

การลดรอยร้าวจากความร้อนของฐานรากแพขนาดใหญ่ด้วยการแทรกคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ Thermal crack reduction of large mat foundation using inserted precast lightweight concrete

ภูริช ฉั่วสุวรรณ^{1,*} และ ทศพล ปิ่นแก้ว²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

^{*}Corresponding author; E-mail address: 6370440421@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ฐานรากแพขนาดใหญ่เป็นที่นิยมใช้มากขึ้นในโครงการก่อสร้างอาคารสูง การก่อสร้างฐานรากแพขนาดใหญ่จำเป็นต้องคำนึงถึงปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งเกิดจากอุณหภูมิบริเวณผิวและแกนภายในคอนกรีตที่แตกต่างกันมากจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตและการระบายความร้อนที่ต่ำกว่าบริเวณผิว ส่งผลให้เกิดความเค้นในคอนกรีตที่อาจสูงกว่ากำลังรับแรงดึงในช่วงแรกที่ยังพัฒนากำลังไม่เต็มที่ จึงมีความเสี่ยงเกิดปัญหาการแตกร้าวซึ่งส่งผลเสียต่อความทนทานของฐานรากแพ งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาและนำเสนอแนวคิดในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการแทนที่คอนกรีตบริเวณแกนกลางด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ เพื่อช่วยลดปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและช่วยดูดซับความร้อนบริเวณแกนกลางของฐานราก การศึกษาอาศัยการสร้างแบบจำลอง 3D finite element เพื่อทำนายอุณหภูมิและความเค้นที่เกิดขึ้นในฐานรากแพจำนวน 2 ฐาน ซึ่งเปรียบเทียบผลกับการตรวจวัดอุณหภูมิของฐานรากแพจริง จากนั้นจึงพิจารณาการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพในตำแหน่งที่มีความเค้นน้อยหรือไม่ให้ส่งผลกระทบต่อรับแรงของฐานรากแพ แล้วทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของอุณหภูมิและตรวจสอบความเค้นที่เกิดขึ้นในฐานรากแพเปรียบเทียบกับกรณีการก่อสร้างแบบปกติ เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการลดความเสี่ยงที่จะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตฐานรากแพขนาดใหญ่

คำสำคัญ: ฐานรากแพขนาดใหญ่, คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ, ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน, ความเค้นที่เกิดจากความร้อน, การแตกร้าวที่เกิดจากความร้อน

Abstract

A large mat foundation has become more popular among tall building construction. During construction, its thermal crack problem, due to temperature difference between concrete

surface and concrete core generated from hydration reaction, is concerned. Consequently, the induced concrete stresses may higher than tensile strength in early age concrete which has not been fully strength developed. This thermal crack problem negatively affects the durability of a large mat foundation. This research aims to study and present an alternative solution by inserting concrete core with precast lightweight concrete which can reduce the heat from hydration reaction and absorb the heat at concrete core. This study uses 3D finite element model to predict temperature and stress inside 2 large mat foundations. Actual temperatures of the large mat foundations were also measured, and the results were used to improve the accuracy of the models. Then, the models with precast lightweight concretes partially replaced into mat foundations in small stress region is studied. The thermal stress analysis of the mat foundations with and without precast lightweight concretes is compared in order to demonstrate the efficiency in reducing the risk of thermal crack in large mat foundations.

Keywords: Large mat foundation, Precast lightweight concrete, Hydration heat, Thermal stress, Thermal crack

1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการก่อสร้างอาคารสูงสามารถพบเห็นได้มากขึ้น เนื่องจากความต้องการพื้นที่ใช้สอยที่มากขึ้น ซึ่งฐานรากของอาคารสูงมีความสำคัญอย่างมากต่อความมั่นคงแข็งแรงของอาคาร โดยทั่วไปฐานรากของอาคารสูงจะใช้ฐานรากแพเป็นหลักเพื่อรองรับเสาเข็มขนาดใหญ่จำนวนมาก ซึ่งการออกแบบและก่อสร้างจำเป็นต้องทำอย่างละเอียดรอบคอบ เพื่อความปลอดภัยของอาคาร

คอนกรีตหลา ตามนิยามของ ACI 207.1R-05 [1] คือคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่ ที่จำเป็นต้องมีการพิจารณาความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์และปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง เพื่อป้องกันการเกิดรอยร้าวในคอนกรีต ดังนั้นฐานรากแพส่วนใหญ่จึงจัดเป็นคอนกรีตหลา เนื่องจากการก่อสร้างฐานรากแพจำเป็นต้องใช้คอนกรีตในปริมาณมากและต้องมีการเทอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่เทคอนกรีตจะเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้อุณหภูมิภายในฐานรากแพสูงขึ้น บริเวณผิวของคอนกรีตสามารถถ่ายเทความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ดีกว่าแกนกลาง ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่แกนกลางและผิวคอนกรีต โดยเมื่ออุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตลดลงทำให้เกิดการหดตัวของคอนกรีต ส่วนแกนกลางของคอนกรีตจะเป็นคอนกรีตที่แช่ตัวอยู่ในสถานะที่แข็งกว่าผิว ซึ่งจะประพฤติตัวเป็นสิ่งที่จำกัดต่อการหดตัวส่งผลให้เกิดเป็นความเค้นแรงดึงที่ผิวของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตยังอยู่ในช่วงแรก ทำให้กำลังรับแรงดึงยังพัฒนาไม่เต็มที่ และหากความเค้นแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงดึงจะทำให้เกิดรอยร้าวจากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งรอยร้าวเหล่านี้เป็นสิ่งที่ยอมรับไม่ได้ เนื่องจากฐานรากแพนั้นอยู่ใต้ดิน มีความชื้นที่อาจส่งผลเสียต่อความทนทานของฐานราก ทำให้เป็นอันตรายต่อโครงสร้างของอาคาร (Do, 2013) [2]

วิธีการลดผลต่างของอุณหภูมิภายในคอนกรีตหลาเพื่อป้องกันรอยร้าวมีหลากหลายวิธีทั้งช่วงก่อนเทและหลังเทคอนกรีต เช่น การใช้คอนกรีตความร้อนต่ำ (Low heat concrete) , Pre cooling or Post cooling concrete , การแบ่งเทคอนกรีตเป็นหลายชั้น , การปิดฉนวนความร้อนที่ผิวบนของคอนกรีต ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้คือ polystyrene foam เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยฉนวนความร้อนเหล่านี้จะถูกลวางที่ผิวบนของคอนกรีต ป้องกันความร้อนถ่ายเทสู่อากาศภายนอก ส่วนที่ผิวล่างของคอนกรีตซึ่งอยู่บนดิน เราจะมองว่าดินทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องปิดฉนวนความร้อน

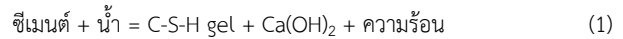
งานวิจัยนี้ จะใช้ 3D model finite element ในการวิเคราะห์เพื่อทำนายอุณหภูมิและความเค้นที่เกิดขึ้นในฐานรากแพ และเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จากหน้างาน โดยการวิเคราะห์นี้ จะเป็นประโยชน์กับผู้ก่อสร้างคือช่วยให้ทราบและสามารถวางแผนล่วงหน้าเพื่อควบคุมผลต่างของอุณหภูมิ และป้องกันการเกิดรอยร้าวได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาเพิ่มเติม คือการใส่คอนกรีตเบาห่อสำเร็จในฐานรากแพ และวิเคราะห์หาอุณหภูมิและความเค้นด้วย 3D model finite element ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าจะสามารถลดอุณหภูมิภายในแกนกลางและผลต่างอุณหภูมิระหว่างแกนกลางกับผิวคอนกรีต นอกจากนั้นข้อดีของวิธีนี้คือปริมาณคอนกรีตที่ใช้จะน้อยลง ทำให้วางแผนการทำงานได้สะดวกขึ้น และประหยัดมากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตเบาห่อสำเร็จมีราคาถูกกว่าคอนกรีตความร้อนต่ำที่ใช้ฐานรากแพ

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการแตกร้าวของฐานรากแพขนาดใหญ่

2.1.1 Hydration of cement

คือปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด เรียกว่า เพสต์ ซึ่งจะทำหน้าที่ประสานมวลรวมเข้าด้วยกัน เกิดเป็นคอนกรีต โดยปฏิกิริยาเคมีนี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน สามารถเขียนสมการอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (1)



C-S-H gel = Calcium Silicate Hydrate ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้กำลังกับคอนกรีต

2.1.2 Strength development

คือค่ากำลังรับแรงของคอนกรีตสดที่พัฒนาเพิ่มขึ้นตามเวลา โดยค่ากำลังของ Low heat concrete จะช้ากว่าคอนกรีตปกติ โดย ACI ได้มีการกำหนดสัมประสิทธิ์ a และ b เพื่อใช้บ่งบอกอัตราการพัฒนากำลังของคอนกรีต สมการของ ACI, 1997 [3] เพื่อทำนาย compressive strength ของคอนกรีตที่เวลาต่างๆ แสดงในสมการที่ (2)

$$f_c'(t) = \frac{t}{a+bt} (f_c')_{28} \quad (2)$$

โดยที่ a, b = concrete strength development coefficient
(f_c')₂₈ = 28-day compressive strength
t = age of concrete (days)

2.1.3 Crack potential

คือ ค่าอัตราส่วนของ tensile strength ทหารด้วย tensile stress ซึ่งการที่คอนกรีตเกิดรอยร้าว เกิดจาก tensile stress ที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในคอนกรีต มีค่ามากกว่า tensile strength ของคอนกรีต ค่า crack potential จึงจะต่ำกว่า 1.0 มักพบได้ในช่วงแรกของคอนกรีต เพราะ tensile strength ของคอนกรีตในช่วงแรกจะยังมีค่าน้อย เนื่องจากกำลังยังพัฒนาได้ไม่เต็มที่

2.2 คุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต

2.2.1 ความร้อนจำเพาะ (specific heat)

คือปริมาณ ความร้อนที่ทำให้วัสดุมวล 1 กิโลกรัม มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 องศา ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความร้อนจำเพาะของคอนกรีตคือความพรุน, water content, ปริมาณและคุณสมบัติของมวลรวม

2.2.2 ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity)

คืออัตราการส่งผ่านพลังงานความร้อน ด้วยวิธีการนำความร้อน ซึ่งเป็น การส่งผ่านพลังงานความร้อนภายในโมเลกุลของวัสดุที่มีพลังงานความร้อน

แตกต่างกัน จากบริเวณที่มีความร้อนมากไปยังบริเวณที่มีความร้อนน้อยกว่า

2.2.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection coefficient)

คือค่าที่บอกระดับการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนผ่านอากาศภายนอก ด้วยวิธีการพาความร้อน ซึ่งจะเกิดบริเวณผิวคอนกรีตที่สัมผัสกับอากาศ ปัจจัยที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนคือความเร็วลม

2.2.4 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion coefficient)

คือ ค่าความแตกต่างของปริมาตรคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน 1 °C เทียบกับปริมาตรเริ่มต้น ซึ่งค่านี้จะไม่กระทบโดยตรงกับการถ่ายเทความร้อนในคอนกรีต แต่มีผลกับ thermal stress ที่เกิดขึ้น

2.2.5 Adiabatic temperature rising equation

คือสมการที่ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของ heat of hydration ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยคำว่า adiabatic หมายถึงระบบไม่มีการสูญเสียหรือได้รับความร้อนจากสภาพแวดล้อม สมการนี้ถูกพัฒนาและนำเสนอโดย T-a Tanabe (1985) [4] แสดงในสมการที่ (3)

$$T(t) = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (3)$$

โดย T = อุณหภูมิ (°C)

t = เวลา (วัน)

K = ขนาดของ adiabatic temperature rising ในตอนสุดท้าย

α = อัตราเร็วในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

จากงานวิจัยในอดีตสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปคุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต

Concrete thermal parameter	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
Specific heat (kcal/kg °C)	0.25	0.27-0.31	0.241	0.227	0.2008	0.208
Rate of heat conduction (kcal/m hr °C)	2.3	2.15-2.51	2.230	2.28	2.495	2.034
Convection coefficient (kcal/m ² hr °C)	12	12-14	-	10.325	12	-
Thermal expansion coefficient (1/°C)	1.00E-05	-	-	1.00E-05	1.00E-05	7.00E-06
Heat source coefficients	K=30.1 a=0.477	-	K=47.9 a=0.78	-	K=59.6 a=1.113	-

[5] = Jin Keun Kim & Cha (2013)

[6] = Lee, M. Chae, Khil, Yun (2014)

[7] = Liu, Cao, Yan, Ye, & Jia (2016)

[8] = Aniskin & Nguyen (2019)

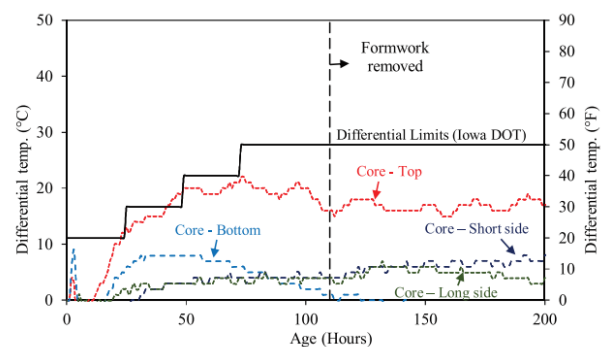
[9] = Nguyen & Luu (2019)

[10] = CONTEC SIIT (2021)

2.3 การวิเคราะห์ฐานรากแพแข็งอุณหภูมิด้วยแบบจำลอง

Sargam et al. (2019) [11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวัดอุณหภูมิฐานรากของสะพานในประเทศสหรัฐอเมริกา ขนาด 10.06 m. x 8.23 m. x 2.13 m. โดยมีการใช้ฉนวนความร้อนคลุมผิวของฐานรากเป็นเวลา 10 วัน และใช้โปรแกรม ConcreteWorks เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในฐานรากและเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจากหน้างานจริง โดยจุดที่วัดอุณหภูมิมี 7 จุด มาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิคือ Iowa DOT specification ซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของคอนกรีตอยู่ระหว่าง 5 – 21 °C อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 71 °C ผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิที่หน้างานคือ อุณหภูมิเริ่มต้นของคอนกรีตเท่ากับ 19 °C และอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 65 °C ซึ่งถือว่าผ่านตามาตรฐานกำหนด ในส่วนของผลต่างอุณหภูมิที่ตรวจวัดหน้างานแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นจึงเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตรวจวัดหน้างานกับอุณหภูมิจากแบบจำลองและวิเคราะห์ผลกระทบเมื่อเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ด้วยโปรแกรม ConcreteWorks ซึ่งแบ่งตัวแปรออกเป็น 3 หมวด คือ

1. Mix proportion พบว่าการเพิ่มปริมาณซีเมนต์จะทำให้อุณหภูมิสูงสุดและผลต่างของอุณหภูมิสูงขึ้น แต่การเพิ่ม fly ash หรือ silica fume จะช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดและผลต่างของอุณหภูมิได้
2. Material properties พบว่าอุณหภูมิสูงสุดและผลต่างอุณหภูมิของซีเมนต์ประเภทที่ 1 มากกว่าประเภทที่ 2 นอกจากนั้นเมื่อเพิ่มค่าการนำความร้อนของคอนกรีตและความจุความร้อนจำเพาะของมวลรวม จะช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดและผลต่างของอุณหภูมิได้
3. Construction parameters พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของคอนกรีตและชนิดของ subbase ส่งผลกระทบบนอุณหภูมิที่วัดได้ชัดกับอุณหภูมิสูงสุดและผลต่างของอุณหภูมิ



รูปที่ 1 ผลต่างของอุณหภูมิที่ตรวจวัดหน้างานของฐานรากสะพานในประเทศสหรัฐอเมริกา

2.4 คุณสมบัติของคอนกรีตความหนาแน่นต่ำ (lightweight concrete)

Pan, Li, & Liu (2014) [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับคอนกรีตโพมที่มีความหนาแน่นที่ต่ำมากๆ อยู่ระหว่าง 150-300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร คุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตโพมที่แข็งตัวอายุครบที่ 28 วัน จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดระหว่าง 0.33 MPa ถึง 1.1 MPa การดูดซึมน้ำระหว่าง 6.6% ถึง 8.3% และค่าการนำความร้อนระหว่าง 0.05 W/m.K ถึง 0.07 W/m.K

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยทำความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาเรื่องของอุณหภูมิในคอนกรีตหลารวมถึงผลกระทบและวิธีการแก้ไขปัญหา จากนั้นจึงศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองฐานรากแพและทดลองสร้าง 3D finite element model ของฐานรากแพด้วยโปรแกรม Midas Civil โดยมีการเปรียบเทียบกับเอกสารที่มีผู้ศึกษาในอดีต เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถสร้างแบบจำลองได้อย่างถูกต้องและพารามิเตอร์ที่ใช้มีความเหมาะสม ทำความเข้าใจพฤติกรรมด้านอุณหภูมิและความเค้นที่เกิดขึ้นใน mass concrete จากนั้นจึงสร้าง 3D finite element model ของฐานรากแพของโครงการตัวอย่าง F42 และ F65 วิเคราะห์หาอุณหภูมิ, ความเค้นและ crack potential ที่เกิดขึ้นและกำหนดจุดที่จะทำการตรวจวัดอุณหภูมิ ศึกษาวิธีการใช้งานของอุปกรณ์และขั้นตอนการติดตั้งที่หน้างาน ทำการ calibrate อุปกรณ์เพื่อหาความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่วัดได้จาก sensor จากนั้นจึงดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงในฐานรากแพเป็นเวลา 5 วัน (120 ชั่วโมง) นับตั้งแต่เริ่มเทคอนกรีตจนถึงวันที่ปลดผนว ความร้อนออก เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลที่วัดได้จากหน้างาน วิเคราะห์ถึงปัจจัยที่มีผลกระทบกับอุณหภูมิและสาเหตุของความแตกต่างของอุณหภูมิจากแบบจำลองและข้อมูลที่วัดได้หน้างาน ปรับปรุงแบบจำลองเพื่อให้ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับข้อมูลจากหน้างาน หลังจากนั้นทดลองใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพเดิมที่เคยศึกษา โดยใช้โปรแกรม Midas Civil วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบอุณหภูมิและ crack potential ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต้องมีการตรวจสอบกำลังในการรับแรงของฐานรากแพเพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติ

4. แบบจำลองและการตรวจวัดอุณหภูมิคอนกรีต

4.1 แบบจำลองฐานรากแพ

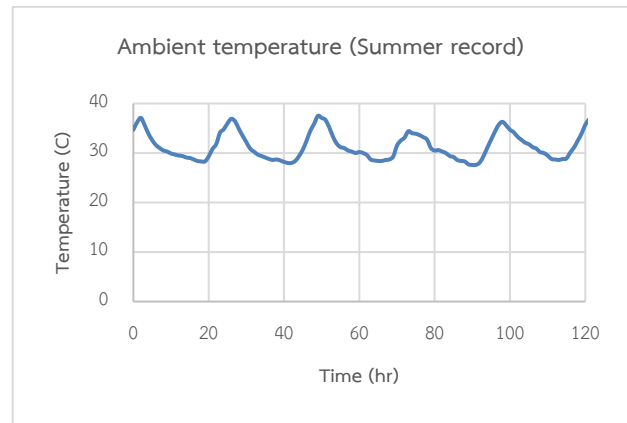
ผู้วิจัยสร้างแบบจำลองฐานรากแพ โดยใช้โปรแกรม Midas Civil ในการสร้าง 3D finite element (element size = 25x25x25 cm³) เพื่อจำลองพฤติกรรมในด้านอุณหภูมิและความเค้นที่เกิดขึ้นในฐานรากแพเนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้สร้างแบบจำลองฐานรากแพแสดงในตารางที่ 2 โดย Heat source function coefficients มาจากการทดลองเทคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 1 เมตรและวัดอุณหภูมิแกนกลาง จากนั้นจึงปรับค่า Heat source function coefficients เพื่อให้กราฟอุณหภูมิจากการวิเคราะห์ด้วย Midas Civil ใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริงที่วัดได้ นอกจากนี้ยังมีการปิดโคมที่ผิวบนของฐานรากแพตลอดการวิเคราะห์เพื่อให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับฐานรากแพจริง

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้สร้างแบบจำลองฐานรากแพทั้ง 2 ฐาน

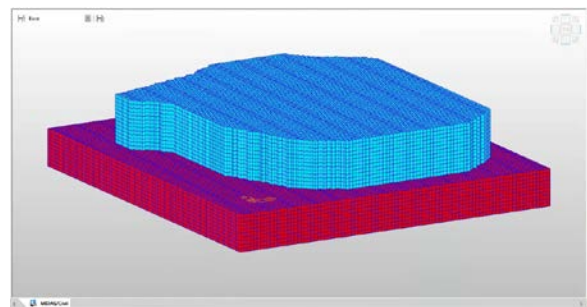
Property	Low heat concrete	Precast lightweight concrete	Subsoil
Specific heat (kcal/kg °C)	0.208	0.294	0.2
Density (kgf/m ³)	2400	250	1800

Rate of heat conduction (kcal/m hr °C)	2.034	0.162	1.7
Convection coefficient (kcal/m ² hr °C)	12	-	12
Ambient temperature (°C)	Summer record	-	-
Casting temperature (°C)	35	-	-
28-day compressive strength (kgf/cm ²)	320	1.2	-
Compressive strength gain coefficients	a=13.9 b=0.86	-	-
Modulus of elasticity (kgf/cm ²)	2.56x10 ⁵	5.72x10 ³	1x10 ⁴
Thermal expansion coefficient (1/°C)	9x10 ⁻⁶	9x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁵
Poisson's ratio	0.2	0.2	0.2
Unit cement content (kg/m ³)	225	-	-
Heat source coefficients	K=36 a=1.75	-	-
Soil temperature	-	-	27

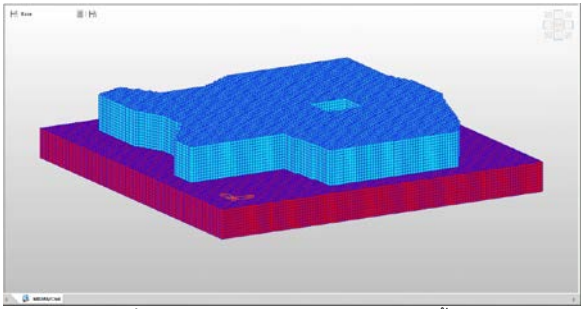
Ambient temperature ที่ใช้คืออุณหภูมิของอากาศที่วัดในบริเวณฐานรากที่ใช้ทดสอบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิคอนกรีต ซึ่งผู้วิจัยแทนด้วยคำว่า Summer record โดยอุณหภูมิเป็นไปตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 Ambient temperature (Summer record)



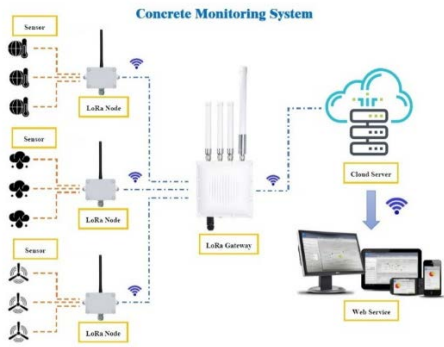
รูปที่ 3 แบบจำลองฐานรากแพ F42 วางบนพื้นดิน



รูปที่ 4 แบบจำลองฐานรากแพ F65 วางบนพื้นดิน

4.2 ระบบที่ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิคอนกรีต

ผู้วิจัยใช้ temperature remote sensor ในการวัดอุณหภูมิภายในคอนกรีต โดยข้อมูลจากแต่ละสาย sensor จะส่งต่อมาที่ LoRa node หลังจากนั้น LoRa node แต่ละตัวจะวัดค่าจาก sensor และส่งสัญญาณ uplink ไปที่ LoRa Gateway หลังจากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อไปที่ cloud server สำหรับเก็บบันทึกบนฐานข้อมูลและนำมาแสดงผลบนเว็บไซต์ต่อไป



รูปที่ 5 ระบบการตรวจวัดอุณหภูมิภายในคอนกรีต

- LoRaWan Temperature Remote Sensor Node

กล่องที่ประกอบไปด้วยสาย temperature sensor และแผงวงจรเพื่อส่งสัญญาณ uplink ทุกๆ 1 นาทีไปยัง LoRa gateway ซึ่งแต่ละกล่องสามารถต่อสาย temperature sensor ได้สูงสุด 6 สาย โดยสาย temperature sensor จะมีความยาวแตกต่างกัน ขึ้นกับระดับที่ต้องการวัดอุณหภูมิในฐานรากแพ สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -55°C ถึง 125°C โดยมีความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิคือ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ในช่วง -10°C ถึง 85°C ข้อดีคือการส่งข้อมูลไปยัง Gateway ไม่จำเป็นต้องใช้สายทำให้สะดวกในการติดตั้งและเทคอนกรีตหน้างานที่ปกติแต่ละจุดวัดจะมีระยะห่างมาก

- LoRaWan Ambient Sensor Node

กล่องที่ใช้วัดอุณหภูมิสภาพแวดล้อมและความชื้นสัมพัทธ์ ในขณะที่วัดอุณหภูมิของฐานรากแพ

- LoRa Gateway

อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณ uplink ที่เป็นข้อมูลอุณหภูมิจาก Node แต่ละตัว และส่งข้อมูลไปเก็บบันทึกไว้ใน cloud server เพื่อนำไปแสดงผลบนเว็บไซต์ ทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกตลอดเวลาและเข้าใจได้ง่าย

เนื่องจากแสดงผลเป็นกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ระยะห่างที่สามารถรับสัญญาณจาก Node คือ 2 กม. (line of sight)

4.3 การวัดอุณหภูมิฐานรากแพ

4.3.1 รายละเอียดของฐานรากแพที่ทำการศึกษา

การเทฐานรากแพขนาดใหญ่โดยการเทคอนกรีตแบบต่อเนื่องครั้งเดียวจะทำให้ประหยัดเวลาก่อสร้างและเหล็กเปลือง แต่ทำให้เกิดความเสี่ยงที่ฐานรากแพจะเกิดการแตกร้าวจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นจึงต้องมีการวัดอุณหภูมิระหว่างการเทฐานรากแพ

ฐานรากแพขนาดใหญ่ที่จะทำการศึกษามีจำนวน 2 ฐานได้แก่ F42 และ F65 รายละเอียดของแต่ละฐานรากมีดังนี้

- 1) F42

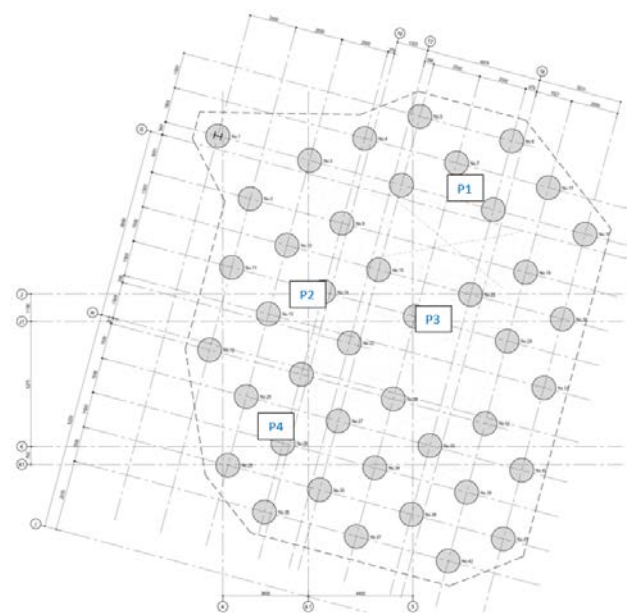
มีขนาดกว้าง 18 เมตร ยาว 19.8 เมตร ความหนา 3 เมตร ปริมาตรคอนกรีต 900 ลูกบาศก์เมตร

- 2) F65

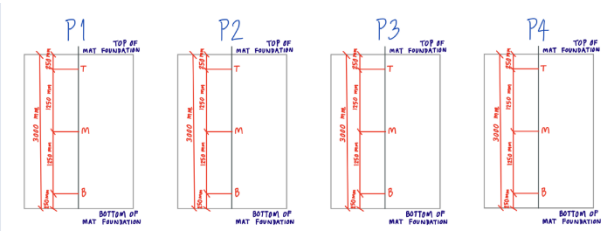
มีขนาดกว้าง 23.2 เมตร ยาว 24.6 เมตร ความหนา 2.8 เมตร ปริมาตรคอนกรีต 1,288 ลูกบาศก์เมตร

4.3.2 การติดตั้งระบบวัดอุณหภูมิคอนกรีต

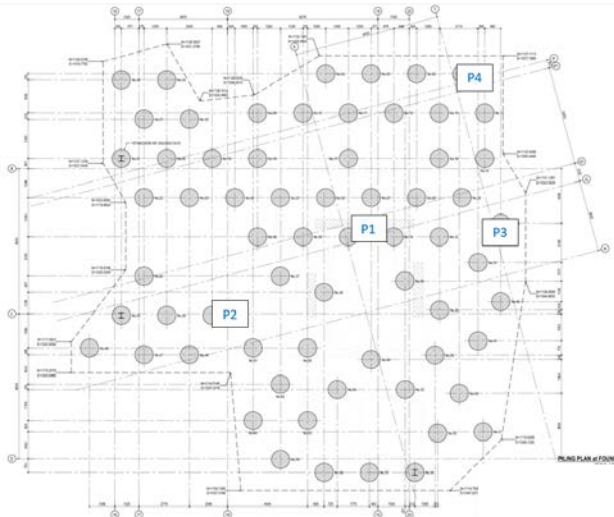
กำหนดจุดวัดอุณหภูมิ โดยแต่ละจุดจะมี 3 ระดับคือ top (ห่างจากผิวบน 25 cm), middle (ระดับกึ่งกลางของฐานราก) และ bottom (ห่างจากผิวล่าง 25 cm) ซึ่งตำแหน่งของจุดวัดอุณหภูมิควรเลือกให้อยู่ในบริเวณที่คิดว่าน่าจะเกิดปัญหา คือบริเวณกลางฐานรากเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิสูงสุดในแกนกลางของฐานรากแพ และบริเวณขอบฐานรากเพื่อตรวจสอบผลต่างของอุณหภูมิภายในฐานรากแพ และติดตั้ง Ambient Node ในบริเวณใกล้เคียงกับฐานราก เพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศ



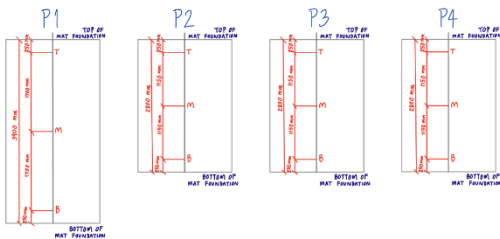
รูปที่ 6 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิ 4 จุดของฐานรากแพที่ F42



รูปที่ 7 ระดับจุดวัดอุณหภูมิ top, middle และ bottom ของฐานรากแพ F42



รูปที่ 8 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิ 4 จุดของฐานรากแพที่ F65



รูปที่ 9 ระดับจุดวัดอุณหภูมิ top, middle และ bottom ของฐานรากแพ F65

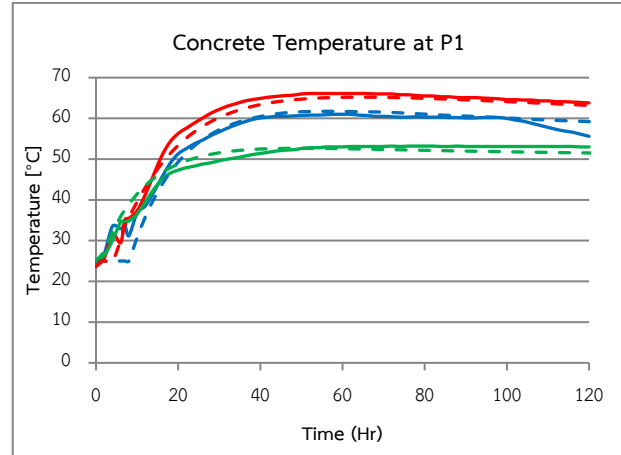
5. ผลการดำเนินงาน

5.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิจากการตรวจวัดและแบบจำลองและปรับแก้แบบจำลองฐานรากแพ

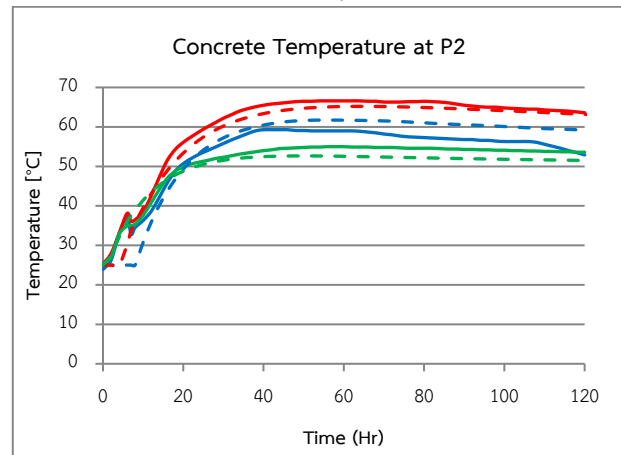
เมื่อนำอุณหภูมิในแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่า Root Mean Square (RMS) เฉลี่ยทุกจุดของฐานราก F42 และ F65 ก่อนปรับแก้เท่ากับ 7.624 °C และ 9.970 °C ตามลำดับ ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มขั้นตอนการก่อสร้างของแบบจำลองโดยค่อยๆ ใส่คอนกรีตฐานรากแพทีละชั้น เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับการเทคอนกรีตฐานรากแพจริงที่มีช่วงระยะเวลาในเทคอนกรีตค่อนข้างนานและปรับแก้แต่ละตัวแปรโดยกำหนดช่วงของค่าแต่ละตัวแปรไม่เกินค่าตัวแปรของคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยในอดีต ซึ่งตัวแปรที่ทำให้อุณหภูมิจากแบบจำลองเปลี่ยนแปลงและใกล้เคียงค่าจริงมากขึ้นคือ rate of heat conduction, ambient temperature, casting temperature, heat source function และ soil temperature โดยเมื่อปรับแก้แบบจำลองแล้วค่า RMS ของฐานรากแพ F42 และ F65 เท่ากับ 2.315 °C และ 2.400 °C

ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองหลังปรับแก้จึงมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปวิเคราะห์ข้อมูลของฐานรากแพเมื่อใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

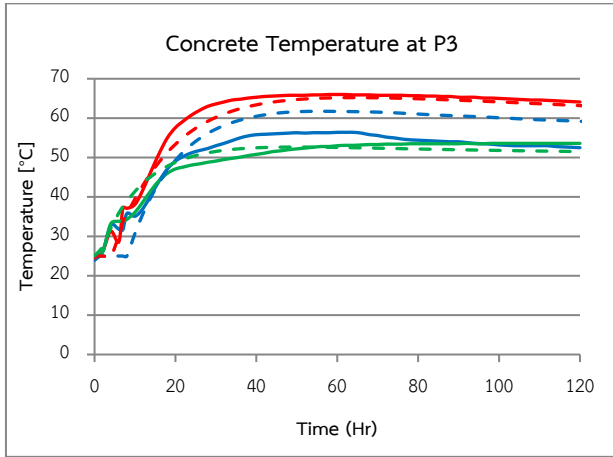
รูปที่ 10-13 เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิของฐานรากแพ F42 หลังปรับแก้แล้ว โดยสัญลักษณ์ในกราฟจะใช้เส้นทึบแทนอุณหภูมิที่ตรวจวัดจากหน้างานจริงและเส้นประแทนอุณหภูมิจากแบบจำลอง โดยสีน้ำเงินคือระดับ top สีแดงคือระดับ middle และสีเขียวคือระดับ bottom



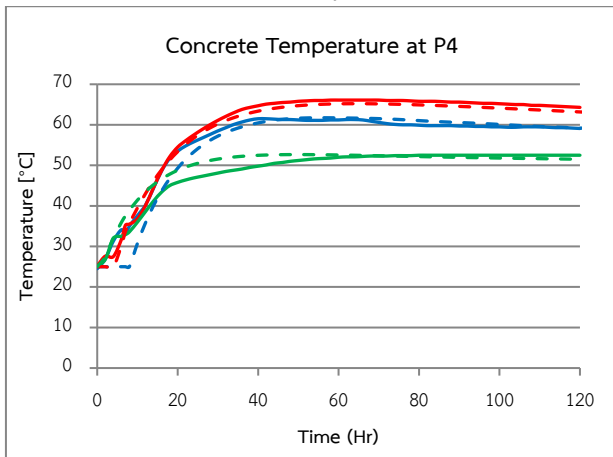
รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P1 ของแบบจำลองฐานรากแพ F42 ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P2 ของแบบจำลองฐานรากแพ F42 ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P3 ของแบบจำลองฐานรากแพ F42 ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิจุด P4 ของแบบจำลองฐานรากแพ F42 ที่ปรับแก้แล้วกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดจริง

5.2 การแทนที่คอนกรีตบางส่วนด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ

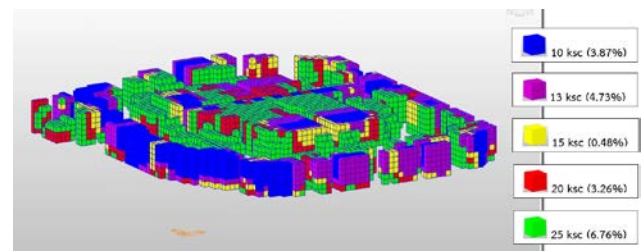
แนวคิดในการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จคือแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในบริเวณที่มีความเค้นหลักหรือ principal stress (พิจารณา ความเค้นหลักในแกนที่มีค่าสูงสุด) ที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกทุกพลอดภัยของเสาเข็มน้อย (ฐานรองรับคือเสาและผนังรับแรงเฉือน) เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อการรับแรงของฐานรากแพ จากนั้นผู้วิจัยจะวิเคราะห์ฐานรากแพที่ใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ และตรวจสอบความเค้นแกน x และ y ที่เพิ่มขึ้นในคอนกรีตชั้นบนและชั้นล่าง (ความหนา 75 ซม.) โดยผู้วิจัยจะกำหนดให้ความเค้นที่เพิ่มขึ้นมีค่าไม่เกิน 10% ของความเค้นสูงสุดของแกน x และ y ในฐานรากแพเดิมที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงของฐานรากแพและไม่จำเป็นต้องเพิ่มเหล็กเสริมคอนกรีตจากแบบฐานรากที่ออกแบบเรียบร้อยแล้ว

ผู้วิจัยจะวิเคราะห์ฐานรากแพด้วยวิธีแรงสถิต โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกพลอดภัยจากเสาเข็มและฐานรองรับคือเสาและผนังรับแรงเฉือน เพื่อหาตำแหน่งของ element ที่มีความเค้นน้อยกว่าค่าความเค้นที่กำหนดเช่น 10 ksc หลังจากนั้นผู้วิจัยจะแทนที่คอนกรีตความร้อนต่ำด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในทุกตำแหน่งของ element ที่มีความเค้นหลักน้อยกว่า 10 ksc แต่

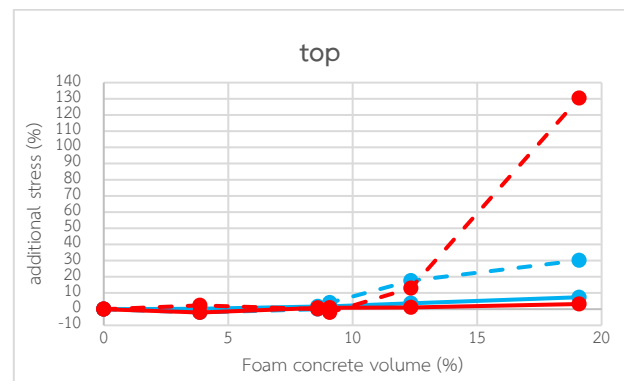
จะไม่แทนที่คอนกรีตในชั้นบนและชั้นล่าง เนื่องจากการรับแรงคดจะมีความเค้นมากที่ตำแหน่งบนกับล่างและเพื่อให้เป็นชั้นคอนกรีตหุ้มคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จบางส่วนกลับเป็นคอนกรีตความร้อนต่ำในตำแหน่งของฐานรากที่มีความเค้นหลักสูง ซึ่งพบได้บ่อยในบริเวณที่ใกล้เสาเข็มหรือตอม่อของเสาและผนังรับแรงเฉือน วิเคราะห์หาความเค้นสูงสุดในแกน x และ y ของคอนกรีตชั้นบนและชั้นล่าง ต่อมาจึงเปลี่ยนค่าความเค้นที่กำหนดเช่น 15 ksc และแทนที่คอนกรีตความร้อนต่ำด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในทุกตำแหน่งของ element ที่มีความเค้นหลักน้อยกว่า 15 ksc โดยไม่แทนที่คอนกรีตในชั้นบนและชั้นล่าง เช่นเดิม ทำการวิเคราะห์หาความเค้นสูงสุดในแกน x และ y ของคอนกรีตชั้นบนและชั้นล่างเช่นเดิม ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนค่าความเค้นที่กำหนดหลากหลายค่า จะสามารถวาดกราฟเพื่อดูแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเค้นในแกน x และ y เมื่อเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จที่คิดเป็นร้อยละของปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด

เมื่อใช้เกณฑ์ของความเค้นที่กำหนดเท่ากับ 8, 10, 13, 15, 20, 25 ksc พบว่าตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จแสดงในรูปที่ 14 และรูปที่ 17 โดยเลขในวงเล็บคือร้อยละของปริมาตรของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จเทียบกับปริมาตรคอนกรีตฐานรากทั้งหมด

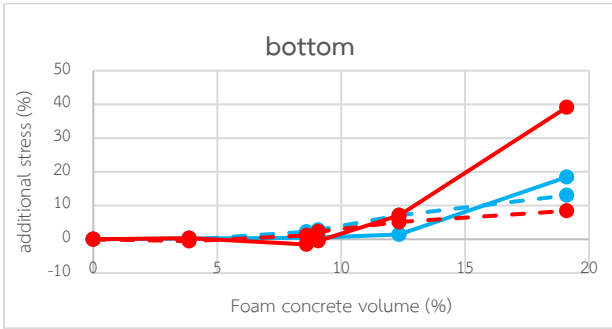
รูปที่ 15-16 และ รูปที่ 18-19 แสดงกราฟระหว่างค่าความเค้นสูงสุดที่เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละกับความเค้นสูงสุดของฐานรากที่ไม่มีคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จของฐานรากแพ F42 และ F65 ตามลำดับ โดยสีฟ้าคือความเค้นในแกน x และสีแดงคือความเค้นในแกน y เส้นทึบคือความเค้นอัด และเส้นประคือความเค้นดึง



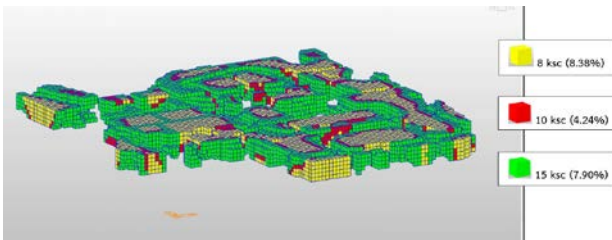
รูปที่ 14 ตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ F42 เมื่อใช้ค่าความเค้นที่กำหนดแตกต่างกัน



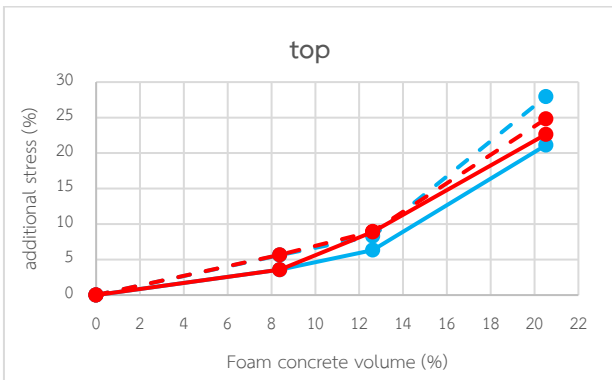
รูปที่ 15 กราฟระหว่างค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นของชั้นบนและปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ ฐานรากแพ F42



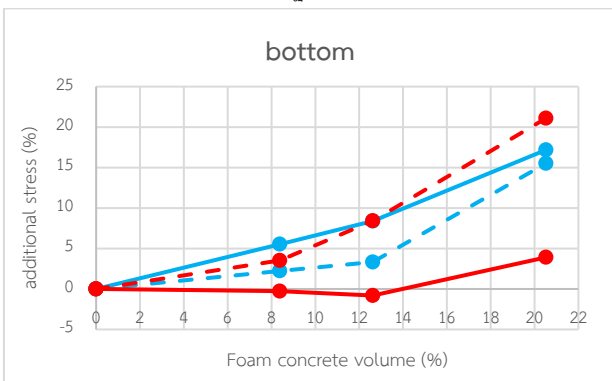
รูปที่ 16 กราฟระหว่างค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นของชั้นล่างและปริมาณคอนกรีตเบา
หล่อสำเร็จ ฐานรากแพ F42



รูปที่ 17 ตำแหน่งของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพ F65 เมื่อใช้ค่าความ
เค้นที่กำหนดแตกต่างกัน



รูปที่ 18 กราฟระหว่างค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นของชั้นบนและปริมาณคอนกรีตเบา
หล่อสำเร็จ ฐานรากแพ F65

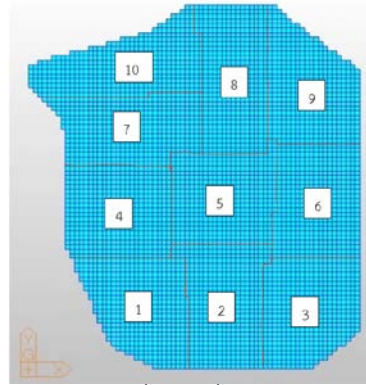


รูปที่ 19 กราฟระหว่างค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้นของชั้นล่างและปริมาณคอนกรีตเบา
หล่อสำเร็จ ฐานรากแพ F65

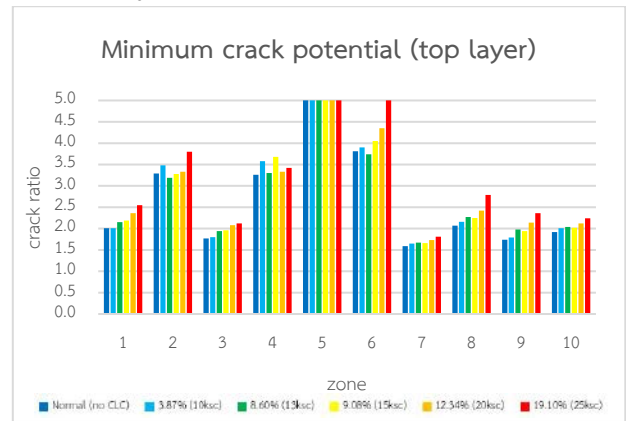
ดังนั้นจะพบว่าฐานราก F42 และ F65 สามารถแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จได้ 9.08% และ 12.62% ตามลำดับ ซึ่งจะให้ความเค้นในแกน x และแกน y มีค่าไม่เกิน 10%

5.3 วิเคราะห์หาค่า crack potential

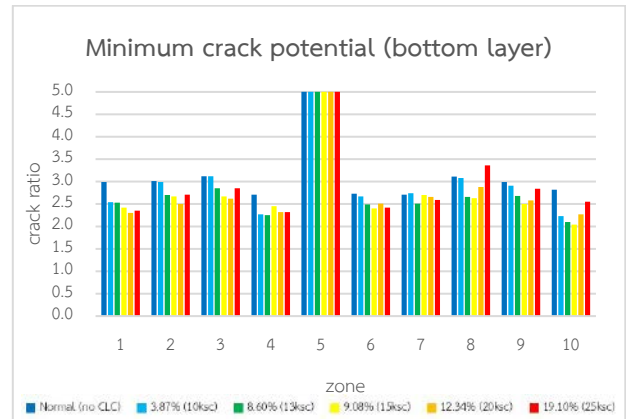
นำแบบจำลองที่ปรับแก้ตัวแปรแล้ว มาแทนที่ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อวิเคราะห์หา crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ โดยแบ่งพื้นที่ของชั้นบนและชั้นล่างออกเป็น 10 ส่วน ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน เพื่อหาว่าจุดภายในพื้นที่บริเวณใดมีโอกาสเกิดรอยร้าวมากที่สุด (crack potential น้อยที่สุด) และศึกษาการเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จส่งผลกับค่า crack potential ในแต่ละพื้นที่อย่างไร



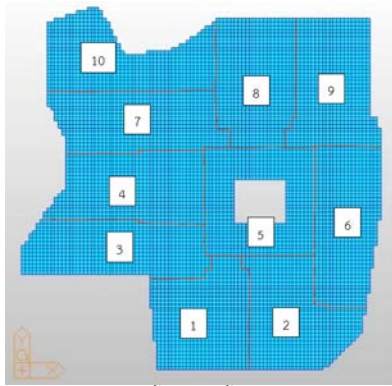
รูปที่ 20 การแบ่งพื้นที่ 10 พื้นที่ของฐานราก F42



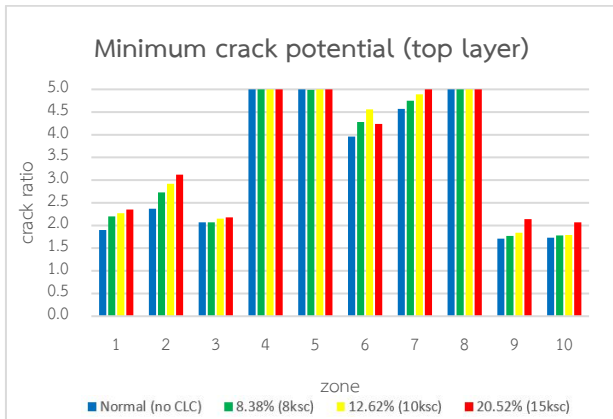
รูปที่ 21 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นบนฐานราก F42



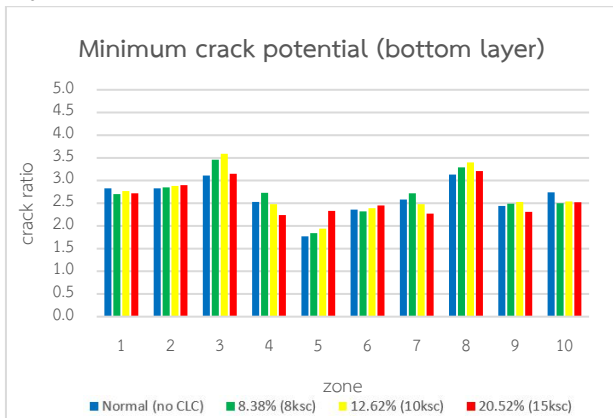
รูปที่ 22 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นล่างฐานราก F42



รูปที่ 23 การแบ่งพื้นที่ 10 พื้นที่ของฐานราก F65



รูปที่ 24 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นบนฐานราก F65



รูปที่ 25 Crack potential ที่น้อยที่สุดในแต่ละพื้นที่ของชั้นล่างฐานราก F65

จากรูปที่ 20-25 พบว่าตำแหน่งชั้นบนจะเป็นตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดรอยร้าวมากกว่าชั้นล่างเนื่องจากค่า crack potential ที่น้อยที่สุดของชั้นล่างส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 2 โดยค่า crack potential ของชั้นบนที่มีค่าน้อยที่สุดของฐานรากแพ F42 และ F65 เท่ากับ 1.59 และ 1.71 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อแทนที่ด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จจะทำให้ crack potential มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้ทำการปรับแก้แบบจำลองเพื่อให้ใกล้เคียงฐานรากจริง พบว่าสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในฐานรากแพที่พิจารณาได้ โดยมีความแม่นยำคิดเป็นค่า Root Mean Square เฉลี่ยทุกจุดวัดของ

แบบจำลองฐานรากแพอาคารตัวอย่าง F42 เท่ากับ 2.315 °C d และแบบจำลองฐานรากแพ F65 เท่ากับ 2.400 °C และสามารถคาดการณ์ผลต่างอุณหภูมิของผิวบนและผิวล่างของฐานรากแพได้ โดยพบความคลาดเคลื่อนสูงสุดของ F42 เท่ากับ 7.8 °C และของ F65 เท่ากับ 6.5 °C

การทำตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อแทรกคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์แรงน้ำหนักบรรทุกตลอดภัยจากเสาเข็มในฐานรากแพ และเลือกแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในตำแหน่งกลางฐานรากที่มีความเค้นต่ำ เพื่อให้ไม่ส่งผลกระทบต่อรับแรงของฐานรากแพ โดยเมื่อสังเกตการกระจายตัวของคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จจะพบว่าคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จจะอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากเสาเข็มและต่อมอของเสาหรือผนังรับแรงเฉือน หากกำหนดให้พฤติกรรมในการรับแรงของฐานรากแพยังคงใกล้เคียงเดิมโดยควบคุมไม่ให้ความเค้นในฐานรากแพเพิ่มขึ้นเกิน 10% จากการศึกษาฐานรากแพตัวอย่างขนาดใหญ่ 2 ฐานพบว่า สามารถแทนที่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จได้ประมาณ 9-13% ของปริมาตรคอนกรีตทั้งหมด

การแทนที่คอนกรีตของฐานรากแพด้วยคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จบริเวณแกนกลางของฐานรากแพสามารถลดอุณหภูมิในบริเวณที่ใกล้เคียงกับคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ (ประมาณ 75 ซม.) ซึ่งจะทำให้ thermal stress น้อยลง โดยพิจารณาจากค่า crack potential เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ ซึ่งพบว่า การใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในฐานรากแพทำให้ crack potential ในด้านบนมีแนวโน้มมากขึ้น แต่ด้านล่างจะลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามโดยปกติคอนกรีตในด้านบนจะวิกฤติกว่า การศึกษานี้พบว่าการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จในปริมาณที่ไม่ทำให้ความเค้นของฐานรากแพเปลี่ยนแปลงเกิน 10% สามารถทำให้ค่า crack potential ของฐานรากอาคารตัวอย่าง F42 ในด้านบนมากขึ้นเฉลี่ยทุกพื้นที่เท่ากับ 7.60% และฐานราก F65 ในด้านบนมากขึ้นเฉลี่ยทุกพื้นที่เท่ากับ 9.45%

ข้อดีของการใส่คอนกรีตเบาหล่อสำเร็จ นอกเหนือจากการช่วยลดโอกาสการเกิดรอยร้าวที่ผิวคอนกรีตเนื่องจากความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีต ยังช่วยให้ฐานรากแพมีน้ำหนักที่เบาลงซึ่งนำไปสู่การลดจำนวนเสาเข็มและทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างฐานรากแพขนาดใหญ่ได้นอกจากนั้นปริมาณคอนกรีตที่ใช้จะน้อยลง ทำให้การบริหารจัดการเทคอนกรีตมีความสะดวกมากขึ้น

อย่างไรก็ดีการศึกษานี้พิจารณาฐานรากที่ได้ออกแบบไว้แล้ว โดยกำหนดเงื่อนไขไม่ให้เกิดผลกระทบต่อพฤติกรรมและกำลังในการรับแรงของฐานรากจมน้ำสำคัญ เพื่อให้ใช้แบบก่อสร้างเดิมได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนแบบก่อสร้าง แต่หากแนวคิดนี้ได้ถูกผนวกไว้ในกระบวนการออกแบบฐานรากแพตั้งแต่ต้น ก็มีความเป็นไปได้ที่จะสามารถเพิ่มปริมาณคอนกรีตเบาหล่อสำเร็จได้ในปริมาณที่มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิของฐานรากแพดีขึ้น และยังทำให้สามารถประหยัดต้นทุนค่าก่อสร้างได้มากขึ้นด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท เอ็นจีเนียริ่ง แอ็ชเพิร์ท อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและอุปกรณ์การทดสอบ และ บริษัท เอ็ม

คอนกรีต จำกัด ที่สนับสนุนข้อมูลของฐานรากแพขนาดใหญ่ที่ศึกษาและช่วยอำนวยความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์

ขอขอบคุณ ทนอดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจาก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Concrete Institute (2005). Guide to mass concrete. (ACI 207.1R-05). USA.
- [2] Do, T. A. (2013). Finite Element Modeling of Behavior of Mass Concrete Placed on Soil. Gainesville, Fla. University of Florida.
- [3] American Concrete Institute (1997). Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures. (ACI 209R-92). USA.
- [4] T-a Tanabe, M. Kawasumi, Y. Yamashita. (1985). Thermal stress analysis of massive concrete. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ASCE, pp.407-421.
- [5] Jin Keun Kim, & Cha, S. L. (2013). Hydration heat and thermal stress in concrete structures. Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM13), pp.8-12.
- [6] Lee, M. Chae, Y. Khil, B. Yun, H.-D. (2014). Influence of Casting Temperature on the Heat of Hydration in Mass Concrete Foundation with Ternary Cements. Applied Mechanics and Materials, 525, pp.478-481.
- [7] Liu, W., Cao, W., Yan, H., Ye, T., & Jia, W. (2016). Experimental and Numerical Studies of Controlling Thermal Cracks in Mass Concrete Foundation by Circulating Water. Applied Sciences, 6, pp.110.
- [8] Aniskin, N., & Nguyen, T.-C. (2019). Influence factors on the temperature field in a mass concrete. E3S Web Conf., 97.
- [9] Nguyen, T.-C., & Luu, B. (2019). Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation. Magazine of Civil Engineering, 88, pp.70-79.
- [10] CONTEC SIIT, T. U. (2021). รายงานการวิเคราะห์ทางความร้อนของฐานราก MF1 โครงการงาน Bangkok Mall Phase 2-4
- [11] Sargam, Y., Faytarouni, M., Riding, K., Wang, K., Jahren, C., & Shen, J. (2019). Predicting thermal performance of a mass concrete foundation – A field monitoring case study. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00289.
- [12] Pan, Z., Li, H., & Liu, W. (2014). Preparation and characterization of super low density foamed concrete

from Portland cement and admixtures. *Construction and Building Materials*, 72, pp.256-261.