

繰り返し一面せん断試験による Hvorslev の強度定数算定の試み

北海道大学大学院 ○学生会員 伊藤 裕之
 北海道大学大学院 フェロー 三田地 利之
 清水建設（株） 正会員 石橋 正広
 北海道大学大学院 学生会員 鷲 隼人

1.はじめに

筆者らは地すべり対策工設計用の強度定数設定法の提案にあたって、粘土のピーク、完全軟化、残留状態の強度パラメータ相互の関係を導いている^{1),2)}。この際、粘土の破壊規準を Hvorslev³⁾の破壊基準にならって以下のように仮定している。

$$\tau = c_g + \sigma' \tan \phi_e \quad c_g = c_e + c_f = (K_e + K_f) \cdot \sigma'_e \quad \dots (1)$$

c_e は間隙比の変化に基づく強度成分を表し、 c_f は間隙比および有効垂直応力一定条件下での、ageing による構造の発達に基づく強度成分である。さらに単純化のために、 c_e と c_f の和すなわち c_g が等価圧密応力 σ'_e に比例 ($c_g = K \cdot \sigma'_e$; $K = K_e + K_f$) とすると仮定していることから、Hvorslev の破壊基準における c_e が c_g に相当する。 $\tan \phi_e$ は間隙比 e 一定の下で破壊時に破壊面上に作用する有効垂直応力 σ' のみに依存するせん断抵抗を表す材料定数であり、粘土の応力履歴に依存しないと仮定される。

完全軟化状態では、構造の発達に基づく強度成分 c_f は無いものと考えられ、図1より $\tan \phi_s$ は次式で表すことができる。

$$\tan \phi_s = \frac{(c_{en} + \sigma_n \tan \phi_e) - (c_{eo} + \sigma_o \tan \phi_e)}{\sigma_n - \sigma_o} = \frac{\kappa_e \{(\sigma_{en}/\sigma_o) - (\sigma_{eos}/\sigma_o)\} + (OCR - 1) \tan \phi_e}{(OCR - 1)}$$

ここで上式と図2に示される関係を用いることにより、次式が導ける。

$$\tan \phi_s = m_s \{1 - (OCR^{\Lambda_s} - 1)/(OCR - 1)\} + \tan \phi_e$$

$$m_s = \kappa_e \cdot \exp\{(N - \Gamma)/\lambda\} \quad \dots (2)$$

$$\Lambda_s = 1 - \lambda_s/\lambda$$

$$c_s/\sigma_o = m_s \cdot OCR \cdot \{(OCR^{\Lambda_s} - 1)/(OCR - 1)\}$$

次に残留状態での強度パラメータについて考える。OCR=1の完全軟化状態を起点として残留状態に至る間に、粘土粒子の再配列によって間隙比の変化なしに強度が低下すると言われている⁴⁾。間隙比が変化しない状態では間隙比の変化に基づく強度成分 c_e は存在しないと考えられるから、(2)式で κ_e をゼロ ($m_s=0$) とすると残留強度に対応するせん断抵抗角 ϕ_r は次式で表され、Hvorslev の有効せん断抵抗角 ϕ_e に等しいことが示される。

$$\tan \phi_r = \tan \phi_e, \quad c_r = 0 \quad \dots (3)$$

また等価圧密応力 σ'_e は破壊時の間隙比 e_f を正規圧密線(NCL), または NCL に平行な任意の直線に対応させて求めることができる。後述の図4に一例を示すように、正規圧密粘土において、破壊時の $e_f - \ln \sigma'_f$ 線(CSL)は一般に NCL に平行になる。したがって正規圧密粘土における CSL は等価圧密応力 σ'_e の決定に使用できる。

ところで、正規圧密粘土の場合、図1の σ_n に対応するせん断抵抗 τ は次式で表すことができる。

$$\tau = c_{en} + \sigma_n \tan \phi_e = \sigma_n \tan \phi_{sn}$$

σ'_e の決定に CSL を用いた場合、有効垂直応力 σ_n と等価圧密応力 σ_{en} が等しくなり、上式を書き直すと、

$$(c_{en}/\sigma_{en}) + \tan \phi_e = \tan \phi_{sn}$$

完全軟化状態の正規圧密粘土では c_f は存在しないことから、 $\kappa = c_e/\sigma'_e$ であり、上式より次式を導くことができる。

$$\kappa = \tan \phi_{sn} - \tan \phi_e$$

ここで前述の $\tan \phi_r = \tan \phi_e$ を用いると、 κ を求める式は

$$\kappa = \tan \phi_{sn} - \tan \phi_r \quad \dots (4)$$

以上のことから $\phi_r = \phi_e$ の関係が確かめられれば、正規圧密試料について2~3回程度の定圧繰り返し一面せん断試験結果から、 ϕ'_{sn} および ϕ'_r を得ることにより、(3)、(4)式によって Hvorslev の強度定数 κ , ϕ'_e を求めることができる。これらのことを踏まえて、本研究では再構成粘土試料を用いて H- 型一面せん断試験装置²⁾による定圧繰り返し一面せん断試験を行い、(3)、(4)式の検証を行った。

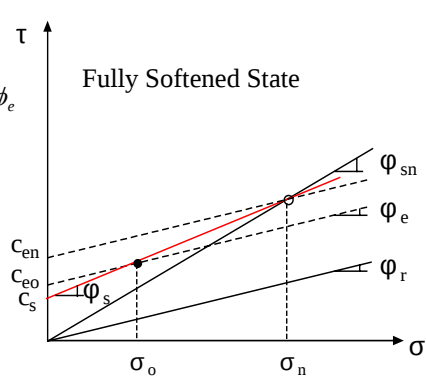


図1 完全軟化状態強度パラメータ

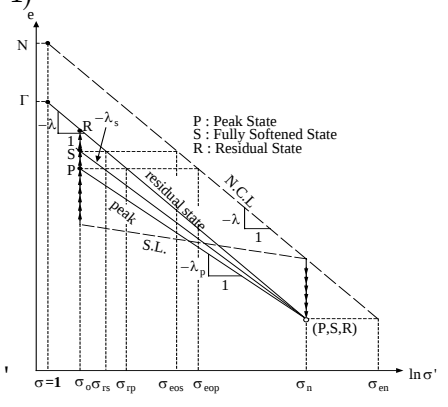


図2 有効応力と間隙比の関係

Key Word: 繰り返し一面せん断試験 Hvorslev の強度定数 完全軟化状態 残留状態

〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学大学院工学研究科

電話番号 (011-706-6196) FAX(011-706-7204)

2. 試験条件

本研究で行った繰返し一面せん断試験の試験条件を表1に示す。供試体寸法は高さ 30mm, 直径 60mm で, 圧密・膨張の打ち切りは 3 t 法により, 試験は両面排水の定圧条件で, 繰返しせん断は片振幅 6mm で行った。試験試料は市販の NSF-clay の予圧密試料, 北海道内で採取し, 繰返し再構成した夕張粘土, 篠路粘土, 岩見沢粘土, 日高粘土の 5 種類である。

表 1

垂直応力(kPa)	圧密速度(kPa/min)	OCR	せん断速度(mm/min)	繰返し回数
50 ~ 400	2.0(除荷時-1.0)	1, 2, 4, 8	0.02	5

3. 試験結果

図3は, 篠路粘土の正規・過圧密試料について, 垂直応力を変えて行った一連の定圧繰返し一面せん断試験結果であり, この図の正規圧密のデータから完全軟化状態のせん断抵抗角(ϕ'_{sn})を, また正規・過圧密の両データを用いて残留状態のせん断抵抗角(ϕ'_r)を求めた。図4は篠路粘土の定圧繰返し一面せん断試験により得られた $e - \ln \sigma'_v$ 図である。このグラフより圧密終了時の間隙比をプロットした正規圧密線(NCL)と完全軟化状態(ピーク時)の間隙比をプロットした $e - \ln \sigma'_v$ 線の平行性が分かる。すなわち, 正規圧密粘土においてはせん断中の間隙比の減少量が垂直応力に依存していないことを示している。そこで正規圧密のピーク時の $e - \ln \sigma'_v$ 線に正規圧密, 過圧密試料のピーク時の間隙比を対応させてそれぞれの等価圧密応力 σ'_e を求めた。

図5は篠路粘土において定圧繰返し一面せん断試験により求められた各供試体における完全軟化強度 τ_s とそれに対応する垂直応力 σ'_v を, 図4より求めた等価圧密応力 σ'_e で正規化したものである。図5より篠路粘土における Hvorslev の有効粘着力係数 $\kappa = 0.112$ と有効せん断抵抗角 $\phi'_e = 25.2^\circ$ を得る。また式(4)を用いて κ を求めると $\kappa = 0.090$, 一方, 残留状態せん断抵抗角 $\phi'_r = 26.0^\circ$ であり, 両者がほぼ一致するという結果を得た。

図6, 図7は日高粘土における定圧繰返し一面せん断試験により求められた ϕ'_s , ϕ'_r と, 篠路粘土の場合と同様にして算定した Hvorslev の強度定数 κ , ϕ'_e を示したグラフである。また, 式(4)を用いて粘着力係数 κ を求めた ($\kappa = 0.108$)。日高粘土においても Hvorslev の強度定数 ($\kappa = 0.140$, $\phi'_e = 27.2^\circ$) と式(4)による κ , ϕ'_r ($\kappa = 0.108$, $\phi'_r = 28.2^\circ$) がほぼ一致するという結果を得た。

4. まとめ

5 種類の試料について Hvorslev の強度定数 κ , ϕ'_e と式(4)による κ , 残留状態のせん断抵抗角 ϕ'_r の比較をまとめた結果を表2に示す。篠路粘土, 夕張粘土, 日高粘土の三種類の粘土において Hvorslev の強度定数 κ , ϕ'_e と式(4)による κ , ϕ'_r はほとんど一致するという結果を得た。

以上の結果は, Hvorslev の有効せん断抵抗角 ϕ'_e が定圧繰返し一面せん断試験より得られる残留状態のせん断抵抗角 ϕ'_r に相当し, Hvorslev の強度定数 κ , ϕ'_e を正規圧密試料についての 2 ~ 3 回程度の定圧繰返し一面せん断試験を行うことで決定できる可能性を示唆している。

表 2

	W _L (%)	I _p	κ	$\phi'_e(^\circ)$	κ (式4)	$\phi'_r(^\circ)$	比較
NSF-clay	54	22.2	0.020	29.2	0.087	27.2	
篠路粘土	78.5	45.8	0.112	25.2	0.090	26.0	
岩見沢粘土	65.4	32.1	0.055	31.3	0.190	24.8	×
夕張粘土	55.7	31.7	0.115	21.5	0.126	20.4	
日高粘土	64.4	33.9	0.140	27.2	0.108	28.2	

(参考文献)

- 1) T. Mitachi et al.: Determination of Strength Parameters for Landslide Slope Stability Analysis by Laboratory Test and Inverse Calculation Engagement, 地すべり学会誌, 2003(印刷中)。
- 2) 三田地利之・九田敬行・大河原文正: 全自動繰返し一面せん断試験装置の開発と安定解析用強度パラメータの決定, 第39回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.265-268, 2000。
- 3) Hvorslev, M.J.: Physical components of the shear strength of saturated clays, Proc ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, pp.169-273, 1960。
- 4) Skempton, A.W.: Residual Strength of Clay in Land-slides, Folded Strata and the Laboratory, Geotechnique, Vol.35, No.1 pp.3-18, 1985。

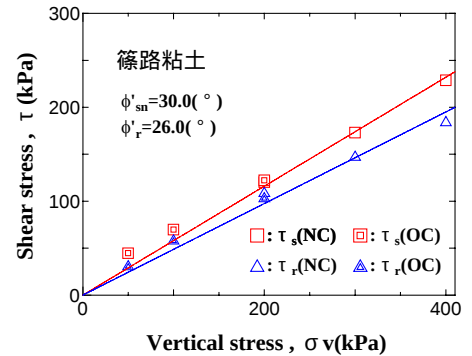


図3 せん断応力～垂直応力関係(篠路粘土)

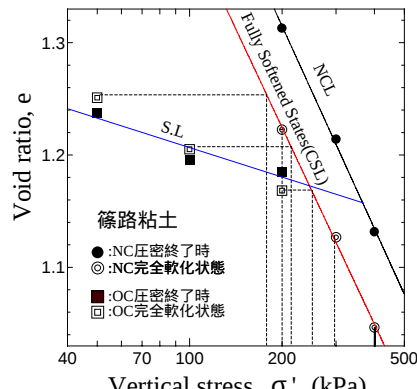
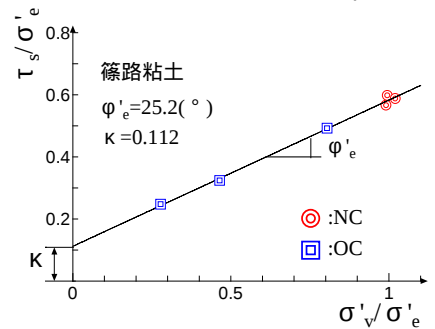
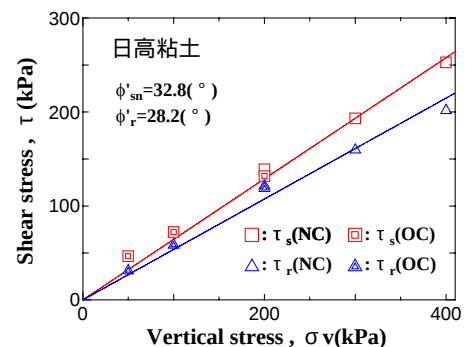
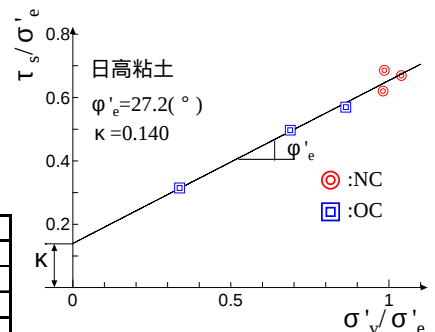
図4 $e - \ln \sigma'_v$ 図(篠路粘土)図5 $\tau_s/\sigma'_e, \sigma'_v/\sigma'_e$ (篠路粘土)

図6 せん断応力～垂直応力関係(日高粘土)

図7 ($\tau_s/\sigma'_e, \sigma'_v/\sigma'_e$) 図(日高粘土)