

เทคโนโลยีการออกแบบและก่อสร้างสะพานในปัจจุบัน

โดย ดร.สุทธิพล วิวัฒน์ที่ปะ
ดร.ทรงพล จารุวิศิษฐ์

เทคโนโลยีการออกแบบสะพานในปัจจุบัน

วิธีการออกแบบสะพานทั้งสำหรับสะพานที่สร้างจากคอนกรีตและสะพานที่สร้างจากเหล็กนั้นโดยอ้างอิงตามมาตรฐานของทั้ง AASHTO, ACI และ AISC แล้ว มีด้วยกันสองวิธีคือ

1. วิธี Allowable stress design (ASD)
2. วิธี Strength design method (or load factor method)

การออกแบบสะพานในช่วงแรกๆ เน้นที่ลักษณะโครงสร้างเหล็กจึงกำหนดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กต่ำกว่าค่า Yielding stress ซึ่งยังทำให้โครงสร้างปลอดภัย (เนื่องจาก yielding strength น้อยกว่าค่า Ultimate strength) ซึ่งเป็นการกำหนดค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ วิธีนี้จึงเรียกว่าการออกแบบโดยใช้ค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress design, ASD) ซึ่งวิธี ASD นี้ถูกพัฒนามาจากการออกแบบโครงสร้างสะพานแบบ Statically determinate ที่เป็นโลหะซึ่งจะไม่เหมาะกับการกับออกแบบสำหรับวัสดุอื่นๆ และโครงสร้างที่ซับซ้อน

ดังนั้นสำหรับวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติ Nonlinear เช่น ไม้และคอนกรีต ซึ่งคุณสมบัติวัสดุเปลี่ยนแปลงตามเวลาและสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ อากาศ การหดตัว ความชื้น ไม่สามารถทราบค่าหน่วยแรงเริ่มต้นได้ แต่ทราบค่ากำลังที่สามารถรับได้ การออกแบบจึงได้พัฒนามาใช้วิธีกำลัง (Ultimate strength design, USD)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบด้วยวิธี ASD และวิธี USD แล้วจะเห็นว่า การออกแบบสะพานต้องการวิธีที่

- (1) ควรใช้ค่ากำลังประลัยของวัสดุ
- (2) ต้องคำนึงถึงผลของความผันแปรหรือความแปรปรวน Variation ที่อาจเกิดขึ้นได้ ไม่ใช่เพียงคำนึงถึงการต้านทานแต่รวมถึงผลกระทบจากน้ำหนักต่างๆ และ
- (3) มีการวัดค่าความปลอดภัยในรูปแบบสถิติความน่าจะเป็นในการวิบัติของโครงสร้าง Probability of Failure (ไม่ใช่เพียงแค่กำหนดค่า Safety factor)

ดังนั้นวิธีการออกแบบที่เหมาะสมและใช้ในปัจจุบันคือวิธี **Load and Resistance Factor Design (LRFD)** ซึ่งมีการใช้ค่า Resistance factor และ Load factor ทางสถิติทำให้สามารถรวมผลกระทบจากแรงที่กระทำต่างๆ (ขนาดของแรง, การจัดวางตำแหน่งแรงที่กระทำ, การรวมแรงที่เป็นไปได้) ได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งยังคำนึงถึงคุณสมบัติวัสดุ, การควบคุมคุณภาพ, แรงงานก่อสร้าง, ลำดับการเกิดการวิบัติของโครงสร้างเข้าไปในการออกแบบด้วย

ในการออกแบบด้วยวิธี LRFD จะมีการคำนึงถึงสถานะต่าง ๆ ดังนี้

1. สถานะการใช้งาน (Service Limit State) เกี่ยวข้องกับข้อกำหนดด้านหน่วยแรง, การโก่งตัว, ความกว้างของรอยแตก crack ซึ่งอาจเกิดขึ้นภายใต้สถานะการใช้งานสะพานอย่างปกติ ซึ่งยังแบ่งย่อยลงไปเพื่อคำนึงถึงกรณีต่างๆ เช่น การกระทำร่วมกันของแรง (Load combination) ภายใต้สถานะปกติและแรงลมขนาด 90 กม./ชม., Load combination ที่เกี่ยวข้องของเฉพาะโครงสร้างหลัก, Load combination ที่เกี่ยวข้องของเฉพาะแรงดึงในคอนกรีตอัดแรง เป็นต้น

2. สถานะการล้าและแตกร้าว (Fatigue and Fracture Limit State) จะเกี่ยวข้องกับข้อกำหนดที่ใช้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นจากรถบรรทุก

3. สถานะกำลัง (Strength Limit State) จะคำนึงถึงกำลังต้านทานหรือกำลังที่เพียงพอต่อแรงทั้งหมดที่คาดว่าจะกระทำต่อโครงสร้างตลอดอายุการใช้งานตามการออกแบบ ซึ่งจะรวมทั้งกำลังต้านทานแรงดัด, แรงเฉือน, แรงบิดและแรงตามแนวแกน นอกจากนี้ยังแบ่งย่อยเป็นกรณีต่างๆ เช่น

- สถานะภายใต้แรงกระทำจากการใช้งานสะพานโดยยานพาหนะทั่วไปและไม่คำนึงถึงแรงลม
- สถานะภายใต้ยานพาหนะที่ต้องจำกัดน้ำหนักและไม่คำนึงถึงแรงลม
- สถานะภายใต้แรงลมขนาด 90 กม./ชม.
- สถานะภายใต้อัตราส่วนน้ำหนักบรรทุกคงที่ต่อน้ำหนักบรรทุกจรสูงๆ
- สถานะที่คำนึงถึงแรงลมเพิ่มเติมอีกขนาด 90 กม./ชม. นอกจากน้ำหนักบรรทุกจร

4. สถานะเหตุการณ์กรณีพิเศษ (Extreme Event Limit State) จะคำนึงถึงกรณีที่ต้องรับแรงกระทำพิเศษเช่น แผ่นดินไหว, น้ำท่วม, ถูกแรงกระแทกจากรถชนสะพาน เป็นต้น ซึ่งกรณีต่างๆ เหล่านี้มีค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นพร้อมกันต่ำจึงทำให้การออกแบบภายใต้สถานะนี้จะแยกทำเป็นกรณีต่างหาก แบ่งเป็นกรณีย่อยดังนี้

- สถานะภายใต้แรงจากแผ่นดินไหวและน้ำท่วม
- สถานะภายใต้การกระแทกจากรถชนสะพานและก้อนน้ำแข็ง

หลักในการเลือกรูปแบบสะพาน

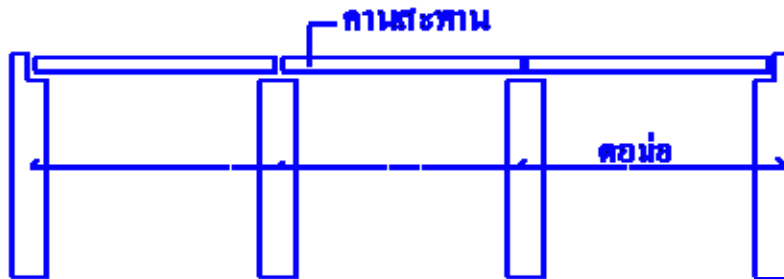
การเลือกรูปแบบของสะพานขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัยเช่นแนวสะพานที่จะก่อสร้างทั้งทางแนวราบและแนวตั้ง, ช่วงระยะห่างระหว่างสะพานและถนน ยกตัวอย่างถ้าสะพานเป็นแนวโค้งควรเลือกลักษณะสะพานเป็นรูปแบบ Box girders และ Slab ต่อเนื่อง เนื่องจากจะทำให้มีลักษณะที่สวยงามด้วยและยังสามารถสร้างให้โค้งได้ตามต้องการอีกทั้งยังมีความสามารถต้านทานแรงบิดได้สูง อย่างไรก็ตามการเลือกรูปแบบสะพานมีอยู่หลากหลายซึ่งอาจแบ่งลักษณะรูปแบบสะพานตามขนาดความยาวสะพาน, ตามวิธีการก่อสร้างสะพาน, ฯลฯ ในที่นี้จะกล่าวถึงลักษณะสะพานในรูปแบบต่างๆ ดังนี้

ชนิดของสะพานแบ่งตามช่วงความยาวสะพาน

1. สะพานขนาดเล็ก (ช่วงความยาวสั้น) (Span ยาวน้อยกว่า 15 เมตร) ได้แก่ สะพานไม้, สะพาน Slab, Box culvert, T-beam, I-beam, Precast concrete box beam และสะพาน Composite rolled steel beam ซึ่งสะพานขนาดเล็กมักใช้ในลักษณะรูปแบบของ สะพานแบบคาน (Beam Bridge)

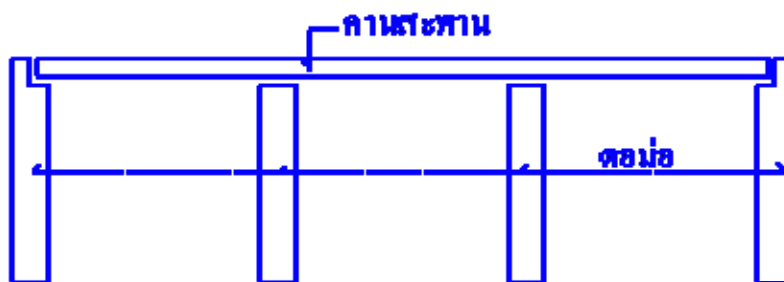
โครงสร้างหลักของสะพานแบบนี้ คือ ตัวคาน ซึ่งอาศัยคุณสมบัติการรับแรงดัดของวัสดุเป็นแรงต้านทางในการรับน้ำหนักพื้นสะพานจะถ่ายแรงสู่คานก่อนแล้วจึงถ่ายลงตอม่อโดยอาจก่อสร้างเป็นลักษณะสะพาน

Simple span คานรับพื้นสะพานแยกขาดออกจากกัน และคานในแต่ละช่วงจะไม่ถ่ายหน่วยแรง (Stress) ผ่านกันและกัน



รูปที่ 1: รูปแสดงลักษณะสะพานแบบ Simple span

หรือจะเป็นลักษณะคานต่อเนื่อง (Continuous Span) คานในแต่ละช่วงจะยึดติดกันและถ่ายหน่วยแรง (Stress) ผ่านกันและกันก็ได้



รูปที่ 2: รูปแสดงลักษณะสะพานแบบ Continuous span





รูปที่ 3: รูปแสดงสะพานแบบ Beam bridge

- **สะพานไม้** มักใช้กับการสัญจรที่ไม่ต้องการการรับน้ำหนักมาก, รถที่แล่นผ่านมีความเร็วต่ำ อีกทั้งต้องคำนึงถึงเรื่องอายุการใช้งานด้วย

- **สะพาน Slab** เป็นแบบที่ง่ายและค่าก่อสร้างถูกที่สุด มีความยาวช่วงไม่เกิน 12 เมตร สามารถสร้างโดยตั้งนั่งร้านบนพื้นธรรมดาได้ หรือจะใช้เป็นชั้นส่วนสำเร็จก็ได้ และสามารถขยายช่วงความยาวออกไปได้โดยการตั้งลวดอัดแรงเสริม

- **สะพาน Box culvert** มักใช้กับช่วงความยาวสั้นๆ และเป็นรูปแบบที่ประหยัด สร้างโดยใช้การวางเป็นท่อกลม, ท่อกลวง, แผ่นคอนกรีตโค้ง, Frame box หรือ Plate box

- **สะพาน T-beam** จะประหยัดสำหรับช่วงความยาว 10-20 เมตร มักก่อสร้างโดยการตั้งนั่งร้านบนพื้นดินธรรมดาที่ปรับเรียบ นั่งร้านอาจซับซ้อนตามความเอียงของสะพาน โดยมากมักใช้เป็นสะพานข้ามแม่น้ำที่ไม่กว้างมาก และมีความสูงพอสมควรไม่ให้อัตถุที่ลอยมาตามกระแสน้ำชนตัวสะพานเสียหายได้ การก่อสร้างจะแบ่งเป็นสองส่วนคือส่วนตัวสะพานและส่วนพื้นสะพาน

- **สะพาน Precast concrete I-beam** สามารถใช้กับช่วงความยาว 10-50 เมตรได้ (อาจมีการตั้งลวดอัดแรงเสริม) มีข้อดีที่ความสะดวกสบายของผู้ขับที่รถยนต์ที่ผ่านตัวสะพานเนื่องจากมักมีปัญหาที่ช่วงรอยต่อโครงสร้าง ตัว Girder ของสะพานจะออกแบบให้รับน้ำหนักตัวเองและน้ำหนักที่เกิดขึ้นในขณะก่อสร้าง ในลักษณะของคานช่วงเดียว ส่วนน้ำหนักบรรทุกจรและน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมจะออกแบบให้รับน้ำหนักโดยโครงสร้างส่วนคอมโพสิตของตัว Girder และตัวพื้นสะพานเทในที่

- **สะพาน Precast concrete box beam** มีลักษณะเช่นเหมือนกันกับสะพานแบบ Precast concrete I-beam เหมาะสมกับการก่อสร้างในกรณีที่ไม่สามารถตั้งนั่งร้านได้หรือการตั้งนั่งร้านทำได้ยากหรือสิ้นเปลืองมาก ระบบนี้มีข้อดีเช่นเดียวกันในเรื่องความสะดวกสบายของผู้ขับที่รถยนต์ที่ผ่านตัวสะพาน

- **สะพาน Rolled steel beam** เป็นรูปแบบที่ออกแบบและก่อสร้างได้ง่าย และประหยัดสำหรับช่วงความยาวประมาณไม่เกิน 30 เมตร โดยออกแบบเป็นโครงสร้างคอมโพสิตเนื่องจากทำให้โครงสร้างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับสะพานคอนกรีตต้องคำนึงถึงเรื่องการบำรุงรักษาและผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมด้วย

2. สะพานขนาดกลาง (ช่วงความยาวไม่เกิน 50 เมตร) ได้แก่ สะพาน precast concrete box beam, precast concrete I-beam, composite rolled steel beam, composite steel plate girder, cast-in-place concrete box girder และสะพาน steel box girder

- สะพาน **Precast concrete box beam, I-beam** มีลักษณะเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อสะพานขนาดเล็กแต่ก่อสร้างด้วยความยาวช่วงที่ยาวขึ้นทำให้ต้องคำนึงถึงการแบ่งชิ้นส่วนคานออกเป็น Segment ต่างๆ นอกจากนี้ยังต้องการพื้นดินที่มีความแข็งแรงมากขึ้นในการลำเลียงตัวคานขนาดใหญ่ๆ เข้าไปสู่พื้นที่ก่อสร้าง อีกทั้งต้องออกแบบส่วน Bracing ต่างๆ เนื่องจากการก่อสร้างโดยแบ่งชิ้นส่วนย่อยๆ ในเบื้องต้นอาจทำให้โครงสร้างไม่ Stable จนกว่าจะก่อสร้างไประดับหนึ่งแล้ว



รูปที่ 4: รูปแสดงสะพานแบบ Precast

- สะพาน **Composite rolled steel beam** มีลักษณะเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อสะพานขนาดเล็กและการเพิ่ม cover plate และการเพิ่มความต่อเนื่องในหลายๆ ช่วง span ความยาวจะช่วยให้ตัวสะพานประหยัดขึ้น

- สะพาน **Composite Steel plate girder** เหมาะกับสะพานช่วงความยาว 25-50 เมตร ตัว Girder ต้องมีการยึด bracing กันและกันเพื่อเพิ่มเสถียรภาพแก่โครงสร้าง (เพิ่มเสถียรภาพต่อการพลิกคว่ำ, Flange buckling, ด้านทานแรงด้านข้าง และช่วยกระจายน้ำหนักกระทำเฉพาะที่ในแนวดิ่ง)

- สะพาน **Corrugated Steel Web Box Girder Bridges** ปัจจุบันมีสะพานประเภทนี้ไม่มากนัก หลักการของสะพานประเภทนี้คือการใช้แผ่นเหล็กแทนคอนกรีต โดยส่วนคอนกรีตที่ส่วนแกน (Web) ถูกแทนด้วยแผ่นเหล็กผิวลูกฟูก (Corrugate steel web) ทำให้น้ำหนักสะพานลดลง และลดงานที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตออก (งานวางเหล็ก ผูกเหล็ก งานไม้แบบและงานเทคอนกรีต) แต่การใช้ Corrugated steel นี้ไม่สามารถรับแรงในแนวแกนได้ ดังนั้นแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากลวดอัดแรงจึงต้องถ่ายแรงสู่ส่วนพื้น Upper slab และ Lower slab, รอยต่อระหว่างแผ่น Corrugated steel ใช้วิธีการเชื่อมทาบ Lap fillet welding ส่วนรอยต่อระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็กนั้นใช้วิธี Angle dowel joint หรือการฝังแผ่นเหล็กในคอนกรีต (Embedding system)



รูปที่ 5: รูปแสดงสะพานแบบ Corrugated Steel Web Box Girder Bridges (ประเทศญี่ปุ่น)

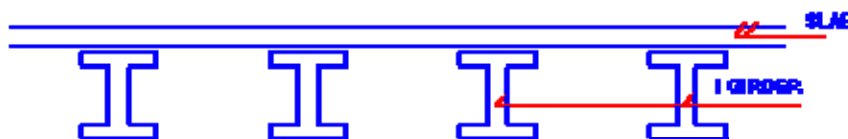
- สะพาน **Cast-in-place concrete box girder** สามารถใช้ในช่วงความยาว 15-35 เมตรในกรณีที่ไม่ใช้ลวดอัดแรงซึ่งจะเป็นรูปแบบที่ประหยัดกว่าแบบ Steel girder และ Precast concrete girder แต่หากใช้ลวดอัดแรงเพิ่มจะสามารถขยายช่วงความยาวได้ถึง 180 เมตร นอกจากนี้ยังต้องการการบำรุงรักษาไม่มากนักในส่วนของ Bearing และรอยต่อ deck joints

- สะพาน **Composite steel box girder** สามารถใช้กับช่วงความยาว 20-150 เมตร โดยจะประหยัดกว่าสำหรับสะพานที่มีช่วงความยาวมากและมีข้อจำกัดในเรื่องความลึกของตัวสะพาน รูปแบบนี้มีความต้านทานแรงบิดได้สูงและสามารถก่อสร้างตามแนวโค้งสะพานได้ แต่เนื่องจากในงานเชื่อมหากทำไม่ดีจะส่งผลให้เกิด Fatigue failures ได้ ดังนั้นการใช้ระบบ Steel box จึงควรใช้ในกรณีพิเศษเท่านั้น

- สำหรับสะพานขนาดช่วงความยาวสั้นและปานกลางนั้นในประเทศไทยจากประสบการณ์ออกแบบและทดลองทำของกรมทางหลวงได้แนะนำรูปแบบทางเลือกสะพานดังนี้

- Span ช่วง 5 – 10 เมตร มักใช้เป็น แบบพื้นท้องเรียบ (Slab Type)

- Span ช่วง 10 – 15 เมตร มักใช้เป็น แบบคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา (Girder Type) ดังรูป



รูปที่ 6: รูปแสดงหน้าตัดสะพานชนิด Precast concrete I-beam girder

- Span ช่วง 15 – 20 เมตร มักใช้เป็น แบบคอนกรีตอัดแรง (Box Girder Type) (ถ้าใช้คอนกรีตเสริมเหล็กจะทำให้โครงสร้างใหญ่ ไม่ประหยัด)



รูปที่ 7: รูปแสดงหน้าตัดสะพานชนิด Precast Box girder

- ถ้า Span ยาวมาก ๆ กล่าวคือ 40 – 60 เมตร ใช้แบบ Truss

3. สะพานขนาดยาว (ช่วงความยาว 50-150 เมตร) ได้แก่ สะพาน composite Steel plate girder, cast-in-place post-tensioned concrete box girder, post-tensioned concrete segmental, สะพาน Concrete arch และสะพานโครงเหล็กถัก Steel truss

- สะพาน **Composite steel plate girder** มีลักษณะเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อสะพานขนาดกลาง โดยมีการสะพานประเภทนี้กับช่วงความยาวกว่า 100 เมตร

- สะพาน **Cast-in-place post-tensioned concrete box girder** กล่าวไว้แล้วในหัวข้อสะพานขนาดกลาง

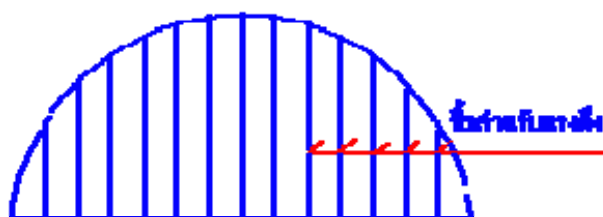
- สะพาน **Post-tensioned concrete segmental** เป็นการก่อสร้างโดยแบ่งส่วนสะพานออกเป็น ส่วนๆ (Segment) ซึ่งสามารถใช้วิธีนี้ได้กับสะพานหลายประเภท วัตถุประสงค์ของการแบ่งสะพานออกเป็น ส่วนก็เพื่อประหยัดและสามารถทำการก่อสร้างให้เป็นมาตรฐานและใช้ประโยชน์เครื่องมืออุปกรณ์ก่อสร้างได้เต็มที่ ชิ้นส่วน Segment ต่างๆ สามารถทำจากการเทคอนกรีตในที่หรือจะผลิตเป็นชิ้นส่วนสำเร็จ Precast ก็ได้ ในกรณีที่ทำการเทคอนกรีตในที่การก่อสร้างจะใช้วิธี Balanced cantilever และใช้ Traveling Form แต่ให้

ใช้ชิ้นส่วน Segment แบบชิ้นหล่อสำเร็จ Precast การติดตั้งอาจใช้วิธี Balanced cantilever หรือการติดตั้งไปที่ช่วง Span เป็นส่วน Segment หรือเป็นชิ้นเดียวต่อความยาวก็ได้ (วิธี Progressive span by span และวิธี Launching spans from one end) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยากง่ายเหมาะสมและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างของแต่ละสะพาน

ตารางที่ 1: รูปแบบสะพานในกรณีที่ก่อสร้างด้วยระบบ Segmental

ช่วงความยาว (เมตร)	รูปแบบสะพาน
0-45	Precast pretensioned I-beam conventional
30-90	Cast-in-place post-tensioned box girder conventional
30-90	Precast-Balanced cantilever segmental, constant depth
60-180	Precast-Balanced cantilever segmental, variable depth
60-300	Cast-in-place cantilever segmental
240-450	Cable-stay with Balanced cantilever segmental

- สะพานโค้งโดยใช้คอนกรีตหรือเหล็ก (Concrete arch, Steel arch) มีทั้งแบบที่ตัวโครงสร้างหลัก (ส่วนโค้ง) อยู่ใต้พื้นสะพานหรืออยู่เหนือพื้นสะพาน (สะพานโค้งคอนกรีตส่วนใหญ่จะเป็นกรณีที่ส่วนโค้งอยู่ใต้พื้นสะพาน) หลักการกว้าง ๆ ของสะพานแบบ Arch คือ การอาศัยแรงอัดหรือแรงกดของวัสดุเป็นแรงต้านทานในการรับน้ำหนัก น้ำหนักของตัวสะพานจะถูกถ่ายน้ำหนักในรูปของแรงอัดในแนวแกนเป็นหลัก (ลดค่าโมเมนต์และแรงดึง) โดยจะถือเสมือนว่าน้ำหนักพื้นสะพาน น้ำหนักจรดและน้ำหนักอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับแขวนอยู่กับโครงสร้างส่วนที่โค้ง จึงทำให้ใช้วัสดุประหยัดกว่าสะพานประเภทอื่นที่มีความยาวใกล้เคียงกัน แต่การก่อสร้างและติดตั้งชิ้นส่วนสะพานทำได้ยากกว่าจึงทำให้ค่าก่อสร้างสูงกว่าโดยรวม ความยากในการออกแบบสะพานประเภทนี้อยู่ที่การพิจารณาความผิดพลาด (Error) ของรูปแบบความโค้งซึ่งอาจมีผลอย่างมีนัยสำคัญได้ หรือค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากตัวสะพานนอกเหนือจากที่ได้คาดการณ์ไว้ (เนื่องจากออกแบบส่วนโค้งให้รับแรงอัดเป็นหลัก) ทั้งนี้จึงต้องระวังในเรื่องรายละเอียดจุดต่อต่างๆ ด้วย และต้องมีฐานรองรับ Arch ที่มั่นคงแข็งแรงไม่เลื่อนไหลไปในทางใด



รูปที่ 8: รูปแสดงลักษณะโครงสร้างสะพานโค้ง



รูปที่ 9: รูปแสดงสะพานแบบสะพานโค้ง

- สะพานโครงเหล็กถัก **Steel truss** โครงสร้าง Truss ประกอบด้วยชิ้นส่วนเป็นจำนวนมาก บางชิ้นส่วนจะรับแรงอัด บางชิ้นส่วนจะรับแรงดึง บางชิ้นส่วนอาจจะต้องรับทั้งแรงอัดและแรงดึง วัสดุที่จะนำมาใช้จึงต้องสามารถรับทั้งแรงอัด และแรงดึงได้ดี ด้วยเหตุนี้จึงมักไม่ค่อยเห็นแบบ Truss ซึ่งก่อสร้างด้วยคอนกรีต ส่วนใหญ่จะเป็นสะพานเหล็กหรือไม่เท่านั้น สะพานชนิดนี้มีทั้งแบบที่ตัวโครงถักอยู่ใต้พื้นสะพานหรืออยู่เหนือพื้นสะพาน โดยโครงสร้างหลักจะประกอบด้วยโครงถักหลักสองข้างของตัวสะพานและ Bracing cross girder ยึดระหว่างโครงถักหลักทั้งสองข้าง สะพานโครงถักนี้มีข้อดีสองอย่างหลักๆ คือ (1) แรงในโครงถักเป็นแรงตามแนวแกน และ (2) ลักษณะ Open web system ทำให้โครงสร้างมีความลึก depth มากกว่าลักษณะที่เป็น web girder ดังนั้น, ข้อดีทั้งสองประการนี้ทำให้สะพานโครงถักใช้วัสดุที่น้อยกว่าและมีน้ำหนักเบาซึ่งมีผลตามให้การแอ่นตัวของสะพานเกิดขึ้นน้อยกว่า แต่จะต้องคำนึงถึงเรื่องการบำรุงรักษามากกว่า สะพานโครงเหล็กถักนี้สามารถใช้ได้ถึงช่วงความยาวกว่า 150-500 เมตร



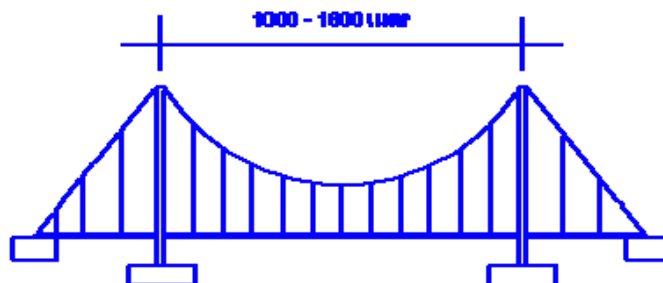
รูปที่ 10: รูปแสดงลักษณะโครงสร้างสะพานโครงเหล็กถัก

4. สะพานขนาดยาวพิเศษ (ช่วงความยาวมากกว่า 150 เมตร) ได้แก่ สะพานขึง Cable-stayed และสะพานแขวน Suspension bridge ซึ่งใช้กับสะพานที่มีช่วงความยาวมากๆ โครงสร้างหลักของสะพานมีลักษณะเป็นโครงสร้างรับแรงดึง (Tension Cable) ซึ่งถูกยึดไว้ด้วยตัวเสาสะพาน (Tower)

- **สะพานแขวน (Suspension bridge)** เป็นสะพานที่ใช้กันมาตั้งแต่โบราณและเป็นสะพานประเภทหนึ่งที่มีความเก่าแก่มากที่สุด กล่าวกันว่า ชาวจีนรู้จักการทำสะพานชนิดนี้มาตั้งแต่สมัยก่อนประวัติศาสตร์ โดยใช้เถาวัลย์หรือหนังสัตว์ โยงข้ามระหว่างสองฝั่งแม่น้ำ โดยยึดปลายทั้งสองข้างไว้กับเสาหรือต้นไม้ สะพานแขวนแบบง่ายประกอบด้วยสายเคเบิลที่ทำมาจากเถาวัลย์ตั้งแต่ 3 เส้น หรือมากกว่านั้น ซึ่งคนหรือสัตว์สามารถเดินบนเชือกเพื่อข้ามไปได้โดยตรง หรือจะเป็นสะพานแขวนอย่างง่ายข้ามแม่น้ำหรือหุบเขาซึ่งมีพื้นสะพานที่ทำจากไม้กระดานยัดวางไว้บนสายเคเบิล 2 เส้นนั้น หรือจะยึดตัวสะพานห้อยไว้ด้วยเชือก ซึ่งการใช้วัสดุจำพวกไม้ทำตัวสะพานหรือวัสดุอื่นที่ไม่ค่อยแข็งแรงทำให้ตัวสะพานมีลักษณะที่แอ่นลง ไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นสะพานถนนหรือทางรถไฟสมัยใหม่

ในปัจจุบันเนื่องจากมีความก้าวหน้าของวัสดุและเทคโนโลยีใหม่ๆ ทำให้เกิดการพัฒนาของสะพานแขวนที่สามารถรับน้ำหนักยานพาหนะหรือรางรถไฟได้ โดยเปลี่ยนรูปแบบจากตัวสะพานที่แอ่นลงเนื่องจากน้ำหนักสะพานและการห้อยจากเชือก โซ่ หรือเคเบิลแขวนไปเป็นการใช้สายเคเบิลรับแรงดึงสูงที่ยึดไว้ระหว่างเสาทาวเวอร์ของสะพานและใช้สายเคเบิลซึ่งสามารถรับน้ำหนักตัวสะพานที่แขวนไว้ด้านล่างและน้ำหนักบรรทุกอื่นๆ ได้มาก และยังทำให้สามารถสร้างสะพานในแนวราบหรือแม้แต่โค้งขึ้นบนเล็กน้อยเพื่อให้มีช่องว่างสัญจรด้านล่างใต้ตัวสะพานได้อีกด้วย

สะพานแขวนสามารถออกแบบให้ช่วงความยาวของช่วงกลางสะพานยาวได้มากกว่า 300 เมตร จนถึงกว่า 2 กิโลเมตร (เป็นสะพานประเภทเดียวที่สามารถใช้ได้กับช่วงความยาวที่ยาวเกินกว่า 600 เมตรขึ้นไป) โดยมีลักษณะของสะพานคือ มีการขึงสายเคเบิล (สายเคเบิลหลัก) จากตัวยึดที่ปลายสะพาน (Anchorage หรือเสาตอม่อที่ปลาย) 4 จุด (ฝั่งละ 2 จุด) ไปยังเสาทาวเวอร์บนสะพาน 2 เสา ในแนวนอนเป็นรูปตัว M (ดังรูป) โดยจะมีสายเคเบิลขนาดเล็กกว่าช่วยดึงตัวสะพานในแนวตั้ง (สายเคเบิลแขวน) มีลักษณะเหมือนการแขวนสะพาน ซึ่งแตกต่างจากสะพานขึงที่ไม่จำเป็นต้องใช้เสาทาวเวอร์บนสะพานถึง 2 เสาและตัวยึดสายเคเบิลหลักมากถึง 4 จุด แต่สามารถออกแบบให้สายเคเบิลหลักยึดสะพานกับเสาขนาดใหญ่รูปร่างคล้ายตัว A เพียง 1 เสาเท่านั้น แต่สะพานขึงโดยส่วนใหญ่จะมีช่วงความยาวได้ไม่เกิน 300 เมตร



รูปที่ 11: รูปแสดงลักษณะโครงสร้างสะพานแขวน (Suspension bridge)



รูปที่ 12: สะพานแขวนที่ยาวที่สุดในโลก (พ.ศ.2551) (Akashi Kaikyo Bridge, Japan)

สะพานแขวนมีลักษณะโครงสร้างการรับน้ำหนักตัวสะพานด้วยสายเคเบิลหลัก (Suspension cables) สองเส้นที่โยงยึดพาดผ่านระหว่างเสาสะพานที่มีขนาดใหญ่ (เสาทาวเวอร์ หรือเรียกว่า Pillar) ช่วยรับแรงอัดของตัวสะพานและรับแรงดึงจากสายเคเบิลรองที่แขวนตัวสะพาน (Deck) ไว้เพื่อย้ายลงสู่พื้นดิน และสายเคเบิลหลักจะถูกยึดตรึงเข้ากับตัวเสาสะพานและที่ปลายอีกทีหนึ่ง

การรับน้ำหนักของตัวสะพานจะถูกถ่ายแรงผ่านสายเคเบิลแขวนในแนวดิ่ง (เรียกว่า hanger) ที่แขวนตัวสะพานไว้ ไปเป็นแรงดึงภายในสายเคเบิลหลักซึ่งยึดโยงระหว่างเสาสะพานและถูกตรึงไว้ที่ปลายในแนวระดับเดียวกับตัวสะพานแต่ละข้างของสะพานผ่านลงไปยังตัวยึดสายเคเบิลที่ฝังอยู่ใต้พื้นดิน โดยทั่วไปสะพานแขวนจะมีช่วงสะพาน 3 ช่วงแบ่งกันที่ตำแหน่งเสาทาวเวอร์ของสะพานที่อยู่ในน้ำ โดยช่วงสะพานทั้ง 3 ช่วงได้แก่ช่วงกลางซึ่งเป็นช่วงหลัก และช่วงด้านข้างที่สั้นกว่าในแต่ละฝั่งของสะพาน ซึ่งทั้งสามช่วงจะถูกยึดไว้กับสายเคเบิลแขวนและสายเคเบิลหลักอีกที แต่ในบางกรณีอาจไม่มีช่วงสะพานด้านข้างก็ได้เนื่องจากตัวเสาสะพานตั้งอยู่ที่ริมฝั่งโดยตรงทำให้มีแต่ช่วงกลางช่วงเดียว

การวิเคราะห์โครงสร้าง

แรงหลักที่เกิดขึ้นในสะพานแขวน ได้แก่แรงดึงในสายเคเบิลหลักและแรงอัดในเสาสะพาน (Tower หรือ Pillar) และเนื่องจากแรงเกือบทั้งหมดในเสาสะพานเป็นแรงในแนวดิ่งและแรงนี้ยังมีสภาพสมดุลด้วยแรงดึงจากสายเคเบิลหลักทำให้สามารถใช้เสาสะพานที่มีความเพียวและขนาดไม่ใหญ่มากได้

แม้ว่าน้ำหนักของสายเคเบิลหลักจะน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของตัวสะพานและน้ำหนักจากยานพาหนะที่ต้องรองรับ น้ำหนักของสายเคเบิลหลักนี้ทำให้สายเคเบิลหลักของสะพานแขวนที่โยงยึดระหว่างเสาสะพานมีลักษณะย่อยเหมือนรูปร่างพาราโบลา (Parabola) โดยมีความลาดชันของแนวสายเคเบิลหลักเปลี่ยนไปตามแนวความยาวของตัวสะพาน ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นจากการยึดแขวนตัวพื้นสะพานตามที่ได้กล่าวถึงข้างต้นมีเพียงแรงที่ขึ้นในแนวดิ่งเท่านั้น ทำให้การวิเคราะห์โครงสร้างและออกแบบสะพานแขวนมีความง่ายกว่าสะพานซึ่งเป็นอย่างมาก เนื่องจากการวิเคราะห์และออกแบบสะพานซึ่งต้องคำนึงถึงแรงอัดในแนวแกนที่เกิดขึ้นในตัวพื้นสะพานเพิ่มเติมด้วย อย่างไรก็ตามความยุ่งยากของการออกแบบสะพานแขวนอยู่ที่ การคำนวณแรงในสายเคเบิลซึ่งต้องใช้หลักการ Nonlinear geometry เนื่องจากสะพานมีการโก่งตัวสูง ระบบ

Stiffening system เพื่อยึดโครงสร้างให้มั่นคงจะยึดโดยใช้ตัว Girder หรือโครง Truss ใต้ตัว Deck ของพื้นสะพาน ซึ่งระบบนี้จะต้องคำนึงถึงเสถียรภาพของตัวพื้นสะพานต่อแรง Aerodynamics และมุมการเคลื่อนตัวของพื้นสะพานด้วย

ข้อดีที่เหนือสะพานชนิดอื่น

- สามารถสร้างให้มีความยาวของช่วงหลักช่วงกลางได้ยาวกว่าสะพานประเภทอื่น
- สะพานแขวนใช้วัสดุสิ้นเปลืองน้อยกว่าสะพานประเภทอื่น แม้แต่สำหรับสะพานแขวนที่มีช่วงความยาวมากกว่าที่สะพานประเภทอื่นจะสร้างได้ จึงทำให้สามารถลดค่าก่อสร้างได้มาก
- นอกเหนือจากการติดตั้งสายเคเบิลรับแรงชั่วคราวในช่วงแรกของการก่อสร้างที่ต้องใช้พื้นที่ก่อสร้างใต้ตัวสะพานแล้ว ความจำเป็นต้องใช้พื้นที่ก่อสร้างใต้ตัวสะพานในขั้นตอนอื่นมีน้อย ทำให้มีประโยชน์ไม่กีดขวางการใช้งานพื้นที่ใต้สะพานในระหว่างการก่อสร้าง เช่นการเปิดช่องทางใต้สะพานแก่การสัญจรทางน้ำ เป็นต้น
- อาจสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ดีกว่าสะพานประเภทอื่นที่มีน้ำหนักมากกว่าหรือสะพานประเภทอื่นที่มีลักษณะโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า

ข้อเสียเมื่อเปรียบเทียบกับสะพานชนิดอื่น

- อาจจำเป็นต้องป้องกันการสั่นของสะพานภายใต้สภาวะที่มีลมแรงด้วยการเพิ่ม stiffness ความแข็งแรงของตัวสะพานหรือวิธีการทาง Aerodynamic
- เนื่องจากตัวสะพานมีความแข็งแรง (Stiffness) น้อยกว่าสะพานประเภทอื่น ทำให้สะพานแขวนรับน้ำหนักบรรทุกจรได้น้อยกว่า
- มีความจำเป็นต้องใช้พื้นที่ก่อสร้างใต้ตัวสะพานในบางขั้นตอนเช่น การติดตั้งสายเคเบิลในขั้นตอนแรก หรือการยกติดตั้งตัวชิ้นส่วนพื้นสะพาน ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงได้หากก่อสร้างเป็นสะพานขึงแทน

สะพานแขวนชนิดต่าง ๆ

สะพานแขวนแบบ Underspan

เป็นสะพานแขวนที่แนวของสายเคเบิลหลักอยู่ต่ำกว่าตัวพื้นสะพาน แต่ยังคงยึดสายเคเบิลหลักเข้าไปในพื้นดินเช่นเดียวกับสะพานแขวนแบบทั่วไป สะพานประเภทนี้เพียงจำนวนน้อยเท่านั้น เนื่องจากตัวพื้นสะพานจะมีเสถียรภาพต่ำกว่าการแขวนตัวพื้นสะพานไว้ในแนวที่ต่ำกว่าสายเคเบิลหลัก

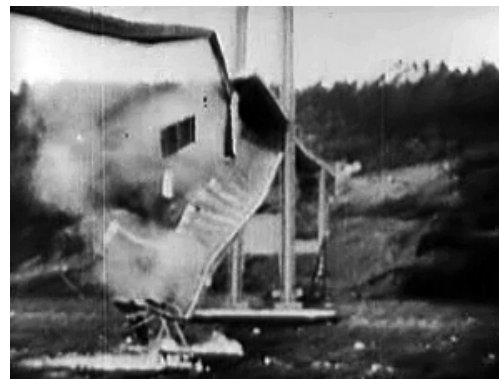
สะพานแขวนชนิดที่ใช้โซ่หรือท่อนเหล็กเชื่อมต่อกัน (linked bars) แทนสายเคเบิลหลัก

เป็นสะพานแขวนในสมัยก่อนเนื่องจากยังไม่มีสายเคเบิลแรงดึงสูงที่ได้จากการพันเกลียวของเส้นลวดแรงดึงสูงอย่างในปัจจุบัน ซึ่งในปัจจุบันได้เปลี่ยนมาใช้สายเคเบิลรับแรงดึงสูงแล้วเนื่องจากหากโซ่หรือท่อนเหล็กเกิดความเสียหายจะเป็นสาเหตุให้เกิดการพังทลายของตัวสะพานทั้งสะพานได้ (เช่นสะพาน Silver bridge ข้ามแม่น้ำ Ohio ในสหรัฐอเมริกา) แต่หากเส้นลวดภายในสายเคเบิลแรงดึงสูงขาดเพียงบางเส้น ตัวสะพานยังคงปลอดภัยและสามารถซ่อมแซมได้ทันที

สะพานแขวนที่ใช้ตัวสะพาน Deck แบบเป็นโครงถักหรือ Plate girder



สะพานแขวนโดยส่วนใหญ่จะใช้โครงสร้างตัวสะพาน Deck เป็นแบบโครงถัก open truss มากกว่าการใช้โครงสร้างแบบคานเหล็กประกอบหรือ Plate girder อันเนื่องมาจากสาเหตุของการสั่นไหวจากแรงลม ดังที่ได้เคยเกิดการพังทลายของสะพาน Tacoma Narrows bridge ในสหรัฐอเมริกา เนื่องจากการใช้โครงสร้างตัวสะพานที่บางเกินไปแม้ว่าสะพานแขวนจะสามารถสร้างให้มีขนาดใหญ่และรับน้ำหนักมากก็ตาม สะพานแขวนมีข้อด้อยในเรื่องของการแกว่งของสะพานหากสะพานมีความยาวมากๆ การใช้เสาบนสะพานเพียงเสาเดียวนั้นไม่เพียงพอต่อการต้านทานแรงบิด (torsion) ที่เกิดขึ้นหากมีลมแรงๆ จนเกิดการแกว่งของสะพานอย่างรุนแรงได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบัน ความรู้ทางด้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) ได้พัฒนาจนสามารถใช้โครงสร้างตัวสะพานแบบ Plate girder ที่บางได้แต่ต้องใช้รูปร่างของตัวสะพานให้เหมาะสม (เช่น ความลาดเอียงด้านข้างของตัวสะพาน) เพื่อลดแรงหรือการสั่นไหวอย่างรุนแรงอันเนื่องมาจากแรงลมลง หรือใช้โครงสร้างของเสาแบบลดแรงเสียดทาน และการใช้สายเคเบิลชิ่งหรือแขวนในแนวทแยงเพิ่มเติม



รูปที่ 13: สะพานแขวนที่เกิดการสั่นอย่างรุนแรงและวิบัติ (Tacoma Narrows Bridge, USA)

- สะพานชิ่ง (Cable-stayed bridge) เป็นสะพานที่ประกอบด้วย เสาสะพานตั้งแต่ 1 เสาหรือมากกว่า (โดยปกติจะเรียกเสาสะพานชิ่งว่า เสาชิ่ง (Tower) หรือไพลอน (Pylon)) ซึ่งจะมีสายเคเบิลยึดรั้งตัวสะพาน (Deck) ไว้



รูปที่ 14: ลักษณะรูปแบบของสะพานชิ่ง (Cable-stayed bridge)

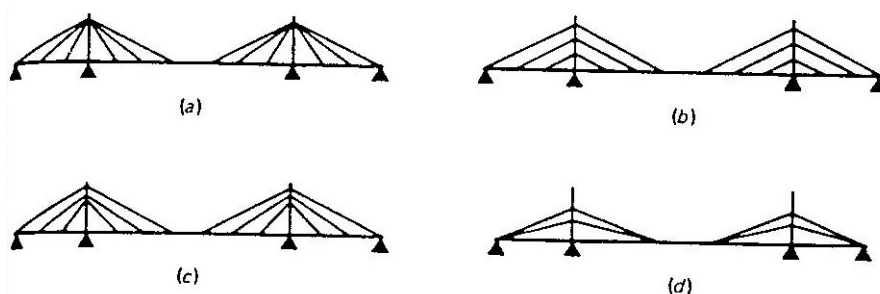
สะพานชิ่งพัฒนาขึ้นโดยอาศัยแรงดึงเป็นแรงต้านทานในการรับน้ำหนักเหมือนสะพานแขวน แตกต่างกันที่สายเคเบิลหลักของสะพานแขวนจะถูกชิ่งโยงตลอดแนวความยาวสะพาน และมีสายเคเบิลรอง (สายเคเบิลแขวน) จำนวนมากห้อยจากสายเคเบิลหลักมาผูกยึดตัวสะพานไว้ แต่สะพานชิ่งจะใช้เคเบิลหลายๆ

เส้นยึดรั้งตัวสะพาน (Deck) โดยตรงเข้ากับเสาสะพาน ความแตกต่างอีกประการหนึ่ง คือ ในสะพานแขวน น้ำหนักที่ถ่ายลงตอม่อจะมาจากสายเคเบิลหลักเท่านั้น ส่วนสะพานขึงนั้น นอกจากแรงจะมาจากสายเคเบิลขึงแล้วจะถ่ายมาจากตัวสะพานโดยตรงด้วย การคำนวณแรงในสายเคเบิลใช้เพียงหลักการ Linear Elastic ก็พอ เนื่องจากตัวเคเบิลขึงอยู่ในแนวเส้นตรงต่างจากสะพานแขวน (สำหรับตัวเคเบิลหลักของสะพานแขวนจะมีความโค้งส่งผลให้มีพฤติกรรม Nonlinearity) เหมาะสำหรับสะพานช่วงความยาว 100-350 เมตร แต่อาจใช้ได้ถึงช่วงความยาวราว 800 เมตร การจัดวางแนวสายเคเบิลอาจให้อยู่ในระนาบเดียวในแนวดิ่งที่แนวกกลางสะพานตามแนวยาวของสะพานหรือเป็นสองระนาบด้านข้างหรือจัดแนวให้เกิดความสวยงามได้ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงผลต่อแรงบิดที่จะเกิดขึ้น สำหรับสะพานขึงพบว่าไม่มีปัญหาในเรื่อง Aerodynamics อย่างที่เกิดกับประเภทของสะพานแขวนแต่ต้องคำนึงถึงเรื่องของค่าความถี่ธรรมชาติอันเนื่องมาจากการจัดวางตำแหน่งยึดสายเคเบิลซึ่งอาจทำให้ลด Stiffness ในตัว Deck สะพานลง และการสั่นของตัวสะพานที่ทำให้สายเคเบิลสั่นขึ้นลงในแนวดิ่ง

สะพานขึงในยุคแรกๆ เริ่มจากลักษณะที่เป็นสะพานไม้และได้พัฒนาต่อมาในภายหลัง จนปัจจุบันมีการใช้งานผสมผสานร่วมกันของรูปแบบสะพานขึงกับรูปแบบของสะพานแขวนอีกเป็นจำนวนมาก ซึ่งการผสมผสานร่วมกันของเทคโนโลยีสองรูปแบบนี้สามารถช่วยให้ได้สะพานที่มีโครงสร้างแข็งแรงกว่าเดิม ตัวอย่างเช่นการนำมาใช้เพื่อลดการโก่งตัวของทางรถไฟข้ามน้ำตกไนแองการ่า (Niagara Falls Suspension Bridge)

สะพานขึงสามารถแบ่งออกได้ 4 ประเภทหลักๆ (ดังรูป) ซึ่งมีความแตกต่างกันตรงวิธีการยึดสายเคเบิลเข้ากับตัวเสาของสะพานได้แก่

- a) แบบรัศมี (Radial design) เป็นแบบที่สายเคเบิลถูกขึงไปรวมกันที่ด้านบนสุดของเสาขึง
- b) แบบพิณฝรั่ง (Harp design) เป็นแบบที่สายเคเบิลแต่ละเส้นของแต่ละฝั่งสะพานถูกขึงให้ขนานกันจากตำแหน่งความสูงระดับต่างๆ บนเสาขึงมายังตำแหน่งระยะต่างๆ บนตัวสะพาน เพื่อที่ระยะห่างความสูงของการยึดสายเคเบิลแต่ละเส้นบนเสาขึง จะได้เท่ากับระยะห่างของการยึดสายเคเบิลในแนวระดับด้านล่างที่ตัวสะพานตามแนวของถนน
- c) แบบพัด (Fan design) เป็นแบบที่ผสมกันระหว่างแบบรัศมีและแบบพิณคือเป็นการขึงสายเคเบิลจากเสาขึงกับตัวสะพานแต่ไม่ขนานกัน
- d) แบบดาว (Star design) เป็นแบบที่สายเคเบิลในแต่ละฝั่งสะพานถูกขึงไปรวมกันที่ตำแหน่งเดียวบนตัวสะพาน



รูปที่ 15: ประเภทสะพานขึงแบบต่าง ๆ แบ่งตามการจัดเรียงสายเคเบิล

โดยทั่วไปแล้วมักจะออกแบบให้แนวของสายเคเบิลมีความชัน (มุมของสายเคเบิลจากแนวนอน) อยู่ที่ประมาณ 15 ถึง 30 องศา ทั้งนี้จากทั้ง 4 รูปแบบข้างต้น รูปแบบหลักๆ ของสะพานซึ่งที่มักกล่าวถึงหรือใช้กันมากคือ รูปแบบพylon และแบบพัด

สำหรับการเรียงตัวของสายเคเบิลยังแตกต่างกันในแนวระนาบของสายเคเบิลอีกด้วยซึ่งมีสองรูปแบบหลักๆ คือ

- แบบที่มีเคเบิลระนาบเดียว ซึ่งมีทั้งแบบที่เป็นระนาบเดียวในแนวดิ่งโดยสายเคเบิลเรียงกันอยู่ในแนวตั้งกลางสะพานหรือระนาบเดียวแต่ไม่ได้อยู่ในแนวตั้งกลางสะพาน ซึ่งการใช้รูปแบบของสายเคเบิลระนาบเดียวในแนวตั้งกลางสะพานได้ จำเป็นจะต้องจัดแนวตั้งกลางสะพานที่กว้างพอสำหรับไว้ยึดสายเคเบิล ซึ่งจะทำให้โครงสร้างต้องมีความกว้างมากขึ้นและรับแรงบิดมากขึ้น ทำให้ต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของตัวพื้นสะพาน bridge deck ที่ต้องรับแรงบิดเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้อาจต้องเลือกใช้รูปแบบถัดไปคือ
- แบบที่มีสองระนาบ ซึ่งเคเบิลแต่ละระนาบอาจอยู่เรียงตัวกันเป็นระนาบในแนวดิ่งอยู่ด้านข้างแต่ละด้านของสะพาน หรือเป็นระนาบเอียงเข้าหากันที่กึ่งกลางด้านบนของเสาซึ่ง

การเลือกใช้สะพานซึ่ง จะเหมาะสมสำหรับสะพานที่มีช่วงความยาวมากกว่าการเลือกใช้สะพานยื่น (Cantilever bridges) แต่ยาวนานกว่าการเลือกใช้สะพานแขวน (Suspension bridges) ทั้งนี้เนื่องจากสะพานยื่นมักจะสิ้นเปลืองวัสดุและมีน้ำหนักมากกว่าสะพานซึ่ง ในขณะที่สะพานแขวนนั้นมักจะใช้จำนวนสายเคเบิลที่มากกว่า อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับแต่ละกรณีต่างๆ กันไป

ส่วนประกอบหลักของสะพานซึ่ง (นอกเหนือจากส่วนของสายเคเบิลสะพานซึ่งที่ได้กล่าวถึงไปแล้วข้างต้น) ตัวเสาซึ่ง (Tower, Pylon)

มีทั้งแบบที่เป็นลักษณะของที่รองรับที่ปลายแบบยึดแน่น (Fixed) หรือแบบยึดหมุน (Hinged) ซึ่งอาจใช้เสาซึ่งหนึ่งต้นต่อเคเบิลหนึ่งระนาบ หรือหากใช้เคเบิลสองระนาบก็อาจใช้เป็นเสาซึ่งสองต้นหรือใช้เป็นลักษณะของเฟรมรูปตัว A (A-Frame) ก็ได้ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความแข็งแรงในแนวด้านข้างของเสาซึ่งได้อีกด้วย นอกจากนี้หากสะพานซึ่งเป็นแบบที่มีช่วงความยาวหลายๆ ช่วง อาจใช้รูปแบบของเฟรมรูปตัว A ในแนวของตามยาวของสะพาน (แนวระนาบสายเคเบิล) และยึดตัวเฟรมแต่ละข้างของสะพานไว้ด้วยกันแนวตามขวางที่ปลายบนสุดอีกทีหนึ่ง เป็นการเพิ่มความแข็งแรงและ stiffness ให้แก่สะพานโดยรวม

เสาซึ่งที่ใช้ปลายที่รองรับแบบยึดแน่นมีข้อเสียคือทำให้เพิ่มแรงดัดในตัวเสาซึ่งทำให้ต้องออกแบบใช้เสาซึ่งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ข้อเสียนี้ก็สามารถชดเชยจากการที่เสาซึ่งแข็งแรงขึ้นก็ทำให้ตัวโครงสร้างสะพานแข็งแรงขึ้นทั้งสะพานและการก่อสร้างติดตั้งตัวพื้นสะพานก็ทำได้ง่ายกว่าส่งผลให้ท้ายสุดเป็นวิธีที่ประหยัดกว่าการใช้เสาซึ่งแบบที่รองรับแบบยึดหมุน

ตัว Deck สะพาน

มีทั้งลักษณะที่ใช้โครงเหล็กถักหรือเป็นคอนกรีตทั้งแบบเทในที่หรือเป็นแบบหล่อสำเร็จ เช่นเดียวกันกับสะพานแบบอื่นๆ ทั้งนี้มักใช้เป็นรูปแบบกล่อง Box girder เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงบิด (Torsional stiffness) อันเกิดจากแรงกระทำด้านข้าง แรงลม หรือน้ำหนักบรรทุกจรของผู้ใช้สะพานที่ไม่สมมาตรกันในแต่ละข้างของสะพาน

การจัดช่วงความยาวของสะพาน

สามารถแบ่งสะพานซึ่งจากลักษณะของช่วงความยาวสะพานได้สามแบบคือ

1. แบบช่วงความยาวสองช่วงโดยแต่ละช่วงอาจยาวเท่ากัน (สมมาตรกัน) หรือไม่เท่ากัน (อสมมาตร) ก็ได้ โดยในกรณีที่เป็นสะพานแบบช่วงความยาวไม่เท่ากัน อัตราส่วนของช่วงความยาวช่วงที่ยาวกว่า (ช่วงความยาวที่ตัวสายเคเบิลถูกยึดเข้ากับตัว Deck สะพาน) ต่อความสูงของเสาซึ่งจะมีค่าประมาณ 0.6-0.7 และอัตราส่วนความยาวของช่วงยาวต่อความยาวสะพานทั้งหมดมีค่าประมาณ 0.8 โดยสายเคเบิลที่ยึดตั้งของช่วงความยาวที่สั้นกว่ามักจะยึดรวมกันเข้ากับตัวยึด Abutment ที่ปลายฝั่งของสะพาน
2. แบบสามช่วงความยาว ซึ่งประกอบด้วยช่วงด้านข้างสองช่วงและช่วงหลัก (Main span) ในช่วงกลางหนึ่งช่วงโดยมีอัตราส่วนความยาวของช่วงหลักช่วงกลางนี้ต่อความยาวสะพานทั้งหมดมีค่าประมาณ 0.55
3. แบบหลายช่วงความยาวต่อๆ กัน ซึ่งมักจะยาวเท่าๆ กันในแต่ละช่วงความยาว

สำหรับสะพานซึ่ง ตัว Girder ของสะพานจะถูกยึดไว้หลายตำแหน่งได้แก่ ที่ตัวยึดปลายสะพาน Abutment, ที่เสาซึ่ง และที่ตำแหน่งยึดสายเคเบิล ตำแหน่งต่างๆ เหล่านี้มีผลต่อการวิเคราะห์และออกแบบตัวสะพาน ซึ่งมีทั้งกรณีที่ต้องวิเคราะห์ให้เป็นที่รองรับแบบยึดแน่น (Fixed support) และที่รองรับแบบมีการเคลื่อนตัวได้ (Yielding support) ทั้งนี้หลักในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานสามารถแบ่งออกเป็นหลักๆ ได้สองวิธีคือ 1.กรณีแบบสายเคเบิลระนาบเดียว และ 2.กรณีแบบสายเคเบิลสองระนาบ

ความแตกต่าง หลักๆ อยู่ที่ลักษณะการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานกรณีแบบเคเบิลระนาบเดียว แรงในแนวดิ่งที่กระทำกับตัวสะพาน (รวมถึงแรงตามแนวแกน) จะถูกรับไว้ด้วยสายเคเบิล ส่วนแรงด้านข้างและแรงบิดจะถูกถ่ายแรงไปที่เสาซึ่งผ่านทางตัวพื้น deck ของสะพาน แต่สำหรับกรณีที่เป็นแบบเคเบิลสองระนาบ ตัวสายเคเบิลจะรับแรงทั้งแรงดิ่งตามแนวแกนและแรงบิดที่เกิดขึ้นกับตัวสะพาน ทำให้การวิเคราะห์ต้องพิจารณาโครงสร้างในรูปแบบสามมิติ โดยต้องคำนึงถึงการยึดหดของสายเคเบิลสัมพันธ์กับการโก่งตัวและการบิดของตัวสะพานด้วย

รูปแบบสะพานเมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบการวางสายเคเบิลแบบพินและแบบพัด โดยทั่วไปสะพานแบบพินจะมีโมเมนต์ดัดมากกว่าและมีแรงดิ่งในสายเคเบิลน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการส่งผ่านถ่ายแรงของสายเคเบิลไปที่เสาซึ่งและที่ยึดตั้งปลายสะพานไม่ได้เกิดขึ้นโดยตรง (ต้องอาศัย Stiffness ของตัว deck สะพานและตัวเสาซึ่ง) ทำให้โดยทั่วไปมักเลือกใช้สะพานในรูปแบบพัดมากกว่าแบบพินซึ่งจะออกแบบด้วยค่าโมเมนต์ดัดที่น้อยกว่า อย่างไรก็ดี การที่สะพานแบบพินมีแรงดิ่งในเคเบิลน้อยกว่าจะทำให้ใช้หน้าตัดของสายเคเบิลที่เล็กกว่า นอกจากนี้สะพานในรูปแบบพิน ค่าโมเมนต์ดัดในช่วงความยาวหลัก (Main span) อาจมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์ดัดในช่วงของช่วงความยาวด้านข้าง (Side span) ได้

สะพานชนิดต่าง ๆ

Side-spar cable-stayed bridge (สะพานขึงแบบใช้เสาข้างด้านข้าง)

จะมีเสาข้างรับน้ำหนักตัวสะพานอยู่ทางด้านข้างของสะพานเพียงด้านเดียว และเนื่องจากการที่มีสายเคเบิลยึดตั้งตัวสะพานทางด้านข้างเพียงด้านเดียวนั้นมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างมีความแตกต่างจากรูปแบบสะพานขึงแบบธรรมดาตรงที่แรงทางด้านข้างที่กระทำต่อตัวเสาข้างจากสายเคเบิลของแต่ละฝั่งนั้นไม่สมดุลกัน ทำให้ตัวเสาข้างต้องออกแบบให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเพื่อสามารถรับแรงดัดและไม่เกิดการล้มคว่ำรวมถึงความแข็งแรงของฐานรากที่ต้องพอเพียงด้วย ข้อดีของสะพานขึงที่ให้เสาข้างอยู่ทางด้านข้างสะพานเพียงด้านเดียวคือช่วยให้สามารถก่อสร้างสะพานในแนวโค้งได้

Multiple span cable-stayed bridge (สะพานขึงแบบหลายช่วง)

สำหรับสะพานขึงที่มีช่วงสะพาน 2 หรือ 3 ช่วง น้ำหนักของช่วงสะพานหลักช่วงกลางมักถูกยึดตั้งไว้ใกล้กับจุดปลายตอม่อริม Abutment ในช่วงสะพานช่วงสุดท้าย

แต่สำหรับในสะพานที่มีมากกว่า 3 ช่วง ลักษณะโครงสร้างจะมี Stiffness ลดลง ทำให้ยากต่อการออกแบบตัวสะพานและเสาข้างของสะพาน ซึ่งบางครั้งทำให้ต้องมีการยึดตั้งตัวเสาข้างของสะพานเพิ่มเติม หรือการใช้เสาข้างแบบเสาสองขาหรือมากกว่า หรือการใช้เสาที่มีลักษณะเป็นโครง (Frame) ปัญหาเช่นเดียวกันนี้เกิดกับสะพานแขวนด้วยเช่นกันสำหรับสะพานแขวนที่มีช่วงสะพานมากกว่า 3 ช่วงในบางกรณี ซึ่งทำให้ต้องมีเสายึดตั้ง Anchorage เพิ่มเติมทุกๆ 3 ช่วงสะพาน

Extradosed bridge

เป็นสะพานรูปแบบใหม่ผสมผสานระหว่างสะพานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องและสะพานขึง มีลักษณะเหมือนสะพานขึงแต่ใช้ตัวสะพาน deck ที่แข็งแรงกว่า ซึ่ง ทำให้สามารถลดทอนสายเคเบิลในบริเวณที่ต้องยึดตั้งช่วงที่ใกล้กับตัวเสาข้างได้ทำให้สามารถลดความสูงของเสาข้างลง (มีผลให้สัดส่วนความสูงต่อความยาวช่วงสะพานลดลงจากสะพานขึงทั่วไป) ช่วง Span ที่เหมาะสมของ Extradosed Bridge จะอยู่ระหว่าง 100-250 เมตร ซึ่งอยู่ระหว่างสะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องและสะพานขึง ถึงแม้ว่า Extradosed Bridge จะมีรูปร่างคล้ายสะพานขึง แต่โดยความเป็นจริงแล้วพฤติกรรมทางด้านโครงสร้างของ Extradosed Bridge จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับ สะพานคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องมากกว่า เนื่องจากเสาข้างที่มีความสูงไม่มากนัก ประกอบกับมุมเอียงที่น้อยกว่าของสายเคเบิลของสะพานขึงจะทำให้เกิดแรงในแนวราบต่อคานรูปกล่องอย่างมาก ทำให้สายเคเบิลมีพฤติกรรมทางโครงสร้างทั้งด้านแนวตั้งและแนวราบต่อองค์ประกอบของโครงสร้างโดยรวม หรืออาจกล่าวได้ว่า นอกจากสายเคเบิลจะทำหน้าที่ยึดตั้งตัวสะพานหรือคานรูปกล่องในแนวดิ่งแล้ว ยังทำหน้าที่คล้ายกับลวดอัดแรงในคานรูปกล่องด้วย แตกต่างจากพฤติกรรมสายเคเบิลของสะพานขึงที่ทำหน้าที่หิ้วน้ำหนักที่กระทำทั้งหมดต่อ Deck ผ่านสายเคเบิลไปสู่เสาข้างและ เสาหน้าส่งแรงลงสู่ฐานราก โดยมากแล้วเสาข้างของ Extradosed Bridge จะมีความสูงประมาณ 10-25 เมตร และมีอัตราส่วนของความสูงของเสาข้างต่อความยาวช่วงสะพานประมาณ $H/L = 1/15$ ถึง $1/10$ เปรียบเทียบกับสะพานขึง ที่มีอัตราส่วนประมาณ $1/5$ ทำให้ที่ปลายเสาข้างมีความเป็นไปได้ในการใช้โครงสร้างแบบอานม้า (Saddle Structures) เพื่อให้สายเคเบิลลอดผ่านโดยไม่ต้องยึดตั้งสายเคเบิลไว้กับเสาข้าง Tower (ไม่ต้องใช้ระบบ Anchored System) ซึ่งจะช่วยลดราคาก่อสร้างและลดความหนาแน่นของระบบโครงสร้างที่ด้านบนของเสาข้างลง นอกจากนี้เนื่องจากอัตราส่วน H/L ที่มีค่าน้อยกว่าสะพานขึง ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในสายเคเบิล

เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจร สามารถลดลงได้ราว 1 ใน 4 ของสะพานซึ่ง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้หน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stress) สำหรับ Extradosed Bridge อยู่ในระดับเดียวกันกับการใช้ลวดอัดแรง โดยทั่วไป หรือราว 60% ของกำลังดึงลวดอัดแรงสูงสุด ในขณะที่สำหรับสะพานซึ่งจะมีค่า Allowable Stress ประมาณ 40% หรือน้อยกว่า ยิ่งไปกว่านั้นเนื่องจากเสาซึ่งของ Extradosed Bridges มีความสูงไม่มากนักทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษา หรือแม้แต่การเปลี่ยนสายเคเบิลเมื่อเทียบกับสะพานซึ่ง

Self-anchored suspension bridge

เป็นสะพานที่มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับสะพานซึ่งตรงที่แรงดึงที่ใช้ในการยึดตัวสะพาน Bridge deck ถูกถ่ายแรงผ่านแรงอัดในแนวแกนของตัวเสาสะพาน (Tower) ในแนวดิ่งและแรงอัดในแนวแกนของตัวสะพานในแนวนอน ในขณะที่เดียวกันสะพานประเภทนี้ก็มีลักษณะคล้ายคลึงกับสะพานแขวนตรงที่มีสายเคเบิลโค้งและสายเคเบิลแขวนตัวสะพานแต่จะขาดส่วนยึดรั้ง Anchorage นอกจากนี้สะพานประเภทนี้แตกต่างจากสะพานซึ่งและสะพานแขวนตรงที่จะต้องใช้นั่งร้านค้ำยันชั่วคราวในระหว่างการก่อสร้าง ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองค่าก่อสร้าง



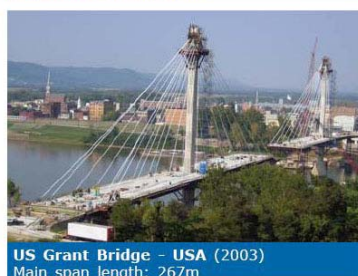
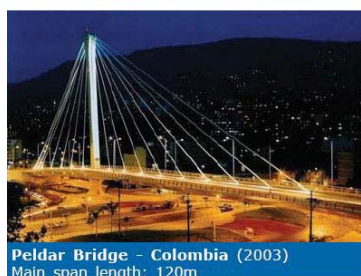
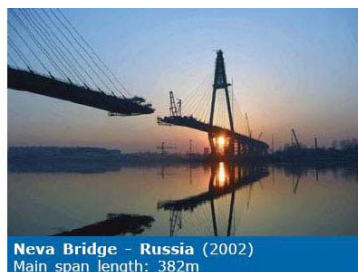
รูปที่ 16: สะพานซึ่งชนิด (Self anchored suspension bridge,
(สะพาน San Francisco-Oakland bay bridge, USA)

ตัวอย่างสะพานซึ่งในประเทศไทย

สะพานพระราม 8 เป็นสะพานซึ่งแบบอสมมาตรเสาเดียว 3 ระบายที่ยาวที่สุดในโลกกล่าวคือ ซึ่งด้วยเคเบิลระนาบคู่บริเวณตัวสะพาน (Main Bridge) จำนวน 28 คู่ และซึ่งด้วยเคเบิลระนาบเดี่ยวช่วงหลังสะพาน (Back Span) จำนวน 28 เคเบิล สะพานมีความยาวทั้งสิ้น 475 เมตร โดยมีช่วงตัวสะพานยาว 300 เมตร (ซึ่งนับว่ายาวที่สุดในโลกในสะพานที่มีลักษณะนี้) และช่วงหลังสะพานยาว 175 เมตร



รูปที่ 17: สะพานพระราม 8



รูปที่ 18: ตัวอย่างสะพานขึง (Cable-stayed bridge)

ตารางที่ 2: รูปแบบลักษณะสะพานเมื่อแบ่งตามขนาดความยาวของสะพาน

ชนิดโครงสร้าง	วัสดุ	ช่วงความยาว (ม.)
Slab	คอนกรีต	0-12
Girder	คอนกรีต	12-250
	เหล็ก	30-260
Cable-stayed girder	คอนกรีต	≤ 250
	เหล็ก	90-850
Truss	เหล็ก	90-550
Arch	คอนกรีต	90-300
	Steel truss	240-500
	Steel rib	120-360
Suspension	เหล็ก	300-1400

ข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นต้องทราบในการออกแบบสะพาน

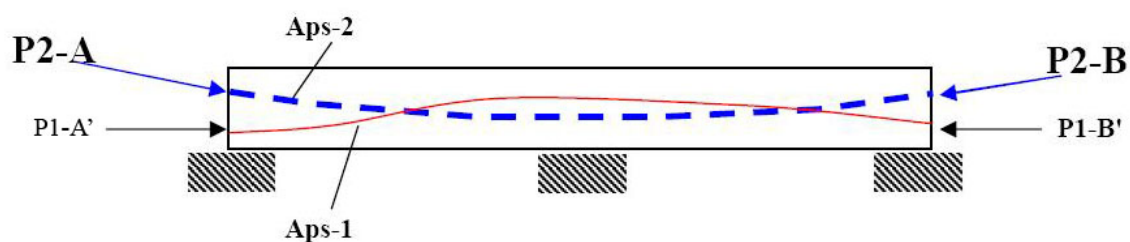
1. การจัดตำแหน่ง การแบ่งอัดแรงเหล็กเสริมอัดแรงในโครงสร้างที่ใช้ลวดอัดแรงที่ขั้นตอนการก่อสร้างต่าง ๆ

เนื่องจากโครงสร้างของสะพานมักใช้ในลักษณะของคอนกรีตอัดแรง ดังนั้นความรู้ด้านคอนกรีตอัดแรงและคุณสมบัติวัสดุต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจึงเป็นข้อมูลจำเป็นที่จะต้องทราบ

การจัดตำแหน่งเหล็กเสริมอัดแรงจะจัดให้มีระยะแขนของแนวแรงมากที่สุดเพื่อให้สามารถมีกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดได้มากที่สุด ตำแหน่งดังกล่าวจึงเป็นการจัดลวดอัดแรงในหน้าตัดคานให้ใกล้ผิวคานด้านรับแรงดึงมากที่สุด (หลักการเดียวกันกับในคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาที่ต้องการเสริมเหล็กอยู่ใกล้ผิวล่างมากที่สุดเพื่อให้มีกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดมากที่สุด) โดยในกรณีการใช้ลวดอัดแรงนั้นต้องคำนึงถึงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นขณะถ่ายแรงจากลวดอัดแรงเข้าสู่คอนกรีตด้วยโดยเฉพาะที่สภาวะเริ่มต้นซึ่งคอนกรีตยังไม่แข็งตัวเต็มที่และกำลังประลัยของคอนกรีตยังไม่ถึงค่าสูงสุด การอัดแรงที่สูงเกินไปประกอบกับหากมีน้ำหนักบรรทุกไม่เพียงพออาจทำให้ผิวหน้าตัดคานด้านล่างถูกอัดแรงมากเกินไปจนทำให้หรือผิวคานด้านบนของคานเกิดแรงดึงเกินกว่าค่าที่ยอมให้ได้ จึงทำให้ในการออกแบบโดยการใช้ลวดอัดแรงนั้นต้องคำนึงถึงน้ำหนักบรรทุกหรือค่าโมเมนต์ที่ต้องคำนึงถึงตั้งแต่ขั้นตอนการอัดแรงและถ่ายแรงของลวดอัดแรงเพื่อช่วยให้สามารถจัดตำแหน่งของลวดอัดแรงให้อยู่ชิดผิวด้านรับแรงดึงให้มากที่สุดได้

อีกวิธีหนึ่งที่ใช้เพื่อช่วยให้การจัดตำแหน่งลวดอัดแรงสามารถทำได้ชิดผิวคานด้านรับแรงดึงให้มากที่สุดได้นั้นคือการแบ่งดึงและถ่ายแรงลวดอัดแรงที่ละส่วนตามขั้นตอนก่อสร้าง โดยดึงและถ่ายแรงลวดอัดแรงจำนวนเท่าที่จำเป็นในขั้นตอนนั้นๆ เช่นในการก่อสร้างเบื้องต้นเมื่อมีน้ำหนักบรรทุกน้อยก็สามารถแบ่งดึงและถ่ายแรงลวดอัดแรงเพียงบางส่วนก่อน เมื่อการก่อสร้างดำเนินไปได้มากแล้วคอนกรีตมีการแข็งตัวมากขึ้นและน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นจึงค่อยอัดแรงลวดส่วนที่เหลือเป็นต้น วิธีนี้ทำให้สามารถจัดแนวลวดอัดแรงให้ได้ตำแหน่งใกล้ผิวคานด้านรับแรงดึงมากที่สุดเท่าที่จะทำได้และทำให้มีกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ด้วย หลักการดังกล่าวจึงต้องนำมาใช้ในการออกแบบให้มีประสิทธิภาพ

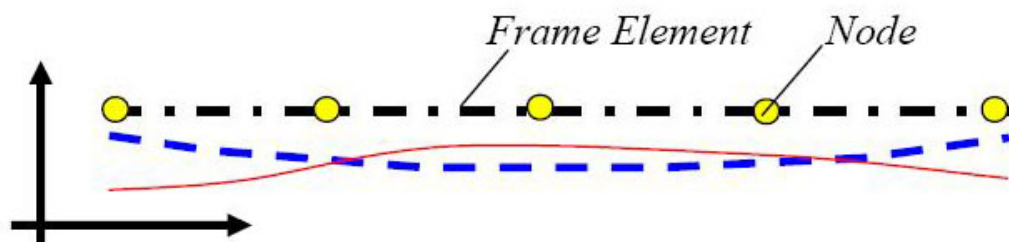
นอกจากนี้ ในขั้นตอนก่อสร้างต่างๆ ยังอาจทำให้ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นแตกต่างกันออกไปเช่น เมื่อเริ่มต้นก่อสร้างคานที่ออกแบบอาจรับโมเมนต์ดัดในทิศทางหนึ่ง แต่เมื่อก่อสร้างเสร็จแล้วหรือในระหว่าง ขั้นตอนการก่อสร้างอื่นๆ อาจมีผลให้คานที่ออกแบบดังกล่าวต้องรับโมเมนต์ดัดในอีกทิศทางหนึ่งทำให้มีผล ต่อแนวลดอัดแรงที่แตกต่างกันดังแสดงในรูป การออกแบบจึงต้องคำนึงถึงสิ่งที่จะเกิดขึ้นจริงจึงจะออกแบบ ได้อย่างถูกต้อง



Muilti-Strands

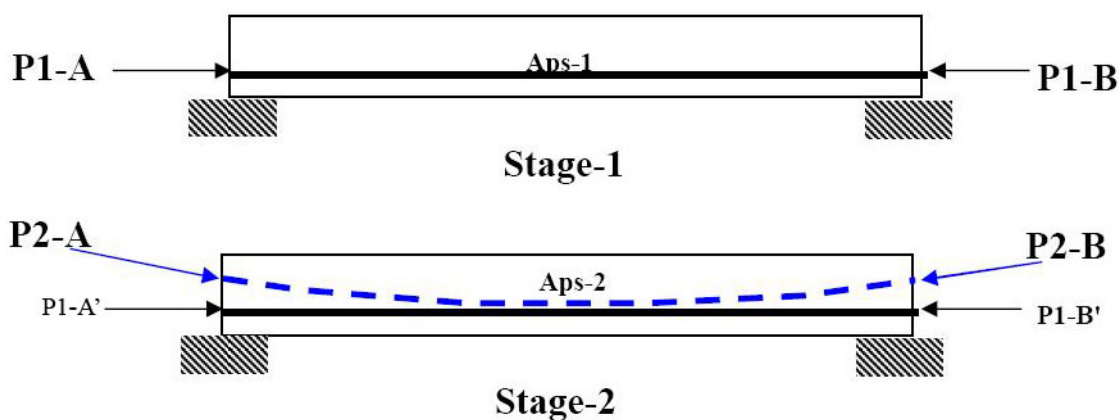
รูปที่ 19: รูปแสดงการแบ่งอัดแรงโครงสร้างตามขั้นตอนการก่อสร้างต่าง ๆ

ดังนั้นการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงการจัดตำแหน่งเหล็กเสริมอัดแรง, การแบ่งจำนวนเหล็กเสริมอัดแรงและการอัดแรงเหล็กเสริมอัดแรงตามขั้นตอนการก่อสร้างต่างๆ ซึ่งในการวิเคราะห์, คำนวณและออกแบบนั้นสามารถจำลองโครงสร้างให้เป็นลักษณะเฟรมเดี่ยวยาวต่อเนื่องกันที่ Node และมีลวดอัดแรงหลายๆ ชุดตั้งรูปได้



รูปที่ 20: รูปแสดงการจำลองโครงสร้างเป็นเฟรมเดี่ยวยาวต่อเนื่องกันที่ Node

หมายเหตุ: เมื่อมีการแบ่งการอัดแรงที่ละส่วนนั้น ต้องคำนึงถึงการคลายแรงดึงของลวดอัดแรงในแต่ละขั้นตอนของการแบ่งอัดแรงและการก่อสร้างด้วยเนื่องจากการสูญเสียแรงดึงในลวดอัดแรงเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปลวดอัดแรงชุดที่ 1 (Aps-1) และการอัดแรงด้วยแรง P1-A และ P1-B จะเกิดการคลายแรงดึงเนื่องจากการอัดแรงลวดอัดแรงชุดที่ 2 (Aps-2) ทำให้แรงดึงในลวดอัดแรงชุดที่ 1 เปลี่ยนไปเป็น P1-A' และ P1-B'



รูปที่ 21: การคลายแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงชุดแรกเมื่อทำการอัดแรงในเหล็กเสริมอัดแรงชุดที่สอง

2. การคำนึงถึงผลของอายุของคอนกรีตตามเวลา

คอนกรีตเป็นวัสดุสำคัญที่ใช้ในโครงสร้าง และในงานคอนกรีตอัดแรงซึ่งต้องการคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยสูง (f_c') เนื่องจากต้องต้านทานหน่วยแรงอัดหรือหน่วยแรงยืดเหนือยวที่สูงมาก ซึ่งถ้าหากคอนกรีตกำลังไม่สูงพออาจทำให้โครงสร้างเกิดการเสียหายได้ นอกจากนั้นคอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยสูงยังมีกำลังในการรับแรงดึง แรงเฉือนและแรงยึดเหนี่ยวสูงด้วย

เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามเวลา ดังนั้นผลของอายุคอนกรีตจึงเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงและใช้ในการออกแบบ

ลักษณะการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตตามเวลาจะมีอัตราการเพิ่มมากในช่วงแรก (หลังจากเริ่มเทคอนกรีต) และค่อยๆ ช้าลงเมื่อเวลาผ่านไป อัตราการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับวิธีการบ่ม (curing) และชนิดของซีเมนต์ที่ใช้ ในงานคอนกรีตอัดแรงการเพิ่มกำลังคอนกรีตได้เร็วๆ เป็นสิ่งที่ต้องการเพื่อทำการอัดแรงให้เร็วที่สุดเท่าที่ทำได้ โดยเฉพาะคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงเหล็กก่อนนิยมใช้การบ่มด้วยไอน้ำหรือบางทีก็ใช้ซีเมนต์ประเภทที่สามซึ่งเป็นซีเมนต์ที่ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงในเวลาสั้นๆ

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เวลา (t) ใดๆ สามารถประมาณได้จาก

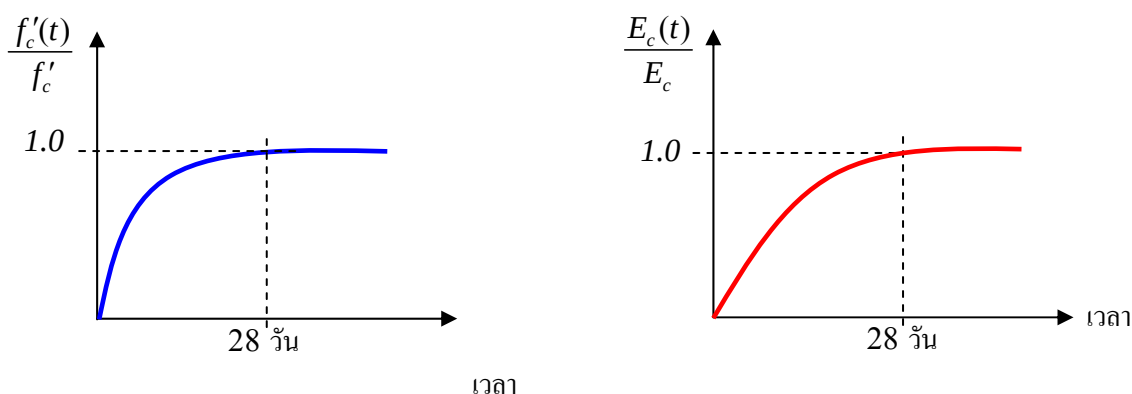
$$f'_c(t) = \frac{t}{\alpha + \beta t} f'_c(28)$$

โดยที่ค่า α และ β คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของซีเมนต์และวิธีการบ่ม ส่วนค่า $f'_c(28)$ คือค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

นอกจากค่าของกำลังอัดประลัยของคอนกรีตแล้ว ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity, E_c) ก็เป็นอีกค่าหนึ่งที่มีความสำคัญในการคำนวณวิเคราะห์และออกแบบ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงสติฟเนส (stiffness) ของวัสดุ ถ้ามีค่ามากจะมีความสามารถในการต้านทานการโก่งได้ดี ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

สำหรับคอนกรีตที่มีน้ำหนักระหว่าง 1.45 ถึง 2.48 ตัน/ม.³ สามารถประมาณค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ดังนี้ $E_c = 4270w^{1.5}\sqrt{f'_c}$ และสำหรับคอนกรีตน้ำหนักธรรมดาทั่วไปสามารถใช้ค่า $w = 2.33$ ตัน/ม.³ ดังนั้นจะได้สามารถประมาณค่า $E_c = 15200\sqrt{f'_c}$

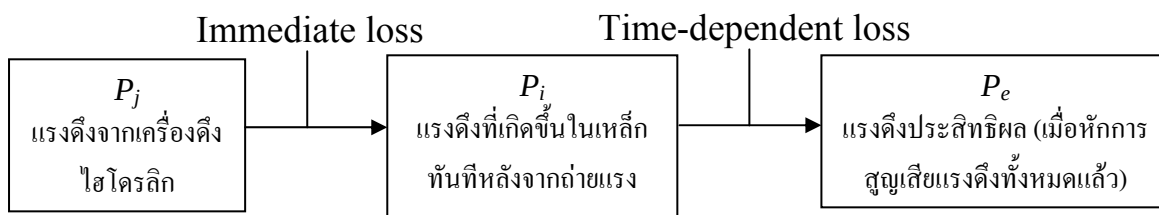
ทั้งนี้ในวิเคราะห์และออกแบบจะไม่คิดถึงผลของน้ำหนักบรรทุกจรที่กระทำกับโครงสร้างในช่วงเวลาที่คำนึงถึงผลของอายุคอนกรีต ณ เวลาต่างๆ ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีตและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่เวลาใดๆ เทียบกับค่าของคอนกรีตที่มีอายุ 28 วัน



รูปที่ 22: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกับเวลา

3. การคำนึงถึงค่าการสูญเสียแรงดึงในลวดอัดแรงหรือการเสื่อมลดของแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

ในการใช้ระบบการอัดแรง จะมีการสูญเสียแรงดึงเกิดขึ้นในลวดอัดแรงหรือเหล็กเสริมอัดแรง ซึ่งการสูญเสียแรงดึงนี้มีทั้งการสูญเสียที่เกิดขึ้นทันทีทันใดหลังจากการถ่ายแรง (immediate loss) และการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา (time-dependent loss) ดังแสดงตามผังได้ดังนี้



รูปที่ 23: แพนผังแสดงขั้นตอนการเสื่อมลดแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นทันทีทันใด มีสาเหตุจากหลายประการด้วยกัน แต่ที่มักนำมาพิจารณาในการออกแบบได้แก่ การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง (friction loss) การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวอีลาสติกของคอนกรีต (elastic shortening loss) และการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage take up) นอกจากนี้ยังอาจมีสาเหตุอื่นๆ อีกเช่น การหดตัวของไม้แบบในระบบอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อน การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ฯลฯ

การสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นตามเวลา มีสาเหตุหลักๆ มาจาก การหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้น (shrinkage loss) การคืบ (creep loss) และการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น การสูญเสียแรงดึงจะเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยที่อัตราการสูญเสียแรงดึงจะสูงในช่วงแรกและค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้น

การสูญเสียแรงดึงทั้งสองประเภทข้างต้นสามารถอธิบายคร่าวๆ แยกตามแต่ละหัวข้อได้ดังนี้

3.1 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดที่เกิดขึ้นบนเหล็กเสริมอัดแรง (friction loss)

เป็นการสูญเสียแรงดึงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการดึงเหล็กของคอนกรีตอัดแรงระบบดึงเหล็กทีหลัง (Post-tensioning system) ความการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดฝืดระหว่างเหล็กเสริมอัดแรงกับท่อที่ใช้ร้อยลวดอัดแรง (hollow duct) จะทำให้แรงดึงในเหล็กค่อยๆ ลดลงตามระยะที่ห่างออกไปจากปลายเหล็กเสริมที่ทำการดึง ค่าการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดขึ้นอยู่กับค่ามรรวมของความโค้ง ระยะห่างจากปลายเหล็กเสริมที่ทำการดึง ชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง และชนิดของท่อที่ใช้ร้อยเหล็กเสริมอัดแรง การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดนี้จะพิจารณาเฉพาะกรณีระบบดึงเหล็กทีหลังเท่านั้น เนื่องจากในระบบอัดแรงก่อน (Pre-tensioning) จะไม่ใช้ท่อร้อยลวดและไม่มีคมความฝืดเกิดขึ้นขณะดึงลวดอัดแรงจึงไม่นำปัจจัยนี้มาพิจารณา

สำหรับการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากความฝืดนั้นสามารถแบ่งปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงได้สองส่วนคือความฝืดที่เกิดจากความโค้งของแนวร้อยเหล็กเสริมอัดแรง (Intended curvature effect)

และความผิดที่เกิดตามความยาวของเหล็กเสริมอัดแรงในแนวเส้นตรงตามทฤษฎี (Length effect) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วแนวเหล็กเสริมอัดแรงดังกล่าวไม่สามารถเป็นแนวเส้นตรงได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ทั้งนี้เนื่องจากปัจจัยเช่นความคดภายในท่อร้อยเหล็กอัดแรงที่เล็กมาก ๆ หรือการหย่อนตัวของลวดอัดแรงเนื่องจากน้ำหนัก จึงอาจเรียกปัจจัยความผิดนี้ว่าเป็นปัจจัยที่เกิดจากความโค้งที่ไม่ได้ตั้งใจของแนวร้อยเหล็กเสริมอัดแรงหรือความคดก็ได้ (Wobbling effect) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้งและความคดทั้งสองส่วนนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของท่อร้อยเหล็กเสริมอัดแรงที่ใช้ ชนิดของลวดอัดแรง ความเรียบและผิวสัมผัสของท่อและเหล็กเสริมอัดแรง ฯลฯ

3.2 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (elastic shortening loss)

สาเหตุของการสูญเสียแรงดึงชนิดนี้เกิดจากการหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการแรงอัดตามทฤษฎีอัสติค และในขณะเดียวกันเหล็กเสริมอัดแรงก็จะสั้นลงตาม ดังนั้นการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจึงเกิดขึ้นด้วย โดยที่การสูญเสียหน่วยการยึดตัวในเหล็กเสริมอัดแรง ($\Delta\epsilon_s$) เท่ากับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่เกิดขึ้น ($\Delta\epsilon_c$) แต่จะมีความแตกต่างกันระหว่างการอัดแรงในระบบอัดแรงก่อนและอัดแรงที่หลังตรงที่ ในระบบอัดแรงก่อน เหล็กเสริมอัดแรงจะสูญเสียแรงดึงภายหลังการอัดแรงตามที่อธิบายข้างต้น แต่การสูญเสียแรงดึงในระบบอัดแรงที่หลังจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการอัดแรง เนื่องจากค่าแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่วัดได้จากเครื่องอัดแรงไฮดรอลิกนั้นเป็นค่าหลังจากการหดตัวของคอนกรีตได้เกิดขึ้นแล้ว ดังนั้นสำหรับการอัดแรงครั้งแรกของระบบอัดแรงที่หลัง จึงเสมือนไม่มีการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากการหดตัวของอัสติค แต่จะเห็นเมื่อทำการอัดแรงครั้งถัด ๆ ไปซึ่งทำให้คอนกรีตและเหล็กเสริมอัดแรงก่อนหน้ามีการหดตัวตามทฤษฎีอัสติค

3.3 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการเข้าที่ของสมอยึด (anchorage take up)

ในคอนกรีตอัดแรงประเภทดึงเหล็กที่หลัง การถ่ายแรงจากเครื่องดึงไฮดรอลิกจะกระทำผ่านสมอยึด (Anchorage) ซึ่งอยู่ที่ปลายเหล็กเสริมอัดแรง โดยที่สมอยึดมีการขยับตัวเพื่อเข้าที่ขณะทำการถ่ายแรงจากเครื่องดึงสู่สมอยึด การขยับตัวนี้ทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงด้วยเพราะเหล็กเสริมอัดแรงจะขยับตัวตาม การขยับตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของสมอยึด

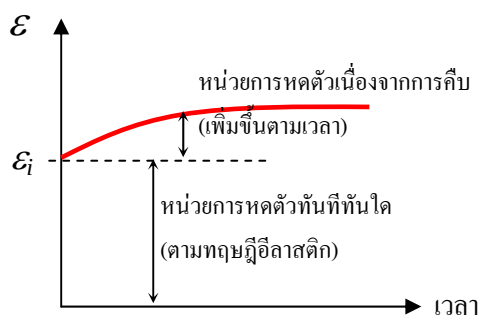
การสูญเสียแรงดึงประเภทนี้จะมีค่ามากในส่วนของเหล็กเสริมอัดแรงที่อยู่ใกล้สมอยึดเนื่องจากผลของการขยับตัวของสมอยึด และการสูญเสียแรงดึงจะน้อยลงตามผลกระทบจากการขยับตัวของสมอยึดที่ลดลงและหมดไปตามตำแหน่งที่ห่างออกไปเนื่องจากผลของความผิดซึ่งด้านการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมอัดแรง ลักษณะการดำนนี้คล้ายกันกับแรงด้านขณะทำการดึงลวด (หัวข้อที่ 3.1) เพียงแต่มิที่ตรงกันข้าม

3.4 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต (shrinkage loss)

การสูญเสียแรงดึงในกรณีนี้มีผลมาจากหลายปัจจัย แต่ปัจจัยหลักคือผลจากการหดตัวของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียความชื้นในคอนกรีต ในการหาค่าการสูญเสียแรงดึงจะคำนึงถึงปัจจัยของอัตราส่วนปริมาตรต่อพื้นที่ผิว ค่าความชื้นสัมพัทธ์ และระยะเวลานับจากหลังการบ่มคอนกรีตจนถึงการอัดแรง ซึ่งการสูญเสียแรงดึงประเภทนี้มีค่ามากในช่วงแรก (ราว 80% ในปีแรก) และจะค่อย ๆ ลดลงในปีถัด ๆ ไป และตามค่าระยะเวลานับจากหลังการบ่มคอนกรีตจนถึงการอัดแรงมีผลต่อการสูญเสียแรงดึงประเภทนี้นั้น จะเห็นว่าระบบการอัดแรงแบบดึงเหล็กก่อนจะมีการสูญเสียแรงดึงมากที่สุด ส่วนระบบการอัดแรงแบบดึงเหล็กที่หลังจะพบว่ายิงทำการอัดแรงซ้ำก็จะยิ่งทำให้การสูญเสียแรงดึงนี้มีค่าน้อยลง

3.5 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคืบ (creep loss)

การคืบหมายถึงการที่คอนกรีตเกิดการหดตัวเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากการหดตัวแบบอีลาสติก (หรือการหดตัวทันทีทันใดภายใต้แรงตามทฤษฎีอีลาสติก) ภายใต้หน่วยแรงคงที่ซึ่งกระทำค้างอยู่บนคอนกรีตในช่วงระยะเวลาหนึ่ง การคืบที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับเวลาและค่าหน่วยแรงบนคอนกรีต และเมื่อเกิดการหดตัวเพิ่มจากการคืบ ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงในขณะเดียวกัน



รูปที่ 24: กราฟแสดงค่าหน่วยการหดตัวของคอนกรีตกับเวลา

3.6 การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรง (steel relaxation loss)

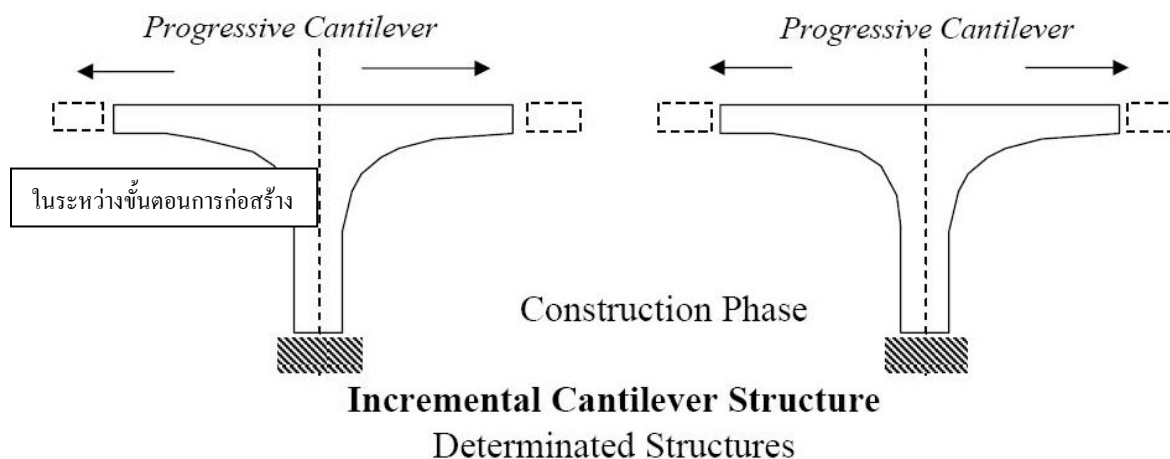
การสูญเสียแรงดึงในกรณีนี้ เกิดเนื่องจากการคลายแรงดึงในตัวเหล็กเสริมอัดแรงภายใต้การยึดตัวคงที่ของเหล็กเสริมในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ขนาดของแรงดึงที่ลดลงขึ้นอยู่กับค่าของหน่วยแรงดึงแรกเริ่ม เวลาที่ผ่านไปหลังจากดึงเหล็กเสริมอัดแรง และชนิดของเหล็กเสริมอัดแรง สำหรับเหล็กเสริมอัดแรงที่มีกำลังสูงจะมีค่าการคลายแรงดึงมากกว่าเหล็กเสริมอัดแรงที่มีกำลังต่ำกว่า นอกจากนี้ในคอนกรีตอัดแรง หน่วยการยึดตัวของเหล็กเสริมอัดแรงภายหลังการอัดแรงจะลดลงเนื่องจากการสูญเสียแรงดึงภายใต้สาเหตุอื่นๆ ตามหัวข้อที่อธิบายก่อนหน้า ซึ่งในขณะเดียวกันมีผลต่อค่าการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงด้วย ดังนั้นในการหาค่าการคลายแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงนี้จึงต้องคำนึงถึงการสูญเสียแรงดึงเนื่องจากสาเหตุอื่นๆ ประกอบด้วย

การสูญเสียแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงเนื่องจากสาเหตุต่างๆ ทั้ง 6 หัวข้อตามที่ได้อธิบายข้างต้น เป็นสาเหตุหลักที่สำคัญในการวิเคราะห์คำนวณกำลังของโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ดังนั้นในการวิเคราะห์คำนวณและออกแบบโครงสร้างสะพานนั้น ค่าการสูญเสียแรงดึงดังกล่าวจะต้องสามารถประมาณหาค่าได้ เพื่อให้การออกแบบถูกต้องและสมบูรณ์ที่สุด

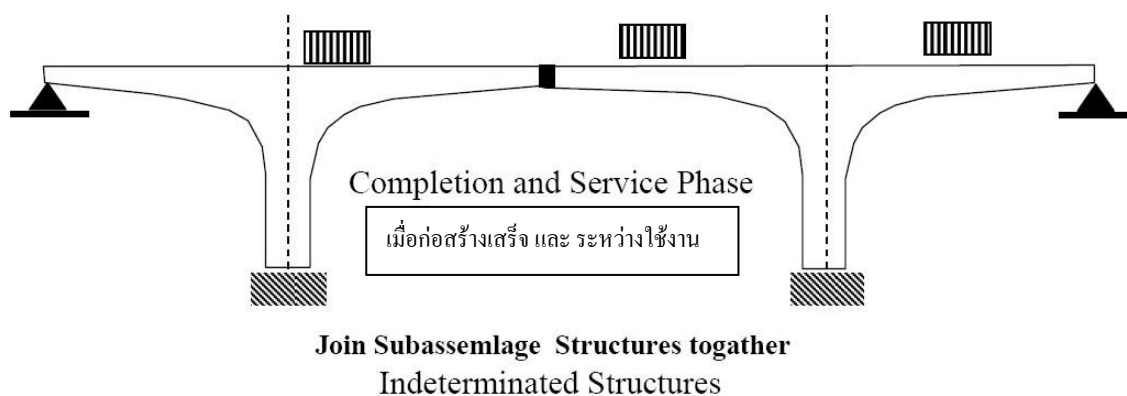
4. การคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างตามขั้นตอนการก่อสร้าง

ในการก่อสร้าง ก่อนที่โครงสร้างจะเสร็จเรียบร้อยสมบูรณ์นั้น โครงสร้างย่อยส่วนต่างๆ ที่สร้างขึ้นในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างอาจมีการรับน้ำหนักโครงสร้างแตกต่างจากโครงสร้างสมบูรณ์ในขั้นตอนสุดท้าย หรืออาจใช้การวิเคราะห์คำนวณและออกแบบโครงสร้างที่แตกต่างจากโครงสร้างสมบูรณ์ ดังนั้นในขั้นตอนการก่อสร้างต่างๆ จึงต้องมีการวางแผนและออกแบบส่วนโครงสร้างย่อยต่างๆ ที่สอดคล้องและเหมาะสม ตัวอย่างเช่นที่แสดงในรูป การก่อสร้างสะพานใช้วิธีการก่อสร้างแบบ Incremental cantilever ซึ่งเป็นการก่อสร้างตัว Deck สะพานยื่นออกด้านข้างจากเสา Pier สะพานแต่ละต้น แล้วจึงสร้างไปบรรจบกับส่วนสะพานที่สร้างยื่นออกมาจากเสา Pier ต้นข้างเคียงรวมกันเป็นโครงสร้างสะพานที่สมบูรณ์ จะเห็นได้ว่าส่วนโครงสร้าง

ย้อยที่ยื่นออกจากเสา Pier สะพานนั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ Determinated structure สามารถวิเคราะห์ออกแบบด้วยวิธีอย่างง่าย แต่เมื่อโครงสร้างย้อยรวมกันเข้าเป็นโครงสร้างสะพานที่สมบูรณ์แล้ว ลักษณะโครงสร้างกลายเป็นแบบ Indetermined structure ซึ่งต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ออกแบบอีกวิธีหนึ่งที่แตกต่างออกไปเป็นต้น



รูปที่ 25: ลักษณะโครงสร้างสะพานในช่วงขั้นตอนระหว่างการก่อสร้าง



รูปที่ 26: ลักษณะโครงสร้างสะพานเมื่อก่อสร้างเสร็จเรียบร้อยสมบูรณ์เพื่อใช้งาน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโครงสร้างย้อยที่เป็นเสมือนคานยื่นออกจากตัวเสา Pier สะพานนั้นจะเห็นว่า ตัวสะพานต้องรับโมเมนต์ลบที่บริเวณหัวเสาอันเนื่องมาจากน้ำหนักของโครงสร้างเป็นหลัก แต่เมื่อเป็นโครงสร้างสะพานที่สมบูรณ์แล้ว ตัวสะพานจะต้องคำนึงถึงการรับโมเมนต์บวกที่กลางสะพานเนื่องจากน้ำหนักโครงสร้างและน้ำหนักบรรทุกทุกจร เป็นต้น

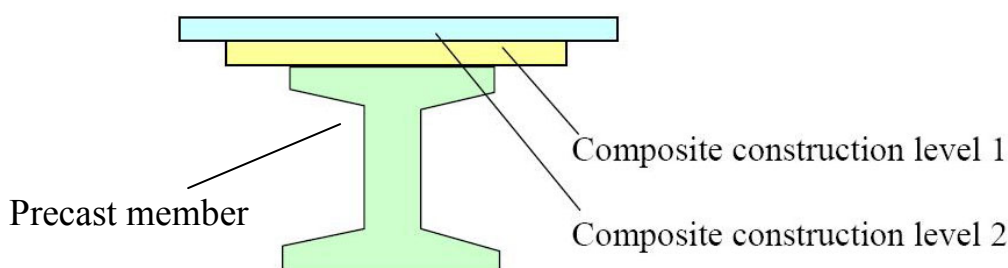
หมายเหตุ: ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างสะพานนั้น การวิเคราะห์คำนวณหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสามารถใช้เพียงทฤษฎี linear elastic และสามารถคำนวณได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้ข้อมูลที่เกิดขึ้นตามเวลา (Past history data) ก่อนหน้าได้ แต่ในการวิเคราะห์คำนวณค่าการโก่งตัวของสะพาน (Deflection) หรือค่าการเปลี่ยนรูป Deformation ของสะพานนั้นจะต้องใช้ข้อมูลที่เกิดขึ้นตามเวลาก่อนหน้าในการคำนวณด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและต้องใช้ทฤษฎี Non-linear ในการวิเคราะห์คำนวณและออกแบบ

5. การคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดโครงสร้างตามขั้นตอนการก่อสร้าง

นอกจากลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงตามขั้นตอนการก่อสร้างดังที่กล่าวมาในหัวข้อข้างต้นแล้ว นั้น หน้าตัดโครงสร้างก็มีการเปลี่ยนแปลงตามขั้นตอนการก่อสร้างด้วย ในที่นี้หมายถึงลักษณะของหน้าตัดคอมโพสิตซึ่งประกอบด้วย ส่วนของคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จและส่วนของคอนกรีตหล่อในที่รับแรงร่วมกัน โดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวทั้งสอง ทั้งนี้ต้องวิเคราะห์และออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้แน่ใจว่าส่วนทั้งสองมีพฤติกรรมร่วมกันเป็นโครงสร้างแบบคอมโพสิต นอกจากนี้คุณสมบัติของหน้าตัดที่คำนึงถึงอาจเป็นโครงสร้างคอมโพสิตร่วมกันมากกว่าสองส่วนขึ้นไปก็ได้ (เช่นการเทคอนกรีตในส่วนที่ส่วนหนึ่งไปหรือการใช้วัสดุอื่นร่วมกันเช่นเหล็กเป็นต้น) โดยในแต่ละขั้นตอนที่เกิดขึ้น หน้าตัดก็มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป ซึ่งจะต้องนำมาคำนึงถึงในการวิเคราะห์คำนวณและออกแบบสะพานในขั้นตอนต่างๆ ด้วย

ข้อดีของโครงสร้างคอมโพสิต

- สามารถลดเวลาในการก่อสร้างลง โดยขึ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงสามารถหล่อสำเร็จจากโรงงานแล้วนำมาติดตั้ง ทำให้การก่อสร้างเป็นไปด้วยความสะดวกรวดเร็ว
- เนื่องจากคอนกรีตอัดแรงต้องการคอนกรีตที่มีกำลังสูง การผลิตในโรงงานทำให้สามารถควบคุมคุณภาพได้ดี อีกทั้งสามารถควบคุมต้นทุนได้
- สามารถใช้ขึ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จเป็นที่รองรับ (ท้องแบบ) ขณะเทคอนกรีตในที่ได้ ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำค้ำยันและไม้แบบ และไม่เป็นอุปสรรคกีดขวางการจราจร
- ส่วนคอนกรีตเทในที่ที่จะช่วยเพิ่มความต่อเนื่องของโครงสร้างช่วงเดียว โดยความต่อเนื่องนี้จะออกแบบสำหรับการรับน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมและน้ำหนักบรรทุกจรเท่านั้น



รูปที่ 27: หน้าตัดคอมโพสิตในระหว่างการก่อสร้างเริ่มจากติดตั้งขึ้นส่วนคอนกรีตหล่อสำเร็จ, หน้าตัดคอมโพสิต 1 ในขั้นตอนก่อสร้างที่หนึ่ง และเมื่อผ่านไปขั้นตอนก่อสร้างถัดไป หน้าตัดก็เพิ่มเป็นหน้าตัดคอมโพสิต 2

ข้อจำกัดของโครงสร้างคอมโพสิต คือ ขนาดและน้ำหนักของขึ้นส่วนคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จที่ต้องขนย้ายจากโรงงานมายังสถานที่ก่อสร้างจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการยกขึ้นลงติดตั้ง ช่วงรถที่สามารถขนส่งได้

การวิเคราะห์คำนวณและออกแบบโครงสร้างคอมโพสิตจะต้องทราบคุณสมบัติต่างๆ ของหน้าตัดทั้งส่วนที่เป็นคอนกรีตอัดแรงหล่อสำเร็จและส่วนคอนกรีตเทที่หลัง คุณสมบัติของทั้งสองส่วนนี้จะแตกต่างกันเนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อาจมีกำลังต่างกัน และอายุคอนกรีตก็แตกต่างกัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตก็แตกต่างกันด้วย การวิเคราะห์คำนวณจะสมมติว่าโครงสร้างคอมโพสิตมีพฤติกรรมยึดหยุ่น การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวเป็นเส้นตรงตลอดหน้าตัด หน่วยแรงดึงและแรงอัดของคอนกรีตเป็นปฏิภาคโดยตรงกับหน่วยการยึดหดตัวตามกฎของฮุก

6. การคำนึงถึงชนิดของแรงและน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ที่กระทำกับตัวสะพานเนื่องจากปัจจัยต่างๆ

โดยหลักแล้วแรงที่กระทำกับตัวสะพานในการวิเคราะห์และออกแบบนั้นหากแบ่งออกตามปัจจัยที่ก่อให้เกิดแรงแล้วสามารถแบ่งออกได้ประมาณ 5 ประเภทคือ

6.1 น้ำหนักบรรทุกเคลื่อนที่ Moving loads

เป็นน้ำหนักของรถที่กระทำกับตัวสะพานในขณะที่ใช้งาน (น้ำหนักบรรทุกจร) ซึ่งในการวิเคราะห์คำนวณและออกแบบจะต้องคำนึงถึงน้ำหนักของรถประเภทต่างๆ กัน ซึ่งมีผลต่อระยะเพลของรถและตำแหน่งของแรงที่กระทำกับตัวสะพาน นอกจากประเภทของรถแล้วยังต้องมีการจัดน้ำหนักของรถที่กระทำกับตัวสะพานออกเป็นลักษณะต่างๆ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ค่าโมเมนต์ แรงเฉือน และหน่วยแรงต่างๆ ที่สูงที่สุดที่จะต้องครอบคลุมถึง เพื่อที่สะพานสามารถรับน้ำหนักได้ปลอดภัยในทุกกรณี ซึ่งมีทั้งการจัดตำแหน่งแรงที่กระทำกับสะพานแบบเฉพาะที่ การจัดขนาดความยาวของน้ำหนักบรรทุกแบบต่อเนื่อง การจัดน้ำหนักบนช่องทางจราจรที่แตกต่างกันเพื่อตรวจสอบแรงบิด (Lane load) เป็นต้น

นอกจากนี้น้ำหนักรถที่กระทำกับตัวสะพานนั้นมีลักษณะไม่หยุดนิ่งอยู่กับที่ เนื่องจากรถมีการเคลื่อนที่ทำให้การวิเคราะห์แรงในโครงสร้างต้องคำนึงถึงน้ำหนักกระทำในลักษณะเคลื่อนที่ด้วยหรือ Moving load และในการวิเคราะห์โครงสร้างจะวิเคราะห์โดยใช้วิธี Influence line

6.2 ปัจจัยจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ในการวิเคราะห์และออกแบบสะพานจะสนใจผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อหน่วยแรงในระบบโครงสร้างพื้นสะพานและคานรองรับ deck-girder system ผลของการขยายหรือหดตัวของส่วนโครงสร้างต่อแรงเฉือนหรือแรงเสียดทานที่อาจเกิดขึ้นโดยเฉพาะบริเวณจุดต่อโครงสร้าง และความยืดหยุ่นของโครงสร้างส่วนฐานรากต่อผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

6.3 ปัจจัยจากการอัดแรงโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง

ตามที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 1 และ 3 เกี่ยวกับการใช้คอนกรีตอัดแรงในงานสะพาน แรงเนื่องจากการอัดแรงในคอนกรีตเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการวิเคราะห์และออกแบบสะพานเพื่อให้ได้โครงสร้างที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพ การจัดตำแหน่งเหล็กเสริมอัดแรง การคำนึงถึงการสูญเสียแรงดึงที่อาจเกิดขึ้น ค่าการอัดแรงเริ่มต้นที่เหมาะสม รวมถึงการจัดลำดับการอัดแรงที่เหมาะสม ซึ่งต้องคำนึงให้สอดคล้องกันกับขั้นตอนการก่อสร้างด้วย

6.4 ค่าการทรุดตัวของสะพาน

ค่าการทรุดตัวของสะพานเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเช่นกันเนื่องจากต้องพิจารณาค่าการทรุดตัวที่ยอมรับได้ อีกทั้งต้องพิจารณาให้สอดคล้องกับสิ่งแวดล้อมข้างเคียงหรือผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นด้วย

6.5 น้ำหนักของเครื่องมืออุปกรณ์ก่อสร้างต่างๆ

ในระหว่างการก่อสร้างมีน้ำหนักของเครื่องจักรและอุปกรณ์ก่อสร้างที่ต้องคำนึงถึงด้วยเนื่องจากในบางครั้งเครื่องจักรและอุปกรณ์เหล่านี้มีน้ำหนักมากกว่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานของสะพานเสียอีก จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์คำนวณและออกแบบสะพานจะต้องทราบหรือประมาณการน้ำหนักของเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ที่อาจกระทำกับโครงสร้างได้เพื่อที่จะได้ออกแบบสะพานให้ถูกต้องและสามารถรับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย

นอกจากประเภทของแรงที่อาจเกิดขึ้นตามที่กล่าวข้างต้นนี้ ยังมีแรงอีกหลายชนิดที่กระทำกับตัวสะพานและอาจต้องคำนึงถึงในการวิเคราะห์และออกแบบสะพานด้วยเช่นกัน เช่น แรงต้านข้างเนื่องจากแรงลมและแผ่นดินไหว แรงต้านข้างเนื่องจากเรือหรือวัตถุทางน้ำที่สะพานคร่อมอยู่เป็นต้น ซึ่งเป็นส่วนต้องพิจารณาเพิ่มเติมในแต่ละกรณี

เครื่องมือช่วยในการออกแบบ

โดยทั่วไปในการออกแบบสะพานจะต้องวิเคราะห์ตัวสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ (Uniform Load) และแบบกระทำเฉพาะที่ (Line Load) ซึ่งการคำนวณจะใช้วิธี Influence Line ทั้งนี้จึงมีการทำตาราง Influence functions ขึ้นใช้ในกรณีสะพานช่วง Span ต่างๆ เพื่อให้สะดวกในการใช้งานคำนวณออกแบบ

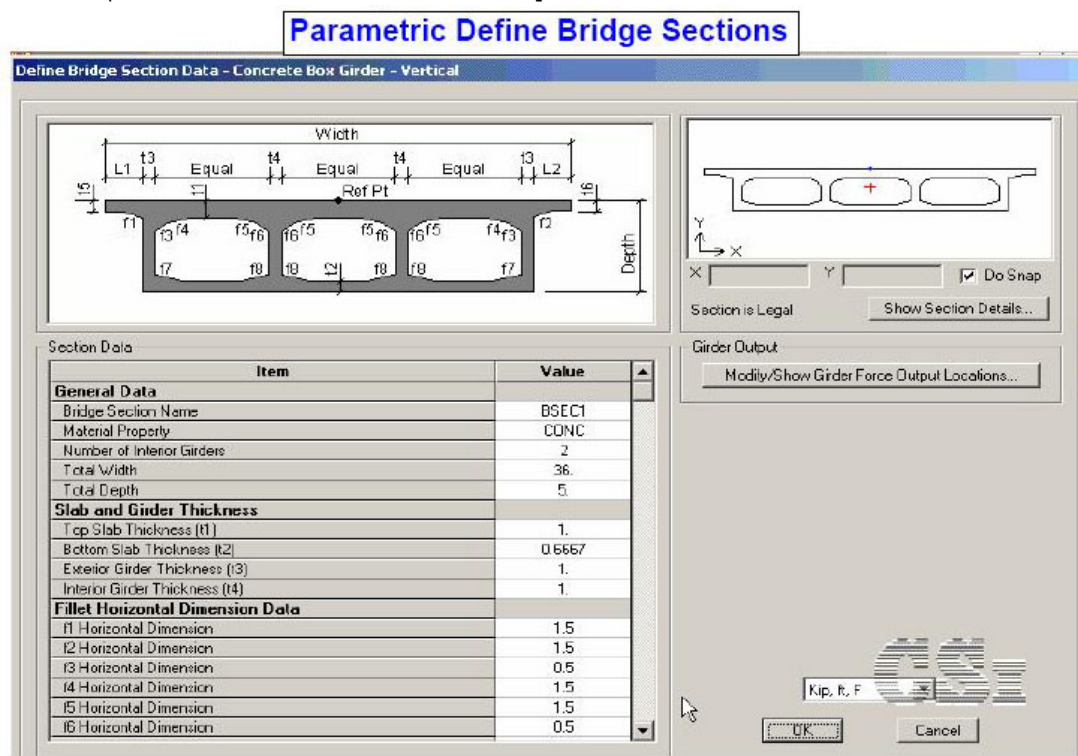
โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปช่วยในการออกแบบสะพาน

- โปรแกรม BT BEAM โดยบริษัท Bridge Tech Inc. (USA) ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานและวิเคราะห์แรงกระทำ Load combination ตามวิธี LRFD แต่ไม่มีการคำนวณกำลังต้านทาน
- โปรแกรม AASHTO BDS (AASHTO Bridge Design System) โดย AASHTO ใช้ได้ทั้งในการวิเคราะห์และออกแบบสะพานตามวิธี LRFD มีโมดูลสำหรับน้ำหนักบรรทุกจรและรูปแบบสะพานต่างๆ ให้เลือกใช้ด้วย
- โปรแกรม BRASS LRFD-SI (Bridge Analysis and Structural System) นิยมใช้กันแพร่หลายใช้ได้ทั้งการวิเคราะห์และออกแบบสะพาน สามารถใช้ในหน่วย SI ได้และใช้ได้ทั้งกับโครงสร้างสะพานที่เป็นเหล็ก, เหล็กผสมคอนกรีต, คอนกรีตอัดแรง, ไม้
- โปรแกรม PENNDOT สามารถออกแบบตามวิธี LRFD ออกแบบได้ทั้งส่วนโครงสร้างเสา Pier สะพาน, Culvert, Superstructure, ฐานรองรับสะพาน Abutment

ปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการวิเคราะห์คำนวณและออกแบบสะพานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ผู้เขียนขอยกตัวอย่างของโปรแกรม **SAP2000** ซึ่งมีความสามารถวิเคราะห์โครงสร้างได้ครอบคลุมหัวข้อต่างๆ ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น รวมทั้งสามารถวิเคราะห์แบบ Dynamic ได้

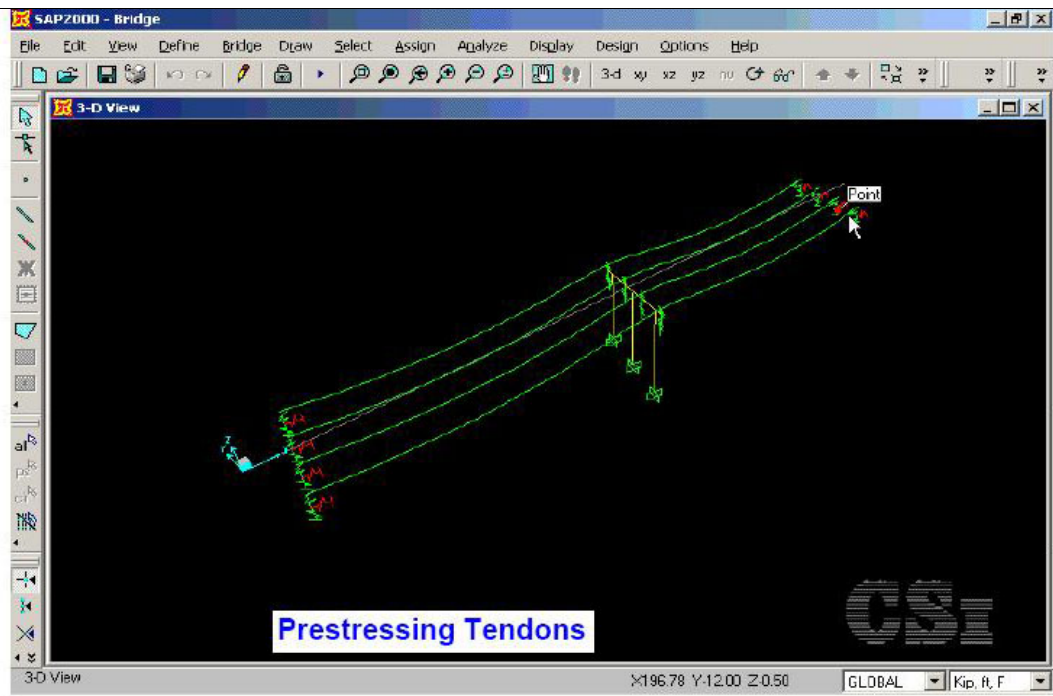
ตัวอย่างความสามารถของโปรแกรมในการวิเคราะห์คำนวณและออกแบบสะพาน

1. การใส่ค่าคุณสมบัติของหน้าตัดโครงสร้างดังแสดงในรูป



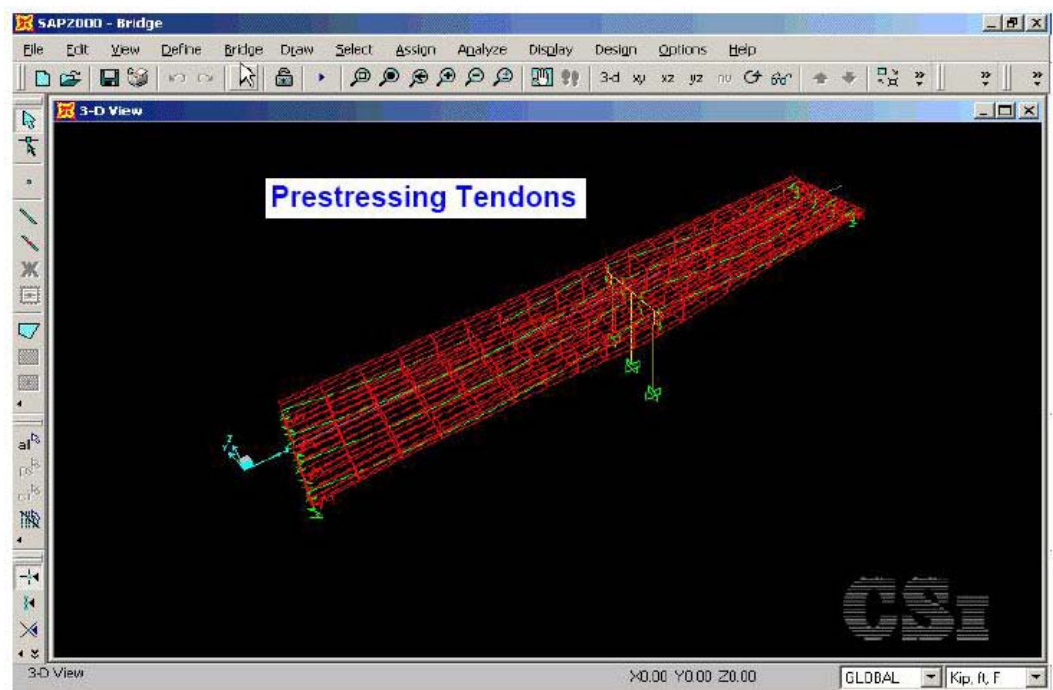
รูปที่ 28: หน้าจอโปรแกรม SAP2000 ในขั้นตอนการใส่ข้อมูลคุณสมบัติหน้าตัดโครงสร้างสะพาน

2. ความสามารถในการจำลองโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง เหล็กเสริมอัดแรง แรงดึงเริ่มต้นของเหล็กเสริมอัดแรง อีกทั้งสามารถคำนึงถึงผลของการสูญเสียแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงได้ ดังรูป



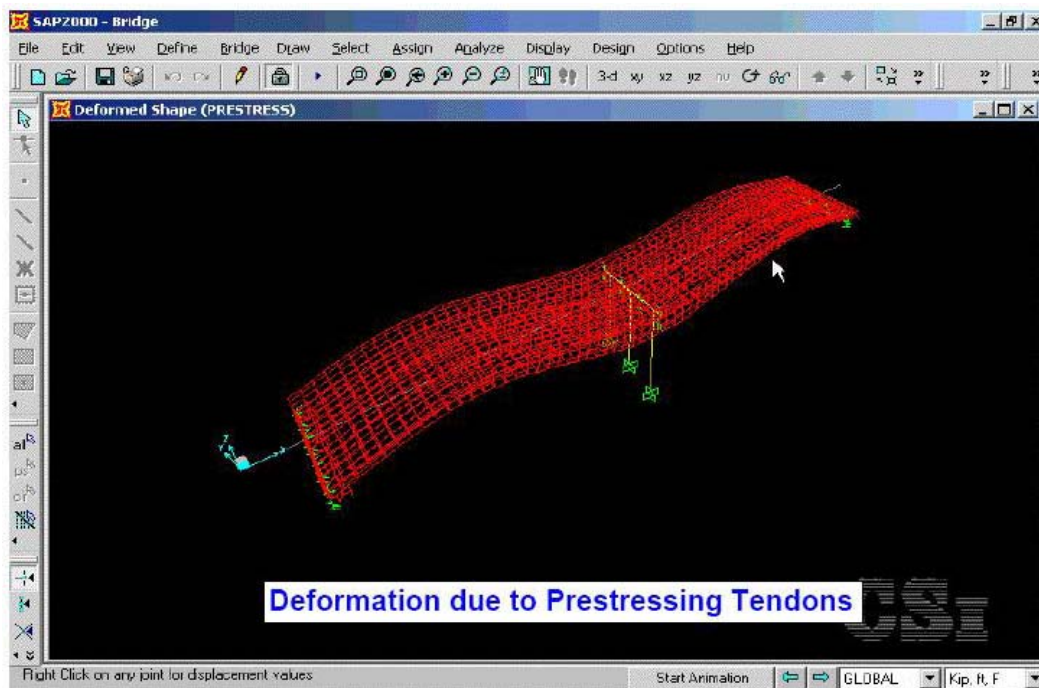
รูปที่ 29: การจำลองแนวเหล็กเสริมอัดแรง

3. แบบจำลองเหล็กเสริมอัดแรงที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานร่วมกันกับโครงสร้างอื่นๆ ได้ เช่นคาน พื้นสะพาน โครงสร้างแบบ shell ฯลฯ



รูปที่ 30: การจำลองเหล็กเสริมอัดแรงและโครงสร้างสะพาน

4. สามารถวิเคราะห์หาค่า Deformation เนื่องจากการอัดแรงเหล็กเสริมอัดแรงได้อีกทั้งสามารถแสดงลักษณะการโก่งตัวหรือการเสียรูปที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 31: การวิเคราะห์หาค่า Deformation ของสะพาน

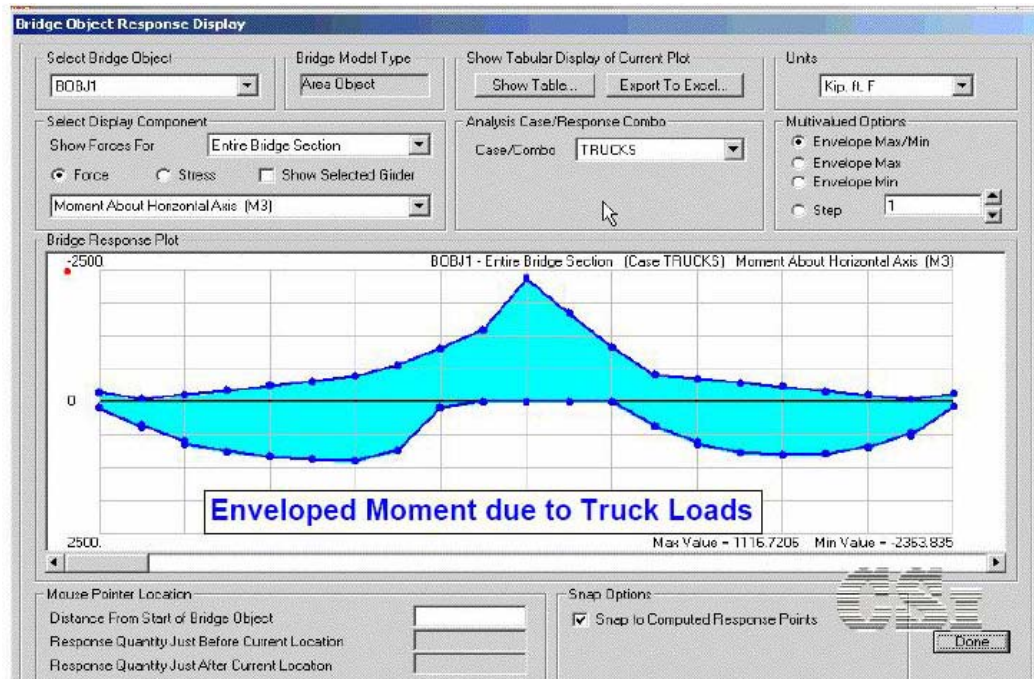
5. โปรแกรมมีความสามารถที่จะแสดงค่าการวิเคราะห์ต่างๆ ในรูปแบบต่างๆ ที่หลากหลายช่วยให้เข้าใจได้ง่ายเช่นการใช้สี



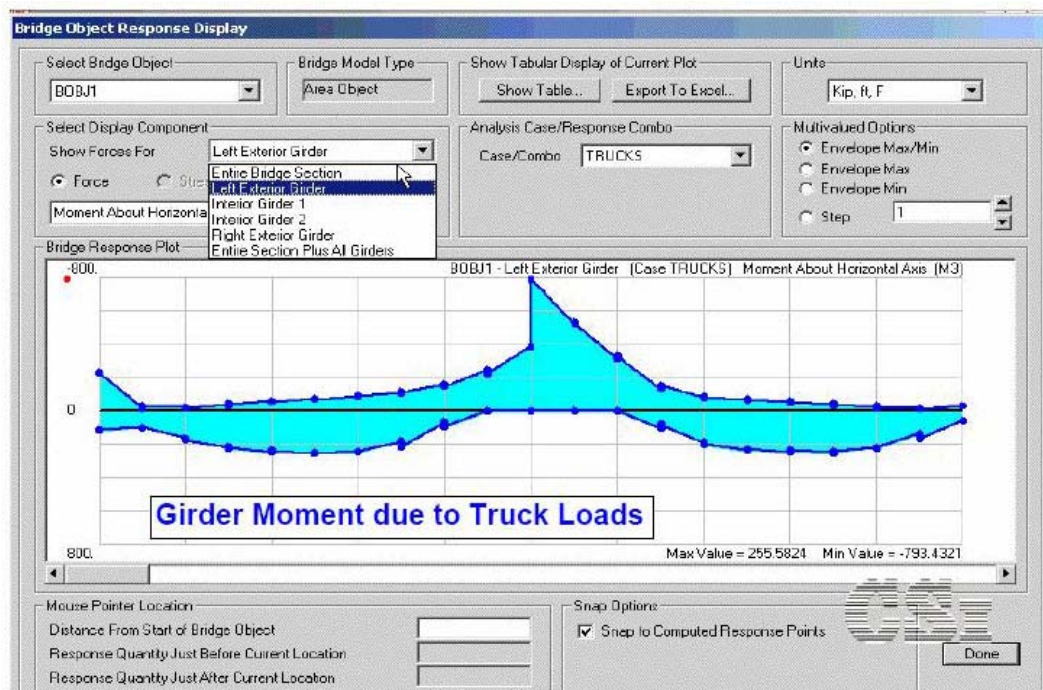
รูปที่ 32: การแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยสี

6. วิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Influence line ทั้งในส่วนของการวิเคราะห์ตัวสะพาน (deck) และคานรองรับพื้นสะพาน (girder) หรือโครงสร้าง shell อื่นๆ เพื่อหาค่าโมเมนต์ แรงเฉือน แรงปฏิกิริยา หรือหน่วยแรงอื่นๆ

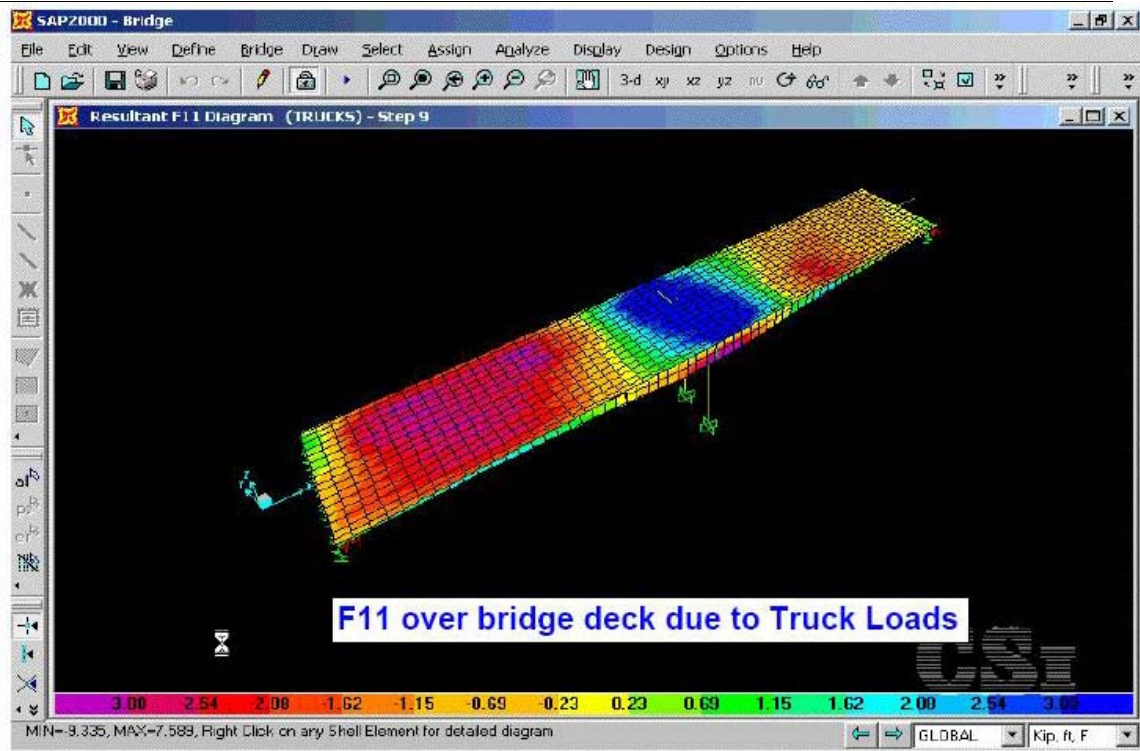
ที่ต้องการ ทำให้สามารถทราบค่าสูงสุดหรือต่ำสุดที่อาจเกิดขึ้นของโครงสร้างได้ ดังแสดงในรูป (รูปแสดงค่าโมเมนต์สูงสุด ต่ำสุด ตลอดช่วงความยาวสะพานที่อาจเกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุกจรของรถบรรทุก)



รูปที่ 33: ค่าที่วิเคราะห์ได้ของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในตัวสะพาน

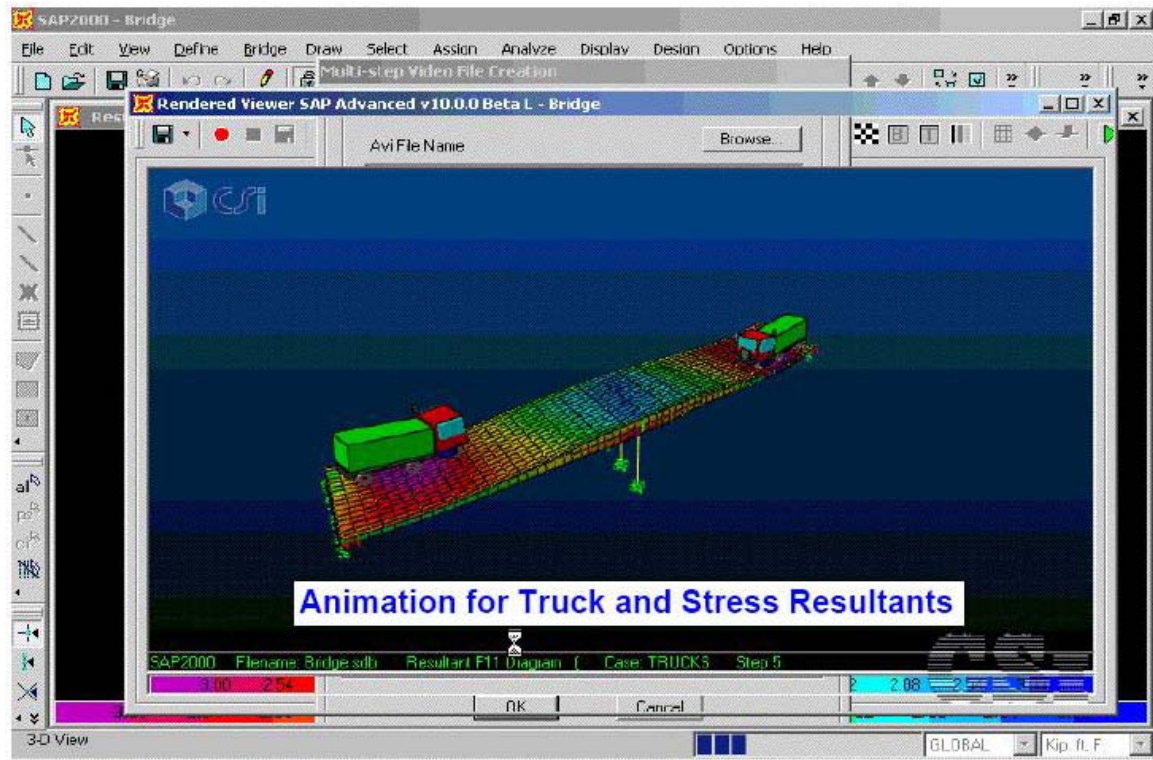


รูปที่ 34: ค่าที่วิเคราะห์ได้ของโมเมนต์ดัดที่ใน Girder



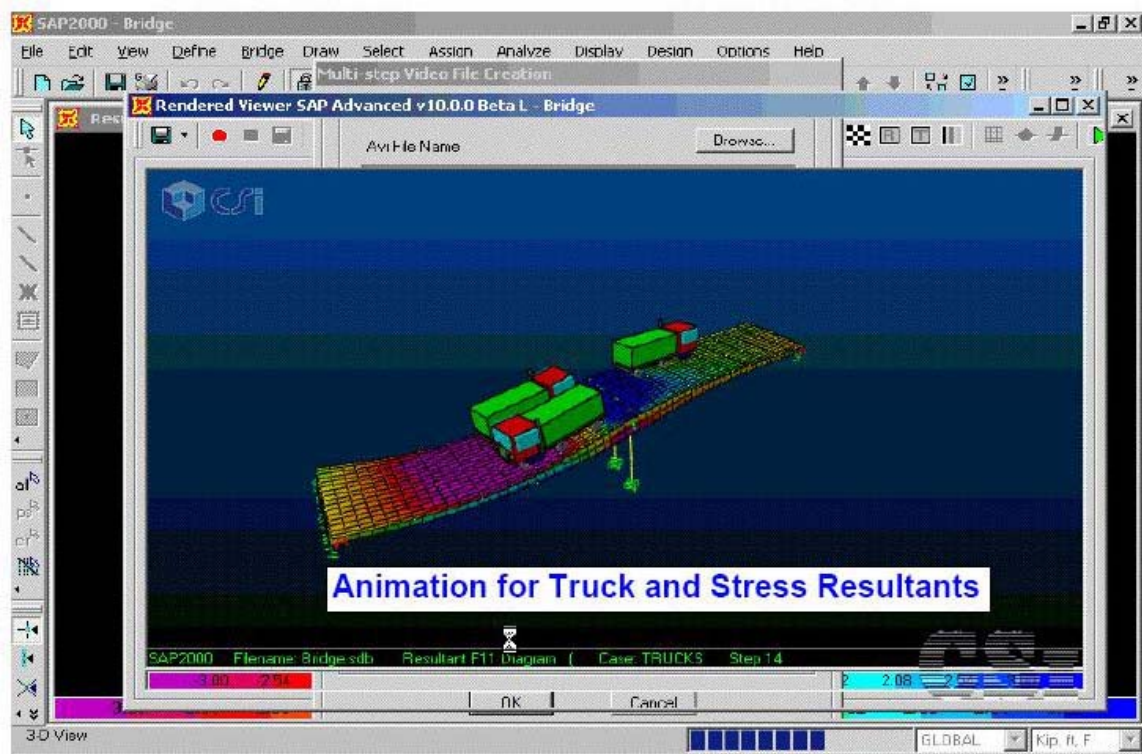
รูปที่ 35: ค่าที่วิเคราะห์ได้ Resultant ของสะพาน (แสดงด้วยสี)

7. สามารถจัดน้ำหนักบรรทุกในรูปแบบต่างๆ อีกทั้งสามารถแสดงรูปแบบจำลองที่เคลื่อนไหวได้เหมือนสถานการณ์จริง



รูปที่ 36: การแสดงผลในรูปแบบจำลองเคลื่อนไหว Animation

8. สามารถวิเคราะห์แบบ Dynamics ได้ ซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์แรงต้านข้างจากแผ่นดินไหวโดยใช้ข้อมูล Response spectrum หรือข้อมูลก่อนหน้าที่เกิดตามเวลา (Time history data) ได้ การวิเคราะห์ผลต่อตัวสะพานเนื่องจากการเคลื่อนตัวของพื้นดิน หรือการจำลองรูปแบบการสั่นไหวของสะพานในลักษณะต่างๆ



รูปที่ 37: การวิเคราะห์แบบ Dynamics

เทคโนโลยีการก่อสร้างสะพานในปัจจุบัน

ปัจจุบันการก่อสร้างสะพานได้พัฒนามาจนมีอยู่หลายวิธีมากมาย ทั้งนี้แต่ละวิธีมีข้อดีข้อด้อยต่างกัน การเลือกใช้วิธีการก่อสร้างต่างๆ นั้นก็ขึ้นอยู่กับขนาดของสะพานนั้นๆ สภาพสถานที่ตั้ง สิ่งแวดล้อม การลำเลียงขนส่งอุปกรณ์ก่อสร้างต่างๆ โดยหลักๆ หากพิจารณาตามขนาดของความยาวสะพานในการเลือกรูปแบบสะพานนั้นการก่อสร้างอาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือการก่อสร้างตัวสะพาน Bridge Deck ตลอดความยาวช่วงเป็นชิ้นส่วนเดียวซึ่งเหมาะสำหรับสะพานที่มีช่วงความยาวสั้นๆ และการก่อสร้างโดยการแบ่งช่วงสะพานออกเป็นชิ้น ส่วน Segment ย่อยๆ ซึ่งสามารถใช้กับสะพานที่มีช่วงความยาวมากๆ ได้

1. การก่อสร้างตัวสะพาน Bridge Deck ตลอดความยาวช่วงเป็นชิ้นส่วนเดียว

สามารถที่จะเลือกเป็นการเทคอนกรีตในที่หรือการใช้ชิ้นส่วนหล่อสำเร็จก็ได้ แต่ในปัจจุบันเนื่องจากงานชิ้นส่วนสำเร็จสามารถควบคุมคุณภาพได้ดีและกรณีที่มีช่วงความยาวสะพานไม่มากนัก การขนส่งลำเลียงชิ้นส่วนคานสำเร็จหรือชิ้นส่วนสะพาน Bridge deck สามารถทำได้ไม่ยาก การใช้ Precast จึงเป็นที่นิยมมากกว่าการเทคอนกรีตในที่

1.1 การใช้ชิ้นส่วน Precast Beam

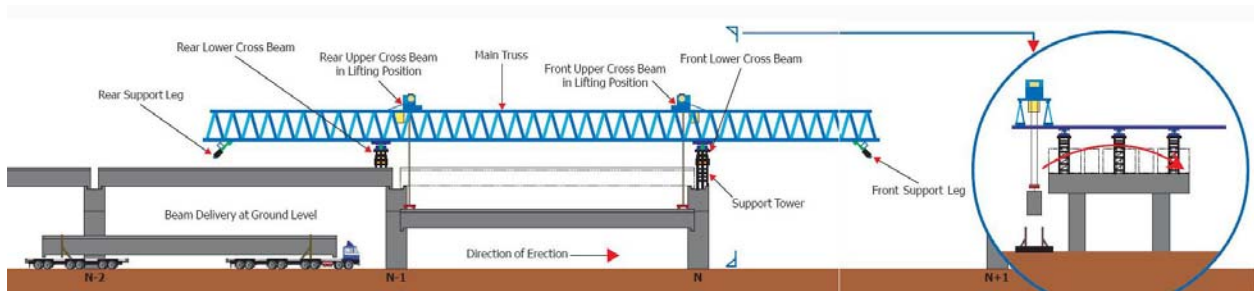
โดยปกติแล้วสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการใช้วิธีการก่อสร้างโดยการติดตั้งชิ้นส่วน Precast Beam นี้คือการขนส่งชิ้นส่วนไปยังตำแหน่งที่ต้องการติดตั้ง ซึ่งสามารถใช้ระบบ Launching girder, Beam launcher หรือ Lifting Frame ก็ได้โดยจะสามารถยกชิ้น Precast Beam มาจากทางด้านหลังสะพานช่วงที่ก่อสร้างแล้วหรือยกจากทางด้านล่างหรือด้านข้างเข้าสู่ระบบการติดตั้ง ซึ่งประกอบด้วยระบบรอกและลวดสลิงต่างๆ ทำให้การติดตั้งมีความแม่นยำและปลอดภัย นอกจากนี้สามารถที่จะยกชิ้นส่วนขนาดใหญ่ๆ ยาวกว่า 40 เมตรและหนักมากกว่า 100 ตันได้อย่างสบาย

ข้อดีของการติดตั้งด้วยวิธีนี้

- สามารถติดตั้งได้รวดเร็ว
- ใช้ระบบ Gantry หรือเครนที่ง่ายไม่ซับซ้อน
- สามารถขนส่งชิ้นส่วน Precast Beam มาสู่ด้านหลังตัว Gantry ได้โดยขนส่งบนช่วงสะพานที่ติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำให้รบกวนการจราจรเบื้องล่างน้อยที่สุด
- ใช้จำนวนคนงานก่อสร้างน้อย
- ต้องการการควบคุมงานด้านตำแหน่งและแนวสะพานน้อย
- การหล่อชิ้นส่วน Precast Beam สามารถทำได้ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน

ขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วน

- ยกติดตั้งชิ้นส่วนคานตัวแรก (ตัวริมสุด) พร้อมกับแผ่นพื้นสำเร็จ (precast plank) ด้านบน
- ยกติดตั้งชิ้นส่วนคานตัวที่ 2 พร้อมกับแผ่นพื้นสำเร็จ (precast plank) ด้านบน
- ยกติดตั้งชิ้นส่วนคานตัวที่ 3 พร้อมกับแผ่นพื้นสำเร็จ (precast plank) ด้านบน
- ยกติดตั้งชิ้นส่วนคานตัวที่ 4 พร้อมกับแผ่นพื้นสำเร็จ (precast plank) ด้านบน
- จัดวางตำแหน่งแผ่นพื้นสำเร็จให้ถูกต้อง
- ย้าย Gantry เข้าแนวกลางเพื่อย้ายสู่ช่วง span ถัดไป



รูปที่ 38: วิธีการก่อสร้างด้วยการติดตั้งชิ้นส่วน Precast Beam





รูปที่ 39: ตัวอย่างสะพานที่ใช้รูปแบบ Precast Beam

1.2 การใช้ชิ้นส่วน Full Span Precast

วิธีนี้เหมาะสำหรับสะพานที่มีขนาดช่วงความยาว span เท่าๆ กันหลายๆ ช่วงและมีรัศมีความโค้งในแนวราบ(แนวเส้นทาง) น้อยเช่น ช่วงความยาวที่เท่าๆ กันของรางรถไฟลอยฟ้า เป็นต้น

การหล่อชิ้นส่วน Full span Precast นี้สามารถหล่อได้จากโรงงานหรือจากโรงหล่อที่สามารถควบคุมการผลิตให้มีคุณภาพ ถูกต้อง ปลอดภัย และใช้คนงานน้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

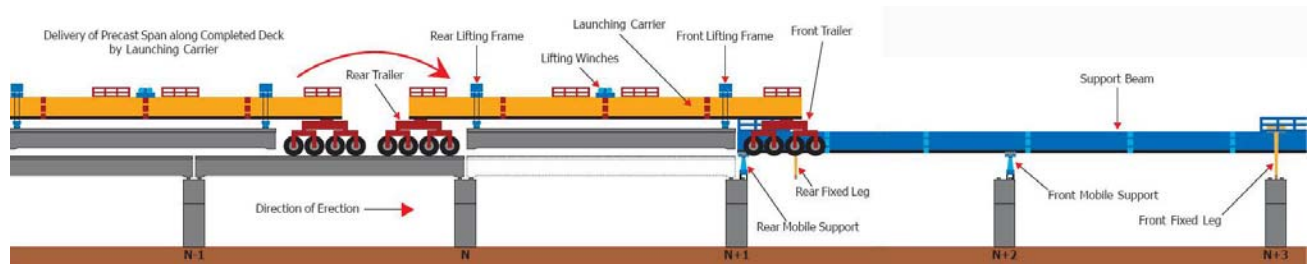
การขนส่งชิ้นส่วนสะพาน Full Span Precast นี้จะทำการขนส่งมาบนสะพานช่วงที่ก่อสร้างเสร็จแล้ว ซึ่งทำให้บริเวณพื้นผิวจราจร และระบบจราจร เบื้องล่างน้อยที่สุดมีฉะนั้นจะต้องขนส่งทางผิวจราจรปกติซึ่งจะก่อปัญหาในการขนส่งได้มาก

ข้อดีของการติดตั้งด้วยวิธีนี้

- ติดตั้งได้อย่างรวดเร็วมากและมีคุณภาพสูง
- มีงานเก็บน้อย
- การหล่อชิ้นส่วนสำเร็จจากโรงงานทำให้ควบคุมคุณภาพได้ดีและสามารถปรับปรุงให้ดียิ่งๆ ขึ้นได้
- ลดงานก่อสร้างที่หน้างาน ทำให้ลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุและกระทบสิ่งแวดล้อมน้อย
- ต้องการงานโครงสร้างชั่วคราวน้อยกว่าการก่อสร้างด้วยวิธีอื่น

ขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วน

- ขนส่งชิ้นส่วนสะพานมาจากโรงงาน
- ติดตั้งชิ้นส่วนสะพาน
- รถขนส่งชิ้นส่วนสะพานกลับไปโรงงานเพื่อยกขนส่งชิ้นส่วนถัดไป (โดยระหว่างการขนส่งชิ้นส่วนนั้น ที่
หน้างานสามารถเตรียมงานส่วน Bearing และ Grout permanent Bearing ได้)



รูปที่ 40: วิธีการก่อสร้างด้วยการติดตั้งชิ้นส่วน Full span Precast



รูปที่ 41: ตัวอย่างสะพานที่ใช้รูปแบบ Full span Precast

2. การก่อสร้างสะพานโดยการแบ่งออกเป็นชิ้นส่วน Segment ย่อยๆ

วิธีนี้ช่วยให้สามารถสร้างสะพานคอนกรีตที่มีช่วงความยาวเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากเดิมที่การผลิตและขนส่งชิ้นส่วนหล่อสำเร็จคานรูปตัว I มีขีดจำกัดประมาณความยาว 50 เมตร เมื่อต้องการสะพานที่มีช่วงความยาวมากขึ้นรูปแบบโครงสร้างที่เป็นไปได้เดิมจึงมีเพียงการเท Box girder คอนกรีตในที่ตั้งลวดอัดแรงและต้องใช้นั่งร้านเท่านั้น ซึ่งในบางกรณีการตั้งนั่งร้านไม่สามารถทำได้เช่นการสร้างสะพานข้ามหุบเขาหรือทางน้ำใหญ่ๆ วิธีการก่อสร้างโดยการแบ่งออกเป็นชิ้นส่วน Segment นี้จึงสามารถแก้ปัญหาได้

ข้อดีของการก่อสร้างด้วยการแบ่งออกเป็นชิ้นส่วน Segment

- ไม่มีความจำเป็นต้องใช้นั่งร้านก่อสร้างในบริเวณที่การก่อสร้างหรือการติดตั้งชิ้นส่วนสามารถทำได้จากส่วนโครงสร้างก่อกำหนดที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว จุดนี้เป็นข้อดีอย่างยิ่งในกรณีที่โครงสร้างสะพานอยู่สูงมากๆ หรือเมื่อได้สะพานมีข้อจำกัดในการก่อสร้างหรือมีการจราจรหนาแน่นที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้
- สามารถออกแบบโครงสร้างให้มีความโค้งในแนวราบและตั้งได้
- มีผลกระทบจากการคืบและหดตัวของคอนกรีตน้อยเนื่องจากสามารถควบคุมคุณภาพชิ้นส่วนสะพานในขณะที่หล่อคอนกรีตได้ดี
- มีผลกระทบจากสภาวะแวดล้อมและสภาพอากาศในการก่อสร้างน้อย
- โครงสร้างสะพาน Bridge Deck มีความทนทานสูงและสามารถควบคุมรอยแตกร้าว Crack ได้ด้วยการใช้วิธีดัดลวดอัดแรงและสามารถใช้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติสูงๆ ได้

ข้อดี

- การผลิตและติดตั้งชิ้นส่วนต้องการความแม่นยำและความละเอียดสูง
- ในกรณีที่สภาวะแวดล้อมและสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงกะทันหันหรือกรณีพิเศษอาจมีผลกระทบต่อรอยต่อชิ้นส่วนโครงสร้างได้

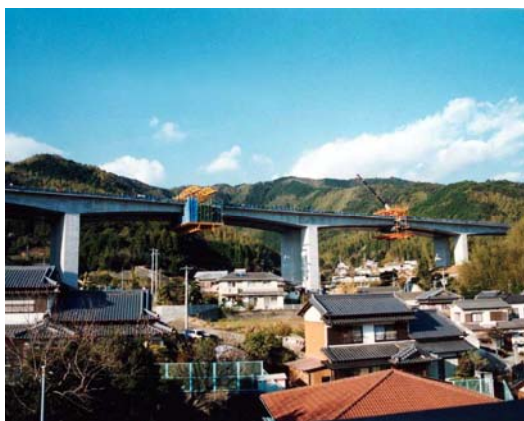
การก่อสร้างสะพานโดยการแบ่งออกเป็นชิ้นส่วน Segment สามารถแยกย่อยได้เป็น

2.1 วิธี Balanced cantilever



รูปที่ 42: การก่อสร้างสะพานด้วยวิธี Balanced cantilever

วิธีนี้เป็นการก่อสร้างตัวสะพานออกจากส่วนเสา Pier ของสะพานโดยค่อยๆ ก่อสร้างให้มีน้ำหนักสมดุลเมื่อยื่นออกจากเสาทั้งสองข้างไปจนถึงส่วนกึ่งกลางของช่วงสะพานซึ่งจะไปบรรจบกันกับส่วนยื่นที่ก่อสร้างออกมาจากเสาสะพานต้นข้างเคียง ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ในเสาสะพานที่ละต้นจนครบทั้งสะพาน หากมีชิ้นส่วนใดที่ไม่สมมาตรกันอาจต้องออกแบบส่วนยึดรั้งชั่วคราวเพิ่มเติม



รูปที่ 43: การก่อสร้างสะพานโดยใช้ Movable Formwork (Form Traveler)

การก่อสร้างจะเป็นการติดตั้งชิ้นส่วนหล่อสำเร็จหรือจะเป็นการเทคอนกรีตในที่ก็ได้ สำหรับการเทคอนกรีตในที่จะต้องมีการหล่อที่สามารถเคลื่อนตัวตามส่วนยื่นของตัวสะพานที่สร้างออกไป (Movable Formwork or Form Traveler) ดังตัวอย่างการใช้ Moving Travelers สองตัวแยกจากกันเพื่อติดตั้งตัวคาน Stiffening girder และโครงโค้ง Arch ribs ทำให้การก่อสร้างส่วนสะพาน (ส่วนแนวตรงด้านบน), ส่วนโครงโค้ง และ ส่วนยึดในโครงโค้งกับส่วนสะพานที่อยู่ในแนวตั้งฉาก สามารถทำได้พร้อมๆ กันในลักษณะเหมือนเป็นโครงถัก (Truss)



รูปที่ 44: การใช้ Movable Formwork ในการก่อสร้างสะพานโค้ง

การก่อสร้างด้วยวิธี Balanced cantilever นี้ยังแยกย่อยออกได้ตามอุปกรณ์ที่ใช้ยกติดตั้ง Segment ต่างๆ ได้แก่การใช้ Launching gantry, Lifting frame และ Mobile crane

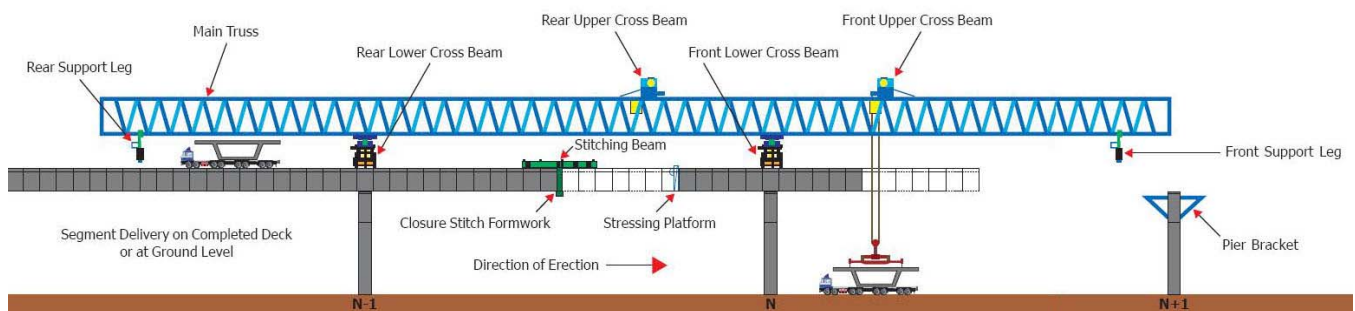
2.1.1 วิธี Balanced Cantilever โดยใช้ Launching Gantry

ข้อดีของการติดตั้งด้วยวิธีนี้

- สามารถขนส่งชิ้นส่วนต่างๆ มาสู่ด้านหลังตัว Gantry ได้โดยขนส่งบนช่วงสะพานที่ติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำให้รบกวนการจราจรเบื้องล่างน้อยที่สุด
- ต้องการงานโครงสร้างชั่วคราวบริเวณใต้สะพานน้อยและโดยมากจะเป็นโครงสร้างที่ยกระดับอยู่เหนือพื้น ทำให้รบกวนการจราจรเบื้องล่างน้อยและไม่ต้องปรับปรุงพื้นดินหรือผิวทางด้านล่างมาก ส่งผลดีต่อทั้งระบบการจราจรและโครงสร้างผิวทาง
- ใช้งานเครนน้อยลงเนื่องจากสามารถใช้ Gantry แทนในงานต่างๆ ได้
- การเข้าสู่หน้างานสะดวกและไม่ติดขัดหรือถูกกีดขวางเนื่องจากการใช้ Gantry
- สามารถเปิดงานได้หลายตำแหน่งภายใน Gantry เช่นการติดตั้งชิ้นส่วน Pier พร้อมกับการก่อสร้างส่วนยื่น Cantilever และงานเทคอนกรีต
- น้ำหนักของโครงสร้างชั่วคราวสามารถถ่ายลงสู่ส่วน Pier ได้โดยตรง
- สามารถก่อสร้างได้รวดเร็วเนื่องจากสามารถติดตั้งได้หลายชิ้นส่วนในเวลาเดียวกัน

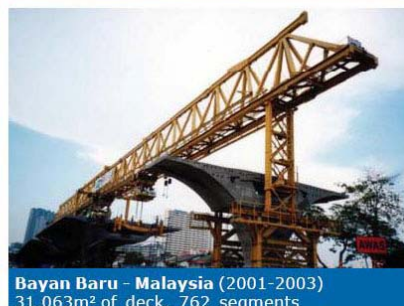
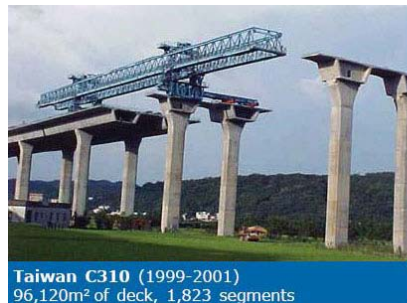
ขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วน

1. ช่วง Span N-1: ปมคอนกรีตรอยต่อชิ้นส่วนสะพาน (ช่วงเวลากลางคืน), ดึงลวดอัดแรงเพิ่มความต่อเนื่องของโครงสร้าง
2. ช่วง Span N: เคลื่อนย้ายโครง Gantry จากช่วง Span N-1 ไปยังส่วน Span N แล้วติดตั้งชิ้นส่วนสะพานของช่วง Span N นี้ จากนั้นทำการเทคอนกรีตเก็บรอยต่อชิ้นส่วนของช่วง Span N ให้เข้ากับชิ้นส่วนของช่วง Span N-1 ก่อนหน้า
3. ช่วง Span N+1: ในขณะที่ติดตั้งชิ้นส่วนสะพานของช่วง Span N สามารถทำงานติดตั้งชิ้นส่วนเสา Pier ของช่วง Span N+1 ได้โดยทำการจัดตำแหน่ง Pier ให้ถูกต้อง, จัดวางตำแหน่งเหล็กเสริมและไม้แบบต่างๆ, งานคอนกรีตที่เกี่ยวข้องและยึดรอยต่อเสา Pier จนเรียบร้อยพร้อมมวลขั้นตอนการทำงานปมคอนกรีตรอยต่อชิ้นส่วนสะพานของช่วง Span N เหมือนขั้นตอนแรกไปเรื่อยๆ จนเสร็จทั้ง



สะพาน

รูปที่ 45: การก่อสร้างแบบ Balanced Cantilever โดยใช้ Launching Gantry



รูปที่ 46: ตัวอย่างสะพานที่ใช้การก่อสร้างแบบ Balanced Cantilever โดยใช้ Launching Gantry



บริษัท ซี คอนซัลท์ เอ็นจิเนียริง จำกัด



บริษัท ยูทิลิตี้ ดีไซน์ คอนซัลแตนท์ จำกัด

โครงการก่อสร้างสะพานในเขตชุมชนในภูมิภาคปี 2551 กลุ่มที่ 5

2.1.2 การติดตั้งด้วยวิธี Balanced Cantilever โดยใช้ Lifting Frames

การใช้ระบบ Lifting Frames ในการติดตั้งชิ้นส่วนสะพานสามารถทำให้งานติดตั้งชิ้นส่วนต่างๆ และการจัดตำแหน่งให้ถูกต้องมีความแม่นยำสูง นอกจากนั้นตัว Platform มีระบบการยก (Lifting) และเคลื่อนย้ายได้ด้วยตนเองในตัว (Self-Launching) อีกทั้ง Platform สามารถตั้งอยู่ได้ด้วยตนเองจึงไม่กีดขวางการทำงาน และการใช้งานเครนเพิ่มเติมในส่วนที่เหมาะสมจะช่วยให้ระบบสามารถทำงานเป็นอิสระจากส่วนงานอื่นๆ ได้

ข้อดีของการติดตั้งด้วยวิธีนี้

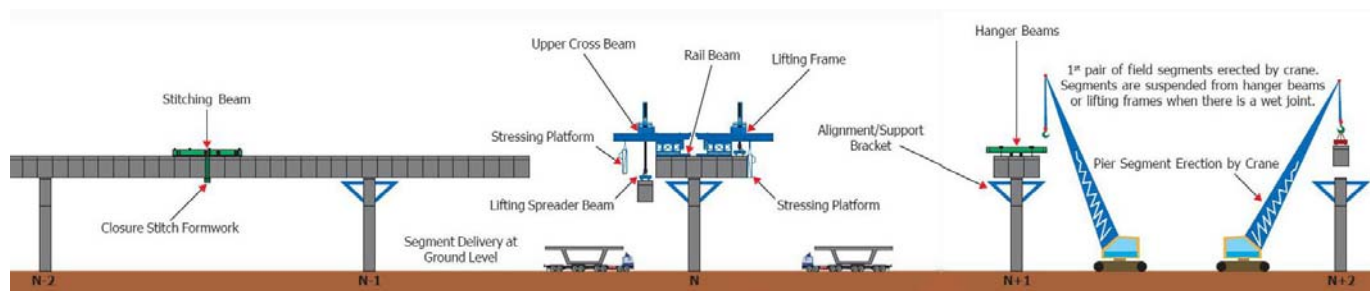
- งานชั่วคราวต่างๆ มีความง่ายกว่าการก่อสร้างในระบบอื่น
- สามารถติดตั้งชิ้นส่วนต่างๆ ได้รวดเร็วและทำให้มีรอบกะเวลาทำงานคนงานมีประสิทธิภาพ
- สามารถติดตั้งชิ้นส่วนที่มีขนาดใหญ่ได้
- สามารถติดตั้งและปรับระดับและตำแหน่งชิ้นส่วนต่างระดับกันได้
- สามารถประยุกต์และปรับเปลี่ยนการทำงานของระบบการยกได้หลายรูปแบบ



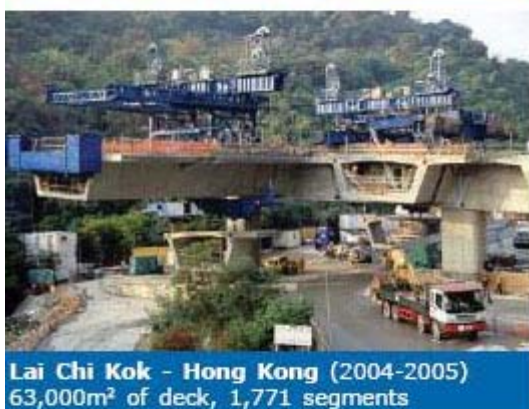
รูปที่ 47: การก่อสร้างวิธี Balanced Cantilever โดยใช้ Lifting Frames

ขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วน

1. ประกอบและติดตั้ง Lifting Frame บนส่วนหัว Pier ที่ต้องการติดตั้ง
2. ติดตั้งชิ้นส่วนสะพานคู่แรก (โดยเครน)
3. ทำงานรอยต่อเปียกของโครงสร้าง (Wet joint construction) เนื่องจากชิ้นส่วนสะพานคู่แรกถูกติดตั้งด้วยเครนและยื่นออกไปจากตัว Hanger beam และมีรอยต่อโครงสร้างอยู่
4. ปมรอยต่อเปียกนี้
5. ติดตั้งชิ้นส่วนสะพานคู่ที่ 2-3, 4-5, 6-7, ..., 12-13
6. ย้าย Lifting Frame ออก



รูปที่ 48: การก่อสร้างแบบ Balanced Cantilever โดยใช้ Lifting Frame



รูปที่ 49: ตัวอย่างสะพานที่ใช้รูปแบบการก่อสร้างแบบ Balanced Cantilever โดยใช้ Lifting Frame

2.1.3 การติดตั้งด้วยวิธี Balanced Cantilever โดยใช้ Cranes

เป็นการก่อสร้างด้วยวิธี Balanced Cantilever โดยใช้ Mobile crane ร่วม, วิธีนี้เหมาะกับกรณีที่สภาพหน้างานและสภาพพื้นดินเหมาะสมสามารถให้รถเครนเข้าออกได้ การใช้วิธีนี้จะต้องมีการจัดระบบการจราจรในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างให้เหมาะสมด้วย

ข้อดีของการติดตั้งด้วยวิธีนี้

- งานชั่วคราวต่าง ๆ มีน้อยกว่าการก่อสร้างในระบบอื่น
- สามารถติดตั้งชิ้นส่วนได้รวดเร็ว
- สามารถเปิดงานพร้อมกันได้หลายส่วน

- ใช้จำนวนคนงานก่อสร้างไม่มาก
- งานทางด้านวิศวกรรมไม่ยาก
- รถเครนมียุ่ทั่วไปได้ไม่ยาก
- สามารถใช้ประโยชน์งานเครนอย่างอื่นได้นอกจากการติดตั้งชิ้นส่วนสะพาน

ขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วน

1. ติดตั้งชิ้นส่วน Pier และ Support Bracket
2. ติดตั้งชิ้นส่วนสะพานเป็นคู่ๆ โดยใช้รถเครน



Shatin T3 - Hong Kong (2004-2007)
65,800m² of deck, 1,806 segments



West Link - Australia (2004-2005)
86,000m² of deck, 3,013 segments



Lai Chi Kok - Hong Kong (2004-2006)
63,000m² of deck,
1,771 segments



West Rail - Hong Kong (1999-2002)
8,330m² of deck,
617 segments

รูปที่ 50: ตัวอย่างสะพานที่ใช้รูปแบบการก่อสร้างแบบ Balanced Cantilever โดยใช้ Crane



รูปที่ 51: การก่อสร้างแบบ **Balanced Cantilever** โดยใช้ Crane

การก่อสร้างโดยวิธีนี้ใช้ได้กับการก่อสร้างสะพานขึง (Cable-stayed bridge) และเหมาะสำหรับสะพานที่มีช่วง Span ยาวและไม่ต้องใช้น้ำหนักมาก



รูปที่ 52: การก่อสร้างสะพานขึง **Cable-stayed bridge** โดยวิธี **Balanced cantilever**

2.2 วิธีการก่อสร้างแบบ Progressive placement

โดยหลักการแล้วเป็นการก่อสร้างออกไปในทิศทางเดียวจนเสร็จที่ละช่วงสะพาน แต่จะเป็นการก่อสร้างยื่นออกไปจากเสา Pier เพียงด้านเดียวต่างจากวิธี Balanced cantilever ที่จะยื่นออกไปสองข้างเพื่อสร้างสมดุลซึ่งกันและกัน วิธีนี้เหมาะกับสะพานในช่วงความยาวประมาณ 30-100 เมตร และเนื่องจากต้องก่อสร้างยื่นออกไปจากเสาจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นด้วย ทำให้อาจต้องมีส่วนโครงสร้างชั่วคราวเพื่อยึดตรึงชิ้นส่วนในขณะติดตั้งเช่นการตั้งเสาชั่วคราวเพื่อติดสายเคเบิลเพื่อยึดชิ้นส่วน Segment ไว้จนกว่าจะก่อสร้างในแต่ละช่วงความยาวเสร็จเรียบร้อย การก่อสร้างวิธีนี้สามารถแบ่งออกได้ตามการใช้อุปกรณ์ในการก่อสร้างเช่น

2.2.1 วิธี Span-by-span โดยใช้โครง Truss หรือนั่งร้าน Falsework

เหมาะสำหรับสะพานที่มีช่วงความยาวสั้นกว่าที่จะใช้วิธี Balanced cantilever โดยวิธีนี้จะเป็นการก่อสร้างออกไปในทิศทางเดียวที่ละช่วงความยาวสะพานซึ่งใช้ Form Traveler เช่นกัน โดยสามารถยึดเข้ากับตัวสะพานที่ก่อสร้างเสร็จแล้วหรือส่วนเสา Pier ของสะพานก็ได้ เดิมทีเป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นสำหรับการเทคอนกรีตในท่อเพื่อหล่อตัวสะพานแต่วิธีนี้ก็สามารรถประยุกต์เข้ากับการติดตั้งชิ้นส่วนหล่อสำเร็จก็ได้ โดยอาจใช้การติดตั้งชิ้นส่วนหล่อสำเร็จบนโครง Truss ชั่วคราวที่ยึดระหว่างช่วงความยาว Span จนติดตั้งชิ้นส่วนครบตลอดช่วงความยาว ใช้การดึงลวดอัดแรงเสริมเพื่อยึดชิ้นส่วนให้ติดกันและเป็นโครงสร้างต่อเนื่องกันกับช่วงความยาวสะพานข้างเคียง



รูปที่ 53: Movable Formwork หรือ Form Traveler ในการก่อสร้างแบบ Span-by-span

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือขนาดและชนิดของนั่งร้านเนื่องจากความสูงของนั่งร้านและน้ำหนักที่ต้องรับอาจเป็นนั่งร้านธรรมดาหรืออาจต้องเป็นชนิดใช้งานหนักซึ่งสามารถรับน้ำหนักมากเป็นพิเศษ

มีการใช้ระบบไฮดรอลิกในการรองรับชิ้นส่วนสะพานเป็นการชั่วคราว, ปรับตำแหน่งชิ้นส่วนสะพานและถ่ายน้ำหนักชิ้นส่วนเข้าสู่ Pier

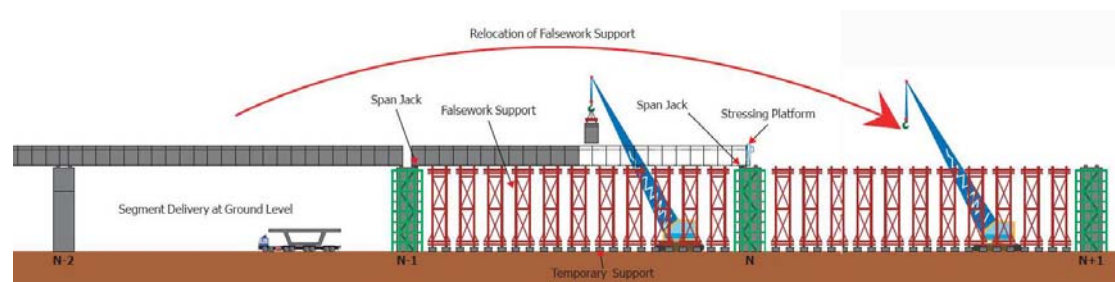
โดยทั่วไปชิ้นส่วนสะพานจะถูกยกวางบนนั่งร้านด้วยเครนแต่หากสภาพเหมาะสมและมีการออกแบบและจัดการที่ดีก็สามารถที่จะทำระบบรองรับต่างๆ ให้เป็นโมดูล (Modular support system) ทำให้ลดเวลาในการเคลื่อนย้ายจัดตำแหน่งต่างๆ และก่อสร้างได้เร็วขึ้น เช่นการทำโครงสร้างรองรับที่มีช่วงยาวๆ เพื่อใช้ในการก่อสร้างช่วงที่ต้องสร้างข้ามถนนหรือทางรถไฟเบื้องล่าง

ข้อดีของการติดตั้งด้วยวิธีนี้

- มีความซับซ้อนทางวิศวกรรมน้อย ไม่ยุ่งยาก
- สามารถทำระบบ Modular support system เพื่อให้งานทำได้รวดเร็วและง่ายขึ้น
- สามารถเปิดงานได้หลายงานพร้อมๆ กัน

ขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วน

- ติดตั้งนั่งร้านและส่วนที่เกี่ยวข้องต่างๆ
- ติดตั้งชิ้นส่วนสะพาน
- จัดวางตำแหน่งให้ถูกต้องและยึดชิ้นส่วนต่างๆ
- งานดึงลวด Post tensioning
- ถ่ายน้ำหนักลงบนส่วนรองรับถาวร (Permanent Bearing)



รูปที่ 54: การก่อสร้างแบบ Span-by-span โดยการตั้งนั่งร้าน



West Rail - Hong Kong (1999-2002)
116,667m² of deck, 8,642 segments



Penny's Bay - Hong Kong (2003-2004)
16,240m² of deck, 627 segments



Deep Bay Link - Hong Kong (2004-2005)
108,000m² of deck, 3,014 segments



Penny's Bay - Hong Kong (2003-2004)
16,240m² of deck, 627 segments



West Link - Australia (2004-2005)
86,000m² of deck, 3,013 segments



East Rail - Hong Kong (2000-2003)
58,320m² of deck, 4,449 segments

รูปที่ 55: ตัวอย่างสะพานที่ใช้รูปแบบการก่อสร้างแบบ Span-by-span
โดยการใช้โครง Truss หรือนั่งร้าน

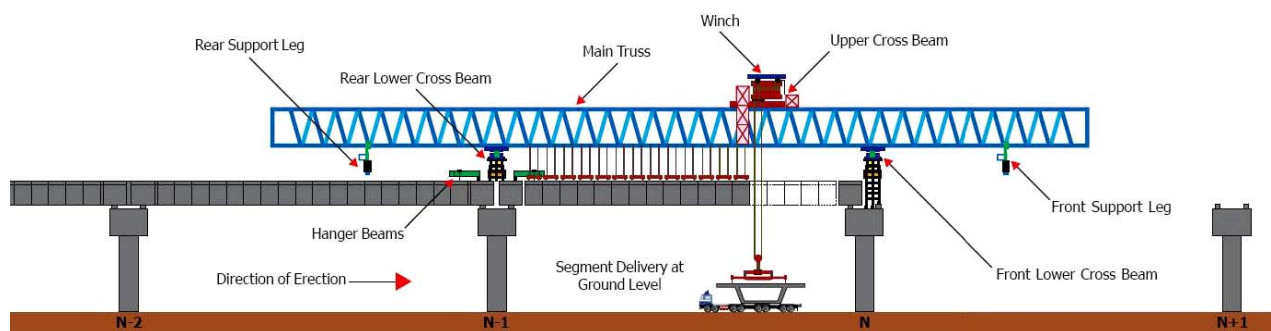
2.2.2 การติดตั้ง Span by Span โดยใช้ Launching Gantry

ข้อดีของการติดตั้งด้วยวิธีนี้

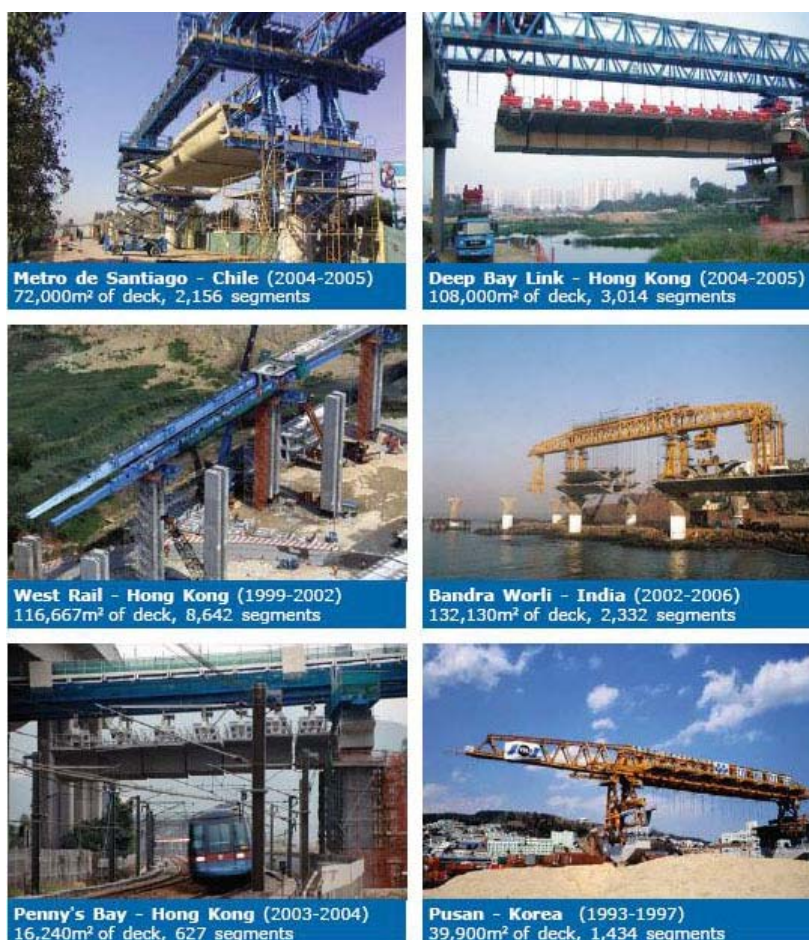
- สามารถเลือกใช้ Gantry แบบติดตั้งบน (Overhead gantry) หรือแบบแขวนติดตั้งด้านล่าง (Underslung gantry) ก็ได้
- สามารถก่อสร้างได้รวดเร็วเนื่องจากการใช้ระบบดึงลวดอัดแรงภายนอก (External Post-tensioning)
- สามารถขนส่งชิ้นส่วนต่างๆ มาสู่ด้านหลังตัว Gantry ได้โดยขนส่งบนช่วงสะพานที่ติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำให้กระบวนการจราจรเบี่ยงล่งน้อยที่สุด หรือจะขนส่งชิ้นส่วนมาทางพื้นด้านล่างก็ได้
- ใช้จำนวนคนงานก่อสร้างน้อยกว่าการก่อสร้างด้วยระบบ Balanced cantilever
- การเข้าสู่หน้างานสะดวกและไม่ติดขัดหรือถูกกีดขวางเนื่องจากการใช้ Gantry

ขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วนในแต่ละ Span

1. เลือกระบบ Gantry ไปยังตำแหน่ง Span ที่จะติดตั้งชิ้นส่วนสะพาน
2. ติดตั้งชิ้นส่วนสะพาน
3. จัดตำแหน่งชิ้นส่วนสะพานให้ถูกต้องและยึดชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน
4. ทำงานคอนกรีตเชื่อมรอยต่อเปียกต่างๆ (Wet joint casting)
5. บ่มคอนกรีตรอยต่อในช่วงเวลากลางคืน
6. ติดตั้งระบบลวดอัดแรงภายนอก (External Post-tensioning)
7. ดึงลวดอัดแรง (External Post-tensioning) และงานลวดอัดแรงที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 56: การก่อสร้างแบบ Span-by-span โดยใช้ Launching Gantry



รูปที่ 57: ตัวอย่างสะพานที่ใช้รูปแบบการก่อสร้างแบบ Span-by-span โดยใช้ Launching Gantry

2.3 วิธี Incremental launching

มีอีกชื่อหนึ่งคือเรียกว่าวิธี Push-out construction หลักการของวิธีนี้คือการหล่อชิ้นส่วนสะพานทีละชิ้นต่อกันที่โรงหล่อหน้างานบริเวณปลายสุดของสะพานด้านหนึ่งโดยการหล่อแต่ละชิ้นส่วนจะหล่อให้มีขนาดที่เข้ากันได้กับชิ้นส่วนที่หล่อก่อนหน้านี้ชิ้นและเมื่อหล่อเสร็จจะทำการดึงลวดอัดแรงเข้ากับชิ้นส่วนสะพานที่หล่อก่อนหน้านี้ จากนั้นชิ้นส่วนที่หล่อเสร็จและยึดกันทั้งหมดก็จะถูกดันออกไปทางตำแหน่ง Pier ในแนวสะพานเป็นระยะความยาวเท่ากับชิ้นส่วนที่หล่อขึ้นทีละชิ้น ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ (หล่อชิ้นส่วน 1 ชิ้น, ดึงลวดยึดชิ้นส่วน, ดันสะพาน แล้วหล่อชิ้นส่วนใหม่ วนไปเรื่อยๆ) จนหล่อครบและดันสะพานเสร็จเรียบร้อยไปยังตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นจึงดึงลวดอัดแรงเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความต่อเนื่องของตัวสะพานและให้ยึดติดกันทั้งหมด สุดท้ายจึงทำการเปลี่ยนส่วนรองรับ (Bearings) จากส่วนรองรับชั่วคราวให้เป็นส่วนรองรับถาวร (Permanent Bearings)

เพื่อให้ชิ้นส่วนโครงสร้าง Superstructure สามารถถูกดันออกไปได้จะต้องมีส่วนรองรับที่บริเวณหัวเสา Pier สะพานที่มีความเสียดทานน้อยมากเป็นพิเศษเพื่อชดเชยแรงเสียดทานเนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างและสามารถให้โครงสร้างเลื่อนออกไปได้ตลอดทุกชิ้นส่วนและทุกครั้งที่มีการดันชิ้นส่วน

การก่อสร้างด้วยวิธีนี้ใช้ได้กับกรณีที่มีสะพานมีรูปแบบขนาดหน้าตัดเหมือนกันตลอดความยาวสะพาน และสะพานจะต้องเป็นเส้นตรงหรือมีความโค้งทั้งในแนวราบและแนวตั้งคงที่

งานก่อสร้างเกือบทั้งหมดทำขึ้นในส่วนหล่อชิ้นส่วนสะพาน (ที่ปลายสะพาน) ทำให้สามารถควบคุมคุณภาพการทำงานได้ดีเสมือนโรงงานหล่อชิ้นส่วนสำเร็จ

อย่างไรก็ตามวิธีนี้ทำให้งานติดตั้ง Post tension ในการดันตัวสะพานออกไปยังตำแหน่งจริงมีจำนวนมากกว่าการก่อสร้างด้วยวิธีอื่น และจำเป็นต้องมีอุปกรณ์พิเศษต่างๆ ที่ต้องลงทุนสูงเช่น Launching Nose, Launching jacks, Launching bearings and guides



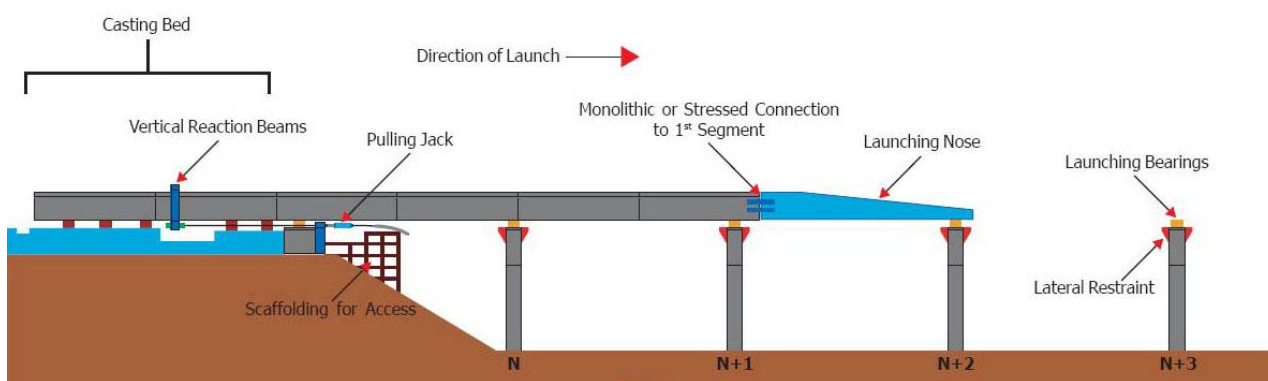
รูปที่ 58: การก่อสร้างโดยวิธี Incremental Launching

ข้อดีของการติดตั้งด้วยวิธีนี้

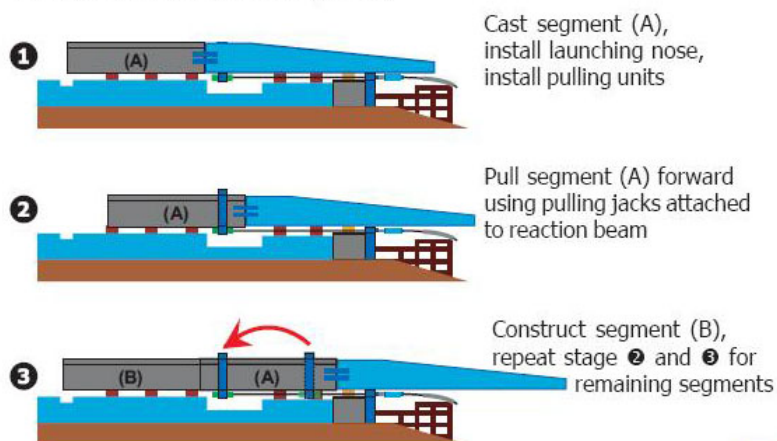
- ไม่ต้องใช้หน้าร้านเพื่อรองรับโครงสร้าง (มีประโยชน์ในกรณีที่สะพานอยู่ในบริเวณที่ห่างไกลเข้าถึงยากเช่น Pier ที่มีความสูงมากๆ, สะพานข้ามแม่น้ำที่ลึกมากๆ, สะพานข้ามถนน ทางรถไฟ หรือช่องเขาที่สูงมากๆ)
- แก้ปัญหาการก่อสร้างในบริเวณที่เข้าถึงได้ยากหรือสภาพแวดล้อมไม่อำนวย
- มีงานโครงสร้างชั่วคราวน้อย

ขั้นตอนการทำงาน

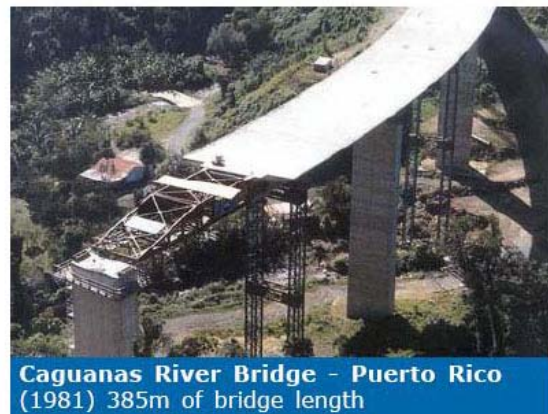
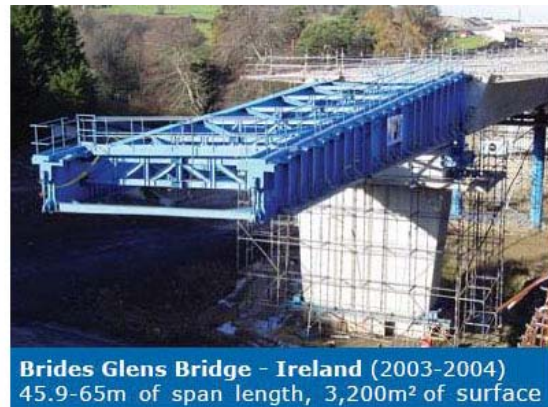
1. ดันขึ้นส่วนสะพาน
2. ถอดแบบและทำความสะอาด
3. จัดเรียงเหล็กในส่วนฐานและตัวแกนของชิ้นส่วนสะพาน
4. ติดตั้งแบบของตัวแกน
5. หล่อคอนกรีตส่วนฐานและตัวแกนของชิ้นส่วนสะพาน
6. ติดตั้งแบบภายใน
7. จัดเรียงเหล็กเสริมส่วนบนของพื้นสะพาน
8. หล่อคอนกรีตส่วนพื้นสะพาน
9. บ่มคอนกรีต
10. ดึงลวดอัดแรง



TYPICAL CONSTRUCTION SEQUENCE



รูปที่ 59: ขั้นตอนการก่อสร้างด้วยวิธี Incremental Launching



รูปที่ 60: ตัวอย่างสะพานที่ใช้การก่อสร้างวิธี Incremental Launching

2.4 การใช้ Form Traveler

เป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นสูงสามารถใช้กับสะพานที่มีหน้าตัดต่างๆ กัน และสามารถหล่อคอนกรีตสำหรับความยาวช่วงต่างๆ กันได้ตามที่การออกแบบต้องการ, สามารถใช้การบ่มด้วยไอน้ำภายในตัว Form Traveler ได้ทำให้การก่อสร้างทำได้เร็วขึ้น



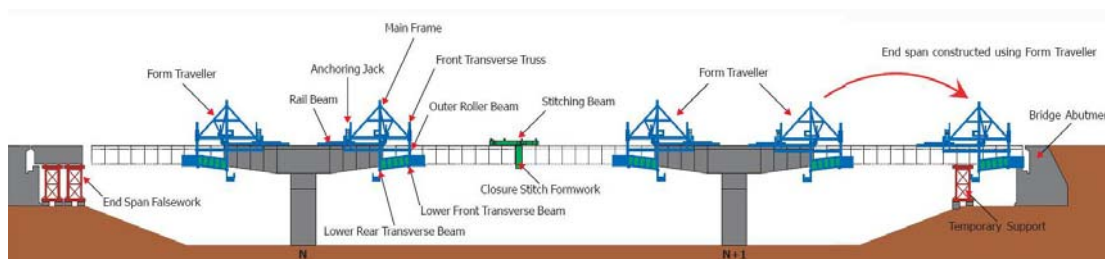
รูปที่ 61: การใช้ Form Traveler ในการก่อสร้างสะพาน

ข้อดีของการติดตั้งด้วยวิธีนี้

- สามารถใช้กับการก่อสร้างสะพานที่มี span ยาวๆ การเข้าถึงทำได้ยาก
- สามารถใช้กับรูปแบบสะพานที่มีหน้าตัดต่างๆ กัน

ขั้นตอนการทำงาน

1. ถอดแบบส่วนปลายและอุปกรณ์ยึดแบบ
2. ติดตั้งลวดอัดแรง
3. ดึงลวดอัดแรงในชั้นส่วนยื่น
4. ถอดแบบด้านข้างภายนอก, ภายในและด้านล่าง
5. เลื่อนและติดตั้งส่วนคานและเฟรมยึดต่างๆ
6. ทำความสะอาดแบบ
7. เข้าแบบส่วนต่างๆ
8. วางแนวลวดอัดแรงและเหล็กเสริม
9. ตรวจสอบระดับ, ตำแหน่งต่างๆ
10. เทคอนกรีตขึ้นส่วนสะพานแล้วจึงปมคอนกรีต



รูปที่ 62: การก่อสร้างโดยใช้ Form traveler



Deep Bay Link - Hong Kong (2004-2005)
71.5m of span length, 28 cantilevers



H-3 North Halawa Valley Viaduct - Hawaii (1990-1992)



Sinu Bridge - Columbia (2005)
150m of main span length, 2 cantilevers



Ma Wan - Hong Kong (1999)
48m of main span length, 15 cantilevers

รูปที่ 63: ตัวอย่างสะพานที่ใช้การก่อสร้างโดยใช้ Form traveler

2.5 การใช้อุปกรณ์ยกสำหรับชิ้นส่วนขนาดใหญ่พิเศษ

ด้วยเหตุผลทางเทคนิคต่างๆ มีบางสะพานทำให้ต้องใช้ชิ้นส่วนหล่อสำเร็จที่มีขนาดใหญ่พิเศษและน้ำหนักมากทำให้ไม่สามารถใช้อุปกรณ์ยกเคลื่อนย้ายขนส่งธรรมดาได้ จึงต้องมีการออกแบบอุปกรณ์พิเศษเพื่อเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนขนาดใหญ่ดังกล่าว รวมถึงการออกแบบโครงสร้างชั่วคราวที่ต้องใช้และให้สอดคล้องกันรวมถึงต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการก่อสร้างด้วย



รูปที่ 64: การใช้อุปกรณ์ยกชิ้นส่วนขนาดใหญ่พิเศษ

การก่อสร้างสะพานแขวนและสะพานขึง

การก่อสร้างสะพานแขวน

- เริ่มจากการก่อสร้างเสาทาวเวอร์สะพานเป็นขั้นตอนแรก ในกรณีที่เสาสะพานและตัวต่อม่อเสาสพานต้องตั้งอยู่ในน้ำ จะใช้วิธีการก่อสร้างแบบเคซอง (Caissons) โดยจมเคซองลงและขุดดินอ่อนใต้น้ำออกเพื่อก่อสร้างฐานราก
- หากชั้นหินแข็งใต้น้ำนั้นอยู่ลึกเกินกว่าที่จะขุดถึงหรือจมเคซองลงได้ จะใช้วิธีการตอกหรือเจาะเสาเข็มให้ถึงชั้นหินหรือชั้นดินแข็งที่อยู่ด้านบนแทน หรืออาจใช้วิธีสร้างฐานคอนกรีตขนาดใหญ่เพื่อกระจายน้ำหนักสู่ชั้นดินที่มีแรงต้านทานต่ำโดยการเตรียมพื้นผิวด้วยการถมกรวดอัดแน่น (วิธีสร้างฐานคอนกรีตแบบนี้สามารถใช้ได้กับบริเวณที่มีแผ่นดินไหวหรือมีรอยเลื่อนของแผ่นดินไหวได้ด้วย) จากนั้นจากสร้างส่วนของตอม่อฐานรากต่อขึ้นมาจนถึงเหนือระดับน้ำ
- ในกรณีที่การก่อสร้างเสาสพานอยู่บนบริเวณพื้นที่แห้ง จะใช้วิธีการขุดเจาะเพื่อสร้างฐานรากที่ลึกหรือใช้เสาเข็ม
- ถัดจากส่วนของฐานราก จะเป็นการก่อสร้างหรือติดตั้งส่วนของเสาทาวเวอร์สะพาน โดยใช้โครงสร้างคอนกรีต หินหรือเหล็ก เมื่อก่อสร้างถึงความสูงระดับหนึ่งจะต้องมีทางผ่านไว้สำหรับก่อสร้างติดตั้งตัวพื้นสะพาน Deck แล้วจึงสร้างเสาทาวเวอร์ต่อให้สูงขึ้นไปจนสุด

- ที่ปลายบนสุดของเสาทาวเวอร์ จะติดตั้งโครงสร้างลักษณะอานม้าหรืออุปกรณ์เพื่อให้สายเคเบิลหลักลอดผ่าน (เรียกว่า Saddles) ซึ่งตัว Saddles นี้มีผิวเรียบและช่องว่างพอที่จะให้สายเคเบิลสามารถเคลื่อนตัวได้เล็กน้อยอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นในระหว่างการก่อสร้าง ท้ายสุดหลังจากที่สะพานได้สร้างเสร็จ อาจมีการปิดช่องตัว Saddles นี้ไว้ด้านในอีกทีหนึ่ง
- ขั้นตอนถัดไปเป็นการสร้างเตรียมที่ตรึงยึดปลายสายเคเบิล (Anchorage) ซึ่งโดยมากใช้เป็นลักษณะของสลักเกลียวแบบ Eyebolts ซึ่งต้องรับแรงดึงของตัวสายเคเบิลที่จะมายึด ดังนั้นตัวยึดนี้จึงมักจะใช้การขุดฝังไว้ในหินและถ่วงไว้ด้วยก้อนน้ำหนักคอนกรีตขนาดใหญ่ น้ำหนักมากๆ ให้ปลอดภัย
- ทำทางเดินชั่วคราวสำหรับคนงานก่อสร้างแขวนด้วยสายเคเบิลรับแรงดึงโดยให้ทางเดินนี้อยู่ในแนวเดียวกันและหย่อนตัวเหมือนกันกับสายเคเบิลหลักที่กำลังจะติดตั้ง พร้อมด้วยสายเคเบิลอีกหนึ่งชุดเพื่อรองรับการติดตั้งตัวเครื่องโยงสายเคเบิลหลัก (Traveler) เหนือทางเดิน
- การติดตั้งสายเคเบิลหลักของสะพานจะเริ่มจากการติดตั้งตัว Traveler โดยตัว Traveler จะวิ่งอยู่บนสายเคเบิลที่ติดตั้งเตรียมไว้ในขั้นตอนก่อนหน้า เคลื่อนที่ไปตามตามแนวสายเคเบิลจากปลายยึดของฝั่งหนึ่งไปยังอีกฝั่งหนึ่งของสะพานได้
- จากนั้นตัว Traveler จะดึงลวดรับแรงดึงสูง (โดยปกติมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 มม.) ที่ลวดชุดที่เตรียมไว้สำหรับเป็นสายเคเบิลหลักโดยปลายหนึ่งของลวดจะถูกยึดไว้กับตัวยึด Anchorage อีกปลายหนึ่งอยู่ที่ตัว Traveler ซึ่งเคลื่อนที่ออกไปตามแนวสะพานเพื่อนำอีกปลายหนึ่งพาดผ่านเสาทาวเวอร์ของสะพานที่ละต้น ไปยึดไว้รวมกันที่ตัวยึด Anchorage อีกปลายด้านหนึ่งของสะพาน ด้วยวิธีนี้สลักไปมาที่ละข้าง ลวดแรงดึงสูงจะถูกโยงพาดจากฝั่งหนึ่งของสะพานไปยังอีกฝั่งหนึ่งได้โดยจัดวางตำแหน่งให้เป็นสายเคเบิลหลักที่ได้ออกแบบไว้
- ลวดรับแรงดึงสูงที่ถูกติดตั้งนี้จะถูกพันเกลียวและยึดเข้าด้วยกันที่ลวดชุด และทาเคลือบสารป้องกันการสึกกร่อนไปพร้อมกัน ลวดรับแรงดึงสูงแต่ละชุดจะมีลักษณะหน้าตัดเป็นหกเหลี่ยม ท้ายสุดเมื่อพันลวดรับแรงดึงสูงมัดรวมกันทั้งหมดจนมีขนาดเท่าสายเคเบิลหลักที่ได้ออกแบบไว้จะทำการบีบอัดด้วยเครื่องตัดไฮดรอลิกและใช้ลวดมัดเพิ่มเติมเพื่อให้หน้าตัดของสายเคเบิลหลักนี้เป็นหน้าตัดวงกลมในที่สุด
- เมื่อติดตั้งสายเคเบิลหลักเรียบร้อยแล้ว จะติดตั้งอุปกรณ์ Saddles ย่อยที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความยาวของสายเคเบิลหลัก โดยยึดเข้ากับสายเคเบิลหลักเพื่อใช้ลวดสายเคเบิลแขวนที่ไว้แขวนตัว Deck สะพาน โดยจะต้องปรับยึดตัว Saddles ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามสายเคเบิลหลักทั้งสองเส้นที่พาดผ่านแต่ละเสาให้ห่างเท่ากันกับความกว้างของตัวสะพาน Deck ที่จะติดตั้งต่อไป อีกทั้งปรับตัวยึด Saddles นี้ให้มีมุมลาดเอียงที่สอดคล้องกันกับแนวของสายเคเบิลหลักที่ไปยึดติดไว้ด้วย
- จากนั้นจึงติดตั้งสายเคเบิลแขวน โดยเตรียมสายเคเบิลแขวนให้มีความยาวตามที่ได้ออกแบบไว้และคล้องพาดเข้าที่ตัว Saddles ตามตำแหน่งต่างๆ ที่ยึดไว้บนสายเคเบิลหลัก ในกรณีที่เสาทาวเวอร์ของสะพานตั้งอยู่บนฝั่ง จะใช้สายเคเบิลแขวนกับสะพานช่วงกลาง (Central span) เท่านั้น
- สุดท้ายจะเป็นการติดตั้งตัว Deck สะพาน ซึ่งจะใช้อุปกรณ์ยกขึ้นส่วนตัวสะพาน (อาจติดตั้งด้วยยกไว้กับสายเคเบิลแขวนหรือสายเคเบิลหลักก็ได้) ขึ้นมาติดตั้งตามตำแหน่ง การลำเลียงชิ้นส่วนตัวสะพานอาจลำเลียงมาทางเรือแล้วจึงยกขึ้นติดตั้ง หรืออาจใช้วิธีการติดตั้งแบบยื่น Cantilever ติดตั้งชิ้นส่วนตัวสะพานออกไปทีละชิ้น



รูปที่ 65: การก่อสร้างสะพานแขวน

- ในการติดตั้งชิ้นส่วนตัว Deck สะพานออกจากสทาวเวอร์สะพานนั้น ในช่วงแรกเนื่องจากยังไม่มีน้ำหนักถ่วงลงจากช่วงกึ่งกลางของสะพาน จะทำให้ด้านปลายสุดของสะพานที่กำลังติดตั้งอยู่มีลักษณะเซดขึ้น แต่เมื่อติดตั้งตัวสะพานทั้งหมดแล้ว น้ำหนักตัวสะพานจะถ่วงลงและสายเคเบิลหลักจะถูกดึงเพิ่มเติมจากน้ำหนักตัวเองทำให้สายเคเบิลหลักหย่อนลงจนได้แนวโค้งพาราโบลาตามที่ได้ออกแบบไว้ พร้อมกันกับแนวของตัว Deck สะพานจะโค้งขึ้นเล็กน้อย (เพื่อให้มีช่องว่างใต้สะพานเพื่อการใช้งานสัญจรทางน้ำ) หรืออาจอยู่ในแนวราบตามที่ได้ออกแบบไว้เช่นกัน

การก่อสร้างสะพานขึง

สะพานขึงที่มีเสาขึงหลายๆ ต้น อาจดูคล้ายกันกับสะพานแขวน แต่แท้จริงแล้วมีความแตกต่างเป็นอย่างมากทั้งในหลักการและวิธีการก่อสร้าง

สำหรับสะพานแขวนนั้น สายเคเบิลหลักที่มีขนาดใหญ่จะเกิดจากการพันเกลียวของ เส้นลวดเคเบิลที่มีขนาดเล็กและตัวสายเคเบิลหลักนี้จะถูกโยงข้ามระหว่างเสาสะพาน (Tower) ทั้ง 2 ฟังของสะพาน และโยงไปสิ้นสุดที่ตัวยึด Anchorages ที่ปลายสะพานแต่ละฝั่งในพื้นดิน หรือยึดรั้งไว้กับโครงสร้างขนาดใหญ่ โดยสายเคเบิลหลักนี้จะทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักในการรับน้ำหนักเบื้องต้นสำหรับตัวสะพาน โดยในขั้นแรกก่อนที่จะติดตั้ง ตัวสะพานจะถูกติดตั้ง สายเคเบิลหลักนี้จะรับแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักของตัวเอง จากนั้นสายเคเบิลขนาดที่เล็กกว่า (สายเคเบิลแขวน) จะถูกแขวนจากสายเคเบิลหลักอีกทีเพื่อใช้ในการรับน้ำหนักของตัวสะพาน ซึ่งจะถูกยกขึ้นติดตั้งทีละชิ้นส่วนเข้ากับสายเคเบิลแขวน เมื่อติดตั้งตัวสะพานเสร็จเรียบร้อยแล้ว แรงดึงในสายเคเบิลจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของตัวสะพาน รวมทั้งน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะและคนที่กำลังข้ามสะพาน โดยแรงดึงในสายเคเบิลหลักจะถูกถ่ายแรงผ่านตัวยึด Anchorages ลงสู่พื้นดินซึ่งในบางครั้ง มันมีความยากลำบากในการก่อสร้าง เนื่องจากสภาพของดินที่ไม่อำนวย

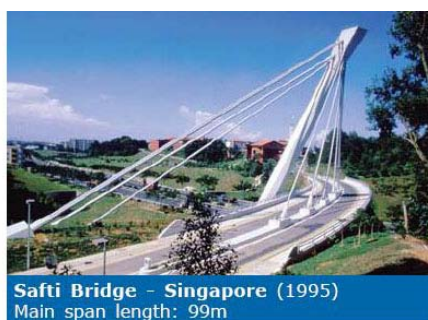
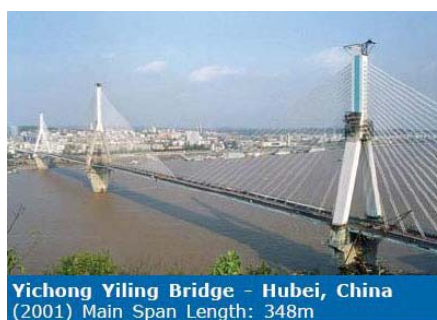
สำหรับการก่อสร้างสะพานขึง ตัวเสาขึงจะทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักในการรับน้ำหนักเบื้องต้น ในการก่อสร้างตัวสะพาน (Bridge deck) หรือชิ้นส่วนสะพานที่อยู่ใกล้ตัวเสา โดยมากมักใช้หลักการของการก่อสร้างสะพานแบบสะพานยื่น (Cantilever approach) ซึ่งตัวเสาขึงจะเป็นโครงสร้างรับน้ำหนักสะพาน แต่เมื่อก่อสร้างหรือติดตั้งชิ้นส่วนสะพานออกห่างจากตัวเสาขึงไป น้ำหนักสะพานจะถูกรับด้วยสายเคเบิลที่ถูกยึดรั้งไว้กับตัวเสาขึงโดยตรง

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการก่อสร้างสะพานแขวน การก่อสร้างสะพานซึ่งมีข้อเสียคือ สายเคเบิลจะถูกดึงในแนวที่ไม่ใช่แนวตั้งเพื่อรับน้ำหนักตัวสะพาน จึงส่งผลทำให้เกิดแรงอัดในแนวแกนในตัวสะพาน bridge deck จึงต้องออกแบบให้ตัวสะพานมีความแข็งแรงมากขึ้นเพื่อต้านทานแรงอัดดังกล่าว แต่การก่อสร้างสะพานซึ่งมีข้อดีตรงที่ไม่จำเป็นต้องมีตัวยึด anchorages ที่แน่นอน เพื่อต้านทานแรงดึงในแนวนอนของสายเคเบิล อย่างในกรณีของสะพานแขวน

แรงในแนวราบทั้งหมดจะถูกออกแบบให้สมดุลกันเพื่อให้เสาชิงของสะพานจะไม่เอียงหรือลื่นไถล ทำให้ตัวเสาชิงต้องมีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อต้านทานแรงจากน้ำหนักบรรทุกจรเท่านั้น

สรุปข้อดีที่สำคัญของรูปแบบสะพานซึ่งมีดังนี้คือ

- มี Stiffness สูงกว่าสะพานแขวนทำให้สามารถลดการโก่งตัวของสะพานภายใต้น้ำหนักบรรทุกจรได้ สามารถก่อสร้างด้วยวิธี Cantilever ยื่นออกมาจากตัวเสาชิง และใช้สายเคเบิลช่วยในการรับน้ำหนักสะพานทั้งเป็นการชั่วคราวและถาวร
- สำหรับสะพานที่มีลักษณะสมมาตร (สะพานซึ่งมีช่วงความยาวทั้งสองข้างของเสาชิงยาวเท่ากัน) แรงในแนวราบมีความสมดุลกันเอง และไม่จำเป็นต้องมีตัวยึด Anchorage ขนาดใหญ่ที่ปลายสะพาน
- ข้อดีอีกอย่างคือ สามารถใช้จำนวนเสาชิงเท่าใดก็ได้ รูปแบบของสะพานเช่นนี้ สามารถสร้างได้โดยใช้เพียงโครงสร้างเสาชิง 1 ต้นหรือ 2 ต้น (1 คู่) ก็ได้ แต่ในขณะที่สะพานแขวนนั้น โดยทั่วไปจะต้องใช้โครงสร้างเสาสะพาน (Tower) จำนวน 1 คู่



รูปที่ 66: ตัวอย่างการก่อสร้างสะพานซึ่ง

ที่มา:

- Design of Highway bridge, Richard M. Barker & Jay A. Puckett, John Wiley & Sons Inc. 1997



-
- Theory and Design of Bridges, Petros P. X., John Wiley & Sons Inc. 1994
 - การออกแบบคอนกรีตอัดแรง, ดร.เนรศ พันธราธร
 - ข้อมูลจาก Wikimedia Foundation, Inc. (wikipedia)
 - ข้อมูลจากบริษัท VSL
 - ข้อมูลจากบริษัท Infrastructure Monitoring and Management System
 - ข้อมูลจากฟิสิกส์ราชมงคล
 - ข้อมูลจากบริษัท Infra Technology Service