บทที่ 4
กระบวนการวิจัย

4.1 วิธีการศึกษา

ในการวิจัยนี้จะทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวดิ่ง (Normal Beam) โดยจะวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในเหล็กเสริม, รูปแบบการกระจายของการแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวของคาน ตั้งแต่เริ่มรับน้ำหนักจนกระทั่งคานวิบัติโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) กับคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวดิ่ง (Normal Beam)

4.1.1 วัสดุสิ้นเปลืองและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1.1 วัสดุสิ้นเปลือง

(1) เกจวัดความเครียด (strain gauge) เป็นเกจวัดความเครียดชนิดไฟฟ้ายี่ห้อ KYOWA รุ่น KFG-10-120-C1-11 L1M2R ซึ่งใช้ติดที่เหล็กเสริมตามยาวล่างในคอนกรีตมีความยาวเกจ (Gauge length) 10 มม. ความต้านทาน 120.0±1.0 โอห์ม เกจแฟคเตอร์ 2.10±1% และรุ่น KFG-5-120-C1-11 R1M2 ซึ่งใช้ติดเหล็กปลอก มีความยาวเกจ 5 มม. ความต้านทาน 120.0±1.0 โอห์ม เกจแฟคเตอร์ 2.10±1%

(2) เหล็กเสริม เหล็กเสริมตามยาวของคานรับแรงดึงและแรงอัดที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเหล็กข้ออ้อย (deformed bar) ผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 24 ชั้นคุณภาพ SD 30 เหล็กเสริมนี้ทำการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A370-80 โดยสุ่มตัวอย่างทดสอบขนาดละ 3 ท่อน

(3) เหล็กปลอก ใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. ผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 20 ชั้นคุณภาพ SR ทำการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A370-80

(4) คอนกรีตออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM

(5) ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 15-2532 กระทรวงอุตสาหกรรม

(6) หิน ใช้หินปูนขนาด ¾ นิ้ว ใช้กับงานก่อสร้างโครงสร้างทั่วไป วิเคราะห์หาปริมาณคละและค่าโมดูลัสความละเอียด ตามข้อกำหนดของ ASTM C-33

(7) ทรายใช้ทรายหยาบน้ำจืด นำไปวิเคราะห์หาปริมาณส่วนคละ และโมดูลัสความละเอียด

4.1.1.2 อุปกรณ์

(1) Data logger เป็นชุดแปลงสัญญาณอ่านค่าความเครียด แบบ portable data logger รุ่น TDS-303

(2) Dial gauge เป็นเกจวัดการแอ่นตัว ซึ่งวัดการแอ่นตัวได้สูงสุด 100 มม. มีความละเอียด 0.1 มม.

(3) Proving ring วงแหวนวัดแรงสำหรับวัดค่าแรงกระทำ

(4) Hydraulic jack สำหรับให้แรงกระทำ

(5) Linear Variable Differential Transformer (LVDT) DTH-50

4.1.2 การออกแบบตัวอย่างทดสอบ

การศึกษานี้จะทำการแบ่งการทดสอบเป็น 3 กลุ่ม คือคานทดสอบกลุ่ม A, คานทดสอบกลุ่ม B และ คานทดสอบกลุ่ม C ทั้ง 3 กลุ่มเป็นคานช่วงเดียว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) คานทดสอบกลุ่ม A

สำหรับการทดสอบของคานกลุ่ม A มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมเบื้องต้นของคานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam : TB) กับคานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกลูกตั้งแนวดิ่งเพียงอย่างเดียว (Normal Beam : NB) เพื่อให้ทราบถึงรูปแบบการกระจายของการแตกร้าวและความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน โดยรายละเอียดการติดตั้งของคานทดสอบกลุ่ม A ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ในระหว่างการทดสอบได้ทำการเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (P) กับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานทดสอบและนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานทดสอบของคานทดสอบกลุ่ม A ทำการบันทึกข้อมูลรายละเอียดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานทดสอบได้แก่ การแตกร้าวดัดแรก (First Flexural Crack : FC) และการแตกร้าวเฉือนแรก (First Shear Crack : SC) ที่แต่ละน้ำหนักบรรทุกและรูปแบบการวิบัติของคานทดสอบ

ข้อมูลการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานได้จากการให้น้ำหนักบรรทุกแบบ Four-Point Loading โดยจะทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (P) ครั้งละ 0.30 ตัน และจะค้างน้ำหนักบรรทุกไว้

2 นาทีเพื่อให้น้ำหนักบรรทุกได้ถ่ายลงไปที่คานแล้วบันทึกค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานทดสอบ แล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของคานทดสอบกลุ่ม A

หมายเลขคาน	ขนาดเหล็กปลอก (มม.)	ระยะห่างเหล็กปลอก (ซม.)	เหล็กเสริมตามยาว		ขนาดหน้าตัด (ซม.)	ความลึกประสิทธิผล ,*d* (ซม.)	อัตราส่วน *a/d*
			(ล่าง)	(บน)			
A-NB1	6	25	4-DB16	2-DB12	15 x 30	25	3
A-TB1	6	25	4-DB16	2-DB12	15 x 30	25	3
A-NB2	6	25	4-DB16	2-DB12	15 x 30	25	3
A-TB2	6	25	4-DB16	2-DB12	15 x 30	25	3
A-NB3	6	12.5	4-DB16	2-DB12	15 x 30	25	2.5
A-TB3	6	12.5	4-DB16	2-DB12	15 x 30	25	2.5

จากตารางที่ 4.1 แสดงคำอธิบายได้ดังนี้

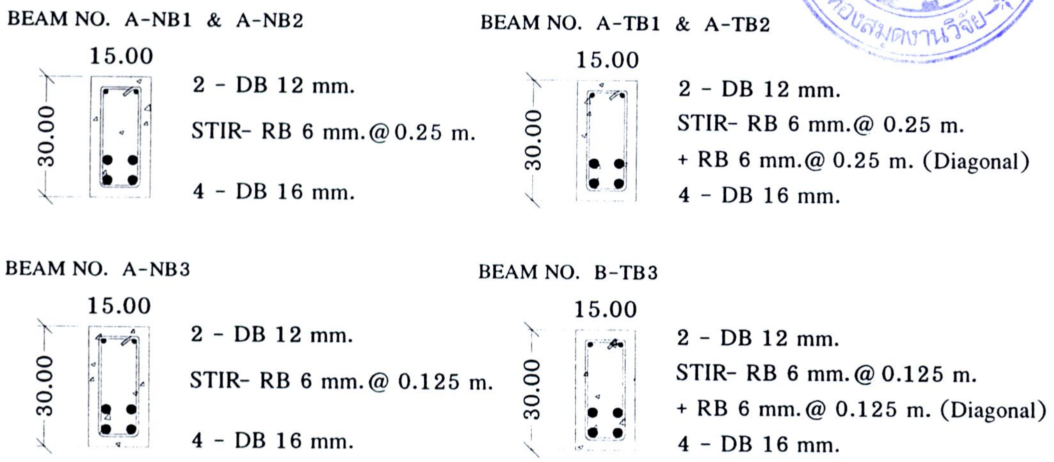
NB : Normal Beam คือ คานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกลูกตั้งแนวดิ่งเพียงอย่างเดียว

TB : Truss Beam คือ คานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน

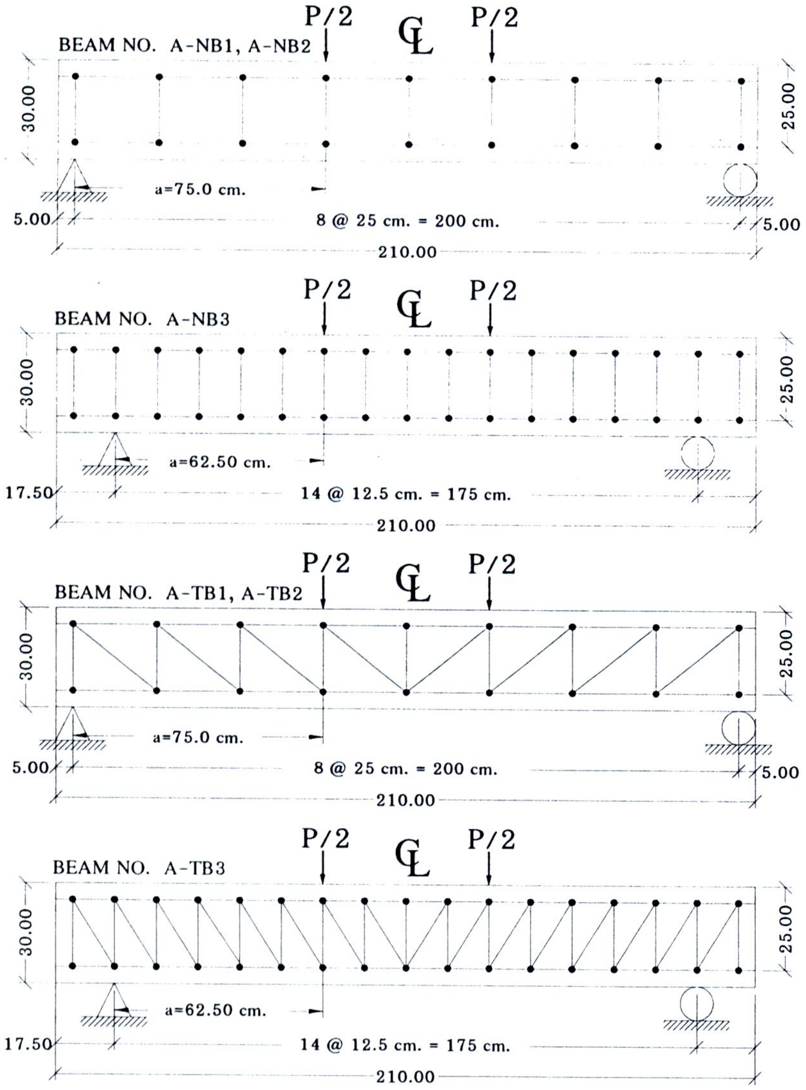
a : Shear span คือ ช่วงการเฉือนของคาน

ภาพที่ 4.1 ได้แสดงรายละเอียดการเสริมเหล็กของคานทดสอบกลุ่ม A ทั้ง 6 ตัว โดยที่คานทดสอบหมายเลข A-NB1, A-NB2, A-TB1 และ A-TB2 มีระยะห่างเหล็กปลอกลูกตั้งทั้งหมดเท่ากับ 25 ซม. และในส่วนคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบโครงข้อหมุน (A-TB1, A-TB2) มีการเสริมเหล็กปลอกทแยงเพิ่มเติมโดยมีระยะห่างเท่ากับ 25 ซม.

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย



ก) หน้าตัดตามขวาง



ข) หน้าตัดตามยาว

ภาพที่ 4.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กของคานทดสอบกลุ่ม A

สำหรับคานทดสอบหมายเลข A-NB3 และ A-TB3 มีระยะห่างเหล็กปลอกลูกตั้งทั้งหมดเท่ากับ 12.5 ซม. และในส่วนคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบโครงข้อหมุน (A-TB3) มีการเสริมเหล็กปลอกทแยงเพิ่มเติมโดยมีระยะห่างเท่ากับ 12.5 ซม.

2) **คานทดสอบกลุ่ม B**

ภายหลังทำการวิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูลจากผลทดสอบคานตัวอย่างกลุ่ม A (รายละเอียดดังระบุในบทที่ 5) จึงเกิดแนวคิดในการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนย่อยของคานตัวอย่างโดยใช้เกจวัดความเครียด (Strain gauge) โดยได้ติดตามตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 4.2 ของชิ้นส่วนย่อยตามแบบจำลอง Lattice Model เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมการรับแรงของชิ้นส่วนย่อยระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบทั่วไป (Normal Beam) กับคานที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) เพิ่มเติมจากเดิม ตารางที่ 4.2 แสดงถึงรายละเอียดการติดตั้งของคานทดสอบกลุ่ม B

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของคานทดสอบกลุ่ม B

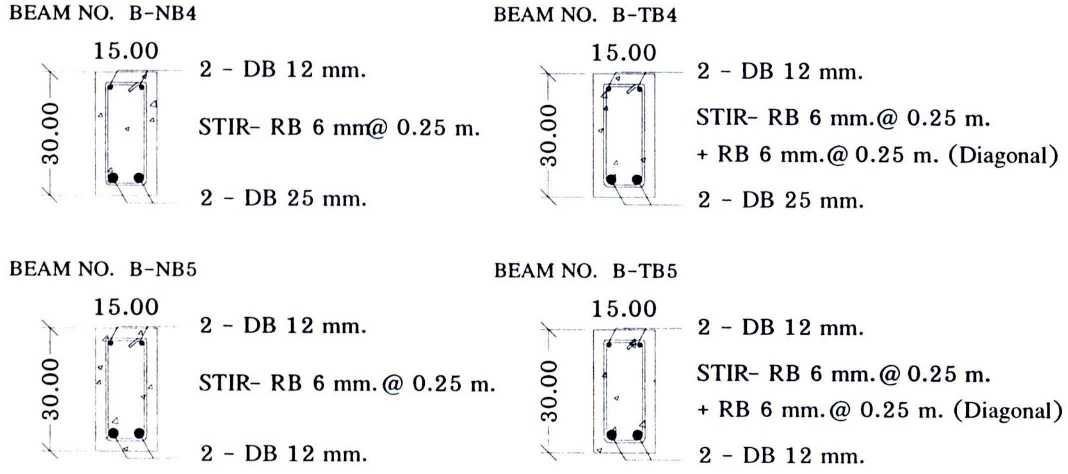
หมายเลขคาน	ขนาดเหล็กปลอก (มม.)	ระยะห่างเหล็กปลอก (ซม.)	เหล็กเสริมตามยาว		ขนาดหน้าตัด (ซม.)	ความลึกประสิทธิผล ,*d* (ซม.)	อัตราส่วน *a/d*
			(ล่าง)	(บน)			
B-NB4	6	25	2-DB25	2-DB12	15 x 30	25	3
B-TB4	6	25	2-DB25	2-DB12	15 x 30	25	3
B-NB5	6	25	2-DB12	2-DB12	15 x 30	25	3
B-TB5	6	25	2-DB12	2-DB12	15 x 30	25	3

จากตารางที่ 4.2 แสดงคำอธิบายได้ดังนี้

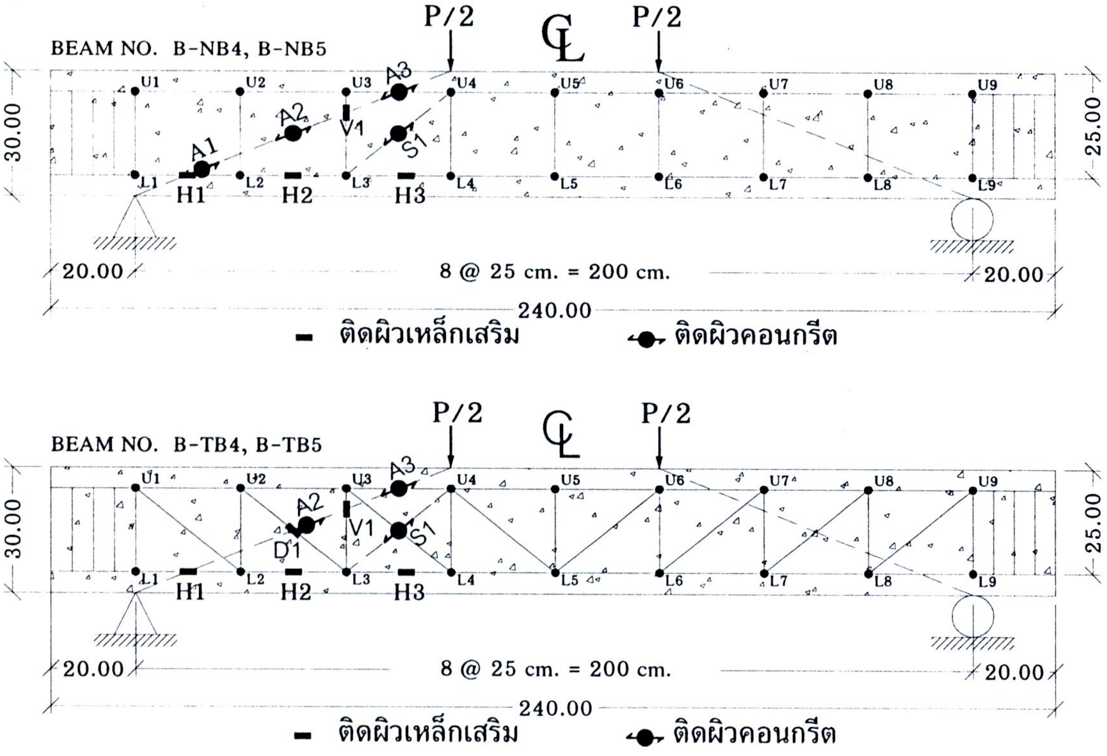
NB: Normal Beam คือ คานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกลูกตั้งแนวดิ่งเพียงอย่างเดียว

TB: Truss Beam คือ คานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน

a : Shear span คือ ช่วงการเฉือนของคาน



ก) รูปตัดตามขวาง



ข) รูปตัดตามยาว

ภาพที่ 4.2 รายละเอียดการเสริมเหล็กและตำแหน่งติดเกจวัดความเครียดของคานกลุ่ม B

ในระหว่างการทดสอบได้ทำการเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (P) กับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน บันทึกรูปแบบการแตกร้าวที่เกิดขึ้นได้แก่ การแตกร้าว

ดัดแรก (first flexural crack : FC) และการแตกร้าวเฉือนแรก (first shear crack : SC) ที่แต่ละน้ำหนักบรรทุกรวมถึงรูปแบบการวิบัติของคานทดสอบ

3) คานทดสอบกลุ่ม C

รายละเอียดการติดตั้งของคานทดสอบกลุ่ม C ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 การทดสอบครั้งนี้ได้ปรับปรุงรูปแบบการติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gauge) เพื่อรวบรวมข้อมูลให้ครบถ้วนมากขึ้นโดยใช้ LVDT ภาพที่ 4.3 แสดงรายละเอียดการติดตั้งเกจวัดความเครียดของแต่ละชิ้นส่วนย่อยของคานกลุ่ม C โดยที่คานทดสอบของกลุ่ม C จะมีความแตกต่างในการติดตั้งเกจวัดความเครียดเมื่อเปรียบเทียบกับคานกลุ่ม B ดังนี้ คานที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวดิ่ง (Normal Beam) ในคานกลุ่ม C ได้เพิ่มชิ้นส่วนย่อย D1* เพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตรับแรงดึงทแยง และเพิ่มชิ้นส่วนย่อย A1 ในคานที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดของคานทดสอบกลุ่ม C

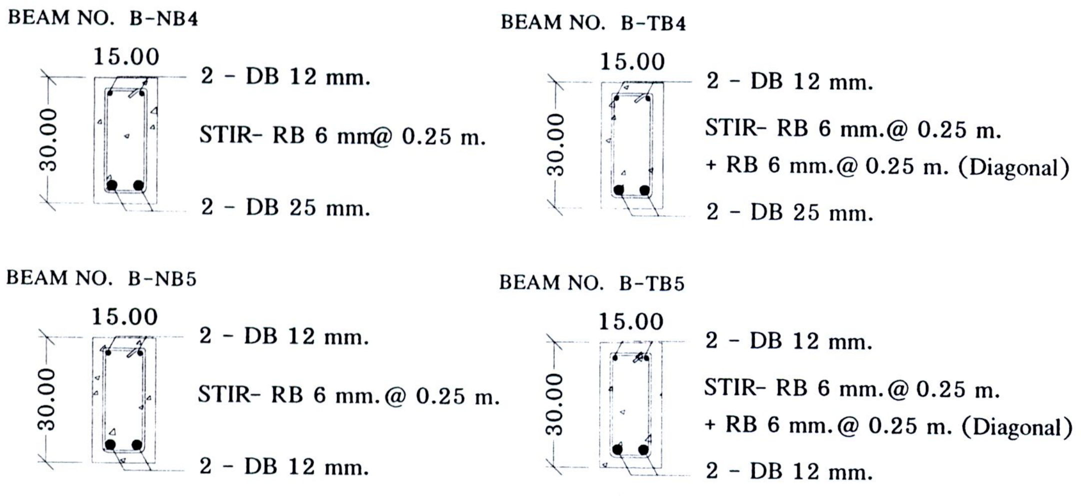
หมายเลขคาน	ขนาดเหล็กปลอก (มม.)	ระยะห่างเหล็กปลอก (ซม.)	เหล็กเสริมตามยาว		ขนาดหน้าตัด (ซม.)	ความลึกประสิทธิผล ,d (ซม.)	อัตราส่วน a/d
			(ล่าง)	(บน)			
C-NBM	6	25	2-DB16	2-DB12	15 x 30	25	3
C-TBM	6	25	2-DB12	2-DB12	15 x 30	25	3
C-NBS	6	25	2-DB16	2-DB12	15 x 30	25	3
C-TBS	6	25	2-DB25	2-DB12	15 x 30	25	3

จากตารางที่ 4.3 แสดงคำอธิบายได้ดังนี้

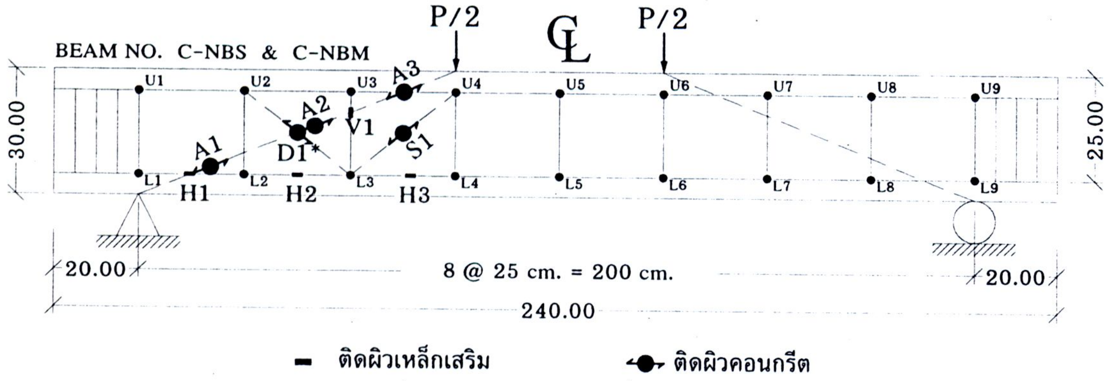
NBM: Normal Beam คือ คานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกลูกตั้งแนวดิ่งเพียงอย่างเดียว ที่ออกแบบให้วิบัติด้วยโมเมนต์ สำหรับ TBM คือ คานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุนที่ได้เสริมเหล็กปลอกทแยงเพิ่มจากคานทดสอบ NBM

NBS: Normal Beam คือ คานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกลูกตั้งแนวดิ่งเพียงอย่างเดียว ที่ออกแบบให้วิบัติด้วยแรงเฉือน สำหรับ TBS คือ คานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุนที่ได้เสริมเหล็กปลอกทแยงเพิ่มจากคานทดสอบ NBS

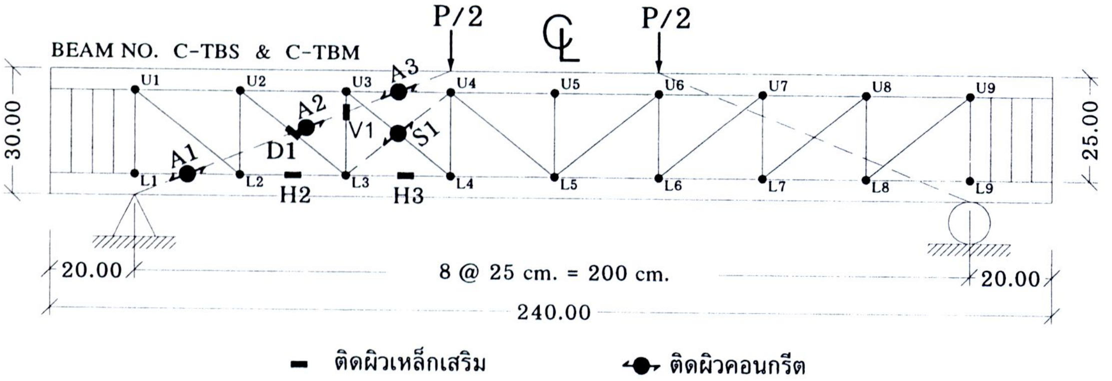
a : Shear span คือ ช่วงการเฉือนของคาน



ก) หน้าตัดตามขวางของคาน NB และ TB



ข) คานเสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวดิ่ง (Normal Beam : NB)

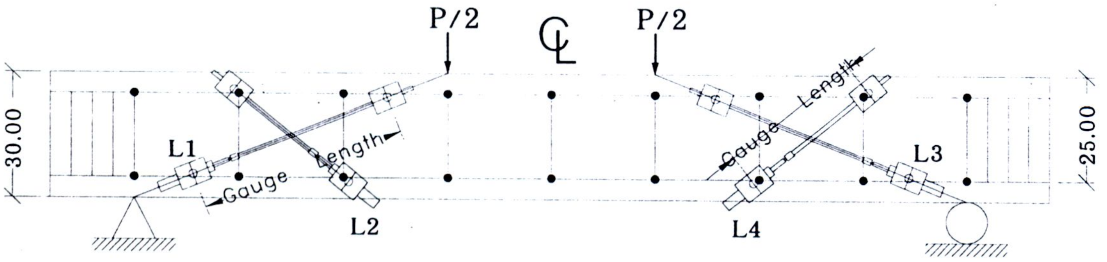


ค) คานเสริมเหล็กแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam : TB)

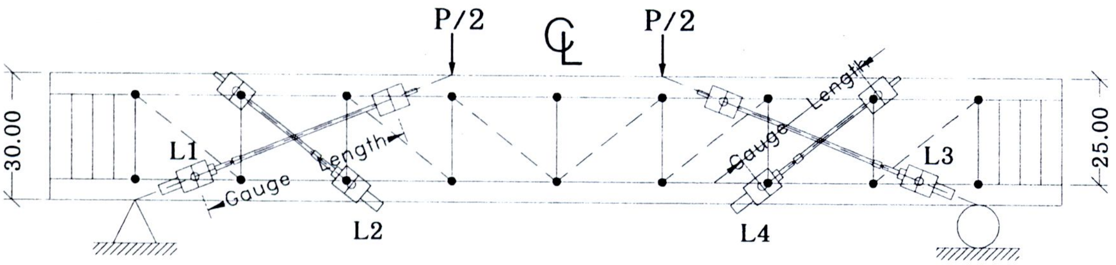
ภาพที่ 4.3 รายละเอียดการติดตั้งเกจวัดความเครียดในแต่ละชิ้นส่วนย่อยของคานกลุ่ม C

ในระหว่างการทดสอบได้ทำการเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (P) กับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานทดสอบและนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานทดสอบของคานทดสอบกลุ่ม C ทำการบันทึกข้อมูลรายละเอียดการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานทดสอบ ได้แก่ การแตกร้าวดัดแรก (First Flexural Crack: FC) และการแตกร้าวเฉือนแรก (First Shear Crack: SC) ที่แต่ละน้ำหนักบรรทุก และรูปแบบการวิบัติของคานทดสอบ

การทดสอบครั้งนี้ได้เพิ่มการทดสอบเพื่อหาการยืดตัวหดตัวหรือความเครียดด้วยอุปกรณ์ LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ภาพที่ 4.4 ได้แสดงรายละเอียดการติดตั้ง LVDT



ก) คานเสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวดิ่ง (Normal Beam : NB)



ข) คานเสริมเหล็กแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam : TB)

ภาพที่ 4.4 การติดตั้ง Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

ในการศึกษานี้จะมีขั้นตอนการทดสอบคานทั้ง 3 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

1) ทำการเตรียมเหล็กเสริมแล้วเก็บตัวอย่างเหล็กไปทำการทดสอบกำลังดึง

2) ทำการติด Strain gauge ในเหล็กเสริม โดยก่อนและหลังติดเกจวัดความเครียดนั้นให้ทำการตรวจสอบเกจวัดความเครียดด้วยโอห์มมิเตอร์ว่าอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน

3) เตรียมแบบหล่อและวางเหล็กเสริมที่เตรียมไว้ ตรวจสอบเกจวัดความเครียดอีกครั้งด้วยโอห์มมิเตอร์

4) ทำการหล่อคานทั้ง 3 กลุ่มและทำการเก็บตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 15 x 30 ซม. ในแต่ละคานให้เก็บตัวอย่างคอนกรีตจำนวน 2 ตัวอย่าง

5) ทำการบ่มและทดสอบกำลังอัดตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกในแต่ละตัวอย่างคาน

6) เมื่อได้กำลังอัดที่กำหนดจากนั้นนำตัวอย่างคานทิ้งไว้ 1 วัน เพื่อให้ผิวแห้งจากการบ่ม

7) เตรียมพื้นผิวหน้าคานให้สะอาดและทาสีรองพื้นพลาสติกเพื่อให้เห็นรอยแตกร้าวได้ชัดเจนขึ้น เมื่อสีแห้งให้ทำการตี Grid ตำแหน่งของเหล็กเสริมทั้งเหล็กเสริมตามยาวล่างและบน และเหล็กปลอกในแนวดิ่งและทแยง

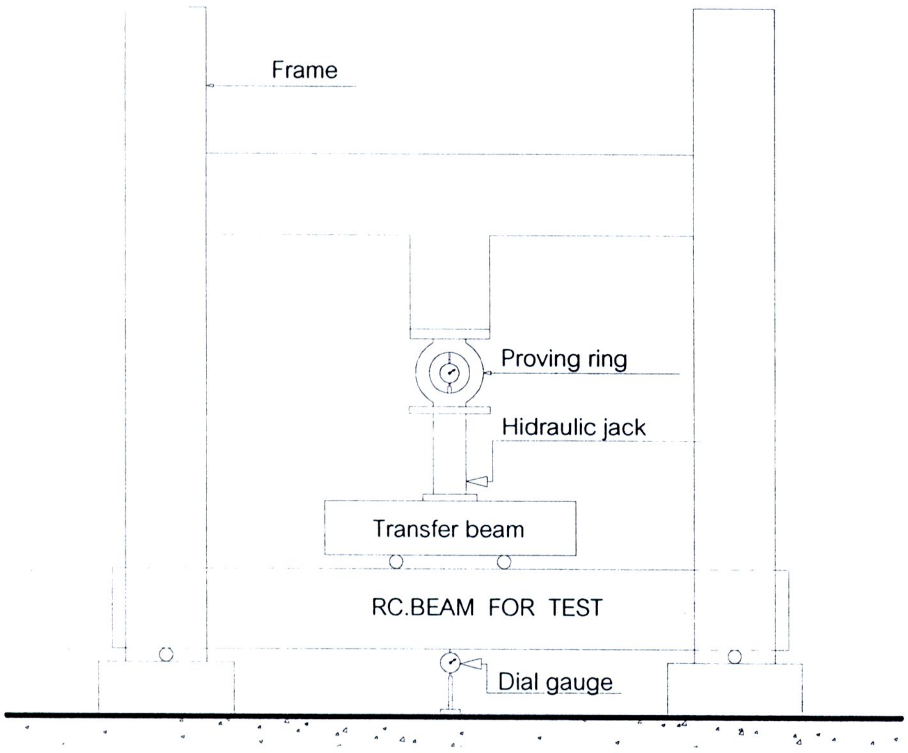
8) ทำการติดตั้งคานเข้ากับโครงข้อแข็ง โดยวางคานบนฐานรองรับ 2 จุด จากนั้นติดตั้งคานถ่ายแรงเพื่อถ่ายน้ำหนักบรรทุกแบบ 2 จุด บนคานทดสอบ ทำการติดตั้ง Hydraulic jack และติดตั้งวงแหวนวัดแรง (Proving ring) โดยการติดตั้งแต่ละขั้นตอนนั้นให้ทำการตรวจสอบแนวและดิ่งของตำแหน่งที่จะติดตั้งให้ถูกต้องเรียบร้อย ซึ่งรายละเอียดอธิบายการติดตั้งทดสอบคานนั้นดังแสดงในภาพที่ 4.5

9) ทำการติดตั้ง Dial gauge เพื่อวัดการเคลื่อนที่หรือการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน 2 ตัว ที่บริเวณขอบคาน

10) ทำการติดตั้ง LVDT

11) ทำการเชื่อมต่อ Data logger กับเกจวัดความเครียด และ LVDT (กรณีคานกลุ่ม C) พร้อมระบุค่าตั้งต้นกับ Data logger ให้พร้อมใช้งาน

12) ในการทดสอบคานจะทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนคานวิบัติ โดยจะให้น้ำหนักบรรทุก เป็นช่วงๆ ช่วงละ 300 กก. เวลาห่างกัน 2 นาทีต่อช่วงน้ำหนักบรรทุกที่ให้



ภาพที่ 4.5 อธิบายการติดตั้งทดสอบคาน

ในการเก็บข้อมูลมีวิธีการดังต่อไปนี้

1) ทำการเก็บข้อมูลความเครียดด้วย Data logger ที่เชื่อมต่อกับ Strain gage ในแต่ละช่วงของน้ำหนักบรรทุกโดยแต่ละช่วงเก็บ 2 ค่า คือ ค่าก่อนและค่าหลัง

2) เขียนแนวเส้นการแตกร้าวของคานในแต่ละช่วงของน้ำหนักบรรทุกพร้อมทั้งระบุค่า น้ำหนักบรรทุกแต่ละช่วงที่ผิวคานในขณะที่ให้น้ำหนักบรรทุกคานในแต่ละช่วงของน้ำหนักบรรทุก

3) บันทึกการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานจาก Dial gauge 2 ตัว อ่านค่า 2 ครั้งในแต่ละช่วงน้ำหนักบรรทุกโดยมีค่าก่อนและค่าหลัง