

การวิเคราะห์กำลังแบกทานของเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินด้วยวิธี FHWA (1999)

Bearing Capacity Analysis of Rock-Socketed Pile using FHWA (1999) Method

อติเทพ ศรีคงศรี¹ ดำรง รังสรรค์² โชติไกร ไชยวิจารณ์³ วิกรม พนิชการ⁴ และ นรินทร์ เอื้อศิริวรรณ⁵

^{1,2,3,4,5}คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

60 ถนนร่มเกล้า แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510

Atitep Srikongsri¹, Damrong Rangsan², Chotikrai Chaivijarn³, Vicrom Panichacarn⁴, and Narin Eursiriwan⁵

^{1,2,3,4,5}Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, Romklao Campus,

60 Romklao Road, Minburi, Bangkok 10510

E-Mail: atitep.sri@kbu.ac.th

วันที่รับบทความ 12 ธันวาคม 2565

วันแก้ไขบทความ 20 ธันวาคม 2565

วันที่ตอบรับบทความ 26 ธันวาคม 2565

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์กำลังแบกทานของเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินด้วยวิธี FHWA (1999) โดยใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจทางปฐพีวิศวกรรม เสาเข็มชนิดนี้มีแรงต้านจากความเสียดทานจากชั้นดินรอบเสาเข็มส่วนบนซึ่งคำนวณแรงเสียดทานด้วยวิธีและพารามิเตอร์แบบเดียวกันกับการคำนวณเสาเข็มทั่วไป และแรงต้านจากส่วนล่างที่ฝังในหินพิจารณาจากชนิดของหิน ความเป็นมวลเนื้อเดียวกัน (ค่า RQD) ระดับความผุพัง คุณสมบัติกำลังรับแรงอัด และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเสาเข็ม ในการวิเคราะห์ได้เลือกเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 เมตร จากโครงการหนึ่งในจังหวัดชลบุรีที่มีการทดสอบกำลังแบกทานของเสาเข็มในสนามเป็นกรณีศึกษา เมื่อนำผลการคำนวณกำลังแบกทานของเสาเข็มมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาเข็มโดยใช้สัดส่วนความปลอดภัยอ้างอิงกฎกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 6 พศ. 2527 พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

คำสำคัญ: กำลังแบกทาน, เสาเข็มปลายฝังในหิน, ทดสอบเสาเข็ม

ABSTRACT

Bearing capacity of rock-socketed pile was analyzed using FHWA (1999) method. The method relies on geotechnical investigation data. The bearing capacity is generally generated from skin friction in the upper part where the shaft is in contact with soil and the lower part where the shaft embedded in the rock socket. The friction at the soil-shaft interface was calculated by conventional static method. The capacity from the rock socket including friction and tip resistance was calculated by considering type of rock, RQD value, degree of weathering, and compressive strengths of rock and concrete. A bored pile with a diameter of 0.80 m. from a site that pile load test result reported was selected as case study. Comparison between

the calculated result and the test result, with reference to the Ministerial Regulation (Ministry of Interior) no.6 B.E. 2527, appeared in very good agreement.

Keywords: bearing capacity, rock-socketed pile, pile load test

1. บทนำ

กำลังแบกทานของเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินเป็นกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มที่อาศัยแรงต้านจากปลายเสาเข็มที่ฝังในหินส่วนหนึ่งและแรงเสียดทานผิวสัมผัสผิวด้านบนเสาเข็มทั้งจากส่วนที่ฝังในหินและส่วนที่อยู่ในชั้นดินด้านบนของชั้นหิน ระยะฝังในเนื้อหินโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณไม่น้อยกว่า 1.5 ถึง 3 เท่าของขนาดหน้าตัดเสาเข็มขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหินและกำลังแบกทานของเสาเข็มที่ต้องการ ปัจจุบันมีวิธีวิเคราะห์เชิงสถิต (Static Method Analysis) คำนวณจากข้อมูลผลเจาะสำรวจและทดสอบสอบดินอยู่หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นวิธีที่เน้นแรงเสียดทานเป็นหลักหรืออาศัยทั้งจากแรงเสียดทานและแรงต้านที่ปลายเสาเข็มแนวคิดที่ใช้แรงต้านจากแรงเสียดทานของเสาเข็มเพียงอย่างเดียวนั้นไม่มีสมมติฐานว่าแรงเสียดทานของเสาเข็มนั้นมากเพียงพอที่จะรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกขณะใช้งานแล้ว แรงจากน้ำหนักบรรทุกทุกจึงไม่ถ่ายทอดไปถึงปลายเสาเข็ม (Xu, Dai, Gong, Zhang, Haque, & Gamage, 2021) ในขณะที่การนำแรงต้านทั้งจากแรงเสียดทานและที่ปลายเสาเข็มนำมาคำนวณรวมกันเป็นกำลังแบกทานประลัยก่อนลดทอนค่าด้วยสัดส่วนความปลอดภัยให้เป็นน้ำหนักบรรทุกที่ยอมรับได้ ยังคงเป็นวิธีที่นิยมและมีสูตรการคำนวณให้เลือกใช้เป็นจำนวนมาก (Rowe, R.K. & Armitage, H.H., 1987), (Zhang, 1997), (Kim, Kwon, Han, & Yoo, 2019) เนื่องจากสูตรและวิธีการคำนวณแรงต้านจากส่วนที่ฝังในหินมีหลากหลายและด้วยหินนั้นมีพารามิเตอร์ทั้งด้านกำลังและเงื่อนไขด้านคุณภาพของตัวอย่างหินเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงทำให้ผลลัพธ์จากการคำนวณของแต่ละวิธีมีโอกาสแตกต่างกันได้มาก (สยาม อิมศิริ, 2559)

Federal Highway Administration ของสหรัฐอเมริกาหรือ FHWA ได้เผยแพร่คู่มือการออกแบบและก่อสร้างเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินที่ถือเป็นเอกสารที่จัดทำโดยองค์กรที่เป็นที่ยอมรับในวงกว้าง (O’Niel & Reese, 1999) วิธีในคู่มือของ FHWA (1999) นี้เป็นวิธีคำนวณจากตัวแปรคุณสมบัติหินที่พิจารณาองค์ประกอบร่วมหลายอย่าง ทั้งการประเมินสภาพโครงสร้างมวลหิน ประเภทและความต่อเนื่องของหิน ค่ากำลังและอื่นๆ จึงเหมาะแก่การนำมาทดลองศึกษาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์กำลังแบกทานของเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินของกรณีศึกษาในบทความนี้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์แสดงการวิเคราะห์กำลังแบกทานของเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินด้วยวิธี FHWA (1999) ที่คำนวณจากข้อมูลเจาะสำรวจและทดสอบทางปฐพีวิศวกรรมและเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณกับผลการทดสอบกำลังแบกทานของเสาเข็มในสนาม โดยใช้สัดส่วนความปลอดภัยอ้างอิงจากกฎกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 6 พศ. 2527 การศึกษานี้ใช้เสาเข็มเจาะเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.80 เมตรจากโครงการแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรีเป็นกรณีศึกษา

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากโครงการที่เลือกเป็นกรณีศึกษาเป็นพื้นที่ที่ชั้นดินประกอบด้วยชั้นทรายและเริ่มพบชั้นหินแกรนิตผุที่ระดับความลึกตั้งแต่ 13 เมตร ในบางตำแหน่งพบในระดับที่ลึกกว่านี้ ดังนั้นสูตรที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์กำลังต้านทานจากดินและหินจึงประกอบด้วยสูตรคำนวณ 1) หน่วยแรงเสียดทานในทราย 2) หน่วยแรงเสียดทานในชั้นหิน (ระยะที่ฝังในหิน) และ 3) หน่วยแรงแบกของหินที่ปลายเสาเข็ม

1) สูตรทั่วไปสำหรับหน่วยแรงเสียดทานประลัยรอบเสาเข็มในชั้นทราย (Maximum Shaft Friction Resistance in Sand) หรือ $f_{\max(S)}$ คำนวณจาก

$$f_{\max(S)} = \beta P_{avg} \quad (1)$$

เมื่อ β คำนวณจาก $K_s \tan \delta$
 K_s คือสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง
 δ คือมุมเสียดทานระหว่างคอนกรีตกับดินรอบเสาเข็ม (ประมาณ 0.75 เท่าของค่า ϕ มุมเสียดทานของดิน)

P_{avg} คือหน่วยแรงกดทับประสิทธิผลเฉลี่ยที่กึ่งกลางช่วงความยาวเสาเข็มในชั้นทราย

2) สูตรสำหรับหน่วยแรงเสียดทานประลัยรอบเสาเข็มในชั้นหิน (Maximum Shaft Friction Resistance in Rock) หรือ $f_{\max(R)}$ คำนวณจาก (O’Niel & Reese, 1999)

$$f_{\max(R)} = 0.65 P_a [q_u / P_a]^{0.5} \quad (2)$$

ทั้งนี้ต้องมีค่าไม่เกิน $0.65 P_a [f'_c / P_a]^{0.5}$

เมื่อ P_a คือความดันบรรยากาศ (101 kPa)
 q_u คือค่ากำลังอัดประลัยแกนเดียวของหิน (Uniaxial Compressive Strength) มีหน่วยเป็น kPa
 f'_c คือค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน มีหน่วยเป็น kPa

3) สูตรสำหรับหน่วยแรงแบกทานประลัยของหินที่ปลายเสาเข็ม (Maximum End Bearing in Rock) หรือ q_{\max} (หน่วยเป็น kPa) พิจารณาจากค่ากำลังอัดประลัยแกนเดียวหรือ q_u และเปอร์เซ็นต์ความต่อเนื่องของตัวอย่างหินในรูปแบบของค่า RQD (Rock Quality Designation) สูตรแบ่งเป็น 3 กรณี (O’Niel & Reese, 1999)

กรณีที่ 1 หินมีค่า RQD เท่ากับ 100 และระยะฝังไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม

$$q_{\max} = 2.5 q_u \quad (3)$$

กรณีที่ 2 หินมีค่า RQD ระหว่าง 70 ถึง 100 มีรอยไม่ต่อเนื่องปิดสนิทวางตัวค่อนข้างอยู่แนวราบและค่า q_u ไม่น้อยกว่า 0.5 MPa (สูตรนี้ใช้หน่วย MPa)

$$q_{\max} = 4.83 q_u^{0.51} \quad (4)$$

กรณีที่ 3 หินมีรอยไม่ต่อเนื่องจำนวนมาก แต่ละแนวทำมุมแตกต่างกัน การประเมินสภาพรอยดังกล่าวสามารถทำได้ด้วยการชูดทดสอบ ต้องพิจารณาร่วมกับ ชนิดหิน ความผูกพัน และความไม่ต่อเนื่อง

$$q_{\max} = [s^{0.5} + (ms^{0.5} + s)^{0.5}] q_u \quad (5)$$

โดยค่า s และ m หาได้จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ชนิดหินสำหรับใช้ในตารางที่ 2 (O’Niel & Reese, 1999)

Rock Type	Description
A	carbonate rock with well-developed crystal cleavage (e.g., dolomite, limestone, marble)
B	mudstone, siltstone, shale, slate
C	sandstone, quartzite
D	fine-grained igneous rocks (andesite, dolerite, diabase, rhyolite)
E	coarse-grained igneous rocks and metamorphic rocks (amphibole, gabbro, gneiss, granite, quartz-diorite)

ตารางที่ 2 ค่า s และ m จำแนกตามคุณภาพและชนิดของหิน (O’Niel & Reese, 1999)

Quality of Rock Mass by Joint Description and Spacing	s	m based on rock type				
		A	B	C	D	E
Excellent: Intact (closed); spacing > 3 m	1	7	10	15	17	25
Very Good: Interlocking; spacing of 1 to -3 m	0.1	3.5	5	7.5	8.5	12.5
Good: Slightly weathered; spacing of 1 to 3	0.04	0.7	1	1.5	1.7	2.5
Fair: Moderately weathered; spacing of 0.3 to 1	10-4	0.14	0.2	0.3	0.34	0.5

4. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการนำข้อมูลผลเจาะสำรวจและทดสอบชั้นดินมาวิเคราะห์โดยใช้สูตรต่างๆที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3 เพื่อให้ทราบค่ากำลังแบกทานของเสาเข็ม ตัวแปรที่ใช้ประกอบด้วย คุณสมบัติด้านกำลังของดินและหิน คุณสมบัติเชิงคุณภาพของหิน (RQD ชนิดหิน ความผุพัง และความไม่ต่อเนื่อง) ส่วนที่สองเป็นการนำผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักเสาเข็มมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่คำนวณไว้โดยใช้สัดส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.5 เท่าสำหรับผลการคำนวณและ 2 เท่าสำหรับผลการทดสอบในสนาม (กฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 6 พศ.2527 ออกตามความใน พรบ.ควบคุมอาคาร พศ.2522)

การศึกษานี้ใช้กรณีศึกษาเสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.80 เมตร ความยาว 19 เมตร โครงการก่อสร้างปรับปรุงทางแยกต่างระดับเขาไม้แก้ว ทางหลวงหมายเลข 36 จังหวัดชลบุรี ผลการเจาะสำรวจชั้นดินใช้ค่าเฉลี่ยจากหลุมเจาะสำรวจ 2 หลุม (บริษัท แคลสแลบ(ประเทศไทย) จำกัด, 2563) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลเจาะสำรวจชั้นดิน

ความลึก (ม)	ชนิดของดิน/หิน	SPT		q_u (MPa)	หน่วยน้ำหนัก γ (kN/m ³)
		N	N _{cor}		
0 ถึง 9.0	ทรายปนทรายแข็งแน่นปานกลางถึงแน่น (SM)	33	24		21
9.0 ถึง 16.5	ทรายปนทรายแข็งแน่นมาก (SM)	>50	50		21
16.5 ถึง 21.0	หินแกรนิตสีเทา ผุพังปานกลาง (RQD \approx 50%)			44	21

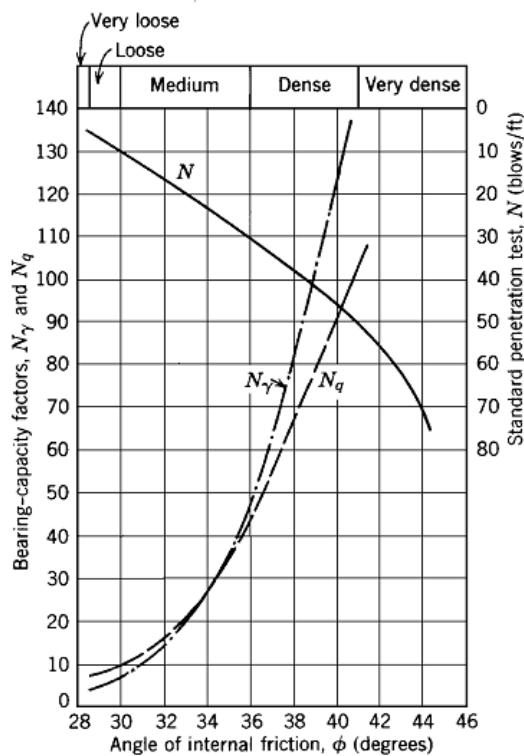
ช่วงความลึกถึง 9 เมตรเป็นทรายปนทรายแข็งมีค่า N เท่ากับ 33 จึงทำการปรับแก้ค่า N ด้วย N_{COR} เท่ากับ $15 + 0.5(N-15)$ ทำให้ N_{COR} มีค่าเท่ากับ 24 สำหรับช่วงที่ลึกกว่า 9 เมตร ค่า N สูงกว่า 50 มากจึงใช้ N_{COR} จำกัดไว้ที่ 50 โดยไม่ปรับแก้แล้วนำค่า N_{COR} ไปแปลงเป็นค่ามอดูล ϕ โดยใช้กราฟในรูปที่ 2 สำหรับตัวอย่างหินได้เก็บตัวอย่างมาคำนวณค่า RQD (รูปที่ 1) และนำไปทดสอบกำลังอัดแกนเดียวได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44 MPa

ค่า β ในตารางที่ 4 คำนวณได้จากสูตรในคำอธิบายของสมการที่ 1 ค่าหน่วยแรงกดทับประสิทธิผลเฉลี่ย P_{avg} ในช่วงความลึก 9 เมตรและช่วง 9 ถึง 16.5 เมตรเท่ากับ 49.5 kPa และ 140.3 kPa ตามลำดับ (กำหนดให้ระดับน้ำอยู่ที่ผิวดิน) นำสองค่านี้แทนค่าในสมการที่ 1 จะได้ค่าหน่วยแรงเสียดทานประลัยต่อไป



รูปที่ 1 ตัวอย่างหินจากหลุมเจาะสำรวจ

ที่มา: บริษัทแคลบ(ประเทศไทย) จำกัด (2563)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า N และค่า ϕ

ที่มา: Peck, Hanson, & Thornburn (1974)

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์กำลังเสียดทานในชั้นทราย

ความลึก (ม)	N	ϕ	δ	K_s	β	γ (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	P_{avg} (kPa)
0 - 9.0	24	34	26	0.7	0.33	21	11	49.5 (11x9/2)
9.0 - 16.5	50	41	31	0.7	0.42	21	11	140.3 (11x9) + 11 x (16.5-9)/2

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการคำนวณค่าหน่วยแรงเสียดทานประลัยด้วยสมการที่1 ในชั้นดินทรายทั้งสองช่วงได้ค่า $f_{max(S)}$ เท่ากับ 16.5 kPa และ 58.4 kPa ตามลำดับ และเมื่อคูณด้วยพื้นที่ผิวสัมผัสรอบเสาเข็ม (A_s) 22.91 และ 18.85 m² จะได้กำลังเสียดทานประลัย 374 kN และ 1,101 kN ตามลำดับ ทั้งหมดรวมทั้งสองช่วงเป็นกำลังเสียดทานประลัย 1,475 kN

การคำนวณกำลังเสียดทานประลัยในหินด้วยสมการที่2 โดยเลือกใช้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเนื่องจากค่ากำลังอัดประลัยแกนเดียวของหินมีค่าสูงกว่าคอนกรีต จึงใช้ค่า f'_c เท่ากับ 24 MPa ระยะฝังในชั้นหิน 2.4 เมตร ค่ารวมค่า $f_{max(R)}$ ได้ 1,012 kPa คูณด้วยพื้นที่ผิวสัมผัสรอบเสาเข็มได้กำลังของแรงเสียดทานในชั้นหินเท่ากับ 6,104 kN

การคำนวณกำลังแบกทานที่ปลายเสาเข็มในหินเลือกใช้สมการที่5 เนื่องจากค่า RQD ของตัวอย่างหินที่เก็บจากหลุมเจาะในโครงการมีค่าต่ำกว่าค่าที่แนะนำให้ใช้ในสมการที่3 และสมการที่4 เมื่อพิจารณาระดับการผูกมัด จัดว่าอยู่ในคุณภาพระดับ “Fair” ตามตารางที่1 และหินแกรนิตจัดอยู่ในกลุ่ม “E” ตามตารางที่2 ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ “s” และ “m” เท่ากับ 0.0001 และ 0.5 ตามลำดับ แทนค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดในสมการที่5 จะได้ q_{max} เท่ากับ 4.17 MPa เมื่อคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (A_p) 0.503 m² ผลลัพธ์คือแรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม 2,094 kN (ประมาณ 213 ตัน) เมื่อรวมแรงต้านทานทั้งหมดจากชั้นทราย (1,475 kN) จากชั้นหิน (6,104 + 2,094) เป็นกำลังแบกทานประลัยของเสาเข็มเท่ากับ 9,673 kN (ประมาณ 967 ตัน) ผลการคำนวณสรุปไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณกำลังต้านทานในชั้นดินทรายและชั้นหิน

ความลึก (ม)	$f_{max(S)}$ หรือ $f_{max(R)}$ (kPa)	พื้นที่ผิวสัมผัสรอบเสาเข็ม A_s (m ²)	กำลังเสียดทานประลัย (kN)	q_{max} (kPa)	พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม A_p (m ²)	แรงแบกทานประลัยที่ปลายเสาเข็ม (kN)
0 ถึง 9.0	16.5	22.91	374			
9.0 ถึง 16.5	58.4	18.85	1,101			
Rock Socket	1,012	6.03	6,104	4,166	0.503	2,094

ในส่วนของการทดสอบเสาเข็มในสนาม เป็นการทดสอบที่ขนาดและความยาวเดียวกันกับที่ใช้รายการคำนวณ การทดสอบทำด้วยวิธีน้ำหนักสถิต (Static Load Test) ใช้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดในการทดสอบเท่ากับ 765 ตัน (รูปที่ 3) ผลการทดสอบเสาเข็มที่น้ำหนักทดสอบสูงสุด (Max Load Test) 765 ตัน วัดค่าการทรุดตัวสูงสุดเมื่อคงค้ำน้ำหนักทดสอบทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง (Total Settlement at Max Load) ได้ 10.59 มม. และเมื่อถอนน้ำหนักทดสอบออกทั้งหมด วัดค่าการทรุดถาวร (Permanent Settlement) ได้ 5.43 มม.



รูปที่ 3 การทดสอบการรับน้ำหนักของเสาเข็ม ที่มา: บริษัทแคสแลบ(ประเทศไทย) จำกัด (2564)

ตามที่กฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 6 พศ.2527 ระบุในข้อ 21 ว่าให้ใช้กำลังแบกทานของเสาเข็มไม่เกินอัตราดังต่อไปนี้ (1) กำลังแบกทานของเสาเข็มที่คำนวณจากการทดสอบคุณสมบัติของดินให้ใช้กำลังแบกทานได้ไม่เกินร้อยละ 40 ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (2) กำลังแบกทานของเสาเข็มที่ได้จากการทดสอบให้ใช้กำลังแบกทานได้ไม่เกินร้อยละ 50 ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด จะเห็นว่าผลการทดสอบเสาเข็มซึ่งปรากฏว่าค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักสูงสุดวัดได้ 10.59 มม. ซึ่งยังห่างจากเกณฑ์ 25 มม. อยู่มาก แต่ค่าการทรุดตัวถาวรที่วัดได้ 5.43 มม. ก็เข้าใกล้ขีดจำกัดที่ 6 มม. ทั้งนี้หากใช้เกณฑ์ค่าการทรุดตัวที่น้ำหนักสูงสุดเกณฑ์อื่นๆที่คำนึงถึงขนาดหน้าตัดเสาเข็ม เช่น American Society of Civil Engineers (1997) หรือ ASCE แนะนำ $3.81+D/100$ (D มีหน่วยเป็น มม.) อาจได้ค่าน้ำหนักสูงสุดสูงมากกว่านี้ อย่างไรก็ตาม ด้วยข้อมูลชุดนี้อนุมานได้ว่าค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 765 ตันนั้นใกล้เคียงค่ากำลังแบกทานประลัยภายใต้หลักเกณฑ์ของกฎกระทรวงนี้ ดังนั้น กำลังแบกทานที่ยอมให้จึงควรคิดจากร้อยละ 50 ของ 765 ตันซึ่งเท่ากับ 383 ตัน หากเทียบกับผลจากการคำนวณ 967 ตันและใช้ค่าร้อยละ 40 จะได้ค่า 387 ตัน ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี FHWA (1999) กับผลการทดสอบเสาเข็มในสนามโดยพิจารณาใช้สัดส่วนความปลอดภัยตามกฎกระทรวงมีความสอดคล้องดีกันมาก

อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังแบกทานที่ยอมให้ของเสาเข็มนั้นจะต้องตรวจสอบความสามารถรับกำลังอัดของหน้าตัดเสาเข็มที่มาจากกำลังอัดของคอนกรีตด้วย พิจารณาใช้กำลังอัดของคอนกรีตที่ยอมให้คือ 60 กก/ซม² (กฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 6 พศ.2527) นำมาคูณพื้นที่หน้าตัดจะได้กำลังแบกทานที่ยอมให้ประมาณ 300 ตัน (เสาเข็มต้นนี้ออกแบบรับน้ำหนักบรรทุกที่ 300 ตัน) ในกรณีนี้แปลว่าแรงต้านจากชั้นดินและหินที่ปลายเสาเข็มสูงกว่าเกือบ 30 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการกำหนดระยะฝังในหินอย่างน้อย 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางอาจเป็นการอนุรักษ์นิยมเกินไปหรือไม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในหินที่มีคุณภาพดี เพราะค่าก่อสร้างเสาเข็มชนิดนี้มีราคาสูงมากอันเกิดจากความลึกที่เจาะหลุมฝังปลายเสาเข็มในหินนั่นเอง

6. สรุปผล

การวิเคราะห์กำลังแบกทานของเสาเข็มชนิดปลายฝังในชั้นหินด้วยวิธี FHWA (1999) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งจากหลายวิธี ข้อดีของวิธีการนี้คือสูตรที่ใช้ในการคำนวณไม่ซับซ้อน มีการพิจารณาชนิด ค่า ROD กำลังอัด รวมถึงระดับความผูกพันของหิน ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์เสาเข็มชนิดปลายฝังในชั้นหิน เสาเข็มเจาะเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.80 ม. ยาว 19 ม. ส่วนอยู่ในชั้นทราย 16.5 ม. และมีระยะฝังในหินประมาณ 2.5 ม. ค่ากำลังแบกทานที่ยอมให้จากการคำนวณมีค่า 387 ตัน มีความสอดคล้องดีมากกับค่าจากการทดสอบเสาเข็มในสนามที่ 383 ตัน โดยใช้ค่าสัดส่วนความปลอดภัย 2.5 เท่าและ 2 เท่าสำหรับ

ผลจากการคำนวณและผลทดสอบในสนาม ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าจำกัดความสามารถรับน้ำหนักของหน้าตัดเสาเข็มด้วยกำลังของคอนกรีตที่ร้อยละ 25 ของกำลังอัดประลัยคอนกรีตหรือไม่เกิน 60 กก/ซม^2 (300 ตัน) บอกเป็นนัยว่ามีแนวโน้มจะทำให้ระยะฝังในชั้นหินอาจจะใช้สั้นกว่า 3 เท่าก็เป็นได้

7. ข้อเสนอแนะ

อย่างไรก็ตาม ผลที่แสดงในบทความนี้เป็นการเปรียบเทียบกับเสาเข็มเพียงต้นเดียว ในทางปฏิบัติ ค่าจากการคำนวณอาจมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ทดสอบในสนามได้ จากปัจจัยความแปรปรวนของคุณสมบัติหินในตำแหน่งเสาเข็มต้นที่ทดสอบกับคุณสมบัติที่ตำแหน่งของหลุมเจาะ นอกจากนี้ กำลังแบกทานของเสาเข็มจริงในสนามที่ทดสอบได้ยังขึ้นกับปัจจัยสำคัญอื่นเช่น คุณภาพในการก่อสร้างเสาเข็ม การเตรียมกันหลุมก่อนเทคอนกรีต รวมถึงความแม่นยำในการวัดค่าการทรุดตัวระหว่างการทดสอบ ในอนาคตหากมีจำนวนข้อมูลทดสอบเสาเข็มมากขึ้นจะช่วยยืนยันผลลัพธ์จากวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ได้มั่นใจมากขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอบขอบคุณ คุณพงศ์ศักดิ์ แซ่หลี และบริษัทแคลสแลบ (ประเทศไทย) จำกัด เป็นอย่างสูงในความอนุเคราะห์ข้อมูลสำรวจชั้นดินและผลการทดสอบเสาเข็มเพื่อใช้เป็นประโยชน์ทางวิชาการและการศึกษาที่นำเสนอในบทความนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- กฎกระทรวงฉบับที่ 6 พ.ศ. 2527 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 (ฉบับพิเศษ) พ.ศ. 2527. (2527, 11 ตุลาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 101 ตอนที่ 143, หน้า 10-29.
- บริษัทแคลสแลบ(ประเทศไทย) จำกัด (2563). รายงานเจาะสำรวจสภาพชั้นดินโครงการก่อสร้างปรับปรุงทางแยกต่างระดับเขาไม้แก้วจุดตัดทางหลวงหมายเลข 36 จังหวัดชลบุรี-จังหวัดระยอง.
- บริษัทแคลสแลบ(ประเทศไทย) จำกัด (2564). รายงานการทดสอบการรับแรงอัดของเสาเข็มเจาะโดยวิธีทางสถิตศาสตร์ (Static Pile Load Test) โครงการก่อสร้างปรับปรุงทางแยกต่างระดับเขาไม้แก้ว จ.ชลบุรี จ.ระยอง 1 แห่ง
- สยาม ยัมศิริ (2559). กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินในเขตเมืองพัทยา. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559, มหาวิทยาลัยบูรพา
- American Society of Civil Engineers (1997). Standard Guidelines for the Design and Installation of Pile Foundations; ASCE 20-9; ASCE: Reston, VA, USA.
- Kim, S.J., Sun Yong Kwon, S.Y., Han, J.T. and Yoo, M. (2019). Development of Rock Embedded Drilled Shaft Resistance Factors in Korea based on Field Tests. Applied Science, 9 , p.1-17. doi.org/10.3390/app9112201
- O’Niel, M.W. and Reese, L.C. (1999). Drill Shafts: Construction Procedure and Design Method. Publication No. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, USA.
- Peck, R.B., Hanson, W.E., and Thornburn, T.H., (1974). Foundation Engineering, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Rowe, R.K. & Armitage, H.H. (1987). A Design Method for Drilled Pile in Soft Rock. Canadian Geotechnical Journal, 24, 126-142.

Zhang, L. (1997). Analysis and Design of Axially Loaded Drilled Shafts Socketed into Rock. M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.