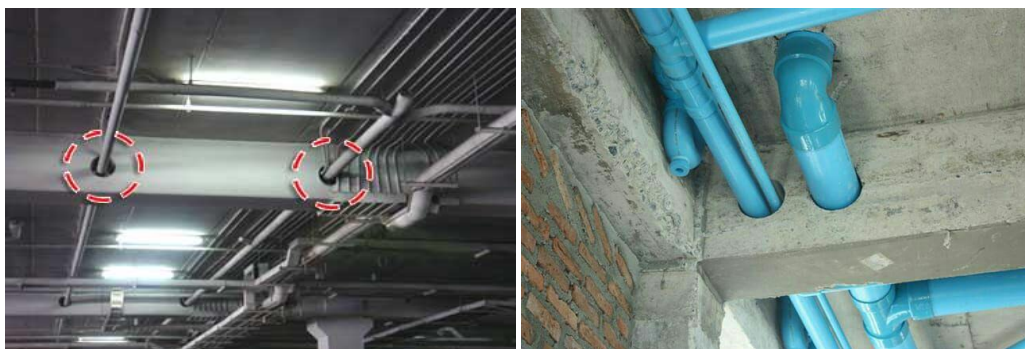


## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการก่อสร้างในประเทศไทยนิยมใช้คอนกรีตอัดแรงระบบ (Pretension) ในผลิตเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จรูป ในการก่อสร้างอาคารพักอาศัย สิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีข้อได้เปรียบทางด้านระยะเวลาการก่อสร้างที่รวดเร็วใช้แรงงานในการก่อสร้างน้อยอีกทั้งยังสามารถควบคุมคุณภาพของงานได้ดี แต่อย่างไรก็ตามในการก่อสร้างอาคารพักอาศัย นอกจากโครงสร้างขององค์อาคารที่มีความสำคัญแล้วยังมีระบบไฟฟ้า-สุขาภิบาลที่ต้องทำควบคู่กันไปด้วยในระหว่างการก่อสร้างดังนั้นการเจาะช่องเปิดหรือช่องท่อต่าง ๆ ในคานเพื่อวางแนวท่อทางระบบเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1.1.1



รูปที่ 1.1.1 การเจาะช่องเปิดเพื่อวางงานระบบไฟฟ้า-สุขาภิบาล

แน่นอนว่าเมื่อมีช่องเปิดในคานก็จะทำให้ความสามารถในการรับแรงของคานลดลง ดังนั้น จะดีไม่น้อยหากรู้พฤติกรรมแนวแรงที่เกิดขึ้นภายในคานที่มีช่องเปิด ก็จะสามารถเสริมกำลังให้กลับมาแข็งแรงดังเดิมได้ ซึ่งวิธีที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คานที่มีช่องเปิดคือวิธี Strut and tie model เป็นวิธีแสดงการถ่ายแรงในโครงสร้างเสมือนว่ามีโครงถัก (Truss) ขึ้นหนึ่งอยู่ในโครงสร้างคอนกรีตนั่นเอง ซึ่งทิศทางการถ่ายแรงในโครงสร้างนั้นสามารถนำไปเป็นแนวทางพิจารณารูปแบบของการเสริมกำลังในลำดับต่อไป

ดังนั้น การศึกษาโครงการในครั้งนี้จะมุ่งเน้นในการศึกษาถึงพฤติกรรมการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่โดยใช้วิธี Strut and tie model

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. สร้างแบบจำลอง Strut and tie model สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงจำนวน 2 ตัว โดยเป็นคานที่มีช่องเปิดและไม่มีช่องเปิด
2. ใช้ Strut and tie model ในการศึกษาแนวการถ่ายแรงในคานคอนกรีตอัดแรง
3. สร้างแบบจำลอง Strut and tie model สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดช่องเปิด  $\approx 50\%$  ของความลึกคาน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างแบบจำลอง Strut and tie model สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ได้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในเนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน Strut and tie model สำหรับคานคอนกรีตอัดแรงอัดแรงที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่รวมไปถึงองค์ประกอบของแบบจำลอง Strut and tie model ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังต่อไปนี้

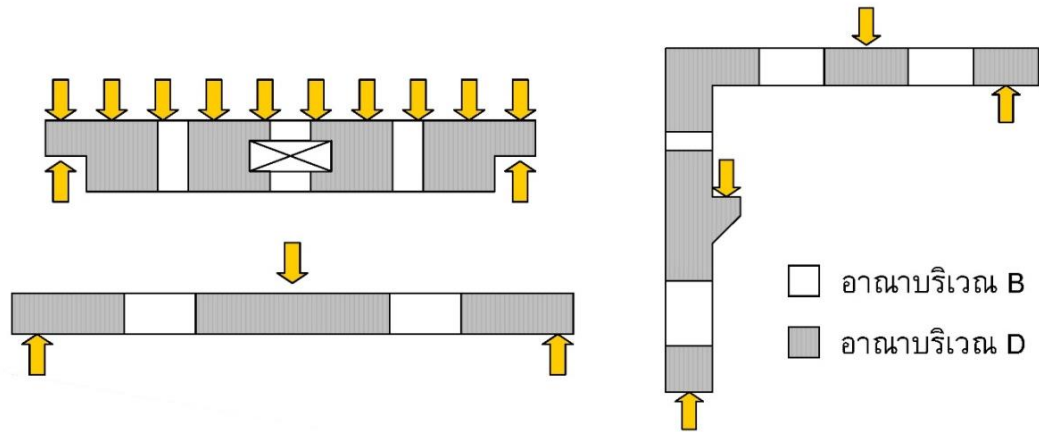
### 2.1 ทฤษฎี Strut and tie model [1]

สำหรับทฤษฎี Strut and tie model เป็นการจำลองการกระจายหน่วยแรงภายในให้เป็นแรงอัดและแรงดึงในชิ้นส่วนโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กหรือคานคอนกรีตอัดแรงในรูปแบบโครงถัก (Truss) เพื่อแสดงทิศทางการถ่ายแรงกระทำที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างไปยังจุดรองรับหรือจำลองเสมือนกับว่ามีโครงถักชิ้นหนึ่งในโครงสร้างคอนกรีตนั้นเอง โดยปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการนั้นจะได้มาจากแรงดึงที่เกิดขึ้นในโครงถักของแบบจำลอง วิธีนี้จะทำให้เห็นภาพเส้นทางการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างได้อย่างชัดเจนซึ่งการออกแบบด้วยวิธี Strut and tie model เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีความซับซ้อน เช่น โครงสร้างที่ขาดความต่อเนื่องและโครงสร้างที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของน้ำหนักบรรทุกหรือการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงทางเรขาคณิตในโครงสร้าง บริเวณที่ไม่ต่อเนื่องในโครงสร้างอาจเกิดขึ้นได้หลายตำแหน่งในโครงสร้าง เรียกว่าบริเวณ D (D-region) ส่วนบริเวณที่มีความต่อเนื่องปกติเรียกว่าบริเวณ B (B-region) ซึ่งทั้งสองบริเวณสามารถอธิบายได้ ดังต่อไปนี้

#### 2.1.1 อาณาบริเวณ B (B-region) และ D (D-region) [1]

1. อาณาบริเวณ B (B-region) หมายถึง บริเวณพื้นที่ของโครงสร้างที่มีการกระจายความเครียดเป็นไปตามหลักการของเบอร์นูลลี ซึ่งหมายความว่าความเครียดตามยาวในคอนกรีตหรือเหล็กเสริมที่ตำแหน่งใด ๆ ของหน้าตัดเป็นสัดส่วนโดยตรงจากแนวแกนสะเทิน ดังนั้นจะกระจายความเครียดตลอดความลึกของชิ้นส่วนเนื่องมาจากแรงดัด จึงถือว่าเป็นเส้นตรงจนกระทั่งวิบัติ หน่วยแรงที่เกิดสามารถหาได้จากแรงที่หน้าตัด เช่น โมเมนต์ (M) แรงเฉือน (V) และแรงบิด (MT)

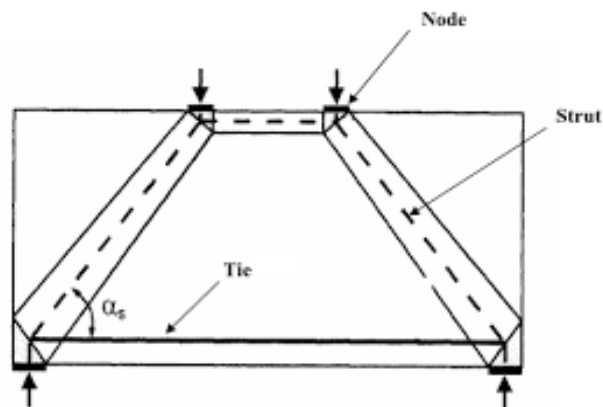
2. อาณาบริเวณ D (D-region) หมายถึง บริเวณพื้นที่ของโครงสร้างที่มีการกระจายความเครียดไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) เป็นบริเวณที่ถูกรบกวนและขาดความต่อเนื่องของโครงสร้างหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงกะทันหัน และการเปลี่ยนรูปทรงทางเรขาคณิตของโครงสร้าง เช่น คานลิกคานบาค่า คานแป้นหูช้าง ฐานราก หรือคานที่มีรูเจาะ ดังแสดงในรูปที่ 2.1.1 ดังนั้น วิธีการที่จะนำมาวิเคราะห์ออกแบบในส่วนบริเวณ D (D-region) ได้อย่างมีประสิทธิภาพก็คือทฤษฎี Strut and tie model



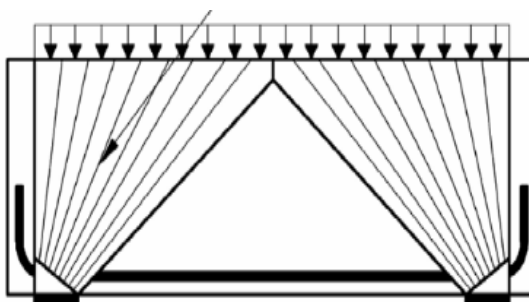
รูปที่ 2.1.1 แสดงอาณาบริเวณ (B-region) และ (D-region)

### 2.1.2 องค์ประกอบของแบบจำลอง Strut and tie model [1]

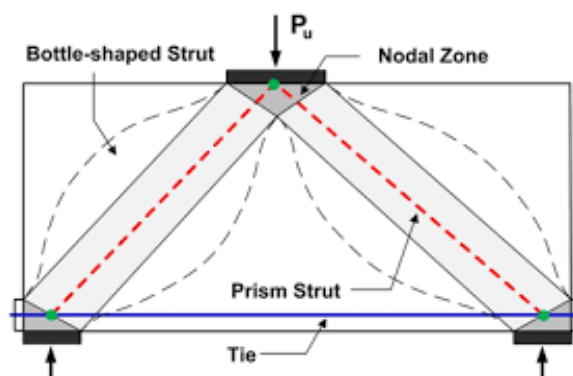
1. ท่อนรับแรงอัด (Compressive Strut) เป็นชิ้นส่วนของคอนกรีตที่ถูกสมมติให้แทนด้วยหน่วยแรงอัดโดยมีทิศทางพุ่งเป็นแนวตรงเชื่อมต่อระหว่าง Node ถึง Node โดยท่อน Strut จะมีความกว้างและความหนาที่จำกัดขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโครงสร้างแบบจำลอง ขนาดของจุดรองรับและกำลังอัดของคอนกรีตนั้น ๆ ลักษณะรูปแบบของ Strut สามารถจำลองเป็นท่อนแรงอัดทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular) ที่เกิดจากการถ่ายแรงที่กระทำสู่จุดรองรับโดยขนาดของท่อนจะมีขนาดเท่ากับพื้นที่ของจุดต่อ (Node) รับแรงกับจุดต่อถ่ายแรงในองค์อาคารนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1.2 ท่อนแรงอัดทรงใบพัด (Fan) เกิดขึ้นในกรณีที่มีการรวมแรงกระทำแบบแผ่เข้าสู่ฐานรองรับ ดังนั้น ลักษณะของท่อนแรงอัดจะลู่เข้าของแรงลงสู่ฐานรองรับคล้ายรูปพัด โดยจะรวมแรงกระจายให้ลงเป็นจุด ๆ ตามความยาวของท่อนในแต่ละท่อนรับผิชอบดังแสดงในรูปที่ 2.1.3 และท่อนแรงอัดทรงขวด (Bottle) เกิดขึ้นเมื่อมีการถ่ายแรงกระทำจากตำแหน่งหนึ่งไปสู่อีกตำแหน่งหนึ่ง โดยแนวแรงอัดสามารถแผ่ขยายออกทางด้านข้างได้อย่างอิสระที่บริเวณกลางของท่อนรับแรงอัดและจะลู่เข้ามารวมกันที่จุดต่อ (Node) โดยเฉพาะองค์อาคารหรือโครงสร้างที่ไม่ได้จำกัดทางด้านขนาดและรูปร่าง เช่น คานลี้ก ดังแสดงในรูปที่ 2.1.4



รูปที่ 2.1.2 ลักษณะของท่อนแรงอัดทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular)



รูปที่ 2.1.3 ลักษณะของท่อนแรงอัดทรงใบพัด (Fan)



รูปที่ 2.1.4 ลักษณะของท่อนแรงอัดทรงขวด (Bottle)

โดยกำลังของท่อนแรงอัด ( $F_{ns}$ ) เป็นผลคูณระหว่างพื้นที่ของท่อนแรงอัดที่น้อยกว่าระหว่างปลายทั้งสองด้านของท่อนแรงอัดกับกำลังรับแรงอัดประสิทธิผลของท่อนแรงอัดดังสมการ (1-1)

$$F_{ns} = A_{cs} f_{ce} \quad (1-1)$$

เมื่อ  $A_{cs}$  คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อนแรงอัดที่น้อยกว่าระหว่างหน้าตัดที่ปลายทั้งสองด้านของท่อนแรงอัด

$f_{ce}$  คือ กำลังรับแรงอัดประสิทธิผลคำนวณจากสมการ

$$\text{โดยที่} \quad f_{ce} = 0.85 \beta_s f'_c \quad (1-2)$$

เมื่อ  $\beta_s$  คือ ค่าตัวคูณกำลังรับแรงอัดประสิทธิผลของท่อนรับแรงอัดซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างชนิดของท่อนแรงอัดและการเสริมเหล็กในท่อนแรงอัดซึ่งสามารถพิจารณาค่าตัวคูณกำลังรับแรงอัดประสิทธิผลของท่อนรับแรงอัดได้ ดังตารางที่ 2.1.1

ชนิดท่อนแรงอัด		$\beta_s$
ทรงเหลี่ยม (Prism)		1.00
ทรงขวด (Bottle)	มีการเสริมเหล็กพิเศษเป็นไปตาม ACI318 A3.3	0.75
	ไม่มีการเสริมเหล็ก	$0.60 \lambda^*$
ท่อนแรงอัดที่อยู่ในชิ้นส่วนที่รับแรงดึง หรืออยู่ในชิ้นส่วนปีกที่รับแรงดึง		0.40
กรณีอื่นๆ		0.60

ตารางที่ 2.1.1 ตัวคูณลดกำลังท่อนรับแรงอัด ( $\beta_s$ )

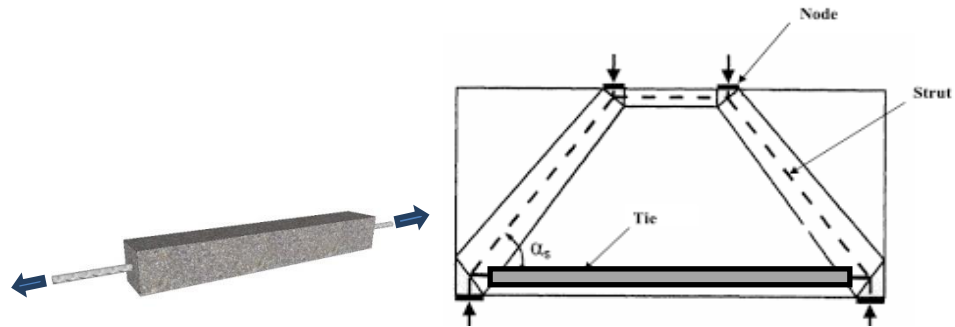
$\lambda^*$  คือ ตัวคูณปรับแก้เท่ากับ 1.00 สำหรับคอนกรีตปกติ, 0.85 สำหรับคอนกรีตที่ใช้ทรายมวลเบา ในการผสมคอนกรีต และ 0.75 สำหรับคอนกรีตมวลเบาประเภทอื่น ๆ

สำหรับกรณีอื่น ๆ ค่า  $\beta_s = 0.6$  เช่น เมื่อรอยร้าววิ่งขนานและผ่านกลางท่อนแรงอัด และกรณีที่เกิดรอยร้าวไขว้ผ่านท่อนแรงอัด ในกรณีที่มีการวางเหล็กเสริมในแนวขนานกับท่อนแรงอัด สามารถคำนวณกำลังของท่อนแรงอัดได้ ดังนี้

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

เมื่อ  $f'_s$  คือ หน่วยแรงในเหล็กเสริมรับแรงอัด สำหรับเหล็ก SD30 และ SD40 ใช้  $f'_s = f_y$   
 $A'_s$  คือ พื้นที่ของเหล็กเสริมรับแรงอัดในท่อนแรงอัด

2. ท่อนรับแรงดึง (Tension Tie) หมายถึง ชิ้นส่วนที่รับแรงดึงของโครงข้อหมุน ซึ่งได้แก่เหล็กเสริมธรรมดา หรือลวดอัดแรง ซึ่งวางอยู่ในตำแหน่งและในแนวเดียวกันกับท่อนแรงดึง ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยวิธี Strut and tie จะต้องคำนวณแรงดึงที่เกิดขึ้นในท่อนแรงดึง แล้วนำไปคำนวณปริมาณเหล็กเสริมต้านแรงดึงที่เกิดขึ้น ในการออกแบบจะพิจารณาขนาดของท่อนรับแรงดึงโดยรวมพื้นที่ของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมด้วยเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ของจุดต่อ (Node) ดังแสดงในรูปที่ 2.1.5 แต่การคำนวณกำลังรับแรงดึงของท่อนแรงดึงจะไม่พิจารณาคอนกรีตในการรับแรงดึง เนื่องจากกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตน้อยมากเพียงแต่คอนกรีตจะช่วยเพิ่มสติเฟนส์ให้กับท่อนแรงดึงเท่านั้น ดังนั้นกำลังรับแรงดึงของท่อนรับแรงดึงจะมีค่าเท่ากับกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมหรือลวดอัดแรงนั้น ๆ



รูปที่ 2.1.5 ลักษณะของท่อนแรงดึง

โดยกำลังของท่อนแรงดึง ( $F_{nt}$ ) สามารถคำนวณได้จากกำลังของเหล็กเสริมและลวดอัดแรง ดังสมการ (1-4)

$$F_{nt} = A_{st}f_y + A_{ps}(f_{pe} + \Delta f_p) \quad (1-4)$$

เมื่อ	$A_{st}, A_{ps}$	คือ	พื้นที่ของเหล็กเสริมและลวดอัดแรงตามลำดับ
	$f_y$	คือ	หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริม
	$f_{pe}$	คือ	หน่วยแรงประสิทธิผลของลวดอัดแรง
	$\Delta f_p$	คือ	หน่วยแรงในลวดอัดแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยมีค่าเท่ากับ 4,200 กก./ $\text{ซม}^2$ สำหรับลวดอัดแรงประเภทมีแรงยึดเหนี่ยวมีค่าเท่ากับ 700 กก./ $\text{ซม}^2$ สำหรับลวดอัดแรงประเภทไร้แรงยึดเหนี่ยว

โดยในสมการข้างต้น  $f_{pe} + \Delta f_p$  จะต้องมีค่าไม่มากกว่ากำลังที่จุดครากของลวดอัดแรง ( $f_{py}$ ) และสำหรับกรณีที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริม เทอมที่สองของสมการนี้จะมีค่าเป็นศูนย์

3. จุดเชื่อมต่อ (Node หรือ Nodal Zone) หมายถึง จุดบรรจบกันของท่อนรับแรงต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นท่อนรับแรงอัดหรือท่อนรับแรงดึง ดังนั้น จุดต่อจึงเป็นบริเวณที่สำคัญสำหรับการออกแบบ Strut and tie เนื่องจากเป็นจุดรวมของแรงที่มาบรรจบกันและทำหน้าที่ถ่ายแรงระหว่างชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อสร้างความสมดุลให้เกิดขึ้นซึ่งแรงที่เกิดขึ้นจะต้องไม่ทำให้เกิดโมเมนต์ภายในจุดเชื่อมต่อ (Node) นั่นคือการตั้งสมมติฐานให้จุดเชื่อมต่อ (Node) เป็นจุดหมุน

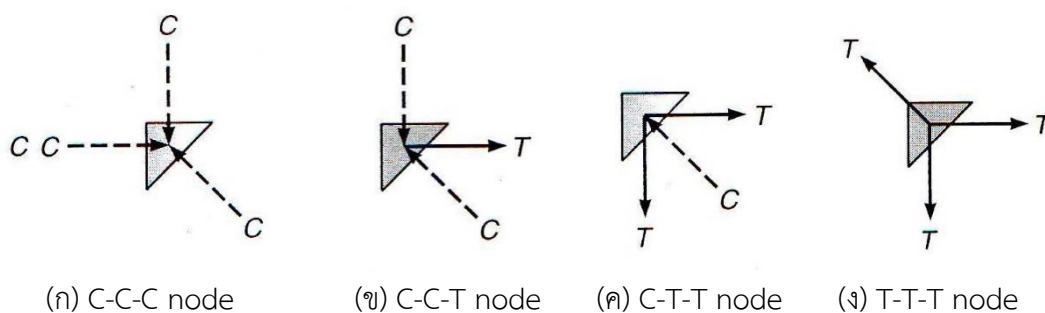
รูปร่างของ Node จะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดของจุดรองรับจำนวนและขนาดของ Strut หรือ Tie ที่พุ่งไปบรรจบกันในที่นี้พื้นที่สามเหลี่ยมดังกล่าว เรียกว่า Nodal Zone การแบ่งประเภทของ Nodal Zone เนื่องจากพื้นที่บริเวณ Node เป็นบริเวณที่แนวแห่ง Strut หรือแนว Tie ที่พุ่งไปบรรจบกัน ซึ่งสภาพดังกล่าวสามารถแยกประเภทใหญ่ ๆ ตามลักษณะการเข้ามาบรรจบกันของแรงได้ ดังนี้

(ก) C-C-C node (แรงอัด-แรงอัด-แรงอัด) เกิดขึ้นตรงจุดที่หน้าหน้ากระทำโดยมี Strut สองตัวเข้ามาแบกรับน้ำหนัก

(ข) C-C-T node (แรงอัด-แรงอัด-แรงดึง) แนวแห่ง Strut รับแรงอัดแนวทแยง และมีแรงปฏิกิริยาที่จุดรองรับถูกทำให้สมดุลด้วยแรงจากเหล็กเสริมที่ยึดรั้งภายในจุดต่อ (Node)

(ค) C-T-T node (แรงอัด-แรงดึง-แรงดึง) แรงอัด Strut ถูกทำให้สมดุลด้วยเหล็กเสริมสองทิศทาง

(ง) T-T-T node (แรงดึง-แรงดึง-แรงดึง) เกิดขึ้นจากแนวแห่งรับแรงดึง (Tension Tie) มาบรรจบกันทั้งสามทิศทางโดย C แทนด้วยแนวแห่งรับแรงอัด T แทนด้วยแนวแห่งรับแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 2.1.6



รูปที่ 2.1.6 แสดงลักษณะรูปแบบและประเภทของจุดเชื่อมต่อ (Node)

โดยกำลังของจุดต่อ ( $F_{nn}$ ) สามารถคำนวณได้ ดังสมการ (1-5)

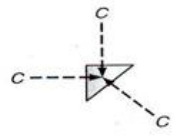
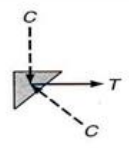
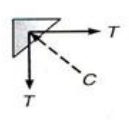
$$F_{nn} = f_{cu}A_n \quad (1-5)$$



เมื่อ  $f_{cu}$  คือ กำลังรับแรงอัดประสิทธิผลของจุดต่อ คำนวณได้จากสมการ (1-6)  
 $A_n$  คือ (1) พื้นที่ของจุดต่อในทิศทางตั้งฉากกับท่อนแรงอัดหรือท่อนแรงดึงที่มาบรรจบ หรือ  
 (2) พื้นที่ของจุดต่อในทิศทางที่ตั้งฉากกับแนวแรงอัดลัฟท์ (ในกรณีที่แรงอัดมากกว่า 1 แรงกระทำที่หน้าจุดต่อ)

$$f_{cu} = 0.85\beta_n f'_c \quad (1-6)$$

โดยค่า  $\beta_n$  เป็นตัวคูณที่แสดงถึงระดับของความยุ่งเหยิง (Degree of disruption) ที่จุดต่อ ซึ่งเกิดจากความไม่สอดคล้องกันของหน่วยแรงในท่อนแรงอัดและแรงดึงที่มาบรรจบกันที่จุดต่อ ซึ่งมีค่าตามตารางที่ 2.1.2

ชนิดของจุดต่อ	ลักษณะ	สัญลักษณ์	$\beta_n$
รับแรงอัดอย่างเดียว ไม่มีชิ้นส่วนรับแรงดึงมากระทำ		C-C-C	1.0
รับแรงอัดและรับแรงดึง 1 แนว		C-C-T	0.8
รับแรงอัดและรับแรงดึง 2 แนว หรือมากกว่า		C-T-T	0.6

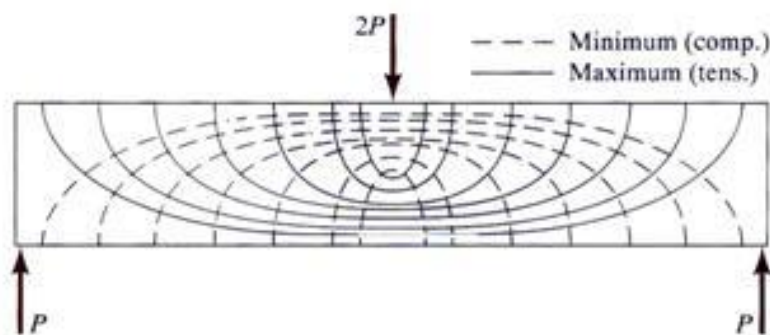
ตารางที่ 2.1.2 ตัวคูณลดกำลังของจุดต่อ ( $\beta_n$ )

### 2.1.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ออกแบบ Strut and tie model [1]

1. การวิเคราะห์โครงสร้างทั้งหมด (Overall Structural Analysis) หมายถึง การวิเคราะห์เพื่อหาแรงปฏิกิริยาหรือแรงที่เกิดขึ้นที่หน้าตัดของโครงสร้างนั้น
2. การสร้างแบบจำลอง (Model) หมายถึง การจำลองหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปแบบจำลองแรงอัดแรงดึงภายใน
3. การให้ขนาด (Dimensioning) หมายถึง การหาลำดับของคอนกรีตและการหาปริมาณเหล็กเสริม

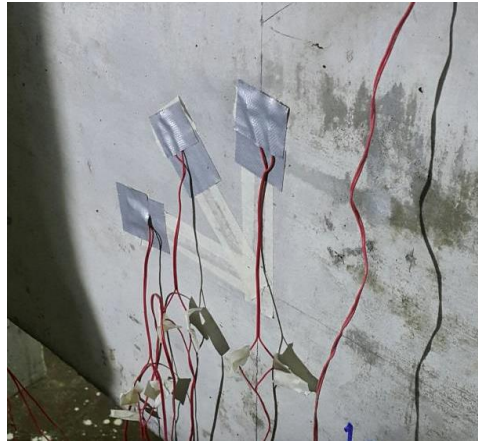
## 2.2 ทฤษฎี Stress Trajectories and Strain rosette [2]

Stress Trajectories คือ แผนภาพแสดงหน่วยแรงภายในโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 2.2.1 ประกอบด้วยหน่วยแรงสูงสุด (Maximum principal stress) คือ หน่วยแรงดึงสูงสุดแสดงด้วยเส้นทึบ และหน่วยแรงน้อยสุด (Minimum principal stress) คือ หน่วยแรงอัดสูงสุดแสดงด้วยเส้นประ โดยเส้นหน่วยแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเกิดภายในแผนภาพ Stress Trajectories เกิดขึ้นจากการที่คานได้รับแรงกระทำภายนอกองค์อาคาร ทำให้เกิดแรงภายในกระทำกับอนุภาคภายในองค์อาคารและสามารถหมุนอนุภาคเข้าสู่ระนาบหลัก (Principal plain) ทำให้มีเฉพาะหน่วยแรงตั้งฉาก (Normal Stress) โดยที่หน่วยแรงเฉือน (Shearing Stress) เท่ากับศูนย์ จึงทำให้หน่วยแรงสูงสุดเกิดขึ้นในองค์อาคารเมื่อนำอนุภาคในระนาบหลักมาเรียงต่อกันเป็นเส้นยาว จะทำให้เกิดเส้นหน่วยแรงสูงสุดดังกล่าว โดยที่มีทิศทางของมุมแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการกระจายแรงภายในองค์อาคาร



รูปที่ 2.2.1 แผนภาพ Stress Trajectories

ในการหาทิศทางของหน่วยแรงภายในองค์อาคารสามารถนำเอาหลักการ Strain rosette มาประยุกต์ใช้โดยการนำอุปกรณ์ที่เรียกว่า Strain gauge ดังแสดงในรูปที่ 2.2.2 ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดหน่วยการยืดหดตัวขององค์อาคาร โดยการนำ Strain gauge ติดไว้บริเวณองค์อาคารที่ต้องการพิจารณาหาทิศทางและหน่วยแรงภายใน โดยเมื่อองค์อาคารได้รับน้ำหนักบรรทุกทุกทำให้องค์อาคารเกิดหน่วยการยืดหดตัวสามารถวัดความเครียดที่เกิดขึ้นและคำนวณหาทิศทางและขนาดของหน่วยแรงภายในองค์อาคารได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2.3



รูปที่ 2.2.2 Strain gauge

(1) Regard  $\epsilon_a \rightarrow \epsilon_b \rightarrow \epsilon_c$  as the forward direction.

(2) Angle  $\theta$  is:

Angle of the maximum

strain to the  $\epsilon_a$  axis

when  $\epsilon_a > \epsilon_c$ ;

Angle of the minimum

strain to the  $\epsilon_a$  axis

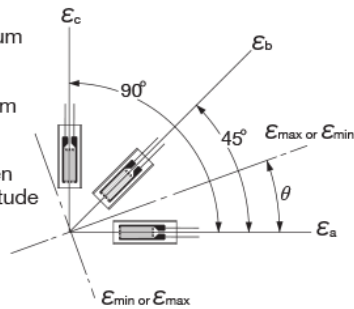
when  $\epsilon_a < \epsilon_c$ .

Comparison between

$\epsilon_a$  and  $\epsilon_c$  in magnitude

includes plus

and minus signs.



Max. principal strain

$$\epsilon_{\max} = \frac{1}{2} \left[ \epsilon_a + \epsilon_c + \sqrt{2 \left\{ (\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2 \right\}} \right]$$

Min. principal strain

$$\epsilon_{\min} = \frac{1}{2} \left[ \epsilon_a + \epsilon_c - \sqrt{2 \left\{ (\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2 \right\}} \right]$$

Direction of principal strain (from  $\epsilon_a$  axis)

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2\epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c}{\epsilon_a - \epsilon_c} \right]$$

Max. shearing strain

$$\gamma_{\max} = \sqrt{2 \left\{ (\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2 \right\}}$$

Max. principal stress

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left[ (1+\nu)(\epsilon_a + \epsilon_c) + (1-\nu) \times \sqrt{2 \left\{ (\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2 \right\}} \right]$$

Min. principal stress

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left[ (1+\nu)(\epsilon_a + \epsilon_c) - (1-\nu) \times \sqrt{2 \left\{ (\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2 \right\}} \right]$$

Max. shearing stress

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2(1+\nu)} \times \sqrt{2 \left\{ (\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2 \right\}}$$

$\nu$  : Poisson's ratio

$E$  : Young's modulus

(Refer to "Mechanical Properties of Industrial Materials,")

รูปที่ 2.2.3 การคำนวณหาทิศทางและหน่วยแรงต่าง ๆ จากหลักการ Strain Rosette