

III-14 砂の変形にもなる構造変化に関する研究

埼玉大学理工学部 正員 小田 匡寛

(1) まえがき : 砂はごく小さい主応力差で降伏する。降伏点を越えた砂の応力～歪関係は一種の歪硬化現象に依存するとみなせる。すなわち、変形にもなる、砂の微視的構造は増加した外荷重に対し安定したものに転化する。それ故、砂の応力～歪関係の微視的立場からの解明には、構造変事の様相を明らかにすることが不可欠の条件となる。変形前の砂の初期構造と変形後のそれとを比較検討し、砂質土にみられる歪硬化現象の本質を究明するために、次のような実験を実施した。

(2) 実験試料及び実験方法 : 実験に使用した砂は粒径範囲を $0.075 \sim 1.18 \text{ mm}$ に調整した相馬標準砂で、よく円磨された石英粒子 (92%) と長石粒子 (8%) とからなる。最大・最小間がき比はそれぞれ、0.859, 0.539 である。成形用モールドで支持されたゴムスリーブ中に、上述の砂を三層に分けて注ぎ入れる。各層を初期間がき比 0.64 (相対密度: 68%) となるように、次の二通りの方法で調整する。①成形用モールドの側壁を突き棒で軽く連打する方法 (T-方法)、②突き棒で突き詰める方法 (P-方法)。ここでは便宜上、T-方法、P-方法で詰めた供試体を、それぞれ、T-供試体、P-供試体と呼ぶ。上述のごとく初期間がき比を調整した砂を水-レジジン混合液で飽和させる。この供試体について、 $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ の定拘束圧・ $0.01\%/min$ の定歪速度で排水三軸圧縮試験を行ない、所定の軸歪まで変形させる。(水-レジジン混合液は粘性約 10 centi poise で、この混合液で飽和した砂の強度-変形-体積変化関係は、脱気水

で飽和した砂のそれとほとんど同じことを確認している。) 所定の軸歪に達すれば、その時の主応力比・体積変化率を記し、軸荷重を除荷する。 $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ の状態で供試体を一昼夜三軸室内に放置し、固結させる。

Method of Compaction	Name of Specimen	Axial Strain (%)	Mobilized Stress Ratio	Dilatancy Rate	S_z/S_x
Specimen Compacted by T - method	T - UND	0.00	0.00		1.19
	T - 1	0.18	2.54	0.00	1.26
	T - 2	0.37	2.65	0.05	1.30
	T - 3	0.50	3.02	0.36	1.40
	T - 4	0.74	3.28	0.52	1.61
	T - 5	1.48	3.30	0.56	1.51
	T - 6	5.18	4.09	0.46	1.64
Specimen Compacted by P - method	P - UND	0.00	0.00		0.92
	P - 1	0.22	2.05	0.20	1.04
	P - 2	0.37	1.94	0.37	1.03
	P - 3	0.74	2.44	0.00	1.15
	P - 4	1.11	2.70	0.15	1.34
	P - 5	1.48	2.65	0.15	1.34
	P - 6	2.96	2.79	0.20	1.33
	P - 7	3.70	3.21	0.29	1.31
	P - 8	14.81	2.96	0.14	1.43

Table I Specimens tested

供試体が受けた軸歪 ϵ_1 及び除荷直前の主応力比 σ_3/σ_1 ・体積変化率 $\Delta V/V$ を Table I に示す。三軸室内より取り出した供試体を、2つの鉛直断面 (AEFD)・(HIFJ) と1つの水平断面 (EFG) で切断し (Fig. 1), それぞれの断面に平行な3枚の薄片 (V_x ・ V_y ・ H_z -薄片) を作製する。3枚の薄片を用い、①粒子の長軸の配列性及び②粒子間接点における接平面の配列性を自在回転付き偏光顕微鏡で測定した。

(3) 実験結果 : 粒子の見掛けの長軸方向と座標軸 X (Fig. 1) とのなる角度 θ_1 を、 V_y -薄片と H_z -薄片について測定し、見掛けの長軸の配列性を検討した (Fig. 2)。いずれの供試体の H_z -薄片

も、その θ_i の度数分布はランダムで、集中傾向を示さない。P-法試体の V_f -薄片について測定した θ_i の度数分布を図-3に示す。P-法試体の θ_i の度数分布図は初め $\theta_i = \pm 90^\circ$ にピークを持つU字形であるが、変形(ε_i)の増加によってこの集中傾向は消滅し、ランダム分布に転化する。すなわち軸歪の増加で、 $-60^\circ \leq \theta_i \leq +60^\circ$ の θ_i の度数は増加し、 $-90^\circ \leq \theta_i < -60^\circ$, $60^\circ < \theta_i \leq 90^\circ$ では逆に減少する。この傾向はT-法試体

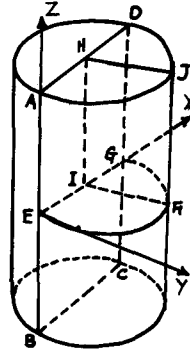


Fig.1 Preparation of thin section

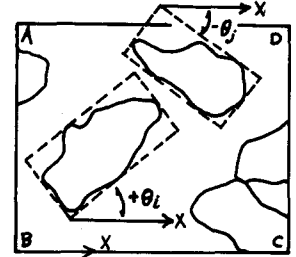


Fig.2 Measurement of θ_i

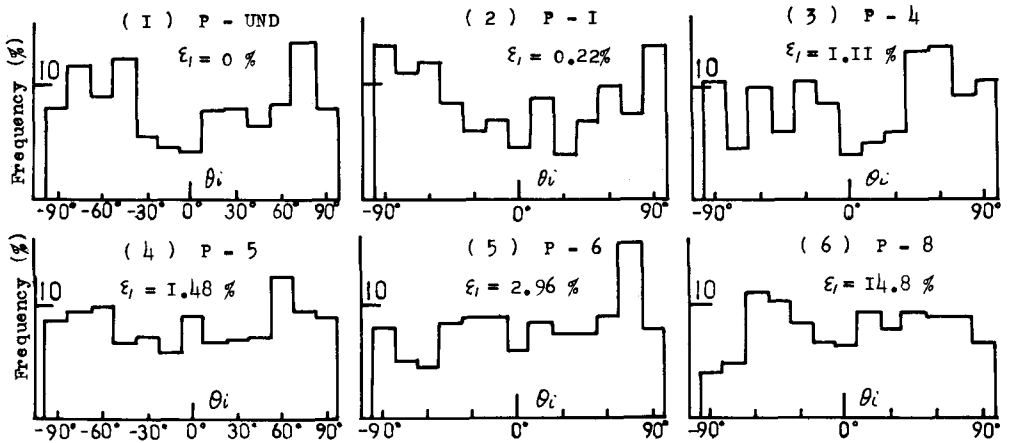


Fig.3 Frequency distributions of θ_i of deformed sands compacted by the P-method

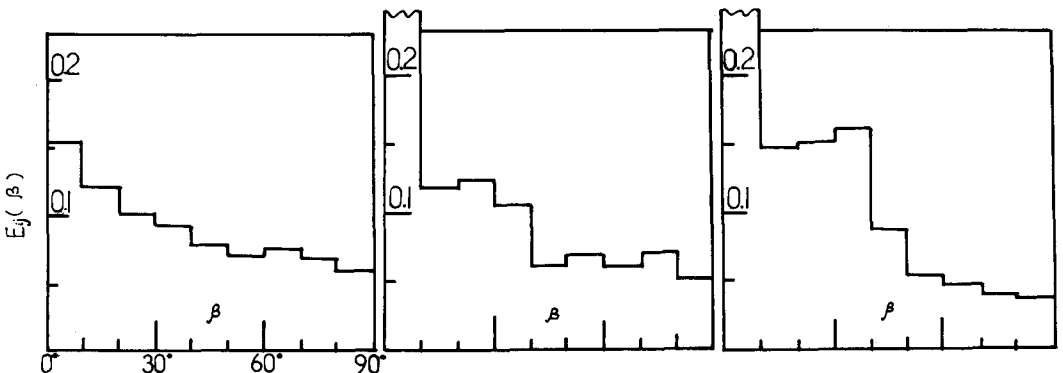


Fig.4 $E(\beta)_j - \beta$ relation of deformed sands compacted by the T-method

の場合にも認められる。このような変形にもなる粒子の長軸の配列性の変化は粒子の回転によって説明されるので、歪増分に与える粒子の回転の影響は無視できないであろう。またモール・クーロン理論で予想される方向への粒子の長軸の配列や、微視的なせん断面の発生等は観察できなかった。

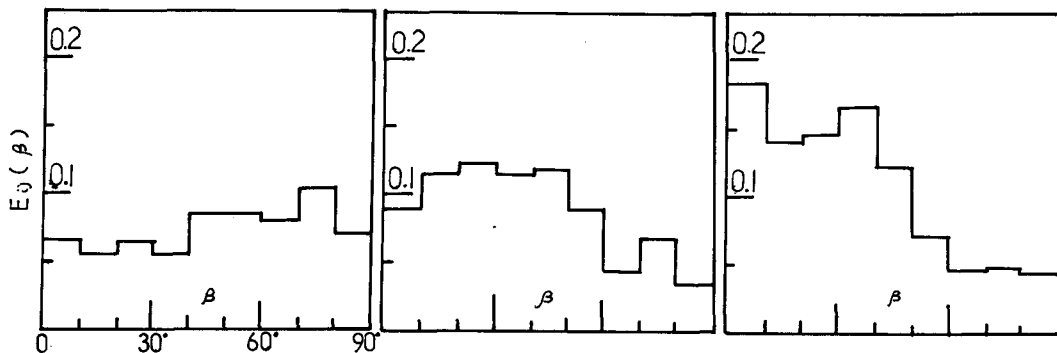


Fig.5 $E_{ij}(\beta) - \beta$ relation of deformed sands compacted by the P - method

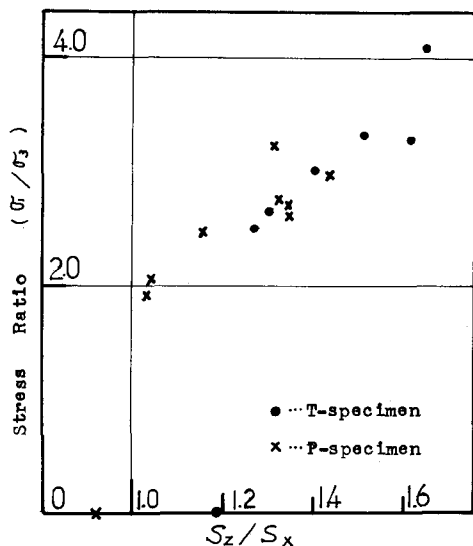


Fig.7 Relationship between σ_r/σ_3 and S_z/S_x

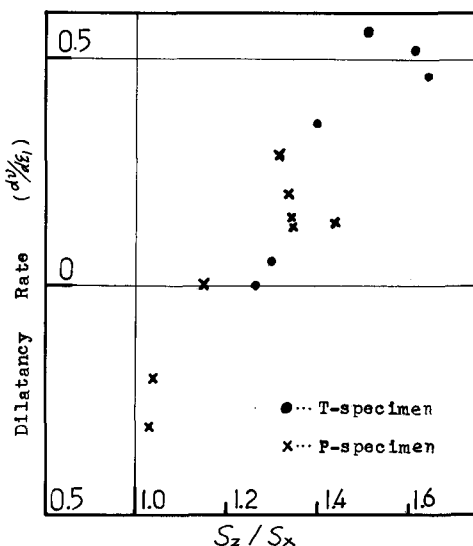


Fig.8 Relationship between $dv/d\epsilon_1$ and S_z/S_x

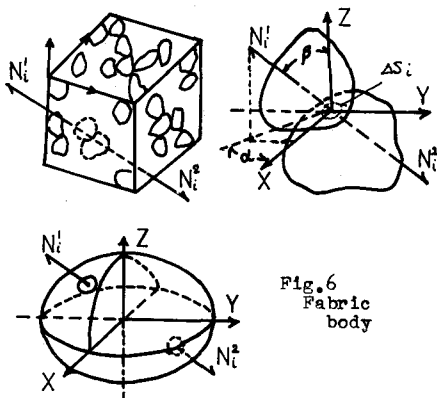


Fig.6
Fabric
body

粒子間接点における接平面の方向性は、接平面への法線 (N_i) (Fig.6) の三次元的分布によって表わされる。 N_i が α, β 方向である確率密度を $E(\alpha, \beta)$ とすると、 $\int_0^\pi \int_0^{2\pi} E(\alpha, \beta) \sin \beta d\alpha d\beta = 1$ となる。 N_i は α による軸対称的分布で、かつ $E(\alpha, \beta) = E(\alpha + \pi, \pi - \beta)$ である。そこで、 $\beta_i \leq \beta < \beta_j$ の $\beta_j - \beta_i$ 内における N_i の平均確率密度を $E_{ij}(\beta)$ とすると、 $E_{ij}(\beta) = M_{ij} / M \cdot 4\pi (\cos \beta_i - \cos \beta_j)$ (M : 総接点数, M_{ij} : N_i が $\{\frac{\beta_i \leq \beta < \beta_j}{\pi - \beta_j \leq \beta < \pi - \beta_i}\}$ 内にある接点数) となる。確率密度を測定値より計算し、各々の供試体に関する結果の一部を、図-4 (T-供試体) と図-5 (P-供試体) に示した。T-UND では、 $0^\circ \leq \beta \leq 50^\circ$ の $E_{ij}(\beta)$ は $50^\circ < \beta \leq 90^\circ$ の $E_{ij}(\beta)$ より大きい値を示す。この傾向は変形の増加によって益々強められる。(しかし、軸歪が 0.7% を越す

供試体(T-4, T-5, T-6)では、ほぼ同じ $E_{ij}(\beta)$ - β 関係を示す。 P -UNDは $40^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ の $E_{ij}(\beta)$ は $0^\circ \leq \beta < 40^\circ$ の $E_{ij}(\beta)$ より大きい。 P -張試体においても、軸歪の増加にともない、 $0 \leq \beta \leq 50^\circ$ の $E_{ij}(\beta)$ の値は漸次増加し、前述したT-張試体とほぼ同様の $E_{ij}(\beta)$ - β 関係を持つに至る。

(4) 考察 : 砂の初期構造は軸歪の増加に応じて新しい構造に転化されるが、 $E_{ij}(\beta)$ - β 関係の顕著な変化は軸歪の小さい(荷重増分の大きい)領域にみられる。軸荷重がピークに達した後の $E_{ij}(\beta)$ - β 関係はある一定な関係に収れんする。構造特性と σ_3 ・ $d\epsilon/d\epsilon_1$ との定量的関係をも更に検討するために、“Fabric Body”の概念を導入した。単位立方体中にある粒子間接点における接触平面(ΔS_i)をすべてはり合わせて、1つの曲面体(fabric bodyと仮称する)を作ることかできる(Fig.6)。

Fabric bodyの形・大きさは単位立方体中の結接点数、接触面積の平均値($\bar{\Delta S}$)、Niの確率密度函数 $E(\alpha, \beta)$ によってきまる。実際の砂においては、その形は球あるいは扁平楕円体に近いものである。そこで、fabric bodyのPrincipal plane, S_x, S_y, S_z を、 $S_x = \bar{\Delta S} \cdot M \int_0^\pi \int_0^\pi E(\alpha, \beta) \cos \alpha \cdot \sin \beta \, d\alpha \, d\beta$, $S_y = \bar{\Delta S} \cdot M \int_0^\pi \int_0^\pi E(\alpha, \beta) \sin \alpha \cdot \sin \beta \, d\alpha \, d\beta$, $S_z = \bar{\Delta S} \cdot M \int_0^\pi \int_0^\pi E(\alpha, \beta) \sin \beta \cdot \cos \beta \, d\alpha \, d\beta$ で計算する。 $E(\alpha, \beta)$ が α によらない場合、 $S_x = S_y$ である。異方性を示す粒状体の構造特性は S_z/S_x で表現できるので、 $S_z/S_x - \sigma_3$, $S_z/S_x - d\epsilon/d\epsilon_1$ の関係をFig.7とFig.8に示した。これらの関係は砂の詰め込み方法とは無関係に、 $\sigma_3 = k_1 \cdot S_z/S_x + k_2$, $d\epsilon/d\epsilon_1 = k_3 \cdot S_z/S_x + k_4$ の直線で回帰でき、この両式から、 $\sigma_3 = K_1 \cdot d\epsilon/d\epsilon_1 + K_2 \cdots (1)$ が導かれる。Fig.9は豊清標準砂(0.105~0.42mm)と栃木珪砂(0.25~0.42mm)とについて、ピーク時の $(\sigma_3)_f$ と $(d\epsilon/d\epsilon_1)_f$ との直線関係を示している。この図は、①著しく粒子形状を異にする両砂の $(\sigma_3)_f \sim (d\epsilon/d\epsilon_1)_f$ の関係はほぼ同一の回帰直線 $((\sigma_3)_f = K_1'(d\epsilon/d\epsilon_1)_f + K_2' \cdots (1'))$ で表わせること、② K_1', K_2' は初期構造(粒子の方向性、粒子の相互関係)、初期間ゲキ比、拘束圧力($0.5 \leq \sigma_3 \leq 3 \text{ Kg/cm}^2$)などとは無関係な定数であること、などを示している。砂の微視的構造を考慮して求めた実験式-①と式-①'とか相方ともに $\sigma_3 - d\epsilon/d\epsilon_1$ の線形関係を示していることは興味深い事実である。

(5) まとめ : 以上の実験・考察から、次のことが明らかになった。① 軸歪の増加で、その構造特性は連続的に変化する。② モーロ、フーロンの理論で仮定されるようなせん断面は微視的観察からも確認できない。③ 粒子の回転は無視できない構造変革機構の1つである。④ 異方性を示す粒状体の構造特性は、 S_z/S_x で十分表現できる。⑤ $S_z/S_x - \sigma_3$, $S_z/S_x - d\epsilon/d\epsilon_1$, $\sigma_3 - d\epsilon/d\epsilon_1$ はそれぞれ線形関係として表わせる。砂のような粒状土の強度・変形特性の微視的立場からの究明には、上述のような実験事実に基づ付けられた“Granular Model”の確立が不可欠の条件であると確信している。

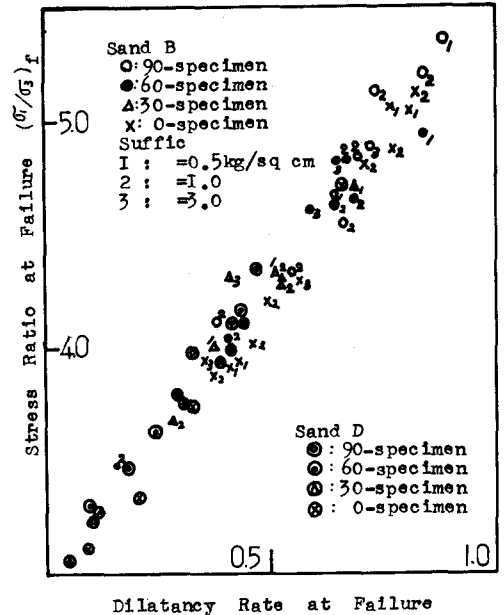


Fig.9 Relationship between $(\sigma_3/\sigma_{3x})_f$ and $(d\epsilon/d\epsilon_1)_f$