



วิทยานิพนธ์

พฤติกรรมการเฉือนของคานคอนกรีตคุณภาพสูงที่เสริมเหล็กปลอก

SHEAR BEHAVIOR OF HIGH PERFORMANCE REINFORCED CONCRETE BEAMS

นายจักรพรรดิ กอฉินัย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง พฤติกรรมการเนือนของคานคอนกรีตคุณภาพสูงที่เสริมเหล็กปลอก

Shear Behavior of High Performance Reinforced Concrete Beams

นามผู้วิจัย นายจักรพรรดิ กอฉินัย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ต่อกุล กาญจนาลัย, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ตระกูล อร่ามรักษ์, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วิชาญ ภูพัฒน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์วรากร ไม้เรียง, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

พฤติกรรมการเฉือนของคานคอนกรีตคุณภาพสูงที่เสริมเหล็กปลอก

Shear Behavior of High Performance Reinforced Concrete Beams

โดย

นายจักรพรรดิ กอณินัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

พ.ศ. 2550

จักรพรรดิ กอณินัย 2550: พฤติกรรมการเนือนของคานคอนกรีตคุณภาพสูงที่เสริมเหล็กปลอก ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ปรธานกรรรมการที่ปรึกษา: ศาสตราจารย์ต่อกุล กาญจนาลัย, Ph.D. 147 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรม กำลังรับแรงเนือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเป็นคอนกรีตคุณภาพสูง HPC (High Performance Concrete) ซึ่งตัวอย่างในการวิจัยมีทั้งหมด 12 ตัวอย่าง และกำหนดขนาดตัวอย่างในการทดสอบ เป็นคานขนาดหน้าตัด 12x20 ซม. มีช่วงยาว 100 ซม. โดยกำลังอัดประลัยอยู่ในช่วง 630-905 กก./ซม.²

ในการทดสอบจะแบ่งออกเป็น คาน B1,B2 เสริมเหล็กปลอกรับแรงเนือน 0.167% ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง 1.26% อัตราส่วนระหว่างช่วงแรงเนือนและความลึกประสิทธิผล 3 และ 1.5 คาน B3, B4 เสริมเหล็กปลอกรับแรงเนือน 0.194% ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง 1.26%, 2.51% อัตราส่วนระหว่างช่วงแรงเนือนและความลึกประสิทธิผล 3 และ 1.5 คาน B5, B6 เสริมเหล็กปลอกรับแรงเนือน 0.292% ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง 2.51 % อัตราส่วนระหว่างช่วงแรงเนือนและความลึกประสิทธิผล 3 และ 1.5 คาน B7, B7*, B8, B8* เสริมเหล็กปลอกรับแรงเนือน 0.583% ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง 2.51% อัตราส่วนระหว่างช่วงแรงเนือนและความลึกประสิทธิผล 3 และ 1.5 คาน B1*, B2* ไม่เสริมเหล็กปลอกรับแรงเนือน ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง 1.26% อัตราส่วนระหว่างช่วงแรงเนือนและความลึกประสิทธิผล 3 และ 1.5

ในการทดสอบพบว่า คานชุด $a/d=3$ กำลังเนือนวิกฤตของคอนกรีตจะน้อยกว่าคานชุด $a/d=1.5$ และทำการเปรียบเทียบผลการทดลอง กับสมการรับแรงเนือนของ ACI 318-89 ผลการเปรียบเทียบมีความอนุรักษ์สำหรับกลุ่มคาน $a/d=3$ ส่วนกลุ่มคานชุด $a/d=1.5$ ผลการเปรียบเทียบมีความอนุรักษ์ค่อนข้างมาก เนื่องจากคานเกิด โครงสร้าง Arch จากการทดลองพบว่าในกลุ่มคานที่มี $a/d=3$ เหล็กปลอกเกิดการครากแต่ในกลุ่มคานที่มี $a/d=1.5$ ไม่เกิดการคราก ซึ่งทำให้การประเมินกำลังเนือนที่รับด้วยเหล็กปลอกตามสมการ ACI ให้ค่าที่มากเกินไป

Jakkapat Korneenai 2007: Shear Behavior of High Performance Reinforcee Concrete Beams. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Professor Torkul Kanchanalai, Ph.D. 147 pages.

The Purpose of this reasearch is to study the shear behavior and the shear strength of reinforcement concrete beam with high performance concrete. Twelve samples of 12x20 cm a rectangular section and 100 cm span length were testd. The specimens have high strength concrete having f_c' in the range of 630-905 kg/cm².

Samples B1,B2 have shear reinforcement 0.167% and main tension steel of 1.26% with ratio of shear span:effective depth = 3 and 1.5 . Samples B3,B4 have shear reinforcement of 0.194% and tension steel 1.26%, 2.51% with ratio of shear span:effective depth = 3 and 1.5. Samples B5, B6 have shear reinforcement of 0.292% and tension steel 2.51% with ratio of shear span:effective depth = 3 and 1.5. Samples B7 ,B7*, B8, B8* have shear reinforcement of 0.583% and tension steel 2.51% with ratio of shear span: effective depth = 3 an 1.5; and for samples B1*, B2* no shear reinforcement is provide. The tension steel is 1.26% ratio and the shear span:effective depth = 3 and 1.5.

From the test it was found that the concrete shear strength of the beams with $a/d = 3$ is less than those with $a/d = 1.5$. The shear strength from the test results were compared with the functions of the ACI 318-89 specifications were conservative for the beams with $a/d = 3$ and rather conservative for $a/d = 1.5$ which is due to the arch action effect in the later. The shear reinforcement yields for beams with $a/d = 3$. For those with $a/d = 1.5$ the reinforcement dose not yields making the predicted strength from the ACI provision being too excessive.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ศ.ดร. ต่อกุล กาญจนาลัย ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
รศ.ดร. ตระกูล อร่ามรักษ์ กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก และ รศ.ดร. วิชาญ ภูพัฒน์ กรรมการที่ปรึกษา
วิชาการ ที่ได้ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์
จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ธนาศรี สัมพันธ์รักษ์ เพ็ชรยิ้ม ผู้แทน
บัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนในการสนับสนุนในงานวิจัยครั้งนี้

ขอบพระคุณ บริษัท ซีก้า (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้สนับสนุนในเรื่องวัสดุในการวิจัย

ขอบคุณเพื่อนร่วมงานและน้องๆที่ช่วยทั้งความคิดและแรงกายในการวิจัยครั้งนี้

กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และ ครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า
ณ โอกาสนี้

จักรพรรดิ กอฉินัย

ตุลาคม 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตการศึกษา	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	15
อุปกรณ์	15
วิธีการ	18
ผลและวิจารณ์	24
ผล	24
วิจารณ์	40
สรุปและข้อเสนอแนะ	48
สรุป	48
ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	51
ภาคผนวก	57
ภาคผนวก ก ตาราง	58
ภาคผนวก ข รูปภาพ	88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	Test program for shear of RC-Beam	19
ตารางผนวกที่		
ก1	สัดส่วนในการผสมคอนกรีตกำลังสูง	59
ก2	กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม	59
ก3	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต	60
ก4	กำลังรับแรงเฉือนของคานที่ไม่เสริมเหล็กปลอก	60
ก5	กำลังรับแรงเฉือนของคานที่เสริมเหล็กปลอก	61
ก6	หน่วยแรงรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตกำลังสูง	61
ก7	ลักษณะการวิบัติ(Mode of Failure)	62
ก8	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=3$ คาน B1	63
ก9	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=3$ คาน B3	64
ก10	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=3$ คาน B5	65
ก11	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=3$ คาน B7	66
ก12	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=3$ คาน B1*	67
ก13	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=3$ คาน B7*	68
ก14	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=1.5$ คาน B2	69
ก15	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=1.5$ คาน B4	70
ก16	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=1.5$ คาน B6	71
ก17	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=1.5$ คาน B8	72
ก18	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=1.5$ คาน B 2*	73
ก19	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และการโก่งตัวของคานขนาด $a/d=1.5$ คาน B8*	74
ก20	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานขนาด $a/d=3$ คาน B1	75
ก21	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานขนาด $a/d=3$ คาน B3	76
ก22	น้ำหนักบรรทุกทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานขนาด $a/d=3$ คาน B5	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก23	น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชูด $a/d=3$ คาน B7	78
ก24	น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชูด $a/d=3$ คาน B1*	79
ก25	น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชูด $a/d=3$ คาน B7*	80
ก26	น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชูด $a/d=1.5$ คาน B2	81
ก27	น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชูด $a/d=1.5$ คาน B4	82
ก28	น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชูด $a/d=1.5$ คาน B6	83
ก29	น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชูด $a/d=1.5$ คาน B8	84
ก30	น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชูด $a/d=1.5$ คาน B2*	85
ก31	น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชูด $a/d=1.5$ คาน B8*	86
ก32	ความเครียดการ โกงตัวที่น้ำหนักวิกฤติ($a/d=3$)	87
ก33	ความเครียดการ โกงตัวที่น้ำหนักวิกฤติ($a/d=1.5$)	87

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การทดสอบคานคอนกรีตที่มี ช่วงแรงเฉือน/ความลึกประสิทธิผล ($a/d = 3$)	20
2	การทดสอบคานคอนกรีตที่มี ช่วงแรงเฉือน/ความลึกประสิทธิผล ($a/d = 1.5$)	20
3	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัย ของคาน B1	41
4	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B3	41
5	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B5	42
6	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B7	42
7	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B1*	43
8	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B7*	43
9	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B2	44
10	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B4	45
11	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B6	45
12	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B8	46
13	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B2*	46
14	ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของ คาน B8*	47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข1	การทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยของตัวอย่างทรงกระบอก	89
ข2	ค่าน้ำหนักที่อ่านได้	89
ข3	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทรงกระบอก	90
ข4	น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต	90
ข5	โมที่ใช้ในการผสมคอนกรีต	91
ข6	ปริมาณการใช้สารลดน้ำ	91
ข7	เหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอกและการติดstrain gauge กับเหล็กเสริม	92
ข8	แม่แรงที่ใช้ในการทดสอบ	92
ข9	Computer และ Data Logger	93
ข10	ติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบ	93
ข11	คาน B1 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	94
ข12	คาน B1 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	94
ข13	คาน B1 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	95
ข14	คาน B2 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	95
ข15	คาน B2 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	96
ข16	คาน B2 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	96
ข17	คาน B2 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	97
ข18	คาน B2 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	97
ข19	คาน B3 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	98
ข20	คาน B3 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	98
ข21	คาน B3 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	99
ข22	คาน B3 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	99
ข23	คาน B4 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	100
ข24	คาน B4 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	100
ข25	คาน B4 ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข26	กานB4ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	101
ข27	กานB4ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	102
ข28	กานB4ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	102
ข29	กานB5ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	103
ข30	กานB5ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	103
ข31	กานB5ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	104
ข32	กานB5ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	104
ข33	กานB6ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	105
ข34	กานB6ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	105
ข35	กานB6ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	106
ข36	กานB6ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	106
ข37	กานB6ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	107
ข38	กานB6ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	107
ข39	กานB7ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	108
ข40	กานB7ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	108
ข41	กานB7ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	109
ข42	กานB7ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	109
ข43	กานB8ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	110
ข44	กานB8ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	110
ข45	กานB8ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	111
ข46	กานB8ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	111
ข47	กานB8ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	112
ข48	กานB8ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	112
ข49	กานB8ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	113
ข50	กานB8ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	113
ข51	กานB1*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	114

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข52	คานB1*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	114
ข53	คานB1*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	115
ข54	คานB1*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	115
ข55	คานB2*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	116
ข56	คานB2*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	116
ข57	คานB2*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	117
ข58	คานB2*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	117
ข59	คานB7*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	118
ข60	คานB7*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	118
ข61	คานB7*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	119
ข62	คานB7*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	119
ข63	คานB7*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	120
ข64	คานB7*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	120
ข65	คานB7*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	121
ข66	คานB7*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	121
ข67	คานB8*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	122
ข68	คานB8*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	122
ข69	คานB8*ขณะทดสอบและแสดงรอยแตกต่างๆ	123
ข70	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคานB1	123
ข71	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเนื่องด้านซ้ายของคานB1	124
ข72	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงคัดของคานB1	124
ข73	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเนื่องด้านขวาของคานB1	125

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข74	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการ โกงตัวของคานB2	125
ข75	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงเฉือนด้านซ้ายของคานB2	126
ข76	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงค้ำของคานB2	126
ข77	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงเฉือนด้านขวาของคานB2	127
ข78	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการ โกงตัวของคานB3	127
ข79	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงเฉือนด้านซ้ายของคานB3	128
ข80	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงค้ำของคานB3	128
ข81	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงเฉือนด้านขวาของคานB3	129
ข82	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการ โกงตัวของคานB4	129
ข83	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงเฉือนด้านซ้ายของคานB4	130
ข84	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงค้ำของคานB4	130
ข85	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงเฉือนด้านขวาของคานB4	131
ข86	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการ โกงตัวของคานB5	131
ข87	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงเฉือนด้านซ้ายของคานB5	132

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข88	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำของคานB5	132
ข89	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนด้านขวาของคานB5	133
ข90	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคานB6	133
ข91	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนด้านซ้ายของคานB6	134
ข92	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำของคานB6	134
ข93	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนด้านขวาของคานB6	135
ข94	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคานB7	135
ข95	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนด้านซ้ายของคานB7	136
ข96	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำของคานB7	136
ข97	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคานB8	137
ข98	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนด้านซ้ายของคานB8	137
ข99	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำของคานB8	138
ข100	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนด้านขวาของคานB8	138
ข101	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคานB1*	139

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข102	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำของคานB1*	139
ข103	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคานB2*	140
ข104	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำของคานB2*	140
ข105	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคานB7*	141
ข106	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนด้านซ้ายของคานB7*	141
ข107	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำของคานB7*	142
ข108	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนด้านขวาของคานB7*	142
ข109	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคานB8*	143
ข110	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนด้านซ้ายของคานB8*	143
ข111	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำของคานB8*	144
ข112	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนด้านขวาของคานB8*	144
ข113	เปรียบเทียบระหว่างสมการ ACI และผลการทดสอบค่า $a/d=3$	145
ข114	เปรียบเทียบระหว่างสมการ ACI และผลการทดสอบค่า $a/d=3$	145
ข115	เปรียบเทียบระหว่างสมการ(deep beam) ACI และผลการทดสอบค่า $a/d=1.5$	146
ข116	เปรียบเทียบระหว่างสมการ(deep beam) ACI และผลการทดสอบค่า $a/d=1.5$	146

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข117	เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกระหว่าง สมการ ACI และผลการทดสอบ $a/d=3$	147
ข118	เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกระหว่าง สมการ(deep beam) ACI และผลการทดสอบ $a/d=1.5$	147

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	ช่วงของแรงเฉือน
A_v	=	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกทั้งสองข้าง
d	=	ความลึกประสิทธิผล
E_c	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_s	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมตามยาว
\mathcal{E}	=	ความเครียด
f_c	=	หน่วยแรงอัดของคอนกรีต
f_c'	=	หน่วยแรงดึงประลัยของคอนกรีต
f_y	=	หน่วยแรงดึงประลัยของเหล็กเสริมตามยาว
f_{y_w}	=	หน่วยแรงดึงประลัยของเหล็กปลอก
M	=	โมเมนต์คดใดๆ
M_u	=	โมเมนต์คดประลัย
N	=	จำนวนเหล็กปลอกที่ร้อยราวแนวทแยงเดินผ่าน
P_{ci}	=	น้ำหนักกระทำวิกฤต
P_u	=	น้ำหนักกระทำประลัย
V_a	=	แรงชัดประสานของวัสดุมวลรวม
V_{ci}	=	กำลังรับแรงเฉือน ณ จุดแตกราวแนวทแยง
v_{ci}	=	หน่วยแรงเฉือน ณ จุดแตกราวแนวทแยง
V_{cz}	=	การต้านทานแรงเฉือนของคานคอนกรีตโดยส่วนที่ยังไม่แตกราว
V_d	=	การต้านทานแรงเฉือนของเหล็กเสริมตามยาวในคานคอนกรีต
V_u	=	กำลังรับแรงเฉือนประลัย
V_s	=	แรงเฉือนที่รับโดยเหล็กปลอก
v_s	=	หน่วยแรงเฉือนที่รับโดยเหล็กปลอก
v_u	=	หน่วยแรงเฉือนประลัย
α	=	มุมของเหล็กปลอกทำกับเหล็กเสริมตามยาว
ρ	=	ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว (สัดส่วนหน้าตัดเหล็กต่อหน้าตัดคานคอนกรีต)
ρ_w	=	ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (สัดส่วนหน้าตัดเหล็กต่อผลคูณความลึกประสิทธิผลกับระยะเรียงเหล็กปลอก)

พฤติกรรมการเฉือนของคานคอนกรีตคุณภาพสูงที่เสริมเหล็กปลอก

Shear Behavior of High performance Reinforced Concrete Beams

คำนำ

คอนกรีต คือ วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร ประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วนคือ วัสดุประสาน ได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต วัสดุผสม ได้แก่ หิน หรือกรวด และทราย เมื่อผสมกันจะมีสภาพเหลวอยู่ในช่วงเวลาหนึ่งเนื่องจากปฏิกิริยา Hydration จะเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็ง และสามารถรับน้ำหนักได้ตามกำลังของอายุคอนกรีต โดยปกติกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตทั่วไปจะอยู่ในช่วง 180-270 กก./ซม.² ซึ่งในการวิจัยนี้ได้กำหนดช่วงของกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วัน อยู่ในช่วง 650-850 ซึ่งเป็นคอนกรีตกำลังสูงเมื่อได้มีการพัฒนาในด้านกำลังรับแรงอัดให้สูงขึ้นในปัจจุบัน คอนกรีตกำลังสูงสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันได้ถึง 1,000-1,500 กก./ซม.² โดยในการก่อสร้างสามารถลดขนาดของโครงสร้างได้มากขึ้น จึงทำให้น้ำหนักโครงสร้างเบาลงเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน เทียบกับคอนกรีตธรรมดาซึ่งมีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่กว่า และเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับโครงสร้างที่ต้องรับแรงอัดสูง

คอนกรีตคุณภาพสูง (High Performance Concrete) หรือ (HPC) คอนกรีตคุณภาพสูงเกิดจากการผลิตคอนกรีตกำลังสูงก่อน (HSC) แล้วพัฒนาไปสู่คอนกรีตคุณภาพสูง คอนกรีตกำลังสูง (HSC) กับคอนกรีตคุณภาพสูง (HPC) มีวัตถุประสงค์ที่ใกล้เคียงกันมาก คือ คอนกรีตกำลังสูง จำทำการผลิตได้ จะต้องมีการควบคุมสัดส่วนในการผสมวัสดุ และควบคุมกระบวนการผลิต คอนกรีตที่ได้มาจึงจะได้คอนกรีตที่มีกำลังสูงตามที่ต้องการ ในการผลิตจะทำการลดสัดส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ให้น้อยลง เมื่อลดน้ำถึงระดับหนึ่งจะทำให้คอนกรีตเทเข้าแบบยาก จึงจำเป็นจะต้องใช้สารลดน้ำเติมลงไปเพื่อช่วยในการทำงาน (ทำให้เกิดความลื่นไหล) สามารถทำงานได้สะดวก สารที่ผสมเพิ่มแบ่งเป็น 7 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C-494 คือ A-G และสารที่ใช้ในการผสมเพิ่ม ก็คือ สารประเภท Type F (High range water reducing) ใช้น้ำยาในปริมาณ 0.5-1.0 ลิตร/ม³ คอนกรีตคุณภาพสูงหมายถึงคอนกรีตที่มีคุณสมบัติที่ดีในทุก ๆ ด้าน คือ คอนกรีตที่สามารถในการทำงานก่อให้เกิดคุณภาพที่ดีกับโครงสร้างได้ ซึ่งในสถานะเหลวจะมีการไหลตัวที่ดี ในสภาพแข็งจะให้อินด้านกำลังสูง และมีความทึบน้ำและความทนทานสูง

พฤติกรรมการณ์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการวิจัยทำการศึกษารื่องของ ลักษณะการเกิดรอยแตกร้าว และอัตราส่วนของช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d)

- การเกิดรอยแตกร้าวที่เอว (Web Shear Crack) ลักษณะของรอยแตกร้าวจะเป็นรอยแตกร้าวแบบทแยง รอยแตกร้าวลักษณะนี้เกิดขึ้นจากแรงเฉือน มักจะเกิดบริเวณใกล้กับฐานรองรับหรือระหว่างฐานรองรับกับช่วงแรงเฉือน

- การเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดผสมกับแรงเฉือน (Flexure Shear Crack) รอยแตกร้าวจะเป็นแบบผสมคือเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดเป็นเส้นตรงที่ท้องคานคอนกรีตและรอยแตกจะเริ่มเบนเป็นแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือนจะเกิดขึ้นในบริเวณที่รับแรงเฉือนและแรงดัดช่วงถัดจากฐานรองรับมาพอสมควรและอยู่ในช่วงแรงเฉือน

อัตราส่วนของช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d)

- $a/d = 6$ เป็นคานที่มีช่วงการเฉือนยาวมาก การวิบัติจะเกิดจากโมเมนต์อย่างเดียวเท่านั้น การเกิดรอยร้าวในแนวตั้งจะเกิดบริเวณช่วงกลางคาน (ช่วงรับโมเมนต์) ลักษณะเป็นรอยแตกจากท้องคานแล้วเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณรับแรงอัดของหน้าตัดคาน

- $a/d = 3$ หรือ 4 เป็นคานที่มีช่วงการเฉือนยาว การวิบัติจะเกิดขึ้นแบบผสมทั้งโมเมนต์และแรงเฉือน คือจะเกิดรอยร้าวในแนวตั้งในช่วงกลางคานก่อนและต่อมารอยร้าวในแนวตั้งจะเกิดขึ้นในช่วงรับแรงเฉือนและจะเคลื่อนตัวเป็นรอยร้าวแบบทแยงเนื่องจากแรงเฉือน รอยร้าวแบบทแยงวิกฤตจะอยู่ถัดจากฐานรองรับเข้ามาจะเคลื่อนตัวเร็วและยาวกว่ารอยร้าวแบบทแยงรอยอื่น ๆ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมรับแรงเฉือนของคานอยู่ในช่วงนี้คือ $a/d = 3$

- $1.0 < a/d \leq 2.5$ เป็นคานที่มีช่วงการเฉือนสั้น ในการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนจะเกิดรอยร้าวแบบทแยงวิกฤตเคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณรับแรงอัด คานลักษณะนี้แรงกำลังรับแรงเฉือนวิกฤตจะรับได้สูงกว่าที่ได้คำนวณไว้ เนื่องจากคอนกรีตระหว่างฐานรองรับและน้ำหนักกระทำ เกิดโครงสร้างโค้ง (Arch) ส่วนเหล็กเสริมทำหน้าที่รับแรงดึง ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมรับแรงเฉือนคือใช้ค่า $a/d = 1.5$

- $a/d \leq 1.0$ เป็นคานลึกลับ เมื่อเกิดรอยร้าวแบบทแยงวิกฤต คานคอนกรีตจะมีพฤติกรรมเป็นโครงสร้างแบบมีแรงยึดดึง (Tied Arch)

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของกำลังอัดที่สูงขึ้นต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตคุณภาพสูงที่เสริมเหล็กปลอก (Web Reinforcement)
2. ศึกษากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c') กับอิทธิพลของอัตราส่วนการเสริมเหล็กปลอกของ (Web Reinforcement Ratio) และอิทธิพลของสัดส่วนช่วงรับแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) ที่ค่า 1.5 และ 3 ว่ามีผลต่อพฤติกรรมการแตกร้าวและกำลังการรับแรงเฉือน
3. ศึกษาลักษณะความสัมพันธ์ของการโก่งตัว (deflection) และความเครียดของเหล็กเสริมกับน้ำหนักกับน้ำหนักกระทำ (load) ของคานคอนกรีตคุณภาพสูง HPC (High Performance Concrete)
4. เปรียบเทียบกับฟังก์ชันของมาตรฐาน ACI 318-89 ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้านการรับแรงเฉือนเมื่อคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตคุณภาพสูง

ขอบเขตการศึกษา

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมและกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตคุณภาพสูง ซึ่งทำการเสริมเหล็กปลอกในอัตราส่วนต่างกัน (Web Reinforcement Ratio) มีกำลังอัดเฉลี่ยจะอยู่ในช่วง 630-905 กก./ซม.² และอัตราส่วนระหว่างช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) คือ 3 และ 1.5 เพื่อเปรียบเทียบกับกำลังเฉือนตามมาตรฐานในการออกแบบของ ACI 318-89 สำหรับคอนกรีตคุณภาพสูงทำการออกแบบส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตมีกำลังสูงเป็นหลัก คานคอนกรีตคุณภาพสูงที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ขนาดหน้าตัด 12x20 ซม. มีความยาว 100 ซม. จำนวน 12 ตัวอย่าง ซึ่งจำลองส่วนโครงสร้างประเภทคานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

การตรวจเอกสาร

คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตคุณภาพสูง

คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ของคอนกรีตกำลังสูงจะแตกต่างจากคอนกรีตธรรมดาทั่ว ๆ ไป จากการศึกษาลักษณะพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูงพบว่า ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของคอนกรีตกำลังสูงจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากความแข็งที่เพิ่มขึ้นของเนื้อปูน (Cement Past) และการยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อปูนกับมวลรวม Perera (1979) ได้ทำการทดลองและพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและกำลังดึงของคอนกรีตกำลังสูง จะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงเพิ่มขึ้น แต่ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) อยู่ประมาณ 0.2-0.23 เหมือนกับคอนกรีตธรรมดา Nilson et al. (1981) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตกำลังสูงพบว่าค่าโมดูลัสคอนกรีตกำลังสูงมีค่า $4.0-5 \times 10^5$ กก./ซม.² และความเครียดสูงสุดของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าอยู่ในช่วง 0.002-0.003 Thoman and Warren (1934) ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัด (Stress) และความเครียด (Strain) ของคอนกรีตกำลังสูงจะมีความชันสูงมากกว่าคอนกรีตธรรมดา คอนกรีตคุณภาพสูงในประเทศไทยเริ่มจากคอนกรีตกำลังสูง ได้มีการวิจัยและศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่ไหลตัวได้ดีไว้พอสมควร และมีกำลังสูงเพื่อใช้ ในงานก่อสร้าง โดยคอนกรีตคุณภาพสูงมีข้อกำหนดดังนี้ ค่าการยุบตัวไม่น้อยกว่า 20 ซม., ช่วงเวลาทำงานไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง, กำลังที่ 28 วันเกิน 600 กก/ซม.², กำลังที่ 24 ชั่วโมงไม่น้อยกว่า 50% ของ 28 วัน, ไม่มีการแยกตัว, หดตัวน้อย, ทึบน้ำ, ไม่มีรอยแตกร้าว และความทนทานสูง (เอกสิทธิ์, 2537) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 จะเหมาะสมมากกว่าประเภทที่ 3 เนื่องจากปูนประเภทที่ 1 ต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่าประเภทที่ 3 เพื่อการไหลตัวที่เท่ากัน (Saucier et al., 1964)

ส่วนผสมของคอนกรีตคุณภาพสูง

คุณสมบัติของคอนกรีตคุณภาพสูงขึ้นอยู่กับส่วนผสมของคอนกรีต ได้แก่ มวลรวม อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ และชนิดของสารผสมเพิ่ม มวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตก็มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตด้วย Thoman and Warren (1934) ได้ใช้มวลรวม 3 ชนิด คือ กรวด หินทราย และหินบะซอลท์ (Basalt) เนื่องจากโครงสร้างผิว (Texture Surface) ของทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกัน และขนาดโตสุดของมวลรวมคือ 3/4 นิ้ว พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินบะซอลท์เป็นมวลรวมจะให้กำลังสูงสุด และได้สรุปว่า หินบะซอลท์มีความเป็นเนื้อเดียวกัน

และมีคุณสมบัติที่ดีทางฟิสิกส์ จึงสามารถสร้างและพัฒนาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างน้ำซีเมนต์ (Cement Past) ได้ดีกว่า Gold Beck (1928); Weymoth (1933); McGreary (1961) ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อปริมาณคอนกรีตที่เพิ่มเนื้อปูนซีเมนต์สูงขึ้น ความสำคัญของขนาดมวลรวมก็จะน้อยลงไปด้วย Walker (1960) พบว่าผลกระทบของขนาดโตสุดของมวลรวมที่มีต่อกำลังของคอนกรีต โดยเมื่อใช้มวลรวมขนาดเล็กลงทำให้คอนกรีตมีความต้องการน้ำในการผสมเพิ่มมากขึ้น และทำให้เกิดการหดตัว (Shrinkage) เกิดขึ้น Gillespie and Cordon (1963, 1964) ได้ศึกษาผลกระทบของมวลรวมที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต พบว่าเมื่อใช้ค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง (Lean Mix) ต้องใช้มวลรวมขนาดใหญ่จึงจะได้กำลังสูง แต่ถ้าใช้ค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำ (Rich Mix) ขนาดโตสุดของมวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีตจะต้องเล็กลง Mather (1965) คอนกรีตที่ใช้มีมวลรวมที่มีน้ำหนักมาก เช่น แมกเนตไทต์ (Magnetite) หรือไฮลิไมไนท์ (Ilmenite) โดยมีขนาดโตที่สุด 1/2 นิ้ว ปูนซีเมนต์ 580 กก/ม³ สัดส่วนของน้ำและปูนซีเมนต์ 0.3 จะได้กำลังของคอนกรีตถึง 770 กก/ซม.³ และ Morgan (1971) ได้ค้นพบว่า ทราयीที่มีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตด้วย ซึ่งพบว่า ทราयीที่มีรูปร่างลักษณะเป็นแฉ่มหรือขรุขระจะให้กำลังของคอนกรีตต่ำกว่าทราयीที่มีลักษณะผิวกลมมน Freedman (1971) ได้ให้คำแนะนำว่าทราयीที่จะนำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงนั้น ควรมีค่าโมดูลัสความละเอียดอยู่ในช่วง 2.7-3.2

Klieger (1958) พบว่าในการวิจัยเรื่อง Early High Strength Concrete for Prestressing) ถ้าใช้น้ำในปริมาณเล็กน้อยมาก ๆ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะสูงมากขึ้น และในขณะการบ่มต้องป้องกันการระเหยของน้ำ (น้ำที่ใช้บ่มต้องเพียงพอหรือท่วมตัวอย่าง) หรือมีการเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปด้วย

Gilkey (1961) ได้ทำการทดลองโดยลดค่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เมื่อลดค่าลง และลดขนาดโตสุดของมวลรวมลงด้วยพบว่ากำลังของคอนกรีตจะสูงขึ้นด้วย และจากการศึกษาปฏิกิริยาของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์กับน้ำ (The Concrete Society) ได้พบว่า อัตราส่วน น้ำ : ปูนซีเมนต์ โดยประมาณ 0.25 จะเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ซึ่งส่วนผสมในการออกแบบไม่ควรใช้ค่าต่ำกว่านี้ แต่ Freedman (1971) ให้คำแนะนำว่าสำหรับการต้องการคอนกรีตกำลังสูงควรจะใช้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อยู่ระหว่าง 0.30-0.40 ซึ่งค่าที่ต่ำกว่านี้สามารถทำงานได้แต่การทำงานจะทำงานยาก ต่อมา Perenchio (1973) พบว่าในการที่จะทำงานหรือเทคอนกรีตได้สะดวกควรใช้อัตราส่วน น้ำ : ซีเมนต์ 0.30 และยังพบอีกว่าอัตราส่วนเท่านี้เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาของน้ำกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

Perenchio (1973) ได้ใช้สัดส่วนระหว่างน้ำ และปูนซีเมนต์โดยประมาณ 0.30 และขนาดโตสุดของหินเท่ากับ 3/8 นิ้ว จากการวิจัยที่ได้ศึกษาพบว่า กำลังอัดที่ทดสอบได้มีค่ามากกว่า 900 กก./ชม.²

Pichai (2537) ได้ทำการทดลองผสมคอนกรีตคุณภาพสูง โดยใช้ อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ 0.22-0.32 อัตราส่วนของทรายต่อมวลรวม 0.39-0.45 โดยใช้หินสองขนาด 3/8 นิ้ว และ 3/4 นิ้ว กำหนดค่าการยุบตัว 20 ± 5 ซม. หินที่ใช้มีปริมาณ 997-1117 กก./ม³ และสารลดน้ำ 1.2 ลิตร/ม³ สารลดน้ำปริมาณสูง 15.4 ลิตร/ม³ พบว่ากำลังทดสอบหน่วยแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้หิน 3/8 นิ้ว 28 วัน มีค่าสูงสุด 1,035 กก./ชม.²

มานิต (2525) ได้ทำการทดลองคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้หินขนาดโตสุด 1/2 นิ้ว ค่าความละเอียดของโมดูลัส 6.51 ใช้ทรายมีค่าความละเอียดของโมดูลัส 2.87 และปริมาณคละของมวลรวมตาม ASTM C-33 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ 0.24-0.30 และน้ำยาผสมคอนกรีต 2.378% โดยน้ำหนักพบว่าใช้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ 0.24 เมื่อทดสอบหน่วยแรงอัดได้ประมาณ 780-900 กก./ชม.²

ปรีชา (2526) ทำวิจัยพฤติกรรมการคัดของคานคอนกรีตกำลังสูง โดยเสริมด้วยลวดกำลังสูง ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน : คือ 1 : 1.333 : 2.15 และใช้ขนาดโตสุดของหิน 1/2 นิ้ว ค่าโมดูลัสความละเอียดของทราย 2.95 สัดส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.24 ใช้น้ำยาที่มีสาร Naphthalene Acid เป็นสารหลักในอัตราส่วน 2.4% ต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ และจากทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ 70 วัน คือ 646 กก./ชม.²

Animesh (1997) ได้ทำการผสมคอนกรีตโดยใช้สัดส่วนของปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน คือ 1.30 : 1 : 1.32 เมื่อทำการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอกแล้วสามารถรับแรงอัดประลัยที่ 28 วันได้ถึง 1180 กก./ชม.²

กิตติกร (2538) ได้ทำการออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตคุณภาพสูง (High Performance Concrete) โดยใช้สัดส่วนหิน 3/8" ต่อ 3/4" มีค่า 40/60 และสัดส่วนทรายต่อหิน 0.43 ปริมาณสารลดน้ำ 1.5-2.5% ของปริมาณปูนซีเมนต์ และสัดส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ อยู่ระหว่าง 0.23-0.30 พบว่ากำลังอัดของตัวอย่างทรงกระบอกที่อายุ 28 วันมีค่าระหว่าง 627-679 กก./ชม.²

สารผสมเพิ่ม(Admixture)

Gaynor (1968) ได้ใช้สารผสมเพิ่ม (Admixture) ในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารหลักคือ ลิกนิน เพื่อเพิ่มความสามารถในการเท แต่ก็ยังพบปัญหาอัตราส่วนที่ยังไม่ลงตัวที่แน่นอน สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำ (Water Reducing Admixture) หรือ (Super Plasticizer) เป็นสารประกอบ จำพวก กรดซัลโฟนิค (Sulphonic Acid Group) เมทอกซี (Methoxy) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) และ คาร์บอกซิล (Carboxyl) ช่วยเพิ่มความสามารถในการเท เพิ่มกำลังของคอนกรีตได้ และสามารถลดน้ำ ได้ไม่เกิน 15% การใช้สารผสมเพิ่มให้ประสิทธิภาพสูงสุด ควรผสมน้ำกับซีเมนต์ก่อนแล้วจึงค่อย เติมสารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำลงไปผสมภายหลัง (Donson and Farkas, 1964) แต่ถ้าใช้สารผสม เพิ่มแบบลดน้ำในปริมาณที่มากเกินไปจากคำแนะนำของผู้ผลิตแนะนำจะส่งผลกระทบต่อพัฒนา กำลังของคอนกรีตในระยะแรก คือ กำลังที่ทดสอบได้ต่ำกว่าปกติ หลังจากนั้นกำลังจะพัฒนาตามปกติ สารผสมเพิ่มประเภท ลิกโนซัลโฟเนต (Lignosulphonate) ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปปกติ ผลที่ตามมาคือจะเกิดฟองอากาศซึ่งมากกว่า 3% ส่งผลให้คอนกรีตกำลังตกลง (Blick et al., 1972)

ASTM C494 แบ่งสารผสมเพิ่มในคอนกรีตออกเป็น 7 ประเภท (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

1. ประเภท A สารลดปริมาณน้ำ (Water Reducing)
2. ประเภท B สารยืดยาวการก่อตัว (Retarding)
3. ประเภท C สารเร่งการก่อตัวและแข็งตัว (Accelerating)
4. ประเภท D สารลดปริมาณน้ำและยืดยาวการก่อตัว (Water Reducing and Retarding)
5. ประเภท E สารลดปริมาณน้ำและเร่งการก่อตัว (Water Reducing and Accelerating)
6. ประเภท F สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (High Range Water Reducing)
7. ประเภท G สารลดปริมาณน้ำจำนวนมากและยืดยาวการก่อตัว (High Range Water Reducing and Retarding)

Hewlett (1978) พบว่าสารลดน้ำปริมาณสูง (High Range Water Reducing Admixture) หรือสารผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเทให้สูงขึ้น (Super Plasticizer) โดยมีฟอ์มาลดีไฮด์ เป็นสารประกอบหลัก สามารถลดน้ำได้มากกว่าสารลดน้ำธรรมดา (Water Reducing) ถึง 10 เท่า, จากผลการทดลองพบว่า การเติมสารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำให้ได้ประสิทธิภาพ ควรใช้ไม่เกิน 1% เทียบกับน้ำหนักปูนซีเมนต์ (Yamato and Ohira, 1976)

สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำในอัตราสูง (High Range Water Reducing Admixture) มีสารเคมี จำพวก ฟอ์มาลดีไฮด์ แนนพาลีน หรือสารประกอบจำพวกโพลีเมอร์ (Polymer) โซเดียมเมลามีน ซัลโฟเนต เหมาะสำหรับคอนกรีตที่ต้องการการไหลตัวเข้าแบบได้ดีกว่าสารลดน้ำประเภทแรก อาจจะต้องทำการจี้ หรือบางชนิดแทบไม่ต้องจี้เลยก็ได้ช่วยเพิ่มเรื่องการไหลตัวของคอนกรีต (Flow Concrete) มักจะใช้กับงานส่วนโครงสร้างเสาเข็มหรือฐานราก หรืองานส่วนโครงสร้างที่ค่อนข้างบางหรือบางมาก หรืองานส่วนโครงสร้างที่เสริมเหล็กชนิดแน่นหนา และสามารถลดน้ำได้ประมาณ 35%

พฤติกรรมการเนือของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

พฤติกรรมการค้ำ Tognon et al. (1980) กล่าวว่า โมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังที่สูงขึ้น จะไม่มีผลต่อความเหนียวของคาน Leslie et al. (1976) ได้ทำ การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก หน่วยแรงอัดของคอนกรีตช่วง 625-825 กก./ซม.² พบว่า การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง ถ้าใช้การกระจายของหน่วยแรงอัดเป็นรูปสามเหลี่ยมจะมีความปลอดภัยมากกว่าใช้รูปแบบอื่นและมีข้อเสนอว่า ควรลดปริมาณเหล็กเสริมสูงสุดลดลง เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อกำลังอัดเกินกว่า 560 กก./ซม.² เสรี และ เอกสิทธิ์ (2537) คอนกรีตที่มีกำลังสูง จะมีกำลังดึงสูงมากขึ้นด้วยมาตรฐาน ACI 318-89 ให้ใช้ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงต่ำสุด คือ 14/fy แต่อาจจะไม่เหมาะสมกับคอนกรีตกำลังสูงได้ เพราะอาจจะเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน กรณีที่ทราบกำลังดึงจากการทดสอบหาโมดูลัสแตกร้าว ก็จะสามารถกำหนดปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดได้

ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อกำลังเหนือนของคาน

1. ขนาดของพื้นที่หน้าตัด

ได้มีการศึกษาหากำลังเหนือนของคานรูปสี่เหลี่ยมคล้าย ซึ่งไม่มีเหล็กเสริมตามขวาง โดย Leonhart (1964) ทดสอบคานคอนกรีตตัวอย่างชุดแรกประกอบด้วยคานคอนกรีตรูปร่างคล้าย 4 คาน ซึ่งหน้าตัดจะเปลี่ยนแปลงจาก $2 \times 3''$ เป็น $8 \times 12.6''$ ขนาดของเหล็กเสริมในแนวแกนเป็นสัดส่วนกับขนาดของคานและมีจำนวนเท่ากันทุกคาน โดยในคานชุดที่สอง หน้าตัดของคานมีอัตราส่วนของความกว้างต่างจากอัตราส่วนความลึกและมีขนาดตั้งแต่ $4 \times 7''$ ถึง $9 \times 21.3''$ คานชุดนี้มีเหล็กเสริมขนาดเท่ากันแต่จำนวนเปลี่ยนแปลงไปเพื่อให้อัตราส่วนของเหล็กเสริมคงที่ จากการศึกษาพบว่า ค่าหน่วยแรงเหนือนที่จุดวิบัติลดลง 37% เทียบระหว่างคานขนาดเล็กที่สุดและใหญ่ที่สุด สำหรับคานชุดแรก และค่าหน่วยแรงเหนือนประลัยลดลง 21% สำหรับคานชุดที่สอง เหตุผลที่หน่วยแรงเหนือนลดลงมากในคานชุดแรกเนื่องจากเหล็กเสริมมีขนาดต่างกัน ดังนั้นการยึดเกาะระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตจะลดลงถ้าเหล็กเสริมมีขนาดใหญ่

Swamy (1971) พบว่าคานขนาดเล็กมีหน่วยแรงเหนือนประลัยสูงกว่าคานขนาดใหญ่ เนื่องจากความชันของการแจกแจงความเค้นสูง

2. คานหน้าสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Talor (1972) and Diaz (1962) พบว่ากำลังเหนือนของคานซึ่งไม่มีเหล็กปลอกเสริมตามขวางเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วน b/d โดยที่ b เป็นความกว้างของคานคอนกรีต และ d เป็นความลึกประสิทธิผล

Iyengar (1968) ได้ศึกษาทางสถิติพบว่ากำลังเหนือนของคานที่มี b/d อยู่ระหว่าง 0.25 และ 1 ไม่เปลี่ยนแปลงมาก แต่พบในแผ่นพื้นซึ่งมีอัตราส่วน b/d อยู่ระหว่าง 4 ถึง 10 มีกำลังเหนือนมากกว่าในคานทั่วไป

Leonhardt and Walter (1964) ได้ทำการทดสอบกำลังรับแรงเหนือนของแผ่นพื้นและพบว่ากำลังรับแรงเหนือนของแผ่นพื้นมีค่ามากกว่าคาน

3. คานทรงกระบอก

Fradoji (1965) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงเฉือนของคานรูปทรงกระบอกซึ่งมีอัตราส่วนของผิวคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมและเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 1/10 คานเหล่านี้เป็นคานที่มีทั้งเหล็กเสริมตามขวาง จากการศึกษาพบว่า สูตรกำลังรับแรงเฉือนสำหรับคานรูปสี่เหลี่ยมสามารถใช้ได้กับคานทรงกระบอก ถ้าค่า d ในสูตรของคานรูปสี่เหลี่ยมใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกแทน และค่า d ในสูตรของคานสี่เหลี่ยมใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกแทน และค่า bd ของหน้าตัดสี่เหลี่ยมแทนด้วยค่าพื้นที่หน้าตัดรวมโดยไม่คิดเหล็กเสริมของคานรูปทรงกระบอก

4. คาน ตัว T หรือ ตัว I

Pascal and Regan (1971) ได้รายงานผลการทดสอบของคานคอนกรีตรูปตัว T จำนวน 24 ตัว โดยในชุดแรกกำหนดความหนาของเอวเป็น 6 “ และความกว้างของปีกคานเปลี่ยนแปลงจาก 6” เป็นถึง 24” และทุกแต่ละตัวอย่างมีปริมาณเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมเอวคานตามขวางเท่ากัน และคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าใช้ความกว้าง 6” และเสริมด้วยเหล็กรับแรงอัด เพื่อที่จะเปรียบเทียบเท่าปีกคานสำหรับคาน ตัว T พบว่าคานรูปตัว T ที่มีปีกกว้าง 12” ขึ้นไป มีกำลังรับแรงเฉือนสูงกว่าคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า 20%

Leonhardt (1970) เสนอว่าส่วนของปีกคานซึ่งอยู่ติดกับเอวคานในหน้าที่รับแรงอัดจะทำหน้าที่รับแรงเฉือนในคานดงรับพื้นซึ่งมีเอวเรียวยาวไปทางข้างล่าง

Hanson (1969) ได้ทำการทดสอบคานดงให้รับโมเมนต์ดัดลบและได้พบว่า ค่า V_c ควรคำนวณจากความกว้างของเอวด้านล่าง

5. อัตราส่วนของเหล็กเสริมตามยาว

ค่ากำลังเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงมากเมื่ออัตราส่วนเหล็กเสริมลดลงต่ำกว่า 1.2% ถึง 1.5% ทั้งนี้เนื่องจากแรงเฉือนที่รับด้วยโคเวตแอ็คชั่นลดลงเมื่อ ρ มีค่าน้อยและเมื่ออัตราส่วนเหล็กเสริมลดลงรอยร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัด เคลื่อนตัวสูงขึ้นภายในคานและมีความกว้างมากขึ้นก่อนที่จะเบนตัวเข้าเป็นรอยร้าวทะแยงมุม ทำให้พื้นที่คอนกรีตส่วนที่รับ

แรงอัดทำหน้าที่รับแรงเฉือนน้อยลง เมื่อรอยร้าวมีความกว้างสูง แรงเฉือนส่วนที่รับด้วยการเกาะเกี่ยวของมวลรวมของคอนกรีตก็จะลดลงด้วย

Ferguson (1968) ได้ให้ข้อเสนอว่าในกรณีที่ ρ น้อยควรวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงเฉือนเป็น $V_c = (0.8 + 100 \rho)(f_c')^{1/2} \leq 2.0(f_c')^{1/2}$

6. ลักษณะของแรงกระทำตามขวาง

ในการทดลองหาค่ากำลังของคานคอนกรีตโดยปกติ แรงตามขวางจะกระทำที่หลังคาน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าแรงกระทำโดยตรง สำหรับคานช่วงการเหินสั้น (a/d น้อยกว่า 2.5) เมื่อเกิดการแตกร้าวเนื่องจากโมเมนต์คัต คอนกรีตส่วนที่อยู่นอกรอยแตกร้าวระหว่างแรงปฏิกิริยาและแรงตามขวางจะมีลักษณะเป็น โครงสร้างโค้ง (Tied arch action) แรงอัดที่เกิดในคอนกรีตของโครงสร้างโค้งเมื่อแตกแรงเข้าสู่แนวตั้งจะมีค่าสูง ซึ่งก็คือคานสามารถรับแรงเฉือนได้เพิ่มขึ้น

กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมเหล็กปลอก

กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วยกลไกต่างกันคือ การต้านทานแรงเฉือนโดยคอนกรีตส่วนที่ยังไม่แตกร้าว V_c , แรงขัดประสาน (Interlock Force) ของมวลรวม V_a , แรงปฏิกิริยาเดือย (Dowel Action) V_d ของเหล็กเสริมตามยาว และ ปฏิกิริยา (Arch Action) กรณีเป็นคานทึบในระยะแรกใช้หลักการเดียวกันกับการรับแรงของ โครงข้อหมุน คือ เหล็กเสริมตามยาว (Longitudinal Reinforcement) ทำหน้าที่รับแรงดึง และคอนกรีตด้านบน และคอนกรีตในแนวทแยงทำหน้าที่รับแรงอัด และถ้าปริมาณเหล็กเสริมตามยาวเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย Ritter (1952) กล่าวว่า แรงดึงในแนวทแยงคือการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก แรงเฉือนจะเกิดจากการดึงในแนวทแยง ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว (Longitudinal Reinforcement) ก็มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ถ้าปริมาณเหล็กเสริมตามยาวเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตก็จะเพิ่มขึ้นตามด้วย และจากการที่ได้ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล Talbot ได้สรุปว่า เมื่อสัดส่วนของช่วงแรงเฉือน: ความลึกประสิทธิผลลดลงโดยขนาดหน้าตัดของคานตัวอย่างเท่ากัน และความยาวเท่ากันกำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้น

Kani (1967) ได้ทำการทดลองคานคอนกรีตจำนวน 4 ตัวอย่างโดยที่ค่า fc' และค่า ρ คงที่และแปรค่าของความลึกหน้าตัดคานใช้ต่าง ๆ กันคือ 6, 12, 24, และ 48 ได้ผลสรุปว่าคานขนาดใหญ่สุดเมื่อเทียบกับเล็กสุดอัตราส่วนความปลอดภัยลดลง 40 % จากของคานเล็ก ซึ่งเป็นอิทธิพลจากค่าความลึกของหน้าตัดนั่นเอง

Rajagopalan and Ferguson (1968) ได้กล่าวว่า เมื่อปริมาณเหล็กเสริมตามยาว ต่ำกว่า 1.2-1.5% กำลังรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด

Mathey and Watstein (1963) ได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) 1.5-3.8 และใช้เหล็กเสริมมีช่วงกำลังคลากระหว่าง 2813-7037 กก./ซม² พบว่า ค่าอัตราส่วนของช่วงคานต่อความลึกเดียวกันนั้น กำลังรับแรงเฉือน ณ จุดแตกร้าวจากการดึงในแนวทแยง จะลดลงแบบเป็นเส้นตรง

Keun et al. (2003) ได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตกำลังสูง ชนิด คานลึก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d) 0.5 และ 1.0 โดยใช้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 800 กก./ซม² พบว่าค่า $a/d = 0.5$ จะมีค่าผลจากอิทธิพลของหน้าตัดน้อยกว่าค่า $a/d = 1.0$ ในปัจจุบัน ACI 318-89 ได้กำหนดสมการกำลังรับแรงเฉือนคือ

$V_c = (0.5(fc')^{1/2} + 176 \rho V_d/M) bd$ ซึ่งได้กำหนดให้ใช้สำหรับคอนกรีตกำลังอัดประลัยระหว่าง 384-996 กก./ซม² และปริมาณเหล็กเสริมตามยาว ρ (Longitudinal Reinforcement) อยู่ระหว่าง 1.77-6.64 %

Animesh (1997) ได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตกำลังสูง โดยใช้คานคอนกรีตขนาดหน้าตัด 15x30 ความลึกประสิทธิภาพ 24 ซม. ความยาวทั้งหมดของคาน 250 ซม. และช่วงคานยาว 210 ซม. ใช้ช่วงรับแรงเฉือนเท่ากับ 90 ซม. ผลจากการทดสอบพบว่าสามารถรับแรงเฉือนประลัยได้ 9.32 ตัน และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการ ACI 318-89 แล้วพบว่ายังให้ในเรื่องการอนุรักษ์อยู่หรือค่อนข้างปลอดภัยค่อนข้างมาก

กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดที่เสริมเหล็กปลอก

กำลังรับแรงเฉือนที่เหล็กปลอกรับนั้น จะใช้วิธีโครงข้อหมุนอุปมัย (Truss Analogy) โดยจะกำหนดให้รอยแตกร้าวที่ 45° ใช้ในการออกแบบจะสมมุติให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกร้าวในแนวทแยงแทนด้วย Truss ที่มีจุดต่อแบบยึดหมุน (Hinge) และเหล็กปลอกนั้นจะถูกแรงกระทำ เหล็กปลอกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถมีแรงปฏิกิริยาต่อแรงเฉือนในแนวราบเหมือนกับเหล็กเสริมในคานไม้ Kami (1969) ได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตจำนวน 44 ตัวอย่าง และแปรเปลี่ยนปริมาณในการเสริมเหล็กปลอกมีจุดประสงค์ให้เกิดจุดรองรับสำหรับโครงสร้างโค้ง (Arch Action) รอยแตกในแนวทแยงเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ เพราะอาจจะทำให้เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด ควรเสริมสิ่งที่สามารถต้านทานรอยแตกดังกล่าวให้มากที่สุดพอ และได้แนะนำให้เสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือน 2 ใน 3 ส่วนของแรงเฉือนภายนอก

Bresler and Scordelis (1963) ได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 12 ตัวอย่าง โดยใช้ $r_f y$ (ปริมาณการเสริมเหล็กปลอก) เป็นดังนี้คือ 0, 3.5, 5.25, และ 7 กก./ชม² และใช้ช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d) 4, 5 และ 7 ได้ผลการทดลองว่าใช้ ปริมาณเหล็กปลอกแค่เพียงเล็กน้อยก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ ในการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตได้มากขึ้น และยังลดความเสี่ยงเนื่องจากการวิบัติจากแรงเฉือนทันทีทันใดได้

มาตรฐานการออกแบบคานรับแรงเฉือน

มาตรฐานในการออกแบบ ACI 318-89

กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเหล็กปลอกโดย ACI 318-89 ได้อธิบายไว้ว่าคือกำลังเฉือนของคานคอนกรีตที่เกิดขึ้น ณ จุดที่เกิดการแตกร้าวแบบแนวทแยงปรากฏขึ้น สมการที่ได้จากการทดสอบคานคอนกรีตเป็นจำนวน 440 ตัวอย่าง ทาง ACI ได้เสนอสมการรับแรงเฉือนคือ

$$V_c = (0.5fc'^{1/2} + 176 \rho V_d/M_u)bd \leq 0.93fc'^{1/2}bd \text{ (kg)}$$

$$\text{โดยที่ } M_u/V_u = (M_{\max}/V - d) \geq (M_{\max}/V - a/2)$$

และเพื่อความสะดวกในการคำนวณ ACI ได้กำหนดกำลังรับแรงเฉือนแบบประมาณ ซึ่งเป็นค่าอนุรักษ์ สมการรับแรงเฉือนคือ

$$V_c = (0.53fc')^{1/2}bd \text{ (kg)}$$

กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตที่เสริมเหล็กปลอกจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ กำลังรับแรงเฉือนส่วนที่เป็นคอนกรีต และกำลังรับแรงเฉือนส่วนของเหล็กปลอก สมการที่ได้คือ

$$V_u = V_c + V_s$$

$$V_u = V_c + A_v f_y d/s$$

$$V_s = A_v f_y (\sin\alpha + \cos\alpha) d/s$$

หรืออยู่ในรูปหน่วยรับแรงเฉือนคือ

$$v_u = v_c + v_s$$

โดย ACI 318-89 ได้กำหนดปริมาณเหล็กปลอกเป็นหน่วยแรง/พื้นที่หน้าตัดคานคอนกรีต ในการเสริมด้วยปริมาณต่ำสุดคือ

$$v_{s \text{ min}} = 3.5 \text{ kg/cm}^2$$

ACI 318-89 ได้กำหนดมาตรฐานในการเสริมจำนวนเหล็กปลอกต่ำที่สุด คือ ($r_{fy} = 3.5$ กก./ซม²) เพื่อป้องกันมิให้เกิดรอยร้าวในแนวทแยงมากเกินไปที่สภาวะประลัยก่อนที่เหล็กเสริมตามขวางจะเกิดการคลาก และป้องกันการอัดระเบิดของคอนกรีตระหว่างเสริมเหล็กตามขวาง ACI ได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบ โดยกำหนดค่าสูงสุดของกำลังคลากเป็น 4,200 กก./ซม² เมื่อคิด $V_s = 2.1(fc')^{1/2}$ และถ้าคิด $V_c = 0.5(fc')^{1/2}$ พบว่า $V_u = 2.61(fc')^{1/2}$ ความกว้างของรอยร้าวทแยงจะเป็น 0.015 ซม.(Kani, 1969)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. ทราช
3. หิน
4. เหล็กเสริม
5. ไม้แบบ
6. น้ำมันทาแบบ
7. สารลดน้ำประเภท High Range Water Reducing
8. Silica fume
9. น้ำ
10. Hydraulic jack
11. dial gages
12. data logger
13. computer
14. strain gage

1. ปูนซีเมนต์

เป็นปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตราช้างแดง มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.

15-2514/2517

2. ทราช

เป็นทรายหยาบ ค่าละเอียดโมดูลัส 2.8

3. หิน

ใช้หินขนาด 3/4 นิ้ว 60% และ หิน 3/8 นิ้ว 40% ทำความสะอาดเพื่อผลการทดลองที่แม่นยำ

4. เหล็กเสริม

เหล็กเสริมรับแรงดึงใช้เหล็กข้ออ้อย ขนาด 12 มิลลิเมตร เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 24-2527 SD-40 มีกำลังคลาก (f_y) ไม่น้อยกว่า 4,000 กก./ ซม^2 และมีความสามารถรับแรงดึงประลัย (f_u) ได้ไม่น้อยกว่า 5,700 กก./ ซม^2 โดยทำการทดสอบได้ผลการทดสอบมีกำลังคลาก 4,830.65 กก./ ซม^2 และกำลังรับแรงดึงประลัย 6,120.98 กก./ ซม^2 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 2.2×10^6 ในการศึกษาเพื่อให้คานวิบัติด้วยแรงเฉือนจึงใช้เหล็กรับแรงดึงมากกว่าปกติ 2 และ 4 เส้น ที่แรงเฉือนค่าที่ต่างกัน เหล็กปลอกใช้เหล็กเสริมขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นไปตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 20-2524 SR 24 มีกำลังคลาก (f_y) ไม่น้อยกว่า 2,400 กก./ ซม^2 และมีความสามารถรับแรงดึงประลัย (f_u) ได้ไม่น้อยกว่า 3,900 กก./ ซม^2 จากการทดสอบได้ผลการทดสอบมีกำลังคลาก 4,120.34 กก./ ซม^2 และกำลังรับแรงดึงประลัย 5,197.88 กก./ ซม^2 โมดูลัสยืดหยุ่น 2.05×10^6

5. ไม้แบบ

ใช้ไม้เนื้อแข็งหนา 3/4 นิ้ว มาประกอบเป็นแบบสำหรับเทคอนกรีต ใช้เหล็กฉากยึด 3 ช่วงระหว่างด้านข้างกับท้องคานหนึ่งด้าน ส่วนอีกด้านใช้นอตและหางปลายึดกับท้องคานเพื่อสะดวกในการประกอบ และในการถอดแบบเพื่อนำตัวอย่างไป บ่มด้วยน้ำ

6. น้ำมันทาแบบ

น้ำมันทั่วไปใช้ทาแบบเพื่อให้ถอดตัวอย่างที่จะทดสอบได้ง่ายขึ้น

7. สารลดน้ำประเภท High Range Water Reducing

เป็น Super Plasticizer ประเภท High Range Water Reducing Type F มาตรฐาน ASTM C 494-81 เพื่อสะดวกในการเทคอนกรีต และสามารถลดน้ำในการผสมคอนกรีตได้ เป็น Super Plasticizer ประเภท เมลามีน ซัลโฟเนต ให้ผลในการลดน้ำอย่างมากช่วยเร่งการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้น ระยะเวลา 16-18 ชั่วโมงของคอนกรีตสูงขึ้น และจะปรับปรุงคอนกรีตขณะเหลวให้มีความสามารถไหลตัวสูงตัวน้ำยามีสีน้ำตาล และความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 1.19-1.21 กก./ลิตร

8. Silica Fume

ใช้ 10 % ของปริมาณปูนซีเมนต์ เนื่องจากเป็นวัสดุแทรกขนาดเล็กลงจึงเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเนื้อปูนได้ดี สามารถเกิดปฏิกิริยาพอซโซลานทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

9. น้ำ

ใช้น้ำประปาในการผสมคอนกรีต

10. Hydraulic Jack

เป็นแม่แรงชนิด ส่งผ่านน้ำหนักกระทำได้ถึง 150 ตัน

11. dial gages

ใช้เพื่อวัดการโก่งตัวของคานคอนกรีต ความละเอียดถึง 1 ใน 1000

12. data logger

ใช้เชื่อมต่อกับ computer และ สายของ Strain Gage โดยข้อมูลในการส่งข้อมูลการยืดของเหล็กเสริมจะส่งมาทางสายที่เชื่อมต่อระหว่างตัว data logger กับ Strain Gage

13. computer

ใช้เชื่อมต่อกับตัว data logger เพื่อรับข้อมูลความเครียดที่ส่งผ่านมาทางสาย Strain Gage และทำการบันทึกข้อมูลที่ได้รับมาเป็นตัวเลข และเป็นกราฟ

14. Strain Gage

ใช้ติดกับเหล็กเสริมตามยาว และเหล็กปลอกเพื่อจะได้ทราบและทำการบันทึกความเครียดของเหล็กเสริมที่อ่านได้จาก data logger Strain Gage ที่ใช้เป็นชนิดที่มีความต้านทาน 120Ω และ Gage Factor 2.1 Gage length 5 mm เมื่อทำการติด Strain Gage กับเหล็กเสริม และเหล็กปลอกแล้วจะทำการปิดทับด้วยเทปชนิดพิเศษ เพื่อป้องกันความเสียหายจากการเทคอนกรีตลงในแบบ และป้องกันความชื้นในการบ่มตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ

วิธีการ

รายละเอียดวิธีการ

สัดส่วนในการผสม

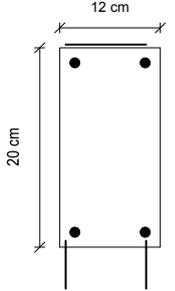
จากการทดสอบพบว่า อัตราส่วนในการผสมที่ได้ คือ ปูน:ทราย:หิน:น้ำ คือ 1:1.375:1.8:0.249 หน่วยเป็นกิโลกรัม ใช้ W/B 0.226 และใช้ Super Plasticizer 2.42 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ คิดเป็นปูน 1 ลูก (50กก.) ใช้ ทราย 68.75 กก. หิน 90 กก. น้ำ 12.43 กก. Silica Fume 5 กก. Super Plasticizer 1.21 กก. Type F

การเตรียมตัวอย่างในการทดสอบ

คานที่ใช้ในการทดสอบ $a/d = 3$ เมื่อทำการคำนวณแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด ในการทดลองเป็นการศึกษาเรื่องแรงเฉือนของคานคอนกรีต เพื่อให้คานคอนกรีตที่ทดสอบวิบัติด้วยแรงเฉือนวิกฤตซึ่งอยู่ในช่วง 2000 – 2400 กก. จึงได้ทำการเสริมเหล็กรับแรงดึงให้มากกว่าปกติ คือ 2 เส้น คือ B1, B3, B1* 4 เส้นคือ B5, B7, B7*

คานที่ใช้ในการทดสอบ $a/d = 1.5$ เมื่อทำการคำนวณแรงเฉือนและ โมเมนต์ค้ด ในการทดลอง เป็นการศึกษาเรื่องแรงเฉือนของคานคอนกรีต เพื่อให้คานคอนกรีตที่ทดสอบวิบัติด้วยแรงเฉือน วิกฤตซึ่งอยู่ในช่วง 2200 – 2600 กก. จึงได้ทำการเสริมเหล็กรับแรงดึงให้มากกว่าปกติ คือ 2 เส้น คือ B2, B24 เส้นคือ B4, B6, B8, B8*

ตารางที่ 1 Test program for shear of RC-Beam

Specimen No.	a/d	Web-reinforcement	$\rho_w(\%)$	$\rho(\%)$	f_c' (ksc)	remarks
B1	3	RB 6 @ 280 mm	0.167	1.26	694 ksc	
B3	3	RB 6 @ 240 mm	0.194	1.26	665 ksc	
B5	3	RB 6 @ 160 mm	0.292	2.51	630 ksc	
B7	3	RB 6 @ 80 mm	0.583	2.51	642 ksc	
B1*	3	0	0	1.26	750 ksc	
B7*	3	RB 6 @ 80 mm	0.583	2.51	780 ksc	
B2	1.5	RB 6 @ 280 mm	0.167	1.26	675 ksc	
B4	1.5	RB 6 @ 240 mm	0.194	2.51	762 ksc	
B6	1.5	RB 6 @ 160 mm	0.292	2.51	750 ksc	
B8	1.5	RB 6 @ 80 mm	0.583	2.51	752 ksc	
B2*	1.5	0	0	1.26	905 ksc	
B8*	1.5	RB 6 @ 80 mm	0.583	2.51	767 ksc	

หมายเหตุ B1*, B2* เสริมเหล็กเสริมรับแรงดึงเช่นเดียวกับ B1, B2 แต่ไม่ได้เสริมเหล็กปลอก
B7*, B8* เสริมเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กปลอกเช่นเดียวกับ B7, B8

ในการเตรียมตัวอย่างนั้นจะเริ่มจากเตรียมแบบหล่อตัวอย่างคาน โดยจะเริ่มทำความสะอาดแบบหล่อหลังจากนั้นจะประกอบแบบหล่อตัวอย่างคานเข้าด้วยกัน และทาน้ำมันเพื่อความสะดวกในการถอดแบบ และทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก จำนวน 6 ตัวอย่าง ในการเทคอนกรีตแต่ละครั้ง ซึ่งมีทั้งหมดเป็นจำนวน 12 ครั้ง และในการเตรียมแบบตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกก็ทำความสะอาด ทาน้ำมัน และประกอบเข้าด้วยกันเช่นเดียวกับแบบหล่อตัวอย่างคาน และในการเทคอนกรีตแต่ละครั้งนั้นใช้คอนกรีตประมาณ 0.091m^3 โม่ซึ่งใช้ในการผสมคอนกรีตมีความจุ 0.167 m^3 เมื่อเตรียมทรายที่จะใช้ในการผสมคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว จะทำการเตรียมหินคือหินขนาด $3/4$ นิ้ว : หินขนาด $3/8$ นิ้ว เป็นอัตราส่วน 6:4 และจะทำความสะอาดหินที่เตรียมให้สะอาด สังกัดจากน้ำที่ใช้ล้างจนน้ำ เริ่มใส หลังจากนั้นจะทำการล้างโม่ด้วยน้ำ และเทหินกับ ทรายที่สะอาดแล้วลงไปโม่ แล้วทำการผสมให้เข้ากัน เมื่อหินและทรายเข้ากันดีแล้วจะใส่ปูน Type 1 และ Silica Fume ลงไปโม่แล้วผสมแล้วทำการผสมหิน ทราย ปูน และ Silica Fume ให้เข้ากันอีกครั้งหนึ่งเมื่อหิน ทราย ปูน และ Silica Fume ผสมเข้ากันดีแล้ว จะค่อย ๆ ใส่น้ำ ซึ่งผสมกับ Super Plasticizer ลงไปในโม่คอนกรีต

ระหว่างทำการผสมต้องค่อย ๆ เติมน้ำที่ผสมน้ำยาที่ละน้อย ๆ จนได้คอนกรีตที่ต้องการลักษณะของคอนกรีตที่ผสมได้ จะมีลักษณะความชื้นของคอนกรีตสูงและจับตัวกันค่อนข้างเหนียวมากแต่การไหลตัวดีมาก หลังจากนั้นทำการเทลงกระบะแล้วตัวใส่แบบคานตัวอย่าง คอนกรีตที่ผสมได้มีการไหลตัวที่ดี ดังนั้นจึงแทบไม่ต้องใช้เครื่องจี้ให้แน่น เมื่อเทลงในแบบคานตัวอย่างจนเต็มและคอนกรีตส่วนที่เหลือจะใส่ในตัวอย่างทรงกระบอก หลังจากนั้นทิ้งไว้สัก 10-15 นาที จะทำการปาดหน้าคอนกรีตที่ได้เทลงแบบไปแล้ว เมื่อครบ 24 ชั่วโมง จะทำการถอดคานตัวอย่างออกจากแบบตัวอย่าง และถอดตัวอย่างทรงกระบอกออกจากตัวอย่างทรงกระบอก และนำไปปอมในถังน้ำ

ตัวอย่างทรงกระบอกจะทำการทดสอบที่ 1 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ส่วนตัวอย่างคานคอนกรีตจะทำการทดสอบอายุที่ 28 วัน หลังจากนั้นจะเอาตัวอย่างขึ้นจากบ่อบ่มคอนกรีตเมื่อผิวคอนกรีตแห้งแล้วจะทาด้วยปูนขาว เพื่อที่จะสังเกตเห็นรอยแตกร้าวได้ง่ายขึ้น จากนั้นจะนำไปตั้งบนฐาน Simply Support และ Check ระดับของตัวอย่างคานคอนกรีต และตำแหน่งของตัวถ่วงน้ำหนักกระทำคู่ (Two Point Load) ที่จะกระทำบนตัวอย่างคานคอนกรีต เมื่อได้ตำแหน่งที่ถูกต้องแล้ว ก็จะนำแม่แรงมาวางบนตัวให้น้ำหนักกระทำซึ่งต้องให้ลงตรงตำแหน่งตรงกลางพอดีของตัวถ่วงน้ำหนักกระทำคู่

นำ Load Cell มาตั้งบน แม่แรงอีกทีหนึ่งซึ่งระหว่าง Load Cell กับแม่แรงนั้นควรมีแผ่นเหล็กรองรับไว้เพื่อในการถ่ายน้ำหนักที่สมบูรณ์ และตรวจสอบว่า แม่แรงและ Load Cell อยู่ในแนวตั้งทุก ๆ ด้าน หลังจากนั้นต่อสาย Load Cell เข้าเครื่องแปลงสัญญาณ (ดังแสดงในรูป....) จาก Load Cell ซึ่งเครื่องแปลงสัญญาณจะต่อระหว่าง Load Cell กับ Volt meter ซึ่งจะแปลงน้ำหนักกระทำน้อยเป็นกิโลกรัมออกมาเป็นโวลต์ในการทดสอบจะตั้งค่าความต่างศักย์ไว้ที่ 4.5 โวลต์ ซึ่ง จะเท่ากับน้ำหนัก 0 กิโลกรัม โดยเวลาทดสอบน้ำหนักจากแม่แรงจะส่งผ่าน Load Cell แล้วสัญญาณที่ เครื่องแปลงส่งไปยังโวลต์มิเตอร์จะลดลงเรื่อย ๆ ถ้าโวลต์มิเตอร์อ่านค่าได้ 4.48 โวลต์ น้ำหนักกระทำก็จะคือ 100 กิโลกรัม คือ น้ำหนักกระทำ 100 กิโลกรัม ค่าความต่างศักย์จะลดลง 0.02 โวลต์

จากนั้นจะต่อสาย Strain Gage ที่ติดกับเหล็กเสริม และเหล็กปลอกในคานตัวอย่างเข้ากับ Data logger และต่อ Data logger เข้ากับ Computer เพื่อดูผลของค่า Strain ที่ได้จากการทดสอบ ในการให้น้ำหนักกระทำแต่ละครั้ง และทำการบันทึกไปพร้อม ๆ กันด้วย ซึ่งจะทำการบันทึกค่า ความเครียด (Strain) ต่อหนักกระทำที่ต้องการแต่ละครั้ง

วัดระยะการโก่งตัวของคานคอนกรีตตัวอย่างด้วย Dial gage ซึ่งมีความละเอียดถึง 0.001 มม. จะทำการติดตั้งที่กึ่งกลางคานคอนกรีต 1 ตัว

วิธีการทดสอบ

การวิจัยนี้จะทำการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตคุณภาพสูง โดยกำลังอัดประลัยของคอนกรีต f_c' อยู่ในช่วง 630 -905 กก./ซม² จำนวนทั้งสิ้น 12 ตัวอย่าง (ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก5)

เมื่อทำการ ติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบเรียบร้อยแล้ว จะทำการทดสอบ คือให้น้ำหนักกระทำครั้งละ 500 กิโลกรัม โดยจะอ่านจากโวลต์มิเตอร์ ซึ่งจาก 4.5 โวลต์ จะลดลงมาที่ 4.4 โวลต์ และจะทำการบันทึกค่า Strain 500 ค่าของเหล็กเสริมรับแรงดึง และเหล็กปลอกพร้อมกับบันทึกค่าการโก่งตัวไปด้วย จะทำการบันทึกโดยการเพิ่มน้ำหนักกระทำที่ละ 500 กิโลกรัมไปเรื่อย ๆ จนเห็นรอยแตกในแนวทแยงเกิดขึ้นหลังจากนั้นจะทำการบันทึกค่าโดยเพิ่มน้ำหนักที่ละ 200 กิโลกรัม

จนกระทั่งเห็นรอยร้าวแตกเฉียงเพิ่มมากขึ้น จนใกล้เคียง หรือถึงตำแหน่งที่ให้น้ำหนัก 2 จุด (Two Point Load) กับคานตัวอย่าง

ผลการทดสอบของคอนกรีตทรงกระบอกซึ่งจะทำการทดสอบที่ 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน เป็นคอนกรีตที่เก็บมาพร้อมกับการผสมในการเทแต่ละครั้ง ซึ่งมีทั้งหมดเป็นจำนวน 12 ตัวอย่าง (ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก3)

ผลและวิจารณ์

ผล

ผลการทดลอง

$$(a/d = 3)$$

คาน B1

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีต จนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 4 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัด และรอยร้าวเนื่องจากแรงคัดจะเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเพิ่มน้ำหนักถึง 5.4 ตัน จะเกิดรอยร้าวแบบทแยงปรากฏขึ้นในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) (ดังแสดงในรูปการทดสอบที่ 11, 12 และ 13) เมื่อให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ รอยแตกร้าวแบบทแยงก็จะเกิดมากขึ้น และมีทิศทางพุ่งเข้าสู่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำกับคานคอนกรีตตัวอย่าง เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีตจนถึง 6.4 ตัน การโก่งตัวของคานคอนกรีตตัวอย่างจะเพิ่มมากขึ้น และรอยแตกร้าวแบบทแยง ก็เพิ่มจำนวนขึ้นจนกระทั่งอ่านน้ำหนักได้ 5.9 ตันจะเกิดรอยแตกลักษณะคล้ายกับ (Arch) โโค้ง และคานคอนกรีตตัวอย่างถึงจุดที่วิบัติ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียด ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัดจะเกิดขึ้นตอนให้น้ำหนักกระทำ 4 ตัน (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข70) และความเครียดของเหล็กเสริมที่รับแรงดึงจะอ่านได้คือ 0.00176 อ่านค่าความเครียดของเหล็กปลอกค้ำยันซ้ายมือและขวามือ (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข69, ข71) ในช่วงแรงเฉือนค่าที่อ่านได้คือ 0.00026 และ 0.000203 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำ และการโก่งตัวช่วง 0-2 ตัน ความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรง แต่หลังจากน้ำหนักกระทำเท่ากับ 2.2 ตัน กราฟจะเบนเล็กน้อยแต่ยังคงเป็นเส้นตรง จนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 6.4 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะการโก่งตัวคือ กราฟจะค่อย ๆ แบนราบลงขนานไปกับแกนในแนวราบ (X, ระยะการโก่งตัว) (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข68) ซึ่งคือน้ำหนักแทบจะไม่เพิ่มหรือไม่เพิ่มเลย แต่การโก่งตัวยังคงดำเนินต่อไป (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข68)

คาน B 3

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีตตัวอย่าง เมื่อให้น้ำหนักกระทำไปจนกระทั่งถึง 2.5 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัต และรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตจะเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งถึง 4.5 ตัน จะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัต และรอยแตกร้าวแบบทแยงก็ปรากฏขึ้นพร้อม ๆ กันด้วยในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) (ดังแสดงในรูปการทดสอบที่ 19-22) เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำไปเรื่อย ๆ จนถึง 5.5 ตัน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตจะไม่ปรากฏ แต่จะมีรอยร้าวเนื่องจากแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ รอยร้าวเนื่องจากแรงคัตที่ไม่อยู่ในแนวกึ่งกลางคานคอนกรีตตัวอย่างจะเริ่มโค้งเป็นเส้นทแยง และเมื่อน้ำหนักกระทำถึง 6.00 ตัน จะเกิดรอยร้าวแบบทแยงที่วิ่งจากฐานรองรับมีทิศทางไปสู่ ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ เมื่อน้ำหนักกระทำถึง 7.5 ตัน รอยร้าวแบบทแยงจากฐานรองรับก็วิ่งถึงตำแหน่งน้ำหนักกระทำโดยสมบูรณ์มีลักษณะของรอยแตกร้าวคล้ายกับแบบ (Arch) โคง เมื่อให้น้ำหนักกระทำถึง 7.7 ตัน คือน้ำหนักสูงสุดที่คานคอนกรีตตัวอย่างสามารถรับได้ หลังจากนั้นน้ำหนักกระทำที่ให้จะไม่เพิ่มและมีแนวโน้มคงที่หรือลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียด ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตจะเกิดขึ้นตอนน้ำหนักกระทำ 2.5 ตัน และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่อ่านได้คือ 0.000594 หลังจากนั้นเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มเป็น 4.5 ตัน จะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตมากขึ้นและเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนขึ้นเป็นครั้งแรกด้วย ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่อ่านได้คือ 0.0013 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงรับแรงเฉือน (Shear Span) ทางซ้ายและขวามีค่าอ่านได้คือ 0.000172 และ 0.000087 เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปจนกระทั่งถึง 5.5 ตัน จะมีแต่รอยแตกทแยงเพิ่มขึ้นเท่านั้น ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง คือ 0.00167 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน อ่านค่าได้ 0.00056 และ 0.00086 และในที่สุดเมื่อให้น้ำหนักกระทำจนน้ำหนักกระทำถึง 6 ตัน จะเกิดรอยร้าวแบบแตกทแยงจากฐานรองรับคานวิ่งไปสู่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำแบบสมบูรณ์ หลังจากนั้นน้ำหนักกระทำที่ให้กับคานคอนกรีตตัวอย่างแทบจะคงที่หรือลดลงเล็กน้อย ค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่อ่านได้คือ 0.0022 และค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ที่อ่านได้คือ 0.0015 และ 0.0019 น้ำหนักที่กระทำ 7.5 ตัน (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข77, ข78 และ ข79)

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัว ในช่วงน้ำหนักกระทำ 0-2 ตัน ความสัมพันธ์จะเป็นแบบเส้นตรง หลังจากนั้นน้ำหนักกระทำ 2-5 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัว ยังคงเป็นเส้นตรงดังเดิมแต่ความชันจะลดลงเล็กน้อย ช่วงน้ำหนักกระทำ 5-7.5 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวยังคงเป็นเส้นตรงดังเดิม แต่ความชันก็จะน้อยลงไปอีก จนกระทั่งน้ำหนักกระทำถึง 7.5 ตันเป็นต้นไปจนถึง 7.7 ตัน ความสัมพันธ์เริ่มเป็นเส้นโค้ง (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข76) ความชันลดลงมาก คือน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่การโก่งตัวเกิดมากขึ้น

คาน B5

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีตเมื่อให้น้ำหนักกระทำ จนกระทั่งถึง 4 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวที่ท้องคานคอนกรีตอันเนื่องจากแรงดัดและรอยแตกร้าวแบบแรงดัดจะปรากฏชัดเจนและเพิ่มจำนวนมากขึ้นที่น้ำหนักกระทำ 6.5 ตัน และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยจนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 8 ตัน จะปรากฏรอยแตกร้าวแบบทแยงในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ของคานคอนกรีตตัวอย่างเป็นครั้งแรก เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกจะเกิดรอยแตกร้าวแบบทแยงปรากฏขึ้นจากที่ตำแหน่งฐานรองรับคาน (Support) ซึ่งมีทิศทางมุ่งไปยังตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) แต่ยังเป็นรอยแตกทแยงเล็ก ๆ และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดแทบจะไม่ปรากฏหรือไม่ปรากฏให้เห็นจะมีแต่รอยแตกร้าวแบบทแยงในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) และรอยแตกร้าวทแยงซึ่งเกิดจากตำแหน่งฐานรองรับคานคอนกรีตตัวอย่างเพิ่มมากขึ้นและชัดเจนขึ้น (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข 27-30) เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 10.4 ตัน รอยแตกแบบทแยงจากฐานรองรับยิ่งชัดเจนและยาวขึ้น และ วังตรงเข้าหาตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) โกล้มมากขึ้นทุกทีมีลักษณะเป็นรูปโค้ง (Arch Action) เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำไปจนถึง 10.8 ตัน การพัฒนาของรอยแตกแบบทแยงที่เกิดจากฐานรองรับ ก็ยาวขึ้นอีกและความกว้างของรอยแตกก็จะกว้างขึ้นและวังมาบรรจบที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำพอดี (Two Point Load) ที่ทั้งสองจุดในช่วงแรงเฉือนคือ ด้านซ้ายและด้านขวา เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกจะกระทั่งถึง 12.2 ตัน จะเป็นน้ำหนักสูงสุดต่อจากนั้นน้ำหนักกระทำที่กระทำต่อคานคอนกรีตตัวอย่างค่อนข้างจะคงที่หรือลดลง แต่การโก่งตัวจะมากขึ้นเรื่อย ๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียด (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข 85-87) ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำจะเกิดขึ้นต่อน้ำหนักกระทำถึง 4 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำที่อ่านได้คือ 0.000099 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำจะมากขึ้นเรื่อย ๆ จนน้ำหนักกระทำถึง 6.5 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำที่อ่านได้คือ 0.000513 หลังจากนั้นก็เพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีก รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำก็จะเพิ่มขึ้นและปรากฏชัดขึ้น เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 8 ตัน จะประจากรอยแตกแบบทแยงขึ้นเป็นครั้งแรกในช่วงแรงเฉือนของคานคอนกรีตตัวอย่าง (Shear Span) และอ่านค่าความเครียดของเหล็กเสริมเนื่องจากแรงค้ำได้คือ 0.00067 ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) อ่านได้ 0.000064 และ 0.000013 เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีก รอยแตกเนื่องจากแรงค้ำจะน้อยลงและจากรอยแตกแบบแรงค้ำจะพัฒนารอยแตกแนวแตกที่ต่อจากของเดิมจะเริ่มเฉียงเป็นแนวทแยงเข้าหาตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) ต่อกาน ส่วนรอยแตกแบบทแยงที่เกิดขึ้นในช่วงแรงเฉือน ก็จะปรากฏจำนวนมากขึ้นเรื่อย ๆ และยาวขึ้นเมื่อน้ำหนักกระทำดำเนินมาถึง 10.4 ตัน จะปรากฏรอยแตกแบบทแยงขึ้นจากตำแหน่งฐานรองรับของคานคอนกรีตตัวอย่างทั้ง 2 ข้าง มีทิศทางวิ่งเข้าหาตำแหน่งของน้ำหนักกระทำ แต่ยังเป็นรอยที่ยังไม่ยาวและกว้าง สามารถอ่านความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน อ่านได้ คือ 0.00072 และ 0.00066 เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปจะมีรอยแตกแบบทแยงขนานกับรอยแตกทแยงที่เกิดจากตำแหน่งฐานรองรับทั้งสองข้าง (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข32 และ ข33) เมื่อน้ำหนักกระทำดำเนินต่อไป รอยแตกทแยงจากฐานรองรับทั้งสองข้างจะวิ่งไปใกล้กับน้ำหนักกระทำ และรอยแตกทแยงที่ขนานกับรอยทแยงจากฐานรองรับก็จะวิ่งยาวขึ้นไปในทิศทางขนานกัน จนกระทั่งน้ำหนักกระทำถึง 12.2 ตัน สามารถอ่านค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำสามารถอ่านค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำได้เท่ากับ 0.0023 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ในช่วงแรงเฉือนทั้งสองข้างคือ 0.0013 และ 0.0014

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคานB5 (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข 84) ช่วงแรกระหว่างน้ำหนักกระทำ0-8.8 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและการโก่งตัวจะเป็นเส้นตรงและเมื่อน้ำหนักกระทำต่อไปอีก 9-11.2 ตัน ความสัมพันธ์ยังคงเป็นเส้นตรงเหมือนเดิม แต่ความชันของกราฟจะลดลงเล็กน้อย และช่วง 11.4 ตันเป็นต้นไปความสัมพันธ์จะเริ่มเป็นเส้นโค้งชัดเจน และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกจะได้น้ำหนักสูงสุดคือ 12.2 ตัน หลังจากนั้นน้ำหนักกระทำที่ส่งผ่านแม่แรงไปกระทำต่อกานคอนกรีตตัวอย่างจะคงที่สักพัก แต่การโก่งตัวยังดำเนินต่อไป และได้ค่าการโก่งตัวสูงสุดคือ 5.98 มม.

คาน B7

ในการทดสอบ จะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคอนกรีตตัวอย่าง เมื่อให้น้ำหนักกระทำไปจนกระทั่งถึง 4 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวที่ตรงกลางคานคอนกรีตตัวอย่างอันเนื่องจากแรงคัต และรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตก็เพิ่มจำนวน และความยาวขึ้นจน น้ำหนักกระทำถึง 5.5 ตัน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตก็เพิ่ม พร้อมทั้งเกิดรอยแตกร้าวแบบทแยงขึ้นเป็นครั้งแรก ณ ตำแหน่งถัดจากฐานรองรับ (Support) เข้ามาด้านในทั้งสองข้างในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ของคานตัวอย่างคอนกรีต (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข38) และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มจนถึง 6.5 ตัน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ปรากฏว่ารอยแตกร้าวแบบทแยงที่อยู่ระหว่างจากฐานรองรับ (Support) กับตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) ที่ได้แตกมาก่อนหน้านี้แล้วจะแตกและวิ่งยาวออกไปที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) เมื่อทำการส่งแรงจากแม่แรงผ่านไปยังตำแหน่งน้ำหนักกระทำต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งน้ำหนักกระทำถึง 8 ตัน รอยแตกร้าวแบบทแยงที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้น ก็ยังวิ่งเข้าใกล้ตำแหน่งน้ำหนักกระทำทุกที และมีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นใหม่อีกสองตำแหน่งซึ่งตรงกับตำแหน่งฐานรองรับ (Support) (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข40) แบบทแยงคู่ขนานไปกับรอยแตกทแยงก่อนหน้านั้น เมื่อแรงที่ส่งจากแม่แรงไปผ่านกับตำแหน่งน้ำหนักกระทำจนกระทั่งถึง 9 ตัน (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข38, ข39 เช่นกัน) รอยแตกสองรอยแบบทแยงที่ตรงกับฐานรองรับ (Support) คานคอนกรีตตัวอย่าง จะแตกยาวและมุ่งหน้าเข้าไปใกล้ที่ตำแหน่งของน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) และกินระยะเกินครึ่งหนึ่งของหน้าตัดคานคอนกรีตตัวอย่างทั้งสองช่วงแรงเฉือน จนในที่สุดเมื่อแม่แรงซึ่งเป็นตัวส่งน้ำหนักกระทำผ่านมาถึงตำแหน่งน้ำหนักกระทำบนคานคอนกรีตตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 10.5 ตัน รอยแตกแบบทแยงซึ่งเกิดตรงฐานรองรับทั้งสองข้างและรอยแตกทแยงซึ่งถัดเข้ามาด้านในจากฐานรองรับประมาณ 1-1.5 นิ้ว จะวิ่งเป็นคู่ขนานกันไปบรรจบที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) พอดีเมื่อน้ำหนักกระทำมาถึง 10.5 ตัน หลังจากนั้นจะค่อย ๆ คงตัวและลดลงเรื่อย ๆ แต่การโก่งตัวจะเกิดขึ้นมากกว่าเก่า

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดของคานตัวอย่าง (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข93, ข94) ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตจะเกิดขึ้นตอนน้ำหนักกระทำถึง 4 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่อ่านได้คือ 0.0012 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีก รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งน้ำหนักกระทำถึง 5.5 ตัน จะปรากฏรอยแตกร้าวแบบทแยงขึ้นในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็น 0.0016

ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็น 0.00041 และเมื่อน้ำหนักกระทำถึง 6.5 ตัน รอยแตกร้าว เนื่องจากแรงคัดเพิ่มและรอยแตกร้าวแบบทแยงก็เพิ่มจำนวนขึ้น แต่มีรอยแตกร้าวที่ติดกับฐานรองรับด้านในเกิดขึ้นเป็นรอยร้าวแบบทแยงมีทิศทางมุ่งสู่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็น 0.0019 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็น 0.00067 และเมื่อน้ำหนักกระทำถึง 8 ตัน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัดจะเกิดขึ้นเล็กน้อย แต่ว่ารอยแตกร้าวในช่วงแรงเฉือนจะยาวขึ้นและเบนเข้าหา ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ รอยแตกที่อยู่ชิดกับฐานรองรับ (Support) จะวิ่งยาวออกไปกว่ารอยแตกร้าวอันอื่นมุ่งหน้าสู่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำและมีรอยแตกร้าวแบบทแยงตรงฐานรองรับแตกคู่ขนาน เมื่อน้ำหนักกระทำถึง 10.45 ตัน รอยแตกคู่ขนานที่ฐานรองรับ (Support) ก็จะวิ่งไปเกือบบรรจบที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงคือ 0.0029 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนคือ 0.0012

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคานคอนกรีตตัวอย่าง (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข92) ในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัว จะเป็นเส้นตรง เมื่อน้ำหนักกระทำถึง 10.4 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวก็จะเริ่มลดลง คือ กราฟเริ่มค้ำ และขนานกับแกนราบ (Deflection, X) กล่าวคือ น้ำหนักกระทำเพิ่มน้อยมาก แต่การโก่งตัวกลับเพิ่มขึ้นซึ่งก็คือความชันของกราฟลดลงเรื่อย ๆ (อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักกระทำต่อค่าความโก่งตัวลดลงหรือเข้าไปใกล้ศูนย์) และการโก่งตัวสูงสุดมีค่า 5.9 มม.

คาน B1*

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีตตัวอย่าง เมื่อให้น้ำหนักกระทำเพิ่มไปจนกระทั่ง 4 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวอันเนื่องมาจากแรงคัด และรอยแตกร้าวเนื่องจากรวมจะเพิ่มจำนวนมากขึ้น และสังเกตเห็นชั้นเจนขึ้นที่น้ำหนักกระทำ 4.5 ตัน และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มต่อไปอีกจนกระทั่ง 5.5 ตัน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัดจะเพิ่มมากขึ้น และรอยแตกร้าวแนวเดิมก็จะยาวขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกรอยแตกร้าวเนื่องจากอิทธิพลของแรงคัดจะไม่เพิ่มขึ้น หรือไม่เกิดขึ้นอีกเลย จนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นถึง 7.5 ตัน จะปรากฏรอยแตกร้าวในช่วงแรงเฉือน และตรงตำแหน่งฐานรองรับ (Support) คานคอนกรีตตัวอย่างมีลักษณะเป็นแนวทแยงมุ่งหน้าไปยังตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำไปจนถึง 7.9 ตัน รอยแตกร้าวแบบแนวทแยงก็จะยาวขึ้นไปบรรจบที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two

Point Load) หลังจากนั้นแม่แรงซึ่งใช้ในการส่งผ่านแรงไปยังตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) ซึ่งส่งต่อไปที่คานคอนกรีตตัวอย่างนั้นค่อนข้างจะคงที่ แต่การโก่งตัวของคานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ น้ำหนักสูงสุดของคานคอนกรีตตัวอย่างที่ทดสอบได้คือ 7.9 ตัน (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข49-ข52)

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียด (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข 100) ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำจะเกิดขึ้นตอนน้ำหนักกระทำถึง 4 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำที่อ่านได้คือ 0.0011 และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มไปจนถึง 4.5 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำที่อ่านได้คือ 0.0012 ช่วงนี้ยังเป็นช่วงที่เกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงค้ำอยู่ เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 5.5 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำที่อ่านได้คือ 0.0015 และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกจนคานคอนกรีตตัวอย่างเกิดรอยร้าวแบบทแยงขึ้น ค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงค้ำที่อ่านได้คือ 0.0019 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดซึ่งสามารถบันทึกเอาไว้ได้

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัว (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข99) ช่วงน้ำหนักกระทำระหว่าง 0- 7.7 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำ และการโก่งตัวจะเป็นเส้นตรง และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปจนถึงช่วง 7.7-7.9 ตัน ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวจะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักกระทำมีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลง และช่วงน้ำหนักกระทำ 7.9 ตันเป็นต้นไปความชันเกือบจะเป็นศูนย์หรือเป็นศูนย์ (อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักกระทำ/การโก่งตัวเข้าใกล้ศูนย์) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักกระทำค่อนข้างคงที่ แต่การโก่งตัวกลับดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นน้ำหนักกระทำจะค่อยๆลดลง แต่การโก่งตัวก็ยังเพิ่มขึ้นจากการทดสอบจะได้ค่าการโก่งตัวสูงสุดคือ 3.98 มม.

คาน B7*

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีตตัวอย่างไปจนกระทั่งถึง 3.5 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวที่ตรงกลางคานคอนกรีตตัวอย่าง อันเนื่องจากแรงค้ำและรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงค้ำก็เพิ่มจำนวนและความยาวมากขึ้น จนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 5.2 ตัน รอยร้าวเนื่องจากแรงค้ำก็ยาวขึ้นอีก และปรากฏรอยแตกร้าวแบบทแยงขึ้นเป็นครั้งแรกตำแหน่งในช่วงแรงเฉือนของคานคอนกรีต เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นจนถึง 6 ตัน รอยแตกร้าวแบบทแยงจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของคานคอนกรีตตรงฐานรองรับ (Support) และบริเวณใกล้เคียงฐานรองรับ และมีทิศทางการเคลื่อนตัวมุ่งหน้าไปที่

ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 6.6 ตัน รอยแตกแบบทแยงบริเวณฐานรองรับ (Support) ก็จะเคลื่อนตัวเข้าไปใกล้ตำแหน่งน้ำหนักกระทำมากขึ้น ลักษณะของรอยแตกคล้ายกับการเกิด (Arch Action) เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 8.8 ตัน รอยแตกแบบทแยงบริเวณฐานรองรับ (Support) และบริเวณใกล้เคียงฐานรองรับ จะเคลื่อนตัวเข้าไปใกล้ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) มากขึ้นจนน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 9.25 ตัน รอยแตกแบบทแยงก็ยาวขึ้นไปในทิศทางของตำแหน่งน้ำหนักกระทำ และในที่สุดน้ำหนักกระทำสูงสุดคือ 10.8 ตัน ก็จะมีรอยร้าวแบบทแยงเกิดขึ้นตรงบริเวณฐานรองรับ (Support) ด้านขวาของคาน (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข58-ข64)

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดของคานคอนกรีตตัวอย่าง (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข104-106) ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะเกิดขึ้นตอนน้ำหนักกระทำถึง 3.5 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้คือ 0.00061 หลังจากนั้นเมื่อน้ำหนักกระทำต่อไปอีกรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะมากขึ้นเรื่อย ๆ จนน้ำหนักกระทำถึง 5.2 ตันจะปรากฏรอยแตกร้าวแบบทแยงเกิดขึ้นในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดเป็น 0.0011 ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็น 0.000056 และ 0.00016 และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 6 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดคือ 0.0013 ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนคือ 0.0003 และ 0.00044 เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 6.6 ตัน ช่วงนี้เกิดรอยแตกแบบทแยงที่คานตัวอย่างบริเวณฐานรองรับ (Support) ซึ่งผลของความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้คือ 0.0015 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนคือ 0.00045 และ 0.0006 และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำไปเรื่อยจนถึง 9.25 ตัน ซึ่งช่วงนี้รอยแตกแบบทแยงได้แตกยาวขึ้นและเคลื่อนตัวเข้าไปใกล้ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้คือ 0.0021 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่อ่านได้คือ 0.0008 และ 0.00075 และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 9.8 ตัน สามารถบันทึกค่าความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมรับแรงดัดได้ คือ 0.00222 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนคือ 0.001 และ 0.00078 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคานคอนกรีต (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข103) ในช่วง 0-3 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวจะเป็นเส้นตรง (ความชันคงที่) หลังจากนั้นน้ำหนักกระทำตั้งแต่ 0-10.8 ตัน ความชันจะสูงขึ้นแต่ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวก็ยังเป็นเส้นตรงเหมือนเดิม และหลังจากน้ำหนักกระทำ 10.8 ตัน เป็นต้นไปคาน้ำหนักกระทำจะคงที่ แต่ว่าการโก่งตัวของคานคอนกรีตตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นตลอด

ความชันจะค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ และน้ำหนักสูงสุดที่ทดสอบได้คือ 10.8 ตัน กับค่าการโก่งตัวสูงสุดคือ 5.34 มม.

$$(a/d = 1.5)$$

คาน B2

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีต เมื่อให้น้ำหนักกระทำไปจนกระทั่งถึง 6.5 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด และรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 7.6 ตัน จะเกิดรอยแตกร้าวแบบทแยงปรากฏขึ้นในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) (ดังแสดงในรูปการทดสอบที่ 12-18) และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำไปจนถึง 9.6 ตัน รอยแตกร้าวแบบทแยงก็จะเริ่มวิ่งเข้าหาตำแหน่งของน้ำหนักกระทำ เมื่อเพิ่มไปน้ำหนักกระทำต่อไปอีกจนกระทั่งถึง 11.6 ตัน รอยแตกร้าวแบบทแยงก็เพิ่มมากขึ้นและวิ่งจากฐานรองรับ (Support) ไปหาตำแหน่งของน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) และรอยแตกร้าวแบบทแยงก็เริ่มกว้างมากขึ้น และเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีตไปจนกระทั่งถึง 14.2 ตัน น้ำหนักกระทำที่ให้อย่างต่อเนื่องจะไม่เพิ่มหรือลดลงเล็กน้อย แต่การโก่งตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และการโก่งตัวสูงสุดคือ 4.8 มม.

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียด ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะเกิดขึ้นตอนให้น้ำหนักกระทำ 6.5 ตัน (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข74) และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้คือ 0.001669 และเมื่อน้ำหนักกระทำสูงสุดที่คานรับได้เท่ากับ 14.2 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้คือ 0.00269 ส่วนความเครียดที่อ่านได้จากเหล็กปลอกด้านซ้ายมือและขวามือ (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข73, ข75) ในช่วงแรงเฉือนที่อ่านได้คือ 0.000135 และ 0.000235 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวในช่วง 3 ตันแรก กราฟจะเป็นเส้นตรง (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข72) หลังจากนั้นที่น้ำหนักกระทำ 3.5 ตันเป็นต้นไปกราฟจะเบนด้วยความชันที่น้อยลง แต่ก็ยังเป็นเส้นตรงจนกระทั่งน้ำหนักกระทำถึง 14.2 ตัน ความสัมพันธ์ของน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคานคอนกรีตตัวอย่าง คือน้ำหนักกระทำจะเริ่มลดลงเล็กน้อย แต่การโก่งตัวยังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

คาน B4

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีตตัวอย่างเมื่อให้น้ำหนักกระทำไปจนกระทั่งถึง 8.5 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวที่ท้องคานคอนกรีตตัวอย่างอันเนื่องจากแรงดัด และรอยแตกร้าวแบบแรงดัดจะเพิ่มมากขึ้นไปเรื่อยจนถึง 11 ตัน จะปรากฏรอยแตกร้าวแบบทแยงเกิดขึ้นในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) เริ่มเกิดขึ้นที่ฐานรองรับคานคอนกรีตตัวอย่าง เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำให้มากขึ้นเรื่อย ๆ รอยแตกแบบทแยง ก็จะเริ่มเดินยาวขึ้นและเพิ่มจำนวนมากขึ้น ส่วนรอยแตกเนื่องจากแรงดัดนั้นส่วนที่ไม่อยู่ตรงแนวกลางคานรอยแตกที่เกิดขึ้นต่อจากรอยเดิมก็จะเริ่มเบนเป็นแนวทแยงเช่นเดียวกัน (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข23, ข25 และ ข26) กับที่ฐานรองรับ ซึ่งจะวิ่งเข้าหาตำแหน่งที่ให้น้ำหนักกระทำ เมื่อให้น้ำหนักกระทำเพิ่มไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึง 20.4 ตัน และเพิ่มไปอีกจน 20.6 ตัน น้ำหนักมีแนวโน้มลดลงแต่การโก่งตัวมีค่ามากขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียด (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข81-83) ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะเกิดขึ้นตอนน้ำหนักกระทำ 8.5 ตัน และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้คือ 0.00086 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนัก จะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งน้ำหนักกระทำต่อคานเพิ่มถึง 11 ตันจะปรากฏรอยแตกร้าวแบบทแยงขึ้นที่ฐานรองรับ (Support) มีทิศทางวิ่งไปสู่ตำแหน่งของน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) และมีลักษณะคล้ายกับ (Arch) โค้ง (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข26) และช่วงนี้อ่านค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดได้เท่ากับ 0.0016 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ทางด้านซ้ายมือและขวามือมีค่า 0.00019 และ 0.00054 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีก รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะไม่ปรากฏ รอยแตกร้าวที่พัฒนาต่อจากรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด จะเริ่มวิ่งโค้งเข้าตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) ส่วนรอยแตกร้าวแบบทแยงก็จะมีมากขึ้น รอยเก่าก็จะยาวขึ้นและความกว้างของรอยแตกก็จะกว้างขึ้นในที่สุดรอยแตกแบบทแยงที่วิ่งจากฐานรองรับจะวิ่งเข้ามาบรรจบตำแหน่งของน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) อย่างสมบูรณ์ในที่สุด ซึ่งเป็นรูปโค้ง (Arch Action) ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้คือ 0.00214 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ที่อ่านได้คือ 0.00023 และ 0.00042 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการ โกงตัว (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข80) ในช่วงที่น้ำหนัก 0- 20.4 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการ โกงตัวจะเป็นเส้นตรง หลังจากนั้นเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 20.6 ตัน จะคงที่แต่การ โกงตัวจะเพิ่มขึ้น ไปเรื่อย ๆ ความสัมพันธ์จะกลายเป็นเส้นตรงขนานกับแกนราบ (ระยะการ โกงตัว, X) และค่อย ๆ โค้งลงน้ำหนักบรรทุกมากที่สุดที่คานคอนกรีตตัวอย่างสามารถรับได้ คือ 20.8 ตัน การแอ่นตัวสูงสุดคือ 4.75 มม.

คาน B6

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีตตัวอย่างเมื่อให้น้ำหนักกระทำไปจะกระทั่งถึง 9 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวที่ตรงกลางคานคอนกรีตอันเนื่องจากแรงคัด และรอยแตกร้าวอันเนื่องมาจากแรงคัดจะเพิ่มมากขึ้น และเห็นชั้นเจนขึ้นเมื่อน้ำหนักกระทำเท่ากับ 10 ตัน หลังจากนั้น ก็จะมีการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไป รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัดจะเพิ่มชัดเจนมากขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักกระทำดำเนินต่อไปจนถึง 10.6 ตัน จะปรากฏรอยแตกร้าวแบบทแยงในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ของคานคอนกรีตตัวอย่างครั้งแรก (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข36) เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปก็รอยแตกอันเนื่องมาจากแรงคัดจะไม่ปรากฏ แต่แนวรอยแตกที่ดำเนินต่อจากแนวเดิมของรอยแตกอัน เนื่องมาจากแรงคัดจะเริ่มเบนเป็นแนวเฉียง (ทแยง) วิ่งเข้าหาตำแหน่งน้ำหนักกระทำและรอยแตกแบบทแยงในช่วงแรงเฉือนก็เริ่มยาวขึ้น และเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักกระทำดำเนินต่อไปจนกระทั่งถึง 12 ตัน ที่ตำแหน่ง ถัดจากฐานรองรับของคานคอนกรีตตัวอย่างเข้ามาด้านในประมาณ 1 นิ้ว จะสังเกตเห็นรอยแตกทแยงเกิดขึ้นและมีทิศทางเบนไปตำแหน่งน้ำหนักกระทำอย่างชัดเจน และเมื่อน้ำหนักกระทำดำเนินต่อไปถึง 14 ตัน จะเกิดรอยแตกทแยงที่ถัดจากฐานรองรับ (Support) ยาวขึ้นและเข้าใกล้กับตำแหน่งของน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) และเกิดรอยแตกทแยงที่ปรากฏอย่างชัดเจนมากขึ้นที่ฐานรองรับทั้งสองข้าง เป็นแนวขนานกับรอยแตกทแยงด้านในมีลักษณะคล้ายกับ (Arch Action) เมื่อน้ำหนักกระทำถึง 18 ตัน รอยแตกทแยงที่ขนานกันแบบ Arch ก็วิ่งเข้าใกล้ตำแหน่งน้ำหนักกระทำมากขึ้นทุกที และเมื่อน้ำหนักกระทำถึง 22 ตัน แล้วรอยแตกทแยงที่ขนานกัน ก็เดินทางมาบรรจบที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) พอดี และเมื่อขณะทดสอบน้ำหนักกระทำได้เดินทางมาถึง 22.7 ตัน เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใดขึ้นคือ ตรงตำแหน่งของฐานรองรับด้านซ้ายมือได้เกิดแรงเฉือนทะลุขึ้น สาเหตุของการเกิดคือขณะที่ระหว่างการเทคอนกรีตได้ทำการจี้คอนกรีตให้ไหลไปทั่วแบบ ผลของกาจี้ทำให้เหล็กเสริมรับแรงคดเลื่อนหนีออกจากตำแหน่งไปชิดติดกับด้านขวาของคานหมดขณะทำการทดสอบ จึงทำให้เกิดเหตุการณ์เช่นนี้ได้

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียด (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข89-91) ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงจะเกิดขึ้นต่อน้ำหนักกระทำถึง 9 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่อ่านได้คือ 0.00085 หลังจากนั้น เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีก รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงจะมากขึ้นเรื่อย ๆ จนน้ำหนักกระทำถึง 10.6 ตัน จะเกิดรอยร้าวแบบทแยงเป็นครั้งแรก และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่อ่านได้เท่ากับ 0.0011 ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ทั้งสองข้างคือ 0.000084 และ 0.000023 และเมื่อให้น้ำหนักกระทำดำเนินต่อไป รอยแตกเนื่องจากแรงดึงจะไม่ปรากฏแต่แนวแตกที่พัฒนาจากรอยแตกของเดิมจะเริ่มเบนเข้าหาตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) และรอยแตกแบบทแยงก็จะยาวขึ้นเมื่อน้ำหนักกระทำถึง 12 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็น 0.0012 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทั้งสองข้างเป็น 0.0001 และ 0.000035 ตามลำดับ เมื่อน้ำหนักกระทำถึง 14 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็น 0.0014 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนเป็น 0.00012 และ 0.000048 และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 15 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็น 0.00154 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ทั้งสองข้างคือ 0.00013 และ 0.00005 เมื่อน้ำหนักกระทำถึง 18 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็น 0.0019 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็น 0.00014 และ 0.0005 และในที่สุดน้ำหนักกระทำถึง 22.5 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็น 0.0024 และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนคือ 0.00014 และ 0.000056 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัว (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข88) ในการทดสอบความสัมพันธ์ยังคงเป็นเส้นตรงเนื่องจากขณะทดสอบเกิดการวิบัติ ระหว่างการทดสอบจึงไม่สามารถสรุปได้ว่าน้ำหนักกระทำเท่าใดจึงทำให้คานคอนกรีตตัวอย่างวิบัติด้วยแรงเฉือน

คาน B8

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีตตัวอย่างเมื่อน้ำหนักกระทำไปจนกระทั่งถึง 9 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวอันเนื่องจากแรงดึง และรอยแตกร้าวจะเพิ่มจำนวนขึ้นอีกที่น้ำหนักกระทำ 9.5 ตัน และจะเห็นชัดเจน เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 10 ตัน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดึงจะยาวออกไปมากขึ้น หลังจากนั้นเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 10.5 ตัน เราจะสังเกตเห็นรอยแตกร้าวแบบทแยงเกิดขึ้นตำแหน่งใกล้กับฐานรองรับ (Support) (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข47, ข48) มากที่สุดห่างจากฐานรองรับประมาณ 1 นิ้ว ตกเป็น

แนวยาวมีทิศทางพุ่งไปสู่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำ ไปอีกรอยแตกร้าว ก็จะยาวขึ้นเรื่อยๆ และเกิดรอยแตกร้าวขึ้นอีกเป็นจำนวนมาก เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 14 ตัน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตก็เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย แต่รอยแตกทแยงที่อยู่ในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) เพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 16.6 ตัน จะเกิดรอยแตกร้าวแบบทแยงใกล้กับฐานรองรับ (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข52) จะเห็นว่าเป็นรอยแตกคู่ขนานกับไปสู่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) ได้อย่างชัดเจนมาก และมีลักษณะคล้ายกับการเกิด (Arch Action) เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่ม ถึง 18.5 ตัน รอยแตกแบบทแยงที่ขนานกับบริเวณฐานรองรับคานคอนกรีตตัวอย่าง จะวิ่งเข้าใกล้ ตำแหน่งน้ำหนักกระทำมากขึ้นอีก และมองเห็นรอยแตกเป็นจุดแขนที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำอย่าง ชัดเจน และตำแหน่งของคานคอนกรีตตัวอย่างที่วางบนฐานรองรับทั้งสองข้างอย่างชัดเจน จนกระทั่ง น้ำหนักกระทำนั้นเพิ่มถึง 20.5 ตัน รอยแตกทแยงคู่ขนานที่ฐานรองรับ จะวิ่งไปบรรจบที่ตำแหน่ง น้ำหนักกระทำพอดี และจะเห็นรอยแตกเป็นจุดแขนงที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) และตำแหน่งที่ฐานรองรับ (Support) ชัดเจนมากขึ้น เมื่อทดสอบไปจะได้น้ำหนักสูงสุด คือ 22.3 ตัน

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียด (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข96-98) ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตจะเกิดขึ้นตอนน้ำหนักกระทำที่ 9 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริม รับแรงดึงที่อ่านได้คือ 0.0011 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัต จะมากขึ้น จนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 9.5 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงคือ 0.0016 และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกจะมีแต่รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคัตเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่ง น้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 10 ตันความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงคือ 0.00115 หลังจากนั้นจะเพิ่ม น้ำหนักกระทำต่อไปอีก จนกระทั่งน้ำหนักกระทำถึง 10.5 ตัน จะเกิดรอยแตกร้าวแบบทแยงครั้งแรก ตรงที่ฐานรองรับวิ่งไปที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำและเห็นได้ชัดเจนมาก ความเครียดของเหล็กเสริมรับ แรงดึงคือ 0.0013 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่อ่านได้คือ 0.000063 หลังจากนั้น จะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งน้ำหนักกระทำถึง 14 ตัน จะสังเกตเห็นรอยแตกร้าว อันเนื่องมาจากแรงคัต และรอยแตกร้าวแบบทแยงในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ความเครียดของ เหล็กเสริมรับแรงดึงที่อ่านได้คือ 0.0018 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่อ่านได้คือ 0.000064 เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีก จนกระทั่งน้ำหนักกระทำถึง 14.5 ตัน ในช่วง แรงเฉือนจะเกิดรอยร้าวแบบทแยงเพิ่มขึ้น และรอยร้าวแบบทแยงที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้นก็ยาวขึ้น ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่อ่านได้คือ 0.0018 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ที่อ่านได้มีค่า 0.000071 หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งน้ำหนัก กระทำเพิ่มถึง 16.6 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง คือ 0.002 และ ความเครียดของ

เหล็กเสริมรับแรงเฉือนคือ 0.000061 เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปจนเพิ่มถึง 18.5 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงคือ 0.0024 และ ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน คือ 0.00057 เมื่อรอยแตกร้าวแบบทแยงที่ฐานรองรับและส่วนที่ใกล้กันแตกคู่ขนานกันเดินทางมาบรรจบกับตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Loads) ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงคือ 0.0027 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนคือ 0.00006

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคานคอนกรีตตัวอย่าง (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข95) ความสัมพันธ์จะเป็นกราฟเส้นตรงทั้งช่วงที่น้ำหนักกระทำ 9 ตัน หลังจากนั้นน้ำหนักกระทำเพิ่มเป็น 9.5 ตัน ความสัมพันธ์ก็เป็นเส้นตรงดั้งเดิม และความชันคงที่เท่าเดิม (อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักกระทำต่อค่าการโก่งตัว) จนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 22 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคานคอนกรีตตัวอย่างเมื่อเทียบกับการโก่งตัวแล้วเกิด การโก่งตัวที่มากขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่น้ำหนักกระทำเพิ่มแบบคงตัวหรืออาจคงที่ (อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักกระทำต่อค่าการโก่งตัวมีค่าเข้าใกล้ศูนย์)

คาน B2*

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีต เมื่อให้น้ำหนักกระทำไปจนกระทั่งถึง 7.2 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวที่กลางคานอันเนื่องมาจากแรงดัด และรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะปรากฏชัดเจนขึ้น และเพิ่มมากขึ้นที่น้ำหนักกระทำ 7.8 ตัน และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดก็จะยาวขึ้น และเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 9.2 ตัน จะปรากฏรอยแตกร้าวแบบทแยงขึ้นเป็นครั้งแรกที่ตำแหน่งฐานรองรับ (Support) ยาวประมาณ 1/3 ของหน้าตัดคานคอนกรีตตัวอย่าง และมีทิศทางเข้าหาตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำไปจนถึง 10 ตัน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดก็จะยาวขึ้นและเกิดแตกร้าวแบบทแยงแนวใหม่ขึ้นในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ของคานคอนกรีต เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มต่อไปอีกถึง 12 ตัน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดก็จะยาวเพิ่มขึ้นอีก (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข54, ข55) เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มต่อไปอีกจนถึง 12.45 ตัน จะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด และรอยแตกร้าวแบบทแยงขึ้นซึ่งเป็นแนวรอยแตกซึ่งยาวออกจากแนวเดิม และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปเรื่อยจนถึง 12.6 ตัน รอยแตกแบบทแยงที่ฐานรองรับ (Support) คอนกรีตที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักกระทำ 9.2 ตัน ได้แตกเป็นแนวทแยงต่อจากแนวเดิมออกไปและเข้าใกล้ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) ทุกทีมีลักษณะการเกิดคล้ายกับ (Arch Action) ต่อจากนั้นจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีก

เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 13.4 ตัน รอยแตกแบบทแยงจากฐานรองรับ (Support) กับรอยแตกทแยงซึ่งอยู่ชิดกันจะแตกเป็นแนวทแยงคู่ขนานกันไปเข้าใกล้อีกที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) พอดีตรงช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ด้านขวาของคานคอนกรีต และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 17 ตัน รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะเพิ่มขึ้นอีกนิดหน่อย และรอยแตกร้าวแบบทแยงตรงช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ด้านซ้ายจากฐานรองรับประมาณ 1-1.5 นิ้ว และตรงตำแหน่งฐานรองรับ (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข53, ข56) เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำไปกระทั่งจนถึง 20.6 ตัน รอยแตกแบบทแยงจากตำแหน่งฐานรองรับ (Support) ก็วิ่งยาวต่อจากแนวเดิมขนานกันไป จนถึงไปบรรจบที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ และน้ำหนักสูงสุดที่ทดสอบได้คือน้ำหนักกระทำ 20.6 ตัน

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียด (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข102) ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะเกิดขึ้นต่อน้ำหนักกระทำถึง 7.2 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้คือ 0.00073 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำจนถึง 7.8 ตัน รอยแตกร้าวก็ยังเป็นแบบแรงดัด ผลของความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้ที่น้ำหนักกระทำนี้มีค่า 0.00083 และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกจนกระทั่งถึง 9.2 ตัน รอยแตกอันเนื่องมาจากผลของแรงดัดก็ยังปรากฏ แต่ว่ามีรอยแตกแบบทแยง (ซึ่งเป็นผลจากแรงเฉือน) เกิดขึ้นที่ฐานรองรับคานด้วยพอดี ซึ่งสามารถ อ่านค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่น้ำหนักกระทำดังกล่าวได้ 0.001 และที่น้ำหนักกระทำ 10 ตัน จะเกิดรอยแตกเนื่องจากแรงดัดพร้อมกับรอยแตกเนื่องจากแรงเฉือนพร้อม ๆ กัน ผลของความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้ที่น้ำหนักกระทำนี้คือ 0.0011 และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มจนถึง 12.6 ตัน รอยแตกร้าวแบบทแยงที่ฐานรองรับในช่วงแรงเฉือนด้านขวาได้เคลื่อนตัวเข้าใกล้ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ ค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่อ่านได้ ณ น้ำหนักกระทำนี้คือ 0.0015 และจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกจนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 14.8 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวแบบทแยงของคานคอนกรีตตัวอย่างที่ตำแหน่งฐานรองรับ (Support) ด้านขวาของช่วงแรงเฉือนได้เคลื่อนตัวเข้าไปใกล้ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) มากขึ้น ความเครียดของเหล็กเสริมที่อ่านได้มีค่า 0.0018 และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีก จนกระทั่ง 17.4 ตัน จะเกิดรอยแตกร้าวแบบทแยงที่ฐานรองรับ (Support) ด้านซ้ายและรอยแตกแบบทแยงในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) มีทิศทางของการเคลื่อนตัวเข้าหาตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดเท่ากับ 0.0021 ที่น้ำหนักสูงสุดคือ 20.6 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัดคือ 0.0025 แต่ค่าความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมรับแรงดัดที่บันทึกได้คือ 0.0026

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัว (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข101) ในช่วงน้ำหนักกระทำ 0-2 ตัน ความสัมพันธ์ เป็นกราฟเว้าขึ้นแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักกระทำมาก แต่การแอ่นตัวค่อนข้างจะน้อย และหลังจากเพิ่มน้ำหนักกระทำไปอีก ช่วง 2-20.6 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำ และการโก่งตัวจะเป็นเส้นตรงและมีความชันคงที่ และหลังจากนั้นได้ทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกจาก 18.2-20.6 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่งตัวของคานคอนกรีตตัวอย่างเริ่มเป็นเส้นโค้ง คือความชันจะค่อยลดลงจนเป็นศูนย์ที่ 20.6 ตัน และหลังจากนั้นความชันมีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักค่อย ๆ ลดลง และการโก่งตัวกลับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากผลการทดสอบน้ำหนักกระทำสูงสุดที่ทดสอบได้มีค่า 20.6 ตัน และการโก่งตัวสูงสุดของคานคอนกรีตวัดได้เท่ากับ 5.3 มม.

คาน B8*

ในการทดสอบจะทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อคานคอนกรีต เมื่อให้น้ำหนักกระทำไปจนกระทั่งถึง 10 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด และรอยแตกร้าวแบบทแยงในช่วงแรงเฉือน และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 12.8 ตัน รอยแตกร้าวแบบทแยงในช่วงแรงเฉือน (Shear Span) ก็ยาวขึ้นและมีจำนวนรอยแตกทแยงใหม่ ๆ เพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 13.4 ตัน รอยแตกทแยงจะเกิดขึ้นที่คานคอนกรีตตัวอย่างบริเวณฐานรองรับ (Support) และบริเวณใกล้เคียงกัน แนวของรอยแตกมีทิศทางเคลื่อนตัวไปที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำไปจนกระทั่งถึง 16.2 ตันการเคลื่อนตัวของรอยแตกแบบทแยงที่แตกเป็นแนวคู่ขนานก็เริ่มเคลื่อนตัวเข้าใกล้ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ (Two Point Load) มากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีกจนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 17 ตัน รอยแตกเนื่องจากแรงดัดที่สังเกตเห็นได้จะเริ่มยาวออกไปอีก และมีรอยแตกร้าวแบบทแยงอันใหม่บริเวณฐานรองรับ (Support) (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข65, ข67) และเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 18.4 ตัน รอยแตกแบบทแยงบริเวณฐานรองรับ (Support) ทางด้านซ้ายมือก็เคลื่อนตัวมาบรรจบที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำพอดี ในการทดสอบน้ำหนักกระทำสูงสุดที่ทดสอบได้คือ 19.4 ตัน

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียด (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข108-ข110) ช่วงที่เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะเกิดขึ้นตอนน้ำหนักกระทำที่ 10 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่อ่านได้คือ 0.0011 หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด ก็จะมีจำนวนมากขึ้นและยาวขึ้น จนกระทั่งน้ำหนักกระทำที่เพิ่มถึง 12.8 ตัน ความของ

เหล็กเสริมรับแรงดึงที่บันทึกได้คือ 0.0013 และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนคือ 0.00012 เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไปอีก รอยแตกแนวทแยงก็เพิ่มจำนวนและความยาวมากขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 14.6 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่บันทึกได้คือ 0.0015 และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนคือ 0.00013 เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำถึง 19.4 ตัน ความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึงคือ 0.00214 และความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมรับแรงดึง และเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่สามารถบันทึกได้คือ 0.00216 และ 0.00015

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและการโก่ง (ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข 107) ความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงตั้งแต่น้ำหนักกระทำอยู่ในช่วง 0- 19.2 ตัน หลังจากนั้นที่น้ำหนักกระทำ 19.2- 19.4 ตัน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัว ความชันเริ่มลดลง (อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักกระทำ/ค่าความโก่งตัว ไม่คงที่แบบลดหรือเข้าใกล้ศูนย์) หรือเกือบเป็นเส้นโค้ง หลังจากนั้นน้ำหนักกระทำ 19.4 ตันเป็นต้นไป ความชันของความสัมพันธ์จะเป็นลง คือน้ำหนักกระทำเริ่มลดลงช้า ๆ แต่การโก่งตัวยังคงเพิ่มขึ้นดังเดิม และค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ได้คือ 5.12 มม.

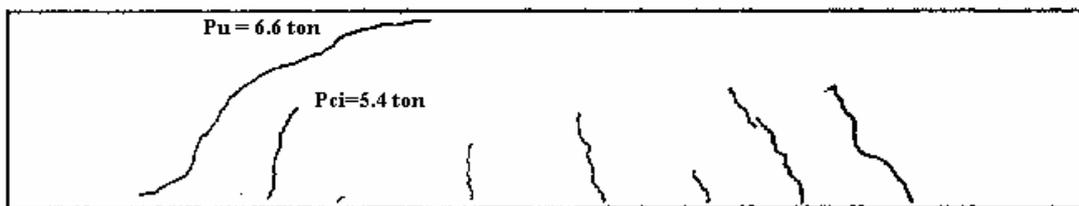
วิจารณ์

การวิจารณ์ผล

(a/d = 3)

คาน B1

ลักษณะของรอยร้าวจะเกิดเนื่องจากแรงดัด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 4 ตัน ก่อน เมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำต่อไป จะเกิดรอยร้าวแนวทแยง (Diagonal Cracks) บริเวณฐานรองรับ (Support) ที่น้ำหนักกระทำ 6.6-6.7 ตัน ซึ่งเคลื่อนตัวอย่างรวดเร็ว จากตำแหน่งฐานรองรับกินแกน สะเทินและมุ่งหน้าไปสู่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ ที่บริเวณฐานรองรับตรงกับตำแหน่งเหล็กเสริมรับแรงดึงจะสังเกตเห็นรอยร้าวแตกขนาดเท่ากับเหล็กเสริมซึ่งหมายถึง แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตได้ลดลง ตัวเหล็กเส้นมีโอกาสหลุดจากเนื้อคอนกรีตสูง และการวิบัติชนิดนี้เรียกว่าวิบัติจากแรงดึงแนวทแยง (Diagonal Tension Failure)



ภาพที่ 3 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของคาน B1

คาน B3

ขณะทำการทดสอบจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงคด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 2.5 ตัน จากนั้นเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มไปที่ 7.1-8 ตัน จะเกิดรอยร้าวแนวทแยงวิกฤต ซึ่งห่างจากบริเวณฐานรองรับ ซึ่งรอยร้าวชนิดนี้จะเคลื่อนตัวได้ยาวที่สุด และไปบรรจบที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ เป็นการวิบัติแบบแรงดึงแนวทแยง (Diagonal Tension Failure)



ภาพที่ 4 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และน้ำหนักกระทำประลัยของคาน B3

คาน B5

เมื่อให้น้ำหนักกระทำจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงคด (Flexural Cracks) ก่อน เมื่อน้ำหนักกระทำ อยู่ระหว่าง 8-10.8 ตัน เกิดรอยร้าวแนวทแยงวิกฤตเคลื่อนตัวจากตำแหน่งของคานคอนกรีตตรงฐานรองรับไปบรรจบที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ และที่สังเกตได้ขณะทำการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบนี้คอนกรีตบริเวณฐานรองรับ (Support) ถูกน้ำหนักกระทำบดจะกะเทาะแตกออกมาจากลักษณะของรอยร้าวเป็นการวิบัติแบบแรงดึงแนวทแยง (Diagonal Tension Failure)



ภาพที่ 5 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของคาน B5

คาน B7

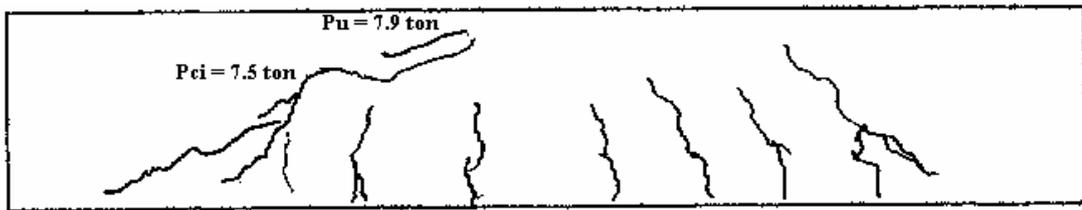
เมื่อให้น้ำหนักกระทำจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 4 ตัน และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำที่ 8-10.5 ตัน รอยร้าวแบบแนวทแยงวิกฤตได้เกิดขึ้น (Diagonal Cracks) และเคลื่อนตัวยาวกว่ารอยแตกทุก ๆ แนว ในการทดสอบตัวอย่างนี้เป็นการวิบัติแบบแรงดึงแนวทแยง (Diagonal Tension Failure)



ภาพที่ 6 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของคาน B7

คาน B1*

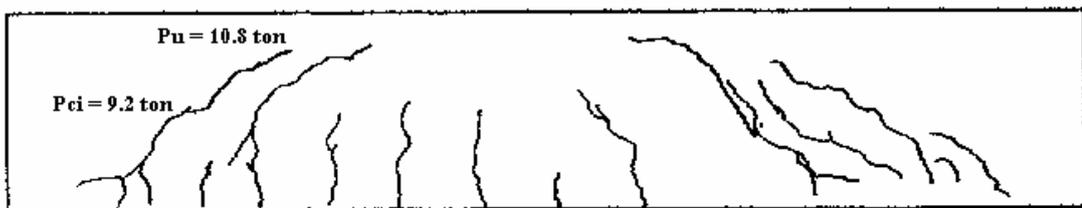
เมื่อให้น้ำหนักกระทำจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 4 ตัน เมื่อน้ำหนักกระทำที่ 7.5-7.9 ตัน เกิดรอยร้าวแบบแนวทแยงวิกฤตขึ้น ที่ตัวอย่างทดสอบบริเวณฐานรองรับ (Support) และเกิดรอยแตกขนาดกั้มเหล็กรับแรงดึง (Loss of Bond Due to Cracks) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมรับแรงดึงลดต่ำลง เหล็กมีโอกาสรูดออกจากคานคอนกรีตตัวอย่างได้ และในการทดสอบคานตัวอย่างนี้ เป็นการวิบัติแบบแรงดึงแนวทแยง (Diagonal Tension Failure)



ภาพที่ 7 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของคาน B1*

คาน B7*

เมื่อให้น้ำหนักกระทำจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 3.5 ตัน เมื่อน้ำหนักกระทำที่ 6-10.8 ตัน รอยร้าวแบบแนวทแยงวิกฤตได้เกิดขึ้นและเคลื่อนตัวอย่างรวดเร็วจากคอนกรีตบริเวณฐานรองรับมาที่ตำแหน่งแนวแกนสะเทินและหยุดอยู่ที่สักรูและได้เคลื่อนตัวต่อไปจนกระทั่งเกือบถึงตำแหน่งน้ำหนักกระทำ และคอนกรีตบริเวณฐานรองรับมีรอยร้าวแตกขนานกับเหล็กเสริมรับแรงดัด นั่นคือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อคอนกรีตของคานคอนกรีตตัวอย่างกับเหล็กเสริมได้ลดลง และเหล็กเสริมรับแรงดัดอาจมีการเคลื่อนตัวในคานตัวอย่างจึงเกิดรอยร้าวในลักษณะนี้ได้ จากลักษณะรอยร้าวที่เกิดขึ้นและได้สังเกตพบว่าเป็นการวิบัติแบบแรงดึงแนวทแยง (Diagonal Tension Failure)

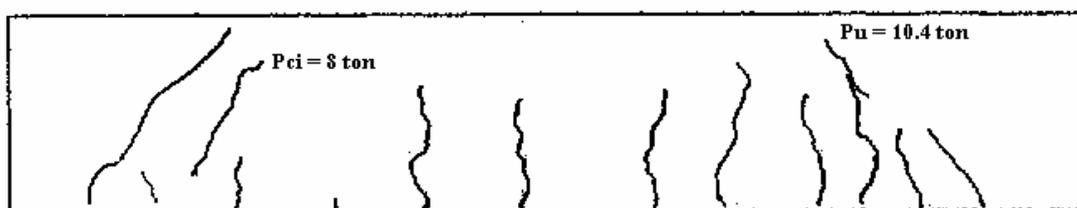


ภาพที่ 8 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของคาน B7*

($a/d = 1.5$)

คาน B2

เมื่อให้น้ำหนักกระทำจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 6.5 ตัน เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักต่อไปที่น้ำหนักกระทำ 8 ตัน จะเกิดรอยร้าวแนวทแยง विकฤติ อย่างรวดเร็วซึ่งยาวกินแนวแกนสะเทิน ลักษณะของรอยร้าว विकฤติจะเป็นแบบโครงสร้างโค้ง (Arch) ที่ค่อนกริตรีบริเวณระหว่างฐานรองรับกับน้ำหนักกระทำ แต่ทางด้านขวารอยร้าวเกิดขึ้นไม่ค่อยชัดเจน อาจเป็นเพราะแรงเกาะเกี่ยวระหว่างมวลรวมค่อนข้างจะยึดกันแน่นกว่าค่อนกริตรีทางด้านซ้ายของคานตัวอย่าง และน้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดรอยร้าวแบบทแยงสูงสุดที่บันทึกได้คือ 11.6 ตัน ในการทดสอบลักษณะรอยร้าวเป็นการวิบัติแบบการเฉือนผสมกับการอัด (Shear Compression Failure)



ภาพที่ 9 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำ विकฤติ และ น้ำหนักกระทำประลัยของคาน B2

คาน B4

เมื่อให้น้ำหนักกระทำจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 8.5 ตัน และที่น้ำหนักกระทำ 11.5 ตัน จะเกิดรอยร้าวแนวทแยง विकฤติที่ค่อนกริตรีบริเวณฐานรองรับ (Support) ถัดมาประมาณความลึกประสิทธิผล (d) และรอยร้าวมีลักษณะเกิดเป็นโครงสร้างโค้ง (Arch) อย่างชัดเจนทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ซึ่งน้ำหนักกระทำคือ 16 ตันลักษณะการวิบัติแบบการเฉือนผสมกับการอัด (Shear Compression Failure)



ภาพที่ 10 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของคาน B4

คาน B6

เมื่อให้น้ำหนักกระทำจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 9 ตัน และคานคอนกรีตตัวอย่างเกิดรอยร้าวเป็น โครงสร้างโค้งที่น้ำหนักกระทำที่ 14-15 ตัน ซึ่งเคลื่อนตัวเร็วมากจนเกินตำแหน่งของแกนสะเทินแต่ขณะทำการทดสอบได้เกิดการวิบัติอีกรูปแบบหนึ่งของคานตัวอย่าง ซึ่งคานคอนกรีตที่อยู่ตรงตำแหน่งฐานรองรับ (Support) ด้านซ้ายได้เกิดขาดออกจากกันอย่างฉับพลัน ซึ่งอาจมีสาเหตุเกิดจากขณะที่ทำการเทคอนกรีตได้ทำเครื่องช่วยในการจี้คอนกรีตให้ไหลตัวและแน่น แต่ในการจี้นั้นทำให้เหล็กเสริมเคลื่อนตัวหนีออกไป จึงทำให้ขณะทำการทดสอบเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ได้



ภาพที่ 11 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และน้ำหนักกระทำประลัยของคาน B6

คาน B8

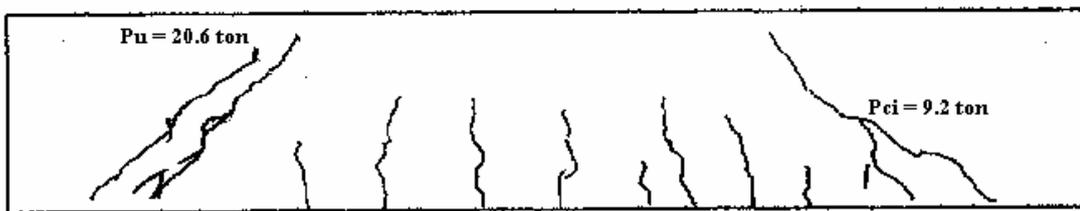
เมื่อให้น้ำหนักกระทำจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 9 ตัน เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มถึง 10.5 ตัน จะพบว่ารอยร้าววิกฤติเคลื่อนตัวผ่านแนวแกนสะเทินเคลื่อนตัวเข้าสู่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ และเกิดรอยร้าวก่อตัวเป็นโครงสร้างโค้ง (Arch) ที่ชัดเจนที่น้ำหนักกระทำ 16.6-20.5 ตัน ลักษณะเป็นแบบการเฉือนผสมกับการอัด (Shear Compression Failure)



ภาพที่ 12 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของคาน B8

คาน B2*

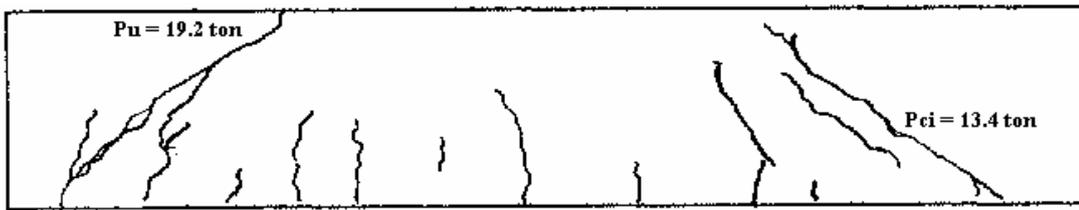
ก่อนเมื่อน้ำหนักกระทำจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 7.2 ตัน เมื่อน้ำหนักกระทำที่ 13.4 ตัน เกิดรอยร้าวแนวทแยง विकฤตขึ้นและเริ่มตัวเป็นโครงสร้างโค้ง (Arch) อย่างชัดเจนที่ 12.4-20.6 ตัน คอนกรีตที่บริเวณฐานรองรับเกิดรอยร้าวแขนงขึ้นซึ่งตรงกับตำแหน่งเหล็กเสริมรับแรงดึง และลักษณะการวิบัติแบบนี้จัดเป็นแบบการเฉือนผสมการดึง (Shear Tension Failure)



ภาพที่ 13 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และน้ำหนักกระทำประลัยของคาน B2*

คาน B8*

ก่อนเมื่อน้ำหนักกระทำจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural Cracks) ที่น้ำหนักกระทำ 10 ตัน รอยร้าวแนวทแยง विकฤตเกิดขึ้นที่น้ำหนักกระทำ 13.4 ตัน ที่ตำแหน่งแนวแกนสะเทิน และได้หยุดระยะหนึ่งจากนั้นได้เคลื่อนตัวไปบรรจบที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำพอดีที่ 18.4 ตัน แต่การก่อตัวของรอยร้าวแนวทแยงไม่เป็นโครงสร้างโค้ง (Arch) ที่ชัดเจน และจากการวิบัติเป็นแบบการเฉือนผสมการดึง (Shear Tension Failure)



ภาพที่ 14 ลักษณะการแตกร้าว น้ำหนักกระทำวิกฤต และ น้ำหนักกระทำประลัยของคาน B8*

หมายเหตุ $V_{ci} = P_{ci}/2$

$$V_u = P_u/2$$

คานชุด $a/d = 1.5$ เมื่อทำการทดสอบแรงเฉือนวิกฤตและแรงเฉือนประลัยมากกว่าที่คำนวณไว้มาก เมื่อเทียบกับสมการ ACI 318-89 เนื่องจากโครงสร้างเกิด Arch Action จึงได้ใช้สมการ deep beam ของ ACI เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ การวิเคราะห์ผลของคานกลุ่มนี้จะได้แรงเฉือนประลัยและค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนสามารถหาปริมาณแรงเฉือนของเหล็กได้ผลต่างของแรงเฉือนประลัยกับแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน คือแรงเฉือนของคอนกรีต

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการทดสอบ คานคอนกรีตคุณภาพสูงเสริมเหล็กจำนวน 12 ตัวอย่างตามลักษณะคาน และเปอร์เซ็นต์เหล็กปลอกสรุปได้ดังนี้

1. กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดประลัย, ปริมาณเหล็กเสริมตามยาว และปริมาณเหล็กปลอกที่เพิ่มขึ้น เช่น คาน B8 และคาน B8* เปรียบเทียบกันโดยปริมาณเหล็กเสริมตามยาวและปริมาณเหล็กปลอกเท่ากัน โดยค่ากำลังอัดประลัย (f_c') ของ B8 = 752 และ B8* = 767 กก./ซม.² จากผลการทดสอบพบว่า รอยแตกร้าวครั้งแรก (Initial Crack) ของคาน B8 คือ 9 ตัน ส่วน B8* ทดสอบได้ 10 ตัน และรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนวิกฤติที่ทดสอบได้ B8 10.5 ตัน B8* ทดสอบได้ 13.4 ตัน และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่สูงขึ้นและกำลังเฉือนของคานคอนกรีต คานชุด $a/d = 3$ คือ $V_c = 4.8981 f_c' + 245.57$ (kg) และ $a/d = 1.5$ คือ $V_c = 6.8364 f_c' + 275.31$ (kg)

2. คานคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วน $a/d=3$ คือคานหมายเลข B1, B3, B5, B6, B7, B1*, B7* เมื่อทำการทดสอบ ขณะทำการทดสอบรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดจะเกิดขึ้นก่อน ซึ่งอยู่ในช่วง 2.5-4 ตัน และรอยแตกร้าวแบบแนวทแยงจะเกิดในช่วง 6-10.8 ตัน ซึ่งรอยแตกร้าววิกฤตินี้จะเคลื่อนตัวยาวและรวดเร็วกว่ารอยแตกร้าวอื่น ๆ และเคลื่อนตัวมุ่งหน้าสู่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำ คานคอนกรีตที่ทดสอบบางตัวอย่างมีการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต ซึ่งจะมีร้าวแตกร้าวที่ขนานกับเหล็กเสริมรับแรงดัด จากการทดสอบพบว่าคานคอนกรีตทุกตัวอย่างมีการวิบัติแบบแรงดัดแนวทแยง (Diagonal Tension Failure) คานคอนกรีตที่ใช้ อัตราส่วน $a/d = 1.5$ คือคานหมายเลข B2, B4, B6, B8, B2*, B8* เมื่อทำการทดสอบ ขณะทำการทดสอบจะเกิดรอยแตกเป็นลักษณะ (Arch) โค้ง ซึ่งจะทำโครงสร้างรับน้ำหนักตามขวางได้มากขึ้น ทำให้น้ำหนักประลัยที่ทดสอบต่างจากที่คำนวณไว้ค่อนข้างมากซึ่งสอดคล้องและตรงกับทฤษฎี ซึ่งการวิบัติจะเป็นแบบ (Shear Compression Failure) ยกเว้นคาน B2*, B8* จะวิบัติแบบ (Shear Tension Failure)

3. ความสัมพันธ์ของการโก่งตัว (deflection) และความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน กับน้ำหนักกระทำของคานชุด $a/d = 1.5$ น้ำหนักกระทำจะอยู่ในช่วง 14.2-22 ตัน ซึ่งเป็นช่วง น้ำหนักกระทำสูงสุดของคานชุดนี้และการโก่งตัวก็เข้าใกล้จุดสูงสุดซึ่งอยู่ในช่วง 4.7-5 มม. และความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะอยู่ในช่วง 0.00006-0.0026 เหล็กเสริมรับแรงเฉือนอยู่ในช่วง 0.0013-0.0027 คานชุด $a/d = 3$ น้ำหนักกระทำอยู่ในช่วง 7-12.2 ตัน การโก่งตัวจะอยู่ในช่วง 3.98-5.9 มม. และความเครียดสูงสุดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนอยู่ในช่วง 0.001-0.0078 เหล็กเสริมรับแรงเฉือนอยู่ในช่วง 0.00176-0.0029

4. กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตคุณภาพสูงที่ทดสอบจะได้ค่าจากการทดสอบสูงกว่าสมการ ACI 318-89 ซึ่งได้จากการคำนวณจากกำลังอัดประลัยในสมการแสดงให้เห็นว่าสมการให้ผลในเชิงอนุรักษ์หรือในความปลอดภัยได้

$$\text{ACI 818-89 } V_c = (0.5fc'^{1/2} + 176 \rho Vd/M)bd \text{ (kg)}$$

$$\text{ACI (deep beam)} = (3.5 - 2.5M/Vd) (0.5fc'^{1/2} + 176 \rho Vd/M)bd \text{ (kg)}$$

$$a/d=3 \quad V_c = (0.3421fc'^{1/2} + 1220.5 \rho Vd/M)bd \text{ (kg)}$$

$$V_u = (0.2891fc'^{1/2} + 1885 \rho Vd/M)bd \text{ (kg)}$$

$$a/d=1.5 \quad V_c = (0.558fc'^{1/2} + 867.81 \rho Vd/M)bd \text{ (kg)}$$

$$V_u = (1.0957fc'^{1/2} + 580.22 \rho Vd/M)bd \text{ (kg)}$$

5. กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนกลุ่มคาน $a/d = 3$ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการ ACI พบว่าผลการทดสอบมีค่าสูงกว่าสมการแสดงให้เห็นว่ามีความปลอดภัย ส่วนกลุ่มคาน $a/d = 1.5$ ผลการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการ ACI แสดงให้เห็นว่าไม่มีความปลอดภัย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดสอบพฤติกรรมในการรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตคุณภาพสูง HPC ที่มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงต่าง ๆ

2. ทำการทดสอบโดยกำหนดหน้าตัด และช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลต่าง ๆ เพื่อที่จะได้ทราบพฤติกรรมที่แท้จริงและปริมาณการเสริมเหล็กปลอก ที่เหมาะสม

3. เปรียบเทียบผลการทดลองโดยกำลังรับแรงเฉือนที่ทดสอบได้กับสมการของ ACI ว่ามีความอนุรักษ์เพียงใด

4. ควรมีการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมในแนวระดับ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิตติกร ต้นเปาว์. 2538. ผลกระทบจากขนาดคละของมวลรวมในสภาพเหลวของคอนกรีต
 สมรรถนสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ��ชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ.
- ��ชสวัสดิ์ ศรีรัตนรัฐ. 2537. FLOW CONCRETE BY THE USE OF SUPERPLASTICIZER, น.
 125-127. ใน การประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง **Pre-Workshop on High
 Performance Concrete** . คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถาน
 แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.
- ปรีชา ภาวสุทธีวงศ์. 2526. พฤติกรรมการค้ดของคาน ทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากและด้วยลวด
 กำลังสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มานิต ศิวกุล. 2525. พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมาก.
 วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เสรี เกียรติยุทธชาติ. 2537. การศึกษาเพื่อเสนอแนวทางการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีต
 กำลังสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เอกสิทธิ์ ลีสุวรรณ. 2537. การพัฒนาคอนกรีตคุณภาพสูงที่ผ่าน, น. 4. ใน การประชุมสัมมนา
 ทางวิชาการ เรื่อง **Pre-Workshop on High Performance Concrete** . คณะกรรมการ
 วิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์,
 กรุงเทพฯ.

- ACI Committee 318. 1989. **Building Code Require for Reinforced Concrete and Commentary.** American Concrete Institute.
- Blick, R.L., C.F. Peterson and W.E Michael. 1972. Proportioning and Controlling High Strength Concrete. **Paper for Presentation to ACI Annual Convention**
- Bresler, B. and A.C. Scordelis. 1963. Shear Strength of Reinforced Concrete Beams. **ACI Journal** (Proceedings, V.60, No.11): 942-951.
- Cordon, W.A. and H.A. Gillespie. 1963. Variables in Concrete Aggregates of Portland Cement Paste which Influence the Strength of Concrete. **ACI Journal** (60): 1029-1055.
- _____. 1964. Variables in Concrete Aggregates of Portland Cement Paste which Influence the Strength of Concrete. **ACI Journal** (60): 1981-1998.
- Das, A. 1977. **Shear Behavior of Reinforced Bems of High-Strength Concrete Without Web Reinforcement.** A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Engineering thesis, Asian Institute of Technology School of Civil Engineering Bangkok, Thailand.
- Diaz de Cossio, R. 1962. dicussion of Reference 7. **ACI Journal** (59): 1323-1332.
- Dodson, V.H. and E. Farkas. 1964. Delayed Addition of Set Retarding Admixtures of Portland Cement Concrete. **ASTM Reprint** (No.77):
- Farodji, M.J. and R. Diaz de Cassico. 1965. Diagonal Tension in Concrete Members of circular Section. **(in Spanish) Ingenieria, Mexico,** (Translation by) **Portland Cement Assoc.** (466): 257-280.

- Freedman, S. 1971. High Strength Concrete. **Portland Cement Association (Reprint from Modern Concrete)** (Publication No.15176): 19.
- Gaynor, R.D. 1968. **High-Strength Air-Entrained Concrete**. National Ready Mixed Concrete Associate Joint Research Laboratory 17.
- Gilkey, H.J. 1961. Water-Cement Ratio Versus Strength-Another Look. **Journal of the American Concrete Institute,ACI** (54): 1287-1312.
- Gold Beck, A.T. 1928. Gradation and Charactor of Aggregates As a Facotr in Workability. **ACI Journal** (24).
- Hanson, J.M. 1969. Square Openings in Webs of Continuous Joints,Research and Development Bulletin. **Portland Cement Association**. 14.
- Hewlett, P.C. 1978. Superplasticizing Admixtures in Concrete. **Cement and Concrete Association**.
- Hongnestad, E. 1952. What Do We Know About Diagonal Tension and Web Reinforcement in Concrete. **Bulletin No.3 University of Illinois Engineering Experinent Station** (Proceeding V.66,No.3): 185-197. (Circular Series No. 64): 47P
- Iyengar , K.T.S.R., B.V. Rangan and R. Paloniswamy. 1968. Some Factors Affecting Shear Strength of Reinforced Concrete Beams. **Indian Concrete Journal** (42): 499-505.
- kani, G.N.J. 1966. Basic Facts Concernings Shear Failure. **ACI Journal** (vol. 63): 675-692.
- _____. 1969. Rational Theory for The Function of Web Reinforcement. **ACI Journal** (Proceeding V.66,No.3): 185-197.

_____. 1969. Rational Theory for The Function of Web Reinforcement. **ACI Journal**
(Proceeding V.66,No.3): 185-197.

Keun, H.Y., S.C. Heon and T.L. Eun. 2003. **Shear Characteristics of High-strength concrete deep beams without shear reinforcements.** www.sciencedirect.com, September 16, 2006.

Klieger, Paul. 1958. Early High Strength Concrete for Prestressing. **Portland Cement Association** (R&D Bulletin):

Mathey, R.G. and D. Watstein. 1963. Shear Strength of Beams Whitout Web Reinforcement Containing Deform Bars of Different Yield Strengths. **ACI Journal Proceeding** (V.60,No.2): 183-206.

Leonhardt, F. and R. Walther. 1964. The Stuttgart Shear Test. **Cement and Concrete Association, London, England** (111).

Leslie, Keith E., K.S. Rajagopalan and N. J. Everade. 1976. Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams. **ACI Journal** (Proceeding V. 73): 517-521.

Mather, K. 1965. High Strength High Density Concrete. **ACI Journal** (61): 951-962.

Mathey, R.G. and D. Watstein. 1963. Shear Strength of Beams Whitout Web Reinforcement Containing Deform Bars of Different Yield Strengths. **ACI Journal Proceeding** (V.60,No.2): 183-206.

McGreary, R.K. 1961. Mechanical Packing of Spherical Particals. **ACI Journal** (44).

Morgan, A. H. 1971. High-Strength Ready-Mixed Concrete. **Paper Presented ot 41st Annual Convention of the National Ready Mixed Concrete Association**

- Nilson, A.H., R.L. Carrasquillo and F.O. Slate. 1981. Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads. **ACI Journal** : 171-178.
- Nimityongskul, P. 2537. Mix Proportions for High Performance Concrete, pp. 23-37. *In การสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง Pre-Workshop on High Performance Concrete . คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ร่วมกับ ACI-Thailand Chapter, กรุงเทพฯ.*
- Perenchio, W.F. 1973. An Evaluation of Some of the Factors Involved in Proceeding Very High Strength Concrete. **Portland Cement Association** (Bulletin No.014-1973).
- Perera, K.J.W. 1979. **Mechanical Properties of High Strength Concrete.** Master's Thesis thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Placas, A. and P.E. Regan. 1971. Shear Failure of Reinforced Concrete Beams. **Proceedings, American Concrete Institute** (68): 736-773.
- Rajagopalan K.S. and P.N. Ferguson 1968. Exploratory Shear Tesis Emphasizing Percentage of Longitudinal Steel. **American Concrete Institute Journal** (65): 634-638.
- Saucier, K.L., E.F. Smith and W. D. Tynes. 1964. High-Compressive Strength Concrete: Development of Concrete Mixtures, U.S. Air Force weapon Laboratory.
- Swami, R.M. and S.A. Qureshi. 1971. Strength, Cracking and Deformation Similitude in Reinforce T-Beams under Bending and Shear. **American Concrete Institute** (68): 187-195.
- Taylor, H.P.J. 1972. Shear Strength of large Beams. **Journal of the Structural Division** ,ASCE (98): 2473-2490.

Tognon, G., Ursella P. and Coppetti G. 1980. Design and Properties of Concrete with Strength Over $1500/\text{cm}^2$. **ACI Journal** : 171-176.

Thoman, W.H. and R. Wareen. 1934. Ultimate Strength and Modulus of Elasticity of High Strength Portland Cement Concrete. **ACI Journal** (30): 231-238.

Walker, S. and, D. Bloem. 1960. Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete. **ACI Journal** Aug.1963 (60): 1029-1055.

Waymouth, A.L.G. 1933. Effects of Particle Interference in Mortars and Concrete.

Rock Products.

Yamato, Y. and K. Ohira. 1976. On Effective Use of Highly Water Reducing Admixtures in Concrete. **Annual Technical Report Cement Association of Japan** (30):

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง

ตารางผนวกที่ ก1 สัดส่วนในการผสมคอนกรีตกำลังสูง

สัดส่วนในการผสมคอนกรีต	กก./ม ³
ซีเมนต์	702
ทราย	966
หิน	1264
น้ำ	175
สารผสมเพิ่ม	17
ซิลิกาฟูม	70.22

ตารางผนวกที่ ก2 กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

Sample	Yield Load (kg)	Ultimate Load (kg)	Yield Strain x 10 ⁻⁶
SD 40 DB 12	5510	6923	2120
	5512	6915	2113
	5368	6935	2359
AVE	5463.33	6924.33	2197.33
SR 24 RB 6	839	1139	1533
	858	1158	1487
	898	1198	1452
AVE	865	1165	1490.67

ตารางผนวกที่ ก3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

Specimen	f_c' (kg/cm ²)	E_c (kg/cm ²)
B1	694	4.0096×10^5
B2	675	3.9516×10^5
B3	665	3.9220×10^5
B4	762	4.182×10^5
B5	630	3.800×10^5
B6	750	4.1622×10^5
B7	642	3.8331×10^5
B8	752	4.1726×10^5
B1*	750	4.1000×10^5
B2*	905	4.3733×10^5
B7*	780	4.2727×10^5
B8*	767	4.5122×10^5

ตารางผนวกที่ ก4 กำลังรับแรงเฉือนของคานที่ไม่เสริมเหล็กปลอก

Specimen	f_c' (kg/cm ²)	V_u (ACI) (kg)	V_{ci} (test) (kg)	V_u (test) (kg)	v_c (test) (kg/cm ²)	v_u (test) (kg/cm ²)
B1*	750	2644.355	3750	3950	20.83	21.94
B2*	905	5696.967	4700	10400	31.65	57.78

ตารางผนวกที่ ก5 กำลังรับแรงเฉือนของคานที่เสริมเหล็กปลอก

Specimen	f_c' (kg/cm ²)	$V_c(ACI)$ (kg)	$V_c(test)$ (kg)	$V_u(ACI)$ (kg)	$V_u(test)$ (kg)	$v_c(ACI)$ (kg/cm ²)	$v_u(ACI)$ (kg/cm ²)	$v_c(test)$ (kg/cm ²)	$v_u(test)$ (kg/cm ²)	v_s (kg/cm ²)
B1	694	2570.533	2700	2642.646	3200	14.28	14.68	15	17.78	0.40
B2	675	5096.983	6993	5558.400	7100	28.32	30.88	38.85	39.44	0.59
B3	665	2520.467	2750	3690.125	3850	14.00	20.50	15.28	21.39	6.50
B4	762	6621.431	10279	7160.400	10300	36.79	39.78	57.11	57.22	0.12
B5	630	2656.566	5200	3186.181	6100	14.76	17.70	28.89	33.89	2.94
B6	750	6589.518	11335	7396.200	11350	36.61	41.09	62.97	63.06	0.08
B7	642	2677.979	4000	3139.417	5250	14.88	17.44	22.22	29.17	2.56
B8	752	6594.855	11141	8208.000	11150	36.64	45.60	61.89	61.94	0.05
B7*	780	2911.147	3700	3295.247	5400	16.17	18.31	20.56	30.00	2.17
B8*	767	6634.656	9667	8248.000	9700	36.86	45.82	53.70	53.89	0.18

ตารางผนวกที่ ก6 หน่วยแรงรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตกำลังสูง

Specimen	f_c'	$v_c/(f_c')^{1/2}$	$v_u/(f_c')^{1/2}$	$\rho V_d/M(f_c')^{1/2}$ (x10 ⁻³)
B1	694	0.54	0.67	0.239
B2	675	0.81	1.52	0.970
B3	665	0.54	0.83	0.244
B4	762	0.82	2.07	1.819
B5	630	0.59	1.35	0.500
B6	750	0.82	2.30	1.833
B7	642	0.59	1.15	0.495
B8	752	0.82	2.26	1.831
B1*	750	0.54	0.80	0.230
B2*	905	0.65	1.92	0.84
B7*	780	0.58	1.07	0.499
B8*	767	0.82	1.95	1.813

ตารางผนวกที่ ก7 ลักษณะการวิบัติ (Mode of Failure)

Specimen	a/d	Mode of failure	Remark
B1	3	Diagonal Tension Failure	
B3	3	Diagonal Tension Failure	
B5	3	Diagonal Tension Failure	
B7	3	Diagonal Tension Failure	
B1*	3	Diagonal Tension Failure	
B7*	3	Diagonal Tension Failure	
B2	1.5	Shear Compression Failure	
B4	1.5	Shear Compression Failure	
B6	1.5	-	Pull Out Failure
B8	1.5	Shear Compression Failure	
B2*	1.5	Shear Tension Failure	
B8*	1.5	Shear Tension Failure	

น้ำหนักบรรทุก (load) และการโก่งตัว(deflection)ของคานชุด a/d=3

ตารางผนวกที่ ๓๘ น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B1

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
600	4.38	0.26
1000	4.30	0.40
1400	4.22	0.50
1800	4.14	0.61
2200	4.06	0.85
2600	3.98	1.09
3000	3.90	1.25
3400	3.82	1.50
3800	3.74	1.74
4000	3.70	1.85
4200	3.66	1.96
4400	3.62	2.08
4600	3.58	2.18
4800	3.54	2.29
5000	3.50	2.38
5200	3.46	2.49
5400 *	3.42	2.60
5600	3.38	2.75
5800	3.34	2.88
6000	3.30	2.91
6200	3.26	3.10
6400 **	3.22	3.23
5900	3.32	3.65
0	4.50	0.8

หมายเหตุ *,** = P_{ci}, P_u

ตารางผนวกที่ ๙ น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B3

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
500	4.40	0.12
1000	4.30	0.23
1500	4.20	0.34
2000	4.10	0.50
2500	4.00	0.77
3000	3.90	1.00
3500	3.80	1.25
4000	3.70	1.51
4500	3.60	1.77
5000	3.50	2.00
5500 *	3.40	2.29
6000	3.30	2.71
6500	3.20	3.05
7000	3.10	3.38
7500	3.00	3.78
7700 **	2.96	4.30
7000	3.10	4.50
0	4.5	0.89

ตารางผนวกที่ 10 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B5

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
1000	4.30	0.41
2000	4.10	0.80
3000	3.90	1.22
4000	3.70	1.66
5000	3.50	2.01
6500	3.20	2.55
8000	2.90	3.10
8800	2.74	3.48
9400	2.62	3.98
10400 *	2.42	4.50
10800	2.34	4.74
11600	2.18	5.00
12200 **	2.06	5.80
12000	2.10	5.95
11750	2.15	5.97
11650	2.17	5.97
11600	2.18	5.98
0	4.50	1.32

ตารางผนวกที่ ก11 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B7

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
500	4.40	0.14
1000	4.30	0.30
1500	4.20	0.50
2000	4.10	0.76
2500	4.00	0.94
3000	3.90	1.18
3500	3.80	1.43
4000	3.70	1.65
4500	3.60	1.94
5000	3.50	2.17
5500	3.40	2.49
6000	3.30	2.74
6500	3.20	3.04
7000	3.10	3.39
7500	3.00	3.70
8000 *	2.90	4.05
8500	2.80	4.33
9000	2.70	4.63
9500	2.60	4.96
10500	2.50	5.24
10400	2.44	5.36
10455	2.45	5.49
10500 **	2.40	5.65
10300	2.44	5.90
10100	2.48	5.95
0	4.50	2.31

ตารางผนวกที่ ก12 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B1*

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
500	4.40	0.16
1000	4.30	0.30
1500	4.20	0.41
2000	4.10	0.55
2500	4.00	0.72
3000	3.90	0.87
3500	3.80	1.03
4000	3.70	1.23
4500	3.60	1.40
5000	3.50	1.62
5500	3.40	1.79
6000	3.30	1.97
6500	3.20	2.15
7000	3.10	2.36
7500 *	3.00	2.63
7700	2.96	2.74
7900 **	2.92	3.08
7900	2.92	3.20
7800	2.94	3.67
6500	3.20	3.98
0	4.50	1.7

ตารางผนวกที่ ก13 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งของคาน B7*

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
3500	3.80	2.00
5200	3.46	2.63
6000	3.30	2.93
6600	3.18	3.12
7400 *	3.02	3.42
7800	2.94	3.56
8200	2.86	3.73
8600	2.78	3.90
8800	2.74	3.99
9000	2.70	4.10
9800	2.54	4.53
9800	2.54	4.54
9800	2.54	4.55
9800	2.54	4.56
9800	2.54	4.57
9950	2.51	4.60
10000	2.50	4.63
10200	2.46	4.70
10400	2.42	4.78
10600	2.38	4.85
10800 **	2.34	5.34
0	4.50	1.28

น้ำหนักบรรทุก(load)และการโก่งตัว(deflection)ของคานขนาด $a/d=1.5$

ตารางผนวกที่ ก14 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B2

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
1000	4.30	0.19
2000	4.10	0.37
3000	3.90	0.50
4000	3.70	0.80
5000	3.50	1.11
6500	3.20	1.61
7000	3.10	1.77
7600	2.98	2.02
8400 *	2.82	2.27
9000	2.70	2.46
9600	2.58	2.65
9800	2.54	2.72
10000	2.50	2.79
10200	2.46	2.84
10400	2.42	2.90
11000	2.30	3.07
11200	2.26	3.12
11600	2.18	3.23
11800	2.14	3.29
12000	2.10	3.34
14200 **	1.66	4.28
14200	1.66	4.30
14150	1.67	4.40
14150	1.67	4.55
0	4.50	1.40

ตารางผนวกที่ ก15 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B4

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
1000	4.30	0.28
2000	4.10	0.53
3000	3.90	0.75
4000	3.70	0.95
5000	3.50	1.20
6000	3.30	1.40
7000	3.10	1.63
8500	2.80	1.95
9000	2.70	2.05
11500 *	2.20	2.62
12500	2.00	2.87
14000	1.70	3.14
15000	1.50	3.32
15800	1.34	3.49
19000	0.70	4.11
19800	0.54	4.26
20400	0.42	4.38
20600	0.38	4.55
20600	0.38	4.62
20600	0.38	4.70
20600 **	0.38	4.73
18900	0.72	4.75
0	4.50	1.22

ตารางผนวกที่ ก16 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B6

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
1000	4.30	0.31
2000	4.10	0.65
3000	3.90	0.92
4000	3.70	1.15
5000	3.50	1.35
6000	3.30	1.58
7000	3.10	1.82
8000	2.90	2.02
9000	2.70	2.22
10000	2.50	2.41
11000	2.30	2.55
12000*	2.10	2.78
13000	1.90	3.02
14000	1.70	3.17
15000	1.50	3.30
16000	1.30	3.41
17000	1.10	3.77
18000	0.90	3.95
19000	0.70	4.20
20000	0.50	4.42
21000	0.30	4.62
22000	0.10	4.87
22700 **	-0.04	5.06

ตารางผนวกที่ ก17 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B8

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
1000	4.30	0.28
2000	4.10	0.53
3000	3.90	0.84
4000	3.70	1.15
5000	3.50	1.44
6000	3.30	1.71
7000	3.10	2.00
8000	2.90	2.21
9500	2.60	2.65
10000	2.50	2.76
10500 *	2.40	2.91
14000	1.70	3.71
14800	1.54	3.95
16000	1.30	4.21
18400	0.82	4.76
20500	0.40	5.25
21000	0.30	5.39
21600	0.18	5.59
21800	0.14	5.65
22000	0.10	5.74
22100	0.08	5.85
22200	0.06	6.07
22300 **	0.04	6.20
22000	0.10	6.40
0	4.50	1.15

ตารางผนวกที่ ก18 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B2*

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
1000	4.30	0.36
2000	4.10	0.54
3000	3.90	0.66
4000	3.70	0.81
5000	3.50	1.00
6000	3.30	1.27
7200	3.06	1.57
7800	2.94	1.63
9200 *	2.66	1.97
12000	2.10	2.56
12400	2.02	2.67
12600	1.98	2.72
14000	1.70	3.00
14800	1.54	3.20
17400	1.02	3.78
18000	0.90	3.94
19000	0.70	4.16
20000	0.50	4.40
20200	0.46	4.45
20400	0.42	4.48
20600	0.38	4.52
20800 **	0.34	4.58
21000	0.30	4.80
20600	0.30	5.10
19400	0.62	5.30
0	4.50	1.91

ตารางผนวกที่ ก19 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวของคาน B8*

Load(kg)	Volt	Deflection(mm)
0	4.50	0
7200	3.06	1.67
7800	2.94	1.80
10000*	2.50	2.26
12800	1.94	2.96
13400	1.82	3.12
13800	1.74	3.25
14600	1.58	3.42
15600	1.38	3.65
16200	1.26	3.78
17000	1.10	3.99
18400	0.82	4.36
18600	0.78	4.42
18800	0.74	4.48
19000	0.70	4.55
19200	0.66	4.63
19400 **	0.62	4.78
19200	0.66	4.86
19050	0.69	4.92
18900	0.72	4.97
18800	0.74	5.01
18750	0.75	5.04
18500	0.80	5.12
0	4.50	1.21

น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชุด a/d=3

ตารางผนวกที่ ก20 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B1

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	0	0	0
400	-0.825	32.445	0.810
800	-3.470	68.900	-1.860
1200	2.370	100.490	0.840
1600	26.515	125.370	8.235
2000	52.145	614.005	61.990
2400	65.585	968.880	86.400
2800	86.590	1223.020	113.135
3200	146.425	1412.375	140.905
3600	209.675	1585.730	190.165
4000	259.250	1761.370	2034.000
4400	317.775	1928.345	129.065
4800	355.620	2084.290	199.260
5200	273.505	2239.690	98.310
5400*	276.485	2338.520	115.385
5600	276.485	2357.720	122.500
6400**	290.245	2553.005	491.605

ตารางผนวกที่ ก21 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B3

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	0	0	0
500	-0.180	17.470	-6.150
1000	2.160	41.450	-5.560
1500	-3.130	57.920	-10.350
2000	-1.360	97.320	-7.510
2500	23.190	549.230	-13.630
3000	30.770	798.040	-11.030
3500	56.180	985.210	5.830
4000	102.800	1173.380	48.630
4500	172.040	1331.520	86.680
5000	216.010	1496.230	195.620
5500*	320.970	1669.280	377.280
6000	563.640	1824.050	859.510
6500	923.430	1977.840	1088.110
7000	1203.880	2131.070	1469.210
7500	1525.440	2229.870	1878.35
7700**	1510.130	2204.340	1660.83

ตารางผนวกที่ ก22 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B5

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	0	0	0
1000	1.035	20.770	-0.550
2000	3.735	49.910	1.245
3000	7.000	72.340	0.625
4000	25.345	98.705	9.000
5000	49.690	139.195	13.815
6000	55.650	464.325	17.300
7000	55.940	581.840	7.405
8000	63.555	673.705	12.670
9000	71.820	848.935	16.385
10000	653.73	1088.970	560.660
10400*	720.195	1179.500	662.500
11000	980.700	1548.260	1100.500
11200	1050.600	1708.250	1170.200
11400	1120.700	1786.140	1240.220
11600	1190.750	1906.080	1296.550
11800	1275.600	2126.150	1333.750
12000	1290.650	2238.005	1338.300
12200**	1301.380	2257.190	1352.150

ตารางผนวกที่ ก23 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B7

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	0	0	-
500	7.250	31.100	-
1000	3.280	90.220	-
1500	-4.520	350.660	-
2000	-15.760	526.520	-
2500	-21.360	676.500	-
3000	-17.770	847.180	-
3500	-0.510	1037.510	-
4000	25.080	1192.320	-
4500	140.830	1357.170	-
5000	236.220	1506.730	-
5500	412.610	1635.320	-
6000	580.790	1754.050	-
6500	673.250	1892.360	-
7000	637.250	2017.85	-
7500	623.350	2149.960	-
8000	684.080	2301.430	-
8500*	764.290	2441.320	-
9000	831.340	2560.360	-
10000	915.440	2812.140	-
10500**	1190.450	2925.240	-

ตารางผนวกที่ ก24 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B1*

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	-	36.259	-
500	-	60.152	-
1000	-	94.792	-
1500	-	255.401	-
2000	-	501.399	-
2500	-	680.681	-
3000	-	808.305	-
3500	-	943.954	-
4000	-	1085.142	-
4500	-	1207.018	-
5000	-	1294.713	-
5500	-	1467.966	-
6000	-	1592.627	-
6500	-	1702.986	-
7000	-	1804.134	-
7500*	-	1873.106	-
7900**	-	1583.645	-

ตารางผนวกที่ ก25 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B7*

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	0	0	0
1000	-2.245	42.680	-0.355
2000	-4.150	291.345	-8.045
3000	4.085	605.715	36.000
4000	0.595	859.445	56.210
5000	44.300	1097.305	131.350
6000	295.120	1327.755	439.430
7000	536.660	1574.180	630.905
7400*	575.735	1668.385	631.23
8000	625.180	1811.230	691.410
9000	765.830	2032.725	721.550
9200	834.035	2085.820	760.170
9250	844.960	2092.535	736.245
9650	967.340	2170.335	760.735
9700	978.880	2184.015	761.370
9800	987.355	2205.145	775.690
9800	990.895	2213.585	787.825
10800**	997.235	2215.310	782.585

น้ำหนักบรรทุก(load)และความเครียด(strain)ของคานชุด a/d=1.5

ตารางผนวกที่ ก26 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B2

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	0	0	0
1000	1.749	24.006	2.371
2000	1.170	57.000	0.485
3000	0.591	104.635	713.160
4000	106.908	652.299	1350.385
5000	171.938	861.980	1320.066
6000	245.311	1087.250	1491.184
7000	392.657	1420.283	290.765
8400	104.164	1875.593	385.755
9000	105.661	1977.559	462.301
10000	110.860	2152.768	165.765
11000	136.429	2131.830	217.491
12200	134.760	2333.610	213.080
12400	135.560	2369.32	228.180
12600	137.580	2410.750	206.490
12800	137.260	2442.020	204.970
13000	136.720	2481.620	207.960
13200	137.270	2514.440	211.560
13400	137.160	2552.510	215.120
13600	137.010	2581.260	219.700
13800	137.500	2618.890	224.660
14000	137.560	2650.940	230.200
14200**	134.930	2687.620	234.520
14050	139.610	2946.700	240.840

ตารางผนวกที่ ก27 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B4

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	0	0	0
1000	1.840	27.820	4.120
2000	-4.160	53.550	6.680
3000	-2.740	85.640	9.410
4000	26.490	253.240	4.410
5000	31.410	397.240	-15.090
6000	63.310	527.110	-17.560
7000	99.960	638.470	-14.200
8000	127.390	749.060	-11.690
9000	144.020	857.810	15.460
10000	173.590	968.250	39.000
11500	194.390	1111.450	48.170
12000	203.630	1162.580	60.720
13000	212.770	1259.760	61.790
14000	220.760	1358.120	70.980
15000	229.550	1459.180	87.580
16000	237.850	1567.490	93.640
18800	242.730	1858.280	103.830
19000	240.900	1878.460	107.310
20000	244.650	1986.200	106.220
20200	243.930	2002.070	107.030
20400	244.900	2008.320	108.450
20600**	243.670	2013.940	128.040
18900	230.920	2014.220	141.520

ตารางผนวกที่ ก 28 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B6

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	0	0	0
1000	1.035	20.700	-0.550
2000	3.735	49.910	1.245
3000	7.000	72.340	0.625
4000	25.345	98.705	9.000
5000	49.690	139.195	13.815
6000	55.650	464.325	17.300
7000	55.940	581.840	7.405
8000	63.555	673.705	12.670
9000	71.820	848.935	16.385
10000	83.730	1048.280	20.555
11000	88.005	1148.015	26.315
12000	101.065	1238.055	35.830
13000	110.760	1340.265	38.650
14000*	120.335	1448.295	48.445
15000	126.230	1538.710	49.165
16000	131.509	1661.960	50.959
17000	135.850	1790.295	52.605
18000	139.615	1906.010	54.145
19000	140.270	2014.315	55.140
20000	141.955	2128.905	56.960
21000	139.905	2185.790	57.350
22300	143.430	2349.825	56.310
22400	143.345	2353.610	56.135
22500**	143.550	2367.400	56.180

ตารางผนวกที่ ก29 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B8

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	-	0	-
1000	-	20.946	-
2000	-	116.088	-
3000	-	234.234	-
4000	-	323.998	-
5000	-	538.764	-
6000	-	775.660	-
7000	-	816.766	-
8000	-	943.236	-
9000	-	1059.624	-
10000	-	1195.148	-
11000	-	1372.978	-
12000	-	1483.646	-
13000	-	1602.872	-
14000	-	1721.558	-
15000*	-	1815.098	-
16000	-	1927.440	-
17000	-	2091.074	-
18000	-	2354.564	-
19000	-	2482.482	-
20000	-	2516.704	-
21000	-	2725.142	-
21100	-	2750.452	-
21200	-	2766.328	-
21300	-	2785.078	-
21400	-	2800.458	-

ตารางผนวกที่ ๓๐ น้ำหนักบรรทุกและความเครียดเหล็กเสริมของคาน B2*

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	-	0	-
1000	-	23.790	-
2000	-	47.760	-
3000	-	75.730	-
4000	-	169.200	-
5000	-	368.470	-
6000	-	529.840	-
7000	-	684.720	-
8000	-	873.430	-
9200*	-	1023.330	-
10000	-	1140.750	-
11000	-	1270.260	-
12000	-	1402.700	-
13000	-	1545.150	-
14000	-	1661.140	-
15000	-	1795.220	-
16000	-	1916.690	-
17000	-	2076.200	-
18000	-	2198.400	-
19000	-	2325.160	-
20000	-	2456.350	-
20200	-	2477.240	-
20400	-	2499.500	-
20600	-	2523.240	-
20800**	-	2555.550	-
21000	-	2577.430	-

ตารางผนวกที่ ก31 น้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมของคาน B8*

Load(kg)	Strain Gauge 1($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 2($\times 10^{-6}$)	Strain Gauge 3($\times 10^{-6}$)
0	0	0	0
1000	4.600	10.490	3.480
2000	4.440	-12.810	-8.480
3000	5.020	10.590	-10.020
4000	21.520	47.460	20.250
5000	38.370	91.770	27.680
6000	63.660	224.930	32.010
7000	63.740	353.760	33.630
8000	77.740	765.600	45.340
9000	83.240	887.370	50.810
10000	94.400	1016.620	59.480
11000	106.560	1119.640	-301.330
12000	114.560	1227.090	-278.840
13400*	122.850	1376.140	-270.460
14000	127.220	1445.420	-265.900
15000	131.740	1551.350	-254.740
16000	137.710	1654.220	-231.100
17000	144.800	1788.880	-206.270
18000	144.190	1964.800	-182.380
19000	147.360	2090.680	-167.930
19200	148.420	2117.660	-156.270
19400**	145.780	2140.230	-156.280
19200	146.110	2157.540	-151.010

ตารางผนวกที่ ก32 ความเครียด การโก่งตัว ที่น้ำหนักริขุด ($a/d = 3$)

specimen	V_c (kg)	strain	Deflection (mm)
B1	2700	276.485	2.60
B3	2750	320.97	2.29
B5	5200	720.195	4.50
B7	4000	684.08	4.05
B7*	3700	575.735	3.42

ตารางผนวกที่ ก33 ความเครียด การโก่งตัว ที่น้ำหนักริขุด ($a/d = 1.5$)

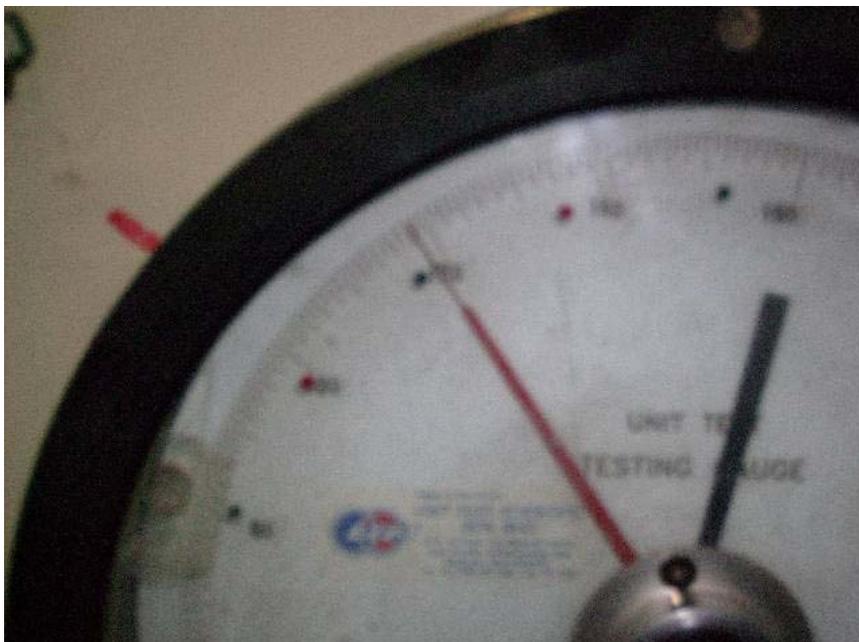
specimen	V_c (kg)	strain	Deflection (mm)
B2	4300	-	2.33
B4	5750	48.17	2.62
B6	7000	120.335	3.17
B8	5000	-	2.91
B8*	6700	122.85	3.12

ภาคผนวก ข

ภาพ



ภาพผนวกที่ ข1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยของตัวอย่างทรงกระบอก



ภาพผนวกที่ ข2 ค่าน้ำหนักที่อ่านได้



ภาพผนวกที่ ข3 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทรงกระบอก



ภาพผนวกที่ ข4 น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีต



ภาพผนวกที่ ข5 โมที่ใช้ในการผสมคอนกรีต



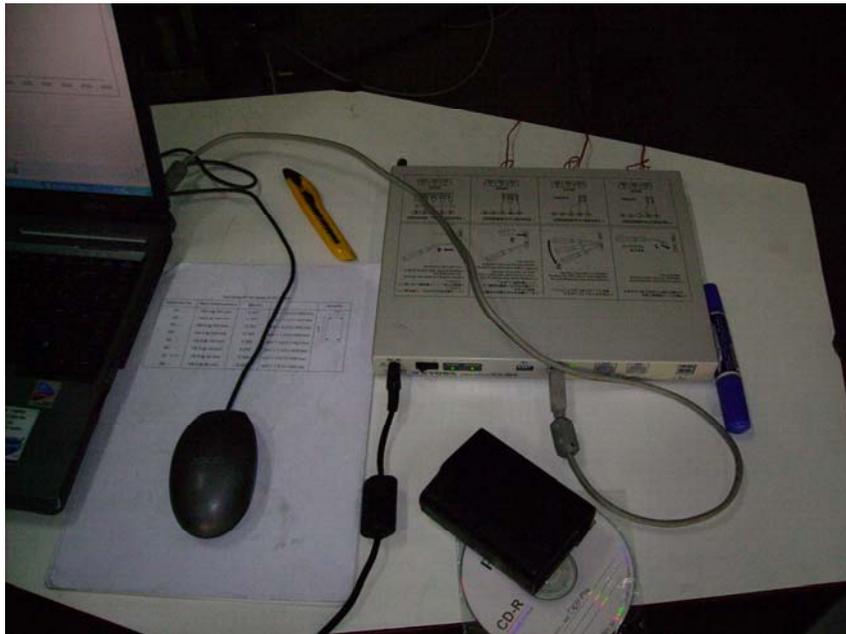
ภาพผนวกที่ ข6 ปริมาณการใช้สารลดน้ำ



ภาพผนวกที่ ข7 เหล็กเสริมตามยาวและเหล็กปลอกและการติดstrain gauge กับเหล็กเสริม



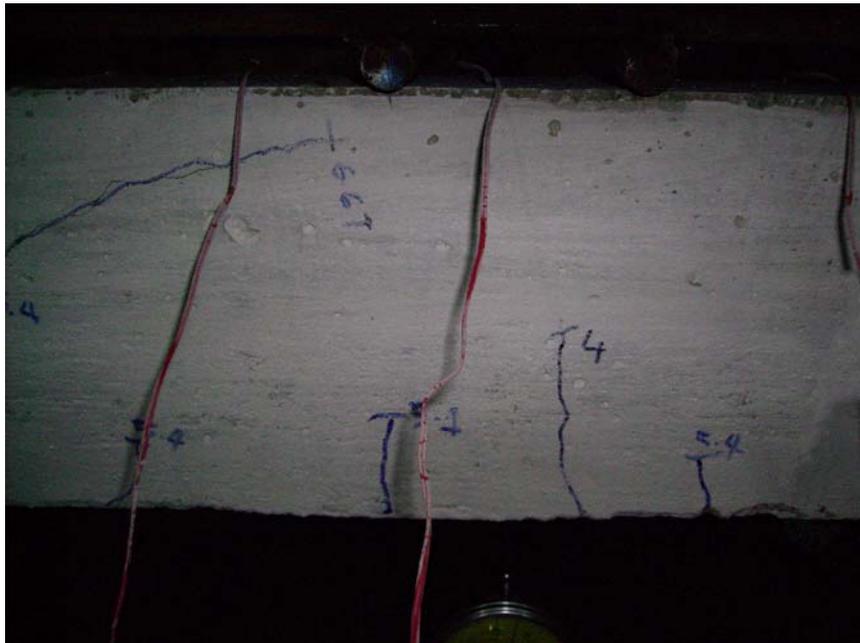
ภาพผนวกที่ ข8 แม่แรงที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพผนวกที่ ข9 Computer และ Date Logger



ภาพผนวกที่ ข10 ติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบ



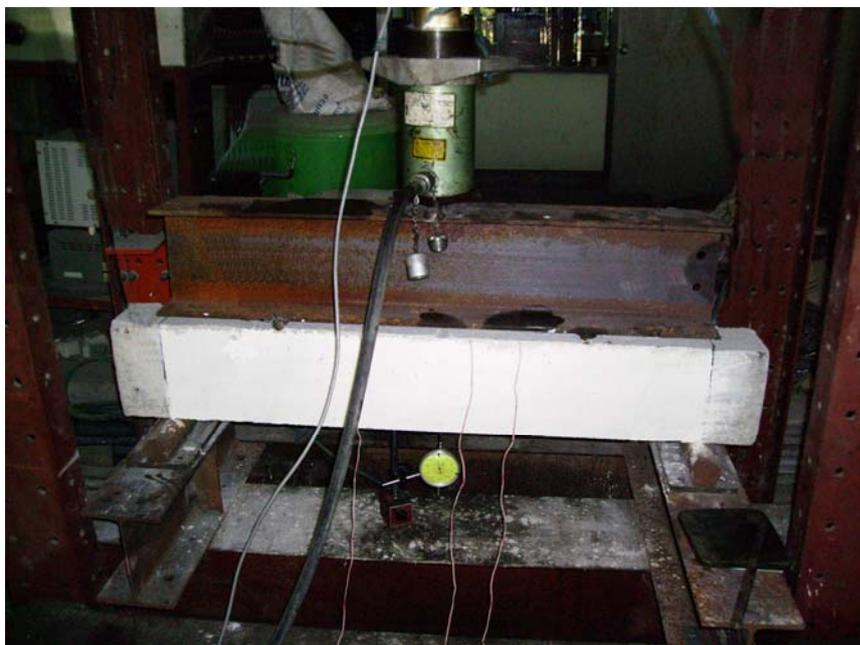
ภาพผนวกที่ ข11 คาน B1



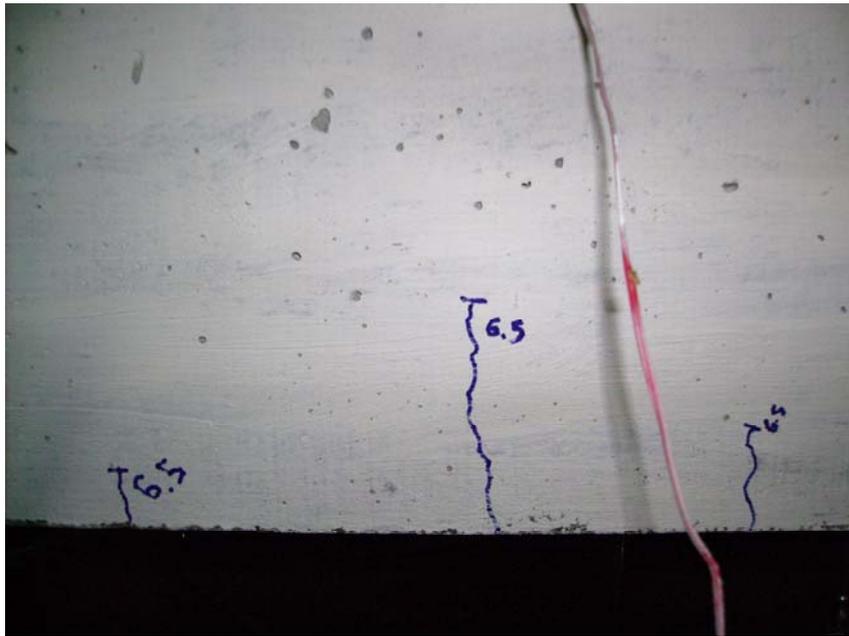
ภาพผนวกที่ ข12 คาน B1



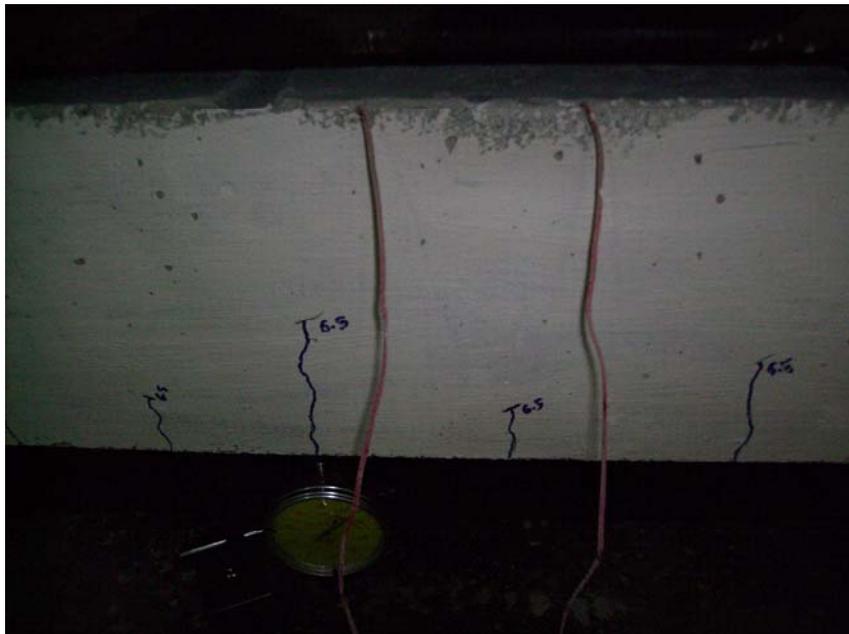
ภาพผนวกที่ ข13 คาน B1



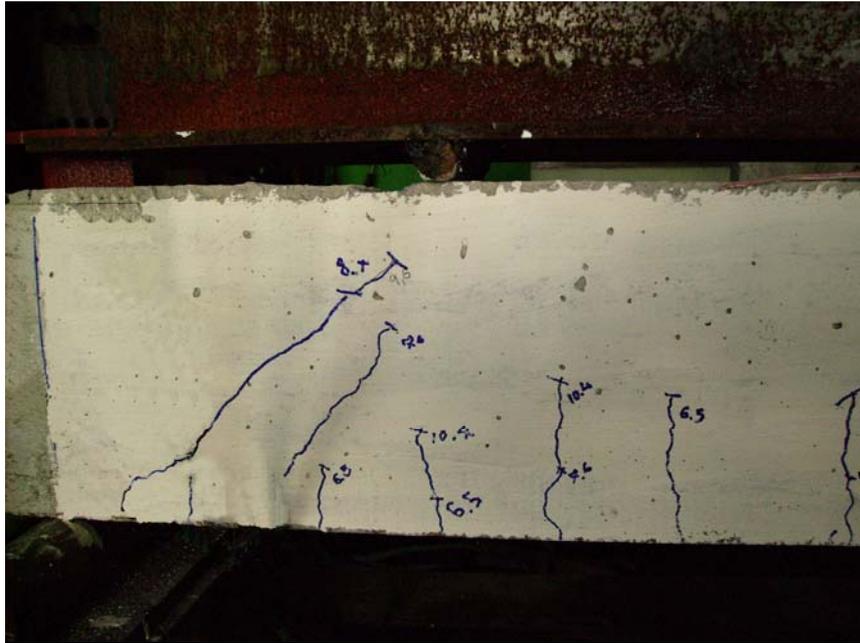
ภาพผนวกที่ ข14 คาน B2



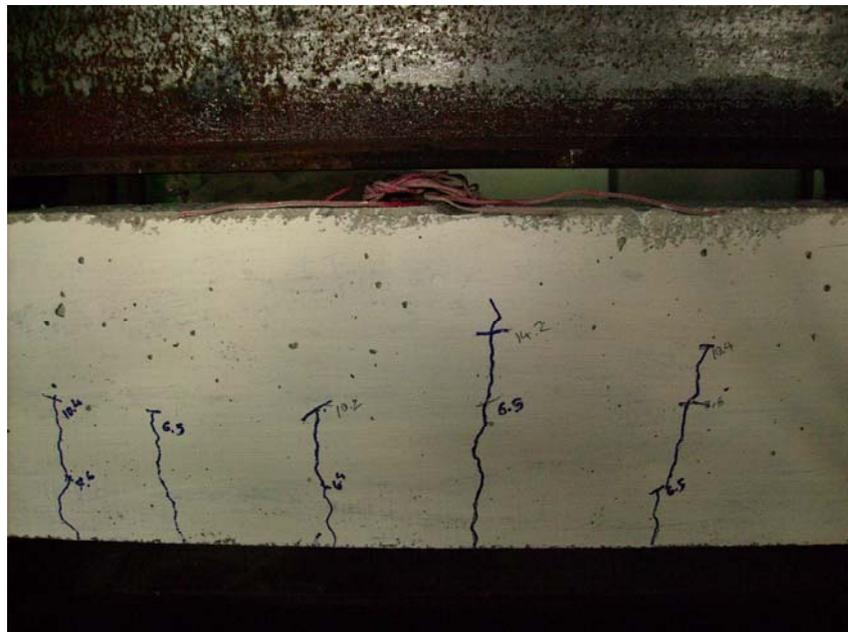
ภาพผนวกที่ ข15 คาน B2



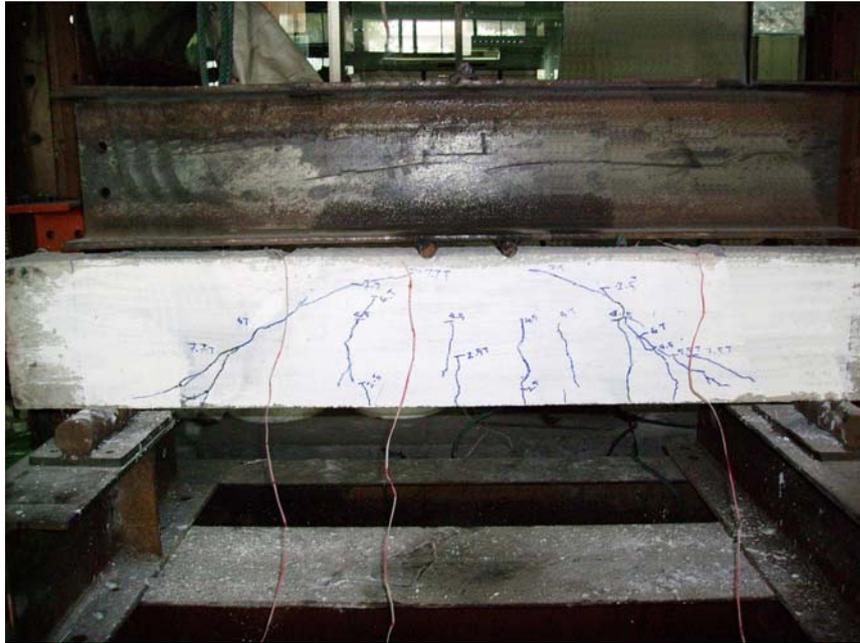
ภาพผนวกที่ ข16 คาน B2



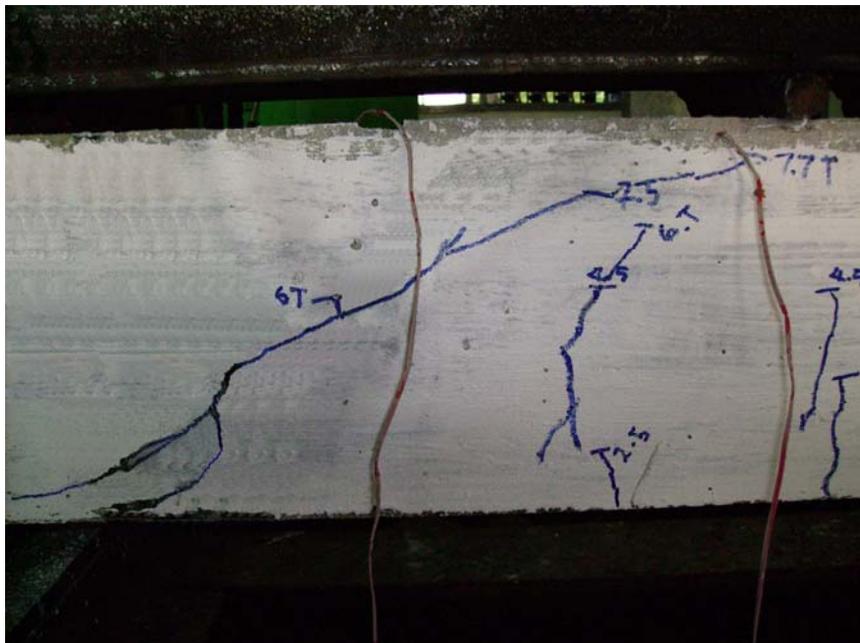
ภาพผนวกที่ ข17 คาน B2



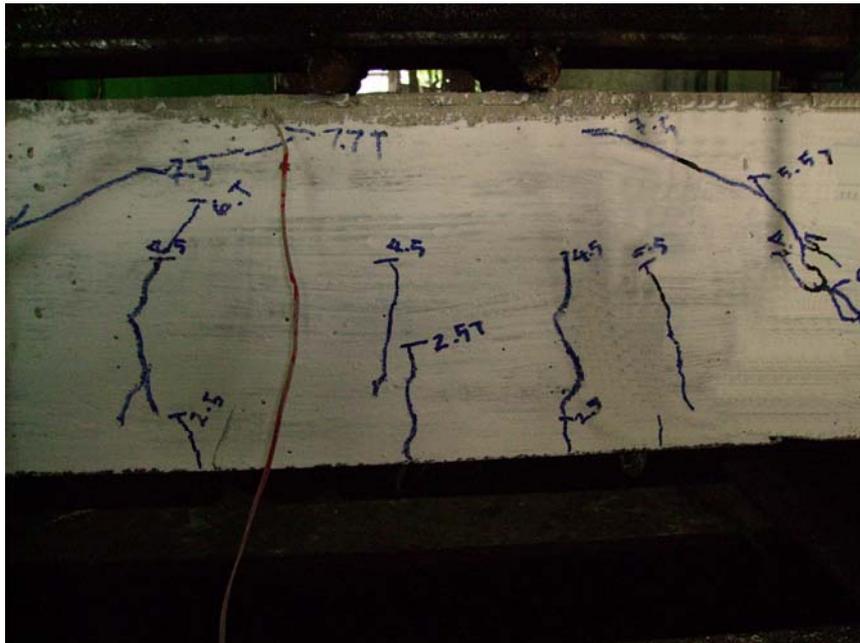
ภาพผนวกที่ ข18 คาน B2



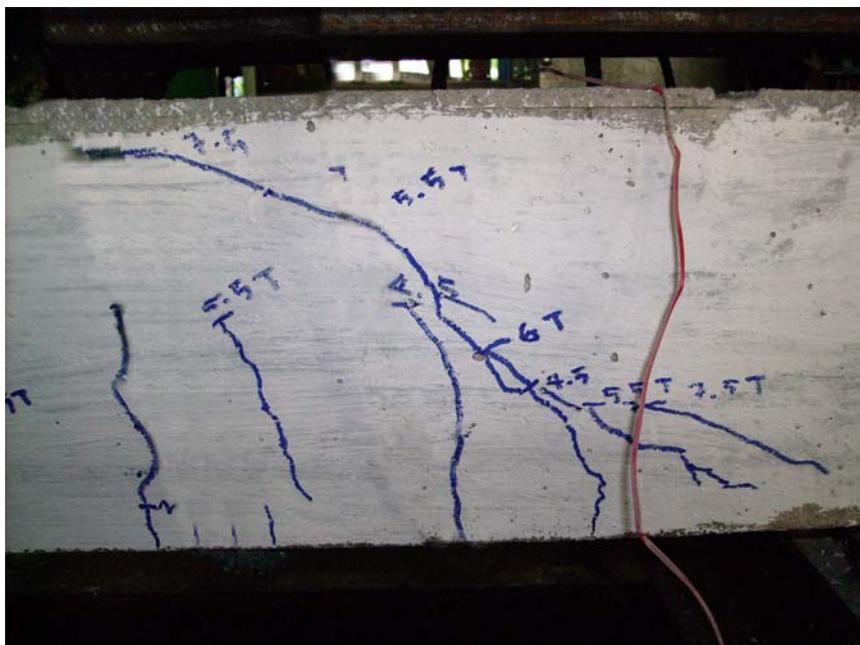
ภาพผนวกที่ ข19 คาน B3



ภาพผนวกที่ ข20 คาน B3



ภาพผนวกที่ ข21 คาน B3



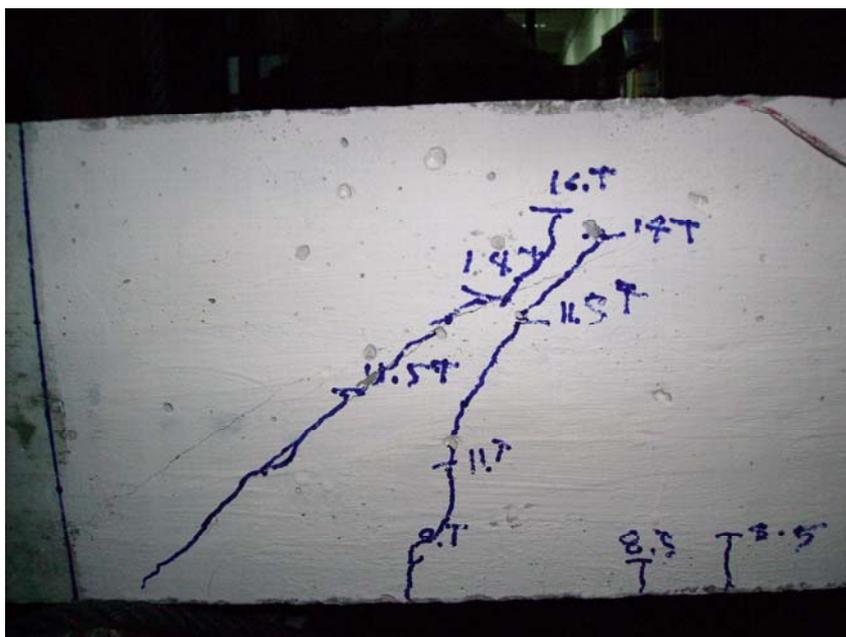
ภาพผนวกที่ ข22 คาน B3



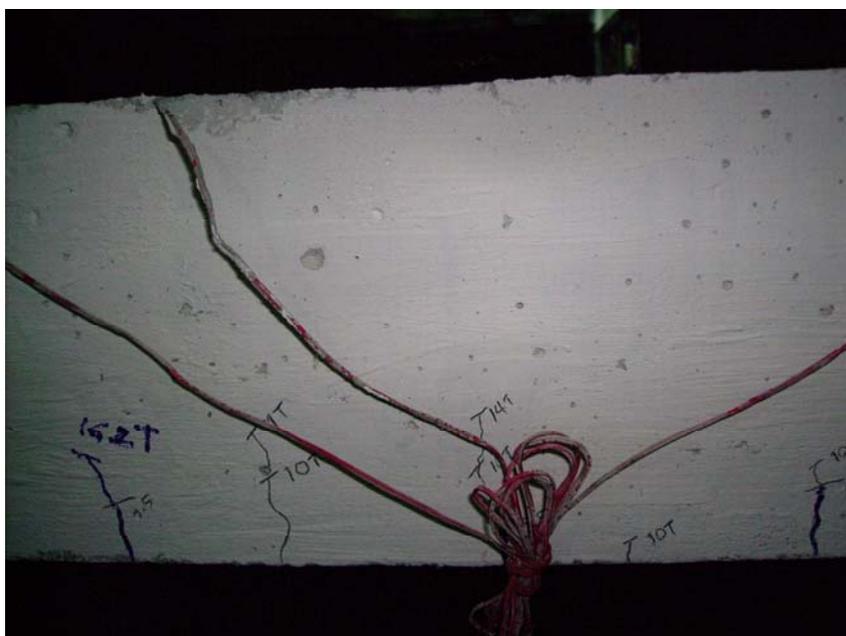
ภาพผนวกที่ ข23 คาน B4



ภาพผนวกที่ ข24 คาน B4



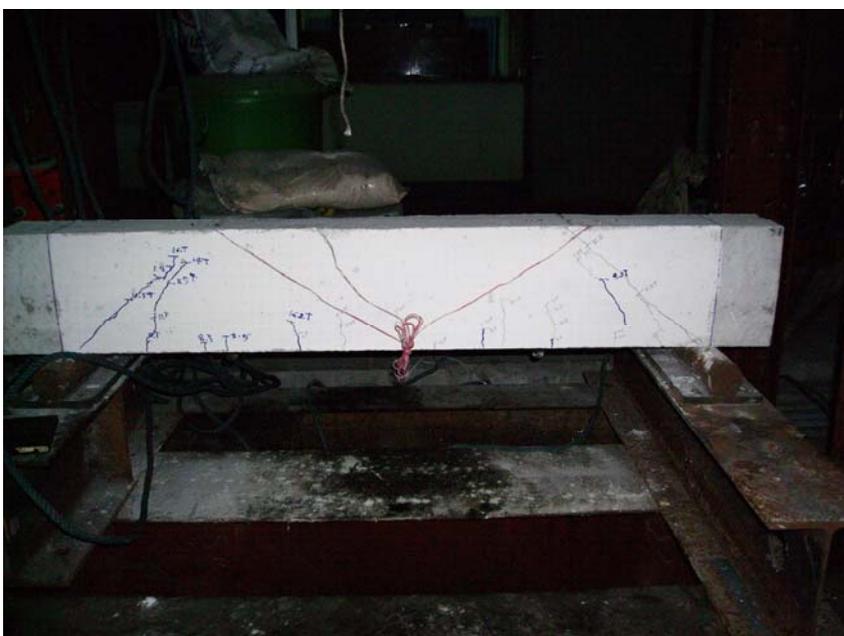
ภาพผนวกที่ ข25 คาน B4



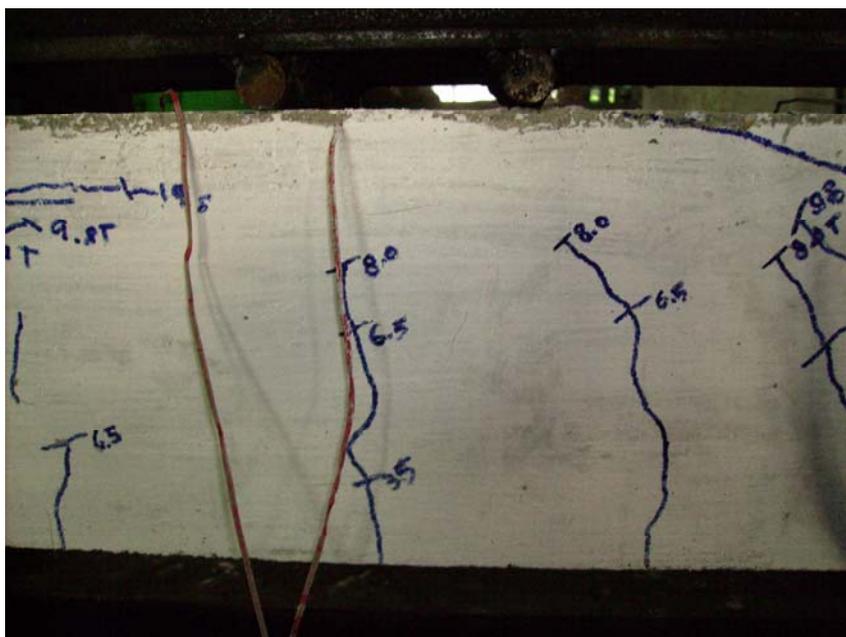
ภาพผนวกที่ ข26 คาน B4



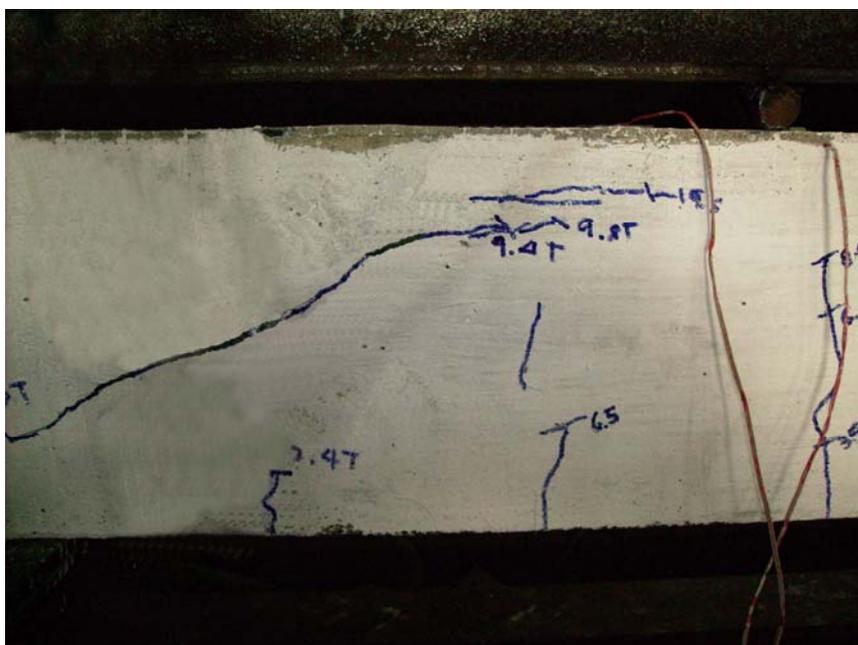
ภาพผนวกที่ ข27 คาน B4



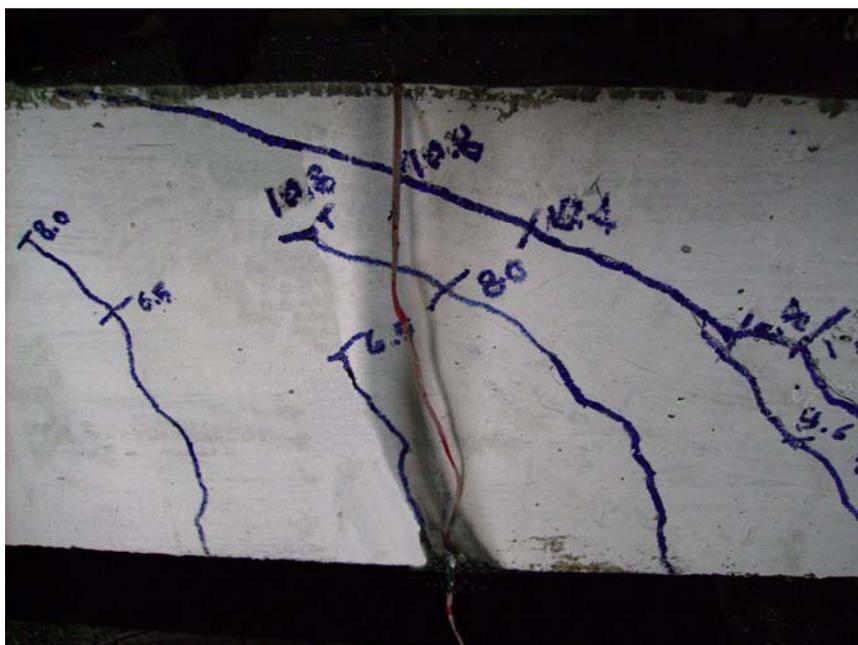
ภาพผนวกที่ ข28 คาน B4



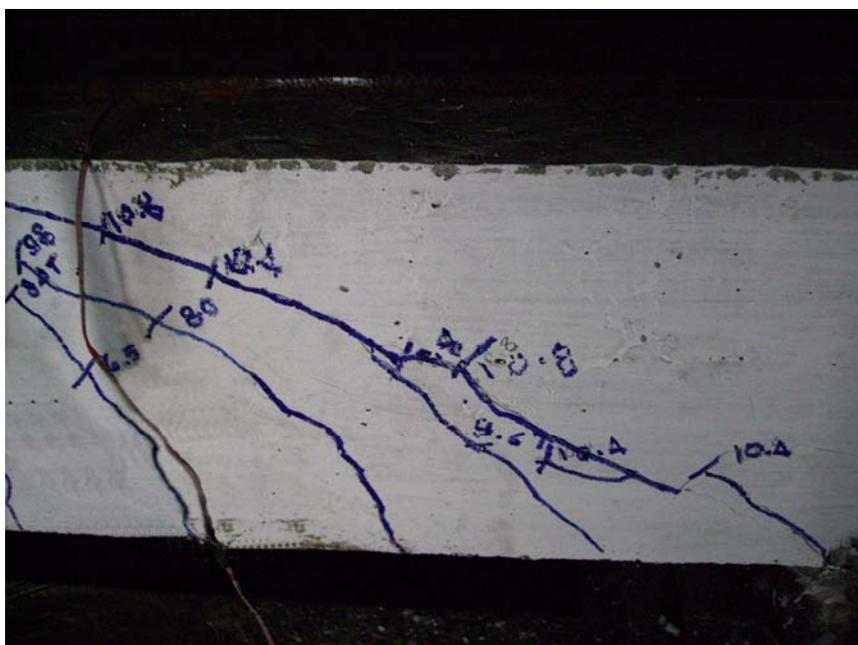
ภาพผนวกที่ ข29 คาน B5



ภาพผนวกที่ ข30 คาน B5



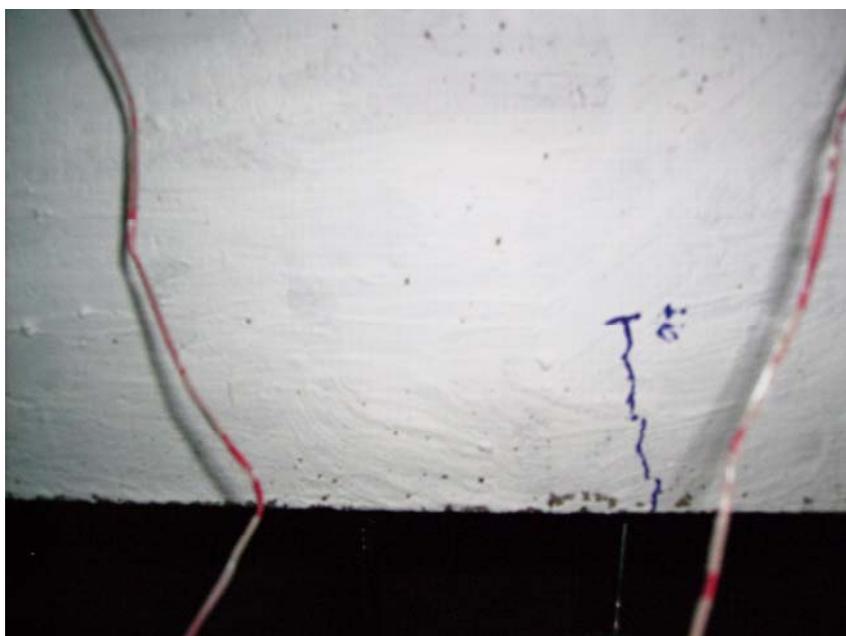
ภาพผนวกที่ ข31 คาน B5



ภาพผนวกที่ ข32 คาน B5



ภาพผนวกที่ ข33 คาน B6



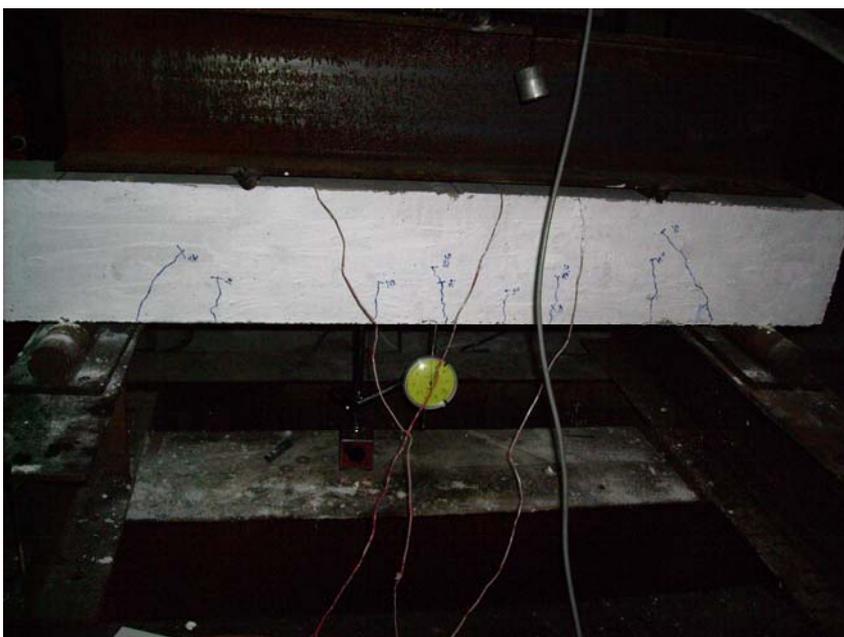
ภาพผนวกที่ ข34 คาน B6



ภาพผนวกที่ ข35 คาน B6



ภาพผนวกที่ ข36 คาน B6



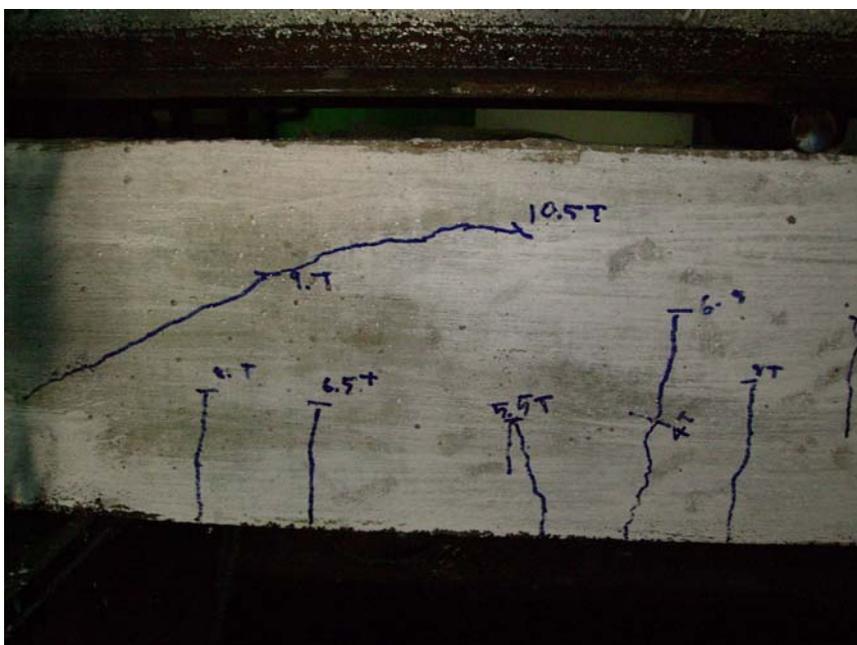
ภาพผนวกที่ ข37 คาน B6



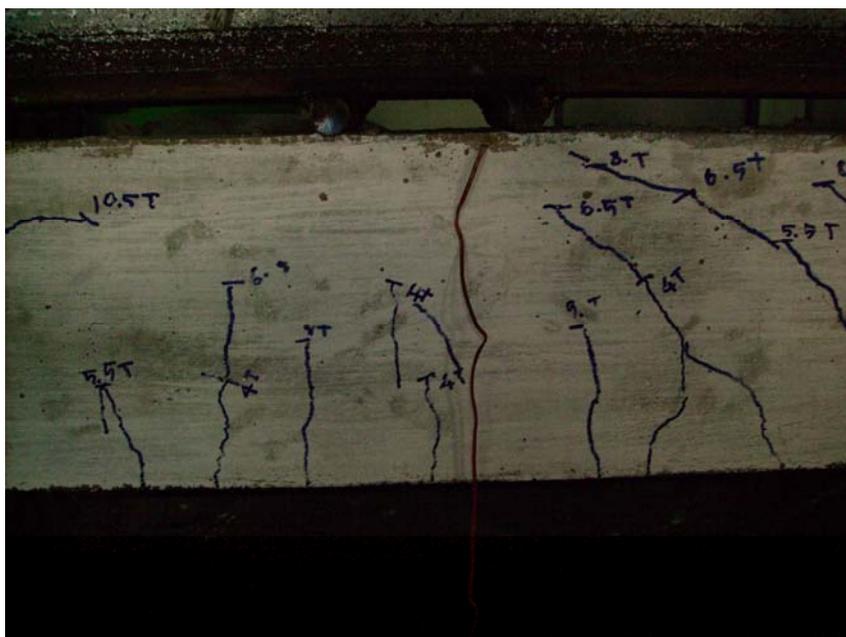
ภาพผนวกที่ ข38 คาน B6



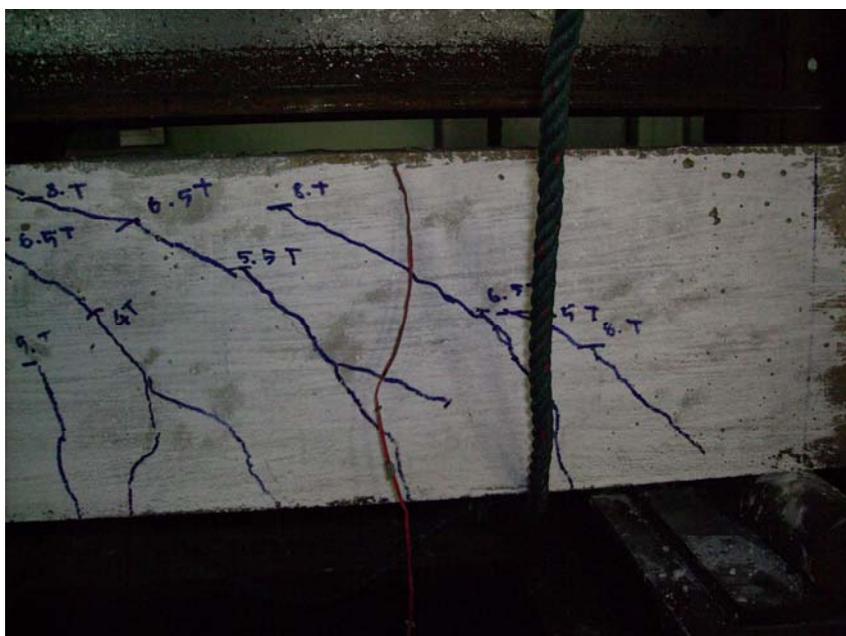
ภาพผนวกที่ ข39 คาน B7



ภาพผนวกที่ ข40 คาน B7



ภาพผนวกที่ ข41 คาน B7



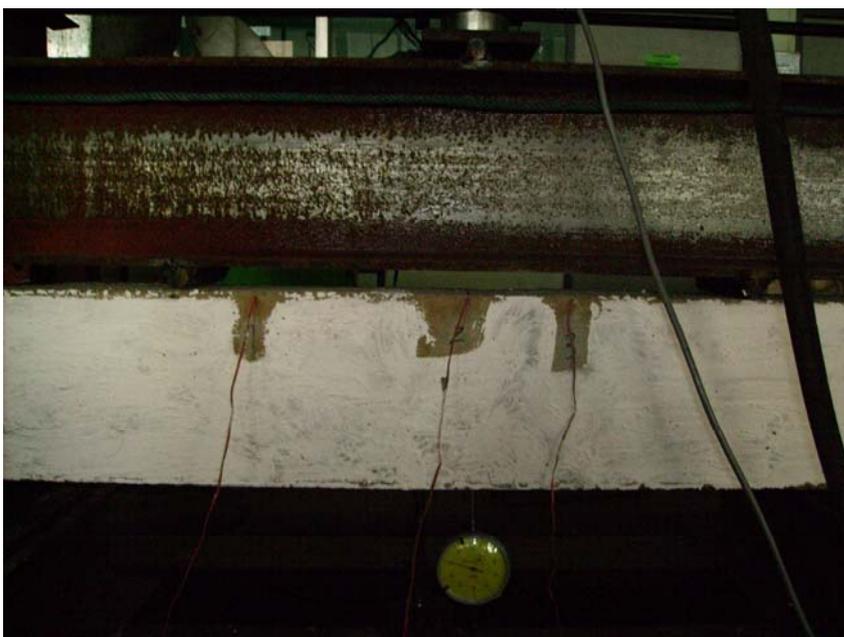
ภาพผนวกที่ ข42 คาน B7



ภาพผนวกที่ ข43 คาน B8



ภาพผนวกที่ ข44 คาน B8



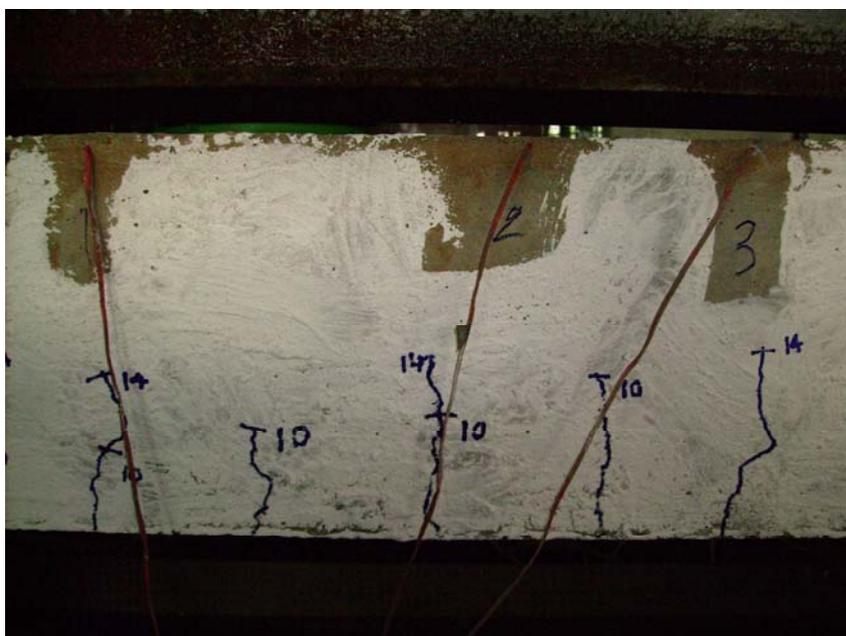
ภาพผนวกที่ ข45 คาน B8



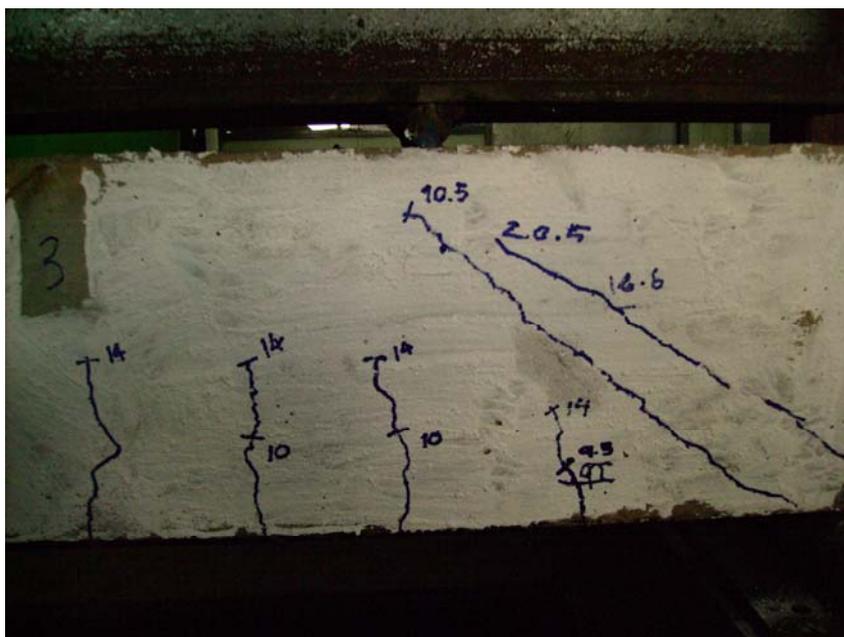
ภาพผนวกที่ ข46 คาน B8



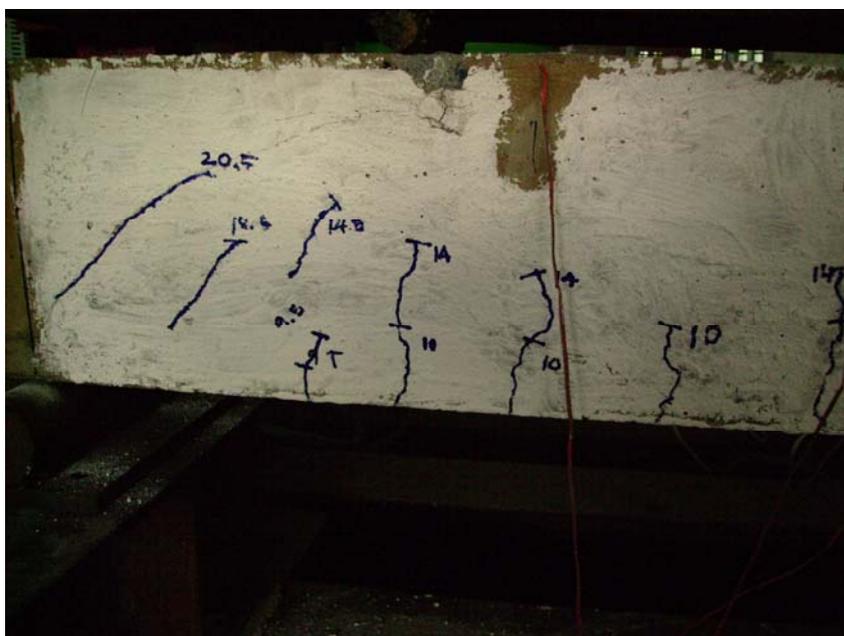
ภาพผนวกที่ ข47 คาน B8



ภาพผนวกที่ ข48 คาน B8



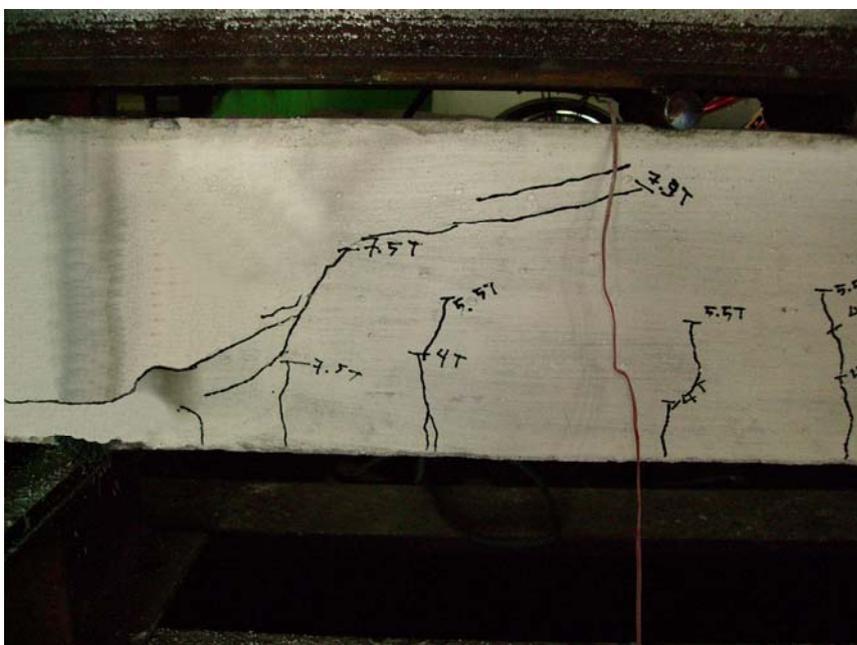
ภาพผนวกที่ ข49 คาน B8



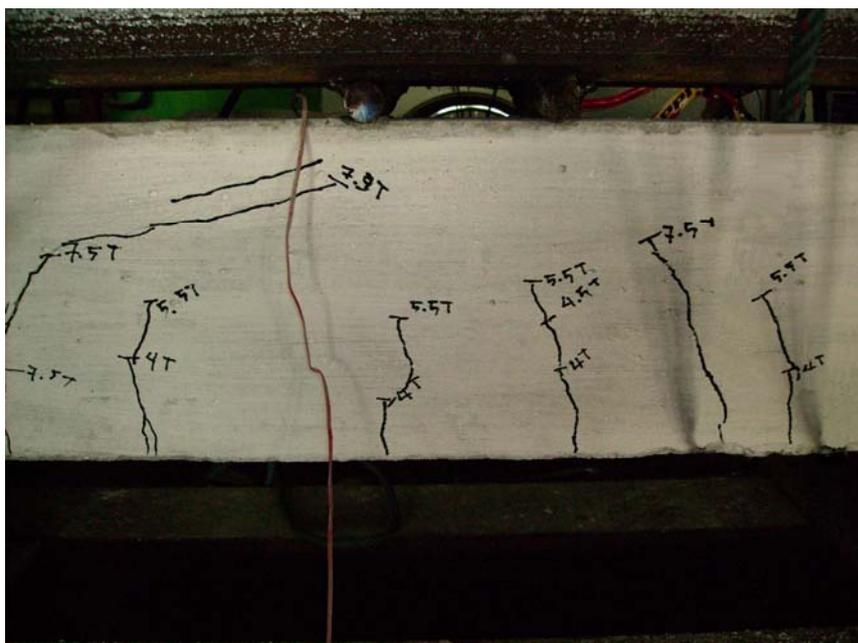
ภาพผนวกที่ ข50 คาน B8



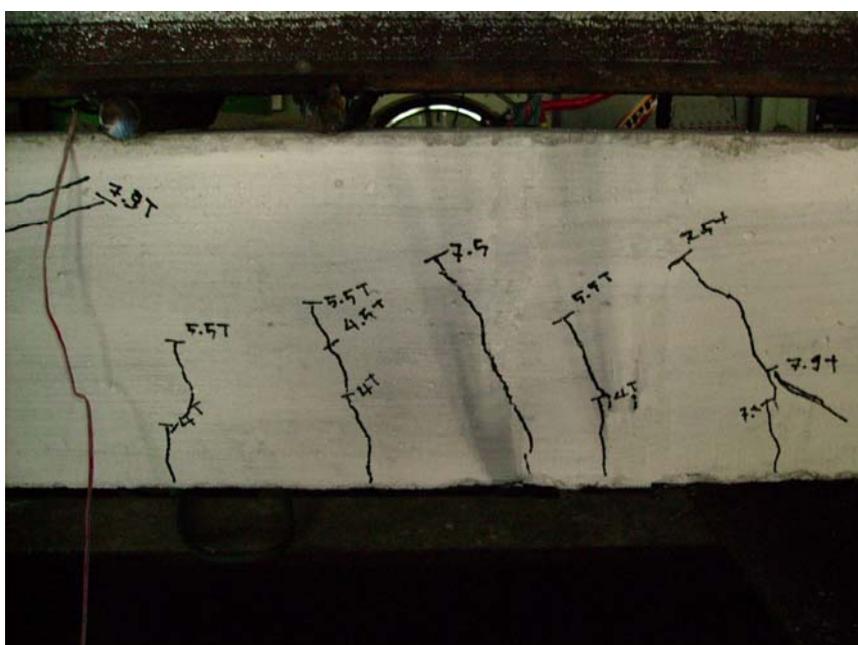
ภาพผนวกที่ ข51 คาน B1*



ภาพผนวกที่ ข52 คาน B1*



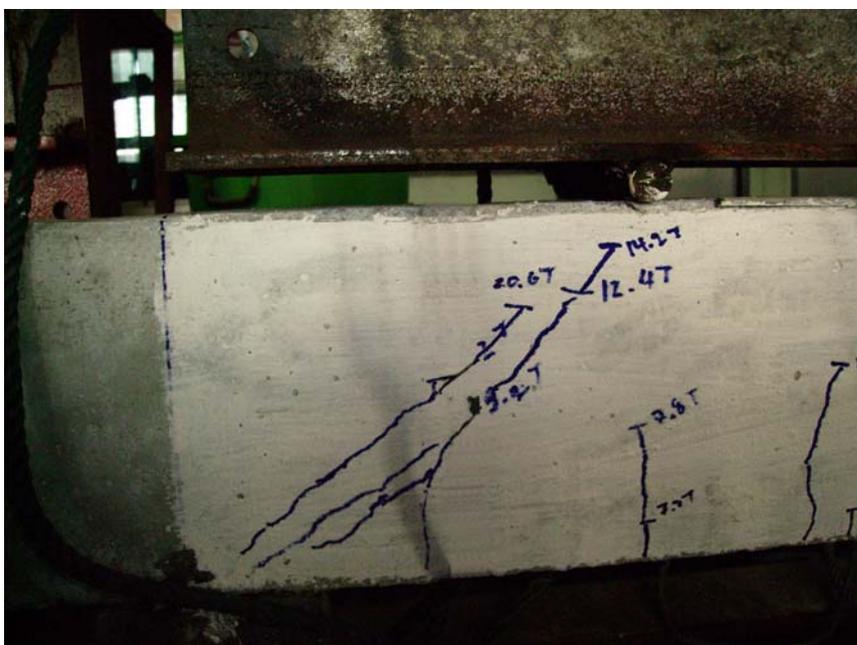
ภาพผนวกที่ ข53 คาน B1*



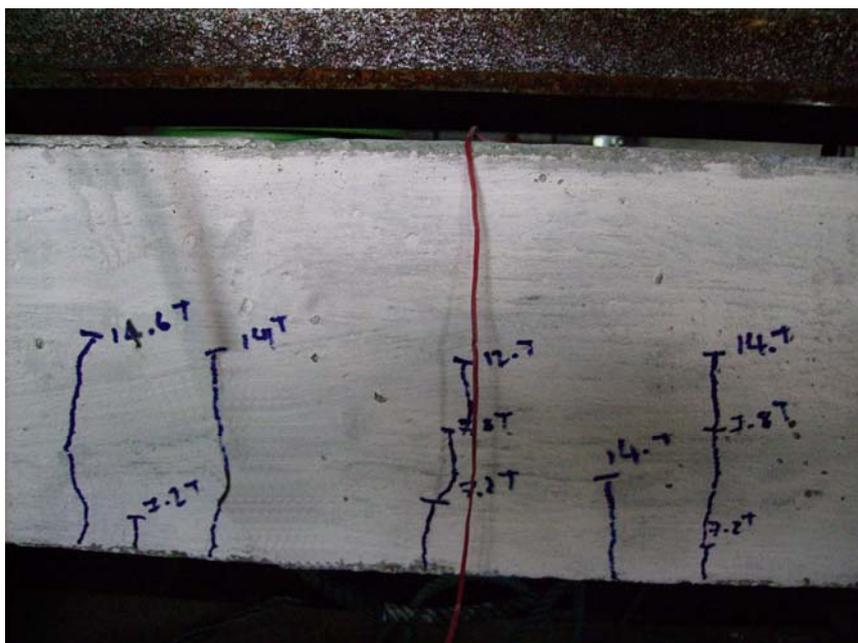
ภาพผนวกที่ ข54 คาน B1*



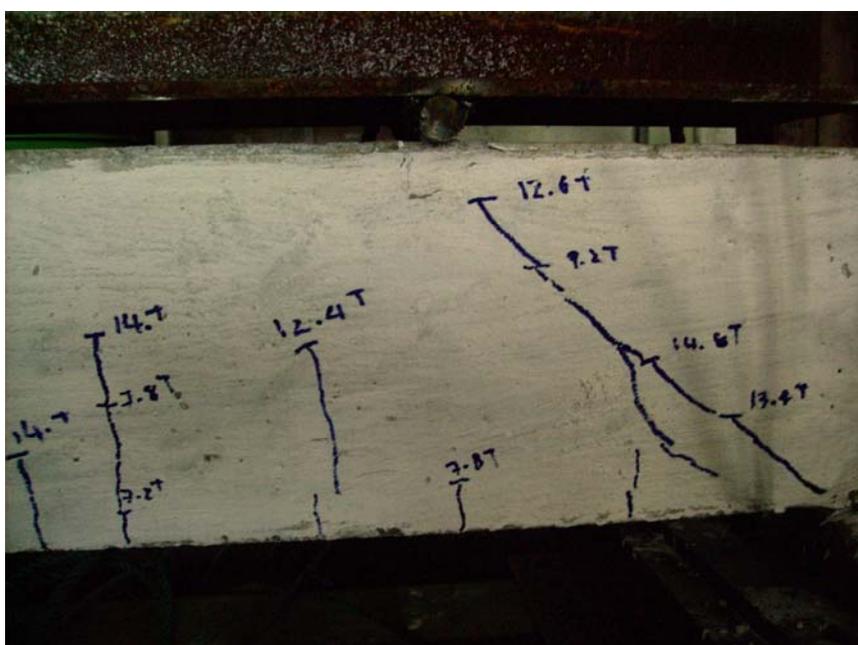
ภาพผนวกที่ ข55 คาน B2*



ภาพผนวกที่ ข56 คาน B2*



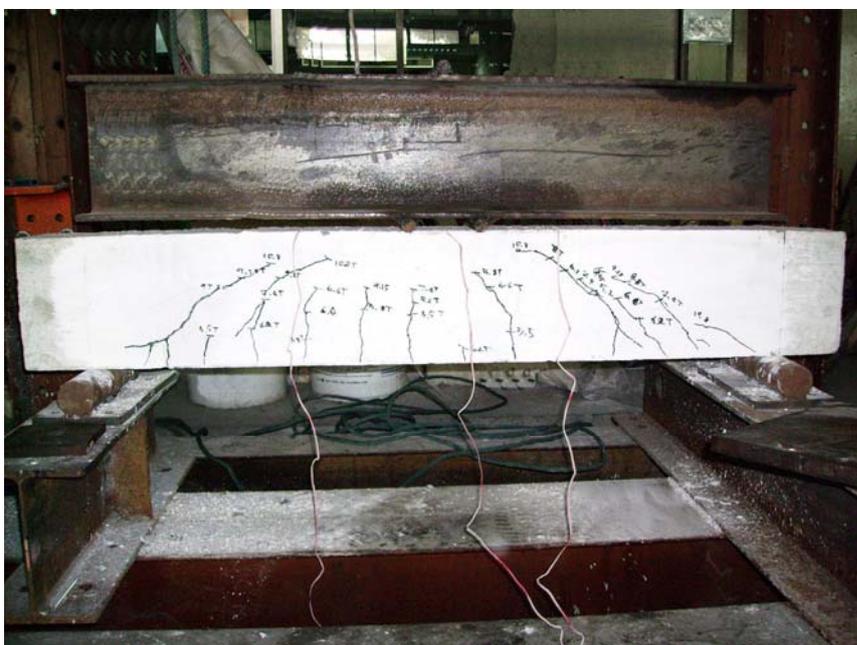
ภาพผนวกที่ ข57 คาน B2*



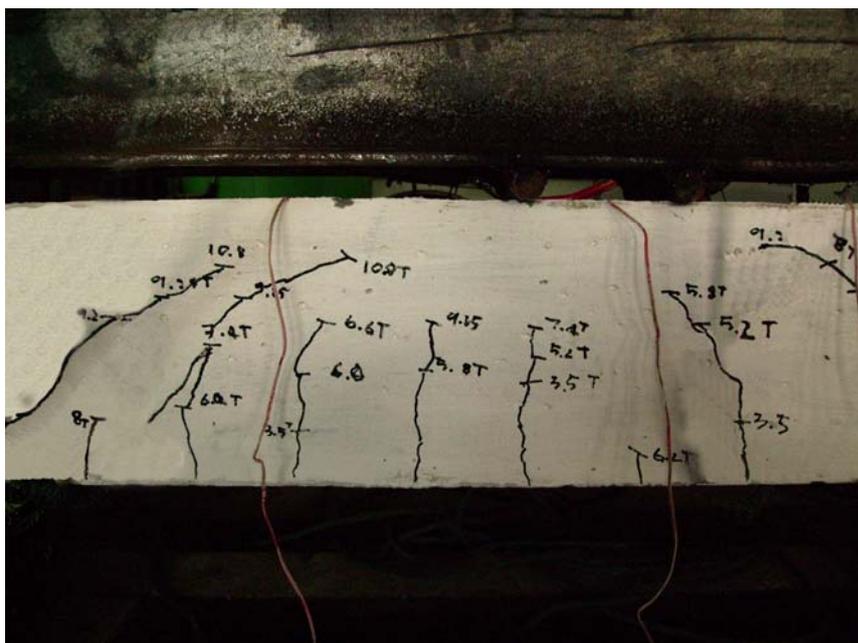
ภาพผนวกที่ ข58 คาน B2*



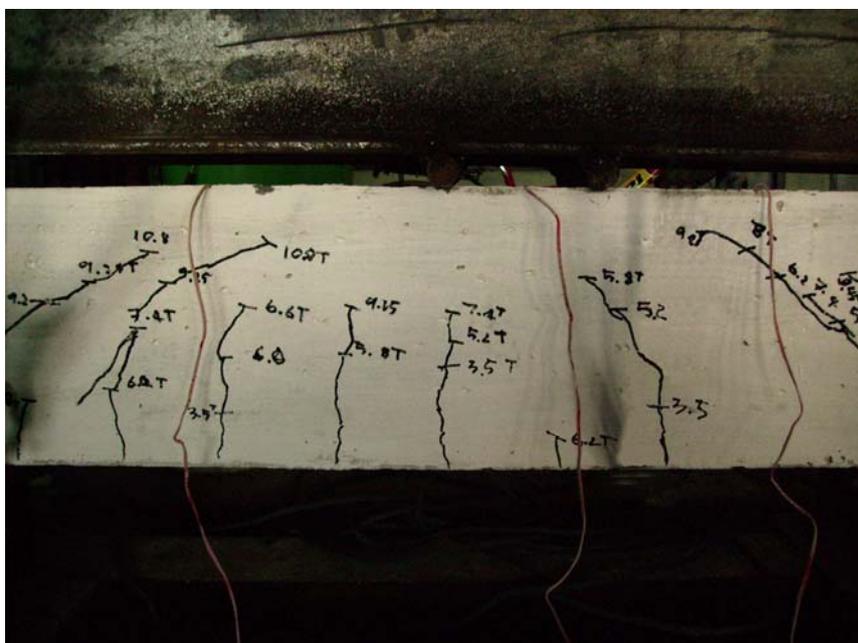
ภาพผนวกที่ ข59 คาน B7*



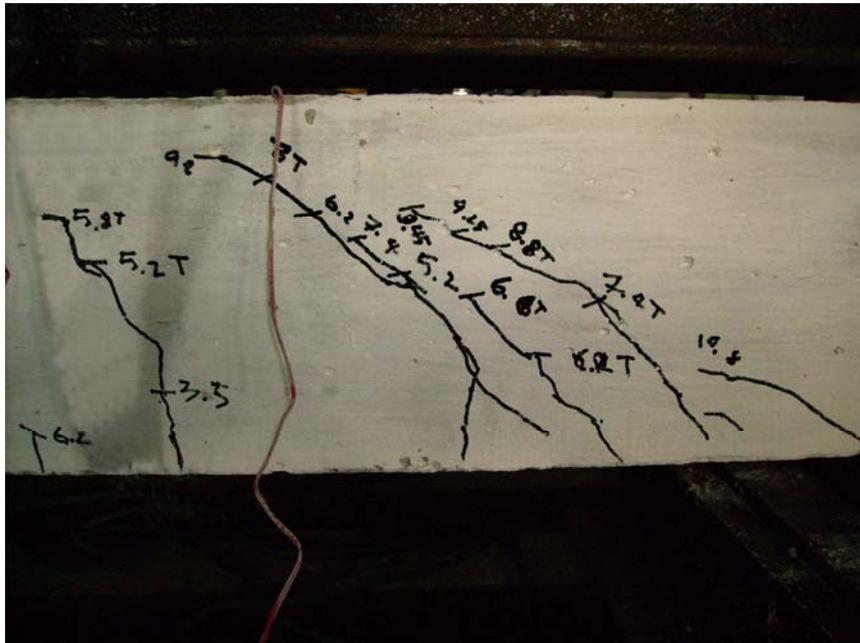
ภาพผนวกที่ ข60 คาน B7*



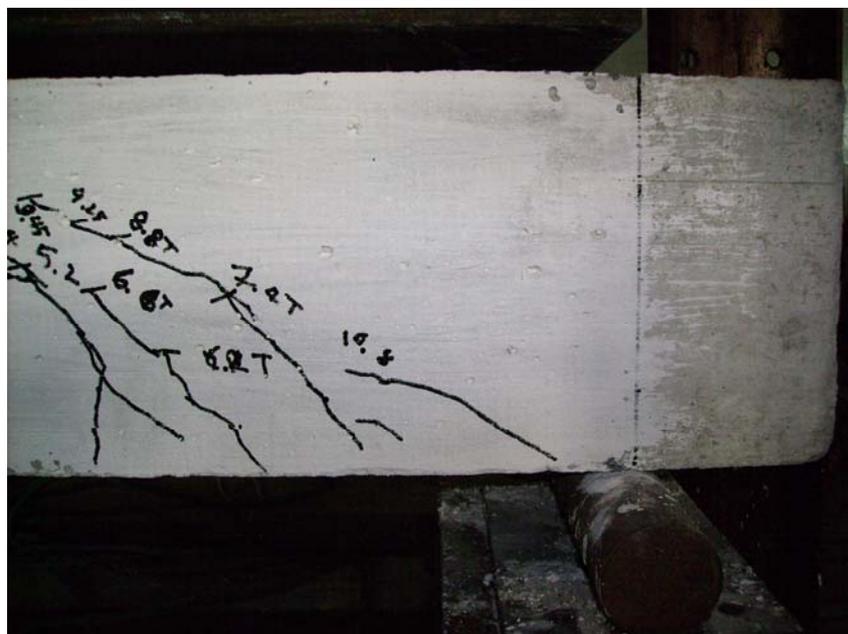
ภาพผนวกที่ ข61 คาน B7*



ภาพผนวกที่ ข62 คาน B7*



ภาพผนวกที่ ข63 คาน B7*



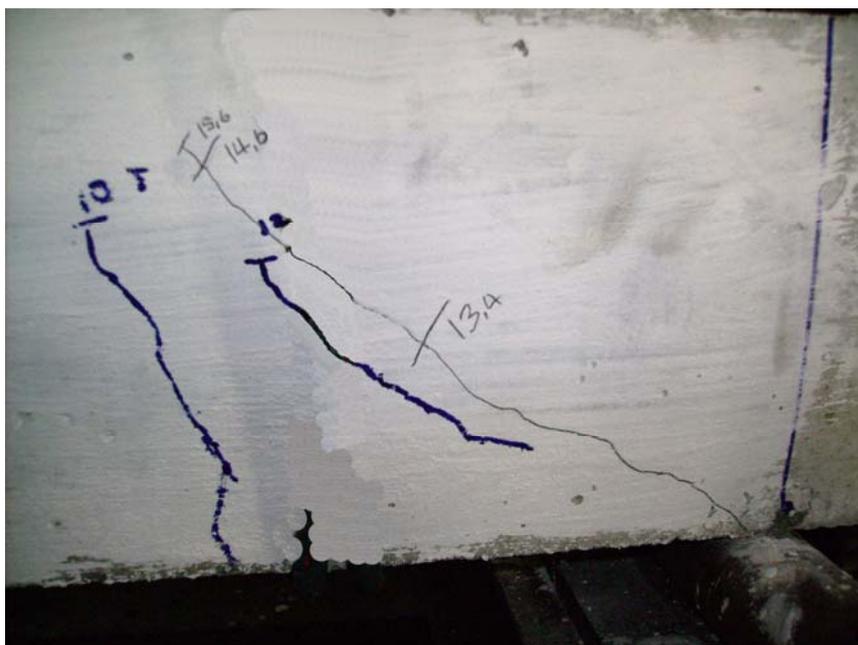
ภาพผนวกที่ ข64 คาน B7*



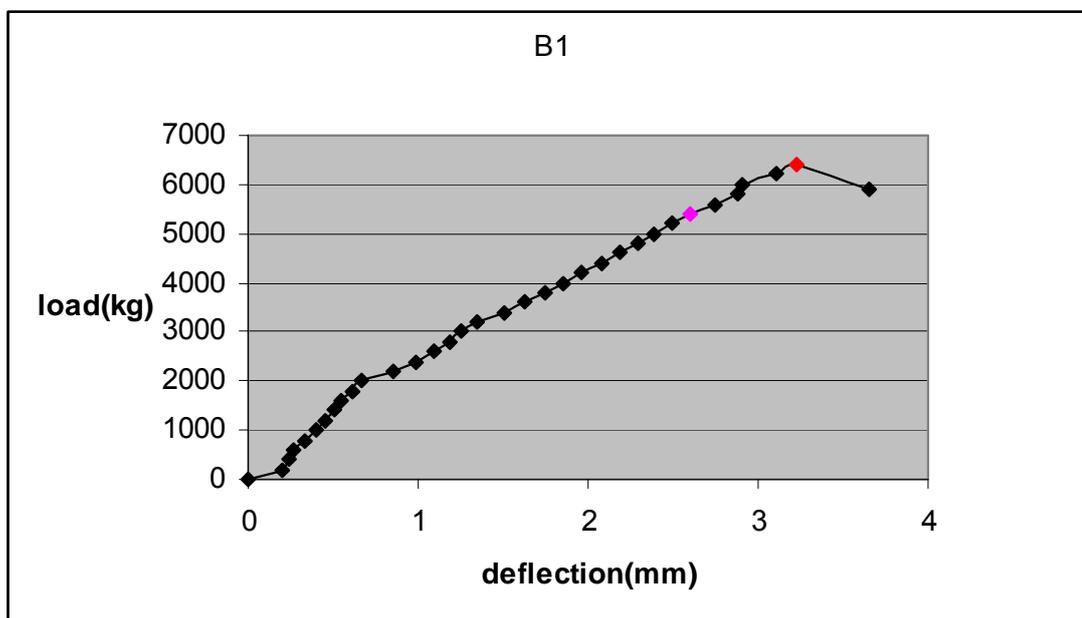
ภาพผนวกที่ ข67 คาน B8*



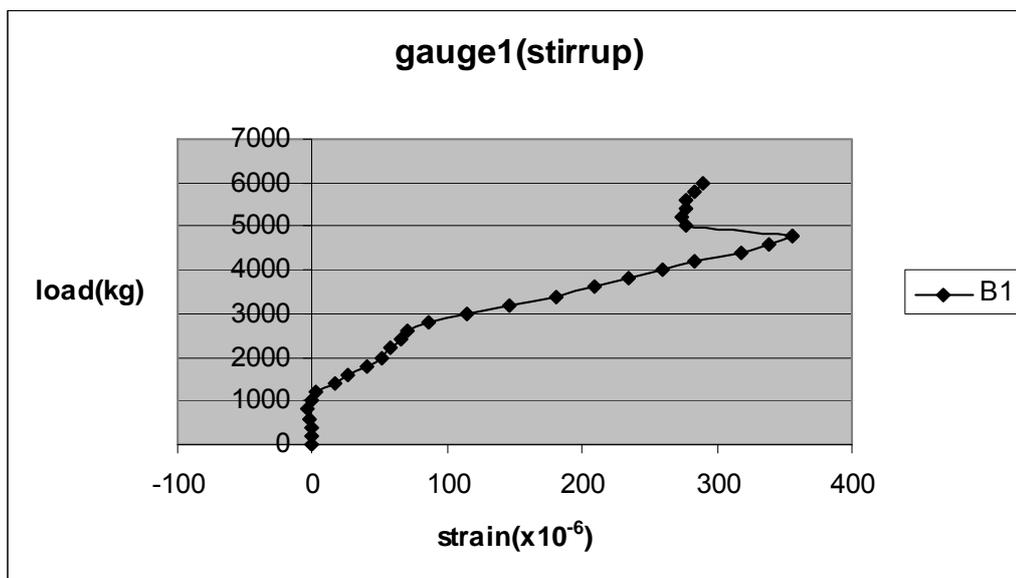
ภาพผนวกที่ ข68 คาน B8*



ภาพผนวกที่ ข69 คาน B8*

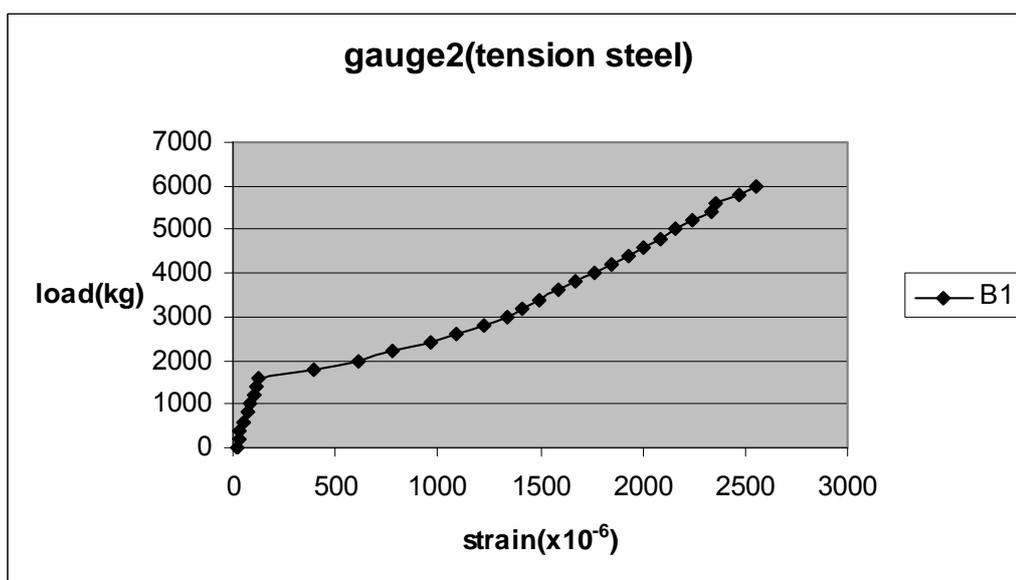


ภาพผนวกที่ ข70 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของ คาน B1

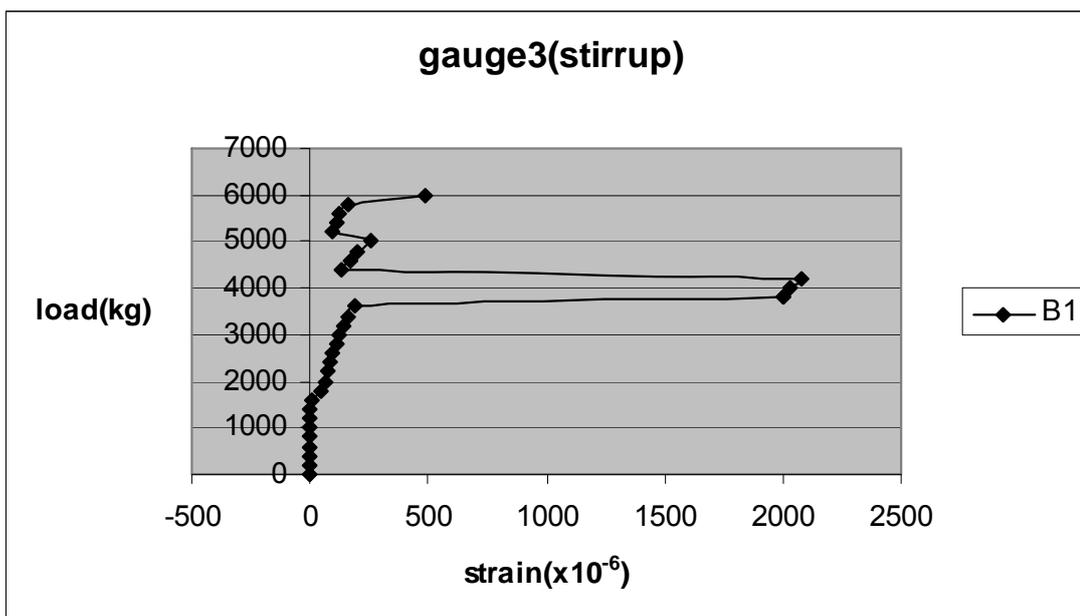


ภาพผนวกที่ ข71 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กรับแรงเฉือน
ซ้ายมือของคาน B1

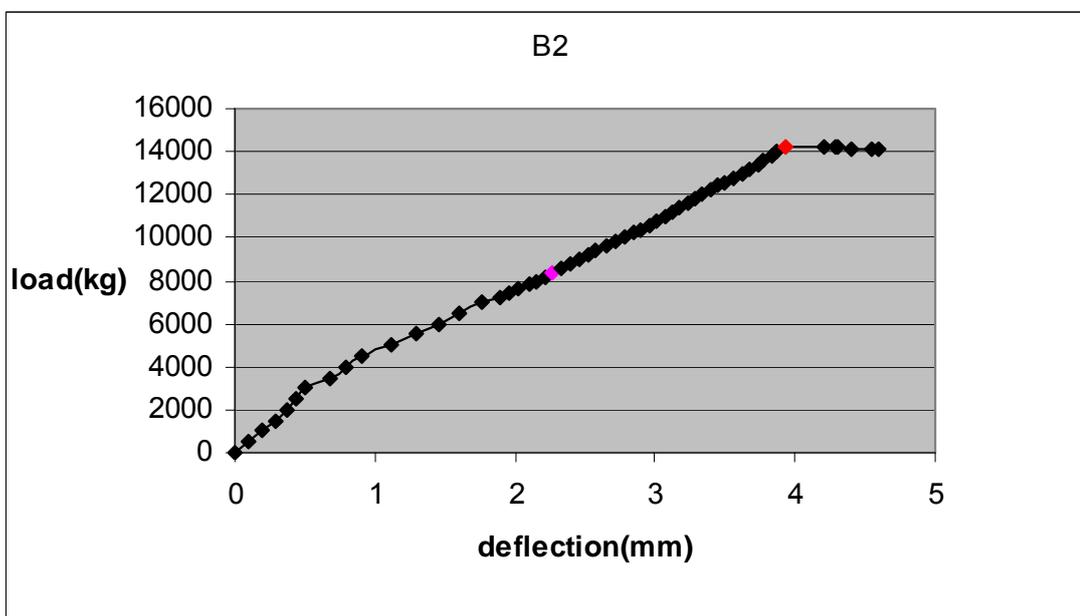
หมายเหตุ ◆ = P_{ci} (น้ำหนักวิกฤต)
◆ = P_u (น้ำหนักประลัย)



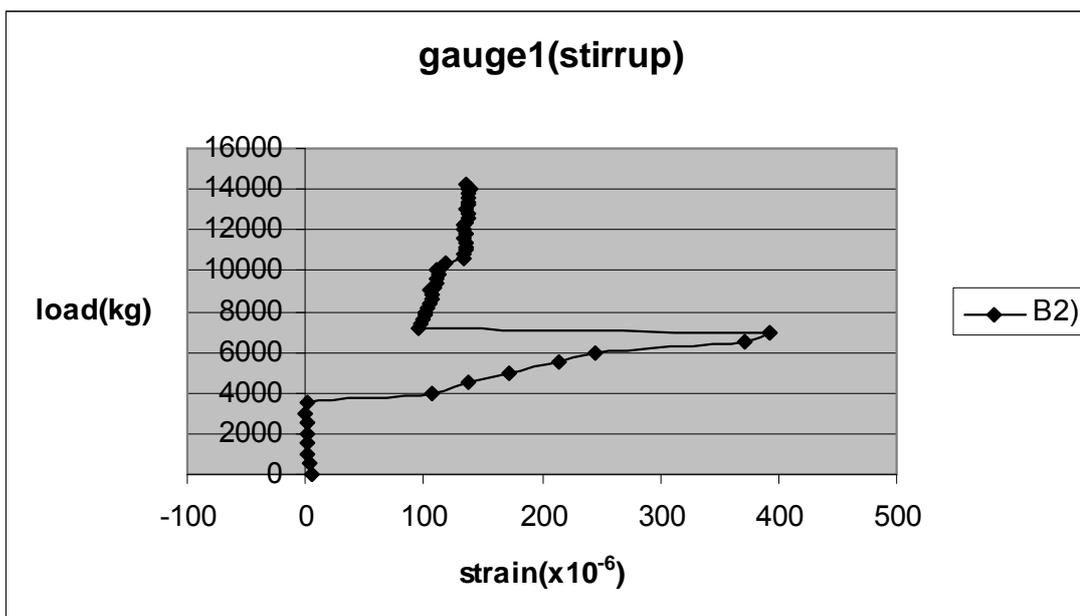
ภาพผนวกที่ ข72 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัด
ของคาน B1



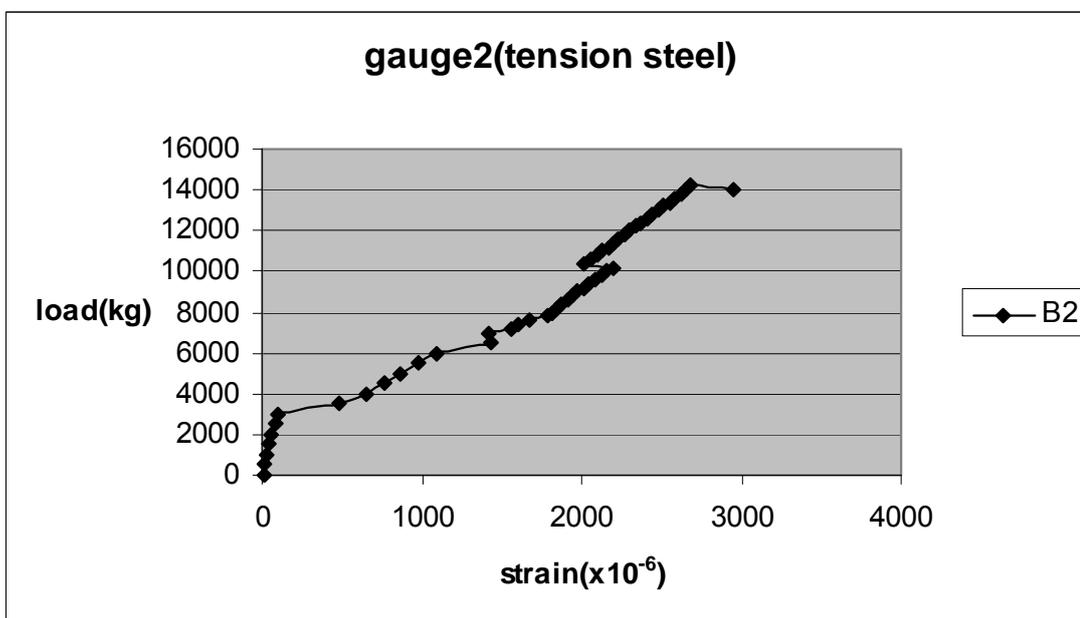
ภาพผนวกที่ ข73 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของคาน B1



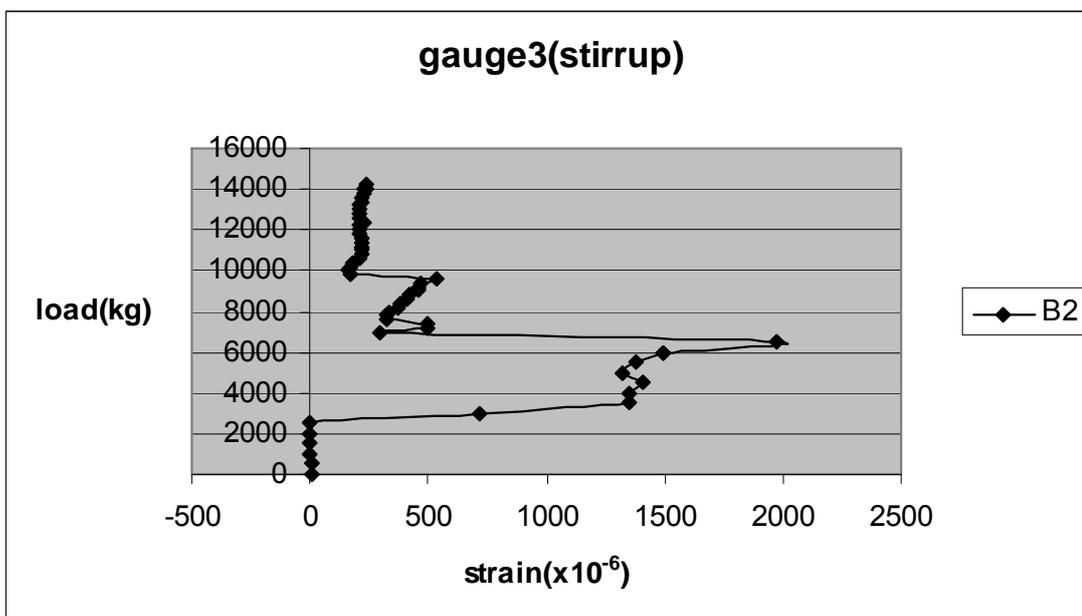
ภาพผนวกที่ ข74 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B2



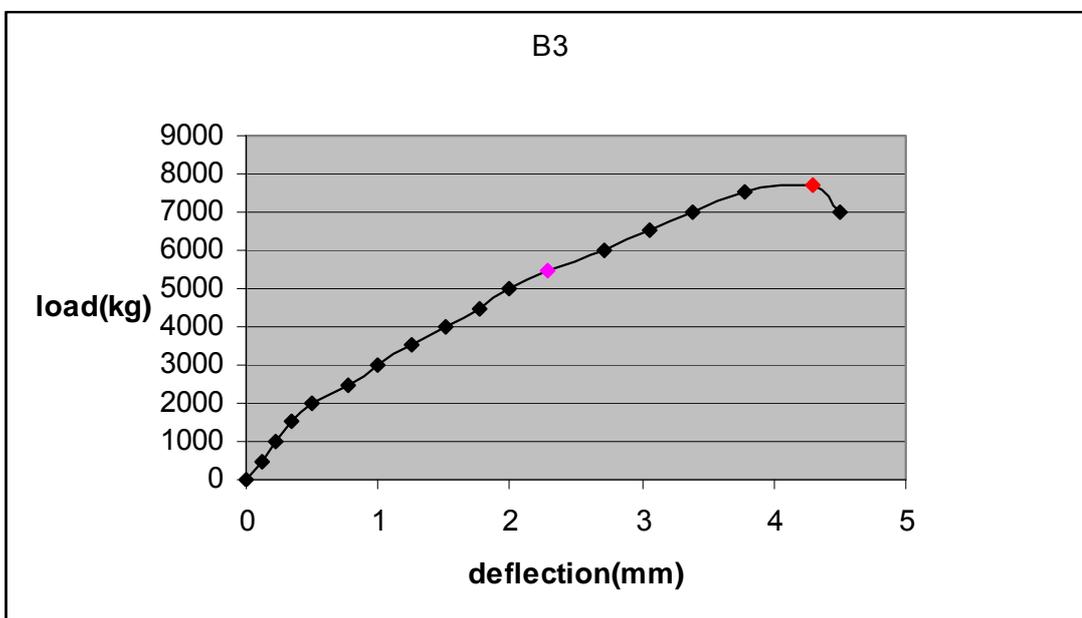
ภาพผนวกที่ ข75 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริม
รับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนซ้ายมือของ คาน B2



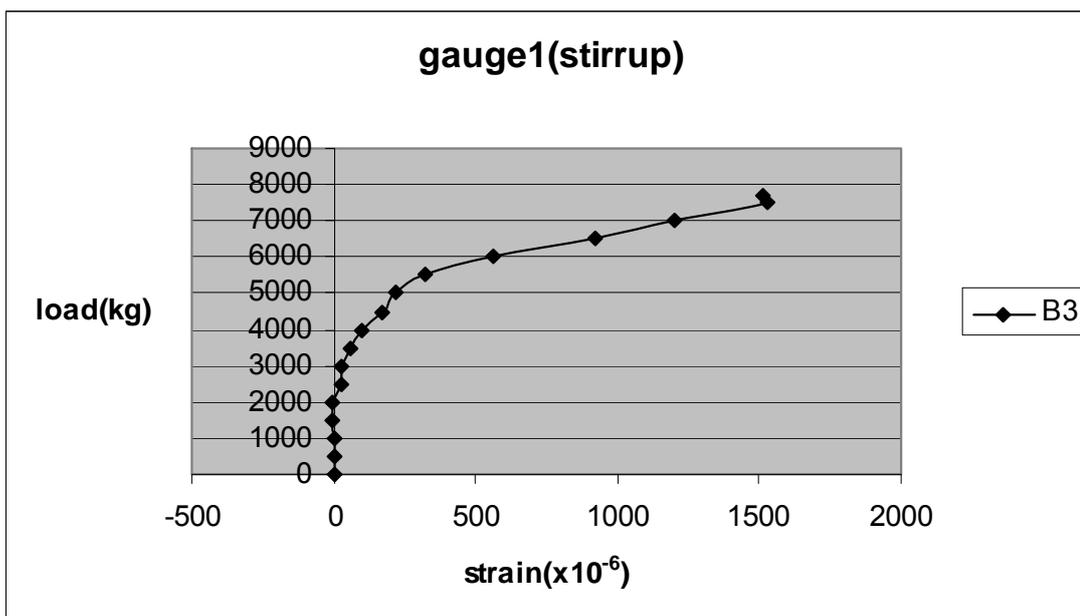
ภาพผนวกที่ ข76 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว
ของ คาน B2



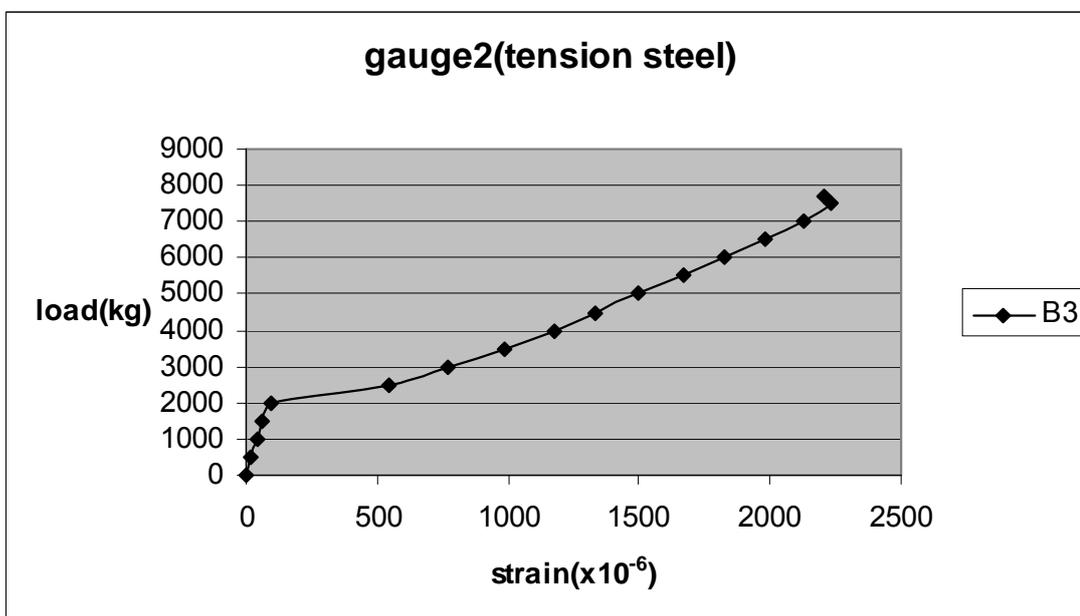
ภาพผนวกที่ ข77 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริม
รับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนขามือของ คาน B2



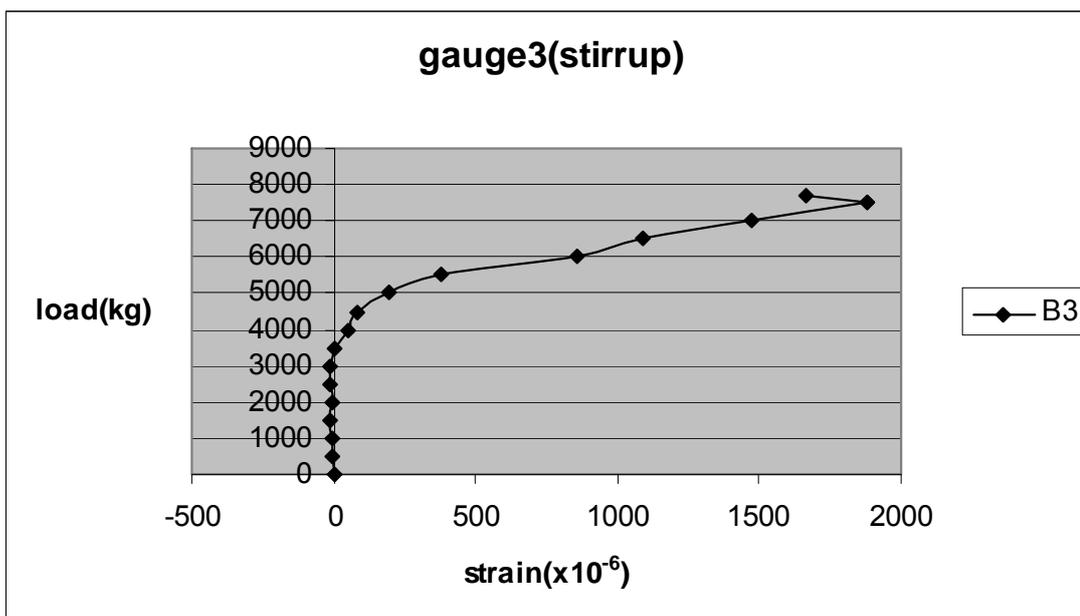
ภาพผนวกที่ ข78 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B3



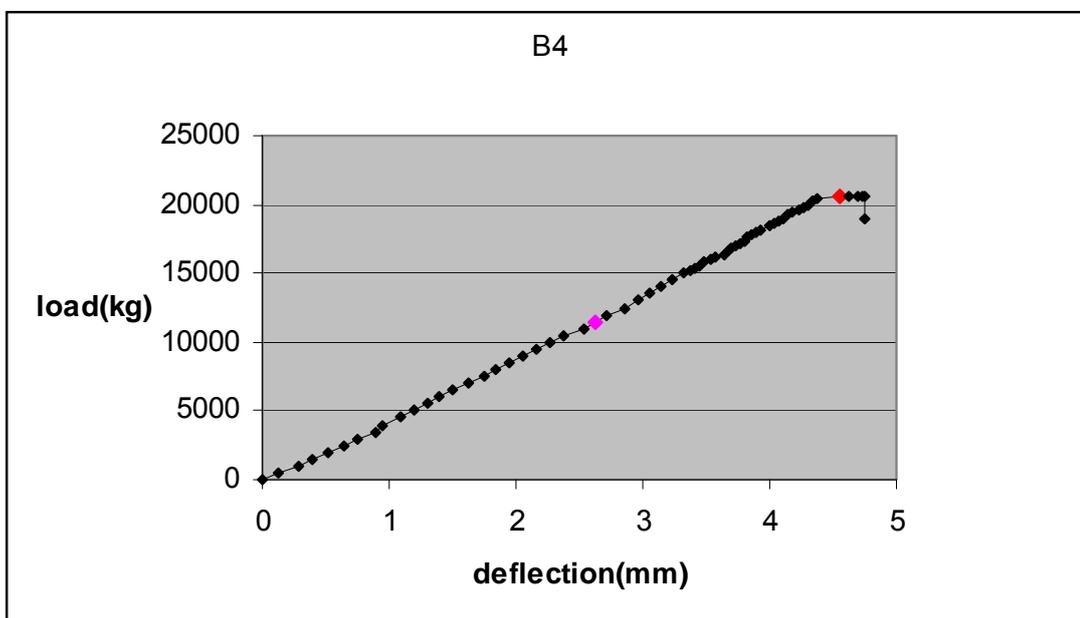
ภาพผนวกที่ ข79 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนซ้ายมือของ คาน B3



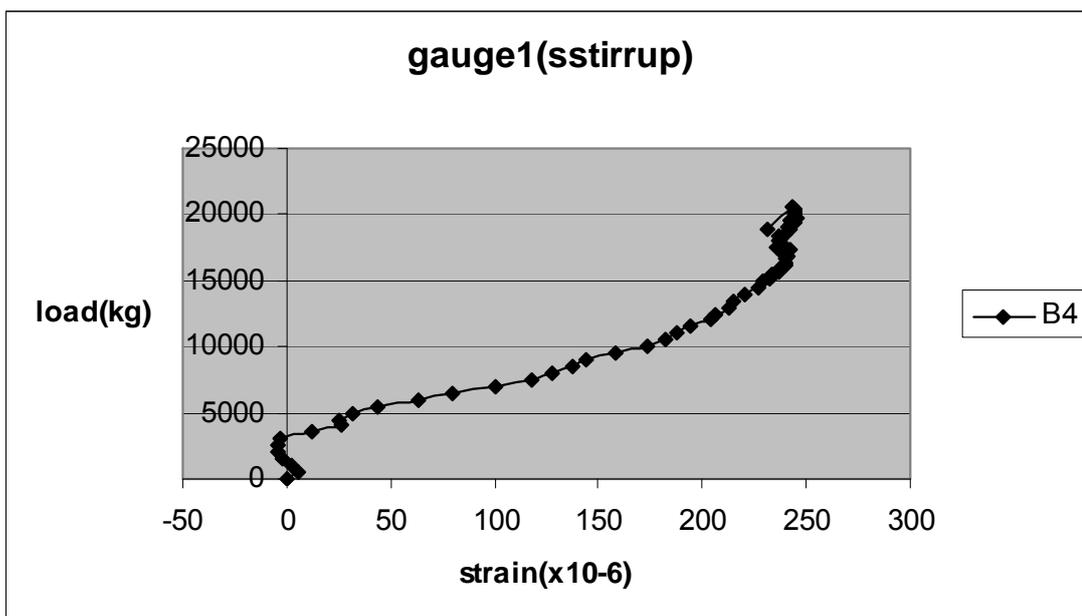
ภาพผนวกที่ ข80 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวของ คาน B3



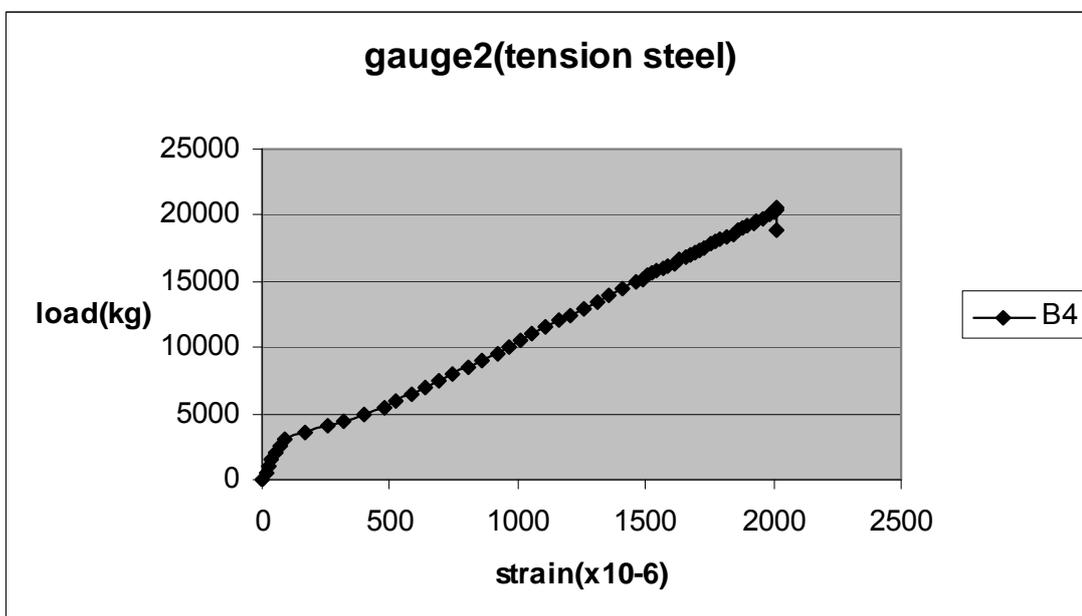
ภาพผนวกที่ ข81 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนขามือของ คาน B3



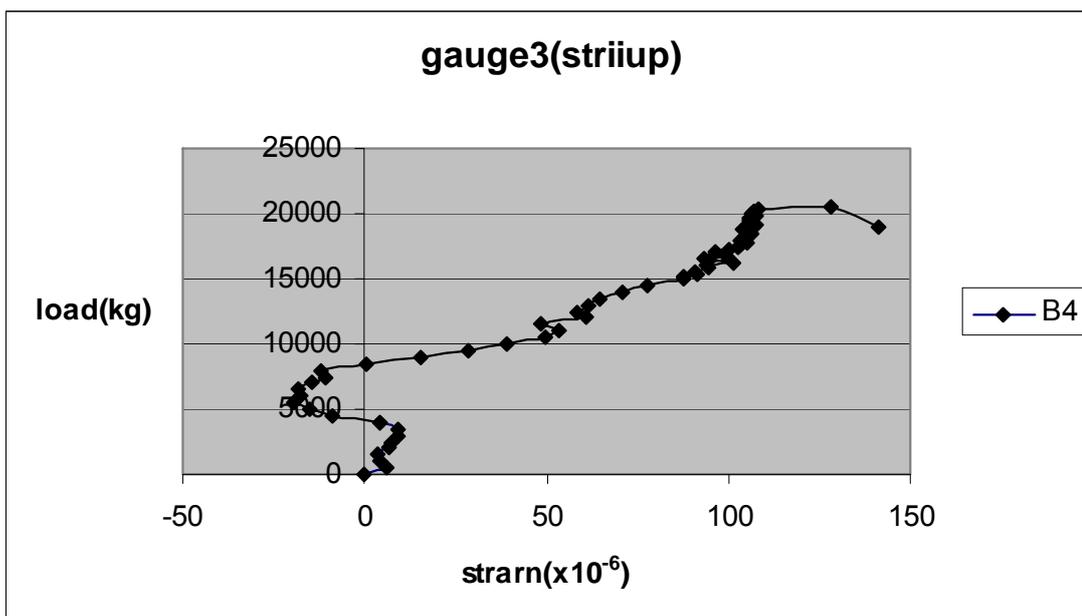
ภาพผนวกที่ ข82 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B4



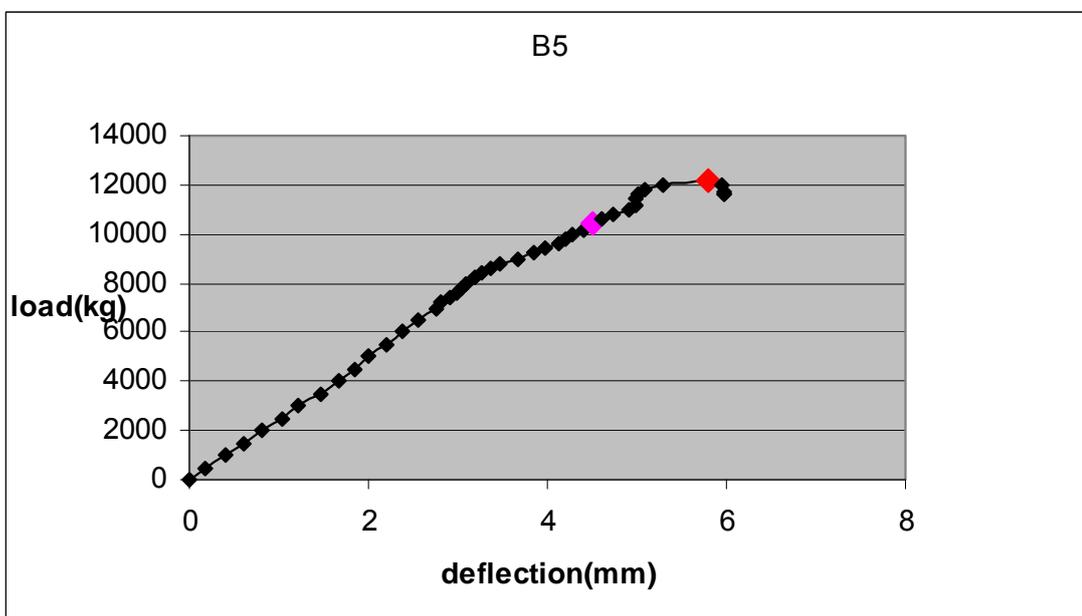
ภาพผนวกที่ ข83 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริม
รับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนซ้ายมือของ คาน B4



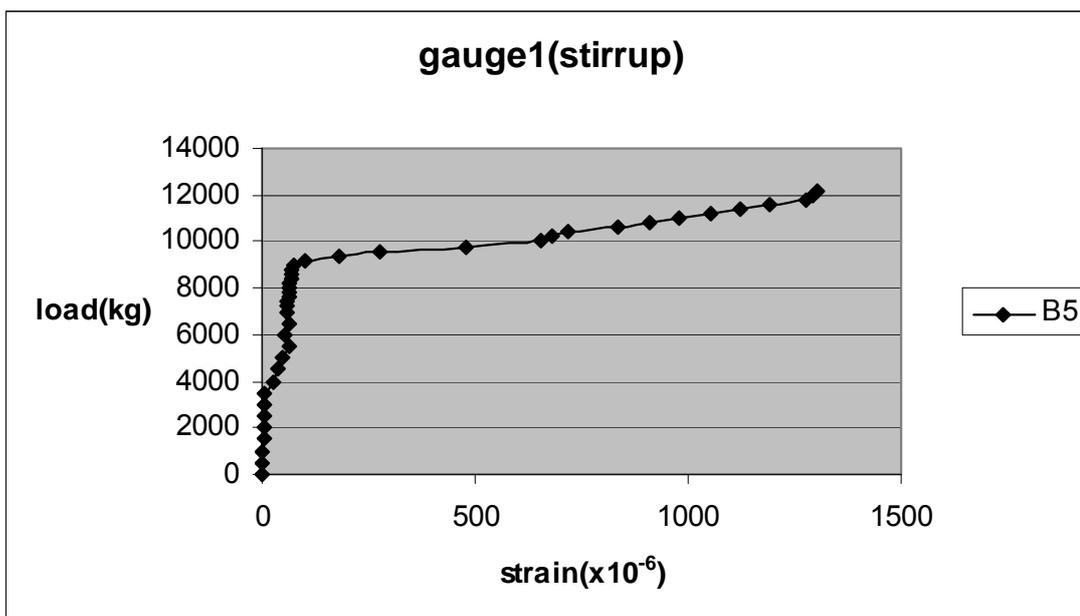
ภาพผนวกที่ ข84 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว
ของ คาน B4



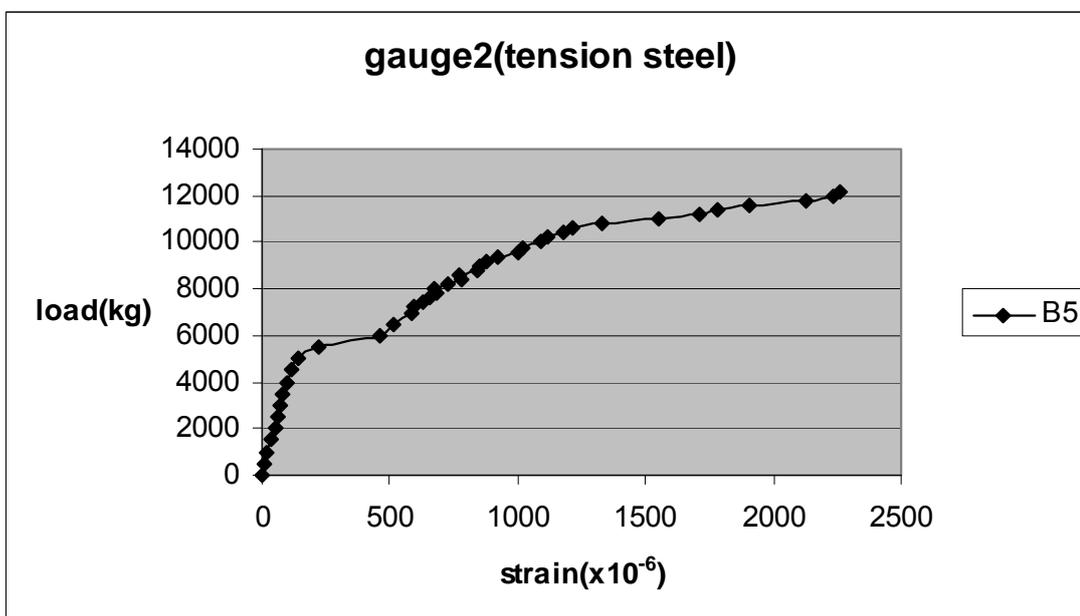
ภาพผนวกที่ ข85 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริม
รับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนขามือของ คาน B4



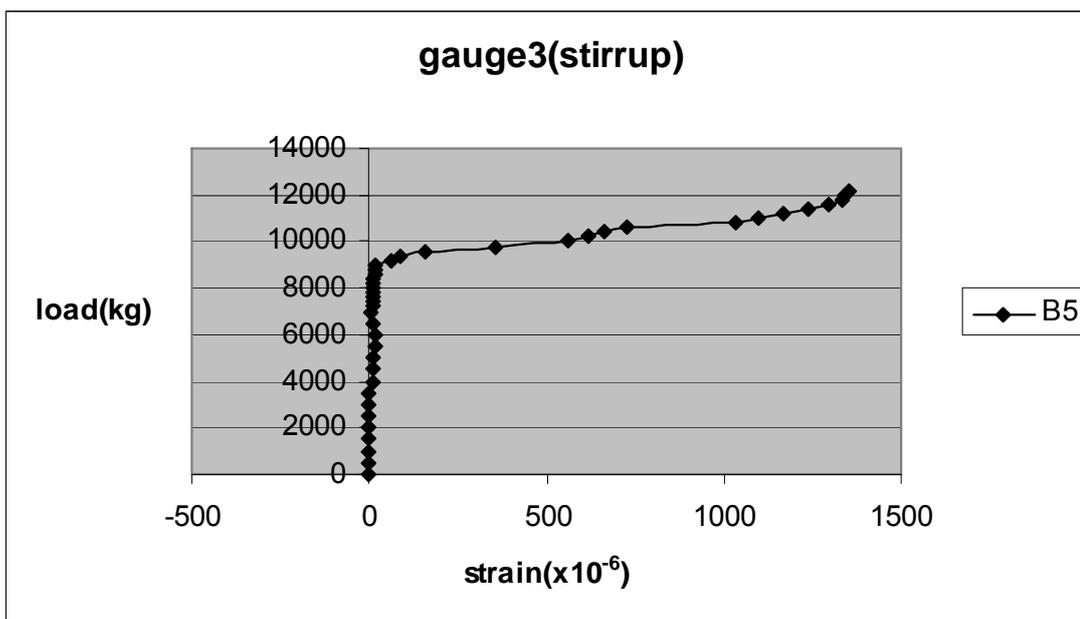
ภาพผนวกที่ ข86 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B5



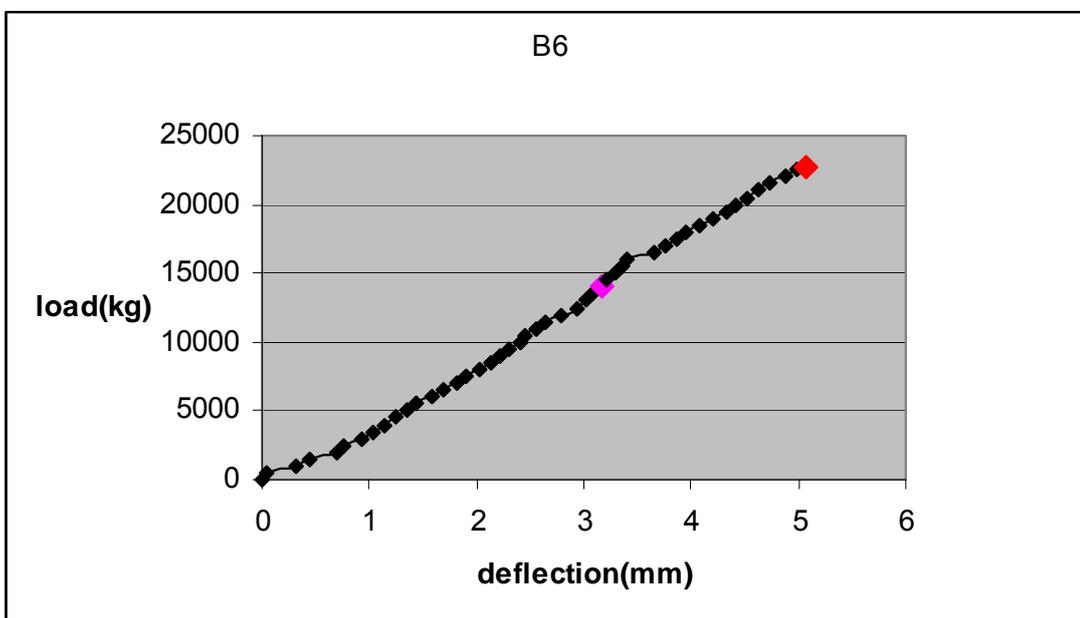
ภาพผนวกที่ ข87 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริม
รับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนซ้ายมือของ คาน B5



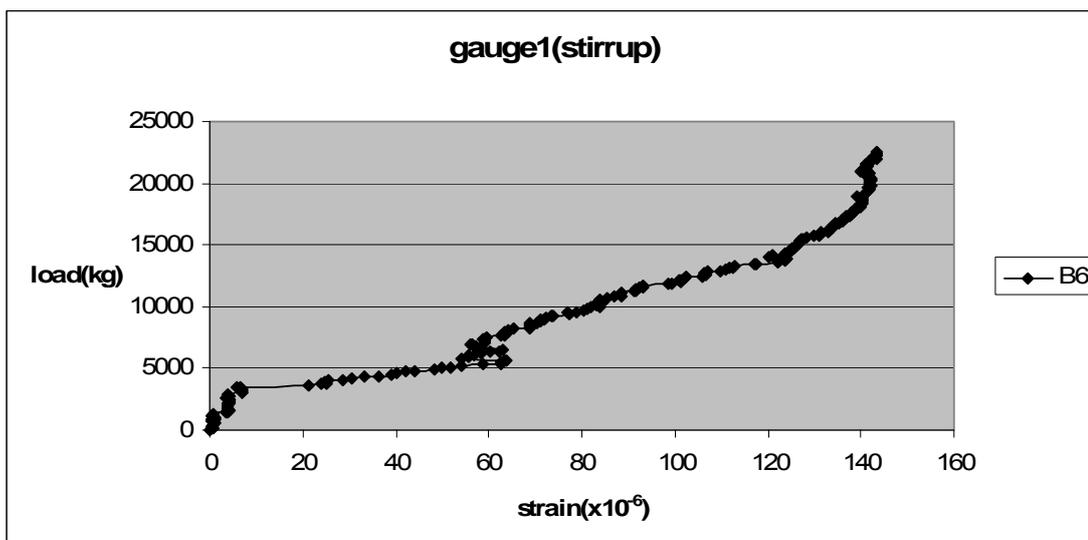
ภาพผนวกที่ ข88 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว
ของ คาน B5



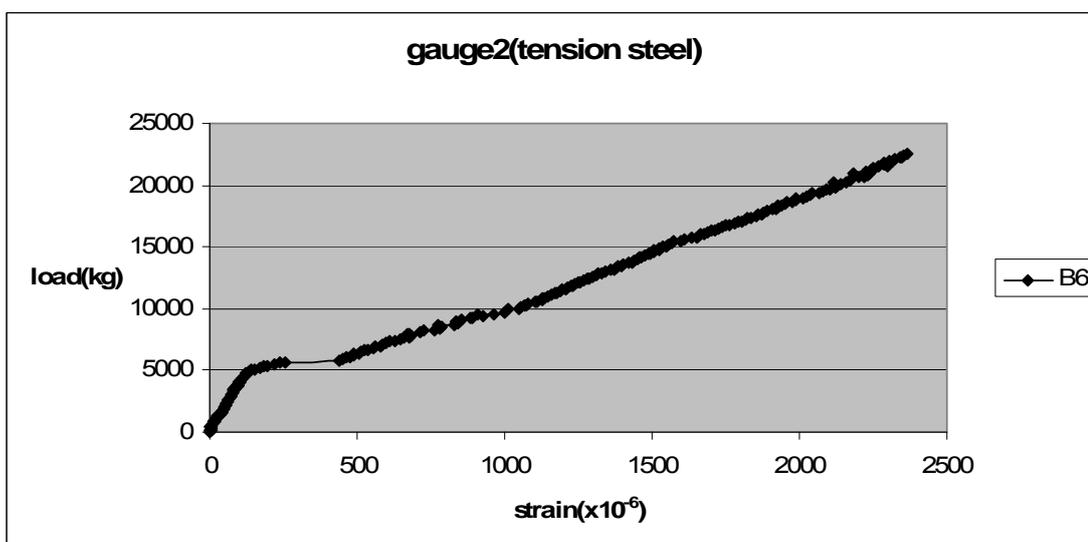
ภาพผนวกที่ ข89 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริม
รับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนขามือของ คาน B5



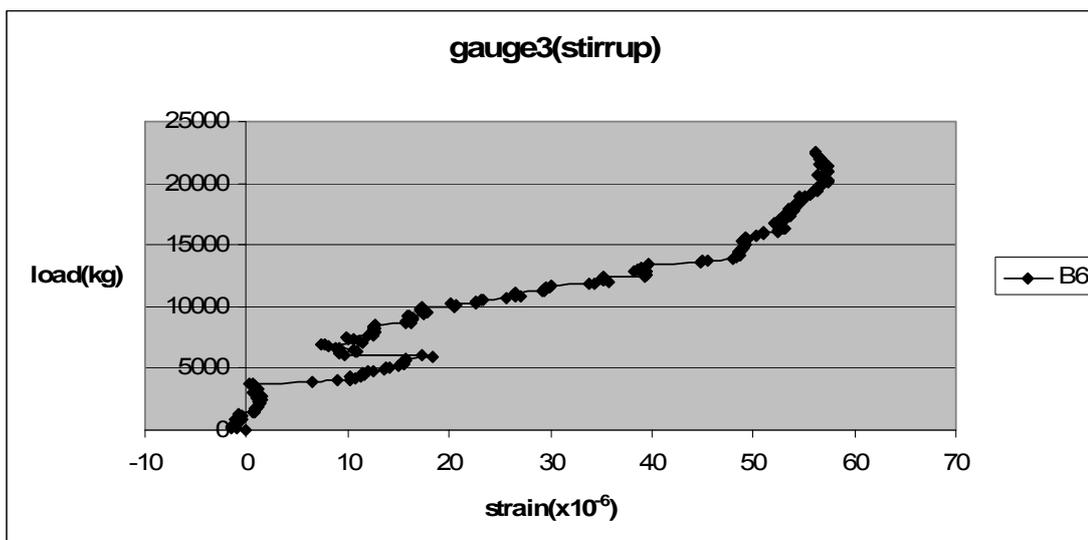
ภาพผนวกที่ ข90 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B6



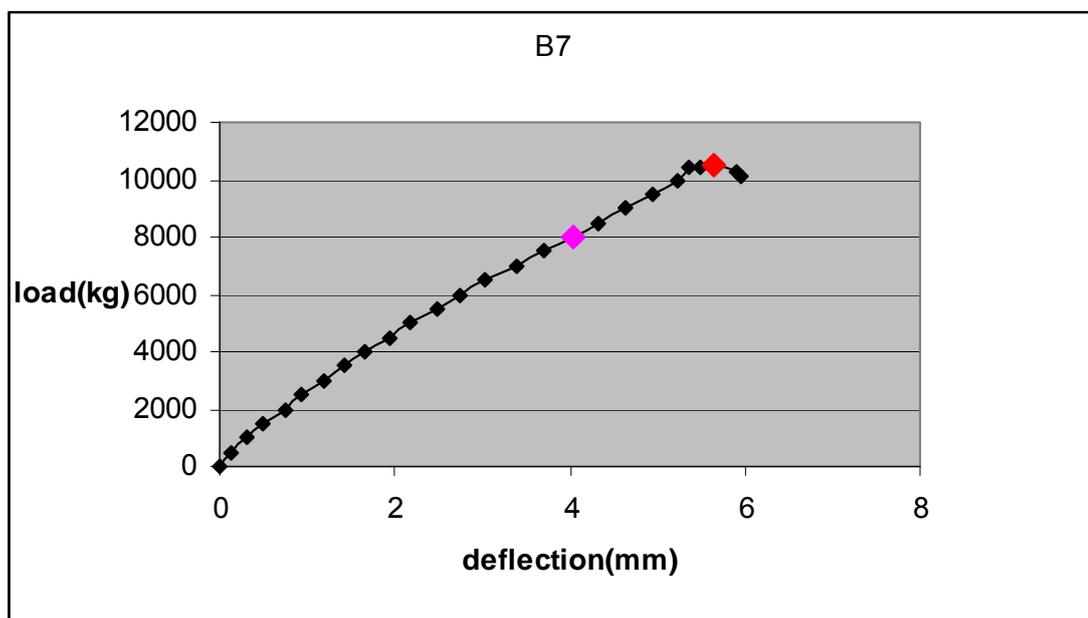
ภาพผนวกที่ ข91 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริม
รับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนซ้ายมือของ คาน B6



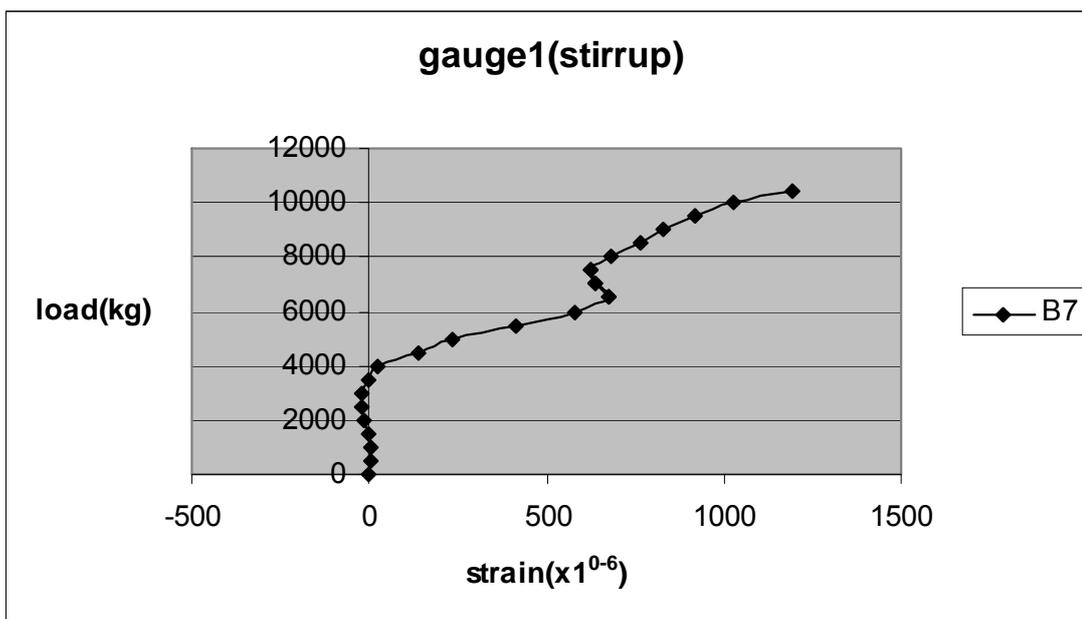
ภาพผนวกที่ ข92 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว
ของ คาน B6



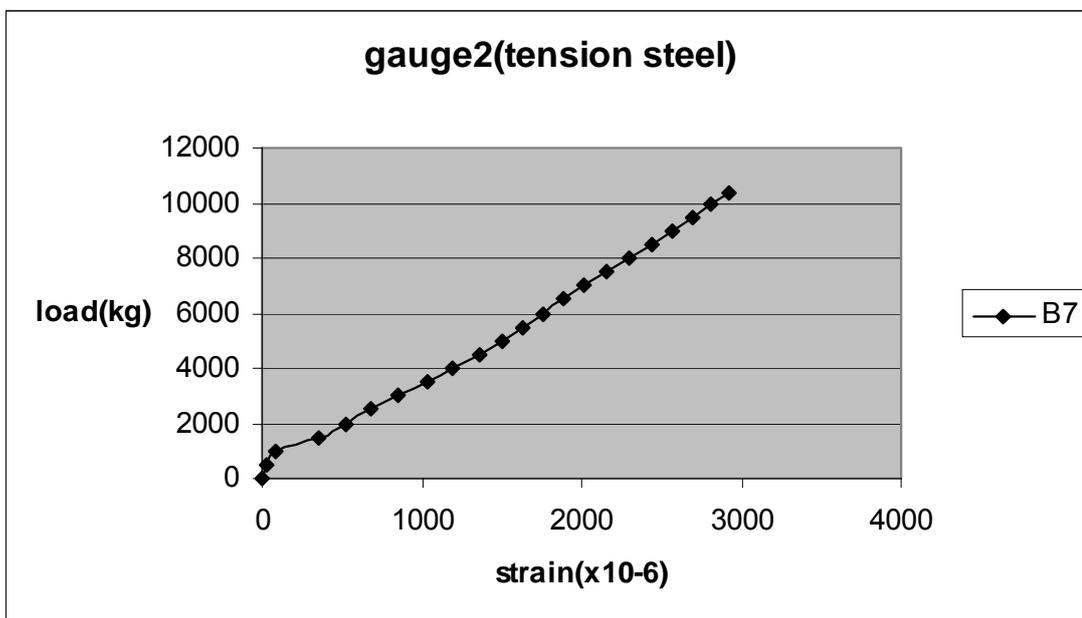
ภาพผนวกที่ ข93 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนขวามือของ คาน B6



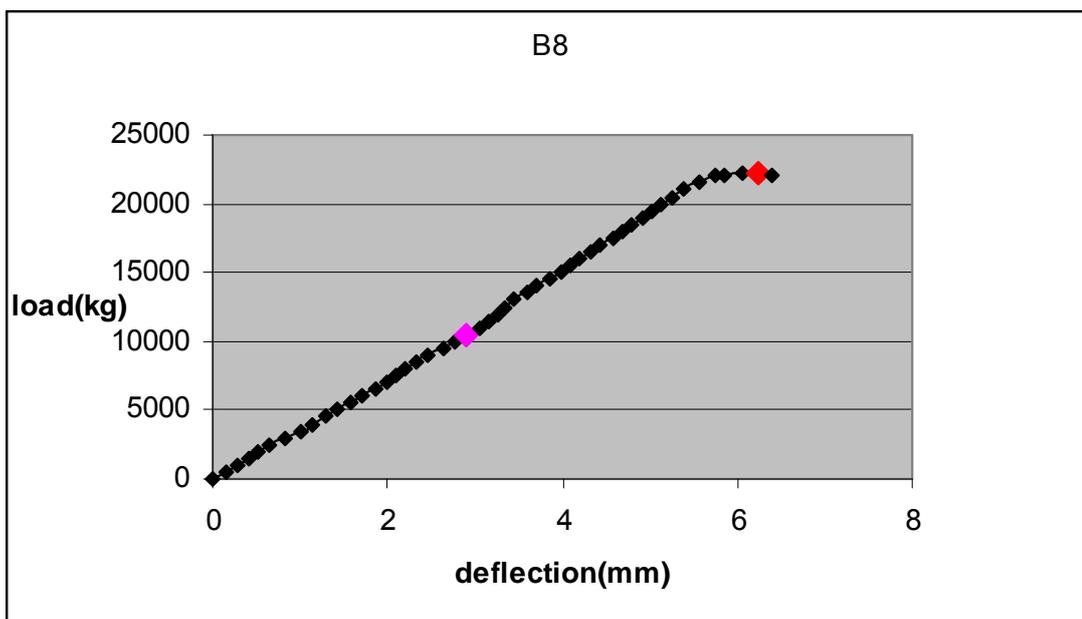
ภาพผนวกที่ ข94 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B7



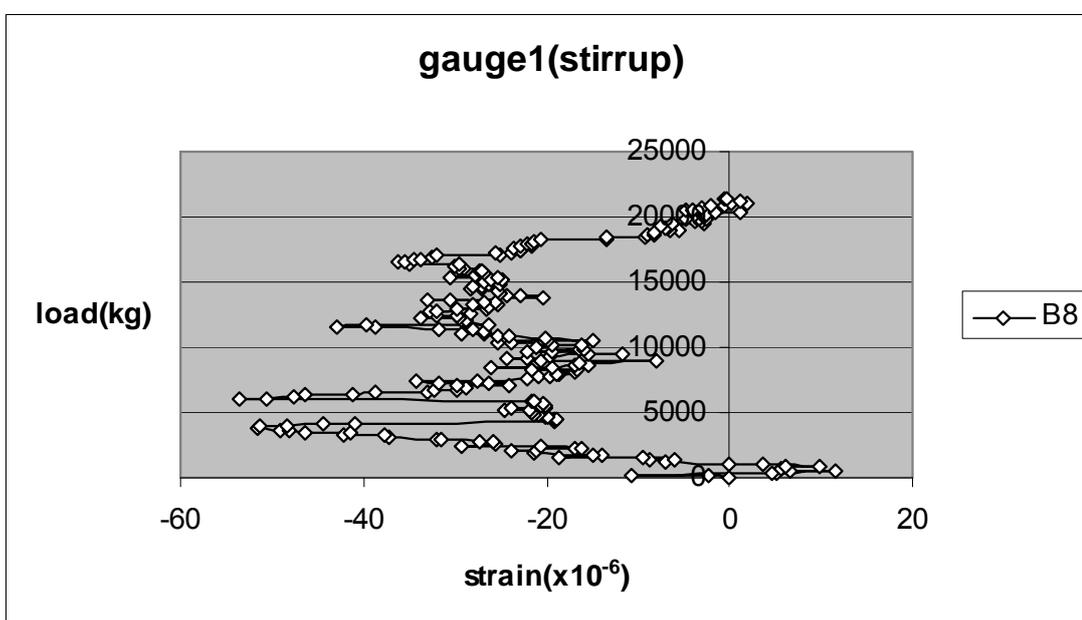
ภาพผนวกที่ ข95 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริม
รับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนซ้ายมือของ คาน B7



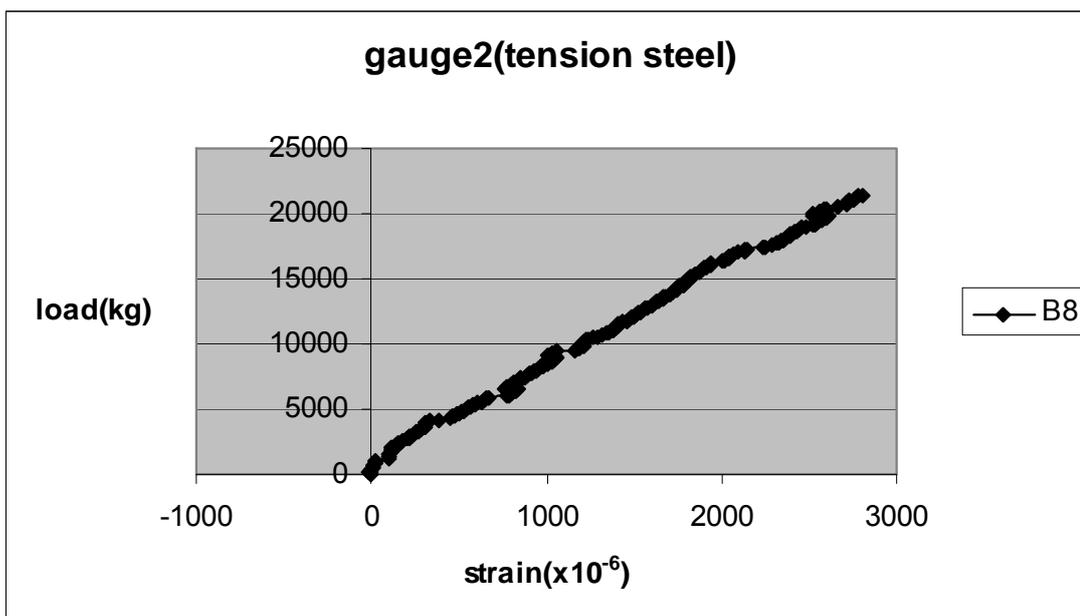
ภาพผนวกที่ ข96 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว
ของ คาน B7



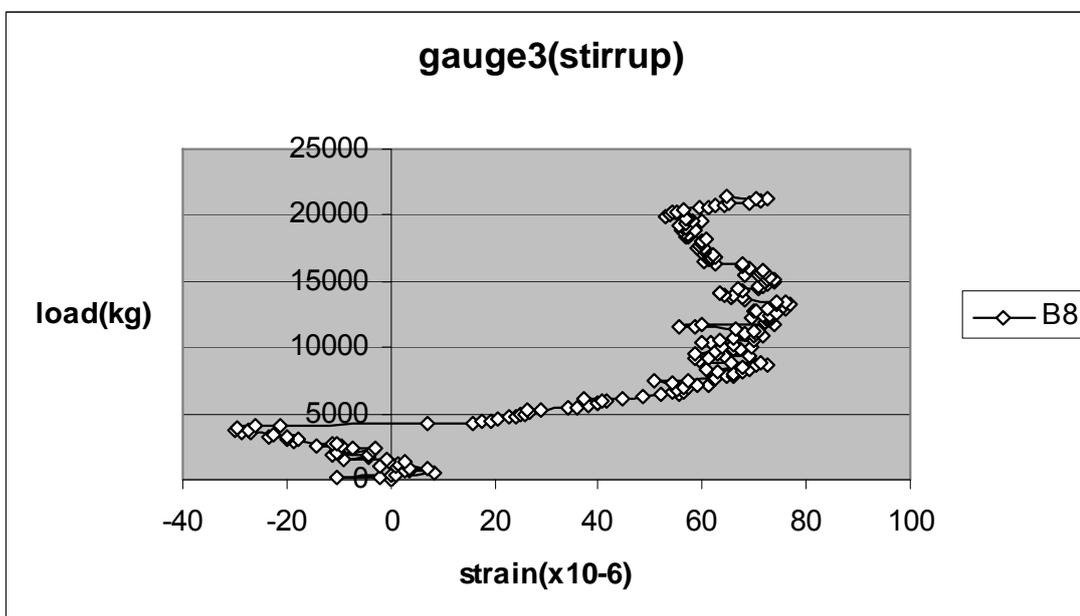
ภาพผนวกที่ ข97 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B8



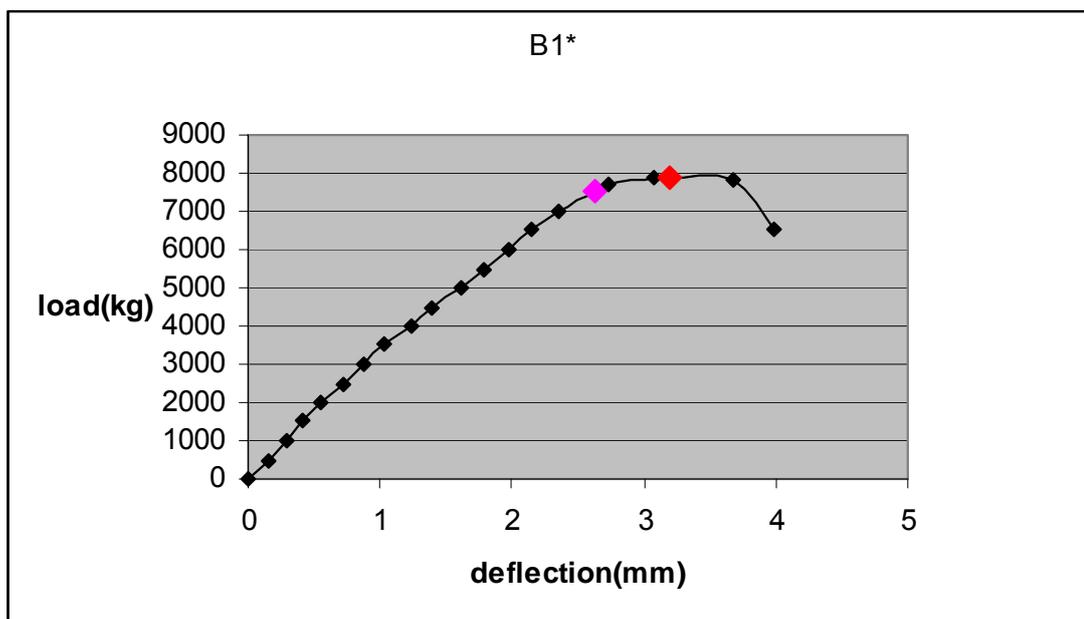
ภาพผนวกที่ ข98 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนซ้ายมือของ คาน B8 (หมายเหตุ ข้อมูล strain gauge ไม่น่าเชื่อถือเนื่องจากปัญหา bonding)



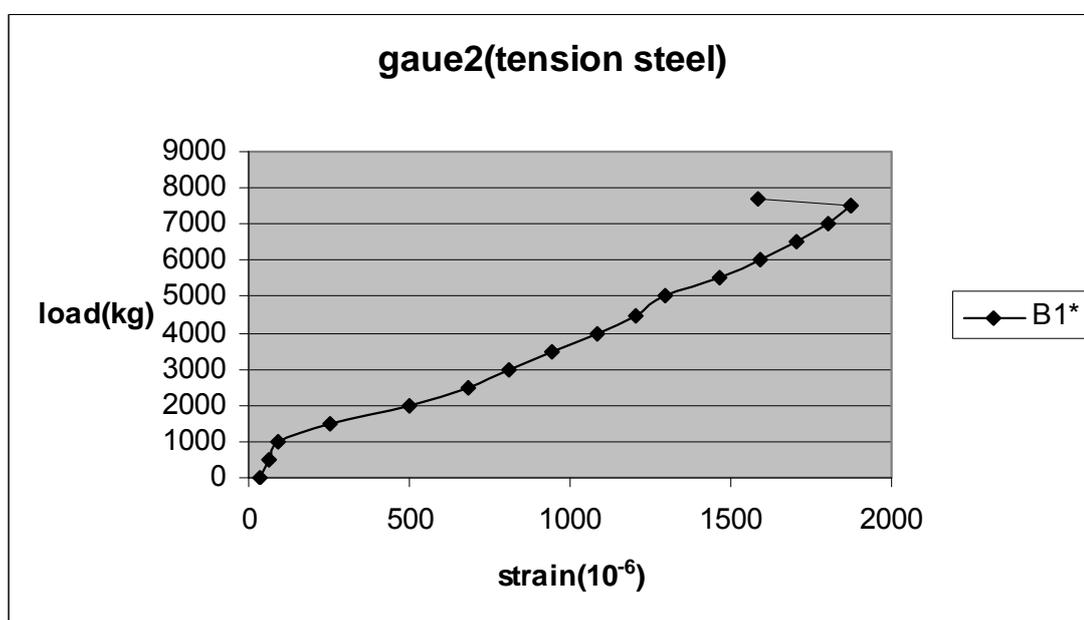
ภาพผนวกที่ ข99 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว
ของ คาน B8



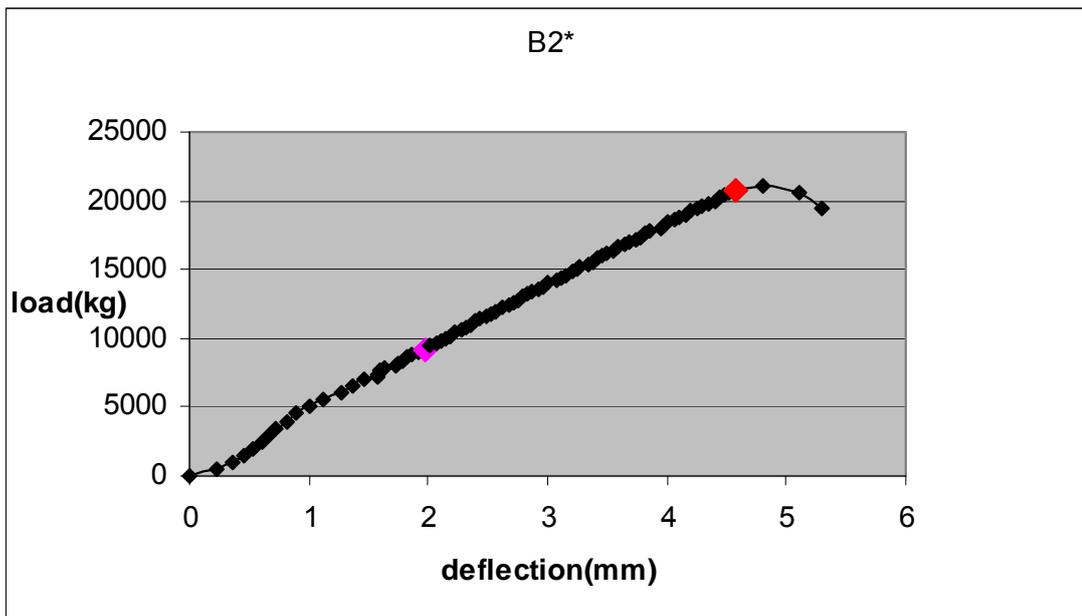
ภาพผนวกที่ ข100 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับ
แรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนขวามือของ คาน B8 (หมายเหตุ ข้อมูล strain
gauge ไม่น่าเชื่อถือเนื่องจากปัญหา bonding)



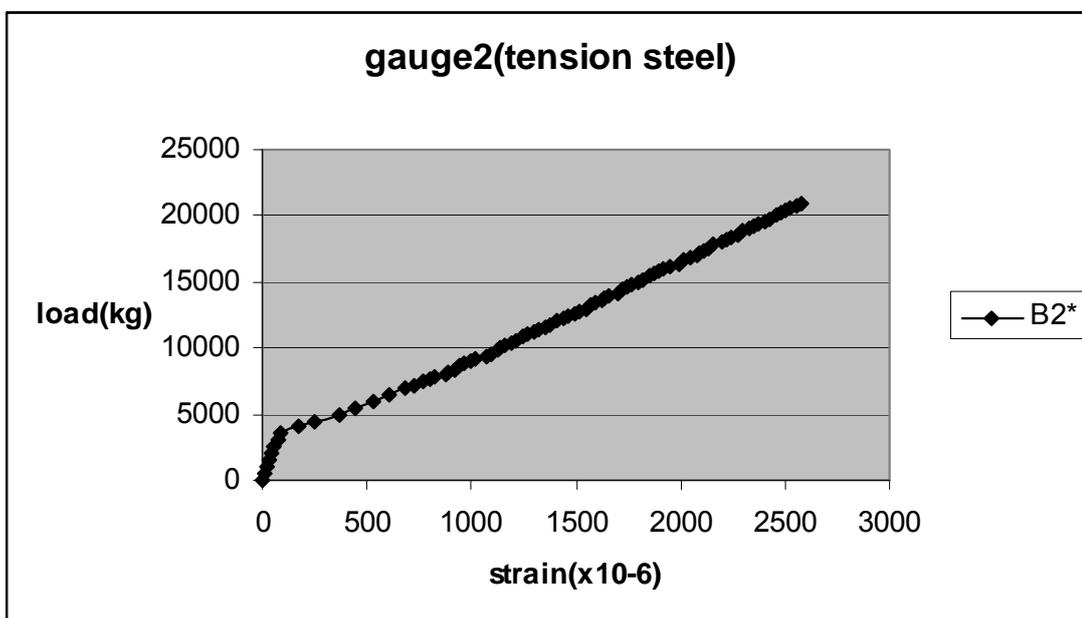
ภาพผนวกที่ ข101 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B1*



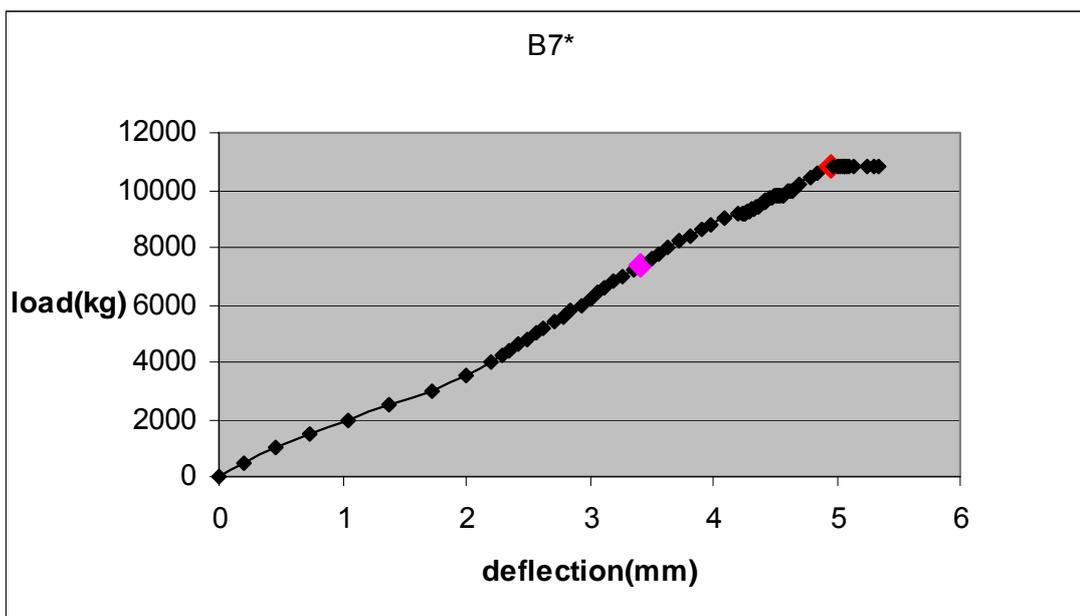
ภาพผนวกที่ ข102 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวของ คาน B1*



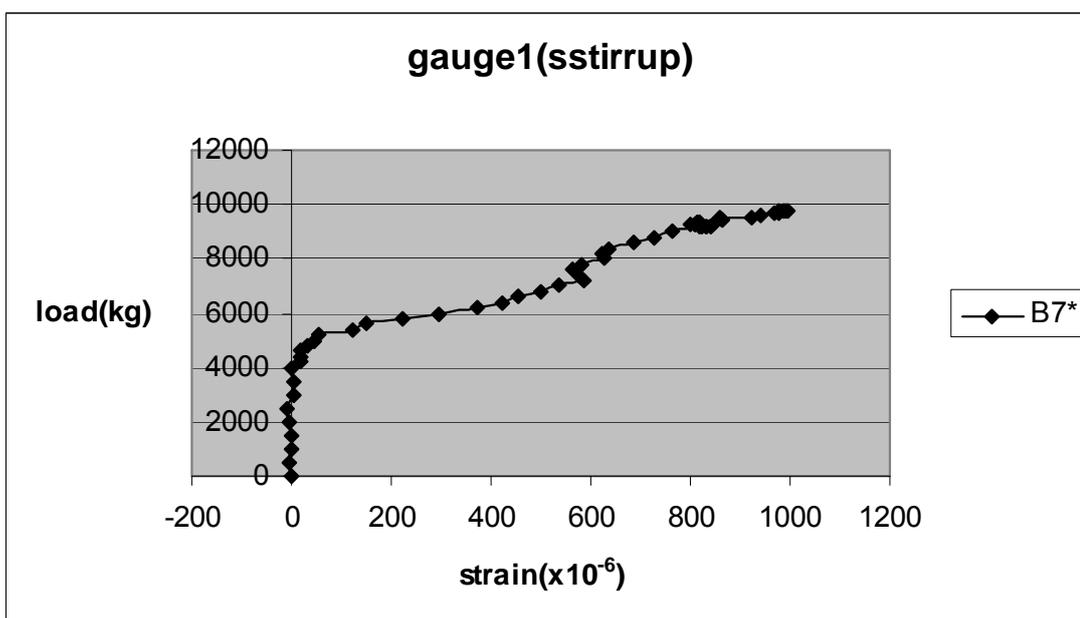
ภาพผนวกที่ ข103 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B2*



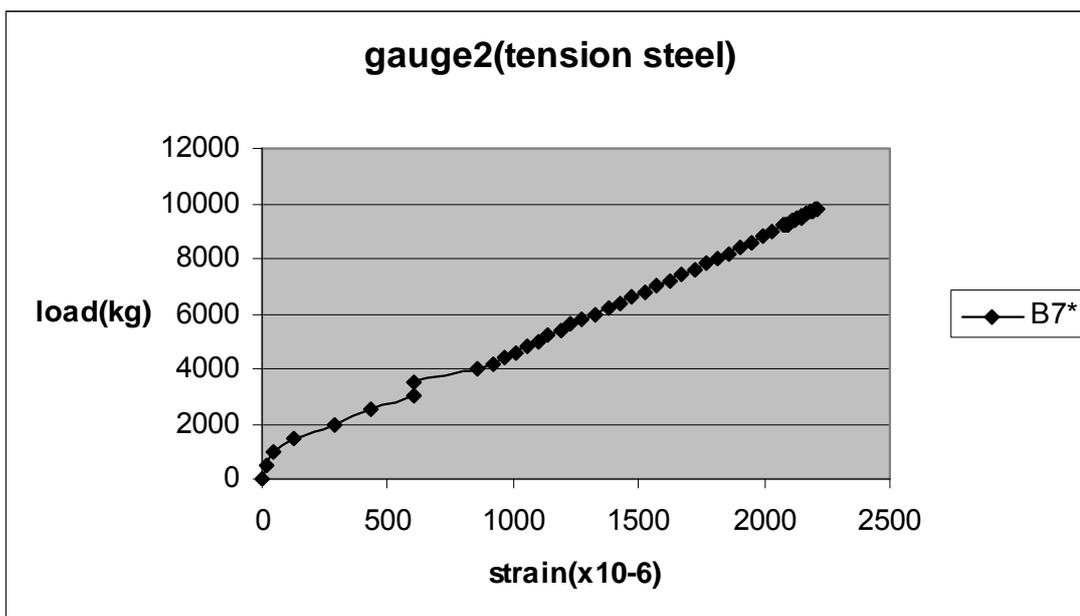
ภาพผนวกที่ ข104 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวของ คาน B2*



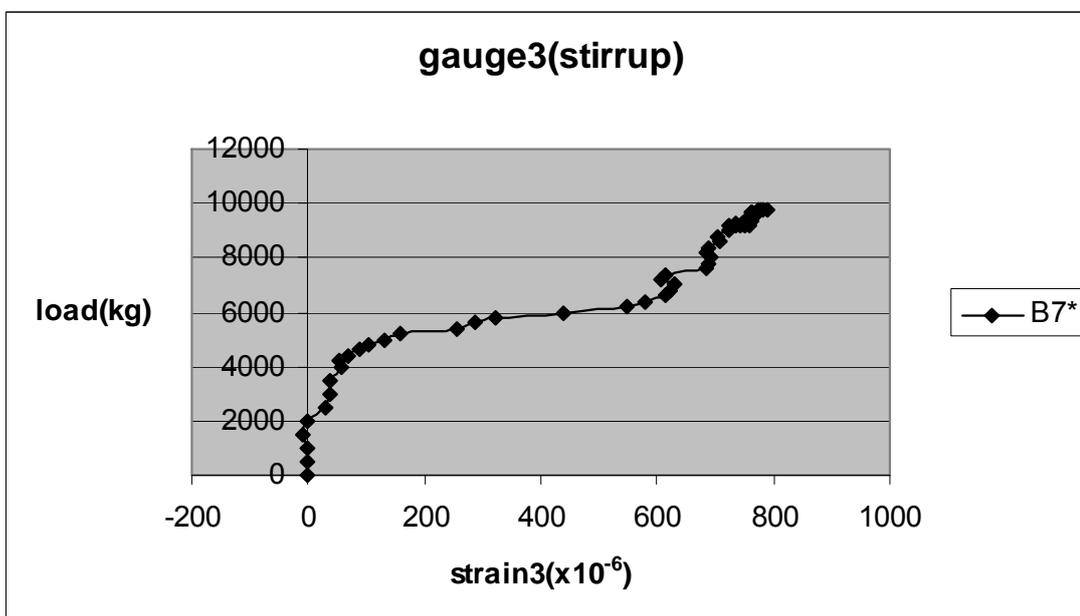
ภาพผนวกที่ ข105 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B7*



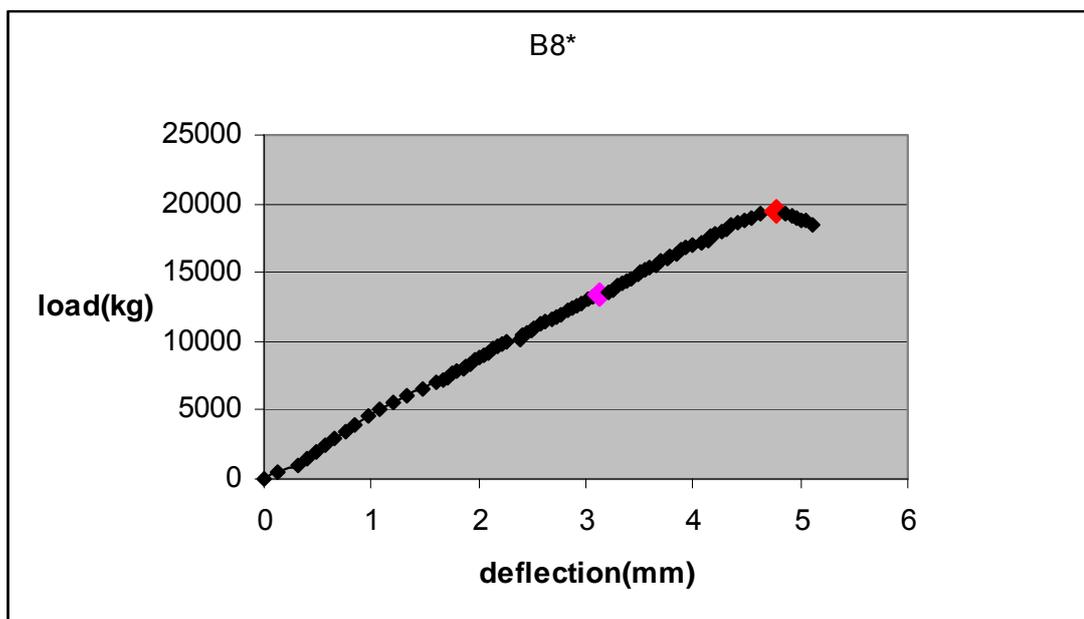
ภาพผนวกที่ ข106 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริม
รับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนซ้ายมือของ คาน B7*



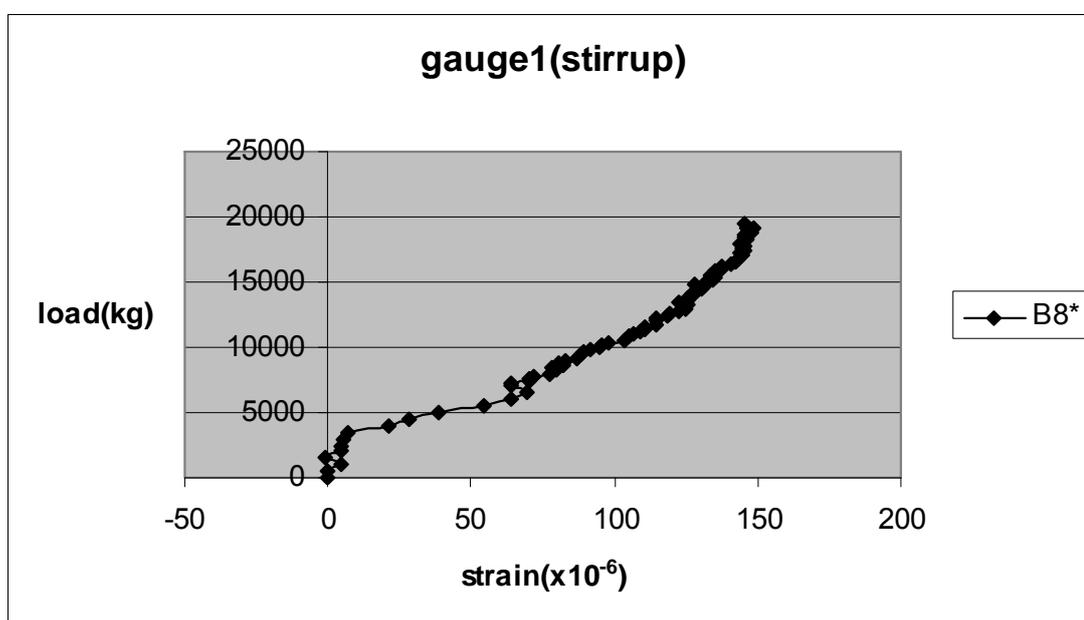
ภาพผนวกที่ ข107 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว
ของ คาน B7*



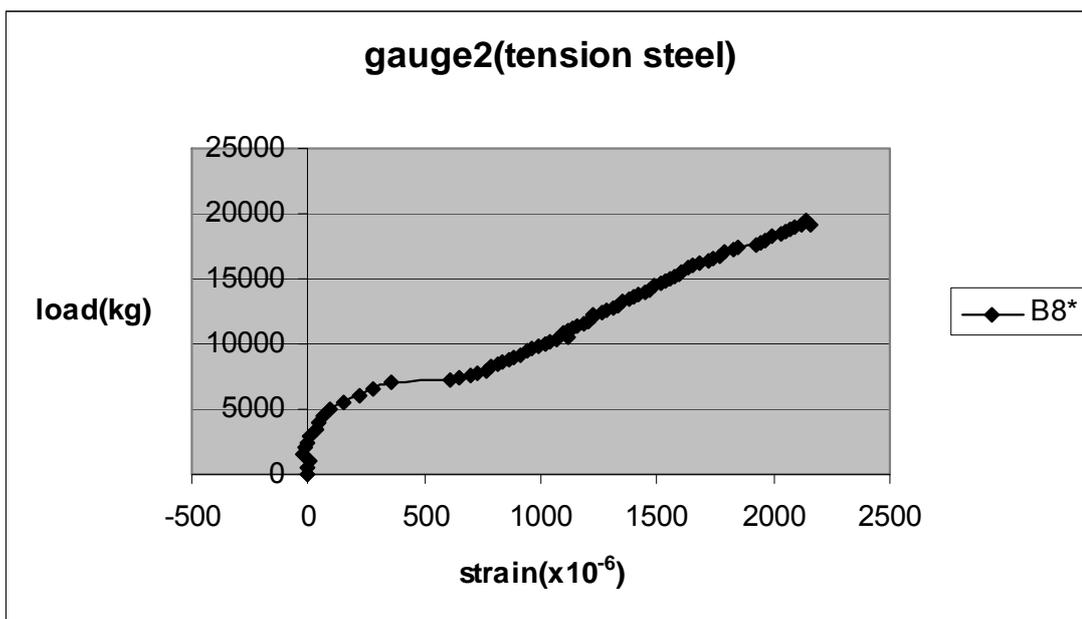
ภาพผนวกที่ ข108 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรง
เฉือนในช่วงแรงเฉือนขามือของ คาน B7*



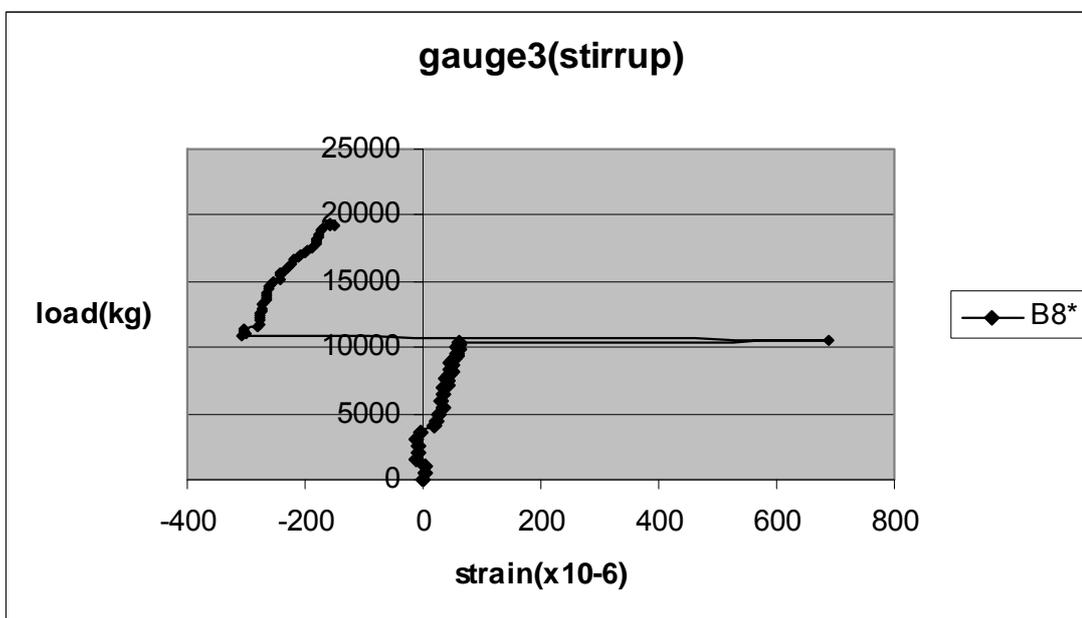
ภาพผนวกที่ ข109 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการโก่งตัวของคาน B8*



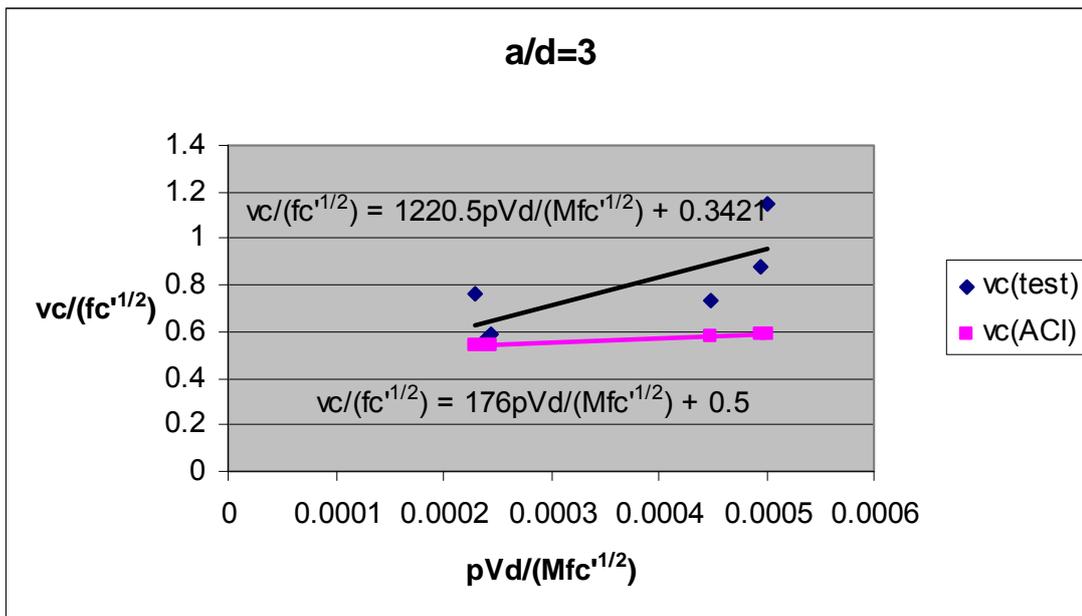
ภาพผนวกที่ ข110 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรง
เฉือนในช่วงแรงเฉือนซ้ายมือของ คาน B8*



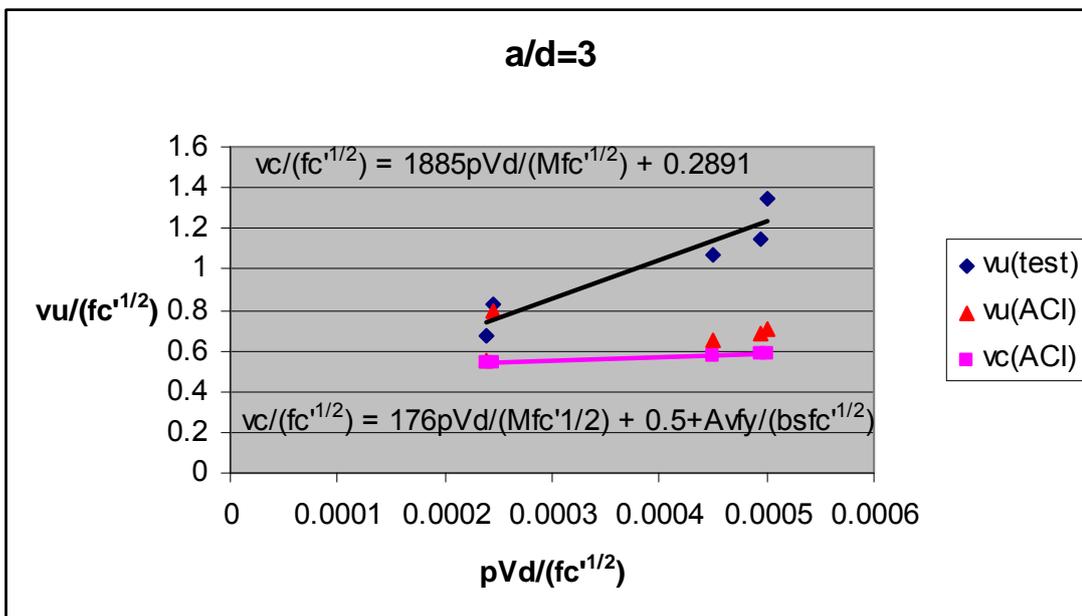
ภาพผนวกที่ ข111 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว
ของ คาน B8*



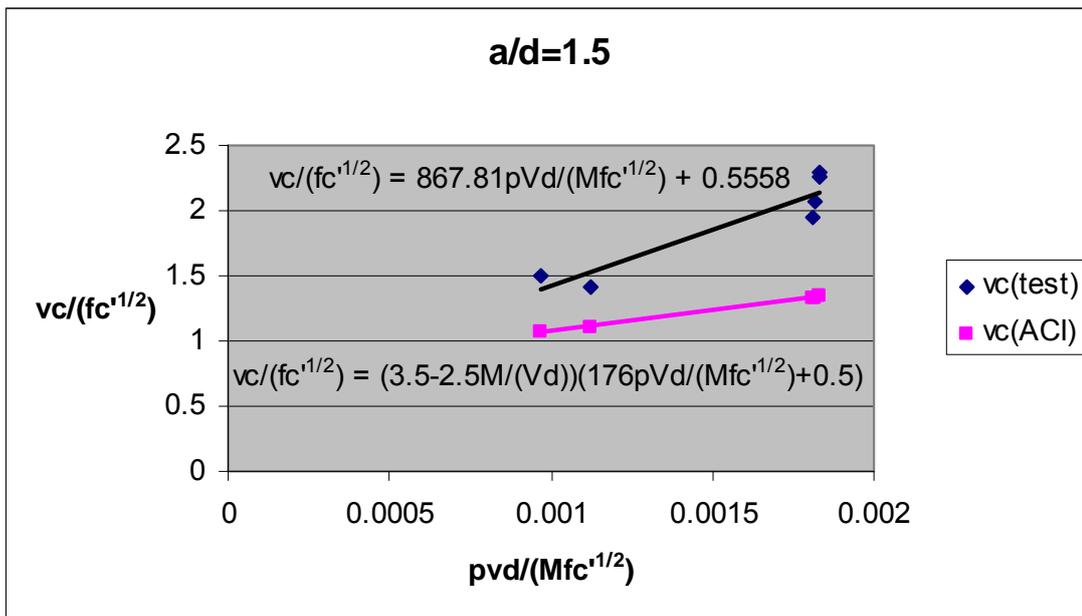
ภาพผนวกที่ ข112 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับความเครียดของเหล็กเสริม
รับแรงเฉือนในช่วงแรงเฉือนขามือของ คาน B8*



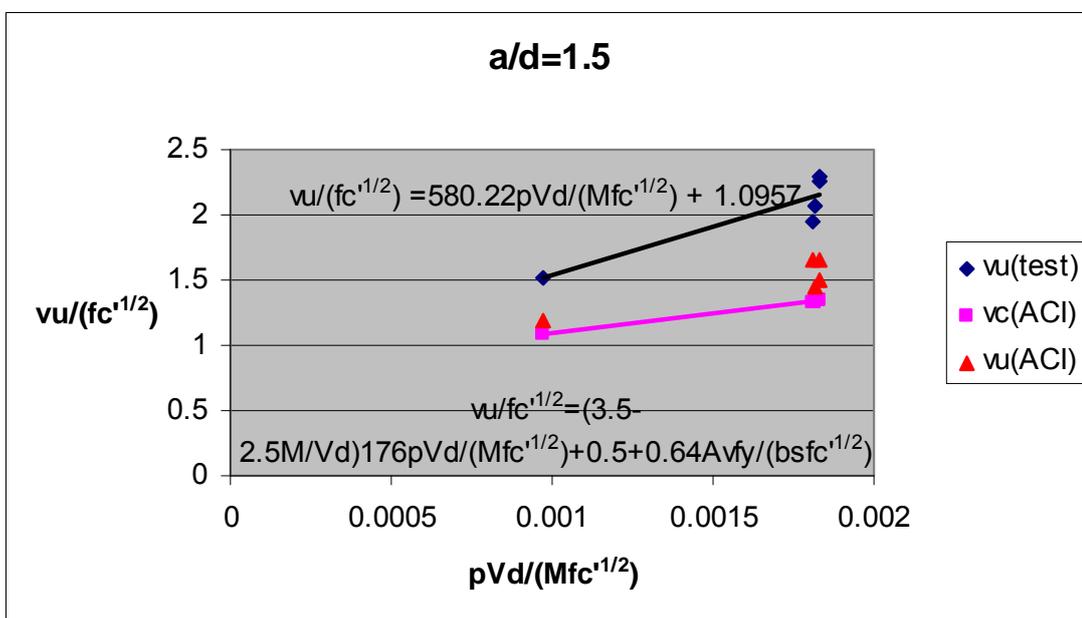
ภาพผนวกที่ ข113 เปรียบเทียบระหว่างสมการ ACI และ ผลการทดสอบ ค่า a/d=3



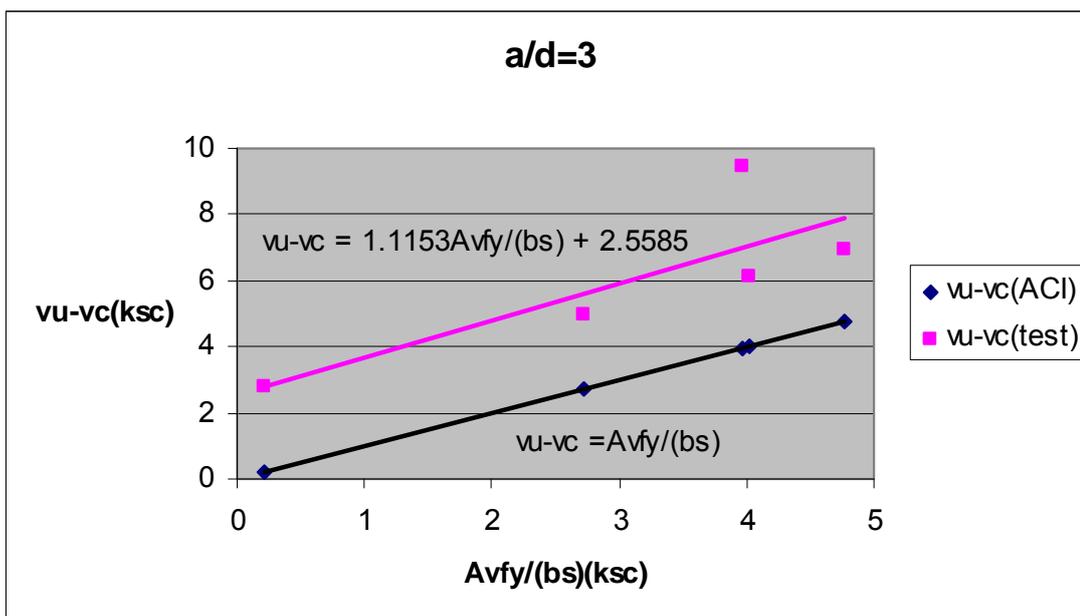
ภาพผนวกที่ ข114 เปรียบเทียบระหว่างสมการ ACI และ ผลการทดสอบ ค่า a/d=3



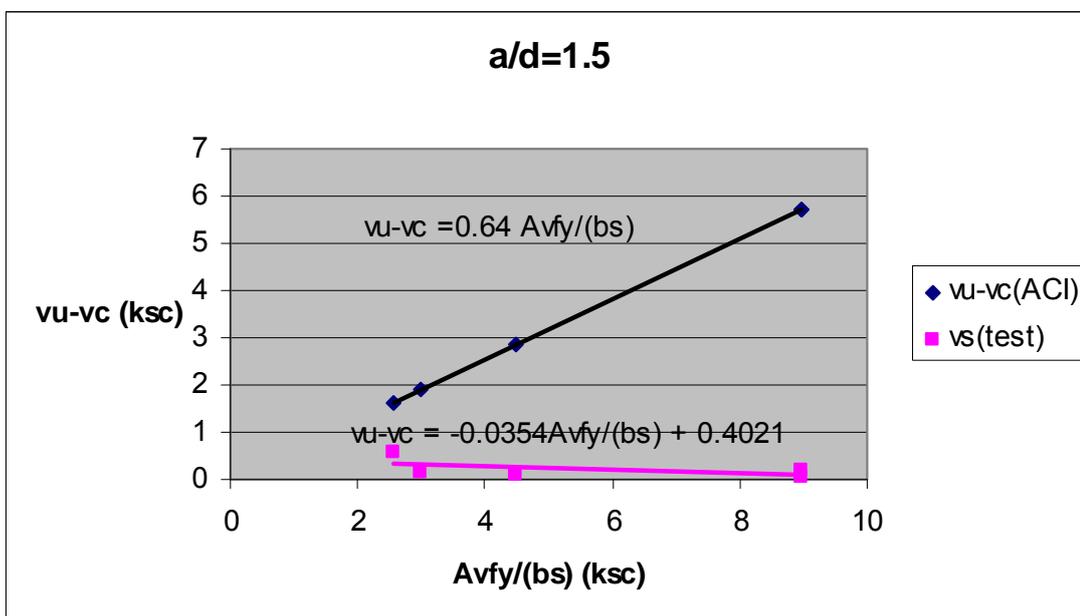
ภาพผนวกที่ ข115 เปรียบเทียบระหว่างสมการ (deep beam) ACI และ ผลการทดสอบ ค่า a/d=1.5



ภาพผนวกที่ ข116 เปรียบเทียบระหว่างสมการ (deep beam) ACI และ ผลการทดสอบ ค่า a/d=1.5



ภาพผนวกที่ ข117 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกกระหว่าง
สมการ ACI และการทดสอบ a/d=3



ภาพผนวกที่ ข118 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกกระหว่าง
สมการ(deep beam) ACI และการทดสอบ a/d=1.5