

京都大学防災研究所 正員 松岡 元
京都大学 大学院 学生員 北村 良介

実際の地盤内の応力状態は一般には主応力が異なるものであるが、従来の三軸試験機は軸対称応力状態しか再現できない構造になっている。そこで、今回の主応力を任意に変化できる多軸試験機を新たに開発し、平面ひずみ試験および相異なる主応力を任意にさせる多軸試験を飽和豊浦砂を試料として行った。ここでは多軸試験機の説明と、新たに提案している空間モービライスト面 (spatial mobilized plane, 以下SMPと略す) の概念に基づいた実験データの解析結果を報告する。

実験装置の概要、実験方法: 多軸試験機は柴田・輕部による装置⁽¹⁾と同型である。最大主応力 σ_1 はピストンによって、最小主応力 σ_3 はセル内の液圧によって載荷し、中間主応力 σ_2 は、平面ひずみ試験では、一對の剛なアクリル板によって、また多軸試験では一對の rubber bag によって作用させる機構になっている。供試体は断面 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 、高さ 10cm の直方体である。試料には飽和した豊浦砂を用い、実験はすべて排水状態で行ない、上、下端のポーラスストーンを通して排水させた。載荷方式はひずみ制御であり、せん断速度は $0.17\%/\text{min}$ である。軸方向力 σ はプル-ビンクアリングにより、軸方向変位はダイヤルゲージにより、また体積変化はピロレットにより測定した。平面ひずみ試験の場合、 σ_2 は水圧計により測定し、また多軸試験の場合、 σ_2 は rubber bag 内の水圧により、最小ひずみ ϵ_3 は横変位計により測定した。写真-1は多軸試験の場合の供試体セット終了時の状況を示している。ここでは、圧密後、平面ひずみ試験では σ_2 一定でせん断を行なったデータと多軸試験では σ_2 と平均有効主応力 σ_m を一定にしてせん断を行なったデータを掲げた。

実験結果の解析: 提案しているSMPとは3次元応力空間において土粒子が最も滑動すると考えられる合成応力面であり、この面上でのせん断応力 τ と垂直応力 σ_n の比 τ/σ_n 、垂直ひずみ増分 $d\epsilon_v$ 、せん断ひずみ増分 $d\epsilon_s$ と測定された主応力、主ひずみ増分との関係は次式で表わされる。

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \sqrt{\frac{J_1 J_2 - 9 J_3}{9 J_3}} \quad \dots \dots (1) \quad d\epsilon_v = \frac{J_3}{J_2} \left(\frac{d\epsilon_1}{\sigma_1'} + \frac{d\epsilon_2}{\sigma_2'} + \frac{d\epsilon_3}{\sigma_3'} \right) \dots (2)$$

$$\frac{d\epsilon_s}{2} = \frac{J_3}{J_2} \sqrt{\frac{(d\epsilon_1 - d\epsilon_2)^2}{\sigma_1' \sigma_2'} + \frac{(d\epsilon_2 - d\epsilon_3)^2}{\sigma_2' \sigma_3'} + \frac{(d\epsilon_3 - d\epsilon_1)^2}{\sigma_3' \sigma_1'}} \quad \dots \dots (3)$$

ここに、 J_1 、 J_2 、 J_3 は各々 $J_1 = \sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3'$ 、 $J_2 = \sigma_1' \sigma_2' + \sigma_2' \sigma_3' + \sigma_3' \sigma_1'$ 、

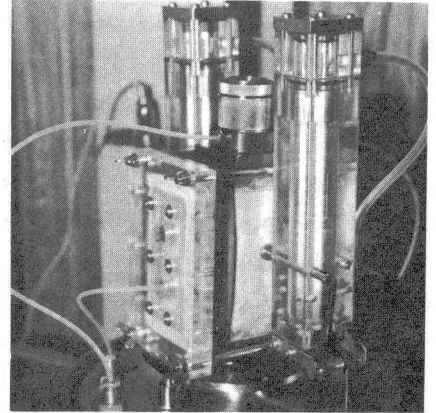


写真-1 多軸試験時の供試体セット状況
(右載左用 rubber bag, 横変位計がみえる)

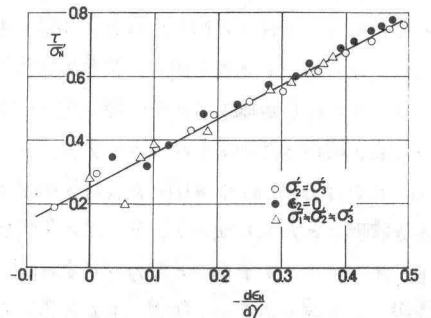


図-1 $\tau/\sigma_n \sim \frac{d\epsilon_s}{d\epsilon_v}$ 関係

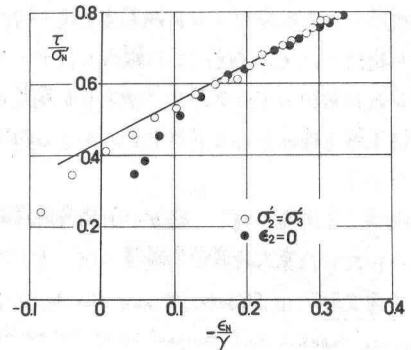


図-2 $\tau/\sigma_n \sim \frac{\epsilon_s}{\epsilon_v}$ 関係

$J_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$ であらわされる応力の1次, 2次, 3次の不変量である。

図-1は(1), (2), (3)式を用いて三軸圧縮試験 (OFP: $\sigma_m = 1 \text{ kg/cm}^2$, $e_i = 0.889$, N.G.I.型三軸試験機による), 平面ひずみ試験 (●FP: $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2$, $e_i = 0.623$), 多軸試験 (Δ FP: $\sigma_m = 1 \text{ kg/cm}^2$, $e_i = 0.648$) 結果を $\sigma_{\theta\theta} \sim d\epsilon_{\theta\theta}$ 関係で整理したものであり, 図-2は三軸圧縮試験と平面ひずみ試験の $\sigma_{\theta\theta} \sim \epsilon_{\theta\theta}$ 関係で整理したものである。両図より応力状態のちがいににかかわらず $\sigma_{\theta\theta}$ 上ではほぼ同一直線上にプロットされるのからみられるので, モービライスト面での基本関係式 $\sigma_{\theta\theta} = \lambda(-d\epsilon_{\theta\theta}) + \mu \dots (4)$, $\sigma_{\theta\theta} = \lambda(-\epsilon_{\theta\theta}) + \mu \dots (5)$ が成立することおよび豊前砂の係数値は $\lambda = 1.1$, $\mu = 0.25$, $\mu = 0.44$ であることがわかる。これらは従来求められた値と等しい。

図-3は平面ひずみ試験結果を $\sigma_{\theta\theta} \sim \gamma \sim \epsilon_{\theta\theta}$ 関係で整理したものであり, (4), (5)式を合わせて導いた式 $\sigma_{\theta\theta} = (\mu - \mu') \log \gamma_0 + \mu \dots (6)$ $\epsilon_{\theta\theta} = \frac{\mu - \mu'}{\lambda} \cdot \gamma \cdot (\log \gamma_0 - 1) \dots (7)$ より計算された曲線 (実線) も示している。図-4は同じ平面ひずみ試験結果を $\sigma_{\theta\theta} \sim \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 関係で整理したものであり, $\sigma_{\theta\theta}$ 上の $d\epsilon_{\theta\theta}$, $d\gamma$ の主ひずみ増分への変換式 $d\epsilon_i = d\epsilon_{\theta\theta} + \frac{b_i}{a_i} \frac{d\gamma}{2}$, a_i : $d\epsilon_{\theta\theta}$ の方向余弦, b_i : $d\gamma$ の方向余弦, ($i = 1, 2, 3$) $\dots (8)$ と平面ひずみ条件 $\epsilon_2 = 0$ から計算された値 (実線) も示している。図-5は多軸試験の場合の $\sigma_{\theta\theta} \sim \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 関係で整理したものであり, (8)式と $\sigma_{\theta\theta}$ 上の $d\epsilon_{\theta\theta}$ の方向と $d\gamma$ の方向が一致するという仮定から導かれる式を用いた計算曲線 (実線) と実測値である。図-4, 5の計算曲線を求めるに際し用いた係数値は上述の λ, μ, μ' と粒子構造を評価するパラメータ β について (図-4では $\beta = 0.16\%$, 図-5では $\beta = 0.01\%$) を用いた。(計算曲線の求め方の詳細は文献(2), (3)を参照された。) 図-3, 4, 5の実測値と計算曲線を比較すると, モービライスト面での応力 $\sim$ ひずみ間の基本関係式 (4), (5)式を基礎にして導かれた (6), (7)式, および主応力-主ひずみ関係式は実測値をよく説明している。このことより, 空間モービライスト面 ($\sigma_{\theta\theta}$) という新たに提案している応力面に着目すれば, すべての応力状態での土の応力-ひずみ関係を統一的に説明できるのではないかと期待される。今回ここに報告したデータは, この多軸試験機で得られた最初のものであり, 必ずしも満足のものではないが, 今後実験を積み重ねて $\sigma_{\theta\theta}$ 上のせん断現象を支配しているユニークな応力面であることを検証していくつもりである。

謝辞: 本研究に対し, 暖かい御指導御援助を賜っている京大村山教授に深謝の意を表します。また実験に御協力いただいた京大研修員馬場重一氏, および京大防災研地盤災害部門の方々にも感謝いたします。

参考文献: (1) Shibata, T. and Karube, D.: 'Influence of the Variation of the Intermediate Principal Stress on the Mechanical Properties of Normally Consolidated Clays', Proc. 6th Int. Conf. SMFE, vol. 1, 1965

(2) 松岡元, 中井昭夫: '多軸応力下の土の変形・強度特性', 京大防災年報, 第17号B, 1974

(3) 松岡元, 中井昭夫: '相異なる主応力下の土の応力-ひずみ関係と降伏条件', 第9回土質工学研究発表会, 1974

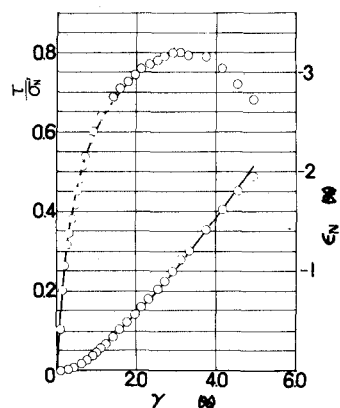


図-3 $\sigma_{\theta\theta} \sim \gamma \sim \epsilon_{\theta\theta}$ 関係 (平面ひずみ試験)

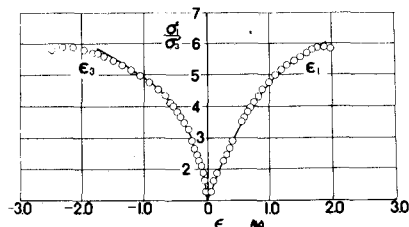


図-4 $\sigma_{\theta\theta} \sim \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 関係 (平面ひずみ試験)

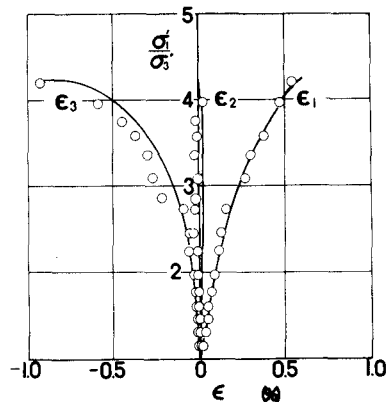


図-5 $\sigma_{\theta\theta} \sim \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 関係 (多軸試験)