

土の締固め特性と粒子破碎に関する実験的考察

咸太圭 (社会建設工学科)
 中田幸男 (社会建設工学科)
 兵動正幸 (社会建設工学科)
 村田秀一 (社会建設工学科)
 吉本憲正 (社会建設工学科)

Experimental consideration on compaction characteristics and particle crushing of soils

HAM Tae Gew (Department of civil Engineering)
 Yukio NAKATA (Department of civil Engineering)
 Masayuki HYODO (Department of civil Engineering)
 Hidekazu MURATA (Department of civil Engineering)
 Norimasa YOSHIMOTO (Department of civil Engineering)

In order to understand the compaction characteristics and particle breakage for soil, a series of the experimental tests have been carried out for two Masado and silica sand. One of the Masado was sampled in Ube, and the other in Sondo, Incheon city, South Korean. X-ray diffraction, the mineral composition classification test, the single particle crushing test were conducted to understand the physical properties of Masado, especially the degree of weathering. (1) Sondo Masado contains 30% of the colored mineral. The rate of the colored mineral of the Ube Masado is as low as 9%. (2) Sondo Masado has lower average single particle crushing strength than that for Ube Masado. As comparing with Silica, single particle strength of Masado was lower, and the variation in particle strength for Masado was larger. (3) Although the density of Masado in the compaction test increased clearly with increasing particle breakage, the amount of particle breakage doesn't control the degree of compaction (the density) for soil from the experimental evidence which Sondo masado showed more breakage and the lower density than Ube masado.

Key Words : *Compaction, Weathering, Crushability, Single particle crushing, Mineral composition, Weibull Modulus, Fines*

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 **Figure 1** に示すように韓国、日本を始め全世界に広く分布している土であり、土木工事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Silicaを用い、締固め試験、単粒子破碎試験を行い、ミクロな粒子の形状や粒子の強度に着目しながらまさ土の締固め特性について考察を行った。

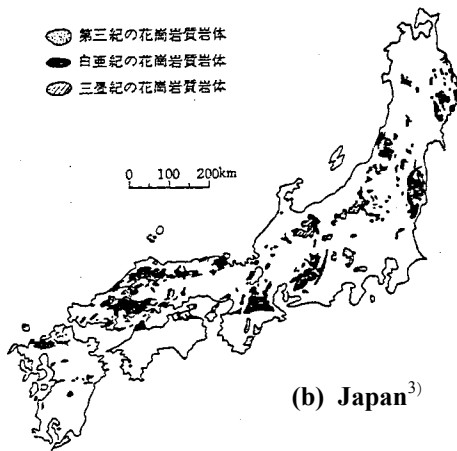
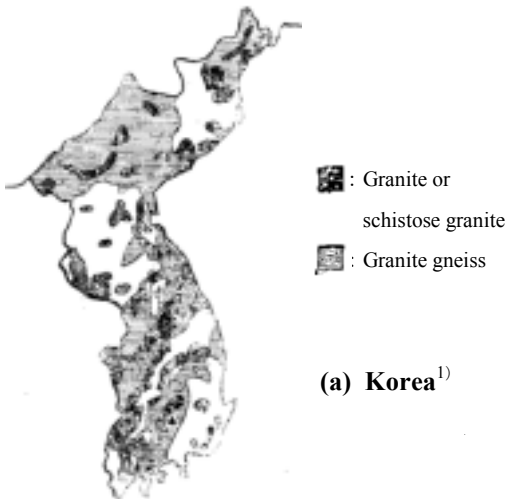


Figure 1 distribution of granite soil

2. 用いた試料及び実験方法

2.1 用いた材料の物性値

本研究では山口県宇部市で採集されたまさ土と韓国の仁川（インチョン）市のソンドで採集したまさ土の 2mm ふり通過分を試料として用いた。また比較のために粒度分布を 0.18mm から 2.0mm に調整した三河珪砂である Silica を用いた。以下それぞれの試料を本論文では“UBE”，“SD”，“Silica”と呼称する。Table 1 にその物性値を示す。

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

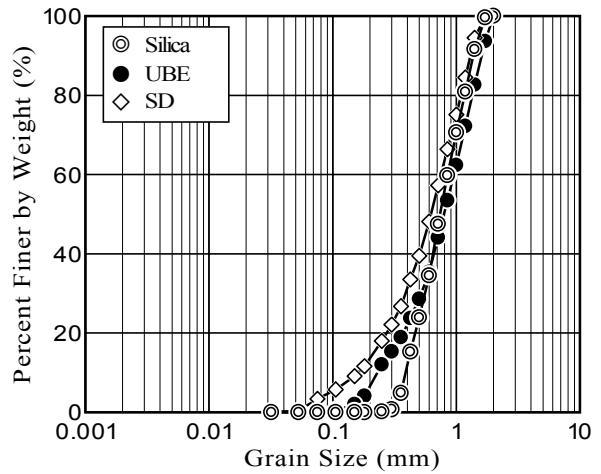


Figure 2 Grain size distribution curves for used soils(JIS A 1204)

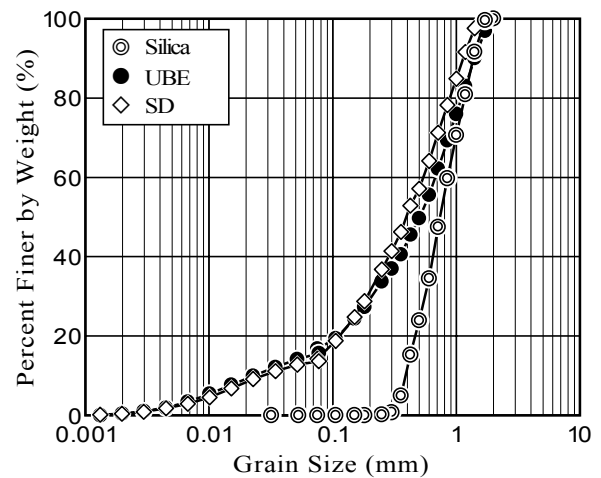


Figure 3 Grain size distribution curves for used soils (wet method)

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。Figure 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

Table 1 Physical properties of soils used

sample	grain size	Gs	e_{max}	e_{min}	D ₅₀	ignition loss(%)	Uc
Silica	0.18~2.0	2.65	0.93	0.58	0.736	1.184	2.19
UBE	~2.0	2.60	1.31	0.81	0.509	3.995	22.4
SD	~2.0	2.66	1.44	0.89	0.394	5.295	10.3

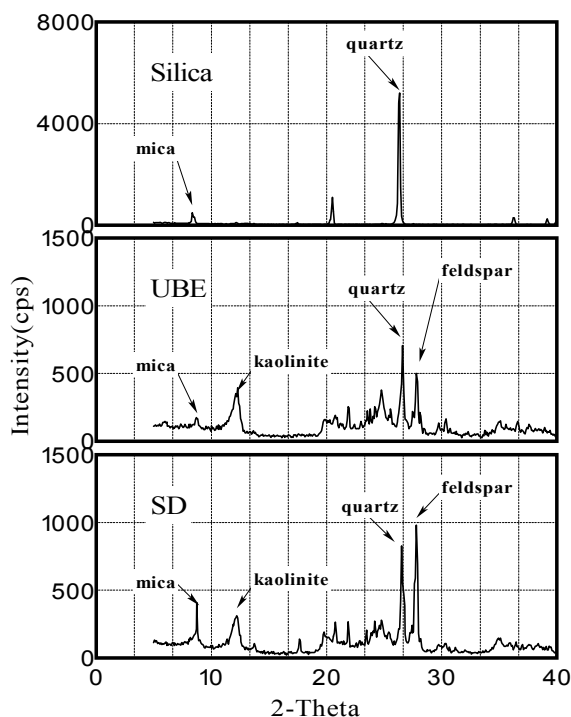


Figure 4 X-ray diffraction curve of the soils used

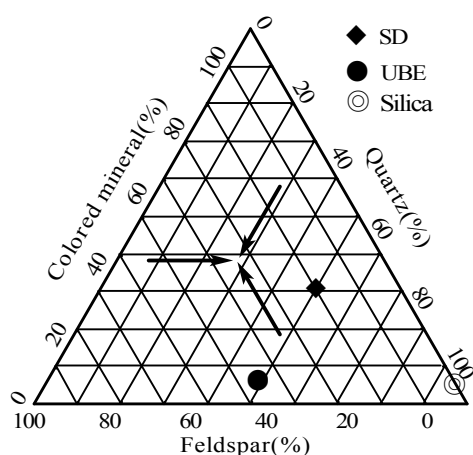


Figure 5 mineral rate of soil use

いる。本研究では UBE 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 $75 \mu\text{m}$ 以下の細粒分についてはレーザ回折法により、粒径が $75 \mu\text{m}$ 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 Figure 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。

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るつぼに入れ 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 線回折試験は各試料の $75 \mu\text{m}$ 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²⁾に分けた。ここで無色鉱物とは白っぽい、もしくは無色透明に近い鉱物をいい、有色鉱物とは濃い色の鉱物で、岩石の中に入っていると黒っぽく見えるものである。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強熱減量を調べた。Table 1 にその結果を示している。UBE 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 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。その結果を **Figure 4** に示している。図より Silica 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 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 Silica は石英と有色鉱物、UBE と SD は石英、長石、有色鉱物の3種類に分類した。その結果を **Figure 5** に示す。図より Silica 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 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 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 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。

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

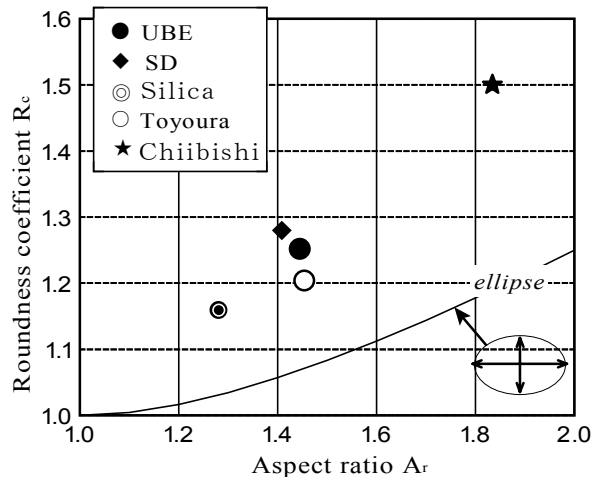


Figure 6 Relationship between R_c and A_r



Photo 1 Micrograph of the soils used

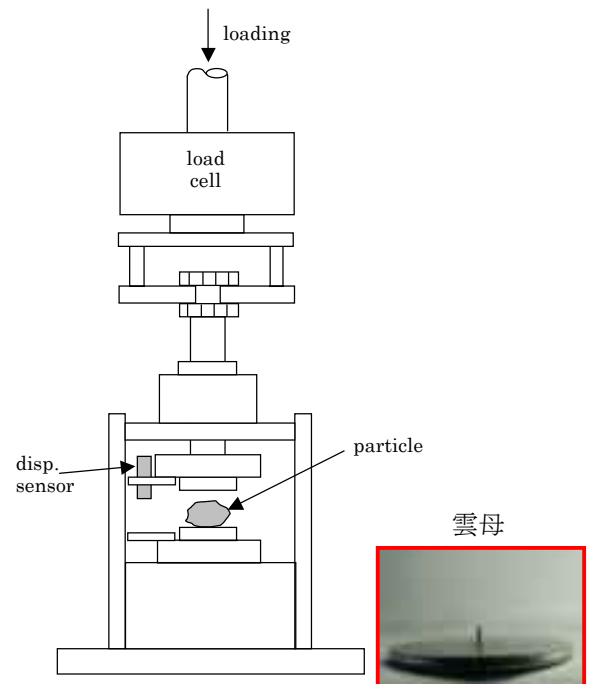


Figure 7 Schematic diagram of particle crushing testing apparatus^{10),11),12)}

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。実験としては後述する単粒子破碎試験に用いた水洗いた粒径（平均粒径 d_{50} ）と同じ粒径の鉱物別に各々30個以上の粒子に対し顕微鏡による観察を行った。Figure 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 Chiibishi 砂を示している。また Photo 1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 Chiibishi 砂は真円度と縦横比の値が最も大きいことがわかる。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 と SD は両方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 Figure 7の装置におい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、粒子が扁平で層状を成している²¹⁾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 Figure 7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。各試験は荷重速度 0.1mm/min で行った。荷重は測定精度が 9.81×10^{-3} N であり最大 4.91×10^2 N 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^{-3} mm、最大 2.00mm まで計測可能な非接触型変位計により計測を行った。

破碎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⁾により破碎強度を算出した。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がその粒子の引張強度と等しくなったときに破碎を起こす。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、

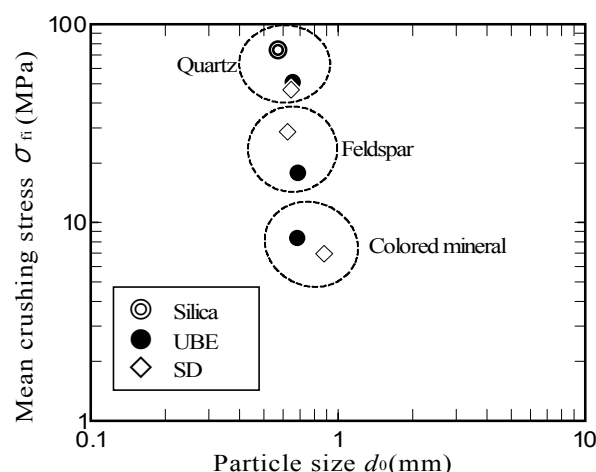


Figure 8 Single particle crushing strengths for each mineral

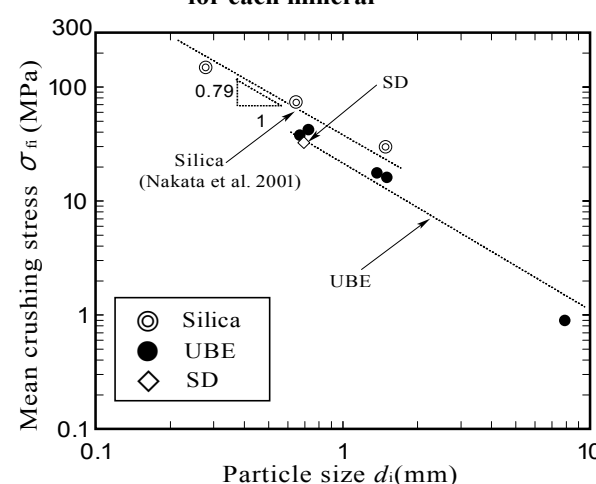


Figure 9 Relationship between single particle crushing strength and grain size

粒径 d_0 により次式によって表される。

$$\sigma = \frac{XF}{d_0^2} \quad (3)$$

ここで、 X は定数であり、その値は Billam¹⁹⁾によると、 $X=2.0/\pi$ 、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碎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 を破碎強度とする。すなわち最大ピーク荷重 F_f における最大破碎強度 σ_f は次式により求められる。

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

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る。

Figure 9に各試料の各鉱物に対する平均単粒子破碎試験の結果を示している。図より、試料によらず平均単粒子破碎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き土を比べてみると石英については風化度によらず UBE と SD の平均破碎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 の方が平均破碎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易い鉱物である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 の方が平均破碎強度の値が UBE より大きく、より風化度の高い試料の方が単粒子破碎強度が高いという結果になっている。これは、まき土に含まれる長石にも様々な性質を持つものがあるのにもかかわらず、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碎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。

Figure 8 は様々な粒子において行った単粒子破碎試験の結果であり、破碎強度 σ_{fi} 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碎試験の平均値を示している。まき土の σ_{fi} は鉱物組成の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 に比べ破碎性材料と呼ばれるまき土は単粒子破碎強度が低いことがわかる。図中の Silica 砂を用いた実験結果¹⁰⁾から、単粒子破碎強度 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 は粒径が 1.0mm の粒子の単粒子破碎強度である。また、図より式 (5) は UBE についても概ね成り立つといえる。

Table 2 single particle crushing test results

sample	σ_{fm} (MPa)	D_{50} (mm)	Colored mineral(%)
Silica	74.2	0.57	6
UBE	33.1	0.67	9
SD	31.1	0.71	30

Table 2 に平均粒径における各試料の平均単粒子破碎強度を示している。この結果から平均単粒子破碎強度は、ほとんど石英で構成されている Silica がまき土の 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。

ま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。粒子集合体の単位面積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。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。

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

ここで σ_{fi} は、式 (5) により定義される。また d_{max} および d_{min} 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 $d_{max}=2\text{mm}$, $d_{min}=0.115\ \mu\text{m}$ である。 σ_{fm} は全粒子の平均単粒子破碎強度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 $\sigma_{fi} / \sigma_{fm}'$ の平均値であり次式で与えられる。

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

次に、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粒径 d_{50} の粒子に対し行われた単粒子破碎試験の結果から考える。破碎強度の確率変数 $Y (= \sigma_{fj} / \sigma_{fm})$ 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_{fi} , 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 個を抽出する確立であり、 $1/n$ 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。

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

Table 3 Distribution of particle crushing strength and Weibull modulus

sample	V(X)	V(Y)	V(X)+V(Y)	Weibull係数 m
UBE	5.465	0.596	6.062	0.617
SD	5.042	0.625	5.668	0.626
Silica	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

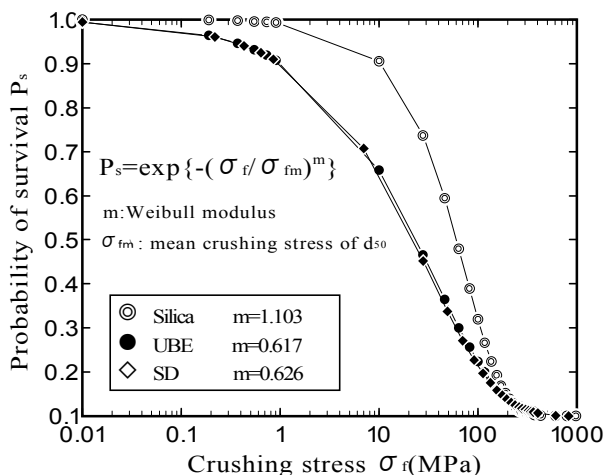


Figure 10 Relation of probability of survival P_s against crushing stress σ_f

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。

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

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(10)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。

今回用いた 2 種類のまさ土と Silica, 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 **Table 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

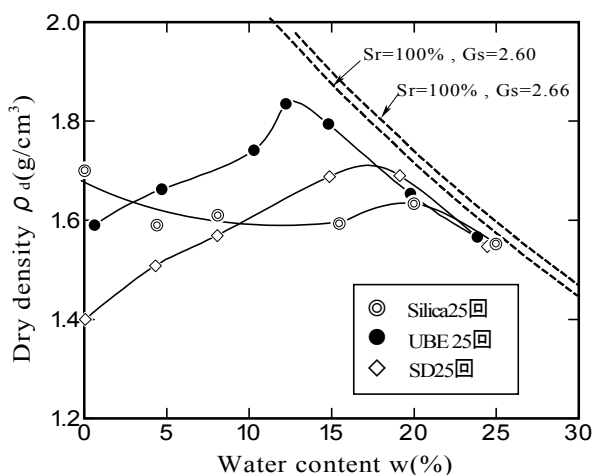


Figure 11 Relationship between water content and dry density

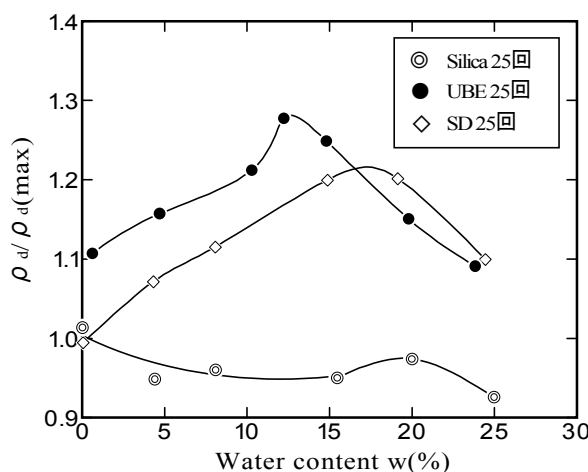


Figure 12 Relationship between water content and $\rho_d / \rho_d(\max)$

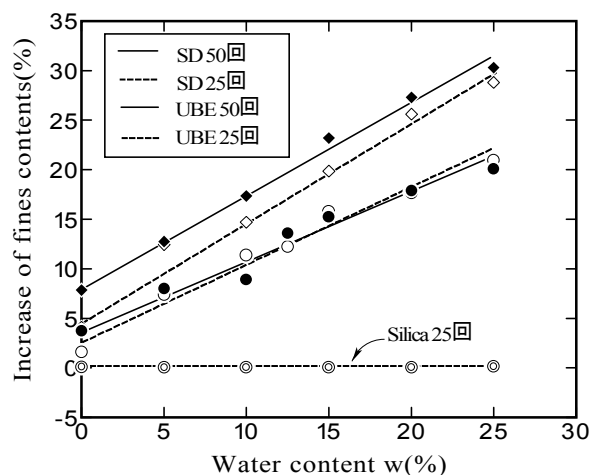


Figure 13 Relationship between water content and increase of fines contents

分を多く含んでいる UBE と SD が最も高く、細粒分がほとんど含まれていない Silica と豊浦砂の値は小さい結果であった。また、粒子形状や構成鉱物などに起因した破碎強度の分散値 $V(Y)$ は破碎強度が

小さい有色鉱物を多く含んでいる SD が最も高い値を示している。

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 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砕強度 σ_{fm} とし、ある強度における粒子が破砕しない確率 P_s を示したものが図-11 である。この図から Silica より SD と UBE 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

締固め試験は、JIS A 1210 A-b で行い、突き固め回数を 15, 25, 35, 50 回に変化させた。試験終了後の各試料は、水洗いをしながらふるい分析を行い粒子破砕量を調べた。Figure 11 は突き固め回数 1 層 25 回における締固め試験の結果である。

Figure 12 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。 $\rho_d(\max)$ は粒子破砕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砕強度が低い 2 つのまさ土の方が粒子破砕強度の高い 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破砕を伴う粒子再配列によるものであることがわかる。Figure 13 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 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 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 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、Figure 11 より、乾燥密度は破砕量が多い SD より UBE 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砕性の影響が大きく現れることが明らかとなったが、単純に粒子破砕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砕強度が極めて小さく破砕され易い鉱物であることが明らかになった。
2. 単粒子破砕試験からまさ土は Silica と比べて一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砕を伴う粒子の再配列による密度増加が大きくなることがわかった。
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わかった。
5. 土の締固め特性には粒子の破砕性の影響が大きいが明らかとなったが、単純に破砕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。

参考文献

- 1) Duek Hyon Do・Yea Hook Kang：花崗岩質風化土の破砕性に関する研究，韓国農工学会誌，第 21 巻，第 2 号，pp. 81～103，1979 年
- 2) 松尾新一郎：まさ土の特性と問題点，土と基礎 23，[2]，1～8，1975 年
- 3) 土木工学会：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 年
- 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，地盤と設計 1，[1]，pp.1～8，1984 年
- 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 年
- 6) 加登文学：単粒子の形状および強度に基づく破砕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 年
- 7) 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，pp.274，1999 年

- 8) 加登文学・中田幸男・兵動正幸・村田秀一：1965年
 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年
 2 1) <http://www.mica.ymsc.co.jp/kiso/kiso.html>
 2 2) <http://www.ceres.dti.ne.jp/~usa-kuma/geo/mineral/mineral.html>
- 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概要，pp.475～476. 2001年
- 1 0) 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年 (平成14年08月30日受理)
- 1 1) 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年
- 1 2) 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年
- 1 3) 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年
- 1 4) Weibull, W. : A statistical distribution function of wide applicability, *Journal of Appl. Mech.*, Vol.18, pp.293～297, 1951年
- 1 5) 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年
- 1 6) 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年
- 1 7) 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年
- 1 8) 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年
- 1 9) Billam, J. : Some aspects of the behaviour of granular materials at high pressures, *Proceeding of the Roscoe Memorial Symposium*, Cambridge, pp.69～80, 1971年
- 2 0) 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.