2次元アクリル円板の一面せん断試験によるせん断機構に関する基礎的研究

Fundamental study on shear mechanism of two-dimensional acrylic circular disks during direct shear

中村太意1,板橋一雄2,小高猛司3,岩田 賢4

- 1 名城大学大学院・理工学研究科建設システム工学専攻
- 2 名城大学・常勤理事
- 3 名城大学・理工学部建設システム工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 4 中央開発株式会社

概 要

土のせん断特性に間隙率が大きく影響することは周知であるが、特に礫材料の場合には、充填特性や壁効果などの影響が顕著に現れる。本研究では、礫粒子をアクリル円板で模擬して一面せん断試験を実施することにより、せん断中の粒子の回転や粒子接点角の変化などを観察し、微視的に初期充填構造の効果や壁効果などの礫材料特有の問題の解明を試みる。本論文では、粒径 10, 20, 30mm の均一粒径アクリル円板ならびに細粒分含有率 5.26, 30.77, 80.00%の二種混合粒径アクリル円板での実験結果を示し、微視的な観察を通して粒子の内部構造の変化がせん断特性に与える影響を考察する。その結果、均一円板では粒径が大きいほど粘着力が大きくなり、せん断面にある粒子が膨張傾向を示した。また密な充填構造を形成するほどせん断応力が大きくなった。一方、二種混合円板では細粒分含有率が小さいほど粘着力が大きくなり、総じて膨張傾向を示すものの、圧縮傾向を示す粒子もみられた。また粗粒分が多いと容器端部で粒子が拘束されるため、みかけの粘着力が大きくなることが示唆された。

キーワード: 礫材料, アクリル円板, 一面せん断試験, 粒子観察

1. はじめに

地盤の土圧,支持力や斜面安定などの安定解析を行う場合,粒子の配列方向や充填構造をはじめ、相対密度、せん 断強度、粒度組成、粒度分布といった要素が重要となって くる。その中でも、間隙率が土のせん断特性に大きく影響 することは周知であり、さらに礫材料の場合には、壁効果 などの影響が顕著に現れる。しかしながら、それらの影響 についての研究はあまり行われていない。そこで、本論文 では礫粒子をアクリル円板で模擬して一面せん断試験を 実施することにより、せん断中の粒子の回転や粒子接点角 の変化などを観察し、微視的に初期充填構造の効果や壁効 果などの礫材料特有の問題の解明を試みる。

はじめに、一面せん断試験を実施し、巨視的にせん断特性を検討する。充填構造による影響を考察するため、均一な同じ大きさの粒径を用いた一面せん断試験(以下に「均一円板」と呼ぶ)と粒径が異なる2種類の円板を用いた一面せん断試験(以下に「二種混合円板」と呼ぶ)の2通りの試験を行う。次に、微視的な観察を行い、粒子の内部構造の変化がせん断特性与える影響を考察する。これにより、微視的観点から巨視的なせん断特性に与える影響を考察する。

2. 試験概要

2.1 一面せん断試験

本試験では、粒径が 10, 20 および 30mm, 厚さが 20mm のアクリル円板粒子を用いた。一面せん断試験はアクリル円板をせん断するための特殊な一面せん断試験機(写真 1)を用いた。せん断箱は幅 300mm, 高さ 310mm の長方形であり、上下中央部の高さ 150mm の位置で、上下 2 分割できるようになっている。そして、上部せん断容器を固定し、下部せん断容器にせん断力を与える。せん断力と垂直力はせん断荷重計と垂直荷重計で測定し、せん断変位と垂直変



写真1 2次元一面せん断試験機

位は変位計により測定する。試験は3つの粒径の円板をそれぞれ単独でせん断する均一円板の試験と粒径10mm および30mmの2種類のアクリル円板粒子を混合して用いる二種混合円板の試験を行った。二種混合円板では、粒径比を10/30とし、細粒分含有率(混合割合)を面積比により、0(30mmのみ)、5.26、30.77、80.00、100%(10mmのみ)と算出した。せん断箱および一面せん断試験機は均一円板と同様である。

試験手順は、均一円板では、(1) アクリル円板粒子が斜方配列を形成するように詰める。(写真 2=初期状態)(2)せん断箱上部から載荷板を介して垂直応力 50,100,150,200kN/m²を一定にかける。(3) 手動式ジャッキによりせん断変位速度 2.4mm/min でせん断容器下部を左方向に移動させる。(4)粒径と同じ水平変位となるまでせん断する。一方、二種混合円板では、(1) せん断容器に所定の細粒分含有率になるように粒子を一粒子ずつ無行為に投入し、粒子を投入するごとに落し蓋で軽く押し付け最密充填状態になるように詰める。(写真 3=初期状態)均一円板と同様に(2)、(3)を行い、(4)すべての細粒分含有率で水平変位 30mm となるまでせん断する。



写真 2 粒径 30mm の供試体



写真3 細粒分含有率5.26%の供試体

2.2 粒子観察

粒径 10 と 30mm の 2 種類のアクリル円板粒子を用いた 試験を対象に観察を行った。垂直応力 50kN/m² の条件で 2.1と同様のせん断試験を行った。せん断前,最大せん断 応力 τ_{max} 発揮時,せん断中間部分,せん断終了時にそれぞ れ粒子の観察を行った。そのため,粒径 10mm の均一円板 では図 1 (a)より, δ =0, 2 (τ_{max}), 5, 10mm の 4 種類であり, 粒径 30mm では図 1 (b)より δ =0, 2 (τ_{max}), 15, 29mm の 4 種 類である。なお、粒径 30mm の δ =30mm ではせん断面で粒子の移動が拘束されるため、 δ =29mm とした。二種混合円板では、混合比 1 (粒径 10mm): 2 (粒径 30mm) (細粒分含有率 5.26%) の試験において粒子観察を行った。観察を行うせん断変位は τ_{max} を示した時の充填構造を明らかにするために、せん断前と図 1(c)に示す τ_{max} の周辺部分とした。そのため、 δ =0、20、22、23 (τ_{max})、25、26mm の 6 種類である。なお、図 1 の詳細は、後述の 3.1 を参照していただきたい。

観察方法は、せん断試験中の供試体をデジタルカメラで 撮影し、その画像から各粒子の中心座標とその周囲の粒子 との接点座標を読み取り、写真4に示すように供試体の任 意領域を9等分したうえで、せん断による各領域の間隙率、 接点数、接点角度、粒子の回転の変化を計算した。

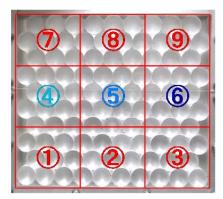


写真4 せん断前の解析領域分け

3. 試験結果

3.1 一面せん断試験

表1と2に均一円板と二種混合円板のせん断変位とせん 断強度ならびに強度定数を示す。また、図1にせん断変位 とせん断応力の関係,図2にせん断変位と垂直変位の関係, 図3に垂直応力とせん断応力の関係を示し、それぞれに均 一円板の 10mm (図(a)), 30mm (図(b)), 二種混合円板 の 5.26% (図(c)) の結果を示す。なお、図 3 の直線はせん 断応力の最大値を結んだものであり、この直線から強度定 数を決定した。図1(a),(b)と表1より,均一円板において はτ_{max} はせん断初期に発揮され、垂直応力が増加するほど 大きくなる。図1(c)と表2より、二種混合円板においては 垂直応力に関係なくせん断応力の変動が大きく、 Tmax はせ ん断後半部分に現れる。図 2 (a), (b)より,均一円板におい ては垂直応力の大きさに関係なくせん断開始直後から体 積膨張しており、供試体の初期構造が密であることがわか る。また、ダイレイタンシー特性を比較するために垂直変 位, せん断変位の値をそれぞれの粒径の大きさで除して正 規化した場合, 粒径の大きさに関係なくダイレイタンシー 特性が等しいことを別途確かめている。図2(c)より, 二種 混合円板では、全体的に体積膨張の傾向を示しているが、 せん断変位に応じて体積収縮する部分がみられる。図1(c) と比較すると局所的に体積収縮したせん断変位において せん断応力が局所的に減少していることがわかる。そのた

め、せん断によって発生したすき間を細粒分が埋めるため 膨張と同時に収縮し、供試体全体の充填構造が変わったこ とが考えられる。図 3 (a), (b)と表 1 より均一円板では、粒 径が大きいほど粘着力は高い値を示すが、粒径の違いがせ

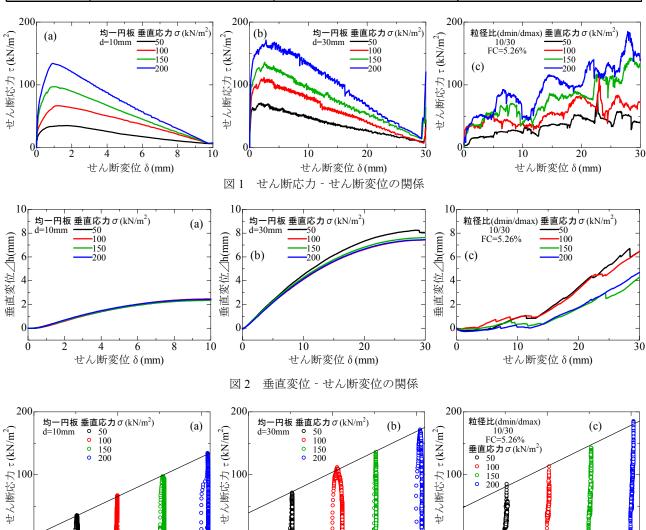
ん断抵抗角に与える影響は小さいことが示唆される。図3 (c)と表2より二種混合円板では、細粒分含有率が小さいほ ど粘着力は高い値を示すが、細粒分含有率の違いがせん断 抵抗角に与える影響は小さいことが示唆される。

均一円板のせん断変位とせん断強度および強度定数と初期間隙率

	粒径10mm			粒径20mm			粒径30mm		
垂直応力	せん断変位	せん断強度	初期間隙率	せん断変位	せん断強度	初期間隙率	せん断変位	せん断強度	初期間隙率
(kN/m^2)	(mm)	(kN/m^2)	(%)	(mm)	(kN/m^2)	(%)	(mm)	(kN/m^2)	(%)
50	1.74	35.22	13.68	1.13	61.77	13.23	1.97	71.17	15.53
100	1.14	66.73	13.44	1.15	100.12	13.20	2.46	111.85	15.53
150	1.07	97.10	13.44	0.92	134.28	13.15	2.58	136.03	15.53
200	0.92	134.20	13.29	0.93	166.60	13.08	2.79	171.53	15.45
粘着力(kN/m²)	2.89			26.56			39.45		
せん断抵抗角(°)	32.36			34.90			32.83		

二種混合円板のせん断変位とせん断強度および強度定数と初期間隙率

	細粒分含有率5.26%			細粒分含有率30.77%			細粒分含有率80.00%		
垂直応力	せん断変位	せん断強度	初期間隙率	せん断変位	せん断強度	初期間隙率	せん断変位	せん断強度	初期間隙率
(kN/m^2)	(mm)	(kN/m^2)	(%)	(mm)	(kN/m^2)	(%)	(mm)	(kN/m^2)	(%)
50	22.73	85.12	18.84	10.69	58.20	16.77	4.36	44.73	15.59
100	23.02	112.90	18.80	25.11	78.30	16.71	9.53	83.68	15.55
150	28.36	142.58	18.80	25.09	119.65	16.53	5.48	106.27	15.55
200	27.87	184.93	18.72	4.99	154.65	16.46	9.47	133.57	15.55
粘着力(kN/m²)	48.02			20.01			17.56		
せん断抵抗角(°)	32.32			33.21			29.97		



100

垂直応力 $\sigma(kN/m^2)$

せん断応力 - 垂直応力の関係

0

200

100

垂直応力 $\sigma(kN/m^2)$

0000000

200

図 3

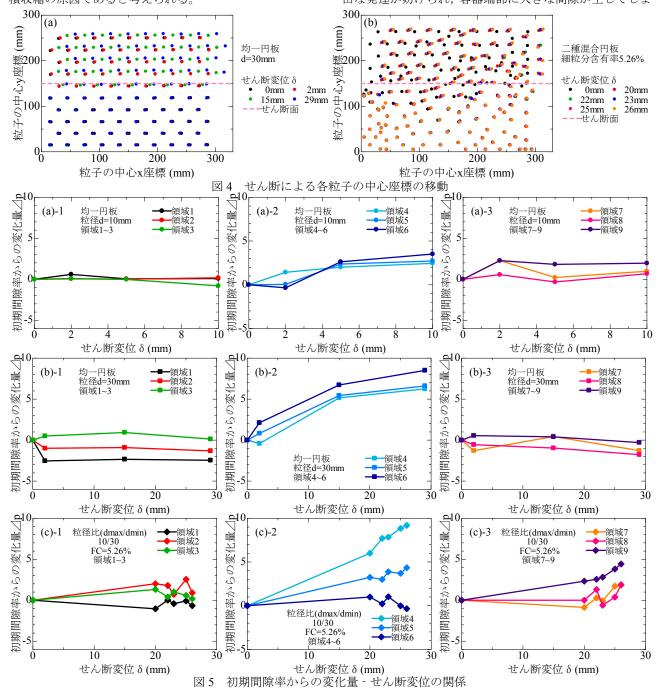
100

垂直応力 σ(kN/m²)

3.2 粒子観察

図4に30mmの均一円板と二種混合円板のせん断中の各粒子の中心座標の移動を示す。図4(a)より、30mmの均一円板の場合、せん断下部はせん断変位が大きくなっても粒子は移動せず、せん断面にある粒子のみが膨張しながら右方向に移動していることがわかる。そして、せん断面より上部の粒子はせん断面の粒子の膨張分だけ移動している。斜方配列を形成している均一円板では、せん断面以外の粒子の充填構造は乱されないことがわかった。なお、このような粒子の移動は均一円板の10mmでも同様にみられた。図4(b)より、二種混合円板の場合、均一円板と同様にせん断面を中心に右方向に膨張しているが、すべての粒子が膨張しているのではなく、せん断面の下側では下に移動している粒子もみられる。これが図1(c)でみられた局所的な体積収縮の原因であると考えられる。

図 5 に写真 4 に示した各領域においての初期間隙率からの変化量とせん断変位の関係を示す。均一円板における試験結果の図 5 (a), (b)より,均一円板の領域 $1 \sim 3$ ならびに領域 $7 \sim 8$ ではせん断変位による間隙率の変化量に大きな差はみられなかった。領域 $4 \sim 6$ ではせん断初期に間隙率が大きくなり,せん断後半部分では間隙率の増加が緩やかになる。図 1 (a), (b)より,均一円板ではせん断初期にせん断応力が大きくなったが,最密充填状態を形成する初期状態に最も τ_{max} が大きくなると考えられる。二種混合円板の図 5 (c)より,領域 $1 \sim 3$ ではせん断変位による間隙率の変化量に大きな差はみられなかった。領域 $4 \sim 6$ ではせん断変位によって間隙率の変化量に大きな差がみられた。領域 4 ではせん断変位とともに間隙率が大きくなる。この要因として,せん断面上に粗粒分が多いことからせん断層の自由な発達が妨げられ,容器端部に大きな間隙が生じてしま

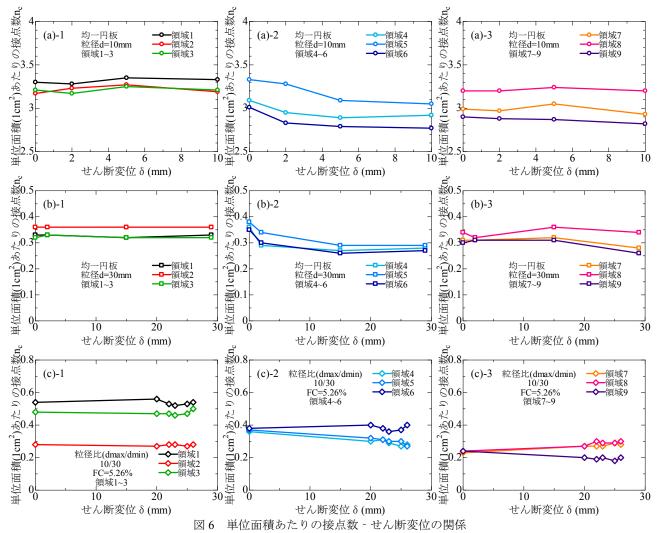


い, その間隙を粒子が埋めることができなかったことが示 唆される。また、領域 5 と領域 6 では τ_{max} を示す直前の δ =22mm では間隙率が小さくなり, τ_{max} を示した δ =23mm では間隙率が大きくなる。これより, 粒子が密な充填構造 を形成しているときにせん断応力が大きくなるという均 一円板と同様な傾向がみられる。しかし、最密状態である せん断初期ではなく、せん断後半部分でτ_{max}を示した。そ の要因として, 容器端部で粗粒分が拘束されたことが考え られる。その粒子の拘束力により、粗粒分が多いとみかけ の粘着力が大きくなることが示唆される。領域7~9では せん断変位により間隙率の変化量に多少のばらつきがみ られた。この要因として、せん断面の粒子の移動により充 填構造が乱れたことが考えられる。また、領域9では領域 7および8と比較して間隙率の変化量が大きい。この要因 として、領域6で生じた容器端部の間隙を粒子が埋めたた め、領域9の粒子も下方向に移動して間隙率が大きくなっ たことが示唆される。

図6に各領域においての単位面積 (1cm²) あたりの接点数とせん断変位の関係を示す。なお、単位面積あたりの接点数は各領域に含まれる粒子接点数を各領域面積で除して算出した。図6(a),(b)より、均一円板では、初期接点数は容器壁に接している辺が多いほど少ない。この要因として、壁効果の影響により接点数が少なくなったことが示唆

される。また、中心の領域4~6では、せん断変位による 接点数に大きな変化がみられ, せん断前半部分で接点数が 減少し、その後ほぼ一定の値を推移している。また、せん 断前半部分で δ=2mm のときに大きく減少している。これ より、接点数は τ_{max} を示すせん断初期に大きく変化し、図 1 (a), (b)のせん断応力の急激な増加は接点を通してより多 くの力が伝達されたことが示唆される。図 6(c)より, 二種 混合円板では、初期接点数は領域1~3では容器壁に接し ている辺が多いほど多くなり, 均一円板とは異なる傾向を 示した。この要因として,容器壁付近に細粒分が集中して いることが考えられる。また、領域4~6および7~9にお いて、初期接点数はそれぞれ一定の値を示している。この 要因として、領域1~3と同様に容器壁付近に細粒分が集 中していることが考えられる。そのため、均一円板でみら れた壁効果による接点数の減少はみられなかった。そして, せん断変位による接点数の変化は間隙率と同様に領域4~ 6と領域9でみられ、全体的に接点数が減少していく傾向 がみられた。以上の試験結果より、中心の領域4~6と上 部の領域7~9でせん断による変化がみられたが、上部の 領域の変化は中心の領域の変化の影響を受けている。した がって、次に均一円板とともに中心領域である領域4~6 の内部構造を明確にする。

図7に領域4~6における接点角度の頻度を示す。なお、



頻度は領域内の総接点数に対する所定の接点角度を有す る接点数の割合である。接点角度はせん断方向に対して乗 り上がるときを正,真上で0°,下がるときを負とする。均 一円板の図 7 (a), (b)より, δ=0mm の初期接点角度は-30°, 30°, 90°, -90°の頻度が高くなっており、斜方配列を形成し ていることがわかる。また, せん断変位が大きくなると 30° の接点の割合が少なくなり、せん断終了時には0°もみられ た。図 1(a), (b)より、せん断応力は τ_{max} を過ぎると減少し ていき, せん断終了時に最小となることから, 接点角度が 0°に近づくほど抵抗しにくい角度になることがわかる。図 7 (c)より, 二種混合円板では δ=0mm の初期接点角度にば らつきがみられることから斜方配列を形成していないこ とがわかる。図1(c)からせん断応力が大きくなるせん断変 位 22~23mm と 25~26mm をみると, 90°,-90°付近の割合 が多くなっている。これより、粒子が水平方向に並ぶと接 点を通してより多くの力が伝わり、せん断応力が大きくな ることがわかる。

図8に領域 $4\sim6$ における回転角度の頻度を示す。なお,領域分けは δ =0mm での粒子の中心座標で行い,頻度は各領域に含まれる各粒子の回転角度の数を領域内の総粒子数で除して算出した。また,回転角度とはせん断によって粒子自体が回転した角度で右方向の回転を正,左方向(せん断方向)への回転を負とする。均一円板における図8(a),

(b)より、せん断変位が大きくなると、回転角度が大きくな る粒子がみられる。しかし、10mmの粒子は右方向へ回転 するが、30mmの粒子は左右両方向に回転している。この 粒径の違いによる粒子の回転角度の相違を明らかにする ために、せん断面周辺の粒子に着目した。図9に10mmお よび 30mm の均一粒径におけるせん断面付近の各粒子の 回転角度を示す。横軸の粒子番号は、10mm 粒径円板では せん断面の下に位置する粒子(粒子番号1~30), せん断 面の粒子(粒子番号31~59), せん断面の上に位置する粒 子(粒子番号60~89)である。また,30mm 粒径円板では せん断面の下に位置する粒子(粒子番号1~10), せん断 面の粒子(粒子番号11~19), せん断面の上に位置する粒 子(粒子番号 20~29) と振り分けた(写真 5)。図 9 (a)よ り, せん断面にある粒子以外はほとんど回転していないこ とがわかる。そして、せん断面にある粒子は、多くの粒子 が右方向に回転しており, 左方向に回転している粒子が少 ない。図9(b)より、粒子が右方向と左方向に交互に回転し ており, 左右の回転角度の大きさもほぼ等しい。この要因 として、 粒径が大きくなるとせん断面にある粒子の数が少 なくなるため、一粒子にかかる粒子間の伝達力が大きくな り左右の粒子に影響を与えることが考えられる. この粒子 の拘束力が、図3(b)での粘着力の増加に影響を与えている ことが予想される。

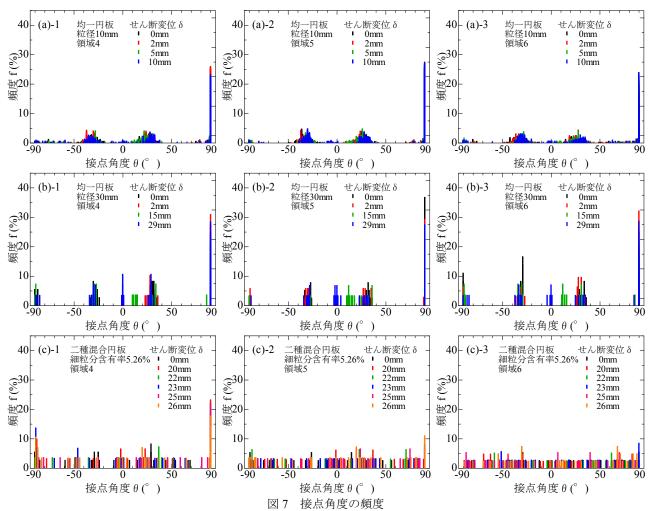
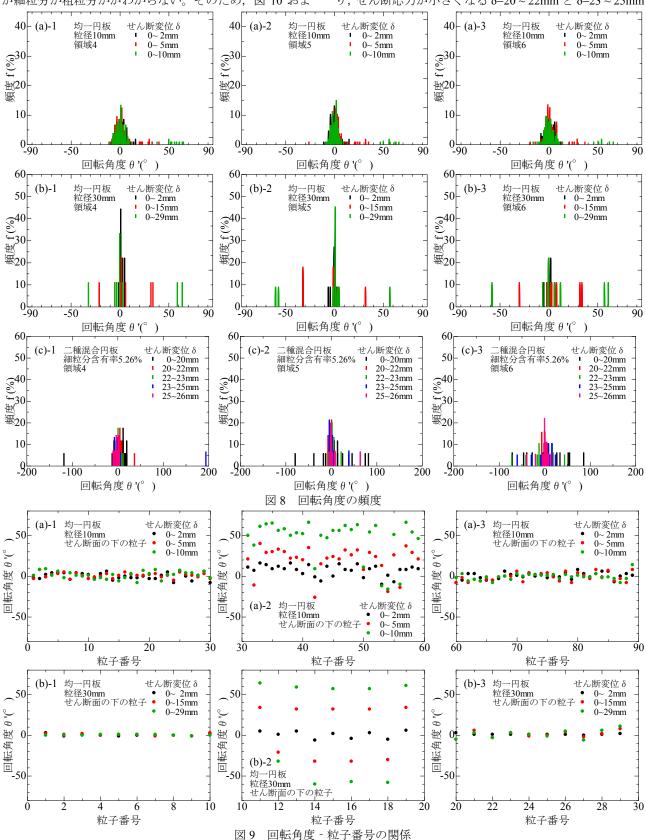


図 8 (c)より、二種混合円板では、 δ = 0~20mm より、 0°付近の粒子の頻度が高いが、回転角度のばらつきが大きくなっている。 δ =20~26mm より、全体的に 0°付近の頻度が高くなっているが 0°以外の角度がみられた。以上のことより、回転角度がせん断応力の減少や増加に影響を与えることがわかる。しかし、図 8 (c)からでは、回転している粒子が細粒分か粗粒分かがわからない。そのため、図 10 およ

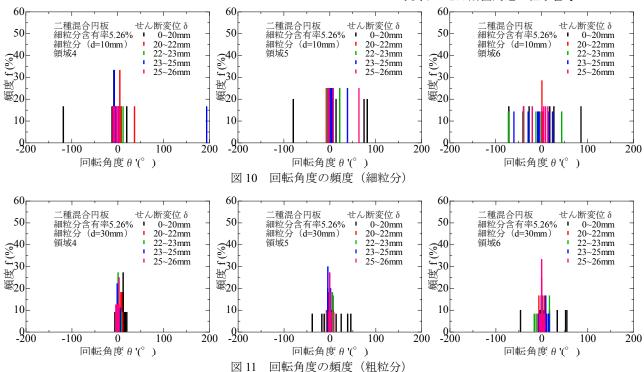
び図 11 に各せん断変位の領域 $4 \sim 6$ の回転角度の頻度を細粒分 (10mm) および粗粒分 (30mm) それぞれについて示す。各領域の δ =0 \sim 20mm より,細粒分・粗粒分に関係なく全体的に粒子が回転している傾向がみられるが 10mm の方が大きく回転している。また,回転角度の偏りもみられず左右両方向に回転している。各領域の δ =20 \sim 26mm より,せん断応力が小さくなる δ =20 \sim 22mm と δ =23 \sim 25mm



では回転角度のばらつきが小さく、せん断応力が大きくなる δ =22~23mm と δ =25~26mm では細粒分の回転角度のばらきが大きい。このことより、せん断応力が大きくなると粒子間の伝達力も大きくなり、粒子に回転が生じることが示唆される。図 11 の領域 4 では大きく回転している粒子がみられるが、これはせん断によって生じた間隙に粒子が入り込んだためである。全体的に領域 6 での回転角度のばらつきが大きいが、この要因として容器端部に生じた間隙を粒子が埋めるときに回転したことが考えられる。



写真5 せん断面周辺の粒子番号



4. まとめ

本研究の一面せん断試験の結果, 粒径が大きくなるほど, また粒径が大きい粒子が多いほど (細粒分含有率が小さい ほど) せん断抵抗角に大きな差はないが, 粘着力が大きく なることが示された。

粒子観察より、均一円板ではせん断面にある粒子が膨張傾向を示すが、二種混合円板では総じて膨張傾向を示すものの圧縮傾向を示す粒子もみられた。また、均一円板では密な充填構造を形成するとせん断応力が大きくなるが、二種混合円板では粗粒分が多いと容器端部で粒子が拘束されるため、みかけの粘着力が大きくなる。また、接点角度の変化がせん断応力に与える影響が大きいことが示唆された。粒子の回転角度より、均一円板では、せん断による回転角度の変化はせん断面にある粒子が回転しており、粒径が小さいと多くの粒子が右方向すなわちせん断方向に回転し、せん断方向が粒子の回転に影響を与えると考えられる。また、粒径が大きくなるとせん断面にある粒子の数が少なくなるため、一粒子にかかる粒子間の伝達力が大きくなり左右の粒子に影響を与える。同様に、このような粒

子の拘束力によってみかけの粘着力が大きくなることが 示唆された。二種混合円板では、せん断による回転角度の 変化は中心の領域だけでなく他の領域でも多少の変化が みられ、中心の領域では細粒分の方が大きく回転しており、 一面せん断試験よりみられたせん断応力が大きくなるせ ん断変位では回転角度が大きくなる。

なお,試験の実施にあたり,元大学院生の春日井真氏, 古谷祐樹氏に多大なお世話になった。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 春日井真・古谷祐樹・岩田賢・板橋一雄・小高猛司: 二次元一面せん断試験による均一アクリル円板のせん断 特性, 平成20年度土木学会中部支部研究会発表会,2009.
- 2) 板橋一雄・小高猛司・中村太意・岩田賢: 二次元アク リル円板粒子を用いた一面せん断試験, 第 47 回地盤工学 研究発表会, 2012.
- 3) 板橋一雄・小高猛司・中村太意・岩田賢:アクリル 円板粒子の一面せん断に伴う内部構造の変化,平成24年 度全国大会第67回年次学術講演会、2012.