

หัวทดสอบแบบวงแหวนวัดแรงสำหรับหากำลังของดินเหนียวอ่อน

กิติเดช สันติชัยอนันต์^{1*} และ ธวัชชัย เพ็ชรไม้²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

* Corresponding Author: kitidech.san@kmutt.ac.th

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

² นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 15 มกราคม 2562

แก้ไข : 3 พฤษภาคม 2562

ตอบรับ : 22 พฤษภาคม 2562

คำสำคัญ :

หัวกด / วงแหวนวัดแรง /
กำลังของดินแบบไม่ระบายน้ำ /
ดินเหนียวอ่อน /
การหมุนเหวี่ยง / ทีบาร์

ในการหากำลังของดินเหนียวอ่อนแบบไม่ระบายน้ำ นิยมใช้หัวทดสอบแบบ T-bar ทั้งในห้องทดลองและในสนาม สำหรับในห้องทดลอง หัวกดชนิดนี้ต้องอาศัยอุปกรณ์ประกอบขนาดเล็กที่มีราคาสูงเพื่อวัดแรงกด งานวิจัยนี้จึงคิดค้นและออกแบบหัวกดแบบใหม่ ได้แก่ หัวกดแบบวงแหวนวัดแรง โดยในเบื้องต้นได้ออกแบบวงแหวนที่ใช้สำหรับหัวกด 2 ขนาด คือ ขนาด ϕ 22.20 มม. และขนาด ϕ 16.35 มม. สำหรับงานวิจัยก่อนหน้าและปัจจุบันตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้ามิได้ศึกษาผลกระทบของมิติของขนาดวงแหวน งานวิจัยนี้จึงทำการสอบเทียบและทดสอบการกดของวงแหวนขนาดขนาด ϕ 16.35 มม. ลงในดินเหนียวประดิษฐ์ จากผลการวิจัยทั้งสองระยะ พบว่าสัมประสิทธิ์ของวงแหวนวัดแรง (N-Factor) ที่ใช้ในการหากำลังของดินมีค่าเท่ากับ 8.39 และ 8.08 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นค่าความแตกต่างเพียงร้อยละ 3.71 แสดงให้เห็นว่าค่า N-Factor ได้รับอิทธิพลน้อยจากมิติของขนาดวงแหวนที่แตกต่างกัน ดังนั้น หัวกดแบบวงแหวนวัดแรงจึงเป็นนวัตกรรมและอีกหนึ่งทางเลือกที่ใช้ต้นทุนค่อนข้างต่ำในการสร้างหัวกดเพื่อใช้สำหรับทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว ทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนาม

Proving Ring Penetrometer for Undrained Shear Strength Determination of Soft Clay

Kitidech Santichaianant^{1*} and Tawatchai Patchmai²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru Bangkok 10140

* Corresponding Author: kitidech.san@kmutt.ac.th

¹ Assistant Professor, Department Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology.

² Graduate Student, Department Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: January 15, 2019

Revised: May 3, 2019

Accepted: May 22, 2019

Keywords:

Penetration / Proving ring /
Undrained Shear Strength /
Soft Clay / Centrifuge /
T-bar

T-bar penetration test is a globally accepted technique for determination of undrained shear strength of soft clay, both at the laboratory and field levels. However, for laboratory test, T-bar requires an expensive miniature load sensor attached to a thin pushing rod. An attempt to invent a new penetration probe, i.e., proving ring penetrometer (PRP), was therefore made; the rings with the diameters of 22.20 and 16.35 mm and with different thicknesses were fabricated. However, no prior study is yet available to clearly determine the effect of the ring size. In this study, a smaller ring of 16.35 mm in diameter was then calibrated and tested with various strengths of artificial soft clay. The normalized coefficients (N-Factor) were noted to be 8.39 and 8.08 in our previous and present studies, respectively; this represents only 3.71% difference. This implies that the probe dimensions exhibit less influence on the N-Factor. Therefore, the new proving ring penetrometer (PRP) is qualified as a low-cost option to determine shear strength of soft clay both in laboratory and for the field investigation.

1. บทนำ

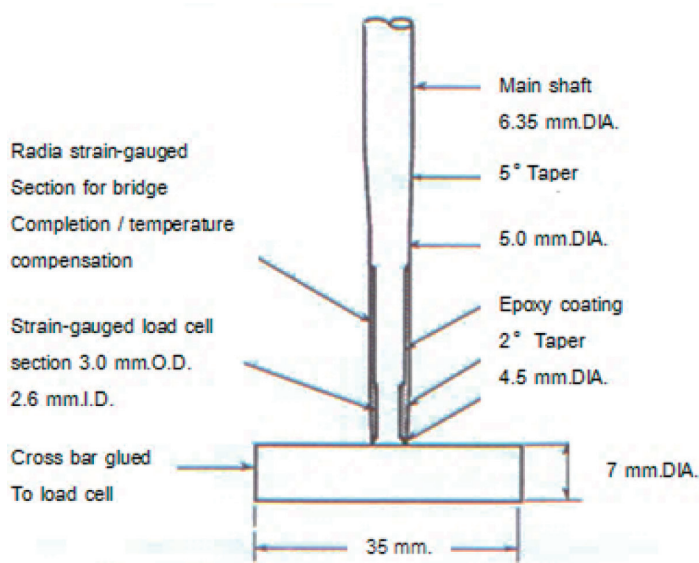
ปัจจุบันการออกแบบและตรวจสอบสมบัติของดินในบริเวณสิ่งปลูกสร้างและในห้องทดลองสามารถทำได้สะดวก และมีความแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์และเทคนิคการทดสอบมีการพัฒนาขึ้นเป็นลำดับ ส่งผลทำให้วิศวกรและผู้ออกแบบสามารถคำนวณการออกแบบฐานรากหรือสิ่งปลูกสร้างใต้ดินได้ถูกต้องและมีความผิดพลาดน้อยลง ทั้งนี้ เนื่องจากสามารถประเมินค่าความต้านทานแรงเฉือนของดิน (Shear Strength) ได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตาม วิธีประเมินค่ากำลังของดินเหนียวแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, S_u) ทั้งในสนามและในห้องทดลองก็ยังคงมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่องตามเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงไป แต่วิธีการก็ยังคงคล้ายกับในอดีต วิธีการหยั่งทดสอบ (Probing) ถือได้ว่าเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ให้ผลการทดสอบที่รวดเร็วและเชื่อถือได้ ซึ่งมักจะนิยมใช้ในสนาม อย่างไรก็ตาม สำหรับในห้องทดลองเมื่อมีการเก็บตัวอย่างดินเหนียวจากในสนาม หรือมีการสร้างตัวอย่างดินเหนียวขึ้นเอง วิธีการหยั่งทดสอบก็มักถูกใช้อยู่เป็นประจำ โดยเฉพาะการหยั่งทดสอบกำลังของตัวอย่างดินขนาดใหญ่ในห้องทดลองแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifuge Laboratory) หรือในบางกรณีอาจต้องการหยั่งทดสอบขณะหมุนเหวี่ยงด้วย

การหยั่งทดสอบ (Probing) เพื่อหาค่า S_u ที่ใช้กันในปัจจุบันมีด้วยกันหลายวิธีตามเทคนิคการทดสอบ ได้แก่ แบบกดต่อเนื่องแบบตอกนับ และแบบปั่นเหวี่ยง โดยในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบกดต่อเนื่อง และมาตรฐานการหยั่งทดสอบแบบกดต่อเนื่องที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ 1) หัวกดแบบกรวย (Cone Penetration Test, CPT) และ 2) หัวกดรูปตัว T หรือหัวกด T-bar (T-bar Penetration Test)

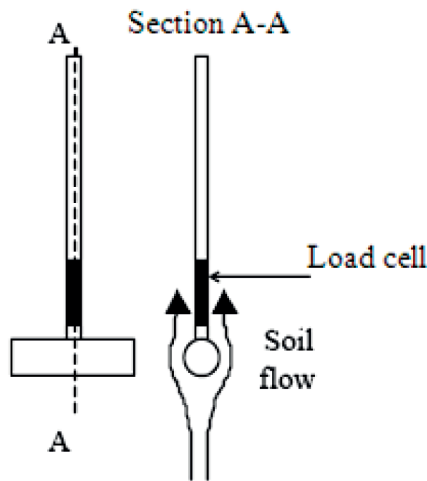
หัวกด CPT ถือว่าเป็นหัวกดมาตรฐานเริ่มแรก แต่มีข้อเสียคือ ขนาดของหัวกดมีขนาดเล็กใกล้เคียงกับก้านกด ในขณะที่กดลงในดินเหนียว ดินไม่สามารถไหลอ้อมมาทางด้านหลังได้ เนื่องจากมีพื้นที่ก้านกดบังอยู่ ดังนั้นตำแหน่งความลึกในการกด

จะมีผลต่อค่าแรงกดที่วัดได้ ซึ่งแตกต่างจากหัวกด T-bar ที่มีขนาดของหัวกดใหญ่กว่าขนาดของก้านกด ในขณะที่กดลงในดินเหนียว ดินเหนียวสามารถไหลอ้อมมาด้านหลังได้ ดังนั้นตำแหน่งความลึกในการกด (หรืออิทธิพลของ Overburden Stress) จึงมีผลน้อยมากต่อค่าแรงกดที่วัดได้ ด้วยเหตุนี้หัวกด T-bar จึงเป็นที่นิยมใช้กันในต่างประเทศ เนื่องจากให้ค่ากำลังของดินเหนียวที่แม่นยำกว่า และในการคำนวณกำลังของดินเหนียวนั้นไม่ต้องทำการปรับแก้มากเท่าหัวกดแบบกรวย นอกจากนี้หัวกด T-bar มักถูกใช้เพื่อทดสอบหาลักษณะของตัวอย่างดินเหนียวขนาดใหญ่ เช่น ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกับแบบจำลองแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifuge Model) เป็นต้น

Stewart และ Randolph [1, 2] ได้ทำการวิจัยและพัฒนาหัวกด T-bar จากประสบการณ์ที่ได้พยายามเสาะหาเครื่องมือมาทดแทนหัวทดสอบแบบหัวกรวย (CPT) และใบพัดเฉือน (Vane Shear Test, VST) ที่ไม่ต้องปรับแก้มากนัก และเหมาะสมสำหรับใช้ทดสอบในแบบจำลองแบบหมุนเหวี่ยง โดยได้ทำการเปรียบเทียบค่ากำลังของดินเหนียวอ่อนที่ได้จากการใช้เครื่องมือแบบต่างๆ คือ หัวกด T-bar หัวกดแบบ CPT และ VST ทั้งนี้หลักการทดสอบของหัวกดแบบ CPT และ VST ถูกนำมาปรับปรุงเป็นเครื่องมือใหม่คือ หัวกด T-bar ดังรูปที่ 1 และ 2 หัวกดแบบใหม่นี้เป็นการผสมผสานข้อดีจากสองเครื่องมือนี้นี้ดังกล่าว โดยใช้หลักการทำงานในแนวตั้งซึ่งเป็นการกดเหมือนหัวกดแบบ CPT และดินที่ไหลอ้อมหัวทรงกระบอกของ T-bar ก็เหมือนกับการตัดดินของใบ VST จากหลักการทั้งสองนี้ Stewart และ Randolph จึงได้พัฒนาและทดลองหัวกด T-bar สำหรับทดสอบในแบบจำลองแบบหมุนเหวี่ยง และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ หัวกด T-bar ให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อย และไม่ต้องทำการปรับแก้มากนัก ถ้าต้องมีการปรับแก้ก็น้อยกว่าวิธีทดสอบทั้งสองแบบเดิม ดังนั้นหัวทดสอบแบบใหม่นี้จึงเริ่มเป็นที่นิยมในต่างประเทศ สำหรับในประเทศไทยนั้นยังไม่ปรากฏเด่นชัดว่ามีการนำหัวกด T-bar มาใช้งานกันแพร่หลาย



รูปที่ 1 รายละเอียดของหัวกด T-bar [1]



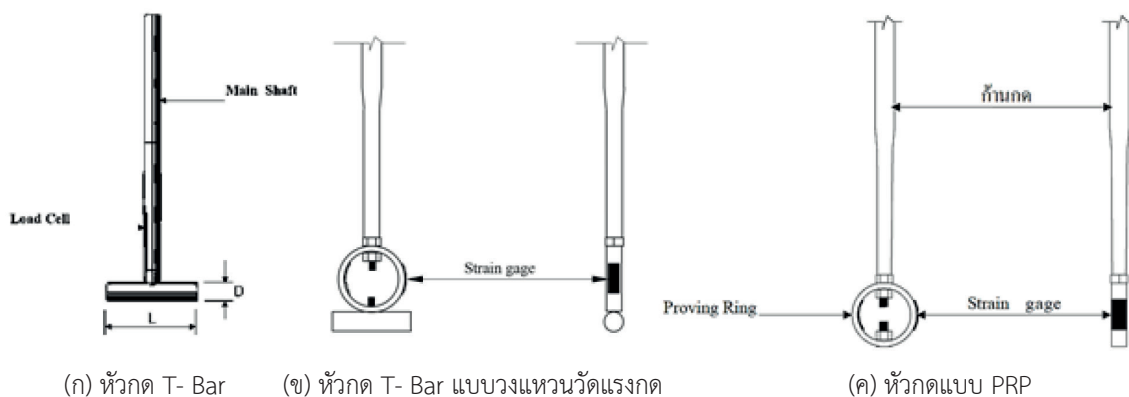
รูปที่ 2 หลักการทำงานของหัวกด T-bar [3]

ช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาหัวกด T-bar ขึ้นมาใช้งานในห้องทดลอง และทำการสอบเทียบ (Calibrate) เพื่อให้เกิดเทคนิคการใช้หัวทดสอบแบบใหม่ในประเทศไทย ผู้วิจัยได้พยายามหาอุปกรณ์ทดแทนเซนเซอร์วัดแรงกด (Load Cell) ที่มีขนาดเล็กมากเพื่อติดตั้งกับก้านกดที่มีขนาดเล็กอยู่แล้ว และให้สามารถยึดกับก้านกดบริเวณ

ใกล้หัวทดสอบให้มากที่สุด โดยมีให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของ Load cell กีดขวางการเคลื่อนตัวของดินขณะกดหัวกดลงไปในตัวอย่างดินเหนียว Load cell ขนาดเล็กดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง และต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ นอกจากนี้ Strain gage ที่จะติดตั้งโดยตรงกับก้านกดที่เป็นโลหะแข็งก็ต้องมีความไวเพียงพอที่จะวัดค่าแรงกดได้อย่างแม่นยำ ผู้วิจัยจึงพัฒนาอุปกรณ์ที่จะ

นำมาประยุกต์ใช้ทดแทน Load cell ดังกล่าว นั่นคือ วงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ขนาดเล็กสำหรับติดตั้งใกล้หัวกด T-bar [4] (ดังรูปที่ 3 ข.) โดยยังคงหลักการเริ่มแรกของหัวกด T-bar Proving ring ตรวจจับแรงกดโดยอาศัย Strain gage เป็นเซนเซอร์ตรวจจับความเครียดดัด (Bending Strain) ซึ่งเกิดขึ้นจากการแอ่นตัวของวงแหวนวัดแรงในขณะที่มีการกดหัวทดสอบลงในเนื้อดินเหนียว ผู้วิจัยได้ทดลองสร้าง Proving Ring หลากหลายขนาดขึ้นมาใช้ในห้องปฏิบัติการทางปฐพีกลศาสตร์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พบว่า สามารถใช้ได้เป็นอย่างดี และปัจจุบันก็ไม่ต้องสั่งซื้อ Load cell ที่มีราคาแพงจากต่างประเทศแล้ว งานวิจัยใน

ระยะแรกนั้น Kiti-asa และ Santichaianant [4] ได้นำ Proving ring ขนาดเล็กมาติดตั้งบนหัวกด T-bar (ดังรูปที่ 3 ข.) แต่ก็พบปัญหาการเคลื่อนตัวของดิน (Soil Flow) ส่งผลกระทบมากต่อการวัดค่าแรงกด ดังนั้น จึงได้ประยุกต์หัวทดสอบโดยทดลองนำหัวกด T-bar ออก และเหลือเพียงวงแหวนวัดแรง (Proving Ring) (ดังรูปที่ 3 ค.) ที่จะทำหน้าที่ทั้งเป็นส่วนของวงแหวนวัดแรงและวัดแรงกดในเวลาเดียวกัน งานวิจัยในระยะแรก หัวกดแบบวงแหวนวัดแรง (PRP) จะมีเพียงขนาดเดียวคือ 22.2 มม. เพื่อศึกษาเบื้องต้นด้านความเป็นไปได้ในการใช้หัวกด PRP เท่านั้น แต่ยังไม่ได้ศึกษาผลกระทบของขนาด PRP ที่มีต่อผลการทดสอบการรบกวนของดิน



รูปที่ 3 ลักษณะของหัวทดสอบที่พัฒนาขึ้นใช้ในงานวิจัยระยะแรก [4]

ดังนั้นงานวิจัยระยะที่สองนี้ จึงเป็นการดำเนินการต่อเนื่องจากงานวิจัยระยะแรก โดยมีจุดประสงค์เพื่อทดสอบหัวกดแบบวงแหวนวัดแรง (PRP) ที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม เพื่อศึกษาอิทธิผลของขนาดของวงแหวนวัดแรง และวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ของวงแหวน (N-Factor)

2. วิธีการศึกษา

2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐาน

2.1.1 การต่อวงจร Strain Gage [5]

อุปกรณ์ตรวจวัดความเครียดชนิด Strain gage สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจหาปริมาณความเค้นได้ เช่น น้ำหนัก ความดัน ความร้อน การสั่นสะเทือน และแรงบิดของมอเตอร์ Strain gage เป็นกลุ่มของ Passive sensor

ที่ต้องมีแหล่งจ่ายไฟเข้ามากระตุ้นจากภายนอก ใช้ร่วมกับวงจรในลักษณะแบ่งแหล่งต้านหรือวงจรวีลสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge)

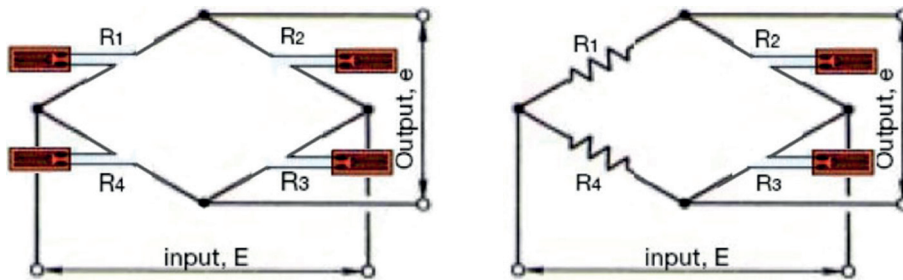
การต่อแบบ Wheatstone bridge มี 3 ลักษณะคือ

- 1) วงจรแบบ Quarter bridge ใช้ในกรณี Strain gage ต่อแบบตัวเดียวใช้ความต้านทาน (R) แบบค่าคงที่ 3 ตัว มีค่าเท่ากันทุกตัว
- 2) วงจรแบบ Half bridge ใช้ในกรณี Strain gage ต่อแบบสองตัวใช้ R แบบคงที่ 2 ตัว มีค่าเท่ากันทุกตัว
- 3) วงจรแบบ Full bridge ใช้ในกรณีต่อ Strain Gage แบบสี่ตัว โดยให้ R มีค่าเท่ากันหมดเช่นกัน

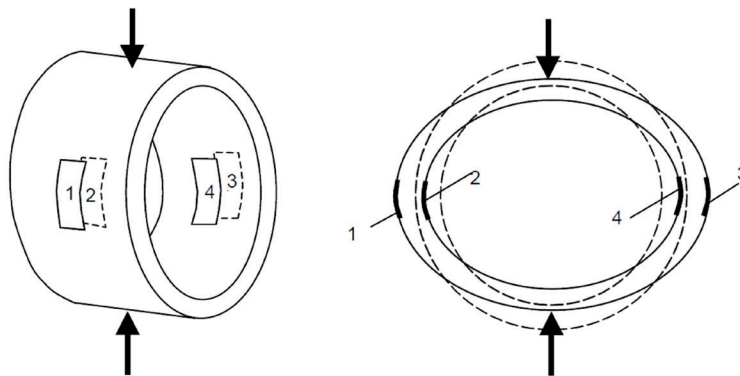
การประยุกต์เทคนิคการต่อวงจรโดยใช้การต่อแบบ Half bridge ในการติดตั้ง Strain gage จึงเป็นเทคนิคของการสร้างหัวทดสอบวัดแรงในงานวิจัยนี้ การต่อวงจรโดย Strain

gage เพียง 2 ตัวสามารถสร้างความละเอียดในการตรวจวัดที่เพียงพอ บนพื้นที่ที่จำกัด และยังสามารถลดจำนวนสายไฟที่เชื่อมออกจากวงจรได้อีก 1 เส้น รูปที่ 4 แสดงการต่อ Strain gage แบบ Full และ Half bridge การติดตั้งที่ถูกต้อง อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดการยืดหดตัวที่หักล้างกัน ค่าความผิดพลาดจากอุณหภูมิจึงเกิดขึ้นน้อย แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (e) จะเป็นศูนย์ก็ต่อเมื่อแรงดันไฟฟ้าเกิด

ภาวะสมดุลทางด้านไฟฟ้าเมื่อไม่มีความเครียดเกิดขึ้น แต่เมื่อมีแรงกระทำดังรูปที่ 5 จะทำให้ Strain gage เกิดการยืดหรือหดตามแรงที่กระทำ ส่งผลให้ความต้านทานของ Strain gage มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง วงจรจึงส่งแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (e) ออกมา แล้วนำไปขยายสัญญาณไฟฟ้า แปลงสัญญาณเป็นดิจิตอลสู่เครื่องวัดและแปลงเป็นค่าแรงกดที่มากระทำต่อไป



รูปที่ 4 การต่อวงจร Wheatstone bridge แบบ Full และ Half bridge [5]



รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain gage และลักษณะการยุบอัดตัวของ Proving ring [5]

2.1.2 หัวกด T-Bar

(T-bar Penetration Test) [2]

หัวกด T-Bar มีหลักการการวัดค่าแรงต้านการกดในดินเหนียว และแปลงค่าดังกล่าวมาเป็นค่าของ Undrained shear strength (S_u) จากหลักการของ T-Bar ค่า S_u สามารถถูกวิเคราะห์จากความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ N-Factor ได้ ดังนี้ โดยพิจารณารูปที่ 3 ประกอบ

$$N_t = \frac{Q}{S_u d} \quad (1)$$

โดยที่ $Q = P/L$

$P =$ แรงกระทำในแนวตั้ง

$L =$ ความยาวของหัว T-Bar

$d =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของหัว T-Bar

$S_u =$ Undrained shear strength ของดินเหนียว

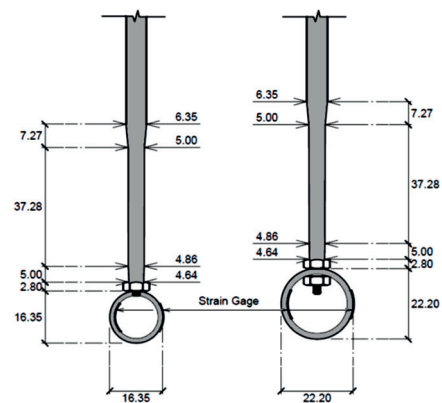
$N_t =$ N-Factor สำหรับหัวทดสอบแบบ T-Bar

2.2 การออกแบบและทดสอบหัวกดแบบวงแหวนวัดแรง (PRP)

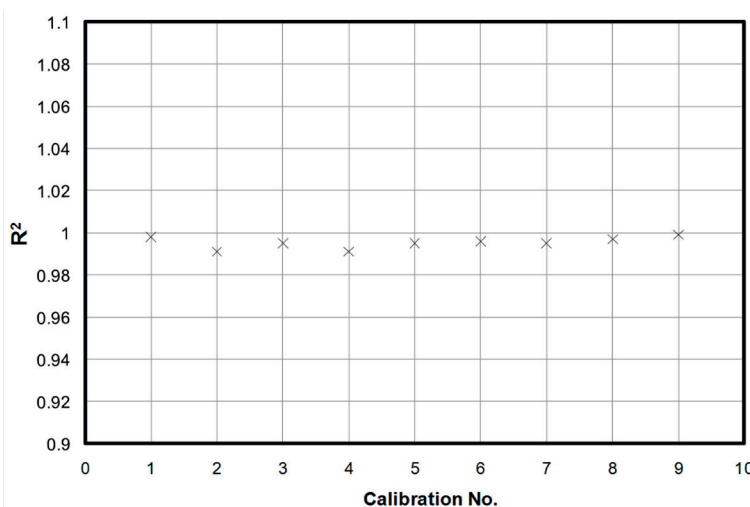
2.2.1 หัวกดแบบวงแหวนวัดแรง (PRP)

การออกแบบหัวกด PRP แบ่งเป็น 2 ขนาด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับความหนาแตกต่างกัน คือ ϕ 16.35 มม. หนา 5.67 มม. และ ϕ 22.20 มม. หนา 6.10 มม. ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวงแหวนสำหรับขนาดแรกทำจากโลหะสแตนเลสและยึดติดกับก้านกด โดยตั้งใจให้มีขนาดมิติเล็กกว่าในงานวิจัยระยะแรกระดับหนึ่ง รูปที่ 6 แสดงการติดตั้ง Strain gage แบบ Half bridge ในทิศทางแบบสมมูล จากนั้นใช้ซิลิโคน

ที่ยืดหยุ่นเติมปิดช่องว่างภายในเพื่อไม่ให้ดินและน้ำเข้าไปในวงแหวนโดยผิวของซิลิโคนถูกปรับระดับให้เว้าเข้าไปในวงแหวนเล็กน้อยเพื่อลดแรงเสียดทานด้านข้างที่อาจเกิดขึ้นกับดินเหนียว หัวกดแบบ PRP จะถูกสอบเทียบ (Calibrate) กับน้ำหนักมาตรฐานเพื่อหาสัมประสิทธิ์ (K) ในการเปลี่ยนค่าทางไฟฟ้าเป็นค่าแรงกด และต้อง Calibrate ซ้ำอย่างต่อเนื่องเพื่อให้เกิดความมั่นใจในการวัดค่าแรงกด หรือในกรณีที่ผู้ทดสอบเริ่มไม่มั่นใจว่าหัวกดเกิดการชำรุดจากการกดทดสอบในดินเหนียวหรือไม่



รูปที่ 6 หัวกดแบบ PRP ทั้ง 2 ขนาด คือ ϕ 16.35 มม. หนา 5.67 มม. และ ϕ 22.20 มม. หนา 6.10 มม.



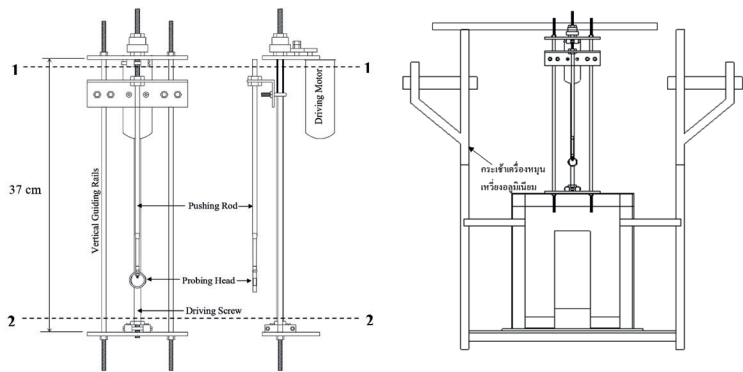
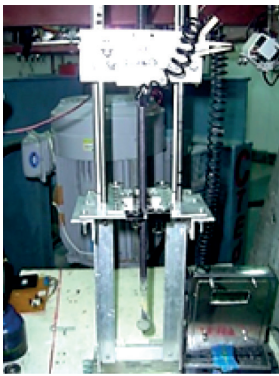
รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity, R²) ของหัวทดสอบ PRP ขนาด ϕ 16.35 มม. ที่ได้จากการสอบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานในแต่ละช่วงระยะเวลาของงานวิจัย

จากรูปที่ 7 แสดงผลค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity, R^2) ของการสอบเทียบ (Calibrate) ในช่วงเวลาที่ใช้งานของหัวกดแบบ PRP ϕ 16.35 มม. การสอบเทียบ (Calibrate) จำนวนทั้งหมด 9 ครั้ง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นตรง (R^2) มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.990 - 0.999 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการอ่านค่าแรงกดของหัวกดแบบ PRP ในงานวิจัยนี้มีความน่าเชื่อถือ และอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

2.2.2 ชุดเครื่องทดสอบ

เครื่องทดสอบที่นำมาใช้งานวิจัยระยะแรก [6] ได้ถูกนำมาใช้อีกครั้งในงานวิจัยนี้ โดยมีหลักการทำงานของเครื่อง

ควบคุมการกดโดยใช้มอเตอร์แบบ DC ขนาด 24 โวลต์ (Volt) เป็นตัวขับเคลื่อนฟันเฟืองให้บังคับ Driving screw หมุนขึ้นและลง ให้กำหนดเลื่อนขึ้นลงได้ด้วยความเร็ว 3 มม.ต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 8 เครื่องทดสอบนี้ ยังสามารถนำไปติดตั้งและใช้งานกับเครื่องหมุนเหวี่ยง CTed-2 (CTed-2 Geotechnical Centrifuge) [7] ได้เป็นอย่างดีด้วย



รูปที่ 8 รายละเอียดและการติดตั้งเครื่องทดสอบ [4]

2.3 การเตรียมตัวอย่างดินเหนียวประดิษฐ์โดยใช้การผสมซีเมนต์

ตัวอย่างดินที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้คือ ดินเหนียวประดิษฐ์ที่มีส่วนผสมของแร่ดินขาว เบนโทไนท์ ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ชนิดที่ 3 และน้ำ โดยมีส่วนผสมตามหลักการการผสมดินเหนียวประดิษฐ์กรุงเทพฯ [8] คือ แร่ดินขาว (Imerys) ผสมกับเบนโทไนท์ ในอัตราส่วน 8 : 1 จากนั้นนำปูนซีเมนต์ประเภทที่ 3 ผสมปริมาณน้ำร้อยละ 70 โดยน้ำหนักแห้ง การเตรียมตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบได้แบ่งตามกำลังของดิน-

เหนียว ได้แก่ ค่าซีเมนต์ร้อยละ 0.5, 1, 1.25, 1.5, และ 2 ของน้ำหนักแห้งรวมของแร่ดินขาวและสารเบนโทไนท์ ทำการบ่ม 7 วัน ในแบบหล่อขนาด ϕ 3.50 ซม. สูง 7.10 ซม. จำนวน 5 ตัวอย่าง ต่อค่าซีเมนต์ร้อยละต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9 และตารางที่ 2 หลังจากนั้นนำไปทดสอบแบบ Unconfined compression test (UC) ตามมาตรฐาน ASTM: D2166-85 สำหรับตัวอย่างจากแบบหล่อขนาด ϕ 8.75 ซม. สูง 25 ซม. ตามค่าซีเมนต์ต่างๆ ถูกนำไปทดสอบการกดต่อเนื่องโดยใช้วงแหวนวัดแรงทั้งใช้และไม่ใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง



รูปที่ 9 แบบหล่อ ϕ 3.5 ซม. สูง 7.1 ซม. (สำหรับการทดสอบ UC) และ ϕ 8.75 ซม. สูง 25 ซม. (สำหรับการทดสอบ PRP)

2.4 การทดสอบห้กดแบบ PRP

กับตัวอย่างดินเหนียวประติษฐ์

ขนาดของห้กดแบบ PRP ที่ใช้สำหรับทดสอบตัวอย่างดินเหนียวประติษฐ์มี 2 ขนาด โดยในงานวิจัยระยะแรกใช้ห้กดขนาด ϕ 22.20 มม. หนา 6.10 มม. [4] สำหรับในงานวิจัยนี้ (ระยะที่สอง) ใช้ห้กดขนาด ϕ 16.35 มม. หนา 5.67 มม. การทดสอบเริ่มต้นโดยการบันทึกค่าเริ่มต้นจากมิเตอร์วัดค่าทางไฟฟ้า แล้วทำการกดห้กดทดสอบลงในดินเหนียวอย่างต่อเนื่องที่ความเร็ว 3 มม. ต่อวินาที ค่าทางไฟฟ้าถูกบันทึกตลอดความ

ลึกของกระบอกตัวอย่าง ผลต่างของค่าทางไฟฟ้าถูกคำนวณโดยใช้ค่า K เพื่อหาค่าแรงกดต่อไป สมบัติของตัวอย่างดินเหนียวประติษฐ์ ในงานวิจัยระยะแรกและงานวิจัยนี้ ถูกแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังแบบไม่ระบายน้ำของชั้นดินเหนียวกรุงเทพ กำลังของตัวอย่างดินอยู่ในช่วงของชั้นดินเหนียวอ่อนของกรุงเทพในระยะความลึกไม่เกิน 15 ม. [9] แสดงให้เห็นว่า ช่วงกำลังของดินเหนียวประติษฐ์ ในงานวิจัยนี้น่าจะเพียงพอที่จะเป็นตัวแทนของการประเมินค่ากำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพได้

ตารางที่ 1 ข้อมูลสมบัติของตัวอย่างดินเหนียวประติษฐ์ ของงานวิจัยระยะแรก [6]

ปูนซีเมนต์ (%)	เวลาในการบ่ม (day)	ปริมาณความชื้น (%)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงกด Unconfined Compression Strength q_u (ksc)
1.0	7	69-71	0.12
2.0	7	69-70	0.48
2.5	7	70-71	0.76
3.0	7	70-71	1.08
3.5	7	70-71	1.40
4.0	7	69-71	1.72

ตารางที่ 2 ข้อมูลสมบัติของตัวอย่างดินเหนียวประติษฐ์ ของงานวิจัยนี้

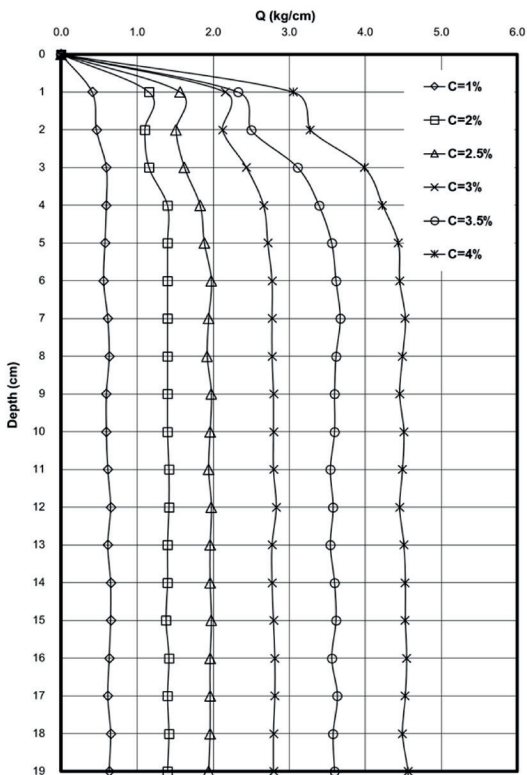
ปูนซีเมนต์ (%)	เวลาในการบ่ม (day)	ปริมาณความชื้น (%)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงกด Unconfined Compression Strength q_u (ksc)
0.5	7	68 - 71	0.087
1.0	7	71 - 73	0.120
1.25	7	67 - 76	0.232
1.50	7	70 - 71	0.256
2.0	7	67 - 72	0.511

3. ผลการศึกษา และอภิปรายผล

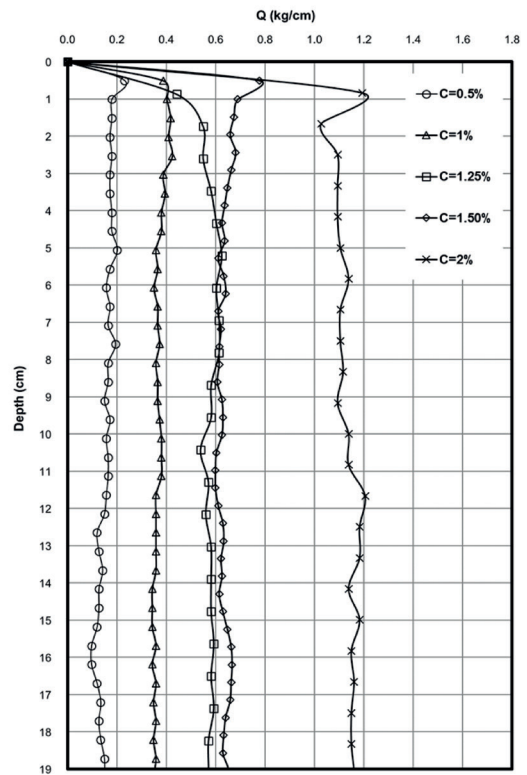
3.1 ผลการทดสอบหัตถดแบบ PRP

จากค่าแรงกดที่ได้จากการทดสอบแสดงตามความลึกของตัวอย่างดินเหนียว ลักษณะกราฟวัดแรงกดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าคงที่ที่ระดับความลึกประมาณ 3 เท่าของขนาดวงแหวน

ผลการทดสอบหัตถดแบบ PRP ขนาด ϕ 22.20 มม. และ ϕ 16.35 มม. ของตัวอย่างในแบบหล่อขนาด 8.75 ซม. ถูกแสดงในรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ โดยผลที่แสดงในรูปมาจากค่าเฉลี่ยของการกดทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง โดยค่า Q คือ ค่าแรงกด P ที่หารด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงแหวน (D)



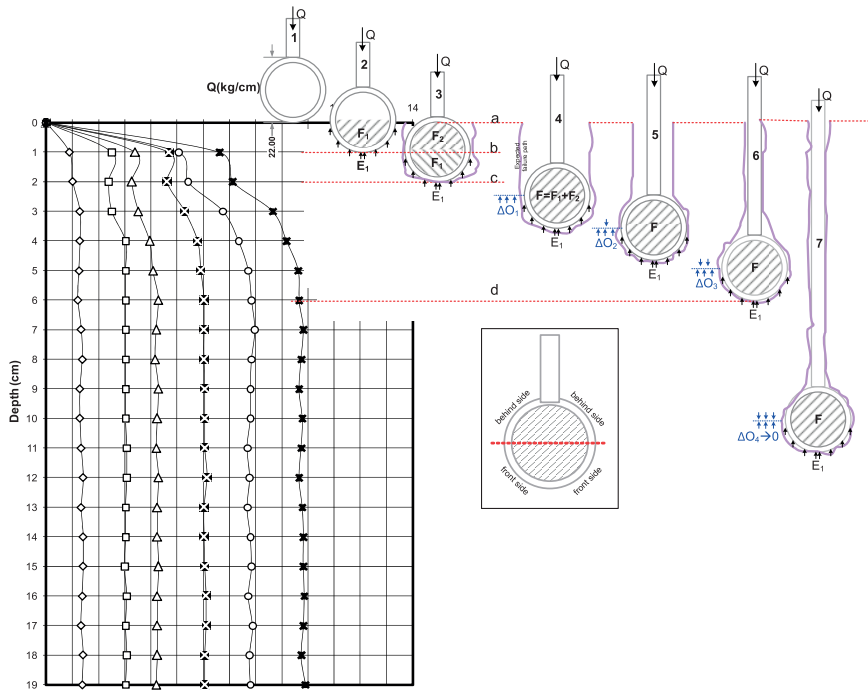
รูปที่ 10 กราฟแสดงผลการทดสอบการหยังสำหรับหัตถดแบบ PRP ขนาด ϕ 22.20 มม. [4]



รูปที่ 11 กราฟแสดงผลการทดสอบการหยังสำหรับหัตถดแบบ PRP ขนาด ϕ 16.35 มม.

สำหรับพฤติกรรมของรูปแบบแรงกด Q ผู้เขียนขออธิบาย โดยอ้างอิงความลึกและผลของการกดวงแหวนขนาด ϕ 22.20 มม. และพบว่า ลักษณะการเพิ่มของแรงกดตามตำแหน่งความ ลึกของวงแหวนซึ่งค่อยๆ แหวกกลงในดินเหนียว โดยเฉพาะ

ในช่วงต้น เกิดจากวงแหวนได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลง ของแรงกดทับในแนวดิ่ง (Overburden Stress) ที่ค่อยๆ โอบ ด้านข้างรอบๆ วงแหวน รายละเอียดของพฤติกรรมนี้ถูกอธิบาย โดยรูปที่ 12 และมีคำอธิบายดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 12 กราฟแสดงพฤติกรรมการกดของหัวกดแบบ PRP ขณะหยั่งลงใต้ผิวดิน

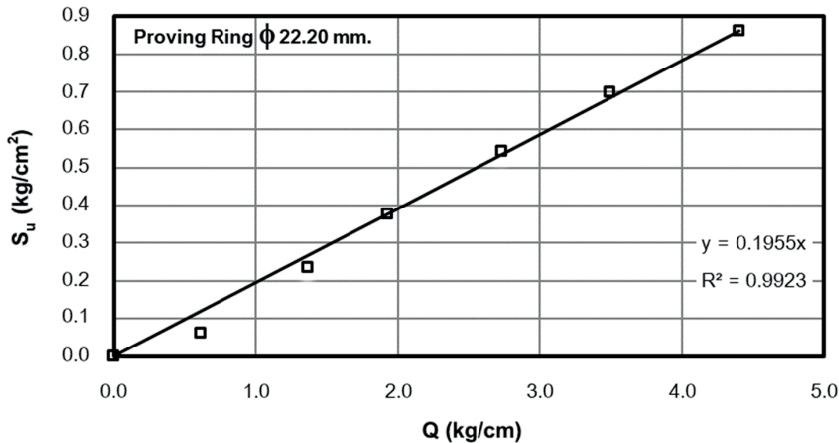
ตารางที่ 3 สรุปลักษณะพฤติกรรมของวงแหวนวัดแรงขนาดเล็ก ตามรูปที่ 12

ตำแหน่ง	อธิบาย
1	-หัวกดเริ่มสัมผัสดิน
2	-หัวกดจมไปแล้วครึ่งหนึ่ง วัดแรงต้านได้จากทั้ง End bearing (E_1) และ Side friction (F_1)
3	-หัวกดจมเพิ่ม และได้ค่าแรงกดเพิ่มจาก friction (F_2)
4	-หัวกดออกแรงเอาชนะแรงรวม $F_1+E_1+\Delta O_1$ โดย ΔO_1 คือ ผลต่างของแรงกดทับ (Overburden) ระหว่างด้านหน้าและหลังวงแหวน ซึ่งมีค่ามากขึ้น เนื่องจาก ณ ตำแหน่ง ดังรูปนี้ วงแหวนเพิ่งแหวกเข้าสู่มวลดิน จนทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่หลังวงแหวน และ เกิดการเสียดสมมูลของแรงกดทับ (ΔO) ระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของวงแหวน
5-6	-ช่องว่างหลังวงแหวนน้อยลง หลังจากวงแหวนเคลื่อนผ่านลงสู่มวลดินมากขึ้น ทำให้เริ่ม เกิดสมมูลของแรงกดทับด้านหน้ากับด้านหลังของวงแหวนมากขึ้นเรื่อย ๆ (ค่า ΔO น้อยลงเรื่อย ๆ ตามความลึกที่เพิ่มขึ้น)
7	-ช่องว่างหลังวงแหวนน้อยลงจนเกิดสมมูลของแรงกดทับ ($\Delta O_4 \rightarrow 0$) ซึ่งส่งผลให้ค่า $Q=F+E_1$ ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดระยะความลึกหลังจากระดับความลึกหนึ่ง เช่น ระดับ d ดังรูป

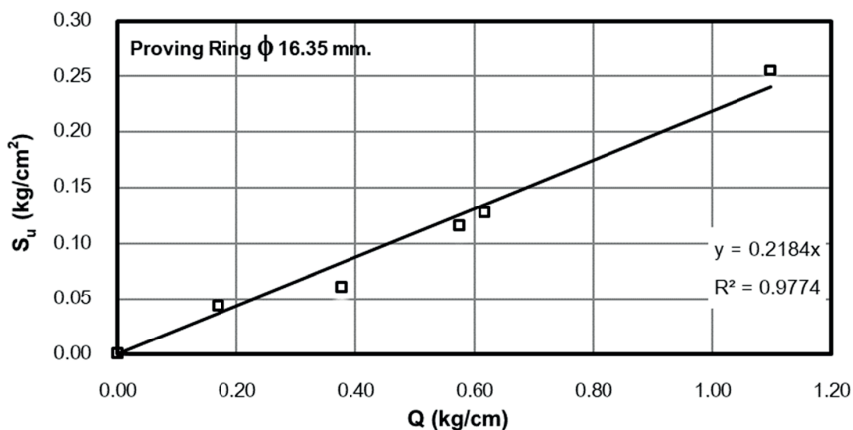
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ N-Factor จากหัตถดแบบวงแหวนวัดแรง (PRP)

กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ N-Factor จากการทดสอบหัตถดแบบ PRP จากงานวิจัยในระยะแรก คือ N_{p1} สำหรับวงแหวนขนาด ϕ 22.20 มม. และ จากงานวิจัยนี้ คือ N_{p2} สำหรับขนาด ϕ 16.35 มม. ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นของกราฟ

ระหว่างค่าเฉลี่ยของ S_u และค่าเฉลี่ยของ Q (ในช่วงที่คงที่) ถูกแสดงดังรูปที่ 13 และ 14 โดยค่า S_u เฉลี่ยมาจากผลการทดสอบ Unconfined compression test ที่เฉลี่ยมาจากผลการทดสอบดินเหนียวประดิมชู้ซ่า 5 ครั้งทีเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ต่างๆ



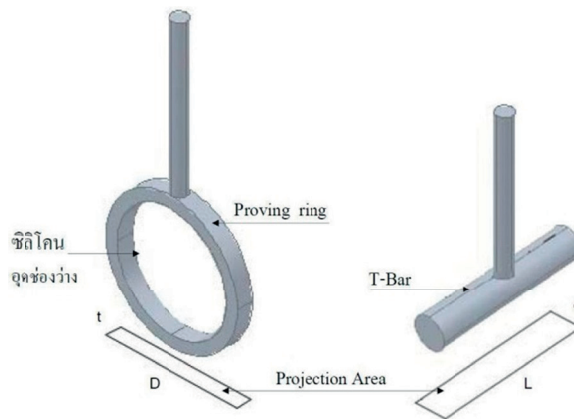
รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Q (เฉลี่ยในช่วงที่คงที่) กับ Undrained shear strength จากงานวิจัยระยะแรก [4]



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Q (เฉลี่ยในช่วงที่คงที่) กับ Undrained shear strength จากงานวิจัยนี้

สำหรับหัตถดแบบ PRP ในงานวิจัยนี้มีพฤติกรรมของการต้านแรงกดจากดินเหนียวคล้ายกับปรากฏการณ์ของหัตถด T-Bar จากหลักการดังกล่าว หัตถดแบบ PRP สามารถนำมา

วิเคราะห์ใหม่โดยการปรับปรุงสมการ (1) ให้เป็นสมการ (2) โดยมีมิติต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 มิติเปรียบเทียบระหว่างหัวกดแบบ PRP และหัวกด T-bar

$$N_p = \frac{Q}{S_u t} \quad (2)$$

โดยที่ $Q = P/D$

$P =$ แรงกระทำในแนวดิ่ง

$D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงวงแหวน

$t =$ ความหนาของ Proving ring

$S_u =$ Undrained shear strength

$N_p =$ Proving ring probe factor

(เดิมคือ N-Factor ของ T-Bar)

จากรูปที่ 13 และ 14 ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้น (Slope) ระหว่างค่าเฉลี่ย S_u (Undrained shear strength) กับค่าเฉลี่ย Q (ในช่วงที่คงที่) ถูกนำมาหาค่า N_p โดยเอาค่าส่วนกลับของ Slope หารด้วยค่าความหนาของวงแหวน (t) ตามสมการที่ (2) พบว่า งานวิจัยในระยะแรก N_{p1} สำหรับวงแหวนขนาด ϕ 22.20 มม. มีค่าเท่ากับ 8.39 และงานวิจัยนี้ N_{p2} สำหรับวงแหวนขนาด ϕ 16.35 มม. มีค่าเท่ากับ 8.08 ซึ่งในอุดมคติค่านี้ควรเท่ากันสำหรับวงแหวนที่มีมิติเหมือนกัน ค่าความคลาดเคลื่อนของ N_{p2} คิดเป็นร้อยละ 3.71 เมื่อเทียบกับค่า N_{p1} ของงานวิจัยในระยะแรก

ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนของหัวกดแบบ PRP ดังกล่าวเมื่อนำมาเทียบกับค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของหัวกด

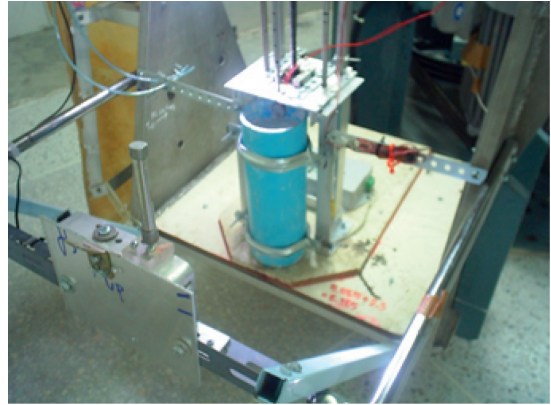
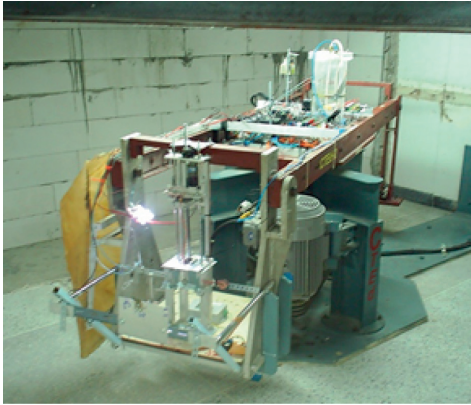
T-Bar ที่มีการทดสอบในต่างประเทศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13% [2] จะเห็นได้ว่า ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าที่ยอมรับได้และอยู่ในระดับที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตามค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากคุณภาพของการเตรียมตัวอย่างด้วยคน และความสม่ำเสมอของขั้นตอนการทดสอบ ถึงแม้งานวิจัยทั้งสองระยะจะพยายามใช้อุปกรณ์และชุดทดลองชุดเดียวกัน นอกจากนี้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า N-Factor ของหัวกด T-Bar ก็อาจจะเกิดจากอิทธิพลของปัจจัยอื่นๆ ที่แตกต่างกันของแต่ละห้องทดลองในแต่ละประเทศ เช่น ความสามารถในการเตรียมตัวอย่างและการทดสอบตัวอย่างดินเหนียว คุณภาพการวัดค่าทางไฟฟ้า ลักษณะการกดหัวทดสอบ และความผิดพลาดอันเนื่องมาจากมนุษย์ (Human Error) เป็นต้น จากผลการศึกษาของ Stewart และ Randolph [1] พบว่า หัวกด T-Bar หลายขนาดที่สร้างขึ้น และได้นำไปทดสอบในห้องทดลองต่างๆ มีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ N-Factor เท่ากับ 10.5

3.3 ผลการทดสอบบนเครื่อง Centrifuge

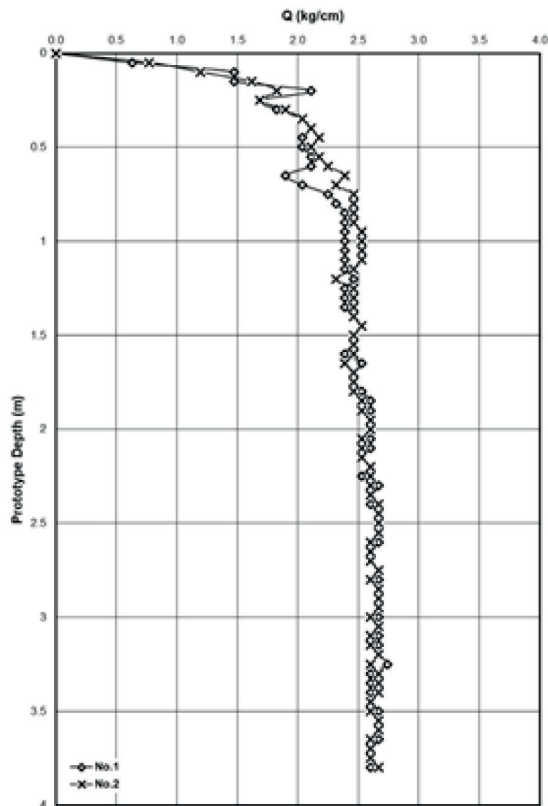
ผู้วิจัยนำตัวอย่างเพิ่มเติมจากแบบหล่อขนาด ϕ 8.75 ซม. จำนวน 2 ตัวอย่าง ที่มีปริมาณซีเมนต์ในสัดส่วน 4% บ่มที่อายุครบ 2 วัน มาศึกษาผลของสภาวะแรงโน้มถ่วงกับการแปรผลการหยั่ง โดยทำการทดสอบวงแหวนขนาด ϕ 22.20 มม. ที่ความเร็ววงที่ 3 มม. ต่อวินาที บนเครื่องหมุนเหวี่ยง CTEd-2

ที่ความเร่ง 20 เท่าของแรงโน้มถ่วงโลก (20g) ตัวอย่างดินเหนียว
ประติษฐ์ถูกจำลองให้มีความสูงเสมือนชั้นดินเหนียวสูง 4 ม.

รูปที่ 16 แสดงเครื่องหมุนเหวี่ยง CTed-2 และการติดตั้ง
อุปกรณ์การทดสอบหยั่ง PRP ทั้งหมด



รูปที่ 16 เครื่องหมุนเหวี่ยง CTed-2 และการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบหยั่ง PRP บนกระเช้าเครื่องหมุนเหวี่ยง



รูปที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q กับ ความลึกของต้นแบบ (Prototype)
บนเครื่องหมุนเหวี่ยง CTed-2 ของดินเหนียวประติษฐ์ (C = 4%)

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่า ลักษณะของแรงกดคล้ายกับผลทดสอบที่ผ่านมาที่ระดับแรงโน้มถ่วง 1 เท่า ค่าเฉลี่ยของแรงกด Q ในช่วงที่คงที่มีค่าเท่ากับ 2.6 กก./ซม. จากการคำนวณตามสมการที่ (2) จะได้ค่า S_u เท่ากับ 0.51 กก./ซม.² เปรียบเทียบกับผลการทดสอบ Unconfined compression test ของตัวอย่างดินที่ทำการผสมพร้อมกันได้ค่า $q_u = 1.052$ หรือ S_u เท่ากับ 0.53 กก./ซม.²

4. สรุปผลการศึกษา

ผู้วิจัยคิดค้นและพัฒนาหัวกดแบบวงแหวนวัดแรง (Proving Ring Penetrometer, PRP) สำหรับทดสอบกำลังของดินเหนียวขึ้นมาเพื่อนำมาใช้ทดแทนหัวกด T-Bar ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงจากการใช้ Load cell ขนาดเล็กจากต่างประเทศ ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

4.1 หัวกดแบบ PRP ที่ประดิษฐ์ขึ้นมา มีต้นทุนในการสร้างต่ำ และมีประสิทธิภาพ ความแม่นยำและความไว (Sensitivity) โดยรวมอยู่ในระดับที่น่าพอใจ เมื่อพิจารณาผลการสอบเทียบและผลทดสอบกับดินเหนียวประดิษฐ์ที่มีกำลังต่างกัน พบว่าค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity, R^2) อยู่ในเกณฑ์ดี และสัมประสิทธิ์ของวงแหวนวัดแรง (N-Factor) ที่ใช้ในการหาค่ากำลังของดินมีค่าเท่ากับ 8.39 ซึ่งมากกว่าค่า N-Factor ที่ได้จากงานวิจัยระยะแรกคิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 3.71 และมีค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนของหัวกด T-bar ที่ได้จากผลการทดสอบทั่วโลกที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 13 ผลการทดสอบของหัวกด PRP ทั้ง 2 ขนาด ที่ให้ค่า N_p ใกล้เคียงกัน ยืนยันในประเด็นของความน่าเชื่อถือของ “ความสอดคล้องเชิงมิติ” (Similitude) หรือ ขนาดของ PRP มีอิทธิพลน้อยต่อค่า N_p ได้เป็นอย่างดี และสนับสนุนความเชื่อมั่นที่จะออกแบบใช้หัวกดแบบ PRP ที่มีขนาดเล็กถึง หรือใหญ่ขึ้น โดยยังมีค่า N_p อยู่ในช่วงเดิม เช่น การใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ประมาณ 5-7 ซม. ในการหยั่งทดสอบในหลุมเจาะสำรวจดินขนาดมาตรฐาน

ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า หัวกดแบบ PRP เป็นนวัตกรรมและเป็นอีกหนึ่งทางเลือก เพื่อใช้สำหรับทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามต่อไป

4.2 การทดสอบหัวกดแบบ PRP บนเคื่องหมุนเหวี่ยง CTED-2 ที่ความเร่ง 20 เท่าของแรงโน้มถ่วงโลก โดยจำลองตัวอย่างดินเหนียวประดิษฐ์ที่มีความสูงเสมือนชั้นดินเหนียวสูง 4 ม. ผลการทดสอบพบว่า แรงกดทับในแนวตั้ง (Overburden Stress) ไม่มีผลต่อการตรวจวัดค่ากำลังของดินเหนียว ซึ่งแตกต่างจากการใช้หัวกดแบบ CPT ที่ต้องปรับแก้ค่าหน่วยแรงกดทับในแนวตั้ง พฤติกรรมเช่นนี้เป็นข้อดีปกติของหัวกดแบบ T-bar และ หัวกด PRP (ในงานวิจัยนี้) อยู่แล้ว ซึ่งอาศัยหลักการเดียวกัน ดังนั้น จึงมั่นใจได้ว่าศักยภาพของหัวกดแบบ PRP ที่พัฒนาขึ้นมาจะส่งผลต่อเทคนิคการหยั่งเพื่อหาค่า Undrained shear strength (S_u) ของดินเหนียวที่แม่นยำและเที่ยงตรงมากขึ้นทั้งในห้องทดลอง ตลอดจนสามารถใช้เป็นต้นแบบหัวหยั่งทดสอบที่มีประสิทธิภาพในสนามของการประเมินค่ากำลังของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ สำหรับอุตสาหกรรมการก่อสร้างของประเทศไทยต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้ และภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์และอำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่

6. เอกสารอ้างอิง

1. Stewart, D.P. and Randolph, M.F., 1991, “A New Site Investigation Tool for the Centrifuge,” pp. 531-538, in H.Y. Ko and F.G. McLean (Eds.), Centrifuge 91 : Proceedings of the International Conference Centrifuge 1991, Balkema, Rotterdam.
2. Stewart, D.P. and Randolph, M.F., 1994, “T-bar Penetration Testing in Soft Clay,” *Geotechnical Engineering*, 120 (12), pp. 2230-2235.
3. Newson, T.A., Bransby, M.F., Brunning, P. and Marrow, D., 2004, “Determination of Undrained Shear Strength Parameter for Buried Pipeline Stability in Deltaic Soft Clays,” *ISOPE 2004 Conference*, Toulon,

France, pp. 1-6.

4. Kiti-asa, A. and Santichaianant, K., 2009, "Laboratory Proving Ring Penetrometer for Undrained Shear Strength Determination of Soft Clay," *Rangsit University Journal of Engineering and Technology*, 12 (1), pp. 71-78. (In Thai)

5. Sriratana, V., 2007, Sensors and Transducer for Industry, SE-EDUCATION Public Company Limited, Bangkok, pp. 155-182. (In Thai)

6. Kiti-asa, A., 2008, Laboratory Proving Ring Penetrometer for Undrained Shear Strength Determination of Soft Clay, Master of Science Industrial Education Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi. (In Thai)

7. Santichaianant, K., Boonsung, A. and Meesawat, A., 2007, "Prototype of the First Research Geotechnical Centrifuge in THAILAND," *Proceeding of the 12th National Convention on Civil Engineering (NCCE12)*, Phitsanulok, Thailand, GTE-44. (In Thai)

8. Choppradit, C., Yibchalearnpron, K. and Chantawarangul, K., 2000, "An Artificial Clay for Simulating Soft Bangkok Clays," *The 38th Kasetsart University Annual Conference*, Bangkok, Thailand. (In Thai)

9. The Engineering Institute of Thailand under H.M The King's Patronage, 2006, Soil Properties of South Chao Phraya River Plain, 1st ed., Bangkok, pp. 4.1-4.27. (In Thai)