

粒度分布に着目した砂の単粒子破碎挙動とせん断挙動

山口大学工学部
中央復建コンサルタンツ(株)
山口大学大学院

正 員 中田幸男 兵動正幸 村田秀一
正 員 ○ 足立 剛
学生員 加登文学 原田孝行

1 まえがき 著者は、昨年砂の粒子破碎を詳細に検討する上で、まず、単粒子の破碎特性を把握する必要があるという認識から、単粒子破碎試験を実施した。その結果、単粒子破碎特性と供試体内の粒子破碎に関連性があるという結論を得た。本報では、さらに詳細検討を行うことを目的に、粒径の異なる試料を対象とし一連の単粒子破碎試験および力学試験を行なった。別報¹⁾では、単粒子破碎特性と一次元圧縮特性との関連性について論議している。ここでは、単粒子破碎特性とせん断特性の特に強度特性についての関連性に着目して検討を行っている。

2 試料及び実験方法 試料は、粒径を $d_0=0.25\sim0.30\text{mm}$ ($G_s=2.648$, $e_{\max}=1.088$, $e_{\min}=0.666$)、 $d_0=1.40\sim1.70\text{mm}$ ($G_s=2.639$, $e_{\max}=0.881$, $e_{\min}=0.632$) に粒度調整した珪砂である。単粒子破碎試験は、試験装置の上盤を固定し、下盤を載荷速度一定で上昇させることにより粒子を破碎させるものであり、各粒径100個ずつ行った。また、三軸試験供試体は、高さ100mm、直径50mmをタンピング法によって作成し、等方圧縮試験および側圧一定排水三軸圧縮試験を行った。

3 実験結果 まず、単粒子破碎試験結果における荷重変位関係から得られた荷重が最初に減少する点 F_0 と最大値を示す点 F_f を、それぞれ初期粒径 d_0 の二乗で除して第1破碎強度 σ_c と最大破碎強度 σ_f を求めた。図1は、粒径 $d_0=1.40\sim1.70\text{mm}$ の破碎しない確率 P_s と σ_c および σ_f を特性破碎強度 σ_{c0} と σ_{f0} で除した正規化破碎強度で表される粒子の破碎しない確率曲線である。

$$P_s = \exp\left\{-\left(\sigma/\sigma_0\right)^m\right\} \cdots (1)$$

ここで、 P_s はある破碎強度 σ の時の粒子が破碎しない確率(生存確率)である。また、 σ_0 は粒子が破碎しない確率37%の時の特性破碎強度であり、破碎強度の絶対値を示すパラメータと言える。 m は Weibull 係数であり、破碎強度の変動性を表すパラメータである。この値が高いほど特性破碎強度付近で破碎する粒子が多いことを示している。この式(1)は、Weibull(1951)²⁾の単一ブロックの引っ張り試験におけるブロックの破碎しない確率分布関数をもとに McDowell(1996)³⁾によって修正されたものである。また、図1には式(1)中のWeibull係数 m の範囲を0.6~5.0間で変化させたラインを示している。この P_s と σ_c/σ_{c0} および σ_f/σ_{f0} のプロットに対し最小二乗法を用いてそれぞれの曲線のWeibull係数を求めた。以下、 σ_c/σ_{c0} および σ_f/σ_{f0} について求めた係数をそれぞれ " m_c " を " m_f " と称す。表1は、求めた各粒径における σ_{c0} および σ_{f0} と m_c および m_f の値を示している。

図2は、 $d_0=1.40\sim1.70\text{mm}$ の初期間隙比 $e_0=0.666$ の等方圧縮試験の結果を空隙比 e と平均有効主応力 p で示したものである。ここでは、 $e\text{-log}p$ 曲線の折れ曲がりに着目し、図中に示すように圧縮降伏応力

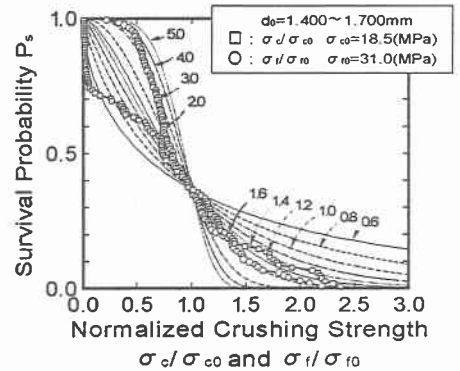


図1 破碎しない確率と正規化破碎強度関係

表1 各粒径における特性破碎強度とWeibull係数

粒径(mm)	σ_{c0} (MPa)	σ_{f0} (MPa)	m_c	m_f
0.25~0.30	61.76	110.87	1.012	1.822
1.40~1.70	18.49	30.96	0.586	3.038

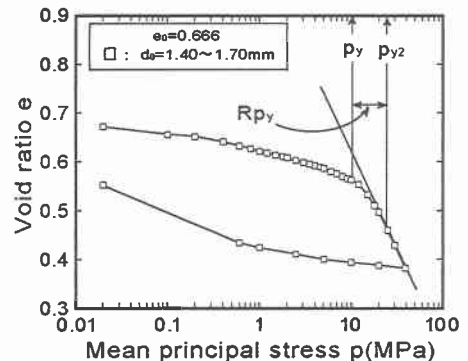


図2 間隙比と平均有効主応力関係

p_y と最大圧縮指数を示す時の平均有効主応力 p_{y2} 、さらに、 $e\text{-log}p$ 曲線の折れ曲がりの程度を表すパラメータとして $\log(p_{y2}/p_y)$ で与えられる R_{py} の値を求め、以下の結果の整理に用いた。

図3は、表1に示した Weibull 係数 m と R_{py} の関係を示したものである。この図から、 R_{py} の値が増加すると、 m_e の値はほぼ一定の値となるものの m_r の値は減少する傾向があることがわかる。このことから、一次元圧縮試験結果¹⁾と同様、折れ曲がりの程度($e\text{-log}p$ 曲線の降伏点付近の曲率)は、単粒子破砕強度の変動性と関連づけられると言える。

図4は、排水三軸圧縮試験を行なった結果を、ピーク時でのセカントアングル $\phi'_{\max}$ と平均有効主応力 p の関係について示したものである。また、図中には秋穂砂の三軸試験から得られた関係⁴⁾も示している。いずれの供試体についても、 p の増加に伴いある範囲で強度が減少していることが分かる。以下では、図中に示すように、この $\phi'_{\max}$ の低下が認められる p の範囲を表すものとして $R_p = \log(p_2/p_1)$ を定義し、結果の整理に用いた。

図5は、図4において横軸の p を $e\text{-log}p$ 曲線から得られる圧縮降伏応力 p_y で正規化した p/p_y と $\phi'_{\max}$ の関係を示したものである。この図から、いずれの供試体についても p/p_y が1付近から、 $\phi'_{\max}$ の値の減少が見られなくなっていることが分かる。

図6は、単粒子破砕試験から得られた m_r および等方圧縮試験から得られた R_{py} と三軸圧縮試験から得られた R_p の関係を示したものである。珪砂について R_p の値は、確からしい値を求めることが難しいため、ここでは、今回得られたプロットから求められる R_p の値を幅として示している。この図から、 $R_p\text{-}m_r$ と関係および $R_p\text{-}R_{py}$ 関係には、おおむねよい対応関係があると言えそうである。

4 まとめ 本報では、粒径に着目して単粒子破砕試験と等方圧縮試験および三軸圧縮試験を行い、統計分布関数を用いて得られる単粒子破砕特性と圧縮特性およびせん断特性との関連性について検討を行った。その結果、高拘束圧域において、せん断強度が一定値を示す応力レベルは、 $e\text{-log}p$ 曲線の降伏応力とよい対応関係があることが認められた。また、せん断強度の低下を示す応力の範囲は、単粒子の破砕強度の変動性や $e\text{-log}p$ 曲線の折れ曲がりの程度と対応関係が伺えた。

〈参考文献〉(1)中田, 兵動, 足立, 加登, 原田: "石英砂の単粒子破砕特性と一次元圧縮特性", 第33回地盤工学会研究発表概要集(1997)

(2)W. Weibull: "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability.", JOURNAL OF APPLIED MECHANICS, (1951)

(3)R. MCDOWELL, M. D. BOLTON, D. ROBERTSON: "THE FRACTAL CRUSHING OF GRANULAR MATERIALS" J. Mech. Solids, Vol. 44, No. 12, pp2079-2102(1996) (4)中田, 兵動, 児玉, 足立: "広範な拘束圧下における砂の強度異方性について", 第31回地盤工学会研究発表概要集 p 679-p 689(1996)

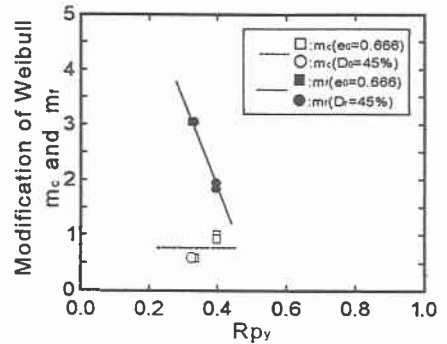


図3 Wiebull 係数と R_{py} 関係

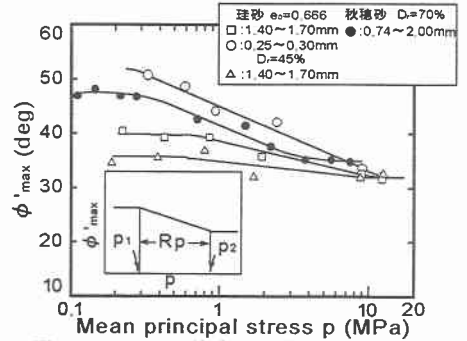


図4 $\phi'_{\max}$ と平均有効主応力関係

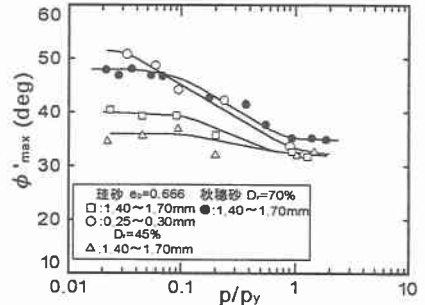


図5 $\phi'_{\max}$ と p/p_y 関係

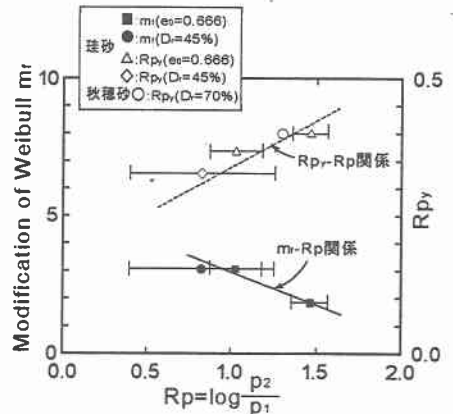


図6 Wiebull 係数および R_{py} と R_p 関係