บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองคานคอนกรีตอัดแรง แบบคานเชิงประกอบ

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่ง

รูปที่ 5.1 และ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งที่กึ่งกลางช่วงคาน จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงเริ่มบรรทุกน้ำหนักน้อย ๆ จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีความลาดชันมาก ซึ่งช่วงนี้จะเกิดระยะโก่งน้อยมาก ต่อไปกราฟจะมีความชันน้อยลงและจะค่อยโค้งเล็กน้อย ซึ่งช่วงนี้อัตราการโก่งจะเร็วกว่าช่วงแรกเนื่องจากเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด หลังจากช่วงนี้แล้วคานจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดมากขึ้น กราฟจะโค้งมาก ระยะโก่งจะเพิ่มมากในขณะที่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งคานวิบัติ ในการทดลองนี้การวิบัติแบบแรงดัดวิบัติและแรงเฉือนวิบัติกราฟจะมีลักษณะความโค้งคล้ายคลึงกัน ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กเสริมแรงดึงสูงที่ใช้มีเปอร์เซ็นต์การยืดเพียง 3% เท่านั้น จึงทำให้การโก่งตัวที่เกิดขึ้นขณะที่เกิดการวิบัติแบบแรงดัดวิบัติมีค่าน้อย แต่ในกรณีเกิดการวิบัติโดยแรงยึด รั้งระยะโก่งจะเพิ่มขึ้นในขณะที่น้ำหนักบรรทุกคงที่และค่อย ๆ ลดลง การพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งนี้อย่างเดียวจะไม่สามารถบอกได้ว่าคานนั้นเกิดการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือนด้วยหรือไม่

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด

5.2.1 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกและความเครียดในเหล็กเสริมแรงดึงสูงในรูปที่ 5.3 และ 5.4 จะเห็นว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ ช่วงนี้

กราฟจะเป็นเส้นตรงโดยที่ค่าอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นน้อยมาก ทั้งนี้เพราะยังอยู่ในช่วง Proportional Limit แต่เมื่อถึงน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว ค่าความเครียดจะเพิ่มมากขึ้นทันที ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อเกิดการแตกร้าวคอนกรีตส่วนล่างจะไม่ช่วยรับแรงดึงเลย กราฟที่จุดนี้จะเริ่มโค้งจนกระทั่งเหล็กเสริมอัดแรงถึงจุดคลาก กราฟจะโค้งน้อยลง อัตราการเพิ่มของความเครียดจะมากในขณะที่น้ำหนักบรรทุกไม่เพิ่มขึ้น

5.2.2 จากการลงพิกัดความเครียดที่ผิวบนของคานคอนกรีตที่หน้าตัดตามช่วงต่าง ๆ ของคานสำหรับน้ำหนักบรรทุกจำนวน 3 ค่าในรูปที่ 5.5 พบว่าขณะที่น้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ ความเครียดเกือบจะเป็นสัดส่วนกับโมเมนต์ที่หน้าตัดนั้น ๆ ถ้าน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นความเครียดจะเพิ่มขึ้นสูงในบริเวณใกล้จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำและที่บริเวณปลายของการแตกร้าว ในกรณีที่เกิดการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน ความเครียดอาจเพิ่มขึ้นสูงที่ปลายของการแตกร้าวดังกล่าวมากกว่าปกติเล็กน้อย

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงและความเครียดในคอนกรีต

เพื่อต้องการจะเปรียบเทียบความเครียดของเหล็กเสริมอัดแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่รูปหน้าตัดต่าง ๆ ในขณะรับน้ำหนักบรรทุก ความเครียดของคอนกรีตที่รูปหน้าตัดต่าง ๆ ถูกนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับความเครียดของเหล็กเสริมอัดแรงที่ตำแหน่งกลางคานซึ่งติดเกจวัดความเครียด ในรูปที่ 5.6 เส้นกราฟ ก., ข. และ ค. สำหรับความเครียดของคอนกรีตตามตำแหน่งที่แสดงในรูปตัดกลางของคาน F-4 ก่อนการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด อัตราการเพิ่มขึ้นของความเครียดของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมอัดแรงจะสูง หลังจากเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดอัตราส่วนของความเครียดในคอนกรีตต่อความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงจะลดลงไป และจะรักษาอัตราส่วนนี้เกือบคงที่โดยประมาณเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือนจะทำให้อัตราส่วนของความเครียดในคอนกรีตต่อความเครียดในเหล็กจะสูงขึ้น ความชันของเส้นกราฟจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด แต่เส้นกราฟ ข. ที่ซึ่งอยู่ในตำแหน่งกลางคานจะเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จะเห็นว่ากราฟเหล่านี้จะชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของคอนกรีตและเหล็กก่อนและหลังการเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือน

5.4 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ

ลักษณะการแตกร้าวของคานต่าง ๆ มีดังนี้

5.4.1 คาน F-1 ลักษณะการแตกร้าวตามรูปที่ 5.7 และ 5.13 เมื่อน้ำหนักบรรทุก 6.74 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดเป็นแนวดิ่งเล็กมากที่กึ่งกลางคาน เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเป็น 7.44 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดในแนวดิ่งสูงเกือบเท่าความลึกของคานใต้จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำด้านปลาย ข. และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเป็น 7.78 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดอยู่ในแนวทำมุมกับแนวดิ่งเล็กน้อยสูงเกือบเท่ากับความลึกของคานอยู่เลยน้ำหนักบรรทุกกระทำไปทางด้านปลาย ก. และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปรอยแตกร้าวจะสูงขึ้นและกว้างขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกถึง 9.23 ตัน คานจึงวิบัติแบบแรงดัดวิบัติที่กลางคานโดยเหล็กแรงดึงสูงขาด

5.4.2 คาน F-2 ลักษณะการแตกร้าวตามรูปที่ 5.8 และ 5.14 เมื่อน้ำหนักบรรทุก 11.70 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดในแนวดิ่งใต้จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ปลาย ก. เป็นแนวเส้นเล็กมาก สูงเกือบเท่ากับครึ่งหนึ่งของความลึกของคาน เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเป็น 12.38 ตัน จะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดอยู่ในแนวดิ่ง สูงประมาณ 15 ซม. ที่บริเวณกลางคาน และตามด้วยการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด (ขณะที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากัน) ใต้จุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำด้านปลาย ข. สูงประมาณ 25 ซม. เป็นแนวเอียงเล็กน้อย การแตกร้าวไม่ได้อยู่ในช่วงแรงเฉือน หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปรอยแตกร้าวต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนี้จะค่อยสูงขึ้น กว้างขึ้น และลึกเข้าไปในปีกคาน ทำให้คอนกรีตด้านบนเริ่มแตกร้าวเล็กน้อย จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกถึง 17.03 ตัน คานจึงวิบัติแบบแรงดัดวิบัติโดยเหล็กแรงดึงสูงขาด

5.4.3 คาน F-4 ลักษณะการแตกร้าวตามรูปที่ 5.9 และ 5.15 เมื่อน้ำหนักบรรทุก 10.08 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดที่ใต้จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ปลาย ข. เมื่อน้ำหนักบรรทุกถึง 10.54 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดที่ใต้จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ปลาย ก. ในขณะที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกถึง 11.00 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดบริเวณกลางคาน ขณะที่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น รอยแตกร้าวทั้ง 3 รอยค่อย ๆ สูงขึ้นและกว้างขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเป็น 16.05 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือนขึ้นในช่วงแรงเฉือนด้านปลาย ข. เลยจุดน้ำหนักบรรทุกกระทำไป 25 ซม. เป็นแนวเกือบตั้งฉากจากท้อง

คานสูงประมาณ 10 ซม. แล้วเอียงทำมุมประมาณ 50 องศากับแกนแนวนอนของคานสูงอีกประมาณ 15 ซม. ดังรูปที่ 5.16 จากนั้นคานจะโก่งมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่น้ำหนักบรรทุกเกือบคงที่จนกระทั่งที่ระยะโก่ง 45 มม. เกิดการเฉือนวิบัติขึ้น

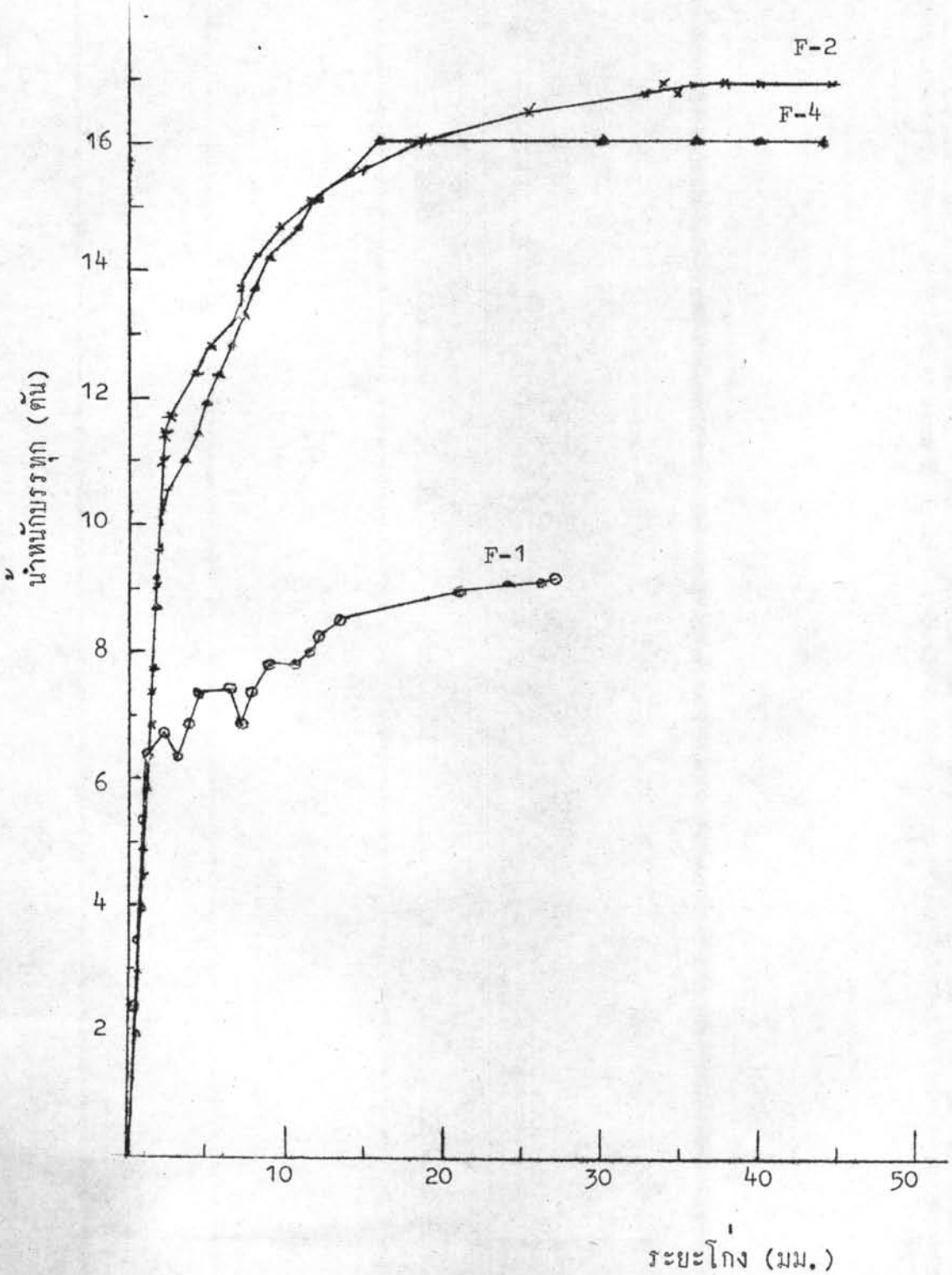
5.4.4 คาน F-5 ลักษณะการแตกร้าวตามรูปที่ 5.10 และ 5.17 เมื่อน้ำหนักบรรทุก 10.08 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดเป็นรอยแตกเล็กมาก สูงประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงของคานที่กึ่งกลางคาน เมื่อน้ำหนักบรรทุกเป็น 10.30 ตัน เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดสูงประมาณครึ่งหนึ่งของความลึกของคานที่ใต้จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ปลาย ก. และเมื่อน้ำหนักบรรทุกกระทำเป็น 11.00 ตัน เกิดการแตกร้าวเป็นแนวเอียงอยู่ในช่วงแรงเฉือนด้านปลาย ข. ห่างจากจุดน้ำหนักบรรทุกกระทำ 7.5 ซม. ซึ่งเป็นรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดเหมือนกันเพราะน้ำหนักบรรทุกใกล้เคียงกับการแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อนมาก และรอยแตกร้าวเอียงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ขณะที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปรอยแตกร้าวต่าง ๆ ค่อยสูงขึ้นและกว้างขึ้น จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเป็น 14.25 ตันเกิดการยึดรั้งวิบัติโดยที่เหล็กแรงดึงสูงเกิดการรูด (slip) ขึ้น ทั้งนี้เพราะใช้เหล็กเสริมแรงดึงสูงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มม. ผิวเรียบ ความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกจะลดลง และระยะโก่งเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนเมื่อระยะโก่งเท่ากับ 32 มม. จึงยุติการทดลอง

5.4.5 คาน F-6 ลักษณะการแตกร้าวตามรูปที่ 5.11 และ 5.18 เมื่อน้ำหนักบรรทุก 10.75 ตันเกิดการแตกร้าวเนื่องแรงดัดที่ใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำด้านปลาย ข. เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็น 11.00 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดที่บริเวณกึ่งกลางคานและเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็น 11.20 ตันจะเกิดการแตกร้าวเป็นแนวเอียงทำมุมกับแนวดิ่งอยู่ในช่วงแรงเฉือนด้านปลาย ก. ห่างจุดน้ำหนักกระทำ 3 ซม. ซึ่งเป็นการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด เพราะน้ำหนักบรรทุกใกล้เคียงกับการแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อน และรอยแตกเอียงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ขณะที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปรอยแตกต่าง ๆ จะค่อย ๆ สูงขึ้นและกว้างขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเป็น 16.53 ตัน เกิดการฉีกที่ปลาย ข. ซึ่งใส่ grip ไว้กันเหล็กเสริมแรงดึงสูง(ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มม. ผิวเรียบ) รูดดังรูปที่ 5.19 และตามด้วยการเกิดการยึดรั้งวิบัติเช่นเดียวกับคาน F-5 โดยความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกจะลดลง และระยะโก่งเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนเมื่อระยะโก่งเท่ากับ 40 มม. จึงยุติการทดลอง

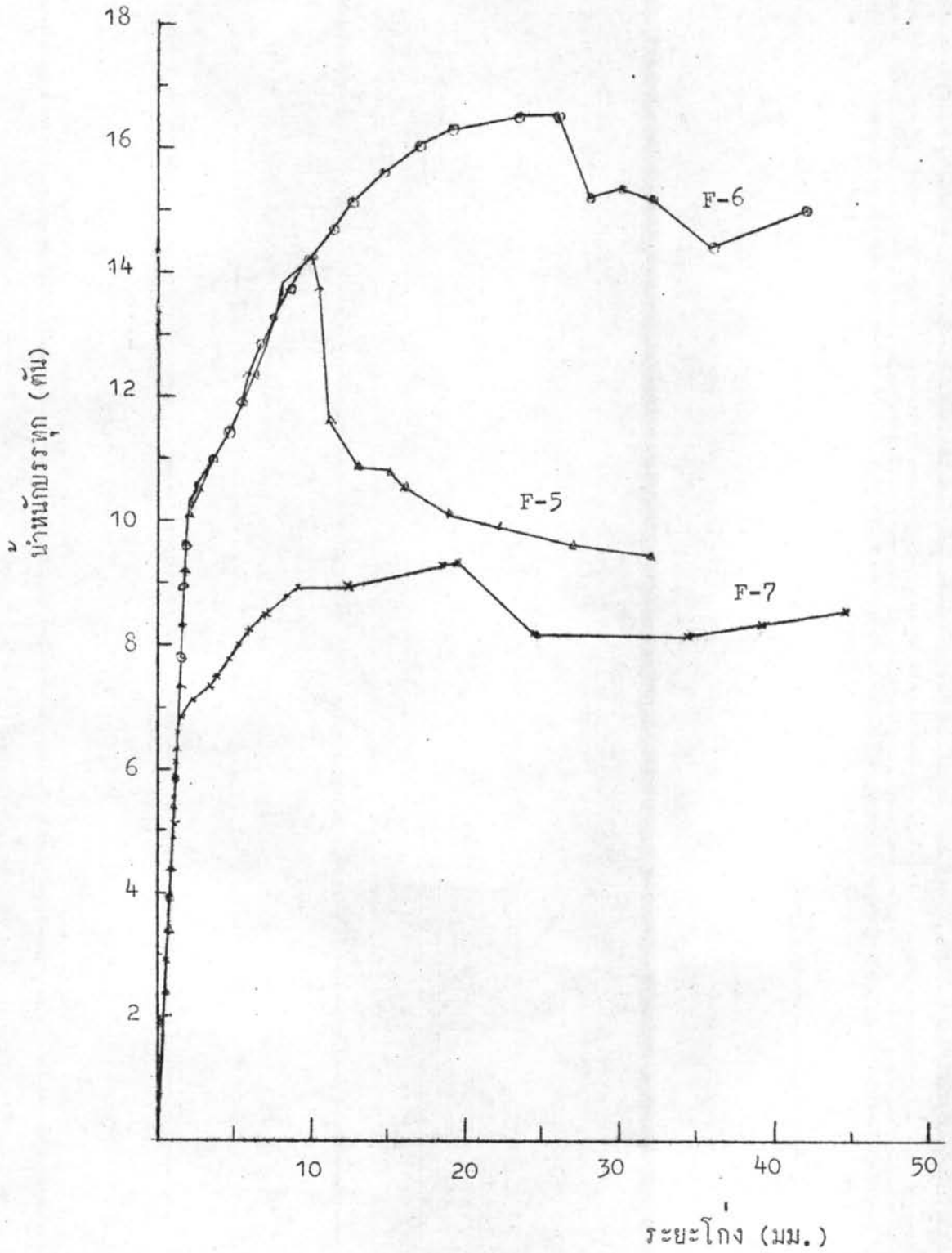
5.4.6 คาน F-7 ลักษณะการแตกร้าวตามรูป 5.12 และ 5.20 (มีน้ำหนักบรรทุกกระทำที่กึ่งกลางคาน) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเป็น 6.85 ตัน เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดในตำแหน่งกลางคานและเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกไปเรื่อย ๆ ก็ไม่เกิดการแตกร้าวในแนวอื่นอีก นอกจากรอยแตกร้าวแนวเดิมแยกออกมาอีกแนวหนึ่งลงไปข้างล่างดังรูป และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเป็น 9.30 ตัน เกิดการฉีกที่ปลาย ข. ของคานเช่นเดียวกับคาน F-6 และตามด้วยการเกิดการยึดครั้งวิบัติโดยความสามารถการรับน้ำหนักบรรทุกจะลดลง และระยะโก่งเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนเมื่อระยะโก่งเท่ากับ 43 มม. จึงยุติการทดลอง

5.5 การรับแรงเฉือนโดยเนื้อคอนกรีตเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน

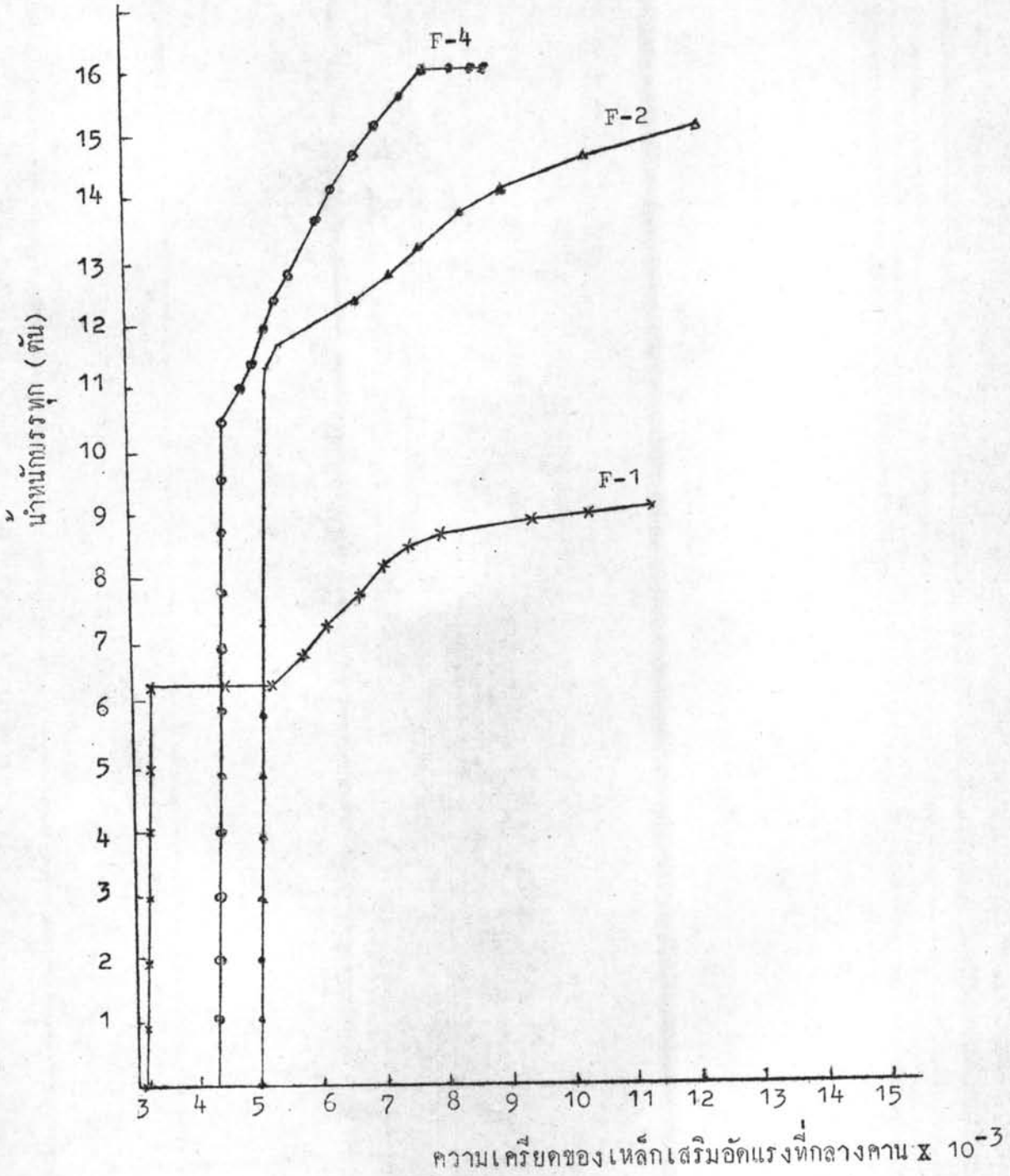
การทดลองได้พยายามที่จะทำให้คานที่ทดลองเกิดการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือน โดยอาศัยการคำนวณและหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการแตกร้าวแบบแรงเฉือนที่อกคานหรือการวิบัติโดยสาเหตุอื่น ๆ เสียก่อน คาน 2 ตัวแรก (F-1, F-2) ใช้ปีกคานกว้างประมาณ 60 ซม. และใช้เหล็กเสริมแรงดึงสูงทั้งจำนวนน้อยและมาก (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 มม. จำนวน 2 เส้นและ 4 เส้น) ปรากฏว่าการทดลองไม่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือนตามการคำนวณเลย ทั้งนี้เนื่องจากโมเมนต์แตกร้าว (M_{cr}) มีค่ามากจึงทำให้ค่าแรงเฉือนเนื่องจากการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือนสูงมาก และไม่สามารถที่จะเพิ่มเหล็กเสริมแรงดึงสูงได้อีกเนื่องจากอาจจะทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนที่อกคานเสียก่อน จึงได้ลดขนาดของปีกคานลงเหลือเพียง 30 ซม. และเริ่มทำการทดลองกับคาน F-4 พบว่ามีการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือนเกิดขึ้น จึงทำการทดลองกับคาน F-5, F-6 และ F-7 โดยลดแรงดึงในเหล็กลงอีก แต่ปรากฏว่าไม่เกิดการแตกร้าวดังกล่าวเลยนอกจากมีการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดเป็นแนวเอียงทั้ง ๆ ที่คานดังกล่าวมีคุณสมบัติส่วนใหญ่เหมือนกับคาน F-4 สรุปได้ว่าการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือนมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปีกคานช่วยรับแรงเฉือน [24] ทำให้การแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือนจากการทดลองนี้มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมาก นอกจากนี้ในคาน F-5, F-6 และ F-7 ได้เกิดการรูดของเหล็กเสริมแรงดึงสูง การถ่ายแรงระหว่างเหล็กกับคอนกรีตไม่ดีพอทำให้รอยแตกร้าวอ้ามากกว่าปกติ ค่าแรงเฉือนที่น้ำหนักบรรทุกประลัยถูกเปรียบเทียบกับค่าแรงเฉือน V_{ci} ตามสูตรของ ACI และค่าแรงเฉือน V_{cip} ตามสูตรที่เสนอในตารางที่ 5.1



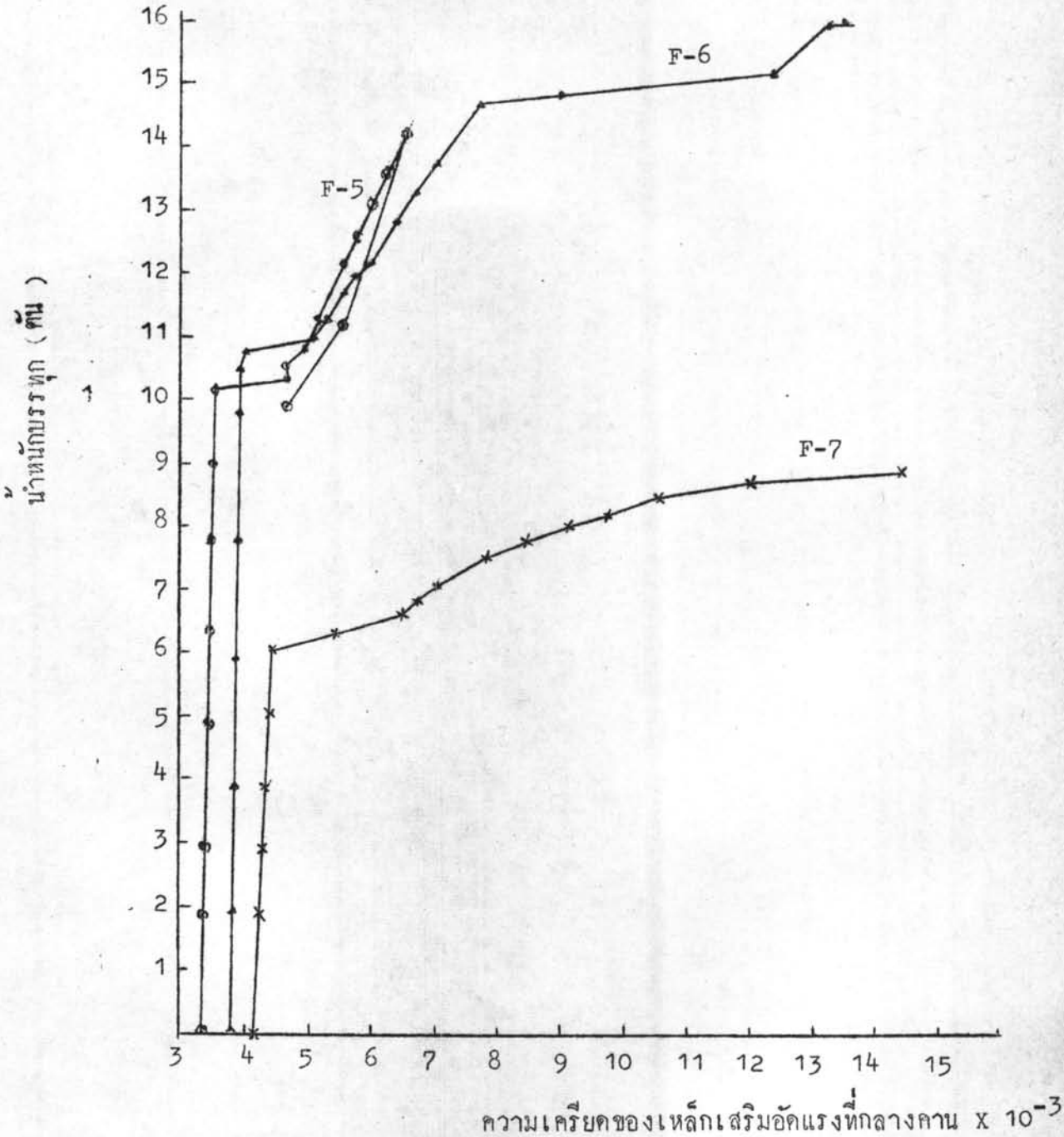
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งของคาน F-1, F-2 และ F-4



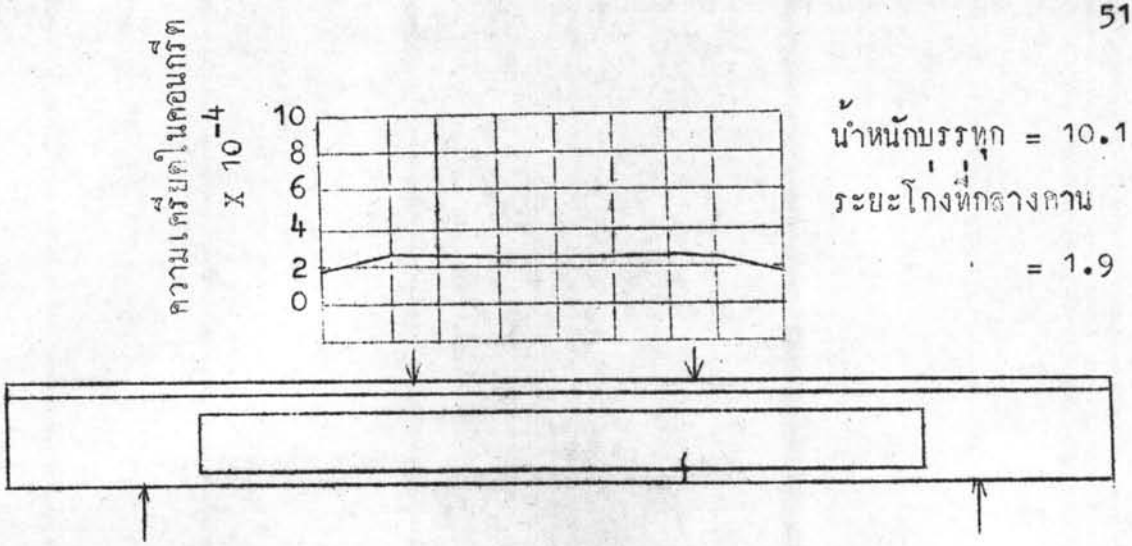
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งของคาน F-5, F-6 และ F-7



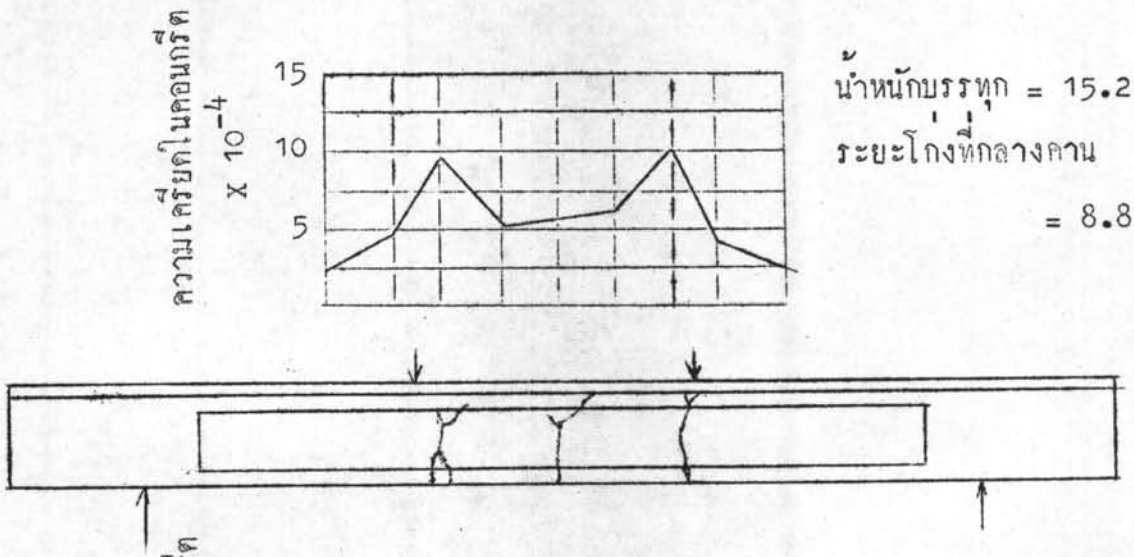
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงที่กลางคานของคาน F-4, F-2 และ F-1



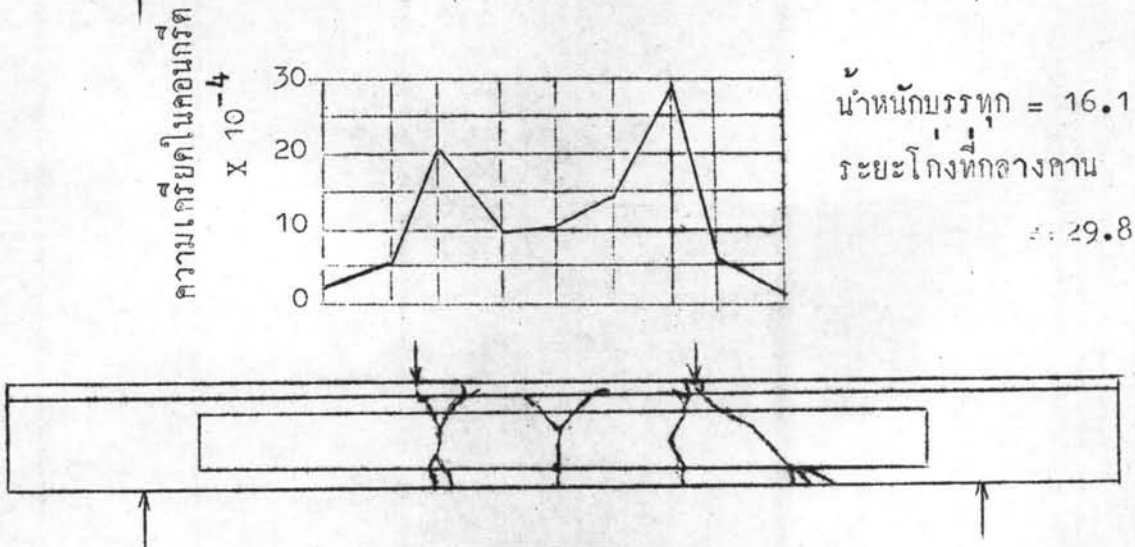
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงที่กลางคาน F-5, F-6 และ F-7



น้ำหนักบรรทุก = 10.1 ตัน
ระยะโก่งที่กลางคาน
= 1.9 มม.



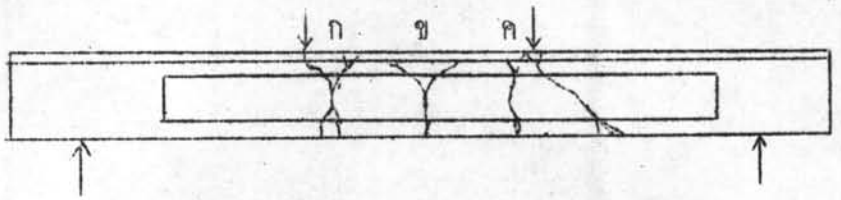
น้ำหนักบรรทุก = 15.2 ตัน
ระยะโก่งที่กลางคาน
= 8.8 มม.

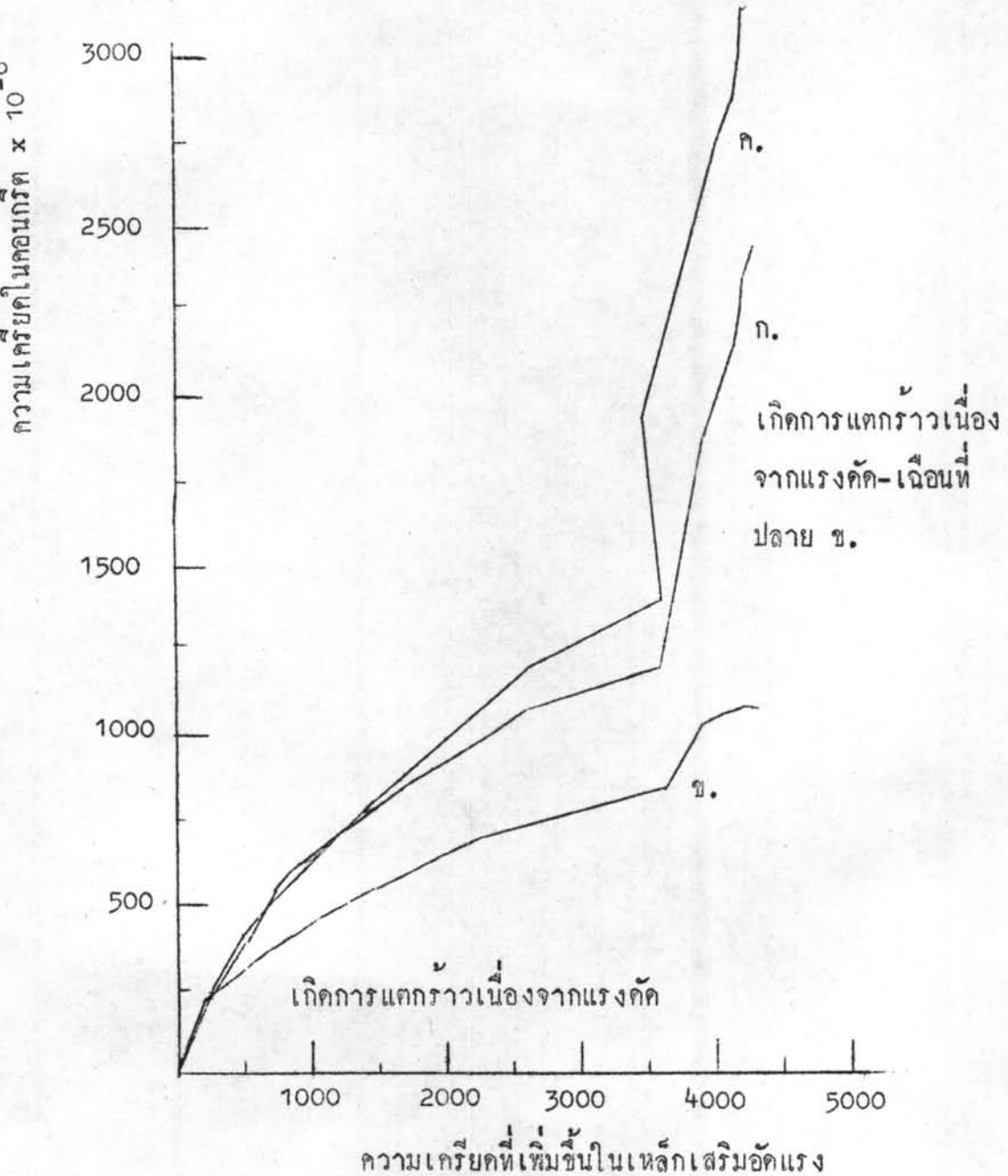


น้ำหนักบรรทุก = 16.1 ตัน
ระยะโก่งที่กลางคาน
= 29.8 มม.

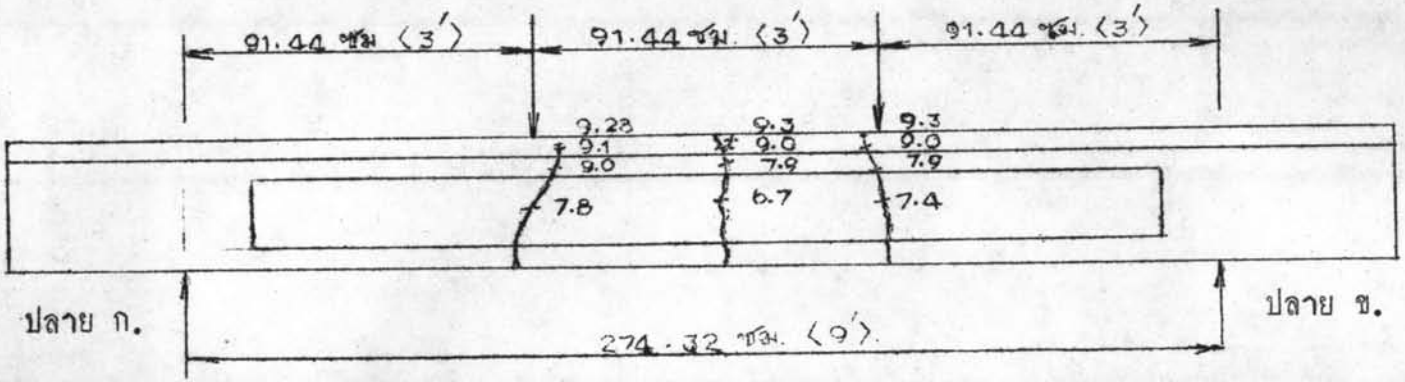
รูปที่ 5.5 ลักษณะการเกิดการแตกร้าวและการเปลี่ยนความเครียดที่ผิวบนของคาน F-4

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

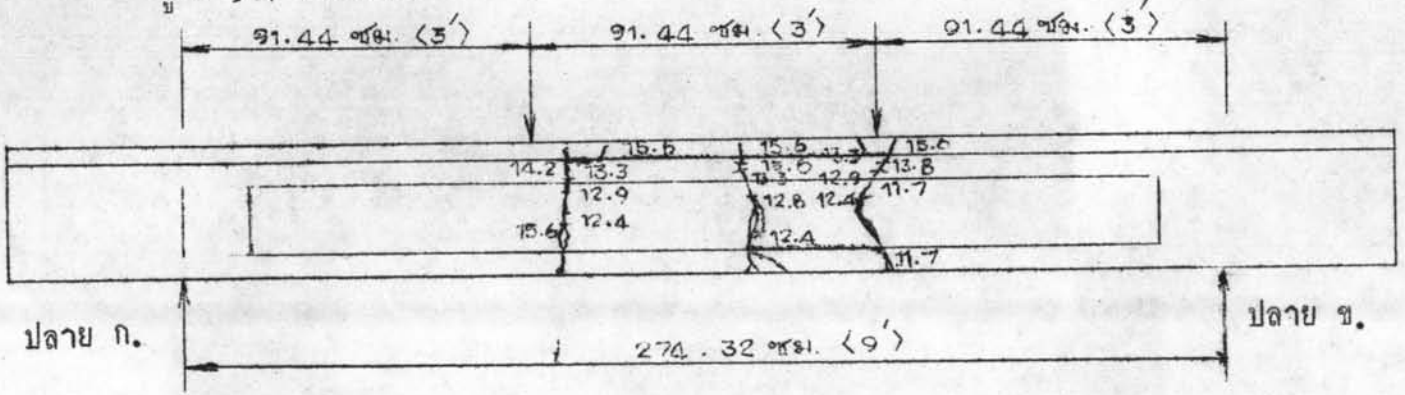




รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในคอนกรีตและเหล็กเสริมอัดแรง

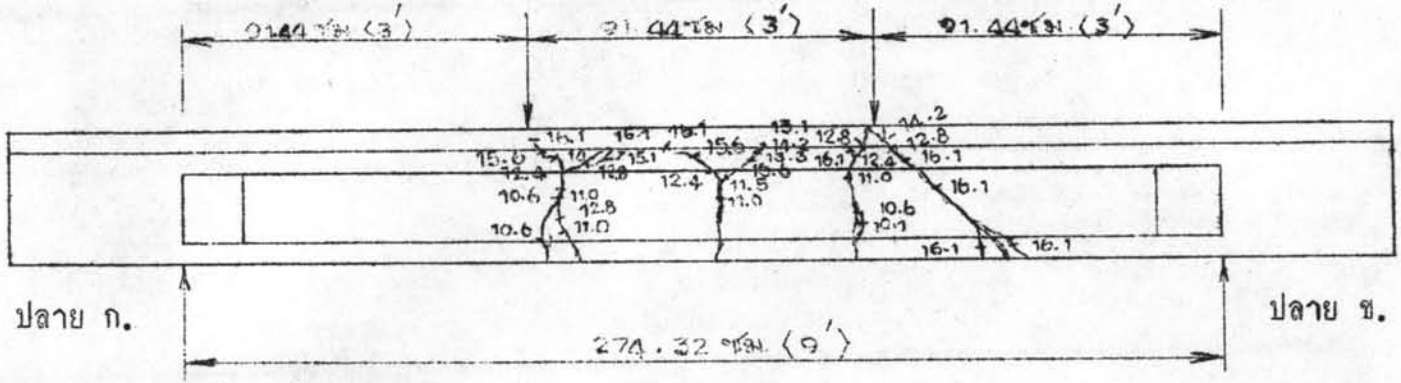


รูปที่ 5.7 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F-1 (ต้น)

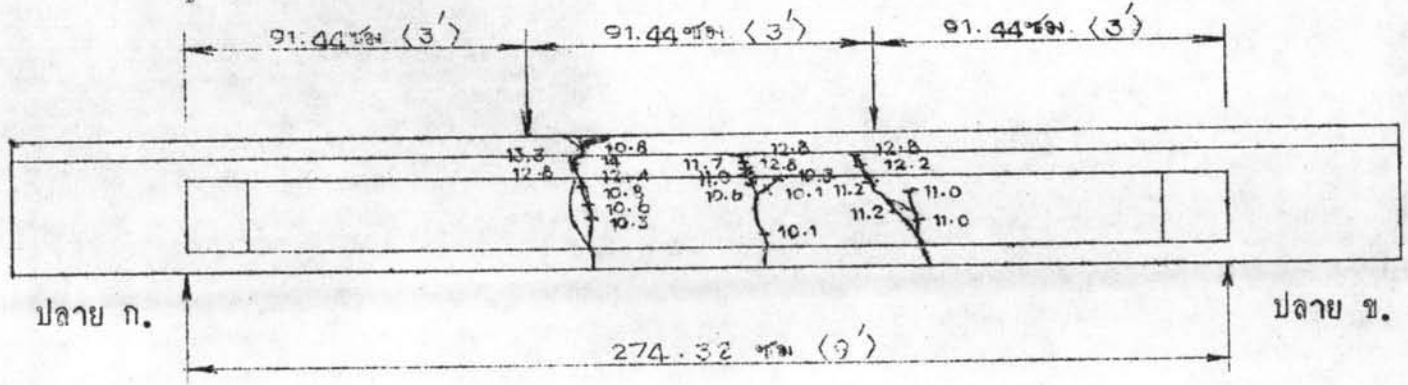


รูปที่ 5.8 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F-2 (ต้น)

หมายเหตุ ค่าตัวเลขตรงรอยแตกร้าวแสดงค่าน้ำหนักบรรทุกเป็นตันขณะเกิดรอยแตกร้าวนั้น ๆ

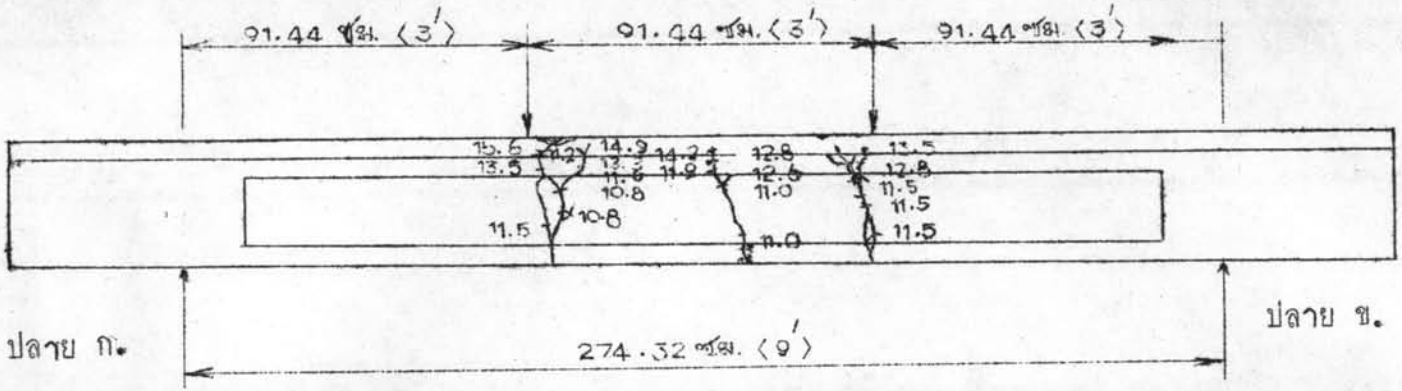


รูปที่ 5.9 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F-4 (ตัน)

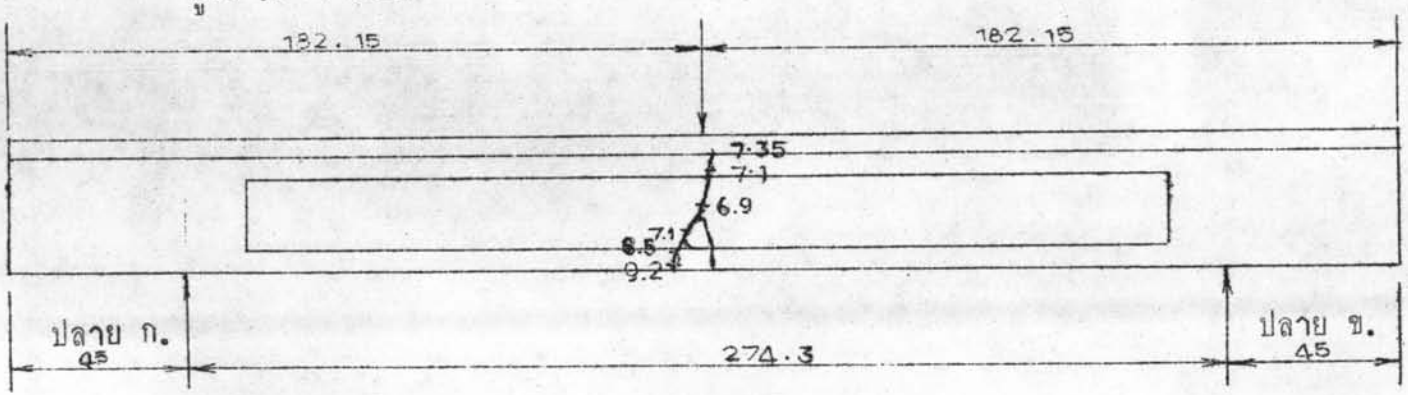


รูปที่ 5.10 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F-5 (ตัน)

หมายเหตุ ค่าตัวเลขตรงรอยแตกร้าวแสดงค่าน้ำหนักบรรทุกเป็นตันขณะเกิดรอยแตกร้าวนั้น ๆ

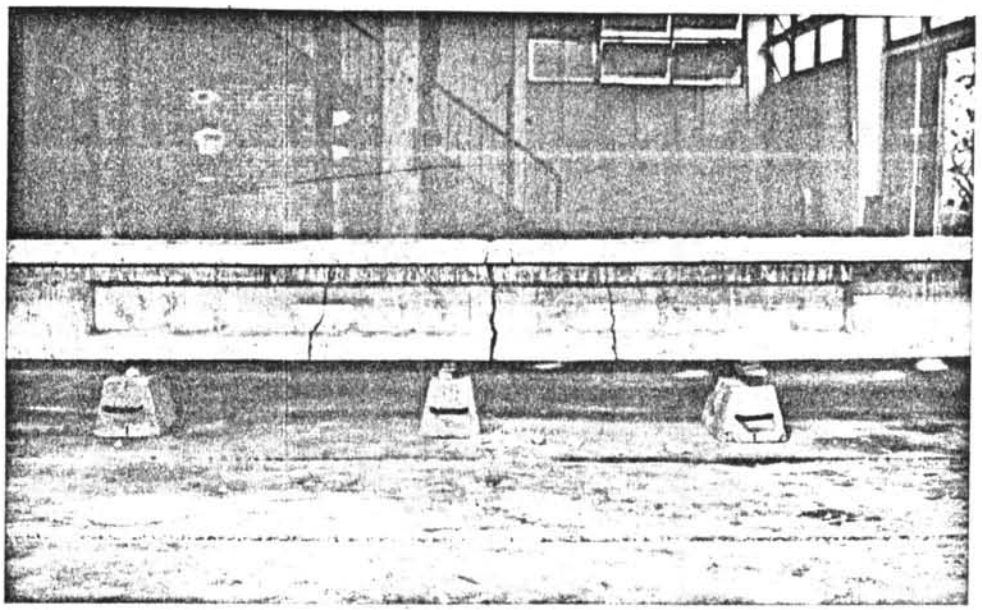


รูปที่ 5.11 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F-6 (ต้น)

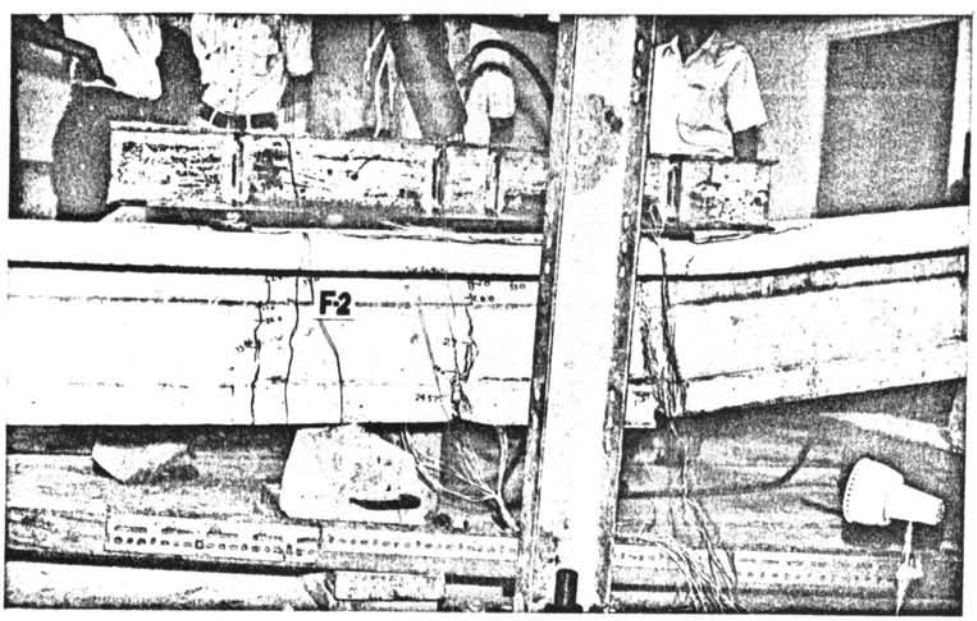


รูปที่ 5.12 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F-7 (ต้น)

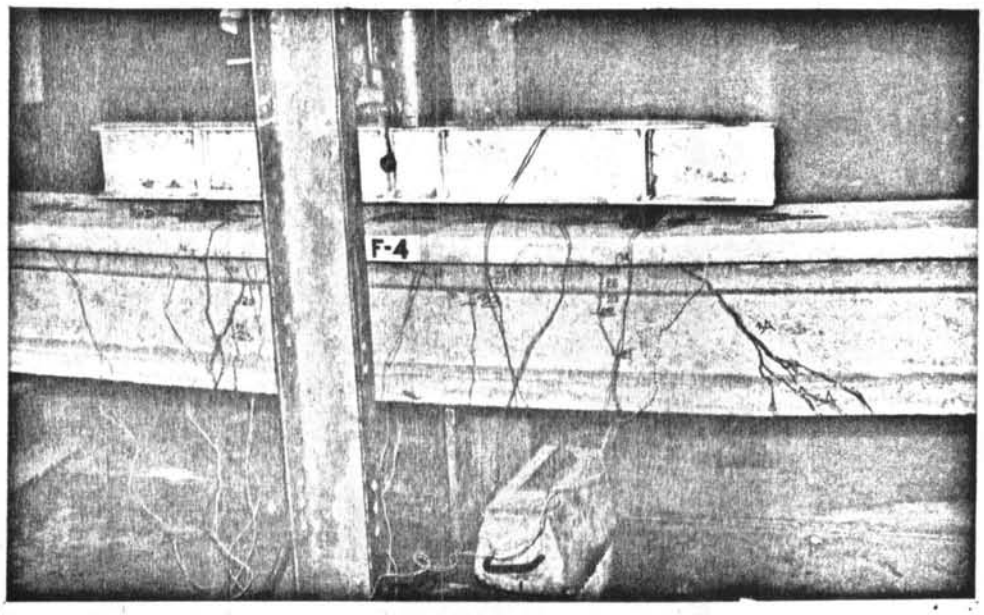
หมายเหตุ ค่าตัวเลขตรงรอยแตกร้าวแสดงค่าน้ำหนักบรรทุกเป็นตันขณะเกิดรอยแตกร้าวนั้น ๆ



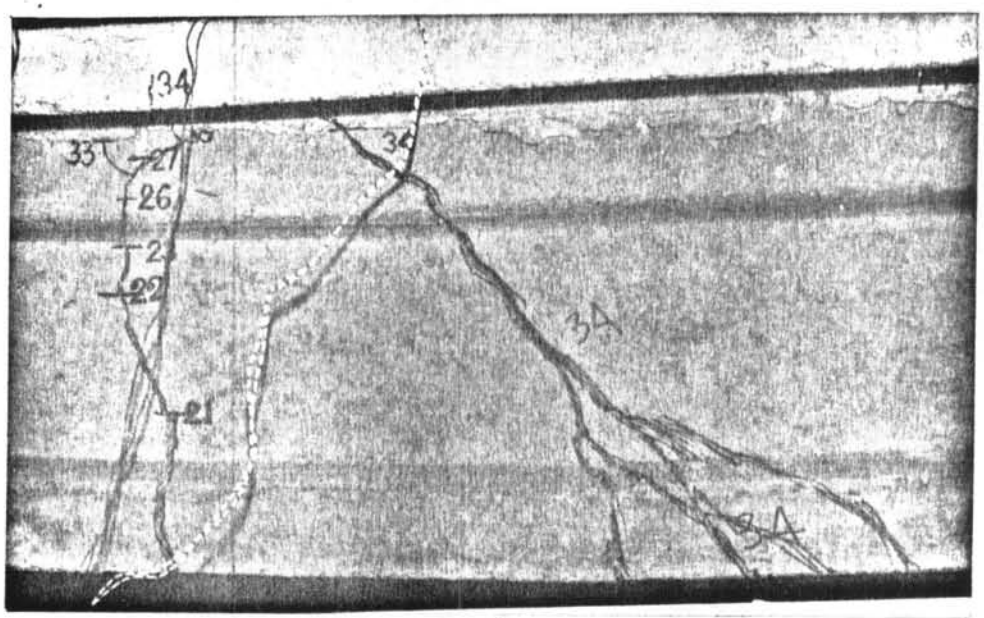
รูปที่ 5.13 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F - 1



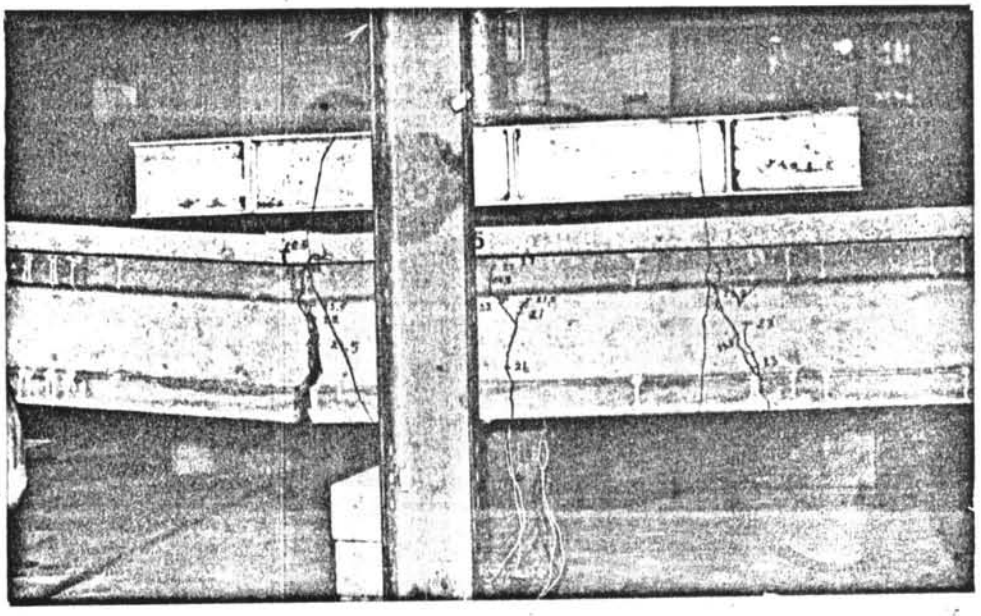
รูปที่ 5.14 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F - 2



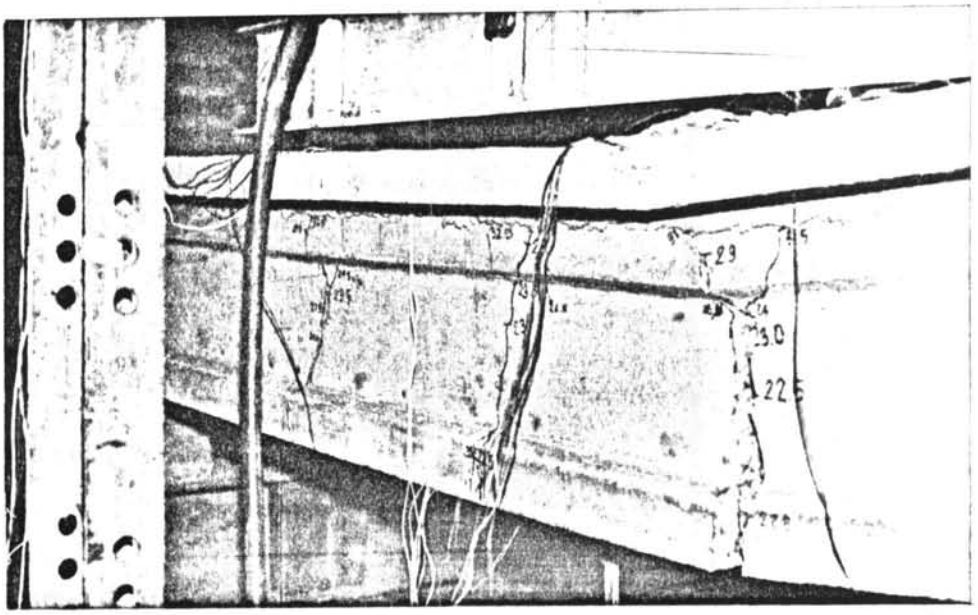
รูปที่ 5.15 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F - 4



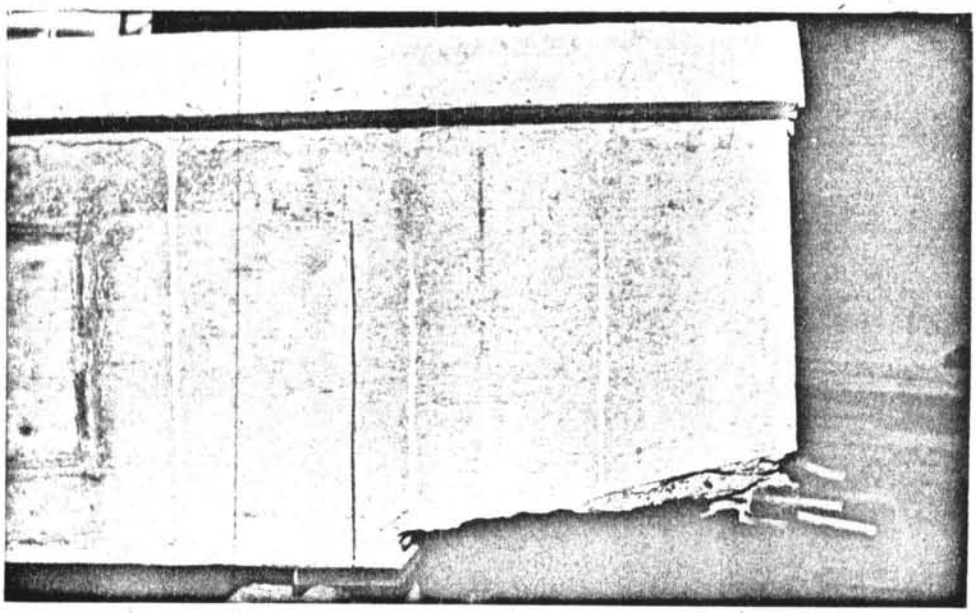
รูปที่ 5.16 ลักษณะการแตกร้าวแบบแรงดัด-เฉือนของคาน F - 4



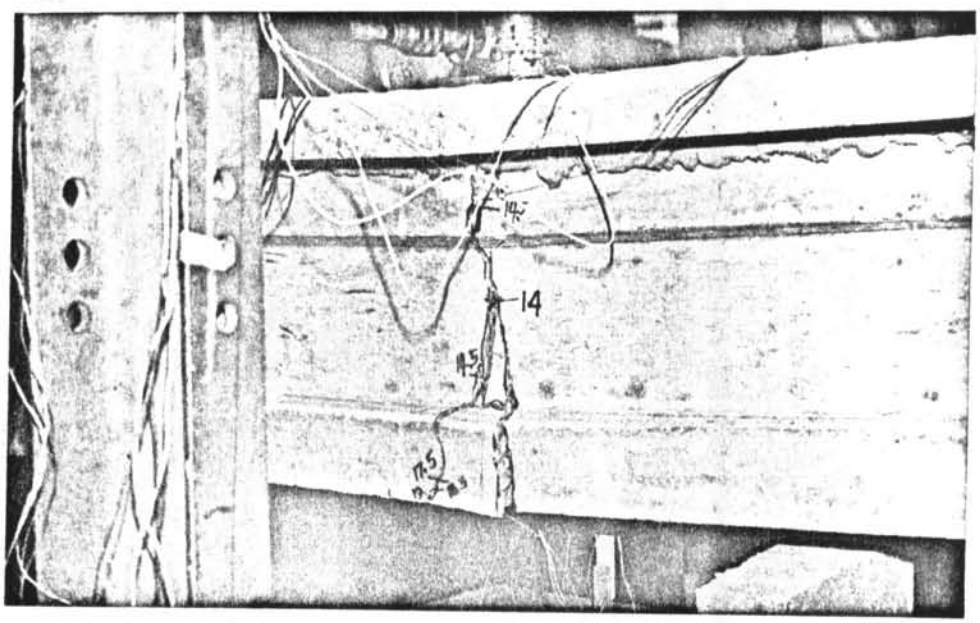
รูปที่ 5.17 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F - 5



รูปที่ 5.18 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F - 6



รูปที่ 5.19 ลักษณะการฉีกที่ปลายของคาน F - 6



รูปที่ 5.20 ลักษณะการแตกร้าวของคาน F - 7

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าแรงเฉือนจากการทดลองและการคำนวณ

ชื่อคาน	P_{ut} กก.	P_{ue} กก.	V_u กก.	V_{cr} กก.	V_{ci} กก.	V_u/V_{ci}	V_{cip} กก.	V_u/V_{cip}	การวิบัติ
F-1	8270	9230	4690	-	3780	1.24	3900	1.20	F
F-2	14610	17030	8590	-	5920	1.45	6050	1.42	F
F-4	14890	16090	8110	8110	5370	1.51	5530	1.47	S
F-5	14680	14250	7210	-	4680	1.54	4780	1.51	B
F-6	15140	16520	7870	-	4940	1.59	5040	1.56	B
F-7	7674	9340	4670	-	4220	1.11	4550	1.03	B

P_{ut} = น้ำหนักบรรทุกประลัยโดยการคัดวิบัติ คำนวณตามมาตรฐาน ACI

P_{ue} = น้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากการทดลอง

V_u = แรงเฉือนประลัยจากการทดลอง

V_{cr} = แรงเฉือนขณะที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือน

V_{ci} = แรงเฉือนที่คำนวณตามมาตรฐาน ACI

V_{cip} = แรงเฉือนที่คำนวณตามสูตรที่เสนอ

F = การคัดวิบัติ

S = การเฉือนวิบัติ

B = การยึดรั้งวิบัติ