模型土槽に用いるまさ土とグラスビーズ混合試料の 一面せん断試験

野並 賢*

Direct Shear Test of Mixed Sample of Decomposed Granite Soil and Glass Beads Applying to Laboratory Test

Satoshi NONAMI*

ABSTRACT

For evaluating laboratory test, the influence which shear strength characteristic of soil has on an experimental result may be considered. Then, in order to produce arbitrary shear resistance angle, direct shear tests by the specimen which mixed the glass beads with decomposed granite soil was carried out. The influence of the normal stress dependency of shear resistance angle by rigid boundary of the shearing box was corrected. As a result, the proportion of decomposed granite soil and glass beads and shear resistance angle became nonlinear proportionality relation. The cause was explained by the simple particle model.

Keywords : Shear Resistance Angle, Direct Shear Test, Decomposed Granite Soil, Glass Beads, Miniature Ground Model,

1. はじめに

土留め壁などの大型構造物が地盤に与える影響の評 価や,改良地盤の挙動解明を行う場合,原位置と同じ スケールの実験は非常に困難であるため、縮小模型に よる検討が一般に行われる.その際,実物と模型の相 似比と同じだけ剛性や強度を縮小した模型による実験 か、遠心力により土の自重作用を原位置と同じように 作用させた遠心模型実験かが選択される. それらの実 験では、設計に必要な関係式を求めるために、土のせ ん断強度が実験結果に与える影響の感度分析を行うこ とがある.ここで筆者らは、深層混合処理工法を施し た改良地盤の沈下量を算出する際に設定する応力分担 比の合理的な設定方法を提案するため、重力作用場に おいて室内模型土槽による実験的検討を行っている(1), (2). その結果,未改良部の沈下量に盛土材のせん断抵 抗角が影響を与えることがわかったため、せん断抵抗 角~沈下量関係の把握を目的として、せん断抵抗角が 異なる盛土材を用いている.

一方, 重力場で行う模型実験では, 盛土材の粘着力

* 都市工学科 教授

の影響が実地盤との相似比に合わせて大きくなるため, これを有する試料を用いると原位置での挙動の再現性 が低下する.このため細粒分が少なく、気乾状態の試 料を用いて実験を行うことが望ましい. ただし現場で 用いられるせん断抵抗角の小さな試料は細粒分含有量 が高く、粘着力を有するものが多い. そこで、粒子形 状が丸くかみ合わせ効果が小さいグラスビーズ(3)をせ ん断抵抗角が小さい試料として用いれば、上記の問題 を回避できる. さらに, 自然材料とグラスビーズは土 粒子比重がほぼ同じであるため、同程度の粒度であれ ばそれらの混合試料は分級が生じにくいという利点が ある.したがって、両者の混合割合とせん断抵抗角の 間に比例関係が見出されば、せん断抵抗角を任意に調 整した試料が作製できると考えられる. なお筆者は過 去に、グラスビーズを細粒分と見立てて珪砂に混入し た試料の三軸圧縮試験を行い、混入量に比例してせん 断抵抗角が低下することを確認している(4).ただし, 同程度の粒度を混入した試料を用いてせん断抵抗角の 推定方法を検討した試験結果はあまり見られない.

上記を踏まえ本研究は、先述の室内土槽実験に用いるまさ土およびグラスビーズと、それらを任意の割合で混入した試料を用いて一面せん断試験を行った.そ







表1 用いた試料の混入割合

計料之	混入割合		
PP-01-7-14	まさ土	グラスビーズ	
DG100	100%	0%	
DG75GB25	75%	25%	
DG50GB50	50%	50%	
DG25GB75	25%	75%	
GB100	0%	100%	

の結果に基づき,規定よりも粒径が大きい試料を用い たときのせん断抵抗角補正方法の検討を行った.あわ せて,粒子間力が伝達することによって形成される骨 格構造の概念に基づき,まさ土とグラスビーズの混入 割合とせん断抵抗角の関係に関する考察を行った.

2. 試料および試験方法

まさ土とグラスビーズの近接写真を写真 1(a), (b)に, まさ土とグラスビーズのみの試料の粒径加積曲線を図 1 に示す.まさ土はホームセンターで購入したものを 2mm のふるいで通過させており,作業性を考慮して砂 ぼこりが飛ばないように試料を水洗いし,細粒分を除 いている.写真 1 より,まさ土粒子は角張っているの に対しグラスビーズ粒子は丸く,粒子形状が全く異な ることがわかる.粒子形状の凹凸度合いを示す凹凸係 数 *FU*⁽⁵⁾ (*FU*=4π*A*/*L*²,*A*:粒子の投影面積,*L*:粒子の周 長,この値が小さいほど粒子の凹凸度合いが激しくな る)を0.85mm~2mmの粒径の粒子に対して求めると, まさ土が FU=0.69, グラスビーズが FU=0.97 であった. 表1には試験に用いた真砂土とグラスビーズ混入試料 の仕様を示した.それぞれの試料の混入割合を重量比 で25%ずつ変えて、5 種類の試料を作製している.な お、試験に供した試料は模型実験用のものを粒度調整 せずに用いたため、地盤工学会基準⁽⁶⁾による一面せん 断試験の許容粒径(供試体直径 6cm のとき最大粒径 0.85mm)を上回っている.次章で述べるように、この ことがせん断強度を大きくさせることが判明したため、 簡易的な補正方法の検討と、定量的な評価方法に関す る課題の抽出を行っている.なお、土粒子密度はまさ 土が $\rho_s=2.67g/cm^3$ 、グラスビーズが $\rho_s=2.50g/cm^3$ と、両 者に大きな差はない.

一面せん断試験は気乾状態の試料を用いて定圧条件で行い、せん断速度を0.5mm/minとした.データの取得は0.1s毎に行っている.せん断箱のすき間は地盤工学会基準⁽⁶⁾を参考に0.2mmとし、反力板側のすき間設定用ねじを緩めて垂直応力作用時に上せん断箱を浮かせることで設けた.垂直応力は25,50,100,150kN/m²とし、圧縮過程は全て1段階で作用させた.供試体の密度は室内土槽作製時の検討の結果、気乾状態でも締固め可能な値として、一律でρd=1.53g/cm³とした.

3. 結果および考察

3.1 せん断変位~せん断応力・垂直変位関係 図 2(a) ~(e)に、それぞれの試料のせん断変位~せん断応力、 垂直変位関係を示した.試料名の最後尾の数字は設定 した垂直応力を表している.なお、垂直変位、せん断 応力共に微小な凹凸が見られ、せん断応力の最大値の 評価やダイレイタンシー係数の算出に支障をきたした ため、ステンレス球を用いた試験⁽⁷⁾と同様、任意のせ ん断変位における計測値を中心にせん断変位 0.13mm の範囲の計測値を合計しその個数で割り戻すことで連 続平均を行い、凹凸の補正を行っている.

せん断変位~せん断応力関係について、プロット上 の▼印はピーク値を示しており、このときを供試体の 破壊としている.↓印は残留強度におけるせん断応力 の値を示している.同一の垂直応力で各試料を比較す ると、まさ土の混入量が多いほど概ねピーク値は大き くなっている.また、せん断変位が1~2mm でピーク 値を迎えており、その後軟化を示している.せん断変 位~垂直変位関係は、いずれの試料も破壊時のせん断 変位~垂直変位の傾きが概ね最大値となっており、こ れらの傾向は密な砂が示す挙動と類似している.

また、グラスビーズのみの試料も含めて、垂直応力 が小さくなるといずれも垂直変位の発生量が大きくな る傾向がある。一方グラスビーズの三軸圧縮試験結果 では、ダイレイタンシー係数およびせん断抵抗角の拘 束圧依存性がないことが確認されており⁽³⁾、両者の挙 動に差が生じる結果となった。これは試験機構の違い



図2 せん断変位~せん断応力・垂直変位関係(塗りつぶしはせん断応力,白抜きは垂直変位)



図3 垂直応力~せん断応力の関係(プロットはピーク強度時)

が影響していることが指摘できる. すなわち, 一面せん断試験の供試体は三軸圧縮試験とは異なり側面が剛 な境界となっているため, 側面付近の粒子が拘束される. その影響は垂直応力に拘らず一定に正のダイレイ タンシーとなって現れるため, 垂直応力の小さな供試 体のダイレイタンシー発現量が大きくなったと考えられる.

次に、せん断変位 7mm (試験終了時)の垂直変位に 着目すると、試料に拘らず 0.45mm~0.75mm の値に収 束していることがわかる.これより、側面付近の粒子 拘束効果は試料の混入割合によらず、比較的大きな影 響を与えているものと考えられる.一面せん断試験に よるせん断抵抗角の評価に際しては、粒径が大きいこ とによる粒子拘束効果を補正することが望ましいため、 次節でその検討を行う.

3.2 破壊時のせん断抵抗角の算出過程の検討 図3(a) ~(e)までに、それぞれの試料の垂直応力~せん断応力 関係を示した.図中のプロットは破壊時の応力を示し ている.今回の試料は期間状態で細粒分を含まない試 料であり、本質的には粘着力を有さないとみなせる. そこで、c=0kN/m²に固定したときの破壊線を図中の黒 実線で示した.黒破線は粘着力を固定しない方法によ る最小二乗法で得た破壊線である.図3中には両方法 でせん断抵抗角を求めた結果を示している.なお、 GB100 試料の垂直応力のばらつきが他と比べ大きくな っているが、グラスビーズのような固くて丸い試料に 特徴的な現象⁽³⁾と考えられる.これより、c=0法で得た





図6 垂直応力~せん断抵抗角の関係(c=7kN/m²)

比例関係にあり,試料の混入割合がせん断抵抗角に大きな影響を与えることがわかる.

次に粘着力を固定しない方法のせん断抵抗角は、細 粒分を含まない気乾状態の試料であるにもかかわらず、 いずれも粘着力が算出されている.特に、三軸圧縮試 験ではせん断抵抗角の垂直応力依存性がないグラスビ



図 7 まさ土の混入割合~log σ~せん断抵抗角φの 傾きの関係



図8 せん断抵抗角の垂直応力依存性模式図

ーズのみの試料でも見られるのが興味深い.これは3.1 節で述べたように、側面付近の粒子拘束効果によるせ ん断抵抗力の増加が、見かけの粘着力として現れたた めと考えられる.地盤工学会の技術基準⁽⁶⁾でも供試体 直径に対して粒径が過大になると、せん断強度がかな り大きくなることが示されているが、同様の傾向が確 認されたといえる.また、まさ土の混入割合が多くな るにつれて粘着力も大きくなっているが、これは先述 の影響に加え、せん断抵抗角の垂直応力依存性の影響 によるものと考えられる.この傾向は三軸圧縮試験で も確認される一般的なものであり、そのことを踏まえ た粒子拘束効果の補正方法について以下に考察する.

まず, c=0kN/m²として垂直応力毎にせん断抵抗角を 求めた結果を図4に示した.これより,グラスビーズ のせん断抵抗角の垂直応力依存性が確認できる.そし て図5に示す方法で粒子拘束効果による見かけの粘着 力を c=7kN/m²に固定し,垂直応力毎にせん断抵抗角を 求めた結果を図6に示した.これより,図4でみられ たグラスビーズのみの試料はほとんど垂直応力依存性 がなくなり,三軸圧縮試験の傾向と同様になっている. 図7にまさ土混入割合と最小二乗法で求めた垂直応力





図10 垂直変位増分 dh/ds の模式図

	ピーク強度					残留強度						
計料之	c最小二乗法		c=0法		$c=7kN/m^2$		c最小二乗法		c=0法		$c=5kN/m^2$	
₽-V1-1 1⊒	$\phi (\circ)$	<i>C</i> (kN/m²)	ϕ (°)	<i>C</i> (kN/m²)	ϕ (°)	<i>C</i> (kN/m²)	ϕ (°)	<i>C</i> (kN/m²)	ϕ (°)	<i>C</i> (kN/m²)	ϕ (°)	<i>C</i> (kN/m²)
DG100	39.4	23.0	45.9	0	43.3	7	33.7	12.9	38.1	0	36.4	5
DG75GB25	42.1	10.2	44.9	0	43.3	7	34.4	8.1	37.1	0	35.5	5
DG50GB50	39.2	9.2	42.0	0	40.0	7	30.5	8.6	33.7	0	31.9	5
DG25GB75	36.4	7.2	38.8	0	36.4	7	30.1	5.3	32.2	0	30.2	5
GB100	31.2	7.7	34.1	0	31.5	7	24.8	5.6	27.2	0	25.0	5

表2 評価したせん断抵抗角φと粘着力 c

の対数 $\log \sigma$ ~せん断抵抗角 ϕ の傾きの関係を示したが, $c=7kN/m^2$ とするとグラスビーズのみでは傾きがかな り小さくなること、まさ土の混入割合 75%の試料を除 き、まさ土の混入量に比例して概ね傾きが大きくなる ことが確認できる.これらの結果より、せん断抵抗角 における粒子拘束効果の補正は、粘着力 $c=7kN/m^2$ を見 込むことで可能であると考えられる.

なお、まさ土のせん断抵抗角は垂直応力依存性があるため、任意の垂直応力に揃えた値で試料間の比較を行うことが望ましい.そこで図8の方法により log σ ~せん断抵抗角 ϕ の近似線から求まる σ =100kN/m² における ϕ を評価することとした.

次に,三軸圧縮試験ではせん断抵抗角との相関が確認されている⁽³⁾破壊時のダイレイタンシー係数 dh/ds を図9に示した.算出方法は図10のとおりである.これより本研究の条件においては,全体的な傾向としては垂直応力が大きくなるとダイレイタンシー係数が小さくなる.しかし,せん断抵抗角とは異なりダイレイタンシー係数と混入割合の間に明確な傾向が見られな

かった.この原因について現状では十分な考察を行っておらず、今後の課題としたい.

3.3 残留時のせん断抵抗角の評価 模型土槽による 実験では、局所的にせん断面が観察されることがしば しば見られる.この時に土槽試料が発揮するせん断強 度は残留状態、すなわちせん断変位が十分に発生して ピーク強度を超え、一定値を示す状態になっていると 考えられる. そこで本節では, 3.2節で整理した強度定 数整理方法に従い、残留強度時のせん断抵抗角の評価 を行うこととした. 図 11(a)~(e)までに, 残留強度時の 応力状態をプロットした垂直応力~せん断応力関係を 示した. 図3と同様に、黒実線は c=0kN/m²に固定した 残留強度時の破壊線、黒破線は最小二乗法による破壊 線である.後者によるせん断強度定数に着目すると、 ピーク強度時の値と比べると小さくなっているものの, グラスビーズだけの試料でも残留強度時において粘着 力が発揮されており、 せん断箱の剛性による粒子拘束 効果が残留時にも影響を与えていることが伺える、そ こでグラスビーズのみの試験結果を参考に c=5kN/m²



図 11 垂直応力~せん断応力の関係 (プロットは残留強度時)

に固定して最小二乗法によるせん断抵抗角の算出を行った.その結果を表2にまとめた.これより,残留強度時の¢はピーク強度時よりも6~8°小さくなっていることがわかる.せん断抵抗角の値は各種構造物の安定性検討結果などに大きな影響を与えるため,N値などから換算されるせん断抵抗角と実験で用いた試料のせん断抵抗角を比較する場合は,換算式の前提条件(道路土工の一般値は残留強度を用いている)や,実験状況を反映した強度定数を用いることが望ましい.なお,残留強度時のダイレイタンシー係数はいずれの試料も0に近い値になっており,残留状態に至っていることを確認している.

3.4 試料の混入割合とせん断抵抗角の関係 本節では 試料の混入割合とせん断抵抗角の関係について着目す る.図12に試料全体に対するまさ土の混入割合とせん 断抵抗角の関係を示した.これより,単独試料のせん 断抵抗角を結んだ線よりも試験結果は上方にあり,ま さ土を混入するとその割合以上にせん断抵抗角が大き くなっている.この理由について本研究では,粒子間 で伝達される粒子間力とせん断強度の関係に着目する. 粒状体がせん断強度を発揮するとき,応力を伝える粒 子の柱である構造骨格が形成,発達することが知られ ている^{例えば(8)}.これを図化した例として,図13にDEM (個別要素法)による二軸圧縮試験シミュレーション の,ピーク強度付近(軸方向ひずみ約6%)での粒子間 力図を示す.この図は応力を伝える粒子の骨格構造を 示すものである.これより,粒子間力は最大主応力方 向に卓越して発達すること,粒子間力を伝える粒子は



粒子数:3000 個 粒子間力が作用 している粒子接点数: 5737 点 最大粒子間力:16.7kN



図 13 DEM による二軸圧縮試験シミュレーション のピーク強度時の構造骨格図⁽⁸⁾



図 14 混入試料の粒子間力模式図

選択的かつ連続的に存在することなどがわかる.この 傾向に基づき今回の混入試料の結果を考察すると,ま さ土粒子とグラスビーズ粒子が一体となって骨格構造 を形成し,粒子間力を伝えていると考えられる.次に, 粒子に作用する応力の算出結果より,骨格構造は主に 粒子間の回転抵抗の伝達によって発達し,回転抵抗の 大きさは粒子形状が複雑であるほど大きいことが確認 されている⁽⁸⁾.これより,まさ土粒子間の回転抵抗は グラスビーズ粒子間よりも大きいといえる.さらに両 者の傾向から,まさ土粒子が発揮する回転抵抗はグラ スビーズ粒子同士の粒子間力に波及する可能性が指摘 できる.

以上の予備的検討に基づき,図14のようなピーク強 度時に粒子間力を伝える粒子を表現したモデルを用い て,混入割合とせん断抵抗角の関係を考察する. 簡単 のため総粒子数は12個とし,まさ土粒子とグラスビー ズ粒子はそれぞれの試料の混入割合に応じている. 図 中①のまさ土同士,④のグラスビーズ同士の粒子間力 はせん断抵抗角の大きさに比例し,②のまさ土粒子と GB粒子間に働く粒子間力は,①と④の粒子間力が2:1

表3 せん断抵抗角の試験値と推定値一覧

試料名	試験値(°)	推定値(°)
DG100	43.3	43.3
DG75GB25	43.3	41.3
DG50GB50	40.0	39.4
DG25GB75	36.4	36.7
GB100	31.5	31.5

の割合で発揮されるとする. ③のまさ土粒子に触れて いる GB 粒子と触れていない GB 粒子間に働く粒子間 力は、①と④の粒子間力が 1:2 の割合で発揮されると する.そして、粒子間力の合計を接点数で除した値を せん断抵抗角推定値とした.その結果を図 15 および表 3に示した.これより,推定値はまさ土の混入割合が 高い試料で試験値をやや下回るものの、直線関係より は相関がよくなる結果となった. なお,本検討結果は 粒子間力とせん断抵抗角の関係を直感的に設定してお り、推定式の提案に至るような精度を有するものでは ない.しかし、試験値と推定値の傾向が概ね一致した ことから、せん断抵抗角が示す傾向の定性的な説明は 可能と考えられる. すなわち, まさ土粒子が発揮する 回転抵抗がグラスビーズ粒子の回転抵抗を大きくさせ, 供試体全体としての粒子間力を大きくする. このこと が、単独の試料で得られたせん断抵抗角を混入割合で 案分した値より,試験値の方が大きくなった原因と推 察される.

4. おわりに

本研究は深層混合処理地盤の沈下量予測手法の検討 のため実施する室内土槽実験に用いるまさ土およびグ ラスビーズと、それらを任意の割合で混入した試料を 用いて一面せん断試験を行った結果をまとめたもので ある.得られた結論は以下のとおりである.

- 今回設定した密度および粒度では、まさ土とグラ スビーズの混入割合に拘らずせん断変位~せん断 応力および垂直変位の関係は密な砂が示す挙動と 類似するものであった。
- 2) 試料の最大粒径が供試体の直径に対する規定値よりも大きいことに起因し、供試体側面の粒子拘束効果が過大に発生し、ダイレイタンシーの発生量およびせん断強度の垂直応力依存性が見られた.そこで粒子拘束効果を粘着力成分の増加とみなし、これを考慮したせん断抵抗角の補正を行った.その結果、三軸圧縮試験で見られるせん断抵抗角の拘束圧依存性と同様の傾向となったことから、補正の妥当性を確認した.
- まさ土の混入割合が多いほどピーク強度時および 残留強度時のせん断抵抗角は大きくなるが、その



図15 せん断抵抗角の試験値と推定値の比較

混入割合とせん断抵抗角の関係は、単独の試料で 得られたせん断抵抗角を混入割合で案分したもの より大きくなった.これはまさ土粒子が発揮する 回転抵抗がグラスビーズ粒子の回転抵抗を大きく させ、供試体全体としての粒子間力が大きくなっ たためと考えられる.

本研究では、供試体側面が剛な壁であることによる 粒子拘束効果がせん断抵抗力を大きくさせる影響の補 正方法について検討を行った.その妥当性の検証を行 うにあたっては、規定以内の粒径に収まった試料の一 面せん断試験結果の比較や、三軸圧縮試験によるせん 断抵抗角 ϕ および log $\sigma \sim \phi$ 関係の傾きとの比較を行う ことが望まれる.これらへの取り組みが今後の検討課 題であると考えられる.

参考文献

- 野並 賢,長谷川 愛,臼田 和希,加藤 翔也,眞 鍋 達哉,鳥居 宣之:深層混合処理工法の沈下特 性に与える盛土材と未改良部の剛性の影響,第56 回地盤工学研究発表会講演概要集,12-1-3-03,2021.
- (2) 野並 賢, 臼田 和希, 長谷川 愛, 加藤 翔也, 眞 鍋 達哉, 鳥居 宣之:室内土槽による深層混合処 理工法の応力分担機構に関する実験的検討, 第 56 回地盤工学研究発表会講演概要集, 12-1-3-04, 2021.
- (4) 野並 賢,加藤 正司,柴田 安彦,吉森 久貴: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,土木学会論文集,Vol.757,III-66,pp.155~166, 2004.
- (5) 吉村 優治,小川 正二:砂のような粒状態の粒状 体の粒子形状の簡易な定量化方法,土木学会論文 集,No.463, III-22, pp.95-103, 1993.
- (6) 地盤工学会:地盤材料試験の方法と解説 第7編 変

形・強度試験,第4章 土の一面せん断試験, pp.661-699, 2009.

- (7) 野並 賢,河原 輝虎,鳥居 宣之:供試体作製方法 がステンレス球試料の一面せん断強度特性に与え る影響,Kansai Geo-Symposium 2020 論文集 -地下 水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウ ム-,pp.112~117, 2020.
- (8) 野並 賢,加藤 正司,吉村 優治,前田 健一,山本 修一:粒状体の変形・強度特性に与える粒子形状の影響に関する二次元個別要素法による検討, 土木学会論文集,Vol.799,Ⅲ-72, pp.51~63, 2005.