

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.1 ชนิดของระบบชั้นส่วนสำเร็จรูป

เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการรับน้ำหนักของโครงสร้างสามารถแยกรูปแบบของชั้นส่วนสำเร็จรูปออกเป็นหมวดหมู่ได้ดังนี้

- ระบบเป็นช่องแผ่นขนาดใหญ่ (Large - panel systems)
- ระบบโครงเฟรม (Frame systems)
- ระบบพื้นต่อกับเสาพร้อมกับผนังอาคาร (Slab - column system with walls)
- ระบบผสมของแต่ละระบบ (Mixed systems)

อย่างไรก็ตาม รูปแบบที่ได้รับความนิยมจะเป็น 2 รูปแบบแรก หรือ รูปแบบที่ผสมกันระหว่าง 2 รูปแบบแรกทั้งนี้ข้อมูลรายละเอียดทั้ง 2 รูปแบบมีดังนี้

1) ระบบเป็นช่องแผ่นขนาดใหญ่ (Large - panel systems)

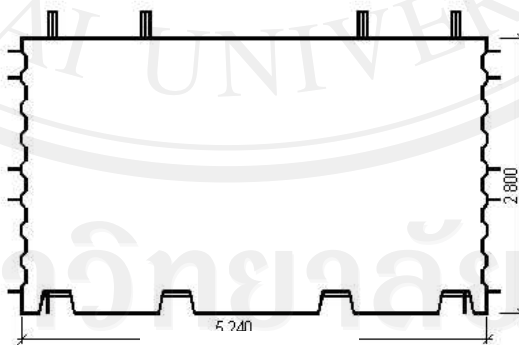
การออกแบบระบบ large - panel systems เหมาะสำหรับอาคารที่มีจำนวนชั้นมาก ๆ โดยอาคารดังกล่าวนี้ประกอบไปด้วยกำแพงขนาดใหญ่ และแผ่นพื้นคอนกรีตเชื่อมต่อตัวอย่างการก่อสร้างโดยใช้ระบบเป็นช่องแผ่นขนาดใหญ่นั้นแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยรูปร่างของอาคารมีลักษณะคล้ายกล่องที่ประกอบด้วยกำแพงและแผ่นพื้น ซึ่งชั้นส่วนเหล่านี้จะทำหน้าที่ในการต้านทานแรงในแนวตั้ง ชั้นส่วนสำเร็จรูปที่เป็นกำแพงนั้นจะมีความสูงเท่ากับความสูงของอาคาร 1 ชั้น และชั้นส่วนที่เป็นแผ่นพื้นนั้นจะเป็นพื้นแบบทางเดียวหรือพื้นสองทางก็ได้ กรณีของแรงในแนวราบที่เกิดขึ้นในโครงสร้างนั้นชั้นส่วนพื้นจะทำหน้าที่เป็น diaphragm และกำแพงทำหน้าที่รับแรงทางด้านข้าง ความหนาของกำแพงนั้นโดยทั่วไปสำหรับกำแพงภายในอาคารจะมีความหนาประมาณ 120 mm. ส่วนกำแพงภายนอกนั้นจะหนาประมาณ 300 mm. ในส่วนของแผ่นพื้นคอนกรีตนั้นมีความหนาประมาณ 60 mm. หรือมากกว่าขึ้นกับระยะช่วงพาด ความยาวของชั้นส่วนกำแพงจะเท่ากับความยาวของห้อง 1 ห้องซึ่งโดยทั่วไปประมาณ 2.7 - 3.6 m.



รูปที่ 2.1 การก่อสร้างอาคารโดยระบบ Large - panel systems

(Brzev and Perez, 2011)

ระบบการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปสามารถจำแนกจุดต่อออกเป็น 2 ประเภทคือ จุดต่อในแนวตั้ง และจุดต่อในแนวราบตามรูปที่ 2.2 โดยจุดต่อในแนวตั้งนั้นจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นส่วนกำแพงทำหน้าที่เชื่อมต่อกับชิ้นส่วนกำแพงถัดไป ซึ่งจุดเชื่อมต่อนี้จะเป็นส่วนหลักในการต้านทานแรงเฉือนในแนวตั้ง ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวจุดเชื่อมต่อในแนวราบซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนกำแพงและชิ้นส่วนแผ่นพื้นจะทำหน้าที่ต้านทานแรงในแนวราบที่เกิดจากแผ่นดินไหว รวมถึงยังทำหน้าที่ในการรับแรงแรงกดในแนวตั้งเนื่องจากน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง



Wall panel

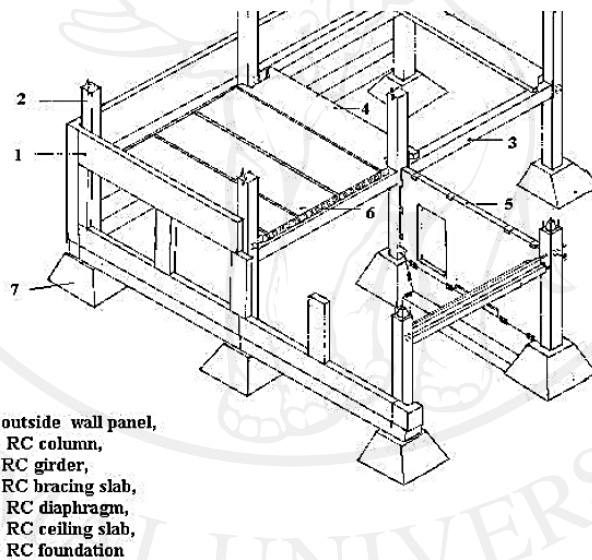
รูปที่ 2.2 ชิ้นส่วนแผ่นกว้างสำเร็จรูปแบบมีเหล็กเดือยและร่องสำหรับเชื่อมต่อ

(Brzev and Perez, 2011)

วิธีการเชื่อมต่อจุดต่อนั้นสามารถทำได้ทั้งจุดต่อแบบเป็ยกและจุดต่อแบบแข็ง โดยจุดต่อแบบเป็ยกคือจุดต่อที่ใช้วิธีการเทในที่โดยมีเหล็กเสริมของชิ้นส่วนสำเร็จเชื่อมต่อกันเพื่อให้สามารถถ่ายแรงระหว่างกันได้ ในส่วนของจุดต่อแบบแข็งนั้นคือจุดต่อที่ใช้วิธีการเชื่อมชิ้นส่วนด้วยแผ่นเหล็ก หรือใช้วิธีการยึดชิ้นส่วนเชื่อมต่อกันด้วยสลักเกลียว ซึ่งรูปแบบการเทในที่นั้นจะสามารถปิดช่องว่างในการเชื่อมต่อได้ดีกว่าวิธีอื่น แต่การถ่ายแรงระหว่างโครงสร้างนั้นวิธีการเชื่อมหรือใช้สลักเกลียวจะสามารถถ่ายแรงได้ดีกว่า

2) ระบบโครงเฟรม (Frame systems)

ลักษณะรูปร่างของชิ้นส่วนเฟรมสำเร็จรูปนั้นมีทั้งแบบที่เป็นแท่งยาว และแบบชิ้นส่วนคาน - เสาซึ่งต่อเป็นรูปร่างแบบไม้กางเขนตามรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 ตามลำดับ

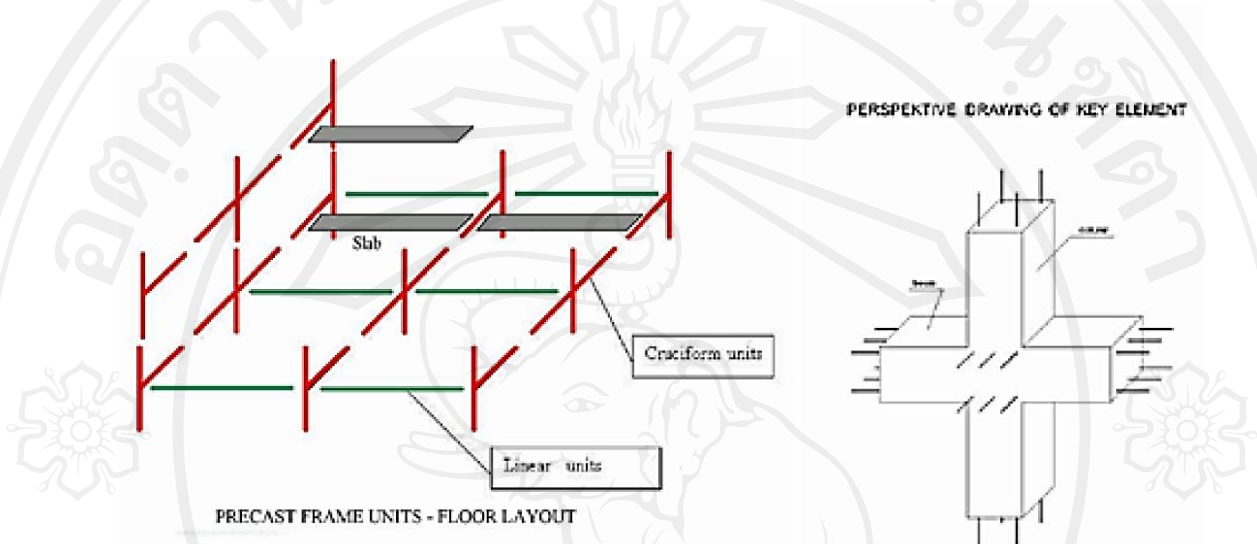


รูปที่ 2.3 ชิ้นส่วนประกอบของโครงสร้างระบบโครงเฟรม

(Brzev and Perez, 2011)

อย่างไรก็ตามรูปแบบชิ้นส่วนเฟรมที่มีลักษณะแบบแท่งยาวนั้นเป็นที่นิยมมากกว่าเนื่องจากวิธีการหล่อชิ้นส่วนและการเคลื่อนย้ายเพื่อนำไปติดตั้งที่หน้างานสามารถทำได้ง่ายกว่า การใช้งานชิ้นส่วนเฟรมแบบแท่งยาวนั้นจะต้องทำการเทปิดรอยเชื่อมบริเวณคาน - เสาโดยชิ้นส่วนที่เป็นคานนั้นจะวางบนแท่นรองรับของเสา แท่นนี้จะทำหน้าที่ถ่ายแรงเฉือนจากคานสู่เสา โดยการเชื่อมต่อแบบนี้พฤติกรรมการเชื่อมต่อของคานจะเป็นแบบจุดหมุน (hinge) อย่างไรก็ตามบริเวณจุดต่อคาน -

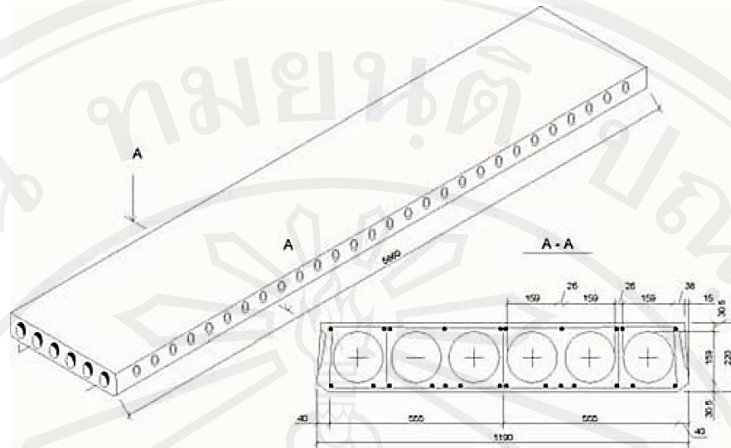
เสาสามารถทำให้เป็นการเชื่อมต่อแบบยึดแน่นได้โดยการให้เหล็กเสริมตามยาวของชิ้นส่วนคานทั้ง 2 ปลายเชื่อมต่อกันผ่านจุดต่อคาน - เสา เพื่อให้การถ่ายแรงแหว่างชิ้นส่วนทำได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.4 ชิ้นส่วนเฟรมสำเร็จรูปแบบแก่งยาว และ ชิ้นส่วนคานเสาซึ่งต่อแบบรูปแบบไม้กางเขน (Brzev and Perez, 2011)

ชิ้นส่วนเฟรมสำเร็จรูปที่มีรูปร่างแบบไม้กางเขนหรือชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปเป็นตัวอย่างของโครงสร้างเฟรมที่ใช้ระบบจุดต่อคาน - เสา โดยระบบนี้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในบางประเทศตั้งแต่ปี 1975 โดยระบบการรับน้ำหนักของโครงสร้างประกอบไปด้วยชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปแบบ space frame และ แผ่นพื้นสำเร็จ

โครงเฟรมอาคารประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ชิ้นส่วนสำเร็จรูปไม้กางเขน และชิ้นส่วนคานสำเร็จรูป โดยชิ้นส่วนสำเร็จรูปแบบกางเขนประกอบไปด้วยจุดต่อที่มีส่วนของคานและเสา โดยทำมุมตั้งฉากกัน ความยาวของคานและเสาในชิ้นส่วนนี้มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของช่วงพาด ซึ่งการเชื่อมต่อชิ้นส่วนเข้าด้วยกันจะใช้วิธีการเชื่อมเหล็กเสริมของชิ้นส่วนที่มาประกอบกันและทำการเทคอนกรีตปิดบริเวณที่เชื่อมต่อ ตำแหน่งที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปแบบกางเขนนั้นอยู่บริเวณกึ่งกลางระหว่างช่วงเสา สำหรับพื้นอาจใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปดังเช่นที่แสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อนำมาเชื่อมต่อจะทำหน้าที่เป็นพื้นและเพดานของอาคาร

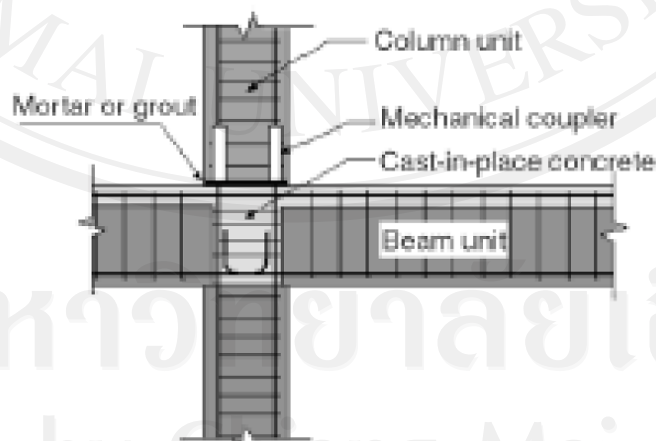


รูปที่ 2.5 ชิ้นส่วนแผ่นพื้นสำเร็จรูป

(Brzev and Perez, 2011)

2.2 จุดต่อของโครงสร้างชิ้นส่วนคาน-เสาสำเร็จรูป

เมื่อก้าวถึงจุดต่อของโครงสร้างอาคารซึ่งนับว่าเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างโดยการใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูป พฤติกรรมของโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปนั้นจะขึ้นกับพฤติกรรมของจุดต่อ ซึ่งการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างอาคารนั้นจะส่งผ่านแรงที่กระทำไปยังส่วนอื่นๆ ของโครงสร้างผ่านทางจุดเชื่อมต่อ ซึ่งรูปแบบของจุดเชื่อมต่ออาคาร โครงเฟรมต้านแรงดัด (moment resisting frame) แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ 1) เสมือนหล่อเป็นชิ้นเดียวกัน (Equivalent monolithic system) 2) แบบมีจุดต่อ (Jointed system) โดยในแต่ละแบบนี้มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.6 จุดเชื่อมต่อกาน-เสาที่ใช้ระบบ equivalent monolithic

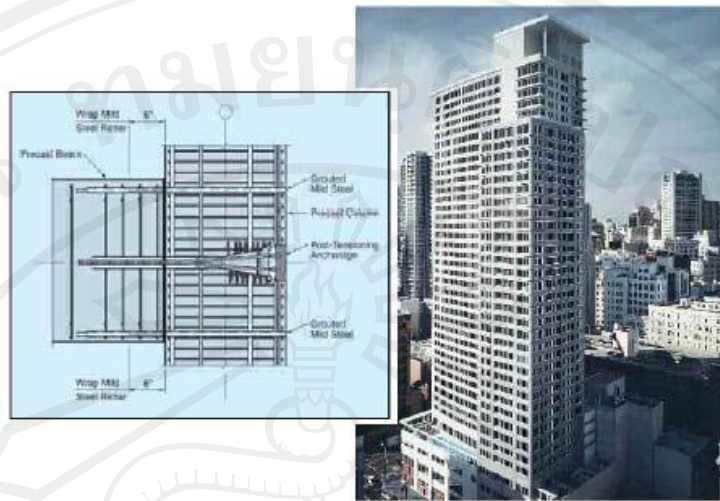
(Camarena, 2006)

1) Equivalent monolithic systems หรือเป็นการเทในที่ ตามรูปที่ 2.6 สามารถแบ่งเป็นลักษณะย่อยได้อีก 2 แบบ คือ จุดต่อแบบแข็งที่มีความเหนียวจำกัด (connections of limited ductility) และ จุดต่อที่มีความเหนียว (ductile connections) โดยการออกแบบจุดต่อที่มีความเหนียวจำกัดนั้นจะออกแบบให้จุดต่อมีความแข็งแรงพอเพื่อให้เกิด yield เท่านั้น แต่จุดต่อแบบที่มีความเหนียวนั้นเป็นแบบที่ต้องการให้เกิด plastic hinge ขึ้นที่บริเวณคานตำแหน่งบริเวณหน้าเสาขณะที่โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวมากๆ และให้บริเวณจุดเชื่อมต่อเกิดเพียง yield เท่านั้น

2) Jointed systems ระบบนี้บริเวณจุดต่อจะมีความอ่อนแอกว่าชิ้นส่วนที่อยู่ติดกัน โดยระบบ jointed นั้นประสิทธิภาพจะต่างจากระบบการเทในที่ โดยแบ่งย่อยออกได้เป็น จุดต่อที่มีความเหนียวจำกัด และ จุดต่อที่มีความเหนียว

จุดต่อที่มีความเหนียวจำกัดนั้น โดยทั่วไปจะเป็นจุดต่อแบบแห้ง (dry joint) ที่ใช้วิธีการเชื่อมต่อโดยการเชื่อมหรือใช้สลักเกลียวในการยึดเชื่อมต่อ ซึ่งพฤติกรรมของจุดต่อแบบนี้ไม่เหมือนกับจุดต่อของวิธีการเทในที่ ในส่วนของจุดต่อแบบมีความเหนียวการยึดชิ้นส่วนจะใช้การเชื่อมหรือใช้สลักเกลียวเช่นเดียวกันแต่จะเพิ่มเติมการใช้การอัดแรงไว้การยึดเหนียว (unbonded post-tensioned tendons) ซึ่งจุดต่อแบบนี้จะเป็นจุดต่อแบบแห้ง โดยเมื่อชิ้นส่วนเกิดการเสียรูปจนผ่านจุดยึดหย่อนไปแล้วจะทำให้รอยต่อบริเวณหน้าเสาที่ติดกับคานเกิดการเปิดอ้าออก แต่ก็ปิดกลับที่เดิมหลังจากแรงที่กระทำลดลงเนื่องจากลวดอัดแรงทำหน้าที่ดึงชิ้นส่วนให้เชื่อมติดกันนั้นยังคงอยู่ในช่วงยึดหย่อนอยู่

พัฒนาการของโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปสำหรับด้านทานแผ่นดินไหวภายใต้ PRESS program (Precast Seismic Structural Systems) จากการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของจุดต่อคาน - เสาแบบที่มีความเหนียวในหลายๆรูปแบบพบว่า รูปแบบที่เหมาะสมในการใช้งานคือระบบ unbonded และการเพิ่มเหล็กเสริมเพื่อช่วยในการกระจายพลังงานเป็นวิธีที่นิยมออกแบบใช้งานเนื่องจากวิธีนี้ช่วยลดความเสียหายหลังจากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว โดยระบบผสมนี้ได้ถูกใช้ในอาคาร Paramount ใน San Francisco ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งอาคารนี้สร้างโดยใช้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่สูงที่สุดในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่อยู่ในส่วนที่มีความเสี่ยงการเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรง



รูปที่ 2.7 อาคาร Paramount และรูปแบบจุดต่อที่ใช้
(Englekirk, 2002)

สำหรับโครงสร้างเฟรมด้านแรงดัดที่ใช้วิธีการเชื่อมต่อชิ้นส่วนแบบเสมือนหล่อเป็นชิ้นเดียวกัน (equivalent monolithic systems) วิธีการที่นิยมใช้ในประเทศญี่ปุ่นและนิวซีแลนด์มีรูปแบบดังนี้

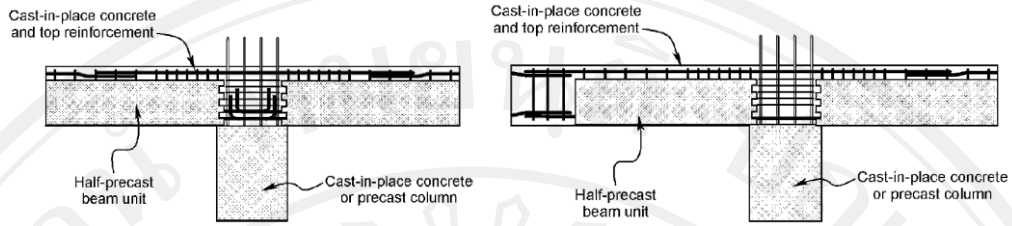
1) ระบบจุดต่อชิ้นส่วนสำเร็จ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระบบ

ระบบ 1. ชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปวางไว้บนแท่นวางของเสาโดยเหล็กคางของคานนั้นยื่นและงอเข้าไปในบริเวณจุดต่อ และทำการเทคอนกรีตในที่บริเวณส่วนบนของคานรวมถึงบริเวณที่เป็นจุดต่อตามรูปที่ 2.8(ก) หรือจะให้เหล็กคางของชิ้นส่วนคานเชื่อมต่อกันผ่านบริเวณจุดต่อตามรูปที่ 2.8(ข) ก็สามารทำได้

ระบบ 2. เตรียมรูในชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปเพื่อให้เหล็กคางของเสาสามารถสอดผ่านได้จากนั้นจึงทำการเกรทบริเวณรูที่เหล็กผ่านจากนั้นจึงทำเชื่อมต่อกานบริเวณกึ่งกลางช่วงเสาโดยการเทในที่ดังแสดงในรูปที่ 2.8

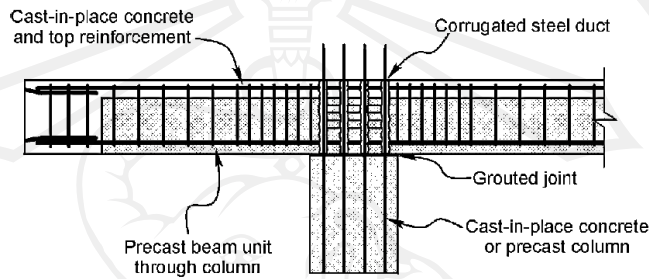
ระบบ 3. ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปตัวที่หรือรูปไม้กางเขน เชื่อมต่อในแนวตั้งผ่านทางเหล็กในเสาและทำการเชื่อมต่อในแนวราบโดยการเทในที่บริเวณกึ่งกลางช่วงเสา ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ระบบ 4. ในประเทศนิวซีแลนด์นั้นนิยมใช้คานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวยู และใช้วิธีการเทในที่ในการเชื่อมต่อชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.8

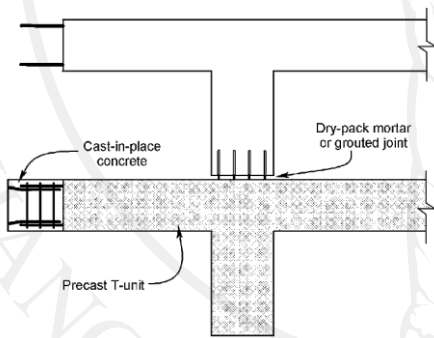


(ก) Approach using hooked bottom bar anchorage (ข) Approach using straight bottom bars

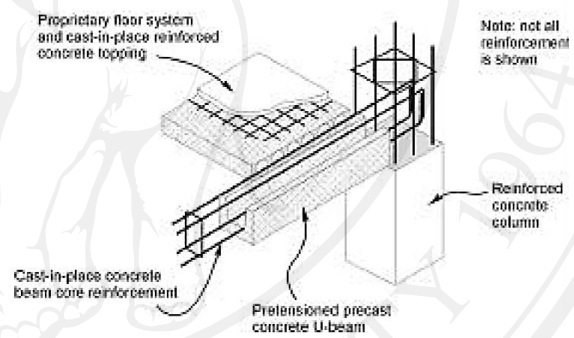
ระบบที่ 1



ระบบที่ 2



ระบบที่ 3



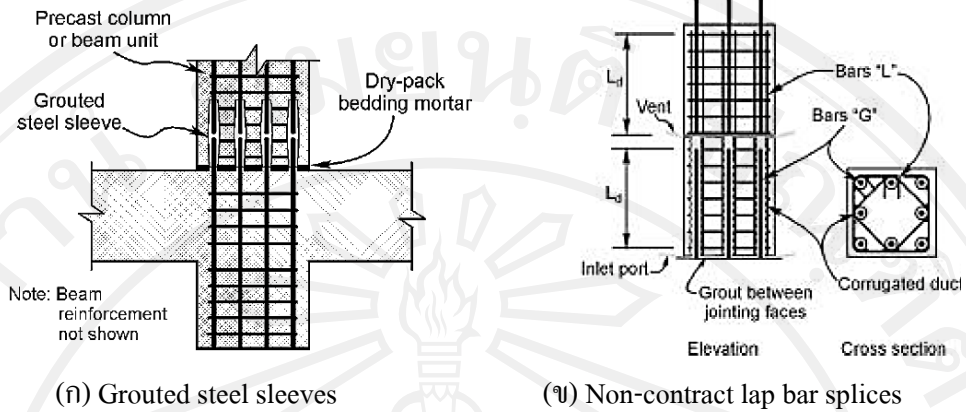
ระบบที่ 4

รูปที่ 2.8 จุดต่อชิ้นส่วนสำเร็จแบบมีความเหนียวโดยวิธี equivalent monolithic systems

(Park, 2003)

2) การเชื่อมต่อเสา และ คาน

ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้การเชื่อมต่อระบบที่ 2 และ 3 นั้นตำแหน่งที่เชื่อมต่อชิ้นส่วนเสานั้นมีทั้งจุดที่อยู่เหนือคานหรือกึ่งกลางความสูงของเสา การเชื่อมต่อนั้นมีทั้งรูปแบบที่มีการฝังท่อเหล็กสำหรับต่อเหล็กจากนั้นจึงทำการเกรทตามรูป 2.9(ก) และรูปแบบการเชื่อมต่อโดยการใช้เหล็กทาบซึ่งตามรูปคือ Bar-L ส่วนเหล็กที่ยื่นมาจากส่วนเสาเพื่อสอดเข้าไปยังเสาส่วนที่มาเชื่อมต่อคือ Bar-G ตามรูปที่ 2.9(ข) และทำการเกรทเพื่อปิดช่องว่างอีกทั้งเพื่อให้การถ่ายแรงระหว่างชิ้นส่วนสามารถทำได้



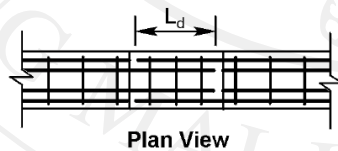
(ก) Grouted steel sleeves

(ข) Non-contract lap bar splices

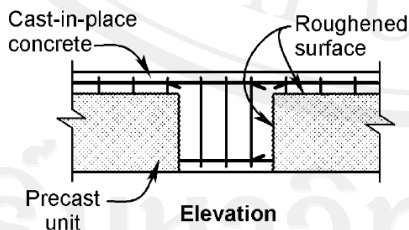
รูปที่ 2.9 การเชื่อมต่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

(Park, 2003)

ส่วนของการเชื่อมต่อบริเวณกึ่งกลางช่วงคานนั้นใช้วิธีการเทในที่โดยในประเทศนิวซีแลนด์เป็นที่นิยมมาก โดยส่วนมากจะใช้เหล็กเสริมตรงในการเชื่อมต่อหากความยาวของจุดต่อเพียงพอตามรูปที่ 2.10(ก) และ (ข) สำหรับจุดต่อที่มีพื้นที่น้อยที่ทำการเทในที่นั้นจะใช้วิธีการ double hooked ในการเชื่อมต่อตามรูปที่ 2.10(ค) วิธีการที่ง่ายในการประกอบชิ้นส่วนสำเร็จระหว่างการก่อสร้างในประเทศญี่ปุ่นนั้นนิยมใช้การเชื่อมเหล็กเสริมให้ติดกันหรือใช้ coupler ในการเชื่อมต่อเหล็กเสริมตามรูปที่ 2.10(ง) และ (จ)

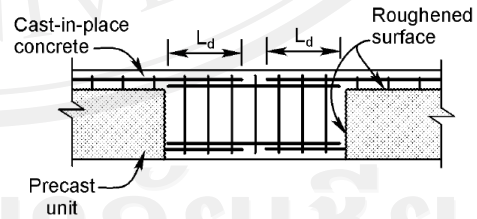


Plan View

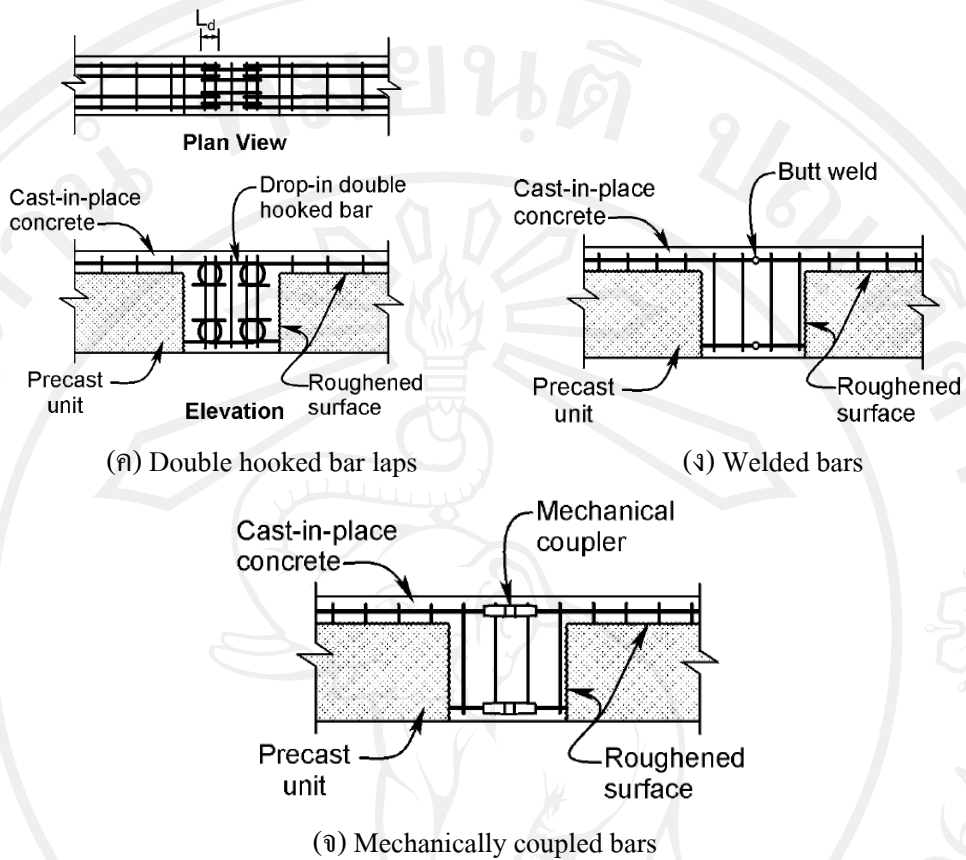


Elevation

(ก) Straight bar laps



(ข) Double straight bar laps



รูปที่ 2.10 การเชื่อมต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
(Park, 2003)

3) จุดต่อที่มีการใช้ระบบลวดอัดแรงร่วมด้วย

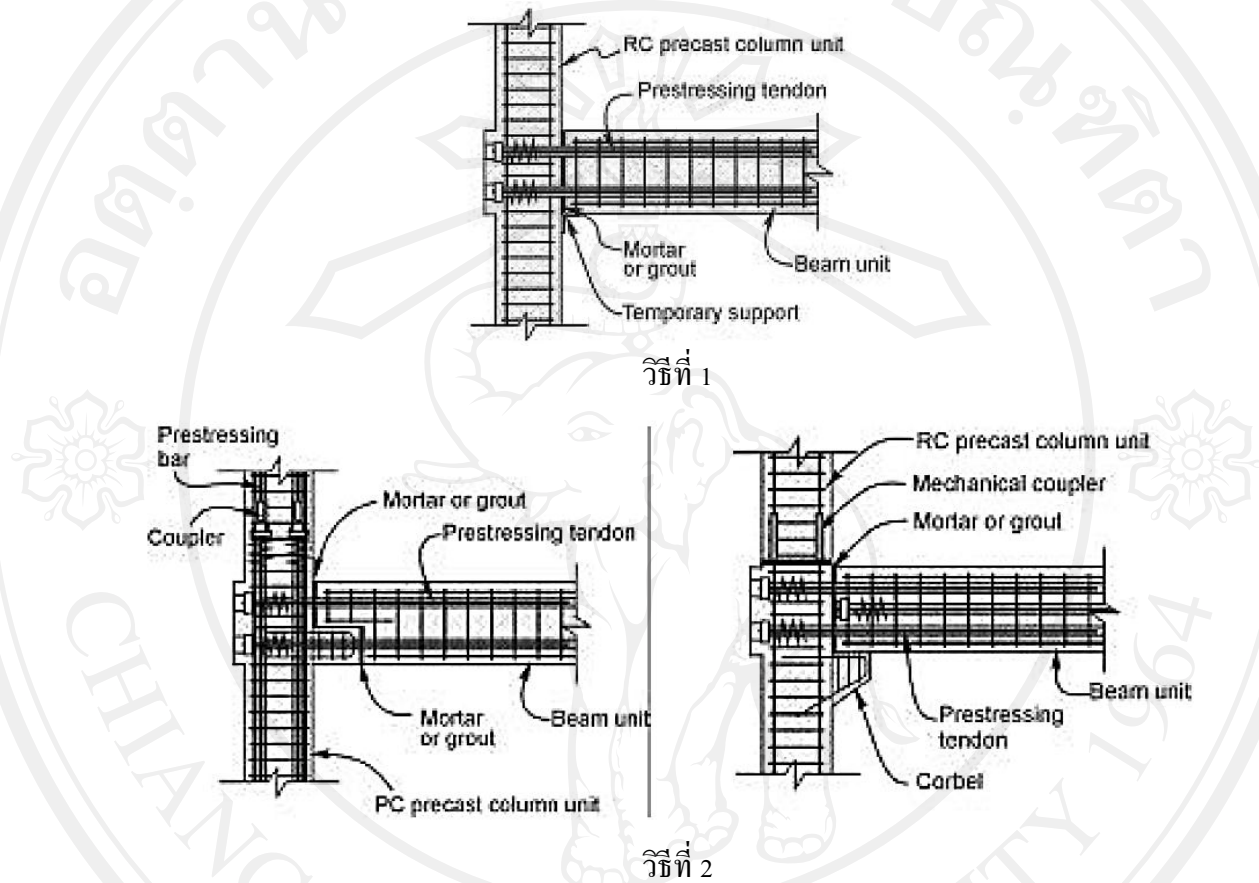
โดยทั่วไปนั้นจุดต่อที่มีการใช้ลวดอัดแรงร่วมด้วยนั้นจะเป็นจุดต่อแบบ equivalent monolithic systems และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างลวดกับคอนกรีตซึ่งระบบนี้จะทำให้จุดต่อมีความเหนียวและระบบลวดอัดแรงที่ใช้ร่วมในจุดต่อนั้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. การเชื่อมต่อด้วยระบบคานอัดแรงชนิดดึงลวดที่หลัง (post-tensioned beam)

การก่อสร้างโดยระบบนี้เป็นที่นิยมในประเทศญี่ปุ่นและนิวซีแลนด์ตั้งแต่ปี 1960 โดยระบบนี้ได้รับการทดสอบแล้วว่าสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้เป็นอย่างดี ระบบนี้จะมีวิธีหลักๆในการเชื่อมต่ออยู่ 2 วิธีตามรูปที่ 2.11

- วิธีที่ 1 คานคอนกรีตสำเร็จรูปจะวางอยู่บนที่รองรับชั่วคราวของเสาจากนั้นทำการเกรทที่ปิดรอยต่อ และสุดท้ายจึงทำการดึงลวดอัดแรงและทำการเกรทลวดอัดแรงเป็นขั้นตอนสุดท้าย

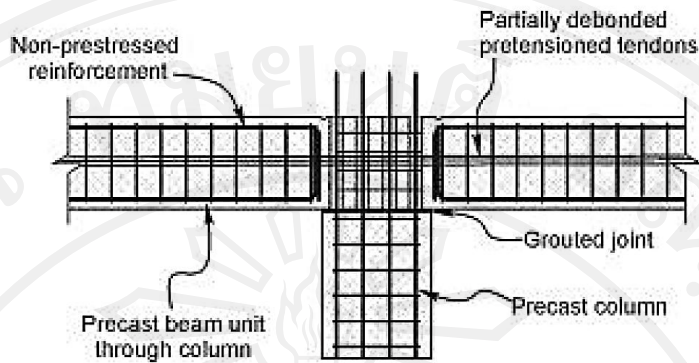
- วิธีที่ 2 คานคอนกรีตสำเร็จรูปวางอยู่บนแท่นรองรับถาวรของเสา หลังจากนั้นทำเหมือนขั้นตอนในวิธีที่ 1



รูปที่ 2.11 การเชื่อมต่อโดยวิธี equivalent monolithic systems ชนิดคิงเหล็กที่หลัง (Park, 2003)

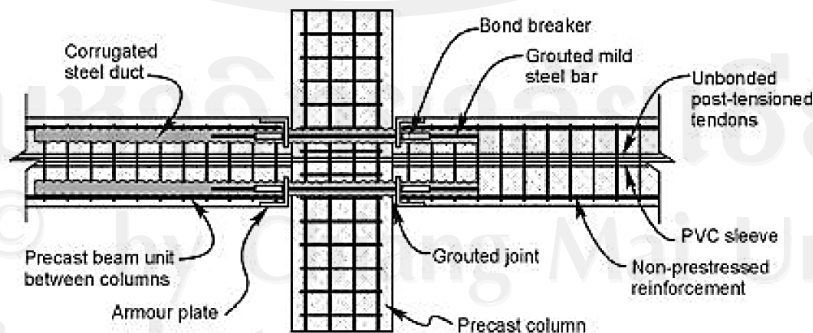
2 การเชื่อมต่อด้วยระบบคานอัดแรงชนิดดึงลวดก่อน (pretensioned beam)

ระบบนี้จะทำการดึงลวดเตรียมไว้ก่อนครั้งละหลายๆช่วงพาด ตามรูปที่ 2.12 โดยการไ้ระบบ debonded ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างลวดและคอนกรีต จากนั้นจึงทำการเชื่อมต่อกานกับเสาเข้าด้วยกันตามระบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.12 ระบบคาน pretensioned ที่ทำการดึงลวดผ่านเสาด้วยระบบ debond (Park, 2003)

วิธีการเชื่อมต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปโดยใช้การดึงเหล็กที่หลังแบบไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างลวดอัดแรงกับคอนกรีตซึ่งการเชื่อมต่อรูปแบบนี้ทำให้จุดต่อที่ได้เป็นจุดต่อแบบเหนียว แต่โดยทั่วไปจะนิยมใช้ระบบจุดต่อผสมที่ร่วมกันระหว่างระบบลวดอัดแรงแบบไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตและเหล็กเสริมตามรูปที่ 2.13 ระบบจุดต่อแบบผสมนี้เป็นที่นิยมใช้ในประเทศอังกฤษ วิธีการที่ชิ้นส่วนคานคอนกรีตอัดแรงเชื่อมต่อกับเสานั้น โดยการใช้ระบบลวดอัดแรงดึงเหล็กที่หลังแบบไม่มีแรงยึดเหนี่ยว โดยลวดอัดแรงนั้นจะวิ่งผ่านท่อ PVC ที่จุดกึ่งกลางของคาน ในส่วนของช่องว่างระหว่างคานกับเสานั้นจะทำการเกราะด้วยเส้นใยเสริมแรง และในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหวนั้นจะต้องมั่นใจว่าแรงที่เกิดในลวดอัดแรงจะต้องไม่เกินจุด proportional limit การเสริมเหล็กกรรมดาบริเวณจุดต่อนั้นจะต้องเตรียมท่อสำหรับสอดเหล็กดังก้าวผ่านระหว่างคานและเสา โดยท่อที่เตรียมไว้จะต้องมีผิวขรุขระเพื่อที่เวลาทำการเกราะแล้วจะได้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวท่อกับน้ำยาที่เกราะที่ได้ดี ซึ่งเหล็กที่ทำการเสริมเข้าไปนี้จะทำให้การกระจายพลังงานไปยังจุดต่ออื่นๆเพื่อไม่ให้เกิดการครากของเหล็กหรือแรงอัดที่เกิดมากเกินไป



รูปที่ 2.13 รายละเอียดการเสริมเหล็กของจุดต่อระบบผสม (Park, 2003)

เมื่อโครงสร้างได้รับแรงกระทำจากแผ่นดินไหวและมีการเสีรูปร่างเข้าสู่พฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) แล้วนั้นจะเกิดรอย crack ที่เปิดออกแต่เนื่องจากมีแรงของลวดอัดแรงดึงไว้เมื่อแรงกระทำลดลงรอย crack ดังกล่าวก็จะปิดลง แสดงให้เห็นว่าระบบนี้มีประโยชน์ในการลดความเสียหายที่เกิดขึ้นในระหว่างที่เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว

2.3 ชนิดจุดต่อตามมาตรฐาน Euro code 3

Euro code 3 จะใช้การเปรียบเทียบค่าของความแข็งเกร็ง (stiffness) และกำลังของจุดต่อกับชิ้นส่วนที่เชื่อมอยู่โดยจะแบ่งออกเป็นคือ 3 ชนิดคือ rigid, semi rigid และ nominal pin หรือ flexible

เกณฑ์ที่ใช้แยกแยะระหว่างจุดต่อแบบ rigid กับ semi rigid ออกจากกันคือ

- ผลของ stiffness ของจุดต่อทำให้กำลังของเสา (euler buckling load) ลดลงน้อยกว่าร้อยละ 5 ถือเป็นจุดต่อแบบ rigid
- จุดต่อมีกำลังไม่น้อยกว่าโมเมนต์พลาสติกของคานที่เชื่อมต่ออยู่ถือเป็นจุดต่อแบบ rigid

เกณฑ์ที่ใช้แยกแยะระหว่างจุดต่อแบบ semi rigid กับ nominal pin หรือ flexible ออกจากกัน

คือ

- Stiffness ของจุดต่อมากกว่าครึ่งของคานที่เชื่อมต่ออยู่ถือเป็นจุดต่อแบบ semi rigid
- จุดต่อมีกำลังไม่น้อยกว่า 1/4 ของโมเมนต์พลาสติกของคานที่เชื่อมต่ออยู่ถือเป็นจุดต่อแบบ semi rigid

เกณฑ์การแบ่งแยกชนิดของจุดต่อตาม Euro code 3 แสดงในรูปที่ 2.14 (ก), (ข) โดยที่

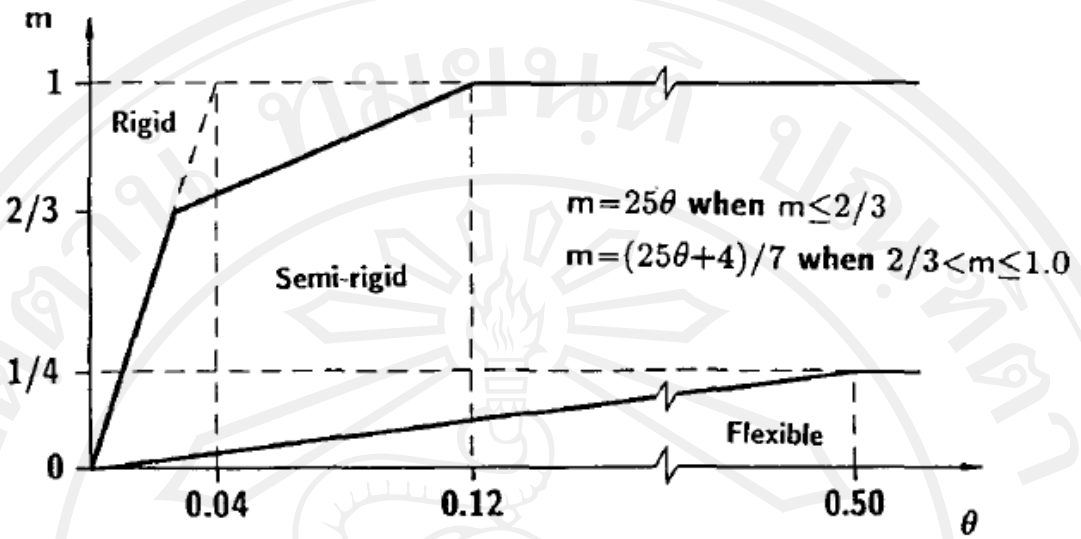
$m = \frac{M}{M_p}$ คือ อัตราส่วนโมเมนต์ที่กระทำกับจุดต่อและโมเมนต์พลาสติกของคานที่

เชื่อมต่ออยู่

$\theta = \frac{\theta'}{\theta_p}$ คือ อัตราส่วนมุมหมุนของจุดต่อและมุมหมุนพลาสติกของคานที่เชื่อมต่ออยู่

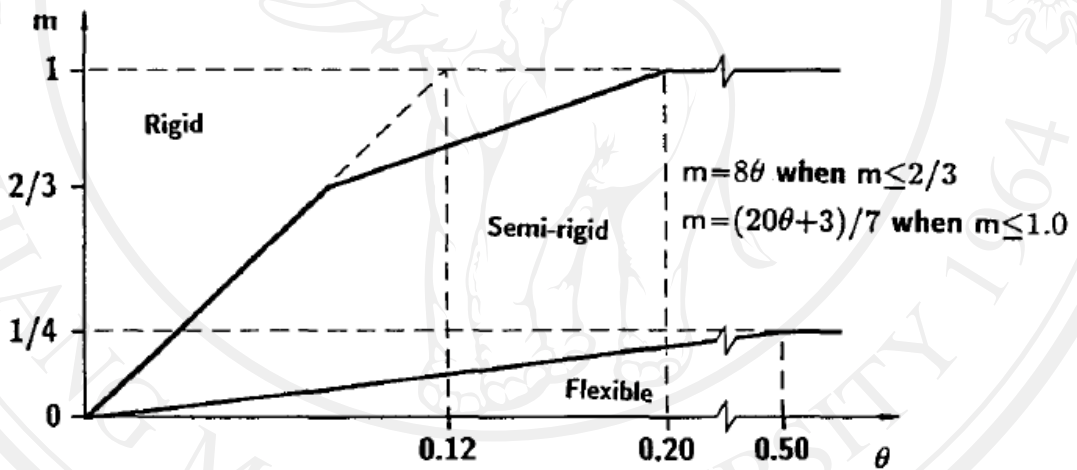
$\theta_p = M_p / \left(\frac{EI}{L_b} \right)$ L_b และ EI คือ ความยาว และความแข็งของคานตามลำดับ

M_p คือ โมเมนต์พลาสติกของคานที่เชื่อมต่ออยู่



(a) Unbraced frames

(ก) ชนิดของจุดต่อสำหรับโครงไม่ยึดรั้ง (unbraced frame)



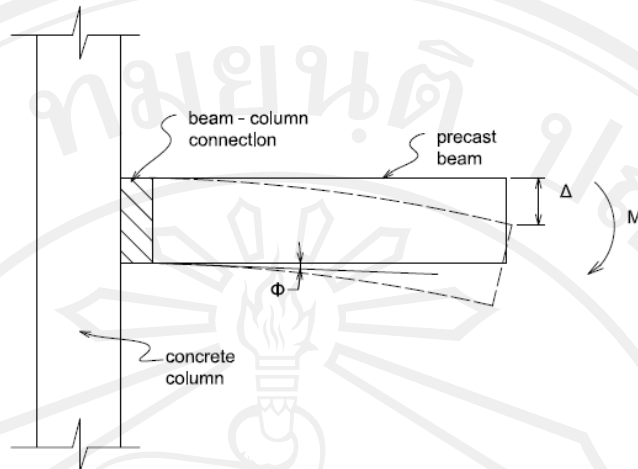
(b) Braced frames

(ข) ชนิดของจุดต่อสำหรับโครงยึดรั้ง (braced frame)

รูปที่ 2.14 การแบ่งแยกชนิดจุดต่อตาม Euro Code 3

2.4 คุณสมบัติของจุดต่อ

เมื่อมีแรงดัดหรือโมเมนต์กระทำกับคานในรูปที่ 2.15 ซึ่งมีจุดต่อเป็น semi rigid จะเกิดการส่งผ่านแรงดัดไปยังเสาและเกิดมูมหมุนสัมพัทธ์ระหว่างหน้าเสาและคาน (ϕ) ดังนั้นการตอบสนองหรือพฤติกรรมของจุดต่อจึงส่งผลต่อการตอบสนองของโครงสร้างทั้งหมด

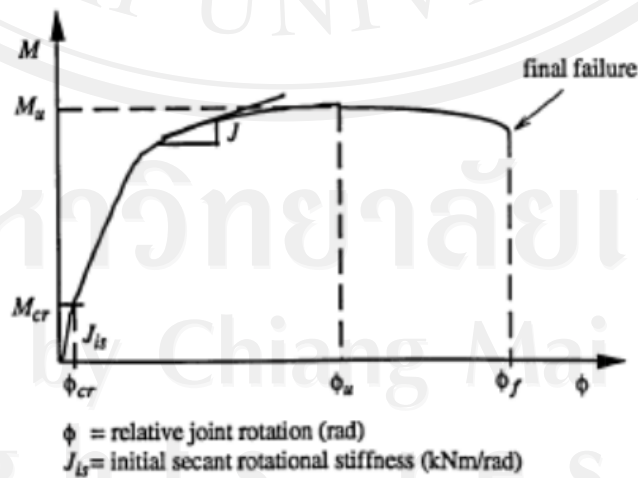


รูปที่ 2.15 กานคอนกรีตสำเร็จรูปปรับโมเมนต์

คุณสมบัติที่สำคัญของจุดต่อที่เป็นจุดเน้นของงานวิจัยสามารถแบ่งได้ดังนี้

- Stiffness หรือความแข็งแกร่ง
- Strength หรือกำลังของจุดต่อ
- Ductility หรือความเหนียว

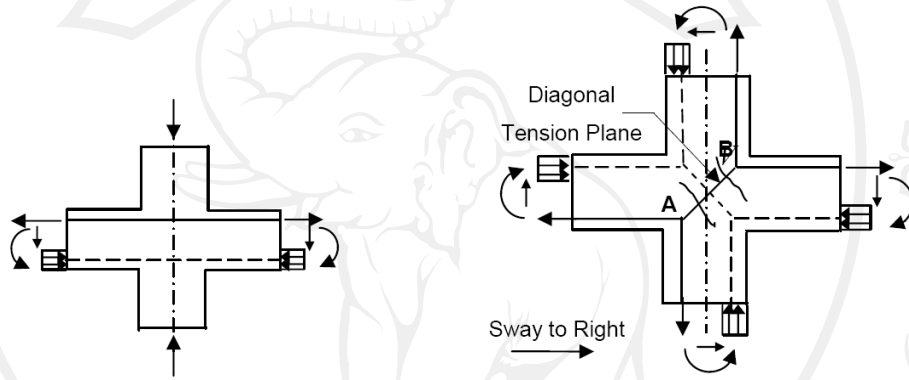
คุณสมบัติดังกล่าวของจุดต่อสามารถแสดงได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ (M) และมุมหมุน (ϕ) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยที่แต่ละส่วนของกราฟจะแสดงถึงคุณสมบัติของจุดต่อ ดังนี้ ความชันแสดงถึงความแข็งแกร่ง (J), ค่าสูงสุดของโมเมนต์ (M_u) แสดงถึงกำลังของจุดต่อ และอัตราส่วนระหว่างมุมหมุนที่โมเมนต์สูงสุด (ϕ_u) และที่มุมหมุนที่จุดวิบัติ (ϕ_f) หรือ (ϕ_f/ϕ_u) แสดงถึงความเหนียว



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมหมุน (ϕ) และ โมเมนต์ (M)

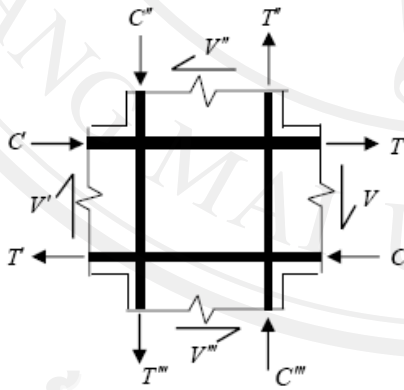
2.5 กลไกการรับแรงจุดต่อระหว่างคาน-เสาในโครงสร้างคอนกรีตชั้นเดียว

กรณีที่โครงข้อแข็งรับแรงแนวตั้งจะเกิดแรงภายในกระทำกับจุดต่อคาน – เสาดังในรูปที่ 2.17(ก) ซึ่งจะไม่เกิดแรงเฉือนขึ้นภายในจุดต่อหรือเกิดขึ้นน้อย ต่างกับการรับแรงแนวราบดังในรูป 2.17(ข) ซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนขึ้นภายในจุดต่อขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อต้องรับแรงแนวราบที่มีขนาดใหญ่เช่น แผ่นดินไหว แรงเฉือนที่เกิดขึ้นภายในจุดต่อเกิดจาก แรงและโมเมนต์ที่ส่งผ่านจาก เสาและคานทำให้เกิดแรงกระทำกับจุดต่อดังในรูปที่ 2.17(ค) จากผลของแรงดังกล่าวจะทำให้จุดต่อ คาน-เสาเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงดังในรูปที่ 2.17(ง)

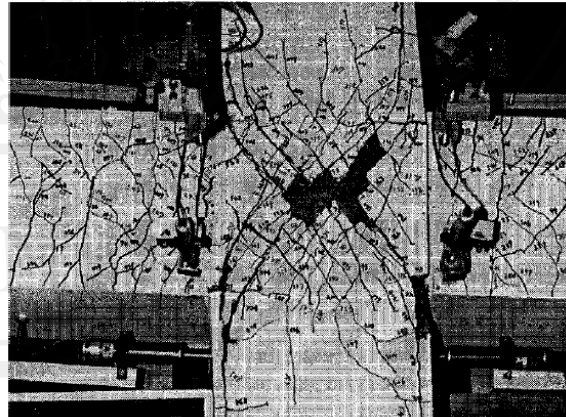


(ก) แรงภายในเสาและคานกรณีรับแรงแนวตั้ง

(ข) แรงภายในเสาและคานกรณีรับแรงแนวราบ



(ค) แรงที่กระทำกับจุดต่อกรณีรับแรงแนวราบ



(ง) รอยแตกร้าวในแนวทแยง

รูปที่ 2.17 แรงและ โมเมนต์ที่กระทำกับ โครงสร้างคาน – เสา

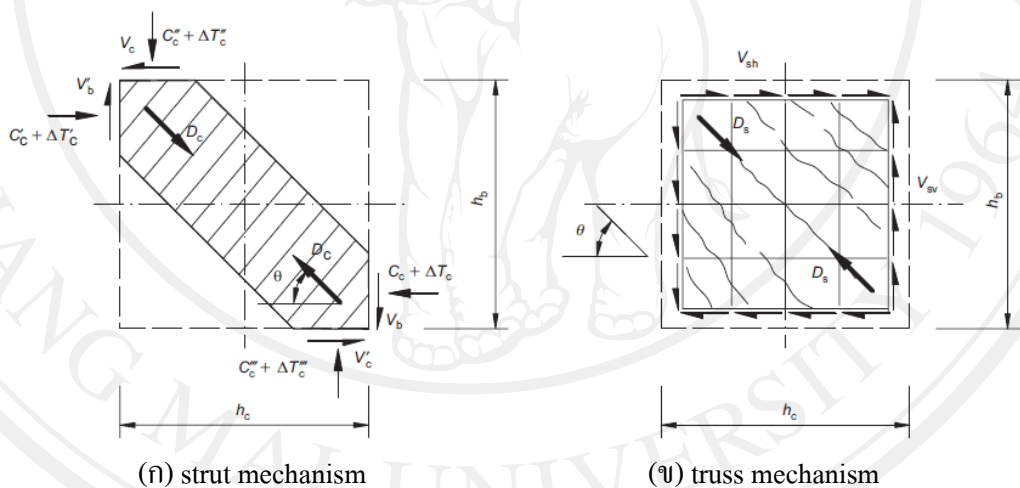
ทฤษฎีเกี่ยวกับกลไกการต้านทานแรงและ โมเมนต์ของจุดต่อคาน – เสาเมื่อจุดต่อรับแรง แนวราบอยู่ 3 ทฤษฎี คือ 1) Strut mechanism 2) Truss mechanism และ 3) Bond failure mechanism

ทฤษฎี strut mechanism และ truss mechanism เป็นทฤษฎีที่อธิบายการรับแรงเฉือนของจุดต่อ ส่วนทฤษฎี bond failure อธิบายการรับโมเมนต์ของจุดต่อ

ทฤษฎี strut mechanism มีสมมุติฐานว่าทิศทางลัพธ์ของแรงอัดจากคานและเสาที่ผ่านทางคอนกรีตนั้นอยู่ในแนวทแยงดังแสดงรูปที่ 2.18(ก)

ทฤษฎี truss mechanism มีสมมุติฐานอยู่ว่าบริเวณจุดต่อมีแรงกระทำในแนวตั้งและแนวราบเท่านั้น โดยแรงในแนวตั้งเกิดจากในเหล็กเสริมตามยาวของเสา ส่วนแรงในแนวราบเกิดจากแรงในเหล็กเสริมตามยาวของคานซึ่งทิศทางของแรงลัพธ์จะอยู่ในแนวทแยง ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 2.18(ข)

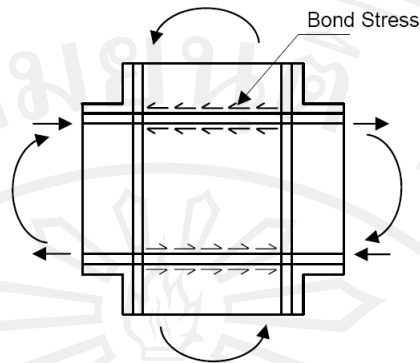
กำลังรับแรงเฉือนของจุดต่อนั้นอาศัยทั้งหลักการของstrut mechanism และ truss mechanism แต่เมื่อจุดต่อสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมแล้วกำลังของจุดต่อจะขึ้นกับ strut mechanism เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.18 กลไกการรับแรงเฉือนของจุดต่อคาน – เสา

(Au et al., 2002)

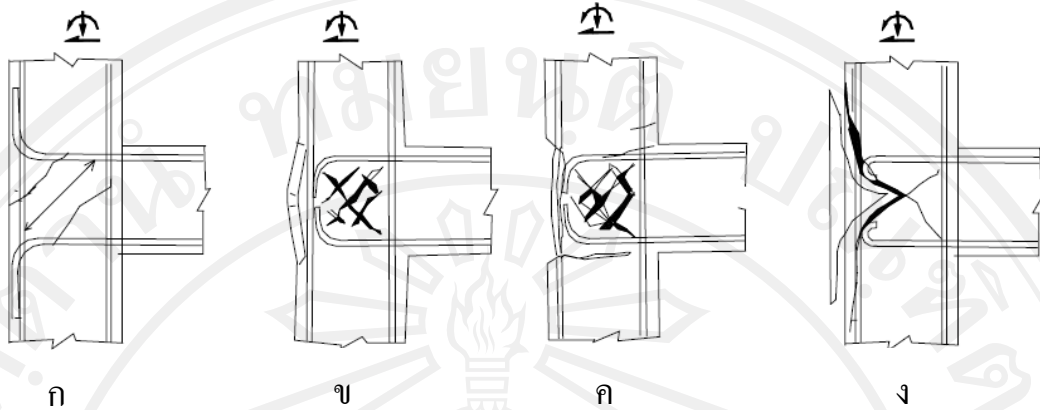
ทฤษฎี bond failure mechanism เมื่อโครงข้อแข็งรับแรงแนวราบจะเกิดแรงและโมเมนต์กระทำกับจุดตอดังในรูปที่ 2.17(ค) แรงอัดและแรงดึงในเหล็กเสริมจะทำให้เกิด bond stress ขึ้นดังแสดงรูปที่ 2.19 การเสียแรงยึดเหนี่ยวจะทำให้หน้าตัดเสียกำลังและ rigidity ในการต้าน โมเมนต์



รูปที่ 2.19 หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond stress) ที่เกิดกับเหล็กเสริมของคานภายในจุดต่อ

ภายใต้แรงจากแผ่นดินไหวกำลังยึดเหนี่ยว (bond strength) ของเหล็กเสริมคานกับคอนกรีตภายในจุดต่อจะลดลงหรือหายไป โดยเริ่มแรก truss mechanism ซึ่งต้องอาศัย bonding จะลดลงทำให้ strut mechanism ต้องเป็นตัวรับแรงเฉือนส่วนใหญ่ และหากเกิด bond failure ขึ้นกับเหล็กเสริมรับแรงดึงของคาน แล้วจะทำให้แรงดึงในเหล็กไม่สามารถส่งผ่านจุดต่อได้ จึงต้องส่งผ่านแรงดึงผ่านแรงอัดที่หน้าเสาด้านตรงข้ามแทน (ดูรูป 2.18(ก)) ส่งผลให้เกิดแรงอัดกับ strut คอนกรีตใน strut mechanism เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกับ strut คอนกรีตก็จะอ่อนแอลงเพราะแรงกระทำซ้ำๆ ของแผ่นดินไหวและ และยังมีความเค้นดึงในแนวตั้งฉากกับ strut ลดกำลังอัดของคอนกรีตลงอีกด้วย ทั้งสองสิ่งนี้เป็นสาเหตุให้เกิดการวิบัติของจุดต่อ

อย่างไรก็ตามกลไกการรับแรงของจุดต่อยังขึ้นกับรายละเอียดการเหล็กเสริมอีกส่วนหนึ่งด้วย เช่น รูปแบบการวิบัติที่แตกต่างกันของจุดต่อคาน – เสารูปตัว T ในการศึกษาของ Pampanin et al. (2002) ในรูปที่ 2.20(ก) เมื่อเกิดรอยร้าวทแยงแล้วจุดต่อไม่อาจส่งผ่านแรงเฉือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ไม่สามารถสร้าง strut mechanism ได้อย่างมีประสิทธิภาพ) และในรูปที่ 2.20(ง) การใช้เหล็กเสริมเส้นกลมผิวเรียบจะทำให้คอนกรีตหลุดออกเป็นลิ่ม เนื่องเสียการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตบริเวณจุดต่อ เมื่อเหล็กเสริมรับแรงอัดจะเกิดการลื่นไถลและดันคอนกรีตให้หลุดออก



รูปที่ 2.20 กลไกการการเกิดเสียหายที่ต่างกันของจุดต่อรูปตัว T (ก) เหล็กเสริมคานตัดออกจากจุดต่อ (ข) และ (ค) เหล็กเสริมคานตัดเข้าสู่บริเวณจุดต่อ และ (ง) มีการงอปลายเหล็กเสริมคาน (Pampanin et al., 2002)

2.6 ความเหนียว (Ductility)

ความเหนียว หมายถึง ความสามารถของโครงสร้างที่ยังสามารถรับแรงได้อยู่ถึงแม้จะมีการเสียรูปไปแล้ว ซึ่งการเสียรูปร่างนั้นอาจจะเป็น การเคลื่อนที่ ค่าการหมุน ค่าความโค้ง หรือค่าความเครียดก็ได้ โดยปกติแล้วจะสนใจค่าความเหนียวของโครงสร้างที่จุดเกิดการวิบัติโดยนิยามค่าความเหนียวคือ

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2.1)$$

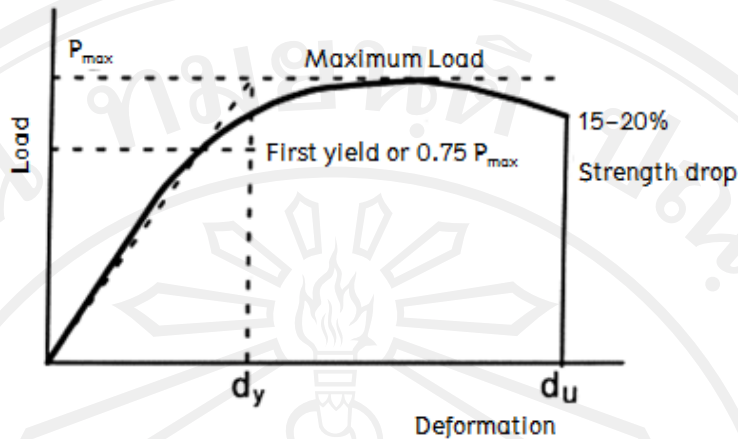
μ คือ ค่าความเหนียว

Δ_u คือ ระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่หัวเสาเมื่อแรงลดลงเหลือ 80 % ของแรงกระทำ

Δ_y คือ ระยะการเคลื่อนที่ทางด้านข้างที่หัวเสา ณ จุดคราก (yielding)

ตัวแปรสำคัญในการหาค่าความเหนียวนั้นคือค่า Δ_u ในอดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านได้เสนอการหา Δ_y ไว้หลายวิธีที่แตกต่างกันได้แก่

- การหาระยะการเคลื่อนที่ด้านข้าง ณ จุดครากจากเส้นสัมผัส ณ จุดเริ่มต้น (initial tangent) โดย Sheikh and Houry (1993) ซึ่งหาได้จากการลากเส้นตรงสัมผัสจุดเริ่มต้นไปจนถึงเส้นตรงที่ขนานกับแกนที่ลากจากจุดที่แรงกระทำด้านข้างสูงที่สุด

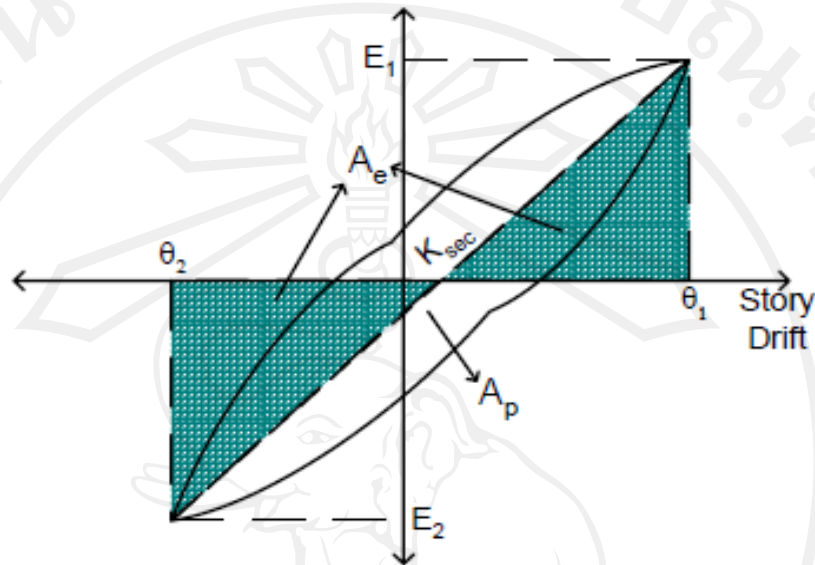


รูป 2.23 วิธีคำนวณค่าความเหนียวที่เสนอโดย Park (1989)

2.7 การสลายพลังงาน (Energy Dissipation)

เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงแผ่นดินไหวจะเกิดการโยกตัวจนเกิดความเสียหาย แต่เมื่อโครงสร้างเริ่มเกิดความเสียหายจนบางตำแหน่งอยู่ในภาวะไม่เชิงเส้นแล้วส่งผลให้พื้นที่ภายในเส้นกราฟวนรอบโดยรวม (hysteresis) มีพื้นที่มากขึ้น ซึ่งพื้นที่วงรอบที่เพิ่มขึ้นนี้เองที่เป็นส่วนช่วยในการสลายพลังงานที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหว เพราะหากพื้นที่ภายในวงรอบมีค่าน้อยแล้วนั้นแสดงให้เห็นว่าค่าแรงที่กระทำต่อโครงสร้างมีเท่าไรเมื่อโครงสร้างโยกตัวกลับก็จะคืนแรงทั้งหมดกลับแต่หากพื้นที่ภายในวงรอบมีมากขึ้นแล้วแสดงให้เห็นว่าเมื่อโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวแล้วจังหวะที่โครงสร้างโยกตัวกลับนั้นจะเห็นว่ามีแรงบางส่วนที่มีการสลายออกไปโดยดูได้จากแรงที่ใช้ขณะโยกโครงสร้างกลับที่จุดเดิม ค่าการสลายพลังงานจากตัวอย่างการทดสอบ มีวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวางอยู่ 2 วิธีคือ การคำนวณค่าอัตราส่วนการดูดซับพลังงานสัมพัทธ์ (relative energy dissipation ratio) จากวิธีการของ ACI T1.1-01(2001) และการสลายพลังงานโดยพิจารณาจากอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า (equivalent viscous damping ratio, ζ_{eq}) จากการศึกษาของ Chopra(1999) งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการประเมินค่าการสลายพลังงานจากการศึกษาของ Chopra(1999) ซึ่งการคำนวณอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า (ζ_{eq}) จะพิจารณาจากความสัมพันธ์ของเส้นกราฟวนรอบโดยรวม (hysteresis) จากการทดสอบ โดยการหาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ภายในเส้นกราฟวนรอบโดยรวม (hysteresis) (A_p) ซึ่งอยู่ในรูปการสลายพลังงานของโครงสร้างจากการทดสอบกับพลังงานความเครียดที่ได้จากเส้นยืดหยุ่นสมมติที่ใช้ในการพิจารณาค่า K_{sec} ดังแสดงในรูป 2.24 ในการคำนวณอัตราหน่วงหนืดเทียบเท่า (ζ_{eq}) ได้แสดงในสมการที่ 2.2

$$\zeta_{eq} = \frac{A_p}{2\pi A_e} \times 100 \quad (2.2)$$



รูป 2.24 การคำนวณค่าอัตราส่วนการหน่วงเทียบเท่า

(Ertas ,2006)

2.8 การเสื่อมถอยของค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness Degradation)

โครงสร้างใดก็ตามย่อมมีค่าความแข็งเกร็งเริ่มต้นอยู่ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำแบบวัฏจักร โดยในการทดสอบมีการทำให้โครงสร้างมีระยะโยกตามที่ต้องการซ้ำๆกัน ส่งผลให้ค่าความแข็งเกร็งเกิดการเสื่อมถอยเมื่อโครงสร้างมีระยะโยกมากขึ้น ค่าความแข็งเกร็งในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Secant stiffness, K_{sec} สำหรับการหาค่าความแข็งเกร็งหาได้จากความชันของเส้นกราฟระหว่างแรงในแนวราบกับค่าระยะโยกตัวที่ตำแหน่งไกลที่สุดในทิศทางบวกและลบของแต่ละระดับของระยะโยก หรือกล่าวได้ว่าเป็นค่าความแข็งเกร็งระหว่างค่าจุดยอดของวงทดสอบระยะโยกหนึ่งๆ (peak-to-peak stiffness) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 และเมื่อโครงสร้างมีระยะโยกเพิ่มมากขึ้นย่อมส่งผลให้ค่าความแข็งเกร็งเสื่อมถอยตามความเสียหายที่เกิดขึ้นเพิ่มมากขึ้น

2.9 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Drift ratio)

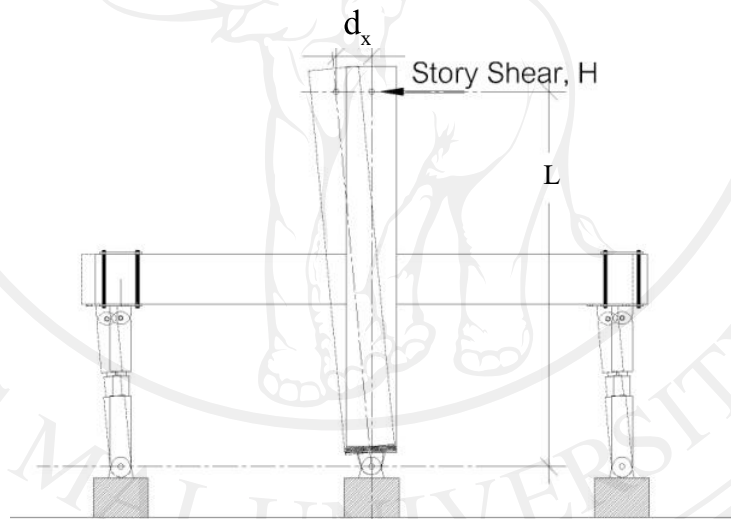
การโยกตัวสัมพัทธ์เป็นการวัดระยะการเสียดรูปที่ตำแหน่งต่างๆเทียบกับความสูงของโครงสร้างนั้นๆ ค่าอัตราส่วนการเสียดรูปสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะเคลื่อนที่ด้านข้างกับความสูงของโครงสร้างนั้น วิธีการวัดค่าต่างๆสามารถดูได้จากรูปที่ 2.25 และสมการที่ใช้ในการหาค่าอัตราส่วนการโยกตัวสัมพัทธ์ดูได้จากสมการที่ 2.3

$$\theta = \frac{d_x}{L} \quad (2.3)$$

โดย θ คือ การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift ratio)

d_x คือ ระยะเคลื่อนตัวในแนวราบที่หัวเสา, mm.

L คือ ความสูงระหว่างชั้นวัดจากกึ่งกลางของเสา, mm.



รูปที่ 2.25 การวัดอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น