บทที่ 2

การก่อสร้างระบบกึ่งสำเร็จรูป

สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 แนวคิดการก่อสร้างกึ่งสำเร็จรูป

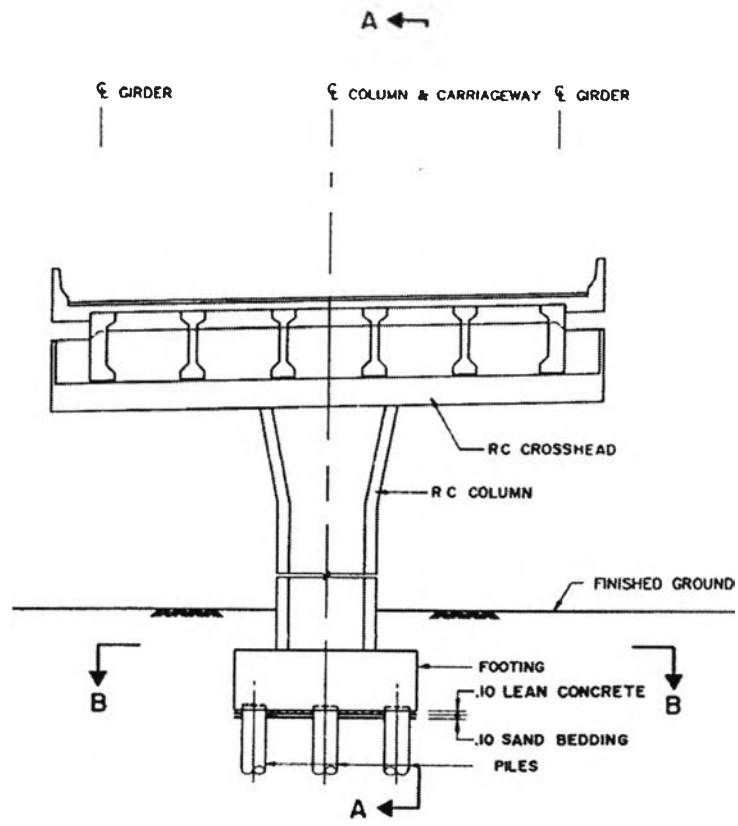
ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคานขวางกึ่งสำเร็จรูปแบบปลายยื่นสำหรับทางยกระดับ หน้าตัดรูปตัวทีหงาย (Inverted T section) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยประยุกต์ปีกคานขวางเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Precast member) ใช้เป็นโครงสร้างชั่วคราว และแบบหล่อคอนกรีตของส่วนที่หล่อหน้างาน การก่อสร้างด้วยวิธีนี้อาจพิจารณากำหนดเงื่อนไขการก่อสร้างบริเวณเกาะกลางถนนที่สามารถเปิดการจราจรได้ตามปกติ อีกทั้งอาจจำกัดพื้นที่การก่อสร้างให้อยู่ภายใต้ขอบเขตของฐานราก การเลือกใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาในลักษณะนี้ อย่างไรก็ตามเพื่อควบคุมขนาดและน้ำหนักในการขนส่งและการยกติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูป จึงอาจพิจารณาเฉพาะส่วนปีกคานขวางเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูป โดยแยกการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ ชิ้นส่วนสำเร็จรูป, การจัดระบบค้ำยันชั่วคราว, และ โครงสร้างแล้วเสร็จสมบูรณ์

2.1.1 ชิ้นส่วนสำเร็จรูป

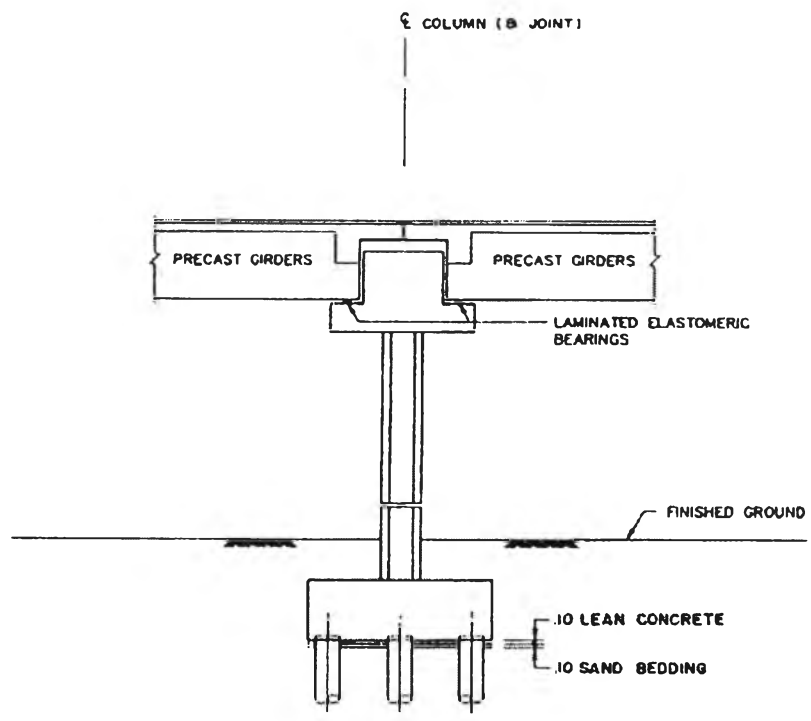
การกำหนดขนาดของชิ้นส่วนสำเร็จรูป จะสัมพันธ์กับขนาดหน้าตัดของคานขวางเมื่อเป็นโครงสร้างแล้วเสร็จ เนื่องจากส่วนปีกของคานขวางอาจกำหนดชิ้นส่วนสำเร็จรูป และขนาดความกว้างของชิ้นส่วนสำเร็จรูปจะเท่ากับความกว้างของส่วนปีกทั้ง 2 ข้าง รวมกับความกว้างส่วนเอวของคานขวางเมื่อแล้วเสร็จ ซึ่งอาจพิจารณาคำนวณโดยยึดหลักการให้ความสูงของคานขวางจะต้องเท่ากับความสูงของคานหลัก ดังนั้นจึงต้องกำหนดขนาดของคานขวางกึ่งสำเร็จรูปก่อนถึงจะกำหนดขนาดของชิ้นส่วนสำเร็จรูปได้

ขนาดหน้าตัดของคานขวางของชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่อาจจะต้องพิจารณาจากกำลังรับแรงเฉือนของบ่าแยกพิจารณาจาก 3 ลักษณะ คือ :-

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



FRONT ELEVATION



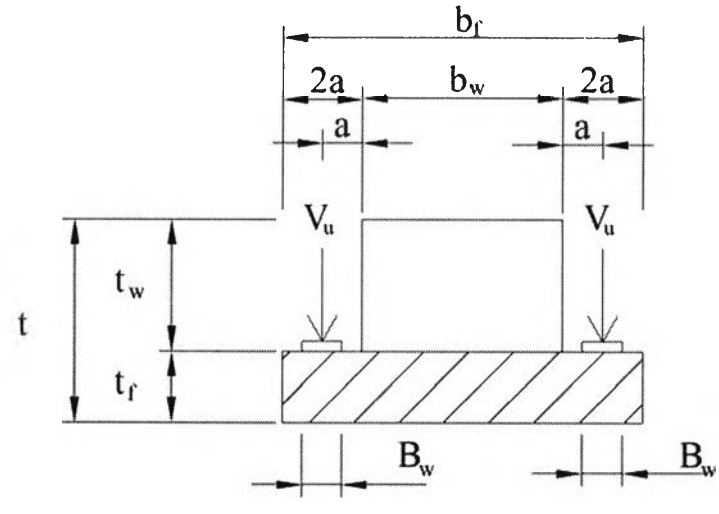
SECTION A–A

รูปที่ 2.1 โครงสร้างคานขวาง และรูปตัดขวางของทางยกระดับ

ก. ความลึกของคานขวางโดยอาศัยแนวคิดที่จะควบคุมระยะความสูงของโครงสร้างแล้วเสร็จ จึงได้กำหนดความลึกคานขวาง (t) เท่ากับ ความลึกของคานหลักรูปตัวไอ รูปตัวที รูปตัวยู และรูปแบบกล่อง ทั้งนี้อาจจะต้องพิจารณาทำบ่าที่ปลายคานหลัก เพื่อควบคุมความสูงของทางระดับได้อย่างเหมาะสม

ข. ความลึกของบ่าคานขวาง (t_f) และขนาดความกว้างของบ่า (2a) กำหนดจากกำลังรับแรงเฉือนของบ่ารองรับแรงกระทำจากคานหลัก โดยมีระยะห่างของคานหลักที่เหมาะสม กอปรกับจะต้องสอดคล้องกับแป้นรองรับ (Bearing pad) กำหนดเป็น 2 เท่าของความกว้าง (B_w) ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.3

ค. ความกว้างของปีกคานขวาง (b_f) จะพิจารณาจากกำลังการรับแรงตัดของหน้าตัดคานรวม ที่อาจกำหนดโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก, โครงสร้างคอนกรีตอัดแรงบางส่วน และหน้าตัดโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หน้าตัดคานขวางชิ้นส่วนสำเร็จรูป

เมื่อ t คือ ความลึกของคานขวางแล้วเสร็จ

t_f คือ ความลึกของบ่าคานขวาง หรือความลึกของปีกคานขวาง

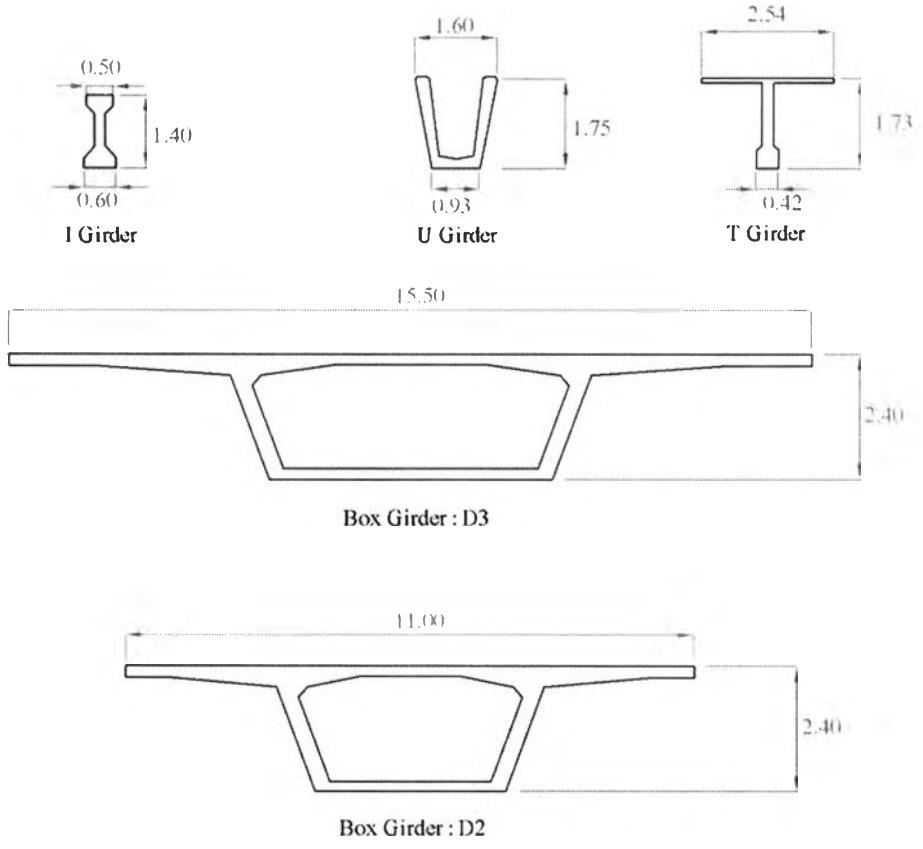
t_w คือ ความลึกส่วนเอวของคานขวาง

b_f คือ ความกว้างของปีกคานขวาง หรือความกว้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป

b_w คือ ความกว้างเอวของคานขวาง

2a คือ ความกว้างของบ่าคานขวาง

B_w คือ ความกว้างของแผ่นรองรับ



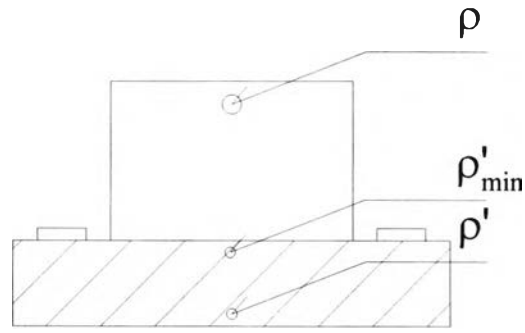
รูปที่ 2.3 หน้าตัดชิ้นส่วนสำเร็จรูป

ตารางที่ 2.1 มิติความลึกและความยาวช่วงของชิ้นส่วนสำเร็จรูป

หน้าตัดคานหลัก	ความลึกของคานหลัก (ม.)	ความยาวช่วง(ม.)
รูปตัวไอ	1.40	22-30
รูปตัวที	1.75	22-35
รูปตัวยู	1.75	22-32
รูปกล่อง(D2)	2.40	30-45
รูปกล่อง(D3)	2.40	30-45

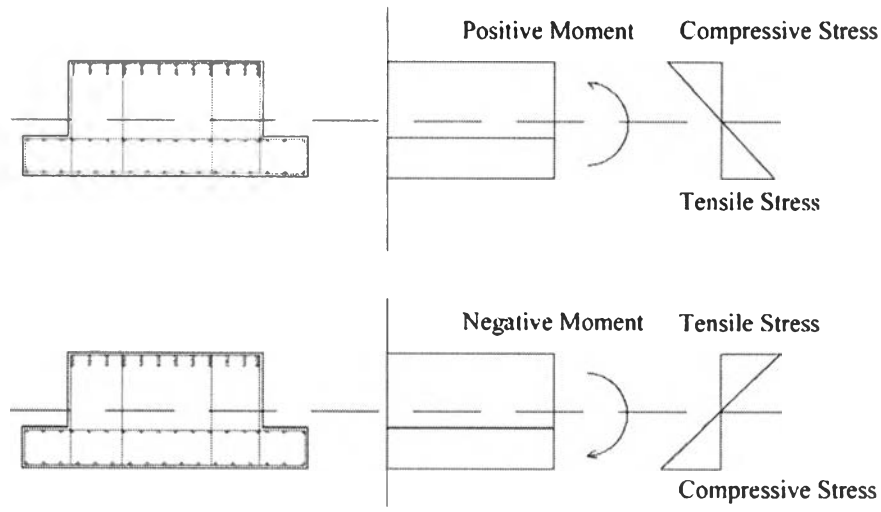
กำลังการรับแรงดัดของคานขวางส่วนสำเร็จรูป จะขึ้นกับขนาดของหน้าตัดที่เกี่ยวกับน้ำหนักบรรทุก จุดยกในการประกอบติดตั้ง และการจัดระบบค้ำยันชั่วคราวในการก่อสร้างส่วนหล่อในที่ ซึ่งในแง่ของกำลัง จะขึ้นกับปริมาณเหล็กเสริม หรือการอัดแรงให้เกิดสถานะในการรับแรงตามสภาพการใช้สอยได้อย่างปลอดภัยตามที่ระบุไว้ในข้อกำหนดของมาตรฐานการออกแบบ โดยที่มีกำลังพอเพียงต่อการรับแรงในการใช้งานได้อย่างสมบูรณ์ด้วยคานขวางกึ่งสำเร็จรูป เป็นโครงสร้างคานยื่น การเสริมเหล็กรับแรงดัดจึงได้จัดไว้ผิวบนของหน้าตัด การเสริม

เหล็กกันร้าวอาจทำที่ผิวล่างของหน้าตัด แต่ เพื่อไม่ให้พฤติกรรมการรับแรงดังกล่าวเปลี่ยนไป การเสริมเหล็กในการชิ้นส่วนสำเร็จรูป จะยังคงแนวคิดการเสริมเหล็กตามที่ได้ออกแบบไว้ในโครงสร้างแล้วเสร็จ โดยใส่เหล็กเสริมเฉพาะส่วนที่อยู่ในบริเวณที่จะนำมาทำชิ้นส่วนสำเร็จรูป และใส่เหล็กเสริมที่ผิวบนของชิ้นส่วนสำเร็จรูปเพิ่มเท่าที่จำเป็นทางด้านความปลอดภัยที่กำหนด โดยมาตรฐานการออกแบบทำให้กำลังรับแรงดัดของชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่วิเคราะห์ได้มีค่าไม่สูงมาก และถูกควบคุมไว้ภายใต้ค่าแรงดัดการแตกร้าว (Cracking moment)

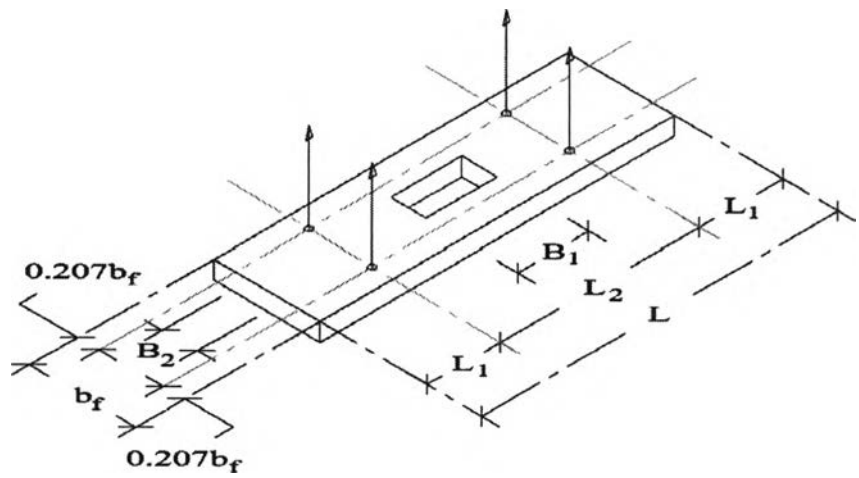


รูปที่ 2.4 การเสริมเหล็กคานขวางสำเร็จรูป

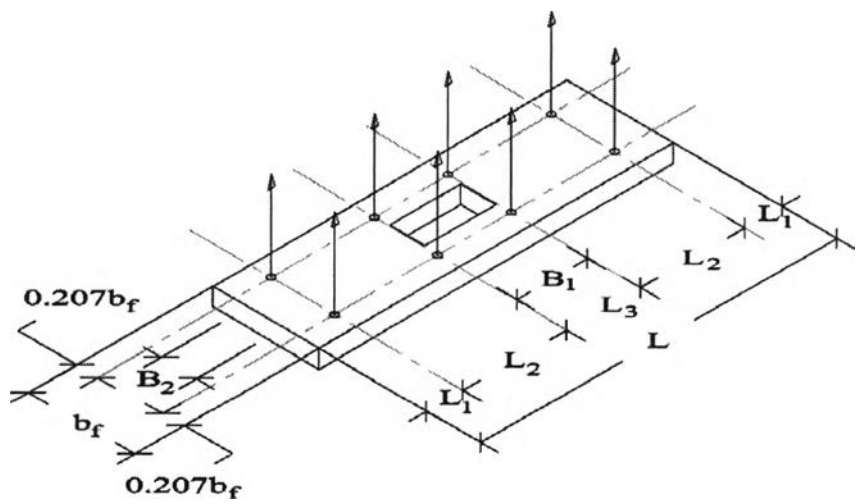
การยกติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูป จะต้องไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางโครงสร้าง อันเนื่องมาจากการแตกร้าว โดยในการกำหนดจุดยกของชิ้นส่วนสำเร็จรูป จะพิจารณาจากกำลังในการรับแรงดัดของชิ้นส่วนสำเร็จรูป อันเนื่องมาจากแรงดัดที่ก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดที่บนผิวของชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Positive moment) และแรงดัดที่ก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดที่ผิวล่างของชิ้นส่วนสำเร็จรูป (Negative moment) ดังแสดงในรูป 2.4 และมีการควบคุมให้หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงดึงแตกร้าว (Cracking stress) อย่างไรก็ตามในชิ้นส่วนสำเร็จรูปบริเวณที่จะติดตั้งอยู่เหนือเสา จะต้องทำช่องเปิดเพื่อเสริมเหล็กให้มีความต่อเนื่องจากโครงสร้างของคานขวางไปในเสาที่รองรับ หน้าดัดชิ้นส่วนโครงสร้างดังกล่าวจะมีขนาดเล็กกว่าปกติ จึงได้มีการกำหนดจุดยกโดยให้มีสัดส่วนของแรงกระทำโมเมนต์ลบต่อโมเมนต์บวกน้อยกว่า 1.0



รูปที่ 2.5 การกระจายหน่วยแรงบนหน้าตัด



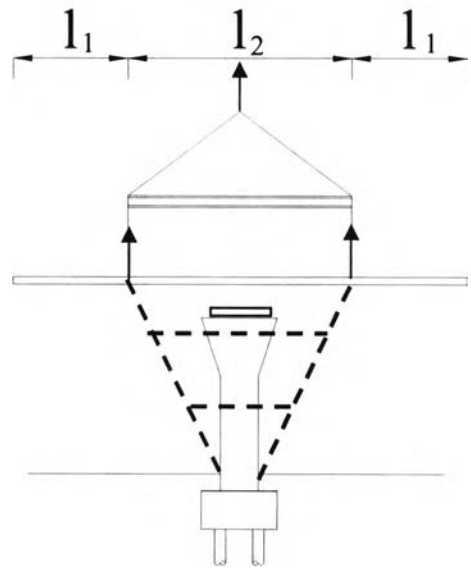
ก. การยกแบบ 2 จุด



ข. การยกแบบ 4 จุด

รูปที่ 2.6 การจัดตำแหน่งจุดยกชิ้นส่วนสำเร็จรูป

ก) รูปตัด



ข) รูปตามยาว

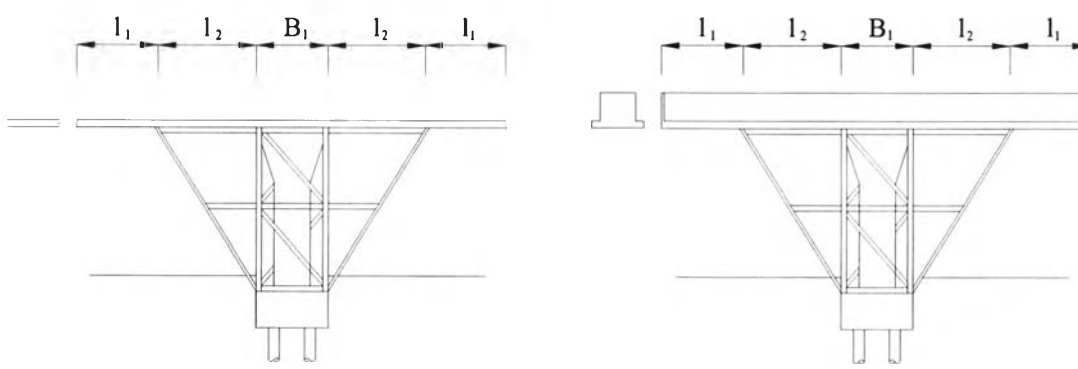
รูปที่ 2.7 การยกติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูป

2.1.2 การจัดระบบโครงสร้างชั่วคราว

ระบบโครงสร้างชั่วคราวประกอบด้วย ค้ำยันและชิ้นส่วนสำเร็จรูป ซึ่งทำหน้าที่ในการรองรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นในขณะการเทคอนกรีตคานขวางในที่ โดยจะมีการติดตั้งค้ำยันแล้วจึงทำการติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูป และสมมติให้การหดตัวในแนวแกนและการแอ่นตัวของค้ำยันเนื่องจากน้ำหนักของชิ้นส่วนสำเร็จรูปและน้ำหนักของคอนกรีตสดไม่ก่อให้เกิดการยุบตัวที่จุดรองรับของชิ้นส่วนสำเร็จรูป

การจัดระบบโครงสร้าง มีหลักการเช่นเดียวกับการกำหนดจุดยกของชิ้นส่วนสำเร็จรูป คือ จะมีการควบคุมแรงดัดที่กระทำให้สอดคล้องกับกำลังของหน้าตัดในแต่ละช่วงโดยในขณะที่ชิ้นส่วนสำเร็จรูปได้ใช้งานเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างชั่วคราวจะต้องมีหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นน้อยกว่าค่าหน่วยแรงการแตกร้าว

การวิเคราะห์หาหน่วยแรงภายในที่เกิดขึ้น เริ่มจากการพิจารณาถึงหน่วยแรงคงค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ในขณะทำการยกติดตั้ง และหลังจากที่มีการติดตั้งบนค้ำยันเรียบร้อยแล้ว เนื่องจากในขั้นตอนการยกติดตั้งได้กำหนดให้ไม่เกิดรอยแตกร้าวที่ชิ้นส่วนสำเร็จรูป ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่า ชิ้นส่วนโครงสร้างยังคงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติก ซึ่งจะมีการคืนตัวของหน่วยแรงโดยไม่มีหน่วยแรงคงค้างเกิดขึ้น โดยหลังจากที่มีการติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูปลงบนค้ำยัน ด้วยน้ำหนักตัวเองจะก่อให้เกิดแรงดัดขึ้น และมีหน้าตัดที่เกิดหน่วยแรงสูงสุดหรือหน้าตัดวิกฤติ ที่บริเวณจุดรองรับของชิ้นส่วนสำเร็จรูป และช่วงกลางระหว่างจุดรองรับที่อยู่นอกสุดกับจุดรองรับที่อยู่ถัดเข้ามา ซึ่งหน่วยแรงที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปจะมีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงแตกร้าว แต่เนื่องจากตั้งแต่ขั้นตอนการติดตั้งไปถึงการเทคอนกรีตคานขวางในที่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างอีก ซึ่งหน่วยแรงดังกล่าวจะสะสมเพิ่มขึ้นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเทคอนกรีตคานขวางในที่ และพิจารณาให้เป็นหน่วยแรงคงค้างในการคำนวณหาหน่วยแรงในหน้าตัดคานขวางหลังจากที่หน้าตัดทั้งหมดสามารถรับแรงได้



ก. การติดตั้งโครงสร้างชั่วคราว ข. การหล่อคอนกรีตคานขวาง

รูปที่ 2.8 ระบบโครงสร้างชั่วคราว

การแอ่นตัวของชิ้นส่วนสำเร็จรูปในขณะที่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างชั่วคราวเป็นการตอบสนองทางโครงสร้างที่จะเริ่มมีความสำคัญมากขึ้นว่า เมื่อพิจารณาขณะยกติดตั้งเนื่องจากการยอมให้เกิดการแตกร้าวที่โครงสร้างได้ แต่อย่างไรก็ตาม การควบคุมความกว้างรอยร้าวที่เกิดขึ้นเมื่อเป็นโครงสร้าง ซึ่งอยู่ในช่วงที่น้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดความกว้างรอยร้าวที่ยอมให้เกิดในโครงสร้างแล้วเสร็จ การตรวจสอบการแอ่นตัวจึงเป็นการตรวจสอบเพื่อยืนยันว่าโครงสร้างดังกล่าวมีการแอ่นตัวมีค่าไม่เกินข้อกำหนดที่ระบุไว้ในมาตรฐานการออกแบบ

2.1.3 โครงสร้างแล้วเสร็จ

โครงสร้างแล้วเสร็จ ที่พิจารณาคือ โครงสร้างคานขวางกึ่งสำเร็จรูปที่พร้อมเปิดใช้งานรองรับการจราจรซึ่งเป็นโครงสร้างแบบคานยื่น โดยน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างประกอบไปด้วยน้ำหนักบรรทุกคงที่ จากน้ำหนักคานหลัก และน้ำหนักผิวทางคอนกรีต และน้ำหนักบรรทุกจรเนื่องจากรถบรรทุก อย่างไรก็ตามในพิจารณาน้ำหนักบรรทุกในแต่ละขั้นตอนจะต้องพิจารณาการแอ่นตัวประกอบ โดยหากมีการแอ่นตัวมากเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบจะต้องมีการอัดแรงภายหลัง ซึ่งในการหาหน่วยแรงภายจะต้องคำนึงถึงขั้นตอนนี้ด้วย นอกจากผลของหน่วยแรงคงค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จในขณะที่เป็นโครงสร้างชั่วคราว

กำลังของหน้าตัดที่พิจารณาประกอบด้วย กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงเฉือน โดยจะกำลังรับแรงดัดของหน้าดัดคานขวางกึ่งสำเร็จรูป ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงดัดและความโค้งของหน้าตัดทั้งสภาวะประลัยและที่สภาวะใช้งาน ว่ามีกำลังเหมาะสมกับแรงที่มากระทำ พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบกับกำลังดัดของหน้าตัดคานขวางที่มีขนาดเท่ากันแต่ทำการก่อสร้างด้วยการเทคอนกรีตในที่ ส่วนกำลังรับแรงเฉือนที่พิจารณา จะพิจารณาที่กำลังรับแรงเฉือนของบ่าที่รองรับน้ำหนักของคานหลัก และกำลังรับแรงเฉือนของคานขวาง นอกจากนี้ จะต้องพิจารณากำลังรับแรงเฉือนแนวราบของหน้าตัดเชิงประกอบ

การตอบสนองทางโครงสร้างที่พิจารณา ประกอบไปด้วย ค่าความเหนียวของโครงสร้าง (Ductility), การแอ่นตัว (Deflection), และขนาดความกว้างรอยร้าว (Crack width) โดยค่าความเหนียวของโครงสร้าง (Ductility) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสัดส่วนความโค้งเมื่อสภาวะวิบัติต่อค่าความโค้งเมื่อเกิดการคราก ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดที่สำคัญของโครงสร้างรับแรงดัด การแอ่นตัวของโครงสร้างที่ต้องควบคุมให้ได้ตามมาตรฐานการออกแบบ โดยกรณีที่มีการแอ่นตัวมากเกินได้จะต้องทำการอัดแรงภายหลัง (Post-tension) เพื่อให้การลดค่าการแอ่นตัว ส่วนขนาดความกว้างรอยร้าว เป็นการตรวจสอบว่า สุดท้ายเมื่อเป็นโครงสร้างแล้วเสร็จ รอยร้าวที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่มากกว่าที่มาตรฐานการออกแบบกำหนด โดยเฉพาะเมื่อเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.2 ขั้นตอนการก่อสร้างและแนวคิดการออกแบบ

ขั้นตอนการก่อสร้างได้แบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คือ

ก. การยกติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูป

ข. การติดตั้งโครงสร้างชั่วคราว

ค. การหล่อคอนกรีตหน้าตัดคานขวางส่วนที่เหลือหน้างาน

ง. การติดตั้งคานหลักและการใช้งานโครงสร้างที่สภาวะใช้งาน

2.3 ตัวแปรที่พิจารณาออกแบบ

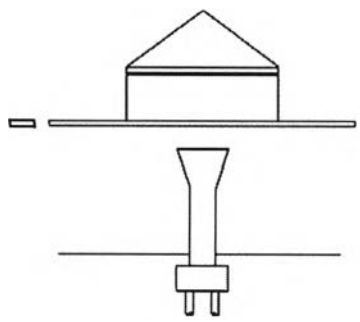
ตัวแปรที่พิจารณาออกแบบ ประกอบไปด้วย

ก. ขนาดความหนาของชิ้นส่วนสำเร็จรูป

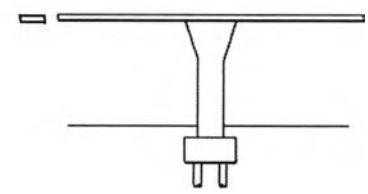
ข. การจัดระบบโครงสร้างชั่วคราวที่สอดคล้องกับพฤติกรรมทางโครงสร้าง

ค. กำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงเฉือนของโครงสร้างแล้วเสร็จ

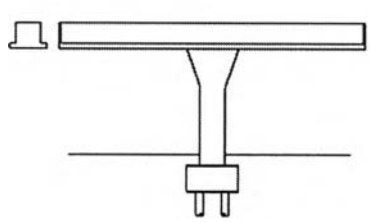
ง. การตอบสนองของโครงสร้างแล้วเสร็จ ทั้งการอ่อนตัว ความกว้างของรอยร้าว ความเครียดและหน่วยแรงที่เกิดขึ้น



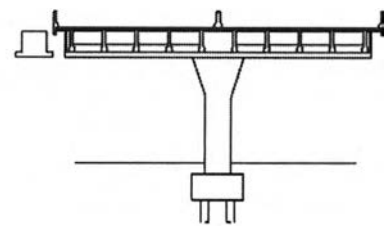
ก. การติดตั้งโครงสร้างชั่วคราว



ข. การหล่อคอนกรีตบริเวณชิ้นส่วนที่



ค. การหล่อคอนกรีตคานขวาง



ง. การติดตั้งคานหลักและโครงสร้างในสภาวะใช้งาน

รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการก่อสร้างคานขวางกึ่งสำเร็จรูป