

繰返し一面せん断試験による Hvorslev の強度定数算定の可能性

Possibility of determination of Hvorslev's strength parameters by reversal direct box shear test

北海道大学大学院	フェロー	三田地	利之(Toshiyuki Mitachi)
北海道大学大学院	○学生員	伊藤	裕之(Hiroyuki Ito)
北海道大学大学院	学生員	石橋	正弘(Masahiro Ishibashi)
北海道大学工学部	学生員	鷲	隼人(Hayato Washi)

1.はじめに

1960年に提案された Hvorslev¹⁾の破壊基準における粘土の強度定数(c'_e, ϕ'_e)は粘土の真の強度定数と呼ぶにふさわしいものと考えられている。しかし(c'_e, ϕ'_e)を求めるにあたり、一種類の粘土で正規圧密試料と過圧密試料それぞれ3回程度のせん断試験を行う必要があり、決定が必ずしも容易でなく実用的でないことから、これまでは理論的な考察に用いられるだけの状態が続いてきた。

一般に土の破壊基準として Mohr-Coulomb の破壊基準(式(1))が広く用いられている。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

しかし c, ϕ は粘土の圧密履歴や排水条件により値が変化し、排水条件を示す添字を付けて表示する約束になっていることから明らかなように「定数」ではない。これに対し、Hvorslev の破壊基準(式(2))における c'_e, ϕ'_e は排水条件によらない定数である。

$$\tau = c'_e + \sigma' \tan \phi'_e, \quad c'_e = \kappa \cdot \sigma'_e \quad (2)$$

c'_e は有効粘着力、 ϕ'_e は有効せん断抵抗角と定義され、 κ は粘着力係数、 σ'_e は等価圧密応力である。

c'_e は間隙比の変化に基づく強度成分を表し、 σ'_e に比例する。また ϕ'_e は、同一間隙比で得られる粘土の摩擦成分であり(図1)、間隙比に無関係であることがわかって

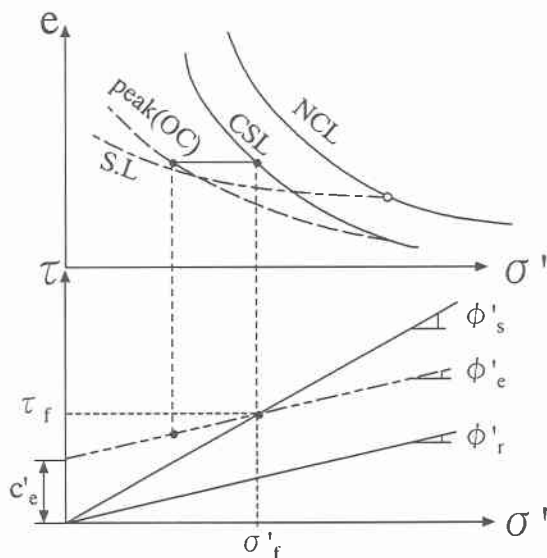


図1 c'_e, ϕ'_e の定義

σ'_e は破壊時の間隙比 e_f を正規圧密線(NCL)に対応させて求められる(図2において、●:NC(σ'_{f1}, e_{f1}) $\rightarrow \sigma'_{e1}$ 、■:OC(σ'_{f2}, e_{f2}) $\rightarrow \sigma'_{e2}$)。 κ, ϕ'_e は破壊時のせん断

抵抗 τ_f 、有効垂直応力 σ'_f を σ'_e で正規化した($\tau_f/\sigma'_e, \sigma'_f/\sigma'_e$) 図から決定される(図3)。

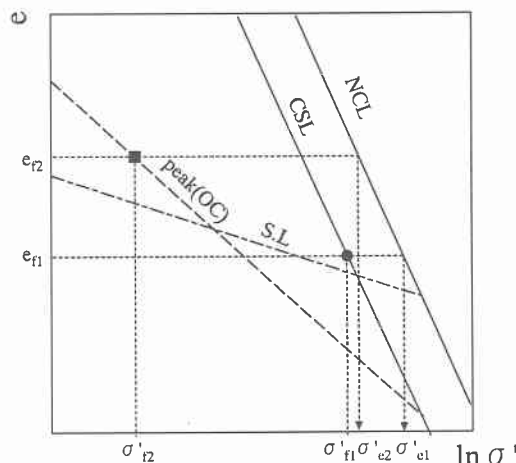


図2 σ'_e の決定法

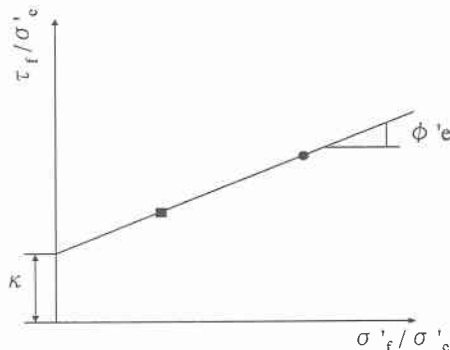


図3 κ, ϕ'_e の決定法

筆者らは地すべり斜面の安定解析に必要なピーク・完全軟化・残留状態での強度パラメータが粘土の基本的力学定数を用いてどのように表されるかという考察の過程で ϕ'_e が残留状態のせん断抵抗角 ϕ'_r に相当することを見出した²⁾。残留状態はピーク、完全軟化状態を越えて大きなせん断変形を受けた後せん断応力が一定値に収束し、体積変化を起こさない状態であると定義される。また、大変形の後では応力履歴の影響は生じ得ないと考えられる。一方、Hvorslev の有効せん断抵抗角 ϕ'_e は応力履歴によらず、間隙比の変化に無関係なものであると定義されている。したがって、前述の考察で見出された

$$\tan \phi'_r = \tan \phi'_e \quad (3)$$

という結果は妥当なものと判断される。

前述のように等価圧密応力 σ'_e は通常正規圧密線 (NCL) に対応させて求める (図 2)。しかし、NCL に限らず、NCL に平行な任意の直線もまた σ'_e の決定に使用できる。すなわち NCL に平行な任意の直線に対応させた σ'_e を用いて Hvorslev の強度定数を決定すると、有効せん断抵抗角 ϕ'_e は NCL に対応させた σ'_e を用いて求めた ϕ'_e と変わらないものであり、またその時 κ が σ'_e の変化と同じ割合で変化するため $c'_e = \kappa \cdot \sigma'_e$ も変わらない。

後述の図 7 に一例を示すように、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 CSL は等価圧密応力 σ'_e の決定に使用できる。本研究では各粘土試料について CSL を用いて σ'_e を決定し、Hvorslev の強度定数 κ, ϕ'_e を求めた (図 4)。

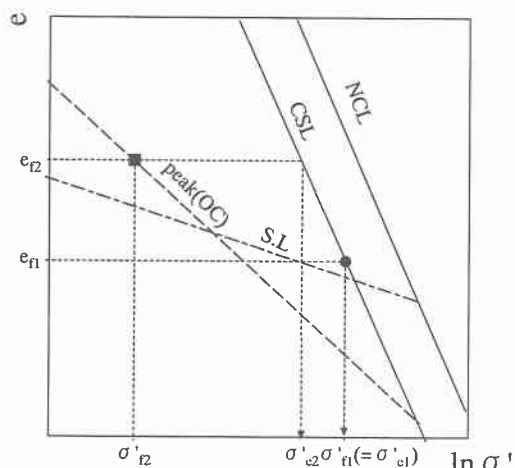


図 4 CSL を用いた σ'_e の決定法

ところで、図 1 より正規圧密粘土の場合、次式が成り立つ。

$$\tau_f = c'_e + \sigma'_f \tan \phi'_e = \sigma'_f \tan \phi'_s$$

上式は次のように書き直され、

$$\frac{c'_e}{\sigma'_f} + \tan \phi'_e = \tan \phi'_s$$

ここで等価圧密応力 σ'_e の決定に CSL を用いた場合、 $\sigma'_f = \sigma'_e$ となることから、

$$\frac{c'_e}{\sigma'_e} + \tan \phi'_e = \tan \phi'_s$$

$\kappa = c'_e / \sigma'_e$ より

$$\kappa = \tan \phi'_s - \tan \phi'_e$$

ここに式 (3) を適用すれば Hvorslev の粘着力係数 κ が次式で求められる。

$$\kappa = \tan \phi'_s - \tan \phi'_r \quad (4)$$

以上のことから、もしも $\phi'_e = \phi'_r$ の仮説が実証できれば、正規圧密試料において 3 回程度の定圧繰返し一面せん断試験を行うことにより、式 (3) によって ϕ'_e を、また式 (4) によって κ を求めることが可能になる。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-III 型一面せん断試験装置⁴⁾による定圧繰返し一面せん断試験を行い、Hvorslev の示した方法で得られる κ, ϕ'_e と、残留状態のせん断抵抗角 ϕ'_r および式 (4) による κ との比較検討を行った。

2. 試験概要

試験試料は市販の NSF-clay の予圧密試料、北海道内で採取し、練り返し再構成した夕張粘土、岩見沢粘土、篠路粘土の 4 種類である。供試体 No. とその試験条件を表 1 に示す。供試体 No. は NSF-clay、夕張粘土、岩見沢粘土、篠路粘土についてそれぞれ NSF、YUB、IWA、SI と表示してある。それぞれの試料は直径を 60mm とし、NSF-clay では高さ 40mm、夕張粘土、岩見沢粘土、および篠路粘土では高さ 30mm の円板状に供試体を成形した。

両面排水条件の下、表 1 に示す速度で所定の圧密応力まで載荷後、3t 法により圧密を打ち切り (過圧密条件のものは先行圧密応力 (σ_y) まで載荷、圧密し、3t 経過後所定の応力まで除荷して再び 3t 法を用いて圧密を打ち切り)、定圧、両面排水条件のもと表 1 に示す条件で繰返しせん断をおこなった。せん断の片振幅は 6mm で、せん断箱間隔は 0.2mm である。

試料名	圧密応力 (kPa)	圧密速度 (kPa/min)	せん断速度 (mm/min) (繰返し回数 (回))	過圧密比 (先行圧密応力)
NSF01	175	2	0.02(5)	
NSF02	175	2	0.02(5)	
NSF03	305	2	0.02(5)	
NSF04	200	2(-1)	0.02(5)	OCR2 ($\sigma_y=400$)
NSF05	100	2(-1)	0.02(5)	OCR4 ($\sigma_y=400$)
NSF06	50	2(-1)	0.02(5)	OCR8 ($\sigma_y=400$)
NSF07	100	2(-1)	0.02(5)	OCR2 ($\sigma_y=200$)
YUB01	200	2	0.02(5)	
YUB02	400	2	0.02(5)	
YUB03	200	2(-1)	0.02(5)	OCR2 ($\sigma_y=400$)
YUB04	100	2(-1)	0.02(5)	OCR4 ($\sigma_y=400$)
YUB05	50	2(-1)	0.02(5)	OCR8 ($\sigma_y=400$)
IWA01	70	2	0.02(5)	
IWA02	140	2	0.02(5)	
IWA03	210	2	0.02(5)	
IWA04	280	2	0.02(5)	
IWA05	200	2(-1)	0.02(5)	OCR2 ($\sigma_y=400$)
IWA06	100	2(-1)	0.02(5)	OCR4 ($\sigma_y=400$)
IWA07	50	2(-1)	0.02(3)	OCR8 ($\sigma_y=400$)
SI01	200	2	0.02(5)	
SI02	300	2	0.02(5)	
SI03	400	2	0.02(5)	
SI04	200	2(-1)	0.02(5)	OCR2 ($\sigma_y=400$)
SI05	100	2(-1)	0.02(5)	OCR4 ($\sigma_y=400$)
SI06	50	2(-1)	0.02(5)	OCR8 ($\sigma_y=400$)

表 1 試験条件

3. 試験結果

3-1 定圧繰返し一面せん断試験結果

図 5 は一例として定圧繰返し一面せん断試験から得られた篠路粘土 (SI02) のせん断応力～水平変位関係を示したものである。本研究では不攪乱粘土におけるピーク時の強度をピーク強度 (τ_p)、練り返し再構成粘土におけるピーク時の強度を完全軟化強度 (τ_s) と定義している。グラフより繰返しせん断の進行とともにせん断応力は減少し、一定値に収束した後ほぼ同じ経路をたどることがわかるが、繰返し最終回で水平変位が原点に戻ったときのせん断応力を残留強度 (τ_r) とした。

図 6 は、篠路粘土正規・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'_s) 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。

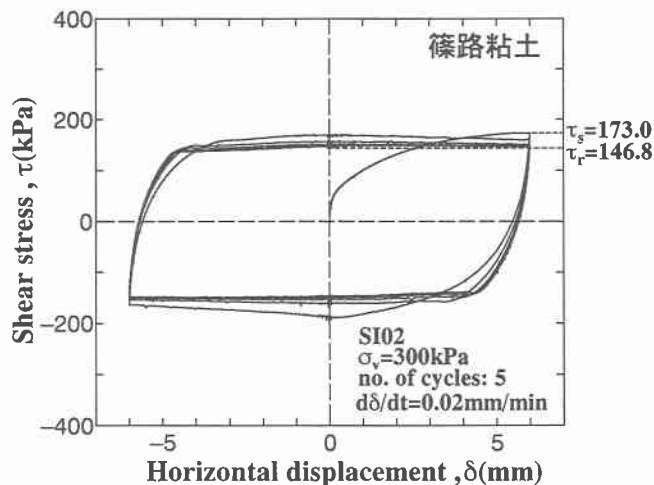


図5 せん断応力～水平変位関係 (SI02)

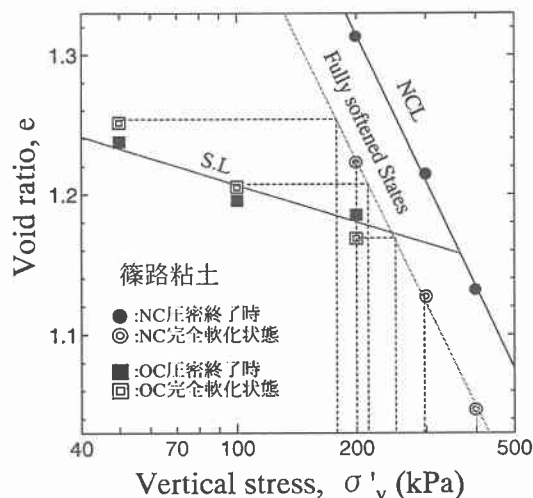


図7 $e-\ln \sigma'_v$ 図 (篠路粘土)

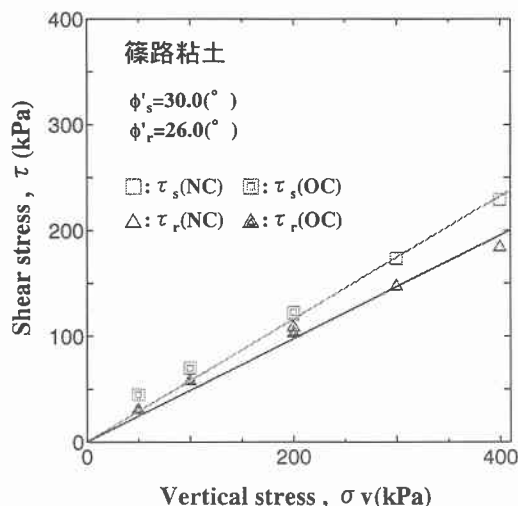


図6 せん断応力～垂直応力関係 (篠路粘土)

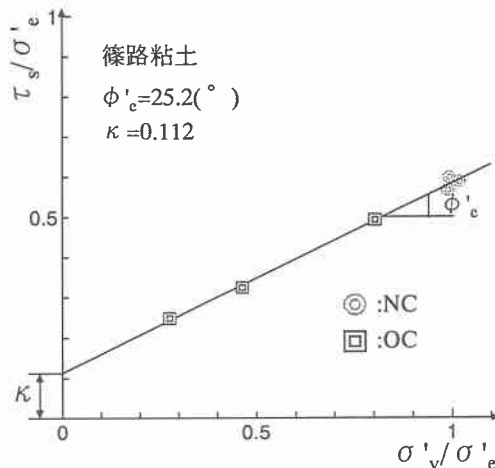


図8 $(\tau_s/\sigma'_e, \sigma'_v/\sigma'_e)$ 図 (篠路粘土)

3-2 Hvorslev の強度定数の算定

図7は篠路粘土の定圧繰り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が垂直応力に依存していないことを示している。そこで本研究では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8は篠路粘土において定圧繰り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7より求めたそれぞれの等価圧密応力 σ'_e で正規化したものである。図8より篠路粘土における Hvorslev の有効粘着係数 $\kappa=0.112$ と有効せん断抵抗角 $\phi'_e=25.2^\circ$ を得た。また式(4)を用いて Hvorslev の有効粘着力係数 κ を求めると $\kappa=0.090$ となる。

ここで篠路粘土の残留状態せん断抵抗角は $\phi'_r=26.0^\circ$ であり、Hvorslev の強度定数 ($\kappa=0.112, \phi'_e=25.2^\circ$) と式(4)による κ, ϕ'_r ($\kappa=0.090, \phi'_r=26.0^\circ$) はほとんど等しいという結果を得た。

図9、図10は岩見沢粘土における定圧繰り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 の有効せん断抵抗角 ϕ'_e を示したグラフである。

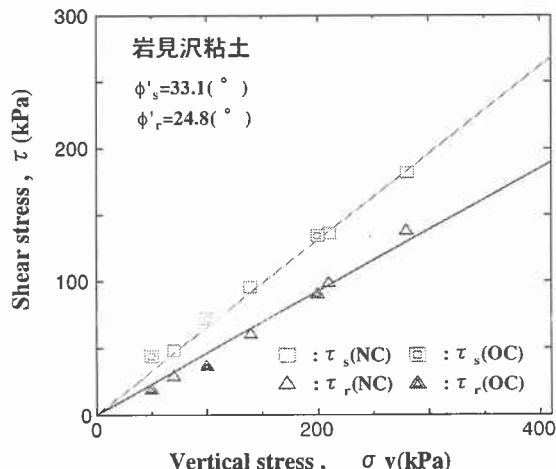


図9 せん断応力～垂直応力関係 (岩見沢粘土)

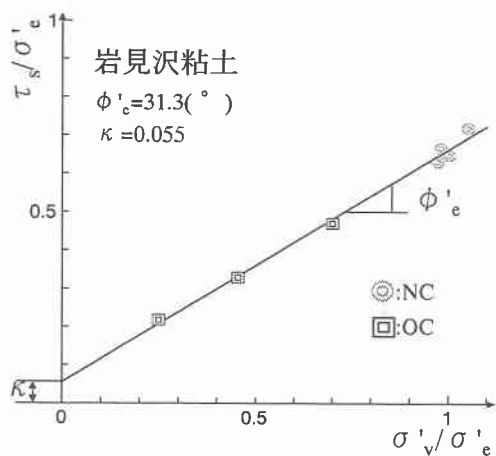


図 10 $(\tau_s/\sigma'_e, \sigma'_v/\sigma'_e)$ 図(岩見沢粘土)

また、式 (4) を用いて粘着力係数 κ を求めた ($\kappa = 0.190$)。岩見沢粘土においては Hvorslev の強度定数 ($\kappa = 0.055, \phi'_e = 31.3$) と式 (4) による κ, ϕ'_r ($\kappa = 0.190, \phi'_r = 24.8^\circ$) に差が見られるという結果を得た。

4. 考察

4 種類の試料における 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。

	κ	$\phi'_e (^\circ)$	κ (式4)	$\phi'_r (^\circ)$
NSF-clay	0.020	29.2	0.087	27.2
篠路粘土	0.112	25.2	0.090	26.0
岩見沢粘土	0.055	31.3	0.190	24.8
夕張粘土	0.115	21.5	0.126	20.4

表 2

篠路粘土と夕張粘土において Hvorslev の強度定数 κ, ϕ'_e と式 (4) による κ, ϕ'_r はほとんど等しい値を得ている。岩見沢粘土においては両者の間に差が存在している。

この 4 種類の粘土における結果は 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、式 (4) による κ, ϕ'_r が粘土の真の強度定数である可能性を示唆している。Hvorslev の強度定数 (c'_e, ϕ'_e) を筆者らの提案する方法によって決定できるかどうかについて試料数を増やし、さらなる検討を行っていきたい。

(参考文献)

- 1) Horslev, 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.
- 2) T.Mitachi et al: Method for determining design strength parameters for slope stability, Slope Stability Engineering, A.A.Balkema, pp.781-785, 1999.

- 3) Skempton, A.W.: Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, Geotechnique, Vol.35, No.1, pp.3-18, 1985.
- 4) 九田敬行・三田地利之・石橋正弘: 逆算法と繰返し一面せん断試験による地すべり安定解析用パラメータの決定法, 地盤工学会北海道支部技術報告集, Vol.42, pp1-10, 2002.
- 5) 真田昌慶・三田地利之・九田敬行: 過圧密履歴を受けた粘性土の一面せん断特性, 第 36 回地盤工学研究発表会発表講演集 pp.309-310, 2001.
- 6) 真田昌慶・三田地利之: 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, 土木学会第 57 回年次学術講演会, Ⅲ-316, 2002.