

名古屋工業大学 正員 中井 照夫

土の強度や変形に関する定数を決めるための代表的な室内せん断試験としては、三軸圧縮試験、平面ひずみ試験、単純せん断試験（あるいは一面せん断試験）等がある（排水試験を考えているので一軸試験と別にする）。しかし、試験方法によりその得られた定数（例えば内部摩擦角 ϕ など）はさまざまな値となる。ここでは、従来より提案している3主応力下の土の応力・ひずみ関係式に基づいて平面ひずみ試験や単純せん断試験の有限要素解析を行ない、その解析結果を三軸圧縮試験結果と比較することによりこれら3つの試験の意味について考える。

1. 3主応力下の土の応力・ひずみ関係と破壊規準¹⁾

式(1)に示されるように土の全ひずみ増分 $\{\Delta\epsilon\}$ がせん断による塑性ひずみ増分 $\{\Delta\epsilon^p\}$ 、圧密による塑性ひずみ増分 $\{\Delta\epsilon^c\}$ および弾性ひずみ増分 $\{\Delta\epsilon^e\}$ の和で表わされると考え、一般応力条件下の応力・ひずみ関係式を誘導している。¹⁾

$$\{\Delta\epsilon\} = \{\Delta\epsilon^p\} + \{\Delta\epsilon^c\} + \{\Delta\epsilon^e\} \quad (1)$$

ここに、 $\{\Delta\epsilon^p\}$ 、 $\{\Delta\epsilon^c\}$ は空間滑動面(SMP)²⁾に基づいたひずみ増分量を導入することにより統一的に規定し^{3,4)}、 $\{\Delta\epsilon^e\}$ は膨張指数と弾性式を用いて表わしている。そしてひずみ増分の方については、弾塑性論の仮定に基づいて、弾性主ひずみ増分の方には主応力増分の方、塑性主ひずみ増分の方には主応力の方向に一致するとしている。この応力・ひずみ関係式の妥当性は三軸圧縮・伸張試験および多軸試験結果により検証している。^{1,3,4)} またその土質パラメータはすべて通常の三軸圧縮試験より決定されるものである。解析に用いるやや密詰めの豊満砂($e_0 \approx 0.68$)の土質パラメータを表-1に示す。

次に、土の破壊規準はSMP上のせん断・垂直応力比 τ/σ_{smp} が一定になると土が破壊するとして得られた図-1に示す規準を用いる。²⁾ 同図より、三軸圧縮($b=0$)・三軸伸張($b=1$)条件下では $\phi=40^\circ$ で一致しているが、相異なる3主応力下($0 < b < 1$)では ϕ は 40° より大きくなる。この規準の妥当性も多軸試験結果により検証している。³⁾

2. 平面ひずみ試験の解析

図-2は平面ひずみ条件下、三軸圧縮条件下、三軸伸張条件下における最小主応力一定($\sigma_3 = 196 \text{ kN/m}^2$)試験の解析結果を示したものである。同図の計算曲線の最終状態はそれぞれ図-1の破壊規準に至った時の主応力比と主ひずみを表わしている。三軸圧縮および三軸伸張条件下では $\phi(\text{comp.}) = \phi(\text{ext.}) = 40^\circ$ より破壊時の主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ は約4.6となるが、平面ひずみ条件下では破壊時の主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f = 5.7$ (内部摩擦角にすると $\phi(\text{plane strain}) = 44 \sim 45^\circ$)となる。以上の結果から、平面ひずみ条件下では破壊主応力比(あるいは内部摩擦角 ϕ)は三軸圧縮・伸張条件下のそれよりもかなり大きくなることが理解できよう。また、図-3は平面ひずみ試験の中間主応力 σ_2 の

表-1 豊満砂の土質パラメータ

λ^*	0.9	
μ^*	0.27	
μ^{**}	0.41	
σ_0^*	σ_{01}^*	0.10 %
	σ_{02}^*	0.066 %
	σ_{03}^*	98 kN/m ²
$C_c/(1+e_0)$		0.928 %
$C_s/(1+e_0)$		0.578 %
K_0		0.45
ν_b		0.3
ϕ (comp)		40°

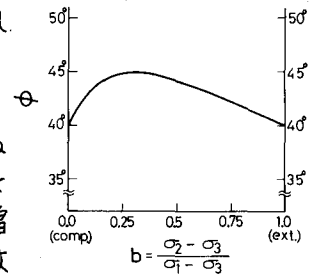


図-1 空間滑動面(SMP)に基づいた破壊規準

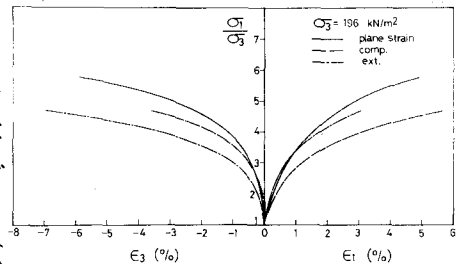
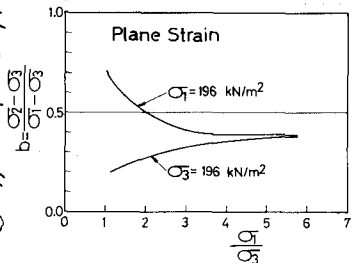


図-2 最小主応力一定条件下の平面ひずみ試験、三軸圧縮試験、三軸伸張試験の解析結果

図-3 平面ひずみ試験の σ_2/σ_3 関係の解析結果

大ききの解析結果を $b \sim \sigma_3$ 関係で示しているが応力経路にかかわらず $b=0.38 \sim 0.39$ に収束している。

3. 単純せん断試験の解析

単純せん断状態は図-4に示すように要素の上端を x 軸方向に強制変位させることにより生じさせている。座標軸の取り方は図中に示す通りであり、 z 軸方向は紙面に垂直な方向となり z 軸方向の変位を拘束する平面ひずみ状態を考

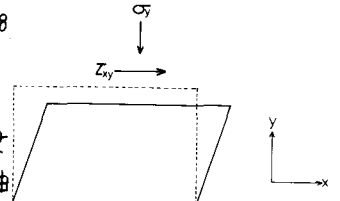


図-4 単純せん断試験の要素

えている。初期状態は $\sigma_y = 196 \text{ kN/m}^2$, $\sigma_x = \sigma_z = K_0 \cdot \sigma_y = 88.2 \text{ kN/m}^2$ ($K_0 = 0.45$)

なる K_0 圧密状態を考えている。図-5は解析結果をせん断・垂直応力

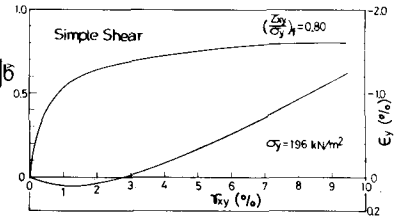


図-5 単純せん断試験の $\tau_{xy}/\sigma_y \sim \sigma_{xy} \sim \epsilon_y$ 関係の解析結果

比 $\tau_{xy}/\sigma_y \sim$ せん断ひずみ $\sigma_{xy} \sim$ 垂直ひずみ ϵ_y 関係で示しているが、図5

よく見られる単純せん断試験の応力・ひずみ曲線となっている。さて、

この結果から破壊時の応力比は $(\tau_{xy}/\sigma_y)_f = 0.80$ となる。そして通常

よく行なわれる方法でこの応力比から内部摩擦角 ϕ (simple shear)

$= \tan^{-1}(\tau_{xy}/\sigma_y)$ を計算すると、 ϕ (simple shear) $= 38.0^\circ$ となる。ところ

で、この時最大・最小主応力比は $(\sigma_1/\sigma_3)_f = 5.74$ となり図-2の平面ひ

ずみ試験の破壊応力比と対応する。つまりこの場合 ϕ (plane strain) $= 44.7^\circ$

となる。またこの試料の三軸圧縮強度 ϕ (comp.) $= 40^\circ$ である。以上の解析結果に

基づけば、単純せん断試験から得られる ϕ (simple shear)は平面ひずみ状態であ

るにもかかわらず ϕ (comp.)より少し小さくなることになる。

図-6は単純せん断試験の解析結果を $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z), (\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_x, \sigma_3) \sim \sigma_{xy}$ 関係

で示したものであるが、 σ_{xy} は一定であっても σ_x, σ_y は大きくなるようである。

したがって単純せん断試験といえども、せん断中に平均主応力 $\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$

はかなり増加することになる。なお、落合は小田・小西の提案式⁵⁾に基づい

て単純せん断では最小主応力 σ_3 が変化しないことを示しているが⁶⁾、この結果か

ら判断する限り $\sigma_3 = \text{一定}$ というのはいはば妥当な仮定といえよう。

図-7には $b \sim \sigma_{xy}$ 関係を示しているが、図-3の主応力軸の方向が変化しない平面ひずみ試験の場合同様 $b = 0.38 \sim 0.39$ に収束している。

図-8はこの単純せん断試験の最大主ひずみ増分 $d\epsilon_1$ 方向、最大主応力

σ_1 方向、最大主応力増分 $d\sigma_1$ 方向とせん断ひずみ σ_{xy} 関係の解析結果を示

したものである。ここに方向角 ψ の符号は y 軸から反時計回りを正とする。

σ_{xy} の小さい時(応力レベルの低い所)では $d\epsilon_1$ の方向は σ_1 の方向と $d\sigma_1$

の方向の間にあるが、 σ_{xy} が大きくなるに従い σ_1 の方向に漸近するのが見

られる。同図にみられるこれらの傾向はRoscoeらが単純せん断試験機で調

べた実験結果とよい対応を示している。またこの結果から本解析で用いて

いる主ひずみ増分の方向の仮定もいはば妥当といえよう。

謝辞 日頃議論いたしている本学松岡 元助教教授に感謝致します。

参考文献 1)中井：第15回土質工学研究発表会，1980。2)松岡・中井：Proc

of JSCE, No. 232, PP.59~70, 1974。3)中井・松岡・南・横井：第14回土質工学

研究発表会 PP.385~398, 1979。4)中井・松岡：第34回土木学会年次講演会，

PP.17~18, 1979。5)小田・小西：S & F, vol 14, No.4, PP.39~53, 1974。6)落合：

土質工学論文集, vol 15, No.4, PP.93~100, 1975。7)Roscoe・Bassett・Cole: Proc. Geotech Conf., Oslo, 1967。

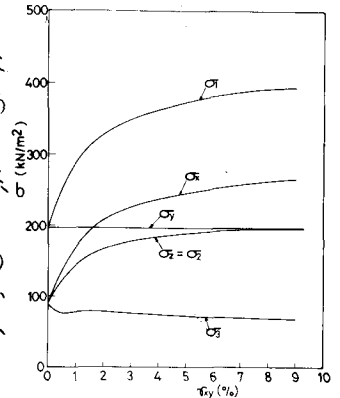


図-6 単純せん断試験の $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, (\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_x, \sigma_3) \sim \sigma_{xy}$ 関係の解析結果

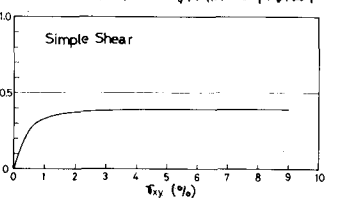


図-7 単純せん断試験の $b \sim \sigma_{xy}$ 関係の解析結果

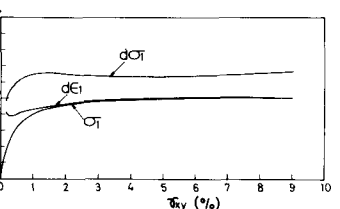


図-8 単純せん断試験の $d\epsilon_1, \sigma_1, d\sigma_1$ の方向の解析結果