การสูญเสียกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินใต้ฐานรากเสาเข็มตอก ในพื้นที่ชุ่มน้ำและแนวทางการแก้ปัญหา

ศิวัตม์ กมลคุณานนท์*

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาปัญหางานก่อสร้างฐานรากเสาเข็มตอกของโครงการก่อสร้างอาคารแห่งหนึ่งในจังหวัดอุตรดิตถ์ จากการศึกษาพบว่าบริเวณพื้นที่ก่อสร้างมีลักษณะชั้นดินค่อนข้างซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-Homogeneous Soil) ประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียว (Clay) ตะกอนทราย (Silt) และการผสมรวมกันของดินเหนียวและตะกอนทราย (Silty Clay) เรียงตัวสลับกันตลอดความลึกและกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ ตั้งแต่ระดับผิวดินจนถึงระดับความลึก 13.00 เมตร และที่ระดับ 14.00 เมตรโดยประมาณ ชั้นดินเปลี่ยนเป็นชั้นทรายปนกรวดอัดตัวแน่นถึงแน่นมาก (Dense to Very Dense Sand and Gravel) นอกจากนั้นยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table, GWT) อย่างมากเมื่อเปลี่ยนฤดูกาล ทำให้ความชื้นในมวลดิน (Moisture Content) เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) ของชั้นดินที่ปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ ลดลงถึงร้อยละ 48 ดังนั้นเสาเข็มตอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.30 x 0.30 เมตร ยาว 10.00 เมตร ที่ออกแบบด้วยตัวแปรด้านกำลังที่ได้จากการแปรผลค่า N – Value จากการเจาะสำรวจในช่วงฤดูร้อน ซึ่งไม่พบระดับน้ำใต้ดินในหลุมเจาะแม้เวลาผ่านไปมากกว่า 24 ชั่วโมง จึงมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง ส่งผลให้ความยาวของเสาเข็มที่ออกแบบไว้นั้น มีความยาวไม่เพียงพอต่อการรับน้ำหนักบรรทุกตามที่กำหนดไว้เมื่อทำการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) แนวทางการแก้ไขทำได้โดยเพิ่มความยาวเสาตอม่อเพื่อส่งปลายเสาเข็มไปยังชั้นดินที่เหมาะสม แต่ทั้งนี้ก็ทำให้เกิดผลกระทบด้านต้นทุนการก่อสร้างเป็นอย่างมาก ดังนั้นการเจาะสำรวจชั้นดินเพื่อให้ได้มาซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบฐานราก จึงต้องมีความเหมาะทั้งเรื่องของช่วงเวลาและแผนการทำงานที่สอดคล้องกับฤดูการ อันนำไปสู่การได้มาของข้อมูลที่ถูกต้องมีประสิทธิภาพสูงสุด และเกิดความปลอดภัยในทำงาน

คำสำคัญ : การเจาะสำรวจชั้นดิน, ฐานรากเสาเข็ม, กำลังรับน้ำหนักเสาเข็ม, สูตรตอกเสาเข็ม

ภาคโยธาและการออกแบบ, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
* ผู้ติดต่อ, อีเมล์: siwat3003@gmail.com รับเมื่อ 12 มีนาคม 2557 ตอบรับเมื่อ 23 มิถุนายน 2557

Loss in Shear Strength of Soil under Driven Pile Foundation in Wetland and the Problem Solving

Siwat Kamonkunanon*

Abstract

This article is the result of a study of construction driven pile foundation problems in the large building construction project in Uttaradit. The soil in this construction area was a quite complex, non-homogeneous soil consisting of clay, silt, and silty clay mixed in combination layers at various depths and spread across the region from the surface grade elevation to 13.00 meters depth. At approximately 14.00 meters depth, soil properties change to a very dense to dense sand and gravel. Moreover, the layers also revealed that the ground water table (GWT) varied dramatically by season, affecting the moisture content of the soil. As a result, the undrained shear strength, S_u at the pile tip reduced by 48 percent. Consequently, the original design pile size of 0.30 x 0.30 square meters, x 10.00 meters long, with a variable on the N – Value from the boring in the summer when the GWT is lower and no ground water exists in the bore hole is over value, over extended periods of time (more than 24 hours). Consequently, the original designed pile length is no longer sufficient to bear the required load, which has been confirmed by testing bearing capacity using dynamic load testing methods. The solution for solving the problem is to increase the length of pile and driving it to the appropriate soil layer. This solution will result in an increase in the cost of construction of the building. The problem illustrates the need for proper data from planning to bore sampling by considering seasonal impacts for analyzing and designing to ensure a safe working.

Keywords : Soil Exploration, Pile Foundation, Pile Bearing Capacity, Pile Driving Formula

---

Department of Civil and Design, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University.

* Corresponding author, E-mail: siwat3003@gmail.com Received 12 March 2014, Accepted 23 June 2014

1. บทนำ

ฐานรากเป็นส่วนประกอบของอาคารที่ทำหน้าที่ส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดสู่ชั้นดิน ฐานรากแบบลึก (Deep Foundation) หรือฐานรากแบบเสาเข็ม (Pile Foundation) มักนิยมใช้ในการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่ที่ต้องรับน้ำหนักบรรทุกมาก โดยอาจเป็นฐานรากแบบเสาเข็มตอกหรือเจาะ (Driven or Bore Pile Foundation) ซึ่งความเหมาะสมขึ้นอยู่กับสภาพการทำงานเป็นหลัก แต่สิ่งสำคัญที่เป็นองค์ประกอบหลักในการออกแบบฐานรากคือตัวแปรด้านกำลัง (Strength Parameters) ของดินใต้ฐานราก การเจาะสำรวจชั้นดินจึงเป็นข้อปฏิบัติแรกเพื่อให้ได้มาซึ่งการจัดเรียงตัวและคุณสมบัติของชั้นดินอันจะนำไปสู่การคาดคะเนพฤติกรรมด้านต่างๆและมักทดสอบการตอกทะลวงมาตรฐาน (Standard Penetration Test, SPT) ร่วมด้วย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความต้านทานการตอกทะลวง (N – Value) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแปรผลตัวแปรด้านกำลังของดินแต่ละชั้นได้ อันนำไปสู่การออกแบบฐานรากต่อไป

แต่เป็นที่เข้าใจกันดีว่าดินในสภาพธรรมชาตินั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการเช่น กระบวนการย่อยสลาย การถูกพัดพาด้วยตัวกลางทางธรรมชาติ สภาพแวดล้อมโดยรวมของพื้นที่ รวมไปถึงระดับน้ำใต้ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อความแข็งแรงของดิน (Shear Strength of Soil) อันเป็นผลเนื่องมาจากแรงดันน้ำ โดยทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของดินต่ำลง [1] จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าชั้นดินในสภาพตามธรรมชาตินั้นมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง บทความฉบับนี้เกิดขึ้นจากการที่ผู้เขียนได้เรียบเรียงข้อมูลจากเอกสารที่เกี่ยวข้องเท่านั้น เพื่อนำเสนอปัญหาการออกแบบฐานรากเสาเข็มตอกในการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่แห่งหนึ่งที่ใช้ตัวแปรด้านกำลังจากการแปลผลการทดสอบตอกทะลวงมาตรฐาน (SPT) ใน 2 ช่วงเวลา จากรายงานการควบคุมงานและตรวจงานก่อสร้าง ซึ่งวัตถุประสงค์หลัก 2 ข้อคือ 1) แสดงผลกระทบของระดับน้ำใต้ดินที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงของดินใต้ฐานราก 2) แสดงวิธีการแก้ไขปัญหาในการก่อสร้างฐานรากของอาคารดังกล่าว และนำเสนอแนวทางในการวางแผนเจาะสำรวจชั้นดิน รวมไปถึงการพิจารณาเลือกใช้ผลการทดสอบตอกทะลวงมาตรฐาน (SPT) ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

2. ขอบเขตและวิธีการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลจากรายงานการเจาะสำรวจชั้นดิน รายงานผลการทดสอบการตอกทะลวงมาตรฐาน และรายงานการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) จากโครงการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่แห่งหนึ่งในจังหวัดอุตรดิตถ์ ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นที่กว่า 2,000 ไร่ซึ่งมีลักษณะดินค่อนข้างซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อทำการวิเคราะห์สภาพปัญหาที่เกิดขึ้นและนำเสนอแนวทางการแก้ไข อันสะท้อนให้เห็นถึงความอ่อนไหวของการเลือกใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจชั้นดินสู่การออกแบบฐานราก

2.1 การเจาะสำรวจชั้นดิน

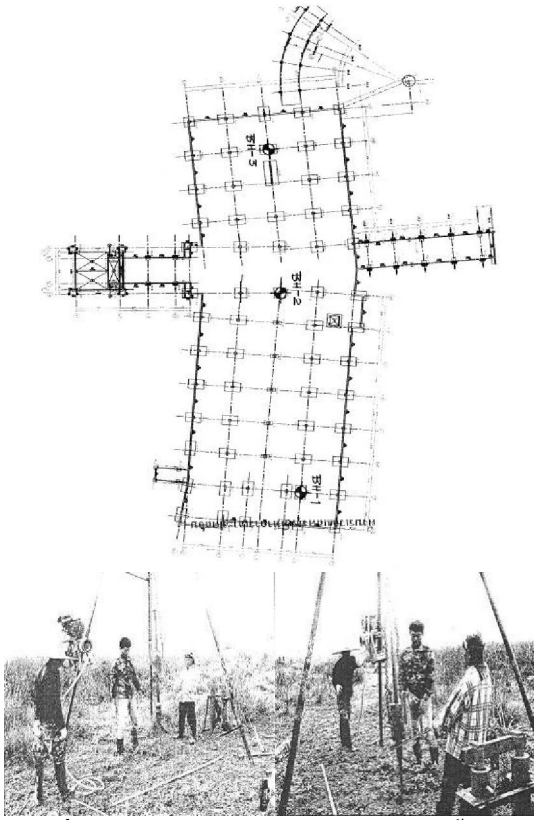
การเจาะสำรวจเพื่อสังเกตการณ์การจัดเรียงตัวของชั้นดินใช้วิธีการเจาะด้วยสามขาแบบแห้ง (Dry Process) โดยเก็บตัวอย่างดินด้วยกระบอกผ่า (Split Spoon Sample) เพื่อทดสอบคุณสมบัติในห้องปฏิบัติการต่อไป นอกจากนั้นยังได้ทำการทดสอบการตอกทะลวงมาตรฐาน (SPT) โดยใช้ตุ้มเหล็กหนัก 63.5 กิโลกรัม ระยะก่อนปล่อยตกกระทบเท่ากับ 76 เซนติเมตร

ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 1586 [2] ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อประเมินความต้านทานของดินแต่ละชั้น ในกรณีที่ชั้นดินอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดินมักทำให้ค่าต้านทานการทดสอบตอกทะลวงมาตรฐาน (N – Value) สูงกว่าความเป็นจริงอันเป็นผลเนื่องมาจากแรงดันน้ำในมวลดิน ดังนั้นต้องมีการปรับแก้ค่าก่อนนำไปใช้แปรผลการทดสอบดังสมการที่นำเสนอโดย Terzaghi และ Pack ในปี 1967 ดังนี้ [3]

$$N = 15 + 0.5\,(N' - 15) \qquad (1)$$

เมื่อ N = ค่า N-Value ที่ปรับแก้ไขแล้ว

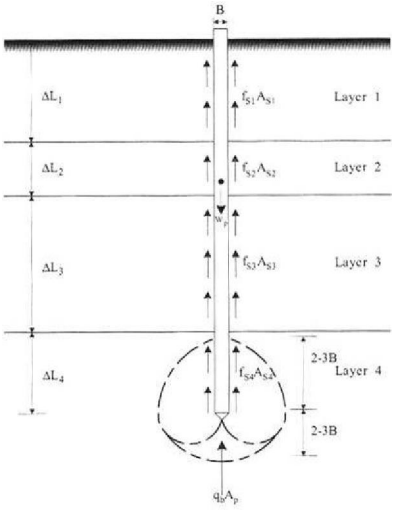
N' = ค่า N-Value ที่ได้จากสนาม



รูปที่ 1 ผังตำแหน่งหลุมและการเจาะสำรวจชั้นดิน

2.2 การออกแบบฐานรากเสาเข็ม

หลักการออกแบบฐานรากเสาเข็มจะพิจารณาให้ความต้านทานต่อน้ำหนักบรรทุกเกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างผิวเสาเข็มและดินแต่ละชั้น (Skin Friction Load, Q_s) และแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็ม (End Bearing Load, Q_b) โดยแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มจะเกิดขึ้นได้อย่างเต็มที่เมื่อเสาเข็มฝังอยู่ในชั้นดินแข็งเป็นระยะประมาณ 2–3 เท่าของขนาดเสาเข็ม และระนาบการวิบัติก็จะเกิดขึ้นในช่วง 2–3 เท่าของขนาดเสาเข็มเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม [4]

ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกประลัย (Failure Load, Q_f) ของเสาเข็มสามารถคำนวณได้จากกำลังต้านทานแรงเฉือนรวม (Total Shear Strength Analysis) และต้องไม่เกิดการวิบัติของเสาเข็มขณะรับน้ำหนักบรรทุกประลัย [4] โดยสามารถแสดงได้ด้วยสมการทั่วไปดังต่อไปนี้

$$Q_f = Q_s + Q_b \qquad (2)$$

$$P_f + W_p = C_s.A_s + (N_c.A_b.S_u + q.A_b) \quad (3)$$

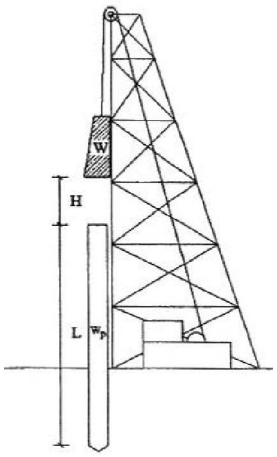
เมื่อ P_f = น้ำหนักบรรทุกประลัยสุทธิ
W_p = น้ำหนักของเสาเข็ม
C_s = หน่วยแรงยึดเกาะเฉลี่ยระหว่างผิวเสาเข็มและดิน
A_s = พื้นที่รอบรูปเสาเข็ม
N_c = แฟคเตอร์กำลังรับแรงแบกทาน
S_u = กำลังต้านทานของดินที่ปลายเสาเข็ม
q = น้ำหนักกดทับ (Overburden Pressure)
A_b = พื้นที่หน้าตัดปลายเสาเข็ม

2.3 การประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มตอก

ขั้นตอนการตอกเสาเข็มนั้นจะถูกควบคุมด้วยค่าการจมตัวของเสาเข็มที่ยอมให้ (Allowable Settlement) อันเป็นผลเนื่องมาจากพลังงานที่เกิดจากตุ้มน้ำหนักตกกระทบที่ความสูงค่าหนึ่งและเงื่อนไขทางด้านคุณสมบัติของวัสดุถ่ายลงสู่เสาเข็มดังแสดงในรูปที่ 3 การศึกษาครั้งนี้วิธีการคำนวณของ Danish Formula ถูกนำเสนอให้ใช้เป็นสมการควบคุมการตอกเสาเข็มดังแสดงไว้ในสมการที่ (4) [5]

$$Q_U = \frac{ef.W.H}{S + \sqrt{\frac{ef.W.H.L}{2.A.E}}} \quad (4)$$

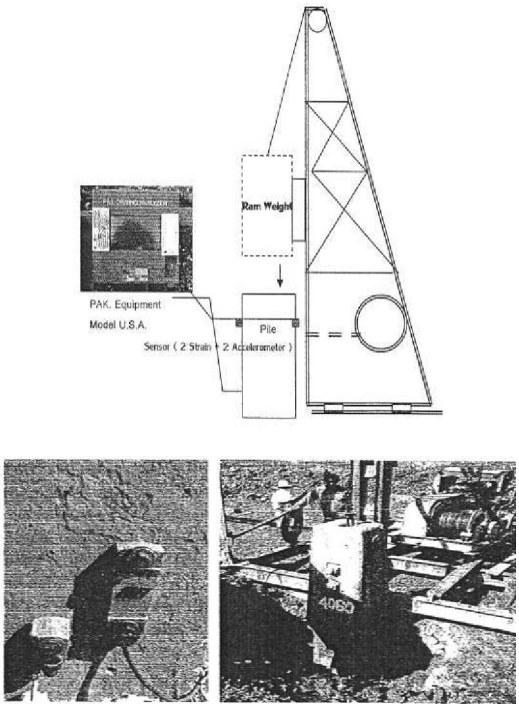
เมื่อ Q_u = น้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม
ef = ประสิทธิภาพของตุ้มตอกเสาเข็ม
W = น้ำหนักของตุ้มตอกเสาเข็ม
H = ระยะยกตุ้มตอกเสาเข็ม
L = ความยาวเสาเข็ม
A = พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม
E = โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม
S = ระยะจมต่อครั้งของเสาเข็ม



รูปที่ 3 ลักษณะการทำงานของเสาเข็มตอก

2.4 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test)

วิธีการประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถทดสอบได้อย่างรวดเร็วและค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าวิธีอื่นๆ โดยเครื่องมือที่ใช้ประกอบไปด้วยเครื่องประมวลผลสัญญาณ (Pile Driving Analyzer) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่ตรวจวัดการเสียรูปและการเคลื่อนตัวของคลื่น (Strain and Accelerometer Transducer) ที่ถูกส่งถ่ายไปยังเสาเข็มที่ทดสอบ การทดสอบจะทำโดยการวัดค่าแรง และความเร็วของสัญญาณสะท้อนคลื่นความเค้นขณะที่มีการกระแทกของลูกตุ้มเหล็กที่ตอกเสาเข็ม [6] แล้วประเมินการรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธี Case Method ด้วยโปรแกรม Case Pile Wave Analysis Program – Continuous Model (CAPWAP) ตามมาตรฐาน ASTM D 4945



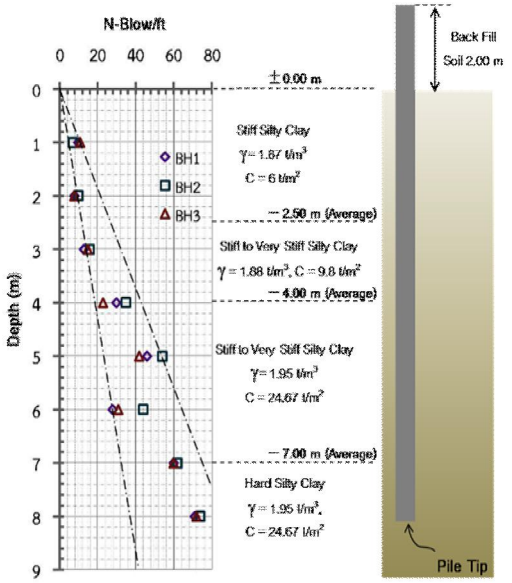
รูปที่ 4 กลไกและการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test)

3. ผลการวิจัย

แบบรูปรายการได้กำหนดให้ใช้เสาเข็มหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.30x0.30 เมตร โดยไม่กำหนดความยาวของเสาเข็ม และสามารถรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย (Safety Design Load) ได้ไม่น้อยกว่า 45.0 ตันต่อต้น ภายใต้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Safety Factor) เท่ากับ 2.5 ซึ่งกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัย (Ultimate Load Capacity) ไม่น้อยกว่า 112.5 ตันต่อต้น

3.1 คุณสมบัติของชั้นดินและการออกแบบเสาเข็มตอก

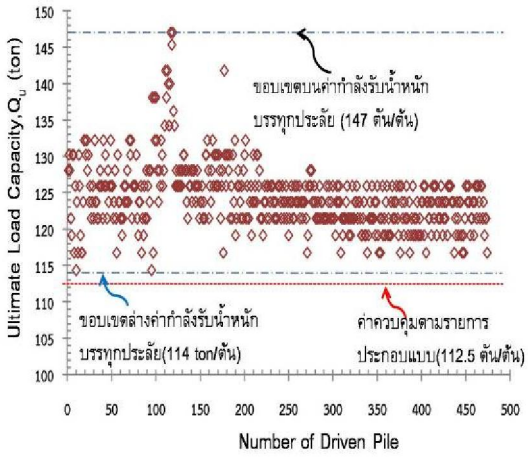
จากการศึกษาข้อมูลและเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่าการเจาะสำรวจชั้นดินภายในโครงการก่อสร้างเกิดขึ้นใน 2 ช่วงเวลาโดยครั้งแรก (วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2553) เป็นการเจาะสำรวจเพื่อสังเกตลักษณะการเรียงตัวของชั้นดินและหาค่าตัวแปรด้านกำลังที่ใช้ในการออกแบบฐานรากแบบเสาเข็มตอก จากการแปรผลการทดสอบตอกทะลวง (SPT) จำนวน 3 หลุม โดยตำแหน่งของหลุมเจาะแสดงได้ดังรูปที่ 1 ผลการเจาะสำรวจแสดงให้เห็นว่าจากผิวดินลงไปถึงก้นหลุมเจาะที่ระดับความลึกประมาณ 9.00 เมตร เป็นดินประเภทดินเหนียวปนตะกอนทราย (Silty Clay) มีค่า N - Value อยู่ในระดับที่สูงมากมีคุณลักษณะของดินอยู่ในช่วงแน่นถึงแข็ง (Dense to Stiff Silty Clay) และตรวจไม่พบระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table, GWT) ภายหลังการเจาะเมื่อปล่อยเวลาทิ้งไว้มากกว่า 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5 ผลการเจาะสำรวจและการออกแบบฐานราก

รูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบการตอกทะลวงมาตรฐานพบว่าค่า N – Value มีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าค่าความต้านทานการรับน้ำหนักของดิน ก็จะ

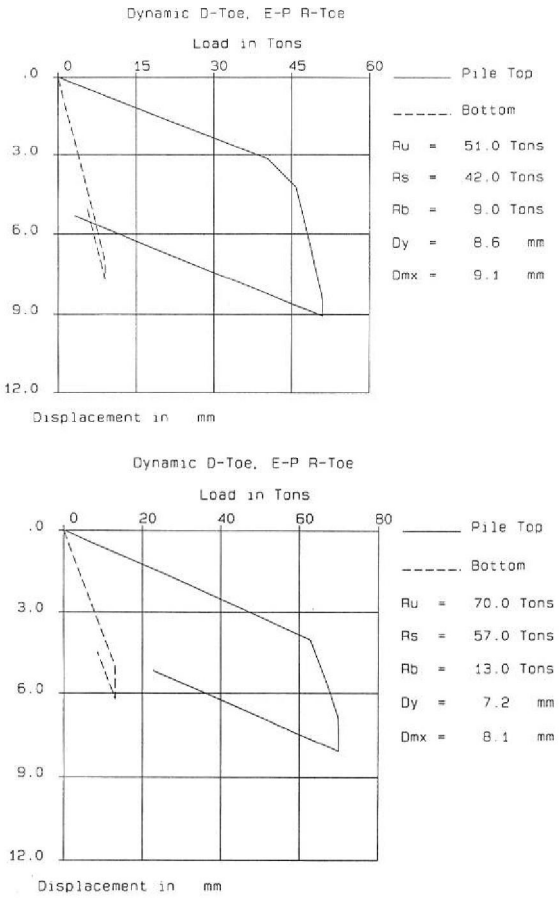
เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน จากนั้นผู้ออกแบบได้ใช้ข้อมูลเดียวกันนี้ในการออกแบบฐานรากเสาเข็มโดยใช้สมการที่ (2) และ (3) ซึ่งพบว่าต้องใช้เสาเข็มตอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.30x0.30 เมตร ยาว 10.00 เมตร จึงจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยได้ไม่น้อยกว่า 47.14 ตันต่อต้นที่อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 (FS = 2.5) ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ระบุไว้ในแบบรูปรายการ



รูปที่ 6 ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเสาเข็มตอก

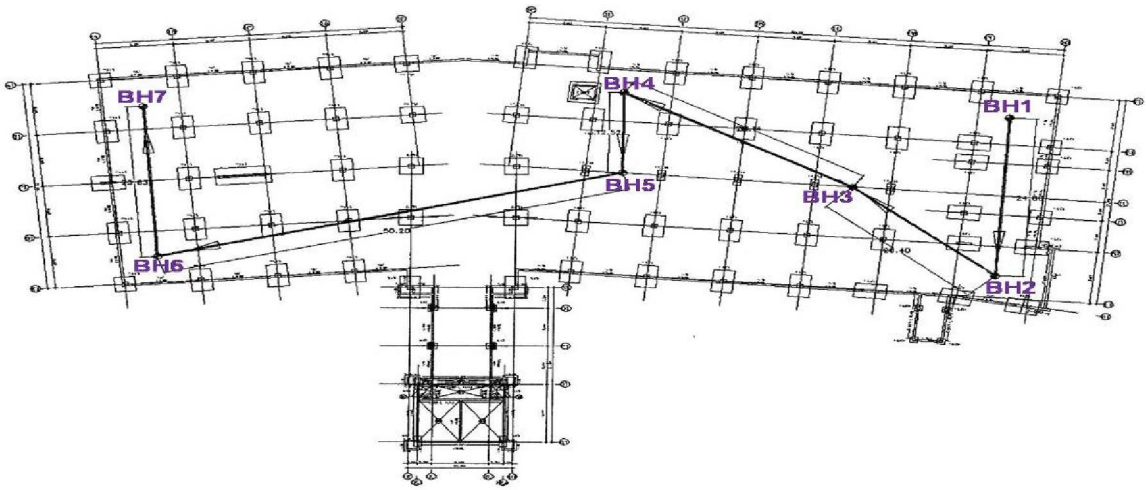
โดยระหว่างการตอกเสาเข็มจะถูกควบคุมการทำงานโดยการประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอก ตามวิธีการคำนวณของ Danish Formula ดังแสดงไว้ในสมการที่ (4) ในรูปค่าการจมตัวของเสาเข็มสำหรับการตอก 10 ครั้งสุดท้าย (Last Ten Blow) ซึ่งพบว่า ค่าการจมตัวที่ยอมให้ของเสาเข็มตอกจะต้องมีค่าไม่เกินกว่า 12.22 เซนติเมตร ก่อนเคลื่อนย้ายปั้นจั่น และจากข้อมูลระเบียนควบคุมการตอกเสาเข็มไม่พบเสาเข็มที่มีค่าการจมตัวเกินกว่าที่ยอมให้ รูปที่ 6 แสดงค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยจากการแปลผลค่าการจมตัวที่การตอก 10 ครั้งสุดท้ายด้วยสมการของ Danish พบว่าเสาเข็มตอกทุกต้นนั้นมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเป็นไปตามข้อกำหนดดังแสดงไว้ในรายการประกอบแบบโดยมีค่าอยู่ในช่วง 144 ถึง 147 ตันต่อต้น มีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของข้อมูลเท่ากับ 124 ตันต่อต้น และ 4.66 ตันต่อต้น ตามลำดับ

3.2 การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มตอก

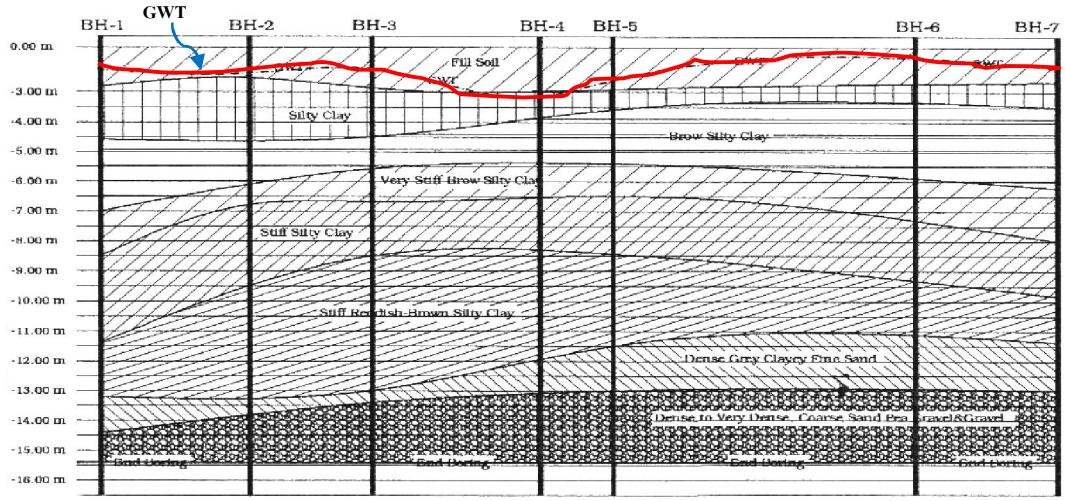


รูปที่ 7 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) ครั้งที่ 1

การตอกเสาเข็มเริ่มตั้งแต่วันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2553 ซึ่งดำเนินการหลังจากการเจาะสำรวจชั้นดินประมาณ 2 เดือน และแล้วเสร็จในวันที่ 31 สิงหาคม พ.ศ. 2553 ใช้เวลาดำเนินการทั้งสิ้นประมาณ 3 เดือน เมื่อตอกเสาเข็มจำนวน 474 ต้นแล้วเสร็จ จะปล่อยระยะเวลาทิ้งไว้ไม่น้อยกว่า 7 วัน ก่อนทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็ม รูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มจำนวน 2 ต้น พบว่าระหว่างการทดสอบมีการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในแนวดิ่งค่อนข้างสูง เมื่อมีแรงกระทำอย่างทันทีทันใดและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งคาดว่าเกิดการสูญเสียแรงเสียดทานระหว่างเสาเข็มกับดินทางด้านข้างและปลายเสาเข็ม บ่งชี้ให้เห็นว่าเสาเข็มนั้นวางตัวอยู่ในชั้นดินที่ไม่เหมาะสม โดยมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 51.0 ตันต่อต้น และ 70.0 ตันต่อต้น ที่อัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 1.13 – 1.55 ตามลำดับ แสดงว่าเสาเข็มไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามที่กำหนดไว้ในแบบรูปรายการ ดังนั้นจึงต้องมีการเจาะสำรวจชั้นดินครั้งที่ 2 (วันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2553) โดยกำหนดตำแหน่งและจำนวนหลุมเจาะเพิ่มขึ้นจากเดิมดังแสดงในรูปที่ 8 เพื่อตรวจสอบสภาพชั้นดินและตัวแปรด้านกำลังที่ใช้ในการออกแบบเสาเข็มตอกโดยละเอียดอันจะนำไปสู่การวิเคราะห์และแนวทางการแก้ไขที่ถูกต้อง ผลการเจาะสำรวจดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าลักษณะชั้นดินที่มีความซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-Homogeneous Soil) ประกอบด้วยชั้นดินกลุ่มดินเหนียว (Clay) ตะกอนทราย (Silt) หรือการผสมรวมกันของดินเหนียวและตะกอนทราย (Silty Clay) กระจายตัวกันทั่วบริเวณ ตั้งแต่ระดับผิวดินจนถึงระดับความลึก 13.00 เมตร โดยที่ระดับความลึก 14.00 เมตร โดยประมาณชั้นดินเปลี่ยนเป็นชั้นทรายปนกรวดอัดแน่นถึงแน่นมาก (Dense to Very Dense Sand and Gravel) กระจายตัวอย่างต่อเนื่องทั่วบริเวณโดยให้ค่า N – Value สูงมากถึง 60 ครั้งต่อฟุต ซึ่งเหมาะต่อการวางปลายเสาเข็มในชั้นดินนี้ โดยพบระดับน้ำใต้ดิน (GWT) ช่วงระดับ 1.50 – 3.00 เมตร จากระดับผิวดินถมหนา 3 เมตรในทุกหลุมเจาะ



รูปที่ 8 ผังแสดงตำแหน่งหลุมครั้งที่ 2



รูปที่ 9 ลักษณะการจัดเรียงตัวของชั้นดินโดยละเอียด

3.3 กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินใต้ฐานราก

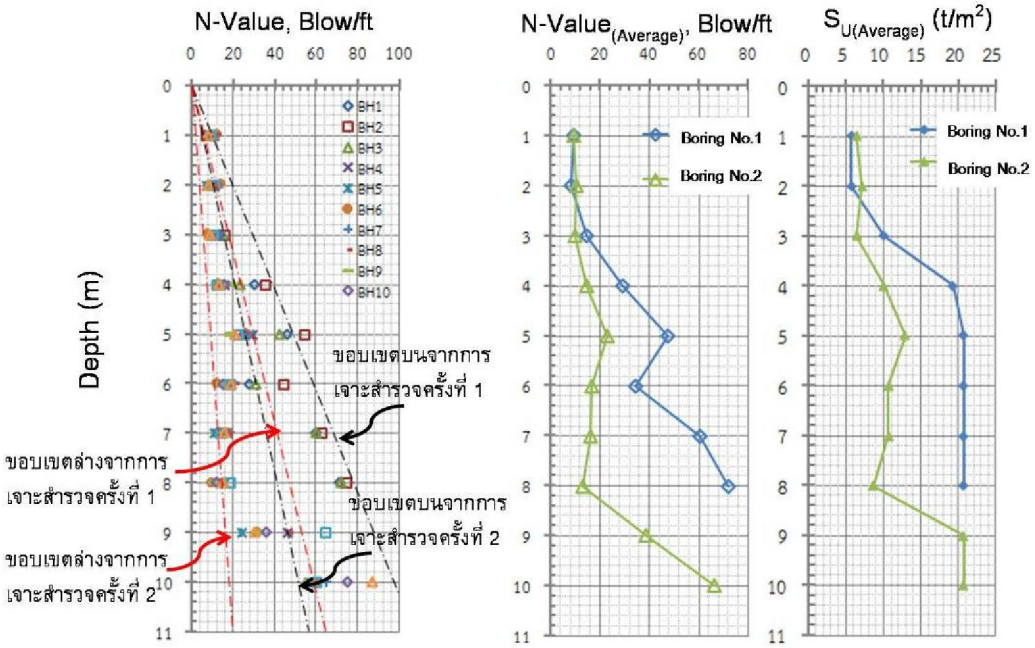
(a)

(b)

รูปที่ 10 สภาพแวดล้อมระหว่างการเจาะสำรวจชั้นดิน

รูปที่ 10 แสดงสภาพโดยรอบบริเวณก่อสร้างในช่วงที่มีการเจาะสำรวจชั้นดินครั้งที่ 1 (วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2553) และครั้งที่ 2 (วันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2553) ดังแสดงในรูปที่ 10 (a) และ (b) ตามลำดับ โดยการเจาะสำรวจครั้งที่ 1 อยู่ในช่วงฤดูร้อนจึงทำให้บริเวณโดยรอบมีสภาพที่แห้ง และไม่พบระดับน้ำใต้ดินแต่อย่างใด ส่วนการเจาะสำรวจครั้งที่ 2 เพื่อตรวจสอบลักษณะชั้นดินโดยละเอียดนั้นอยู่ในช่วงฤดูฝนสภาพโดยรอบบริเวณมีน้ำท่วมขัง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในมวลดิน (Water Content) อันเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลังของดินโดยตรง รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดสอบการตอกทะลวงมาตรฐาน (SPT) ของชั้นดินจากการเจาะสำรวจครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 (BH1 – BH7) ข้อมูลแสดงให้ว่าค่า N – $Value_{(average)}$ ของทุกหลุมเจาะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกโดยมีค่า N – Value อยู่ในช่วง 9 – 72 และจากการแปลผลการทดสอบดังกล่าวข้างต้นพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำอยู่ในช่วง

5.7 – 20.7 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นคุณลักษณะของดินเหนียวอัดตัวแน่นถึงแข็งมาก (Stiff to Very Hard Clay) และ ค่า N – Value อยู่ในช่วง 9 – 13 จากการแปลผลพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำอยู่ในช่วง 5.7 – 10.7 ตันต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นคุณลักษณะของดินเหนียวอัดตัวแน่นถึงอัดตัวแน่นมาก (Stiff to Very Stiff Clay) [7] โดยที่ระดับผิวดินเดิมค่า N – Value ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน จากการเจาะสำรวจครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ นอกจากนั้นยังพบว่าที่ระดับความลึก 8.00 เมตร ซึ่งเป็นระดับที่ถูกออกแบบให้วางปลายเสาเข็มนี้ ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำมีค่าลดลงถึงร้อยละ 48 ทำให้เสาเข็มที่ได้ออกแบบไว้ ไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามที่กำหนดไว้ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำใต้ดินส่งผลต่อค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความชื้นจะทำให้มวลดินมีระดับความอิ่มตัวที่สูงขึ้น ทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion, C) ในดินเหนียวลดลงในลักษณะความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear) แต่จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (Internal Friction Angle, ϕ) อย่างชัดเจน [8 - 11]

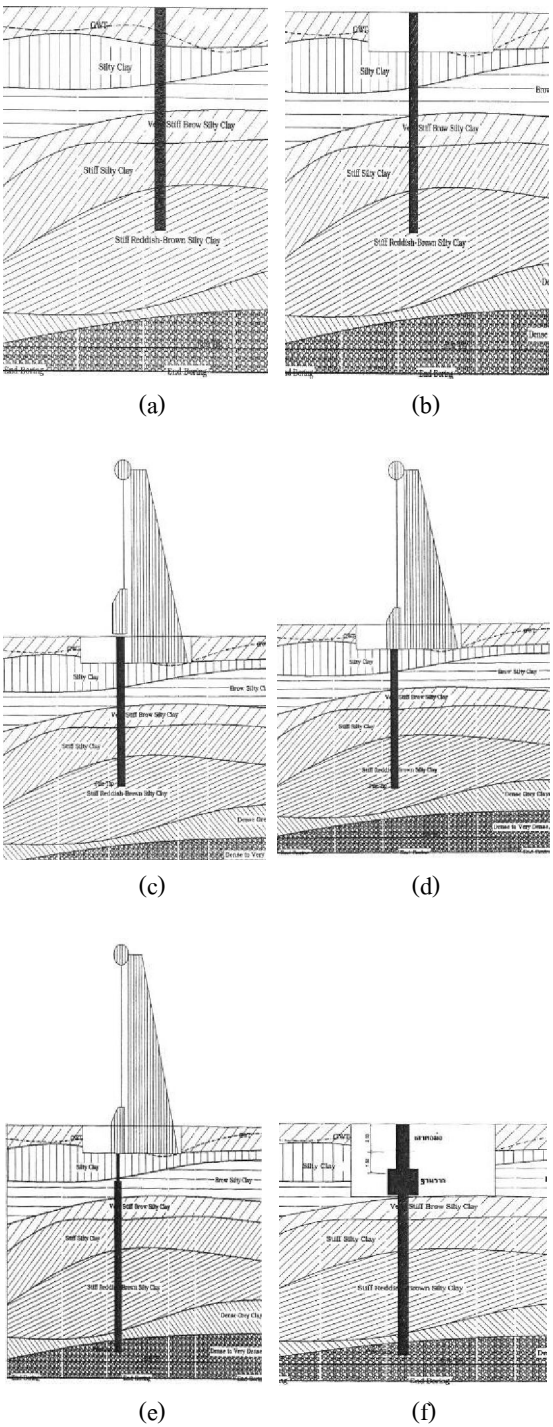


รูปที่ 11 ผลการทดสอบ SPT และ N – Value$_{(average)}$ ในรูปของค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_U)

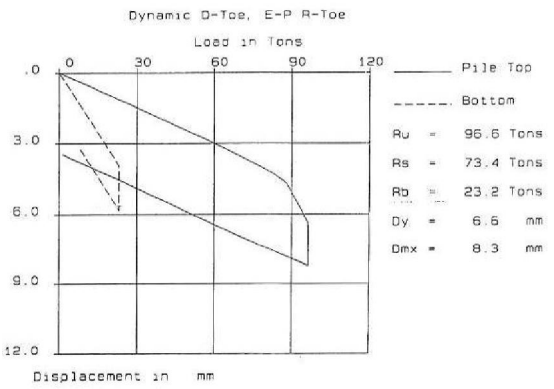
4. อภิปรายผล

จากผลการศึกษาพบว่าเสาเข็มตอกหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.30 x 0.30 เมตร ยาว 10.00 ที่ออกแบบจากการแปลผลการทดสอบตอกทะลวงมาตรฐาน (SPT) ในครั้งแรกนั้น มีความยาวไม่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อให้เกิดกำลังรับน้ำหนักบรรทุกตามที่กำหนดไว้

หากไม่ดำเนินการแก้ไขจะทำให้เกิดการทรุดตัวในอนาคตอันเป็นผลมาจากการยุบอัดตัวคายน้ำหนัก (Primary Consolidation) นอกจากนั้นการที่เสาเข็มวางตัวอยู่ในชั้นดินที่ไม่เหมาะสมและกระจายน้ำหนักไม่เท่ากันยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงฉุด (Native Skin Friction) ซึ่งทำให้น้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มเพิ่มขึ้น [12] โดยปัญหาดังกล่าวข้างต้นมักมีสาเหตุมาจากการออกแบบระบบฐานรากผิดพลาดอันเป็นผลจากข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินไม่เพียงพอ เลือกระบบฐานรากไม่เหมาะกับลักษณะชั้นดิน และสภาพชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลงสูง [13] โดยผลการคำนวณความยาวของเสาเข็มจากข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินโดยละเอียดพบว่า ขนาดของเสาเข็มที่ต้องการคือ 0.30 x 0.30 เมตร ยาว 15.00 เมตร จึงจะทำให้ปลายเสาเข็มวางตัวอยู่ในชั้นดินที่เหมาะสม รูปที่ 12 แสดงขั้นตอนการแก้ไขปัญหาฐานรากเสาเข็มอันเป็นผลเนื่องมาจากการสูญเสียกำลังของดินใต้ฐานราก ทำโดยตอกเสาเข็มให้ถึงระดับผิวดินถมก่อนขุดเปิดฐานรากที่ความลึกประมาณ 3.00 เมตร เพื่อเคลื่อนย้ายปั้นจั่นเข้าประจำที่ จากนั้นจึงเริ่มตอกโดยใช้เสาส่งเพื่อให้ปลายเสาเข็ม (Pile Tip) วางตัวอยู่บนชั้นทรายปนกรวดอัดตัวแน่น ดังแสดงในรูปที่ 12 (a) ถึง รูปที่ 12 (e) จากนั้นจึงขุดเปิดหน้าดินออกลงไปถึงระดับหัวเสาเข็มเพื่อจัดทำชุดฐานรากเสาเข็มตามแบบรูปรายการดังแสดงในรูปที่ 12 (f) ระหว่างการตอกส่งเสาเข็มจะควบคุมการทำงานโดยประมาณค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มตอกด้วยวิธีการของ Danish Formula เช่นเดิม หลังจากการตอกส่งปลายเสาเข็มไปยังชั้นทรายแน่นแล้วจึงได้ทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีพลศาสตร์อีกครั้ง เพื่อตรวจสอบค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก



รูปที่ 12 ลักษณะการจัดเรียงตัวของชั้นดิน



รูปที่ 13 ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มโดยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) ครั้งที่ 2

รูปที่ 13 แสดงผลการทดสอบพบว่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของเสาเข็มเมื่อรับน้ำหนักนั้นเกิดขึ้นน้อยเมื่อมีแรงมากระทำอย่างทันทีทันใด โดยค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 96.6 ตันต่อตัน ด้วยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.15 โดยค่าที่เพิ่มขึ้นนี้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็มอย่างมีนัยยะ อันเป็นผลเนื่องมาจากปรากฏการณ์ ทีโซโทรพี (Thixotropy) ของดินรอบเสาเข็มโดยอนุภาคของเม็ดดินจะเคลื่อนตัวเพื่อจัดเรียงโครงสร้างใหม่ ขบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งจะทำให้มวลดินมีค่ากำลังรับแรงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา [14] โดยเมื่อเวลาผ่านไป 14 วันได้ทำการทำสอบซ้ำอีกครั้งเพื่อยืนยันผล พบว่าเสาเข็มตอกสามารถรับน้ำหนักได้ตามที่กำหนดไว้ในรายการประกอบแบบ

5. สรุปผล

การศึกษาปัญหาการสูญเสียกำลังของดินใต้ฐานรากเสาเข็มตอกและแนวทางการแก้ไขสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ลักษณะชั้นดินบริเวณพื้นที่โครงการก่อสร้างมีการเรียงตัวที่ค่อนข้างซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Non-Homogeneous Soil) ประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียว (Clay) ตะกอนทราย (Silt) และดินเหนียวปนตะกอนทราย (Silty Clay) เรียงตัวสลับกันตลอดความลึกและกระจายตัวทั่วบริเวณ ตั้งแต่ระดับผิวดินจนถึงระดับ 13.00 เมตร และพบชั้นทราย (Sand) ที่ระดับความลึกตั้งแต่ 14.00 เมตร เป็นต้นไป

2. จากข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินยังพบว่าระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่ดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยการเจาะสำรวจชั้นดินครั้งที่ 1 เมื่อวันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2553 ไม่พบระดับน้ำใต้ดินในหลุมเจาะแม้ปล่อยเวลาทิ้งไว้มากกว่า 24 ชั่วโมง แต่จากการเจาะสำรวจชั้นดินครั้งที่ 2 เมื่อวันที่ 5 ตุลาคม พ.ศ. 2553 พบว่ามีระดับน้ำใต้ดินในหลุมเจาะเมื่อแม้ปล่อยเวลาทิ้งไว้เพียง 24 ชั่วโมง ที่ระดับความลึก 1.00 – 3.00 เมตร จากผิวดิน และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบการตอกทะลวงมาตรฐาน (SPT) ทั้ง 2 ครั้งพบว่า N – Value มีค่าลดลงในกรณีที่พบระดับน้ำใต้ดินในหลุมเจาะซึ่งแสดงให้เห็นว่าความชื้นในดินส่งผลต่อค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนโดยตรงและจากผลการศึกษาของนักวิจัยหลายท่านพบว่าการสูญเสียค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเมื่อความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงนี้เป็นผลมาจากการลดลงของค่าแรงยึดเหนี่ยวของเม็ดดิน (C) ในขณะที่ความชื้นไม่ส่งผลต่อมุมเสียดทานภายในของเม็ดดิน (ϕ) อย่างชัดเจน

3. แนวทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นนั้น ใช้วิธีการตอกเพื่อส่งปลายเสาเข็มให้วางตัวอยู่ในชั้นทรายที่ระดับความลึกประมาณ 14.00 เมตร โดยต้องทำการขุดเปิดหน้าดินเพื่อให้สามารถก่อสร้างส่วนขยายของเสาตอม่อ

เนื่องจากความยาวของเสาเข็มที่ออกแบบไว้นั้นไม่เพียงพอต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดไว้และจากการดำเนินงานพบว่าการแก้ปัญหาโดยวิธีนี้ ทำให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มตอกเพิ่มขึ้นและเป็นไปตามข้อกำหนดการก่อสร้าง แต่ทั้งนี้อาจต้องพิจารณาถึงสมการที่ใช้ในการควบคุมการตอกเสาเข็มให้มีความเหมาะสมกับสภาพชั้นดินอย่างแท้จริง ในกรณีนี้ใช้สมการของ Danish ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับสภาพดินเหนียวอันเนื่องมาจากผลของค่าความหนืดของดินส่งผลให้ค่าการจมตัว 10 ครั้งสุดท้ายมีค่าน้อย เมื่อทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Load Test) ภายหลังจึงพบว่ามีค่ากำลังรับแรงต่ำกว่าความเป็นจริง

อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะสามารถแก้ปัญหาการก่อสร้างฐานรากเสาเข็มตอกนี้ได้ แต่ก็ทำให้ต้นทุนการก่อสร้างเพิ่มขึ้นมาก เกิดเป็นประเด็นที่ต้องหารือกันระหว่างเจ้าของงานและผู้รับจ้าง ดังนั้นในการเจาะสำรวจชั้นดินเพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำมาใช้ในการออกแบบฐานรากนั้นจำเป็นต้องมีการวางแผนงานที่เหมาะสมซึ่งจะนำไปสู่การทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ห้างหุ้นส่วนจำกัด ศิลป์โยธา ที่อนุเคราะห์ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน การออกแบบฐานราก และผลการทดสอบกำลังรับรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มเพื่อใช้ในการเรียบเรียงบทความวิจัยฉบับนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] V. Sooksatra, *"Foundation Engineering (7th ed.)"*, Forepace Publishing House, 2004. (in Thai)

[2] ASTM, *"Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils"*, ASTM D 1586, American Society for Testing and Materials, 2000.

[3] W. Youyongwatana, *"Soil Mechanics (2nd ed)"*, Sat Four Printing, 2006. (in Thai)

[4] S. Horpibulsuk, *"Foundation Engineering"*, Mc-Grae Hill Education, 2012. (in Thai)

[5] Department of Public work and Town County Planning, *"Piles and Capacity Calculation of Piles"*, Available:http://eservices.dpt.go.th/-edocument/doc_work.html, 14 January 2014. (in Thai)

[6] ASTM, *"Standard Test Method for high-strain dynamic test of piles"*, ASTM D 4945, American Society for Testing and Materials, 2000.

[7] M.D. Braja, ***"****Principles of Geotechnical Engineering (5th ed)****"****,*** Books/Cole-Thomson Leaning, Pacific Grove, 2002.

[8] S. Soralump and Worawat Thowiwat, *"Shear Strength – Moisture Behaveior of Residual Soils of Landslide Sensitive Rock Group in Thailand"*, Proceedings of the 15th National Convention on Civil Engineering, Ubonratchathani, Thailand, 2010, pp. 1-9. (in Thai)

[9] A. Yagob, D. Tonnayopas and P. Thongchim, *"Shear Strength of Soil in Natural water Content Condition and Soaked Condition: Case Study Slope at Highway No.41 Segment of Thungsong District – Ron Phibun District"*, Proceedings of the 13th National Convention on Civil Engineering, Chonburi, Thailand, 2008, pp. 393-398. (in Thai)

[10] S. Inthapichai, *"Normalization of Shear Strength of at Various Moisture Content"*, Proceedings of the 1[2th] National Convention on Civil Engineering, Phitsanulok, Thailand, 2007, pp. 381-385. (in Thai)

[11] P. Punrattanasin and K. Changjutturas, *"The Bearing Capacity of Shallow Foundation on Losse Sand Under Various Water Levels"*, Proceedings of the 12[th] National Convention on Civil Engineering, Phitsanulok, Thailand, 2007, pp. 216-221. (in Thai)

[12] S.Promboon and N.Kawsri, *"The Forensic Engineering for Investigation, Diagnosis and Repair of Leaning Building in Thailand"*, Proceedings of Geotechnical Engineering and Foundation'52, Bangkok, Thailand, 2012, pp. 1-32. (in Thai)

[13] P.Mongkolsung, J.Puengnoy and T.Kumsuwan, *"The Underpinning for the Building"*, Proceedings of the 1[8th] National Convention on Civil Engineering, Chiang Mai, Thailand, 2013, pp. 252-257. (in Thai)

[14] Braja M.Das**,** ***"Principles of Geotechnical Engineering (5t[h] ed)",*** Books/Cole-Thomson Leaning, Pacific Grove, 2002.