

定体積一面せん断試験による Hvorslev の強度定数の評価

Evaluation of Hvorslev's Strength Parameters by Constant Volume Direct Shear Test

北海道大学大学院 フェロー会員 三田地 利之(Toshiyuki, Mitachi)
 北海道大学大学院○学 生 員 真田 昌慶(Masanori Sanada)
 北海道大学大学院 学 生 九田 敬行(Takayuki Kuda)
 北海道大学工学部 学 生 山根 正義(Masayoshi Yamane)

1. はじめに

筆者らは、地すべり斜面の安定解析に従来多用されてきた $c-\tan \phi$ 図によるいわゆる逆算法に、室内強度試験結果を組み入れた安定解析用強度パラメータの実用算定法を提案している^{1)・2)}。筆者らの提案する方法を用いるにあたっては、すべり面付近から採取された試料についてのピーク・完全軟化・残留強度をせん断試験によって求めるのが基本であるが、この方法に限らず一般に地すべり問題を扱う上で粘土の残留状態での強度パラメータを知ることが不可欠である。

残留状態のせん断抵抗角 ϕ_r はピークおよび完全軟化状態を越えた大きなせん断変形の後せん断応力がほとんど一定値に収束し、体積変化もほとんどない状態でのせん断抵抗角として定義される。³⁾一方、Hvorslev の破壊基準⁴⁾による強度パラメータ c_e 、 ϕ_e は、排水条件および応力履歴によらずまた間隙比の変化に依存しないものとして以下のように定義されている。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= c_e + \sigma' \tan \phi_e \\ c_e &= \kappa \cdot \sigma'_e \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで c_e 、 ϕ_e はそれぞれ有効粘着力、有効せん断抵抗角と定義され、 κ は粘着力係数、 σ'_e は等価圧密圧力である。

以上より、「両者は事実上同一のものと考えてよいのではないか」というのが本研究の発端であり、①最新の一面せん断試験装置（H-II型一面せん断試験装置⁴⁾）を用いて、Hvorslev が過去に行った実験（圧密定圧一面せん断試験）をトレースすること、②あわせて圧密定体積一面せん断試験を行い、両試験から得られる Hvorslev の強度パラメータを比較すること、③繰り返し定圧一面せん断試験（H-II型を基本として高精度の変位制御自動繰り返しせん断が可能のように改良した H-III型一面せん断試験装置⁵⁾）を用いて実施）から得られる残留状態におけるせん断抵抗角 ϕ_r と ϕ_e の対応関係を検討すること、が本研究の目的である。

2. 試験概要

試料は市販の NSF-clay ($\rho_s=2.77\text{g/cm}^3$ 、液性限界 $LL=56\%$ 、塑性指数 $I_p=28$) で粉末状の試料に液性限界の2倍程度になるように蒸留水を加えて攪拌後、150kPa で10日間予圧密したものを供試体として用いた。

単調載荷一面せん断試験においては供試体は定圧、定体積条件共に一辺60mmの正方形断面で高さは40mmで

ある。供試体には所定の応力履歴を与えるため表1に示す条件で圧密、除荷を行った。圧密、除荷の打ち切りについては軸変位による3t法に従った。せん断過程については定圧せん断においては変位速度0.02(mm/min)、定体積せん断については変位速度0.1(mm/min)でいずれもせん断変位7mmまで実施した。なお、定圧せん断において明確なピークが現れない場合はせん断変位7mmの点を破壊点とした。

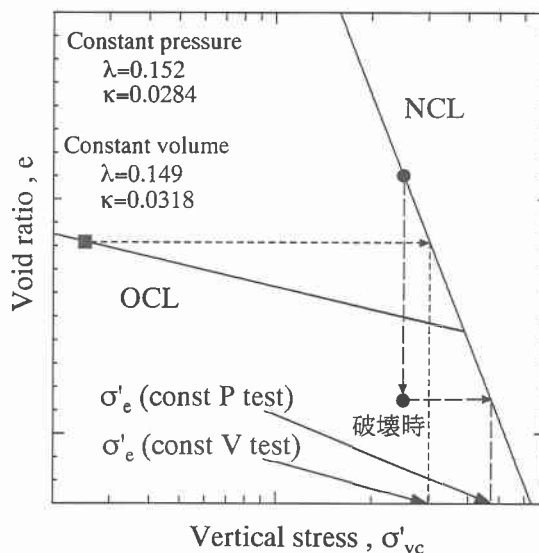
表1 試験条件

先行圧密応力(kPa)	175	250	400				
OCR	1	1	1	1.25	2	4	8

(定圧試験については OCR16 まで実施)

残留状態におけるせん断抵抗角 ϕ'_r については前述の H-III型一面せん断試験装置より得られた値より算出した。供試体は直径60mmの円形断面で高さ40mmである。せん断については供試体を所定の圧密応力(75, 175, 186, 250, 300, 400(kPa))で圧密後、定圧条件でせん断速度0.2mm/min、繰り返しせん断の片振幅6mmで繰り返し回数3回(累積変位72mm)まで行った。

3. 実験結果

図1. σ'_e 算出の概念図

以下の試験結果において、粘着力係数 κ 、有効せん断抵抗角 ϕ'_e 。残留状態におけるせん断抵抗角 ϕ'_r の算出については供試体せん断面上のせん断応力および鉛直応力

を正確に測定することが重要であるが、本試験において用いた一面せん断試験装置はいずれも上記の条件を満たすものである。

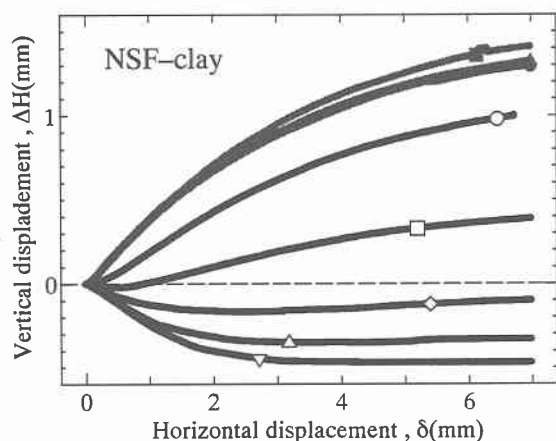


図 2. $\Delta H \sim \delta$ 関係(定圧せん断試験)

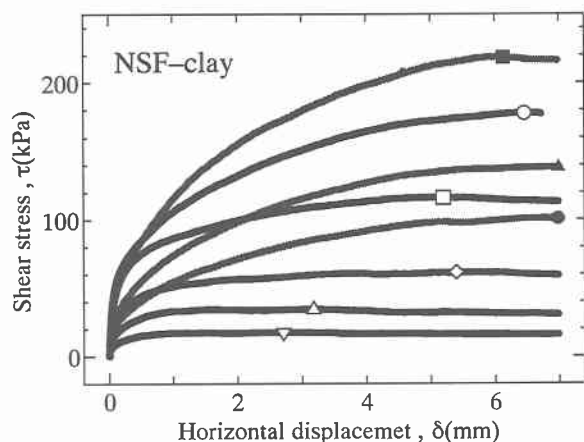


図 3. $\tau \sim \delta$ 関係 (定圧せん断試験)

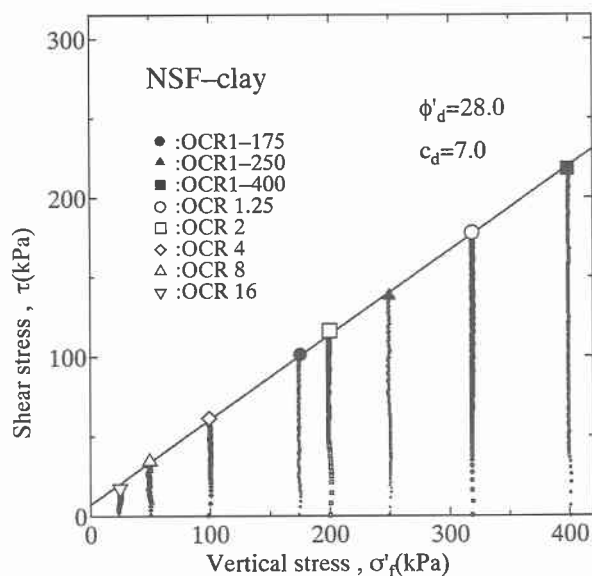


図 4. $\tau_f \sim \sigma'_f$ 関係 (定圧せん断試験)

3. 1 定圧試験結果

図 1 は等価圧密応力 σ'_e 算出の概念図である。定圧試

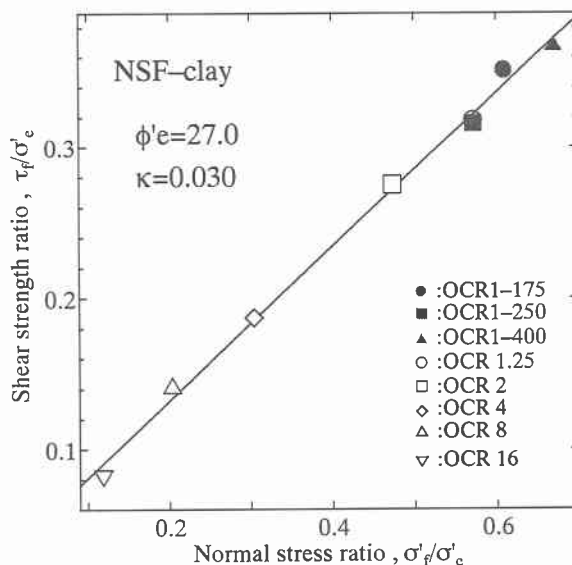


図 5. $\tau_f / \sigma'_e \sim \sigma'_f / \sigma'_e$ 関係 (定圧せん断試験)

験においては図 2, 図 4 から分かるようにせん断中に間隙比が変化し鉛直応力は変化しないので NCL の傾き入と圧密終了時の間隙比および図 2, 図 4 から求められる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 より等価圧密応力 σ'_e を算出し, 図 3, 図 4 より得られるせん断強度 τ_f と鉛直応力 σ'_f 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 5 である。定圧試験においては, 有効粘着力 $\phi_e = 27.0^\circ$, 粘着力係数 $\kappa = 0.030$ が得られた。

3. 2 定体積試験結果

定体積せん断においてはせん断中の間隙比の変化が生じないので, 図 1 に示すように正規圧密領域においては圧密応力そのものを, 過圧密領域においては膨張終了時の間隙比に対応する NCL 上での応力より算出しそれぞれ等価圧密応力とした。

図 6 は定体積せん断中の応力経路を示したものであるが, この試験においてはせん断応力最大時 (τ_{max}) とせん断・垂直応力比最大時 (τ / σ')_{max} の 2 組の破壊点が生

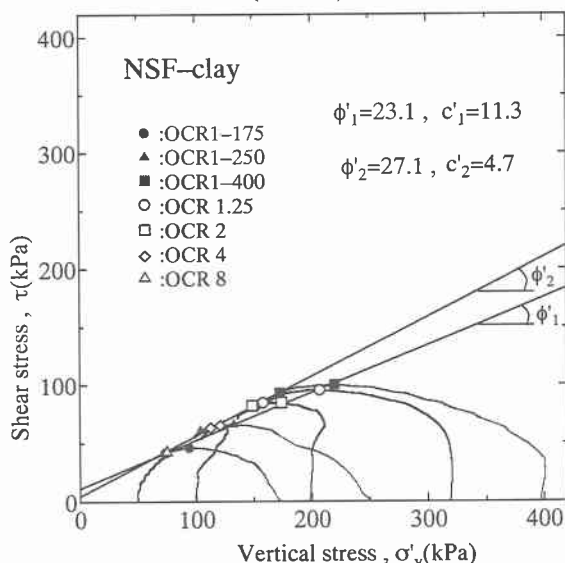


図 6. $\tau_f \sim \sigma'_v$ 関係 (定体積せん断試験)

義可能である。図中の (c'_{11}, ϕ'_{11}) および (c'_{22}, ϕ'_{22}) はそれぞれ $(\tau_{\max})$, $(\tau/\sigma')_{\max}$ 基準による Mohr-Coulomb の強度パラメータである。図6より得られるそれぞれの破壊点についてせん断強度 τ_f と鉛直応力 σ'_f を等価圧密応力 σ'_e で正規化したものを示した図が図7, 図8である。 $(\tau_{\max})$ を破壊点とした時の Hvorslev の有効せん断抵抗角 ϕ'_e , 粘着力係数 κ はそれぞれ 19.4° , 0.067 であり, $(\tau/\sigma')_{\max}$ を破壊点とした場合の有効せん断抵抗角 ϕ'_e , 粘着力係数 κ はそれぞれ 27.3° , 0.014 であった。

なお, $(\tau_{\max})$ を破壊点とした場合において正規圧密領域および比較的軽い過圧密領域でデータの分布に偏りが見られるのは図6の有効応力経路から分かるように, 等価圧密応力とせん断破壊時の垂直応力の比がせん断開始時の応力によらず近い値に集中する傾向を示すためである。

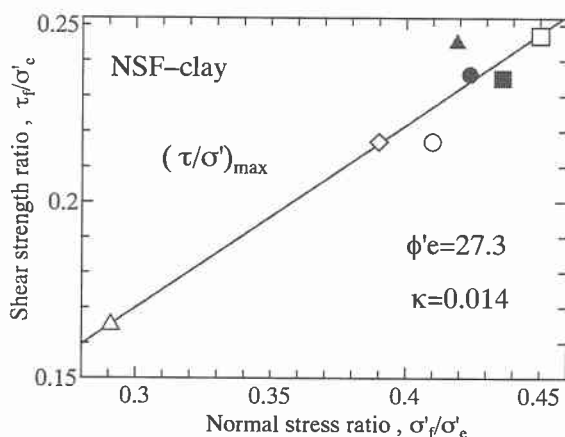


図7. $\tau_f/\sigma'_e \sim \sigma'_f/\sigma'_e$ 関係(定体積せん断試験)

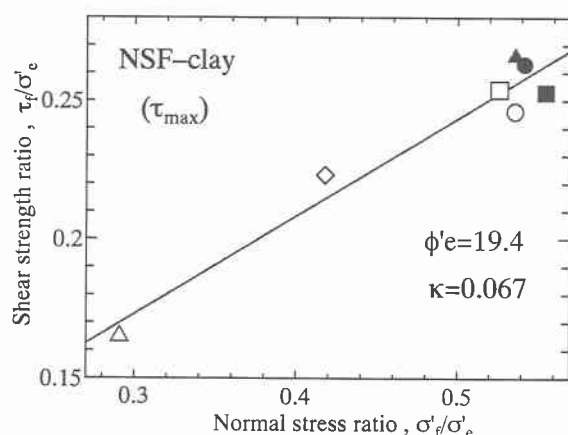


図8. $\tau_f/\sigma'_e \sim \sigma'_f/\sigma'_e$ 関係(定体積せん断試験)

3.3 ϕ'_e , κ の比較

定圧一面せん断試験から算出した有効せん断抵抗角 ϕ'_e と定体積一面せん断試験において $(\tau/\sigma')_{\max}$ および $(\tau_{\max})$ の点を破壊点として有効せん断抵抗角 ϕ'_e を算出した場合ではそれぞれの値が $\phi'_e=27.0^\circ$, $\phi'_e=$

27.3° , $\phi'_e=19.4^\circ$ となり, 定圧試験における ϕ'_e と $(\tau_{\max})$ を破壊点とした場合の定体積試験の ϕ'_e との間にはかなりの開きがあるのに対し, $(\tau/\sigma')_{\max}$ を破壊点とした場合の定体積試験の ϕ'_e と定圧試験における ϕ'_e とは非常に近い値を示した。また, 粘着力係数 κ においても定圧試験における粘着力係数, 定体積試験において $(\tau_{\max})$ を破壊点とした場合の粘着力係数および $(\tau/\sigma')_{\max}$ を破壊点とした場合の粘着力係数がおおよそ $\kappa=0.030$, $\kappa=0.067$, $\kappa=0.014$ となっており, 有効せん断抵抗角ほどではないが定圧試験に対して $(\tau/\sigma')_{\max}$ を破壊点とした場合の定体積試験の粘着力係数の方が近似した値を示しており, 定体積せん断においては $(\tau/\sigma')_{\max}$ を破壊点とするのが妥当であると考えられる。

3.4 繰り返し定圧一面せん断試験結果

繰り返し定圧一面せん断試験結果の一例として圧密応力 $250(\text{kPa})$ での水平変位とせん断応力の関係および, 累積水平変位とせん断応力の関係を示したのが図9, 図10である。図9より, せん断開始後累積変位 12mm 程度でせん断応力のピーク(完全軟化状態)に達し, その後せん断応力が変化しなくなり, 残留状態に至っている。本研究では, 繰り返しせん断中に水平変位が図10の原点に戻った時のせん断応力を残留強度と定義している。図9, 図10のようにして決定された完全軟化強度および残留強度をプロットしたものが図11であり, 完全軟化状態に対応するせん断抵抗角 $\phi'_r=29.3^\circ$, 残留状態におけるせん断抵抗角 $\phi'_r=25.0^\circ$ であった。

正規圧密粘土において定圧条件下で単調せん断を行った場合, 圧密応力 175 および $250(\text{kPa})$ ではピークが現れずせん断変位 7mm の時点でせん断を打ち切っているが, 繰り返しせん断時の完全軟化強度までの水平変位(約 12mm)との間に変位量に大きな差がある。しかし, 各圧密応力におけるせん断強度の差は小さくせん断抵抗角の値はほぼ等しい(図4における (c'_{11}, ϕ'_{11}) , 図11における (c'_{11}, ϕ'_{11}) 参照)のものであった。残留状態におけるせん断抵抗角 $\phi'_r=25.0^\circ$ に対して, 定圧および定体積条件下での単調せん断試験での有効せん断抵抗角 ϕ'_e はそれぞれ 27.0° , 27.3° ($(\tau/\sigma')_{\max}$) であり, その差は約 2° であった。

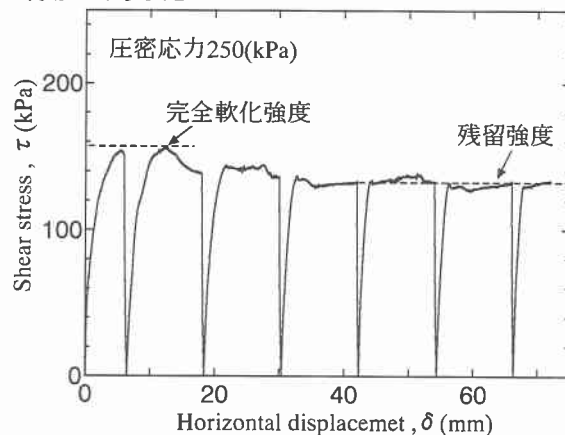


図9. $\tau \sim \delta$ 関係

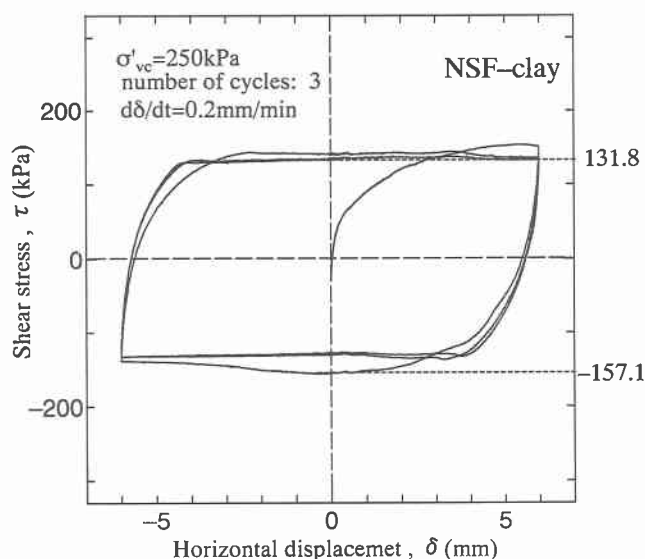


図 10. $\tau \sim \delta$ 関係

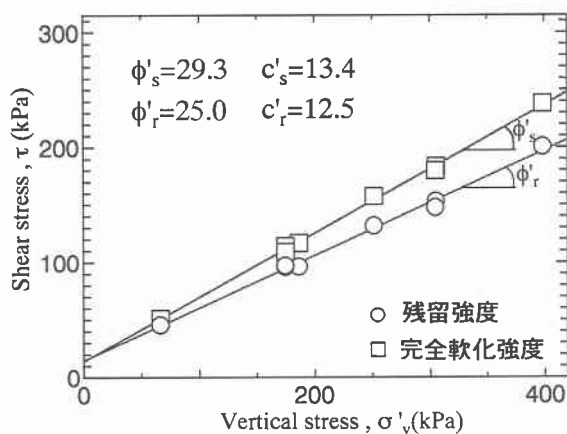


図 11. $\tau_f \sim \sigma'_f$ 関係

したいと考えている。

参考文献

- 1) 三田地・佐野・大河原：室内せん断試験による“強度定数”と安定解析に用いる強度パラメータの関係について，第 35 回地すべり学会研究発表会講演集，pp. 345-384, 1996.
- 2) T.Mitachi et al: Method for determining design strength parameters for slope stability, Slope Stability Engineering, pp. 781-785, 1999.
- 3) Skempton, A.W.: Residual strength of clay in landslides, folded strata and the laboratory, Geotechnique, 35(1):3-18, 1985.
- 4) 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.
- 5) 高田増男，澁谷啓，三田地利之：粘性土の一面せん断試験結果に及ぼすせん断速度の影響，土質工学会北海道支部技術報告集，第 35 号，pp. 60-67, 1995
- 6) 三田地利之，九田敬行，大河原正文：全自動繰り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.

4. まとめ

- 1) 従来，Hvorslev の破壊基準に基づく強度定数を求めるための実験手順は複雑であり，実用的ではないとされて来た．しかし本研究の結果，制御および計測が高度に自動化された現在の試験装置を用いることにより Hvorslev の破壊基準における粘着力係数 κ ，有効せん断抵抗角 ϕ'_0 を容易にかつ高精度で求めることが可能である．
- 2) 定圧試験および定体積試験結果の比較から， $(\tau/\sigma')_{\max}$ 基準による定体積試験から，定圧試験による ϕ_0 に等しい値が得られることが分かった．したがって短時間で Hvorslev の強度定数を求め得る見通しができた．
- 3) 残留状態におけるせん断抵抗角 ϕ'_r と Hvorslev の破壊基準による有効せん断抵抗角 ϕ'_0 は同一の強度定数であるとみなして良いような結果が得られた．今後結論 2) の確認もあわせて，粘土の種類を変えた実験により検証