

การประเมินกำลังรับแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำโดยวิธีแรงอัดสามแกน

รัตมณี นันทสาร*

บทคัดย่อ

ความหมายในนัยหนึ่งของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำคือดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำบางส่วน ซึ่งจะมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำน้อยกว่าหนึ่ง ดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะมีส่วนประกอบ 3 ส่วนได้แก่ของแข็ง (เม็ดดิน) น้ำและอากาศ ดังนั้นการประยุกต์ทฤษฎีทางกลศาสตร์และชลศาสตร์จึงไม่เพียงพอต่อการอธิบายพฤติกรรมของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ พฤติกรรมของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นเกี่ยวข้องกับแรงและพลังงานที่ใช้ในการยึดส่วนประกอบของดินทั้งสามส่วนเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นนอกจากทฤษฎีทางกลศาสตร์และชลศาสตร์แล้ว พื้นฐานของฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับแรงดึงดูดระหว่างผิวของอนุภาคจึงได้ถูกนำมาใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของดินไม่อิ่มตัวด้วย ผลให้ทฤษฎีกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบประสิทธิผลของเทอซาก็ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้ เนื่องจากแรงดันน้ำในโพรงที่มีค่าเป็นลบ Fredlund และคณะ (1978) ได้เสนอสมการในการหากำลังต้านทานแรงเฉือนสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขึ้น โดยมีสมมติฐานว่าค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') มีค่าคงที่ทุกค่าแรงดูดเมทริก และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานรับแรงเฉือนกับแรงดูดเมทริกเป็นเส้นตรง ในการหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้น จำเป็นต้องทราบค่าแรงดูดเมทริกและตัวแปรที่ 3 ของแรงเฉือน (the third shear parameter, ϕ^b) ดังนั้น เครื่องแรงอัดสามแกนจึงจำเป็นต้องถูกดัดแปลง จากการศึกษาของ Gan และคณะ (1988), Escario และคณะ (1989), Vanapalli และคณะ (1996) และ Thu และคณะ (2006) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับแรงดูดเมทริกไม่เป็นเส้นตรง นอกจากนี้ Toll และคณะ (2008) พบว่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ') มีค่าไม่คงที่ทุกค่าแรงดูดเมทริก โดย Toll และคณะ (2008) พบว่ามุม ϕ^o มีค่ามากกว่า ϕ' เมื่อ ϕ^o ซึ่งเป็นมุมระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนกับหน่วยแรงสุทธิ (Angle of Friction due to Net Stress)

คำสำคัญ: ดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ การทดสอบแรงอัดสามแกน แรงดูดเมทริก กำลังต้านทานแรงเฉือน

* อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

The shear strength evaluation of unsaturated soils by Triaxial testing

Ratamane Nuntasarn^{*}

Abstract

The alternative meaning of unsaturated soil is partially saturated soil, in which the degree of saturation is less than unity. Unsaturated soils have three phases of solid (soil particles), air and water. Therefore the applications of mechanical and hydraulic laws are inadequate in describing unsaturated soil behaviour. Unsaturated soil behaviour is associated of forces and energies with multi-phase interactions. Since the fundamentals of interfacial physics are added in the application laws to explain unsaturated soil behaviour. In particular, Terzaghi's effective stress law for saturated soil is not appropriate for unsaturated soil because of negative pore water pressure. The stress, which acts on unsaturated soil, not only acts through the soil skeleton and the pore water, but also acts through the air phase. The stress state theory at failure of unsaturated soil must consider the thermodynamic properties of pore water in terms of soil suction, material variables, state variables and the consequent interparticle forces. In 1978, Fredlund et al. formulated the shear strength equation for an unsaturated soil. The assumption that the internal friction angle (ϕ') is constant with matric suction and the relationship between matric suctions and shear strengths is linear. As the shear strength of unsaturated soil is influenced by matric suction and the third shear parameter (ϕ^b) needs to be determined (Fredlund et al 1978), the conventional triaxial equipment has to be modified. Thu et al. (2006) found that non-linearity of the ϕ' angle with respect to matric suction was in agreement with data reported by Gan et al. (1988), Escario et al. (1989) and Vanapalli et al. (1996). Moreover Toll et al (2008) proposed that the angle of friction due to net stress (ϕ^a) being greater than ϕ' as measured in saturated conditions.

Keyword: unsaturated soils, triaxial test, matric suction, shear strength

^{*} Lecturer, Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002

1. บทนำ

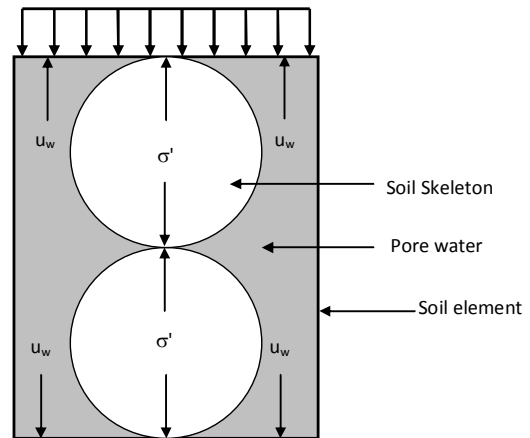
นิยามของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ คือ ดินที่อิ่มตัวบางส่วน ซึ่งมีระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of saturation) น้อยกว่าหนึ่ง ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะประกอบไปด้วย ของแข็ง (เม็ดดิน) น้ำ และอากาศ ดังนั้น ทฤษฎีหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress) ของ Terzaghi ของสำหรับดินอิ่มตัวด้วยน้ำจึงไม่เหมาะสมสำหรับดินไม่อิ่มตัว เนื่องจากความดันน้ำในโพรงของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าเป็นลบ หน่วยแรงที่กระทำกับก้อนดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้น ไม่ได้เพียงแต่กระทำกับเม็ดดินและน้ำในช่องว่างในก้อนดินเท่านั้น แต่หน่วยแรงนี้ ยังกระทำกับอากาศในช่องว่างในก้อนดินด้วย ดังนั้น ทฤษฎีของหน่วยแรงที่สภาวะวิบัติต้องพิจารณาเกี่ยวกับคุณสมบัติทาง Thermodynamic ของน้ำในรูปของแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดิน ตัวแปรทางวัสดุ ตัวแปรของสภาวะสิ่งแวดล้อม และผลเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค (Interparticle forces)

2. แบบจำลองกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

แนวคิดของเทอซากิ (1936) เกี่ยวกับน้ำหนักที่กระทำกับดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ คือ น้ำหนักที่กระทำกับมวลดินจะกระทำกับน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินกับเม็ดดิน โดยให้หน่วยแรงรวม (Total stress, σ) คือ หน่วยแรงที่กระทำกับมวลดิน ซึ่งทำให้เกิดแรงดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore water pressure, u_w) และหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective stress, σ') หน่วยแรงประสิทธิผลนี้เป็นหน่วยแรงที่กระทำกับเม็ดดิน ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้น หน่วยแรงรวมจึงเป็นผลรวมของแรงดันน้ำในโพรงกับหน่วยแรงประสิทธิผล ดังแสดงในสมการที่

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad (1)$$

กำลังรับแรงเฉือนของดินอิ่มตัวด้วยน้ำคำนวณหาได้ตามแบบจำลองการวิบัติของ Mohr-Coulomb และแนวคิดหน่วยแรงประสิทธิผลของเทอซากิ (1936) ดังแสดงในสมการที่ 2



รูปที่ 1 แนวคิดหน่วยแรงประสิทธิผลของเทอซากิ (1936)

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \tan \phi' \quad (2)$$

- เมื่อ τ_f = กำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดวิบัติ
- c' = ค่าความเชื่อมแน่นประสิทธิผล
- σ'_f = หน่วยแรงประสิทธิผลที่จุดวิบัติ
= $\sigma_f - u_{wf}$
- σ_f = หน่วยแรงรวมที่จุดวิบัติ
- u_{wf} = ความดันน้ำในโพรงที่จุดวิบัติ
- ϕ' = มุมเสียดทานประสิทธิผล

อย่างไรก็ตามเมื่อดินเข้าสู่สภาพไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ช่องว่างระหว่างเม็ดดินจะมีอากาศอยู่ด้วย ดังนั้น แนวคิดหน่วยแรงประสิทธิผลของเทอซากิจึงไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้ Bishop (1959) ได้เสนอสมการหน่วยแรงประสิทธิผลของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เมื่อน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดินได้ถูกแทนที่ด้วยอากาศและน้ำ meniscus ยังคงอยู่รอบเม็ดดินดังแสดงในรูปที่ 2 สมดุลของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงภายใน แสดงในสมการที่ 3

$$\sigma = \sigma' + \chi u_w + (1 - \chi) u_a \quad (3)$$

ดังนั้น

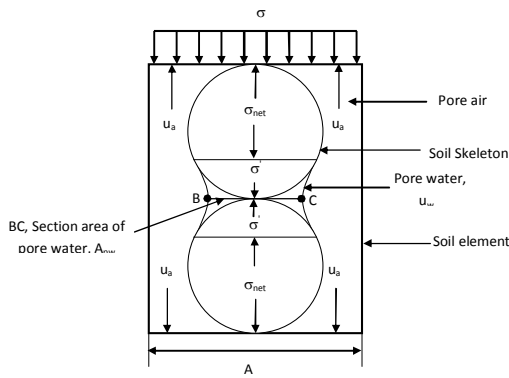
$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (4)$$

หรือ

$$\sigma' = \sigma_{net} + \chi(u_a - u_w) \quad (5)$$

เมื่อ

- σ' = หน่วยแรงประสิทธิผล
- σ_{net} = หน่วยแรงสุทธิ (Net stress)
= $\sigma - u_a$
- χ = ตัวแปรหน่วยแรงประสิทธิผล
= $\frac{A_{pw}}{A}$
- A = พื้นที่หน้าตัดของก้อนดิน (รูปที่ 2)
- A_{pw} = พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างน้ำในก้อนดิน (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 หน่วยแรงประสิทธิผลของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำตามแนวคิดของ Bishop (Kurube และ Kawai, 2001)

เมื่อแทนสมการที่ 5 ลงในสมการที่ 2 จะได้สมการหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแสดงในสมการที่ 6:

$$\tau_f = c' + \{ \sigma_{netf} + \chi_f (u_a - u_w)_f \} \tan \phi' \quad (6)$$

เมื่อ

- σ_{netf} = หน่วยแรงสุทธิที่จุดวิบัติ
- χ_f = ตัวแปรหน่วยแรงประสิทธิผลที่จุดวิบัติ
- $(u_a - u_w)_f$ = แรงดูดเมทริก (matric suction) ที่จุดวิบัติ

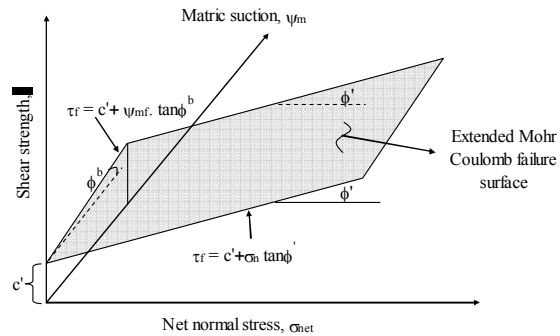
ตัวแปรหน่วยแรงประสิทธิผล χ นี้คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของโพรงน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดก้อนดินทั้งก้อน ซึ่ง χ ขึ้นอยู่กับระดับของความอิ่มตัว ตัวแปรหน่วยแรงประสิทธิผล χ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อดินอยู่ใน

สภาพแห้งสมบูรณ์ และมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อดินอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วย

ต่อมาในปี 1978 Fredlund และคณะ ได้เสนอสมการในการหากำลังต้านทานแรงเฉือนสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 7 และรูปที่ 3

$$\tau_f = c' + \sigma_{netf} \tan \phi' + \psi_{mf} \tan \phi^b \quad (7)$$

- เมื่อ ϕ^b = มุมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนกับค่าแรงดูดเมทริกที่จุดวิบัติ ψ_{mf}
- ψ_{mf} = แรงดูดเมทริก (Matric suction) ที่จุดวิบัติ = $(u_a - u_w)_f$



รูปที่ 3 แสดงเส้นขอบเขตความแข็งแรงของดินสำหรับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Fredlund, 1978)

ซึ่งสมมติฐานของ Fredlund และคณะ (1978) คือ ค่ามุมเสียดทานภายใน (ϕ^b) มีค่าคงที่ทุกค่าแรงดูดเมทริกและความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานรับแรงเฉือนกับแรงดูดเมทริกเป็นเส้นตรง

ความสัมพันธ์ระหว่างมุม ϕ^b กับพารามิเตอร์ของหน่วยแรงประสิทธิผลที่ระนาบการเกิด, χ_f , แสดงในสมการที่ 8 และ 9 ซึ่งได้จากการแก้สมการที่ 6 และ 7:

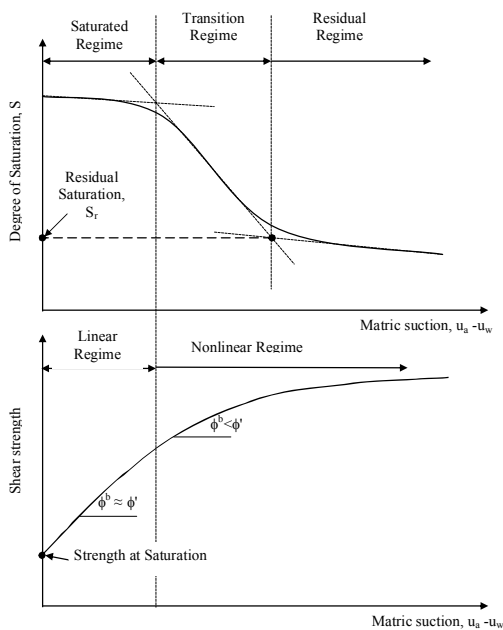
$$\tan \phi^b = \chi_f \tan \phi' \quad (8)$$

หรือ

$$\chi_f = \frac{\tan \phi^b}{\tan \phi'} \quad (9)$$

เมื่อ χ_r มีค่าเท่ากับ 1.0 มุม ϕ^b มีค่าเท่ากับมุม ϕ' หมายความว่าดินอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนและแรงดัดเมทริกในสภาวะนี้เป็นเส้นตรง

เมื่อ χ_r มีค่าน้อยกว่า 1.0 มุม ϕ^b มีค่าน้อยกว่ามุม ϕ' หมายความว่าดินอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนกับแรงดัดเมทริกในสภาวะนี้ไม่เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แนวคิดเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่าง Soil Water Characteristic Curve และกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Lu และ Likos, 2004)

Vanapalli และคณะ (1996) ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับความอิ่มตัวและตัวแปรของหน่วยแรงประสิทธิผล, χ_r , โดยอาศัยผลการทดสอบของ Escario และคณะ (1989) ดังแสดงในสมการที่ 10 และ 11 โดยแรงดัดเมทริกอยู่ในช่วง 0 ถึง 1500 kPa:

$$\chi_r = s^\kappa = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\kappa \quad (10)$$

$$\chi_r = \frac{s - s_r}{1 - s_r} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (11)$$

- เมื่อ s = ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำ
- θ = ปริมาณความชื้นโดยปริมาตร (Volumetric Water Content)
- θ_s = ปริมาณความชื้นที่อิ่มตัวโดยปริมาตร (Saturated Volumetric Water Content)
- κ = ตัวแปร
- θ_r = ปริมาณความชื้นที่เหลือโดยปริมาตร (Residual Volumetric Water Content)
- s_r = ระดับความอิ่มตัวด้วยน้ำที่เหลือ (Residual Degree of Saturation)

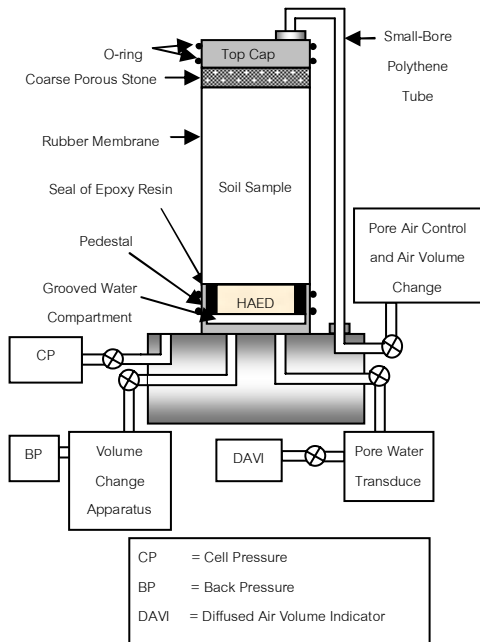
3. เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

ในการหากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้น จำเป็นต้องทราบค่าแรงดัดเมทริกและตัวแปรที่ 3 ของแรงเฉือน (The Third Shear Parameter, ϕ^b) ดังนั้น เครื่องแรงอัดสามแกนจึงจำเป็นต้องถูกดัดแปลง

Ho และ Fredlund (1982) ได้ดัดแปลงเครื่องมืออัดแรงสามแกนเพื่อศึกษาอิทธิพลของเมทริกต่อการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเครื่องมือแรงอัดสามแกนจะประกอบไปด้วย สายน้ำ (Water Line) เป็นสายที่ให้น้ำไหลเข้าหรือไหลออกจากตัวอย่าง ที่ต่อเข้ากับฐานของเครื่องอัดสามแกนและปลายอีกข้างต่อเข้ากับเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพื่อใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้ำในโพรงสายระบายอากาศ (Air Drainage Line) เป็นสายที่อากาศไหลเข้าหรือไหลออกจากตัวอย่าง โดยปลายด้านหนึ่งจะต่อเข้ากับฝาครอบตัวอย่าง (Loading Cap)

สำหรับการวัดค่าเมทริกโดยอาศัยเทคนิค Axis-translation ของ Bishop และคณะ (1960) โดยแผ่นเซรามิก (High Air-Entry Ceramic Disks, HAED) เป็นอุปกรณ์ที่ป้องกันไม่ให้อากาศไหลผ่านไปยังเครื่องมือวัดความดันน้ำ ซึ่งติดตั้งที่ฐานของเครื่องอัดสามแกน แทนของเครื่องอัดสามแกน (Pedestal) จะถูกเจาะให้มีขนาดเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของ HAED และลึกเท่ากับความ

หนาของ HAED ที่ผิวของช่องที่ถูกเจาะจะถูกเจาะให้เป็นร่องสำหรับให้น้ำไหล แล้วติด HAED ลงไปโดยใช้อีพ็อกซี่ (Epoxy) ทารอบข้างเพื่อยึดติด HAED กับแท่น



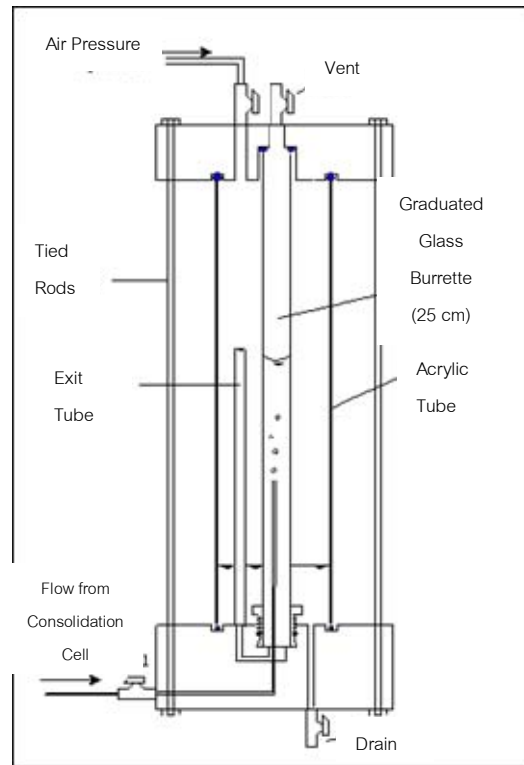
รูปที่ 5 เครื่องแรงอัดสามแกนที่ถูกดัดแปลงสำหรับการทดสอบดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Ho และ Fredlund, 1982)

อากาศที่กระจายอยู่ในน้ำก่อให้เกิดความผิดพลาดในการวัดหาค่าความดันน้ำในโพรง รวมถึงการวัดหาค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดิน ซึ่งในการคำนวณหาปริมาตรของอากาศที่กระจายอยู่ในน้ำนั้น สามารถทำได้โดยการไล่ให้น้ำที่ไหลออกจากตัวอย่างไหลไปยังเครื่องมือวัดปริมาณอากาศที่กระจายอยู่ในน้ำ (Diffused Air Volume Indicator, DAVI) ที่ถูกต่อเข้ากับเครื่องมืออัดสามแกนดังแสดงในรูปที่ 6

4. เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรดิน

เนื่องจากช่องว่างของเม็ดที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นจะประกอบไปด้วยน้ำและอากาศ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดิน ขณะทำการทดสอบน้ำจะเกิดจากปริมาตรของน้ำและอากาศ ซึ่งแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำในดิน ดังนั้น การ

วัดหาค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ จึงใช้เพียงแค่เครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change Apparatus) วัดหาปริมาตรการไหลของน้ำเข้าหรือออกจากตัวอย่างดิน

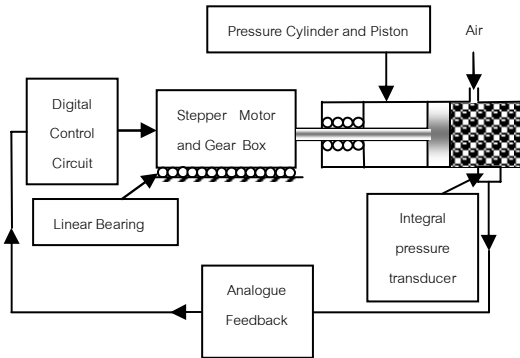


รูปที่ 6 เครื่องมือวัดปริมาณอากาศที่กระจายอยู่ในน้ำ (Fredlund และ Rahardjo, 1993)

Drumright (1987) ได้ใช้ Non-contacting Radial Deformation Transducers ในการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ แต่ Fredlund และ Rahardjo (1993) ไม่แนะนำให้ใช้ในกรณีนี้ที่ตัวอย่างดินมีการเสียรูปค่อนข้างมาก

Adams และคณะ (1996) ได้เสนอเครื่องมือควบคุมปริมาตรความดันอากาศ (Digital Pressure-Volume Controller) ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยเครื่องมือนี้ออกแบบให้ควบคุมความดันอากาศในตัวอย่างดิน ซึ่งสามารถคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรอากาศในตัวอย่างดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้ ดังนั้นเมื่อทราบถึงปริมาตรของอากาศที่เปลี่ยนไปและปริมาณน้ำในตัวอย่างที่เปลี่ยนไปก็ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินได้ อย่างไรก็ตามเครื่องมือนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิ ทำให้ระหว่างการทดสอบอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ต้องถูกตรวจสอบและรักษาให้คงที่

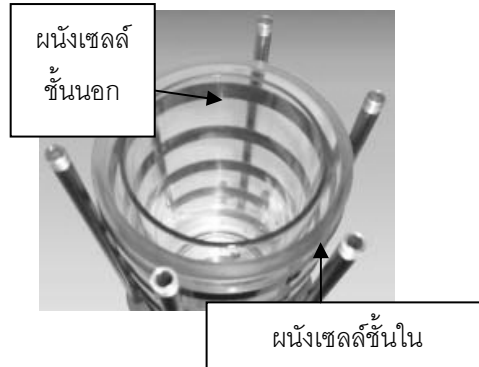


รูปที่ 7 เครื่องมือควบคุมปริมาตรความดันอากาศ (Adams และคณะ, 1996)

บริษัท Wykeham Farrance (2007) ได้นำเสนอระบบเซลล์ 2 ชั้นสำหรับชุดทดสอบแรงอัดสามแกน (Double Wall Triaxial Cell) ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งระบบเซลล์ 2 ชั้นสำหรับชุดทดสอบแรงอัดสามแกนจะประกอบด้วยผนังเซลล์ชั้นนอก (Outer Cell Wall) และผนังเซลล์ชั้นใน (Wall Cell Inner) โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำในผนังเซลล์ชั้นในจะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของตัวอย่างดิน ผนังเซลล์ชั้นนอกจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ เพราะแรงดันน้ำภายในของผนังเซลล์ชั้นนอกมีค่าเท่ากับแรงดันน้ำรอบข้างที่กระทำกับตัวอย่างดิน ซึ่งแรงดันน้ำนี้จะมีค่าสูงกว่าแรงดันภายนอกผนังเซลล์ชั้นนอก ซึ่งเป็นความดันของอากาศที่อยู่รอบผนังเซลล์ชั้นนอก ส่วนผนังเซลล์ชั้นในนั้น จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เพราะแรงดันภายในที่กระทำกับผนังเซลล์ภายในเท่ากัน เนื่องจากเป็นแรงดันน้ำรอบข้างที่กระทำกับตัวอย่างดินน้ำเหมือนกัน ดังนั้น ที่ปลายด้านหนึ่งของสายน้ำ ซึ่งต่อเข้ากับช่องน้ำที่ฐานของเครื่องอัดแรงสามแกน เพื่อให้ น้ำไหลเข้าไปยัง ผนังเซลล์ชั้นในนั้น จะต่อเข้ากับเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume Change Apparatus) ดังแสดงในรูปที่ 9

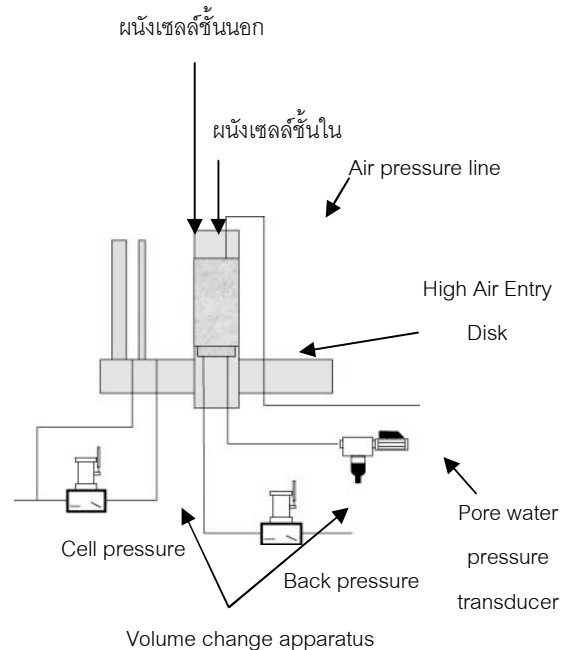
ข้อเสียของระบบเซลล์ 2 ชั้นคือมีราคาสูง สิ้นค้ายังมีจำกัดเพียงไม่กี่บริษัท มีความยุ่งยากในการดัดแปลง

เครื่องมือเดิมที่มีอยู่แล้ว แต่ข้อดีของระบบเซลล์ 2 ชั้น จะไม่มีความยุ่งยากขณะการทดสอบ และความสะดวกในการประมวลผล เนื่องจากเครื่องมือวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (Volume change apparatus) จะสามารถต่อตรงเข้ากับโปรแกรมที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลขณะทำการทดสอบได้เลย



รูปที่ 8 ระบบเซลล์ 2 ชั้น

(http://www.wfi.co.uk/pdf/wf_catalogue_double_wall_tri_axial_cell.pdf)



รูปที่ 9 แผนผังระบบการทดสอบแรงอัดสามแกน ของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยใช้ระบบเซลล์ 2 ชั้น

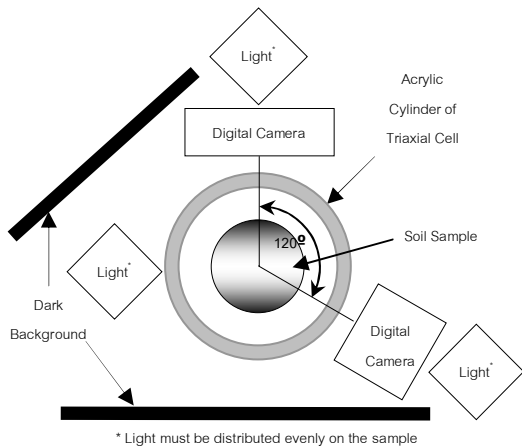
(http://www.wfi.co.uk/pdf/wf_catalogue_double_wall_tri_axial_cell.pdf)

Elkady (2002) ได้ใช้กล้องดิจิตอล 2 ตัว ในการบันทึกการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดิน ทุกๆ 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งกล้องจะวางห่างกัน 120° รูปที่ 10 ถูกบันทึกจะถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยจะแปลงจากค่าพิกเซล (Pixel) ไปอยู่ในรูปของหน่วยความยาวและจากนั้นจะแปลงไปเป็นความเครียด ซึ่งความเครียดตามแนวแกนและความเครียดในแนวรัศมีที่ได้จะนำไปคำนวณหาความเครียดโดยปริมาตรจากสมการที่ 12

$$\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_r \quad (12)$$

เมื่อ

- ϵ_v = ความเครียดโดยปริมาตร (Volumetric Strain)
- ϵ_a = ความเครียดตามแนวแกน (Axial Strain)
- ϵ_r = ความเครียดตามแนวรัศมี (Radial Strain)



รูปที่ 10 ตำแหน่งการวางกล้องที่ใช้ในการทำการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดิน (Elkady, 2002)

Elkady (2002) พบว่า ความเครียดโดยปริมาตรที่ได้จากการวัดโดยกล้อง ให้ความสอดคล้องที่ดีกับความเครียดโดยปริมาตร ที่ได้จากการวัดปริมาตรของน้ำที่ไหลเข้า หรือออกจากกระบอกเซลล์ 2 ชั้นสำหรับชุดทดสอบแรงอัดสามแกน

อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีราคาที่ถูกกว่ากระบอกเซลล์ 2 ชั้นสำหรับชุดทดสอบแรงอัดสามแกนมาก แต่จะมีความ

ยุ่งยากกว่า และใช้เวลานานกว่าในการวิเคราะห์ข้อมูล เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้ในการบันทึกและวิเคราะห์เป็นโปรแกรมคนละตัวกับโปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องมีการเขียนโปรแกรมใหม่หรือเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมจากโปรแกรมการทดสอบเดิม

5. เครื่องมือวัดปริมาณอากาศที่กระจายอยู่ในน้ำ (Diffused Air Volume Indicator, DAVI)

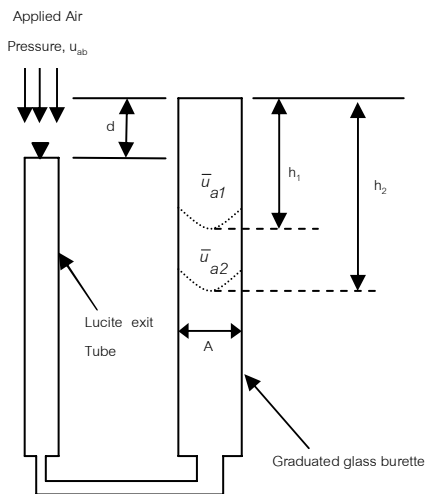
ปริมาตรของอากาศที่กระจายอยู่ในช่องน้ำที่ฐานใต้ HAED และสายน้ำวัดหาได้ด้วยเครื่องมือ DAVI ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 11 (Fredlund และ Rahardjo, 1993) วิธีการหาปริมาตรของอากาศที่กระจายอยู่ในน้ำนั้นทำได้โดย ให้ความดันน้ำใต้ HAED (u_c) สูงกว่าความดันน้ำ (u_{ab}) ในท่อออก (Exit tube) ของเครื่องมือ DAVI ดังนั้นเมื่อเปิดวาล์วน้ำในช่องน้ำใต้ฐาน HAED จะไหลไปยังหลอดแก้ววัดระดับน้ำในเครื่องมือ DAVI ระดับน้ำในหลอดแก้วจะต้องบันทึกก่อนให้ความดันในท่อออก ระดับน้ำที่บันทึกได้ให้เป็นค่า h_{a1} และหลังจากปล่อยให้ น้ำไหลจากช่องน้ำที่ฐานใต้ HAED แล้วให้บันทึกระดับน้ำอีกครั้งหนึ่งเป็นค่า h_{a2} ปริมาตรอากาศที่กระจายอยู่ในน้ำคำนวณหาได้จากสมการที่

$$V_{fa} = \frac{\bar{u}_{a2} V_{a2} - \bar{u}_{a1} V_{a1}}{\bar{u}_{fa}} \quad (13)$$

เมื่อ

- \bar{u}_{fa} = ความดันของอากาศที่ผสมอยู่ในน้ำสมบูรณ์ (Absolute diffused air pressure)
- = $\bar{u}_{atm} + u_c$
- \bar{u}_{a1} = ความดันอากาศในหลอดแก้วสมบูรณ์เริ่มต้น (Absolute initial air pressure in the burette)
- = $\bar{u}_{atm} + u_{ab} + (h_{a1} - d) \rho_w g$
- \bar{u}_{a2} = ความดันอากาศในหลอดแก้วสมบูรณ์ หลังจากการระบายน้ำจากช่องน้ำใต้ฐาน HAED

- $$= \bar{u}_{atm} + u_{ab} + (h_{a2} - d) \rho_w g$$
- V_{fa} = ปริมาตรของอากาศที่กระจายอยู่ในน้ำที่อยู่ในช่องน้ำใต้ฐาน HAED (Volume of diffused air in the base plate)
- V_{a1} = ปริมาตรของอากาศที่กระจายอยู่ในน้ำในหลอดแก้วสมบูร์นเริ่มต้น (Initial volume of diffused air in burette)
- $$= h_{a1} \cdot A$$
- V_{a2} = ปริมาตรของอากาศที่กระจายอยู่ในน้ำในหลอดแก้วสมบูร์นหลังจากการระบายน้ำจากช่องน้ำใต้ฐาน HAED (Final volume of diffused air in burette)
- $$= h_{a2} \cdot A$$
- A = พื้นที่หน้าตัดของหลอดแก้ววัดระดับน้ำ (Graduated glass burette)
- \bar{u}_{atm} = ความดันบรรยากาศ
- d = ความแตกต่างในความสูงระหว่างท่อออก (Exit tube) กับหลอดแก้ววัดระดับน้ำ (Graduated glass burette)



รูปที่ 11 เครื่องมือวัดปริมาณอากาศที่กระจายอยู่ในน้ำ (Fredlund และ Rahardjo, 1993)

6. การทดสอบหาลังต้านทานรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ในการหาลังต้านทานแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 1

Thu และคณะ (2006) พบว่ามุม ϕ^b ของดินตะกอนจากการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบปริมาณความชื้นคงที่ (Constant Water content Triaxial Test, CW test) มีค่าไม่คงที่กับค่าแรงดึงจุดเมทริก ค่าของ ϕ^b ที่แรงดึงจุดเมทริกมีค่าน้อย (ดินอยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ) มีค่าเท่ากับมุมของแรงเสียดทานประสิทธิผล (Effective stress friction angle, ϕ') ในช่วงของแรงดึงจุดเมทริกเท่ากับ 55 ถึง 75 kPa มุม ϕ^b มีค่าลดลงเป็นอย่างมากและหลังจากนั้นมุม ϕ^b จะมีค่าคงที่ เมื่อแรงดึงจุดเมทริกมีค่าเกินกว่า 150 kPa ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือนกับค่าแรงดึงจุดเมทริกที่ไม่เป็นเส้นตรงนี้ตรงกับผลการศึกษาของ Gan และคณะ (1988), Escario และคณะ (1989) และ Vanapalli และคณะ (1996)

Toll และคณะ (2008) ได้ทดสอบหาอิทธิพลของแรงดึงจุดต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของดิน Artificial ที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคไม่แข็งแรง โดยวิธีแรงอัดสามแกนแบบปริมาณความชื้นคงที่ (Constant Water content Triaxial Test, CW test) พบว่ามุม ϕ^b ของดินนี้ที่ได้จากการคำนวณหาจากสมการที่ 2 โดยอาศัยค่าความเชื่อมแน่นและมุมเสียดทานของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ มีค่าสูงกว่ามุม ϕ^b ที่ถูกประมาณจากสมการที่ 4 ซึ่งอาศัยค่าระดับอิ่มตัวด้วยน้ำ (Degree of Saturation) เมื่อดินมีค่าอิ่มตัวด้วยน้ำน้อยกว่า 25% ข้อมูลนี้ได้ถูกวิเคราะห์ใหม่และพบว่า ค่าความแตกต่างของมุม ϕ^b เกิดจากมุม ϕ^s ซึ่งเป็นมุมระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนกับหน่วยแรงสุทธิ (Angle of Friction due to Net Stress) มีค่ามากกว่ามุม ϕ' ของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ

ตารางที่ 1 วิธีการทดสอบแรงอัดสามแกนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Fredlund และ Rahardjo, 1993)

วิธีการทดสอบ	Consolidation prior to shearing process	Drainage		Shearing process		
		Pore air	Pore water	Pore air pressure, u_a	Pore water pressure, u_w	Soil volume change, ΔV
Consolidated drained (CID)	Yes	Yes	Yes	C	C	M
Constant water content (CW)	Yes	Yes	No	C	M	M
Consolidated Undrained (CIU)	Yes	No	No	M	M	-
Undrained	No	No	No	-	-	-
Unconfined compression (UC)	No	No	No	-	-	-

หมายเหตุ: C = controlled; M = measured

7. สรุป

ดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำประกอบไปด้วย อากาศ น้ำ และของแข็ง (เม็ดดิน) ดังนั้นหน่วยแรงที่กระทำกับดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจึงกระทำกับเม็ดดิน น้ำในช่องว่างของก้อนดิน และ อากาศในช่องว่างของก้อนดิน ไม่ใช่เพียงแค่เม็ดดินกับน้ำในโพรงเท่านั้น

ระนาบการวิบัติของ Mohr-Coulomb ได้ขยายออกไปเป็น 3 มิติเพื่อใช้ในการคำนวณหากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ เนื่องจากอิทธิพลของแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดิน กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดินเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยแรงสุทธิเท่ากัน ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับแรงคูดเมทริกจะถูกหาในรูปของ χ (สมการของ Bishop, 1959) หรือมุม ϕ^b (สมการของ Fredlund, 1978) ตัวแปรของหน่วยแรงประสิทธิผล χ เป็นฟังก์ชันของระดับการอิ่มตัวด้วยน้ำของดิน (Degree of saturation, S) หรือปริมาณความชื้นโดยปริมาตรของดิน (Volumetric water content, θ) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง χ และ ϕ^b จะเชื่อมผ่านมุมเสียดทานของดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ϕ')

เครื่องมืออัดแรงสามแกนจำเป็นจะต้องดัดแปลงเพื่อทำการทดสอบหาตัวแปรที่ 3 ของกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ϕ^b) เพื่อใช้ควบคุมหรือวัดแรงคูดเมทริกระหว่างการทดสอบ โดย HAED จะถูกติดตั้งที่ฐานของเครื่องอัดสามแกนเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศไหลผ่านไปยังเครื่องมือวัดความดันน้ำ

การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำนั้นจะไม่สามารถหาได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำในดิน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีเครื่องเฉพาะในการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของตัวอย่างดินขณะทำการทดสอบ

จากการทดสอบพบว่าแรงคูดเมทริกที่ค่าต่ำ ค่ามุม ϕ^b จะมีค่าเท่ากับ ϕ' และจะลดลงเมื่อแรงคูดเมทริกเพิ่มขึ้น และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนกับแรงคูดเมทริกไม่เป็นเส้นตรง นอกจากนี้ยังพบว่า ค่ามุมเสียดทาน ϕ' มีค่าไม่คงที่เมื่อค่าแรงคูดเมทริกเปลี่ยนไป

8. เอกสารอ้างอิง

- Adams, A.B., Wulfsohn, D. and Fredlund, D. (1996). *Air Volume Change Measurement in Unsaturated Soil Testing Using a Digital Pressure-Volume Controller*, Geotechnical Testing Journal, No.1, pp. 12-21.
- Bishop, A.W. (1959). The Principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Tenikk*, Oslo, Norway, 106(39), pp. 859-863
- Bishop, A.W., I. Alpan, G. E. Blight and I. B. Donald (1960). *Factors Controlling the Shear Strength of Partly Saturated Cohesive Soils*, ASCE Res. Conf. Shear Strength of Cohesive Soils (Univ. of Colorado, Boulder), pp. 503-522.
- Drumright, E. (1987). *Shear Strength for Unsaturated Soils*, Ph.D. dissertation, University of Colorado, Fort Collins.
- Elkady, Y.T. (2002). *Static and Dynamic Behaviour of Collapsible Soils* (PhD dissertation). University of Arizona.

- Escario, V., Juca, J. and Coppe, M.S. (1989). *Strength An Deformation Of Partly Saturated Soils*, Proceeding of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3, Rio de Janeiro , pp. 43-46.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A. (1978). *The Shear Strength of Unsaturated Soils*, Canadian Geotechnical Journal, 15, pp. 313-321.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, New York
- Gan, J.K., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1988). *Determination of the Shear Strength Parameters of an Unsaturated Soil Using the Direct Shear Test*. Canadian Geotechnical Journal, 25, No.3, pp 500-510.
- Ho, D.Y.F. and Fredlund, D.G. (1982). *Multistage Triaxial Test for Unsaturated Soils* Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 5, No. 1/2, pp.18-25
- Karube, D. and Kawai, K. (2001). *The Role of Pore water in the Mechanical Behaviour of Unsaturated Soils*. Geotechnical and Geological Engineering, 19, pp. 211-241.
- Lu, N. and Likos, W.J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Terzaghi, K. (1936). *The Shear Strength Resistance of Saturated Soils*, Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol.1, Cambridge, MA, pp.54-56.
- Thu, T.M., Rahardjo, H. and Leong, E.C. (2006). *Shear Strength and Pore Water Pressure Characteristics during Constant Water content Triaxial Tests*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol.132, no.3, pp.411- 419.
- Toll, D.G., Ali Rahman, Z. & Gallipoli, D. (2008). 'Critical State Conditions for an Unsaturated Artificially Bonded Soil', *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*, Taylor&Francis Group, Lodon, pp 435-440.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. and Clifton, A.W. (1996). *Model for the Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction*, Canadian Geotechnical Journal, 33, pp 379-392.
- Geotechnical: Advanced soil testing. Wykeham Farrance (Cited 2010Nov01). Availablefrom http://www.wfi.co.uk/soil_products.php?code=243&page=Unsaturated_Triaxial_Testing&product=556&prod_name=Double_Wall_Triaxial_Cell