

京都大学防災研究所 正員 村山朝郎

松岡元

京都大学大学院 学生員 北村良介

1. まえがき 粒子の微視的な挙動の解析から、モービライズ面に着目した応力～ひずみ関係式を導き、これまで砂やガラスビーズを用いて三軸圧縮、三軸伸張、平面ひずみ、相異なる3主応力下での実験を行ってきた。そして物理的な意味の明確な係数 λ, μ, μ' を決めることによって、一般的な応力条件下でのせん断特性が統一的に説明できることを検証してきた。^{2), 3), 4)}ここでは、粘性土について平均有効主応力 σ_m 一定の排水三軸圧縮、排水三軸伸張試験を行ない、砂やガラスビーズの場合と同様に、せん断時の力学特性を統一的に説明できる結果が得られたので報告する。またダイレイタンシーについて、柴田、輕部⁵⁾が行っている整理方法とを比較も行った。

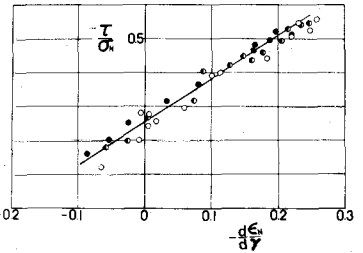


図-1
 $\frac{\tau}{\sigma_m} \sim -\frac{d\sigma_v}{d\sigma_v}$ 関係

2. 試料, 実験の手順 試料は粉末状の通称藤の森粘土を水で十分練った後、直径25cmの大型円形圧入密着器で圧入圧力 $\sigma_v = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ まで圧入したものをを用いた。 $\sigma_v = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ 圧入終了時、せん断終了時の含水比はそれぞれ $w = 37.67 \sim 38.22\%$, $w = 27.83 \sim 31.90\%$ である。供試体の寸法は高さ8cm, 径3.5cmに成形したものをを用いた。試験はN.G.I.型三軸試験機によって、ひずみ制御で行なった。ひずみ速度は 10 mm/1200分 である。なお伸張試験についてはフックのついたピストンと入れかえるミゾのあるキャップを用いた。供試体は所要の拘束圧 $\sigma_m = 1, 2, 3 \text{ kg/cm}^2$ まで等方圧入し、1次圧入が終了した時点(約1日後)で平均主応力 σ_m を一定に保ちながらせん断を行なった。実験中の供試体の変形は、軸方向についてはダイヤルゲージにより、体積変化はビュレットにより測定した。またせん断時の軸圧はロードセルにより測定し、側圧を变化させることにより平均主応力 σ_m を一定に保った。

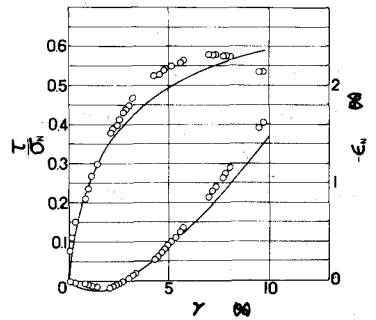


図-2 ($\sigma_m = 3 \text{ kg/cm}^2$, comp.)
モービライズ面上の $\frac{\tau}{\sigma_m} \sim \frac{d\sigma_v}{d\sigma_v} \sim \epsilon_v$ 関係

3. 土の応力～ひずみ関係式 モービライズ面($\partial\sigma_m/\partial\sigma_v = \max$ の面)上の応力～ひずみ関係式は次のとおりである。¹⁾

$$\frac{\tau}{\sigma_m} = \lambda \left(-\frac{d\sigma_v}{d\sigma_v} \right) + \mu \quad \dots (1) \quad \frac{\tau}{\sigma_m} = \lambda \left(-\frac{d\sigma_v}{d\sigma_v} \right) + \mu' \quad \dots (2)$$

(1), (2)式をそれぞれ微分方程式を解けば次式を得る。

$$\frac{\tau}{\sigma_m} = 2.3 (\mu' - \mu) \log_{10} \frac{\sigma_v}{\sigma_v^0} + \mu \quad \dots (3) \quad \epsilon_v = \frac{\mu' - \mu}{\lambda} \cdot \gamma \cdot (2.3 \log_{10} \frac{\sigma_v}{\sigma_v^0} - 1) \quad \dots (4)$$

ここに、 $\frac{\tau}{\sigma_m}$, γ , ϵ_v はそれぞれモービライズ面上のせん断・垂直応力比、せん断ひずみ、垂直ひずみであり、 λ, μ, μ' は試料に固有な、ほぼ一定な係数であり、 σ_v^0 は初期の粒子構造を評価するパラメーターと考えられる。(3), (4)式に主応力と主ひずみ増分の方向が一致するという条件を入れて、主応力比と主ひずみ関係に変換すると次式を得る。

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1 \exp(-\frac{\lambda}{2(\mu' - \mu)})}{2} \cdot \exp \left\{ \frac{\lambda}{2(\mu' - \mu)} \right\} \cdot \left\{ \frac{1}{2} X^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{\lambda}{2} \right) X + (\mu' - \mu)^2 - (\mu' - \mu) + \frac{\lambda^2}{4} + 1 \right\} = f(\epsilon_1) \quad (5)$$

$$\epsilon_3 = \frac{\sigma_3 \exp(-\frac{\lambda}{2(\mu' - \mu)})}{2} \cdot \exp \left\{ \frac{\lambda}{2(\mu' - \mu)} \right\} \cdot \left\{ -\frac{1}{8} X^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{\lambda}{2} \right) X - (\mu' - \mu)^2 - (\mu' - \mu) + \frac{\lambda^2}{4} - 1 \right\} = g(\epsilon_3) \quad (6)$$

$$\text{但し } X = \sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_3}, \quad f(1) = g(1) = 0 \text{ とする。}$$

さらに複合モービライズ面の概念を導入することによって、三軸圧縮、三軸伸張の場合は次式を得る。

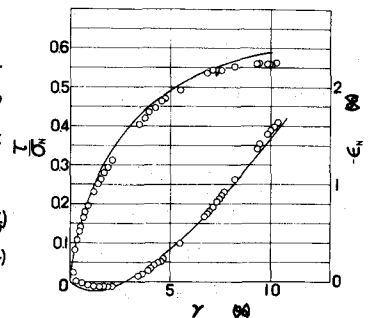


図-3 ($\sigma_m = 3 \text{ kg/cm}^2$, ext.)
モービライズ面上の $\frac{\tau}{\sigma_m} \sim \frac{d\sigma_v}{d\sigma_v} \sim \epsilon_v$ 関係

三軸圧縮 ($\sigma_2 = \sigma_3$)

$$\epsilon_1 = 2f(\sigma_1), \quad \epsilon_2 = \epsilon_3 = g(\sigma_1), \quad \sigma_1/\sigma_3 = 2\{f(\sigma_1/\sigma_3) + g(\sigma_1/\sigma_3)\} \quad \text{----- (7)}$$

三軸伸張 ($\sigma_1 = \sigma_2$)

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = f(\sigma_1), \quad \epsilon_3 = 2g(\sigma_1), \quad \sigma_1/\sigma_3 = 2\{f(\sigma_1/\sigma_3) + g(\sigma_1/\sigma_3)\} \quad \text{----- (8)}$$

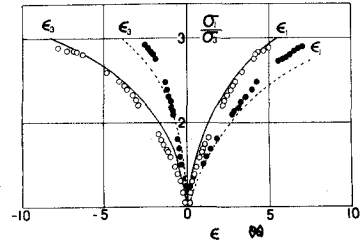


図-4
主応力比～主ひずみ関係

4. 実験データによる検証 (7), (8)式より三軸圧縮試験で測定した ϵ_1 を 2 倍し, 三軸伸張試験で測定した ϵ_3 を 2 倍して, 主応力と主ひずみ増分の方向が一致するという条件のもとに計算すれば単一のモービライズ面上の関係式 (1), (2), (3), (4) 式に対する整理ができる。このようにして三軸圧縮, 三軸伸張試験結果を $\sigma_1/\sigma_3 \sim \epsilon_1/\epsilon_3$ 関係 (4, (1) 式) で整理したものが図-1 である (0p: $\sigma_m = 3 \text{ kg/cm}^2$, ext., ●p: $\sigma_m = 2 \text{ kg/cm}^2$, ext., ●p: $\sigma_m = 1 \text{ kg/cm}^2$, comp.)。拘束圧 σ_m の大小, 圧縮, 伸張の区別は $\lambda = 1.3$, $\mu = 0.25$ の直線上にあることがわかる。他の試験についても同様の結果が得られている。次に $\sigma_1/\sigma_3 \sim \epsilon_1/\epsilon_3$ 関係 (4, (1) 式) で整理したものが図-2 (圧縮), 図-3 (伸張) であり, これらの図より $\lambda \approx 1\%$ が得られる。さらに $\sigma_1/\sigma_3 \sim \epsilon_1/\epsilon_3$ 関係 (4, (2) 式) の図 (省略) より $\mu = 0.4$ が得られる。図-2, 3 にはこれらの係数 $\lambda = 1.3$, $\mu = 0.25$, $\lambda = 0.4$, $\mu = 1\%$ を (3), (4) 式に代入して得られた計算曲線が実験データと共に示されている。これらのデータを主応力比～主ひずみ関係になおしたものが図-4 (0p: $\sigma_m = 3 \text{ kg/cm}^2$, ext., ●p: $\sigma_m = 3 \text{ kg/cm}^2$, comp.) であり, 図中の実線は伸張, 点線は圧縮の計算曲線 (7), (8) 式に示している。

さて, テイラー弾性率 (σ_1/σ_3) を縦軸, 弾性の整理に代ら, $(\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m$ についてプロットしたのが図-5 である⁵⁾。この図より, この整理方法では三軸圧縮と三軸伸張との間に明らかなる差が存在するように思われる。なおこの実験事実は Cambridge 学派の state boundary surface の三軸圧縮, 三軸伸張について対称であるという主張と反するものである。また図中の実線, 点線は (6), (6'), (7), (8) 式より得られた計算曲線である。一方, $\sigma_1/\sigma_3 \sim \epsilon_1/\epsilon_3$ 関係で整理したものが図-1 である。図よりで, σ_1/σ_3 によれば三軸圧縮, 三軸伸張を統一的に説明できることがわかる。以上より粘性土の排水三軸圧縮, 三軸伸張試験の場合も複合モービライズ面の概念を導入したモービライズ面上の応力～ひずみ関係にもとづけば, 統一的に説明できることが検証された。これらの事実から土のせん断現象を整理する場合, モービライズ面上の σ_m の現象を支配するより本質的なパラメータのように思われる。粘性土は砂に比べるとデータにバラツキがあり, 今後より多くのデータの集積や排水三軸試験だけでなく非排水三軸試験, 平面ひずみ試験, 相異なる主応力下での試験について必要と思われる。最後に本研究に対して適切な御助言をいただいた京大柴田敏教授, 神戸大幹部大蔵教授に感謝いたします。また測定の手伝いをしてもらった京大研究生藤村内に謝意を表します。

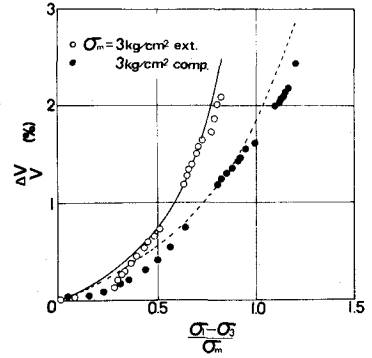


図-5
グレイタンス比 (σ_1/σ_3) $\sim \sigma_1/\sigma_3$ 関係

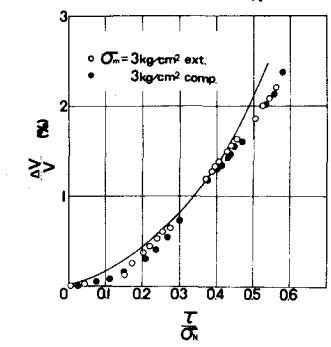


図-6
グレイタンス比 (σ_1/σ_3) $\sim \epsilon_1/\epsilon_3$ 関係

参考文献

- 1). 松岡元: せん断時の土の応力～ひずみ関係について, 京大防衛研年報第15号B, 1972
- 2). 村本朝郎, 松岡元, 服部若樹: 三軸圧縮, 伸張条件下の砂の応力～ひずみ関係について, 第8回土質工学研究発表会, 1973
- 3). 松岡元: 多軸応力下の土の応力～ひずみ関係について, 第8回土質工学研究発表会, 1973
- 4). 松岡元, 橋本正: 多軸試験機の製作とその測定結果の解析について, 第8回土質工学研究発表会, 1973
- 5). Shibata, T. and Kanube, D.: Influence of the variation of the intermediate principal stress on the mechanical properties of normally consolidated clays, Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. I, 357~363