Journal of Thailand Concrete Association
วารสารวิชาการสมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

เทคโนโลยีการก่อสร้างอาคารทรงกลมโครงสร้างถักสานด้วยเทคโนโลยีคอนกรีตสำเร็จรูป

CONSTRUCTION OF A SPHERICAL SKELETON FRAME STRUCTURE BY PRECAST CONCRETE TECHNOLOGY

มั่น ศรีเรือนทอง

กรรมการบริหาร บริษัท ฤทธา จำกัด

ARTICLE INFO:

Received: September 10, 2015

Received Revised Form: December 11, 2015

Accepted: December 18, 2015

**Corresponding Author,*
Email address: mhan@ritta.co.th

ABSTRACT :

The 100-year memorial Lady Master Chan's Building is a master piece symbolic building of Dhammakaya Temple at Khlong Luang, Pathum Thani, Thailand. Water cooling system was selected to cool down temperature of a 5.40 meter deep mat footing with a volume of 10,944 m^3 and 5,400 m^3 of transfer floor. The large volume mass concrete was not allowed by the owner to use fly ash. Water cooling tower, normally used in building air-conditioning system, was adopted to be used for a closed circuit water cooling system to eliminate the need of water reservoir, as the transfer floor was located 27.50 meter above ground. The spherical shape of building is a unique one. No building of this shape and size has been built with concrete Skeleton before. The connected nodes of columns and beams, to form the triangle shape of concrete skeleton were too narrow to accommodate all reinforcement needed. Also the off-form exposed concrete surface without rendering and painting are the important architectural requirements. Precast Technology was implemented. The reinforced concrete elements were converted to be composite section comprising of two 300 x 40 mm thick high strength steel plate and DB40 rebar, encased by 750 ksc. high strength concrete. High performance self-compacting concrete, with a slump flow of 600 mm, was needed to ensure that the precast concrete elements with complicated shape and heavy reinforcement were perfectly casted. Nice and smooth surfaces were achieved by using specially made steel formwork and high frequency vibrator. The skeleton structure was categorized into precast inclined column element, beam element and node element. The precast elements were transported to the job site and lifted by 540 ton-meter tower crane, to seat on a specially made temporary steel frame. The reinforcement were connected and encased by high performance concrete. A nice looking and high strength skeleton for the building were then achieved.

KEYWORDS: Mass Concrete, Water cooling system, Precast concrete, Spherical shape skeleton, High performance self-compacting concrete

1. บทนำ

อาคาร ๑๐๐ ปี คุณยายอาจารย์ มหารัตนอุบาสิกา จันทร์ ขนนกยูง เป็นอาคารเอนกประสงค์ใช้ประโยชน์เป็นโรงเรียนพระปริยัติธรรม หอประชุม และสำนักงานของวัดพระธรรมกาย ตั้งอยู่ ณ อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี (ดูรูปที่ 1)

อาคารมีลักษณะเป็นเอกลักษณ์รูปทรงกลม (Sphere) โครงสร้างภายนอกถักสานแบบลูกตะกร้อ ขนาดเส้นผ่าน

©2015 J. of TCA All rights reserved

ศูนย์กลาง 81.00 เมตร มีความสูงรวม 95.55 เมตร โครงสร้างทรงกลมรองรับด้วยโครงสร้างปล่องลิฟท์และปล่องบันไดจำนวนเพียง 4 จุด ซึ่งปล่องดังกล่าวตั้งอยู่ห่างกันเป็นระยะทาง ประมาณ 25.20 x 40.41 เมตร

อาคารบริวารที่ล้อมรอบมีความสูงเพียง 5 ชั้น ไม่มีโครงสร้างเชื่อมต่อหรือค้ำยันกับอาคารทรงกลมแต่อย่างใด เว้นแต่พื้นชั้นที่ 4 และชั้นที่ 6 ที่สามารถเดินเชื่อมต่อถึงกันได้ การออกแบบตั้งใจทำให้เห็นเสมือนลูกแก้วลอยอยู่เหนือพื้น

อาคารทรงกลมประกอบด้วยพื้นชั้นที่ 4 ถึงชั้น 17 ใช้เป็นห้องจัดแสดงและห้องประชุมใหญ่ขนาดความจุ 2,000 คน และห้องสำนักงาน กลุ่มอาคารมีพื้นที่อาคารรวม 170,000 ตารางเมตร

รูปที่ 1 ภาพอาคารทรงกลมและอาคารบริวาร

2. การก่อสร้างฐานราก

อาคารตั้งอยู่บนเสาเข็มเจาะขนาดใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.80 ถึง 1.80 เมตร ลึก 53.00 เมตร จำนวน 636 ต้น ฐานรากของอาคารบริวารเป็นฐานรากเดี่ยว (Isolated Footing) ฐานรากของอาคารทรงกลมเป็นฐานรากแพ (Mat Footing) จำนวน 3 ฐาน เชื่อมยึดรั้งกันด้วยคานรับแรงดึงขนาดใหญ่หน้าตัด 6.00 x 3.00 เมตร คานขนาดใหญ่นี้มีเพื่อรับแรงถีบจากรูปแบบการเอียงของปล่องบันไดที่รองรับอาคารทรงกลม

ฐานรากแพที่ใหญ่ที่สุดตั้งอยู่บนเสาเข็มเจาะ 98 ต้น มีขนาด 33.78 x 69.70 x 5.40 เมตร การขุดดินเพื่อการก่อสร้างฐานรากแพ ความลึก 5.40 เมตร ใช้ระบบป้องกันดินพังทลาย โดยการปรับปรุงคุณภาพดินเหนียวอ่อน ด้วยการฉีดน้ำปูนซีเมนต์สร้างเสาดินซีเมนต์ (Soil Cement Column) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.70 เมตร ลึก 10.50 เมตร จำนวน 4-7 แถว เรียงกันทำให้สามารถขุดดินแบบตั้งฉาก (Vertical Free Standing) ความลึก 4.30-7.30 เมตร โดยไม่มีการค้ำยันภายในบ่อขุดแต่อย่างใด ทำให้สามารถขุดดินได้อย่างรวดเร็ว การผูกเหล็กเสริมและเทคอนกรีต ก็กระทำได้โดยง่ายไม่มีสิ่งกีดขวาง ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายและทำงานขุดได้อย่างรวดเร็ว (รูปที่ 2 และ 4)

มีประเด็นที่ต้องพิจารณาให้รอบคอบถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของดินใต้ฐานรากแพ เพราะเหตุว่าฐานรากแพนี้มีความหนา 5.40 เมตร จะมีน้ำหนักกระทำต่อดินใต้ฐานรากสูงมากถึง 13.00 ตันต่อตารางเมตร โดยปกติโครงการอื่นๆ ซึ่งเป็นอาคารสูงมักมีชั้นใต้ดิน ทำให้ฐานรากแพจมอยู่ในชั้นดินลึก แต่ฐานรากแพนี้ตั้งอยู่เสมอผิวดิน โดยไม่ได้ฝังจมอยู่ใต้ดิน ดังนั้น ดินใต้ฐานรากแพนี้ระดับลึกเพียง 5.10 เมตร ซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อน ย่อมไม่สามารถรับน้ำหนักของคอนกรีตสดได้ จำเป็นต้องตอกเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอขนาด 0.15 x 0.15 เมตร ความยาว 6-8 เมตร จำนวน 3,116 ต้น ระยะห่าง 1.24 x 1.24 เมตร และหล่อพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กไร้คาน ความหนา 0.15 เมตร เพื่อเป็นโครงสร้างชั่วคราว รับน้ำหนักคอนกรีตสดของฐานรากแพ (รูปที่ 3 และ 4)

รูปที่ 2 ระบบป้องกันดินด้วยเสาดินซีเมนต์ ทำให้สามารถขุดบ่อดินลึก 4.30-7.30 เมตรได้ โดยไม่มีเหล็กค้ำยันภายในบ่อขุด

รูปที่ 3 การตอกเสาเข็มคอนกรีตอัดแรง และสร้างพื้นคอนกรีตไร้คานช่วยรับน้ำหนักคอนกรีตสดขณะเทคอนกรีตฐานรากแพ

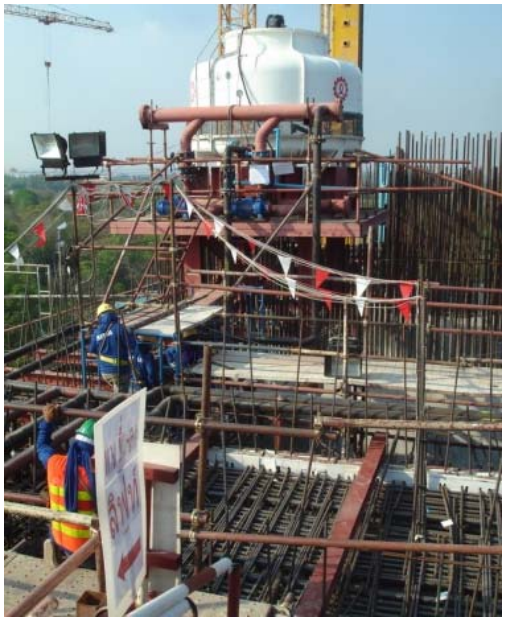
©2015 J. of TCA All rights reserved

รูปที่ 4 การเพิ่มพื้นคอนกรีตไร้คานใต้ฐานรากแพ เพื่อช่วยรับน้ำหนักคอนกรีตสดขณะเทคอนกรีต

คอนกรีตหลา (Mass Concrete) สำหรับฐานรากแพขนาดใหญ่นี้มีข้อจำกัดที่ถูกกำหนดโดยเจ้าของโครงการ มิให้มีส่วนผสมของเถ้าลอย (Fly Ash) ซึ่งปกติเป็นส่วนผสมหลักในคอนกรีตความร้อนต่ำ ทีมวิศวกรเทคนิคก่อสร้างตัดสินใจใช้เทคนิคดั้งเดิมที่ใช้กันคือ การต่อท่อน้ำเย็นหล่อเลี้ยงภายในฐานรากแพ (Cooling Pipe System) (Ref. 4) โดยจากการวิเคราะห์คำนวณการถ่ายเทความร้อน ใช้ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว วางห่างกันระยะ 1x1 เมตร ปั๊มน้ำผ่านท่อด้วยอัตรา 120 ลิตรต่อนาที (รูปที่ 5)

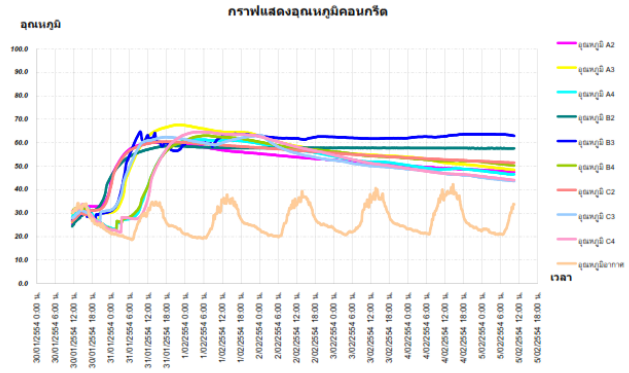
รูปที่ 5 ฐานรากแพความหนา 5.40 มม. กำลังติดตั้งเหล็กเสริมล่างและเริ่มติดตั้งงานท่อระบายความร้อนด้วยน้ำ

ปกติระบบน้ำหล่อเย็นมักมีปัญหาต้องใช้ปริมาณน้ำมากในการลดอุณหภูมิ ทีมวิศวกรเทคนิคก่อสร้างได้ประยุกต์ ดัดแปลง นำเอาหอผึ่งน้ำเย็น (Cooling Tower) ของระบบปรับอากาศ มาใช้เป็นอุปกรณ์ช่วยลดอุณหภูมิน้ำ จากอุณหภูมิน้ำที่ออกจากฐานรากประมาณ 50 องศาเซลเซียส ลงมาให้มีอุณหภูมิไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส (รูปที่ 6) ทำให้ไม่ต้องมีบ่อน้ำหรือถังเก็บกักน้ำขนาดใหญ่ ระบบน้ำหล่อเย็นนี้จะใช้ปั๊มน้ำหล่อเย็นเป็นวงจรปิด (Closed Circuit) ต่อเนื่องตลอดเวลา ทั้งนี้ การต่อท่อน้ำเย็นจัดวางเป็นวงรอบ 3 ระดับ จำนวนหลายวงจร มีประตูน้ำควบคุมการไหลในแต่ละวงจร เมื่อผลการอ่านอุณหภูมิภายในคอนกรีตปรากฏออกมา ทีมงานจะจัดการปรับอัตราการไหลของน้ำในแต่ละวงจรให้เหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่ต้องการระบายออก เทคนิคที่นำมาประยุกต์ใช้นี้มีความคุ้มค่ามาก สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในคอนกรีตให้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน ACI 301-10 ที่กำหนดไว้ได้ (Ref. 1-3) (รูปที่ 7)



รูปที่ 6 หอผึ่งน้ำเย็นใช้ลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในระบบวงจรปิดอย่างได้ผลและประหยัด

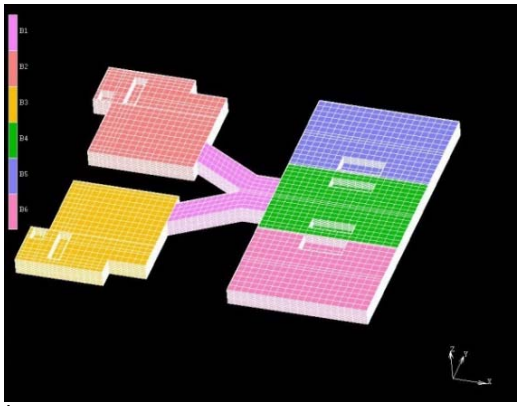
©2015 J. of TCA All rights reserved



รูปที่ 7 กราฟบันทึกอุณหภูมิของคอนกรีตฐานรากแพ 6 จุด เทียบกับอุณหภูมิอากาศ

เนื่องจากฐานรากแพที่ใหญ่ที่สุดมีปริมาตรสูงถึง 10,994 ลูกบาศก์เมตร ไม่สามารถจัดหาคอนกรีตมาเทในครั้งเดียวได้ จึงแบ่งการเทคอนกรีตฐานรากแพออกเป็น 5 ส่วน ครั้งละประมาณ 3,660 ลูกบาศก์เมตร (รูปที่ 8) และรูปที่ 9 แสดงการเตรียมรอยต่อแนวตั้งสำหรับการแบ่งเทคอนกรีต

ประเด็นพิจารณาวิธีเทคอนกรีต โดยปกติการเทคอนกรีตฐานรากแพที่ประหยัดและรวดเร็วที่สุดคือ การเทโดยการปล่อยคอนกรีตจากท้ายรถบรรทุกคอนกรีตลงสู่ฐานรากโดยตรง โดยใช้ท่อและรางเอียง แต่ฐานรากแพโครงการนี้อยู่เสมอผิวดินไม่มีระยะความสูงที่จะวางรางเอียงได้ ประกอบกับระบบป้องกันดินพังที่ใช้ไม่มีค้ำยันภายในบ่อขุด ไม่มีสะพานโครงเหล็กชั่วคราว (Temporary Platform) อยู่เหนือบ่อขุด การจะสร้างสะพานโครงเหล็กชั่วคราวเหนือฐานรากแพเพื่อการเทคอนกรีตจึงไม่เหมาะ วิธีที่เลือกใช้คือการใช้รถปั๊มคอนกรีตจำนวน 5-6 คัน กระจายโดยรอบเพื่อขนถ่ายคอนกรีตลงสู่ฐานรากแพโดยทั่วถึง (รูปที่ 10)



รูปที่ 8 โมเดลฐานรากแพขนาด 10,944 ลบ.ม. และแนวการแบ่งส่วนเทคอนกรีตเป็น 6 ส่วน

รูปที่ 9 รอยต่อแนวตั้งเพื่อแบ่งส่วนการเทคอนกรีตฐานรากแพ

รูปที่ 10 การเทคอนกรีตฐานรากแพโดยใช้ปั๊มคอนกรีต จำนวน 5-6 ตัว

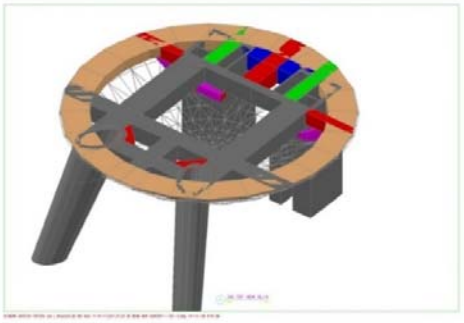
3. พื้น–คานถ่ายน้ำหนัก (Transfer Floor)

โครงสร้างของอาคารทรงกลม (Sphere) ประกอบด้วยเสาเอียงโดยรอบจำนวน 48 ต้น และเสาตั้งแนวดิ่งภายในอาคารวางเรียงตัวเป็นรูปวงกลมจำนวน 24 ต้น ด้วยอาคารทรงกลมนี้ตั้งอยู่บนปล่องลิฟท์และปล่องบันได คอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 ต้น ที่ตั้งอยู่ห่างกัน 25.20 x 40.41 เมตร โดยมีพื้น-คานถ่ายน้ำหนัก (Transfer Floor) เป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62.91 เมตร และมีความหนามากถึง 4.00 เมตร มีปริมาณคอนกรีตรวม 5,430 ลูกบาศก์เมตร ทำให้มีประเด็นข้อพิจารณาหลักในการก่อสร้างสองประการคือ การเทคอนกรีตหลาปริมาณมาก และการจัดหานั่งร้านแบบหล่อตั้งอยู่ที่ระดับความสูง + 27.50 เมตร จะทำอย่างไร

เนื่องจากรูปร่างโครงสร้างพื้น-คานถ่ายน้ำหนักมีความซับซ้อนและมีงานเหล็กเสริมจำนวนมาก ฝ่ายวิศวกรเทคนิคก่อสร้างจึงวางแผนแบ่งส่วนการเทคอนกรีตโครงสร้างออกเป็น 8 ส่วน (รูปที่ 11) โดยส่วนที่มีปริมาณคอนกรีตมากที่สุด คือ 846 ลูกบาศก์เมตร และมีขนาดความลึกมากที่สุดคือ 4.00 เมตร การแก้ปัญหาความร้อนในคอนกรีตซึ่งไม่มีส่วนผสมของเถ้าลอย (Fly

©2015 J. of TCA All rights reserved

Ash) ใช้วิธีท่อน้ำหล่อเย็น (Pipe-Cooling) เช่นเดียวกับการเทคอนกรีตฐานรากแพ (รูปที่ 12)



รูปที่ 11 โมเดลพื้น-คานถ่ายน้ำหนักที่ชั้น 6 ปริมาตร 5,430 ลบ.ม. ต้องตัด แบ่งส่วน เทคอนกรีต 8 ครั้ง

รูปที่ 12 การเทคอนกรีตหลาของพื้น-คานถ่ายน้ำหนัก ซึ่งมีความหนา 4-6 เมตร โดยใช้ระบบหล่อน้ำเย็นเช่นเดียวกับฐานรากแพ

นั่งร้านแบบหล่อสำหรับพื้น-คานถ่ายน้ำหนัก ซึ่งตั้งอยู่สูงกว่าระดับพื้นดิน 27.80 เมตร และต้องรับน้ำหนักคอนกรีตสดมากถึง 13,032 ตัน การตั้งนั่งร้านจำเป็นต้องใช้โครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ อีกทั้งปัญหาน้ำหนักคอนกรีตสดที่สูงมากก็ทำให้ไม่สามารถถ่ายน้ำหนักลงดินได้โดยตรง ต้องถ่ายน้ำหนักลงเสาเข็ม แต่พื้นที่ใต้อาคารทรงกลมก็มีจำนวนเสาเข็มน้อยมาก เพราะพื้นที่บริเวณนี้มีพื้นอาคารเพียงสองชั้นเท่านั้น อีกทั้งตำแหน่งของเสาเข็มที่มีอยู่ตั้งอยู่ห่างกัน 10 ถึง 12 เมตร ต้องมีการออกแบบโครงสร้างชั่วคราว เพื่อถ่ายน้ำหนักคอนกรีตสดลงเสาเข็มแต่ละต้นโดยไม่เกินความสามารถรับน้ำหนักของเสาเข็ม (รูปที่ 13-14)

รูปที่ 13 โครงสร้างเหล็กตั้งขึ้นจากฐานรากเพื่อรองรับน้ำหนักคอนกรีตของพื้น–คานถ่ายน้ำหนักที่ชั้น 6 ระดับความสูง 27.80 เมตร

รูปที่ 14 โครงสร้างเหล็กชั่วคราวรองรับไม้แบบชั้น 6 ใช้เหล็กปริมาณมากเนื่องจากการถ่ายน้ำหนักสูงมาก ต้องลงตำแหน่งที่มีเสาเข็มเท่านั้น

โครงสร้างเหล็กที่ออกแบบเพื่อรับน้ำหนักคอนกรีตสดนี้มีขนาดใหญ่มาก และใช้ปริมาณเหล็กประมาณ 2,000 ตัน ด้วยเหตุที่โครงสร้างค้ำยันรับน้ำหนักต่อต้นสูงมากและค่าการแอ่นตัวของพื้น-คานถ่ายน้ำหนักที่คำนวณไว้ก็มีค่าสูง การลดระดับนั่งร้านค้ำยันชั่วคราวจำเป็นต้องใช้เกลียวสกรูขนาดใหญ่ เพื่อลดระดับนั่งร้านลงมาอย่างช้าๆ เพื่อรองรับการแอ่นตัวสูงมากของพื้น-คานถ่ายน้ำหนัก และมิให้เกิดแรงกระแทกรุนแรง รูปที่ 15 แสดงรอยต่อคานถ่ายน้ำหนักซึ่งมีแรงเฉือนสูงมากทำเป็นรอยต่อตั้งฉาก

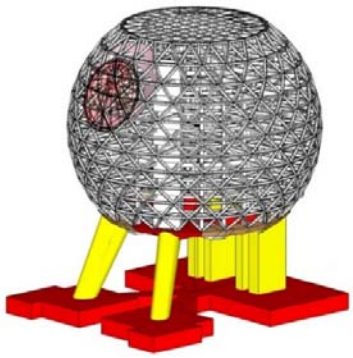
©2015 J. of TCA All rights reserved

โดยมีส่วนครึ่งล่างยื่นออกมา 1 เมตร คล้าย Corbel และใช้ลวดอัดแรงทำการอัดแรงให้รอยต่อมีกำลังอัดเฉลี่ยขั้นต่ำ 7 กก/ ตร.ซม.

รูปที่ 15 รอยต่อของคานถ่ายน้ำหนัก

4. โครงสร้างผิวนอกอาคารทรงกลม (Skeleton Frame of Sphere Building)

เจ้าของโครงการและสถาปนิกมีความประสงค์ให้อาคารทรงกลมแสดงให้เห็นโครงสร้างที่ผิวนอกอาคารเป็นคอนกรีตเปลือยไม่ทาสี (Exposed Concrete Surface) ด้วยรูปลักษณะเสาเอียงไขว้กัน และคานแนวราบที่ขอบอาคารทำให้โครงสร้างอาคารคล้ายลูกตระกร้อที่มีหวายถักสานกันที่ผิวทรงกลม (รูปที่ 16)



รูปที่ 16 โมเดลโครงสร้างอาคารรูปทรงกลม ซึ่งวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SAP

แบบก่อสร้างที่ใช้ประมูลก่อสร้างเป็นโครงสร้างคอนกรีตหล่อในที่ แนวทางก่อสร้างที่เป็นไปได้เพื่อให้ได้โครงสร้างคอนกรีตผิวเปลือยนั้นอาจเป็นไปได้สองทางคือ การจัดทำแบบหล่อคุณภาพสูงเพื่อหล่อคอนกรีตในที่ กับอีกแนวทางคือ การดัดแปลงโครงสร้างให้เป็นชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป ซึ่งทีมวิศวกรเทคนิคการก่อสร้างตัดสินใจเลือกแนวทางหลัง เนื่องจากเล็งเห็นผลดีว่าจะสามารถเตรียมงานชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปได้ล่วงหน้า และจะสามารถควบคุมคุณภาพผิวของชิ้นงานได้ดีกว่า เมื่อศึกษาถึงขั้นตอนการก่อสร้างแล้วพบว่า มีประเด็นปัญหาที่ต้องนำมาคิดวิธีก่อสร้างที่ลึกซึ้งเพิ่มขึ้น

รูปที่ 17 วิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนแต่ละชิ้นตามขั้นตอนการก่อสร้างจริง โดยใช้โปรแกรม SAPPโดยเฉพาะขั้นตอนที่โครงสร้างส่วนล่างยื่นออกไป

ชิ้นส่วนโครงสร้างเสาเอียงและคานซึ่งจะประกอบเป็นโครงสร้างผิวนอกอาคารทรงกลมนี้มีขนาดหน้าตัด 900x900 มม. ลบมุมทั้งสี่ด้าน ทำให้มีหน้าตัดเป็นรูปแปดเหลี่ยม ชิ้นส่วนเสาเอียงในแต่ละชั้นมี 48 ชิ้น และมีคานในแนวราบอีก 24 ชั้น วางตัวถักกันเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยมีความสูงทุกชั้นเท่ากันกล่าวคือ 5.50 เมตร ทำให้มุมที่เกิดจากเสาเอียงและคานชนกันมีค่ามุมเท่ากันเฉพาะในชั้นเดียวกัน แต่ค่ามุมนี้จะลดลงเล็กน้อยทุกๆ ชั้น ดังนั้นเสาเอียงและคานหน้าตัดรูปแปดเหลี่ยมต้องมีหน้าตัดเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยทุกชั้น เพื่อให้ผิวระนาบบรรจบกันได้ (เปรียบเทียบให้เข้าใจง่ายขึ้น ถ้าจิตนาการถึงการมุงหลังคาหน้าจั่วของอาคารรูปตัวแอล ที่ตัวอาคารมิได้ทำมุมตั้งฉากกัน แต่มีมุมเปลี่ยนแปลงไปทีละน้อย เราย่อมไม่สามารถใช้ขนาดหลังคาที่เท่ากันได้ทุกครั้ง) ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการเขียนแบบและวิเคราะห์แรง (รูปที่ 17) ทีมเทคนิคงานก่อสร้างตัดสินใจเลือกให้คงหน้าตัดของเสาเอียงเท่ากันทุกชั้น ขณะที่เปลี่ยนแปลงหน้าตัดคานชั้นละเล็กน้อย เพื่อให้ระนาบของหน้าตัดบรรจบกันได้ เพราะ

©2015 J. of TCA All rights reserved

เห็นว่าเสาเอียงวางตัวเรียงต่อเนื่องกันทั้งอาคาร (สานกันลักษณะคล้ายลูกตะกร้อ) ในขณะที่คานจะวางตัวเรียงแนวนอนตามขอบพื้น เสาเอียงจะมีมุมมองที่เห็นได้รอบตัว ขณะที่คานจะมองเห็นได้เพียงบางมุม การคงหน้าตัดเสาไว้ให้เท่ากันทั้งอาคารแต่เปลี่ยนแปลงหน้าตัดคานชั้นละเล็กน้อยทำให้สังเกตุไม่เห็นความเปลี่ยนแปลง ผลพลอยได้คือ แบบหล่อเสาสามารถใช้ร่วมกันทุกชั้น โดยทำการปรับความยาวเพียงอย่างเดียว ในขณะที่แบบหล่อคานจะทำชั้นละหนึ่งแบบหล่อ (รูปที่ 18, 21-22 และ 25-27) เทคนิคและวิธีการแก้ปัญหาการก่อสร้างโครงสร้างผิวนอกอาคารมีดังต่อไปนี้

รูปที่ 18 โครงสร้างผิวนอกอาคารทรงกลมที่แบ่งออกเป็นชิ้นส่วนหลัก 3 ชนิด คือ เสาเอียง คาน และจุดต่อ (Node) ซึ่งจะหล่อสำเร็จรูปจากโรงงาน ก่อนประกอบติดตั้งที่หน่วยงานก่อสร้าง

รูปที่ 19 การยกชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปวางบนโครงสร้างเหล็กชั่วคราว ซึ่งยื่นออกมาจากขอบอาคารประมาณ 4.50 เมตร

4.1

ชิ้นส่วนโครงสร้างมีน้ำหนักมากประมาณ 1.8 ตันต่อเมตร ชิ้นส่วนคานชั้นที่กึ่งกลางรูปทรงกลมมีช่วงคานยาวมากที่สุด 10.57 เมตร ขณะที่เสาเอียงที่ยาวที่สุดมีระยะศูนย์กลางยาว 9.02 เมตร เพื่อลดน้ำหนัก ชิ้นส่วนให้อยู่ในเกณฑ์ที่จะยกติดตั้งได้ จึงมีแบ่งแยกโครงสร้างชิ้นเป็น 3 ชิ้นส่วนหลักคือ เสาเอียงและคาน และแยกจุดที่โครงสร้างเชื่อมต่อกันออกเป็นอีกชิ้นส่วนหนึ่งคือ Node ผลสรุปจะได้ชิ้นส่วนที่หนักที่สุด คือชิ้นส่วน Node หนัก 16.00 ตัน ส่วนคานที่ยาวที่สุด 7 เมตร หนัก 13.00 ตัน และชิ้นส่วนเสาเอียงหนัก 8.50 ตัน (รูปที่ 19)

4.2

เครื่องจักรที่ใช้ในการติดตั้งมีทางเลือกสองแนวทางคือ Crawler Crane และ Tower Crane บริษัทให้เช่าเครื่องจักรจากประเทศสิงคโปร์ เสนอให้เช่า Crawler Crane หนึ่งตัวขนาด 500 ตัน-เมตร และต่อปลายบูมให้สูงพอที่จะยกชิ้นส่วนได้ แต่มีข้อเสียที่ Crawler Crane ต้องการพื้นดินที่วิ่งโดยรอบอาคารทรงกลม ซึ่งหมายความว่าจะไม่สามารถสร้างอาคารบริวารได้จนกว่าจะติดตั้งชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปแล้วเสร็จ ทางเลือกนี้จึงไม่เหมาะสมกับระยะเวลาก่อสร้าง การเลือกใช้ Tower Crane ที่จะยกชิ้นส่วนหนัก 16 ตัน ทำให้ต้องลงทุนแพงมากในการจัดซื้อ Tower Crane ขนาด 540 ตัน-เมตร จำนวน 4 เครื่อง ติดตั้งโดยรอบอาคารทรงกลมทั้ง 4 ด้าน จึงจะสามารถครอบคลุมการติดตั้งได้ทุกชิ้นส่วน (รูปที่ 20)

รูปที่ 20 การยกชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีน้ำหนักมากถึง 16 ตัน โดยใช้ทาวเวอร์เครนขนาด 540 ตัน-เมตร 4 เครื่อง ตั้งอยู่โดยรอบอาคารทรงกลม

©2015 J. of TCA All rights reserved

4.3

การติดตั้งชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักมากถึง 16 ตัน ในลักษณะที่ยื่นออกจากตัวอาคารประมาณ 4.50 เมตร เป็นอีกปัญหาที่ต้องแก้ปัญหา โดยจัดทำโครงเหล็กรองรับชิ้นส่วนขณะติดตั้ง โครงเหล็กชั่วคราวเหล่านี้ต้องสามารถปรับใช้ได้ทุกชั้นและต้องสามารถปรับระยะอย่างละเอียด (Fine Adjust) ได้ทีมวิศวกรเทคนิคก่อสร้างได้ออกแบบโครงสร้างเหล็ก ประกอบด้วยชิ้นส่วนมากมายเพื่อให้ทำงานในที่สูงได้ง่าย (รูปที่ 21)

รูปที่ 21 การตรวจวัดตำแหน่งโครงเหล็กชั่วคราวให้ถูกต้องและตั้งเผื่อค่าชดเชยการแอ่นตัวของโครงเหล็กให้การปรับระยะละเอียดด้วยสกรูแจ็คน้อยที่สุด เพื่อให้ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปคานและเสาเอียงอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

4.4

เหล็กเสริมในเสาเอียงและคานไม่สามารถจัดรูปแบบเป็นเหล็กเสริมเรียงตัวโดยรอบผิวของโครงสร้างได้ เนื่องจากที่จุดต่อเชื่อม (Node) มีเสาเอียงและคานจำนวน 6 ชิ้น วิ่งมาบรรจบกันจะมีเหล็กเส้นของเสาเอียงและคานที่มาบรรจบกันจำนวนมากเกินกว่าที่จะทะลุผ่านกันได้ ทีมวิศวกรเทคนิคก่อสร้างจึงได้ออกแบบดัดแปลงให้เป็นโครงสร้างเชิงประกอบ (Composite Section) โดยใช้เหล็กแผ่น High Strength ความกว้าง 400 มม. และมีความหนาตั้งแต่ 20 ถึง 40 มม. เป็นเหล็กเสริมหลักในเสาและคาน โดยมีเหล็กเส้นเสริมอยู่โดยรอบที่ผิวคอนกรีต (รูปที่ 22)

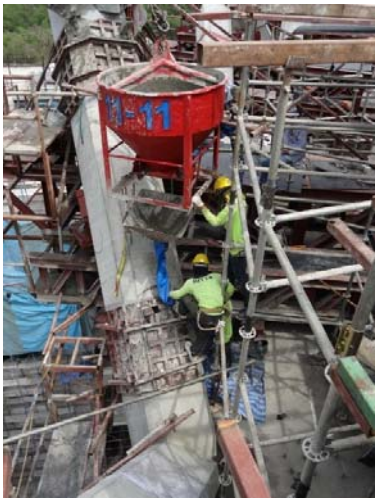
รูปที่ 22 โครงสร้างอาคารเป็นโครงสร้างประเภท Composite Section ประกอบด้วย เหล็กแผ่นกำลังสูงอยู่แกนกลาง เหล็กเสริมข้ออ้อยอยู่รอบนอก และหุ้มด้วยคอนกรีตกำลังอัดสูง

4.5

การต่อชิ้นส่วนเสาเอียงและคานสำเร็จรูป ทีมวิศวกรเทคนิคก่อสร้างเลือกวิธีการต่อเหล็กแผ่นด้วยการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมและก๊าซเฉื่อย (Flux Cored Arc Welding) การควบคุมคุณภาพโดยการทดสอบรอยเชื่อมด้วย Ultrasonic test ตามข้อกำหนด American Welding Society, AWS D1.1/D1.1M: 2010 (Ref.5) สำหรับเหล็กเส้นข้ออ้อยเชื่อมต่อด้วยตัวต่อแบบหนีบ (Cold Pressed Tube Coupler) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ACI หลังจากต่อเชื่อมเหล็กแล้ว จะต้องประกอบแบบหล่อและเทคอนกรีตหุ้มส่วนต่อที่เว้นช่วงระยะ 1 เมตร ด้วยคอนกรีตเหลวพิเศษ (Flow Concrete) ซึ่งมีกำลังอัดเท่ากับชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ออกแบบไว้ กล่าวคือ ระหว่าง 450 ถึง 750 กก./ตร.ซม. แต่เนื่องจากลักษณะการเทคอนกรีตที่ต้องกรอกเข้าแบบหล่อคอนกรีต ซึ่งหุ้มโดยรอบทุกด้านไม่สามารถเขย่าคอนกรีตได้สะดวก จึงต้องใช้คอนกรีตประเภท Self-Compacting Concrete ที่มีค่า Slump Flow ไม่น้อยกว่า 60 ซม. ขณะเทคอนกรีตต้องใช้กรวยและท่อสายยางช่วยให้เกิดแรงดันคอนกรีตให้เต็มแบบหล่อ และใช้ค้อนยางทุบแบบหล่อเพื่อลดฟองอากาศที่ผิวคอนกรีต (รูปที่ 23-24)

©2015 J. of TCA All rights reserved

รูปที่ 23 การเชื่อมต่อเหล็กแผ่นที่แกนกลางด้วยการเชื่อมลวดเชื่อมไฟฟ้าและทดสอบ UT ทุกรอยเชื่อม ก่อนที่จะต่อเหล็กเสริมข้ออ้อยด้วยข้อต่อเหล็กชนิด Cold Pressed Coupler

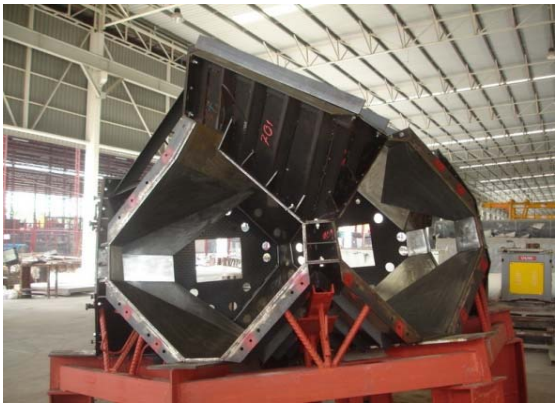


รูปที่ 24 การปิดแบบหล่อและเทคอนกรีตผ่านกรวยลงในรูที่เปิดไว้ที่ผิวบนของแบบหล่อ

4.6

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้หล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูป ซึ่งต้องการกำลังอัดสูง ตั้งแต่ 450-750 กก./ตร.ซม. และสำหรับชิ้นส่วนจุดต่อ (Node) ซึ่งมีความสลับซับซ้อนอย่างยิ่งต้องการ Slump Flow ไม่น้อยกว่า 60 ซม. การหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป ซึ่งมี 3 ชนิด กล่าวคือ ชิ้นส่วนเสาเอียง ชิ้นส่วนคาน และชิ้นส่วนจุดต่อ (Node) เนื่องจากชิ้นงานที่ต้องการเป็นคอนกรีตผิวเปลือย (Exposed Concrete Surface) การหล่อชิ้นส่วนงานจึงต้องมีการทดลองหล่อ (Trial Test) หลายครั้ง จนกระทั่งได้ชิ้นส่วนตัวอย่างผิวสวยที่น่าพอใจ จึงมีการจัดทำคู่มือขั้นตอนการหล่อชิ้นส่วนแต่ละชนิด ซึ่งต้องมีจับเวลาการเทคอนกรีต ตั้งแต่รถคอนกรีตเข้าโรงงานและทดสอบ Slump Flow แล้วจึงให้เทคอนกรีตลงแบบหล่อ แล้วเปิดเครื่องเขย่าคอนกรีตชนิดติดแบบหล่อ (Form Vibrator) เป็นเวลากี่วินาที แล้วจึงพักช่วงอีกกี่วินาที เพื่อให้ฟองอากาศลอยขึ้น ออกจากเนื้อคอนกรีต แล้วจึงเริ่มขั้นตอนการเทคอนกรีตลงแบบหล่อชั้นต่อไปได้ เป็นวงจรซ้ำเรื่อยๆ จนคอนกรีตเต็มแบบหล่อ (รูปที่ 25-26)

รูปที่ 25 เหล็กเสริมสำหรับชิ้นส่วนจุดต่อ Node ซึ่งมีทั้งเหล็กแผ่นและเหล็กข้ออ้อย เหล็กทุกชิ้นต้องถูกตัด ดัด แต่ง ให้ทำมุมตรงกับแบบ Bar List ก่อน นำมาประกอบเข้าด้วยกัน



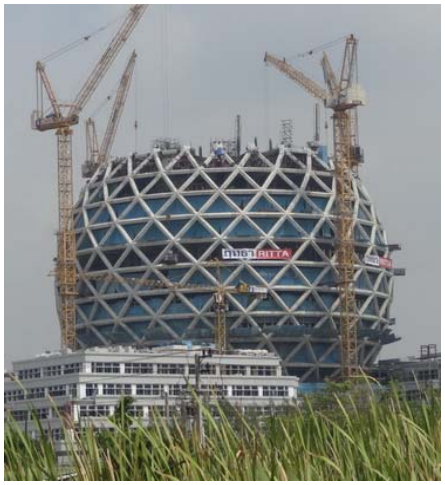
รูปที่ 26 แบบหล่อชิ้นส่วนจุดต่อ Node จัดทำพิเศษโดยมีผิวเหลี่ยมมุมที่ถูกต้อง และต่อเนื่องเป็นระนาบเดียวกันกับผิวของเสาเอียง คาน และพื้นอาคารที่จะมาเชื่อต่อกันที่จุดต่อนี้

©2015 J. of TCA All rights reserved

รูปที่ 27 โครงสร้างเสาเอียงและคานมีผิวเรียบและมีระนาบที่ต่อเนื่องกันอย่างสวยงาม รวมทั้งต่อเนื่องกับพื้นภายในอาคาร

ชิ้นส่วนเสาเอียงซึ่งมีหน้าตัดแปดเหลี่ยม ต้องการผิวเรียบสวยทั้งแปดด้านจึงต้องเทคอนกรีตโดยตั้งแบบหล่อเสาในแนวดิ่งและใช้เครนช่วยในการเทคอนกรีตผ่านกรวยและสายยาง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากชิ้นส่วนคานมีความยาวถึง 7.00 เมตร การเทคอนกรีตต้องเทเป็นชั้นๆ และเปิดเครื่องเขย่าคอนกรีตและจับเวลาการเขย่าคอนกรีตที่แม่นยำ เพื่อลดฟองอากาศที่ผิวชิ้นส่วนคอนกรีตสำหรับชิ้นส่วนจุดต่อ (Node) มีความซับซ้อนของแบบหล่อ และเหล็กเสริมแบบหล่อของชิ้นส่วนจุดต่อ ต้องจัดทำพิเศษเป็น 3 ชิ้นใหญ่ คือ ชิ้นแบบท้อง (Base Mold) และชิ้นส่วนแบบปิดหล่อด้านบน (Top Mold) และชิ้นแบบฝาปิด ด้านข้าง (End Plate) ซึ่งมีเหล็กเสริมทะลุออกมา จะต้องมีตัวจับยึด เหล็กเสริมที่พุ่งทะลุออกมาให้อยู่ในตำแหน่งที่แม่นยำ ± 3 มม. เพื่อให้ไม่เกิดปัญหาขณะต่อประกอบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป เหล็กเสริมของชิ้นส่วนจุดต่อ (Node) มีความซับซ้อนอย่างยิ่ง เพราะมีทั้งเหล็กแผ่นและเหล็กเส้นพุ่งมาจาก 6 ทิศทาง เกิดการทับซ้อนของเหล็กเสริม ทีมงานจึงต้องทดสอบโดยการจัดวางเหล็กเสริมใน 3D AutoCAD เพื่อปรับให้สามารถทำงานได้จริง โดยที่เหล็กเสริมและเหล็กแผ่นต้องตัดและดัดทำมุมที่ถูกต้องก่อนนำมาประกอบรวมกัน ขั้นตอนการเทคอนกรีตต้องแบ่งชั้นการเทคอนกรีตและจับเวลาในการเขย่าคอนกรีตทุกขั้นตอน นอกจากนั้น มุมการวางแบบหล่อของแต่ละชิ้นส่วนถูกวางแผนมาเพื่อให้สามารถเทคอนกรีตได้เต็มแบบหล่อ โดยไม่เกิดการกักฟองอากาศภายในแบบหล่อ ซึ่งปิดเกือบทุกด้านเหลือเพียงช่องเทคอนกรีตเล็กๆ ที่ด้านบนเพื่อให้เทคอนกรีตเข้าแบบเท่านั้น (รูปที่ 25-27)

การบ่มคอนกรีต โรงงานไม่มีระบบบอบไอน้ำ ทีมงานจึงประยุกต์โดยการคลุมผ้าใบ แล้วนำเอาหม้อต้มไอน้ำแบบเคลื่อนที่ได้ต่อท่อสอดเข้าไปพ่นไอน้ำใต้ผ้าใบ และหมุนเวียนทำเช่นนี้ตลอดวัน ไอน้ำที่ถูกผ้าใบกักไว้จะทำให้ชิ้นส่วนถูกบ่มได้ดี รูปที่ 28 แสดงสภาพขณะก่อสร้างอาคารในส่วนล่างของทรงกลม อาคารจะมีลักษณะยื่นออกไปภายนอก เมื่อสร้างจนเกินครึ่งแล้วโครงสร้างอาคารจะสอบกลับเข้าภายในอาคาร แรงในชิ้นส่วนของอาคารจะแปรเปลี่ยนและหักล้างกับแรงที่เกิดขึ้นมาก่อน โปรแกรมคอมพิวเตอร์มีบทบาทในการวิเคราะห์ตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบ

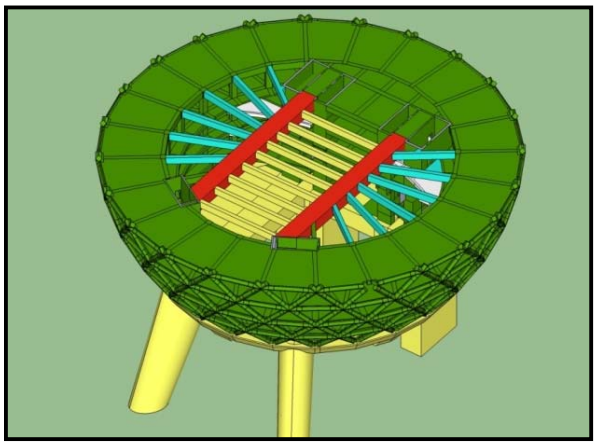


รูปที่ 28 สภาพการก่อสร้างอาคารในส่วนทรงกลม

5. โครงสร้างชั้นที่ 10

อาคารทรงกลมจะมีพื้นอาคารเป็นรูปโดนัทวิ่งอยู่โดยรอบขอบของอาคารเท่านั้น ส่วนภายในเปิดโล่ง มีพื้นเต็มอาคารเฉพาะที่ชั้น 6, 10 และ 17 เท่านั้น ซึ่งจะทำให้เกิดห้องประชุมโถงโล่งขนาดใหญ่ที่ชั้น 6 และ 10 ห้องโถงโล่งที่มีช่วงความยาวถึง 39.00 เมตร และมีความสูงประมาณ 22.0 เมตรทำให้เกิดความยุ่งยากในการก่อสร้าง คานและพื้นชั้น 10 (รูปที่ 29) ทีมวิศวกรเทคนิคก่อสร้างได้ปรับปรุงแบบให้ก่อสร้างง่ายขึ้นโดย ตั้งนั่งร้านค้ำยันขนาดใหญ่จากชั้นที่ 6 เพื่อหล่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กทีมีหน้าตัดขนาด 3.70 x 2.50 เมตร และมีช่วงคาน (Clear Span) 36 เมตร

©2015 J. of TCA All rights reserved



รูปที่ 29 โมเดลโครงสร้างอาคารชั้นที่ 10 ซึ่งมีคานขนาดใหญ่ 2 ตัว วิ่งพาดระหว่างปล่องลิฟท์และปล่องบันได และมีคานชอยพาดระหว่างคานทั้งสองกับเสารอบอาคาร

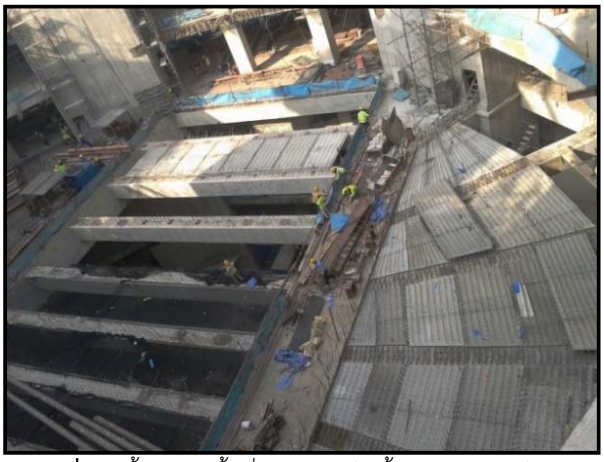
สำหรับคานชอยซึ่งมีหน้าตัด 0.80 x 1.50 ม. มีช่วงคานยาว 14.50 เมตร มีน้ำหนักมากถึง 42 ตันต่อตัว ทีมวิศวกรเทคนิคก่อสร้างได้ปรับเปลี่ยนเป็นคานหล่อสำเร็จรูปกลวงรูปตัวยู เพื่อลดน้ำหนักเหลือ 1.24 ตันต่อเมตร เพื่อให้สามารถหล่อชิ้นส่วนคานช่วงริมซึ่งมีความยาว 10.00 เมตร น้ำหนัก 12.40 ตันต่อตัว โดยหล่อคอนกรีตชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่ชั้นล่างแล้วใช้ Tower Crane ยกขึ้นติดตั้งบนอาคาร (รูปที่ 30)

รูปที่ 30 ชิ้นส่วนคานชอยชั้นที่ 10 ที่มีช่วงยาวไม่เกิน 10 เมตร ถูกหล่อเป็นชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปแบบตัวยู เพื่อลดน้ำหนักให้ทาวเวอร์เครนสามารถยกชิ้นติดตั้งได้

สำหรับคานช่วงในมีน้ำหนักสูงถึง 42 ตัน ซึ่ง Tower Crane ที่มีอยู่ยกไม่ไหว เพื่อลดงานตั้งนั่งร้านไม้แบบเพื่อเทคอนกรีตบนที่สูง จึงใช้วิธีตั้งแบบหล่อคานที่ริมช่องริมเปิดที่ระดับพื้นชั้นที่ 10 เพื่อหล่อเป็นคานคอนกรีตสำเร็จรูป แล้วใส่รางเลื่อนซึ่งกรุด้วย Stainless Steel กับผิวเทปรอน เพื่อลดแรงเสียดทาน ทำให้สามารถนำคานเคลื่อนที่ไปวางในตำแหน่งได้โดยง่าย (รูปที่ 31)

รูปที่ 31 คานชอยชั้นที่ 10 ซึ่งมีช่วงยาว 14.50 เมตร ถูกหล่อเป็นชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่ขอบอาคารด้านหนึ่ง ก่อนจะถูกเลื่อนไปบนราง เพื่อนำไปติดตั้งตามตำแหน่ง

ส่วนพื้นอาคารก็ใช้วิธีหล่อพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีความหนาส่วนล่างเพียง 8 ซม. นำไปวางบนคานแล้ว ผูกเหล็กเสริมบนและเทคอนกรีตทับหน้าเป็น Composite Slab (รูปที่ 32)



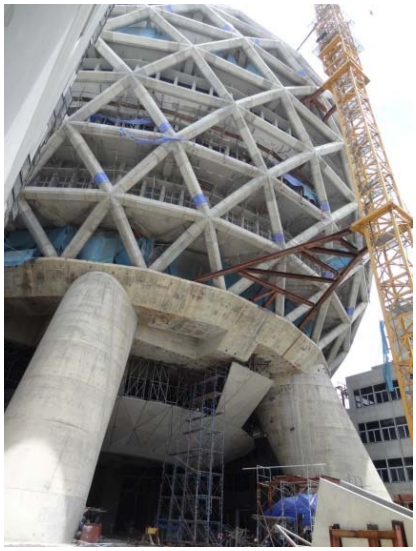
รูปที่ 32 พื้นอาคารชั้นที่ 10 หล่อเป็นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูป โดยมีความหนาครึ่งเดียวและเสริมแรงด้วย Alpha Truss ถูกยกไปติดตั้งบนคานชอย ก่อนผูกเหล็กเสริมชั้นบนและเทคอนกรีตทับหน้า

รูปที่ 33 แสดงสภาพโครงสร้างผิวนอกของอาคารในระหว่างก่อสร้างโครงสร้างที่ผิวนอกของอาคารที่เป็นเสาถักเอียงไปตามผิวของทรงกลม เมื่อก่อสร้างครบเป็นทรงกลมแล้วจะมี

©2015 J. of TCA All rights reserved

ประสิทธิภาพสูงมากในการรับแรง เนื่องจากแรงในเสาเอียงจะเป็นแรงอัด ขณะที่คานรัดโดยรอบจะเป็นแรงดึง โดยมีพื้นและคานภายในอาคารช่วยยึดรั้งคานที่รัดโดยรอบไว้

รูปที่ 33 โครงสร้างที่ผิวนอกของอาคารที่เป็นเสาถักเอียงไปตามผิวของทรงกลม



รูปที่ 34 แรงจากเสาเอียงลงคานพื้นถ่ายน้ำหนักชั้นที่ 6 ก่อนจะถ่ายลงสู่ปล่องลิฟท์และปล่องบันไดทั้งสี่ตำแหน่ง

6. การเขียนแบบ 3 มิติ (3D AutoCAD)

การก่อสร้างอาคารหลังนี้ด้วยเทคนิคที่กล่าวมาทั้งหมดจะเป็นไปไม่ได้หากปราศจากเทคโนโลยีการเขียนแบบ 3 มิติ (3D AutoCAD) ทีมวิศวกรเทคนิคก่อสร้างสามารถใช้แก้ปัญหางานก่อสร้างล่วงหน้าด้วยเทคนิคเขียนแบบ 3 มิติ ทำให้ทราบถึงปัญหาการขัดแย้ง หรือความไม่ลงตัวของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปและเหล็กเสริม นอกจากนี้ การเตรียมชิ้นงานแบบหล่อเหล็กเสริม และนั่งร้านค้ำยันล้วนแต่จัดทำข้อมูลจากแบบ 3 มิติทั้งสิ้น

7. บทสรุป

จุดเด่นของโครงการก่อสร้างอาคารรูปทรงกลมนี้ สามารถสรุปโดยย่อดังนี้

1. อาคารทรงกลม (Sphere) มีโครงสร้างเสา และคานอยู่ที่ผิวนอกของอาคาร เป็นโครงสร้างที่ต้องการแสดงให้เห็นคอนกรีตผิวเปลือยเป็นจุดเด่น โดยปราศจากการทาสีและไม่มีวัสดุทางสถาปัตยกรรมปิดทับ

2. การขุดดินก่อสร้างฐานรากแพ ที่มีความลึก 5.40 เมตร โดยใช้เทคนิคเสาดิน ซีเมนต์ (Soil Cement Column) ทำให้สามารถขุดบ่อดินตั้งฉาก โดยปราศจากค้ำยันภายในทำให้ก่อสร้างได้รวดเร็ว

3. การเทคอนกรีตหลาของฐานรากแพ (Mat Footing) และพื้นคานถ่ายน้ำหนัก (Transfer Floor) ซึ่งมีปริมาณสูงและมีความหนามากถึง 5.40 เมตร โดยที่คอนกรีตไม่มีส่วนผสมเถ้าลอย โดยใช้เทคนิคท่อน้ำหล่อเย็น ผนวกกับการเปิด-ปิดประตูน้ำหล่อเย็น ในการควบคุมอุณหภูมิ

4. การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัดสูงถึง 750 กก./ตร.ซม. และมี Slump Flow 60 ซม. เพื่อใช้ในการเทชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป

5. การหล่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป ซึ่งเป็นโครงสร้างอาคารและมีรูปร่างซับซ้อน ให้สามารถมีผิวคอนกรีตเปลือยที่ดีเยี่ยม เป็นส่วนที่เด่นของอาคาร

6. การติดตั้งชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีน้ำหนักมากถึง 16 ตันต่อชิ้น โดยใช้ Tower Crane และ โครงเหล็กค้ำยันที่ปรับระยะได้ โดยปลอดภัยปราศจากอุบัติเหตุ

7. การแก้ปัญหางานก่อสร้างคานขนาดใหญ่บนที่สูง (ชั้นที่ 10) โดยใช้เทคนิคการหล่อชิ้นส่วนคอนกรีต และเลื่อนไปวางในตำแหน่งที่ต้องการ

©2015 J. of TCA All rights reserved

8. การใช้เทคนิคเขียนแบบ 3 มิติ (3D AutoCAD) ในการตรวจสอบความขัดแย้ง ความไม่ลงตัวของชิ้นงาน อีกทั้งใช้เตรียมชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป ทำให้สามารถประกอบติดตั้งได้อย่างรวดเร็วโดยไม่มีชิ้นส่วนใดผิดพลาดเลย

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.การุญ จันทรางศุ วิศวกรผู้ออกแบบโครงสร้าง ผู้อนุญาตให้ดัดแปลงโครงสร้างบางส่วนให้เหมาะสมกับเทคโนโลยีคอนกรีตสำเร็จรูปที่เลือกใช้ ศ.ดร.สมนึก ตั้งเติมสิริกุล ที่ปรึกษางานคอนกรีตเทคโนโลยี ผศ.ดร.พรพจน์ ตันเส็ง ที่ปรึกษางานปฐพี นางจุรินธร นิทัศวิจิตร และทีมงานวิศวกรโครงสร้างของบริษัท ฤทธา จำกัด ผู้ช่วยดำเนินการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง

9. References

[1] ACI Committee 301, Specification for Structural Concrete, ACI 301-10, American Concrete Institute, Michigan, USA, 2010

[2] ACI Committee 207, Mass Concrete, ACI 207.1R-96, American Concrete Institute, Michigan, USA, 1996

[3] ACI Committee 207, Effect of Restrain, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete, ACI 207.2R-95, American Concrete Institute, Michigan, USA, 1995

[4] ACI Committee 207, Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete ,ACI 207.4R-93 , American Concrete Institute, Michigan, USA, 1993

[5] American Welding Society, Structural Welding Code-Steel, AWS D1.1/D1.1M:2010, American Welding Society, Miami, Florida, USA, 2010

©2015 J. of TCA All rights reserved