

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ในบทนี้ จะทำการประมวลผลจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเพื่อแสดงผลในรูปแบบของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัด และบรรยายพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบตัวอย่างทดสอบ

4.1 การปรับแก้ค่า

รูปที่ 4.1-4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนรูปในแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับเวลา สำหรับตัวอย่างทดสอบ CA21-1-3 , CA45-1-3 และ CB45-1-3 ซึ่งจากรูปที่ 4.1 สังเกตได้ว่าก่อนถึงจุดที่แรงกระทำสูงสุด ค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ทั้ง 4 ตัวมีค่าใกล้เคียงกัน ต่างจากช่วงหลังจากแรงกระทำเลยค่าสูงสุดแล้ว ซึ่งสังเกตได้ว่า การเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ เริ่มมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะเครื่องวัดการเคลื่อนที่ในทิศตะวันตกจะมีค่าที่แตกต่างกับทิศอื่นๆ มาก ทั้งนี้เป็นเพราะเกิดการโก่งงอของเหล็กยึดเครื่องวัดการเคลื่อนที่ในทิศนั้น อันเนื่องมาจากการที่ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบเฉือน ส่งผลให้เหล็กในด้านที่ถูกกดทับลงมาเกิดการโก่งงอ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อเกิดปัญหานี้ขึ้นในระหว่างการทดสอบ จะส่งผลให้ค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดการเคลื่อนที่มีความไม่น่าเชื่อถือเกิดขึ้น จึงต้องมีการปรับแก้ค่า เพื่อให้ได้ค่าระยะการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบที่สามารถนำไปใช้ได้

จากกราฟความสัมพันธ์ ระหว่างการเปลี่ยนรูปในแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับเวลา ในรูปที่ 4.1(ข) นี้ จะเห็นได้ว่า เส้นกราฟในช่วงก่อนที่แรงกระทำจะถึงค่าสูงสุด ค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเหล็กยึดเครื่องวัดการเคลื่อนที่ยังไม่เกิดการโก่งงอ เพราะยังไม่เกิดการเปลี่ยนรูปหรือเกิดรอยแตกร้าวภายในมากนัก ดังนั้น ค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ในช่วงก่อนที่แรงกระทำจะถึงค่าสูงสุด จะสามารถนำไปใช้ได้ แต่หลังจากนั้น ตัวอย่างทดสอบจะเกิดการเสียรูปมากขึ้น ซึ่งการเสียรูปนี้จะเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ส่งผลให้เกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องวัดการเคลื่อนที่แต่ละตัว แต่เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ เทียบกับการเคลื่อนที่ของหัวกดของเครื่องทดสอบแล้ว จะสังเกต

ได้ว่า ความชันของเส้นกราฟของการเคลื่อนที่ของการเคลื่อนที่ของหัวกด ซึ่งแสดงถึงอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของหัวกด ซึ่งเท่ากับ 1 มม./นาทิจ มีค่าใกล้เคียงกับความชันของเครื่องวัดการเคลื่อนที่ นั่นหมายความว่า หลังจากที่ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเกินค่าสูงสุดแล้ว จะเกิดความเสียหายขึ้นภายในตัวอย่างทดสอบ นั่นก็คือ รอยแตกร้าวภายในคอนกรีตจำนวนมาก ส่งผลให้การเปลี่ยนรูปตามแนวแกนในช่วงกลางที่ติดเครื่องวัดการเคลื่อนที่ มีการหดตัวไปด้วยอัตราเร็วเดียวกันกับอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกด ดังนั้นจึงสมมติให้ อัตราการเปลี่ยนรูปตามแนวแกน ที่วัดได้จากเครื่องวัดของตัวอย่างทดสอบหลังจากที่ตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเกินค่าสูงสุดแล้ว มีค่าเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกดของเครื่องทดสอบ ซึ่งจะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่ปรับค่าแล้วกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ค)

รูปที่ 4.2(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูปในแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับเวลาของตัวอย่างทดสอบ CA45-1-3 จะเห็นได้ว่าค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ในด้านทิศตะวันออก ทิศเหนือ และทิศใต้ มีความชันใกล้เคียงกับความชันของการเคลื่อนที่ของหัวกดด้วย ดังนั้นจึงสามารถใช้วิธีที่กล่าวมาแล้วทำการปรับแก้ค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนได้ รูปที่ 4.3(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูปในแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องมือวัดกับเวลาของตัวอย่างทดสอบ CB45-1-3 จะเห็นได้ว่าค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ทุกอันนั้น แตกต่างจากการเคลื่อนที่ของหัวกดเนื่องจากการโค้งงอของเหล็กจึงจำเป็นต้องทำการปรับแก้ค่า

รูปที่ 4.1(ค) – 4.3(ค) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่ปรับค่าแล้วกับเวลา สังเกตได้ว่า ในช่วงแรกก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะรับแรงถึงค่าสูงสุด อัตราเร็วของการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนมีค่าน้อยกว่าอัตราเร็วของหัวกด ทั้งนี้เป็นเพราะการที่เครื่องทดสอบมีช่องว่างระหว่างข้อต่อต่างๆ ภายในเครื่องทดสอบ และช่องว่างระหว่างหัวกดกับตัวอย่างทดสอบ อีกทั้งการที่ตัวอย่างทดสอบยังไม่เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กภายในขึ้น ทำให้ความชันของกราฟช่วงนี้มีค่าน้อยกว่าความชันของกราฟในช่วงหลังจากแรงกระทำสูงสุดแล้ว

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่ปรับแก้แล้วของตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5 ซึ่งสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบได้โดย การนำค่าแรงกระทำหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง

ทดสอบส่วนที่รับแรง นั้นก็คือส่วนที่เป็นคอนกรีต โดยคิดจากพื้นที่ของแผ่นเหล็กที่เจาะรูตามตำแหน่งเหล็กเสริมตามยาวที่นำมาประกบส่วนบนและส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ และค่าความเครียด คำนวณจากการนำค่าความยาวเกจของการวัดการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนจากเครื่องวัดการเคลื่อนที่ทั้งสี่ด้านมาเฉลี่ย เพื่อใช้เป็นค่าความยาวเกจเฉลี่ยนำมาหารค่าการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนที่ปรับแก้แล้ว เพื่อใช้เป็นค่าความเครียดเฉลี่ย โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5 แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำถึงค่าสูงสุด 25.97 MPa จากนั้นกำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบลดลงมาเรื่อยๆ จนมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 6.5 MPa ส่วนตัวอย่างทดสอบ CB45-1-1 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงได้ถึง 49.7 MPa จากนั้นกำลังของตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างรวดเร็วเหลือ 17 MPa แต่หลังจากนั้นเหล็กปลอกเริ่มทำงานจึงทำให้อัตราการลดลงของกำลังคอนกรีตช้าลง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ของคอนกรีตที่มีการโอบรัดสามารถกล่าวสรุปได้ว่า เมื่อตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำจนถึงค่าสูงสุดแล้วกำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบจะลดลง โดยที่อัตราการลดลงของกำลังรับน้ำหนักนั้นมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังที่จะกล่าวในบทต่อไป

4.3 ความเครียดในเหล็กเสริม

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่วัดได้จากเกจวัดความเครียด (strain gage) ที่ตำแหน่งต่างๆ กับเวลา สำหรับตัวอย่าง CA21-1-5 โดยที่เส้นตรง 2 เส้นที่ลากขนานกับแกนนอนแสดงค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2485 และ 1850 $\mu\epsilon$ ตามลำดับ (ความเค้นที่จุดครากของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวาง มีค่าเท่ากับ 502 และ 374 MPa ตามลำดับ) รูปที่ 4.18(ก) และ (ข) แสดงความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวที่ตำแหน่ง LI-NW และ LO-NW พบว่าเกิดความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวใกล้เคียงศูนย์ในช่วง 800 วินาทีแรก และมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ไม่เกินค่าความเครียดคราก ส่วนความเครียดในเหล็กเสริมตามขวาง พบว่ามีค่าไม่เกิน 100 ในช่วง 400 วินาทีแรก ต่อมาความเครียดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงวินาทีที่ 500 ซึ่งเป็นจุดที่เกิดแรงกระทำสูงสุด จากนั้น ที่เกจ HI-N ความเครียดลดลงมาเรื่อยๆ จนถึงค่าความเครียดครากที่วินาทีที่ 1368 ส่วนเกจ HO-N ความเครียดจะลดลงมาถึงวินาทีที่ 579 แล้วจึงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่ง ณ จุดนี้ เกิดการแยกออกของความเครียด คือ เกจ HI-N มีค่าลดลงเรื่อยๆ แต่เกจ HO-N ค่าเริ่มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดครากที่

เวลา 776 วินาที ส่วนเกจ HI-S และ HO-S เห็นได้ว่า ความเครียดมีค่าไม่เกินค่าความเครียดคราก ส่วนตัวอย่างทดสอบ CB45-1-5 ที่แสดงในรูปที่ 4.10 นั้น ความเครียดในเหล็กเสริมมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่าง CA21-1-5 คือ ความเครียดในเหล็กเสริมตามยาวมีไม่มาก ส่วนความเครียดในเหล็กปลอก HI-N กับ HO-N มีค่าความเครียดเป็นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดที่แรงกระทำสูงสุดที่เวลา 387 ต่อมา ความเครียดในเกจ HI-N ลดลงจนถึงจุดครากที่เวลา 789 วินาที ส่วนเกจ HO-N มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดครากที่เวลา 421 วินาที ส่วนเกจ HI-S และ HO-S เกิดการขาดหายของสัญญาณที่เวลา 490 และ 630 วินาที ตามลำดับ เนื่องจากเกิดการขาดของสายไฟของเกจวัด ความเครียดจากการที่คอนกรีตแตกกะเทาะออกแล้วไปดึงสายไฟจนขาด ส่วนตัวอย่างทดสอบ CB21-1-1 ที่แสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า ความเครียดในเหล็กปลอกทั้งสี่ตัว มีค่าไม่เกินค่าความเครียดที่จุดครากตลอดการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องจาก ตัวอย่างทดสอบนี้มีระยะเรียงเหล็กปลอกมาก การวิบัติของตัวอย่างทดสอบเกิดขึ้นในแกนคอนกรีตระหว่างชั้นของเหล็กปลอก ทำให้เกิดแรงในเหล็กปลอกน้อย

ความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกเป็นผลมาจากการที่ แกนคอนกรีตเกิดการแตกร้าวภายใน ทำให้เกิดการขยายปริมาตรออกทางด้านข้างจนไปดันเหล็กปลอกให้เกิดแรงโอบรัดขึ้น และเมื่อมีการเบ่งออกทางด้านข้างของคอนกรีตมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เหล็กปลอกโก่งออกจนเกิดการเสียรูป ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการโอบรัดของเหล็กปลอกจะดีก็ต่อเมื่อมีการโอบรัดที่ดี หรือมีอัตราส่วนโดยปริมาตรของเหล็กเสริมตามขวางมาก ส่วนคอนกรีตที่มีการโอบรัดที่ไม่ดี ประสิทธิภาพในการโอบรัดจะน้อยลง โดยจะเห็นได้จากการที่ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนโดยปริมาตรของเหล็กเสริม 0.23% เหล็กปลอกจะไม่เกิดการคราก เนื่องจากมีการโอบรัดที่ไม่ดี ส่วนความเครียดและแรงในเหล็กยื่นจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อ 4.5

4.4 พฤติกรรมที่สังเกตได้ระหว่างการทดสอบ

ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ มีพฤติกรรมความเสียหายในภาพรวมที่ใกล้เคียงกัน ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างกรณีของตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5 และ CB21-1-5 มากล่าวดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5 ซึ่งระบุตำแหน่งที่เกิดเหตุการณ์ที่สำคัญในระหว่างการทดสอบ โดยที่จะแสดงการบรรยายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นพร้อมภาพถ่ายประกอบในตารางที่ 4.1 ก่อนถึงจุดที่แรงกระทำสูงสุด ไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงที่ตัวอย่างทดสอบ แต่หลังจากค่าความเค้นเลย

จุดสูงสุดไม่นาน เกิดการแตกร้าวตามยาวที่มุมของตัวอย่างทดสอบ และรอยแตกร้าวจะขยายขนาดความกว้างและความยาวมากขึ้นเรื่อยๆ จนเกิดรอยแตกร้าวตามขวางที่ตำแหน่งของเหล็กปลอกช่วงกลางอันเนื่องมาจากการที่เหล็กปลอกเริ่มโดนคอนกรีตดันออก ที่ค่าความเครียดตามยาวเท่ากับ 0.0071 จากนั้นเริ่มเกิดการกระเทาะออกของคอนกรีตส่วนนอกสุดที่ความเครียดตามยาว 0.0094 และเกิดการกระเทาะออกเรื่อยๆ จนเห็นเหล็กปลอกอย่างชัดเจนที่ความเครียด 0.0168 และเหล็กปลอกเกิดการโค้งงอขึ้น ต่อจากนั้นคอนกรีตกระเทาะออกเรื่อยๆ จนเห็นเหล็กปลอกอย่างชัดเจน จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบเฉือน โดยมีระนาบเฉือนทำมุม 60 องศากับแนวราบ

พฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ CB21-1-5 แสดงในรูปที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.2 พบว่า ก่อนที่แรงกระทำสูงสุด ไม่สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงที่ตัวอย่างทดสอบ และหลังจากตัวอย่างทดสอบรับแรงกระทำเลยค่าสูงสุดจึงเกิดการแตกร้าวตามยาวที่ผิวคอนกรีต และเกิดการขยายขนาดของรอยแตกร้าว หลังจากนั้นเกิดการแตกร้าวตามขวางจนเกิดการกระเทาะออกของคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กปลอกที่ความเครียดตามยาวเท่ากับ 0.005 เมื่อเกิดการกระเทาะออกของคอนกรีตมากขึ้นเรื่อยๆ สังเกตเห็นเหล็กปลอกเริ่มอ้าออกเล็กน้อยที่ความเครียดเท่ากับ 0.01 จนกระทั่งที่ความเครียด 0.023 เหล็กปลอกเกิดการอ้าออกอย่างชัดเจน ซึ่งการกระเทาะออกของคอนกรีตยังคงเกิดขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเห็นเหล็กยื่นที่ความเครียด 0.035 ต่อมาเหล็กปลอกอีก 2 อันเกิดการอ้าออกเช่นกัน จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติที่ส่วนล่างของชิ้นตัวอย่าง

สรุปพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบในระหว่างการทดสอบ ซึ่งทุกตัวอย่างทดสอบไม่สังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงภายนอกได้ชัดเจนมากนักก่อนถึงจุดที่แรงกระทำสูงสุด นอกจากการแตกออกที่มุมบนและล่างของตัวอย่างทดสอบเล็กน้อย ซึ่งเป็นการแตกร้าวของส่วนที่ถูกกดทับและเป็นส่วนที่ไม่มีความแข็งแรงมากนัก และเมื่อตัวอย่างทดสอบรับน้ำหนักกระทำจนถึงค่าสูงสุดแล้ว กำลังรับน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบจะลดลง และเกิดรอยแตกร้าวตามยาวที่บริเวณมุมของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จากนั้นรอยแตกร้าวจะขยายความยาวและความกว้างมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งต่อมาจะเกิดรอยแตกร้าวตามขวางที่ตำแหน่งของเหล็กปลอกที่ช่วงกลาง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นผลมาจากการที่คอนกรีตเกิดการขยายตัวออกด้านข้างเพราะเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กภายใน (internal microcracking) จำนวนมากและเกิดการขยายปริมาตรออกด้านข้าง ส่งผลให้คอนกรีตไปดันเหล็กปลอกให้เกิดการโค้งตัวออกด้านข้าง และเมื่อรอยแตกร้าวเกิดการขยายขนาดมากขึ้นเรื่อยๆ ก็จะมีการกระเทาะออกของคอนกรีตส่วนนอกสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.16 แต่เนื่องจากตัวอย่างในการทดสอบในงานวิจัยนี้ไม่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (cover concrete)

ดังนั้นการกะเทาะออกของคอนกรีต จะเป็นการกะเทาะเข้าไปในส่วนที่เป็นแกนคอนกรีตเข้าไปเล็กน้อย และต่อจากนั้นจะเริ่มเกิดการแตกร้าวเป็นแนวทแยงทำมุมประมาณ 60-70 องศา กับแนวราบ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งการเกิดการแตกร้าวในลักษณะนี้จะส่งผลให้เกิดความเสียหายรวมจุดอยู่ในระนาบเฉือนนี้ ทำให้เหล็กปลอกในช่วงบริเวณที่ระนาบเฉือนนี้ผ่านเกิดการโก่งงอตามระนาบของรอยแตกร้าวนี้ จนเกิดการเสียรูปอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ดังนั้น เหล็กปลอกจะไม่เกิดการวิบัติ โดยการอ้าออกของเหล็กปลอกเนื่องจากเหล็กยื่นโก่งออกไปดันเหล็กปลอก และต่อจากนั้น เมื่อเหล็กปลอกเกิดการครากแล้ว จะเกิดการแตกร้าวและหลุดร่อนออกของคอนกรีตเข้าไปในแกนคอนกรีต และเกิดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ตามลำดับ

สำหรับตัวอย่างทดสอบ CA45-1-1 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีกำลังคอนกรีต 45 MPa ของอ 135 องศา และมีระยะเรียงของเหล็กเสริมตามยาว 20 เซนติเมตร ซึ่งกว้างมาก เมื่อตัวอย่างทดสอบรับน้ำหนักกระทำเลยค่าสูงสุดแล้ว กำลังรับแรงของตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างรวดเร็ว และเกิดการแตกร้าวอย่างรุนแรงที่ตำแหน่งของเหล็กปลอกช่วงกลาง และเกิดเสียงระเบิดดังขึ้น จากนั้นเกิดรอยแตกร้าวจำนวนมากและเกิดการกะเทาะออกของคอนกรีตส่วนนอก และเกิดรอยแตกร้าวเป็นแนวทแยงทำมุม ประมาณ 60 องศา กับแนวราบ เหมือนตัวอย่างทดสอบอื่นๆ ต่อจากนั้นเหล็กเสริมตามขวางโก่งงอตามระนาบเฉือนนั้น และที่สำคัญคือ เกิดการกะเทาะของคอนกรีตเข้าไปในส่วนที่เป็นแกนคอนกรีตค่อนข้างมาก อันเนื่องมาจากระยะเรียงของเหล็กเสริมตามขวางที่กว้างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบนี้คล้ายกับตัวอย่างทดสอบ CB45-1-1 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีกำลังคอนกรีต 45 MPa ของอ 90 องศา และมีระยะเรียงของเหล็กเสริมตามยาว 20 เซนติเมตร คือการเกิดเกิดการแตกร้าวอย่างรุนแรงที่ตำแหน่งของเหล็กปลอกช่วงกลาง และเกิดเสียงระเบิดดังขึ้น แต่รอยแตกร้าวเป็นระนาบทแยงทำมุม 30 องศา กับแนวราบ และเกิดเสียงระเบิดดังขึ้นอีกครั้งหลังจากการการกะเทาะออกของคอนกรีตส่วนนอกสุด ทำให้เกิดรอยแตกร้าวตามแนวยาวที่กลางเสาและเกิดการกะเทาะออกของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ส่วนรูปแบบการวิบัติคล้ายๆ กับตัวอย่างทดสอบ CA45-1-1 คือเกิดการกะเทาะลึกเข้าไปในส่วนที่เป็นแกนคอนกรีต

ข้อสังเกตของการวิบัติของตัวอย่างทดสอบส่วนมาก คือ

1. ของอของเหล็กปลอกจะไม่อ้าออกเนื่องจากเหล็กเสริมตามยาวโก่งตัวออก แต่จะเกิดการโก่งงอตามระนาบเฉือนของตัวอย่างทดสอบ และเกิดการอ้าออกของเหล็กปลอกของอ 90

องศา เนื่องจากการเสียรูปของเหล็กปลอกตามระนาบเฉือนนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และเหล็กปลอกของอ 135 องศาไม่เกิดการแอ่นออกแต่อย่างใด ดังแสดงในรูปที่ 4.23

2. ตัวอย่างทดสอบเกือบทุกตัวเกิดการวิบัติแบบเฉือน ระนาบทำมุมประมาณ 60-70 องศากับแนวราบ ยกเว้นตัวอย่าง CB45-1-1 ที่มีระนาบเฉือนทำมุมประมาณ 30 องศากับแนวราบ

3. ตัวอย่างทดสอบที่มีระยะเรียงของเหล็กปลอก 20 เซนติเมตร จะเกิดการกะเทาะของคอนกรีตลึกเข้าไปในแกนคอนกรีตมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีระยะเรียงของเหล็กปลอก 5 และ 10 เซนติเมตร

4.5 แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมตามยาว

เนื่องจากการทดสอบในงานวิจัยนี้ จะทำการให้แรงอัดกระทำตามแนวแกนต่อหน้าตัดเฉพาะส่วนที่เป็นคอนกรีตเท่านั้น และทำการลดแรงยึดเหนี่ยว (unbond) ระหว่างคอนกรีตกับเหล็กยื่น ดังที่กล่าวในบทที่แล้ว ดังนั้นเหล็กยื่นจะไม่ทำหน้าที่รับแรงกระทำตามแนวแกน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบโดยการติดเกจวัดความเครียด 2 ตัวที่ติดไว้ที่ด้านในและด้านนอกของเหล็กยื่น และสามารถนำมาคำนวณหาโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกนในเหล็กยื่นได้ดังนี้

- นำค่าอิลาสติกโมดูลัสของเหล็ก มาคูณกับค่าความเครียดที่วัดได้จากเกจวัดความเครียดตัวในและตัวนอก จะได้ความเค้นที่ผิวในและผิวนอกของเหล็กปลอก
- นำความเค้นที่ได้ มาคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกนจากสมการข้างล่าง

จาก

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{Mc}{I}$$

จะได้ว่า

$$\sigma_{in} = \frac{P}{A} - \frac{Mc}{I}$$

$$\sigma_{out} = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I}$$

โดยที่ σ_{in} และ σ_{out} คือ ความเค้นที่ได้จากการวัดความเครียดที่ตำแหน่งด้านในและด้านนอกของเหล็กเสริม ตามลำดับ ซึ่งค่าโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกนในเหล็กปลอกสามารถพิจารณาในเชิงความสัมพันธ์กับ พฤติกรรมของคอนกรีตที่มีการโอบรัดได้ดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงกราฟความเค้นตามแนวแกน โมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกนในเหล็กยื่นของตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5 และ CB21-1-1 ตามลำดับ รูปที่ 4.24 แสดงทิศทางและเครื่องหมายของโมเมนต์ดัดกับแรงตามแนวแกน โดยที่ค่าโมเมนต์บวกหมายถึงเหล็กยื่นมีการโก่งตัวออก โมเมนต์ลบหมายถึงเหล็กยื่นมีการโก่งตัวเข้า และค่าแรงตามแนวแกนเป็นบวกหมายถึงการดึง เป็นลบหมายถึงการกดอัด โดยมีค่าโมเมนต์ดัดคราก (ไม่คิดแรงตามแนวแกน) เท่ากับ 0.20 kN-m และแรงตามแนวแกนคราก (ไม่คิดโมเมนต์ดัด) เท่ากับ 101 kN

พิจารณาตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5 ในรูปที่ 4.25 พบว่า ที่จุดแรงกระทำสูงสุดค่าโมเมนต์ดัดของเหล็กยื่นมีค่าใกล้เคียงศูนย์ และค่าจะค่อนข้างคงที่จนถึงค่าความเครียดตามแนวแกนเท่ากับ 0.011 จึงมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเป็นการโก่งออกของเหล็กยื่นอันเนื่องมาจากการเกิดระนาบเฉือนในแกนคอนกรีต ส่งผลให้เกิดการไถลของตัวอย่างทดสอบตามระนาบเฉือนนั้น ทำให้ส่วนของคอนกรีตที่ไถลนั้น ไปดันเหล็กยื่นออกจนเกิดค่าโมเมนต์ดัดขึ้น ส่วนตัวอย่างทดสอบ CB21-1-1 ในรูปที่ 4.26 นั้น ช่วงแรกเหมือนกับตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5 คือ ค่าโมเมนต์ดัดเป็นศูนย์ที่จุดแรงกระทำสูงสุด แต่หลังจากนั้นไม่นานเริ่มเกิดค่าโมเมนต์ดัดขึ้นที่ค่าความเครียดตามแนวแกนเท่ากับ 0.002 แต่ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นนั้นไม่เกินค่าโมเมนต์ดัดคราก และเมื่อพิจารณาพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในรูปที่ 4.26(ก) จะเห็นได้ว่าตัวอย่างทดสอบ CB21-1-1 นั้นมีการลดลงของกำลังรับแรงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีปริมาณเหล็กเสริมตามขวางน้อย ถ้าพิจารณาที่จุด A คือ ที่ความเค้นตกลงเหลือ 50% ของความเค้นสูงสุด จะพบว่าเกิดโมเมนต์ดัดขึ้นในเหล็กเสริมตามยาวเพียง 0.035 kN-m เท่านั้น ซึ่งช่วงหลังจากนั้นเหล็กปลอกเริ่มแอ้ออกและเกิดการกะเทาะเข้าไปในส่วนของแกนคอนกรีตแล้ว ร่วมกับการเกิดระนาบเฉือนขึ้น ทำให้คอนกรีตเกิดการไถลไปดันเหล็กยื่นออกจนเกิดค่าโมเมนต์ดัดขึ้นมาก

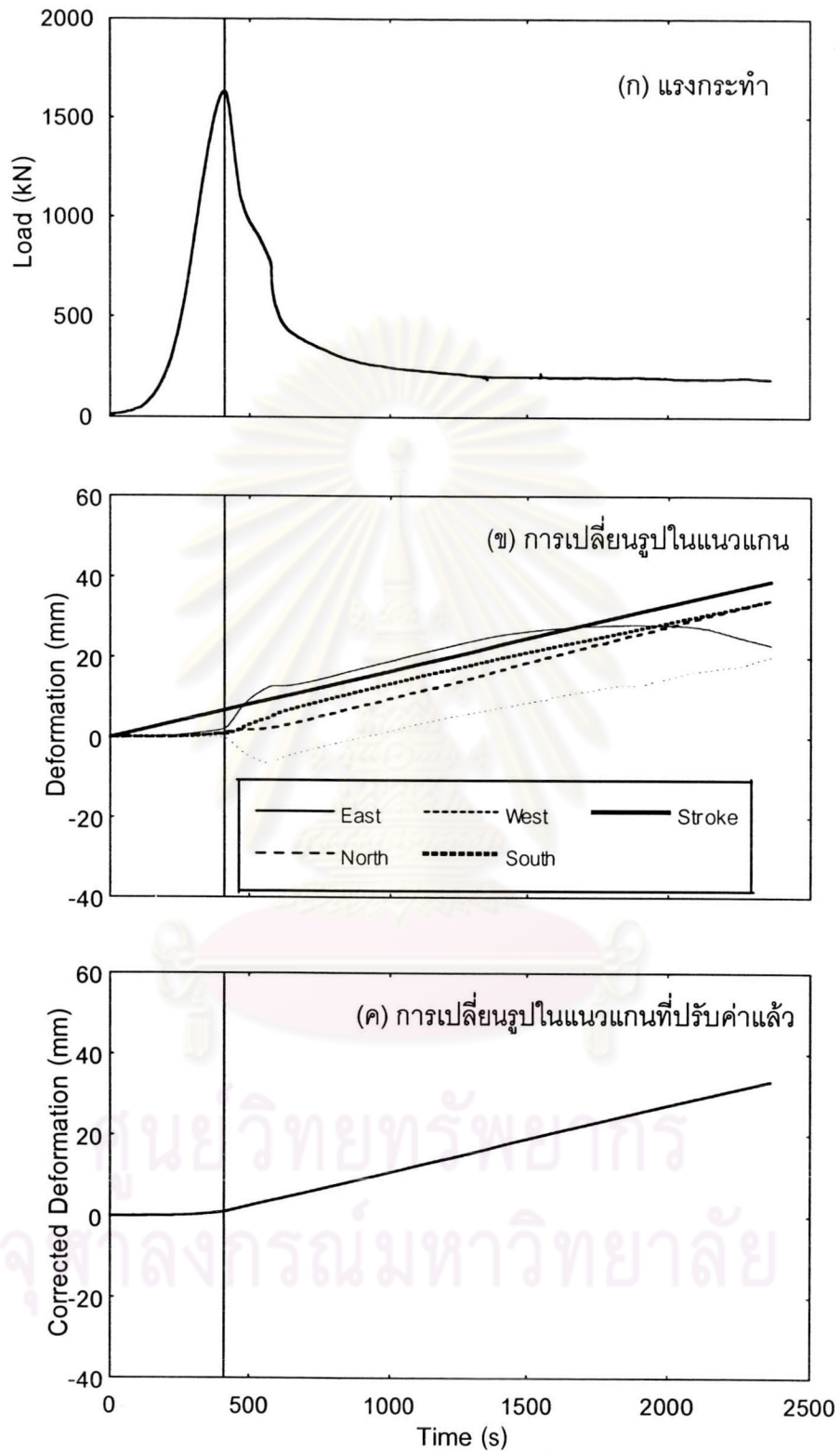
เมื่อพิจารณาในเรื่องของแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมตามยาว ดังแสดงในรูปที่ 4.25(ค) และ 4.26(ค) จะเห็นได้ชัดว่า แรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นมีค่าแกว่งอยู่ใกล้ค่าศูนย์ โดยค่าที่เกิดการแกว่งนั้นเป็นเพราะความไม่นิ่งของสัญญาณไฟฟ้าที่เข้ามาที่หน่วยรวบรวมข้อมูล อีกทั้งการตั้งค่าช่วงการเก็บข้อมูลที่สูง ทำให้ค่าที่วัดออกมามีค่าหยาบเกินไป

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงตามแนวแกนที่เกิดขึ้นในเหล็กยื่น มีค่าใกล้เคียงศูนย์มาก ในขณะที่ค่าโมเมนต์ดัดในรูปที่ 4.27 และ 4.28 ซึ่งแสดงค่าโมเมนต์ดัดในเหล็กเสริมตามยาวเป็นกราฟแท่งที่ตำแหน่งที่มีค่าความเค้นสูงสุด ที่ 80% ของค่าความเค้นสูงสุด และที่ 50% ของค่า

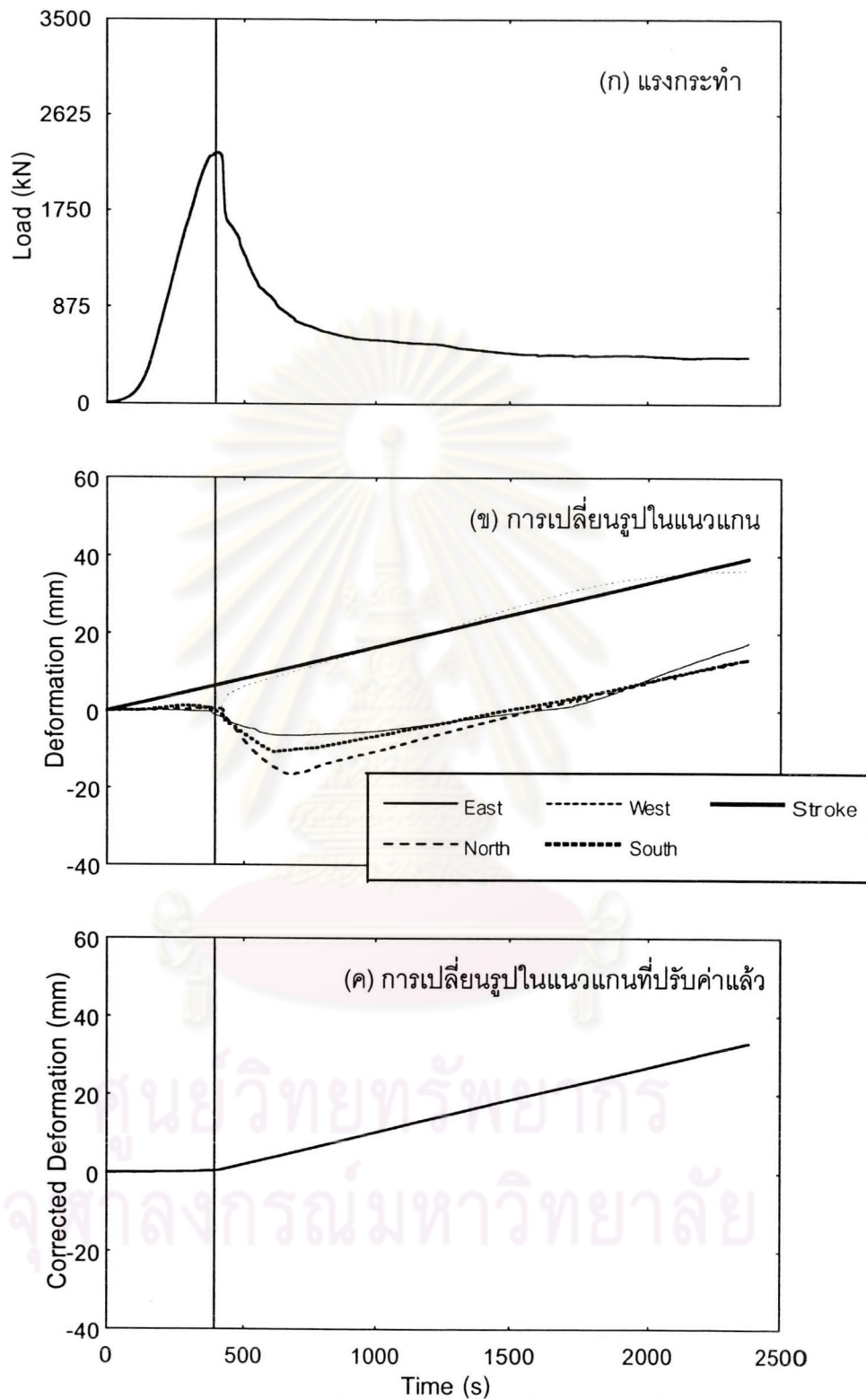
ความเค้นสูงสุด ซึ่งพบว่าค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมตามยาวที่มีค่าสูงสุดสำหรับทุกตัวอย่างทดสอบเป็น 2%, 9% และ 17% ของค่าโมเมนต์ดัดคราก ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดสอบด้วยวิธีนี้ เป็นการทดสอบโดยเหล็กเสริมตามยาวไม่ได้ช่วยรับแรงอัดกระทำตามแนวแกน อีกทั้งค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นก็มีค่าน้อยมากเช่นกัน ดังนั้น จึงสามารถตัดผลของเหล็กยื่นออกจากกำลังของคอนกรีตที่มีการโอบรัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

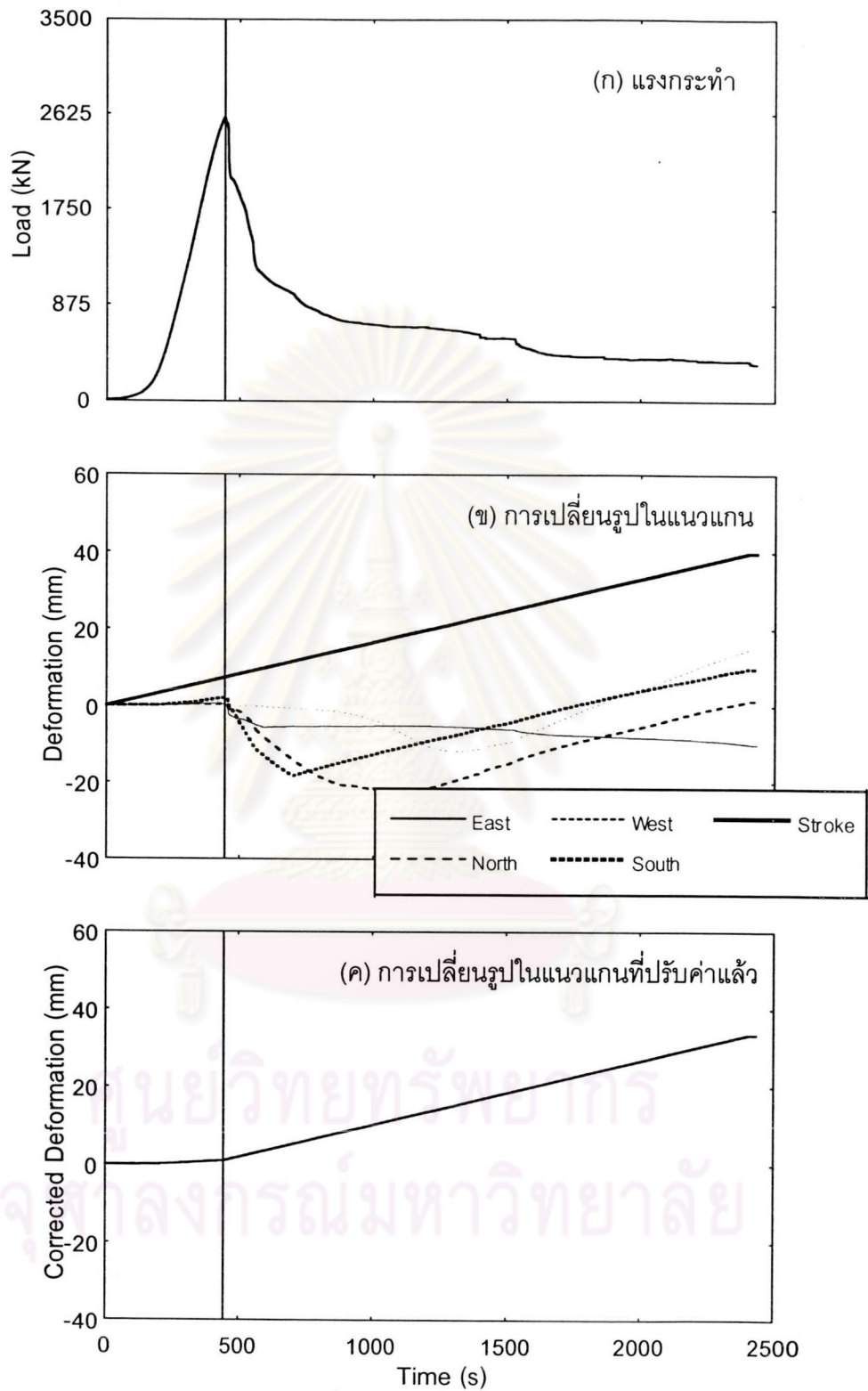


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงแรงกระทำและการเปลี่ยนรูปในแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องมือวัดสำหรับตัวอย่าง



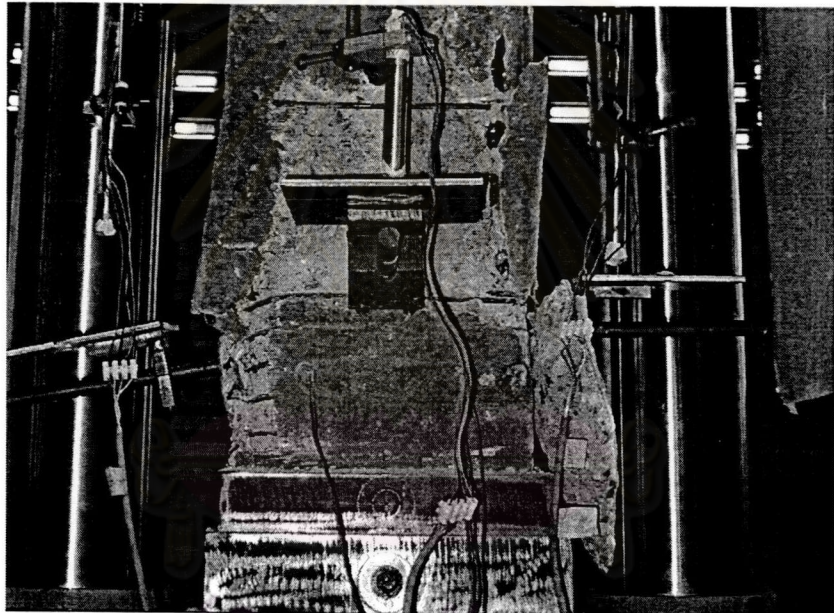
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงแรงกระทำและการเปลี่ยนรูปในแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องมือวัดสำหรับตัวอย่าง

CA45-1-3



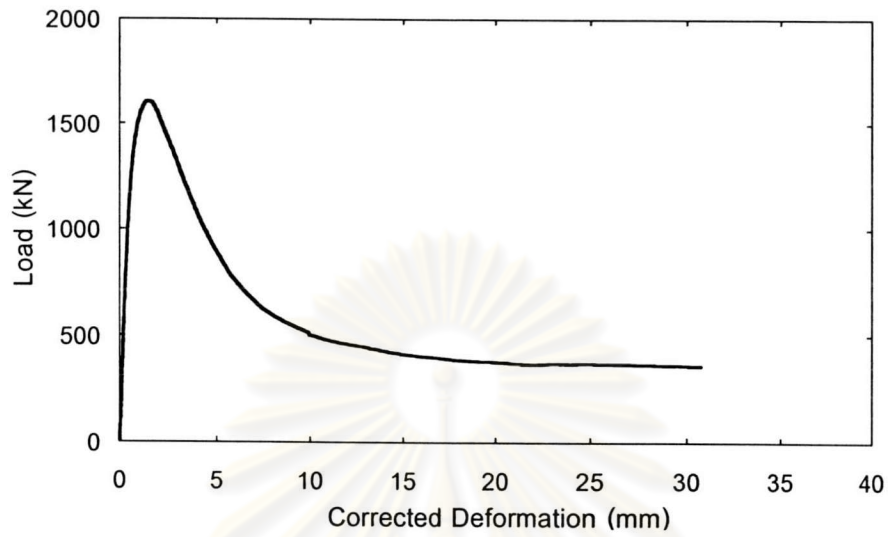
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงแรงกระทำและการเปลี่ยนรูปในแนวแกนที่วัดได้จากเครื่องมือวัดสำหรับตัวอย่าง

CB45-1-3

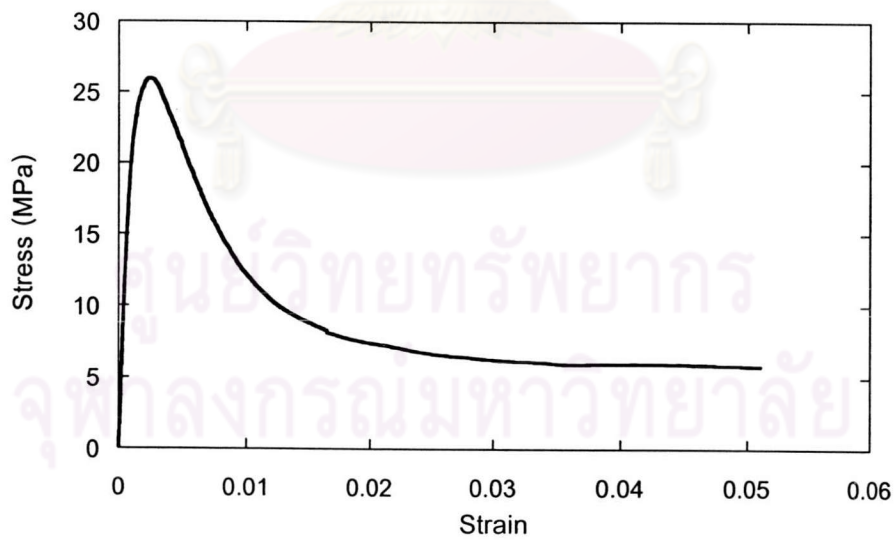


รูปที่ 4.4 เหล็กยึดเครื่องวัดการเคลื่อนที่ด้านล่างเกิดการโก่งงอลงในระหว่างการทดสอบ

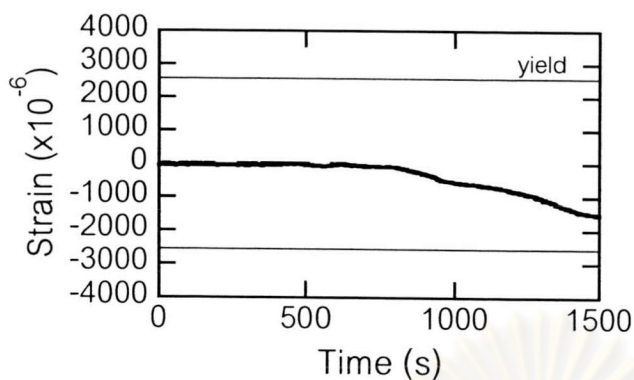
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



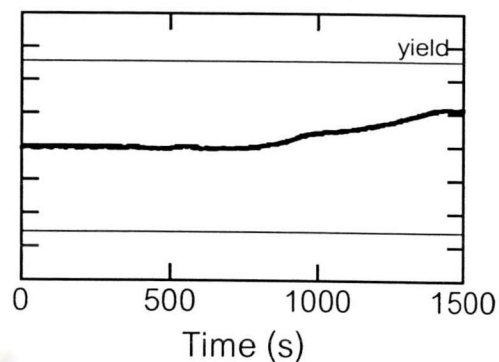
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับระยะหดตัวที่ปรับค่าแล้ว
สำหรับตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5



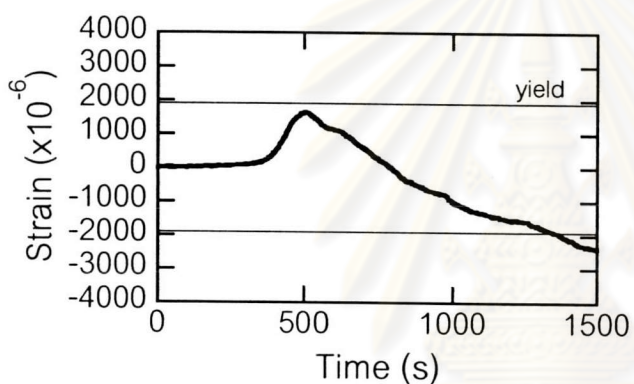
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด สำหรับตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5



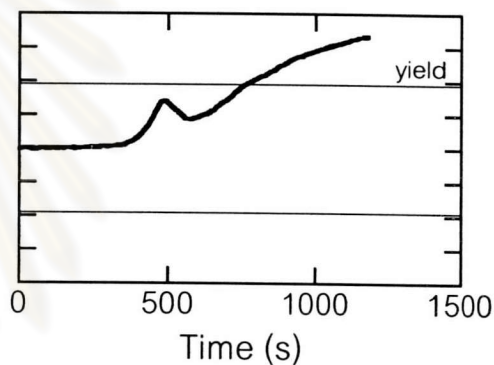
(ก) ตำแหน่ง LI-NW



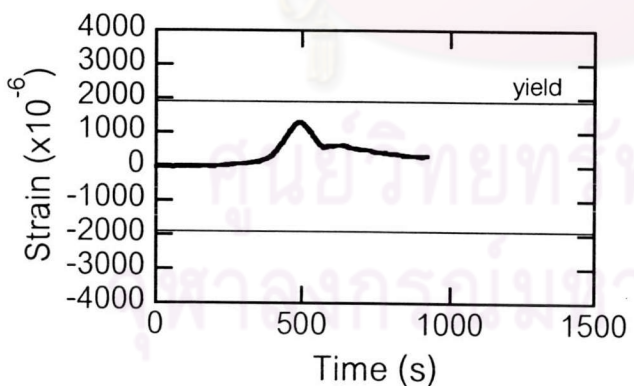
(ข) ตำแหน่ง LO-NW



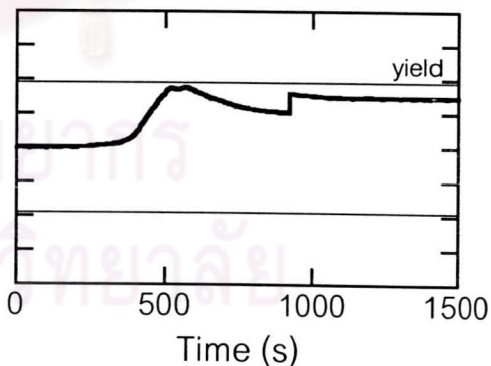
(ค) ตำแหน่ง HI-N



(ง) ตำแหน่ง HO-N

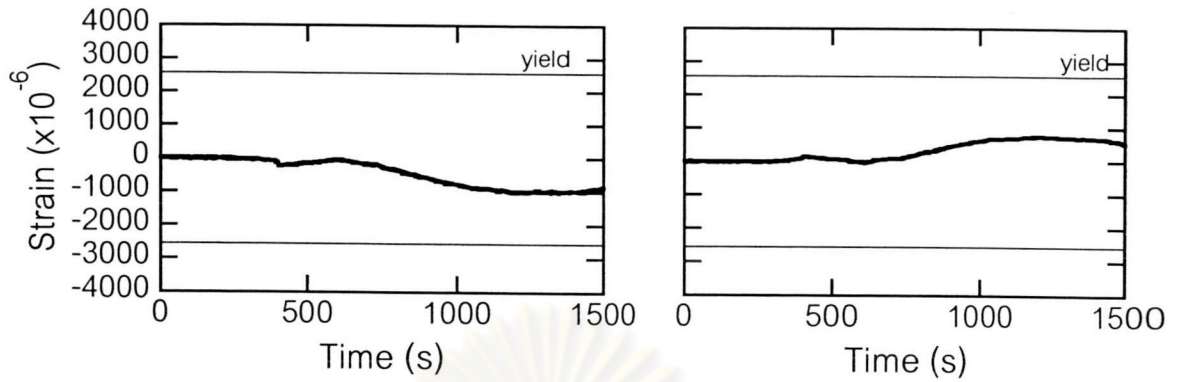


(จ) ตำแหน่ง HI-S



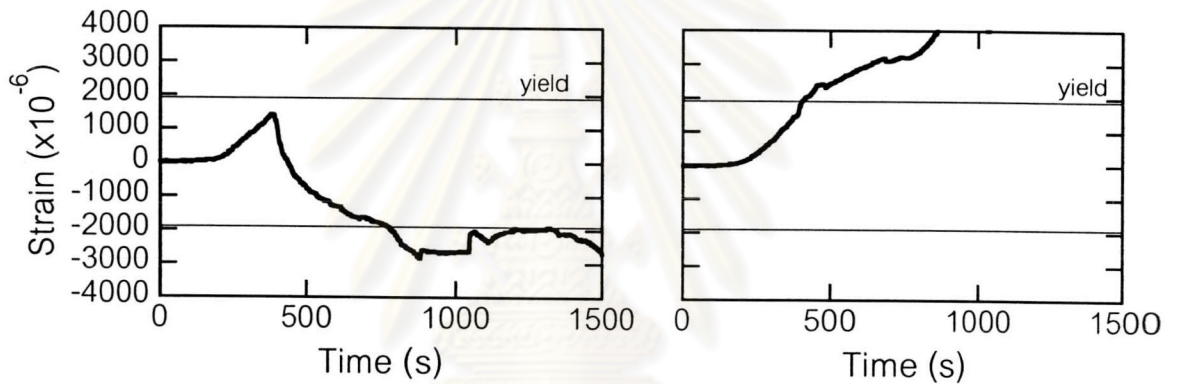
(ฉ) ตำแหน่ง HO-S

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่วัดได้จากเกจวัดความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ กับเวลา สำหรับตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5



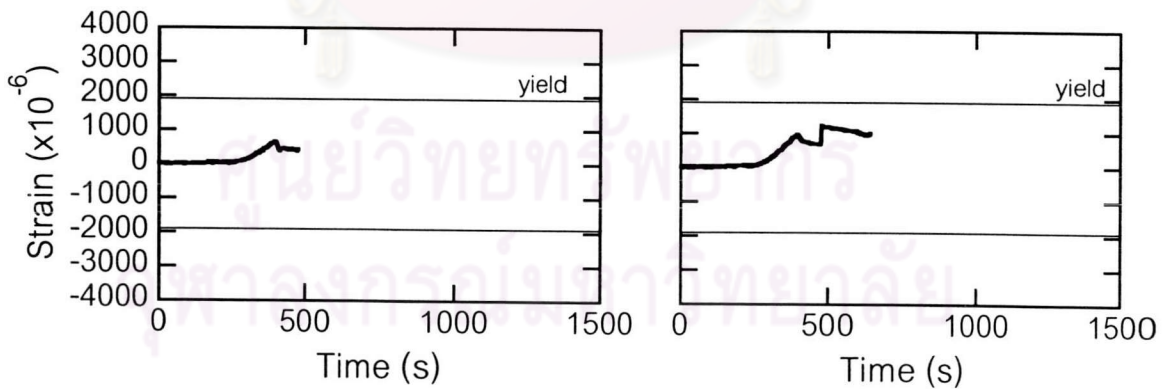
(ก) ตำแหน่ง LI-NW

(ข) ตำแหน่ง LO-NW



(ค) ตำแหน่ง HI-N

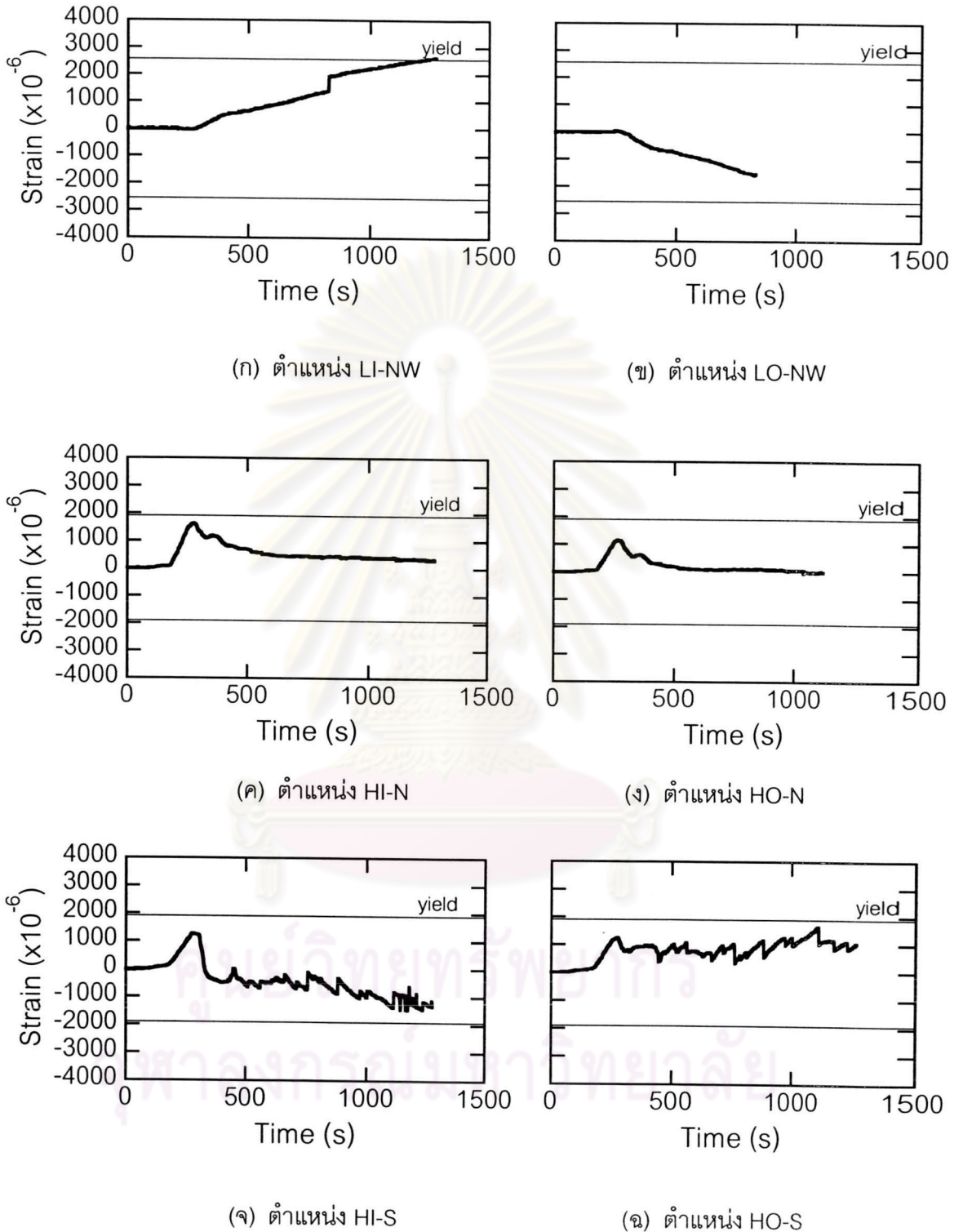
(ง) ตำแหน่ง HO-N



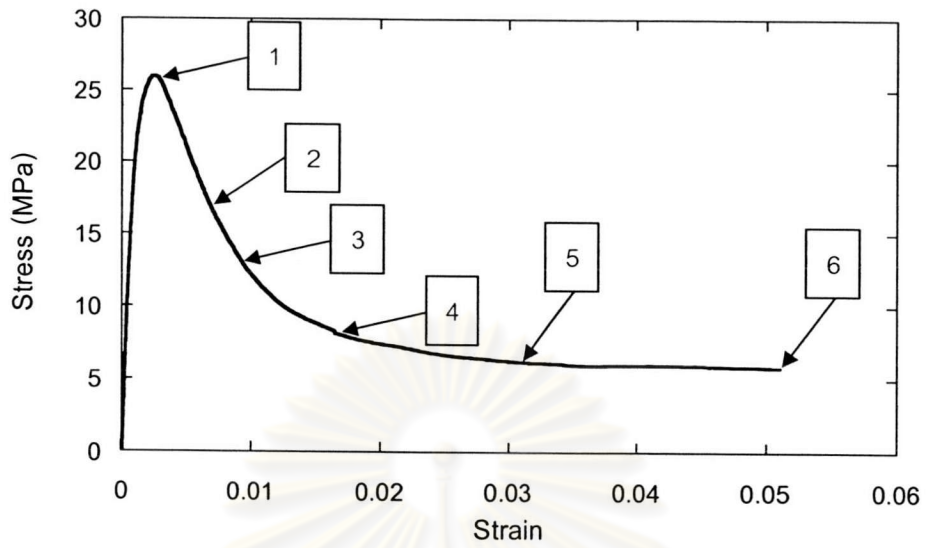
(จ) ตำแหน่ง HI-S

(ฉ) ตำแหน่ง HO-S

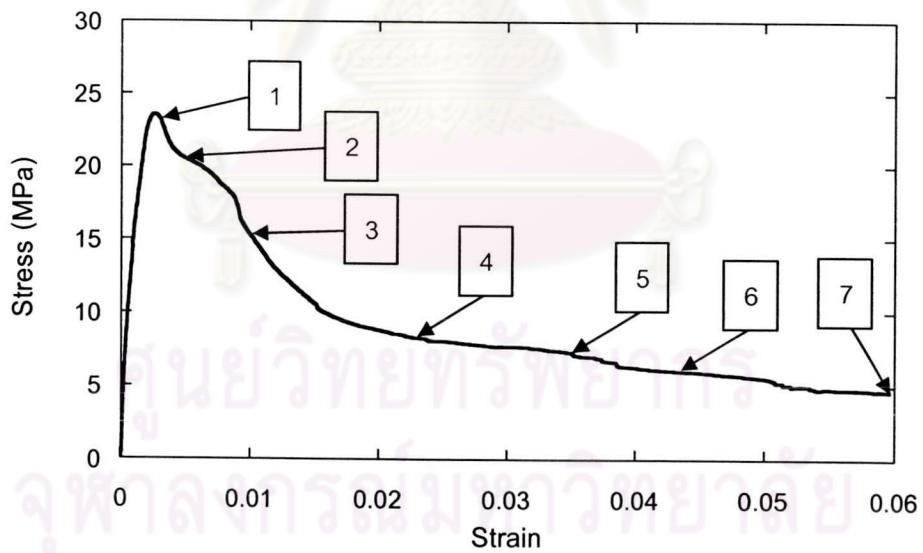
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่วัดได้จากเกจวัดความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ กับเวลา สำหรับตัวอย่างทดสอบ CB45-1-5



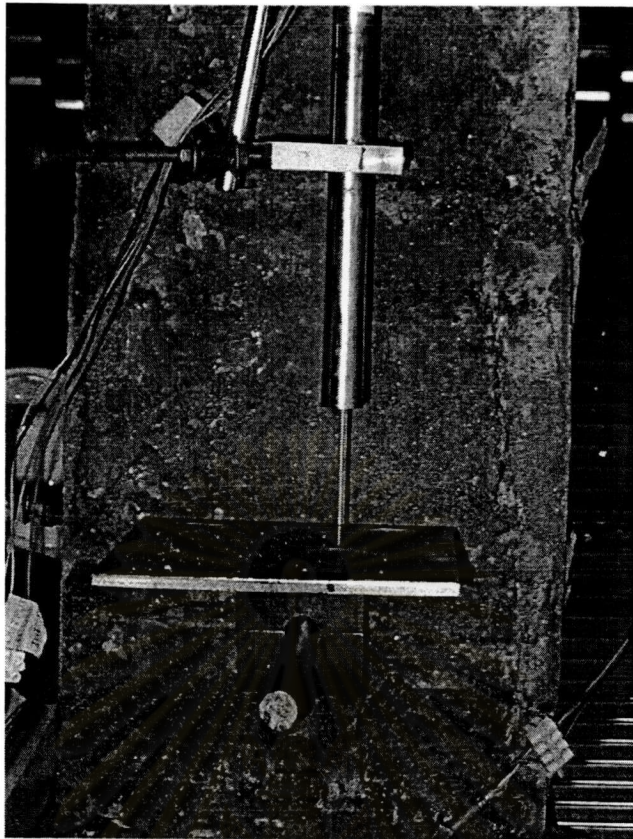
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่วัดได้จากเกจวัดความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ กับเวลา สำหรับตัวอย่างทดสอบ CB21-1-1



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด
สำหรับตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด
สำหรับตัวอย่างทดสอบ CB21-1-5



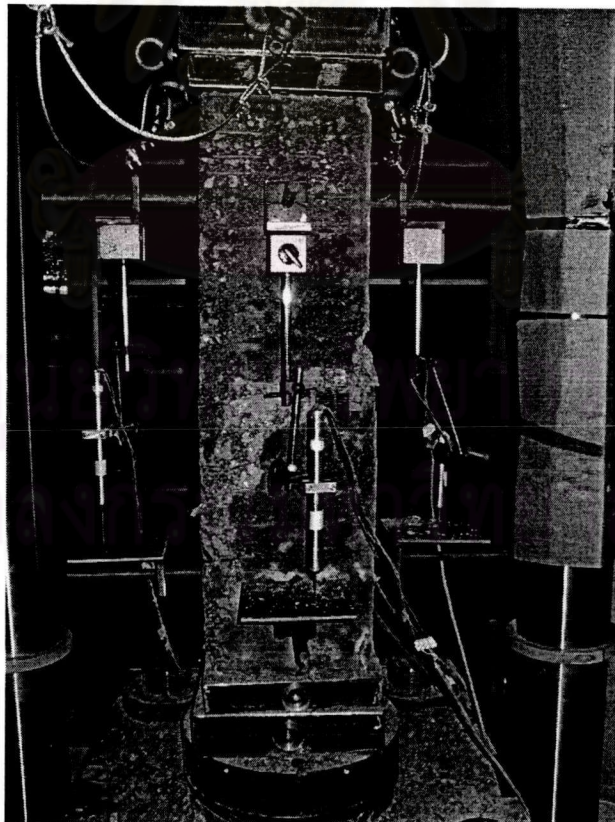
รูปที่ 4.14 รอยแตกร้าวตามแนวยาวเกิดขึ้นที่มุมของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.15 เกิดรอยแตกร้าวตามขวางตรงตำแหน่งของเหล็กปลอก



รูปที่ 4.16 คอนกรีตส่วนนอกสุดเกิดการกะเทาะออก



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกร้าวในแนวทแยง ทำมุมประมาณ 60 องศากับแนวราบ



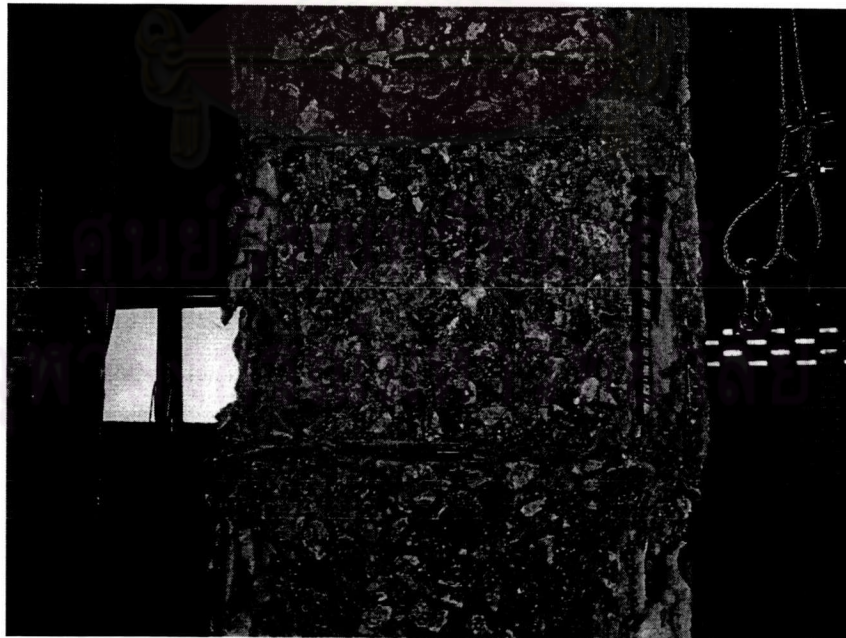
รูปที่ 4.18 เหล็กเสริมตามยาวเกิดการโก่งงอตามระนาบเจ็อนจนเสียรูปอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.19 เกิดการกะเทาะเข้าไปในส่วนคอนแกนคอนกรีตเล็กน้อย



รูปที่ 4.20 ตัวอย่างทดสอบหลังการทดสอบที่เกิดการวิบัติแบบเฉือน ระบายท่ามุม 60 กับแนวราบ



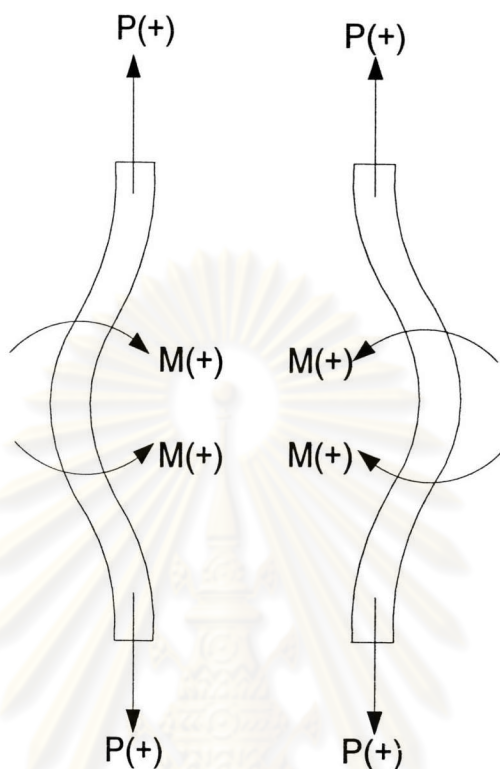
รูปที่ 4.21 การกะเทาะเข้าไปในส่วนของแกนคอนกรีตสำหรับตัวอย่างทดสอบ CA45-1-1



รูปที่ 4.22 เหล็กปลอก 90 องศาเกิดการชำรุดเนื่องจากการโก่งงอตามระนาบเฉือน

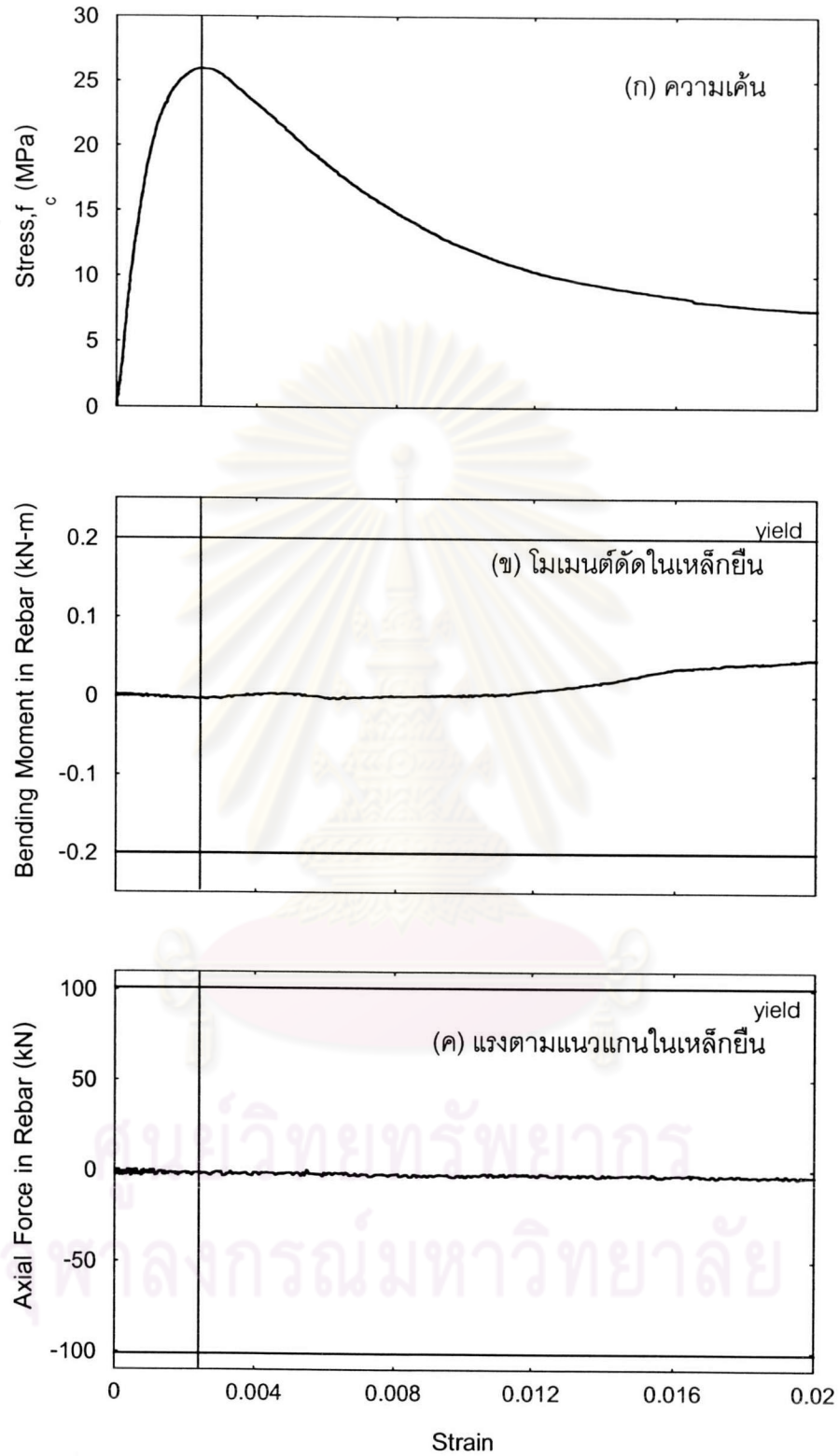


รูปที่ 4.23 เหล็กปลอก 135 องศาไม่เกิดการชำรุดแต่เกิดการโก่งงอตามระนาบเฉือน

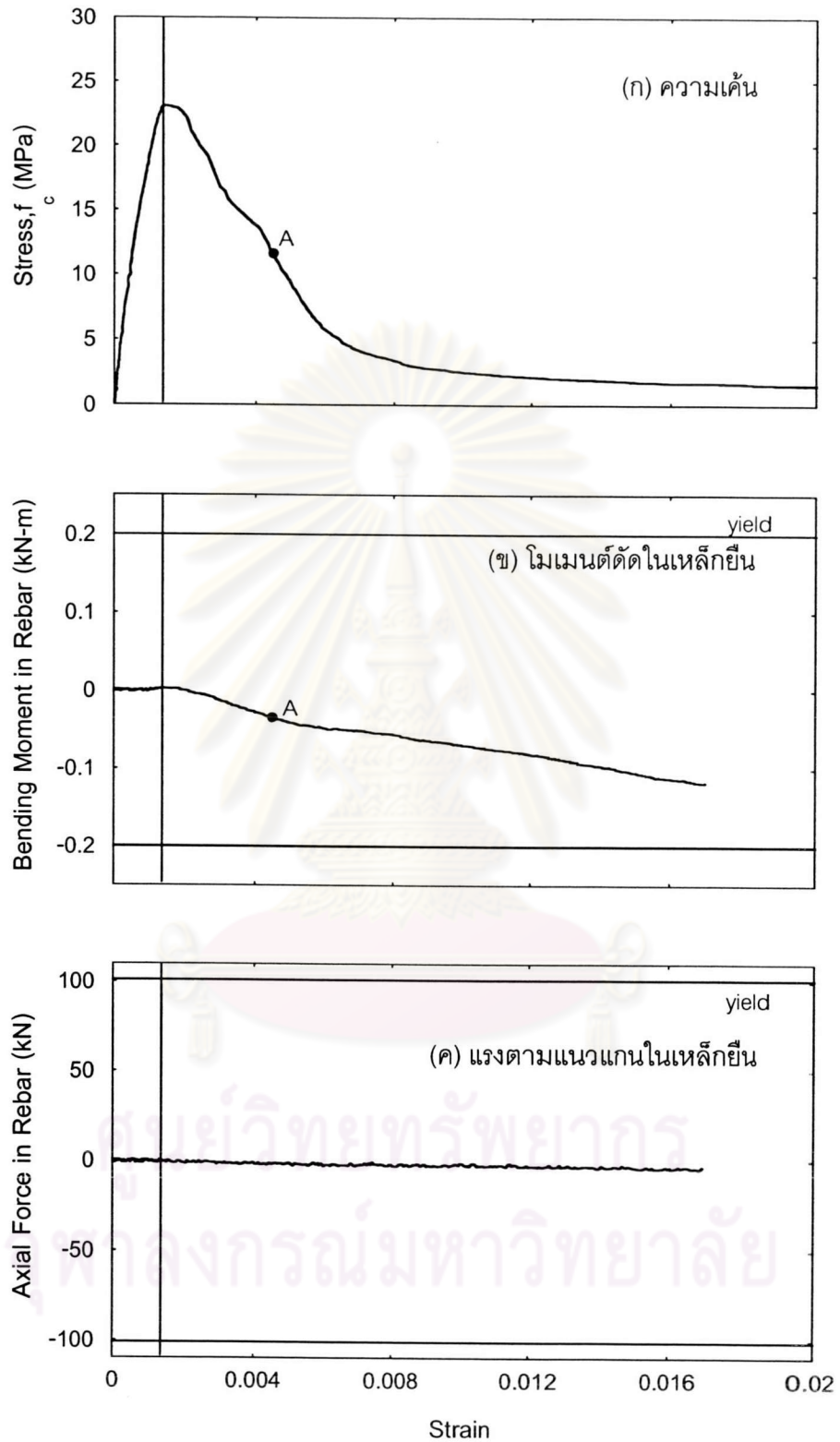


รูปที่ 4.24 แสดงการกำหนดเครื่องหมายของค่าโมเมนต์ดัดและแรงตามแนวแกนในเหล็กยื่น

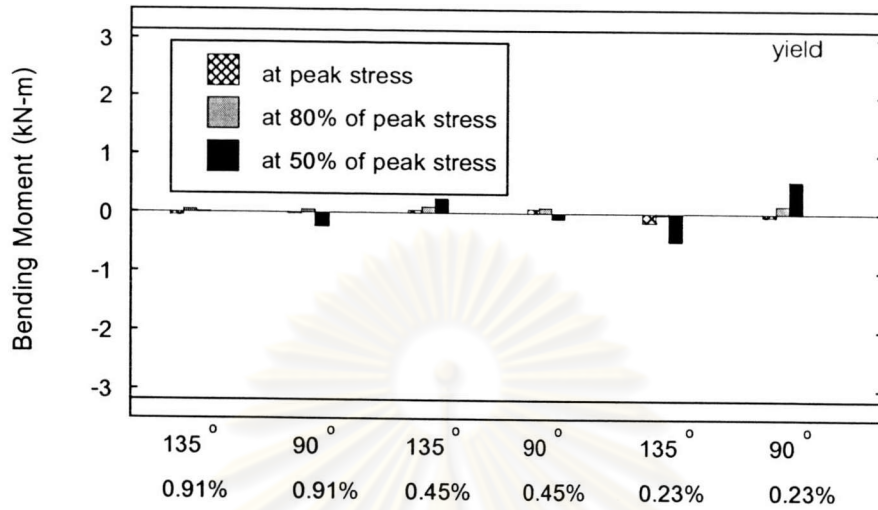
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



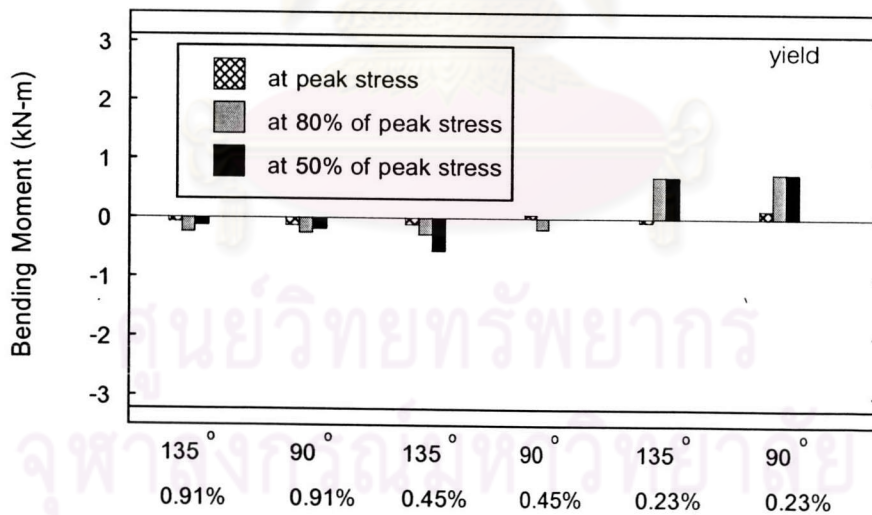
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความเค้น โมเมนต์ดัด และแรงตามแนวแกนในเหล็กยื่น
สำหรับตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความเค้น โมเมนต์ดัด และแรงตามแนวแกนในเหล็กยื่น
สำหรับตัวอย่างทดสอบ CB21-1-1



รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์คดในเหล็กยื่น สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีกำลังคอนกรีตออกแบบ 21 MPa

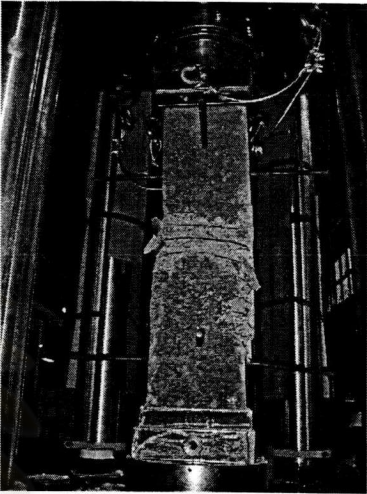


รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์คดในเหล็กยื่น สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีกำลังคอนกรีตออกแบบ 45 MPa

ตารางที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมและภาพถ่ายประกอบที่เหตุการณ์ต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5

เหตุการณ์	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพถ่ายประกอบ
1	เกิดรอยแตกร้าวเล็กๆ ตามแนวยาวที่ขอบนอกของตัวอย่างทดสอบ	
2	รอยแตกร้าวเดิมขยายความกว้างและความยาว รวมทั้งเกิดรอยแตกร้าวตามขวางที่ตำแหน่งของเหล็กปลอกที่เริ่มเกิดการโค้งออก	
3	เริ่มเกิดการกะเทาะออกของคอนกรีตจนสามารถเห็นเหล็กปลอกได้	
4	คอนกรีตกะเทาะออกมากและเห็นเหล็กปลอกโค้งอย่างชัดเจน	
5	คอนกรีตกะเทาะออกมากขึ้นจนเห็นเหล็กยื่น	

ตารางที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมและภาพถ่ายประกอบที่เหตุการณ์ต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบ CA21-1-5 (ต่อ)

เหตุการณ์	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพถ่ายประกอบ
6	ตัวอย่างทดสอบหลังการทดสอบ สังเกตได้ว่าเกิดความเสียหายแบบเฉือนระนาบทำมุมประมาณ 60 องศา กับแนวราบ และเหล็กปลอกไม่เกิดการแอ่นออก แต่จะเกิดการเสียรูปอย่างชัดเจน	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 แสดงพฤติกรรมและภาพถ่ายประกอบที่เหตุการณ์ต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบ CB21-1-5

เหตุการณ์	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพถ่ายประกอบ
1	เกิดรอยแตกร้าวตามแนวยาวที่ขอบนอกของตัวอย่างทดสอบ	
2	คอนกรีตกะเทาะออกจนเห็นเหล็กปลอก	
3	เหล็กปลอกของอ 90 องศาเริ่มแอ้ออกเล็กน้อย	
4	เหล็กปลอกแอ้ออกอย่างชัดเจน	
5	คอนกรีตกะเทาะออกมากจนสามารถเห็นเหล็กยื่น	

ตารางที่ 4.2 แสดงพฤติกรรมและภาพถ่ายประกอบที่เหตุการณ์ต่างๆ ของตัวอย่างทดสอบ CB21-1-5 (ต่อ)

เหตุการณ์	พฤติกรรมที่เกิดขึ้น	ภาพถ่ายประกอบ
6	เหล็กปลอกจำนวนมากเกิดการแอ่อกมาก	
7	ตัวอย่างทดสอบหลังการทดสอบ สังเกตได้ว่าความเสียหายเกิดขึ้นบริเวณส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบ และเหล็กปลอกจำนวนมากเกิดการแอ่อก	