บทที่ 2

การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

การวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงจากสมอยึดเข้าสู่คอนกรีตขององค์อาคารบริเวณสมอยึดโดยแยกส่วนทดสอบออกมาเป็นสมอยึดเดี่ยวและมีการถ่ายแรงตรงศูนย์ผ่านแกนกลาง (Concentric Loading) ในแต่ละหน่วยจะศึกษาผลการโอบรัดของเหล็กเสริมขนาดต่างๆที่มีต่อพฤติกรรมการถ่ายแรงบริเวณสมอยึด

2.1 ระบบสมอยึด (Anchorage System)

ระบบสมอยึดที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการวิจัยนี้ จะเป็นแบบ K - range ของ Fryssinet ประกอบด้วยกรวยร้อยลวดอัดแรงเป็นชิ้นเดียวกันกับแผ่นเหล็กถ่ายแรงจากลวดสู่เนื้อคอนกรีต แรงอัดทั้งหมดจากลวดจะกระจายเข้ากระโหลกสมอ (Anchorage block) ด้วยจำปาจับลวด (Jaws) และถ่ายจากกระโหลกสมอผ่านแผ่นเหล็กสมอยึดเข้าสู่คอนกรีตบริเวณสมอยึด และถ่ายต่อเข้าสู่ชิ้นส่วนโครงสร้างส่วนของสมอยึดดังแสดงในรูปที่ 2.1 แยกส่วนออกเป็น สมอยึด กระโหลกสมอยึด และจำปาจับลวด ในการวิจัยนี้จะใช้สมอยึดแบบ 12K13 สำหรับลวดเกลียวอัดแรง 12 เส้น ขนาด 13 มม. แต่ละเส้นรับแรงดึงประลัยได้ถึง 18.7 ตัน วัสดุของสมอยึดเป็นเหล็กหล่อเหนียวมีขนาดของแป้นเหล็กกว้าง 21 x 21 ซม. หนา 2 ซม. มีส่วนกรวยยาว 15 ซม. มีท่อร้อยลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.1 ซม. ดังรายละเอียดของมิติต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.2 แท่งตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบบริเวณสมอยึดประกอบไปด้วย สมอยึด ท่อร้อยลวด หล่อคอนกรีตโอบไว้เป็นแท่งตัวอย่างหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส ยาวเป็นสองเท่าของความกว้าง รอบสมอยึดจะมีเหล็กปลอกเกลียวและเหล็กเสริมตามยาวฝังไว้ในแท่งตัวอย่างทดสอบด้วย การกำหนดขนาดของตัวอย่างทดสอบจะพิจารณาจากขีดความสามารถของเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ เพื่อการทดสอบจนถึงขั้นวิบัติได้ และยึดถือตามมาตรฐานการทดสอบของอังกฤษ BS-4447:1973 จากขนาดของ

แป้นแผ่นแบกทานของสมอยึดสามารถกำหนดขนาดของแท่งตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจตุรัส ขนาด 35x35 ซม. ยาว 70 ซม. สมอยึดและท่อร้อยลวดจะอยู่กลางแท่งตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.2 จึงทำให้มีรูกลวงที่กลางตัวอย่าง ปลายหนึ่งเป็นแป้นแผ่นแบกทานของสมอยึดและอีกปลายหนึ่งจะเป็นปลายของท่อร้อยลวดอัดแรง ในการทดสอบในการวิจัยนี้มีตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 6 ตัวอย่าง แยกเป็นตัวอย่างที่มีเหล็กเสริมโอบรัดชนิดปลอกเกลียวเป็นตัวแปร 4 ตัวอย่าง และเป็นตัวอย่างเพื่อศึกษาผลของเหล็กเสริมตามยาวอีก 2 ตัวอย่าง รายละเอียดการเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบได้แสดงในตารางที่ 2.1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงเกลียว 28 ซม. ระยะวงเกลียว 5 ซม. พอเพียงต่อการเทคอนกรีตหล่อตัวอย่างทดสอบได้อย่างมีประสิทธิผล

2.3 วัสดุของแท่งตัวอย่างทดสอบ

2.3.1 คอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้หล่อแท่งตัวอย่างทดสอบได้ออกแบบไว้ให้มีกำลังสูง 420 กก/ซม^2 กำหนดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยใช้สารเคมีผสมเพิ่มแบบ Super Plasticizer เพื่อเพิ่มความไหลลื่นสะดวกต่อการเทคอนกรีต ด้วยส่วนผสมนี้จะกำหนดอัตราน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.40 ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ III ชนิดให้กำลังสูงในระยะแรกทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต โดยที่จำนวนซีเมนต์มีค่า 450 กก/ ม.^{3} และอัตราส่วนระหว่างซีเมนต์ต่อมวลรวม 1:4 และทรายต่อหิน 1:1.5

2.3.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมดเป็นเหล็กข้ออ้อย ผลิตตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 24-2527 กระทรวงอุตสาหกรรม SD-30 ตามมาตรฐานจะต้องมีกำลังคลากไม่น้อยกว่า 3000 กก/ซม.^{2} กำลังดึงประลัยไม่น้อยกว่า 4900 กก/ซม.^{2} และมีการยืดตัวได้เกินกว่าร้อยละ 17 เมื่อทำการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM A370-80 ผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 2.3 ซึ่งให้ค่ากำลังคลากจาก 3513 - 4080 กก./ซม.^{2} กำลังประลัยระหว่าง 5446 - 6219 กก/ซม.^{2} และโมดูลัสยืดหยุ่น 2.0×10^6 - 2.15×10^6 กก/ซม.^{2}

ทั้งนี้โดยมีค่าการยืดตัว 22 - 34 %

2.3.3 แบบหล่อตัวอย่างทดสอบ

แบบหล่อตัวอย่างทดสอบบริเวณสมอยึดเป็นแบบหล่อไม้อัดหนา 10 มม. ประกอบกัน 4 ด้าน ใช้ไม้ขนาด 1 1/2" x 3" เป็นเคร่ายึดหัวท้ายและระหว่างกลางด้วยระยะ 35 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แบบจะยึดอย่างมั่นคงแข็งแรงทนต่อการจี้ด้วยเครื่องเขย่าคอนกรีตในระหว่างการเทโดยไม่บิดงอหรือปริด้านข้าง การวางแบบจะวางในลักษณะตั้งขึ้นคล้ายแบบหล่อเสาโดยมีแผ่นไม้อัดขนาด 10 มม. รองที่พื้นยึดด้วยตะปู ผิวของไม้แบบทาด้วยน้ำมันเคลือบเงาไม้เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำของไม้แบบขณะเทคอนกรีต แบบหล่อตัวอย่างสามารถถอดประกอบได้หลายครั้งโดยมีทั้งสิ้น 2 ชุด แต่ละชุดใช้หล่อ 3 ตัวอย่าง

2.4 <u>การเตรียมตัวอย่างทดสอบ</u>

2.4.1 เหล็กเสริมโอบรัด

เหล็กเสริมโอบรัดเป็นเหล็กข้ออ้อยตามรายละเอียดใน 2.3.2 มีขนาดแตกต่างกันตามรายละเอียดการทดสอบ ดัดเป็นขดเกลียวให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงเกลียว 28 ซม. ระยะเรียงของวงเกลียว 5 ซม. เพื่อรักษาระยะวงเกลียวไม่ให้คลาดเคลื่อนในขณะทำงานจึงต้องผูกยึดด้วยเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. 2 เส้นวางในตำแหน่งตรงกันข้าม เหล็กเสริมโอบรัดทุกตัวอย่างจะติดเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าที่ระยะ 10,15,20,25 และ 35 ซม. วัดจากปลายด้านที่รับแรงดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 การติดเกจเริ่มด้วยการขัดผิวเหล็กเสริมบริเวณที่จะติดเกจให้เรียบปราศจากรอยขรุขระและสนิม จากนั้นทำความสะอาดบริเวณดังกล่าวให้ปราศจากคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกด้วยน้ำยา Carbon tetra chloride และทำลายความเป็นกรดเป็นด่างด้วยน้ำยา Conditioner ชนิด A และ B แล้วจึงติดเกจด้วยกาว Epoxy แบบแห้งเร็ว เกจที่ใช้เป็นชนิดไฟฟ้าที่มีแผ่นทับหลังเป็นแผ่น Polyamide Film มีความต้านทาน ไฟฟ้า 120 โอห์ม และเกจแฟคเตอร์ (G.F.) 2.04 เมื่อติดเกจเรียบร้อยแล้วจึงต่อสาย ไฟฟ้าโยงผ่านท่อร้อยลวดให้โผล่ออกมาอยู่นอกแบบหล่อตัวอย่างทดสอบ จะต้องกันความชื้นและความเสียหายในระหว่างการเทคอนกรีต ด้วยการฉาบเคลือบหุ้มด้วยสาร

Sealastis ที่มีความยืดหยุ่นได้พอเพียง สำหรับตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กตามยาวจะผูกยึดเข้ากับเหล็กเสริมปลอกเกลียวโดยกระจายกันในลักษณะสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 2.6 และมีการผูกลวดยึดทุกจุดตัดกับเหล็กเสริมโอบรัด

2.4.2 สมอยึด

สมอยึดเป็นเหล็กหล่อเหนียว จะต้องติดเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าทั้งแนวตามยาวและในแนวโอบรอบ ที่ระยะกึ่งกลางของสมอยึด โดยติดที่ผิวผนังด้านในของกรวยร้อยลวดอัดแรง 2 ด้านตรงข้ามกันดังแสดงในรูปที่ 2.7 เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการถ่ายแรงแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสมอยึดและคอนกรีต เกจที่ใช้เป็นชนิดไฟฟ้าที่มีทับหลังเป็นแผ่น Polyamide Film มีความต้านทานไฟฟ้า 120 โอห์ม เกจแฟคเตอร์ (G.F.) 2.02 วิธีการติดเกจตลอดจนวิธีการป้องกันความชื้นจะเหมือนกับที่เหล็กเสริมโอบรัดทุกประการ

2.4.3 การหล่อตัวอย่างทดสอบ

ทาผิวไม้แบบด้วยน้ำมันเครื่องแบบเหลวเพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำของไม้แบบและเพื่อความสะดวกต่อการถอดแบบ แป้นเหล็กของสมอยึดวางบนพื้นล่างของแบบยึดให้มั่นคงกับแบบกันการขยับ จากนั้นนำโครงเหล็กเสริมวางเข้าแบบแล้วทำการจัดระยะหุ้มผิวเหล็กเสริมให้เรียบร้อย รวบสายไฟจากเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าผ่านท่อร้อยลวดออกมานอกแบบดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 การหล่อตัวอย่างทดสอบจะหล่อครั้งละ 1 ตัวอย่าง โดยเก็บแท่งคอนกรีตทรงกระบอกไว้ 6 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆควบคู่กับการทดสอบแท่งตัวอย่างทดสอบ ในการเทคอนกรีตแต่ละครั้งจะใช้คอนกรีตประมาณ 0.13 $ม^3$ ผสมด้วยโม่ซึ่งหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดความจุ 0.16 $ม^3$ ให้คลุกเคล้าเข้ากันอย่างสม่ำเสมอจึงถ่ายใส่กะบะแล้วจึงตักลงแบบการหล่อตัวอย่างทดสอบบริเวณสมอยึดและการเก็บแท่งคอนกรีตทรงกระบอก จะกระทำไปพร้อมกันเพื่อให้ได้คอนกรีตที่สอดคล้องกัน ในการหล่อจะจี้คอนกรีตด้วยเครื่องเขย่าคอนกรีตอย่างระมัดระวังเพื่อให้กระทบกระเทือนต่อเกจวัดความเครียดที่เหล็กเสริมน้อยที่สุด เมื่อเทคอนกรีตจนเต็มแบบจึงใช้เกรียงปาดหน้าเรียบ จากนั้นใช้กระสอบเปียกน้ำคลุมเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น ทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบ แล้วทำการบ่มชื้นโดยใช้กระสอบคลุมพยายามให้เปียกชื้นตลอดระยะเวลาของการบ่มเป็นเวลา 14 วัน และรอการทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป

ตัวอย่างที่หล่อเสร็จเรียบร้อยแล้วแสดงในรูปที่ 2.10

2.5 การเตรียมการทดสอบ

ก่อนทำการทดสอบต้องทำการปรับผิวหน้าของปลายทั้งสองข้าง ด้านที่รับการถ่ายแรงของแท่งตัวอย่างทดสอบและปลายด้านตรงกันข้ามให้ผิวเรียบสนิท เพื่อให้การกระจายของหน่วยแรงเป็นไปอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งผิวหน้าตัด ในการปรับผิวหน้าเริ่มด้วยการทำกรอบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเท่าตัวอย่างทดสอบโดยมีขอบเรียบและได้ระนาบ ใช้สวมเข้ากับตัวอย่างซึ่งหล่อเสร็จแล้ว ปรับแต่งขอบให้ได้ระดับด้วยลูกน้ำวัดระดับโดยแต่งให้ขอบแบบสูงจากผิวตัวอย่างประมาณ 1 ซม. แล้วเททับหน้าด้วยปูนซีเมนต์ขาวผสมน้ำด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.3 เทจนล้นขอบแบบหล่อเล็กน้อยแล้วจึงใช้กระจกใสขนาด 50 x 50 ซม. หนา 1/2 ซม. วางทับแต่งหน้าให้เรียบดังแสดงในรูปที่ 2.11 เป็นผิวตัวอย่างทดสอบที่ปรับแต่งผิวเรียบร้อยแล้ว

ที่ผิวด้านข้างของตัวอย่างทดสอบบริเวณสมอยึดจะติดเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าที่กึ่งกลางแท่งตัวอย่างที่ผิว 2 ด้านตรงกันข้ามในแนวขนานกับแรงกระทำ การติดเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าลงบนผิวคอนกรีตจะต้องเตรียมผิวให้เรียบด้วยการอัดกาว Epoxy ฉาบที่ผิวบริเวณที่จะติดและขัดให้เรียบจนถึงเม็ด หิน-ทราย จะต้องทำหลายๆครั้งจนได้ผิวเรียบปราศจากโพรงอากาศหลังจากนั้นจึงติดเกจชนิดที่มีทับหลังเป็นกระดาษขนาดยาว 7.5 ซม. มีความต้านทานไฟฟ้า 120 โอห์ม และเกจแฟคเตอร์ (G.F.) 2.06 นอกจากนี้ยังมีการติดเกจวัดความเครียดเชิงกล (Mechanical Straingauge) แบบเม็ดกระดุม (Demec) โดยมีค่า Gage Length 20 ซม. ในทิศทางขวางกับแนวแรงกระทำ ตำแหน่งที่ติดกำหนดระยะ 15 ซม. และ 30 ซม. จากปลายด้านที่รับแรง การติดเกจวัดความเครียดเชิงกลจะต้องขัดผิวที่จะติด Demec ให้ถึงผิวคอนกรีตและใช้กาว Epoxy เป็นตัวประสาน ตำแหน่งที่ติดเกจวัดความเครียดเชิงกลนี้จะกำหนดที่กึ่งกลางของแท่งตัวอย่างทดสอบ ในชุดการวัดหนึ่งๆจะติดเกจวัดเป็น 3 ชุด ดังรายละเอียดที่แสดงในรูปที่ 2.12 นอกจากนี้ยังมีการติดเกจวัดความเครียดเชิงกลในแนวแรงอีก 1 ชุด เพื่อเปรียบเทียบกับเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าอีกด้วย

2.6 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบตัวอย่างบริเวณสมอยึดจะดำเนินการตามมาตรฐานอังกฤษ BS-4447 : 1973 หัวข้อที่ 7 (7) สามาตรทดสอบโดยการถ่ายแรงโดยตรงจากเครื่องทดสอบแบบสากล (Universal testing machine) ในการวิจัยนี้ใช้เครื่องทดสอบแบบ Amsler ขนาด 500 ตัน น้ำหนักจากเครื่องทดสอบจะถ่ายผ่านกระโหลกสมอยึดเข้าแป้นเหล็กแบกทานของสมอยึดเข้าสู่เนื้อคอนกรีตตามลำดับ

ในการทดสอบเมื่อนำแท่งตัวอย่างทดสอบจัดให้เข้าที่บนแท่นของเครื่องทดสอบแล้วจึงนำกระโหลกสมอยึดวางบนแกนกลางของแป้นเหล็กแบกทานของสมอยึด และเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายอันอาจเกิดขึ้นจากความเข้มข้นของหน่วยแรงกดบนแป้นถ่ายน้ำหนักของเครื่องทดสอบ จะใช้แผ่นเหล็กขนาด 25 x 25 ซม. หนา 4 ซม. วางบนกระโหลกสมอยึดดังแสดงในรูปที่ 2.13 การวัดการยืดหดตัวของตัวอย่างทดสอบ กระทำโดยใช้เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบ LVDT (Linear displacement transducer) วัดการทรุดตัวสัมพัทธ์ที่มุมทั้งสี่ด้านของหน้าตัดด้านที่รับแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 การวัดค่าการยืดหดตัวจาก LVDT และการวัดความเครียดจากเกจแบบไฟฟ้าจะใช้การบันทึกค่าจาก Data logger ซึ่งจะส่งข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกในระหว่างการทดสอบลงจานแม่เหล็ก (Disk) ทั้งนี้โดยกำหนดตามลำดับของแรงที่กระทำต่อแท่งตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบจะเริ่มโดยการถ่ายแรงจากเครื่องทดสอบเข้าสู่ตัวอย่างทดสอบ การวัดความเครียดจากเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้าและการวัดการเคลื่อนที่ที่จุดต่างๆจะกระทำทุกๆ 10 ตัน ของแรงที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ ส่วนเกจวัดความเครียดเชิงกลจะบันทึกค่าทุก 50 ตัน โดยสามารถทำได้ถึงประมาณ 60 % ของน้ำหนักประลัยเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายและความเสียหายอันอาจจะเกิดขึ้นจากการวิบัติของแท่งตัวอย่างทดสอบ และเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายต่อเครื่องมือวัดต่างๆ ดังนั้นเมื่อเริ่มมองเห็นการแตกร้าวของตัวอย่างปรากฏขึ้นจะต้องถอดเครื่องมือวัดที่อาจจะเสียหายออก โดยจะเหลือการวัดที่เป็นไฟฟ้าไว้จนถึงขั้นวิบัติ

อนึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการวิเคราะห์พฤติกรรมของแท่งตัวอย่างภายใต้การถ่ายแรงโดยใช้ไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ศึกษาพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear elastic) โดย นาย บวรพันธุ์ วงศ์อนันต์ ใช้ประกอบการทดสอบด้วย เพื่อการเตรียมการวัดต่างๆเป็นไปอย่างละเอียดและเที่ยงตรงมากขึ้น

2.7 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเฉพาะส่วนที่เกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุกที่การแตกร้าวเริ่มแรก และที่น้ำหนักบรรทุกประลัยได้แสดงในตารางที่ 2.4 ส่วนพฤติกรรมทางโครงสร้างอย่างอื่นอาจพิจารณาแยกตามชุดการทดสอบคือ

2.7.1 ชุดที่มีเหล็กเสริมโอบรัด

ชุดการทดสอบนี้ประกอบไปด้วยตัวอย่างทดสอบ 4 ตัวอย่าง คือตัวอย่าง SP0, SP10, SP12 และ SP16 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็ก 1 ตัวอย่างและเสริมเหล็กโอบรัดแบบปลอกเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม., 12 มม.และ 16 มม. อีก 3 ตัวอย่างตามลำดับ การถ่ายแรงจากเครื่องทดสอบเข้าสู่ตัวอย่างจะก่อให้เกิดการเสียรูป (Deformation) ของตัวอย่างโดยเกิดการหดตัวในแนวแกนและการป่องตัวออกด้านข้าง เหล็กเสริมจะทำการโอบรัด (Confinement) ทำให้ตัวอย่างมีกำลังสูงขึ้นและเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในเหล็กเสริม พฤติกรรมของแท่งตัวอย่างทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกดังกล่าวจะแสดงผลได้ดังนี้คือ

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการหดตัวในแนวแกน

การหดตัวของตัวอย่างโดยอ่านผลจาก LVDT แสดงในรูปที่ 2.16-2.19 การหดตัวของชุดตัวอย่างทดสอบนี้จะเพิ่มมากในช่วงเริ่มต้นของการถ่ายแรง คือช่วงระหว่าง 0 - 30 ตัน จากนั้นจึงจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยลงในลักษณะที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ การวัดค่าการหดตัวทำได้ถึงน้ำหนักแตกร้าวที่เริ่มมองเห็นเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายต่อเครื่องมือวัดเนื่องจากการวิบัติของตัวอย่างทดสอบได้

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่ผิวคอนกรีต

ความเครียดตามแนวแกนเนื่องจากการหดตัวที่กึ่งกลางของแท่งตัวอย่างทดสอบ แสดงในรูปที่ 2.20 - 2.23 การเพิ่มของความเครียดกับน้ำหนักมีลักษณะเป็นเส้นตรง

015893

ในช่วงต้น ๆ ของการถ่ายแรง จากนั้นความเครียดจะเพิ่มมากขึ้นโดยจะเบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงเดิมที่น้ำหนักประมาณ 150 ตัน ในทุก ๆ ตัวอย่างสำหรับชุดการทดสอบนี้ ส่วนความเครียดในแนวขวางเนื่องจากการป่องตัวออกด้านข้างของตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.24 - 2.27 การเพิ่มของความเครียดจะสม่ำเสมอเป็นเส้นตรงในช่วงน้ำหนัก 0 - 150 ตัน จากนั้นจึงเริ่มเบี่ยงเบนโดยความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ความเครียดที่ระยะ 15 ซม. จากปลายส่วนที่รับแรงจะมีค่ามากกว่าที่ระยะ 30 ซม. อย่างเห็นได้ชัด การเปรียบเทียบกับไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติในเบื้องต้นนี้จะเห็นว่าสอดคล้องกันดีกับผลการทดสอบ

ค. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริม

เมื่อตัวอย่างรับการถ่ายแรงจะเกิดการโอบรัดของเหล็กเสริม ทำให้ความเครียดที่เกิดจากหน่วยแรงดึงเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.28 - 2.30 อัตราการเพิ่มของความเครียดที่ระยะต่าง ๆ จากปลายด้านที่รับแรงกับน้ำหนักบรรทุก จะสม่ำเสมอเป็นเส้นตรงในช่วงต้น ๆ ของการถ่ายแรง จากนั้นจะเริ่มเบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงที่น้ำหนักบรรทุกค่าหนึ่ง โดยความเครียดที่เหล็กเสริมในส่วนที่ใกล้กับสมอยึดจะเบี่ยงเบนที่น้ำหนักน้อยกว่าส่วนที่อยู่ห่างออกไป ดังจะเห็นได้จากตัวอย่าง SP10 ความเครียดที่ระยะ 10, 15, 20 และ 25 ซม. เบี่ยงเบนที่น้ำหนัก 130 ตัน ตัวอย่าง SP12 ที่ระยะ 10, 15 และ 20 ซม. เบี่ยงเบนที่ 130 ตัน และตัวอย่าง SP16 ที่ระยะ 10, 15, 20 และ 25 ซม. จะเบี่ยงเบนที่น้ำหนัก 140 ตัน หลังจากจุดเบี่ยงเบนความเครียดจะเพิ่มมากกว่าในช่วงเริ่มต้นมีลักษณะค่อนข้างจะสม่ำเสมอ ความเครียดที่เหล็กเสริมจะเพิ่มอย่างมากที่ค่าน้ำหนักซึ่งตรงกับน้ำหนักแตกร้าวเมื่อสังเกตุได้จากภายนอก สำหรับตัวอย่าง SP10 ไม่สามารถวัดความเครียดที่น้ำหนักแตกร้าวได้เนื่องจากเกิดความบกพร่องของเครื่องมือวัดในระหว่างการทดสอบ

ความเครียดที่เหล็กเสริมในส่วนที่ห่างออกไปจากสมอยึด คือที่ระยะ 35 ซม. ของตัวอย่าง SP10 เบี่ยงเบนที่น้ำหนัก 190 ตัน ระยะ 25 ซม. ของตัวอย่าง SP12 เบี่ยงเบนที่ 160 ตัน และระยะ 35 ซม. ของตัวอย่าง SP16 เบี่ยงเบนที่น้ำหนัก 180 ตัน ภายหลักจากนั้นการเพิ่มของความเครียดจะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับความเครียดที่เหล็กเสริมส่วนที่ใกล้กับสมอยึด แต่จุดที่ความเครียดเพิ่มขึ้นอย่างมากแบบทันที จะเกิดขึ้นที่น้ำหนักมากกว่าน้ำหนักแตกร้าวเริ่มแรก ซึ่งอาจเป็นผลจากการแตกร้าวได้แผ่ขยายมายังส่วนปลายด้านล่างของตัวอย่างเมื่อน้ำหนักเพิ่มขึ้น

ง. การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด

การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่น้ำหนักต่าง ๆ ในระหว่างการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.31 - 2.33 จะแสดงถึงลำดับของการโอบรัดของเหล็กเสริม โดยจะเห็นได้ว่าความเครียดที่เหล็กเสริมจะเพิ่มน้อย และคงที่ในช่วงเส้นตรง ความเครียดจะเพิ่มในอัตรามากยิ่งขึ้นภายหลักการเบี่ยงเบน และมากที่สุดภายหลังการแตกร้าว แสดงให้เห็นว่าการโอบรัดของเหล็กเสริมจะมีประสิทธิภาพมากเมื่อเกิดการสูญเสียพฤติกรรมแบบเชิงเส้นของตัวอย่าง และมากที่สุดหลังการแตกร้าวที่เริ่มมองเห็น เป็นที่น่าสังเกตุว่าในช่วงเส้นตรงการกระจายของความเครียดมีลักษณะป่องออก โดยมีค่ามากที่สุดที่ระยะ 15 ซม. จากปลายส่วนที่รับแรงภายหลังการแตกร้าว ความเครียดสูงสุดจะเปลี่ยนมาอยู่ที่ระยะ 10 ซม. ดังจะเห็นได้ในตัวอย่างทดสอบที่สามารถวัดความเครียดได้จนเกือบถึงขั้นวิบัติ คือตัวอย่าง SP12 ในขณะใกล้การวิบัติความเครียดสูงสุดจะมากกว่าความเครียดที่จุดคลาดของเหล็กเสริม โดยวัดได้ 3000 x 10^{-6} สำหรับตัวอย่าง SP12 ที่น้ำหนัก 340 ตัน และ 2000 x 10^{-6} สำหรับตัวอย่าง SP16 ที่น้ำหนัก 400 ตัน

จ. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่สมอยึด

การวัดความเครียดในสมอยึดแยกเป็นความเครียดในแนวแกนและในแนวโอบรอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.34 และ 2.35 จะเห็นได้ว่ารูปร่างความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวแกนมีลักษณะเพิ่มในอัตราสม่ำเสมอทั้งในตัวอย่าง SP10 SP12 และ SP16 โดยมีลักษณะสอดคล้องกัน แนวโน้มดังกล่าวจะเป็นไปถึงจุดหนึ่งจะเกิดการวกกลับ โดยความเครียดจะลดลงในขณะที่น้ำหนักเพิ่มขึ้น ความเครียดที่จุดนี้จะมีค่ามากที่สุด ที่จุดแปรเปลี่ยนนี้จะพบว่าตรงกับการแตกร้าวดังจะเห็นได้ในตัวอย่าง SP16 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ขณะแตกร้าวจะเกิดการขยับตัวของสมอยึด (Anchorage slip) ความเครียดสูงสุดที่วัดได้ 800 x 10^{-6} ที่น้ำหนัก 280 ตันในตัวอย่าง SP12 และ 830 x 10^{-6} ที่น้ำหนัก 270 ตัน ของตัวอย่าง SP16 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่าความเครียดที่จุดคลากของเหล็กหล่อเหนียวที่ใช้เป็นวัสดุของสมอยึด

ความเครียดในแนวโอบรอบของสมอยึดวัดจากตัวอย่าง SP0, SP10,SP12 และ SP16 แสดงในรูปที่ 2.35 จะเห็นได้ว่าความเครียดเป็นแบบแรงอัดและมีค่าน้อยกว่าความเครียดในแนวแกนอย่างเห็นได้ชัด การเพิ่มของความเครียดในช่วงเริ่มต้นระหว่าง 0-80 ตัน

จะเพิ่มน้อยมาก จากนั้น การเพิ่มของความเครียดมีลักษณะไม่แน่นอน ขึ้นกับการทำงานร่วมกันแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างสมอยึดและคอนกรีตโดยมีอัตราการเพิ่มที่มากกว่าในช่วงแรก สำหรับตัวอย่างที่วัดความเครียดได้จนเกือบถึงขั้นวิบัติ ได้แก่ตัวอย่าง SP12 และ SP16 จะสังเกตุเห็นได้ว่า ในขณะเกิดการแตกร้าวจะเห็นการเปลี่ยนแนวโน้มอัตราการเพิ่มของความเครียด คือที่น้ำหนัก 250 ตัน และ 270 ตัน สำหรับตัวอย่าง SP12 และ SP16 ตามลำดับ ความเครียดสูงสุดที่วัดได้ 340 x 10^{-6} และ 640 x 10^{-6} ที่น้ำหนักประลัย สำหรับตัวอย่าง SP12 และ SP16

ฉ. ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ

การแตกร้าวของตัวอย่างเมื่อเริ่มมองเห็นได้ภายนอก จะมีลักษณะเป็นรอยปริแตกที่ผิวคอนกรีตตามแนวท่อร้อยลวดผ่านแกนกลางของตัวอย่าง เนื่องจากหน่วยแรงดึงในแนวขวางที่เกิดจากการถ่ายแรงดังแสดงในรูปที่ 2.36 รอยแตกร้าวนี้เริ่มที่ระยะประมาณ 7 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงสำหรับตัวอย่าง SP10 และ SP12 ส่วนตัวอย่าง SP16 จะเริ่มที่ระยะประมาณ 5 ซม. เมื่อการถ่ายแรงเพิ่มขึ้น จนตัวอย่างวิบัติ รอยแตกร้าวจะแผ่ขยายมากขึ้น มีลักษณะแพร่กระจายไปรอบๆ ตัวอย่างทั้งในแนวขนาน และในแนวขวางกับแนวแรงดังแสดงในรูปที่ 2.37 ส่วนในตัวอย่าง SP0 ซึ่งไม่ได้เสริมเหล็กโอบรัดจะสังเกตุเห็นว่า รอยแตกร้าวจะมีจำนวนน้อย และไม่กระจาย โดยจะมีขนาดของรอยแตกกว้างมากอย่างเห็นได้ชัด ที่ด้านหนึ่งของตัวอย่าง SP0 จะเกิดการแตกระเบิดของคอนกรีตที่หุ้มท่อร้อยลวด และจะสังเกตุเห็นการเกิดคอนกรีตรูปกรวยเหลี่ยม (Pyramid cone) ใต้แป้นแบกทานของสมอยึด ดังแสดงในรูปที่ 2.38 ถ้าสังเกตที่ปลายด้านที่รับแรงของตัวอย่างในชุดการทดสอบนี้ จะเห็นว่า แป้นสมอยึดจะยุบเข้าสู่แท่งตัวอย่างทำให้เนื้อคอนกรีตเบ่งตัวออกข้างและเกิดการแตกร้าวตามแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 2.39

2.7.2 ชุดที่มีเหล็กเสริมโอบรัด และเหล็กเสริมตามยาว

ชุดการทดสอบนี้มี 3 ตัวอย่าง คือตัวอย่าง SP12L0 SP12L10 และ SP12L12 ตัวอย่าง ทดสอบจะมีการเสริมเหล็กโอบรัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. โดยไม่มีการเสริมเหล็กตามยาว 1 ตัวอย่าง อีก 2 ตัวอย่างจะเสริมเหล็กตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. และ 12 มม. ตามลำดับ พฤติกรรมของแท่งตัวอย่างภายใต้น้ำหนักบรรทุก จะได้แสดงเป็น

ลำดับดังต่อไปนี้

ก. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการหดตัวในแนวแกน

การหดตัวในแนวแกนสำหรับชุดการทดสอบนี้ จะมีลักษณะการเพิ่มคล้ายกันกับชุดที่เสริมเหล็กปลอกเกลียว โดยอัตราการหดตัวจะเพิ่มมากในช่วงน้ำหนัก 0-30 ตัน จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยกว่าในช่วงเริ่มต้นมีลักษณะค่อนข้างจะสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.40-2.42 ช่วงการวัดการหดตัวกระทำได้จำกัด เนื่องจากต้องถอดเก็บ LVDT เมื่อเกิดการแตกร้าวของตัวอย่างเพื่อป้องกันความเสียหายอันอาจเกิดขึ้นจากการวิบัติของแท่งตัวอย่างทดสอบ

ข. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่ผิวคอนกรีต

ความเครียดเนื่องจากการหดตัวในแนวแกนที่ผิวคอนกรีตกึ่งกลางแท่งตัวอย่าง จะมีลักษณะการเพิ่มสัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุกเป็นเส้นตรงในระหว่างช่วงน้ำหนัก 0-150 ตัน สำหรับทุกตัวอย่างในชุดการทดสอบนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.43-2.45 จากนั้น ความเครียดจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่มากกว่าในช่วงเริ่มแรก การวัดความเครียดโดยเกจแบบไฟฟ้า และแบบเชิงกลค่อนข้างสอดคล้องกันดี

ความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีตเนื่องจากการปองตัวของตัวอย่างภายใต้น้ำหนักบรรทุก แสดงในรูปที่ 2.46-2.48 จะเห็นได้ว่า ความเครียดจะสัมพันธ์กับน้ำหนักบรรทุกเป็นเส้นตรงตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงน้ำหนัก 150 ตัน ในทุกตัวอย่างของชุดการทดสอบนี้ ภายหลังจากนั้น ความเครียดจะเพิ่มด้วยอัตราที่มากยิ่งขึ้น ความเครียดที่ระยะ 15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงจะมีค่ามากกว่าที่ระยะ 30 ซม. อย่างเห็นได้ชัด

ค. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด

ผลการวัดความเครียดที่เกิดจากการโอบรัดของเหล็กเสริมในระหว่างการถ่ายแรงที่ระยะต่างๆ จากปลายด้านที่รับแรง แสดงในรูปที่ 2.49-2.51 จะเห็นว่า การเพิ่มของความเครียดจะสัมพันธ์กับน้ำหนักแบบสม่ำเสมอเป็นเส้นตรงในช่วงเริ่มต้นของการถ่ายแรงจนถึงน้ำหนักค่าหนึ่งจะเกิดการเบี่ยงเบนของความเครียดจากแนวเส้นตรง โดยที่ระยะ10, 15

และ 20 ซม. ของตัวอย่าง SP12L0 จะเบี่ยงเบนที่น้ำหนัก 130 ตัน ที่ระยะ 10,15 และ 20 ซม. ของตัวอย่าง SP12L10 เบี่ยงเบนที่น้ำหนัก 150 ตัน และที่ระยะ 10,15,20 และ 25 ซม. ของตัวอย่าง SP12L12 จะเบี่ยงเบนที่น้ำหนัก 120 ตัน ในช่วงหลังจุดเบี่ยงเบนความเครียดจะเพิ่มในอัตรามากขึ้นกว่าเดิม และมีลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง ซึ่งจะเห็นได้จากผลการวัดความเครียดในตัวอย่าง SP12L10 และ SP12L12 ที่จุดหนึ่งภายหลังการเบี่ยงเบนจะเกิดการเพิ่มของความเครียดอย่างมาก จากการสังเกตุน้ำหนักที่จุดนี้ พบว่า ตรงกันกับน้ำหนักเมื่อเริ่มมองเห็นการแตกร้าว ซึ่งจะเห็นได้ในตัวอย่าง SP12L0 SP12L10 และ SP12L12 น้ำหนักที่จุดนี้ คือ 250,240 และ 250 ตันตามลำดับ สำหรับความเครียดที่ระยะที่ห่างออกไปจากสมอยึด คือที่ระยะ 35 ซม. จะเห็นว่า น้ำหนักที่จุดเบี่ยงเบน และจุดซึ่งความเครียดเพิ่มอย่างทันที จะมีค่ามากกว่าในส่วนที่ใกล้กับสมอยึด ซึ่งเป็นไปได้ว่า การแตกร้าวในส่วนปลายด้านล่างของตัวอย่างจะเกิดขึ้นที่น้ำหนักมากๆ เนื่องจากความเข้มของหน่วยแรงดึง มีค่าน้อยกว่าในส่วนที่ใกล้กับสมอยึด

ง. การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด

เมื่อนำความเครียดที่อ่านได้จากการทดสอบมาสร้างแผนผังการกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.52-2.54 การกระจายของความเครียดดังกล่าวจะแสดงถึงการโอบรัดของเหล็กเสริม จะเห็นได้ว่าการโอบรัดของเหล็กเสริมในช่วงเริ่มต้นจะเป็นไปค่อนข้างจะไม่เต็มที่ จนเมื่อตัวอย่างเริ่มจะสูญเสียพฤติกรรมแบบเชิงเส้น เหล็กเสริมจะทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพมากขึ้น โดยจะโอบรัดได้ดีที่สุดภายหลังการแตกร้าว ซึ่งจะทำให้กำลังประลัยของตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น การกระจายของความเครียดในช่วงเส้นตรง จะมีลักษณะเป็นรูปของการปองออก โดยมีค่ามากที่สุดที่ระยะ 15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรง ภายหลังการแตกร้าว ค่าสูงสุดจะเปลี่ยนมาอยู่ที่ระยะ 10 ซม. ซึ่งจะเห็นได้ในทุกตัวอย่าง ในขณะใกล้การวิบัติ ความเครียดสูงสุดจะเกินกว่าความเครียดที่จุดคลากของเหล็กเสริม โดยตัวอย่าง SP12L0 วัดได้ 3600×10^{-6} ที่ 340 ตัน ตัวอย่าง SP12L10 วัดได้ 3100×10^{-6} ที่ 350 ตัน และตัวอย่าง SP12L12 วัดได้ 5780×10^{-6} ที่น้ำหนัก 360 ตัน

จ. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่สมอยึด

ความเครียดตามแนวแกนที่สมอยึดสำหรับชุดการทดสอบนี้แสดงในรูปที่ 2.55 รูปร่างของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดมีลักษณะเพิ่มขึ้น อย่างสอดคล้องกันในทุกตัวอย่างโดยเพิ่มในอัตราค่อนข้างอย่างสม่ำเสมอ จนเกิดการวกกลับโดยความเครียดมีค่าลดลงหลังจากที่เพิ่มจนถึงค่าสูงสุด ตัวอย่าง SP12L0 และ SP12L12 จะเกิดการวกกลับที่น้ำหนัก 280 และ 300 ตัน ตามลำดับ ส่วนตัวอย่าง SP12L10 ความเครียดวกกลับที่น้ำหนักแตกร้าวคือประมาณ 240 ตัน ความเครียดสูงสุดวัดได้ 800 x 10^{-6} สำหรับตัวอย่าง SP12L0 และ SP12L12 ส่วนตัวอย่าง SP12L10 วัดได้ 1000 x 10^{-6} จะเห็นได้ว่า ความเครียดสูงสุดยังไม่ถึงที่จุดคลาก และในขณะเกิดการแตกร้าวจะเห็นการแปรปรวนของความเครียด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เกิดการขยับตัวของสมอยึด

ความเครียดในแนวโอบรอบ แสดงในรูปที่ 2.56 จะเห็นได้ว่า การเพิ่มของความเครียดจะมีค่าน้อยในช่วง 0-80 ตัน จากนั้น จึงเพิ่มในอัตราที่มากขึ้น ตัวอย่าง SP12L0 จะเกิดการแปรปรวนของความเครียดที่น้ำหนักแตกร้าว คือที่ 250 ตัน ส่วนในตัวอย่าง SP12L10 และ SP12L12 จะสังเกตุเห็นได้ว่าการเพิ่มของความเครียดมีลักษณะที่ค่อนข้างจะแปรปรวนน้อยและมีลักษณะสอดคล้องกัน ตัวอย่าง SP12L0 วัดความเครียดสูงสุดได้ 340 x 10^{-6} ที่น้ำหนักประลัย ตัวอย่าง SP12L10 และ SP12L12 วัดได้ 750 x 10^{-6} ที่น้ำหนักประลัยเช่นเดียวกัน จะเห็นได้ว่าความเครียดในแนวโอบรอบ จะมีค่าน้อยกว่าความเครียดตามแนวแกน

ฉ. ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ

การแตกร้าวของชุดการทดสอบนี้ จะเริ่มด้วยการปริแตกที่ผิวคอนกรีตตามแนวท่อร้อยลวดเป็นแนวยาวโดยผ่านแกนกลางของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.57 รอยแตกร้าวนี้ จะเริ่มต้นที่ระยะ 7 ซม. จากปลายที่รับแรง สำหรับตัวอย่าง SP10,SP12 และ SP16 เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น รอยแตกร้าวเดิมจะมีขนาดกว้างมากขึ้น และเกิดรอยแตกร้าวแนวใหม่ ทั้งในแนวขนานและแนวขวางกับแนวแรง แพร่กระจายรอบๆ ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.58 ซึ่งเป็นการแตกร้าวหลังการวิบัติ จะเห็นว่าการแตกร้าวมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยรอยแตกจะมีจำนวนมากในบริเวณใกล้กับสมอยึด ที่ส่วนปลายบนของตัวอย่างจะเห็นการยุบตัวของสมอยึดเข้าไปยังตัวอย่างทำให้คอนกรีตเบ่งตัวออกข้างและเกิดการแตกร้าวตามแนวรัศมี ดังแสดงในรูปที่ 2.59