

鹿児島大学工学部 正員 春山 元寿

はじめに 土の変形・強度関係に及ぼす応力履歴、応力経路及び堆積構造等の影響に関する研究は、土の構成式を確立するうえで重要であるが、これらを統一的に説明することは困難である。ここではガラスビーズを試料として三主応力を制御可能な応力条件で、平均主応力一定のせん断試験を行い、粒状体の変形・強度関係に及ぼす応力経路の影響と π 面上における降伏・破壊曲面を検討した結果を報告する。ガラスビーズを使用した理由は等方性供試体を期待してのことであったが、試験結果からみれば異方性と無視出来ないようであり、試験機の個性と併せての検討が必要である。

試料及び試験方法 試験装置は試料室、加圧装置及び体積変化測定装置から構成される。試料室は $10 \times 10 \times 10$ cmの立方体で、6面のラバーバッグ(厚さ約1 mm)その他で組立てられ、排気は4本の注射針により行う。加圧はラバーバッグ内の脱気液圧によって行う。加圧装置はコンプレッサー、調圧弁、ブルドン管式圧力計(最小目盛 0.05 kg/cm^2)から構成される。体積変化は加圧時にラバーバッグ内に流入する液の体積を=重管式ビューレットで測定する。試料は粒径 $125 \sim 420 \mu\text{m}$ のガラスビーズ、間隙比は 0.719 である。主応力 σ_1 は鉛直方向、 σ_2 と σ_3 は水平方向にとる。応力経路は、 1 kgf/cm^2 のもとでの等方圧密の後、平均主応力を 1 kgf/cm^2 の一定とした π 面において $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 180^\circ$ の条件で負荷・除荷を繰返し、その後最大主応力方向を 120° 及び 180° 回転させた。1荷重段階は最大主応力増分 0.05 kgf/cm^2 の応力制御法である。応力パラメーターは $N = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/\sqrt{3}$ を平均主応力、 $S = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}/\sqrt{3}$ をせん断応力とする。変形パラメーターは $dV = (d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3)/\sqrt{3}$ を体積増分、 $d\gamma = \sqrt{(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2}/\sqrt{3}$ をせん断増分とする。体積変化は測定系統による誤差を補正した。 σ_i 及び ε_i は圧縮を「正」とする。

試験結果 試験結果の代表例として、最初の荷重段階で $\theta = 15^\circ$ に取った場合の $S/N - \varepsilon$ 曲線を図-1～3に示す。図-1における $0 \rightarrow 4$ 又は $\theta = 15^\circ$ ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$)、 $4 \rightarrow 5$ 又は $\theta = 195^\circ$ ($\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$) (試験シリーズI)、図-2の $0 \rightarrow 8$ 又は $\theta = 15^\circ$ 、 $8 \rightarrow 9$ 又は $\theta = 135^\circ$ ($\sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_1$) (試験シリーズII)、図-3の $0 \rightarrow 4$ 又は $\theta = 15^\circ$ 、 $4 \rightarrow 8$ 又は $\theta = 135^\circ$ 、 $8 \rightarrow 9$ 又は再び $\theta = 15^\circ$ (試験シリーズIII)である。除荷・負荷は供試体を弾性化するために行った。図-1は降伏後に除荷・負荷を行っており、処せ供試体の降伏・破壊条件が検討される。図-2は降伏前に1回目の除荷・負荷を行っており、図-1と比較することによって降伏に及ぼす応力経路の影響が検討される。図-3は降伏前に最大主応力方向の回転が与えられている。

最大主応力方向の変化は、それ以前の材料の弾性的性質を全く消失して、直ちに塑性変形状態をもたらす。ことに図-3に示されるように処せ供試体の弾性域内においても最大主応力方向の変化は、大きな歪における場合と同様に直ちに塑性化を引起す。この最大主応力方向の変化角度と材料の塑性化の関係は、工学的には重要であり、現在検討を進めている。 S/N と γ の関係においても上記と同様である。除荷・負荷前におけるダイレイタンス

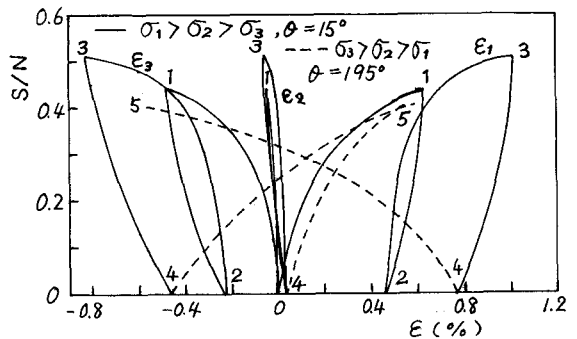


図-1 試験シリーズ I

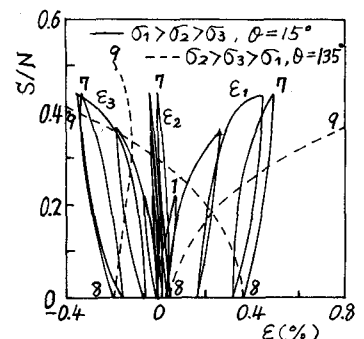


図-2 試験シリーズ II

は $\theta = 30^\circ$ において $dV \approx 0$ 、他の θ において $dV > 0$ 、即ち収縮傾向であるが、除荷過程は一般に $dV > 0$ 、再負荷過程で $dV \leq 0$ の傾向となる。また同一 θ での除荷・負荷は $dV/d\gamma$ を $+$ 、 $-$ に変化させるが、最大主応力方向の変化 (θ の変化) は $dV/d\gamma$ に変化を与えないことは、材料の塑性化との関係で考える必要を感じさせる。

いま、 $S/N \sim \gamma$ 曲線の最大曲率点を降伏点とし、 S/N の最大値を破壊点と定義する。 S/N の最大値は試験シリーズ I の $S/N \sim \gamma$ 曲線の負荷過程 0~1 の部分を双曲線関係 $S/N = \gamma / (a + b\gamma)$ によって表示し、その係数 $1/b$ によって決定した。 a はせん断弾性係数に比例。 θ と降伏及び破壊点の強度の関係を表-1 に、 $\theta = 0 \sim 60^\circ$ の π 面上のプロットを図-4 に示す。一般に行われているように、 $\theta = 0 \sim 60^\circ$ の範囲を各応力状態に拡張して考えると、降伏曲面は圧縮応力軸上では連続的であるが、伸張応力軸上では不連続となる。しかし、表-1 から考えられるように $\theta = 60 \sim 180^\circ$ の範囲で降伏強度が連続的に減小しているとすれば、 $\sigma_x = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sqrt{3} = N$ なる π 面上における降伏曲面は、 $\theta = 0^\circ$ 軸上に中心を持つ円の式 (1) で表示される。この場合、歪増分方向の直交性は満足されていない。

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = [(n - k_l)\sigma_x]^2 + [m(\sigma_y - k_l)]^2 - [m(n - k_l)]^2 = 0 \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 $\sigma_x = (\sigma_2 - \sigma_3) / \sqrt{2}$; $\sigma_y = (2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3) / \sqrt{6}$; m, n, k, l = 材料定数 (m : $\theta = 60^\circ$ のときの σ_x 値, n : $\theta = 0^\circ$ のときの σ_y 値, k : $\theta = 60^\circ$ のときの σ_y 値, 図-4 においては $m = 0.345$, $n = 0.537$, $k = 0.199$, $l = 3/4$) 222° $\theta = 60 \sim 180^\circ$ の間の実験結果が得られていないので今後の検証を必要とする。表-2 の降伏点強度においても同様の性質がみられる。

以上述べたように降伏曲面は、従来多くの研究者によって得られているものとかなり異なるものである。破壊強度は $\theta = 0^\circ$ と 180° における ϕ が等しく、従来の試験結果と合うが、 $\theta = 60^\circ$ と 180° における ϕ が異なる値を示しているのは特異である。表-1 から判断すると降伏面の形と破壊面の形は相似ではないようである。即ち規準が異なるようである。

おわりに 本研究の結果は、球粒子の集合体であるにも拘らず、強度異方性を示しているが、これは球粒子集合体の本質的なものか、又は試験機上のものか今後明らかにする。また、粒状体の工学的性についての新たな問題点が見出された。

表-1 試験シリーズ I

θ°	降伏点		破壊点	
	S/N	ϕ°	S/N	ϕ°
0	0.31	17.2	0.544	28.8
15	0.315	20.6	0.556	36.7
30	0.285	20.4	0.500	37.7
45	0.25	18.1	0.472	37.7
60	0.23	15.4	0.400	29.6
180	0.14	9.1	0.389	28.6

表-2 試験シリーズ II

θ°	降伏点	
	S/N	ϕ°
0	0.39	21.3
15	0.38	24.9
30	0.335	24.2
45	0.29	21.2
60	0.27	18.4
180	0.19	12.4

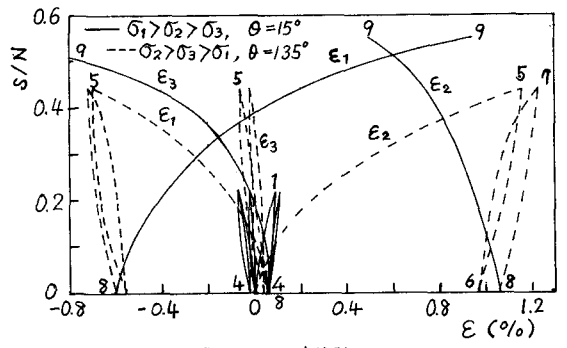


図-3 試験シリーズ III

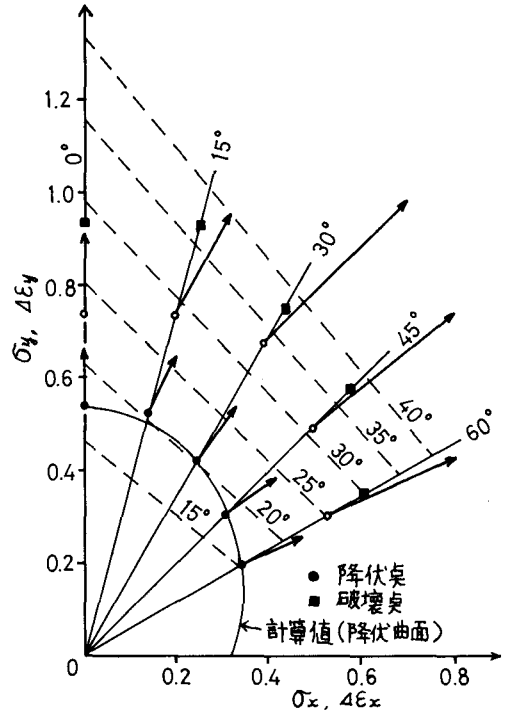


図-4 降伏点, 破壊点, 塑性歪増分方向 (試験シリーズ I)