การเสริมฐานรากอาคารพระราชวังสราญรมย์ โดยใช้เสาเข็มขนาดเล็ก

Foundation underpinning of historical buildingsat Saranrom Palace using micro piles

ปิยะ รัตนสุวรรณ, วรรณสิริ พันธ์อุไร

Piya Rattanasuwan and Wonsiri Punurai

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

โทร 02-889-2138 ต่อ 6396 โทรสาร 02-889-2138 ต่อ 6388

E-mail: egprt@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

การซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังฐานรากของโบราณสถานในพื้นที่ปิด ที่วางอยู่บนชั้นดินอ่อน มีพื้นที่ก่อสร้างจำกัดทำได้โดยการติดตั้งเสาเข็มขนาดเล็กทั้งชนิดแบบคอนกรีตหล่อสำเร็จและหรือชนิดเจาะฉีดด้วยน้ำปูนแรงดันสูงเป็นองค์ประกอบสนับสนุนกระบวนการรับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจากความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของฐานรากเดิม และเพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของชั้นดิน การเสริมฐานรากด้วยวิธีดังกล่าวเหมาะสำหรับซ่อมแซมฐานราก การศึกษานี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์สำรวจลักษณะดินของสถานที่ก่อสร้างและขั้นตอนการเลือกใช้เสาเข็มเล็ก เพื่อการเสริมฐานรากและเพิ่มความแข็งแรงให้กับอาคารโบราณสถานพระราชวังสราญรมย์

Abstract

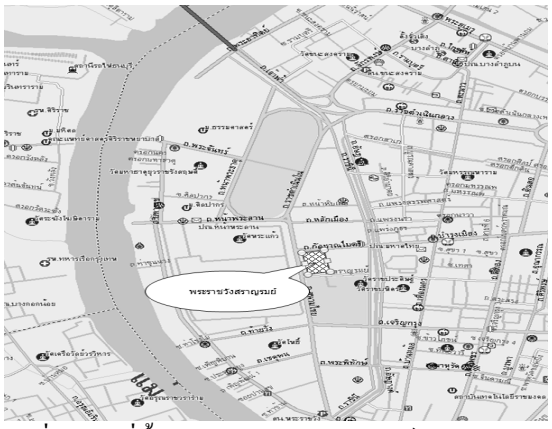
Micro piles are small diameter high capacity pre-cast concrete hydraulically driven, drilled and/or grouted piles which are ideal for building foundations on sites with poor ground conditions, sensitive surroundings, restricted vertical clearance, or difficult access. Micro piles are well suited to foundation underpinning, arresting ground movements, and increasing the capacity of existing foundations. In this study, site characterizations as well as steps for selection of micro piles are reviewed; and a major case history is presented for the underpinning of historical buildings at Saranrom Palace renovation project.

1. ประวัติที่ตั้งอาคารโบราณสถานพระราชวังสราญรมย์

พระราชวังสราญรมย์ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของพระบรมมหาราชวังระหว่างพระบรมมหาราชวังกับวัดราชประดิษฐ์ (รูปที่ 1) จัดสร้างขึ้นในสมัยพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวเป็นอาคารก่ออิฐถือปูนสองชั้นออกแบบโดยเฮนรี อาลาบาศเตอร์ เคยใช้เป็นที่ทำการของกระทรวงการต่างประเทศและเป็นบ้านพักรับรองพระราชอาคันตุกะ ในปี 2441 พระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัวได้ทรงกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้ซ่อมและขยายวังสราญรมย์ให้เหมาะสมสำหรับเป็นที่ประทับและที่พำนักของพระราชอาคันตุกะมากยิ่งขึ้น โดยจัดให้มีการแก้ไขให้ด้านหน้าหันเข้าสู่พระบรมมหาราชวัง ต่อมามีการซ่อมแซมใหญ่อีกครั้งในปี 2494 นอกจากนั้นยังได้รับพระราชทานบรมราชานุญาต ให้ก่อสร้างอาคารเพิ่มเติมขึ้นมา และในปี 2511 กระทรวงการต่างประเทศได้ทำการขยายพื้นที่สำหรับปฏิบัติราชการในบริเวณวังสราญรมย์ ได้ทำการรื้อถอนปีกด้านตะวันออกของวังสราญรมย์ และสร้างอาคารสูง 4 ชั้นขึ้นมาแทน ส่วนพระราชวังด้านอื่นนั้นคงสภาพไว้เช่นเดิมและในปี 2539 กระทรวงการต่างประเทศมีความเห็นสมควรให้ดำเนินการรื้อถอนอาคาร 4 ชั้น ควบคู่ไปกับการสำรวจและออกแบบอาคารที่จะก่อสร้างขึ้นใหม่ เพื่อให้วังสราญรมย์คืนสู่สภาพเดิม และได้ให้กรมศิลปากร มาดำเนินการในส่วนของการสำรวจและออกแบบก่อสร้าง

RECEIVED 14 March, 2012

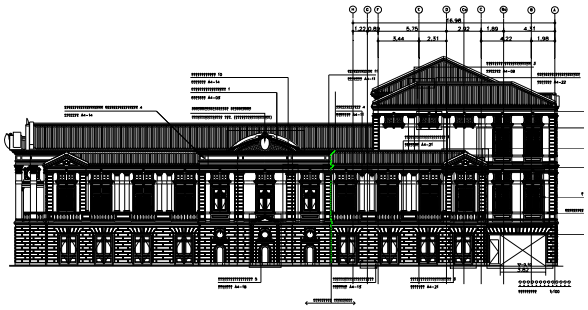
ACCEPTED 3 September, 2012



รูปที่ 1 แผนที่ตั้งของพระราชวังสราญรมย์

1.1 แบบทางด้านสถาปัตยกรรม

พระราชวังสราญรมย์ เป็นวังหลวงที่มีการสร้างตามแบบยุโรปหรือ ชาวต่างชาติเรียกกันว่า สถาปัตยกรรมแบบโคโลเนียล (รูปที่ 2) เป็นอาคาร 2 ชั้นโดยมีความกว้าง 29.96 เมตร ความยาว 85.35 เมตร ความสูง 11.95 เมตร พื้นที่ใช้สอย 2627.23 ตารางเมตร หลังคาเป็นทรงหน้าจั่วและทรงปั้นหยาวัสดุมุงหลังคาเป็นเหล็กรีดร้อน(Metal Sheet) ปูทับด้วยกระเบื้องจีน ฝ้าชั้นบนใช้ไม้สัก ฝ้าชั้นล่างใช้แคลเซียมซิลิเกต กำแพงมีลักษณะการก่ออิฐเรียงสลับตามความยาวของอิฐทุกชั้นแบบ Stretcher Bond ทำการฉาบปูนและทาสีขาวทับโดยมีรูปแบบการสร้างเป็นเรือนแถวสองชั้นเรียงแผ่ไปตามขอบเขตความยาวของบริเวณพื้นที่ชั้นบนปูด้วยไม้สักและพื้นชั้นที่ล่างปูด้วยหินอ่อน



รูปที่ 2 รูปด้านทิศใต้พระราชวังสราญรมย์

1.2 แบบทางด้านวิศวกรรม

พระราชวังสราญรมย์มีการบูรณะมาแล้ว 2 ครั้ง สภาพปัจจุบันเป็นอาคารสองชั้น ขนาดใหญ่ มีโครงสร้างแบบโบราณ คือ ระบบผนังรับน้ำหนัก ไร้คาน-เสา ส่วนโครงหลังคา เดิมใช้ไม้แดง ส่วนในปัจจุบันใช้เหล็ก และ ไม้ มาซ่อมแซมส่วนเดิม โดยวัสดุมุงหลังคา สมัยก่อนจะใช้กระเบื้องจีนเท่านั้น แต่ปัจจุบัน มีการใช้เหล็กแผ่นรีดร้อน (Metal Sheet) มาทำเป็นหลังคา และทับด้วยกระเบื้องจีนเพื่อกันน้ำรั่ว โดยผนังเดิมเป็นผนังอิฐมอญชนิดตัน ความหนา 60 เซนติเมตร ขนาด 11 x 22 x 5 เซนติเมตร ก่ออิฐเรียงสลับตามความยาวของอิฐทุกชั้น แบบ Stretcher Bond ปัจจุบันในส่วนที่สมบูรณ์ ยังคงสภาพเดิมไว้ แต่ส่วนที่ทรุดโทรม ได้มีการซ่อมแซมให้มีลักษณะเหมือนสภาพเดิมได้มากที่สุด โดยใช้อิฐมอญชนิดตัน ขนาด 9 x 19 เซนติเมตร และผนังในบางส่วนมีการเสริมเสาเพื่อช่วยในการถ่ายน้ำหนักของโครงสร้าง ส่วนระบบพื้น พื้นชั้นล่างเป็นแบบพื้นวางบนดิน (Slab on ground) เดิมเป็นพื้นหินอ่อน ต่อมาเมื่อมีการบูรณะ ได้เปลี่ยนระบบพื้นเป็นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในบางส่วน และปูพื้นด้วยหินอ่อน แต่ในบางส่วนที่ยังไม่ทรุดโทรม สามารถรับน้ำหนักได้ จึงคงสภาพเดิมไว้ ส่วนพื้นชั้นบนจะใช้พื้นไม้สัก ในระบบฐานรากนั้น เดิม เป็นเสาเข็มไม้ ฝังเป็นแพ รองรับฐานรากแผ่ที่เป็นอิฐก่อแบบเรียงสลับทุกชั้นระหว่างอิฐตามยาวและอิฐตามกว้าง เรียกว่า “English Bond” ส่วนในปัจจุบันได้มีการเสริมฐานราก ในปี 2543 ด้วยการเสริมเสาเข็มตามแนวฐานรากเดิม

1.3 กรณีการบูรณะซ่อมแซมอาคารพระราชวังสราญรมย์

ปัจจุบันมีการสร้างองค์อาคารใหม่ใกล้เคียงโดยรอบอาคารพระราชวังประกอบกับกระทรวงต่างประเทศมีความประสงค์จัดสร้างอาคารใหม่เพิ่มเติมเพื่อเชื่อมต่อกับอาคารเดิมที่ชำรุดปรากฏรอยแตกร้าวในลักษณะเอียงเป็นเส้นทแยงมุมกับแนวราบผนังปูนในส่วนของห้องหมายเลข 121 และห้องหมายเลข 124 ทางทิศใต้ของตัวพระราชวังสราญรมย์ชั้นล่าง มีความกว้าง 8.72 เมตร ความยาว 15 เมตร พื้นที่ใช้สอย 130.8 ตารางเมตร ที่เกิดจากการทรุดตัวและการเอียงของฐานรากอาคารพระราชวังสราญรมย์เดิมซึ่งตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนชุ่มน้ำสอดคล้องกับข้อมูลการทรุดตัวของสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่างที่วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ได้จัดทำไว้ พบว่าองค์อาคารตั้งอยู่บนชั้นดินที่ประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนที่ความลึกประมาณ 0 - 10 เมตร เรียกดินชั้นนี้ว่า “ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ” (Soft Bangkok Clay) คุณสมบัติ

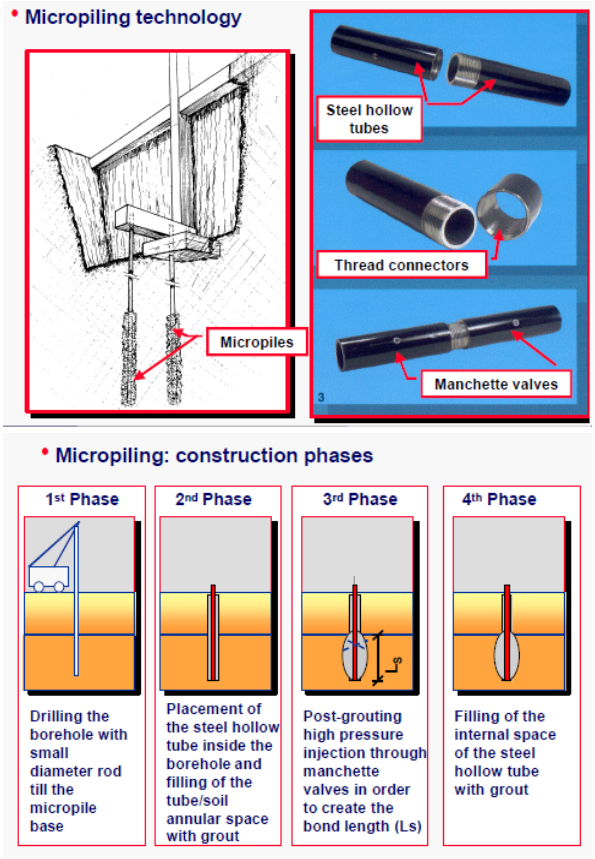
ของดินเหนียวชนิดนี้ มีกำลังและความซึมผ่านของน้ำได้ต่ำ อัตราการค่าซึมผ่าน (Coefficient of Permeability, k) มีค่าอยู่ระหว่าง $5x10^{-9}$ถึง $5x10^{-8}$ เมตรต่อวินาที และค่าคุณสมบัติการทรุดตัวของดินแบบระบายน้ำ (Coefficient of Consolidation, c_v) มีค่าระหว่าง $1x10^{-7}$ ถึง $1x10^{-5}$ ตารางเมตรต่อนาที ก่อให้เกิดปัญหาการทรุดตัวที่เรียกว่าการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) สำหรับอาคารที่มีฐานรากวางอยู่บนดินชั้นนี้

ดังนั้นเพื่อให้การบูรณะซ่อมและเสริมกำลังฐานรากของอาคารพระราชวังและการเชื่อมต่อองค์อาคารเดิมเข้ากับอาคารใหม่ได้สัมฤทธิ์ผลกระทรวงการต่างประเทศจึงได้ว่าจ้างให้มีการก่อสร้างซ่อมแซมฐานรากโดยวิธีการใช้เสาเข็มเล็ก (Foundation underpinning using micro piles)

2. เสาเข็มขนาดเล็ก

การเสริมกำลังฐานรากโดยการใช้เสาเข็มขนาดเล็ก (Foundation underpinning using micro piles) เป็นวิธีการดั้งเดิมที่มีต้นกำเนิดมาจากประเทศทางยุโรปซึ่งต่อมาถูกพัฒนาและนิยมใช้ในหลายประเทศเพื่อการปรับปรุงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและยืดอายุการใช้งานของโบราณสถานที่สำคัญซึ่งเดิมถูกออกแบบก่อสร้างให้รับน้ำหนักด้วยเสาเข็มไม้ที่กำลังผุพังลงตามเวลา การเสริมกำลังฐานรากทำเพื่อทดแทนเสาเข็มเดิม และลดพฤติกรรมการทรุดตัวขององค์อาคารที่ตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนเมื่อถูกรบกวนจากการก่อสร้างองค์อาคารอื่นๆบริเวณใกล้เคียงและใต้ดิน (Bustamante and Doix 1985; Mazon et al., 1999; Han and Ye, 2006a; Han and Ye, 2006b; ธเนศ, 2552)

เสาเข็มขนาดเล็กที่นิยมนำมาใช้โดยทั่วไปมีทั้งชนิดที่เป็นแบบคอนกรีตหล่อสำเร็จและหรือชนิดที่เป็นแบบเจาะผนวกกับการฉีดด้วยน้ำปูนแรงดันสูง ทั้งสองแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 5 ถึง 12 นิ้ว นิยมหล่อร่วมกับการใช้ท่อเหล็กกลมเป็นข้อต่อหรือแกนกลางเพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งและกำลังการรับน้ำหนัก การติดตั้งเสาเข็มทำได้แบบทั้งที่เป็นเสาเข็มเดี่ยวหรือเสาเข็มกลุ่ม รูปที่ 3 แสดงลักษณะเสาเข็ม ขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มขนาดเล็กชนิดเจาะฉีดด้วยน้ำปูนแรงดันสูง



รูปที่ 3 ลักษณะและขั้นตอนการก่อสร้างเสาเข็มขนาดเล็กชนิดเจาะฉีดด้วยน้ำปูนแรงดันสูง (Pinto et al., 2001)

กำลังรับน้ำหนักต่อต้นของเสาเข็มขนาดเล็กขึ้นอยู่กับหน่วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นดินกับผิวโดยรอบของเสาเข็ม (Unit skin friction bond) สามารถคำนวณการรับน้ำหนักของเสาเข็มประลัยได้จากสมการที่ (1)

$$Q_f = \Sigma A_f f_s \qquad (1)$$

เมื่อ A_f = $p\Delta L$ (ม^2.)

p = เส้นรอบรูปของเสาเข็ม (ม.)

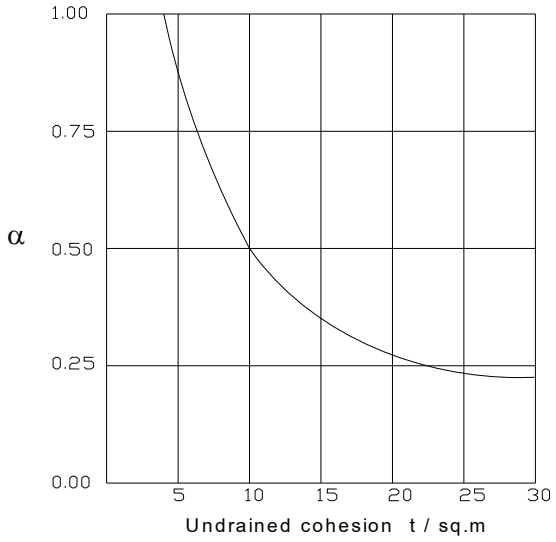
ΔL = ความหนาของชั้นดินพิจารณา (ม.)

f_s = หน่วยแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มในชั้นดินที่พิจารณา (ตัน/ม^2.)

= $\alpha\, c_u$

c_u = แรงยึดเหนี่ยวแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว (ตัน/ม^2.)

α = สัมประสิทธิ์ แรงยึดเหนี่ยว (รูปที่ 4) โดยวิธีแอลฟา



รูปที่ 4 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกับ สัมประสิทธิ์ แรงยึดเหนี่ยวโดยวิธีแอลฟา (Braja M. Das., 2007).

ส่วนการพิจารณากำลังรับน้ำหนักโดยปลอดภัยของเสาเข็มเดี่ยว ($Q_{all(net)}$) ได้จากการใช้อัตราส่วนปลอดภัย (safety factor)ตามสมการที่ (2)

$$Q_{all(net)} = \frac{Q_f}{F.S.} - W_p \qquad (2)$$

เมื่อ Q_f = กำลังรับน้ำหนักประลัย (ตัน)

W_p = น้ำหนักของเสาเข็ม (ตัน)

$F.S.$ = อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 3.0 (2.5 – 4.0)

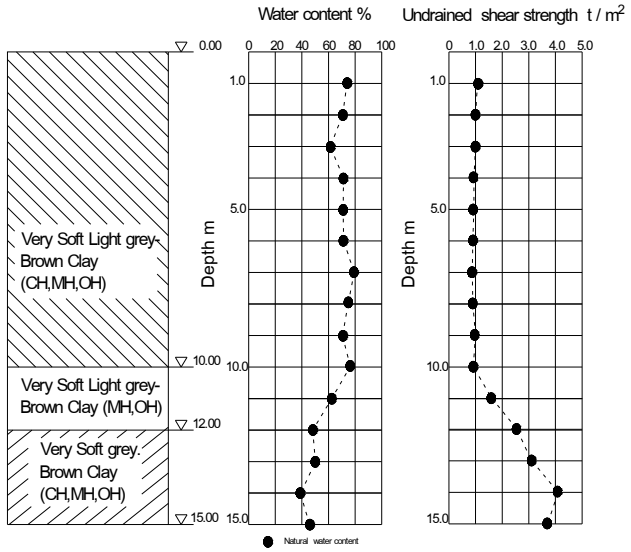
3. การเจาะดินและเก็บตัวอย่างดิน

การเจาะเก็บตัวอย่างดิน บริเวณพื้นที่อาคารพระราชวังสราญรมย์ เพื่อคำนวณหาค่าหน่วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นรวมถึงเพื่อการหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกและจำนวนเสาเข็มเล็กที่ต้องการเพื่อการซ่อมแซมและเสริมกำลังฐานรากดังที่กล่าวมาในข้างต้นเนื่องจากบริเวณที่ก่อสร้างมีจำกัดประกอบการเจาะสำรวจดินจึงจำกัดเพียง 1 หลุม เก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพทุกๆ 1 เมตร ตลอดความลึกยาว 15 เมตรรวม15 ตัวอย่าง เพื่อไปทดสอบสภาพในห้องปฏิบัติการ

4. การทดสอบตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยการทดสอบหาปริมาณน้ำในมวลดิน ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ขีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit , L.L.) ขีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit , P.L.) และการทดสอบรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test , q_u)

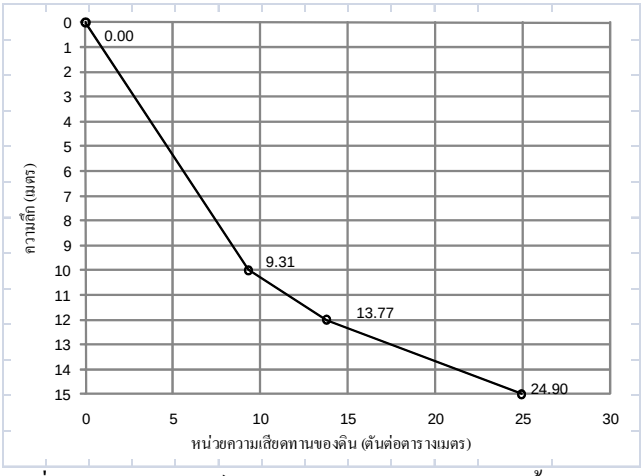
เมื่อนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบหาปริมาณน้ำในมวลดิน L.L P.L. และ s_u ตามค่าความลึกต่างๆ ผลการทดสอบเป็นดังแสดงในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าชั้นดินบริเวณที่ทำการก่อสร้างประกอบด้วยชั้นดิน 3 ชั้นคือชั้นที่ 1 หนา 10 เมตร ชั้นดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนมาก สีน้ำตาลปนเทาอ่อน (Very soft light grey - brown clay) ดินมีค่าหน่วยน้ำหนักดินชื้นเฉลี่ย 2.89 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และ มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย 0.931 ตันต่อตารางเมตร ชั้นที่ 2 หนา 2 เมตร ชั้นดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนมาก สีน้ำตาลปนเทาอ่อน (Very soft light grey - brown clay) มีค่าหน่วยน้ำหนักดินชื้นเฉลี่ย 2.64 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย 2.231 ตันต่อตารางเมตร และชั้นที่ 3 หนา 3 เมตร ชั้นดินมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนมาก สีน้ำตาลปนเทา (Very soft grey - brown clay) มีค่าหน่วยน้ำหนักดินชื้นเฉลี่ย 2.56 ตันต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย 3.709 ตันต่อตารางเมตรดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่าความชื้นและกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในดินหลุมเจาะที่ 1 บริเวณพื้นที่พระราชวังสราญรมย์

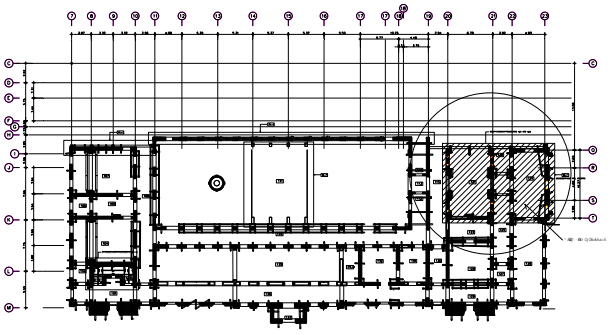
5 .การคำนวณการรับน้ำหนักของเสาเข็มเล็ก

จากข้อมูลการทดสอบดินในห้องปฏิบัติการ มาคำนวณการรับน้ำหนักของเสาเข็มเล็ก โดยใช้ค่าเฉลี่ยของหน่วยน้ำหนักดินชื้นเฉลี่ย (Average Wet Unit Weight) และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ย (Average Undrained Shear Strength) จะได้ความสัมพันธ์ ค่าความเสียดทานของดินกับค่าความลึก ดังแสดงในรูปที่ 6

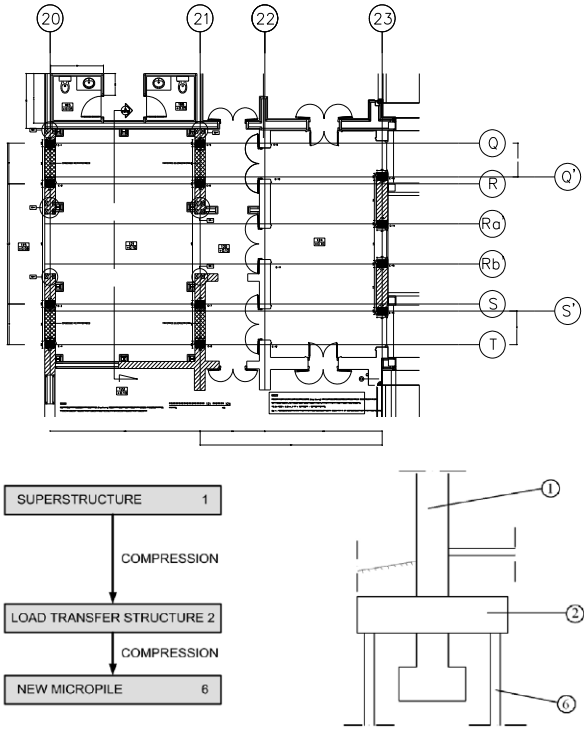


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเสียดทานของชั้นดินกับความลึก

จากแบบโครงสร้างของพระราชวังสราญรมย์ห้องหมายเลข 121 และ 124 ดังแสดงในรูปที่ 7 การซ่อมแซมและเสริมกำลังฐานรากได้กำหนดให้มีการวางตัวของเสาเข็มและการถ่ายแรงแสดงดังรูปที่ 8 และเมื่อนำมาคิดน้ำหนักบรรทุกตามตำแหน่งของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่กำหนดไว้ในแบบโดยเลือกใช้เสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร (8 นิ้ว) ระดับปลายเสาเข็มอยู่ที่ความลึก 14. 00 เมตร ปลายเสาเข็มหยั่งอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อนมาก สีน้ำตาลปนเทา (Very soft grey - brown clay) สามารถรับน้ำหนักได้โดยปลอดภัย 4.29 ตันต่อต้น กำหนดระยะห่างของเสาเข็มแต่ละฐานรากให้มีระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มห่างกัน 3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มคือ 60 เซนติเมตร รูปที่ 9 แสดงส่วนต่อระหว่างอาคารที่ซ่อมแซมฐานรากและเชื่อมต่อกับอาคารใหม่ที่กำลังดำเนินการก่อสร้างทางทิศใต้ห้องหมายเลข 121 และ 124



รูปที่ 7 การเสริมฐานรากของห้องหมายเลข 121 และ124 พระราชวังสราญรมย์



รูปที่ 8 ลักษณะและตำแหน่งการจัดวางเสาเข็มเล็ก

รูปที่ 9 ส่วนต่อระหว่างอาคารที่ซ่อมแซมและเชื่อมต่อกับห้องทางทิศใต้หมายเลข 121 และ 124

6. สรุป

การเสริมฐานรากอาคารพระราชวังสราญรมย์โดยใช้เสาเข็มเล็กมีวัตถุประสงค์เพื่อการป้องกันการทรุดตัวของอาคารด้านทิศใต้ และเพื่อการเชื่อมต่ออาคารเดิมกับการก่อสร้างอาคารหลังใหม่ การศึกษาเริ่มต้นจากการตรวจสอบเอกสารแบบอาคารพระราชวังสราญรมย์ และประวัติการซ่อมแซมฐานรากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนทำการทดสอบและสำรวจชั้นดินตามหลักวิศวกรรม เพื่อนำมาคำนวณขนาดและจำนวนเสาเข็มขนาดเล็กที่เหมาะสมในการใช้เสริมฐานราก

การศึกษาพบว่าเสาเข็มเล็กหนึ่งต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม. ลึก 14.00 เมตรสามารถรับน้ำหนักด้วยแรงเสียดทานระหว่างดินกับเสาเข็มได้ 4.29 ตัน โดยปลอดภัย การเสริมฐานรากของห้องหมายเลข 121 และ124 ของอาคารพระราชวังกำหนดให้ใช้จำนวนเสาเข็มที่เพียงพอกับการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานปลอดภัยโดยจัดให้มีระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของเสาเข็มให้ห่างกัน3 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็มคือ 60 เซนติเมตร การเสริมกำลังฐานรากก็จะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามวัตถุประสงค์ออกแบบ

เพื่อให้อาคารมีความปลอดภัยมั่นคงขึ้นการใช้งานอาคารภายหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จกำหนดให้รับน้ำหนักของอาคารร้อยละ 50 ตลอดจนการศึกษาแบบอาคารพระราชวังสราญรมย์ และประวัติการซ่อมแซมฐานรากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการเสริมฐานรากในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณสมศักดิ์ ยินดียั่งยืน คุณพงษ์พิษณุ สุวรรณศรี และคุณนิศานาถ ศรีคำ จาก บริษัทคริสเตียนี และนีลเส็น (ไทย) จำกัด (มหาชน) ขอขอบคุณ นางสาวจตุรพร จารุวัจนกุล นางสาวภัณทิมา สามารถนายนิพนธ์ สุดา และ นายสารเดช ไตรวิชารวมทั้งมหาวิทยาลัยมหิดลที่ได้เข้าร่วมเก็บข้อมูลภาคสนามและสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Bustamante, M. and Doix, B. 1985. Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés (in french). Bull. Liasion Labo. P. et Ch., nº140, p.75-92.

[2] Mason, J.A. and Kulhawy, F.H. (1999) Notes on improvement and underpinning of foundations of historic structures with reticulated micro piles. Proceedings of the 2nd International Workshop on Micro piles, Ube.

[3] Han, J and Ye, S.-L. (2006a) A field study on the behavior of micro piles in clay under compression or tension. Canadian Geotechnical Journal 43, p. 19-29.

[4] Han, J. and Ye, S.-L. (2006b) A field study on the behavior of a foundation underpinned by micro piles. Canadian Geotechnical Journal 43, p. 30-42.

[5] Pinto, A., Ferreira, S., and Barros, V. (2001) Underpinning solutions of historical constructions. Historical Constructions, 1003-1012.

[6] ธเนศ วีระศิริ. (2552) เทคนิคการแก้ไขและยกอาคารที่ทรุดเอียง. กรุงเทพมหานคร. บริษัท ฟีเนสส์ ซอยส์ เทสติ้ง จำกัด

[7] ASTM D 4718 – 87 Practice for Correction of Unit Wright and Water Content for Soils Containing Oversize Particles

[8] ASTM D 4318-93 Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils

[9] ASTM D 2166-00 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil

[10] Braja M. Das. (2007). Principles of Foundation Engineering. (Six Edition): Thomson Learning ASTM

[11] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, ว.ส.ท. (2550) ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง.กรุงเทพมหานคร.

[12] ปิยะ รัตนสุวรรณ. (2552). วิศวกรรมฐานราก. (พิมพ์ครั้งที่ 1).กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล