

บทที่ 5

ผลการศึกษา

5.1 ผลการทดสอบของคานทดสอบกลุ่ม A

5.3.1 พฤติกรรมในการรับแรงและลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบกลุ่ม A

สำหรับการทดสอบของคานกลุ่ม A มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมเบื้องต้นของคานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam : TB) กับคานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้งเพียงอย่างเดียว (Normal Beam : NB) เพื่อให้ทราบถึงรูปแบบการกระจายของการแตกร้าวและความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน โดยรายละเอียดการติดตั้งและผลทดสอบคุณสมบัติวัสดุของคานทดสอบกลุ่ม A ได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดการติดตั้งและผลทดสอบคุณสมบัติวัสดุของคานทดสอบกลุ่ม A

| รายละเอียด | | | หมายเลขของคานทดสอบกลุ่ม A | | | | | |
|-------------------------------|----------|-----------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | A-NB1 | A-TB1 | A-NB2 | A-TB2 | A-NB3 | A-TB3 |
| เหล็กเสริม | ด้านล่าง | ขนาด | 4-DB16 | 4-DB16 | 4-DB16 | 4-DB16 | 4-DB16 | 4-DB16 |
| | | จุดคราก, f_y (ksc.) | 6297 | 6297 | 6297 | 6297 | 6297 | 6297 |
| ตามยาว | ด้านบน | ขนาด | 2-DB12 | 2-DB12 | 2-DB12 | 2-DB12 | 2-DB12 | 2-DB12 |
| | | จุดคราก, f_y (ksc.) | 4975 | 4975 | 4975 | 4975 | 4975 | 4975 |
| เหล็กปลอก RB6 | แนวตั้ง | ระยะห่าง (cm.) | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 12.5 | 12.5 |
| | | จุดคราก, f_y (ksc.) | 4290 | 4290 | 4290 | 4290 | 4290 | 4290 |
| | แนวทแยง | รูปแบบ | ไม่มี | มี | ไม่มี | มี | ไม่มี | มี |
| | | จุดคราก, f_y (ksc.) | - | 4290 | - | 4290 | - | 4290 |
| กำลังอัดคอนกรีต f'_c (ksc.) | | | 297 | 297 | 260 | 260 | 267 | 267 |

ในระหว่างการทดสอบได้ทำการเก็บข้อมูลการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานกับน้ำหนักบรรทุกของคานทดสอบมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานทดสอบของคานทดสอบกลุ่ม A ดังแสดงในภาพที่ 5.1, 5.3 ถึงภาพที่ 5.5

ส่วนรูปแบบการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานทดสอบ ได้แก่ การแตกร้าวคัดแรก (First Flexural Crack : FC) และการแตกร้าวเฉือนแรก (First Shear Crack : SC) ที่แต่ละน้ำหนักบรรทุกเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3 แสดงเปอร์เซ็นต์แตกต่างของการรับน้ำหนักบรรทุกที่การแตกร้าวแรกและการแตกร้าวเฉือนแรกของคานกลุ่ม A

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกกับรูปแบบการแตกร้าวที่เกิดขึ้นของคานทดสอบกลุ่ม A

| รายละเอียดคานทดสอบกลุ่ม A | | น้ำหนักบรรทุก, P (ตัน) | |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------|
| หมายเลขคานทดสอบ | รูปแบบของคานทดสอบ | การแตกร้าวคัดแรก (FC) | การแตกร้าวเฉือนแรก (SC) |
| A-NB1 | เสริมเหล็กปลอกเฉพาะปลอกแนวตั้ง | 3.6 | 9.9 |
| A-TB1 | เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน | 2.7 | 11.7 |
| A-NB2 | เสริมเหล็กปลอกเฉพาะปลอกแนวตั้ง | 2.7 | 9.0 |
| A-TB2 | เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน | 3.6 | 10.8 |
| A-NB3 | เสริมเหล็กปลอกเฉพาะปลอกแนวตั้ง | 3.6 | 9.0 |
| A-TB3 | เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน | 2.7 | 16.2 |

ตารางที่ 5.3 เปอร์เซนต์แตกต่างของการรับน้ำหนักบรรทุกที่การแตกร้าวเฉือนแรกระหว่าง TB/NB ของคานกลุ่ม A

| หมายเลขคาน | เปอร์เซนต์น้ำหนักบรรทุก, P (ตัน) | |
|-------------|----------------------------------|-------------------------|
| | การแตกร้าวคัดแรก (FC) | การแตกร้าวเฉือนแรก (SC) |
| A-TB1/A-NB1 | 75.00 | 118.18 |
| A-TB2/A-NB2 | 133.33 | 120.00 |
| A-TB3/A-NB3 | 75.00 | 180.00 |

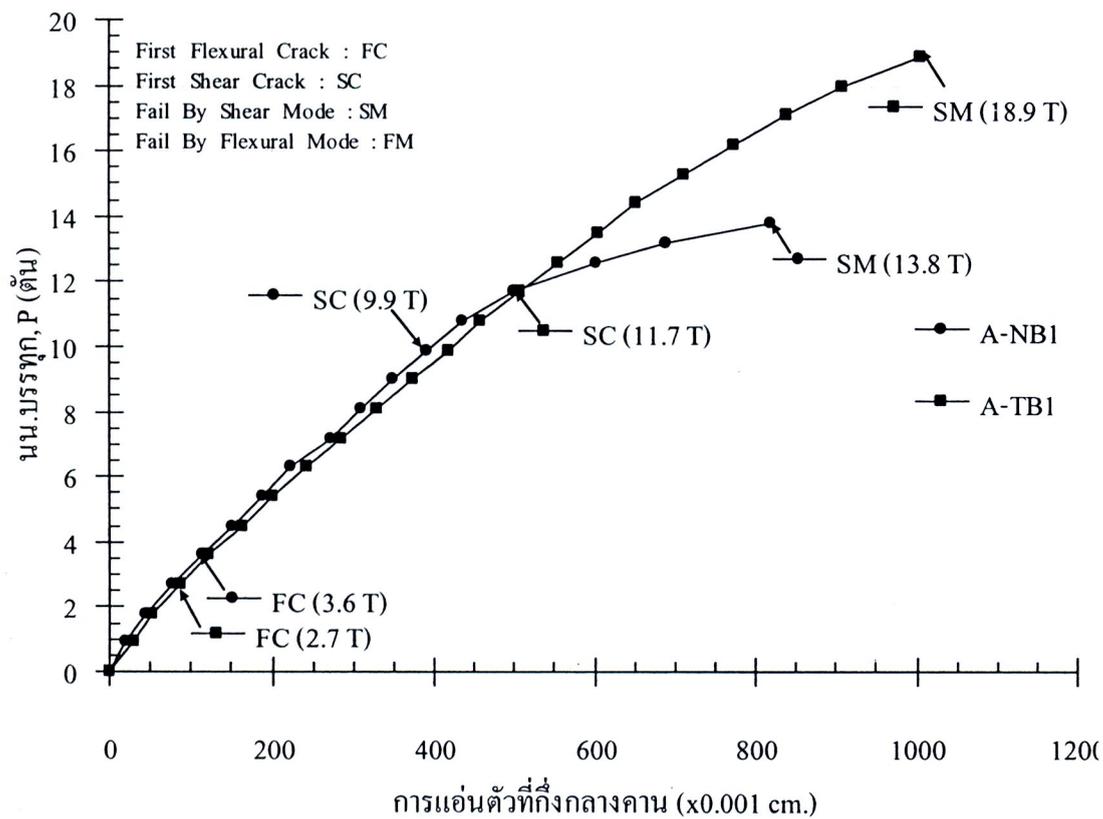
จากการทดสอบสามารถสรุปค่าการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานทดสอบกับค่าการวิเคราะห์ ทางทฤษฎีได้ดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 การรับน้ำหนักของคานทดสอบกับค่าวิเคราะห์ทางทฤษฎี

| หมายเลขคาน | ค่าการวิเคราะห์ทางทฤษฎี | | ผลการทดสอบ | |
|------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| | $P_{(ultimate)}$ (ตัน) | รูปแบบการวิบัติ | $P_{(ultimate)}$ (ตัน) | รูปแบบการวิบัติ |
| A - NB1 | 11.7 | การเฉือน | 13.8 | การเฉือน |
| A - TB1 | - | - | 18.9 | การเฉือน |
| A - NB2 | 11.3 | การเฉือน | 12.6 | การเฉือน |
| A - TB2 | - | - | 16.2 | การเฉือน |
| A - NB3 | 16.2 | การเฉือน | 19.8 | การเฉือน |
| A - TB3 | - | การเฉือน | 25.2 | การเฉือน |

ข้อมูลการแอนตัวที่กึ่งกลางคานได้จากการให้น้ำหนักบรรทุกแบบ Four-Point Loading โดยจะทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (P) ครั้งละ 0.30 ตัน และจะค้ำน้ำหนักบรรทุกไว้ 2 นาทีเพื่อให้น้ำหนักบรรทุกได้ถ่ายลงไปที่คานแล้วบันทึกค่าการแอนตัวที่กึ่งกลางของคานทดสอบแล้วค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป

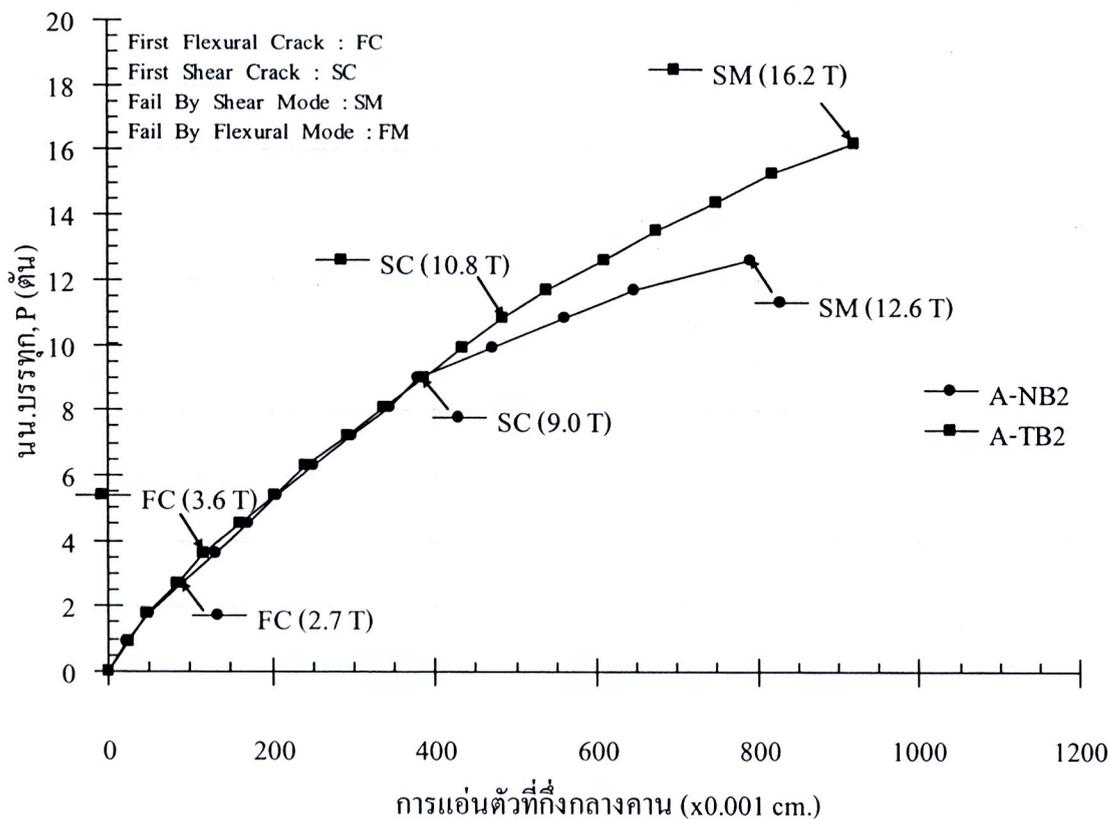
พิจารณาภาพที่ 5.1 และภาพที่ 5.2 เป็นข้อมูลของคาน A-NB1 และ A-TB1 เริ่มต้นพิจารณาที่คาน A-NB1 เป็นคานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกถูกตั้งแนวตั้งเพียงอย่างเดียว (Normal Beam: NB) พบว่าคานตัวอย่างเริ่มแตกร้าวคัดแรก (First Flexural Crack: FC) มีลักษณะเป็นเส้นตรงตั้งฉากกับท้องคานที่น้ำหนักบรรทุก (P) เท่ากับ 3.6 ตัน ทำการให้น้ำหนักบรรทุกต่อไปจนเกิดการแตกร้าวเฉือนแรก (First Shear Crack : SC) รอยแตกร้าวมีลักษณะเป็นเส้นแนวเอียงที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 9.9 ตัน และคานวิบัติที่ 13.8 ตัน ในรูปแบบการเฉือน (Shear Mode)



ภาพที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวที่กึ่งกลางคานทดสอบหมายเลข A-NB1 และ A-TB1 ของคานทดสอบกลุ่ม A

สำหรับคาน A-TB1 เป็นคานที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุนโดยมีการเสริมเหล็กปลอกในแนวทแยงขวางตามแนวทิศทางของหน่วยแรงดึงหลัก (Principal tensile stress) เพื่อให้สอดคล้องกับการไหลของหน่วยแรง (Stress Flow) ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงกระทำตามขวาง จะพบการแตกร้าวตัดแรก (FC) ของคานทดสอบหมายเลข A-TB1 ที่ 2.7 ตัน เกิดการแตกร้าวเฉือนแรก (SC) ที่ 11.7 ตัน และคานวิบัติที่ 18.9 ตัน ในรูปแบบการเฉือน (Shear Mode) เมื่อทำการเปรียบเทียบคาน A-NB1 กับ A-TB1 พบว่าคาน A-TB1 ที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam : TB) แล้วนั้นสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (P) ได้มากกว่าคานทดสอบหมายเลข A-NB1 ที่เสริมเหล็กปลอกทั่วไป (Normal Beam : NB) หรือเสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้งเพียงอย่างเดียว

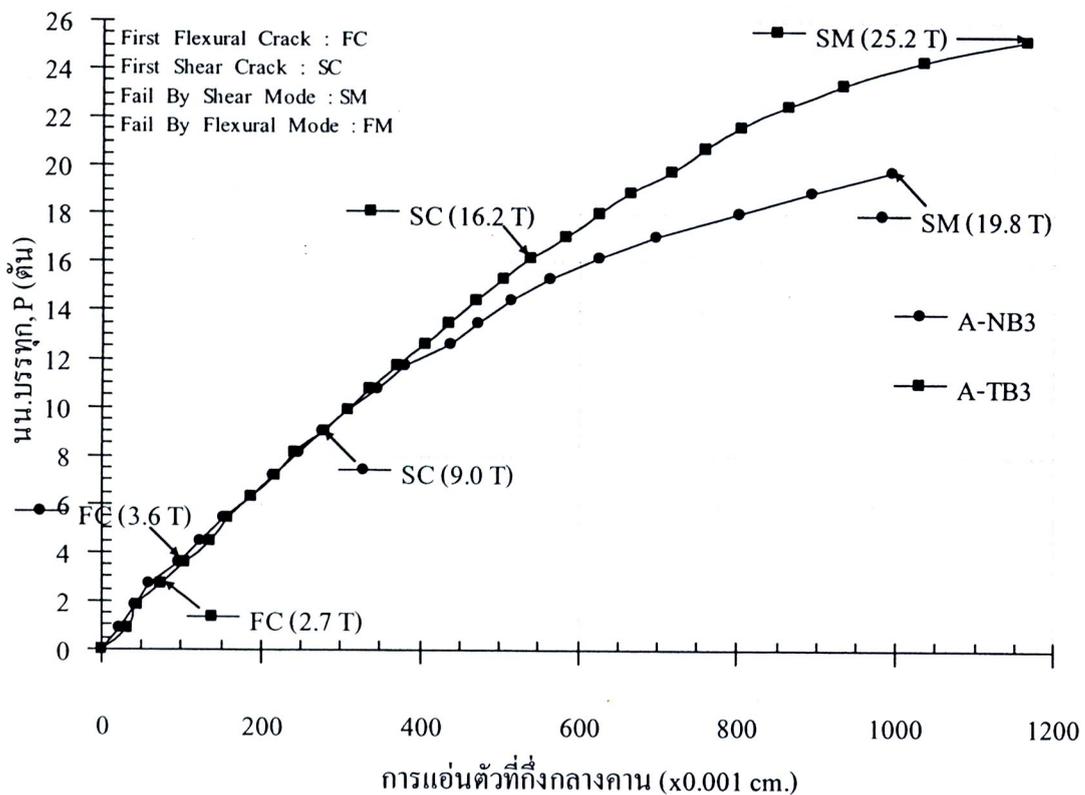
ภาพที่ 5.3 และภาพที่ 5.4 เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคาน A-NB2 และ A-TB2 โดยมีรูปแบบการเสริมเหล็กเหมือนกับคานหมายเลข A-NB1 และ A-TB1 ตามลำดับ ต่างกันที่ค่ากำลังอัดคอนกรีต (f_c') ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 การทดสอบคานทั้งสองในครั้งนี้อยู่เพื่อการตรวจสอบผลการทดสอบครั้งแรก



ภาพที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานทดสอบหมายเลข A-NB2 และ A-TB2 ของคานทดสอบกลุ่ม A

พิจารณาคาน A-TB2 การแตกร้าวคัดแรก (FC) เกิดขึ้นที่ 3.6 ตัน การแตกร้าวเฉือนแรกเกิดขึ้นที่ 10.8 ตัน และวิบัติที่ 16.2 ตันในรูปแบบการเฉือน

จากข้อมูลคานทดสอบทั้ง 4 ตัวนี้ยืนยันให้เห็นว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) ภายหลังจากการแตกร้าวเฉือนแรกแล้วจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุก (P) ได้มากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (Normal Beam) ที่เสริมเฉพาะเหล็กปลอกลูกตั้งแนวตั้งเพียงอย่างเดียว และมีการชะลอหรือมีการพัฒนาการแตกร้าวค้ำทแยงข้างล่างโดยสาเหตุมาจากการที่ได้เสริมเหล็กปลอกทแยงให้เป็นรูปแบบโครงข้อหมุนตามแบบจำลอง Lattice Model ในทิศทางเดียวกันกับการไหลของหน่วยแรงค้ำหลัก (Principal tensile stress) ทำให้เหล็กปลอกทแยงช่วยต้านทานการขยายตัวการแตกร้าวค้ำทแยง (Diagonal tension crack) ซึ่งได้เริ่มพัฒนาการแตกร้าวจนมาถึงตำแหน่งเหล็กเสริมทแยงดังกล่าว เป็นผลทำให้การกระจายตัวการแตกร้าวภายหลังจากการแตกร้าวเฉือนแรกได้ดีกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (Normal Beam) ที่เสริมเฉพาะเหล็กปลอกลูกตั้งแนวตั้งเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวที่กึ่งกลางคานทดสอบหมายเลข A-NB3 และ A-TB3 ของคานทดสอบกลุ่ม A



ภาพที่ 5.5 และภาพที่ 5.6 เป็นข้อมูลผลการทดสอบของคานกลุ่ม A หมายเลข A-NB3 และ A-TB3 โดยมีรายละเอียดการติดตั้งเหล็กเสริมที่แตกต่างจากคานทั้ง 4 ตัวที่ผ่านมา ตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ได้แก่ การจัดรูปแบบการเสริมเหล็กปลอกเป็นระยะ $d/2$ และ ระยะช่วงการเฉือน (Shear span : a) ต่อความลึกประสิทธิภาพ (d) ของหน้าตัดคานเท่ากับ 2.5

เริ่มพิจารณาคาน A-NB3 เมื่อเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกคานครั้งละ 0.30 ตัน จนกระทั่งเกิดการแตกร้าวคัดแรก (FC) ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 3.6 ตัน เริ่มเกิดการแตกร้าวเฉือนแรก (SC) ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 9.0 ตัน และให้น้ำหนักบรรทุกต่อไปจนคานทดสอบวิบัติในรูปแบบการเฉือนที่ 19.8 ตัน

สำหรับคาน A-TB3 เมื่อเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกจนเริ่มเกิดการแตกร้าวคัดแรก (FC) ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 2.7 ตัน เริ่มการแตกร้าวเฉือนแรก (SC) ที่ 16.2 ตัน และคานทดสอบวิบัติในรูปแบบการเฉือนที่ 25.2 ตัน

จากข้อมูลคาน A-NB3 กับคานทดสอบหมายเลข A-TB3 ยืนยันให้เห็นว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) ภายหลังจากการแตกร้าวเฉือนแรกแล้วจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุก (P) ได้มากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (Normal Beam) ที่เสริมเฉพาะเหล็กปลอกในแนวตั้งเพียงอย่างเดียว และมีการชะลอหรือมีการพัฒนาการแตกร้าวดึงทแยงข้าง (ภาพที่ 5.6) ซึ่งจะเห็นได้จากค่าน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นที่ได้ระบุ ณ ตำแหน่งการแตกร้าวเดียวกันของคานทั้งสองรูปแบบ

โดยสรุปผลการทดสอบคานกลุ่ม A ที่ผ่านมาทำให้พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) ตามแบบจำลอง Lattice Model ที่วางเหล็กเสริมทแยงตามแนวการไหลของหน่วยแรงดึงหลัก (Principal tensile stress) จะช่วยรับแรงดึงและชะลอการแตกร้าวดึงทแยง (Diagonal tension crack) ทำให้การพัฒนาการแตกร้าวภายหลังที่เกิดการแตกร้าวเฉือนแรกมีการพัฒนาอย่างช้าๆ และค่อยๆ กระจายตัวจนกระทั่งคานวิบัติดังแสดงในภาพที่ 5.2, 5.4 และ 5.6 โดยสาเหตุมาจากการที่ได้เสริมเหล็กปลอกทแยงให้เป็นรูปแบบโครงข้อหมุนตามแบบจำลอง Lattice Model ในทิศทางเดียวกันกับการไหลของหน่วยแรงดึงหลัก (Principal tensile stress) ทำให้เหล็กปลอกทแยงช่วยต้านทานการขยายตัวการแตกร้าวดึงทแยง (Diagonal tension crack) ซึ่งได้เริ่มพัฒนาการแตกร้าวจนมาถึงตำแหน่งเหล็กเสริมทแยงดังกล่าว เป็นผลทำให้การกระจายตัวของการแตกร้าวภายหลังการแตกร้าวเฉือนแรกได้ดีกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (Normal Beam) ที่เสริมเฉพาะเหล็กปลอกแนวตั้งเพียงอย่างเดียว การกระจายตัวของการแตกร้าวที่เห็นได้ชัดเจนคือคานทดสอบหมายเลข A-NB1 กับ A-TB1 และคานทดสอบหมายเลข A-NB1 กับ A-TB2

5.2 ผลการทดสอบของคานทดสอบกลุ่ม B

5.2.1 พฤติกรรมในการรับแรงและลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบกลุ่ม B

ภายหลังจากการทดสอบคานตัวอย่างกลุ่ม A ได้ทำการวิเคราะห์และตรวจสอบข้อมูล จึงเกิดแนวคิดในการวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นส่วนย่อยของคานทดสอบ โดยได้จำลองรูปแบบของชั้นส่วนย่อย (Stress Flow) เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมการรับแรงของชั้นส่วนย่อยระหว่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบทั่วไป (Normal Beam) กับคานที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) เพิ่มเติมจากกลุ่ม A ตารางที่ 5.5 แสดงถึงรายละเอียดการติดตั้งและผลทดสอบคุณสมบัติวัสดุของคานทดสอบกลุ่ม B ในระหว่างการทดสอบ ได้ทำการเก็บข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (P) กับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานดังแสดงภาพที่ 5.7, 5.9 และ 5.10 และบันทึกการแตกร้าวที่เกิดขึ้นได้แก่ การแตกร้าวคัดแรก (First Flexural Crack : FC) และการแตกร้าวเฉือนแรก (First Shear Crack : SC) ที่แต่ละน้ำหนักบรรทุกไว้ในตารางที่ 5.6 และเปอร์เซ็นต์แตกต่างของการรับน้ำหนักบรรทุกที่การแตกร้าวแรกและการแตกร้าวเฉือนแรกของคานกลุ่ม B แสดงไว้ในตารางที่ 5.7 จากตารางจะพบว่าคาน B-TB4 มีการเกิดการแตกร้าวเฉือนแรกก่อนคาน B-NB4 น่าจะมีสาเหตุมาจากการที่กำลังอัดคอนกรีตก่อนข้างต่ำคือ 62 ksc. และความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเดียวกันของวัสดุของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ข้อมูลจากการทดสอบสามารถสรุปค่าการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานทดสอบกับค่าการวิเคราะห์ทางทฤษฎีได้ดังแสดงในตารางที่ 5.8

พิจารณาคาน B-NB4 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้งทั่วไป (Normal Beam: NB) ที่ออกแบบให้วิบัติในรูปแบบการเฉือน (Shear Mode) พบว่าคานทดสอบเริ่มแตกร้าวคัดแรก (First Flexural Crack : FC) มีลักษณะเป็นเส้นตรงตั้งฉากกับท้องคาน ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 2.7 ตัน ทำการให้น้ำหนักบรรทุกต่อไปจนเกิดการแตกร้าวเฉือนแรก (First Shear Crack : SC) รอยแตกร้าวมีลักษณะเป็นเส้นแนวเอียง ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 5.7 ตัน และคานวิบัติที่ 8.4 ตันในรูปแบบ การเฉือน (Shear Mode)

สำหรับคาน B-TB4 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam: TB) โดยเพิ่มเหล็กปลอกทแยงระยะห่างเท่ากับ 25 ซม. เช่นเดียวกับระยะห่างของปลอกแนวตั้ง เมื่อเริ่มให้น้ำหนักบรรทุก (P) คานเกิดการแตกร้าวคัดแรก (FC) ที่ 0.6 ตัน เกิดการแตกร้าวเฉือนแรก (SC) ที่ 4.2 ตัน และคานวิบัติในรูปแบบการเฉือนที่ 10.8 ตันตามลำดับเมื่อพิจารณาภาพที่ 5.7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานทดสอบหมายเลข B-NB4 และ B-TB4 พบว่าคาน B-TB4 ที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อ

หมุน (Truss Beam) สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่การแอ่นตัวเท่ากันได้มากกว่าคาน B-NB4 ที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้ง (Normal Beam) และในภาพที่ 5.8 แสดงลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบหมายเลข B-NB4 และ B-TB4 พบว่าคาน B-TB4 สามารถช่วยให้รอยแตกทแยงเนื่องจากหน่วยแรงเฉือนกระจายตัวได้ดีกว่าคาน B-NB4 ที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้งเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 5.5 รายละเอียดการติดตั้งและผลทดสอบคุณสมบัติวัสดุของคานทดสอบกลุ่ม B

| รายละเอียด | | | หมายเลขของคานทดสอบกลุ่ม B | | | |
|-------------------------------|----------------|----------------|---------------------------|--------|--------|--------|
| | | | B-NB4 | B-TB4 | B-NB5 | B-TB5 |
| เหล็กเสริมตามยาว | ด้านล่าง | ขนาด | 2-DB25 | 2-DB25 | 2-DB12 | 2-DB12 |
| | | จุดคราก (ksc.) | 5036 | 5036 | 4710 | 4710 |
| | ด้านบน | ขนาด | 2-DB12 | 2-DB12 | 2-DB12 | 2-DB12 |
| | | จุดคราก (ksc.) | 4710 | 4710 | 4710 | 4710 |
| เหล็กปลอก RB6 | แนวตั้ง | ระยะห่าง(cm.) | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 |
| | | จุดคราก (ksc.) | 4513 | 4513 | 4513 | 4513 |
| | แนวทแยง | | ไม่มี | มี | ไม่มี | มี |
| | จุดคราก (ksc.) | | 4513 | 4513 | 4513 | 4513 |
| กำลังอัดคอนกรีต f'_c (ksc.) | | | 62 | 62 | 62 | 62 |

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกกับรูปแบบการแตกร้าวที่เกิดขึ้น

| หมายเลขคาน | น้ำหนักบรรทุก, P (ตัน) | |
|------------|------------------------|-------------------------|
| | การแตกร้าวตัดแรก (FC) | การแตกร้าวเฉือนแรก (SC) |
| B-NB4 | 2.7 | 5.7 |
| B-TB4 | 0.6 | 4.2 |
| B-NB5 | 1.8 | 2.7 |
| B-TB5 | 1.5 | 4.8 |



ตารางที่ 5.7 เปรอ์เซ็นต์แตกต่างของการรับน้ำหนักบรรทุกที่การแตกร้าวเฉือนแรกระหว่าง TB/NB

| หมายเลขคาน | เปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุก, P (ตัน) | |
|-------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | การแตกร้าวคัดแรก (FC) | การแตกร้าวเฉือนแรก (SC) |
| B-TB4/B-NB4 | 22.22 | 73.68 |
| B-TB5/B-NB5 | 83.33 | 177.78 |

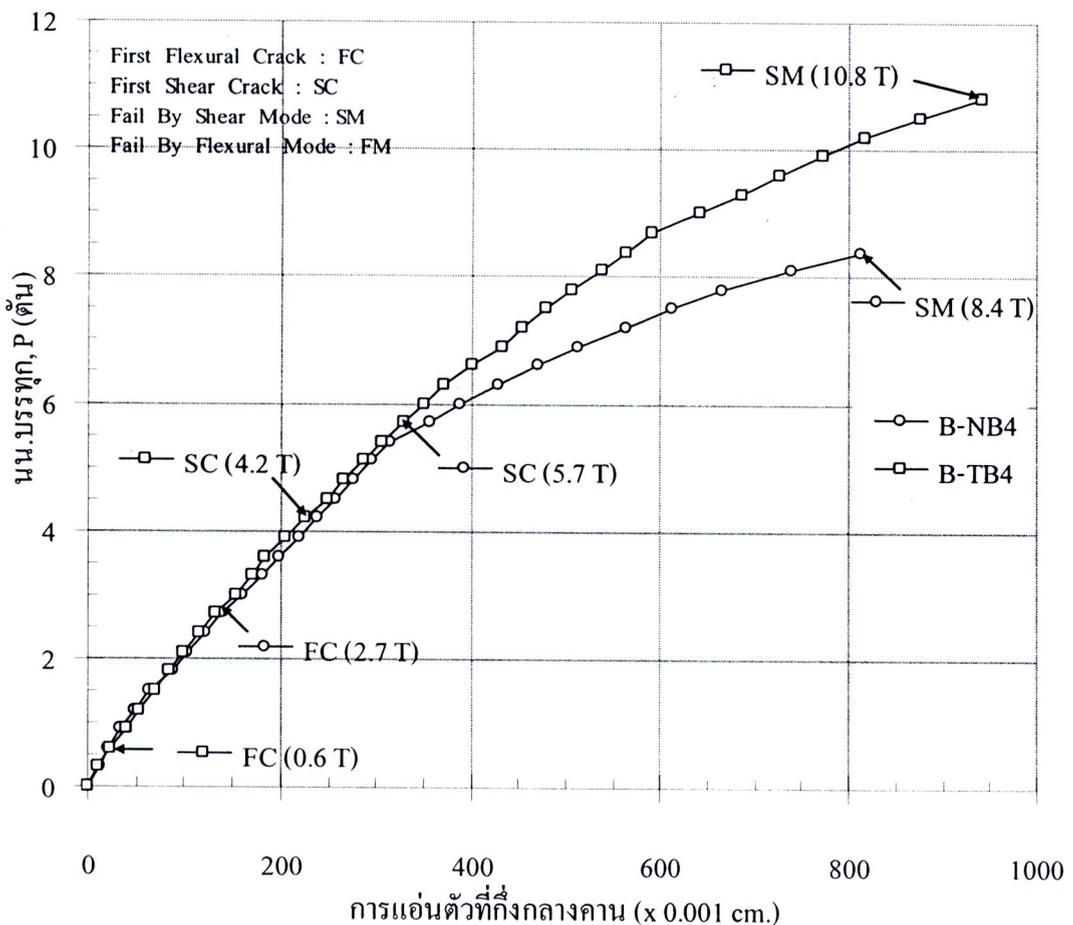
ตารางที่ 5.8 การรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานทดสอบกับค่าวิเคราะห์ทางทฤษฎี

| หมายเลขคาน | ค่าการวิเคราะห์ทางทฤษฎี | | ผลการทดสอบ | |
|------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| | $P_{(ultimate)}$ (ตัน) | รูปแบบการวิบัติ | $P_{(ultimate)}$ (ตัน) | รูปแบบการวิบัติ |
| B – NB4 | 8.2 | การเฉือน | 8.4 | การเฉือน |
| B – TB4 | - | - | 10.8 | การเฉือน |
| B – NB5 | 5.9 | การคัด | 6.9 | การเฉือน |
| B - TB5 | - | - | 6.9 | การคัด |

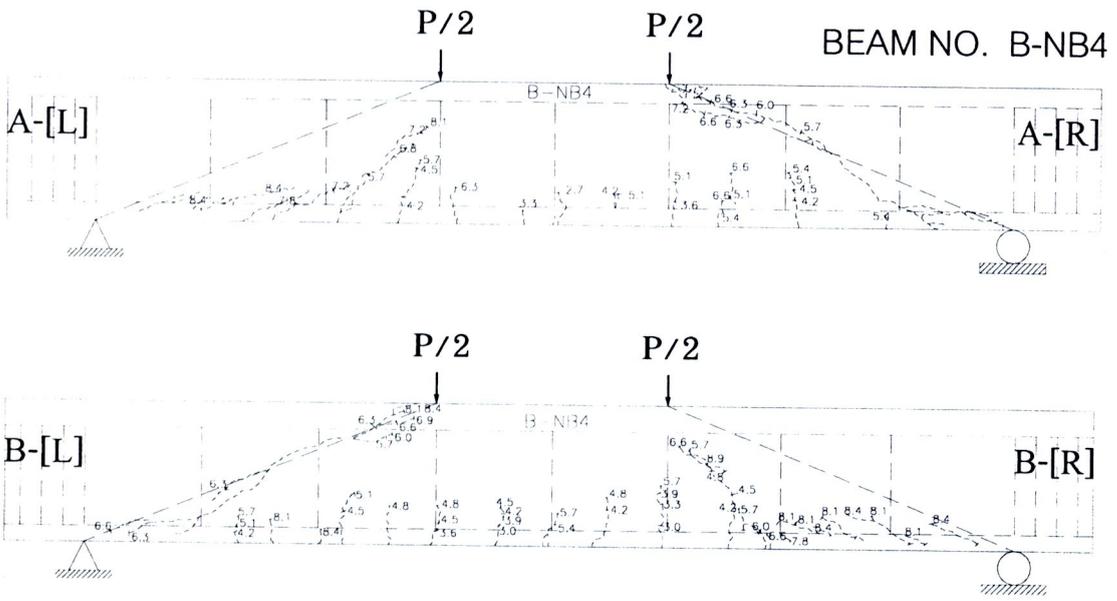
พิจารณาคานตัวอย่าง B-NB5 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้งทั่วไป (Normal Beam : NB) ที่ออกแบบให้วิบัติในรูปแบบการคัด (Flexural Mode) พบว่าคานตัวอย่างเริ่มแตกร้าวคัดแรก (First Flexural Crack : FC) ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 1.8 ตัน ทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกไปจนกระทั่งเกิดการแตกร้าวเฉือนแรก (First Shear Crack : SC) ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 2.7 ตัน และคานวิบัติที่ 6.9 ตัน ในรูปแบบการเฉือน (Shear Mode) สาเหตุเนื่องจากได้ออกแบบให้คานตัวอย่างรับแรงเฉือนมากกว่าโมเมนต์เพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงอาจเป็นสาเหตุให้คานวิบัติด้วยแรงเฉือนแทนการคัดได้

สำหรับคานทดสอบหมายเลข B-TB5 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam : TB) โดยเพิ่มเหล็กปลอกทแยงระยะห่างเท่ากับ 25 ซม. เช่นเดียวกับระยะห่างของปลอกแนวตั้ง เมื่อเริ่มให้น้ำหนักบรรทุก (P) ทำให้คานเกิดการแตกร้าวคัดแรก (FC) ที่ 1.5 ตัน เกิดการแตกร้าวเฉือนแรก (SC) ที่ 4.8 ตัน และคานวิบัติในรูปแบบการคัด (Flexural Mode) ที่ 6.9 ตัน ตามลำดับ (ได้สมมติการแอนตัวของคานที่ 6.9 ตันขึ้น เนื่องจากคานอาจจะพังใ้ อุปกรณ์ทดสอบ) จากภาพที่ 5.9 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอนตัวที่กึ่งกลางคานของคานทดสอบหมายเลข B-NB5 และ B-TB5 พบว่าคานทดสอบหมายเลข B-TB5 ที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่การแอนตัวเท่ากัน

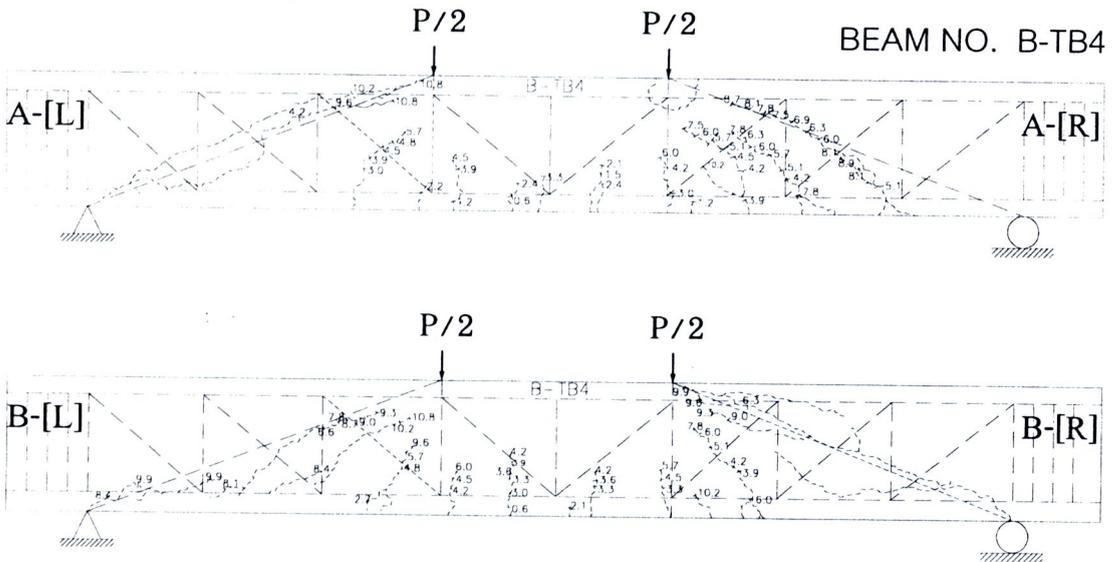
ได้มากกว่าคานทดสอบหมายเลข B-NB5 ที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้ง (Normal Beam) และในภาพที่ 5.11 ได้แสดงลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบหมายเลข B-NB5 และ B-TB5 พบว่าคานทดสอบหมายเลข B-TB5 สามารถช่วยชะลอการแตกร้าวตั้งทแยงให้ช้าลง และช่วยให้รอยแตกร้าวตั้งทแยงเนื่องจากหน่วยแรงเฉือนกระจายตัวดีกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (Normal Beam) ที่เสริมเฉพาะเหล็กปลอกแนวตั้งเพียงอย่างเดียว โดยสาเหตุมาจากการที่ได้เสริมเหล็กปลอกทแยงให้เป็นรูปแบบโครงข้อหมุนตามแบบจำลอง Lattice Model ในทิศทางเดียวกันกับการไหลของหน่วยแรงตั้งหลัก (Principal tensile stress) ทำให้เหล็กปลอกทแยงช่วยต้านทานการขยายตัวการแตกร้าวตั้งทแยง (Diagonal tension crack) ซึ่งได้เริ่มพัฒนาการแตกร้าวจนมาถึงตำแหน่งเหล็กเสริมทแยงดังกล่าว เป็นผลทำให้การกระจายตัวของการแตกร้าวภายหลังการแตกร้าวเฉือนแรกได้ดีกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป (Normal Beam) ที่เสริมเฉพาะเหล็กปลอกแนวตั้งเพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานทดสอบหมายเลข B-NB4 และ B-TB4 ของคานทดสอบกลุ่ม B

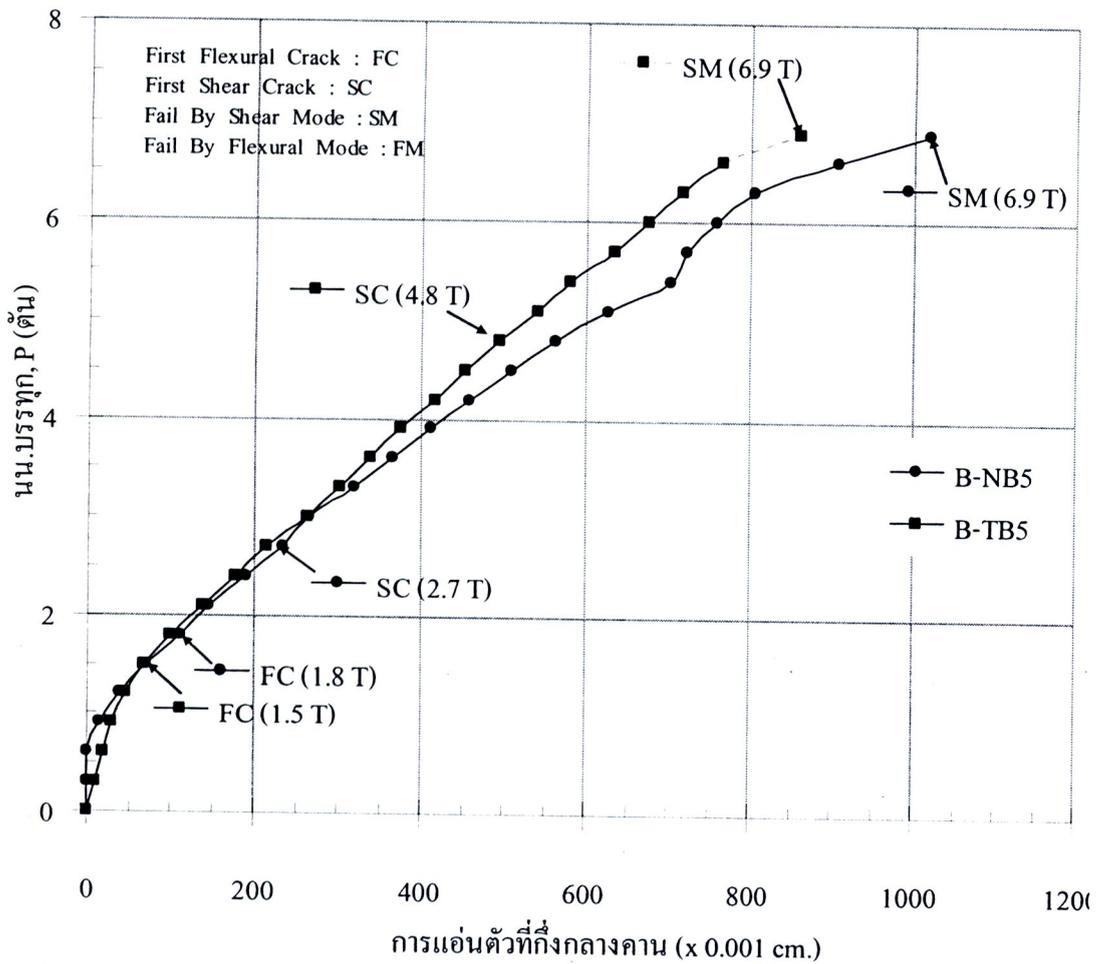


ก) คานทดสอบหมายเลข B-NB4



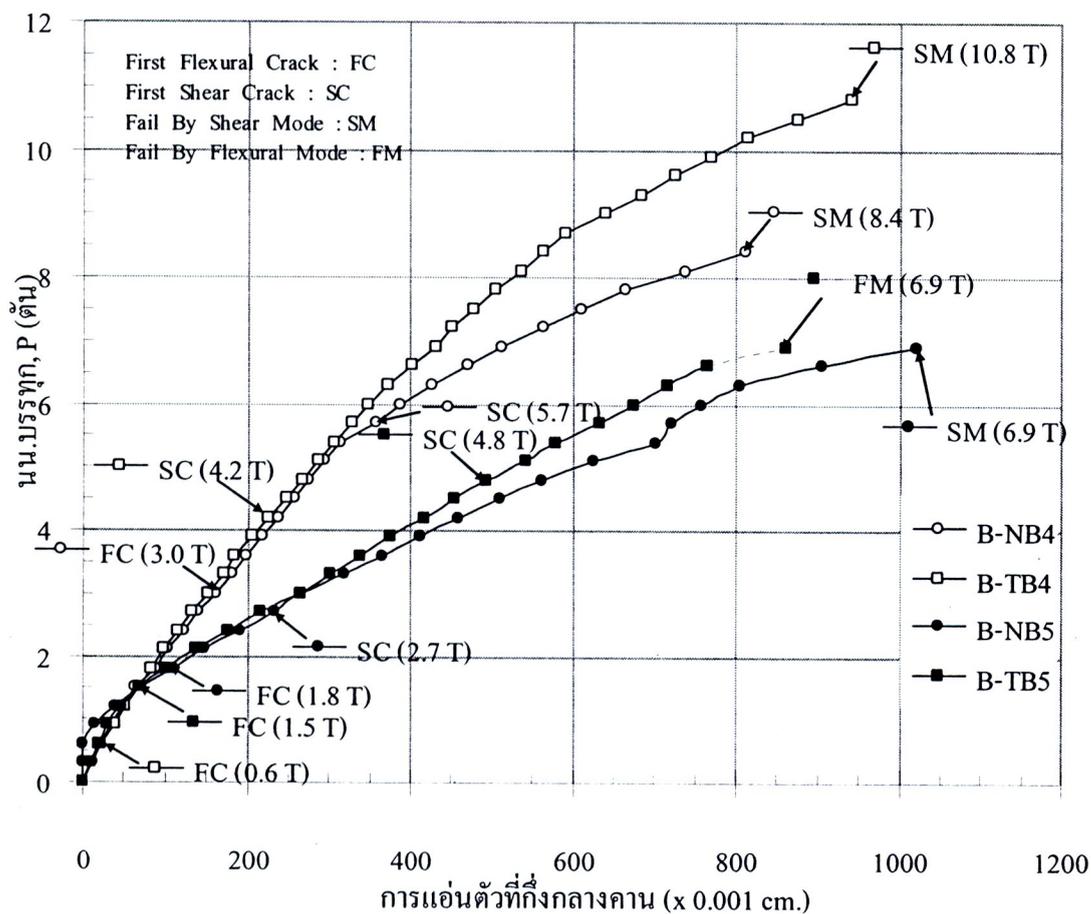
ข) คานทดสอบหมายเลข B-TB4

ภาพที่ 5.8 ลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบหมายเลข B-NB4 และ B-TB4

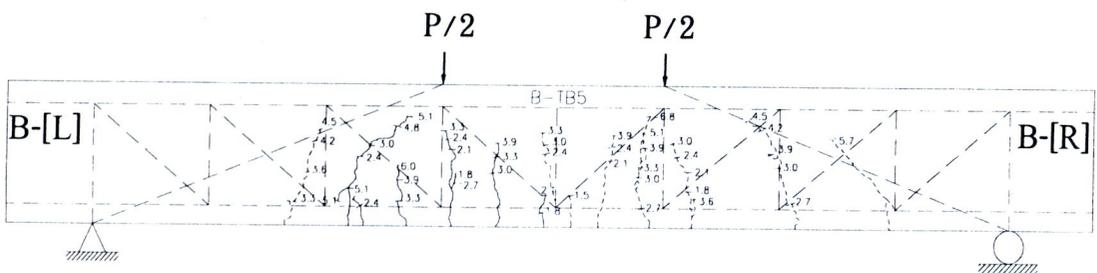
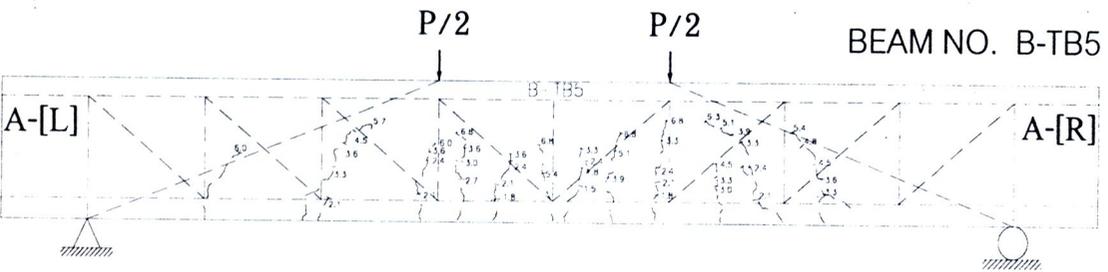
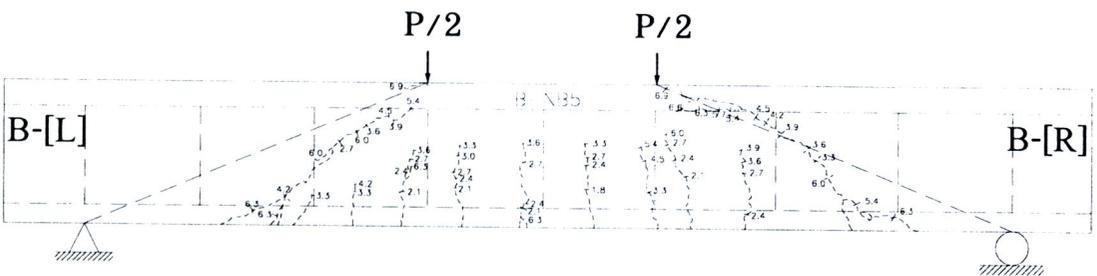
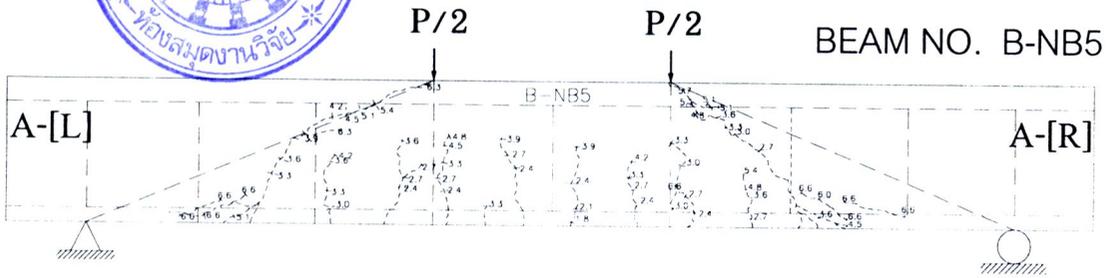


ภาพที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานทดสอบหมายเลข B-NB5 และ B-TB5 ของคานทดสอบกลุ่ม B

พิจารณาภาพที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของกลุ่ม B ผลการทดสอบคานทั้ง 4 ตัว ซึ่งให้เห็นว่าปริมาณเหล็กเสริมตามยาวที่มากขึ้นมีผลช่วยให้คานรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้นที่การแอ่นตัวเท่ากัน



ภาพที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานกลุ่ม B



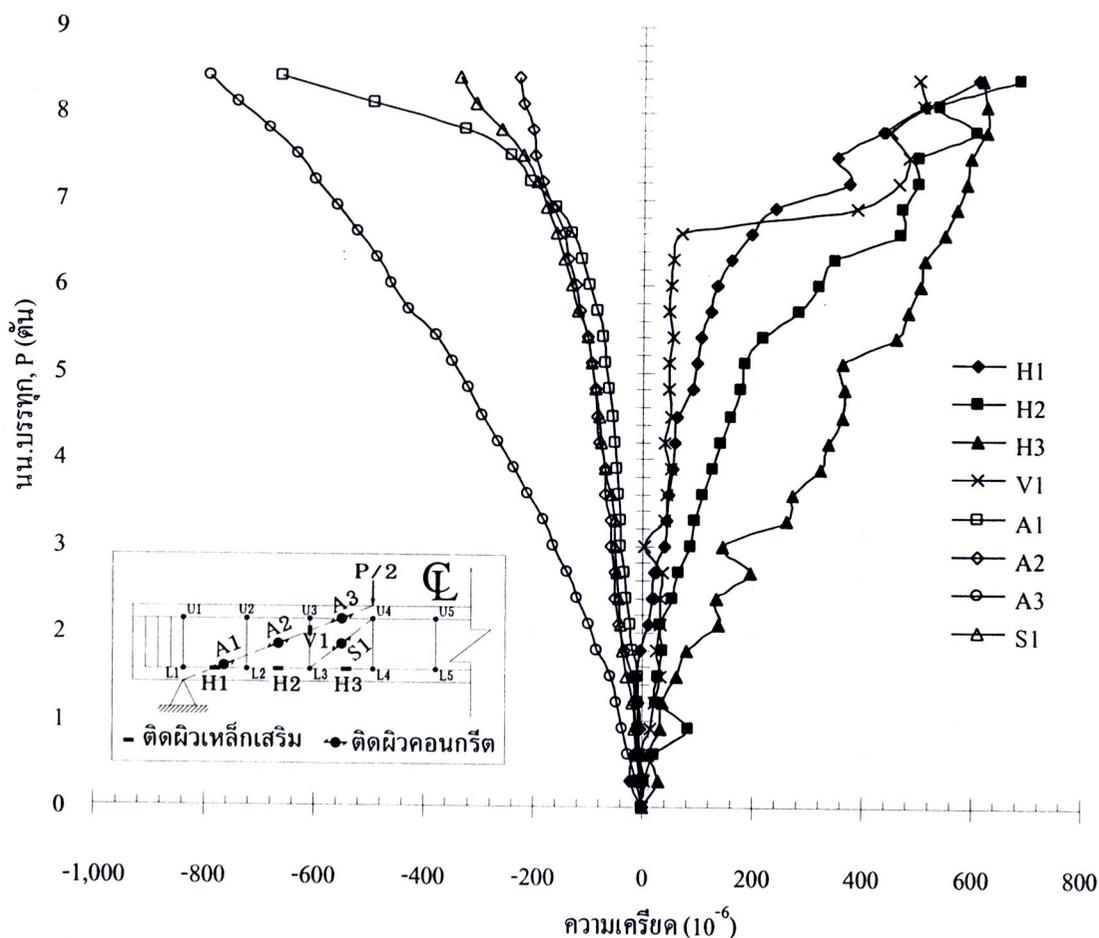
ภาพที่ 5.11 ลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบหมายเลข B-NB5 และ B-TB5

5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายของความเครียด (Strain) ภายในชิ้นส่วนย่อย กับ ลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบกลุ่ม B

5.2.2.1 คานทดสอบหมายเลข B-NB4

พิจารณาภาพที่ 5.12 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคานทดสอบหมายเลข B-NB4 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเฉพาะปลอกแวนดิ่ง (Normal Beam) โดยแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นข้อมูลจาก

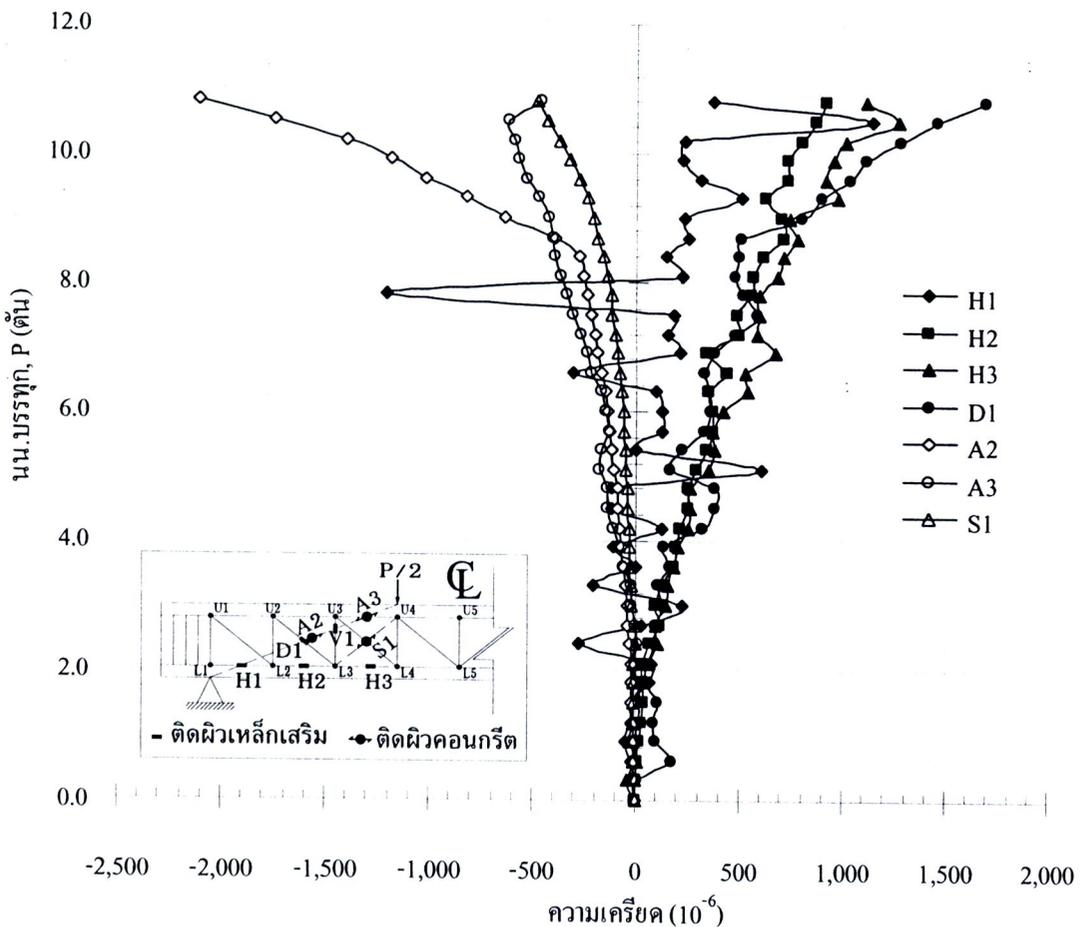
เกจวัดความเครียด (Strain gauge) ที่ติดผิวคอนกรีตประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อยแนวอาร์ช ได้แก่ A1, A2 และ A3 เมื่อเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกชิ้นส่วนย่อยทั้งสามมีการหดตัวหรือมีความเครียดอัดจนกระทั่งคานวิบัติ ชิ้นส่วนย่อย A3 ที่อยู่ใกล้ตำแหน่งให้น้ำหนักบรรทุก (P) นั้นมีความเครียดอัดมากที่สุด สำหรับชิ้นส่วนย่อยคอนกรีตรับแรงอัด (Strut), S1 มีการหดตัวหรือมีความเครียดอัดตั้งแต่เริ่มให้น้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งคานวิบัติ ส่วนที่สองเป็นข้อมูลจากเกจวัดความเครียด (Strain gauge) ที่ติดผิวเหล็กเสริม โดยประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อยเหล็กเสริมตามยาวล่าง ได้แก่ H1, H2, H3 เมื่อให้น้ำหนักชิ้นส่วนย่อยแต่ละชิ้นจะเริ่มมีการยืดตัวหรือความเครียดดึงเกิดขึ้น โดย H3 จะมีความเครียดดึงมากที่สุดรองลงมาคือ H2 และ H1 ตามลำดับ และชิ้นส่วนย่อยเหล็กปลอกแนวตั้ง ได้แก่ V1 มีความเครียดดึงตลอด โดยเฉพาะช่วงน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ 6.9 ตัน ถึง 7.2 ตัน เส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างมาก สาเหตุจากการที่เหล็กปลอกแนวตั้งเริ่มทำหน้าที่รับแรงดึงจากการแตกร้าวทแยงพิจารณาให้ชัดเจนขึ้นได้จากภาพที่ 5.10 ด้าน A[L] ณ ตำแหน่งติดเกจวัดความเครียด (Strain gauge) รอยร้าวที่พาดผ่านเริ่มปรากฏที่น้ำหนักบรรทุกที่ 7.2 ตัน และพยายามต้านทานการแตกร้าวทแยงจนกระทั่งคานวิบัติ



ภาพที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคาน B-NB4

5.2.2.2 กานทดสอบหมายเลข B-TB4

ภาพที่ 5.8 และภาพที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของกานทดสอบหมายเลข B-TB4 เป็นกานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) พบว่าชิ้นส่วนย่อยคอนกรีต A3, A2 ในแนวอาร์ช (Arch) ทำหน้าที่รับแรงอัดตั้งแต่แรกจนกระทั่งกานวิบัติ โดยที่ชิ้นส่วนย่อย A2 มีการเปลี่ยนแปลงความชันมากในช่วงหลังจากน้ำหนักบรรทุกที่ 8.4 ตันเป็นต้น ไปจนกานวิบัติ เนื่องจากการแตกร้าวทแยงอยู่ในแนวอาร์คก่อนข้างพอดีและแนวการแตกร้าวได้พาดผ่านตามแนวตำแหน่งที่ติดเกจวัดความเครียด สำหรับชิ้นส่วนย่อย S1 ทำหน้าที่รับแรงอัดเช่นเดียวกัน พิจารณาที่ชิ้นส่วนย่อยเหล็กเสริมตามยาวล่าง H1, H2 และ H3 ทำหน้าที่รับแรงดึงจากน้อยไปหามาก โดยความเครียดในชิ้นส่วนย่อย H1 ก่อนข้างแปรปรวนเป็นการหดตัวบ้างเล็กน้อย



ภาพที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของกาน B-TB4

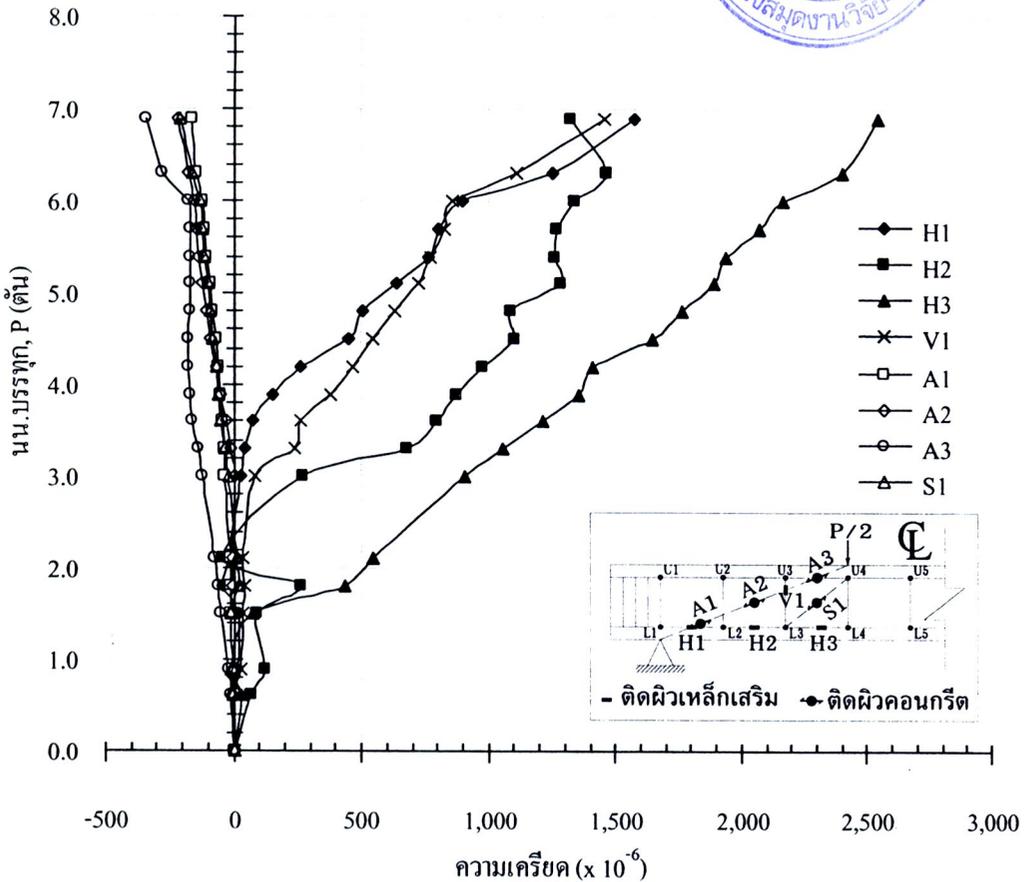
ชิ้นส่วนย่อย D1 ทำหน้าที่รับแรงดึงจนกระทั่งคานวิบัติ ความชันของกราฟมากขึ้นในช่วง 8.4 ตัน เป็นต้นไปเนื่องจากรอยแตกร้าวทแยงผ่าน ชิ้นส่วนและตำแหน่งติดเกจวัดความเครียด สำหรับชิ้นส่วนย่อย V1 นั้นชำรุดในระหว่างการหล่อคานทดสอบ

5.2.2.3 คานทดสอบหมายเลข B-NB5

ภาพที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคานทดสอบหมายเลข B-NB5 ชิ้นส่วนย่อย A1, A2 และ A3 ทำหน้าที่รับแรงอัดภายในชิ้นส่วนย่อยโดยที่ชิ้นส่วนย่อย A1 กับชิ้นส่วนย่อย A2 มีการเปลี่ยนแปลงความชันน้อยตั้งแต่เริ่มให้น้ำหนักบรรทุก (P) เนื่องจากรอยแตกร้าวดึงทแยง (Diagonal tension crack) ไม่ได้พาดผ่าน ณ ตำแหน่งชิ้นส่วนย่อย A1 และ A2 ดังกล่าว จนกระทั่งชิ้นส่วนย่อยทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงความชันที่ชัดเจนในช่วงท้ายที่น้ำหนักบรรทุก 6.3 ตัน เป็นต้นไปเนื่องจากได้มีรอยแตกร้าวทแยงพาดผ่านชิ้นส่วนย่อยและแตกร้าวทแยงไปจนถึงจุดให้น้ำหนักบรรทุกและวิบัติที่ 6.9 ตันในเวลาต่อมาดังแสดงในภาพที่ 5.11 ชิ้นส่วนย่อย H3, H2 และชิ้นส่วนย่อย H1 มีการบิดตัวหรือรับแรงดึงจากมากไปหาน้อยตามลำดับ ชิ้นส่วนย่อย H3 จะมีการเปลี่ยนแปลงความชันมากภายหลังจากการเกิดการแตกร้าวตัดแรก (FC) ที่ 1.8 ตัน เป็นต้นไป และเมื่อให้น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นส่วนย่อย H2 และ H3 มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงความชันแบบเดียวกัน สำหรับชิ้นส่วนย่อย V1 จะทำหน้าที่รับแรงดึง กราฟเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความชันในช่วงหลังจาก 3.9 ตัน จากภาพที่ 5.11 พบว่าเนื่องจากมีรอยร้าวทแยงได้พาดผ่านชิ้นส่วนย่อยเหล็กปลอกค้ำ V1

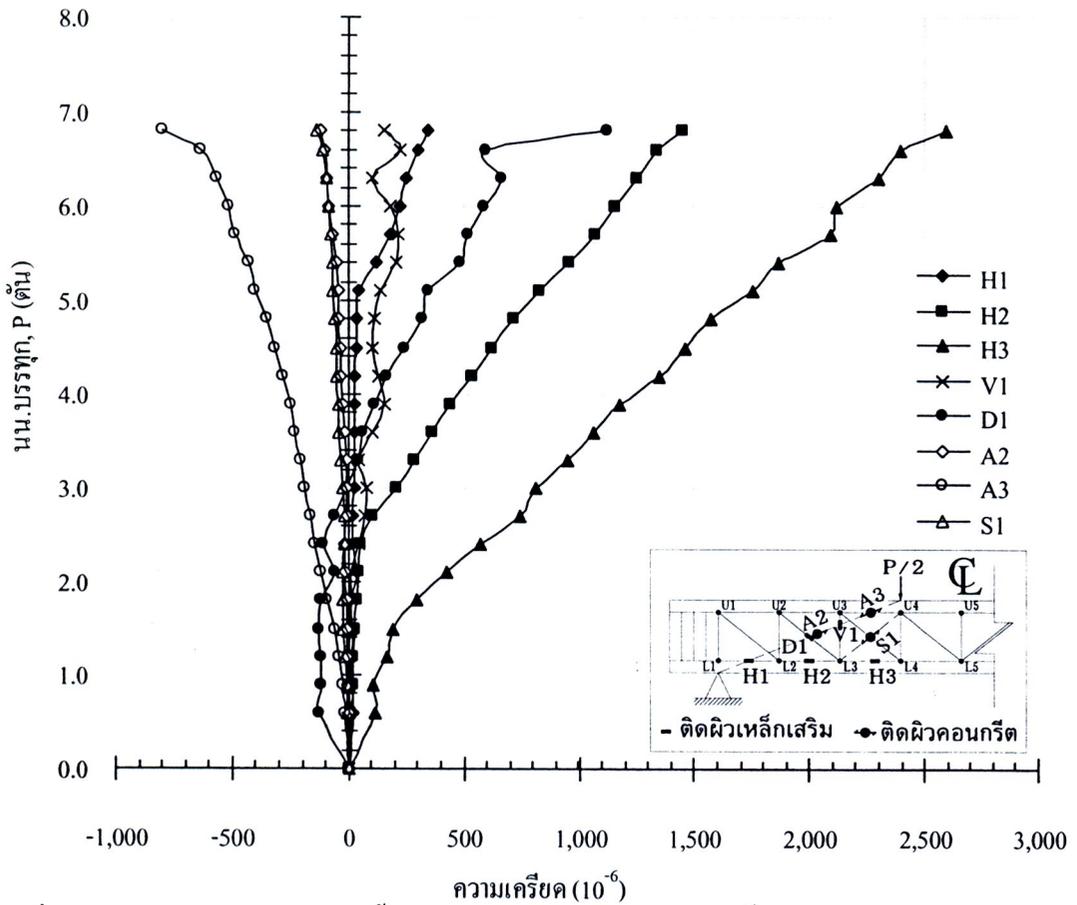
5.2.2.4 คานทดสอบหมายเลข B-TB5

ภาพที่ 5.15 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคานทดสอบหมายเลข B-TB5 โดยชิ้นส่วนย่อย A2 และ A3 ทำหน้าที่รับแรงอัดจนกระทั่งคานวิบัติแบบการค้ำที่ 6.9 ตัน ชิ้นส่วนย่อยเหล็กเสริมตามยาวล่าง H1, H2 และ H3 ทำหน้าที่รับแรงดึงจากน้อยไปหามากตามลำดับ H3 จะมีการเปลี่ยนแปลงความชันมากภายหลังจากการเกิดการแตกร้าวตัดแรก (FC) ที่ 1.5 ตัน เป็นต้นไปและเมื่อให้น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นชิ้นส่วนย่อย H2 และ H3 มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงความชันแบบเดียวกัน ชิ้นส่วนย่อย V1 และ D1 เป็นแบบเหล็กปลอกค้ำและทแยงตามลำดับโดยจะทำหน้าที่รับแรงดึง จากภาพที่ 5.15 นั้น D1 จะรับแรงดึงมากกว่า V1



ภาพที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคาน B-NB5

จากผลการทดสอบหาความสัมพันธ์กับการกระจายความเครียด (Strain Distribution) ภายในชิ้นส่วนย่อยกับลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบกลุ่ม B พบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นทั้งในคอนกรีตและเหล็กเสริม นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะรูปแบบการเกิดการแตกร้าว เช่น ชิ้นส่วนคอนกรีตในแนวอาร์ช ได้แก่ A1, A2 และ A3 มีความเครียดอัดหรือการหดตัวเนื่องจากทิศทางการดัดอยู่แนวเดียวกันกับการแตกร้าวทแยงหรือแนวการส่งถ่ายหน่วยแรงอัดสำหรับเหล็กเสริมตามยาวล่างนั้นจะมีการยึดตัวชัดเจนขึ้นเมื่อการแตกร้าวคัดแรก พาดผ่านตั้งฉากชิ้นส่วน H1, H2 และ H3 ในแนวคั้ง และเหล็กปลอกทแยงและปลอกคั้งหรือชิ้นส่วนย่อย V1 และ D1 มีความเครียดดึงจากการที่มีทิศทางการวางเหล็กเสริมไปขวางกับแนวการแตกร้าวซึ่งการแตกร้าวจะขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก โดยเฉพาะชิ้นส่วนย่อย D1 ซึ่งได้วางขวางเกือบตั้งฉากกับแนวการแตกร้าวคั้งทแยงซึ่งมีความสอดคล้องกับการไหลของหน่วยแรง (Stress flow) ในคานตามแบบจำลอง Lattice model



ภาพที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชั้นส่วนย่อยของคาน B-TB5

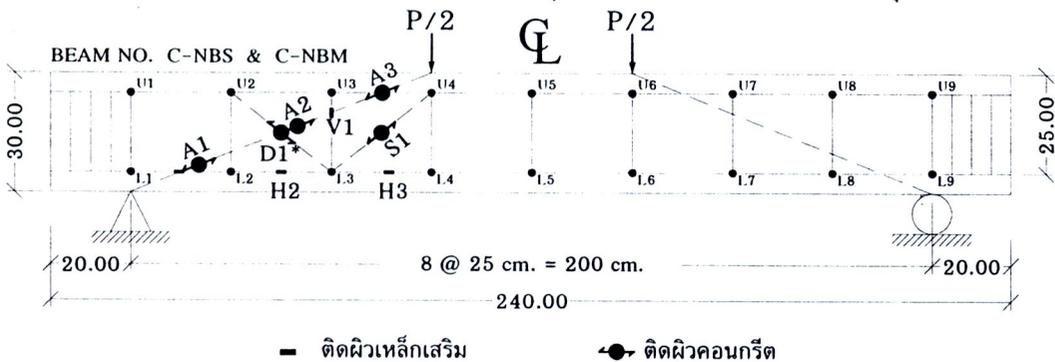
จากข้อมูลความเครียดในแต่ละชั้นส่วนย่อยนั้นสามารถสรุปค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเหล็ก ณ จุดวัดติของคานทดสอบกลุ่ม B ไว้ในตารางที่ 5.9 จากข้อมูลพบว่าความเค้นดึง ณ จุดวัดติของชั้นส่วนย่อยของเหล็กเสริมล่างของคานที่เสริมเหล็กปลอกแบบ โครงข้อหมุนนั้นมีการรับแรงดึงโดยเรียงจากมากไปหาน้อยคือ H3, H2 และ H1 ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับแรงภายในของชั้นส่วน โครงข้อหมุนที่ชั้นส่วนด้านล่างรับแรงดึงมากที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งการเกิดโมเมนต์มากที่สุด ในส่วนของเหล็กปลอกนั้นคานที่เสริมเหล็กปลอกแบบ โครงข้อหมุนพบว่าเหล็กปลอกทแยง (D1) จะช่วยรับแรงดึงมากกว่าเหล็กปลอกแนวตั้ง (V1) จนกระทั่งคานวัดติ (คาน B-TB4 นั้น V1 ชำรุดระหว่างการหล่อคาน)

ตารางที่ 5.9 ความเค้นในชิ้นส่วนย่อยของเหล็กเสริม ณ จุดวิบัติของคานทดสอบกลุ่ม B

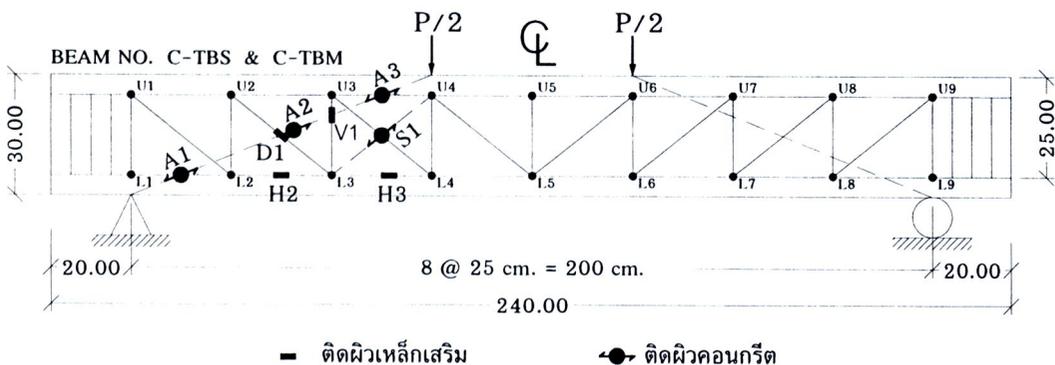
| หมายเลขคาน | ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนย่อยของเหล็กเสริมในคาน (ksc.) | | | | |
|------------|--|------|-------|------|------|
| | H1 | H2 | H3 | V1 | D1 |
| B-NB4 | 1243 | 1403 | 1265 | 1027 | N/A |
| B-TB4 | 753 | 1882 | 2270 | N/A | 3453 |
| B-NB5 | 3221 | 2698 | Yield | 2973 | N/A |
| B-TB5 | 714 | 2971 | Yield | 318 | 2302 |

5.3 ผลการทดสอบของคานทดสอบกลุ่ม C

ในการทดสอบครั้งนี้ได้ปรับปรุงรูปแบบการติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gauge) เพื่อตรวจสอบการไหลของหน่วยแรงระหว่างคานเสริมเหล็กปลอกแนวตั้งปกติ (Normal Beam) เพื่อรวบรวมข้อมูลให้ครบถ้วนมากขึ้นโดยใช้ LVDT โดยภาพที่ 5.16 แสดงรายละเอียดการติดตั้งเกจวัดความเครียดของแต่ละชิ้นส่วนย่อยของคานกลุ่ม C โดยที่คานทดสอบของกลุ่ม C จะมีความ



ก) คานเสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้ง (Normal Beam : NB)

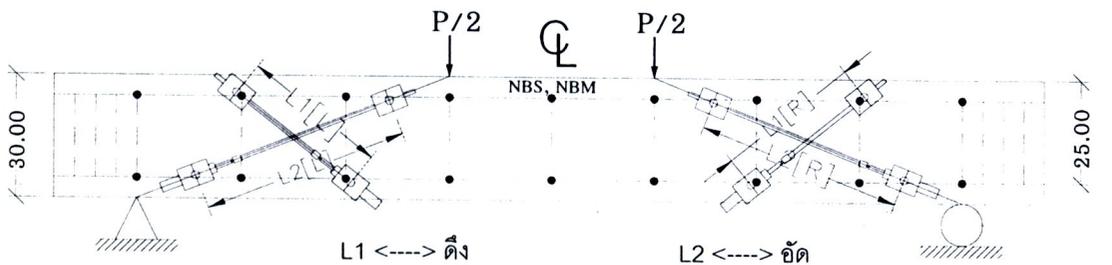


ค) คานเสริมเหล็กแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam : TB)

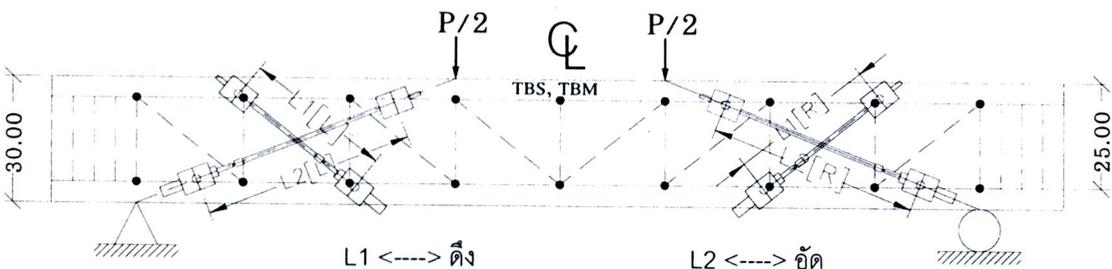
ภาพที่ 5.16 รายละเอียดการติดตั้งเกจวัดความเครียดในแต่ละชิ้นส่วนย่อยของคานกลุ่ม C

แตกต่างในการติดตั้งเกจวัดความเครียดเมื่อเปรียบเทียบกับคานกลุ่ม B ได้ดังนี้ คานที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้ง (Normal Beam) ในคานกลุ่ม C ได้เพิ่มขึ้นส่วนย่อย D1* เพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตรับแรงดึงทแยง และเพิ่มขึ้นส่วนย่อย A1 ในคานที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 5.16

การทดสอบครั้งนี้ได้เพิ่มการทดสอบเพื่อหาการยึดตัวหดตัวหรือความเครียดด้วยอุปกรณ์ LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ภาพที่ 5.17 ได้แสดงรายละเอียดการติดตั้ง LVDT



ก) คานเสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้ง (Normal Beam : NB)



ข) คานเสริมเหล็กแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam : TB)

ภาพที่ 5.17 รายละเอียดการติดตั้ง Linear Variable Differential Transformer : LVDT

5.3.1 พฤติกรรมในการรับแรงของคานทดสอบและลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบกลุ่ม C

ในการทดสอบครั้งนี้ได้แบ่งออกแบบกลุ่มคานเป็น 2 รูปแบบการวิบัติ ได้แก่

- 1) คานออกแบบให้วิบัติรูปแบบการเฉือน (Shear Mode) ได้แก่ คานทดสอบหมายเลข C-NBS เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้ง (Normal Beam)

โดยคานทดสอบหมายเลข C-TBS เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) เพิ่มเติมจาก C-NBS

2) คานออกแบบให้วิบัติรูปแบบการคด (Flexural Mode) ได้แก่ คานทดสอบหมายเลข C-NBM เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวคด (Normal Beam) โดยคานทดสอบหมายเลข C-TBM เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) เพิ่มเติมจาก C-NBM

ตารางที่ 5.10 แสดงถึงรายละเอียดการติดตั้งและผลทดสอบคุณสมบัติวัสดุของคานทดสอบกลุ่ม C ในระหว่างการทดสอบได้ทำการเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก (P) กับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานดังแสดงภาพที่ 5.18-5.19 การแตกร้าวที่เกิดขึ้น ได้แก่ การแตกร้าวคดแรก (First Flexural Crack : FC) และการแตกร้าวเฉือนแรก (First Shear Crack : SC) ที่แต่ละน้ำหนักบรรทุกไว้ในตารางที่ 5.11 และตารางที่ 5.12 แสดงเปอร์เซ็นต์แตกต่างของการรับน้ำหนักบรรทุกที่การแตกร้าวแรกและการแตกร้าวเฉือนแรกของคานกลุ่ม C จากตารางจะพบว่าคาน C-TBM มีการเกิดการแตกร้าวเฉือนแรกก่อนคาน C-NBM น่าจะมีสาเหตุมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเดียวกันของวัสดุของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ข้อมูลจากการทดสอบสามารถสรุปค่าการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานทดสอบกับค่าการวิเคราะห์ทางทฤษฎีได้ดังแสดงในตารางที่ 5.13

ภาพที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานตัวอย่าง C-NBS กับ C-TBS พบว่าคาน C-NBS เริ่มแตกร้าวคดแรก (FC) ที่น้ำหนักบรรทุก 0.6 ตัน และเริ่มมีการแตกร้าวเฉือนแรก (SC) ที่น้ำหนักบรรทุก 3.3 ตัน เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความชันชัดเจนที่น้ำหนักบรรทุก 6.6 ตัน และ 8.1 ตัน ตามลำดับ จนกระทั่งคานวิบัติที่น้ำหนักบรรทุก 8.4 ตันในรูปแบบการเฉือน (SM)

สำหรับคาน C-TBS เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) พบว่าคานทดสอบได้เริ่มแตกร้าวคดแรก (FC) ที่น้ำหนักบรรทุก 1.8 ตัน และเริ่มมีการแตกร้าวเฉือนแรก (SC) ที่น้ำหนักบรรทุก 3.6 ตัน โดยที่เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน C-TBS เปรียบเทียบกับคานทดสอบ C-NBS ก่อนการวิบัติมีการเปลี่ยนแปลงความชันค่อนข้างน้อยจนกระทั่งคานวิบัติที่น้ำหนักบรรทุก 12.6 ตันในรูปแบบการเฉือน (SM)

ภาพที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานที่วิบัติรูปแบบการคดของคาน C-NBM และ C-TBM โดยการทดสอบได้เปรียบเทียบ

คานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้ง (Normal Beam : NB) กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam : TB) คาน C-NBM เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้ง (Normal Beam) พบว่าคาน C-NBM เริ่มแตกร้าวตัดแรก (FC) ที่น้ำหนักบรรทุก 1.2 ตัน และเริ่มมีการแตกร้าวเฉือนแรก (SC) ที่น้ำหนักบรรทุก 3.6 ตัน จนกระทั่งคานวิบัติที่น้ำหนักบรรทุก 6.0 ตัน ในรูปแบบการตัด (FM) คาน C-TBM เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) พบว่าคานตัวอย่างเริ่มแตกร้าวตัดแรก (FC) ที่น้ำหนักบรรทุก 0.6 ตัน และเริ่มมีการแตกร้าวเฉือนแรก (SC) ที่น้ำหนักบรรทุก 2.4 ตัน จนกระทั่งคานวิบัติที่น้ำหนักบรรทุก 7.2 ตัน ในรูปแบบการตัด (FM)

ตารางที่ 5.10 รายละเอียดการติดตั้งและผลทดสอบคุณสมบัติวัสดุของคานทดสอบกลุ่ม C

| หมายเลขคาน | fc' (ksc.) | รูปแบบเหล็กปลอก | | | เหล็กเสริมตามยาว | | | |
|------------|-----------------|-------------------------------|---|----------------|------------------|----------------|--------|----------------|
| | | ϕ , ระยะห่าง (cm.) | ϕ เหล็กแนว ทแยง, ระยะห่าง (cm.) | fy (ksc.) | ล่าง | | บน | |
| | | | | | ปริมาณ | fy (ksc.) | ปริมาณ | fy (ksc.) |
| C-NBM | 246 | RB6, 25 | ไม่มี | 3980 | 2-DB12 | 4632 | 2-DB12 | 4632 |
| C-TBM | 145 | RB6, 25 | RB6@25cm | 3980 | 2-DB12 | 4632 | 2-DB12 | 4632 |
| C-NBS | 122 | RB6, 25 | ไม่มี | 3980 | 2-DB16 | 5530 | 2-DB12 | 4632 |
| C-TBS | 154 | RB6, 25 | RB6@25cm | 3980 | 2-DB16 | 5530 | 2-DB12 | 4632 |

ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกกับรูปแบบการแตกร้าวที่เกิดขึ้น

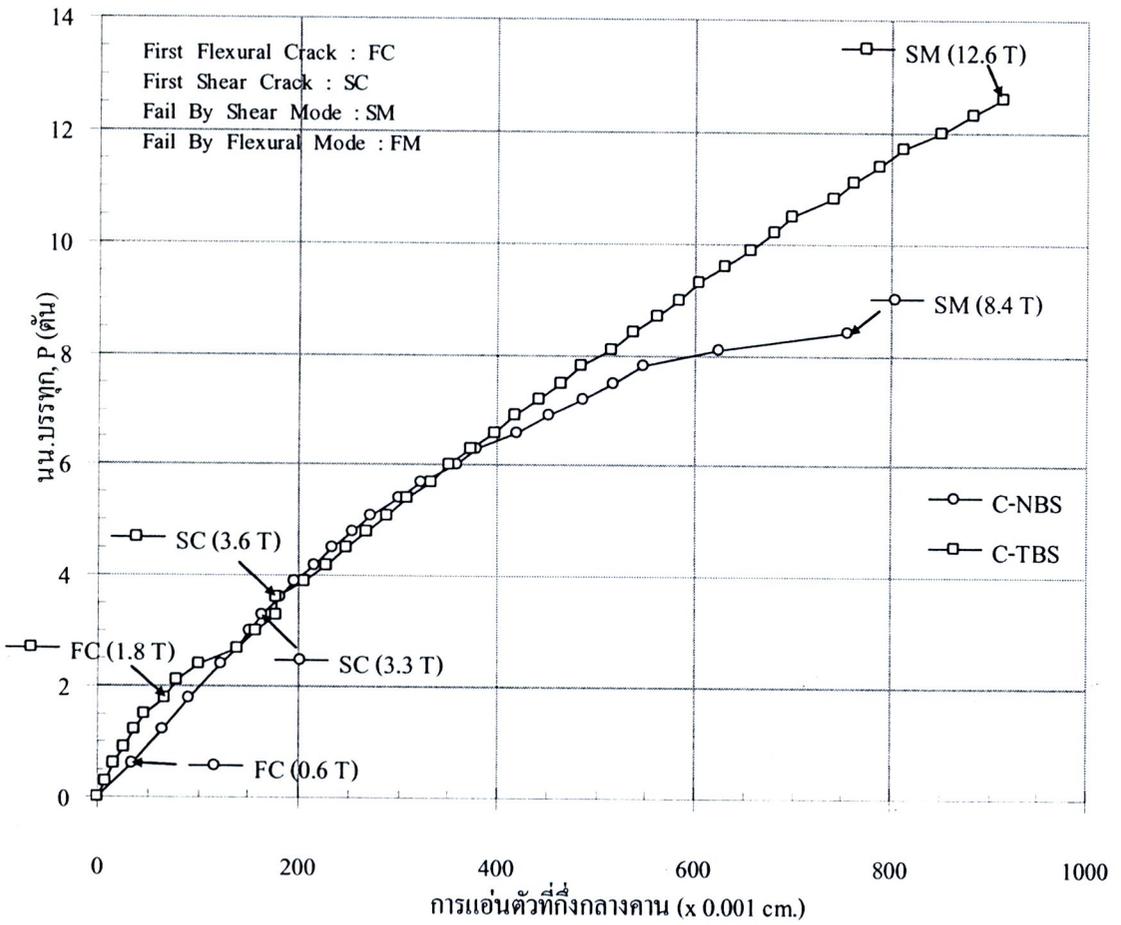
| หมายเลขคาน | น้ำหนักบรรทุก, P (ตัน) | |
|------------|------------------------|-------------------------|
| | การแตกร้าวตัดแรก (FC) | การแตกร้าวเฉือนแรก (SC) |
| C-NBS | 0.6 | 3.3 |
| C-TBS | 1.8 | 3.6 |
| C-NBM | 1.2 | 3.6 |
| C-TBM | 0.6 | 2.4 |

ตารางที่ 5.12 เปอร์เซ็นต์แตกต่างของการรับน้ำหนักบรรทุกที่การแตกร้าวเฉือนแรกระหว่าง TB/NB ของคานกลุ่ม C

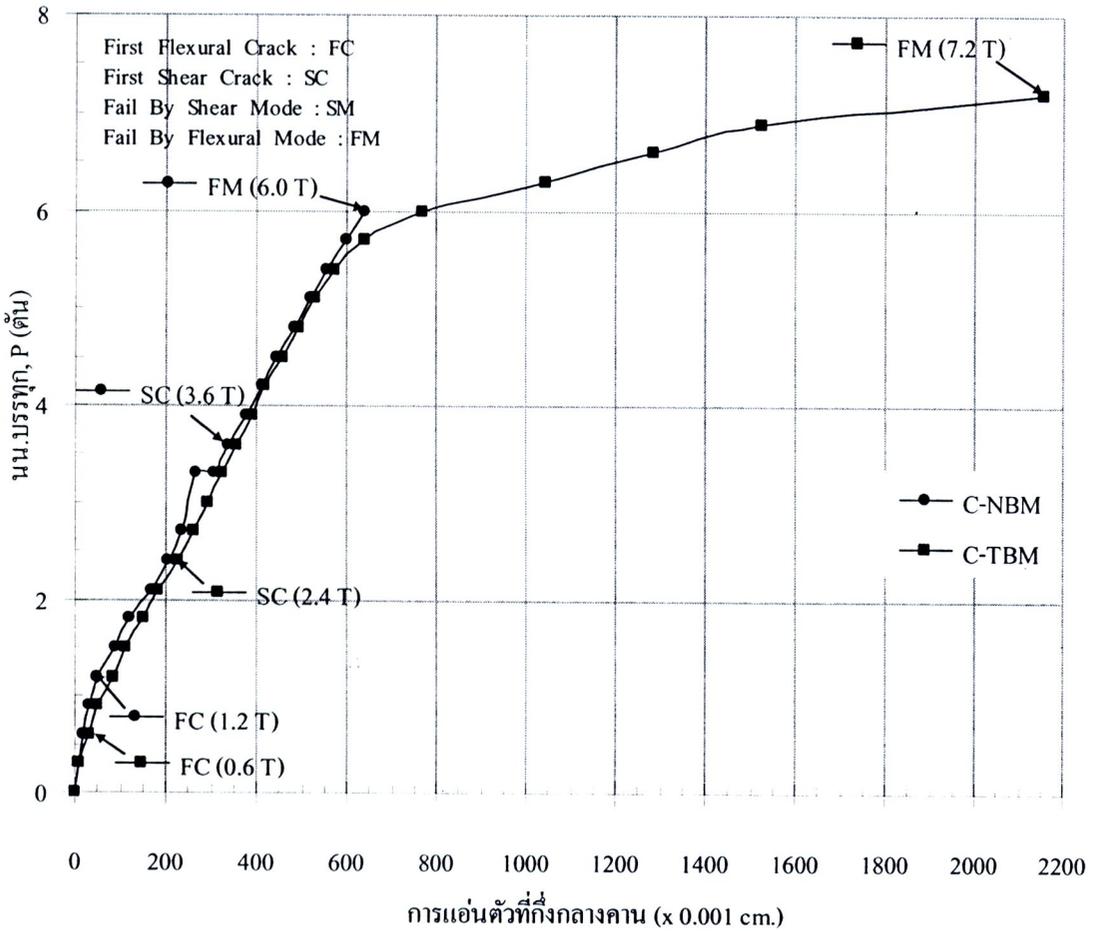
| หมายเลขคาน | เปอร์เซ็นต์น้ำหนักบรรทุก, P (ตัน) | |
|-------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | การแตกร้าวคัตแรก (FC) | การแตกร้าวเฉือนแรก (SC) |
| C-TBS/C-NBS | 300.00 | 109.09 |
| C-TBM/C-NBM | 50.00 | 66.67 |

ตารางที่ 5.13 การรับน้ำหนักประลัยของคานทดสอบกับค่าวิเคราะห์ทางทฤษฎีของคานทดสอบ กลุ่ม C

| หมายเลขคาน | ค่าการวิเคราะห์ทางทฤษฎี | | ผลการทดสอบ | |
|------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| | $P_{(ultimate)}$ (ตัน) | รูปแบบการวิบัติ | $P_{(ultimate)}$ (ตัน) | รูปแบบการวิบัติ |
| C - NBS | 8.9 | การเฉือน (SM) | 8.4 | การเฉือน (SM) |
| C - TBS | - | - | 12.6 | การเฉือน (SM) |
| C - NBM | 6.6 | การคัต (FM) | 6.0 | การคัต (FM) |
| C - TBM | - | - | 7.2 | การคัต (FM) |



ภาพที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานที่วิบัติ
 รูปแบบการเือนของคานทดสอบ C-NBS และ C-TBS กลุ่ม C



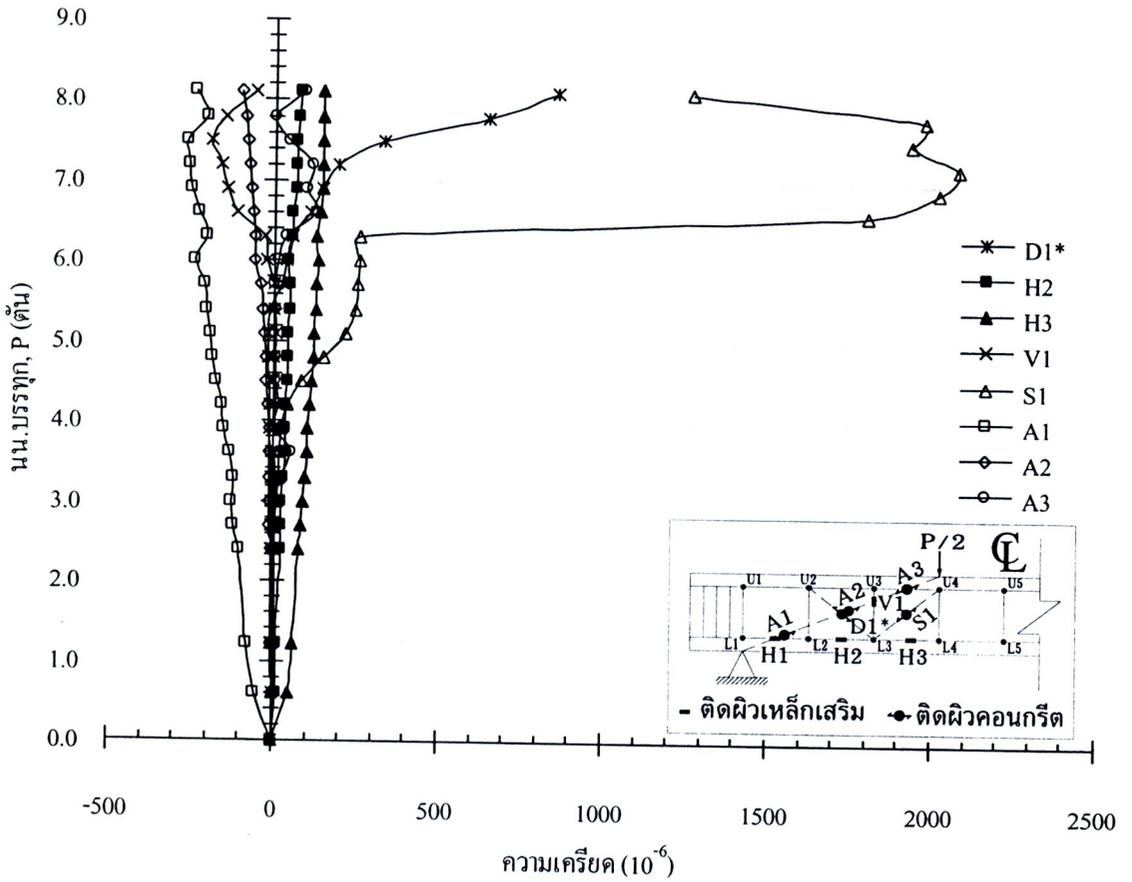
ภาพที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแ่นตัวตัวที่กึ่งกลางคานของคานที่วิบัติรูปแบบการคัตของคานทดสอบ C-NBM และ C-TBM กลุ่ม C

จากผลการทดสอบพบว่าปริมาณเหล็กเสริมล่างที่มากกว่ามีผลช่วยลดการแ่นตัวของคานซึ่งได้เปรียบเทียบกับรูปแบบการออกแบบคานให้วิบัติในรูปแบบการเฉือน (Shear Mode) และรูปแบบการคัต (Flexural Mode) พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) ตามแนวคิด Lattice Model ยังช่วยให้คานชะลอรอยแตกกว้างทแยงจากการเฉือนได้ดีกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปที่เสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้ง (Normal Beam) ทำให้คานทดสอบสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและมีความเหนียว (Ductility) หรือสามารถไปต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่จุดวิบัติได้มากกว่า

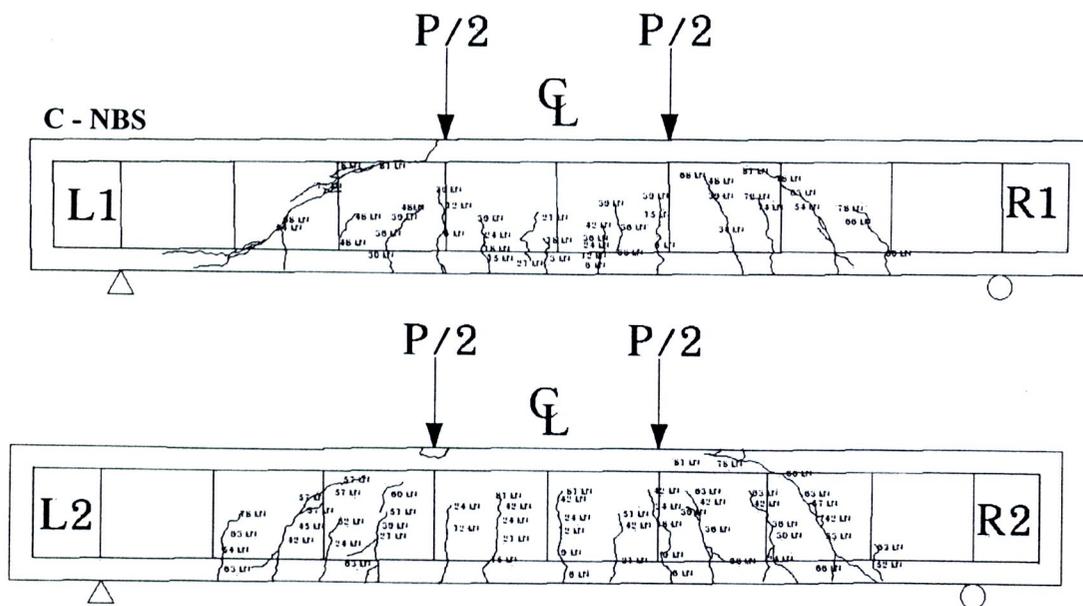
5.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายของความเครียด (Strain) ภายในชิ้นส่วนย่อย กับลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบกลุ่ม C

5.3.2.1 คานทดสอบหมายเลข C-NBS

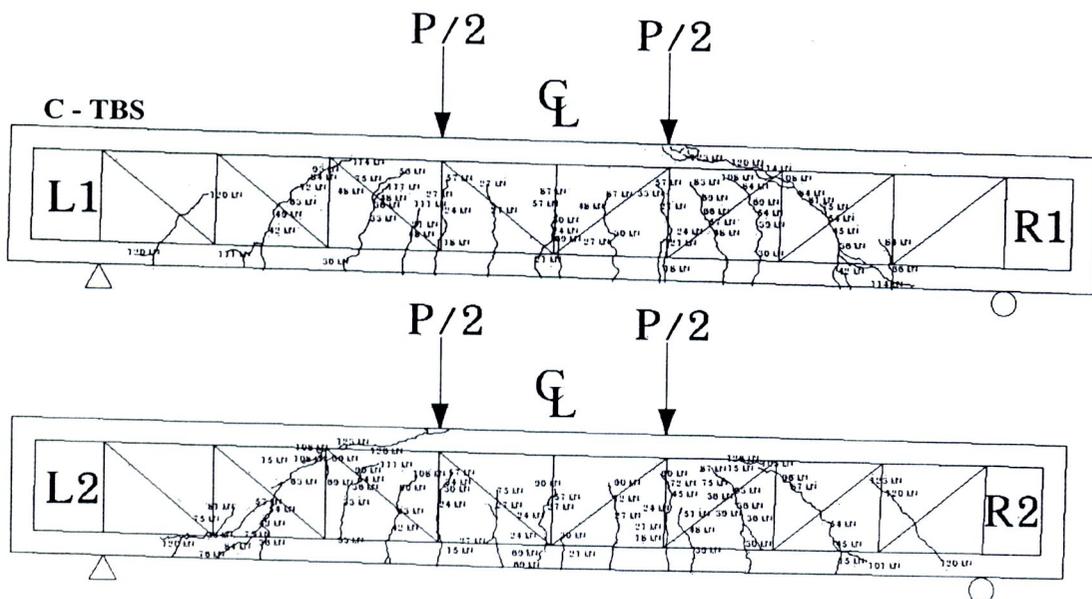
พิจารณาภาพที่ 5.20 ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคาน C-NBS เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเฉพาะแนวตั้ง (Normal Beam) โดยเริ่มพิจารณาแถวความเครียดที่ติดผิวคอนกรีตประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อยย่อยแนวอาร์ช (Arch) ได้แก่ A1, A2 และ A3 เมื่อเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกชิ้นส่วนย่อย A1 และ A2 มีการหดตัวหรือมีความเครียดอัดจนกระทั่งคานวิบัติ ชิ้นส่วนย่อย A1 ที่อยู่ใกล้ตำแหน่งจุดรองรับ (Support) นั้นมีความเครียดอัดมากที่สุด รองลงมาคือชิ้นส่วนย่อย A2 แต่ในชิ้นส่วนย่อย A3 นั้นกลับมีความเครียดดึงแต่ก็มีไม่มากคือค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับ 128.2×10^{-6} ที่น้ำหนักบรรทุก 6.6 ตัน และที่จุดวิบัติมีความเครียดเท่ากับ 88.9×10^{-6} ที่น้ำหนักบรรทุก 8.1 ตัน และมีความแปรปรวนของข้อมูลที่วัดได้ค่อนข้างสูง ชิ้นส่วนย่อยของคานคอนกรีตรับแรงอัด (Strut: S1) มีการหดตัวหรือมีความเครียดอัดสอดคล้องกับการพัฒนารอยแตกร้าวค้ำทแยงในช่วงน้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ 3.6 ตัน การแตกร้าวได้ไหลผ่านด้านข้างของชิ้นส่วนย่อยหรือ ณ ตำแหน่งติดแถวความเครียดดังแสดงในภาพที่ 5.21 ก) ด้าน L1 และภาพที่ 5.22 ที่ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนย่อย S1 กับลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบหมายเลข C-NBS ในช่วงแรกชิ้นส่วนย่อย D1* และ V1 มีการหดและยึดตามลำดับจนถึงน้ำหนักบรรทุกที่ 5.4 ตัน และเริ่มเปลี่ยนมาเป็นการยึดและหดที่ 5.7 ตัน ตามลำดับ เมื่อรอยแตกร้าวทแยงไหลผ่านแถวความเครียดทำให้เกิดจุดเปลี่ยนความชันของเส้นกราฟสูงในช่วงนี้ ชิ้นส่วนย่อยเหล็กเสริมตามยาวล่าง ได้แก่ H2, H3 เมื่อให้น้ำหนักชิ้นส่วนย่อยแต่ละชิ้นจะเริ่มมีการยึดตัวหรือความเครียดดึงเกิดขึ้น โดย H3 จะมีความเครียดดึงมากที่สุด รองลงมาคือ H2 ตามลำดับซึ่งตามหลักการการไหลของหน่วยแรง (Flow stress) หรือ โครงข้อหมุนเหล็กล่างจะรับแรงดึงซึ่งปริมาณแรงขึ้นอยู่กับโมเมนต์ที่เกิด



ภาพที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคาน C-NBS

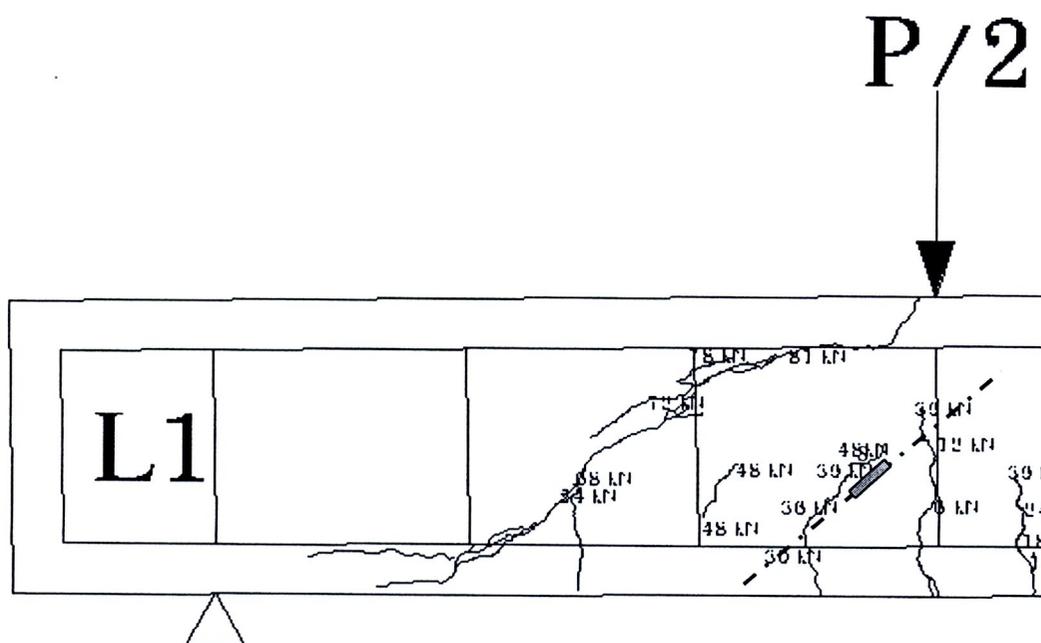


ก) คานทดสอบ C-NBS



ข) คานทดสอบ C-TBS

ภาพที่ 5.21 ลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบหมายเลข C-NBS และ C-TBS

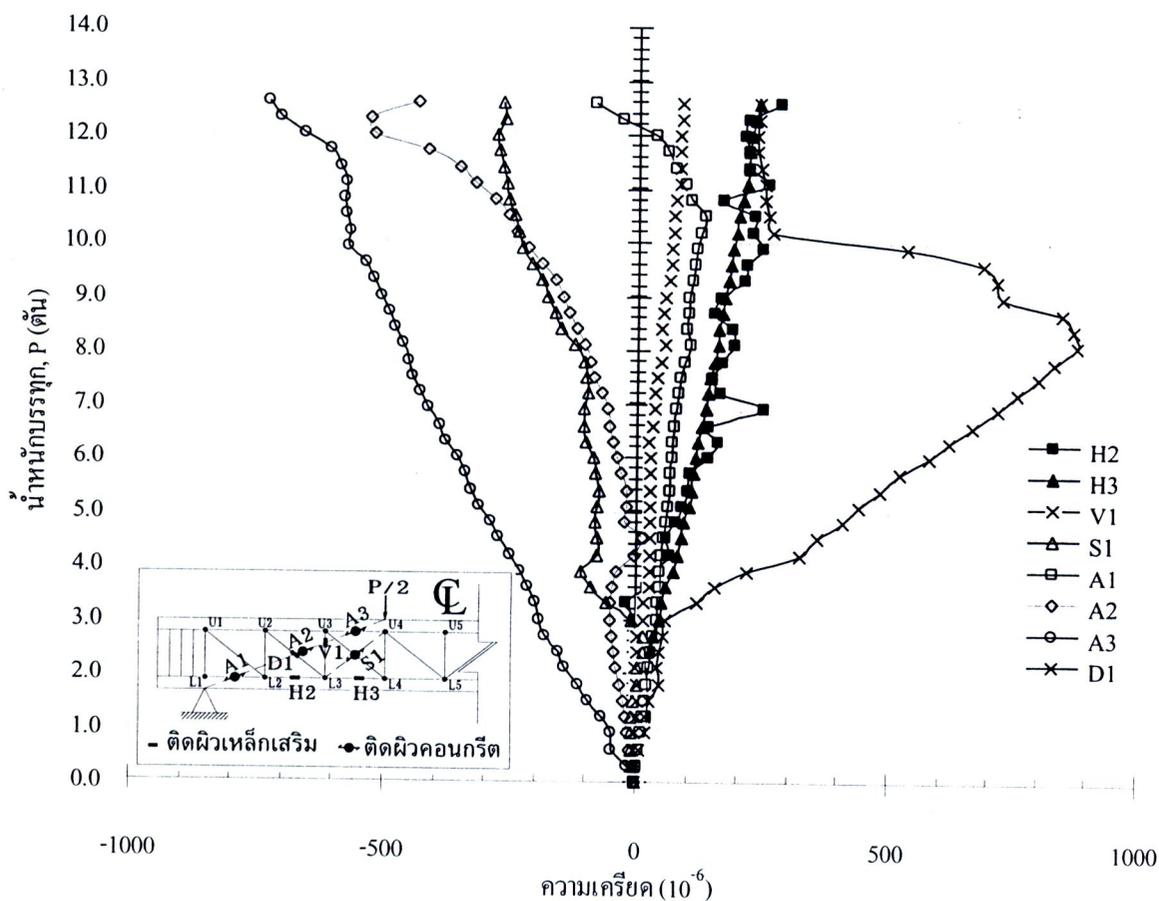


ภาพที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนย่อย S1 กับลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบหมายเลข C-NBS

5.3.2.2 คานทดสอบหมายเลข C-TBS

ภาพที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคาน C-TBS เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) โดยเริ่มพิจารณาแถวความเครียดที่ติดผิวคอนกรีตประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อยย่อยแนวอาร์ช ได้แก่ A1, A2 และ A3 เมื่อเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกชิ้นส่วนย่อย A3 และ A2 มีการหดตัวหรือมีความเครียดอัดจนกระทั่งคานวิบัติ ชิ้นส่วนย่อย A3 ที่อยู่ใกล้ตำแหน่งให้น้ำหนักบรรทุก (P) นั้นมีความเครียดอัดมากที่สุด รองลงมาคือชิ้นส่วนย่อย A2 แต่ในกรณีของชิ้นส่วนย่อย A1 นั้นในช่วงแรกนั้นชิ้นส่วนย่อยจะมีความเครียดดึงจนถึงน้ำหนักบรรทุกที่ 10.5 ตัน ความเครียดดึงค่อยลดลงจนเปลี่ยนเป็นความเครียดอัดที่น้ำหนักบรรทุก 12.3 ตันจนกระทั่งคานวิบัติ ชิ้นส่วนย่อยของคานคอนกรีตรับแรงอัด (Strut : S1) มีการเปลี่ยนแปลงเป็นความเครียดอัดชัดเจนขึ้นในขณะที่มีการแตกร้าวเริ่มไหลผ่านแถวความเครียดในช่วงหลังจาก 3.0 ตัน จนกระทั่งคานวิบัติ ชิ้นส่วนย่อย D1 มีการยืดตัวหรือมีความเครียดดึงมากกว่า V1 ตามแนวคิดของ Lattice Model ซึ่งสอดคล้องกับการไหลของหน่วยแรง (Stress Flow) ชิ้นส่วนย่อย D1 ลักษณะเส้นกราฟนั้นมีการเปลี่ยนแปลงความชันหรือรับความเครียดมากขึ้นแตกต่างจากช่วงแรกอย่างเห็นได้ชัดในช่วงที่น้ำหนักบรรทุกตั้งแต่ 3.3 ตัน จนถึง 8.1 ตัน แล้วความเครียดดึงลดลงเล็กน้อยจนถึง 8.7 ตัน

หลังจากนั้นความเครียดได้ลดลงอย่างทันทีทันใดจนถึงน้ำหนักบรรทุกที่ 10.2 ตัน เนื่องจากการแตกร้าวทแยงได้ผ่านไปยังชั้นส่วนเหล็กปลอกแนวตั้งถัดไป จากนั้นความเครียดเกือบจะคงที่จนคานวิบัติ ในส่วนชั้นส่วนย่อย V1 มีการเปลี่ยนแปลงความชันตั้งแต่น้ำหนักบรรทุก 3.0 ตัน จนกระทั่งคานวิบัติ ชั้นส่วนย่อยเหล็กเสริมตามยาวล่าง ได้แก่ H2, H3 เมื่อให้น้ำหนักชั้นส่วนย่อยแต่ละชั้นจะเริ่มมีการยึดตัวหรือความเครียดค้างเกิดขึ้น ความชันของของเส้นกราฟของชั้นส่วนย่อย H3 เกือบจะมีความชันคงที่ ในขณะที่เดียวกันชั้นส่วนย่อย H2 ก็มีความเครียดค้างใกล้เคียงกันหรือมากกว่า H3 เล็กน้อยในบางช่วงความเครียดมีการแกว่งเล็กน้อยอาจมีสาเหตุการที่กระโดดร้าวผ่านใกล้เคียงบริเวณติดแถวความเครียดของชั้นส่วนย่อย H2 ภาพที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นส่วนย่อย H2 และ H3 กับลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบหมายเลข C-TBS

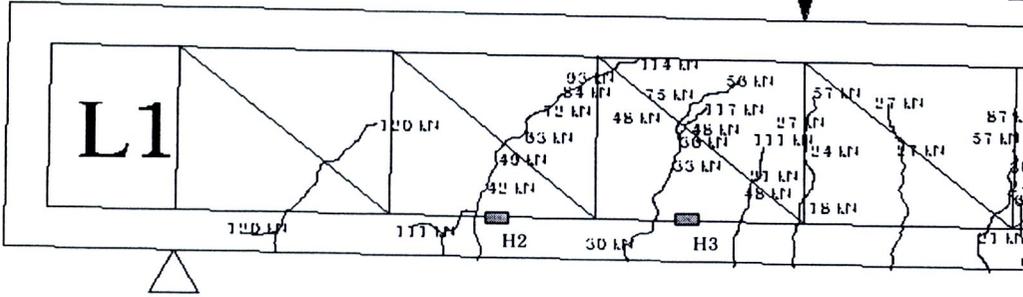


ภาพที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง นน.บรรทุกกับความเครียดในชั้นส่วนย่อยของคาน C-TBS



P/2

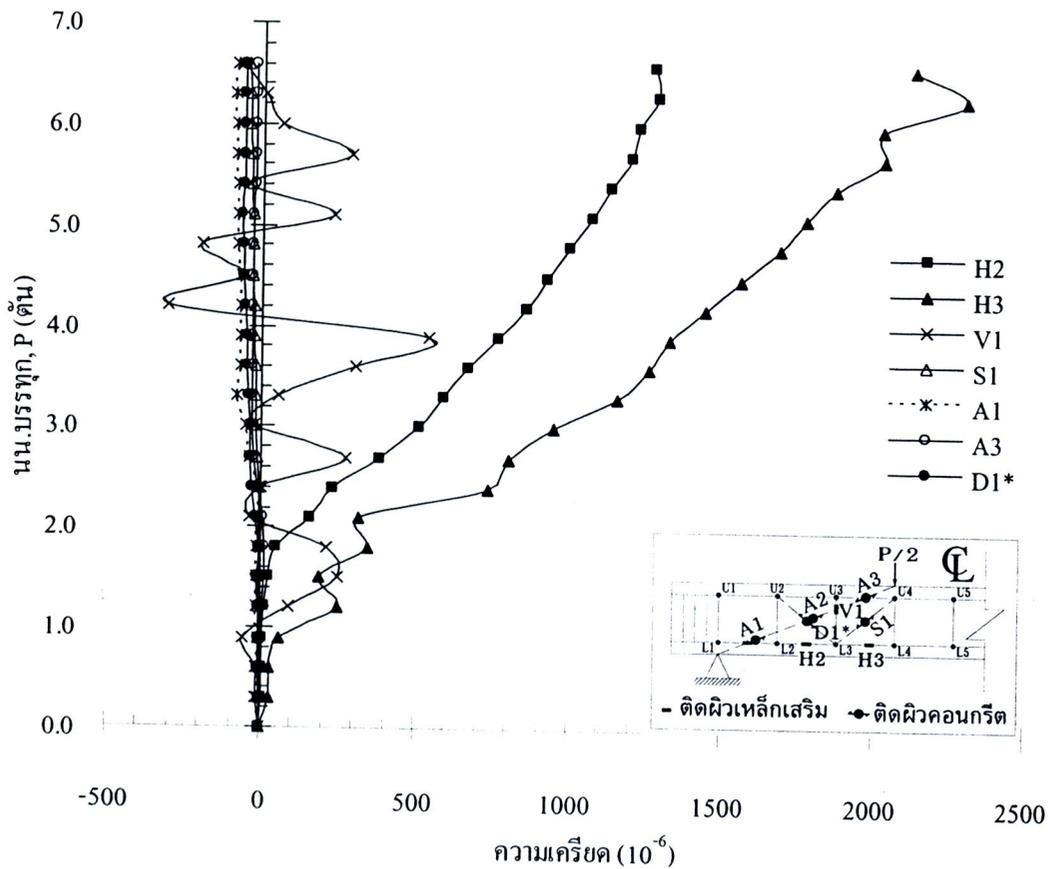
G



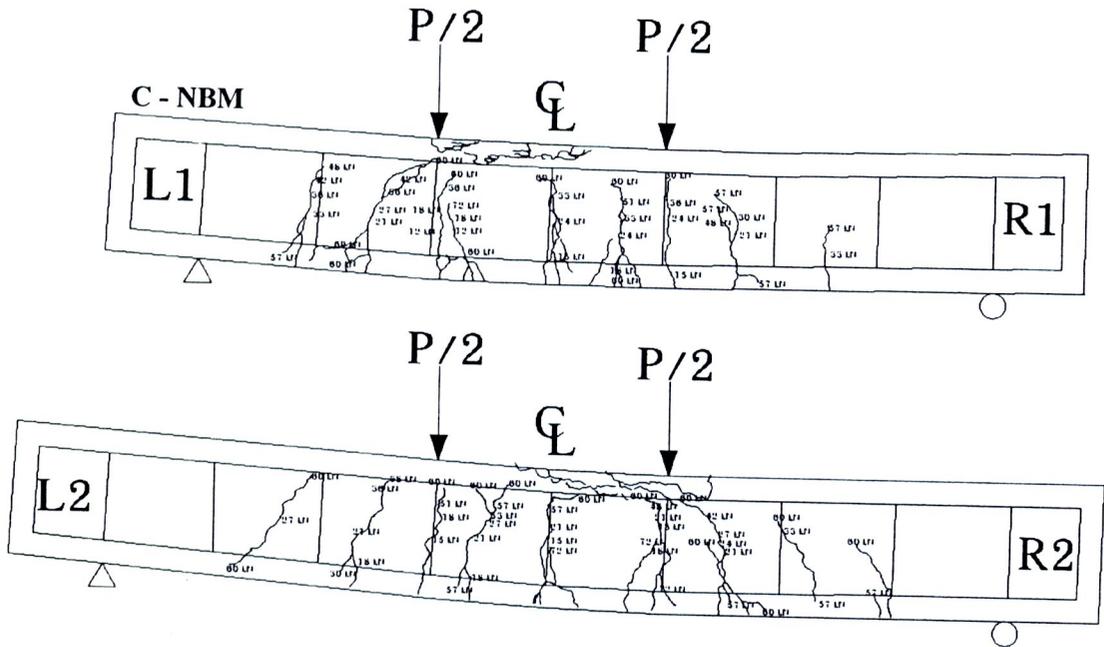
ภาพที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนย่อย H2 และ H3 กับลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบหมายเลข C-TBS

5.3.2.3 คานทดสอบหมายเลข C-NBM

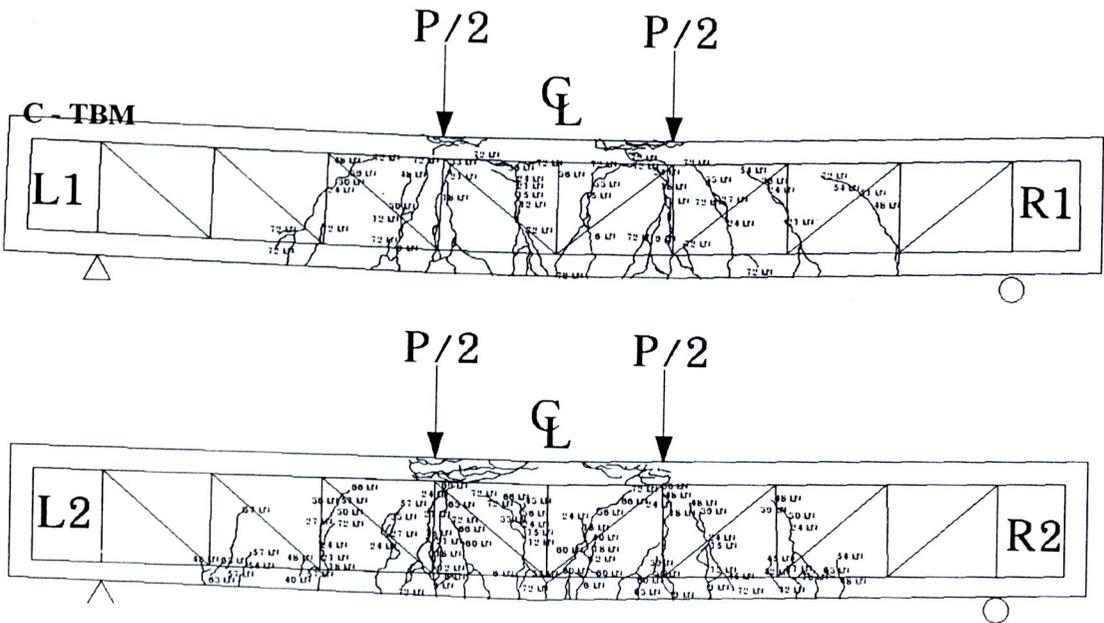
ภาพที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคาน C-NBM และภาพที่ 5.26 แสดงลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบหมายเลข C-NBM และ C-TBM เริ่มพิจารณาคาน C-NBM เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเฉพาแนวคิง (Normal Beam) เมื่อเริ่มทำการให้น้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งเกิดการแตกร้าวแรกหรือการแตกร้าวคัดแรก (FC) ที่น้ำหนักบรรทุก 1.2 ตัน และมีอัตราความเครียดคิงเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการแตกร้าวเพิ่มขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกที่ 1.8 ตัน ลักษณะการแตกร้าวจะตั้งฉากกับแนวเหล็กเสริมตามยาวล่างทำให้ชิ้นส่วนย่อย H3 ชิ้นส่วนย่อย H2 มีอัตราความเครียดคิงเพิ่มมากขึ้นที่น้ำหนักบรรทุก 2.1 ตัน 2.7 ตัน 3.0 ตันอย่างต่อเนื่องตามที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 5.26 ชิ้นส่วนย่อย H2 และ H3 มีแนวโน้มที่เกิดความเครียดคิงเพิ่มมากขึ้นจนคานวิบัติ ผลเนื่องจากการแตกร้าวแนวคิงตั้งฉากกับแนวเหล็กเสริมล่าง พิจารณาที่ชิ้นส่วนย่อย V1 และ D1 จากภาพที่ 5.25 พบว่าชิ้นส่วนย่อย D1 มีการหดตัวและ V1 ก็มีแนวโน้มการหดตัวเหมือน D1 แต่ก็มีอาการยืดตัวสลับกับการหดตัวไปมาเนื่องจากมีรอยแตกร้าวแนวคิงจากการตัดผ่านชิ้นส่วนย่อยทั้งสองและเมื่อพิจารณาที่จุดต่อตามหลักการโครงข้อหมุนตามแนวคิด Lattice Model และพยายามมองหาชิ้นส่วนอื่นพิจารณาเพิ่มเติมอีกคือชิ้นส่วนย่อย S1 จึงพบว่าการแตกร้าวคัดได้ผ่านชิ้นส่วนย่อย S1 ทำให้เกิดความเครียดคิงดังแสดงในภาพที่ 5.25 ดังนั้นชิ้นส่วนย่อย D1 และ V1 จึงถูกต้องตามข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเมื่อพิจารณาการสมดุลที่จุดต่อที่ L3



ภาพที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคาน NBM



ก) คานทดสอบ C-NBM

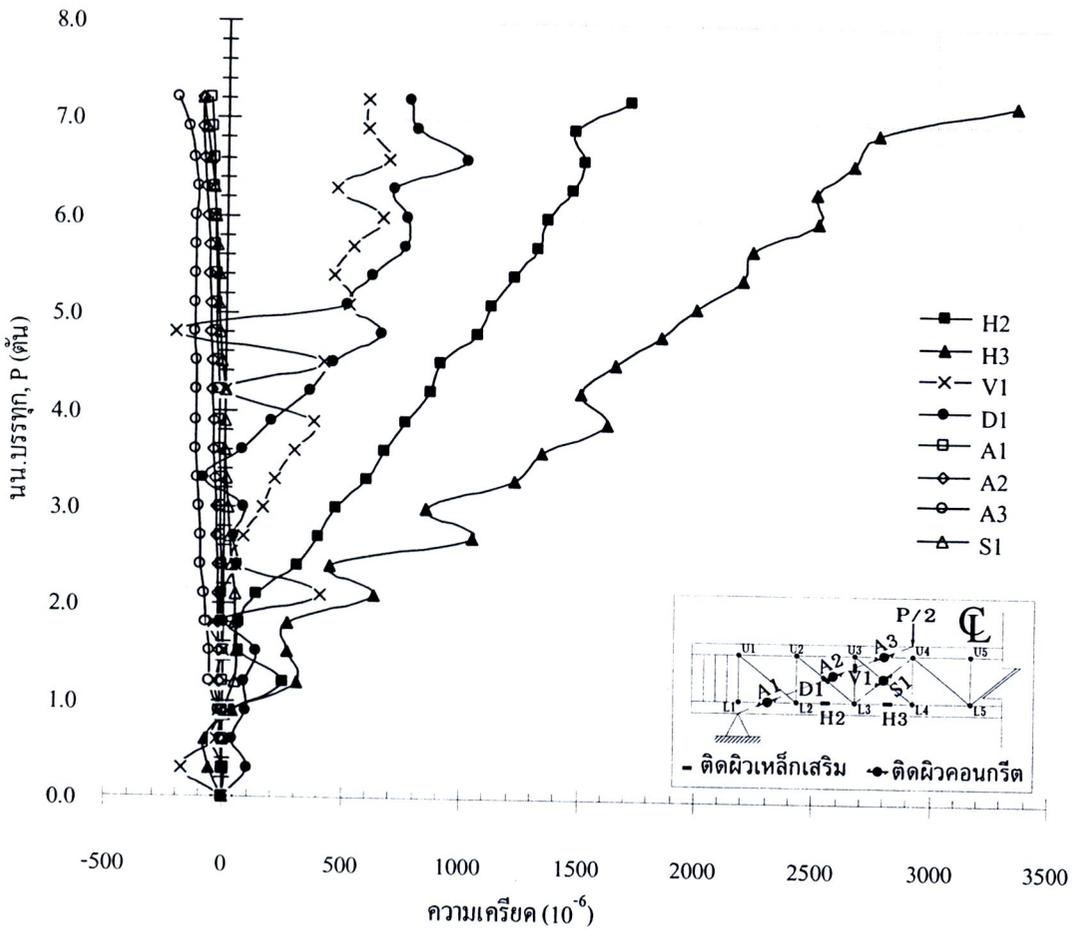


ข) คานทดสอบ C-TBM

ภาพที่ 5.26 ลักษณะการแตกตัวของคานทดสอบหมายเลข C-NBM และ C-TBM

5.3.2.4 คานทดสอบหมายเลข C-TBM

จากภาพที่ 5.26 และภาพที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคาน C-TBM เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam)) เมื่อเริ่มทำการให้น้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งเกิดการแตกร้าวครั้งแรก (FC) ที่น้ำหนักบรรทุก 0.6 ตัน ชิ้นส่วนย่อย H2 และ H3 ยังมีการหดตัวช่วงแรกเล็กน้อยเนื่องจากการแตกร้าวครั้งแรกไม่ได้ผ่านตรงตำแหน่งชิ้นส่วน แต่เมื่อเกิดการแตกร้าวครั้งที่ 0.9 และ 1.2 ตัน ตามลำดับไหลผ่านชิ้นส่วนย่อย H3 และ H2 ทำให้ชิ้นส่วนย่อย H3 และ H2 รับแรงดึงมากขึ้นทันที และชะลอความเครียดค่อนข้างคงที่จนเกิดการแตกร้าวเพิ่มอีกที่น้ำหนักบรรทุก 2.4 ตัน ลักษณะความชันของเส้นกราฟหลังจากนี้ของชิ้นส่วนย่อย H2 และ H3 ค่อนข้างคงที่คือมีความเครียดดึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงน้ำหนักบรรทุกที่คานวิบัติความเครียดดึงของชิ้นส่วนทั้งสองเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ให้น้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งเกิดการแตกร้าวเฉือนแรก (SC) ที่น้ำหนักบรรทุก 2.4 ตันผ่านชิ้นส่วนย่อย V1 พอดี ทำให้ V1 ทำหน้าที่ต้านทานแรงดึงจากการแตกร้าวดึงทแยง (Diagonal tension crack) นี้ไป ในส่วนของชิ้นส่วนย่อย D1 แม้ว่าการแตกร้าวจะแตกผ่านเหล็กปลอกทแยงแต่ก็ไม่ได้ผ่านใกล้ตำแหน่งติดเกวัดความเครียดโดยตรงจึงยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงความเครียดดึงอย่างชัดเจนเหมือนชิ้นส่วนย่อย V1 ในช่วงน้ำหนักบรรทุกนี้ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นความเครียดดึงของชิ้นส่วนย่อย D1 เริ่มเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนที่น้ำหนักบรรทุก 3.9 ตันและมีความเครียดดึงเพิ่มขึ้นต่อเนื่องและมากกว่า V1 จนกระทั่งคานวิบัติในรูปแบบการคด (Flexural Mode : FM) (ข้อมูลที่วัดได้ทั้งสองค่อนข้างกว้างไปมา) ชิ้นส่วนย่อย S1 ในช่วงแรกที่ให้น้ำหนักบรรทุกนั้นส่วนใหญ่มีความเครียดดึงจนถึงน้ำหนักบรรทุก 3.6 ตัน และเริ่มจาก 3.9 ตันการแตกร้าวดึงทแยงเริ่มผ่านทางด้านข้างขนานกับแนวติดเกวัดความเครียดของชิ้นส่วนย่อย S1 และความเครียดอัดชัดเจนมากขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกที่ 4.8 ตัน จนกระทั่งคานวิบัติ ชิ้นส่วนย่อย A1, A2 และ A3 มีการหดตัวหรือมีความเครียดอัดเรียงจากน้อยไปหามากตามลำดับ เมื่อตรวจสอบการแตกร้าวประกอบพบว่าชิ้นส่วนย่อย A1 และ A2 ถึงแม้จะไม่มีการแตกร้าวทแยงผ่านตำแหน่งก็ยังมี ความเครียดอัดเกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการส่งถ่ายแรงของคอนกรีตอาร์ช (Arch) ในแบบจำลอง Lattice Model และชิ้นส่วนย่อย A3 พบว่าเมื่อมีการแตกร้าวทแยงเมื่อเริ่มผ่านใกล้แนวชิ้นส่วน ประมาณที่น้ำหนักบรรทุก 6.6 - 7.2 ตัน ทำให้เกิดความเครียดอัดในอัตราส่วนเพิ่มขึ้นจากที่ผ่านมา



ภาพที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในชิ้นส่วนย่อยของคาน C-TBM

จากข้อมูลความเครียดในแต่ละชิ้นส่วนย่อยนั้นสามารถสรุปค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับเหล็ก ณ จุดวิกฤติของคานทดสอบกลุ่ม C ไว้ในตารางที่ 5.14 จากข้อมูลพบว่าความเค้นดึง ณ จุดวิกฤติของชิ้นส่วนย่อยของเหล็กเสริมล่างของคานที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุนได้แก่ชิ้นส่วนย่อย H3, H2 นั้นมีการรับแรงดึงแต่ไม่ได้เรียงจากแรงดึงมากไปหาน้อยทั้งหมดเมื่อเปรียบเทียบกับคานทดสอบกลุ่ม B ในส่วนของเหล็กปลอกนั้นคานที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุนพบว่าเหล็กปลอกทแยง (D1) จะช่วยรับแรงดึงมากกว่าเหล็กปลอกแนวตั้ง (V1) จนกระทั่งคานวิบัติ

ตารางที่ 5.14 ความเค้นในชิ้นส่วนย่อยของเหล็กเสริม ณ จุดวิบัติของคานทดสอบกลุ่ม C

| หมายเลขคาน | ความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนย่อยของเหล็กเสริมในคาน (ksc.) | | | | |
|------------|--|------|------|------|------|
| | H1 | H2 | H3 | V1 | D1 |
| C-NBS | - | 156 | 299 | -119 | - |
| C-TBS | - | 570 | 482 | 174 | 490 |
| C-NBM | - | 2602 | 4336 | -133 | - |
| C-TBM | - | 3477 | 6822 | 1202 | 1569 |

5.3.3 ความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแนวคอนกรีตอาร์ชและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคานทดสอบกลุ่ม C ที่วิบัติแบบการเฉือนและการตัด

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแนวคอนกรีตอาร์ชและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคานทดสอบที่วิบัติแบบการเฉือนและการตัด โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างคานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) กับคานทดสอบที่เสริมเหล็กปลอกถูกตั้งแนวตั้งเพียงอย่างเดียว (Normal Beam)

การศึกษานี้จะใช้เครื่องมือ Linear Variable Differential Transformer (LVDT) วัดข้อมูลจากคานทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5.17 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดการติดตั้ง LVDT ที่ผิวคอนกรีตของหน้าตัดคานตามแนวยาว การเก็บข้อมูลจะใช้เครื่องจัดเก็บข้อมูล (Data Logger) จาก LVDT ในแต่ละช่วงน้ำหนักบรรทุกตามที่ได้กำหนดไว้ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้อ่านค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแต่ละน้ำหนักบรรทุกโดยใช้ความยาวที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากอุปกรณ์ LVDT ทารด้วยความยาวเกจ (Gauge Length) ที่ได้วัดค่าเก็บข้อมูลไว้ก่อนการทดสอบ จากนั้นนำข้อมูลจากผลการทดสอบที่ได้นำมาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดดึง (ϵ_1) และความเครียดอัด (ϵ_2) ตามแนวของชิ้นส่วนคอนกรีตอาร์ชและคอนกรีตรับแรงดึงทแยง

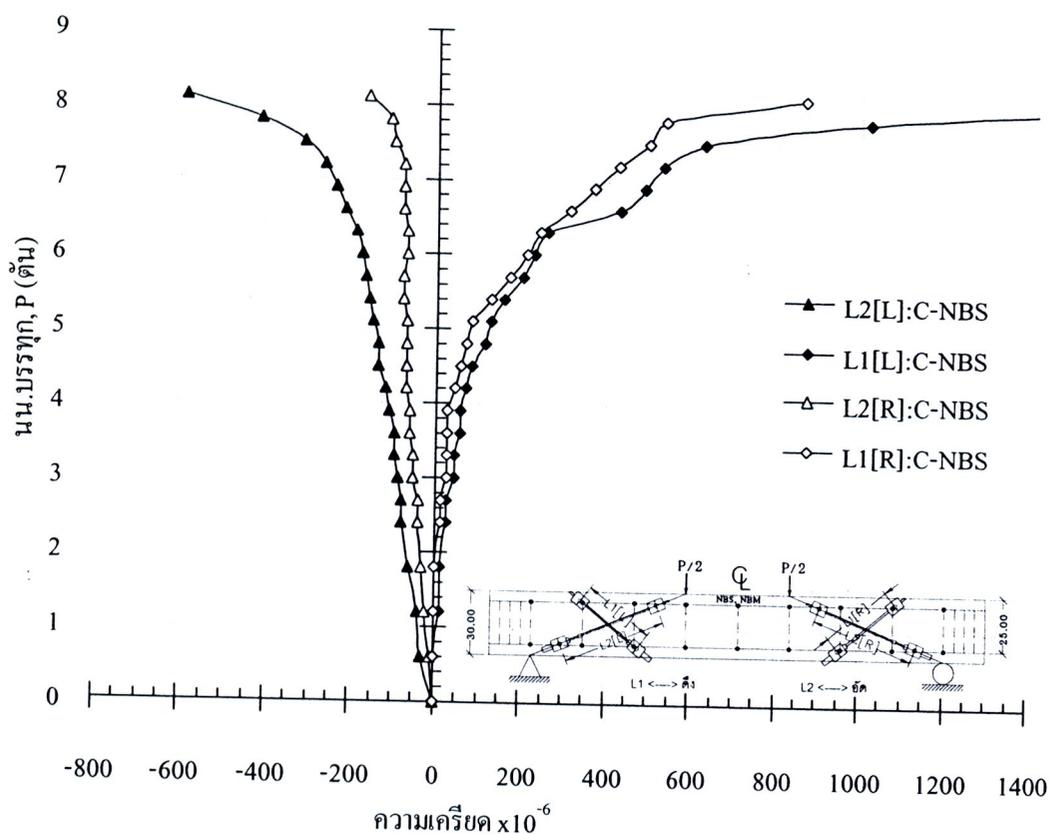
จากภาพที่ 5.28-5.33 ได้อธิบายให้ค่าความเครียดอัด (ϵ_2) เป็นค่าทางลบและความเครียดดึง (ϵ_1) เป็นค่าทางบวกของแกน x ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของน้ำหนักบรรทุกในทางแกน y ทางบวก

เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นได้เรียกชิ้นส่วนคอนกรีตอาร์ชที่ด้านทานค่าความเครียดอัด (ϵ_2) ว่า “L2-R และ L2-L” โดยที่ R และ L คือด้านขวาและด้านซ้ายของคานทดสอบตามลำดับ

สำหรับชิ้นส่วนคอนกรีตรับแรงดึงทแยงที่ต้านทานการขยายตัวจากรอยแตกกว้างจากการอัดของแนวชิ้นส่วนคอนกรีตอาร์ชทำให้เกิดความเครียดดึง (ϵ_1) จะตั้งชื่อว่า “L1-R และ L1-L” โดยที่ R และ L คือด้านขวาและด้านซ้ายของคานทดสอบตามลำดับ

5.3.3.1 คานทดสอบที่วิบัติแบบการเลื่อน

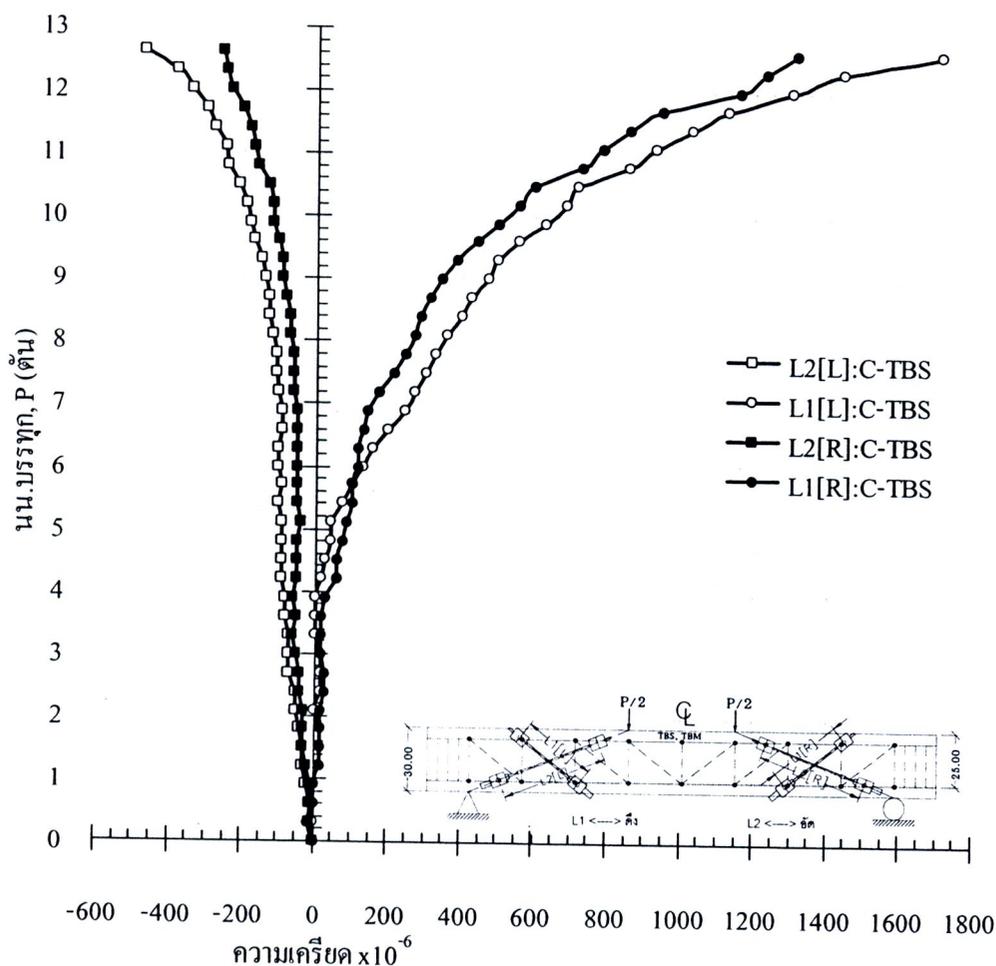
ภาพที่ 5.28-5.30 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแนวคอนกรีตอาร์ชและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคานทดสอบที่วิบัติแบบการเลื่อน



ภาพที่ 5.28 ความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแนวคอนกรีตอาร์ชและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคาน C-NBS ที่วิบัติแบบการเลื่อน

พิจารณาคานทดสอบ C-NBS พบว่าเมื่อเริ่มให้น้ำหนักบรรทุกความเครียดภายในชิ้นส่วนของคอนกรีตอาร์ช (Concrete arch member) เป็นความเครียดอัด (ϵ_2) เนื่องจากการส่งถ่ายแรงจากน้ำหนักบรรทุกไปถึงจุดรองรับ ทำให้ชิ้นส่วนคอนกรีตอาร์ชเกิดการหดตัวหรือมีความเครียดอัด (ϵ_2) และเกิดความเครียดดึง (ϵ_1) ในชิ้นส่วนคอนกรีตรับแรงดึงทแยง (Concrete diagonal tension member) ที่เกิดจากการขยายตัวของรอยแตกกว้างในแนวทแยง

(Diagonal tension crack) มีความสอดคล้องกับค่าความเครียดอัดดังกล่าว คือเมื่อมีความเครียดอัด (ϵ_2) มากขึ้นก็จะเกิดความเครียดดึง (ϵ_1) มากขึ้นตามไปด้วย สาเหตุจากการที่คอนกรีตเมื่อรับแรงอัดแล้ว ก็จะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นและเกิดการแตกร้าวมากขึ้น



ภาพที่ 5.29 ความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแนวคอนกรีตอาร์ชและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคาน C-TBS ที่วิบัติแบบการเลื่อน

พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความเครียดอัดและความเครียดดึงดังกล่าวสามารถเข้าใจมากขึ้นเมื่อได้พิจารณาพร้อมกับภาพที่ 5.21 และภาพที่ 5.30 โดยได้แบ่งการพิจารณาดังนี้

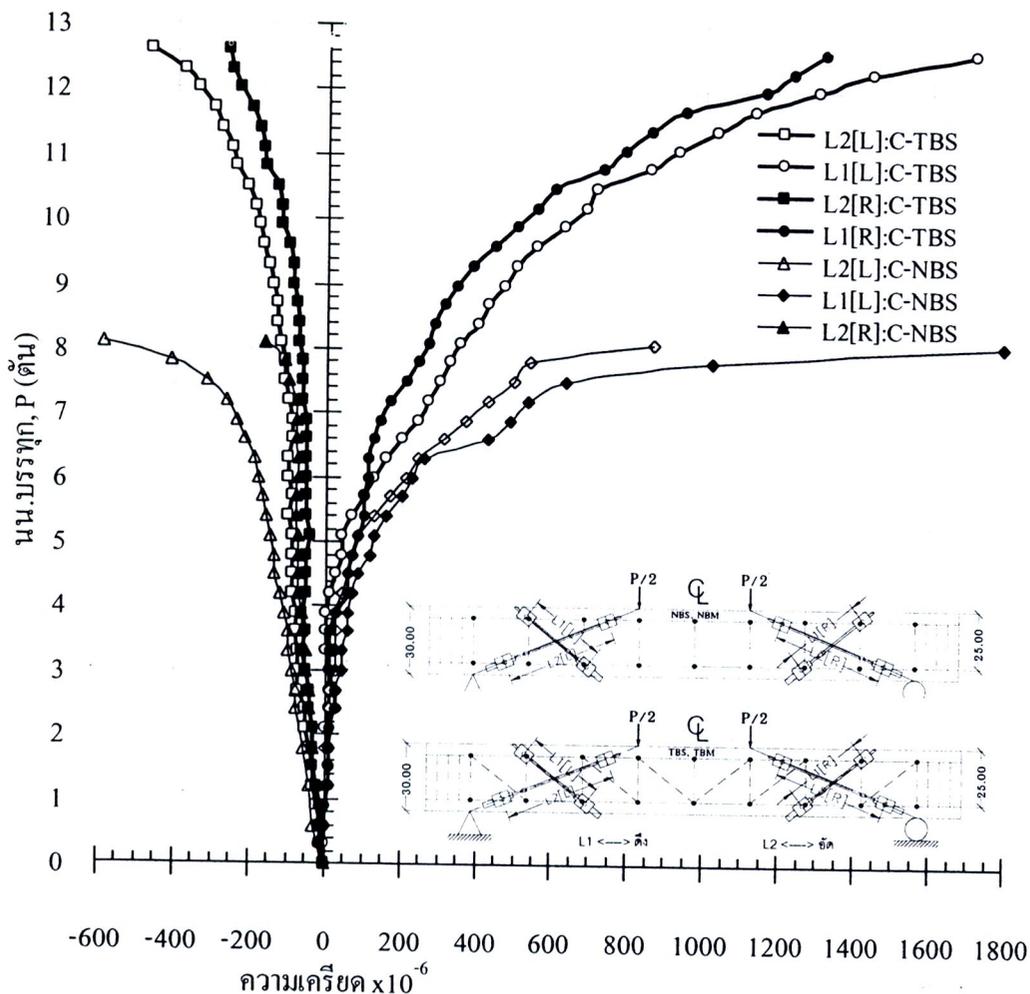
- 1) LVDT ด้านซ้ายของคานทดสอบ ได้แก่ ชิ้นส่วน L1-L:C-NBS และ L2-L:C-NBS ความเครียดอัด (ϵ_2) ในชิ้นส่วน L2-L:C-NBS เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความชันของ

เส้นกราฟมากขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกในช่วงประมาณ 6.6 ตัน และมากขึ้นอีกที่น้ำหนักบรรทุกประมาณเท่ากับ 7.8 ตัน สอดคล้องกับลักษณะการแตกร้าวของคานทดสอบ

2) LVDT ด้านขวาของคานทดสอบ ได้แก่ ชั้นส่วน L1-R:C-NBS และ L2-R:C-NBS ความเครียด (ϵ_2) ในชั้นส่วน L2-R:C-NBS เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟมากขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกในช่วงประมาณ 6.6 ตัน และมากขึ้นอีกที่น้ำหนักบรรทุกประมาณเท่ากับ 8.1 ตัน สอดคล้องกับลักษณะการขยายตัวของความกว้างของรอยแตกร้าวที่มากขึ้นในขณะที่คานทดสอบใกล้จะวิบัติ

จากภาพที่ 5.21 พบว่าเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมการรับแรงในชั้นส่วนของคอนกรีตอาร์ชและชั้นส่วนคอนกรีตรับแรงดึงทแยง โดยคอนกรีตอาร์ชจะทำหน้าที่ต้านทานแรงอัด สำหรับชั้นส่วนคอนกรีตรับแรงดึงทแยงจะทำหน้าที่ต้านทานการแตกร้าวดึงทแยงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคานเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกถ่ายแรงสู่ฐานรองรับผ่านชั้นส่วนคอนกรีตอาร์ช ทำให้รอยแตกร้าวนั้นขยายตัวจึงวัดค่าความเครียดในแนวตั้งฉากกับรอยแตกร้าวได้มากกว่าแนวของคอนกรีตอาร์ช

จากภาพที่ 5.29 และภาพที่ 5.30 สำหรับคานทดสอบ C-TBS พบว่าเมื่อรอยแตกร้าวนั้นขยายตัวมากขึ้นจึงวัดค่าความเครียดในชั้นส่วนคอนกรีตรับแรงดึงที่แนวตั้งฉากกับรอยแตกร้าวได้มากกว่าความเครียดของชั้นส่วนคอนกรีตอาร์ช และพบว่ากราฟของคานทดสอบ C-TBS มีความชันที่มากกว่า (มีความเครียดน้อย) และการยึดหดตัวน้อยกว่าคาน C-NBS ที่เกิดจากรอยแตกร้าวดึงทแยงที่ขยายตัวช้ากว่าของคาน C-NBS ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ได้เสริมเหล็กปลอกทแยงในรูปแบบโครงข้อหมุนตามทิศทางการไหลของหน่วยแรงดึงหลัก (Principal tensile stress) ไปขวางกับแนวการแตกร้าวนั่นเอง ทำให้การเสียรูปหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคานทดสอบ C-TBS น้อยกว่า C-NBS

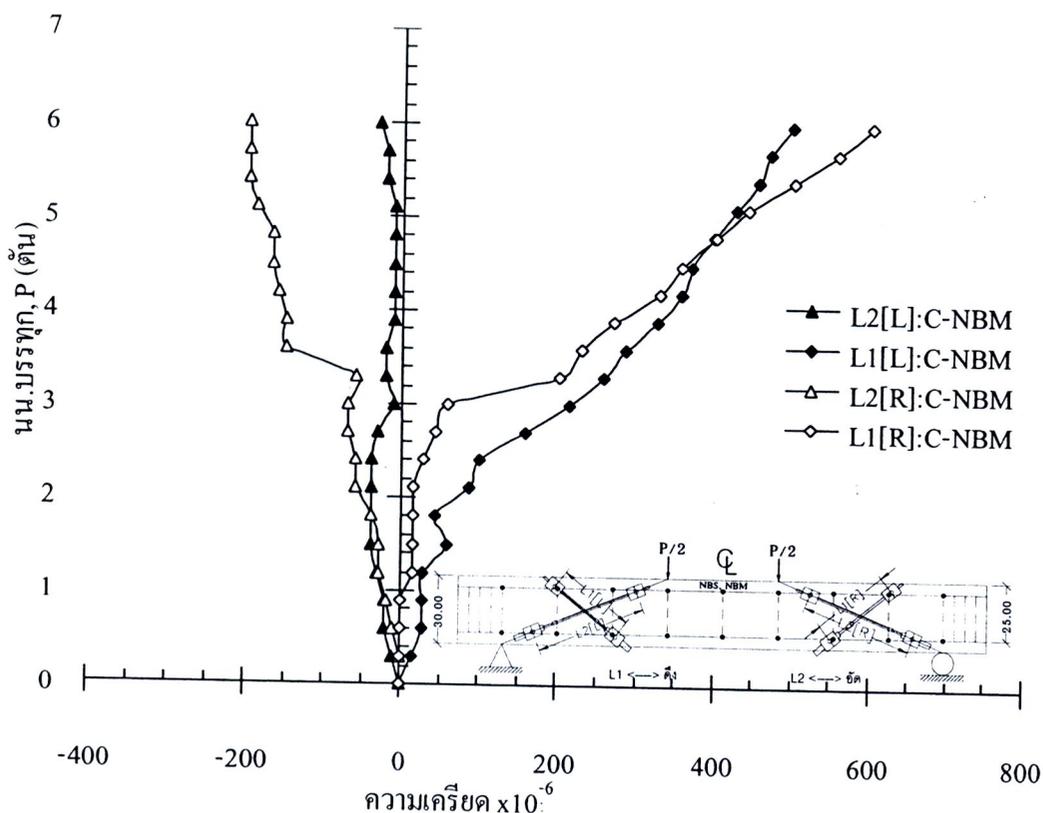


ภาพที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเคี้ยวของแนวคอนกรีตอาร์ชและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคานกลุ่ม C ที่วิบัติแบบการเฉือน

5.3.3.2 คานทดสอบที่วิบัติแบบการดัด (Flexural Mode)

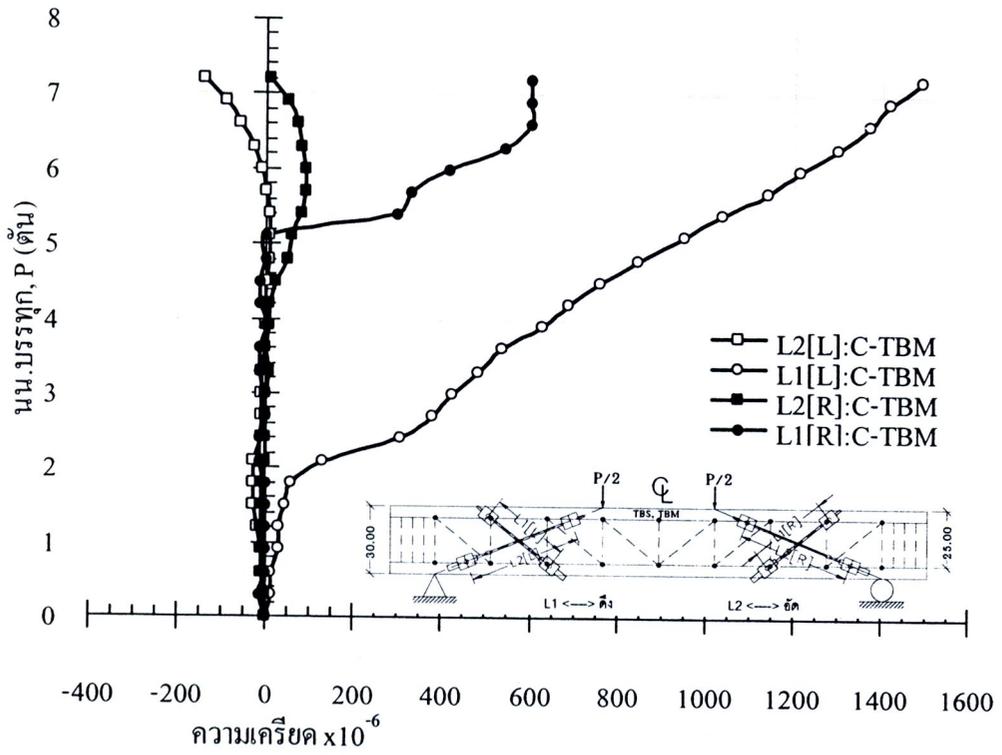
ภาพที่ 5.31-5.33 แสดงความสัมพันธ์ความเคี้ยวระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเคี้ยวของแนวคอนกรีตอาร์ชและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคานทดสอบกลุ่ม C ที่วิบัติแบบการดัด พบว่าค่าความเคี้ยวเฉลี่ยของด้านซ้ายและขวาของคาน C-NBM มีค่าใกล้เคียงกันเพราะรอยแตกกว้างโดยมากจะเกิดในช่วงของโมเมนต์ดัด สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่วิบัติแบบการดัดนั้นการแตกร้าวส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบจากการดัดคือเริ่มแตกร้าวแนวตั้งจากกลางคานแล้วค่อยกระจายการแตกร้าวออกไปทางด้านข้างในช่วงการเฉือน (Shear span) บางส่วนแต่ลักษณะการแตกร้าวขณะคานวิบัติจะเป็นเส้นลักษณะในแนวตั้งที่อยู่กึ่งกลางคาน ซึ่งในการ

ติดตั้งเครื่องวัด LVDT จะวัดค่าการเสียรูปได้เฉพาะในช่วงการเฉือน (Shear span) เท่านั้น ทำให้ข้อมูลที่ได้ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบในลักษณะเดียวกับคานกลุ่ม C-NBS และ C-TBS



ภาพที่ 5.31 ความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแนวคอนกรีตอาร์ชและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคาน C-NBM ที่วิบัติแบบการคัต

จากผลการทดสอบนำข้อมูลค่าความเครียดที่วัดได้ในแต่ละจุดของชิ้นส่วนแนวอาร์ชจากเกจวัดความเครียด ได้แก่ A1, A2 และ A3 กับชิ้นส่วนแนวดึงทแยง D1 หรือ D1* มาหาค่าเฉลี่ยแล้วเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จาก LVDT แสดงในตารางที่ 5.15 พบว่าค่าความเครียดมีความแตกต่างกันในระดับหนึ่งเนื่องจากข้อมูลที่วัดได้จากเกจวัดความเครียดเป็นข้อมูลความเครียดที่แต่ละจุดไม่ใช่ความเครียดที่วัดได้ตลอดแนวชิ้นส่วนเหมือนกับ LVDT



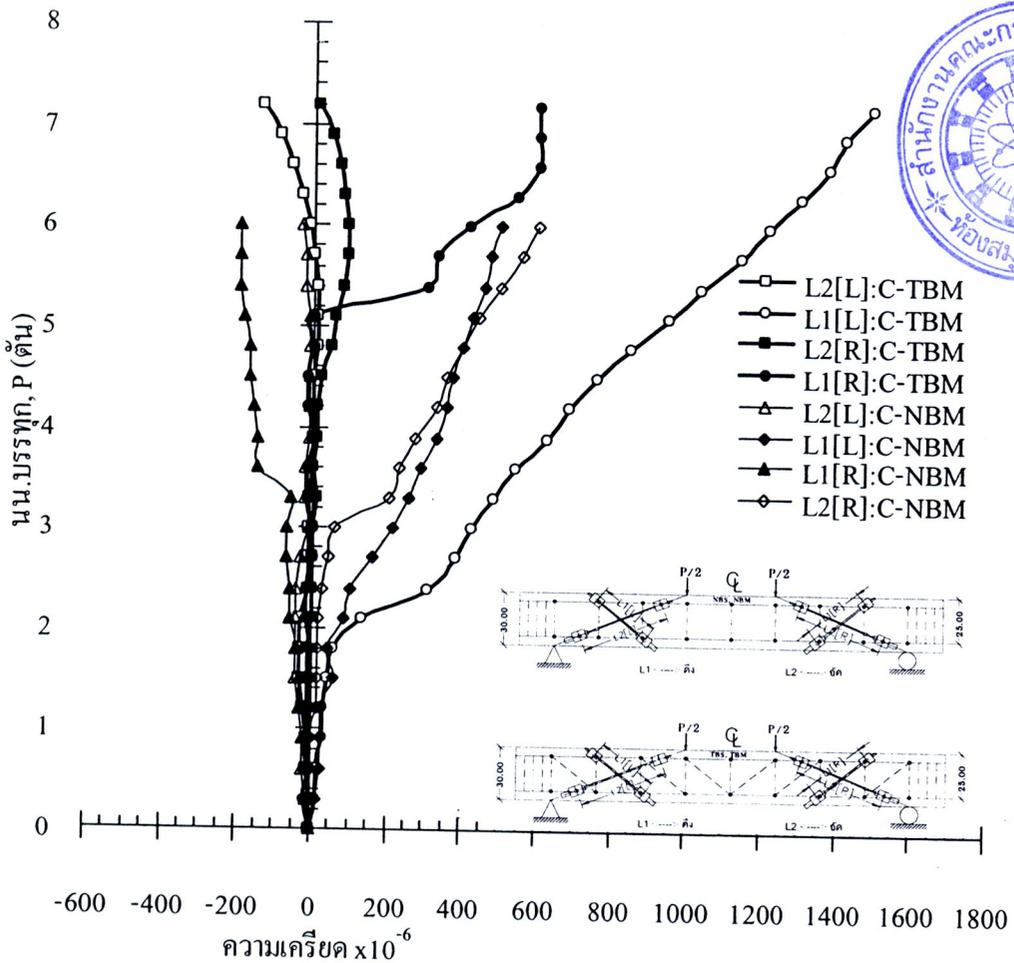
ภาพที่ 5.32 ความสัมพันธ์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแนวคอนกรีตอาร์คและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคาน C-TBM ที่วิบัติแบบการดัด

ตารางที่ 5.15 ความเครียดในของแนวคอนกรีตอาร์คและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคานทดสอบ
กลุ่ม C

| หมายเลข คาน | ช่วงที่เก็บข้อมูล | ความเครียดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนคอนกรีต (10^{-6}) | | | |
|----------------|-------------------|--|-------------|--------------|----------|
| | | ข้อมูล Strain gauge | | ข้อมูล LVDT | |
| | | แนว L2 | แนว L1 | แนว L2 | แนว L1 |
| | | (A1+A2+A3)/3 | D1* หรือ D1 | ϵ_2 | e_1 |
| C-NBS | FC (0.6 T) | -18.27 | -1.90 | -29.41 | 0.00 |
| | SC (3.3 T) | -37.50 | -6.60 | -98.04 | +43.10 |
| | FAIL (8.1 T) | -83.63 | +859.20 | -588.24 | +1795.98 |
| C-TBS | FC (1.8 T) | -39.57 | +48.80 | -40.00 | +14.29 |
| | SC (3.6 T) | -72.07 | +157.90 | -80.00 | 0.00 |
| | FAIL (12.6 T) | -418.73 | +240.20 | -470.00 | +1714.29 |
| C-NBM | FC (1.2 T) | -2.85 | -10.50 | -30.30 | +28.49 |
| | SC (3.6 T) | -49.70 | -50.70 | -20.20 | +284.90 |
| | FAIL (6.0 T) | -57.40 | -60.30 | -30.30 | +498.58 |
| C-TBM | FC (0.6 T) | -10.47 | +40.10 | 0.00 | +14.62 |
| | SC (2.4 T) | -49.70 | +50.70 | -10.00 | +307.02 |
| | FAIL (7.2 T) | -159.10 | +769.30 | -140.00 | +1491.23 |

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 5.1, 5.2 และ 5.3 เมื่อพิจารณาถึงหน่วยการยึดหดตัวของคอนกรีตในแนว L2 และในแนว L1 รวมถึงข้อมูลหน่วยการยึดหดตัวที่วัดได้จากเหล็กปลอกลูกตั้งและเหล็กปลอกทแยงของคานทั้ง 2 รูปแบบ จะเห็นได้ว่าคานที่เสริมเหล็กปลอกลูกตั้งปกติแนวตั้งอย่างเดียว (Normal Beam) จะมีหน่วยการหดตัวในแนวอาร์ชมากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) และพบว่าหน่วยการยึดตัวในแนวตั้งทแยง หรือแนว L1 มากกว่าหน่วยการยึดตัวของคานที่เสริมเหล็กปลอกแบบโครงข้อหมุน (Truss Beam) และเหล็กปลอกลูกตั้งแนวตั้งมีหน่วยการยึดตัวน้อยกว่าเหล็กปลอกทแยงชัดเจนภายหลังจากการแตกร้าว ซึ่งแสดงว่าเหล็กปลอกลูกตั้งแนวตั้งแทบไม่รับแรง จากหน่วยการยึดหดตัวของ

คอนกรีตและเหล็กเสริมสามารถแปลงหน่วยแรงเป็นความเค้นได้ตามทฤษฎีในบทที่ 3 หัวข้อ 3.3 ซึ่งได้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุ



ภาพที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแนวคอนกรีตอาร์ชและคอนกรีตรับแรงดึงทแยงของคานกลุ่ม C ที่วิบัติแบบการค้ำ