

# 単粒子破砕強度からみた砂集合体の破砕特性

山口大学工学部 正会員 中田幸男 兵動正幸 村田秀一  
山口大学大学院 学生会員 加登文学

1. まえがき 最近、地盤材料を破砕性の異なる材料として取り扱い、工学的な問題に対処していることとする試みがなされている<sup>1)</sup>。このような試みに際し、室内試験における研究についてもより詳細に粒子破砕を検討する必要があるといえる。粒状体内における粒子破砕を詳細に考える方法として、試験前後の粒子破砕量を詳細に検討する方法や、個々の粒子の強さについて検討する方法とがある。これまでの粒子破砕に着目した検討は破砕した粒子について考察されたものがほとんどであり(たとえば Marsal<sup>2)</sup>)、単粒子破砕特性を十分に把握した上での検討は十分になされていないのが現状である。本研究では、比較的簡単な力学条件である一次元圧縮を中心に単粒子破砕特性との関わりについて検討を行い、集合体内の粒子に作用する粒子応力について考察を加えるものである。

2. 一次元圧縮中の最大圧縮指数時の鉛直応力と単粒子破砕強度 表1は、今回の検討に用いたすべての試料の物理的性質およびその試料の単粒子破砕試験<sup>2)</sup>結果についてまとめたものである。ここで、 $\sigma_f$  は平板間での単粒子破砕試験において割裂破砕を起こすときに示す破砕荷重を粒子の高さの2乗で除したことを意味する。

また、下付の数字は、粒子の破砕しない確率つまり生存確率を意味する。つまり、 $(\sigma_f)_{50}$  は、この試料の粒子にこの応力に相当する粒子内応力が生じると50%の確率で破砕することを意味する。さらに、 $(\sigma_f)_{37}$  と  $m_f$  は、Weibull 統計関数<sup>3),4)</sup>に関連する定数であり、基準破砕強度および強度の不均一性を示すパラメータである。また、粒子形状が最大および最小間隙比の大きさやそれらの幅に影響を与えることは、吉村・小川<sup>5)</sup>によって示されている。図1は、初期の相対密度を100%となるように作成した供試体に対する一次元圧縮試験から得られた  $e - \log \sigma_v$  曲線を示している。この圧縮曲線の降伏部分は、従来から試料の粒子破砕に依存していることが知られている(たとえば三浦・山内<sup>6)</sup>)。また、着色粒子を用いた微視的な粒子破砕の観察<sup>7)</sup>から、単一粒径を有する材料の圧縮曲線の降伏部分において、多くの粒子が2つか3つに割れるような割裂破砕を同時に示すことが明らかにしている。

図2は、50%生存強度 $(\sigma_f)_{50}$  と圧縮指数最大時の鉛直応力 $(\sigma_v)_{Cmax}$  との関係を両対数グラフ上にプロットしたものである。単一粒径で構成された材料の場合、圧縮指数最大時に50%の粒子が割裂破砕を示すことが微視的な検討<sup>7)</sup>から明らかとなっている。この図から、単粒子破砕強度の方が、最大圧縮指数時の鉛直応力の値よりも大きいことがわかる。このことは、粒子に作用する粒子内応力が圧縮指数最大時の最大主応力と異なることを示している。また、各々のプロットは複数個図中に記されているが、これは

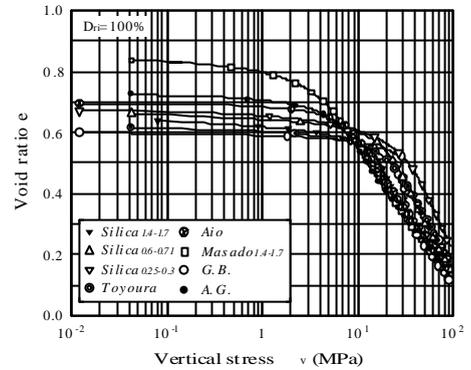


図1 単一粒径試料の圧縮曲線

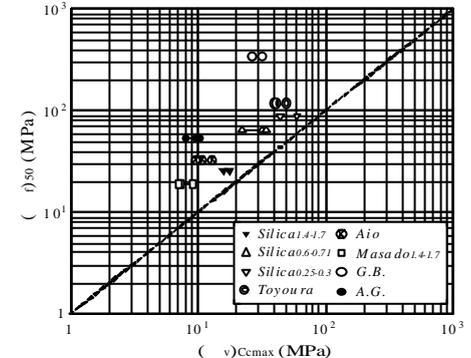


図2  $(\sigma_f)_{50}$  と  $(\sigma_v)_{Cmax}$  との関係

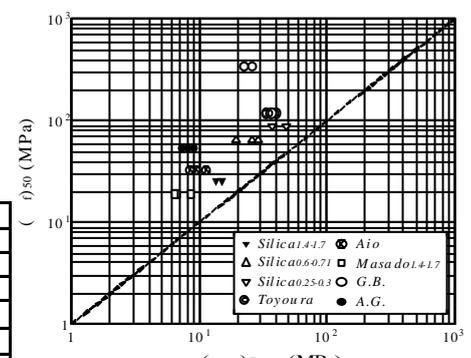


図3  $(\sigma_f)_{50}$  と  $(\sigma_{sp})_{Cmax}$  との関係

表1 試料の物性値及び単粒子破砕試験結果

Sample	$e_{max}$	$e_{min}$	$D_{50}$	$U_c$	$(\sigma_f)_{50}$	$(\sigma_f)_{37}$	$m_f$
G.B.	0.699	0.600	0.925	1.085	336.1	365.8	5.900
A.G.	1.145	0.746	0.925	1.085	53.10	62.10	2.100
Toyouura	0.977	0.609	0.202	1.334	117.6	147.4	2.170
Masado14+17	1.216	0.847	1.550	1.102	19.08	24.18	1.230
Silica14+17	0.881	0.632	1.550	1.102	25.64	30.96	3.038
Silica0.6-0.71	0.968	0.659	0.655	1.088	63.89	72.87	2.172
Silica0.25-0.3	1.088	0.666	0.275	1.095	87.32	110.9	1.822
Aio	0.971	0.699	1.138	1.335	32.73	38.85	1.927

等に荷重を受けていると仮定して求めた平均粒子内応力  $(\sigma_{sp})_{C_{cmax}}$  と 50% 生存強度  $(\sigma_f)_{50}$  との関係について示したものが、図 3 である。ここで、粒子内応力  $(\sigma_{sp})_{C_{cmax}}$  は以下の式によって与えられる<sup>3)</sup>。

$$(\sigma_{sp})_{C_{cmax}} = \frac{F_{sp}}{d_0^2} = (\sigma_v)_{C_{cmax}} \left( \sqrt[3]{\frac{(1+e)\pi}{6}} \right)^2 \quad (1)$$

この図においても同じ形状のプロットがやや幅を持ってプロットされている。この結果は、間隙比の違いが、粒子 1 個で分担される荷重に影響を与えるだけではないことを示している。間隙比が増加するとともに、粒子接点数は増加することが知られている(たとえば Field<sup>8)</sup>)。結果として、粒子接点数の増加が粒子内応力を減少させることから、図のような結果をもたらしたと考えられる。さらに、50% 生存強度は平均粒子内応力  $(\sigma_{sp})_{C_{cmax}}$  よりも大きいことがわかる。この傾向は、Cundall and Strack<sup>9)</sup> に代表される DEM 解析の結果や、Oda and Konishi<sup>10)</sup> のような光弾性体を用いた検討結果から導かれた力を伝達する粒子としない粒子の存在によって説明付けられる。そこで、圧縮指数最大時の平均粒子内応力  $(\sigma_{sp})_{C_{cmax}}$  に対する 50% 生存強度  $(\sigma_f)_{50}$  の比を間隙比幅との関係でまとめたものが図 4 である。この比は、上述の考察を踏まえると荷重が作用している粒子とそうでない粒子の数の比に関連付けられるものといえる。この図から、ガラス材料よりも地盤材料の方が、間隙比の幅が大きいものの方が、この比は小さくなることを示している。つまり、粒状体内において荷重を伝達している粒子の割合は粒子表面の粗度や粒子形状に依存することを示唆している。

**3. 異方圧縮挙動と単粒子破碎強度** 図 5 は、Silica<sub>1.4-1.7</sub> の試料に対する応力比一定および  $K_0$  圧縮試験結果について  $e$ - $\log p$  曲線を示したものである。この応力比は、軸差応力を平均有効主応力で除すことで得られるものである。この図から、応力比の増加とともに降伏部分の曲率半径が小さくなっている。このことから、応力比も粒子内の破碎の傾向に何らかの影響を与えていることが推測される。三浦・山内<sup>6)</sup>は、塑性仕事量が同値である場合には同程度の破碎が生じていることを示した。そこで、試験中全仕事量  $W=1.0, 1.12, 2.0 \text{ J/cm}^3$  に達したときの最大主応力と式(1)を用いて得られる粒子内応力  $(\sigma_{sp})_W$  で 50% 生存強度  $(\sigma_f)_{50}$  を除したものを、応力比との関係でまとめたものが図 6 である。ここで、50% の粒子が割裂破碎を示すことが明らかとなっている圧縮指数最大時の全仕事量は  $1.12 \text{ J/cm}^3$  であった。つまり、図中の  $W=1.12 \text{ J/cm}^3$  の曲線が図 4 の縦軸におおむね等価であるといえる。この図から、応力比  $\eta=0.5$  までは  $(\sigma_f)_{50}/(\sigma_{sp})_W$  の値にさほど変化が無いこと、0.5 以上となるところから  $(\sigma_f)_{50}/(\sigma_{sp})_W$  の値が徐々に増加すること、さらに 1.0 以上となるところから顕著に増加しそうであることがわかる。

**4. あとがき** 単一粒径で構成された材料について、50% 生存強度と、単一粒径で構成される場合に 50% の粒子が破碎する事が確認されている最大主応力との比較がなされ、最大主応力と粒子内応力との関係が議論された。その結果、粒子内応力は、最大主応力、粒度分布、初期間隙比、粒子形状、表面粗度や応力比に依存することが認められた。特に、粒子形状、表面粗度および応力比は個々の粒子に伝達される荷重の不均一性に大きく寄与することが考えられた。

< 参考文献 > 1) 地盤工学会編(1999): 破砕性地盤の工学的諸問題に関する研究員委員会報告書。2) Marsal, R.J. (1967): Large scale testing of rockfill materials, ACSE Vol.93, SM2, pp.27-43. 3) Nakata et al. (1999): A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test, Geotechnique Vol.49, No.5, pp.567-583. 4) Weibull, W. (1951): A statistical distribution function of wide applicability, Journal of Appl. Mech., Vol.18, pp.293-297. 5) 吉村優治・小川正二: 砂のような粒状体の簡易な定量化法, 土木学会論文報告集, No.463 / -22, pp.95-103, 1993. 6) 三浦哲彦・山内豊聡(1977): 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文集, 第260号, pp.109-118. 7) 中田幸男他(1999): 一次元圧縮試中の砂の粒子破碎特性, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, pp.352-353. 8) Field, W. G. (1963): Towards the statistics definition of a granular material, Proc. 4th A. and N.Z. Conf. on Soil Mech., pp.143-148. 9) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. (1979): A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, Vol. 29, No.1, pp.47-65. 10) Oda, M. and Konishi, J. (1974): Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear, Soils and Foundations, Vol.14, No.4, pp.25-38.

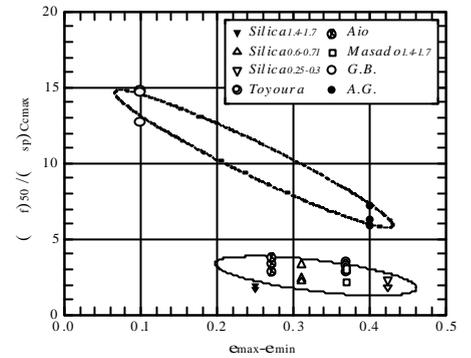


図 4  $(\sigma_f)_{50}/(\sigma_{sp})_{C_{cmax}}$  と  $\Delta e$  の関係

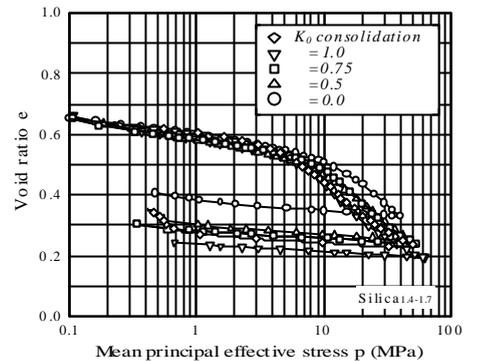


図 5 単一粒径試料の圧縮曲線

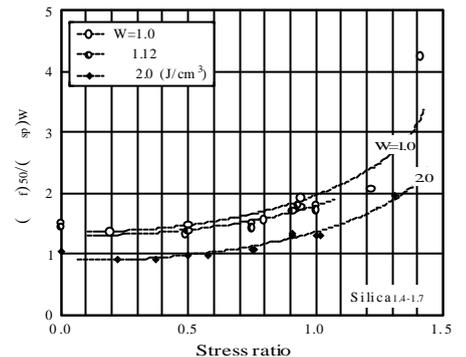


図 6  $(\sigma_f)_{50}/(\sigma_{sp})_W$  と  $\eta$  の関係