

京都大学防災研究所 正員 八木 則男

熊谷組

正員 高木 俊郎

1. まえがき

砂の応力-ヒズミ関係を実験的に求めるには一般に三軸試験が行なわれる。従来、一般に行なわれている三軸試験より応力-ヒズミ関係または強度を求めるのに供試体のどの部分も一様に等しい変形が生じているとして、応力、ヒズミを計算してきた。しかし、加圧キャップやベDESTALの摩擦によりせん断変形の大部分がFig.1に示す供試体の斜線の部分で生ずる。圧縮の場合はせん断部で断面積が増加するので、応力の低下が起りせん断部分は拡がるが、エキステンションではせん断により断面積が減少するので、その部分で増々せん断変形が大きくなる。しかも圧縮に比べエキステンションでは供試体全体に比べせん断部分が小さいので、試料が一樣に変形しているとして計算した応力-ヒズミ関係には大きな誤差がある。ここでは、主応力が等しい圧縮(Comp. $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)およびエキステンション(Ext. $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)状態における三軸試験を行ない、実際に大きな変形が生じている供試体中央部における軸方向変位と直径の変化を測定し、それにもとづいて応力-ヒズミ関係を検討するとともに砂の破壊規準に関しても比較検討した。

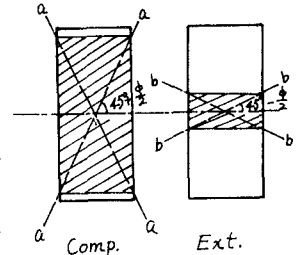


Fig.1

砂の破壊規準として考えられるものにつきの3つがある。

Mohr-Coulomb の規準: $\{(\sigma_1' - \sigma_2')^2 - (\sigma_1' + \sigma_2')^2 \sin^2 \phi\} \times \{(\sigma_2' - \sigma_3')^2 - (\sigma_2' + \sigma_3')^2 \sin^2 \phi\} \times \{(\sigma_3' - \sigma_1')^2 - (\sigma_3' + \sigma_1')^2 \sin^2 \phi\} = 0 \dots (1)$
 ここに σ_1' , σ_2' , σ_3' は有効主応力, ϕ は内部摩擦角。

拡張された Tresca の規準: $\{(\sigma_1' - \sigma_2')^2 - R'^2 \sigma_m'^2\} \times \{(\sigma_2' - \sigma_3')^2 - R'^2 \sigma_m'^2\} \times \{(\sigma_3' - \sigma_1')^2 - R'^2 \sigma_m'^2\} = 0 \dots (2)$

ここに $\sigma_m' = (\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3$, R' は常数。

拡張された von Mises の規準: $(\sigma_1' - \sigma_2')^2 + (\sigma_2' - \sigma_3')^2 + (\sigma_3' - \sigma_1')^2 = R'' \sigma_m'^2 \dots (3)$ R'' は常数

これらの規準のうちどの規準が適切であるかは従来より多くの研究が行なわれてきている。例えば, Bishop & Eldin⁽¹⁾ は三軸圧縮およびエキステンション試験を行ない, Kirkpatrick⁽²⁾ は中空円筒供試体を用いて中間主応力を考慮した三軸試験より, Cornforth⁽³⁾ は平面ヒズミ状態における試験より砂の破壊規準が Mohr-Coulomb の規準に従うことを示した。これに対し Roscoe 等⁽⁴⁾ は供試体中央部の大きな変形を測定して, 拡張された Tresca の規準の方が適切であろうと予言している。

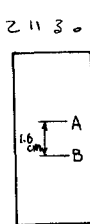


Fig.2

2. 実験装置, 試料

三軸試験機はN.G.I.型のもを用い, Ext. 試験には加圧キャップとヒズトンにつけたフックで引かけて引にかける装置を用いた。また, 試料の部分的な変形の測定には真鍮製の三軸セル側面に2枚のガラス板をはめ込み, それらを平行にした。そのガラス板を通じて観望鏡

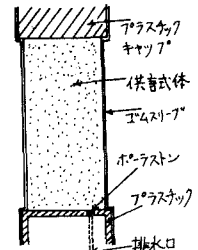


Fig.3

鏡で Fig. 2 に示す供試体につけた軸方向の標尺間の距離および直径を測定した。標尺間の距離は約 16 cm にした。読取精度は軸方向は 1/100 mm のダイヤルゲージ、直径方向は 1/50 mm のバーヤである。

また、キャップおよびペダスタルと供試体との摩擦を減少させるため供試体の上下面と接する部分にホーラストンを置かないで、直接アラスタックを接触させた。排水にはペダスタルのプラスチックの一部にホーラストン（直径 3mm）を埋め込んだ。（Fig. 3 参照）

用いた試料は豊浦の標準砂であり、供試体は円筒形で高さ 8.0 cm、直径 3.55 cm である。なお完全飽和である。

3. 実験結果

三軸試験の計算に一般に用いられている平均的な軸方向ヒズミ、すなわち軸方向の変形量を供試体高で除して求めたものを E_{avr} 、平均的なセリ断ヒズミ δ_{avr} ($\frac{3}{2}E_{avr} - \frac{1}{2}\frac{\sigma_r}{\sigma_1}$) とする。ここに V は供試体体積、 ΔV は供試体の体積変化である。一方、Fig. 2

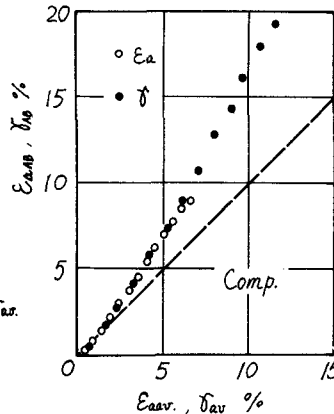


Fig. 4

に示した AB 間の軸方向ヒズミを E_{AB} 、セリ断ヒズミを δ_{AB} ($E_{AB} - \alpha d/\alpha$) とする。ここに d は供試体の直径、 αd はその変化量である。なお、あまり大きなヒズミを取っているのので、すべて対数ヒズミで表わした。 E_{avr} に対して E_{AB} 、 δ_{avr} に対して δ_{AB} をプロットすると Fig. 4 および Fig. 5 のようになる。Fig. 4 は Comp.、Fig. 5 は Ext. である。破線は $E_{avr} = E_{AB}$ 、 $\delta_{avr} = \delta_{AB}$ を表わしている。これらの図によると Comp.、Ext. のいずれの場合も E_{avr} に對する E_{AB} の変化は δ_{avr} に對する δ_{AB} の変化と同様である。

Comp. の場合は約 2% までは $E_{avr} = E_{AB}$ 、 $\delta_{avr} = \delta_{AB}$ であるが、 $E_{avr}(\delta_{avr}) = 5\%$ では $E_{AB}(\delta_{AB})$ は $E_{avr}(\delta_{avr})$ の 1.3 倍、10% では 1.6 倍であり、この値はヒズミの増加とともに大きくなっている。Ext. の場合は δ_{AB}/δ_{avr} の比はさらに大きく $\delta_{avr} = 5\%$ で 2、10% で 2.8 となっている。したがって、平均的なヒズミを用いた場合、無視できないほど大きな誤差を含んでいると考えてよい。

つぎに応力 $\{\sigma_2 - \sigma_r\}$ の計算で Ext. 試験ではゴムスリーブの張力が影響すると思われるので、その補正を行なうために軸方向ヒズミとゴムスリーブの張力の関係を求めたのが Fig. 6 である。この補正を行ない、供試体が一樣に変形していると仮定して断面積を求め応力を計算したものに α_r をつけ、中央部で測定した直径より断面積を求め計算した応力には AB をつける。これらの応力とヒズミを用いて、セリ断ヒズミ δ_{avr} に対し応力比 $\{\sigma_2 - \sigma_r\} / \{\sigma_2 + \sigma_r\}_{avr}$ 、 δ_{AB} に対し $\{\sigma_2 - \sigma_r\} / \{\sigma_2 + \sigma_r\}_{AB}$

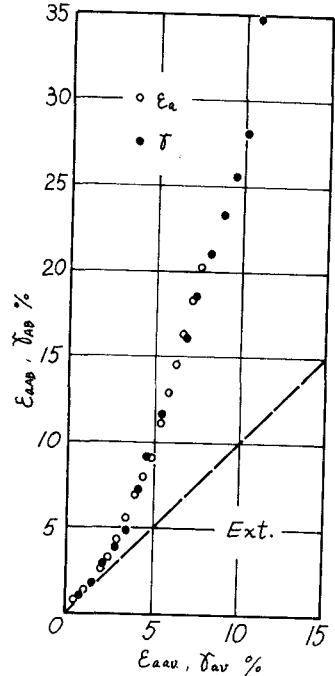


Fig. 5

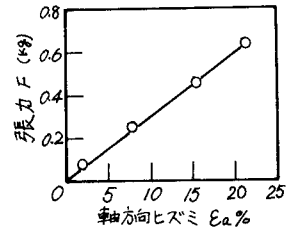


Fig. 6

をプロットすると Fig. 7, Fig. 8 のようになる。このように応力比 $|σ_a - σ_r| / (σ_a + σ_r)$ および $|σ_a - σ_r| / σ_m$ を用いたのは砂のような摩擦のみによる抵抗を示す土のせん断変形にもなるせん断抵抗が破壊と同様に記のいずれの応力比に従うかを調べるためである。Fig. 7, Fig. 8 によると一見して $|σ_a - σ_r| / (σ_a + σ_r)$ を用いた方が Comp., Ext. の結果を統一的に表わされるようである。しかし Comp. は平均的なものを用いても AB 間のものを用いてもあまり変らないのに、Ext. の場合は平均的な $|σ_a - σ_r| / (σ_a + σ_r)$ は Comp. のそれより小さいが、AB 間のその値はあるヒズミ以上にすると Comp. より大きくなる。また $|σ_a - σ_r| / (σ_a + σ_r)$ の最大値も平均的な場合は Comp. の方が大きく、AB 間のときはその逆である。一方、応力比に $|σ_a - σ_r| / σ_m$ を用いた場合はいずれの $σ$ に対しても、 $|σ_a - σ_r| / σ_m$ は Ext. の方が Comp. よりかなり小さい。

破壊について調べるために、 $σ_r = 1.0, 2.0, 3.0 \text{ Kg/cm}^2$ を一定にして Comp., Ext. 試験を行なった。これらすべてについて、AB 間のヒズミを測定することは非常に手間がかかるので、平均的なヒズミ $ε_a$ に対して AB 間のヒズミや断面種の値は $σ_r$ の大きさに無関係であるとして Fig. 4, Fig. 5 を用いて、供試体中央部の AB 間のヒズミ、応力を求めた。そしてこれらの結果と $|σ_a - σ_r|$ の最大値と $(σ_a + σ_r)$ の関係で示したのが Fig. 9 である。この図には平均的な値および AB 間の値をあわせて示した。同種の点はほぼ原点を通る直線上にある。Ext. の場合は応力が小さいので、Comp. と比較のため直線を延長した。直線を引いたのは AB 間の値である。これらの直線の勾配の値 $|σ_a - σ_r| / (σ_a + σ_r)$ は内部摩擦角 $φ$ の正弦の値を示している。すなわち $\sin φ$ の値である。この $\sin φ$ 中、中の値を上記の 4 種の場合について示すと Table 1 のようになる。供試体の実際に破壊している部分の内部摩擦角は平均的なものと比べると Comp. では 2° 以下であるが、Ext. の場合は 12° の差があってこの差は無視できない。したがって Mohr-Coulomb の破壊規準で考えると平均的な値で調べると Comp. の方が大きいが、AB 間の値で調べると Ext. の方が大きくなる。

つぎに拡張された Tresca または拡張された von Mises の規準の適合性を調べるために $|σ_a - σ_r|$ の最大値と $σ_m$ の関係を図示すると Fig. 10 のようになる。他の説明は Fig. 9 の場合と同様である。Fig. 10 より (2) または (3) 式の $σ$ または $σ_r$ の値を算出すると Table. 2 のようになる。この表より、

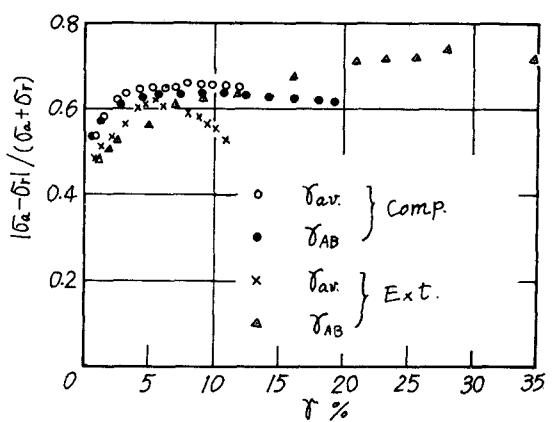


Fig. 7

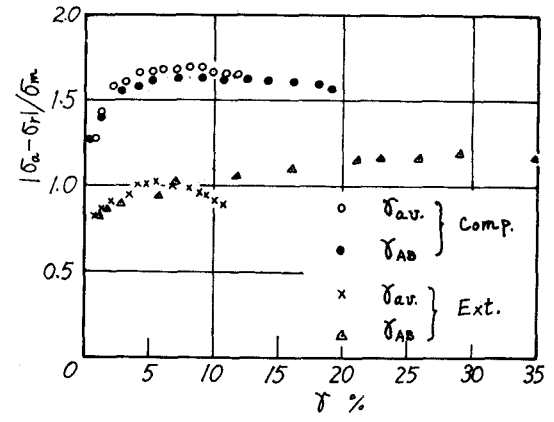


Fig. 8

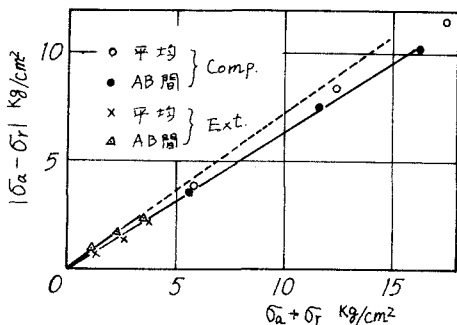


Fig. 9

	Comp.		Ext.	
	平均的 値のもの	AB間	平均的 値のもの	AB間
$\sin \phi$	0.66	0.64	0.57	0.73
ϕ	41°18'	39°48'	34°46'	46°55'

Table 1

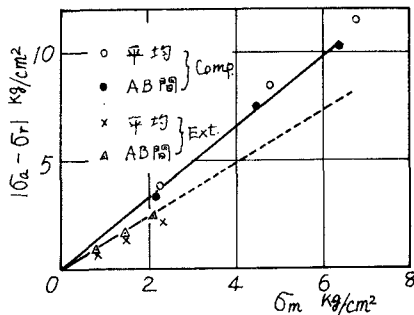


Fig. 10

	Comp.		Ext.	
	平均的 値のもの	AB間	平均的 値のもの	AB間
σ'_m / σ'_m	1.31	1.27	0.98	1.11

Table 2

表または表の値は平均的な場合も AB 間の場合も Ext. の方が Comp. より小さい。しかし Comp. と Ext. の差は平均的なものより AB 間の値の方が小さい。したがって、平均的な応力より AB 間の応力の方が供試体の破壊応力に近いという前に述べた 3 つの規準のうちどれが適切かは判断できない。

4. おさげ

三軸試験による供試体の変形はかたより部分的に不均一であることがわかった。その結果、供試体の中央部で測定した応力-ひずみ関係は供試体が一様に変形したと仮定して計算した場合ではかたよりの差がみとめられた。また、セリ断時の砂の体積変化は重要であるが、中央部の実際に生じたセリ断変形が生じている部分だけの体積変化を測定することができなかった。

破壊規準を論ずるには中間主応力を考慮した三軸試験を行なわねばならない。しかしここでは 2 主応力が等しい圧縮および引張三軸試験より求めた結果では Mohr-Coulomb の規準が拡張された Tresca または von Mises の規準に従うかを判定するのは困難であった。しかし内部摩擦角が 40° 程度の材料では後者の規準に従うには 1 主応力が引張状態になるのど、砂のような材料ではこの規準に従えないであろう。また、破壊時には砂は粒子間摩擦によるセリ断抵抗とグレイターニミーによる体積変化によるセリ断抵抗があるが、これらの抵抗が破壊規準に及ぶ影響などについて今後研究を進めたい。

参考文献

- (1) A.W. Bishop and A.G. Eldin, "The Effect of Stress History on the Relation between ϕ and Porosity in Sand" Proc 3rd I.C.S.M.F.E. Vol. I, 1959, PP100-105.
- (2) W.M. Kirkpatrick, "The Condition of Failure for Sand", Proc 4th I.C.S.M.F.E. Vol. I, 1959, PP172-177.
- (3) D.H. Cornforth, "Some Experiments on the Influence of Strain Condition on the Strength of Sand" Geotech. Vol. 14, 1964, PP143-167.
- (4) K.H. Rosco, AN. Schofield and A. Phurairasajak, "An Evaluation of Test Data for Selecting a Yield Criterion for Soils", Laboratory Shear Testing of Soils, A.S.T.M., 1963, PP 111-128.