

相似粒度に調整した粗粒材料の 強度特性に及ぼす粒子形状と粒子破碎の影響

軽部大蔵¹・野並 賢²・鶴ヶ崎和博³・山口 充⁴

¹正会員 工博 神戸大学教授 大学院自然科学研究科地球環境科学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町)

²正会員 工修 応用地質(株) 関西事業本部設計部(〒564-0062 大阪府吹田市垂水町 2-36-27)

³正会員 工修 東洋建設(株) 総合技術研究所鳴尾研究所(〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 3-17-6)

⁴工修 (株)鴻池組 大阪本社土木設計部(〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町 6-1)

本研究では実材料の強度を相似粒度試料から推定する方法を確立することを目的に、相似粒度試料間の力学的特性の相似性を検討している。力学試験としては母岩の異なる相似粒度試料の三軸圧縮 CD 試験を実施した。その結果、初期相対密度を揃えた供試体では、粒子形状の差異が粒度間における強度差の主要な原因であることが明らかとなった。粒子破碎が軸圧縮中に発生したが、その圧縮強度への影響は明らかでなかった。ただし、粒子破碎は粒子の角がとれる程度にとどまっていた。

Key Words : coarse materials, parallel grading, grain shape, particle breakage

1. まえがき

従来、ロックフィルダムやケーソンの基礎など、粗粒材料を用いた構造物が数多く建設されている。これらの構造物を安全かつ経済的に設計するには粗粒材料の力学的特性を正しく評価することが必要である。そのためには実材料を力学試験するのが理想であるが、たとえば最大粒径が 1m 以上に及ぶような実材料を力学試験することには、試験装置や費用の制約がある。この問題の対応策として、粒径の大きい部分を除去したせん頭粒度試料や、実材料を一定の割合で縮小した相似粒度試料など、同一母岩から作製されたより小さい粒度の試料を用いて室内試験を行い、その結果から実材料の力学特性を推定しようとする試みがある。しかし粗粒材料の著しい粒子破碎性等の材料特性や、異なる粒度間における力学挙動の相似性についての系統だった研究は、いまだ途上にあると考えられる。そのため、室内試験の結果を現場の設計に反映させるのには慎重ならざるを得ない状況である。

室内試験の結果を実材料に外挿するには、実材料と相似粒度試料の材料特性の相違点に着目し、その違いが強度に及ぼす影響を把握する必要がある。本論文では、2 種類の母岩からそれぞれ相似粒度試料を作製し、それらを同じ相対密度に調整して三軸 CD 試験を行い、その強度特性を検討している。

2. 既往の研究

(1) 粒子破碎

粗粒材料は粒子間に粘着力のない摩擦性材料であるため、その工学的性質は砂と本質的に変わらない¹⁾。しかし、比較的低压域においても顕著に生じる粒子破碎が、粗粒材料に特徴的な第一の性質であると考えられる。粒径の小さな砂は高压域において顕著な粒子破碎を生じるが、火山性粗粒土やまさ土等の破碎性土は低压域でも粒子破碎を生じることが報告されている²⁾⁹⁾。粒子破碎の要因について、高橋ら⁷⁾は花崗岩質試料の三軸試験より、最大粒径が同じであれば粒度分布が悪い(均等係数が小さい)試料ほど、また相対密度が大きい試料ほど粒子破碎率は高くなるとしている。Miura et al.⁸⁾は粒度調整をした 80 種類以上の砂試料の粒子破碎特性を調べ、平均粒径が大きく、均等係数が小さく、角張った粒子から成る試料ほど粒子破碎量は多くなるとしている。

粒子破碎量は等方圧密時よりもせん断時に多く生じ、拘束圧(側圧)が増大するにつれてそれらの量は多くなる。圧密時においては、粒子破碎が顕著になり始める応力と、圧密降伏応力の間的良好な相関性がある⁹⁾。中田ら¹⁰⁾は、着色粒子を混入した秋穂砂の高圧三軸試験を行い、比較的脆弱な長石粒子の方が堅固な石英粒子よりも破碎開始応力が小さいことを見出した。粒子

破碎の形態は、大まかに分けて粒子が粉々に壊れる、粒子の角張りがとれる、粒子表面のギザがとれる、に区別できると考えられる。三浦ら²⁾は、豊浦砂は高压三軸試験により粒子が丸くなることを示している。ところで、粒子破碎は母岩の圧裂強度や風化の程度と関連があり、各種母岩が入り混じっているような試料や、粒径により風化度合が異なる試料では、様々な形態の破碎が同時に生じていると考えられる。しかし、現状ではそれらを区別して評価することはできない。

粒子破碎は強度定数に影響を与えることが指摘されている。三浦ら³⁾、Yamamuro and Lade⁴⁾はそれぞれ豊浦砂と Cambria 砂を用いた高压三軸試験より、粒子破碎は負のダイレイタンスを引き起こし、結果的に強度低下をもたらすが、やがて粒子破碎が鈍化すると強度低下の度合も小さくなることを示している。粗粒材料の三軸試験結果からも同様の見解が得られており^{11)~13)}、強度定数の側圧依存性に粒子破碎が関連することが示唆されている。しかし、三軸試験後の観察から、粒子破碎のみが側圧依存性の原因でないことを示唆する報告¹⁴⁾や、強度特性に粒子破碎はあまり影響を与えないという報告もあり、粒子破碎が強度に与える影響に関する見解は一致していない。また粗粒材料のせん断抵抗角は、粒子の圧裂強度とも密接な関係があることが報告されている¹⁵⁾。

(2) 粒子形状

吉村ら¹⁶⁾は、粒状土の強度定数に及ぼす影響因子の中で、粒径や粒度分布、粒子形状など、試料の生来的な性質である一次性質¹⁾に関連する事柄に着目し、粒子形状の影響が最も大きいとしている。以下に粒子形状を表す指標および粒子形状が強度定数に与える影響に関する研究を紹介する。

粒子の凹凸度合を表す指標がいくつか提案されている。Wadell¹⁷⁾は粒子の円磨度を表す指標として、その値が大きいほど粒子が丸みを帯びる Roundness の概念を考案している。下辺ら¹⁸⁾は最上の強度定数 k と最小間隙比 e_{min} の関係図を整理する際、粒子形状の指標に Roundness を用いており、その値が大きいほど強度定数は小さくなるとしている。Lees¹⁷⁾は、その値が大きいほど試料の角張り度合が大きくなる Total Degree of Angularity=A を提案している。Miura et al.⁸⁾は砂の粒子形状の定量化に A 値を採用している。吉村ら¹⁶⁾は粒子の投影面積と周長を用いて、粒子が角張るほどその値が小さくなる凹凸係数 FU を提案した。彼らは、FU が小さいほどせん断抵抗角が大きくなるという、良好な相関を見出した^{16),19)}。

一方、粒子の立体的な形状を示す指標として、Zingg¹⁷⁾は図-1 に示すように、粒子を3辺の積が最小に

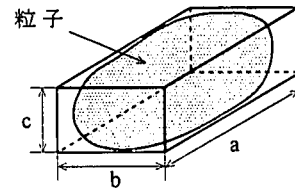


図-1 Zingg の分類における 3 直径

なるような直方体に詰めるとき、辺の寸法を大きいものから最大径(a)、中間径(b)、最小径(c)とし、伸張率:b/a、扁平率:c/b を定義して粒子の形を整理する方法を提案した。春山²⁰⁾は扁平率の異なる鉛弾を用いて三軸試験を行い、扁平率が小さい(扁平な)ものほどせん断抵抗角が大きくなるとしている。

以上のように、粒径の小さい、粒子破碎を生じにくい砂試料の場合、ある程度は粒子形状からせん断抵抗角を推定できる。しかし、粗粒材料の場合、粒子形状の指標のみで、その特徴的な性質である強度定数の側圧依存性を表現できるかについては研究成果が少ない。なお、強度定数の側圧依存性に関する既往の研究は5.(3)で紹介する。

(3) 粒子サイズ

実材料と相似粒度試料の間で幾何学および力学的な相似条件が異なっていることは「粒子サイズ効果」¹⁾と呼ばれている。赤司¹²⁾は緑色片岩もしくは玄武岩から作製された相似粒度試料の最大乾燥密度 $\rho_{d,max}$ と、最大粒径 D_{max} の対数が直線関係で表されることを示している。また、強度定数が相対密度の関数となることを示し、さらに相対密度よりも簡便な有効間隙比の有用性を示している。

相似粒度試料間の強度差に関する報告はこれまで数多くされており、いくつかの文献に整理されている。その結果の多くは、粒度(粒子サイズ)が大きくなるにしたがって強度定数は小さくなることを示しており、これを「粒度が大きくなるほど粒子破碎量が多くなり、ダイレイタンスが抑えられるから」と結論づけている^{11)~13)}。しかし、砂の粒度の範囲では、粒径の大きい試料ほど強度定数が大きくなるといった報告²¹⁾や、粒度にかかわらず強度差は生じないといった報告⁷⁾もあり、粒度差と強度差に関する見解は一致しておらず、その原因も十分に解明されていない。

また、最大・最小粒径が同じで均等係数が異なる試料の強度特性²²⁾や、粗粒分の割合を調整した礫補正試料の強度特性²³⁾なども報告されている。

(4) 著者らの研究成果

著者らは、神戸大学工学部において粗粒材料の三

表-1 土粒子の物理特性

試料	絶乾比重 D_p	吸水率 $Q(\%)$	比重 G_s
流紋岩質大粒径	2.525	2.095	2.666
流紋岩質小粒径	2.534	1.927	2.664
花崗岩質大粒径	2.606	1.235	2.692
花崗岩質小粒径	2.604	1.280	2.693

表-2 試料の最大・最小間隙比

試料	e_{MAX}	e_{MIN}
流紋岩質大粒径	0.885	0.587
流紋岩質小粒径	0.967	0.628
花崗岩質大粒径	0.842	0.583
花崗岩質小粒径	0.877	0.624

軸CD試験を中心とする実験的研究を次のように進めてきた: 1)大型三軸試験機(供試体寸法: $\phi 30\text{cm} \times h60\text{cm}$)の試作, 2)試料の最大粒径と供試体寸法の比が試験結果に与える影響の検討, 3)供試体形状(直径/高さ)の影響の検討, 4)試料中の扁平粒子を分離するための「簾ふるい」の開発, 5)相対密度の導入。

本論文では上記(1)~(3)で概観した既往の研究成果を踏まえ, また(4)に示した著者らの研究成果を引用しながら, 問題を「実材料の圧縮強度を相似粒度試料の試験結果から推定する方法の確立」に限定して論述するものである。

3. 試料および試験方法

(1) 試料

流紋岩質および花崗岩質のクラッシュヤーンをそれぞれふるい分け, 各岩種について相似比 3:1 の大粒径試料と小粒径試料を作った。試料の粒度分布形は, 力学特性がよく知られている豊浦砂とほぼ同じに設定した。土粒子の物理特性を表-1に, 粒度曲線を図-2に示す。なお, 最大・最小粒径(mm)は, 大粒径試料(13.2, 4.75), 小粒径試料(4.75, 1.70)である。小粒径試料は砂分を 5%含んでいるが, 土質分類名は, 大・小粒径試料とも「粒度の悪い礫(GP)」である。

つぎに, 構成土粒子の形状を凹凸係数 FU と Zingg の分類法によって定量化した。結果を表-3に示す。 FU は吉村優治博士(岐阜工業高等専門学校)のご好意により測定された値である。同じ岩種ならば粒度間に差がないが, 岩種に注目すると花崗岩質の方が FU は大きく, したがって粒形が丸いことが分かる。つぎに, Zingg の分類法については, まず図-3に各試料から無作為に抽出した粒子 100 個の扁平率と伸張率を示す。定量値は, 100 個の平均(図中の黒塗り記号)で表すこととした。図-3より, 花崗岩質試料では粒度間で粒子形状の差はみ

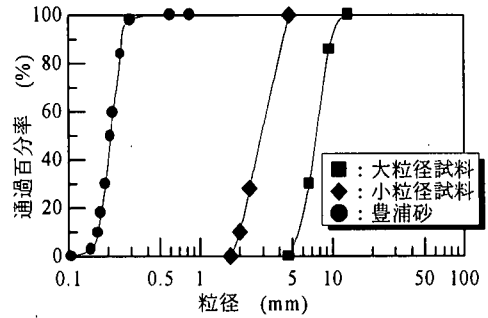


図-2 粒度曲線

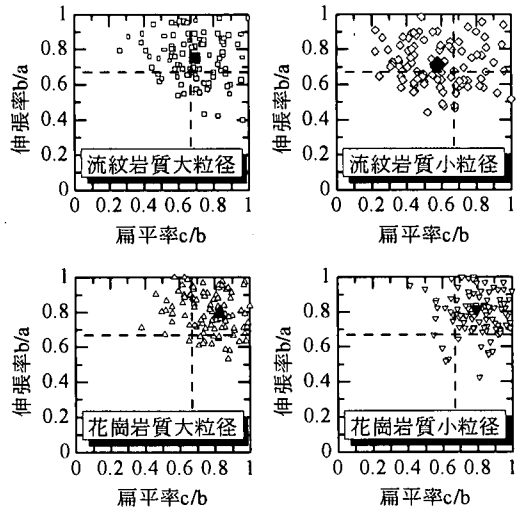


図-3 試料の粒子形状 (黒塗り記号は平均値を示す)

られないが, 流紋岩質試料は小粒径試料の方が扁平であることおよび, 扁平率と伸張率に相関があることがわかる。岩種に注目すると, Zingg の分類法によっても花崗岩質の方が丸いことが分かる。これらのことから, 本論文では粒子形状を Zingg の扁平率で代表させることにする。

試料の最大・最小間隙比は内径 24cm, 高さ 22cm の金属製容器を用いて求めた。炉乾燥試料をハンドスコープでできるだけゆるめ詰めとなるように入れ, 最大間隙比と見なした。最小間隙比は, 試料を 10 層に分けて入れ, 各層ごとに容器の側面をプラスチックハンマーで, その振幅を 5cm 程度にして, 1000 回打撃した。間隙比の算出には, 絶乾比重を用いた。結果を表-2 に示す。表より, 小粒径試料の方が大粒径試料よりも最大・最小間隙比共に大きいことがわかる。締め固めによる粒子破碎は, 流紋岩質試料では皆無であったが, 花崗岩質試料で若干みられた。なお, 各試料の面載荷による圧裂強度は表-3に示されている。

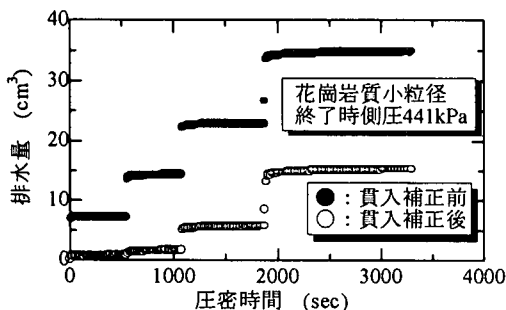


図-4 時間～排水量関係

(2) 試験方法

三軸圧縮試験には、直径10cm、高さ20cmの供試体に適合する通常の中型三軸試験機を用いた。計測データはセンサーの出力をデジタル信号に変換してパーソナルコンピュータで自動計測した。軸荷重計が三軸セルの外部に取り付けられているため、ピストンの摩擦軽減の目的から軸受けはリニアモーションベアリングとなっている。軸方向変位はピストンに取り付けた変位計で計測し、体積変化の測定は、飽和供試体であるので排水ビュレットの水位を差圧計で計測することによった。

供試体は水中で作製した。供試体の密度は相対密度によって管理し、 $Dr=90\%$ 程度の比較的密詰めとした。所定の密度を得るため、モールド側面のプラスチックハンマーによる打撃および金属棒による突き固めを併用した。試料の飽和を促進させるため、水浸状態の試料に $-98kPa$ の負圧を24時間与えた。

圧密過程では、所定の側圧を一挙に加えると、メンブレンが破損しやすいので、段階的に増圧した。また、Vaid²⁴⁾の方法によるメンブレン貫入補正を行った。

軸圧縮過程はひずみ制御による側圧一定の両面排水条件で行った。軸ひずみ速度は、予備試験より過剰間隙水圧が発生しない値として、 $0.4\%/min$ とした。

三軸試験後に粒子破砕量を評価するため、再度粒度試験を行った。まず、試験後試料を乾燥させたが、乾燥割れを避けるために乾燥条件を $40^{\circ}C$ 、24時間とした。ふるい分け作業は、自動ふるい機で15分間ふるった後、各ふるいを個別に再度振とうして行った。

4. 試験結果の整理

(1) 圧密過程

圧密過程の例として、図-4に花崗岩質小粒径試料を側圧441kPaまで圧密した時の時間～排水量の関係を示す。増圧による排水は1分程度で落ち着いており、大きな透水性がうかがわれる。また、全排水量に占めるメンブレン貫入分は約60%であった。

(2) 軸圧縮過程

図-5に流紋岩質試料、図-6に花崗岩質試料の応力～ひずみ線を示す。図中の実線は軸ひずみ～主応力差線で、破線は軸ひずみ～体積ひずみ線である。全ての試料に共通して、側圧が増加するにつれ破壊時の軸ひずみが増大し、また体積ひずみは収縮傾向となった。

また、大粒径試料と小粒径試料を比較すると、大粒径試料の方が軸ひずみ～主応力差曲線の凹凸が激しい。これは大粒径試料の方が最大粒径 D_{max} と供試体直径 ϕ の比が大きいためと考えられる。ただし既往の試験結果によれば、軸圧縮強度そのものは (D_{max}/ϕ) 比に影響されていない。すなわち、流紋岩質大粒径試料の供試体直径30cm、高さ60cm($D_{max}/\phi \approx 1/23$)の結果と今回と同じ中型供試体($D_{max}/\phi \approx 1/8$)の結果に強度差はみられなかった²⁵⁾。

(3) 試験後粒度試験

三軸圧縮前後の粒度曲線の例として、図-7に流紋岩質大粒径試料の側圧490kPaの場合を示す。図より、三軸試験後は粒度曲線が細粒側に移動し、粒子破砕していることがわかる。粒子破砕の指標としては、試料が貧粒度であること、細粒分を含んでいないことから、最小ふるい通過率 B_{ms} を用いることにした。 B_{ms} は、通過百分率が原粒度における0%の粒径から細粒分の増加した割合で示される。本指標は算出が容易であり、個人誤差がないといった利点がある。他の指標については福本²⁶⁾、石井²⁷⁾等に詳述されている。

粒子破砕量は軸ひずみと密接な関係にあることが報告されている。流紋岩質大粒径試料を用いて一定の側圧(294kPa)下で、複数の供試体について相異なる軸ひずみで試験を終了させ、軸ひずみと粒子破砕量の関係が調べられた²⁸⁾。その結果は、 B_{ms} が軸ひずみの2/3乗に比例するという式(1)にまとめられた。なお、圧密時には粒子破砕は生じなかった。

$$B_{ms} = A \cdot \epsilon_a^{2/3} \quad (1)$$

ただし、 A : 比例定数、 ϵ_a : 軸ひずみ

本研究では各供試体の試験終了時の軸ひずみは、試験機の容量の制限や試験途上のメンブレンの破損等により一定ではないため、実際に測定された軸ひずみと B_{ms} を式(1)に代入し、比例定数 A を算出するとともに軸ひずみ20%時に換算した B_{ms} を求め、これによって粒子破砕率を評価した。

5. 強度定数に関する考察

(1) せん断抵抗角とダイレイタンス係数

粗粒材料を三軸圧縮試験し、破壊時主応力 σ_1 (軸圧)と σ_3 (側圧)を用いてモールの応力図上に破壊包絡

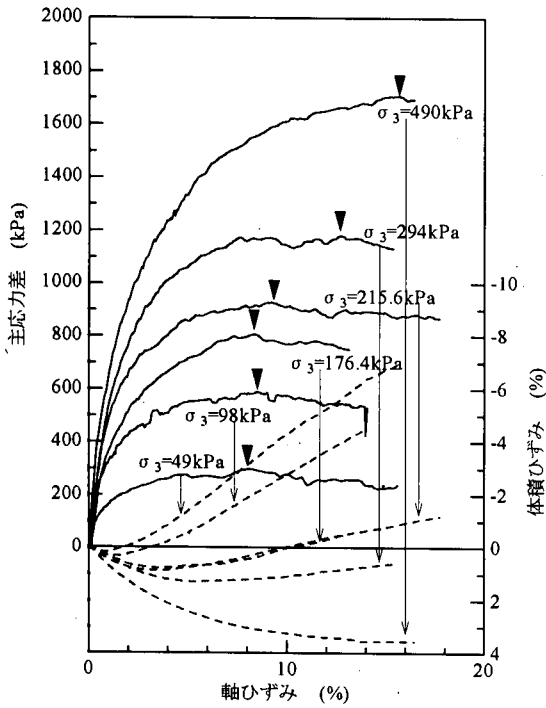


図-5(a) 流紋岩質大粒径試料の応力～ひずみ関係 (▼は破壊時の応力点を示す)

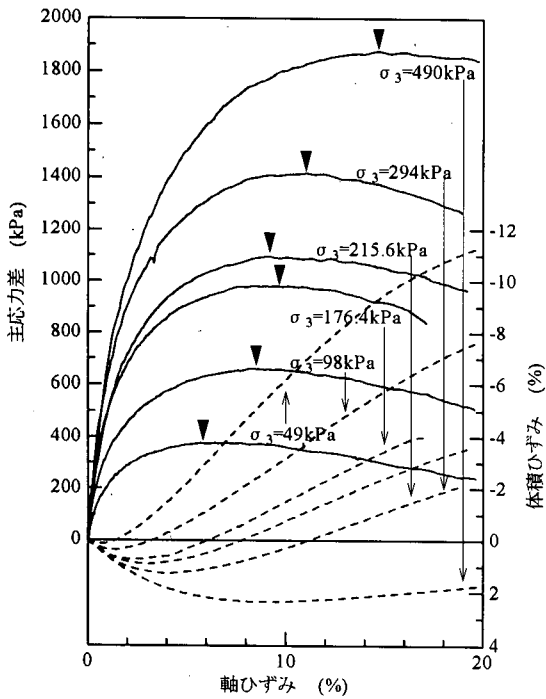


図-5(b) 流紋岩質小粒径試料の応力～ひずみ関係

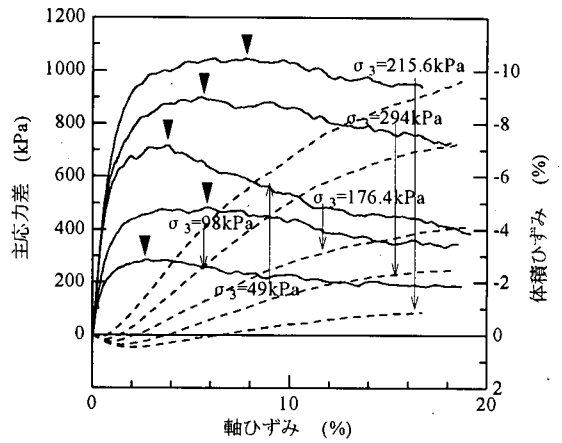


図-6(a) 花崗岩質大粒径試料の応力～ひずみ関係

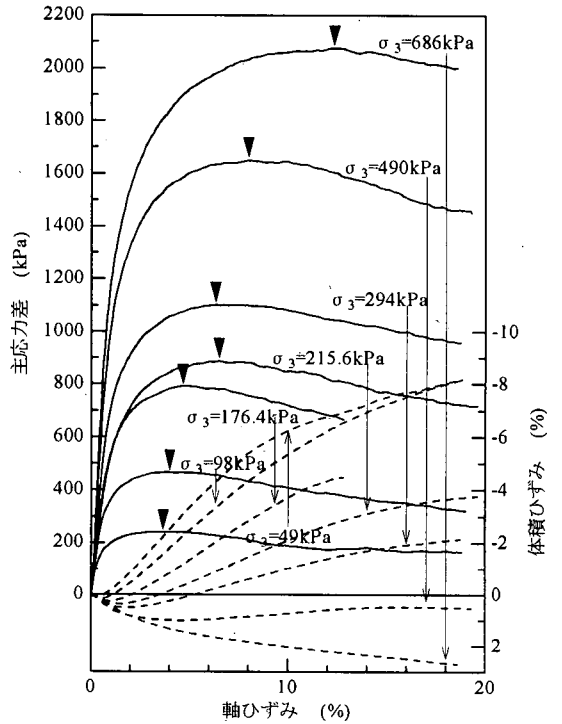


図-6(b) 花崗岩質小粒径試料の応力～ひずみ関係

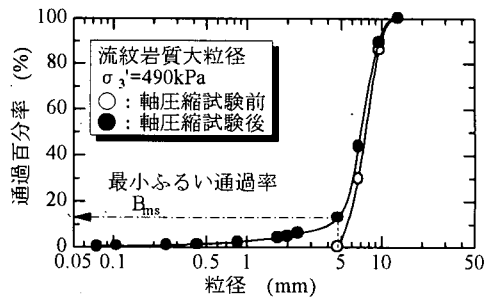


図-7 三軸試験前後の粒度曲線

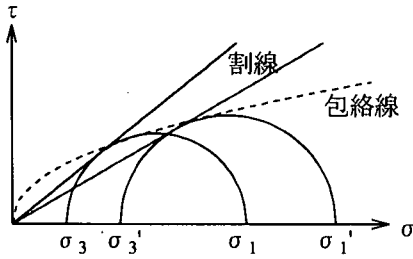


図-8 モールの応力概念図

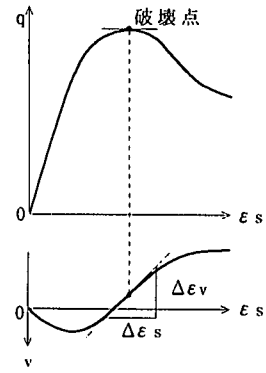


図-9 応力～ひずみ線概念図

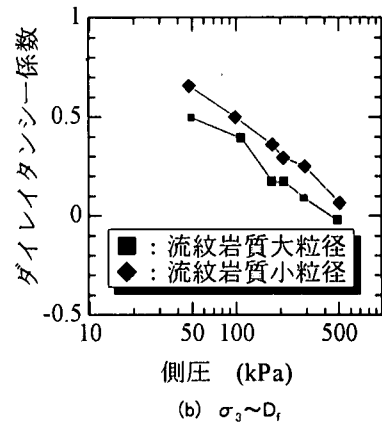
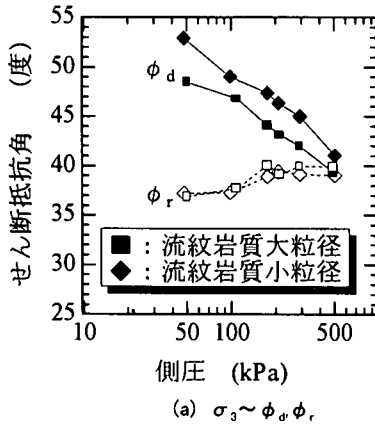


図-10 流紋岩質試料の強度成分

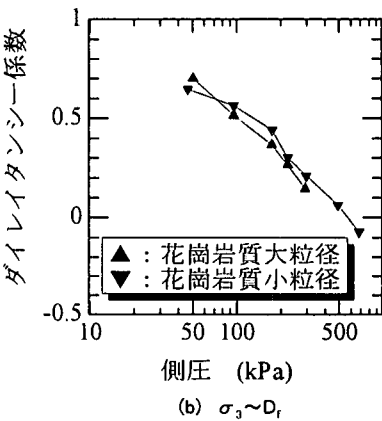
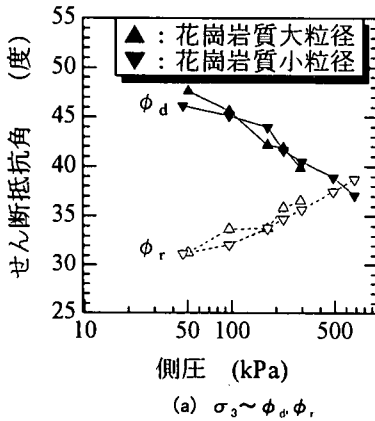


図-11 花崗岩質試料の強度成分

線を描くと、図-8 の概念図に示すように座標の原点を通り上に凸の曲線が得られ、粗粒材料の強度定数に側圧依存性があることがわかる。包絡線の式を実験式として式示することも考えられるが、本論文では簡単のために各破壊円を側圧 σ_3 で特定し、その強度定数を割線係数で表すことにした。また、割線係数はダイレイタンス係数との演算のしやすさから次式で定義した。

$$M_d = \left(\frac{q}{p} \right)_{\max} = \left(\frac{q}{p} \right)_f \quad (2)$$

ただし、 $q = \sigma_1 - \sigma_3$: 主応力差
 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$: 平均主応力
 M_d : 破壊時のせん断抵抗係数

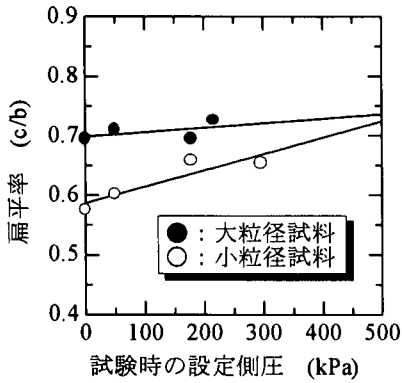


図-12 側圧～試験後扁平率の関係
(流紋岩質試料)

軸圧縮過程における粒状体のせん断抵抗は、供試体内部の粒子間に作用する摩擦などによる成分と、外部から供試体に作用する側圧と軸圧に対して供試体表面が動くために仕事が行われ、それがせん断抵抗となった分、すなわちダイレイタンス成分から成っている。本論文ではエネルギー式に基づく Poorooshasb の式により、ダイレイタンス成分を評価することにした。すなわち、図-9を参照してエネルギー式は

$$p d\varepsilon_v + q d\varepsilon_s = M_r \cdot p d\varepsilon_s + p d\varepsilon_v^e + q d\varepsilon_s^e \quad (3)$$

ただし、 ε_v : 体積ひずみ ε_v^e : 弾性体積ひずみ
 ε_s : せん断ひずみ ε_s^e : 弾性せん断ひずみ
 式(3)を変形すると、

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_s} + \frac{q}{p} = M_r + \frac{d\varepsilon_v^e}{d\varepsilon_s} + \frac{q}{p} \frac{d\varepsilon_s^e}{d\varepsilon_s} \quad (3)'$$

$$\text{ただし、} d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{1+e_0} dp = \frac{\kappa}{3(1+e_0)} dq$$

$$d\varepsilon_s^e = \frac{2(1+\nu)\kappa}{9(1-2\nu) \cdot (1+e_0)} dq$$

κ : 膨潤指数 ν : ポアソン比
 e_0 : 基準間隙比

破壊時においては図-9に示すように $(dq/d\varepsilon_s)=0$ であるから、式(3)'は

$$M_d = \left(\frac{-d\varepsilon_v}{d\varepsilon_s} \right)_f + M_r \quad (4)$$

式(4)において、 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_s)_f = D_f$ と表し、ダイレイタンス係数とする。これは図-9に示すように、ひずみ増分比の最大値にあたる。また、 M_r はダイレイタンス補正済みのせん断抵抗係数と呼ぶ。式(2)および式(4)によって定義した $M(M_d$ および $M_r)$ とせん断抵抗角 ϕ (ϕ_d および ϕ_r) の関係は次式で与えられる。

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{3M}{6+M} \right) \quad (5)$$

図-10(a)は流紋岩質試料における側圧の対数 $\log \sigma_3$ に対するせん断抵抗角 ϕ_d およびダイレイタンス補正されたせん断抵抗角 ϕ_r を表している。また、図-10(b)は側圧と破壊時のダイレイタンス係数 D_f の関係を示す。同様に、図-11に花崗岩質試料の結果を示す。グラフ内の記号は以下、 ϕ_d を黒塗り、 ϕ_r を白抜きとする。

図-10、図-11から次のことが分かる。1) ϕ_d は σ_3 の増大と共に減少し、 ϕ_r は増加する。2) 同じ母岩の ϕ_r は、大粒径試料の方がわずかに大きいように見える。3) ϕ_d は花崗岩質試料では粒径によらず一致するが、流紋岩質試料では小粒径の方が大きい。これは式(3)を考慮すると、ダイレイタンスの差に起因している。このように、 ϕ_d あるいは D_f に不一致が見られる原因として考えられることは、相似粒度試料間で異なる可能性がある粒子形状と粒子破碎特性である。また、 ϕ_d の側圧依存性の程度は流紋岩質試料の方が大きい。そこで側圧依存性に影響を及ぼす因子として、やはり粒子形状と粒子破碎特性に着目する。

(2) 粒度間の強度差に関する検討

流紋岩質試料で大・小粒径試料間に強度差が生じた原因の一つとして、図-3に示すように花崗岩質試料は粒度にかかわらず粒子形状がほぼ同一であるのに対し、流紋岩質試料は粒度間で粒子形状が異なっていることが考えられる。そこで粒子形状の強度に対する影響を検討するため、同一粒度でも粒子形状に差がある試料を作製した。その方法として、粒子破碎を生じると粒子形状が丸くなる方向に変化することを利用し、1度三軸試験に用いた流紋岩質試料を改めて粒度調整した「再使用試料」を作製した。図-12に1回目の三軸試験側圧～試験後扁平率の関係を示す。図中で $\sigma_3=0$ kPa は三軸試験前を表している。図-12より、大・小粒径共に側圧の増大に伴い、粒子形状は丸くなる傾向にあるが、当初より扁平であった小粒径の方が急速に丸くなることわかる。

ここで、三軸試験中にどのような形態の破碎を生じているかを把握するための試験を行った。大粒径試料の粒子40個を無作為に抽出して耐水インクで着色し、供試体中央部に配した。試験後にその粒子を観察した結果、破碎は粒径にかかわらず角張りがとれるような形態で起こっていた。この場合、とれる角の大きさが粒径によらないとすると、小粒径試料の方が扁平率の増加が顕著となり、図-12の結果と符合する。

さて、再使用試料の三軸試験は、側圧の影響を除くため全て176.4kPaで行った。図-13に流紋岩質再使用試料の扁平率～せん断抵抗角 ϕ_d 、ダイレイタンス係

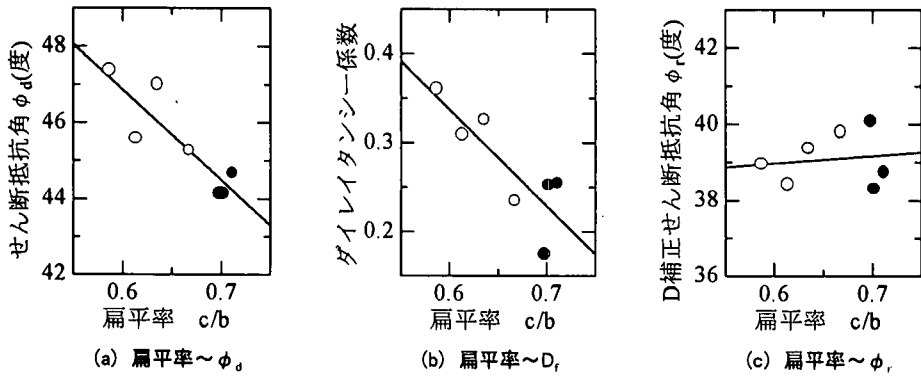


図-13 扁平率～強度成分の関係 (黒塗りは大粒径, 白抜きは小粒径)

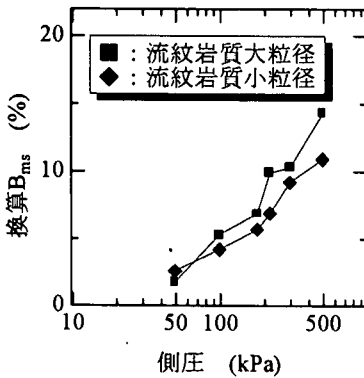


図-14 流紋岩質試料の側圧～換算 B_{ms} の関係

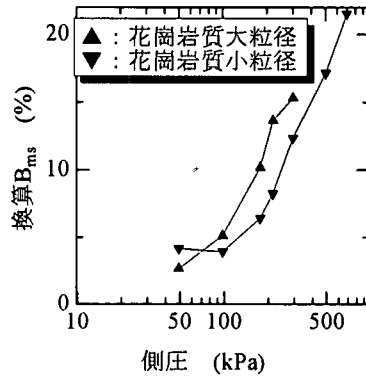


図-15 花崗岩質試料の側圧～換算 B_{ms} の関係

数 D_r および、ダイレイタンスー補正されたせん断抵抗角 ϕ_r の関係を示す。ただし、各試料の扁平率は、図-12 の内挿直線上で読みとった。また、「大粒径 1 度目 $\sigma_3 = 216.4 \text{ kPa}$ 」を再使用したものは初期間隙比が過大であったので除いた。図-13(a),(b)より、 ϕ_d と D_r は粒度にかかわらず扁平率の関数となっており、(c) の ϕ_r は式(4),(5)により結果的に扁平率にほぼ無関係となっている。したがって、流紋岩質試料における粒度間の強度差の主要な原因は、扁平率の差にあるといえる。一方、図-11 において、花崗岩質試料では粒度が異なっても強度に差がないのは、粒子形状が同じためと考えられる。

次に粒子破碎特性の影響について検討する。図-14, 15 は流紋岩質試料および花崗岩質試料の側圧の対数 $\log \sigma_3$ と軸ひずみ 20% 時換算最小ふるい通過率 B_{ms} の関係を示している。両図より、岩質によらず概ね大粒径試料の方が B_{ms} は大きくなっている。これは、大粒径試料の方が 1 接点当たりの接点力が大きいので、角張りがとれやすいためと考えられる。ここで、花崗岩質試料では粒度間で粒子破碎量が著しく異なっているにもかかわらず、図-11 に示すように強度差は生じていない。したがって、少なくとも角張りがとれていくような破碎形態

の場合、強度と粒子破碎量は対応しないと考えられる。また、粒径が大きくなれば内部欠陥が存在する可能性が増大するが、内部欠陥に沿って粒子が大きく割れる前に粒子の角張りが小刻みに破碎され、粒子内に蓄えられたエネルギーはそのたびに放出されるために、今回の側圧範囲では大粒子でも大きな割れに至らなかったと考えられる。

(3) 強度定数の側圧依存性に関する検討

Charles and Soares²⁹⁾ はロックフィルダムの設計における強度定数の拘束圧依存性の重要性を指摘している。また Mirhgasemi et al.³⁰⁾ は多角形粒子の数値実験より、拘束圧の増加による粒子間摩擦角の減少がなくても、強度定数の拘束圧依存性は生じるとしている。本研究では粒子形状と粒子破碎が側圧依存性に及ぼす影響を次のように検討した。

まず、広範な検討を行うために、粒子破碎を全く生じない試料として、真鍮六角ナットとグラスビーズを新たに用意した。六角ナットは対辺間 2.5mm、厚さ 2.0mm の短柱状粒子であり、グラスビーズはほぼ球形で、粒径 1mm である。全試料の粒子形状と強度の指標を表-3 に示す。

表-3 試料粒子の形状と強度

試料	凹凸係数 FU	扁平率	圧裂強度 (MPa)	粒子破砕性
流紋岩質大粒径	0.60	0.70	15	やや有り
流紋岩質小粒径	0.59	0.58	39	
花崗岩質大粒径	0.61	0.80	8	有り
花崗岩質小粒径	0.62	0.82	18	
六角ナット	0.95	0.80	∞	無し
ガラスビーズ	1	1	非常に大	無し

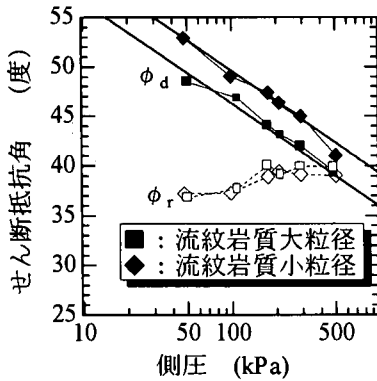


図-16 流紋岩質試料の $\sigma_3 \sim \phi_d, \phi_r$ の関係

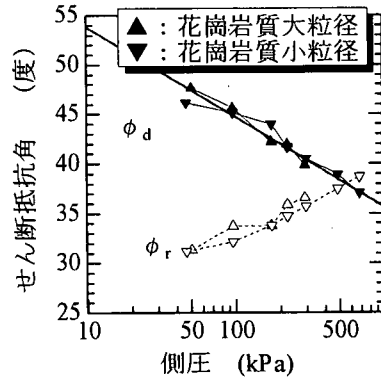


図-17 花崗岩質試料の $\sigma_3 \sim \phi_d, \phi_r$ の関係

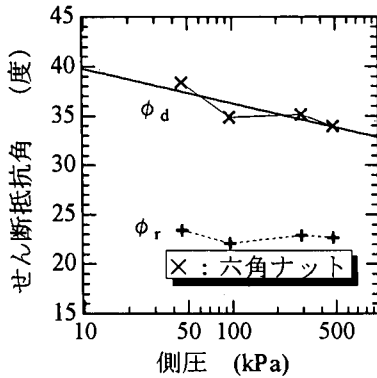


図-18 六角ナットの $\sigma_3 \sim \phi_d, \phi_r$ の関係

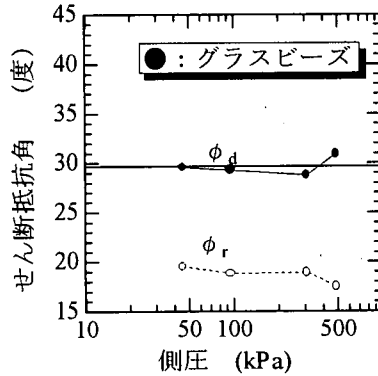


図-19 ガラスビーズの $\sigma_3 \sim \phi_d, \phi_r$ の関係

なお、六角ナット試料から成る供試体は、直径 5cm、高さ 10cm とした。

図-16~19 に全試料の側圧 σ_3 に対するせん断抵抗角 ϕ_d およびダイレイタンスー補正されたせん断抵抗角 ϕ_r を示す。各図中、太い直線は最小 2 乗法により決定されたが、これらの傾きはガラスビーズ、六角ナット、花崗岩質試料、流紋岩質試料の順に大きくなっている。まず、ガラスビーズと六角ナットを比較すると、ガラスビーズは側圧依存性がないが、六角ナットでは僅かに見られる。両者とも破砕性はないから、側圧依存性の源は粒子の扁平率にあると推測される。そこで、全試料について扁平率と側圧依存性の関係を見ると、扁平な試料ほど側圧の増加に対して強度定数の低下が著しいこと

が分かる。

次に粒子破砕の影響について、図-20 に礫質大粒径試料の側圧 σ_3 と軸ひずみ 20% 時換算最小ふるい通過率 B_{ms} の関係を示す。図より花崗岩質試料の方が破砕量は多いにもかかわらず、 ϕ_d の側圧依存性は図-16、17 より流紋岩質試料の方が大きい。これは、粒子破砕の影響が直接的でないことを示していると思われる。また、図-14、15 より、大粒径試料の方が粒子破砕量は多いにもかかわらず、図-16、17 では $\log \sigma_3 \sim \phi_d$ の傾きは一致している。この一致は相似粒度試料によって実材料のせん断強度を推定する上で有用と考えられる。一方、ダイレイタンスー補正されたせん断抵抗角 ϕ_r と側圧 σ_3 の関係は、図-16~19 に示すように粒子破砕量が

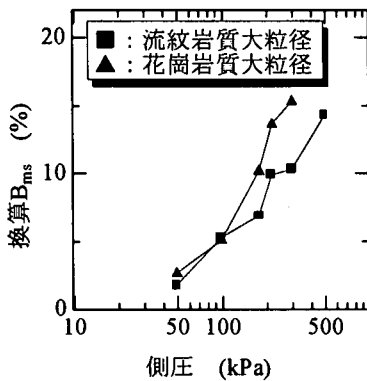


図-20 礫質大粒径試料の側圧～換算 B_{ms} の関係

側圧と共に増加する試料ほど、 ϕ_c も増加することがわかる。これは粒子破碎エネルギーが ϕ_c に含まれることを示すものであろう。粒子破碎はダイレイタンスを減少させる一方で ϕ_c を増加させ、式(4)を通じて結果的にせん断抵抗角 ϕ_d に与える影響が目立たなくなるものと考えられる。

6. 結論

本研究では、主として2種類の母岩から作製された相似粒度粗粒材料を用いて三軸試験を行い、粒子形状と粒子破碎特性が強度定数および、その側圧依存性に与える影響を検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 粒子形状の指標について、相似粒度試料では凹凸係数 FU の適用性は限られている可能性がある。一方、Zingg の分類法による扁平率は粒子形状の適当な指標となった。
- 2) 花崗岩質試料の三軸試験結果より、粒度が異なっても相対密度と粒子形状が同一ならば、粒度間の強度差は生じないことがわかった。
- 3) 粒度間において粒子形状が異なる流紋岩質試料では、初期相対密度を揃えても強度差が生じた。そこで、粒子形状が異なる同一粒度試料を用いて三軸試験を行ったところ、粒度にかかわらず扁平率とせん断抵抗角の間に良好な相関が確認された。
- 4) 粒子が、その角張りがとれるような形態の破碎を生じる場合、小さい粒子の方が相対的に大きく角が取れることがわかった。
- 5) 強度定数の側圧依存性には粒子形状が影響しており、扁平な試料ほど影響の度合は大きい。
- 6) 強度定数の側圧依存性に与える粒子破碎の影響は次のように考えられる。側圧と共に粒子破碎量が多くなるとダイレイタンスが抑えられ、せん断抵抗角 ϕ_d を小さくする。一方、ダイレイタンス補正されたせん

断抵抗角 ϕ_c は粒子破碎エネルギーを含むので、側圧が大きくなるほど ϕ_c は大きくなり、したがって ϕ_d を大きくする。結局、測定される ϕ_d には粒子破碎の影響が目立たなくなる。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、有益なご助言を頂いた神戸大学飯塚 敦・加藤正司両助教授、また実験および結果の整理に尽力頂いた大学院生秋田 伸氏に感謝します。

参考文献

- 1) 粗粒材料の現場締め固め, 土質工学会, pp.1-96, 1990.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Yamamuro, J.A. and Lade, P.V.: Drained sand behavior in axisymmetric tests on granular materials, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122(2), pp.109-119, 1996.
- 5) 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, pp.257-269, 1997.
- 6) 鬼塚克忠, 吉武茂樹: 破碎性まさ土の低圧条件下におけるせん断特性, 土木学会論文集, No.400, pp.141-150, 1988.
- 7) 高橋邦夫, 春日井康夫: 捨て石材の強度特性における粒度組成と最大粒径の影響, 粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.41-48, 1986.
- 8) Miura Kinya, Maeda Kenichi, Furukawa Minori and Toki Shousuke: Physical characteristic of sands with different primary properties, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.3, pp.53-64, 1997.
- 9) 萩原敏行, 日下部治, 大内正敏, 岡本圭司: 構造特性に着目した不攪乱早川河口砂の強度・変形特性, 土木学会論文集, No.487, pp.119-128, 1994.
- 10) 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一, 児玉信, 足立剛, 加登文学: 砂粒子の破碎特性と供試体内における粒子形状の変化, 第32回地盤工学会研究発表会発表講演集, pp.29-30, 1997.
- 11) 粗粒材料の変形と強度, 土質工学会, pp.172-201, 1986.
- 12) 赤司六哉: ロック材料の密度管理と強度確認試験, 土と基礎, Vol.33, No.6, pp.19-24, 1985.
- 13) Charles, J.A. and Watts, K.S.: The influence of Confining Pressure on the shear strength of compact rockfill, *Geotechnique*, Vol.30, No.4, pp.353-367, 1980.

- 14) 布施洋一, 高橋 昇, 福島伸二, 香川和夫: 関西国際空港埋め立て材料の超大型三軸圧縮試験による強度, 変形特性, 土木学会論文集, No.448, pp.131-140, 1992.
- 15) Moroto Nobuchika and Ishii Takemi: Shear strength of unisized gravels under triaxial compression, *Soils and Foundations*, Vol.30, No.2, pp.23-32, 1990.
- 16) 吉村優治, 小川正二: 粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次的性質の影響, 土木学会論文集, No.487, pp.99-108, 1994.
- 17) 土質力学, pp.896-904, 最上武雄編著, 技報堂, 1969.
- 18) 下部 悟, 諸戸靖史: 粗粒土の $k \sim e_{min}$ 図, 第48回土木学会年次学術講演概要集(Ⅲ), pp.866-867, 1993.
- 19) 吉村優治, 小川正二: 砂の等方圧密およびせん断特性に及ぼす粒子形状の影響, 土木学会論文集, No.487, pp.187-196, 1994.
- 20) 春山元寿: 粒状体のせん断特性に及ぼす粒子の形の影響, 第24回土木学会年次学術講演会講演概要集(Ⅲ), pp.21-24, 1969.
- 21) 鎌田隆司, プラダンテージ, 今井五郎: 砂のせん断特性に及ぼす粒径の影響, 第48回土木学会年次学術講演概要集, 第3部(A), pp.902-903, 1993.
- 22) 豊田光雄, 藤沢侃彦: 粗粒材料のせん断抵抗角における力学的要因の実験的検討, 第27回地盤工学会研究発表会発表講演集, pp.595-596, 1992.
- 23) 中岡時春, 脇坂良男, 望月秋利, 坂口 理: 室内三軸(CD)試験による粗粒材料の現場力学特性の推定, 第32回地盤工学会研究発表会発表講演集, pp.643-644, 1997.
- 24) Vaid, Y.P.: A critical assessment of membrane penetration in the triaxial test, *Geotechnical Testing Journal*, pp.115-143, 1984.
- 25) 鶴ヶ崎和博, 平野勝識, 軽部大蔵: 相似粒度に調整した粗粒材料の強度定数特性について, 建設工学研究所報告第36号, pp.111-125, 1994.
- 26) 福本武明: 粒子破碎の程度を示す指標, 土と基礎, Vol.29, No.12, pp.64-65, 1981.
- 27) 石井武美: 粒子破碎の表示尺度の持つ物理的意義, 土質工学会論文報告集, Vol.29, No.4, pp.155-164, 1989.
- 28) 鶴ヶ崎和博, 坂井逸作, 山口 充, 徳田尚器, 軽部大蔵: 粗粒材料の強度定数特性に及ぼす供試体形状の影響と粒子破碎特性について, 第50回土木学会年次学術講演概要集, 第3部(A), pp.336-337, 1995.
- 29) Charles, J.A. and Soares, M.M.: Stability of compacted rockfill slopes, *Geotechnique*, Vol.34, No.1, pp.61-70, 1984.
- 30) Mirhgasemi, A.A., Rothenburg, L., Matyas, E.L.: Numerical simulations of two-dimensional polygon-shaped particles and effects of confining pressure on shear strength, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.3, pp.43-52, 1997.
- 31) 軽部大蔵, 足立智之, 米本義彦: 粒状土の力学特性と土粒子の性状の関係, 粗粒材料の変形, 強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.49-54, 1986.
- 32) 軽部大蔵, 椎名教之: 粗粒材料の三軸試験について, 建設工学研究所報告第34号, pp.101-119, 1992.
- 33) 野並 賢: 粗粒材料の一次的性質がダイレイタンスと強度特性に及ぼす影響, 神戸大学自然科学研究科修士論文, 1998.

(1998.4.13 受付)

EFFECTS OF GRAIN SHAPE AND PARTICLE BREAKAGE ON SHEAR STRENGTH OF PARALLEL GRADING COARSE MATERIALS

Daizo KARUBE, Satoshi NONAMI, Kazuhiro TSURUGASAKI and Mitsuru YAMAGUCHI

Triaxial compression test was performed on two set of parallel grading samples, which were composed of crushed rhyolite and granite, respectively and compacted to 90% of relative density. Finer and coarser samples of granite showed same relation of confining pressure and shear strength, however, the finer sample showed higher strength for rhyolite. It would come from the flatter grain shape of finer sample. The nature of decreasing secant modulus of shear strength with increasing confining pressure was due to the flatness of grain shape, too. On the other hand, crushing of grain during shearing seemed to no influence on shear strength.