

แนวทางการวิเคราะห์กำลังแบกทานและระยะฝังของเสาเข็มเจาะฝังปลายใน หินแกรนิตผุพังปานกลาง Guidelines for Analyzing Bearing Capacity and Embedded Length of Rock-Socketed Piles in Moderately Weathered Granite

อติเทพ ศรีคงศรี^{1*} พงศ์ศักดิ์ แซ่หลี่²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 60 ถนนร่มเกล้า แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพฯ 10510

² บริษัท แคสแลบ (ประเทศไทย) จำกัด 168/6 หมู่ที่ 2 ตำบลบ้านคลองสวน อำเภอพระสมุทรเจดีย์ จังหวัดสมุทรปราการ 10290

Atitep Srikongsri^{1*} Pongsak Saelee²

¹Faculty of Engineering, Kasem Bundit University Romklao Campus, 60 Romklao Road, Minburi, Bangkok 10510

²Castlab (Thailand) Co., Ltd., 168/6 Moo 2 Ban Khlong Suan Subdistrict Phra Samut Chedi District Samut Prakan Province, 10290

*Corresponding author Email: atitep.sri@kbu.ac.th

(Received: April 3, 2023; Revised: December 7, 2023 ; Accepted: January 25, 2024)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์กำลังแบกทานของเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินด้วยวิธี FHWA และ Tomlinson โดยใช้ข้อมูลจากการเจาะสำรวจทางปฐพีวิศวกรรม สมการแรงเสียดทานและแรงแบกทานปลายเสาเข็มที่ฝังในหินคำนวณจากตัวแปรประกอบด้วย ชนิดหิน คุณภาพมวลหิน (ค่า RQD) ระดับความผุพัง กำลังรับแรงอัดแกนเดียวของหินและกำลังอัดประลัยของคอนกรีต เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 และ 1.00 เมตรฝังปลายในหินแกรนิตผุพังปานกลางถูกนำมาวิเคราะห์กำลังแบกทาน จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณพบว่าทั้งสองวิธีให้ค่าแรงเสียดทานใกล้เคียงกันแต่วิธีของ Tomlinson ให้ค่าแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มสูงกว่าวิธีแรกมาก เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับน้ำหนักทดสอบสูงสุดจากการทดสอบเสาเข็มด้วยวิธีสถิตศาสตร์ในสนาม พบว่าการกำหนดระยะฝังในหิน 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางทำให้ได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยค่อนข้างสูงเกินความจำเป็น จึงมีการเสนอแนวทางวิเคราะห์ระยะฝังประสิทธิภาพเพื่อลดระยะฝังในหินให้สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่เหมาะสม

คำสำคัญ: เสาเข็มปลายฝังในหิน กำลังแบกทานของหิน เสาเข็มเจาะ ทดสอบเสาเข็ม

ABSTRACT

Bearing capacity of pile socketed in moderately weathered granite was statically analyzed using FHWA and Tomlinson methods. The capacity equations for the pile socket including friction and tip resistance were based on several geotechnical parameters such as type of rock, rock quality designation

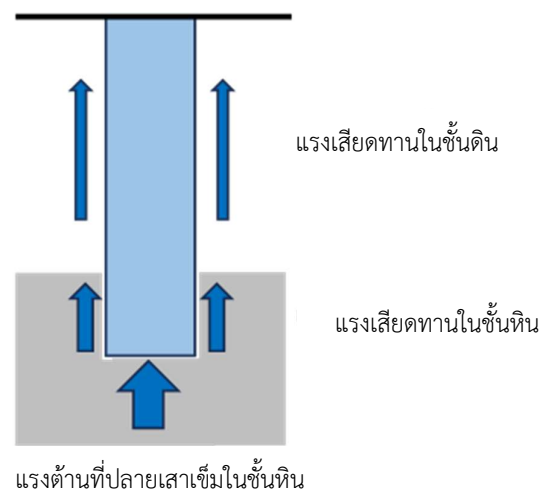
(RQD), degree of weathering, and compressive strengths of rock and concrete. Two bored piles with a diameter of 0.80 m and 1.00 m were selected for analysis. Calculated results of the methods are then compared. The results show that the friction resistances yielded from both methods are comparable, however, the tip resistance of Tomlinson method exhibits much higher the magnitude than FHWA. The results were also validated by static pile load test results. Comparison between the calculated results and the maximum tested loads implies an ample factor of safety. Therefore, an analytical approach for effective socket depth is proposed herein to reduce the embedded length in rock for yielding appropriate values of factor of safety.

Keyword: Rock socketed pile, Rock bearing capacity, Bored pile, Pile load test.

1. บทนำ

เสาเข็มชนิดปลายฝังในหิน (Rock-Socketed Pile) เป็นทางเลือกหนึ่งที่ประยุกต์ใช้ได้กับสภาพทางธรณีวิทยาที่พบชั้นหินในระดับตื้นและสามารถก่อสร้างเสาเข็มได้ แม้ว่าเสาเข็มชนิดนี้จะมีค่าก่อสร้างค่อนข้างสูงเนื่องจาก การเจาะหลุมในหินส่วนปลายเสาเข็ม แต่ก็ยังเป็นเสาเข็มที่รับน้ำหนักได้มากซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมากจนถึงหรือมากกว่าขีดจำกัดของกำลังอัดคอนกรีตที่ยอมให้ ถือว่าเป็นเสาเข็มที่ใช้กำลังได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ การใช้เสาเข็มชนิดนี้ในประเทศไทยพบได้ตามพื้นที่ภูมิภาคต่างๆ ที่ไม่ใช่พื้นที่ลุ่มที่มีชั้นดินหนา ถูกใช้ในงานฐานรากสะพานขนาดใหญ่และโครงสร้างอื่นที่มีน้ำหนักมากเกินกว่าการใช้เสาเข็มปกติในจำนวนที่เหมาะสมต่อฐานรากหนึ่งฐาน

กลไกแรงดันรอบเสาเข็มเหมือนกับเสาเข็มทั่วไปคือ ประกอบด้วยแรงเสียดทานและแรงดันที่ปลายเสาเข็ม รูปที่ 1 แสดงกลไกการสร้างแรงดันของเสาเข็มมาจากแรงเสียดทานในชั้นดิน แรงเสียดทานในชั้นหิน และแรงดันที่ปลายเสาเข็มในชั้นหิน โดยทั่วไปแรงดันจากส่วนที่ฝังในชั้นหินจะมีค่าสูงกว่าแรงเสียดทานในชั้นดิน สมการออกแบบที่ใช้โดยทั่วไปเป็นสมการเชิงประสบการณ์ [1],[2] ซึ่งค่าพารามิเตอร์บางตัวมีช่วงค่อนข้างกว้างทำให้ต้องใช้ดุลพินิจของผู้ออกแบบ ส่งผลให้กำลังแบกทานที่คำนวณได้มีความแตกต่างกันได้มากเมื่อใช้วิธีที่แตกต่างกัน แม้กระทั่งวิธีเดียวกันก็ตาม



รูปที่ 1 กลไกแรงดันรอบเสาเข็มชนิดปลายฝังในหิน

ตัวแปรที่สำคัญมากอีกตัวหนึ่งคือระยะฝังในหิน ระยะฝังมักจะถูกกำหนดในรูปแบบที่เป็นสัดส่วนกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม สำหรับแนวปฏิบัติที่ผ่านมาในประเทศไทยนิยมใช้วิธีกำหนดระยะฝังเท่ากับหรือไม่น้อยกว่า 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ซึ่งอยู่บนแนวคิดแบบเดียวกันกับเสาเข็มในดินโดยไม่ได้อยู่บนพื้นฐานของคุณสมบัติของหิน แล้วจึงคำนวณกำลังแบกทานของเสาเข็มจากความยาวเสาที่กำหนด อย่างไรก็ตาม คู่มือของ FHWA แนะนำให้กำหนดระยะฝังได้ตั้งแต่ 1.5 เท่าของ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มขึ้นไป หากกำลังแบกทานของเสาเข็มมีเพียงพอก็ไม่จำเป็นต้องกำหนดระยะฝังลึกเกินไป [3] เสาเข็มเมื่อฝังในหินค่อนข้างลึก มักจะมีพฤติกรรมเป็นเสาเข็มเสียดทาน [4] สำหรับกรณีหินที่ฝังปลายเสาเข็มมีความแข็งแรงมาก แรงเสียดทานจะพัฒนาไปก่อนแรงต้านที่ปลายอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระยะฝังมากกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม [5] สอดคล้องกับการศึกษาอิทธิของโมดูลัสยืดหยุ่นระหว่างหินและคอนกรีตเสาเข็มพบว่าถ้าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของหินสูงกว่าคอนกรีต ระยะฝังควรน้อยกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มเพื่อให้แรงในเสาเข็มบางส่วนสามารถถ่ายลงไปที่ปลายด้านล่างได้ มิเช่นนั้นแรงต้านจะเกิดจากแรงเสียดทานเพียงอย่างเดียว [6] ดังนั้นการใช้เกณฑ์ระยะฝังในหินไม่น้อยกว่า 3 เท่าของขนาดหน้าตัดเสาเข็มโดยไม่คำนึงถึงกำลังต้านทานที่ได้จากชั้นหินอาจเป็นการออกแบบที่อนุรักษ์นิยมมากเกินไปเนื่องจากการเจาะหลุมขนาดใหญ่ในหินมีค่าดำเนินการสูงมาก [7]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะแสดงแนวทางการเลือกค่าตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อคำนวณกำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มชนิดปลายฝังในหินด้วยวิธีของ FHWA และ Tomlinson เลือกใช้เสาเข็มเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 และ 1.0 เมตร จากโครงการแห่งหนึ่งในจังหวัดชลบุรี ทำการเปรียบเทียบค่าจากการคำนวณกับผลทดสอบเสาเข็มในสนามด้วยวิธีสถิตศาสตร์ทั้ง 2 ดัน เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างกัน และท้ายที่สุดเพื่อเสนอแนวทางการวิเคราะห์ระยะฝังปลายเสาเข็มในหินที่มีความสอดคล้องกับแรงต้านจากชั้นหินและกำลังอัดคอนกรีตที่ยอมให้ของเสาเข็ม

2. กำลังแบกทานของเสาเข็มฝังปลายในหิน

2.1 ภูมิหลังของวิทยาการ

ช่วงก่อนปี ค.ศ.1976 มีรายงานทางวิชาการเกี่ยวกับเสาเข็มปลายฝังในหินจำนวนน้อยมากจนกระทั่งช่วงระหว่างปี ค.ศ.1976 ถึงปี ค.ศ.1988 เป็นช่วงที่มีความก้าวหน้ามากช่วงหนึ่งในการพัฒนาองค์ความรู้

เกี่ยวกับเสาเข็มปลายฝังในหินอย่างเป็นระบบ [8] มีรายงานวิจัยและเอกสารทางวิชาการเผยแพร่ที่เสนอแนวทางการออกแบบ สูตรการคำนวณ และหลักเกณฑ์ ต่างๆ อันเป็นรากฐานที่ใช้มาถึงปัจจุบัน

งานวิจัยที่สำคัญประกอบด้วยผลการศึกษาคของ Horvath & Kenny ในปี ค.ศ.1979 อ้างอิงใน [6] และ Rowe & Armitage [9] ที่เสนอสมการคำนวณหน่วยแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสหินในรูปแบบความสัมพันธ์กับค่ารากที่สองของกำลังอัดแกนเดียวของหินคูณด้วยค่าคงที่สมการที่เสนอมีการตรวจสอบความเที่ยงตรงของสมการกับข้อมูลผลการทดสอบเสาเข็มในสนาม จึงนับว่าเป็นวิธีแรกๆ ที่ถูกอ้างอิงจำนวนมากและได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีที่ใช้งานได้ดี [10] หน่วยแรงเสียดทานจากผลการศึกษาดังกล่าวถูกนำมาศึกษาเพิ่มเติมในงานของ Carter & Kulhawy [11] เพื่อพัฒนาต่อวิธีการออกแบบเสาเข็มปลายฝังในหินโดยทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมจากฐานข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มในจำนวนที่มากขึ้น ผลการศึกษายืนยันได้ว่าหน่วยแรงเสียดทานมีความสัมพันธ์กับค่ารากที่สองของกำลังอัดแกนเดียวของหิน และเสนอสมการหาค่าหน่วยแรงเสียดทานสูงสุด (f_{max}) ไว้ในรูปแบบดังสมการที่ 1

$$f_{max} = AP_a[q_u/P_a]^{0.5} \quad (1)$$

เมื่อ A คือค่าคงที่มีค่า 0.63 ถึง 0.95

P_a คือความดันบรรยากาศ (101 kPa)

q_u คือค่ากำลังอัดแกนเดียวของหิน (Uniaxial Compressive Strength) มีหน่วยเป็น kPa

นอกจากนี้ยังมีงานศึกษาของ William & Pells [12] ที่ศึกษาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเสียดทานกับกำลังอัดแกนเดียวของหินซึ่งพบว่าหน่วยแรงเสียดทานลดลงเมื่อกำลังอัดแกนเดียวของหินเพิ่มขึ้นและได้เสนอสมการไว้ดังสมการที่ 2

$$f_{max} = Bq_u \quad (2)$$

เมื่อ **B** คือค่าสัมประสิทธิ์คำนวณจากค่าปรับแก้และปัจจัยลดทอน

สมการสำหรับหน่วยแรงแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็มในหิน (Maximum End Bearing in Rock) หรือ q_{max} มีแนวคิดหลักอยู่ 3 แนวทาง คือ สูตรอย่างง่ายโดยใช้ค่าคงที่คูณด้วยค่ากำลังอัดแกนเดียว [9],[12] ดังแสดงในสมการที่ 3 แนวทางที่ 2 เสนอโดย Zang & Einstein [13] เป็นสูตรคล้ายกับแนวทางแรก เพียงแต่มีที่มาจาก การวิเคราะห์สมการเส้นแนวโน้มที่ดีที่สุด (Best Fit Curve) บนชุดข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มในสนาม ทำให้ได้ความสัมพันธ์กับกำลังอัดแกนเดียวในรูปแบบยกกำลัง n ดังแสดงในสมการที่ 4

$$q_{max} = Cq_u \quad (3)$$

$$q_{max} = Cq_u^n \quad (4)$$

เมื่อ **C** คือค่าคงเชิงประสพการณ์ (Empirical Constant) ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละงานวิจัย

แนวทางที่ 3 เป็นแนวคิดบนพื้นฐานจากงานศึกษาของ Hoek & Brown อ้างอิงใน [11] โดยค่าหน่วยแรงแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็มแสดงในสมการที่ 5

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

เมื่อ **m** และ **s** คือค่าพารามิเตอร์เชิงประสพการณ์ จำแนกตามชนิดและคุณสมบัติเชิงคุณภาพของมวลหิน

2.2 วิธีของ FHWA

ในปี ค.ศ. 1999 O'Neil & Reese ได้จัดทำคู่มือการออกแบบและก่อสร้างเสาเข็มปลายฝังในหินให้กับ Federal Highway Administration หรือ FHWA [3] ในส่วนของการออกแบบได้รวบรวมสูตรและหลักเกณฑ์ต่างๆ จากงานวิจัยในอดีตที่ได้กล่าวไป รวมถึงประสพการณ์จากการทดสอบและการใช้งานจริงมาปรับแต่งให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ออกแบบได้จริงในทางปฏิบัติ วิธีนี้เป็นวิธีที่

สามารถคำนวณและตรวจสอบรายการคำนวณได้ง่ายและถูกแนะนำในคู่มือของ TRB [14] และคู่มือของ AASHTO [15]

หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดในชั้นหินหรือ f_{max} คำนวณจากสมการที่ 6

$$f_{max} = 0.65P_a[q_u/P_a]^{0.5} \quad (6)$$

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

เมื่อ **P_a** คือความดันบรรยากาศ (101 kPa)

q_u คือค่ากำลังอัดแกนเดียวของหิน (Uniaxial Compressive Strength) มีหน่วยเป็น kPa

f'_c คือค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน มีหน่วยเป็น kPa

สมการหน่วยแรงแบกทานสูงสุดของหินที่ปลายเสาเข็มหรือ q_{max} (หน่วยเป็น kPa) พิจารณาจากค่ากำลังอัดแกนเดียวของหินหรือ q_u และเปอร์เซ็นต์ความต่อเนื่องของตัวอย่างหินในรูปแบบของค่า RQD (Rock Quality Designation) สูตรแบ่งเป็น 3 กรณี

กรณีที่ 1 หินมีค่า RQD เท่ากับ 100 และระยะฝังไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ให้ใช้สมการที่ 7

$$q_{max} = 2.5q_u \quad (7)$$

กรณีที่ 2 หินมีค่า RQD ระหว่าง 70 ถึง 100 มีรอยไม่ต่อเนื่องปิดสนิทวางตัวค่อนข้างอยู่ในแนวราบและค่า q_u ไม่น้อยกว่า 0.5 MPa (สูตรนี้ใช้หน่วย MPa) ให้ใช้สมการที่ 8

$$q_{max} = 4.83q_u^{0.51} \quad (8)$$

กรณีที่ 3 หินมีรอยไม่ต่อเนื่องจำนวนมาก แต่ละแนวทำมุมแตกต่างกัน การประเมินสภาพรอยดังกล่าวสามารถ

ทำได้ด้วยการขุดทดสอบ ต้องพิจารณาร่วมกับ ชนิดหิน ความผูก และความไม่ต่อเนื่อง ให้ใช้สมการที่ 9

$$q_{max} = [s^{0.5} + (ms^{0.5} + s)^{0.5}]q_u \quad (9)$$

โดยค่า s และ m หาได้จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ชนิดหินสำหรับใช้ในตารางที่ 2 [3]

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 [3]

Rock Quality*	s	m based on rock type				
		A	B	C	D	E
(1)	1	7	10	15	17	25
(2)	0.1	3.5	5	7.5	8.5	12.5
(3)	0.04	0.7	1	1.5	1.7	2.5
(4)	10^{-4}	0.14	0.2	0.3	0.34	0.5

*Quality of Rock Mass by Joint Description and Spacing

(1) Excellent: Intact (closed); spacing > 3 m

(2) Very Good: Interlocking; spacing of 1 to 3 m

(3) Good: Slightly weathered; spacing of 1 to 3

(4) Fair: Moderately weathered; spacing of 0.3 to 1

2.3 วิธีของ Tomlinson

เป็นวิธีในหนังสือ Pile Design and Construction Practice ประพันธ์โดย M. J. Tomlinson [6] ซึ่งนำสมการจากงานวิจัยสำคัญในอดีตที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้ มาเรียบเรียงผนวกกับข้อแนะนำจากผู้แต่งซึ่งเป็นบุคคลที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่ององค์ความรู้และประสบการณ์เกี่ยวกับฐานรากเสาเข็ม วิธีนี้จึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่เชื่อถือได้ หนังสือ Pile Design and Construction Practice ที่พิมพ์หลังจากฉบับที่ 4 (4th Edition) เป็นการประพันธ์ร่วมกับ J. Woodward [16], [17] ซึ่งมีการปรับปรุงเพิ่มเติมเล็กน้อยและมีการกล่าวถึง Euro Code อยู่บ้าง แต่โดยรวมยังคงสาระหลักในฉบับก่อนหน้านี้เอาไว้ อย่างไรก็ตาม สมการที่นำมาใช้ในการศึกษานี้เป็นชุดสมการที่มีตั้งแต่ Tomlinson เป็นผู้ประพันธ์เดี่ยวจึงขอเรียกว่าวิธีของ Tomlinson

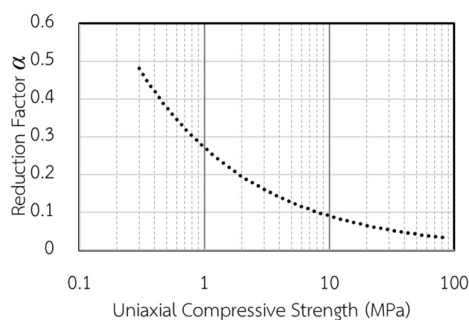
สมการที่ใช้ออกแบบประกอบด้วย หน่วยแรงเสียดทานสูงสุดรอบเสาเข็มในชั้นหิน คำนวณดังสมการที่ 10

$$f_{max} = \alpha \beta q_u \quad (10)$$

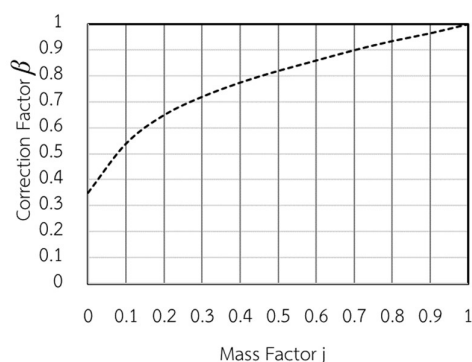
เมื่อ α คือ ปัจจัยลดทอนกำลัง (Strength Reduction Factor)

β คือค่าปรับแก้ความไม่ต่อเนื่องของมวลหิน (Mass Correction Factor)

ค่า α นั้นแปรผันตามค่ากำลังอัดแกนเดียวซึ่งหาได้จากรูปที่ 2 ค่า β แปรผันตามค่า mass factor j ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยค่า mass factor j พิจารณาจากค่า RQD ในตารางที่ 3 สำหรับหินที่มีค่า q_u สูงกว่า f'_c ค่ากำลังเสียดทานประลัยคำนวณจาก f_{max} คูณด้วยพื้นที่ผิวสัมผัสและหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัย (FS) เท่ากับ 2 และต้องมีค่าไม่เกินกำลังอัดของคอนกรีตที่ยอมให้ f_c ที่ 6 MPa คูณด้วยพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม



รูปที่ 2 ปัจจัยลดทอนกำลัง (สร้างใหม่จากข้อมูลใน [6])



รูปที่ 3 ค่าปรับแก้ความไม่ต่อเนื่องของมวลหิน
(สร้างใหม่จากข้อมูลใน [6])

ตารางที่ 3 Mass factor j จำแนกตามคุณภาพของหิน [6]

RQD (%)	ความถี่รอยแตก ของหินช่วง 1 ม.	Mass factor j
0 - 25	15	0.2
25 - 50	15 - 8	0.2
50 - 75	8 - 5	0.2 - 0.5
75 - 90	5 - 1	0.5 - 0.8
90 - 100	1	0.8 - 1

สมการหน่วยแรงแบกทานสูงสุดของหินที่ปลาย
เสาเข็มหรือ q_{max} (หน่วยเป็น kPa) พิจารณาจากค่า
กำลังอัดแกนเดียว q_u และค่ามุมเสียดทานภายในของหิน
 ϕ ดังแสดงในสมการที่ 11

$$q_{max} = 2N_\phi q_u \quad (11)$$

เมื่อ $N_\phi = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$ โดยสามารถใช้ค่า ϕ ที่
แนะนำในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่ามุม ϕ แนะนำ [6]

ระดับความเสียด ทาน	ชนิดหิน	ϕ
Low friction	Schists, Shale, Marl	20 - 27
Medium friction	Sandstone, Siltstone, Chalk, Gneiss, Slate	27 - 34
High friction	Basalt, Granite	34 - 40

เนื่องจากค่า RQD มีผลต่อค่าหน่วยแรงแบกทาน
สูงสุดของหินอย่างมีนัยสำคัญ กรณี RQD น้อยกว่า 70
เปอร์เซ็นต์ ค่า q_{max} หาได้จากสมการที่ 12

$$q_{max} = 0.33q_u \quad (12)$$

ถ้า RQD มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปให้ใช้ค่าตั้งแต่
 $0.33q_u$ ถึง $0.8q_u$

นอกจากนี้ หากคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัย
(FS) เฉพาะส่วนของแรงเสียดทานแล้วมีค่ามากกว่า 2
เท่าของน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ลักษณะนี้สามารถอนุมาน
ได้ว่าแรงจะถ่ายลงไปถึงปลายเสาเข็มน้อยมากภายใต้
น้ำหนักบรรทุกนี้ กรณีนี้ให้ใช้ค่า FS ไม่น้อยกว่า 3 เท่า
ทั้งนี้ต้องตรวจสอบหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเสาเข็มด้วย
ว่าต้องไม่เกิน 6 MPa

3. การคำนวณกำลังแบกทานเสาเข็ม

เสาเข็มที่ศึกษาเลือกจากโครงการแห่งหนึ่งในจังหวัด
ชลบุรีจำนวน 2 ต้น ประกอบด้วยเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80
และ 1.00 เมตร ยาว 18.9 และ 19.5 เมตร และมีระยะ
ฝังในหิน 2.4 และ 3 เมตร ตามลำดับ ผลเจาะสำรวจทาง
ปฐพีพบชั้นหินแกรนิตผุพังปานกลางที่ความลึกประมาณ

16.50 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 5 หินนี้มีค่าเฉลี่ยของกำลังอัดแกนเดียว 44 MPa การวิเคราะห์เริ่มจากการคำนวณแรงเสียดทานในชั้นดินส่วนบนแล้วจึงนำไปรวมกับกำลังต้านทานในชั้นหินที่คำนวณจากวิธีในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 5 ผลเจาะสำรวจทางปฐพี

ความลึก (เมตร)	ชนิดของดิน/หิน	SPT N	γ (kN/m ³)
0 ถึง 9	ทรายปนทรายแข็งแน่น ปานกลางถึงแน่น (SM)	24	21
9 ถึง 16.5	ทรายปนทรายแข็งแน่น มาก (SM)	50	21
ชั้นหิน	RQD		22
16.5 ถึง 17.5	48	หินแกรนิตสีเทา ผุพังปานกลาง $q_u = 44$ MPa	
17.5 ถึง 18.5	35		
18.5 ถึง 19.5	40		

3.1 กำลังเสียดทานในชั้นดินส่วนบน

สมการทั่วไปสำหรับหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดรอบเสาเข็มในชั้นทราย หรือ f_s คำนวณจากสมการที่ 13

$$f_s = K_s \tan \delta P_{avg} \quad (13)$$

เมื่อ K_s คือสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง

δ คือมุมเสียดทานระหว่างคอนกรีตกับดินรอบเสาเข็ม (0.75 เท่าของค่า ϕ มุมเสียดทานของดิน)

P_{avg} คือหน่วยแรงกดทับประสิทธิผลเฉลี่ยที่กึ่งกลางช่วงความยาวเสาเข็มในชั้นทราย

ผลการคำนวณในตารางที่ 6 ใช้ค่าหน่วยน้ำหนักจมน้ำ 11 kN/m³ จากนั้นใช้สมการที่ 13 คำนวณหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดในชั้นทรายช่วงความลึก 0 ถึง 9 เมตร

ได้ 16.5 kPa และหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดในชั้นทรายช่วงความลึก 9 ถึง 16.5 เมตร ได้ 58.4 kPa

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ของชั้นดินทราย

ความลึก (เมตร)	ϕ	δ	K_s	P_{avg} (kPa)
0 ถึง 9	34	26	0.7	49.5 คำนวณจาก (11x9/2)
9 ถึง 16.5	41	31	0.7	140.3 คำนวณจาก (11x9)+11x(16.5-9)/2

3.2 การคำนวณกำลังต้านทานในหินด้วยวิธี FHWA

การคำนวณหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดในหินด้วยวิธี FHWA กรณีนี้ ค่า q_u ของหินมีค่าสูงกว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (f'_c เท่ากับ 24 MPa) ดังนั้นใช้สมการที่ 6 คำนวณค่า f_{max} ได้เท่ากับ 1,012 kPa การคำนวณหน่วยแรงแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็มในหินเลือกใช้สมการที่ 9 เนื่องจากค่า RQD ของตัวอย่างหินที่เก็บจากหลุมเจาะในโครงการ (ค่าเฉลี่ย RQD ประมาณ 41%) มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ของสมการที่ 7 และสมการที่ 8 เมื่อพิจารณาระดับการผุพัง จัดว่าอยู่ในคุณภาพระดับ “Fair” ตามตารางที่ 1 และหินแกรนิตจัดอยู่ในกลุ่ม “E” ตามตารางที่ 2 ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ s และ m เท่ากับ 0.0001 และ 0.5 ตามลำดับ แทนค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดในสมการที่ 9 จะได้ q_{max} เท่ากับ 4,170 kPa

3.3 การคำนวณกำลังต้านทานในหินด้วยวิธี Tomlinson

การคำนวณหน่วยแรงเสียดทานสูงสุดใช้ค่าปัจจัยลดทอนกำลัง α ประมาณ 0.04 (รูปที่ 2) ค่า J เท่ากับ 0.2 (ตารางที่ 3) และค่า β เท่ากับ 0.65 (รูปที่ 3) จากสมการที่ 10 จะได้ค่า f_{max} เท่ากับ 1,144 kPa

การคำนวณหน่วยแรงแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็มในหินนี้เลือกใช้สมการที่ 12 เนื่องจากตัวอย่างหินพบรอยแตกมากพอสมควร (RQD < 70%) ค่า q_{max} คำนวณ

จากค่า $0.33q_u$ ได้เท่ากับ 14.5 MPa ตรวจสอบแล้วน้อยกว่า f'_c (24 MPa) เลือกใช้ 14.5 MPa

กำลังเสียดทานสูงสุด (Q_f) ของแต่ละช่วงความลึก (L) คำนวณได้จาก f_s หรือ f_{max} คูณด้วยพื้นที่ผิวสัมผัส (A_s)

ตารางที่ 7 แสดงผลการคำนวณกำลังเสียดทานสูงสุดของแต่ละช่วงความลึก ในกรณีวิธี Tomlinson ตรวจสอบค่า $Q_f/2$ ได้เท่ากับ 4,187 kN ขณะที่กำลังรับน้ำหนักปลอดภัยของเสาเข็มคำนวณจากกำลังอัดของคอนกรีตอัดที่ยอมให้ 6 MPa มีค่าเท่ากับ 3,000 kN ถือว่าใช้ได้

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณกำลังเสียดทานสูงสุดของเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 เมตร

L (m)	A_s (m ²)	FHWA		Tomlinson	
		f_s and f_{max} (kPa)	Q_f (kN)	f_s and f_{max} (kPa)	Q_f (kN)
9	22.62	16.5	374	16.5	374
7.5	18.85	58.4	1,101	58.4	1,101
2.4	6.03	1,012	6,104	1,144	6,898
		รวม	7,579		8,373

กำลังแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็ม (Q_b) คำนวณจาก q_{max} คูณด้วยพื้นที่หน้าตัด 0.50 ตารางเมตร ตามวิธี FHWA มีค่าเท่ากับ 2,097 kN และวิธี Tomlinson มีค่าเท่ากับ 7,294 kN

ตารางที่ 8 แสดงผลการคำนวณกำลังเสียดทานสูงสุดของแต่ละช่วงความลึกสำหรับเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร (ระยะฝังในดิน 3 เมตร) ใช้หลักการคำนวณตามตารางที่ 7 จะได้ค่า Q_f ตามวิธี FHWA เท่ากับ 9,543 kN และวิธี Tomlinson เท่ากับ 10,788 kN ตามลำดับ

กำลังแบกทานสูงสุดที่ปลายเสาเข็ม (Q_b) คำนวณจาก q_{max} คูณด้วยพื้นที่หน้าตัด 0.786 ตารางเมตร

ตามวิธี FHWA มีค่าเท่ากับ 3,276 kN และวิธี Tomlinson มีค่าเท่ากับ 11,397 kN

ตารางที่ 9 แสดงค่ากำลังแบกทานประลัย (Q_u) ซึ่งได้จากผลรวมของ Q_f และ Q_b กำลังแบกทานที่ยอมให้ (Q_o) ได้จาก Q_u หารด้วย FS ที่ใช้เท่ากับ 2.5 สำหรับวิธี FHWA และ 3 สำหรับ Tomlinson

ตารางที่ 8 ผลการคำนวณกำลังเสียดทานเสาเข็มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เมตร

L (m)	A_s (m ²)	FHWA		Tomlinson	
		f_s and f_{max} (kPa)	Q_f (kN)	f_s and f_{max} (kPa)	Q_f (kN)
9	28.64	16.5	473	16.5	473
7.5	23.56	58.4	1,376	58.4	1,376
3	9.43	1,012	9,543	1,144	10,788
		รวม	11,392		12,637

ตารางที่ 9 ผลการคำนวณกำลังแบกทานทั้งหมด

ค่า kN	ขนาด 0.80		ขนาด 1.00	
	FHWA	Tomlinson	FHWA	Tomlinson
Q_f	7,579	8,373	11,392	12,637
Q_b	2,097	7,294	3,276	11,397
Q_u	9,676	15,667	14,668	24,034
Q_o	3,870	5,222	5,867	8,011

4. การเปรียบเทียบและอภิปรายผล

4.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่าง FHWA และ Tomlinson

ผลการคำนวณด้วยวิธี FHWA แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มอาศัยแรงต้านจากกำลังเสียดทานเป็นหลักหรือเป็นเสาเข็มเสียดทาน (Friction Pile) คิดเป็นร้อยละ 78 ของกำลังแบกทานทั้งหมดซึ่งต่างจากวิธี Tomlinson ที่ค่ากำลังเสียดทานมากกว่ากำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็มเล็กน้อย เนื่องจากค่าหน่วยแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มมีค่าค่อนข้างสูง หากพิจารณาเฉพาะส่วนของกำลังเสียดทาน

ในขั้นหิน วิธี FHWA และ Tomlinson ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยที่วิธีหลังให้ค่าสูงกว่าเล็กน้อย ที่ไม่ต่างกันมากนัก เนื่องจาก FHWA จะใช้กำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตแทนเมื่อหินมีกำลังสูงกว่าคอนกรีต (สมการที่ 6) ส่วนวิธีของ Tomlinson เมื่อพิจารณาว่า α ตามเส้นกราฟ ในรูปที่ 2 พบว่าค่ากำลังอัดของหินที่สูงกว่า 20 MPa ค่า α เกือบคงที่อยู่ที่ในระดับต่ำสุดที่ประมาณ 0.04 ซึ่งเป็นค่าที่นำมาคำนวณแล้วจะให้ผลลัพธ์อยู่ในช่วงที่เทียบเคียงกันได้กับค่าทั่วไปของกำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต ที่แตกต่างกันมากคือกำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็ม พบว่าวิธี Tomlinson มีค่าสูงกว่าประมาณ 3 เท่า อันเป็นผลจากทั้งสองวิธีใช้สูตรและค่าพารามิเตอร์เชิงประสบการณ์บนพื้นฐานที่ต่างกัน ทำให้กำลังแบกทานที่ยอมให้สูงกว่าประมาณร้อยละ 30 แม้ว่าวิธี Tomlinson ใช้อัตราส่วนความปลอดภัย 3 เท่าซึ่งสูงกว่าวิธี FHWA ที่ใช้ 2.5 เท่า แต่วิธี FHWA ยังให้ผลการคำนวณในเชิงอนุรักษ์นิยมกว่า

อย่างไรก็ตาม คำนำน้หนักบรรทุกปลอดภัยของเสาเข็ม (Q_{safe}) นั้นจะต้องตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักรับทุกของเสาเข็มที่ควบคุมโดยขีดจำกัดกำลังอัดของคอนกรีตด้วย กฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 6 พ.ศ.2527 [18] กำหนดให้หน่วยแรงอัดคอนกรีตที่ยอมให้ (f_c) สำหรับหน้าตัดคอนกรีตล้วนคือ 6 MPa ใน (ค่าเหมือนกันกับที่แนะนำโดย Tomlinson) เมื่อคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดจะได้กำลังแบกทานของเสาเข็มที่ยอมให้โดยคอนกรีต (Q_{oc}) กำลังรับน้ำหนักรับทุกปลอดภัย (Q_{safe}) ให้เลือกค่าน้อยกว่าระหว่างค่า Q_a กับ Q_{oc} ดังนั้นค่า Q_{safe} ของเสาเข็มขนาด 0.80 และ 1.00 เมตรจึงมีค่าเท่ากับ 3,000 kN และ 4,716 kN (ใช้จริงกำหนดไว้ 4,500 kN) ตามลำดับ

4.2 เปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณกับผลการทดสอบเสาเข็ม

การทดสอบเสาเข็มขนาด 0.80 และ 1.00 เมตร (รูปที่ 4 และ 5) ในสนามทำด้วยวิธีสถิตศาสตร์ (Static Load Test) กำหนดน้ำหนักรับทดสอบเสาเข็มขนาด 0.80 เมตร สูงสุดไว้ที่ 7,500 kN คิดเป็น 2.5 เท่าของน้ำหนักรับทุก

ใช้งานที่กำหนดไว้ที่ 3,000 kN สำหรับเสาเข็มขนาด 1.00 เมตร กำหนดน้ำหนักรับทดสอบสูงสุดไว้ที่ 11,250 kN คิดเป็น 2.5 เท่าของน้ำหนักรับทุกใช้งานที่กำหนดไว้ 4,500 kN ตารางที่ 10 แสดงข้อมูลสำคัญจากผลการทดสอบเสาเข็ม



รูปที่ 4 การทดสอบน้ำหนักรับทุกเสาเข็มขนาด 0.80
(ภาพถ่ายเมื่อวันที่ 18 ม.ค. 2564)



รูปที่ 5 การทดสอบน้ำหนักรับทุกเสาเข็มขนาด 1.00
(ภาพถ่ายเมื่อวันที่ 2 ก.พ. 2564)

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบเสาเข็ม

ขนาด	น้ำหนักรับทดสอบ	ค่าทรุดตัว	ค่าทรุดตัว
	สูงสุด (kN)	สูงสุด (มม.)	ถาวร (มม.)
0.80	7,500	10.59	5.43
1.00	11,250	8.35	4.95

จากผลการทดสอบเสาเข็มทั้ง 2 ขนาด เมื่อพิจารณาจากค่าการทรุดตัวสูงสุดพบว่าค่าน้ำหนักทดสอบสูงสุดที่ใช้ยังไม่ใช้ค่าที่ทำให้เกิดการวิบัติซึ่งสอดคล้องกับค่าจากการคำนวณทั้งสองวิธี แต่ด้วยข้อจำกัดบางประการจึงไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์พิเศษใดๆเพิ่มเติมในเสาเข็ม ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์แรงเสียดทานและแรงต้านที่ปลายเสาเข็มจากการทดสอบเสาเข็มได้ เป็นผลให้ไม่สามารถระบุได้ว่าระหว่างวิธี FHWA และ Tomlinson วิธีใดมีความแม่นยำกว่ากัน

อย่างไรก็ตาม ประเด็นสำคัญอยู่ตรงที่หินซึ่งมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตจึงสร้างแรงต้านได้สูงมาก โดยปกติเสาเข็มอาศัยแรงเสียดทาน กำลังเสียดทานจะพัฒนาจนกำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็ม กับกรณีนี้ เช่น เสาเข็มขนาด 0.80 เมตร Q_f เท่ากับ 7,579 kN (FHWA) และ 8,373 kN (Tomlinson) ก็มีความมากกว่า Q_{safe} ที่ 3,000 kN อยู่มาก แม้ใช้อัตราส่วนความปลอดภัย 2 เท่า (ตามแนวทาง Tomlinson) ก็ยังมากกว่าอยู่ดี เสาเข็มขนาด 1.00 เมตรก็มีผลไปในทิศทางเดียวกัน ผลตรงนี้มีนัยสำคัญว่าหากเสาเข็มฝังในหินที่มีกำลังสูงกว่าคอนกรีต การจะลดระยะฝังในหินก็สามารถคำนวณใหม่ได้

4.3 แนวทางวิเคราะห์ระยะฝังประสิทธิภาพ

แนวทางการวิเคราะห์อาจเริ่มจากกำหนดระยะฝัง (L_s) ในหิน 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (D) ไว้ก่อน จากนั้นคำนวณ Q_f และ Q_b แล้วตรวจสอบว่า $Q_b > Q_{ac}$ และ $Q_f/2 > Q_{ac}$ หรือไม่ (Q_{ac} คือกำลังแบกทานคำนวณจากหน่วยแรงอัดคอนกรีตที่ยอมให้ 6 MPa) หากมีความมากกว่า Q_{ac} อย่างมีนัยสำคัญ สามารถพิจารณาลดระยะฝังโดยกำหนดให้ระยะฝังประสิทธิภาพ (L_e) คำนวณบนสมมติฐานว่าถ้า $Q_f/2$ มากกว่า Q_{ac} ให้คำนวณใหม่โดยกำหนดค่า Q_f ที่ต้องการให้มีค่าเป็น 2 เท่าของ Q_{ac} (ใช้ FS เท่ากับ 2 สำหรับกำลังเสียดทานนั่นเอง) ทำให้เขียนสมการได้ดังสมการที่ 14

$$L_e = L_s - [(Q_f - 2Q_{ac})/(\pi D f_{max})] \quad (14)$$

ตัวอย่างการคำนวณค่า L_e เสาเข็มขนาด 0.80 จากวิธี FHWA ($L_s = 2.4$ ม.) จะได้

$$L_e = 2.4 - [(7,579 - 2 \times 6,000)/(\pi \times 0.8 \times 1,012)] = 1.8 \text{ ม.}$$

และจากวิธี Tomlinson จะได้

$$L_e = 2.4 - [(8,373 - 2 \times 6,000)/(\pi \times 0.8 \times 1,012)] = 1.5 \text{ ม.}$$

จากตัวอย่างการคำนวณ เห็นได้ว่าถ้าหินมีกำลังอัดแกนเดียวสูงกว่า 44 MPa ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ระยะฝังประสิทธิภาพจะสั้นได้กว่านี้อีก ทั้งนี้ ค่า Q_f ค่าใหม่ (หรือ $2Q_{ac}$ นั่นเอง) เมื่อรวมกับ Q_b และหารด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยเป็นค่า Q_o แล้วจะต้องไม่น้อยกว่า Q_{oc}

5. สรุปผลการศึกษา

การวิเคราะห์กำลังแบกทานเสาเข็มปลายฝังในหินด้วยวิธี FHWA และ Tomlinson เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เพียงแค่การกำหนดค่าตัวแปรในการคำนวณเป็นหัวใจสำคัญเนื่องจากเป็นสูตรเชิงประสบการณ์ การศึกษาเสาเข็มเจาะจำนวน 2 ต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 และ 1.00 เมตร ปลายฝังในหินแกรนิตผุพังปานกลางลึก 2.4 เมตรและ 3.0 เมตร ตามลำดับ โดยมีชั้นทรายหนาประมาณ 16.5 เมตรอยู่เหนือชั้นหิน สรุปได้ว่าการคำนวณทั้งสองวิธีแสดงผลลัพท์กำลังเสียดทานที่ใกล้เคียงกันแต่วิธีของ Tomlinson ให้ผลลัพท์กำลังต้านทานที่ปลายเสาเข็มสูงกว่าอีกวิธีค่อนข้างมากเนื่องจากสูตรที่ใช้ไม่ได้คำนึงถึงระดับความผุพังของหิน ผลการคำนวณกำลังแบกทานที่ยอมให้แสดงให้เห็นอีกว่ามีค่าสูงกว่ากำลังแบกทานจากหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของคอนกรีต อันเป็นผลมาจากกำลังอัดแกนเดียวของหินมีค่าสูงกว่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ผลจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดสอบเสาเข็มบอกเป็นนัยว่ากำลังแบกทานที่คำนวณจากทั้งสองวิธีมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยค่อนข้างสูงเกินความจำเป็นเนื่องจากระยะฝังที่กำหนดไว้ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม แนวคิดในการคำนวณระยะฝังประสิทธิภาพจากกำลังเสียดทานสูงสุดที่กำหนดให้มีค่าเป็น

2 เท่าของกำลังแบกทานที่ได้จากหน่วยแรงอัดที่ยอมให้
ของคอนกรีตเป็นอีกทางเลือกที่นำมาประยุกต์ใช้ได้

ตัวอย่างการคำนวณ ($D = 0.80$ m)

จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 6

กำลังเสียดทานสูงสุดในชั้นดินถึงความลึก 9 เมตร

$$f_s = 0.7 \cdot \tan 26^\circ \cdot 49.5 = 16.5 \text{ kPa}$$

$$A_s = \pi \cdot 0.8^2 \cdot 9 = 22.62 \text{ m}^2$$

กำลังเสียดทานสูงสุดในชั้นดินความลึก 9 ถึง 16.5 เมตร

$$f_s = 0.7 \cdot \tan 31^\circ \cdot 140.3 = 58.4 \text{ kPa}$$

$$A_s = \pi \cdot 0.8^2 \cdot 7.5 = 18.85 \text{ m}^2$$

วิธี FHWA

กำลังเสียดทานสูงสุดในชั้นหิน

$$f_{\max} = 0.65 \cdot 101(24,000/101)^{0.5} = 1,012 \text{ kPa}$$

$$A_s = \pi \cdot 0.8^2 \cdot 2.4 = 6.03 \text{ m}^2$$

กำลังเสียดทานสูงสุดทั้งหมด

$$Q_f = (16.5 \cdot 22.62) + (58.4 \cdot 18.85) + (1,012 \cdot 6.03) = 7,579 \text{ kN}$$

กำลังแบกทานสูงสุดในชั้นหิน

$$q_{\max} = [0.0001^{0.5} + (0.5 \cdot 0.0001^{0.5} + 0.0001)^{0.5}] \cdot 44,000 = 4,170 \text{ kPa}$$

$$Q_b = 4,170 \cdot \pi \cdot 0.8^2 / 4 = 2,097 \text{ kN}$$

$$Q_u = 7,579 + 2,097 = 9,676 \text{ kN}$$

$$Q_o = 9,676 / 2.5 = 3,870 \text{ kN}$$

วิธี Tomlinson

กำลังเสียดทานสูงสุดในชั้นหิน

$$\alpha = 0.04 \text{ (รูปที่ 2) } J = 0.2 \text{ (ตารางที่ 3) และ } \beta = 0.65 \text{ (รูปที่ 3)}$$

$$f_{\max} = 0.2 \cdot 0.65 \cdot 44,000 = 1,144 \text{ kPa}$$

กำลังเสียดทานสูงสุดทั้งหมด

$$Q_f = (16.5 \cdot 22.91) + (58.4 \cdot 18.85) + (1,144 \cdot 6.03) = 8,373 \text{ kN}$$

กำลังแบกทานสูงสุดในชั้นหิน

$$q_{\max} = 0.33 \cdot 44,000 = 14,500 \text{ kPa}$$

$$Q_b = 14,500 \cdot \pi \cdot 0.8^2 / 4 = 7,294 \text{ kN}$$

$$Q_u = 8,373 + 7,294 = 15,667 \text{ kN}$$

$$Q_o = 15,667 / 3 = 5,222 \text{ kN}$$

กำลังแบกทานของเสาเข็มจากหน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของ
คอนกรีต (6,000 kPa)

$$Q_{oc} = 6,000 \cdot \pi \cdot 0.8^2 / 4 = 3,000 \text{ kN}$$

$$Q_{oc} < Q_o \text{ ดังนั้น}$$

$$Q_{oc} = Q_{safe} = 3,000 \text{ kN}$$

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Xu, G. Dai, W. Gong, Q. Zhang, A. Haque and R. P. Gamage, "A review of research on the shaft resistance of rock-socketed piles," *Acta Geotechnica*, vol.16, no.3, pp. 653-677, 2020.
- [2] S. J. Kim, S. Y. Kwon, J. T. Han and M. YOO, "Development of rock embedded drilled shaft resistance factors in Korea based on field tests," *Applied Sciences*, vol. 9, no.11, pp. 1-17, 2019.
- [3] M. W. O'Neil and L. C. Reese, "Drill Shafts: Construction Procedure and Design Method", Federal Highway Administration, USA, Publication No. FHWA-IF-99-025, 1999.
- [4] K. Terzaghi, R.B. Peck and G. Mesri, *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd Ed. Cambridge, John Wiley & Sons, 1995.
- [5] M. Sagong, K. Paik and D. Kim, "A new approach to estimate side resistance of rock socketed drilled shafts," *Soils and Foundations*, vol.47, no.2, pp. 415-421, 2007.
- [6] M. J. Tomlinson, *Pile Design and Construction Practice*. 4th Ed. Chapman & Hall, 1994.

- [7] A. Srikongsri, D. Rangsan, C. Chaivijarn, V. Panichacarn and N. Eursiriwan, "Bearing capacity analysis of rock-socketed pile using FHWA (1999) method," *Journal of Science and Technology Sukhothai Thammathirat Open University*, vol.2, no.2 (July - December), pp. 23-31, 2022.
- [8] F. H. Kulhawy, W. A. Prakoso and S. O. Akbas, "Evaluation of capacity of rock foundation sockets," in *40th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Alaska Rocks 2005, Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions*, Anchorage, Alaska, 2005, pp. 635-642.
- [9] R. K. Rowe and H. H. Armitage, "A design method for drilled piers in soft rock," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 24, pp. 126-142, 1987.
- [10] P. J. N. Pells, "State practice for design of socketed piles in rock," in *8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Nihal Vitharana and Randal Colman Eds., Hobart, 1999, pp. 307-327.
- [11] J. P. Carter and F. H. Kulhawy, "Analysis and design of drilled shaft foundations socketed into rock," Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, Report EL-5918, 1988.
- [12] A. F. Williams and P. J. N. Pells, "Side resistance rock sockets in sandstone, mudstone, and shale," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 18, pp. 502-513, 1981.
- [13] L. Zhang and H. H. Einstein, "End bearing capacity of drilled shafts in sock," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, no. 7, pp. 574-584, 1998.
- [14] Transportation Research Board of the National Academies, "Rock-Socketed Shafts for Highway Structure Foundations: A Synthesis of Highway Practice", National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC, Transportation Research Board, 2006.
- [15] AASHTO, "Section10: estimation of drilled shaft resistance in rock" in *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 4th Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2007, pp. 137-142.
- [16] M. J. Tomlinson and J. Woodward, *Pile Design and Construction Practice*. 5th Ed. Taylor & Francis, 2008.
- [17] M. J. Tomlinson and J. Woodward, *Pile Design and Construction Practice*. 6th Ed. CRC Press, 2015.
- [18] Ministerial regulation no. 6 (B.E. 2527) issued under the building control act, B.E. 2522, 1979.