บทที่ 2

แนวเหตุผลทางทฤษฎีและสมมุติฐานที่สำคัญ

2.1 หลักการหน่วยแรงประสิทธิผล (The Principle of Effective Stress)

ในปี 1960 Terzaghi ได้ศึกษาเกี่ยวกับหลักการของหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress principle) และได้แสดงให้เห็นว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress) เป็นสิ่งที่ควบคุมพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวและการพิบัติของดินอิ่มตัวด้วยน้ำ และมีค่าเท่ากับหน่วยแรงรวม (total stress) ลบด้วยค่าความดันน้ำในโพรงดิน (pore pressure)

$$\bar{\sigma} = \sigma - u \qquad \text{.....(2.1.1)}$$

$\bar{\sigma}$ = หน่วยแรงประสิทธิผล (effective stress)

σ = หน่วยแรงรวม (total stress)

u = ความดันน้ำในโพรงดิน

ในปี 1934 Jergenson และ Casagrande ได้ทบว่า ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเป็นตัวควบคุมพฤติกรรมทางกำลังรับน้ำหนัก (strength) ของดิน และกฎของการพิบัติโดย Mohr และ coulomb ในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผลสำหรับดินอิ่มตัวด้วยน้ำมีค่าค่อนข้างจะเหมือนกัน ถ้าแสดงผลไว้ในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล

$$\tau_{ff} = \bar{c} + \bar{\sigma}_{ff} \tan \bar{\phi} \qquad \text{.....(2.1.2)}$$

τ_{ff} = แรงเฉือนที่พิบัติ (shearing strength)

$\bar{c}$ = หน่วยแรงยึดหน่วงประสิทธิผล (effective cohesion)

$\bar{\sigma}_{ff}$ = หน่วยแรงตั้งฉากประสิทธิผลบนระนาบพิบัติ (effective normally stress on failure plane)

$\bar{\phi}$ = มุมประสิทธิผลของความต้านทานต่อแรงเฉือน

จากสมการที่ 2.1.2 นี้ ใช้แทนสมการของเส้นเอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจาก Mohr และ Coulomb (Mohr-Coulomb strength envelope)

ค่า $\bar{c}$ จากสมการของเส้นเอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจาก Mohr และ Coulomb นี้ ถ้าแสดงผลอยู่ในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผลแล้ว โดยทั่ว ๆ ไปค่า $\bar{c}$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ถ้าดินชนิดนั้นเป็น normally consolidated clays และค่า $\bar{c}$ จะมีค่ามากกว่าศูนย์เมื่อดินชนิดนั้นเป็น overconsolidated clays โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับดินที่อยู่ในช่วง weathered zone ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Muktabhant และคณะ, 1967)

2.2 <u>สัมประสิทธิ์ของแรงดันของดิน ณ สภาวะสมดุลย์</u> (Coefficient of Earth Pressure at Rest, K_o)

K_o เป็นสัมประสิทธิ์ของแรงดันของดิน ณ สภาวะสมดุลย์ที่ไม่มีการเคลื่อนตัวของมวลดินในแนวด้านข้าง (no lateral movement) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวนอนตามธรรมชาติ (in situ effective horizontal stress, $\bar{\sigma}_{ho}$) ต่อค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (in situ effective vertical stress, $\bar{\sigma}_{vo}$)

$$K_o = \frac{\bar{\sigma}_{ho}}{\bar{\sigma}_{vo}} \qquad \text{.....(2.2.1)}$$

ในปี 1960 Jaky ได้ให้ค่าความสัมพันธ์ของค่า K_o สำหรับ normally consolidated sand

$$K_o = 1-\sin \bar{\phi} \quad \text{(สำหรับ cohesionless soil)} \qquad \text{.....(2.2.2)}$$

$\bar{\phi}$ = มุมประสิทธิผลของความต้านทานต่อแรงเฉือน

ในปี 1965 Ireland และ Brooker ให้ให้ค่าความสัมพันธ์ของค่า K_o สำหรับ normally consolidated clay กับมุมประสิทธิผลของความต้านทานต่อแรงเฉือน ($\bar{\phi}$) ไว้ดังนี้

$$K_o = 0.95 - \sin \bar{\phi} \qquad \text{.....(2.2.3)}$$

ห้องสมุดกลาง...ศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Simons (1960) และ Skempton (1961) ได้ทบว่า ค่า K_o ของดินมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของดิน และค่า overconsolidation ratio (OCR) ของดิน ซึ่งค่า OCR นี้คือค่าอัตราส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ (maximum past pressure, $\bar{\sigma}_{vm}$) ต่อค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ (in situ effective vertical stress, $\bar{\sigma}_{vo}$)

ในปี 1968 Moh และ Wang ได้พบว่าค่า K_o สำหรับ normally consolidated clay ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Soft Bangkok Clay) โดยทั่ว ๆ ไปมีค่าประมาณ 0.6 ± 0.02

Abdelhamid & Krizek 1976; Bishop 1958; Brooker & Ireland 1965; Campanella & Valid 1972 และ Wroth 1972 ได้ทบว่าค่า K_o มีความสัมพันธ์กับค่า OCR plasticity index และมุมเสียดทานภายในประสิทธิผล (angle of internal friction, $\bar{\phi}$) ดูรูปที่ 2.1 ถึง 2.3

ในปี 1966 Schmidt ได้เสนอสมการของผลกระทบของประวัติของหน่วยแรง (stress history) ที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์ K_o สำหรับการทดสอบแบบ *Unloading ไว้ดังนี้

$$K_o(OC)/K_o(NC) = OCR^m \qquad \text{.....(2.2.4)}$$

$K_o(OC)$ = สัมประสิทธิ์ของแรงดันของดิน ณ สภาวะสมดุลย์ของ overconsolidated clay

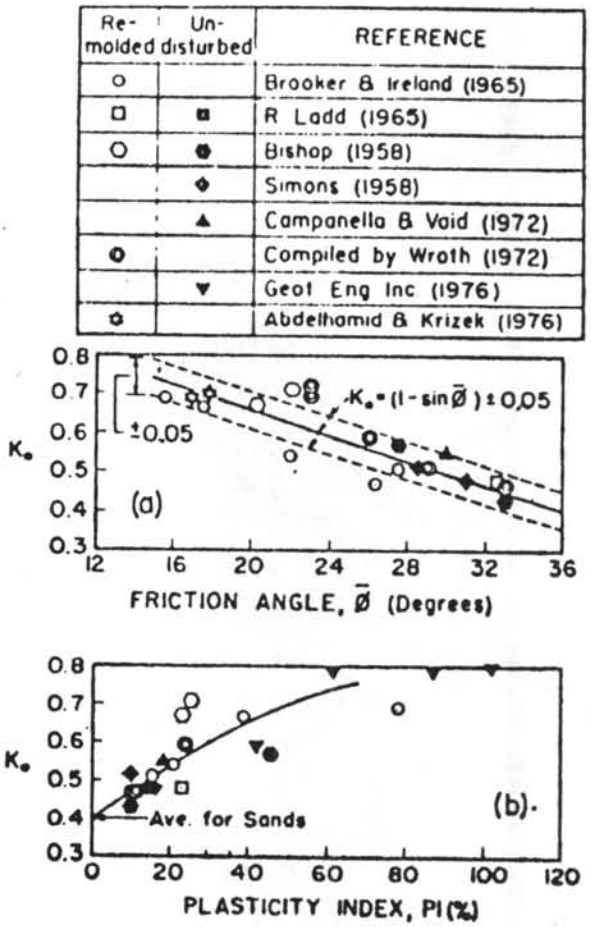
$K_o(NC)$ = สัมประสิทธิ์ของแรงดันของดิน ณ สภาวะสมดุลย์ของ normally consolidated clay

OCR = Overconsolidation ratio

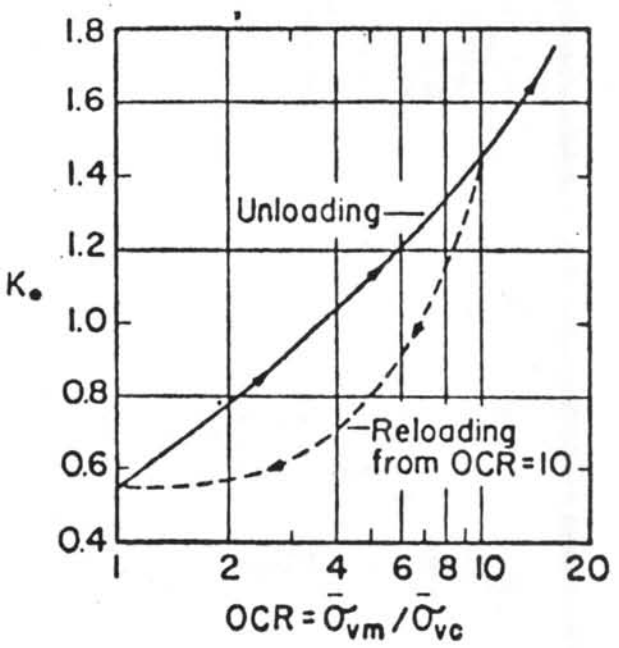
m เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับค่า plasticity index ของดิน (ดูรูปที่ 2.3)

---

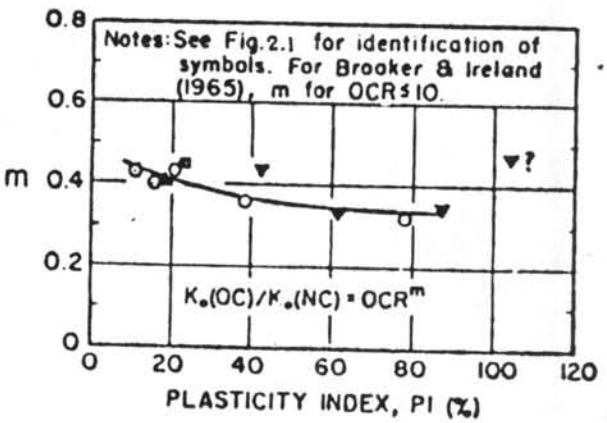
* Unloading คือการที่ทดสอบดินโดยการ consolidated ตัวอย่างดินไปอยู่ที่สภาวะหน่วยแรงประสิทธิผลมากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vc} > \bar{\sigma}_{vm}$) แล้วทำการลดค่าหน่วยแรงประสิทธิผลลง (rebound) มาทำการทดสอบที่ค่า OCR ต่าง ๆ ตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของ K_o ของ normally consolidated clays กับมุมประสิทธิผลของความต้านทานต่อแรงเฉือน, $\bar{\phi}$ (a) และ plasticity index (b)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของ K_o กับ OCR ของ Haney sensitive clay ระหว่างการ unloading และ reloading (Campanella และ Valid, 1972)



รูปที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ m ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของค่า K_o และ OCR กับ plasticity index (Ladd, 1975)

แต่ค่า K_o ที่ค่า OCR หนึ่ง ๆ สำหรับการทดสอบแบบ *Recompression โดยทั่ว ๆ ไป มีค่า K_o ต่ำกว่าที่ได้จากการทดสอบแบบ Unloading (จากการทดสอบกับ Boston blue clay โดย Ladd ในปี 1965)

ในปี 1975 Wroth ได้แสดงให้เห็นว่าค่า K_o สำหรับการทดสอบแบบ Unloading มีความสัมพันธ์กับค่า OCR

2.3 หลักการเบื้องต้นของแรงเฉือน

2.3.1 ค่าจำกัดความของแรงเฉือนแบบอันเดรน (Undrained Shear Strength, S_u)

ในปี 1954 Bishop และ Skempton ได้ให้ค่าจำกัดความของแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) โดยใช้การทดสอบแบบอันเดรน (undrained test) ว่าเป็นค่าหน่วยแรงเฉือนสูงสุด (maximum shear stress) ที่ดินสามารถรับไว้ได้ นั่นคือ

$$S_u = \left(\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\right) f_{max} \qquad \text{.....(2.3.1)}$$

ในปี 1960 Hvorslev ได้ให้ค่าจำกัดความว่า ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) คือค่าหน่วยแรงเฉือน (shear stress) บนระนาบพิบัติที่บวลดิน เกิดการพิบัติขึ้น นั่นคือ

$$S_u = \left(\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\right) f \cos \bar{\phi} \qquad \text{.....(2.3.2)}$$

ในกรณี $\phi = 0$

$$S_u = \left(\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}\right) f \qquad \text{.....(2.3.3)}$$

2.3.2 หลักการแรงเฉือนของ Ladd (1963)

ในปี 1963 Ladd ได้เสนอหลักการเบื้องต้นของแรงเฉือนไว้ 3 ข้อ ซึ่งได้สรุปมาจากผลการวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมา และได้นำมารวบรวมไว้ดังนี้

---

* Recompression คือการที่ใส่ load ในการทดสอบไปที่ซึ่งตัวอย่างดินจะถูก stress ($\bar{\sigma}_{vc}$) โดยการ reconsolidated กลับไปอยู่ที่สภาวะหน่วยแรงเดิมหรือที่ OCR ต่างกันโดย $\bar{\sigma}_{vc} \leq \bar{\sigma}_{vm}$

1. หลักการที่ 1

ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผล ณ จุดพิบัติ (effective stress at failure, $\bar{\sigma}_{ff}$) มีความสัมพันธ์อันหนึ่งกัน (unique relation) ซึ่งมีความสัมพันธ์นี้ขึ้นอยู่กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) และค่าหน่วยแรงรวมหลัก (intermediate principle stress, σ_2)

2. หลักการที่ 2

ค่าปริมาณความชื้น (water content, w) หน่วยแรงเฉือน (shear stress) และหน่วยแรงประสิทธิผล ($\bar{\sigma}$) มีความสัมพันธ์อันหนึ่งกัน (unique relation) ซึ่งความสัมพันธ์นี้ขึ้นอยู่กับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) ถ้าดินนั้นมีค่า OCR มากกว่าหนึ่ง และค่าหน่วยแรงรวมหลัก (intermediate principle stress, σ_2) ค่าใดค่าหนึ่ง

3. หลักการที่ 3

ค่าปริมาณความชื้น ณ จุดพิบัติ (w_f) หน่วยแรงเฉือน (shear stress) และหน่วยแรงประสิทธิผล ณ จุดพิบัติ ($\bar{\sigma}_{ff}$) มีความสัมพันธ์อันหนึ่งกัน ณ ที่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) และหน่วยแรงรวมหลัก (σ_2) เดียวกัน

2.4 ทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path)

ทางเดินของหน่วยแรงเป็นเส้นแสดงสภาวะการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงในมวลดิน ซึ่งแสดงให้เห็นได้โดยทางเดินโลกัสของจุดโคออดิเนทของ $\bar{p}(\frac{\bar{\sigma}_1+\bar{\sigma}_3}{2})$ กับ $q(\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2})$ ในรูปไดอะแกรมของ $\bar{p}$ (แกนนอน) และ q (แกนดิ่ง)

2.5 พารามิเตอร์ของความดันน้ำในโพรงดินของ Skempton

ในปี 1954 Skempton และ Bishop ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้น (excess pore pressure, Δu) กับการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงรวม (total stress) ในการทดลอง triaxial แบบอันเดรนไว้ดังนี้

องสิ่งบุคคลและศิลปกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\Delta u = B|\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)| \qquad \text{.....(2.5.1)}$$

A,B = พารามิเตอร์ของความดันน้ำในโพรงดิน (pore pressure parameter) ของ Skempton

Δu = ความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้น (excess pore pressure)

จากสมการที่ 2.5.1 นี้อาศัยสมมุติฐานที่ว่า ค่าความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้น (Δu) จากที่มีอยู่ในมวลดิน ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของความดัน $\Delta\sigma_3$ ซึ่งในการทดลอง triaxial จะเป็นความดันด้านข้างรอบตัวอย่างดิน และการเปลี่ยนแปลงของความดัน $\Delta\sigma_1$ ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปจะอยู่ในแนวดิ่ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความดันนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนแรก มวลดินถูกแรงกระทำโดยการเปลี่ยนแปลงของความดันรอบ ๆ มวลดิน

2. ขั้นตอนที่สอง มวลดินถูกแรงกระทำโดยหน่วยแรงเบี่ยงเบน (deviator stress) ซึ่งเกิดจากผลต่างของหน่วยแรง $\Delta\sigma_1$ และ $\Delta\sigma_3$

จากการเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำในโพรงดินทั้ง 2 ขั้นตอนนี้ สามารถแทนสมการของค่าความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้น (Δu) ได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\Delta u = \Delta u_a + \Delta u_d \qquad \text{.....(2.5.2)}$$

Δu_a = การเปลี่ยนแปลงความดันน้ำในโพรงดินเนื่องจาก $\Delta\sigma_3$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $B\Delta\sigma_3$

Δu_d = การเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำในโพรงดิน เนื่องจากหน่วยแรงเบี่ยงเบน $(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $BA(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)$

สำหรับดินอิ่มตัวด้วยน้ำ การเปลี่ยนแปลงของ $\sigma_3(\Delta\sigma_3 = \Delta\sigma_1)$ ทำให้ความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้น (Δu_a) มีค่าเท่ากับ $\Delta\sigma_3$ เช่นกัน ดังนั้นในดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ค่า B พารามิเตอร์จึงมีค่าเท่ากับหนึ่ง

ในการทดลอง triaxial compression tests โดยทั่ว ๆ ไปนิยมทำการทดลองโดยให้ค่าความดันน้ำในเซลมีค่าคงที่ ดังนั้นค่า $\Delta\sigma_3$ จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ระหว่างการทดสอบ และเมื่อดินอิ่มตัวด้วยน้ำ ค่า A พารามิเตอร์จากสมการที่ 2.5.1 สามารถเปลี่ยนรูปได้ ดังนี้

$$A = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3} \qquad \text{.....(2.5.3)}$$

ในการทดลอง triaxial compression test ในระหว่างที่ทำการกดน้ำหนัก ค่า A พารามิเตอร์จะมีความสัมพันธ์กับค่าความดันน้ำในโพรงดินที่เพิ่มขึ้นตลอดเวลา ในการทดลองแบบอันเดรน ถ้าระหว่างการกดน้ำหนักมวลดินพยายามที่จะขยายตัว (dilatancy) ค่าความดันน้ำในโพรงดินจะมีค่าลดลงและค่า A พารามิเตอร์อาจมีค่าเป็นลบ แต่ถ้ามวลดินพยายามที่จะเคลื่อนตัวชิดเข้าหากันค่าความดันน้ำในโพรงดินจะมีค่าเพิ่มขึ้น และค่า A พารามิเตอร์จะมีค่าเป็นบวก ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าหนึ่งก็ได้

2.6 เอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจากไดอะแกรมของ $\bar{p}$ และ q และหลักการกำหนดจุดที่เกิดการพิบัติ

2.6.1 เอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจากไดอะแกรมของ $\bar{p}$ และ q ($\bar{p}$-q Strength Envelope)

เอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจากไดอะแกรมของ $\bar{p}$ และ q คือ เส้นตรงที่ลากผ่านจุดที่เกิดหน่วยแรงเฉือน ณ จุดพิบัติในไดอะแกรมของ $\bar{p}$ และ q (ดูคำจำกัดความของการพิบัติในหัวข้อที่ 2.6.2)

ในปี 1960 Whitman ได้แสดงให้เห็นว่าแรงเฉือน (shear strength) ณ จุดพิบัติไม่ว่าจากเอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจาก Mohr และ Coulomb หรือเอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจากไดอะแกรมของ $\bar{p}$ และ q ณ จุดพิบัติ สามารถใช้แสดงแทนซึ่งกันและกันได้ และมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันดังต่อไปนี้ (ดูรูปที่ 2.4)

สมการของเส้นเอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจากไดอะแกรมของ $\bar{p}$ และ q ณ จุดพิบัติ สามารถแทนได้ด้วยสมการของเส้นตรงต่อไปนี้

$$q_f = \bar{a}+\bar{p}_f \tan \bar{\alpha} \qquad \text{.....(2.6.1.1)}$$

$q_f = (\sigma_1-\sigma_3)/2$ ณ จุดพิบัติที่กำหนด

$\bar{p}_f = (\bar{\sigma}_1+\bar{\sigma}_3)/2$ ณ จุดพิบัติที่กำหนด

$\bar{a}$ = หน่วยแรงยึดหน่วงประสิทธิผล ซึ่งมีค่าเท่ากับระยะตัดของเส้นเอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจากไดอะแกรมของ $\bar{p}$ และ q บนแกนตั้ง (q)

สมการของเส้นเอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจาก Mohr และ Coulomb ณ จุดพิบัติ (Mohr-Coulomb Strength Envelope)

$$\tau_{ff} = \bar{c}+\bar{\sigma}_{ff} \tan \bar{\phi}$$

จากสมการของเส้นเอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลทั้งสองแบบนี้จะได้ความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันดังต่อไปนี้ (ดูรูปที่ 2.4)

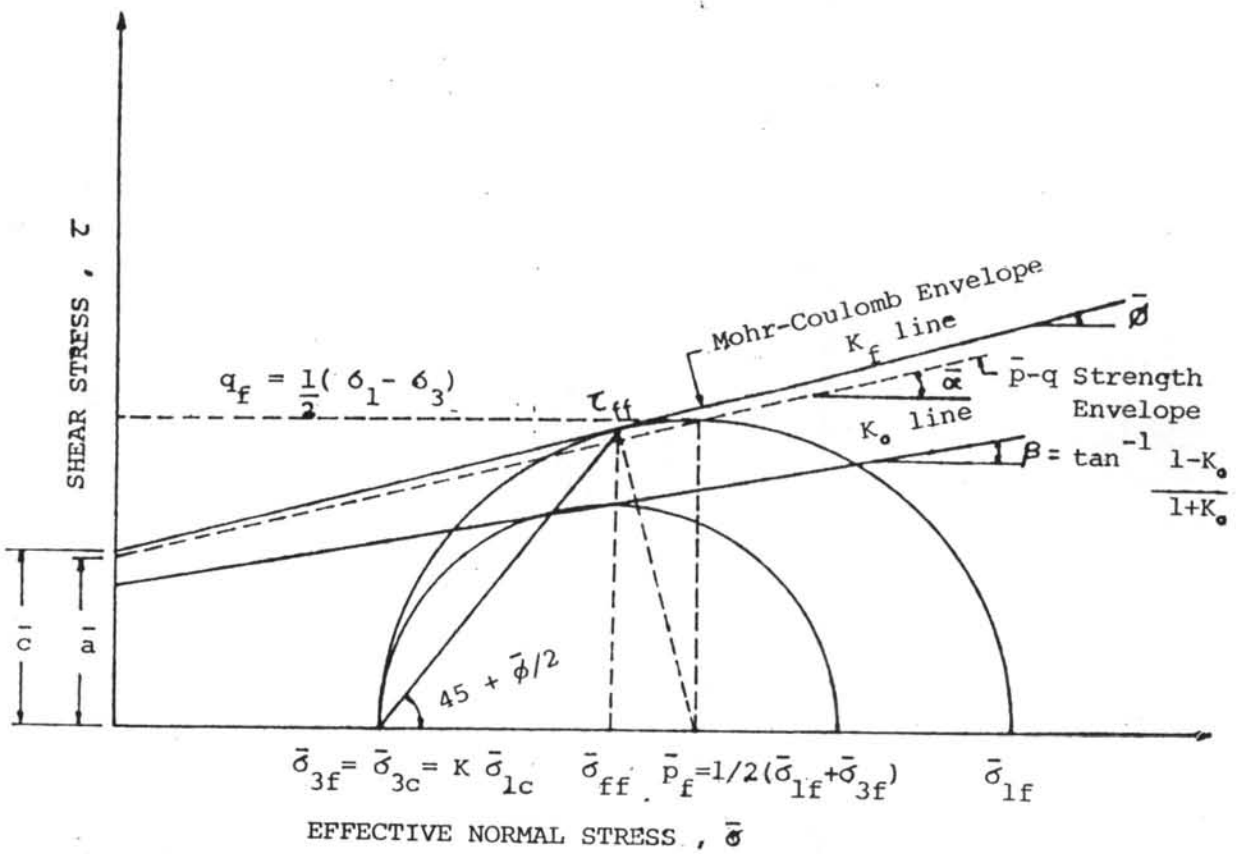
$$\bar{a} = \bar{c} \cos \bar{\phi}$$

$$\tan \bar{\alpha} = \sin \bar{\phi}$$

2.6.2 หลักการกำหนดจุดที่เกิดการพิบัติ (Failure Criteria)

จาก Bjerrum & Simons 1960; Holtz 1947 และ Kenney 1959 หลักการกำหนดจุดที่เกิดการพิบัติในการทดลอง triaxial มีอยู่ 2 แบบคือ

1. ณ จุดที่เกิดค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด (maximum deviator stress), $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ หรือที่ค่าแรงเฉือนสูงสุด $(\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2})_{max}$



รูปที่ 2.4 เอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจาก Mohr และ Coulomb กับเอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจากไดอะแกรมของ $\bar{p}$ และ q

2. ณ จุดที่เกิดค่า maximum principle effective stress ratio $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{max}$ หรือเรียกว่า maximum obliguity

ในการทดลองแบบเดรน (drained test) จุดที่เกิดการพิบัติจากหลักการกำหนดจุดที่เกิดการพิบัติทั้งสองแบบ มักจะอยู่ที่จุดเดียวกัน แต่ในการทดลองแบบอันเดรน (undrained test) สำหรับ sensitive normally consolidated clays จุดที่เกิดการพิบัติจากหลักการกำหนดจุดที่เกิดการพิบัติทั้งสองแบบนี้ อาจจะเกิดขึ้น ณ จุดเดียวกันหรือเกิดขึ้น ณ จุดต่างกันก็ได้ ในกรณีที่เกิดต่างจุดกัน ถ้าค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบน (deviator stress) มีค่าคงที่หรือลดลงเล็กน้อย ภายหลังจากที่ค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนเกิดค่าสูงสุดแล้ว จุดที่เกิดการพิบัติที่ maximum obliguity $(\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_3)_{max}$ จะเกิดขึ้นภายหลังจากจุดที่เกิดการพิบัติที่ค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$

สำหรับแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ที่ใช้ในปัญหาทั่วไป การกำหนดจุดที่เกิดการพิบัติมักจะกำหนดที่จุดที่เกิดค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$

ในปี 1948 Taylor ได้เสนอสมการของค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดินอิ่มตัวด้วยน้ำไว้ดังนี้

$$S_u = \frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_3)_f \cos \phi$$

S_u = แรงเฉือนแบบอันเดรน

$(\sigma_1-\sigma_3)_f$ = ค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด ณ จุดพิบัติ

ϕ = มุมของเส้นเอนเวลอปของกำลังรับแรงเฉือนรวมจาก Mohr และ Coulomb (τ-σ plot)

สำหรับในกรณีที่ทำการวิเคราะห์ความเสถียรภาพ (stability) ของดินโดยวิธี total stress "$\phi = 0$ analysis" ซึ่งใช้หลักการของ $\phi = 0$ ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) มีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด ณ จุดพิบัติ

$$S_u = \frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_3)_f$$ (นั่นคือที่ maximum shear stress)

ในปี 1954 Skempton และ Bishop ได้คิดค้นสมการของค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) อยู่ในรูปอัตราส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งหลังจากการอัดตัวคายน้ำ (effective vertical consolidation pressure, $\bar{\sigma}_{lc}$) หรือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งก่อนถูก load (preshear effective vertical stress, $\bar{\sigma}_{vc}$) ของ normally consolidated clays ซึ่งมีค่า $\bar{c} = 0$ จากการทดสอบกำลังรับแรงกดของดินถูกอัดตัวคายน้ำแบบแบบไอโซทรอบปิกและแอนไอโซทรอบปิกด้วยเครื่อง triaxial ในสภาพอันเดรน (isotropically and anisotropically consolidated undrained triaxial compression tests)

Isotropic Consolidation,

$$\frac{S_u}{\bar{\sigma}_{lc}} = \frac{\sin\bar{\phi}}{1+(2A_f-1)\sin\bar{\phi}} \qquad \text{.....(2.6.2.1)}$$

Anisotropic Consolidation

$$\frac{S_u}{\bar{\sigma}_{lc}} = \frac{|K+(1-K)A_f|\sin\bar{\phi}}{1+(2A_f-1)\sin\bar{\phi}} \qquad \text{.....(2.6.2.2)}$$

S_u = แรงเฉือนแบบอันเดรน ณ จุดที่เกิดค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด

$= (\sigma_1-\sigma_3)_{max}/2$

$\bar{\phi}$ = มุมประสิทธิผลของความต้านทานต่อแรงเฉือน ณ จุดพิบัติที่เกิดค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$

A_f = พารามิเตอร์ของความดันน้ำในโพรงดินของ Skempton ณ จุดพิบัติที่เกิดค่าหน่วยแรงเบี่ยงเบนสูงสุด $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$

ทองมูลนิธิและสถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

K = อัตราส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวนอนหลังจากการอัดตัวคายน้ำ ($\bar{\sigma}_{3c}$) ต่อหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งหลังจากการอัดตัวคายน้ำ ($\bar{\sigma}_{1c}$)

$$= \frac{\bar{\sigma}_{3c}}{\bar{\sigma}_{1c}}$$

2.7 วิธีการวัดแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u)

วิธีการที่ใช้ในการวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดินเหนียวที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ สำหรับการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของดินเหนียวที่มีต่อแรงที่กระทำโดยวิธี total stress "$\phi = 0$ analysis" มีอยู่ 2 วิธีคือ (Ladd 1967; Ladd และคณะ, 1971)

1. โดยใช้หลักการจากแนวทฤษฎีที่ว่า ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) และปริมาณความชื้น ณ จุดพิบัติ (w_f) มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (unique relation) ซึ่งหมายความว่าวิศวกรสามารถทำการวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ได้โดยวิธีการทดสอบใด ๆ ที่ทำให้ค่าปริมาณความชื้น ณ จุดพิบัติ (w_f) ของดิน มีค่าเท่ากับค่าปริมาณความชื้นตามธรรมชาติ (in situ water content, w_n) ในภาคปฏิบัติทั่ว ๆ ไป วิธีการวัดแรงเฉือนที่ใช้หลักการนี้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

(i) ทำการทดลองในสนาม โดยใช้เครื่องมือ เช่น Field Vane และ Dutch Cone

(ii) ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการเก็บตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุด (undisturbed samples) มาทำการทดสอบหากำลังรับแรงกดของดินที่ไม่ถูกอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่อง triaxial มาก่อนและทดสอบในสภาพอันเดรน (unconsolidated undrained triaxial compression test, UU test) และการทดสอบแบบ unconfined compression test (UC)

2. โดยใช้หลักการจากแนวทฤษฎีที่ว่า ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งก่อนถูก load (preshear effective vertical stress, $\bar{\sigma}_{vc}$)

มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (unique relationship) ซึ่งสามารถทำการวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ได้ โดยการทดสอบหากำลังรับแรงกดของดินที่ถูกอัดตัวคายน้ำโดยเครื่อง triaxial ในสภาพอันเดรน (consolidated undrained triaxial compression test, CU test) โดยการนำเอาตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดมาทำการ reconsolidated ที่หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vo}$) แล้วทำการกดน้ำหนักจนเกิดการพังทะลายในสภาพอันเดรน เพื่อหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ซึ่งในการวิจัยนี้เรียกวิธีการวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) โดยวิธีนี้ว่า "Recompression Method" (ดูหัวข้อที่ 2.7.3 สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติม)

จากวิธีการวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) โดยวิธีการทั้งสองนี้ จะเห็นได้ว่าเป็นวิธีการวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) โดยตรง คือพยายามวัดเพื่อให้ได้ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ใกล้เคียงตามธรรมชาติ (in situ undrained shear strength) โดยทำการทดสอบที่ in situ condition แต่ผลที่ได้มักไม่เป็นไปตามที่คิด เพราะว่าการวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) วัดได้ยากลำบาก เพราะมีแฟคเตอร์หลายอย่างที่มีผลต่อการวัด

2.7.1 แฟคเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการวัดค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u)

ผลการวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาได้พบว่า มีแฟคเตอร์สำคัญต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงเฉือน (shear strength) และลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด (stress-strain characteristics) ของดินเหนียว คือ ผลของประวัติของหน่วยแรง (stress history) การรบกวนต่อตัวอย่างดิน (sample disturbance) แอนไอโซทรอปีของกำลังรับแรงและหน่วยแรงกับความเครียด (strength and stress-strain anisotropy) และอัตราความเครียด (strain rate) (ดู Ladd 1974; Ladd และคณะ 1977) ซึ่งค่าแฟคเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้มีอิทธิพลต่อค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ดังต่อไปนี้

1. ประวัติของหน่วยแรง (stress history) (Casagrande และ Wilson, 1953) เป็นแฟคเตอร์ที่สำคัญอันหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนัก (strength) และการยุบตัว (compressibility) ของดิน ซึ่งใช้คุณสมบัติของดินอันหนึ่งแสดงแทนประวัติของหน่วยแรง เรียกว่า overconsolidation ratio (OCR) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) ต่อค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vo}$) และ

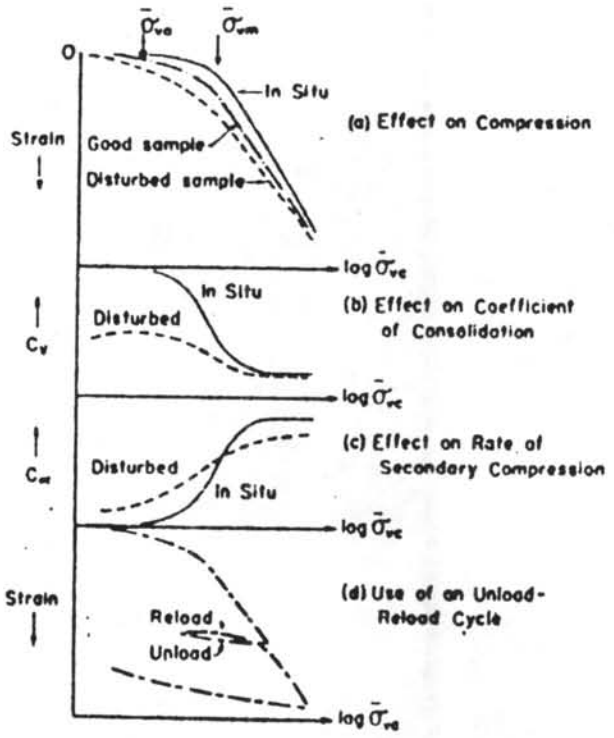
ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) นี้สามารถหาได้โดยวิธีการทดลอง one-dimensional consolidation test โดยใช้วิธีการของ Casagrande ในการหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) จากผลการทดลองต่าง ๆ ที่ผ่านมาพบว่า ประวัติของหน่วยแรง (stress history) มีอิทธิพลต่อกำลังรับน้ำหนัก (strength) และการยุบตัว (compressibility) ของดินคือ ในดินชนิดหนึ่งค่ากำลังรับน้ำหนัก (strength) และการยุบตัว (compressibility) ขึ้นอยู่กับค่า OCR หนึ่ง ๆ กล่าวคือดินชนิดเดียวกันมีค่าหน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากัน แต่ถ้ามีค่า OCR ต่างกันจะมีค่ากำลังรับน้ำหนัก (strength) และการยุบตัว (compressibility) ต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบที่หน่วยแรงประสิทธิผลของดินหลังการอัดตัวคายน้ำ (effective consolidation stress, $\bar{\sigma}_c$) เท่ากัน ดินที่มีค่า OCR สูงกว่าจะมีค่ากำลังรับน้ำหนัก (strength) มากกว่าดินที่มีค่า OCR ต่ำกว่าและจะมีการยุบตัว (compressibility) น้อยกว่าด้วย การทดสอบหาค่าแรงเฉือนในห้องทดลองจึงต้องพยายามรักษาประวัติของหน่วยแรง (stress history) ของตัวอย่าง โดยใช้ reconsolidation เป็นต้น

2. การรบกวนต่อตัวอย่างดิน (sample disturbance) (Skempton และ Sowa, 1963) ในการเก็บตัวอย่างเป็นการยากที่จะไม่ให้ตัวอย่างดินถูกรบกวน (disturbance) เนื่องจากการเก็บตัวอย่างดินขึ้นมาเพื่อทำการทดลองหรือในขณะที่ทำการทดลอง ถึงแม้ว่าจะใช้เทคนิคในการเก็บตัวอย่างดินที่ดีที่สุดเพียงไร สาเหตุเพราะว่าการเก็บตัวอย่างดินขึ้นมาทำให้เกิดการลดค่าหน่วยแรงประสิทธิผล เนื่องจากการลดค่า overburden pressure และโครงสร้างของดินเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการรบกวนต่อตัวอย่างดิน และผลของการที่หน่วยแรงประสิทธิผลลดลง อาจจะเกิดจากสาเหตุที่ดินมีปริมาณความชื้น (w) สูงไปภายหลังจากการเก็บตัวอย่างดินแล้ว ซึ่งผลเหล่านี้ทำให้ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดินที่วัดได้มีค่าลดลงด้วย ถ้าไม่มีการปรับขนาดของหน่วยแรงประสิทธิผลโดยการ reconsolidated เสียก่อนให้มีลักษณะเหมือนตามธรรมชาติ (in situ condition) อนึ่งการทำ reconsolidation ในห้องทดลองก็มีข้อเสียคือดินจะมีความชื้นต่ำกว่าในธรรมชาติ ซึ่งเหตุนี้ทำให้ค่าแรงเฉือนที่วัดได้มีค่าสูงเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีค่า OCR ต่ำ ๆ

นอกจากนี้ผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินยังทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) จากการทดสอบ one-dimensional consolidation มีค่าต่ำกว่าที่เป็นจริงตามธรรมชาติ เนื่องจากการเปลี่ยนการเรียงตัวและโครงสร้างของเม็ดดิน (soil structure) เนื่องจากการเก็บตัวอย่างดินขึ้นมา (ดูรูปที่ 2.5) ทำให้ประวัติของหน่วยแรง (stress history) ที่ได้จากการทดสอบในห้องทดลองผิดไปจากที่เป็นจริงตามธรรมชาติ ดังนั้นผลของการทดลองที่ได้นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับที่เป็นจริงตามธรรมชาติเพียงใดขึ้นอยู่กับคุณภาพของตัวอย่างดินว่าถูกรบกวนมากน้อยเพียงใด และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) ที่ได้จากการทดลองจึงอาจมิใช่ค่าที่ถูกต้องเสียทีเดียว แต่ประมาณใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงตามธรรมชาติ

3. แอนไอโซทรอบปีของกำลังรับน้ำหนักและหน่วยแรงกับความเครียด (strength and stress-strain anisotropy) ค่าแรงเฉือนของดินขึ้นอยู่กับทิศทางของแรงกระทำ เพราะดินไม่ได้เป็น isotropic material ดังนั้นการทดสอบตัวอย่างดินจึงจำเป็นต้องใช้ระบบของหน่วยแรง (stress system) ในการทดสอบให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง จากการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมทางแอนไอโซทรอบปีของแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) พบว่า สามารถแบ่งลักษณะของแอนไอโซทรอบปีที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 องค์ประกอบ คือ

(i) แอนไอโซทรอบปีประจำตัวตามธรรมชาติ (inherent anisotropy) จากการศึกษาเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของโครงสร้างของดินพบว่า ดินชนิด homogeneous ตามธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแตกต่างกับทิศทางที่มีแรงมากระทำ โดยค่อนข้างจะมีโครงสร้างที่จัดเรียงตัวขนานกันในทิศทางแนวนอนมากกว่าในแนวดิ่ง ดินพวก stiff fissure clays และ varved clays ที่ไม่ homogeneous ซึ่งมีชั้นของ silt และดินเหนียวอยู่สลับกันจะแสดงลักษณะของแอนไอโซทรอบปีประจำตัวตามธรรมชาติมากที่สุด ซึ่งผลของแอนไอโซทรอบปีนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในค่าโมดูลัส ค่าแรงดันน้ำในโพรงดิน แรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) และค่าพารามิเตอร์ของกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลจาก Mohr และ Coulomb ($\bar{c}$ และ $\bar{\phi}$) ผลของแอนไอโซทรอบปีนี้สามารถแสดงให้เห็นได้จากผลแตกต่างของค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดินชนิดเดียวกัน เมื่อทำการทดสอบด้วยเครื่อง triaxial โดยวิธีการทดสอบแบบ UU และ CU ซึ่งทำการกดหลังจากสภาวะอัดตัวคายน้ำแบบไอโซทรอบปิกกับ



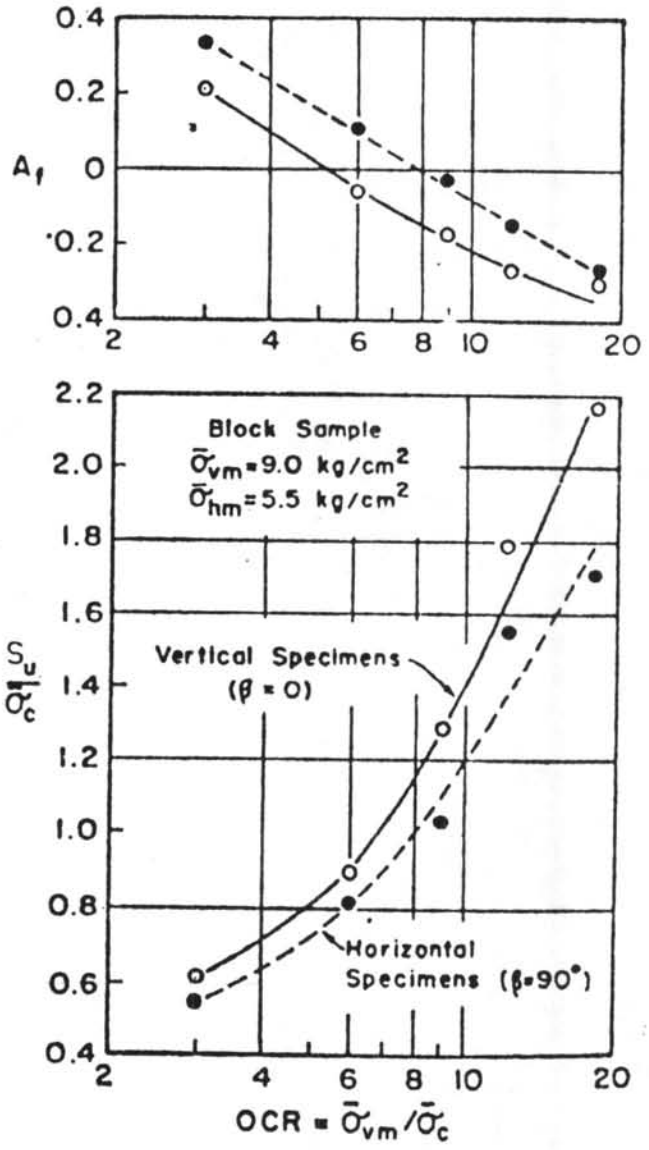
รูปที่ 2.5 ผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินที่มีต่อประวัติของหน่วยแรงในการทดสอบ one-dimensional consolidation test

ตัวอย่างดินที่อยู่ในระนาบต่าง ๆ กัน (ตัวอย่างดินที่ถูกตัดอยู่ในแนวเอียงทำมุมกับแนวดิ่งเป็นมุม β ตั้งแต่ 0^{o}-90^{o}) ดังในรูปที่ 2.6 และ 2.7 แต่ผลการทดสอบที่ได้จาก UU มักจะไม่ค่อยแสดงผลของแอนไอโซทรอบปีตามธรรมชาติ เนื่องจากผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินอาจทำให้โครงสร้างของดินเปลี่ยนไป

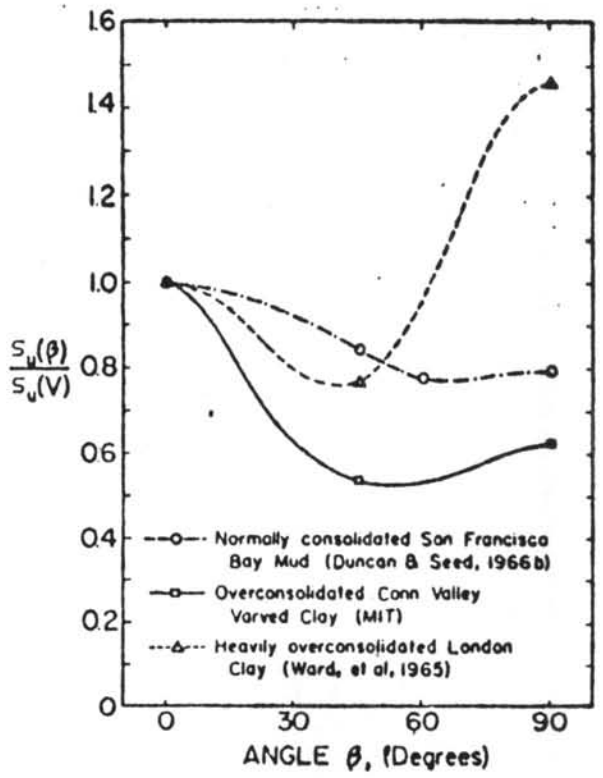
(ii) แอนไอโซทรอบปีเนื่องจากระบบของหน่วยแรงที่กระทำ (stress system induced anisotropy) ผลของระบบของหน่วยแรงสามารถทำให้เกิดพฤติกรรมของแอนไอโซทรอบปีได้ เนื่องจากเปลี่ยนแปลงในทิศทางของหน่วยแรงหลัก ณ จุดพิบัติ (major principle stress at failure, σ_{1f}) เมื่อดินชนิดนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์ K_o ไม่เท่ากับหนึ่ง

ในปี 1975 Ladd ได้สรุปให้เห็นถึงผลแตกต่างของค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดิน เนื่องจากผลของแอนไอโซทรอบปี เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของหน่วยแรงหลัก ณ จุดพิบัติ (σ_{1f}) โดยทำการ consolidated ตัวอย่างดินไปที่หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ($\bar{\sigma}_{vc}$) มากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) ภายใต้สภาวะ K_o และหากำลังรับน้ำหนักของดินโดยมีทิศทางของหน่วยแรงหลัก ณ จุดพิบัติ (σ_{1f}) แตกต่างกันไปตามสภาวะที่จะเกิดขึ้นจริง ๆ ในสนาม ดังแสดงในรูปที่ 2.8

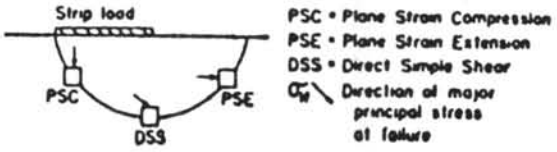
4. อัตราความเครียด (strain rate, $\dot{\varepsilon}$) (Bjerrum และ Simons, 1960) จากผลการทดลองต่าง ๆ ที่ผ่านมาพบว่าในการทดลองหากำลังแรงกดของดินด้วยเครื่อง triaxial ในการทดลองที่ใช้อัตราความเครียด ($\dot{\varepsilon}$) สูง ๆ สำหรับดินชนิดเดียวกันในการทดสอบแบบอันเดรน ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ที่ได้จะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองด้วยอัตราความเครียด ($\dot{\varepsilon}$) ต่ำ ๆ สาเหตุอย่างหนึ่งที่ทำให้แรงเฉือนลดลงก็คือผลของอันเดรนครีบ (undrained creep) ที่เกิดขึ้นระหว่างการกดน้ำหนักตัวอย่างดินด้วยอัตราความเครียด ($\dot{\varepsilon}$) ต่ำ ๆ ซึ่งมีผลทำให้ความดันน้ำในโพรงดิน (Δu) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้หน่วยแรงประสิทธิผลในมวลดินมีค่าลดลงและมีผลทำให้ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดินมีค่าลดลงด้วย ในการทดสอบในห้องทดลองและในสนามมักจะใช้อัตราความเครียด ($\dot{\varepsilon}$) มากกว่าค่าที่เกิดขึ้นจริง ๆ ในสนาม ดังนั้นค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ที่ได้จากการทดสอบในห้องทดลองหรือในสนามอาจให้ค่าที่สูงหรือต่ำกว่าความเป็นจริงก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของตัวอย่างดินและวิธีที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.6 ผลของการทดสอบแบบ $\overline{CIUC}$ Test กับตัวอย่างดินในแนวดิ่ง และแนวนอนของ overconsolidated kaolinite (Duncan และ Seed, 1966a)



รูปที่ 2.7 ผลของแอนไอโซทรอบปีของกำลังรับน้ำหนักแบบอันเดรนจากการทดสอบ UU Test กับตัวอย่างดินในระนาบต่าง ๆ กัน



(a) STRESS SYSTEMS ALONG A FAILURE SURFACE

SOIL	LL% PI%	S_u/σ'_{vc} PSC $S_u=\tau_{ff}$	DSS $S_u=\tau_h$	PSE $S_u=\tau_{ff}$	REFERENCE
Portsmouth Sensitive Clay	33 15	0.295	0.20	0.13	Ladd & Edgers (1972)
Haney Sensitive Clay	44 18	0.27	—	0.175	Vaid & Campanella (1974)
Boston Blue Clay	41 21	0.30	0.20	0.145	Ladd & Edgers (1972)
AGS CH Clay	71 40	0.295	0.25	0.18	MIT & Univ. of British Col.
San Francisco Bay Mud	88 45	0.295	0.25	0.23	Duncan & Dunlop (1969)
Conn Valley Varved Clay	clay 65, 39 silt 35, 12	0.255	0.165	0.23	Ladd & Edgers (1972)

ณ $\tau_{ff}=0.5(\sigma_1-\sigma_3)_f \cos\beta$ ณ $\tau_h=(\tau_h)_{max}$

(b) ANISOTROPIC STRENGTH DATA FOR NORMALLY CONSOLIDATED CLAYS

รูปที่ 2.8 ผลของแอนไอโซทรอปปีเนื่องจากระบบของหน่วยแรงที่กระทำ (stress system induced anisotropy) จากการทดสอบแบบ CK_oU plane strain shear test (ทำให้เกิดการพิบัติโดยมีทิศทางของหน่วยแรงหลักที่ทำให้พิบัติแตกต่างกัน)

2.7.2 หลักการของ NSP และวิธีการวัดแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) แบบแชนเซพ (SHANSEP)

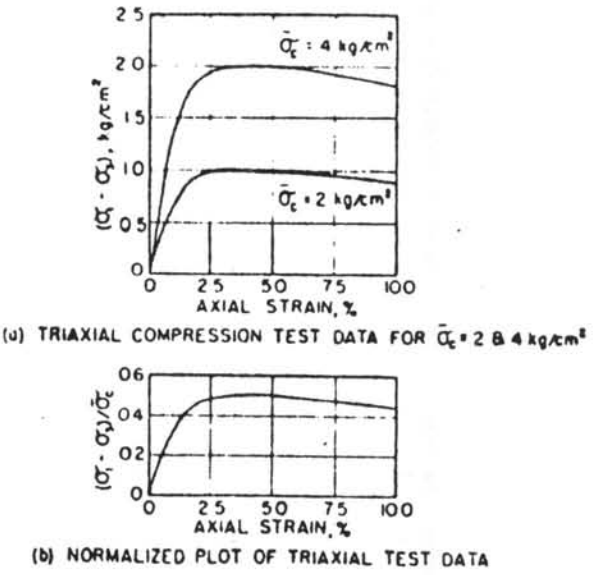
2.7.2.1 หลักการของ NSP (Normalized Soil Parameters Concept, NSP Concept)

หลักการของ NSP ได้วิวัฒนาขึ้นมาจากการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของกำลังรับน้ำหนักและลักษณะของหน่วยแรงกับความเครียดที่ MIT ในปี 1960 เมื่อค่าคุณสมบัติของดินที่วัดได้เมื่อถูก normalized อยู่ในรูปอัตราส่วนของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งก่อนถูก load ($\bar{\sigma}_{vc}$) |หรือหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งหลังการอัดตัวคายน้ำ ($\bar{\sigma}_{lc}$)| พบว่า ผลการทดลองของดิน (ส่วนมากเป็น remoulded normally consolidated clay) จากห้องทดลอง ณ ที่ค่า OCR เท่ากัน แต่ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งก่อนถูก load ($\bar{\sigma}_{vc}$) และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) ต่างกัน เมื่อถูก normalized ด้วยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งก่อนถูก load ($\bar{\sigma}_{vc}$) จะแสดงพฤติกรรมของกำลังรับน้ำหนักและลักษณะของหน่วยแรงกับความเครียดเหมือนกัน ในระยะเริ่มแรกของการคิดค้น NSP จึงมักจะใช้ได้กับดินที่มีพฤติกรรมที่ normalized ได้ด้วยค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งก่อนถูก load ($\bar{\sigma}_{vc}$)

ดินที่มีคุณสมบัติที่ normalized ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงลักษณะของกำลังรับน้ำหนักและลักษณะของหน่วยแรงกับความเครียด เมื่อดินแสดงพฤติกรรมของ normalized ที่สมบูรณ์ โดยแสดงให้เห็นถึงลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเบี่ยงเบน ($\sigma_1-\sigma_3$) กับความเครียด (ε) ของดิน ณ ที่ค่า OCR เดียวกัน วิธีการทดลองเดียวกันแต่มีค่า isotropic consolidation stress ($\bar{\sigma}_c$) ต่างกันจะมีความสัมพันธ์อยู่ที่คนละเส้นกัน แต่ถ้าเขียนรูปใหม่อยู่ในรูปของ normalized หน่วยแรงเบี่ยงเบน $|(\sigma_1-\sigma_3)/\bar{\sigma}_c|$ กับความเครียด (ε) จะได้เส้นโค้งของหน่วยแรงกับความเครียดอยู่ที่เส้นเดียวกันถ้าดินแสดงพฤติกรรมของ normalized ที่สมบูรณ์

ในความเป็นจริงตามธรรมชาติ พฤติกรรมของดินจะถูก normalized ไม่ได้สมบูรณ์เหมือนดังในรูปที่ 2.9 แต่จะมีความแตกต่างกันบ้าง (ดูรูปที่ 2.10) เนื่องจากความ

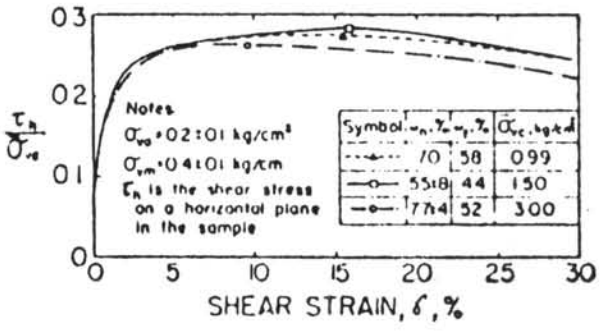
วงสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a) TRIAXIAL COMPRESSION TEST DATA FOR $\bar{\sigma}_c$ = 2 & 4 kg/cm²

(b) NORMALIZED PLOT OF TRIAXIAL TEST DATA

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของพฤติกรรม normalized ที่สมบูรณ์จากการทดสอบ triaxial compression test



รูปที่ 2.10 Normalized ผลการทดลองจากการทดสอบ CK_oU direct simple shear test ของ normally consolidated Maine organic clay (Ladd และ Foott, 1974)

แตกต่างกันของแต่ละตัวอย่างดิน และความผิดพลาดในการทดลองแต่ละครั้งที่แตกต่างกัน

สำหรับดินที่แสดงพฤติกรรมว่า normalized ได้จึงเป็นการเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองที่ค่าหน่วยแรงต่างกัน แต่มีค่า OCR เท่ากัน แล้วแสดงผลที่ได้อยู่ในรูปของ normalized ที่แต่ละค่า OCR (ดูรูปที่ 2.11)

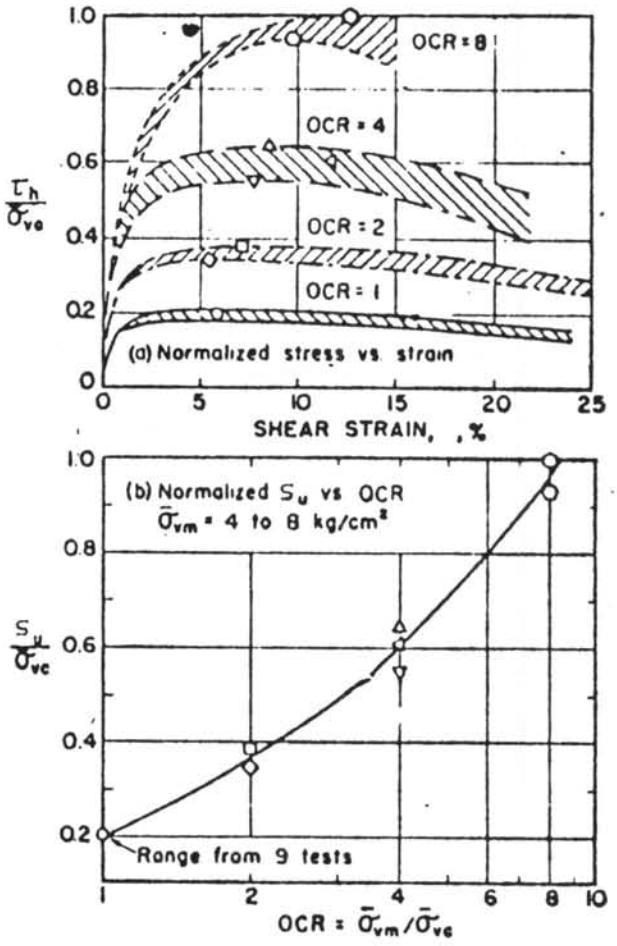
NSP ที่นิยมใช้แสดงผลการทดลองที่ได้มากที่สุดโดยทั่ว ๆ ไป อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ normalized แรงเฉือนแบบอันเดรน ($S_u/\bar{\sigma}_{vc}$) กับความเครียด (ε) ณ แต่ละค่า OCR กับความสัมพันธ์ของ normalized แรงเฉือนแบบอันเดรน ($S_u/\bar{\sigma}_{vc}$) กับ log OCR

ในปัจจุบันนี้หลักการแสดงผลการทดลองแบบหลักการของ NSP ใช้ได้ แม้แต่ในดินที่ไม่มีพฤติกรรมที่ normalized ได้โดยใช้เป็นการแสดงผลของการทดลอง โดยส่วนมากใช้ค่า OCR คำนวณจากค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) ดังนั้นหลักการของ NSP จึงใช้ได้ทั้งในผลการทดลองแบบ Recompression และ SHANSEP ในแบบหลังดินต้องมีคุณสมบัติที่ normalized ได้จึงถูกหลักการ

เนื่องจากหลักการของ NSP นี้อาศัยพื้นฐานมาจากประวัติของหน่วยแรง (stress history) ของดิน ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบค่าที่ถูกต้องแน่นอนของหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) เสียก่อน จึงจะนำหลักการของ NSP มาใช้ได้ถูกต้อง

2.7.2.2 วิธีการวัดแรงเฉือนแบบอันเดรนแบบแซนเซพ (Soil Histories and Normalized Soil Engineering Properties Method of Consolidation, SHANSEP)

วิธีการแซนเซพ (SHANSEP) เป็นวิธีการแบบใหม่ที่ใช้ในการวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดินเหนียว ซึ่งถูกค้นคิดขึ้นมาโดย Dr. Charles C., Ladd ในปี 1969 จากความพยายามที่จะหาวิธีการที่สามารถวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ของดินเหนียวตามธรรมชาติ (in situ undrained shear strength) ได้ถูกต้องใกล้เคียงที่สุด โดยอาศัยหลักการพื้นฐานที่สำคัญมาจากประวัติของหน่วยแรง (stress history) และหลักการของ NSP



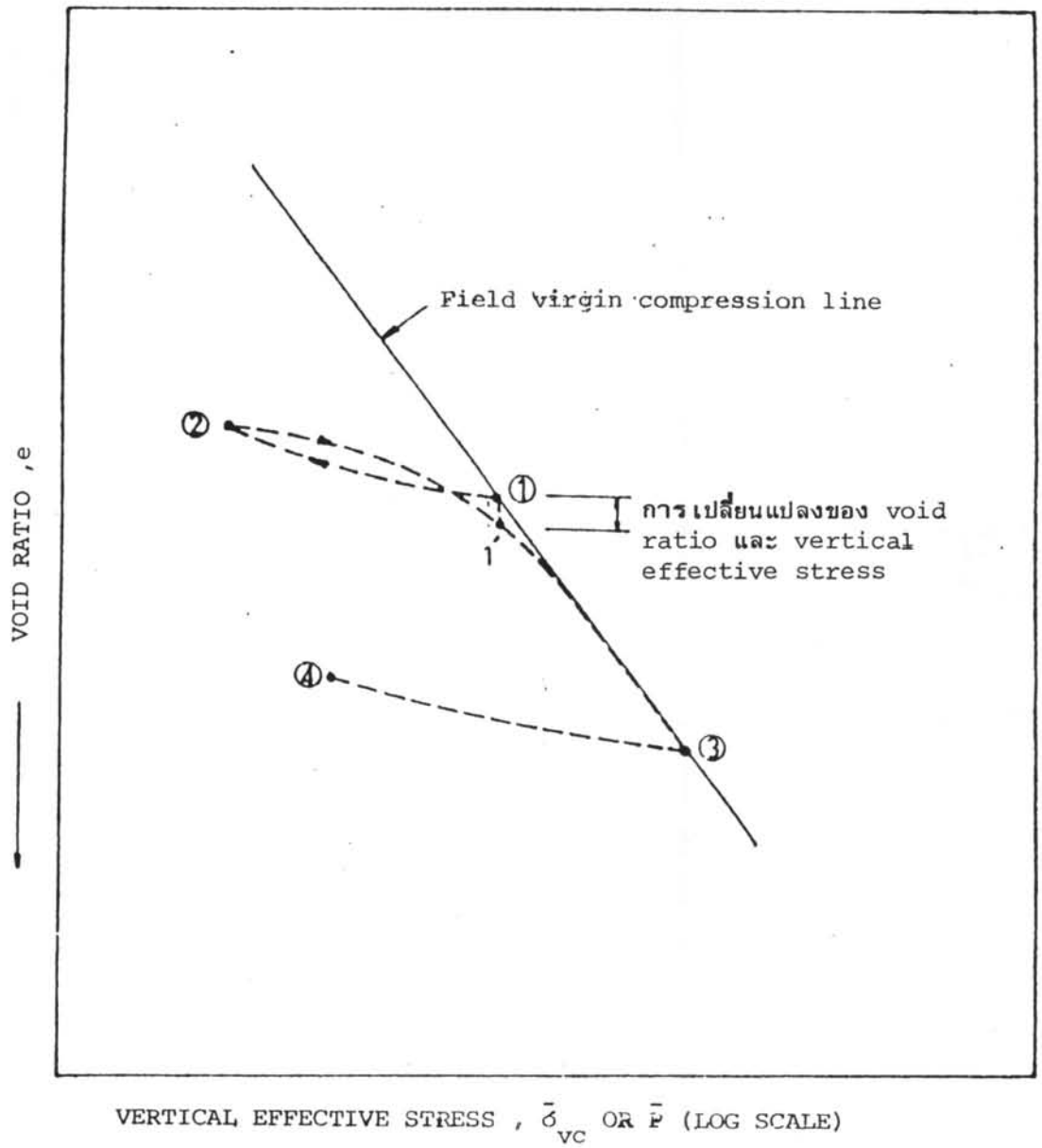
รูปที่ 2.11 Normalized ผลการทดสอบที่ได้จากการทดลอง CK_oU direct simple shear test ของ Boston blue clay (Ladd และ Foott, 1974)

(ดินมีคุณสมบัติที่ normalized ได้) โดยการแสดงผลการทดลองที่ได้อยู่ในรูปของ normalized strength เป็นฟังก์ชั่นกับค่า OCR และพยายามควบคุมผลของแฟคเตอร์ต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ซึ่งได้แก่ประวัติของหน่วยแรง (stress history) การรบกวนต่อตัวอย่างดิน (sample disturbance) แอนไอโซทรอบปีของกำลังรับน้ำหนัก (strength anisotropy) และอัตราความเครียด (strain rate) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อลดผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดิน

การลดผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินทำได้โดย consolidated ตัวอย่างดินด้วยสภาวะหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ($\bar{\sigma}_{vc}$) มากกว่าค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) ไปอยู่ที่ virgin compression line ค่า $\bar{\sigma}_{vc}$ นี้ต้องมีค่าสูงพอ $|\bar{\sigma}_{vc} = (2\text{-}3)\ \bar{\sigma}_{vm}|$ เพื่อให้หน่วยแรงในตัวอย่างดินอยู่ใน in situ virgin compression line โดยหมายความว่าดินมีคุณสมบัติเหมือนตามธรรมชาติ (in situ) แล้ว เนื่องจากดินมีคุณสมบัติที่ normalized ได้ ดังนั้นการใช้ NSP ที่มาจากสภาวะ (condition) ของการทดสอบแบบนี้จึงควรเป็นหรือใกล้เคียงกับ NSP ของดินที่ in situ condition สำหรับ normally consolidated clay สำหรับ overconsolidated clay สาเหตุของ overconsolidation เกิดจาก unloading ทำได้โดยการสร้างประวัติของหน่วยแรง (stress history) ของดินใหม่ในห้องทดลองหลังจากที่ดินอยู่ใน in situ virgin compression curve แล้วจึง rebound ไปที่ OCR ที่ต้องการ

การที่วิธีการ SHANSEP จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบโดยการ consolidated ตัวอย่างดินด้วยสภาวะหน่วยแรงมากกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) เพื่อให้ดินมีสภาวะกลับไปอยู่ใน field virgin compression line (ดูรูปที่ 2.12) เพื่อทำให้ตัวอย่างดินมีคุณสมบัติเหมือนในธรรมชาติ (in situ) มากขึ้นก่อนที่จะทำการลดค่าหน่วยแรงลง เพื่อต้องการทำให้ดินนั้นมีค่า OCR ที่แน่นอนได้

จากรูปที่ 2.12 ดินที่เป็น normally consolidated clay จะมีพฤติกรรมของความสัมพันธ์ในกราฟ e-log $\bar{p}$ อยู่บนเส้น field virgin compression line (Schmertmann 1955) ซึ่งเมื่อนำดินที่เป็น normally consolidated clay (ที่จุด 1 บนเส้น



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของช่องว่างในมวลดิน (e) และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ($\bar{\sigma}_{vc}$) ในลอการิทึมสเกลระหว่างการ reconsolidation เมื่อมีการรบกวนต่อตัวอย่างดินและลักษณะของการ consolidation ตามวิธีการแบบ แซนเซพ (SHANSEP) ของดินที่เป็น normally consolidated clay

field virgin compression line) ขึ้นมาจากพื้นดิน ผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินจะทำให้ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในดินลดลง ดินจะ swell มาอยู่ที่จุด 2 และมีพฤติกรรมเปลี่ยนไปเป็นแบบ overconsolidated clay ถ้านำดินที่เป็น normally consolidated clay นี้มาทำการทดสอบโดยการ reconsolidation กลับไปอยู่ที่สภาวะหน่วยแรงเดิม ดินจะยุบตัวไปตามเส้นโค้งจากจุดที่ 2 ไปจุดที่ 1′ ซึ่งอยู่ต่ำกว่าจุดที่ 1 บน field virgin compression line และจะมีพฤติกรรมอาจเป็น slightly overconsolidated clay แต่เมื่อทำการ consolidated ต่อไปอยู่ที่จุด 3 บนเส้น field virgin compression line ดินนั้นจะมีพฤติกรรมกลับไปเป็น normally consolidated clay อีก และนอกจากนี้ทำให้รู้ค่า OCR ที่แน่นอนได้ และจึงนำหลักการ NSP มาใช้ได้แน่นอนแต่ปริมาณความชื้น (w) จะเปลี่ยนไป

การที่จะใช้หลักการของ NSP ได้สำหรับ normally consolidated clay ที่มีคุณสมบัติที่ normalized ได้ จึงควรทำการ consolidated ตัวอย่างดินมาอยู่ที่ field virgin compression line เพื่อทำให้ดินเป็น normally consolidated clay ก่อน และอยู่บนเส้น in situ virgin curve เสียก่อน เพื่อสามารถนำหลักการของ NSP มาใช้ได้ และช่วยลดผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินคือดินมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ in situ condition

ใน overconsolidated clay การที่จะใช้หลักการของ NSP ได้ ใช้วิธีเดียวกันกับ normally consolidated clay โดยการทำตัวอย่างดินให้กลายเป็น normally consolidated clay ก่อน (คือทำตัวอย่างให้ใกล้เคียงกับ field condition) โดยการ consolidated ตัวอย่างดินไปอยู่บน field virgin compression line ก่อนที่ $\bar{\sigma}_{vc}$ เท่ากับ 2 ถึง 3 เท่าของ $\bar{\sigma}_{vm}$ เพื่อให้อยู่ใน field virgin compression line แล้วทำการลดค่าหน่วยแรงประสิทธิผลลง (rebound) กลับมาอยู่ ณ ค่า OCR ต่าง ๆ ตามต้องการ เพื่อลดผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดิน และสามารถนำหลักการของ NSP มาใช้ได้เช่นเดียวกัน การทดลองแบบนี้อาจใช้ได้เพียงแต่ดินที่การเกิด overconsolidation มาจากการเกิด unloading

เนื่องจากวิธีการ SHANSEP แสดงผลการทดลองที่ได้อยู่ในรูปของ normalized strength เป็นฟังก์ชั่นกับค่า OCR ดังนั้นก่อนใช้วิธีการแบบ SHANSEP จึง

ควรพิจารณาเสียก่อนว่าจะใช้วิธีนี้ได้หรือไม่ โดยทำการทดสอบดูก่อนว่าดินชนิดนั้นมีคุณสมบัติที่ normalized ได้หรือไม่

วิธีการปฏิบัติในการวัดค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) โดยวิธีการ SHANSEP มีลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติดังต่อไปนี้

1. ทำการตรวจสอบชั้นดิน (profile) ของดินที่ต้องการทำการสำรวจเสียก่อน เพื่อต้องการหาค่าของหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vo}$) ของชั้นดินที่ต้องการทดสอบ ณ ความลึกต่าง ๆ

2. นำตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุด (undisturbed samples) จากชั้นดินที่ต้องการทำการทดสอบมาทำการวัดหาค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) โดยวิธีการทดสอบแบบ one-dimensional oedometer การทำควรพล็อตผลทดลองที่จุดที่ primary consolidation หยุด เพื่อหาค่า in situ OCR ของชั้นดิน ณ ความลึกต่าง ๆ ตามต้องการ

3. นำตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดจากชั้นดินที่ต้องการทำการทดสอบมาทำการทดสอบโดยวิธี $\overline{CK_oU}$ (consolidated undrained test under K_o condition with pore pressure measurement) โดยทำการกดน้ำหนัก (shear) ด้วยลักษณะเหมือนกับการพิบัติที่จะเกิดขึ้นจริง ๆ โดยใช้อัตราความเครียด (ε) ตามแนวแกนช้า ๆ (Ladd 1974 แนะนำไว้ว่าควรใช้อัตราความเครียดตามแนวแกนประมาณ 0.5-1.0 % ต่อชั่วโมง) เพื่อทำให้ค่าความดันน้ำในโพรงดิน (u) ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้เต็มที่ในขณะที่ทำการทดสอบ

4. ทำการตรวจสอบดูว่าหลักการของ NSP สามารถนำมาใช้ได้กับดินที่ต้องการทำการทดสอบหรือไม่ โดยนำตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดนี้มาทำการ consolidated ที่หน่วยแรงประสิทธิผลประมาณ 1.5, 2 และ 4 เท่าของหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) แล้วจึงทำการกดน้ำหนัก (shear) เพื่อหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ที่ค่า consolidation stress ต่าง ๆ กันนั้น ถ้าดินนั้นมีพฤติกรรมที่ถูก normalized ได้จะให้ค่าอัตราส่วน $S_u/\bar{\sigma}_{vc}$ มีค่าค่อนข้างคงที่ ก่อนการใช้หลักการของ SHANSEP ต้องแน่ใจเสียก่อนว่าดินนั้นมีพฤติกรรมที่ถูก normalized ได้

5. สำหรับการทดสอบดินที่เป็น overconsolidated clays โดยวิธีการแบบ SHANSEP ทำได้โดยทำการ consolidated ตัวอย่างดินให้เป็น normally consolidated clay อยู่บน field virgin compression line ก่อน ($\bar{\sigma}_{vc}$ = 2 ถึง 3 เท่าของ $\bar{\sigma}_{vm}$) แล้วจึงทำการลดค่าหน่วยแรงประสิทธิผลลง (rebound) จนได้ค่า OCR ที่ต้องการ จึงทำการทดสอบด้วยอัตราความเครียดที่บอกไว้ในข้อ 3. แสดงผลการทดสอบที่ได้อยู่ในรูปของ normalized strength เป็นฟังก์ชั่นกับค่า OCR โดยใช้หลักการของ NSP

6. หาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรนตามธรรมชาติ (in situ S_u) ของดินที่ต้องการทำการทดสอบได้โดยนำผลของ NSP ที่ได้จากการทดสอบแบบ SHANSEP ไปเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vo}$) ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 และค่า in situ OCR ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ของชั้นดินที่ต้องการทำการทดสอบ โดย ณ ที่ความลึกอันหนึ่งและค่า OCR หนึ่ง ค่า $S_u/\bar{\sigma}_{vo}$ ของดินตามธรรมชาติจะมีค่าเท่ากับ $S_u/\bar{\sigma}_{vc}$ ที่ได้จาก NSP ในวิธีการแบบ SHANSEP ณ ค่า OCR นั้น ดังนั้นการหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรนตามธรรมชาติ (in situ S_u) ณ ค่า OCR นั้น ณ ที่ความลึกอันหนึ่งอันใดทำได้โดยนำเอาค่า NSP ที่ได้จากวิธีการ SHANSEP ณ ค่า OCR นั้นคูณกับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vo}$) ของดิน ณ ความลึกนั้น

โดยที่ต้องการจะลดผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินในการทดสอบโดยวิธีการแบบ SHANSEP จึงจำเป็นต้องให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินบ้าง เนื่องจากมิได้ทำการทดสอบที่ in situ stress และหวังว่าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างของดินไม่เปลี่ยน NSP จาก in situ condition มากนัก โครงสร้างของดินจะต้องไม่ถูกเปลี่ยนไปมากเมื่อถูกการ consolidation ด้วยหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ($\bar{\sigma}_{vc}$) มากกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) สำหรับพวก quick clays (highly sensitive clays) ไม่สามารถนำหลักการของ SHANSEP มาใช้ได้ เนื่องจากดินพวก quick clays เมื่อถูก consolidated ด้วยหน่วยแรงประสิทธิผลมากกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) แล้ว โครงสร้างของดินจะถูกเปลี่ยนไปจากเดิม ทำให้ค่า NSP จากวิธีการของ SHANSEP จึงไม่เหมือนแบบธรรมชาติ การใช้หลักการของ NSP สำหรับดินชนิดนี้จึงต้องทำการทดสอบแบบ Recompression

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.3 วิธีการวัดแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) แบบ Recompression

วิธีการวัดแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) โดยวิธีการแบบ Recompression นี้ เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยอาศัยหลักการสมมุติฐานมาจากค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) และค่าหน่วยแรงประสิทธิผลก่อนถูก load (preshear effective stress) มีความสัมพันธ์อันหนึ่งกัน (unique relationship) จึงสามารถทำการหาค่าแรงเฉือนของดินได้โดยการทดสอบกับดินที่มีค่าหน่วยแรงประสิทธิผลในดินเท่ากับตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้โดยวิธี CU test ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดมาทำการ reconsolidated ให้กลับไปอยู่ที่สภาวะหน่วยแรงตามธรรมชาติ (in situ stress) หรือทำการ reconsolidated ตัวอย่างดินไปที่หน่วยแรงประสิทธิผลเท่ากับหรือน้อยกว่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) แล้วแต่ค่า OCR ที่ต้องการทำการทดสอบเสียก่อนแล้วจึงทำการทดสอบหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) โดยทำให้เกิดการพิบัติในสภาพอันเดรน

ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ที่ได้จากวิธีการแบบ Recompression นี้ เป็นค่าที่ต้องการได้โดยตรง เนื่องจากทำการทดสอบที่ in situ condition แต่ผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) ที่วัดได้อาจมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เพราะผลของการรบกวนต่อตัวอย่างดินทำให้พฤติกรรมของดินเมื่อถูกการ reconsolidated เปลี่ยนไปจากที่เป็นจริงตามธรรมชาติ

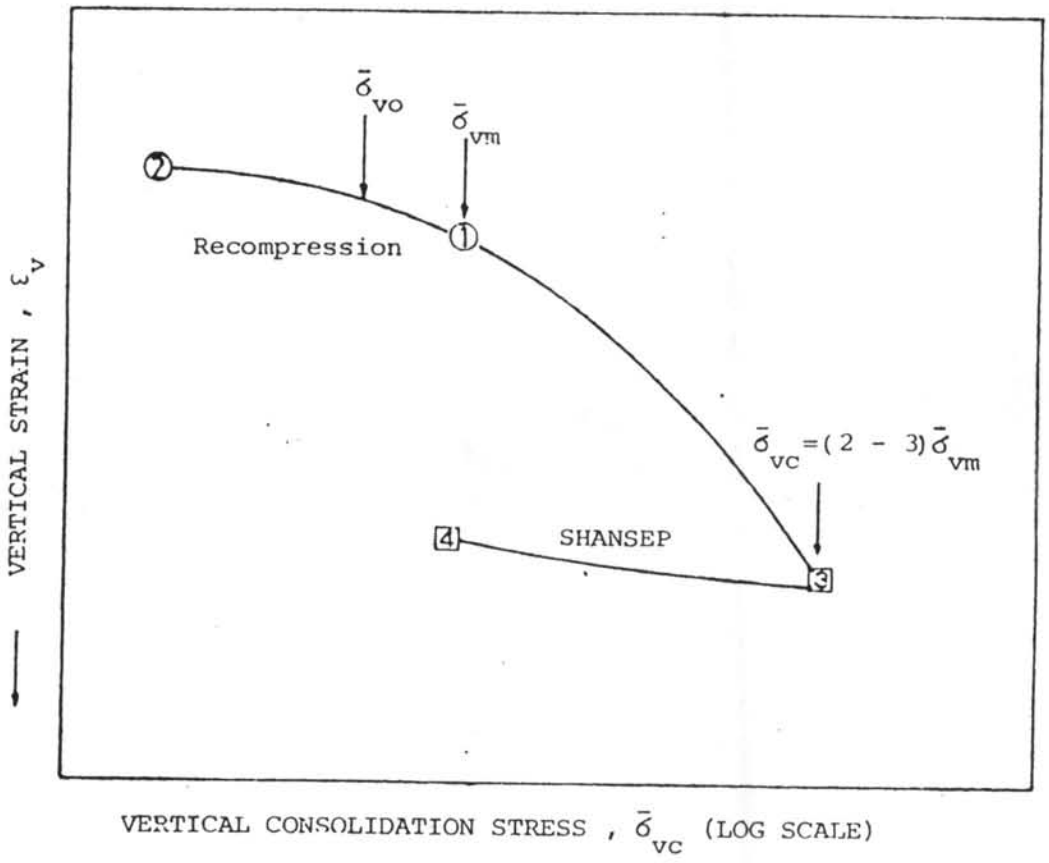
การจะแสดงผลการทดสอบในรูปของ NSP โดยการทดสอบแบบ Recompression จะทำได้ดีต่อเมื่อค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) ที่วัดได้ค่อนข้างดี จึงจำเป็นต้องได้ตัวอย่างที่มีคุณภาพดีมาก

2.7.4 วิธีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) จากวิธีการแบบ SHANSEP และ Recompression

ผลที่ได้จากการวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) โดยวิธีการแบบ SHANSEP สามารถนำมาตรวจสอบได้ว่ามีความถูกต้องใกล้เคียงกับที่เป็นจริงตามธรรมชาติหรือไม่ โดยการนำผลของ NSP ที่ได้จากการทดสอบแบบ SHANSEP ไปเปรียบเทียบกับผลของ NSP ที่ได้จากการทดสอบ

แบบ Recompression โดยใช้ตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุดซึ่งมักนิยม เก็บขึ้นมาโดยวิธี block sample โดยพิจารณาว่าผลของ NSP ที่ได้จากการทดสอบแบบ Recompression จากตัวอย่างที่ถูกรบกวนน้อยที่สุด เป็นค่าที่ถูกต้อง เป็นจริงตามธรรมชาติ ในขณะที่วิธีการแบบ SHANSEP ไม่ได้ทำการทดสอบที่สภาวะตามธรรมชาติ (in situ condition) ถ้าผลของ NSP ที่ได้จากการทดสอบแบบ SHANSEP และ Recompression มีค่าเท่ากัน แสดงว่าหลักการของ SHANSEP สามารถใช้ได้กับดินที่ต้องการทำการทดสอบ

วิธีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบตามวิธีการแบบ SHANSEP และ Recompression สามารถทำได้ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยทำการทดสอบวัดหาค่าแรงเฉือนแบบอันเดรน (S_u) แบบ Recompression ด้วยการ reconsolidated ตัวอย่างดินกลับไปอยู่ที่สภาวะหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vo}$) หรือที่หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ($\bar{\sigma}_{vc}$) น้อยกว่าหรือเท่ากับค่าหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) แล้วแต่ค่า OCR ที่ต้องการทำการทดสอบ (อยู่ระหว่างจุดที่ 1 ถึงจุดที่ 2 ในรูปที่ 2.13) นำผลที่ได้จากการวัดแรงเฉือนมา normalized อยู่ในรูปของ NSP เป็นฟังก์ชั่นกับค่า OCR โดยใช้ค่าแรงดันประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับตามธรรมชาติ ($\bar{\sigma}_{vm}$) ในการทดสอบวัดค่าแรงเฉือนแบบ SHANSEP ทำได้โดยการ consolidated ตัวอย่างดินไปอยู่ที่ virgin compression line (ที่จุดที่ 3 ในรูปที่ 2.13) ด้วยหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่ง ($\bar{\sigma}_{vc}$) เท่ากับ 2 ถึง 3 เท่าของหน่วยแรงประสิทธิผลสูงสุดที่มวลดินเคยได้รับ แล้วทิ้งไว้นานพอสมควร เพื่อ simulate aging ของดินแล้วทำการลดค่าหน่วยแรงประสิทธิผลลง (นั่นคือการ rebound เช่นจากจุดที่ 3 มาอยู่ที่จุด 4 ในรูปที่ 2.13) มาอยู่ที่ค่า OCR ต่าง ๆ ที่ต้องการ แล้วจึงนำผลที่ได้จากการทดสอบแบบ SHANSEP นี้มา normalized อยู่ในรูปของ NSP เป็นฟังก์ชันกับค่า OCR ต่าง ๆ แล้วเอาไปเปรียบเทียบกับผลของ NSP ที่ได้จากการทดสอบแบบ Recompression ที่แต่ละค่า OCR เดียวกัน โดยทำการทดลองด้วยระบบของหน่วยแรง (stress system) และวิธีการทดลองเช่นเดียวกัน ถ้าผลของการ consolidation ไม่ทำให้ค่า NSP ของดินเปลี่ยนไป ค่าของ NSP ที่ได้จากการทดสอบแบบ SHANSEP ย่อมมีค่าเท่ากับ NSP ที่ได้จากการทดสอบแบบ Recompression กับตัวอย่างดินที่ถูกรบกวนน้อยที่สุด ณ แต่ละค่า OCR ที่เท่ากัน



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงสภาวะของการเปลี่ยนแปลงการยุบตัวของมวลดินกับหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวดิ่งในลอการิทึมบิกสเกลจากวิธีการ consolidation แบบ Recompression และ SHANSEP ในการทดลอง $\overline{CK_oU}$ Test