

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันและอดีตที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการก่อสร้างอย่างมากมาย ซึ่งจะเห็นได้จากอาคารที่มีอยู่ทั่วไปที่นอกจากจะมีโครงสร้างที่แปลกตาแล้วยังมีความสูงที่เพิ่มขึ้นมาก การที่อาคารมีความสูงมากขึ้นทำให้การออกแบบโครงสร้างซึ่งเดิมจะออกแบบให้รับแรงในแนวดิ่งเพียงอย่างเดียวต้องคำนึงถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงทางด้านข้างที่จะกระทำต่อโครงสร้าง เช่น แรงลม และแรงอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหว ถ้าอาคารยังมีความสูงมากเท่าไร แรงด้านข้างที่กระทำต่อโครงสร้างยิ่งมีผลต่อการออกแบบอาคารมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งในบางกรณีแรงทางด้านข้างอาจเป็นตัวควบคุมการออกแบบอาคารแทนที่จะเป็นแรงในแนวดิ่งเมื่ออาคารนั้นมีความสูงถึงระดับหนึ่งหรืออาคารก่อสร้างอยู่ในบริเวณที่มีแรงลมจัด หรือมีโอกาสที่จะเกิดแผ่นดินไหวได้มาก

จะด้วยเหตุผลของความสวยงามทางสถาปัตยกรรมหรือเพื่อความสะดวกต่อการออกแบบก่อสร้าง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบางอย่างภายในอาคาร เช่นระบบพื้นซึ่งปกติจะต้องมีคานมารองรับได้มีการเปลี่ยนแปลงโดยการตัดเอาคานออก จึงทำให้ระบบการถ่ายน้ำหนักซึ่งเดิมเริ่มจากพื้นสู่คาน เสา และ ฐานราก ตามลำดับเปลี่ยนมาเป็น พื้นสู่เสา และ ฐานราก เรียกระบบพื้นชนิดนี้ว่าระบบแผ่นพื้นไร้คานท้องเรียบ ซึ่งใช้กับอาคารสูงเป็นเหตุให้การวิเคราะห์แรงด้านข้างที่ปกติจะเกี่ยวข้องกับอาคารสูงนั้นไปมีความสัมพันธ์กับระบบพื้นชนิดนี้

ในการวิเคราะห์หาพฤติกรรมของอาคารระบบแผ่นพื้นไร้คานท้องเรียบนั้น วิธีวิเคราะห์แบบเฟรมสองมิติแทนการวิเคราะห์แบบสามมิติก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่ไม่ซับซ้อนและประหยัดเวลาในการทำงาน การวิเคราะห์แบบเฟรมสองมิตินั้นเริ่มจากการจำลองโครงสร้างให้เป็นเหมือนกับเฟรมในระนาบที่เชื่อมต่อกันเป็นแนว (มีผลคือช่วยให้ง่ายในการรวมกันของชิ้นส่วนในแนวดิ่งและแนวราบ) เมื่อทำการจำลองโครงสร้างให้เป็นเฟรมแบบสองมิติเรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปคือการเลือกค่าคุณสมบัติให้กับชิ้นส่วนแต่ละชิ้น ซึ่งปัญหาในการวิเคราะห์แรงด้านข้างของอาคารที่มีการเชื่อมต่อระหว่างเสากับพื้นในแนวราบซึ่งเป็นพื้นแบบไร้คานท้องเรียบ คือการที่จะเลือกใช้สัดส่วนความกว้างในพื้นที่จะให้ทำหน้าที่เสมือนคานที่เชื่อมระหว่างแนวเสาได้เหมาะสมที่สุด โดยปัจจัยที่มีผลต่อค่าขนาดความกว้างประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับหลายสาเหตุเช่น ขนาดของเสา, ระยะห่างระหว่างเสา และ ความหนาของพื้น (Tamath,

1988) แต่จากการศึกษาที่ผ่านมาจะพิจารณาให้อัตราส่วนของความกว้างเสาคต่อความยาวของแผ่นพื้นเป็นตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดค่าความกว้างประสิทธิภาพ

ในอดีตที่ผ่านมาปัญหาในการเลือกใช้ค่าความกว้างประสิทธิภาพ และค่าสถิติในพื้นจะขึ้นอยู่กับดุลพินิจและการตัดสินใจของวิศวกร ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาค้นคว้าและทำงานวิจัยเพื่อที่จะให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการวิเคราะห์ ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเสนอวิธีการหาค่าความกว้างประสิทธิภาพ และสถิติในพื้นเฉพาะระบบพื้นไร้คานที่กำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุเป็นยึดหยุ่นแบบเชิงเส้น แต่ในความเป็นจริงแล้วการวิเคราะห์ที่กำหนดให้คุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบยึดหยุ่นเชิงเส้นนั้นจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไป โดยจะส่งผลให้ได้ค่าสถิติของแผ่นพื้นสูงกว่าความเป็นจริงเนื่องจากไม่ได้พิจารณาผลจากการแตกร้าวของคอนกรีตซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ ด้วยเหตุนี้การศึกษาค่าความกว้างประสิทธิภาพและค่าสถิติในพื้นโดยพิจารณาให้คุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบไม่เชิงเส้น จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง

1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

Pecknold (1975) ได้ทำการศึกษาหาค่าของความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นพื้นไร้คานในอาคารที่รับแรงกระทำทางด้านข้างโดยไม่พิจารณาแรงกระทำใดๆในแนวดิ่ง ในส่วนของทฤษฎีนั้นได้เลือกใช้ทฤษฎีของแผ่นพื้นอีลาสติก (Elastic Plate) มาหาค่าความกว้างประสิทธิภาพในพื้น การเคลื่อนตัวของเสาที่มีสาเหตุมาจากแรงกระทำทางด้านข้างนั้นก่อให้เกิดโมเมนต์ด้านการเคลื่อนที่ขึ้นที่บริเวณเชื่อมต่อของเสาและพื้นและทำให้เกิดแรงกระทำบนบริเวณพื้นที่อยู่ในเสา การกำหนดรูปแบบของแรงกระทำบนบริเวณพื้นที่อยู่ในเสาเป็นเงื่อนไขที่สำคัญในการสร้างสมการที่ใช้หาค่าความกว้างประสิทธิภาพการกำหนดรูปแบบของแรงกระทำที่ต่างกันจะทำให้ได้สมการที่ต่างกัน ในการศึกษาครั้งนี้ Pecknold ได้กำหนดรูปแบบของแรงกระทำต่อพื้นที่อยู่ในบริเวณเสาขึ้นมาตามรูปแบบ และได้จำแนกคุณสมบัติของเสาออกเป็นสองลักษณะดังนี้คือ เสาแข็ง (Rigid Column) และเสายืดหยุ่น (Flexible Column) รูปแบบของแรงกระทำทั้งสามรูปแบบที่กำหนดขึ้นมานั้นแรงกระทำทั้งหมดจะกระจายสม่ำเสมอตลอดความกว้างเสา c_2 โดยมีแรงสองรูปแบบใช้กับเสาแข็ง แรงกระทำรูปแบบที่หนึ่งคือมีโมเมนต์และแรงกดในแนวดิ่งที่ตำแหน่งขอบเสาทั้งสองด้านโดยแรงกดในแนวดิ่งมีทิศทางตรงกันข้าม รูปแบบที่สองคือมีเฉพาะแรงกดในแนวดิ่งที่ตำแหน่งขอบเสาทั้งสองด้านโดยที่แรงกดมีทิศทางตรงกันข้ามและอีกหนึ่งรูปแบบคือรูปแบบที่สามใช้กับเสายืดหยุ่นรูปแบบที่สามแรงกระทำมีลักษณะอยู่ในแนวดิ่งโดยที่ตำแหน่งขอบเสาจะมีแรงกระทำมากที่สุดเมื่อวัดออกจากขอบเสาด้านหนึ่งแรงนี้จะลดลงอย่างคงที่จนเป็นศูนย์ที่กึ่งกลางเสา และลดลงต่อไปอีกจนไปถึงขอบเสาด้านหนึ่ง โดยแรงในแนวดิ่งที่กระทำนี้มีทิศทางตรงกันข้ามมีตำแหน่งเส้นกึ่ง

กลางเสาเป็นเส้นแบ่ง ตัวแปรที่ทำการศึกษาคืออัตราส่วนของขนาดหน้าตัดเสาเทียบกับพื้นที่สัมผัส และอัตราส่วนรูปร่างของแผ่นพื้น ผลจากการวิจัยในครั้งนี้สรุปได้ว่าเมื่ออัตราส่วนของเสาเทียบกับพื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้นจะทำให้ความกว้างประสิทธิภาพในพื้นที่เพิ่มขึ้นด้วย และเมื่ออัตราส่วนรูปร่างของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความกว้างประสิทธิภาพในพื้นที่ลดลง รูปแบบของแรงกระทำที่กำหนดขึ้นตามรูปแบบคือรูปแบบที่หนึ่ง สอง และสาม รูปแบบที่หนึ่งให้ค่าความกว้างประสิทธิภาพมากที่สุด รองลงมาคือแบบที่สองและสามตามลำดับ

Allen and Darvall (1977) ได้เสนอค่าความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นพื้นไร้คานที่เป็นแผ่นพื้นภายในอาคารและอาคารรับแรงกระทำทางคานข้างโดยใช้ทฤษฎีพื้นอีลาสติก อีกทั้งยังได้หาค่าความกว้างประสิทธิภาพจากการทดสอบจริงกับแบบจำลองของพื้นสองชนิดที่ขนาดต่างกัน แผ่นชนิดแรกคือแผ่นพื้นที่ทำจากเหล็กและชนิดที่สองคือแผ่นพื้นที่ทำจากคอนกรีต โดยแผ่นพื้นมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีเสาเป็นเสาแข็งแรงหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส เมื่อนำค่าผลการทดสอบที่ได้เปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีพื้นอีลาสติกแล้วพบว่าค่าทั้งสองให้ผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดีถึงแม้จะใช้วัสดุที่แตกต่างกันและมีความลำบากในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับพื้นที่ทดสอบ

Allen and Darvall (1984) ทำการศึกษาค่าความกว้างประสิทธิภาพในแผ่นพื้นที่มีแป้นหัวเสา (Drop Panel) โดยที่โครงอาคารรับแรงทางคานข้างเพียงอย่างเดียว ในการศึกษาหาค่าความกว้างประสิทธิภาพในครั้งนี้เลือกใช้กระบวนการทางไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยเลือกใช้อีลิเมนต์ที่เป็นเพลทอีลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีระดับความอิสระเท่ากับ 16 ค่าความกว้างประสิทธิภาพที่ได้จากการศึกษาถูกนำเสนอเป็นกราฟ ซึ่งผลที่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนรูปร่างของแผ่นพื้น, อัตราส่วนความหนาของแป้นหัวเสาเทียบกับความหนาแผ่นพื้น และอัตราส่วนขนาดเสาเทียบกับพื้นที่สัมผัสที่ค่าต่างๆกัน กล่าวโดยสรุปได้ว่าแผ่นพื้นที่มีแป้นหัวเสาจะทำให้ขนาดของค่าความกว้างประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์เมื่อเลือกใช้แป้นหัวเสามาตามมาตรฐานตามข้อกำหนดของ ACI

Pavlovic and Poulton (1985) ได้ทำการศึกษาและหาค่าของความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นพื้นไร้คานโดยใช้ทฤษฎีแผ่นพื้นอีลาสติก ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Pecknold มีความต่างกันที่การกำหนดลักษณะของแรงที่กระทำจากเสาตงสู่พื้น โดยการกำหนดรูปแบบของแรงนั้นอยู่ภายใต้คุณสมบัติเสาที่เป็นแบบเสาแข็งและยังได้มีการกำหนดแบ่งบริเวณของแผ่นพื้น โดยแบ่งแผ่นพื้นออกเป็นสองบริเวณคือ บริเวณที่อยู่ในแนวเสาและบริเวณที่อยู่นอกแนวเสา ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ความละเอียดในการวิเคราะห์ที่สูงขึ้น เมื่อนำค่าความกว้างประสิทธิภาพจากงานวิจัยของ Pavlovic และ Poulton ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Pecknold พบว่ามีค่าน้อยกว่าอยู่เล็กน้อย

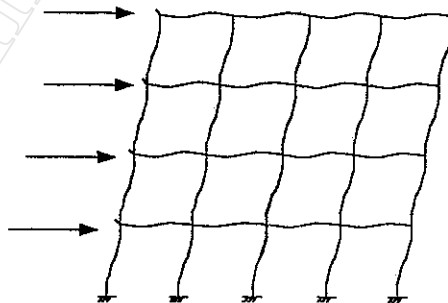
Durrani and Luo (1995) ได้ทำการศึกษาค่าความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นพื้นไร้คาน

ที่รับแรงทางด้านข้างและแรงในแนวดิ่ง โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้รวบรวมรายงานและผลการทดสอบขึ้นทดสอบจำนวน 40 ชิ้นที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการถ่ายโอนโมเมนต์และแรงเฉือนระหว่างพื้นและเสาซึ่งรับแรงทางด้านข้างแบบสถิตย์ (Static) และแรงแบบรอบ (Cyclic) โดยขึ้นทดสอบทั้งหมดเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กและรวบรวมผลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติ เมื่อนำค่าความกว้างประสิทธิภาพที่หาได้จากวิเคราะห์นี้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Pecknold พบว่าค่าความกว้างประสิทธิภาพที่ได้จากการสมการของทฤษฎีอีลาสติคนั้นมีความแตกต่างกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงอยู่บ้างในบางช่วงของอัตราส่วนรูปร่างแผ่นพื้นและอัตราส่วนเสาเทียบกับพื้นสัมพันธ์ ดังนั้น Durrani และ Luo จึงได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการหาความกว้างประสิทธิภาพขึ้นใหม่โดยอาศัยข้อมูลจากผลการทดสอบ ซึ่งสมการที่ใช้นี้ใช้เพียงขนาดของพื้นและเสาเป็นตัวแปรในการคำนวณอีกทั้งสมการไม่ซับซ้อนทำให้สะดวกในการหาค่าความกว้างประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังได้เสนอตัวคูณลดค่าความกว้างประสิทธิภาพในกรณีที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากปัจจัยของแรงในแนวดิ่ง

1.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในโครงการวิจัย

1.3.1 ความกว้างประสิทธิภาพในแผ่นพื้น

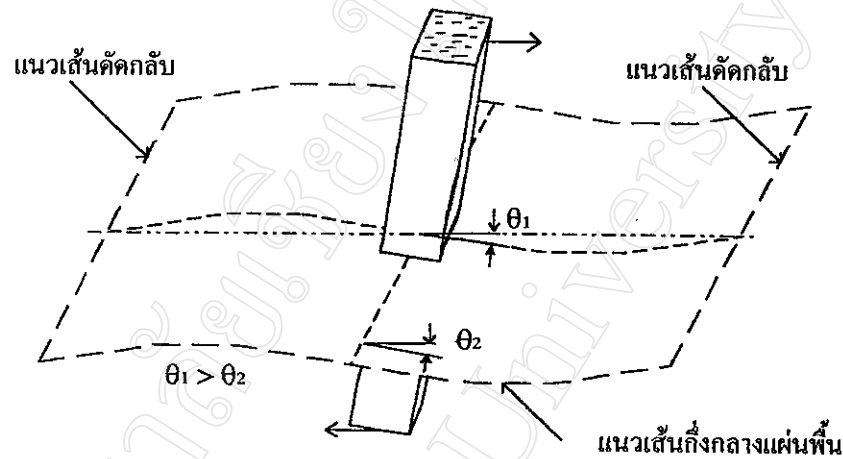
เมื่ออาคารที่ประกอบด้วยแผ่นพื้นไร้คานรับแรงทางด้านข้าง(ไม่คือน้ำหนักพื้นและแรงใดๆในแนวดิ่ง) พิจารณาโครงสร้างให้เป็นระบบเฟรมสองมิติของเสาและพื้น จะเห็นการเคลื่อนตัวของโครงสร้างดังรูปที่ 1.1 พบว่าลักษณะการเคลื่อนตัวของเสาและพื้นจะมีจุดคดกลับ (inflection point) โดยประมาณอยู่ตรงบริเวณกึ่งกลางของความยาวเสาในแต่ละชั้นและกึ่งกลางของความยาวระหว่างช่วงเสาในพื้น



รูปที่ 1.1 การเคลื่อนตัวในแนวระนาบของ โครงสร้าง

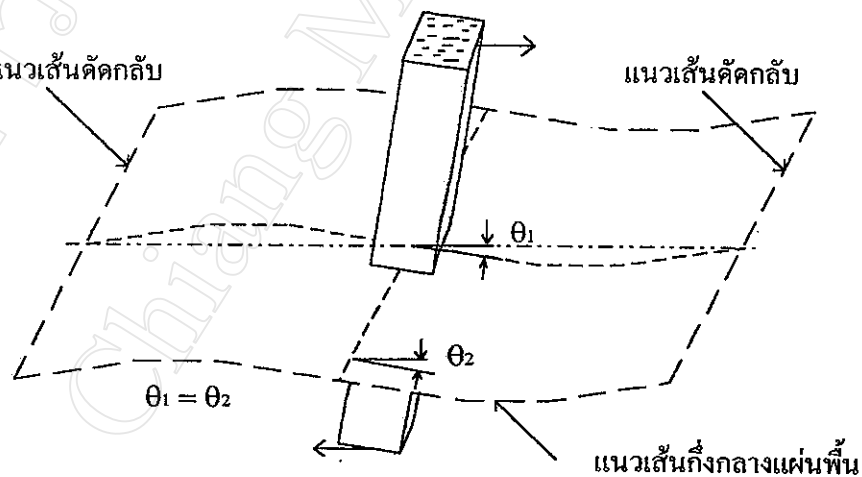
ที่มา : ALLEN and DARVAL (1977)

ทำการแยกส่วนของพื้นและเสา (Plate-Column Element) ในแต่ละช่วงออกจากกันโดยอาศัยแนวของเส้นจุดตัดกลับในพื้นแสดงดังรูปที่ 1.2 จากรูปจะเห็นได้ว่าการบิดตัวของพื้นในแนวเสา (Longitudinal Slope of Plate) มีค่าไม่คงที่ โดยมีการบิดตัวมากที่สุดของพื้นที่ตรงบริเวณที่ติดกับเสา



รูปที่ 1.2 การบิดตัวของพื้นปกติ

ที่มา : ALLEN and DARVALL (1977)



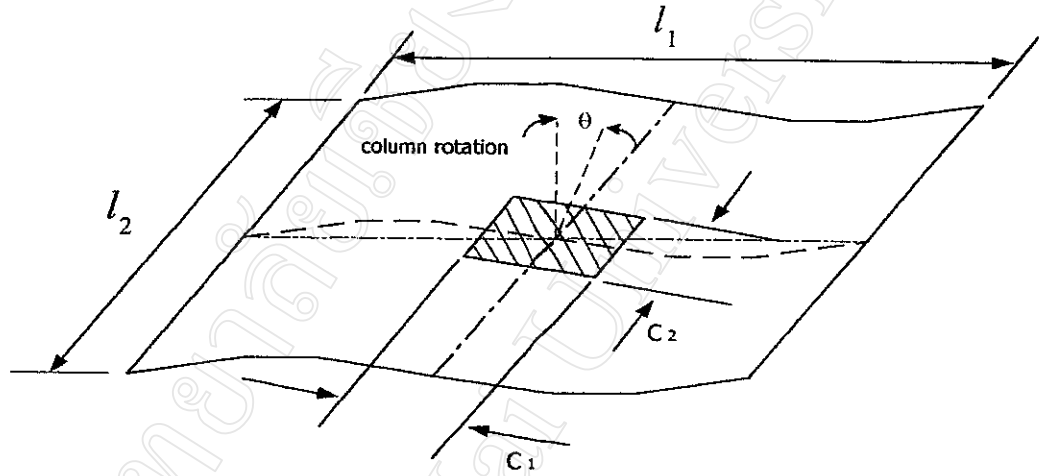
รูปที่ 1.3 การบิดตัวของพื้นที่มีพฤติกรรมเหมือนกัน

ที่มา : ALLEN and DARVALL (1977)

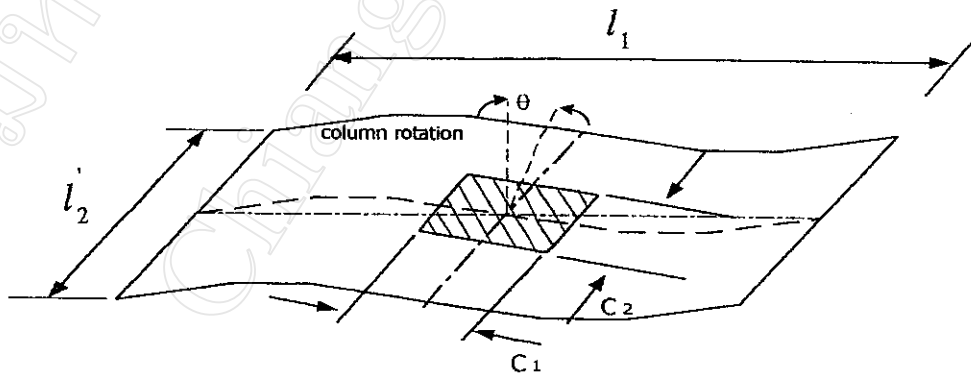
การวิเคราะห์ให้พิจารณาว่าคอนกรีตในเสาและคอนกรีตของพื้นที่อยู่ภายในบริเวณเสามีความแข็งแรงไม่จำกัด (Rigid) และเมื่อพิจารณาให้แผ่นพื้นมีพฤติกรรมเหมือนกันจะทำให้การบิดตัว

ของพื้นในแนวเสา (Longitudinal Slope of Plate) มีค่าคงที่ เนื่องจากคุณสมบัติของคานานั้นจะมีค่ามุมการคดเท่ากันตลอดความกว้างของหน้าตัดแสดงดังรูปที่ 1.3

ถ้ากำหนดให้ความลึกของคานาเท่ากับความหนาของพื้น การที่จะทำให้ความสามารถในการต้านทานการคดของคานาเท่ากับพื้นนั้น ความกว้างของหน้าตัดคานาจะต้องมีขนาดน้อยกว่าความกว้างของพื้น จะเรียกคานาชนิดนี้ว่าคานาเทียบเท่า (Equivalent Beam) โดยเสาที่เชื่อมต่อกับคานาเทียบเท่านี้จะบิดตัวเท่ากับเสาที่เชื่อมต่อกับพื้นปกติเมื่อรับแรงบิดที่เท่ากัน แสดงดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4ก การบิดตัวของพื้นที่มีความกว้าง l_2



รูปที่ 1.4ข การบิดตัวของพื้นที่พิจารณาแบบคานาเทียบเท่า
ความกว้าง l_2' เมื่อ $l_2' < l_2$

รูปที่ 1.4 เปรียบเทียบการบิดตัวของพื้นปกติกับพื้นแบบคานาเทียบเท่า
ที่มา : ALLEN and DARVALL (1977)

ความกว้างที่ทำให้คานเทียบเท่ามีความแข็งแรงเท่ากับพื้นที่นั้นจะเรียกว่าความกว้างประสิทธิผล, I_2' (Effective Width) โดยทั่วไปแล้วจะนำเสนอเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความกว้างประสิทธิผล, λ (Effective Width Coefficient) แทนเพื่อสะดวกในการนำไปใช้

$$\lambda = \frac{I_2'}{I_2} \quad (1.1)$$

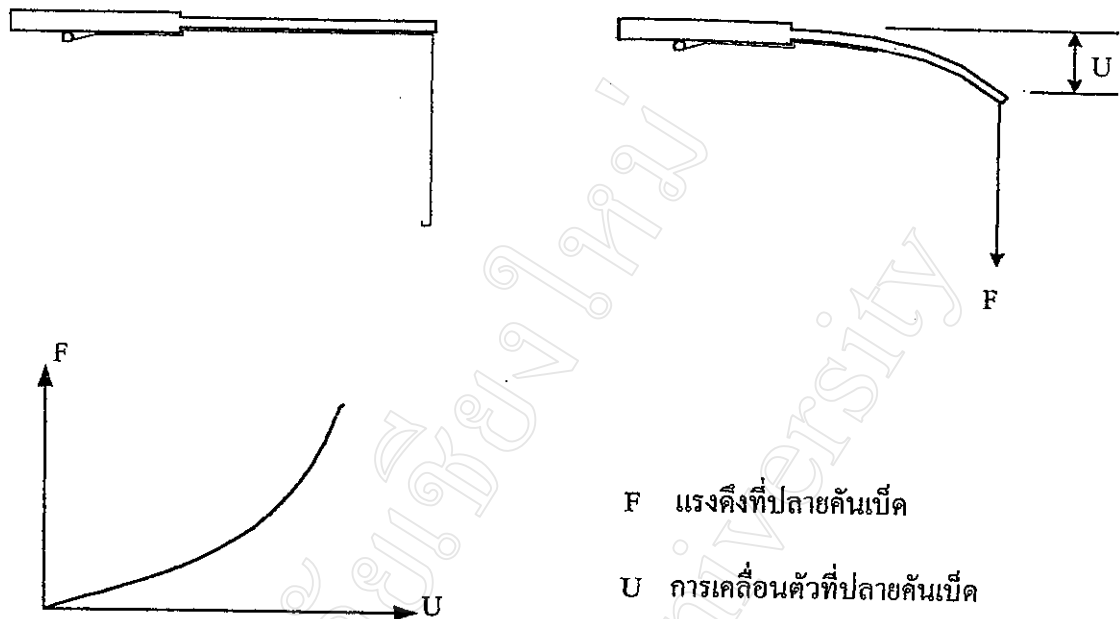
นอกจากวิธีที่กล่าวมาข้างต้นยังมีวิธีที่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ความกว้างประสิทธิผลได้อีกวิธีหนึ่ง คือการเปรียบเทียบค่ามุมที่เกิดขึ้นของคานที่อยู่ภายในบริเวณเสา (θ_{beam}) กับค่ามุมที่เกิดขึ้นของพื้นที่ที่อยู่ภายในบริเวณเสา (θ_{plate}) จากการรับแรงทางด้านข้างที่เท่ากันของอาคาร โดยกำหนดให้ความกว้างและความหนาของคานและพื้นนี้มีขนาดเท่ากัน

$$\lambda = \frac{\theta_{\text{beam}}}{\theta_{\text{plate}}} \quad (1.2)$$

1.3.2 ทฤษฎีความไม่เป็นเชิงเส้น

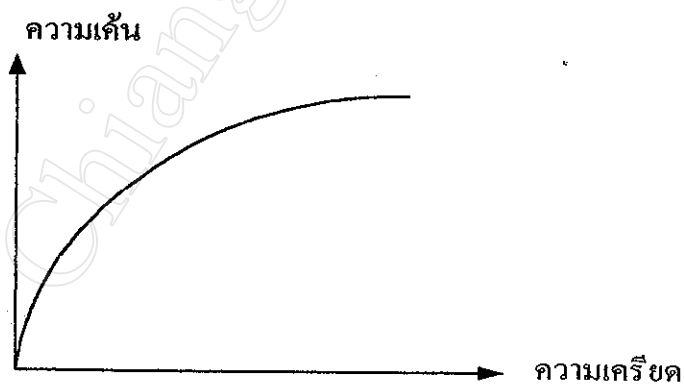
โดยทั่วไปแล้วสามารถจำแนกประเภทการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้นได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน

ก. ความไม่เป็นเชิงเส้นจากรูปร่าง (Geometrical Non-Linearity) ถึงแม้ว่าพฤติกรรมของโครงสร้างจะยังอยู่ในช่วงอีลาสติกแต่ผลกระทบจากการเคลื่อนตัวที่มีค่ามาก (Large Deflection) ที่เป็นสาเหตุให้รูปร่างของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปนั้นจะทำให้ทฤษฎีอีลาสติกไม่สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ได้ ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 พฤติกรรมแบบ Geometrical Non-Linearity ของคานเบิด

ข. ความไม่เป็นเชิงเส้นจากวัสดุ (Material Non-Linearity) เนื่องมาจากความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงระหว่างความเค้นและความเครียด ดังรูปที่ 1.6 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการล้า(Creep) หรือ การแตกร้าว (Crack and Crushing) เช่นวัสดุอย่างคอนกรีต



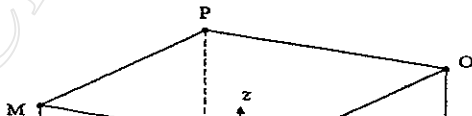
รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบ Nonlinear Elastic

ค. ความไม่เป็นเชิงเส้นแบบผสม (Combined Geometrical and Material Non-Linearity) คือความไม่เป็นเชิงเส้นที่ผสมกันระหว่างสองประเภทข้างต้นดังที่กล่าวไว้แล้ว

ครั้งนี้ได้ทำการวิจัยโดยใช้กระบวนการทางไฟ

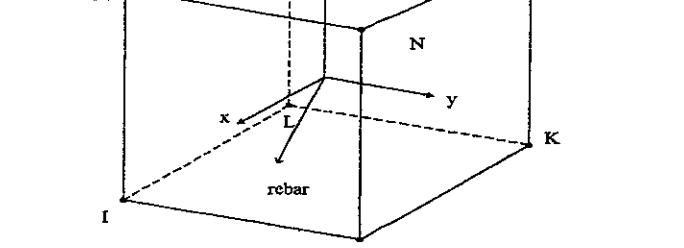
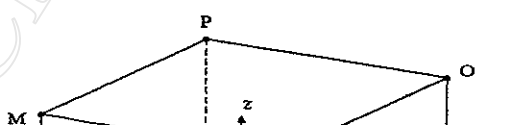
อีลีเมนต์ของคอนกรีตเสริมเหล็ก

อีลีเมนต์ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์เชิงสามมิติของคอนกรีตเสริมเหล็กและไม่มีการเสริมเหล็ก อีกทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตที่เกิดจากการแตกร้าวของเนื้อวัสดุ อีลีเมนต์ประกอบขึ้นด้วย 3 องศาอิสระ (Degree of Freedom, DOF) เท่ากับ 3 ที่มีทิศทางภายในอีลีเมนต์นี้จะสามารถมีอีลีเมนต์ที่เป็นเส้นตรง (Bar Element) ที่คุณสมบัติของโซลิดอีลีเมนต์จะแทนคุณสมบัติของคอนกรีตเส้นตรงจะแทนคุณสมบัติของเหล็กเสริม โซลิดอีลีเมนต์ของคอนกรีตที่แตกต่างกันได้ 4 ชนิดภายในแต่ละอีลีเมนต์ คือชนิดที่ 1 ไม่เสริมได้มากที่สุดสามชนิด ในส่วนที่เป็นคอนกรีตสามารถวิเคราะห์การแตกร้าวและการแตกหลุดได้ ยกเว้นกรณีที่มีการรวมพฤติกรรมของเหล็กเสริมจะมีเพียงสตีฟเนสในแนวแกน (Uniaxial Stiffness) และการกระจาย (Smear) ตลอดอีลีเมนต์ ส่วนทิศทางการวางตัวของ



ข้อดีของเครื่องมือที่มีความสามารถในการวิเคราะห์เชิง

เสริมเหล็กและ ไม่มีการเสริมเหล็ก อีกทั้งคุณสมบัติของคอนกรีตที่เกิดจากการแตกร้าวของเนื้อวัสดุ อีทีเอ็มประกอบขึ้นด้วยเมมเบรน (Degree of Freedom, DOF) เท่ากับ 3 ที่มีทิศทางภายในอีทีเอ็มนี้จะสามารถมีอีทีเอ็มที่เป็นเส้นตรง (Bar) ที่คุณสมบัติของโซลิดอีทีเอ็มจะแทนคุณสมบัติของคอนกรีตเส้นตรงจะแทนคุณสมบัติของเหล็กเสริม โซลิดอีทีเอ็มของคอนกรีตที่แตกต่างกันได้ 4 ชนิดภายในแต่ละอีทีเอ็ม คือชนิดที่เสริมได้มากที่สุดสามชนิด ในส่วนที่เป็นคอนกรีตสามารถวิเคราะห์การแตกร้าวและการแตกหลุดได้ ยกเว้นกรณีที่มีการรวมพฤติกรรมเหล็กเสริมจะมีเพียงสติฟเนสในแนวแกน (Uniaxial Stiffness) กระจาย (Smear) ตลอดอีทีเอ็ม ส่วนทิศทางการวางตัวของ



ที่มา : Moaveni (1999)

ที่มา : Moaveni (1999)

สมมติฐานและข้อจำกัดของโซลิดอีลีเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็ก

- การแตกร้าวสามารถเกิดขึ้นได้ในสามทิศทาง(แกน x , y และ z)ในตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ (จุดของการอินทิเกรต)
- ถ้ามีการแตกร้าวเกิดขึ้นบนตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ การแตกร้าวนี้จะถูกพิจารณาให้เป็นการแตกร้าวแบบกระจาย (Smeared Band) โดยเป็นการจำลองการแตกร้าวที่จะให้ผลในการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการจำลองให้การแตกร้าวเป็นแบบแยกออกจากกัน (Discrete)
- คอนกรีตจะถูกจำลองให้มีคุณสมบัติเป็นไอโซโทรปิก (Isotropic) ในตอนเริ่มต้นของการวิเคราะห์
- เมื่อไรก็ตามที่มีการกำหนดให้มีเหล็กเสริมอยู่ในอีลีเมนต์ เหล็กเสริมนี้จะถูกสมมติให้เป็นแบบกระจายทั่วทั้งอีลีเมนต์

ข. พฤติกรรมแบบเชิงเส้นโดยทั่วไปของโซลิดอีลีเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็ก

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุตามกฎของHooke

แล้ว จะหาได้จาก

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (1.3)$$

โดยที่ $\{\sigma\}$ = เมทริกซ์ความเค้น

$\{\epsilon\}$ = เมทริกซ์ความเครียด

$[D]$ = เมทริกซ์ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดของอีลีเมนต์

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \{\epsilon\} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

และเมทริกซ์ความ stiff พ้นของความเค้น-ความเครียดที่ใช้สำหรับอีลิเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กสามารถหาได้จาก

$$[D] = \left[1 - \sum_{i=1}^{N_r} V_i^R \right] [D^c] + \sum_{i=1}^{N_r} V_i^R [D^r]_i \quad (1.5)$$

N_r = จำนวนชนิดของวัสดุเหล็กเสริม(มากที่สุด3ชนิด)

V_i^R = อัตราส่วนของปริมาตรเหล็กเสริมในทิศ i ต่อปริมาตรรวมของอีลิเมนต์

$[D^c]$ = เมทริกซ์ความ stiff พ้นของความเค้น-ความเครียดของคอนกรีตหาได้จากสมการที่ (1.6)

$[D^r]_i$ = เมทริกซ์ความ stiff พ้นของความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริมหาได้จากสมการที่ (1.7)

ที่มา : Chen (1982)

ก. พฤติกรรมแบบเชิงเส้นของคอนกรีต

ในกรณีที่คอนกรีตยังไม่มีแตกร้าวเกิดขึ้นจะกำหนดให้คอนกรีตมีคุณสมบัติแบบอีลาสติก และสามารถหาเมทริกซ์ความ stiff พ้นของความเค้น-ความเครียดสำหรับคอนกรีต $[D^c]$ ได้จาก

$$[D^c] = \frac{E}{(1+V)(1-2V)} \begin{bmatrix} (1-V) & V & V & 0 & 0 & 0 \\ V & (1-V) & V & 0 & 0 & 0 \\ V & V & (1-V) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2V)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2V)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2V)}{2} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

E = โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต

V = อัตราส่วนปริมาตรของคอนกรีต

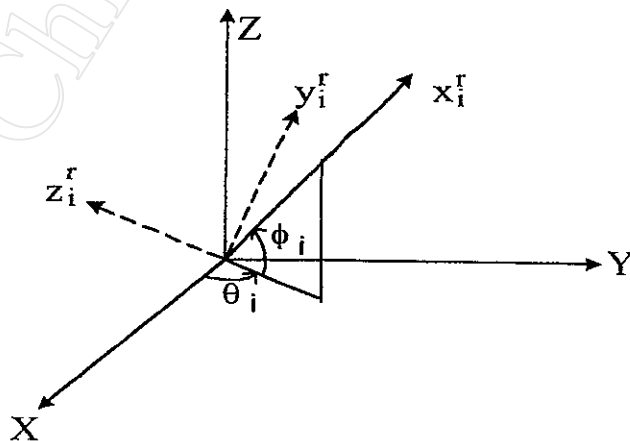
ง. พฤติกรรมแบบเชิงเส้นของเหล็กเสริม

สมมติฐานของเหล็กเสริม ในอีทีเมนต์คอนกรีตเสริมเหล็กสามารถมีเหล็กเสริมได้ i ชนิดและเหล็กเสริมแต่ละชนิดนั้นถูกกำหนดให้มีคุณสมบัติในการรับแรงในแนวแกนเพียงแกนเดียว ดังนั้นค่าเมทริกซ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริม $[D^r]$ ในกรณีที่ยังมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติกสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^r \\ \sigma_{yy}^r \\ \sigma_{zz}^r \\ \sigma_{xy}^r \\ \sigma_{yz}^r \\ \sigma_{zx}^r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i^r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx}^r \\ \epsilon_{yy}^r \\ \epsilon_{zz}^r \\ \epsilon_{xy}^r \\ \epsilon_{yz}^r \\ \epsilon_{zx}^r \end{Bmatrix} = [D^r]_i \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx}^r \\ \epsilon_{yy}^r \\ \epsilon_{zz}^r \\ \epsilon_{xy}^r \\ \epsilon_{yz}^r \\ \epsilon_{zx}^r \end{Bmatrix} \quad (1.7)$$

E_i^r = โมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กเสริมชนิดที่ i

เมื่อพิจารณาการวางตัวของเหล็กเสริมดังรูปที่ 1.8 และจากสมการที่ (1.7) จะสังเกตได้ว่าจะมีเทอมของความเค้นที่ไม่เท่ากับศูนย์อยู่หนึ่งเทอมคือ σ_{xx}^r ซึ่งเป็นความเค้นในแนวแกนของเหล็กเสริมและอยู่ในทิศทางของเวกเตอร์ x_i^r โดยที่เวกเตอร์ x_i^r สามารถแปลงเข้าสู่ระบบพิกัด X, Y, Z ของอีทีเมนต์ดังนี้



รูปที่ 1.8 การวางตัวของเหล็กเสริม

ที่มา : Moaveni (1999)

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \theta_i \cos \phi_i \\ \sin \theta_i \cos \phi_i \\ \sin \phi_i \end{Bmatrix} x_i^r = \begin{Bmatrix} l_1^r \\ l_2^r \\ l_3^r \end{Bmatrix} x_i^r \quad (1.8)$$

θ_i = มุมระหว่างแกน X กับโปรเจกชันของแกน x_i^r บนระนาบ XY

ϕ_i = มุมระหว่างแกน x_i^r กับระนาบ XY

l_i^r = ค่าโคเรกชันโคไซน์ระหว่างแกน x_i^r และแกน X, Y, Z ของอีลิเมนต์

เมทริกซ์ของเหล็กลเสริม $[D^r]$ ถูกสร้างขึ้นจากระบบพิกัดเส้นตรงที่วางตัวในทิศทางเดียว กับเหล็กลเสริม (Local Coordinate) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องแปลงเมทริกซ์นี้ให้เข้าสู่ระบบ พิกัดรวม (Global Coordinate) โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$[D^R]_i = [T^r]^T [D^r]_i [T^r] \quad (1.9)$$

โดยที่เมทริกซ์ $[T^r]$ คือเมทริกซ์ทรานสฟอร์ม (Transformed Matrix) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่จะทำหน้าที่ แปลง ระบบพิกัดเฉพาะอีลิเมนต์ไปสู่ระบบพิกัดรวมของอีลิเมนต์ทั้งหมด

$$[T^r] = \begin{bmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 & a_{13}^2 & a_{11}a_{12} & a_{12}a_{13} & a_{11}a_{13} \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 & a_{23}^2 & a_{21}a_{22} & a_{22}a_{23} & a_{21}a_{23} \\ a_{31}^2 & a_{32}^2 & a_{33}^2 & a_{31}a_{32} & a_{32}a_{33} & a_{31}a_{33} \\ 2a_{11}a_{21} & 2a_{12}a_{22} & 2a_{13}a_{23} & (a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21}) & (a_{12}a_{23} + a_{13}a_{32}) & (a_{11}a_{23} + a_{13}a_{21}) \\ 2a_{21}a_{31} & 2a_{22}a_{32} & 2a_{23}a_{33} & (a_{21}a_{32} + a_{22}a_{31}) & (a_{22}a_{33} + a_{23}a_{32}) & (a_{21}a_{33} + a_{13}a_{21}) \\ 2a_{11}a_{31} & 2a_{12}a_{32} & 2a_{13}a_{33} & (a_{11}a_{32} + a_{12}a_{31}) & (a_{12}a_{33} + a_{13}a_{32}) & (a_{11}a_{33} + a_{13}a_{31}) \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a_{ij} หาได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1^r & l_2^r & l_3^r \\ m_1^r & m_2^r & m_3^r \\ n_1^r & n_2^r & n_3^r \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

เมทริกซ์ $[l_1^r \ l_2^r \ l_3^r]^T$ เป็นโคเวกซ์โคไซน์ของแกน x_i^r หาได้จากสมการที่ (1.8) ส่วนเมทริกซ์ $[m_1^r \ m_2^r \ m_3^r]$ และ $[n_1^r \ n_2^r \ n_3^r]$ เป็นโคเวกซ์โคไซน์ของแกน y_i^r และ z_i^r ตามลำดับ ดังรูปที่ 1.8

จ. พฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้นของคอนกรีต

ในกรณีที่พฤติกรรมของวัสดุอยู่ในช่วงอีลาสติกคอนกรีตจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น และเมื่อรวมเอาการแตกร้าวและการแตกหักดมาพิจารณาร่วมด้วยแล้วจะทำให้ต้องมีการปรับค่าของเมทริกซ์ความเค้น-ความเครียดซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไปโดยขึ้นอยู่กับรูปแบบของการเสียหาย

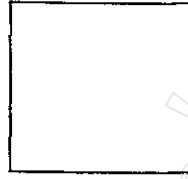
จ1. รูปแบบการแตกร้าวของคอนกรีต

สำหรับรูปแบบการแตกร้าวนั้นอาจแบ่งประเภทการแตกร้าวของคอนกรีต ออกได้เป็นสองประเภทด้วยกันคือ

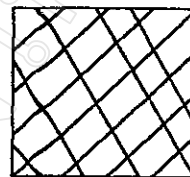
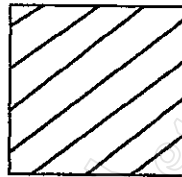
- การแตกร้าวแบบปิด (Closed Crack) คือการแตกร้าวที่เนื้อคอนกรีตบนระนาบที่มีการแตกร้าวไม่แยกออกจากกัน
- การแตกร้าวแบบเปิด (Opened Crack) คือการแตกร้าวที่เนื้อคอนกรีตบนระนาบที่มีการแตกร้าวแยกออกจากกัน

จ2. พฤติกรรมของคอนกรีตเมื่อมีการแตกร้าว

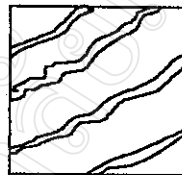
การจำลองรูปแบบการแตกร้าวของคอนกรีตสำหรับ โซลิดอีลีเมนต์คอนกรีต เสริมเหล็ก ได้จำลองการแตกร้าวให้มีลักษณะเป็นแบบสเมียร์ (Smeared Cracking Model) ซึ่งการแตกร้าวที่เกิดขึ้นถูกจำลองให้มีลักษณะไม่แบ่งแยก โดยจะมีรอยแตกร้าวจำนวนไม่จำกัดเป็นรอย



คอนกรีต ไม่มีการแตกร้าว



คอนกรีตเกิดการแตกร้าวแบบปิด



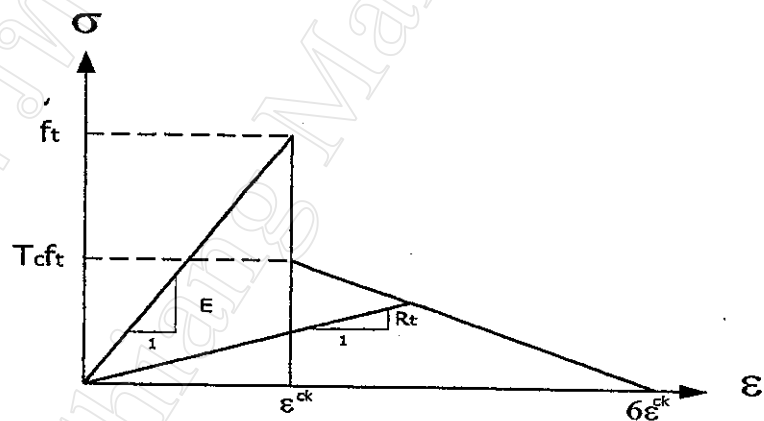
คอนกรีตเกิดการแตกร้าวแบบเปิด

รูปที่ 1.9 การแตกร้าวแบบปิดและการแตกร้าวแบบเปิด

ที่มา : Chen (1982)

แตกที่ขนาดกันและกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งอีลีเมนต์ โดยคอนกรีตที่ยังไม่เกิดการแตกร้าวขึ้นจะมีคุณสมบัติเป็นไอโซโทรปิก (Isotropic) และทันทีที่มีการแตกร้าวเกิดขึ้นคุณสมบัติของคอนกรีตบริเวณที่มีการแตกร้าวจะเป็นแบบออร์ทอโทรปิก (Orthotropic) และค่าความแข็งแรงของวัสดุจะลดลง เมื่อคุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนไปเป็นออร์ทอโทรปิกดังนั้นจึงต้องมีการปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีต เนื่องมาจากการแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้ความสามารถในการถ่ายโอนแรงเฉือนที่ผิวลดลง การปรับค่าความสามารถในการถ่ายโอนแรงเฉือนที่ลดลงนี้ทำได้โดยใช้ตัวคูณปรับค่าการถ่ายโอนแรงเฉือน หรือเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนของแรงเฉือน (Shear Transfer Coefficient, β) ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์นี้จะขึ้นอยู่กับการแตกร้าวว่าเป็นแบบปิด (ใช้สัมประสิทธิ์ β_c) หรือแบบเปิด (ใช้สัมประสิทธิ์ β_t) ในกรณีที่มีการแตกร้าวเกิดขึ้นหนึ่งทิศทางเป็นการแตกร้าวแบบเปิดและระนาบการแตกร้าวตั้งฉากกับแกน x จะได้เมทริกซ์ความเค้น-ความเครียดของอีลีเมนต์เป็นดังสมการที่ (1.12)

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)} \begin{bmatrix} \frac{R^t(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$



รูปที่ 1.10 ค่าความเค้นในสภาวะที่มีการแตกร้าวของคอนกรีต

ที่มา : Hinton and Owen (1986)

จากรูปที่ 1.10 f_t คือค่าความเค้นการแตกร้าวจากแรงดึงในแนวแกน (Uniaxial Tensile Cracking Stress) , T_c = ตัวคูณลดค่าความเค้นการแตกร้าวที่เกิดจากแรงดึง (Multiplier for Amount of Tensile Stress Relaxation) โดยทั่วไปเลือกใช้ค่า 0.6 และ R^t คือค่าความชันซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าเซแคนท์โมดูลัส (Secant Modulus) ซึ่งค่า R^t นี้จะลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์และในขณะเดียวกันค่าของคำตอบจะเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

จากสมการที่ (1.12) เป็นการแตกร้าวแบบเปิด หากการแตกร้าวเป็นแบบปิด ความเค้นที่เกิดจากแรงกดทั้งหมดที่ตั้งฉากกับระนาบการแตกร้าวจะสามารถถ่ายผ่านการแตกร้าวที่เกิดขึ้นได้ตามปกติ มีเพียงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนแรงเฉือน, β_c ที่ต้องนำมาใช้ในการปรับค่าในกรณีที่เป็นการแตกร้าวแบบปิด ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดสำหรับคอนกรีตที่มีการแตกร้าวแบบปิดเป็นดังสมการที่ (1.13)

$$\left[D_c^{ck} \right] = \frac{E}{(1+V)(1-2V)} \begin{bmatrix} (1-V) & V & V & 0 & 0 & 0 \\ V & (1-V) & V & 0 & 0 & 0 \\ V & V & (1-V) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2V}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2V)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2V}{2} \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

เมทริกซ์ความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดสำหรับคอนกรีตที่มีการแตกร้าวสองทิศทางคือในแนวแกน X และ Y และเป็นการแตกร้าวแบบเปิดเขียนได้ดังสมการที่ (1.14)

$$\left[D_c^{ck} \right] = E \begin{bmatrix} \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+V)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+V)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+V)} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

ถ้าเกิดการแตกร้าขึ้นทั้งสองทิศทางคือแกน X และแกน Y และเป็นการแตกร้าแบบปิดทั้งหมด จะได้เมทริกซ์ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดสำหรับคอนกรีตดังสมการที่ (1.15)

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

และถ้ามีการแตกร้าเกิดขึ้นในสามทิศคือแกน X, Y และ Z และเป็นการแตกร้าแบบเปิดทั้งหมด จะได้เมทริกซ์ความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดสำหรับคอนกรีตดังสมการที่ (1.16)

$$[D_c^{ck}] = E \begin{bmatrix} \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R^t}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

ถ้าการแตกร้าทั้งสามทิศทางเป็นการแตกร้าแบบปิดแล้วจะได้เมทริกซ์ความสัมพันธ์ของความ

เค้น-ความเครียดสำหรับคอนกรีตเป็นดังสมการที่ (1.15) การเปลี่ยนรูปของ $[D_c^{ck}]$ ไปสู่ระบบพิกัดรวมของอีลีเมนต์เป็นไปตามสมการที่ (1.17)

$$[D_c] = [T^{ck}]^T [D_c^{ck}] [T^{ck}] \quad (1.17)$$

เมทริกซ์ $[T^{ck}]$ เป็นเมทริกซ์ที่เหมือนกับเมทริกซ์ทรานสฟอร์ม $[T^r]$ ไม่ว่าการแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบเปิดหรือแบบปิด ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจะเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ϵ^{ck} และเรียกว่าความเครียดเมื่อมีการแตกร้าว สำหรับความเครียดที่เป็นไปได้ในทิศทางแกน X หาได้ดังสมการที่ (1.18)

$$\epsilon^{ck} = \begin{cases} \epsilon_x^{ck} + \frac{v}{1-v} (\epsilon_y^{ck} + \epsilon_z^{ck}) & \text{ไม่มีการแตกร้าวเกิดขึ้น} \\ \epsilon_x^{ck} + v\epsilon_z^{ck} & \text{มีการแตกร้าวเกิดขึ้นในทิศทางแกน y} \\ \epsilon_x^{ck} & \text{มีการแตกร้าวเกิดขึ้นในทิศทางแกน y และ z} \end{cases} \quad (1.18)$$

$\epsilon_x^{ck}, \epsilon_y^{ck}$ และ ϵ_z^{ck} = ค่าความเครียดในแนวแกน X, Y และ Z สภาวะที่มีการแตกร้าวเกิดขึ้นในกรณีที่มี ϵ^{ck} มีค่าน้อยกว่าศูนย์จะกล่าวได้ว่าเป็นการแตกร้าวแบบปิดและกรณีที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าศูนย์จะเป็นการแตกร้าวแบบเปิด

จ3. พฤติกรรมของคอนกรีตเมื่อมีการแตกหลุด

ถ้าเนื้อวัสดุที่จุดที่ใช้ในการคำนวณเกิดความเสียหายจากแรงกดไม่ว่าจะเป็นความเสียหายแบบหนึ่งแกน (Uniaxial), สองแกน (Biaxial) หรือสามแกน (Triaxial) วัสดุจะถูกสมมติให้เกิดการแตกหลุด (Crushing) และเมื่อวัสดุอยู่ภายใต้สภาวะการแตกหลุดความแข็งแรงของวัสดุจะลดลงและลดลงอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้สามารถหาค่าสัฟเฟนตรงบริเวณจุดที่ทำการคำนวณนั้นได้

ฉ. พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของเหล็กเสริม

การวิเคราะห์พฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นของเหล็กเสริม นั้น หลักการนั้นคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นต่างกันตรงที่เมื่อพฤติกรรมของวัสดุผ่านพ้นช่วงอีลาสติกไปแล้วต้องมีการเปลี่ยนค่าอีลาสติกโมดูลัสให้กับเมทริกซ์ความเค้น-ความเครียดของเหล็กเสริม ซึ่งค่า

โมดูลัสจะขึ้นอยู่กับความเครียดที่เกิดขึ้นขณะนั้นและค่าความความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่เรากำหนดให้กับเหล็กเสริม

1.4 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.4.1 ศึกษาและวิเคราะห์ความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นพื้นไร้คานท้องเรียบที่เป็นส่วนประกอบของโครงที่รับแรงทางด้นข้างโดยพิจารณาการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุ

1.4.2 ศึกษาเปรียบเทียบค่าความกว้างประสิทธิภาพจากการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและประยุกต์

การวิจัยในครั้งนี้จะทำให้เข้าใจถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุที่มีต่อแผ่นพื้นไร้คานที่รับแรงทางด้นข้าง ผลกระทบที่มีต่อความแข็งแรงและความสามารถในการรับแรงดัดของพื้น ค่าความกว้างประสิทธิภาพและความแข็งแรงในการต้านทานแรงดัดที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้จะมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นผลดีที่จะนำไปวิเคราะห์อาคารที่รับแรงทางด้นข้างในระบบสองมิติ

1.6 ขอบเขตการศึกษา

1.6.1 โครงสร้าง

- พิจารณาระยะห่างระหว่างเสามีค่าเท่ากันทุกต้นและความสูงในแต่ละชั้นของอาคารมีค่าเท่ากัน
- พิจารณาให้แรงกระทำที่กระทำทางด้นข้างของโครงอาคารมีแนวแรงอยู่ในแนวระดับ และเกิดโมเมนต์ดัดทางเดียวบนแผ่นพื้น โดยที่แนวแกนของโมเมนต์ดัดขนานกับด้นกว้างของแผ่นพื้น
- ไม่พิจารณาแรงกระทำใดๆที่อยู่ในแนวตั้ง

1.6.2 วัสดุ

- แผ่นพื้นเป็นวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็ก
- คุณสมบัติของวัสดุเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Material Non-Linearity) โดยความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุเป็นชนิด Bilinear

1.6.3 พารามิเตอร์หรือตัวแปรที่พิจารณา

- อัตราส่วนรูปร่างหน้าตัดเสา (c_1 / c_2) โดยที่ $0.3 < c_1 / c_2 < 3$
- อัตราส่วนรูปร่างของพื้น (l_1 / l_2) โดยที่ $0.5 < l_1 / l_2 < 2$
- อัตราส่วนขนาดเสาเทียบกับพื้นที่สัมผัส (c_1 / l_1)
- เปอร์เซ็นต์การเสริมเหล็ก โดยที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0-4.0 %