

地盤材料の単粒子破碎特性

加登文学¹・中田幸男²・兵動正幸³・村田秀一³

¹学生会員 工修 山口大学大学院理工学研究科博士後期課程設計工学専攻
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

²正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

³正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

本研究では、8種類の試料に対し単粒子破碎試験を実施し、砂の単粒子破碎特性に与える粒子の形状、鉱物、および大きさの影響についての考察を行った。その結果、粒子が破碎するときの形態には、何種類かのパターンがあること、また破碎のパターンと粒子の形状、粒子の構成鉱物とは密接に関連していることが明らかとなった。さらに単粒子破碎強度と粒子の大きさや形状とに相関がみられた。

Key Words : single particle crushing, sand, crushing stress, crushing pattern

1. まえがき

しらす、スコリアなどの火山性堆積物、まさ土などの風化残積土、カルカリアス砂、サンゴ礫混じり土などの生物遺骸を起源とする海成堆積物などの材料は粒子が脆弱なため、工学的に遭遇する応力域において粒子が破碎することが知られている。このような材料は破碎性材料と呼ばれ、工学的に多くの問題を包含することから、近年、活発に研究が行われるようになってきた^{1)~9)}。また、大型構造物の基礎周辺は非常に高い応力域となっており、比較的堅固な粒子でも破碎を生じることが考えられる。

粒子破碎は地盤の圧縮性の増加や負のダイレイタンシーの増加、そして、せん断強度の低下を引き起こすことが指摘されている^{10)~12)}。このため、材料の粒子破碎の起こしやすさ(破碎性)、あるいは粒子破碎を起こす応力域を正確に把握する必要がある。また粒子破碎には、角が欠ける、粒子表面が削れる、粒子母体が完全に壊れるなど様々な形態があり、どの程度の破碎が砂の力学特性を変化させるのかを把握する必要もある。そのためこれらの検討を行う上で基礎的な情報として、粒子レベルの破碎の特性を把握することが重要となってくる。

単粒子破碎に関する研究は、粉体工学の分野では古くから行われており、粉碎における古典理論を提唱したRittinger, Kickを始まりとし⁹⁾、特に1900年頃から、固体物理学等の研究分野の急速な発展とともに活発に行われるようになってきた。一方、土質力学の分野では、個々の粒子に作用する応力状態が複雑であるため、一つの粒子の破碎と供試体内の粒子破碎は単純に対応しない⁶⁾という判断から、これまで単粒子破碎特性は重要視されて

こなかった。近年、単粒子破碎に関する研究が行われるようになってきた^{10)~14)}が、まだその数は少なく、有益なデータの蓄積や検討が充分になされているとはいえない。

単粒子破碎試験は粒子単体を対象とした強度試験であり極めて簡単に行える試験といえる。単粒子破碎試験を地盤を構成するそれぞれの粒径ならびに構成鉱物の粒子に対して行うことにより、それぞれの粒子の硬さを知ることが可能となり、材料相互の硬さの比較を精度よく行うことができる。このような理由から単粒子破碎特性は地盤材料の破碎性を表す一つの有効な指標となる可能性があると考えられる。著者ら^{15), 16)}は、供試体内における粒子レベルの破碎の特徴を把握するとともに、単粒子破碎強度との関連性について検討を行ってきた。本研究では、さらに単粒子破碎特性に対し、粒子破碎中の破碎形態と粒子形状、鉱物との関わりについて検討するとともに、強度と変形速度、大きさ、形状との関連性について検討を行った。

2. 試料および試験方法

(1) 実験対象試料

実験に用いた試料は、ガラスビーズ(G.B.)、角張りのあるガラス(A.G.)、石炭灰を主原料とした軽量骨材(L.A.)、フランス北部海岸から採取したカーボネイト砂(Quiou砂)、三河珪砂(シリカ砂)、山口県秋穂町で採取したシリカ系の海砂(秋穂砂)、山口県宇部市で採取したまさ土(宇部まさ土)、そして豊浦砂である。秋穂砂、宇部まさ土は、主に石英、長石で構成されているため、これらの2つの鉱物粒子に対し試験を行った。また、宇部まさ土に

表-1 試料の物性値

試料	粒径(mm)	Gs	試験回数	Roundness	$\sigma_{Roundness}$	
ガラスビーズ	G.B.	0.85~1.0	2.49	100	1.139	0.105
軽量骨材	L.A.	0.85~1.0	0.83	100	1.747	0.207
角張りガラス	A.G.	0.85~1.0	2.51	100	1.629	0.230
Quiou砂	Quiou	1.0~1.18	2.70	30	1.447	0.158
豊浦砂	Toyoura	0.106~0.25	2.64	100	1.428	0.191
秋穂砂	quartz _{Aio}	0.85~2.0	-	120	1.294	0.070
	feldspar _{Aio}		-	120	1.407	0.148
	quartz _{Masado}		-	70	1.506	0.174
まさ土	feldspar _{Masado}	1.4~1.7	-	80	1.536	0.137
	mix _{Masado}		-	60	1.668	0.152
	Silica _{1.4-1.7}		-	100	1.405	0.246
シリカ砂	Silica _{0.6-0.71}	0.6~0.71	2.66	100	1.297	0.121
	Silica _{0.25-0.3}		2.65	100	1.386	0.121

は石英と長石が混じって一つの粒子を構成しているものが確認された。このような粒子は混合粒子 (mix) とし、石英、長石とは区別して試験を行った。表-1に用いた試料の物性値を示す。ここでRoundness (真円度) は次式から得られる値である。

$$Roundness = \frac{R^2}{4\pi A} \quad (1)$$

ここに、 R は粒子を上から見た状態で周囲長であり、 A は粒子の断面積である。実際には、粒子が最も安定するようにおき、上からの投影される像に対して、顕微鏡を用いた画像解析システムを用いて、各々の値を求めている。表中のRoundnessの値は各試料の粒子約50個に対し求めた値の平均である。この真円度の値が1に近いものほど円に近いということ、大きいものほど扁平、もしくは粒子が角張っているか表面が粗いということを表している。したがって、真円度は粒子の形状を評価しているといえる。また、この値は吉村、小川¹⁷⁾の用いている凹凸係数FUの逆数に相当するものである。 $\sigma_{Roundness}$ は各試料の真円度の標準偏差である。 $\sigma_{Roundness}$ は真円度の値の大きいものほど大きくなるという傾向がみられ、粒子形状が複雑なものほど、その試料中に様々な形状の粒子が含まれていることを示している。吉村、小川¹⁷⁾は粒子形状FUの測定の際、20個程度の標本から得られた平均値は、十分にその特徴を表現し得ること、また、統計的な標本抽出理論からも20個は妥当な標本数であることを示している。このことを踏まえると、表中に示した単粒子破碎試験を行った試験回数も単粒子破碎特性を把握する上で適切な数であると考えられる。

(2) 試験装置ならびに試験方法

本研究で行った単粒子破碎試験は上盤を固定し、粒子を配置した下盤を上昇させ粒子を破碎させるものである。載荷板は上下とも鋼製の平板である。軸荷重載荷は、ACサーボモーターを用い、スクリュージャッキを上昇させ変位速度一定のもと行った。また変位の測定は分解能が0.001mmであり、10mmまで測定可能な接触型変位計で行った。荷重は分解能が0.098Nであり最大50×9.8N

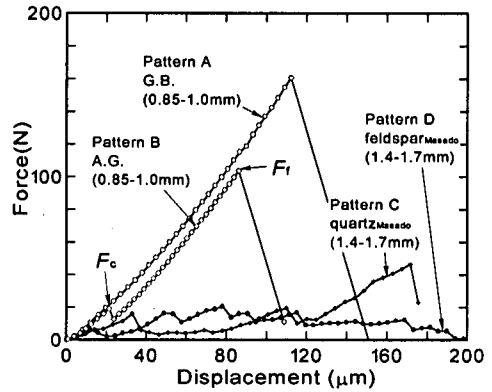


図-1 荷重と変位の関係

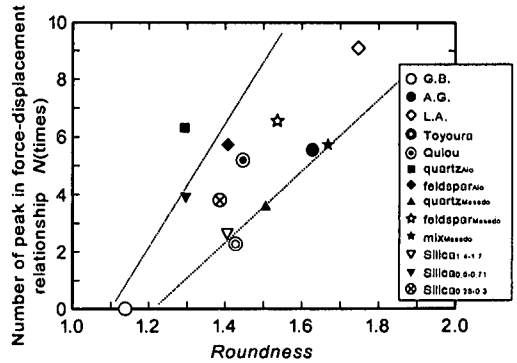


図-2 Nと真円度との関係

まで計測可能なロードセルにより計測を行った。

3. 単粒子破碎特性

(1) 破碎形態に着目した考察

図-1は種々の鉱物及び材料から成る粒子の単粒子破碎試験 (変位速度 0.1mm/min) から得られた代表的な荷重と変位の関係を示すものである。この図から、G.B.以外の試料は、最大のピーク荷重を示す前に、小さな荷重のピークを数回繰り返すことがわかる。この小さなピーク荷重の繰り返しは試験中の観察からその時々、載荷板に接触している粒子の角が破碎するか、粒子内に存在するクラックに沿って粒子の一部が欠けるような破碎に対応していることを確認している。

図-2は各試料の単粒子破碎試験において、荷重が最大値を示すまでのピーク出現の平均回数 N と粒子の形状を表す真円度との関係を示すものである。この図より、真円度の値が1に近いものほど N の値が小さくなる傾向が認められる。すなわち粒子の形状が円に近いものほど、単粒子破碎試験中のピーク荷重の出現回数が少なくなることを示している。

試験中の観察から粒子の破碎には主に図-3に示す

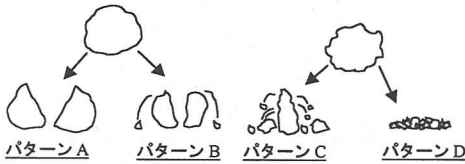


図-3 破砕形態

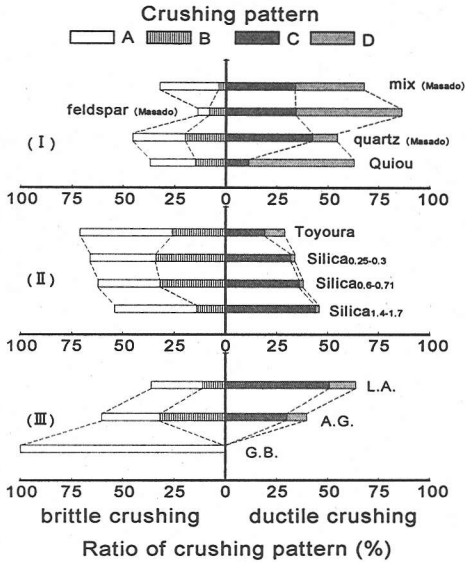


図-4 破砕形態の割合

ような4つのパターンがあることが確認された。
パターンA：荷重が増加しつづけて最大荷重に達すると一気に2, 3個に割れる(割裂する)。
パターンB：数ヶ所角が欠け、最大荷重に達すると2, 3個に割れる。
パターンC：荷重の増加に伴い粒子の端が少しずつ崩れ、粒子の芯のようなものが現れる。
パターンD：粒子の芯のようなものは現れず、荷重の増加に伴い粒子が少しずつ崩れるように破砕する。

また、図-1にそれぞれのパターンに相当する荷重-変位関係を示している。パターンA, Bは荷重増加中の剛性はほぼ等しくパターンC, Dと異なることがわかる。パターンCは前半において極端な荷重の増加が認められないが、ある変位後、明確な荷重増加が現れる。パターンDは実験中、終始明確な荷重の増加が認められない。そこで、パターンA, Bを脆性的な破砕、パターンC, Dを崩れるような、すなわち延性的な破砕と位置付ける。各試料の破砕パターンの割合を(I)風化残積土およびカーボネイト砂(II)石英質の砂、(III)人工材料に分類し、図-4に示す。

この図から、1) G.B.はパターンAの破砕のみを起す、2) シリカ砂においては粒径の大きいものの方が延性的な

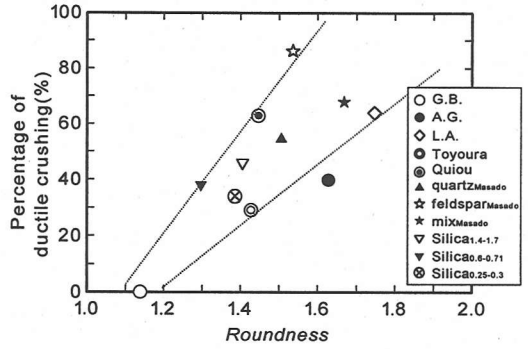


図-5 延性的破砕の割合と真円度との関係

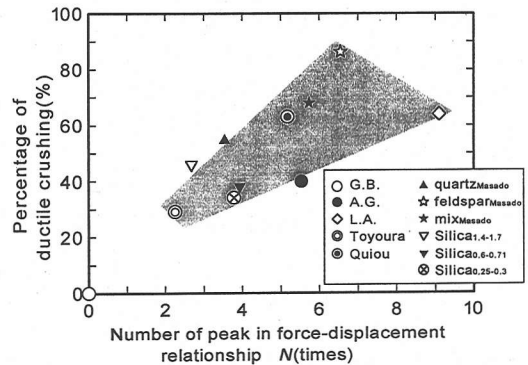


図-6 延性的破砕の割合とNとの関係

破砕の割合が多い、3) 豊浦砂、シリカ砂は石英質であり脆性的な破砕の割合は多いが、これらに比べると風化土である宇部まき土の石英は延性的な破砕の割合が多い、4) 宇部まき土における長石は石英よりも崩れるような破砕の割合が多い、5) カーボネイト系の砂であるQuiou砂は延性的な破砕の割合が多い、ということなどがわかる。これらのことから、単粒子破砕試験における破砕の形態は粒子の大きさ、鉱物組成、さらに風化の程度などにより様々であることがわかる。

図-5は粒子の破砕形態の内粒子が崩れるように破砕する延性的な破砕の割合と真円度との関係である。この図より真円度の値の大きいもの、つまり粒子の形状が角張っている、または表面が粗いものほど延性的な破砕の割合が大きくなっていることがわかる。図-2, 5において真円度の値が大きくなるに従い、点線で示すようにデータが分散しているが、これは表-1に示すように真円度の値が大きいものほど標準偏差が大きくなることに関係があると考えられる。

図-6は最大荷重を示す前のピーク荷重の出現回数Nと破砕形態との関係をまとめたものである。この図から、延性的な破砕の割合の多い試料はピーク荷重の出現回数が多いことがわかる。最大ピーク値前のピーク荷重の

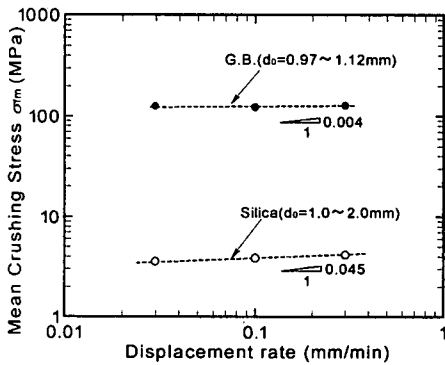


図-7 平均破砕強度 σ_m と載荷速度の関係

回数は粒子の角の数や粒子内の損傷やクラックの数と密接に関係し、回数の多い試料ほどそれらの数が多いと考えられる。逆に、脆性的な破砕の割合の多い試料はピーク荷重の出現回数が少ないことがわかる。例えば、G.B.の結果についてみてみると最大荷重ピーク以外に途中にピークの現れる粒子は一つもない。つまり角や粒子内のクラックに沿った局所的な破砕を起こさず、割裂破砕のみ起こすことを示している。

粒子形状と延性的な破砕を起こす割合に関連性があること、試験中のピーク荷重出現の平均回数 N と延性的な破砕を示す割合に関係があるということは、粒子形状が粒子内の損傷の度合とも関わりを持つことを表している。つまり、単粒子破砕試験を行い、ピーク荷重の出現回数や破砕の形態を知ることにより、粒子の形状や粒子内の損傷の度合をある程度推察することが可能であるといえる。

(2) 単粒子破砕強度特性

図-1に示すような荷重と変位の関係において最初の荷重ピーク点を F_c 、最大ピーク点を F_f と定義し、これら2つの点を単粒子破砕試験から得られる特徴的な荷重値として以下考察を行っていく。

a) 単粒子破砕強度の定義

破砕強度の表示方法については、破壊荷重を粒子体積の2/3乗で除す方法¹⁸⁾、加圧板と粒子の接触面積を直接測定¹⁹⁾、あるいは粒子を14面体と仮定した式により算出し、破壊荷重を除す方法¹⁰⁾などがある。本研究では破壊荷重を粒子の高さの2乗で除す方法²⁰⁾により破砕強度を算出した。以下、算出方法を詳しく示す。

粒子が完全な球と仮定すると、圧縮によって粒子内に生じる引張応力がその粒子の引張強度と等しくなったときに破砕を起こす。すなわち、1回のピーク荷重を示すといえる。粒子内に生じる引張応力は、荷重 F と、粒子径 d_0 により次式によって表される。

$$\sigma = \frac{XF}{d_0^2} \quad (2)$$

ここで、 X は定数であり、その値はBillam²¹⁾によると、 $X=2.0/\pi$ 、平松ら²²⁾によると、 $X=0.7/(\pi/4)$ と定義されている。本研究では試料間における破砕強度の相対的な比較を行うことを目的とすることから、便宜上 $X=1$ とおき、破砕強度とする。すなわち最大ピーク荷重 F_f における最大破砕強度 α_f は次式により求められる。

$$\sigma_f = \frac{F_f}{d_0^2} \quad (3)$$

次に、最初のピーク点 F_c に対応する破砕強度を求める際、 F_c は角の欠けるような破砕に対応しているということ考えると、欠けた角と粒子本体の接合面に引張応力が作用しているといえる。そこで、角の欠ける際に作用する引張応力 σ_c は、接合面の形状を直径 D の円とした時、次式を用いて算出される。

$$\sigma_c = \frac{F_c}{D^2} \quad (4)$$

しかし、実際に欠けた角と粒子本体の接合面を測定することはきわめて困難であり、接合面上に作用する引張力 F_c' を算出することも難しい。そこで本研究では、次式に示すように、 F_c を粒径の二乗で除すことにより、試料全体に対する平均的な破砕強度を求め、これを粒子の角の強度、または粒子内の弱面の強度を表す第一破砕強度 α_c と定義した。

$$\sigma_c = \frac{F_c}{d_0^2} \quad (5)$$

後述するように、この α_c からも各試料の特徴の比較などを行うことができ、単粒子破砕特性を把握する上で有効な指標となることが示されている。

b) 単粒子破砕強度に及ぼす載荷速度の影響

破砕強度の載荷速度依存性に関する研究⁹⁾には、Watsteinによるコンクリート円柱形試験片(7.6 ϕ ×15.2cm, 15.2 ϕ ×30.5cm)に対するもの、小林による数種の岩石の角柱形試験片(35×35×70mm)に対するものなどがあり、高速荷重下での圧縮強度は低速荷重下での圧縮強度に比べ大きい値を示すことや、圧縮強度と載荷速度の関係は両対数上において直線で表されるということを得ている。

図-7はG.B.およびシリカ砂に対し載荷速度 0.03, 0.1, 0.3mm/min (各30個)で行った単粒子破砕試験の結果を平均破砕強度 σ_m と載荷速度との関係に表したものである。いずれも右上がりの関係がみられ、わずかではあるが、圧縮強度の載荷速度依存性が確認された。

c) 単粒子破砕強度に及ぼす粒径の影響

図-8、9は各試料の破砕強度 α_c 、 α_c の平均値 σ_m 、 σ_m と、平均粒径 d_0 との関係それぞれ示したものである。ここで d_0 は、個々の単粒子破砕試験において粒子が上盤

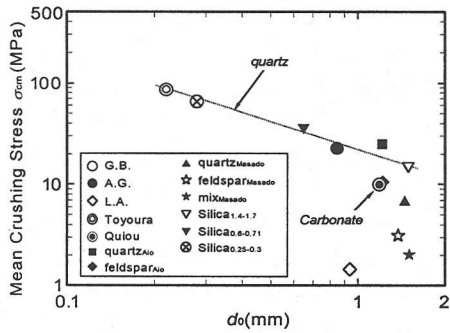


図-8 平均破砕強度 σ_{cm} と平均粒径 d_0 との関係

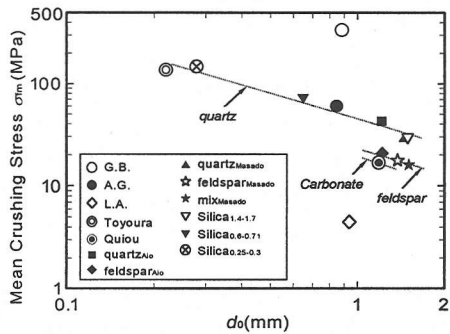


図-9 平均破砕強度 σ_{cm} と平均粒径 d_0 との関係

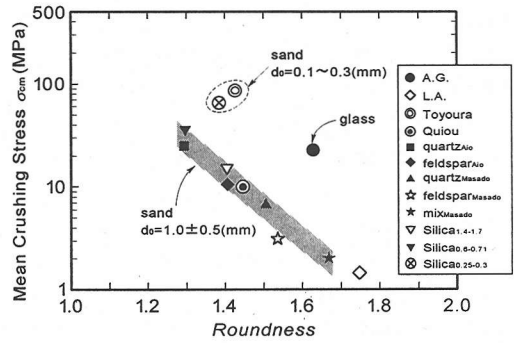


図-10 平均破砕強度 σ_{cm} と真円度との関係

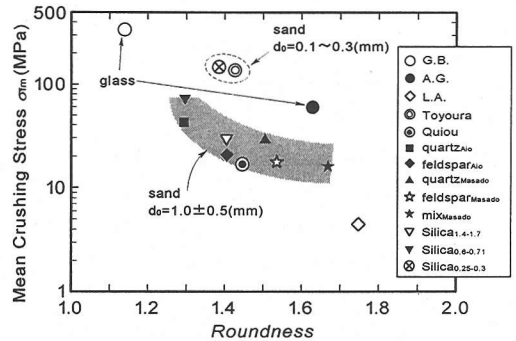


図-11 平均破砕強度 σ_{cm} と真円度との関係

に触れた時の、上盤と下盤との距離を計測することにより得たものである。

粒径の異なる3種類のシリカ砂の結果から、粒径の増加とともにいずれの破砕強度も減少するという関係がみられる。この結果は神田ら²³⁾の行った、広い粒子径範囲における不規則形状粒子の破砕試験の結果や、Braddick²⁴⁾、Billam²¹⁾、Lee²²⁾などの破砕強度の寸法効果に関する研究結果と同様のものとなった。また、図-9中のラインで示すように材質が同じならば破砕強度 σ_{cm} は粒径との間に一義的な関係が存在することがわかる。図-8の破砕強度 σ_{cm} についてみてみると、宇部まき土の石英は他の石英質材料の結果のラインより下方に位置している。このことは、図-4に示すように宇部まき土の石英粒子は延性的な破砕を起こす割合が多いことに関係している。

d) 単粒子破砕強度に及ぼす粒子形状の影響

図-10、11は各試料の σ_{cm} 、 σ_{cm} と、式(1)から得られる真円度との関係を示したものである。これらの関係から、粒径が1mm付近の粒子に着目すると真円度の値の大きいもの、つまり粒子形状が角張っているもの、粒子表面が粗いものほど破砕強度は小さくなるという結果が得られた。また、その関係は図中のゾーンで示すように、 σ_{cm} よりも σ_{cm} の方が明確であるといえる。粒子形状と破砕パターンとに密接な関連があることと併せて考え

ると真円度の値の大きいものは粒子内に存在する損傷やクラックが多いため強度も低くなったものと判断される。

4. 結論

様々な粒状材料を用いた単粒子破砕試験を行い、その特性に与える粒子の形状、鉱物、大きさなどの影響について検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 単粒子破砕試験を行い、荷重のピーク出現の回数や破砕の形態を知ることにより、粒子の形状や粒子内の損傷の度合をある程度推察することが可能である。
- 2) 载荷速度が速くなるほど、単粒子破砕強度は大きくなる。
- 3) 同じ材料の場合、粒径の小さいものほど破砕強度は大きくなる。
- 4) 粒子形状の角張っている、あるいは表面の粗いものほど破砕強度は小さくなる。

今後、土粒子集合体における破砕に対する検討を踏まえ、単粒子破砕特性の工学的利用および破砕性地盤の指標としての利用を検討していきたい。

参考文献

- 1) 安福規之, 田中邦博, 村田秀一, 兵動正幸: 圧縮性の卓越した砂中の杭の先端支持力とその評価, 土木学会論文集, No.505/Ⅲ-29, pp.191-200, 1994.
- 2) 兵動正幸, 荒牧聡隆, 岡林巧, 中田幸男, 村田秀一: 破碎性土の定常状態と液化化強度, 土木学会論文集, No.554/Ⅲ-37, pp.197-209, 1996.
- 3) 三浦清一, 八木一善: 火山灰質粒状体の圧密・せん断による粒子破碎とその評価, 土木学会論文集, No.561/Ⅲ-38, pp.257-269, 1997.
- 4) Hyodo, M., Hyde, A. F. L. and Aramaki, N.: Liquefaction of crushable sand, *Geotechnique*, Vol.48, No.4, pp.527-543, 1998.
- 5) 破碎性地盤の工学的諸問題に関する研究委員会: 破碎性地盤の工学的諸問題に関する研究委員会報告, 地盤工学会, 274p., 1999.
- 6) 三浦哲彦, 山内豊聡: 高拘束圧下における標準砂の排水せん断特性について, 土木学会論文集, No.193, pp.69-79, 1971.
- 7) 三浦哲彦, 山内豊聡: 高い等方圧力を受ける砂の圧縮特性について, 土木学会論文集, No.203, pp.45-52, 1972.
- 8) 三浦哲彦, 山内豊聡: 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, No.260, pp.109-118, 1977.
- 9) 八嶋三郎: 粉碎と粉体物性, ケミカルエンジニアリング・シリーズ10, 培風館, pp.54-149, 1986.
- 10) 福本武明, 原健夫: 粒状体の粒子破碎強度分布に関する研究, 土木学会論文集, No.596/Ⅲ-43, pp.91-99, 1998.
- 11) 児玉信, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一, 足立剛, 加登文学: 砂粒子の破碎特性とせん断中の粒子破碎との関連性について, 第32回地盤工学会研究発表会概要集, No.1, pp.27-28, 1997.
- 12) 日下部伸, 森尾敏, 岡林巧, 兵動正幸, 村田秀一: 砂質土の単粒子破碎と非排水せん断挙動に関する考察, 第32回地盤工学会研究発表会概要集, No.1, pp.663-664, 1997.
- 13) 郭敏, 落合英俊, 安福規之, 大野司郎: 砂の状態量としての単粒子強さの特性とその工学的利用, 第33回地盤工学会研究発表会概要集, No.1, pp.21-22, 1998.
- 14) Galer, M. M., Sasaki, Y. and Hiraga, K.: Time - Dependent Compressibility of Some Decomposed Granites, 破碎性地盤の工学的諸問題に関するシンポジウム発表論文集, pp.35-40, 1999.
- 15) Nakata, Y., Hyde, A. F. L., Hyodo, M. and Murata, H.: A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test, *Geotechnique*, Vol.49, No.5, pp.567-583, 1999.
- 16) Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M. Hyde, A. F. L. and Murata, H.: One-dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength, *Soils and Foundations*, 2001. (printing)
- 17) 吉村優治, 小川正二: 砂のような粒状体の簡易な定量化法, 土木学会論文集, No.463/Ⅲ-22, pp.95-103, 1993.
- 18) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門, 東京大学出版会, pp.153-159, 1971.
- 19) Hobbs, D. W.: A Simple Method for assessing the Uniaxial Compressive Strength of Rock, *Int. J. Rock Mech. Mining. Sci.*, Vol.1, pp.5-15, 1963.
- 20) McDowell, G. R. and Bolton, M. D.: On the micromechanics of crushable aggregates, *Geotechnique*, Vol.48, No.5, pp.667-679, 1998.
- 21) Billam, J.: Some aspects of the behaviour of granular materials at high pressures, *Proceeding of the Rascoe Memorial Symposium*, Cambridge, pp.69-80, 1971.
- 22) 平松良雄, 岡行俊, 木山英朗: 非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験, 日本鉱業会誌, Vol.81, No.932, pp.1024-1030, 1965.
- 23) 神田良照, 八嶋三郎, 下飯坂潤三: 不規則形状粒子の破碎における寸法効果とエネルギー法則, 日本鉱業会誌, Vol.86, No.992, pp.847-852, 1970.
- 24) Braddick, H. J. J.: The physics of experimental method, Chapman and Hall, London, 1963.
- 25) Lee, D. M.: The angle of friction of granular fills, Ph.D. dissertation, University of Cambridge, 1992.

(2000.5.1 受付)

GEOMATERIAL SINGLE PARTICLE CRUSHING CHARACTERISTICS

Yoshinori KATO, Yukio NAKATA, Masayuki HYODO and Hidekazu MURATA

Single particle crushing tests have been carried out on a number of different component minerals in order to investigate the influence of particle shape, size and mineralogy on the nature of the particle crushing. Several patterns of particle crushing were identified from the data. These were shown to be related to particle shape and mineralogy. A close correlation was found between particle crushing strength and corresponding shape and size.