บทที่ 4

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ

4.1 กำลังรับแรงดัด

คุณสมบัติที่สำคัญของชิ้นส่วนโครงสร้างคือ ปฏิกริยาตอบสนองต่อน้ำหนักบรรทุกซึ่งสามารถอธิบายได้โดยเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัว โดยมากจะใช้ในการศึกษาพฤติกรรมในช่วงน้ำหนักใช้งานสำหรับคานที่วิบัติเนื่องจากแรงดัด งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ศึกษาด้านการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน แต่อย่างไรก็ตามคาน BW-D4 วิบัติเนื่องจากแรงดัด เพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมทางด้านกำลังรับแรงดัดอันจะนำไปใช้ประโยชน์ในหัวข้ออื่นต่อไป รายละเอียดของหน้าตัดคานแสดงในตารางที่ 2.6 โดยคาน BW-D4 เป็นคานที่มีการเสริมเหล็กปลอกมากที่สุด (rf_{yw} = 18.20 กก./ซม^2.) ระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานสามารถคำนวณโดยสมการ (3-13) จากทฤษฎียืดหยุ่น ถ้าหน่วยแรงดึงในคานยังไม่เกินค่าโมดูลัสแตกร้าว โมเมนต์ความเฉื่อยในการคำนวณจะใช้โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดยังไม่แตกร้าวในมาตรฐาน ACI (318-83) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดยังไม่แตกร้าวจะไม่คิดพื้นที่แปลงจากเหล็กเสริมและภายหลังจากคานเกิดรอยแตกร้าว ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในการคำนวณโดยสมการจากทฤษฎียืดหยุ่นจะใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผล ซึ่งมีค่าระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแตกร้าวและยังไม่แตกร้าวในสมการ (3-14) เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (3-13) ก็จะได้ระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ สำหรับระยะการโก่งตัวตามทฤษฎีสำหรับพฤติกรรมจริงซึ่งให้การกระจายหน่วยแรงอัดเหนือแกนสะเทินเป็นรูปพาราโบล่านั้น ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดที่ยังไม่แตกร้าวจะรวมถึงพื้นที่แปลงจากเหล็กเสริมเพื่อให้ได้ความแม่นยำกว่า เพราะเหล็กเสริมสามารถเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยได้มากกว่า 30 %[63] และโดยการอินทิเกรตมุมเบี่ยงเบนซึ่งมีความสัมพันธ์กับระยะทางจากจุดรองรับของคานในแนวราบดังสมการ (3-16) และ (3-17) จากจุดรองรับถึงจุดกึ่งกลางคาน จะได้ระยะการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานในช่วงยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่นจากสมการ (3-18)

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานโดยมีเส้นแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบ จากทฤษฎีและโดยวิธีของ ACI (318-83) จะเห็น

ได้ว่า เส้นแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบและจากทฤษฎีให้ความแตกต่างกันบ้าง แต่ยังคงมีแนวโน้มที่เหมือนกัน โดยความชันของเส้นจากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าความชันของเส้นจากทฤษฎี และเมื่อมาพิจารณาเส้นแสดงความสัมพันธ์จากการทดสอบและจากวิธีประมาณของ ACI (318-83) จะเห็นได้ว่าในช่วงต้นจะไม่ต่างกันมากนัก แต่จะต่างกันอย่างมากหลังจากช่วงที่เหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงถึงจุดคลากแล้ว หากจะพิจารณาในช่วงน้ำหนักบรรทุกใช้งาน (น้ำหนักประลัย/1.7) ระยะการโก่งตัวจากการทดสอบจะให้ค่ามากกว่าค่าที่ได้จากวิธีของ ACI (318-83) เล็กน้อย ซึ่งจะกล่าวได้ว่า โดยวิธีการใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยประสิทธิผลของหน้าตัดโดยมาตรฐาน ACI (318-83) ยังสามารถใช้ในการคำนวณระยะการโก่งตัวในช่วงน้ำหนักบรรทุกใช้งานสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากได้เป็นอย่างดี

ในช่วงแรกความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งคานเกิดรอยแตกร้าวในแนวดิ่งในช่วงแรงดัด โมเมนต์ดัดแตกร้าวจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 2.14 ตัน-ม. ซึ่งน้อยกว่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวจากทฤษฎีโดยสมการ (3-1) และ (3-2) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.52 ตัน-ม. ประมาณ 15 % ภายหลังการเกิดรอยแตกร้าวแนวดิ่งความแกร่ง (Stiffness) ของคานจะลดลง ความชันของเส้นแสดงความสัมพันธ์จะลดลงเช่นกัน จนกระทั่งความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงถึงจุดคลาก เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานจะไม่เป็นเส้นตรงจนกระทั่งวิบัติ โมเมนต์ดัด ณ จุดที่เหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงถึงจุดคลากโดยสมการ (3.5.1) และ (3.5.2) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากน้ำหนัก ณ จุดที่เหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงถึงจุดคลากจากเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาวในรูปที่ 2.40 พบว่า โมเมนต์ดัด ณ จุดที่เหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงถึงจุดคลากที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 17.55 ตัน-ม. จะให้ค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการกระจายหน่วยแรงอัดเป็นรูปพาราโบลา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.29 ตัน-ม. ประมาณ 8 % เมื่อคานถึงจุดวิบัติความเครียดที่ผิวบนรับแรงอัดกึ่งกลางคานมีค่าเท่ากับ 0.0029 ซึ่งใกล้เคียงกับขีดจำกัดของความเครียดสูงสุดของคานเมื่อวิบัติโดยแรงดัดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.003 และจากการเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดประลัยทดสอบของคาน BW-D4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.45 ตัน-ม. กับวิธีคำนวณโดยวิธีให้การกระจายหน่วยแรงอัดเป็นรูปพาราโบลา ACI (318-83) และ Nedderman ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.62, 16.41 และ 16.10 ตัน-ม. ตามลำดับ จะให้ค่าโมเมนต์ดัดประลัยทดสอบสูงกว่าวิธีทั้งสามเท่ากับ 11.0, 12.5 และ 14.6 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าวิธีการคำนวณโมเมนต์ดัดประลัยสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากทั้ง 3 วิธีให้ผลในการคำนวณในด้านปลอดภัยได้อย่างน่าพอใจ

4.2 กำลังรับแรงดึง

ในความเป็นจริงกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตควรระบุโดยวิธีการดึงโดยตรง แต่การใส่แรงดึงในแนวแกนเป็นไปได้ยากและไม่มีมาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตโดยตรง วิธีการทดสอบโดยทั่วไปคือการหาค่าโมดูลัสแตกร้าวจากแรงดัดและกำลังดึงแยกตัว ซึ่งไม่ได้ทำการดึงโดยตรง จากรูปที่ 2.14 และตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า กำลังดึงแยกตัวของคอนกรีตกำลังสูงมากมีค่าประมาณ 9 % ของค่ากำลังอัดประลัย ค่ากำลังดึงแยกตัวจากการทดสอบมีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณโดย ACI (363R-84) และ สุพรรณ ประมาณ 19 และ 38 % ตามลำดับ โดยมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 14.46 และ 11.99 % ตามลำดับ จากค่าน้ำหนักบรรทุกเมื่อเกิดรอยแตกร้าวในแนวดิ่งเริ่มแรกในช่วงแรงดัด และค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดยังไม่แตกร้าวคำนึงถึงพื้นที่แปลงของเหล็กเสริม ค่าโมดูลัสแตกร้าวหาได้จากสมการ (3-1) แสดงในรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 พบว่า ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตกำลังสูงมากมีค่าประมาณ 9 % ของค่ากำลังอัดประลัย โดยค่าโมดูลัสแตกร้าวจากการทดสอบจะมีค่าเท่ากับกำลังดึงแยกตัวของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกควบคุมตัวอย่างคานทดสอบ โดยมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 8.0 % และจะให้ค่าที่น้อยกว่าค่าโมดูลัสแตกร้าวของ ACI (363R-84) ในสมการ (3-2) ประมาณ 19 % โดยมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 7.4 % ซึ่งจะกล่าวได้ว่า กำลังดึงแยกตัวของคอนกรีตกำลังสูงมากสามารถใช้ในการหาค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีตกำลังสูงมากได้ และการทดสอบกำลังดึงแยกตัวยังทำได้ง่ายกว่า ซึ่งต่างจากคอนกรีตธรรมดาที่ค่าโมดูลัสแตกร้าวจะมีค่าสูงกว่ากำลังดึงแยกตัวประมาณ 33 % เนื่องจากสภาวะวิบัติของคานคอนกรีตธรรมดาการกระจายหน่วยแรงดึงใต้แกนสะเทินจะไม่เป็นเส้นตรงตามทฤษฎียืดหยุ่น[56] แต่คอนกรีตกำลังสูงมากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าสูงกว่าและการกระจายหน่วยแรงใกล้เคียงเส้นตรงมากกว่าคอนกรีตธรรมดา และงานวิจัยนี้จะใช้ค่ากำลังดึงแยกตัวเป็นค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกำลังสูงมาก

4.3 กำลังรับแรงเฉือน

ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 ว่า เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวนับว่าเป็นคุณสมบัติสำคัญอย่างหนึ่งของชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งจากเส้นแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถบ่งลักษณะการวิบัติได้ โดยคานที่วิบัติเนื่องจากแรงเฉือนจะมีค่าความเหนียว (Ductility) ต่างจากคานที่วิบัติเนื่องจากแรงดัด จากรูปที่ 4.1 จากลักษณะของเส้นแสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน จะเห็นได้ว่า ในช่วงแรกก่อนเกิดรอยแตกร้าวแนวดิ่งในช่วงแรงดัด ความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรง ความชันของเส้นความสัมพันธ์จะใกล้เคียงกันสำหรับคานทุกตัว ภายหลังจากความแกร่งของคานลดลงเนื่องจากการแตกร้าวของหน้าตัดคาน ความชันของเส้นแสดงความสัมพันธ์จะลดลง โดยคานทั้ง 8 ตัวจะยังคงมีพฤติกรรมใกล้เคียงกัน ถึงแม้จะมีการเสริมเหล็กปลอกต่างกันจนกระทั่งเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนคานเกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางความลึกคานสำหรับคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอกและคาน BW-D ซึ่งเสริมเหล็กปลอกห่างที่สุด (rf_{yw} = 4.51 กก./ซม^2.) ความแกร่งจะลดลงอย่างรวดเร็ว ระยะการโก่งตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด อันเป็นการสิ้นสุดพฤติกรรมการรับแรงดัดและคานจะถึงจุดวิบัติภายหลังจากนั้นไม่นาน ส่วนคานชุดที่เสริมเหล็กปลอกที่เหลือ ความกว้างของรอยแตกร้าวแนวทแยงจะถูกควบคุมโดยเหล็กปลอก ความแกร่งจะลดลงในอัตราที่ช้ากว่าโดยแปรตามอัตราส่วนการเสริมเหล็กปลอก คาน BW-3D4 (rf_{yw} = 6.04 กก./ซม^2.) จะวิบัติภายหลังที่เหล็กปลอกถึงจุดคลากก่อนที่คอนกรีตผิวบนรับแรงอัดกึ่งกลางคานจะถึงความเครียดวิบัติ จากนั้นก็จะติดตามด้วยการวิบัติของคาน BW-D2 (rf_{yw} = 9.08 กก./ซม^2.) จากการคลากของเหล็กปลอกก่อนที่คอนกรีตผิวบนรับแรงอัดกึ่งกลางคานจะถึงความเครียดวิบัติเช่นกัน สำหรับคาน BW-D4 ซึ่งวิบัติเนื่องจากแรงดัดคอนกรีตผิวบนรับแรงอัดกึ่งกลางคานจะถึงความเครียดวิบัติก่อนที่เหล็กปลอกที่รอยแตกร้าวแนวทแยงตัดผ่านจะถึงจุดคลาก โดยความชันของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน ภายหลังจากเกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางคานแล้วความชันของเส้นจะลงอีกครั้งเมื่อเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงหรือเหล็กปลอกถึงจุดคลากและจะไม่เป็นเส้นตรงจนกระทั่งวิบัติ

4.3.1 น้ำหนักบรรทุก ณ จุดที่เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางคาน

การระบุน้ำหนักบรรทุก ณ จุดที่เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางคานสามารถทำได้ 3 วิธี โดยแต่ละวิธีจะขึ้นอยู่กับความเครียดของเหล็กปลอก ความเครียดในแนวตั้งของผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนและจากลักษณะรอยแตกร้าว ซึ่งแต่ละวิธีสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของคานและสามารถเปรียบเทียบกันเพื่อหาน้ำหนักบรรทุก ณ จุดเกิดรอยแตกร้าวแนวทแยง

น้ำหนักบรรทุก ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงจะพิจารณาว่า เป็นน้ำหนักที่มีการเปลี่ยนกลไกในการต้านทานน้ำหนักที่กระทำอย่าง เห็นได้ชัด โดยเป็นผลให้ เกิดการกระจายหน่วยแรงใหม่ภายในคาน จากบรรทัดฐานดังกล่าวจะสามารถระบุน้ำหนักบรรทุก ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงได้ เมื่อเกิดการ เปลี่ยนแปลงกลไกในการรับน้ำหนัก

การวัดความ เครียดของ เหล็กปลอกตำแหน่งที่ติด เกจชนิดไฟฟ้าติดที่กึ่งกลางความสูงของเหล็กปลอกซึ่ง เป็นบริ เวณที่หน่วยแรง เฉือนสูงสุด เนื่องจาก เกจมี เพียงตัว เดียวจึงไม่มีข้อมูลการกระจายความ เครียดตลอดความยาวของ เหล็กปลอก อย่างไรก็ตามก็น่า เชื่อถือได้ว่า ความ เครียดที่อ่านได้ใกล้ เคียงกับค่าความ เครียดสูงสุด เหล็กปลอกบางตัวจะติด เกจ ณ ตำแหน่ง เดียวกันแต่ติดที่ด้านตรงข้าม จากข้อมูลที่อ่านได้มีความแตกต่างกันน้อยมาก แสดงว่าระบบของแรงกระทำสมดุลย์กันทั้งสองด้านของหน้าตัด จากเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความ เครียดของ เหล็กปลอกในรูปที่ 2.30, 2.34, 2.38 และ 2.42 ในช่วงน้ำหนักบรรทุกก่อนที่จะ เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงความ เครียดของ เหล็กปลอกจะมีน้อยมาก จนกระทั่งรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่าน เหล็กปลอกความ เครียดจะ เพิ่มขึ้นอย่างรวด เร็ว ณ จุดที่ความ เครียด เพิ่มขึ้นอย่างรวด เร็ว เมื่อลาก เส้นตรงกลับมาตัดแกนน้ำหนักบรรทุก น้ำหนักบรรทุกดังกล่าวคือน้ำหนักบรรทุก ณ จุดที่ เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางคาน ซึ่งระบุค่าไว้ในหัวข้อที่ 2.6 (ผลการทดสอบ)

การวัดความ เครียดที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรง เฉือนโดย เกจชนิดกลนั้น เนื่องจากความ เครียดที่วัด เป็นความ เครียดในแนวตั้ง ดังนั้น เพื่อให้ได้ความ เครียดในแนวทำมุม 45^{o} กับแกนราบของคาน ค่าความ เครียดที่อ่านได้จะหารด้วยค่า Cos 45^{o} จึงจะ เป็นความ เครียดในแนวทำมุม 45^{o} กับแกนราบ น้ำหนักบรรทุก ณ จุดที่ เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางคานจะหาได้โดยสมมุติว่ารอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางคานจะ เกิดขึ้น เมื่อความ เครียดในแนวทำมุม 45^{o} กับแกนราบ มีค่า เท่ากับความ เครียดของคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีหน่วยแรงดึง เท่ากับกำลังดึงแยกตัว จาก เส้นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความ เครียดที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรง เฉือนในรูปที่ 2.17, 2.20, 2.23, 2.26, 2.29, 2.33, 2.37 และ 2.41 น้ำหนักที่สอดคล้องกับความ เครียดดึงแยกตัวคือ น้ำหนักบรรทุก ณ จุดที่ เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางคาน ซึ่งระบุค่าไว้ในหัวข้อที่ 2.6 (ผลการทดสอบ)

สำหรับน้ำหนักบรรทุก ณ จุดที่เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงที่ได้จากลักษณะรอยแตกร้าวในรูปที่ 2.51 และ 2.52 คือน้ำหนักที่รอยแตกร้าวแนวทแยงเริ่มเบนทำมุม 45^{0} กับแกนรางและร้าวผ่านกึ่งกลางความลึกคาน ซึ่งระบุค่าไว้ในหัวข้อที่ 2.6 (ผลการทดสอบ)

ค่าน้ำหนักที่ได้จากความเครียดแนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักที่ได้จากลักษณะรอยแตกร้าว พบว่าค่าน้ำหนักที่ได้จากลักษณะรอยแตกร้าวจะให้ค่าสูงกว่าประมาณ 11 % สำหรับคานชุดที่เสริมเหล็กปลอก เมื่อนำน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากความเครียดของเหล็กปลอกมาเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักที่ได้จากลักษณะรอยแตกร้าวพบว่าค่าน้ำหนักที่ได้จากลักษณะรอยแตกร้าวจะให้ค่าใกล้เคียงกับค่าน้ำหนักที่ได้จากความเครียดของเหล็กปลอกมากและเมื่อเปรียบเทียบค่าน้ำหนักที่ได้จากความเครียด แนวตั้งที่ผิวคอนกรีตในช่วงแรงเฉือนกับค่าน้ำหนักที่ได้จากความเครียดของเหล็กปลอกพบว่า ค่าน้ำหนักที่ได้จากความเครียดของเหล็กปลอกจะให้ค่าสูงกว่าประมาณ 3 % ดังนั้นค่าน้ำหนักบรรทุก ณ จุดที่เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางคานจากลักษณะรอยแตกร้าวเป็นค่าที่น่าเชื่อถือได้ในการนำไปใช้หาหน่วยแรงเฉือนของคานทดสอบ ณ จุดที่เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยง

4.3.2 กำลังรับแรงเฉือนล้วนของคอนกรีตกำลังสูงมาก

คอนกรีตภายใต้แรงกระทำในทิศทางต่าง ๆ โดยทั่วไปจะสมมุติให้หน่วยแรงที่กระทำบนชิ้นส่วนเล็ก ๆ เป็นหน่วยแรงระนาบเดียว และโดยทฤษฎีของ Mohr ซึ่งทำนายกำลังเมื่อวิบัติภายใต้หน่วยแรงในระนาบเดียวได้ กำลังรับแรงเฉือนล้วนของคอนกรีตสามารถหาได้โดยไม่ต้องทำการทดสอบแท่งคอนกรีตทรงกระบอกภายใต้แรงบิดโดยตรง จากรูปที่ 3.9 จะสามารถหากำลังรับแรงเฉือนล้วนได้ตามสมการที่ (3-19) เมื่อรู้ค่ากำลังอัดประลัยและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตกำลังสูงมากซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนล้วนกับกำลังอัดประลัยของคอนกรีตกำลังสูงมาก แสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสมการที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวคือ

$$\nu_{PS} = 2.13\sqrt{f'_c} \quad \text{กก./ซม}^2. \qquad (4\text{-}1)$$

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า กำลังรับแรงเฉือนล้วนของคอนกรีตกำลังสูงมากจะมีค่าประมาณ 8 % ของค่ากำลังอัดประลัย โดยมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 11.66 %

และค่ากำลังรับแรงเฉือนล้วนของคอนกรีตกำลังสูงมากจากการทดสอบให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการที่ (3-20) ของ สุพรรณ ประมาณ 37 % โดยมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 11.36 %

คอนกรีตภายใต้แรงเฉือนล้วนกระทำจะมีค่าหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดหลักเท่ากับค่าหน่วยแรงเฉือน ดังนั้นจากสมการ (4-1) หน่วยแรงดึง ณ จุดวิบัติจะมีค่าเท่ากับ $2.13\sqrt{f'_c}$ เนื่องมาจากผลของการที่มีหน่วยแรงตั้งฉากกระทำ 2 แกนพร้อม ๆ กัน และมีทิศทางต่างกัน ทำให้กำลังรับแรงดึงลดลงดังรูปที่ 3.7

4.3.3 กำลังรับแรงเฉือนของคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอก

ตามมาตรฐานของ ACI (318-83) นั้นคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เสริมเหล็กปลอกนั้นจะสมมุติให้ไม่สามารถต้านทานแรงเฉือนได้อีกต่อไปภายหลังจากการเกิดรอยแตกร้าวแนวทแยง แต่ในความเป็นจริงนั้นคานยังคงสามารถต้านทานแรงเฉือนได้อีก จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า กำลังรับแรงเฉือน ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงและจุดประลัยของคานทดสอบจะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนส่วนที่เหลืออยู่ภายหลังการเกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดประลัยที่เพิ่มขึ้น

ค่าหน่วยแรงเฉือน ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงจากการทดสอบ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการ (3-32), (3-33) และ (3-34) ในตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ค่าหน่วยแรงเฉือน ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงจากการทดสอบจะให้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการ (3-32), (3-33) และ (3-34) ประมาณ 73, 93 และ 26 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่ากำลังรับแรงเฉือน ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงหรืออีกนัยหนึ่งกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมเหล็กปลอกโดยสมการของ ACI (318-83) ให้ค่าที่อนุรักษ์มากเกินไป แต่สมการของ Zsutty[45] ให้ค่าที่ใกล้เคียงในด้านปลอดภัย สามารถใช้สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากอย่างน่าพอใจ

สำหรับหน่วยแรงเฉือนประลัยจากการทดสอบเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ (3-36) และ (3-40) ในตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ค่าหน่วยแรงเฉือนประลัยจากการทดสอบจะให้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากสมการ (3-36) และ (3-40) ประมาณ 33 % และ 79 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่า กำลังรับแรงเฉือน ณ จุดประลัยโดยสมการของ Zsutty ให้ค่าที่อนุรักษ์ แต่ก็ยังสามารถนำไปใช้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากได้ ส่วนสมการของ Ahmad, Khaloo และ Poveda[62] ซึ่งเป็นสมการที่ดัดแปลงมาจากสมการของ Zsutty โดยใช้ค่าที่ขีดจำกัดต่ำสุดของข้อมูลจากการทดลองคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากของเขา ให้ค่าที่อนุรักษ์มากเกินไป ส่วนสมการ (3-38) และ (3-39) ของ Mphonde และ Frantz[49] ซึ่งใช้ในการคำนวณค่าหน่วยแรงเฉือนประลัยจากการทดสอบคานที่มี a/d = 3.6 และ ρ = 0.0336 ไม่นำมาเปรียบเทียบเนื่องจากความจำกัดของข้อมูลที่เขาทำการศึกษา

นอกจากกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นตามกำลังอัดประลัยที่เพิ่มขึ้นแล้ว อัตราส่วนของหน่วยแรงเฉือนประลัยจากการทดสอบต่อหน่วยแรงเฉือน ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงโดยสมการ (3-32) ตามมาตรฐานของ ACI (318-83) ซึ่งอาจหมายถึงสัดส่วนปลอดภัย (Safety Factor) จะเพิ่มขึ้นจาก 1.80 ถึง 2.14 เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มจาก 672.65 ถึง 773.56 กก./ซม^2.

กำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากมีสาเหตุเนื่องมาจากกำลังรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้น ทำให้การขยายของรอยแตกร้าวแนวดิ่งจากแรงดัดจะช้าลง หน่วยแรงดึงที่ปลายยอดก็จะลดลงเมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน เป็นผลให้แรงเฉือนที่จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงสูงขึ้น ภายหลังการเกิดรอยแตกร้าว แรงเฉือนจะถูกต้านทานโดยแรงขัดประสาน ปฏิกริยาเดือยและคอนกรีตส่วนที่ยังไม่แตกร้าว สำหรับคอนกรีตกำลังสูงมาก แรงเฉือนที่ต้านทานโดยแรงขัดประสานจะลดลงเมื่อกำลังอัดประลัยเพิ่มขึ้น เนื่องจากผิวรอยแตกร้าวของคอนกรีตกำลังสูงมากจะเรียบกว่าคอนกรีตธรรมดา[29] (ดูภาคผนวก) จากการทดสอบก็สามารถเห็นได้ชัดถึงความเรียบของรอยแตกร้าวได้ อย่างไรก็ตามแรงขัดประสานยังขึ้นอยู่กับความกว้างและความยาวของรอยแตกร้าว ถ้าปริมาณการเสริมเหล็กตามยาวต่ำ รอยแตกร้าวกว้างและยาวกว่าเมื่อมีปริมาณการเสริมเหล็กตามยาวสูงแรงขัดประสานก็จะน้อยกว่า สำหรับปฏิกริยาเดือยเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ตามรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนจะเพิ่มแรงดึงในแนวดิ่งต่อคอนกรีตที่หุ้มอยู่ ซึ่งกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตก็ขึ้นกับ $\sqrt{f'_c}$ โดยตรง รวมทั้งแรงเฉือนที่ต้านทานโดยคอนกรีตส่วนที่ยังไม่แตกร้าวก็ขึ้นกับค่า

f'_c โดยเฉพาะบริเวณที่รับแรงอัดเหนือแกนสะเทิน

ผู้วิจัยคนอื่น ๆ [49,61,62] ก็สรุปเช่นเดียวกันว่า กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากที่ไม่เสริมเหล็กปลอกจะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดประลัยที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม Mphonde และ Frantz ได้สรุปว่าอัตราส่วนของหน่วยแรงเฉือนประลัยจากการทดสอบต่อหน่วยแรงเฉือน ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงโดยสมการ (3-32) ตามมาตรฐานของ ACI จะให้ค่าลดลงจาก 1.60 สู่ 1.20 เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจาก 210 ถึง 1055 กก./ซม^2. โดยมีค่า a/d = 3.6 และ ρ = 3.36 % ส่วนจากผลการทดลองของ Elzanaty, Nilson และ Slate[61] เมื่อ a/d = 4.0 กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นจาก 210 ถึง 810 กก./ซม^2. อัตราส่วนดังกล่าวจะลดลงจาก 1.36 สู่ 0.93 สำหรับ ρ = 2.5 % และจาก 1.20 สู่ 0.89 สำหรับ ρ = 1.2 %

จากผลการทดสอบในงานวิจัยนี้ที่อัตราส่วนดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของกำลังอัด ความแตกต่างนี้เกิดจากการจัดเรียงเหล็กเสริมตามยาวที่ต่างกัน ผู้วิจัยทั้งสองเรียงเหล็กเสริมตามยาวชั้นเดียว ส่วนในงานวิจัยนี้เรียงเหล็กเสริมตามยาวสองชั้น ซึ่ง Bresler และ Scordelis[44] ได้สรุปไว้ว่า การจัดเรียงเหล็กเสริมตามยาวหลาย ๆ ชั้นจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของคานได้มากขึ้น รวมทั้งเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ของเหล็กเสริมตามยาวจะลดหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นรอบ ๆ คอนกรีตที่หุ้มอยู่เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากัน และที่สำคัญหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมขณะวิบัติจะเปลี่ยนแปลงตามกำลังอัดของคอนกรีตที่เปลี่ยนไปซึ่งมีผลกระทบต่อน้ำหนักบรรทุก ณ จุดวิบัติ Rajagopalan และ Ferguson[42] ได้กล่าวถึงว่าสำหรับการเสริมเหล็กตามยาวปริมาณน้อยกว่า 1 % เมื่อเกิดหน่วยแรงดึงจากแรงดัดสูง กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เสริมเหล็กปลอกจะต่ำกว่ามาตรฐานของ ACI (318-63) ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบกับกรณีนี้ได้ เพราะเมื่อคอนกรีตกำลังอัดสูงขึ้นกำลังรับแรงเฉือนของคานและโมเมนต์ดัดขณะที่คานวิบัติจากแรงเฉือนก็เพิ่มขึ้น ปริมาณการเสริมเหล็กตามยาวที่จะให้ค่าต่ำกว่ามาตรฐานของ ACI ก็ควรจะเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดที่เพิ่มขึ้น[49] Elzanaty, Nilson และ Slate ก็ได้พบว่าเมื่อ a/d = 4.0 ค่า ρ ณ จุดที่กำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบต่ำกว่าของมาตรฐาน ACI จะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.7, 1.4 และ 2.5 % สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัด 210, 408 และ 668 กก./ซม^2. ตามลำดับ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นผลการทดสอบคานทดสอบของผู้วิจัยทั้งสองจึงต่างจากงานวิจัยนี้

เนื่องจากความสามารถในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากที่ไม่เสริมเหล็กปลอกโดยสมการที่มีอยู่ในปัจจุบันให้ผลในด้านที่อนุรักษ์มากเกินไป เพื่อให้ได้สมการที่สอดคล้องกับกำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น จึงจะนำข้อมูลจากงานวิจัยนี้รวมกับงานวิจัยของ Mphonda และ Frantz กับของ Ahmad, Khaloo และ Poveda ซึ่งจะทำให้ได้สมการในการคำนวณกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากที่ไม่เสริมเหล็กปลอก โดยค่า f'_c อยู่ในช่วง 620-955 กก./ซม^2. ρ อยู่ในช่วง 1.77-6.64 % และ a/d อยู่ในช่วง 2.7-4.0 และสมมติให้รอยแตกร้าวแนวทแยงตัดผ่านกึ่งกลางคานที่ระยะความลึกประสิทธิผลจากจุดที่น้ำหนักกระทำ โดยข้อมูลที่ใช้รวมอยู่ในตารางที่ 4.6 จากรูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของสมการในรูปตามมาตรฐาน ACI ได้สมการ

$$V_c = (0.63\sqrt{f'_c} + 231\,\rho\frac{Vd}{M})\,bd \qquad (4\text{-}2)$$

$$V_{uo} = (0.60\sqrt{f'_c} + 515\,\rho\frac{Vd}{M})\,bd \qquad (4\text{-}3)$$

หรืออาจจะหาความสัมพันธ์ในรูปแบบของ Zsutty คือ $k(f'_c\,\rho\frac{d}{a})^{1/3}$ จากรูปที่ 4.7 ได้สมการ

$$V_c = \left|10.37(f'_c\,\rho\frac{d}{a})^{1/3}\right| bd \qquad (4\text{-}4)$$

$$V_{uo} = \left|12.44(f'_c\,\rho\frac{d}{a})^{1/3}\right| bd \qquad (4\text{-}5)$$

จากผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนทดสอบต่อหน่วยแรงเฉือนจากสมการที่นำเสนอในตารางที่ 4.7 ปรากฏว่า สมการ (4-4) และ (4-5) ให้ค่าในด้านปลอดภัยโดยหน่วยแรงเฉือนจากการทดสอบจะมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนจากการคำนวณ ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงและจุดประลัย 22 และ 15 % ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าที่น่าพอใจกว่าผลจากการใช้สมการ (4-2) และสมการ (4-3)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.4 กำลังรับแรงเฉือนของคานชุดที่เสริมเหล็กปลอก

จากการทดสอบจะเห็นได้ว่า การเสริมเหล็กปลอกช่วยชลอการเกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงในคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอกจะมีรอยแตกร้าวแนวทแยงเพียงหนึ่งหรือสองรอย ซึ่งรอยแตกร้าวนี้จะแทงลึกเข้าไปในบริเวณรับแรงอัดแล้วทำให้เกิดการวิบัติ ในคานชุดที่เสริมเหล็กปลอกรอยแตกร้าวแนวทแยงจะสั้นกว่า เนื่องจากเหล็กปลอกที่กระจายอยู่ในแนวแตกร้าว ต้องเพิ่มแรงเฉือนเข้าไปอีกเพื่อให้รอยแตกร้าวขยายแนวไปสู่บริเวณรับแรงอัดและจะเป็นผลให้คอนกรีตบริเวณนั้นเกิดการแตกปริออก จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะการโก่งตัว ในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า การเสริมเหล็กปลอก มีประสิทธิผลในการป้องกันการวิบัติในทันทีทันใดและสามารถทำให้มีระยะการโก่งตัวที่เพียงพอ ทำให้คานถึงจุดวิบัติโดยถึงกำลังรับแรงดัดประลัยได้ ในคาน BW-D4

จากการทดสอบเห็นได้ชัดว่า เหล็กปลอกนอกจากรับแรงเฉือนด้วยตนเองแล้วยังช่วยเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนของกลไกอื่น ๆ ด้วย เหล็กปลอกจะทำหน้าที่เป็นจุดรองรับภายในสำหรับเหล็กเสริมตามยาวรับแรงดึงและป้องกันการแตกปริจากคอนกรีตที่หุ้มอยู่ ในขณะเดียวกันก็ช่วยชลอการแตกร้าวทำให้เพิ่มประสิทธิผลของแรงยึดประสานและกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตส่วนที่ยังไม่แตกร้าว นอกจากนั้นเหล็กปลอกยังช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตส่วนที่ยังไม่แตกร้าวด้วยการโอบ (Confinement)

หน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเกินหน่วยแรงเฉือน ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงจนถึงหน่วยแรงเฉือน ณ จุดประลัยจะใช้เป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอก จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.8 ซึ่งไม่รวมค่าของคาน BW-D4 ซึ่งวิบัติเนื่องจากแรงดัด และในแกน $(\nu_u-\nu_c)$ เมื่อค่า rf_{yw} มีค่าเท่ากับศูนย์จะแสดงจุดที่ได้มาจากคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอกด้วย จะเห็นได้ว่า เมื่อเชื่อมจุดที่สอดคล้องกับคาน BW-3D4 และ BW-D2 แล้วลากมาตัดแกนตั้งจะได้ความสัมพันธ์

$$\nu_u-\nu_c = 1.53\ rf_{yw} + 5.86 \qquad (4\text{-}6)$$

จุดตัดแกนตั้งของเส้นตรงดังกล่าวใกล้เคียงกับจุดที่ได้จากคานชุดที่ไม่เสริมเหล็กปลอกที่สอดคล้องกับคาน BW-D ซึ่งมีระยะเรียงของเหล็กปลอกเท่ากับความลึกประสิทธิผลของคาน และมี rf_{yw} = 4.51 กก./ซม^2 ซึ่งมากกว่าค่าต่ำสุดของ ACI (318-83) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.51 กก./ซม^2 จะให้ค่าที่ต่ำกว่าเส้นตรงดังกล่าว และมีค่าใกล้เคียงกับคานชุดที่ไม่เสริมปลอก แสดงว่าการเสริมเหล็กปลอกด้วยระยะเรียงที่เท่ากับความลึกประสิทธิผลจะไม่ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานเลย และจากสมการ (4-6) จะพบว่า ความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกในการทดสอบมีมากกว่าความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกจากสมการ (3-43.2) ซึ่งได้จากโครงข้อหมุนอุปมัย (Truss Analogies) อยู่ 1.53 เท่า ซึ่งใกล้เคียงกับข้อสรุปของ Palakas, Attiogbe และ Darwin[43] ส่วน Bresler และ Scordelis[67] พบว่าความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกจะมีค่า 1.80 เท่าของค่า rf_{yw}

การเปรียบเทียบกำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบต่อกำลังรับแรงเฉือนจากการคำนวณจะไม่พิจารณาคาน BW-D เนื่องจากความไร้ความสามารถในการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอกดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ตามข้อบัญญัติของ ACI (318-83) กำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เสริมเหล็กปลอกจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงเฉือน ณ จุดที่เกิดรอยแตกร้าวแนวทแยงผ่านกึ่งกลางคาน โดยไม่คำนึงถึงกำลังสำรองที่เหลือก่อนที่คานจะวิบัติ ดังนั้นจากตารางที่ 4.9 หน่วยแรงเฉือนประลัยจากการทดสอบจึงมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนประลัยโดย ACI (318-83) ถึง 112 % หากคิดความสามารถในการรับแรงเฉือนจริงของเหล็กปลอกหน่วยแรงเฉือนประลัยจากการทดสอบจะมากกว่าหน่วยแรงเฉือนประลัยจากการคำนวณลดลงเหลือประมาณ 81 % เมื่อพิจารณาสมการหน่วยแรงเฉือนประลัยของ Zsutty รวมกับความสามารถในการรับแรงเฉือนจริงของเหล็กปลอก ค่าที่ได้จากการทดสอบจะมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณประมาณ 42 % และเมื่อใช้สมการหน่วยแรงเฉือน ณ จุดแตกร้าวแนวทแยงจากงานวิจัยนี้ สมการ (4-4) รวมกับความสามารถในการรับแรงเฉือนจริงของเหล็กปลอกจะให้ค่าจากการทดสอบมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ 46 % สุดท้ายเมื่อใช้สมการหน่วยแรงเฉือนประลัยจากสมการ (4-5) รวมกับความสามารถในการรับแรงเฉือนจริงของเหล็กปลอกค่าที่ได้จากการทดสอบจะมากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณประมาณ 29 % ดังนั้นกำลังรับแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงมากมีเหล็กปลอกเสริมคำนวณโดยมาตรฐาน ACI (318-83) ให้ค่าที่อนุรักษ์มากเกินไป