

การออกแบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูป: กรณีศึกษา

Design of Precast Concrete Load Bearing Walls: A Case Study

เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย* สดภาพ โภคา วิวัฒน์ พัทธสนานนท์ อธิพงษ์ พันธ์นิกุล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Griengsak Kaewkulchai* Sdhabhon Bhokha Wiwat Puatatsananon Ittiphong Phannikul
Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warinchamrab, Ubon Ratchathani 34190
Tel: 045-353340 E-mail: griengsak@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้กล่าวถึงการศึกษาพฤติกรรมและวิธีการออกแบบชิ้นส่วนผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปของบ้านพักอาศัย โดยอาศัยแบบมาตรฐานบ้านเดี่ยว 2 ชั้น ของการเคหะแห่งชาติ เป็นกรณีศึกษา จากการศึกษาพบว่าค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่คำนวณได้จากการวิเคราะห์หน่วยแรงในขณะถอดแบบมีกำลังเพียงพอที่จะรองรับหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นผนังในขณะยกขนย้ายและหน่วยแรงอัดในขณะใช้งานได้อย่างปลอดภัย โดยที่ปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการมีค่าเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดให้เท่านั้น

คำสำคัญ ชิ้นส่วนสำเร็จรูป ผนัง คอนกรีตเสริมเหล็ก

Abstract

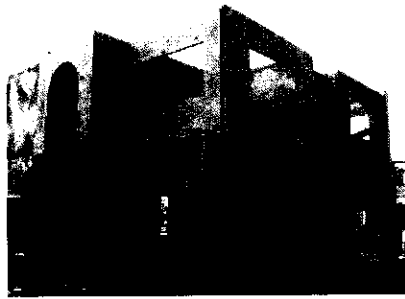
This paper addresses the study of behavior and design of precast concrete load bearing walls of residential houses using the standard plan of a single two-story house from the National Housing Authority of Thailand as a case study. From the study, it was found that the ultimate compressive strength obtained from stress analysis of the wall panels during the casting and removing stage gives sufficient strength for the wall panels to resist tensile stresses occurred during the lifting stage and to resist compressive forces occurred during the service stage by which only minimum reinforcements given by the design codes are required.

Keywords: precast, wall, load bearing

1. บทนำ

เทคโนโลยีการก่อสร้างระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปได้เกิดขึ้นมาเป็นระยะเวลานานแล้ว สำหรับประวัติและการพัฒนาของการใช้คอนกรีตสำเร็จรูปในประเทศไทยนั้น ได้เริ่มใช้ครั้งแรกโดยบริษัท ซีคอน จำกัด โดยพัฒนาระบบการก่อสร้างของตนเอง เรียกว่าระบบซีคอน [1] ในช่วงปี พ.ศ. 2531-2537 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของการก่อสร้างที่อยู่อาศัยจำนวนมาก ระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปจึงเริ่มมีบทบาทต่อการก่อสร้างในประเทศไทย เนื่องจากสามารถก่อสร้างได้รวดเร็วกว่าระบบทั่วไป ในปี พ.ศ. 2535 มีบริษัทผู้ประกอบการบ้านจัดสรรจำนวนมากนำเอาเทคโนโลยีการก่อสร้างระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปชนิดผนังรับน้ำหนักมาใช้ในการพัฒนารูปแบบบ้านของตนเอง [2] ในระบบนี้ผนังจะเป็นโครงสร้างหลักในการรับน้ำหนักของอาคารโดยไม่มีเสาและคานเป็นส่วนประกอบ ซึ่งผนังดังกล่าวยังทำหน้าที่กันห้องไปในตัวด้วย ระบบผนังรับน้ำหนักนอกจากช่วยย่นระยะเวลาการก่อสร้างในการหล่อเสา คาน และก่อผนังแล้ว ยังสามารถควบคุมคุณภาพได้เพราะชิ้นส่วนคอนกรีตสามารถผลิตได้ในโรงงาน สำหรับโครงการก่อสร้างซึ่งใช้ระบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปในปัจจุบันที่กำลังอยู่ในระหว่างการก่อสร้างได้แก่ อาคารชุดพักอาศัย 5 ชั้น โครงการบ้านเอื้ออาทร การเคหะแห่งชาติ บ้านเดี่ยว 2 ชั้น โครงการบ้านเอื้ออาทร การเคหะแห่งชาติ และบ้านเดี่ยว 2 ชั้น โครงการบ้านกสิกรบริษัท พฤษภา เรย์ลเอสเตท จำกัด (ดูรูปที่ 1)

- [12] Abramowicz, W. and Jones, N. 1984. Dynamic axial crushing of circular tubes. *Int J Impact Engng.* 2(3):263-281.
- [13] Jones, N. 1984. Recent studies in the dynamic plastic behavior of structures. *Appl Mech Rev.* 42(4):95-115.
- [14] Poonaya, S., Thinvongthituk, C. and Teebonma, U. 2005. Some analytical methods of plastic collapse of circular steel tube under quasistatic axial compression. The 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. 19-21 October 2005, Songkhla, Thailand.
- [15] Dong-KuK, Kim and Sunghak, Lee. 1999. Impact energy absorption of 6061 aluminum extruded tubes with different cross-sectional shapes. *Material & Design.* 20(1):41-49.
- [16] Mamalis, AG., Manolacos, D.E., Viegelaan, G.L., Vaxevanidis, N.M. and Johnson, W. 1986. On the inextensional axial collapse of thin-walled PVC conical shells. *Int J Mech Sci.* 28(6):323-335.
- [17] Kotelko, M. 2004. Load-capacity and collapse analysis of thin-walled beams and column-recent. *Thin-Walled Structure.* 42:153-175.
- [18] Nagel, G.M. and Thambiratnam, D.P. 2005. Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes. *Thin-Walled Structure.* 43:1225-1242.
- [19] Rossi, A., Fawaz, Z. and Behdinan, K. 2005. Numerical simulation of the axial collapse of thin-walled polygonal section tubes. *Thin-Walled Structure.* 43:1646-1661.
- [20] Kim, H.S. and Wierzbicki, T. 2004. Closed-form solution of crushing response of three-dimensional thin-walled S frames with rectangular cross-sections. *Int J Impact Engng.* 30:87-112
- [21] นิรุต์ อ่อนสลุง, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ อำไพศักดิ์ ทิบุญมา. 2548. การศึกษาผลตอบสนองต่อการกดของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสาร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. 19-21 ตุลาคม 2548, ภูเก็ต, ประเทศไทย.
- [22] นิรุต์ อ่อนสลุง, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ อำไพศักดิ์ ทิบุญมา. 2549. การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารภายใต้แรงกด แรงบิดและแรงดัด. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. 18-20 ตุลาคม 2548, นครราชสีมา, ประเทศไทย.
- [23] นิรุต์ อ่อนสลุง, ขวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และ อำไพศักดิ์ ทิบุญมา. 2550. การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของแบบจำลองโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารภายใต้การชน. วิศวกรรม มช. ปีที่ 34, ฉบับที่ 3 (343-354)
- [24] Thinvongpituk, C. Poonaya, S. and Teebonma, U. 2008. The ovalisation of thin-walled circular tubes subjected to bending. *World Congress on Engineering.* 2:1517-1571.
- [25] Thinvongpituk, C. and Chomkwah, V. 2005. Crush characteristic of conical shells with varying thickness. The 8th asian symposium on visualization: 51(1-6).



รูปที่ 1 ตัวอย่างโครงสร้างบ้านที่ก่อสร้างด้วยระบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูป

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการก่อสร้างด้วยระบบชิ้นส่วนผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปได้มีบทบาทมากขึ้นอย่างมากต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทย อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการก่อสร้างในระบบนี้จะเกิดขึ้นในประเทศไทยกว่า 15 ปีแล้ว เทคโนโลยีและองค์ความรู้ทั้งในด้านการออกแบบและการติดตั้งยังอยู่ในวงจำกัด และบ่อยครั้งเป็นโนว์ฮาว (Know-How) ของบริษัทข้ามชาติเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในการออกแบบชิ้นส่วนผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูป บทความฉบับนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการก่อสร้างระบบชิ้นส่วนผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปและนำเสนอพฤติกรรมกรรมการรับน้ำหนัก รวมถึงวิธีการออกแบบตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง [3] โดยใช้แบบมาตรฐานบ้านเดี่ยว 2 ชั้นของโครงการบ้านเอื้ออาทร การเคหะแห่งชาติเป็นกรณีศึกษา จากการศึกษาพบว่าขั้นตอนการออกแบบเป็นขั้นตอนที่ควบคุมค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ใช้ออกแบบ โดยใช้ความหนาและปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดตามมาตรฐานการออกแบบที่กำหนดให้ก็เพียงพอต่อความปลอดภัยในขณะที่ก่อสร้างและขณะรับน้ำหนักจริง

2. ข้อพิจารณาในการออกแบบระบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูป

หลักเกณฑ์ข้อพิจารณาในการออกแบบอาคารด้วยระบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปประกอบไปด้วย 4 ข้อหลัก [4] ดังต่อไปนี้

(1) น้ำหนักบรรทุก ข้อพิจารณานี้เป็นการกำหนดชนิดและลักษณะของแรงที่มากระทำต่อชิ้นส่วนผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งหมายถึงรวมถึงน้ำหนักผืน น้ำหนักบรรทุกทุกตายตัว น้ำหนักบรรทุกจร แรงลม แรงแผ่นดินไหวและแรงสั่นสะเทือน

โดยอาจมีลักษณะของการกระทำที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงของการก่อสร้างและการใช้งาน ดังจะกล่าวโดยละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 4

(2) ขั้นตอนการก่อสร้าง ในกระบวนการก่อสร้างด้วยระบบชิ้นส่วนผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป ขั้นตอนการขนส่งและยกขนย้าย และขั้นตอนการประกอบและติดตั้ง โดยรายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ เหล่านี้จะได้กล่าวภายหลัง ในหัวข้อที่ 3

(3) ระยะเวลาการก่อสร้าง ข้อกำหนดนี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับของเทคโนโลยีและวัสดุที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้าง เช่น ต้องใช้คอนกรีตเร่งการก่อตัวในกรณีที่ต้องการถอดแบบในระยะเวลาอันสั้นเพื่อนำแบบหล่อกลับมาใช้ใหม่ หรือการพิจารณาใช้การเทคอนกรีตในที่ร่วมกับชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น

(4) เสถียรภาพของโครงสร้าง เป็นข้อพิจารณาในส่วนของความมั่นคงแข็งแรงทั้งในขณะทำการก่อสร้างและในขณะรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน เช่น การใช้ค้ำยันชั่วคราวในขณะก่อสร้างซึ่งต้องมีการคำนวณออกแบบโดยเฉพาะเพื่อป้องกันการล้มคว่ำของผนัง หรือการตอยึดชิ้นส่วนสำเร็จรูปต่าง ๆ เข้าด้วยกันต้องทำให้เกิดความมั่นคงของโครงสร้างและไม่พังพังลงมาเหมือนบ้านทำจากไพ่กระดาษ (House of cards) เป็นต้น

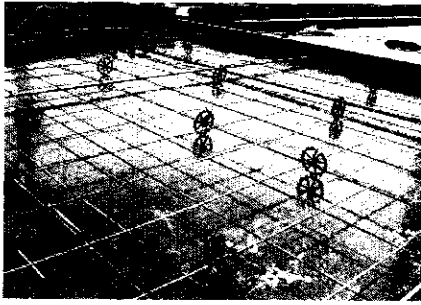
3. ขั้นตอนการก่อสร้างระบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูป

ดังได้กล่าวในหัวข้อที่ 2 การก่อสร้างด้วยระบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

3.1 ขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป

โดยปกติจะมีลำดับขั้นตอนอย่างมีระบบดังต่อไปนี้

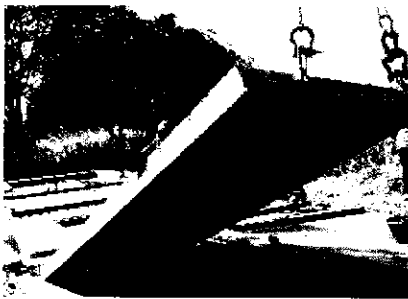
(1) การเตรียมแบบหล่อ ในขั้นตอนนี้แบบหล่อจะถูกทำความสะอาดและเคลือบน้ำมันเพื่อป้องกันคอนกรีตติดแบบ แล้วก็นำแบบด้านข้างเพื่อกำหนดขนาดและความหนาของชิ้นส่วนสำเร็จรูป จากนั้นติดตั้งเหล็กเสริม (รูปที่ 2) แผ่นเหล็กจุดต่อ วงกบประตูและหน้าต่าง และงานระบบ เช่น ท่อร้อยสายและสวิตช์ไฟ



รูปที่ 2 การเตรียมแบบหล่อและจัดวางเหล็กเสริม

(2) การเทคอนกรีต เมื่อตรวจสอบขนาดและความถูกต้องของตำแหน่งเหล็กเสริมและอุปกรณ์ต่าง ๆ แล้วจึงจะสามารถเทคอนกรีตได้ จากนั้นปรับแต่งผิวหน้าคอนกรีต แล้วจึงขัดผิวหน้าให้เรียบเพื่อให้สามารถทาสีได้โดยไม่ต้องฉาบปูน หลังจากขัดผิวหน้าแล้วเสร็จต้องบ่มชั้นส่วนคอนกรีตให้คอนกรีตแข็งตัวก่อนถอดแบบหล่อเพื่อเตรียมขนส่งไปยังสถานที่ก่อสร้าง

(3) การถอดแบบ ภายหลังจากการเทคอนกรีต 6-18 ชั่วโมง (ขึ้นอยู่กับกำลังคอนกรีตและลักษณะการถอดแบบ) จะสามารถถอดแบบได้ โดยในกรณีที่ใช้แบบหล่อซึ่งวางราบกับพื้น ในขณะที่ถอดแบบจะต้องยกแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปขึ้นมาในแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นว่าแผ่นคอนกรีตจะต้องสามารถรับน้ำหนักตัวเองได้ในขั้นตอนนี้ (การรับแรงของผนังคอนกรีตในส่วนนี้จะไม่เกิดขึ้น ในกรณีที่แบบหล่อสามารถยกหมุนตั้งขึ้นในแนวตั้งได้ด้วยตัวเอง)



รูปที่ 3 การถอดแบบโดยใช้จุดยกที่ฝังไว้ก่อนการเทคอนกรีต

ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปนั้นมีข้อพึงพิจารณา เช่น ชิ้นส่วนควรจะมีรูปแบบเรียบง่ายและซ้ำกันให้มากที่สุด เพื่อจะผลิตได้สะดวกรวดเร็วและลดจำนวนแบบหล่อที่ใช้ กำหนดจุดรองรับให้สามารถต้านทานแรงกระทำต่าง ๆ ในระหว่างการผลิต การขนส่ง

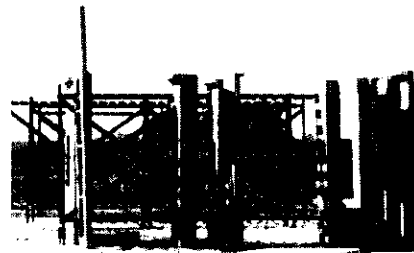
และการติดตั้ง หลีกเลี่ยงการเสริมเหล็กที่แน่นเกินไป เพราะจะทำให้เทคอนกรีตและควบคุมคุณภาพได้ยาก และพยายามใช้วัสดุและอุปกรณ์มาตรฐานที่หาได้ทั่วไป เพื่อลดต้นทุนและลดปริมาณวัสดุที่จะต้องกองเก็บไว้

3.2 ขั้นตอนการขนส่งและยกขนย้าย

หลังจากการถอดแบบ ชิ้นส่วนผนังคอนกรีตสำเร็จรูปจะถูกยกขนย้ายโดยอาศัยจุดยกที่ฝังไว้ก่อนการเทคอนกรีตไปยังจุดวางพัก เพื่อเตรียมขนส่งไปยังสถานที่ก่อสร้าง (ดูรูปที่ 4 และ 5) ในขั้นตอนนี้ควรต้องมีการจัดลำดับก่อนหลังและจำนวนของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่จะขนส่งจากโรงงานผลิตไปยังสถานที่ก่อสร้างให้มีความเหมาะสมกับความต้องการที่จะใช้งาน โดยชิ้นส่วนต้องมีขนาดและรูปร่างที่สามารถขนส่งได้ เช่น ในกรณีที่ขนส่งโดยใช้ถนนสาธารณะ ชิ้นส่วนที่มีขนาดกว้างเกิน 2.50 เมตร จะต้องขนส่งในลักษณะตั้งหรือเอียงโดยมีความสูงไม่เกิน 4.00 เมตร (ยกเว้นแต่มีการขออนุญาตพิเศษ) เป็นต้น



รูปที่ 4 การยกขนย้ายชิ้นส่วนผนังคอนกรีตหลังการถอดแบบ

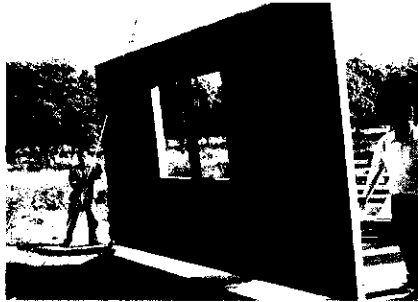


รูปที่ 5 การจัดวางชิ้นส่วนผนังคอนกรีตสำเร็จรูปเพื่อเตรียมขนส่งไปยังสถานที่ก่อสร้าง

3.3 ขั้นตอนการประกอบและติดตั้ง

ในขั้นตอนนี้ต้องกำหนดชนิดและรูปแบบของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการยกและติดตั้ง เช่น จะใช้ Tower crane, Mobile crane หรือ Crawler Crane ซึ่ง

ปกติขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นส่วนคอนกรีต ความสูงของอาคาร สภาพพื้นที่และวิธีการประกอบติดตั้ง รวมถึงความชำนาญของแรงงาน โดยการติดตั้งชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปจะต้องจัดวางตามลำดับขั้นตอนที่วางแผนไว้ ตัวอย่างเช่น ต้องหล่อพื้นชั้นล่างก่อนติดตั้งผนังคอนกรีต (ดูรูปที่ 6ก.) จากนั้นจึงวางแผ่นพื้นคอนกรีตชั้นต่อไปตามลำดับ เป็นต้น



ก. การยกติดตั้งผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ



ข. การใช้ค้ำยันชั่วคราวเพื่อยึดให้ผนังคอนกรีตอยู่กับที่



ค. จุดต่อระหว่างผนังคอนกรีตโดยใช้การเชื่อมเหล็กจาก

รูปที่ 6 การประกอบและติดตั้งผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูป

ในส่วนของการติดตั้งผนังคอนกรีตสำเร็จรูปนั้น ต้องมีการกำหนดหมายเลขชิ้นส่วนและจัดลำดับการวางและตำแหน่งก่อสร้างให้ชัดเจน โดยผนังแต่ละชั้นจะถูกยึดอยู่กับที่ด้วยค้ำยันชั่วคราว (ดูรูปที่ 6ข.) หลังจากการสำรวจแนวของการติดตั้งแผ่นผนังทั้งแนวดิ่งและแนวราบ ทำ

การต่อยึดชิ้นส่วนผนังต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยจุดต่อยึดอาจกระทำได้ใน 2 กรณี (ขึ้นอยู่กับวิธีการออกแบบ) ได้แก่ จุดต่อยึดแบบเปียกโดยการใช้การฝัง Dowel bars เพื่อยึดผนังเข้าด้วยกันแล้วเทคอนกรีตตามแนวรอยต่อผนัง และจุดต่อยึดแบบแห้งโดยการเชื่อมเหล็กฉากเข้ากับแผ่นเหล็กที่ฝังไว้ในขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 6ค. สำหรับจุดต่อยึดแบบแห้งนั้นจะต้องป้องกันน้ำซึมตามแนวขอบผนังคอนกรีตโดยอาจใช้การยาแนวด้วย Poly Urethane sealants

เมื่อติดตั้งโครงสร้างผนังและพื้นขึ้นเป็นตัวบ้านครบทุกชั้นส่วน ก็จะสามารถดำเนินการติดตั้งโครงหลังคา ระบบไฟฟ้าและระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ รวมทั้งตกแต่งอาคารตามแบบทางสถาปัตยกรรมได้ตามวิธีปฏิบัติโดยทั่วไป (General practice)

4. แนวทางการวิเคราะห์และออกแบบ

จากหัวข้อที่ 3 จะเห็นว่าการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ ขณะถอดแบบ ขณะยกขนย้ายและติดตั้ง และขณะรับน้ำหนักบรรทุกจริง โดยในแต่ละขั้นตอนจะมีลักษณะพฤติกรรมการรับน้ำหนักที่แตกต่างกันไป

4.1 พฤติกรรมขณะถอดแบบ

ขั้นตอนนี้ในกรณีที่แบบหล่อไม่สามารถหมุนตั้งขึ้นได้ ผนังคอนกรีตจะถูกยกตั้งขึ้นในแนวดิ่งเพื่อเตรียมขนย้าย ดังนั้น ผนังจะรับเฉพาะน้ำหนักบรรทุกตัวเอง โดยมีลักษณะคล้ายคานกว้าง มีจุดรองรับที่ปลายด้านหนึ่งเป็นจุดหมุนและอีกด้านหนึ่งเป็นจุดยก ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 7 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของผนังในขั้นตอนนี้จะรับแรงดัดเนื่องจากน้ำหนักตัวเองเป็นหลัก มีข้อพิจารณาด้านการออกแบบที่ต้องคำนึงถึงทั้งด้านหน่วยแรงและข้อกำหนดด้านกำลังได้แก่ หน่วยแรงดึง กำลังรับโมเมนต์ดัดและกำลังรับแรงเฉือน โดยการตรวจสอบหน่วยแรงดึงสูงสุด (σ_t) ที่เกิดจากการดัดตามสมการที่ (1) จะทำให้สามารถหาค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_c) ที่ต้องการขณะถอดแบบที่ป้องกันการแตกร้าวในผนัง

$$\sigma_t \leq f_r \quad (1)$$

โดยที่ f_r คือค่าโมดูลัสการแตกร้าวหรือกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ $2.0\sqrt{f'_c}$ กก./ซม.² สำหรับการ

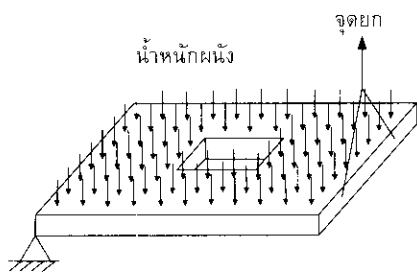
ตรวจสอบด้านกำลัง ต้องตรวจสอบกำลังรับโมเมนต์ดัด และกำลังรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นขณะการถอดแบบเพื่อป้องกันการแตกหักของผนังตามสมการที่ (2) และสมการที่ (3)

$$\phi M_n \geq M_u \quad (2)$$

โดยที่ $\phi=0.9$ M_n คือกำลังรับโมเมนต์ดัดระบุ และ M_u คือโมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดจากน้ำหนักผนังซึ่งคูณตัวคูณแรงแล้ว

$$\phi V_c \geq V_u \quad (3)$$

โดยที่ $\phi=0.85$ V_c คือกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ $0.53\sqrt{f'_c}bd$ กก. และ V_u คือแรงเฉือนประลัยที่เกิดจากน้ำหนักผนังซึ่งคูณตัวคูณแรงแล้ว



รูปที่ 7 ตัวอย่างการรับน้ำหนักของผนังคอนกรีตขณะถอดแบบ

4.2 พฤติกรรมขณะยกขนย้าย

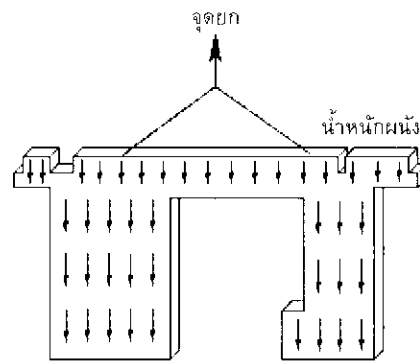
ขณะยกขนย้าย ผนังจะรับเฉพาะน้ำหนักตัวเองในแนวตั้ง โดยมีจุดรองรับที่ตำแหน่งจุดยกเท่านั้น (ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 8) ในกรณีนี้เพื่อป้องกันการแตกร้าว จะต้องตรวจสอบหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้น (σ_t) โดยต้องมีค่าไม่เกินกำลังรับแรงดึงภายใต้แรงดึงตรงของคอนกรีต (Direct tensile strength) ตามสมการที่ (4) และต้องตรวจสอบกำลังของเหล็กเสริมให้สามารถรับแรงดึงที่เกิดขึ้นได้ในกรณีหน้าตัดเกิดรอยร้าว ตามสมการที่ (5) โดยใช้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ได้จากหัวข้อ 4.1 มาใช้ในการพิจารณา

$$\sigma_t \leq f_t \quad (4)$$

โดยที่ f_t คือกำลังรับแรงดึงตรงของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ $1.6\sqrt{f'_c}$ หรือ $0.1f'_c$ กก./ซม.²

$$\phi P_n \geq P_u \quad (5)$$

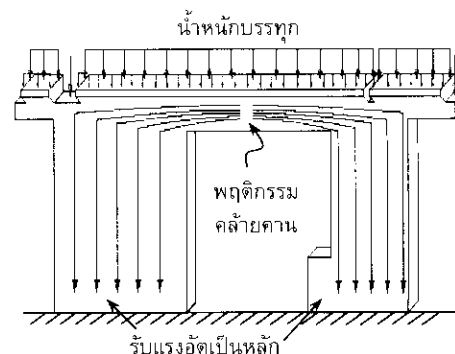
โดยที่ $\phi=0.9$ P_n คือกำลังรับแรงดึงระบุของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ $A_s f_y$ และ P_u คือแรงดึงประลัยที่เกิดจากน้ำหนักผนังซึ่งคูณตัวคูณแรงแล้ว



รูปที่ 8 ตัวอย่างการรับน้ำหนักของผนังคอนกรีตขณะยกขนย้าย

4.3 พฤติกรรมการรับน้ำหนักจริง

ขณะรับน้ำหนักจริง ผนังคอนกรีตจะรับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ นอกเหนือจากน้ำหนักตัวเองได้แก่ น้ำหนักจากหลังคา น้ำหนักจากพื้น น้ำหนักจากผนังชั้นบน และน้ำหนักบันได เป็นต้น ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกตายตัวและน้ำหนักบรรทุกจรดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 9 โดยปกติสำหรับอาคารสูงหรือสูงปานกลางอาจต้องพิจารณาผลของแรงลมด้วย และในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงของแผ่นดินไหว ก็จำเป็นต้องพิจารณาแรงแผ่นดินไหวร่วมด้วย พฤติกรรมการรับน้ำหนักในขั้นนี้คือพฤติกรรมที่เกิดจากการใช้อาคารหลังการก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์ โดยผนังคอนกรีตสำเร็จรูปจะรับแรงอัดตามแกนเป็นหลัก แต่อาจมีหน่วยแรงดึงเกิดขึ้นในกรณีรับแรงเยื้องศูนย์หรือการใช้หูช้างในการรับพื้น ซึ่งจะต้องพิจารณาออกแบบหูช้างให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่างๆ จากพื้น โดยต้องพิจารณาถึงผลจากน้ำหนักเยื้องศูนย์ที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนผนังคอนกรีตด้วย



รูปที่ 9 ตัวอย่างการรับน้ำหนักของผนังขณะรับน้ำหนักจริง ดังนั้นในขั้นตอนการรับน้ำหนักจริงจะมีข้อพิจารณา

ในการออกแบบเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำได้อย่างปลอดภัยโดยใช้การตรวจสอบหน่วยแรงประกอบกับการออกแบบด้านกำลังไปพร้อมกันได้แก่ การตรวจสอบกำลังรับแรงอัดของหน้าตัดผนังคอนกรีต การตรวจสอบหน่วยแรงอัดและการตรวจสอบหน่วยแรงดึงของคอนกรีต ซึ่งการตรวจสอบกำลังรับแรงอัดของหน้าตัดผนังคอนกรีตตามมาตรฐาน วสท. [3] หรือ มาตรฐาน ACI [5] ทำได้โดยใช้สมการที่ (5) เมื่อ $\phi=0.7$ P_n คือ กำลังรับแรงอัดของผนังคอนกรีตหาได้จากสมการที่ (6) และ P_n คือแรงอัดประลัยที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดซึ่งคูณด้วยตัวคูณแรงแล้ว

$$P_n = 0.55 f'_c A_g \left[1 - \left(\frac{k l_c}{32 h} \right)^2 \right] \quad (6)$$

โดยที่ A_g คือขนาดหน้าตัดของผนังคอนกรีต l_c คือ ความสูงของผนัง h คือความหนาของผนัง และ k คือ ตัวคูณความยาวประสิทธิผล มีค่าเท่ากับ 0.8 ในกรณีมีการยึดรั้งด้านการหมุนที่ปลายข้างใดข้างหนึ่ง หรือเท่ากับ 1.0 ในกรณีไม่มีการยึดรั้งด้านการหมุนที่ปลายใด ๆ

สำหรับการตรวจสอบหน่วยแรงอัดสามารถกระทำได้โดยตรวจสอบหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_c) ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่ไม่คูณด้วยตัวคูณแรง โดยใช้สมการที่ (7)

$$\sigma_c \leq f_c \quad (7)$$

โดยที่ f_c คือหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ $0.45 f'_c$ กก./ซม.² จากนั้นใช้สมการที่ (1) ในการตรวจสอบหน่วยแรงดึงในกรณีที่มีหน่วยแรงดึงเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเยื้องศูนย์เกิดขึ้น ในกรณีที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ เช่นช่องเปิดสำหรับติดตั้งหน้าต่างหรือประตู จะต้องพิจารณาเหล็กเสริมพิเศษเพื่อต้านแรงดึงในบริเวณที่มีพฤติกรรมคล้ายคาน (ดูรูปที่ 9) โดยเสริมเหล็กขนาด 16 มม. จำนวน 2 เส้นตามที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบ หรือใช้การวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อออกแบบหาปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสมต่อไป

ข้อกำหนดอื่น ๆ ที่สำคัญในการออกแบบในขั้นตอนการรับน้ำหนักบรรทุกจริงตามมาตรฐานการออกแบบโดยวิธีกำลัง [3, 5] ได้แก่ ความหนาของผนังคอนกรีต (h) ต้องไม่น้อยกว่า $l_c / 25$ และไม่น้อยกว่า 10 ซม. ปริมาณเหล็กเสริมในแนวตั้งและแนวนอนกรณีใช้เหล็กชั้นคุณภาพ SD40 ขึ้นไปต้องไม่ต่ำกว่า $0.0012 A_g$ และ

$0.0020 A_g$ ตามลำดับ หรือต้องเสริมอย่างน้อย $0.0020 A_g$ และ $0.0025 A_g$ ตามลำดับในกรณีใช้เหล็กชั้นคุณภาพ SD30 หรือต่ำกว่า โดยมีระยะเรียงไม่เกิน 3*h* และไม่เกิน 45 ซม.

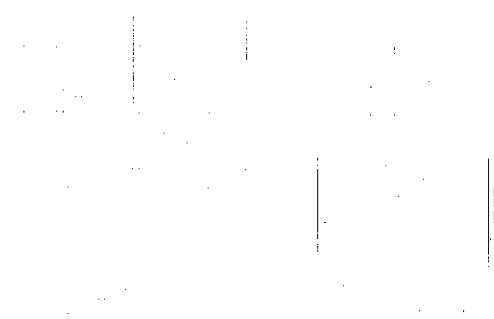
5. แบบบ้านเดี่ยว 2 ชั้นที่ใช้ในการศึกษา

แบบก่อสร้างที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้เป็นแบบมาตรฐานบ้านเดี่ยว 2 ชั้น โครงการบ้านเอื้ออาทร การเคหะแห่งชาติ ซึ่งเป็นแบบก่อสร้างระบบผนังรับน้ำหนัก คอนกรีตสำเร็จรูป ขนาดกว้าง 2.9 - 3.2 ม. ยาว 9.0 ม. (แบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนหน้ายาว 3.5 ม. ส่วนกลางยาว 4.0 ม. และส่วนซีกหลังยาว 1.5 ม.) สูง 6.7 ม. ประกอบด้วย 1 ห้องนั่งเล่น 2 ห้องนอน และ 1 ห้องน้ำ โดยชั้นล่างมี ชั้นส่วนผนังคอนกรีตสำเร็จรูปจำนวน 8 ชั้น (W101-W108) และชั้นสองมีจำนวน 8 ชั้น (W201-W208) ความสูงของผนังทั้ง 2 ชั้นประมาณ 2.5 ม. ผังบริเวณและรูปด้านต่าง ๆ ของบ้านได้แสดงไว้ในรูปที่ 10 ถึง 13 ตามลำดับ

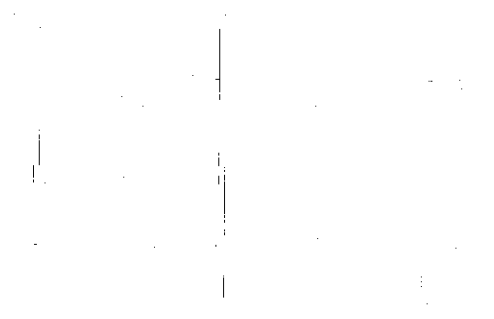
รายละเอียดของแบบบ้านและรายละเอียดของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปชั้นต่าง ๆ จำนวน 16 ชั้น สามารถดูได้จากแบบมาตรฐาน [6] โดยตัวอย่างลักษณะของแผ่นผนังคอนกรีตชั้นล่าง W101 และตัวอย่างลักษณะของแผ่นผนังคอนกรีตชั้นบน W205 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ



รูปที่ 10 ผังบริเวณแสดงพื้นชั้น 1 และ ชั้น 2



รูปที่ 11 รูปด้านหน้าและด้านหลังของแบบบ้านที่ทำการศึกษา



รูปที่ 12 รูปด้านขวาของแบบบ้านที่ทำการศึกษา



รูปที่ 13 รูปด้านซ้ายของแบบบ้านที่ทำการศึกษา

6. การวิเคราะห์และออกแบบผนังรับน้ำหนัก

จากแนวทางในหัวข้อที่ 4 การวิเคราะห์และออกแบบชั้นส่วนผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปจะแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนั้น ผนังแต่ละชั้นจะถูกจำลองทางโครงสร้างและวิเคราะห์โครงสร้างโดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อหาแรงและหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอน



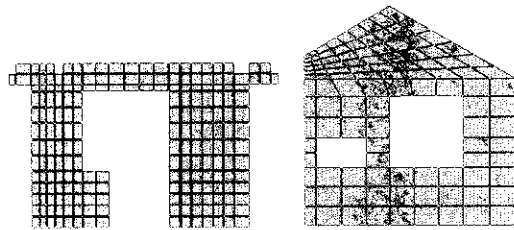
รูปที่ 14 ลักษณะของแผ่นผนังคอนกรีต W101



รูปที่ 15 ลักษณะของแผ่นผนังคอนกรีต W205

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบโดยละเอียดเพื่อเป็นตัวอย่างสำหรับศึกษาเฉพาะผนังแผ่น W101 และ W205 เท่านั้น ซึ่งจากการพิจารณาในเบื้องต้นจะพบว่าผนังแผ่น W101 เป็นผนังที่วิกฤตที่สุดเนื่องจากจะรับน้ำหนักบรรทุกทุกในขณะใช้งานจริงมากที่สุด (ดูรูปที่ 10) โดยผนังแผ่น W205 จะวิกฤตที่สุดในขั้นตอนการถอดแบบ สำหรับการวิเคราะห์และออกแบบของผนังชั้นอื่น ๆ จะนำเสนอในรูปแบบตาราง จากข้อกำหนดเบื้องต้นเกี่ยวกับความหนาและปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดจะได้ว่าความหนาของผนัง $h \geq l_c/25 = 250/25 = 10$ ซม. ดังนั้น ใช้ความหนาผนังเท่ากับ 10 ซม. สำหรับปริมาณเหล็กเสริมในแนวดิ่งคิดต่อ 1 เมตรต้องไม่ต่ำกว่า $0.0012 A_g = 0.0012(10 \times 100) = 1.2$ ซม.²/ม. และปริมาณเหล็กเสริมในแนวราบคิดต่อ 1 เมตรต้องไม่ต่ำกว่า $0.0020 A_g = 0.0020(10 \times 100) = 2.0$

ชม.²/ม. ข้อมูลปริมาณเหล็กเสริมนี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปในขั้นตอนต่างๆ ต่อไป รูปที่ 16 แสดงแบบจำลองทางโครงสร้างของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปชั้น W101 และ W205 โดยใช้ shell element หน้า 10 ซม.



รูปที่ 16 แบบจำลองทางโครงสร้างของผนัง W101 และ W205

น้ำหนักบรรทุกที่นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ พื้นชั้น 1 และ 2 โดยใช้น้ำหนักบรรทุกตายตัว 100 กก./ม.² (ยังไม่รวมน้ำหนักตัวเอง) และน้ำหนักบรรทุกจร 150 กก./ม.² สำหรับหลังคาใช้น้ำหนักวัสดุหลังคา 50 กก./ม.² และ น้ำหนักบรรทุกจร 30 กก./ม.² (โดยปกติสำหรับอาคารสูงหรือสูงปานกลางอาจต้องพิจารณาผลของแรงลมด้วย และในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงของแผ่นดินไหว ก็จำเป็นต้องพิจารณาแรงแผ่นดินไหวร่วมด้วย อย่างไรก็ตามในกรณีบ้านเดี่ยว 2 ชั้นซึ่งเป็นการศึกษาในบทความฉบับนี้จะไม่นำแรงลมและแรงแผ่นดินไหวมาร่วมพิจารณา)

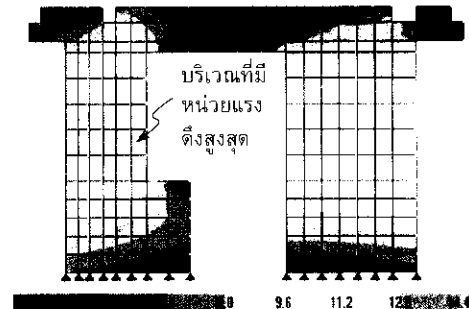
6.1 ขณะถอดแบบ

การวิเคราะห์โครงสร้างในขณะถอดแบบนี้ แบบจำลองจะมีจุดรองรับแบบหมุดเลื่อน (pin) ที่ปลายตลอดแนวฐานของผนัง และอีกปลายมีจุดรองรับแบบหมุดเลื่อนเฉพาะตำแหน่งของจุดยก 2 จุด โดยผนังจะรับเฉพาะน้ำหนักตัวเองในทิศทางตั้งฉากกับระนาบผนังเท่านั้น รูปที่ 17 และ 18 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในผนังชั้น W101 และ W205 ตามลำดับ

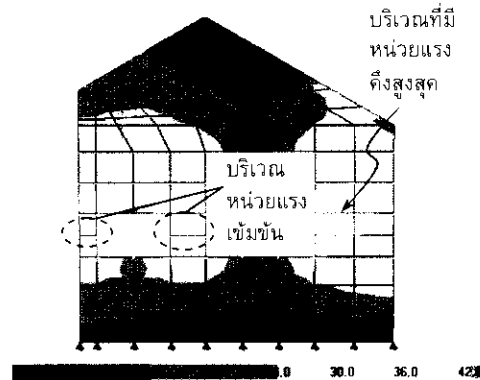
6.1.1 การตรวจสอบหน่วยแรงดึง

จากผลการวิเคราะห์พบว่าหน่วยแรงดึงสูงสุดในขณะถอดแบบ (หน่วยแรงเข้มข้นบริเวณขอบช่องเปิดต่าง ๆ จะพิจารณาภายหลัง) เกิดในผนังชั้น W101 มีค่า 14.8 กก./ชม.² และเกิดในผนังชั้น W205 มีค่า 22.7 กก./ชม.² โดย $22.7 \leq f_r = 2\sqrt{f'_c}$ ดังนั้นจากสมการที่ (1) ค่า f'_c ที่ต้องการเพื่อป้องกันการแตกร้าวในขณะถอด

แบบสำหรับผนัง W101 มีค่า = $(14.8)^2/4 = 55$ กก./ชม.² และสำหรับผนัง W205 มีค่า = $(22.7)^2/4 = 129$ กก./ชม.² ซึ่งค่า f'_c เป็นค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ต้องการขณะถอดแบบ



รูปที่ 17 หน่วยแรงดึงที่เกิดในผนัง W101 ขณะถอดแบบ



รูปที่ 18 หน่วยแรงดึงที่เกิดในผนัง W205 ขณะถอดแบบ

ตารางที่ 1 หน่วยแรงดึง (σ_t) และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f'_c) ที่ต้องการของผนังในขณะถอดแบบ

ผนัง	σ_t	f'_c	ผนัง	σ_t	f'_c
101	14.82	54.91	201	22.59	127.58
102	11.47	32.89	202	11.00	30.25
103	18.57	86.21	203	11.41	32.54
104	17.00	72.25	204	15.25	58.14
105	16.30	66.42	205	22.68	128.56
106	11.28	31.81	206	10.28	26.42
107	12.67	40.13	207	17.04	75.59
108	11.80	34.81	208	20.50	105.06

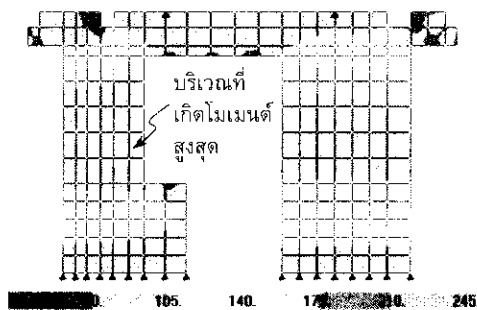
หมายเหตุ หน่วยที่ใช้แสดงในตารางคือ กก./ชม.²

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาผนังแผ่นอื่นๆ ก็จะได้อีกค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f'_c) ในขณะถอดแบบ

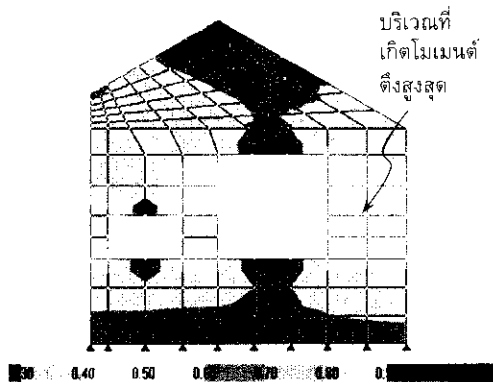
ของผนังแต่ละแผ่นดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าค่า f'_c ที่ต้องการต่ำสุดในขณะถอดแบบที่จะไม่ทำให้เกิดการแตกร้าวของผนังในแต่ละชั้นมีค่าประมาณ 129 กก./ซม.² (ค่า f'_c ที่ได้ในชั้นตอนนี้เป็นค่ากำลังอัดประลัยในขณะถอดจากแบบซึ่งอาจเป็น 12 ชั่วโมง หรือ 1 วันหลังจากเทคอนกรีต ไม่ใช่ค่า f'_c ที่ 28 วัน) ซึ่งค่า f'_c นี้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบด้านกำลังต่อไป

6.1.2 การตรวจสอบกำลังรับโมเมนต์ดัด

ผลการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในขณะถอดแบบแสดงไว้ในรูปที่ 19 และ 20 สำหรับผนังชั้น W101 และ W205 ตามลำดับ (การพิจารณาโมเมนต์ดัดบริเวณขอบช่องเปิดต่าง ๆ ที่มีพื้นที่แคบ ๆ จะกระทำภายหลัง) ซึ่งเป็นค่าต่อหน่วยความยาว จากรูปจะได้ว่าค่าเฉลี่ยโมเมนต์ดัดสูงสุด (M_{max}) ที่เกิดขึ้นในผนังชั้น W101 และ W205 มีค่าประมาณ 248 กก.-ซม./ซม. และ 404 กก.-ซม./ซม. ตามลำดับ



รูปที่ 19 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในผนัง W101 ขณะถอดแบบ



รูปที่ 20 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในผนัง W205 ขณะถอดแบบ

เมื่อพิจารณาค่า M_{max} ที่ได้ต่อความกว้าง 1 เมตร จะได้ค่า $M_{max} = 24,800$ กก.-ซม./ม. และ $40,400$ กก.-

ซม./ม. สำหรับผนัง W101 และ W205 ตามลำดับ เมื่อนำไปคูณด้วยตัวคูณแรงโดยใช้ค่า 1.4 ตามมาตรฐานวสท. และ ACI สำหรับน้ำหนักบรรทุกตายตัว จะได้ค่าโมเมนต์ดัดประลัย $M_{u,max}$ และจากสมการที่ (2) จะสามารถหาลำดับรับโมเมนต์ดัดที่ระบุ M_n ที่ต้องการได้ โดยที่ M_n ของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กในกรณีเสริมเหล็ก 1 ชั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{A_s f_y}{1.7 f'_c b} \right) \quad (8)$$

โดยที่ A_s คือพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม f_y คือกำลังครากของเหล็กเสริม d คือความลึกประสิทธิภาพ และ b คือความกว้างของหน้าตัดคอนกรีต (ใช้กว้าง 1 เมตรหรือ 100 ซม.)

ดังนั้นจากสมการที่ (2) สำหรับผนังชั้น W101 ได้ว่า $M_n = \frac{1.4 \times 24,800}{0.9} = 38,578$ กก.-ซม./ม. ซึ่งจะสามารถ

คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมได้จากสมการที่ (8) โดยเสริมเหล็กตะแกรง 1 ชั้น ค่า $f_y = 5,500$ กก./ซม.² ค่า $d = 5$ ซม. และ $f'_c = 129$ กก./ซม.² ดังนั้น $38,578 = 5,500 A_s \left(5 - \frac{5,500 A_s}{1.7 \times 129 \times 100} \right)$ เมื่อแก้สมการหาปริมาณเหล็กเสริมจะได้ $A_s = 1.52$ ซม.²/ม. สำหรับผนัง W205 ได้ว่า $M_n = \frac{1.4 \times 40,400}{0.9} = 62,844$ กก.-ซม./ม. ดังนั้น

$62,844 = 5,500 A_s \left(5 - \frac{5,500 A_s}{1.7 \times 129 \times 100} \right)$ เมื่อแก้สมการหาปริมาณเหล็กเสริมจะได้ $A_s = 2.63$ ซม.²/ม. สำหรับการพิจารณากำลังรับโมเมนต์ดัดของผนังแผ่นอื่นๆ ก็สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกันนี้ ซึ่งผลการวิเคราะห์และออกแบบของผนังทั้ง 16 แผ่นได้แสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการโดยทั่วไปมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่กำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ (ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เหล็กตะแกรงขนาด 6 มม. @ 20 ซม.) ซึ่งการใช้เหล็กตะแกรง 1 ชั้นนั้น เพียงพอต่อการรับโมเมนต์ดัดของแผ่นผนังส่วนใหญ่และมีบางแผ่นที่ปริมาณเหล็กที่ต้องการมีค่าสูงกว่าปริมาณเหล็กตะแกรงที่จัดไว้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาขั้นตอนขณะถอดแบบ ซึ่งไม่มีแรงใดๆ มากระทำต่อแผ่นผนังนอกจากน้ำหนักผนังเอง จะเห็นได้ว่าการควบคุมการถอดแบบเพื่อไม่ให้เกิดการแตกร้าวจะ

ช่วยกำจัดข้อกำหนดด้านกำลังสำหรับโมเมนต์ดัดเนื่องจากคอนกรีตจะรับแรงที่เกิดขึ้นทั้งหมด ดังนั้นการควบคุมคุณภาพคอนกรีต และการถอดแบบในเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่า f'_c ตามที่ต้องการนั้น มีความสำคัญมากต่อการป้องกันการแตกหักของผนังในชั้นตอนนี้

ตารางที่ 2 โมเมนต์ดัดและปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการของผนังในขณะถอดแบบ

ผนัง	M_{max} (กก.-ชม.)	M_u / ϕ (กก.-ชม.)	A_s 1 ชั้น (ชม. ²)	ตะแกรง 6@200 (ชม. ²)
101	24,800	38,578	1.52	1.4
102	19,120	29,742	1.15	1.4
103	31,020	48,250	1.94	1.4
104	29,200	45,422	1.82	1.4
105	26,900	41,844	1.66	1.4
106	18,400	28,622	1.10	1.4
107	21,000	32,666	1.27	1.4
108	19,550	30,411	1.17	1.4
201	37,400	58,177	2.40	1.4
202	18,200	28,311	1.10	1.4
203	18,530	28,824	1.11	1.4
204	24,800	38,577	1.52	1.4
205	30,400	47,289	1.90	1.4
206	16,730	26,024	1.00	1.4
207	27,460	42,715	1.70	1.4
208	33,800	52,577	2.14	1.4

หมายเหตุ ค่าที่แสดงเป็นค่าต่อความกว้าง 1 เมตร

สำหรับแผ่นผนัง W201 W205 และ W208 โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นมีค่ามากและปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการมีค่ามากกว่าปริมาณเหล็กตะแกรงชั้นต่ำมาก ต้องมีการเสริมเหล็กเพิ่มโดยเมื่อพิจารณาปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการเพิ่ม จะเห็นว่าต้องการเพียงเหล็กขนาด 12 มม. จำนวน 1 เส้นต่อความกว้าง 1 เมตร ซึ่งการเสริมเหล็กขนาด 16 มม. จำนวน 2 เส้นรอบช่องเปิดและบริเวณขอบผนังตามมาตรฐานการออกแบบก็เพียงพอต่อกำลังรับโมเมนต์ดัดที่ต้องการในขณะถอดแบบแล้ว อย่างไรก็ตามพื้นที่เหล็กเสริมรับแรงดัด (ทั้งเหล็กตะแกรงและเหล็กเสริมเพิ่ม) อาจน้อยกว่าที่ต้องการได้ถ้าสามารถควบคุมคุณภาพและป้องกันการแตกร้าวในขณะถอดแบบได้

ดังได้กล่าวไว้ในตอนต้น ค่าต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ 1 และ 2 ไม่ได้พิจารณาบริเวณที่เกิดหน่วยแรงเฉือน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีพื้นที่แคบระหว่างช่องเปิดในกรณีที่มีช่องเปิดหลายช่องหรือช่องเปิดอยู่ใกล้บริเวณขอบของผนัง โดยพื้นที่ที่มีขนาดความกว้างที่แคบนี้จะเกิดหน่วยแรงดัดที่สูงมาก ดังนั้นจะต้องใช้กำลังอัดประลัย (f'_c) ของคอนกรีตที่สูงมากในการต้านทานการแตกร้าวในขณะถอดแบบ ตัวอย่างแผ่นผนังที่มีช่องแคบและก่อให้เกิดหน่วยแรงดัดที่สูงมากได้แก่ ผนัง W104 W202 W205 และ W208 การใช้ค่า f'_c ที่สูงมากนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงโดยเปล่าประโยชน์และแทบจะเป็นไปไม่ได้ที่คอนกรีตปกติจะมีค่ากำลังอัดประลัยที่สูงมากในขณะถอดแบบ เช่นนี้ (ประมาณ 580 กก./ชม.² โดยการคำนวณจากผนัง W205) ดังนั้นเพื่อความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติจึงควรพิจารณาเสริมเหล็กเสริมพิเศษเพื่อต้านโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นในบริเวณหน่วยแรงที่มีความเข้มข้นสูงแทน ตารางที่ 3 แสดงค่าโมเมนต์ดัดและปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการบริเวณหน่วยแรงเข้มข้นในขณะถอดแบบของผนัง W104 W202 W205 และ W208

จากตารางจะเห็นว่าปริมาณเหล็กเสริมพิเศษที่ต้องการใช้บริเวณช่องแคบต่าง ๆ มีจำนวนน้อยกว่าเหล็กเสริมพิเศษที่กำหนดให้สำหรับช่องเปิดตามมาตรฐานการออกแบบ (2-DB16) ดังนั้นการใช้เหล็กเสริมพิเศษที่กำหนดตามมาตรฐานการออกแบบจึงเพียงพอต่อกำลังรับโมเมนต์ดัดในบริเวณช่องแคบต่าง ๆ ของแผ่นผนังที่มีช่องเปิด

ตารางที่ 3 โมเมนต์ดัดและปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการบริเวณหน่วยแรงเข้มข้นในขณะถอดแบบ

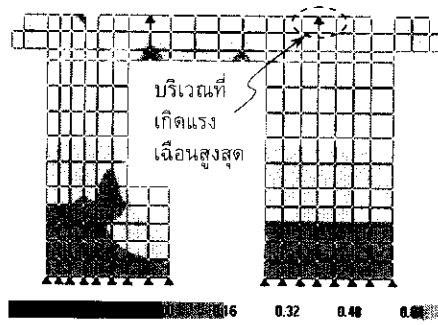
ผนัง	M_{max} (กก.-ชม.)	M_u / ϕ (กก.-ชม.)	A_s (ชม. ²)	จำนวน เหล็กเส้น
104	18,045	28,070	1.61	2-DB12
202	3,150	4,900	0.28	1-DB12
205	25,340	39,417	2.57	3-DB12
208	12,350	19,211	1.15	1-DB12

หมายเหตุ ค่าที่แสดงเป็นค่าต่อความกว้างจริงของช่องแคบ

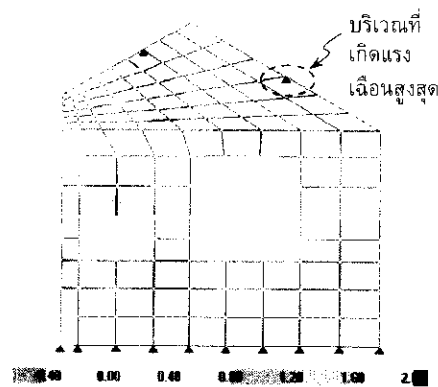
6.1.3 การตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือน

ค่าหน่วยแรงเฉือนที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างของแผ่นผนังชั้น W101 และ W205 ได้แสดงในรูปที่ 21 และ 22 ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าค่าหน่วยแรงเฉือน

เฉลี่ยสูงสุด v_{max} ในแผ่นผนังชั้น W101 และ W205 มีค่าเท่ากับ 1.50 และ 1.40 กก./ชม.² ตามลำดับ เมื่อนำไปคูณตัวคูณแรงจะได้ค่าหน่วยแรงเฉือนประลัย v_u มีค่าเท่ากับ 2.1 และ 1.96 กก./ชม.² ตามลำดับ ซึ่งนำไปใช้ในการออกแบบตามสมการที่ (3) โดย $\phi = 0.85$ และ $v_c = 0.53\sqrt{f'_c}$



รูปที่ 21 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในผนัง W101 ขณะถอดแบบ



รูปที่ 22 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในผนัง W205 ขณะถอดแบบ

จากสมการที่ (3) กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ต้องการ (v_c) จะมีค่าเท่ากับ $v_u / \phi = 2.47$ และ 2.31 กก./ชม.² สำหรับแผ่นผนังชั้น W101 และ W205 ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่า $v_c = 0.53\sqrt{f'_c} = 0.53\sqrt{129} = 6.02$ กก./ชม.² ซึ่งมากกว่าค่ากำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีตที่ต้องการทั้ง 2 ค่า ดังนั้น แผ่นผนังชั้น W101 และ W205 สามารถรับแรงเฉือนได้อย่างปลอดภัย สำหรับการศึกษาการกำลังรับแรงเฉือนของผนังแผ่นอื่นๆ ได้สรุปในตารางที่ 4 จากตารางที่ 4 จะเห็นว่าผนังคอนกรีตสำเร็จรูปทุกแผ่นสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในขณะถอดแบบได้อย่างปลอดภัย โดยไม่จำเป็นต้องเสริมเหล็กกับแรงเฉือนเพิ่ม

ตารางที่ 4 การพิจารณากำลังรับแรงเฉือนของผนังขณะถอดแบบ

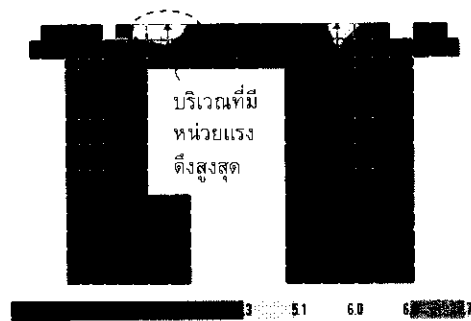
ผนัง	v_{max} (กก./ชม. ²)	v_u / ϕ (กก./ชม. ²)	v_c (กก./ชม. ²)
101	1.50	2.47	6.02
102	0.50	0.82	6.02
103	0.90	1.48	6.02
104	2.13	3.51	6.02
105	1.50	2.47	6.02
106	0.80	1.32	6.02
107	0.50	0.82	6.02
108	0.40	0.66	6.02
201	2.10	3.46	6.02
202	1.74	2.87	6.02
203	0.50	0.82	6.02
204	0.56	0.92	6.02
205	1.40	2.31	6.02
206	0.60	0.99	6.02
207	0.75	1.24	6.02
208	0.80	1.32	6.02

6.2 ขณะยกขนย้าย

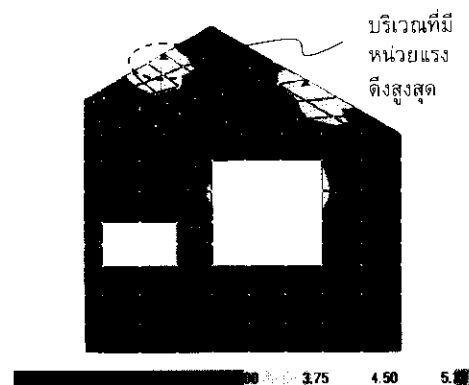
แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างในขณะยกขนย้ายจะมีจุดรองรับแบบหมุดสี่ที่ตำแหน่งจุดยก 2 จุดเท่านั้น โดยผนังจะรับเฉพาะน้ำหนักตัวเองในทิศทางตามแนวตั้งตามระนาบของผนัง สำหรับกำลังอัดประลัย (f'_c) ของคอนกรีตขณะยกขนย้ายนั้นจะมีค่าเท่ากับ f'_c ขณะถอดแบบเนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องกัน โดยในขั้นตอนการยกขนย้ายนี้ น้ำหนักของแผ่นผนังจะทำให้เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นตลอดทั้งแผ่นซึ่งคอนกรีตจะต้องมีค่ากำลังเพียงพอที่จะต้านทานการแตกร้าวของแผ่นผนังเนื่องจากหน่วยแรงดึงเหล่านี้ได้ อย่างไรก็ตามในกรณีผนังเกิดการแตกร้าวเนื่องจากสาเหตุอื่น กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมในผนังต้องสามารถต้านทานแรงดึงที่เกิดขึ้นในผนังได้เพื่อให้ผนังยังสามารถใช้งานได้และไม่เกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ขึ้น

6.2.1 การตรวจสอบหน่วยแรงดึง

รูปที่ 23 และ 24 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงดึงในขณะยกขนย้ายที่เกิดขึ้นในแผ่นผนังชั้น W101 และ W205 โดยได้ค่าหน่วยแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด σ_{tmax} เท่ากับ 8.03 กก./ชม.² และ 5.76 กก./ชม.² ในผนังแต่ละชั้นตามลำดับ



รูปที่ 23 หน่วยแรงดึงที่เกิดในผนัง W101 ขณะยกขนย้าย



รูปที่ 24 หน่วยแรงดึงที่เกิดในผนัง W205 ขณะยกขนย้าย

เมื่อพิจารณาสมการที่ (4) โดยใช้กำลังรับแรงดึงตรงของคอนกรีตเท่ากับ $1.6\sqrt{f'_c}$ จะได้ว่า $\sigma_t \leq 1.6\sqrt{f'_c}$ นั่นคือ $f'_c \geq (\sigma_t / 1.6)^2$ กก./ซม.² ดังนั้น จะได้ค่า f'_c ที่ต้องการของผนัง W101 ในขณะยกขนย้ายมีค่าเท่ากับ $(8.03/1.6)^2 = 25.19$ กก./ซม.² และสำหรับผนัง W205 มีค่าเท่ากับ $(5.76/1.6) = 12.96$ กก./ซม.² ตามลำดับ สำหรับผนังแผ่นอื่นๆ ก็สามารถคำนวณค่า f'_c ที่ต้องการในขณะยกขนย้ายเพื่อดำเนินการแตกร้าได้ในลักษณะเดียวกัน ซึ่งค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดและ f'_c ที่ต้องการของผนังทุกชั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 (สังเกตว่าบริเวณที่เกิดหน่วยแรงดึงสูงสุดจะอยู่บริเวณจุดยกซึ่งเกิดหน่วยแรงเข้มข้น)

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดประลัย f'_c ของคอนกรีตที่ต้องการในขณะยกขนย้ายมีค่าน้อยกว่า f'_c ที่ต้องการในขณะถอดจากแบบมาก (f'_c ในขณะถอดแบบมีค่าเท่ากับ 129 กก./ซม.²) ดังนั้นการใช้ค่า f'_c ในขณะถอดแบบจะมีความปลอดภัยต่อพฤติกรรมการรับน้ำหนักในขณะยกขนย้าย

ตารางที่ 5 หน่วยแรงดึง (σ_t) และกำลังอัดประลัย (f'_c) ที่ต้องการของแผ่นผนังในขณะยกขนย้าย

ผนัง	σ_t (กก./ซม. ²)	f'_c (กก./ซม. ²)
101	8.03	25.19
102	4.10	6.57
103	6.25	15.26
104	5.41	11.43
105	5.45	11.60
106	7.78	23.64
107	6.48	16.40
108	3.16	3.90
201	3.31	4.28
202	7.39	21.33
203	4.35	7.39
204	5.25	10.77
205	5.76	12.96
206	5.91	13.64
207	6.76	17.58
208	6.61	17.07

6.2.2 การตรวจสอบกำลังรับแรงดึง

ในส่วนของการรับแรงดึงจะพิจารณาให้เฉพาะเหล็กเสริมรับเท่านั้น (พิจารณาให้กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าเป็นศูนย์) โดยปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้จะเป็นปริมาณเหล็กเสริมที่ได้จากขั้นตอนการถอดแบบซึ่งใช้ปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่กำหนดตามมาตรฐานการออกแบบ ซึ่งในการศึกษาค้างนี้ใช้เหล็กตะแกรงขนาด 6 มม. @ 20 ซม. ($A_s = 1.41$ ซม.²/ม.)

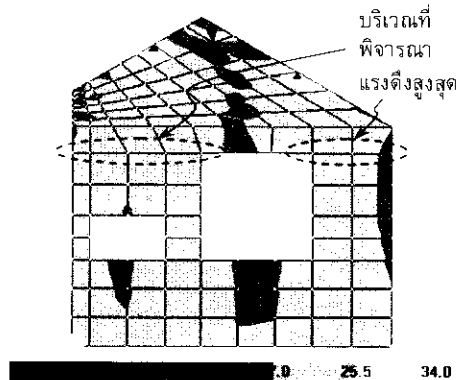
รูปที่ 25 และ 26 แสดงค่าแรงดึงต่อหน่วยความยาวของแผ่นผนัง W101 และ W205 ตามลำดับ แม้ว่าบริเวณจุดยกจะเป็นจุดที่เกิดแรงดึงสูงสุดซึ่งต้องการเหล็กเสริมพิเศษแต่จะไม่นำมาพิจารณาในการศึกษาค้างนี้ (อย่างไรก็ตามจะต้องมีการออกแบบเหล็กเสริมบริเวณจุดยกนี้เป็นการเฉพาะ) รวมไปถึงบริเวณช่องแคบที่มีเหล็กเสริมพิเศษด้านแรงดัด (แคบกว่า 20 ซม. ซึ่งเสริมเหล็กตะแกรงไม่ได้) ก็จะไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากสามารถรับแรงดึงได้อย่างปลอดภัย ดังนั้นการพิจารณากำลังรับแรงดึงควรจะพิจารณาบริเวณวิกฤตอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวมา

จากรูปที่ 25 และ 26 ค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด (P_t) ในบริเวณที่พิจารณาสำหรับผนัง W101 มีค่าเท่ากับ 6.25 กก./ซม. ซึ่งคิดต่อความกว้าง 1 เมตร มีค่าเท่ากับ

$(6.25) \times (100) = 625$ กก./ม. และสำหรับผนัง W205 จะได้ค่าแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดต่อความกว้าง 1 เมตร มีค่าเท่ากับ 500 กก./ม. เมื่อนำไปคูณตัวคูณแรง (ใช้ค่าเท่ากับ 1.4) จะได้ค่าแรงดึงประลัย P_u ซึ่งนำไปใช้ในการตรวจสอบกับค่ากำลังรับแรงดึงระบุของเหล็กเสริม P_n ตามสมการที่ (5) ต่อไป



รูปที่ 25 แรงดึงที่เกิดในผนัง W101 ขณะยกขนย้าย



รูปที่ 26 แรงดึงที่เกิดในผนัง W205 ขณะยกขนย้าย

ในกรณีแผ่นผนังชั้น W101 และแผ่นผนังชั้น W205 ได้ค่า P_u เท่ากับ $(1.4) \times (625) = 875$ กก./ม. และ เท่ากับ $(1.4) \times (500) = 700$ กก./ม. ตามลำดับ เมื่อนำไปตรวจสอบกับค่า ϕP_n ตามสมการที่ (5) พบว่า $\phi P_n = \phi A_s f_y = (0.9) \times (1.41) \times (5,500) = 6,980$ กก./ม. ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดึงประลัยมาก แสดงว่าผนังทั้ง 2 แผ่นนี้มีกำลังรับแรงดึงเพียงพอในขณะที่ยกขนย้าย สำหรับผลการพิจารณาผนังแผ่นอื่นๆ ได้สรุปไว้ในตารางที่ 6

จากตารางที่ 6 จะเห็นว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดในแผ่นผนัง โดยใช้เหล็กตะแกรงขนาด 6 มม. ระยะเรียง 20 ซม. ($A_s = 1.41$ ซม.²/ม.) นั้นเพียงพอต่อการรับแรงดึงที่เกิดในผนังทุกชั้นในขณะที่ยกขนย้าย

ตารางที่ 6 การพิจารณากำลังรับแรงดึงของผนังขณะยกขนย้าย

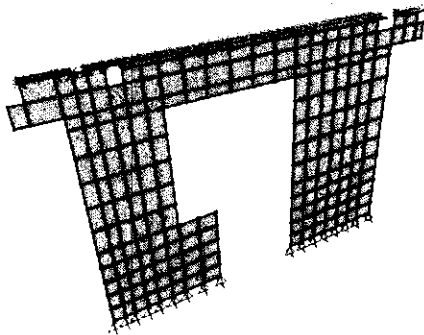
ผนัง	P_f (กก./ซม.)	P_u (กก./ม.)	ϕP_n (กก./ม.)
101	6.25	875	6,980
102	4.05	567	6,980
103	5.61	785	6,980
104	20.00	2800	6,980
105	5.50	770	6,980
106	34.50	4,830	6,980
107	4.80	672	6,980
108	4.75	665	6,980
201	7.68	1,075	6,980
202	21.00	2,940	6,980
203	19.00	2,660	6,980
204	22.50	3,150	6,980
205	5.00	700	6,980
206	27.50	3,850	6,980
207	7.20	1,008	6,980
208	5.20	728	6,980

6.3 ขณะรับน้ำหนักจริง

แบบจำลองโครงสร้างของผนังในขณะรับน้ำหนักจริงนั้นจะมีจุดรองรับแบบหมุดเลื่อนที่ฐานตลอดแนวฐานของผนังและอีกปลายมีจุดรองรับแบบล้อเลื่อนที่ด้านข้างเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับระนาบผนัง ในชั้นตอนนี้ผนังแผ่นต่างๆ จะรับน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นจริงเพิ่มเติมได้แก่ น้ำหนักบรรทุกตายตัว (Dead Load, DL) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load, LL) ซึ่งน้ำหนักเหล่านี้เกิดจากการถ่ายแรงหรือน้ำหนักจากชิ้นส่วนต่างๆ (น้ำหนักจากหลังคา น้ำหนักจากพื้น น้ำหนักจากผนังชั้นบน และน้ำหนักบันได เป็นต้น) ลงสู่ผนังชั้นที่กำลังพิจารณา

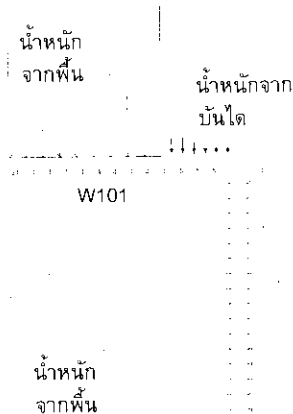
ในขณะที่ใช้งานกำลังอัดประลัย f'_c ของคอนกรีตจะเป็นค่าที่ 28 วัน ซึ่งค่า f'_c ที่ต้องการนั้นสามารถหาได้จากการตรวจสอบหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงอัดตามสมการที่ (1) และ (7) และตรวจสอบกำลังรับแรงอัดตามสมการที่ (5) และ (6) จากลักษณะการรับน้ำหนักและการจัดวางของแผ่นผนังในขณะใช้งานจริง จะเห็นได้ว่ามีแผ่นผนังที่รับน้ำหนักสูงอยู่ 4 แผ่น ได้แก่ผนัง W101 W102 W106 และ W107 แผ่นผนังทั้ง 4 แผ่นนี้จะเป็นตัวแทนเพื่อใช้ในการออกแบบของแผ่นผนังทั้ง 16 แผ่น โดยบทความนี้จะนำเสนอการพิจารณาโดยละเอียดเพื่อเป็นตัวอย่างการออกแบบเฉพาะผนัง W101 เท่านั้น รูปที่ 27

แสดงแบบจำลองทางโครงสร้างและน้ำหนักบรรทุกที่ถ่ายมาจากพื้นชั้นสอง จากบันได และจากผนังชั้นบน ในขณะที่รับน้ำหนักจริงของผนัง W101 โดยรูปแบบการถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากพื้นและบันไดสู่ผนังได้แสดงไว้ในรูปที่ 28 สำหรับการถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากผนังชั้นบนจะใช้น้ำหนักแผ่กระจายสม่ำเสมอโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากน้ำหนักทั้งหมดหารด้วยความยาวของผนัง



รูปที่ 27 แบบจำลองและน้ำหนักบรรทุกของผนัง W101
ขณะรับน้ำหนักจริง

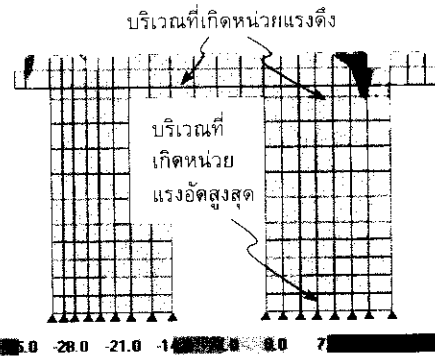
W107



รูปที่ 28 การถ่ายน้ำหนักจากพื้นและบันไดสู่ผนัง W101

6.3.1 การตรวจสอบหน่วยแรง

ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงในผนังชั้น W101 ซึ่งรวมผลของแรงตามแกนและโมเมนต์จากการเยื้องศูนย์ได้แสดงในรูปที่ 29 ซึ่งให้ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 3.49 กก./ซม.² และหน่วยแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 16.85 กก./ซม.²



รูปที่ 29 หน่วยแรงที่เกิดในผนัง W101 ขณะรับน้ำหนักจริง

เมื่อพิจารณาสมการที่ (1) สำหรับตรวจสอบหน่วยแรงดึงจะได้ว่า $f_c' \geq (\sigma_t / 2)^2$ กก./ซม.² ดังนั้น f_c' ที่ต้องการของผนัง W101 เพื่อด้านหน่วยแรงดึงมีค่าเท่ากับ $(3.49 / 2)^2 = 3.05$ กก./ซม.² สำหรับการตรวจสอบหน่วยแรงอัดตามสมการที่ (7) โดยใช้ค่าหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีตได้แก่ $f_c = 0.45 f_c'$ จะได้ว่า $f_c' \geq \sigma_c / 0.45$ ดังนั้น f_c' ที่ต้องการของผนัง W101 เพื่อด้านหน่วยแรงอัดมีค่าเท่ากับ $16.85 / 0.45 = 37.44$ กก./ซม.² สำหรับผนัง W102 W106 และ W107 ก็สามารถคำนวณค่า f_c' ที่ต้องการในขณะรับน้ำหนักจริงได้ในลักษณะเดียวกัน ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 หน่วยแรงดึง หน่วยแรงอัด และ f_c' ที่ต้องการของผนังในขณะรับน้ำหนักจริง

ผนัง	หน่วยแรงดึง		หน่วยแรงอัด	
	σ_t (กก./ซม. ²)	f_c' (กก./ซม. ²)	σ_c (กก./ซม. ²)	f_c' (กก./ซม. ²)
101	3.49	3.05	16.85	37.44
102	0.22	0.01	2.50	5.56
106	0.00	0.00	1.66	3.69
107	1.31	0.43	14.28	31.73

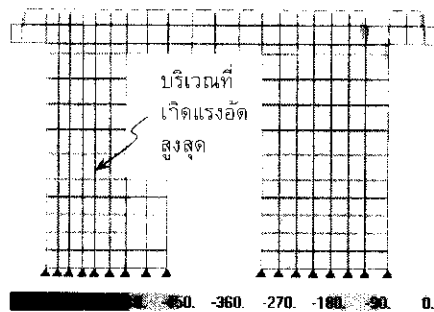
จากตารางที่ 7 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดประลัย f_c' ของคอนกรีตที่ต้องการในขณะรับน้ำหนักจริงเพื่อด้านทานหน่วยแรงดึงที่เกิดในผนังมีค่าน้อยมากเนื่องจากหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยนั่นเอง (หรือเท่ากับศูนย์) และค่า f_c' ที่ต้องการเพื่อด้านทานหน่วยแรงอัดที่เกิดในผนังในขณะรับน้ำหนักจริงก็ยังมีค่าน้อยกว่า f_c' ที่ต้องการในขณะถอดแบบมาก

6.3.2 การตรวจสอบกำลังรับแรงอัด

รูปที่ 30 แสดงค่าแรงอัดประลัยจากการวิเคราะห์โครงสร้าง (P_u) ของผนัง W101 โดยพิจารณาตัวคูณแรง 1.4DL+1.7LL แล้ว ซึ่งให้ค่า P_u เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 140 กก./ชม. หรือเท่ากับ 14,000 กก./ม. เมื่อพิจารณาสมการที่ (5) กำลังรับแรงอัดของผนัง (ϕP_u) จะต้องมีความมากกว่าแรงอัดประลัย P_u โดยที่ $\phi=0.7$ และ P_u คำนวณได้จากสมการที่ (6) ในกรณีนี้สมมติใช้ $f'_c = 180$ กก./ชม.² ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่กำหนดได้ตามมาตรฐาน $A_g = 1,000$ ซม.² (ผนังหนา 10 ซม. กว้าง 1 เมตร) $k = 1.0$ $l_c = 250$ ซม. และ $h = 10$ ซม. ดังนั้นได้ว่า

$$\begin{aligned}\phi P_u &= 0.55 \phi f'_c A_g \left[1 - \left(\frac{k l_c}{32 h} \right)^2 \right] \\ &= 0.55 \times 0.7 \times 180 \times 1,000 \times \left[1 - \left(\frac{1.0 \times 250}{32 \times 10} \right)^2 \right] \\ &= 27,002 \text{ กก./ม.} > P_u\end{aligned}$$

แสดงว่าผนัง W101 มีกำลังเพียงพอในการรับแรงอัดประลัยในขณะรับน้ำหนักจริง สำหรับผนัง W102 W106 และ W107 มีค่า P_u เฉลี่ยสูงสุดจากการวิเคราะห์โครงสร้างเท่ากับ 18.3 19.1 และ 87.5 กก./ชม. ตามลำดับ โดยทั้งหมดรับน้ำหนักบรรทุกประลัยน้อยกว่าผนัง W101 ดังนั้นแผ่นผนังทั้งหมดจึงมีความปลอดภัย



รูปที่ 30 แรงอัดที่เกิดในผนัง W101 ขณะรับน้ำหนักจริง โดยพิจารณาตัวคูณแรง 1.4DL+1.7LL แล้ว

7. สรุป

บทความฉบับนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการก่อสร้างระบบชั้นส่วนผนังคอนกรีตสำเร็จรูปและนำเสนอข้อพิจารณาสำหรับการออกแบบชั้นส่วนผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูปโดยใช้แบบมาตรฐานบ้านเดี่ยว 2 ชั้นของการเคหะแห่งชาติเป็นกรณีศึกษา จากการศึกษา

พบว่าเมื่อใช้ค่าความหนาต่ำสุดของผนังตามข้อกำหนดค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ต้องการในขณะถอดแบบเพื่อป้องกันการแตกร้าวนั้น มีค่าเพียงพอที่จะรองรับหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในแผ่นผนังในขณะยกขนย้ายและหน่วยแรงอัดในขณะใช้งานได้อย่างปลอดภัย ในขณะที่ปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดของผนังที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานการออกแบบ จะมีกำลังเพียงพอและสามารถรับโมเมนต์ดัดในขั้นตอนถอดแบบ รับแรงดึงในขั้นตอนการยกขนย้าย และรับแรงอัดในขั้นตอนใช้งานจริงได้อย่างปลอดภัย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เอกประจิม จำกัด สำหรับข้อมูลและแบบมาตรฐานที่ใช้ในการเขียนบทความฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] บุษบง เจริญพันธ์โยธิน. 2545. กระบวนการก่อสร้างที่อยู่อาศัยโดยระบบชั้นส่วนสำเร็จรูป: กรณีศึกษาโครงการชลลดา รัตนาธิเบศร์. วิทยานิพนธ์เคหะพัฒน์ ศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] บัณฑิต จุลาสัย. 2543. แนวทางการซื้อบ้าน พิจารณาในด้านรูปแบบและเทคโนโลยีการก่อสร้าง (การพัฒนาการบ้านจัดสรรในปัจจุบัน). <http://seed.net/winyou2/article08/how2buyhouse.htm>.
- [3] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2548. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. ว.ส.ท. 1008-38.
- [4] มั่น ศรีเรือนทอง. 2538. การก่อสร้างอาคารพักอาศัยด้วยระบบชั้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป. ว.ส.ท. ฉบับเทคโนโลยี. 48(5): 72-83.
- [5] ACI. 1999. Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute.
- [6] การเคหะแห่งชาติ. 2547. แบบบ้านเดี่ยว 2 ชั้น ระบบผนังรับน้ำหนักคอนกรีตสำเร็จรูป.