

# ประสบการณ์การใช้คอนกรีต ชนิดที่ไหลเข้าแบบได้ง่าย ซึ่งมีส่วนผสมของเถ้าลอยอยู่สูง ในงานเสริมความแข็งแรงให้ฐานรากของอาคารสูง 15 ชั้น

## บทคัดย่อ

เนื่องจากฐานรากของอาคาร ท.101 สูง 15 ชั้น ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จังหวัดนนทบุรี ได้เกิดการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน จึงมีการออกแบบเพื่อเสริมกำลังให้กับคานซึ่งโยงยึดฐานรากคอนกรีต เฉพาะในตำแหน่งที่เกิดความเค้นเฉือน และโมเมนต์ดัดขึ้นสูง โดยยึดตรงแผ่นเหล็กหนา 1 ซม. ด้วย Bolt ให้อยู่ห่างจากด้านข้างของคานซึ่งยึดระหว่างฐานรากเดิมเพื่อเพิ่มความต้านทานแรงเฉือนให้กับคาน และได้เลือกใช้คอนกรีตชนิดที่ไหลเข้าแบบได้ง่าย (Self-Compacting Concrete, SCC) ซึ่งผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงมาก คอนกรีตสดต้องมีคุณสมบัติไหลเข้าแบบได้ง่าย ไม่เกิดการแยกตัว หรือไม่เกิดการติดขัดของเม็ดมวลรวมหยาบที่ช่องแคบใดๆ ในแบบหล่อ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ต้องมีเนื้อแน่น มีการหดตัวน้อย คอนกรีต SCC เป็นของเหลวที่มีหน่วงน้ำหนัก 2.4 ตัน/ลบ.ม. ความดันที่กระทำต่อแบบหล่อจึงสูงมาก ดังนั้น จำเป็นต้องสร้างแบบหล่อที่แข็งแรงกว่าแบบหล่อคอนกรีตปกติ งานเทคอนกรีตลงในแบบหล่อขนาด 120 ลบ.ม. ครั้งนี้ใช้เวลารวมทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง

งานดังกล่าวมีจุดเด่น คือ เป็นงานที่แสดงผลสำเร็จของการเสริมกำลังให้ฐานรากของอาคาร ท.101 โดยใช้คอนกรีตที่มีเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นส่วนผสม แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในปริมาณที่สูงถึง 61% โดยน้ำหนัก ซึ่งนับว่าอยู่ในระดับที่สูงมาก หรืออาจสูงที่สุด ที่เคยใช้กับงานคอนกรีตของโครงสร้างที่สำคัญในประเทศไทย โดยในงานนี้ได้ใช้คอนกรีต SCC เทหุ้มแผ่นเหล็ก และยึดเสริมกำลังให้กับคานเดิม แทนที่จะใช้วัสดุ Non-Shrink Grout ซึ่งเป็นวัสดุพิเศษที่ต้องนำเข้าไปในราคาสูง และในการผสมคอนกรีตครั้งนี้ ได้ใช้น้ำในปริมาณที่ต่ำมาก คือ มีค่า Water/Binder เพียง 0.27 เพื่อทำให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่น มีการหดตัวน้อย และมีกำลังอัดขึ้นได้สูงในเวลาอันสั้น ซึ่งในงานคอนกรีตทั่วไป จะไม่มีใครมีผู้ใดกล้าใช้ปริมาณน้ำที่ต่ำขนาดนี้ผสมคอนกรีต เพราะ

คอนกรีตจะไหลเข้าแบบได้ยาก แต่ในงานนี้ เราสามารถทำให้คอนกรีตเกิดคุณสมบัติพิเศษ สามารถไหลได้เหมือนของเหลวชั้นๆ และใช้เทกรอกเข้าไปในแบบหล่อที่มีช่องเปิดโตเพียง 5-9 ซม. และลิกไนต์ไม่น้อยกว่า 1.6 ม. ได้โดยสะดวก นอกจากนั้น ยังไม่ต้องใช้การสั่นสะเทือนจากเครื่องจักรกลใดๆ เข้ามาช่วยเลย คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงถึง 450 กก./ตร.ซม. มีการหดตัวน้อยมาก และมีเนื้อแน่น ทึบน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้มีความคงทนต่อสิ่งแวดล้อมได้ดีขึ้น ซึ่งนับว่าเนื้อคอนกรีต SCC มีคุณภาพที่สูงกว่าเนื้อคอนกรีตเดิมของอาคาร เนื่องจากผลงานการใช้คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะในครั้งนี้ แสดงให้เห็นผลที่ดีได้หลายอย่างในคราวเดียวกัน คือ มีกระบวนการทำงานที่ง่าย เกิดผลงานที่มีคุณภาพสูง และประหยัดค่าใช้จ่ายของ กฟผ. ได้มาก จึงนับว่าเป็นกรณีที่น่าสนใจ ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยครั้งมากในประเทศไทย ทั้งเป็นตัวอย่างการใช้งานคอนกรีตที่มีคุณสมบัติพิเศษที่จะเป็นประโยชน์ต่อวงการก่อสร้างของไทยด้วย

## 1. บทนำ

อาคาร ท.101 เป็นอาคาร 15 ชั้น สูงประมาณ 47 ม. กว้าง-ยาว ประมาณ 46x76 ม. อยู่ที่สำนักงานกลางของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี แต่เดิมได้ก่อสร้างอาคารนี้ในคราวแรก 14 ชั้น และเริ่มใช้งานเมื่อปี พ.ศ. 2530 ฐานรากส่วนกลางของอาคารที่รองรับช่องลิฟต์ (Lift Core) เป็นฐานรากแพนเสาเข็มกลุ่ม (Mat Foundation on Piles) ขนาดประมาณ 30x31 ม. และหนา 1.6 ม. นอกจากนั้นเป็นฐานรากบนเสาเข็มกลุ่ม ซึ่งรับน้ำหนักจากเสาอาคาร หรือ Shear Wall รูปตัว C ซึ่งอยู่ระหว่างช่วงเสาที่ห่างกัน 8 ม. ช่วงเว้นช่วง เรียงอยู่สองข้างของตามแนวยาวอาคาร เสาเข็มคอนกรีตทั้งหมดเป็นเสาเข็มดอกลีเหลี่ยม ขนาด 35x35 ซม. มีระยะเรียงห่างกัน 1.4-1.6 ม.

และปลายเสาเชื่อมอยู่ที่ระดับ -24 ม. ใต้ระดับดินเดิม โดย ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยได้ตันละ 50 ตัน แต่ละ ฐานรากที่รองรับเสาอาคารถูกโยงยึดเข้าด้วยกันด้วยคานคอนกรีต ขนาดกว้าง 1.8-2.9 ม. ลึก 1.6 ม. ส่วนใหญ่ช่วงคานระหว่าง เสาจะกว้างประมาณ 8 ม. และมีเสาเชื่อมตอกคอนกรีตเรียง รองรับอยู่ที่คานที่ระยะห่างประมาณ 1.1-1.4 ม. แผ่นพื้นอาคาร ทุกชั้นเป็นแผ่นพื้นไร้คานชนิดอัดแรงภายหลัง (Post-Tensioned Flat Slab) หนาประมาณ 18 ซม. ก่อนการ ก่อสร้างได้มีการทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักของ เสาเชื่อมเดี่ยวด้วย Static Load Test พบว่า เสาเชื่อมเดี่ยว สามารถรับน้ำหนักประลัยได้ไม่น้อยกว่า 125 ตัน และมีการ ทรุดตัวเพียง 5 มม.

การทรุดตัวของอาคารเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่มี การก่อสร้างระหว่างปี พ.ศ. 2528-2530 เมื่อเริ่มใช้งานในปี พ.ศ. 2530 พบว่า อัตราการทรุดตัวเริ่มช้าลงในปี พ.ศ. 2531 แต่ การทรุดตัวแตกต่างกันระหว่างฐานราก กลับปรากฏขึ้นอย่าง เห็นได้ชัด และอาคารโดยรวมได้ทรุดตัวลงเป็นแอ่งกระทะ พบการทรุดตัวที่ส่วนกลางอาคารมากที่สุดถึง 77.2 มม.

เมื่อพิจารณาผลการเจาะสำรวจดินในบริเวณตัวอาคาร ที่ได้ทำไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2526 พบว่า ชั้นดินมีลักษณะโดยเฉลี่ย ดังนี้

ความลึก (ม.)	ชนิดของดิน
0.0 - 1.2	Fill Material
1.2 - 14.0	Soft to Medium Silty Clay
14.0 - 18.5	Medium Dense Silty Sand
18.5 - 33.0	Very Stiff to Hard Clay
33.0 - 36.0	Medium to Stiff Low Plastic Silty Clay, Compressible
36.0 - 37.0	Medium Dense to Dense Silty Sand
> 37.0	Very Stiff to Hard Clay

ในปี พ.ศ. 2534 เมื่ออัตราการทรุดตัวต่ำลงจนใกล้ จะหยุดนิ่ง แต่ปริมาณการทรุดตัวแตกต่างกันระหว่างโคนเสา ซึ่งห่างกัน 8 ม. ยังคงมีค่าอยู่สูงที่สุดถึงระดับ 24 มม. จึง ก่อให้เกิดโมเมนต์ดัด และความเค้นเฉือนปริมาณสูงขึ้นในคาน ซึ่งโยงยึดระหว่างฐานรากรองรับเสา หรือ Shear Wall โดยเฉพาะคานที่มีหน้าตัดแข็งแรงน้อยที่สุดในระบบฐานราก เช่น คานช่วงที่หน้าแคบและสั้น ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (ค่า FS) ของคานในตำแหน่งดังกล่าวจะต่ำลง และเมื่อปริมาณการ ทรุดตัวที่แตกต่างระหว่างเสาเพิ่มขึ้น ค่านี้จะลดต่ำลงอีก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากการต่อเติมอาคาร

ชั้น 15 ในช่วงปี พ.ศ. 2535-2536 และในปี พ.ศ. 2537 มีการ เปลี่ยนไปใช้โต๊ะทำงานและฉากกันแบ่งพื้นที่ทำงานชนิด Open Plan จึงทำให้มีน้ำหนักจรมากขึ้น การทรุดตัวที่แตกต่างกัน ระหว่างฐานรากในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งใกล้จะหยุดนิ่งแล้ว ก็ กลับเพิ่มปริมาณขึ้นอีก และเมื่อในช่วงต้นปี พ.ศ. 2544 การ ทรุดตัวของอาคารก็ยังไม่หยุดลง

## 2. การกำหนดวิธีเสริมกำลังให้ฐานรากอาคาร

### 2.1 ผลวิเคราะห์ข้อมูลการทรุดตัว และการพิจารณา เลือกวิธีแก้ไข

ผลการวิเคราะห์การทรุดตัวของโครงสร้างเมื่อเดือน กุมภาพันธ์ 2544 บ่งชี้ว่า มีการทรุดตัวแตกต่างกันเพิ่มขึ้นอีก ระหว่างช่วงเสาซึ่งห่างกัน 8 ม. ในบางช่วง เช่น เพิ่มขึ้นจาก 24 มม. เป็น 27 มม. ซึ่งคานเดิมก่อนหน้านั้น ก็อยู่ในสภาพ ใกล้วิกฤตแล้ว อัตราการทรุดตัวต่อช่วงเสาที่เกิดขึ้นนี้สูงกว่า 1/300 และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยในคานช่วงนั้นอาจ ลดลงใกล้ 1.5

ในการขุดเปิดหน้าดินเพื่อตรวจสอบสภาพหลังคานที่ โยงยึดฐานรากในตำแหน่งใกล้โคนเสา ซึ่งวิเคราะห์ได้แล้วว่า เกิดโมเมนต์ดัดขึ้นสูงกว่าตำแหน่งอื่น กลับไม่พบว่ามียรอยร้าว ที่ผิวหลังคานในตำแหน่งนั้น ทั้งนี้ อาจเป็นด้วยสาเหตุ สองประการ คือ ประการแรก หน้าตัดของคานจริงในส่วนที่ใกล้ โคนเสา ตั้งแต่ระยะ 180 ซม. ก่อนถึงผิวหน้าเสา มีลักษณะ หายกว้างขึ้นเป็นมุม 45° ดังนั้น หน้าตัดคานช่วงประชิด โคนเสาจึงมีขนาดใหญ่กว่าขนาดหน้าตัดปกติที่ส่วนกลางคานซึ่ง นำไปใช้คำนวณวิเคราะห์ความเค้น (Stress) ที่เกิดในโครงสร้าง ความเค้นที่เกิดขึ้นจริงจึงต่ำกว่าความเค้นที่วิเคราะห์ได้ ประการ ที่ 2 กำลังอัดจริงของคอนกรีตในเนื้อคานอาจสูงกว่ากำลังอัด 240 กก./ตร.ซม. ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบและคำนวณ วิเคราะห์ความเค้นที่เกิดในโครงสร้าง

เนื่องจากพบว่า ปริมาณการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่าง ช่วงเสายังคงเพิ่มขึ้นตลอดเวลา จึงได้พิจารณาทางเลือกต่างๆ ที่จะเพิ่มความมั่นคงให้อาคารมีความปลอดภัยเพิ่มขึ้น ดังนี้

#### 1. ลดสาเหตุที่ทำให้เกิดการทรุดตัวแตกต่างกันของ ฐานราก โดย

1.1 จัดการกระจายน้ำหนักบรรทุกบนอาคารให้ เหมาะสมขึ้น โดยให้บริเวณกลางอาคารทุกชั้นรับน้ำหนักเฉลี่ย ไม่เกิน 350 กก./ตร.ม. และให้เคลื่อนย้ายสิ่งที่มีน้ำหนักมาก เช่น ตู้เก็บเอกสารไปไว้ในตำแหน่ง Shear Wall ตัว C ที่เรียง อยู่รอบอาคาร เนื่องจากได้ออกแบบไว้ให้รับน้ำหนักถึง 500 กก./ตร.ม. เพื่อช่วยลดอัตราการทรุดตัวที่ส่วนกลางอาคารลง

1.2 ปรับปรุงสภาพชั้นดิน Silty Clay ที่ระดับความลึก 33 ถึง -36 ม. ให้แข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งชั้นดินนี้เป็นชั้นดินที่ยังยุบตัวได้มาก การปรับปรุงเพิ่มกำลังให้ดิน อาจทำได้โดยการฉีดน้ำปูนซีเมนต์ หรือสารเคมีบางชนิดเข้าไปผสมกับดิน ด้วยวิธี Jet Grouting

2. เสริมความแข็งแรงให้คานโยงยึดฐานรากของอาคารมีความสามารถต้านรับความเค้นเฉือนและโมเมนต์ดัดซึ่งเกิดขึ้นจากการทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของฐานรากอาคารเพิ่มขึ้น

แม้ทางเลือกที่ 1.2 จะเป็นการแก้ปัญหาที่ตรงจุดซึ่งเป็นสาเหตุหลัก แต่ได้พิจารณาตัดทางเลือกนี้ออกไป เนื่องจากมีความเป็นไปได้น้อย เพราะมีเวลาแก้ไขปัญหาค่อนข้างจำกัด ทั้งยังมีโอกาสจะเกิดความเสียหายขึ้นใหม่ในระหว่างการแก้ไขคือ

1. จะหาผู้ที่มีอุปกรณ์จะฉีดน้ำปูนที่เหมาะสมได้ยาก เมื่อต้องการปรับปรุงดินที่ระดับความลึกถึง -36 ม. อย่างต่อเนื่อง ภายใต้อาคารที่มีช่องว่างสำหรับทำงานในทางดิ่งไม่เกิน 3.5 ม. และยังกำหนดให้ทำงานเสร็จภายในเวลาที่จำกัด แม้หาผู้รับจ้างได้ ประเมินว่าราคาค่าปรับปรุงด้วยวิธีนี้จะสูงมาก

2. ในกระบวนการ Jet Grouting ช่วงต้น โครงสร้างดินจะถูกทำลายจนอยู่ในสภาพน้ำโคลน ก่อนหน้าที่ดินจะกลับแข็งตัวขึ้นมาได้อีกครั้ง จะต้องใช้เวลาน้อยกว่าสองสัปดาห์ ดังนั้น จึงมีความเสี่ยงสูงที่ดินในจุดซึ่งปรับปรุงนั้นจะทรุดตัวเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเวลาที่ดินยังไม่แข็งตัว จึงอาจก่อความเสียหายให้กับโครงสร้างอาคารในตำแหน่งซึ่งประชิดอยู่กับฐานรากนั้นๆ ด้วย

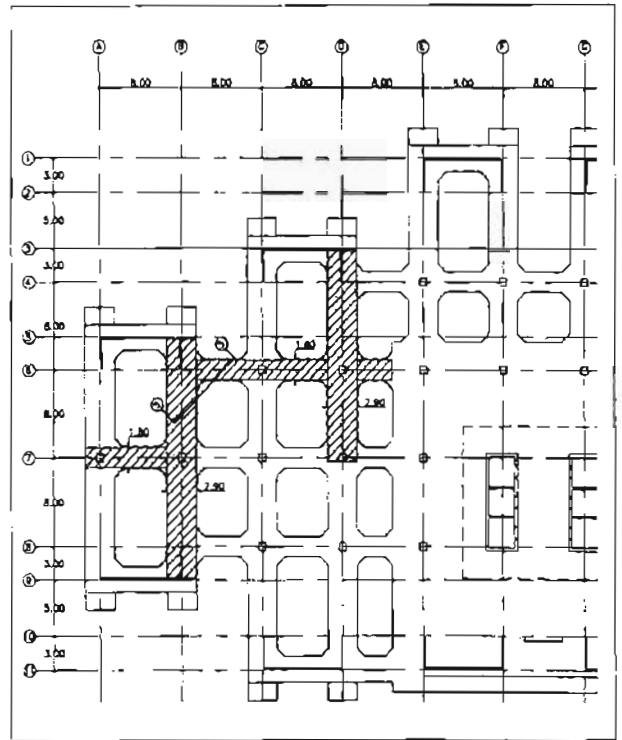
ดังนั้น ในการแก้ปัญหาจึงได้เลือกให้วิธีการกระจายน้ำหนักบรรทุก และวิธีการเสริมกำลังให้คานบางคานประกอบกัน

## 2.2 เกณฑ์การเลือกกำหนดตำแหน่งคานที่จะเสริมกำลัง

ในการเลือกตำแหน่งที่จะเสริมความมั่นคงให้กับคานโยงยึดฐานราก ได้เลือกเสริมกำลังให้กับคานเฉพาะที่วิเคราะห์แล้วพบว่า อัตราส่วนการทรุดตัวแตกต่างกันระหว่างช่วงเสาที่ประชิดกันต่อช่วงความกว้างระหว่างเสานั้น ( $\Delta/L$ ) เข้าใกล้หรือสูงกว่า  $1/300$  เนื่องจากผลการวิเคราะห์ความเค้นในโครงสร้างพบว่า คานในตำแหน่งดังกล่าวได้รับความเค้นเฉือนและโมเมนต์ดัดในระดับที่เข้าใกล้กำลังสูงสุดที่คานจะสามารถรับได้ (รูปที่ 1)

## 2.3 วิธีการและขั้นตอนการเสริมกำลังให้กับฐานรากอาคาร

1. ขุดเปิดดินในตำแหน่งคานยึดฐานรากที่จะเสริม



รูปที่ 1 ผังคานยึดฐานรากในบริเวณที่มีการเสริมกำลัง (บริเวณที่รุนแรง)

ความแข็งแรงจนถึงระดับท้องคาน ซึ่งลึกจากผิวพื้นเดิมประมาณ 2.2 ม.

2. สกัดผิวคอนกรีตของคานในส่วนที่ต้องการให้ขรุขระ เพื่อให้คอนกรีตที่จะเทใหม่สามารถยึดเกาะได้ดี

3. เจาะรูด้านข้างคานเพื่อฝัง Bolt ขนาด DB 20 มม. ทุกระยะห่างประมาณ 50 ซม. ในแนวราบ และ 57 ซม. ในแนวตั้ง โดยยึด Bolt เข้ากับคานเดิมด้วยการ Epoxy HILTI HIT-HY150

4. ติดตั้งแผ่นเหล็กเจาะรูหนา 10 มม. สูงประมาณ 1.5-2.0 ม. เพื่อเพิ่มกำลังรับความเค้นเฉือนให้กับคานเดิมโดยยึดแผ่นเหล็กเข้ากับด้านข้างของคานทั้งสองด้าน ด้วย Bolt ที่ฝังไว้ก่อนแล้ว โดยให้ตำแหน่งของแผ่นเหล็กด้านในห่างจากผิวคานคอนกรีตเดิมประมาณ 5 ซม.

5. ติดตั้งเหล็ก DOWEL DB 20 มม. ยาว 50 ซม. โดยฝังลึก 20 ซม. ยึดตั้งฉากกับหลังคานทุกระยะประมาณ 50 ซม. และติดตั้งเหล็กเสริม DB 28 มม. จำนวน 27 เส้น ที่ระดับเหนือหลังคานเดิมประมาณ 35-45 ซม. ขนานไปตามแนวคานให้เป็นเหล็กเสริมคอนกรีตส่วนที่จะเททับหลังคานหนาขึ้นอีก 50 ซม. เพื่อเพิ่มกำลังในการรับโมเมนต์ดัดให้กับคาน (รูปที่ 2)

6. ติดตั้งเชื่อมตะแกรงตาข่ายซึ่งมีขนาดเส้นลวดโค 4 มม. และช่องตาข่ายมีขนาด 20x20 ตร.ซม. โดยยึดให้ตาข่ายห่างจากผิวแบบหล่อคอนกรีตด้านนอกประมาณ 3 ซม. เพื่อ

ช่วยเสริมแรงด้านการหดตัวของผิวคอนกรีตส่วนใหม่

7. ตัดตั้งแบบหล่อคอนกรีตและค้ำยันให้แข็งแรงพอที่จะรับแรงค้ำยันข้างของคอนกรีตเหลวชนิดที่ไหลเข้าแบบได้ง่าย (Self-Compacting Concrete, SCC)

8. เทคอนกรีต SCC ซึ่งมีกำลังอัดออกแบบของแท่งตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 240 กก./ตร.ซม. เข้าแบบหล่อ ซึ่งมีปริมาณคอนกรีตตามแบบจำนวน 120 ลบ.ม. และให้เทอย่างต่อเนื่องจนแล้วเสร็จใน 12 ชั่วโมง

9. บ่มคอนกรีตด้วยการรดน้ำเป็นระยะๆ บนผ้ากระสอบที่ปูคลุมคาน เพื่อลดการระเหยไม่น้อยกว่า 7 วัน

10. ถอดแบบ และถมกลับกลบช่องว่างระหว่างคานยึดฐานรากด้วยทรายหยาบอัดเป็นชั้นๆ หนาชั้นละ 30 ซม. จนถึงระดับหลังคาน

11. ถมและบดอัดปรับระดับตามแบบด้วยหินคลุกแล้วทำผิวแอสฟัลต์ทับหน้าคลุมบริเวณหลังคานที่เสริมความแข็งแรงและบริเวณที่ถมกลับทั้งหมดให้อยู่ในสภาพเดิม

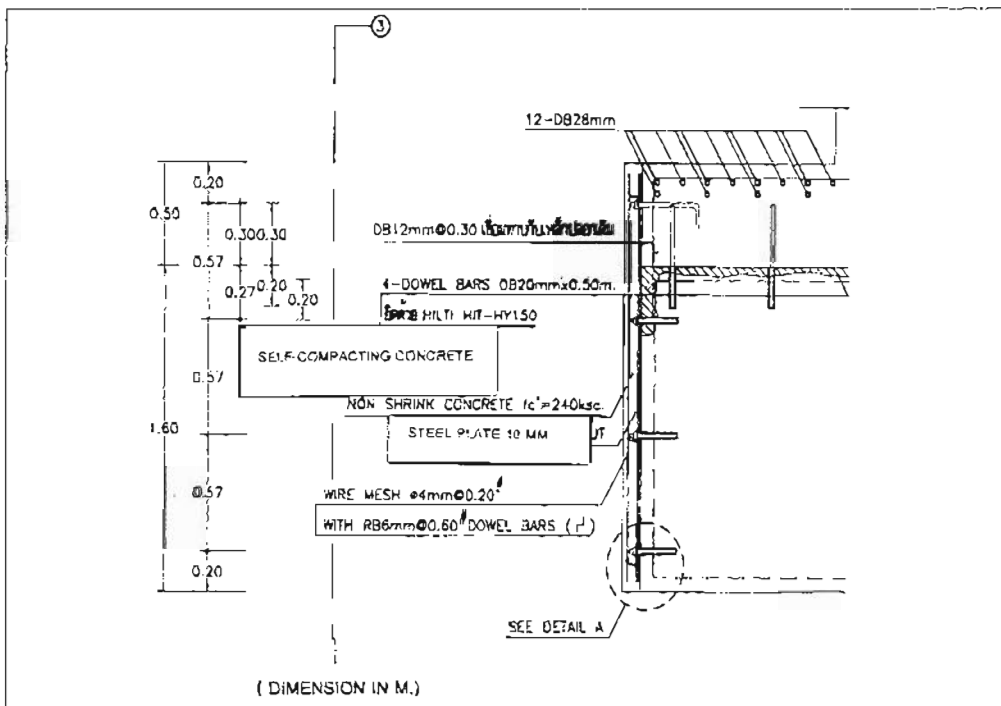
### 3. การกำหนดส่วนผสมคอนกรีต SCC และการทดสอบคอนกรีตลงในแบบจำลอง

3.1 ลักษณะพิเศษของคอนกรีต SCC ที่ต้องการในขณะเทเนื่องจากช่องว่างที่จะเทรอกคอนกรีตใหม่หุ้มแผ่นเหล็กและประสานเข้ากับเนื้อกานคอนกรีตเดิมกว้างเพียง 9 ซม.

และลึกกว่า 1.6 ม. ในสภาพดังกล่าวไม่สามารถใช้คอนกรีตปกติให้เกิดผลดีกับงานนี้ได้ จึงต้องออกแบบคอนกรีตให้มีคุณสมบัติพิเศษที่เหมาะสมกับงานนี้โดยเฉพาะคือ คอนกรีตสดต้องไหลเข้าแบบได้ง่ายโดยไม่ต้องใช้เครื่องจี้แบบสั่นสะเทือนเข้าช่วย เมื่อหินต้องไหลไปพร้อมน้ำปูนทรายโดยไม่ต้องติดขัดกับเหล็กเสริม ทั้งต้องไม่เกิดการแยกตัว และการเยิ้มน้ำของคอนกรีตต้องไม่เกิดขึ้น ก่อนเทคอนกรีตลงแบบหล่อ เส้นผ่าศูนย์กลางของการไหลแผ่ของคอนกรีตสดจากการทดสอบ Slump Flow ควรอยู่ระหว่าง 55-70 ซม. และต้องรักษาความสามารถในการเทได้ให้อยู่ในระดับต่อเนื่องกันในระหว่างการเทคอนกรีตไม่น้อยกว่าสองชั่วโมง

### 3.2 เกณฑ์ในการกำหนดวัสดุ และออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

- ใช้เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ไม่น้อยกว่า 50% โดยน้ำหนัก
- ใช้อัตราส่วน Water/Binder (w/b) ไม่เกิน 0.3
- ใช้หินย่อยขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 10 มม.
- ใช้น้ำยา Super Plasticizer เป็นสารพิเศษช่วยลดน้ำอย่างมาก
- ออกแบบส่วนผสมโดยมุ่งให้ได้ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดทดสอบของแท่งตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐานที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 175 กก./ตร.ซม. และ 350 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางแสดงการยึดแผ่นเหล็กเข้ากับข้างคานเดิมด้วย Bolt

- ค่าการหดตัวแบบ Autogeneous Shrinkage ที่อายุ 28 วัน ไม่เกิน 250 Microstrain (หดตัวได้ไม่เกิน 250 หน่วยในล้านหน่วยของความยาว)

### 3.3 ผลการเลือกส่วนผสมคอนกรีตจากห้องปฏิบัติการ

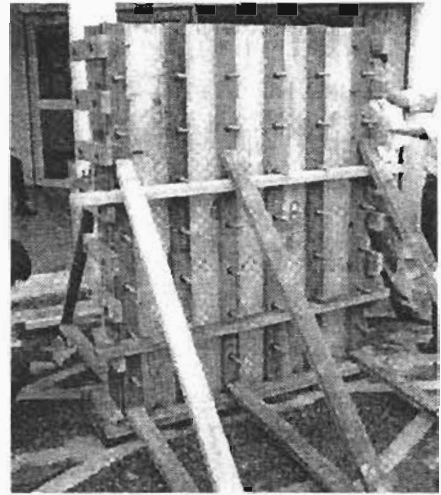
หลังจากการทดลองปรับเปลี่ยนส่วนผสมคอนกรีต SCC ในห้องปฏิบัติการประมาณ 4 ครั้ง ได้เลือกส่วนผสมที่ให้ผลตามต้องการได้ดีที่สุดมาผลิตคอนกรีต SCC เพื่อทดลองเทลงในแบบจำลองที่สำนักงานกลาง กฟผ. คอนกรีต SCC ที่เลือกใช้ มีน้ำหนักของส่วนผสมแต่ละชนิดต่อ ลบ.ม. ของคอนกรีตดังกล่าวนี้

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ 1 200 กก. กล้วยโลกในดีแม่เกาะ 320 กก. หินย่อย (ขนาดโคสุด 10 มม.) 1,026 กก. หวาย 710 กก. น้ำ 135 กก. และสารผสมเพิ่ม Superplasticizer ประเภท Polycarboxylate (Sika Viscocrete) 6,240 ลบ.ซม. จะเห็นว่า ส่วนผสมนี้ได้ใช้กล้วยผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ถึง 61% โดยน้ำหนัก มีค่า w/b เพียง 0.27 เมื่อวัดปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตสดได้ 2.2% จากการตรวจสอบการสูญเสียความสามารถในการเทได้ (Slump Loss) พบว่าคอนกรีต SCC สามารถรักษาคูณสมบัติในการเทได้นานเพียงพอตามกำหนด

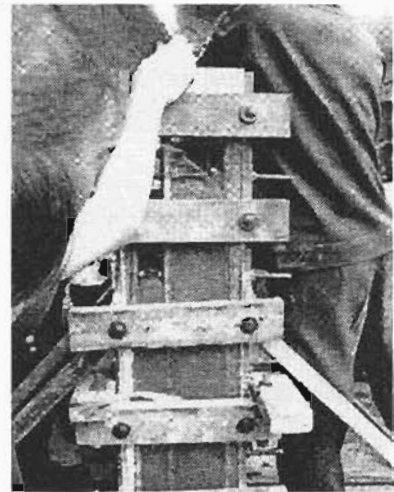
### 3.4 การทดลองเทคอนกรีต SCC ลงในแบบจำลอง

ในวันที่ 10 ตุลาคม พ.ศ. 2545 ได้ทดลองเทคอนกรีต SCC ลงในแบบจำลองซึ่งกว้าง 1.4 ม. สูง 1.6 ม. และหนา 15 ซม. ภายในแบบหล่อ ได้ยึดแผ่นไม้อัดหนา 1 ซม. (แทนที่แผ่นเหล็ก) ไว้กลางแบบหล่อในแนวตั้ง โดยผิวด้านหนึ่งของแผ่นไม้อัดห่างจากผนังด้านในแบบหล่อเพียง 5 ซม. และขอบด้านล่างลอยอยู่สูงเหนือกันแบบ 5 ซม. (รูปที่ 3) ใช้กระจกใส่กันแบบหล่อด้านข้าง เพื่อให้สังเกตเห็นการไหลของคอนกรีตในด้านภาคตัดขวางได้สะดวก ในการทดลองได้เทคอนกรีตที่ผ่านการผสมน้ำมานานสองชั่วโมง ให้อไหลผ่านช่องเปิดซึ่งกว้าง 9 ซม. ลงไปได้ถึงกันแบบ และคอนกรีตสามารถไหลย้อนขึ้นมามากด้านของแผ่นไม้อัดทางช่องที่กว้างเพียง 5 ซม. จนเต็มแบบได้โดยไม่ต้องใช้การจี้เขี่ยเข้าช่วย (รูปที่ 4)

หลังจากนั้นประมาณหนึ่งสัปดาห์ เมื่อถอดแบบพบว่าคอนกรีตมีเนื้อแน่น ผิวชิ้นงานเรียบร้อยดี นอกจากนั้น ผลการทดสอบกำลังอัดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่หล่อขึ้นในวันผสมผ่านการบ่มโดยวิธีพรมน้ำให้ชื้น และเก็บใส่ถุงพลาสติกหุ้มกันแน่นสองชั้น พบว่า กำลังอัดที่อายุ 7 วัน และที่อายุ 28 วัน ขึ้นสูงถึงระดับ 300 กก./ตร.ซม. และ 400 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ



รูปที่ 3 แบบจำลองที่ยึดตรึงอย่างแข็งแรงสำหรับทดสอบเทคอนกรีต SCC



รูปที่ 4 คอนกรีต SCC ไหลลงช่องทางกว้าง 9 ซม. และไหลย้อนขึ้นมาช่องทางข้างที่แคบ 5 ซม. ได้เอง โดยไม่ใช้การจี้เขี่ยเข้าช่วย

## 4. งานเทคอนกรีตเพื่อเสริมกำลังให้ฐานราก

### 4.1 งานทดลองยืนยันคุณสมบัติของส่วนผสมคอนกรีต

ก่อนหน้าที่จะนำส่วนผสมคอนกรีตที่ได้ใช้เทลงในแบบจำลองครั้งแรกไปใช้งาน ได้มีการทดลองผสมคอนกรีตอีกครั้งด้วยส่วนผสมเดิมในวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2545 โดยปรับวิธีการเติมน้ำยา Superplasticizer ชนิดเดิม ในช่วงแรกผสมเพียง 5,200 มล. และเติมน้ำยาเพิ่มอีกครั้งละ 520 มล. เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที และ 90 นาที ปรากฏว่า ความสามารถในการไหลแผ่ลดลงเร็วขึ้นในช่วงต้น แต่ก็สามารถเพิ่มให้กลับคืนมาอยู่ในช่วงที่ต้องการได้ทุกครั้งที่ได้เติมน้ำยา Superplasticizer ลงไป ความสามารถในการไหลแผ่ในช่วงที่กำหนดนี้คงอยู่น้อยกว่าสองชั่วโมงหลังการผสม ส่วนกำลังอัดของ



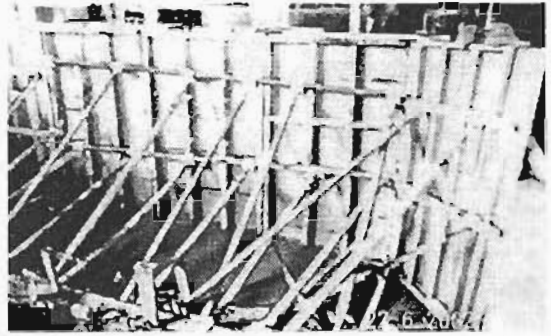
คอนกรีตที่อายุ 28 วัน ก่ออยู่ในระดับไม่ต่ำกว่า 400 กก./ตร.ซม. เช่นเดียวกัน

#### 4.2 งานเทคอนกรีตเพื่อเสริมกำลังให้ฐานรากอาคาร

ในวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2545 ได้มีงานเทคอนกรีต SCC เพื่อเสริมกำลังให้ฐานรากอาคารลงในแบบหล่อที่มีปริมาณ 120 ลบ.ม. ซึ่งได้ค้ำยันไว้เรียบร้อยแล้ว โดยมีเป้าหมายการเทให้แล้วเสร็จภายในเวลาไม่เกิน 6 ชั่วโมง งานเทในช่วงต้นเริ่มในเวลาประมาณ 10.00 น. และดำเนินไปได้ด้วยความราบรื่นในอัตราเร็วประมาณ 5 ลบ.ม./10 นาที จนกระทั่งเทไปได้ประมาณ 25 ลบ.ม. ก็เกิดปัญหาคอนกรีต SCC ดันแบบหล่อบางส่วนจนไม้แบบขยับห่างออกจากตำแหน่งเดิม และยกตัวลอยขึ้น เหล็กค้ำยันแบบหล่อบางชิ้นรับแรงดันจนโค้งงอ คอนกรีตที่ยังเหลวอยู่จึงไหลลลอคได้ไม้แบบออกไปจากแบบหล่อซึ่งเสียรูปแล้วจนเกือบหมด ผู้รับจ้างได้แก้ไขปัญหามาโดยเพิ่มเหล็กค้ำยันด้านข้าง และเพิ่มเหล็กค้ำยันทางแนวตั้ง เพื่อค้ำยันขอบด้านบนของไม้แบบเข้ากับเพดานอาคารเพื่อป้องกันการยกตัวลอยขึ้นของไม้แบบ โดยถูกคอนกรีตเหลวดันข้างได้ขอบแบบล่าง เนื่องจากแบบหล่อลึกถึง 2.1 ม. ความดันจากคอนกรีตเหลวที่เกิดต่อไม้แบบที่ส่วนลึกสุด จึงสูงถึง  $2.4 \times 2.1 \sim 5$  ตัน/ตร.ม. ซึ่งความดันในระดับดังกล่าวสูงกว่าความดันที่คอนกรีตปกติกระทำต่อไม้แบบที่มีความสูงเท่าๆ กัน ดังนั้นปริมาณการค้ำยันที่เคยใช้ได้กับคอนกรีตปกติจึงใช้ไม่ได้ ในกรณีนี้ อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่า เหตุที่แบบหล่อเสียหายครั้งนี้เกิดขึ้นเพราะระบบโครงค้ำยันแบบหล่อยังไม่แข็งแรงเพียงพอ (รูปที่ 5) ในประเด็นดังต่อไปนี้

1. ท่อนเหล็กที่ใช้ค้ำยันมีความชะลูดมาก ไม่มีการตามเป็นช่วงๆ จึงเกิดการโค้งงอ (Bulking) ได้ง่าย เมื่อรับแรงดันสูงจากแบบหล่อ และทำให้กำลังค้ำยันของท่อนเหล็กตกลง
2. จุดที่ท่อนเหล็กค้ำยันแบบหล่อมีไม่มากเพียงพอ โดยเฉพาะในส่วนล่างของแบบก็ไม่ได้ค้ำให้ดีกว่าส่วนบนๆ
3. จุดฐานที่ท่อนเหล็กถ่ายแรงค้ำยันกับดินอยู่ที่กันบ่อขุด มีหลายจุดที่ดินไม่แข็งแรงแน่นหนาพอ ดินจึงยุบตัวและเคลื่อนถอยหลังได้ เมื่อรับแรงดันสูงๆ จึงทำให้แบบหล่อห่างออกจากแนวตั้ง

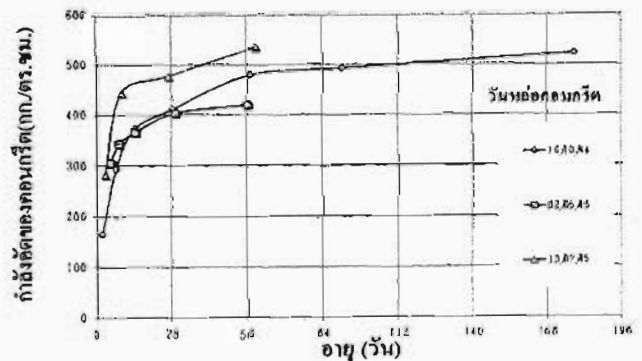
ระหว่างการก่อสร้างในวันนั้น มีปัญหาคอนกรีตเหลวรั่วออกจากแบบเนื่องจากการค้ำยันไม้แบบเพียงพอก่อขึ้นอีก 2-3 จุด ในช่วงเวลาต่างๆ กัน จึงทำให้ต้องเสียเวลาแก้ไขแบบหล่อ และเพิ่มการค้ำยันขึ้นหลายครั้ง งานเทคอนกรีตจึงหยุดชะงักลงหลายช่วง และทำให้เวลาเสร็จสิ้นเนิ่นนานออกไปถึง 12 ชั่วโมง ซึ่งนานกว่าที่ได้เตรียมการไว้ถึงเท่าตัว นอกจากนั้นผู้รับจ้างต้องสูญเสียคอนกรีตที่รั่วออกไปจากแบบหล่อถึง 16 ลบ.ม.



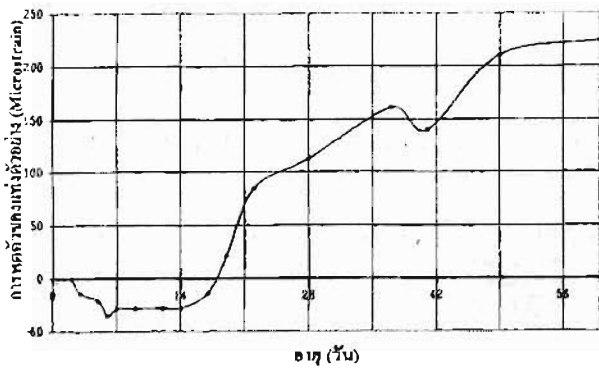
รูปที่ 5 ลักษณะการค้ำยันแบบหล่อลงกับกันบ่อขุดยังไม่แข็งแรงไม่เพียงพอ

สิ่งที่สังเกตเห็นได้จากการเทคอนกรีต SCC ครั้งนี้ คือ

1. ระยะเวลาก่อตัวของคอนกรีตได้ยึดออกไปจนปกติมาก สิ่งเกิดได้จากการที่เราสามารถใช้ไม้กระทุ้งเทวางลงไปได้ในคอนกรีตสดที่ไหลลลอคออกมาจากได้แบบและนองค้างอยู่ในบ่อขุด แม้เวลาผ่านไปถึง 4 ชั่วโมงนับจากผสมน้ำ
  2. อุณหภูมิคอนกรีตที่เทลงในแบบตลอดทั้งวันสูงไม่เกิน  $35^{\circ}\text{C}$  และในช่วงเวลาเดียวกัน พบว่า อุณหภูมิของคอนกรีตสดที่เท สูงกว่าอุณหภูมิปกติของอากาศ (ประมาณ  $30-32^{\circ}\text{C}$ ) ไม่เกิน  $4^{\circ}\text{C}$  ทั้งนี้การผสมแฉะลอยลิกในต้มแฉะมาเข้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึง 61% น่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในมวลคอนกรีตสดน้อยลง
- นอกจากนี้กำลังอัดของตัวอย่างที่อายุ 28 วัน ซึ่งได้จากการสุ่มเก็บจากหน้างานเป็นระยะๆ ล้วนสูงเกิน 450 กก./ตร.ซม. (รูปที่ 6)



รูปที่ 6 กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต SCC ที่พัฒนาขึ้นตามอายุ จากตัวอย่างที่สุ่มเก็บในการผสมคอนกรีตสามครั้ง ผลการทดสอบการหดตัวแบบ Autogeneous Shrinkage ในห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 7) โดยใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตซึ่งหล่อด้วยส่วนผสมดังกล่าว พบว่า การหดตัวที่ 28 วัน และที่ 60 วัน เกิดขึ้นเพียง 112 และ 224 Microstrain ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้สามารถทำคอนกรีต SCC ที่มีการหดตัวน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดได้



รูปที่ 7 การหดตัวแบบ Autogenous Shrinkage ของแท่งตัวอย่างคอนกรีต

## 5. unสรุป

ข้อสังเกตที่ได้จากงานเสริมกำลังให้ฐานรากคอนกรีตครั้งนี้ คือ

5.1 การสร้างค้ำยันสำหรับแบบหล่อคอนกรีต SCC ต้องแข็งแรง เรื่องนี้เป็นเรื่องที่สำคัญมาก และต้องคำนวณความดันต่อไม้แบบโดยถือคอนกรีตเป็นของเหลวที่มีหน่วยน้ำหนัก 2.4 ตัน/ลบ.ม.

5.2 ต้องป้องกันไม่ให้คอนกรีต SCC ดันยกไม้แบบให้ลอยตัว

ในกรณีที่คอนกรีต SCC มีโอกาสไหลลอดได้ส่วนล่างสุดของไม้แบบได้ จะต้องป้องกันแรงยกตัวของคอนกรีตไว้ด้วย โดยทำค้ำยันด้านแรงดังกล่าว ซึ่งอาจสร้างค้ำยันกด หรือตรึงแบบให้คงอยู่ในแนวตั้งเพื่อต้านรับแรงยกตัวนี้ด้วย

5.3 สามารถใช้เถ้าลอยลิกไนต์แทนที่ปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 ถึง 61% โดยน้ำหนักทำคอนกรีต SCC ที่มีคุณภาพสูงได้

ในงานเสริมกำลังให้คานโยงยึดฐานรากอาคารในครั้งนี้สามารถใช้คอนกรีต SCC อย่างเป็นผลดี โดยใช้ค่า w/b เพียง 0.27 และใช้ Superplasticizer ประเภท Polycarboxylate ประมาณ 1.2% ของน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้ได้คอนกรีตที่มีความสามารถไหลแผ่ได้ดีได้นานกว่าสองชั่วโมง คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีเนื้อแน่น มีการหดตัวแบบ Autogenous Shrinkage ที่อายุ 28 วัน น้อยกว่า 250 Microstrain และมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 450 กก./ตร.ซม.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณท่านผู้มีส่วนเกี่ยวข้องหลายท่าน ที่ได้ช่วยให้งานเสริมกำลังฐานรากอาคาร ท.101 ของ กฟผ. ตั้งแต่ระยะเริ่มต้นจนงานเทคอนกรีตลุล่วงไปได้ด้วยดี ดังนี้

1. รศ. ดร.สมนึก ดั่งเต็มสิริกุล ที่ช่วยให้คำปรึกษาและเสนอส่วนผสมเริ่มต้นของคอนกรีต SCC ที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษสำหรับงานที่มีข้อจำกัดหลายประการครั้งนี้

2. บริษัทน้ำแข็งคอนกรีต ที่ได้ร่วมการศึกษา และสนับสนุนการทดลองส่วนผสมคอนกรีตพิเศษครั้งนี้ ตลอดจนสนับสนุนการทดลองเทคอนกรีตลงในแบบจำลอง โดยมิได้มีเงื่อนไขที่จะได้รับประโยชน์ทางธุรกิจใดๆ จาก กฟผ. เป็นพิเศษ

3. บริษัท Sika (Thailand) จำกัด ที่ได้สนับสนุนให้น้ำยา Superplasticizer ในท้องตลาดขึ้นปฏิบัติการ และได้สนับสนุนให้ใช้น้ำยาประเภท Polycarboxylate ซึ่งมีคุณภาพสูงในงานใช้คอนกรีต SCC เสริมกำลังฐานรากในครั้งนี้ ด้วยราคาที่ย่อมเยาเป็นพิเศษ

4. บริษัท อรุณ ชัยเสรี คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียริ่ง ที่ได้ให้ความร่วมมือ และรับฟังเหตุผลแย้งของทีมงานวิศวกรของ กฟผ. ในการทำงานครั้งนี้จนทีมิตร ตั้งแต่ชั้นวิเคราะห์ที่โครงการ การเลือกวิธีเสริมกำลัง และโดยเฉพาะการเลือกใช้ส่วนผสมคอนกรีต SCC ที่ยังไม่เคยใช้ในงานใดมาก่อนแทนการใช้ Non-Shrink Grout Material ที่มีราคาแพงมาก ตลอดจนอำนวยความสะดวกและให้ความร่วมมือแก่ผู้เขียนในการรวบรวมข้อมูลเป็นอย่างดีจนถึงขั้นตอนควบคุมงานก่อสร้าง

5. บริษัท อาร์ ซี เอ็นจิเนียริ่ง ผู้รับงานเสริมกำลังโครงสร้าง ที่ได้ทุ่มเทความตั้งใจ คัดเลือกวัสดุ และทีมงานที่มีฝีมือมาทำงานเพื่อให้งานมีคุณภาพดี พร้อมทั้งเอาใจใส่ให้ข้อมูลต่อผู้เขียน ติดตามดูแลความก้าวหน้าของงานให้เป็นไปตามแผน มีผลงานที่เรียบร้อย และพยายามให้งานแล้วเสร็จไปได้ตามกำหนด

6. ทีมงานจากสำนักงานวิจัยและพัฒนา จากหน่วยงานก่อสร้าง และจากห้องทดลองคอนกรีต ของ กฟผ. ที่ได้ให้ความร่วมมือสนับสนุนข้อมูลต่างๆ แก่ผู้เขียนมาโดยตลอด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ฝ่ายออกแบบและบริหารงานก่อสร้าง, เอกสารการจ้างเหมา ก่อสร้างงาน ซ่อมและเสริมความแข็งแรงโครงสร้างอาคาร ท.101 ในบท "ข้อกำหนดทั่วไปสำหรับงานคอนกรีต SCC" หน้า 2-8, กันยายน พ.ศ. 2544.
- [2] บ.อรุณ ชัยเสรี คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียริ่ง, แบบก่อสร้างในโครงการเสริมความแข็งแรงฐานราก อาคาร ท.101, สิงหาคม พ.ศ. 2544.

