

การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินตะกอนปนทรายที่อัดตัวคายน้ำปกติถึงปานกลางในสภาพระบายน้ำด้วยความสัมพันธ์จากผลการทดลองแรงอัดสามแกน

Estimation of the Drained Strength Parameters of Normally Consolidated to Medium Overconsolidated Sandy Silt by Regressions from Triaxial test results

นบปนม แก้วหานาม^{1*}, ณัฐวุฒิ ทุดปอ², อาทิตย์ บุตรภักดี³, รัชณี ศรีเกตุ⁴, ศราวุธ ทารพาน⁵
Nopanom Kaewhanam¹, Nattawoot Tootpor², Artid Budpakdee³, Rachanee Srikat⁴
and Sarawut Tharaphan⁵

บทคัดย่อ

พารามิเตอร์ด้านกำลังในสภาพระบายน้ำมีความสำคัญมากในงานออกแบบด้านวิศวกรรมฐานราก งานวิจัยนี้ศึกษาพารามิเตอร์ด้านกำลังรับน้ำหนักของดินตะกอนปนทรายในสภาพระบายน้ำที่อัดตัวคายน้ำปกติถึงปานกลาง ทฤษฎีของ มอร์-คูลอมบ์ ซึ่งได้แก่ ค่าความเชื่อมแน่น(c') และค่ามุมเสียดทานภายใน(ϕ') ตัวอย่างดินคงสภาพที่ความลึกประมาณ 2.0-2.5 เมตรในจังหวัดมหาสารคาม ขอนแก่น และร้อยเอ็ด ถูกทดสอบแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำโดยอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำเท่ากับ 1 2 และ 4 มีการทดสอบความหนาแน่นของดินในสนาม และตัวอย่างดินถูกทดลองเพื่อจำแนกชนิดดินด้วย จากผลการศึกษาพบว่าดินจัดอยู่ในกลุ่ม CL(USCS) หรือ A-2-4(AASHTO) ค่า c' และ ϕ' ที่ได้มีค่า 0.27-1.09 ตันต่อตารางเมตร และ 21°-39° ตามลำดับ นอกจากนี้สมการสำหรับคาดคะเน c' ได้แก่ $S_u / \sigma'_{vo} = 0.2674OCR^{-0.994}$ ($r^2=0.743$) และ $S_u / \sigma'_{vo} = 0.0208PI - 0.0538$ ($r^2=0.885$) ถึงแม้ว่า r^2 จะไม่สูงมากนักแต่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับงานออกแบบเพราะมีความน่าเชื่อถือร้อยละ 75 ขึ้นไปและไม่ต้องทดลองแรงอัดสามแกน

คำสำคัญ: ดินตะกอนปนทราย ความเชื่อมแน่น มุมเสียดทานภายใน แรงอัดสามแกน ไม่ระบายน้ำ

Abstract

Drained strength parameters of soil are very important in foundation engineering. The aim of this research is to study the drained strength parameters of normally consolidated to medium overconsolidated sandy silt complied with the Mohr-Coulomb theory i.e., cohesion(c') and internal friction angle (ϕ') of soil. Undisturbed samples at the depth of 2.0-2.5 m in 3 provinces i.e., Maha Sarakham, Khon Kaen and Roi-Et were tested by drained triaxial method with the overconsolidation ratio of 1, 2 and 4. The field density of soil was also determined at site. Soil samples were classified. The results showed that soil is CL(USCS) or A-2-4(AASHTO) with the value of c' and ϕ' of 0.27-1.09 t/m² and 21°-39°, respectively. Equations for estimating c' are $S_u / \sigma'_{vo} = 0.2674OCR^{-0.994}$ ($r^2=0.743$) and $S_u / \sigma'_{vo} = 0.0208PI - 0.0538$ ($r^2=0.885$). Even though the r^2 are not very high, but are acceptable in the practice design purposes with 75% reliability without the triaxial tests.

Keywords: sandy silt, cohesion, internal friction angle, triaxial test, drained

¹ อาจารย์, ²⁻⁵ นิสิตปริญญาตรี, หน่วยวิจัยวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

^{1*} Lecturer, ²⁻⁵ Undergraduate student, Structural Engineering Research Unit, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.



บทนำ

ในทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการศึกษามากขึ้น เกี่ยวกับพฤติกรรมของดินที่มีการผสมกันมากกว่าหนึ่งชนิด¹⁻⁷ โดยเฉพาะ ดินตะกอนปนทราย(ดินตะกอนมากกว่าดินทราย) หรือดินทรายปนตะกอน(ดินทรายมากกว่าดินตะกอน) ซึ่งต่อจากนี้จะเรียกรวมกันว่า ดินตะกอนปนทราย มีทั้งการศึกษาพฤติกรรมและพารามิเตอร์ขั้นสูง¹⁻⁵ และพารามิเตอร์กายภาพทั่วไป⁶⁻⁷ ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ในการคำนวณออกแบบฐานรากในพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยดินตามธรรมชาติที่ไม่ใช่ดินเพียงหนึ่งชนิด เช่น²⁻⁶ พารามิเตอร์เหล่านี้สามารถนำไปคาดการณ์พฤติกรรมต่างๆ ของดินตะกอนปนทรายต่างๆ ได้มากมาย ทั้งในปัญหาการเคลื่อนตัว และปัญหาเสถียรภาพที่ต้องใช้พารามิเตอร์ด้านกำลัง เช่น การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของฐานรากดิน⁸⁻¹⁰ การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของเสาเข็ม⁹ หรือการวิเคราะห์เสถียรภาพของดินที่มีความลาดเอียงและกำแพงกันดิน⁸⁻¹⁰ เป็นต้น ทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณส่วนใหญ่เหล่านี้ใช้พารามิเตอร์ของดินแบบประสิทธิผล (Effective stress concept) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\sigma = \sigma' - u \quad (1)$$

เมื่อ σ, σ' และ u คือหน่วยแรงรวม หน่วยแรงประสิทธิผล และแรงดันน้ำในโพรง ตามลำดับ



Figure 1 Soil sampling by test pit method

การทดลองที่เกี่ยวข้องต่างๆ จำเป็นต้องใช้ตัวอย่างดินแบบคงสภาพ เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ของดินที่สอดคล้องกับดินตามธรรมชาติ ซึ่งดินตะกอนปนทรายโดยทั่วไปจะมีความแข็งมากและไม่สามารถเก็บด้วยกระบอกรูปทรงบาง และถ้าดิน

อยู่ทุกระดับความลึกไม่มากจากผิวดินเราสามารถเก็บตัวอย่างดินด้วยวิธีการขุดเปิดหน้าดินดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งทำให้ได้ก้อนตัวอย่างดินดังแสดงใน Figure 2 และต้องทำการเตรียมตัวอย่างดินให้เป็นทรงกระบอกดังแสดงใน Figure 3 ก่อนที่จะนำไปทำการทดลองแรงอัดสามแกนภาพวาดเครื่องมือในการทดลองแรงอัดสามแกนดังแสดงใน Figure 4



Figure 2 Undisturbed soil sample



Figure 3 Prepared cylindrical soil sample

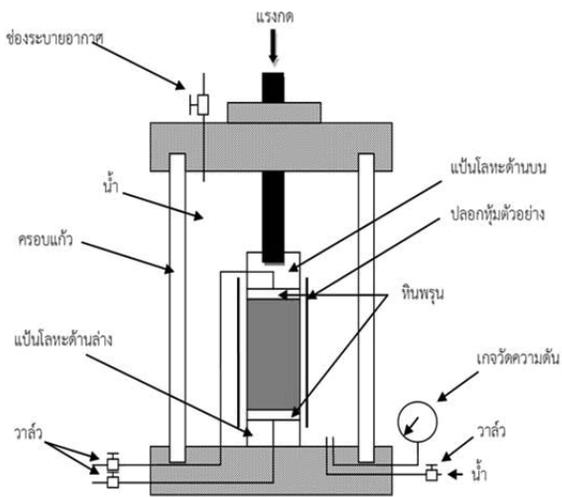


Figure 4 Triaxial test equipments

ผลการทดลองแรงอัดสามแกนที่มีแรงดันแตกต่างกัน อย่างน้อย 3 ตัวอย่าง สามารถนำมาเขียนวงกลมมอร์เพื่อหาพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินได้ 1 ชุด ดังแสดงใน Figure 5 ค่าความเชื่อมั่นหาได้จากค่าตัดแกนตั้ง และมุมเสียดทานภายในหาได้จากความชันของเส้นขอบเขตความแข็งแรง (Strength Envelope)

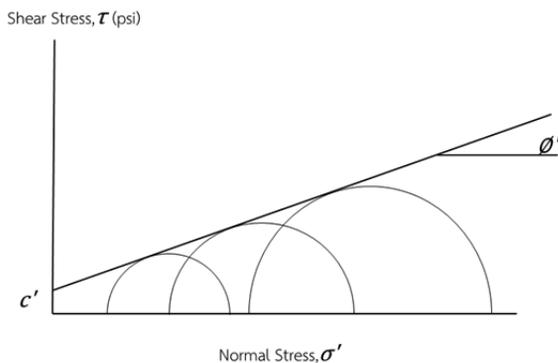


Figure 5 Strength parameters in Mohr-Coulomb theory

จะเห็นได้ว่า เพื่อให้ได้ผลการทดลองในสภาพระบายน้ำเพื่องานออกแบบฐานรากนั้น จะต้องทำการเก็บตัวอย่างดินแบบไม่ถูกรบกวนซึ่งเป็นการยากลำบาก โดยเฉพาะหากตัวอย่างดินอยู่ลึกมาก และในการทดลองแรงอัดสามแกนต้องใช้จำนวนตัวอย่างดินค่อนข้างมาก อีกทั้งใช้เวลาในการทดสอบแต่ละตัวอย่างค่อนข้างนานเนื่องจากตัวอย่างดินมีเม็ดขนาดเล็กมาก นอกจากนี้การทดลองสำหรับดินในสถานที่หนึ่งอาจจะใช้ไม่ได้กับอีกสถานที่หนึ่งเนื่องจาก ดิน ตามธรรมชาติ

มีหน่วยน้ำหนักไม่เท่ากัน ซึ่งทำให้จะต้องทำการทดสอบใหม่สำหรับการก่อสร้างต่างสถานที่กัน ซึ่งเป็นข้อเสียหนึ่งของการปฏิบัติการคำนวณที่ใช้พารามิเตอร์ของดินในสภาพระบายน้ำ อย่างไรก็ตาม ได้มีความพยายามเพื่อสร้างสมการที่สามารถใช้คาดการณ์กำลังรับน้ำหนักของดินในสภาพระบายน้ำ ของดินเหนียว เช่น¹¹⁻¹² ทั้งนี้สมการดังกล่าวสามารถนำมาใช้คาดการณ์พารามิเตอร์ของดินในบริเวณอื่นได้เพื่อให้การคำนวณออกแบบในทางวิศวกรรมฐานรากในดินตะกอนปนทรายสามารถทำได้ง่ายขึ้นการศึกษานี้จึงศึกษาพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินตะกอนปนทรายในสภาพระบายน้ำและนำเสนอสมการที่สามารถนำไปใช้ได้กับดินชนิดเดียวกันในบริเวณอื่นได้

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้มีทั้งการทดลองดินในสนาม และการทดลองในห้องปฏิบัติการ สำหรับการทดลองในสนามได้แก่การทดลองหาความหนาแน่นของดินในสนามด้วยวิธีการแทนที่ทรายและการวัดความลึกของตัวอย่างดินจากผิวดินเพื่อนำมาคำนวณความเค้นในแนวดิ่ง ภาพตัวอย่างการทดลองในสนามดังแสดงใน Figure 6



Figure 6 Field Density Test by sand cone method

การทดลองในห้องปฏิบัติการแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1) การทดลองเพื่อจำแนกชนิดดิน ซึ่งได้แก่การทดลองการกระจายขนาด (การทดลองร่อนผ่านตะแกรง และการทดลองไฮโดรมิเตอร์ ดังแสดงใน Figure 7) และการทดลองพิกัดอัตราเตอร์เบิร์ต ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองเพียง 2 การทดลองคือพิกัดเหลว และพิกัดพลาสติก เพื่อให้สามารถหาค่าพลาสติกชดัดดินได้ ภาพการทดลองดังแสดงใน Figure 8-9



(a) (b)

Figure 7 Grain-sized distribution tests (a) sieve analysis (b) hydrometer analysis



Figure 10 Soil Sample preparation for triaxial test



Figure 8 Equipment for Liquid Limit test



Figure 9 Plastic Limit Testing

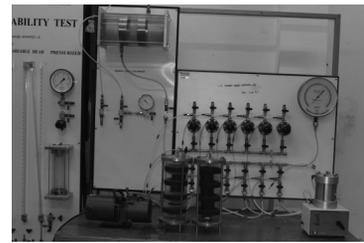


Figure 11 Control panel of triaxial test

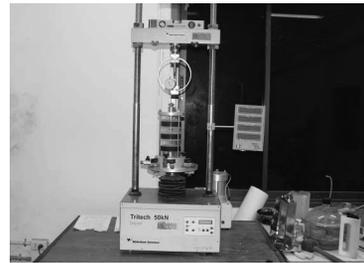


Figure 12 Loading frame for triaxial test

2) การทดลองเพื่อให้ได้พารามิเตอร์ด้านกำลังของดิน ซึ่งในการศึกษานี้เลือกใช้การทดลองแรงอันสามแกน ในสภาวะระบายน้ำ (Consolidated drained Test, CD test) ดังแสดงใน Figure 10-12 ในส่วนนี้ได้ควบคุมตัวอย่างดินให้มีอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ (Overconsolidation ratio, OCR) ที่แตกต่างกันด้วยคือมีค่าเป็น 1 2 และ 4



จังหวัดมหาสารคาม

จังหวัดขอนแก่น

จังหวัดร้อยเอ็ด

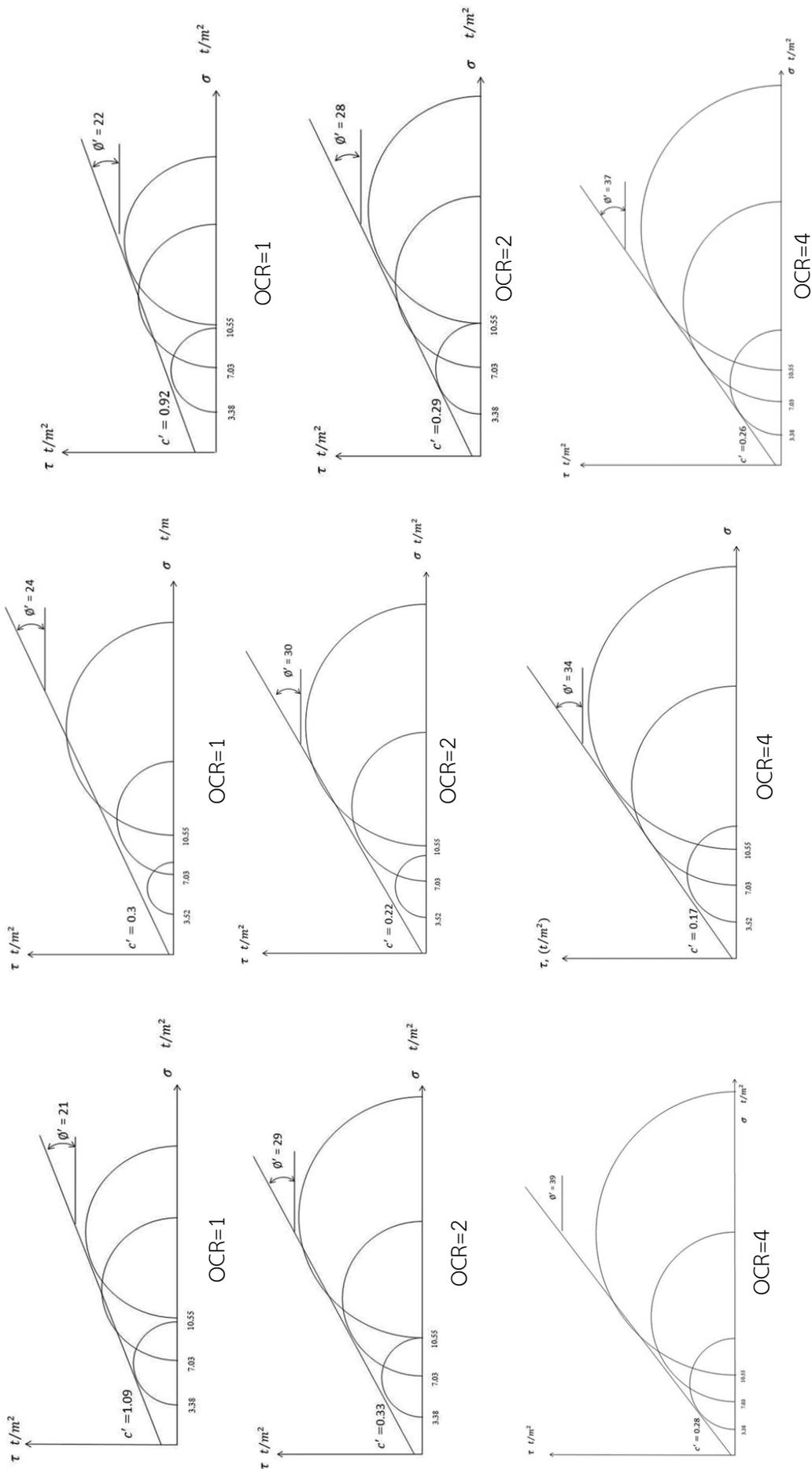


Figure 13 Triaxial test results: Mohr's circles for soil in Maha Sarakham, Khon Kaen and Roi Et for OCOR=C1R, = 24 and 4



ผลการทดลอง

ผลการจำแนกชนิดดิน ด้วยระบบ USCS (Unified Soil Classification System) และ AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) ได้ผลเป็น CL (Lean clay with gravel) และ A-2-6 หรือ A-4 (silty or clayey gravel and sand, Silty soil) ตามลำดับ สำหรับผลการทดลองแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำนั้นเมื่อนำผลการทดลองมาเขียนเป็นวงกลมมอร์และเส้นขอบเขตกำลังของดิน (Strength Envelope) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ด้านกำลังได้ผลการทดลอง ดังแสดงใน Figure 15 และสรุปพารามิเตอร์ด้านกำลังของดินจากFigure 15 ตามทฤษฎีมอร์-คูลอมบ์ ของตัวอย่างดินทั้ง 3 จังหวัดแสดงใน Table 1

Table 1 Summary of results from triaxial tests

| Area | OCR | cohesion, c (t/m ²) | φ' (deg.) |
|---------------|-----|---------------------------------|-----------|
| MAHA SARAKHAM | 1 | 1.09 | 21 |
| | 2 | 0.33 | 29 |
| | 4 | 0.28 | 39 |
| KHON KAEN | 1 | 0.30 | 24 |
| | 2 | 0.22 | 30 |
| | 4 | 0.17 | 34 |
| ROI ET | 1 | 0.92 | 22 |
| | 2 | 0.29 | 28 |
| | 4 | 0.26 | 37 |

จาก Table 1 และ Figure 13 ตัวอย่างดินทุกตัวอย่างมีค่าความเชื่อมแน่นใกล้เคียงกันและมีค่าค่อนข้างต่ำ คือ ประมาณ 0.27-1.09 ตันต่อตารางเมตรทั้งนี้เนื่องจากอาจมีดินเหนียวปะปนรวมอยู่ด้วยในปริมาณเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลการจำแนกดิน ค่ามุมเสียดทานภายในมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ (Overconsolidation ratio, OCR) โดยมีค่าเป็น 21°-24° 28°-30° และ 34°-39° สำหรับค่าOCR เท่ากับ 1 2 และ 4 ตามลำดับ เมื่อนำค่าความเชื่อมแน่นแบบระบายน้ำปกติ (อัตราส่วนระหว่างความเชื่อมแน่น และหนวนแรงแนวตั้งประสิทธิผล) มาสร้างความสัมพันธ์กับค่า OCR ตามสมการของ Jamiolkowski, et al. (1985)¹¹ ได้ผลดังแสดงใน Figure 14 และได้สมการความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2 และตามสมการของ Skempton (1957)¹² ได้ผลดังแสดงใน Figure 14 และได้สมการดังแสดงในสมการที่ 3

$$S_u / \sigma'_{vo} = 0.2674OCR^{-0.994} \quad (2)$$

$$S_u / \sigma'_{vo} = 0.0208PI - 0.0538 \quad (3)$$

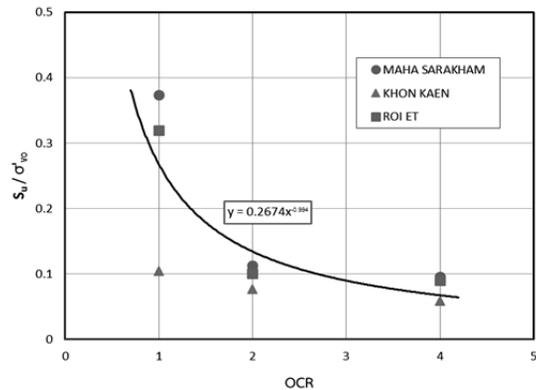


Figure 14 Relationships between c' / σ'_{vo} and OCR

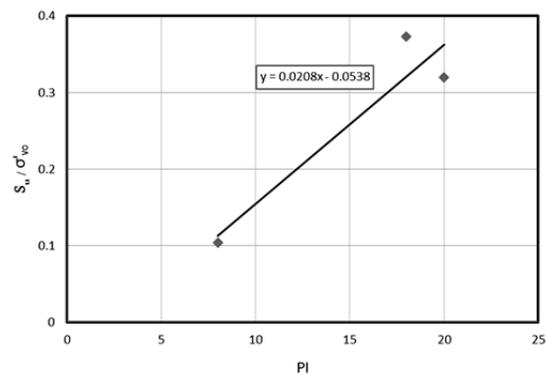


Figure 15 Relationships between c' / σ'_{vo} and PI Area OCR

โดยที่ OCR ในสมการที่ 2 และ PI ในสมการที่ 3 คือ อัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ และ พลาสติกซีตอินเด็กซ์ของดิน ตามลำดับ สมการที่ 2 และ สมการที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r-square, r²) เท่ากับ 0.743 และ 0.885 ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความน่าเชื่อถือยอมรับได้ในระดับงานคำนวณออกแบบ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าสมการที่ 3 จะมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงกว่าสมการที่ 2 แต่ผลการทดลองพิกัดอัตราเบิร์ตั้นมีความน่าเชื่อถือขึ้นต่อฝีมือและประสบการณ์ของผู้ทดลอง ซึ่งอาจทำให้ได้ผลการคาดคะเนที่แตกต่างจากค่าจริงมากก็ได้ ดังนั้นการนำสมการที่ 3 ไปใช้งานต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษ

สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ นำ ตัวอย่างดินตะกอนปนทรายความลึกประมาณ 2.0-2.5 เมตรจากผิวดินในจังหวัดมหาสารคาม จังหวัด



ขอนแก่น และจังหวัดร้อยเอ็ดมาทดลองแรงอัดสามแกนแบบระบายน้ำ (Consolidated drained test, CD test) โดยควบคุมให้ดินมีค่า OCR เป็น 3 ค่า คือ 1 2 และ 4 สำหรับตัวอย่างดินในแต่ละจังหวัด และใช้ 3 ตัวอย่างดินเพื่อทำการทดลองที่แรงดันที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละ OCR จำนวนตัวอย่างรวมทั้งสิ้นเป็น 27 ตัวอย่าง เมื่อจำแนกชนิดของตัวอย่างดินที่เก็บมาพบว่าดินจัดอยู่ในกลุ่ม CL (Lean clay with gravel) สำหรับระบบ USCS และส่วนใหญ่เป็น A-2-4 และบางส่วนเป็น A-4 (silty or clayey gravel and sand, Silty soil) และสำหรับระบบ AASHTO

จากผลการทดลองแรงอัดสามแกนได้ว่าค่าความเชื่อมแน่นและค่ามุมเสียดทานภายในประสิทธิผลมีค่า 0.27-1.09 ตันต่อตารางเมตร และ 21°-39° ตามลำดับ ถึงแม้ว่าค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผลที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับดินเหนียวที่จัดอยู่ในกลุ่มดินเม็ดละเอียดเหมือนกัน แต่พบว่ามีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆ ดี เช่น ความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำ และค่าพลาสติกซิตีอินเด็กซ์ โดยมีสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือของสมการ (rsquared, r^2) ที่ได้มีค่าเป็น 0.743 และ 0.885 ซึ่งถือว่ามีค่าที่น่าเชื่อถือเพียงพอในระดับที่ยอมรับได้ในงานคำนวณออกแบบฐานราก ดังนั้นสมการที่ได้นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดคะเนค่าความเชื่อมแน่นของดินประเภทเดียวกันนี้ได้สำหรับการก่อสร้างในบริเวณอื่นโดยที่ไม่ต้องทำการเก็บตัวอย่างดินแบบคงสภาพและทดลองแรงอัดสามแกนที่มีความยุ่งยากและใช้เวลาในการทดสอบค่อนข้างนาน ทำให้สะดวกขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ในการสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับนิสิตระดับปริญญาตรี และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการพิพิธภัณฑ์ศาสตร์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่เอื้ออำนวยความสะดวกทุกอย่าง รวมถึงการใช้ห้องปฏิบัติการด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. Ching S. Chang and Zhen-Yu Yin, Micromechanical modeling for behavior of silty sand with influence of fine content, International Journal of Solids and Structures 2011; 48:2655–2667.
2. Yao-Tao Huang, An-Bin Huang, Yu-Chen Kuo and Ming-Dou Tsai, A laboratory study on the undrained strength of a silty sand from Central Western Taiwan,

Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2004; 24; 733–743.

3. S. Thevanayagam, T. Shenthan, S. Mohan and J. Liang, Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands, and Sandy Silts, J. Geotech. Geoenviron. Eng. 2002; 128: 849-859.
4. Abouzar Sadrekarimi, Influence of fines content on liquefied strength of silty sands, Soil Dynamic sand Earthquake Engineering 2013; 55: 108–119.
5. R. Salgado, P. Baudini and A. Karim, Shear strength and stiffness of silty sand, J. Geotech. Environ. Eng. 2000; 126: 451-462.
6. Nopanom Kaewhanam, Jariya Chaisaeng, Patcharaphan Chaisaeng, Pakawut Outsaha, Siripong Yuwarach and Chokchai Chaiyasan, The updated physical properties of soil in Northeast Thailand, Proc. The 6th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB VI), 28-30 August 2014, Apsara Angkor Resort & Conference, Siem Reap, Kingdom of Cambodia, Companion CD.
7. นบปนม แก้วหานาม, ชัยรัตน์ เสนารัตน์ และ ยุธภูมิ บัวผัน, การประเมินการทรุดตัวของฐานรากต้นแบบแถบยาวเนื่องจากการอัดตัวคายน้ำของดินจำพวกดินลมหอบโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองดินชั้นสูง, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ฉบับพิเศษ 2556; 347-354.
8. Braja M. Das, Principles of foundation engineering 7th edition, CL-Engineering 2010.
9. Joseph E. Bowles, Foundation analysis and design 5th edition, McGraw-Hill 1997.
10. M.J.Tomlinson, Pile design and construction practice 4th edition, E and FN Spon 1997.
11. Jamiolkowski, M. et al. (1985). New developments in field and laboratory testing of soils. Theme Lecture, 11th. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco
12. Skempton, A.W. (1957) "Discussion on the planning and design of the new Hongkong airport." Proc. Inst. Civil Engrs., 7, pp 305-307