

不攪乱粘性土の一面せん断強度に及ぼす応力履歴と年代効果の影響

西松建設（株） 正 会 員 真 田 昌 慶
北海道大学大学院 フェロー会員 三 田 地 利 之

1. はじめに

粘土の力学挙動に及ぼす年代効果の影響はひずみの小さな領域における変形係数に顕著に表れるとされている^{1)~3)}。本研究では下記の Hvorslev の強度定数⁴⁾に及ぼす年代効果と応力履歴の影響について、H-型一面せん断試験装置^{2),3)}を用いて実施した定圧³⁾および定体積^{5),6)}一面せん断試験結果に基づいて検討を行っている。

$$c_g = c_e + \sigma' \tan \phi'_e, \quad c_e = \mu \cdot \sigma'_e \quad \dots (1) \quad (\phi'_e: \text{有効せん断抵抗角}, \mu: \text{有効粘着力係数}, \sigma'_e: \text{等価圧密応力})$$

2. 試験概要

1) 圧密定圧(CP)試験：不攪乱試料としてタイの AIT キャンパス内より採取された粘土試料(CP-01~03)を供試体として用いた。不攪乱試料の試験後の供試体等を練返し予圧密(予圧密応力 50kPa)したものを再構成供試体(CP-R)として用いた。試験は供試体に所定の応力履歴を与えるため以下の条件で圧密、膨張を行った後せん断試験を実施している(表 1 参照)。不攪乱試料(CP01~03)については、原地盤での有効土被り圧まで一次元的に圧密したものを正規圧密とした。過圧密条件として、原地盤での有効土被り圧まで圧密(先行圧密応力 $=\sigma'_{vy}$)後 OCR2 4 まで膨張させた。再構成試料(CP-R)では正規圧密の場合 70, 120, 180(kPa)、過圧密では 120(kPa)まで圧密後 OCR2, 4 まで膨張させた。せん断は変位速度 0.02(mm/min)でせん断変位 7(mm)まで行った。

表 1 定圧試験条件

Test No.	σ'_{vy} (kPa)	図中記号		
		OCR1	OCR2	OCR4
CP-01	42.3	●	▲	■
CP-02	41.6	○	△	□
CP-03	51.0	◎	△	■
CP-R	50.0	●	▲	■

2) 圧密定体積(CV)試験：AIT において前述の不攪乱試料と同一のサンプリングホールより採取された試料を用いて Ali⁵⁾, Hanh⁶⁾によって行われた試験結果である。試験はすべて正規圧密で、原地盤での有効土被り圧まで一次元的に圧密したもの(CV-01, 02)と、その 4 倍の応力まで一次元的に圧密を行い年代効果の影響が消散したと考えられるもの(4CV-01, 02)についてせん断試験を実施している(表 2 参照)。せん断は変位速度 0.1(mm/min)でせん断変位 10(mm)まで行っている。

表 2 定体積試験条件

Test No.	σ'_{vy} (kPa)	σ'_{vc} (kPa)	図中記号
CV-01	42.2	42.2	●
CV-02	51.5	51.5	■
4CV-01	42.2	168.8	◆
4CV-02	51.5	206.0	▲

3. 試験結果

図 1 は CP, CV 試験における圧密終了時の間隙比と鉛直応力の関係を示したものである。CP 試験ではせん断中に間隙比が変化するので、図 1 に示す圧密終了時の間隙比と再構成試料における NCL の傾き λ およびせん断破壊時の鉛直変位の変化量より算出した破壊時の間隙比 e_f によって不攪乱試料および再構成試料についてそれぞれ等価圧密応力 σ'_e を算出し、破壊時のせん断応力 τ_f と鉛直応力 σ'_v をそれぞれ σ'_e で正規化したものをプロットしたものが図 2 である。なお、CP 試験における図中の記号は表 1 の凡例に従っているが、図 1, 図 2, 図 4 における凡例は OCR1 の場合の記号で代表している。CP 試験では有効せん断抵抗角 ϕ'_e は再構成試料において $\phi'_e=10.5^\circ$ 、不攪乱試料においては $\phi'_e=9.9^\circ$ であり両者はほぼ等しい値を示した。また、この値は同じ試料について別途行った繰返し一面せん断試験⁷⁾による残留状態せん断抵抗角 $\phi'_r(=11.5^\circ)$ に近似している。一方、有効粘着力係数 μ は再構成試料で $\mu=0.170$ 、不攪乱試料では $\mu=0.485$ となり、両者の間に大きな差がみられた。この不攪乱試料と再構成試料の μ の差が年代効果による構造の影響を表していると考えられ、式(1)を以下のように拡張できると考えられる。

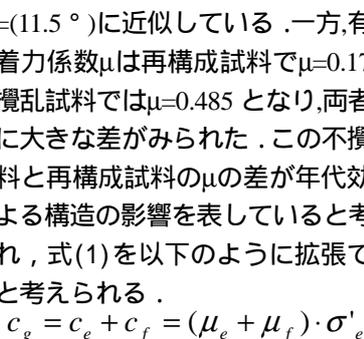


図 1 $e \sim \ln \sigma'_{vc}$ 関係

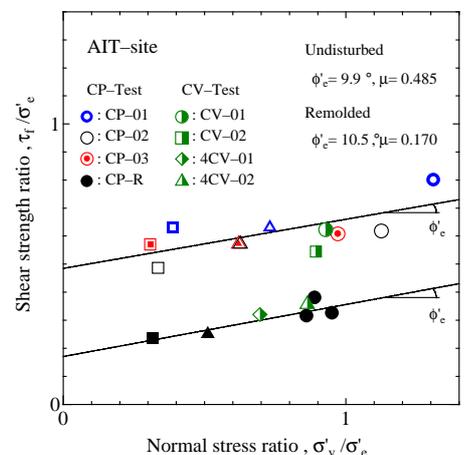


図 2 $\tau_f/\sigma'_e \sim \sigma'_v/\sigma'_e$ 関係

Key Word: 一面せん断試験 応力履歴 年代効果 Hvorslev の強度定数 等価圧密応力

〒060-8628 北海道札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目北海道大学大学院工学研究科

係(CV で 2 本,4CV で 2 本のみ)から正規圧密線が得られなかったため, CP 試験による N, λ を利用して σ'_e を算出し, 破壊時のせん断応力 τ_u と鉛直応力 σ'_v を正規化したものを図 2 中に併せてプロットした. CV 試験による実験結果は年代効果の有無に関わらず CP 試験による結果と良好一致を示している.

図 3 は CP 試験における圧密終了時およびせん断応力最大時の間隙比と鉛直応力の関係を示した模式図である. 正規圧密領域において圧密終了時とせん断破壊時の間隙比の差は鉛直応力によらずほぼ一定である. せん断破壊時の $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係の $\sigma'_v = 1 \text{ kPa}$ に相当する間隙比の値を Γ とし, 図 3 中のパラメータを用いると式(1)は式(2)のように表される. つぎに, 図 3 の幾何学的関係から得られる式(3)を用いて等価圧密応力を消去することにより式(1)は式(4)のように表現することができる. 過圧密領域においても同様にせん断破壊時の $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係の傾き λ_p を用いて式(1)は式(6)のように表現することができる. 試験より得られた各パラメータの値を式(4), 式(6)に適用して得られた計算値と実験値を比較したものが図 4 である. 再構成, 不攪乱試料ともに計算値は実験結果の傾向をよく表している.

図 5 は CV 試験における圧密終了時およびせん断応力最大時の間隙比と鉛直応力の関係を示した模式図である. $\tau_d / \sigma'_n = \mu \cdot \sigma'_{en} / \sigma'_n + \tan \phi'_e$ (2)
 図 5 中のパラメータを用いると 式(1) は式(8)のように表現される. また, 図 5 において NCL と Peak(NC)-line の傾きは等しいと仮定すると, その幾何学的関係から式(9)が得られ, 式(1)は式(10)のように表現できる. 過圧密領域においても同様に, 図 5 の幾何学的関係から式(1)は式(11)のように表現される. 図 6 は式(10)による計算値と実験結果をプロットしたものである. 計算値は実験値の傾向を良く表している. なお, CV 試験については過圧密領域での実験が行われていないので, 図 2 に示すように $\tau_f / \sigma'_e \sim \sigma'_v / \sigma'_e$ 関係が CP と CV で一致していることから, ϕ'_e, μ については CP 試験より得られた値を用いている.

4. まとめ

- 1) 不攪乱試料, 再構成試料に関わらず(すなわち年代効果の有無に関わらず)粘土の有効せん断抵抗角 ϕ'_e は一定であり, 有効粘着力係数 μ の差が構造の発達などによる年代効果の影響であると考えられる.
- 2) 定圧一面せん断強度 τ_f と鉛直応力 σ'_v の関係は ϕ'_e, μ を用いて応力履歴, 年代効果により異なる傾きを持つ直線関係として表現可能であり, 同一の過圧密比において不攪乱試料の傾きは再構成試料の傾きより大きな値を示す. この関係は定体積試験でも同様に成り立つ.

参考文献

1) Satoru Shibuya: Assessing Structure of Aged Natural Sedimentary Clays, Soils and Foundation s Vol.40, No.3, 1-16, June 2000, 2) 荻野俊寛, 三田地利之, 澁谷啓, 及川洋: 圧密定体積一面せん断試験による粘性土の変形・強度特性, 土木学会論文集, No.673/ -54, 15-26, 2001.3, 3) 真田昌慶, 三田地利之: 不攪乱粘性土の変形・強度特性に及ぼす応力履歴と年代効果の影響, 土木学会北海道支部論文報告集第 58 号, -6, pp546-549, 2002., 4) Hvorslev, M.J. Physical components of the shear strength of saturated clays, Proc. ASCE Research Conf. On Shear Strength of Cohesive Soils, pp169-273, 1960, 5) Justin Ali, (1997): Strength Of Bangkok Clay in Constant Volume Direct Shear Test, M.eng. Thesis, AIT, Bangkok, Thailand., 6) Le Thu Hanh, (1997): Properties Of Bangkok Clay As Measured Using Piezocone, M.eng. Thesis, AIT, Bangkok, Thailand, 7) 九田敬行, 三田地利之, 石橋正弘: 逆算法と繰り返し一面せん断試験による地すべり強度パラメータの決定法, 第 42 回地盤工学会技術報告集, pp1-10, 2002

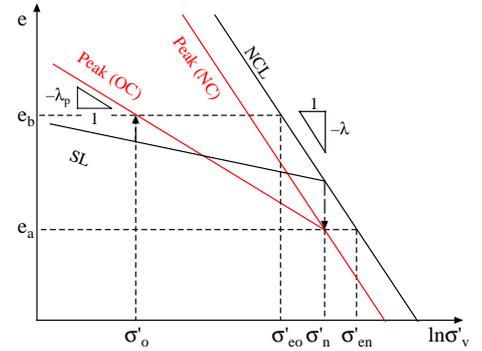


図 3 模式図 $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係(CP-Test)

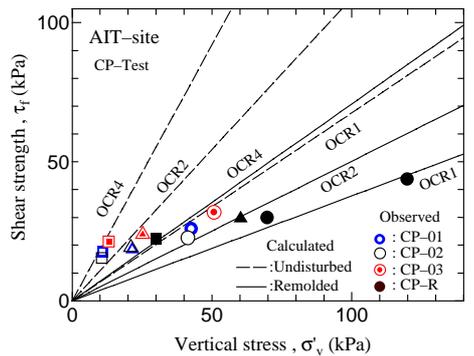


図 4 $\tau_f \sim \sigma'_v$ 関係 (CP-Test)

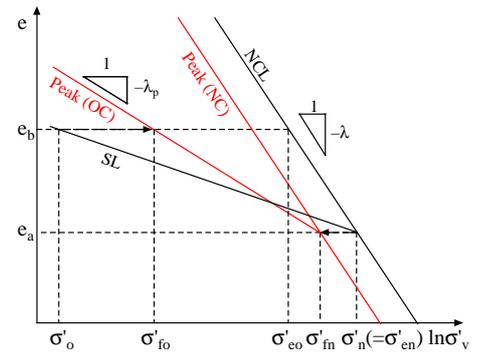


図 5 模式図 $e \sim \ln \sigma'_v$ 関係(CV-Test)

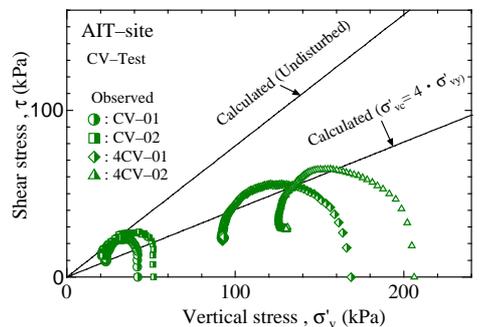


図 6 $\tau \sim \sigma'_v$ 関係 (CV-Test)