202－15　　単純せん断試験による飽和粘土の強度増加率 C_u/P の算定法

長崎大学工学部　正員　落合英俊

はじめに

飽和粘土の非排水強度 C_u と圧密圧力 p との比 C_u/P は，圧密による非排水せん断強度の増加割合を表わす重要な指標であり，強度増加率といわれている。ここに，C_u は次式で表わされる飽和粘土の非排水せん断強度である。

$C_u=\frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_3)_{max}=\tau_{max}$ …(1)　ところで，たいていの粘土は，その非排水強度に異方性をもつため，室内せん断試験により，この C_u/P 値を求めるには，現場の破壊形式を再現できる試験によらねばならない[1]。

室内せん断試験の一つである単純せん断試験は，他の試験にないいくつかの利点を有しており，この試験の応力状態は，現場におけるある種の荷重条件を満足するものである。たとえば，Ladd[1]は，単純せん断試験結果は軟弱地盤上の盛土載荷による円弧すべり面に沿う平均的な強度の，わずかに小さめではあるが，ほぼ良い予測値を与えると述べている。しかし，この試験において実測される水平面上のせん断応力 τ_h は，最大せん断応力 τ_{max} とは等しくなく，また破壊面上のせん断応力とも等しくないことは注目しなければならない。すなわち，$(\tau_h)_{max}$ は，式(1)で定義される飽和粘土の非排水強度 C_u に等しくなく，したがって，$(\tau_h)_{max}/P$ は飽和粘土の真の強度増加率 $(C_u/P)_{ss}$ を与えるものではない。　$(\tau_h)_{max}/P \neq (C_u/P)_{ss}$ …(2)　本文は，単純せん断試験で実測される水平面上の垂直応力（圧密圧力）p，およびせん断応力 τ_h の値を用いて，正規圧密粘土の強度増加率 $(C_u/P)_{ss}$ の算定式を新たに提案したものである。また，Duncan らの方法[2]について，その問題点の指摘も行なっている。

単純せん断試験による正規圧密粘土の非排水強度の算定式

単純せん断試験において，垂直応力（圧密圧力）p のみを作用させた初期応力状態は，K_0 圧密状態である。この状態における垂直および水平方向の有効応力 σ_v', σ_h' は，最大および最小主応力 σ_1', σ_3' に等しく，次式で表わされる（図.2参照）。　$\sigma_v'=\sigma_1'=p$，$\sigma_h'=\sigma_3'=K_0p$ …(3)　ここに，K_0 は静止土圧係数である。ところで，単純せん断試験においては，せん断中に主応力軸が回転するが，その主応力軸の回転式として，小田・小西[3]は次式を提案している。　$\tau_h/\sigma_n'=\kappa\tan\psi$ …(4)　ここに，σ_n', τ_h は水平面上で実測される有効垂直応力およびせん断応力，ψ は最大主応力軸が鉛直軸に対してなす角度，κ は次式で表わされる材料定数である[4][5]。

$\kappa=1-K_0=\sin\phi_{cv}=2\sin\phi_\mu/(1+\sin\phi_\mu)$ …(5)　ここに，ϕ_{cv} は限界間げき比状態における内部摩擦角，ϕ_μ は粒子間摩擦角である。なお，σ_n' は初期垂直応力（圧密圧力）p と次の関係にある。　$\sigma_n'=\beta p$ …(6)　ここに，β は非排水せん断中の間げき水圧 u に関係する量であり，次のように表わされる。　$\beta=(p-u)/p$ …(7)

式(4)(5)(6)より，単純せん断試験における有効最大および最小主応力は次のように表わされる[4][5]。

$$\sigma_1'=\sigma_n'\frac{(1-K_0)+(\tau_h/\sigma_n')^2}{1-K_0}=p\frac{\beta^2(1-K_0)+(\tau_h/P)^2}{\beta(1-K_0)}\quad\cdots(8)\qquad \sigma_3'=K_0\sigma_n'=K_0\beta p\quad\cdots(9)$$

それゆえ，有効最小主応力 σ_3' は，せん断応力 τ_h に無関係に，有効垂直応力 σ_n' によって一義的に決定される。そして，垂直応力 p ＝一定の排水単純せん断試験の場合，$\sigma_n'=p$ $(\beta=1)$ であるので，$\sigma_3'=K_0p$ ＝一定となるが，水平方向の有効応力 σ_h' は一定値とはならない（この点が後述する Duncan らの方法と異なる点である）。なお，小西[6]はエポキシ樹脂丸棒を用いて，垂直応力 p ＝一定の排水単純せん断試験を行ない，σ_3' はほぼ一定値となることを実験的に確かめている。また，全応力による最小主応力 σ_3 は次のようになる。　$\sigma_3=\sigma_n'+u=K_0p+(1-K_0)u$ …(10)

式(8)(9)より，単純せん断試験による正規圧密粘土の非排水せん断強度 $(C_u)_{ss}$，および強度増加率 $(C_u/p)_{ss}$ の算定式は次のように表わされる。

$$(C_u)_{ss}=\frac{1}{2}(\sigma_1'-\sigma_3')_{max}=p\frac{\beta^2(1-K_0)^2+((\tau_h)_{max}/p)^2}{2\beta(1-K_0)}\quad\cdots(11)\qquad \left(\frac{C_u}{p}\right)_{ss}=\frac{\beta^2(1-K_0)^2+((\tau_h)_{max}/p)^2}{2\beta(1-K_0)}\quad\cdots(12)$$

また，有効応力による内部摩擦角 ϕ_{ss}' は次式で表わされる。

$$\sin\phi_{ss}'=\left(\frac{\sigma_1'-\sigma_3'}{\sigma_1'+\sigma_3'}\right)_{max}=\frac{\beta^2(1-K_0)^2+((\tau_h)_{max}/p)^2}{\beta^2(1-K_0^2)+((\tau_h)_{max}/p)^2}\quad\cdots(13)$$

表1は正規圧密粘土の実験結果と，本提案法による $(Cu/p)_{ss}$，ϕ'_{ss} の計算結果である。NC Boston blue clay について Ladd[1] は，$(\tau_h)_{max}/p$ は盛土載荷による円弧すべり面に沿う平均強度のわずかに小さめな値を与えると述べているが，$(\tau_h)_{max}/p$ よりも約7%大きい $(Cu/p)_{ss}$ 値は 平均強度を与えるのではないかと考えられる。

表-1 正規圧密粘土の実験結果と2つの方法による計算値

Measured values						Proposed Method		Duncan's Method	
p (kPa)	$(\tau_h)_{max}$ (kPa)	u (kPa)	$\frac{(\tau_h)_{max}}{p}$	$\frac{\sigma'_n}{p}=\beta$	K_o	$(\frac{c_u}{p})_{ss}$	ϕ'_{ss} (degs.)	$(\frac{c_u}{p})_{ss}$	ϕ'_{ss} (degs.)
Boston blue clay (Ladd, 1973, 1979)									
-	-	-	0.200	0.575	0.50	0.213	25.2	0.320	80.0
Kaolin clay (Ohara and Matsuda, 1978)									
49	11.76	10.78	0.24	0.78	0.51	0.27	23.8	0.35	41.3
98	24.50	22.54	0.25	0.77		0.27	24.1	0.35	41.3
147	36.26	32.34	0.25	0.78		0.27	23.8	0.35	40.8
196	47.04	41.16	0.24	0.79		0.27	23.8	0.34	38.7
Manglerud quick clay (Bjerrum and Landva, 1966)									
58.80	10.78	22.34	0.18	0.62	0.51	0.21	23.2	0.30	53.1
58.80	9.60	18.23	0.16	0.69		0.21	22.0	0.29	40.7
58.80	11.37	21.17	0.19	0.64		0.22	23.4	0.31	51.7
66.64	11.17	20.68	0.21	0.69		0.23	23.5	0.32	46.0
66.64	11.37	29.30	0.17	0.56		0.19	23.5	0.30	72.4
65.66	10.29	32.14	0.16	0.51		0.18	23.8	0.29	-
67.62	14.70	28.42	0.22	0.58		0.23	26.1	0.33	80.8
75.46	16.37	29.40	0.22	0.61		0.23	25.1	0.33	64.7
73.50	14.60	29.40	0.20	0.60		0.21	24.2	0.32	64.5
85.26	16.17	36.65	0.19	0.57		0.20	24.3	0.31	72.6

また，$(Cu/p)_{ss}$ の値は，3種の粘土とも，三軸圧縮試験から得られる $(Cu/p)_{TC}$ の値よりも小さい（$(Cu/P)_{TC}$ の値は，Boston blue clay: 0.33，Kaolin clay: 0.34，Manglerud clay: 0.30）。これは，非排水強度の異方性のため，$(Cu/p)_{ss}$ は $(Cu/p)_{TC}$ よりも小さくなるべきであるという Ladd の結論とも一致する。また，ϕ'_{ss} の計算値は，正規圧密粘土に対して，実に，妥当な値であると考えられる。

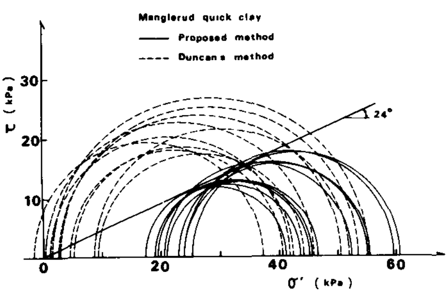

図-1 2つの方法による有効応力に関するモール応力円

Duncan らの方法[2]について

Duncan らは，単純せん断試験の応力状態は，純粋せん断の応力状態によって表わされるとの仮定に基づき，次式を提案している。

$$(Cu)_{ss} = \tau_{max} = \sqrt{\frac{p^2(1-K_o)^2}{4} + (\tau_h)^2_{max}} \quad \cdots (14)$$

$$(Cu/p)_{ss} = \sqrt{\frac{(1-K_o)^2}{4} + ((\tau_h)_{max}/p)^2} \quad \cdots (15)$$

式(15)による $(Cu/p)_{ss}$ の計算値は表.1に示すように，本提案法による値に比べてかなり大きな値を与え，彼らも述べているように，$(Cu/p)_{TC}$ の値とほぼ等しい。しかし，これは上に述べた Ladd の結論と矛盾する。

また，この方法によれば，非排水単純せん断試験におけるモール円は図.2のようになり，有効応力による内部摩擦角 ϕ'_{ss} の式は次のようになる。

$$\sin\phi'_{ss} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2u}\right)_{max} = \frac{\sqrt{(1-K_o)^2 + ((\tau_h)_{max}/p)^2}}{(1+K_o) - 2(1-\beta)} \quad \cdots (16)$$

式(16)による ϕ'_{ss} の計算値も表.1に示す。なお，図.1は Manglerud clay について，有効応力によるモール円を示したものである。これらからわかるように，Duncan らの方法は，正規圧密粘土に対して，あまりにも大きな ϕ'_{ss} 値を与え，この方法が適当でないことが明らかである。

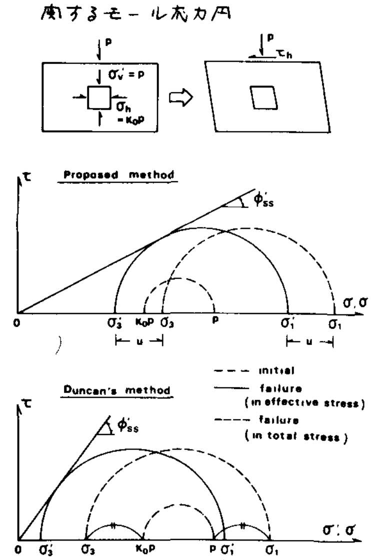

図-2 非排水単純せん断試験におけるモール応力円