

まさ土の締固め特性に及ぼす破碎の影響

Effects of Crushability on Compaction Characteristics for Decomposed Granite Soil

成 太 圭 HAM Tae Gew (山口大学大学院)
 中田 幸男 Yukio NAKATA (山口大学工学部)
 兵動 正幸 Masayuki HYODO (山口大学工学部)
 村田 秀一 Hidekazu MURATA (山口大学工学部)
 加登 文学 Yoshinori KATO (舞鶴工業高等専門学校)

本研究では粒度分布が異なる宇部まさ土とSilicaを用いて締固め特性に及ぼす粒度分布の影響について調べるとともに、鉱物組成が異なる韓国のソンドまさ土の締固め特性との比較を粒子破碎に着目して考察した。その結果、まさ土はSilicaと比べて粒子強度が低く、粒子強度のばらつきが大きい試料であり、締固め試験において粒子破碎を伴う粒子の再配列による密度増加が大きいことがわかった。また、宇部まさ土は粒度分布が良いものほど最大乾燥密度は大きくなるが、気乾状態において締固めエネルギーによって最もよく締固まる粒度分布が存在することを示唆した。加えて、有色鉱物が30%程度含まれているソンドまさ土は今回用いた試料の中で細粒分が最も増加し易い材料であることが分かった。さらに、土の締固め特性には粒子の破碎性の影響が大きいことが明らかとなったが、単純に破碎量が多い材料が最大乾燥密度が高くなるとはいえないことも示された。

キーワード：締固め、まさ土、風化、破碎性、単粒子強度、鉱物組成 (IGC: D09)

1. まえがき

まさ土とは大気中の他岩石に比べて風化されやすい花崗岩質岩石の結晶性深成岩すなわち、花崗岩、花崗閃緑岩と花崗斑岩の半深成岩、またこのような同質の片麻岩が風化されその場所に残留している残積土 (Residual soil) あるいはこれと同質の崩積土を意味する¹⁾。まさ土は、英語では「weathered granite soil」またその存在状態によって「decomposed granite」「residual granite soil」、韓国では「花崗岩質風化土」と呼ばれている¹⁾。まさ土は図-1 に示すように日本、韓国を始め全世界に広く分布している土であり、土木工専用材料として各方面で盛んに使用されている。石英に加え、長石、有色鉱物などの鉱物で構成されているまさ土は圧縮性の顕著な土であり、現場問題で通常の土質力学では対処しきれない土であるため、「特殊土」として取り扱われている²⁾。その高い圧縮性は主として粒子の破碎が原因であり、粒子の破碎性はまさ土の締固め特性やせん断特性に強く関係していることが知られている。これまで、まさ土の破碎性が締固め特性に及ぼす影響についての研究³⁾がいくつかなされており有益な情報が集積されつつあるが、ミクロな粒子の形状や粒子の強度に着目したまさ土の破碎性と締固め特性との関係についての研究は数多くない。そこで本研究では、まさ土の破碎性と締固め特性の関係を究明することを目的として2種類のまさ土とシリカ砂を用いて締固め試験、単粒子破碎試験を行い、締固め特性に及ぼす粒度分布および鉱物組成の影響について考察した。

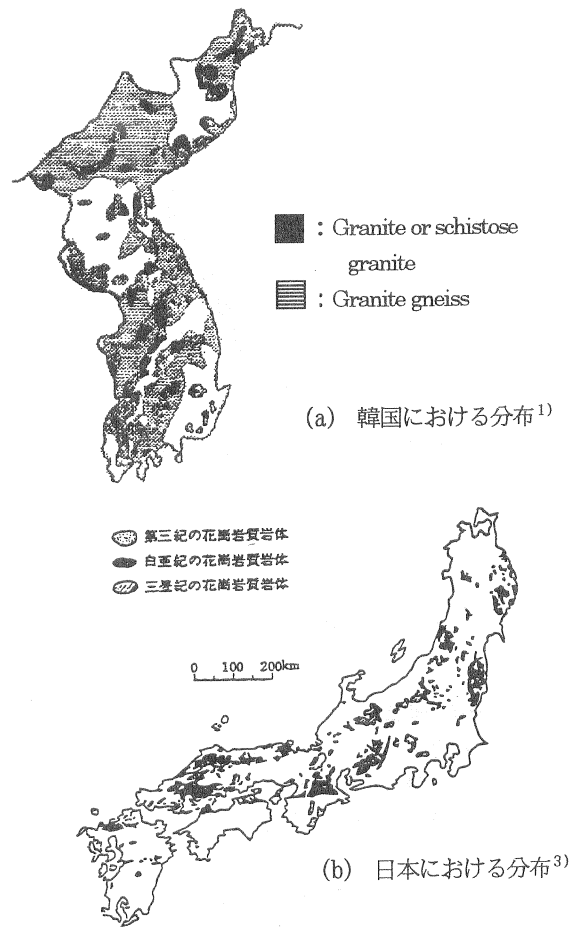


図-1 花崗岩質岩体の分布

表-1 用いた試料の物性値

試料	粒径 (mm)	G _s	e _{max}	e _{min}	D ₅₀	強熱減量 (%)	U _c
UBE-A	~ 2.0	2.60	1.31	0.81	0.79	3.995	4.29
UBE-B	1.0~ 2.0	2.60	-	0.93	1.40	-	1.59
UBE-C	~ 19.1	2.60	-	-	1.07	-	4.79
UBE-D	4.76~ 9.52	2.60	-	-	7.14	-	1.41
Silica-A	0.18~ 2.0	2.65	0.93	0.58	0.74	1.184	2.19
Silica-B	1~ 2.0	2.65	-	0.64	1.14	-	1.03
SD	~ 2.0	2.66	1.44	0.89	0.60	5.295	4.73

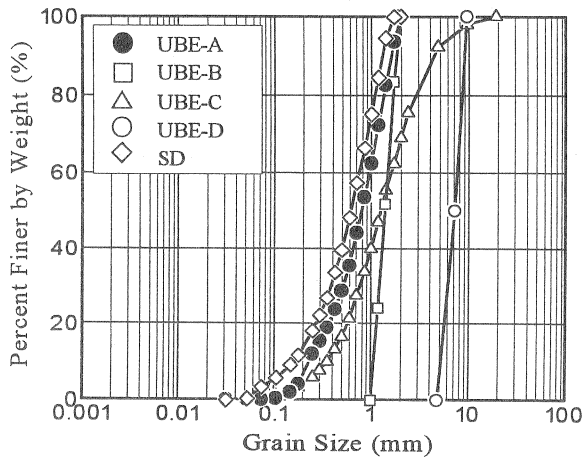


図-2.(a) 初期粒径加積曲線 (まさ土)

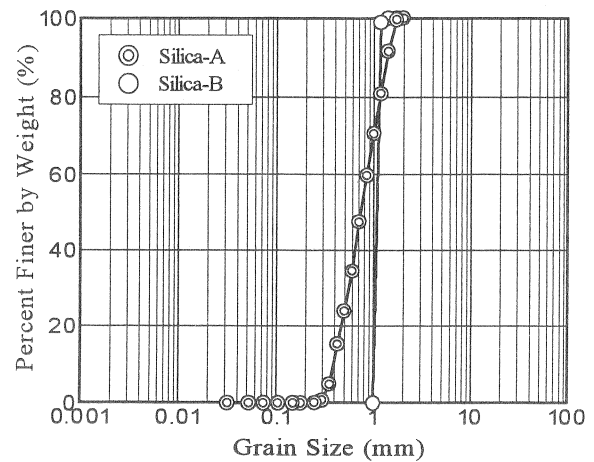


図-2.(b) 初期粒径加積曲線 (Silica)

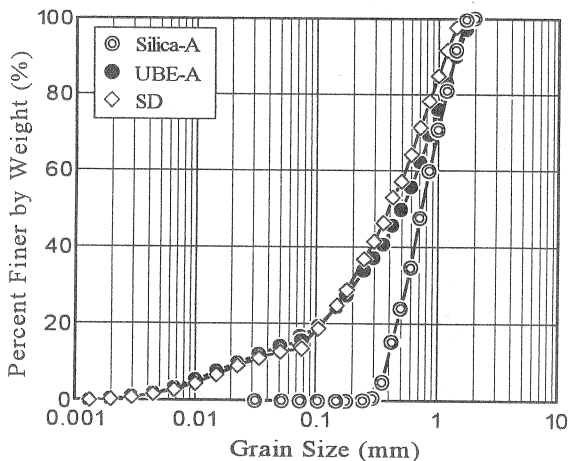


図-3 初期粒径加積曲線 (湿式法)

2. 用いた試料及び実験方法

2.1 用いた材料の物性値

本研究では粒径を 20mm 以下, 10~20mm, 19.1mm 以下, 4.76~9.52mm の 4 種類に粒度調整した山口県宇部市で採取した宇部まさ土と鉱物組成が異なる韓国の仁川 (インチョン) 市のソンドで採取したソンドまさ土の 2mm ふるい通過分を試料として用いた。また比較のために, 0.18~2.0mm, 10~20mm に粒度調整した三河珪砂である Silica を用いた。以下 4 種類の宇部まさ土の試料を “UBE-A”, “UBE-B”, “UBE-C”,

“UBE-D”, ソンドまさ土を “SD”, 2 種類の三河珪砂を “Silica-A”, “Silica-B” と称する。表-1 にそれらの物性値を示している。

2.2 実施した試験

今回実施した試験はまさ土の一次的性質を調べるために行った①粒度分析, ②強熱減量, ③X線回折, ④鉱物組成試験があり, 組成粒子の破碎強度を調べるために行った⑤単粒子破碎強度試験と各材料の締固め特性を調べるために行った⑥締固め試験である。

2.3 試験方法

本研究ではまず, 各試料の試験前後の粒度分布を調べるために粒度試験を日本工業規格 JIS A 1204 により行った。図-2 に用いた UBE まさ土と Silica の初期粒径加積曲線を示している。

まさ土は単一の粒子だけで構成されていることはなく, いくつかの粒子が団粒化して粒子を形成している。本研究では UBE-A と SD について締固めによる細粒分の増加量を調べるためにふるい分析中に水を流しながら細粒分と粗粒分を分けることを試みた。粒径が 75 μ m 以下の細粒分についてはレーザー回折法により, 粒径が 75 μ m 以上から 2mm 以下の粗粒分は JIS A 1204 により粒度分布を求めた。その結果を図-3 に示している。図よりふるい分析中に水を流すことにより, 団粒化している粒子が各々単一の粒子になり細粒分が増えていることが確認できた。表-1 中の均等係数 U_c は図-2 に基づいて算出している。

強熱減量法は日本工業規格 JIS A 1226 により各試料の風化度

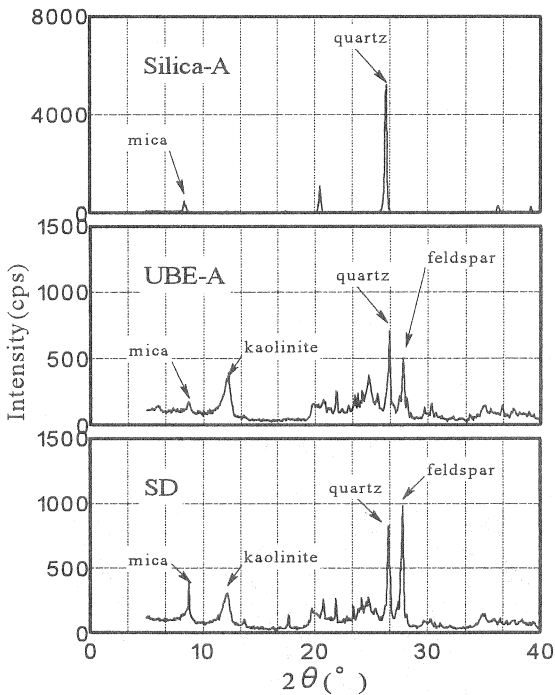


図-4 X線回折試験結果

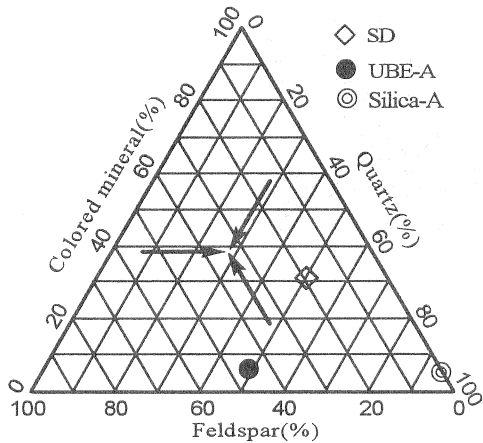


図-5 鉱物の割合

を調べるために行った。試験方法としては乾燥炉において一定の質量になるまで乾燥させた試料をろ紙に入れ 1000°C の乾燥炉に 1 時間乾燥させ強熱前後の質量の差を調べた。

また、まさ土の一次鉱物と粘土鉱物を調べるために X 線回折を行った。X 線回折試験は UBE-A と SD, Silica-A の 75 μm 以下の細粒分を用いて行った。しかし、X 線回折試験は鉱物組成を定性的には調べることはできるが定量的に調べるのが困難であるため、X 線回折の結果を受けてそれぞれの試料において平均粒径 D_{50} を取り出し水洗いをした後、鉱物の割合を分類する鉱物組成試験を行った。本研究ではまず鉱物を無色鉱物と有色鉱物に分けた。ここで無色鉱物とは色が白、もしくは無色透明に近い鉱物をいい、シリカ鉱物、長石などをさす。Si, Al, Na, K などに富む。有色鉱物とは色が暗い鉱物で、オリビン、輝石、黒雲母などをさす。無色鉱物に比べて、一般に Si

が少なく、Fe, Mg に富む²²⁾。それからさらに無色鉱物の中で無色透明な鉱物を石英とみなし、無色で白っぽい鉱物を長石として分類した。また濃い色の鉱物を有色鉱物とみなして全試料の鉱物を分類した。

さらに、粒子の破碎強度を調べるために単粒子破碎試験を行った。この試験についての詳しいことは次節で述べる。締固め試験は、JIS A 1210 A-b に示される方法に準じて行い、突固め回数は 1 層 5, 15, 25, 35, 50 回に変化させながら行った。試験終了後の各試料は、ふるい分析を行い粒子破碎量を調べた。

3. まさ土の一次的性質

3.1 風化度を表す指標について

まさ土の風化過程において、ぜい弱な長石、雲母は急速に粘土化されるが、石英は風化に対して抵抗性が強い²⁾と言われている。このような特徴を持つまさ土の風化の程度を評価するための指標として、①長石比重、②みかけ比重、③比表面積、④強熱減量、⑤給水率、⑥pF 値による方法が提案されている^{3), 4)}。ここで、まさ土の風化が保水性の増大、土粒子の微細化と対応すると考えれば、まさ土の風化度を表す指標として、比表面積、強熱減量、吸水率を用いることは妥当であり、実験方法の容易さを考慮すると、強熱減量と吸水率が最適である⁵⁾と考えられる。そこで、本研究ではまさ土の風化の程度を評価するために粒度分布がほぼ同じである UBE-A と SD, また比較のために Silica-A に対して強熱減量を調べた。表 1 にその結果を示している。UBE-A は強熱減量が 3.99% に対して SD は 5.29% で高い値を示している。このことから UBE-A より SD が風化が進行していると考えられる。

3.2 鉱物組成

まさ土は一次鉱物と粘土鉱物の組み合わせによってその工学的性質が支配される。しかし、まさ土は鉱物組成や風化の程度が採取場所や深さによって著しく異なり、その工学的性質も複雑である。したがって、用いるまさ土の工学的性質を判断するためには、一次鉱物と粘土鉱物の混合割合を検討する必要がある。そこで本研究では用いたまさ土の一次鉱物と粘土鉱物を調べるために X 線回折を行った。X 線回折も UBE-A と SD, および Silica-A に対して行った。その結果を図 4 に示している。図より Silica-A には石英と若干の雲母が含まれていることが確認でき、UBE-A と SD にはいずれも石英、長石、雲母、および粘土鉱物であるカオリナイトが含まれていることがわかる。この結果を受けて、それぞれの試料において平均粒径 D_{50} を取り出し、水洗いをした後、鉱物を石英、長石、有色鉱物の 3 種類に分類し、各鉱物の質量を求め、鉱物の割合を調べた。その結果を図 5 に示す。図より Silica-A は石英が 96% を占め、ほとんどが石英であることがわかる。また、UBE-A と SD の石英の割合は 50% でほぼ同じであるが、SD は有色鉱物を 30% 含んでいるのに対し、UBE-A の有色鉱物の割合は 9% と低い。有色鉱物は他の鉱物に比べ単粒子強度が低い⁹⁾ことから、UBE-A より SD

の方が小さい締固めエネルギーでも破碎されやすいことが予想される。

3.3 粒子形状の評価

砂粒子の形状が砂の力学特性に与える影響について、これまで多くの研究者によって調べられてきた。それによると、粒子形状は密度などと同様に、砂の力学特性などに大きい影響を与える⁶⁾ことが明らかになっている。また、破碎性の材料ほど粒子形状が複雑である⁷⁾ことが指摘されている。このようなことから粒子形状を砂の一次的な性質の一つとして、数値化して表現することに意義がある。そこで本研究では粒子の形状を定量的に評価するために真円度 (Roundness coefficient: R_c) と縦横比 (Aspect ratio: A_r) を用いた⁸⁾。真円度は次式によって定義される。

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

ここで L は投影粒子の周囲長、 A は投影粒子の断面積である。真円度はその値が 1 に近いほど円に近い形状を意味し、大きいものほど粒子の表面が粗く、角張っていることを意味している。また、縦横比は次式で定義される。

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

ここに b は投影粒子の相当楕円の長軸長さ、 a は短軸長さであり、縦横比はその値が大きいほど形が扁平であることを表している。実験としては全試料の平均粒径 D_{50} を鉱物別に分け、各々30個以上の粒子に対し顕微鏡による観察を行った。図-6に全試料の真円度と縦横比の関係を表している。比較のために標準的な石英質砂である豊浦砂と粒子形状が複雑なカーボネイト砂である Chibishi 砂を示している。また図-7には試料の写真を示している。写真からわかるように粒子の形状が最も複雑な Chibishi 砂は真円度と縦横比の値が最も高いことがわかる。また標準的な石英質である豊浦砂と Silica 砂は真円度と縦横比の値が小さく、粒子の形状が円に近いことがわかる。また UBE-A と SD は両者で真円度と縦横比の値がほぼ同じであり、粒子形状の違いはさほど見当たらなかった。

4. 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^{10), 11), 12)}を行った。単粒子破碎試験は図-8の装置によって単一の粒子を下盤に最も安定する方向に配置し、上盤を一定速度で下降させることにより粒子を破碎させる試験であり、試験中に軸荷重と軸変位が測定される。有色鉱物である雲母は他の鉱物と異なり、結晶構造がサンドイッチのような層状になっていて、層と層をつなぐ引力が弱い²¹⁾。このことから下盤に最も安定する方向に配置し実験を行うと単粒子破碎強度が過大評価される可能性がある。そこで本研究において雲母は図-8のように下盤に垂直になるように設置し単粒子破碎試験を行った。各試験は載荷速度 0.1mm/min で行った。荷重は測定精度が

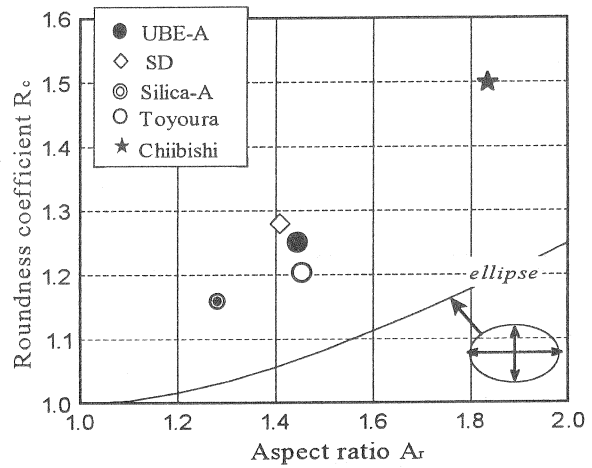


図-6 真円度と縦横比の関係

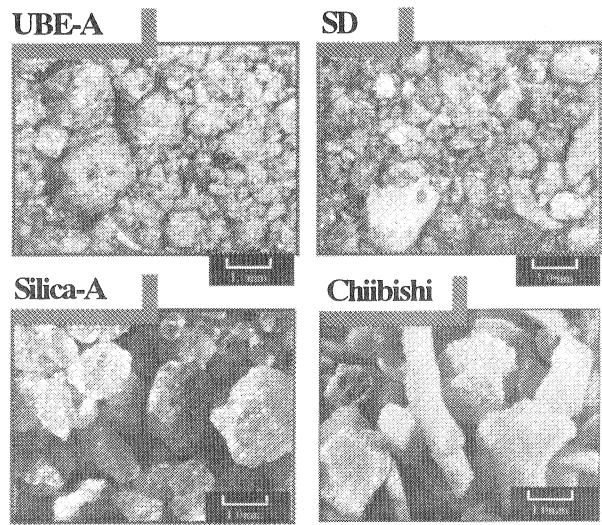


図-7 試料の写真

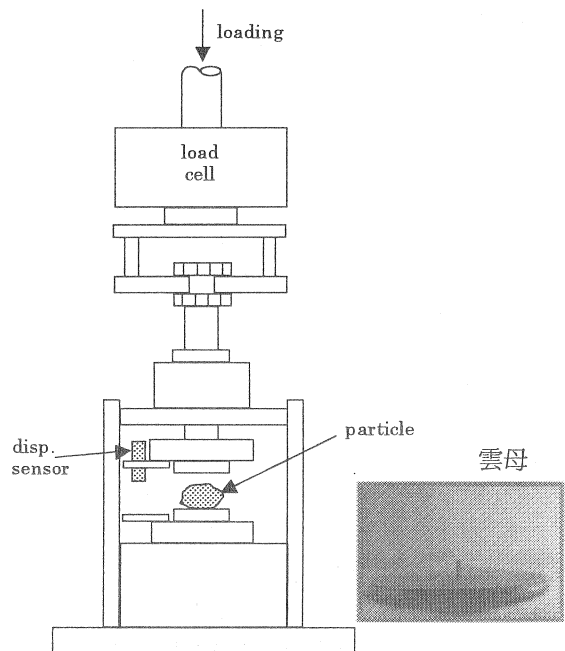


図-8 単粒子破碎試験機の概要図^{10), 11), 12)}

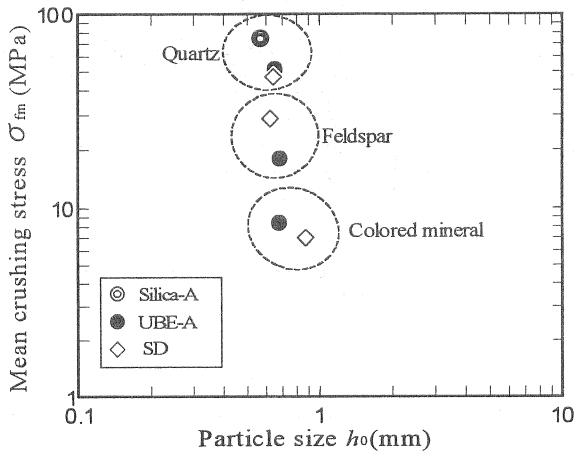


図-9 鉱物別の単粒子破砕強度

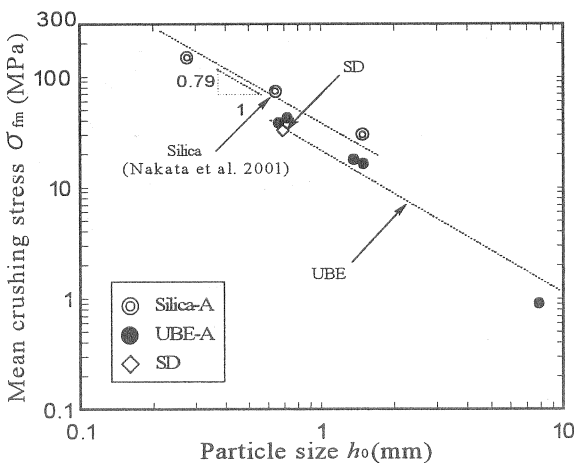


図-10 単粒子破砕強度と粒径の関係

9.81×10³N であり最大 4.91×10³N まで計測可能なロードセルにより計測を行い、変位は測定精度 1.00×10⁻³mm、最大 200mm まで計測可能な非接触型変位計により計測を行った。

破砕強度の求め方については、破壊荷重を粒子体積の 2/3 乗で除す方法¹⁵⁾、破壊荷重を直接測定された加圧板と粒子の接触面積で除す方法¹⁶⁾、あるいは粒子を 14 面体と仮定して加圧板と粒子の接触面積を算出し、これで破壊荷重を除す方法¹⁷⁾ 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¹⁸⁾ により破砕強度を算出した。粒子を完全な球であると仮定すると、圧縮によって粒子内に生じる引張応力は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 回のピーク荷重が現れる。粒子内に生じる引張応力は、荷重 F と、粒子径 d により次式によって表される。

$$\sigma = \frac{XF}{d^2} \quad (3)$$

ここで、 X は定数であり、その値は Billam¹⁹⁾ によると、 $X=20\pi$ 、平松ら²⁰⁾ 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 $X=1$ と置いた場合の σ を破砕強度とする。すなわち最大ピーク荷重 F_f における最大破砕強度 σ_f は次式により求められる。

表-2 平均破砕強度と初期平均高さ

試料	σ_{fm} (MPa)	\bar{h} (mm)	有色鉱物の 割合(%)
Silica-A	74.2	0.57	6
UBE-A	33.1	0.67	9
SD	31.1	0.71	30

$$\sigma_f = \frac{F_f}{h_0^2} \quad (4)$$

ここで、 F_f は試験中の最大荷重、 h_0 は粒子の初期高さである。

図-9 に各試料の各鉱物に対する平均単粒子破砕試験の結果を示している。単粒子破砕試験は試料 UBE-A, SD, Silica-A のそれぞれに含まれる鉱物別に各々 30 個以上の粒子に対して行った。図より、試料によらず平均単粒子破砕強度は石英が最も高く、有色鉱物は極めて低い値を示していることがわかる。そして、風化度が異なる両まさ土を比べてみると石英については風化度によらず UBE-A と SD の平均破砕強度はほぼ同じ値を示しているのに対し、有色鉱物は強熱減量の値が大きい SD の方が平均破砕強度は小さいことがわかる。このことから石英は風化に対して抵抗が強く、有色鉱物は風化の影響を受けやすい鉱物である³⁾ ことが明らかになった。長石は強熱減量の値が大きい SD の方が平均破砕強度の値が UBE-A より大きく、より風化度の高い試料の方が単粒子破砕強度が高いという結果になっている。これは、まさ土に含まれる長石にも様々な性質を持つものがあるにもかかわらず、本研究では実験の便宜上、長石を 1 種類に分類していること、粒子の配置方法や粒子の異方性を考えずに実験を行ったことも考えられるが、風化度には単粒子破砕強度の大小だけでなく鉱物組成によるところが大きいことを示している。

図-10 は様々な粒径において行った単粒子破砕試験の結果であり、破砕強度 σ_{fm} と粒径との関係をまとめたものである。一つのプロットについて、30 個以上の同一粒径に対して行った単粒子破砕試験の平均値を示している。まさ土の σ_{fm} は鉱物組成重量比を考慮して求めている。同じサイズの結果を比べると、石英質の Silica に比べ破砕性材料と呼ばれるまさ土は単粒子破砕強度が低いことがわかる。図中の Silica 砂を用いた実験の結果¹⁰⁾ から、単粒子破砕強度 σ_{fm} と粒子の初期高さ h_0 の関係は次式で表される。

$$\sigma_{fm} = Bh_0^{-0.79} \quad (5)$$

ここで、 B は粒径が 10mm の粒子の単粒子破砕強度である。また、図より式(5)は UBE についても概ね成り立つといえる。

表-2 に初期平均高さにおける各試料の平均単粒子破砕強度を示している。ここで、 \bar{h} とは単粒子試験結果から求められる粒子の初期高さの平均値である。また、表-1 の D_{50} とは粒径加積曲線から得られる平均粒径である。表-2 の結果から平均単粒子破砕強度は、ほとんど石英で構成されている Silica がまさ土の 2 倍ほど高く、有色鉱物が 30% も含まれている SD が最も低いことが明らかになった。

粒子の強度は形状、構成鉱物、材料内の欠陥（クラック）だけでなく、粒子サイズにより大きく変動する^{12),13)}。したがって、強度の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なる。ここでは加登ら⁸⁾と同様に粒子サイズに起因した破碎強度のばらつきと、粒子サイズは等しく粒子形状や構成鉱物などに起因した破碎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、今回用いたまき土の分散について考察する。

先ず粒子サイズに起因した破碎強度のばらつきについて考える。粒子集合体に応力が作用する時、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。ここで粒子の断面積割合とは土粒子全体の断面積に対する粒径 d_i の土粒子が占める断面積の割合を意味する。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碎強度の分散 $V(X)$ 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。本研究での粒径 d_i は i 番目のふるい目寸法 D_i と $i+1$ 番目のふるい目寸法 D_{i+1} の平均値であり、 $d_i = (D_i + D_{i+1}) / 2$ として求められる。

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

ここで σ_{fi} は、式(5)により定義される。また d_{mx} および d_{mn} は本研究で行った粒度試験の最大、最小粒径であり、それぞれ $d_{mx} = 2\text{mm}$, $d_{mn} = 0.115\mu\text{m}$ である。 σ_{fm}' は全粒子の平均単粒子強度の値であり次式で定義される。

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

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

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

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、平均粒径 D_{50} の粒子を対象とした単粒子破碎試験について考える。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表す。 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ので、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。

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係数 m
UBE-A	5.465	0.596	6.062	0.617
SD	5.042	0.625	5.668	0.626
Silica-A	0.137	0.624	0.76	1.103
Toyoura	0.021	0.372	0.392	1.470
Chiibishi	0.248	0.772	1.02	0.993

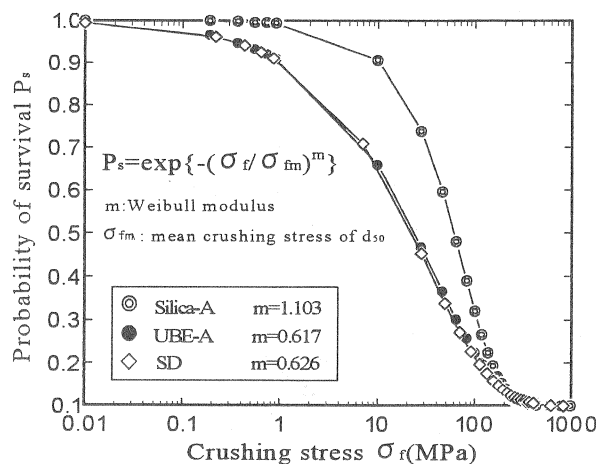


図-11 σ_r において粒子が破碎しない確率 P_s

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

Weibull¹⁴⁾ 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。

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

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る。 m 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 分布における分散値 V は次式により定義される。

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

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。

UBE-A, SD, Silica-A, また比較のために豊浦砂と Chiibishi 砂の $V(X)$, $V(Y)$, $V(X+Y)$, および Weibull 係数 m ⁶⁾ を表-3 に示す。粒子サイズに起因した破碎強度の分散値 $V(X)$ は細粒分を多く含んでいる UBE-A と SD が最も高く、細粒分がほとんど含まれていない Silica-A と豊浦砂の値は小さい結果であった。

Weibull 係数はその値が大きくなると単粒子強度のばらつきが小さいことを意味する。豊浦砂と Silica 砂の Weibull 係数の値がもっとも大きく単粒子強度のばらつきが小さいことがわかる。それに対して UBE-A と SD は Weibull 係数の値が小さく、Silica と比べ、単粒子強度のばらつきが大きいことが分かる。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 、

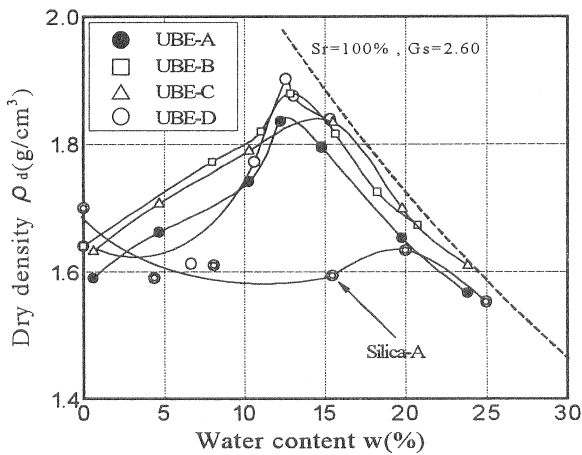


図-12 乾燥密度と含水比の関係(25回)

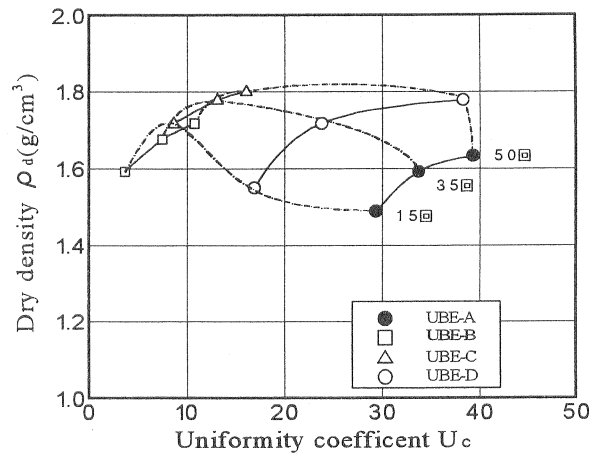


図-15 乾燥密度と均等係数の関係(気乾状態)

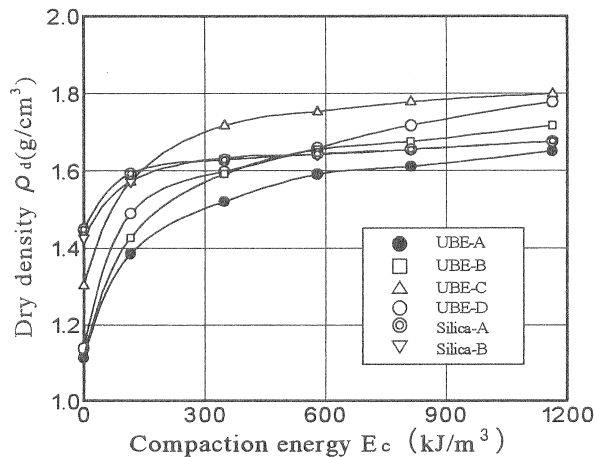


図-13 乾燥密度と締固めエネルギーの関係(気乾状態)

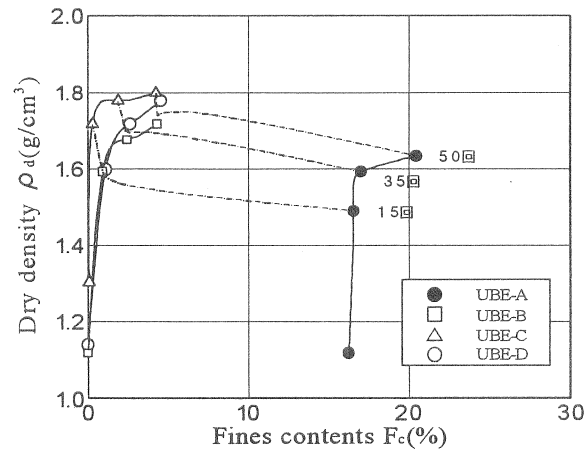


図-14 乾燥密度と細粒分含有率の関係(気乾状態)

を示したものが図-11である。この図から Silica-A より SD と UBE-A は単粒子強度のばらつきが大きく、平均単粒子強度の値が小さいことが見て取れる。

5. 締固め特性

5.1 締固め特性に及ぼす粒度分布の影響

表-1のように粒度分布を調節した4種類の宇部まさ土と2種類のシリカ砂を用いて行った締固め試験の結果から考察を行う。

図-12は突き固め回数を1層25回で締固め試験を行った結果を示している。図のように、まさ土とSilicaでは締固め曲線に明瞭な違いが認められる。また、宇部まさ土においても粒度分布の違いによって、締固め曲線が若干異なることがわかる。また、UBE-BとUBE-Dの最大乾燥密度はおよそ 19g/cm^3 を示し他よりも高い値を示している。一方、Silica砂は含水比の変化に伴う乾燥密度の変化が小さく、宇部まさ土のように乾燥密度の明確なピークがみられない。このことから単粒子破碎強度が低いまさ土は最適含水比までは含水比を増加させることにより締固まりやすい状態になるが、Silica砂のような単粒子破碎強度が高く、堅固な材料は明確な最大乾燥密度を示さず、締固めにくいものであるといえる。

図-13は気乾状態で締固め試験を行った宇部まさ土とSilica砂の乾燥密度と締固めエネルギーの関係を示している。突き固め回数を1層5, 15, 25, 35, 50回と変化させることでそれぞれの締固めエネルギーは 116kJ/m^3 , 349kJ/m^3 , 581kJ/m^3 , 814kJ/m^3 , 1162kJ/m^3 となる。ここで、締固めエネルギーが 0kJ/m^3 とは最大最小密度試験(地盤工学会基準 JGS 0161)から得られる最小密度である。この図から宇部まさ土はエネルギーの増加とともに乾燥密度も増加するが、Silica砂は締固めエネルギーが 300kJ/m^3 を超えたあたりからほとんど変化がみられない。Silica砂は初期のエネルギー段階では粒子の再配列により密度が増加するが、比較的堅固な材料であるため、それ以降はこの範囲の締固めエネルギーでは粒子破碎が進行せず、密度が一定の値をとり続けていると考えられる。

図-14に宇部まさ土の各粒度分布の乾燥密度と締固め後の細粒分含有率の関係を示す。各粒度分布について見ると、エネルギーが増加すると細粒分含有率は増加し、それとともに乾燥密度も大きくなることがわかる。同じエネルギーでの突き固めに着目すると、細粒分の多いものほど乾燥密度は小さな値をとっていることがわかる。次に、同じ結果について乾燥密度と締固め後の均等係数との関係を図-15に示す。締固め後はいずれの粒度分布も均等係数が増加し、粒度分布が良くなっている。それにとともに、乾燥密度も増加している。図-14と図-15にしめ

したように、細粒分含有率と均等係数のいずれについてもその増加とともに乾燥密度も大きくなることから、今回用いた試料では細粒分が多くなれば均等係数も大きくなる傾向があることを示している。各突固め回数で乾燥密度と均等係数の関係を見ると、それぞれの突固め回数で最も乾燥密度が大きくなる均等係数が現れてくる。これは、ある同一のエネルギーでの突固め条件では、最大の乾燥密度となりうる粒度分布が存在することを示唆している。

5.2 2種類のまさ土の締固め特性の比較

粒度分布はほぼ同じであるが、鉱物組成が異なる宇部まさ土とソンドまさ土を用いて行った締固め試験の結果から考察を行う。

図-16は突固め回数 1層 25回における UBE-A と SD, Silica-A を用いて行った締固め試験の結果である。

図-17は縦軸に乾燥密度を最大最小密度試験（地盤工学会基準 JGS 0161）から得られる最大密度で正規化した $\rho_d / \rho_{d(max)}$ を表し、横軸は含水比を示している。 $\rho_{d(max)}$ は粒子破碎が起こらない状態での最大の密度とみなすことができる。この図から締固めによる密度増加は粒子破碎強度が低い2つのまさ土の方が粒子破碎強度の高い Silica よりも大きく、Silica では $\rho_d / \rho_{d(max)}$ が 1 以下であることから密度増加は粒子の再配列によるものであることがわかる。図-18 に締固め後の含水比と細粒分増加量の関係を示している。Silica-A はいずれの含水比においても細粒分が増加していないのに対し、UBE-A と SD は含水比の増加に伴い細粒分が増加する傾向が認められる。また、UBE-A は締固め回数が増加しても細粒分の増加量に変化はないが、SD は含水比 10% 以上では増加している様子が認められる。しかし、図-17 より、乾燥密度は破碎量が多い SD より UBE-A の方が高いことがわかる。以上のことから、土の締固め特性には粒子の破碎性の影響が大きく現れることが明らかとなったが、単純に粒子破碎量が多い材料の方が最大乾燥密度が高くなるとはいえないことも示唆された。

6. 結論

本論文では粒度分布の異なる 4 種類の宇部まさ土と Silica を用いて締固め特性を調べた。また鉱物組成が異なる宇部まさ土とソンドまさ土を比較して鉱物組成が締固め特性に及ぼす影響について考察を行った。得られた知見を以下に示す。

1. まさ土に多く含まれる有色鉱物は他の鉱物と比べ単粒子破碎強度が極めて小さく破碎され易い鉱物であることが明らかになった。
2. 単粒子破碎試験からまさ土は Silica と比べて全般的に粒子強度が低く、平均粒径による粒子強度のばらつきが大きい試料であることがわかった。
3. 締固め試験からまさ土は粒子破碎を伴う粒子の再配列による密度増加が大きく、気乾状態において締固めエネルギーによって最もよく締固まる粒度分布が存在

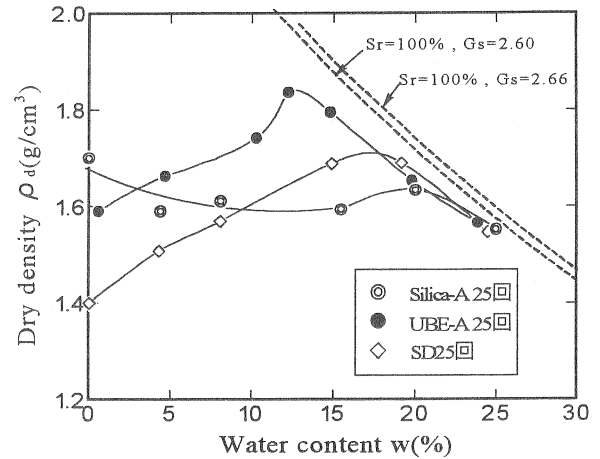


図-16 含水比と乾燥密度の関係

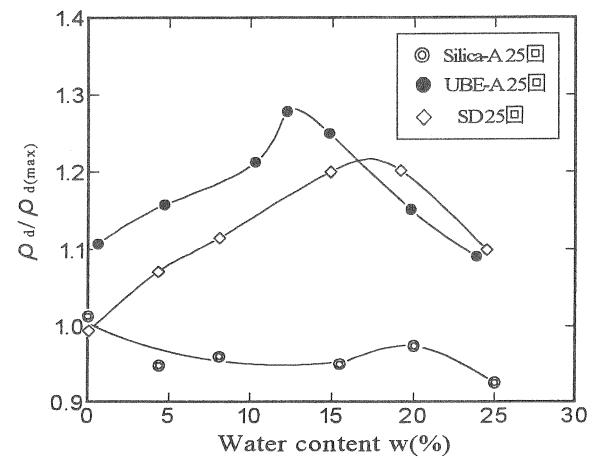


図-17 $\rho_d / \rho_{d(max)}$ と含水比の関係

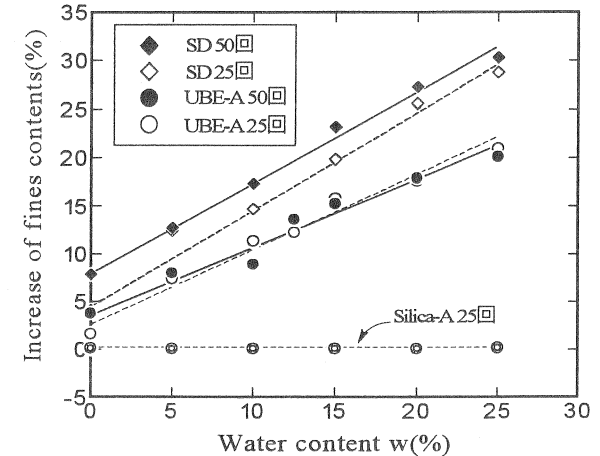


図-18 含水比と細粒分増加量の関係

4. 有色鉱物が 30%程度含まれているソンドまさ土は今回用いた試料の中で細粒分が最も増加し易い材料であることが分かった。
5. 土の締固め特性には粒子の破碎性の影響が大きいことが明らかとなったが、単純に破碎量が多い材料が最大乾燥密度が高くなるとはいえないことも示された。

謝辞

本研究を進めるに当たり、貴重なご助言をいただいた吉本憲正助手（山口大学工学部）、実験およびデータ整理に多大なご助力をいただいた石田修司君（山口大学大学院）に深く感謝します。

参考文献

- 1) Duek Hyon Do, Yea Hook Kang : 花崗岩質風化土の破碎性に関する研究, 韓国農工学会誌, 第 21 巻, 第 2 号, pp.81-103, 1979.
- 2) 松尾新一郎: まさ土の特性と問題点, 土と基礎 23, [2]. pp.1-8, 1975.
- 3) 土質工学会: 風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用, 土質基礎工学ライブラリー16, pp.175-183, 1980.
- 4) 高橋悟, 田中弥寿男: まさ土の風化とその判定法について, 地盤と建設 Vol. 1, No. 1, pp.1-8, 1983.
- 5) 安福規之: 風化度に着目したまさ土の圧縮・せん断特性, 山口大学工学部研究報告 Vol. 36, No. 1, 1985.
- 6) 加登文学: 単粒子の形状および強度に基づく破碎性材料の力学特性に関する研究, 山口大学博士論文, pp.28-29, 2002.
- 7) 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, pp.274, 1999.
- 8) 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一: 破碎性材料の粒子特性と一次元圧縮特性, 土木学会論文集, No. 701/Ⅲ-58, pp.343-355, 2002.
- 9) 若槻好孝: まさ土の締固め特性に関する研究, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.475-476, 2001.
- 10) 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.
- 11) 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碎特性, 土木学会論文集, No. 673/Ⅲ-54, pp.189-194, 2001.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) Weibull, W.: A statistical distribution function of wide applicability, Journal of Appl. Mech, Vol. 18, pp.293-297, 1951.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) McDowell, G. R., Bolton, M. D. and Robertson, D.: The fractal crushing of granular materials, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 44, No. 12, pp.2079-2102, 1996.
- 19) Billam, J.: Some aspects of the behaviour of granular materials at high pressures, Proceeding of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge, pp.69-80, 1971.
- 20) 平松良雄, 岡行俊, 木山英郎: 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.
- 21) 堀秀道: 楽しい鉱物図鑑, 草思社, p.181, 1992.
- 22) 森本信男: 造岩鉱物学, 東京大学出版会, p.45, 1989.