

การควบคุมการแตกร้าวและความถาวร ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก Cracking Control and Durability of Reinforced Concrete Structures

คำนำ

คอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างมีความเปราะ ไม่สามารถรองรับแรงดึงได้ดีด้วยตัวเอง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใส่วัสดุอื่นเข้ามาช่วยร่วมด้วยในทีเดียวกันเพื่อที่จะจรรโลงความสามารถที่ขาดไปนั้นให้สมบูรณ์ขึ้น การนำเอาเหล็กเสริมที่มีคุณสมบัติที่ดียิ่งในทางต้านทานแรงดึงเข้ามาเสริมในตำแหน่งที่เอื้ออำนวยต่อการรับแรงดึง จะทำให้โครงสร้างอาคารนั้น ๆ มีศักยภาพเพิ่มขึ้น สามารถที่จะต้านทานแรงดึงและไม่เมื่อยล้าได้ดีขึ้น

เมื่อมีแรงมากระทำบนคานหรือเสาของโครงสร้างโดยทั่วไปแล้ว แม้จะมีเหล็กเสริมเข้ามาช่วยในคอนกรีตแล้วก็ดี โครงสร้างรวมที่เรียกว่า “คอนกรีตเสริมเหล็ก” นั้นจะยังคงมีการแตกร้าวเกิดขึ้นอยู่ดี ปรากฏการณ์เช่นนี้มีได้หมายความว่า โครงสร้างนั้นกำลังจะวิบัติ แต่ทว่าในข้อเท็จจริงแล้วแสดงว่าวัสดุทั้งสองกำลังทำงานผสมกันอยู่ตามธรรมชาตินั่นเอง อีกประการหนึ่งการแตกร้าวที่มองเห็นได้หรืออาจมองไม่เห็นได้โดยง่ายได้โดยตาเปล่า นั้นสามารถจะถูกควบคุมให้อยู่ในวงจำกัด โดยที่ไม่ลดทอนอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้นแต่อย่างใดแล้ว ก็จะเป็นการบรรลุถึงเป้าหมายของการควบคุมอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้นได้เป็นอย่างดี

1. ต้นเหตุของการแตกร้าวในคอนกรีตที่สำคัญ

1.1 แรงดึง (tension) คือแรงที่กระทำให้วัสดุยืดออกหรือขาดออกจากกัน เป็นการต้านความพยายามที่จะทำให้วัสดุนั้นแผ่ยืดออก ยาวออก หรือขาดจากกัน

แรงดึงในมโนคติของสถาปนิก

หากพิจารณาวัสดุเหนียวยาวเส้นหนึ่งถูกกระทำโดยแรงดึง สัดส่วนย่อยของแรงดึง ณ ขณะนั้นต่อพื้นที่หน้าตัดที่รับอยู่มีค่าเป็นตัวเลขและเราให้ชื่อว่า หน่วยความเค้น ดึง (tensile stress) ส่วนหน่วยความยาว (unit length) ที่ยืดตัวออกเพราะแรงดึงนี้เรียกว่า หน่วยความเครียดจากการดึง (tensile strain) ยกตัวอย่างเช่น ถ้านำเหล็กเส้นหนึ่งมายืดออกด้วยแรงจำนวนหนึ่ง เหล็กจะยืดออก และจะยืดออกมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับขนาดหน้าตัดของเหล็กเส้นนั้นด้วย อัตราส่วนระหว่างค่าความเค้นดึงต่อความเครียดนี้เป็นค่าของคุณสมบัติจำเพาะของวัสดุชนิดและมาตรฐาน

นั้น ๆ เราเรียกค่านี้ว่า “เกณฑ์อัตรายืดหยุ่นในแรงดึง modulus of elasticity)” ของวัสดุ นั้น เรื่องนี้นักค้นคว้าชื่อ Young เป็นผู้ริเริ่มทดลองและกำหนดขึ้นเป็นคนแรกเราจึง นิยมระลึกถึงและให้เกียรติ เรียกค่านี้ติดปากกันว่าเป็นค่า Young’s Modulus เรื่อยมา จนกระทั่งปัจจุบันนี้

เหล็กนั้นนับว่าเป็นวัสดุที่ทนแรงดึงได้สูงมาก บางครั้งนิยมทำให้รับน้ำหนักโดย ตัวเองโดด ๆ เช่นสายลวดเคเบิลที่เหนียวและทนแรงดึงได้สูง ๆ ขนาดเล็กที่สุดจะมีเส้น ผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดประมาณ 1.2 นิ้ว ซึ่งสามารถรับน้ำหนักดึงอย่างปลอดภัยได้ไม่ ต่ำกว่า 100,000 ปอนด์ และทนแรงประลัยได้สูงสุดประมาณ 200,000 ปอนด์

1.2 แรงเฉือน (shear force) คือแรงที่กระทำให้วัสดุเฉไป หรือเบือนทิศทาง ไปจากเดิมจนอาจจะขาดจากกันไป เปรียบประดุจถูกกรรไกรตัดออก อันเป็นผลมาจาก แรงที่ลงมาเยื้องกันและต่างทิศทางกันในเวลาเดียวกัน เป็นการต้านความพยายามของ แรงที่มากระทำในแนวสัมผัส ตรงเฉพาะพื้นระนาบที่รับแรงนี้พอดี วัสดุไม่จำเป็นต้องต่อ ติดเป็นเนื้อเดียวกันทางกายภาพ เพื่อที่จะต้านแรงเฉือนนี้ก็ได้ แต่ต้องมีแรงอัดกดไว้ให้ พื้นผิวดังกล่าวชนกันแน่นอยู่ ทำให้เป็นแรงผิที่พอเพียงต่อการต้านแรงเฉือนนั้นได้ โดย วัสดุในระบบโครงสร้างไม่หลุดเคลื่อนออกจากกัน ก็ได้

1.3 แรงบิด (torsion) คือแรงที่กระทำให้วัสดุบิดหมุนไปรอบแกนกลางแท่ง (centroid axis) ของวัสดุรูปแท่งหรือท่อน ทำให้เกิดค่าโมเมนต์ขึ้นในหน้าตัดขวางของ โครงสร้างนั้น ๆ เพื่อที่จะทำให้การวิเคราะห์ค่าของแรงและการเปลี่ยนรูปของวัสดุสามารถ จะทำไปได้อย่างขึ้นนั้น จำเป็น ต้องตั้งสมมุติฐานในการคิดไว้บางประการดังต่อไปนี้ เป็นการ ต้านความพยายามที่จะบิดวัสดุให้ขาดจากกันเป็นคล้ายเกลียวในตะปูเกลียว

แรงหลักทั้งสามชนิดดังกล่าวนี้มีหลักการต้านง่าย ๆ ด้วยการลองรู้ค่าความเข้ม ของแรงนั้นที่เราเรียกกันว่า ความเค้น (stress) และมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อพื้นที่หน้าตัด ว่ามีค่าเท่าใด ในทางการออกแบบ จะพยายามจัดให้แรงต้านในเนื้อวัสดุมีขนาดที่เท่ากัน และกระทำในทิศทางที่ตรงกันข้ามเสมอ โครงสร้างใด ๆ จะอยู่ในภาวะสมดุลได้ก็ต่อ เมื่อวัสดุที่ประกอบเป็นตัวโครงสร้างนั้น มีความสามารถต้านแรงได้มากกว่าแรงที่เกิดขึ้น จริงจำนวนหนึ่งเสมอ เพื่อความปลอดภัย ในทางปฏิบัติ หลังจากทราบผลของการใช้งาน จริง ๆ และจากการทดสอบกำลังของวัสดุ จะทำให้เราทราบค่าความสามารถของวัสดุ ก่อสร้างชนิดต่าง ๆ ที่จะรับแรงได้อย่างปลอดภัย แต่ทั้งนี้กฎหมายควบคุมการออกแบบ และก่อสร้างก็ยังได้กำหนดให้มีการบวกเพิ่มส่วนที่เผื่อไว้สำหรับความปลอดภัยเสมอ เราเรียกตัวเลขแห่งการเผื่อไว้นี้ว่า ตัวคูณแห่งความปลอดภัย (factor of safety) เมื่อ ใช้ตัวเลขนี้ในการกำหนดขนาดของวัสดุแล้ว เราจะได้ความแข็งแรงที่มีค่าเผื่อไว้ในงาน ก่อสร้างจริงเพื่อรับมือกับอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นต่อโครงสร้างที่ไม่คาดฝันได้นั่นเอง ค่านี้โดยทั่วไป หากโครงสร้างทำด้วยอิฐก่อ คอนกรีตเสริมเหล็ก และ เหล็กที่กันสนิมแล้ว มักจะกำหนดให้ยึดถือค่าตัวคูณความปลอดภัยเป็นตัวเลขเท่ากับ 10, 3.0 และ 1.5 ตามลำดับ

2. แรงต้านภายในเนื้อวัสดุโครงสร้าง

โครงสร้างที่รับแรงดึง (tensile structural members) หมายถึงส่วนของ โครงสร้างที่รับแรงดึงที่ปลายทั้งสองข้าง ซึ่งมักจะมีรูปทรงเรียวยาวหรือเป็นเส้นยาว มีหน้า

ตัด ในความหนาน้อยกว่าขนาดที่วัดตามยาวมาก โดยปกติจะมีแรงต้านภายในเนื้อวัสดุ โครงสร้างเป็นธรรมชาติเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ การคิดคำนวณในการรับแรงแม้จะอนุมาน เอาว่าทุก ๆ หน่วยพื้นที่หน้าตัดของวัสดุนั้น สามารถรับแรงได้พอสมควรเท่าเทียม กันหมดทั้งหน้าตัด ซึ่งหากว่า น้ำหนักที่มากกระทำไม่ทำให้วัสดุนั้นต้องต้านจนกระทั่ง เกินความสามารถในการรับแรงแตามหน่วยแรงเฉพาะวัสดุนั้นแล้ว วัสดุนั้นจะยึดตัวและ อาจจะขาดจากกันได้

3. การเปลี่ยนรูปของวัสดุโครงสร้าง

การต้านแรงที่มากกระทำจากน้ำหนักบรรทุกทุกนั้น แม้ว่าจะพอเพียงและไม่ทำให้ โครงสร้างล้มเหลวลงก็ตาม ขึ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ จะเปลี่ยนรูปไปเนื่องจากแรงต่าง ๆ ที่มากกระทำนั้น เช่น ยาวออก หรือสั้นเข้า เป็นต้น การเปลี่ยนรูปดังกล่าวนี้มีอัตราน้อย มากจนไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า ขนาดหน้าตัดขององค์อาคารก็จะใหญ่ขึ้น เล็กลง หรือ ยาวออก แปรเปลี่ยนตามไปตลอดเวลา แต่เมื่อน้ำหนักบรรทุกนั้นถูกเคลื่อนย้าย ออกไปแล้ว โครงสร้างนั้นก็จะมีขนาดหรือหน้าตัดเท่าเดิมอีก คุณสมบัติที่วัสดุมีการ เปลี่ยนรูปและคืนตัวนี้ จำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ตามคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุ ก่อสร้างประเภทใหญ่ ๆ คือ วัสดุที่อ่อนและหลวม (flexibility) เช่น พลาสติก หรือ ยางชนิดต่าง ๆ และที่มีความแข็งเกร็ง (rigidity) เช่น เหล็ก หรือ ไม้ เป็นต้น

ปริมาณการเปลี่ยนรูปของวัสดุนั้น นอกจากจะเป็นไปตามธรรมชาติของวัสดุเอง ระยะเวลาที่ปล่อยให้แข็งตัว (เช่น คอนกรีต) ขนาดของน้ำหนักบรรทุก วิธีการบรรทุก น้ำหนัก และขนาดหน้าตัดหรือความยาวของวัสดุแล้ว ยังขึ้นอยู่กับวิธีการรับน้ำหนัก หรือสภาพแวดล้อมด้วย เช่น อุณหภูมิและความชื้น เป็นต้น

ในโครงสร้างที่ใช้งานทั่วไป ยอมให้มีการเปลี่ยนรูปจากสภาพเดิมได้บ้างดัง ตัวอย่างข้างล่างนี้คือ

ความยาวของโครงชนิดท่อนยอมให้เปลี่ยนได้ในอัตรา 1 ต่อ 300 จากความยาว เดิมเมื่อบรรทุกน้ำหนักจร

การเบนหนีศูนย์ของเสา มักยอมให้เบี่ยงไปได้ไม่เกิน 1 ต่อ 50 ของความสูง และยอมให้โครงสร้างทรุดที่พาดช่วงเพื่อการมุงหลังคาเคลื่อนตัวในแนวนอนได้ไม่เกิน 1 ต่อ 1000 ของความสูงระหว่างพื้นถึงหลังคา เป็นต้น

การเปลี่ยนรูปของวัสดุนั้นอาจจะเกิดขึ้นได้ด้วยน้ำหนักตายของวัสดุเอง จึงควร ได้มีการสังวรและป้องกันไว้ล่วงหน้า หรือ ระหว่างการทำการก่อสร้าง เช่น การยกปลาย ยื่นของโครงสร้างขึ้นไว้ก่อน หรือ ยกท้องคานที่พาดช่วงยาว (pre-casting camber) ขึ้นไว้ก่อนสัก 0.5% ถึง 1.0% แล้วยกตึงไว้จนกระทั่งคานที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก แข็งตัวเต็มที่ก่อน แล้วจึงยอมให้ทำการบรรทุกน้ำหนักต่อไป การปฏิบัติเช่นนี้เป็นการลด อัตราการเปลี่ยนรูปหรือการหย่อนตัวของโครงสร้าง โดยเฉพาะในส่วนที่จะไปรับกวน และส่งผลกระทบไปยัง ประตู หน้าต่าง หรือ ผนังภายในอาคารที่จะติดตั้งตามมาที่หลัง ส่วนของโครงสร้างที่ยื่น (cantilevered) แม้ว่าจะอยู่ในระนาบนอนอยู่แล้ว บางครั้งดู คล้ายลงดวงตาว่าปลายนอกนั้นหย่อนตัวตกลงเล็กน้อย ในทางปฏิบัติมักนิยมที่จะยกปลาย ขึ้นก่อนสัก 1 ต่อ 300 ของช่วงยื่น

การสั่นสะเทือนก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปได้ ความมั่นคงของโครงสร้างที่รับแรงสั่นสะเทือนอยู่เนื่อง ๆ ต้องทำการมัดล้ามทแยง (diagonal bracing) ในส่วนของเสาเอก คานเอก และโครงทรัสส์เข้าด้วยกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารโครงเหล็กและตั้งอยู่ในบริเวณที่มีลมพัดแรง หรืออยู่ในโซนของแผ่นดินไหว เป็นต้น

เราจึงสรุปได้ว่า การตัดสินใจเลือกรูปหน้าตัดที่ดี รูปด้านที่ดี จะต้องพิจารณาตามกฎหมายเกณฑ์ต่าง ๆ ในประเด็นต่อไปนี้

1. เมื่ออยู่ในภาวะการรับแรงดึง ภาวะการออกแบบไม่มีอุปสรรคมากนัก หากว่าวัสดุรับแรงดึงนั้นไม่บางจนขาดเสียก่อน รูปทรงที่ปรากฏก็จะดูคล้ายบางเบา หรือผอมบางบ่งบอกธรรมชาติของการทำงานของโครงสร้างที่ตรงไปตรงมา

2. เมื่ออยู่ในภาวะการรับแรงอัด ต้องเลือกรูปหน้าตัดที่สามารถรับแรงโก่งเดาะได้ดี ทำการแผ่กระจายพื้นที่ของรูปหน้าตัดให้เพิ่มความแข็งแรง ความคงและตั้งในแนวนั้น ๆ ผนังบาง ๆ ของรูปหน้าตัดจะมีกำลังมากขึ้น โดยการออกแบบให้มีการเสริมหน้าตัดกัน โดยการทำรูปมุมฉาก ทำรูปลอนลูกฟูก หรือเสริมให้เป็นรูปโค้ง เพื่อเพิ่มกำลัง และจำกัดไม่ให้มีรูปหน้าตัดที่ปล่อยชาย (free edge) หรือทำการตัดแปลงให้เป็นรูปหน้าตัดชนิดเปิด (opened sections) ด้วยการยึดไขว้ทแยงระหว่างองค์ประกอบมุมขององค์อาคาร เพื่อเอื้ออำนวยให้หน้าตัดในการรับแรงอัดทั้งหมดทำงานร่วมกันได้เป็นอย่างดี

อนึ่ง การแผ่ขยายพื้นที่รูปหน้าตัดของโครงสร้างนี้ ก็เกิดประโยชน์ในทางการใช้สอยในแง่สถาปัตยกรรมขึ้นมาเป็นผลพลอยได้ เช่นสามารถใช้ในการเดินท่ออุปกรณ์อาคาร เช่นท่ออากาศ ท่อน้ำ ท่อเดินไฟฟ้า และท่อใส่โครก เป็นต้น

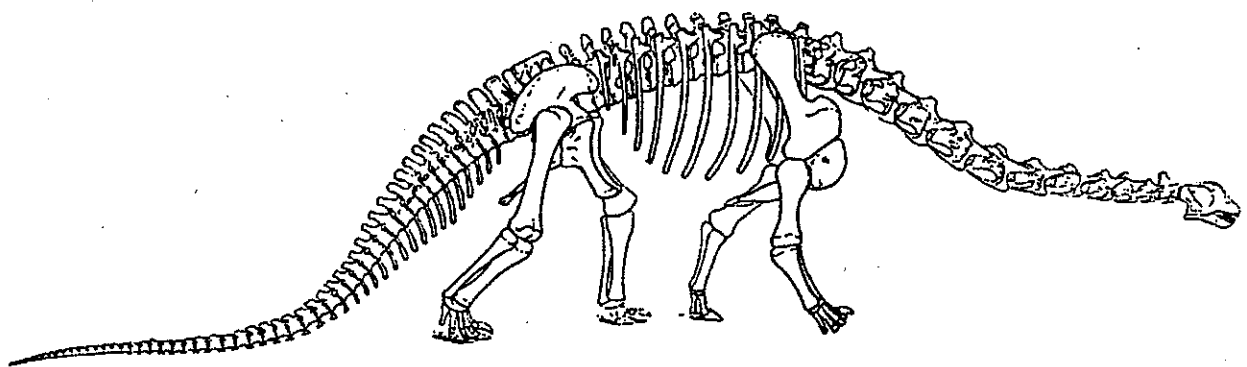
3. เมื่ออยู่ในภาวะต้องรับแรงดัดและแรงเฉือนร่วมกัน โดยที่ธรรมชาติของการรับแรงที่กระทำลงตามแนวโน้มถ่วงของโลกนั้น แรงดัดมีความสัมพันธ์กับแรงเฉือนโดยตรง กล่าวคือ แรงดัดจะต้องการการกระคานในหน้าตัดวิกฤตเฉพาะที่อยู่ตรงผิวบนสุดและล่างสุดของหน้าตัดซึ่งจะมาสัมพันธ์กันตรงแกนสะเทินเพื่อให้เกิดการสมดุลในโครงสร้าง ดังนั้น รูปหน้าตัดที่ลึกลึกมากย่อมแข็งแรงกว่าหน้าตัดที่ตื้นกว่า ส่วนที่เรียกว่า ปีก ของหน้าตัดนอกจากรับแรงอัดหรือแรงดึงตามโอกาสแล้ว ยังช่วยป้องกันการโก่งเดาะให้อีกส่วนหนึ่งด้วย ส่วนที่เป็นหลักในการต้านทานการโก่งตัวจึงเป็นส่วน เหว ของตัววัสดุนี้เอง ส่วน เหว นี้เอง ที่ช่วยรับแรงเฉือนด้วยในจำนวนมากตามสัดส่วนของความกว้างและหนาของหน้าตัด

รูปร่างและรูปด้านของท่อนรับแรงดัดนั้น จึงถูกกำหนดขึ้นจากภาวะการรับแรงดัดและแรงเฉือนนี้เองเป็นหลัก การออกแบบในรายละเอียดสามารถกำหนดให้เป็นรูปทรงที่เป็ด หรือเป็นรูปทรงที่ปัดชอน (compact shape) ก็ได้ ในบางโอกาส การออกแบบมีความจำเป็นต้องจัดองค์อาคารให้มีรูปทรงที่ประกอบกันเป็นแผง เช่นแผงรับแรงเฉือน (shear panel) เพื่อให้สอดคล้อง

กับภาระการรับน้ำหนักบรรทุกบนคาน แต่สามารถลดน้ำหนักคานให้เบาลงมาได้บ้าง ด้วยการชอยหรือฉลุนี้อกัคคานออกไปบ้าง ในแพทเทอนของรูปสามเหลี่ยม หรือรูปอื่นหากมีความจำเป็น (เช่นต้องเจาะช่องประตู หน้าต่าง เป็นต้น) โดยที่หน้าตัดของการรับแรงเฉือนไม่ได้ถูกฉลิตรอนออกไป เราเรียกการเจาะฉลุนี้อกัคคานนี้ว่า “vierendeel girder” หรือ “คานลูกผสม” นั้นเอง

4. เมื่ออยู่ในภาวะต้องรับแรงบิด ในกรณีนี้้องค้คาคคานมีภาระเพิ่มขึ้น จากการที่มีแรงมากระทำในรัศมี รอบแกนหมุนกลาง (centroid axis) ขององค้คาคคานนั้น ภาระงานโดยทั่วไปก็คือ จะต้องออกแบบให้มีการเพิ่มความหนาขององค้ค้ประกอบของโครงสร้างนั้นขึ้นมา ในอัตราส่วนทั่วไปแล้ว หากเพิ่มความหนาขึ้นมาอีก หนึ่งเท่าจากเดิม ความสามารถในการต้านทานแรงบิดจะเพิ่มมากขึ้นถึง 8 เท่า หมายความว่า องค้คาคคานไม่จำเป็นต้องมีหน้าตัดที่ตันไปหมดทุกหน่วยเล็กรอบแกนหมุนกลาง การใช้หน้าตัดกลวงจึงเป็นโอกาส ในอันที่จะได้มาซึ่งโครงสร้างที่บางเบา แต่สามารถทนต่อแรงบิดได้ดี หากผิวของมันมีความหนาเพียงพอ ดังกล่าวข้างต้น

องค้คาคคานที่เป็นการประกอบขึ้นมาจากชิ้นส่วนของโครงสร้างเล็ก ๆ หลาย ๆ ชิ้นเข้าด้วยกัน และมีรูปหน้าตัดเป็นรูปทรงต่าง ๆ เช่น รูปตัว “H”, “U”, “T”, “O” หรือ “Z” ล้วนแต่เป็นหน้าตัดที่นิยมออกแบบใช้กันอย่างกว้างขวาง และให้ผลทางด้านความแข็งแรงและประหยัดวัสดุโครงสร้างได้ดีทั้งสิ้น หน้าตัดเหล่านี้ต้านทานแรงบิดได้ดี บางครั้งมีการนำมาวางเคียงกันแล้วมัดติดกันแน่นทำให้ได้ปฏิกิริยาของคานคู่แฝด (twin beams action) สามารถต้านแรงบิดได้ดีมาก



รูปที่ 1 โครงสร้างเปรียบเป็นกระดูกของร่างกายที่ต้องรองรับน้ำหนักนานาชนิด

4. คอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete)

แท่งคอนกรีตที่ใช้กันอยู่ตามปกติในงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไปนั้นสามารถรับแรงอัดประลัยได้ประมาณ 140-420 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่รับแรงดึงได้เพียง 1/ 10 ของแรงอัดนั้นเท่านั้น การนำท่อนเหล็กเข้ามาเสริมในส่วนที่คอนกรีตต้องรับความเค้นดึง ด้วยการฝังเข้าไปในเนื้อคอนกรีตด้วยการเทหุ้มไปพร้อมกันในขณะที่หล่อให้หุ้มห่อกันสนิท เสมือนว่าเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจะทำให้มีความสามารถในการรับแรงได้กว้างขวางขึ้น สามารถต้านทานแรงที่มากกระทำชนิดที่สลับซับซ้อน เช่น แรงบิด หรือโมเมนต์ดัดได้ดี

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในการช่วยรับแรงดึงในจุดที่จำเป็นสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงให้คอนกรีตเสริมเหล็กมีศักยภาพเพิ่มขึ้นตามความต้องการทำได้โดยการเพิ่มหรือลดปริมาณของเหล็กเสริมเข้าไปในอัตราและตำแหน่งที่เหมาะสมทำให้อาคารที่ออกแบบสามารถรองรับน้ำหนักได้ดีกว่าโครงสร้างไม้ สามารถออกแบบเป็นอาคารสาธารณะขนาดใหญ่ได้ดี คานและพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถพาดช่วงได้ยาวมากขึ้น สามารถทำความเชื่อมโยงให้มีความต่อเนื่องในรอยต่อเพื่อการลดขนาดของโครงสร้างได้ดี การออกแบบและก่อสร้างโครงสร้าง 3 มิติ เช่น โครงสร้างชนิดเปลือกบาง (thin shell) หรือ ไฮเพอร์โบลอยด์ พาราโบลอยด์ (hyperbolic paraboloid) เป็นต้น นอกจากนี้ อาคารประเภทที่ออกแบบเป็นโครงสร้างชนิด แท่งพื้นโค้งสวนทางกันก็ดี หรือ แท่งแผ่นพับหักเป็นลอนก็ดี บางครั้งหากนำเอา เทคนิคของการอัดแรงมาช่วยด้วยแล้ว จะสามารถลดขนาดของโครงสร้างได้มาก เช่นจากอัตราส่วนหน้าลึก ต่อ ความยาวของการพาดช่วงอาจจะลดจาก $1/30$ มาเป็น $1/120$ ก็ทำได้ เมื่อหน้าตัดขององค์อาคารลดขนาดลง น้ำหนักอาคารที่เป็นภาระต่อฐานรากก็ลดลงด้วยทำให้การก่อสร้างประหยัดงบประมาณลงได้ วิศวกรเพียงแต่ควบคุมปริมาณเหล็กเสริมและเหล็กมัดอัดแรง อีกทั้งตรวจสอบความสามารถในการรับแรงเฉือนให้พอเพียงเท่านั้น ความทนทานถาวรของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอัตราสูงมาก ตราบเท่าที่สิ่งแวดล้อมและภัยธรรมชาติไม่ได้คุกคามต่อโครงสร้างนั้น หากควบคุมการรับน้ำหนักให้เป็นไปตามข้อกำหนดโดยเคร่งครัดแล้ว โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 100 ปี

5. การอัดแรงในคอนกรีต

วัสดุโครงสร้างต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดให้รับแรงดึง ชนิดต่าง ๆ นั้นมีคุณสมบัติแตกต่างกัน บางชนิดสามารถทนแรงดึงได้สูงมาก เช่น ท่อนเหล็กซึ่งสามารถรับแรงดึงได้ถึง 4800 กิโลกรัม ต่อ พื้นที่หน้าตัดรับแรง 1 ตารางเซนติเมตรอย่างปลอดภัย แต่วัสดุบางอย่างรับแรงดึงได้น้อยมากหรือเกือบไม่ได้เลย เช่นคอนกรีตเป็นต้น

เมื่อวัสดุหนึ่งรับแรงดึงอยู่นั้นจะยืดตัวออกไป แต่จะยืดออกในปริมาณมากหรือน้อยเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้น ๆ ที่แตกต่างกันในวัสดุชนิดเดียวกันหรือต่างชนิด รายละเอียดในเรื่องของแรงดึงนั้นจะได้อธิบายในบทที่ 6

หลักการออกแบบคอนกรีตอัดแรงเพียงบางส่วน

(partially - prestressed concrete)

หลักการออกแบบคอนกรีตอัดแรงในระยะแรก มักจะพิจารณาระดับของแรงอัดแบบเต็ม (full prestressing) ก่อน กล่าวคือ ที่ระดับน้ำหนักบรรทุกปกตินั้นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเป็นเฉพาะหน่วยแรงอัดเท่านั้น ไม่ยอมรับให้มีหน่วยแรงดึงให้เกิดขึ้นเลย นโยบายการอัดแรงแบบนี้ มีข้อเสียคือต้องใช้แรงอัดสูงมากทำให้ขนาดหน้าตัดคานที่จะอัดแรงนั้นต้องมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อหน่วยแรงอัดจะไม่ต้องสูงมากเกินไป แรงอัดที่ต้องทำให้สูงมากนั้นอาจก่อให้เกิดการโก่งโค้งขึ้น และในทางกลับกันหากเกิดการโก่งโค้งมากนักอาจเกิดรอยร้าวขึ้นด้านบนก่อนการรับน้ำหนัก ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้จะปิดสนิทลงเมื่อน้ำหนักบรรทุกมากกระทำตามปกติ แต่หากว่าอยู่ในภาวะที่ต้องรับน้ำหนักมากเกินไปจนกระทั่งเรียกว่า ช่วง "overloading" แล้ว องค์อาคารจะแตกร้าวทางผิวล่างแทน และที่สุด

เมื่อน้ำหนักบรรทุกมาก ๆ นั้นผ่านเลยไป รอยแตกร้าวที่เห็นก็จะปิดลง ลงเมื่อน้ำหนักบรรทุกที่สูงมากนั้นได้ผ่านเลยไป เช่นในกรณีของคานรับสะพานที่รองรับน้ำหนักบรรทุกขนาดใหญ่เป็นต้น ซึ่งต่อมาภายหลัง ข้อบังคับการออกแบบได้อนุญาตให้องค์อาคารเกิดหน่วยแรงดึงได้บ้างภายใต้การควบคุม นโยบายนี้เป็นผลทำให้ขนาดของแรงอัดที่จำเป็นนั้นลดลง เราเรียกกรรมวิธีใหม่นี้ว่าเป็น การอัดแรงแบบบางส่วน (partially - prestressing) ทั้งนี้ภาระหลักก็คือ ควบคุมไม่ให้เกิดแรงดึงสูงเกินไปที่หน้าตัดล่างของคาน พฤติกรรมการแอ่นตัวก่อนรับแรงก็บรรเทาลง และเพื่อให้การแตกร้าวกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอมักจะใช้เหล็กกล้าเสริมช่วยในส่วนที่จะเกิดการแตกร้าวได้อีกด้วย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า การอัดแรงบางส่วนนี้เป็นมาตรการกลางระหว่างคอนกรีตอัดแรงเต็มที่และคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา นั่นเอง

เมื่อเป็นเช่นนี้เกิดมีการกำหนดนโยบายใหม่ขึ้น ในอันที่จะลดขนาดแรงอัดลงบ้างเพื่อให้นอกจากจะลดขนาดขององค์อาคารลงได้แล้ว พฤติกรรมการแอ่นตัวทั้งขาขึ้นและขาลงก็จะสอดคล้องกับขนาดน้ำหนักที่รับจริง ๆ และข้อบัญญัติจะยอมให้มีการแตกร้าวเกิดขึ้นได้บ้างภายใต้การควบคุมขนาดความกว้างของรอยร้าวร่วมด้วยกับการเสริมเหล็กเสริมช่วย การอัดแรงแบบเพียงเฉพาะส่วนนี้จึงนับว่าเป็นมาตรการกลางระหว่างคอนกรีตอัดแรงเต็มที่และคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ทำให้ค่าก่อสร้างสำหรับโครงสร้างชนิดนี้ในงานสถาปัตยกรรมนั้นลดลง ในขณะที่ขนาดขององค์อาคารก็ดูไม่ใหญ่เทอะทะจนเกินไปทั้ง ๆ ที่ต้องพาดช่วงยาวก็ตาม เราเรียกการอัดแรงในคอนกรีตชนิดนี้ว่า การอัดแรงเพียงบางส่วนหรือ “partially prestressing”

กำลังของคอนกรีต

หลังจากการหล่อคอนกรีตจะพบว่าการกำลังอัดของคอนกรีต (compressive strength of concrete) จะเพิ่มขึ้นตามเวลา อัตราการเพิ่มกำลังจะมีค่ามากในช่วงแรก หลังจากการเริ่มต้นเทคอนกรีตแล้วค่อย ๆ ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป อัตราเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับวิธีการบ่ม (curing) และชนิดของซีเมนต์ที่ใช้ ในงานคอนกรีตอัดร่งนั้นต้องการการเพิ่มกำลังของคอนกรีตที่เร็ว ๆ เพื่อที่จะสามารถเร่งงานการอัดแรงให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้เมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดพร้อมทำงานแล้ว การผลิตชิ้นงานสามารถทำได้เร็วขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนซึ่งมักจะทำการบ่มด้วยไอน้ำ หรืออาจใช้ซีเมนต์ประเภทที่สาม ซึ่งเป็นซีเมนต์ชนิดที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงได้ในช่วงเวลาสั้น ๆ หลังจากเริ่มเทคอนกรีต

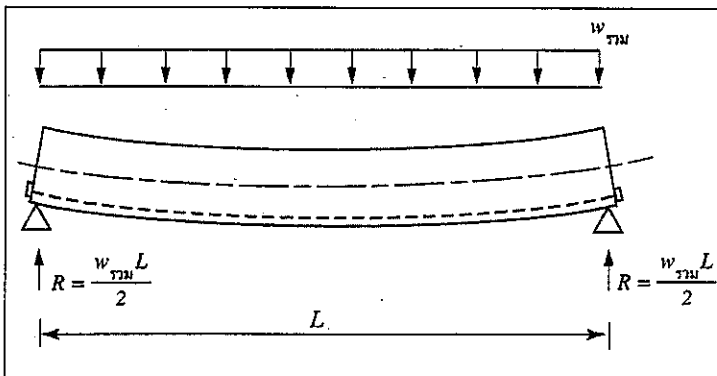
กำลังของคอนกรีตในการรับแรงดึง (tensile strength of concrete) จะมีค่าน้อยกว่ากำลังในการรับแรงอัดมาก (ประมาณร้อยละ 10 เท่านั้น) ค่าที่นิยมใช้บอกกำลังของคอนกรีตในการรับแรงดึง คือ ค่าโมดูลัสของการแตกหัก (modulus of rupture) ซึ่งจะได้มาจากการทดสอบคานคอนกรีตไม่เสริมเหล็กขนาด 15 ซม. x 15 ซม. x 75 ซม. ตามมาตรฐานของ ASTM

6. พฤติกรรมการดัดและการโก่งตัวของคาน

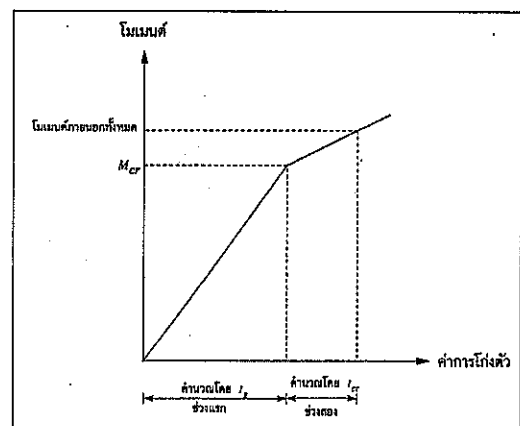
ในการออกแบบและใช้คานคอนกรีตอัดแรงเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกประเภทต่าง ๆ นั้นจำเป็นต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมการดัดและการโก่งตัวของคาน การโก่งตัวของคาน

นั้นเกิดจากผลของการอัดแรง น้ำหนักของคานเอง น้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่เพิ่มเติม และ น้ำหนักบรรทุกจรในรูปของแรง แรงที่กระทำต่อคานต่าง ๆ เหล่านี้ ยกเว้นน้ำหนักบรรทุกจรแล้วล้วนแต่เป็นแรงกระทำถาวรที่กระทำต่อคาน ซึ่งทำให้เกิดการคืบในคอนกรีตและมีผลทำให้เกิดการโก่งตัวมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้ การคลายตัวของเหล็กเสริมอัดแรงก็มีผลต่อแรงดึงในเหล็กเสริม ทำให้ลดแรงพยุลงไปอีก การโก่งตัวในระยะยาวจึงมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แม้ น้ำหนักภายนอกจะมีค่าคงที่ก็ตาม การคำนวณการโก่งตัวที่เกิดขึ้นในระยะยาวไม่สามารถทำได้อย่างแม่นยำ เพราะการคืบของคอนกรีตและการคลายตัวของเหล็กเสริมอัดแรงทำให้สูญเสียแรงอัดซึ่งสามารถจะคำนวณได้เพียงค่าโดยประมาณเท่านั้น

วิธีที่จะคำนวณการโก่งตัวที่เกิดขึ้นระยะยาวนั้น สามารถทำได้โดยประมาณด้วยการใช้ตัวคูณซึ่งได้พิจารณาผลของการคืบ การคลายแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงและตัวแปรค่าอื่น ๆ ไว้แล้วที่ระยะเวลายาวเป็นช่วงหนึ่ง ค่าตัวคูณนี้ได้แสดงไว้ใน PCI design handbook ค่าตัวคูณนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของแรงที่กระทำให้เกิดการโก่งตัว และขึ้นอยู่กับว่าเป็นช่วงติดตั้งหรือช่วงรับน้ำหนักบรรทุกทุกภายนอก ที่ต้องพิจารณาช่วงติดตั้งด้วยก็เพราะว่าหลังจากถ่ายแรงแล้วแต่ยังไม่ได้รับน้ำหนักบรรทุกภายนอกนั้นอาจใช้เวลาเป็นเดือน การโก่งตัวจึงเปลี่ยนไปด้วย นอกจากนี้ค่าตัวคูณยังขึ้นอยู่กับว่าพื้นที่ที่อยู่เหนือคานหล่อนั้นเป็นเนื้อเดียวกับคานหรือไม่ เพราะพื้นที่ส่วนนี้จะช่วยในการรับแรงด้วย ในลักษณะคอมโพสิต การคำนวณจะต้องแยกค่าการโก่งตัวจากแรงที่กระทำแต่ละอย่างออก แล้วคูณด้วยค่าตัวคูณจำเพาะ หลังจากนั้นจึงนำค่าทั้งหมดมารวมกัน



รูปที่ 2 การโก่งตัวลงของคานคอนกรีตอัดแรง



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวลงและโมเมนต์ของคานคอนกรีตอัดแรง

7. การเปลี่ยนรูปของวัสดุโครงอายุการใช้งานของโครงสร้างอย่างไร

7.1 โครงสร้างรับแรงอัดเปลี่ยนรูปไปตามฟังก์ชันของเวลา

ในงานออกแบบสถาปัตยกรรมนั้นจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่ง นั่นคือการเปลี่ยนรูป (elastic deformation) ของคอนกรีตเนื่องจากการคืบและการหดตัว ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการสูญเสียแรงอัดในองค์อาคารคอนกรีตอัดแรง ปรากฏการณ์นี้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเป็นไปตามฟังก์ชันของเวลา ทำให้การแอ่นตัว (deflection) ขององค์อาคารเพิ่มมากขึ้น

7.2 การคืบ (creep)

การคืบเป็นคุณสมบัติของคอนกรีตที่เกิดการเปลี่ยนรูปเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงที่มากกระทำชนิดถาวรบนคอนกรีต เมื่อคอนกรีตมีแรงมากกระทำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปทันทีทันใด หลังจากนั้นจะเกิดการคืบโดยมีอัตราการเพิ่มของความเครียดรวดเร็วในเวลาแรกเริ่ม และอัตราการคืบจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่งเมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ ความเครียดเนื่องจากการคืบนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ ได้แก่ ส่วนประกอบของคอนกรีต ความชื้นสัมพัทธ์ สภาพการบ่ม และอายุของคอนกรีตขณะที่มีแรงมากกระทำจากการวิจัยพบว่าความเครียดเนื่องจากการคืบจะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกับแรงที่กระทำ

การคืบเกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต เมื่อคอนกรีตนั้นรับน้ำหนักบรรทุกทุกค่างไว้เป็นเวลานาน หน่วยการหดตัวจะเพิ่มขึ้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกนั้น หน่วยการหดตัวเนื่องจากการคืบนี้ เป็นค่าที่เกิดขึ้นเพิ่มเติมนอกเหนือจากหน่วยการหดตัวเนื่องจากแรงกระทำตามทฤษฎีอีลาสติค เมื่อคอนกรีตได้รับแรงกระทำจะทำให้เกิดหน่วยการหดตัวยืดหยุ่น (elastic strain) เกิดขึ้นทันทีทันใด หลังจากเวลาผ่านไปภายใต้แรงกระทำเดิม หน่วยการหดตัวจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการคืบ และจะมีอัตราสูงมากในช่วงเวลาเริ่มต้น ซึ่งต่อมาก็คงลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนเกือบจะหยุดนิ่งเมื่ออายุเริ่มจะครบประมาณ 2 ปี

หน่วยการหดตัวเนื่องจากการคืบนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง เช่น เวลา ความชื้นสัมพัทธ์ วิธีการบ่ม อายุนับตั้งแต่เริ่มถูกแรงมากกระทำ ในการคำนวณหาค่าการหดตัวเนื่องจากการคืบนี้อาจทำได้อย่างใกล้เคียงโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การคืบ C_c

7.3 การยืดหรือหดตัวไปตามยาว (linear strain)

การหดตัวคือการเปลี่ยนรูปของคอนกรีต เนื่องจากการสูญเสียความชื้นอิสระในมวลคอนกรีตซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา การเปลี่ยนรูปนี้จะเกิดขึ้นถึงแม้ว่าคอนกรีตไม่มีหน่วยแรงใด ๆ มากกระทำเลยก็ตาม การสูญเสียความชื้นในเนื้อคอนกรีตเป็นสาเหตุหลัก อัตราการหดตัวเช่นนี้จะมีมากในช่วงแรก ๆ หลังจากการแข็งตัวของคอนกรีตแห้งแล้ว และจะค่อย ๆ ลดลงจนเป็นค่าคงตัวเมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ การหดตัวทั้งหมดเมื่อหยุดนิ่งแล้วมีค่าน้อยกว่าความเครียดเท่ากับ 0.00080 สำหรับคอนกรีตที่บ่มด้วยน้ำ และเท่ากับ 0.00073 สำหรับคอนกรีตที่บ่มด้วยไอน้ำ อัตราการหดตัวนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ อุณหภูมิ ขนาดและรูปร่างขององค์อาคาร เป็นต้น

7.4 การยืดหรือหดตัวทางด้านข้าง (lateral strain)

เมื่อวัตถุได้รับแรงกระทำตามแนวแกน นอกจากจะเกิดการยืดหดดังตามแนวแกนแล้วการยืดหดตัวทางด้านข้างก็เกิดขึ้นด้วย อัตราส่วนระหว่างหน่วยการยืดหดตัวด้านข้างต่อหน่วยการยืดหดตัวตามแนวแกน เรียกว่า อัตราส่วนปัวซอง (poisson's ratio) สำหรับคอนกรีตโดยทั่วไปแล้ว ค่าอัตราส่วนปัวซองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.15 - 0.20 ซึ่งในที่นี้อาจใช้ 0.17 เป็นค่ากลางสำหรับคอนกรีตโดยทั่วไปและถือได้ว่าใกล้เคียงกับความเป็นจริง

7.5 การหดตัวเนื่องจากสูญเสียความชื้น (drying shrinkage)

หลังจากการหล่อคอนกรีต คอนกรีตจะมีการหดตัวโดยธรรมชาติ การหดตัวในคอนกรีตนี้เป็นการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีต การหดตัวนี้ขึ้นอยู่กับ

กับเวลาและสภาพความชื้นในอากาศแต่ไม่ขึ้นอยู่กับแรงกระทำต่อคอนกรีต การหดตัวอาจเกิดขึ้นเร็วหรือน้อยมาก หรือไม่เกิดขึ้นเลยถ้าคอนกรีตนั้นถูกเก็บไว้ในน้ำ หรืออยู่ภายใต้สภาพความชื้นที่สูงมาก อัตราการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีตนี้จะเกิดเร็วและมากในช่วงแรก แต่จะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปนานๆ ในการออกแบบสามารถคิดค่าหน่วยการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage strain) เท่ากับ 0.0002 ถึง 0.0006 สำหรับคอนกรีตทั่วไปในงานคอนกรีตอัดแรง

8. ความคงทนถาวรและอายุการใช้งานของโครงสร้าง

8.1 การแตกร้าวของโครงสร้างคอนกรีต

(concrete cracking phenomenon)

องค์อาคาร คอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงเมื่อต้องรับน้ำหนักเกินเลยจากความสามารถจนจุดโมดูลัสแตกร้าวในย่านอิลาสติค จะเกิดการแตกร้าวภายนอกให้เห็นแม้แต่เพียงบางๆ หากสังเกตจะสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ในขณะเดียวกันนั้น ส่วนที่ลึกลงไปใบบริเวณรอบๆ ผิวของเหล็กเสริมและเหล็กมัดอัดแรงกำลังสูงที่อยู่ใกล้เคียงก็จะเกิดรอยแตกร้าวด้วยเช่นกัน เราเรียกการแตกร้าวชนิดนี้ว่า การแตกร้าวภายใน (internal cracking) จำนวนรอยแตกร้าวภายในนี้จะมีจำนวนมากกว่าและมักจะก่อตัวกันขึ้นห่อหุ้มรอยแตกร้าวใหญ่ (primary crack) ไว้ระหว่างกลางช่วง รูปที่ การแตกร้าวบริเวณนี้นอกจากจะก่อตัวอย่างกว้างขวางรอบท่อนเหล็ก แล้วยังจะมีผลให้เกิดภาวะแยกการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตและเหล็กที่มันห่อหุ้มอยู่ด้วย

การแตกร้าวในคอนกรีตของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง เป็นสาเหตุของการแปรเปลี่ยนสภาพการยึดเกาะ (bond) และแรงเฉือนไปในทางที่เสี่ยงต่อการวิบัติขึ้นในหลายกรณีการแตกร้าว ถูกรวมเข้าในการวัดความล้าและเป็นตัวบ่งชี้ถึงการวิบัติของโครงสร้าง นอกจากนี้ อายุการใช้งานของโครงสร้างก็สามารถจะชี้ให้แน่ชัดลงไปได้จากการวัดสภาพการแตกร้าวนี้ด้วย ในอาคารพิเศษเช่นถังภาชนะบรรจุน้ำหรือน้ำมันขนาดใหญ่หรือท่อระบายน้ำที่อยู่ติดกันนั้น นอกจากเหล็กละมุนที่เสริมแล้วหากลดเหล็กกำลังสูงที่ใช้ไม่ได้ทำเป็นระบบร้อยอยู่ในท่อแล้วทำการเกราท์เพื่อการยึดเกาะแล้ว การแตกร้าวย่อมเป็นสิ่งที่ไม้อาจยอมให้เกิดขึ้นเลย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในองค์อาคารที่อาจมีการแอ่นตัวได้มาก ๆ นั้นการตรวจสอบและควบคุมการแตกร้าวจะต้องทำอย่างถี่ถ้วนเพื่อการกำหนดมาตรการควบคุมน้ำหนักบรรทุกอย่างเข้มงวด

8.1.1 การแตกร้าวในคอนกรีตอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุก

การแตกร้าวในคอนกรีตของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง เป็นสาเหตุของการแปรเปลี่ยนสภาพการยึดเกาะ (bond) และแรงเฉือนไปในทางที่เสี่ยงต่อการวิบัติขึ้นในหลายกรณีการแตกร้าว ถูกรวมเข้าในการวัดความล้าและเป็นตัวบ่งชี้ถึงการวิบัติของโครงสร้าง นอกจากนี้ อายุการใช้งานของโครงสร้างก็สามารถจะชี้ให้แน่ชัดลงไปได้จากการวัดสภาพการแตกร้าวนี้ด้วย ในอาคารพิเศษเช่นถังภาชนะบรรจุน้ำหรือน้ำมันขนาดใหญ่หรือท่อระบายน้ำที่อยู่ติดกันนั้น นอกจากเหล็กละมุนที่เสริมแล้วหากลดเหล็กกำลังสูงที่ใช้ไม่ได้ทำเป็นระบบร้อยอยู่ในท่อแล้วทำการเกราท์เพื่อการยึดเกาะแล้ว การแตกร้าวย่อมเป็นสิ่งที่ไม้อาจยอมให้เกิดขึ้นเลย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในองค์อาคาร

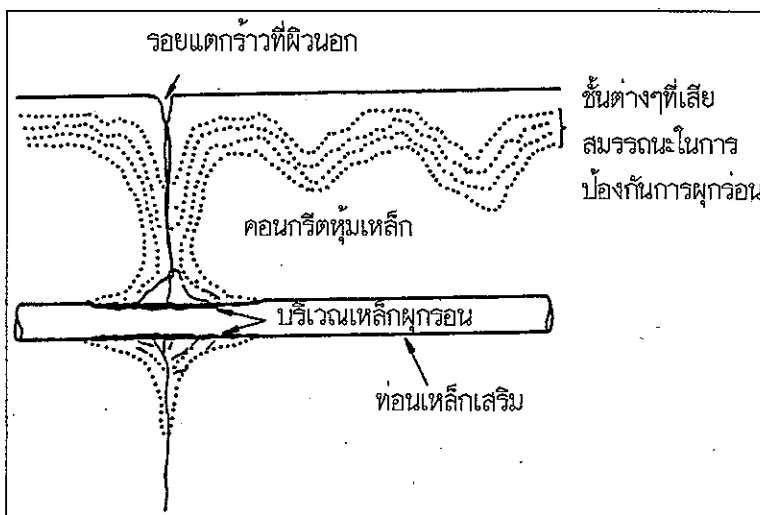
ที่อาจมีการแอ่นตัวได้มาก ๆ นั้นการตรวจสอบและควบคุมการแตกร้าว จะต้องทำอย่าง
ถี่ถ้วนเพื่อกำหนดมาตรการควบคุมน้ำหนักบรรทุกอย่างเข้มงวด

8.1.2 โมเมนต์ที่จุดแตกร้าว (cracking moment)

ค่าของโมเมนต์ ณ จุดที่จะเริ่มทำให้รอยแตกร้าวแรกก่อตัวขึ้นในคานที่โน้ม
เอียงไปในทางที่แอ่นตัวนั้นสามารถจะคำนวณได้ในหลักเกณฑ์ของทฤษฎีอิลาสติค
ทั้งนี้ด้วยการสมมติว่าการแตกร้าวจะเริ่มต้นเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อหน่วยแรงเค้นดึงบนผิวล่าง
สุดของคอนกรีตนั้นได้สะสมเพิ่มมากขึ้นจนบรรลุจุดโมดูลัสของการแตกสลายแล้วนั่นเอง
แต่เนื่องจากคานคอนกรีตที่อัดแรงอยู่นั้นนับได้ว่าเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีระบบประกอบกัน
อย่างสลับซับซ้อนยิ่งในตัวเอง จึงต้องถือเอาข้อเท็จจริงที่ว่าจะต้องถือเอาเกณฑ์หรือ
มาตรฐานตรงจุด ๆ หนึ่งที่สามารถจะส่งสัญญาณว่า ณ จุดนั้นเป็นจุดเริ่มต้นของขบวนการ
ความอดทนหรือการชะลอความเสียหายให้นานกว่าปกติ เนื่องจากยังมีแรงอัดที่กำลัง
ทำหน้าที่คานกับน้ำหนักบรรทุกจากภายนอกอยู่ และหากว่าน้ำหนักบรรทุกเพิ่ม
ขึ้นเรื่อย ๆ ความเสียหายในระดับกลางก็เพียงแต่จะทำให้รอยแตกร้าวนั้นสามารถจะ
มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเท่านั้น และหลังจากนี้หากเมื่อน้ำหนักบรรทุกถูกเคลื่อนย้าย
ออกไปแล้ว สมรรถนะของการรับน้ำหนักในสภาวะการเดิมจะกลับมาอีกครั้งหนึ่ง และ
พร้อมที่จะเริ่มต้นทำงานหรือรับภาระการลงน้ำหนักได้อีกเช่นเดิม ในจุดนี้คานที่อยู่ใน
สภาพเดียวกันหากมิได้ก่อสร้างเป็นระบบอัดแรงจะทำได้

จากการทำการทดลองซ้ำแล้วซ้ำอีกบ่งชี้ว่า ความสามารถในการต้านทาน
น้ำหนักบรรทุกก่อนการเกิดการแตกร้าว นั้น จะขึ้นอยู่กับหน่วยรับกำลังดึงของวัสดุที่
ประกอบกันเป็นคานนั้นนั่นเอง

การศึกษาค้นคว้าทางวิศวกรรมคอนกรีต เริ่มบ่งชี้ถึงความสำคัญของการ
ควบคุมการแตกร้าวขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาโดยเชื่อว่ารอยแตกร้าว
เป็นช่องทางที่จะก่อให้เกิดการผุกร่อนของเหล็กที่เสริมในเบื้องต้น ซึ่งจะลุกลามไปอย่าง
รวดเร็วทันทีที่สนิมเหล็กเริ่มก่อตัว เพราะเหตุว่าปริมาณของสนิมเหล็กที่ก่อตัว ณ จุด
แตกร้าวในเบื้องต้นนั้นจะกลายเป็นจุดสะสมความชื้น ในเวลาเดียวกันก๊าซออกซิเจนก็



สามารถเข้าอันวยอยู่ตลอดเวลาอยู่แล้ว อีก
ประการหนึ่งได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า
รอยแตกร้าวอันเกิดจากโมเมนต์ดัดคานตรง
รอยแตก-ร้าวมักจะมีการแยกผิวกันระหว่าง
ท่อนเหล็กและคอนกรีตเป็นระยะทางยาวเป็น
10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม
ณ บริเวณรอยแตกร้าวนั้น ในการอธิบาย
ทางด้านวิศวกรรมอาจกล่าวได้ว่าที่ใดมีการ
แตกร้าว การสูญเสียการยึดเหนี่ยว (bond)
ระหว่างเหล็กและคอนกรีตจะเกิดขึ้น ณ
บริเวณนั้น

รูปที่ 4 ความถาวรของโครงสร้างจะถูกทำลายลงโดยการเหนี่ยวนำสิ่งที่
ทำให้เกิดสนิมต่อเหล็กเสริมในคอนกรีต

8.1.3 รอยแตกร้าวภายนอก (primary cracking)

รอยแตกร้าวที่เห็นได้ภายนอก แม้ว่าจะเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจต้องใช้แว่นขยายส่องดูเพื่อทำการวัดวิจัยก็ตาม เป็นผลมาจากการที่วัสดุคอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กอยู่นั้นต้องรวมตัวกับเหล็กที่นอนที่อยู่ใกล้เคียงแบกรับความเค้นดึงจนมาถึงระดับหนึ่ง ที่หมดความสามารถที่จะจะต้านต่อไปอีกได้ จึงต้องแยกตัวออกจากกันไป ทั้งนี้เหล็กที่อยู่ใกล้เคียงจะแบกรับอยู่เพียงลำพังตั้งแต่จุดนั้น เราสามารถจะอธิบายออกมาในเทอมของสมการได้ดังนี้

โมดูลัสของการแตกร้าว

ดังนั้นโมเมนต์ตัดในจุดเริ่มแตกหรือ "Cracking Moment"

ซึ่งในที่นี้ $F \cdot e$: ค่าต้านทานโมเมนต์จากการวางเหล็กให้เยื้องศูนย์กลางมาด้านล่าง

■ : ค่าต้านทานโมเมนต์จากการอัดแรงลงมาตรง ๆ ในค่าเดิม

■ : ค่าต้านทานโมเมนต์จากโมดูลัสก่อนการแตกร้าวของคอนกรีตที่ห่อหุ้ม

8.1.4 การแตกร้าวภายใน (internal cracking)

องค์อาคาร คอนกรีตเสริมเหล็กและคอนกรีตอัดแรงเมื่อต้องรับน้ำหนักเกินเลยจากความสามารถก่อนจุดโมดูลัสแตกร้าวในย่านอิลาสติคจะเกิดการแตกร้าวภายนอกให้เห็นแม้แต่เพียงกลาง ๆ หากสังเกตจะสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ในขณะที่เดียวกันนั้น ส่วนที่ลึกลงไปในบริเวณรอบ ๆ ผิวของเหล็กเสริมและเหล็กมัดอัดแรงกำลังสูงที่อยู่ใกล้เคียงก็จะเกิดรอยแตกร้าวด้วยเช่นกัน เราเรียกการแตกร้าวชนิดนี้ว่า การแตกร้าวภายใน (internal cracking) จำนวนรอยแตกร้าวภายในนี้จะมีจำนวนมากกว่า และมักจะก่อกองกันขึ้นห่อหุ้มรอยแตกร้าวใหญ่ (primary crack) ไว้ระหว่างกลางช่วง การแตกร้าวบริเวณนั้นนอกจากจะก่อตัวอย่างกว้างขวางรอบห่อหุ้มเหล็กแล้วยังจะมีผลให้เกิดภาวะแยกการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตและเหล็กที่มันห่อหุ้มอยู่ด้วย

ผลการศึกษาในระดับวิทยานิพนธ์ขั้นสูงสุดของผู้เขียน ซึ่งได้แสดงผล ณ มหาวิทยาลัยไอซากา ประเทศญี่ปุ่นเมื่อปี ค.ศ. 1985 ซึ่งให้เห็นว่า ณ รอยแตกร้าวที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าที่ผิวของคอนกรีตอัดแรงของคานทดลอง ที่มีขนาดความกว้างวัดได้ประมาณ 0.08 มิลลิเมตรนั้น จะมีการแตกร้าวลุกลามเข้าไปถึงเหล็กเสริมธรรมดาและลึกลงไปถึงเหล็กแรงดึงสูงที่อัดแรงอยู่ ความกว้างของรอยแตกร้าวที่ผิวเหล็กเสริมและผิวของเหล็กอัดแรงจะมีขนาดวัดได้ประมาณ 0.05 และ 0.008 มิลลิเมตรตามลำดับ จากการวินิจฉัยในหลักการสากลทางด้านคอนกรีตวิศวกรรมสามารถสรุปผลได้ว่าการแตกร้าวลึกถึงภายในนั้นเป็นผลมาจากการยึดตัวก่อให้เกิดการคอดเอวของเหล็กที่รุนแรง ณ บริเวณรอยแตกร้าวนั้น ๆ ซึ่งสามารถประเมินขนาดของการยึดออกของเหล็กได้ตามรายการคำนวณอย่างง่ายต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1

เหล็กเสริมข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 19 มิลลิเมตร

โมดูลัสยืดหยุ่น $E_s = 2.1 \times 1,000,000$ กก./ตร.ซม.

ความเค้นดึงในท่อนเหล็ก = 2,000 กก./ตร.ซม.

Poisson's Ratio $\nu = \Delta d / \Delta l = 0.3$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} & : \text{ความเครียดในแนวขวางเส้นเหล็ก} \\ & : \text{ความเครียดในแนวยาวของเส้นเหล็ก} \\ \text{ดังนั้น} & = 0.3 \times \Delta l \\ & = 0.3 \times \Delta \sigma_s / E_s \\ & = 0.3 \times 2,000 / (2.1 \times 1,000,000) \\ & = 0.00029 \end{aligned}$$

ค่าการคอดเอวของเส้นเหล็ก

$$\begin{aligned} & = 0.00029 \times 19 \\ & = 0.006 \text{ mm.} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2

เหล็กลวดอัดแรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11 มิลลิเมตร

โมดูลัสยืดหยุ่น $E_s = 2.0 \times 1,000,000$ กก./ตร.ซม.

ความเค้นดึงในท่อนเหล็ก = 1,700 กก./ตร.ซม.

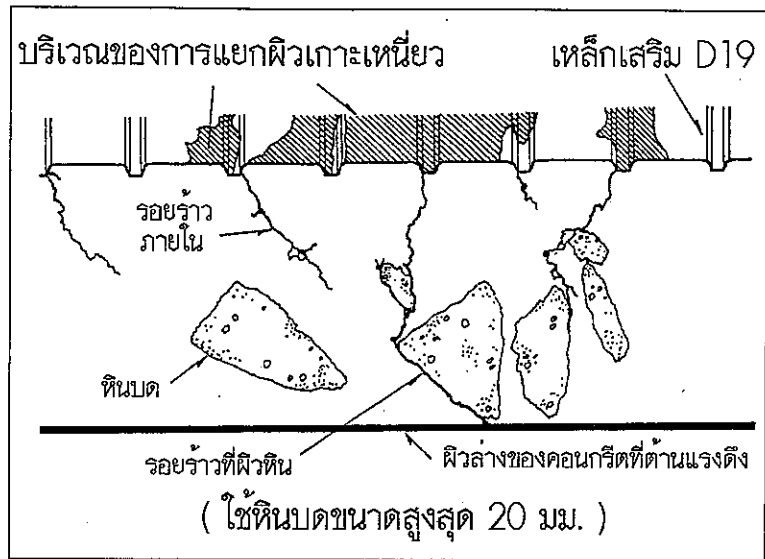
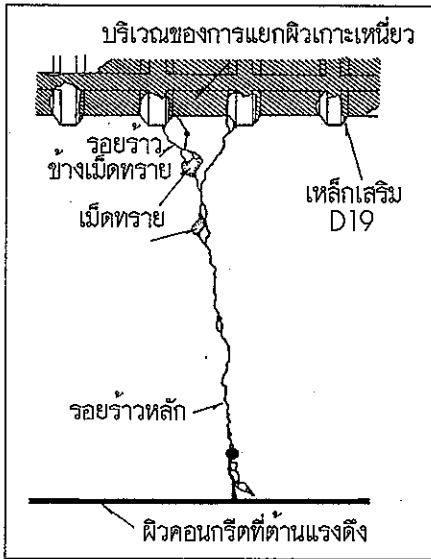
Poisson's Ratio $\nu = \Delta d / \Delta l = 0.3$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} & : \text{ความเครียดในแนวขวางเส้นเหล็ก} \\ & : \text{ความเครียดในแนวยาวของเส้นเหล็ก} \\ \text{ดังนั้น} & = 0.3 \times \Delta l \\ & = 0.3 \times \Delta \sigma_s / E_s \\ & = 0.3 \times 1,700 / (2.0 \times 1,000,000) \\ & = 0.00026 \end{aligned}$$

ค่าการคอดเอวของเส้นเหล็ก

$$\begin{aligned} & = 0.00026 \times 11 \\ & = 0.003 \text{ mm.} \end{aligned}$$

การประเมินผลด้วยรายการคำนวณง่าย ๆ ข้างบนชี้ให้เห็นว่า หากเหล็กเสริมคอดเอวลง 0.006 มม. จะเกิดการแยกตัวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่หุ้ม เท่ากับ 0.003 มม. รอบตัว แต่ผลจากการทดลองด้วยการฉีดสีและเรซิน (plastic raisin) เข้าไปแล้วผ่าออกเพื่อวัดรอยแตกและอัตราการแยกตัวพบว่า ค่าของความกว้างของการแยกตัวมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.075 มม. ซึ่งมีอัตรามากกว่าผลการคำนวณ ทั้งนี้ประมวลผลและสามารถกล่าวได้ว่า นอกจากการคอดเอวของท่อนเหล็กแล้ว การเคลื่อนตัวอันเนื่องมาจากการได้เกิดการแตกร้าวแบบภายในเพิ่มเติมเข้ามาสมทบอีกส่วนหนึ่งดังที่กล่าวแล้ว

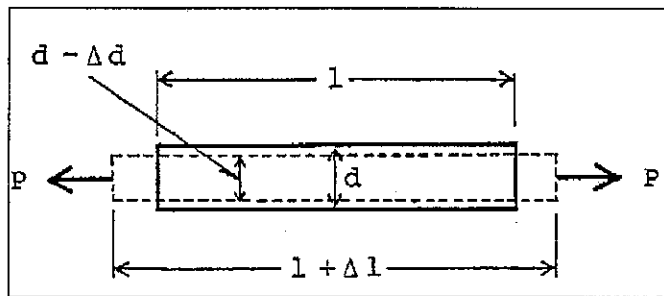


รูปที่ 5 บริเวณของการแยกผิวเกาะเหนียวระหว่างเหล็กและคอนกรีตจะขยายเป็นแนวกว้างตลอดลำเหล็กในเวลาอันรวดเร็ว

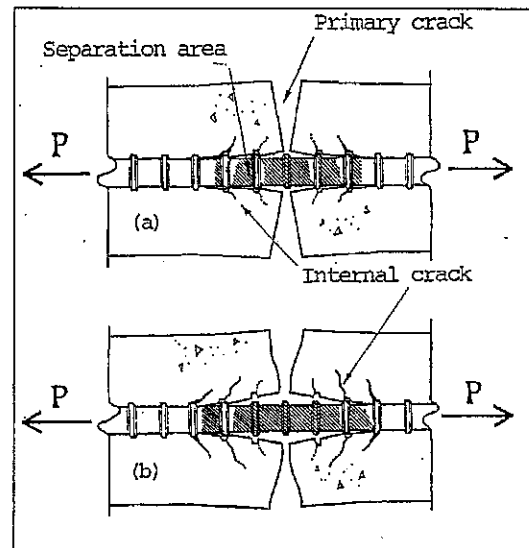
รูปที่ 6 รอยแตกร้าวภายในช่วยกระจายขอบเขต

โดยสร้างช่องว่างแทรกอยู่ระหว่างผิวของวัสดุคอนกรีต

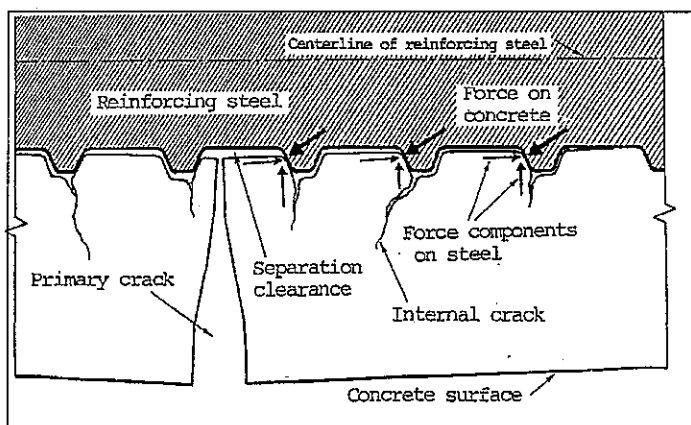
ในด้านความเสียหายเพิ่มขอบเขตของรอยแตกร้าวนี้ได้ถูกหยิบยกขึ้นมาศึกษาแล้วโดย Lutz & Gergel [28] ดูรูปที่ 6



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงขนาดคอดลงของท่อนเหล็กภายใต้แรงดึง (Lutz & Gergely) [28]



รูปที่ 8 ภาพขยายแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแตกร้าวภายในและรอยแตกร้าวภายนอก (ส.ศรีสมพงษ์)



รูปที่ 9 ภาพขยายแสดงช่องว่างระหว่างการแยกผิวเหนียวยี่ดระหว่างเหล็กและคอนกรีตใกล้บริเวณรอยแตกร้าวภายนอก (ส.ศรีสมพงษ์)

9. ความสัมพันธ์ระหว่างการแตกร้าวและอายุการใช้งาน (cracking control & durability)

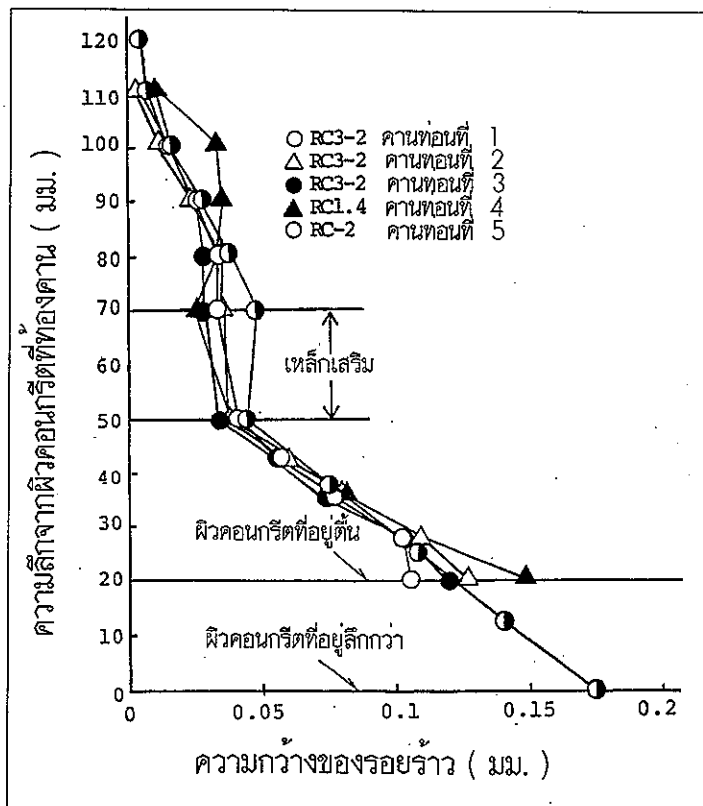
ในสภาวะของการล่อแหลมต่อบรรยากาศการที่มีความชื้นสูง มีธาตุเกลือ (NaCl) อยู่ค่อนข้างหนาแน่นนั้น รอยแตกร้าวใหญ่ที่ผิวหน้าจะเป็นช่องทางที่เอื้ออำนวยให้ต่อเชื่อมเข้าถึงภายใน ทำปฏิกิริยากับอนุไอออนของเหล็กที่กระจายอยู่ตามผิวเหล็กที่ถูกทิ้งให้เปลือยเปล่าจากการแยกตัวอันเนื่องจากการแตกร้าวภายในดังกล่าวแล้ว และเมื่อสภาวะดังกล่าวทรงตัวอยู่หรือกระทำซ้ำวกเป็นไซเคิลแล้ว ในเวลาไม่ช้าเหล็กก็จะเป็นสนิมทำให้เกิดการเกาะกิน (corrosion) และโครงสร้างจะเสียอายุการใช้งานไปในที่สุด

10. ความปลอดภัยและมาตรฐานการออกแบบโครงสร้าง

ในแง่ของความปลอดภัย องค์อาคารคอนกรีตอัดแรงนั้นมีขอบเขตการแอ่นตัวก่อนสภาวะประลัยสูงกว่าในแบบคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ทำให้สามารถกำหนดระดับความปลอดภัยได้สูงกว่า นอกจากนี้รอยแตกร้าวจะไม่เกิดขึ้นในระดับของการบรรทุกน้ำหนักปกติ ทำให้ไม่เสี่ยงต่อการผุกร่อนของเหล็กภายใน

น้ำหนักบรรทุกปกติเนื่องจากน้ำหนักขององค์อาคารและน้ำหนักบรรทุกจรทำให้เกิดแรงต้านภายในเนื้อโครงสร้างในส่วนต่าง ๆ ในการออกแบบองค์อาคารนั้นส่วนต่าง ๆ ขององค์อาคารจะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะต้านทานแรงประลัยจนถึงขีดกำลังสูงสุดของวัสดุรับกำลังที่ใช้ ทางด้านการออกแบบคอนกรีตอัดแรงนั้นได้มีการกำหนดมาตรฐานของการออกแบบและข้อแนะนำที่รัดกุม เช่น มาตรฐานการออกแบบคอนกรีต

อัดแรงของอเมริกัน ชื่อ "Prestressed Concrete Institute (P C I)" ได้มีการกำหนดมาตรฐานต่าง ๆ ในการออกแบบและควบคุมอีกทั้งแนะนำการใช้โครงสร้างคอนกรีตอัดแรง มีการกำหนดโหลดแฟคเตอร์ อัตราส่วนของแรงกระทำประลัยต่อแรงกระทำปกติบนโครงสร้าง ทั้งนี้นอกเหนือไปจากมาตรฐานทั้งไปสำหรับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา คือมาตรฐาน "A C I หรือ American Concrete Institute" ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของการแตกร้าวภายในและความลึกจากผิวหน้าของคอนกรีตที่หุ้ม (ส.ศรีสมพงษ์)

11. ข้อกำหนดเพื่อลดความเสี่ยงต่อความวิบัติทางชนิด

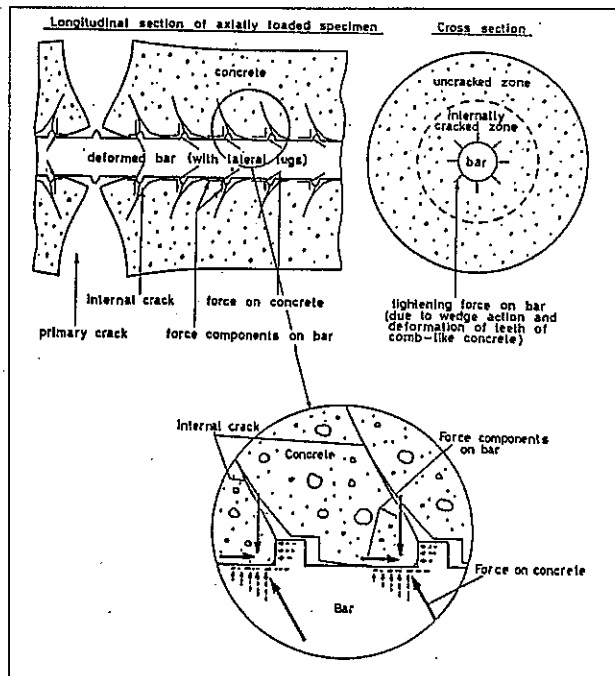
สมาคมทางหลวงของประเทศสหรัฐอเมริกา (Bureau of Public Roads) ก่อตั้งมาเมื่อปี ค.ศ.1952 ได้คาดคะเนว่าโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงจะมีบทบาทและมีศักยภาพที่จะเผยแพร่ไปใช้อย่างกว้างขวางในวงการก่อสร้างอาคารไม่แพ้กับที่ทางวิศวกรรมโยธา ได้ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายอยู่แล้ว ณ ช่วงเวลาดังกล่าวนั้น ทางสมาคมได้ออกข้อกำหนดเพื่อช่วยในการออกแบบและควบคุมคุณภาพโครงสร้างชนิดนี้ซึ่งเรียกว่า “Design Criteria for Prestressed Concrete Bridges (Post Tensioning) 1952” ขึ้นมา ซึ่งในเวลาอีกไม่กี่ปีต่อมาปรากฏว่าโครงสร้างชนิดนี้ได้ขยายตัวขึ้นจนเกือบเทียบได้กับโครงสร้างเหล็กเลยทีเดียว

แม้ว่าตัวบทของข้อกำหนดนี้ มิได้ครอบคลุมอย่างกว้างขวางและพิถีพิถันมากเท่าใดนักก็ตาม ได้มีผู้ที่เกี่ยวข้องในวงการนี้ให้ความสนใจและหยิบยกขึ้นมาพิจารณาอีกทั้งวิเคราะห์วิจารณ์กันอย่างกว้างขวาง ทั้งในทวีปยุโรปและอเมริกาจนทำให้เกิดการประกาศขึ้นเป็นทางการซึ่งมาตรฐานร่วมของโครงสร้างนี้ในเดือนกันยายน ค.ศ. 1953 เป็นฉบับแรก ลงนามโดยผู้ทรงคุณวุฒิจากสมาคมวิศวกรรมโยธา (American Society of Civil Engineers) และสถาบันคอนกรีต (American Concrete Institute ACI)

บทสรุป

จากการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

1. คอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างจะแตกร้าวเสมอเมื่อทนแรงดึงแล้วแม้แต่น้อย
2. การใช้เหล็กเส้นหรือเหล็กท่อนมาช่วยรับแรงดึงแทนคอนกรีตเป็นวิธีที่ดีและสอดคล้องกันอย่างยิ่งเพื่อเอื้ออำนวยในการควบคุมการแตกร้าวให้อยู่ในพิสัยที่จะไม่เป็นอันตรายต่อโครงสร้างอันอาจถึงแก่วิบัติได้
3. การเป็นสนิมในเหล็กเสริมเป็นผลสืบเนื่องโดยตรงจากการแตกร้าวของคอนกรีตทั้งที่ผิวนอกและจากภายในเนื้อคอนกรีตเอง
4. ขนาดและลักษณะของการแตกร้าวจะต้องถูกควบคุมในเบื้องต้นเพื่อจรรโลงอายุการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในทุกบรรยาการที่ห่อหุ้มกันอย่างรัดกุม



รูปที่ 11 ผลการทดลองหารอยแตกร้าวภายในโดย “Goto” ซึ่งได้ค้นพบปรากฏการณ์ของการแตกร้าวภายในที่คล้ายคลึงกันในแท่งปริซึมคอนกรีตเสริมเหล็ก

บรรณานุกรม

- [1] จักรไชย คทวณิช, “อาคารระบบอุตสาหกรรม,” คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2537
- [2] วิเชียร สุวรรณรัตน์, “โครงสร้างในงานสถาปัตยกรรม,” คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2537
- [3] สมลักษณ์ อัครเหม, “เทคโนโลยีอาคาร 8,” คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2537
- [4] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, “มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก,” พ.ศ. 2534
- [5] สนั่น เจริญเภา, วินิต ช่อวิเชียร, “คอนกรีตเสริมเหล็ก,” พิมพ์ครั้งที่ 7 พ.ศ. 2530
- [6] นเรศ พันธราธร, “Design of Prestressed Concrete,” พิมพ์ครั้งที่ 3 พ.ศ. 2542
- [7] ประทีป มาลากุล, “ประวัติสถาปัตยกรรมสมัยใหม่,” พิมพ์ครั้งที่ 2 พ.ศ. 2542
- [8] ดร.สุจิต คุณธนกุลวงศ์ - ดร.ทักษิณ เทพชาติ, “การก่อสร้างโครงสร้างเหล็ก” พ.ศ. 2542
- [9] ลูติพัฒน์ ประทานทรัพย์, “โปรแกรมสำหรับการวางแผนงาน TIME LINE,” พ.ศ. 2521
- [10] สมชาย ศรีสมพงษ์, “โครงสร้างต้านทานแรงอัดและยุทธวิธีในงานออกแบบสถาปัตยกรรม,” พ.ศ. 2547
- [11] สมชาย ศรีสมพงษ์, “คอนกรีตอัดแรงสำหรับอาคารระบบอุตสาหกรรม,” คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2544
- [12] วินิต ช่อวิเชียร, “การออกแบบโครงสร้างเหล็ก” (มาตรฐาน AISC/ASD/LRFD) พิมพ์ครั้งแรก พ.ศ. 2539
- [13] ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, “คอนกรีตเสริมเหล็ก ทฤษฎีกำลังประลัย” พิมพ์ครั้งที่ 3 บ.เอส. เอส. บุคเฮาส์ จก.พ.ศ. 2539
- [14] เรืองศักดิ์ กันตบุตร, “ระบบประสานทางพิคัดในงานก่อสร้าง,” พ.ศ. 2520
- [15] Francis D.K.Ching & Cassandra A., “Building Construction Illustrated,” Delmar Inc., 1995
- [16] T.Y.Lin, “Design of Prestressed Concrete Structures,” John Wiley & Sons Inc. Modern Asia Ed., Japan 1960
- [17] Broms, B.B., “Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Members,” J. ACI. Proc. Vol.62, No.10, 1965
- [18] Y. Besser, V. Proskurnin, “Erection of Prefabricated Reinforced-Concrete Structures,” MIR PUBLISHERS, Moscow 1971 (in English)
- [19] Suzuki, K., Ohno, Y. and Srisompong, S., “Experimental Study on Internal Cracking of Partially Prestressed Concrete Flexural Members, Part 1: Examination of Double Injection Technique,” Proc.AIJ.1985
- [20] Suzuki, K., Ohno, Y. and Srisompong, S., “Experimental Study on Internal Cracking of Partially Prestressed Concrete Flexural Members, Part 2: Internal Cracking Characteristics,” Proc.AIJ.1985

- [21] Suzuki, K., Ohno, Y., Srisompong, S and Yokotani, T., "Influences of Type of Prestressing Steel and Loading Condition upon Internal Cracking of Partially Prestressed Concrete Beams," Review of the 39th General Meeting, Cement Association of Japan, 1985
- [22] Srisompong, S, "Investigation of Internal Cracking in Partially Prestressed Concrete Flexural Members," Ph.D.thesis submitted to the Graduate School, Faculty of Engineering, Osaka University, Japan, 1985
- [23] Sandaker B.Normann & Eggen A.Petter, "The Structural Basis of Architecture," Watson-Guptill /New York 1992
- [24] Architectural Institute of Japan(AIJ), "Standard Handbook I" 1978 (in Japanese)
- [25] Architectural Institute of Japan(AIJ), "Standard Handbook II" 1978 (in Japanese)
- [26] Goto, Y., "Cracks Formed in Concrete around Deformed Tension Bars," J. ACI, Proc. Vol 68, No.4, Apr. 1971
- [27] Beeby, A.W., "Concrete in the Oceans," Report No.1 Cement & Concrete Association.1978
- [28] Lutz, L.A. and Gergly, P., "Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete," J.ACI, No.62-64, Nov. 1967
- [29] Goto, Y., and Otsuka, K., "Experimental Studies on Cracks Formed in Concrete around Deformed Tension Bars," Proc. JSCE No. 294, Feb.1980 (in Japanese)
- [30] Beeby, A.W., "Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete and Its Relations to Cracking," The Structural Engineer (London), No.3, Vol.56 A, Mar. 1978
- [31] Sandaker B.Normann & Eggen A.Petter, "The Structural Basis of Architecture," Watson-Guptill /New York 1992
- [32] Architectural Institute of Japan(AIJ), "Standard Handbook I," 1978 (in Japanese)
- [33] Architectural Institute of Japan (AIJ), "Standard Handbook II," 1978 (in Japanese)