

破碎性材料の粒子特性と一次元圧縮特性

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 山口大学工学部助教授 工学部社会建設工学科 (同上)

³正会員 工博 山口大学工学部教授 工学部社会建設工学科 (同上)

破碎性材料の粒子特性や圧縮特性を把握するため、4種類の破碎性材料と、その比較として2種類の石英質の砂を用い、顕微鏡による粒子形状の画像処理、単粒子破碎試験、一次元圧縮試験を行った。その結果、破碎性材料の粒子特性として、粒子形状が石英質の砂に比べ複雑であること、単粒子破碎強度の分散が大きいことなどを確認した。そして、一次元圧縮試験の結果から、粒子強度の高い石英質の砂に比べ、破碎性材料の降伏応力は低く、それ以下の応力域においても高い圧縮性を示すことがわかった。さらに、一次元圧縮降伏応力は単粒子破碎強度と関連があること、圧縮曲線の曲率は粒度分布や粒子形状に依存することが明らかとなった。

Key Words : crushable soils, one-dimensional compression, single particle crushing, shape of grains

1. まえがき

土質力学、地盤工学の分野では砂の粒子は破碎しないものとして取り扱われているところが多いが、破碎により引き起こされる力学挙動の変化は古くから指摘されている。例えば三浦・山内¹⁾³⁾は豊浦砂の等方圧縮試験より、高圧下になると粘性土の圧密降伏応力に相当する折れ曲がり点を持つ e - $\log p'$ 曲線が求まり、この折れ曲がり点より大きな応力レベルで生じる塑性的な体積圧縮および時間依存性挙動は、主として粒子破碎によるものであると述べている。また、広範な応力域における排水せん断試験より砂のせん断強度の拘束圧依存性と粒子破碎との関連性についてまとめている。さらに多くの研究者⁴⁾により、しらす、スコリアなどの火山性堆積物、カーボネイト砂(炭酸カルシウム成分 CaCO_3 を多く含んだ砂)や珊瑚礫混じり土などの生物遺骸を起源とする海成堆積物、まさ土などの風化残積土は、上述したような力学挙動の変化が低い圧力域で容易に起こることが指摘されている。このような材料は通常の設計、施工で対象とする土破りや載荷により発生する応力域において、顕著な粒子破碎を伴うことから破碎性材料と呼ばれる⁵⁾。近年、破碎性材料を念頭に置いた、粒子破碎が力学特性に及ぼす影響に対する研究が活発に行われ、工学的な問題との関連性が議論されるようになってきた⁶⁾¹²⁾。

破碎性材料を対象とする場合、工学的に重要な問題として高い圧縮性が挙げられる。圧縮性は地盤の沈下と

直結した問題であり、沈下量予測のために圧縮降伏応力などの圧縮特性を把握しておくことは重要なことである。また圧縮性の卓越した材料はピーク強度を発揮するまでに大きな体積変化を生じるため、従来の支持力公式では的確に表現されないという問題もある^{8),9)}。

水平地盤上の基礎や盛土の直下は水平方向の変位が抑制されており、地盤は K_0 状態すなわち一次元圧縮条件下にある。よって地盤の沈下問題を考える際、一次元圧縮条件下における圧縮特性を把握しておくことは重要なことである。砂の一次元圧縮特性に関する研究は、古くは Terzaghi and Peck¹³⁾ に始まり、現在までにいくつかの研究¹⁴⁾¹⁹⁾ が行われてきた。破碎性材料を対象とした圧縮特性に関する研究には、気乾状態のカーボネイト砂やまさ土を用いた等方圧縮特性⁹⁾、火山灰質土を用いた一次元圧縮および等方圧縮特性¹⁰⁾、しらすの一次元圧縮特性¹¹⁾、石灰質砂を用いた一次元圧縮特性の時間依存性¹²⁾に関する研究などが挙げられる。その中で、圧縮曲線に現れる変曲点は砂粒子の破碎によることや、その応力域は初期の間隙比に依存することなどが明らかにされている。また、これらの研究においてはもっぱら圧縮性と破碎性との関連性について試験後の粒子破碎量を中心に議論がなされている。

一方、破碎性材料の粒子は、火山からの噴出物(主に火山ガラス)や生物遺骸、または岩石の風化物などが主であるため、河川の運搬・分級作用により堆積した砂の、粒子表面の脆弱な部分が削り取られ、丸みを帯びた

表-1 試料の物性値

Sample	d_c (mm)	d_{50} (mm)	U_c	G_s	e_{max}	e_{min}
Silica _{0.18-2.0}	0.18~2.0	0.74	2.20	2.655	0.936	0.588
Silica _{2.0}	~2.0	0.20	9.91	2.639	0.770	0.280
Chiibishi	0.075~2.0	0.61	2.40	2.821	1.574	0.983
Quiou	0.075~2.0	1.11	2.30	2.700	1.431	0.915
Shirasu	~2.0	0.18	11.7	2.489	1.494	0.775
Shirasu _{cut}	0.075~2.0	0.42	3.38	2.307	1.551	1.027
Masado	~2.0	0.51	22.4	2.587	1.353	0.811
Glass	0.85~1.0	0.93	1.08	2.490	0.699	0.600
Toyoura	0.106~0.25	0.20	1.33	2.636	0.977	0.609

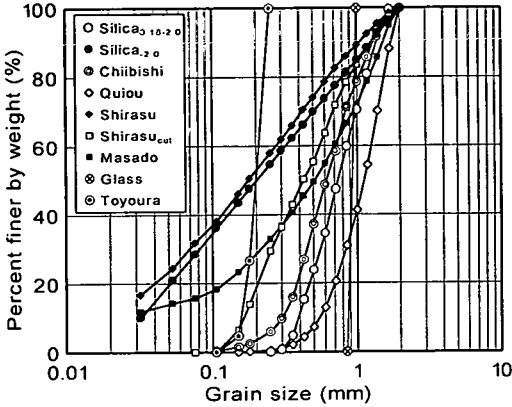


図-1 粒径加積曲線

粒子に比べ、粒子の形状が複雑であることが指摘されている⁴⁾。

これまでに著者ら^{20), 21)}は主に単一粒径のシリカ砂を用いた一連の一次元圧縮試験を行い、降伏応力付近における粒子破碎の状況を把握し、さらに単粒子破碎強度との関連性について検討を行った。しかしながら、粒子の強度や形状などを考慮した上で、破碎性材料の圧縮性を明らかにする検討は、十分に行われていないのが現状である。本研究は4種類の破碎性材料、2種類の石英質の砂およびガラスビーズを用いて一次元圧縮試験を行い、その特性の違いをそれぞれの材料の間隙比、粒度分布、粒子強度、粒子形状などに着目し観察を行うものである。

2. 材料の粒子特性

(1) 粒度分布と間隙比

用いた試料の基本的な物理的性質は表-1に示すとおりである。2種類のシリカ砂は、それぞれ粒径0.18~2.0mmのもの(Silica_{0.18-2.0})と2mm以下細粒分を含むもの(Silica_{2.0})に粒度調整された三河珪砂である。チイビシ砂(Chiibishi)、キュー砂(Quiou)は、それぞれ沖縄およびフランスで採取したカーボネイト砂である。しらすは鹿児島県で採取した1次しらすであり、細粒分を含む

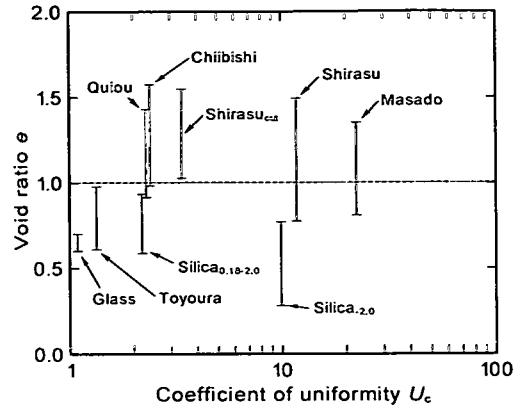


図-2 間隙比の範囲($e_{min} \sim e_{max}$)と均等係数 U_c

もの(Shirasu)と細粒分を除去したもの(Shirasu_{cut})である。まさ土(Masado)は宇部市で採取したものである。ガラスビーズ(Glass)は球形で均質な材料であり、豊浦砂(Toyoura)は標準的な石英質砂である。この中で一般に破碎性材料と呼ばれるものは、カーボネイト砂のChiibishi, Quiou, 火山性堆積物のShirasu, Shirasu_{cut}, 花崗岩の風化残積土のMasadoである。用いた試料の粒径加積曲線を図-1に示す。いずれの材料も2mm以上の礫分を取り除いている。


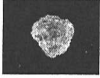


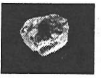




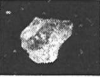


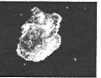

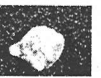


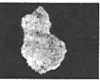





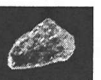


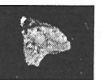


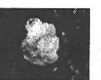











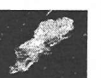
図-2に各試料が取り得る間隙比の範囲($e_{min} \sim e_{max}$)と均等係数 U_c の関係を示す。石英質の材料に比べ、2つのカーボネイト砂は同等の均等係数であるが間隙比が大きいこと、ShirasuやMasadoは均等係数が大きいにもかかわらず、間隙比が大きいことが特徴的である。また図より、最大間隙比が1を大きく超えていることが破碎性材料と判断する一つの指標として挙げられる。

(2) 粒子形状

破碎性材料の特徴である粒子形状の複雑さを定量的に評価するために、それぞれの試料の粒子に対し顕微鏡による観察を行った。観察は、平らな面に最も安定する状態に粒子をおき、顕微鏡を用いた画像解析システムにより、上から投影される像に対して行った。撮影された画像の画素は640×480ピクセルである。対象とした粒子の大きさはSilica_{2.0}, Shirasu, Toyouraでは平均粒径 d_{50} が含まれるJISふるい二目盛分、その他の試料においてはJISふるい一目盛分に相当するものである。

粒子形状の表現方法には、種々のものがあるが、ここでは、真円度(Roundness coefficient: R_c)と縦横比(Aspect ratio: A_r)を用いている。後述するように、真円度は表面積の計算における形状係数として有効であること、また縦横比は真円度に影響を与える値であることからこれらの値を用いた。真円度の値は次式で表される。

表-2 各試料粒子の顕微鏡写真および縦横比 A_r と真円度 R_c

Sample	Silica _{0.18-2.0}	Silica _{2.0}	Chiibishi	Quiou	Shirasu	Shirasu _{cut}	Masado	Toyoura
d (mm)	0.71~0.85	0.18~0.25	0.6~0.71	1.0~1.18	0.18~0.25	0.355~0.425	0.5~0.6	0.18~0.25
d_s (mm)	0.74	0.20	0.61	1.11	0.18	0.42	0.51	0.20
Av.	(1.28, 1.16)	(1.37, 1.21)	(1.83, 1.50)	(1.51, 1.34)	(1.54, 1.35)	(1.66, 1.40)	(1.44, 1.25)	(1.45, 1.20)
①	81%  (1.11, 1.08)	51%  (1.08, 1.09)	29%  (1.07, 1.03)	29%  (1.28, 1.10)	31%  (1.23, 1.09)	20%  (1.22, 1.11)	34%  (1.08, 1.09)	58%  (1.32, 1.10)
②	11%  (1.29, 1.31)	27%  (1.22, 1.23)	8.9%  (1.18, 1.34)	27%  (1.28, 1.34)	28%  (1.38, 1.29)	13%  (1.38, 1.32)	32%  (1.23, 1.30)	10%  (1.29, 1.23)
③	5.6%  (1.62, 1.26)	22%  (1.66, 1.35)	22%  (1.81, 1.24)	16%  (1.77, 1.30)	14%  (1.77, 1.30)	10%  (1.84, 1.36)	26%  (1.83, 1.30)	27%  (1.66, 1.22)
④	0	0	1.1%  (1.16, 1.57)	7.8%  (1.49, 1.75)	4.4%  (1.13, 1.41)	10%  (1.07, 1.64)	2.3%  (1.45, 1.52)	1.1%  (1.28, 1.54)
⑤	2.2%  (1.65, 1.84)	0	20%  (2.30, 1.56)	20%  (1.80, 1.41)	18%  (2.02, 1.54)	47%  (2.37, 1.57)	6.7%  (1.85, 1.48)	4.4%  (2.32, 1.54)
⑥	0	0	2.2%  (1.19, 2.47)	0	2.2%  (1.23, 2.06)	0	0	0
⑦	0	0	17%  (3.32, 2.21)	1.1%  (2.43, 2.09)	2.2%  (3.05, 2.09)	0	0	Percentage picture (A_r, R_c)

$$R_c = \frac{L^2}{4\pi A} \quad (1)$$

ここに、 L は投影粒子の周囲長であり、 A は投影粒子の断面積である。真円度は 1 に近いほどその形状は円に近づき、大きくなるほど形状が角張っている、もしくは扁平であることを表す値である。また、吉村・小川²²⁾

が導入した凹凸係数 FU の逆数である。

次に、縦横比は次式で定義される。

$$A_r = \frac{b}{a} \quad (b \geq a) \quad (2)$$

ここで、 b は投影粒子の相当楕円（投影粒子と同面積かつ一次、及び二次モーメントの等しい楕円）の長軸長さ、 a は短軸長さである。

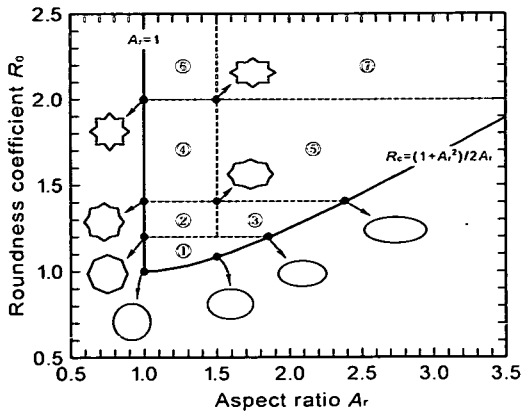


図-3 真円度 R_c と縦横比 A_r による粒子形状図表

楕円の面積を " $\pi \times (a/2) \times (b/2)$ ", 周囲長を " $\pi \times \sqrt{(a^2 + b^2)}/2$ " とすると, 式(1), (2)より楕円における真円度 (R_c)_{ellipse} と縦横比の関係は次式で表される.

$$(R_c)_{\text{ellipse}} = \frac{1 + (A_r)^2}{2(A_r)} \quad (3)$$

図-3は, 真円度 R_c と縦横比 A_r により粒子形状を表すことを試みたものである. 図-3中の $A_r=1 (R_c \geq 1)$ で表される直線は投影粒子形状の境界線となり, 曲線は式(3)から得られる楕円に対する結果を示したものである.

真円度は粒子の角張りや扁平さにより変化する指標である. そのため真円度が等しくとも, その形状は全く異なる場合がある. 真円度と縦横比の関係を軸にもつ座標で表すことにより粒子の形状は同定されたと考えられる. 図-3中にはこの座標の中における粒子形状のイメージを示している.

各試料の平均粒径に相当する粒子約 100 個を抽出し, それぞれの縦横比と真円度を調べて分類した. 表-2は, 図-3に示す領域①~⑦に存在する粒子の割合と代表的な顕微鏡写真, 及びその写真の粒子の縦横比, 真円度をまとめたものである. また, 表中には各試料の縦横比と真円度の平均値も示している.

ここで, 領域①~⑦の区分は破碎性材料と非破碎性材料の特徴が明確となるように以下の手順で行う. まず Silica_{2.0}の結果を基準として, ①に Silica_{2.0}の観察結果全体の約 50%, ②, ③にそれぞれ約 25%の結果が存在するように区分する. さらに②と③の境界である $A_r=1.5$ と $R_c=2.0$ により領域④~⑦を区分する. また, 本研究で行った観察結果の範囲では図-3中の楕円の曲線よりも下側の結果は得られなかった.

表-2の粒子形状の観察結果より以下のようなことが特徴的な点として挙げられる. 1) 石英質の材料である

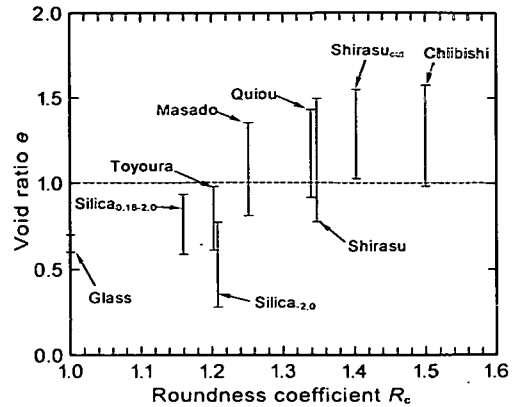


図-4 間隙比の範囲($e_{\min} \sim e_{\max}$)と真円度 R_c との関係

Silica_{0.18-2.0} と Toyoura は①に 50%以上の結果が含まれており, ②, ③を含めるとほとんど全ての結果が含まれている. 2) 破碎性材料の結果においても①の領域に 20~34%の結果が含まれており, 破碎性材料の粒子全てが複雑な形をしているわけではない. 3) Masado は①~③の領域に 90%以上の粒子が含まれており, 他の破碎性材料よりも粒子形状が単調である. 4) カーボネイト砂である Chiibishi, Quiou の④, ⑥に存在する粒子は特異な形状を有しており, 角張りが少なく滑らかである. それに対し, Shirasu や Shirasu_{cut} の粒子は粒子の角が鋭利に尖っている. 5) Chiibishi はサンゴの死骸の枝部分が多く含まれているため⑦に存在する粒子が 17%と, 他の材料に比べ非常に多い.

また, 本研究で用いた試料を粒子形状の観点から判断すると, ①以外の領域に 50%以上の粒子が含まれる材料は破碎性材料となる.

図-4は各試料が取り得る間隙比の範囲 ($e_{\min} \sim e_{\max}$) と真円度の平均値との関係を示すものである. 真円度の値が大きい材料ほど間隙比は大きい値となっているのが特徴的である. 真円度の値が大きいということは, 粒子が角張っている, または扁平であることを示している. 粒子の角張りは粒子相互の移動を妨げ, そのため粒子形状が複雑なものほど緩い初期構造ができると考えられる. また, 扁平な粒子はその重なり合いの方向によっては大きな間隙を有しやすいと考えられる. そのような意味からも, 破碎性材料の間隙比が大きい理由の一つは, 粒子形状の複雑さであると結論付けられる.

(3) 単粒子破碎強度

それぞれの材料を構成している砂粒子に対し単粒子破碎試験^{21), 23), 24)}を行った. 単粒子破碎試験は粒子を下盤に最も安定する方向に配置し, 上盤を下降させ粒子を破碎させる試験である. 試験中の荷重は, それぞれの

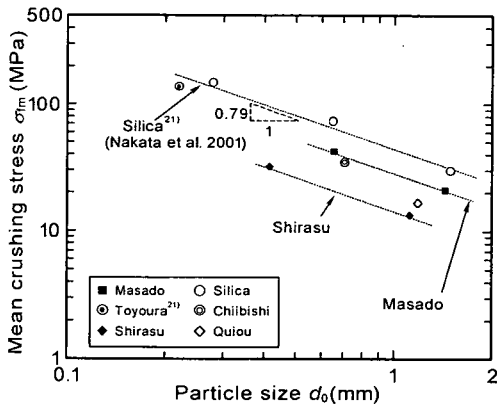


図-5 単粒子破砕強度 σ_{fm} と粒径 d_0 との関係

載荷版が平板であるため、上下方向の2点から粒子に作用する。また、荷重は測定精度が $9.81 \times 10^{-3} \text{N}$ であり最大 $4.91 \times 10^2 \text{N}$ まで計測可能なロードセルにより、変位は測定精度 $1.00 \times 10^{-3} \text{mm}$ 、最大 2.00mm まで計測可能な非接触型変位計によりそれぞれ計測を行った。すべての試験中の荷重と変位は自動計測により行った。

図-5は、単粒子破砕強度 σ_{fm} と粒径との関係をまとめたものである。ここで、 σ_{fm} はそれぞれの試料に対する単粒子破砕試験から得られる最大破砕強度 $\sigma_f^{21), 23), 24)}$ の平均値である。 σ_f は次式から得られる。

$$\sigma_f = \frac{F_f}{d_0^2} \quad (4)$$

ここで、 F_f は試験中の最大荷重、 d_0 は粒子の初期高さであり、これを粒径とみなす。

σ_{fm} は同一材料でも粒子サイズが大きくなるほど低くなる傾向があり、また、同じ粒子サイズの強度を比較すると、石英質の材料に比べ、破砕性材料と呼ばれるカーボネイト砂や Shirasu, Masado は単粒子破砕強度が低いことがわかる。

シリカ砂を用いた実験結果²¹⁾から、単粒子破砕強度 σ_{fi} と粒径 d_i の関係は次式で表される。

$$\sigma_{fi} = B d_i^{-0.79} \quad (5)$$

ここで、 B は $d_0=1.0 \text{mm}$ の単粒子破砕強度である。

図-5よりデータは少ないが、各試料共に平行な直線関係が存在し、式(5)の関係は Shirasu や Masado に対しても概ね適用できると考えられる。

図-6は、粒径 $d=0.6 \sim 0.71 \text{mm}$ の粒子に対する単粒子破砕試験による正規化破砕強度(粒子個々の破砕強度 σ_f をその試料の平均破砕強度 σ_{fm} で正規化したもの)の頻度分布であり、Silica_{0.18-2.0}と Chibishi についてまと

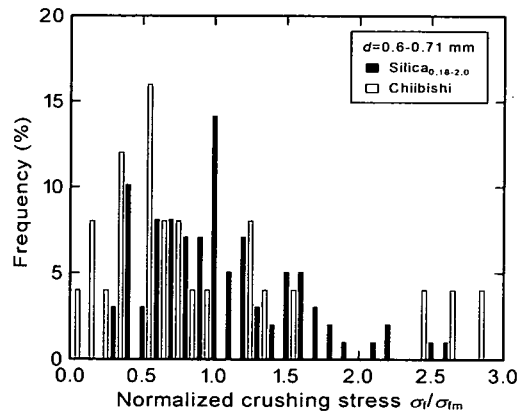


図-6 正規化破砕強度 σ_f/σ_{fm} の頻度分布

めたものである。この図より、Silica_{0.18-2.0}においては $\sigma_f/\sigma_{fm}=1$ 、すなわち平均値付近に多く分布しているが、Chibishiの強度は広範囲に分布していることが認められる。

粒子の強度は、粒子サイズ、形状、構成鉱物、材料内の欠陥(クラック)などによって大きく変動する^{24), 25)}。したがって、粒子の強度を表す場合、強度の平均値の表示とともに、そのばらつき(分散)を併記することが重要と思われる。そこで粒子サイズに起因した破砕強度の変動と、粒子サイズは等しいが粒子形状や構成鉱物の違いなどに起因した破砕強度のばらつきをそれぞれ独立した確率変数 X, Y と考え、それぞれの分散について以下考察する。

まず粒子サイズに起因した破砕強度の分散について考える。粒子集合体の単位面積に応力が作用する場合、粒径 d_i の粒子に作用する荷重はその粒子の断面積割合に比例する。また、その断面積割合は土粒子の比重が粒径によって変化しないとすると粒径 d_i の粒子の重量割合と等しくなる。したがって、粒子サイズに起因した破砕強度の分散 $V(X)$ は、確率変数 $X (= \sigma_{fi}/\sigma_{fm}')$ について、その粒度分布より得られる粒径 d_i の残留率を p_i として次式で与えられる。

$$V(X) = \sum_{i=d_{\min}}^{d_{\max}} \left(\frac{\sigma_{fi}}{\sigma_{fm}'} - E(X) \right)^2 p_i \quad (6)$$

ここで σ_{fi} は、式(5)により定義される。 σ_{fm}' は粒子に作用している平均応力であり次式で定義される。

$$\sigma_{fm}' = \sum_{i=d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_{fi} p_i \quad (7)$$

また $E(X)$ は σ_{fi}/σ_{fm}' の平均値であり次式で与えられる。

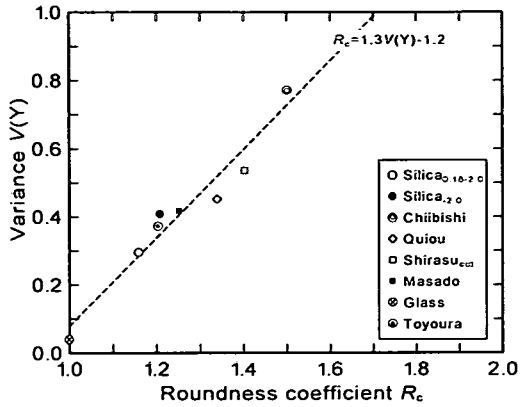


図-7 $V(Y)$ と真円度 R_c との関係

$$E(X) = \sum_{i=d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{\sigma_{fi}}{\sigma_{fm}} p_i \quad (8)$$

次に、一定の粒子サイズで粒子形状や構成鉱物などの違いによる影響を調べるために、 d_{50} の粒径の粒子に対し行った結果について考える。

破碎強度の確率変数 Y ($=\sigma_{fi}/\sigma_{fm}$) について、その分散 $V(Y)$ は次式で与えられる。

$$V(Y) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\sigma_{fj}}{\sigma_{fm}} - E(Y) \right)^2 p_j \quad (9)$$

ここで σ_{fj} 、 σ_{fm} は同一サイズの粒子に対し得られた各粒子の破碎強度、およびそれらの平均値をそれぞれ示す。 n は試験個数であり、 p_j は全試験個数から1個を抽出する確率であり、 $1/n$ となる。平均 $E(Y)$ は次式で与えられ、ここでは $E(Y)=1$ となる。

$$E(Y) = \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_{fj}}{\sigma_{fm}} p_j (=1) \quad (10)$$

それぞれの確率変数 X 、 Y は互いに独立であると仮定して、全体としての粒子強度のばらつきは次式により表される。

$$V(X+Y) = V(X) + V(Y) \quad (11)$$

図-7は同一粒子サイズの強度の分散 $V(Y)$ と粒子形状を表す真円度との関係を示したものである。この図より、真円度 R_c と分散 $V(Y)$ の間には右上がりの線形関係がみられ、真円度が大きい、つまり粒子形状が複雑なものほど同一サイズの粒子に対する粒子破碎強度のばらつきは大きくなるのがわかる。

Weibull²⁶⁾は、単一ブロック要素の引張り試験から、ある応力 σ でブロックが破碎しない確率 P_s は次式で表されることを示している。

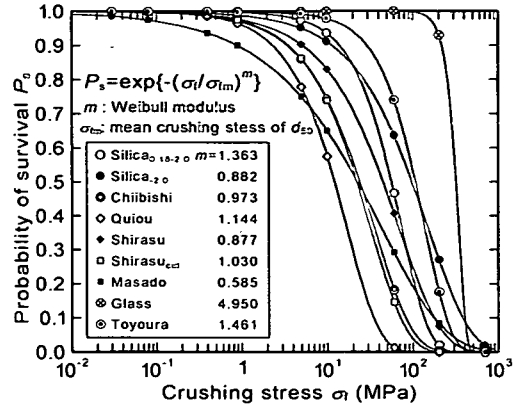


図-8 σ_f において粒子が破碎しない確率 P_s

表-3 単粒子破碎強度の分散と Weibull 係数

Sample	$V(X)$	$V(Y)$	$V(X)+V(Y)$	Weibull m
Silica _{0.18-2.0}	0.137	0.296	0.432	1.405
Silica _{2.0}	0.896	0.409	1.306	0.914
Chiibishi	0.248	0.772	1.020	0.993
Quiou	0.195	0.452	0.647	1.179
Shirasu	1.225	no data	1.225+	0.934-
Shirasu _{cut}	0.319	0.537	0.856	1.058
Masado	5.253	0.418	5.671	0.626
Glass	0.003	0.041	0.044	5.000
Toyouura	0.021	0.372	0.392	1.470

$$P_s = \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right\} \quad (12)$$

ここで、 σ_0 は基準強度、 m は強度の均一性を表す係数であり、その値が大きいものほど均一であることを示す。また、式(12)で示される Weibull 分布における分散 V' は次式により定義される。

$$V' = \Gamma \left(1 + \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (13)$$

ここで Γ はガンマ関数である。

式(11)による分散 $V(X+Y)$ と V' を等価とみなすことにより、Weibull 係数 m が得られる。この Weibull 係数 m と式(12)における基準強度を平均粒径の単粒子破碎強度 σ_{fm} とし、ある強度における粒子が破碎しない確率 P_s を求めると図-8の関係が得られる。このように Weibull 係数を用いることにより単粒子破碎強度のばらつきを応力に対する関数として表すことが可能となる。

この図より、Glassは200MPa~300MPaの破碎応力において多くの粒子が破碎すること、Chiibishi、Quiouの曲線形状はToyouuraのそれと類似しているが、破碎強度は低いこと、細粒分を含む Shirasu や Masado

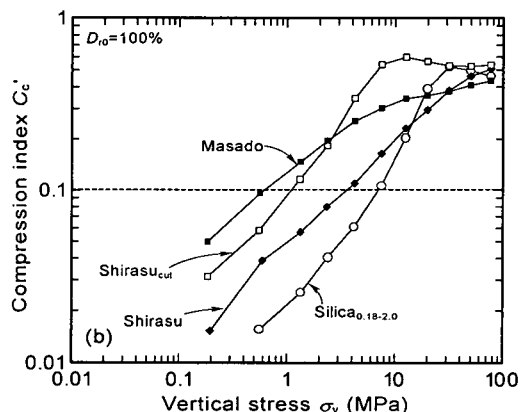
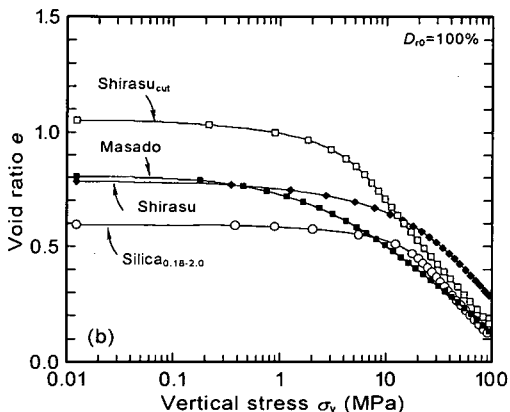
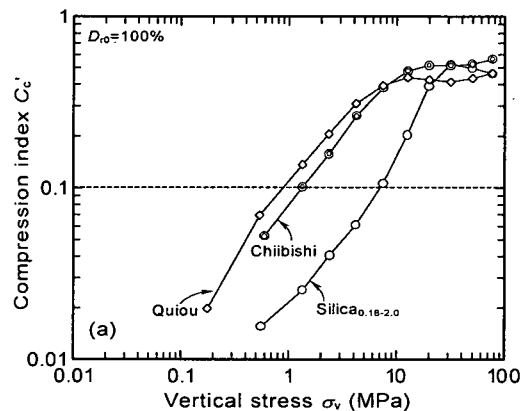
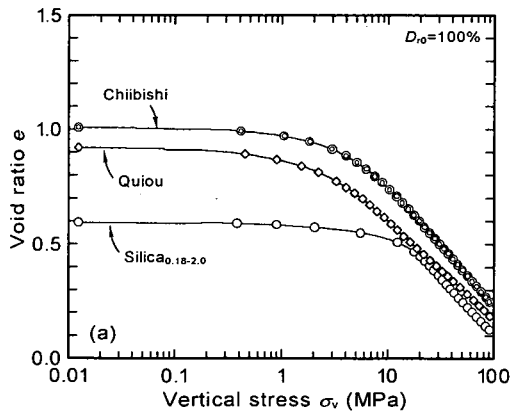


図-9 間隙比 e と鉛直応力 σ_v との関係

図-10 圧縮指数 C_c と鉛直応力 σ_v との関係

の破碎強度は、1MPa 以下の低い領域から 100MPa 以上の領域に至る、広い範囲で分布していることなどがわかる。

各材料の $V(X)$, $V(Y)$, $V(X+Y)$, および Weibull 係数 m を表-3 に示す。

3. 破碎性材料の一次元圧縮特性

(1) 一次元圧縮挙動

一次元圧縮試験^{20), 21)} は直径 50mm のリング内に、高さ 10mm で所定の相対密度あるいは間隙比を目標に供試体を作成し、載荷速度 0.1mm/min で鉛直荷重を漸増させることによって行った。荷重は測定精度 6.42×10^4 N で最大 1.96×10^5 N まで計測可能なロードセルにより、変位は測定精度 1.00×10^{-3} mm で、最大 5.00mm まで計測可能な接触型変位計により計測を行った。試験中の荷重と変位はコンピューターにより自動計測可能なものとした。

図-9(a), (b) は相対密度 100% の供試体に対して行った一次元圧縮試験の結果を間隙比と鉛直応力との関係で表したものである。図-9(a) はカーボネイト砂の Chiibishi と Quiou, 図-9(b) には Shirasu と Masado, および細粒分を取り除いた Shirasu_{cut} の結果を示した。また、図-9 中には比較として Silica_{0.18-2.0} の結果を同時に示してある。図-9(a) から、カーボネイト砂は Silica_{0.18-2.0} と同様、ある応力域において急激に間隙比が減少している。しかしその応力域は Silica_{0.18-2.0} が 20MPa 付近であるのに対し、カーボネイト砂は 5MPa 付近と低い。一方、図-9(b) の細粒分を多く含んでいる Shirasu や Masado は急激な降伏は示さず、応力の増加に伴い徐々に間隙比が減少する挙動を示し、降伏点不明瞭である。しかし、細粒分を取り除いた Shirasu_{cut} の圧縮曲線は 5MPa 付近で急激に間隙比が減少しており、図-9(a) で示したカーボネイト砂と類似した挙動となっている。このような間隙比の変化は地盤の沈下と密接に関係しており、圧縮特性を検討する上で、降伏応力だけでなく、降伏応力までの間隙比の減少量(沈下量)も材料によっては無視できないことを示している。

表4 一次元圧縮試験結果

Sample	D_{10} (%)	e_0	σ_v (MPa)	C_c'	$(\sigma_v)_y$ (MPa)	R'
			at $C_c'=0.3$	at $\sigma_v=90$ MPa	by Casagrande	
Silica _{0.18-2.0}	98.3	0.594	16.3	0.485	17	0.35
			48.1	0.486	11	0.41
Silica _{2.0}	100	0.280	92.7	0.275	49	0.67
Chiibishi	95.8	1.008	5.03	0.597	5.8	0.54
			46.0	0.619	2.3	0.57
Quiou	99.1	0.920	3.96	0.488	3.4	0.63
			48.7	0.500	1.2	0.70
			83.0	0.475	2.1	0.63
Shirasu	98.8	0.784	19.5	0.547	17	0.73
			45.4	0.584	8.0	1.31
			77.1	0.539	11	0.78
Shirasu _{cut}	95.2	1.052	3.93	0.545	4.1	0.51
			70.4	0.553	3.1	0.53
Masado	101	0.807	7.30	0.429	3.8	1.12
Glass	100	0.600	25.0	0.428	24	0.10
Toyoura	98.3	0.615	30.1	0.588	34	0.33

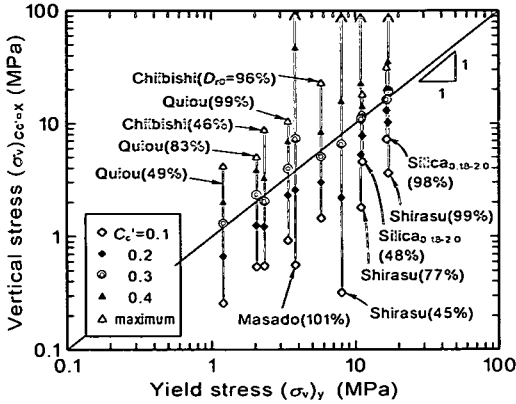


図-11 キャサグランデの方法で求めた圧縮降伏応力とある圧縮指数を示した時の鉛直応力

図-10(a), (b)は次式から得られる $e-\log \sigma_v$ 曲線の接線勾配である圧縮指数 C_c' と鉛直応力との関係を両対数表示によりまとめたものである。

$$C_c' = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_v} \quad (14)$$

図-10(a)のカーボネイト砂、図-10(b)の細粒分を取り除いた Shirasu_{cut}、および Silica_{0.18-2.0}の結果をみると、圧縮指数の値は応力の増加に対し直線的に増加し、Silica_{0.18-2.0}では30MPa付近、カーボネイト砂や細粒分を取り除いた Shirasu_{cut}では10MPa付近からはほぼ一定の値となる様子が観察できる。一方、図-10(b)の細粒分を含む Shirasu と Masado の場合、圧縮指数の増加の割合が他と比べて小さく、終始漸増しており100MPaの载荷までは一定とはならない様子が認められる。しかし実際には間隙比が0以下とはなり得ないことを考えると圧縮指数の値は、ある応力域で最大値となり、その後応力の増加と共に減少していくと考えられる。また、カーボネイト砂、Masado、Shirasuの圧縮指数は総じて Silica_{0.18-2.0}のそれに比べ10MPa以下の低応力域において高い値を示していることがわかる。これは破碎性材料の粒子形状の複雑さに起因した高い間隙比によるものと考えられる。しかし50MPaを超える高い応力域では、いずれの材料の圧縮指数の値も0.5~0.6付近の値となっており、非常に高い応力域における砂の圧縮性は粒子の強度や粒度分布、あるいは粒子形状などに依存していないといえる。

(2) 一次元圧縮特性を表すパラメーター

一般的に圧縮降伏応力を決定する場合、Casagrandeの方法に代表される図解法が用いられる。

図-11に図-9の $e-\log \sigma_v$ 曲線に対して Casagrande の

方法により求めた圧縮降伏応力 $(\sigma_v)_y$ と、図-10における所定の圧縮指数 ($C_c'=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, \text{最大}$) に対応する鉛直応力 $(\sigma_v)_{C_c'=X}$, $X=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, \text{最大}$ の関係をプロットしてみた。図-11より全ての材料、相対密度に対し $C_c'=0.3$ に対応する鉛直応力が対角線上に存在し Casagrande 法で得られた降伏応力とほぼ等価であるといえる。粒度分布の良い材料のように Casagrande 法では降伏応力を決定することが困難な場合があること、また図解法であるため人的誤差が生じることなどから、 $C_c'=0.3$ の時の鉛直応力 $(\sigma_v)_{C_c'=0.3}$ を砂の一次元圧縮特性における降伏応力とみなすことが有効であると考えられる。

また、図-11に示した圧縮指数が0.1から最大に至るまでの鉛直応力の幅に着目すると、カーボネイト砂に比べ、細粒分を含む Shirasu や Masado は広く、Silica_{0.18-2.0} は狭いことがわかる。つまり図-9に示したとおり、カーボネイト砂に比べ、Shirasu や Masado は広い応力範囲で緩やかに圧縮曲線が変化することを、Silica_{0.18-2.0} は狭い範囲で急激に変化することを意味している。

著者ら²¹⁾は圧縮曲線の折れ曲がり度を次式により定義した。

$$R = \log \left[\frac{(\sigma_v)_{C_c'=\max}}{(\sigma_v)_y} \right] \quad (15)$$

ここで、 $(\sigma_v)_{C_c'=\max}$ は圧縮指数が最大となる時の応力、 $(\sigma_v)_y$ は圧縮降伏応力である。しかしながら、細粒分を含む Shirasu や Masado など粒度分布の良い材料においては圧縮指数の最大値が特定できないことがあった。そこで本論文では、いずれの材料に対しても適用できるように式(15)を次式のように修正した。

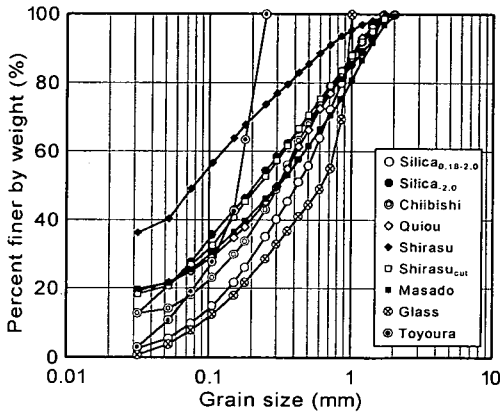


図-12 鉛直応力 90MPa 載荷後の粒径加積曲線

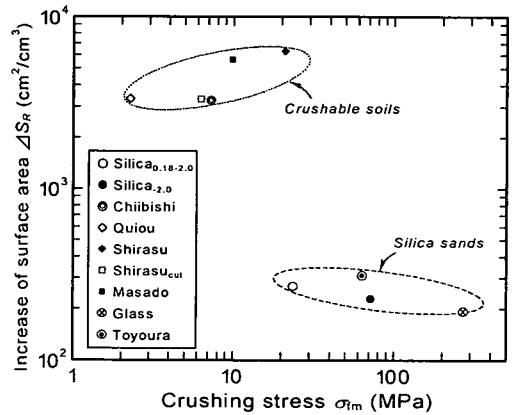


図-13 修正表面積増加量 ΔS_R と単粒子破碎強度 σ_{fm}

$$R' = \log \left[\frac{(\sigma_v)_{Cc=0.3}}{(\sigma_v)_{Cc=0.1}} \right] \quad (16)$$

ここで、 $(\sigma_v)_{Cc=0.3}$ は圧縮指数が 0.3 となる時の、 $(\sigma_v)_{Cc=0.1}$ は圧縮指数が 0.1 となる時の鉛直応力である。 R' が大きいほど圧縮曲線の接線勾配である C_c' の変化する応力域が広範囲であること、すなわち圧縮曲線が緩やかに折れ曲がり始めることを意味する。また、着色粒子の観察²⁰⁾ から、 R' で示される応力域では粒子本体の完全な破碎が、 R' で示される応力域では粒子の角の損傷、またはより小さな粒子の破碎が支配的であることが確認された。

表-4 に一次元圧縮試験結果を示す。

(3) 一次元圧縮中の粒子破碎

鉛直応力 90MPa 載荷後のそれぞれの試料に対し粒度試験を行った。その結果、得られた粒径加積曲線を図-12 に示す。図-12 と図-1 を比較すると、試験前の粒度曲線に比べ、全体的に左上に移動しており、粒子破碎が生じていることが確認できる。三浦・山内³⁾ は粒子を球と仮定して表面積 S を求め、試験前後の粒度分布の変化から、表面積増加量 ΔS を算出した。しかし、前述したように破碎性材料の粒子は非常に複雑な形状をしていることから、粒子を球と仮定した場合に得られる表面積は真の表面積よりも小さい値となる。そこで、粒子形状を考慮した表面積 S_R (修正表面積) を以下のように与える。

表面積 S の算出では各ふるい目のサイズ d を直径とした球粒子を仮定している。その球粒子の表面積は πd^2 となる。これに対し修正表面積 S_R の算出では、粒径 d の実際に計測された粒子の投影断面の周囲長を L とし、周囲長 L の相当円の直径 L/π を直径とした球粒子を仮定する。その粒子の表面積は L^2/π となる。よって、表面積 S と修正表面積 S_R との比は次式で表される。

$$S_R / S = \frac{L^2}{\pi^2 d^2} \quad (17)$$

ここで、直径 d の円の面積を A とすると式(16)の右辺の分母は $4\pi A$ となり、式(16)と式(1)の右辺は等しくなる。したがって、修正表面積 S_R は次式に示すように、真円度 R_c と粒子を球と仮定した場合の表面積 S との積で表すことができる。

$$S_R = R_c \times S \quad (18)$$

また、試験前後で粒子の形状が変わらないものとして、修正表面積増加量 ΔS_R は次式で表される。

$$\Delta S_R = S_{R\text{after}} - S_{R\text{before}} \quad (\text{cm}^2/\text{cm}^3) \quad (19)$$

ここで、それぞれ $S_{R\text{before}}$ は試験前、 $S_{R\text{after}}$ は試験後の修正表面積である。また、0.032mm 以下の粒子についてはその直前の粒度分布曲線の傾きから最小粒径を外挿し 0.032mm 以下の平均粒径を求め、表面積の計算に用いている。

図-13 は、 $\sigma_v=90\text{MPa}$ 載荷後の各試料について修正表面積増加量 ΔS_R と単粒子破碎強度との関係をまとめたものである。破碎性材料は石英質の砂に比べて ΔS_R が 10 倍以上にも及んでおり、破碎がより顕著に生じていることがわかる。

著者ら²⁰⁾ はシリカ砂の着色粒子を用いた一次元圧縮中の粒子破碎の観察結果から、鉛直応力の増加とともに、比較的小さな粒子から破碎し始めること、降伏応力付近において、平均粒径付近の粒子が粒子本体の完全な破碎を起こしていること、そして圧縮指数が最大値となった後の粒子破碎は、主に大きい粒子の表面の削れや、壊れた粒子がさらに壊れるような破碎であることを確認している。破碎性材料の方が ΔS_R が大きくなる理由として、

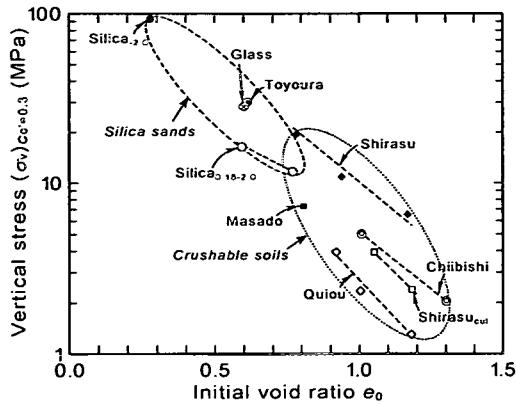


図-14 $(\sigma_v)_{Cc=0.3}$ と初期間隙比 e_0 との関係

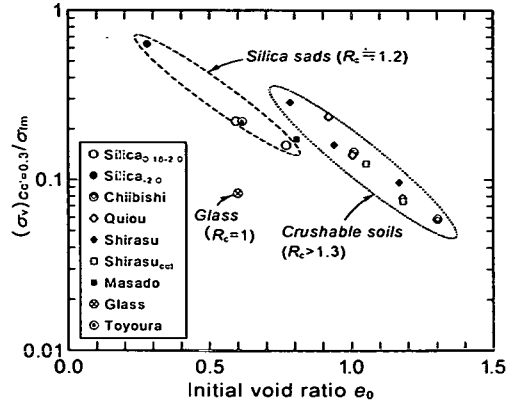


図-16 $(\sigma_v)_{Cc=0.3}/\sigma_{fm}$ と初期間隙比 e_0 との関係

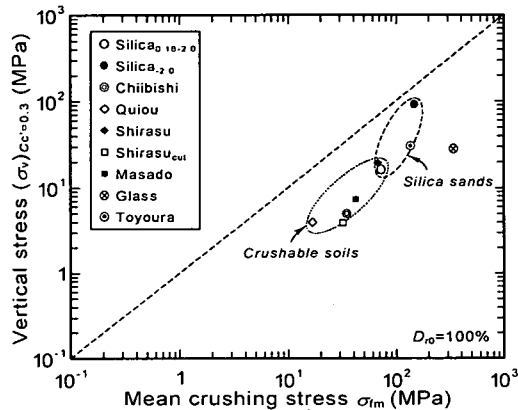


図-15 $(\sigma_v)_{Cc=0.3}$ と単粒子破砕強度 σ_{fm} との関係

Shirasu や Masado など粒度分布の良い材料では、より小さな粒径成分の粒子が破砕しやすいことが考えられる。また、Chibishi や Quiou では、圧縮指数が最大値を示す鉛直応力が低く、90MPa まで載荷した場合、粒子表面の削れがより多く生じることや、粒子形状が複雑なため角の破砕などが起こりやすいことなどが考えられる。

(4) 一次元圧縮降伏応力

一次元圧縮試験から得られる降伏応力に対する諸要因について調べた。図-14 は、圧縮指数が 0.3 となる時の鉛直応力と初期間隙比との関係を表したものである。両者の関係には全体的に右下がりの傾向がみられ、これまで多くの研究者^{16), 21), 27)}により調べられている結果と同様の傾向が確認された。またその関係は各材料ごとにみると直線で表されることがわかる。破砕性材料の結果は石英質の砂の結果に比べて初期間隙比が大きく圧縮指数が 0.3 となる応力は低いことがわかる。間隙比が大きいものほど粒子間の接点数が減少し^{28), 29)}、その結果、粒子間の各接点に作用する力が大きくなり、粒子内の

平均応力は増加する³⁰⁾。初期間隙比の大きい破砕性材料では、粒子強度が低いことも併せて、より低い応力域で破砕が進み、降伏するといえる。

図-15 は、圧縮指数が 0.3 となる時の鉛直応力とその試料の平均粒径の単粒子破砕強度 σ_{fm} との関係初期相対密度が 100% の実験結果について示したものである。破砕性材料の結果は、石英質の砂や Glass の結果に比べて単粒子破砕強度が低く、圧縮降伏応力も低いことがわかる。また、全体的に右上がりの傾向がみられ、圧縮降伏応力は平均粒径の粒子の強度に関係付けられることを示唆している。

図-16 は、圧縮指数が 0.3 となる時の応力と平均粒径の単粒子破砕強度 σ_{fm} との比 $((\sigma_v)_{Cc=0.3}/\sigma_{fm})$ と初期の間隙比との関係である。 $((\sigma_v)_{Cc=0.3}/\sigma_{fm})$ の値が 1 に近くなるほど図-15 において単粒子破砕強度と降伏応力の関係は 1:1 の対角線に近づくことを示す。図-16 より初期間隙比 e_0 の小さいものほど、また e_0 が同程度の場合、粒子形状の複雑なもの (R_c の大きいもの) ほど $((\sigma_v)_{Cc=0.3}/\sigma_{fm})$ は大きくなっており、対角線に近づいていることがわかる。

(5) 一次元圧縮曲線の曲率

一次元圧縮試験から得られる e - $\log \sigma_v$ 曲線の曲率に対する諸要因について調べた。まず、図-17 は、圧縮曲線の折れ曲がり度 R' と初期間隙比との関係をまとめたものである。各試料ごとにみると僅かながら右上がりの直線傾向がみられるが、全体的にみると同程度の初期間隙比に対して、 R' の範囲が大きいことがわかる。したがって、初期間隙比の圧縮曲線の折れ曲がり度に対する影響はさほどないものと考えられる。

図-18 は、 R' と均等係数 U_c との関係を初期相対密度が 100% の実験結果についてまとめたものである。図中には単一粒径に対する結果を同時に示している。均等係

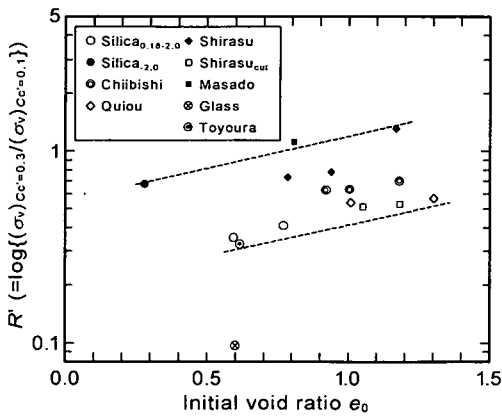


図-17 圧縮曲線の折れ曲がりの程度 R' と初期間隙比 e_0 との関係

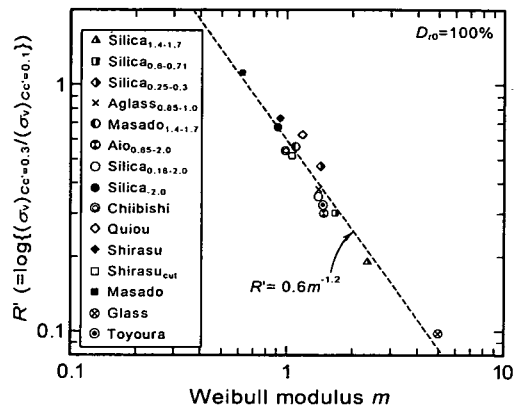


図-19 圧縮曲線の折れ曲がりの程度 R' と Weibull 係数 m との関係

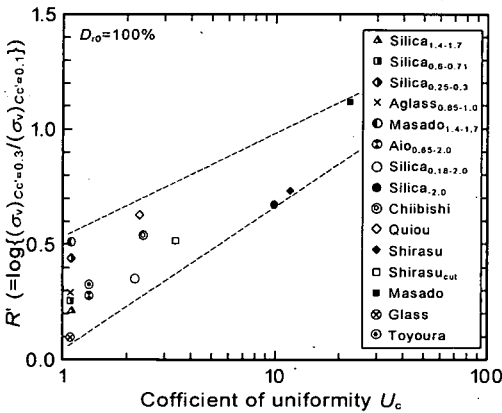


図-18 圧縮曲線の折れ曲がりの程度 R' と均等係数 U_c との関係

数 $U_c=1$ 付近のプロットがその結果である。

この図より、 R' と U_c の関係に右上がりの傾向がみられ、均等係数が大きいものほど、圧縮曲線は緩やかに折れ曲がることを意味している。しかし、同一の均等係数においても R' の値に差がみられる。特に均等係数が 1 付近の単一粒径の材料の R' はおよそ 0.1~0.6 の範囲で分布している。したがって、均等係数は R' の要因の一つではあるが唯一ではなく、他にも影響要因があると考えられる。

密な砂供試体の一次元圧縮条件下での間隙比の顕著な変化は、主に粒子の破碎に起因する。供試体内の全ての粒子が同じ破碎強度を持つならば、ある応力に達した時に多くの粒子が破碎を起こすため、急激に間隙比は減少すると考えられる。しかし現実には各粒子の破碎強度は全て等しいとはいえず、ある程度の幅（分散）を有している。圧縮応力の増加と共に、強度の低い粒子から順に破碎し、それに対応して間隙比も徐々に小さくなって

いくと考えられる。

図-19 は粒子強度のばらつきを表す Weibull 係数 m との関係で、一次元圧縮曲線の折れ曲がり度 R' を両対数上にまとめたものである。全て初期相対密度 100% の結果である。また、図中には単一粒径の結果を同時に示している。両者の間には右下がりの直線関係が得られ、Weibull 係数 m が小さい、つまり粒子強度のばらつきが大きいものほど R' は大きくなり、一次元圧縮曲線は緩やかに折れ曲がるのがわかる。このことは、一次元圧縮降伏応力と単粒子破碎強度とに関係があることと併せて考えると、砂の一次元圧縮特性が単粒子の破碎特性から推察可能であることを示している。また、単粒子破碎強度のばらつきは主に粒度分布と粒子形状に依存している。したがって、破碎性材料の一次元圧縮曲線の曲率の大小は、実用的な粒子特性からいうと、粒度分布や、粒子形状に依存するといえる。

4. まとめ

本研究では単粒子破碎試験、顕微鏡による粒子形状の観察および一次元圧縮試験を行い、破碎性材料の粒子特性や圧縮特性を把握した。そして破碎性材料の一次元圧縮特性に対して、材料を構成している個々の粒子の特性からの解明を試みた。その結果得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 破碎性材料は、主に粒子形状の複雑さに起因し高い間隙比を有する。
- 2) 破碎性材料の単粒子破碎強度は、同じ粒径の石英質の砂に比べ低い。また、単粒子破碎強度と粒径の関係は両対数図上において直線で表され、その傾きは材料によらずほぼ等しい。

- 3) 単粒子破砕強度の分散は、主に粒子サイズ、粒子形状に依存している。破砕性材料は粒子形状が複雑なため、同一サイズの石英質の砂に比べ単粒子強度の分散が大きい。また、Shirasu や Masado は、粒度分布が良いことに起因し、単粒子強度の分散がさらに大きくなる。
- 4) 一次元圧縮試験の結果、圧縮指数の最大値は粒子の強度や粒度分布に依存せず、ほぼ 0.5~0.6 の値となる。
- 5) 破砕性材料の 90MPa 載荷後における修正表面積増加量 ΔS_R は、より小さい粒子の破砕や、粒子表面の削れなどに起因して石英質の砂の ΔS_R に比べ大きく、10倍程度の値となった。
- 6) 破砕性材料の一次元圧縮試験から得られる圧縮降伏応力が石英質の砂に比べ低い要因は、初期間隙比が大きいことや単粒子破砕強度が低いことにある。
- 7) 一次元圧縮曲線の折れ曲がりの程度が単粒子破砕強度のばらつきと関係付けられた。
- 8) 上記 3), 7) を併せて考えることにより、破砕性材料の一次元圧縮曲線は、粒度分布や、粒子形状に起因し、曲率に変化することが明らかとなった。

本研究の結果から、砂地盤の圧縮性に粒子レベルの特性、とりわけ粒子の破砕性が関係していることが明らかとなった。これは、支持力問題や地盤の沈下に関する問題に対し、その地盤を構成している粒子の特性の把握が圧縮性の程度に対する有効な指標になることを示しているといえる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 三浦哲彦, 山内豊聡: 砂のせん断特性に及ぼす粒子破砕の影響, 土木学会論文集, No.260, pp.109-118, 1977.
- 4) 破砕性地盤の工学的諸問題に関する研究委員会: 破砕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.
- 5) 北村良介: 破砕性土の力学特性と破砕性地盤の工学的諸問題, 土と基礎, Vol.48, No.10, pp.3-6, 2000.
- 6) Hyodo, M., Hyde, A. F. L. and Aramaki, N. : Liquefaction of crushable sand, *Geotechnique*, Vol.48, No.4, pp.527-543, 1998.
- 7) Angemeer, J., Carlson, E. and Klick, J. H. : Techniques and Results of Offshore Pile Load Testing in Calcareous Soils, *Proc. 5th Offshore Tech. Conf.*, Houston, Vol.2, pp.677-692, 1973.
- 8) Yasufuku, N. and Hyde, A. F. L. : Pile end-bearing capacity in crushable sands, *Geotechnique*, Vol.45, No.4, pp.663-676, 1995.
- 9) 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.
- 10) 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砕とその評価, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.257-269, 1997.
- 11) 片桐雅明, 片上典久, 斎藤邦夫, 高柳哲: しらすの圧縮特性と粒子破砕指標の関係, 破砕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.85-88, 1999.
- 12) 新城俊也: 一次元圧縮下における破砕性砂の時間依存性, 第35回地盤工学研究発表会概要集, No.1 pp.899-900, 2000.
- 13) Terzaghi, K. and Peck, R. B. : Soil mechanics in engineering practice, *John Wiley and Sons, Inc.*, New York, N.Y., pp.65-67, 1948.
- 14) Yamamuro, J. A., Bopp, P. A. and Lade, P. V. : One-dimensional compression of sands at high pressures, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.122, No.2, pp.147-154, 1996.
- 15) McDowell, G. R. and Bolton, M. D. : On the micro-mechanics of crushable aggregates, *Geotechnique*, Vol.48, No.5, pp.667-679, 1998.
- 16) Hagerty, M. M., Hite, D. R., Ullrich, C. R. and Hagerty, D. J. : One-dimensional high pressure compression of granular media, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.1, pp.1-18, 1993.
- 17) Hendron, A. J. : The behavior of sand in one-dimensional compression, *PhD thesis, University of Illinois*, Ill., pp.50-89, 1963.
- 18) Roberts, J. E. and de Souza, J. M.: The compressibility of sand, *Proc., Am. Soc. for Testing Mat.*, Vol.58, ASTM, Philadelphia, Pa., pp.1269-1277, 1958.
- 19) Vesic, A. S. and Clough, G. W. : Behavior of granular materials under high stresses, *J. Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, 94(3), pp.661-688, 1968.
- 20) Nakata, Y., Hyodo, M., Hyde, A. F. L., Kato, Y. and Murata, H. : Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one dimensional compression, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.1, pp.69-82, 2001.

- 21) 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*, Vol.41, No.2, pp.39-51, 2001.
- 22) 吉村優治, 小川正二 : 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法, 土木学会論文集, No.463/Ⅲ-22, pp.95-103, 1993.
- 23) 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一 : 地盤材料の単粒子破砕特性, 土木学会論文集, No.673/Ⅲ-54, pp.189-194, 2001.
- 24) Nakata, Y., Hyde, A. F. L., Hyodo, M. and Murata, H. : A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test, *Géotechnique*, Vol.49, No.5, pp.567-583, 1999.
- 25) 福本武明, 原健夫 : 粒状体の粒子破砕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.
- 26) Weibull, W. : A statistical distribution function of wide applicability, *Journal of Appl. Mech.*, Vol.18, pp.293-297, 1951.
- 27) Pestana, J. M. and Whittle, A. J. : Compression model of cohesionless soils, *Géotechnique*, Vol.45, No.4, pp.611-631, 1995.
- 28) Field, W. G. : Towards the statistics definition of a granular material, *Proc. 4th A. and N. Z. Conf. on Soil Mech.*, pp.143-148, 1963.
- 29) Oda, M. : Co-ordination number and its relation to shear strength of granular material, *Soils and Foundations*, Vol.17, No.2, pp.29-42, 1977.
- 30) Jaeger, J. C. : Failure of rocks under tensile conditions, *Int. Journal of Rock and Mining Science*, Vol.4, pp.219-227, 1967.

(2001. 5. 17 受付)

GRAINS CHARACTERISTICS AND ONE-DIMENSIONAL COMPRESSION PROPERTIES OF CRUSHABLE SOILS

Yoshinori KATO, Yukio NAKATA, Masayuki HYODO and Hidekazu MURATA

The one-dimensional compression test, single particle crushing test and observation by microscope were carried out for four kinds of crushable soil and two kinds of silica sand. The particle roughness and single particle crushing strength variability of crushable soils were larger than that of silica sands. It was proven that the yield stress of the crushable soil was lower than that of the silica sand. The yield stress was shown to be related at d_{50} single particle crushing strength. It was further shown that the curvature of a compression curve was dependent on the variance of single particle crushing strength.