บทที่ 3

การทดสอบและผลการทดสอบ

3.1 การเตรียมเครื่องมือและตัวอย่างทดสอบ

หลังจากบ่มคอนกรีตในอากาศจนได้อายุประมาณ 90 วัน จึงเริ่มลงมือติดอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อการทดสอบ ในการทดสอบนี้สิ่งที่สำคัญที่สุด คือจะต้องควบคุมหัวท้ายของตัวอย่างทดสอบให้เรียบและได้ระดับ และสามารถบังคับให้ตัวอย่างทดสอบอยู่ในแนวดิ่ง นอกจากนี้ยังจะต้องติดเกจวัดความเครียดที่ผิวคอนกรีตและที่เหล็กเสริมยืน เกจวัดความเครียดที่ใช้มี 2 ชนิด คือ ชนิดเชิงกล (Mechanical strain gauge) และชนิดไฟฟ้า (Electrical strain gauge)

เกจวัดความเครียดไฟฟ้า ใช้สำหรับวัดความเครียดในเหล็กเสริมยืนทั้งหมด ส่วนที่ผิวคอนกรีตจะใช้เฉพาะตัวอย่างทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์ของน้ำหนักบรรทุกเป็นตัวแปรเท่านั้น และจะติดเฉพาะที่ผิวที่รับแรงอัดเพียงด้านเดียว ในการติดเกจชนิดไฟฟ้าในเหล็กเสริมยืนได้กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.3 ส่วนในการติดเกจวัดความเครียดชนิดไฟฟ้าที่ผิวคอนกรีตจะต้องขัดผิวให้เรียบ ฉาบผิวด้วยอีพ็อกซี่ แล้วขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดให้ถึงเนื้อคอนกรีต การขัดและฉาบอีพ็อกซี่อาจต้องทำหลายครั้งจนอีพ็อกซี่เข้าไปอุดรูฟองอากาศเล็ก ๆ ในเนื้อคอนกรีตได้หมด หลังจากนั้นจึงติดเกจเข้ากับผิวคอนกรีตอาศัยขั้นตอนเช่นเดียวกับการติดที่ผิวเหล็กเสริมยืนดังได้กล่าวแล้ว เกจที่ใช้ติดคอนกรีตนี้มีความยาวเกจ 120 มม. เป็นแบบฟอยล์ ความต้านทาน 120 โอห์ม และเกจเฟคเตอร์ 2.15 ในการต่อเกจวัดความเครียดชนิดไฟฟ้าทั้งหมดเข้าเครื่องอ่าน (Strain Indicator) โดยใช้ระบบครึ่งวงจร (Half Bridge) ซึ่งการต่อแบบนี้จะต้องมีเกจดัมมี่เพื่อช่วยหักล้างผลอันเกิดจากเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ

ส่วนเกจวัดความเครียดชนิดเชิงกลซึ่งมีระยะเกจ 20 ซม. จะอ่านค่าด้วยเครื่องวัดระยะแบบหน้าปัทม์ (Dial Indicator) ซึ่งมีความละเอียดถึง 0.002 มม. รูปที่ 3.1 ก แสดงการ

ติดเม็ดกระดุมของตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กยืนเป็นตัวแปร ตำแหน่งที่ติดจะติดที่กึ่งกลางพื้นที่ของแต่ละหน้า หน้าหนึ่ง ๆ จะติดเม็ดกระดุม 3 ชุด แล้วใช้ค่าเฉลี่ย ส่วนรูปที่ 3.1 ข แสดงการติดเม็ดกระดุมของตัวอย่างทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์ของน้ำหนักบรรทุกเป็นตัวแปร จะติดเพียงสองหน้า คือหน้าที่ตั้งฉากกับแกนคัด โดยติด 5 จุด จุดแรกที่กึ่งกลางพื้นที่ จุดสองและสามห่างออกไปจากจุดแรก 3.0 ซม. มาทางด้านรับแรงอัดและแรงดึงตามลำดับ จุดที่สี่และห้าห่างออกไปจากจุดแรก 6.0 ซม. มาทางด้านรับแรงอัดและแรงดึงตามลำดับ จุดหนึ่ง ๆ จะใช้เม็ดกระดุม 2 ชุด แล้วใช้ค่าเฉลี่ย

ในการวัดการโก่งงอของเสา จะใช้เกจวัดแบบหน้าปัทม์ที่อ่านค่าได้ละเอียด 0.01 มม. ตำแหน่งที่วัดจะวัดที่กึ่งกลางความยาวเสา โดยใช้ขายึด ยึดเกจให้แน่นกับพื้น เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมยืนเป็นตัวแปรจะติดทั้งสี่ด้าน ส่วนตัวอย่างทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์ของน้ำหนักบรรทุกเป็นตัวแปรจะติดเพียงแกนเดียวและด้านเดียว คือที่หน้ารับแรงดึง

ในการเตรียมผิวหัวท้ายของตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมยืนเป็นตัวแปรจะฉาบหัวเสาให้เรียบและได้ระดับโดยใช้อีพ๊อกซี่ที่รับแรงอัดได้ถึง 1000 กก/ซม^2. หลังจากฉาบแล้วทิ้งไว้อย่างน้อยหนึ่งวันก่อนทดสอบ ส่วนตัวอย่างทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์ของน้ำหนักบรรทุกเป็นตัวแปร จะให้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบคมมีด โดยการใช้เหล็กแผ่นหนา 3.8 ซม. กว้าง 5.0 ซม. ยาวเท่ากับความกว้างหน้าตัดเสา คือ 15.0 ซม. กลึงให้เป็นร่องโค้งกลม ใช้เหล็กเหนียวกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 $\frac{1}{2}$ นิ้ววางลงไปตรงร่องนั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ในกรณีการทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์สูงสุด คือมีค่า ∞ ซึ่งรับแรงคัดอย่างเดียว จะทำการทดสอบแบบการรับแรงคัด โดยให้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสองจุด (Two point Loading) ระยะกระทำของแรง กระทำที่หนึ่งในสามของช่วงยาว จุดที่แรงกระทำจะใช้เหล็กแผ่นที่กลึงให้เป็นร่องแล้วใช้เหล็กกลมวางในร่องเพื่อให้เกิดแรงเป็นจุด ดังปรากฏในรูปที่ 3.3 ในการถ่ายน้ำหนักจากเครื่องทดลองลงสู่ตัวอย่างทดสอบโดยผ่านเหล็กรูปตัวไอ (I-beam) ที่มีความแข็ง

แรงเกินพอที่จะถ่ายน้ำหนักได้

ในการทดสอบตัวอย่างทดสอบทุกครั้งจะใช้เครื่อง Amsler 500 ตัน ที่มีความละเอียดสอดคล้องกับ BS1610 Grade A กล่าวคือคลาดเคลื่อนได้เพียง 0.2% ของค่าที่อ่านได้ ในการบรรทุกน้ำหนักจะแบ่งน้ำหนักบรรทุกเป็นขั้นตอน (Load interval) โดยแบ่งออกประมาณครั้งละ 5% ของน้ำหนักสูงสุดที่คาดว่าจะรับได้ และเมื่อบรรทุกน้ำหนักแต่ละขั้นได้แล้วจะต้องรักษาน้ำหนักนั้นให้คงที่ไว้จนกว่าจะจดบันทึกข้อมูลแล้วเสร็จ จึงจะทำการเพิ่มน้ำหนักขั้นต่อไป

3.2 การทดสอบตัวอย่าง

ในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องป้องกันอันตรายซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างทดสอบ จึงต้องติดตั้งโครงเหล็กล้อมไว้ดังปรากฏในรูปที่ 3.4 และเมื่อเตรียมเครื่องมือและตัวอย่างทดสอบเรียบร้อยแล้ว ก็จะดำเนินการทดสอบตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมยืนเป็นตัวแปร จะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกครั้งละ 10 ตัน แล้วอ่านข้อมูลต่าง ๆ ให้ครบถ้วนในแต่ละครั้ง ข้อมูลเหล่านี้ประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ ความเครียดในคอนกรีตซึ่งจะอ่านจากเกจวัดความเครียดเชิงกล อ่านความเครียดในเหล็กเสริมยืนจากเครื่องวัดความเครียด และอ่านการเคลื่อนตัวด้านข้างจากเกจวัดแบบหน้าปัทม์ ขณะเดียวกันก็จะมีการบันทึกรอยแตกร้าวของตัวอย่างควบคู่กันไปด้วย อนึ่ง การกะประมาณการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาจะใช้ ACI-318-77 Code[23] เป็นแนวทาง เมื่อการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกใกล้จุดประลัยการวัดความเครียดของคอนกรีตโดยใช้เกจวัดความเครียดเชิงกลต้องระมัดระวังอันตรายอันเนื่องจากตัวอย่างทดสอบเกิดระเบิด กล่าวคือ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการแล้วจะรอสักประมาณ 1 นาทีจึงเข้าทำการวัด ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความแน่ใจว่าไม่ระเบิดที่จุดนั้น ผลทดสอบและลักษณะการวิบัติจะได้กล่าวต่อไป

ส่วนตัวอย่างทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์ของน้ำหนักบรรทุกเป็นตัวแปร การเพิ่มน้ำหนักบรรทุกแต่ละตัวอย่างไม่เท่ากัน โดยเลือกเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็น 10, 5, 2, 1 และ 0.5 ตัน

สำหรับตัวอย่างทดสอบ CE 000, CE 055, CE 095, CE 165 และ CE ∞ ตามลำดับ การบันทึกข้อมูลกระทำในลักษณะดังกล่าวแล้วข้างต้น

3.3 ผลการทดสอบ

1. การทดสอบกลุ่มที่มีเหล็กเสริมยืนเป็นตัวแปร เนื่องจากตัวอย่างทดสอบในกลุ่มนี้มีขนาดเท่ากันหมด การจัดเตรียมการทดสอบจึงเหมือนกัน โดยการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นเป็นชั้น ๆ ในแต่ละชั้นจะหยุดอ่านค่าต่าง ๆ ตลอดจนบันทึกรอยแตกร้าวต่าง ๆ ดังกล่าวแล้วข้างต้น สำหรับการจดบันทึกการโก่งงอของเสาจะเลิกทำการวัดเมื่อน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 70% ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คาดเกณฑ์ไว้ ทั้งนี้เพื่อป้องกันอันตรายซึ่งอาจเกิดขึ้นได้แก่เกจวัดการโก่งงออันเนื่องมาจากการระเบิดของเสา ส่วนเกจวัดความเครียดชนิดเชิงกลได้พยายามทำต่อไปเรื่อย ๆ จนใกล้จุดวิบัติที่สุด ซึ่งต้องทำด้วยความระมัดระวัง

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของคอนกรีตทั้ง 6 ตัวอย่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นกราฟทุกเส้นจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนถึงน้ำหนักบรรทุกประมาณ 60 % ของน้ำหนักบรรทุกประลัย จึงเริ่มเบนออกจากแนวเส้นตรงมีความลาดชันน้อยลงเป็นเส้นโค้ง ตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมยืนมากจะให้ความชันมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมยืนน้อย และอัตราการหดตัวของตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมยืนน้อยจะเกิดขึ้นมากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กเสริมยืนมาก น้ำหนักบรรทุกประลัยของตัวอย่างทดสอบ C-00, C-12, C-16, C-20, C-25 และ C-28 มีค่า 187, 197, 218.5, 202, 200 และ 209 ตัน ตามลำดับ

ลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มนี้ ไม่ปรากฏให้เห็นเลยจนกระทั่งเกิดการวิบัติขึ้น และลักษณะการวิบัติเป็นแบบแตกกระจาย (Splitting failure) เกิดขึ้นทันทีทันใด โดยไม่มีสัญญาณเตือนล่วงหน้า บริเวณที่เกิดการแตกร้าวหลังวิบัติส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ โดยที่คอนกรีตหุ้มเหล็กจะกระจายออกจนมองเห็นเหล็กเสริมยืนได้ชัดเจนในตัวอย่างทดสอบที่มีเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมยืนน้อย รอยแตกร้าวลึกเข้าไปเกินเปลือกหุ้มเหล็ก โดยมีความลึกประมาณ 4 ซม. เหล็กเสริมยืนเกิดการโก่งงอดังปรากฏในรูปที่ 3.6, C-12 และ C-16 ส่วน

007391

ตัวอย่างทดสอบที่มีเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมยืนมาก ความลึกของการแตกกระจายจะตื้นกว่า กล่าวคือ จะลึกประมาณ 2.5 ซม. เหล็กเสริมมักจะไม่โก่งงอ ดังแสดงในรูปที่ 3.6, C-20, C-25 และ C-28

2. การทดสอบกลุ่มที่มีการเยื้องศูนย์ของน้ำหนักบรรทุกเป็นตัวแปร เหล็กเสริมยืนของตัวอย่างทดสอบกลุ่มนี้มีค่า ρ = 3.53 % เท่ากันหมดทุกตัวอย่าง แต่ในการทดสอบพยายามจัดระยะเยื้องศูนย์ให้ได้ตามที่กำหนด ทำการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็นชั้น ๆ ซึ่งในแต่ละชั้นจะทำการบันทึกเกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุก ความเครียดคอนกรีต ณ บริเวณกึ่งกลางความยาวเสา การวัดการโก่งงอที่จุดกึ่งกลางความยาวเสาก็ได้ทำการวัดควบคู่กับน้ำหนักบรรทุกเช่นกัน ในการทดสอบการเยื้องศูนย์อันนี้ต้องป้องกันอันตรายอันอาจเกิดจากตัวอย่างทดสอบเคลื่อนตัวออกจากแนวเยื้องศูนย์ด้วย ผลการทดสอบน้ำหนักบรรทุกประลัยของตัวอย่างทดสอบ CE 000, CE 055, CE 095 CE 165 และ CE ∞ มีค่า 210, 77, 34.6, 14.5 และ 13.85 ตัน ตามลำดับ

ในรูป 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งงอที่จุดกึ่งกลางเสากับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งจะเห็นว่าการโก่งงอจะไม่แปรผันโดยตรงกับน้ำหนักบรรทุก แต่จะขึ้นอยู่กับการเยื้องศูนย์ ตัวอย่างทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์น้อยจะรับน้ำหนักบรรทุกได้มาก แต่จะมีการโก่งงอที่จุดกึ่งกลางเสาน้อย ในทำนองเดียวกันเมื่อมีการเยื้องศูนย์มากจะให้การโก่งงอมาก แต่จะรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อย

ในรูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดที่ผิวคอนกรีตรับแรงอัด จะเห็นว่าในช่วงแรกจะเป็นเส้นตรงแต่เมื่อน้ำหนักบรรทุกประมาณ 85 % ของน้ำหนักบรรทุกประลัยก็เริ่มเบนออกจากแนวเส้นตรง ค่าความเครียดประลัยที่ผิวคอนกรีตรับแรงอัดทุกตัวอย่างทดสอบ จะให้ค่าใกล้เคียงกันมาก คือประมาณ 0.0034 ยกเว้นตัวอย่างทดสอบ CE ∞ ซึ่งมีระยะเยื้องศูนย์ ∞ เป็นการทดสอบรับแรงตัดอย่างเดียว มีค่าความเครียดที่ผิวคอนกรีตรับแรงอัดเพียง 0.00215 เท่านั้น

ส่วนรูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในเหล็กเสริมยืนรับแรงดึง จะพบว่า ตัวอย่างทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์น้อยเมื่อตอนต้น ๆ เหล็กเสริมยืนจะยัง

ไม่รับน้ำหนัก ลักษณะเส้นกราฟทุกเส้นจะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกประมาณ 85 % ของน้ำหนักบรรทุกประลัยจะเริ่มเบนออก การวัดความเครียดในเหล็กเสริมยืนรับแรงดึงไม่สามารถวัดได้จนถึงจุดประลัย ทั้งนี้เพราะเกจวัดความเครียดชนิดไฟฟ้าจะชำรุดก่อนถึงจุดวิบัติ

ลักษณะการแตกร้าวในตัวอย่างทดสอบกลุ่มนี้ แตกต่างกันออกไปตามการเยื้องศูนย์ ตามรูปที่ 3.10 เรียงจากตัวอย่างทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์น้อยที่สุดไปยังตัวอย่างทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์สูงสุด ตัวอย่าง CE 055 จะวิบัติแบบ Compression Failure การแตกร้าวยังไม่ปรากฏจนกว่าจะเกิดการวิบัติ หลังจากวิบัติเกิดรอยแตกร้าวเพียงเส้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3.10, CE 055 ส่วนด้านรับแรงอัดเกิด Crushing ลึกลงไปประมาณ 1 ซม. ในตัวอย่างที่มีการเยื้องศูนย์มากขึ้น จะปรากฏการแตกร้าวที่ผิวรับแรงดึงบริเวณกึ่งกลางเสา แล้วรอยแตกร้าวค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น รอยแตกร้าวเมื่อเข้าใกล้แกนสะเทินจะแยกเป็น 2 แฉก และในที่สุดการวิบัติก็เกิดขึ้นโดยการ Crushing ที่ผิวรับแรงอัด ส่วนตัวอย่างทดสอบที่มีการเยื้องศูนย์ ∞ เนื่องจากทำการทดสอบแบบแรงตัดอย่างเดียว จึงปรากฏลักษณะแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนให้เห็นด้วยและมีการแตกแบบ Crushing บริเวณที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ จากการตรวจสอบความเครียดในเหล็กเสริมยืนจะพบว่า เหล็กเสริมยืนรับแรงดึงรับน้ำหนักบรรทุกถึงกำลังคลาก