

土の応力-ひずみ関係の微視的根源について

京都大学防災研究所 正員 松田 元

我々が目にする砂や粘土の応力-ひずみ曲線の源を究明することは土質力学の根本課題の一つであるが、この問題に対し明解な説明はほとんどなされてはいないのが現状である。ここでは密詰め砂や過圧密粘土(過圧密比:大)がピークをもつ応力-ひずみ特性を示すこと、およびゆる詰め砂や正規圧密粘土が単調増加の応力-ひずみ特性を示すことの意味を、せん断にともなう粒子接点角 θ の度数分布の変化に着目した微視的な観点から説明を試みた。

このため写真-1に示すように、アルミ棒(φ3, 5, 9mm)の粒状土モデルを幅20cm、高さ約20cmの枠の中にならべ単純せん断(simple shear)変形を与えて写真撮影した。このよう写真から任意の水平せん断面上において θ を測定することによって、せん断ひずみ γ の増加にともなう θ の度数分布の変化状況を調べた。その結果を図-1(1)~(8)に示す。これらの図より、せん断にともなう対称的な分布から右寄り(θ の正の領域)にピークをもつ三角形分布に移り、せん断ひずみがさらに増加すると分布のピークは右から中央の方へもどるのがみられる。そこで θ の分布形の変化とその平均値 $\bar{\theta}$ を評価し、それぞれのせん断ひずみ γ (写真に示す平行四辺形状の枠の回転角を測定して求める)に対し示したのが図-2である。

この図の8個のプロットは図-1の(1)~(8)にそれぞれ対応している。さて、すでに発表したように(τ/σ_N)_{max}面すなわち($45^\circ + \frac{\phi_{mp}}{2}$)面(= $\tau/\sigma_N = \tan \phi_{mp}$)上のせん断・垂直応力比 τ/σ_N は $\bar{\theta}$ に対し次式のように表現される。²⁾

$$\tau/\sigma_N = \lambda \cdot \bar{\theta} + \mu \quad \text{----- (1)}$$

ここに $\lambda = 1.4 \sim 1.5$ (定数), $\mu = \tan \phi_{mp}$ (粒子間摩擦)である。またダイラタンジーの発生機構の考察から、上述の面上の垂直ひずみ ϵ_N (圧縮を正とする)はピーク強度以前、以後についてそれぞれ次のように表される。²⁾

$$\epsilon_N = (\omega \bar{\theta} - \omega \bar{\theta}_0) / \omega \bar{\theta}_0 \quad \text{----- (2)}$$

$$\epsilon_N = (2\omega \bar{\theta}_p - \omega \bar{\theta} - \omega \bar{\theta}_0) / \omega \bar{\theta}_0 \quad \text{----- (3)}$$

ここに $\bar{\theta}_0$, $\bar{\theta}_p$ はそれぞれせん断開始直後、ピーク強度時にあける $\bar{\theta}$ である。

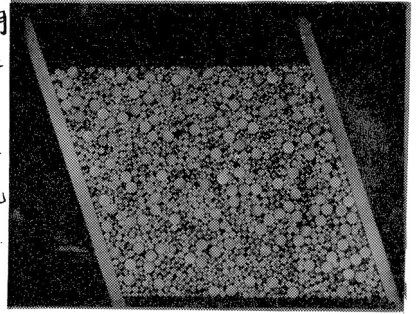


写真-1 アルミ棒の粒状土モデルの単純せん断変形

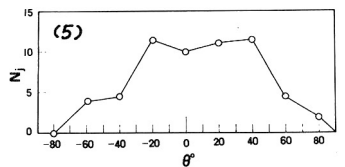
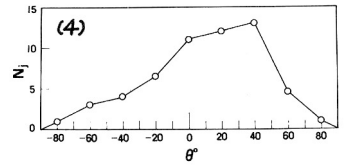
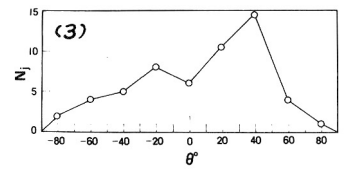
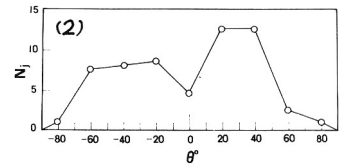
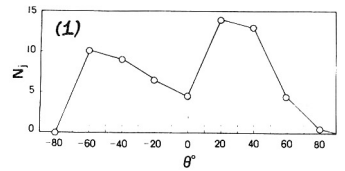


図-2に δ に対する $\bar{\sigma}$ のプロットが得られ、(1), (2), (3)式より $\tau/\sigma_N \sim \delta \sim \epsilon_N$ の関係と算定できる。この結果を図-3に示す。なお計算には $\lambda=1.5$, アルミ棒どうしの実測した摩擦係数から $\mu=0.35$ を採用し (ただし $\delta=0$ のときには $\mu=0$ とし、この), $\bar{\sigma}_p$ は図-2のオ4プロットから $\bar{\sigma}_p=10.1^\circ$, $\bar{\sigma}_0$ はオ2とオ3のプロットの延長線の縦軸との交点から $-\bar{\sigma}_0 \cong -7^\circ$ とした。この試験機ではせん断応力の測定がごまないので図-3の τ/σ_N と比較することはごまはないが、写真から読み取った垂直ひずみの最終値は $\epsilon_N = -2.0\%$ となり図-3の ϵ_N の最終値とよい対応を示している。次に、この図-3の応力-ひずみ曲線が生じる物理的意味を考えると、せん断が進むにつれて σ の分布が右の方(ひの正の領域)へ寄っていくが、右へ寄るほど抵抗しやすい角度になるため τ/σ_N は増加する。そして図-1(4)に示す σ の分布が最も右寄りになると、すなわち σ が最大のときピーク強度となり、やがて粒子の集りエガリにより σ が小さくなるにつれて残留強度に近づくことが解釈される。

さて、アルミ棒の粒状土モデルはどうしても密詰めになるが、図-3は密詰め砂や過圧密粘土(過圧密比大)の応力比-ひずみ-ダイラテンシー曲線の形とよく類似している。ここでは過圧密粘土をその拘束応力のもとの正規圧密粘土と比較して密詰め状態と考え、密詰め砂と同様のせん断のメカニズムを想定している。このとき粘土粒子がいくつか集合した団粒(aggragate)を、1個の砂粒に対応するせん断時の行動単位と考えた。一方、非常にゆるぎの砂や正規圧密粘土は極めてゆるい構造であるため、せん断をうけると直ちに負の接点角をもつようになり σ の分布は左の方へ寄ると考えられる。やがてせん断ひずみが増すにつれて σ の分布は右の方へ向かい、それにとまって τ/σ_N も増加するが、そのままひずみが大きくなって破壊すると考えられる。このため単調増加型の応力-ひずみ特性を示すものと解釈できる。以上のような考察を進展させて土の応力比-ひずみ-ダイラテンシー関係式を誘導し、各種の実測データをよく説明するこを検証している²⁾が、詳細は講演時に発表する。また下記の文献を参照されたい。

謝辞 御指導を賜った村山朝即教授に深謝の意を表します。また粒子接点角の測定を伝て下さった京大研修員(現・院生)北村良介氏に感謝します。

文献 1) 村山・松岡: 砂と粘土のせん断特性の類似性とそのメカニズムについて, 京大防災研年報才14号B, 1971, 4.
2) 松岡: せん断時の土の応力-ひずみ関係について, 京大防災研年報才15号B, 1972, 4.

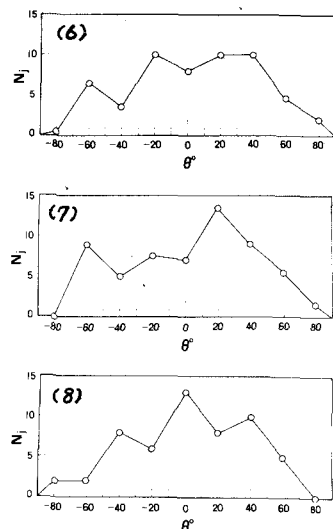


図-1 せん断とともに σ の度数分布の変化: (1) $\rightarrow$ (8)

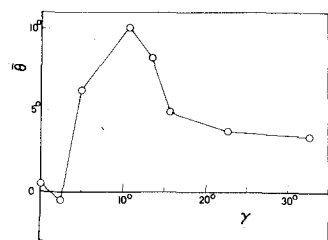


図-2 $\bar{\sigma} \sim \gamma$ 関係

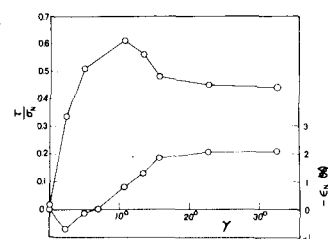


図-3 $\tau/\sigma_N \sim \delta \sim \epsilon_N$ 関係