บทที่ 4 การทดสอบ

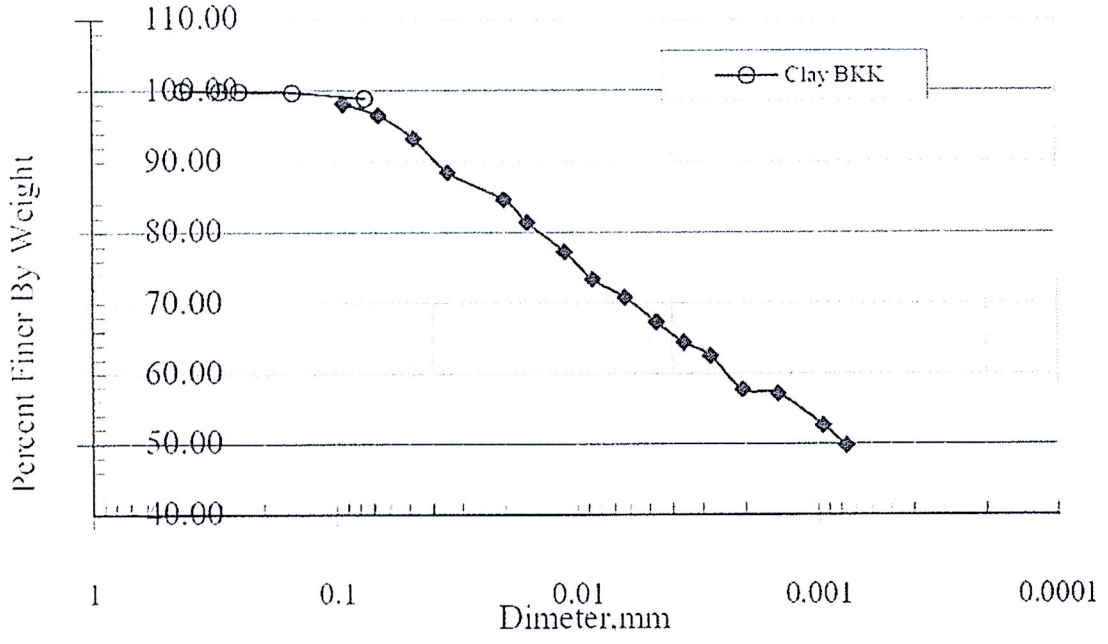
4.1 ดินที่ใช้ในการทดสอบ

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

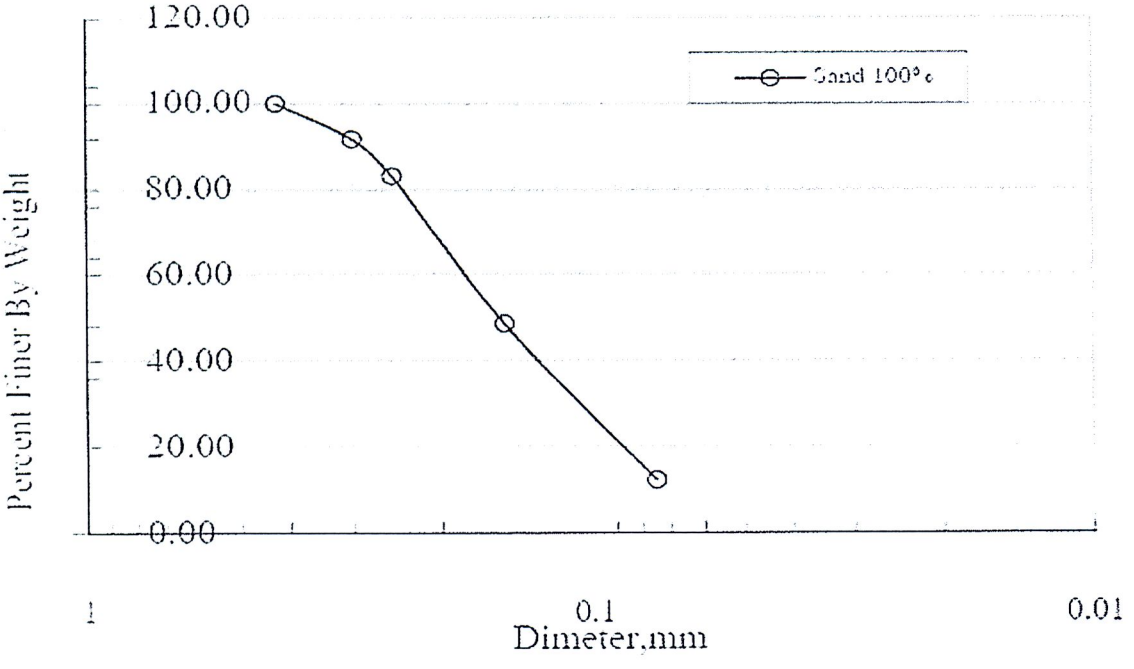
เพื่อความรวดเร็วในการเตรียมตัวอย่าง งานวิจัยนี้จึงทำการผสมทรายละเอียดเข้าดินเหนียว โดยมีสัดส่วนผสม 0% 30% และ 60% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เพื่อให้ได้ตัวอย่างดินที่มีค่าความเป็นพลาสติกแตกต่างกัน และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำต่างกันด้วย เมื่อนำดินไปทดสอบหาการกระจายขนาด (ASTM D422-63) พิกัดแอตเตอร์เบริ์ก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

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวกรุงเทพที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ดินตัวอย่าง	ประเภทดิน	พิกัดแอตเตอร์เบริ์ก			ความถ่วงจำเพาะ
	USCS	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

4.2.1เครื่องมือเตรียมตัวอย่างดิน

เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบนี้จะใช้โครงถ่ายน้ำหนัก และแม่แรงกระบอกไฮโดรลิค (Hydraulic jack) ในการให้น้ำหนักบรรทุก การระบายน้ำจะใช้แผ่นใยสังเคราะห์โดยติดตั้งทั้งในแนวดิ่งและแนวราบ เพื่อเร่งการระบายน้ำให้เร็วที่สุด

ก. แบบใส่ตัวอย่างดิน (Large Consolidation Cell)

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

ข. แผ่นโลหะถ่ายน้ำหนัก (Top Cap)

แผ่นโลหะถ่ายน้ำหนักมีความหนา 5 มม. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.6 ซม. และมีแผ่นน้ำหนักวงกลมวางซ้อนให้สูงกว่าแบบใส่ตัวอย่าง

ค. แผ่นใยสังเคราะห์ (Geotextile)

ทำหน้าที่ระบายน้ำ ใช้แทน Porous Stone โดยจะหุ้มแผ่นใยสังเคราะห์รอบตัวอย่างด้านข้างทั้งด้านบนและด้านล่างเพื่อให้น้ำซึมผ่านได้ทุกทิศทาง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ห่อหุ้มน้ำโคลนไม่ให้ไหลออกจากแบบใส่ตัวอย่างดิน

ง. โครงถ่ายน้ำหนัก (Loading Frame)

เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ต้องการค่อนข้างมาก โครงถ่ายน้ำหนักจึงมีขนาดใหญ่โดยใช้เหล็ก Wide flange เป็นโครงรับน้ำหนัก และมีแม่แรงกระบอกไฮโดรลิคทำหน้าที่ส่งแรงกดทับมาที่ตัวอย่างดิน

4.2.2ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

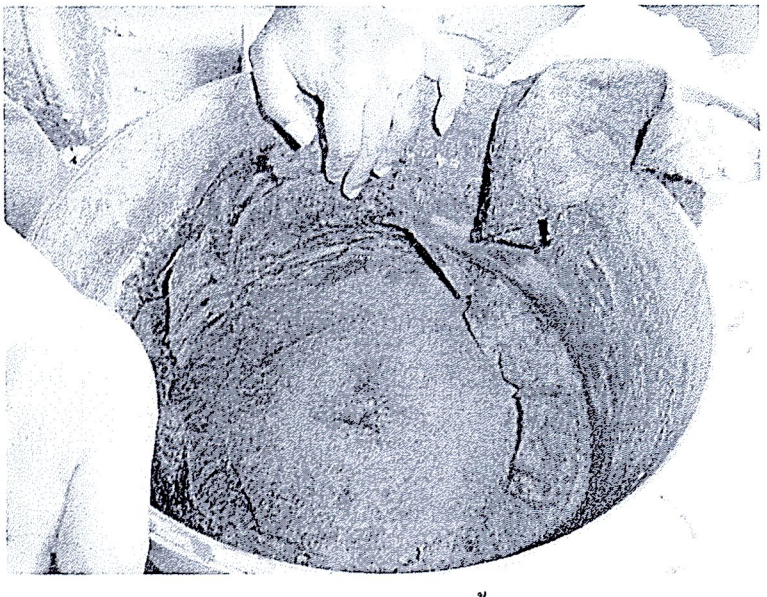
ก. การเตรียมตัวอย่างดินเหลว

เนื่องจากดินที่เก็บมาจากสนามนี้ยังไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีเปลือกหอยอยู่เป็นจำนวนมากจึงจำเป็นต้องมีการคัดแยกเปลือกหอยออกให้หมดโดยการเติมน้ำเข้าไป โดยกำหนดให้ดินมีความชื้น (water content) สูงกว่า 150% หลังจากนั้นใช้เครื่องปั่น ปั้นดินและน้ำให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงคัดแยกเศษเปลือกหอยโดยใช้ร่อนผ่านตะแกรง

ข. การอัดตัวคายน้ำ

หลังจากการคัดแยกดินเรียบร้อยแล้วนำน้ำโคลนที่ได้มาเทลงในแบบใส่ตัวอย่างดิน (Consolidation Cell) ให้ได้ความสูงตามต้องการ ก่อนจะเทน้ำโคลนให้นำแผ่นใยสังเคราะห์มารองรอบๆแบบใส่ตัวอย่างดิน โดยกะให้ด้านข้างแผ่นใยสังเคราะห์อยู่เลยผิวของน้ำโคลนที่จะเทเล็กน้อย พับแผ่นใยสังเคราะห์ด้านข้างให้มีขนาดเท่าความสูงของน้ำโคลน เพื่อไม่ให้น้ำโคลนไหลผ่านช่องว่างออกมา รูปที่ 4.2 แสดงการวางแผ่นใยสังเคราะห์ก่อนเทน้ำโคลนลงในแบบใส่ตัวอย่างดิน เมื่อเทน้ำโคลนเสร็จแล้วให้คลุมด้านบนด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ แล้วจึงวางแผ่นถ่ายน้ำหนักลงด้านบน รูปที่ 4.3 แสดงภาพร่างการเตรียมดินลงในแบบ

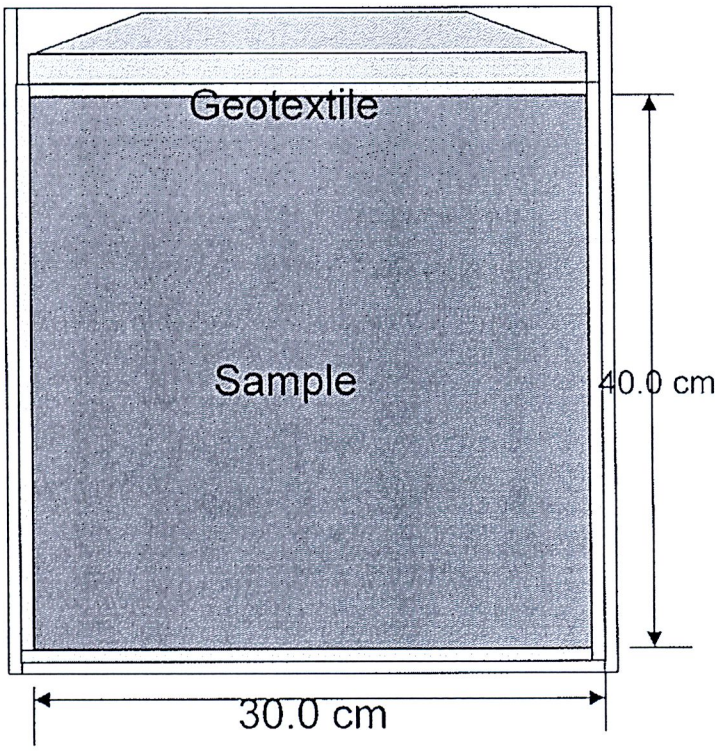
หลังจากนั้นจะทำการติดตั้งแบบที่บรรจุน้ำโคลนเข้ากับ Loading Frame โดยพยายามให้แนวกระทำน้ำหนักได้ศูนย์กลาง จากนั้นติดตั้ง Dial gauge สองตำแหน่ง เพื่อใช้วัดการทรุดตัวเทียบกับเวลา เมื่อติดตั้งเสร็จจะมีลักษณะแสดงรูปที่ 4.4 ทำการบันทึกค่าการทรุดตัวเทียบกับเวลา จนสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำ ซึ่งใช้เวลาประมาณ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



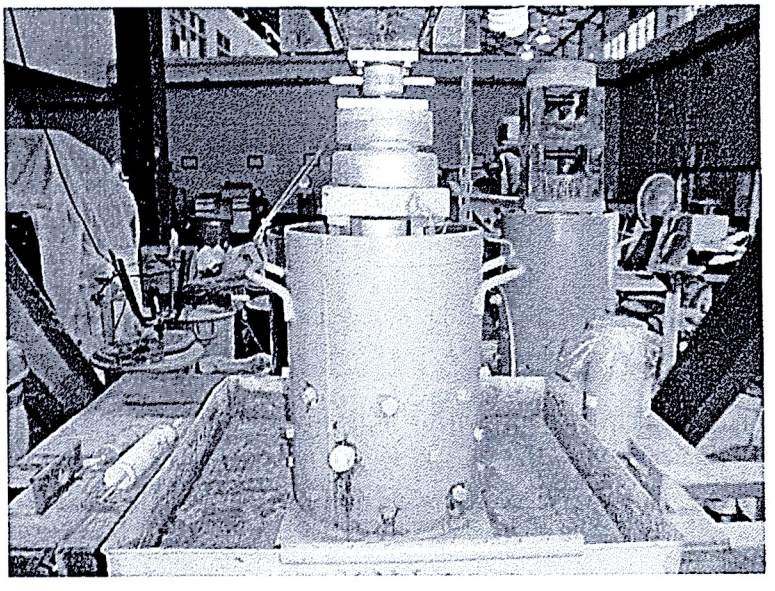
รูปที่ 4.2 แสดงการวางแผ่นใยสังเคราะห์ก่อนเทน้ำโคลนลงในแบบใส่ตัวอย่างดิน

ค. การเก็บตัวอย่าง

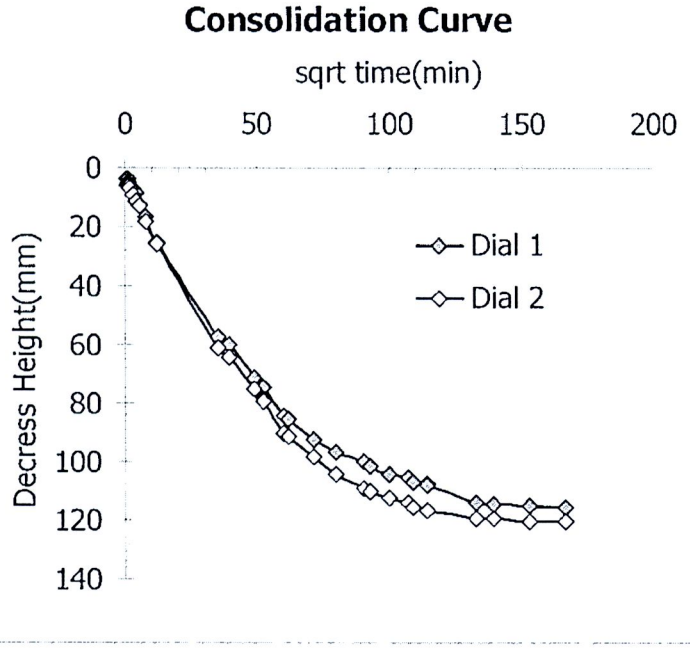
หลังจากสิ้นสุดกระบวนการอัดตัวคายน้ำแล้ว ใช้ผ้าซับน้ำที่ยังหลงเหลือออกให้หมด แล้วทำการเก็บตัวอย่างโดยใช้กระบอกเก็บตัวอย่างผิวบาง (Shelby Tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 ซม. และสูงประมาณ 10 ซม. ดันตัวอย่างดินออกแล้วนำไปหุ้มด้วย Waxed paper และเคลือบด้วยพาราฟินเพื่อเก็บไว้ทดสอบในขั้นต่อไป รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างดินที่เคลือบด้วยพาราพินแล้ว



รูปที่ 4.3 ภาพร่างการเตรียมดินลงในแบบเพื่อให้ผ่านการอัดตัวคายน้ำ



รูปที่ 4.4 การทดสอบการอัดตัวคายน้ำในแบบขนาดใหญ่

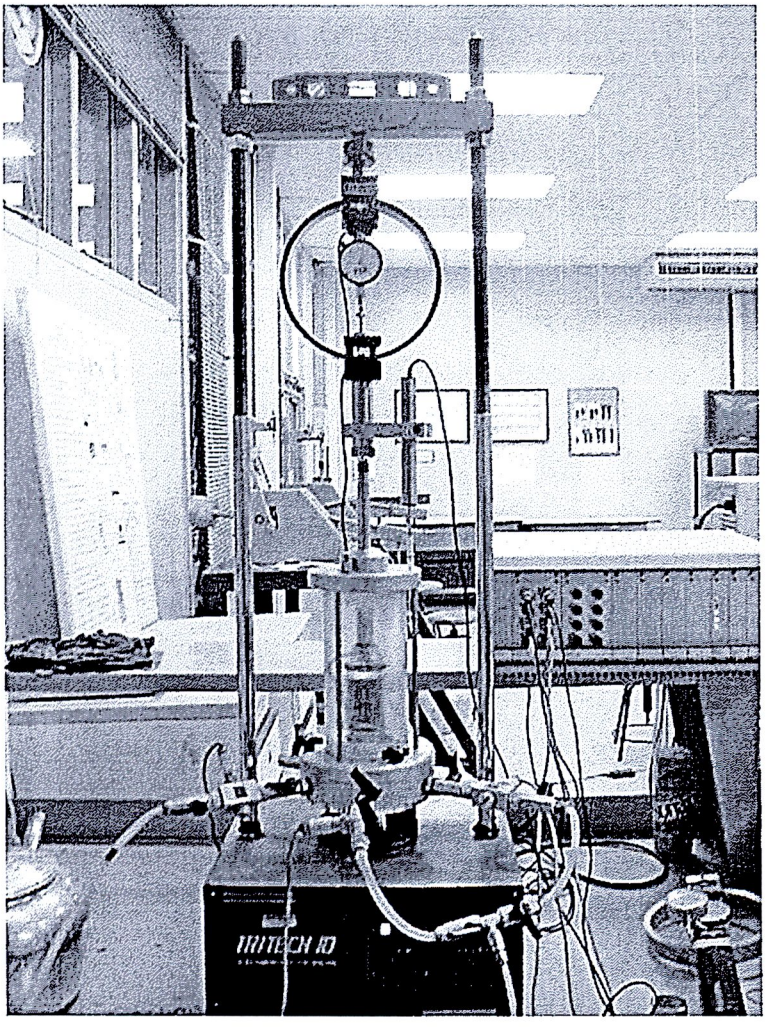


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการทรุดตัวกับเวลาที่หน่วยแรงกดทับเท่ากับ 1 ksc

รูปที่ 4.6 ดินตัวอย่างทดสอบที่เตรียมขึ้นมาใหม่ (Remolded Clay)

ง. ทดสอบหากำลังรับแรงเฉือนในสภาวะไม่ระบายน้ำ

นำดินที่จากขั้นตอนก่อนหน้า มาทดสอบเพื่อหากำลังรับแรงเฉือนสภาวะไม่ระบายน้ำ โดยทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ (Unconsolidated Undrained Test, ASTM D2850) การทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.7 แสดงการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ



รูปที่ 4.7 การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ

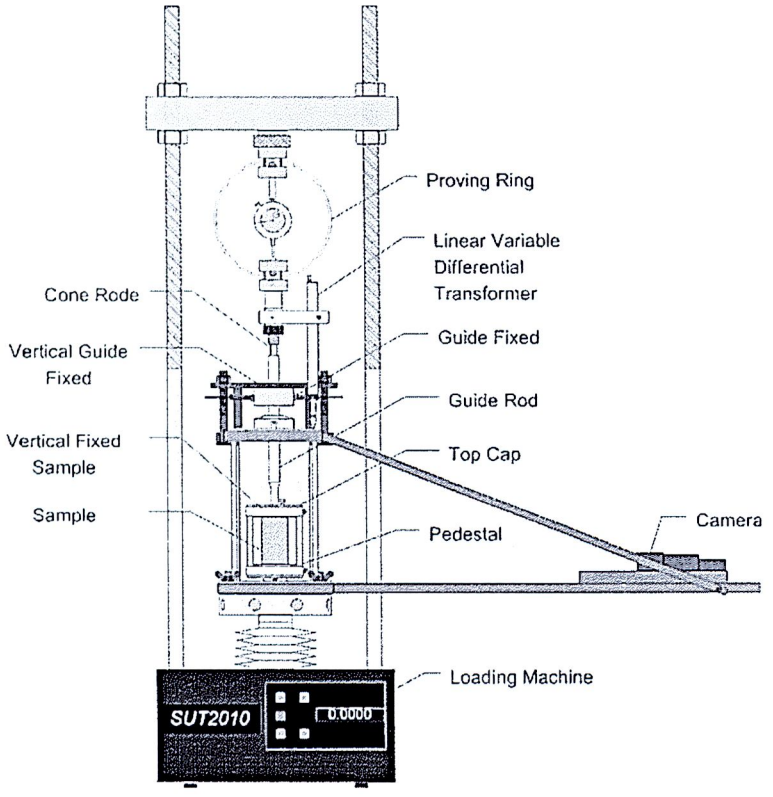
4.3 การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็ก

การทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยกับชุดทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Testing Machine) พร้อมติดตั้งกล้อง CCD (ดูรูปที่ 4.8) เพื่อใช้ในงานกราฟฟิค เช่นตรวจดูพฤติกรรมการเสียรูปขณะที่กรวยถูกดันลงไปที่ระดับความลึกต่างๆ การวัดค่าการทะลุทะลวงของกรวยจะวัดเป็นแรงต้านการทะลุทะลวง และระยะทะลุทะลุทะลวงของกรวย ซึ่งสามารถนำไปแปลงเป็นค่าแรงต้านที่ปลายกรวย (q_c) และความเสียดทานที่ปลอก (f_s) ได้ ขั้นในการทดสอบสามารถแจกแจงโดยละเอียดได้ดังต่อไปนี้

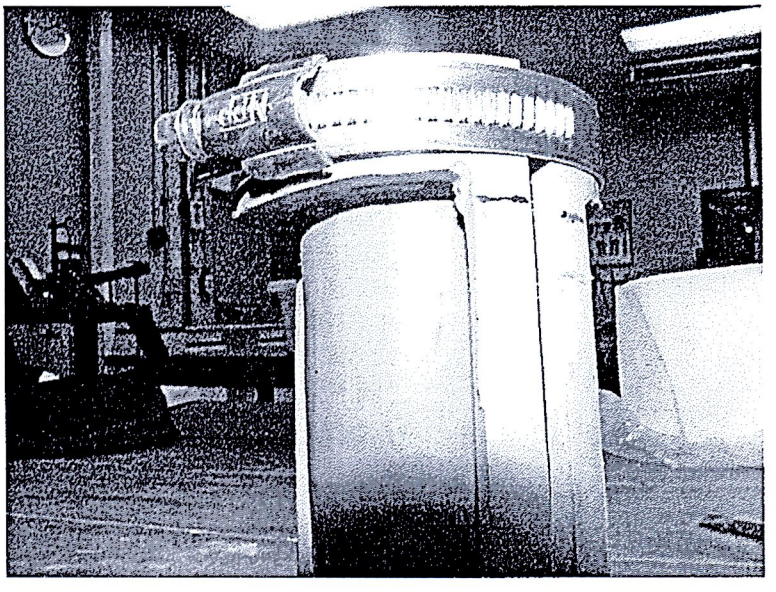
4.3.1 การเตรียมตัวอย่าง และการติดตั้ง

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

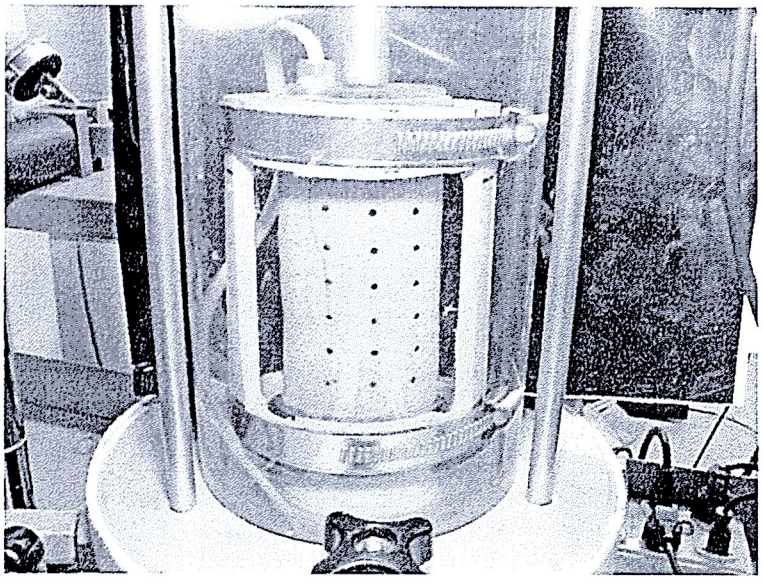
รัด O-ring ที่ปลายทั้งสองด้านบนล่าง แล้วประกอบตัวอย่างอย่างเข้ากับตัวยึดแนวดิ่ง และหมุนปลอกเกลียวให้แน่น ดังรูปที่ 4.9 ตัวยึดแนวดิ่งทำหน้าที่ยึดตัวอย่างดินไม่ให้ยุบลงเมื่อทำการกดกรวยลงในตัวอย่างดิน หากต้องการวัดการเสียรูปเชิงปริมาณ จะทำการกำหนดจุดที่จะตรวจวัดการเคลื่อนตัวดังรูปที่ 4.10 เมื่อเตรียมตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างจะถูกนำไปติดตั้งใน Triaxial cell แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 ภาพร่างเครื่องมือทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยในห้องปฏิบัติการ

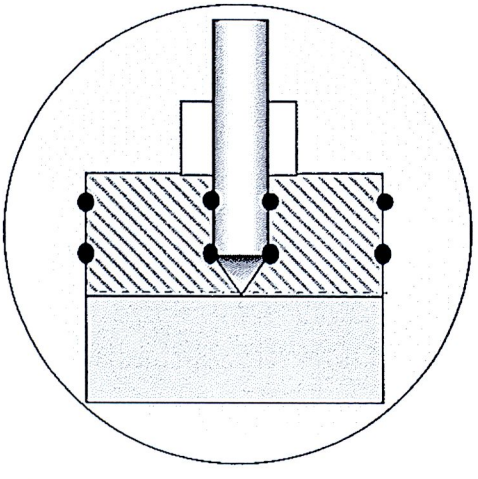


รูปที่ 4.9 ดินตัวอย่างที่รัดด้วยตัวยึดในแนวดิ่ง



รูปที่ 4.10 ตัวอย่างดินที่พร้อมสำหรับการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย

นำตัวอย่างที่ประกอบเรียบร้อยมาวางบนฐาน ใส่ที่ครอบเซลล์ ใส่ Guide Rod และ แท่งกรวย (Cone Rode) ในฝาครอบเซลล์ให้ได้ศูนย์กลาง แล้วดันแท่งกรวยเข้าไปในฝา Top cap ที่กลึงรูไว้ โดยให้ปลายกรวยอยู่ที่ผิวตัวอย่างพอดี ส่วนปลาย Guide Rod จะอยู่ตรงด้านบนของ Top cap ดังรูปที่ 4.11

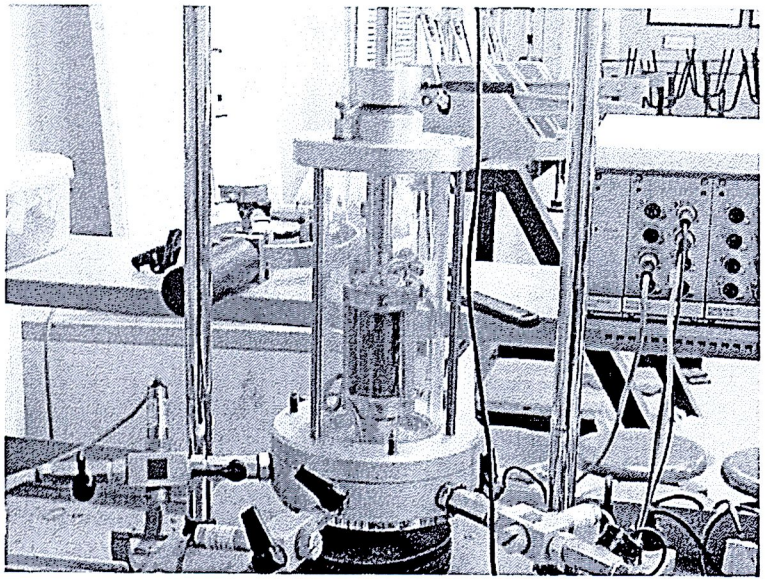


รูปที่ 4.11 ตำแหน่งปลายกรวยต่อตัวอย่างดิน

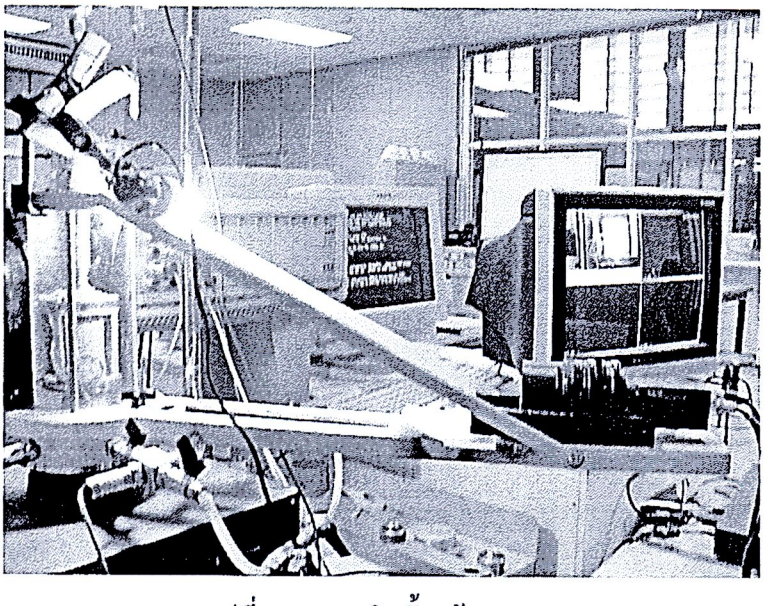
รูปที่ 4.12 แสดงรูปถ่ายเมื่อประกอบชุดทดสอบเสร็จ หากต้องการบันทึกการทดสอบด้วยกล้อง CCD ให้ประกอบที่ยึดกล้อง แล้วจัดตำแหน่งให้ได้ตามต้องการดังรูปที่ 4.13

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

ของความดันน้ำใน Triaxial cell ดังนั้นก่อนทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยจึงต้องทำการสอบเทียบกรวยก่อน ภายใต้ความดันน้ำที่เท่ากับค่าที่จะทดสอบจริง



รูปที่ 4.12 การติดตั้วชุดทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย

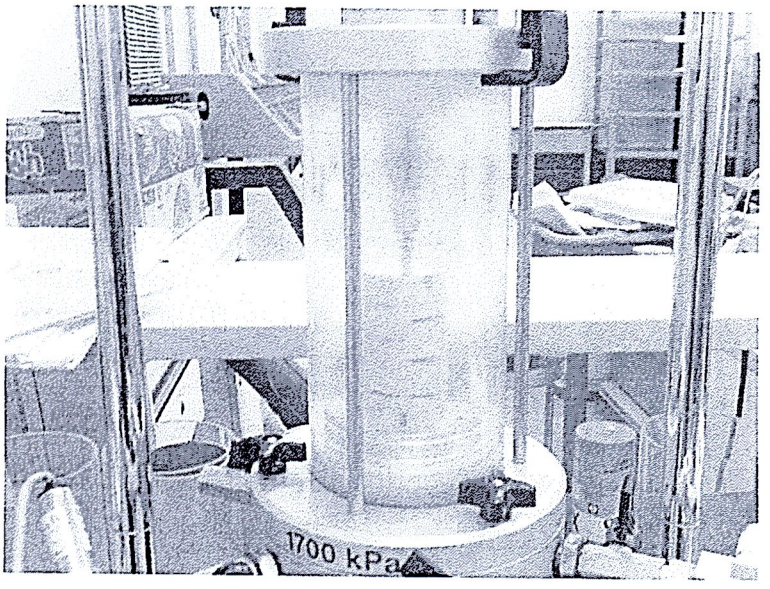


รูปที่ 4.13 การติดตั้งกล้อง CCD

4.3.2 การสอบเทียบกรวย และการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวย

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

โดยในการสอบเทียบกรวยนี้จะทำการทดสอบโดยไม่ใช้ตัวอย่างดิน แต่จะมีกระบอกที่มีรูกรวงมาเป็นแท่นวางหัว Top cap ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การติดตั้งตัวอย่างเพื่อสอบเทียบน้ำ

แรงที่ใช้ในการดันแท่งกรวยเกิดจากแรงเสียดทานระหว่าง O-Ring กับแท่งกรวย ซึ่งเกิดจากการบีบรัดของ O-Ring ที่ติดตั้งใน Top Cap โดยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นหาจากสมการที่ 4.1

$$f = F - \sigma_c A_c \tag{4.1}$$

เมื่อ

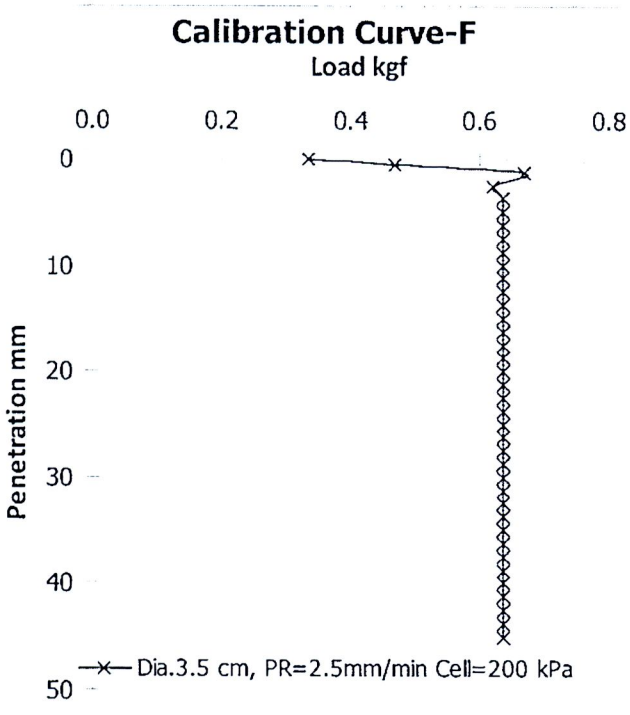
f แรงเสียดทานระหว่าง O-Ring กับแท่งกรวย

F แรงที่ใช้ในการดันแท่งกรวย (อ่านได้จาก Proving Ring)

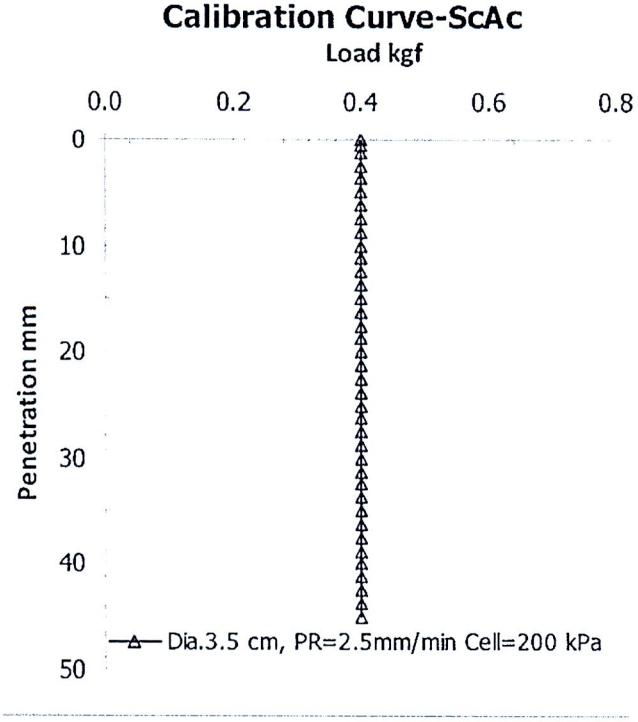
σ_c ความดันใน Triaxial cell

A_c พื้นที่หน้าตัดปลายกรวย

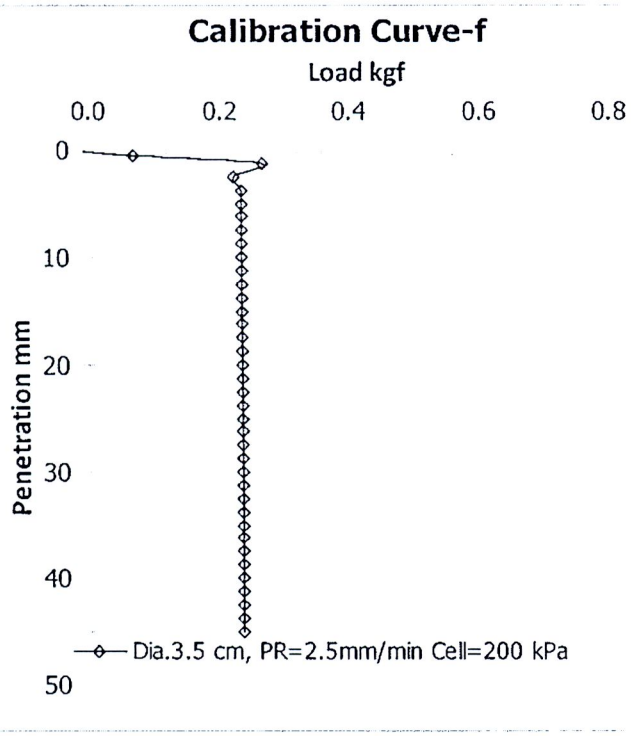
การทดสอบจะใช้ความดันรอบข้างเท่ากับการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยลงในตัวอย่างดินเหนียว (ในรายงานวิจัยนี้ใช้ 200 kPa) รูปที่ 4.15 แสดงขนาดของแรงที่ใช้ในการดันแท่งกรวย (F) ตามระยะที่กรวยถูกดันลงไป จากรูปแรง F มีค่าคงที่ตลอดตวามลึกเท่ากับ 0.63 kgf รูปที่ 4.16 แสดงค่า $\sigma_c A_c$ ตามระยะที่ดันแท่งกรวย จากรูป $\sigma_c A_c$ เท่ากับ 0.40 kgf และรูปที่ 4.17 แสดงแรงเสียดทาน (f) ตามระยะที่แท่งกรวยถูกดันซึ่งทีค่าเท่ากับ 0.23 kgf



รูปที่ 4.15 แสดงขนาดของแรงที่ใช้ในการดันแท่งกรวย (F) ตามระยะที่กรวยถูกดันลงไป



รูปที่ 4.16 แสดงค่า $\sigma_c A_c$ ตามระยะที่ดันแท่งกรวย



รูปที่ 4.17 แสดงแรงเสียดทาน (f) ตามระยะที่แท่งกรวยถูกดัน

สำหรับการทดสอบการทะลุทะลวงของกรวยขนาดเล็กกับเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกนในตัวอย่างดินเหนียว จะทดสอบที่อัตราเร็วการกดที่ต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.25 มม./นาที 0.50 มม./นาที 1.0 มม./นาที และ 5.0 มม./นาที ขนาดของตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะมีสองขนาดได้แก่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มม. สูง 70 มม. และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. สูง 70 มม. การทดสอบการกดกรวยนี้สามารถบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างที่ระยะทะลุทะลวงต่างๆได้ โดยต่อกล้อง CCD ดังรูปที่ 4.13

ผลการทดสอบการกดกรวยขนาดเล็กในเครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน สามารถนำไปแปลค่าเพื่อหาหน่วยแรงต้านทานปลายกรวย (q_c) และแรงเสียดทานที่ปลอก (f_s) โดยอ่านได้จากเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมต้านทานปลายกรวยกับระยะทะลุทะลวงของกรวยดังรูปที่ 4.18

$$Q_{total} = Q_c + Q_s \tag{4.2}$$

$$X = \frac{-C + Y}{M} \tag{4.3}$$

$$Y = MX + C \tag{4.4}$$

$$f = F + \sigma_c A_c \tag{4.5}$$

โดยที่

Q_{total} แรงต้านทานรวม (Total Cone Resistance)

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

Q_s แรงเสียดทานที่ปลอก $\frac{Y}{M}$

M ความชันของกราฟ

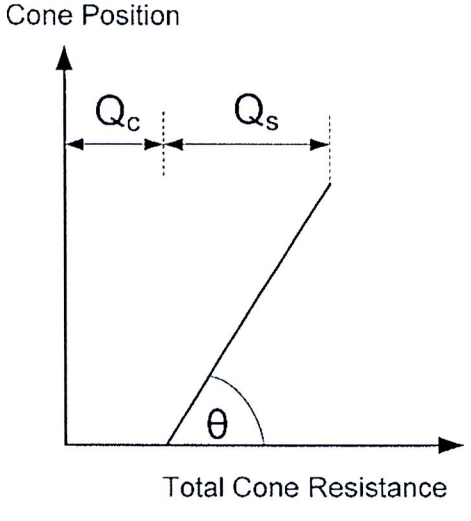
$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \tag{4.6}$$

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s} \tag{4.7}$$

โดยที่

A_c = พื้นที่หน้าตัดกรวย

A_s = พื้นที่ผิวปลอกที่สัมผัสกับดิน



รูปที่ 4.18 การหา Q_c และ Q_s จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงรวมต้านทานกับระยะทะลุทะลวงของกรวย