

ค่าปัจจัยการยึดเกาะในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ จากการวิเคราะห์ข้อมูลการกดจมบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูป The Adhesion Factor in Soft Bangkok Clay from the Data Analysis of Precast Concrete Manhole Installation

ณัฐพร เพชรวงศ์¹ และ ศลิษา ไชยพุทธ^{2,*}

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: salisa.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ เพื่อการวิเคราะห์น้ำหนักที่ใช้จริงของการกดจมบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูป และค่าปัจจัยการยึดเกาะ จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ความยาวเส้นรอบรูป (L) และค่าปัจจัยการยึดเกาะ (Adhesion Factor; α) ของบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปที่ก่อสร้างในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนในพื้นที่กรุงเทพฯ โดยใช้ข้อมูลการติดตั้งบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปในพื้นที่กรุงเทพฯ จำนวน 32 บ่อ ซึ่งมีความยาวเส้นรอบรูป 22.30 เมตร และค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ยในช่วง 10.10–25.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลการตรวจสอบความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์ ด้วยข้อมูลการตรวจวัดที่ได้ในสนาม จำนวน 32 บ่อ พบว่าน้ำหนักที่ใช้จริงของการกดจมบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปจากการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ มีความคลาดเคลื่อนเพียง -5.81% ถึง 3.90% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่ใช้จริงของการกดจมบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปจริงในสนาม ดังนั้น สมการความสัมพันธ์สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์แรงเสียดทาน ($F_{friction}$) และ กำลังรองรับน้ำหนักที่ฐาน ($W_{bearing}$) ได้ ช่วยในการออกแบบบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ลดความผิดพลาดของการคำนวณน้ำหนักที่ใช้จริงของการกดจมบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูป ช่วยให้ประหยัดงบประมาณและระยะเวลาในการก่อสร้าง

คำสำคัญ: บ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูป, กำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, ค่าปัจจัยการยึดเกาะ, ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

Abstract

This research presents a correlation equation for analyzing the actual weight used in the installation of precast concrete manholes and the adhesion factor. The study investigates the relationship between undrained shear strength (S_u), perimeter length (L), and adhesion factor (Adhesion Factor; AF) of precast concrete manholes constructed in soft Bangkok clay. Data from the installation of 32 precast concrete manholes in Bangkok

were utilized, with a perimeter length of 22.30 meters and an average undrained shear strength ranging from 1.03 to 2.70 tons per square meter. Validation of the correlation equation using field measurement data revealed that the calculated weight for manhole installation had a deviation of only -3.54% to +2.67% compared to the actual weight used in the field. Therefore, the correlation equation can be applied for analyzing frictional force ($F_{friction}$) and bearing capacity at the base ($W_{bearing}$). This helps optimize the design of precast concrete manholes in soft Bangkok clay, reduces errors in calculating the actual weight for installation, and contributes to cost and time savings in construction.

Keywords: Precast concrete manhole, undrained shear strength, adhesion factor, soft Bangkok clay

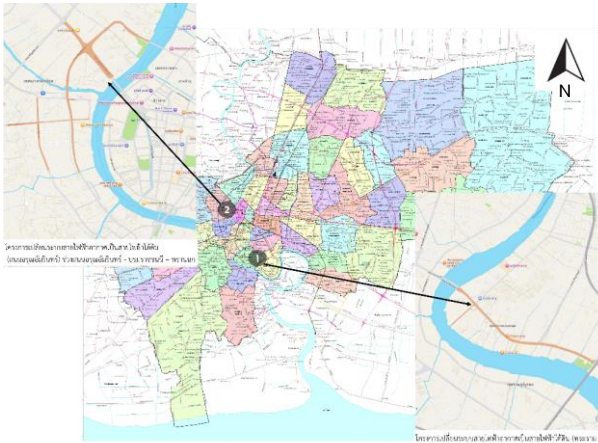
1. บทนำ

ปัจจุบันกรุงเทพมหานครและเขตปริมณฑลมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วทั้งในด้านประชากรและการกระจายตัวของแหล่งเศรษฐกิจ ทำให้ความต้องการใช้งานระบบสาธารณูปโภคเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะระบบไฟฟ้า ระบบประปา และระบบระบายน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องมีการก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคใต้ดินที่ต้องมีความมั่นคงและความปลอดภัย ในการก่อสร้างจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติทนทานต่อแรงกดทับจากการจราจรและแรงดันจากดินที่ด้านบนบ่อพักคอนกรีตนับเป็นหนึ่งในวัสดุสำคัญที่ใช้เป็นโครงสร้างของการก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคใต้ดิน

บ่อพักคอนกรีตมีหลากหลายประเภทและหลายขนาด ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและสภาพแวดล้อมในพื้นที่ก่อสร้าง การติดตั้งบ่อพักคอนกรีตที่ใช้สำหรับการระบายน้ำหรือบ่อพักที่ใช้ในการตรวจสอบระบบท่อสาธารณูปโภค ในพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล มักจะพบเจอกับความท้าทายที่มาจากสภาพดินอ่อนที่ไม่สามารถรับน้ำหนักหรือแรงกดทับได้ดี การติดตั้งบ่อพักคอนกรีตจำเป็นต้องพิจารณาการกระจายแรงดันด้านทานจาก

ดินที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการยกตัวขึ้น หรือคดงอมากกว่า
แบบก่อสร้างกำหนด

ปัจจุบันมีการศึกษาเรื่องการคดงอของคอนกรีต ทำโดยใช้ไฟไนต์
อิลิเมนต์ (FEM) ช่วยจำลองพฤติกรรมของคอนกรีตและแรงดันทาน
ระหว่างดินกับบ่อพักได้แม่นยำ ทำให้การออกแบบโครงสร้างสอดคล้องกับ
สภาพแวดล้อมจริงมากขึ้น [1] แต่ยังไม่มีการศึกษาจากข้อมูลจริงจาก
โครงการก่อสร้างจริง โดยพบแค่การศึกษาจากเสาเข็มเท่านั้น ซึ่งศึกษา



รูปที่ 1 พื้นที่การศึกษา 2 โครงการก่อสร้างในพื้นที่การพัฒนาสาธารณูปโภคใน
กรุงเทพมหานคร

การวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานทั้งหมดที่เกิดขึ้นระหว่าง
ดินกับบ่อพักคอนกรีตขนาดต่างๆ ณ โครงการก่อสร้างจำนวน 2 โครงการ
ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยมุ่งเน้นการพิจารณาสมประสิทธิ์แรงเสียด
ทานของดินจากข้อมูลในภาคสนามที่สามารถทราบแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น
จริง เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาออกแบบในอนาคต

2. พื้นที่ทำการศึกษา

ดินเหนียวกรุงเทพฯ พบส่วนใหญ่ในพื้นที่ทางตอนใต้ของที่ราบลุ่ม
แม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งอยู่ใต้ชั้นตะกอนน้ำพาและตะกอนสามเหลี่ยมปาก
แม่น้ำในแอ่งเจ้าพระยา ครอบคลุมพื้นที่กว่า 14,000 ตารางกิโลเมตร [2]
โครงสร้างดินเหนียวกรุงเทพฯ มีลำดับชั้นดินทั่วไป ได้แก่ ชั้นเปลือกดิน ชั้น
ดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก ชั้นดินเหนียวปานกลาง ชั้นดินเหนียวแข็ง
ลักษณะเด่นคือยิ่งใกล้ตัวไทย ชั้นดินเหนียวอ่อนจะมีความหนาแน่นมากขึ้น
อย่างชัดเจนดินเหนียวกรุงเทพฯ ถูกแบ่งออกเป็น 6 โซน ได้แก่ A, B, C, D,
E และ F โดยพิจารณาจากคุณสมบัติเฉพาะของดิน [2] ซึ่งแสดงรายละเอียด
ใน ตารางที่ 1

พื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือพื้นที่โซน F และพื้นที่ดังกล่าวมีความ
หนาแน่นของชั้นดินเหนียวอ่อนมากกว่า 18 เมตร การศึกษาความสัมพันธ์
ระหว่าง สมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับ ค่าเฉลี่ยกำลังเฉือนของดินเหนียว
กรุงเทพฯ โดยใช้วิธีการ กดลงบ่อน้ำบ่อพักคอนกรีต ในพื้นที่ศึกษา 2
โครงการก่อสร้าง ซึ่งตั้งอยู่ในโซน F ได้แก่

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยการยึดเกาะ (Adhesion Factor) กับกำลัง
เฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u)

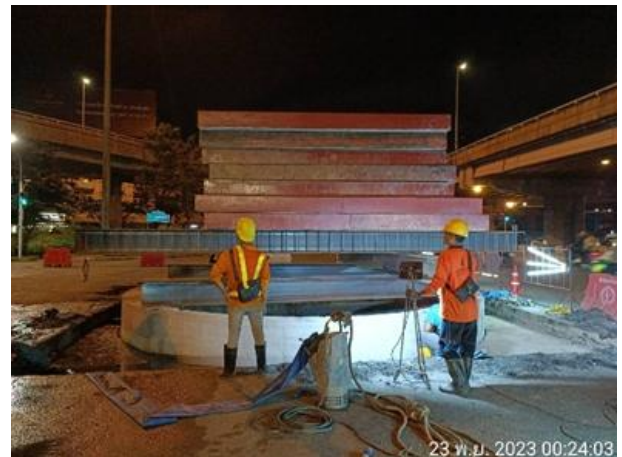
ในด้านการออกแบบบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปในดินเหนียว การ
วิเคราะห์สมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างดินกับบ่อพักหรือปัจจัยการยึด
เกาะในดินเป็นเรื่องที่สำคัญ เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อการกำหนดค่าของ
แรงกดในการถมบ่อพักที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างและระยะเวลาใช้
งานของบ่อพักคอนกรีตในพื้นที่ต่างๆ โดยเฉพาะในดินประเภทที่มีความ
เหนียวและมีความสามารถในการรับแรงดันทานได้

1. โครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน
(พระราม 3) ตั้งอยู่ในพื้นที่จากสถานีต้นทางถนนตกร ถึงสะพานพระราม 9
ครอบคลุมระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร

ตารางที่ 1 การแบ่งโซนและคุณสมบัติของดินเหนียวกรุงเทพฯ [2]

โซน	ความหนาของ ดินเหนียวอ่อน (เมตร)	ปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	ขีดจำกัดเหลว (ร้อยละ)	ดัชนีความ พลาสติก (ร้อยละ)	น้ำหนักรวมต่อ หน่วย (ตัน/ตร.ม.)
A	0-3	< 20	< 20	< 10	> 1.85
B	3-6	20-40	20-40	10-20	1.75-1.85
C	6-10	40-60	40-60	20-30	1.65-1.75
D	10-14	60-80	60-80	30-50	1.55-1.65
E	14-18	80-100	80-100	50-60	1.45-1.55
F	> 18	> 100	> 100	> 60	< 1.45

2.โครงการเปลี่ยนระบบสายไฟฟ้าอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดิน (ถนน
อรุณอมรินทร์) ช่วงถนนอรุณอมรินทร์ - บรมราชชนนี - พรานนก ตั้งอยู่
จากถนนอรุณอมรินทร์ถึงถนนพรานนก ครอบคลุมระยะทางประมาณ 13
กิโลเมตร



รูปที่ 2 ใช้น้ำหนักกดทับบ่อน้ำบ่อพักเพื่อทำการกดลงบ่อพักคอนกรีต

3. การวัดแรงต้านของดินและการเก็บข้อมูลเชิงประจักษ์

การเก็บข้อมูลภาคสนามในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาค่าเฉลี่ยกำลังเฉือน
ของดินเหนียว (S_u) และแรงดันของดินที่ปลายของบ่อพักคอนกรีตซึ่ง
เกิดขึ้นระหว่างการกดลงในพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ การเก็บข้อมูล
ดำเนินการในหลายจุดเพื่อสะท้อนสภาพดินที่หลากหลายในพื้นที่ศึกษา

3.1 น้ำหนักที่กดลงบนบ่อพัก

ถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการกดลงที่กระทำกับบ่อพักคอนกรีตในแต่ละตำแหน่ง โดยค่าที่ได้จะถูกบันทึกและจัดเก็บเพื่อใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยกำลังเฉือนของดินเหนียวกรุงเทพฯ (S_u) ดังในรูปที่ 2 จากการทดสอบ เป็นตัวอย่างดินที่เก็บจากหลุมเจาะสำรวจจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test) เพื่อวัดค่าเฉลี่ยกำลังเฉือนของดินเหนียว (S_u) และตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างการกดลง

4. การกดลงบ่อพักคอนกรีตด้วยวิธีการแบบเคซอง

กระบวนการกดลงบ่อพักคอนกรีตเริ่มต้นด้วยการเตรียมพื้นที่และบ่อพัก โดยทำการสำรวจสภาพพื้นที่เพื่อประเมินคุณสมบัติของดิน

ตารางที่ 2 ตัวอย่างตารางการเก็บข้อมูล:

ชื่อโครงการ	ตำแหน่งหลุมเจาะ	ตำแหน่งบ่อพัก	ความลึกของการเจาะ (เมตร)	น้ำหนักที่กดลง (ตัน)	S_u (ตัน/ตร.ม.)	ข้อสังเกตอื่น
โครงการพระราม 3	หลุมเจาะที่ 1	บ่อพักที่ 1	25	320	150	-
โครงการพระราม 3	หลุมเจาะที่ 2	บ่อพักที่ 2	25	250	200	-
โครงการอรุณรินทร์	หลุมเจาะที่ 1	บ่อพักที่ 8	15	150	180	สภาพดินเปียก
โครงการอรุณรินทร์	หลุมเจาะที่ 2	บ่อพักที่ 10	20	140	170	-

เช่น ชนิดของดิน ระดับน้ำใต้ดิน และโครงสร้างทางกายภาพของดิน จากนั้นทำการเตรียมบ่อพักคอนกรีต โดยตรวจสอบความหนา ความสมบูรณ์ของโครงสร้าง และขนาดที่เหมาะสมกับพื้นที่ บ่อพักจะถูกนำไปวางในตำแหน่งที่กำหนดอย่างเหมาะสมและตรวจสอบให้ตั้งอยู่ในแนวตั้งฉาก

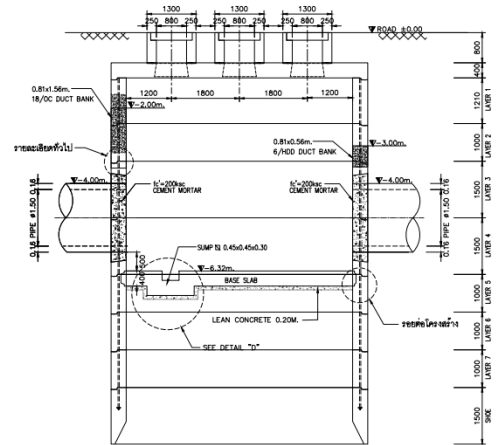
ใช้เครื่องจักรไฮดรอลิกหรือแรงกดบ่อพักลงในดินอย่างช้าๆ โดยการเพิ่มแรงกดทีละขั้น ระหว่างกระบวนการกดลงจะมีการวัดแรงกด (Compressive Force) ช่วงความลึก พร้อมตรวจสอบพฤติกรรมของดินโดยรอบ เช่น การยุบตัวหรือการบวมตัวของดิน เพื่อป้องกันความเสียหายต่อโครงสร้างบ่อพัก

กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับแรงหลัก 2 ประเภท ได้แก่:

1. แรงกด (Compressive Force): แรงที่ใช้จากเครื่องจักร เช่น แม่แรงไฮดรอลิก น้ำหนักที่ถ่วง เพื่อกดลงบ่อพักลงในดิน ซึ่งต้องมีความพอที่จะเอาชนะแรงต้านของดิน [4]
2. แรงต้านของดิน (Soil Resistance): แรงที่เกิดจากดินต่อต้านการเคลื่อนตัวของบ่อพัก ประกอบด้วย:
 - o แรงเสียดทานตามผนัง (Skin Friction): แรงที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างผนังบ่อพักกับดิน
 - o แรงต้านฐาน (Base Resistance): แรงที่เกิดขึ้นบริเวณฐานของบ่อพักที่ต้านการเคลื่อนตัวลง

การกดลงบ่อพักคอนกรีตด้วยวิธีการแบบเคซอง (Caisson Method) เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับติดตั้งโครงสร้างคอนกรีตใต้ดิน โดยขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้:

- รายละเอียดขนาดของบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูป



รูปที่ 3 แบบก่อสร้างบ่อพักคอนกรีต

- การเตรียมพื้นที่

สำรวจและเตรียมพื้นที่บริเวณที่จะติดตั้งบ่อพักคอนกรีต ทำการปรับระดับพื้นดินให้เหมาะสมและตรวจสอบตำแหน่งให้ตรงตามแบบแผนการก่อสร้างดังในรูปที่ 4

- การติดตั้งบ่อพักคอนกรีต

นำบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปมาวางในตำแหน่งที่กำหนด ใช้เครื่องมือช่วยในการปรับตำแหน่งให้ตั้งตรงและได้ระดับที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเอียงระหว่างการกด ดังแสดงในรูปที่ 5

- การเพิ่มน้ำหนักเพื่อลดแรงต้าน

กรณีที่บ่อพักไม่สามารถจมได้ตามความต้องการ ใช้วิธีเพิ่มน้ำหนักกดทับบ่อพักคอนกรีต ลดแรงต้านจากดิน ดังในรูปที่ 7



รูปที่ 4 เตรียมพื้นที่และสำรวจอุปสรรคใต้ดิน



รูปที่ 5 ปรับตำแหน่งให้ตั้งตรงและได้ระดับที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเอียงระหว่างการถม

○ การขุดดินภายในบ่อพัก

ทำการขุดดินภายในบ่อพักอย่างสมดุลทั้งสองด้าน เพื่อให้โครงสร้างค่อยๆ จมลงสู่พื้นดิน การขุดดินสามารถทำได้ด้วยเครื่องจักรกลหนักหรือแรงงานคน ขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะของบ่อพัก ดังในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขุดดินภายในบ่อพักอย่างสมดุลทั้งสองด้าน เพื่อให้โครงสร้างจมลงสู่พื้นดิน

○ การตรวจสอบตำแหน่งสุดท้าย

เมื่อบ่อพักจมถึงระดับที่กำหนด จะทำการตรวจสอบตำแหน่งสุดท้ายอีกครั้งเพื่อให้มั่นใจว่าตรงตามแบบที่กำหนด และไม่มีการเอียงหรือเบี่ยงเบน [1] ดังในรูปที่ 8

○ การปิดกั้นบ่อพัก

หลังจากที่บ่อพักถึงระดับที่ต้องการ จะทำการปิดกั้นบ่อพักด้วยวัสดุ เช่น คอนกรีตหรือซีเมนต์มอร์ตาร์ เพื่อป้องกันการซึมผ่านของน้ำ และเพิ่มความมั่นคงของโครงสร้าง



รูปที่ 7 เติมน้ำหนักในการกดจมบ่อพัก เพื่อเพิ่มแรงกดจากด้านบนและลดแรงต้านจากดินด้านล่าง

4.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของดิน

จากการทดสอบพฤติกรรมของการกดจมบ่อพักคอนกรีต พบว่าแรงเสียดทานที่ผิวบ่อพักจะเกิดแรงต้านเต็มที่เมื่อบ่อพักจมไปในชั้นดินที่มีค่าเฉลี่ยกำลังเฉือน (S_u) ที่สูงสุด [1] รวมถึงได้เกิดแรงต้านที่ปลายของบ่อพัก [4] โดยการหาแรงต้านทั้งหมดในโครงการใช้การออกแบบเช่นเดียวกับการออกแบบเสาเข็ม



รูปที่ 8 ตรวจสอบตำแหน่งสุดท้ายตรงตามแบบที่กำหนด

4.2 แรงเสียดทานตามผนัง (Skin Friction)

$$f_s = \alpha S_u \quad (1)$$

โดยที่ α คือ ค่าปัจจัยการยึดเกาะ (adhesion Factor)

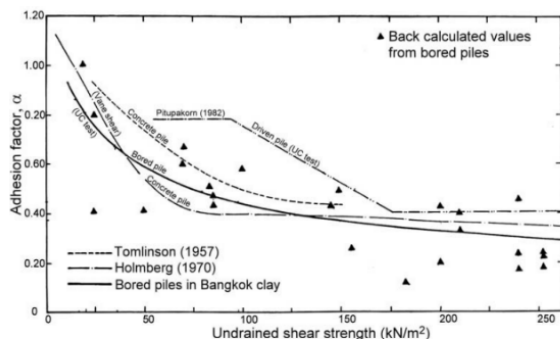
S_u คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำตลอดความสูงบ่อพัก

○ ค่าปัจจัยการยึดเกาะ (α)

ค่าปัจจัยการยึดเกาะเป็นสมบัติทางกลที่แสดงถึงแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาคดิน ซึ่งมีความสำคัญในงานวิศวกรรมโยธา เช่น การออกแบบความเสถียรของลาดชัน งานฐานราก และโครงสร้างอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับดิน ที่ผ่านมา Holmberg (1970) [4] ได้ศึกษาผลกระทบของกระบวนการอัดตัว (consolidation) และความชื้นต่อค่าปัจจัยการยึดเกาะ โดยพบว่าดินเหนียวที่ผ่านกระบวนการอัดตัวมีค่า สูงกว่าดินที่ยังไม่ได้ผ่านการอัดตัว ในขณะที่ Pitupakorn (1982) [5] ศึกษาค่าปัจจัยการยึดเกาะในดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยทำการทดสอบในเสาเข็มจำนวน 39 ต้น พบว่าค่าปัจจัยการยึดเกาะ ต่ำกว่าแบบจำลองจากต่างประเทศ สะท้อนถึงความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพของดินในพื้นที่ จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นค่าปัจจัยการยึดเกาะในงานวิจัยก่อนหน้า ในงานวิจัยนี้ ได้มีการบันทึกแรงกดในแต่ละช่วงความลึก พร้อมวิเคราะห์พฤติกรรมของดินในพื้นที่เพื่อประเมินความเหมาะสมของการติดตั้งบ่อพักคอนกรีตในลักษณะเดียวกันในอนาคต ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการถมในพื้นที่ที่มีสภาพดินแตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีข้อมูลที่ศึกษาทั้งหมด 32 บ่อพักเป็นการสร้างความน่าเชื่อถือของข้อมูล

4.3 แรงดันที่ปลายบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูป

การหาแรงดันที่ปลายของเสาเข็มได้รับการพัฒนาโดยนักวิจัยหลายคน ที่ศึกษาแรงดันที่ปลาย (Bearing Capacity) ของดินเหนียวภายใต้เงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำตามทฤษฎีของ Terzaghi บ่อพักคอนกรีตในโครงการก่อสร้างออกแบบจากทฤษฎีของ Terzaghi (1943)[6]



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบตัวประกอบการยึดเกาะ (α) ที่ใช้สำหรับเสาเข็มดินชั้นใต้พื้นกรุงเทพฯ [5]

$$q_b = 9S_u \quad (2)$$

โดยที่ q_b = หน่วยแรงดันปลายเสาเข็ม (End Bearing Stress)

Skempton (1951) [7] และ Meyerhof (1956) [8] ได้ศึกษาค่าสำหรับพื้นดินแบบไม่มีน้ำหนักเอง (Zero Overburden Pressure) และพลศาสตร์ของดินเหนียวล้วน ๆ จะมีค่าประมาณ 9

จากการวิจัยของ Royston (2022) [1] ได้ทำการศึกษาคำนวณค่าแรงดันที่ปลายของบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปพิจารณาแรงดันที่เกิดขึ้นจากหน้าตัดฐานของบ่อพัก (Cutting face) โดยทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขผ่านแบบจำลอง (Finite-element limit analysis) เพื่อศึกษาแรงดันในดิน

เหนียวที่ไม่ระบายน้ำ (Undrained soil) แสดงแรงดันที่ปลายของบ่อพักมีความสัมพันธ์กับมุมความเอียงของหน้าตัด (Inclination angle) และความขรุขระของผิวสัมผัส (Roughness) ผลลัพธ์จากงานวิจัย มุมเอียงของหน้าตัดที่เหมาะสมในสภาพดินที่ไม่ระบายน้ำสามารถเพิ่มหรือลดแรงดันได้ขึ้นอยู่กับระดับความขรุขระ โดยสามารถคำนวณค่าปัจจัยแรงดันได้จากสมการที่ (6) โดยในงานวิจัยได้นำการคำนวณหาแรงดันปลายบ่อพักโดยการอ้างอิงจากงานวิจัยของ Royston (2022) [1] โดยคำนวณค่าแรงดันที่ปลายบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูป (N_{axi})

$$N_{axi} = N_{ps} + m \times \left(\frac{B}{R}\right) \quad (3)$$

โดยที่

$$N_{ps,h=0} = N_{ps,h=0} + \frac{\left(\frac{h}{B}\right)^{0.425}}{\cos \beta + 0.133\alpha} \quad (4)$$

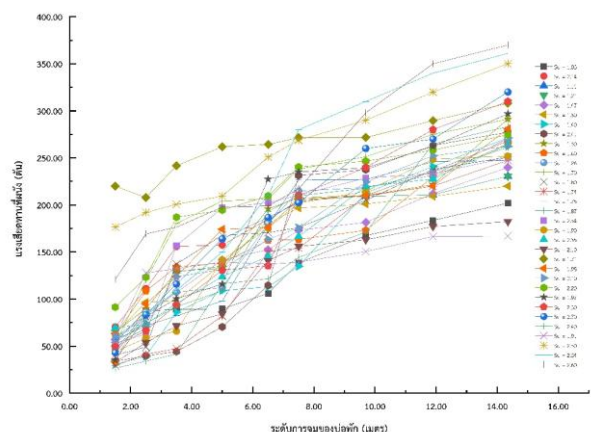
$N_{ps,h=0}$ ได้จากการ

$$N_{ps,h=0} = \left(2 \times \frac{\beta\pi}{180} + 2\right) + \frac{\alpha}{\tan(\beta)} + \left(\alpha + \frac{(\pi-4)}{2} \times \alpha^2\right) \quad (5)$$

5. ผลการวิจัยและอภิปราย

5.1 การวิเคราะห์ย้อนกลับหาค่าปัจจัยการยึดเกาะของบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูป

การวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back-Analysis) ดำเนินการเพื่อศึกษา ข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างระดับการจมและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น (ตารางที่ 3) แสดงค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัด

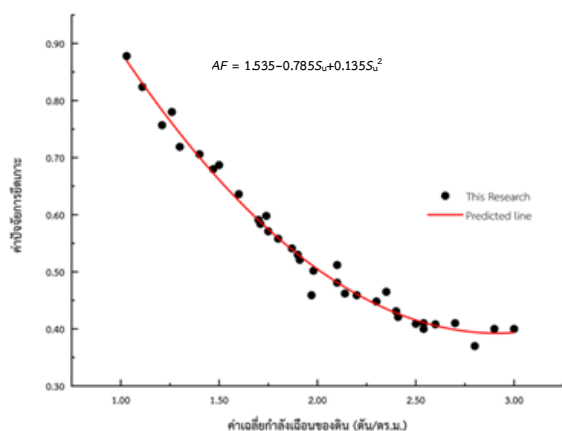


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์แรงเสียดทานที่ผนังและระดับการจมของบ่อพัก

ในภาคสนาม รวมถึงแรงเสียดทานที่ผนัง แรงดันที่ปลาย และ น้ำหนักรวมของบ่อพัก ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าแรงเสียดทานที่ผนังมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระดับการจม โดยสามารถอธิบายด้วยสมการ โดยที่ y คือแรงเสียดทานที่ผิวของบ่อพัก (ตัน) และ x คือระดับการจมของบ่อพัก (เมตร) แสดงใน รูปที่ 11 แสดงถึงความสัมพันธ์แรงเสียดทานที่ผนังและระดับการจมของบ่อพักดังกล่าวซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ยังได้คำนวณแรงเสียดทานรวมของผนังบ่อพักโดยพิจารณาจากพื้นที่สัมผัส (ตัน/ตร.ม.) และคำนวณค่าปัจจัยการยึดเกาะ (Adhesion factor) เพื่อเพิ่มความเข้าใจในพฤติกรรมการยึดเกาะระหว่างดินและบ่อพัก ผลการคำนวณในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแรงเสียดทานที่ผนังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการจมของบ่อพักเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในชั้นดินที่มี

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าปัจจัยการยึดเกาะ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกำลังเฉือน (S_u) และค่าปัจจัยการยึดเกาะ (Adhesion Factor) เป็นประเด็นสำคัญในงานวิจัยหลายชิ้น โดย Tomlinson (1957) [7] พบว่าค่า ค่าปัจจัยการยึดเกาะ มีแนวโน้มลดลงเมื่อ ค่าเฉลี่ยกำลังเฉือน (S_u) เพิ่มขึ้นในดินเหนียวอ่อน พื้นฐานสำคัญสำหรับการออกแบบฐานรากเสาเข็มในวิศวกรรมฐานราก เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Peck (1958) [8] ที่เน้นถึงความแตกต่างของค่าปัจจัยการยึดเกาะ ระหว่างดินเหนียวโครงสร้างต่ำและดินเหนียวที่มีโครงสร้างแข็งแรง โดยพบว่าดินที่มีโครงสร้างต่ำจะมีค่าปัจจัยการยึดเกาะ ลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าค่าปัจจัยการยึดเกาะ มีแนวโน้มลดลงในช่วงค่าเฉลี่ยกำลังเฉือน (S_u) น้อยกว่า 2 ตัน/ตร.ม. ควรนำมาพิจารณาอย่างเหมาะสมในการออกแบบโครงสร้างในดินเหนียวอ่อนซึ่ง จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าค่าปัจจัยการยึดเกาะในงานวิจัยนี้ลดลงเร็ว กว้างงานวิจัยก่อนหน้า การศึกษานี้ยังชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าปัจจัยการยึดเกาะในโครงสร้างบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปเมื่อเทียบกับเสาเข็มดังในรูปที่ 13



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์แรงเสียดทานที่ผนังและระดับการจมของบ่อพัก

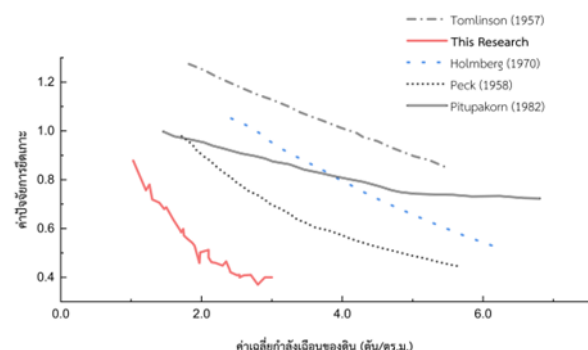
โดยค่าปัจจัยการยึดเกาะ คำนวณได้จากสมการที่พัฒนาขึ้น:

$$\alpha = 1.535 - 0.785S_u + 0.135S_u^2 \quad (3)$$

5.3 การตรวจสอบความถูกต้องของสมการ

การเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคสนาม (Field Data Validation) ความแตกต่างระหว่าง น้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ และ น้ำหนักที่ใช้ในโครงการก่อสร้าง อยู่ในช่วง -5.81% ถึง 3.90% ดังในรูปที่ 14 ตามที่แสดงในรูปที่ 15 กราฟค่าความคลาดเคลื่อน (Residual Plot) แสดงระยะห่างระหว่างค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และค่าที่ทำนายของค่าปัจจัยการยึดเกาะ ซึ่งคำนวณจากสมการที่นำเสนอ (3) ตารางที่ 4 สรุปผลการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยด้วย โดยค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ และค่าปัจจัยการยึดเกาะมีความสัมพันธ์กันที่ค่า $R = 0.9679$ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และค่าปัจจัยการยึดเกาะประมาณ 96.79% ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) แสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในค่าปัจจัยการยึดเกาะ ที่สามารถทำนายได้จากชุดข้อมูลค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ในสมการที่นำเสนอ โดย $R^2 = 0.9369$ หมายความว่า 93.69% ของความแปรปรวนของข้อมูลค่าปัจจัยการยึดเกาะสามารถอธิบายได้จากค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ซึ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ที่แม่นยำ เนื่องจาก $R^2 > 0.7$ [11]

ตาราง ANOVA ถูกใช้เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือทางสถิติของสมการที่นำเสนอ ตารางนี้ประกอบด้วยคอลัมน์ที่แสดง ผลรวมของกำลังสอง (Sum of Squares, SS), องศาอิสระ (Degree of Freedom, df), ค่ากำลังสองเฉลี่ย (Mean Square, MS), ค่าฟังก์ชัน F (F-ratio, F), และค่าความสำคัญทางสถิติ (Significant F, Sig. F) โดยค่าความสำคัญทางสถิติ (Sig. F) ที่ใช้พิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติอยู่ต่ำกว่า 0.05 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และค่าของค่าปัจจัยการยึดเกาะ ในงานวิจัยนี้มีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำและค่าปัจจัยการยึดเกาะจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 3 ตัวอย่างข้อมูลแรงเสียดทานและแรงต้านรวมของบ่อพักหมายเลข MH.BR01

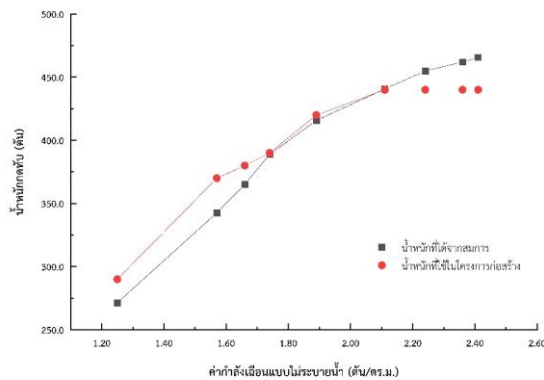
บ่อพักหมายเลข	ความยาวรอบรูป	หนังสือพิมพ์	ความสูงของหนังสือพิมพ์	ค่าระดับจาก 0.00 (เมตร)	S _u (ตัน/ตร.ม.)	S _u เฉลี่ย (ตัน/ตร.ม.)	น้ำหนักที่ใช้กลม (ตัน)	แรงดันที่ปลาย (ตัน)	น้ำหนักหนังสือพิมพ์ (ตัน)	น้ำหนักรวม (ตัน)	แรงเสียดทานที่หนังสือพิมพ์ (ตัน)	ความล้มเหลวระดับหนังสือพิมพ์และแรงเสียดทานที่หนังสือพิมพ์	แรงเสียดทานที่หนังสือพิมพ์ทั้งหมด (ตัน)	พื้นที่แรงเสียดทาน (ตร.ม.)	แรงเสียดทานที่หนังสือพิมพ์ (ตัน/ตร.ม.)	ค่าปัจจัยการยึดเกาะ
MH.BR01	22.30	Shoe	1.50	1.5	10.00		0.00		20.18	20.18	0					
		1	1.00	2.5	2.41		0.00		17.55	37.73	0					
		2	1.00	3.5	2.75		48.00		17.55	55.28	-16.53					
		3	1.50	5	2.68		67.20		26.32	81.6	28.99					
		4	1.50	6.5	2.44	2.32	57.60	119.81	26.32	107.92	45.71					
		5	1.00	7.5	2.39		76.80		17.55	125.47	82.46					
		6	1.00	9.7	2.71		76.80		17.55	143.02	100.01					
		7	1.00	11.9	1.34		105.60		17.55	160.57	146.36					
		8	1.25	14.35	1.87		105.60		26.32	186.89	172.68					

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์การถดถอย

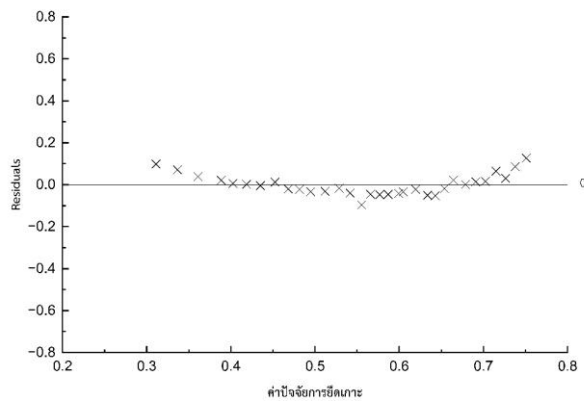
Descriptive Statistics							
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation	Skewness	Kurtosis
AF	32	0.400	0.878	0.557	0.1347	0.749	-0.4671
Su	32	1.030	2.700	1.909	0.4705	-0.125	-0.9912

Model summary				
R	R square	Adjust R square	Standard Error	Observations
0.9679	0.9369	0.9348	0.0343	32

ANOVA					
	SS	df	MS	F	Significance F
Regression	0.63108	2	0.31554	1124.7416	<0.0001
Residual	0.00898	32	2.80544E-4		
Total	0.64006	34			



รูปที่ 14 เปรียบเทียบน้ำหนักที่ก่อดมบ่อพักจากสมการและภาคสนาม



รูปที่ 15 ค่าความคลาดเคลื่อน

บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าปัจจัยการยึดเกาะ (α) และค่าเฉลี่ยกำลังเฉือนของดินเหนียว (S_u) สำหรับการติดตั้งบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ข้อมูลภาคสนามจาก 2 โครงการก่อสร้างถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ใช้คำนวณน้ำหนักที่จำเป็นในการก่อดมบ่อพักคอนกรีต ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าน้ำหนักที่คำนวณได้จากสมการมีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงในสนาม โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง -5.81% ถึง 3.90%

ผลการวิจัยยืนยันถึงความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างค่าปัจจัยการยึดเกาะ (α) และค่าเฉลี่ยกำลังเฉือนของดินเหนียว (S_u) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการออกแบบฐานรากเสาเข็มในดินเหนียวอ่อน สมการที่นำเสนอสามารถใช้ในการประมาณ แรงเสียดทานที่ผิว ($F_{friction}$) และ กำลังรองรับน้ำหนักที่ฐาน ($W_{bearing}$) ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งช่วยเพิ่มความถูกต้องของการคำนวณน้ำหนักที่ใช้จริง ลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพในการก่อสร้างที่เกี่ยวข้องกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

สมการที่ได้รับการตรวจสอบแล้วสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือช่วยสำหรับวิศวกรเทคนิคในการออกแบบและติดตั้งบ่อพักคอนกรีตสำเร็จรูปในสภาพดินที่คล้ายคลึงกัน งานวิจัยในอนาคตควรขยายขอบเขตการศึกษาให้ครอบคลุมสภาพดินที่หลากหลายขึ้น และตรวจสอบความแม่นยำของสมการในโครงการโครงสร้างพื้นฐานในเมืองประเภทอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (KMUTL), การไฟฟ้านครหลวง, บริษัท เอทีทีคอนซัลแตนท์ จำกัด และ บริษัท ทีม คอนซัลติ้ง เอนจิเนียริ่ง แอนด์ แมเนจเม้นท์ จำกัด (มหาชน) สำหรับการสนับสนุนและความช่วยเหลือที่มีคุณค่าในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Royston, P., Sheil, B., & Byrne, K. (2022). Finite element limit analysis of precast concrete manhole installation in soft clay. *Geotechnical Engineering Journal*, 48(3), pp. 245-260.
- [2] Mairiang, W. & Amonkul, C. (2010). Zonation and characteristics of Bangkok clay for geotechnical engineering applications. *Journal of Thai Geotechnical Society*, 15(2), pp. 87-99.
- [3] Lai, F., Liu, S., Deng, Y., Sun, Y., Wu, K., & Liu, H. (2020). Compressive force and soil resistance in caisson sinking process. *International Journal of Geomechanics*, 20(6), pp. 1-15.
- [4] Holmberg, R. (1970). Effects of consolidation and moisture on adhesion factor in clay. *Ph.D. Dissertation*, Royal Institute of Technology, Sweden.
- [5] Sambhandaraksa, K., & Pitupakorn, P. (1985). Adhesion factor for pile design in Bangkok subsoil. *Proceedings of the 5th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Singapore, pp. 342-355. (In case of Articles from Conference Proceedings)
- [6] Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, pp. 310-315.
- [7] Skempton, A.W. (1951). The Bearing Capacity of Clays. *Proceedings of the Building Research Congress*, London, pp. 180-187.

- [8] Meyerhof, G.G. (1956). Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 82(SM1), pp. 1-19
- [9] Tomlinson, M.J. (1957). The adhesion factor in cohesive soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 7(1), pp. 45-55.
- [10] Peck, R.B. (1958). Design considerations for foundations in soft clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 84(2), pp. 1-26.
- [11] Moore, D.S., McCabe, G.P., & Craig, B.A. (2013). *Introduction to the Practice of Statistics*. 8th ed. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp. 210-225.