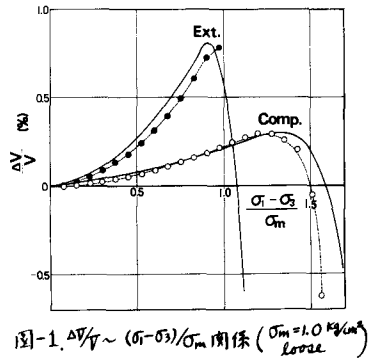
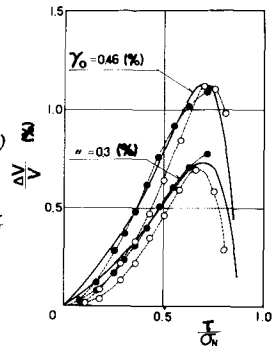


土の状態を評価するパラメーターとしては、Cambridge学派(Roscoe et al)の提唱する (e, p, q) 座標 (e : 間隙比, p : 平均有効主応力, q : 偏差応力)が現在のところ最も普及しているようである。土のせん断特性が応力の絶対値ではなく応力比によって規定されることは数多くの実験事実からも確からしいと思われる。応力比といっても上述の q/p (一般的には τ_{tot}/σ_m ; τ_{tot} : 正八面体せん断応力, $\sigma_m (=p)$), 主応力比 σ_1/σ_3 , モービライズ面上のせん断・垂直応力比 τ/σ_N 等が考えられ、研究者によってまちまちの整理がなされている。土のせん断特性がいかなる指標によってユニークに規定されるかということは、せん断時の土の内部機構に係わる重要な問題であるので、ここでは $q/p (= (\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m)$ 説と τ/σ_N (三軸圧縮・伸張の場合には σ_1/σ_3 と対応する)説について、主に三軸圧縮・伸張試験結果を比較検討し、土がいかなる法則に従う材料であるかを考察する。

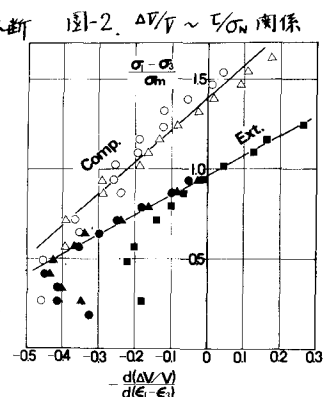
1. ダイレイタンス ($\Delta V/V$) について 図-1, 2 は龍岡池¹⁾による相模川砂の三軸圧縮 (○印) および三軸伸張 (●印) 試験結果 (σ_m 一定) より得られたダイレイタンス ($\Delta V/V$) とそれぞれ $q/p (= (\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m)$, τ/σ_N の関係を示したものである。この両図より $\Delta V/V$ のピーク (最大圧縮) 時の応力比の値は、 q/p の整理では三軸圧縮と三軸伸張試験でかなりはがれるのに対し、 τ/σ_N の整理では共にほぼ一致するのがみられる。なお両図中の実線の曲線は $\lambda=1.2$, $\mu=0.28$, $\mu'=0.46$ とし算定した計算曲線を示す (詳細は文献 図-1. $\Delta V/V \sim (\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m$ 関係 ($\sigma_m=1.0 \text{ kg/cm}^2$ loose) 2), 3) を参照)。このような傾向は、これ以外の砂あるいは粘土⁴⁾ についても一貫してみられるものである。



2. 応力比 $\sim$ ひずみ増分比関係について 図-3 は同じ砂の三軸圧縮 (白印) と三軸伸張 (黒印) 試験結果¹⁾ (σ_m 一定) を Cambridge学派の主張する q/p と $d(\Delta V)/d(\epsilon_1 - \epsilon_3)$ で整理したものである。この図より明らかなように、この整理では三軸圧縮と三軸伸張で縦軸切片、勾配ともかなり異なるのがみられる。しかしこの学派はあらゆる応力状態においてこの整理が同一直線上にプロットされることを重要な基本式として理論を組み立てている。これに対して図-4 は同じ砂の三軸圧縮 (○印: $\sigma_m=1.0 \text{ kg/cm}^2$, loose) と三軸伸張 (●印: $\sigma_m=3.0 \text{ kg/cm}^2$, loose) 試験結果¹⁾ を着者の主張する 1 つのモービライズ面上のせん断・垂直応力比 τ/σ_N と垂直せん断ひずみ増分比 $d\epsilon_N/d\delta$ の関係で整理したものである。この整理によれば三軸圧縮、三軸伸張ともほぼ同一直線上に整理されることがみられる。この直線勾配が $\lambda (=1.2)$, 縦軸切片が $\mu (=0.28)$ である。



3. 非排水せん断時の応力経路について 図-5, 6 は同じ砂の非排水三軸圧縮 (○印)・三軸伸張 (●印) 試験の有効応力経路とそれぞれ $q (= (\sigma_1 - \sigma_3)) \sim p (= \sigma_m)$ 関係と $\tau \sim \sigma_N$ 関係で整理したものである。この両図より、有効応力経路が左から右へ反転する点およびピーク強度時の応力比が、 $q \sim p$ 関係の整理では三軸圧縮と三軸伸張でかなりがれるのに対し (Cambridge学派のいう State Boundary Surface が p 軸に対して対称でない), $\tau \sim \sigma_N$ 関係の整理では共にほぼ一致することがみられる。そこで、この有効応力経路が反転



ある点(石原・龍岡・安田⁶⁾)によって変相点、と呼ばれているものであるが、その物理的意味はダイラテンション($\Delta V/V$)の最大圧縮点(極小点)と考えられる。

着着の主応力比 $\sim$ ひずみ増分比関係式³⁾に $d(\Delta V/V) = d\epsilon_1 + 2d\epsilon_3 = 0$ (三軸圧縮), $d(\Delta V/V) = 2d\epsilon_1 + d\epsilon_3 = 0$ (三軸伸張) なる条件を入れると共に次式を得る。 $\sigma_1/\sigma_3 + \{4\mu/(\lambda-2)\} \cdot \sqrt{\sigma_1/\sigma_3} - 1 = 0$

上式に相模川砂の係数値 $\lambda=1.2$, $\mu=0.28$ を代入すれば $\sigma_1/\sigma_3 = 3.69$, $\tau/\sigma_N = 0.70$ と得る。この値は図-2のダイラテンションの極小点の τ/σ_N の値としても、図-6の有効応力経路が反転する点の τ/σ_N の値としてもほぼ等当であることがわかる。また図-6においてピーク強度時の τ/σ_N の値が三軸圧縮と三軸伸張で同じ値となるのは、土が Mohr-Coulomb の破壊規準に従うことを示している。なお図-5, 6中の実線の曲線は着着の考え方にもとづく計算曲線を示すが、詳細は文献2), 3)を参照されたい。また図-7は Rendulic の応力面上の応力経路の計算例を示したものである。上の係数値としては $\lambda=1.2$, $\mu=0.30$, $\mu'=0.42$, $\gamma_0=1.0\%$, $C_c=0.24$, $e_c=0.897$ を使い、 σ_m だけを变化させて計算した。

以上より、土のせん断特性は $\tau/p = (\sigma_1 - \sigma_3)/\sigma_m$ ではなく τ/σ_N (三軸圧縮・伸張の場合は σ_1/σ_3 と対応する) によってユニークに規定されると考えられる(このことは着着の応力 $\sim$ ひずみ関係式からもいえることである)。またここではふれなかったが、多軸応力 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) 条件の場合でも複合モービライズ面の各々の面上の τ/σ_N によって支配されると考えれば実験値をよく説明できることがわかって^{2), 3)}いる。これらの事実より、土は通常の固相よりもむしろ基本的には摩擦法則に従う材料であると考えられる。例えば、モービライズ面上で成立する1つの基本式

$\tau/\sigma_N = \lambda \cdot (-d\epsilon_N/d\delta) + \mu$ は表面に凹凸がある場合の摩擦法則⁷⁾に対応する形になっている。破壊時に Coulomb の破壊規準に従う材料が、せん断の途中においても Coulomb 則に支配されると考えることはさほど不自然ではないように思われる。

謝辞

本研究に於いて御指導を賜った京都大学・村山朔郎教授、同・柴田徹教授、神戸大学・軽部大蔵助教授、資料を送っていただいた建設省土木研究所・龍岡文夫氏に謝意を表します。また粗状体のセンサー等によって議論し合った東京大学土質研究室の方々にも感謝致します。

参考文献

- 1) 龍岡文夫・芝野司: 三軸装置における砂の応力-ひずみ特性(才三報), 第7回土質工学研究発表会, 1972, pp.165-168.
- 2) 松岡元: 多軸応力下の土の応力 $\sim$ ひずみ関係について, 第8回土質工学研究発表会, 1973, pp.227-230.
- 3) 松岡元: 3主応力下の土の応力 $\sim$ ひずみ関係について, 京大防災研究所年報第16号B, 1973.
- 4) 村山朔郎・松岡元・北村良介: 粘性土の応力 $\sim$ ひずみ関係について, 土木学会第28回年次講演会, 1973.
- 5) Schofield, A. N. and Wroth, C. P.: *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London, 1968.
- 6) 石原龍岡・龍岡文夫・安田進: 飽和砂のくり返し静排水せん断特性, 土木学会第27回年次講演会, 1972, pp.177-180.
- 7) Bowden, F. P. and Tabor, D.: *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford, 1954.

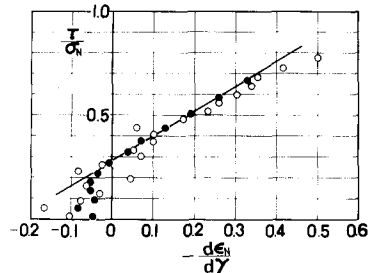


図-4. $\tau/\sigma_N \sim d\epsilon_N/d\delta$ 関係

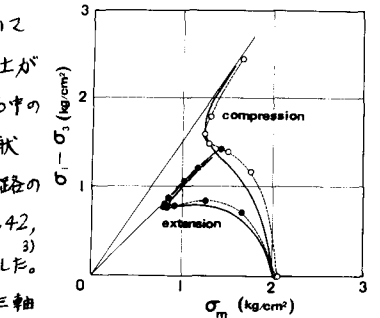


図-5. $q = (\sigma_1 - \sigma_3) \sim p = (\sigma_m)$ 関係

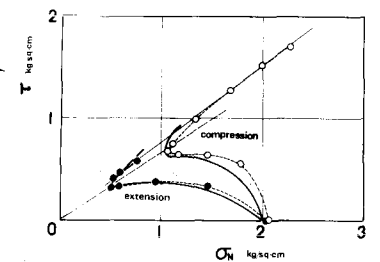


図-6. $\tau \sim \sigma_N$ 関係

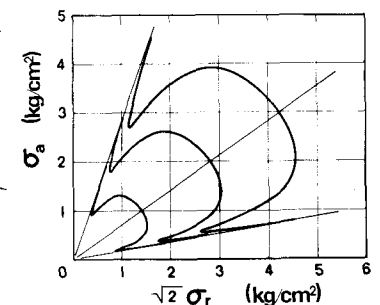


図-7. Rendulic の応力面上の有効応力経路の計算例³⁾