

# 粗粒土にグラスビーズを混入した試料のせん断強度特性

野並 賢<sup>1</sup>・加藤正司<sup>2</sup>・柴田安彦<sup>3</sup>・吉森久貴<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 応用地質(株)関西支社神戸支店(〒658-0807 神戸市中央区浜辺通5-1-14 神戸商工貿易センタービル 401)

<sup>2</sup>正会員 博(工学) 神戸大学都市安全研究センター助教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

<sup>3</sup>修(工学) 荏原製作所 (〒144-8510 東京都大田区羽田朝日町 11-1)

<sup>4</sup>正会員 修(工学) 神戸市役所 (〒650-8570 神戸市中央区加納町 6-5-1)

本研究は粗粒土に細粒分が混入したときに生じる強度低下について、三軸圧縮試験により検討を行っている。供試体の作製を容易にするため、粗粒分としての珪砂に細粒分として内部摩擦角の小さいグラスビーズを混入して供試体を作製して試験を実施した。粗粒分のみによる間隙比を一定とし、グラスビーズの混入量を増加させたところ、グラスビーズの混入量の増加に伴い内部摩擦角が低下した。また、混入量が一定状態での強度の側圧依存性は、混入量が大きくなると小さくなる傾向を示した。しかしダイレイタンス補正により得られる内部摩擦角 $\phi_p$ は、グラスビーズと珪砂のそれぞれの重量比に従い平均した値とほぼ一致することが明らかとなった。さらに、得られた側圧と破壊時のダイレイタンス係数の関係に基づき、内部摩擦角 $\phi_p$ の予測方法を示している。

*Key Words* : course materials, shear strength, soil structure, void ratio

## 1. まえがき

粗粒土のせん断強度特性の検討は、主として細粒分が含まれていない粒度組成の砂を対象として行われてきた。そして、粒子形状や粒度分布などの一次的性質や、密度や異方性などの二次的性質がせん断強度特性に与える影響が検討されている。一方、自然状態にある砂は多少なり細粒分を含んでいることが多く、砂分が80%以上であれば砂質土として取り扱われる<sup>1)</sup>ことが多い。しかし、粗粒土のせん断強度特性は「粒子間の摩擦抵抗+粒子間のかみ合わせ」によって発現されるとの見方にたつと、細粒分は粒子間のかみ合わせを阻害し、せん断強度特性に影響を与えることが予想される。したがって、細粒分が含まれる砂に対して上記要因について検討する場合、細粒分の含有率がせん断強度特性に与える影響も評価する必要が考えられる。

粒子間のかみ合わせ効果はダイレイタンス現象と密接に関連していると考えられる。ダイレイタンスが主たる要因である液状化現象に対しては、砂に別材料の細粒分を加えることにより、細粒分が液状化強度に与える検討がこれまでになされている<sup>2)~7)</sup>。それらの成果をまとめると、細粒分の塑性が小さいほど液状化強度は小さく

なること、非塑性の細粒土を混入させた場合、最も液状化強度が小さくなる細粒分含有率が存在することが報告されている。また、砂の骨格間隙比が最大間隙比よりも大きくなると、細粒分主体の構造になり、液状化強度は細粒分の影響を強く受けることが報告されている。一方、大嶺・落合<sup>8),9)</sup>は粗粒土の粒子構造とマトリックスの応力分担特性に着目し、砂と粘土の混合土の強度・変形特性を検討している。以上の例においては、砂に別材料の細粒分を混入させた混合土の強度・液状化特性が検討されており、粗粒土の骨格構造の形成に係る考察が多く行われている。

混合土の実験的検討を行う際、問題点の一つとして、供試体の密度設定が挙げられる。多くの研究者は、粗粒土、細粒土のそれぞれの混合割合に応じた最大・最小密度を設定し、各々で相対密度を揃えて供試体を作製している。ただし、その様な方法で供試体を作製すると、粗粒土の骨格間隙比が細粒分含有率により変化する。そのため、骨格間隙比が一定で細粒分含有率のみが異なる試料を用いた試験はほとんどなされていない。粗粒土の骨格構造と強度特性の間に密接な関連があると考えられるため、粗粒土の骨格間隙比を一定にした上で、細粒分含有率を変えた試料を用いた検討が望まれる。ま



表-2 供試体諸元

Sample	GVFC	Volume Fine Content, $F_c$ (%)	Mass of Coarse-Grained Fraction, $M_{sc}$ (g)	Mass of Fine-Grained Fraction, $M_{sf}$ (g)	Initial Void ratio
Siliceous Sand (Coarse)	0	0	278.0	0	0.855
Siliceous Sand (Coarse) + Glass Beads	0.1	5.1		14.0	0.760
	0.3	13.8		42.0	0.596
	0.5	21.1		70.0	0.461
Siliceous Sand (Coarse) + Siliceous Sand (Fine)	0.1	4.1		12.0	0.774
	0.3	11.5	36.0	0.632	
	0.5	17.8	60.0	0.511	

GVFC, which is author's parameter, is the rate of gross volume of fine content to void.

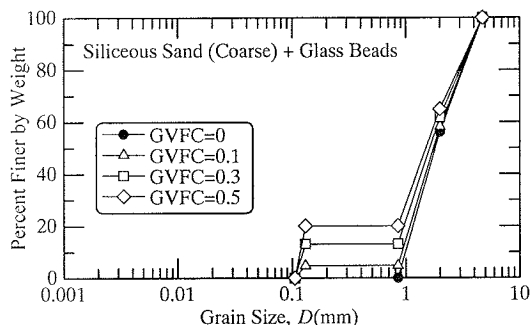


図-2 GB 混入試料の粒度曲線

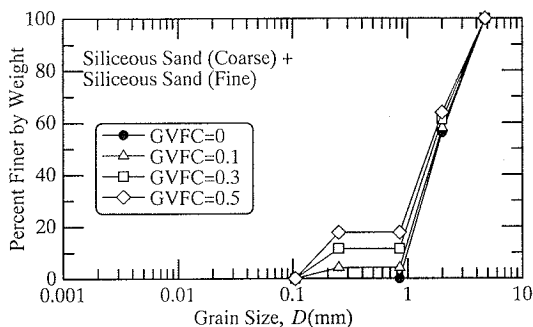


図-3 細粒細砂混入試料の粒度曲線

細粒分の混入量を表す指標として GVFC を用いたのは、以下の理由による。中間土の強度特性は、細粒分の質量比のみならず、密度の大小によっても支配されていると考えられる。しかし細粒分含有率  $F_c$  のような、細粒分の質量比を中間土の強度特性を表す指標として採用すると、密度の影響を適切に反映することができない。粗粒土の骨格構造が強度特性を支配しているとする、細粒分の質量比よりも供試体の密度、すなわち細粒分の分布状態に着目した指標の方が適切であると考えられる。一方、GVFC は粗粒土の間に細粒分がどれだけ存在しているかを表した指標であるため、今回のように粗粒土の骨格構造に与える細粒分の影響を検討する場合には、有効な指標になると考えられる。

骨格間隙比と GVFC の概念図を図-1 に示す。粗粒土の骨格間隙比に着目した相対密度を全ての試料で 50% とし、細粒分混入割合は、細粒珪砂および GB 試料ともに、GVFC=0(粗粒土のみ)、0.1、0.3、0.5 の 4 種類に変化させた。試料に混入させる細粒分量の設定方法については、以下の仮定のもとに設定した。図-1 に示したように、粗粒土の間隙を全て細粒土粒子が埋めるわけではなく、細粒土のみで存在したときに有する間隙をとまって粗粒土の間隙を埋めるものと考えられる。そこで、細粒分のみ相対密度も粗粒分の相対密度と同じになるとして、試料に混入させる細粒分量を設定した。実際には、細粒土の分量が少ない場合は細粒土のみの骨格を形成せずに粒子がばらばらになっていたり、粗粒子骨格の中

にある細粒土が粗粒土と同等の締固めがなされないなどの状態が想定されるが、力学的性質が異なる細粒珪砂とグラスビーズを比較する場合、同一量を混入した試料と比較するよりも相対密度を揃えた方が適当と考えられるため、本方法によって細粒分量を設定した。

また、供試体を三軸セル内に設置する前に、19.6kPa の負圧を与えた状態で供試体を自立させ、供試体の諸元を確認した。この状態での相対密度および GVFC を調整することは、細粒分の材料および混入割合によって圧縮特性が異なるために困難であった。よって試験条件としての相対密度と GVFC は、すべて試料をモールド投入し、締固めを終了した時点の値とした。

このような細粒分混入割合設定方法のもとで得られる、粗粒土に GB を混入した試料(以下、GB 混入試料と呼ぶ)と、粗粒土に細粒珪砂を混入した試料(以下、細粒珪砂混入試料と呼ぶ)の粒径加積曲線を、それぞれ図-2 および図-3 に示す。また、供試体の諸元を表-2 に示す。

## (2) 供試体作製方法の検討

供試体の作製に際して、粗粒土と GB が供試体内で均一に混入するよう、紙製モールド(直径 50mm×高さ 100mm)を用いて次に示す 4 種類の方法により検討を行い、適当な作製方法を採用することにした。なお、ここで行った予備検討では、すべての供試体作製方法において GB が供試体全体の体積に対する含有率を 10% に設

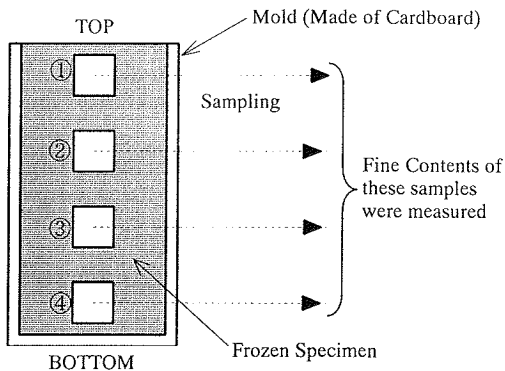


図-4 GB 混入試料の細粒分含有率測定方法概念図

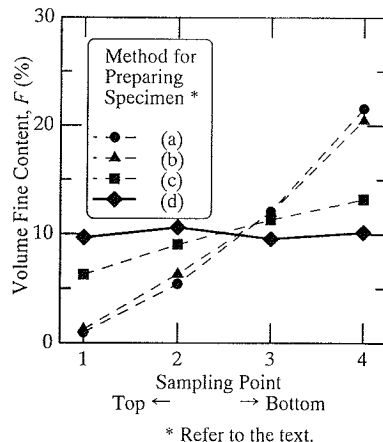
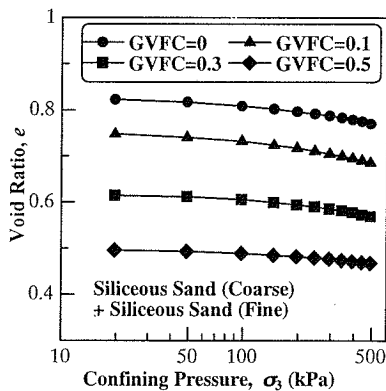
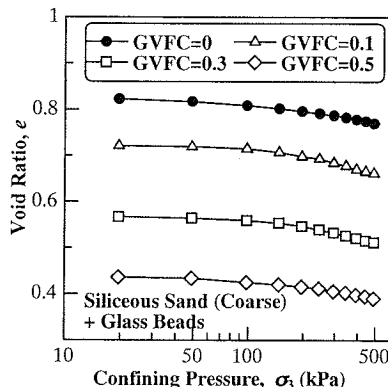


図-5 供試体作製方法の違いによる GB 分布量



(a) GB 混入試料



(b) 細粒細砂混入試料

図-6 側圧～間隙比関係

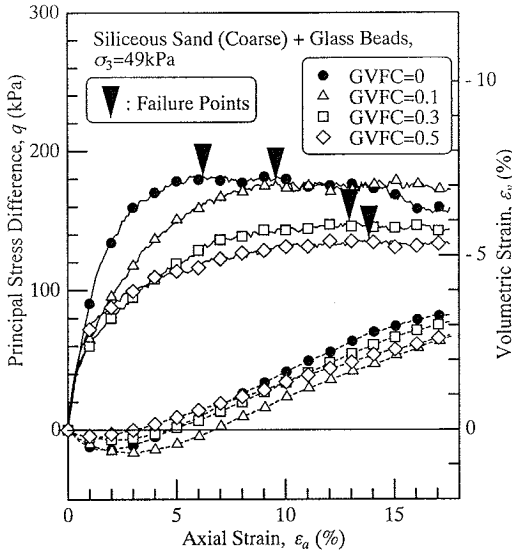
定した。

比較した供試体作製方法は以下の通りである。

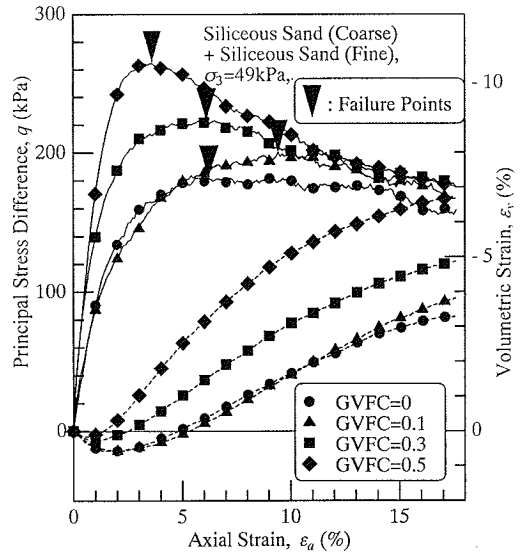
- 気乾状態の各試料を 5 等分し、モールド内に粗粒土を投入した後、GB をその上から投入して、一層毎にモールド側面をプラスチックハンマーで打撃して締固めた。
- 気乾状態の各試料を 5 等分し、それぞれをあらかじめ混合した後、モールド内に投入して一層毎にモールド側面をプラスチックハンマーで打撃して締固めた。この方法は、砂と粘土を混合した中間土の試験でよく行われる。
- 気乾状態の各試料を 5 等分し、各層毎に粗粒土(珪砂)分と GB 試料を混合し脱気水に浸し 24 時間脱気した後、脱気水を適当な水位まで満たしたモールド内に試料を少量ずつ投入し、一層毎にモールド側面をプラスチックハンマーで打撃して締固めた。この方法は、水中落下法<sup>12)</sup>の一種と判断される。
- 気乾状態の各試料を 5 等分し、モールド内に適度に水分を含ませて不飽和状態とした粗粒土を投入し、その上から GB 試料を投入して直径 1cm の突き棒で

一層毎に所定の密度になるまで突固めた。この方法により、砂粒子の周りに GB をメニスカスで附着させて GB の打撃に伴う落下を少なくすることにより試料が均一に混入されるようにし、突固め対象の層以下への影響を最小限に抑えることを目指したものである。

これらの方法により作製された供試体を凍結した後、図-4 に示すように供試体の高さ 2.5cm ごとに切断して各部分の GB 試料の体積含有率を測定した。図-5 は供試体高さごとに GB 試料の体積含有率を示したものである。図-5 より、作製方法(d)は GB 試料の分布が供試体の高さ方向にほぼ均一分布しているのに対し、作製方法(a), (b)では供試体の締固め時の影響により GB 試料が下部に集まってしまうことがわかる。また作製方法(c)もやや GB 試料の分布の偏りが見られる。なお、GB 試料のかわりに細粒分として細粒珪砂を用いた場合も、同様の傾向が得られた<sup>13)</sup>。よって本研究で用いる供試体の作製方法としては、細粒土を混入する場合はすべて作製方法(d)を採用することにした。このときの供試体内の細粒分は、メニスカス力によって粗粒土の周りに附着させているため、

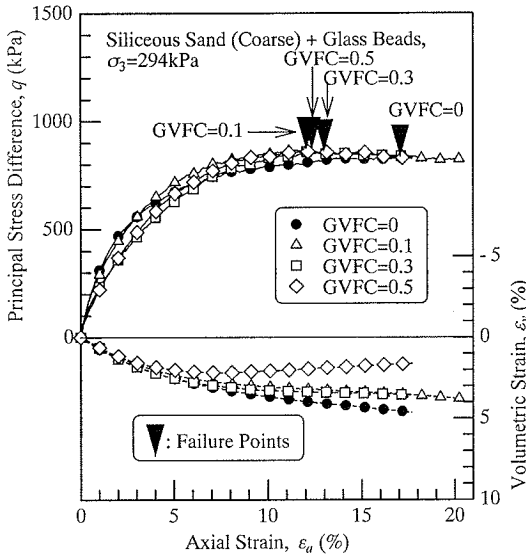


(a) GB 混入試料

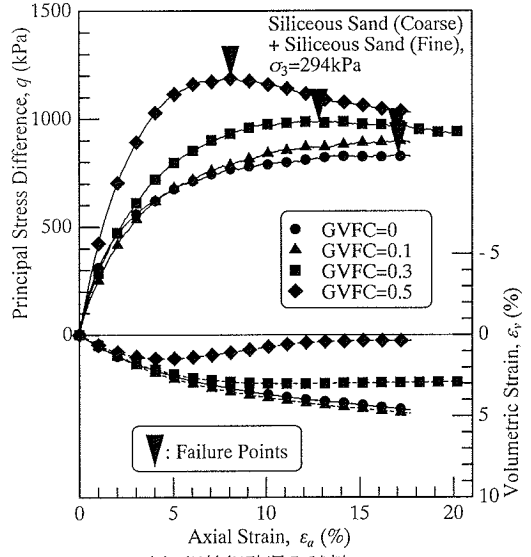


(b) 細粒細砂混入試料

図-7 側圧 49kPa 時の応力～ひずみ関係



(a) GB 混入試料



(b) 細粒細砂混入試料

図-8 側圧 294kPa 時の応力～ひずみ関係

粗粒土の単位表面積あたりに均等に分布しているものと推測される。このため、細粒分の混入量が少ない場合でも、粗粒土同士の粒子接点に細粒分が入り込む割合が高くなると考えられる。

### (3) 試験条件

所定の混入割合で作製した直径約 50mm、高さ約 100mm の供試体を用いて、等方圧密後に側圧一定の排水条件で三軸圧縮試験を行った。三軸圧縮試験の圧密過程では、急激な増圧によるメンブレンの破損を防止するため、所定の等方応力まで段階的に拘束圧を増した。

供試体のメンブレン貫入量は、Vaid<sup>14)</sup>の提案する方法により補正を行った。軸圧縮過程は、0.2%/min.のひずみ制御により、側圧一定の排水条件で行った。側圧は、49,98,196,294,490kPa の 5 種類を設定した。

## 3. 試験結果

### (1) 等方圧密過程

図-6(a),(b)に GB 混入試料と細粒珪砂混入試料の側圧(圧密圧力)490kPa まで圧密した場合の側圧～間隙

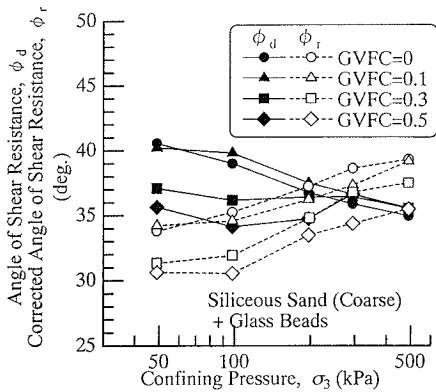


図-9 GB 混入試料の  $\sigma_3 \sim \phi_d, \phi_r$  関係

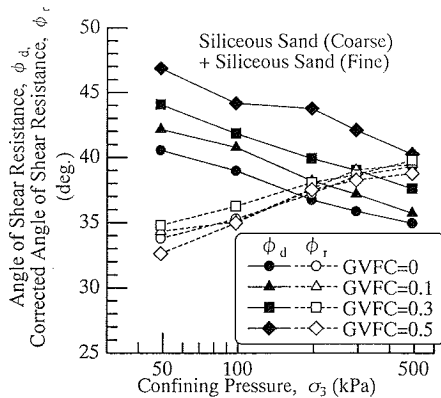


図-11 細粒細砂混入試料の  $\sigma_3 \sim \phi_d, \phi_r$  関係

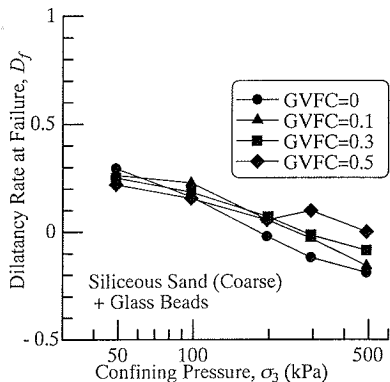


図-10 GB 混入試料の  $\sigma_3 \sim D_f$  関係

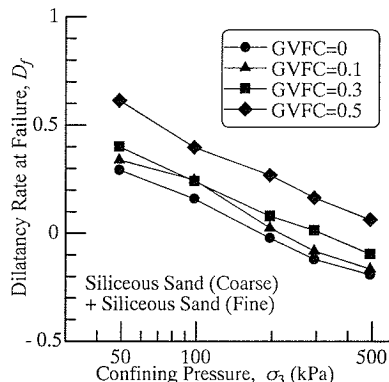


図-12 細粒細砂混入試料の  $\sigma_3 \sim D_f$  関係

比の関係を示す。これより、今回の側圧の範囲であれば、いずれの細粒分混入量においても側圧～間隙比に変曲点は見られなかった。このため、圧密降伏応力には達していないものと考えられる。

## (2) 軸圧縮過程

図-7(a),(b)にそれぞれ GB 混入試料と細粒珪砂混入試料の側圧 49kPa 時における軸ひずみ～主応力差、体積ひずみ関係を示す。同様に、図-8(a),(b)に側圧 294kPa 時の軸ひずみ～主応力差、体積ひずみ関係を示す。本研究では、主応力差が最大となる点を供試体の破壊とした。なお、GB 試料のみの試験も別途実施した。この試験における軸ひずみ～主応力差はばらつきの大い挙動を示した。このため、GB 試料のみの試験については体積変化率最大点を破壊点とした。このときの主応力差はほぼ最大値を示していた。GB 試料のみの内部摩擦角  $\phi_d$  およびダイレイタンシー補正された内部摩擦角  $\phi_r$  は側圧依存性は見られず、 $\phi_d$  は約  $31^\circ$ 、 $\phi_r$  は約  $17^\circ$  と、珪砂のみの試料よりも小さい値を示した。

図-7,8 において主応力差に着目すると、GB 混入試料では、側圧 49kPa の場合において混入量の増加に対応してせん断強度が低下し、破壊時の軸ひずみは大きく

なる傾向を示している。しかし側圧 294kPa では、混入量が多くなると若干強度が大きくなるが、破壊時の軸ひずみは小さくなる傾向を示している。また、細粒珪砂混入試料では、側圧の大きさに拘わらず混入量の増加に対応して強度が大きくなり、破壊時の軸ひずみが小さくなる傾向を示している。したがって、GB 試料の混入がせん断強度に与える影響は側圧によって変化するが、細粒細砂混入試料は側圧に拘わらず、混入量の増加によりせん断強度・剛性ともに大きくなるものと考えられる。

体積ひずみの傾向としては、両試料とも側圧 49kPa では試験初期の体積圧縮傾向は、GVFC=0 の場合より GVFC=0.1 の場合の方が圧縮量は大きい。これは、混入割合が少ないうちは細粒分が混入することにより、粗粒土粒子の移動が活発となり、圧縮量を増加させるためであると考えられる。佐藤ら<sup>3)</sup>が行った、豊浦砂に DL クレーを混入した試料の液状化試験においては、GVFC=0.1 のときの  $F_c$  に相当する  $F_c=5\%$  のときの液状化強度が大きくなっている。今回の結果と合わせて考察すると、少量の細粒分は粗粒土粒子の移動を活発化させ、ダイレイタンシーの発生量を大きくさせるものと考えられる。佐藤らの  $F_c=5\%$  のときの液状化試験の結果は、ダイレイタンシーの発生量が多くなって液状化強度が大きくなったものと

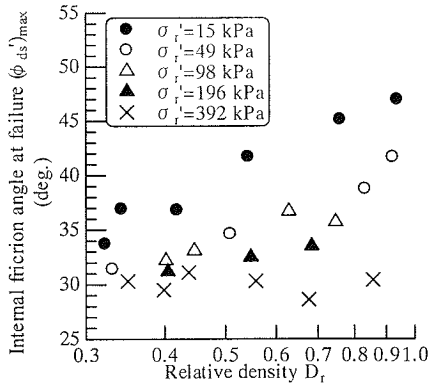


図-13 豊浦砂の内部摩擦角～相対密度<sup>15)</sup>

推察される。

次に試験終了直前の体積ひずみに着目する。GB 混入試料では、細粒分が増加すると側圧 49kPa の場合は圧縮傾向、側圧 294kPa の場合は膨張傾向となり、細粒分の増加は体積ひずみの発生量を抑える効果があるものと考えられる。一方、細粒珪砂混入試料では、細粒分が増加すると側圧に拘わらず、破壊時の体積ひずみは膨張傾向を示している。

### (3)GB 混入試料と細粒珪砂混入試料の強度比較

せん断強度に細粒分がどのような影響を与えているかを考察するため、破壊時の強度定数について GB 混入試料と細粒珪砂混入試料の比較を行った。図-9 には GB 混入試料の側圧  $\sigma_3$  ～内部摩擦角  $\phi_d$  の関係と側圧  $\sigma_3$  ～ダイレイタンスー補正された内部摩擦角  $\phi_r$  の関係を示す。図-10 には側圧  $\sigma_3$  ～破壊時のダイレイタンスー係数  $D_r$  の関係を示す。また、図-11,12 には細粒細砂混入試料の同じ関係を示す。なお、試験に用いた試料が珪砂とグラスビーズであり、共に飽和状態では粘着力を持たないと見なされるような試料であるため、内部摩擦角は粘着力を 0 として求めている。

ダイレイタンスー係数  $D_r$  と内部摩擦角  $\phi_d$  および  $\phi_r$  の関係は、せん断抵抗係数を介して以下のように導かれる。

破壊時のせん断抵抗係数  $M_d$  は次式で表される。(添え字の f は破壊時を示す。)

$$M_d = \left( \frac{q}{p} \right)_{\max} = \left( \frac{q}{p} \right)_f \quad (3)$$

ただし、 $q = \sigma_1 - \sigma_3$  : 主応力差

$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$  : 平均主応力

$\sigma_1, \sigma_3$  : 最大および最小主応力

また、ダイレイタンスー係数  $D_r$  は次式で表される。

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

ただし、 $d\varepsilon_v$  : 体積ひずみ増分

$d\varepsilon_s$  : せん断ひずみ増分

そして、ダイレイタンスー補正されたせん断抵抗係数  $M_r$  は、エネルギー式により  $M_d$ 、 $D_r$  を用いて次式で示される。

$$M_r = M_d - D_r \quad (5)$$

式(3)によって定義した  $M_d$  と内部摩擦角の関係および式(5)によって定義した  $M_r$  と内部摩擦角  $\phi_d$  および  $\phi_r$  の関係は、それぞれ次式で与えられる。

$$\phi_d = \sin^{-1} \left( \frac{3M_d}{6 + M_d} \right) \quad (6a)$$

$$\phi_r = \sin^{-1} \left( \frac{3M_r}{6 + M_r} \right) \quad (6b)$$

$\phi_d$  はダイレイタンスー成分を除いた内部摩擦角であるが、粒子の乗り上げによる体積膨張と落ち込みによる体積収縮が平衡状態にあるときの内部摩擦角を評価している。さらに粒子破碎等の供試体内部の消散エネルギーも評価しており、以上の要因をあわせたみかけの粒子間摩擦角と見なされる。

図-9,10 において、GB 混入試料では、側圧が小さいと  $\phi_d$  の混入量による差が大きく、混入量が増えると  $\phi_d$  は小さくなる傾向を示している。しかし、側圧が増加するに連れて混入量による強度差は小さくなっていることがわかる。強度成分別に見ると、 $\phi_r$  は側圧に関係なく、混入量が増加すると常に小さくなる傾向を示している。 $D_r$  は低側圧下では混入量に比例して大きくなるが、高側圧下では逆に混入量に比例して小さくなっている。したがって、 $\phi_d$  について側圧が大きくなるに連れて混入量による強度差が小さくなる傾向が示されるのは、 $\phi_r$  と  $D_r$  の混入量による傾向差が互いに影響を与えているためと考えられる。また、GB の混入割合が小さくとも強度低下が生じている。大嶺、落合<sup>9)</sup>は細粒分として粘土、粗粒分として珪砂を用いて細粒分が強度低下に与える影響を調べている。そして細粒分がある含有率に達するまで強度低下しないという結果を示しているが、今回はそのような傾向は見られなかった。これは両者の供試体作製方法の違いに起因していると考えられ、今回用いた供試体は GB の混入量が少ないうちから均一に分布しているため、GB の摩擦係数の影響が、混入量に対して敏感に反応したものと考えられる。

一方、図-11,12 より、細粒珪砂混入試料では混入量に比例して  $\phi_d$  は大きくなっており、混入量の違いによる強度の側圧依存性の違いは見られないことがわかる。強度成分別に見ると、混入量に比例して  $D_r$  が大きくなるが、 $\phi_r$  は混入量に拘わらず側圧に対して一定となっている。

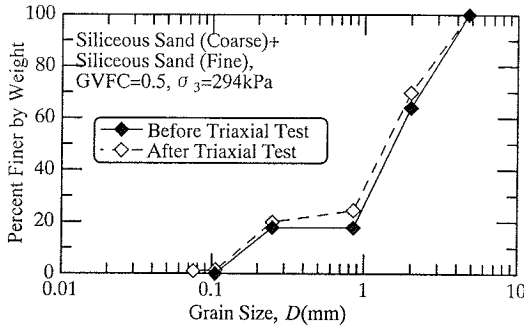


図-14 三軸試験前後の粒度曲線

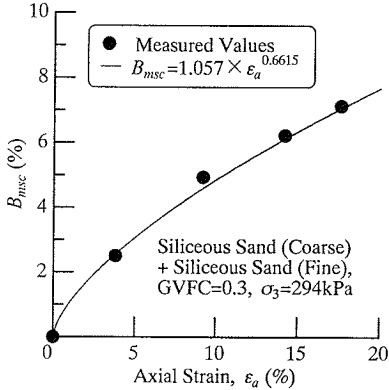


図-15 軸ひずみ～粒子破碎率の  $B_{msc}$  関係

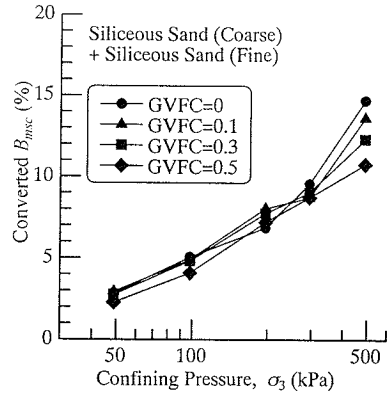


図-16  $\sigma_3$ ～換算  $B_{msc}$  の関係

の移動を抑えようとする効果の2つに影響を与えていると考えると、以下のように説明される。細粒珪砂混入試料とGB混入試料の傾向の違いは、細粒分の粒子間摩擦角の差が原因していると考えられる。GB混入試料はGBの内部摩擦角が小さいため、混入量と比例して  $\phi_i$  が小さくなる。また、正のダイレイタンスが卓越する範囲では、GBが粗粒土同士のかみ合わせ効果を小さくさせるため、GB混入量と比例してダイレイタンスが抑えられる。側圧が大きくなると体積変化は収縮方向に卓越するが、GBが粒子の移動を抑えるため、GB混入量と比例して収缩量は小さくなる。一方、細粒珪砂を混入した場合は粒子間摩擦角が粗粒土と同程度であるため、細粒珪砂混入試料の  $\phi_i$  に混入量の差は見られず、また、正のダイレイタンス量を大きくさせているのは、細粒細砂が粗粒土の移動を抑えようとする力を発揮するためであると考えられる。

#### (4) 粒子破碎特性の検討

細粒細砂混入試料については、試験後に試料を回収して粒度試験を行い、三軸圧縮試験中の粒子破碎量の評価を行った。図-14にGVFC=0.5の拘束圧294kPaの試験における粒径加積曲線を示す。図中の実線は三軸試験前の粒径加積曲線、破線は三軸試験後の粒径加積曲線を示している。三軸試験後には粒子破碎を生じて、粒径が細粒側に移動していることがわかる。粒子破碎の定量化は、粗粒土の破碎をよく表現する指標を採用する必要があると考えられる。そこで今回、貧粒度の粗粒材料に対して用いられた指標である最小ふるい通過率  $B_{ms}$ <sup>17)</sup>を参考に、粗粒土の最小(850 $\mu$ m)ふるいを通過した試料の増加割合を示す粒子破碎率  $B_{msc}$  をその指標とした。 $B_{msc}$  は次式で示される。

$$B_{msc}(\%) = \frac{M'_{sc} - M_{st}}{M_{sc}} \times 100 \quad (7)$$

ただし、 $M_{sc}$  : 三軸試験前における珪砂粗粒材料分の質量

したがって混入量による強度差は、 $D_i$  の差によるものと考えられる。ただし、細粒珪砂と粗粒土の物性がほぼ同じであるため、混入量に比例して  $\phi_a$  が大きくなるのは、単に密度増加による効果である可能性がある。図-13は、岩橋ら<sup>15)</sup>が行った豊浦砂について密度を変化させて直接せん断試験を行った結果を示している。今回用いた粗粒土と豊浦砂とは、粒径や粒子形状が異なっているものの、ともに貧粒度で細粒分を含んでおらず、締固め特性に大きな差異はないものと判断される。この図から、豊浦砂では側圧が小さい場合、相対密度が大きいほど内部摩擦角が大きくなるが、側圧が大きくなると相対密度による強度差が小さくなることからわかる。三浦、山内<sup>16)</sup>が行った豊浦砂を用いた三軸圧縮試験結果においても、密詰め供試体の強度の側圧依存性がゆる詰め供試体よりも大きいことを示しており、直接せん断試験と同様の傾向が確認されている。一方、本結果では高側圧下でも混入量が多くなると内部摩擦角は大きくなっており、両者は別の傾向を示していることがわかる。したがって、今回の結果において細粒細砂の混入量が多くなると強度が大きくなるのは、密度増加による効果だけではなく、細粒分が強度に影響を与えているためと考えられる。

図-9～12に示された傾向は、粗粒土の骨格構造の形成と消失が粗粒土のせん断強度特性を支配し、細粒分は粗粒土同士のかみあわせを阻害する効果と、粗粒土



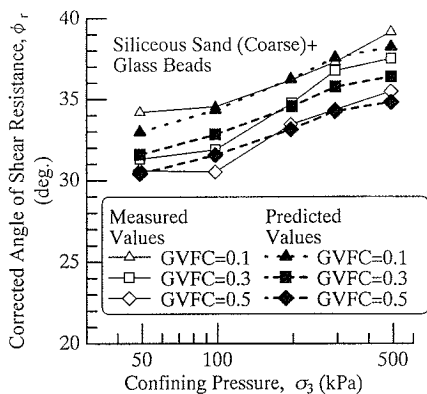


図-17  $\sigma_3$  ~ 予測  $\phi_r$  と実測の  $\phi_r$  の関係

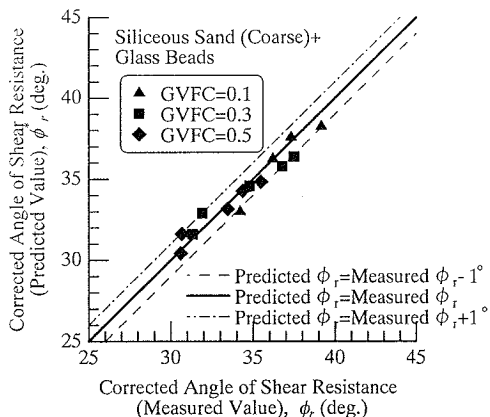


図-18 予測  $\phi_r$  と実測の  $\phi_r$  の対比

$M_{sc}^*$ : 三軸試験後における珪砂粗粒材料分原粒度の最小(850 $\mu$ m)ふるいを通過した試料の総質量

$M_{sf}$ : 三軸試験前における細粒珪砂の質量

粒子破砕量は軸ひずみに比例することが知られている。そこで GVFC=0.3 の試料を用い、任意の軸ひずみで試験を終了させて軸ひずみと  $B_{msc}$  の関係を調べた。その結果を図-15 に示す。図より  $B_{msc}$  は  $B_{ms}$  と同様<sup>18)</sup>、式(8)に示すように軸ひずみの  $2/3$  乗に比例することがわかった。

$$B_{msc} = A \cdot \varepsilon_a^{2/3} \quad (8)$$

ただし、A: 比例定数

$\varepsilon_a$ : 軸ひずみ(%)

粒子破砕量は、試験終了時の軸ひずみと  $B_{msc}$  を式(8)に代入し、比例定数Aを算出して、軸ひずみ20%時に換算した  $B_{msc}$  (以下、換算  $B_{msc}$  と記す)を求め、これによって評価した。なお、圧密過程における粒子破砕については、圧密過程終了時に供試体を取り出し、同じふるい分け試験を行った結果、粒子破砕はほとんど生じていないことを確認している。

図-16 に側圧  $\sigma_3$  ~ 換算  $B_{msc}$  の関係を示す。これより、側圧 294kPa までは換算  $B_{msc}$  は混入量に拘わらずほぼ同じ値を示している。しかし、側圧 490kPa になると混入量が多くなるほど換算  $B_{msc}$  は小さくなっていることがわかる。Miura et al.<sup>19)</sup>は粒度調整した80種類以上の砂試料の粒子破砕特性を調べ、粒度分布がよい試料ほど粒子破砕量は少なくなることを示している。この結果を考慮すると、細粒土の混入量が多い試料ほど粒子同士の接点数が増加し、粒子1個当たりに加わる接点力が小さくなったため、破砕量が減少したと考えられる。

一方、粒子破砕はせん断強度の低下を招くとされている。しかし今回の結果によると、低側圧下では細粒土の混入量で粒子破砕量に差がないのに拘わらず、強度差

は生じている。したがって、軽部<sup>17)</sup>が示した結論と同様、粗粒土に細粒土を混入させた試料においても、同一の材質を持つ試料同士の比較であれば、粒子破砕量が多い試料ほどせん断強度が小さくなるとは限らないと考えられる。これより今回の試験の範囲では、粒子破砕がせん断強度に与える影響は十分に把握されなかったものと判断される。

#### (5) GB 混入試料の $\phi_r$ の予測法

今回作製した GB 試料が内部に均一に分布していると考えられる供試体を用いた場合では、GB が粗粒土の骨格構造を阻害するため、GB 混入量に比例して見かけの粒子間摩擦角  $\phi_r$  が減少すると考えられる。このことを検証するために、 $\phi_r$  が GB 混入量と比例して低下することを示す式(9)により予測値の  $M_r^*$  を算出し、式(6)に代入して得られる予測  $\phi_r$  と実測  $\phi_r$  の比較を行った。 $\phi_r$  は図-9 に示すように弱い側圧依存性を有しているため、予測  $\phi_r$  は試験を行った側圧における  $\phi_r$  を用いて算出を行った。したがってなお、式(9)は、細粒土の割合が増加して粗粒土の骨格構造は一部形成されて、その部分で粗粒土としての強度を発揮することを意味している。

$$M_r^* = M_{rg} \times \frac{F_c}{100} + M_{rs} \times \frac{100 - F_c}{100} \quad (9)$$

ただし、 $M_r^*$ : その側圧における GB 混入試料の  $M_r$  予測値

$M_{rg}$ : GB のみの試料の三軸試験結果から求められた  $M_r$

$M_{rs}$ : 珪砂粗粒材料分だけの試料の三軸試験結果から求められた、任意の側圧における  $M_r$

F(%): 細粒分(GB)含有率

図-17 に予測  $\phi_r$  と実測  $\phi_r$  の側圧  $\sigma_3$  との関係を示す。実線で示されたものは実験結果であり、破線で示された

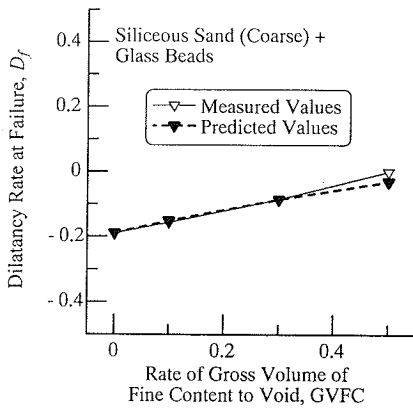


図-19 側圧 490kPa での GB 混入試料の  $D_f$  予測結果

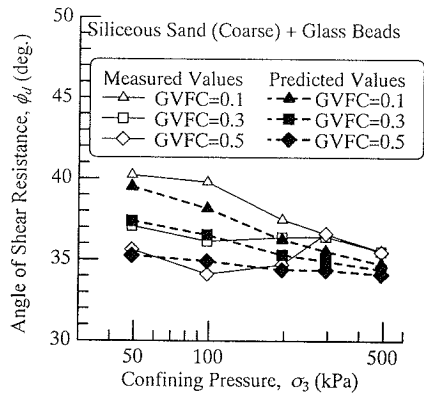


図-21  $\sigma_3 \sim$  予測  $\phi_d$  と実測の  $\phi_d$  の関係

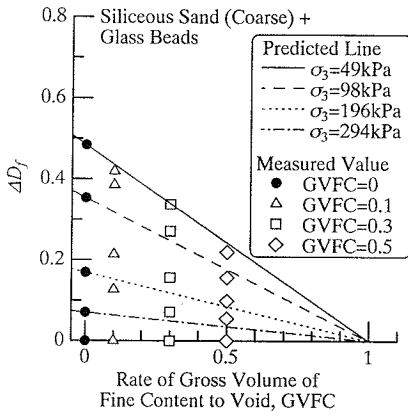


図-20 GB 混入試料の  $D_f$  予測方法

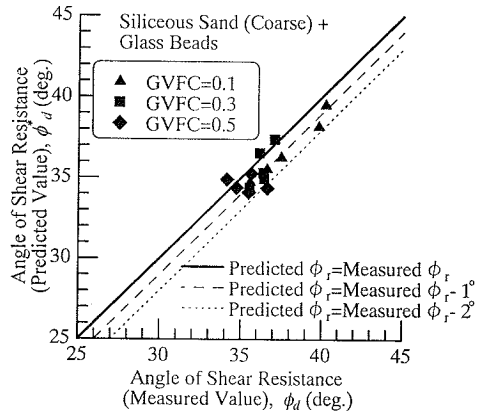


図-22 予測  $\phi_d$  と実測  $\phi_d$  の対比

ものは予測結果である。これより予測  $\phi_r$  と実測  $\phi_r$  の傾向は類似していることがわかる。図-18 には予測  $\phi_r$  と実測  $\phi_r$  の比較結果を示す。これより両者の差は  $\pm 1$  度の範囲内に収まっており、良好な予測結果となっている。以上から、先述の仮定の検証がなされたと考えられる。

### (6) GB 混入試料の $\phi_d$ の予測法

GB 混入試料の内部摩擦角  $\phi_d$  を予測するには、(5)で予測方法を示した  $\phi_c$  とあわせて、破壊時のダイレイタンシー係数  $D_f$  を予測する必要がある。しかし先述のように GB の影響は、低側圧下では  $D_f$  を抑える働きをし、その結果高側圧下では  $D_f$  を大きくするように、粗粒土同士のかみあわせを阻害する効果と、粗粒土の移動を抑えようとする効果が内部摩擦角に対し複雑に影響を及ぼしていると考えられる。そこで本論文では、GB 混入量の増加と共に  $\sigma_3 \sim D_f$  関係の傾きは小さくなっていくことに着目し、以下に示す方法により GB 混入量別の  $D_f$  を予測した上で、 $\phi_d$  の予測を行った。

側圧 490kPa における GB 混入試料の破壊時のダイレイタンシー係数が、式(9)と同様にそれぞれの重量比によって発揮されるとすると、次式で示される。

$$D_{f(490kPa)} = D_{f(Ave)} \times \frac{F_c}{100} + D_{f(490kPa)} \times \frac{100 - F_c}{100} \quad (10)$$

ただし、 $D_{f(490kPa)}$  : GB 混入試料の側圧 490kPa における  $D_f$  予測値

$D_{f(Ave)}$  : GB のみの試料の  $D_f$  平均値

$D_{f(490kPa)}$  : 珪砂粗粒材料分のみの試料の 490kPa における  $D_f$

図-19 に式(10)による予測結果を示す。これより、予測値と実測値がよく一致することがわかる。したがって、側圧 490kPa では式(10)の適用性が認められたと考えられる。

次に、ある GVFC における側圧 490kPa での実測  $D_f$  と任意の側圧での実測  $D_f$  の差を  $\Delta D_f$  とすると、 $\Delta D_f$  は次式で示される。

$$\Delta D_f = D_{f(XkPa)} - D_{f(490kPa)} \quad (11)$$

ただし、 $D_{f(490kPa)}$  : ある GVFC の側圧 490kPa における  $D_f$  実測値

$D_{f(XkPa)}$  : ある GVFC の側圧 X (kPa) における  $D_f$  実測値 (X=49, 98, 196, 294)

図-20に $\Delta D_f \sim GVFC$ の関係を示す。これより、GVFCが0から0.1に増加する場合を除いて、GVFCが増加すると $\Delta D_f$ は概ね直線的に減少することがわかる。GVFCが0から0.1に増加すると $\Delta D_f$ が増加するのは、(2)で述べたように混入割合が少ないうちは粗粒土粒子の移動が活発になって、ダイレイタンシー量が大きくなるためであると考えられる。ここではその影響を無視し、各々の側圧においてGVFC=0の $\Delta D_f$ を固定点とし、任意のGVFCにおける $\Delta D_f$ を回帰するような直線を引くことによって、この直線を予測値とした。なお、GVFC=1.0で $\Delta D_f$ は0となり、これ以上GVFCが増加してもダイレイタンシー特性は側圧依存性を示さないものと予測している。図-20上でこの直線とGVFC=0.1, 0.3, 0.5軸の交点を $\Delta D_f^*$ と表すと、側圧294kPa以下における $D_f$ の予測値 $D_f^*$ は次式で示される。

$$D_f^* = D_{f(490kPa)} + \Delta D_f^* \quad (12)$$

以上より、せん断抵抗係数の予測値 $M_d^*$ は式(9)、(12)で得られる予測 $M_f^*$ 、 $D_f^*$ を用いて、次式で示される。

$$M_d^* = M_f^* + D_f^* \quad (13)$$

図-21にGB混入試料の内部摩擦角の予測結果を示す。これより、側圧294kPa以上では実測値よりも小さい予測結果を与えており、GVFC=1:0.1では全ての側圧において小さい予測結果となっているものの、全体的な傾向としては実測値と予測値はよく対応しており、良好な予測結果を与えていると考えられる。次に、図-22に予測 $\phi_d^*$ と実測 $\phi_d$ の対比結果を示す。これより、全体的に内部摩擦角は実測値よりも予測値のほうが約2度の範囲で低く評価されているが、両者は概ね一致していると考えられる。

以上のように、粗粒土、細粒土それぞれのみの試料の強度試験を実施することにより、混合土の内部摩擦角をある程度推定することが可能であることがわかった。ただし本方法は、式(10)によるダイレイタンシー係数の予測方法が直感的であり、任意の側圧下での適用性は不明であること、また粗粒土が卓越する範囲のみでしか試験を行っていないため、細粒土が卓越する試料での適用性は不明であること、などの点に留意する必要がある。今後、土の骨格構造の微視的な構造に着目した上で、より一般性のある破壊時のダイレイタンシー係数の予測方法を確立する必要がある。

#### 4. まとめ

本研究では、粗粒土に細粒土が混入したときに生じる強度低下を検討するため、粗粒土の骨格間隙比を一定にし、細粒土として内部摩擦角の小さいグラスビーズを

用いた試料を用いて、三軸圧縮試験を実施した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 粗粒土の周りにメニスカス力によって細粒土を付着させることにより、細粒土が均一に分布した試料を作製することができた。
- (2) 破壊時に正のダイレイタンシーを示すような側圧下では、試験初期の体積圧縮傾向は粗粒土の骨格間隙中に占める細粒分の総体積の割合を示すGVFC (Rate of Gross Volume of Fine Content to Void)が1:0のときよりも1:0.1の方が圧縮量は大きくなる。これは、混入割合が少ないうちは細粒分が混入することにより、粗粒土粒子のすべりが生じやすくなり、圧縮量を増加させるためであると考えられる。
- (3) 細粒土は粗粒土同士のかみあわせを阻害する効果と、粗粒土の移動を抑えようとする効果の2つに影響を与えると考えられる。そのため、内部摩擦角の小さいグラスビーズを混入した試料は混入量と比例してダイレイタンシー補正された内部摩擦角 $\phi_f$ が小さくなり、破壊時のダイレイタンシーは0に近づく。その結果、グラスビーズの混入量に比例して内部摩擦角 $\phi_d$ は低下し、その側圧依存性は小さくなる。一方、内部摩擦角が粗粒土とほぼ同じ細粒珪砂を混入した試料は、 $\phi_f$ に混入量の差は見られないが、混入量と比例してダイレイタンシーが大きくなり、 $\phi_d$ は大きくなる。
- (4) 細粒土の混入量が多い試料ほど粒子1個当たりに加わる接点力が小さくなるため、粒子破砕量は減少する。ただし、粒子破砕量が多い試料ほどせん断強度が小さくなるとは限らず、粒子破砕がせん断強度に与える影響は十分に把握されなかった。
- (5) グラスビーズが均一に分布しているような試料では、 $\phi_f$ はグラスビーズの混入量に比例して低下し、グラスビーズの割合が100%となると、グラスビーズ試料の内部摩擦角に一致すると考えられる。また、上記の関係から得られる予測 $\phi_f$ と、側圧 $\sigma_3$ と破壊時のダイレイタンシー係数 $D_f$ の関係から求められる予測 $D_f$ から、任意のグラスビーズ混入量におけるグラスビーズ混入試料の $\phi_d$ の予測方法を示した。

謝辞：本研究を進めるにあたり、実験および結果の整理に御尽力頂きました元神戸大学生小林克哉氏(現鹿島建設)に感謝します。また、珪砂試料の凹凸係数の測定に御協力頂きました岐阜工業高等専門学校助教授吉村優治先生に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.173,2001.

- 2) 黄大振, 柳沢栄司, 菅野高弘:シルトを含む砂のせん断特性について, 土木学会論文集, No.463/Ⅲ -22,pp.25-33, 1993.
- 3) 佐藤正行, 小田匡寛, 風間秀彦, 小瀬木克己:細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.561/Ⅲ -38,pp.271-282,1997.
- 4) 桑野二郎, 中澤博志, 杉原弘一, 矢部浩志:細粒分を含む砂の非排水繰返しせん断強度, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp.993-994,1996.
- 5) 矢島寿一, 沼田佳久, 中根 淳:細粒分を含む砂質土の液状化特性と液状化強度評価に関する一考察, 土木学会論文集, No.624/Ⅲ -47,pp.113-122,1999.
- 6) 伊東周作, 兵藤正幸, 藤井照久, 山本陽一, 谷口聡一:砂・粘土・中間土の非排水単調及び繰返しせん断特性, 土木学会論文集, No.680/Ⅲ -55,pp.233-243,2001.
- 7) 野田達也, 山田信作, 松永 哲, 前田健一:砂-低塑性粘土混合土の非排水せん断及び液状化挙動, 第35回地盤工学研究発表会講演集, pp.967-968,2000.
- 8) 大嶺 聖, 落合英俊:二種混合体の応力-ひずみ関係と混合土の一次元圧縮特性への適用, 土木学会論文集, No.448/Ⅲ -19,pp.121-130,1992.
- 9) 大嶺 聖, 落合英俊:土構造に着目した混合土の強度特性, 土木学会論文集, No.469/Ⅲ -23,pp.55-64,1993.
- 10) 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.
- 11) Mitchell, J.K.: "Fundamentals of soil behavior", New York, wiley, 1976.
- 12) 地盤工学会:土質試験の方法と解説(第一回改訂版), p.446,2000.
- 13) 柴田安彦:砂質土のせん断時の変形強度特性に及ぼす細粒分の影響, 神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程学位論文, 2002.
- 14) Vaid, Y. P.: A critical assessment of membrane penetration in the triaxial test, ASTM. , *Geotechnical Testing Journal*, pp.115-143, 1984.
- 15) 岩橋 輔, 湯浅英司, 澁谷 啓, 三田地利之:広範囲な上載圧における砂の一面せん断強度, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp.673-674,1996.
- 16) 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.
- 17) 軽部大蔵, 野並 賢, 鶴ヶ崎和博, 山口 充:相似粒度に調整した粗粒材料のせん断強度特性に及ぼす粒子形状と粒子破碎の影響, 土木学会論文集 No.617/Ⅲ -46, pp.201~211,1999.
- 18) 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, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, 第3部(A), pp.336-337,1995.
- 19) Miura, K., Maeda, K., Furukawa, M. and Toki, S.:Physical characteristic of sands with different primary properties, *Soil and Foundations*, Vol.37, No.3, pp.53-64, 1997.
- 20) 吉森久貴, 柴田安彦, 野並 賢, 加藤正司:粗粒土にグラスビーズを混入させた試料の三軸圧縮試験, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, Ⅲ -A103,2001.
- 21) 柴田安彦, 小林克哉, 野並 賢, 加藤正司:粗粒土に細粒分を混入した試料のせん断強度特性, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, Ⅲ -291,2002.

(2003.3.10.受付)

## SHEAR STRENGTH CHARACTERISTIC OF A COURSE MATERIAL INCLUDING GLASS BEADS

Satoshi NONAMI, Shoji KATO, Yasuhiko SHIBATA and Hisaki YOSHIMORI

Triaxial compression test was carried out to study effect of fine content on shear strength of coarse grained soil. Siliceous sand and wetted glass beads were used as coarse sand and fine content, and they were mixed in mould to make specimen. It is found that the increase of ratio of glass beads decreases the internal friction angle under constant void ratio of siliceous sand, and that the dependency of shear strength on confining pressure decreases with the increase of ratio of glass beads. The modified internal friction angle for dilatancy at failure depends on the weight ratio of glass beads and siliceous sand. Finally, we propose a prediction method for the measured internal friction angle by using the relationship between confining pressure and the dilatancy coefficient at failure.