หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การทดลองตงและแผ่นพื้น-ตง คอนกรีตเสริมไม้ไผ่

4.1 การสร้างตงและแผ่นพื้น-ตง

ในการวิจัยนี้ได้สร้างตง 6 ตัว และแผ่นพื้น-ตง 6 ตัว โดยแบ่งออกเป็น 5 โครงการ คือ

โครงการที่ 1 เป็นการศึกษาพฤติกรรมเบื้องต้นของตงคอนกรีตเสริมไม้ไผ่ที่ไม่มีการปรับปรุงผิว ตงที่ใช้ในโครงการนี้มี 2 ตัว คือ B1 น และ B2 น ความยาวประสิทธิผลเท่ากับ 2.50 ม. มีรูปตัดและรายละเอียด แสดงในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 ตามลำดับ

โครงการที่ 2 เป็นการศึกษาพฤติกรรมเบื้องต้นของแผ่นพื้น-ตง คอนกรีตเสริมไม้ไผ่ที่ไม่มีการปรับปรุงผิว แผ่นพื้นที่ใช้ในโครงการนี้มี 1 ตัว คือ S1 น โดยนำเอาตง 2 ตัวที่มีรูปตัดเหมือนตงในโครงการที่ 1 แต่เพิ่มความยาวประสิทธิผลเป็น 3.00 ม. มาต่อกัน ใช้แผ่นคอนกรีตเสริมไม้ไผ่สำเร็จรูปขนาด 3x37x40 ซม. ซึ่งเสริมด้วยไม้ไผ่ตะแกรง 4 เส้น วางบนตงแล้วเทคอนกรีตทับหน้าหนา 3 ซม. รูปตัดของแผ่นพื้น-ตงแสดงในรูปที่ 4.2 ส่วนรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.1

โครงการที่ 3 เป็นการดัดแปลงหน้าตัดของแผ่นพื้น-ตง และแผ่นคอนกรีตเสริมไม้ไผ่ในโครงการที่ 2 ซึ่งมีการวิบัติของรอยต่อระหว่างตงกับคอนกรีตทับหน้าทำให้ไม่ได้ Composite action เนื่องจากมีพื้นที่สำหรับรับแรงเฉือนในแนวนอนไม่พอ ดังนั้นจึงแก้ไขโดยการเพิ่มพื้นที่ระหว่างตงกับคอนกรีตทับหน้า สำหรับแผ่นพื้น-ตง S2 น ที่ใช้ในโครงการนี้ รูปตัดและรายละเอียดแสดงในรูปที่ 4.3 และ ตารางที่ 4.1 ตามลำดับ

โครงการที่ 4 เป็นการศึกษาพฤติกรรมเบื้องต้นของตงที่เสริมด้วยไม้ไผ่ปรับปรุงผิวที่เลือกมาจากการเปรียบเทียบระหว่างแรงยึดเหนี่ยวเมื่ออายุ 7 วัน กับอัตราการดูดซึมน้ำ

ของไม้ไผ่ที่มีผิวต่างกัน ตงที่ใช้ในโครงการนี้มี 4 ตัว คือ B3 F16 (1) B4 F3 (S1) B5 F16 (1) และ B6 F3 (S1) รูปตัดของตงเหมือนกับที่ใช้ในโครงการที่ 1 รายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.1

โครงการที่ 5 เป็นการศึกษาพฤติกรรมระหว่างแผ่นพื้น-ตง ที่เสริมด้วยไม้ไผ่ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงผิวกับที่เสริมด้วยไม้ไผ่ที่ปรับปรุงผิว แผ่นพื้นที่ใช้ในโครงการนี้มี 4 ตัว คือ S3 น S4 F16 (1) S5 น และ S6 F16 (1) เป็นแผ่นพื้นที่มีรูปตัดเหมือนกับโครงการที่ 3 แต่ในโครงการนี้ แผ่นพื้น-ตง 1 ตัว ใช้ตงเพียง 1 ตัวแทน 2 ตัว รูปตัดของแผ่นพื้น-ตงแสดงในรูปที่ 4.4 รายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.1

4.2 <u>วิธีการก่อสร้างตงและแผ่นพื้น-ตงที่ใช้ในการทดลอง</u>

4.2.1 กรณีของตง ผ่าไม้ไผ่ให้ได้ความยาวและขนาดตามความต้องการ แล้วนำมาวางในแบบไม้ตามขนาดปีกล่างของตง ผูกไม้ไผ่ตามแบบโดยให้เส้นนอกห่างจากขอบ 2 ซม. แล้วจัดระยะเรียงของไม้ไผ่ที่เหลือให้เท่ากันโดยประมาณ

4.2.2 ใช้กระดาษทรายขัดผิวไม้ไผ่แล้วทาด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetra chloride) ตรงที่จะติดเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า (Electrical Strain gage) ให้สะอาด หลังจากติดเกจเรียบร้อยแล้วก็เอากัมกรีตเคลือบไว้ แล้วนำมาวางในแบบปีกล่างของตง

4.2.3 ผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 4.2 แล้วนำมาหล่อปีกล่างของตง ต้องคอยยกไม้ไผ่เสริมให้อยู่ประมาณกึ่งกลางความหนาของปีกล่าง แล้วหล่อแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ไว้ทดสอบหากำลังอัดประลัยของคอนกรีต

4.2.4 หลังจากหล่อปีกล่างของตงแล้วนำไม้แบบข้างขนาดหนา 3.5 ซม. กว้าง 9.0 ซม. และยาว 3.0 ม. หรือ 3.5 ม. ตามความยาวของตง มาวางบนแบบปีกล่างของตงแล้วตีประกับหัวท้ายด้วยลิ่มไม้และตียึดแบบข้างบนด้วยไม้เล็ก ๆ ระยะห่าง 50 ซม. เพื่อให้

แบบแน่นและไม่แบะ

4.2.5 เทคอนกรีตลงในแบบครีบกลาง ปรับผิวหน้าให้เรียบ

4.2.6 กรณีของแผ่นพื้น จะหล่อแผ่นคอนกรีตเสริมไม้ไผ่สำเร็จรูปขนาด 3x37x40 ซม. ไว้ก่อน หลังจากหล่อตงและบ่มจนมีอายุครบ 7 วัน แล้วนำแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูปมาวางบนตง ผูกปลายไม้ไผ่ที่โผล่ตรงกันข้ามกันเข้าด้วยกัน

4.2.7 ผสมปูนทรายมาทำเป็นขอบข้างสูง 3 ซม. ทิ้งไว้สักครู่ให้แห้ง แล้วเททับหน้าด้วยคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมเดียวกับตงและแผ่นคอนกรีตเสริมไม้ไผ่ลงไปให้เสมอกับขอบปูนทรายที่ทำไว้ ปรับผิวหน้าให้เรียบ

4.3 <u>เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้</u>

4.3.1 แม่แรงไฮดรอลิกซ์ 10 ตัน Model CPI-10 ใช้กดน้ำหนักลงบนแผ่นพื้น-ตง

4.3.2 แม่แรงไฮดรอลิกซ์ 30 ตัน และ Proving Ring ใช้กดน้ำหนักลงบนตงและแผ่นพื้น-ตง

4.3.3 เกจวัดระยะโก่ง (Mechanical dial gage) ที่อ่านได้ละเอียด 0.01 มม. พร้อมขายึดแม่เหล็กใช้วัดระยะโก่งที่ระยะ 1/3 และกึ่งกลางความยาวประสิทธิผลของตงและแผ่นพื้น-ตง รายละเอียดการติดเกจแสดงในตารางที่ 4.1

4.3.4 เกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า (Electrical strain gage) ชนิด KFW-5-C1-11L 100 (Water proof) ซึ่งมีระยะเกจ 5 มม. ความต้านทาน 120 $\pm$ 0.3 โอห์ม เกจแฟคเตอร์ (Gage factor) 2.08 $\pm$ 1% ใช้วัดความเครียดของไม้ไผ่เสริมเอก รายละเอียดในการติดเกจแสดงในตารางที่ 4.1

4.3.5 เกจวัดความเครียดแบบกล (Mechanical strain gage) ที่มีระยะเกจ 20 ซม. ใช้วัดความเครียดบนผิวคอนกรีตของตงและแผ่นพื้น-ตง รายละเอียดในการติดเกจแสดงในตารางที่ 4.1

4.3.6 เครื่องอ่านความเครียดสถิต (Static strain indicator Type SM-60 D) และเครื่อง Switching and Balancing Box Model SS-R ใช้อ่านความเครียด

ที่ได้จากเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า โดยวิธีการต่อแบบ Half bridge โดยมีตัวดัมมี่ (Dummy)

4.3.7 สายไฟฟ้า ใช้ต่อเกจวัดความเครียดเข้าเครื่องอ่านความเครียดสถิต

4.3.8 กัมกรีต ใช้เคลือบเกจวัดความเครียดเพื่อป้องกันการกระทบกระเทือนต่อเกจวัดความเครียดในขณะเทและกระทุ้งคอนกรีต

4.3.9 คานเหล็กรูปรางน้ำขนาด 7.3x15.0 ซม. ยาว 1.20 ม. จำนวน 2 อัน นำมาประกอบกันเป็นรูป ไอ (I) และคานรูป ไอ (I) ขนาด 5.0x10.0 ซม. ยาว 1.50 ม. จำนวน 2 อัน ใช้ถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงบนตงและแผ่นพื้น-ตงที่ทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม

4.3.10 ไม้บรรทัดเหล็กยาว 60 ซม. ใช้วัดระยะโก่งที่กึ่งกลางความยาวประสิทธิ-ผลของตงและแผ่นพื้น-ตงที่ทดลอง หลังจากเอาเกจวัดระยะโก่งออกไปแล้ว

4.4 การทดลองหาการรับน้ำหนักบรรทุกของตงและแผ่นพื้น-ตง

การทดลองหาการรับน้ำหนักบรรทุกของตงและแผ่นพื้นในการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

4.4.1 การทดลองหาการรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงสั้น ใช้วิธีบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม โดยใช้แม่แรงไฮดรอลิกซ์เป็นตัวกด บันทึกระยะโก่งที่กึ่งกลางความยาวประสิทธิผล ความเครียดของคอนกรีตด้านรับแรงอัด ชิ้นส่วนทดลองมี B1 น B2 น B3 F16 (1) B4 F3 (S1) S1 น และ S2 น โปรแกรมการทดลองของตงและแผ่นพื้น-ตง แสดงในตารางที่ 4.2

4.4.2 การทดลองหาการรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงยาวนานพอสมควรซึ่งกระทำโดยบรรทุกน้ำหนักค้างไว้บนตงหรือแผ่นพื้น-ตงด้วยคอนกรีตบล็อควางเรียงอย่างสม่ำเสมอ บันทึกระยะโก่งที่กึ่งกลางความยาวประสิทธิผล ความเครียดของคอนกรีตด้านรับแรงอัด และดูลักษณะการแตกร้าวที่เกิดขึ้น ชิ้นส่วนทดลองมี B5 F16 (1) และ B6 F3 (S1) บรรทุกน้ำหนักค้างไว้ 150 กก./ม.^{2}

ซึ่งเมื่อทดลองไปได้ 35 วัน พบว่าตงทั้งสองมีพฤติกรรมคล้ายคลึงกันมาก จึงนำตง B6 F3 (S1) ซึ่งปรับปรุงผิวลำบากกว่ามาทดลองหากำลังประลัย ส่วนตง B5 F16 (1) ทดลองหาพฤติกรรมในช่วงระยะเวลายาวนานต่อไปจนครบ 4 เดือน สำหรับแผ่นพื้นที่ทดลองแบบนี้มี S3 น S4 F16 (1) S5 น และ S6 F16 (1) บรรทุกน้ำหนักค้างไว้ 200 กก./ม.^{2} เป็นเวลา 2 เดือน

4.5 ผลการทดลองการรับน้ำหนักบรรทุกของตงและแผ่นพื้น-ตง

กำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ของตงและแผ่นพื้น-ตงทุกตัว แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่ง

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตรงกึ่งกลางความยาวช่วงตงและแผ่นพื้น-ตง สำหรับการทดลองการรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงสั้นแสดงในรูปที่ 4.5 - 4.8 โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับระยะโก่งที่คำนวณโดยใช้ค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียประสิทธิผลและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐานของ ACI 318-71

เห็นได้ว่าในช่วงแรกที่น้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ ก่อนเกิดการแตกร้าวเริ่มแรก ระยะโก่งจะเพิ่มขึ้นน้อยและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะโก่งที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ความชันของเส้นผลการทดลองจะชันกว่าเส้นที่ได้จากทฤษฎีเล็กน้อย จนกระทั่งเกิดการแตกร้าวเริ่มแรก น้ำหนักบรรทุกที่ตงรับได้จะลดลงเล็กน้อยโดยกระทันหันแต่ระยะโก่งเพิ่มขึ้น ยกเว้นตง B3 F16 (1) และตง B4 F3 (S1) อันเป็นผลเนื่องมาจากค่าโมเมนต์อินเนอร์เชียประสิทธิผลของหน้าตดลดลงจากการแตกร้าว เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นระยะโก่งจะเพิ่มขึ้นตามโดยความชันจะน้อยลงกว่าเดิม และอาจมีการลดลงของน้ำหนักบรรทุกบ้างเป็นครั้งคราว เส้นกราฟจะมีความชันพอสมควรจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ

4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะโก่งกับเวลา

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะโก่งตรงกึ่งกลางช่วงตงและแผ่นพื้น-ตงกับเวลา

สำหรับการทดลองหาการรับน้ำหนักบรรทุก ในช่วงยาวนานพอสมควร แสดงในรูปที่ 4.9-4.10 เห็นได้ว่าระยะโก่งจะมากในช่วงแรกแล้วค่อย ๆ เพิ่มในอัตราที่น้อยลง แต่หากเกิดการแตกร้าวแล้วระยะโก่งจะเพิ่มขึ้นอย่างมากกว่าปกติเนื่องจากโมเมนต์อินเนอร์เชียประสิทธิผลมีค่าน้อยลงแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง แต่แผ่นพื้น-ตง S6 F16 (1) มีการเพิ่มขึ้นมากของระยะโก่ง เมื่อวันที่ 44 ซึ่งเป็นวันที่เกิดการแตกร้าวเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนของระยะโก่งเมื่อ 35 วัน ต่อระยะโก่งเริ่มแรกของตง B5 F16 (1) และ B6 F3 (S1) เท่ากับ 6.9 และ 8.2 ตามลำดับ เมื่อระยะโก่งเริ่มแรกเท่ากับ 1.14 และ 0.91 มม. ตามลำดับ และเมื่อเวลา 120 วัน อัตราส่วนของระยะโก่งสุดท้ายต่อระยะโก่งเริ่มแรกของตง B5 F16 (1) เท่ากับ 10.1 อัตราส่วนนี้เมื่อเวลา 60 วันของแผ่นพื้น-ตง S3 น S4 F16 (1) S5 น และ S6 F16 (1) เท่ากับ 5.7 6.5 18.2 และ 14.9 ตามลำดับ เมื่อระยะโก่งเริ่มแรกเท่ากับ 0.26 0.32 0.25 และ 0.27 มม. ตามลำดับ อัตราส่วนของระยะโก่งเมื่อ 42 วัน (ประมาณ 1,000 ชม.) ต่อระยะโก่งเริ่มแรกของตง B5 F16 (1) เท่ากับ 7.4 และอัตราส่วนนี้ของแผ่นพื้น-ตง S3 น S4 F16 (1) S5 น และ B6 F16 (1) เท่ากับ 4.7 5.5 16.6 และ 5.8 ตามลำดับ จากการสังเกตพบว่าหากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศน้อยกว่า 55% จะเกิดการเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติของตงหรือแผ่นพื้น-ตง ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศระหว่างการทดลองอยู่ในช่วง 45% ถึง 73% ค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 59.9% อุณหภูมิของอากาศในห้องทดลองอยู่ในช่วง 29.8 °C ถึง 34.7 °C และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 33 °C

4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียด

(1) ไม้ไผ่เสริม

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของไม้ไผ่เสริมในตงและแผ่นพื้น-ตง แสดงในรูปที่ 4.11-4.13 เห็นได้ว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ ก่อนเกิดการแตกร้าวเริ่มแรก คอนกรีตส่วนล่างยังรับแรงดึงได้ ความเครียดของไม้ไผ่ที่ปรากฏอยู่จึงมีค่าน้อยมากในช่วงแรก แต่เมื่อเกิดการแตกร้าวขึ้นแล้ว ค่าความเครียดของไม้ไผ่เสริมจะเพิ่ม

ขึ้นมากทันที ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อเกิดการแตกร้าวแล้วคอนกรีตส่วนล่างจะไม่ช่วยรับแรงดึงเลย ไม้ไผ่เสริมจะรับแรงดึงทั้งหมดตรงรอยแตกร้าวแทนทันที เมื่อเลยน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดเกือบเป็นเส้นตรง และหากเกิดการแตกร้าวขึ้นอีก น้ำหนักบรรทุกตกลงแต่ความเครียดเพิ่มมากขึ้นและเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอีก ความฝืนจะน้อยลงจนถึงวิบัติ

จากผลการทดลองพบว่าค่าของความเครียดในไม้ไผ่เสริมส่วนใหญ่ที่วัดได้ก่อนถึงจุดวิบัติมีค่าประมาณ $4,500 \times 10^{-6}$ ซม./ซม. หรือประมาณ 60% ของค่าความเครียดเมื่อใกล้กำลังประลัยของไม้ไผ่ที่ได้จากการทดลองหาคุณสมบัติการรับแรงดึงของไม้ไผ่. ไม่พบการวิบัติที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขาดของไม้ไผ่เลย

(2) คอนกรีตบนผิวของตงและแผ่นพื้น-ตง

ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกจรกับความเครียดของคอนกรีตบนผิวของตงและแผ่นพื้น-ตงแสดงในรูปที่ 4.12 4.14 และ 4.15 เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของคอนกรีตจะเป็นเส้นตรงในช่วงแรกของการใส่น้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งถึงจุดการแตกร้าวเริ่มแรก ความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงแต่ความฝืนลดลงจนใกล้ถึงจุดวิบัติอาจมีการโค้งเล็กน้อย

4.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดของคอนกรีตกับเวลา

การแปรเปลี่ยนตามเวลาของความเครียดของคอนกรีตบนผิวของตงและแผ่นพื้น-ตงแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 พบว่าความเครียดจะเพิ่มขึ้นสูงในช่วงแรกแล้วค่อยเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง จากการทดลองพบว่าตง B5 F16 (1) และตง B6 F3 (S1) มีช่วงที่ความเครียดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 20 วันแรก ส่วนแผ่นพื้น-ตง S3 น S4 F16 (1) S5 น และ S6 F16 (1) ในช่วง 15 วันแรกมีความเครียดเพิ่มขึ้นสูง และแผ่นพื้น-ตง S6 F16 (1) มีความเครียดเพิ่มขึ้นสูงเมื่อวันที่ 44 ซึ่งเป็นวันที่เกิดการแตกร้าวเพิ่มขึ้นตลอดความกว้างของปีกล่าง

จากการสังเกตพบว่าเมื่อความฝืนสัมพัทธ์มีค่าต่ำกว่า 55% จะเกิดการเพิ่มขึ้นมากกว่าปกติของความเครียด

4.5.5 ลักษณะการแตกร้าวของตงและแผ่นพื้น-ตง

ลักษณะการแตกร้าวของตงและแผ่นพื้น-ตงคอนกรีตเสริมไม้ไผ่ที่ได้ทำการทดลองเป็นดังนี้

(1) ตง B1 น ทำการบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสามเกิดการแตกร้าวเริ่มแรกที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 480 กก. ที่ตำแหน่งห่างจากที่รองรับปลาย (ก) 80 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ตลอดความกว้างปีกล่างของตง รอยแตกด้าน (1) สูง 5.5 ซม. รอยแตกด้าน (2) สูง 7.0 ซม. จากผิวล่างของตง น้ำหนักบรรทุกตกลงมาเหลือ 400 กก. เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปถึง 680 กก. เกิดเสียงดังขึ้น สำรวจพบรอยแตกเพิ่มขึ้นอีก 2 รอย ห่างจากปลาย (ข) 115 ซม. เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปรอยแตกจะลุ่งขึ้นเรื่อย ๆ จากรอยแตกเดิม รอยแตกที่กว้างที่สุดเมื่อน้ำหนักบรรทุก 780 กก. กว้างประมาณ 2 มม. เมื่อน้ำหนักบรรทุก 905 กก. เกิดการวิบัติจากรอยแตกร้าวเริ่มแรกบริเวณจุดถ่ายน้ำหนัก ลักษณะการวิบัติเกิดขึ้นโดยการอัด-ดัดวิบัติ (Compression Flexural failure)

(2) ตง B2 น ทำการบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม เมื่อใส่น้ำหนักบรรทุกถึง 477 กก. เกิดเสียงดังขึ้นสำรวจพบรอยแตกร้าวเริ่มแรกห่างจากที่รองรับปลาย (ข) 70 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พร้อมทั้งน้ำหนักบรรทุกตกลงมาเหลือ 282 กก. รอยแตกด้าน (1) สูง 5.5 ซม. ด้าน (2) สูง 5.0 ซม. เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปถึง 477 กก. เกิดเสียงดังขึ้นพบรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้นอีก 1 แห่ง ห่างจากจากที่รองรับปลาย (ข) 83 ซม. น้ำหนักบรรทุกลดลงเหลือ 267 กก. รอยแตกที่กว้างที่สุดเมื่อน้ำหนักบรรทุก 612 กก. กว้างประมาณ 2.5 มม. เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกไปถึง 647 กก. เกิดเสียงดังและรอยแตกเพิ่มขึ้นอีก 1 แห่ง บริเวณกึ่งกลางตงและเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกถึง 1,052 เกิดเสียงดังและเกิดการวิบัติขึ้นบริเวณจุดถ่ายน้ำหนักทั้งสองลักษณะการวิบัติเกิดขึ้นโดยการเฉือนวิบัติ (Shear failure)

(3) ตง B3 F16 (1) เป็นตงที่มีรอยแตกตามยาวก่อนการทดลอง 5 รอย มี 3 รอยที่ยาวตลอดความยาวตงและ 2 รอยที่ยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวตง เป็นรอยร้าวขนาดเส้นผม (Hair Line Crack) ซึ่งปรากฏตามแนวของไม้ไผ่เสริมสันนิษฐานว่าเกิด

จากการดูดน้ำของไม้ไผ่เล่ริมจากคอนกรีตและการขยายตัวทางด้านข้างที่มากของไม้ไผ่ทำการทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 236 กก. เกิดการแตกร้าวเริ่มแรกห่างจากที่รองรับปลาย (ก) 115 ซม. รอยแตกปรากฏด้าน (2) ด้านเดียว สูง 4 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4.20 เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปถึง 290 กก. รอยแตกจึงปรากฏขึ้นด้าน (1) ของตง เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปรอยแตกจะเพิ่มขึ้นและสูงขึ้นเรื่อย ๆ รอยแตกที่น้ำหนักบรรทุก 404 กก. กว้างประมาณ 0.2 มม. เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 1,014 กก. จึงเกิดการวิบัติ โดยเกิดรอยแตกร้าวเริ่มจากบริเวณห่างจากที่รองรับปลาย (ก) ประมาณ 70 ซม. แล้ววิ่งเข้าหาจุดที่น้ำหนักกระทำ ลักษณะการวิบัติเกิดขึ้นโดยการเฉือนวิบัติ เป็นที่น่าสังเกตว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีถึง 14 รอย ในด้าน (2) มากกว่าตง B1 น และ B2 น ที่มี 2 รอย และ 3 รอย ตามลำดับ

(4) ตง B4 F3 (S1) เป็นตงที่มีรอยแตกขนาดเส้นผมตามแนวยาวคล้ายกับตง B3 F16 (1) ก่อนการทดลอง 4 รอย มี 3 รอยที่ยาวตลอดความยาวตง และ 1 รอยที่ยาวประมาณ 1/3 ของความยาวตงทำการทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม พบว่าเมื่อบรรทุกน้ำหนัก 229 กก. เกิดรอยแตกร้าวเริ่มแรกที่บริเวณห่างจากที่รองรับปลาย (ก) 105 ซม. เกิดรอยแตกด้าน (1) ด้านเดียว สูง 3 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เมื่อเพิ่มน้ำหนักต่อไปรอยแตกจะเพิ่มมากขึ้นและเยิบสูงขึ้นเรื่อย ๆ รอยแตกเมื่อน้ำหนักบรรทุก 501 กก. กว้างประมาณ 0.6 มม. และเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกต่อไปจนมีค่าเท่ากับ 1,084 กก. ได้เกิดเสียงดังและเกิดการวิบัติ ตรงรอยแตกเส้นเดิมที่มีอยู่แล้วห่างจากที่รองรับปลาย (ก) 80 ซม. ขยายและวิ่งเข้าหาจุดที่น้ำหนักกระทำ ลักษณะการวิบัติเกิดขึ้นโดยการเฉือนวิบัติรอยแตกที่เกิดขึ้นมี 15 รอยในด้าน (2)

(5) ตง B5 F16 (1) เป็นตงที่มีรอยแตกขนาดเส้นผมตามแนวยาวคล้ายกับตง B3 F16 (1) ก่อนการทดลอง 6 รอยมี 3 รอยที่ยาวตลอดความยาวตง 3 รอยและ 3 รอยที่ยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวช่วงตง พบว่าเมื่อบรรทุกน้ำหนักค้างไว้ 60 กก./ม. (150 กก./ม.^{2}) ไว้ 4 วัน เกิดรอยแตกขึ้นที่บริเวณห่างจากที่รองรับปลาย (ก) ด้าน (2)

สูง 3 ซม. ด้านเดียวดังแสดงในรูปที่ 4.22 รอยแตกลึกเข้าไปใต้ท้องตง 5.5 ซม. ไปหยุดตรงรอยแตกตามยาวอีกรอยหนึ่ง พอเวลา 10 วัน สำรวจพบรอยแตกขึ้นอีก 1 รอย ด้านเดียวกับรอยแรก แต่อยู่ห่างจากปลาย (ข) 125 ซม. เมื่อเวลา 12 วัน เกิดรอยแตกขึ้นอีก 1 รอย บริเวณกึ่งกลางตงสูง 3 ซม. ในด้าน (1) ด้านเดียว แล้วขยายต่อไปอีกในด้าน (2) เมื่อเวลา 17 วัน รอยแตกเขยิบสูงขึ้นเรื่อยจนหยุดในวันที่ 60 แล้วไม่เขยิบสูงขึ้นอีกจนครบ 120 วัน เมื่อครบ 120 วัน รอยแตกกว้างประมาณ 0.7 มม.

(6) ตง B6 F3 (S1) เป็นตงที่มีรอยแตกตามแนวยาวของตงคล้ายกับตง B3 F16 (1) อยู่ 6 รอยก่อนการทดลอง ซึ่งมี 4 รอยที่ยาวตลอดแนวตงและอีก 2 รอยที่ยาวประมาณ 1/5 ของตง เมื่อทำการบรรทุกน้ำหนักค้างไว้ 60 กก./ม. (150 กก./ม.^{2}) เป็นเวลา 4 วัน ปรากฏรอยแตกขึ้น 1 รอย บริเวณกึ่งกลางความยาวช่วงตง รอยแตกปรากฏด้าน (1) ด้านเดียว สูง 3 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4.23 ลึกเข้าไปกึ่งกลางใต้ท้องตงเมื่อเวลา 10 วัน เกิดรอยแตกเพิ่มขึ้นอีก 1 รอย รอยแตกปรากฏด้านเดียวกับรอยแรกสูง 3 ซม. อยู่ห่างจากที่รองรับปลาย (ก) 95 ซม. เมื่อครบ 17 วัน รอยแตกทั้งสองจึงข้ามไปฝั่งตรงกันข้าม รอยแตกยาวตลอดความกว้างของปีกล่างแต่ปรากฏให้เห็นในด้าน (2) เพียงหนึ่งรอยคือ รอยแตกที่ต่อจากรอยแรกแล้วเขยิบสูงขึ้นเมื่อเวลา 21 วัน 22 วันและเป็นอย่างนั้นจนถึงอายุ 35 วัน จึงนำมาทดลองหาน้ำหนักบรรทุกประลัยแบบบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม

ปรากฏว่าเมื่อใส่น้ำหนักบรรทุกได้ 255 กก. รอยแตกเดิมที่เกิดขึ้นเมื่อเวลา 10 วันเขยิบสูงขึ้นกว่าเดิมเป็น 7 ซม. ในทิศทางเข้าหาจุดที่น้ำหนักกระทำ เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกรอยแตกเพิ่มขึ้นและเขยิบสูงขึ้น จนน้ำหนักบรรทุกเป็น 1,408 กก. ได้เกิดการวิบัติที่บริเวณจุดถ่ายน้ำหนักด้านปลาย (ข) ลักษณะการวิบัติเกิดขึ้นเป็นการอัด-ดัดวิบัติ

(7) แผ่นพื้น-ตง S1 น เป็นแผ่นพื้นที่มีรอยแตกตามยาวขนาดเส้นผมคล้ายตง B3 F16 (1) อยู่ 4 รอย ก่อนทำการทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม

การแตกร้าวเริ่มแรกเกิดขึ้นเมื่อใส่น้ำหนักบรรทุกเพียง 338 กก. ในตงทั้งสองตัวปรากฏรอยแตก 2 รอย ๆ ละ 2 ด้าน บริเวณใกล้จุดถ่ายน้ำหนักทั้งสองดังแสดง

ในรูปที่ 4.24 เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกรอยแตกเพิ่มขึ้นและเยยิบสูงขึ้น จนเมื่อน้ำหนักบรรทุกเป็น 2,638 กก. จึงเกิดการวิบัติขึ้น จากการเผยอระหว่างตงกับแผ่นคอนกรีตเล่ริมไม้ไผ่และทับหน้า ทั้งนี้เนื่องจากตรงรอยต่อมีพื้นที่ยึดเกาะระหว่างคอนกรีตทับหน้ากับตงน้อยมาก (ความกว้างเพียง 3 ซม.) ทำให้กำลังรับแรงเฉือนในแนวนอนไม่เพียงพอ ซึ่งหน่วยแรงเฉือนตามแนวนอนสูงถึง 13.9 กก./ซม.^{2} ณ น้ำหนักบรรทุกประลัย

(8) แผ่นพื้น-ตง S2 น ทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม เกิดการแตกร้าวเริ่มแรกเมื่อน้ำหนักบรรทุกเป็น 1,454 กก. พร้อมทั้งมีเสียงดัง ในขณะเดียวกันน้ำหนักบรรทุกได้ลดลงเหลือ 870 กก. สำรวจพบรอยแตกขึ้น 2 แห่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.25 แห่งแรกห่างจากที่รองรับปลาย (ข) 115 ซม. รอยแตกปรากฏด้าน (2) ด้านเดียว สูง 9 ซม. อีกแห่งห่างจากที่รองรับปลาย (ก) 120 ซม. รอยแตกปรากฏขึ้นด้าน (1) สูง 8.5 ซม. และด้าน (2) สูง 10 ซม. เมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกรอยแตกได้เพิ่มขึ้นและเยยิบสูงขึ้นตามลำดับ รอยแตกใหญ่ที่สุดเมื่อน้ำหนักบรรทุก 3,234 กก. กว้าง 1 มม. และเกิดการวิบัติเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็น 4,004 กก. ณ จุดประลัยเกิดการแตกร้าวตามแนวนอนของครีบกลางที่ติดกับปีกบนและเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตด้านรับแรงอัดพร้อมกัน สันนิษฐานว่า การวิบัติเกิดเนื่องจากการเฉือนในแนวนอนบริเวณรอยต่อระหว่างตงกับคอนกรีตทับหน้าก่อน ทำให้ Composite action หายไป เหลือแต่ตงที่รับน้ำหนักบรรทุกอยู่จึงทำให้คอนกรีตผิวบนของตงเกิดการแตกร้าวและวิบัติในที่สุด จากการคำนวณพบว่าค่าหน่วยแรงเฉือนตามแนวนอนสูงถึง 10.1 กก./ซม.^{2} ณ น้ำหนักบรรทุกประลัย

(9) แผ่นพื้น-ตง S3 น ทำการทดลองใส่น้ำหนักบรรทุกค้างไว้ 200 กก./ม.^{2} ปรากฏว่าเมื่อครบ 60 วัน แล้วไม่มีรอยแตกร้าวเลย

(10) แผ่นพื้น-ตง S4 F16 (1) ทำการทดลองใส่น้ำหนักบรรทุกค้างไว้ 200 กก./ม.^{2} เมื่อค้างน้ำหนักได้ 14 วัน เกิดรอยแตกขึ้น 1 รอย ห่างจากกึ่งกลางแผ่นพื้นไปทางด้านปลาย (ก) 7.5 ซม. รอยแตกกว้าง 0.1 มม. ปรากฏด้าน (1) ด้านเดียวสูง 3 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ลึกเข้ามากึ่งกลางความกว้างด้านปีกล่างของแผ่นพื้น และเป็นอยู่ลักษณะนั้นจนครบ 60 วัน

(11) แผ่นพื้น-ตง S5 น ทำการทดลองใส่น้ำหนักบรรทุกค้างไว้ 200 กก./ม.^{2} 60 วัน ซึ่งเกิดการแตกร้าวรอยแรกเมื่อค้างน้ำหนักบรรทุกได้ 6 วัน บริเวณห่างจากที่รองรับปลาย (ข) 115 ซม. สูง 5.5 ซม. ในด้าน (1) และสูง 3.0 ซม. ในด้าน (2) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 รอยร้าวค่อย ๆ เยยิบสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ จนหยุดที่ขอบล่างของแผ่นคอนกรีตเสริมไม้ไผ่เมื่อเวลา 15 วัน รอยแตกเมื่อครบ 60 วัน กว้าง 0.7 มม.

(12) แผ่นพื้น-ตง S6 F16 (1) เป็นแผ่นพื้นที่มีรอยแตกตามยาวริมขอบปีกล่างด้าน (1) ประมาณ 3 ซม. 1 รอย ยาวตลอดแนวยาวของแผ่นพื้น แผ่นพื้นนี้รับน้ำหนักบรรทุกค้างไว้ 200 กก./ม.^{2} เมื่อเวลา 6 วัน เกิดการแตกร้าวที่บริเวณห่างจากที่รองรับปลาย (ก) 130 ซม. รอยแตกปรากฏด้าน (1) สูง 3 ซม. ด้านเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ลึกเข้าไปใต้ท้องแผ่นพื้น 3 ซม. หยุดตรงรอยแตกร้าวตามยาวที่เกิดขึ้นตอนแรกเริ่ม เมื่อเวลา 17 วัน รอยแตกเยยิบสูงขึ้น จนในวันที่ 44 รอยแตกได้ข้ามไปตลอดความกว้างของท้องปีกล่าง และเยยิบสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนหยุดที่ใต้แผ่นคอนกรีตเสริมไม้ไผ่ในวันที่ 46 รอยแตกเมื่อครบ 60 วัน กว้าง 0.7 มม.

สรุปลักษณะการแตกร้าวในตงคอนกรีตเสริมไม้ไผ่ 6 ตัว และแผ่นพื้นตงคอนกรีตเสริมไม้ไผ่ 6 ตัว ซึ่งได้กระทำการทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม 6 ตัว คือ B1 น B2 น B3 F16 (1) B4 F3 (S1) S1 น และ S2 น บรรทุกน้ำหนักค้างไว้ 5 ตัว คือ B5 F16 (1) S3 น S4 F16 (1) S5 น และ S6 F16 (1) ส่วนตง B6 F3 (S1) ทำการบรรทุกน้ำหนักค้างไว้ 35 วัน แล้วจึงทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม

สำหรับการทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสาม การแตกร้าวเริ่มแรกจะเริ่มจากปีกล่างก่อนแล้วค่อยเยยิบสูงขึ้นจนถึงวิบัติ การวิบัติที่เกิดขึ้นเป็นการอัด-ดัดวิบัติ 2 ตัว คือ B1 น และ B6 F3 (S1) เกิดการเฉือนวิบัติ 3 ตัว คือ B2 น B3 F16 (1) และ B4 F3 (S1) ส่วน S1 น และ S2 น เกิดการวิบัติโดยแรงเฉือนตามแนวราบ

(Horizontal Shear) ซึ่งลักษณะของตงที่ทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสามนี้มีโอกาสที่จะเกิดการเฉือนวิบัติมากเนื่องจากไม่มีการเสริมลูกตั้ง ช่วยรับแรงเฉือน

ส่วนการทดลองบรรทุกน้ำหนักค้างไว้การแตกร้าวเริ่มจากปีกล่างเช่นกัน พบว่าสำหรับตงหรือแผ่นพื้นที่เสริมด้วยไม้ไผ่ที่ปรับปรุงผิวมักเกิดการแตกร้าวเพียงครั้งหนึ่งของด้านกว้างปีกล่างแล้วค่อยเยิบต่อไปภายหลัง ส่วนแผ่นพื้นที่เสริมด้วยไม้ไผ่ที่ไม่ปรับปรุงผิวจะแตกร้าวตลอดด้านกว้างของปีกล่างเลยทีเดียว

4.5.6 การรับน้ำหนักบรรทุกของตงและแผ่นพื้น-ตง

จากการทดลองตงและแผ่นพื้น-ตง คอนกรีตเสริมไม้ไผ่สามารถรู้น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ ดังนี้ จุดแตกร้าวเริ่มแรก หน่วยแรงที่ยอมให้ของวัสดุ ระยะโก่งที่ยอมให้และจุดประลัย ดังแสดงในตารางที่ 4.4

(1) น้ำหนักบรรทุกที่จุดแตกร้าวเริ่มแรก

จากการทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสามนั้นการแตกร้าวเริ่มแรกหาได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันของความเครียดในไม้ไผ่ ซึ่งจะมีค่าน้อยในช่วงแรก และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเกิดการแตกร้าว ในตงและแผ่นพื้น-ตงทุกตัวยกเว้น B1 น และ B2 น ที่ไม่ได้ติดเกจวัดความเครียดซึ่งหาได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งแทน จากการทดลองพบว่าน้ำหนักบรรทุกที่จุดแตกร้าวเริ่มแรกเป็น 0.61 เท่า ถึง 1.43 เท่า ของค่าที่คำนวณทางทฤษฎี ทั้งนี้ไม่รวมถึงแผ่นพื้น-ตง S1 น ที่วิบัติโดยแรงเฉือนตามแนวราบและไม่รวมถึงตงหรือแผ่นพื้น-ตงที่ทดลองการบรรทุกน้ำหนักค้างไว้เพียงอย่างเดียว

(2) น้ำหนักบรรทุกใช้งาน

น้ำหนักบรรทุกใช้งานของตงและแผ่นพื้น-ตง ในการทดลองบรรทุกน้ำหนักที่จุดแบ่งสามหาได้จากน้ำหนักบรรทุกเมื่อหน่วยแรงอัดในคอนกรีตถึงค่าที่ยอมให้ ($0.45\ f'_c$) เมื่อหน่วยแรงดึงในไม้ไผ่เท่ากับ $0.3\ f_{bu}$* หรือเมื่อระยะโก่งถึงค่าที่ยอมให้ (L/360) โดยโดยใช้ค่าต่ำสุดของทั้ง 3 กรณี

*หน่วยแรงที่ยอมให้ของไม้ไผ่ใช้ $0.3\ f_{bu}$ เนื่องมาจากไม้ไผ่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นน้อย เป็นเหตุให้เกิดรอยร้าวกว้างและระยะโก่งสูงเมื่อเกิดหน่วยแรงดึงในไม้ไผ่สูง จึงใช้เพียง 30% ของหน่วยแรงดึงประลัย

สำหรับคุณสมบัติทางทฤษฎีของตง พบว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานได้จากเมื่อถึงหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต ส่วนแผ่นพื้น-ตงได้จากเมื่อถึงหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของไม้ไผ่ จากการทดลองพบว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานถูกควบคุมโดยค่าที่ให้ระยะโก่งในพิกัด สำหรับตง B1 น ตง B2 น ตง B3 F16 (1) และตง B4 F3 (S1) ส่วนตง B6 F3 (S1) และแผ่นพื้น-ตง S2 น ได้จากหน่วยแรงอัดที่ยอมให้

จากการทดลองพบว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานเป็น 1.04 เท่า ถึง 3.4 เท่า ของผลที่คำนวณได้จากทฤษฎี

(3) น้ำหนักบรรทุกประลัย

พบว่าน้ำหนักบรรทุกประลัยของตงและแผ่นพื้น-ตง เป็น 0.73 เท่าถึง 1.75 เท่าของผลที่คำนวณได้จากทฤษฎี

และเห็นได้ว่าก่อนถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยนั้นตงและแผ่นพื้น-ตง มีการโก่งตัวมากตั้งแต่ 15.9 เท่าถึง 36.4 เท่าของระยะโก่งที่เกิดรอยร้าวเริ่มแรกเป็นการเตือนให้รู้ล่วงหน้าก่อนเกิดการวิบัติ

(4) น้ำหนักบรรทุกค้างไว้

จากการทดลองพบว่าตงและแผ่นพื้น-ตงมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกค้างไว้ 60 กก./ม. และ 200 กก./ม.^{2} ตามลำดับไว้ได้โดยไม่เกิดการวิบัติ แม้ว่าจะเกิดระยะโก่งค่อนข้างมากในตง แต่เห็นได้ว่าการรับน้ำหนักค้างไว้นี้ได้แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมในช่วงเวลายาวนานอันเป็นเสถียรภาพของการยึดเหนี่ยวตัวระหว่างไม้ไผ่กับคอนกรีตเป็นตัวควบคุมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง