บทที่ 5

การวิเคราะห์

5.1 การโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืน

ในงานวิจัยนี้ได้มีตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 14 ตัวอย่างและในสองชุดหลังของตัวอย่างทดสอบได้ให้ระยะห่างของเหล็กปลอกเป็นตัวแปร ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องวิเคราะห์หาระยะห่างของเหล็กปลอกที่ป้องกันการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืน และส่งผลให้เหล็กเสริมยืนสามารถรับน้ำหนักได้ถึงจุดคลาก ในการวิเคราะห์ได้แยกเป็น 2 กรณี คือในกรณีที่ถือว่าคอนกรีตที่หุ้มมีผลต่อหน้าตัด และอีกกรณีในช่วงพลาสติกเมื่อคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเกิดการแตกแยกจากผิวเหล็กเสริมและถือเสมือนว่าคอนกรีตที่หุ้มไม่มีผลต่อการยึดเหล็กเสริมยืน

5.1.1 วิเคราะห์เหล็กเสริมยืนโดยคิดคอนกรีตที่หุ้ม

ในช่วงอีลาสติกที่ยังไม่มีการแตกร้าวขึ้นในเนื้อคอนกรีต โดยเฉพาะคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมยืนยังสามารถที่จะพิจารณาวิเคราะห์การโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนโดยคิดสมบัติของหน้าตัดที่มีคอนกรีตหุ้มอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยตัดหน้าตัดเสามาหนึ่งในสี่ส่วน การวิเคราะห์อาจใช้วิธีการแปลงหน้าตัดของเหล็กและคอนกรีตให้เป็นอย่างหนึ่งอย่างใดโดยอาศัยความสัมพันธ์ของไมดูลัสยืดหยุ่นในช่วงอีลาสติกเป็นสัดส่วนการแปลงหน้าตัด

จากตัวอย่างทดสอบทุกต้นได้ใช้วิธีการแปลงหน้าตัดของเหล็กเสริมยืนให้เป็นคอนกรีตโดยอาศัยหน้าตัดในรูปที่ 5.1 และโดยใช้หน่วยแรงที่วัดได้ก่อนการวิบัติเป็นหน่วยแรงวิกฤติ แล้วทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ 4.1 โดยเปลี่ยนค่า E_t เป็นค่า E_c ของคอนกรีต และให้ค่า s เป็นระยะห่างของเหล็กปลอกแทนค่า L ผลการวิเคราะห์หาระยะโก่งเดาะ แสดงในตารางที่ 5.1

ผลการวิเคราะห์แบบนี้จะเห็นได้ว่าไม่มีตัวอย่างทดสอบแบบใดเลยที่มีการโก่งเดาะในเหล็กเสริมยืนในช่วงแรก และลักษณะการณ์ จะเปลี่ยนไปเมื่อแรงอัดเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเกิดการยืดตัวทางด้านข้างในเนื้อคอนกรีตสูง จนเกิดการแตกล่อนภายใน และทำให้ผิวเหล็กและคอนกรีต

ส่วนนอกกับแกนในจะแยกออกจากกัน ดังนั้นจึงสมควรที่จะมาพิจารณาช่วงหลัง เมื่อคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวเกิดขึ้นดังกรณีที่ 2

5.1.2 วิเคราะห์เหล็กเสริมยืนเส้นเดียว

ในการวิเคราะห์แบบนี้ได้สมมติว่า เนื้อคอนกรีตที่หุ้มเหล็กอยู่ไม่มีผลต่อคุณสมบัติหน้าตัดของเหล็กเสริมเลยจะคิดค่ายังส์โมดูลัสเป็นของเหล็กเสริมยืนเพียงอย่างเดียว และให้ตัวคูณค่าความยาวประสิทธิผล(Effective length Factor),k มีค่าเป็น 1.0 โดยถือว่าไม่มีการยึดรั้งที่หัวท้ายของเหล็กเสริมยืนในกรณีของเสา C001 ส่วนเสาตัวอย่างต้นอื่น ๆ ซึ่งมีเหล็กปลอกเสริมในช่วงกลางของเสาจะใช้ค่า K = 0.7 ตามรูปที่ 4.1 ทั้งนี้ถือว่าเหล็กเสริมยืนจะต้องถึงจุดคลากหรือหน่วยแรงวิกฤติ, f_{cr}, ของเหล็กเสริมยืนจะมีค่าเท่ากับกำลังคลาก, f_y จะพบว่าระยะสูงสุดของเหล็กปลอกที่ไม่ทำให้เกิดการโก่งเดาะจะมีค่า 30.05 ซม. ในกรณีของเสา C001 และ 42.93 ซม. ในกรณีเสาต้นอื่น ๆ แต่ถ้าแทนค่าหน่วยแรงวิกฤติที่ได้จากการวัดก่อนการวิบัติเล็กน้อย จะพบว่าระยะโก่งเดาะจะมีค่าแตกต่างกันไป ดังตารางที่ 5.1

จากผลการทดสอบใน เสา C001 ซึ่งเป็นเสาที่ไม่มีเหล็กเสริมในช่วงกลาง มีเพียงเหล็กปลอกยึดหัวท้ายของโครงเหล็กข้างละ 2 ปลอก ระยะห่างสุทธิ 90 ซม. ซึ่งเกินกว่าระยะวิกฤติ จากการคำนวณทางทฤษฎี จึงถือว่าเหล็กเสริมยืนเกิดการโก่งเดาะก่อนถึงกำลังคลากและผลการทดสอบพบว่า เสา C001 ซึ่งมีหน่วยแรงก่อนการวิบัติโดยคำนวณจากความเครียดมีค่า 3445 กก/ซม. คิดเป็นร้อยละ 97 เปรียบเทียบกับกำลังคลากจริงที่ได้จากการทดสอบเหล็กด้วยการดึง เห็นได้ว่าค่อนข้างจะสอดคล้องกับทางทฤษฎี คือพอจะกล่าวได้ว่าที่น้ำหนักประลัยของเสา C001 มีผลเนื่องมาจากการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนด้วย

จากผลการทดสอบของเสาที่เสริมเหล็กปลอก ปรากฏว่าที่น้ำหนักประลัย มีเสาทดสอบ CT300 และ CS300 ซึ่งมีเหล็กปลอก 6 มม. เสริมระยะห่าง 30 ซม. มีหน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมยืนต่ำกว่ากำลังคลากประมาณ 7 % จึงอาจกล่าวได้ว่า เหล็กเสริมยืนอาจจะเกิดการโก่งเดาะก่อนการวิบัติเล็กน้อย จากการตรวจสอบหาค่าความเครียดด้านข้างที่สอดคล้องกับโมดูลัสของการแตกร้าวและกำลังดึงแยกตัวดังตารางที่ 5.2 จะให้ค่าเฉลี่ยของความเครียดทางด้านข้างมีค่าเฉลี่ยประมาณ 116×10^{-6} จากผลการวัดค่าความเครียด

I16552378

เหล็กปลอกในเสา CT300 และ CS300 เมื่อเสาถึงกำลังประลัยมีค่า 511×10^{-6} และ 446×10^{-6} ตามลำดับซึ่งสูงกว่าความเครียดการแตกร้าว ดังนั้นในช่วงเสาวับน้ำหนักถึงน้ำหนักประลัยนั้นคอนกรีตได้มีการแตกร้าวด้านข้างเกิดขึ้น การวิเคราะห์การโก่งเดาะของเหล็กเยื่นในเสาสองต้นนี้ควรจะพิจารณาใช้กรณีที่ 2 คือ วิเคราะห์เหล็กเสริมยืนเส้นเดียวโดยไม่คิดผลของคอนกรีตที่หุ้มอยู่

อนึ่งการวิเคราะห์ตามสมการ 4.1 ดังแสดงผลในตารางที่ 5.1 นั้น พบว่าระยะวิกฤติของเหล็กปลอกอาจจะห่างสูงสุด 42.9 ซม. เมื่อใช้ค่า k = 0.7 แต่เมื่อใช้ค่าk=1.0ก็จะได้ระยะวิกฤติของเหล็กปลอก 30.05ซม. ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า ผลการทดสอบสอดคล้องกับการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะที่เหล็กปลอกมีการขยายตัวด้านข้างเล็กน้อย จึงส่งผลให้ค่า k เพิ่มขึ้นได้และมีค่าเข้าใกล้ 1.0 เพื่อการยืนยันผลการวิเคราะห์อันนี้ จากตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่า เสา C001, CT300 และ CS300 นั้นกำลังคอนกรีตที่น้ำหนักประลัยเพียง 0.828, 0.793 และ 0.798 ของกำลังอัดทรงกระบอกตามลำดับ ซึ่งจะน้อยกว่าที่ควรจะเป็นตามหัวข้อ 5.2 ก. หรือเทียบกับเสา C000 ซึ่งเป็นเสาคอนกรีตล้วนซึ่งมีค่า 0.928 f'_c จึงสรุปได้ว่าเสาทดสอบ C001, CT300 และ CS300 เกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนก่อนถึงน้ำหนักประลัยจริง

ดังนั้นภายใต้สภาวะเงื่อนไขจุดยึดปลายเป็นจุดหมุนทั้ง 2 ข้าง โดยใช้สัมประสิทธิ์ k = 1.0 และใช้โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมยืนธรรมดาแทนค่า Tangent Modulus ของเหล็กเสริมยืนแล้วระยะห่างของเหล็กเสริมทางขวางที่เหมาะสมและจะกันไม่ให้เหล็กเสริมยืนโก่งเดาะก่อนถึงจุดหลากควรจะห่างน้อยกว่าระยะที่คำนวณจากสมการของ Euler ซึ่งก็คือสมการที่ 4.12 นั่นเอง

เกี่ยวกับขนาดของเหล็กเสริมทางขวางตามสมการที่ 4.10 นั้น ถ้าแทนค่าระยะห่าง 30.05 ลงไปจะได้ขนาดของเหล็กทางขวางที่จะกันไม่ให้เหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะก่อนกำหนดเนื่องจากสติฟเนสเหล็กปลอกไม่เพียงพอนั้นใช้ขนาด 1.1 มม. ก็พอ แต่ถ้าแทนค่าระยะห่าง 15 ซม. ลงไป จะได้ขนาดของเหล็กปลอกเป็น 3 มม. จะเห็นได้ว่า ในเสาทุกต้นที่ระยะห่าง 15 ซม. ลงมาเหล็กเสริมยืนรับน้ำหนักถึงจุดหลากทั้งหมด และเนื่องจากในเสาทุกต้นมีเหล็กเสริมทางขวางขนาด 6-12 มม. ซึ่งมากเกินพอ ดังนั้น ขนาดเหล็กเสริมที่ใช้อยู่เพียงพอที่จะกันไม่ให้เหล็กเสริมยืนเกิดการโก่งเดาะก่อนถึงกำหนดหลาก และการโก่งเดาะที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องมาจากระยะห่างของเหล็กปลอกเป็นสำคัญ

5.2 กำลังรับทุกในแนวแกน

กำลังรับทุกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก อาจแยกเป็นกำลังส่วนที่คอนกรีตรับและส่วนที่เหล็กเสริมรับ และส่วนที่เป็นกำลังเพิ่มเติมของแกนคอนกรีตอันเนื่องมาจากการโอบของเหล็กเสริมทางขวาง ในการวิเคราะห์จะแยกออกแต่ละส่วนดังนี้

5.2.1 กำลังรับทุกในคอนกรีต

เนื่องจากกำลังของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบด้วยตัวอย่างรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39-80 เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังคอนกรีตจริงในโครงสร้างไม่เท่ากันนัก ด้วยผลอันเนื่องจากรูปร่างหน้าตัด หรือสัดส่วนของขนาดหน้าตัดเทียบกับความสูงของตัวอย่างทดสอบ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ขนาดและรูปร่างของตัวอย่างทดสอบเหมือนกันหมดจึง

สามารถหาความสัมพันธ์ของกำลังคอนกรีตระหว่างรูปทรงกระบอกมาตรฐานกับตัวอย่างทดสอบโดยการวิเคราะห์จากตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กเสริม

การวิเคราะห์กระทำโดยนำค่าความเครียดที่อ่านได้จากการทดสอบไปหาหน่วยแรงของคอนกรีต จากรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและความเครียดที่ได้จากการทดสอบวัสดุตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 จากค่าหน่วยแรงที่ได้ ได้นำมาทำให้ไม่มีหน่วยด้วยการหารด้วยค่าหน่วยแรงประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกและเขียนกราฟเทียบกับหน่วยแรงที่แท้จริงที่ได้จากการทดสอบทุกอย่าง คือเอาน้ำหนักที่วัดได้หารด้วยพื้นที่หน้าตัดและทำให้อยู่ในรูปที่ไม่มีหน่วยโดยนำเอาหน่วยแรงประลัยของคอนกรีตทรงกระบอกไปหาร จากกราฟที่ได้จะแทนได้ด้วยเส้นตรงตามวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least-Square Method) และความลาดชันจะเป็นตัวแปรความสัมพันธ์ของหน่วยแรงของคอนกรีตในเสาเทียบกับหน่วยแรงจากคอนกรีตทรงกระบอก

จากตัวอย่างเสาคอนกรีต C000ซึ่งเป็นเสาคอนกรีตล้วนวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวจากตารางที่ 5.4 แสดงในรูป 5.3ก และเมื่อเขียนกราฟตามวิธีกำลังสองน้อยสุด(Least-Square Method) แล้วได้ค่าความชันของกราฟ 0.947 เนื่องจากบานิต สิริกุลได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตล้วน มีหน้าตัดและความยาวเช่นเดียวกับการทดสอบในงานวิจัยนี้อีกทั้งใช้คอนกรีตกำลังสูงมากเช่นกัน จึงได้นำข้อมูลการทดสอบของเขามาวิเคราะห์ในทำนองเดียวกัน จากตารางที่ 5.5 ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.3 ข และเมื่อหาค่าความลาดชันได้ค่า 0.951

เมื่อนำค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรค่าหน่วยแรงของคอนกรีตจากกำลังทรงกระบอกไปเป็นกำลังในเสาตัวอย่างทดสอบ จากสองตัวอย่างจะให้ค่าเฉลี่ย 0.949 ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ในรูปสมการว่า

$$P_c = 0.95 f_c A_c \quad \text{.....(5.1)}$$

เมื่อ f_c = หน่วยแรงอัดที่หาได้จากการทดสอบลูกปูนทรงกระบอก

A_c = เนื้อที่หน้าตัดสุทธิของคอนกรีต

P_c = กำลังรับน้ำหนักของเสา

5.2.2 <u>กำลังบรรทุกในเหล็กเสริมยืน</u>

จากการทดสอบได้มีการบันทึกความเครียดของเหล็กเสริมยืนโดยตลอดตั้งแต่เริ่มบรรทุกน้ำหนักจนถึงขั้นวิบัติ ดังนั้น จากค่าความเครียดที่วัดได้นี้สามารถหาหน่วยแรงของเหล็กเสริมยืนได้ โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดที่ได้จากการทดสอบวัสดุโดยการดัง เหล็กดังได้แสดงในรูปที่ 5.4 เนื่องจากความสัมพันธ์ดังกล่าวส่วนมากจะรับแรงอยู่ 2 ช่วงแรก คือในช่วงที่ความเครียดยังไม่ถึงจุดคลากซึ่งจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงอาจใช้โมดูลัสยืดหยุ่นเป็นตัวแปลง จะสามารถใช้สมการที่ 4.18 คำนวณหาค่ากำลังรับน้ำหนักในเหล็กเสริมยืน ส่วนในช่วงหลังเมื่อความเครียดถึงจุดคลากแล้วจะเปลี่ยนมาใช้สมการที่ 4.19 แทน โดยถือว่ากำลังคลากของเหล็กเสริมยืนไม่ได้เพิ่มไปจากกำลังคลาก เพราะจากการทดสอบพบว่า การทดตัวสุดยังไม่ถึงจุดที่ทำให้เกิด Strain Hardening ทั้งนี้ถือว่าความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดของเหล็กเสริมยืนกับความเครียด จะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับแรงดึงซึ่งได้จากการทดสอบวัสดุตามมาตรฐาน[10] ในรูปที่ 5.5 ได้แสดงความสัมพันธ์ที่ใช้นี้ตามสมการที่ 4.18 และ 4.19 โดยที่โมดูลัสของการยืดหยุ่นมีค่า $2.03\ 10^6$ กก/ซม^2 กำลังคลากมีค่า 3550 กก/ซม^2 และความเครียดที่จุดคลากมีค่า 0.001748

5.2.3 <u>กำลังบรรทุกจากผลการโอบของเหล็กเสริมทางขวาง</u>

น้ำหนักบรรทุกของเสาทดสอบอันเกิดจากการผลการโอบของเหล็กเสริมตามขวาง สามารถหาได้จากการทดสอบ โดยการหักกำลังส่วนที่คอนกรีตและเหล็กเสริมยืนรับออกไป หรืออาจเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\Delta P = P_{test} - P_c - P_s \quad \text{..... (5.2)}$$

เมื่อ ΔP = กำลังบรรทุกที่เพิ่มขึ้นจากผลการโอบของ เหล็กปลอก

P_{test} = กำลังบรรทุกจากการทดสอบ

P_c = กำลังบรรทุกของคอนกรีต

P_s = กำลังบรรทุกของ เหล็ก เสริมยืน

ผลที่เกิดจากการ โอบของ เหล็กปลอกนี้จะนำไปวิ เคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการโอบอีกต่อหนึ่ง ซึ่งจะได้กล่าวรายละ เอียดภายหลัง

เมื่อนำผลที่ได้จากการวิ เคราะห์กำลังที่บรรทุกด้วยคอนกรีต เหล็ก เสริมยืนมารวม เข้าด้วยกันและ เขียนกราฟเปรียบ เทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5.6 - 5.18 จะเห็นได้ว่าผลการโอบจะแปรตามกับน้ำหนักบรรทุกรวม กล่าวคือในช่วงที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกรวมกับความ เครียดในแนวแกนยัง เป็น เส้นตรง จะไม่ค่อย เห็นผลการ โอบมากนัก แต่พอกราฟ เริ่ม เบี่ยง เบนออกจากแนว เส้นตรงจะพบว่าการโอบของ เหล็กปลอกจะ เพิ่มมากขึ้น เรื่อย ๆ และจะสูงสุด เมื่อคอนกรีตแตกล่อนออก

5.3 กำลังคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจากการโอบของ เหล็ก เสริมทางขวาง

จากที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า กำลังบรรทุกส่วนที่เพิ่มขึ้นจากผลรวมของกำลังบรรทุกจากคอนกรีตและ เหล็ก เสริมยืน ถือว่า เป็นผลสืบ เนื่องมาจากการโอบของ เหล็ก เสริมทางขวางที่มีต่อแกนคอนกรีตและสามารถแปลงค่าให้ เป็นหน่วยแรงในแกนคอนกรีตได้โดยการหารด้วยพื้นที่หน้าตัด เฉพาะส่วนที่ เป็นแกนคอนกรีต เท่านั้น

ดังนั้น $\Delta f_c = \Delta P / A_c$ .....(5.3)

เมื่อ Δf_c = หน่วยแรงอัดของแกนคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

A_c = เนื้อที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต

จากการทดสอบจะ เห็นว่า กำลังในส่วนของแกนคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น มีปรากฏในชุดทดสอบต่าง ๆ คือ ชุดของ เหล็กปลอก เดี่ยวจะ เพิ่ม เฉพาะใน เสาที่มีระยะห่างของ เหล็กปลอกตั้งแต่ 7.5 ซม. ลงไปถึง 2.5 ซม. ส่วนในชุดของ เสา เสริม เหล็กปลอก เกลียวนั้นพบว่า

ในเสาทดสอบแทบทุกต้นยกเว้นในเสาที่มีระยะเหล็กปลอกเกิน 15 ซม. กราฟที่แสดงในรูปที่ 5.19 และ 5.20 แกนตั้งเป็นค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นคำนวณจากสมการ 5.3 แล้วหารด้วย f'_c เพื่อให้อยู่ในรูปที่ไม่มีหน่วย ส่วนแกนนอนเป็นความเครียดทางขวางที่วัดได้จากเหล็กปลอกจะเห็นได้ว่าจุดต่าง ๆ ของกราฟอาจแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ในช่วงแรกที่ความเครียดของเหล็กปลอกยังน้อย ค่าหน่วยแรงจากการโอบรัดในแกนคอนกรีตก็จะมีค่าน้อยด้วย แต่เมื่อความเครียดในเหล็กปลอกสูงขึ้น ค่าหน่วยแรงในแกนคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่าในช่วงแรกมาก และจุดเปลี่ยนนี้จะเห็นได้ชัดเจน โดยการต่อกราฟสองช่วงให้ตัดกัน ถ้าจะเปรียบเทียบความเครียดที่จุดเปลี่ยนเทียบกับความเครียดที่โมดูลัสแตกร้าวจากตารางที่ 5.2 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจะพอตั้งสมมติฐานได้ว่าเมื่อคอนกรีตแตกร้าวแล้วจะทำให้การโอบรัดของแกนคอนกรีตจากผลของเหล็กเสริมทางขวางเพิ่มขึ้น

จากลักษณะของจุดในกราฟพอจะเขียนความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงได้สองช่วง ด้วยการฟิตกราฟด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least-Square Method) โดยพยายามหาจุดเปลี่ยนแนวของกราฟด้วยการประมาณผล จากการทดสอบที่เริ่มมีการเปลี่ยนจากช่วงแรกสูงขึ้นเป็นจุดสุดท้ายในการฟิตกราฟช่วงแรกและใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการฟิตกราฟช่วงหลัง ตำแหน่งที่กราฟสองเส้นตัดกันจะถือว่าเป็นสภาวะที่เริ่มมีการแตกร้าวของเนื้อคอนกรีตแยกส่วนแกนคอนกรีตและส่วนที่เป็นเปลือกหุ้มเหล็กเสริม จะเห็นว่าเสาที่เสริมเหล็กปลอกถี่หรือปริมาณมากจะมีการเพิ่มของหน่วยแรงมากกว่าในเสาที่เสริมเหล็กปลอกห่างหรือปริมาณน้อย ซึ่งจะได้ทำการวิเคราะห์ต่อไป

5.3.1 พิกัดและปริมาณเหล็กเสริมทางขวางต่อพฤติกรรมการโอบ

เสาตัวอย่างทั้งหมดส่วนมากแล้วจะมีตัวแปรที่สำคัญคือปริมาณเหล็กเสริมทางขวางซึ่งมีสัดส่วนของปริมาตรเหล็กเสริมทางขวางต่อปริมาตรของแกนคอนกรีตในเสาปลอกเดี่ยวแปรจาก 0.004-0.043 และแปรจาก 0.004-0.137 ในเสาปลอกเกลียวโดยที่ระยะห่างของเหล็กเสริมทางขวางนี้จะแปรตามไปด้วย ดังนั้นจะได้เน้นผลของพฤติกรรมการโอบนี้ในรูปของปริมาณเป็นสำคัญ

จากผลการทดสอบของเสาบางต้นเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดนั้นไม่สามารถหาผลการโอบได้เนื่องจากความเครียดของเสาตามแนวแกนมีค่ามากกว่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตทรงกระบอก (ภาคผนวก A1-A13) แต่สำหรับผลการโอบของเสาเมื่อเหล็กเสริมยืน

ถึงกำลังคลากนั้นสามารถหาได้และใกล้เคียงกับ เมื่อเสารับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ผลการโอบของเสา เมื่อ เหล็ก เสริมยืนถึงกำลังคลากนั้นสามารถจะหาได้โดยนำความเครียดเหล็ก เสริมทางขวาง ที่สอดคล้องกับความ เครียดของ เหล็ก เสริมยืน เมื่อถึงจุดคลากไปหาหน่วยแรงที่ เพิ่มขึ้นของแกน คอนกรีตได้จากรูปที่ 5.19 และ 5.20 โดยถือว่าได้มาจากการทดสอบ เมื่อเขียนความสัมพันธ์ ระหว่างอิทธิพลของการ โอบ เป็นแกนคอนกรีต เทียบกับปริมาณ เหล็ก เสริมทางขวางที่ตำแหน่งนี้ ดังแสดงในรูปที่ 5.21 จะเห็นว่าผลการโอบจะสูงขึ้นตามปริมาณ เหล็กโดยกราฟจะแสดงลักษณะมีความชันในช่วงแรกมาก ความชันจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อปริมาณเหล็ก เสริมทางขวางมีค่าประมาณ 4 % ดังนั้น จุดที่กราฟ เปลี่ยนความชันนี้น่าจะ เป็นปริมาณที่ให้ประสิทธิผลสูงในการโอบ จากตัวอย่างทดสอบถ้าใช้ ปริมาณเหล็กปลอกที่มากที่สุดของ เสาปลอก เดี่ยว CT25 มาพิจารณาผลการโอบจากกราฟ จะให้ ผลการโอบดีพอควรคือหน่วยแรงที่ เพิ่มขึ้นของแกนคอนกรีตใน เสาปลอก เดี่ยวและปลอก เกลียวจะมีค่า ประมาณ 8 % และ 10 % ของกำลังคอนกรีตทรงกระบอกตามลำดับ โดยปริมาณน้อยกว่านี้จะเห็นว่า ผลการโอบจะมีค่าน้อยกว่านี้จะเห็นว่าผลการโอบจะมีค่าน้อย ปริมาณ 0.043 นี้ พอจะเป็นแนวทาง ชี้ว่าปริมาณ เหล็กปลอกที่ เสริมใน เสาปลอก เดี่ยวและปลอก เกลียวควรจะไม่น้อยกว่าค่านี้ เพื่อให้ เกิด ประสิทธิผลการโอบใน เสา

สำหรับพิกัดสูงสุดของปริมาณ เหล็ก เสริมทางขวาง จากรูปที่ 5.21 จะ เห็น ได้ว่า เมื่อปริมาณ เหล็ก เสริมทางขวางมีค่ามากกว่า 4.3 % แล้วกำลังที่ เพิ่มขึ้นของแกนคอนกรีต ยังแปรตามปริมาณของ เหล็ก เสริมทางขวาง แต่อัตราที่ เพิ่มจะน้อยกว่าช่วงแรกและจะ เห็นได้ว่า ปริมาณ เหล็ก เสริมทางขวางของ เสาปลอก เกลียวอาจ เพิ่มให้สูงถึง p_s = 0.137 ดังนั้นพิกัดที่ เหมาะสมในการ เสริม เหล็กทางขวางควรอยู่ระหว่าง 4.8 % ถึง 13.7 %

5.3.2 พฤติกรรมการโอบของ เหล็กปลอก เดี่ยวและปลอก เกลียว

เพื่อ เปรียบ เทียบถึงพฤติกรรมนี้ได้นำผลการโอบของ เสาตัวอย่างที่มีขนาด และปริมาณ เหล็ก เสริมทางขวาง เท่ากันของ เสาปลอก เดี่ยวและปลอก เกลียว เมื่อ เสารับน้ำหนัก บรรทุกกระทำ เหล็ก เสริมยืนถึงจุดคลากมาพิจารณา เปรียบ เทียบ แสดงในตารางที่ 5.6

อนึ่งในการ เปรียบ เทียบจะ เปรียบ เทียบในรูปของ $(\Delta f_c/f'_c)$ จากการ เปรียบ เทียบจะ เห็นได้ว่า เหล็กปลอก เกลียวจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า เหล็กปลอกประมาณ 21 % โดยเฉลี่ย

5.4 การคาดคะเนการโอบของเหล็กเสริมทางขวาง

ในหัวข้อที่ 5.3 จากลักษณะของกราฟในรูปที่ 5.19 และ 5.20 ซึ่งแสดงผลการโอบในรูปที่ไม่มีหน่วยของหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นในแกนคอนกรีต เทียบกับความเครียดของเหล็กเสริมทางขวาง จะเห็นได้ว่าเสาที่มีปริมาณเหล็กเสริมทางขวางมากจะให้ผลการโอบสูงกว่าเสาที่มีปริมาณเหล็กเสริมทางขวางน้อย ซึ่งแสดงว่าอิทธิพลของปริมาณเหล็กเสริมทางขวางมีผลต่อพฤติกรรมการโอบในแกนคอนกรีตมาก นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าผลการโอบนี้จะขึ้นกับความเครียดของเหล็กเสริมทางขวางด้วย

ด้วยเหตุนี้จึงได้สร้างความสัมพันธ์ที่มีผลจากปริมาณเหล็กเสริมทางขวางและความเครียดที่เกิดขึ้น โดยนำปริมาณ (ρ_s) ไปหารค่า (f'_c)/f'_c แล้วให้เป็นแกนตั้งของกราฟสำหรับความเครียดที่เกิดขึ้นของเหล็กเสริมสามารถจะแปลงให้อยู่ในรูปของหน่วยแรงที่เกิดในเหล็กเสริมทางขวางได้ตามความคุณสมบัติในช่วงอีลาสติกของเหล็กเสริมทางขวาง คือจะเปลี่ยนเป็น (f_{st})/E_{st} ซึ่งจะให้เป็นแกนนอน ผลการทดสอบของเสาที่แสดงความสัมพันธ์เหล่านี้ได้แยกเป็นสองชุด คือชุดของเหล็กปลอกเดี่ยวและเหล็กปลอกเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 5.22 และ 5.23 จะเห็นได้ว่าลักษณะของจุดยังคงมีแนวคล้ายความสัมพันธ์ของรูปที่ 5.19 และ 5.20 ซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีเดียวกันกับการเขียนกราฟในรูปที่ 5.19 และ 5.20 ต่างกันแต่เพียงว่าในการพิจารณาทั้งสองช่วงได้นำผลการทดสอบของเสาทุกต้นมารวมกันแล้วพิจารณากราฟด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด(Least-Square Method) กราฟที่ได้จะมีสองช่วงโดยจะตัดกันที่จุด ๆ หนึ่ง ซึ่งมีค่าตรงกับความเครียด(f_{st}/E_{st}) ประมาณ 230×10^{-6} ในชุดของเสาปลอกเดี่ยว และมีค่า 191×10^{-6} ในชุดของเสาปลอกเกลียว ซึ่งความเครียดอันนี้ถือเสมือนเป็นจุดที่มีการแตกร้าวภายในและเมื่อเทียบกับความเครียดเฉลี่ยของไมโครสแตกร้าวที่คำนวณจากกำลังดึงแยกตัวของคอนกรีตทรงกระบอกซึ่งมีค่า 138×10^{-6} แล้วจะสูงกว่าประมาณ 1.4 และ 1.7 เท่าตามลำดับ สำหรับความสัมพันธ์ของกราฟในแต่ละช่วงแสดงได้ดังนี้

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. อิทธิพลการโอบก่อนการแตกร้าวภายใน

เหล็กปลอกเดี่ยวเมื่อ f_{st}/E_{st} น้อยกว่า 230×10^{-6} และ $0.014 < p_s < 0.043$

$$\Delta f_c = (0.021 + 2418 \frac{f_{st}}{E_{st}}) p_s f'_c \qquad \text{.....(5.4)}$$

เหล็กปลอกเกลียวเมื่อ f_{st}/E_{st} น้อยกว่า 191×10^{-6} และ $0.014 < p_s < 0.137$

$$\Delta f_c = (0.006 + 4217 \frac{f_{st}}{E_{st}}) p_s f'_c \qquad \text{.....(5.5)}$$

ข. อิทธิพลการโอบภายหลังการแตกร้าวภายใน

เหล็กปลอกเดี่ยวเมื่อ f_{st}/E_{st} มากกว่า 230×10^{-6} และ $0.014 < p_s < 0.043$

$$\Delta f_c = (-1.593 + 9448 \frac{f_{st}}{E_{st}}) p_s f'_c \qquad \text{.....(5.6)}$$

เหล็กปลอกเกลียวเมื่อ f_{st}/E_{st} มากกว่า 191×10^{-6} และ $0.014 < p_s < 0.137$

$$\Delta f_c = (-0.718 + 8001 \frac{f_{st}}{E_{st}}) p_s f'_c \qquad \text{.....(5.7)}$$

จากสมการข้างต้นนี้จะให้ความหมายว่าหน่วยแรงอัดที่เพิ่มขึ้นของแกนคอนกรีตจะเพิ่มมากขึ้น เป็นสัดส่วนในเชิง เส้นตรงโดยจะมากขึ้นตามสัดส่วนของปริมาณเหล็กเสริมทางขวางกำลังอัดของคอนกรีตและความเครียดของ เหล็กเสริมทางขวาง

เพื่อที่จะคาดคะเนผลการโอบที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของ เหล็กปลอกเดี่ยวและเหล็กปลอกเกลียวจึงได้นำผลการโอบที่ตำแหน่ง เหล็กเสริมยืนถึงจุดคลากมาวิเคราะห์ เพราะว่าที่ตำแหน่งนี้ใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของ เสามาก จากค่าความ เครียดที่จุดนี้จะสามารถหาหน่วยแรงของ เหล็กเสริมทางขวางในรูปของกำลังคลากของ เหล็กได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.7 ซึ่งได้ค่า เฉลี่ยของ เหล็กปลอกเดี่ยวมีค่า $0.24\ f_y$ และ $0.25\ f_y$ ใน เสาปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียวตามลำดับ แทนค่า เหล่านี้ลงในสมการที่ 5.6 และ 5.7 และแทนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ เหล็กเสริมทางขวางลงไป จะหาค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นของแกนคอนกรีตได้ในรูปตัวแปรต่าง ๆ คือ

เหล็กปลอกเดี่ยวเมื่อ $0.014 < p_s < 0.043$

$$\Delta f_c = (0.001 f_{yy} - 1.593) p_s f'_c \quad \text{.....(5.8)}$$

เหล็กปลอกเกลียวเมื่อ $0.014 < p_s < 0.137$

$$\Delta f_c = (0.001 f_{yy} - 0.718) p_s f'_c \quad \text{.....(5.9)}$$

สมการที่ 5.8 และ 5.9 ที่ได้จะถือเป็นค่าหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นสูงสุดของแกนคอนกรีตจากอิทธิพลการโอบของเหล็กเสริมทางขวางเพื่อคำนวณหาหน้าที่รับน้ำหนักของเสาต่อไป

ในสมการที่ 5.8 และ 5.9 ได้แสดงหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นของแกนคอนกรีตอยู่ในรูปตัวแปร f_{yy} , p_s และ f'_c ซึ่งได้มาจากผลการทดสอบที่มีอยู่ คือเสาตัวอย่างมีขนาดหน้าตัด 15x15 ซม. ยาว 1.00 ม. เหล็กเสริมยืนที่ใช้มี 4 เส้น มีปริมาณคงที่คือ 3.58 % ของหน้าตัดรวม สำหรับเหล็กปลอกเดี่ยวและเหล็กปลอกเกลียวที่ใช้มีปริมาณ 1.4 % - 4.3 % และ 1.4 - 13.7 % โดยปริมาตรของแกนคอนกรีตตามลำดับ ส่วนกำลังของคอนกรีตที่ใช้มีค่าอยู่ระหว่าง 855-931 กก/ซม^2 นอกจากนี้ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมทางขวางขณะที่เหล็กเสริมยืนถึงจุดคลากยังสมมติว่ามีค่าประมาณ 0.24 f_{yy} ในเสาปลอกเดี่ยวและ 0.25 f_{yy} ในเสาปลอกเกลียว ซึ่งค่าสมมตินี้ได้มาจากการทดสอบ ดังนั้นในสภาพของเสาคอนกรีตที่แตกต่างกันไป เช่น เมื่อขนาด, รูปร่างหน้าตัด, จำนวนเส้นและปริมาณของเหล็กเสริมยืน, ปริมาณและรูปร่างลักษณะของเหล็กเสริมทางขวางรวมทั้งกำลังของคอนกรีต เปลี่ยนไปแล้วหน่วยแรงในเหล็กเสริมทางขวางที่เกิดขึ้นอาจมีค่าแตกต่างออกไปได้และจะทำให้ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงที่เพิ่มขึ้นของแกนคอนกรีตที่อยู่ในรูปของตัวแปรในสมการที่ 5.8 และ 5.9 เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

5.5 เปรียบเทียบพฤติกรรมการโอบเมื่อเหล็กเสริมยืนถึงจุดคลาก

การเปรียบเทียบเสาปลอกเดี่ยวจะได้นำสมการ 4.26 ของ Vallenas et al[17] เปรียบเทียบโดยเปลี่ยนค่า $f_{\ell y}$ ของเหล็กปลอกเดี่ยวเป็น f_{st} ที่คำนวณได้จากความเครียดของเหล็กปลอกเดี่ยว ส่วนผลของ Khan ได้นำสมการ 4.27 มาใช้โดยเปลี่ยนค่า f'_c เป็น f_c สำหรับผลการโอบที่ได้จากการวิเคราะห์ จะใช้สมการที่ 5.6 การเปรียบเทียบนี้แสดงในตารางที่ 5.8

ส่วนชุดของเสาปลอกเกลียวได้นำสมการที่ 4.25 ของ Ti-Haung มาใช้โดยเปลี่ยนค่า $f_{\ell y}$ เป็น f_{st} และได้นำประยุกต์ผลการทดสอบของ Richart et al[27] มาคำนวณโดยแทนค่า 4.1 ลงในสมการที่ 4.23 จะได้

$$\Delta f_c = 2.05\, p_s f_{\ell y} \qquad \text{.....(5.10)}$$

และเปลี่ยนค่า $f_{\ell y}$ เป็น f_{st} ของเหล็กปลอกเกลียวในการคำนวณผลการโอบเมื่อเหล็กเสริมยืนถึงกำลังคลาก สำหรับผลการโอบที่ได้จากการวิเคราะห์จะใช้สมการที่ 5.7 ส่วนในตารางที่ 5.9 แสดงผลการเปรียบเทียบนี้

อนึ่ง เพื่อให้ง่ายแก่การเปรียบเทียบตารางที่ 5.7 และ 5.8 ได้แปลงหน่วยแรงอัดที่เพิ่มขึ้นในแกนคอนกรีตให้เป็นน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น

5.6 เปรียบเทียบกำลังบรรทุกรวม

ผลการทดสอบได้นำมาเปรียบเทียบกับการคำนวณตาม ACI[1] ตามสมการที่ 4.16 และ 4.19 โดยไม่คิดตัวคูณลดกำลังมาใช้ และเปรียบเทียบกับของ Khan[24] ตามสมการที่ 4.15 และ 4.19 ในกรณีของเสาปลอกเดี่ยวนอกจากนี้ยังเปรียบเทียบของ CP110[11] ซึ่งคำนวณน้ำหนักบรรทุกจากสมการ

$$P = 0.4\, f_{cu} A_c + 0.67\, A_s f_y \qquad \text{.....(5.11)}$$

เมื่อ P = น้ำหนักบรรทุกของเสา

f_{cu} = กำลังของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์

สำหรับสมการที่เสนอแนะจะใช้สมการดังนี้คือ

เหล็กปลอกเดี่ยว

$$P_{max} = 0.95f'_c(A_g-A_s)+ A_sf_y+A_c(0.001f_{\ell y}-1.593)p_sf'_c \quad ....(5.12)$$

เหล็กปลอกเกลียว

$$P_{max} = 0.95f'_c(A_g-A_s)+ A_sf_y+A_c(0.001f_{\ell y}-0.718)p_sf'_c \quad ...(5.13)$$

ผลการคาดคะเนตามที่เสนอแนะจากการวิเคราะห์นั้นปรากฏว่า ตัวอย่างทดสอบที่มีผลการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนก่อนถึงจุดคลากจะให้ค่าสูงกว่าการทดสอบ แต่ในเสาต้นอื่นที่มีปริมาณของเหล็กเสริมทางขวางอยู่ในพิกัด 0.014 ถึง 0.047 ในเหล็กปลอกเดี่ยวและ 0.014 ถึง 0.137 ในเหล็กปลอกเกลียว ซึ่งเป็นพิกัดที่กำหนดในหัวข้อ 5.4 เกี่ยวกับอิทธิพลการโอบจะให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบมาก

ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 5.10 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักประลัยที่ได้จากการทดสอบส่วนใหญ่แล้วมีค่าสูงกว่าการคาดคะเนจาก ACI และ Khan ยกเว้นในตัวอย่างทดสอบ C001, CT300 และ CS300 ที่มีผลของการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนก่อนถึงจุดคลากซึ่งน้ำหนักประลัยที่ได้จากการทดสอบจะให้ค่าที่ต่ำกว่า

ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับ CP110 นั้น เนื่องจากสมการที่ใช้เป็นสมการที่ใช้ในการออกแบบซึ่งได้ใช้ตัวคูณลดค่าไว้แล้ว สำหรับค่ากำลังประลัยของแท่งคอนกรีตรูปลูกบาศก์ก็จะใช้ค่าประมาณ 80 % ของกำลังของคอนกรีตทรงกระบอก[41] ผลการคำนวณจะให้ค่าที่ต่ำกว่าน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบมาก ซึ่งจะให้ผลทางด้านความปลอดภัย

5.7 ลักษณะการวิบัติของเสา

ลักษณะการวิบัติจากตัวอย่างทดสอบมีความแตกต่างกัน 4 แบบ คือ แบบแรกเป็นการวิบัติแบบแตกกระจาย (splitting) ของคอนกรีตเปลือกนอกซึ่งเกิดขึ้นในเสาที่มีปริมาณเหล็กเสริมทางขวางมากและมีระยะห่างของเหล็กปลอกน้อยกว่า 5.0 ซม. ตามที่ปรากฏ ในเสาปลอกเดี่ยว CT50 และ CT25 ส่วนที่พบในเสาปลอกเกลียวคือ CS50, CS25, CA และ CB แบบที่สองคือการวิบัติโดยการแตกกระจายของคอนกรีตเปลือกนอกและประกอบไปด้วยการโก่งเดาะในเหล็กเสริมยืนดังที่เห็น ในเสาปลอกเดี่ยว CT75 ส่วนที่พบในเสาปลอกเกลียวคือ CS150 และ CS75 แบบที่ 3 คือการวิบัติแบบแรงเฉือน (shear failure) โดยมีระนาบของการวิบัติทำมุมประมาณ 17-30^{0} ประกอบไปด้วยการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนตามที่พบในเสาปลอกเดี่ยว CT300 และ CT150 ส่วนในเสาปลอกเกลียวคือ CS300 และในเสาที่ไม่เสริมเหล็กทางขวาง C001 สำหรับแบบสุดท้ายคือการวิบัติแบบแรงเฉือนในเสา C000 ซึ่งเป็นเสาคอนกรีตล้วน

ในการวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้น แบบแตกกระจายของคอนกรีตที่เปลือกนอกนี้จะวิเคราะห์หาน้ำหนักที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบนี้ จากรูปที่ 5.24 ซึ่งแสดง Free-body ของหน้าตัดตามยาวในช่วงระยะห่างของเหล็กปลอก สมมุติให้หน้าตัดนี้ประกอบ ด้วยเปลือกคอนกรีตนอกเหล็กปลอกและแกนคอนกรีตเมื่อเสาเริ่มรับน้ำหนักบรรทุกจะมีการขยายตัวด้านข้างเนื่องจากสัดส่วนพัวซอง ในขณะที่เกิดการขยายตัวนั้นทั้งคอนกรีตเปลือกนอกและเหล็กเสริมทางขวางจะมีพฤติกรรมคล้ายสปริงที่ถูกยืดพยายามจะรั้งกลับสู่สถานะเดิม เกิดเป็นแรงกระทำด้านข้างแก่แกนคอนกรีต เมื่อพิจารณาความสมดุลย์ของแรงในแนวราบ (รูป ก, ข, ค) จะได้ว่า

$$f_{\ell}.c.s = 2A_{st}f_{st} + f_{2}.2t.s \qquad .....(5.14)$$

เมื่อ f_{ℓ} = หน่วยแรงทางขวางของคอนกรีต

f_{st} = หน่วยแรงในเหล็กเสริมทางขวาง

f_{2} = หน่วยแรงด้านข้างของคอนกรีตที่หุ้ม (Covering)

c = ขนาดของแกนคอนกรีต

t = ความหนาของคอนกรีตที่หุ้ม

s = ระยะห่างของเหล็กเสริมทางขวาง

เพื่อให้การวิบัตินั้น เกิดการวิบัติแบบแตกกระจายของคอนกรีตที่หุ้ม (f_2) จะต้องมีค่าเท่ากับหน่วยแรงดึงของคอนกรีต (f_t) เขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$f_t = (2A_{st}f_{st}+f_t.2t.s)/c.s. \quad .....(5.15)$$

หน่วยแรง f_t นี้สมมติให้มีค่าสม่ำเสมอ (Uniform) ตลอดช่วงระยะห่างของเหล็กเสริมทางขวางทั้งในแกน x และแกน y เกิดลักษณะแรงอัด 3 ทิศทางขึ้นซึ่งจะทำให้หน่วยแรงอัดประลัยตามแนวดิ่งสูงขึ้น Richart et al[27] พบว่ามีค่าประมาณ 4.1 เท่าของหน่วยแรงอัดด้านข้าง

ดังนั้นหน่วยแรงอัดประลัยแกน y จะมีค่า

$$f''_c = f'_c+4.1(2A_{st}f_{st}+f_t.2t.s)/c.s. \quad .....(5.16)$$

f''_c = หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีตเนื่องการการโอบ

$$P_{core} = (A_g-A_s-A_{cc})\{f'_c+4.1(2A_{st}f_{st}+f_t.2t.s)/c.s\}...(5.17)$$

เมื่อ P_{core} = น้ำหนักบรรทุกประลัยของแกนคอนกรีต

A_g = พื้นที่หน้าตัดรวมของเสา

A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมยืน

A_{cc} = พื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่หุ้ม (Covering)

เมื่อพิจารณาคอนกรีตเปลือกนอกจะอยู่ในลักษณะผสมของหน่วยแรงอัดและแรงดึง (Combined Compression-Tension)[20] ซึ่งให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดตามแนวดิ่งกับหน่วยแรงดึงด้านข้าง เมื่อเกิดการวิบัติอยู่ในรูปสมการดังนี้คือ

$$f_2 = f_t\left|1-\frac{f_c}{f'_c}\right| \quad .....(5.18)$$

เพื่อให้สมมติฐานของการวิบัติ เนื่องมาจากแรงดึงของคอนกรีตเปลือกนอกถึงกำลังประลัย จึงให้การวิบัตินั้นมีค่า $f_2 = f_t$ เมื่อเกิดการวิบัติ เมื่อแทนค่าลงในสมการ 5.17 จะได้ f_c ตาม

แนวแกนเมื่อคอนกรีตวิบัติมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงสมมติให้ก่อนการวิบัติเล็กน้อยคอนกรีตรับกำลังได้เท่ากับ f'_c ของคอนกรีต ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกที่รับโดยคอนกรีตเปลือกนอกจะหาได้มีค่าดังนี้คือ

$$P_{cc} = (A_g - A_c) f'_c \qquad \text{.....(5.19)}$$

เมื่อ P_{cc} = น้ำหนักบรรทุกรับโดยคอนกรีตเปลือกนอกที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบแตกกระจาย

นั่นคือจะสามารถหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกของเสาที่ทำให้เกิดการวิบัติแบบแตกกระจายได้คือ

$$P_{splitting} = P_{cc} + P_{core} \qquad \text{.....(5.20)}$$

เมื่อ $P_{splitting}$ = น้ำหนักบรรทุกโดยคอนกรีตที่ทำให้เกิดการแตกกระจายของคอนกรีตเปลือกนอก

เขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$P_{splitting} = (A_g - A_c) f'_c + (A_c - A_s)\{f'_c + 4.1(2A_{st} f_{st} + f_t .2t.S)/c.s.\}$$

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.2 ให้ค่า Shape factor ของกำลังคอนกรีตในเสาเป็น $0.95f'_c$ ดังนั้นจะได้น้ำหนักบรรทุกของคอนกรีตที่ทำให้เกิดการ splitting ได้เป็น

$$P_{splitting} = 0.95(A_g - A_c) f'_c + (A_c - A_s)\{0.95f'_c + 4.1(2A_{st} f_{st} + f_t .2t.S)/c.s.\} \qquad (5.21)$$

การเกิดลักษณะวิบัติแบบแตกกระจายจะเกิดขึ้นได้เมื่อน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบของคอนกรีตมีค่ามากกว่าที่ได้จากการคาดคะเน ตารางที่ 5.11 แสดงผลการเปรียบเทียบนี้ ซึ่งเสาปลอกเดี่ยวและเสาปลอกเกลียวที่เกิดการวิบัติแบบแตกกระจายของคอนกรีตที่หุ้มจะให้น้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคาดคะเนเฉลี่ยประมาณ 0.84 % ในขณะที่เสาที่วิบัติแบบแตกกระจายของคอนกรีตที่หุ้มและเหล็กเสริมยืนไก่งเดาะให้ค่าต่ำกว่าค่าคาดคะเน 4.34 % ส่วนพวกที่วิบัติแบบแรงเฉือน และมีการไก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนจะให้ค่าต่ำกว่า $P_{splitting}$

เฉลี่ย 19.54 % จะเห็นว่ากลุ่มที่น้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบต่ำกว่าค่าคาดคะเนมากนั้นจะพบในเสาที่พบว่ามีการโก่ง เดาะของเหล็กเสริมยืนก่อนถึงกำลังคลาก

ในกลุ่มเสาที่มีการวิบัติแบบแตกกระจายของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กนั้น ถึงแม้ว่าน้ำหนักบรรทุกจากการทดสอบจะไม่มากกว่าค่าคาดคะเนแต่ก็ใกล้เคียงกันมากทั้งนี้เนื่องจากค่าคงที่ 4.1 นั้นเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบแรงอัดสามทาง[27] โดยใช้ของเหลวเป็นด้านข้างซึ่งจะให้หน่วยแรงอัดด้านข้างสม่ำเสมอต่างไปจากหน่วยแรงโอบที่เกิดจากการเสริมเหล็กทางขวางซึ่งจะให้ผลดีที่บริเวณที่มีเหล็กเสริมทางขวางและโดยเฉพาะบริเวณมุมของเหล็กปลอก ส่วนช่วงกลางระหว่างเหล็กเสริมทางขวางจะให้ผลน้อย ดังนั้นตามพฤติกรรมจริง ควรจะให้ค่าที่น้อยกว่าที่แสดงตามสมการที่ 5.21 ซึ่งจะให้ผลใกล้เคียงกับลักษณะการวิบัติจริง ดังนั้นอิทธิพลของเหล็กเสริมที่มีปริมาณมากและระยะถี่จะให้การวิบัติแบบแตกกระจายของคอนกรีตเปลือกนอก

กลุ่มที่มีการวิบัติแบบแรงเฉือนของคอนกรีตและประกอบไปด้วยการโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนนั้นเป็นกลุ่มที่มีการโก่ง เดาะของเหล็กเสริมยืนก่อนถึงกำลังคลาก (ยกเว้น CT150) โดยให้มุมการวิบัติในแกนคอนกรีตคล้ายเสาคอนกรีตล้วน C000 ซึ่งอธิบายลักษณะการวิบัติเสากลุ่มนี้จากการพิจารณาลักษณะการวิบัติของเสา C000 ซึ่งรับหน่วยแรงอัดแกนเดียว (Uniaxial Stress) ลักษณะวิบัติที่ได้เป็นแบบ shear failure ที่เห็นได้ชัดเจนให้มุมของการวิบัติประมาณ 18^{0} เมื่อนำค่ากำลังอัดและกำลังดึงแยกตัวของคอนกรีตมาเขียน Mohr-Envelope[17] เพื่อหามุมวิบัติดังรูปที่ 5.25 ซึ่งให้ค่ากำลังอัดและกำลังดึงแยกตัวของคอนกรีตมาเขียนรูปครึ่งวงกลมบนแกนที่มีค่าลบและบวกตามลำดับ และให้กำลังต้านทานแรงเฉือนอยู่บนแกนตั้ง มุมวิบัติจากการเขียนรูปจะมีค่าเท่ากับ 16^{0} สอดคล้องกับมุมวิบัติที่เกิดจริง ดังนั้นสมมติฐานการวิบัติของเสา CT300, CS300, C001 ที่พอจะเป็นไปได้คือ จากหัวข้อที่ 5.1 ได้พบว่า เสาสามต้นนี้เกิดการโก่งเดาะก่อนถึงกำลังคลากซึ่งจะดันให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กแตกกระจายไป ณ จุดนี้เองกำลังรับน้ำหนักที่เคยแบ่งรับโดยคอนกรีตที่หุ้มและเหล็กเสริมยืนจะถูกถ่ายไปให้แก่แกนคอนกรีตและเนื่องจากระยะห่างของเหล็กปลอกมาก คอนกรีตภายในแกนจะอยู่ในลักษณะเช่นเดียวกับเสาคอนกรีตล้วน, น้ำหนักที่ต้องรับเพิ่มขึ้นจะทำให้หน่วยแรงในคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงกำลังประลัยของคอนกรีตซึ่งจะให้ลักษณะการวิบัติเป็นแบบ shear failure ที่เกิดในกรณีของเสาคอนกรีตล้วน พฤติกรรมนี้น่าจะเป็นเช่นเดียวกับเสา CT150 ต่างกันตรงที่การโก่งเดาะของเหล็กเสริมยืนนั้นเกิดขึ้นที่หน่วยแรงคลาก