บทที่ 4

ผลการทดสอบ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของตงและแผ่นพื้น-ตง

4.1.1 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของตง

ตง J_1 ลักษณะการแตกร้าวเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.1 คือ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 453 กก. ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 12.54 มม. เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรกในแนวประมาณดิ่ง ปรากฏให้เห็นชัดด้วยตาเปล่า บริเวณที่ใต้จุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำในช่วงดัด (Flexural Span) และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นถึง 460 กก. จะเกิดรอยแตกร้าวในแนวดิ่งที่ประมาณกึ่งกลางช่วงอีก 2 รอย โดยที่รอยแตกร้าวที่สังเกตเห็นเริ่มแรกนั้นไม่มีการแตกร้าวเขยิบสูงขึ้น เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นไปอีกรอยแตกร้าวจะเพิ่มจำนวน, ความลึก และความกว้าง ขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงดัด ทั้งรอยแตกร้าวบางรอยจะแตกแยกออกเป็น 2 ทาง (Forked Cracks) และเริ่มปรากฏรอยแตกร้าวในช่วงแรงเฉือน (Shear span) บริเวณใต้จุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 474 กก. รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดจะไปหยุดอยู่ที่ใต้ปีกบนของตง และเกิดการวิบัติแบบแรงดัดวิบัติที่บริเวณกึ่งกลางช่วง โดยคอนกรีตปีกบนของตงระเบิดออก เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 649.25 กก. ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 61.40 มม.

ตง J_2 ลักษณะการแตกร้าวเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.2 คือ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 374 กก. ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 11.37 มม. เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรกปรากฏให้เห็นที่ตำแหน่งประมาณกึ่งกลางระหว่างจุดกึ่งกลางช่วงกับจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำด้านปลาย ก. รอยแตกร้าวจะเพิ่มจำนวน, ความลึก และความกว้างขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงดัดเป็นส่วนมาก และจะไปหยุดอยู่ที่ใต้ปีกบนของตง คล้ายกับตง J_1 เพียงแต่ตง J_2 จะมีจำนวนรอยแตกร้าวต่อความยาวช่วงดัดของตง และรอยแตกแบบ 2 ทาง น้อยกว่าตง J_1 และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 626.2 กก. ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 69.40 มม. จึงเกิดการวิบัติแบบแรงดัดวิบัติที่ประมาณกึ่งกลางช่วงโดยคอนกรีตด้านปีกบนของตงระเบิดออก

ตง J_3 ลักษณะการแตกร้าวเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวในลักษณะแนวดิ่งที่บริเวณกึ่งกลางช่วงคัด เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 434 กก. ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 13.20 มม. เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น รอยแตกร้าวจะเพิ่มจำนวน, ความลึก และความกว้างมากขึ้นในช่วงคัด และจะเริ่มปรากฏรอยแตกร้าวในช่วงแรงเฉือนบริเวณใต้จุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำเมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 510 กก. รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดจะไปหยุดอยู่ที่ใต้ปีกบนของตง และเมื่อน้ำหนักบรรทุกถึง 693.7 กก. ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วงเท่ากับ 93.60 มม. ตงจึงเกิดการวิบัติแบบแรงคัดวิบัติที่ประมาณกึ่งกลางช่วงโดยคอนกรีตด้านปีกบนของตงระเบิดออก

ตง J_4 ลักษณะการแตกร้าวเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกร้าวด้วยตาเปล่าที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างจุดกึ่งกลางกับจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำด้านปลาย ก. เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 473 กก. ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 17.02 มม. รอยแตกร้าวจะเพิ่มจำนวน, ความลึก และความกว้างมากขึ้นในช่วงคัดเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นคล้ายกับตง J_3 เริ่มปรากฏรอยแตกร้าวในช่วงแรงเฉือนบริเวณใต้จุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 549 กก. และเกิดการวิบัติแบบแรงคัดวิบัติที่บริเวณกึ่งกลางช่วง เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 736.45 กก. ระยะการแอ่นตัว 89.90 มม. โดยคอนกรีตปีกบนของตงระเบิดออก

สรุปลักษณะการแตกร้าวของตงคอนกรีตอัดแรงที่ทดสอบทั้งสี่ตัวได้ว่า รอยแตกร้าวเกือบทั้งหมดอยู่ในช่วงคัด จะปรากฏรอยแตกร้าวในช่วงแรงเฉือนบริเวณใต้จุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำบ้างเล็กน้อย ในช่วงคัดรอยแตกร้าวอยู่ในลักษณะเกือบดิ่ง ส่วนรอยแตกร้าวบริเวณใต้จุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ จะมีลักษณะเบนเข้าหาจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดจะไปหยุดอยู่ใต้ปีกบนของตง และการวิบัติของตงทั้งสี่ตัว เป็นแบบแรงคัดวิบัติโดยคอนกรีตด้านปีกบนของตงเกิดระเบิดออก

4.1.2 <u>ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติของแผ่นพื้น-ตง</u>

แผ่นพื้น-ตง S_1 ลักษณะการแตกร้าวเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยเกิดรอยแตกร้าวในแนวดิ่งปรากฏในเห็นด้วยตาเปล่า 1 รอย ที่บริเวณกึ่งกลางช่วง ขณะใส่น้ำหนักบรรทุกรอบที่สอง เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 600 กก/ม (869.57 กก/$ม^2$) ระยะการ-

แอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 3.89 มม. รอยแตกร้าวจะเพิ่มจำนวน, ความลึก และความกว้างมากขึ้นขณะเพิ่มน้ำหนักบรรทุก รอยแตกร้าวจะยาวไปถึงขอบล่างของปีกแผ่นพื้น-คาน (แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่) เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 728 กก/ม (1055.07 กก/$ม^2$) หลังจากเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไป รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นแล้วบางส่วนจะแตกร้าวเฉียบสูงเข้าไปในปีกของแผ่นพื้น-คาน ทำให้เกิดการแตกร้าวบนส่วนของปีกของแผ่นพื้น-คาน สูงประมาณเท่ากับครึ่งหนึ่งของความลึกของปีก เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 835 กก/ม (1210.15 กก/$ม^2$) และจะเกิดการวิบัติแบบแรงดัดวิบัติบริเวณจุดกึ่งกลางช่วงโดยเหล็กแรงดึงสูงขาด เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 1041.94 กก/ม (1510.06 กก/$ม^2$) ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 26.00 มม.

แผ่นพื้น-คาน S_2 ลักษณะการแตกร้าวเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยเกิดรอยแตกร้าวในแนวดิ่งปรากฏให้เห็นด้วยตาเปล่าสามรอย ขณะใส่น้ำหนักบรรทุกรอบที่สองที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 505 กก/ม (731.88 กก/$ม^2$) ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 5.36 มม. หนึ่งรอยอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่วงบนตัวคงค้าน (1) อีกสองรอยอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่วงบนตัวคงค้าน (2) ความสูงของรอยแตกร้าวทั้งสามรอยประมาณ 3.75 ซม. เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกรอยแตกร้าวจะเพิ่มจำนวน, ความลึก และความกว้างมากขึ้น รอยแตกร้าวบางรอยจะแยกออกเป็นสองทางเมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 555 กก/ม (804.35 กก/$ม^2$) รอยแตกร้าวบางส่วนจะแตกร้าวยาวเข้าไปถึงขอบล่างของปีกของแผ่นพื้น-คาน เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 822 กก/ม (1191.30 กก/$ม^2$) และจะเฉียบสูงเข้าไปในส่วนปีกของแผ่นพื้น-คาน จนเกิดการวิบัติแบบแรงดัดวิบัติโดยเหล็กแรงดึงสูงขาดออกจากกันและแผ่นพื้น-คานจะพับลงอย่างรวดเร็วที่น้ำหนักบรรทุก 956 กก/ม (1385.51 กก/$ม^2$) ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 47.80 มม.

แผ่นพื้น-คาน S_3 ลักษณะการแตกร้าวเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.7 คือ ขณะใส่น้ำหนักบรรทุกรอบที่สอง เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 438 กก/ม (608.33 กก/$ม^2$) ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 4.42 มม. เกิดรอยแตกร้าวในแนวดิ่งสูงประมาณเท่ากับความลึกของปีกล่างของแผ่นพื้น-คาน ที่ตำแหน่งห่างจากจุดกึ่งกลางช่วงไปทางด้านปลาย ก. บนตัวคงค้าน (1) ระยะ 7.5 ซม. ปรากฏให้เห็น 1 รอย เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น รอยแตกดังกล่าวจะเฉียบสูงขึ้นไป พร้อมกับมีรอยแตกร้าวแห่งใหม่เกิดขึ้น รอยแตกร้าวจะแตกร้าวยาวเข้าไปถึงขอบล่างของปีกของแผ่นพื้น-คาน เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 718 กก/ม (997.22 กก/$ม^2$) และจะเฉียบสูงเข้าไปในส่วนปีกของแผ่นพื้น-คาน จนเกิดการวิบัติแบบแรงดัดวิบัติที่บริเวณกึ่งกลางช่วงโดยเหล็กเสริมแรงดึงสูงขาด ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 930.27 กก/ม (1292.04 กก/$ม^2$) ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 63.50 มม.

แผ่นพื้น-ตง S_4 ลักษณะการแตกร้าวเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยเกิดรอยแตกร้าวในแนวดิ่งปรากฏให้เห็นด้วยตาเปล่าสี่รอย ขณะใส่น้ำหนักบรรทุกรอบแรก เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 535 กก/ม (743.06 กก/$ม^2$) ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 6.00 มม. โดยรอยแตกร้าวสองรอยแรกจะอยู่บริเวณกึ่งกลางช่วงบนตัวตงด้าน (1) อีกสองรอยอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่วงบนตัวตงด้าน (2) หลังจากทิ้งน้ำหนักบรรทุกนั้นค้างไว้ 24 ชั่วโมง พบว่ารอยแตกร้าวทั้งสี่แตกร้าวเขยิบขึ้นไปน้อยมาก และจะปิดสนิทจนไม่สามารถมองเห็นได้ขณะทำการปลดน้ำหนักที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 338.87 กก/ม (470.65 กก/$ม^2$) รอยแตกร้าวดังกล่าวจะเปิดให้เห็นอีกครั้งขณะใส่น้ำหนักบรรทุกรอบที่สอง ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 299 กก/ม (404.17 กก/$ม^2$) รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะยาวเข้าไปถึงขอบล่างของปีกของแผ่นพื้น-ตง เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 586 กก/ม (813.89 กก/$ม^2$) และเริ่มเขยิบสูงเข้าไปในส่วนของปีกของแผ่นพื้น-ตง เมื่อใส่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น และที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 738 กก/ม (1025.00 กก/$ม^2$) เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนที่อกตง (web) บนตัวตงด้าน (2) ห่างจากจุดรองรับปลาย (ข) 20 ซม. โดยรอยแตกร้าวจะเอียงทำมุมประมาณ 45° กับแนวนอน ดังรูปที่ 4.8 และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกขึ้นไปอีก รอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนดังกล่าวนี้จะมีขนาดกว้างขึ้นและแตกร้าววิ่งเข้าหาจุดรองรับปลาย (ข) พร้อมกันนั้นรอยแตกร้าวในส่วนปีกของแผ่นพื้น-ตง จะกว้างและยาวมากขึ้น จนเกิดการวิบัติที่บริเวณกึ่งกลางช่วง โดยเหล็กแรงดึงสูงขาด ที่น้ำหนักบรรทุก 769 กก/ม (1069.17 กก/$ม^2$) ระยะการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วง 87.00 มม.

สรุปลักษณะของการแตกร้าวของแผ่นพื้น-ตงที่ทดสอบทั้งสี่ตัวได้ว่า แผ่นพื้น-ตง S_1, S_2, S_3 และ S_4 จะเริ่มการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดก่อนแล้วจึงเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด-เฉือน เพียงแต่แผ่นพื้น-ตง S_4 เท่านั้น ที่นอกจากจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัด และแรงดัด-เฉือน แล้วยังเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนที่อกตงใกล้จุดรองรับขณะรับน้ำหนักบรรทุกที่ใกล้ถึงน้ำหนักบรรทุกประลัย การวิบัติของแผ่นพื้น-ตง ทั้งสี่นั้นเกิดจากเหล็กเสริมแรงดึงสูงขาดออกจากกันที่บริเวณจุดกึ่งกลางช่วง

4.2 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน

กำลังอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นของแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 15 × 30 ซม. ของคานทุกตัว แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ค่าการเสื่อมสูญแรงอัด และค่าการแอ่นตัวขึ้นที่จุดกึ่งกลางช่วงของคานทุกตัว แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

4.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วงของคานที่ทดสอบแสดงในรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบกับระยะการแอ่นตัวที่คำนวณโดยใช้เมเมนต์อินเนอร์เชียประสิทธิผลตามมาตรฐาน ACI 318 - 77[26] และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ

เห็นได้ว่าในช่วงแรกที่น้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ ก่อนเกิดการแตกร้าวเริ่มแรก ระยะการแอ่นตัวจะเพิ่มขึ้นน้อย และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักบรรทุก ระยะการแอ่นตัวที่เกิดในช่วงนี้ความชันของเส้นจากผลการทดสอบจะชันกว่าเส้นที่ได้จากทฤษฎีเล็กน้อย จนกระทั่งเกิดการแตกร้าวเริ่มแรกของคอนกรีต อัตราการแอ่นตัวของคานจะเพิ่มขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียประสิทธิผลของหน้าตัดลดลงจากการแตกร้าว และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นไปอีก ระยะการแอ่นตัวจะเพิ่มขึ้นมากในขณะที่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเส้นกราฟจะมีลักษณะโค้ง และมีความชันพอสมควรจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรง

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงที่จุดกึ่งกลางช่วงของคานที่ทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.12 เห็นได้ว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ ก่อนเกิดการแตกร้าวแรกเริ่ม คอนกรีตส่วนล่างยังรับแรงดึงได้ ความเครียดที่เพิ่มขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรงจะมีค่าน้อย และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักบรรทุก แต่เมื่อเกิดการแตกร้าวขึ้นแล้ว ค่าความเครียดของเหล็กเสริมอัดแรงจะเพิ่มขึ้นมากทันที ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อเกิดการแตกร้าวแล้วคอนกรีตส่วนล่างจะไม่ช่วยรับแรงดึงเลย กราฟจะเริ่มโค้ง และมีความชันน้อยลง อัตราการเพิ่มของความเครียดจะมากขึ้นจนถึงจุดวิบัติ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าของความเค้นในเหล็กเสริมอัดแรงของคาน J_1, J_2, J_3 และ J_4 ที่วัดได้ก่อนถึงจุดวิบัติมีค่า .89, .88, .89 และ .88 เท่าของค่าความเค้น เมื่อใกล้กำลังประลัยของเหล็กเสริมที่ได้จากการทดสอบหาคุณสมบัติรับแรงดึงของเหล็กเสริมแรงดึงสูง และไม่มีการวิบัติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขาดของเหล็กเสริมแรงดึงสูงเลย

4.2.3 <u>ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงกับความเครียดของคอนกรีตที่ผิวบนของคาน</u>

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เพิ่มขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรงกับความเครียดที่เพิ่มขึ้นที่ผิวบนของคอนกรีตของคานที่ทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 เห็นได้ว่า ก่อนเกิดการแตกร้าวเริ่มแรกความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เพิ่มขึ้นในเหล็กเสริมอัดแรง กับความเครียดที่เพิ่มขึ้นที่ผิวบนของคอนกรีตจะเป็นเส้นตรง อัตราการเพิ่มขึ้นของความเครียดของคอนกรีตต่อเหล็กเสริมอัดแรงจะสูง จนกระทั่งเกิดการแตกร้าว อัตราส่วนของความเครียดของคอนกรีตต่อความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงจะลดลงไป และจะรักษาอัตราส่วนนี้ไว้เกือบคงที่โดยประมาณเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิบัติ

4.2.4 <u>การวิเคราะห์การรับน้ำหนักบรรทุกของคาน</u>

จากการทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงดังกล่าว สามารถรู้น้ำหนักต่าง ๆ ดังนี้ จุดแตกร้าวเริ่มแรก หน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุ ระยะการแอ่นตัวที่ยอมให้ และจุดประลัย ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.4

ก. น้ำหนักบรรทุกที่จุดแตกร้าวเริ่มแรก

จากการทดสอบบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสามนั้น น้ำหนักบรรทุกที่จุดแตกร้าวเริ่มแรกหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดเปลี่ยนแปลงความชันของการแอ่นตัวกับค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดเปลี่ยนแปลงความชันของความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรง ซึ่งจะมีค่าความชันน้อยในช่วงแรก และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเกิดการแตกร้าว จากการทดสอบพบว่าน้ำหนักที่จุดแตกร้าวเริ่มแรกเป็น 1.07 เท่า ถึง 1.13 เท่า ของค่าที่คำนวณทางทฤษฎี

ข. น้ำหนักบรรทุกประลัย

พบว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานเป็น .99 เท่า ถึง 1.11 เท่าของผลที่คำนวณได้จากวิธี Strain Compatibility[22, 24] และเป็น 1.10 เท่า ถึง 1.21 เท่าของผลที่คำนวณได้จากวิธีของ ACI 318 - 77[26]

และเห็นได้ว่าก่อนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยนั้น คานมีการแอ่นตัวมาก ตั้งแต่ 7.43 เท่า ถึง 11.10 เท่าของระยะการแอ่นตัวที่เกิดการแตกร้าวเริ่มแรก เป็นการเตือนให้รู้ล่วงหน้าก่อนเกิดการวิบัติ

ค. น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน (Service Live Load)

น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานของคานในการทดสอบบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสามหาได้จากน้ำหนักบรรทุกเมื่อหน่วยแรงอัดในคอนกรีตถึงค่าที่ยอมให้ ($.45\ f'_c$), เมื่อหน่วยแรงดึงในคอนกรีตถึงค่าที่ยอมให้ ($1.59\ \sqrt{f'_c}$), เมื่อระยะการแอ่นตัวถึงค่าที่ยอมให้ ($\frac{L}{360}$) หรือที่น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานตามหลักการจัดน้ำหนักบรรทุก (1.4 DL + 1.7 LL สำหรับมาตรฐาน ACI 318 - 77 หรือ 1.7 DL + 2.0 LL สำหรับมาตรฐาน วสท.[2]) โดยใช้ค่าต่ำสุดของทั้ง 4 กรณี

กรณีที่ใช้การจัดน้ำหนักบรรทุกโดยใช้ตัวคูณน้ำหนักตามมาตรฐาน ACI 318 - 77[26] พบว่า น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานตามทฤษฎีของคาน J_1, J_2 และ J_3 ได้จากค่าน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานที่ออกแบบ ส่วนคาน J_4 นั้น ถูกควบคุมโดยค่าที่ให้ระยะการแอ่นตัวในพิกัด แต่จากการทดสอบพบว่าน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานของคานทั้งสี่ ได้จากค่าน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานที่ออกแบบ และพบว่าน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานเป็น 1.10 เท่า ถึง 1.22 เท่าของผลที่คำนวณได้จากทฤษฎี

กรณีที่ใช้การจัดน้ำหนักบรรทุกโดยใช้ตัวคูณน้ำหนักตามมาตรฐาน วสท.[2] พบว่า น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานทั้งตามทฤษฎีและจากการทดสอบของคานทั้งสี่ได้จากค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่ออกแบบและพบว่าน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานเป็น 1.11 เท่า ถึง 1.22 เท่าของผลที่คำนวณได้จากทฤษฎี

4.3 ผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้น-ตง

กำลังอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นของแท่งคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก ขนาด 15 × 30 ซม. ของแผ่นพื้น-ตง ทุกตัว แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ค่าการเสื่อมสูญแรงอัด และค่าการแอ่นตัวขึ้นที่จุดกึ่งกลางช่วงของแผ่นพื้น-ตงทุกตัว แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่จุดกึ่งกลางช่วงของแผ่นพื้น-ตง ที่ทดสอบ แสดงไว้ในรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17 และ 4.18 โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบกับระยะการแอ่นตัวที่คำนวณโดยใช้โมเมนต์อินเนอร์เชียประสิทธิผลตามมาตรฐาน ACI 318 - 77[26] และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ

เห็นได้ว่าในช่วงของการใส่น้ำหนักบรรทุกรอบแรกที่มีน้ำหนักน้อย ๆ ก่อนเกิดการแตกร้าวเริ่มแรก ระยะการแอ่นตัวของแผ่นพื้น-ตง จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักบรรทุกมีพฤติกรรมเป็นเชิงเส้น จนกระทั่งหน่วยแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกถึงค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตก็จะเกิดการแตกร้าวขึ้น สติฟเนสของแผ่นพื้น-ตงจะลดลง ทำให้ความชันของกราฟน้อยลงและเริ่มโค้ง ในช่วงปลดน้ำหนัก และใส่น้ำหนักบรรทุกรอบสอง เมื่อหน้าตัดยังไม่เกิดการแตกร้าวเริ่มแรก ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวจะยังเป็นเส้นตรงอยู่ และในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกรอบแรกมีขนาดเกินค่าน้ำหนักบรรทุกที่ก่อให้เกิดการแตกร้าวเริ่มแรก (แผ่นพื้น-ตง S_2, S_3 และ S_4) แล้ว ในการบรรทุกน้ำหนักรอบสอง กราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวจะเป็นเส้นตรง ซึ่งมีความชันน้อยลงกว่าความชันของกราฟเมื่อบรรทุกน้ำหนักรอบแรก

จากผลการทดสอบพบว่า หลังจากค้างน้ำหนักบรรทุกที่ค่า 1.5 เท่าของน้ำหนักบรรทุกใช้งานปลอดภัยที่ออกแบบไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แผ่นพื้น-ตง S_1, S_2, S_3 และ S_4 มีค่าการคืนตัวของระยะการแอ่นตัว (Recovery of Deflection) เท่ากับ 78, 87, 95 และ 93 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรง

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงที่จุดกึ่งกลางช่วง แสดงในรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 เห็นได้ว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ ก่อนเกิดการแตกร้าว กราฟจะเป็นเส้นตรงโดยมีค่าอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นน้อยมาก แต่เมื่อถึงค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวเริ่มแรกแล้ว ค่าความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงจะเพิ่มขึ้นมากทันทีกราฟจะเริ่มโค้ง จนกระทั่งเหล็กเสริมอัดแรงถึงจุดคลาก กราฟจะโค้งน้อยลง อัตราการเพิ่มของความเครียดจะมากในขณะที่น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นน้อยจนถึงจุดวิบัติ

และในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกรอบแรกมีขนาดไม่เกินค่าน้ำหนักบรรทุกที่ก่อให้เกิดการแตกร้าวเริ่มแรก (แผ่นพื้น-คง S_1) แล้ว เมื่อปลดน้ำหนักบรรทุกออกหมด จะปรากฏว่ามีค่าความเครียดถาวรในเหล็กเสริมอัดแรงเกิดขึ้นน้อยมาก

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความเค้นในเหล็กเสริมอัดแรงของแผ่นพื้น-คง S_1, S_2, S_3 และ S_4 ที่วัดได้ก่อนถึงจุดวิบัติมีค่า .95, .94, .94 และ .95 เท่าของค่าความเค้น เมื่อใกล้กำลังประลัยของแรงเสริมอัดแรงที่ได้จากการทดสอบหาคุณสมบัติการรับแรงดึงของเหล็ก หลังจากนั้นค่าความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรงดังกล่าวจะเพิ่มอย่างรวดเร็วมากและขาดออกจากกันในที่สุด

4.3.3 การกระจายความเครียดที่หน้าตัดกึ่งกลางช่วงของแผ่นพื้น-คง

การกระจายความเครียดที่หน้าตัดกึ่งกลางช่วงขณะรับน้ำหนักบรรทุกที่ค่าระดับต่าง ๆ ของแผ่นพื้น-คงที่ทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.21, 4.22, 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ เห็นได้ว่าการกระจายของค่าความเครียดตลอดความลึกของหน้าตัดที่จุดกึ่งกลางช่วงของแผ่นพื้น-คง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกค่าใด ๆ มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมเชิงประกอบที่สมบูรณ์ (Fully Composite Section) ระหว่างตัวคง กับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่ ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าการเลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างคงกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่ซึ่งอ่านได้เป็นศูนย์ทั้งหมด และไม่ปรากฏรอยแตกร้าวตามแนวนอนที่บริเวณรอยต่อระหว่างคงกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่เลย

นอกจากนี้การกระจายห่างขวางของค่าความเครียดตามยาวที่ผิวบนของแผ่นพื้น-ตงจะมีการกระจายของค่าความเครียดค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความกว้างจากศูนย์กลางถึงศูนย์กลางของตัวตงเป็นความกว้างประสิทธิผลของปีกของแผ่นพื้น-ตงเมื่อรับโมมนต์ดัด

4.3.4 <u>การวิเคราะห์การรับน้ำหนักบรรทุกของแผ่นพื้น-ตง</u>

จากการทดสอบแผ่นพื้น-ตงดังกล่าว สามารถรู้น้ำหนักต่าง ๆ ดังนี้ จุดแตกร้าวเริ่มแรก หน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุ ระยะการแอ่นตัวที่ยอมให้ และจุดประลัย ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8

ก. น้ำหนักบรรทุกที่จุดแตกร้าวเริ่มแรก

จากการทดสอบบรรทุกน้ำหนักแบบแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอนั้น น้ำหนักบรรทุกที่จุดแตกร้าวเริ่มแรกหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดเปลี่ยนแปลงความชันของการแอ่นตัวกับค่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดเปลี่ยนแปลงความชันของความเครียดในเหล็กเสริมอัดแรง ซึ่งจะมีค่าความชันน้อยในช่วงแรก และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเกิดการแตกร้าว จากการทดสอบพบว่า น้ำหนักบรรทุกที่จุดแตกร้าวเริ่มแรกเป็น .96 เท่า ถึง 1.11 เท่า ของค่าที่คำนวณทางทฤษฎี

ข. น้ำหนักบรรทุกประลัย

พบว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของแผ่นพื้น-ตงที่ทดสอบเป็น .89 เท่า ถึง 1.03 เท่า ของผลที่คำนวณได้จากวิธี Strain Compatibility[22, 24] และเป็น 1.01 เท่า ถึง 1.16 เท่า ของผลที่คำนวณได้จากวิธีของ ACI 318 - 77[26]

และเห็นได้ว่าก่อนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยนั้น แผ่นพื้น-ตงมีการแอ่นตัวมาก ตั้งแต่ 10.4 เท่า ถึง 19.54 เท่า ของระยะการแอ่นตัวที่เกิดการแตกร้าวเริ่มแรก เป็นการเตือนให้รู้ล่วงหน้าก่อนเกิดการวิบัติ

ค. น้ำหนักบรรทุกจรใช้งาน (Service live load)

น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานของแผ่นพื้น-ตงในการทดสอบน้ำหนักบรรทุกแบบแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอ ได้จากน้ำหนักบรรทุกเมื่อหน่วยแรงอัดในคอนกรีตถึงค่าที่ยอมให้ ($.45\ f'_c$), เมื่อหน่วยแรงดึงในคอนกรีตถึงค่าที่ยอมให้ ($1.59\ \sqrt{f'_c}$), เมื่อระยะการ-

แอ่นตัวถึงค่าที่ยอมให้ ($\frac{L}{360}$) หรือที่น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานตามหลักการจัดน้ำหนักบรรทุก (1.4 DL + 1.7 DL สำหรับมาตรฐาน ACI 318 - 77[26] หรือ 1.7 DL + 2.0 LL สำหรับมาตรฐาน วสท.[2]) โดยใช้ค่าต่ำสุดของทั้ง 4 กรณี

กรณีที่ใช้การจัดน้ำหนักบรรทุก โดยใช้ตัวคูณน้ำหนักตามมาตรฐาน ACI 318 - 77[26] พบว่า น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานตามทฤษฎีของแผ่นพื้น-ตง S_1 ได้จากน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานที่ออกแบบ ส่วนแผ่นพื้น-ตง S_2, S_3 และ S_4 นั้นได้จากค่าน้ำหนักบรรทุกที่หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีต จากการทดสอบพบว่าน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานของแผ่นพื้น-ตงทั้งสี่ได้จากค่าน้ำหนักบรรทุกที่หน่วยดึงที่ยอมให้ของคอนกรีต และพบว่าน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานเป็น 1.00 เท่า ถึง 1.11 เท่า ของผลที่คำนวณได้จากทฤษฎี

กรณีที่ใช้การจัดน้ำหนักบรรทุกโดยใช้ตัวคูณน้ำหนักตามมาตรฐาน วสท.[2] พบว่า น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานทั้งตามทฤษฎี และจากการทดสอบของแผ่นพื้น-ตง S_1, S_2 และ S_3 ได้จากค่าน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานที่ออกแบบ ส่วนแผ่นพื้น-ตง S_4 น้ำหนักบรรทุกจรใช้งานทั้งตามทฤษฎีและจากการทดสอบได้จากค่าน้ำหนักบรรทุกที่หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของคอนกรีต และพบว่าน้ำหนักบรรทุกจรใช้งานเป็น 1.04 ถึง 1.18 เท่าของผลที่คำนวณได้จากทฤษฎี

และจะเห็นได้ว่าแผ่นพื้น-ตง ซึ่งมีลักษณะเป็นหน้าตัดแบบเชิงประกอบที่ประกอบด้วยตงและแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่นั้นสามารถที่จะรับโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น 35 เปอร์เซนต์ ถึง 56 เปอร์เซนต์ สำหรับโมเมนต์ดัดที่จุดแตกร้าวเริ่มแรก, 59 เปอร์เซนต์ ถึง 91 เปอร์เซนต์ สำหรับโมเมนต์ดัดที่จุดใช้งาน และ 50 เปอร์เซนต์ ถึง 76 เปอร์เซนต์ สำหรับโมเมนต์ดัดที่จุดประลัยจากค่าโมเมนต์ดัดที่เฉพาะตงสามารถรับได้ ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.9

4.4 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างตงกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่

ผลการทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างตงกับแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่ แสดงในตารางที่ 4.10

จากผลการทดสอบได้ค่าเฉลี่ยกำลังแรงเฉือนของผิวสัมผัสแบบเรียบและแบบหยาบเท่ากับ 15.77 กก/ซม^2 และ 27.23 กก/ซม^2 ตามลำดับ เห็นได้ว่าผิวสัมผัสที่หยาบรับแรงเฉือนได้มากกว่าผิวสัมผัสแบบเรียบประมาณ 73 เปอร์เซนต์

4.5 การวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพในเชิงทฤษฎีของพื้นสำเร็จรูประบบตงคอนกรีต-อัดแรงและแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่ กับระบบพื้นอื่น ๆ

ระบบพื้นที่จะนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับพื้นสำเร็จรูประบบตงคอนกรีตอัดแรงและแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่นั้น ได้แก่ ระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่ พื้นระบบอิฐบล็อคและคานรูปตัวทีหงาย และพื้นระบบคานรูปตัวที

ประสิทธิภาพของพื้นแต่ละระบบจะพิจารณาจากราคาของแผ่นพื้น, น้ำหนักของตัวแผ่นพื้น, น้ำหนักบรรทุกที่ใช้งาน, ความหนาทั้งหมดของแผ่นพื้น, รูปร่างลักษณะและความสะดวกในการติดตั้งของแผ่นพื้น โดยจะพิจารณาจากว่าพื้นแต่ละระบบมีความยาวช่วง 4 ม. รับน้ำหนักบรรทุกจรปลอดภัย 150 กก/ม^2

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของพื้นแต่ละระบบ ซึ่งแสดงรายละเอียดของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพื้นระบบต่าง ๆ ในตารางที่ 4.11 พบว่า พื้นสำเร็จรูประบบตงคอนกรีตอัดแรง และแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่นั้น มีประสิทธิภาพทางด้านโครงสร้าง การรับน้ำหนัก และการใช้วัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ (Material Utilazation) ดีกว่า พื้นระบบอิฐบล็อค และคานรูปตัวทีหงาย, พื้นระบบคานรูปตัวที และพื้นระบบคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่ตามลำดับ และในกรณีที่ไม่มีการทำฝ้าเพดาน ราคาแผ่นพื้นต่อตารางเมตรของพื้นสำเร็จรูประบบตงคอนกรีตอัดแรง และแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่นั้นจะประหยัด 82 เปอร์เซนต์ 22 เปอร์เซนต์ และ 14 เปอร์เซนต์ กว่าพื้นระบบคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่, พื้นระบบอิฐ-บล็อคและคานรูปตัวทีหงาย และพื้นระบบคานรูปตัวที ตามลำดับ ในกรณีที่มีการทำฝ้าเพดาน ราคาแผ่นพื้นต่อตารางเมตรของพื้นสำเร็จรูประบบตงคอนกรีตอัดแรง และแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่จะประหยัด 48 เปอร์เซนต์ และ 6 เปอร์เซนต์ กว่าพื้นระบบคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่ และพื้นระบบคานรูปตัวที แต่จะแพงกว่าพื้นระบบอิฐบล็อค และคานรูปตัวทีหงาย 2 เปอร์เซนต์ แต่ทั้งนี้เมื่อพิจารณารวมไปถึงน้ำหนักคงที่ (Dead load) ของแผ่นพื้นแล้ว จะเห็นว่าน้ำหนักคงที่ของแผ่นพื้นสำเร็จรูป ระบบตงคอนกรีตอัดแรง และแผ่นพื้นคอนกรีตเสริม-เหล็กหล่อกับที่นั้น มีค่าน้อยกว่าน้ำหนักคงที่ของแผ่นพื้นระบบอิฐบล็อค และคานรูปตัวทีหงาย ถึง 25 เปอร์เซนต์ ซึ่งหมายถึงว่า คาน, เสา และฐานรากของโครงสร้างจะมีขนาดเล็กลง เมื่อใช้พื้นสำเร็จรูประบบตงคอนกรีตอัดแรง และแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่ดังกล่าว

จากผลการวิเคราะห์นี้ สามารถสรุปได้ว่า ถ้ามีการคำนวณออกแบบพื้นสำเร็จรูป - ระบบตงคอนกรีตอัดแรง และแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อกับที่อย่างดีแล้ว จะทำให้พื้นระบบดังกล่าวนี้มีประสิทธิภาพของโครงสร้าง และความประหยัดดีกว่าพื้นระบบอื่น ๆ