หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียด

คานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดลองรับน้ำหนักบรรทุก ส่วนใหญ่จะติดเกจวัดความเครียดที่เหล็กเสริมเอก คอนกรีตที่ผิวบนนอกสุด อิฐและเหล็กปลอก เพื่อวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในขณะที่เพิ่มน้ำหนักบรรทุก เมื่อนำค่าน้ำหนักบรรทุกและความเครียดมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 5.1 – 5.11 (ภาคผนวก ค.) จากกราฟจะเห็นว่า

5.1.1 เหล็กเสริมเอก เมื่อน้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ ช่วงนี้จะเป็นเส้นตรงโดยที่ค่าอัตราความเครียดเพิ่มน้อยมาก ทั้งนี้เพราะว่าช่วงนี้ยังอยู่ในช่วง Proportional limit คอนกรีตส่วนล่างยังรับแรงดึงได้บ้าง แต่เมื่อถึงน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว ค่าความเครียดของเหล็กเสริมเอกจะเพิ่มมากทันที ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อเกิดแตกร้าว คอนกรีตส่วนล่างจะไม่ช่วยรับแรงดึงเลย เหล็กเสริมเอกจะรับแรงดึงทั้งหมดทันที กราฟที่จุดนี้จะเริ่มโค้งมาก เมื่อเลยน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดเกือบเป็นสัดส่วนกันอีกจนถึงค่าจุดคลาก โดยกราฟยังเป็นเส้นตรง แต่อัตราการเพิ่มของความเครียดจะมากกว่าช่วงแรก

5.1.2 คอนกรีตที่ผิวบนสุดของคาน

ค่าน้ำหนักบรรทุกและความเครียดจะเป็นสัดส่วนโดยตรง จะได้กราฟเป็นเส้นตรงหรืออาจโค้งน้อยมากแล้วก็เป็นเส้นตรงอีก เมื่อน้ำหนักบรรทุกมากกว่าน้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเอกถึงจุดคลาก ความเครียดที่ผิวบนสุดของคอนกรีตจะเพิ่มมากทันที ดูกราฟเกจที่ 1 ของรูปที่ 5.3 รูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 (ภาคผนวก ค.) ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อเหล็กเสริมเอกถึงกำลังดึงคลากแล้วจะยืดออกมาก ทำให้คานเกิดการโค้ง (Curvature) เพิ่มมากขึ้น ผิวบนสุดของคานก็จะถูกอัดทำให้เกิดความเครียดเพิ่มมากขึ้นและจะเพิ่มมากขึ้นต่อไปอีกโดยที่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มน้อยมาก

5.1.3 อิฐที่ผิวบนสุดของคาน ค่าน้ำหนักบรรทุกและความเครียดจะเป็นสัดส่วนกัน จะได้กราฟเป็นเส้นตรงซึ่งมีพฤติการคล้าย ๆ กับของคอนกรีตที่ผิวบนสุด

5.1.4 เหล็กปลอก ในช่วงน้ำหนักบรรทุกที่คอนกรีตยังไม่แตกร้าว ความเครียดของเหล็กปลอกจะน้อยมาก แต่พอเลยน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว ความเครียดจะเกิดขึ้นมากหรือบางทีจะเกิดขึ้นมากอย่างทันทีทันใด แสดงว่า เมื่อคอนกรีตแตกร้าวแล้ว เหล็กปลอกจะช่วยรับแรงเฉือน มีที่น่าสังเกต คือ คานช่วงยาว 3.00 ม. ความเครียดที่เกิดขึ้น ในเหล็กปลอกตัวที่อยู่ใต้จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำในช่วงน้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ จะเป็นความเครียดเนื่องจากการหด (รับแรงอัด) ทั้งนี้สันนิษฐานว่า เหล็กปลอกอาจจะถูกแรงอัดก่อน เนื่องจากอยู่ใต้จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำอีกประการหนึ่งแรงเฉือนระหว่างจุดน้ำหนักบรรทุกกระทำมีค่าน้อยมาก เมื่อน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น ความเครียดของเหล็กปลอกจะเป็นความเครียดเนื่องจากการยืด (รับแรงดึง) แสดงว่าเหล็กปลอกทำหน้าที่ต้านแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ดูกราฟของเกจที่ 4–5 รูปที่ 5.8 และกราฟของเกจที่ 6–7 รูปที่ 5.11 (ภาคผนวก ค.)

จากกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่ได้จากการทดลองคานนั้น สามารถหาน้ำหนักบรรทุกในกรณีต่าง ๆ ได้ดังนี้ (ดูตารางที่ 5.1) คือ

(ก) น้ำหนักบรรทุกแตกร้าว (P_{cr}) โดยหาจากจุดที่ความเครียดในเหล็กเสริมเอกเริ่มเบนออกจากเส้นตรงช่วงแรก ซึ่งเป็นจุดที่เปลี่ยนความเครียดเร็วมาก

(ข) น้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเอกถึงหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ (P_{sw})

(ค) น้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเอกถึงกำลังถึงคลาก (P_{sy})

(ง) น้ำหนักบรรทุกที่คอนกรีตถึงหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (P_{cw})

(จ) น้ำหนักบรรทุกที่อิฐถึงหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ (P_{bw})

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่ง

การวัดระยะโก่งที่กึ่งกลางช่วงของคานในการทดลองนี้ ใช้ Dial gage และไม้บรรทัด (ใช้เมื่อถอด Dial gage ออกแล้ว) เมื่อนำค่าน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งที่กึ่งกลางช่วงมา

เขียนกราฟ จะได้ดังรูปที่ 5.12 – 5.20 จากกราฟจะเห็นว่า ในช่วงเริ่มบรรทุกน้ำหนักน้อย ๆ จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงไประยะหนึ่ง ซึ่งช่วงนี้จะเกิดระยะโก่งน้อยมาก ต่อไปกราฟจะมีความชันน้อยลงและจะค่อย ๆ โค้งเล็กน้อย ซึ่งช่วงนี้อัตราการโก่งจะเร็วกว่าช่วงแรก หลังจากช่วงนี้แล้วกราฟจะโค้งมาก ระยะโก่งจะเพิ่มมากในขณะที่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มน้อย ซึ่งช่วงนี้จะเลย Propertional limit แล้ว ในขณะที่ลดน้ำหนักบรรทุกลง ระยะโก่งจะค่อย ๆ ลดลง จนน้ำหนักบรรทุกเป็นศูนย์ คานจะไม่กลับคืนในแนวเดิม จะมีระยะโก่งถาวรเนื่องจากว่า คานถูกบรรทุกน้ำหนักจนเลย **Proportional limit.**

จากกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่ง สามารถหาน้ำหนักบรรทุกที่จุดเริ่มเบนออกจากเส้นตรงช่วงแรกได้ (P_{fc}) และระยะโก่งที่จุดน้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเอกถึงหน่วยแรงดึงที่ยอมให้และกำลังดึงคลากดังแสดงในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.3 ตามลำดับ

จากตารางที่ 5.3 ระยะโก่งที่กึ่งกลางช่วงคานนี้ได้จากการทดลองที่จุดน้ำหนักบรรทุกที่เหล็กถึงหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ ($\triangle_{ew}$) มีค่าตั้งแต่ 0.40 มม. ถึง 1.53 มม. สำหรับคานช่วงยาว 1.50 ม. ซึ่งมีพิกัดระยะโก่ง 4.17 มม. ระยะโก่งตั้งแต่ 1.00 มม. ถึง 2.95 มม. สำหรับคานช่วงยาว 2.00 ม. ซึ่งมีพิกัดระยะโก่ง 5.56 มม. และระยะโก่งตั้งแต่ 2.40 มม. ถึง 3.60 มม. สำหรับคานช่วงยาว 3.00 ม. ซึ่งมีพิกัดระยะโก่ง 8.33 มม. จะเห็นว่าระยะโก่งที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าพิกัดระยะโก่งมากทุกตัว ฉนั้นปัญหาเรื่องระยะโก่งของคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กสำหรับคานที่มีอัตราส่วน t/L ประมาณ $\frac{1}{5}$ ถึง $\frac{1}{9}$ เท่าที่ทดลองนี้จึงไม่เป็นที่น่าวิตก

การคำนวณระยะโก่งที่จุดน้ำหนักบรรทุกที่เหล็กถึงค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ และใช้โมเมนต์อินเนอร์เชียประสิทธิผลตามมาตรฐาน ACI 1971 ส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นใช้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับระยะโก่งที่ได้จากการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.3 จะเห็นว่า ระยะโก่งที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าระยะโก่งที่ใช้โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเล็กน้อย ยกเว้นคานช่วงยาว 3.00 ม. ระยะโก่งจากการทดลองกลับมีค่าน้อยกว่า

แต่ระยะโก่งจากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าระยะโก่งที่ใช้โมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐมาก ถ้าใช้ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ จะได้ระยะโก่งใกล้เคียงกับระยะโก่งที่ได้จากการทดลอง ฉะนั้นในการคำนวณระยะโก่งของคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก ควรใช้ค่าเฉลี่ยของโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและโมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐ

การทดลองคานประกอบทั้งหมดนี้ จะได้ค่าอัตราส่วนของระยะโก่งมากที่สุดที่ได้จากการทดลองกับระยะโก่งที่จุดน้ำหนักบรรทุกที่เหล็กถึงค่ากำลังดึงคลาก (Δ_m/Δ_y) มีค่าระหว่าง 1.36 ถึง 8.62 ซึ่งมีคาน B4 – 1.50 เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่มีค่าอัตราส่วนนี้น้อยกว่า 2 แต่ภายหลังนำเอาคานตัวนี้ไปทดลองใหม่จะได้ระยะโก่ง 10 มม. เทียบเป็นอัตราส่วนนี้ได้เท่ากับ 2.45 ค่าอัตราส่วนนี้เรียกว่า "อัตราส่วนความเหนียว" (Ductility ratio) ถ้าคานนี้มีอัตราส่วนความเหนียวมาก แสดงว่าหลังจากถึงน้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเอกถึงกำลังดึงคลาก คานนี้จะไม่วิบัติทันที จะเห็นคานโก่งมากขึ้นเรื่อย ๆ เป็นการเตือนให้รู้ล่วงหน้าก่อนที่คานจะวิบัติ ซึ่งคานแบบนี้ ส่วนมากจะวิบัติแบบการดัด (Flexural failure) ถ้าคานนี้มีอัตราส่วนความเหนียวน้อยคานนั้นอาจจะเกิดการวิบัติทันที ฉะนั้น เพื่อความปลอดภัย คานที่ดีควรจะมีอัตราส่วนความเหนียว (Δ_m/Δ_y) ไม่น้อยกว่า 2 * ทั้งนี้เพื่อให้คานเมื่อถูกบรรทุกเกินน้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเอกถึงกำลังดึงคลากแล้ว คานนั้นจะไม่วิบัติทันที จะมีการเตือนให้รู้ล่วงหน้าก่อน โดยสังเกตระยะโก่งจะเพิ่มมากขึ้น สรุปคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กที่ทดลองนี้ มีอัตราส่วนความเหนียวไม่น้อยกว่า 2 จึงเป็นคานที่มีความเหนียวเหมาะที่จะนำมาเป็นคานทั่วไปได้

* Committee 318, "Building Code Requirement for requirement Reguirement for Reinforced Concrete" (ACI 318 - 71), Americal Concrete Institute, Detroit, 1971

5.3 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก

วิธีการก่อสร้างคานและการทดลองการรับน้ำหนักของคานประกอบได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2 และหัวข้อ 4.3 แล้ว ต่อไปนี้จะกล่าวถึงลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของคานประกอบที่ทดลอง ดังนี้ คือ

5.3.1 คาน B1 – 1.50 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 3.8 ตัน ได้ยินเสียงดัง แต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อน้ำหนักบรรทุก 3.9 ตัน เริ่มเห็นรอยแตกร้าวเป็นแนวดิ่งเล็กมากที่รอยเชื่อมต่อปูนสอระหว่างอิฐรูปตัว U ที่เทคอนกรีตใต้ท้องคานระหว่างช่วงน้ำหนักบรรทุกกระทำ เมื่อ น้ำหนักบรรทุกประลัย 6.1 ตัน รอยแตกร้าวจะกว้างมากที่สุดประมาณ 1 ซม. แต่เมื่อน้ำหนักบรรทุก 5.2 ตัน จะมีรอยแตกร้าวแถวฐานรองรับออกไปเป็นมุมประมาณ 20° กับแนวราบ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น รอยแตกร้าวนี้จะเอียงทำมุมมากขึ้นไปตามรอยเชื่อมต่อระหว่างอิฐเข้าไปหาจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ ลักษณะการวิบัติเป็นแบบ "การเฉือนวิบัติ" (Shear failure) มีที่น่าสังเกต คือเมื่อน้ำหนักบรรทุก 4.2 ตัน จะมีรอยเผยอที่ปลายคานด้านหนึ่งระหว่างอิฐก่อชั้นที่ 2 กับคอนกรีตช่วงบน รอยเผยอนี้จะแยกออกจากกันมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยจะเผยอกว้าง 1 ซม. ทั้งนี้ เป็นเพราะการก่ออิฐที่ปลายคานนั้นไม่ดี มีรอยแยกนิดหน่อย ก่อนการทดลองแล้ว ลักษณะการแตกร้าวก็เกิดขึ้นเพียงครึ่งช่วงของคานด้านที่มีรอยเผยอเท่านั้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.21 และรูปที่ 5.39 (ภาคผนวก ค.)

5.3.2 คาน B2 – 1.50 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 2.6 ตัน ได้ยินเสียงดังและพบรอยแตกร้าวเป็นแนวดิ่งเล็กมากที่รอยเชื่อมต่อปูนสอใต้ท้องคานระหว่างช่วงน้ำหนักบรรทุกกระทำ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะสูงขึ้นและแผ่กระจายไปที่อื่น ๆ ด้วย เมื่อน้ำหนักบรรทุก 8.0 ตัน รอยแตกร้าวจะกว้างมากที่สุด 4 มม. เมื่อน้ำหนักบรรทุกประลัย 8.25 ตัน รอยแตกร้าวจะกว้างมากที่สุดประมาณ 9 มม. ไม่มีรอยแตกร้าวใกล้ฐานรองรับ ลักษณะการวิบัติเป็นแบบ "การดัดวิบัติ"(Flexural failure) ดังรูปที่ 5.22 และรูปที่ 5.40 (ภาคผนวก ค.)

5.3.4 คาน B 4 – 1.50 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 5.0 ตัน ได้ยินเสียงดัง แต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อ 5.3 ตัน เริ่มเห็นรอยแตกร้าวเล็กมากที่รอยเชื่อมต่อปูนสอไต้ทองคาน ระหว่างช่วงน้ำหนักบรรทุกกระทำ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะสูงขึ้นและจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อ 8.6 ตัน เกิดเสียงดังมากทางด้านติดเกจวัดความเครียดที่ 6,8 และ 10 พบรอยแตกร้าวเห็นชัดมากเป็นแนวทะแยงมุมประมาณ 45° ออกจากฐานรองรับไปหาจุดน้ำหนักบรรทุกกระทำ แล้วน้ำหนักบรรทุกจะลดลงเหลือ 8.1 ตัน หลังจากนั้น น้ำหนักบรรทุกจะเพิ่มขึ้นอีกถึง 9.9 ตัน จะเกิดเสียงดังมากทางอีกด้านหนึ่งที่ติดเกจวัดความเครียดที่ 5,7 และ 9 และพบรอยแตกร้าวเห็นชัดมากเป็นแนวทะแยงมุมประมาณ 45° ออกจากฐานรองรับไปหาจุดน้ำหนักบรรทุกกระทำ แล้วน้ำหนักบรรทุกจะลดลงมาเหลือ 9.0 ตัน หลังจากนั้นน้ำหนักบรรทุกจะเพิ่มขึ้นอีกจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย 10.82 ตัน รอยแตกร้าวจะปรากฏชัดมาก ลักษณะการวิบัติเป็นแบบ "การเฉือนวิบัติ" ดังรูปที่ 5.25 – 5.26 และรูปที่ 5.42

5.3.5 คาน B 1 – 2.00 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 1.8 ตัน ได้ยินเสียงดัง แต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อน้ำหนักบรรทุก 2.0 ตัน เริ่มเห็นรอยแตกร้าวเป็นแนวดิ่งที่รอยเชื่อมต่อปูนสอไต้ทองคานใกล้จุด น้ำหนักบรรทุกกระทำ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะสูงขึ้นและแผ่กระจายมากขึ้น จนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย 2.83 ตัน ที่รอยเชื่อมต่อของอิฐใกล้จุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ จะมีปูนสอแตกออกมากว้างประมาณ 4 มม. หลังจากนั้นน้ำหนักบรรทุกจะลดลงมาเล็กน้อย ไต้จุดที่ปูนสอแตกออกมาและปริมาณใกล้เคียงจะมีรอยแตกของอิฐและปูนสอกว้างประมาณ 4 มม. รอยแตกร้าวนี้จะผ่านกลางกอนกรีตและอิฐขึ้นไป และที่ใกล้กันจะมีปูนสอแตกออกกว้าง 9 มม. การแตกแบบนี้เกิดใกล้จุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำเพียงด้านเดียวเท่านั้น ลักษณะการวิบัติเป็นแบบ "การดัดวิบัติ" ดังรูปที่ 5.27 และ รูปที่ 5.43 (ภาคผนวก ค.)

5.3.6 คาน B 2 – 2.00 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 2.8 ตัน ได้ยินเสียงดัง แต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อ 3.2 ตัน เริ่มเห็นรอยแตกร้าวเล็กมากที่รอยเชื่อมต่อปูนสอ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น รอยแตกร้าวจะสูงขึ้นและเพิ่มมากขึ้น จนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย 6.15 ตัน

รอยแตกร้าวสูงขึ้นไปเกือบจะถึงขอบบนสุดของคาน ไม่มีรอยแตกร้าวใกล้ฐานรองรับ การวิบัติเป็นแบบ " การดัดวิบัติ" ดังรูปที่ 5.28 และรูปที่ 5.44 (ภาคผนวก ก.)

5.3.7 คาน B 3 – 2.00 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 3.2 ตัน ได้ยินเสียงดัง แต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อ 3.4 ตัน เริ่มเห็นรอบแตกร้าวเป็นแนวดิ่งเล็กมากที่รอยเชื่อมต่อปูนสอ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกรอยแตกร้าวจะดึงขึ้นช้ามาก เมื่อ 4.2 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวเป็นแนวทะแยงมุมประมาณ 45° ออกจากฐานรองรับด้านหนึ่งเท่านั้น เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวทะแยงนี้จะแผ่ออกหลายแนวจนเกือบจะถึงขอบบนสุดของคอนกรีต รอยแตกร้าวจะเกิดเพียงครึ่งช่วงของคานเท่านั้น มีที่น่าสังเกตก่อนการทดลองจะมีรอยเยอนิดหน่อย เนื่องจากการวางเหล็กเสริมเอกที่ปลายคาน ระหว่างคอนกรีตช่วงล่างกับอิฐก่อชั้นที่ 1 และด้านนี้แหละที่เกิดการแตกร้าวเป็นแนวทะเยง การวิบัติเป็นแบบ "การเฉือนวิบัติ" ดังรูปที่ 5.29 และรูปที่ 5.45 (ภาคผนวก ก.)

5.3.8 คาน B 4 – 2.00 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 3.0 ตัน และ 3.8 ตัน ได้ยินเสียงดัง แต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อ 4.2 ตัน เริ่มเห็นรอยแตกร้าวเป็นแนวดิ่งเล็กมากที่รอยเชื่อมต่อปูนสอ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกรอยแตกร้าวจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อ 6.3 ตัน ที่ด้านข้างของอิฐก้อนบนสุดที่กึ่งกลางช่วง จะมีอิฐแตกหลุดออกมาเล็กน้อย จนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย 6.35 ตัน ข้างบนของอิฐชั้นที่ 2 ที่กึ่งกลางช่วงจะมีอิฐแตกหลุดออกมาเล็กน้อยและปูนสอระหว่างอิฐ 2 ก้อนนี้จะแตกหลุดออกมาด้วยการวิบัติเป็นแบบ "การอัด – ดัดวิบัติ" (Compression - flexural failure) ดังรูปที่ 5.30 และ รูปที่ 5.46 (ภาคผนวก ก.)

5.3.9 คาน B 5 – 2.00 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 2.4 ตัน ได้ยินเสียงดัง แต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อ 2.8 ตัน เริ่มเห็นรอยแตกร้าวเล็กมากในแนวราบของปูนก่อระหว่างอิฐชั้นที่ 1 กับคอนกรีตช่วงล่าง เมื่อ 3.0 ตัน จะเห็นรอยแตกร้าวในแนวราบเพิ่มขึ้น และเริ่มมีรอยแตกร้าวในแนวดิ่ง ที่รอยเชื่อมต่อปูนสอใต้ท้องคาน เมื่อ 4.4 ตัน วัดรอยแตกร้าวในแนวราบได้กว้างประมาณ 0.5 มม. เมื่อ 4.8 ตัน และ 5.2 ตัน วัดรอยแตกร้าวของแนวดิ่งได้ 2 มม. และ 6 มม. ตามลำดับ จากกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่ง จะเห็นว่า

หลังจากเหล็กเสริมเอกถึงจุดคลากแล้ว ระยะโก่งยังไปได้อีกมาก ฉะนั้น การวิบัติจึงเป็นแบบ "การดัดวิบัติ" ดังรูปที่ 5.31 – 5.32 และรูปที่ 5.47 (ภาคผนวก ค.)

5.3.10 คาน B6 – 2.00 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 3.6 ตัน ได้ยินเสียงดัง แต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อ 3.8 ตัน เริ่มเห็นรอยแตกร้าวเล็กมากที่รอยเชื่อมต่อปูนสอ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อ 6.2 ตัน จะมีเสียงดังคล้ายติดเกจวัดความเครียดที่ 7 และ ที่ 9 แล้วน้ำหนักบรรทุกจะลดลงมาเหลือ 5.8 ตัน หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอีกจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย 9.3 ตัน รอยแตกร้าวปรากฏมากและเห็นชัดจนเกือบจะถึงขอบบนสุดของคานตรงจุดน้ำหนักบรรทุกกระทำ เนื่องจากเหล็กเสริมเอกเลยจุดคลากและมีอัตราส่วน (Δ_m / Δ_y) มีค่าถึง 3.07 ฉะนั้นการวิบัติจึงเป็นแบบ "การดัดวิบัติ" ดังรูปที่ 5.33 ถึง 5.34 และรูปที่ 5.48 (ภาคผนวก ค.)

5.3.11 คาน B 1 – 3.00 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 2.4 ตัน ได้ยินเสียงดัง แต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อ 3.0 ตัน เริ่มเห็นรอยแตกร้าวที่รอยเชื่อมต่อปูนสอ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นมากและสูงขึ้น จนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย 7.07 ตัน การวิบัติเป็นแบบ "การดัดวิบัติ" ดังรูปที่ 5.35 และ รูปที่ 5.49 (ภาคผนวก ค.)

5.3.12 คาน B 2 – 3.00 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 2.2 ตัน ได้ยินเสียงดัง แต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อ 2.4 ตัน เริ่มเห็นรอยแตกร้าวที่รอยเชื่อมต่อปูนสอ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นมากและสูงขึ้นจนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย 6.95 ตัน รอยแตกร้าวเกือบจะถึงขอบบนสุดของคาน การวิบัติเป็นแบบ การดัดวิบัติ ดังรูปที่ 5.36 และรูปที่ 5.50 (ภาคผนวก ค.)

5.3.13 คาน B 3 – 3.00 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 8.9 ตัน ได้ยินเสียงดังแต่หารอยแตกร้าวไม่พบ เมื่อ 3.2 ตัน เริ่มเห็นรอยแตกร้าวที่รอยเชื่อมต่อปูนสอ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะเพิ่มมากและสูงขึ้น จนถึงน้ำหนักบรรทุก 7.30 ตัน จะมีเสียงดังกริ๊ก ๆ คล้ายกับเหล็กเสริมเอกเกิดการรูดออกจากการยึดหน่วงกับคอนกรีต ต่อมาอิฐรูปตัว U ที่เทคอนกรีตอัดล่างใต้จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำหลุดออกมากว้างประมาณ 3 ซม น้ำหนัก 7.30 ตัน

เป็นน้ำหนักบรรทุกประลัยและคานตัวนี้ก็ไม่มีการงอขอที่ปลายของเหล็กเสริมเอก ฉนั้นการวิบัติจึงเป็นแบบ "การยึดหน่วงวิบัติ" (Bond failure) ดังรูปที่ 5.37 และรูปที่ 5.51 (ภาคผนวก ค.)

5.3.14 คาน B 4 – 3.00 ขณะที่น้ำหนักบรรทุก 2.8 ตัน ได้ยินเสียงดังและพบรอยแตกร้าวเป็นแนวดิ่งที่รอยเชื่อมต่อปูนสอ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะเพิ่มมากขึ้นและสูงขึ้น เมื่อ 9.2 ตัน น้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะเพิ่มมากขึ้นและสูงขึ้น เมื่อ 9.2 ตัน น้ำหนักบรรทุกเกือบจะคงที่ช่วงระยะหนึ่ง ระยะโก่งจะเพิ่มมากขึ้นและมีรอยแตกร้าวของอิฐรูปตัว U อันบนที่กึ่งกลางช่วงคาน เมื่อถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย 9.61 ตัน รอยแตกร้าวของอิฐนั้นจะหลุดออกมาเล็กน้อยแล้วน้ำหนักบรรทุกจะลดเหลือ 9.4 หลังจากนั้นจะลดลงเรื่อย ๆ การวิบัติเป็นแบบ "การดัดวิบัติ" ดังรูปที่ 5.38 และรูปที่ 5.52 (ภาคผนวก ค.)

สรุปลักษณะการแตกร้าวของคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กทั้งหมด 14 ตัว จะเห็นว่า ลักษณะการแตกร้าวของคานประกอบนั้น เริ่มแรกจะแตกร้าวที่รอยเชื่อมต่อปูนสอระหว่างอิฐรูปตัว U ที่เทคอนกรีตเป็นแนวดิ่งเล็กมากไต้ท้องคาน ระหว่างช่วงน้ำหนักบรรทุกกระทำ ทั้งนี้เพราะว่า แถวนั้นเป็นส่วนที่วัสดุทั้ง 3 อย่าง คือ อิฐ ปูนสอและคอนกรีตมาพบกัน ทำให้เป็นจุดอ่อนที่จะเกิดการแตกร้าวขึ้นก่อน แต่รอยแตกร้าวนั้นเล็กมากขนาดเท่าเส้นด้าย เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น รอยแตกร้าวนั้นจะดิ่งขึ้นและใหญ่ขึ้น แต่ก็ไม่เป็นที่น่าวิตก

การวิบัติของคานประกอบที่ใช้ทดลองทั้งหมด 14 ตัว จะเกิดการวิบัติแบบการดัด 9 ตัว วิบัติแบบการเฉือน 3 ตัว วิบัติแบบการอัด – ดัด 1 ตัว และการวิบัติแบบการยึดหน่วง 1 ตัว ในจำนวนคานที่วิบัติแบบแรงเฉือน 3 ตัวนี้จะเกิดการวิบัติแบบการเฉือนจริง ๆ เพียง 1 ตัว คือ คาน B 4 – 1.50 แต่ภายหลังนำเอาคานตัวนี้ไปทดลองใหม่ ซึ่งมีระยะโก่งไปได้อีกไกล จึงไม่เป็นที่น่าวิตก ส่วนคานอีก 2 ตัว คือ B1 – 1.50 และ B 3 – 2.00 อาจจะไม่วิบัติแบบการเฉือนก็ได้ ดังจะกล่าวในหัวข้อ 5.5 ส่วนคานที่วิบัติแบบการอัด – ดัด 1 ตัวนั้น เป็นคานที่ไม่ได้เทคอนกรีตข้างบน จึงเกิดการวิบัติบนผิวอิฐ เนื่องจากอัฐมีรูกลวง ในทางปฏิบัติจริง ๆ

จะเทคอนกรีตที่ส่วนบนด้วย ส่วนคานที่เกิดการวิบัติแบบการยึดหน่วงคือ คาน B3 – 3.00 เป็นคานที่ไม่ได้งอขอที่ปลายเหล็กเสริมเอก ความยาวของการยึดหน่วงของเหล็กเสริมเอกและคอนกรีตอาจจะไม่เพียงพอก็ได้ จึงเป็นเหตุให้เกิดการวิบัติแบบการยึดหน่วง

5.4 <u>การรับน้ำหนักบรรทุกของคานประกอบ</u>

จากการทดลองคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก จะรู้น้ำหนักบรรทุกที่ค่าต่าง ๆ ดังนี้ คือ เมื่อเหล็กเสริมเอกถึงค่าหน่วยแรงถึงที่ยอมให้และค่ากำลังดึงกลาก คอนกรีตถึงค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ น้ำหนักบรรทุกแตกร้าว น้ำหนักบรรทุกที่จุดระยะโก่ง เริ่มเบนจากเส้นตรงแรกของกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่งและน้ำหนักบรรทุกประลัย ดังตารางที่ 5.1

การเปรียบเทียบน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากการทดลองกับน้ำหนักบรรทุกเมื่อคิดว่า หน้าตัดนั้นเป็นหน้าตัดคอนกรีตล้วน ๆ ตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีขนาดหน้าตัดและขนาดเหล็กเสริมเท่ากันทุกอย่าง ได้ผลดังต่อไปนี้

5.4.1 น้ำหนักบรรทุกแตกร้าว

จากการทดลองจะเห็นว่า น้ำหนักบรรทุกแตกร้าว ซึ่งได้จากตอนที่เหล็กเสริมเอกเริ่มเปลี่ยนความเครียดอย่างเร็วมาก จะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับน้ำหนักบรรทุกที่จุดซึ่งกราฟแสดงระยะโก่งเริ่มเบนจากเส้นตรงแรก ค่าทั้งสองนี้ยังน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกเมื่อเหล็กเสริมเอกถึงหน่วยแรงดึงที่ยอมให้หรือคอนกรีตถึงหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ ฉะนั้น ถ้าไม่ได้ติดเกจวัดความเครียดที่เหล็กเสริมเอก จะใช้น้ำหนักบรรทุกที่จุดระยะโก่งเริ่มเบนจากเส้นตรงแรกเป็นน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวได้

5.4.2 น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้

น้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเอกถึงหน่วยแรงถึงที่ยอมให้ของคานประกอบทุกตัวจะน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกที่คอนกรีตถึงหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ประมาณ 11% ถึง 44% (ยกเว้นคานที่ไม่ได้เทคอนกรีตที่ส่วนบน ซึ่งมีน้ำหนักบรรทุกที่อิฐถึงหน่วยแรงอัดที่ยอมให้มีค่าน้อยกว่าน้ำหนักบรรทุกที่เหล็ก

เสริมเอกถึงหน่วยแรงดึงที่ยอมให้) ฉะนั้น น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ของคานประกอบที่ใช้ทดลองที่มีค่าเปอร์เซนต์เหล็ก $p \leq 1.31\%$ จะถูกควบคุมด้วยหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริมเอก ซึ่งจะเหมือนกับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็ก แสดงว่าคานประกอบที่ใช้ทดลองเป็นคานเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุลย์ (ส่วนมากการคำนวณออกแบบคาน จะพยายามออกแบบให้คานเสริมเหล็กต่ำกว่าสมดุลย์ ทั้งนี้เพื่อว่า เมื่อคานวิบัติ จะได้มีการเตือนให้รู้ล่วงหน้าก่อน จากการที่เหล็กเสริมเอกยืดมาก ทำให้คานโก่งมากและเกิดรอยแตกร้าวให้เห็นชัด ซึ่งต่างจากคานที่เสริมเหล็กเกินสมดุลย์ จะเกิดการวิบัติแบบแรงอัดหรือแบบอื่น ๆ เมื่อคานเกิดการวิบัติจะเกิดขึ้นทันทีทันใด โดยไม่มีการเตือนให้รู้ล่วงหน้าก่อน)

ตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็ก ตั้งแต่ 1% ถึง 74% ยกเว้นคานที่ไม่ได้ติดเกจวัดความเครียด ซึ่งไม่สามารถจะหาน้ำหนักที่ยอมให้ได้อย่างละเอียด และคานที่ไม่ได้เทคอนกรีตที่ส่วนบน สาเหตุที่น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้จากการทดลองมากกว่า เนื่องจากไม่ได้คิดว่าคอนกรีตรับแรงดึงตามสมมุติฐาน ซึ่งความจริงคอนกรีตสามารถรับแรงดึงได้บ้าง อีกประการหนึ่งหน่วยแรงดึงของเหล็กเสริมเอกและหน่วยแรงอัดของคอนกรีตในคานทดลองอาจจะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุนั้น

5.4.3 น้ำหนักบรรทุกประลัย

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่า น้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเอกถึงกำลังดึงคลากที่ได้จากการทดลองคานประกอบ จะมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักบรรทุกประลัยตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็ก กล่าวคือ คานประกอบทั้งหมด 14 ตัว มีค่าน้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเอกถึงกำลังดึงคลากที่ได้จากการทดลองมากกว่าตั้งแต่ 1% ถึง 18% เป็นจำนวน 10 ตัว มีน้อยกว่า 4% และ 6% เพียง 2 ตัว ส่วนคานอีก 2 ตัว ซึ่งไม่เทคอนกรีตที่ส่วนบนมีค่าน้อยกว่า 4% และ 16% สาเหตุที่ได้ต่างกัน อาจจะเนื่องจากกำลังดึงคลากของเหล็กและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตในคานทดลองกับในการทดสอบวัสดุ อาจจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย และทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณกำลังประลัย

ก็เป็นทฤษฎีประมาณซึ่งใช้ข้อสมมุติฐานหลายอย่าง ฉะนั้นจึงถือว่า คานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก มีน้ำหนักบรรทุกเมื่อเหล็กเสริมเอกถึงกำลังดึงคลากมีค่าเท่ากับน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ และสามารถนำทฤษฎีกำลังประลัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมาใช้กับคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กได้ ดังตัวอย่างที่เปรียบเทียบไว้ในภาคผนวก ค.

ส่วนน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็ก ตั้งแต่ 6% ถึง 44% เป็นจำนวน 12 ตัว ส่วนคานอีก 2 ตัว คือ คาน B3 – 3.00 มีค่าน้อยกว่า 2% ซึ่งเป็นคานตัวเดียวเท่านั้นที่เกิดการวิบัติแบบการยึดหน่วงและคาน B 1 – 2.00 มีค่าน้อยกว่า 4% ซึ่งเป็นคานที่ไม่ได้เทคอนกรีตที่ส่วนบน สาเหตุที่น้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็กได้จากเมื่อคิดว่าเหล็กเสริมเหล็กเอกถึงจุดดึงคลากเท่านั้น แต่ในการทดลองคานประกอบนั้นได้กดคานจนกระทั่งเกิดระยะโก่งมาก ทำให้เหล็กเสริมเอกเกิดความเครียดเลยจุดดึงคลากเข้าไปในช่วง Strain hardening ซึ่งมีค่าหน่วยแรงดึง (จากการทดสอบหาคุณสมบัติของเหล็กตัวอย่าง) ประมาณ 1.59 เท่าของกำลังดึงคลาก ฉะนั้น น้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากการทดลองจึงมีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.4.4 ประสิทธิภาพของเหล็กปลอกต่อน้ำหนักบรรทุกประลัย

ในการทดลองคานประกอบนี้ ได้เตรียมคานที่มีลักษณะการก่อสร้างขนาดรูปหน้าตัด ขนาดเหล็กเสริม คอนกรีต และอิฐ เหมือนกันทุกอย่าง เพื่อศึกษาพฤติการของคานตรงตามที่คาดการณ์ไว้หรือไม่ จำนวน 2 คู่ คือ คู่ที่ 1 คาน B 2 – 1.50 มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (เหล็กปลอก) และคาน B 3 – 1.50 ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน คู่ที่ 2 คาน B2 – 2.00 อุดรอยเชื่อมต่อของอิฐด้วยปูนสอในแนวดิ่งตามเหล็กปลอก และคาน B 5 – 2.00 ไม่ได้อุดรอยเชื่อมต่อ ได้ผลดังต่อไปนี้

คู่ที่ 1 คานที่ไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (คาน B3 – 1.50) รับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากการทดลองได้ น้อยกว่าคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (B2 – 1.50) ประมาณ 17% แสดงว่าเหล็กปลอกมีส่วนที่จะทำให้คานรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้นอีกบางเล็กน้อยตรงตามที่คาดการณ์ไว้ แต่คาน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากการทดลองของคานทั้ง 2 นั้น ยังมีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็ก

คู่ที่ 2 คานที่ไม่ได้อุดรอยเชื่อมต่อของอิฐด้วยปูนสอในแนวดิ่งตามเหล็กปลอก จะรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากการทดลองได้น้อยกว่าคานที่อุดรอยเชื่อมต่อนั้น ประมาณ 15% แสดงว่าการอุดรอยเชื่อมต่อของอิฐด้วยปูนสอในแนวดิ่งตามเหล็กปลอก มีส่วนช่วยให้คานรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ แต่คาน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากการทดลองของคานทั้ง 2 นั้น ยังมีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยตามทฤษฎีคอนกรีตเสริมเหล็ก การทดลองนี้แสดงผลในเบื้องต้นนี้ว่า การอุดรอยเชื่อมต่อของอิฐด้วยปูนสอในแนวดิ่งตามเหล็กปลอกที่ไม่ดีพอ จะมีผลเสียต่อการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเล็กน้อย ทั้งนี้เหล็กปลอกต้องมีการยึดหน่วงในส่วนที่เป็นคอนกรีตเพียงพอ การสรุปขั้นสุดท้าย จำเป็นต้องมีการทดลองศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

5.5 <u>การรับแรงเฉือนของคานประกอบ</u>

การรับแรงเฉือนโดยคอนกรีตและอิฐในการวิจัยนี้ ใช้เหล็กปลอกเสริมตั้งฉากกับเหล็กเสริมเอก เพื่อต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นเท่านั้น ไม่มีการงอเหล็กกอม้า

5.5.1 ทฤษฎีอีลาสติก ตามที่คำนวณเมื่อถือว่าเป็นคานคอนกรีตล้วน ดูตัวอย่างในภาคผนวก ค. คานส่วนมากเกือบจะไม่ต้องเสริมเหล็กปลอกสำหรับรับน้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ ซึ่งควบคุมโดยเหล็กเสริมเอก ผลการทดลองคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กจากตารางที่ 5.2 และกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกรูปที่ 5.2 – 5.11 (ภาคผนวก ค.) จะเห็นว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกที่น้ำหนักบรรทุกที่คอนกรีตต้านแรงเฉือนได้เองของคานประกอบทั้งหมด 14 ตัว มีค่ามากที่สุด 114 กก./ซม.^{2} ซึ่งนับว่าน้อยมาก แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้จะก่ออิฐโดยมีรอยต่ออยู่ในแนวเดียวกันหมด คานประกอบนี้ก็ยังสามารถรับแรงเฉือน

ได้ดี ข้อความนี้สนับสนุนโดยคาน B 3 – 1.50

5.5.2 ทฤษฎีกำลังประลัย จากตารางที่ 5.2 และกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกรูปที่ 5.2 – 5.11 (ภาคผนวก ก.) จะเห็นว่า ที่จุดน้ำหนักบรรทุกที่คานนั้นต้านแรงเฉือนประลัยได้เอง โดยคำนวณจากสูตรของทฤษฎีกำลังประลัยของคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กปลอกจะเกิดหน่วยแรงมากที่สุดของคานประกอบทั้งหมด 12 ตัว มีค่าเท่ากับ 495 กก./ซม.^{2} แสดงว่า เหล็กปลอกทำหน้าที่รับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นไม่มาก ยกเว้นคานประกอบอีก 2 ตัว คือ คาน B 6 – 2.00 เหล็กปลอกเกิดหน่วยแรงมากที่สุด 1657 กก./ซม.^{2} และคาน B5 – 2.00 เหล็กปลอกเกิดหน่วยแรงถึง 2330 กก./ซม.^{2} เหล็กปลอกของคาน 2 ตัวหลังนี้ ทำหน้าที่ต้านแรงเฉือนมาก

หน่วยแรงเฉือนประลัยที่เกิดขึ้นจากการทดลองคานประกอบทั้งหมด 14 ตัว มีค่าตั้งแต่ 5.52 กก./ซม.^{2} ถึง 14.47 กก./ซม.^{2} ส่วนหน่วยแรงเฉือนประลัยที่คานสามารถต้านได้เอง มีค่าตั้งแต่ 6.53 กก/ซม.^{2} ถึง 8.80 กก./ซม.^{2} ดังตารางที่ 5.2 ถ้าเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉือนประลัยที่เกิดขึ้นกับหน่วยแรงเฉือนประลัยที่คานสามารถต้านทานได้เอง จะมีค่าตั้ง 0.77 ถึง 1.70 กล่าวคือ มีคานประกอบจำนวน 12 ตัว ที่มีค่าอัตราส่วน $\frac{V_{eu}}{V_{eu}}$ มากกว่า 1.00 มีคานประกอบจำนวน 2 ตัว ที่มีค่าอัตราส่วนนี้น้อยกว่า 1.00 คือ คาน B1 – 2.00 และคาน B 5 – 2.00 ซึ่งคาน B 1 – 2.00 เป็นคานที่ไม่ได้เทคอนกรีตที่ส่วนบน และคาน B5 – 2.00 เป็นคานที่ไม่ได้อุดรอยเชื่อมต่อของอิฐด้วยปูนสอในแนวดิ่งตามเหล็กปลอก ถ้าค่าอัตราส่วน $\frac{V_{eu}}{V_{cu}}$ มีค่ามากกว่า 1.00 แสดงว่า เหล็กปลอกจะช่วยรับแรงเฉือนส่วนที่เหลือจากคานรับได้ จากการทดลองคานประกอบนี้จะได้อัตราส่วนนี้ใกล้เคียง 1.00 ซึ่งแสดงว่า คานนั้นเกือบรับแรงประลัยได้เอง ซึ่งตรงตามที่คำนวณได้จากทฤษฎีแรงเฉือน

5.5.3 การทำงานของเหล็กปลอกในการรับแรงเฉือน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเหล็กปลอกในคานประกอบประเภทนี้ จึงได้ทำการทดลอง คาน B5 – 2.00 โดยออกแบบให้ให้เหล็กปลอกยึดอยู่ในส่วนที่เป็นคอนกรีตเพียงพอ

และไม่ได้อุดรอยเชื่อมต่อของอิฐด้วยปูนสอในแนวดิ่งตามเหล็กปลอก จากการทดลองที่น้ำหนักบรรทุกที่คานต้านแรงเฉือนที่ยอมให้ได้เอง เหล็กปลอกจะเกิดหน่วยแรงถึง 1399 กก./ซม.^{2} แสดงว่าเหล็กปลอกทำงานแล้ว และเมื่อถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย เหล็กปลอกจะเกิดหน่วยแรงถึง 2352 กก./ซม. นั่นคือแสดงว่า เหล็กปลอกในคานประกอบนี้ มีประสิทธิภาพในการรับแรงเฉือนได้ดี

ในการทดลองคานประกอบทั้งหมด 14 ตัว จะมีการวิบัติแบบการเฉือนเพียง 3 ตัว คือ คาน B 1 – 1.50, คาน B 4 – 1.50 และคาน B 3 – 2.00 จากการสังเกตคาน B 1 – 1.50 และ คาน B 3 – 2.00 ก่อนการทดลองจะสังเกตเห็นรอยเยยอนิดหน่อยที่ปลายคานด้านหนึ่ง แถวจุดฐานรองรับ เนื่องจากการก่ออิฐด้วยปูนสอที่ปลายคานนั้นไม่ดี อิฐจึงยึดเกาะกันไม่แน่น เมื่อทำการทดลองรับน้ำหนักของคานทั้ง 2 ตัวแล้ว จึงเกิดรอยเยยอมากขึ้นที่รอยเยยอเท่านั้น และเกิดรอยแตกร้าวมากเป็นแนวทะแยงมุมประมาณ 45° ออกจากฐานรองรับไปหาจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำและรอยแตกร้าวจะเกิดอยู่เพียงครึ่งช่วงความยาวของคานด้านที่เกิดรอยเยยอเท่านั้น ส่วนอีกด้านหนึ่งเกือบจะไม่เกิดการแตกร้าวเลย เนื่องจากคาน 2 ตัวนี้ มีจุดอ่อนที่ปลายคานแถวฐานรองรับ และที่ใกล้ฐานรองรับเป็นส่วนที่จะเกิดการเฉือนมากที่สุด จึงทำให้คานทั้ง 2 ตัวนี้ เกิดการวิบัติแบบการเฉือน ถ้าพิจารณาค่าอัตราส่วนของระยะโก่งที่มากที่สุดจากการทดลองต่อระยะโก่งที่จุดน้ำหนักบรรทุกที่เหล็กเสริมเอกถึงกำลังดึงคลากของคาน 2 ตัวนี้ ซึ่งมีค่า 3.08 และ 2.66 คาน 2 ตัวนี้ ไม่น่าที่จะเกิดการวิบัติแบบการเฉือนเลย ฉะนั้น ถ้าก่อคาน 2 ตัว ให้ดีไม่เกิดรอยเยยอแล้ว คงจะไม่เกิดการวิบัติแบบการเฉือนแน่

ส่วนคาน B 4 – 1.50 ที่เกิดการวิบัติแบบการเฉือน เนื่องจากการกดคานจนเหล็กปลอกเกิดหน่วยแรงถึง 3387 กก./ซม.^{2} ซึ่งเกือบจะถึงกำลังดึงคลากของเหล็กปลอก และคานประกอบตัวนี้เกิดระยะโก่งน้อยได้ค่า Δ_m/Δ_y เพียง 1.36 เท่านั้น แต่ภายหลังนำคานตัวนี้ไปทดลองกดรับน้ำหนักบรรทุกใหม่ สามารถจะให้ค่า Δ_m/Δ_y ถึง 2.45 ซึ่งเป็นค่ามากพอใช้ได้ แสดงว่า คานตัวนี้มีความเหนียวใช้ได้ ฉะนั้น การเกิดการวิบัติแบบการเฉือนของคาน B 4 – 1.50 จึงไม่น่าวิตกมาก จึงพอสรุปได้ว่า คานประกอบที่ใช้ทดลองรับน้ำหนักบรรทุก

ทั้งหมด 14 ตัว จะเกิดการวิบัติแบบการเฉือนเพียง 1 ตัว คือ คาน B4 – 1.50 ซึ่งการวิบัติของคานประกอบตัวนี้ไม่น่าวิตกนัก

ฉะนั้น ปัญหาการวิบัติแบบการเฉือนของคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก จึงไม่เป็นที่น่าวิตกเลย

ต่อไปจะเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเฉือนที่ได้จากการทดลองคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก ซึ่งเขียนอยู่ในรูปฟังชั่นของอัตราส่วนช่วงแรงเฉือน $\frac{a}{d}$ กับหน่วยแรงเฉือนของคานวัสดุก่อที่คนอื่น ๆ เขาทดลองไว้ดังรูปที่ 5.5 3 จะเห็นว่า ค่าหน่วยแรงเฉือนของคานประกอบมีค่ามากกว่าหน่วยแรงเฉือนของคานวัสดุก่อ ซึ่งแสดงว่า คานประกอบนี้รับแรงเฉือนได้ดี

5.6 <u>การเปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก</u>

จากการทดลองคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กทั้งหมด 14 ตัว แล้วนำมาเปรียบเทียบกับทฤษฎีคานคอนกรีตเสริมทั่วไป โดยคิดว่า คานนั้นมีรูปหน้าตัด ขนาดเหล็กเสริม ระยะเรียงเหล็กปลอกและระยะช่วงยาวมีค่าเท่ากันหมด ผลปรากฏว่า จะได้น้ำหนักบรรทุกที่ยอมให้ น้ำหนักบรรทุกประลัย และแรงเฉือนมีค่าใกล้เคียงกันมาก และทฤษฎีต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป สามารถนำมาใช้กับคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กได้

ฉะนั้น ในการเปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างจะถือว่า คานของทั้ง 2 วิธี มีขนาดทุกอย่างเท่ากันหมด และรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากันด้วยที่ต่างกันก็มีวัสดุ ค่าแรง และ ไม้แบบเท่านั้น

ในการก่อสร้างคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กไม่ต้องใช้ไม้แบบเลย ส่วนไม้ค้ำยันใต้ท้องคานอาจจะใช้หรือไม่ใช้ก็ได้ ซึ่งแยกออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ไม่ใช้ไม้ค้ำยันใต้ท้องคาน โดยการก่อกำแพงอิฐขึ้นก่อนให้ได้ระดับที่ต้องการแล้วจึงก่อคานประกอบต่อไป กรณีที่ 2 ใช้ไม้ค้ำยันชั่วคราวใต้ท้องคาน แต่ไม่ต้องใช้ไม้แบบ

การประมาณราคาค่าก่อสร้างใช้วิธี "Unit Quantity Method" โดยวิเคราะห์หาค่าวัสดุและค่าแรง ส่วนค่ากำไรและภาษีของทั้ง 2 วิธี จะไม่นำมาเปรียบเทียบ เพราะค่านี้เกือบจะไม่แตกต่างกันเลย สำหรับราคาวัสดุนั้นถือเอาราคาวัสดุในท้องตลาดเดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ.2520 เป็นเกณฑ์ ซึ่งราคาวัสดุนี้เปลี่ยนแปลงได้ตามสภาวะเศรษฐกิจทั้งภายในและภายนอกประเทศ

คานที่จะนำมาเปรียบเทียบเป็นคานช่วงเดี่ยวธรรมดา มีระยะช่วงยาว 3.00 ม. ขนาดหน้าตัด 0.14 x 0.33 ม. เหล็กเสริมเอกล่าง 2 ϕ 15 มม. เหล็กเสริมบน 2 ϕ 9 มม. เหล็กปลอก ϕ 6 มม. มีระยะเรียง 0.16 ม.

ค่าแรงของคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก ได้มาจากค่าจ้างช่างที่นำมาก่อสร้างคานประกอบที่ใช้ทดลองจริง ๆ ทั้งหมด 14 ตัว คิดเป็นความยาวทั้งหมด 34.76 ม. เสียค่าแรงจ้างช่างทั้งหมด 570 บาท ซึ่งรวมค่าแรงตั้งแต่ดัด – ผูกเหล็ก ผสม – เทคอนกรีต ก่ออิฐ และตบแต่งผิวต่าง ๆ จนเสร็จเป็นคานพร้อมที่จะทดลองได้ ฉะนั้น ค่าแรงก่อคานประกอบประมาณ 16.40 บาท/ม.

ค่าวัสดุ ค่าแรงและค่าก่อสร้างคานทั้งหมดของทั้ง 2 แบบ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 ซึ่งจะเห็นว่า คานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กที่ใช้ไม้ค้ำยันด้วยจะมีราคาถูกกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กประมาณ 11% แต่ถ้าคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็กที่ไม่ใช้ไม้ค้ำยันแล้วจะมีราคาถูกกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กประมาณ 35 % ส่วนดีอีกประการหนึ่งของคานประกอบคอนกรีต – อิฐเสริมเหล็ก คือ มีน้ำหนักเบากว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กประมาณ 23% ซึ่งจะทำให้น้ำหนักที่ถ่ายลงไปยังฐานรากน้อยลง ทำให้ราคาค่าก่อสร้างฐานรากถูกอีกเล็กน้อย แต่ไม่มากนัก

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการทดลองของน้ำหนักบรรทุก (กก.)

คาน	P_w	P_{fc}	P_{cr}	P_{sw}	P_{cw}	P_{sy}	$\frac{P_{sw}}{P_w}$	P_u	P_{eu}	$\frac{P_{sy}}{P_u}$	$\frac{P_{eu}}{P_u}$
B1-1.50	3034	3000	(3000)	(3000)	-	(5500)	0.99	5746	6100	0.96	1.06
B2-1.50	2724	3000	2500	4320	-	6650	1.58	5910	8250	1.13	1.40
B3-1.50	2724	2400	(2400)	(2400)	-	6200	0.88	5910	6830	1.05	1.16
B4-1.50	4210	4200	3800	7200	8100	10600	1.71	9050	10820	1.17	1.20
B1-2.00	1362	1100	(1100)	(1100)	-	(2500)	0.81	2961	2830	0.84	0.96
B2-2.00	1976	1800	1800	3100	5150	4950	1.57	4367	6150	1.13	1.41
B3-2.00	3096	1800	1800	3700	6600	6800	1.20	6725	7150	1.01	1.06
B4-2.00	2490	1300	1450	3100	1700+	5100	0.68*	5298	6350	0.96	1.20
B5-2.00	1976	1600	1800	3100	5030	4800	1.57	4367	5200	1.10	1.19
B6-2.00	3092	2100	2100	4300	6500	7400	1.39	6725	9300	1.10	1.38
B1-3.00	2178	2000	2100	3800	4900	5800	1.74	4908	7070	1.18	1.44
B2-3.00	2178	1800	1600	3000	4600	5100	1.38	4908	6950	1.04	1.42
B3-3.00	3364	2000	2000	3400	5000	7000	1.01	7410	7300	0.94	0.99
B4-3.00	3364	2000	2000	4500	4800	7900	1.34	7410	9610	1.07	1.30

หมายเหตุ ค่าในวงเล็บได้จากกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะโก่ง

\+ ค่าของ P_{bw}

* ค่าของ P_{bw/P_w}

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการทดลองของหน่วยแรงเฉือน (กก./ซม.^{2})

คาน	v_{cw}	P_{vw} (กก.)	v_{cu}	P_{vu} (กก.)	v_{cu}	$\frac{v_{cu}}{v_{cw}}$	หน่วยแรงดึงสูงสุดในเหล็กปลอก (กก./ซม.^{2})	การวิบัติ
B1-1.50	3.43	2739	6.53	5345	7.43	1.14	-	S
B2-1.50	4.30	3135	8.18	6070	11.33	1.39	-	F
B3-1.50	4.30	3135	8.18	6070	9.18	1.12	-	F
B4-1.50	4.46	3253	8.49	6299	14.47	1.70	3387	S
B1-2.00	3.76	1895	7.17	5315	5.52	0.77	-	F
B2-2.00	4.23	3049	8.05	5937	8.33	1.03	558	F
B3-2.00	4.35	3135	8.27	6099	9.66	1.17	92⊕	S
B4-2.00	3.98	2333	7.58	4551	10.50	1.39	587	CF
B5-2.00	-	-	-	-	7.07	-	2352	F
B6-2.00	4.35	3135	8.27	6099	12.51	1.51	3900	F
B1-3.00	4.49	3517	8.55	6927	8.72	1.02	625	F
B2-3.00	4.49	3517	8.55	6927	8.57	1.00	54	F
B3-3.00	4.62	3496	8.80	6899	9.28	1.05	25	B
B4-3.00	4.62	3496	8.80	6899	12.15	1.38	1006	F

หมายเหตุ คาน B5-2.00 ไม่ได้อุดรอยเชื่อมต่อของอิฐด้วยปูนสอในแนวดิ่งตามเหล็กปลอก

⊕ ค่าของเหล็กปลอกด้านที่ไม่เกิดการแตกร้าว

S = การเฉือนวิบัติ

F = การดัดวิบัติ

CF = การอัด - ดัดวิบัติ

B = การยึดหน่วงวิบัติ

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการทดลองของระยะโก่ง (มม.)

คาน	Δ_C	Δ_B	Δ_{CB}	Δ_{ew}	Δ_y	Δ_m	$\frac{\Delta_m}{\Delta_y}$	Δ_a	Δ_p
B1-1.50	0.32	0.77	0.46	(0.85)	(2.60)	8.0	3.08	4.17	6
B2-1.50	0.83	1.98	1.16	1.20	2.90	25.0	8.62	4.17	20
B3-1.50	0.21	0.50	0.29	(0.40)	(2.20)	14.0	6.36	4.17	10
B4-1.50	1.28	3.07	1.81	1.53	4.05	5.5 [10.0]	1.36 [2.45]	4.17	2
B1-2.00	0.78	1.86	1.09	(1.40)	(5.90)	28.0	4.75	5.56	20
B2-2.00	1.35	3.22	1.90	1.70	5.20	24.0	4.62	5.56	17
B3-2.00	1.43	3.42	2.01	2.30	6.20	16.4	2.66	5.56	12
B4-2.00	0.91	2.18	1.28	1.00	5.80	18.5	3.19	5.56	11
B5-2.00	1.35	3.22	1.90	2.95	6.20	23.1	3.73	5.56	17
B6-2.00	1.73	4.15	2.45	1.50	4.40	13.5	3.07	5.56	6
B1-3.00	3.88	9.75	5.53	3.50	7.00	49.0	7.00	8.33	38
B2-3.00	2.82	7.12	4.04	2.50	5.30	50.0	8.62	8.33	34
B3-3.00	3.55	8.95	5.08	2.40	7.80	17.0	2.18	8.33	14
B4-3.00	5.04	12.71	7.21	3.60	8.40	29.8	3.55	8.33	28

[ ] ค่าที่ได้ภายหลังจากทดลองคานใหม่

ตารางที่ 5.4 ราคาค่าก่อสร้างของคานประกอบคอนกรีต-อิฐเสริมเหล็ก ยาว 3.00 ม.

ลำดับที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
	ค่าวัสดุ				
1	คอนกรีต	0.036	ม.^{3}	500	18
2	เหล็ก ϕ 15 มม.	6.30	ม.	8.60	54
	ϕ 9 มม.	6.30	ม.	3.30	21
	ϕ 6 มม.	14.40	ม.	1.70	25
3	ลวดผูกเหล็ก	0.2	กก.	15	3
4	อิฐแบบที่ 3	38	ก้อน	1.50	57
	อิฐแบบที่ 4	11	"	1.90	21
	อิฐแบบที่ 4 H	20	"	1.00	20
5	ปูนสอ	0.020	ม.^{3}	500	10
6	ไม้ค้ำยัน (กิดใช้ 4 ครั้ง)	-	-	-	60
7	ตาปู	0.8	กก.	11	9
8	รวมค่าวัสดุของลำดับที่ 1 - 5	-	-	-	229
9	รวมค่าวัสดุของลำดับที่ 1 - 7	-	-	-	298
	ค่าแรง				
10	ค่าแรงของลำดับที่ 1 - 5	3	ม.	16.40	49
11	ค่าแรงของลำดับที่ 6	-	-	-	35
12	รวมค่าแรงของลำดับที่ 10 - 11	-	-	-	84
	รวมค่าวัสดุและค่าแรง				
13	ค่าวัสดุของลำดับที่8และค่าแรงลำดับที่10	-	-	-	278
14	ค่าวัสดุของลำดับที่9และค่าแรงลำดับที่12	-	-	-	382

ตารางที่ 5.5 ราคาค่าก่อสร้างของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ยาว 3.00 ม.

ลำดับที่	รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ราคาต่อหน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
	ค่าวัสดุ				
1	คอนกรีต	0.140	ม.^{3}	500	70
2	เหล็ก ø 15 มม.	6.30	ม.	8.60	54
	ø 9 มม.	6.30	ม.	3.30	21
	ø 6 มม.	14.40	ม.	1.70	25
3	ลวดผูกเหล็ก	0.2	กก.	15	3
4	ไม้แบบ (คิดใช้ 2 ครั้ง)	2.40	ม.^{2}	65	78
5	ไม้ค้ำยัน (คิดใช้ 4 ครั้ง)	–	–	–	85
6	ตาปู	1	กก.	11	11
7	รวมค่าวัสดุทั้งหมด	–	–	–	347
	ค่าแรง				
8	ค่าเทคอนกรีต	0.140	ม.^{3}	100	14
9	ค่าผัด – ผูกเหล็ก	15	กก.	0.60	9
10	ค่าสร้างไม้แบบ	–	–	–	60
11	รวมค่าแรงทั้งหมด	–	–	–	83
12	รวมค่าวัสดุและค่าแรงทั้งหมด	–	–	–	430