

防衛大学校 (正) 大平至徳
 同 上 (正) 山口晴幸
 同 上 (正) 森 茂

1.はじめに 高圧下における砂は粒子破碎という現象を伴うことによって、土要素内の粒子間接触点数の増大を図り、作用応力を抵抗しようとする。当然この粒子破碎は非可逆的なものであるから、破碎応力領域下で示す砂の塑性的特性は、この砂粒子の破碎に主に起因していると言える。ここでは等方応力及びせん断応力作用下で生じる砂の粒子破碎挙動について、粒径分布及び比表面積の変化と塑性仕事との関係から捉えて考察している。

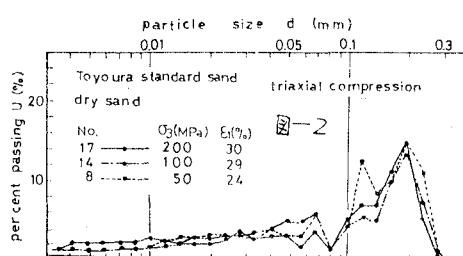
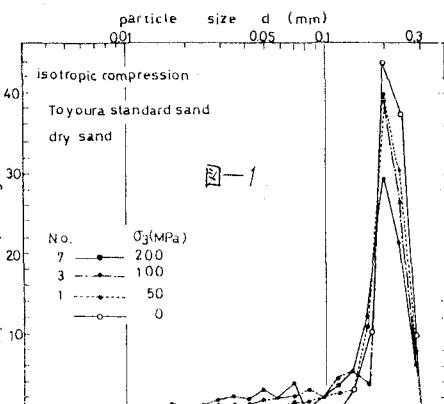
2.実験方法 乾燥した豊浦標準砂を粒径範囲が $0.3\text{mm} \sim 0.074\text{mm}$ の粒子から成るよう調整して、密づめ(初期間隙比 $0.60 \sim 0.68$)供試体(径 $35\text{mm} \times$ 高さ 75mm)を作製した。超高压三軸試験装置を用いて、 200MPa に亘る一連の拘束圧での等方圧縮試験と側圧一定圧縮せん断試験(ひずみ速度 $1\%/\text{min}$)との二種類の試験が非排気条件下で行なわれた。表-1には試験条件が示されている。なお表中の $U(d, 74\mu\text{m})$ の値は後述される破碎によって生じた $74\mu\text{m}$ 以下の粒径粒子の重量百分率を示す。

3.実験結果と考察 1)破碎による粒径分布の変化 高圧領域に亘る砂の $e = \ln p$

曲線は常圧下における粘性土のそれと同様な形状を呈し、粘性土の正密降伏応力に相当する応力付近から、砂は著しい粒子破碎を伴って圧縮することがVesicら¹⁾や三浦ら²⁾によって報告されている。この応力値は圧縮開始時の間隙比にも左右されるが、等方圧縮下ではおおむね $10 \sim 30\text{ MPa}$ と言われている。そこで、粒子破碎を生じると当然砂の粒径分布は変化することになる。図-1, 2はこれを示したものである。等方圧縮下では(図-1)、 $0.2 \sim 0.3\text{mm}$ の粒径粒子の頻度に著しい変化が見られ、 0.2mm 付近の粒子を中心として粒径へ頻度曲線が変化してゆく。これは、粒径の大きな粒子ほど粒子間接触点数が少ないので破碎し易く、破碎することによって作用外力が保持されることを意味している。さらに、せん断応力を受けるとかなり微細な粒子に至るまで破碎が進行し、破壊に至るような大きなせん断変形が与えられるところが図-1, 2から分かる。このことは表-1の中の $U(d, 74\mu\text{m})$ 値からも推測されるように、砂の破碎現象は応力に比例的に進行するのではなく、ある応力・ひずみ域を境として急激に変化することを意味している。ところで図-1, 2の結果を $74\mu\text{m}$ 以上と以下の2つの粒子群に分けて累積加積曲線をまとめると、いずれもそれらは対数正規分布型に近いことを図-3, 4は示している。注目すべきことは、粒径(d) $>74\mu\text{m}$ の場合、応力・変形量によらずほぼ同一の分布型を取るのに対し、 $d < 74\mu\text{m}$ の場合、等方せん断応力作用下でその分布型が異なることである。

表-1

試験 種別	番号 No.	側圧 $\sigma_3(\text{MPa})$	収敛率 $\epsilon_i(\%)$	$U(d, 74\mu\text{m})$ (%)
等 方 圧 縮	1	50		6.4
	2	70		9.4
	3	100		14.9
	4	140		19.3
	5	160		20.6
	6	180		21.4
	7	200		24.8
せ ん 断 せ ん 断 せ ん 断	8	50	24	4.8.3
	9	80	30	5.1.4
	10	100	5	3.5.1
	11	100	10	3.6.4
	12	100	15	3.7.5
	13	100	20	4.9.1
	14	100	29	5.2.6
せ ん 断 せ ん 断 せ ん 断	15	150	32	4.7.6
	16	180	31	5.4.9
	17	200	30	4.8.7



これは、砂の破碎の機構が両応力条件下で異なるために生じたものと言える。

(ii) 比表面積の変化と塑性仕事との関係 図-3, 4に示したように、累積加積曲線を対数正規分布型で近似すると、単位重量当りの比表面積(S_w)は次式で与えられる。

$$S_w = \frac{\phi}{G_s d_{50}} \left[25 \ln^2 \left(\frac{d_{84.13}}{d_{50}} \right) \right] \quad (1)$$

ここに、 ϕ は粒子の形状係数、 d_{50} と $d_{84.13}$ は通過率50%と84.13%の粒径、 G_s は比重である。また、全比表面積は次式で表わされる。

$$S_w = S_{w1} \left(1 - U(d < 74\mu\text{m})/100 \right) + S_{w2} \left(U(d < 74\mu\text{m})/100 \right) \quad (2)$$

ここに、 S_{w1} と S_{w2} は $d > 74\mu\text{m}$ と $d < 74\mu\text{m}$ の粒径粒子から成る比表面積である。なお以下では、単位体積当りの比表面積に換算して $S_v(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ を用いる。全塑性仕事 W^P は次式より求まる。

$$W^P = \int \gamma d\varepsilon + \int P dV - \int \rho dV^e \quad (3)$$

ここに $\gamma = \gamma_1 - \gamma_3$, $P = (\gamma_1 + 2\gamma_3)/3$, $\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$, V は全体積ひずみ、 V^e は弾性的体積ひずみである。そこで、比表面積の変化量 $\Delta S_v (= S_v - S_{v0})$, S_{v0} は初期の S_v)として(4), 塑性仕事量 W^P との関係で示したもののが図-5, 6である。粉体工学の粒子の粉碎に関する分野で、Rittinger, Kick, 田中らが提案した $\Delta S_v \sim W^P$ 関係式がある³⁾。この関係式を等方圧縮試験結果に適用したのが図-5である。本結果は、塑性仕事の増大に伴って粉碎効果の増加率が減少することを説明できる田中らの式(4)によって評価できる。

$$\Delta S_v = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{1}{ekw^P} \right) \quad (4)$$

ここに、 a , k は係数である。ところで前節で破碎効果の钝化を指摘した。このことが図-4から明らかである。即ち、破碎はせん断初期に集中的に起こり、 W^P の増大に伴う ΔS_v の増加割合がひずみと共に減少している。なお図-6の結果から、せん断応力成分による ΔS_v と W^P を $(\Delta S_v)_d$ と W_d^P とし、図-5の等方応力成分による ΔS_v と W^P を $(\Delta S_v)_c$ と W_c^P として示したもののが図-7である。これより両応力成分に起因する破碎のしかたが大きく異なっていることが分かる。しかし $(\Delta S_v)_d$ と W_d^P 関係にも(4)式の適用が可能であることが分かる。しかし(4)式の係数 a と k は粒子破碎が生じる時の応力の載荷方法を規定する係数であると言える。ちなみに、(4)式は衝撃的応力を加えて破碎する荷重落下法によっている。

(参考文献) ① Vesic et al. (1968); Proc. A.S.C.E. 94, SM3, pp. 661~688

② 三浦哲彦 (1971); 土木学会論文報告集 第260号, pp. 107~118

③ 久保輝郎 (1962); 粉体, 文書

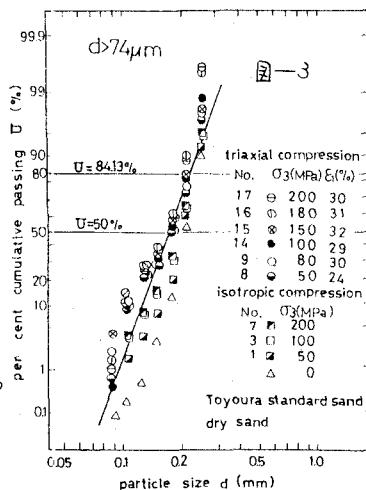


図-3

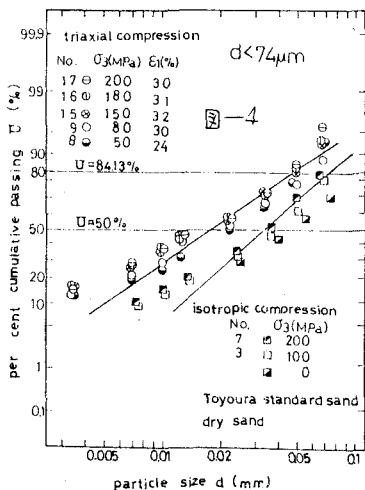


図-4

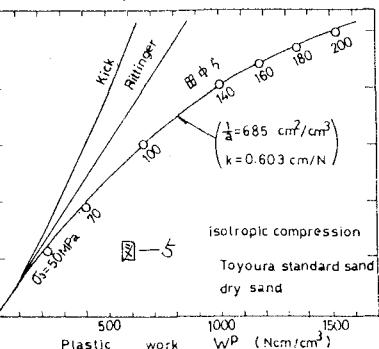


図-5

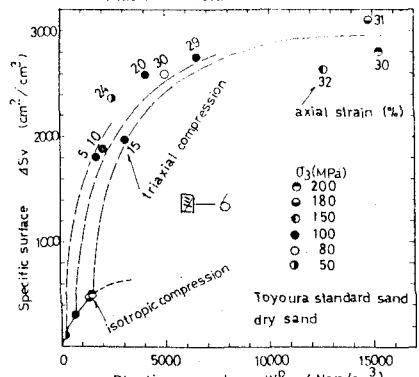


図-6

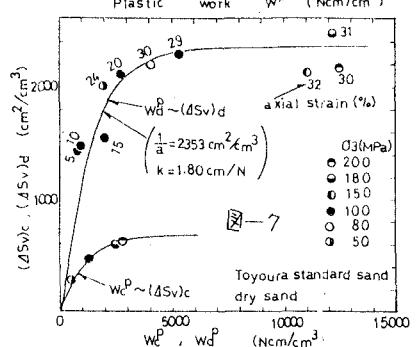


図-7