

การยึดหดตัวของคานสะพานคอนกรีต

และผลต่อเสาสะพาน

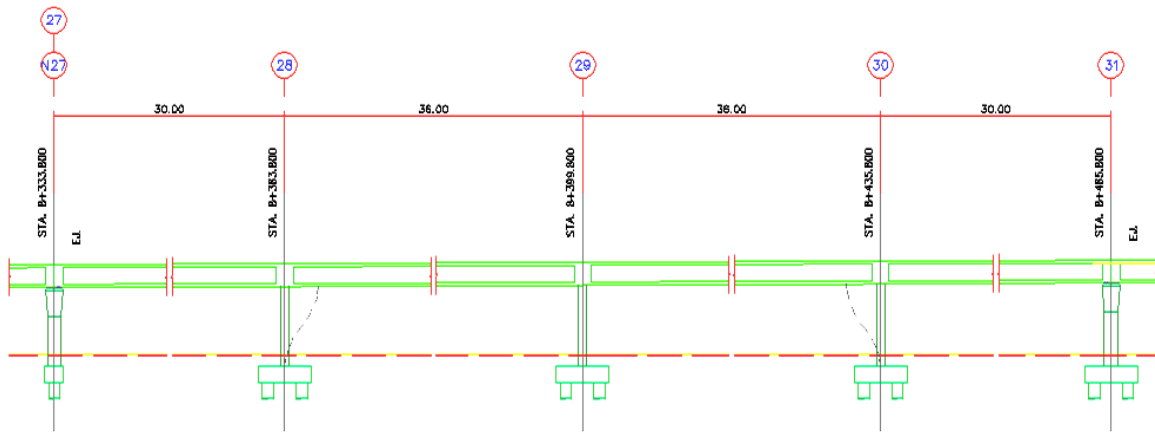
ชวลิต มัชฌิมดำรง

บริษัท เอพซีลอน จำกัด

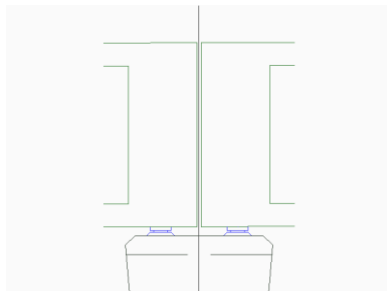
สะพานเป็นโครงสร้างทางวิศวกรรมที่ทำหน้าที่ขนถ่ายน้ำหนักบรรทุกทุกข้ามสิ่งกีดขวาง ซึ่งอาจเป็นแม่น้ำ คลอง ถนน หรือแม้แต่สะพานด้วยกันเองในลักษณะของสะพานข้ามแม่น้ำ สะพานข้ามคลอง ทางยกระดับ ทางแยกต่างระดับ สะพานข้ามแยก โดยลักษณะของโครงสร้างสะพานจะมีส่วนประกอบที่วางตัวในแนวราบเรียกว่า Superstructure คือส่วนของสะพานที่รองรับการจราจร และส่วนของ Substructure ซึ่งรองรับ Superstructure อีกทีหนึ่ง Substructure ที่พบเห็นกันทั่วไปก็คือเสาและเชิงลาดนั่นเอง ในบทความนี้ขอแทน Superstructure ว่า “คานสะพาน” และเนื่องจากสะพานส่วนใหญ่จะมี Substructure เป็นเสาคอนกรีต จึงขอแทน Substructure เป็น “เสา” เพื่อความกระชับ

ในการออกแบบสะพานที่มีความยาวมากๆ นั้น คานสะพานมักจะถูกเลือกให้เป็นโครงสร้างที่มีความต่อเนื่อง (Continuous) โดยวางอยู่บนเสาหลายเสา โดยจะต้องมีอย่างน้อยหนึ่งจุดที่ยึดรั้งกับหัวเสา คือ สามารถถ่ายแรงในแนวราบเข้าสู่หัวเสาได้ (และอาจรวมถึงแรงคัต) หรืออาจจะยึดรั้งมากกว่าหนึ่งจุดก็ได้ โดยยิ่งจำนวนจุดยึดรั้งมากเท่าไร แรงในแนวราบที่ต้องถ่ายสู่ฐานรากก็จะกระจายออกไปมากเท่านั้น และจะทำให้เสาแต่ละต้นรับแรงในแนวราบน้อยลง มีผลทำให้หน้าตัดของเสาเล็กลง (บางลง)

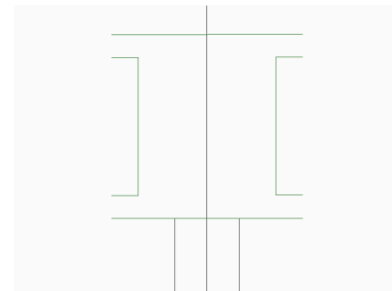
รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างสะพานที่ต่อเนื่อง 4 ช่วง มีจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดที่เสาต้นที่ 27 และ 31 โดยมีที่รองรับแบบเคลื่อนที่ได้ทำให้ไม่เกิดการยึดรั้งระหว่างคานสะพานและเสา ในขณะที่เสาต้นที่ 28, 29 และ 30 เกิดการยึดรั้งขึ้นเนื่องจากคานสะพานและเสาถูกล่อเป็นเนื้อเดียวกัน เส้นประบริเวณเสาต้นที่ 28 และ 30 แสดงการเคลื่อนตัวของเสาในกรณีที่คานสะพานหดตัว โดยมีจุดที่ไม่มี การเคลื่อนตัว (Zero movement) อยู่บริเวณเสาต้นที่ 29



ก) สะพานที่ต่อเนื่อง 4 ช่วง



ข) คานสะพานแยกจากกันบริเวณเสาต้นที่ 27 และ 31



ค) คานสะพานเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกับเสาที่เสาต้นที่ 28, 29 และ 30

รูปที่ 1 ตัวอย่างสะพานที่ต่อเนื่อง

สาเหตุที่ทำให้เกิดการยึดหดตัวและการเคลื่อนที่ในคานสะพาน

ในการวิเคราะห์ห้ออกแบบสะพานคอนกรีต การยึดหดตัวและการเคลื่อนที่ของคานสะพานเกิดจากสาเหตุหลัก คือ

- 1) การล้าของคอนกรีต (Concrete creep หรือการคืบของคอนกรีต) เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำคงค้าง ในกรณีของคานสะพานแรงกระทำคงค้างคือแรงที่เกิดจากการดึงลวดอัดแรงที่ทำให้คานสะพานหดตัว การล้าจะเกิดขึ้นมากในช่วงต้นและลดลงตามเวลา ทั้งนี้ประมาณ 90% ของการล้าจะเกิดขึ้นภายใน 1 ปี การล้าสามารถคำนวณได้โดยอ้างอิงถึงมาตรฐานต่างๆ อาทิเช่น ACI209, CEB-FIP MC-90, BS5400
- 2) การหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (Concrete Shrinkage) ทำให้เกิดการหดตัวของคานสะพาน การคำนวณการหดตัวสามารถอ้างอิงมาตรฐานต่างๆ ได้เช่นเดียวกับการคำนวณการล้าของคอนกรีต
- 3) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พิจารณาได้ทั้งกรณีเพิ่มและลด ทำให้เกิดการยึดและหดตัวของคานสะพานตามลำดับ ตัวอย่างเช่น กำหนดให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น $+20^{\circ}\text{C}$ ในหน้าร้อน และอุณหภูมิลดลง -15°C ในหน้าหนาว (ผลของการกระจายของอุณหภูมิตัดตามความลึกของคานสะพานมีผลต่อการยึดหดตัวไม่มาก)
- 4) แรงเนื่องจากการดึงลวดอัดแรง คือแรงที่เกิดจากการดึงลวดอัดแรงในคานสะพานทำให้เกิดการหดตัวของโครงสร้างในทันทีทันใด (Elastic shortening) ซึ่งอาจจะมีผลต่อโครงสร้างเสาหรือไม้นั้น จะต้องคำนึงถึงขั้นตอนการก่อสร้างด้วย
- 5) แรงอื่นๆ เช่น แรงลม แรงแผ่นดินไหว แรงจากน้ำหนักบรรทุก แรงเนื่องจากการเบรคของรถ ฯลฯ

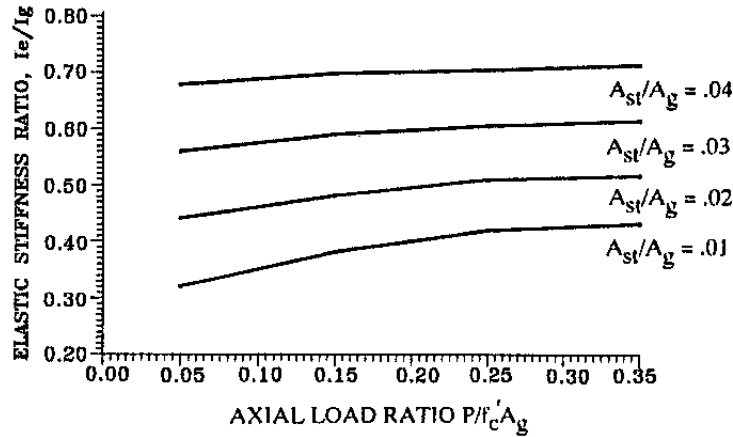
การล้าของคอนกรีต การหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้น และผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสะพานที่เกิดจากการ

เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ ไม่ใช่แรงกระทำจากภายนอก การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงต้องคำนึงถึงวิธีการใส่ข้อมูลที่ถูกต้องด้วย

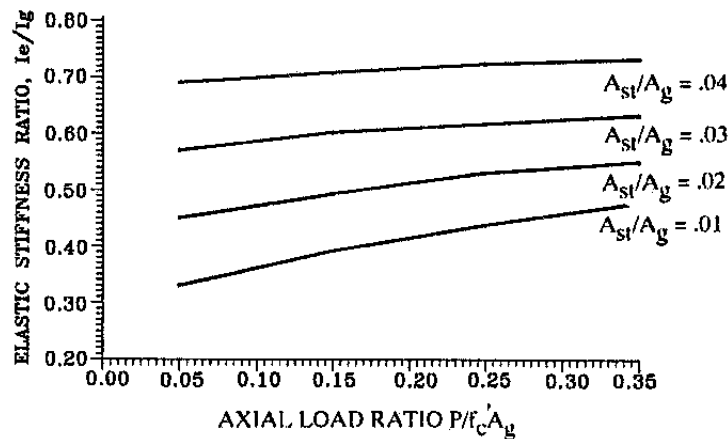
Effective stiffness ของเสา

โดยทั่วไป เสาที่มีลักษณะยาวต่อเนื่อง และยึดรั้งกับเสามากกว่าหนึ่งต้น เสาจะมีสติฟเนสน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคานเสา เสา โดยเฉพาะเมื่อคานเสาเป็น โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงซึ่งหน้าตัดจะอยู่ในสถานะที่ไม่แตกร้าว (Uncracked section) ในขณะที่เสาที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีหน้าตัดที่เล็กกว่า และหน้าตัดของเสาจะเข้าสู่สถานะที่แตกร้าว (Cracked section) เมื่อเวลาผ่านไป เพราะผลจากการยึดหดตัวของคานเสาที่ทำให้เกิดแรงคดในเสาเกินพิกัดแตกร้าว

ด้วยเหตุที่เสามีหน้าตัดที่แตกร้าวทำให้สติฟเนสที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างมีค่าลดลง ซึ่งในกรณีทั่วไปที่สนใจเฉพาะสติฟเนสการคด (Flexural stiffness, EI) เราสามารถประมาณค่าสติฟเนสที่แตกร้าว (Cracked stiffness) ได้จากการวิเคราะห์ Moment-Curvature Analysis หรืออาจจะใช้ค่าประมาณจาก [1] ดังแสดงใน รูปที่ 2 โดยสัมพันธ์กับแรงในแนวแกนและปริมาณเหล็กเสริมในเสา ซึ่งในการออกแบบเสาโครงสร้างสะพานทั่วไป จะมีค่าสัดส่วนการเสริมเหล็ก (ρ) ประมาณ 1-3% และมีแรงอัดประลัยในแนวแกน 10-30% ทำให้ค่าสติฟเนสการคดที่แตกร้าวของเสามีค่าอยู่ระหว่าง 35-60% ของเสาที่ไม่แตกร้าว การที่สติฟเนสในเสาน้อยลงย่อมทำให้เกิดแรงคดในเสาน้อยลงตาม



a) Circular Sections



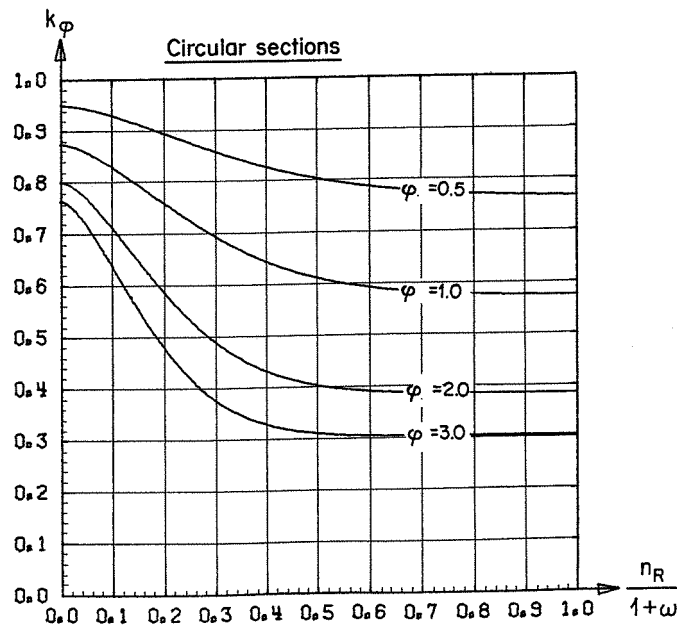
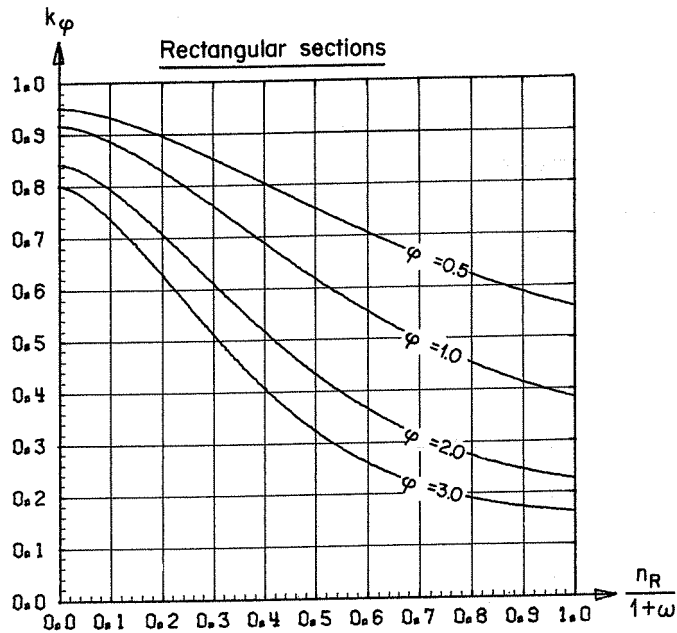
b) Rectangular Sections

รูปที่ 2 Effective stiffness of cracked reinforced concrete sections [1]

นอกจากนี้ การนำค่าการล้าของคอนกรีต และการหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคานสะพาน ไปใช้งานในการวิเคราะห์นั้น จะต้องพิจารณาด้วยว่าปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงที่กินเวลานาน (Long term effect) ทำให้ต้องคำนึงถึงการล้าของคอนกรีตในเสาด้วย (นั่นคือ เกิดการล้าและการหดตัวขึ้นในคานสะพาน แต่ส่งผลให้เป็นแรงค้ำงและเกิดการล้าขึ้นในเสา) โดยในการวิเคราะห์โครงสร้างจะจำลองปรากฏการณ์นี้ได้ด้วยการกำหนดให้เสามีค่าสตีเฟนส์น้อยลงอีก โดยการคูณค่าสตีเฟนส์ที่เดกร้าไว้ที่หาได้

ก่อนหน้านี้ กับค่าปรับแก้อีกครั้งหนึ่ง ทั้งนี้การคำนวณค่าปรับแก้ที่เหมาะสมสามารถศึกษาอย่างละเอียดได้จาก [2]

เอกสารอ้างอิง [3] ได้กล่าวถึงค่าคงที่ดังกล่าว และได้นำมาแสดงไว้ใน รูปที่ 3 ซึ่งในกรณีทั่วไป ค่า Creep coefficient (ϕ) จะมีค่าประมาณ 2 และมีอัตราส่วนแรงอัดประลัยกระทำในแนวแกนต่อกำลังรับแรงอัดประลัยในแนวแกน ($n_r/(1+\phi)$) รายละเอียดสัญลักษณ์ศึกษาได้จาก [3] ของเสาเท่ากับ 0.30 ค่าปรับแก้ (k_ϕ) ที่อ่านได้จากรูป จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-0.6 ทำให้สติฟเนสประสิทธิภาพ (Effective stiffness) ของเสาที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลของการยึดหดตัวของคานสะพานเนื่องจากการล้าของคอนกรีต และการหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้นที่มีต่อเสาเหลือประมาณ 18-36% ของสติฟเนสเต็ม (0.5-0.6 คูณ 35% และ 60%) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าสติฟเนสที่แตกร้าวที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์แรงอื่นๆ ที่มีระยะเวลากระทำสั้นกว่า (Short term)



รูปที่ 3 Diagrams for the reduction of stiffness due to creep [3]

ผลของการยึดหดตัวของคานสะพาน

เมื่อเกิดการยึดหดตัวและการเคลื่อนที่ของคานสะพานประกอบกับการยึดรั้งระหว่างคานสะพานและเสา จะทำให้เกิดแรงในแนวนอนกระทำกับเสา มีผลทำให้เกิดแรงดัดซึ่งโดยปรกติแล้ว ผลของการรวมแรง (Load combination ตาม AASHTO Standard) ในกรณีที่เกิดการล้าของคอนกรีต การหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะทำให้ได้แรงลัพธ์ที่มีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่คิดแรงทั้งสาม (อาจจะยกเว้นในบางกรณี เช่น แรงแผ่นดินไหว) และประกอบกับความยาวของคานสะพานที่ถูกออกแบบให้ยาวต่อเนื่องกันไป ทำให้เกิดแรงดัดมากบริเวณเสาด้านริม ทำให้ต้องแยกคานสะพานออกเป็นช่วง ๆ เช่น ทุก ๆ 4-5 ช่วง เพื่อจำกัดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของหัวเสามากจนเกิดแรงในแนวนอนเกินกว่าที่เสาจะรับได้ ทั้งนี้ตำแหน่งที่แยกโครงสร้างมักเป็นที่ตอม่อ (เช่นในรูปที่ 1) หรือในกรณีพิเศษอาจแยกที่บริเวณช่วงสะพานก็ได้ แต่ในทั้งสองกรณี ผิวทางจราจรจะต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่เรียกว่า Expansion joint เพื่อให้การจราจรไม่สะดุดที่บริเวณดังกล่าว

การกำหนดขนาดการยึดหดตัวที่ต้องการของ Expansion joint สามารถคำนวณได้อย่างคร่าวๆ (โดยไม่คิดผลของเสาที่จะรั้งการยึดหดตัวให้น้อยลง) หากทราบค่าการล้าของคอนกรีต (เช่น 0.0003 ม./ม.) การหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (0.0001 ม./ม.) และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (+20°C/-15°C โดยคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (α) ประมาณ 0.000011 /°C) ตัวอย่างเช่น ในโครงสร้างสะพานยาว 30+36+36+30 เมตร มีลักษณะทั่วไป (Typical ดังในรูปที่ 1) และมีจุดที่ไม่มีเกิดการเคลื่อนตัวของคานสะพานโดยประมาณอยู่ที่กึ่งกลางความยาว จะได้ว่า การหดตัวที่ต้องการเท่ากับ $(30+36) \cdot (0.0003 + 0.0001 + 15 \cdot 0.000011) = 0.037$ เมตร และการขยายตัวที่ต้องการเท่ากับ $(30+36) \cdot 20 \cdot 0.000011 = 0.015$ เมตร สำหรับคานสะพานด้านที่ติดกัน การคำนวณก็สามารถกระทำได้ในทำนองเดียวกัน เมื่อประมาณการการเคลื่อนตัวที่ต้องการได้แล้วจึงทำการเลือกประเภท Expansion joint และขนาดที่เหมาะสมต่อไป

สรุป

การวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างสะพาน โดยเฉพาะสะพานที่มี Superstructure ยาวต่อเนื่องกัน จะต้องคำนึงถึงการยึดหดตัวของ Superstructure ที่เกิดจากการล้าของคอนกรีต การหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพราะเป็นสาเหตุหลักให้เกิดแรงกระทำในแนวนอนกับ Substructure ได้ หากมีการยึดรั้งกับ Superstructure

จากกรณีของโครงสร้างสะพานที่ยาวต่อเนื่องกันที่แสดงในที่นี่ จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาจมีผลต่อการออกแบบโครงสร้างได้มากกว่าน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ที่คาดว่าจะเกิดจากการใช้งาน ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้ สามารถพบเห็นได้ในโครงสร้างที่มีความต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นสะพาน อุโมงค์ รางรถไฟ หรือในองค์อาคารที่มีความยาวมาก ๆ

Reference

- [1] M.J.N. Priestley, F. Seible and G.M. Calvi (1996), Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, inc, p171-173.
- [2] A. Ghali, R. Favre and M. Elbadry (2002), Concrete Structures: Stresses and Deformations, 3rd edition, E&FN Spon.
- [3] C. Menn (1986), Prestressed Concrete Bridge, Springer-Verlag, Wien, p466-467.