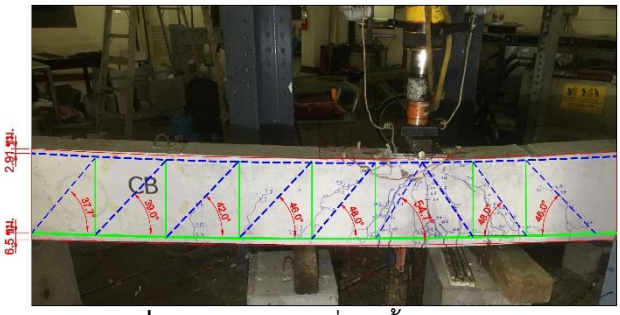
4.3 แบบจำลอง Strut and tie

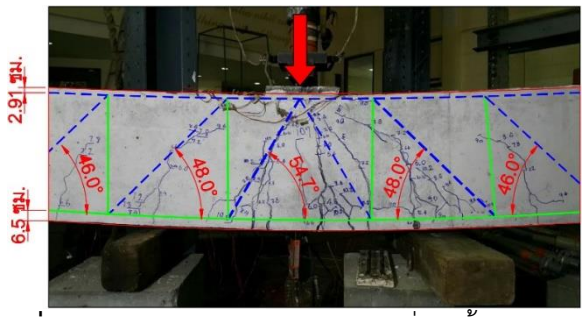
จากข้อมูลผลการทดสอบและพฤติกรรมของคานทั้งสองชนิด ขณะเริ่มการทดสอบจนถึงคานเกิดการวิบัติ สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อสร้างเป็นแบบจำลอง Strut and tie โดยมีแนวทาง ดังนี้

4.3.1 คานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่มีช่องเปิด

จากการพิจารณาค่า Strain gauge ที่ติดตั้งบริเวณผิวด้านข้างของคานคอนกรีตเพื่อนำมาเป็นแนวทางในการกำหนดมุมของท่อนรับแรงอัดแนวทแยงในคานตามทฤษฎี Strut and tie พบว่า ข้อมูลที่ Strain gauge วัดค่าความเครียดในขณะที่ทำการทดสอบ มีความแปรปรวนและผันผวนของข้อมูลมากจนไม่สามารถนำมาวิเคราะห์มุมที่หน่วยแรงอัดสูงสุดที่ทำให้คานเกิดการวิบัติได้ จึงได้สร้างท่อนรับแรงอัดในแนวทแยงโดยพิจารณาจากรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของคาน ดังแสดงในรูปที่ 4.3.1 และรูปที่ 4.3.2



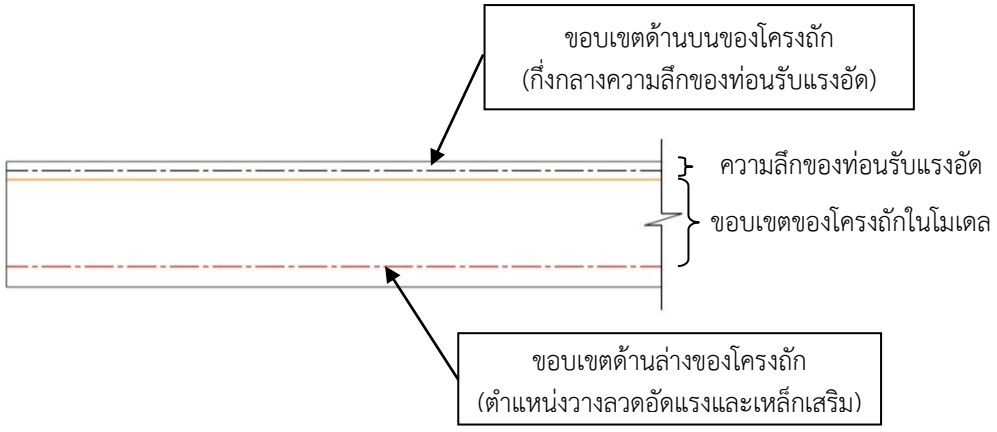
รูปที่ 4.3.1 รอยร้าวที่เกิดขึ้นขณะวิบัติ



รูปที่ 4.3.2 รอยร้าวบริเวณกลางคานที่เกิดขึ้นขณะวิบัติ

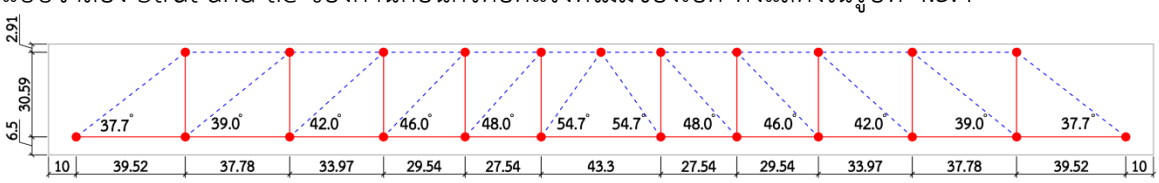
จากภาพจะเห็นว่า รอยร้าวบริเวณช่วงกลางคานจะทำมุมประมาณ 54.7 องศา และเมื่อตำแหน่งรอยร้าวเข้าใกล้ฐานรองรับ มุมรอยร้าวจะมีมุมลดน้อยลงตามลำดับจนกระทั่งให้แรงอัดแนวทแยงบริเวณจุดรองรับทำมุม 37.7 องศา

เมื่อสมมติความลึกของท่อนรับแรงอัดแนวนอนเท่ากับ 5.82 เซนติเมตร จะได้ขอบเขตของโครงถัก (Truss) ของโมเดล Strut and tie ภายในคานซึ่งขอบเขตด้านบนของคานจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของท่อนรับแรงอัดแนวนอน ส่วนขอบเขตด้านล่างของคานจะอยู่บริเวณตำแหน่งการวางลวดอัดแรงและเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 4.3.3



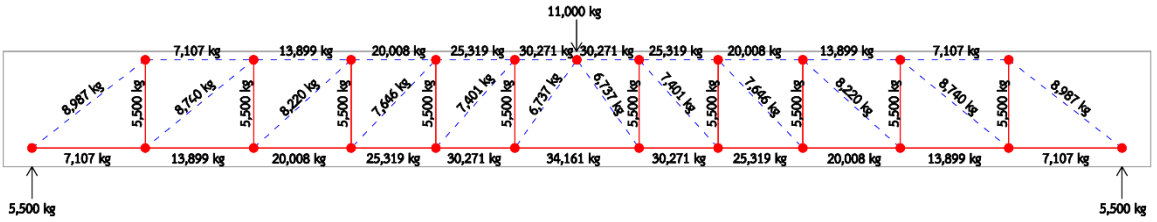
รูปที่ 4.3.3 ขอบเขตโครงถักในโมเดล Strut and tie

หลังจากการทราบมุมของท่อนรับแรงอัดแนวทแยงจากรอยร้าวที่เกิดขึ้นพร้อมกับขอบเขตบนและขอบเขตล่างของโครงถักในโมเดลแล้ว พิจารณาหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวบนมาแปลงเป็นแรงอัดเพื่อให้โมเดลที่แรงอัด ณ ตำแหน่งเดียวกันมีค่าใกล้เคียงผลการทดสอบมากที่สุด ดังนั้น จึงขอเสนอแบบจำลอง Strut and tie ของคานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่มีช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 4.3.4



รูปที่ 4.3.4 แบบจำลอง Strut and tie ของคานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่มีช่องเปิด

หลังจากที่ได้แบบจำลอง Strut and tie ของคานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่มีช่องเปิดแล้ว เมื่อกำหนดให้แรงที่กระทำกับคานเท่ากับแรงที่คานวิบัติจากการทดสอบ 11 ตัน แล้ววิเคราะห์หากำลังรับแรงภายในโมเดล Strut and tie จะได้แรงภายในโมเดล ดังแสดงในรูปที่ 4.3.5



รูปที่ 4.3.5 กำลังรับแรงภายในโมเดล Strut and tie สำหรับคานที่ไม่มีช่องเปิด

ในการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลสามารถตรวจสอบแรงอัดที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาขนาดความลึกของท่อนแรงอัดแนวนอนที่สมมติไว้ข้างต้นว่ามีความลึกเพียงพอหรือไม่ จึงนำแรงอัดที่ผิวบนในโมเดล Strut and tie จากรูปที่ 4.3.5 มีค่าเท่ากับ 30,271 กิโลกรัม ซึ่งแรงอัดดังกล่าวเป็นผลรวมของแรงอัดระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมรับแรงอัด แต่การพิจารณาหาความลึกของท่อนรับแรงอัดจะพิจารณาแรงอัดเฉพาะที่คอนกรีตรับได้เท่านั้น สามารถคำนวณหาขนาดความลึกของท่อนรับแรงอัดแนวนอนจากหน่วยแรงที่ยอมให้ดังสมการ (1-3) ดังนี้

สมการที่ (1-3) $F_{ns} = A_{cs}f_{ce} + A'_sf'_s$

$F_{ns} = 0.85\beta s f'_c A_{cs} + A'_s f'_s$

ดังนั้นความลึกของท่อนรับแรงอัดแนวนอน

$$a = \frac{F_{ns} - A'_s f'_s}{0.85\ \beta s\ f'_c w}$$

$$a = \frac{30{,}271 - (1.13)(2)(5{,}805)}{0.85\ (1.0)(313)(18)}$$

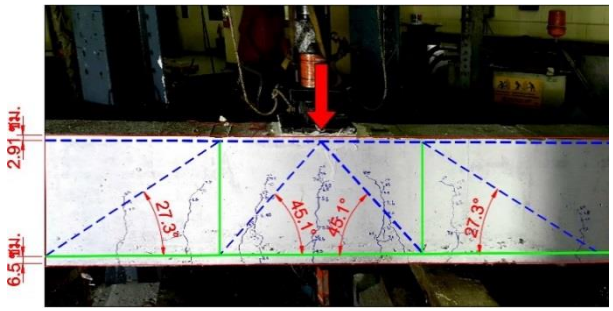
$a = 3.58$ เซนติเมตร

จากการพิจารณาความลึกของท่อนรับแรงอัดแนวนอน พบว่า แรงอัดจากโมเดล 30,271 กิโลกรัม ต้องการพื้นที่ในการกระจายแรงอัดโดยมีความลึกเท่ากับ 3.58 เซนติเมตร แต่ในขณะเดียวกันความลึกที่สมมติไว้ (5.82 เซนติเมตร) มีความลึกเพียงพอต่อการกระจายแรง

4.3.2 คานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิด

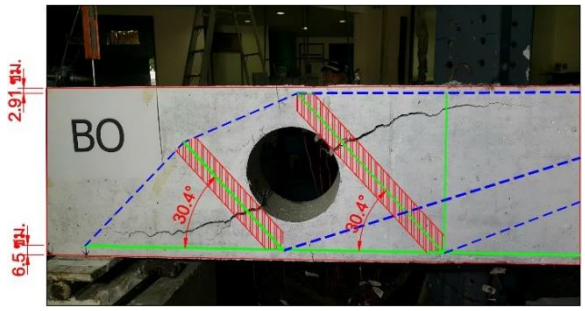
จากการพิจารณาค่า Strain gauge ที่ติดตั้งบริเวณผิวด้านข้างของคานคอนกรีต เพื่อนำมาเป็นแนวทางในการกำหนดมุมของท่อนรับแรงอัดแนวทแยงในคานตามทฤษฎี Strut and Tie พบว่าข้อมูลที่ Strain gauge วัดค่าความเครียดในขณะที่ทำการทดสอบ มีความแปรปรวนและผันผวนของข้อมูลมากจนไม่สามารถนำมาวิเคราะห์มุมที่หน่วยแรงอัดสูงสุดทำให้คานเกิดการวิบัติได้เช่นเดียวกับคานคอนกรีตอัดแรงที่ไม่มีช่องเปิด จึงได้สร้างท่อนรับแรงอัดในแนวทแยงโดยพิจารณาจากรอยร้าวที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของคาน

จากการพิจารณามุมของแรงอัดแนวทแยงบริเวณช่วงกลางคานจะพิจารณาจากรอยร้าว โดยมุมที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 45.1 องศา และ 27.3 องศา ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3.6



รูปที่ 4.3.6 รอยร้าวบริเวณกลางคานที่เกิดขึ้นขณะวิบัติ

ส่วนมุมของแรงดึงแนวทแยงบริเวณช่องเปิดของคานจะพิจารณาจากรอยร้าว โดยมุมที่เกิดขึ้นจะต้องทำมุมตั้งฉากกับรอยร้าว ดังแสดงในรูปที่ 4.3.7

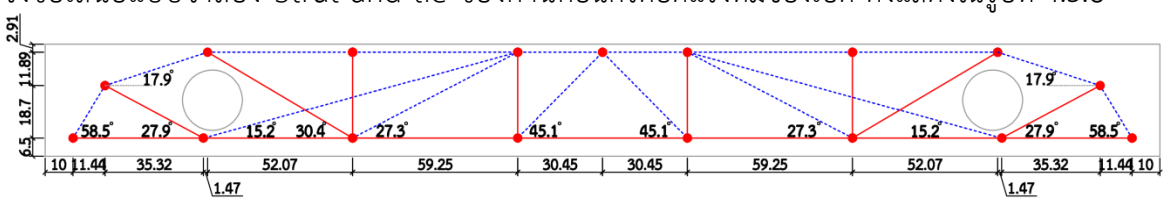


รูปที่ 4.3.7 รอยร้าวบริเวณช่องเปิดขณะวิบัติ

เมื่อสมมติความลึกของท่อนรับแรงอัดแนวนอนเท่ากับ 5.82 เซนติเมตร จะได้ขอบเขตของโครงถัก (Truss) ของโมเดล Strut and tie ภายในคานซึ่งขอบเขตด้านบนของคานจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของท่อนรับแรงอัดแนวนอน และขอบเขตด้านล่างของคานจะอยู่บริเวณตำแหน่งการวางลวดอัดแรงและเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 4.3.3

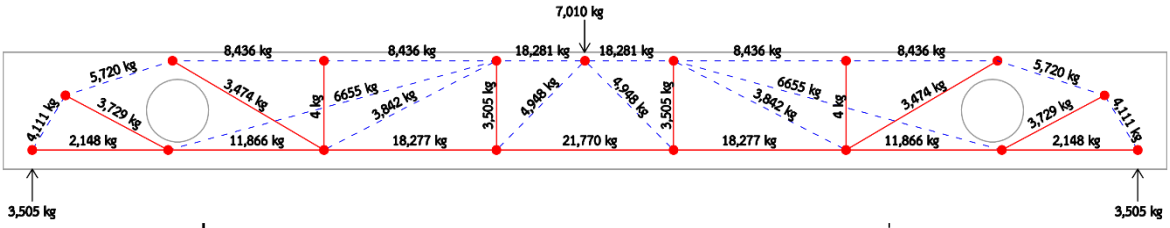
ส่วนแรงดึงแนวทแยงบริเวณช่องเปิดจะพิจารณาจาก 10 เปอร์เซ็นต์ของกำลังอัดของคอนกรีต โดยความลึกในการรับแรงจะกว้างไม่เกินขอบเขตของช่องเปิด

หลังจากการทราบมุมของท่อนรับแรงดึงและแรงอัดจากรอยร้าวที่เกิดขึ้นพร้อมกับขอบเขตบนและขอบเขตล่างของโครงถักในโมเดลแล้ว พิจารณาหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวบนมาแปลงเป็นแรงอัดเพื่อให้โมเดลที่แรงอัด ณ ตำแหน่งเดียวกันมีค่าใกล้เคียงผลการทดสอบมากที่สุด ดังนั้นจึงขอเสนอแบบจำลอง Strut and tie ของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิด ดังแสดงในรูปที่ 4.3.8



รูปที่ 4.3.8 แบบจำลอง Strut and tie ของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิด

หลังจากที่ได้แบบจำลอง Strut and tie ของคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดแล้ว เมื่อกำหนดให้แรงที่กระทำกับคานเท่ากับแรงที่คานวิบัติจากการทดสอบ 7.01 ตัน แล้ววิเคราะห์หากำลังรับแรงภายในโมเดล Strut and tie จะได้แรงภายในโมเดล ดังแสดงในรูปที่ 4.3.9



รูปที่ 4.3.9 กำลังรับแรงภายในโมเดล Strut and tie สำหรับคานที่มีช่องเปิด

ในการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลสามารถตรวจสอบแรงอัดที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาขนาดความลึกของท่อนแรงอัดแนวนอนที่สมมติไว้ข้างต้นว่ามีความลึกเพียงพอหรือไม่ จึงนำแรงอัดที่ผิวบนในโมเดล Strut and tie จากรูปที่ 4.3.9 มีค่าเท่ากับ 18,281 กิโลกรัม ซึ่งแรงอัดดังกล่าวเป็นผลรวมของแรงอัดระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมรับแรงอัด แต่การพิจารณาหาความลึกของท่อนรับแรงอัดจะพิจารณาแรงอัดเฉพาะที่คอนกรีตรับได้เท่านั้น สามารถคำนวณหาขนาดความลึกของท่อนรับแรงอัดแนวนอนจากหน่วยแรงที่ยอมให้ดังสมการ (1-3) ดังนี้

สมการที่ (1-3) $F_{ns} = A_{cs}f_{ce} + A'_s f'_s$

$F_{ns} = 0.85\beta s f'_c A_{cs} + A'_s f'_s$

ดังนั้น ความลึกของท่อนรับแรงอัดแนวนอน

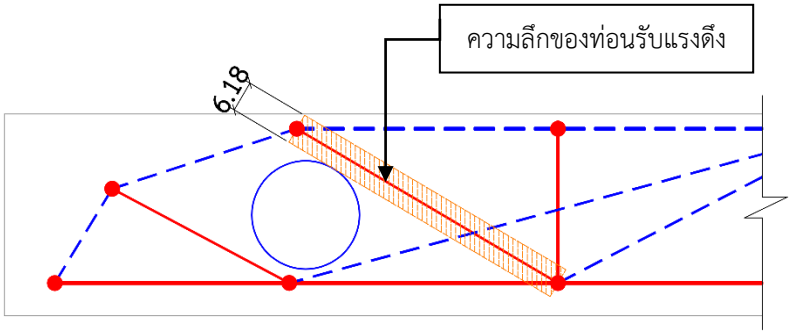
$$a = \frac{F_{ns} - A'_s f'_s}{0.85\ \beta s\ f'_c w}$$

$$a = \frac{18{,}281 - (1.13)(2)(5{,}805)}{0.85\ (1.0)(313)(18)}$$

$a = 1.08$ เซนติเมตร

จากการพิจารณาความลึกของท่อนรับแรงอัดแนวนอน พบว่า แรงอัดจากโมเดล 18,281 กิโลกรัม ต้องการพื้นที่ในการกระจายแรงอัดโดยมีความลึกเท่ากับ 1.08 เซนติเมตร แต่ในขณะเดียวกันความลึกที่สมมติไว้ (5.82 เซนติเมตร) มีความลึกเพียงพอต่อการกระจายแรง

ส่วนแรงดึงแนวทแยงบริเวณช่องเปิดของโมเดลมีความลึกเท่ากับ 6.18 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3.10 ซึ่งสามารถตรวจสอบแรงดึงที่เกิดขึ้นได้ ดังนี้



รูปที่ 4.3.10 ความลึกท่อนรับแรงดึงบริเวณใกล้กับช่องเปิด

กำลังในท่อนรับแรงดึงบริเวณใกล้กับช่องเปิด

$$F_{nt} = 0.10\, f'_c A_{ct}$$

$$F_{nt} = 0.10\ (313)\ (18)\ (6.18)$$

$$F_{nt} = 3{,}481 \text{ กิโลกรัม}$$

จะเห็นว่ากำลังในท่อนรับแรงดึงบริเวณช่องเปิดที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 3,481 กิโลกรัม ในขณะที่กำลังในท่อนรับแรงดึงบริเวณช่องเปิดที่เกิดจากการถ่ายแรงของโมเดลมีค่าเท่ากับ 3,474 กิโลกรัม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน