บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

เมื่อโครงสร้างได้รับแผ่นดินไหวอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนที่ดิน (Ground motion) โครงสร้างจะเกิดการโยกตัวไปมาและมีความเร่งเกิดขึ้นที่ส่วนต่างๆของโครงสร้าง ดังนั้นผลตอบสนองของโครงสร้าง จึงแสดงอยู่ในรูปของ "ความเร่งตอบสนองเชิงสเปรคตัม" จากกฎของนิวตัน เมื่อมีมวลของโครงสร้างและความเร่ง ก็จะทำให้เกิดแรงที่กระทำทางด้านข้างของโครงสร้าง ค่าความเร่งสูงสุดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างขึ้นอยู่กับคาบการสั่นธรรมชาติของโครงสร้างและความหน่วง (Damping) มีงานวิจัยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งของโครงสร้างและความเร่งของการสั่นสะเทือนที่ผิวดิน จากนั้นทำการสรุปหลักการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวไว้ว่า ถ้าหากออกแบบโครงสร้างให้อยู่ในสภาวะอิลาสติกโดยไม่ยอมให้เหล็กเสริมครากหรือโครงสร้างเกิดความเสียหายใดๆ ภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหว ก็ต้องออกแบบให้โครงสร้างมีกำลังสูงพอที่จะต้านทานแรงแผ่นดินไหวนี้ได้ การออกแบบดังกล่าวถึงแม้ให้ความปลอดภัยแต่ก็ไม่เป็นการประหยัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากแรงแผ่นดินไหวสูงมากๆ ก็จะทำให้ขนาดของโครงสร้างมีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น อย่างไรก็ตามหากเราเพิ่มความเหนียวโดยยอมให้โครงสร้างเกิดความเสียหายไปบ้าง หรือยอมให้เหล็กเสริมบางตำแหน่งครากในระหว่างเกิดแผ่นดินไหว สามารถโยกตัวเกินพิกัดยืดหยุ่นของโครงสร้างก็จะทำให้สามารถสลายพลังงานของการสั่นไหวในระดับที่เหมาะสม และโครงสร้างต้องมีกำลังและสติฟเนสที่เพียงพอต่อการถ่ายแรงจากตำแหน่งที่กระทำไปยังโครงสร้างที่ต้านทานแรงนี้ได้

สำหรับข้อต่อคาน-เสาในอดีตนั้นมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาพฤติกรรมของข้อต่อคาน-เสาทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา, นิวซีแลนด์, และญี่ปุ่น ซึ่งในรายงานผลวิจัยเหล่านี้ได้ระบุถึงตัวแปรหลายอย่างที่มีความสำคัญและจะส่งผลต่อข้อต่อเมื่อได้รับแรงแผ่นดิน มีดังนี้

1) คุณสมบัติของวัสดุ กำลังรับแรงอัด (แรงดึง) ของคอนกรีตมีความสำคัญต่อกำลังรับแรงเฉือน ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนจะเพิ่มขึ้นไปก็ต่อเมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเช่นกัน
2) ผลกระทบการค้ำยันด้านข้างของคาน ถ้ามีระยะการค้ำยันด้านข้างของคานที่เพียงพอจะส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น
3) จำนวนของเหล็กเสริมตามขวางบริเวณข้อต่อ เหล็กเสริมตามขวางของเสามีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นซึ่งจะช่วยรักษาสภาพของข้อต่อให้สมบูรณ์และไม่เกิดความเสียหาย

4) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม ลักษณะและขนาดของเหล็กเสริมตามยาวจะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ตัวของข้อต่อ สติฟเนส และการสลายพลังงาน

5) แรงในแนวแกนของเสา จะมีความสำคัญทำให้ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงเฉือนของข้อต่อเสาคาน

เดิมการออกแบบในประเทศไทยจะคำนึงถึงการรับแรงในแนวดิ่งเท่านั้น และอาคารตึกสูงจะคำนึงถึงแรงลมด้วย ซึ่งวิศวกรออกแบบทั่วไปจะออกแบบให้โครงสร้างมีสเถียรภาพ ความปลอดภัย ควบคู่กับราคาประหยัด กล่าวอีกนัยหนึ่งคือโครงสร้างมีกำลังต้านทานโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนที่เกิดจากแรงดังกล่าวได้ และส่วนต่างๆของโครงสร้างมีความแข็งแรงพอในการรองรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย อีกทั้งราคาของโครงสร้างไม่ควรสูงเกินไปซึ่งต้องคุ้มค่าในการลงทุนการก่อสร้าง แต่การออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว โครงสร้างจะต้องประกอบด้วยระบบต้านทานแรงด้านข้าง และระบบรับแรงในแนวดิ่ง โดยจะสมมติว่าแรงแผ่นดินไหวสามารถเกิดขึ้นได้ในทุกทิศทางตามแนวราบ วิศวกรออกแบบต้องตรวจสอบแรงเหล่านี้และการเสียรูปที่เกิดในโครงสร้างให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้อีกด้วย ซึ่งมีพฤติกรรมของโครงสร้างจะแตกต่างกัน ดังนั้นหลักการของการออกแบบจึงแตกต่างกันด้วย วิศวกรผู้ออกแบบควรที่จะศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว หลักการและข้อกำหนดในการออกแบบเพื่อที่จะออกแบบให้รายละเอียดถูกต้อง

2.2 ข้อต่อคาน-เสา (Beam-Column Joint)

ข้อต่อคาน-เสา ในอาคาร ค.ส.ล. คือส่วนของโครงสร้างคานที่อยู่ในเสา หรือส่วนที่ตัดกันระหว่างเสา และคาน ซึ่งทำหน้าที่ถ่ายแรง และโมเมนต์จากปลายคานไปยังเสา ข้อต่อระหว่างคาน-เสา นั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ควรมีความแข็งแรง (Strength and Stiffness) และมีความเหนียว (Ductility) เพียงพอ ที่จะสลายพลังงานแผ่นดินไหวได้

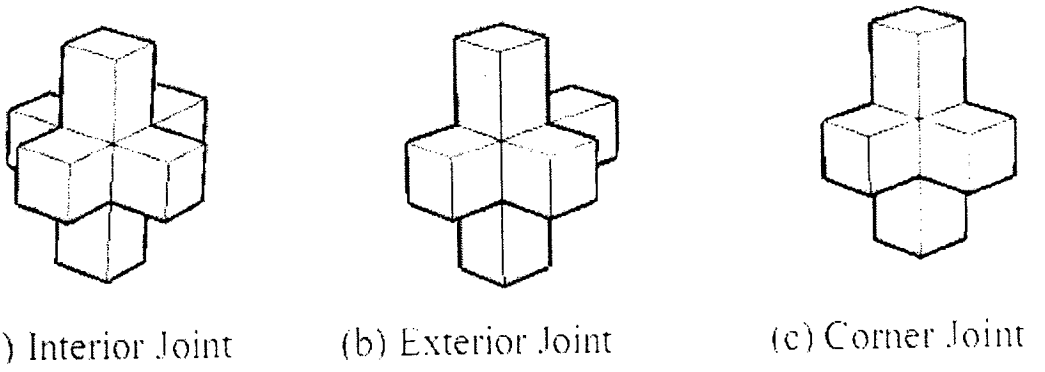
2.2.1 ประเภทของข้อต่อคาน-เสา

สำหรับข้อต่อคาน-เสา ของโครงสร้างอาคาร ค.ส.ล. นั้น ทางสถาบัน ACI Committee 352 [5] ได้จำแนกประเภทตามลักษณะรูปทรงของข้อต่อ (Joint Geometry) ดังนี้

1) Interior beam-column joint โครงสร้างของคานทั้ง 4 ด้าน อยู่ในโครงสร้างของเสาในแนวดิ่ง แสดงดังรูป 2.1(a)

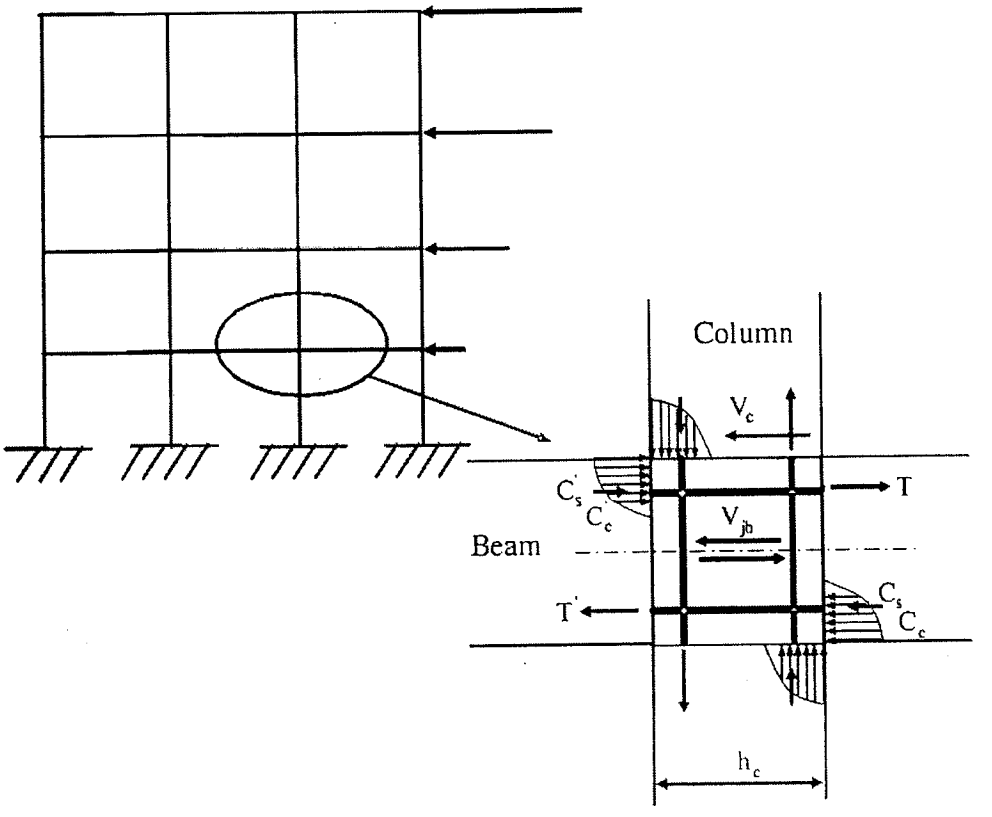
2) Exterior beam-column joint โครงสร้างของคาน 1 ด้านอยู่ในโครงสร้างของเสาในแนวดิ่ง และมีโครงสร้างของคานอีก 2 ด้าน ตั้งฉากกับข้อต่อ แสดงดังรูป 2.1(b)

3) Corner beam-column joint โครงสร้างของคานทั้ง 2 ด้าน อยู่ในโครงสร้างของเสาในแนวดิ่ง โดยคานทั้งสอง มีทิศทางตั้งฉากกัน แสดงดังรูป 2.1(c)



รูปที่ 2.1 ประเภทของข้อต่อคาน-เสา

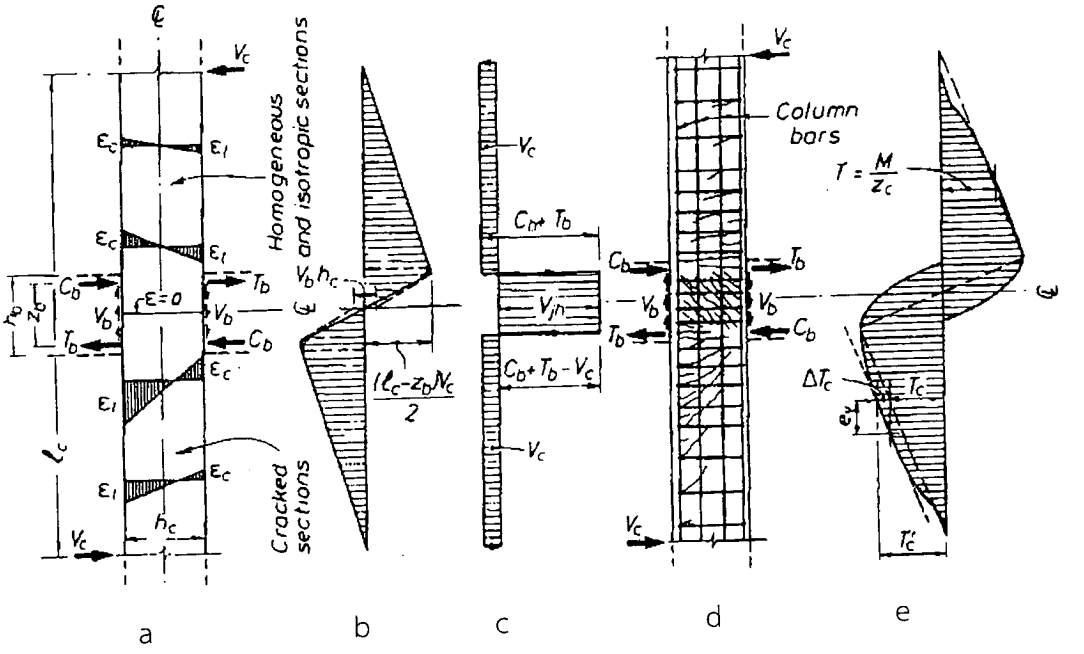
2.3 พฤติกรรมข้อต่อคาน-เสาเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมของข้อต่อคาน-เสา เมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

เมื่อมีแรงแผ่นดินไหว หรือแรงแนวราบ กระทำต่ออาคาร ค.ส.ล. อาคาร ข้อต่อคาน-เสา จะมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.2 ภายใต้ผลของแรงแผ่นดินไหวจะทำให้เกิดแรงเฉือนขนาดใหญ่กระทำภายในข้อต่อคาน-เสาแรงเฉือนนี้จะส่งผลให้การเกิดวิบัติที่มุมของข้อต่อและนำไปสู่การพังทลายจากแรงเฉือนหรือจากแรงยึดเหนี่ยวหรือทั้ง 2 อย่าง

2.3.1 สภาวะสมดุลของคาน-เสา



(a) แรงที่กระทำกับเสา (b) โมเมนต์ดัด (c) แรงเฉือน
(d) ลักษณะรอยแตก (e) การเปลี่ยนแปลงของแรงดึงตลอดความยาวของเสา

รูปที่ 2.3 ลักษณะของเสาและพฤติกรรมของข้อต่อ [20]

เนื่องจากข้อต่อเป็นส่วนหนึ่งของเสา แรงภายในของข้อต่อที่เกิดขึ้นจะเกิดภายในเสาเช่นกันรูปเป็น FBD ซึ่งเป็นแรงภายในต่างๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวจากรูปที่ 2.3(a) ที่ด้านล่างแรงที่กระทำกับเสาซึ่งเกิดจากผลของโมเมนต์ดัดของคานทำให้เกิดแรงดึง (T_b) และแรงอัด (C_b)ในเหล็กคานแล้วส่งผ่านมากระทำที่เสา กำหนดให้ $T_b = C_b$ และ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในฝั่งตรงข้ามกันของข้อต่อมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจากฟรีบอดี้ไดอะแกรมสามารถเขียนสมการแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเสาได้ดังนี้

$$V_c = \frac{2T_b z_b + V_b h_c}{l_c}$$

จากรูปเป็นกราฟแสดงโมเมนต์ดัด (BMD) และแรงเฉือน (SFD) ที่เกิดขึ้นภายใน จะได้เห็นได้ว่าในบริเวณข้อต่อที่จะมีปริมาณแรงเฉือนภายในมาก ดังนั้นจาก FBD, BMD และ SFD สามารถหาปริมาณแรงเฉือนในแนวราบในบริเวณข้อต่อได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V_{jh} = C_h + T_b - V_c = \left(\frac{l_c}{z_b} - 1\right)V_c - \frac{h_c}{z_b}V_b$$

ในส่วนครึ่งบนของรูปจะเห็นว่ามีรอยแตกในแนวราบของคอนกรีตซึ่งเกิดจากแรงดึงภายในเนื้อคอนกรีต (T_c) การวิเคราะห์ส่วนของรอยแตกที่เกิดจากแรงดึงนี้จะมีผลกับค่าโมเมนต์ดัดภายในเสา ถ้ามีค่าโมเมนต์น้อย รอยแตกจะน้อยลงหรือแทบไม่เกิดรอยแตกเลย ดังนั้นจะกำหนดให้ $T_c = \frac{M}{z_c}$ ซึ่ง z_c คือระยะที่วัดจากกึ่งกลางของเสาไปหาตำแหน่งที่ต้องการทราบ และในส่วนข้างล่างของรูปที่ 2.3(d) ผลของแรงเฉือน (V_c) จะทำให้เกิดรอยแตกในแนวเอียง รอยแตกนี้เกิดขึ้นจากแรงดึงภายในที่เพิ่มขึ้น (T_c) จากเดิม เพราะฉะนั้นแรงดึงทั้งหมดที่เกิดภายในเสาช่วงล่างจะมีค่าเท่ากับ $T_c + \Delta T_c$ ซึ่งก็เช่นเดียวกัน แรงดึงที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถหาได้จากการประยุกต์มาจากค่าโมเมนต์ดัด ซึ่งมีสมการดังนี้

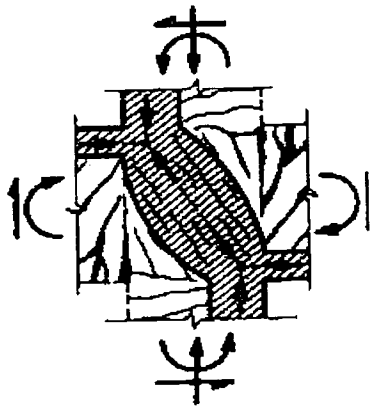
$$\Delta T_c \approx \frac{e_v}{z_c}V_c$$

โดยที่ e_v คือ Tension Shift และโดยปกติแล้วค่า $\frac{e_v}{z_c}$ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-1.0

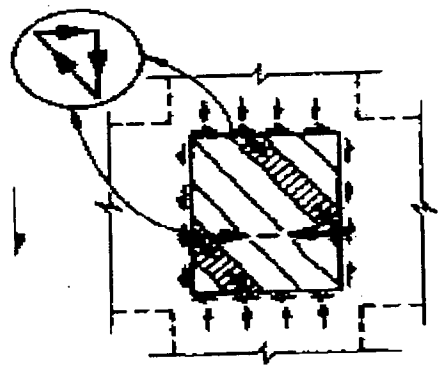
การเพิ่มขึ้นของแรงดึง (T_c) จะเป็นค่าตามอัตราส่วนของแรงเฉือนของคอนกรีต (V_c) ในบริเวณที่พิจารณา สำหรับผลของแรงดึงของเหล็กที่อยู่ภายในข้อต่อและจากโมเมนต์ดัดจะส่งผลให้ข้อต่อเกิดการขยายตัวในแนวตั้งที่ข้อต่อ หลังจากนั้นเกิดรอยแตกในแนวเอียงของเนื้อคอนกรีตบริเวณข้อต่อ และเกิดการขยายตัวในแนวราบของข้อต่อตามมา

2.3.2 กำลังรับแรงเฉือน (Shear Strength)

แรงภายในจะถ่ายแรงไปตามชิ้นส่วนเข้าสู่แกนข้อต่อที่แสดงในรูปที่ 2.4(a) ผลของแรงเฉือนที่กระทำที่มุมของข้อต่อคาน-เสาทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ แรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากแรงเฉือนนี้จะมีทิศทางเอียงทแยงมุมจะทำให้เกิดแรงอัดและแรงดึงกระทำที่มุมของข้อต่อเสาคานเมื่อแรงลัพธ์นี้เพิ่มขึ้นมากกว่ากำลังรับแรงอัดและแรงดึงของคอนกรีตจะส่งผลให้เกิดรอยแตกเป็นแนวเอียงที่บริเวณมุมของข้อต่อคาน-เสา



(a) Concrete Strut



(b) Diagonal Compression Field

รูปที่ 2.4 ลักษณะแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในข้อต่อคาน-เสา [20]

แรงภายในบางแรงของคอนกรีตจะถูกถ่ายแรงเข้าไปในลักษณะของ Diagonal Strut ส่วนแรงภายในอื่นๆจะถูกถ่ายแรงเข้าสู่ข้อต่อโดยเหล็กเสริมของคานและเสา นั่นก็คือแรงยึดเหนี่ยว ทำให้เกิดการถ่ายแรงในลักษณะเดียวกับชิ้นส่วนโครงถัก (truss)

การขัดขวางการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนโดยแรงดึงในทิศทางเอียงนี้ ต้องการการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนนี้จะช่วยรับแรงอัดในทิศทางเอียง (Diagonal Compression Field) ที่แสดงในรูปที่ 2.4(b) แสดงปริมาณของการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวราบต้องมากกว่าที่ต้องการจริง ซึ่งสำหรับการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนของเสานี้จะอยู่ในรูปของเหล็กปลอกหรือตะขอเหล็ก

เมื่อการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนที่ไม่เพียงพอ การเกิดการครากของเหล็กตะขอนี้ จะทำให้เกิดรอยแตกในแนวเอียง หลังจากนั้นเหล็กเสริมรับแรงเฉือนจะทำหน้าที่ถ่ายแรงดึงเท่านั้น ดังนั้นเหล็กที่ยึดตัวจน

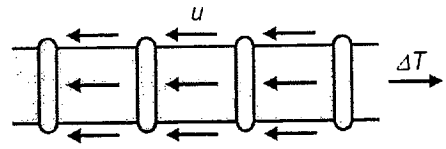
อยู่ในสภาวะอินอิลาสติกจะไม่สามารถหดตัวคืนกลับมาได้ ในระหว่างการเกิดแรงภายนอกมากระทำกับโครงสร้าง เหล็กปลอกจะสามารถช่วยต้านทานกับแรงเฉือนนี้เท่านั้น ถ้าการยืดตัวของเหล็กมีค่ามากกว่าแต่ก่อน จะทำให้สติฟเนสลดลงอย่างรุนแรงและระดับของแรงเฉือนก็ลดลง หลังจากเกิดแรงหรือการเปลี่ยนตำแหน่งสลับทิศทางทันทีทันใดจะทำให้การสลายพลังงานจากแรงแผ่นดินไหวลดลง

เมื่อเหล็กรับแรงเฉือนถึงจุดคราก ผิวหน้าของคอนกรีตที่ข้อต่อจะหลุดร่อนเนื่องจากแรงอัดในแนวเอียงซึ่งต้องพิจารณาสาเหตุของการวิบัตินี้เป็นอย่างแรก อย่างไรก็ตามการวิบัติในลักษณะนี้ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ควรที่จะออกแบบให้โครงสร้างมีกำลังมากกว่าความเป็นจริง (Over Strength)

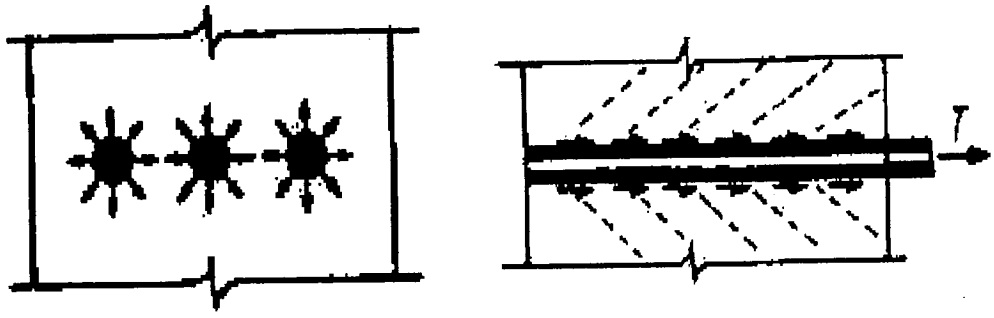
2.3.3 หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond Strength)

กลไกสำคัญของคอนกรีตเสริมเหล็กคือการที่คอนกรีตและเหล็กเสริมทำงานร่วมกันในการต้านทานแรงภายนอก นั่นคือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่เพียงพอจะทำให้เกิดการถ่ายแรงระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต การถ่ายแรงอาจจะเกิดจากการยึดตึงที่ผิวเหล็กหรือความขรุขระของเหล็กเสริมแบบข้ออ้อย แรงยึดเหนี่ยวถูกอธิบายในรูปของระยะฝัง (Development Length) ซึ่งเป็นความยาวของเหล็กเสริมที่ฝังปลายในคอนกรีต แรงยึดเหนี่ยวของข้อต่อคาน-เสาภายนอกนี้จะเกี่ยวข้องกับระยะฝังตัวและการงอปลายของเหล็ก ส่วนในข้อต่อคาน-เสาภายใน แรงยึดเหนี่ยวจะเกิดกับเหล็กจะฝังผ่านจากข้อต่อหนึ่งไปอีกข้อต่อหนึ่งและไปงอปลายที่ข้อต่อคาน-เสาภายนอกสำหรับโครงสร้างที่มีความเหนียวปานกลาง การลื่นไถลของเหล็กเสริมเนื่องจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวนี้จะสามารถเกิดขึ้นได้ แต่ผลจากการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นบริเวณข้อต่อคาน-เสาภายในจะไม่ส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังอย่างทันทีทันใด แต่ถ้าหากมีการงอปลายที่ข้อต่อคาน-เสาภายนอกไม่ดีก็จะส่งผลเสียหายต่อข้อต่อภายในตามมาทีหลัง

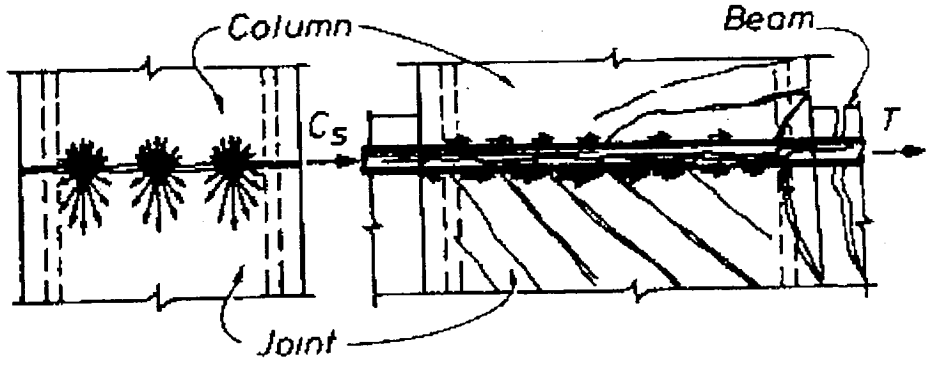
รูปแบบของการวิบัติอาจเกิดจากการที่เหล็กเสริมถูกดึงออกมาจากเนื้อคอนกรีต (Pullout Failure) แต่ที่พบบ่อยไปกว่านั้นคือแบบที่คอนกรีตโดยรอบแยกออกจากกัน (Splitting) อันนี้เนื่องมากจากการหดตัวที่มากเกินไปของเหล็กเสริมเนื่องจากการแยกตัวของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับความสามารถของคอนกรีตที่ต้านทานแรงดึงซึ่งขึ้นอยู่กับระยะหุ้มเหล็กเสริมและระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม รวมถึงการบีบรัดของเหล็กปลอกด้วย



รูปที่ 2.5 แรงเสียดทานและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเหล็กกับคอนกรีต [20]



รูปที่ 2.6 แรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเมื่อเหล็กลื่นไถลออกจากคอนกรีต [20]



รูปที่ 2.7 การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กงอปลายในข้อต่อคาน-เสาภายนอกและเหล็กที่ฝังผ่านข้อต่อคาน-เสาภายใน [20]

มาตรฐานข้อกำหนด ACI 318-99 [6] เมื่อเกิดแผ่นดินไหว อาคารโยกตัวไปมา ชิ้นส่วนโครงสร้างอาจแยกออกจากกัน และคอนกรีตอาจจะแตกหลุดออกจนเสียกำลังส่วนใหญ่จนเกิดการวิบัติพังทลาย การเพิ่มเหล็กปลอกรัดถี่ขึ้นในบริเวณบางส่วนของคาน เสา และข้อต่อ รวมทั้งการเพิ่มความยาวการฝังเหล็กเข้าข้อต่อให้เพียงพอ จะช่วยเพิ่มความเหนียวให้กับโครงสร้างอย่างมาก และช่วยลดความเสี่ยงจากการพังทลายที่กล่าวข้างต้น ดังนั้นการออกแบบอาคารรองรับแผ่นดินไหวโดยใช้รายละเอียดการเสริมเหล็กตามมาตรฐานทั่วไปอาจจะไม่เพียงพอ ACI (American Concrete Institute) จึงได้จัดทำรายละเอียดการเสริมเหล็กสำหรับการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวโดยเฉพาะขึ้น ใน AC1318M-02 ได้แบ่งระดับความเสี่ยงของแผ่นดินไหวเป็นพื้นที่ความเสี่ยงเล็กน้อย (Low Seismic Risk) พื้นที่ความเสี่ยงปานกลาง (Moderate Seismic Risk) และมีพื้นที่ความเสี่ยงสูง (High Seismic Risk) ซึ่งแต่ละพื้นที่จะมีความรุนแรงแตกต่างกันไปในที่นี้จะกล่าวถึงพื้นที่ความเสี่ยงปานกลาง (เทียบเคียงกับ UBC Seismic Zone 2) ซึ่งน่าจะเหมาะสมกับความเสี่ยงที่ไม่แน่นอนและมีการเพิ่มความเหนียวให้กับโครงอาคารในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย ส่วนรายละเอียดการเสริมเหล็กสำหรับโครงเฟรมในพื้นที่ความเสี่ยงปานกลางนี้ AC1318M-02 ให้ใช้ตามข้อกำหนดของโครงเฟรมโมเมนต์ดัดปานกลาง (Intermediate Moment Frame) โดยให้รายละเอียดแนวทางการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 2.8 ไว้ดังนี้

1) รายละเอียดเหล็กเสริมในเสา

1.1) ที่ปลายบนล่างของเสาในช่วง L_o เหล็กปลอกรัดรอบต้องมีระยะห่างทุกระยะ S_o โดยที่ S_o มีระยะไม่เกินค่าที่น้อยที่สุดของค่าต่อไปนี้

(a) 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กยืนที่เล็กที่สุด

(b) 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก

(c) ครึ่งหนึ่งของด้านแคบของเสา

(d) 300 มิลลิเมตร

สำหรับความยาว L_o ต้องไม่น้อยกว่าค่าที่มากที่สุดของค่าต่อไปนี้

(e) 1/6 ของความสูงเสาจากพื้นถึงท้องคาน (Clear Height)

(f) ด้านที่กว้างที่สุดของเสา

(g) 450 มิลลิเมตร

1.2) เหล็กปลอกอันแรกต้องห่างจากขอบคานไม่เกินครึ่งหนึ่งของ

1.3) นอกช่วง L_o เหล็กปลอกต้องมีระยะห่างทุกๆระยะ S_1 โดย S_1 มีระยะไม่เกินค่าที่น้อยที่สุดของค่าต่อไปนี้

(h) 16 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก

(j) ด้านแคบของเสา

(k) 600 มิลลิเมตร

ในกรณีที่ต้องใช้เหล็กปลอกรับแรงเฉือนระยะ S_1 ต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิผลของหน้าตัดเสา

1.4) ระยะห่างของเหล็กปลอกช่วงข้อต่อต้องเป็น 2 เท่าของ S_o

1.5) การต่อทาบเหล็กยืน ยอมให้ต่อทาบในช่วงกึ่งกลาง (Center Half) ของความยาวเสา โดยมีเหล็กปลอกรัดทุกระยะห่างไม่เกินค่าต่อไปนี้

(j) 1/4 ของความกว้างน้อยที่สุดของเสา

(m) 6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กยืน

(n) S_x ตามสมการข้างล่างนี้

$$S = 100 + \frac{350 - h_x}{3}$$

เมื่อ h_x เท่ากับระยะแนวนอนที่มากที่สุดของเหล็กยืนของทุกหน้าตัดเสาที่ถูกยึดเข้ามุมหรือของอของเหล็กปลอกหรือเหล็กปลอกรัดขวางใดๆ หน่วยเป็นมิลลิเมตร โดยที่ h_x ไม่ควรมากกว่า 350 มิลลิเมตร โดยค่าของ S ควรไม่เกิน 150 มิลลิเมตร และไม่จำเป็นต้องน้อยกว่า 100 มิลลิเมตร

2) รายละเอียดเหล็กเสริมในคาน

2.1) ที่ปลายทั้งสองข้างของคานในช่วงความยาว 2 เท่า ของความลึกคาน (h_x) วัดจากขอบเสาเข้าสู่กลางคาน เหล็กปลอกรัดรอบอันแรกต้องมีระยะห่างไม่เกิน 50 มิลลิเมตรจากขอบเสา และปลอกถัดไปต้องมีระยะห่างทุกๆระยะ S_2 โดยที่ S_2 ระยะไม่เกินค่าที่น้อยที่สุดของค่าต่อไปนี้

(a) 1/4 ของความลึกประสิทธิผลของคาน

(b) 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมทางยาวที่เล็กที่สุด

(c) 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก

(d) 300 มิลลิเมตร

2.2) นอกเหนือจากข้อ 2.1 ระยะห่างของเหล็กปลอก (S_3) ต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของความลึกประสิทธิผลของคานตลอดความยาวคาน

2.3) การต่อทาบเหล็กเสริมทางยาวจะต้องพับเหล็กปลอกช่วงทาบเหล็ก โดยที่ระยะเหล็กปลอกห่างกันไม่เกิน 1/4 ของความลึกประสิทธิผลของคานหรือ 100 มิลลิเมตร สำหรับตำแหน่งของเหล็ก ไม่ควรทาบเหล็กในบริเวณดังต่อไปนี้

(e) ภายในรอยต่อเสา-คาน

(f) ภายในระยะ 2 เท่าของความลึกคานจากขอบจุดต่อเสา-คาน

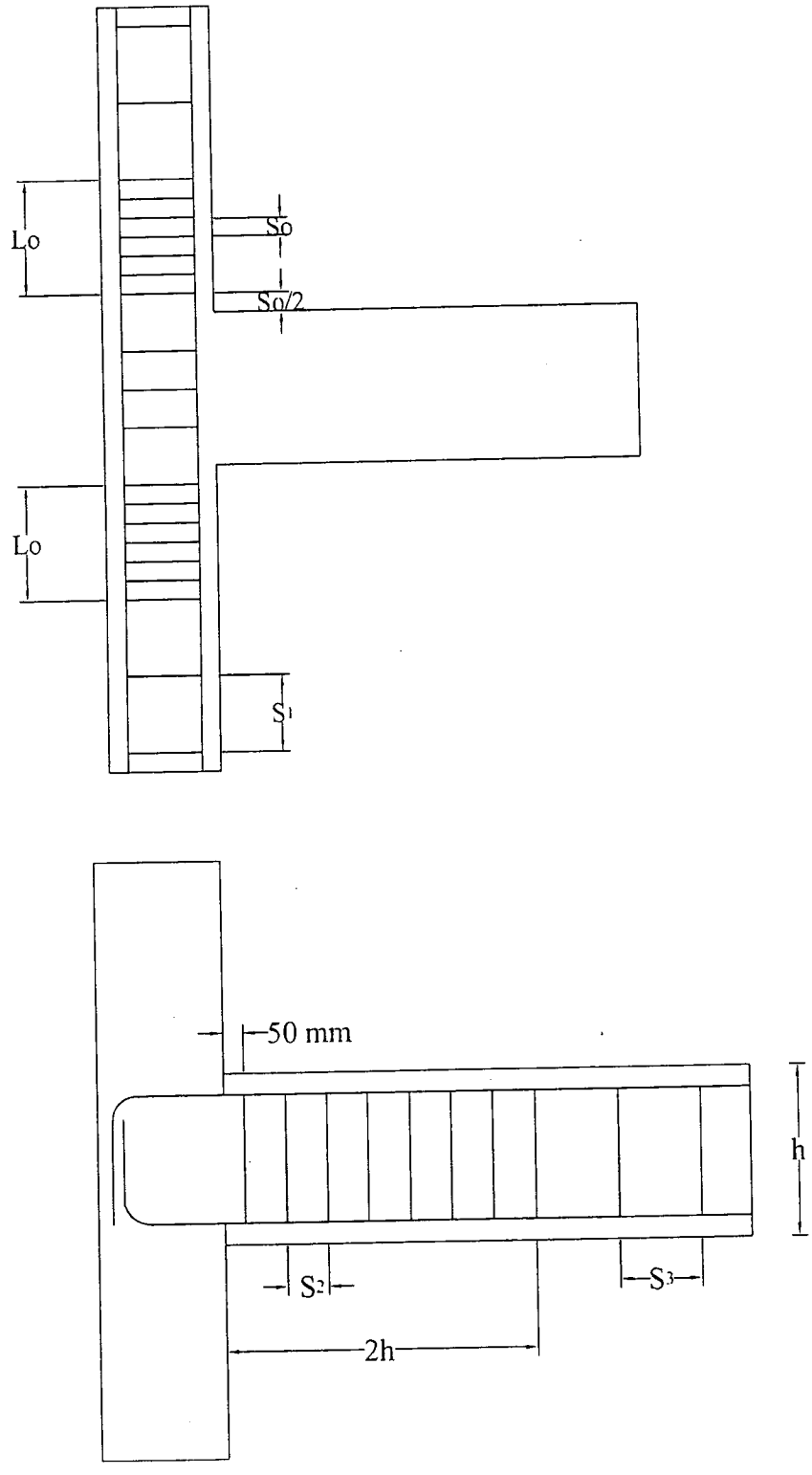
(g) ตำแหน่งที่การวิเคราะห์บ่งชี้ว่าจะเกิดการคลากจากการดัด (Flexural Yielding) หรือข้อหมุนพลาสติก (Plastic Hinging) จากการโยกตัวทางข้างของโครงเฟรมจนเป็น Inelastic

3) จุดต่อชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ

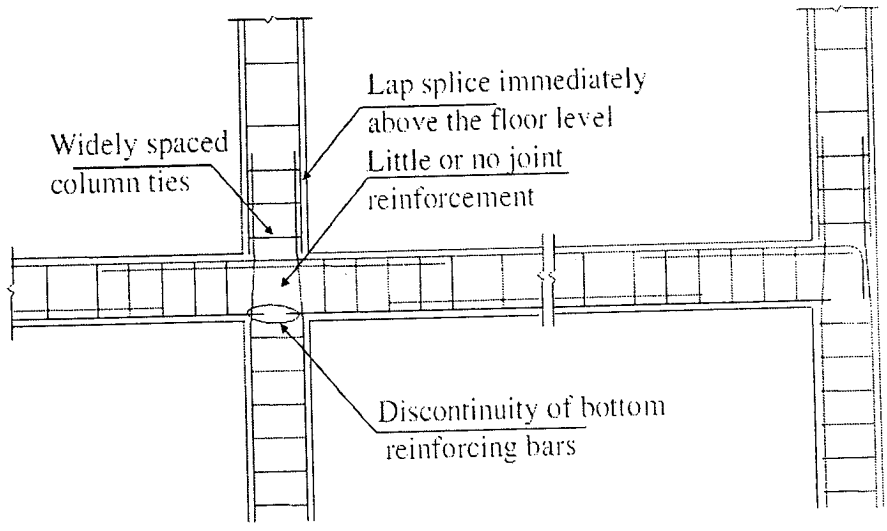
ภายในจุดต่อจะต้องมีการฝังเหล็กเสริมจากชิ้นส่วนโครงสร้างเข้าจุดต่ออย่างเพียงพอ ไม่ครูดหลุดหรือแยกออกเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและจะต้องมีการพันเหล็กปลอกรัดเนื้อคอนกรีต (Confinement) อย่างเพียงพอเพื่อไม่ให้คอนกรีตแตกแยกจนสูญเสียกำลังส่วนใหญ่และเหล็กเส้นเสริมสูญเสียการยึดเหนี่ยว (Bonding)

มาตรฐานข้อกำหนด ACI 352-1985 [5] เมื่อไม่คำนึงถึงแรงจากแผ่นดินไหว และอ้างอิงตามมาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) และวิธีกำลัง (USD) ของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย การให้รายละเอียดเหล็กเสริมโดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- ไม่มีเหล็กทางขวาง (Transverse reinforcement)ในข้อต่อคาน-เสา
- มีการทาบเหล็กยืนในเสาที่ระดับเหนือพื้นเล็กน้อย โดยมีระยะทาบตามมาตรฐาน
- เหล็กปลอกในเสามีระยะเรียงห่างกันมาก ส่วนมากใส่ตามจำนวนเหล็กปลอกขั้นต่ำในมาตรฐาน
- มีการต่อทาบเหล็กล่างในคาน ที่ตำแหน่งข้อต่อคาน-เสา



รูปที่ 2.8 รายละเอียดการเสริมเหล็กในเสา และ คาน คสล. ตามมาตรฐานข้อกำหนด ACI 318-99



รูปที่ 2.9 รายละเอียดของการเสริมเหล็กทั่วไป ที่ก่อสร้างในประเทศไทย [3]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตการศึกษาโครงสร้าง คาน-เสา-พื้นสำเร็จรูปมีน้อยมาก ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมข้อต่อคาน-เสา หรือไม่ก็เป็นการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้าง คาน-เสา-พื้นคอนกรีตอัดแรง อย่างไรก็ตาม การศึกษาเหล่านี้ ก็เป็นแนวทางที่สามารถนำมาเป็นพื้นฐานของการศึกษานี้ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงการศึกษาเหล่านั้นดังนี้

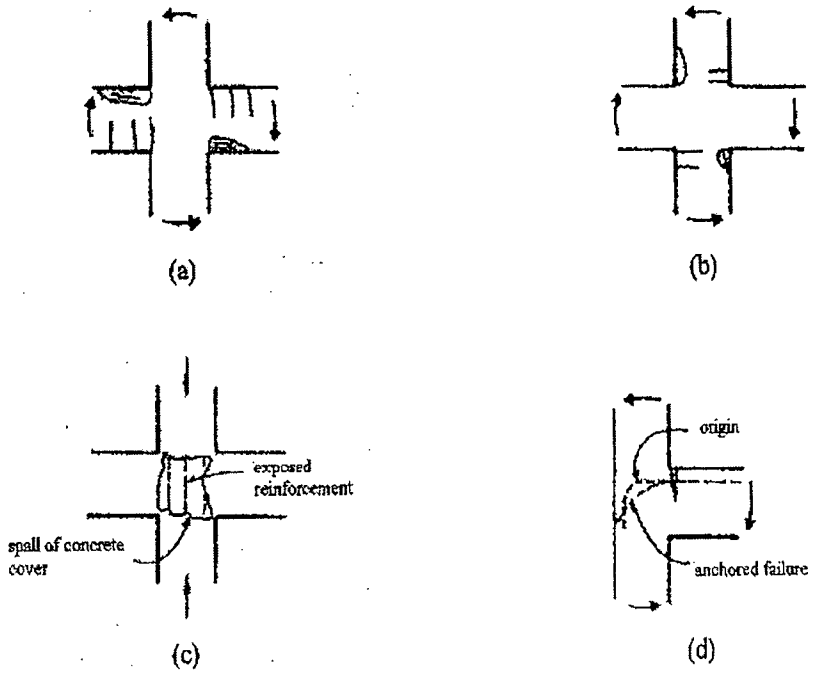
Ehsani and Wight (1985) [10] ได้เสนอข้อมูลของคาน-เสาภายนอกซึ่งมี 6 ส่วนย่อยที่ได้รับการทดสอบ ในการทดสอบนี้พยายามจะหลีกเลี่ยงการสร้างแบบ Plastic Hinges โดยที่อัตราส่วนความแข็งแรงดัดไม่ควรน้อยกว่า 1.4 และแรงเฉือนภายนอกสูงสุดที่เชื่อมต่อกันของคานกับเสาจะต้องไม่เกิน $12\sqrt{f_c'}$ (psi) เพื่อลดความเสียหายที่มากเกินไป เช่น การลื่นไถลของเสาและคานเกิดการเคลื่อนตัวออกจากเสา พบว่าในกรณีที่มีอัตราส่วนความแข็งแรงดัดที่ข้อต่อเนื่องจากแรงเฉือนหรือการงอปลายของเหล็กเสริมมีความสำคัญมากกว่าที่จะยับยั้งไม่ให้เกินค่าแนะนำ (1.4) โดยปริมาณของเหล็กเสริมตามขวางตรงข้อต่อจะทำให้มีความปลอกภัยลดลง

Hakuto et al. (2000) [12] ทำการทดสอบจำลองแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่อข้อต่อคาน-เสาภายนอกและภายในจะเป็นข้อต่อคาน-เสาที่ใส่รายละเอียดต่ำกว่ามาตรฐานของโครงสร้างที่ก่อสร้างก่อนปี ค.ศ.1970 ซึ่งข้อต่อคาน-เสาภายนอกจะมีการเสริมเหล็กตามขวางภายในและมุมของข้อต่อน้อยมาก สำหรับการใส่รายละเอียดในชิ้นงานนั้น ตัวอย่างแรกจะมีเหล็กบนของคานจะงอปลายลงและเหล็กล่างของคานจะงอปลายขึ้นแล้วฝังเข้ามาภายในข้อต่อ ส่วนในตัวอย่างอื่นๆจะมีเพียงเหล็กบนของคานที่งอ

ปลายเท่านั้นซึ่งจะมีลักษณะเดียวกับที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป งานวิจัยนี้จะอธิบายว่าการงอปลายของเหล็กคานที่ใช้อยู่ในปัจจุบันว่าช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของข้อต่อคาน-เสาได้

Meinheit และ Jirsa [15] ได้ศึกษารูปแบบการวิบัติของข้อต่อคาน-เสา โดยมีการจำแนกรูปแบบของการวิบัติดังนี้

a) Beam hinging failure เกิด Plastic hinge ที่ปลายคาน เนื่องจากคานรับแรงกระทำไม่ไหว ทำให้เกิดรอยร้าวบริเวณรอบๆคาน โดยคานจะพังก่อน ข้อต่อ และเสา การวิบัติแบบนี้ก่อให้เกิดความเสียหายไม่มากนัก
b) Column hinging failure failure เกิด Plastic hinge ที่ปลายเสา เนื่องจากเสารับแรงกระทำไม่ไหว ทำให้เกิดรอยร้าวบริเวณรอบๆเสา โดยเสาจะเกิดการพังก่อน การวิบัติแบบนี้ก่อให้เกิดอันตรายอย่างมาก เพราะเมื่อเสาเสียหายทำให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Side sway) ทำให้โครงสร้างทั้งหมดพังทลาย
c) Joint shear failure เกิดขึ้นเนื่องจากกำลังรับแรงของข้อต่อไม่เพียงพอ เกิดรอยร้าวที่ข้อต่อ ทำให้คอนกรีตที่ผิวหลุดร่อนออกจากข้อต่อ ส่งผลให้เหล็กเสริมในเสาเกิดการดุ้ง (Buckle) ทำให้เสาพังลงมา การวิบัติแบบนี้อันตรายมาก
d) Anchorage failure การวิบัตินี้เกิดขึ้นเฉพาะ Exterior Joint เท่านั้น เกิดจากระยะงอปลาย (Anchorage length) ไม่เพียงพอ ทำให้เหล็กเสริมในคานเกิดการรูด ส่งผลให้คานไม่สามารถรับแรงได้ตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 2.10 การวิบัติของข้อต่อ [15]

Pantazapoulou and Bonacci (1992) [17] ตรวจสอบชิ้นส่วนของข้อต่อคาน-เสาในแรงตามขวางที่ทำกับโครงข้อแข็ง โดยได้สร้างและกำหนดความสมดุลความเค้นและความเครียดจนเป็นที่ยอมรับแสดงให้เห็นว่าแรงเฉือนของชิ้นส่วนขึ้นอยู่กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และได้เพิ่มการยึดเหนี่ยวจากการวิบัติให้ข้อต่อมีปริมาตรจำกัดโดยส่วนใหญ่ก็เป็นแนวทแยงในแนวนอน หรือจุดครากของแยงตั้งโดยการเสริมแรงของจุดคราก

Pantazapoulou and Bonacci (1994) [18] ได้ทำการศึกษากลไกการวิบัติของข้อต่อเสาคานเมื่อได้รับแรงด้านข้าง จากทฤษฎีในสภาวะสมดุลของความเค้นและความเครียดแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงเฉือนของข้อต่อจะขึ้นอยู่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ผลงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่ากำลังรับแรงเฉือนจะลดลงเมื่อมีแรงในแนวแกนมากระทำมากขึ้น , การสูญเสียแรงยึดเหนี่ยว และความสามารถในการถ่ายแรงของข้อต่อจะถูกจำกัดลงโดยเกิดจากการ crusting ตามแนวเส้นทแยงมุมของข้อต่อซึ่งการ crusting นี้จะเกิดเมื่อเหล็กลูกตั้งเกิดการครากหลังจากเหล็กงอปลายครากนั่นเอง

Paulay and Scarpas (1981) [19] ได้ทำการวิจัยศึกษาพฤติกรรมข้อต่อคาน-เสาภายนอก ซึ่งได้สร้างชิ้นงานขึ้นมา 3 ตัวอย่าง ผลจากการทดลองสรุปได้ว่าเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวราบจะสามารถช่วยต้านทานแรงเฉือนได้อย่างมาก ซึ่งแต่ละตัวอย่างมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนที่แตกต่างกัน แต่จะมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวตั้งเท่านั้นที่เหมือนกัน ขณะที่ทำการทดลองพบว่าเมื่อแรงในแนวแกนลดลงจาก $0.15 f_c' A_g - 0.075 f_c' A_g$ ซึ่งเกิดจากการที่ Stiffness , Strength , การสลายพลังงานลดลงนั่นเอง

Uzumeri (1997) [21] ได้ทำการสร้างตัวอย่างชิ้นงานที่แตกต่างกัน 8 ตัวอย่าง โดยที่ 3 ตัวอย่างเป็นข้อต่อเสาคานภายนอกภายใต้แรงคงที่ตามแนวแกน เท่ากับ $0.42 f_c' A_g$ เรียกว่า การวิบัติแบบ Concrete Struts ในบริเวณข้อต่อ โดยที่ทั้ง 3 ตัวอย่างนี้ไม่ได้เสริมเหล็กตรงบริเวณข้อต่อ และไม่ได้เหล็กเสริมตามขวางในคานจาก 2 ตัวอย่างในนี้ได้มีเสริมเหล็กที่คานโดยงอปลายฝังเข้าไปในข้อต่อ ทั้ง 3 กรณีนี้ ในขณะที่คานยังคงสภาพสมบูรณ์จนกระทั่งข้อต่อเกิดความเสียหายอย่างรวดเร็วซึ่งจากเกิดจากการเสียรูป และแรงในแนวแกนจะลดลงเมื่อเกิดการสูญเสียการยึดเหนี่ยว เนื่องจากเกิดการเสียรูปที่เพิ่มมากขึ้นในเนื้อคอนกรีต เรียกว่า Splitting ซึ่งจะเกิดที่เหล็กเสริมในเสาที่ผูกติดกับเหล็กงอปลายในคาน จากทฤษฎีที่ดีที่สุดของงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า ข้อต่อจะไม่เสียรูปก็ต่อเมื่อเหล็กงอปลายยังคงมีสภาพสมบูรณ์อยู่ดีภายใต้Cyclic loading

Chris P. Pantelides (2002) ทำการศึกษาโดยเน้นประเมินผลการสั่นสะเทือนของแรงแผ่นดินไหวที่ส่งผลต่อข้อต่อคาน-เสาที่ก่อสร้างมานานแล้ว ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่มีความเหนียวและการใส่รายละเอียดของข้อต่อคาน-เสาที่แตกต่างกัน 3 โครงสร้างตามมาตรฐาน ACI 1963 แต่ยังไม่ใช่การออกแบบที่ดีสำหรับโครงสร้างที่ต้องรับแรงแผ่นดินไหวเหมือนกับมาตรฐาน ACI 352 (1991) ในการทดลองนั้นทำการสร้างตัวอย่าง 6 ตัวอย่าง โดยที่เหล็กบนของคานของทั้ง 6 ตัวอย่างจะงอปลาย 180°

ฝังเข้าไปในบริเวณข้อต่อ ส่วนเหล็กล่างของคานมี 2 ตัวอย่างที่ไม่งอปลายและฝังเหล็กเข้าไปในข้อต่อเพียงเล็กน้อยอีก 2 ตัวอย่างจะไม่งอปลายเช่นกันแต่จะฝังเหล็กเข้าไปลึกถึงขอบข้อต่อ และ 2 ตัวอย่างสุดท้ายจะฝังเหล็กเข้าไปลึกสุดเช่นกันและงอปลาย 180° ด้วย การใส่รายละเอียดของอาคารทั่วไปที่สร้างขึ้นก่อนปี ค.ศ.1970ค่อนข้างต่ำกว่ามาตรฐานกว่าในปัจจุบันมาก ผลการทดลองนี้ตัวอย่างจะเกิดการวิบัติแบบ bond slip และการวิบัติแบบ Shear ในการวิบัติแบบ bond slip นั้นเริ่มแรกเหล็กเสริมเกิดการคราก หลังจากนั้นจะเกิดการพัฒนาของชิ้นส่วน bond slip ทำให้เกิดรอยแตกที่ข้อต่อ แล้วคอนกรีตที่มุมข้อต่อจะเกิดการหลุดร่อนเนื่องจากเหล็กลื่นไถลออก สุดท้ายชิ้นส่วนจะสูญเสียความสามารถในการรับแรง ส่วนการวิบัติแบบ Shear เมื่อเหล็กเสริมเกิดการครากจะเกิดการแตกร้าวที่ข้อต่อ จากนั้นเนื้อคอนกรีตที่แกนข้อต่อจะหลุดร่อน สุดท้ายแล้วชิ้นส่วนจะสูญเสียความสามารถในการรับแรงงานวิจัยนี้ได้ให้ข้อเสนอแนะในการออกแบบใหม่ของข้อต่อคาน-เสาภายนอก โดยต้องคำนึงถึง การวิบัติแบบ bond slip และการวิบัติแบบ Shear ด้วย

Lui , Conhg (2006) ศึกษาพฤติกรรมของข้อต่อคาน-เสาภายในที่ถูกสร้างด้วยวัสดุที่ให้กำลังสูง โดยทำการสร้างชิ้นงานข้อต่อคาน-เสาและพื้นที่ใช้วัสดุที่ให้กำลังปกติและให้กำลังสูง 4 ตัวอย่าง แล้วทดสอบภายใต้ cyclic loading สำหรับตัวอย่าง 3 ตัวอย่างใช้วัสดุที่ให้กำลังสูงซึ่งประกอบด้วย คอนกรีตกำลังสูง $(f_c' = 1200\ psi)$ เหล็กเสริมกำลังรับแรงดึงสูง และลวดเชื่อมกำลังสูง ส่วนอีกตัวอย่างเป็นชิ้นงานที่ใช้วัสดุที่ให้กำลังปกติซึ่งมีลักษณะเดียวกับงานวิจัยที่เคยทำไปในประเทศสหรัฐอเมริกา นิวซีแลนด์ ญี่ปุ่นและจีน ตัวอย่างทั้งหมดนี้ถูกออกแบบเพื่ออธิบายอิทธิพลของวัสดุซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของข้อต่อเสาคาน

อานนท์ วงษ์แก้ว และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนอิเลเมนต์ โดยใช้โปรแกรมไฟไนอิเลเมนต์ ANSYS สร้างแบบจำลองไฟไนอิเลเมนต์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่หล่อในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา และทำการวิเคราะห์แบบจำลอง เทียบผลการรับน้ำหนัก ค่าการแอ่นตัว และลักษณะการพังของแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองไฟไนอิเลเมนต์ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องในระดับที่ดีมาก สามารถทำนายค่าโมเมนต์แตกร้าว ค่าโมเมนต์ที่สภาวะเหล็กเสริมเริ่มคราก และค่าโมเมนต์ที่จุดสูงสุดได้ใกล้เคียงผลการทดสอบ โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 15 เปอร์เซนต์ นอกจากนี้แบบจำลองไฟไนอิเลเมนต์ยังแสดงลักษณะการพังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้แม่นยำใกล้เคียงกับผลการทดสอบอีกด้วย