บทที่ 3

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมของแท่งตัวอย่างภายใต้น้ำหนักบรรทุก

3.1.1 การหดตัวในแนวแกน

ก. ตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด

การหดตัวในแนวแกนภายใต้น้ำหนักบรรทุก จะสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับการทรุดของปลายตัวอย่างด้านที่รับแรงที่วัดจาก LVDT และความเครียดที่ผิวคอนกรีตกึ่งกลางแท่งตัวอย่าง ค่าเฉลี่ยในแต่ละตัวอย่างได้ทำการเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 จะเห็นว่าความเครียดและการหดตัวตามแกนของตัวอย่างไม่เสริมเหล็กคือตัวอย่าง SP0 จะมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่เสริมเหล็กเล็กน้อย การวัดการทรุดตัวและความเครียดที่ผิวคอนกรีตมีลักษณะสอดคล้องกัน ในกลุ่มตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กโอบรัด คือ ตัวอย่าง SP10 SP12 และ SP16 จะอ่านค่าความเครียดอัดในแนวแกนจากการทดสอบได้ใกล้เคียงกันทั้งการวัดโดยเกจแบบไฟฟ้า และเกจแบบเชิงกล การวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ได้ทำการเทียบเคียงกับผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของรูปร่างความสัมพันธ์สอดคล้องกันดีมากกับการทดสอบ โดยในการทดสอบความเครียดที่อ่านได้จะมีค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์จากไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ

เป็นที่น่าสังเกตุว่า ความเครียดในแนวแกนที่ผิวคอนกรีตของตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กทั้งจากการทดสอบและการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ จะมีค่าน้อยกว่าในตัวอย่างที่เสริมเหล็กโอบรัด รูปที่ 3.3 ก. จะแสดงการกระจายของหน่วยแรงอัดตามแกนที่ผิวคอนกรีตในแนวกึ่งกลางแท่งตัวอย่างที่น้ำหนักบรรทุก 100 ตัน โดยกำหนดระยะจากปลายด้านที่รับแรง จะเห็นได้ชัดเจนว่า หน่วยแรงดังกล่าวของตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กจะมีค่าน้อยกว่าในตัวอย่างที่เสริมเหล็กในช่วงส่วนบนของตัวอย่างไปจนถึงประมาณกึ่งกลางแท่งตัวอย่าง ซึ่งจะเห็นได้ว่า จุดที่วัดความเครียดในชุดการทดสอบนี้ คือจุดที่มีค่าของความเครียดอัดตามแกนมากที่สุด

ในส่วนปลายของตัวอย่างความเครียดจะมีค่าเท่ากัน ที่เป็นเช่นนี้ อาจเป็นเพราะเหล็กเสริมจะช่วยถ่ายแรงอัดตามแกนได้ดียิ่งขึ้น และในขณะเดียวกันก็ทำการโอบรัดทำให้การปองออกของตัวอย่างที่เสริมเหล็กน้อยลงกว่าในตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

ส่วนในรูปที่ 3.3 ข จะแสดงการกระจายของหน่วยแรงอัดในแนวแกนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ของตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กและตัวอย่างที่เสริมเหล็กโอบรัด จากการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ที่น้ำหนักบรรทุก 100 ตัน โดยพิจารณาการกระจายด้านข้าง เริ่มจากบริเวณใกล้กับแกนกลางของตัวอย่างบริเวณสมอยึดใกล้กับท่อร้อยลวดต่อเนื่องไปยังผิวคอนกรีต จะเห็นได้ว่าการกระจายบนหน้าตัดส่วนที่ใกล้กับสมอยึดหน่วยแรงจะมีค่ามากที่สุดบริเวณแกนกลางและลดลงมากที่ผิวคอนกรีต โดยการกระจายจะมีลักษณะสม่ำเสมอบนหน้าตัดที่ระยะประมาณ 35 ซม. วัดจากปลายด้านที่รับแรง ซึ่งเท่ากับความกว้างของบริเวณสมอยึดตามหลักการของ แซงต์เวอแนงต์ (Saint Venants Principle) สิ่งที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในตัวอย่างที่เสริมเหล็กเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กคือ การกระจายของหน่วยแรงจะมีลักษณะแปรปรวนที่ คอนกรีตบริเวณส่วนนอกเหล็กเสริมโอบรัด จะเห็นว่าหน่วยแรงอัดที่ผิวคอนกรีตมีค่ามากกว่าในตัวอย่างที่เสริมเหล็กเล็กน้อย

ดังนั้น ในการทดสอบและการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ จึงไปด้วยกันได้อย่างดีมากในช่วงพฤติกรรมแบบเชิงเส้น

ข. ตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว

จากการพิจารณาค่าการหดตัวเฉลี่ยของตัวอย่างและความเครียดที่กึ่งกลางแท่งตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 จะเห็นว่า ในตัวอย่างที่มีเหล็กเสริมตามยาว จะหดตัวน้อยกว่าตัวอย่างซึ่งเสริมเฉพาะเหล็กเสริมโอบรัด แต่เมื่อพิจารณาความเครียดในแนวแกนจะเห็นว่า ค่าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันมากทั้งในกลุ่มที่มีการวัดโดยเกจแบบไฟฟ้าและเกจแบบเชิงกล การวัดความเครียดที่ได้ จึงไม่เพียงพอในการที่จะสรุปว่าตัวอย่างใดมีการหดตัวมากกว่าในช่วงที่ทำการวัด ดังนั้น โดยอาศัยข้อมูลจากการวัด การทรุดตัวเฉลี่ยจากปลายตัวอย่างด้านที่รับแรง โดย LVDT จึงพอสรุปได้ว่า ตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กตามยาวจะช่วยในการถ่ายแรงโดยกระจายแรงอัดไปยังส่วนปลายตัวอย่างโดยเหล็กเสริมตามยาว ในขณะเดียวกันก็ทำการยึดรั้งการหดตัวในแนวแกนของคอนกรีตที่ผิวตัวอย่าง

3.1.2 การปองตัวด้านข้าง

ก.ตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด

การปองตัวออกด้านข้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกจากผลของอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio effect) จะสามารถพิจารณาได้จากการวัดความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีตโดยวัดตามแนวแกนกลางของตัวอย่างที่ระยะ 15 ซม. และ 30 ซม. จากปลายด้านที่รับแรง ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 จะเห็นได้ว่า ความเครียดในส่วนที่ใกล้กับสมอยึดคือที่ระยะ 15 ซม. จะมีค่ามากกว่าระยะ 30 ซม. ในช่วงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงของน้ำหนักกับความเครียด คือช่วงเริ่มต้นของการถ่ายแรง ความเครียดในแนวขวางที่วัดได้ ในชุดตัวอย่างทดสอบนี้จะมีค่าใกล้เคียงกัน จากการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ จะพบว่า ความเครียดในแนวขวางดังกล่าว จะมีความสอดคล้องกับการทดสอบ โดยความเครียดจะมากที่สุดในตัวอย่าง SP0 และลดลงมาเมื่อเหล็กเสริมโอบรัดมีขนาดใหญ่ขึ้น ในช่วงการเบี่ยงเบนของความเครียดเหล็กเสริมจะเริ่มทำการโอบรัด ทำให้การปองตัวของตัวอย่างเริ่มแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยตัวอย่างที่มีปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดมาก จะเกิดการปองตัวน้อยกว่าตัวอย่างที่มีปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดน้อย ในตัวอย่าง SP0 การวัดความเครียดทำได้จำกัดทั้งนี้ เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากการวิบัติแบบทันทีของตัวอย่าง ในช่วงหลังการแตกร้าวของคอนกรีตเปลือกนอก

ข. ตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว

การปองตัวออกด้านข้างภายใต้การถ่ายแรง จะแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในแนวขวางที่ผิวคอนกรีตตามแนวแกนกลางแท่งตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 จะเห็นได้ว่า การปองตัวที่ระยะ 15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรงจะมีค่ามากกว่าที่ระยะ 30 ซม. อย่างเห็นได้ชัด รูปร่างของความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงในช่วงเริ่มต้นของการถ่ายแรงโดยความเครียดที่วัดได้ในตัวอย่างในชุดนี้ มีค่าใกล้เคียงกัน การเบี่ยงเบนของความสัมพันธ์จะเกิดขึ้นที่น้ำหนัก 150 ตัน เนื่องจากการวัดความเครียดกระทำได้ในช่วงจำกัด โดยทำได้มากที่สุดที่น้ำหนัก 200 ตัน จึงมองไม่ค่อยเห็นแนวโน้มของการปองตัวที่แตกต่างกัน

ในชุดการทดสอบนี้ ความเครียดที่วัดได้ในตัวอย่าง SP12L12 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. มีค่ามากกว่าอีก 2 ตัวอย่างคือ SP12L0 และ SP12L10 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กตามยาวและเสริมเหล็กตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้ อาจเป็นไปได้ เนื่องจากเกิดการแตกร้าวภายในที่ไม่สามารถมองเห็นได้ในตัวอย่าง SP12L12 เนื่องจากกำลังอัดและกำลังดึงแยกของคอนกรีตสำหรับตัวอย่างนี้มีค่าน้อยกว่าในตัวอย่าง SP12L0 และ SP12L10 อย่างมาก โดยกำลังอัดประลัยของแท่งตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกจากการทดสอบจะมีค่า 499,450 และ 422 กก/ซม.^{2} ในตัวอย่าง SP12L0 SP12L10 และ SP12L12 ตามลำดับ จึงเป็นเหตุผลที่สนับสนุนว่า ตัวอย่าง SP12L12 จะเกิดการป่องตัวมากกว่าตัวอย่างอื่นในช่วงเริ่มเบี่ยงเบน หรืออาจกล่าวได้ว่าที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากันตัวอย่าง SP12L12 จะเกิดการแตกร้าวมากกว่า

แต่อย่างไรก็ตามในช่วงเบี่ยงเบนที่น้ำหนัก 200 ตัน ตัวอย่าง SP12L10 มีแนวโน้มว่าจะป่องตัวด้านข้างน้อยกว่าตัวอย่าง SP12L0 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กตามยาวดังในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ดังนั้นจากการพิจารณาในขั้นต้นนี้พอจะกล่าวได้ว่า ตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาวจะช่วยควบคุมการเสียรูปจากการป่องตัวของตัวอย่าง ผลอันนี้จะได้พิจารณาอีกครั้งในหัวข้อที่กล่าวถึงผลของเหล็กเสริมตามยาวต่อพฤติกรรมของตัวอย่างซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

3.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด

ก. ตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงผลการวัดความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการโอบรัดของเหล็กเสริมภายใต้น้ำหนักบรรทุกโดยจะสามารถแบ่งช่วงการโอบรัดเป็น 3 ช่วง คือ ในช่วงเส้นตรง ช่วงเบี่ยงเบน และภายหลังการแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตเปลือกนอกของตัวอย่างทดสอบ เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเครียดที่เหล็กเสริมจากการทดสอบ และจากไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ที่ระยะต่างๆ วัดจากปลายตัวอย่างส่วนที่รับแรงสำหรับชุดการทดสอบนี้ มารวมเข้าด้วยกัน จะได้ดังในรูปที่ 3.10-3.14 จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์ในช่วงเส้นตรงจะสอดคล้องกันดีมากกับไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ โดยความเครียดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตัวอย่างทดสอบ ความเครียดมีค่าน้อยในตัวอย่างที่เสริมเหล็กขนาดใหญ่

เมื่อความสัมพันธ์เริ่มเบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงที่ประมาณ 130 ตัน จะเห็นได้ชัดเจนว่า ความเครียดที่เหล็กเสริมจะมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เหล็กเสริมจะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เมื่อตัวอย่างเกิดการสูญเสียพฤติกรรมแบบเชิงเส้น หรือ กล่าวอีกนัยหนึ่งคอนกรีตได้เกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า และจากการสังเกตุจะเห็นได้ว่า ความเครียดจะมีค่าน้อยในตัวอย่างที่เสริมเหล็กขนาดใหญ่และลดหลั่นกับลงไปในตัวอย่างที่เสริมเหล็กขนาดเล็กอย่างชัดเจน ดังจะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่ระยะ 10 ซม. และ 15 ซม. ในรูปที่ 3.10-3.11 ตามลำดับ การโอบรัดของเหล็กเสริมในช่วงเบี่ยงเบนจะทำให้กำลังของตัวอย่างเมื่อเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตผิวนอกที่สังเกตุเห็นได้ สูงขึ้น หลังจากนั้นจะเป็นการโอบรัดในช่วงหลังการแตกร้าวดังได้กล่าวแล้ว ซึ่งจะเป็นช่วงที่เหล็กเสริมได้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยจะมีผลทำให้ตัวอย่างมีความเหนียว (Ductility) และมีกำลังประลัยเพิ่มขึ้นกว่าในตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็ก

จากผลที่ได้ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า การวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ จะสามารถทำนายพฤติกรรมการโอบรัดของเหล็กเสริมได้ดีมาก ในช่วงเส้นตรงหรือในช่วงก่อนการแตกร้าว (Uncrack) ในช่วงนี้ เหล็กเสริมจะทำงานแบบปฏิสัมพันธ์กับคอนกรีตเสมือนเป็นวัสดุเนื้อเดียวโดยการแปลงเนื้อที่เหล็กเสริมไปเป็นเนื้อที่คอนกรีต ซึ่งขนาดของเหล็กเสริมโอบรัดในการวิจัยจะไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้น ความเครียดจะมีค่าใกล้เคียงกันทั้งจากการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ และจากการทดสอบ เมื่อตัวอย่างเริ่มเกิดการแตกร้าว การโอบรัดจะมีประสิทธิภาพดีขึ้น ดังจะเห็นได้จากความเครียดจะแตกต่างกันเด่นชัดขึ้นในเหล็กเสริมขนาดต่างๆกัน จะเห็นได้ว่า พฤติกรรมดังกล่าวจะคล้ายการโอบรัดของเหล็กเสริมในเสาปลอกเกลียว โดย การโอบรัดจะขึ้นกับเนื้อที่หน้าตัดของเหล็กเสริมและกำลังดึงของเหล็กเสริม

ข.ตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว

จากการวัดความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดในตัวอย่างสำหรับชุดการทดสอบนี้ สามารถนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและความเครียดที่เหล็กเสริมได้ดังแสดงในรูปที่ 3.15-3.18 โดยความเครียดจะวัดที่ระยะ 10,15,20 และ 25 ซม. จากปลายบนของตัวอย่างด้านที่รับแรง การเพิ่มของน้ำหนักกับความเครียดจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงเริ่มต้น จากนั้น ความสัมพันธ์จึงเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรงโดย

ตัวอย่าง SP12L10 ความเครียดที่ระยะ 10 และ 15 ซม. จะเบี่ยงเบนที่ 140 ตัน ในขณะที่ตัวอย่าง SP12L0 และ SP12L12 จะเบี่ยงเบนที่ 120 ตัน ความเครียดของตัวอย่าง SP12L10 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. จะมีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง SP12L0 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กตามยาวอย่างเห็นได้ชัด โดยจะแสดงให้เห็นผลของเหล็กเสริมตามยาวต่อการโอบรัดของเหล็กเสริม ทั้งในช่วงเส้นตรงและในช่วงเบี่ยงเบน แต่เป็นที่น่าสังเกตุว่า ตัวอย่าง SP12L12 ซึ่งเสริมเหล็กตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. น้ำหนักที่จุดเบี่ยงเบนจะน้อยกว่าในตัวอย่าง SP12L10 และความเครียดในช่วงเส้นตรงจะมีค่ามากโดยมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง SP12L0 ภายหลังการเบี่ยงเบนจะเห็นว่า ความเครียดของตัวอย่าง SP12L12 จะมีค่ามากกว่าตัวอย่าง SP12L0 เล็กน้อย และเริ่มจะมากขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่น้ำหนัก 170 ตัน เป็นต้นไป และในที่สุด ตัวอย่างจะเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตเปลือกนอก จะสังเกตุเห็นความเครียดเพิ่มขึ้นแบบทันที ภายหลังจากนั้น แนวโน้มของความเครียดของตัวอย่าง SP12L12 จะลดน้อยลงกว่าตัวอย่าง SP12L0 ซึ่งในขั้นตอนนี้ ผลของเหล็กเสริมตามยาว จะเริ่มมองเห็นได้ค่อนข้างจะเด่นชัดขึ้น ดังในรูปที่ 3.15 และ 3.16 ซึ่งจะแสดงความเครียด ที่ระยะ 10 และ 15 ซม.

จากพฤติกรรมที่ค่อนข้างจะแปลกของตัวอย่าง SP12L12 และ SP12L0 ในช่วงของ การเบี่ยงเบน และในช่วงเส้นตรง โดยความเครียดของตัวอย่าง SP12L12 จะมากกว่า ตัวอย่าง SP12L0 ซึ่งไม่น่าจะเป็นไปได้ แต่จากการพิจารณากำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก และกำลังดึงแยก ของตัวอย่างในชุดการทดสอบนี้ จะเห็นได้ว่า คุณภาพของคอนกรีตสำหรับตัวอย่าง SP12L12 จะด้อยกว่าในอีก 2 ตัวอย่างค่อนข้างมาก โดย f'_c = 499 กก/ซม.^{2} , f_{sp} = 44 กก/ซม.^{2} ในตัวอย่าง SP12L0 f'_c = 450 กก/ซม.^{2} , f_{sp} = 45 กก/ซม.^{2} ในตัวอย่าง SP12L10 และ f'_c = 422 กก/ซม.^{2} , f_{sp} = 42 กก/ซม.^{2} ในตัวอย่าง SP12L12 จากผลอันนี้ จะทำให้คอนกรีตสำหรับตัวอย่าง SP12L12 เกิดการแตกร้าวภายในขึ้นมากกว่าในตัวอย่าง SP12L0 ซึ่งมีคุณภาพของคอนกรีตสูงกว่าจะทำให้มองเห็นความเครียดที่สูงกว่าตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ภายหลังการแตกร้าวผลของเหล็กเสริมตามยาว จะเริ่มมองเห็นเด่นชัดขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวถึงอีกครั้งในหัวข้อที่เกี่ยวกับผลของเหล็กเสริมตามยาวต่อพฤติกรรมของตัวอย่าง

3.2 หน่วยแรงดึงในคอนกรีตสำหรับตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด

ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 ถึงการกระจายของหน่วยแรงดึงในคอนกรีตบริเวณสมอยึดจะก่อให้เกิดการแตกร้าวของบริเวณสมอยึด ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ถึงการกระจายของหน่วยแรงดึงสำหรับตัวอย่างทดสอบชุดที่มีการเสริมเหล็กโอบรัด โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.19 จากการวิเคราะห์ พบว่าแนวระนาบที่เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดจะเกิดที่ภาคตัดขวางตามแนวกึ่งกลางแท่งตัวอย่าง ในรูปที่ 3.19 จะแสดงถึงการกระจายหน่วยแรงดึงตามแนวดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ค่าสูงสุดของหน่วยแรงดึงจะเกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรง โดยหน่วยแรงดึงสำหรับตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็ก จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่เสริมเหล็กอย่างเห็นได้ชัด ทั้งในคอนกรีตส่วนที่ถูกโอบรอบโดยเหล็กเสริม และที่ผิว โดยค่าหน่วยแรงดึงและรูปร่างของการกระจายจะมีลักษณะใกล้เคียงกันในตัวอย่างที่เสริมเหล็ก ส่วนตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กหน่วยแรงดึงจะมีค่ามากในส่วนที่อยู่ใกล้แกนกลางบริเวณใกล้กับท่อร้อยลวดของตัวอย่างและที่ผิวนอก โดยส่วนที่อยู่ผิวนอกจะมีค่ามากกว่าเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของตัวอย่างจากการทดสอบจะเห็นได้ว่า การแตกร้าวแรกเริ่มที่มองเห็นได้ในชุดตัวอย่างนี้ จะเกิดตามแนวท่อร้อยลวดผ่านแนวแกนกลางของตัวอย่างโดยการแตกร้าวที่สังเกตุได้จะเริ่มต้นที่ระยะประมาณ 7 ซม. จากปลายด้านที่รับแรง ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.36 ในบทที่ 2 เนื่องจากเป็นการสังเกตด้วยตา จึงไม่สามารถมองเห็นรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจริงๆ เมื่อหน่วยแรงดึงในคอนกรีตมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ดังนั้น ระยะเริ่มต้นของรอยแตกร้าว จากการสังเกตุคือ 7 ซม. จากปลายด้านที่รับแรง จึงอาจเป็นเพียงรอยแตกร้าวที่มีขนาดพอที่ตาจะพอมองเห็นซึ่งได้แพร่ขยายจากจุดที่เริ่มแตกร้าวจริง อย่างไรก็ตาม จากลักษณะการแตกร้าวของตัวอย่าง จะสามารถกล่าวได้ว่า พฤติกรรมการแตกร้าวเริ่มแรกของตัวอย่างจะสอดคล้องกับสถานะหน่วยแรงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ

พฤติกรรมอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจคือ การทำงานของเหล็กเสริมโอบรัด จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดเริ่มเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรงดังได้กล่าวแล้วใน 3.1.3 ซึ่งจะสามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาการกระจายของหน่วยแรงดึงในคอนกรีตที่แสดงในรูปที่ 3.19 สำหรับตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กโอบรัดจะเห็นได้ว่า หน่วยแรงดึงสูงสุดจะเกิดขึ้น ระหว่างผิวเหล็กเสริมกับคอนกรีตผิวนอกของตัวอย่าง เมื่อน้ำหนักเพิ่มขึ้น หน่วยแรงดึง

ดังกล่าวจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อเริ่มเกิดรอยแตกร้าวที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Microcracks) หรืออีกนัยหนึ่ง คอนกรีตเริ่มจะสูญเสียพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจะสังเกตเห็นความเครียดในเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น และเริ่มเบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นตรง โดยความเครียดจะเพิ่มขึ้นมาก เมื่อเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตเปลือกนอกที่หุ้มเหล็กเสริมโอบรัด

การวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ จะสามารถประเมินน้ำหนักที่จุดเริ่มแตกร้าวหรือจุดเบี่ยงเบนในความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดในเหล็กเสริมได้ โดยกำหนดที่ความสามารถต้านแรงดึงของคอนกรีตเป็นขีดจำกัด ซึ่งได้กำหนดไว้ 2 ค่า คือ ที่โมดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture) และ กำลังดึงแยก (Tensile spliting strength) ของคอนกรีต โดยใช้คุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ การเบี่ยงเบนของความเครียดที่เหล็กเสริมจะเกิดขึ้นเมื่อหน่วยแรงดึงในคอนกรีตมีค่าเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ณ จุดดังกล่าวได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันดีมากกับผลการทดสอบ โดยมีความแตกต่างอย่างมากที่สุด 14 % เมื่อกำหนดที่โมดูลัสแตกร้าว และ น้อยที่สุดเพียง 1.5 % เมื่อกำหนดที่กำลังดึงแยกของคอนกรีต

3.3 ผลของเหล็กเสริมโอบรัด

การโอบรัดของเหล็กเสริมอาจพิจารณาได้จากการกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด ซึ่งการโอบรัดนี้ จะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเส้นตรง ช่วงเบี่ยงเบน และภายหลังการแตกร้าวของคอนกรีตเปลือกนอก ดังได้กล่าวมาแล้วใน 3.1.3 ในรูปที่ 3.20 จะแสดงถึงการโอบรัดใน 3 ช่วงดังกล่าว ที่น้ำหนัก 100 ตัน 200 ตัน และ 300 ตัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ในช่วงเริ่มต้น คือช่วงเส้นตรง การทำงานของเหล็กเสริมโอบรัด จะยังเป็นไปอย่างไม่ค่อยเต็มที่ ซึ่งจะเห็นได้จากความเครียดโอบรัดมีค่าใกล้เคียงทั้ง 3 ตัวอย่าง การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมจากไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ โดยพิจารณาในช่วงเส้นตรงก็จะให้ผลที่สอดคล้องดังแสดงในรูปที่ 3.21 จะเห็นได้ว่า รูปร่างของการกระจายจะเป็นเส้นโค้งและมีค่ามากที่สุดที่ 15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรง ความเครียดในตัวอย่างที่เสริมเหล็กขนาดใหญ่จะน้อยกว่าตัวอย่างที่เสริมเหล็กขนาดเล็กไม่มากจนเห็นชัด ผลการทดสอบก็จะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากในช่วงเส้นตรงหรือช่วงก่อนการแตกร้าวเหล็กเสริมจะเปรียบเสมือนการเพิ่มเนื้อที่ของคอนกรีตในการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ดังได้

กล่าวไว้ใน 3.1.3

เมื่อตัวอย่างเกิดการแตกร้าวภายในที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า (Microcracks) เนื่องจากหน่วยแรงดึงในคอนกรีตดังได้กล่าวมาแล้วใน 3.2 เหล็กเสริมโอบรัดจะทำงานได้ดียิ่งขึ้นดังจะเห็นได้ในรูปที่ 3.20 เป็นการกระจายความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดที่น้ำหนัก 200 ตัน ซึ่งเป็นน้ำหนักในช่วงเบี่ยงเบน จะเห็นว่าความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดของตัวอย่าง SP10 จะมากที่สุด และลดน้อยลงมาในตัวอย่างที่เสริมเหล็กขนาดใหญ่ขึ้น คือ ตัวอย่าง SP12 และ SP16 อย่างเห็นได้ชัดกว่าในช่วงเส้นตรง ในช่วงหลังการแตกร้าวของคอนกรีตเปลือกนอกที่น้ำหนัก 300 ตัน ตัวอย่างที่วัดความเครียดได้ จะเหลือเพียง 2 ตัวอย่าง คือ SP12 และ SP16 จะเห็นว่า การโอบรัดของเหล็กเสริมจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด และความเครียดที่เหล็กเสริมของตัวอย่าง SP16 จะมีค่าน้อยกว่า SP12 อย่างเห็นได้ชัด เป็นที่น่าสังเกตุว่า ความเครียดสูงสุด ซึ่งแต่เดิมจะเป็นที่ระยะ 15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรง จะเปลี่ยนมาที่ระยะ 10 ซม. ซึ่งเป็นไปได้ว่า การแตกร้าวได้แพร่ขยายมากขึ้นในส่วนใกล้กับสมอยึดอันเนื่องมาจากการยุบตัวของสมอยึดเข้าไปในเนื้อคอนกรีตภายหลังการแตกร้าว และจะสังเกตุได้ว่าความเครียดสูงสุดของตัวอย่าง SP12 จะเลยจุดคลากออกไปทั้งที่ตัวอย่างยังไม่ถึงขั้นวิบัติ จะแสดงให้เห็นว่า เหล็กเสริมโอบรัดช่วยเพิ่มความเหนียว (Ductility) และกำลังประลัยต่อตัวอย่าง

เป็นที่น่าสังเกตุว่าในช่วงการใช้งานของสมอยึดการถ่ายแรงจะอยู่ในช่วงเบี่ยงเบนโดยแรงสูงสุดจะเท่ากับ 80% ของแรงดึงประลัยระบุของลวดอัดแรง สำหรับชุดตัวอย่างทดสอบนี้ จะประมาณ 180 ตัน ในรูปที่ 3.20 จะแสดงถึงการโอบรัดที่น้ำหนัก 200 ตัน ซึ่งเป็นน้ำหนักในช่วงเบี่ยงเบน จะเห็นว่า การกระจายความเครียดที่เหล็กเสริมขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. จะมีลักษณะป่องมากที่บริเวณใกล้กับสมอยึดและลดลงมากในส่วนปลายอีกด้านหนึ่ง ส่วนตัวอย่างที่เสริมเหล็กขนาดใหญ่ขึ้น การกระจายค่อนข้างราบเรียบโดยการป่องในส่วนใกล้กับสมอยึด และในส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะแตกต่างกันไม่มาก อย่างไรก็ตาม ยังคงป่องน้อยกว่าในตัวอย่างที่เสริมเหล็กขนาดเล็ก ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมจะทำให้การเสียรูปของตัวอย่าง (Deformation) น้อยลง อันจะนำมาถึงการควบคุมขนาดของรอยแตกร้าว นอกจากนั้น ยังช่วยถ่ายแรงโดยกระจายแรงอัดจากส่วนของสมอยึดไปยังส่วนปลายของตัวอย่างได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมที่มากเกินไป เป็นการไม่ประหยัด และในความเป็นจริงแล้ว เหล็กเสริมจะทำการโอบรัดได้ดีมากภายหลังการแตกร้าวของคอนกรีตเปลือกนอกซึ่งหุ้มเหล็กเสริมโอบรัด ซึ่งในช่วงนี้รอยแตกร้าวจะมีขนาดกว้างมาก โดยจะขึ้นกับขนาดของ

เหล็กเสริม สำหรับการใช้งานแล้ว รอยแตกร้าวที่มองเห็นได้เป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ทั้งนี้ รอยแตกร้าวอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนโดยความชื้น หรือสารเคมีจากภายนอกแทรกตัวเข้าไปตามรอยแตก อันจะทำให้สภาพการใช้งานที่ดี (Performace) ของโครงสร้างต้องสูญเสียไป ดังนั้น การใส่เหล็กเสริมโอบรัดปริมาณมากจะช่วยในแง่ของการเพิ่มความเหนียว และกำลังประลัยของตัวอย่างเป็นปัจจัยหลัก ซึ่งอาจจะมากจนเกินความต้องการและเหล็กเสริมจะทำงานได้ไม่เต็มที่ โดยจะสังเกตุจากรูปที่ 3.20 จะเห็นว่า ความเครียดในเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.ที่น้ำหนัก 300 ตัน จะเลยจุดคลากออกไป แต่ก็ยังคงสามารถรับน้ำหนักที่จุดวิบัติได้ถึง 353 ตัน ซึ่งจะประมาณ 1.6 เท่าของแรงดึงประลัยระบุของลวดอัดแรง จะเห็นว่า เป็นการเพียงพอสำหรับส่วนปลอดภัยที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. สามารถรับน้ำหนักประลัยได้ถึง 490 ตัน หรือประมาณ 2.2 เท่าของแรงดึงประลัยระบุของลวดอัดแรง จะเห็นได้ว่ามากเกินความจำเป็น ดังนั้น ปริมาณเหล็กเสริมที่พอเหมาะจะทำให้การโอบรัดของเหล็กเสริมเป็นไปได้ดีในช่วงการใช้งาน และมีส่วนปลอดภัยเพียงพอในกรณีที่มีการถ่ายแรงเกินกำหนด ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดในการอ่านเกจของเครื่องมือวัดหรือในกรณีอื่นๆ โดยจะช่วยป้องกันการวิบัติแบบทันที ทำให้บริเวณสมอยึดมีความเหนียว และกำลังประลัยเพียงพอจะถือได้ว่า เหล็กเสริมได้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

การพิจารณาปริมาณเหล็กเสริมที่พอเหมาะอาจพิจารณาได้จากรูปที่ 3.22 ซึ่งแสดงความเครียดสูงสุดที่เหล็กเสริมโอบรัด โดยแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดที่น้ำหนักในช่วงเบี่ยงเบนคือ 180 200 และ 220 ตัน ตามลำดับ ความเครียดสูงสุดในช่วงดังกล่าว จะอยู่ที่ระยะ 15 ซม. จากปลายด้านที่รับแรง จะเห็นได้ว่า ความเครียดจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมโอบรัด โดยจะลดลงมากในช่วงแรกของการเพิ่มปริมาณเหล็กเสริม หลังจากนั้น การควบคุมการเสียรูปโดยการโอบรัดจะเป็นไปได้ไม่ดีเท่าที่ควร โดยความเครียดจะลดลงน้อยเมื่อเทียบกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณเหล็กเสริม ดังจะเห็นได้จากที่ 180 ตัน ความเครียดจะลดลง 0.24 เท่า เมื่อปริมาณเหล็กเสริมเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า ที่ 200 ตัน ลดลง 0.45 เท่า และที่ 220 ตัน ลดลง 0.38 เท่า จะเห็นได้ว่าปริมาณเหล็กเสริมที่พอเหมาะจะอยู่ที่ประมาณ 4% โดยปริมาณเหล็กเสริมค่านี้จะทำการโอบรัดได้ดีที่สุดในช่วงของการใช้งาน เมื่อพิจารณากำลังประลัยจะเห็นได้ว่าตัวอย่างที่เสริมเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. จะคิดเป็นเปอร์เซนต์เหล็กต่อปริมาตรได้ 3.2% ซึ่งน้อยกว่า 4% กำลังประลัยจะสูงถึง 353 ตัน หรือประมาณ 1.6 เท่า ของแรงดึงประลัยระบุของลวดอัดแรงถือได้ว่าเป็นการเพียงพอสำหรับส่วนปลอดภัยที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นที่

ปริมาณเหล็กเสริม 4% จะทำให้การโอบรัดในช่วงการใช้งานดีที่สุด และทำให้ตัวอย่างมีความเหนียวและกำลังประลัยเพียงพอ และเหล็กเสริมจะทำงานได้เต็มประสิทธิภาพที่สุด

ปริมาณเหล็กเสริมที่พอเหมาะจากการวิจัยนี้ จะมีค่าน้อยกว่า การคำนวณออกแบบตามมาตรฐานการทดสอบของอังกฤษ (7) และมีค่ามากกว่าการคำนวณโดยอาศัยความคล้ายคลึงกับการพิจารณาปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามมาตรฐาน ACI (8) โดยมีค่า 6% และ 3.5 % ตามลำดับ

3.4 ผลของเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมโอบรัด

การกระจายของความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดสำหรับชุดการทดสอบที่เสริมเหล็กตามยาว จะแสดงในรูปที่ 3.23 การกระจายจะมีทั้งในช่วงเส้นตรง ช่วงเบี่ยงเบน และภายหลังการแตกร้าวที่น้ำหนัก 100, 200 และ 300 ตัน ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า การโอบรัดในช่วงเส้นตรงจะใกล้เคียงกันมาก แต่ก็ยังพอมองเห็นผลของเหล็กเสริมตามยาว โดยตัวอย่าง SP12L10 ซึ่งเสริมเหล็กตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ความเครียดจะมีค่าน้อยกว่าในตัวอย่าง SP12L0 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมเหล็กตามยาว ในช่วงของการเบี่ยงเบนที่น้ำหนัก 200 ตัน ผลของเหล็กเสริมตามยาว จะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น แต่เป็นที่น่าสังเกตว่า ความเครียดของตัวอย่าง SP12L10 ที่เสริมเหล็กตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. จะมีค่ามากกว่าตัวอย่าง SP12L0 เล็กน้อย และมากกว่าตัวอย่าง SP12L10 ค่อนข้างมาก ซึ่งจะเห็นว่าไม่น่าที่จะเป็นไปได้ แต่เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของคอนกรีตสำหรับตัวอย่างในชุดการทดสอบนี้จะได้ว่า ในตัวอย่าง SP12L0 f'_c = 499 กก/ซม.^{2} , f_{sp} = 44 กก/ซม.^{2} ตัวอย่าง SP12L10 f'_c = 450 กก/ซม.^{2} , f_{sp} =45 กก/ซม.^{2} และ ตัวอย่าง SP12L12 f'_c = 422 กก/ซม.^{2} , f_{sp} = 42 กก/ซม.^{2} จะเห็นว่า ตัวอย่าง SP12L12 คุณภาพของคอนกรีตจะด้อยที่สุดในกลุ่ม โดยตัวอย่าง SP12L0 จะมีคุณสมบัติดีที่สุด โดยเฉพาะ f'_c สูงเกือบ 500 กก/ซม.^{2} ซึ่งเป็นไปได้ว่า น้ำหนักในช่วงเบี่ยงเบนหรือในช่วงที่ตัวอย่างเกิดการแตกร้าวภายในซึ่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า การแตกร้าวของตัวอย่าง SP12L12 จะเกิดขึ้นก่อนตัวอย่างอื่นและที่ 200 ตัน ซึ่งเป็นน้ำหนักในช่วงของการใช้งานการแตกร้าวจะเพิ่มจำนวนมากขึ้น ทำให้การโอบรัดของตัวอย่าง SP12L12 จะเป็นไปได้ค่อนข้างมากกว่าตัวอย่างอื่น โดยจะสังเกตเห็นความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดจะมากขึ้นกว่าในอีก 2 ตัวอย่าง

แต่อย่างไรก็ตาม ภายหลังการแตกร้าวของคอนกรีตเปลือกนอกที่มองเห็นได้ที่น้ำหนัก 300 ตัน ในรูปที่ 3.23 จะเห็นว่า การโอบรัดของตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กตามยาวจะดีขึ้นกว่าในตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กตามยาวอย่างเห็นได้ชัด โดยความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัดสำหรับตัวอย่าง SP12L10 และ SP12L12 จะมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าน้อยกว่าตัวอย่าง SP12L0 ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า เหล็กเสริมตามยาว จะมีส่วนช่วยปรับปรุงพฤติกรรมของตัวอย่างภายใต้น้ำหนักบรรทุก โดยช่วยการโอบรัดของเหล็กเสริมปลอกเกลียว และ ช่วยในการถ่ายแรงทำให้ตัวอย่างมีการเสียรูป (Deformation) น้อย อันจะนำมาถึง สภาพการใช้งาน (Performance) ที่ดี ของบริเวณสมอยึด โดยจะช่วยป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ที่อาจเกิดขึ้นได้ในขณะถ่ายแรง อย่างไรก็ตาม การเสริมเหล็กตามยาว จะมีส่วนช่วยการโอบรัดได้ดีมากในช่วงของการเบี่ยงเบนหรือในช่วงใช้งาน และแม้ว่าในช่วงหลังของการแตกร้าว ผลดังกล่าวจะมีพอสมควรก็ตาม จากการสังเกตการแตกร้าวที่น้ำหนักในช่วงดังกล่าวที่ 300 ตัน จะเกิดรอยแตกร้าวจำนวนมากแผ่ขยายออกไป และมีขนาดกว้างมากขึ้น จนเห็นได้ชัด ซึ่งจะถือได้ว่า โครงสร้างนั้นไม่อยู่ในสภาพการใช้งานที่ดีต่อไป เพียงแต่เป็นการเตือนว่า ใกล้การวิบัติแล้ว โดยการที่บริเวณสมอยึดยังไม่เกิดการวิบัตินี้จะเกิดจากความเหนียวเนื่องจากการโอบรัดของเหล็กเสริมเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ผลของเหล็กเสริมตามยาวต่อกำลังของบริเวณสมอยึด จะไม่แตกต่างกันมากซึ่งจะได้กล่าวถึงโดยละเอียดต่อไป

3.5 กลไกการวิบัติของแท่งตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบบริเวณสมอยึด จะมีลำดับขั้นของการวิบัติที่แตกต่างกันอยู่ 2 แบบคือ การวิบัติของตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็ก และตัวอย่างที่เสริมเหล็ก ซึ่งจะรวมถึงตัวอย่างทดสอบชุดที่เสริมเหล็กตามยาวด้วย สำหรับตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็ก หลังจากเกิดการแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตตามแนวท่อร้อยลวดอัดแรงแล้ว การเพิ่มน้ำหนักต่อไปอีกไม่มากจะเกิดการวิบัติแบบทันทีโดยคอนกรีตเกิดการแตกระเบิดออกด้านข้าง และที่ใต้แผ่นเหล็กสมอยึดจะมองเห็นคอนกรีตรูปกรวยเหลี่ยม (Pyramid cone) ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.38 การเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลจากคอนกรีตใต้แผ่นเหล็กจะถูกยึดรั้งโดยแรงเสียดทานระหว่างแผ่นเหล็กและคอนกรีตซึ่งวัสดุทั้งสองมีความแข็ง (Stiffness) แตกต่างกัน ทำให้การขยายตัวออกทางด้านข้างของคอนกรีตเนื่องจากผลของอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio effect) ถูกยึดรั้งไว้ ผลดัง

กล่าวจะก่อให้เกิดการพัฒนาสถานะหน่วยแรงอัดสามแกน (Triaxial compressive stress state) ทำให้คอนกรีตภายในรูปกรวยเหลี่ยมมีความแข็งมากกว่าส่วนอื่น ผลจากการยึดรั้งจะน้อยลงที่บริเวณใกล้กับขอบของแผ่นเหล็กสมอยึด จากการพิจารณาสถานะหน่วยแรงและวงกลมมอร์ (Mohr circle) ดังแสดงในรูปที่ 3.24 และ 3.25 จะเห็นได้ว่าเมื่อการถ่ายแรงเพิ่มขึ้นหน่วยแรงเฉือนสูงสุดจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆและจะเกิดการวิบัติในระนาบของหน่วยแรงเฉือนสูงสุดจากรูปที่ 3.25 จะพบว่าระนาบนี้จะเกิดขึ้นที่ 45 องศา วัดจากแนวราบซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดคอนกรีตรูปกรวยเหลี่ยมขึ้นพร้อมๆกับเกิดการแตกร้าวตามแนวท่อร้อยลวดเนื่องจากการดันตัวของสมอยึดและคอนกรีตรูปกรวยเหลี่ยมดังได้กล่าวแล้ว จากผลการวัดความเครียดที่สมอยึดในหลายๆตัวอย่างจะพบว่าในขณะเกิดการแตกร้าวจะเกิดการแปรปรวนของความเครียด แสดงให้เห็นว่า ขณะเกิดการแตกร้าวจะเกิดการขยับตัวของสมอยึดพร้อมกับ คอนกรีตรูปกรวยเหลี่ยมจะดันตัวเข้าไปยังเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตเบ่งตัวออกด้านข้างและเกิดการปริแตกของผิวคอนกรีต

ส่วนในตัวอย่างที่เสริมเหล็ก ความเสียหาย เริ่มจากการแตกร้าวของผิวคอนกรีตตามแนวท่อร้อยลวดที่แกนกลางของตัวอย่าง ซึ่งน้ำหนัก ณ จุดนี้ จะมากกว่าตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการโอบรัดจะควบคุมการเกิดคอนกรีตรูปกรวยเหลี่ยมใต้แผ่นเหล็ก ภายหลังการแตกร้าวเหล็กเสริมโอบรัดจะช่วยเพิ่มความเหนียว (Ductility) และควบคุมการวิบัติแบบทันทีทำให้กำลังประลัยของตัวอย่างเพิ่มขึ้นมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเหล็กเสริมมีปริมาณมากขึ้น

ขณะเกิดการวิบัติของตัวอย่างรอยแตกร้าวจะกระจายทั่วไปรอบๆตัวอย่างทั้งในแนวขวางและในแนวขนานกับแนวแรง และเมื่อทำการกระเทาะคอนกรีตเปลือกนอกที่แตกร้าวจะหลุดร่อนออกได้โดยง่ายดังแสดงในรูปที่ 3.26 จะเห็นว่าพฤติกรรมการโอบรัดของเหล็กเสริมคล้ายคลึงกันกับเสาเสริมเหล็กปลอกเกลียว ซึ่งจะให้ผลการโอบรัดที่ดีกว่าเสาเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว (13)

อนึ่งเป็นที่น่าสังเกตุว่าเหล็กเสริมโอบรัดมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังแบกทาน (Bearing capacity) ของตัวอย่างในขณะเกิดการแตกร้าวและการวิบัติดังแสดงในตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงแบกทานใต้แป้นเหล็กสมอยึด ซึ่งได้จากน้ำหนักบรรทุกต่อพื้นที่แบกทานโดยหักลบพื้นที่ท่อร้อยลวด จะมีค่ามากกว่ากำลังอัดประลัยของตัวอย่างแท่งคอนกรีตทรงกระบอกอยู่ระหว่าง 1-3 เท่า ซึ่งในบรรดามาตรฐานการออกแบบทั่วไปในหลายๆประเทศ เช่น

CEB-FIP ACI AASHTO จะให้ความสำคัญสำหรับหน่วยแรงแบกทานมากโดยกำหนดไว้ไม่เกินค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต Stone และ Breen (6) ก็ได้ทำการศึกษาถึงผลอันนี้โดยพบว่าในระหว่างเกิดการวิบัติของตัวอย่าง หน่วยแรงแบกทานใต้แผ่นเหล็กสมอยึดสามารถเป็นไปได้ถึง 2.5 เท่าของ f'_c เขาได้สรุปว่าหน่วยแรงแบกทานไม่ใช่ตัวแปรหลักในการควบคุมพฤติกรรมอันซับซ้อนของบริเวณสมอยึดและยังได้สรุปว่าการกำหนดของมาตรฐานการออกแบบทั่วไปค่อนข้างจะอนุรักษ์มาก (Overconservative) อย่างไรก็ตามเขาได้เสนอสมการสำหรับหน่วยแรงแบกทานที่ยอมให้เพื่อประโยชน์ในการกำหนดขนาดของบริเวณสมอยึด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของแผ่นเหล็กสมอยึดต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของบริเวณสมอยึด

3.6 กำลังของแท่งตัวอย่าง

จากพฤติกรรมของแท่งตัวอย่างภายใต้น้ำหนักบรรทุกดังได้กล่าวแล้วใน 3.1-3.4 จะเห็นว่า กำลังของตัวอย่างจะมีทั้งในช่วงเส้นตรง กำลังเมื่อแตกร้าว และกำลังประลัย กำลังในช่วงเส้นตรงจะได้จากการพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับความเครียดที่เหล็กเสริมโอบรัด น้ำหนักที่จุดเบี่ยงเบนจะเป็นกำลังในช่วงเส้นตรง โดยจุดดังกล่าวจะเกิดการแตกร้าวภายในขนาดเล็กที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า (Microcracks) เหล็กเสริมจะทำการโอบรัดให้ตัวอย่างมีกำลังสูงขึ้น น้ำหนักเมื่อแตกร้าวจากการวิจัยนี้จะหมายถึงน้ำหนักที่จุดซึ่งความเครียดได้เพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันภายหลังการเบี่ยงเบน ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับการสังเกตุรอยแตกปริของผิวคอนกรีตตามแนวท่อร้อยลวดที่เริ่มมองเห็นได้ ส่วนกำลังประลัยจะหมายถึงจุดที่ตัวอย่างได้เกิดความเสียหายโดยจะเกิดการวิบัติแบบทันทีในตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กและเกิดการแตกร้าวขนาดใหญ่กระจายอยู่โดยรอบตัวอย่างที่เสริมเหล็ก ณ จุดนี้เข็มบนหน้าปัดบอกน้ำหนักของเครื่องทดสอบจะตกลงมา กำลังของตัวอย่างจากการโอบรัดของเหล็กเสริมจะได้พิจารณาแยกตามชุดการทดสอบดังนี้

3.6.1 ตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด

กำลังในช่วงเส้นตรงสำหรับตัวอย่างในชุดการทดสอบนี้ จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยเท่ากับ 130,130 และ 140 ตันในตัวอย่าง SP10,SP12 และ SP16 ตามลำดับ จะเห็นว่าไม่

i 10302074

แตกต่างกันมากโดยจะแสดงถึงผลของเหล็กเสริมโอบรัดต่อกำลังของตัวอย่างในช่วงเส้นตรง ซึ่งจะมีผลน้อย ผลของเหล็กเสริมโอบรัดจะเริ่มเด่นชัดยิ่งขึ้นต่อกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวและมีผลมากที่สุดต่อกำลังประลัย ซึ่งจะมีค่ามากกว่ากำลังเมื่อแตกร้าวของตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กเป็นอันมาก ดังแสดงในตารางที่ 3.3 การแตกร้าวของคอนกรีตจะสอดคล้องกันกับกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (5,6) ดังนั้นการพิจารณากำลังแตกร้าวและกำลังประลัยของตัวอย่างโดยคำนึงถึงคุณสมบัติของคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบจะเป็นการเหมาะสมยิ่งขึ้น ในรูปที่ 3.27 จะแสดงกำลังแตกร้าวและกำลังประลัยต่อ f'_c ,f_{sp} และ $\sqrt{f'_c}$ เมื่อ f'_c และ f_{sp} คือกำลังอัดประลัยและกำลังดึงแยกของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก จะเห็นว่าการพิจารณากำลังของตัวอย่างในรูปของกำลังต่อ f_{sp} จะค่อนข้างสมเหตุผลดีกว่ารูปแบบอื่น กำลังเมื่อแตกร้าวของบริเวณสมอยึดจะขึ้นกับความสามารถในการต้านแรงดึงของคอนกรีตซึ่งจะสามารถแทนได้โดยอ้อมด้วย f_{sp} นอกจากนั้นยังขึ้นกับปริมาณเหล็กเสริมและกำลังดึงที่จุดคลากของเหล็กเสริม กำลังของตัวอย่างต่อ f'_c และ $\sqrt{f'_c}$ จะมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามการพิจารณากำลังของตัวอย่างในเบื้องต้นนี้พอจะประเมินได้ว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมจะช่วยเพิ่มกำลังแตกร้าว นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มความเหนียวและกำลังประลัยต่อตัวอย่าง ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นที่เพิ่มขึ้นของกำลังประลัยเหนือกำลังเมื่อแตกร้าวจะเพิ่มตามปริมาณเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 3.27 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการมีส่วนปลอดภัยที่เพิ่มมากขึ้น

ในรูปที่ 3.38 จะแสดงถึงกำลังเมื่อแตกร้าวและกำลังประลัยโดยพิจารณาต่อ $\sqrt{f'_c}$ และ f_{sp} เมื่อแปรเปลี่ยนปริมาณเหล็กเสริม จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมจะช่วยเพิ่มกำลังแตกร้าวและกำลังประลัยต่อตัวอย่าง โดยในช่วงการทดสอบนี้จะเห็นว่ากำลังเมื่อแตกร้าวมีแนวโน้มว่าจะถูกจำกัดที่ปริมาณเหล็กเสริมค่าหนึ่งดังจะเห็นได้ชัดเจนจากแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่าง $P_{cr}/\sqrt{f'_c}$ กับปริมาณเหล็กเสริม จะพบว่าปริมาณเหล็กเสริมที่พอเหมาะคือ 4 % โดยเมื่อปริมาณเหล็กเสริมเพิ่มมากเกินกว่านี้จะไม่ทำให้กำลังเมื่อแตกร้าวสูงขึ้นแต่อย่างใดและยังเป็นการไม่ประหยัด เมื่อพิจารณากำลังประลัยจะเห็นว่าในช่วงของการทดสอบกำลังประลัยสามารถเพิ่มขึ้นได้เรื่อยๆเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมโอบรัด กำลังประลัยจะแสดงถึงการมีส่วนปลอดภัยหลังจากเกิดการแตกร้าวเริ่มแรกแล้ว

ในตารางที่ 3.4 จะแสดงถึงประสิทธิภาพของเหล็กเสริมโอบรัดโดยจะเทียบกับกำลังแตกร้าวของตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมโอบรัดโดยกำลังเมื่อแตกร้าวต่อ f_{sp} จะเพิ่มขึ้นได้ถึง 90% สำหรับปริมาณเหล็ก

เสริมที่มากที่สุดในชุดการทดสอบนี้ และเพิ่มขึ้นได้ถึง 55% เมื่อพิจารณาต่อ $\sqrt{f'_c}$ ส่วนกำลังประลัยจะเพิ่มขึ้นได้ถึง 244% เมื่อพิจารณาต่อ f_{sp} และเพิ่มขึ้นได้ถึง 180% เมื่อพิจารณาต่อ $\sqrt{f'_c}$ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมจะเป็นปัจจัยหลักในการช่วยเพิ่มความเหนียวและกำลังประลัยของบริเวณสมอยึด อย่างไรก็ตามการเสริมเหล็กโอบรัดที่มากเกินไปจะทำให้ตัวอย่างมีส่วนปลอดภัยที่มากเกินความจำเป็น ปริมาณเหล็กเสริมที่พอเหมาะจะเป็นที่ 4% โดยที่จุดนี้กำลังประลัยจะสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 130% ของกำลังแตกร้าวสำหรับตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็ก ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.29 จะเห็นว่าเป็นการเพียงพอสำหรับส่วนปลอดภัยในการป้องกันการวิบัติแบบทันทีของบริเวณสมอยึดภายหลังการแตกร้าว นอกจากนั้นใน 3.3 จะพบว่าที่ปริมาณเหล็กเสริมดังกล่าวจะให้ผลการโอบรัดในช่วงการใช้งานคือก่อนการแตกร้าวภายนอกที่ดีที่สุดด้วย

3.6.2 ตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กตามยาว

ในทำนองเดียวกันกับการพิจารณากำลังของแท่งตัวอย่างชุดที่เสริมเหล็กโอบรัด น้ำหนักที่จุดเบี่ยงเบนสำหรับตัวอย่าง SP12L0, SP12L10 และ SP12L12 จะมีค่า 130, 150 และ 120 ตันตามลำดับ จะเห็นว่าที่จุดเบี่ยงเบนของตัวอย่าง SP12L12 จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกันในกลุ่มตัวอย่างชุดนี้ ทั้งนี้อาจเกิดจากคุณสมบัติของคอนกรีตที่ด้อยที่สุดในกลุ่มดังจะเห็นได้จากตารางที่ 3.1 จึงทำให้เกิดการแตกร้าวก่อนตัวอย่างอื่น อย่างไรก็ตามกำลังในช่วงเบี่ยงเบนก็จะไม่แตกต่างกันจนเกินไปนัก จึงพอจะมองเห็นว่าผลของเหล็กเสริมโอบรัดและเหล็กเสริมตามยาวจะยังไม่ค่อยมีต่อกำลังในช่วงเส้นตรงอย่างเด่นชัด

ในรูปที่ 3.28 จะแสดงกำลังแตกร้าวและกำลังประลัยโดยพิจารณาในรูปของน้ำหนักต่อ f'_c, f_{sp} และ $\sqrt{f'_c}$ จะเห็นว่ากำลังแตกร้าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามยาว แต่จะพบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังแตกร้าวเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กตามยาวจะเพิ่มขึ้นน้อยมากโดยที่ปริมาณเหล็กเสริมตามยาวที่มากที่สุด กำลังแตกร้าวจะเพิ่มขึ้นเพียง 18%, 4.75% และ 8.75% เมื่อคิดจากน้ำหนักที่พิจารณาต่อ f'_c, f_{sp} และ $\sqrt{f'_c}$ ตามลำดับ หรือเพิ่มขึ้น 10.5% เมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ย ส่วนในด้านการเพิ่มกำลังประลัยจะเห็นว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นค่อนข้างเด่นชัดขึ้นกว่ากำลังเมื่อแตกร้าวโดยกำลังประลัยของตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาวมากที่สุดจะแตกต่างกับตัวอย่างที่ไม่เสริมเหล็กตามยาว 30%, 14.8% และ 19% เมื่อพิจารณาต่อ f'_c, f_{sp} และ $\sqrt{f'_c}$ ตามลำดับ หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยได้ 21.3% การเพิ่มของกำลังประลัยเหนือกำลัง

แตกร้าวก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเหล็กเสริมตามยาว ซึ่งการเพิ่มนี้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันดีมากทั้งใน 3 กรณีโดยเพิ่มขึ้น 42% ในตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาว 49% และ 55% สำหรับตัวอย่างที่เสริมเหล็กตามยาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. และ 12 มม. ตามลำดับ

จากการพิจารณาผลทางด้านกำลังดังกล่าวแล้วจะเห็นว่าเหล็กเสริมตามยาวจะมีผลน้อยมากต่อกำลังเมื่อเริ่มแตกร้าวของตัวอย่าง แต่จะมีผลบ้างในแง่ของการเพิ่มกำลังประลัย และส่วนปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นจากกำลังเมื่อแตกร้าวของตัวอย่าง อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวจะไม่มากและเพียงพอในการที่จะเป็นปัจจัยหลักสำหรับการออกแบบบริเวณสมอยึด การเสริมเหล็กตามยาวจะเป็นการปรับปรุงพฤติกรรมของบริเวณสมอยึดภายใต้การอัดแรงให้ดียิ่งขึ้น เช่นการช่วยโอบรัดโดยทำงานร่วมกับเหล็กเสริมปลอกเกลียว จะช่วยในการถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคาร และลดการเสียรูปโดยการป่องตัวด้านข้างอันจะมีผลในการควบคุมการแตกร้าวดังได้กล่าวไว้ใน 3.4 นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มความปลอดภัยโดยจะมีกำลังประลัยที่สูงเหนือกำลังเมื่อแตกร้าวเพิ่มขึ้น

ดังนั้นการเสริมเหล็กตามยาวที่พอเหมาะโดยไม่ทำให้เกิดความแน่นของเหล็กเสริม ซึ่งจะทำให้การเทคอนกรีตเป็นไปไม่สะดวก จะมีผลต่อสภาพการใช้งาน (Performance) ที่ดีของบริเวณสมอยึด

3.7 การพิจารณาออกแบบเหล็กเสริมบริเวณสมอยึด

จากการทดสอบในการวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของแท่งตัวอย่าง และกำลังของตัวอย่างจากผลการโอบรัดของเหล็กเสริม ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกันกับพฤติกรรมของเสาสั้นเสริมเหล็กปลอกเกลียว โดยการโอบรัดของเหล็กเสริมจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเกิดการแตกร้าวภายในของตัวอย่าง ซึ่งในช่วงนี้อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของคอนกรีตจะมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดการป่องตัวด้านข้างมากขึ้น เหล็กเสริมจะทำการโอบรัดให้ตัวอย่างมีกำลังสูงขึ้นและมีผลให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในเหล็กเสริม จะเห็นได้ว่าปัจจัยเบื้องต้นที่จะมีผลต่อพฤติกรรมและกำลังของบริเวณสมอยึดจะได้แก่ ปริมาณเหล็กเสริม กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต และอีกปัจจัยหนึ่งที่น่าจะมีผลในการควบคุมหน่วยแรงดึงในคอนกรีตคือการจัดวางเหล็กเสริม ในรูปที่ 3.30 จะแสดงถึงการกระจายหน่วยแรงดึงในคอนกรีตของตัวอย่างที่เสริมเหล็กโอบรัดแบบปลอกเกลียว จากไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ โดยให้เหล็กเสริมมีขนาดคงที่แล้วแปรเปลี่ยนขนาดของวงเกลียว จะเห็นว่า ตัวอย่างที่เสริมเหล็กโดย

ให้มีวงเกลียวขนาดใหญ่หน่วยแรงดึงในคอนกรีตทั้งที่ผิวเปลือกนอกและภายในส่วนที่ถูกโอบรัดโดยเหล็กเสริมจะมีค่าน้อยกว่าในตัวอย่างที่เสริมเหล็กโดยให้มีวงเกลียวขนาดเล็ก ดังนั้นการเสริมเหล็กจะต้องจัดวางเหล็กเสริมโดยให้มีขนาดของวงเกลียวใหญ่ที่สุดเท่าที่จะทำได้จะมีผลในการควบคุมหน่วยแรงดึงในคอนกรีตบริเวณสมอยึดได้ดียิ่งขึ้น

3.7.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังของบริเวณสมอยึด

จากการทดสอบและการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการโอบรัดของเหล็กเสริมปลอกเกลียวที่มีต่อกำลังของบริเวณสมอยึดซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกับการโอบรัดของเหล็กเสริมปลอกเกลียวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกำลังของบริเวณสมอยึดจะได้แก่

- ปริมาณเหล็กเสริม
- กำลังดึงที่จุดคลากของเหล็กเสริม
- ลักษณะการเสริมเหล็กเช่น การจัดระยะเรียง และขนาดของวงเกลียว
- กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต

ตัวแปรเหล่านี้จะได้นำมาประกอบการพิจารณาเพื่อหาสมการสำหรับประเมินกำลังเมื่อแตกร้าว และกำลังประลัยของบริเวณสมอยึดซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

3.7.2 วิธีการออกแบบ

การออกแบบบริเวณสมอยึดจะยึดถือตามวิธีภาวะสุดขีด(Limit state design) ซึ่งได้มีการสรุปรวบรวมโดย Stone และ breen (13) โดยให้ความหมายดังนี้คือ

ภาวะสุดขีด หมายถึงภาวะซึ่งโครงสร้างไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์โดยอาจเกิดความเสียหายต่างๆต่อโครงสร้าง เช่น การแตกร้าว การวิบัติแบบทันที ของโครงสร้าง เป็นต้น

วิธีนี้เป็นวิธีการที่เหมาะสมมากสำหรับการออกแบบบริเวณสมอยึด เนื่องจากได้มีการพิจารณาถึงความเป็นไปได้ของรูปแบบความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในขณะการใช้งาน เช่น การแตกร้าว และการวิบัติเป็นต้น โดยจะใช้ส่วนปลอดภัย (Factor of safety) และตัวคูณลดค่ากำลัง (Strength reduction factor) เนื่องจากความไม่แน่นอนของวัสดุโครงสร้างที่เหมาะสม น้ำหนักเมื่อแตกร้าวจะกำหนดที่ $1.1f_{pu}A_{pu}$ ส่วนน้ำหนักประลัยจะกำหนดที่ $1.6f_{pu}A_{pu}$ เมื่อ f_{pu} = กำลังดึงประลัยระบุของลวดอัดแรง (กก/ซม.^{2}) A_{pu} = เนื้อที่หน้าตัดของลวดอัดแรง (ซม.^{2})

3.7.3 การออกแบบเหล็กเสริมโอบรัดแบบปลอกเกลียว

จากการพิจารณาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกำลังของบริเวณสมอยึดและในรูปที่ 3.28 จะสามารถประเมินน้ำหนักแตกร้าวและน้ำหนักประลัยได้จาก

$$P_{cr} = 10.4\sqrt{f'_c}\ A_c \qquad (3.1)$$

$$P_u = 15.7\sqrt{f'_c}\ A_c \qquad (3.2)$$

เมื่อ

P_{cr} = น้ำหนักแตกร้าวของบริเวณสมอยึดเมื่อเสริมเหล็กโอบรัดแบบปลอกเกลียว (กก.)

P_u = น้ำหนักประลัยของบริเวณสมอยึดเมื่อเสริมเหล็กโอบรัดแบบปลอกเกลียว (กก.)

f'_c = กำลังอัดประลัยของแท่งตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก (กก/ซม.^{2})

A_c = เนื้อที่หน้าตัดของบริเวณสมอยึดโดยหักลบพื้นที่ท่อร้อยลวด (ซม.^{2})

การเสริมเหล็กจะใช้ปริมาณเหล็กเสริมที่พอเหมาะที่สุดดังได้กล่าวมาแล้วใน 3.3 คือ 4 % โดยจะคำนึงถึงกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมโอบรัด ซึ่งจะกำหนดกำลังดึงที่จุดคลากของเหล็กเสริม

ไม่ควรจะน้อยกว่า 3000 กก./ซม.^{2}

สำหรับการออกแบบ P_{cr} จากสมการที่ 3.1 จะต้องไม่น้อยกว่า $1.1f_{pu}A_{pu}$ และ P_u จากสมการที่ 3.2 จะต้องไม่น้อยกว่า $1.6f_{pu}A_{pu}$

3.7.4 ข้อแนะนำสำหรับการออกแบบ

เพื่อให้การโอบรัดของเหล็กเสริมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดในการควบคุมหน่วยแรงดึง และการเสียรูปของบริเวณสมอยึดอันจะทำให้สภาพการใช้งาน (Performance) ดีที่สุด และตัวอย่างจะมีกำลังแตกร้าวและกำลังประลัยสูงขึ้น จึงต้องมีการกำหนดข้อแนะนำสำหรับการออกแบบโดยพิจารณาผลต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบ และการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอเลเมนต์ 3 มิติ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

(1) ขนาดของบริเวณสมอยึด ได้จากการพิจารณารูปลูกบาศก์เหมือนกับวิธีการของ Rhode และ Turner ดังแสดงในรูปที่ 1.8 โดยวิธีการสังเกตุระยะซึ่งน้อยที่สุดจากกึ่งกลางของสมอยึดถึงผิวนอกของคอนกรีต หรือระยะครึ่งหนึ่งของระยะห่างระหว่างแกนกลางของสมอยึดที่อยู่ติดกัน

(2) การเสริมเหล็กโอบรัดแบบปลอกเกลียว ต้องพยายามให้ขนาดของวงเกลียวใหญ่ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และเสริมชิดติดกับแผ่นเหล็กของสมอยึดต่อเนื่องไปไม่น้อยกว่าระยะเท่ากับความกว้างของสมอยึดรูปลูกบาศก์

(3) สำหรับเปอร์เซ็นต์เหล็กโดยปริมาตรของคอนกรีตที่กำหนด เหล็กเสริมขนาดเล็กแต่มีระยะเรียงถี่จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเหล็กเสริมขนาดใหญ่แต่ระยะเรียงห่าง อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงความสะดวกต่อการเทคอนกรีต จึงกำหนดระยะเรียงไว้ไม่น้อยกว่า 2.5 ซม. หรือ 4/3 เท่าของขนาดมวลรวมใหญ่ที่สุดตามมาตรฐาน ACI สำหรับเสาปลอกเกลียวโดยเหล็กเสริมต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 6 มม.

3.7.5 ตัวอย่างการออกแบบ

การออกแบบโดยอ้างอิงผลการทดสอบจากการวิจัย จะสะดวกและรวดเร็วดังจะได้แสดงในตัวอย่างต่อไปนี้

สมอยึดแบบ 7K13 ของ Fryssinet มีขนาดของแป้นเหล็กสมอยึด 16 x 16 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อร้อยลวดขนาด 6.10 ซม. สำหรับลวดเกลียวอัดแรง 7 เส้น $f_{pu}A_{pu}$ = 131 ตัน ขนาดหน้าตัดของบริเวณสมอยึด 27 x 27 ซม. f'_c = 420 กก./ซม.^{2} f_y = 3000 กก./ซม.^{2}

$$A_c = 27 \times 27 - 3.14 \ (\ 6.1 \ ) \ (\ 6.1 \ ) \ / \ 4 \ = \ 700 \text{ ซม.}^2$$

$$P_{cr} = 1.1 f_{pu} A_{pu} = 1.1 \ (\ 131 \ ) \ = \ 144 \text{ ตัน}$$

$$P_u = 1.6 f_{pu} A_{pu} = 1.6 \ (\ 131 \ ) \ = \ 209.6 \text{ ตัน}$$

จาก (3.1) $P_{cr} = 10.4\sqrt{f'_c} \ A_c$

$= 10.4 \ \ 420 \ \ 700 \ /1000 = 149$ ตัน $>$ 144 ตัน

จาก (3.2) $P_u = 15.7\sqrt{f'_c} \ A_c$

$= 15.7 \ \ 420 \ \ 700 \ /1000 = 225$ ตัน $>$ 209.6 ตัน

ถ้าเลือกเส้นผ่าศูนย์กลางของวงเกลียว 22 ซม. ระยะเรียง 5 ซม. จะได้ว่า

$$p = 4A_s \ / \ Ds$$

$$4/100 = 4\ A_s\ /\ 22(5)$$

$$A_s = 1.1 \text{ ซม.}^2$$

ดังนั้นใช้เหล็กเสริมขนาด 12 มม. @ 5 ซม. $A_s = 1.13$ ซม.^{2}