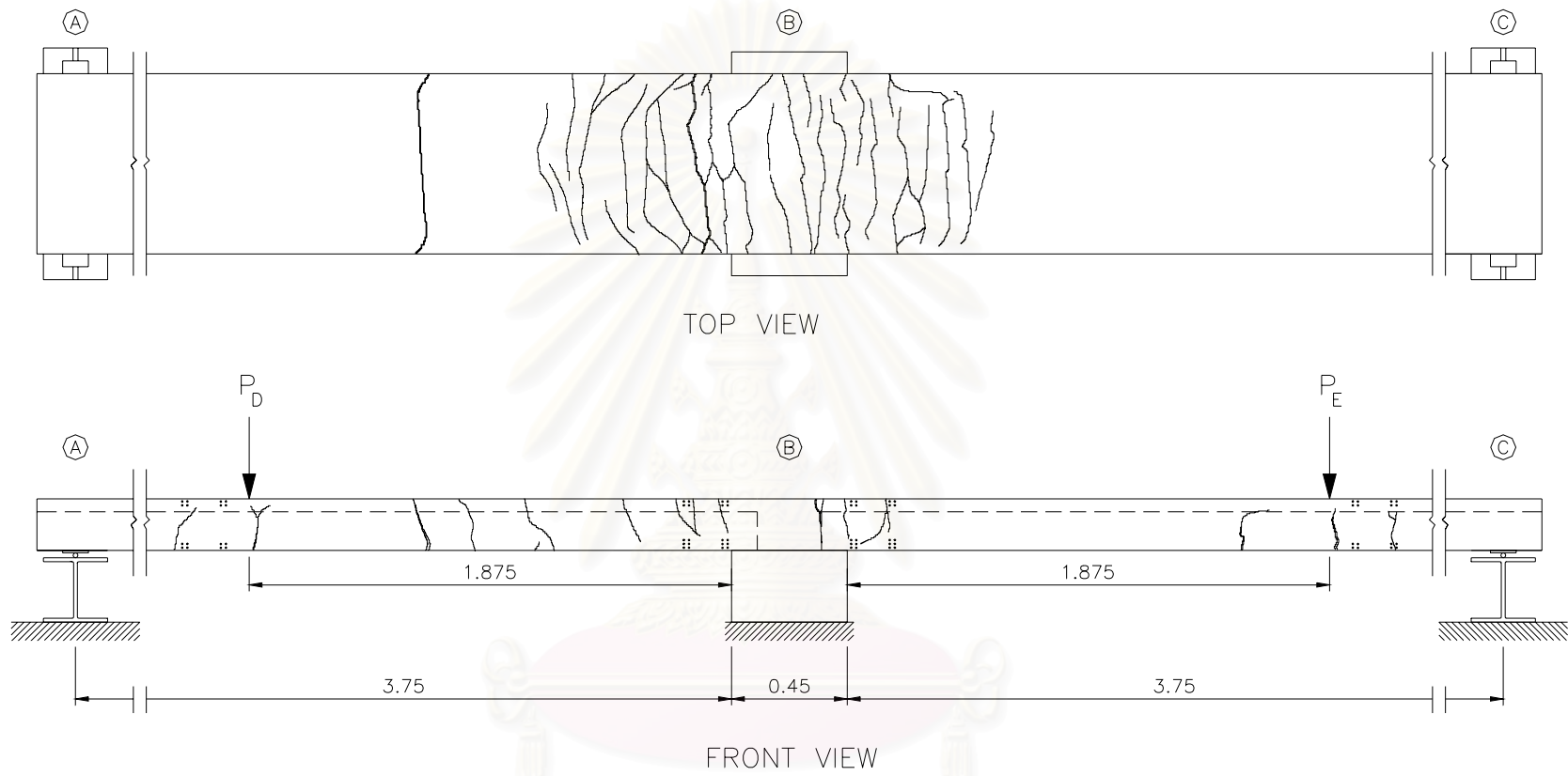


สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.26 ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-98B

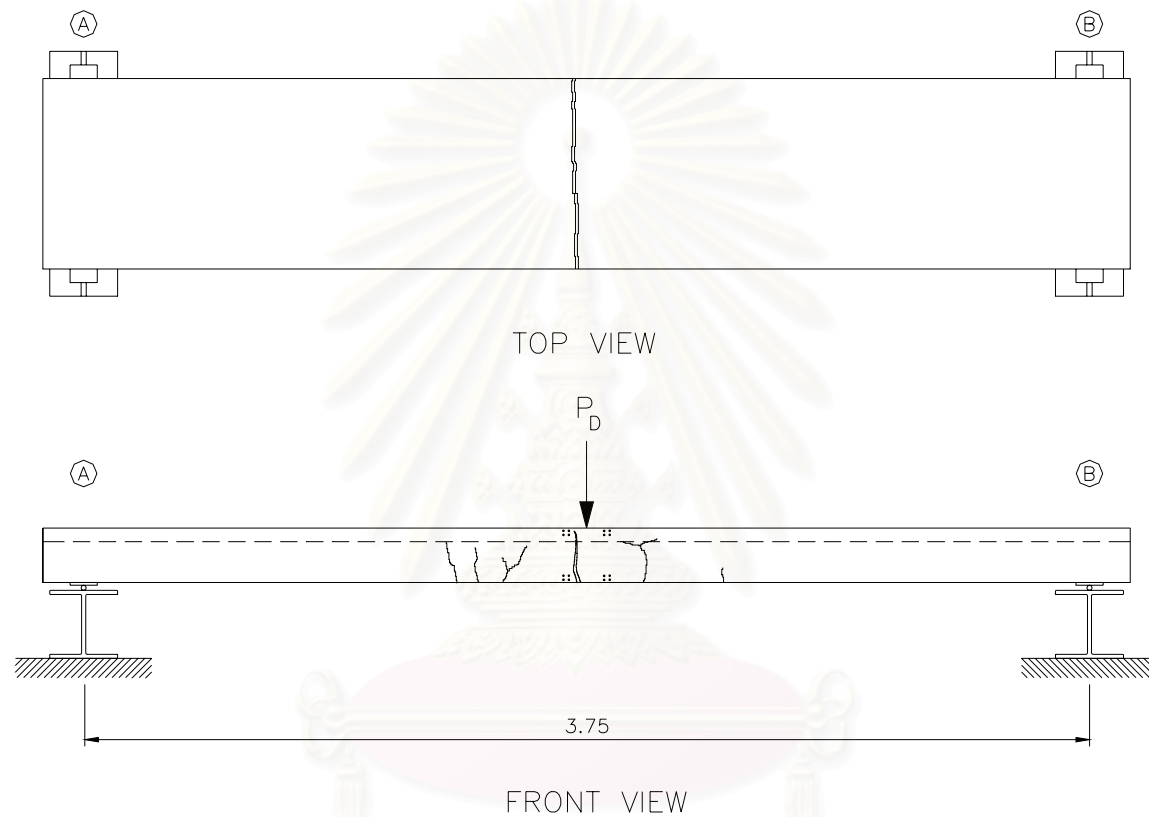


สถาบันวิทยบริการ
 รูปที่ 3.27 ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-25-28B
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.28 ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-45-28B



รูปที่ 3.29 ลักษณะรอยแตกร้าวและการวิบัติ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-SS
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.30 การเข้าแบบตัวอย่างทดสอบ ก่อนเทคอนกรีตเททับหน้า



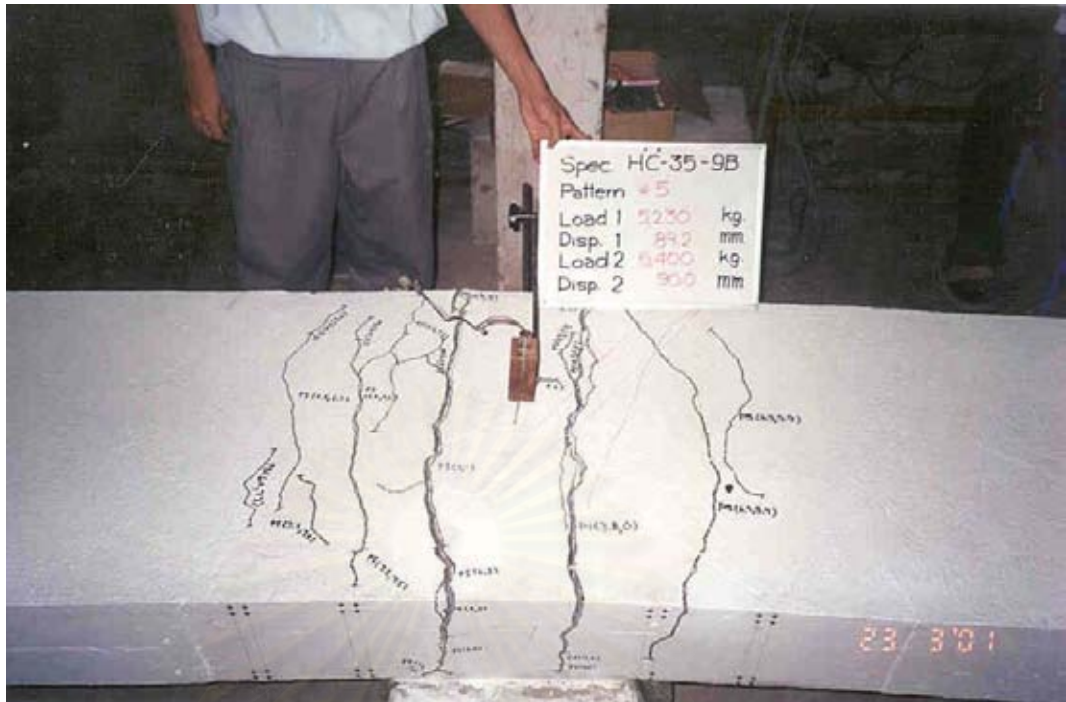
รูปที่ 3.31 การติดมาตรวัดความเครียด (Strain gauge) แบบใช้ไฟฟ้าบนเหล็กเสริม



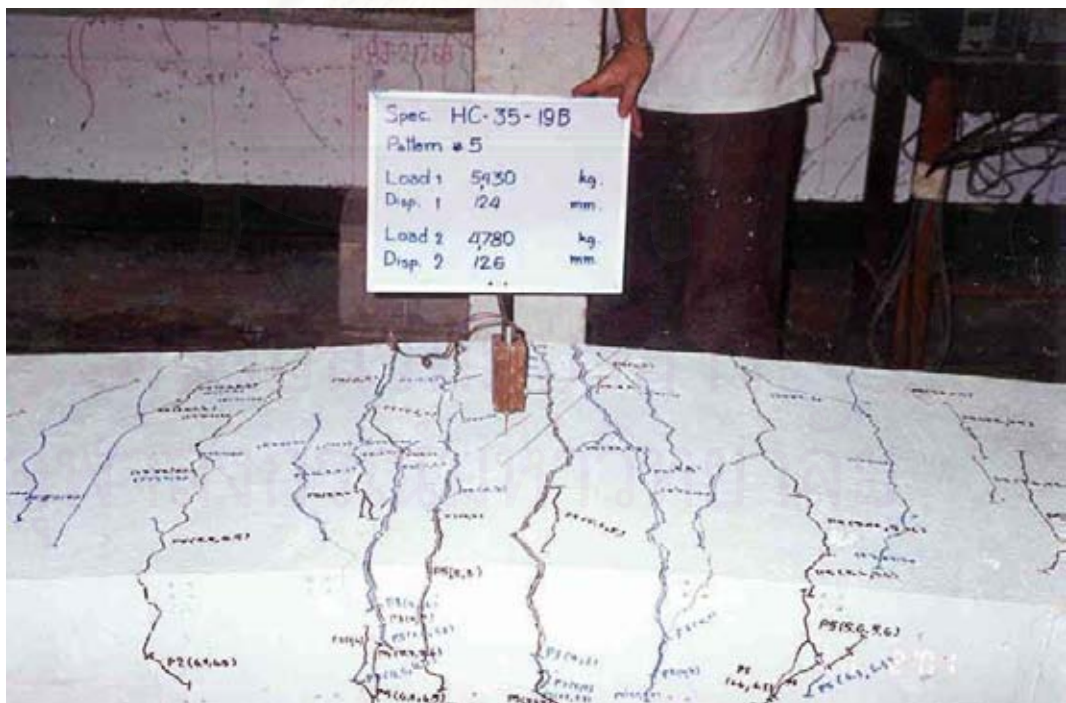
รูปที่ 3.32 การเทคอนกรีตทับหน้า



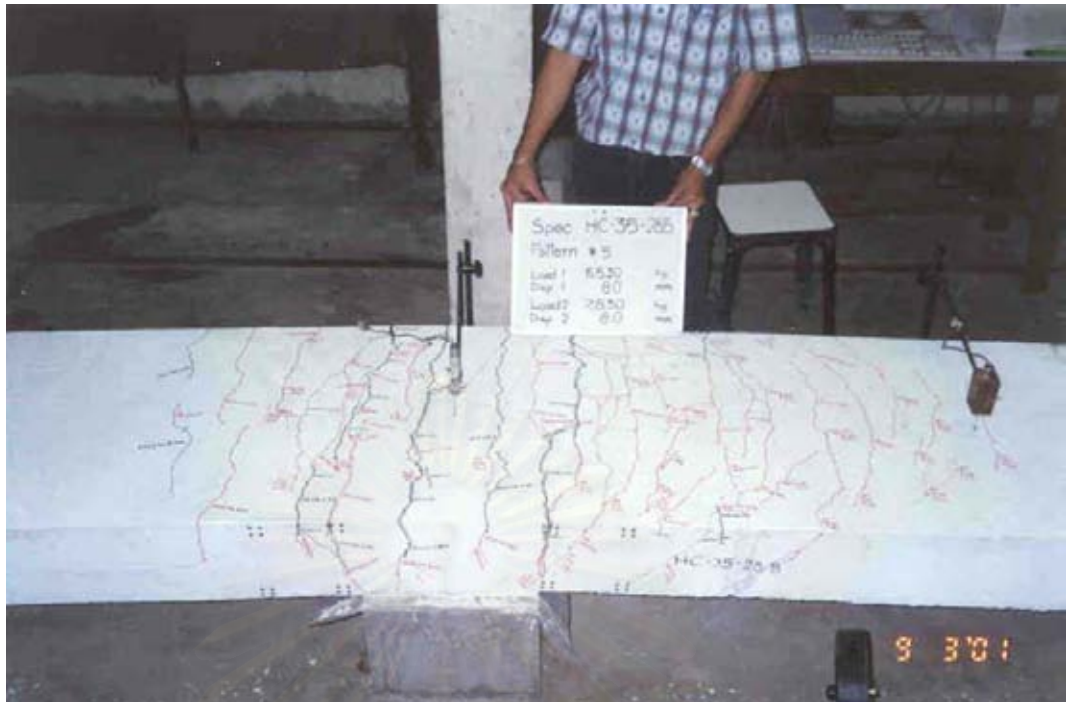
รูปที่ 3.33 การติดตั้งชุดเครื่องทดสอบ



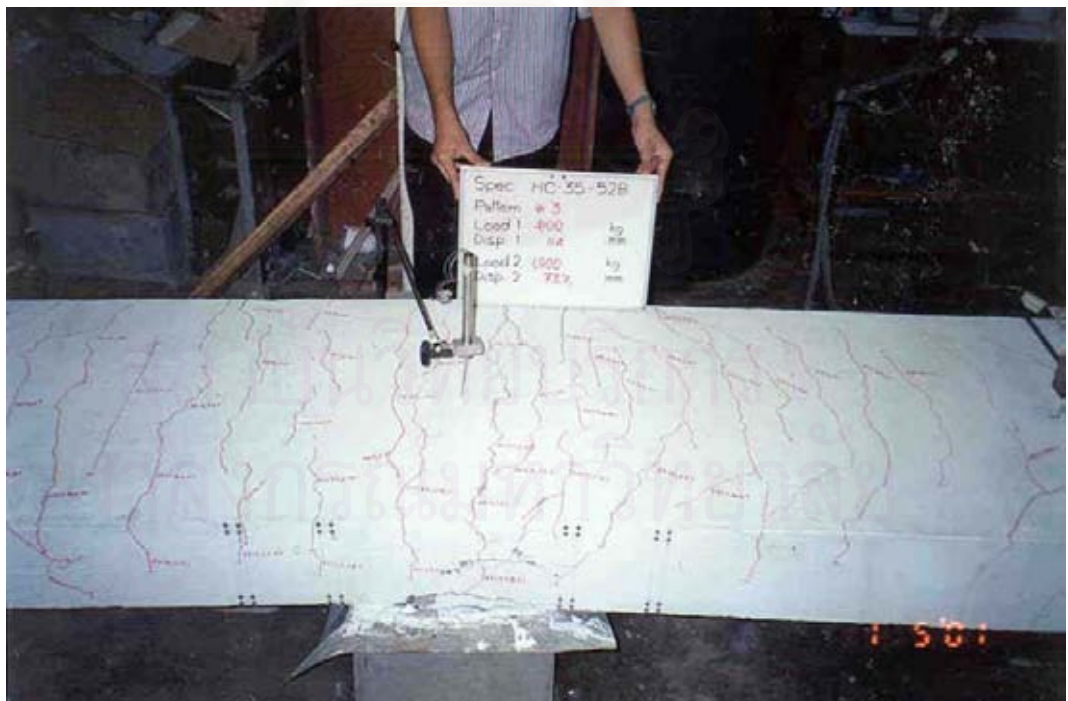
รูปที่ 3.34 ลักษณะรอยแตกกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-35-9B



รูปที่ 3.35 ลักษณะรอยแตกกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-35-19B



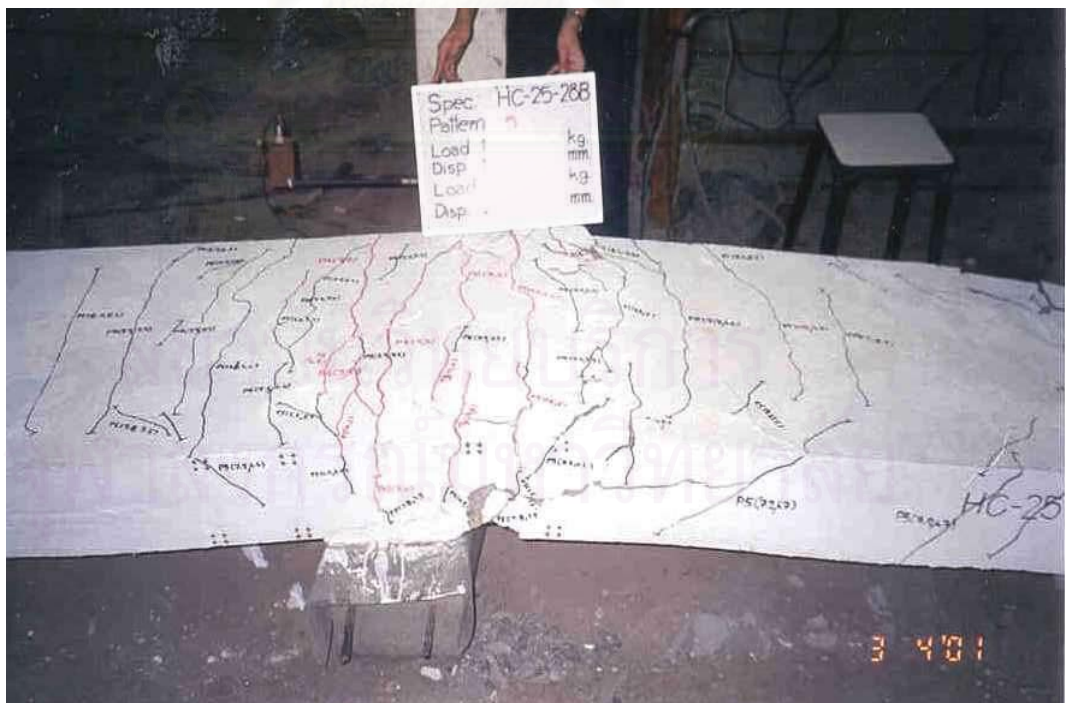
รูปที่ 3.36 ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-35-28B



รูปที่ 3.37 ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-35-52B



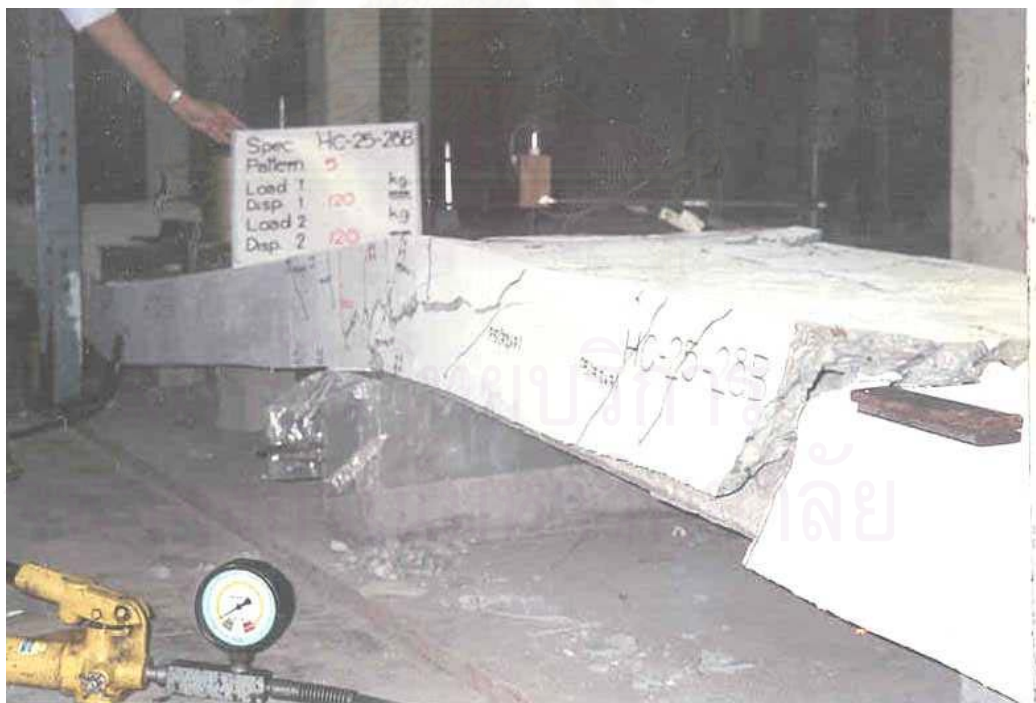
รูปที่ 3.38 ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-35-98B



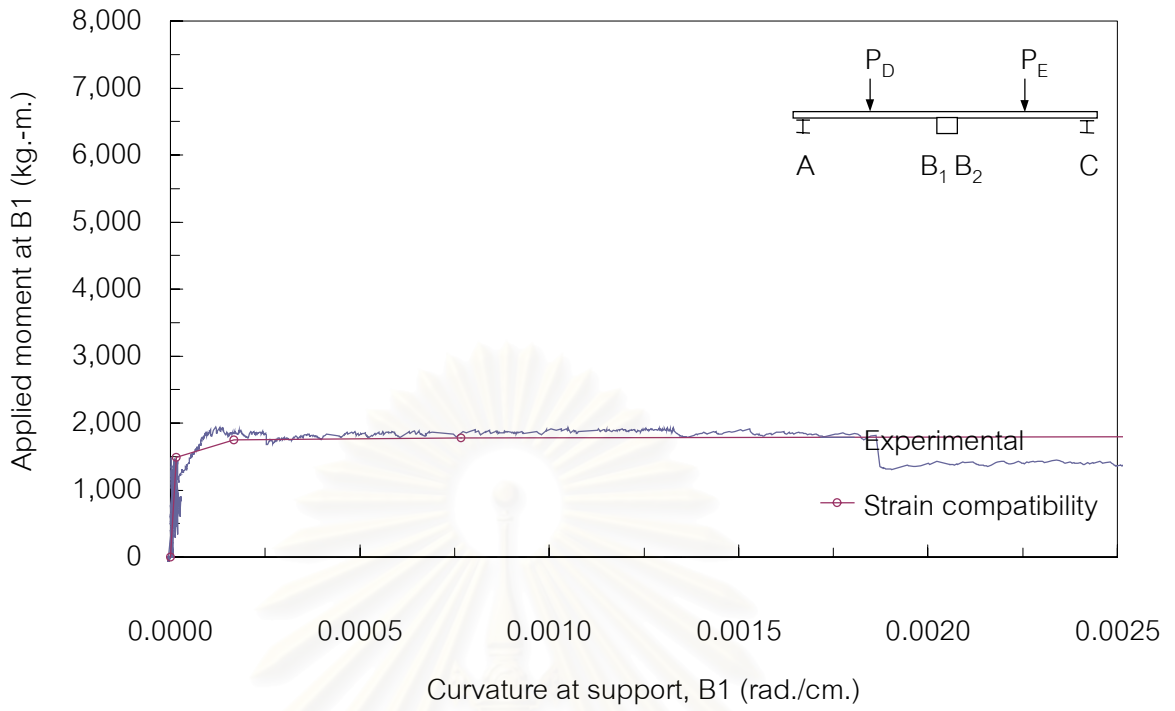
รูปที่ 3.39 ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-25-28B



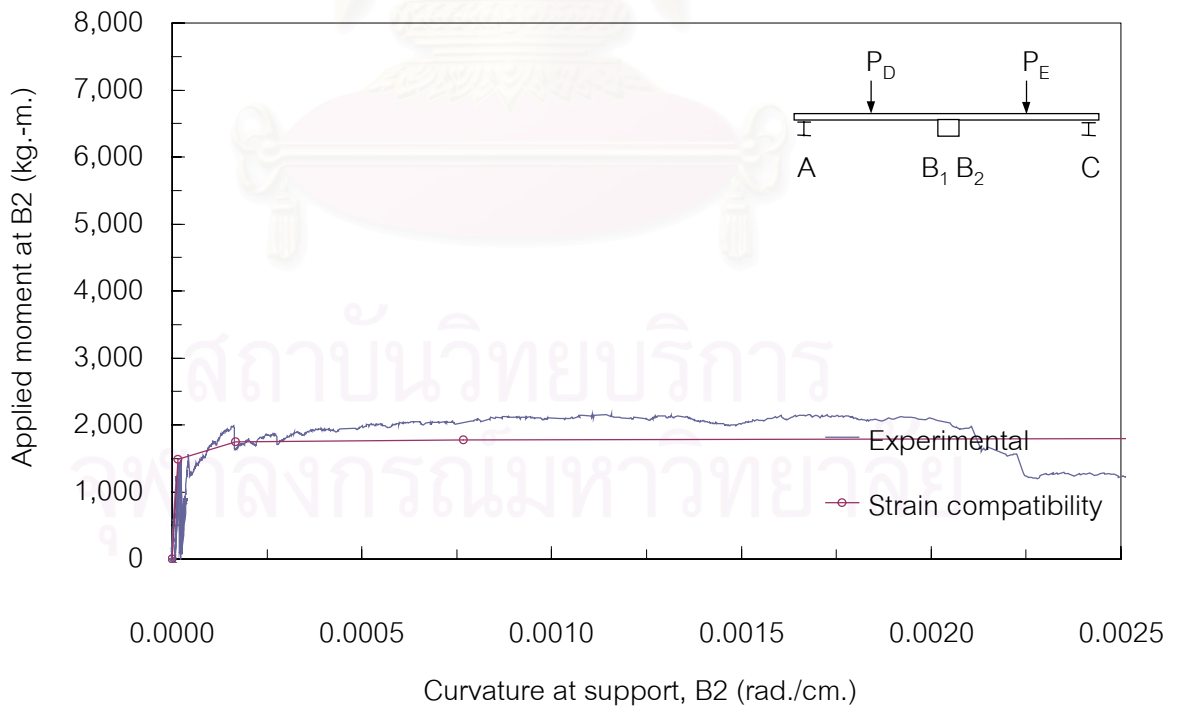
รูปที่ 3.40 ลักษณะรอยแตกร้าวที่รอยต่อเหนือแท่นรองรับ ของพื้นตัวอย่าง HC-45-28B



รูปที่ 3.41 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบโดยแรงเฉือนในทางราบ

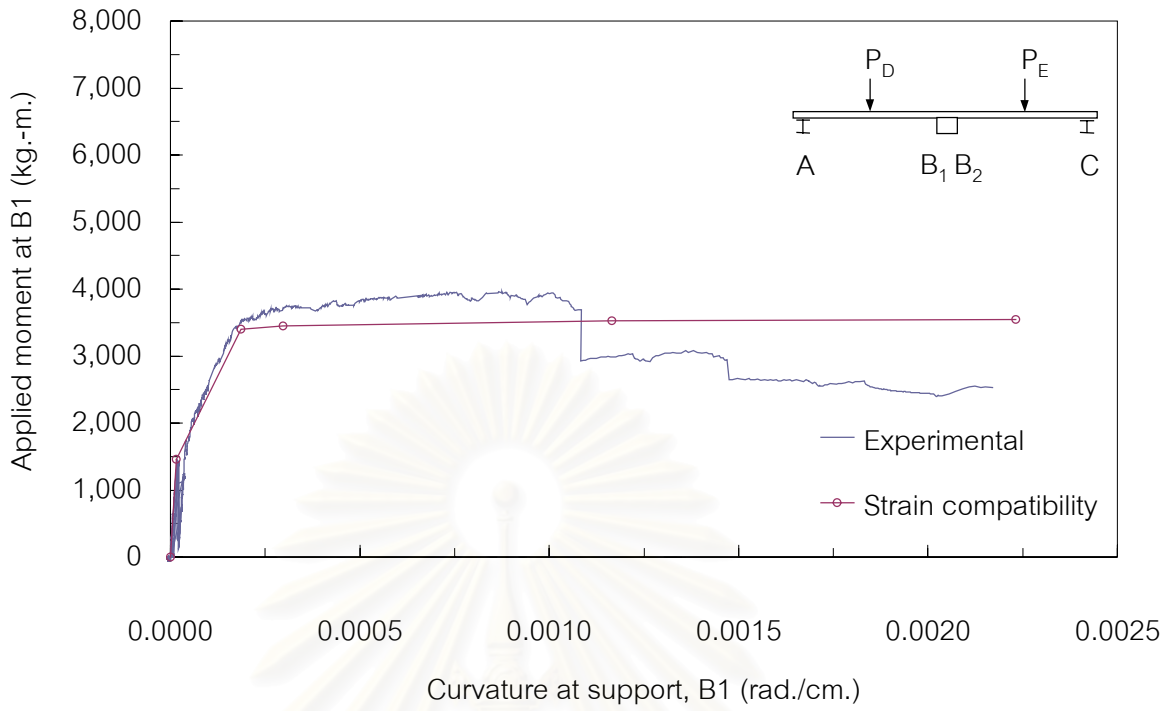


ก.) ที่จุดรองรับ B1

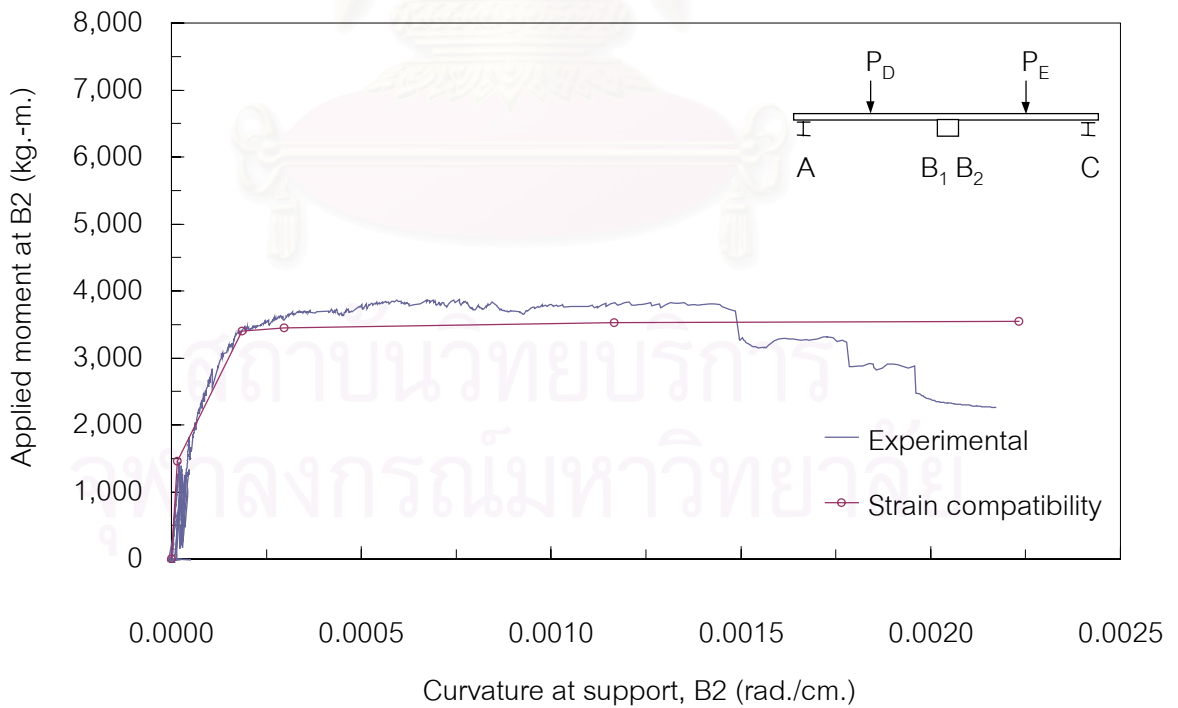


ข.) ที่จุดรองรับ B2

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-9B

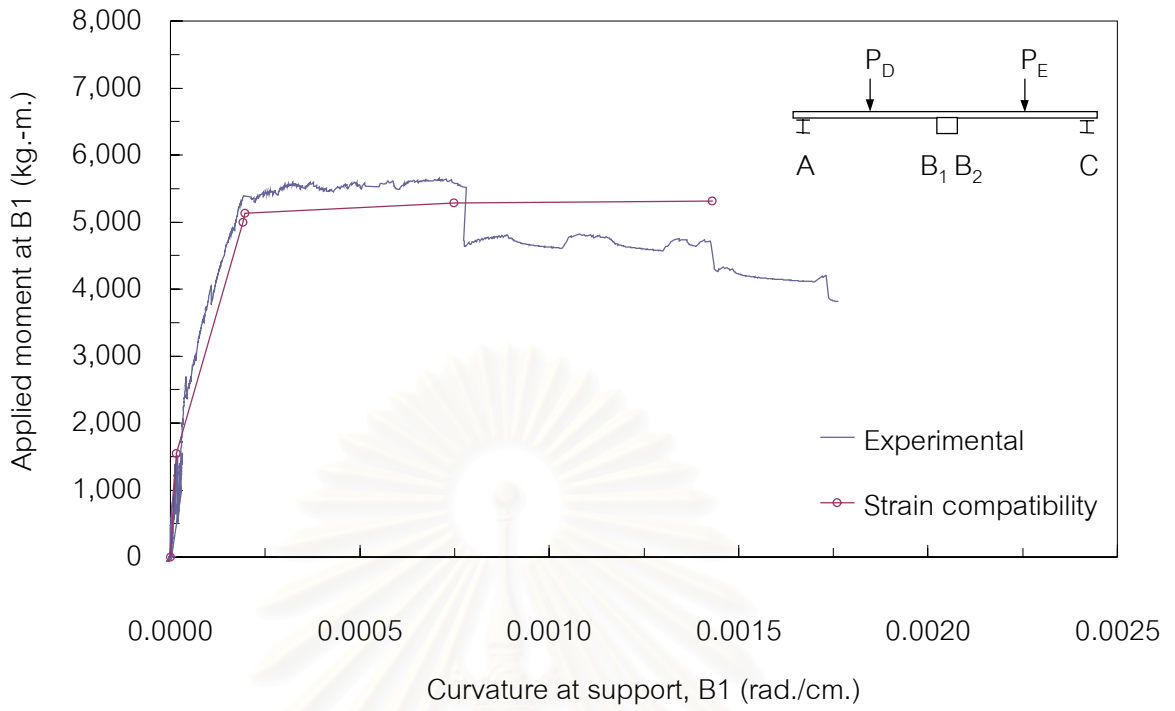


ก.) ที่จุดรองรับ B1

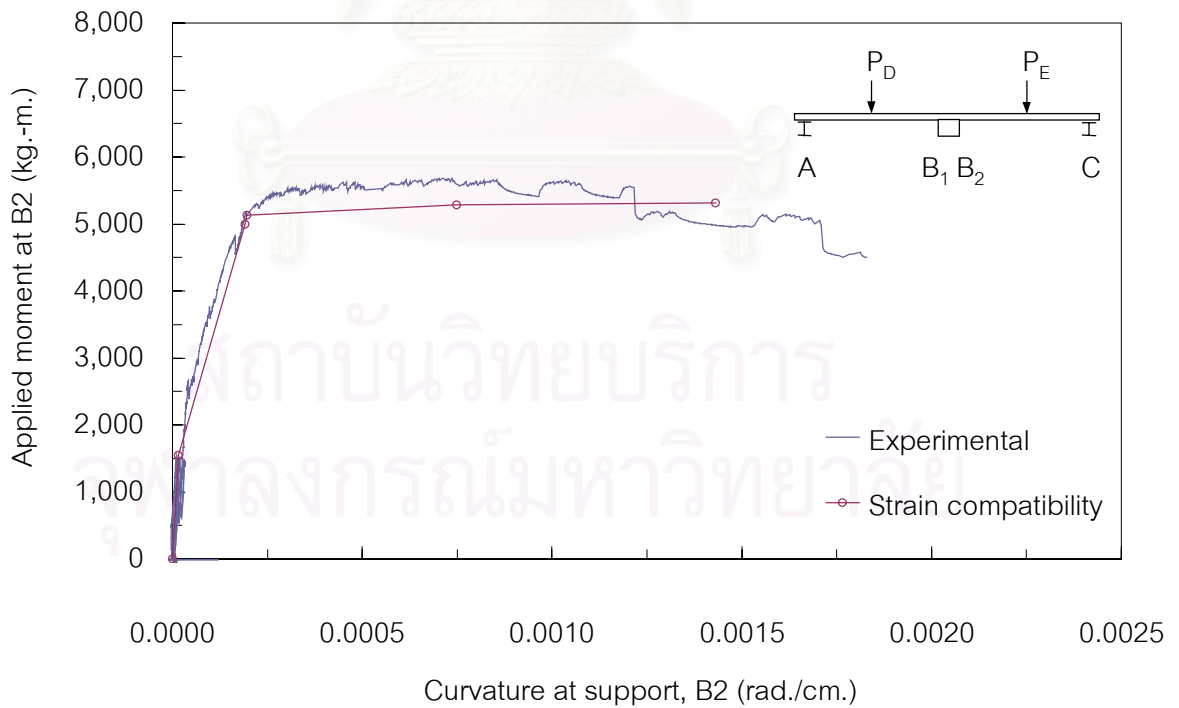


ข.) ที่จุดรองรับ B2

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-19B

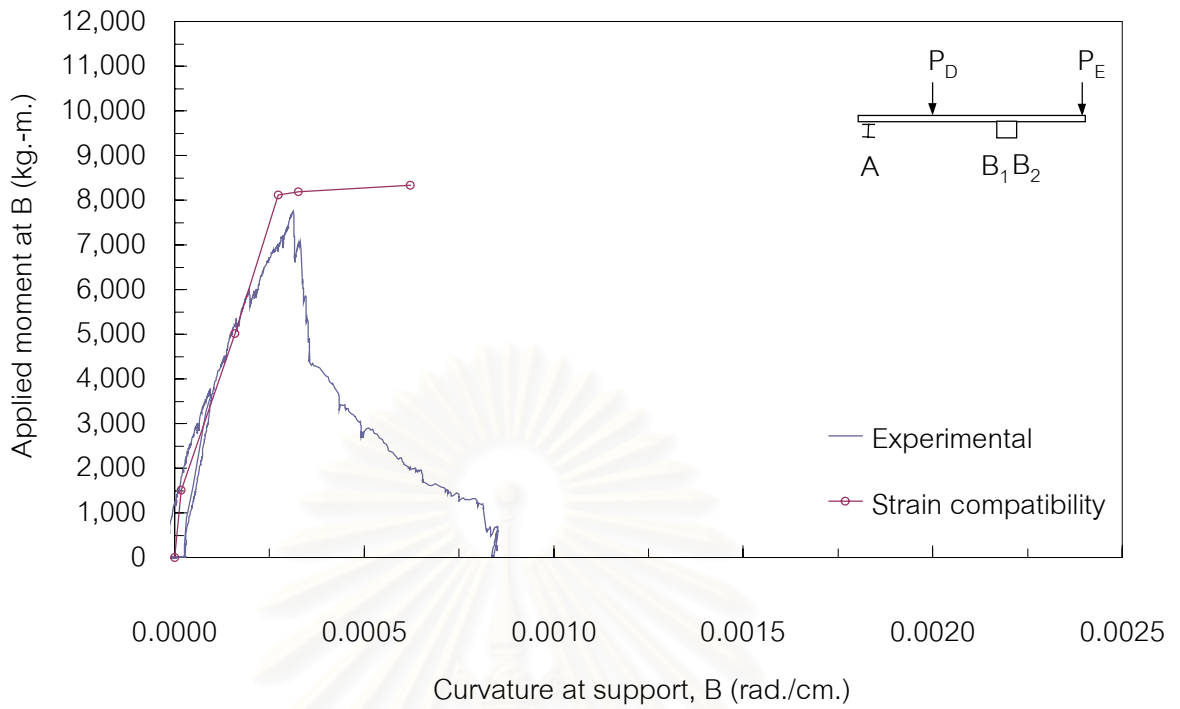


ก.) ที่จุดรองรับ B1

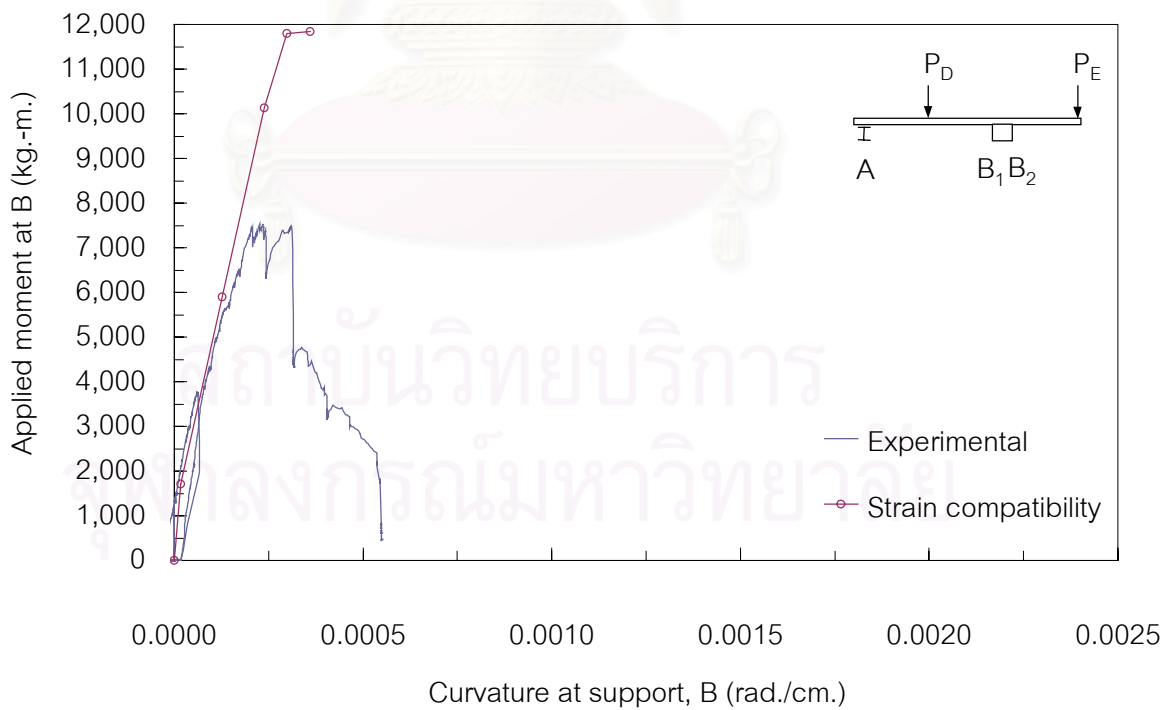


ข.) ที่จุดรองรับ B2

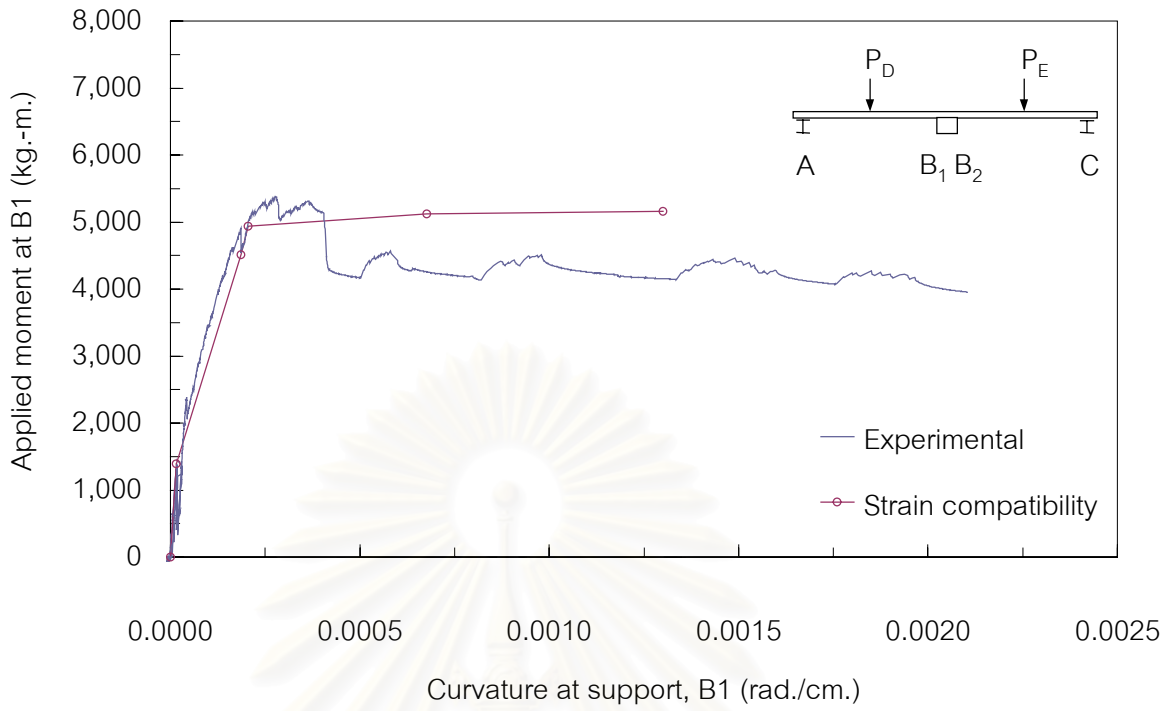
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-28B



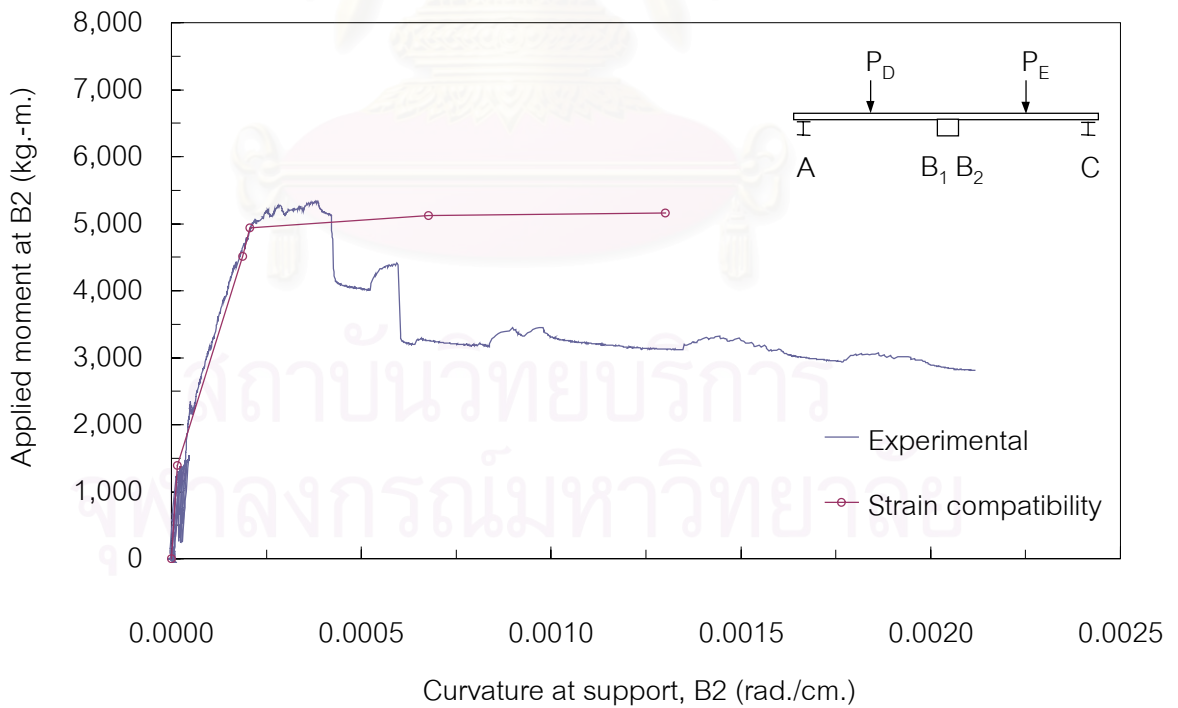
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-52B



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-35-98B

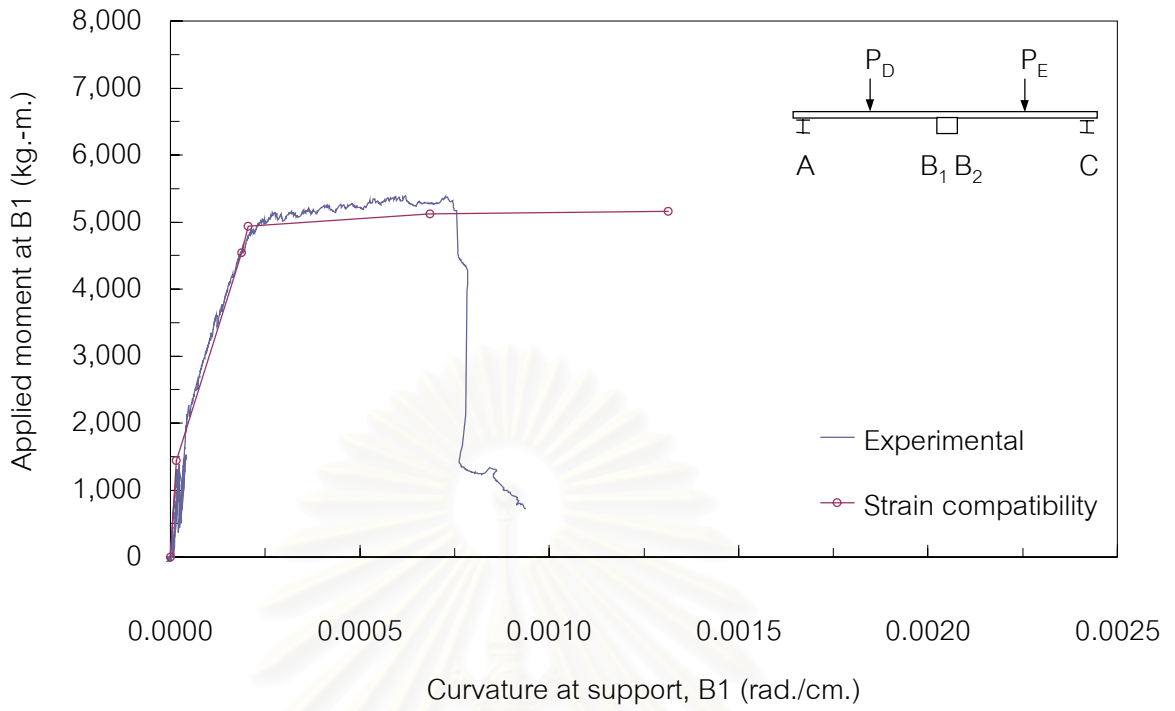


ก.) ที่จุดรองรับ B1

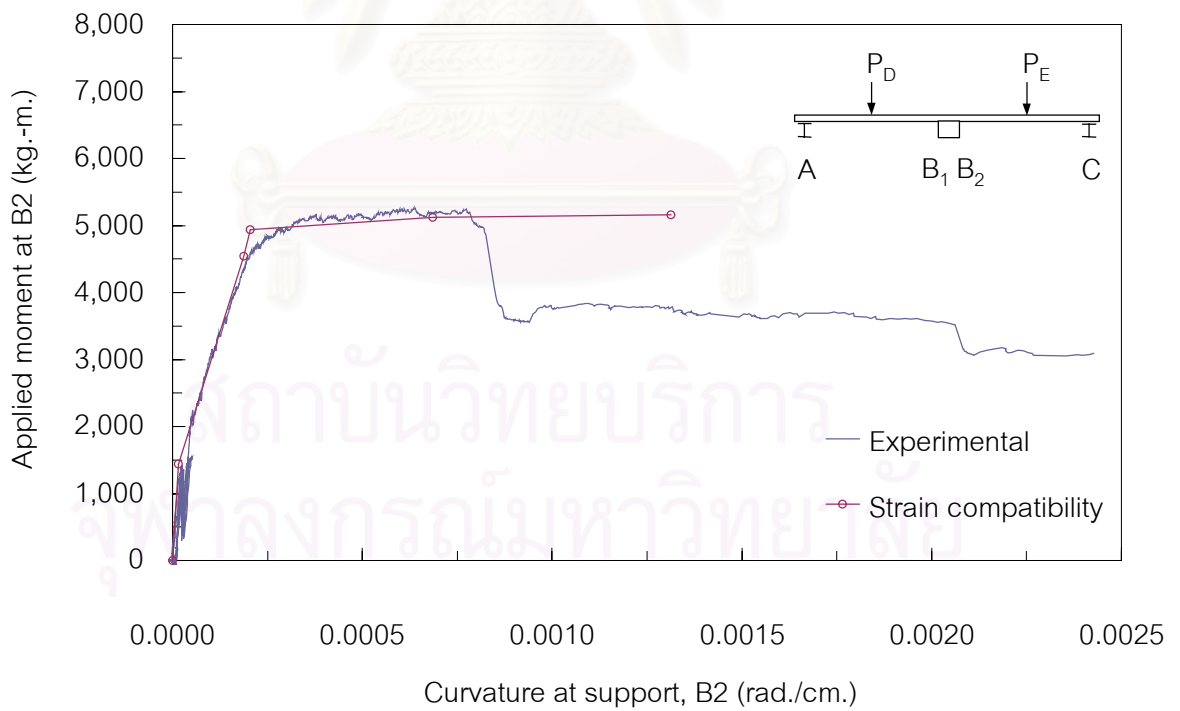


ข.) ที่จุดรองรับ B2

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-25-28B



ก.) ที่จุดรองรับ B1



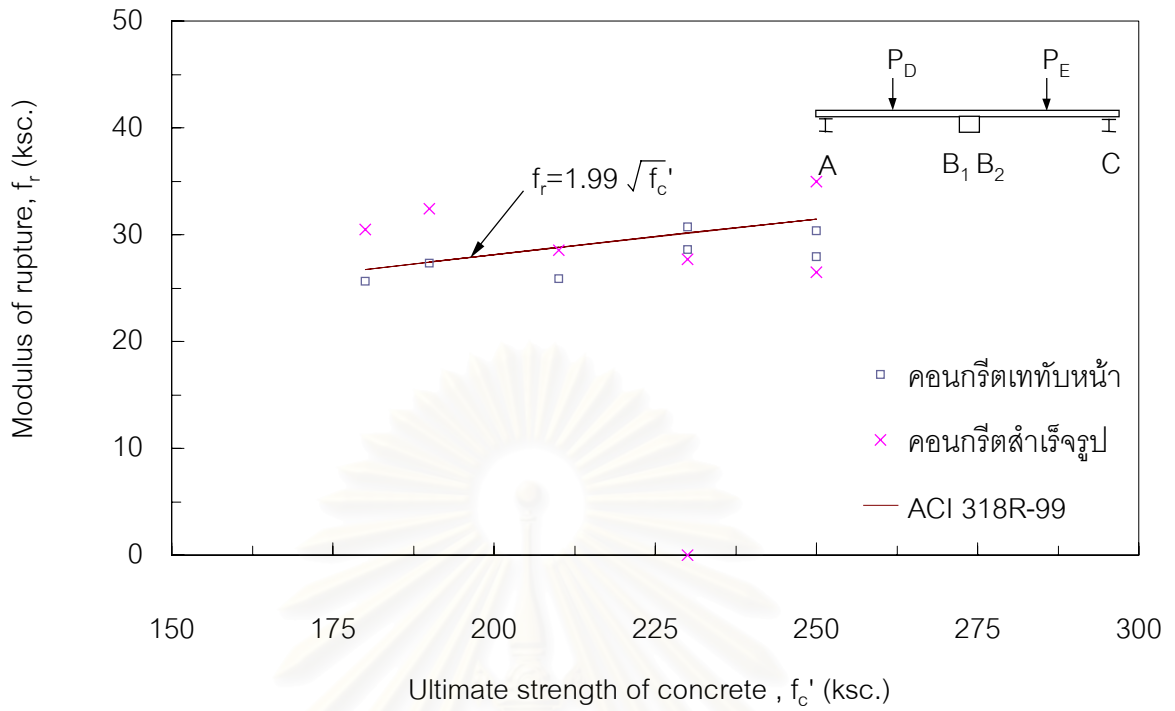
ข.) ที่จุดรองรับ B2

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่างทดสอบ HC-45-28B

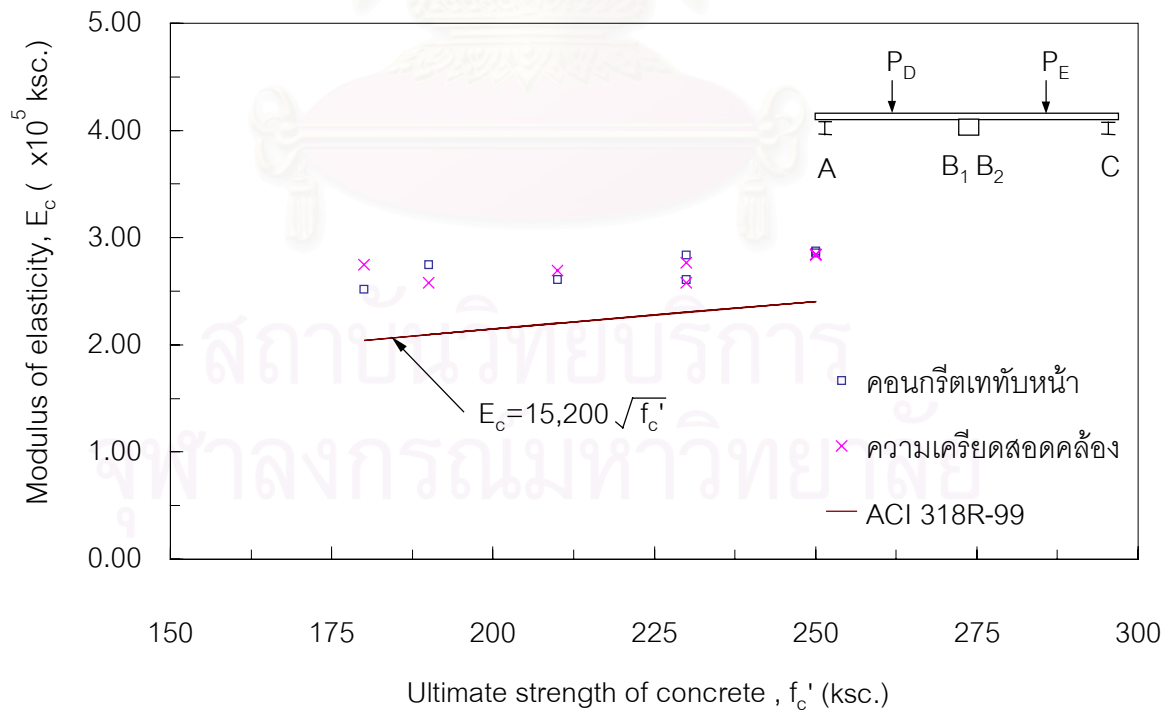


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่าง HC-SS

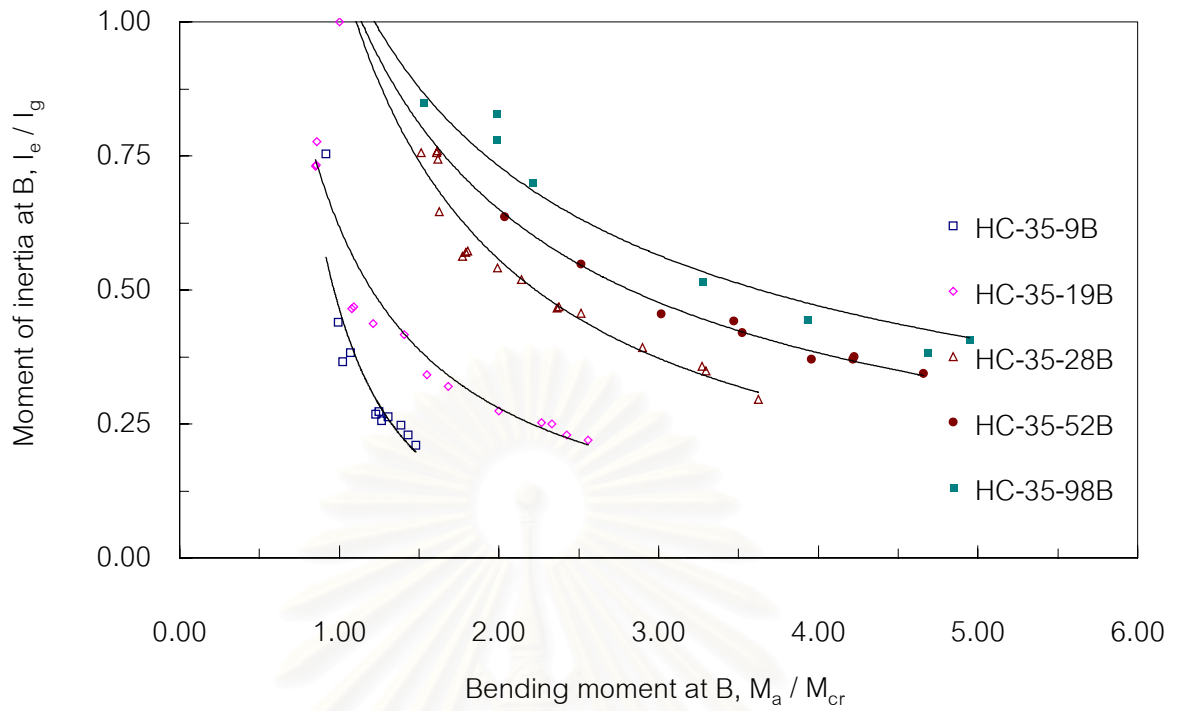
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



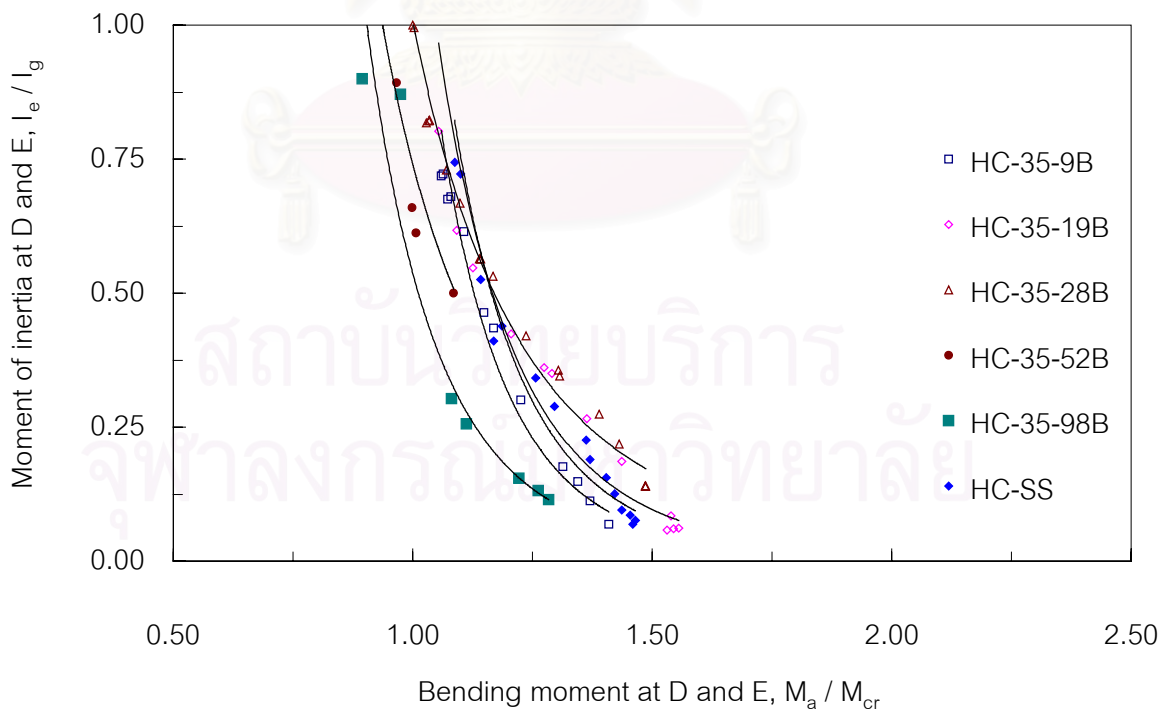
รูปที่ 4.9 โมดูลัสแตกร้าวบริเวณรอยต่อและที่กลางช่วง กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตสำเร็จรูปและคอนกรีตเทตบหน้า



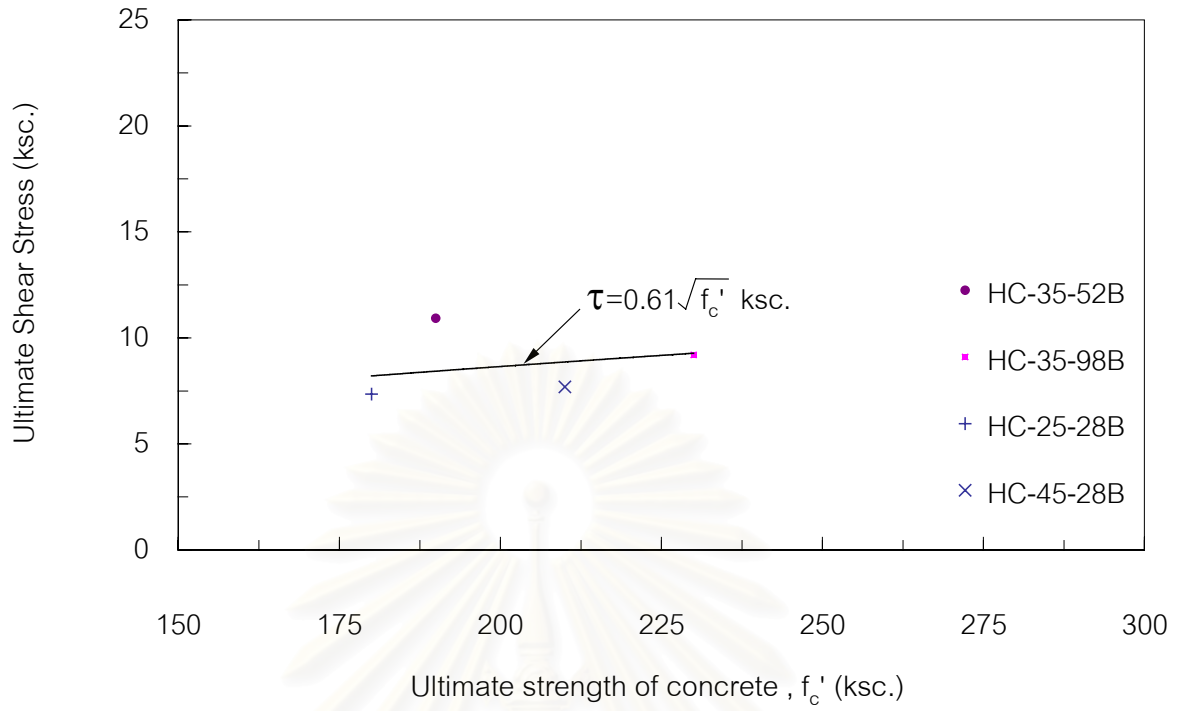
รูปที่ 4.10 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเทตบหน้าที่ย่อยต่อ



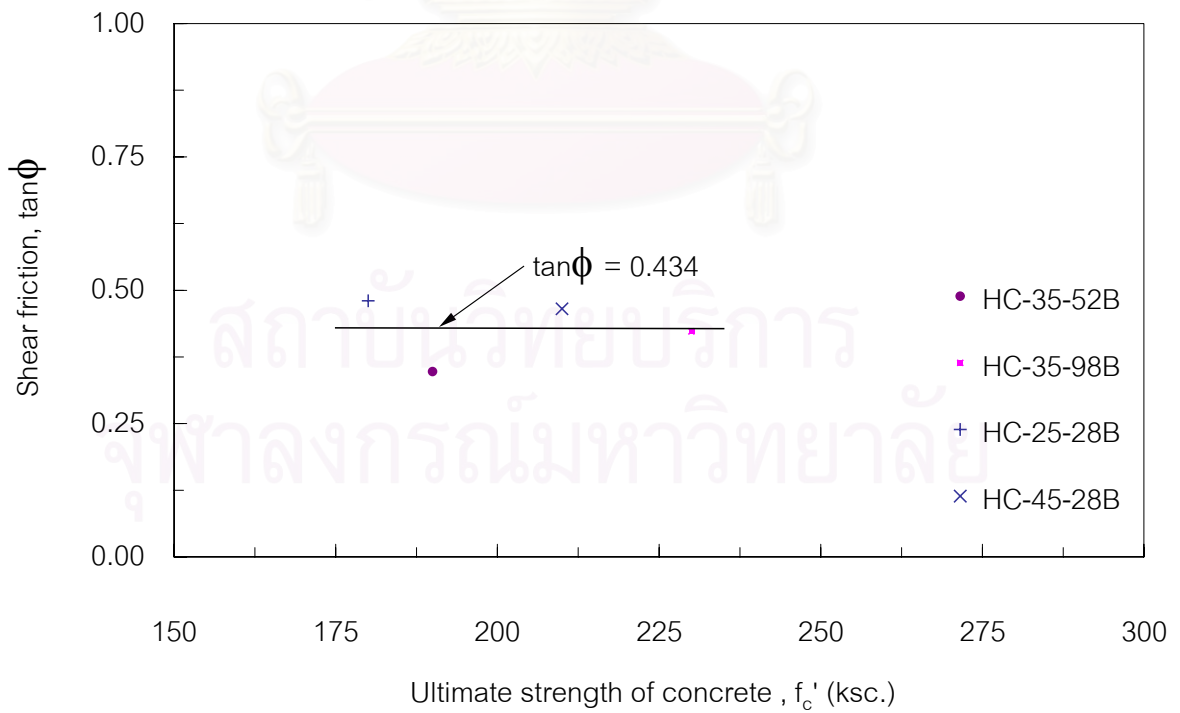
รูปที่ 4.11 (ก.) ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ความเฉื่อย และโมเมนต์ดัดบริเวณรอยต่อ



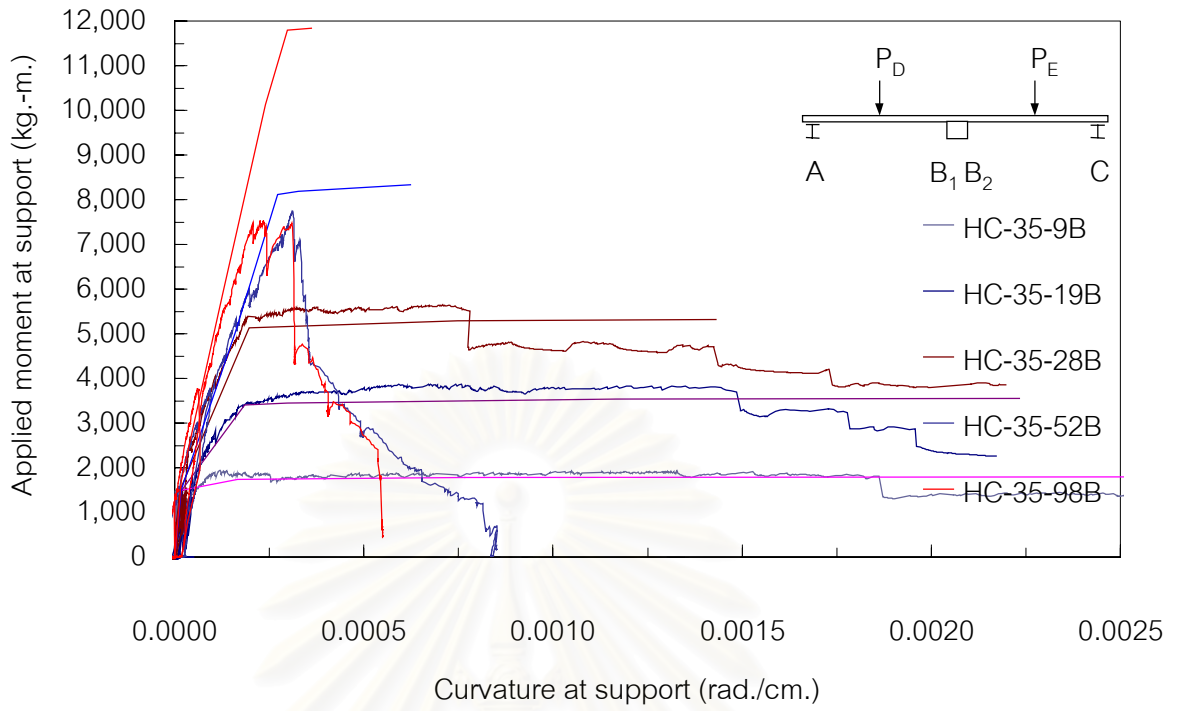
รูปที่ 4.11 (ข.) ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ความเฉื่อย และโมเมนต์ดัดที่กลางช่วง



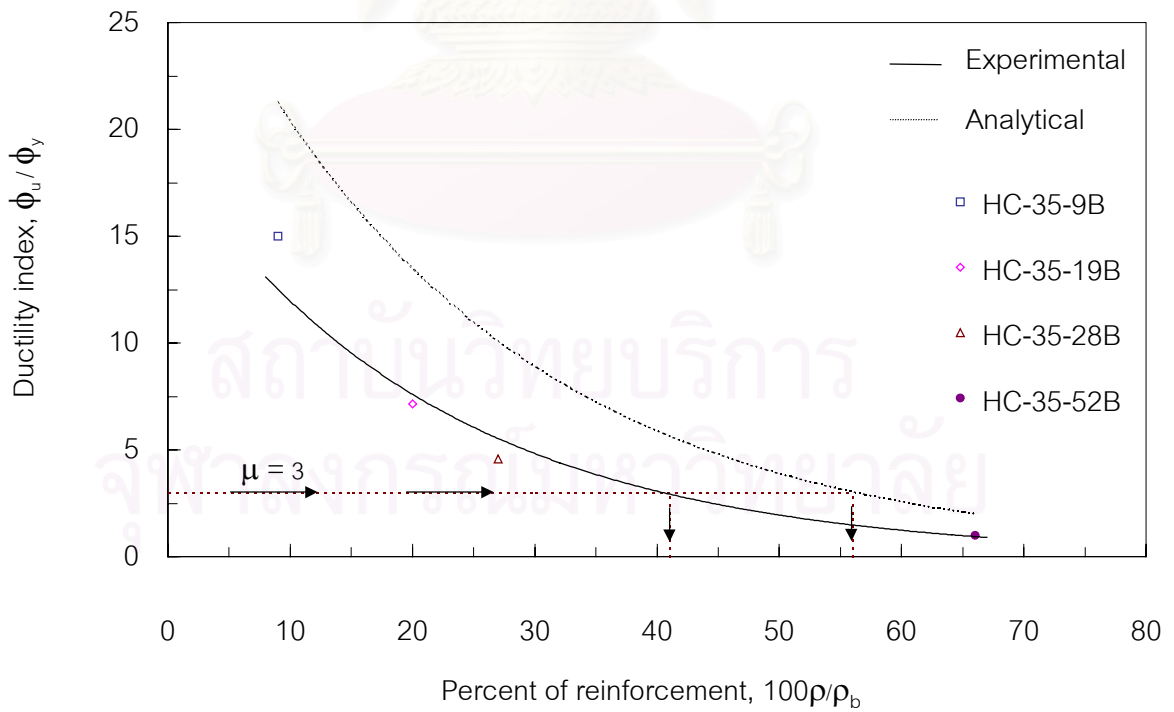
รูปที่ 4.12 หน่วยแรงเฉือนประลัยที่ผิวแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า



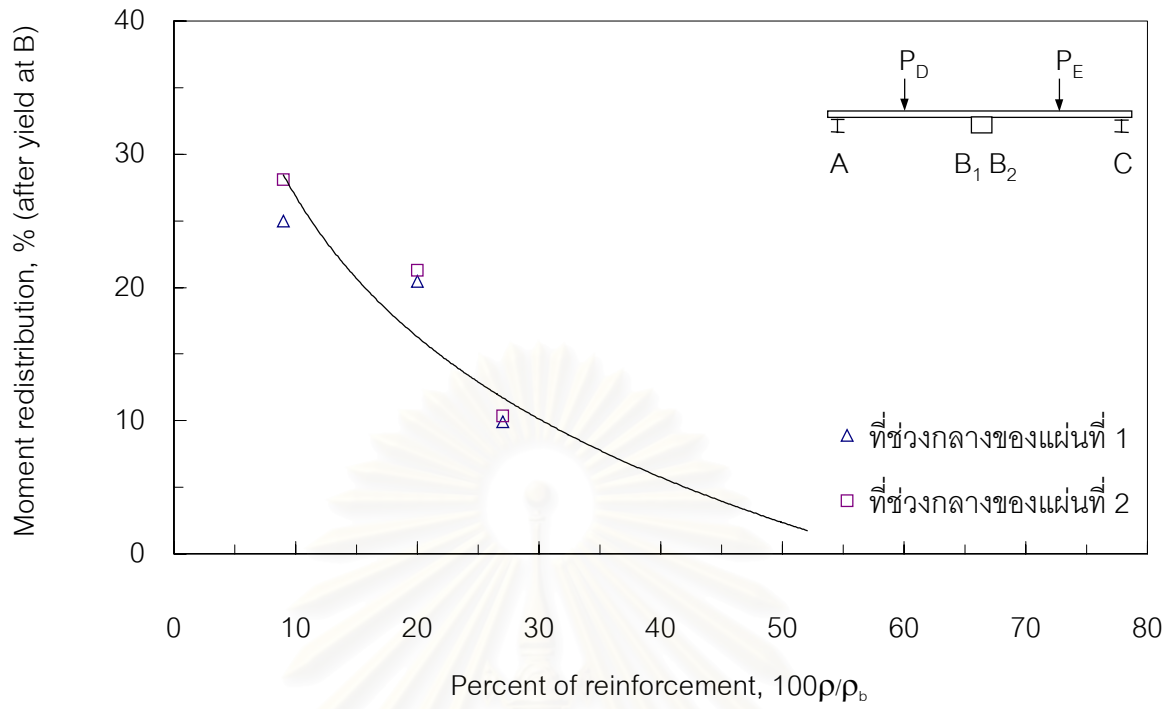
รูปที่ 4.13 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิวแผ่นพื้นสำเร็จรูปกับคอนกรีตเททับหน้า



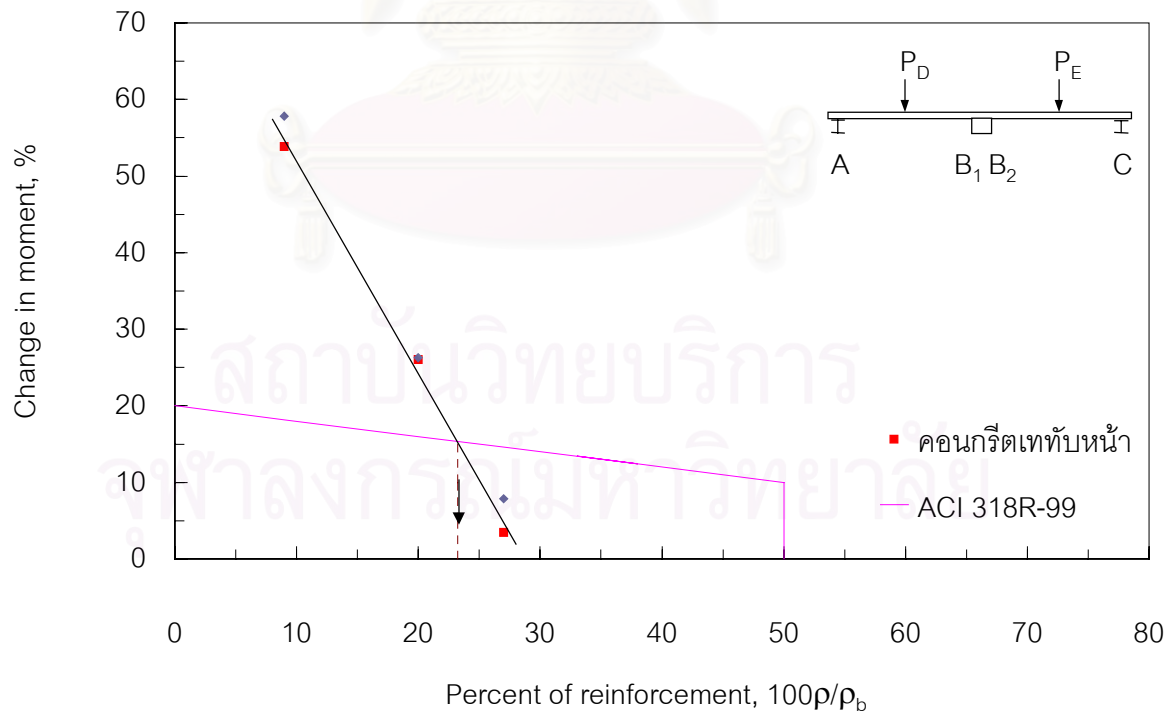
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบกำลังดัดของรอยต่อที่มีต่อปริมาณเหล็กเสริมต่างกัน



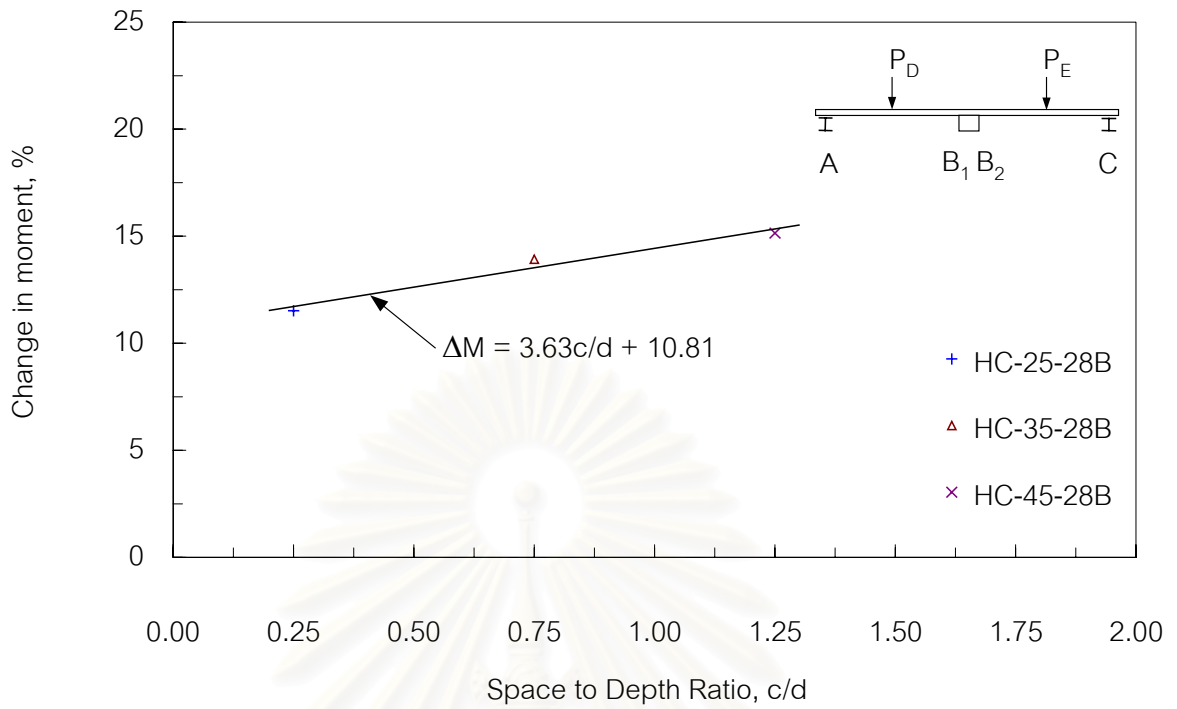
รูปที่ 4.15 ความเหนียวทางโครงสร้างของรอยต่อที่มีปริมาณเหล็กเสริมต่างกัน



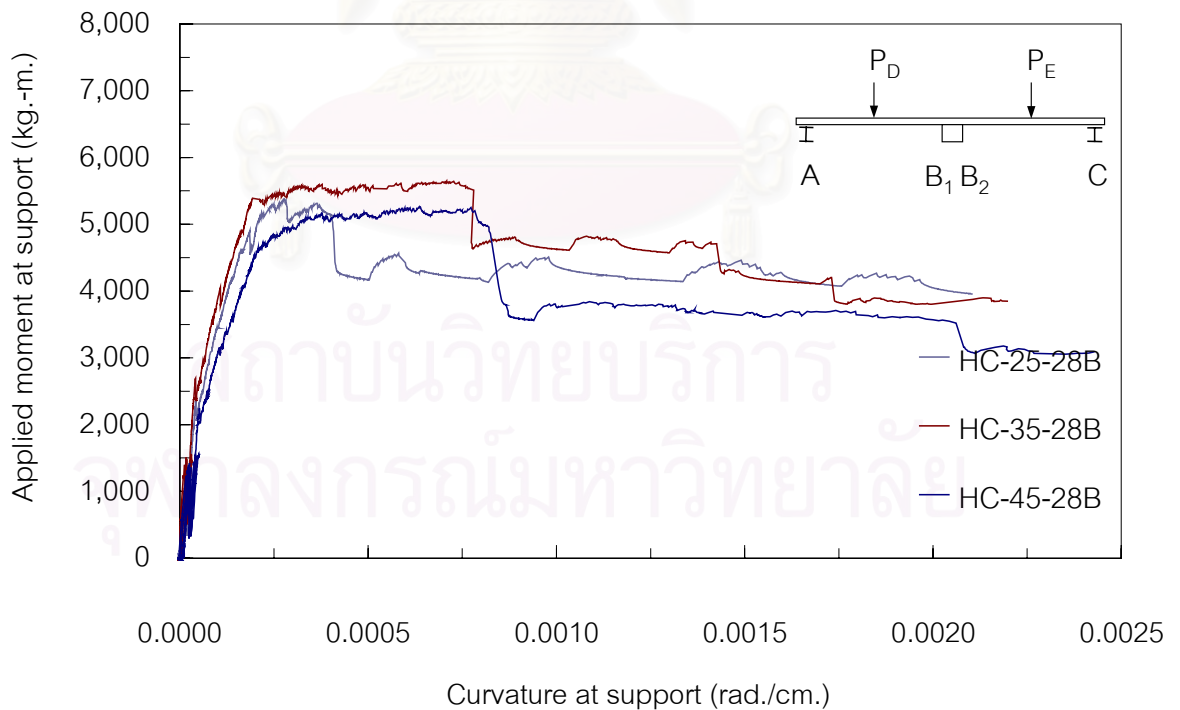
รูปที่ 4.16 การกระจายซ้ำของโมเมนต์ดัดตามปริมาณเหล็กเสริม



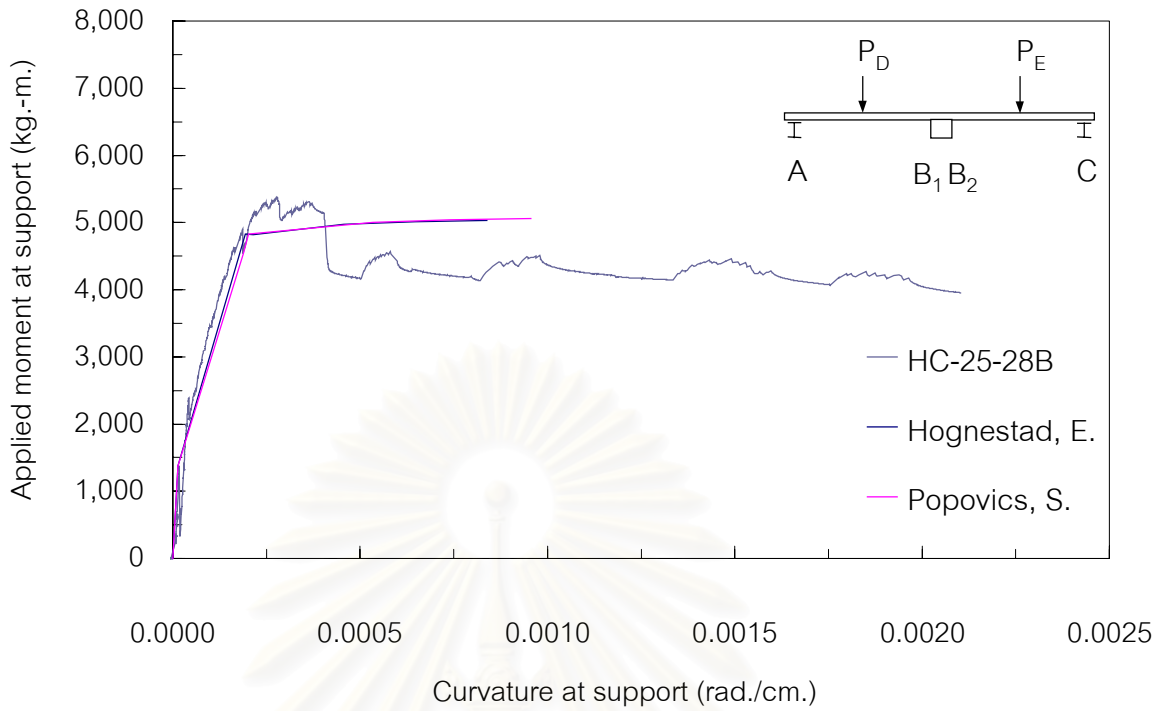
รูปที่ 4.17 ปริมาณเหล็กเสริมที่รอยต่อ และการลดกำลังดัดตามข้อกำหนดของ ACI



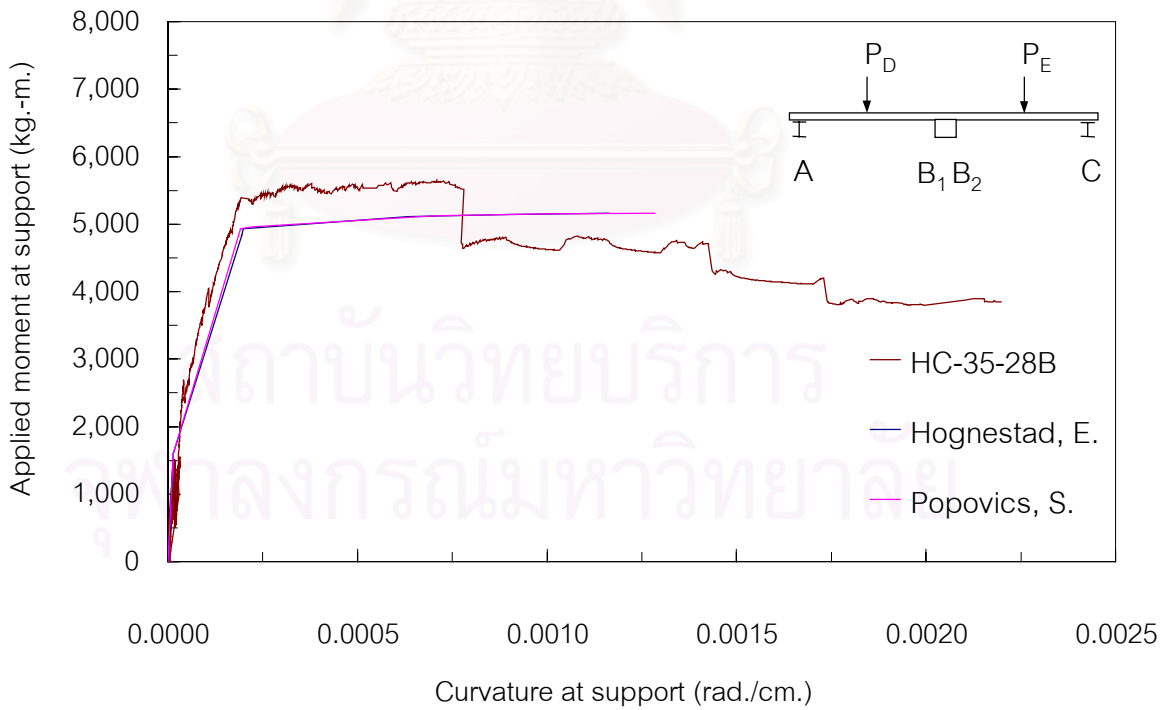
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์โดยใช้ระยะจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางที่รองรับเป็นความยาวช่วง ของพื้นตัวอย่าง HC-25-28B, HC-35-28B และ HC-45-28B



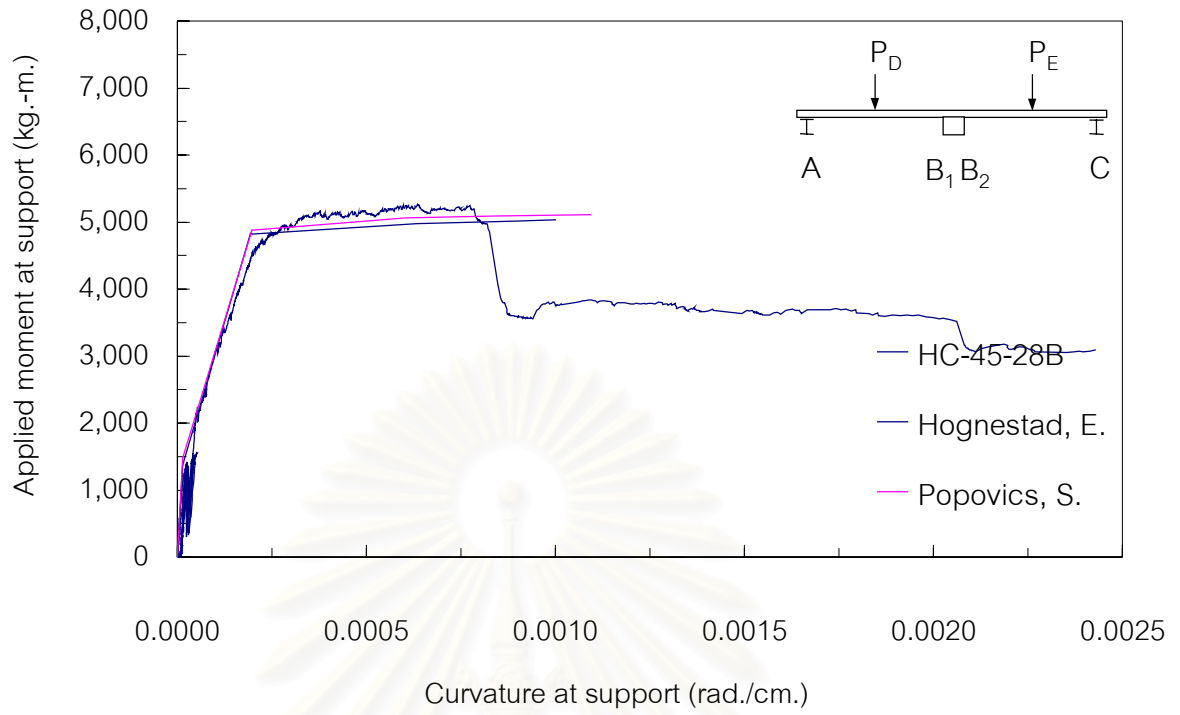
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบกำลังดัดของตัวอย่างทดสอบที่มีความกว้างของรอยต่อเป็นตัวแปร



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ของพื้นตัวอย่าง HC-25-28B



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ของพื้นตัวอย่าง HC-35-28B



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ของพื้นตัวอย่าง HC-45-28B



ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบแผนผังตัวอย่าง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.1 ผลทดสอบและการคำนวณ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-9B

Load pattern	Load (kg.)		Displacement (mm.)		Strain ($\times 10^{-6}$)	Moment (kg.-m.)				Curvature (rad./cm.)				REMARK
	at D	at E	at D	at E		at D	at B1	at B2	at E	at D	at B1	at B2	at E	
1	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	
1	2,009	0	0.72	-0.30	40	1,981	1,292	-37	416	8.01E-6	8.37E-6	3.41E-6	-1.71E-6	Crack at B
1	4,000	0	2.32	-0.70	770	3,588	871	-73	736	2.58E-5	2.70E-5	7.96E-6	-3.98E-6	
2	6	0	-0.13	-0.10	410	234	4	0	-88	1.45E-6	1.51E-6	1.14E-6	-5.69E-7	
2	0	4,001	-0.60	2.90	940	569	-73	896	3,570	3.41E-6	-6.83E-6	3.50E-5	3.35E-5	
3	0	11	-0.60	0.50	440	548	0	7	917	3.41E-6	-6.83E-6	6.03E-6	5.77E-6	
3	4,000	0	2.09	-0.20	940	3,581	876	-73	1,188	2.33E-5	2.43E-5	2.28E-6	-1.14E-6	
3	3,994	3,990	1.68	2.70	1,780	3,507	936	874	3,579	1.84E-5	1.84E-5	3.07E-5	3.07E-5	
4	0	11	-0.28	0.60	370	256	0	7	1,100	1.59E-6	-3.19E-6	7.23E-6	6.93E-6	
4	0	4,001	-0.55	3.20	1,010	523	-73	890	3,580	3.13E-6	-6.26E-6	3.86E-5	3.70E-5	
4	4,000	4,001	1.58	3.00	1,690	3,447	998	874	3,593	1.73E-5	1.73E-5	3.41E-5	3.41E-5	
5	6	0	-0.27	0.70	380	484	4	0	634	3.01E-6	3.14E-6	-7.96E-6	3.98E-6	
5	5,007	4,976	3.89	3.70	2,070	4,011	1,381	1,407	3,954	4.27E-5	4.27E-5	4.21E-5	4.21E-5	Crack at D
5	5,517	5,268	6.36	6.90	2,270	4,267	1,615	1,501	4,160	6.99E-5	7.00E-5	7.82E-5	7.84E-5	Crack at E
5	6,092	6,030	10.71	11.00	2,350	4,607	1,848	1,848	4,556	1.18E-4	1.22E-4	1.32E-4	1.25E-4	Yield at B
5	7,202	7,599	54.32	54.70	12,600	5,757	1,799	2,072	5,843	1.64E-3	1.72E-3	1.84E-3	1.76E-3	Ult. at D
5	6,476	7,487	59.36	59.70	15,340	5,538	1,361	1,980	5,836	1.88E-3	1.95E-3	2.11E-3	2.02E-3	Ult. at E

ตาราง ก.2 ผลทดสอบและการคำนวณ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-19B

Load pattern	Load (kg.)		Displacement (mm.)		Strain ($\times 10^{-6}$)	Moment (kg.-m.)				Curvature (rad./cm.)				REMARK
	at D	at E	at D	at E		at D	at B1	at B2	at E	at D	at B1	at B2	at E	
1	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	
1	2,273	-6	1.50	-0.30	30	2,626	1,462	-46	515	1.67E-5	1.74E-5	4.11E-6	-1.53E-6	Crack at B
1	3,022	0	2.10	-0.40	40	3,062	563	-55	650	2.34E-5	2.44E-5	4.55E-6	-2.28E-6	
2	-6	0	0.30	0.20	-10	-487	-4	-4	163	-3.29E-6	-3.29E-6	1.14E-6	1.14E-6	
2	0	3,982	-0.40	3.40	60	335	-77	1,256	3,369	2.16E-6	-5.05E-6	4.10E-5	3.93E-5	
3	-6	0	0.30	0.70	0	-494	-4	0	575	-3.34E-6	-3.49E-6	-7.96E-6	3.98E-6	
3	4,000	0	3.10	-0.10	60	3,416	1,198	-77	1,219	3.45E-5	3.60E-5	1.26E-6	-5.37E-7	
3	4,000	4,000	3.10	3.20	1,000	3,434	1,168	1,226	3,385	3.40E-5	3.40E-5	3.64E-5	3.64E-5	
4	-6	0	0.70	0.80	240	-1,143	-8	-4	1,298	-7.73E-6	-7.90E-6	8.61E-6	8.98E-6	
4	90	3,988	0.10	3.80	590	154	-31	1,274	3,385	7.66E-7	-3.04E-7	4.58E-5	4.39E-5	
4	4,006	4,000	3.00	3.50	1,020	3,433	1,168	1,239	3,396	3.29E-5	3.29E-5	3.98E-5	3.98E-5	
5	0	-6	0.70	1.00	260	-1,133	-4	-4	1,574	-7.68E-6	-7.67E-6	1.14E-5	1.14E-5	
5	4,929	4,836	3.70	4.00	1,250	3,751	1,731	1,766	3,686	4.06E-5	4.06E-5	4.54E-5	4.55E-5	Crack at D
5	4,671	4,911	3.80	4.10	1,270	3,672	1,578	1,817	3,712	4.17E-5	4.16E-5	4.68E-5	4.67E-5	Crack at E
5	7,064	6,849	15.70	15.80	2,340	4,841	3,406	3,343	4,702	1.69E-4	1.67E-4	1.69E-4	1.72E-4	Yield at B
5	8,515	8,044	57.90	57.10	2,620	5,832	3,931	3,763	5,601	1.15E-3	1.00E-3	9.53E-4	1.12E-3	Ult. at D
5	6,962	8,236	67.00	78.60	327,670	5,352	2,931	3,795	5,702	1.44E-3	1.24E-3	1.40E-3	1.63E-3	Ult. at E

ตาราง ก.3 ผลทดสอบและการคำนวณ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-28B

Load pattern	Load (kg.)		Displacement (mm.)		Strain ($\times 10^{-6}$)	Moment (kg.-m.)				Curvature (rad./cm.)				REMARK
	at D	at E	at D	at E		at D	at B1	at B2	at E	at D	at B1	at B2	at E	
1	0	1	2.00	3.00	4	6	7	8	9	1.00E+1	1.10E+1	1.20E+1	1.30E+1	
1	2,303	-6	1.49	-0.60	10	2,494	1,481	-46	274	1.66E-5	1.73E-5	8.20E-6	-3.07E-6	Crack at B
1	4,000	-6	2.59	-0.90	30	3,211	1,443	-77	547	2.88E-5	3.01E-5	1.14E-5	-4.83E-6	
2	0	-6	0.18	-0.30	0	-146	0	-4	-491	-1.02E-6	2.05E-6	-3.62E-6	-3.46E-6	
2	0	4,000	-0.91	2.40	560	755	-73	1,396	3,192	5.18E-6	-1.04E-5	2.89E-5	2.77E-5	
3	0	-12	0.01	0.20	460	-8	0	-8	327	-5.69E-8	1.14E-7	2.41E-6	2.31E-6	
3	4,000	-6	2.66	-0.70	530	3,213	1,449	-77	699	2.96E-5	3.09E-5	8.85E-6	-3.76E-6	
3	4,000	4,000	2.39	2.10	1,400	3,223	1,394	1,340	3,201	2.62E-5	2.62E-5	2.39E-5	2.39E-5	
4	0	-12	0.28	0.20	670	-227	0	-8	327	-1.59E-6	3.19E-6	2.41E-6	2.31E-6	
4	0	4,000	-0.60	2.70	1,020	504	-73	1,421	3,201	3.41E-6	-6.83E-6	3.26E-5	3.12E-5	
4	4,000	4,000	2.34	2.30	1,440	3,221	1,390	1,356	3,207	2.57E-5	2.57E-5	2.62E-5	2.62E-5	
5	0	-12	0.25	0.50	690	-203	0	-8	818	-1.42E-6	2.84E-6	6.03E-6	5.77E-6	
5	5,475	5,493	3.37	3.20	1,710	3,714	2,381	2,315	3,699	3.70E-5	3.70E-5	3.64E-5	3.64E-5	Crack at D
5	5,493	5,487	3.45	3.30	1,700	3,722	2,398	2,319	3,701	3.79E-5	3.79E-5	3.75E-5	3.75E-5	Crack at E
5	8,551	8,713	19.44	19.10	2,890	5,161	5,370	5,284	5,189	2.21E-4	2.13E-4	2.17E-4	2.23E-4	Yield at B
5	9,198	9,623	55.00	54.90	3,220	5,673	5,540	5,619	5,766	8.65E-4	7.68E-4	7.44E-4	8.12E-4	Ult. at D
5	8,053	9,623	66.71	66.30	3,290	5,406	4,753	5,567	5,830	1.53E-3	1.34E-3	1.20E-3	1.32E-3	Ult. at E

ตาราง ก.4 ผลทดสอบและการคำนวณ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-52B

Load pattern	Load (kg.)		Displacement (mm.)		Strain ($\times 10^{-6}$)	Moment (kg.-m.)		Curvature (rad./cm.)		REMARK
	at D	at E	at D	at E		at D	at B	at D	at B	
1	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0.00E+0	0.00E+0	
1	998	6	0.80	-0.83	10	1,576	9	6.84E-6	-5.53E-6	
1	3,004	-6	2.70	-2.91	0	3,579	-9	2.30E-5	-1.94E-5	
2	2,993	6	2.80	-2.88	10	3,571	9	2.39E-5	-1.92E-5	
2	3,575	929	2.60	0.83	370	3,495	1,394	2.55E-5	5.53E-6	Crack at B
2	3,609	1,001	2.50	1.33	430	3,481	1,502	2.49E-5	8.87E-6	
2	4,069	2,027	2.10	9.68	920	3,301	3,040	2.68E-5	6.45E-5	
2	4,349	2,500	2.10	13.85	1,090	3,264	3,751	3.12E-5	9.23E-5	
3	0	6	0.10	3.85	270	86	9	5.69E-7	2.57E-5	
3	3,026	2,045	1.00	13.21	970	2,738	3,067	2.07E-5	8.81E-5	
3	4,494	3,004	1.50	20.07	1,310	3,128	4,506	3.01E-5	1.34E-4	
3	6,007	3,940	2.40	32.35	1,710	3,569	5,909	4.57E-5	2.16E-4	
3	6,792	4,203	3.10	33.98	1,810	3,884	6,305	5.19E-5	2.27E-4	Crack at D
3	6,501	4,197	3.10	34.41	1,810	3,751	6,296	5.68E-5	2.29E-4	
3	7,790	5,103	6.00	46.14	2,360	4,217	7,654	1.14E-4	3.08E-4	yield
3	7,756	5,169	6.00	46.77	2,400	4,189	7,753	1.19E-4	3.12E-4	Hor. shear slip
3	5,615	4,072	8.90	50.74	2,310	3,913	6,107	2.46E-4	3.38E-4	

ตาราง ก.5 ผลทดสอบและการคำนวณ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-98B

Load pattern	Load (kg.)		Displacement (mm.)		Strain ($\times 10^{-6}$)	Moment (kg.-m.)		Curvature (rad./cm.)		REMARK
	at D	at E	at D	at E		at D	at B	at D	at B	
1	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0.00E+0	0.00E+0	
1	1,995	-6	1.80	-2.20	0	2,546	-9	2.08E-5	-1.47E-5	
1	3,004	-6	2.77	-3.30	-10	2,883	-9	3.20E-5	-2.20E-5	
2	11	-6	0.16	-0.20	-30	260	-9	1.90E-6	-1.33E-6	
2	3,004	12	2.86	-3.50	0	2,885	18	3.30E-5	-2.33E-5	
2	3,553	822	2.56	-0.20	90	3,059	1,232	2.92E-5	-1.33E-6	
2	3,609	1,001	2.47	0.90	180	3,076	1,502	2.81E-5	6.00E-6	Crack at B
2	3,900	1,517	2.37	3.30	330	3,171	2,276	2.68E-5	2.20E-5	
2	4,181	2,003	2.19	6.10	500	3,260	3,004	2.47E-5	4.07E-5	
2	4,517	2,500	2.19	9.30	680	3,372	3,751	2.46E-5	6.20E-5	
3	0	6	0.04	2.60	160	31	9	2.28E-7	1.73E-5	
3	1,009	702	0.24	4.70	290	683	1,052	2.68E-6	3.13E-5	
3	3,049	2,213	0.47	10.20	620	1,681	3,319	5.23E-6	6.80E-5	
3	5,940	4,953	0.88	31.00	1,340	3,225	7,430	9.74E-6	2.07E-4	Crack at D
3	5,492	4,689	0.89	31.10	1,310	3,096	7,034	9.85E-6	2.07E-4	
3	6,052	5,019	2.75	35.20	1,360	3,899	7,528	3.05E-5	2.35E-4	Hor. shear slip
3	4,808	3,670	3.47	47.30	1,100	3,513	5,505	3.86E-5	3.15E-4	

ตาราง ก.6 ผลทดสอบและการคำนวณ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-25-28B

Load pattern	Load (kg.)		Displacement (mm.)		Strain ($\times 10^{-6}$)	Moment (kg.-m.)				Curvature (rad./cm.)				REMARK	
	at D	at E	at D	at E		at D	at B1	at B2	at E	at D	at B1	at B2	at E		
1	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	0.00E+0	Crack at B	
1	2,021	0	1.31	-0.50	0	2,279	1,300	-37	273	1.46E-5	1.52E-5	5.69E-6	-2.84E-6		
1	4,000	0	2.63	-1.00	60	3,232	1,355	-73	533	2.93E-5	3.06E-5	1.14E-5	-5.69E-6		
2	0	11	0.29	-0.10	10	214	0	7	-151	1.65E-6	-3.30E-6	-1.21E-6	-1.15E-6		
2	0	4,001	-0.80	3.40	130	610	-73	1,458	3,275	4.55E-6	-9.10E-6	4.10E-5	3.93E-5		
3	0	11	-0.22	0.40	60	163	0	7	603	1.25E-6	-2.50E-6	4.82E-6	4.62E-6		
3	4,000	0	2.47	-0.70	160	3,227	1,342	-73	756	2.75E-5	2.87E-5	7.96E-6	-3.98E-6		
3	4,006	4,001	0.71	2.90	790	2,303	1,814	1,380	3,278	7.79E-6	7.79E-6	3.30E-5	3.30E-5		
4	-6	0	-1.16	0.50	230	-1,680	-4	0	370	-1.29E-5	-1.35E-5	-5.69E-6	2.84E-6		
4	-6	4,001	-2.00	3.80	500	1,419	-77	1,491	3,287	1.08E-5	-2.53E-5	4.58E-5	4.39E-5		
4	4,000	4,012	0.13	3.30	840	1,474	2,342	1,418	3,293	1.43E-6	1.43E-6	3.75E-5	3.75E-5		
5	0	11	0.50	0.60	250	370	0	7	905	2.84E-6	-5.69E-6	7.23E-6	6.93E-6		
5	5,307	5,346	3.62	4.40	990	3,699	2,195	2,350	3,758	3.97E-5	3.97E-5	5.01E-5	5.01E-5		Crack at E
5	5,589	5,133	3.86	5.40	1,030	3,795	2,390	2,285	3,721	4.24E-5	4.25E-5	6.11E-5	6.14E-5		Crack at D
5	8,503	8,047	21.09	20.70	2,350	5,227	5,218	5,080	5,117	2.61E-4	2.35E-4	2.38E-4	2.66E-4		Yield at B
5	8,839	8,709	29.67	29.70	3,990	5,520	5,265	5,338	5,515	4.32E-4	3.67E-4	3.82E-4	4.49E-4		Ult. at E
5	8,869	8,675	29.95	30.00	3,980	5,532	5,282	5,314	5,508	4.39E-4	3.71E-4	3.87E-4	4.56E-4		Ult. at D

ตาราง ก.7 ผลทดสอบและการคำนวณ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-45-28B

Load pattern	Load (kg.)		Displacement (mm.)		Strain ($\times 10^{-6}$)	Moment (kg.-m.)				Curvature (rad./cm.)				REMARK
	at D	at E	at D	at E		at D	at B1	at B2	at E	at D	at B1	at B2	at E	
1	0	1	2.00	3.00	4	6	7	8	9	1.00E+1	1.10E+1	1.20E+1	1.30E+1	
1	1,997	0	1.55	-0.40	30	2,354	1,284	-37	332	1.73E-5	1.80E-5	4.55E-6	-2.28E-6	Crack at B
1	4,006	0	3.49	-0.70	430	3,181	1,486	-73	741	3.88E-5	4.06E-5	7.96E-6	-3.98E-6	
2	6	0	0.53	0.10	120	756	4	0	75	5.90E-6	6.16E-6	-1.14E-6	5.69E-7	
2	0	4,001	-0.62	3.70	390	469	-73	1,494	3,205	3.53E-6	-7.05E-6	4.46E-5	4.27E-5	
3	-6	0	0.29	0.50	130	-415	-4	0	364	-3.23E-6	-3.37E-6	-5.69E-6	2.84E-6	
3	4,000	0	3.44	-0.40	440	3,177	1,479	-73	958	3.83E-5	4.00E-5	4.55E-6	-2.28E-6	
3	4,000	4,001	3.27	3.30	730	3,190	1,430	1,426	3,211	3.59E-5	3.59E-5	3.75E-5	3.75E-5	
4	18	0	0.70	0.80	150	1,002	12	0	590	7.79E-6	8.13E-6	-9.10E-6	4.55E-6	
4	0	4,001	-0.17	4.10	390	142	-73	1,525	3,216	9.67E-7	-1.93E-6	4.94E-5	4.73E-5	
4	4,000	4,001	3.23	3.50	730	3,189	1,427	1,441	3,216	3.55E-5	3.54E-5	3.98E-5	3.98E-5	
5	0	56	0.62	0.90	150	451	-1	36	1,336	3.53E-6	-7.05E-6	1.09E-5	1.04E-5	
5	5,265	5,201	4.32	4.60	890	3,617	2,272	2,246	3,627	4.74E-5	4.74E-5	5.23E-5	5.23E-5	Crack at D,E
5	4,947	4,819	4.58	4.80	910	3,523	2,098	2,029	3,512	5.03E-5	5.03E-5	5.45E-5	5.46E-5	
5	8,467	8,238	23.63	23.50	2,340	5,185	5,105	4,926	5,156	3.55E-4	2.67E-4	2.74E-4	3.67E-4	Yield at B
5	9,157	8,955	41.07	40.80	5,730	5,629	5,382	5,226	5,600	1.02E-3	7.26E-4	7.44E-4	1.05E-3	Ult. at D,E
5	8,809	8,922	41.84	41.90	5,850	5,526	5,165	5,201	5,595	1.06E-3	7.55E-4	7.84E-4	1.10E-3	

ตาราง ก.8 ผลทดสอบและการคำนวณ ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-SS

Load pattern	Load at D (kg.)	Disp. at D (mm.)	Moment at D (kg.-m.)	Curvature at D (rad./cm.)	REMARK
1	0	0.00	0	0.00E+0	
1	1,000	0.82	1,390	7.00E-6	
1	2,006	1.71	2,503	1.46E-5	
1	2,539	2.21	2,945	1.89E-5	
2	1	0.20	230	1.71E-6	
2	1,005	1.02	1,622	8.70E-6	
2	2,002	1.80	2,537	1.54E-5	
2	3,000	2.70	3,236	2.30E-5	
2	4,000	3.64	3,706	3.11E-5	
2	4,522	4.18	3,953	3.57E-5	Crack at D
2	4,158	4.34	3,792	3.70E-5	
2	5,100	8.32	4,298	7.10E-5	
2	5,199	8.68	4,351	7.41E-5	
2	4,656	8.93	4,111	7.62E-5	
2	5,398	12.39	4,516	1.06E-4	
2	5,650	15.41	4,692	1.31E-4	
2	5,455	16.20	4,620	1.38E-4	

Load pattern	Load at D (kg.)	Disp. at D (mm.)	Moment at D (kg.-m.)	Curvature at D (rad./cm.)	REMARK
2	6,006	20.88	4,966	1.79E-4	
2	6,139	25.01	5,121	2.18E-4	
2	6,501	31.60	5,382	2.94E-4	
2	6,486	35.00	5,417	3.52E-4	
2	6,646	39.93	5,550	4.37E-4	
2	6,692	45.07	5,617	5.48E-4	
2	6,730	50.13	5,676	7.28E-4	
2	6,854	55.09	5,750	8.30E-4	
2	6,903	60.01	5,788	9.41E-4	
2	6,828	64.82	5,768	1.04E-3	Ult. at D
2	6,779	65.16	5,657	1.08E-3	
2	6,715	66.75	5,728	1.12E-3	
2	6,153	66.94	5,475	1.12E-3	
2	5,977	72.85	5,425	1.37E-3	
2	4,765	73.52	4,881	1.38E-3	
2	4,669	75.02	4,847	1.46E-3	
2	4,661	80.72	4,898	1.92E-3	



ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข.1 ผลการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่าง HC-35-9B

Moment - Curvature Relation					
Negative Moment			Positive Moment		
Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)	Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)
(1) $M_{Ext} = 0$	0.00	0.00	(1) $M_{Ext} = 0.00$	0.00	-1.89E-5
(2) $M_{Ext} = M_{cr}$	1,486	1.49E-5	(2) $\epsilon_{ce} = 0.00$	2,921	1.02E-5
(3) $\epsilon_s = \epsilon_y$	1,746	1.67E-4	(3) $M_{Ext} = M_{cr}$	3,893	1.99E-5
(4) $\epsilon_c = 0.001$	1,781	7.67E-4	(4) $\epsilon_c = 0.001$	5,009	2.38E-4
(5) $\epsilon_c = 0.002$	1,798	2.66E-3	(5) $\epsilon_{ps} = \epsilon_{py}$	5,013	2.84E-4
(6) $\epsilon_c = 0.003$	1,802	4.90E-3	(6) $\epsilon_c = 0.002$	5,505	7.48E-4
			(7) $\epsilon_c = 0.003$	5,668	1.34E-3

ตาราง ข.2 ผลการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่าง HC-35-19B

Moment - Curvature Relation					
Negative Moment			Positive Moment		
Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)	Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)
(1) $M_{Ext} = 0$	0.00	0.00	(1) $M_{Ext} = 0.00$	0.00	-1.95E-5
(2) $M_{Ext} = M_{cr}$	1,464	1.49E-5	(2) $\epsilon_{ce} = 0.00$	2,918	1.06E-5
(3) $\epsilon_s = \epsilon_y$	3,401	1.85E-4	(3) $M_{Ext} = M_{cr}$	3,847	2.02E-5
(4) $\epsilon_c = 0.001$	3,447	2.97E-4	(4) $\epsilon_c = 0.001$	4,934	2.23E-4
(5) $\epsilon_c = 0.002$	3,531	1.17E-3	(5) $\epsilon_{ps} = \epsilon_{py}$	4,991	2.87E-4
(6) $\epsilon_c = 0.003$	3,546	2.23E-3	(6) $\epsilon_c = 0.002$	5,464	6.97E-4
			(7) $\epsilon_c = 0.003$	5,623	1.25E-3

ตาราง ข.3 ผลการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่าง HC-35-28B

Moment - Curvature Relation					
Negative Moment			Positive Moment		
Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)	Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)
(1) $M_{Ext} = 0$	0.00	0.00	(1) $M_{Ext} = 0.00$	0.00	-1.89E-5
(2) $M_{Ext} = M_{cr}$	1,542	1.51E-5	(2) $\epsilon_{ce} = 0.00$	2,918	1.03E-5
(3) $\epsilon_c = 0.001$	4,996	1.91E-4	(3) $M_{Ext} = M_{cr}$	3,880	1.99E-5
(4) $\epsilon_s = \epsilon_y$	5,132	1.96E-4	(4) $\epsilon_c = 0.001$	4,993	2.35E-4
(5) $\epsilon_c = 0.002$	5,289	7.48E-4	(5) $\epsilon_{ps} = \epsilon_{py}$	5,008	2.85E-4
(6) $\epsilon_c = 0.003$	5,318	1.43E-3	(6) $\epsilon_c = 0.002$	5,496	7.36E-4
			(7) $\epsilon_c = 0.003$	5,658	1.32E-3

ตาราง ข.4 ผลการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่าง HC-35-52B

Moment - Curvature Relation					
Negative Moment			Positive Moment		
Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)	Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)
(1) $M_{Ext} = 0$	0.00	0.00	(1) $M_{Ext} = 0.00$	0.00	-2.07E-5
(2) $M_{Ext} = M_{cr}$	1,506	1.63E-5	(2) $\epsilon_{ce} = 0.00$	2,882	1.19E-5
(3) $\epsilon_c = 0.001$	5,016	1.60E-4	(3) $M_{Ext} = M_{cr}$	3,721	2.13E-5
(4) $\epsilon_s = \epsilon_y$	8,112	2.72E-4	(4) $\epsilon_c = 0.001$	4,618	1.92E-4
(5) $\epsilon_c = 0.002$	8,185	3.27E-4	(5) $\epsilon_{ps} = \epsilon_{py}$	4,927	2.96E-4
(6) $\epsilon_c = 0.003$	8,328	6.22E-4	(6) $\epsilon_c = 0.002$	5,310	5.88E-4
			(7) $\epsilon_c = 0.003$	5,484	1.06E-3

ตาราง ข.5 ผลการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่าง HC-35-98B

Moment - Curvature Relation					
Negative Moment			Positive Moment		
Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)	Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)
(1) $M_{Ext} = 0$	0.00	0.00	(1) $M_{Ext} = 0.00$	0.00	-2.00E-5
(2) $M_{Ext} = M_{cr}$	1,706	1.70E-5	(2) $\epsilon_{ce} = 0.00$	2,922	1.08E-5
(3) $\epsilon_c = 0.001$	5,900	1.27E-4	(3) $M_{Ext} = M_{cr}$	3,863	2.07E-5
(4) $\epsilon_c = 0.002$	10,132	2.39E-4	(4) $\epsilon_c = 0.001$	4,829	2.27E-4
(5) $\epsilon_s = \epsilon_y$	11,798	2.98E-4	(5) $\epsilon_{ps} = \epsilon_{py}$	5,004	2.87E-4
(6) $\epsilon_c = 0.003$	11,843	3.61E-4	(6) $\epsilon_c = 0.002$	5,429	7.11E-4
			(7) $\epsilon_c = 0.003$	5,608	1.27E-3

ตาราง ข.6 ผลการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่าง HC-25-28B

Moment - Curvature Relation					
Negative Moment			Positive Moment		
Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)	Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)
(1) $M_{Ext} = 0$	0.00	0.00	(1) $M_{Ext} = 0.00$	0.00	-2.04E-5
(2) $M_{Ext} = M_{cr}$	1,390	1.49E-5	(2) $\epsilon_{ce} = 0.00$	2,895	1.15E-5
(3) $\epsilon_c = 0.001$	4,508	1.87E-4	(3) $M_{Ext} = M_{cr}$	3,764	2.11E-5
(4) $\epsilon_s = \epsilon_y$	4,936	2.06E-4	(4) $\epsilon_c = 0.001$	4,686	2.02E-4
(5) $\epsilon_c = 0.002$	5,117	6.77E-4	(5) $\epsilon_{ps} = \epsilon_{py}$	4,940	2.93E-4
(6) $\epsilon_c = 0.003$	5,157	1.30E-3	(6) $\epsilon_c = 0.002$	5,349	6.24E-4
			(7) $\epsilon_c = 0.003$	5,524	1.12E-3

ตาราง ข.7 ผลการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่าง HC-45-28B

Moment - Curvature Relation					
Negative Moment			Positive Moment		
Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)	Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)
(1) $M_{Ext} = 0$	0.00	0.00	(1) $M_{Ext} = 0.00$	0.00	-1.93E-5
(2) $M_{Ext} = M_{cr}$	1,438	1.50E-5	(2) $\epsilon_{ce} = 0.00$	2,880	1.14E-5
(3) $\epsilon_c = 0.001$	4,541	1.88E-4	(3) $M_{Ext} = M_{cr}$	3,743	2.06E-5
(4) $\epsilon_s = \epsilon_y$	4,937	2.05E-4	(4) $\epsilon_c = 0.001$	4,660	2.13E-4
(5) $\epsilon_c = 0.002$	5,119	6.85E-4	(5) $\epsilon_{ps} = \epsilon_{py}$	4,887	2.94E-4
(6) $\epsilon_c = 0.003$	5,159	1.31E-3	(6) $\epsilon_c = 0.002$	5,296	6.59E-4
			(7) $\epsilon_c = 0.003$	5,469	1.18E-3

ตาราง ข.8 ผลการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง ของพื้นตัวอย่าง HC-SS

Moment - Curvature Relation		
Positive Moment		
Stage	M (kg.-m.)	\emptyset (rad./cm.)
(1) $M_{Ext} = 0.00$	0.00	-1.91E-5
(2) $\epsilon_{ce} = 0.00$	2,916	1.04E-5
(3) $M_{Ext} = M_{cr}$	3,906	2.05E-5
(4) $\epsilon_c = 0.001$	5,027	2.44E-4
(5) $\epsilon_c = 0.002$	5,516	7.68E-4
(6) $\epsilon_c = 0.003$	5,683	1.37E-3



ภาคผนวก ค.

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งของแผ่นพื้น HC-35-28B

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง
ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-28B บริเวณรอยต่อเหนือแท่นรองรับ

	Precast width	Total width	Thick		
Topping		70.0	5.0	$f'_{cip} =$	250 ksc.
Layer 1	56.0	70.0	4.0	$f'_{pc} =$	360 ksc.
Layer 2	20.0	36.0	8.5	$E_{cip} =$	237,171 ksc.
Layer 3	33.0	43.0	0.5	$E_{pc} =$	284,605 ksc.
Layer 4	37.0	47.0	1.0	$f_y =$	4,814 ksc.
Layer 5	60.0	70.0	1.0	$E_s =$	2,086,739 ksc.
				$A_s =$	6.78 cm. ² (6DB12)
				$d_s =$	16.80 cm.
				$n_1 =$	7.332 { $n_1 = E_s/E_{pc}$ }
				$n_2 =$	0.833 { $n_2 = E_{cip}/E_{pc}$ }

(1) เมื่อนำหนักบรรทุกภายนอกเท่ากับศูนย์ [$M_{Ext} = 0$]

$$M = 0.00 \text{ kg.-m.}$$

$$\varnothing = 0.00 \text{ rad./cm.}$$

(2) เมื่อโมเมนต์กระทำเท่ากับโมเมนต์ดัดแตกร้าว [$M_{Ext} = M_{Crack}$]

$$A_{pc} = 507.50 \text{ cm.}^2 \quad \{ A_g = \sum b_i t_i \}$$

$$A_{tr} = 550.43 \text{ cm.}^2 \quad \{ A_{tr} = A_{pc} + (n_1 - 1)A_s \}$$

$$A_{tot} = 1,022.93 \text{ cm.}^3 \quad \{ A_{tot} = A_{tr} + \sum n_2 (b_{tot} - b_i) t_i \}$$

$$C_{top} = 8.85 \text{ cm.} \quad \{ C_{top} = [A_i (y_{i-1} + t_i/2) + (n_1 - 1)A_s (\sum t_i + d_s)] / A_{tot} \}$$

$$C_{bot} = 11.15 \text{ cm.} \quad \{ C_{bot} = \sum t_i - C_{top} \}$$

$$I_{tot} = 35,836.32 \text{ cm.}^4 \quad \{ I_{tot} = (b_i t_i^3) / 12 + b_i t_i (C_{top} - y_{i-1} - t_i/2)^2 + (n_1 - 1)A_s (d_s - C_{bot})^2 \}$$

$$f_r = 37.95 \text{ ksc.} \quad \{ f_r = 2.00 * \text{sqrt}(f'_{cip}) \}$$

$$M_{cr} = 1,536.53 \text{ kg.-m.} \quad \{ M_{cr} = f_r I_{tot} / C_{top} \}$$

$$\varnothing_{cr} = 1.51E-05 \text{ rad./cm.} \quad \{ \varnothing_{cr} = \epsilon_{top,cip} / C_{top} \}$$

$$f_s = 177.63 \text{ ksc.} \quad \{ f_s = \varnothing_{cr} (d_s - C_{bot}) E_s \}$$

$$\epsilon_s = 85.12 \text{ micro strain} \quad \{ \epsilon_s = f_s / E_s \}$$

$$T_s = 1,204.35 \text{ kg.} \quad \{ T_s = f_s A_s \}$$

(3) เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก [$\epsilon_s = \epsilon_y$]

	$\epsilon_y =$	2.31E-03	{ $\epsilon_y = f_y / E_s$ }
ให้	$c =$	5.2141 cm.	
	$\theta_y =$	1.99E-04 rad./cm.	{ $\theta_y = \epsilon_y / (d_s - c)$ }
	$f_s =$	4,814.00 ksc.	{ $f_s = \theta (d_s - c) E_s$ }
	$T_s =$	32,638.92 kg.	{ $T_s = f_s A_s$ }
	$T_c =$	419.28 kg.	{ $T_c = 0.5 f_r b_{tr} / (E_{pc} \theta)$ }
	$C_{c1} =$	6,581.67 kg.	{ $C_{c1} = b_1 f_{cip} (\theta / \epsilon_o) c_1^2 [1 - \theta c_1 / (3 \epsilon_o)]$ }
	$C_{c2} =$	3,118.83 kg.	{ $C_{c2} = b_2 f_{pc} (\theta / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \theta (c_2^3 - c_1^3)] / (3 \epsilon_o)$ }
	$C_{c3} =$	8,273.27 kg.	{ $C_{c3} = b_3 f_{pc} (\theta / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \theta (c_2^3 - c_1^3)] / (3 \epsilon_o)$ }
	$C_{c4} =$	15,084.43 kg.	{ $C_{c4} = b_4 f_{pc} (\theta / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \theta (c_2^3 - c_1^3)] / (3 \epsilon_o)$ }
	$C_{c5} =$	0.00 kg.	{ $C_{c5} = b_5 f_{pc} (\theta / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \theta (c_2^3 - c_1^3)] / (3 \epsilon_o)$ }
	$C_{c6} =$	0.00 kg.	{ $C_{c6} = b_6 f_{pc} (\theta / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \theta (c_2^3 - c_1^3)] / (3 \epsilon_o)$ }
	$\Sigma C_c =$	33,058.20 kg.	
	$T_s + T_c - \Sigma C_c =$	0.00 kg.	
	$x_1 =$	1.79 cm.	{ $x_1 = c_1 [(8 \epsilon_o - 3 \theta c_1) / (12 \epsilon_o - 4 \theta c_1)]$ }
	$x_2 =$	2.97 cm.	{ $x_2 = [8 \epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3 \theta (c_2^4 - c_1^4)] / [12 \epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4 \theta (c_2^3 - c_1^3)]$ }
	$x_3 =$	3.73 cm.	{ $x_3 = [8 \epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3 \theta (c_2^4 - c_1^4)] / [12 \epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4 \theta (c_2^3 - c_1^3)]$ }
	$x_4 =$	4.73 cm.	{ $x_4 = [8 \epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3 \theta (c_2^4 - c_1^4)] / [12 \epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4 \theta (c_2^3 - c_1^3)]$ }
	$x_5 =$	0.00 cm.	{ $x_5 = [8 \epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3 \theta (c_2^4 - c_1^4)] / [12 \epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4 \theta (c_2^3 - c_1^3)]$ }
	$x_6 =$	0.00 cm.	{ $x_6 = [8 \epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3 \theta (c_2^4 - c_1^4)] / [12 \epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4 \theta (c_2^3 - c_1^3)]$ }
	$M_y =$	5,069.03 kg.-m.	{ $M_y = [\Sigma C_{ci} x_i + T_s (d_s - c) + T_c (2/3) (f_r / (E_{pc} \theta))] / 100$ }

(4) เมื่อความเครียดที่ผิวบนสุดของแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดคดลงเท่ากับ 0.002 [$\epsilon_{bot,pc} = 0.002$]

	$\epsilon_{bot,pc} =$	0.002	
ให้	$c =$	2.6731 cm.	
	$\theta =$	7.48E-04 rad./cm.	{ $\theta = \epsilon_{bot,pc} / c$ }
	$f_s =$	4,814.00 ksc.	{ $f_s = \theta (d_s - c) E_s$ }
	$T_s =$	32,638.92 kg.	{ $T_s = f_s A_s$ }
	$T_c =$	111.59 kg.	{ $T_c = 0.5 f_r / (E_{pc} \theta) b_{tr}$ }
	$C_{c1} =$	106.64 kg.	{ $C_{c1} = b_1 f_{cip} (\theta / \epsilon_o) c_1^2 [1 - \theta c_1 / (3 \epsilon_o)]$ }
	$C_{c2} =$	1,764.18 kg.	{ $C_{c2} = b_2 f_{pc} (\theta / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \theta (c_2^3 - c_1^3)] / (3 \epsilon_o)$ }
	$C_{c3} =$	9,383.97 kg.	{ $C_{c3} = b_3 f_{pc} (\theta / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \theta (c_2^3 - c_1^3)] / (3 \epsilon_o)$ }
	$C_{c4} =$	21,495.72 kg.	{ $C_{c4} = b_4 f_{pc} (\theta / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \theta (c_2^3 - c_1^3)] / (3 \epsilon_o)$ }
	$C_{c5} =$	0.00 kg.	{ $C_{c5} = b_5 f_{pc} (\theta / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \theta (c_2^3 - c_1^3)] / (3 \epsilon_o)$ }

$$\begin{aligned}
C_{c6} &= 0.00 \text{ kg.} & \{ C_{c6} &= b_6 f_{pc} (\emptyset / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset (c_2^3 - c_1^3)] / (3\epsilon_o) \} \\
\Sigma C_c &= 32,750.50 \text{ kg.} \\
T_s + T_c - \Sigma C_c &= 0.00 \text{ kg.} \\
x_1 &= 0.12 \text{ cm.} & \{ x_1 &= c_1 [(8\epsilon_o - 3\emptyset c_1) / (12\epsilon_o - 4\emptyset c_1)] \} \\
x_2 &= 0.47 \text{ cm.} & \{ x_2 &= [8\epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12\epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset (c_2^3 - c_1^3)] \} \\
x_3 &= 1.23 \text{ cm.} & \{ x_3 &= [8\epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12\epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset (c_2^3 - c_1^3)] \} \\
x_4 &= 2.19 \text{ cm.} & \{ x_4 &= [8\epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12\epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset (c_2^3 - c_1^3)] \} \\
x_5 &= 0.00 \text{ cm.} & \{ x_5 &= [8\epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12\epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset (c_2^3 - c_1^3)] \} \\
x_6 &= 0.00 \text{ cm.} & \{ x_6 &= [8\epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12\epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset (c_2^3 - c_1^3)] \} \\
M &= 5,223.51 \text{ kg.-m.} & \{ M &= [\Sigma C_{ci} x_i + T_s (d_s - c) + T_c (2/3) (f_r / (E_{pc} \emptyset))] / 100 \}
\end{aligned}$$

(5) เมื่อความเครียดที่ผิวนอกสุดของแผ่นพื้นอัดแรงสำเร็จรูปหน้าตัดกลวงเท่ากับ 0.003 [$\epsilon_{bot,pc} = 0.003$]

$$\begin{aligned}
\epsilon_{bot,pc} &= 0.003 \\
\text{ให้ } c &= 2.0970 \text{ cm.} \\
\emptyset_u &= 1.43E-03 \text{ rad./cm.} & \{ \emptyset_u &= \epsilon_{bot,pc} / c \} \\
f_s &= 4,814.00 \text{ ksc.} & \{ f_s &= \emptyset (d_s - c) E_s \} \\
T_s &= 32,638.92 \text{ kg.} & \{ T_s &= f_s A_s \} \\
T_c &= 58.36 \text{ kg.} & \{ T_c &= 0.5 f_r f_r / (E_{pc} \emptyset) b_{tr} \} \\
C_{c1} &= 79.28 \text{ kg.} & \{ C_{c1} &= b_1 f_{cip} (\emptyset / \epsilon_o) c_1^2 [1 - \emptyset c_1 / (3\epsilon_o)] \} \\
C_{c2} &= 8,852.73 \text{ kg.} & \{ C_{c2} &= b_2 f_{pc} (\emptyset / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset (c_2^3 - c_1^3)] / (3\epsilon_o) \} \\
C_{c3} &= 23,765.27 \text{ kg.} & \{ C_{c3} &= b_3 f_{pc} (\emptyset / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset (c_2^3 - c_1^3)] / (3\epsilon_o) \} \\
C_{c4} &= 0.00 \text{ kg.} & \{ C_{c4} &= b_4 f_{pc} (\emptyset / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset (c_2^3 - c_1^3)] / (3\epsilon_o) \} \\
C_{c5} &= 0.00 \text{ kg.} & \{ C_{c5} &= b_5 f_{pc} (\emptyset / \epsilon_o) [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset (c_2^3 - c_1^3)] / (3\epsilon_o) \} \\
\Sigma C_c &= 32,697.28 \text{ kg.} \\
T_s + T_c - \Sigma C_c &= 0.00 \text{ kg.} \\
x_1 &= 0.06 \text{ cm.} & \{ x_1 &= c_1 [(8\epsilon_o - 3\emptyset c_1) / (12\epsilon_o - 4\emptyset c_1)] \} \\
x_2 &= 0.71 \text{ cm.} & \{ x_2 &= [8\epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12\epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset (c_2^3 - c_1^3)] \} \\
x_3 &= 1.60 \text{ cm.} & \{ x_3 &= [8\epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12\epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset (c_2^3 - c_1^3)] \} \\
x_4 &= 0.00 \text{ cm.} & \{ x_4 &= [8\epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12\epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset (c_2^3 - c_1^3)] \} \\
x_5 &= 0.00 \text{ cm.} & \{ x_5 &= [8\epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12\epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset (c_2^3 - c_1^3)] \} \\
M &= 5,252.96 \text{ kg.-m.} & \{ M &= [\Sigma C_{ci} x_i + T_s (d_s - c) + T_c (2/3) (f_r / (E_{pc} \emptyset))] / 100 \}
\end{aligned}$$

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดและความโค้งโดยวิธีความเครียดสอดคล้อง
ของแผ่นพื้นตัวอย่าง HC-35-28B ที่ช่วงกลาง

	Precast width	Total width	Depth	
Topping		70.0	5.0	$f'_{pc} = 360 \text{ ksc.}$
Layer 1	56.0	70.0	4.0	$f'_{cip} = 250 \text{ ksc.}$
Layer 2	20.0	36.0	8.5	$E_{pc} = 284,605 \text{ ksc.}$
Layer 3	33.0	43.0	0.5	$E_{cip} = 237,171 \text{ ksc.}$
Layer 4	37.0	47.0	1.0	$d_{ps} = 17.25 \text{ cm.}$
Layer 5	60.0	70.0	1.0	$A_{ps1} = 0.772 \text{ cm.}^2$
				$f_{se1} = 9,200.64 \text{ ksc.}$
				$E_{ps1} = 1,913,294 \text{ ksc.}$
				$A_{ps2} = 1.090 \text{ cm.}^2$
				$f_{se2} = 9,245.08 \text{ ksc.}$
				$E_{ps2} = 1,745,512 \text{ ksc.}$

(1) เมื่อแรงภายนอกเท่ากับศูนย์ [$M_{Ext} = 0$]

$$A_{pc} = 507.50 \text{ cm.}^2 \quad \{ A_g = \sum b_i \cdot t_i \}$$

$$A_{tr} = 517.51 \text{ cm.}^2 \quad \{ A_{tr} = A_{pc} + (n_1 - 1)A_{ps1} + (n_2 - 1)A_{ps2} \}$$

$$A_{tot} = 990.01 \text{ cm.}^3 \quad \{ A_{tot} = A_{tr} + \sum n_3(b_{tot} - b_i)t_i \}$$

$$C_{top} = 9.18 \text{ cm.} \quad \{ C_{top} = [A_i(y_{i-1} + t_i/2) + (n_1 - 1)A_{ps1}d_{ps} + (n_2 - 1)A_{ps2}d_{ps}] / A_{tot} \}$$

$$C_{bot} = 10.82 \text{ cm.} \quad \{ C_{bot} = \sum t_i - C_{top} \}$$

$$I_{tot} = 35,064.28 \text{ cm.}^4 \quad \{ I_{tot} = (b_i t_i^3) / 12 + b_i t_i (C_{top} - y_{i-1} - t_i/2)^2 + (n_1 - 1)A_{ps1}(d_{ps} - C_{top})^2 + (n_2 - 1)A_{ps2}(d_{ps} - C_{top})^2 \}$$

$$f_{top,cip} = 2.58 \text{ ksc.} \quad \{ f_{top,cip} = n_3[-(f_{se} A_{ps}) / A_{tr} + (f_{se} A_{ps})(d_{ps} - C_{top}) C_{top} / I_{tot}] \}$$

$$f_{bot,cip} = -13.89 \text{ ksc.} \quad \{ f_{bot,cip} = n_3[-(f_{se} A_{ps}) / A_{tot} + (f_{se} A_{ps})(d_{ps} - C_{top})(C_{top} - t_{cip}) / I_{tot}] \}$$

$$f_{top,pc} = -16.67 \text{ ksc.} \quad \{ f_{top,pc} = -(f_{se} A_{ps}) / A_{tot} + (f_{se} A_{ps})(d_{ps} - C_{top})(C_{top} - t_{cip}) / I_{tot} \}$$

$$f_{bot,pc} = -75.98 \text{ ksc.} \quad \{ f_{bot,pc} = -(f_{se} A_{ps}) / A_{tot} - (f_{se} A_{ps})(d_{ps} - C_{top}) C_{bot,pc} / I_{tot} \}$$

$$\emptyset = -1.39E-05 \text{ rad./cm.} \quad \{ \emptyset = (f_{bot,pc} / E_{pc} - f_{top,cip} / E_{cip}) / (\sum t_i) \}$$

$$M_{Ext} = 0 \text{ kg.-m.}$$

$$\epsilon_{top,cip} = 0.000011 \quad \{ \epsilon_{top,cip} = f_{top,cip} / E_{cip} \}$$

$$\epsilon_{ce} = -0.000229 \quad \{ \epsilon_{ce} = \emptyset [d_{ps} - f_{top,cip} / (E_{cip} \emptyset)] \}$$

$$\epsilon_{se1} = 0.004809 \quad \{ \epsilon_{se1} = f_{se1} / E_{ps1} \}$$

$$\epsilon_{se2} = 0.005296 \quad \{ \epsilon_{se2} = f_{se2} / E_{ps2} \}$$

$$c = 0.78 \text{ cm.} \quad \{ c = f_{top,cip} / (\emptyset E_{cip}) \}$$

(2) เมื่อความเครียดในคอนกรีตที่ระดับลวดอัดแรงเท่ากับศูนย์

$$\begin{aligned} \epsilon_{ps} &= 0.00553 & \{ \epsilon_{ps} = \epsilon_{se} + \epsilon_{ce} \} \\ f_{ps1} &= 10,521.80 \text{ ksc.} & \{ f_{ps1} = E_{ps1} \epsilon_{ps} [0.0305 + 0.9695 / (1 + (120.87 \epsilon_{ps})^{8.0, 0.125})] \} \\ f_{ps2} &= 9,636.00 \text{ ksc.} & \{ f_{ps2} = E_{ps2} \epsilon_{ps} [0.0252 + 0.9748 / (1 + (92.88 \epsilon_{ps})^{7.5, 0.133})] \} \\ f_{top,cip} &= 15.79 \text{ ksc.} & \{ f_{top,cip} = n_3 [- (f_{se} A_{ps}) / A_{tot} + (f_{se} A_{ps}) (d_{ps} - C_{top}) C_{top} / I_{tot}] \} \\ f_{bot,cip} &= - 0.69 \text{ ksc.} & \{ f_{bot,cip} = n_3 [- (f_{se} A_{ps}) / A_{tot} + (f_{se} A_{ps}) (d_{ps} - C_{top}) (C_{top} - t_{cip}) / I_{tot}] \} \\ f_{top,pc} &= - 0.82 \text{ ksc.} & \{ f_{top,pc} = - (f_{se} A_{ps}) / A_{tot} + (f_{se} A_{ps}) (d_{ps} - C_{top}) (C_{top} - t_{cip}) / I_{tot} \} \\ f_{bot,pc} &= - 60.13 \text{ ksc.} & \{ f_{bot,pc} = - (f_{se} A_{ps}) / A_{tot} - (f_{se} A_{ps}) (d_{ps} - C_{top}) C_{bot} / I_{tot} \} \\ f_{ce} &= - 49.26 \text{ ksc.} & \{ f_{ce} = - (f_{ps} A_{ps}) / A_{tot} - (f_{ps} A_{ps}) (d_{ps} - C_{top})^2 / I_{tot} \} \\ M &= 2,140.40 \text{ kg.-m.} & \{ M = (f_{ce} I_{tot}) / (d_{ps} - C_{top}) / 100 \} \\ f_{top,cip} &= - 30.91 \text{ ksc.} & \{ f_{top,cip} = (f_{top,cip} - 100 n_3 M C_{top} / I_{tot}) \} \\ f_{bot,cip} &= - 21.95 \text{ ksc.} & \{ f_{bot,cip} = (f_{bot,cip} - 100 n_3 M (C_{top} - t_{cip}) / I_{tot}) \} \\ \text{Then } f_{top,pc} &= - 26.34 \text{ ksc.} & \{ f_{top,pc} = f_{top,pc} - 100 M (C_{top} - t_{cip}) / I_{tot} \} \\ \text{And } f_{bot,pc} &= 5.91 \text{ ksc.} & \{ f_{bot,pc} = f_{bot,pc} + 100 M C_{bot} / I_{tot} \} \\ \emptyset &= 7.56E-06 \text{ rad./cm.} & \{ \emptyset = (f_{bot,pc} / E_{pc} - f_{top,cip} / E_{cip}) / (\Sigma t_i) \} \\ f_{ce} &= 0.00 \text{ ksc.} & \{ f_{ce} = f_{ce} + 100 M (d_{ps} - C_{top}) / I_t \} \\ \epsilon_{top,cip} &= -0.00013 & \{ \epsilon_{top,cip} = f_{top,cip} / E_{cip} \} \\ c &= 17.25 \text{ cm.} & \{ c = f_{top,cip} / (\emptyset * E_{cip}) \} \end{aligned}$$

(3) เมื่อโมเมนต์กระทำเท่ากับโมเมนต์ดัดแตกร้าว [$M_{Ext} = M_{Crack}$]

$$\begin{aligned} f_r &= 37.76 \text{ ksc.} & \{ f_r = 1.99 * \text{sqrt}(f_{pc}') \} \\ \Delta f &= 31.84 & \{ \Delta f = f_r - f_{bot,pc} \} \\ \Delta M &= 1,032.00 \text{ kg.-m.} & \{ \Delta M = \Delta f I_{tot} / (100 C_{bot}) \} \\ M_{cr} &= 3,172.40 \text{ kg.-m.} & \{ M_{cr} = \Delta M + M \} \\ \Delta f_{ps} &= 1.60 \text{ ksc.} & \{ \Delta f_{ps} = (E_{ps} / E_c) * \Delta M (d_{ps} - C_{top}) / I_{tot} \} \\ f_{ps1} &= 10,523.40 \text{ ksc.} & \{ f_{ps1} = \Delta f_{ps} + f_{ps1} \} \\ f_{ps2} &= 9,637.59 \text{ ksc.} & \{ f_{ps2} = \Delta f_{ps} + f_{ps2} \} \\ f_{top,cip} &= - 53.43 \text{ ksc.} & \{ f_{top,cip} = n_3 [- (f_{se} A_{ps}) / A_t + (f_{se} A_{ps}) (d_{ps} - C_{top}) C_{top} / I_{tot} - 100 M_{Crack} C_{top} / I_{tot}] \} \\ f_{bot,cip} &= - 32.21 \text{ ksc.} & \{ f_{bot,cip} = n_3 [- (f_{se} A_{ps}) / A_t + (f_{se} A_{ps}) (d_{ps} - C_{top}) (C_{top} - t_{cip}) / I_{tot} - 100 M_{Crack} (C_{top} - t_{cip}) / I_{tot}] \} \\ f_{top,pc} &= - 38.65 \text{ ksc.} & \{ f_{top,pc} = - (f_{se} A_{ps}) / A_t + (f_{se} A_{ps}) (d_{ps} - C_{top}) (C_{top} - t_{cip}) / I_{tot} - 100 M_{Crack} (C_{top} - t_{cip}) / I_{tot} \} \\ f_{bot,pc} &= 37.76 \text{ ksc.} & \{ f_{bot,pc} = - (f_{se} A_{ps}) / A_t - (f_{se} A_{ps}) (d_{ps} - C_{top}) C_{bot} / I_{tot} + 100 M_{Crack} C_{bot} / I_{tot} \} \\ \emptyset_{cr} &= 1.79E-05 \text{ rad./cm.} & \{ \emptyset_{cr} = (f_{bot,pc} / E_{pc} - f_{top,cip} / E_{cip}) / (\Sigma t_i) \} \\ \epsilon_{top,cip} &= -0.00023 & \{ \epsilon_{top,cip} = f_{top,cip} / E_{cip} \} \\ c &= 12.59 \text{ cm.} & \{ c = f_{top,cip} / (\emptyset * E_{cip}) \} \end{aligned}$$

(4) เมื่อความเครียดที่ผิวบนสุดของพื้นคอนกรีตหล่อในที่เททับหน้าเท่ากับ 0.001 [$\epsilon_{top,cip}=0.001$]

ให้ $\epsilon_{top,cip} = 0.001$

$c = 3.9067$ cm.

$\emptyset = 2.56E-04$ rad./cm. { $\emptyset = \epsilon_{top,cip}/c$ }

$\epsilon_{ps} = 0.00894$ { $\epsilon_{ps} = \epsilon_{se} + \epsilon_{ce} + \emptyset * (d_{ps} - c)$ }

$f_{ps1} = 15,064.77$ ksc. { $f_{ps1} = E_{ps1} \epsilon_{ps} [0.0305 + 0.9695 / (1 + (120.87 \epsilon_{ps})^{8.0, 0.125})]$ }

$f_{ps2} = 15,164.19$ ksc. { $f_{ps2} = E_{ps2} \epsilon_{ps} [0.0252 + 0.9748 / (1 + (92.88 \epsilon_{ps})^{7.5, 0.133})]$ }

$T_{ps1} = 11,630.00$ kg. { $T_{ps1} = f_{ps1} * A_{ps1}$ }

$T_{ps2} = 16,528.97$ kg. { $T_{ps2} = f_{ps2} * A_{ps2}$ }

$T_C = 476$ kg. { $T_C = 0.5 * f_r * f_r / (E_{cip} * \emptyset) * b_{cip}$ }

$C_{c1} = 28,634.61$ kg. { $C_{c1} = b f'_{pc} * (\emptyset / \epsilon_o) * c_1^2 * [1 - \emptyset * c_1 / (3 \epsilon_o)]$ }

$C_{c2} = 0.00$ kg. { $C_{c2} = b f'_{pc} * (\emptyset / \epsilon_o) * [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset * (c_2^3 - c_1^3) / (3 \epsilon_o)]$ }

$C_{c3} = 0.00$ kg. { $C_{c3} = b f'_{pc} * (\emptyset / \epsilon_o) * [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset * (c_2^3 - c_1^3) / (3 \epsilon_o)]$ }

$T_{ps} + T_C - \Sigma C = 0.00$ kg.

$x_1 = 2.55$ cm. { $x_1 = c_1 * [(8 \epsilon_o - 3 * \emptyset * c_1) / (12 * \epsilon_o - 4 * \emptyset * c_1)]$ }

$x_2 = 0.00$ cm. { $x_2 = [8 \epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3 \emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12 * \epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4 \emptyset (c_2^3 - c_1^3)]$ }

$x_3 = 0.00$ cm. { $x_3 = [8 \epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3 \emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12 * \epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4 \emptyset (c_2^3 - c_1^3)]$ }

$M = 4,613.60$ kg.-m. { $M = [\Sigma C_c * (d_{ps} - c + x_1) + T_C * [d_{ps} - c - (2/3) * f_r / (E_{cip} * \emptyset)]] / 100$ }

(5) เมื่อลวดเหล็กถึงจุดคราก [$\epsilon_{ps} = \epsilon_{py}$]

ให้ $\epsilon_{px1} = 0.00542$ { $\epsilon_{ps} = 0.01 - \epsilon_{se1} - \epsilon_{ce}$ }

และ $\epsilon_{px2} = 0.00493$ { $\epsilon_{ps} = 0.01 - \epsilon_{se2} - \epsilon_{ce}$ }

$c = 3.3669$ cm.

$\emptyset = 3.90E-04$ rad./cm. { $\emptyset = \epsilon_{ps} / (d_{ps} - c)$ }

$f_{ps1} = 15,685.35$ ksc. { $f_{ps1} = E_{ps1} \epsilon_{ps} [0.0305 + 0.9695 / (1 + (120.87 \epsilon_{ps})^{8.0, 0.125})]$ }

$f_{ps2} = 16,911.07$ ksc. { $f_{ps2} = E_{ps2} \epsilon_{ps} [0.0252 + 0.9748 / (1 + (92.88 \epsilon_{ps})^{7.5, 0.133})]$ }

$T_{ps1} = 12,109.09$ kg. { $T_{ps1} = f_{ps1} * A_{ps1}$ }

$T_{ps2} = 18,433.07$ kg. { $T_{ps2} = f_{ps2} * A_{ps2}$ }

$T_C = 312$ kg. { $T_C = 0.5 * f_r * f_r / (E_{cip} * \emptyset) * b_{cip}$ }

$C_{c1} = 30,854.02$ kg. { $C_{c1} = b f'_{pc} * (\emptyset / \epsilon_o) * c_1^2 * [1 - \emptyset * c_1 / (3 \epsilon_o)]$ }

$C_{c2} = 0.00$ kg. { $C_{c2} = b f'_{pc} * (\emptyset / \epsilon_o) * [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset * (c_2^3 - c_1^3) / (3 \epsilon_o)]$ }

$T_{ps} + T_C - \Sigma C = 0.00$ kg.

$x_1 = 2.18$ cm. { $x_1 = c_1 * [(8 \epsilon_o - 3 * \emptyset * c_1) / (12 * \epsilon_o - 4 * \emptyset * c_1)]$ }

$x_2 = 0.00$ cm. { $x_2 = [8 \epsilon_o (c_2^3 - c_1^3) - 3 \emptyset (c_2^4 - c_1^4)] / [12 * \epsilon_o (c_2^2 - c_1^2) - 4 \emptyset (c_2^3 - c_1^3)]$ }

$M = 4,999.91$ kg.-m. { $M = [\Sigma C_c * (d_{ps} - c + x_1) + T_C * [d_{ps} - c - (2/3) * f_r / (E_{cip} * \emptyset)]] / 100$ }

(6) เมื่อความเครียดที่ผิวบนสุดของพื้นคอนกรีตหล่อในที่เททับหน้าเท่ากับ 0.002 [$\epsilon_{top,cip}=0.002$]

ให้ $\epsilon_{top,cip} = 0.002$

$c = 2.70$ cm.

$\emptyset = 7.42E-04$ rad./cm. { $\emptyset = \epsilon_{top,cip}/c$ }

$\epsilon_{ps} = 0.01632$ { $\epsilon_{ps} = \epsilon_{se} + \epsilon_{ce} + \emptyset*(d_{ps}-c)$ }

$f_{ps1} = 16,290.39$ ksc. { $f_{ps1} = E_{ps1}\epsilon_{ps}[0.0305+0.9695/(1+(120.87\epsilon_{ps})^{8.0 \cdot 0.125})]$ }

$f_{ps2} = 18,951.13$ ksc. { $f_{ps2} = E_{ps2}\epsilon_{ps}[0.0252+0.9748/(1+(92.88\epsilon_{ps})^{7.5 \cdot 0.133})]$ }

$T_{ps1} = 12,576.18$ kg. { $T_{ps1} = f_{ps1} * A_{ps1}$ }

$T_{ps2} = 20,656.73$ kg. { $T_{ps2} = f_{ps2} * A_{ps2}$ }

$T_C = 164$ kg. { $T_C = 0.5 * f_r * f_r / (E_{cip} * \emptyset) * b_{cip}$ }

$C_{c1} = 33,397.09$ kg. { $C_{c1} = b f'_{pc} * (\emptyset / \epsilon_o) * c_1^2 * [1 - \emptyset * c_1 / (3\epsilon_o)]$ }

$C_{c2} = 0.00$ kg. { $C_{c2} = b f'_{pc} * (\emptyset / \epsilon_o) * [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset * (c_2^3 - c_1^3) / (3\epsilon_o)]$ }

$T_{ps} + T_C - \Sigma C = 0.00$ kg.

$x_1 = 1.72$ cm. { $x_1 = c_1 * [(8\epsilon_o - 3 * \emptyset * c_1) / (12 * \epsilon_o - 4 * \emptyset * c_1)]$ }

$x_2 = 0.00$ cm. { $x_2 = [8\epsilon_o(c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset(c_2^4 - c_1^4)] / [12 * \epsilon_o(c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset(c_2^3 - c_1^3)]$ }

$M = 5,456.82$ kg.-m. { $M = [\Sigma C_c * (d_{ps} - c + x_1) + T_C * [d_{ps} - c - (2/3) * f_r / (E_{cip} * \emptyset)] / 100$ }

(7) เมื่อความเครียดที่ผิวบนสุดของพื้นคอนกรีตหล่อในที่เททับหน้าเท่ากับ 0.003 [$\epsilon_{top,cip}=0.003$]

ให้ $\epsilon_{top,cip} = 0.003$

$c = 2.2630$ cm.

$\emptyset = 1.33E-03$ rad./cm. { $\emptyset = \epsilon_{top,cip}/c$ }

$\epsilon_{ps} = 0.02539$ { $\epsilon_{ps} = \epsilon_{se} + \epsilon_{ce} + \emptyset*(d_{ps}-c)$ }

$f_{ps1} = 16,828.12$ ksc. { $f_{ps1} = E_{ps1}\epsilon_{ps}[0.0305+0.9695/(1+(120.87\epsilon_{ps})^{8.0 \cdot 0.125})]$ }

$f_{ps2} = 19,471.98$ ksc. { $f_{ps2} = E_{ps2}\epsilon_{ps}[0.0252+0.9748/(1+(92.88\epsilon_{ps})^{7.5 \cdot 0.133})]$ }

$T_{ps1} = 12,991.31$ kg. { $T_{ps1} = f_{ps1} * A_{ps1}$ }

$T_{ps2} = 21,224.46$ kg. { $T_{ps2} = f_{ps2} * A_{ps2}$ }

$T_C = 92$ kg. { $T_C = 0.5 * f_r * f_r / (E_{cip} * \emptyset) * b_{cip}$ }

$C_{c1} = 34,307.61$ kg. { $C_{c1} = b f'_{pc} * (\emptyset / \epsilon_o) * c_1^2 * [1 - \emptyset * c_1 / (3\epsilon_o)]$ }

$C_{c2} = 0.00$ kg. { $C_{c2} = b f'_{pc} * (\emptyset / \epsilon_o) * [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset * (c_2^3 - c_1^3) / (3\epsilon_o)]$ }

$C_{c3} = 0.00$ kg. { $C_{c3} = b f'_{pc} * (\emptyset / \epsilon_o) * [(c_2^2 - c_1^2) - \emptyset * (c_2^3 - c_1^3) / (3\epsilon_o)]$ }

$T_{ps} + T_C - \Sigma C = 0.00$ kg.

$x_1 = 1.38$ cm. { $x_1 = c_1 * [(8\epsilon_o - 3 * \emptyset * c_1) / (12 * \epsilon_o - 4 * \emptyset * c_1)]$ }

$x_2 = 0.00$ cm. { $x_2 = [8\epsilon_o(c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset(c_2^4 - c_1^4)] / [12 * \epsilon_o(c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset(c_2^3 - c_1^3)]$ }

$x_3 = 0.00$ cm. { $x_3 = [8\epsilon_o(c_2^3 - c_1^3) - 3\emptyset(c_2^4 - c_1^4)] / [12 * \epsilon_o(c_2^2 - c_1^2) - 4\emptyset(c_2^3 - c_1^3)]$ }

$M = 5,629.24$ kg.-m. { $M = [\Sigma C_c * (d_{ps} - c + x_1) + T_C * [d_{ps} - c - (2/3) * f_r / (E_{cip} * \emptyset)] / 100$ }

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมนต์เกียรติ์ ชนินทรลีลา เกิดเมื่อวันที่ 21 มิถุนายน พ.ศ.2517 ที่อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย