



รายงานการวิจัย

การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยของดินเหนียวกรุงเทพ
โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
(Laboratory Cone Penetration Test for Bangkok Clay)

ได้รับทุนอุดหนุนจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการเพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยของดินเหนียวกรุงเทพ
โดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ
(Laboratory Cone Penetration Test for Bangkok Clay)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการเพียงผู้เดียว

มีนาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถเสร็จสมบูรณ์ได้ จากความร่วมมือจากบุคคลและหน่วยงานต่างๆที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งไปผู้อุดหนุนทุนวิจัยปีงบประมาณ 2552 ผู้เขียนขอขอบคุณ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนากุล ผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรของศูนย์เครื่องมือฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายดิงศักดิ์ เหลืองเจริญทิพย์ ที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงาน



อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์
หัวหน้าโครงการวิจัย
กุมภาพันธ์ 2555

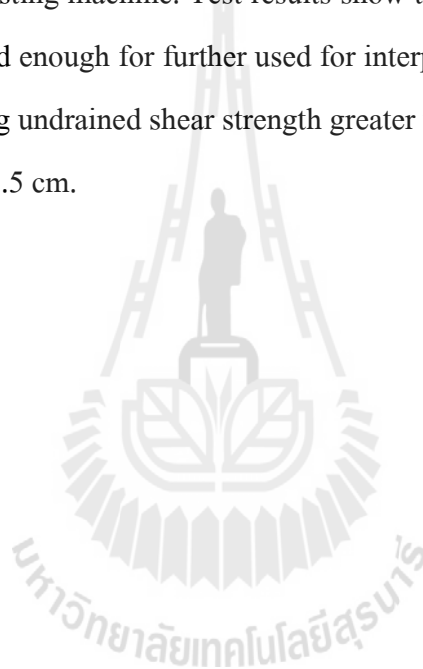
บทคัดย่อ

การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยเป็นวิธีทดสอบคุณสมบัติของดินในสนามที่ได้รับความนิยมอย่างมาก อย่างไรก็ตามการแปลงผลทดสอบให้เป็นคุณสมบัติของดินจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์เชิงประสพ ซึ่งได้จากการสอบเทียบกรวย แต่การสอบเทียบกรวยในสนามมีราคาแพง รายงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีพัฒนาชุดทดสอบกรวยขนาดเล็ก ซึ่งสามารถดัดแปลงชุดทดสอบแรงอัดสามแกนมาใช้ได้ โดยไม่ทำให้ฟังก์ชันการทำงานของชุดทดสอบแรงอัดสามแกนเปลี่ยนไป ผลทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นพบว่าให้ผลทดสอบที่ดีในส่วนของค่าแรงเสียดทานที่ปลอกเหล็ก กับตัวอย่างดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูงกว่า 0.29 กก./ตร.ซม. ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



Abstract

Cone penetration test (CPT) is widely used for determining soil properties in field. However, empirical parameter(s) is/are necessary for converting the CPT test results to the desired properties. Those empirical parameters can be determined by performing cone calibration in field. This task is labor intensive and cost expensive. This report introduces a miniature cone penetration test (MCPT) apparatus. The MCPT apparatus was developed in a conventional triaxial testing machine. Test results show that sleeve friction resistance read from the device is good enough for further used for interpretation. It is recommended to test on soil sample having undrained shear strength greater than 0.29 ksc and a diameter of the specimen should be 5.5 cm.



สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
บทที่ 2 วรรณกรรมวิจารณ์	3
2.1 ความเป็นมา	3
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินกับผลทดสอบ	5
2.3 การพัฒนาชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในห้องปฏิบัติการ	9
2.4 อิทธิพลของอัตราการกดกรวยในการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย	14
2.5 อิทธิพลของขนาดของแบบต่อผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย	16
บทที่ 3 รายละเอียดชุดทดสอบการกดกรวยในห้องปฏิบัติการ	18
บทที่ 4 การทดสอบ	23
4.1 ดินที่ใช้ในการทดสอบ	23
4.2 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย	25
4.2.1 เครื่องมือเตรียมตัวอย่างดิน	25
4.2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง	25
4.3 การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็ก	29
4.3.1 การเตรียมตัวอย่างและติดตั้ง	29
4.3.2 การสอบเทียบกรวย และการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย	32
บทที่ 5 ผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย	37
5.1 ผลทดสอบทั่วไป	37
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานที่ปลอดภัยกับอัตราเร็วการกดกรวย และขนาดเว้าผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างดิน	53

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานที่ปลดปล่อยกับคุณสมบัติของดิน	57
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา	61
เอกสารอ้างอิง	62



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

กรุงเทพมหานครและเขตเศรษฐกิจของหลายประเทศมักตั้งอยู่บริเวณลุ่มแม่น้ำหรือพื้นที่ปากอ่าว ทำให้มีสภาพชั้นดินเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนหนามากกว่า 10 เมตร เช่นสภาพชั้นดินของกรุงเทพฯและปริมณฑล มีชั้นดินเหนียวอ่อนความหนาประมาณ 15 ถึง 30 เมตร ในขณะที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ประมาณ 1 เมตรจากผิวดิน พื้นที่ดังกล่าวมีโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่จำนวนมาก การตรวจสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับโครงการเหล่านี้ การทดสอบในสนามโดยการทดสอบทะลุทะลวงกรวย (Cone penetration test, CPT) กำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศพัฒนาแล้ว และคาดว่าจะถูกนำมาใช้มากขึ้นในประเทศไทย ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบ CPT สามารถทำได้เร็วและได้ผลทดสอบที่ต่อเนื่องหากชั้นดินมีความแปรปรวนก็จะสามารถตรวจพบได้ทันที อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการทดสอบแบบนี้ แต่จะเป็นการแปลงค่าที่อ่านได้จากผลทดสอบ CPT ไปเป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินที่ต้องการ เช่น กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength, S_u) สามารถหาได้จากสมการที่ (1)

$$S_u = \frac{q_c - \sigma}{N_k} \quad (1.1)$$

โดย S_u เป็นกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ q_c เป็นแรงต้านการทะลุทะลวงของกรวย (Cone resistance) σ เป็นหน่วยแรงกดทับ (Overburden pressure) และ N_k เป็นค่าคงตัวของกรวย (Cone factor) ซึ่ง Lunne et al.(1976) ทำการทดสอบกับดินห้ำโครงการในแถบสแกนดิเนเวีย พบว่า N_k มีค่าระหว่าง 15 - 19 สำหรับ Marine clay และ N_k มีค่าระหว่าง 11 -13 สำหรับ Soft clay ซึ่ง Lunne and Eide (1978) แนะนำให้สอบเทียบกรวยเพื่อค่า N_k สำหรับแต่ละพื้นที่ ซึ่งสอดคล้องกับ Schmertmann (1975)

นอกจากนี้ยังสามารถใช้ผลทดสอบ CPT ในการหา ความไวตัวของดิน (Sensitivity, S) ค่าอัตราส่วนการอัดตัวคายน้ำเกินปกติ (Overconsolidation ratio, OCR) ค่าการยุบตัวได้เชิงปริมาตร (Volumetric compressibility, m_v) ฯลฯ และเช่นเดียวกับ S_u คุณสมบัติทางวิศวกรรมเหล่านี้จะไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากผลทดสอบแบบ CPT แต่จะเป็นการแปลงค่าที่อ่านได้จากการทดสอบผ่านสมการคณิตศาสตร์ทั้งสมการคณิตศาสตร์เชิงทฤษฎี (Theoretical based equation) หรือสมการทางคณิตศาสตร์เชิงประจักษ์ (Empirical based equation) โดยสมการเหล่านี้จะมีแฟกเตอร์ของวัสดุ (Material factor) โดยแฟกเตอร์เหล่านี้มักเป็นค่าคงตัวของดินหนึ่งๆ ดังนั้นจึงควรทำการสอบเทียบกรวยเพื่อหาแฟกเตอร์ของวัสดุสำหรับสถานที่ที่ทำการทดสอบจริง การใช้ค่าแฟกเตอร์จากดินแห่งหนึ่งมาใช้กับดินอีกแห่งหนึ่ง จะทำให้

เกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการทราบได้ เช่น ใช้ค่า N_k ในช่วง 15 - 19 ตามผลทดสอบของ Lunne et al. (1976) มาใช้กับการทดสอบเพื่อหาค่ารับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok clay) จะส่งผลทำให้ค่ารับแรงเฉือนที่แปลได้จากผลการทดสอบ CPT มีความไม่แน่นอนสูง หากต้องการความแม่นยำในการประมาณคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินในพื้นที่โครงการซึ่งเป็นพื้นที่ที่ยังไม่มีผลสอบเทียบกรวยรองรับ จำเป็นต้องทำการสอบเทียบอย่างไรก็ตามการสอบเทียบจะมีค่าใช้จ่ายสูงมากและกินเวลานาน หากสามารถลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการสอบเทียบกรวยเพื่อหาพารามิเตอร์ปรับแก้สำหรับคุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ต้องการได้ ก็จะช่วยให้วิศวกรมีข้อมูลที่ต้องการมากขึ้น ทำให้สามารถออกแบบและวิเคราะห์โครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพตามไปด้วย

นอกจากนี้ในการทดสอบ CPT ในสนามซึ่งดินมีความแปรปรวนมาก เช่นอาจมีการเรียงตัวของชั้นดินทรายบางๆสลับกับชั้นดินเหนียวอ่อน พฤติกรรมการเสียดรูปและการรับแรงของดินจะมีความซับซ้อน การทดสอบ CPT ในสนามไม่สามารถมองเห็นพฤติกรรมการเสียดรูปที่เกิดขึ้นได้ ทำให้ไม่สามารถเข้าใจพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้นการประมาณคุณสมบัติทางวิศวกรรมอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งปัญหาในลักษณะดังกล่าวต้องการงานการทดสอบในเชิงวิจัย เพื่อพัฒนาความเข้าใจในพฤติกรรมร่วมระหว่างดินและกรวยในลักษณะ soil-structure interaction ขณะทดสอบ และการทดสอบเชิงวิจัยในลักษณะดังกล่าว หากต้องทำในสนาม จะมีค่าใช้จ่ายสูงมาก นอกจากนี้ยังไม่สามารถควบคุมความแปรปรวนของดินทดสอบได้ด้วย

จากที่ปัญหาต่างๆที่กล่าวถึงข้างต้นแสดงให้เห็นว่า หากสามารถดำเนินการทดสอบ CPT ได้โดยมีขนาดเล็กลง ซึ่งทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบในแต่ละครั้ง และทำให้สามารถเตรียมตัวอย่างดินที่มีคุณสมบัติตามต้องการอย่างไม่ยุ่งยาก จะส่งเสริมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มขึ้นอย่างมาก และจะรองรับการใช้ทดสอบ CPT ที่มีแนวโน้มจะได้รับความนิยมในประเทศเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอชุดทดสอบการทะลุทะลวงกรวยขนาดเล็กซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบน้อย และสามารถควบคุมคุณภาพของตัวอย่างดินที่จะทดสอบได้ดี

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

พัฒนาชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็ก (miniature cone penetration test, mCPT) โดยใช้ร่วมกับชุดทดสอบแรงกดสามแกน (triaxial apparatus) ทำการทดสอบกับดินเหนียวในสภาพไม่มีการระบายน้ำ สภาพอัดตัวคายน้ำตามปกติ (normally consolidated clay)

บทที่ 2. วรรณกรรมวิจารณ์

2.1 ความเป็นมา

การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยหรือ CPT เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางวิศวกรรมถูกเสนอโดยวิศวกรชาวฮอลแลนด์ โดยกรวยมีลักษณะหัวปลายแหลม ต่อกับก้านสำหรับกดกรวยลงในดิน ก้านกดจะมีปลอกเหล็กหุ้มอยู่ใช้สำหรับวัดแรงเสียดทานระหว่างดินกับปลอกเหล็ก ดังรูปที่ 2.1 กรวยขนาดมาตรฐานจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35.7 มิลลิเมตร กรวยมีปลายแหลมทำมุม 60 องศา ปลอกเหล็กแต่ละแท่งมีขนาดพื้นผิว 150 ตารางเซนติเมตร การทดสอบจะทำโดยการกดกรวยลงไป在地ด้วยอัตราเร็วที่เหมาะสม



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย

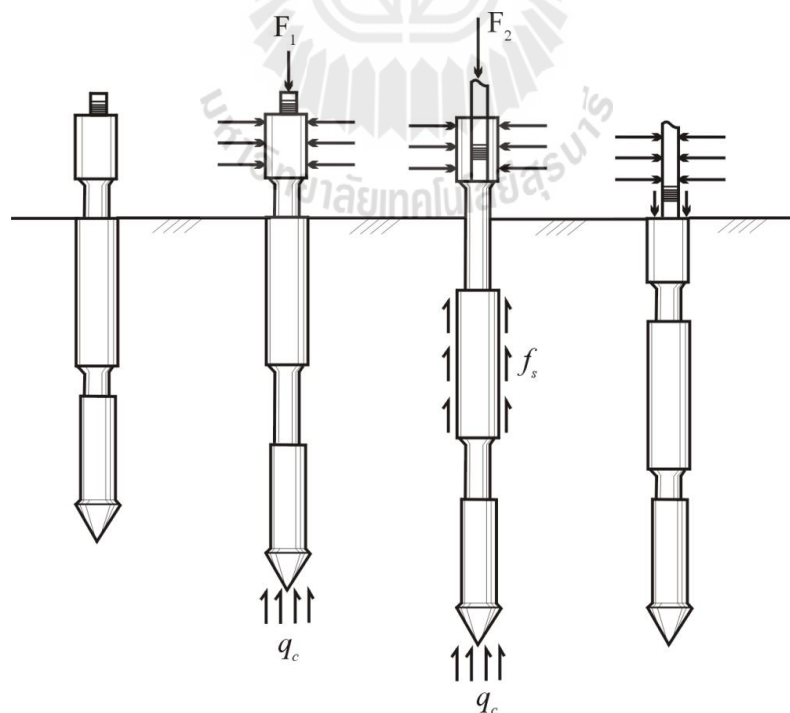
แรงต้านการกดเกิดจากผลรวมของแรงต้านที่ปลายกรวย (Cone resistance, q_c) รวมกับแรงเสียดทานระหว่างดินกับปลอกเหล็ก (Sleeve friction, f_s) แรงทั้งสองประเภทนี้สามารถนำไปแปลงเป็นคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดิน รวมทั้งนำไปจำแนกชนิดของดินได้

การทดสอบในขั้นแรก กรวยและปลอกเหล็กจะอยู่ใกล้กัน เมื่อเริ่มทำการทดสอบโดยดันก้านเหล็กด้วยแรง F_1 ก้านเหล็กจะดันกรวยให้หยั่งลงในเนื้อดิน ในช่วงแรกนี้กรวยจะถูกดันให้เคลื่อนที่ลงเพียงขึ้นเดียว ขณะที่ปลอกยังอยู่กับที่ เมื่อกรวยหยั่งลงไปลึกถึงระดับหนึ่ง คือสุทธระยะอิสระของก้านเหล็ก หากต้องการให้กรวยหยั่งลึกลงไปอีกจะต้องออกแรงเพิ่มขึ้นเพื่อดันทั้งกรวยและปลอกลงไปด้วย แรงในขั้นตอนนี้เท่ากับแรง F_2 ในรูปที่ 2.2 และเมื่อดันก้านเหล็กลงไปถึงระยะหนึ่งแล้ว ให้ยึดก้านเหล็กไว้ แล้วดันปลอกขึ้นบนเพื่อให้อุปกรณ์ทดสอบกลับไปจัดเรียงตัวเหมือนตอนที่เริ่มทดสอบ และพร้อมสำหรับการ

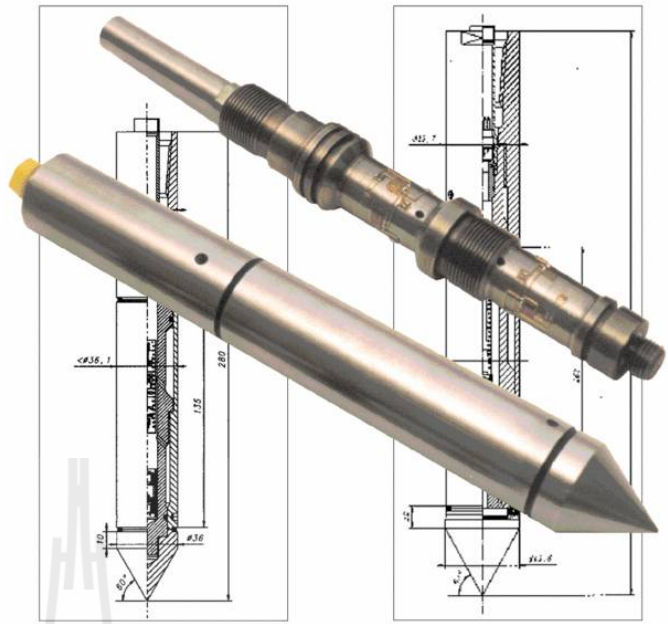
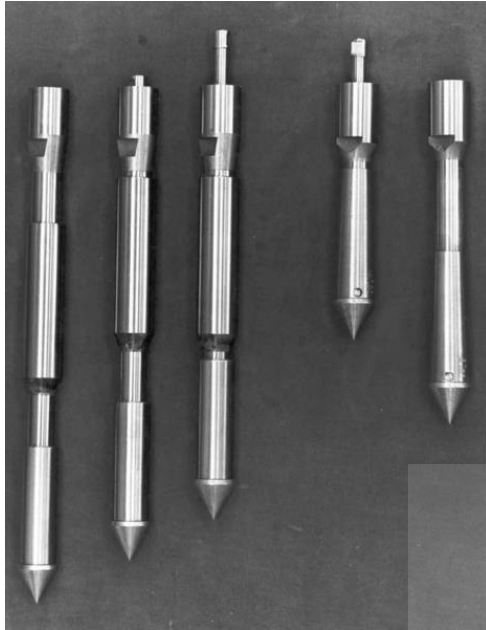
ทดสอบที่ระดับความลึกถัดไป รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย 1 ช่วงทดสอบ จากรูปจะพบว่าแรงต้านที่ปลายกรวย (Cone resistance, q_c) จะมีค่าเท่ากับ F_1 ส่วนแรงเสียดทานระหว่างดิน กับปลอกเหล็ก (Sleeve friction, f_s) จะมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างแรง F_2 กับแรง F_1 ค่า q_c และ f_s ที่อ่านได้ สามารถนำไปประมาณคุณสมบัติ และชนิดของชั้นดิน ได้ ดังจะกล่าวถึงต่อไป

อุปกรณ์ที่แสดงในรูปที่ 2.2 เป็นอุปกรณ์ทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยเชิงกล (Mechanical cone) ซึ่งช่วงของการทดสอบสามารถทำได้ทุกๆ ระยะ 20 เซนติเมตร ต่อมามีการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยแบบไฟฟ้า (Electrical cone) โดยมีเครื่องแปลงสัญญาณวัดแรง (Load cell) อยู่ภายในกรวย และต่อสายสัญญาณขึ้นมาบนดิน ทำให้สามารถวัดแรงได้ถูกต้องมากขึ้น ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างก้านเหล็กกับท่อเหล็กกันดิน สามารถทดสอบได้อย่างรวดเร็ว และต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยแบบวัดแรงดันน้ำ (Piezocone) โดยติดหินพรุน (Porous stone) ไว้ที่ปลายกรวย เพื่อให้สามารถวัดความดันน้ำระหว่างการทดสอบได้ด้วย รูปที่ 2.3 แสดงรูปถ่ายอุปกรณ์ทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยแบบกลและแบบวัดแรงดันน้ำ

กล่าวโดยสรุปสำหรับการทดสอบโดยการทะลุทะลวงของกรวย เมื่อเทียบกับการทดสอบการทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยสามารถทำได้รวดเร็ว มีทฤษฎีรองรับ และมีความต่อเนื่องของข้อมูลมากกว่าการทดสอบการทะลุทะลวงแบบมาตรฐาน แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถทดสอบกับชั้นดินแข็ง หรือดินทรายแน่นได้ นอกจากนี้ยังไม่มีการเก็บตัวอย่างดินขึ้นมาเพื่อจำแนกชนิดของดิน



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์ทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย



รูปที่ 2.3 แสดงรูปถ่ายอุปกรณ์ทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยแบบต่างๆ (<http://www.geomil.com/>)

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของดินกับผลทดสอบ

ค่าที่อ่านได้จากการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยได้แก่ q_c และ f_s สามารถใช้ประมาณคุณสมบัติของชั้นดินหลายประการ ที่นิยมใช้ได้แก่ การประมาณกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) ดังสมการที่ 2.1

$$S_u \text{ [ton/m}^2\text{]} = \frac{q_c - p_o}{N_k} \quad (2.1)$$

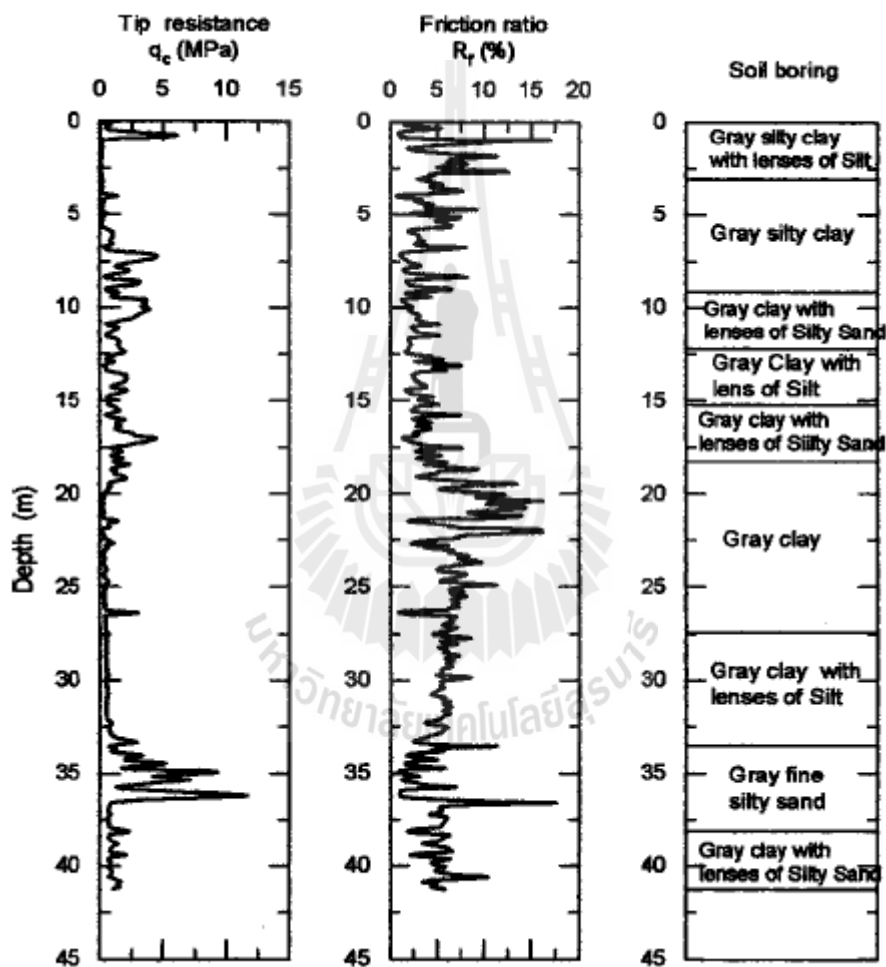
- q_c เป็นแรงต้านที่ปลายกรวย (cone resistance)
- p_o เป็นความดันกดทับรวมในหน่วยตันต่อตารางเมตร (overburden pressure)
- N_k เป็นค่าคงตัวของกรวย (cone factor) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 10-20

(Lunne and Kleven, 1981)

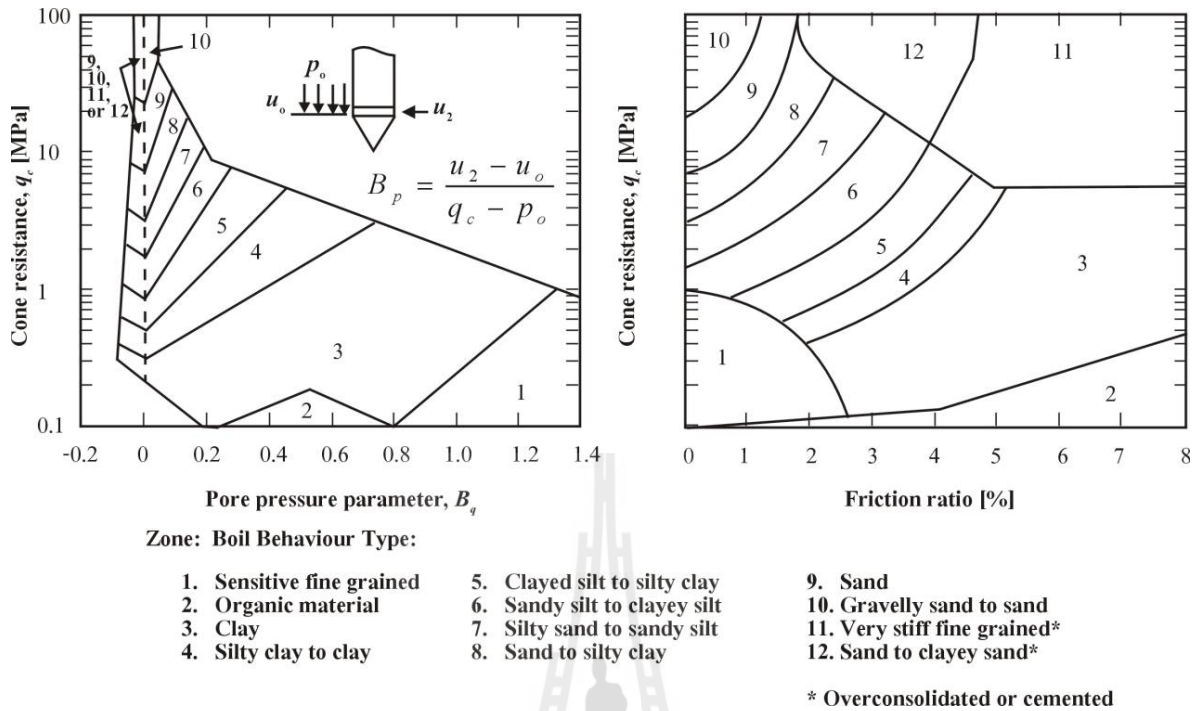
นอกจากนี้ยังสามารถนำค่าที่อ่านได้จากผลทดสอบมาจำแนกชนิดของดิน โดยจำแนกชนิดของดินจากค่า q_c และอัตราส่วนความเสียดทาน (Friction ratio, F_R) ซึ่ง F_R คำนวณจากสมการที่ 2.2

$$F_R = \frac{f_s}{q_c} \quad (2.2)$$

ในการจำแนกโดยหยาบ สามารถกระทำได้โดยพิจารณาจากค่า q_c และ F_R ดังนี้ ในดินเหนียว จะมีค่า q_c ค่อนข้างต่ำ แต่จะมีการยึดเกาะได้ดี เป็นผลให้ F_R มีค่าสูง ในขณะที่ดินทรายจะมีค่า q_c สูง แต่ f_s มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ q_c เป็นผลให้ F_R มีค่าต่ำ รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างผลทดสอบการเจาะหย้าง เปรียบเทียบกับชั้นดินซึ่งได้จากการเจาะสำรวจ ซึ่งจะพบว่าในชั้นดินเหนียว จะมีค่า q_c ต่ำ แต่ f_s ค่อนข้างสูง ขณะที่ชั้นทรายจะพบว่า q_c มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และขณะเดียวกัน f_s จะมีค่าลดลงอย่างไรก็ตามการจำแนกดังกล่าวได้เพียงหยาบๆเท่านั้น มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ได้พยายามใช้ความสัมพันธ์ของค่า q_c และ F_R เพื่อจำแนกชนิดของดินโดยละเอียด ในที่นี้ผู้แต่งขอนำผลงานวิจัยของ Robertson และคณะ (1986) ซึ่งได้แสดงการจำแนกชนิดของดินไว้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยกับผลการเจาะสำรวจ (จาก Abu-Farsakh and Titi, 2004)



รูปที่ 2.5 การจำแนกดินจากผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย (จาก Robertson et al., 1986)

นอกจากนี้ยังสามารถนำผลการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย ไปใช้ในการประเมินกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มได้ดังสมการที่ 2.3

$$Q_u = \alpha Q_{TF} p + \lambda q_{c,avg} A_p - W \quad (2.3)$$

- Q_u เป็นน้ำหนักบรรทุกประลัยของเสาเข็ม [ตัน]
- α เป็นสัมประสิทธิ์เสียดทาน
- λ เป็นสัมประสิทธิ์แรงแบกทาน
- $q_{c,avg}$ เป็นค่าเฉลี่ยแรงต้านปลายกรวย [ตัน/ตร.ม.] ตาม van Der Veen and Boersma (1957)
- W เป็นน้ำหนักเสาเข็ม
- Q_{TF} เป็นแรงฝืดรวม [ตัน/ม. เส้นรอบรูปเสาเข็ม]
- p เป็นเส้นรอบรูปเสาเข็ม [ม.]
- A_p เป็นพื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม [ตร.ม.]

ห้ทั้งนี้ขนาดสัมประสิทธิ์เสียดทาน และสัมประสิทธิ์แรงแบกทาน ขึ้นกับชนิดของดิน สำหรับชั้นดิน กรุงเทพมหานคร Phota-Yanuwat (1979) ได้สรุปไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดสัมประสิทธิ์เสียดทาน และสัมประสิทธิ์แรงแบกทาน สำหรับเสาเข็มตอกในชั้นดิน กรุงเทพมหานคร (Phota-Yanuwat, 1979)

α				λ	
Soft clay	Medium clay	Stiff clay	Sand	Clay	Sand
1.0	0.7	0.5	0.8	0.33	0.50

คำนวณค่าน้ำหนักบรรทุกฐานแผ่ในทราย (Meyerhof, 1956) สำหรับทรายเหนียวระดับน้ำใต้ดิน ค่าทรุดตัวที่ยอมให้ไม่เกิน 25 มม. สามารถประมาณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกได้ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$q_a = q_c / 30, \quad B \leq 4 \text{ ft.} \quad (2.4)$$

$$q_a = q_c (1 + B)^2 / 50, \quad B > 4 \text{ ft.} \quad (2.5)$$

- Q_a เป็นกำลังรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย [ตัน/ตร.ม.]
- B เป็นความกว้างฐานราก

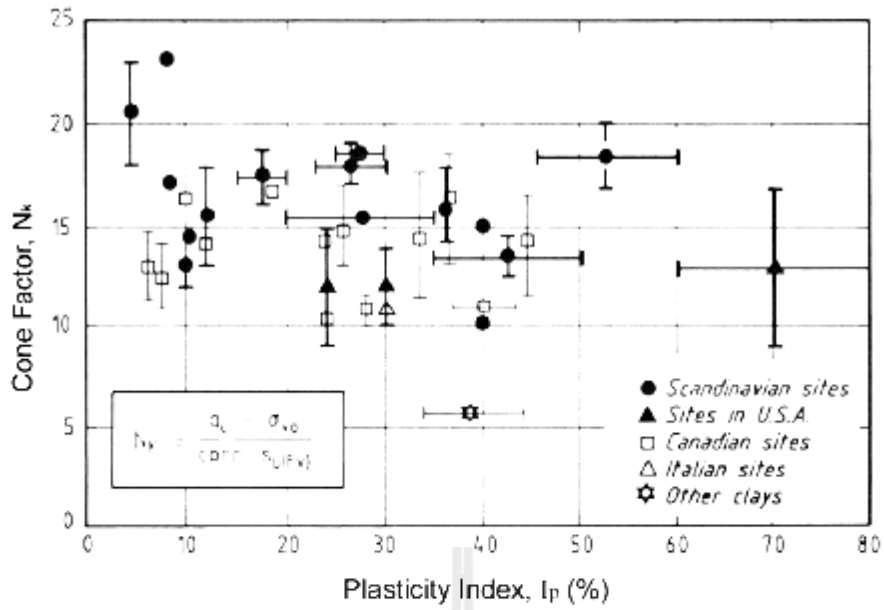
สำหรับฐานรากที่อยู่ต่ำกว่าระดับน้ำใต้ดิน ให้คิดค่าน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยเพียงครึ่งหนึ่งของค่าที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น



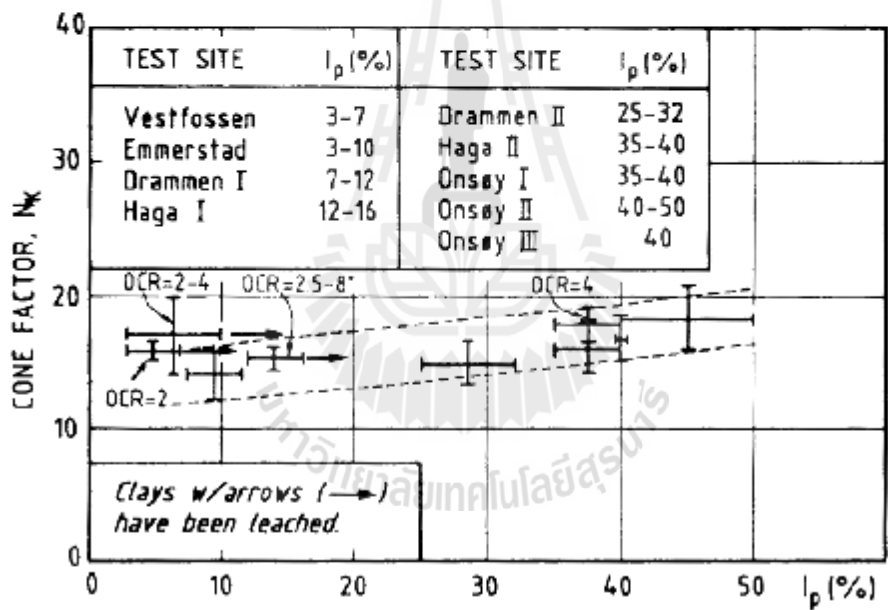
2.3 การพัฒนาชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในห้องปฏิบัติการ

จากหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าการประมาณคุณสมบัติของดินจำเป็นต้องใช้สมการเชิงประจักษ์ (empirical equation) หรือสมการกึ่งประจักษ์ (semi-empirical equation) ซึ่งสมการเหล่านี้จะมีค่าแฟกเตอร์ของวัสดุ (material factor) ในการประมาณคุณสมบัติของดิน ได้อย่างถูกต้องจำเป็นต้องใช้ค่าแฟกเตอร์ของวัสดุที่ถูกต้อง ในการหาแฟกเตอร์ของวัสดุสามารถทำได้โดยการสอบเทียบกรวย (Lunne and Eide, 1978 และ Schmertmann, 1975) เช่น Lunne et al. (1976) ทำการสอบเทียบกรวยเพื่อประมาณค่า S_u ของดินในแถบสแกนดิเนเวีย Anagnostopoulou et al. (2003) ทำการสอบเทียบกรวยเพื่อหาค่าคงตัวของดินในกรีซ

Amar et al. (1975) แสดงให้เห็นว่าค่า N_k ในสมการที่ 2.1 มีค่าตั้งแต่ 5 ถึง 70 บางงานวิจัยอ้างว่า N_k มีความสัมพันธ์กับค่า plasticity index (I_p) ของดิน และสามารถพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างค่า N_k และ I_p ได้ เช่นงานวิจัยของ Lunne et al. (1976) Baligh et al. (1980) Lunne and Kleven (1981) Aas et al. (1986) และ La Rochelle et al. (1988) อย่างไรก็ตามหากพิจารณาจากรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_k และ I_p จะพบว่ารูปดังกล่าวไม่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างในรูปที่ 2.6 สามารถแสดงให้เห็นว่าการกำหนดค่าแฟกเตอร์ของวัสดุจำเป็นต้องมีการสอบเทียบกรวย แต่การสอบเทียบกรวยในสนามเพื่อหาแฟกเตอร์วัสดุมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างมาก นอกจากนี้ยังไม่สามารถควบคุมคุณสมบัติของดินให้มีความสม่ำเสมอได้ตามต้องการ จึงมีงานวิจัยในช่วงเวลาต่อมาที่พยายามพัฒนาชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในห้องปฏิบัติการ เพื่อให้สามารถควบคุมคุณสมบัติของดินที่ทดสอบให้มีความสม่ำเสมอ ตรงตามความต้องการของผู้ทดสอบ และยังประหยัดค่าใช้จ่ายในการสอบเทียบกรวยเมื่อเทียบกับการสอบเทียบกรวยกับดินในสนามอีกด้วย Almeida and Parry (1985) ทำการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยโดยใช้กรวยขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 10 มม. ในดินเหนียวเกาหลี และ Piezocone ขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวย 12.7 มม. ในดินเหนียว Gault ซึ่งดินเหนียวทั้งสองชนิดนี้เป็นดินเหนียวที่ประดิษฐ์ โดยใช้น้ำโคลน (Slurry mud) และยอมให้มีการอัดตัวคายน้ำ โดยใช้เครื่องอัดตัวคายน้ำขนาดใหญ่ เมื่อดินเหนียวอัดตัวคายน้ำถึงระดับที่ต้องการแล้วจึงนำมาทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย โดยกรวยจะถูกกดลงทางด้านบนผ่าน Guide plug ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 Kurup et al. (1994) ทำการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยโดยใช้ Piezocone ขนาดเล็ก โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 11.28 มม. และ Quasi-static cone penetrometer ขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 12.72 มม. ในดินเหนียวเกาหลี การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยทำใน Calibration chamber ดังแสดงในรูปที่ 2.8

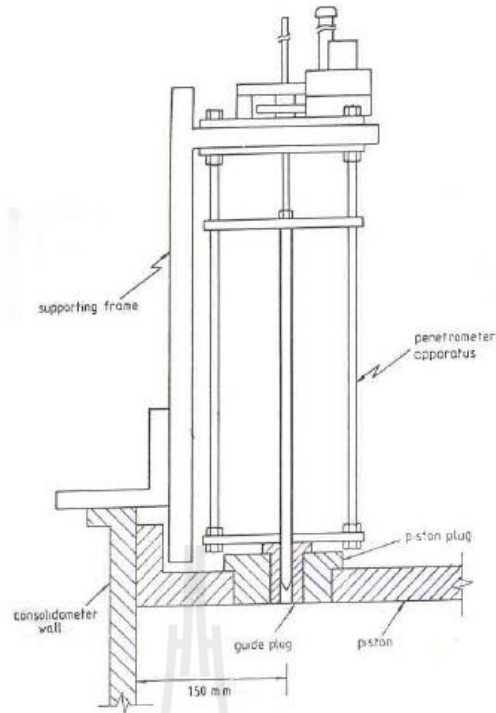


(a)

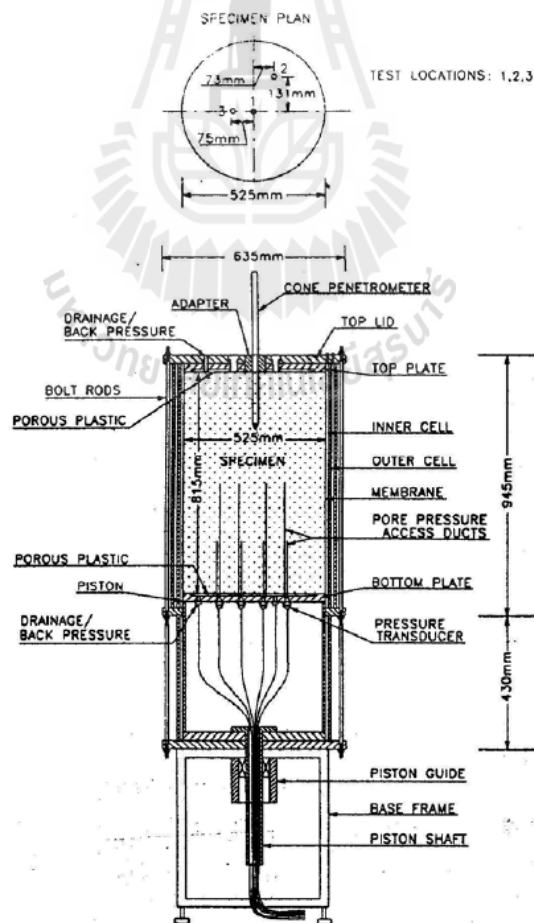


(b)

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง N_k และ I_p (a) จากงานวิจัยของ Baligh et al. (1980) และ Lunne and Kleven (1981) Aas et al. (1986) (b) จากงานวิจัยของ Aas et al. (1986)



รูปที่ 2.7 Guide plug ของ Almeida and Parry (1985)



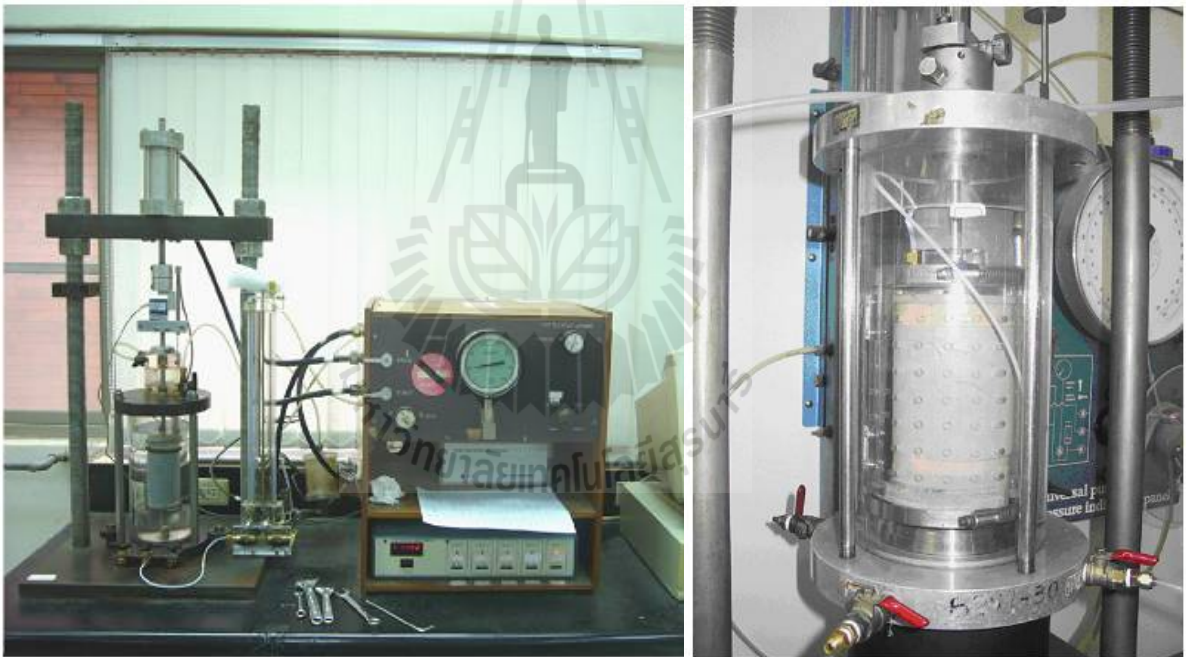
รูปที่ 2.8 Calibration chamber ของ Kurup et al. (1994)

การใช้ Calibration chamber หรือแบบขนาดใหญ่ ในการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในห้องปฏิบัติการ มีข้อดีเมื่อเทียบกับการทดสอบในสนามคือสามารถเตรียมตัวดินให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการใช้ Chamber ขนาดค่อนข้างใหญ่จำเป็นต้องใช้เวลาในการเตรียมตัวอย่างดินค่อนข้างนาน โดยเฉพาะเมื่อดินที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินเหนียว อีกทั้งยังมีราคาแพงมาก มีเฉพาะห้องปฏิบัติการขนาดใหญ่เท่านั้นที่สามารถพัฒนาชุดทดสอบดังกล่าวได้ จากการรวบรวมของ Ghionna and Jamiolkowski ในปี ค.ศ. 1991 (Ghionna and Jamiolkowski, 1991) พบว่ามีเพียง 19 ห้องปฏิบัติการทั่วโลกที่มีชุดทดสอบดังกล่าว ตารางที่ 2.2 สรุปชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยโดยใช้ Calibration chamber ที่มีอยู่ทั้งหมดในปี ค.ศ. 1991

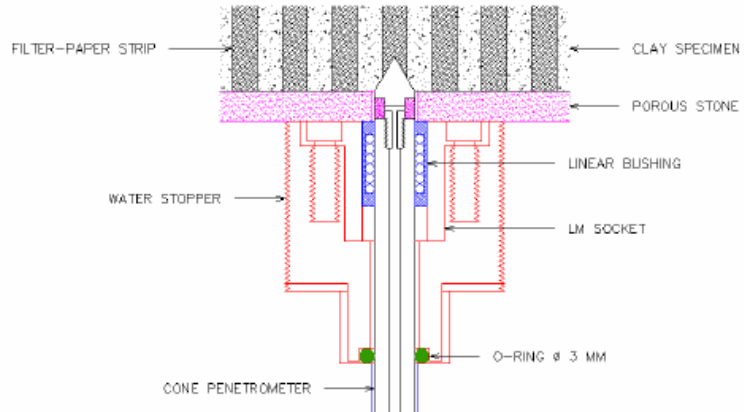
ตารางที่ 2.2 สรุปชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยโดยใช้ Calibration chamber ในปี ค.ศ. 1991

Calibration Chamber Owner and Location	Diameter	Height	Boundary conditions		
	[m]	[m]	Radial	Bottom	Top
Country road board, Australia	0.76	0.91	Flexible	Cushion	Rigid
University of Florida, U.S.A.	1.20	1.20	Flexible	Cushion	Rigid
Monash University, Australia	1.20	1.80	Flexible	Cushion	Rigid
Norwegian Geotechnical Institute	1.20	1.50	Flexible	Cushion	Rigid
ENEL-CRIS., Milano, Italy	1.20	1.50	Flexible	Cushion	Rigid
ISMES, Bergamo, Italy	1.20	1.50	Flexible	Cushion	Rigid
University of California, Berkeley, U.S.A.	0.76	0.80	Flexible	Rigid	Rigid
University of Texas, Austin, U.S.A.			Flexible	Flexible	Flexible
University of Houston, U.S.A.	0.76	2.54	Flexible	Cushion	Cushion
North Carolina State University, U.S.A.	0.94	1.00	Flexible	Rigid	Rigid
Louisiana State University, U.S.A.	0.55	0.80	Flexible	Flexible	Rigid
Golden Associates, Calgary, Canada	1.40	1.00	Flexible	Rigid	Cushion
Virginia Polytechnic Institutewabnd State University, U.S.A.	1.50	1.50	Flexible	Rigid	Rigid
University of Grenoble, France	1.20	1.50	Flexible	Cushion	Cushion
Oxford University, U.K.	0.90	1.10	Flexible	Cushion	Rigid
University of Tokyo, Japan	0.90	1.10	Flexible	Rigid	Rigid
University of Sheffield, U.K.	0.79	1.00	Flexible	Rigid	Flexible
Cornell University, U.S.A.	2.10	2.90	Flexible	Rigid	Rigid
Waterways experimnt station, U.S.A.	0.80-3.00	Variable	Flexible	Rigid	Rigid
National Chiao-Tung University, Taiwan, R.O.C.	0.51	0.76	Flexible	Rigid	Rigid
National Chiao-Tung University, Taiwan, R.O.C.	0.79	1.60	Flexible	Flexible	Flexible

จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงผู้กลุ่มวิจัยอีกกลุ่มที่พยายามพัฒนาชุดทดสอบการทะลุทะลวงกรวยที่มีขนาดเล็กลง โดยมากมักใช้ชุดทดสอบแรงอัดสามแกนมาประยุกต์ใช้ (triaxial compression test) มาประยุกต์ใช้ เช่น Chen and Chen (2008) ดังรูปที่ 2.9 และ พลากร พิรภักย์ (2547) ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งข้อดีของชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยโดยใช้ชุดทดสอบแรงอัดสามแกนคือ ดินที่จะนำใช้การทดสอบสามารถเตรียมได้รวดเร็ว เพราะดินที่ใช้จะเป็นตัวอย่างดินเหมือนกับตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกน จึงทำให้ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในการทดสอบได้มาก นอกจากนี้การทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ต่างๆ ซึ่งต้องการการทดสอบจำนวนมาก สามารถทำได้ในงบประมาณ และเวลาที่จำกัด ถึงแม้จะมีข้อดีหลายประการดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็กโดยใช้ชุดทดสอบแรงอัดสามแกน ไม่เป็นที่นิยมมากนัก และมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องน้อย เนื่องจาก ชุดทดสอบแรงอัดสามแกนมีราคาแพง นอกจากนี้การใช้ตัวอย่างขนาดเล็กก็อิทธิพลขอบขอบเขต (boundary conditions) จะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบที่ได้



รูปที่ 2.9 ชุดทดสอบ mCPT โดยใช้ชุดทดสอบแรงอัดสามแกน (Chen and Chen, 2008)



รูปที่ 2.10 ชุดทดสอบ mCPT โดยใช้ชุดทดสอบแรงอัดสามแกน (พลากร พิรภักย์, 2547)

2.4 อิทธิพลของอัตราการกดกรวยในการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย

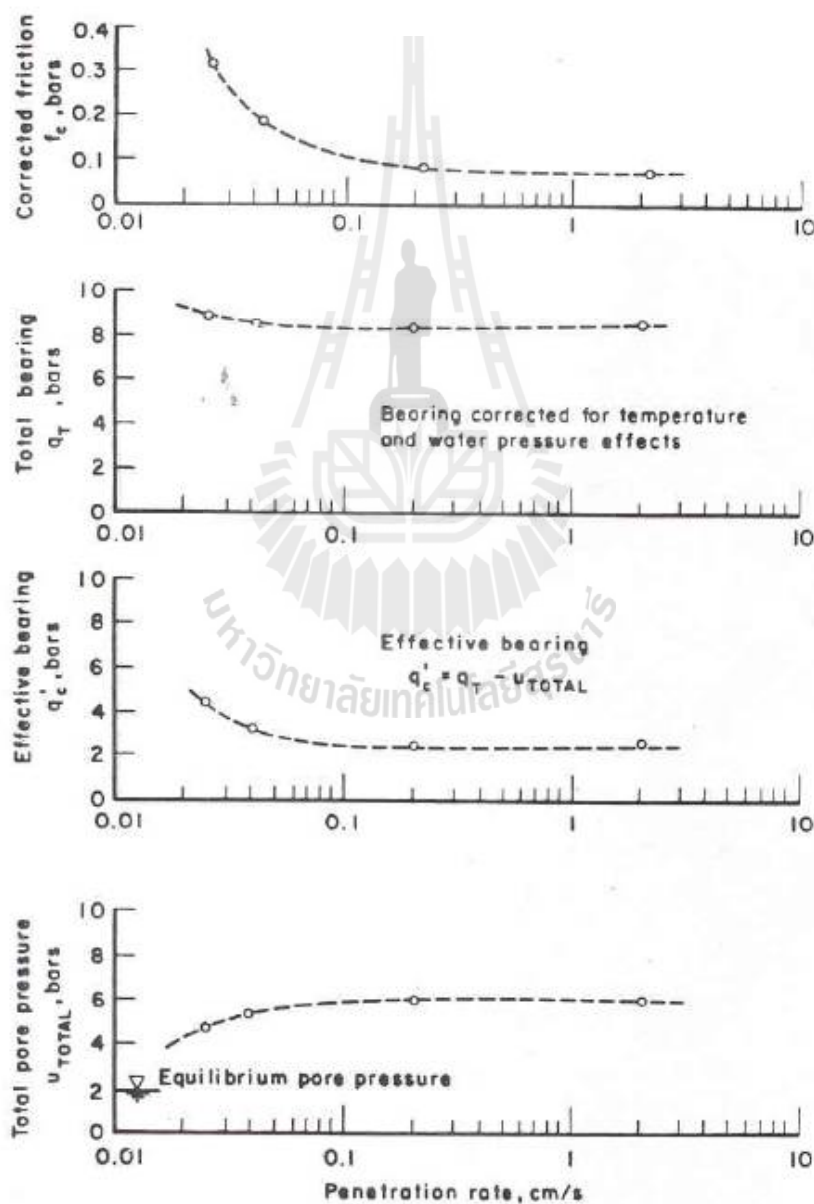
เป็นที่ทราบว่ามีปัจจัยอิทธิพลหลายประการที่ส่งผลต่อผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย ไม่ว่าจะเป็น รูปร่างของกรวย วิธีการทดสอบ ชนิดของดิน ฯลฯ (Campanella et al., 1982; Roy et al, 1982; Tumay and Acar, 1985; Lunne et al., 1986; Voyiadjis et al., 1994) อัตราการกดกรวยซึ่งเป็นปัจจัยอิทธิพลที่สำคัญตัวหนึ่ง และพบว่าขนาดของแรงต้านที่กรวย (Cone resistance, q_c) จะมีขนาดลดลงเมื่ออัตราการกดน้อยกว่า 2 ซม./วินาที (ซึ่งเป็นอัตราการกดมาตรฐานในการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย) นอกจากนี้ อัตราการกดยังส่งผลต่อขนาดของแรงต้านที่ปลอก (Sleeve friction, f_s) และความดันน้ำส่วนเกินด้วย

Kok (1982) ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราเร็วในการกดกรวยต่อผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย โดยทำการทดสอบกับกรวยแบบกล และแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้อัตราการกด 5 และ 20 มม.ต่อนาที ในพื้นที่ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของกรุงอัมสเตอร์ดัม ซึ่งสภาพชั้นดินเป็นชั้นทราย ปกคลุมด้วยชั้นดินเหนียว จากผลการศึกษาพบว่าค่า q_c ที่วัดได้ไม่มีความแตกต่างกันตามอัตราการกด แต่ค่า q_c ที่วัดได้จากชุดทดสอบแบบกล จะแตกต่างจากค่า q_c ที่วัดได้จากชุดทดสอบแบบอิเล็กทรอนิกส์อย่างชัดเจน

Campanella et al. (1982) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการวัดค่าพารามิเตอร์เนื่องจากอัตราการกดกรวยในการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยที่ต่างกัน โดยทำการทดสอบในสนามกับกรวยแบบอิเล็กทรอนิกส์ พื้นที่ทดสอบอยู่ใกล้สนามบินนานาชาติแวนคูเวอร์ สภาพชั้นดินเป็นดินตะกอนปนดินเหนียว (Clayey silt) อัตราการกดทดสอบอยู่ระหว่าง 0.025 ถึง 2.0 ซม./วินาที ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการกดน้อย

กว่า 0.2 ซม./วินาที จะส่งผลให้แรงดันน้ำทั้งหมดที่วัดได้ลดลง ในขณะที่ q_c และ f_s จะมีค่าเพิ่มขึ้น ผลทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 2.11

Almeida and Parry (1985) ทำการศึกษาถึงผลกระทบของอัตราการกด CPT ที่มีผลต่อค่า q_c ในดินเหนียวประคิษฐ์ โดยทำการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย และ Peizocone ขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ ผลทดสอบพบว่าผลกระทบของอัตราการกดกรวยในดินเหนียวกาลินท์ จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ OCR โดยเฉพาะที่ OCR เท่ากับ 3 และ 10 จะมีผลกระทบเกิดขึ้นน้อยมาก สำหรับในดินเหนียว Gault ที่ OCR มากกว่า 1 แรงดันน้ำที่วัดได้ และค่า q_c จะไม่ได้รับผลกระทบจากอัตราการกดของกรวยที่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก ยกเว้นที่ OCR เท่ากับ 1 ซึ่งแรงดันน้ำจะได้รับผลอิทธิพลของอัตราการกดมากกว่าค่า q_c

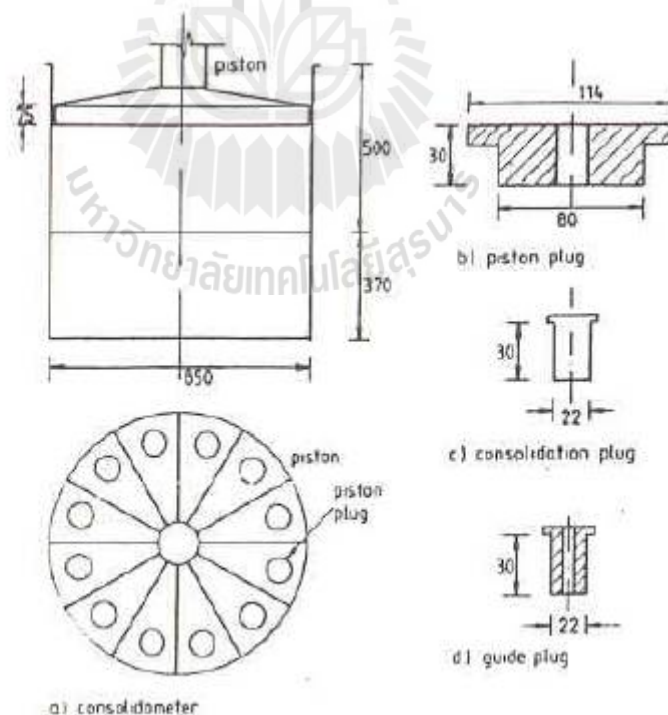


รูปที่ 2.11 อิทธิพลของอัตราการกดกรวยจากการทดสอบของ Campanella et al. (1982)

2.5 อิทธิพลของขนาดของแบบต่อผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย

เป็นที่ทราบดีว่าข้อจำกัดหนึ่งในการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในห้องปฏิบัติการคือปัญหาขอบเขต (Boundary problem) เนื่องจากสภาพดินในสนามมีขอบเขตกว้าง เมื่อนำการทดสอบในสนามมาจำลองในห้องปฏิบัติการที่มีขอบเขตจำกัด ขอบเขตที่ถูกจำกัดนี้ย่อมส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในห้องปฏิบัติการ (Fahey (1980), Parkin and Lunne (1982), Bellotti (1984) และ Parkin (1988)) ซึ่งงานวิจัยในช่วงต้นนี้พบว่าหากทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในดินทรายหลวม สภาพขอบเขตไม่ส่งผลต่อความแตกต่างระหว่างผลทดสอบในสนามและผลทดสอบในห้องปฏิบัติการ แต่ในดินทรายแน่น ความแตกต่างระหว่างผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในสนามและในห้องปฏิบัติการจะแสดงออกอย่างชัดเจน

Almeida and Parry (1985) ทำการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็กในดินเหนียวประดิษฐ์โดยใช้เครื่องมือเตรียมตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 850 ม.ม. ดังแสดงในรูป 2.12 เพื่อกำจัดอิทธิพลของปัญหาขอบเขต Almeida and Parry ทำการทดสอบโดยให้อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างดินและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยมีค่าเท่ากับ 24



รูปที่ 2.12 การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็กของ Almeida and Parry (1985)

ในปี ค.ศ. 1990 Schnaid (Schnaid, 1990) ได้ทำการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในแบบทดสอบขนาดใหญ่ (Calibration chamber) โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยที่ใช้ทดสอบสามขนาดได้แก่ กรวยที่มีขนาดหน้าตัด 15 ตร.ซม. 10 ตร.ซม. และ 5 ตร.ซม. ขณะที่แบบเป็นแบบบรรจุดินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 ม. การทดสอบใช้ดินทรายที่มีความหนาแน่นต่างกันสามค่าคือ ดินทรายที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 30% 65% และ 90% ซึ่ง Schnaid พบว่าอิทธิพลของปัญหาขอบเขตจะมีค่ามากในดินทรายแน่น และทรายแน่นปานกลาง ในขณะที่อิทธิพลของปัญหาขอบเขตจะยังคงอยู่ในดินทรายหลวม แต่มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับผลที่เกิดในดินทรายแน่น และทรายแน่นปานกลาง

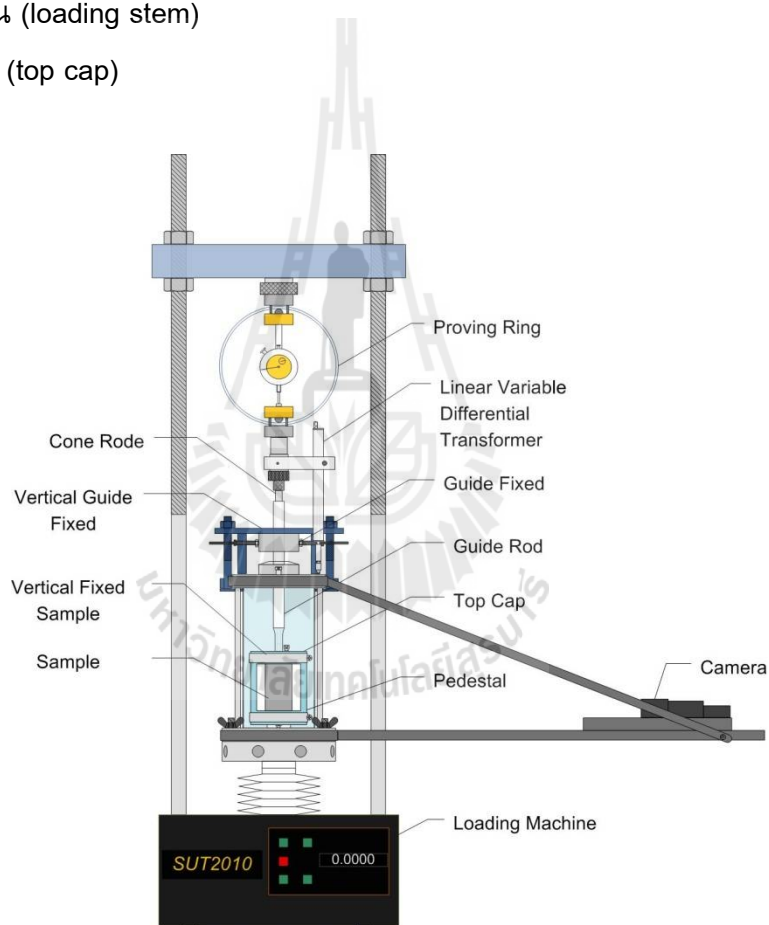
Salgado (1993) พบว่าปัจจัยอิทธิพลที่ส่งผลต่อปัญหาขอบเขตของแบบขนาดใหญ่ในการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในดินทราย ได้แก่ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินทราย อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแบบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวย สภาพวะเริ่มต้นของดินก่อนการทดสอบ รวมทั้งคุณสมบัติข้างประการของดินทราย



3. รายละเอียดของชุดทดสอบการกดกรวยในห้องปฏิบัติการ

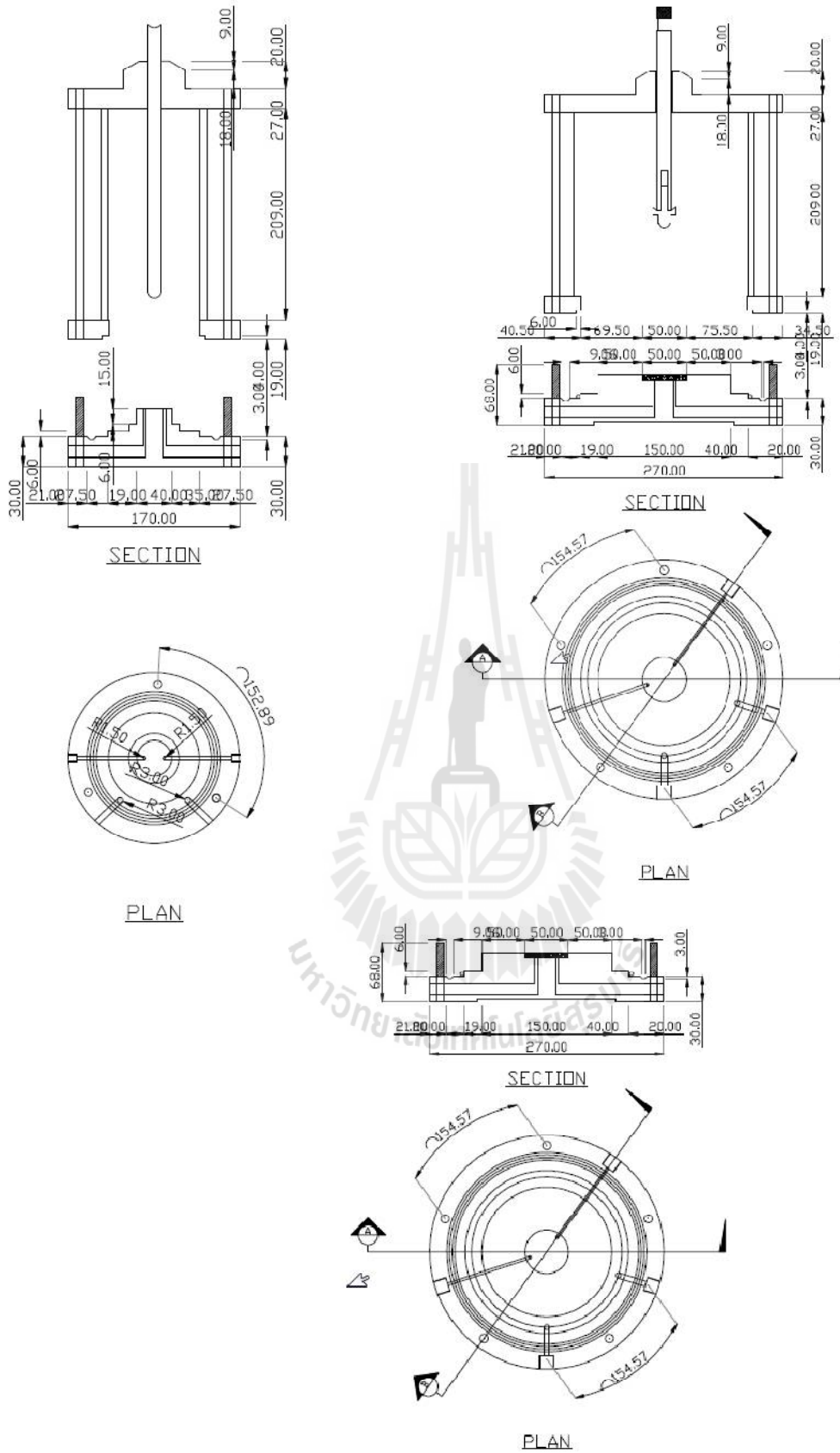
ชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็ก จะทำโดยการปรับปรุงชุดทดสอบแรงอัดสามแกน (triaxial compression test apparatus) ซึ่งชุดทดสอบเมื่อติดตั้งแล้วเสร็จแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยหลักการในการทำชุดทดสอบการทะลุทะลวงขนาดเล็ก คือจะทำการปรับปรุงชุดทดสอบแรงอัดสามแกนให้น้อยที่สุด และต้องไม่เปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ใดๆในชุดทดสอบแรงอัดสามแกน เพื่อให้ชุดทดสอบแรงอัดสามแกนซึ่งมีราคาแพง ยังคงฟังก์ชันการทดสอบแรงอัดสามแกนได้ดังเดิม จากหลักการดังกล่าวผู้วิจัยจึงประดิษฐ์ส่วนประกอบชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็กโดยแยกออกเป็นสามส่วน ได้แก่

- ส่วนฐาน (base)
- แท่งกดด้านบน (loading stem)
- หัวปิดด้านบน (top cap)



รูปที่ 3.1 ภาพร่างเครื่องมือทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในห้องปฏิบัติการ

เซลล์สำหรับบรรจุตัวอย่างดินในชุดทดสอบแรงอัดสามแกนที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีสองขนาดคือเซลล์สำหรับทดสอบดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. และเซลล์สำหรับทดสอบดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. รูปที่ 3.2 แสดงขนาดของเซลล์สำหรับทดสอบแรงอัดสามแกนทั้งสองขนาดแต่หากต้องการใช้แบบทั้งสองขนาดในการทดสอบ



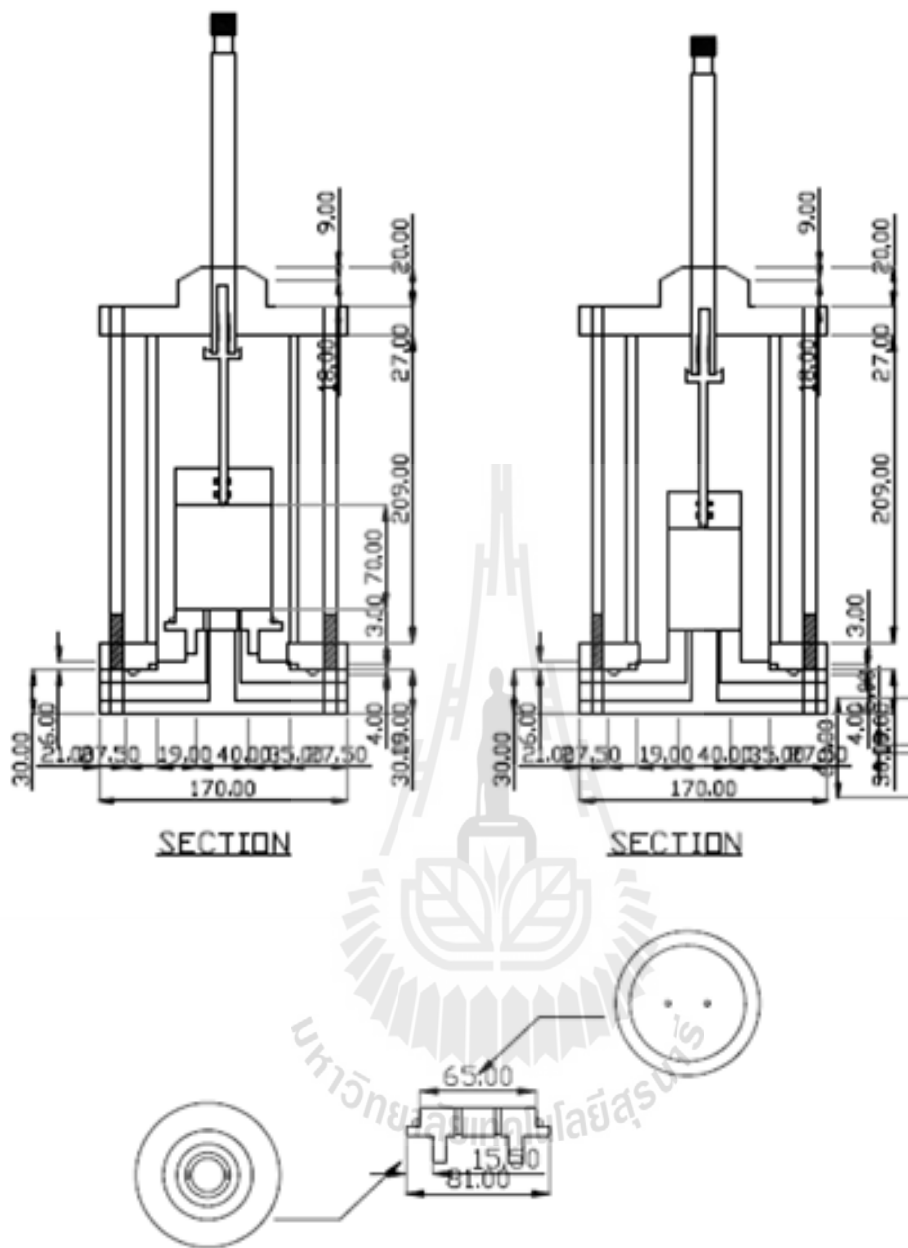
รูปที่ 3.2 ขนาดของเซลล์สำหรับทดสอบแรงอัดสามแกนทั้งสองขนาด

จำเป็นต้องมี loading frame ขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถวางเซลล์สำหรับทดสอบดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. ได้ แต่ในระหว่างดำเนินการวิจัยนั้นห้องปฏิบัติการมี loading frame ที่สามารถใช้ได้กับเซลล์สำหรับทดสอบตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถดำเนินการวิจัยต่อไปได้ ผู้วิจัยจึงดำเนินการปรับปรุงเซลล์สำหรับทดสอบแรงอัดสามแกน เฉพาะเซลล์ที่ใช้กับการทดสอบตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. เท่านั้นโดยมีรายละเอียดแยกตามส่วนดังนี้

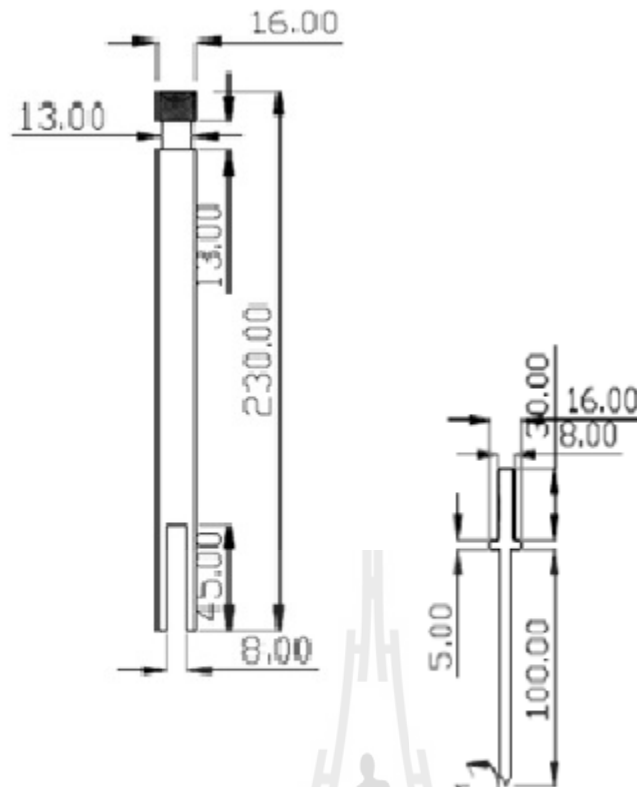
ส่วนฐานจะตัดแปลงฐานเดิมให้น้อยที่สุด หากต้องตัดแปลงจะต้องเป็นลักษณะที่สามารถถอดออกได้เมื่อไม่ใช้งาน เนื่องจากในการทดสอบจะทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างที่แตกต่างกันสองขนาดคือ ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. และตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. สำหรับตัวอย่างขนาด 3.5 ซม. ไม่จำเป็นต้องตัดแปลงใดๆ เนื่องจากเซลล์ที่ใช้ถูกออกแบบมาให้กับตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. อยู่แล้ว ส่วนการทดสอบกับตัวอย่างดินขนาด 5.0 ซม. จะทำการสร้างฐานขึ้นมาประกบกับฐานเดิม เพื่อให้ฐานใหม่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่พอที่จะรองรับตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. ได้รูปที่ 3.3 แสดงการติดตั้งตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. และ ตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. จากรูปจะแสดงให้เห็นว่าฐานของเซลล์สำหรับทดสอบแรงอัดสามแกนเมื่อใช้ตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. จะมีกรอบฐานซึ่งขนาดของกรอบฐานแสดงในรูปที่ 3.3 เช่นกัน

แท่งกดด้านบนจะประดิษฐ์ขึ้นใหม่ โดยมีขนาดและรูปร่างเหมือนกับแท่งเหล็กกดเดิมของชุดทดสอบแรงอัดสามแกน แต่แท่งเหล็กกดที่ทำใหม่นี้จะมีการเจาะรูที่ปลายด้านบนซึ่งสามารถประกบพอดีกับแท่งกรวยขนาดเล็กกรวยซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 มิลลิเมตร ปลายกรวยเป็นมุมแหลมทำมุม 60 องศา ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4

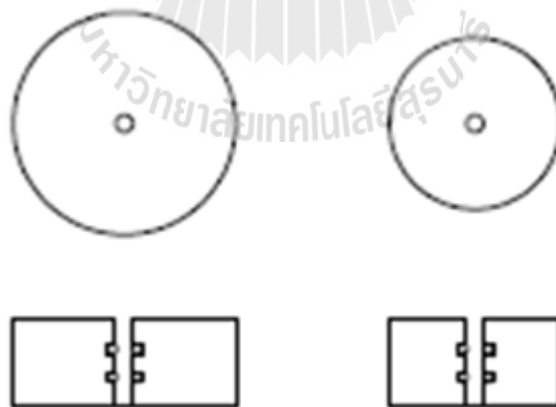
หัวปิดด้านบน แสดงดังรูปที่ 3.5 หัวปิดด้านบนมีลักษณะคล้ายหัวปิดเดิม ของชุดทดสอบแรงอัดสามแกน เพียงแต่หัวปิดด้านบนนี้จะมีการเจาะรูให้ทะลุถึงผิวด้านบนของตัวอย่างดิน โดยแท่งกรวยขนาดเล็กจะถูกกดผ่านรูนี้ และเพื่อกันไม่ให้น้ำในเซลล์ซึมผ่านเข้าตัวอย่างดินผ่านรูนี้ระหว่างการทดสอบ จึงมีการเจาะร่องในรูและใช้โอริง (O-ring) สองชั้นดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงเซลล์สำหรับทดสอบแรงอัดสามแกนซึ่งดัดแปลงมาใช้ทดสอบการทะลุทะลวงกรวย



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงแท่งเหล็กกดและกรวยขนาดเล็กที่ใช้ทดสอบการทะลุทะลวงทราย



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงหัวปิดด้านบนสำหรับตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. และ 5.0 ซม.

บทที่ 4 การทดสอบ

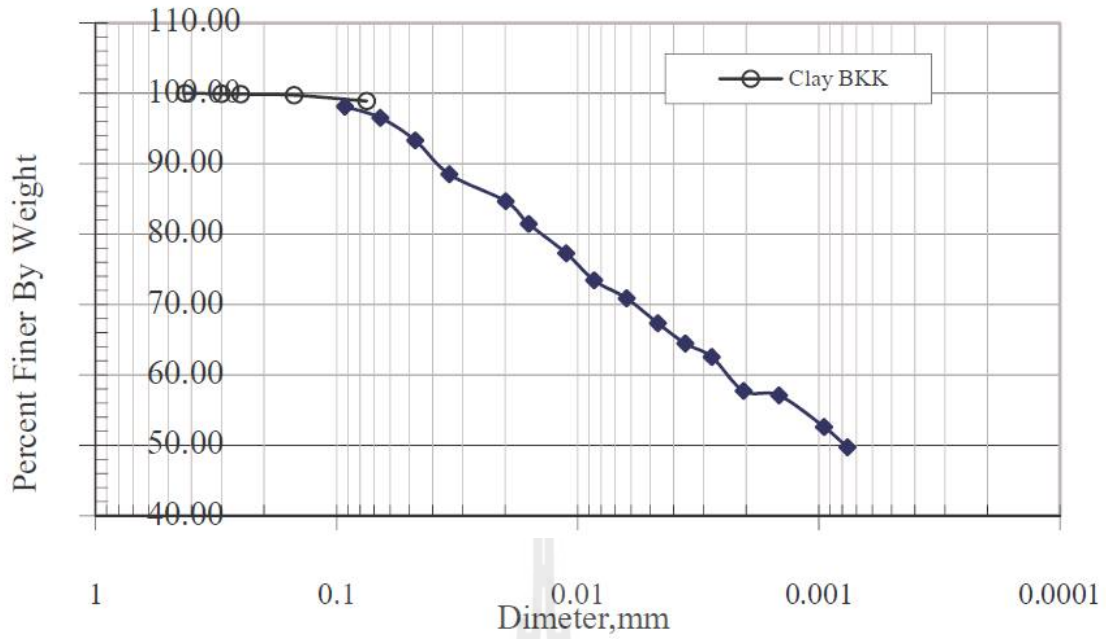
4.1 ดินที่ใช้ในการทดสอบ

ดินที่ใช้ทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้เป็นดินเหนียว ซึ่งเก็บมาจากพื้นที่แจ้งวัฒนะ โครงการก่อสร้างโรงพยาบาลแจ้งวัฒนะเป็นดินเหนียวอ่อน (Soft Clay) โดยเก็บที่ความลึกประมาณ 7-10 เมตร การเก็บดินจะเก็บแบบดินเหนียวแบบแปรสภาพ (Disturbed Sample) แล้วนำมาทำเป็นน้ำโคลน และคัดเอาเศษของเปลือกหอยออก จากนั้นจึงทำการเตรียมตัวอย่างดินจากน้ำโคลนโดยขบวนการอัดตัวคายน้ำเพื่อให้ได้หน่วยแรงคลาก (Maximum pass pressure) ที่แตกต่างกัน สาเหตุที่ต้องทำเช่นนี้เนื่องจากแห่งกรวยในการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดค่อนข้างเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. เท่านั้น) การใช้ดินที่มีเปลือกหอยปนอยู่ตามธรรมชาติ จะเกิดการรบกวนแห่งกรวยขณะกดทดสอบมาก ทำให้ไม่สามารถแปลผลทดสอบได้อย่างแม่นยำ

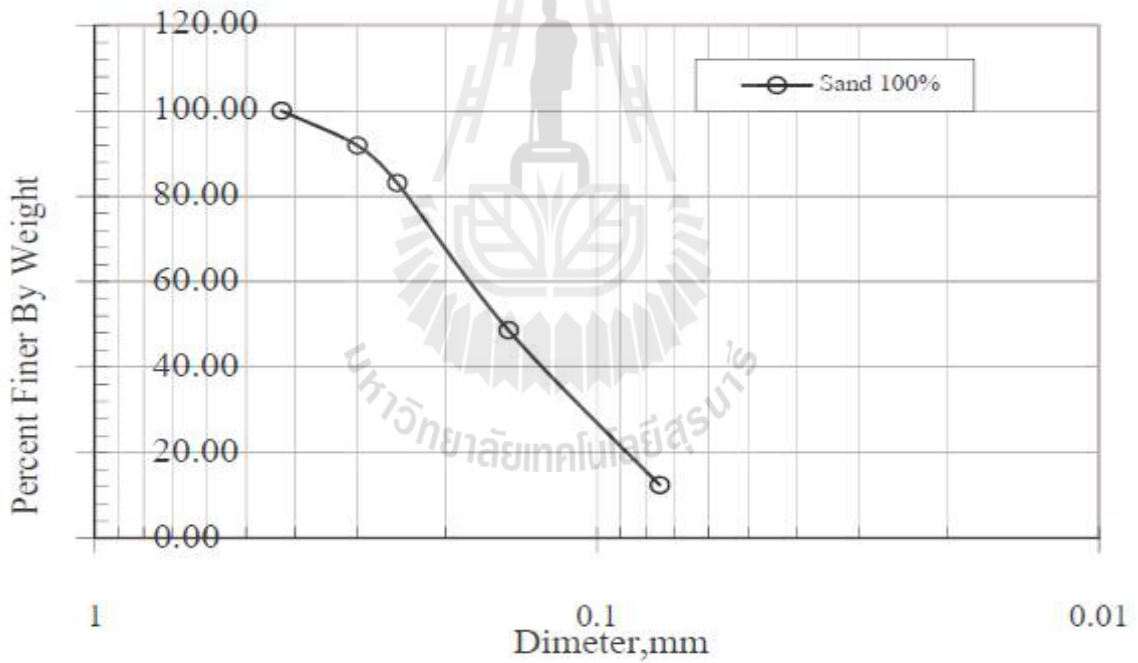
เพื่อความรวดเร็วในการเตรียมตัวอย่าง งานวิจัยนี้จึงทำการผสมทรายละเอียดเข้าดินเหนียว โดยมีสัดส่วนผสม 0% 30% และ 60% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีค่าความเป็นพลาสติกแตกต่างกัน และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำต่างกันด้วย เมื่อนำดินไปทดสอบหาการกระจายขนาด (ASTM D422-63) พิกัดแอดเตอร์เบิร์ก (ASTM D4318) ถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (ASTM D854) สามารถสรุปคุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวกรุงเทพได้ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แสดงการกระจายขนาดของดินเหนียวกรุงเทพ และการกระจายขนาดของดินทรายละเอียดที่นำมาผสม

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวกรุงเทพที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ดินตัวอย่าง	ประเภทดิน USCS	พิกัดแอดเตอร์เบิร์ก			ความถ่วง จำเพาะ
		LL	PL	LI	
BK Caly 100%	CL	74.2	29.0	45.2	2.59
BK Clay + Sand 30%	CL	49.0	17.3	31.3	2.48
BK Clay + Sand 60%	SC	28.7	33.3	15.4	2.69



รูปที่ 4.1a การกระจายขนาดของเม็ดดิน ของดินเหนียวกรุงเทพจากการทดสอบ Hydrometer



รูปที่ 4.1b การกระจายขนาดของดินทรายละเอียดที่นำมาผสมในการเตรียมตัวอย่างดิน

4.2 การเตรียมตัวอย่างดินเพื่อใช้ทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย

เมื่อทำการคัดเปลือกหอยออกจากน้ำโคลนของดินเหนียวกรุงเทพแล้ว จะทำการขึ้นรูปดินเหนียวใหม่ โดยนำน้ำโคลนไปผ่านขบวนการอัดตัวคายน้ำ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกประสิทธิผลที่กำหนดเพื่อให้ได้ตัวอย่างดินเหนียวอัดตัวตามปกติ (Normally consolidated clay) หรือ NC Clay

เนื่องจากขบวนการขึ้นรูปดินเหนียวใหม่นี้ ต้องการแบบขนาดใหญ่สำหรับขบวนการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องจัดทำชุดทดสอบสำหรับขบวนการอัดตัวคายน้ำในแบบขนาดใหญ่ขึ้นมา โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 เครื่องมือเตรียมตัวอย่างดิน

เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบนี้จะใช้โครงถ่าน้ำหนัก และแม่แรงกระบอกไฮดรอลิก (Hydraulic jack) ในการให้น้ำหนักบรรทุก การระบายน้ำจะใช้แผ่นใยสังเคราะห์โดยติดตั้งทั้งในแนวตั้งและแนวราบ เพื่อเร่งการระบายน้ำให้เร็วที่สุด

ก. แบบใส่ตัวอย่างดิน (Large Consolidation Cell)

ทำจากเหล็กหนา 5 มม. เป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 ซม. สูง 50 ซม. และมี Dial gage เพื่อใช้วัดการอัดตัวทั้งสองข้างและมีหูสองข้างเพื่อไว้ใช้ในการเคลื่อนย้าย

ข. แผ่นโลหะถ่าน้ำหนัก (Top Cap)

แผ่นโลหะถ่าน้ำหนักมีความหนา 5 มม. มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 29.6 ซม. และมีแผ่นน้ำหนักรวมวางซ้อนให้สูงกว่าแบบใส่ตัวอย่าง

ค. แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile)

ทำหน้าที่ระบายน้ำ ใช้แทน Porous Stone โดยจะหุ้มแผ่นใยสังเคราะห์รอบตัวอย่างด้านข้างทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อให้น้ำซึมผ่านได้ทุกทิศทาง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ห่อหุ้มน้ำโคลนไม่ให้ไหลออกจากแบบใส่ตัวอย่างดิน

ง. โครงถ่าน้ำหนัก (Loading Frame)

เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการค่อนข้างมาก โครงถ่าน้ำหนักจึงมีขนาดใหญ่โดยใช้เหล็ก Wide flange เป็นโครงรับน้ำหนัก และมีแม่แรงกระบอกไฮดรอลิกทำหน้าที่ส่งแรงกดทับมาที่ตัวอย่างดิน

4.2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

ก. การเตรียมตัวอย่างดินเหลว

เนื่องจากดินที่เก็บมาจากสนามนี้ยังไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีเปลือกหอยอยู่เป็นจำนวนมากจึงจำเป็นต้องมีการคัดแยกเปลือกหอยออกให้หมดโดยการเติมน้ำเข้าไป โดยกำหนดให้ดินมีความชื้น (water content) สูงกว่า 150% หลังจากนั้นใช้เครื่องปั่นปั่นดินและน้ำให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงคัดแยกเศษเปลือกหอยโดยใช้ร่อนผ่านตะแกรง

ข. การอัดตัวคายน้ำ

หลังจากการคัดแยกดินเรียบร้อยแล้วนำน้ำโคลนที่ได้มาเทลงในแบบใส่ตัวอย่างดิน (Consolidation Cell) ให้ได้ความสูงตามต้องการ ก่อนจะเทน้ำโคลนให้หน้าแผ่นใยสังเคราะห์มารองรอบๆแบบใส่ตัวอย่างดิน โดยกะให้ด้านข้างแผ่นใยสังเคราะห์อยู่เลยผิวของน้ำโคลนที่จะเทเล็กน้อย พับแผ่นใยสังเคราะห์ด้านข้างให้มีขนาดเท่าความสูงของน้ำโคลน เพื่อไม่ให้น้ำโคลนไหลผ่านช่องว่างออกมา รูปที่ 4.2 แสดงการวางแผ่นใยสังเคราะห์ก่อนเทน้ำโคลนลงในแบบใส่ตัวอย่างดิน เมื่อเทน้ำโคลนเสร็จแล้วให้คลุมด้านบนด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ แล้วจึงวางแผ่นถ้ำน้ำหนักลงด้านบน รูปที่ 4.3 แสดงภาพร่างการเตรียมดินลงในแบบ

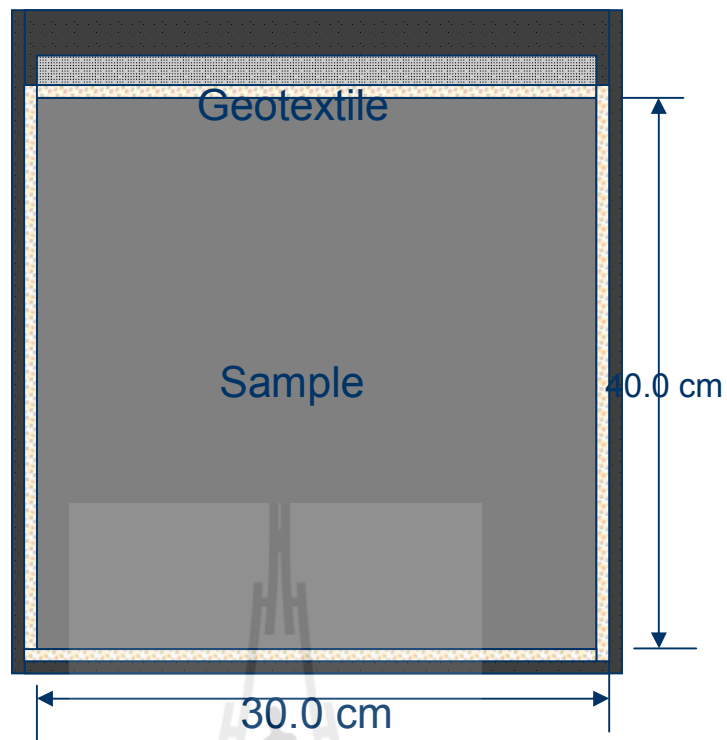
หลังจากนั้นจะทำการติดตั้งแบบที่บรรจุน้ำโคลนเข้ากับ Loading Frame โดยพยายามให้แนวกระทำน้ำหนักได้ศูนย์กลาง จากนั้นติดตั้ง Dial gauge สองตำแหน่ง เพื่อใช้วัดการทรุดตัวเทียบกับเวลา เมื่อติดตั้งเสร็จจะมีลักษณะแสดงรูปที่ 4.4 ทำการบันทึกค่าการทรุดตัวเทียบกับเวลา จนถึงสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 วัน โดยช่วงทำการทดสอบนี้จะเติมน้ำให้ท่วมตัวอย่างอยู่ตลอดเวลา ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาที่อ่านได้จาก Dial gauge ทั้งสองตัวแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.2 แสดงการวางแผ่นใยสังเคราะห์ก่อนเทน้ำโคลนลงในแบบใส่ตัวอย่างดิน

ค. การเก็บตัวอย่าง

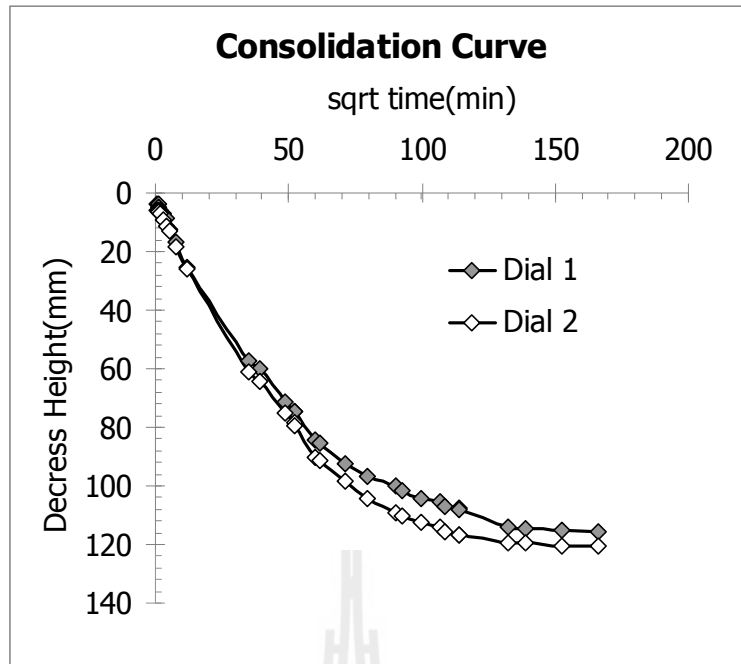
หลังจากสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำแล้ว ใช้ผ้าซับน้ำที่ยังหลงเหลือออกให้หมด แล้วทำการเก็บตัวอย่างโดยใช้กระบอกเก็บตัวอย่างผิวบาง (Shelby Tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 มม. และสูงประมาณ 10 มม. ดันตัวอย่างดินออกแล้วนำไปหุ้มด้วย Waxed paper และเคลือบด้วยพาราฟินเพื่อเก็บไว้ทดสอบในขั้นต่อไป รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างดินที่เคลือบด้วยพาราฟินแล้ว



รูปที่ 4.3 ภาพร่างการเตรียมดินลงในแบบเพื่อให้ผ่านการอัดตัวคายน้ำ



รูปที่ 4.4 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำในแบบขนาดใหญ่



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาที่หน่วยแรงกดทับเท่ากับ 1 ksc



รูปที่ 4.6 ดินตัวอย่างทดสอบที่เตรียมขึ้นมาใหม่ (Remolded Clay)

ง. ทดสอบหาค่ารับแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำ

นำดินที่จากขั้นตอนก่อนหน้า มาทดสอบเพื่อหาค่ารับแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำ โดยทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated Undrained Test, ASTM D2850) การทดสอบแสดงดังรูปที่

4.7 แสดงการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ



รูปที่ 4.7 การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ

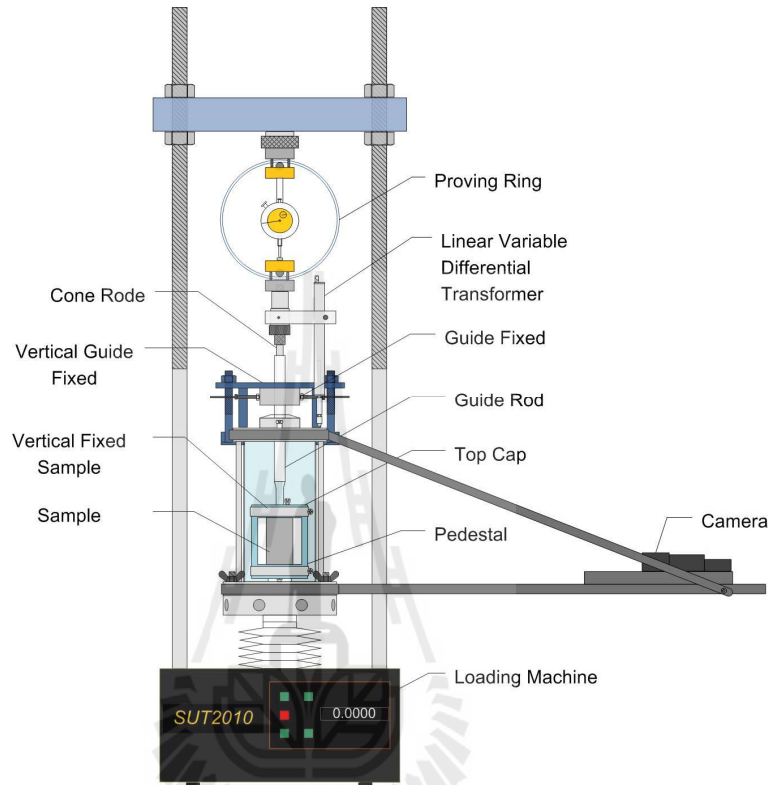
4.3 การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็ก

การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยกับชุดทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Testing Machine) พร้อมติดตั้งกล้อง CCD (ดูรูปที่ 4.8) เพื่อใช้ในการกราฟฟิค เช่น ตรวจสอบพฤติกรรมการเสียรูปขณะที่กรวยถูกดันลงไปที่ระดับความลึกต่างๆ การวัดค่าการทะลุทะลวงของกรวยจะวัดเป็นแรงต้านการทะลุทะลวง และระยะทะลุทะลวงของกรวย ซึ่งสามารถนำไปแปลงเป็นค่าแรงด้านที่ปลายกรวย (q_c) และความเสียดทานที่ปลอก (f_s) ได้ ขึ้นในการทดสอบสามารถแจกแจงโดยละเอียดได้ดังต่อไปนี้

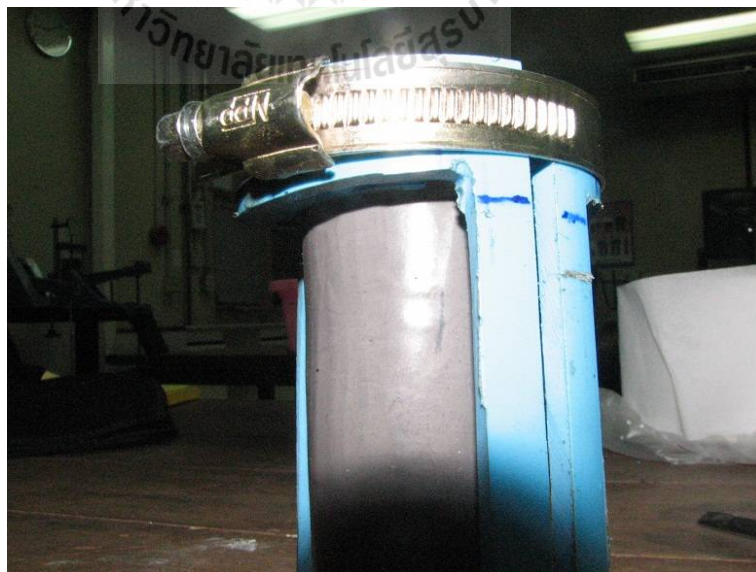
4.3.1 การเตรียมตัวอย่าง และการติดตั้ง

นำดินที่เตรียมไว้ดังรูปที่ 4.6 มาแต่งให้เป็นรูปทรงกระบอกด้วยโครงแต่งตัวอย่าง (Trimming frame) ให้ได้ขนาดตามต้องการคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มม. สูง 70 มม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 70 มม. จากนั้นวัดขนาดตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่น เก็บเศษดินที่ตัดออกระหว่างแต่งตัวอย่างไปหาความชื้น ใส่ Top cap ที่กลิ้งรูไว้ที่ด้านบนของตัวอย่าง

รัด O-ring ที่ปลายทั้งสองด้านบนล่าง แล้วประกอบตัวอย่างอย่างเข้ากับตัวยึดแนวตั้ง และหมุน
 ปลอกเกลียวให้แน่น ดังรูปที่ 4.9 ตัวยึดแนวตั้งทำหน้าที่ยึดตัวอย่างดินไม่ให้ยุบลงเมื่อทำการกดกรวยลง
 ในตัวอย่างดิน หากต้องการวัดการเสียรูปเชิงปริมาตร จะทำการกำหนดจุดที่จะตรวจวัดการเคลื่อนตัวดังรูป
 ที่ 4.10 เมื่อเตรียมตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำไปติดตั้งใน Triaxial cell แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 ภาพร่างเครื่องมือทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในห้องปฏิบัติการ

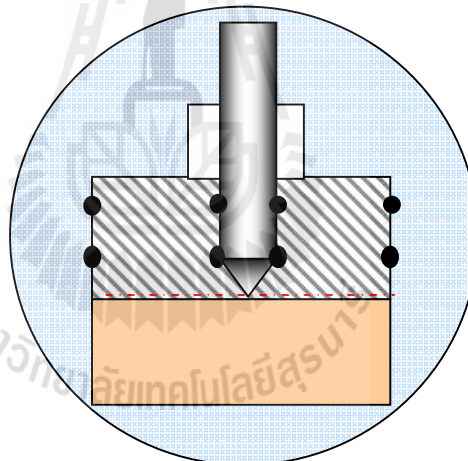


รูปที่ 4.9 ดินตัวอย่างที่รัดด้วยตัวยึดในแนวตั้ง



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างดินที่พร้อมสำหรับการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย

นำตัวอย่างที่ประกอบเรียบร้อยแล้ววางบนฐาน ใส่ที่ครอบเซลล์ ใส่ Guide Rod และ แท่งกรวย (Cone Rod) ในฝาครอบเซลล์ให้ได้ศูนย์กลาง แล้วดันแท่งกรวยเข้าไปในฝา Top cap ที่กึ่งสูงไว้ โดยให้ปลายกรวยอยู่ที่ผิวตัวอย่างพอดี ส่วนปลาย Guide Rod จะอยู่ตรงด้านบนของ Top cap ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งปลายกรวยต่อตัวอย่างดิน

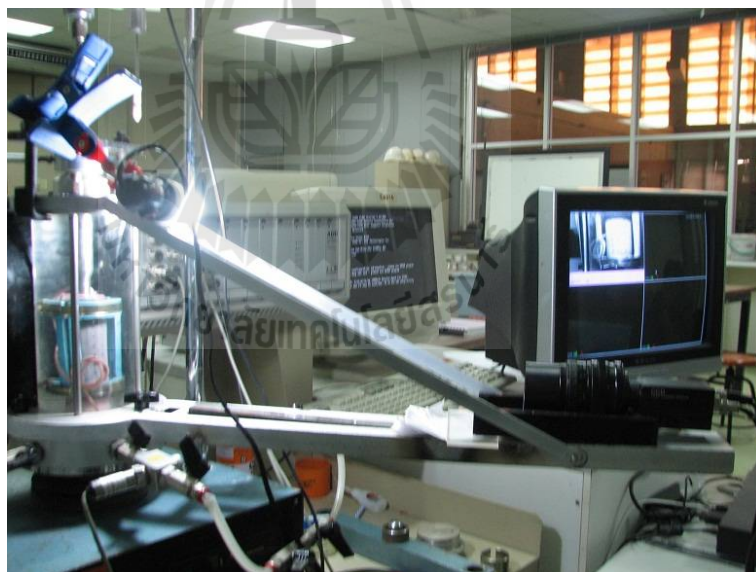
รูปที่ 4.12 แสดงรูปถ่ายเมื่อประกอบชุดทดสอบเสร็จ หากต้องการบันทึกการทดสอบด้วยกล้อง CCD ให้ประกอบที่ยึดกล้อง แล้วจัดตำแหน่งให้ได้ตามต้องการดังรูปที่ 4.13

ติดตั้งเซลล์เข้ากับ Proving ring ดัน Loading frame ให้ปลาย Proving ring พอดีแตะ Cone Rod คลายเกลียวโล่อากาศด้านบน ปล่อยน้ำเข้าในเซลล์ให้เต็ม หมุนเกลียวโล่อากาศให้แน่น ปิดวาล์วน้ำด้านบน หลังจากนั้นจะเพิ่มความดันรอบตัวอย่างดิน (Confining pressure) ในที่นี้ใช้ความดันเท่ากับ 200 kPa ตลอดการทดสอบ เนื่องจากเป็นการทดสอบกับดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำ และทดสอบกดกรวยในสภาพไม่ระบายน้ำ ดังนั้นความดันรอบตัวอย่างดินจึงไม่มีผลต่อผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย ใดๆก็ตามตามความดันน้ำใน Triaxial cell จะออกแรงต้านการกดกรวย โดยแรงต้านนี้จะแปรตามขนาด

ของความดันน้ำใน Triaxial cell ดังนั้นก่อนทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยจึงต้องทำการสอบเทียบกรวยก่อน ภายใต้อุณหภูมิและความดันน้ำที่เท่ากับค่าที่จะทดสอบจริง



รูปที่ 4.12 การติดตั้งชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย



รูปที่ 4.13 การติดตั้งกล้อง CCD

4.3.2 การสอบเทียบกรวย และการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย

การสอบเทียบกรวยทำการทดสอบเหมือนการกดกรวย คือทำการกดแท่งกรวยให้จมลึกลงไปใน Triaxial cell สำหรับชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นจะให้แท่งกรวยมีระยะเคลื่อนจากการกดเท่ากับ 45 มม. ในระหว่างที่แท่งกรวยจมลงให้บันทึกน้ำหนักที่กระทำต่อแท่งกรวยจาก proving ring กับระยะทะลุทะลวง

โดยในการสอบเทียบกรวยนี้จะทำการทดสอบโดยไม่ใช้ตัวอย่างดิน แต่จะมีกระบอกที่มีรูกรวงมาเป็น
แทนวางหัว Top cap ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การติดตั้งตัวอย่างเพื่อสอบเทียบน้ำ

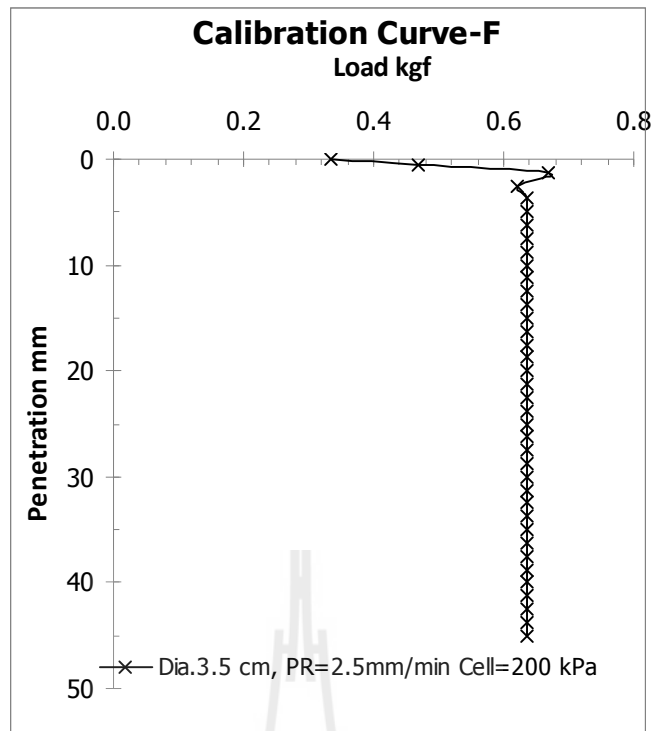
แรงที่ใช้ในการดันแท่งกรวยเกิดจากแรงเสียดทานระหว่าง O-Ring กับแท่งกรวย ซึ่งเกิดจากการ
บีบรัดของ O-Ring ที่ติดตั้งใน Top Cap โดยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นหาจากสมการที่ 4.1

$$f = F - \sigma_c A_c \quad (4.1)$$

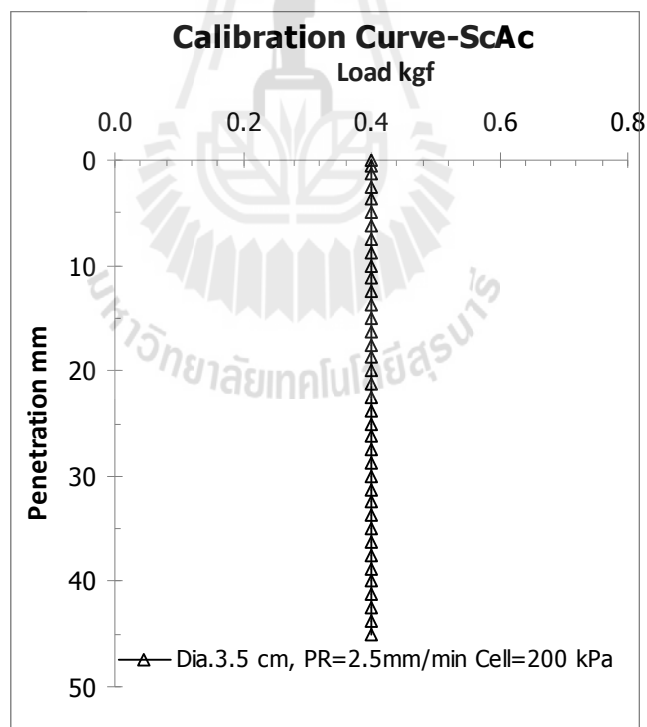
เมื่อ

- f แรงเสียดทานระหว่าง O-Ring กับแท่งกรวย
- F แรงที่ใช้ในการดันแท่งกรวย (อ่านได้จาก Proving Ring)
- σ_c ความดันใน Triaxial cell
- A_c พื้นที่หน้าตัดปลายกรวย

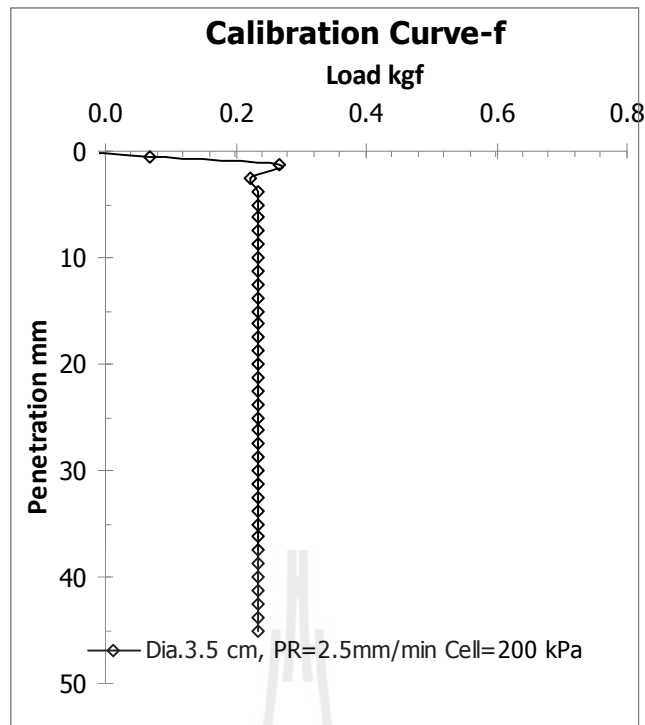
การทดสอบจะใช้ความดันรอบข้างเท่ากับการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยลงในตัวอย่างดิน
เหนียว (ในรายงานวิจัยนี้ใช้ 200 kPa) รูปที่ 4.15 แสดงขนาดของแรงที่ใช้ในการดันแท่งกรวย (F) ตาม
ระยะที่กรวยถูกดันลงไป จากรูปแรง F มีค่าคงที่ตลอดความลึกเท่ากับ 0.63 kgf รูปที่ 4.16 แสดงค่า
 $\sigma_c A_c$ ตามระยะที่ดันแท่งกรวย จากรูป $\sigma_c A_c$ เท่ากับ 0.40 kgf และรูปที่ 4.17 แสดงแรงเสียดทาน (f)
ตามระยะที่แท่งกรวยถูกดันซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.23 kgf



รูปที่ 4.15 แสดงขนาดของแรงที่ใช้ในการดันแท่งกรวย (F) ตามระยะที่กรวยถูกค้ำลงไป



รูปที่ 4.16 แสดงค่า $\sigma_c A_c$ ตามระยะที่ดันแท่งกรวย



รูปที่ 4.17 แสดงแรงเสียดทาน (f) ตามระยะที่แทงกรวยถูกค้น

สำหรับการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็กกับเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนในตัวอย่างดินเหนียว จะทดสอบที่อัตราเร็วการกดที่ต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.25 มม./นาที่ 0.50 มม./นาที่ 1.0 มม./นาที่ และ 5.0 มม./นาที่ ขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะมีสองขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มม. สูง 70 มม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 70 มม. การทดสอบการกดกรวยนี้สามารถบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างที่ระยะทะลุทะลวงต่างๆ ได้ โดยต่อกล้อง CCD ดังรูปที่ 4.13

ผลการทดสอบการกดกรวยขนาดเล็กในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน สามารถนำไปแปลค่าเพื่อหาหน่วยแรงต้านทานปลายกรวย (q_c) และแรงเสียดทานที่ปลอก (f_s) โดยอ่านได้จากเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมต้านทานปลายกรวยกับระยะทะลุทะลวงของกรวยดังรูปที่ 4.18

$$Q_{total} = Q_c + Q_s \quad (4.2)$$

$$X = \frac{-C + Y}{M} \quad (4.3)$$

$$Y = MX + C \quad (4.4)$$

$$f = F + \sigma_c A_c \quad (4.5)$$

โดยที่

Q_{total} แรงต้านทานรวม (Total Cone Resistance)

Q_c แรงต้านทานปลายกรวย = $-\frac{C}{M}$

Q_s แรงเสียดทานที่ปลอก $\frac{Y}{M}$

M ความชันของกราฟ

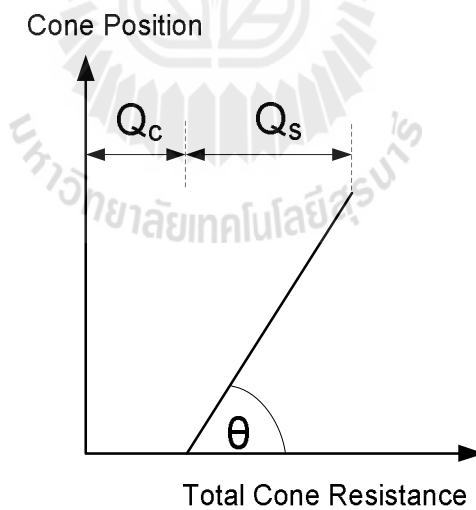
$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad (4.6)$$

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s} \quad (4.7)$$

โดยที่

A_c = พื้นที่หน้าตัดกรวย

A_s = พื้นที่ผิวปลอกที่สัมผัสกับดิน



รูปที่ 4.18 การหา Q_c และ Q_s จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมต้านทานกับระยะทะลุทะลวงของกรวย

บทที่ 5 ผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย

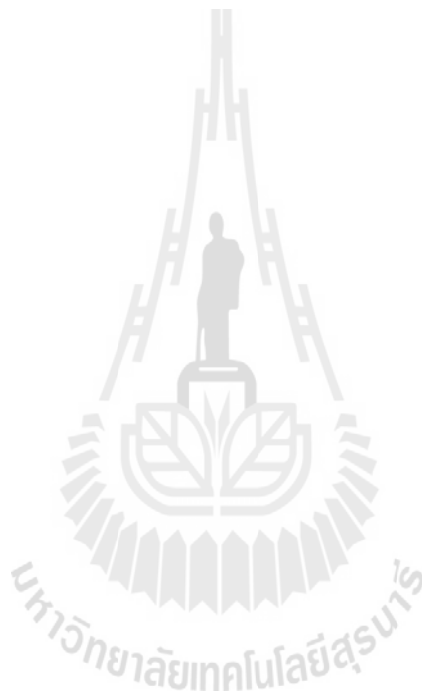
5.1 ผลทดสอบทั่วไป

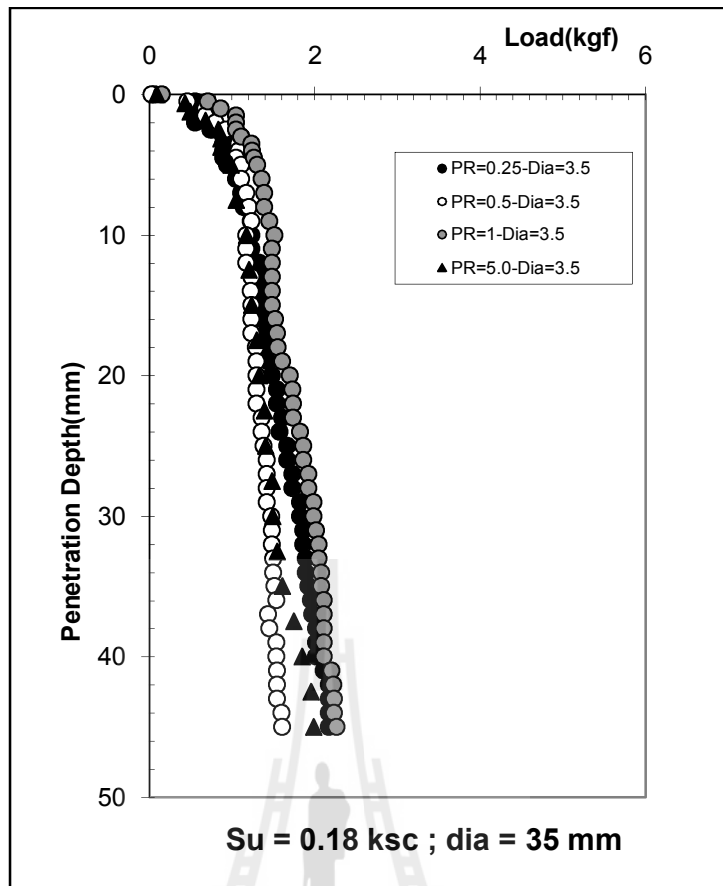
ผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ที่อัตราเร็วการทะลุทะลวงต่างๆแสดงดังรูปที่ 5.1a รูปที่ 5.1b และรูปที่ 5.1c โดยรูปที่ 5.1a แสดงแรงต้านการกดกรวยกับระยะทะลุทะลวง รูปที่ 5.1b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานระหว่างดินกับปลอกเหล็ก (f_s) กับอัตราเร็วการกดกรวยลงไปในตัวอย่างดิน และรูปที่ 5.1c แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านปลายกรวย(q_c) กับอัตราเร็วการกดกรวยลงไปในตัวอย่างดินจากรูปที่ 5.1b พบว่าค่า f_s มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วการกดแต่กลับเพิ่มขึ้นที่อัตราเร็วการกด 5 มม./นาที่ ทั้งนี้พบว่าหากอัตราเร็วการกดเพิ่มขึ้นจาก 0.25 มม./นาที่ เป็น 1.0 มม./นาที่ ค่า f_s จะมีค่าลดลงอย่างมาก และค่า f_s มีการลดลงถึง 40% เมื่ออัตราการกดเพิ่มจาก 0.25 มม./นาที่ เป็น 1.0 มม./นาที่ การเพิ่มขึ้นอีกครั้งของค่า f_s เมื่ออัตราเร็วการกดเท่ากับ 5.0 มม./นาที่ เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า f_s ตามอัตราเร็วการกดแล้ว การเพิ่มขึ้นอีกครั้งของค่า f_s ที่อัตราเร็วการกดเท่ากับ 5.0 มม./นาที่ เมื่อพิจารณาค่า q_c จากรูปที่ 5.1c พบว่าค่า q_c มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วการกดแต่กลับลดลงที่อัตราเร็วการกด 5 มม./นาที่ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า q_c ตามอัตราเร็วการกดแล้ว ค่า q_c ควรจะมีค่าลดลงตามอัตราเร็วการกด การที่ q_c มีค่าเพิ่มขึ้น จึงน่าจะเกิดจากอิทธิพลของตัวอย่าง โดยเฉพาะอิทธิพลของขอบเขต (boundary conditions) รวมกับกำลังของตัวอย่างซึ่งมีค่าต่ำกว่าช่วงทดสอบที่เหมาะสม

ผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. ที่อัตราเร็วการทะลุทะลวงต่างๆแสดงดังรูปที่ 5.2a รูปที่ 5.2b และรูปที่ 5.2c โดยรูปที่ 5.2a แสดงแรงต้านการกดกรวยกับระยะทะลุทะลวง รูปที่ 5.2b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานระหว่างดินกับปลอกเหล็ก (f_s) กับอัตราเร็วการกดกรวยลงไปในตัวอย่างดิน และรูปที่ 5.2c แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านปลายกรวย(q_c) กับอัตราเร็วการกดกรวยลงไปในตัวอย่างดิน ผลทดสอบแสดงการลดลงของความเสียดทานระหว่างดินกับปลอกเหล็ก (f_s) ตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วการกดอย่างชัดเจน (ดูรูป 5.2a และ 5.2) และเป็นที่น่าสังเกตว่า สำหรับตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. ค่า f_s จะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่ออัตราเร็วการกดสูงกว่า 1.0 มม./นาที่ เมื่อพิจารณาค่า q_c จากรูปที่ 5.2c พบว่าค่า q_c มีค่าลดลงตามอัตราเร็วการกดที่เพิ่มขึ้น และกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่อัตราเร็วการกด 5 มม./นาที่ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่า q_c ตามอัตราเร็วการกดแล้ว ค่า q_c ควรจะมีค่าลดลงตามอัตราเร็วการ

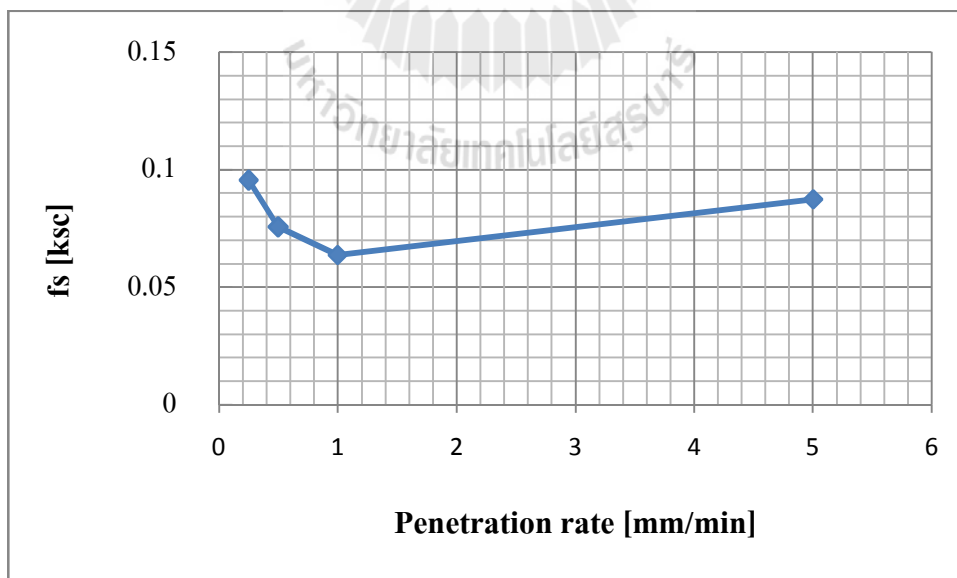
กค การที่ q_c มีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่อัตราเร็วการกค 5.0 มม./นาที จึงว่าน่าจะเป็นเกิดจากอิทธิพลของตัวอย่าง โดยเฉพาะอิทธิพลของขอบเขต (boundary conditions) ร่วมกับกำลังของตัวอย่างซึ่งมีค่าต่ำกว่าช่วงทดสอบที่เหมาะสม

เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้ในดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายก่อนข้างต่ำ (เพียง 0.18 ksc) และเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนของค่า f_s และ q_c ตามอัตราเร็วการกคกรวย พบว่าตัวอย่างดินขนาดใหญ่จะให้ผลทดสอบที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามยังพบค่าผิดพลาดในการทดสอบจากตัวอย่างดินขนาดใหญ่ โดยเฉพาะค่า q_c ที่อ่านได้ที่อัตราเร็วการกคสูงๆ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าชุดทดสอบการกคกรวยขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้นนี้ไม่เหมาะกับการใช้ทดสอบกับดินที่มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายต่ำเกินไป

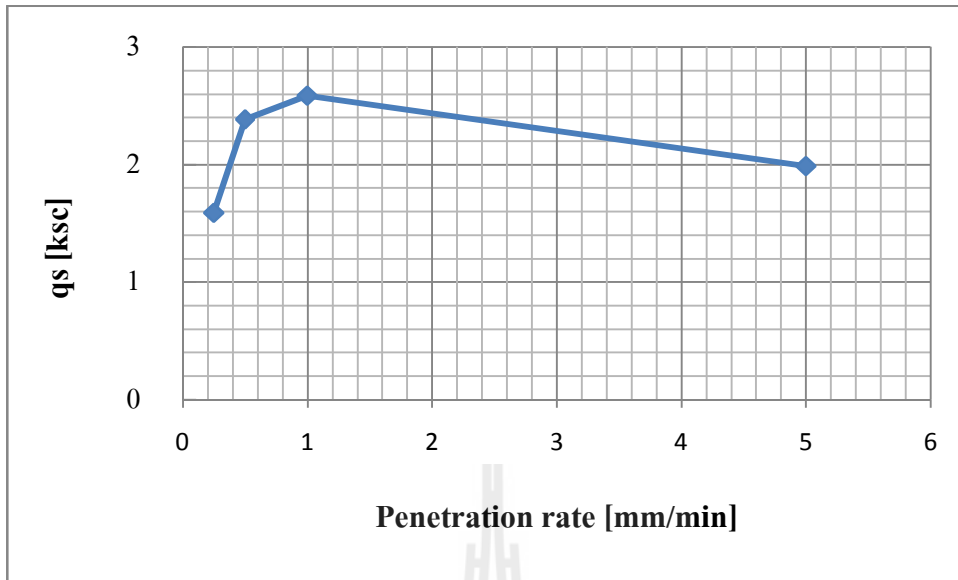




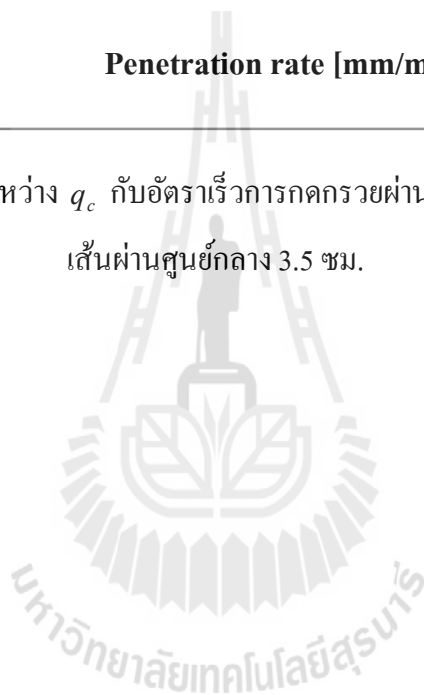
รูปที่ 5.1a แสดงผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

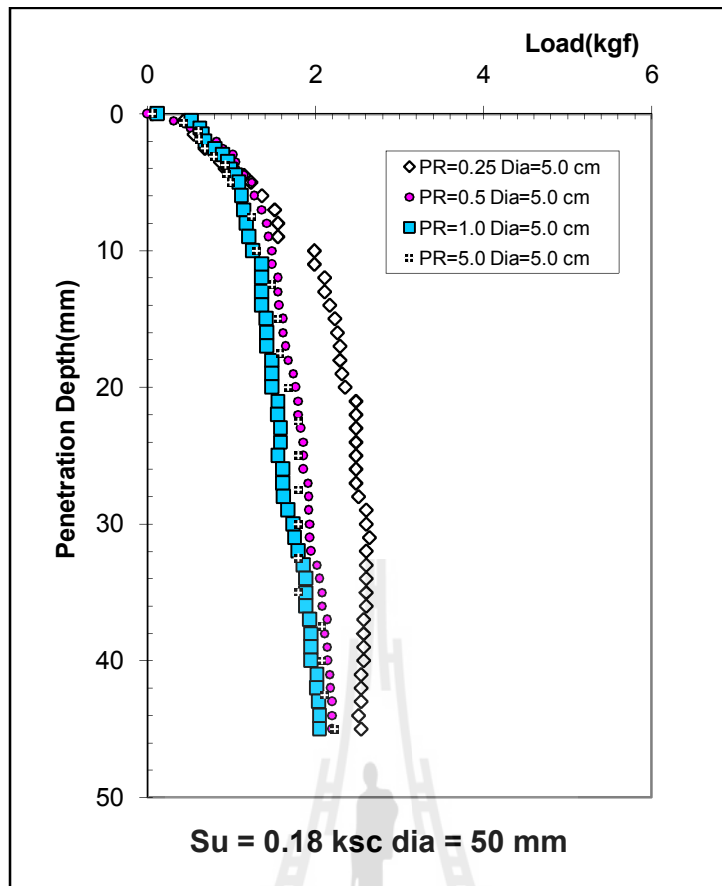


รูปที่ 5.1b แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับอัตราเร็วการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

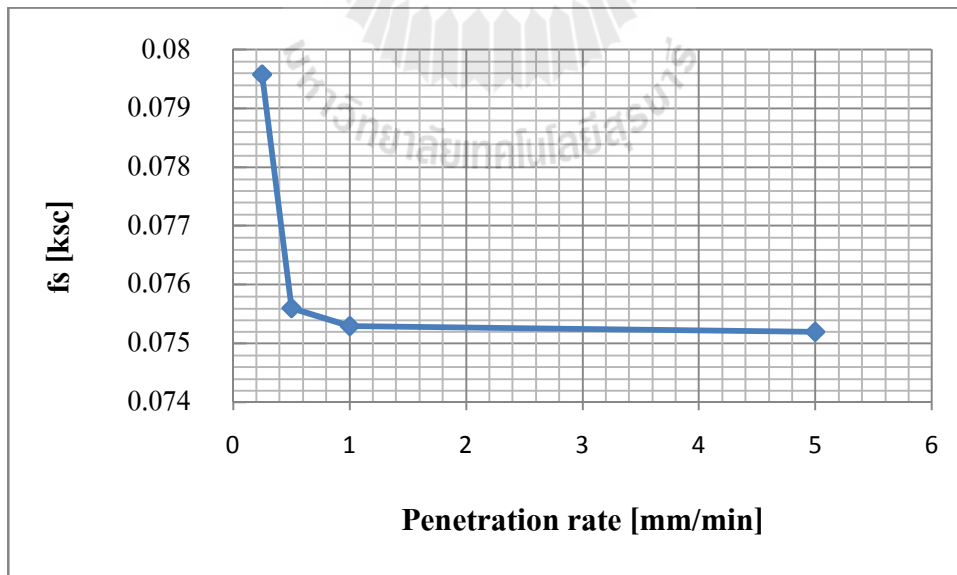


รูปที่ 5.1c แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_c กับอัตราเร็วการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

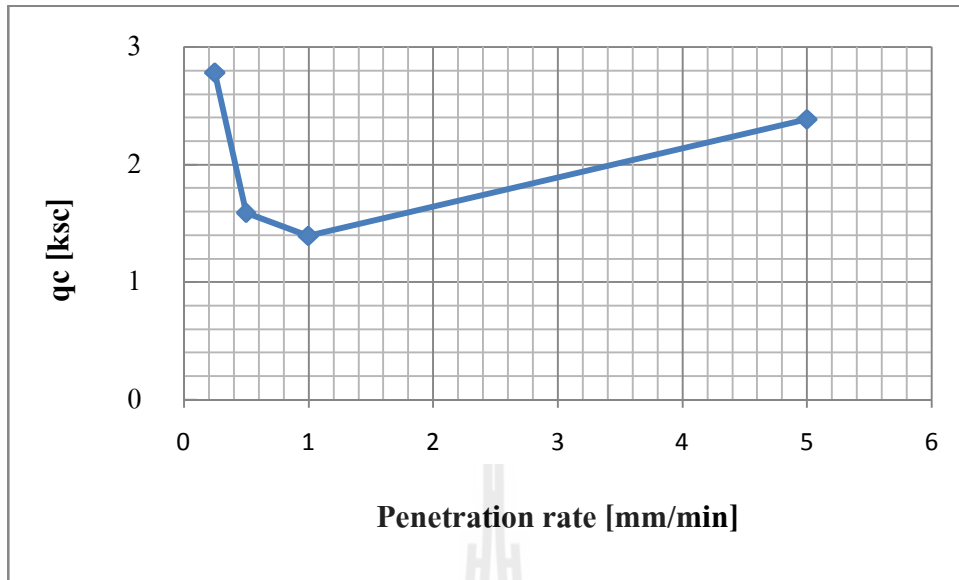




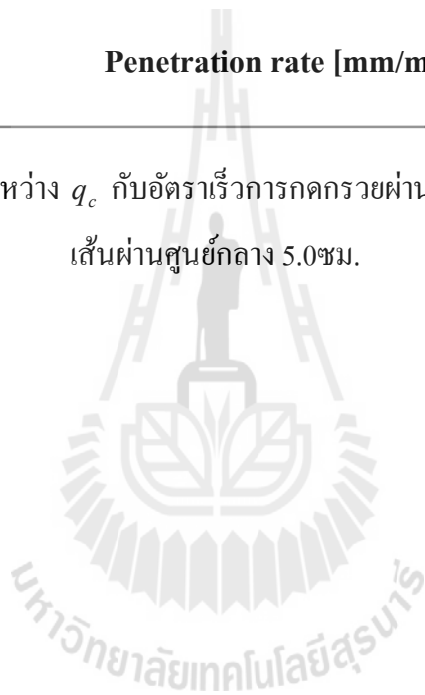
รูปที่ 5.2a แสดงผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



รูปที่ 5.2b แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับอัตราเร็วการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



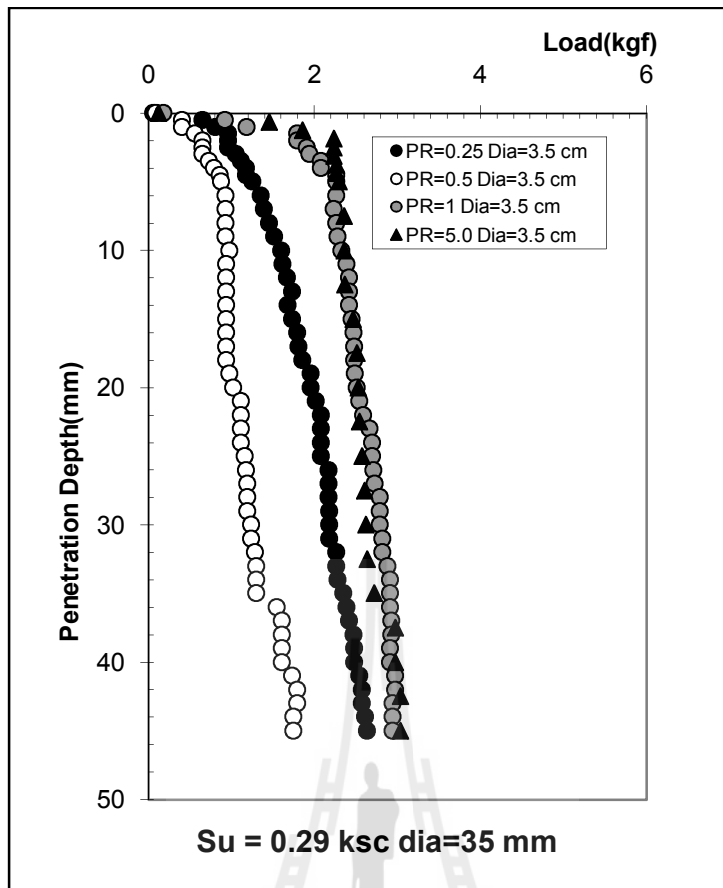
รูปที่ 5.2b แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_c กับอัตราเร็วการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



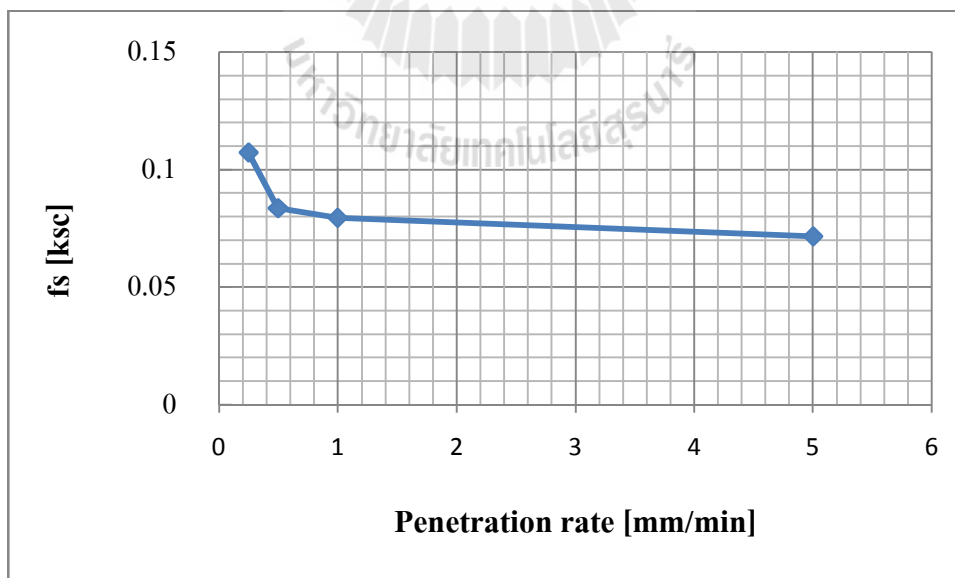
ผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพมหานครละเอียด 30% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ที่อัตราเร็วการทะลุทะลวงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.3a รูปที่ 5.3b และรูปที่ 5.3c โดยรูปที่ 5.3a แสดงแรงต้านการกดกรวยกับระยะทะลุทะลวง รูปที่ 5.3b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานระหว่างดินกับปลอกเหล็ก (f_s) กับอัตราเร็วการกดกรวยลงไปในตัวอย่างดิน และรูปที่ 5.3c แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านปลายกรวย (q_c) กับอัตราเร็วการกดกรวยลงไปในตัวอย่างดิน เมื่อพิจารณาความเสียดทานระหว่างดินกับปลอกเหล็ก (f_s) ดังรูปที่ 5.3b จะพบว่ามีการลดลงของ f_s เมื่ออัตราเร็วการกดมีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่าที่อัตราการกดมากกว่า 1.0 มม./นาทิจำให้ค่า f_s เริ่มคงที่ แต่เมื่อลดอัตราการกดลงน้อยกว่า 1 มม./นาทิจำขนาดของ f_s จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอัตราการกดที่ลดลง เมื่อพิจารณาค่า q_c จากรูปที่ 5.3c พบว่าค่า q_c มีแนวโน้มไม่แน่นอน จึงว่าน่าจะเกิดจากอิทธิพลของตัวอย่าง โดยเฉพาะอิทธิพลของขอบเขต (boundary conditions)

สำหรับผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพมหานครละเอียด 30% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. แสดงดังรูปที่ 5.4a รูปที่ 5.4b และรูปที่ 5.4c จะพบว่าขนาดของ f_s มีค่าลดลงตามอัตราเร็วการกดที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่ออัตราเร็วการกดเพิ่มจาก 0.25 มม./นาทิจำเป็น 0.5 มม./นาทิจำและมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่ออัตราเร็วการกดตั้งแต่ 1.0 มม./นาทิจำเป็นต้นไป ส่วนค่า q_c ก็จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า f_s กล่าวคือค่า q_c จะลดลงตามอัตราเร็วการกดที่เพิ่มขึ้น และมีค่าค่อนข้างคงที่ที่อัตราเร็วการกดตั้งแต่ 1.0 มม./นาทิจำเป็นต้นไป

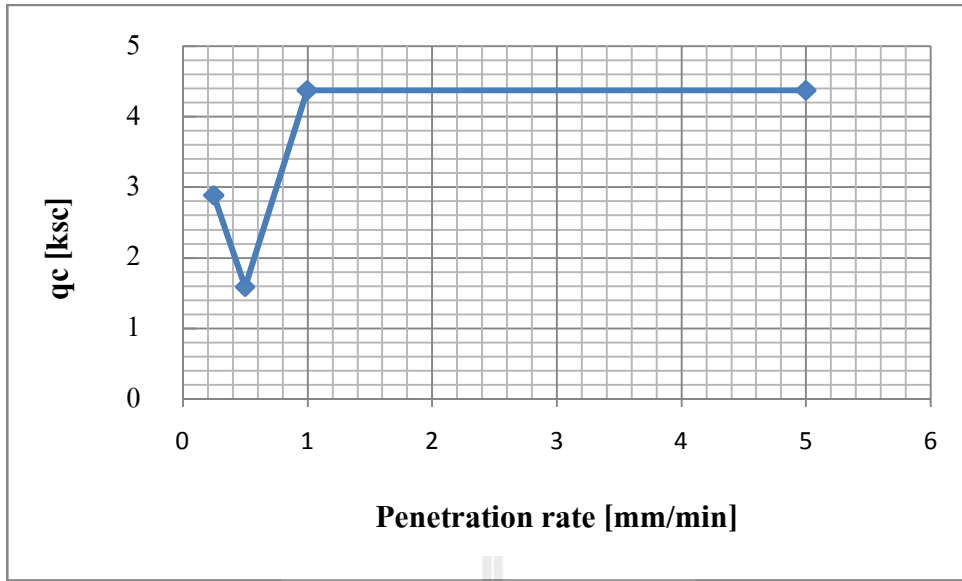
จากผลทดสอบดังรูปที่ 5.1 ถึงผลทดสอบดังรูปที่ 5.4 สามารถสรุปได้ว่าชุดทดสอบการกดกรวยขนาดเล็กให้ผลทดสอบที่ดี เมื่อตัวอย่างมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายมีค่าไม่ต่ำเกินไป และตัวอย่างดินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จะให้ผลทดสอบที่ดีกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่า f_s และ q_c ที่แปลงได้จากผลทดสอบการทะลุทะลวงกรวย พบว่าค่า f_s ที่ได้มีความน่าเชื่อถือกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า f_s มีผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของขอบเขตน้อยกว่าค่า q_c



รูปที่ 5.3a แสดงผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 30% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

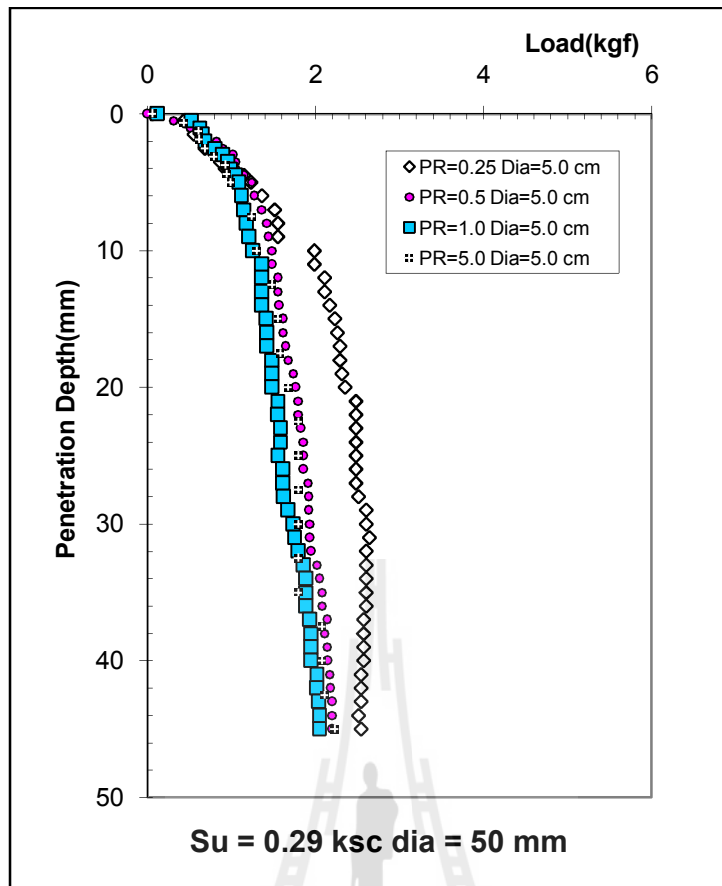


รูปที่ 5.3b แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับอัตราเร็วการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 30% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

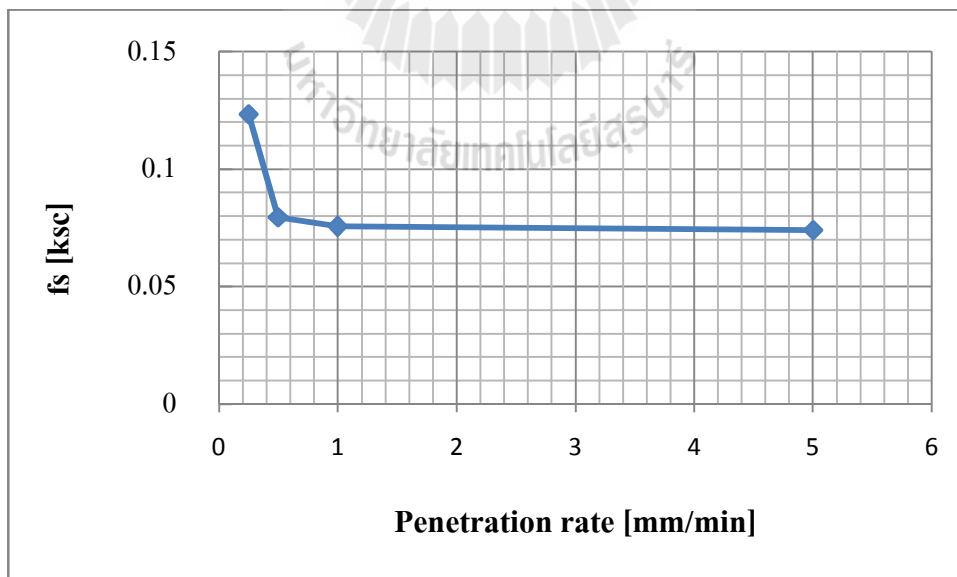


รูปที่ 5.3c แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_c กับอัตราเร็วการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 30% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

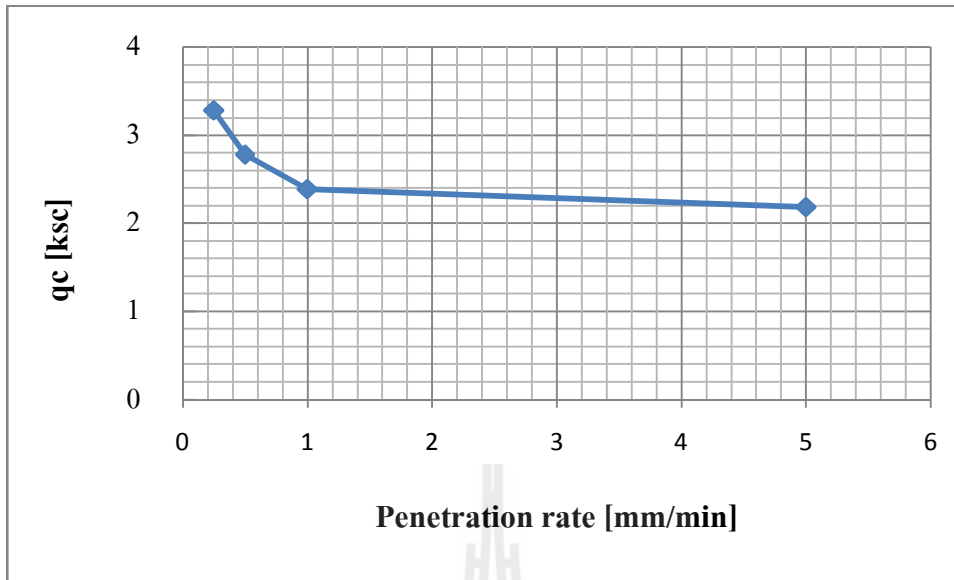




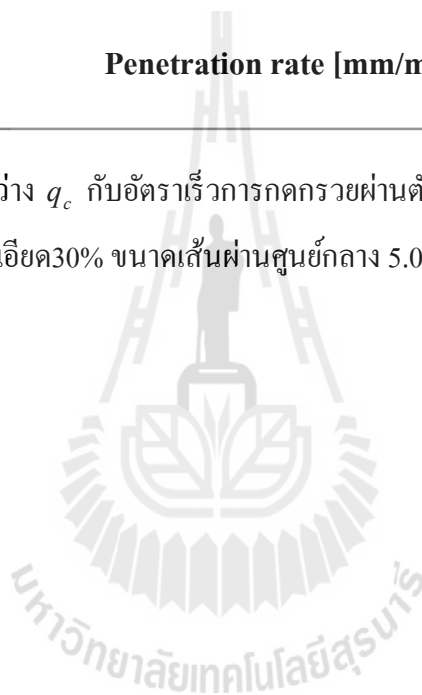
รูปที่ 5.4a แสดงผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 30% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



รูปที่ 5.4b แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับอัตราเร็วการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 30% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



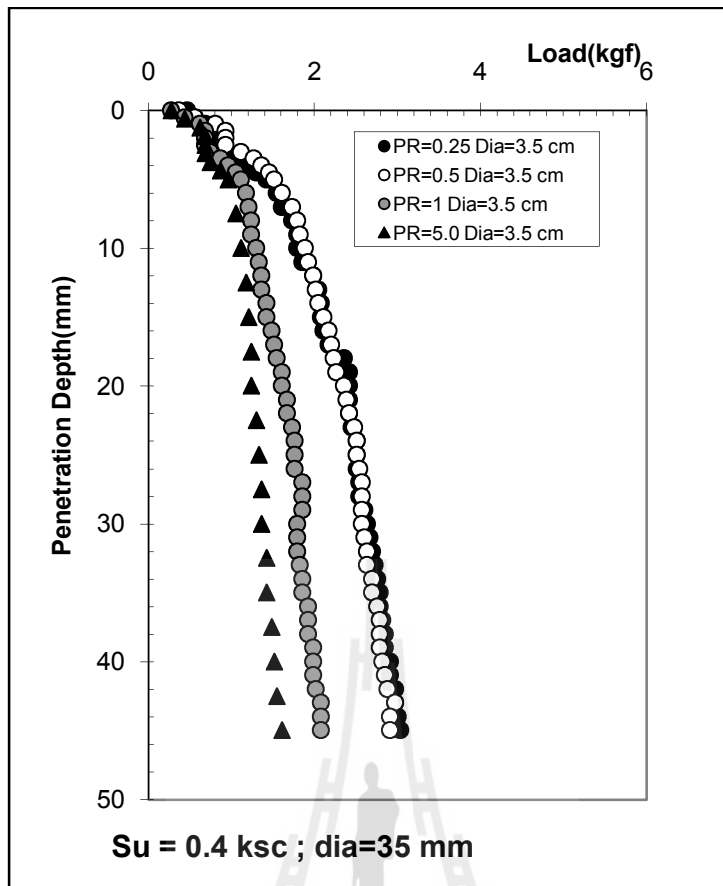
รูปที่ 5.4c แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_c กับอัตราเร็วการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 30% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



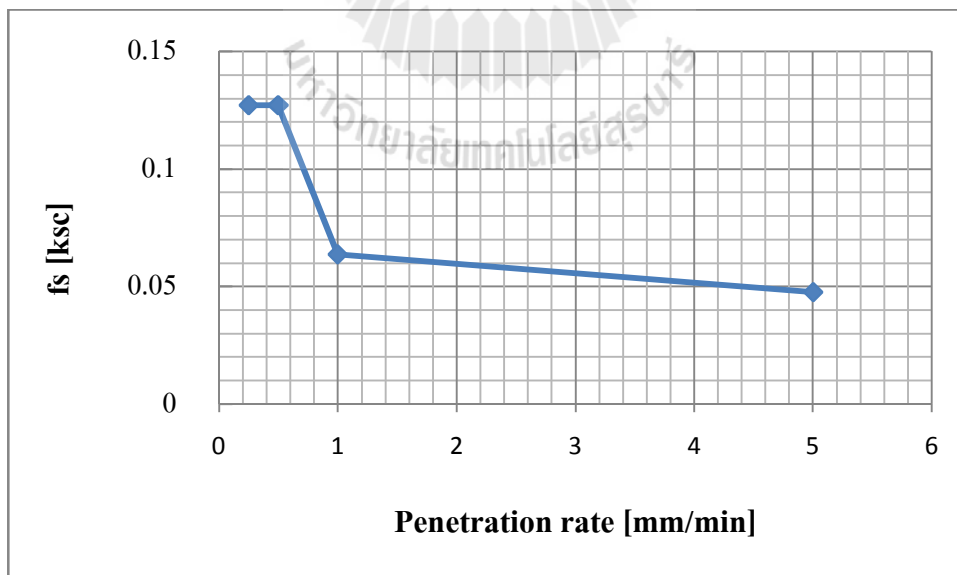
ผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพมหานครละเอียด 60% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ที่อัตราเร็วการทะลุทะลวงต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.5a รูปที่ 5.5b และรูปที่ 5.5c โดยรูปที่ 5.5a แสดงแรงต้านการกดกรวยกับระยะทะลุทะลวง รูปที่ 5.5b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานระหว่างดินกับปลอกเหล็ก (f_s) กับอัตราเร็วการกดกรวยลงไปในตัวอย่างดิน และรูปที่ 5.5c แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านปลายกรวย (q_c) กับอัตราเร็วการกดกรวยลงไปในตัวอย่างดิน เมื่อพิจารณาความเสียดทานระหว่างดินกับปลอกเหล็ก (f_s) ดังรูปที่ 5.5b จะพบว่ามีการลดลงของ f_s เมื่ออัตราเร็วการกดมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อลดอัตราการกดลงน้อยกว่า 1 มม./นาที่ ขนาดของ f_s จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอัตราการกดที่ลดลง เมื่อพิจารณาค่า q_c จากรูปที่ 5.5c พบว่าค่า q_c มีแนวโน้มเช่นเดียวกับ f_s ใดๆก็ตาม หากพิจารณาค่า f_s ของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพมหานครละเอียด 60% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. กับค่า f_s ของตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพมหานครละเอียด 30% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ซึ่งตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพมหานครละเอียด 30% มีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายต่ำกว่า แต่ค่า f_s ที่แปลงได้จากผลทดสอบในดินชนิดนี้กลับมีค่าสูงกว่า ผลที่ได้จึงควรรวใช้อย่างระมัดระวัง

สำหรับผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในตัวอย่างดินเหนียวผสมทรายละเอียด 60% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. แสดงดังรูปที่ 5.6a รูปที่ 5.6b และรูปที่ 5.6c จะพบว่าขนาดของ f_s มีค่าลดลงตามอัตราเร็วการกดที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าลดลงอย่างมากเมื่ออัตราเร็วการกดเพิ่มจาก 0.25 มม./นาที่ เป็น 0.5 มม./นาที่ และมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่ออัตราเร็วการกดตั้งแต่ 0.5 มม./นาที่ เป็นต้นไป ส่วนค่า q_c ก็จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า f_s กล่าวคือค่า q_c จะลดลงตามอัตราเร็วการกดที่เพิ่มขึ้น ใดๆก็ตามค่า f_s และ q_c ของอัตราเร็วการกด 5 มม./นาที่ มิได้รายงานไว้ เนื่องจากคาดว่าน่าจะเป็นความผิดพลาดในการทดสอบผู้วิจัยจึงตัดค่าดังกล่าวออกจากรายงาน

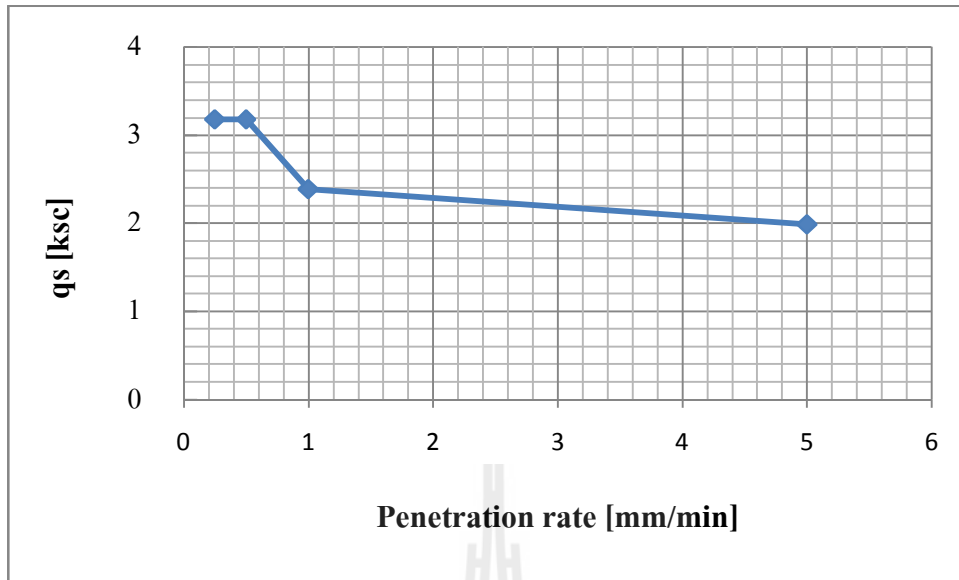
จากผลทดสอบดังรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 สามารถยืนยันผลสรุปที่ได้จากผลการทดสอบดังรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.4 กล่าวคือชุดทดสอบการกดกรวยขนาดเล็กให้ผลทดสอบที่ดี กับตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. โดยพบว่า ค่า f_s ที่ได้มีความน่าเชื่อถือกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า f_s มีผลกระทบเนื่องจากอิทธิพลของขอบเขตน้อยกว่าค่า q_c



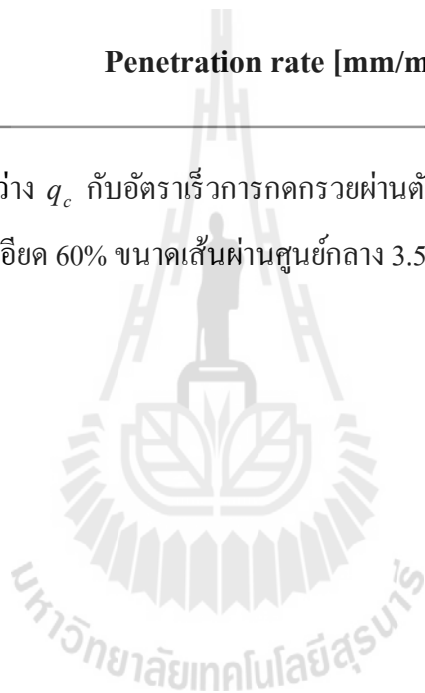
รูปที่ 5.5a แสดงผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 60% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

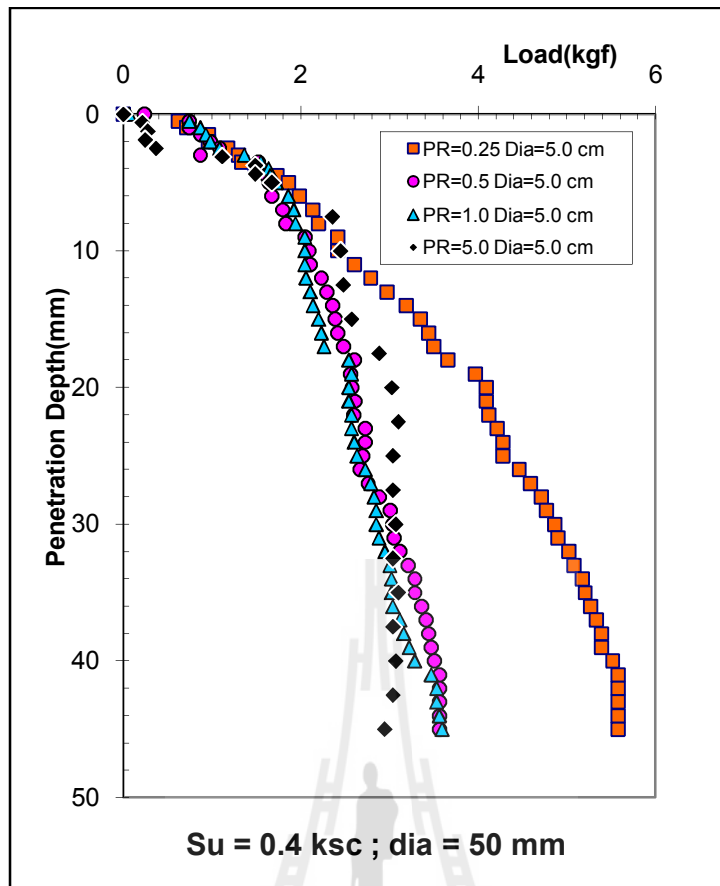


รูปที่ 5.5b แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับอัตราเร็วการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 60% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

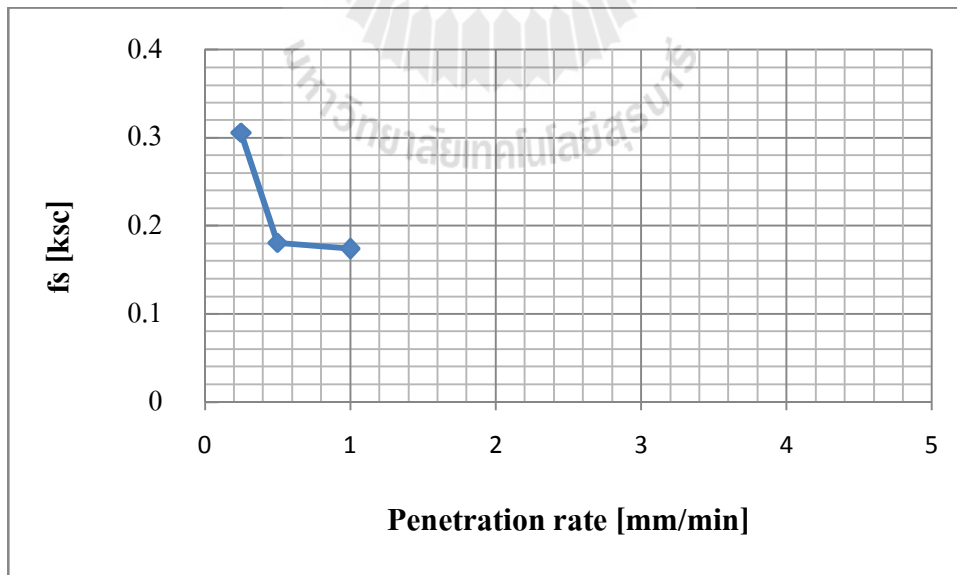


รูปที่ 5.5c แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_c กับอัตราการกรวดทรายผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 60% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม.

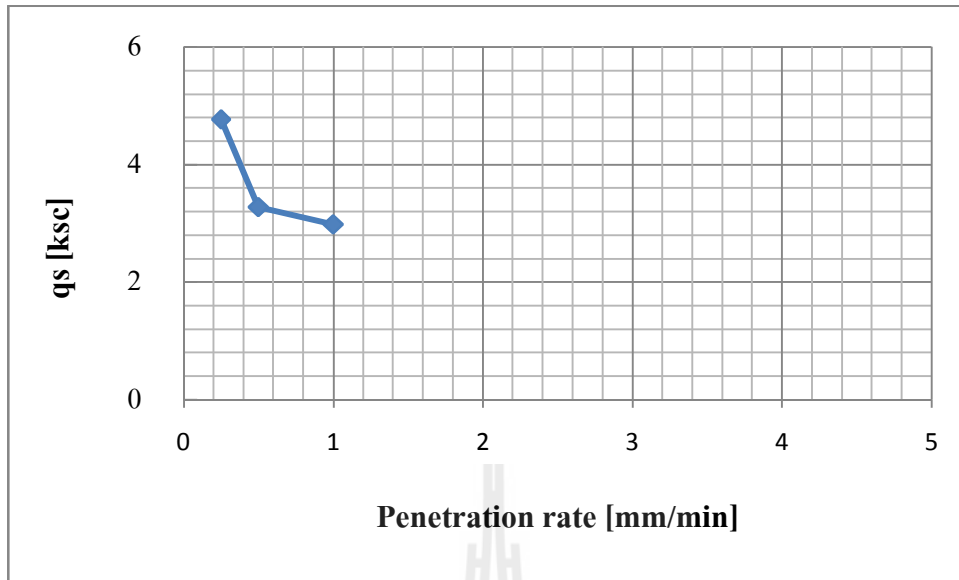




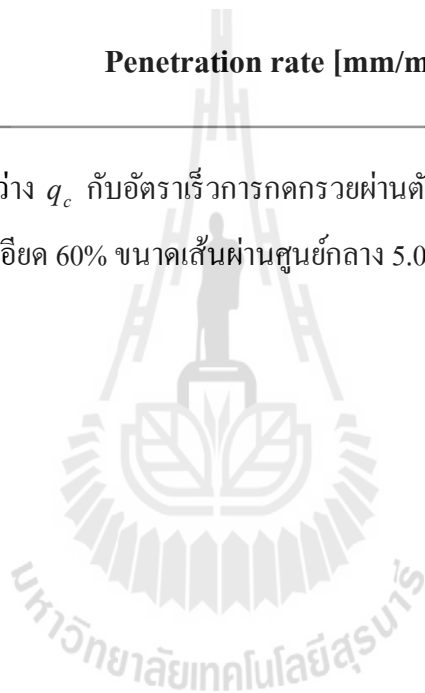
รูปที่ 5.6a แสดงผลทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 60% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



รูปที่ 5.6b แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับอัตราเร็วการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 60% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



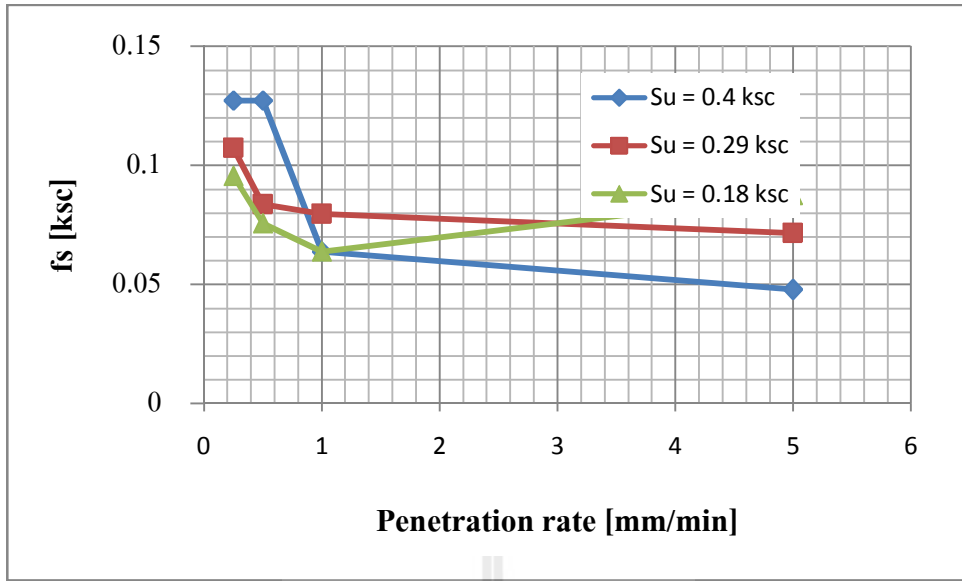
รูปที่ 5.6c แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_c กับอัตราการร้าวการกดกรวยผ่านตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯผสมทรายละเอียด 60% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



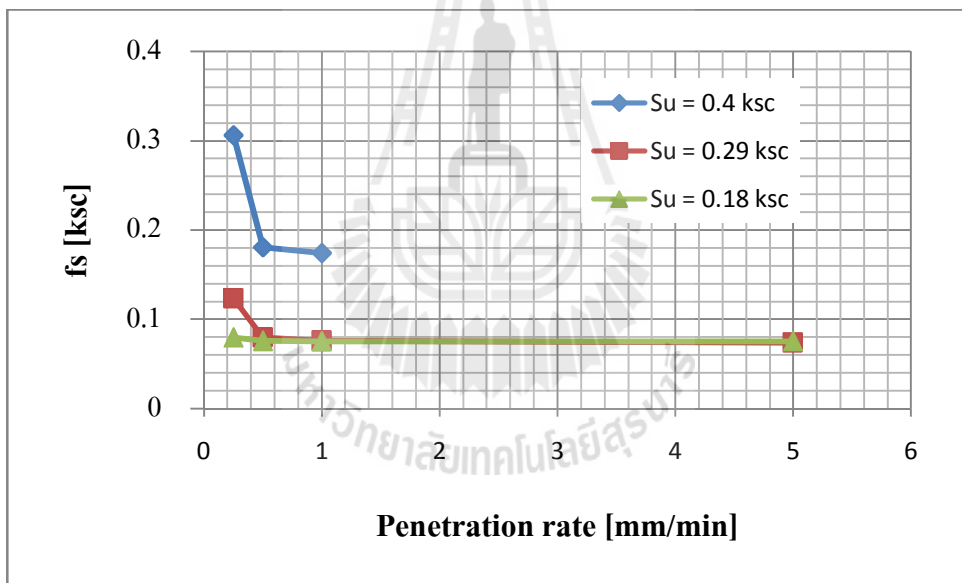
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานที่ปลอกกับอัตราเร็วการกดกรวย และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างดิน

รูปที่ 5.7a และ 5.7b แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (f_s) กับอัตราเร็วการทะลุทะลวงของกรวยของตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. และตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงขนาดของ f_s ในตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน แม้ภาพรวมจะแสดงแนวโน้มที่ลดลงตามอัตราเร็วการกดที่เพิ่มขึ้นก็ตาม แต่พบว่าค่า f_s ที่อ่านได้จากตัวอย่างดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูง (0.4 ksc) กลับมีค่าต่ำกว่า f_s ที่อ่านได้จากตัวอย่างดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำต่ำ (0.29 ksc) อย่างไรก็ตามพบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงขนาดของ f_s ในตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. มีรูปแบบที่แน่นอนกล่าวคือมีแนวโน้มที่ลดลงตามอัตราเร็วการกดที่เพิ่มขึ้น และดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูง (0.4 ksc) จะให้ค่า f_s สูงกว่าดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำต่ำ (0.29 ksc)

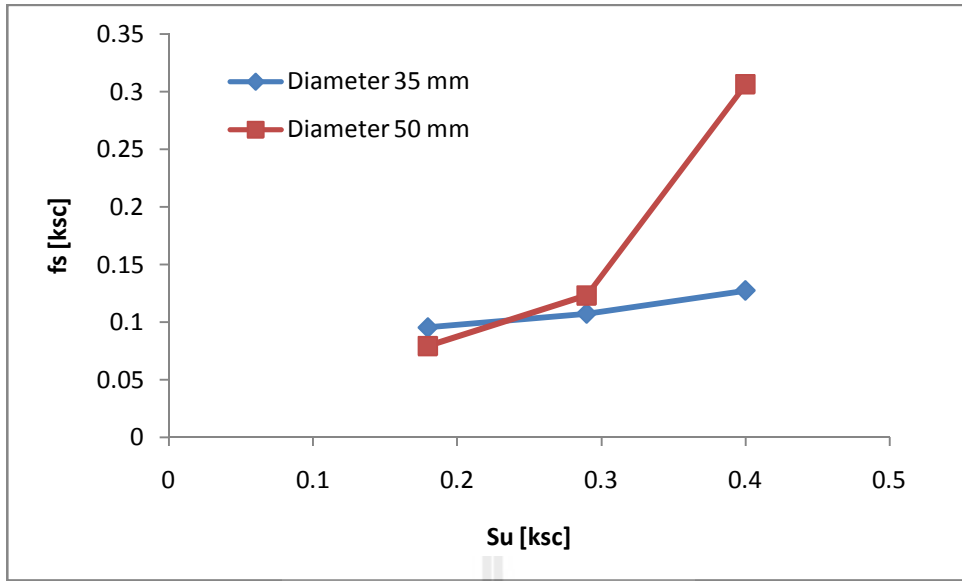
รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_s กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสำหรับตัวอย่างดินสองขนาด ที่อัตราเร็วการกดต่างๆ จากรูปจะพบว่าสำหรับตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. มีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ ที่ไม่แน่นอน ซึ่งตรงกับที่ได้สรุปในเบื้องต้นแล้วว่า ตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาทดสอบกับชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นในรายงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงนำเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างค่า f_s กับกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำสำหรับตัวอย่างดินขนาด 5.0 ซม. ที่อัตราเร็วการกดต่างๆ มาพิจารณาดังแสดงในรูปที่ 5.8e ซึ่งพบว่านอกจากที่อัตราการกด 0.25 มม./นาที แล้ว ที่อัตราเร็วการกดอื่นๆ ค่า f_s ที่ได้ที่ทุกๆ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ แทบจะซ้อนทับกันเลย



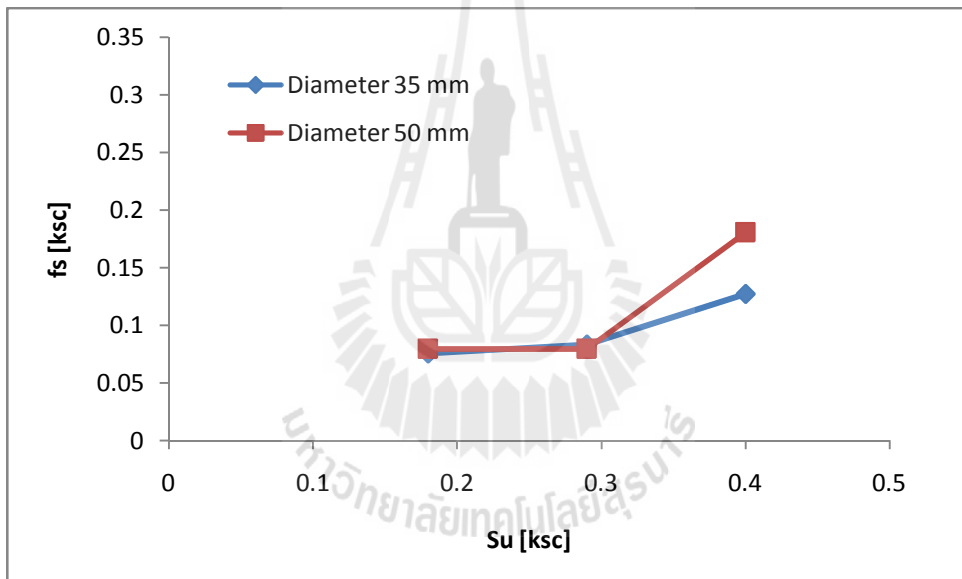
รูปที่ 5.7a ความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับอัตราเร็วการทะลุทะลวงของกรวยของตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม



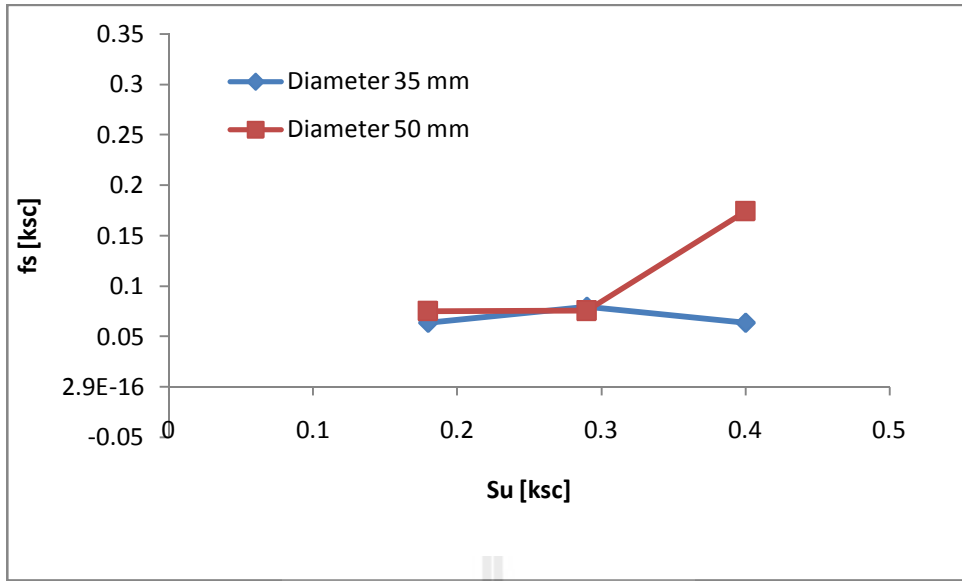
รูปที่ 5.7b ความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับอัตราเร็วการทะลุทะลวงของกรวยของตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม.



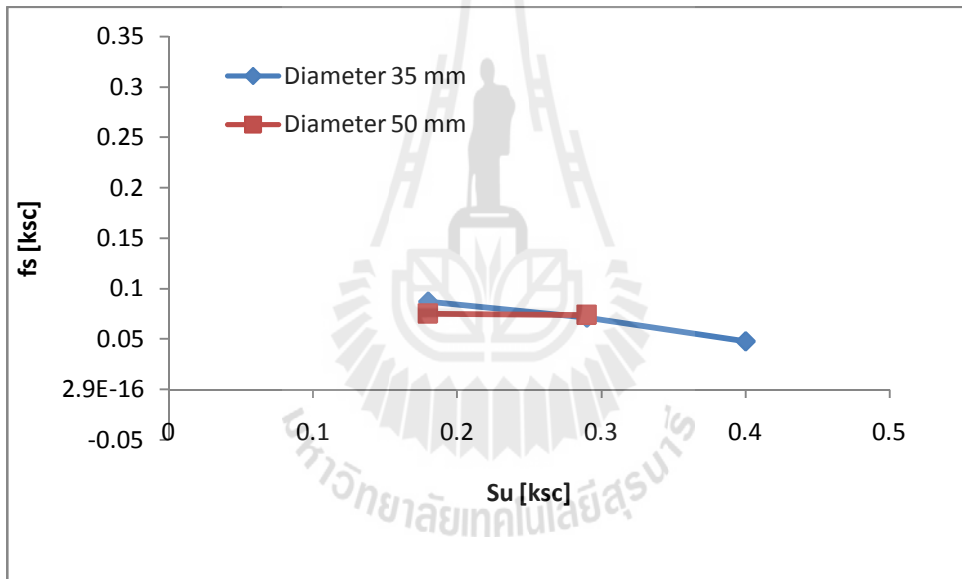
รูปที่ 5.8a ความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับ S_u ที่อัตราเร็วการทะลุทะลวงของกรวย 0.25 มม./นาที



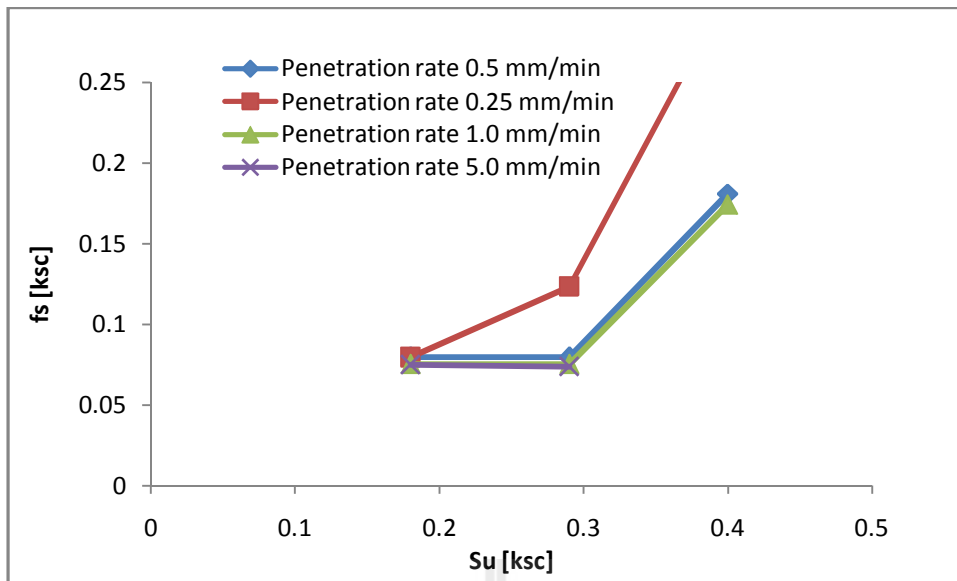
รูปที่ 5.8b ความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับ S_u ที่อัตราเร็วการทะลุทะลวงของกรวย 0.50 มม./นาที



รูปที่ 5.8c ความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับ S_u ที่อัตราเร็วการทะลุทะลวงของกรวย 1.0 มม./นาที



รูปที่ 5.8d ความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับ S_u ที่อัตราเร็วการทะลุทะลวงของกรวย 5.0 มม./นาที

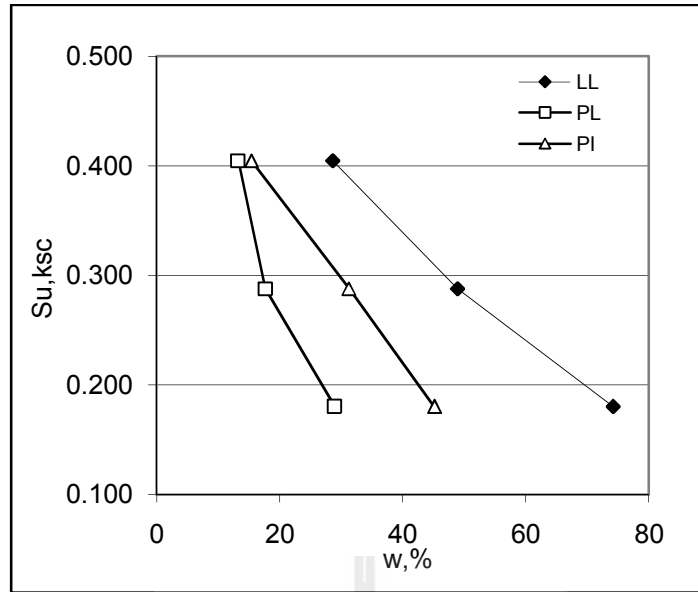


รูปที่ 5.8e ความสัมพันธ์ระหว่าง f_s กับ S_u สำหรับตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. ที่อัตราเร็วการทะลุทะลวงของกรวยต่างๆ

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียดทานที่ปลอกกับคุณสมบัติของดิน

ตัวอย่างดินเหนียวที่นำมาทดสอบทั้งสามชนิดเป็นตัวอย่างดินเหนียวที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และมีการอัดตัวแบบปกติเท่านั้น โดยตัวอย่างดินทั้งสามมีค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ S_u และพิกัดอัตรเบร็ก (Atterberg's limits) ต่างกัน รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติข้างต้นของดินเหนียวทั้งสามประเภทจากรูปสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ดินเหนียวกรุงเทพมหานครทรายละเอียด 60% มีค่า $S_u = 0.40$ กิโลกรัม/ตร.ซม. มีค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) เท่ากับ 28.7% พิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) เท่ากับ 13.3% และมีค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity index, PI) เท่ากับ 15.4%
- 2) ดินเหนียวกรุงเทพมหานครทรายละเอียด 30% มีค่า $S_u = 0.29$ กิโลกรัม/ตร.ซม. มีค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) เท่ากับ 49% พิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) เท่ากับ 17.7% และมีค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity index, PI) เท่ากับ 31.3%
- 3) ดินเหนียวกรุงเทพมหานครมีค่า $S_u = 0.18$ กิโลกรัม/ตร.ซม. มีค่าพิกัดเหลว (Liquid limit, LL) เท่ากับ 74.2% พิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) เท่ากับ 29% และมีค่าดัชนีความเป็นพลาสติก (Plasticity index, PI) เท่ากับ 45.2%



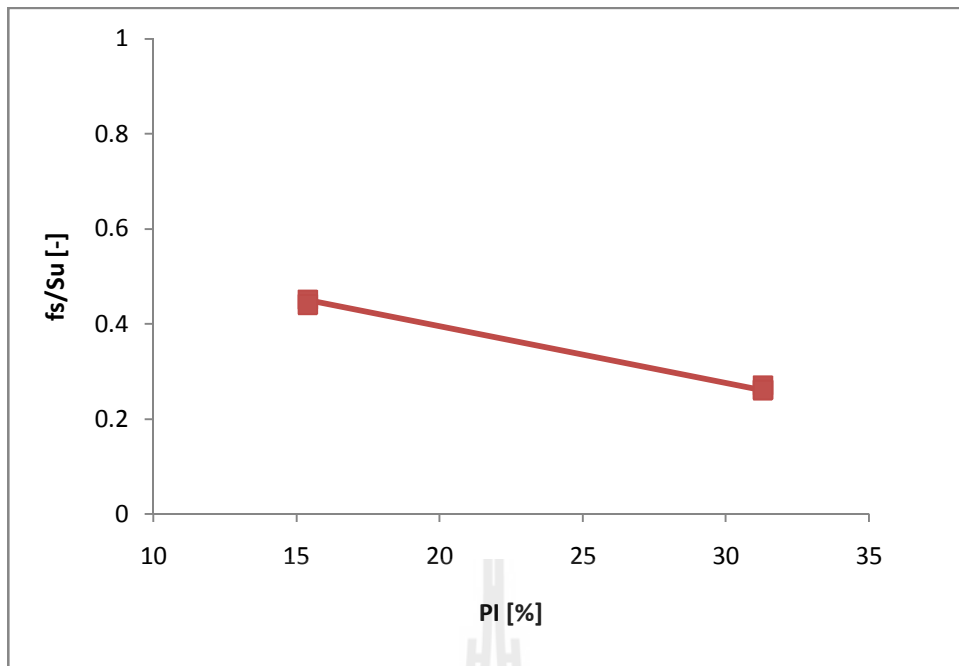
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง S_u กับพิกัดอัตราเบร็กของดินที่นำมาทดสอบ

ตารางที่ 5.1 ค่า f_s และอัตราส่วน f_s / S_u จากในการทดสอบการทะลุทะลวงกรวยกับดินเหนียวทั้งสามประเภท

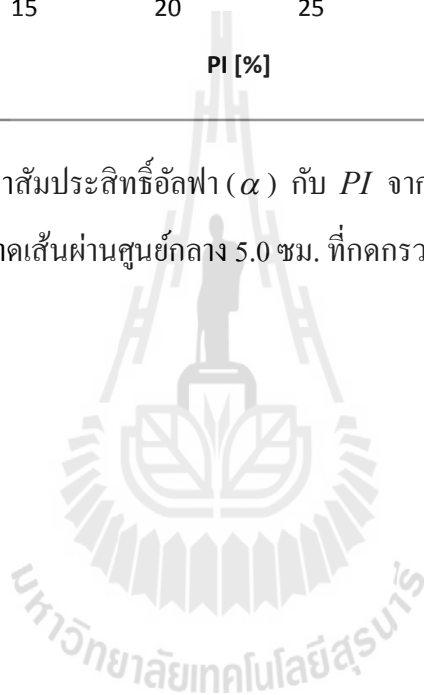
Soil type	Plasticity index [-]	Penetration rate[mm/sec.]	S_u [ksc]	f_s [ksc]	f_s / S_u [-]
BK Clay	0.452	0.25	0.18	0.08	0.44
BK Clay	0.452	0.50	0.18	0.08	0.44
BK Clay	0.452	1.00	0.18	0.08	0.42
BK Clay	0.452	5.00	0.18	0.08	0.42
BK Clay+Sand30%	0.313	0.25	0.29	0.12	0.43
BK Clay+Sand30%	0.313	0.50	0.29	0.08	0.27
BK Clay+Sand30%	0.313	1.00	0.29	0.08	0.26
BK Clay+Sand30%	0.313	5.00	0.29	0.07	0.26
BK Clay+Sand60%	0.152	0.25	0.40	0.31	0.77
BK Clay+Sand60%	0.152	0.50	0.40	0.18	0.45
BK Clay+Sand60%	0.152	1.00	0.40	0.17	0.44
BKK Clay+Sand60%	0.152	5.00	0.40		

ตารางที่ 5.1 แสดงค่า f_s และอัตราส่วน f_s/S_u จากในการทดสอบการทะลุทะลวงกรวยกับดินเหนียวทั้งสามประเภทซึ่งอัตราส่วนระหว่าง f_s/S_u คือค่าสัมประสิทธิ์อัลฟา (α) สำหรับคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็ม (Tomlinson, 1957; Holmberg, 1970) จากผลทดสอบและข้อสรุปที่ผ่านมา ได้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ไม่ควรนำมาใช้ในการทดสอบการทะลุทะลวงแบบมาตรฐานของชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นในรายงานวิจัยนี้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการกรองข้อมูลส่วนที่มาจากตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 ซม. ออกทั้งหมด ตารางที่ 5.1 จึงมีเพียงข้อมูลของตัวอย่างดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. เท่านั้น นอกจากนี้จากข้อสรุปในหัวข้อที่ผ่านมายังพบว่าตัวอย่างดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายต่ำไม่เหมาะสำหรับนำมาทดสอบกับชุดทดสอบการทะลุทะลวงกรวยขนาดเล็กที่พัฒนาขึ้นในรายงานวิจัยนี้ ตารางที่ 5.1 จึงไม่ควรรวมข้อมูลของตัวอย่างดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายเท่ากับ 0.18 กก./ตร. ซม. นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราเร็วการกดกรวยเท่ากับ 0.25 มม./นาที จะให้ค่า f_s สูงเกินไป ดังนั้นตารางที่ 5.1 จึงเรียงข้อมูลดังกล่าวเพื่อแสดงว่าข้อมูลดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาใช้แปลผล

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 5.1 ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อัลฟา (α) กับ PI จะได้ดังรูปที่ 5.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์อัลฟา (α) จะมีค่าลดลงตามการเพิ่มของค่า PI เช่นเดียวกับที่รายงานโดย Stewart and Kulhawy (Stewart and Kulhawy, 1981) ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อัลฟา (α) กับ PI ที่ได้จากผลทดสอบการทะลุทะลวงกรวยและจากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Stewart and Kulhawy (1981) สำหรับดินอัดตัวคายน้ำปกติ พบว่ามีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อัลฟา (α) กับ PI จากตัวอย่างดินเหนียวที่มีกำลังรับแรงเฉือนตั้งแต่ 0.29 กก./ตร.ซม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 ซม. ที่ทดสอบด้วยอัตราเร็วตั้งแต่ 0.5 มม./นาที



เอกสารอ้างอิง

- Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T., and Hoeg, K. (1986). Use of in situ tests for foundation design on clay. Proceedings of In situ '86, Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering. ASCE GSP 6, Blacksburg, Virginia, 1-30.
- Abu-Farsakh, M.Y. and Titi, H. H., (2004). Assessment of Direct Cone Penetration Test Methods for Predicting the Ultimate Capacity of Friction Driven Piles. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130, No. 9, pp. 935-944.
- Almeida, M. S. S. and Parry, R. H. G. (1988). Small Cone Penetrometer Tests in Laboratory Consolidated Clays. Proceedings of the Int. Conf. on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, 2, Balkema Pub., Rotterdam, PP. 607-613.
- Anagnostopoulos, A., Koukis, G., Sabatakakis, N., and Tsiambaos, G. (2003). Empirical correlations of soil parameters based on Cone Penetration Tests (CPT) for Greek soils. Geotechnical and Geological Engineering, 21, 377-387.
- Ghionna, V. N. and M. Jamiolkowski (1991) A critical appraisal of calibration chamber testing of sands. Proceedings of the First International Symposium on Calibration Chamber Testing, Potsdam, NY, U.S.A.
- Baligh, M.M., Azzouz, A.S., and Martin, R.T. (1980). Cone Penetration Tests Offshore the Venezuelan Coast: M.I.T. Report No. R80-21.
- Bellotti, R. (1984). Chamber size effects and boundary conditions effects. Seminar of Cone Penetration Testing in the Laboratory. University of Southampton.
- Campanella, R G., Gillespie, D., and Robertson, P. K. (1982). Pore pressures during cone penetration testing, Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-2, Amsterdam, May 24 - 27, Vol. 2, pp. 507 - 512.
- Chen, J.W., Chen, F.C. (2008). The penetration experiment to predict liquefaction resistance of reclaimed soil. Ocean Engineering, Vol. 35, pp. 380-392.
- Fahey, M. (1980). A study of the pressuremeter test in dense sand. Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
- Kok, L. (1982). The effect of the penetration speed and cone shape on the Dutch static cone penetration test results. Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration, 24-27 May 1982: 215-220.
- Kurup, P.U., Voyiadjis, G.Z., Tumay, M.T. (1994). Calibration chamber studies of peizocone test in cohesive soil. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 1, pp. 81-107.

- La Rochelle, P., Zebdi, P.M., Leroueil, S., Tavenas, F., and Virely, D. (1988). "Piezocone tests in sensitive clays of Eastern Canada," Proceeding of 1st International Symposium on Penetration Testing, Orlando, pp. 831-841.
- Lunne, T., Eide, O and J. de Ruiter. 1976. Correlations between cone resistance and vane shear strength in some Scandinavian soft to medium stiff clays. Canadian Geotechnical Journal,, 13: 430- 441.
- Lunne, T. and Eide, O. 1978. Closure on discussion of correlations between cone resistance and vane shear strength in some Scandinavian soft to medium stiff clays. Canadian Geotechnical Journal,, 15: 438.
- Lunne, T. and Kleven, A. (1981). Role of CPT in North Sea Foundation Engineering. Symposium on Cone Penetration Engineering Division, ASCE, 49-75.
- Lunne, T., Eidsmoen, T., Gillespie, D. and Howland, J.D. (1986). Laboratory and Field Evaluation of cone penetrometers. Proceedings of the ASCE Specialty Conf. In Situ '86: Use of in Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, pp. 714-729.
- Meyerhof, G.G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. Proceedings ASCE, Vol. 82, No. SM1, Paper 866, pp. 1-19.
- Parkin, A.K. and Lunne, T. (1982). Boundary effects in the laboratory calibration of cone penetrometer for sand. Proc. 2nd European Symp. Penetration Testing, Amsterdam, Vol. 2, 761-768.
- Parkin, A.K. (1988). The calibration of cone penetrometers. Proc. First Int. Symp. On Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, Vol. 1, 221-244.
- Roy, M., Tremblay, M., Tavenas, F. and La Rochelle, P. (1982). Development of Pore Pressures in Quasistatic Penetration Tests in Sensitive Clay." Canadian Geotechnical Journal, 19, PP. 124-138.
- Robertson, P. K., R. G. Campanella, D. Gillespie, and J. Greig (1986) "Use of Piezometer Cone Data," Proceedings of the ASCE Specialty Conference on In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, Virginia, pp. 1263-1280.
- Salgado, R. (1993) Analysis of Penetration Resistance in Sands. Ph.D. Dissertation. Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, U.S.A.
- Salgado, R., Mitchell, J.K., Jamiolkowski, M. (1997). Cavity expansion and penetration resistance in sand, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 4, pp. 344-354.

- Schmertmann, J.H. 1975. Measurement of in situ shear strength. Proceedings of the ASCE Special Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, Raleigh, North Carolina, 2: 57-138.
- Schnaid, F. (1990). A study of cone-pressuremeter test in sand. D.Phil. Thesis, University of Oxford.
- Stewart, J. P., and Kulhawy, F. H. 1981. Experimental Investigation of the Uplift Capacity of Drilled Shaft Foundations in Cohesionless Soil. Contract Report B-49 (6), Niagara Mohawk Power Corporation, Syracuse, NY.
- Tumay, M. T. and Acar, Y. B. (1985). Piezocone Penetration Testing in Soft Cohesive Soils. ASTM, STP 883, R. C. Chaney and K. R. Demars (eds.), PP. 72-82.
- Veen, C. van der and Boersma, L. , 1957, The bearing capacity of a pile predetermined by a cone penetration test: Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., August 12-24, 1957, London, Vol. II, p. 72-75.
- Voyiadjis, G. Z., Kurup, P. U. and Tumay, M. T. (1994). Determination of Soil Properties from Laboratory Piezocone Penetration Tests. 13th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering (XIIIICSMFE), India, PP. 303-308
- พลากร พีรภาคย์ (2547). การทดสอบการกดกรวยขนาดเล็กในเครื่องมือแรงอัดสามแกน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมโยธา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย