

การวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดินถมบ่อถูกปรับปรุงด้วยวิธี Vacuum Consolidation Method

Estimated Strength Properties of Soft Clay Lump Backfilled in a Pond Improved by Vacuum Consolidation Method.

ศาสตราจารย์ ภัคดีเมฆ¹, ปิยวัฒน์ เงินบำรุง² และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์³

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ sartsin.p@gmail.com

² นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย piyavat.ng@gmail.com

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ Soralump_s@yahoo.com

บทคัดย่อ

ในอดีตมีบ่อน้ำที่ถูกทิ้งร้างซึ่งเต็มไปด้วยน้ำในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทยเป็นจำนวนมาก ในปัจจุบันบ่อน้ำถูกถมกลับด้วยดินโดยไม่มี การสูบน้ำออก ก้อนดินที่นำมาใช้สำหรับถมกลับในบ่อมีดินส่วนมากจะ มีความชื้นในดินสูง และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำต่ำซึ่งเรียกว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ดินเหนียวอ่อนที่ถูกถมกลับมีลักษณะเป็นก้อน ก้อนดินถมบ่อถูกถมลงในบ่อมีดินอย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้ไม่สามารถระบาย ออกได้ทันที และถูกขังอยู่ระหว่างช่องว่างของก้อนดินถมบ่อ กำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดินถมบ่อมีค่าต่ำตลอดทั้งความลึกเกิดจากการถมกลับใหม่ การวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ ประการที่หนึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ หลังจากปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีสุญญากาศ (Vacuum Consolidation Method) ซึ่งถูกวิเคราะห์จากการทดสอบในสนามด้วยวิธี Cone Penetration Test การทดสอบจากห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด และทฤษฎีของ Mesri and Khan (2011) ประการที่สอง ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ เช่น สิ่งแวดล้อมรอบข้าง การทำถนนเพื่อถมดินกลับ คุณสมบัติของดิน และการลดลงของแรงดันน้ำในชั้นทรายเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล

คำสำคัญ: ปรับปรุงคุณภาพดินวิธีสุญญากาศ, ก้อนดินถม, การลดลงของแรงดันน้ำ

Abstract

There were many abandoned ponds previous time which were filled by water in Bangkok, Thailand. Nowadays, the abandoned pond are dumped fully by backfilled lump soil without pumping the water out. The soil used for backfill in most of the cases have high water content and low shear strength which was called Bangkok soft clay. The backfilled soft clay are

lump soft clay about bucket backhoe shape. The backfilled lump soils are generally dumped quickly and hence the water can't leak out of pond and stuck between inter lump void. The shear strength in the backfilled lump soils are generally low uniformly along the depth because of newly deposition. The analysis has been carried out in two parts to estimate the increase in strength of backfilled soil. Firstly, the increase in strength of backfilled soil after improving by vacuum consolidation method was estimated by in-situ test (Cone Penetration Test), laboratory test (Unconfined Compression Test) and theoretical analysis (Mesri and Khan, 2011). Secondly, various factors (i.e. environmental, surcharge load, service load, soil properties and ground water level drawdown in Bangkok) responsible for increase in strength of ground surface have been estimated.

Keywords: Vacuum Consolidation Method, Backfilled lump soil, ground water level drawdown

1. บทนำ

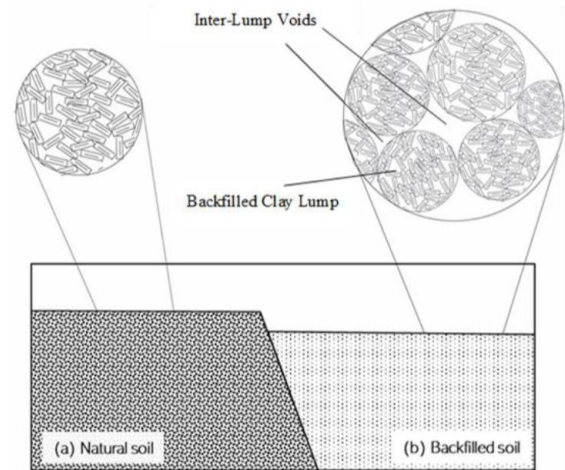
ในอดีตพื้นที่ชานเมืองกรุงเทพมหานครได้ถูกขุดเป็นบ่อมีดินเพื่อนำดินไปใช้ในการก่อสร้าง โดยบ่อมีดินนั้นถูกขุดลึกถึงชั้นดินเหนียวแข็งก่อนถึงชั้นทราย เมื่อเวลาผ่านไปบ่อมีดินที่ถูกทิ้งร้างถูกเติมเต็มไปด้วยน้ำเนื่องจากน้ำฝน และน้ำใต้ดินไหลเข้ามาสู่อบ่อ ต่อมาบ่อมีดินที่ถูกทิ้งร้างไว้ถูกซื้อขายและนำไปพัฒนาที่ดินต่อโดยการถมก้อนดินเหนียวอ่อนกลับลงไปบ่อที่มีน้ำเต็มจนถึงระดับกับบ่อโดยไม่สูบน้ำออก ความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนที่เกิดจากการถมกลับจึงหนากว่าชั้นดินเหนียวอ่อนตามธรรมชาติ ทำให้การทรุดตัวที่เกิดขึ้นมากกว่าดินเหนียวอ่อนที่ตกตะกอนตามธรรมชาติ และก้อนดินเหนียวอ่อนถมบ่อที่ถูกถมใหม่ยังไม่ได้มีการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักของดินเอง (Self-weight consolidation) ดินที่ถมลงไปบ่อนั้นไม่มีโครงสร้างชัดเจน การที่ก้อนดินถูกถมลงมาวัสดุดินจะทับถมกันอย่างรวดเร็วจนไม่มี

เวลาที่ระบายแรงดันน้ำออกได้ทันที ซึ่งจะทำให้มวลดินมีแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Pressure) นอกจากนั้นดินที่ถูกถมลงในบ่อยังมีโอกาสที่จะมีช่องว่างระหว่างก้อนดินแต่ละก้อน (Inter-lump void) ที่ถมลงไปบ่อ ซึ่งอาจจะยุบตัวได้มาก การใช้ก้อนดินถมบ่อ (Backfilled Clay Lump) เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินได้ถูกศึกษาโดย Hartlen and Ingers (1981) และ Leung et al. (2001) อีกทั้งคุณสมบัติโดยรวมมีความแปรปรวนไม่แน่นอนสูงเนื่องจากดินถมนำมาจากหลากหลายแหล่งดังรูปที่ 1 ซึ่งแตกต่างจากดินที่ตกตะกอนทับถมตามธรรมชาติดังรูปที่ 2 โดยดินเหนียวอ่อนที่นำมาถมกลับลงในบ่อมีค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำต่ำมาก (Undrained Shear Strength, S_u) และไม่เพิ่มขึ้นตามความลึกเช่นเดียวกับดินตกตะกอนตามธรรมชาติ และมีความชื้นในมวลดินสูง (Water Content, W_n) จึงต้องทำการปรับปรุงดินให้สามารถมีกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำเพิ่มขึ้น โดยเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ คือการเร่งกระบวนการอัดตัวคายน้ำด้วยวิธีสูญญากาศ (Vacuum Consolidation Method, VCM)

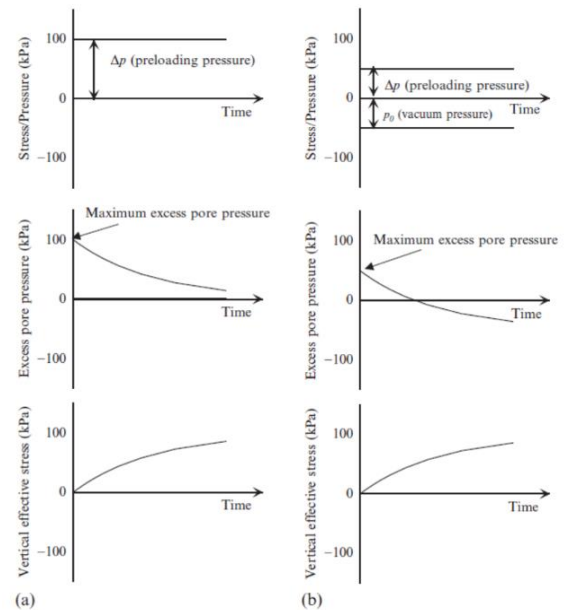
Vacuum Consolidation Method ถูกพัฒนาที่ประเทศสวีเดนโดย Kjellman (1952) โดยใช้ cardboard wick drains ถูกใช้ในการเร่งกระบวนการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวอ่อน โดยในประเทศไทยมีการใช้ Prefabricated vertical drain (PVDs) เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินอ่อน ณ สนามบินสุวรรณภูมิ (Bergado et al., 2002) วิธีการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี VCM เป็นการสร้างแรงดันสูญญากาศในดินเพื่อก่อให้เกิดน้ำหนักรูดทับจากแรงดันบรรยากาศด้านบน โดยวิธีการคือการใช้ปั๊มสูญญากาศดูดอากาศและน้ำออกจากชั้นดินเหนียวอ่อนผ่านทางแผ่น PVDs โดยมี Airtight membrane ป้องกันการรั่วออกของแรงดูดสูญญากาศภายในดิน ยิ่งแรงดันสูญญากาศได้ Airtight membrane ยิ่งแรงดันสูญญากาศยิ่งมาก (ติดลบมาก) แรงดันบรรยากาศที่กดทับลงยิ่งมากตาม กลไกการลดลงของแรงดันน้ำในดินเนื่องจากวิธี VCM และการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงความเค้นประสิทธิผลในมวลดิน (Vertical effective stress) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการใช้น้ำหนักบรรทุกทุกช่วงหน้าแบบปกติ และวิธี Vacuum preloading วิธีการ VCM ทำให้แรงดันน้ำส่วนเกินลดลงในขณะที่ยังคงรักษาหน่วยแรงรวม (Total stress) คงที่ แทนที่จะเพิ่มขึ้น (Indraratna et al., 2005) และสามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักไม่ระบายน้ำของดินได้



รูปที่ 1 ภาพตัดขวางแสดงความแตกต่างระหว่างดินธรรมชาติ และดินถมบ่อ
(ศาสตรศิลป์, 2562)



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางแสดงความแตกต่างระหว่างดินธรรมชาติ และดินถมบ่อ
(ศาสตรศิลป์, 2562)



รูปที่ 3 กลไกการเร่งการอัดตัวการคายน้ำ ด้วยการบรรทุกน้ำหนักช่วงหน้า
(a) น้ำหนักบรรทุกธรรมดา (b) วิธีใช้ Vacuum preloading
(Indraratna et al., 2005)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดินถมบ่อที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธี VCM ซึ่งถูกวิเคราะห์จากการทดสอบในสนามด้วย Cone Penetration Test การทดสอบจากห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการทดสอบแรงอัดแบบไม่จำกัด และทฤษฎีของ Mesri and Khan (2011) ประการที่สอง ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ เช่น สิ่งแวดล้อมรอบข้าง การทำถนนเพื่อถมดินกลับ คุณสมบัติของดิน และการลดลงของแรงดันน้ำในชั้นทรายเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล

2. ข้อมูลพื้นฐาน

2.1 คุณสมบัติของดินถมบ่อก่อนปรับปรุงคุณภาพ

จากผลการเจาะสำรวจทดสอบชั้นดินถมบ่อ และตำแหน่งการเจาะสำรวจ ณ โครงการก่อสร้างหมู่บ้านจัดสรร บุราสิริ วัชรพล ดังรูปที่ 4 คุณสมบัติทั่วไปของดินถมบ่อก่อนปรับปรุงที่ 5 แสดงความหนาของชั้นผิวดินหนา (Weathered Crust) 1.5 เมตรวางตัวบนชั้นดินเหนียวอ่อนมาก (Very soft clay) ถึง ดินเหนียวปนทรายแป้งแข็งปานกลาง (Medium silty clay) หนา 17 เมตร ชั้นดินด้านล่างคือดินเหนียวแข็ง (Stiff clay) ความหนา 3 เมตร โดยสามารถสรุปค่าคุณสมบัติได้ดังนี้

Weathered Crust ความลึกประมาณ 0-1.5 เมตร เป็นชั้นดินเหนียวปนซิลต์

Very Soft to Soft High Plasticity Clay (CH) มีชั้นทรายบางแทรกช่วงความลึกประมาณ 1.5-11 เมตร โดยมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Wn) 75% ,ขีดพิกัดเหลว (LL) 80% ขีดพิกัดพลาสติก (PL) 35% , Plasticity index (PI) 45% , ความหนาแน่นของดินอิ่มด้วย 17 kN/m^3 และค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าน้อยกว่า 20 kPa ซึ่งเป็นชั้นดินที่ถูกถมกลับลงมาใหม่ จึงทำให้มีค่าคุณสมบัติมีความแปรปรวนมาก

Soft to Medium High Plasticity Clay (CH) ช่วงความลึกประมาณ 11-17 เมตร โดยมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Wn) 25-80% ,ขีดพิกัดเหลว (LL) 87% ขีดพิกัดพลาสติก (PL) 35% , Plasticity index (PI) 52% , ความหนาแน่นของดิน $15-18 \text{ kN/m}^3$ และ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำประมาณ $5-30 \text{ kPa}$ โดยมีชั้นทรายแน่นปานกลาง (Medium Dense Clayey Sand) หนาตั้งแต่ 1 – 3 เมตรแทรกกระจายตัวบางความลึก

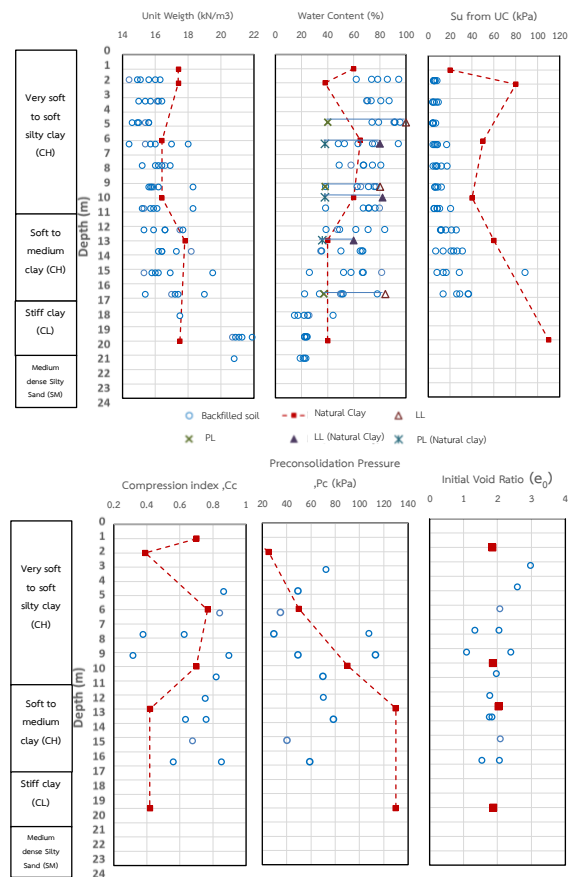
Stiff Low Plasticity Clay (CL) ช่วงความลึกประมาณ 17-21.5 เมตร โดยมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Wn) 25-50% ,ขีดพิกัดเหลว (LL) 52% ขีดพิกัดพลาสติก (PL) 24% , Plasticity index (PI) 28% , ความหนาแน่น $20-22 \text{ kN/m}^3$

Medium to Very Dense Silty Sand (SM) ถูกพบเป็นชั้นถัดลงมาถึงความลึกประมาณ 21.5 เมตรเป็นต้นไป โดยมีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (Wn) 15-20% , ความหนาแน่น $20-22 \text{ kN/m}^3$

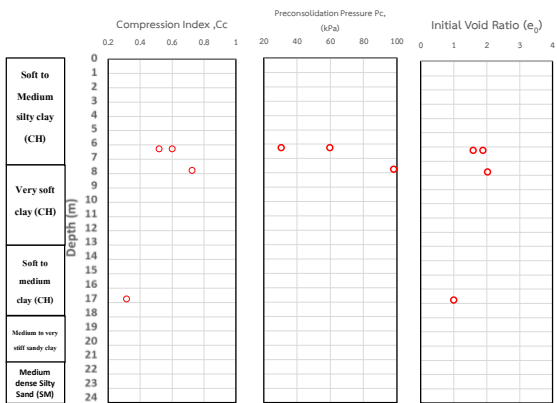
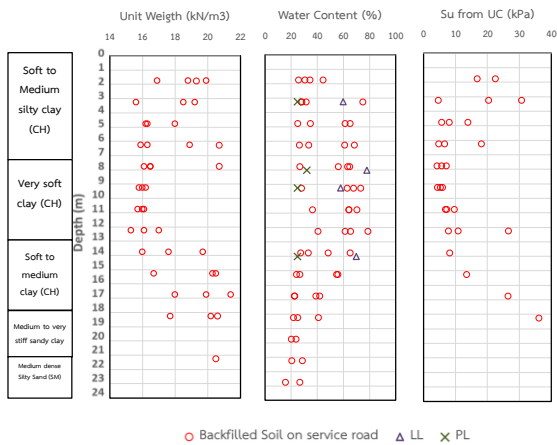
โดยในพื้นที่ทางโครงการ มีทางเดินรถบรรทุกถมดินเดิมในปี พ.ศ. 2557 ดังแสดงรูปที่ 4 โดยคุณสมบัติของดินบริเวณถนนมีความแตกต่างจากบริเวณบ่อดินเดิม ตั้งแต่บริเวณพื้นผิวถนนถึงความลึก 6 เมตร มีปริมาณความชื้นตามธรรมชาติต่ำกว่า และหน่วยน้ำหนักของดินและค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูงกว่า เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการบดอัดด้วยน้ำหนักของรถบรรทุกทุกคล้ายกับการให้น้ำหนักบรรทุกทุกวงหน้า ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 4 ตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจก่อนปรับปรุงคุณภาพดิน



รูปที่ 5 คุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดินถมบ่อ บริเวณบ่อดินเดิม



Load) ด้านบนมีความสูง 1-1.5 เมตร เพื่อเร่งอัตราการระบายน้ำ โดยความยาวของ PVDs แต่ละแผ่นมีขนาดหน้าตัด (a x b) 100 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร ขณะที่ Mandrel ที่ใช้ในการติดตั้งมีขนาดหน้าตัด (w x l) 150 มิลลิเมตร x 45 มิลลิเมตร และกำหนดรูปแบบการติดตั้งแบบจัตุรัส (Square Pattern) ระยะห่าง 1 เมตร ขั้นตอนการก่อสร้างการปรับปรุงด้วยวิธี VCM โดยใช้ PVDs และดินถม (Surcharge Loading) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลำดับการก่อสร้างระบบการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีสูญญากาศ

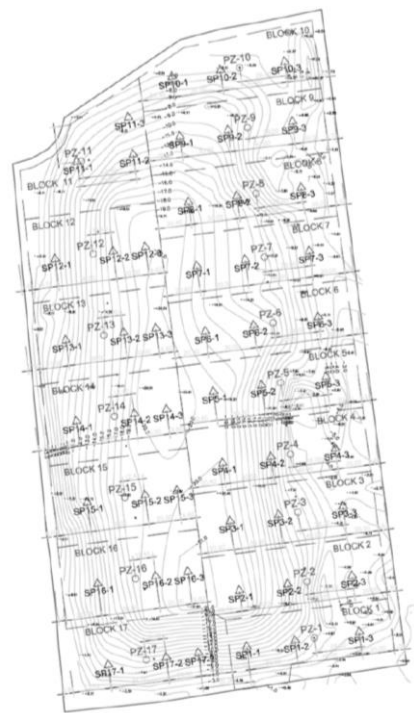
งาน	รายละเอียด
ถม Sand Blanket	หนาประมาณ 0.5 เมตร เพื่อใช้ในการรับแรงเพื่อการติดตั้ง PVDs และช่วยระบายน้ำ
ติดตั้ง PVDs แนวตั้ง	ติดตั้ง PVDs ถึงระดับความลึก 6 - 20 เมตร ตามความลึกของดินถมบ่อ
ติดตั้ง PVDs แนวนอน	ติดตั้ง PVDs ในแนวนอนเพื่อช่วยระบายน้ำ และกระจายแรงดูดสูญญากาศ
ติดตั้ง Airtight Sheet	ป้องกันการรั่วออกของแรงดูดสูญญากาศ
ติดตั้งเครื่องตรวจวัด	ติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดเพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพในการปรับปรุงดิน
เปิดระบบ VCM	เปิดปั๊มเพื่อดูดน้ำ และอากาศออกจากดินถมบ่อ จนกระทั่งอัตราการทรุดตัวถึงร้อยละ 90 ของทั้งหมดจึงปิดระบบ
ถม Surcharge Loading	ถมดินสูง 1.0-1.5 เมตร เพื่อช่วยเร่งการอัดตัวคายน้ำ

รูปที่ 6 คุณสมบัติทางกายภาพของชั้นดินถมบ่อ บริเวณทางเดินรถบรรทุก

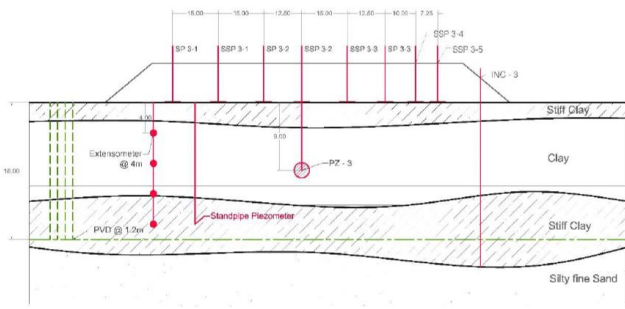
จากผลการเจาะสำรวจดินบริเวณดินถมบ่อจะพบค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำมีค่าต่ำกว่าดินธรรมชาติที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ดินถมบ่อ โดยดินถมบ่อจะมีค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำต่ำไม่เพิ่มขึ้นตามความลึก และเป็นชั้นหนาต่อเนื่องมีค่าประมาณต่ำกว่า 20 kPa แต่ในส่วนของค่ากำลังรับแรงเฉือนบริเวณทางเดินรถบรรทุกมีค่าสูงประมาณ 20 kPa มีความหนา 6 เมตรจากผิวดิน เนื่องด้วยดินที่ถูกนำมามากกลับทำเป็นถนนต้องมีกำลังรับแรงเฉือนสูงเพื่อให้รถบรรทุกสามารถเดินทางได้ และยังได้รับการบดอัดเพิ่มเติมจากแรงที่รถบรรทุกมากระทำ และดินถมบ่อที่มีกำลังรับน้ำหนักต่ำมากจะอยู่บริเวณ BH-8 และ BH-14 เนื่องจากเป็นบริเวณที่ดินเลนหรือดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมไม่ดีไหลไปรวมตัวกันอยู่ ทำให้พื้นที่นั้นมีค่ากำลังรับแรงเฉือนต่ำที่สุด

2.2 การปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธีสูญญากาศ (Vacuum Consolidation Method)

พื้นที่ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี VCM มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 73,432 ตารางเมตร และความหนาของชั้นดินถมมีตั้งแต่ 6 ถึง 20 เมตรจากผิวดิน แบ่งออกเป็น 17 แปลงดังรูปที่ 7 และรูปตัดขวางแสดงการวางเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมดินดังรูปที่ 8 โดยมีการใช้แรงดูดสูญญากาศ -70 kPa เพื่อให้ก่อให้เกิดน้ำหนักรีดทับ 70 kPa เทียบเท่ากับดินถมสูง 3.5 เมตร (ความหนาแน่นของดิน 20 kN/m³) และใช้ดินถมน้ำหนัก (Surcharge



รูปที่ 7 ตำแหน่งการแบ่งแปลงพื้นที่การปรับปรุง และเครื่องมือตรวจวัดในสนาม

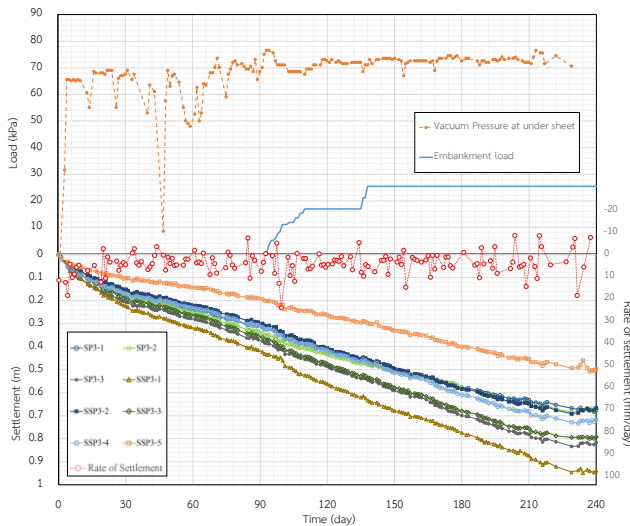


รูปที่ 8 ภาพตัดขวางแสดงการวางเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมทางธรณีเทคนิค

2.3 พฤติกรรมดินถมบ่อที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธี VCM

2.3.1 พฤติกรรมการทรุดตัว

พฤติกรรมการทรุดตัวของดินถมบ่อที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้นหลังจากเปิดระบบสุญญากาศจะเกิดการทรุดตัวโดยทันทีเนื่องจากช่องว่างระหว่างก้อนดินถูกบีบและกดทับทุกทิศทาง ทำให้ช่องว่างพังทลายลง การทรุดตัวในช่วงที่เปิดระบบสุญญากาศเพียงอย่างเดียว ทรุดตัวมากที่สุดประมาณ 0.4 เมตร หลังจากถมหน้าดินแล้วเพิ่มน้ำขึ้น 1-1.5 เมตร การทรุดตัวเกิดขึ้นมากที่สุด 0.9 เมตร ณ สิ้นสุดการเปิดระบบสุญญากาศหรือการอัดตัวคายน้ำอยู่ที่ร้อยละ 90 ดังรูปที่ 9

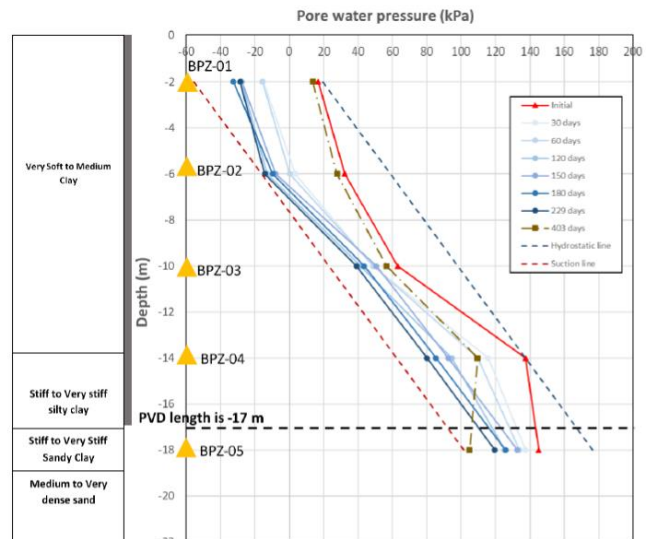


รูปที่ 9 พฤติกรรมการทรุดตัวของดินถมบ่อที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธี VCM (ศาสตราจารย์, 2562)

2.3.2 พฤติกรรมแรงดันน้ำของดินถมบ่อ

ผลการตรวจวัดแรงดันน้ำส่วนเกินในแปลงที่ 3 มีการติดตั้ง PVD 17 เมตร ซึ่งมีการติดตั้ง Piezometer (ความลึก 2, 6, 10, 14 และ 18 เมตร) เปิดระบบ VCM เป็นเวลา 229 วัน มีการเพิ่มน้ำ หนักกดทับ 2 ครั้ง ครั้งแรกวันที่ 94 (1 เมตร) และครั้งที่สองวันที่ 136 (0.5 เมตร) สามารถตรวจวัดการสลายตัวของแรงดันน้ำในช่วงแรงซึ่งมีเฉพาะการเปิดระบบ VCM แรงดันน้ำส่วนเกินลดลง 5-15 kPa แต่ ณ วันที่ 35 เกิดอุบัติเหตุที่บ่มี vacuum ทำ

ให้แรงดันน้ำเพิ่มขึ้นฉับพลัน หลังจากเปิดระบบ VCM ใหม่อีกครั้งแรงดันน้ำลดลง และไปทางเดียวกัน และเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักกดทับ หลังจากการเพิ่มน้ำหนักกดทับ แรงดันน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้น 10 kPa และสลายตัวเมื่อเวลาผ่านไป การลดลงของแรงดันน้ำส่วนเกินเมื่อเปิดระบบ VCM เป็นไปในทางเดียวกัน แต่การลดลงของแรงดันน้ำ ส่วนเกินที่ตรวจวัดได้จาก BPZ-3 (ความลึก 10 เมตร) ลดลง 27 kPa ซึ่งลดลงน้อยกว่าที่ความลึกอื่น เนื่องจากการอุดตันที่ PVD จากตะกอนทรายแป้ง ทำให้แรงดันสุญญากาศไม่สามารถกระจายได้อย่างสมบูรณ์ ที่ BPZ-5 (ความลึก 18 เมตร) แรงดันน้ำลดลง 28 kPa โดยที่ความยาวของ PVD อยู่ที่ 17 เมตร และ Piezometer ถูกติดตั้งในชั้น Stiff Clay มีชั้นทรายวางตัวอยู่ด้านล่างดังรูปที่ 10 การลดลงของแรงดันน้ำในชั้น Stiff Clay เกิดจากการลดลงของแรงดันน้ำในชั้นทราย เนื่องจากการลดลงของระดับน้ำใต้ดิน (Withdrawal of groundwater) การลดลงของแรงดันน้ำตลอดแนวของความยาว PVD ลดลง และเคลื่อนที่เข้าหาเส้น suction line ทั้งหมด หลังจากปิดระบบ VCM แรงดันน้ำที่ตรวจวัดได้ไม่กลับคืนสู่สภาพแรงดันน้ำสถิต (Hydrostatic Pore Pressure) เมื่อเวลาผ่านไป 174 วันหลังจากปิดระบบ แรงดันน้ำ ณ ความลึก 2 เมตร เพิ่มขึ้นเข้าใกล้เส้นแรงดันน้ำสถิตเนื่องจากมีฝนตกลงมาในพื้นที่ทำให้เกิดการซึมของน้ำในระดับตื้น ส่วนแรงดันน้ำบริเวณใกล้ชั้นทรายมีการลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากปิดระบบ VCM แล้ว อันเนื่องมาจากการลดลงของแรงดันน้ำในชั้นทรายที่เหนียวนำไปให้น้ำในชั้นดินเหนียวไหลลงไปยังชั้นทราย ทำให้เกิดการอัดตัวคายน้ำสองทาง (Two-way drainage consolidation)



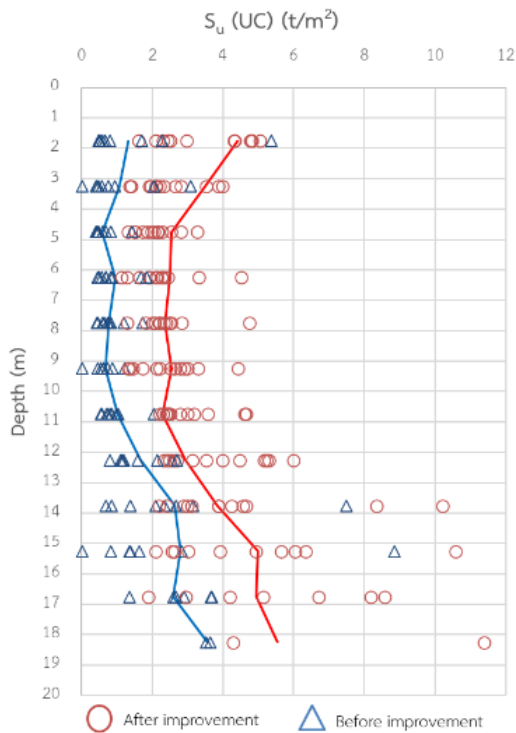
รูปที่ 10 พฤติกรรมการแรงดันของดินถมบ่อที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธี VCM (ศาสตราจารย์, 2562)

3. การวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ

3.1 กำลังแรงเฉือนไม่ระบายน้ำหลังจากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี VCM

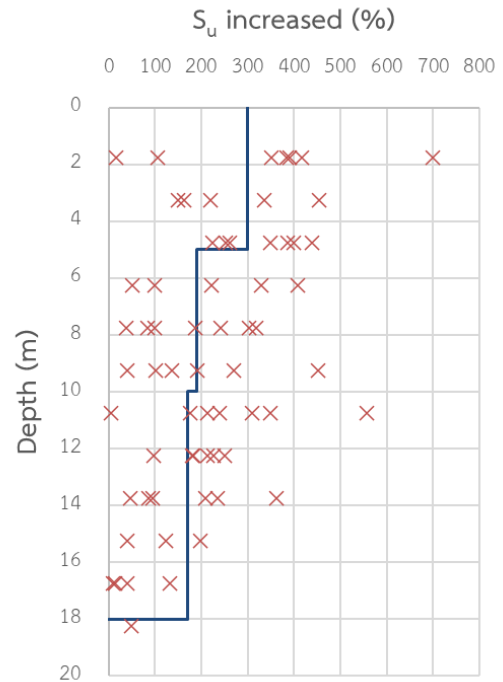
จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการคุณสมบัติของดินถมบ่อหลังจากการปรับปรุงคุณภาพดินด้วย VCM ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำทดสอบ

ด้วยวิธีการ Unconfined compression test มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดทั้งความหนาของชั้นดินเหนียวถมโป (18 – 20 เมตร) ดังรูปที่ 11 ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ ที่ความลึก 0-5 เมตร เพิ่มขึ้นจาก 5-10 kPa ไปยัง 25-45 kPa โดยคิดเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 265 จากก่อนปรับปรุงคุณภาพดินด้วย VCM โดยเพิ่มเนื่องจากอิทธิพลจากแรงดัน vacuum ร่วมกับ surcharge load ที่สามารถถ่ายทอดแรงดันลงดินในระดับตื้น การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ ที่ความลึก 5-10 เมตร เพิ่มขึ้นจาก 5-10 kPa ไปยัง 25 kPa โดยคิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 213 ด้รับอิทธิพลจากแรงดัน vacuum เพียงอย่างเดียว และที่ความลึก 10-18 เมตร เพิ่มขึ้นจาก 10-35 kPa ไปยัง 23-55 kPa มีการเพิ่มขึ้นร้อยละ 79 ซึ่งด้รับอิทธิพลจากแรงดัน vacuum แต่จะลดลงตามความลึก และชั้นดินถมโปที่มีความลึกใกล้เคียงกับชั้นทราย มีค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำเพิ่มขึ้นเนื่องแรงดันน้ำในชั้นทรายลดลงเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล



รูปที่ 11 ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำดินถมโปก่อนและหลังปรับปรุงด้วยวิธี VCM (Piyavat ,2019)

ถ้าหากวิเคราะห์เฉพาะดินถมโปโดยการตัดหลุมเจาะบริเวณที่เป็นแกนถนนออก การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำจะลดต่ำลงตามความลึก การเพิ่มขึ้นที่ความลึก 0-5 เมตร จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 300 โดยเฉลี่ยที่ความลึก 5-10 เมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 190 และ 10-17 เมตรจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 170 ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ร้อยละของการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดินถมโป (Piyavat ,2019)

3.2 วิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำด้วยวิธี Mesri and Khan (2011)

Mesri and Khan (2011) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำเนื่องจากการปรับปรุงด้วยวิธีสูญญากาศ ดังสมการที่ 1 ของ Terzaghi et al. (1996) เกี่ยวกับกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำของดินเหนียวและดินทรายแบ่งที่ถูกต้องที่บ่งส่วนหน้า

$$s_u = \frac{S_{u0}}{\sigma'_p} \sigma'_v \quad (1)$$

โดย s_u คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำ
 S_{u0} คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำเริ่มต้น
 σ'_p คือ หน่วยแรงที่กระทำสูงสุดในอดีต
 σ'_v คือ หน่วยแรงประสิทธิผลแนวตั้ง

ค่ากำลังรับแรงเฉือน (S_u) จะคงที่และเท่ากับค่ากำลังรับแรงเฉือนเริ่มต้น (S_{u0}) เมื่อดินอยู่ในช่วง recompression ซึ่งจะอยู่ในช่วง σ'_{v0} ถึง σ'_p เมื่อ σ'_v มีค่ามากกว่า σ'_p ค่ากำลังรับแรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้น

โดย $\sigma'_v = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v$ สำหรับการถมน้ำหนักบรรทุกทุกปกติ

$\sigma'_v = \sigma'_{v0} + |p_{vm}|$ สำหรับการถมน้ำหนักด้วย vacuum preloading

สำหรับดินเหนียวอ่อนที่มีค่า σ'_p / σ'_{v0} และ S_{u0} / σ'_p คงที่ และ $\Delta\sigma_v$ คงที่ อัตราส่วนระหว่าง S_u / S_{u0} สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\frac{S_u}{S_{u0}} = \frac{1}{\sigma'_p / \sigma'_{v0}} + \frac{1}{\sigma'_p / \sigma'_{v0}} \frac{\Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}} \quad (2)$$

$$\frac{S_u}{S_{u0}} = \frac{1}{\sigma'_p / \sigma'_{v0}} + \frac{S_{u0} \Delta\sigma_v}{\sigma'_p S_{u0}} \quad (3)$$

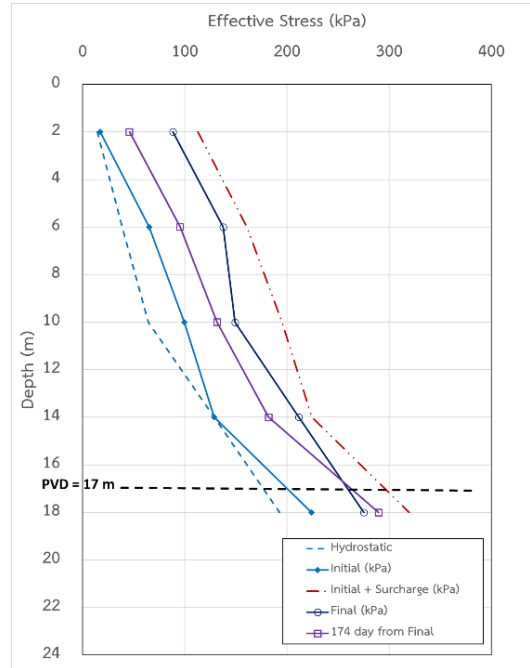
สมการที่ 2 และ 3 แสดงถึง S_u / S_{u0} มีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของ σ'_{v0} ตามความลึก หรือการเพิ่มขึ้นของ S_{u0} นั้นเป็นจริงเมื่อ $\Delta\sigma_v$ และ $|p_{vm}|$ คงที่ การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนหรือดินทราย แป้ง สามารถวิเคราะห์ได้ตามสมการ

$$S_u - S_{u0} = (\Delta\sigma'_v - (\sigma'_p - \sigma'_{v0})) \frac{S_{u0}}{\sigma'_p} \quad (4)$$

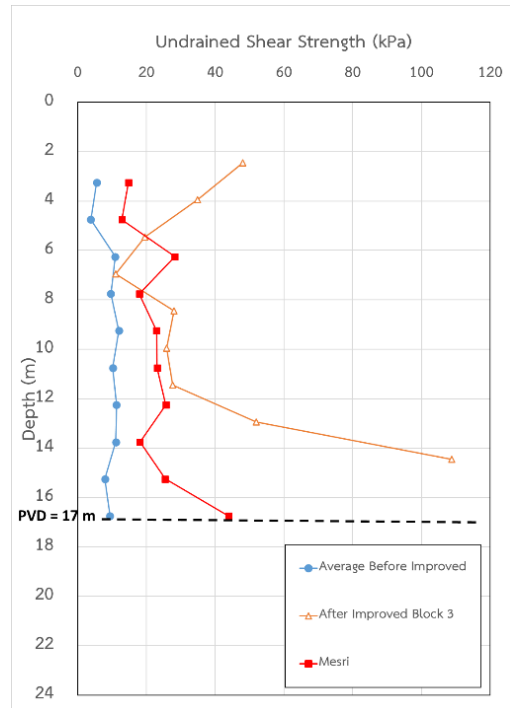
หรือ

$$S_u - S_{u0} = (\Delta\sigma'_v - \frac{1}{\sigma'_{v0}} (\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} - 1)) \frac{S_{u0}}{\sigma'_p} \quad (5)$$

จากผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำเนื่องจากการปรับปรุงวิธี VCM โดยมีแรงดันสุญญากาศที่ -70 kPa และมีการเพิ่ม surcharge load ด้านบนของพื้นดินถมที่ปรับปรุงสูง 1 เมตร มีค่าประมาณ 20 kPa ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของดินที่นำมาวิเคราะห์อยู่บริเวณ BH-5 หรือบริเวณแปลงปรับปรุงที่ 3 โดยค่าหน่วยแรงที่กระทำสูงสุดในอดีต (σ'_p) สามารถคำนวณย้อนกลับจากค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่สลายไปดังรูปที่ 10 ไปยังค่าหน่วยแรงประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสลายไปของแรงดันน้ำในมวลดินดังรูปที่ 13 เปรียบเสมือนการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงสูงสุดที่กระทำในอดีต การคาดการณ์การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำในอดีต แสดงดังรูปที่ 14 มีค่าเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการในช่วง 6-17 เมตร แต่ในช่วง 0-6 เมตร จะมีค่าที่แตกต่างออกไปเนื่องจากหลุมเจาะสำรวจก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพดินมีระยะห่างกัน และสภาพดินบริเวณผิวดินอาจมีการเปลี่ยนแปลงไป การเพิ่มขึ้นในช่วง 3-6 เมตร มีค่าประมาณ 2.5 เท่า ในช่วง 6-12 เมตร มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า และในช่วง 12-17 เมตร มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า จากการวิเคราะห์คาดการณ์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำด้วยทฤษฎีของ Mesri and Khan (2011) จากการลดลงของแรงดันน้ำส่วนเกินในมวลดินพบว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันน้ำส่วนเกินที่ลดลง โดยเฉพาะบริเวณปลายของ PVDs ที่อยู่ใกล้ชั้นทรายมีการเพิ่มขึ้นชัดเจน เป็นไปในทางเดียวกับผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 13 หน่วยแรงประสิทธิผลเนื่องจากการลดลงของแรงดันในมวลดิน (ศาสตร์ศิลป์ ,2562)



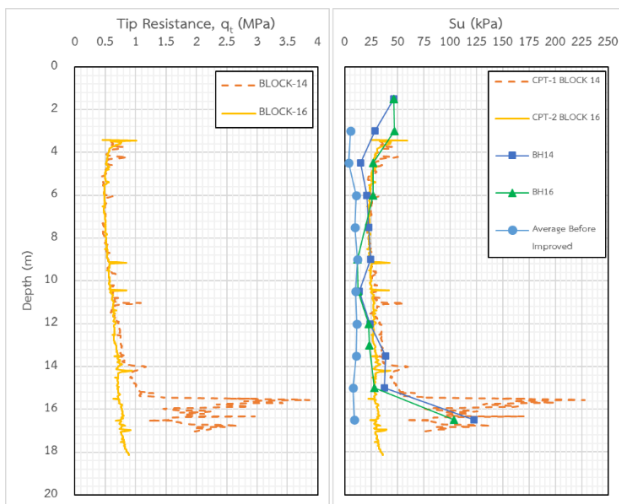
รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำด้วย Mesri and Khan (2011) (ศาสตร์ศิลป์ ,2562)

3.3 วิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายจาก Cone Penetration Test

Campanella and Robertson (1988) เสนอการหาค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายนำจากค่าความต้านทานของ cone (q_t) หน่วยแรงรวมกดทับจากชั้นดิน (σ_{v0}) และ cone factor (N_{KT}) ตามสมการที่ 6

$$S_u = (q_t - \sigma_{v0}) / N_{KT} \quad (6)$$

โดยการทดสอบ Cone Penetration Test ในสนามหลังจากการปรับปรุงคุณภาพดินถมบ่อด้วยวิธี VCM มีการทดสอบ 2 ตำแหน่ง บริเวณใกล้เคียงกับหลุมเจาะสำรวจหลังจากปรับปรุงคุณภาพดินด้วยวิธี VCM แปลงที่ 14 และ 16 J. Sunitsakul et al. (2010) นำเสนอค่า cone factor สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ มีค่าเท่ากับ 15.6 จากการวิเคราะห์ด้วยค่า cone factor ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพตั้งรูปที่ 15 พบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายนำมีค่ามากกว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายนำที่ทดสอบได้จาก Unconfined Compression Test



รูปที่ 15 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายนำด้วย

Cone Penetration Test ด้วย $N_{kt} = 15.6$

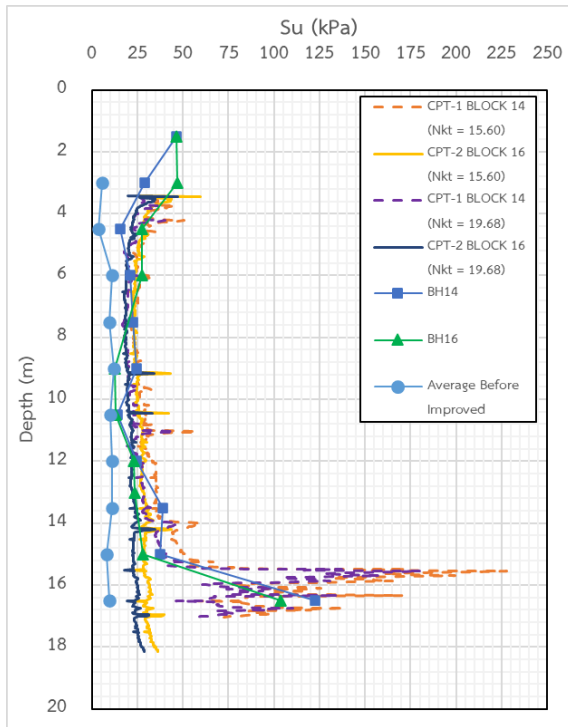
เพื่อหาค่า cone factor ที่เหมาะสมกับดินถมบ่อ ได้ศึกษาและวิเคราะห์ค่า cone factor ของดินถมบ่อจากการวิเคราะห์ย้อนกลับจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการดังสมการที่ 7 และได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของ cone factor สำหรับดินถมบ่อมีค่าเท่ากับ 19.68 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับผลในห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 16

$$N_{KT} = (q_t - \sigma_{v0}) / S_{u,UC} \quad (7)$$

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ย้อนกลับหาค่าเฉลี่ย cone factor ของดินถมบ่อ

No.CPT	Depth (m)	$q_t - \sigma_{v0}$ (kPa)	$S_{u,uc}$ (kPa)	N_{KT}
CPT-1 BLOCK 14	4.50	439.53	15.40	28.54
	6.00	476.21	21.19	22.47
	7.50	346.38	22.76	15.22
	9.00	400.74	24.53	16.34
	10.50	444.60	14.03	31.69
	12.00	529.23	24.33	21.75
	13.50	634.30	38.75	16.37
	15.00	795.92	37.67	21.13
CPT-2 BLOCK 16	4.50	423.51	27.27	15.53
	6.00	375.24	27.27	13.76
	9.00	385.74	12.36	31.21
	10.50	400.80	12.85	31.19
	12.00	454.13	23.15	19.61
	13.50	441.82	23.44	18.84
	15.00	448.40	27.96	16.04
	16.50	464.79	103.69	4.48
Average of N_{KT}				19.68

จากผลการวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายนำจากการทดสอบ Cone Penetration Test โดยใช้ค่า cone factor จากการวิเคราะห์ย้อนกลับพบว่า มีค่าสอดคล้องกับค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายนำจากการทดสอบ Unconfined Compression Test โดยมีการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายนำเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบ Unconfined Compression Test กล่าวคือมีการเพิ่มขึ้นตลอดทั้งความยาวของ PVDs และในช่วงปลายของ PVDs มีการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงของแรงดันน้ำในชั้นทราย แต่จะมีช่วงความลึกที่ 8-12 เมตร ค่าจากการทดสอบ Cone Penetration Test ให้ค่าสูงกว่า อาจเกิดจากตัวอย่างที่นำมาทดสอบถูกรบกวนระหว่างทำการเก็บตัวอย่าง



รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำด้วย Cone Penetration Test ด้วย $N_{kt} = 19.68$ จากการวิเคราะห์ที่ย้อนกลับ

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยวิธี Unconfined Compression Test (UC) และการทดสอบในสนามด้วย Cone Penetration Test (CPT) ร่วมกับการวิเคราะห์จากทฤษฎีของ Mesri and Khan (2011) ที่ได้ศึกษาการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธี Vacuum Consolidation Method (VCM) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายของดินถมบ่อก่อนปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธี VCM มีค่าแตกต่างจากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานครบ่อข้าง คือค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำต่ำและไม่เพิ่มขึ้นตามความลึก ซึ่งแตกต่างจากดินเหนียวอ่อนกรุงเทพที่ตกตะกอนตามธรรมชาติซึ่งเพิ่มขึ้นตามความลึก ซึ่งส่งผลให้เมื่อมีน้ำหนักกดทับบนพื้นที่บ่อถมดิน มวลดินถมบ่อจะไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ดี ทำให้เกิดการวิบัติแบบ shear flow แต่ในส่วนของค่ากำลังรับแรงเฉือนบริเวณทางเดินรถบรรทุกที่มีค่าสูงประมาณ 20 kPa มีความหนา 6 เมตรจากผิวดิน เนื่องด้วยดินที่ถูกนำมาถมกลับทำเป็นถนนต้องมีกำลังรับแรงเฉือนสูงเพื่อสามารถให้รถบรรทุกสามารถเดินทางได้

การวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำด้วยทฤษฎีของ Mesri and Khan (2011) มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบจาก Unconfined Compression Test และการทดสอบในสนาม Cone Penetration Test โดยใช้ค่า Cone factor เท่ากับ 19.68 โดยมีการเพิ่มขึ้นสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีการเพิ่มขึ้นบริเวณ 0-5 เมตร มีการเพิ่มขึ้น 2-3 เท่า ช่วง 5-10 เมตรมีการเพิ่มขึ้น 2 เท่า และในช่วง 10-17 เมตร จะเพิ่มขึ้น 2 เท่า

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น ผลกระทบจากการเพิ่มน้ำหนักกดทับด้านบนด้วย surcharge load จะสังเกตจากการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนบริเวณด้านบนจะมีค่ามากกว่าบริเวณช่วงกลางของ PVDs ผลกระทบต่อมาคือการลดลงของแรงดันน้ำในชั้นทรายส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนไม่ระบายน้ำเพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าดินบริเวณนั้นจะอยู่ส่วนปลายของ PVDs ถูกวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีของ Mesri and Khan (2011) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงประสิทธิผลจากการลดลงของแรงดันน้ำในมวลดิน

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท แอสสิริ จำกัด (มหาชน) บริษัท ไทย มารูยามา อินดัสทรี จำกัด และ ศูนย์วิจัยปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hartlen, J., & Ingers, C. (1981). Land Reclamation Using Fine-Grained Dredged Material. *Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Balkema, Rotterdam, 1, 145-148.
- [2] Leung, C. F., Wong, J. C., Manivanann, R., & Tan, S. A. (2001). Experimental Evaluation of Consolidation Behavior of Stiff Clay Lumps in Reclamation Fill. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 24(2), 145-156
- [3] Bergado, D. T., Balasubramaniam, A. S., Jonathan Fanin, R., & Holtz, R. D. (2002). Prefabricated vertical drains in soft Bangkok clay : A case study of the new Bangkok International Airport project. *Canadian Geotechnical Journal*, 18(39), 304-315.
- [4] Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Balasubramaniam, A. S., & Wijeyakulasuriya, V. (2005). Predictions and observations of soft clay foundations stabilized with geosynthetic drains and vacuum surcharge. *Ground Improvement - Histories Book*, vol 3. Elsevier, London, 3, 199-230.
- [5] ศาสตราจารย์ ภัคดีเมฆ. (2562). การวิเคราะห์พฤติกรรมแรงดันน้ำ ส่วนเกินของดินถมบ่อที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธี VCM. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา.
- [6] Mesri, G., & Khan, A. Q. (2011). Increase in Shear Strength Due to Vacuum Preloading. *Proceeding of 2011 Pan-An CGS Geotech Conference, Canadian Geotechnical Society, Toronto, Canada.*

- [7] Campanella, R. G., & Robertson, P. K. (1988). Current status of the piezometer test. *Penetration Testing, I Sopt De Ruitter (ed.) Balkema, Rotterdam, 93-116.*
- [8] Piyavat Ngerbumrung. (2019). *Strength Improvement of Bangkok Soft Clay Backfilled in Lake with Vacuum PVD Technique.* (M.S. thesis), Asia Institute of Technology.
- [9] Sunitsakul, J, Sawatparnich, A., and Apimeteetamrong, S. (2010). Basic soil properties from CPT in Bangkok clay for highway design. 2nd Symposium for Cone Penetration Testing, May 9-10, 2010 , Huntington Beach, California.