

非排水繰返しせん断後に間隙水流入を受ける砂のせん断変形特性に及ぼす細粒分の影響

上田 恭平¹・玉泉 聡士²・渦岡 良介³

¹正会員 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: ueda.kyohei.2v@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²非会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: tamaizumi.satoshi.52e@st.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: uzuoka.ryosuke.6z@kyoto-u.ac.jp

緩傾斜地盤において地震後に時間遅れを伴う流動変形が生じる要因の一つとして、加振により上昇した過剰間隙水圧が再配分される過程で、表層の難透水層直下の砂層に下層から流入する間隙水の存在が挙げられる。間隙水流入により体積膨張を伴いながらせん断変形が進展するきれいな砂の挙動は実験的に調べられているものの、細粒分の影響に着目した研究はほとんど行われていない。本研究では、細粒分含有率 ($F_c = 0, 10, 20, 30\%$) を変化させた供試体を作製し、中空ねじり試験機を用いて初期せん断応力を載荷した上で非排水繰返しせん断履歴を与えた後、間隙水注入による強制膨張せん断試験を実施した。その結果、細粒分含有率は、砂の非排水繰返しせん断特性のみならず、その後の間隙水流入時のダイレイタンシー特性にも影響を及ぼすことが明らかとなった。

Key Words: *initial shear stress, post-liquefaction shear deformation, pore water inflow, fines content, torsional shear test*

1. はじめに

2018年9月28日の18時2分(現地時間)、インドネシアのスラウェシ島中部を震源とするマグニチュード $M_w 7.5$ の大地震が発生した。この地震は、スラウェシ島中心部を南北に走る Palu-Koro 断層が 150 km にわたり左横ずれを起こしたことによるものと推定されている。震源から 77 km 南に位置する中部スラウェシ州の州都である Palu 市では、地震動そのものや津波、さらには液状化によると考えられる地盤流動によって、甚大な人的被害・建物被害が発生した¹⁾。

大規模な地盤流動の発生は、平野の中心部を流れる Palu 川の東部の 3 地区 (Petobo, Jono Oge, Sibalaya)、および西部の 1 地区 (Balaroa) において報告されている¹⁻⁴⁾。いずれの発生地点も傾斜角が 1~6% の非常に緩い斜面であり、このような緩傾斜地盤が液状化により広大な範囲にわたって流動化したことは非常に稀有な事例と言える。住民の証言や撮影された動画によると、地震動が収束してから数分後に地盤の流動が始まり(遅れ地盤流動)、水分を大量に含んだ泥水上の地盤が上下に波打つように流動しながら、家屋等を飲み込んでいったことが

わかっている⁵⁾。被害を受けた地点はいずれも古い扇状地に位置し、表層は Palu 川からの氾濫堆積物(細砂、シルト等)で覆われた互層構造となっており、地下水位が浅いことが特徴である^{1), 2), 5)}。また、Palu 川東部の 3 地区では、いずれも灌漑用水路を境として被害が発生しており^{1), 2)}、緩傾斜地盤への用水の流入が被害発生の原因ではないかとの指摘もある。しかし、西部の Balaroa 地区では灌漑用水路が存在しないにも関わらず同様の流動現象が生じており、大規模流動の直接的な原因の解明には至っていないのが現象である²⁾。

このような時間遅れを伴う緩斜面の大規模流動の一因として、水膜現象^{6), 7)}や間隙水(もしくは間隙)の再配分⁸⁻¹⁰⁾といったメカニズムが指摘されている³⁾。國生^{6), 7)}は、地盤下部から供給された間隙水が難透水層の直下で滞留する現象を水膜現象と名付け、粒径が層毎に異なる多層構造の地盤ではこのような現象が生じやすいことを示している。また、Sentou¹¹⁾は、液状化で上昇した過剰間隙水圧が地震後に再配分される際に、上方への浸透によってせん断ひずみが遅れて発生する液状化後流動破壊メカニズムに着目し、三軸試験を実施した。初期せん断を受ける供試体に非排水繰返しせん断を作用させた後、間

隙水を強制的に流入させることで、応力状態が破壊線に達するとせん断ひずみが急増すること、浸透に伴う体積ひずみが同じ場合には密よりも緩い砂の状態ではせん断ひずみの発生量が大きくなることを明らかにしている。同様の研究は、山口ら¹²⁾が簡易型単純せん断試験機を用いて、また Yoshimine ら¹³⁾が三軸試験機を用いて実施しているが、Sento ら¹¹⁾含めいずれの実験でも細粒分を含まない豊浦砂が使用されている。これに対して石丸ら¹⁴⁾は豊浦砂にカオリン粘土を混合した試料に対して同様の検討を行っているが、液状化後の遅れ流動変形メカニズムに細粒分がどのように影響するかについては十分に解明されているとは言い難い。

前述の Petobo 地区および Jono Oge 地区における土質調査¹⁵⁾によると、深さにより土質は異なるものの細粒分含有率 F_c は 10~60%、塑性指数 I_p は NP (非塑性) ~27 の範囲にあることが示されている。また、別の文献¹⁶⁾によると、Petobo 地区における F_c は表層(砂質シルト)で 76%、その下の液状化層(シルト砂)で 38%、それ以深で 70%程度とされている。このような(非塑性)細粒分の違いが傾斜地盤の遅れ側方流動に影響を及ぼし得ることは、遠心場での模型実験¹⁷⁾からも示唆されている。そこで本研究では、非塑性細粒分を含む砂の要素挙動に着目し、中空ねじりせん断試験装置と間隙水流入装置を用いることで、液状化後の遅れ流動変形メカニズムに及ぼす細粒分の影響について調べることを目的とする。

2. 中空ねじりせん断-間隙水流入試験

(1) 試験装置の概要

本実験には、図-1に示す京都大学防災研究所土質実験室の中空ねじりせん断試験システム¹⁸⁾を用いた。本システムでは、空気圧シリンダーによって供試体(図-1の中央付近)に作用させるトルク値および垂直荷重を制御することができ、試験中はロガーによりトルク値、回転角、垂直荷重、垂直変位、体積変化量、間隙水圧を0.05秒間隔で計測した。回転角はポテンシオメータ、垂直変位はダイヤルゲージ、そして体積変化は供試体と接続されるビュレット内の水位変化をトランスデューサーにより測定した。なお、トルク値、垂直荷重、回転角および垂直変位は供試体の上面において、間隙水圧は供試体の下に設置されている水圧計にて計測されている。セル圧、背圧、負圧を供試体に与える際には、図-1の左端のパネルに取り付けてあるバルブを用いてそれぞれ調節した。試験システムの詳細については、既往の文献¹⁸⁾を参考にされたい。

本実験では、非排水繰返しせん断試験を実施した後で、供試体に強制的に間隙水を流入させる必要がある。そこで図-2に示すような間隙水流入装置を作製した。装置の機構は Sento ら¹¹⁾および山口ら¹²⁾と同様であり、ステッピングモーターにより注入ピス

トンの間隙水セル室に貫入させることで、セル室内の水が流出される仕組みになっている。なお、ステッピングモーターの貫入速度(すなわち間隙水の流入速度)は、モータードライバーにより調節可能である。流入装置の先端(図-2の左側)は図-1に示す供試体の底面に接続されている。

(2) 土質材料

実験に用いる土質材料は、大規模流動が生じた現地の砂ではなく、基礎的研究との位置付けから非塑性である工業用の珪砂7号と9号とした。表-1に示すように、細粒分含有率が所定の値($F_c = 0, 10, 20, 30\%$)となるように2種類の珪砂を混合した(以下、混合砂と呼ぶ)。なお、同表に示す混合率は重量比で表示している。

(3) 供試体作製手順

供試体のサイズは高さ100mm、外径100mm、内径60mmであり、地盤工学会基準(JGS 0550-2020:土のねじりせん断試験用中空円筒供試体の作製・設置方法)に従い作製した。

初めにペDESTALを台座に固定し、ペDESTALが覆われるように内側と外側のモールドを組み立て、メンブレンをそれぞれに装着させた。その後、アウターメンブレンと外側のモールドの間に隙間が生じないようにモールドサクシオンを作用させながら、空中落下法により2つのメンブレンの間に混合砂を堆積させた。空中落下法による供試体作製直後の目標相対密度(D_{rini})は40%であり、表-2に示すようにケース間で最大で±3%程度の誤差が存在することが確認できる。堆積後、試料キャップを被せてそれ



図-1 中空ねじりせん断試験装置

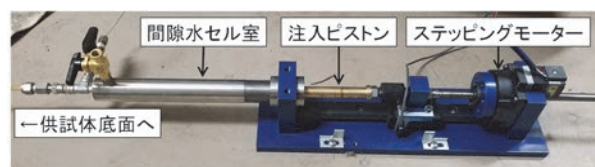


図-2 間隙水注入装置

表-1 混合砂(珪砂7号+9号)の諸元

細粒分含有率 F_c (%)	0	10	20	30
混合率 (%)	珪砂7号	100	85	70
	珪砂9号	0	15	30
最大間隙比 e_{max}	1.136	1.086	1.077	1.099
最小間隙比 e_{min}	0.691	0.640	0.618	0.627

ぞれのメンブレンを装着させ、モールドサクシオンを止めた後、供試体に-20 kPaの負圧を作用させた。負圧作用下のもとでモールドを取り除き、供試体の高さおよび外径を計測した。

供試体作製後、三軸室を組み立て水で完全に供試体を覆い、供試体に作用させていた負圧をセル圧に置換させて飽和作業に移行した。供試体の飽和度を高めるために、二酸化炭素を供試体に一定時間注入した。飽和完了後、供試体に200 kPaの背圧を与え、非排水条件下でセル圧を作用させてB値(表-2参照)を計測し、供試体が飽和されていることを確認した。

(4) 実験手順

本実験で想定しているのは、2018年スラウェシ島地震で広大な地盤流動を生じた非常に緩い傾斜地盤における要素挙動である。このような現象を中空ねじり試験により再現するため、比較的緩い状態で混合砂を堆積させた供試体に対して、初期せん断を作用させたうえで繰返しせん断履歴を与え、その後、間隙水の注入を行うこととした(図-3)。詳細なプロセスを以下で述べる。

B値計測後、初期有効拘束圧100 kPaにて体積変化が一定になるまで供試体の等方圧密を行った。圧密過程で計測された体積変化から算出される圧密終了時の相対密度(D_r)は、表-2に示すように供試体作製時の相対密度(D_{rini})よりも2~3%増加していた。

図-3に示す等方圧密後の実験手順のとおり、圧密終了後に排水条件下で地盤の傾斜角に相当する初期せん断応力 τ_i を供試体に作用させた。非常に緩い斜面(傾斜角 $\theta = 2^\circ$)を想定し、有効上載圧 σ'_v が100 kPaであると仮定すると、

$$\tau_i = \sigma'_v \sin \theta \cos \theta \quad (1)$$

より初期せん断応力は約3.5 kPaとなる。表-2に示すすべての実験ケースにおいて、この初期せん断応力を作用させた。

その後、非排水条件下で所定のせん断応力振幅 τ_d (=13.6, 12.0, 10.0 kPa)の正弦波により繰返しせん断試験を(軸力一定で)実施した。表-2には、 τ_d を初期有効拘束圧で除した繰返しせん断応力比CSRが示されている。繰返しせん断中は過剰間隙水圧を

表-2 実験ケース一覧

Test No.	F_c (%)	CSR	D_{rini} (%)	D_r (%)	B 値
1	0	0.136	40.0	41.6	0.985
2	0	0.136	37.5	39.5	0.973
3	10	0.136	40.8	43.2	0.996
4	10	0.12	38.9	41.2	0.983
5	10	0.10	40.6	43.1	0.978
6	20	0.136	41.2	43.5	0.959
7	20	0.12	38.3	41.2	0.983
8	20	0.10	42.9	45.3	0.972
9	30	0.12	40.9	43.3	0.977
10	30	0.10	40.4	43.0	0.984

計測し、過剰間隙水圧比 r_u が一定値を超えた時点で、せん断応力を初期の値 τ_i に戻したうえで、繰返し載荷を停止させた。Test 1のみ $r_u = 0.8$ で繰返しせん断を終了し、その他のケースでは $r_u = 0.95$ を超えた時点で(すなわち、液状化履歴を一度経た上で)終了とした。

最後に、初期せん断応力が作用した状態のまま、供試体の底面から間隙水を注入した。動的な注入により供試体を乱すことがないように、注入速度は既往の文献^{11), 12)}を参考にすべてのケースで毎秒 $5.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^3$ に設定した。これは体積ひずみが毎秒 1.0×10^{-4} 増加することに相当する。参考までにTest 2における供試体の様子を図-4に示すが、繰返しせん断終了時と比べて、間隙水の流入によりせん断ひずみが進展している様子が確認できる。

3. 間隙水注入のタイミングの影響

これ以降は実験結果について述べるが、まず本章では繰返しせん断を停止する(もしくは間隙水を注入する)タイミング以外の条件がほぼ等しいTest 1とTest 2の比較を行う。その後、次章において一度液状化履歴を経験した9ケース(Test 2~Test 10)の結果を比較することで、非排水繰返しせん断および間隙水流入を受ける砂のせん断変形特性に及ぼす細粒分の影響について考察する。

Test 1とTest 2の実験結果を、図-5に重ねて示す。

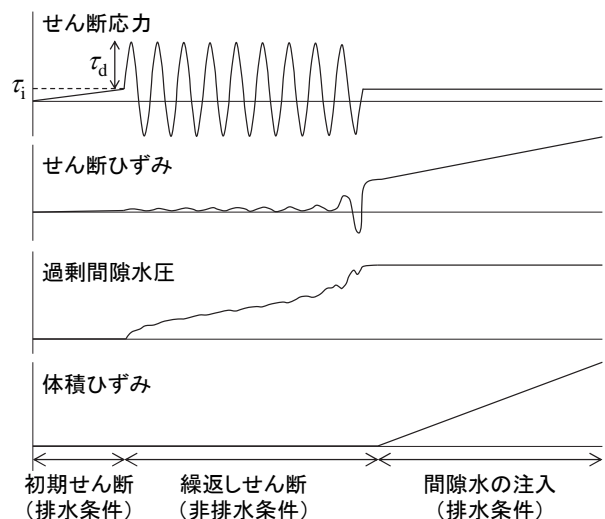


図-3 実験手順(等方圧密後)の模式図

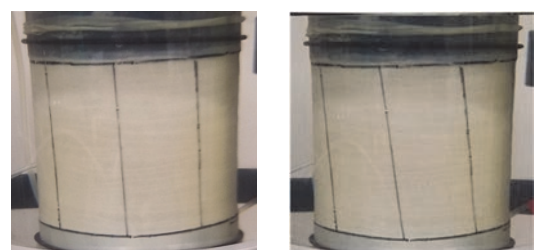
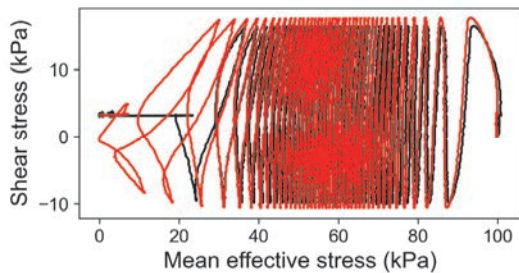


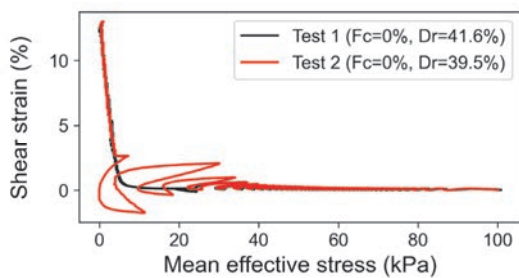
図-4 供試体の様子(左:繰返しせん断終了時, 右:間隙水流入終了時)

図-5(a)(b)は、図-3 の全プロセスにおける有効応力経路および有効拘束圧-せん断ひずみ関係である。前述のとおり、Test 1 と Test 2 では間隙水を注入するタイミングが異なるが、図-5(a)の有効応力経路からもそのことが確認できる。図-5(b)のせん断ひずみの履歴に着目すると、Test 1 では注入開始時点（有効拘束圧 20 kPa）のひずみは 1%にも満たない値であるが、その後の間隙水の注入に伴い、有効拘束圧が 5 kPa を下回ったあたりでひずみが急増することがわかる。一方、Test 2 では注入開始時点（有効拘束圧 5 kPa）で繰返しせん断により 2.5%のせん断ひずみが生じており、この点は Test 1 とは異なっている。しかし、その後の注入に伴うひずみの急増については、Test 1 と同等の挙動を示すことが確認できる。

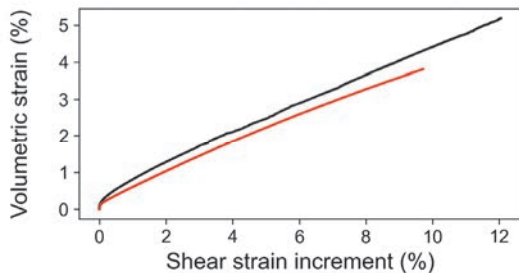
図-5(c)は、間隙水の注入プロセスにおけるダイレイタンス特性（せん断ひずみ増分-体積ひずみ関係）である。Test 1 では、図-5(b)においてせん断ひずみが急増する点以降のみをプロットしている。これ以降、体積ひずみをせん断ひずみ増分で除した値をダイレイタンス係数と称すが、Test 1 と Test 2 で大きな差異は生じていないことがわかる。既往の研究¹¹⁻¹³⁾によると、ダイレイタンス係数は相対密度 D_r の大小と正の相関があることが指摘されてい



(a) 有効応力経路



(b) 有効拘束圧-せん断ひずみ関係



(c) ダイレイタンス特性

図-5 Test 1 と Test 2 の実験結果の比較

る。Test 2 は Test 1 よりも D_r が約 2%小さく、この密度の差がダイレイタンス係数に反映されていると解釈すると、間隙水注入時の有効拘束圧の大小はダイレイタンス係数にほぼ影響を及ぼさないと考えることができる。

4. 砂のせん断変形特性に及ぼす細粒分の影響

(1) 非排水繰返しせん断時の挙動

ここでは、間隙水の注入前に一度液状化履歴を経験した 9 ケース (Test 2~Test 10) を対象に、まずは非排水繰返しせん断時の挙動について考察する。

図-6~図-8 は、繰返しせん断応力比 (CSR) 毎に F_c の異なる供試体の有効応力経路を比較したものである。最も大きい CSR ($=0.136$) で繰返しせん断を行った 3 ケース (Test 2, 3, 6) を比較すると、図-6 に示すように、液状化に至るまでの挙動が F_c により大きく異なることがわかる。細粒分を有する 2 ケースでは、細粒分が存在しない Test 2 より若干密であるにもかかわらず、Test 2 と比べて 1/3 程度の繰返し回数で液状化に至っている。また、わずかではあるが Test 6 ($F_c=20\%$) の方が Test 3 ($F_c=10\%$) よりも液状化しやすいようである。同様の傾向は図-7 に示す CSR=0.12 の 3 ケースの比較からも確認でき、Test 7 ($F_c=20\%$) と Test 9 ($F_c=30\%$) では Test 4 ($F_c=10\%$) よりも液状化が生じやすいと言える。すなわち、液状化強度は F_c が 20-30%で最小となる傾向にあり、これは既往の研究^{19), 20)}とも整

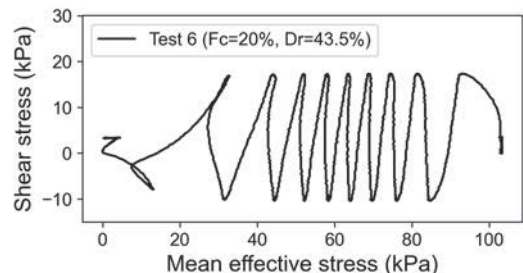
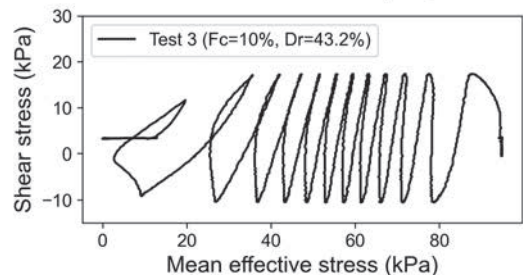
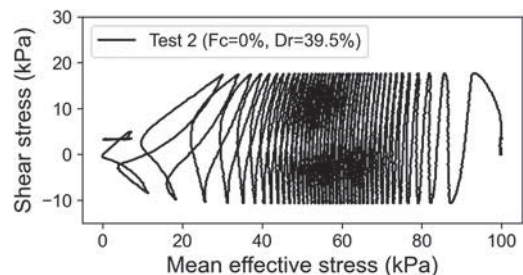


図-6 細粒分による有効応力経路の変化 (CSR = 0.136)

合的である。なお、CSR がより小さいケースでは、**図-8** のように Test 10 ($F_c=30\%$) で繰返し回数がや

や少なく見えるものの、顕著な差異は存在しないようである。

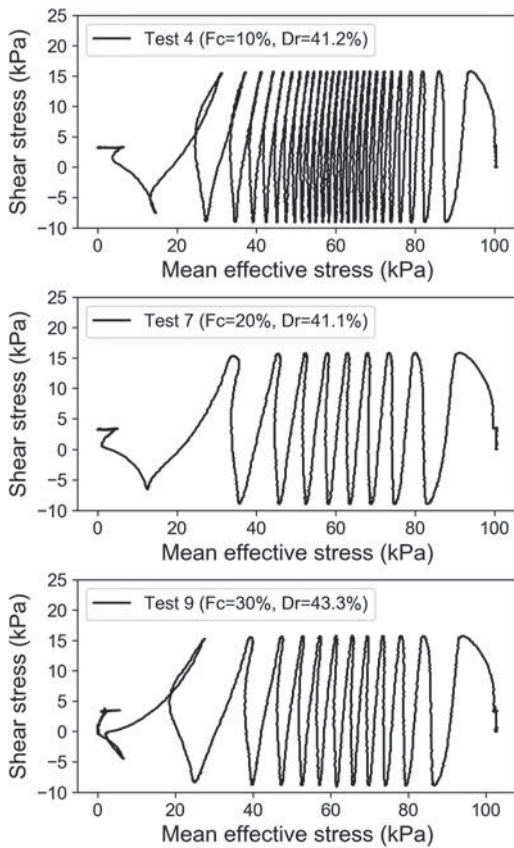


図-7 細粒分による有効応力経路の変化 (CSR = 0.12)

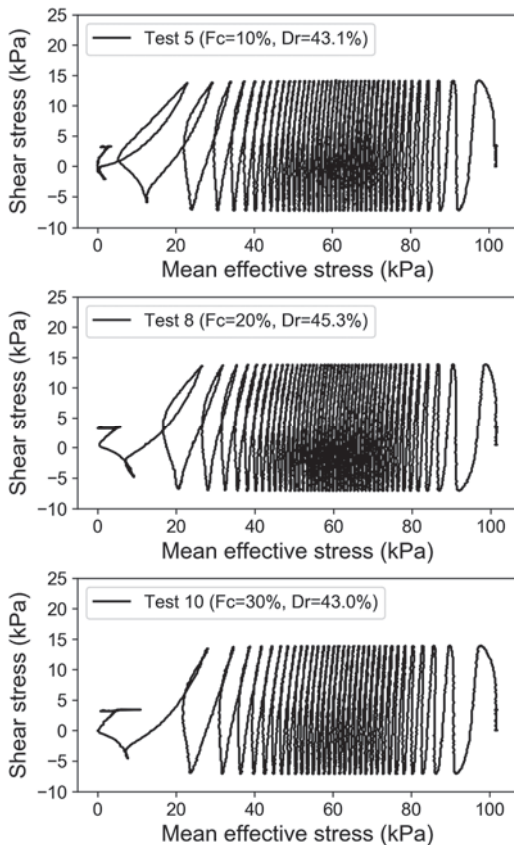
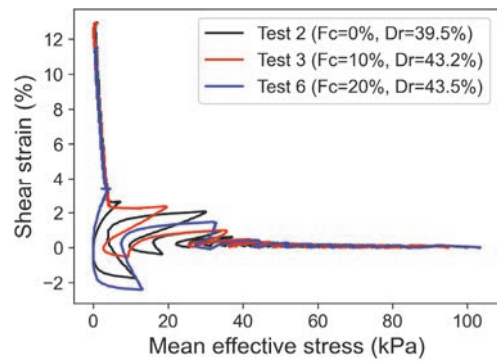


図-8 細粒分による有効応力経路の変化 (CSR = 0.10)

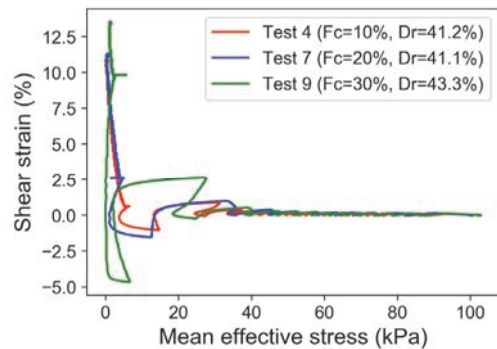
(2) 間隙水流入時の挙動

次に、間隙水注入による強制膨張せん断試験の結果について考察する。まず、**図-9**に有効拘束圧とせん断ひずみの関係を CSR 毎に示す。同図(a)より、非排水繰返しせん断中のひずみの発生量はケース毎にやや異なっており、これは主に F_c の違いに起因するものと考えられる。一方、強制膨張せん断中の挙動は、一見すると F_c の影響を受けないように見える。同様の傾向は CSR に依らず同図(b)(c)でも確認できるが、この図には注水量もしくは体積ひずみに関する情報が含まれていないため、次の段落ではダイレイタンスー特性について考察する。

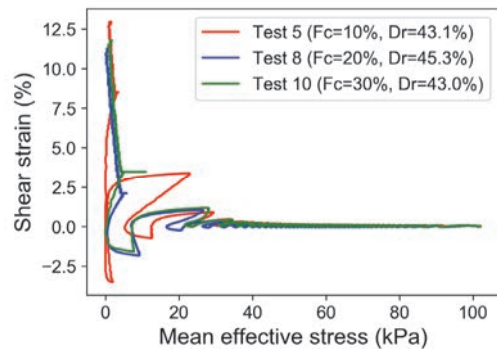
図-10 は、間隙水の注入プロセスにおいて供試体に強制的に与えられた体積ひずみと、それにより生



(a) CSR = 0.136



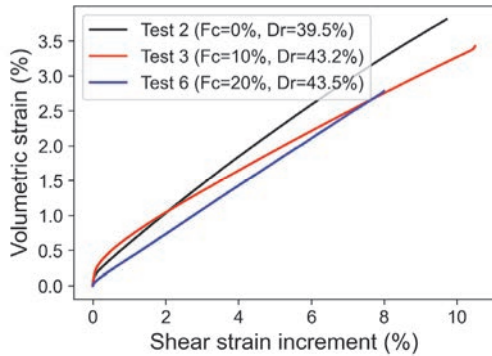
(b) CSR = 0.12



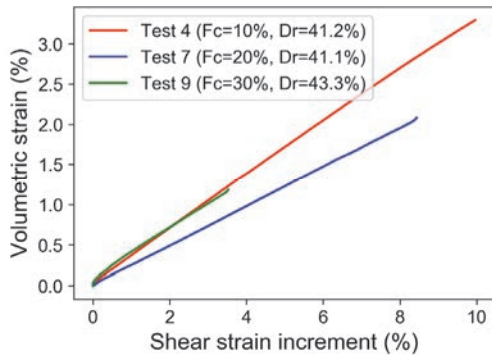
(c) CSR = 0.10

図-9 有効拘束圧-せん断ひずみ関係の比較

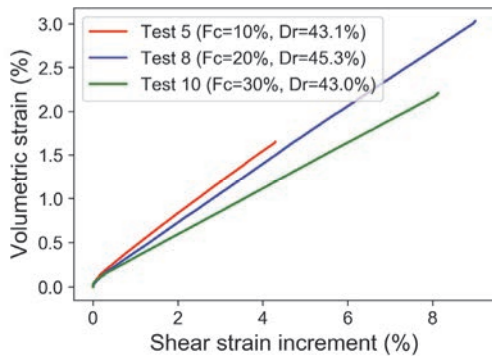
じたせん断ひずみ増分の関係を示している。同図(a)~(c)は、それぞれ $CSR = 0.136, 0.12, 0.10$ の試験条件に対する結果の比較である。まず、 $CSR = 0.136$ の試験条件に着目すると、Test 3 ($F_c = 10\%$) ではグ



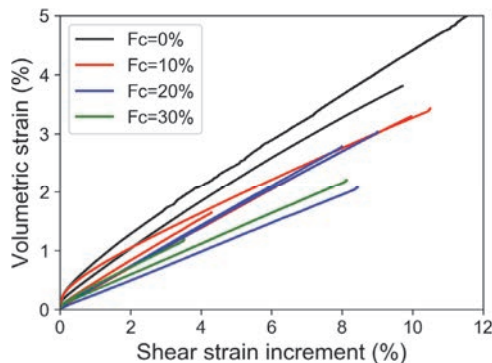
(a) $CSR = 0.136$



(b) $CSR = 0.12$



(c) $CSR = 0.10$



(d) 全ケース (Test 1 を含む)

図-10 ダイレイタンスー特性の比較

ラフの形状がやや非線形であり他との直接的な比較が難しいが、同じ体積ひずみに対して Test 6 ($F_c = 20\%$) では Test 2 ($F_c = 0\%$) よりも大きなせん断ひずみが発生することがわかる。なお、ダイレイタンスー係数と D_r の大小との間に正の相関が存在することを踏まえると、Test 2 の D_r があと 4% 大きく Test 6 と等しいと仮定した場合には、両ケースの差異はさらに広がるものと示唆される。次に、同図(b)に示す $CSR = 0.12$ の試験条件では、Test 7 ($F_c = 20\%$) のダイレイタンスー係数が他のケースよりも小さくなっている。Test 9 ($F_c = 30\%$) の結果は Test 4 ($F_c = 10\%$) とほぼ重なっているが、前述の D_r がダイレイタンスー係数に及ぼす影響を考慮に入れると、同じ D_r の条件下では $F_c = 30\%$ の方が $F_c = 10\%$ よりもダイレイタンスー係数が小さくなる可能性が指摘できる。一方、同図(c)に示す $CSR = 0.10$ の試験条件では、 F_c の増大とともにダイレイタンスー係数が小さくなる傾向にあることがわかる。なお、仮に Test 8 ($F_c = 20\%$) の D_r を他の 2 ケースと同等に揃えたとすると、ダイレイタンスー係数はわずかに小さくなる可能性が高いが、同図(c)に示される F_c に応じたダイレイタンスー係数の大小関係は変わらないものと考えられる。

最後に、間隙水の流入のタイミングが異なる Test 1 も含めた全ケースのダイレイタンスー係数を、 F_c 毎に色分けして図-10(d)に示す。ある程度のばらつきはあるものの、同じ体積ひずみの変化を受けた際のせん断ひずみの発生量は、細粒分含有率が 20-30% のケースで最大となることがわかる。すなわち、非排水繰返しせん断後に間隙水流入を受ける砂のせん断変形特性は細粒分の影響を受けることから、緩傾斜地盤の時間遅れを伴う流動変形を評価する際には、細粒分の評価が重要になると考えられる。

5. 結論

2018 年スラウェシ島地震の際に Palu 市で発生した大規模な地盤流動現象のように、非常に緩い傾斜地盤であっても地震後に時間遅れを伴って流動変形が生じる可能性がある。本研究では、この要因の一つと考えられている過剰間隙水圧の再配分、すなわちすべり層に下層から流入する間隙水の存在に着目し、中空ねじりせん断試験装置と間隙水流入装置を用いた検討を行った。間隙水流入により体積膨張を伴いながらせん断変形が進展する砂の挙動に及ぼす細粒分の影響について調べるため、細粒分含有率 ($F_c = 0, 10, 20, 30\%$) を変化させた供試体を作製した。供試体に緩斜面を模擬した初期せん断応力を与えた上で、非排水繰返しせん断履歴を作用させ、間隙水注入による強制膨張せん断試験を実施した。

非排水繰返しせん断試験の結果、従来から指摘されているように、せん断応力比が等しい条件では、細粒分含有率が 20-30% の供試体で最も過剰間隙水圧が上昇しやすいことが示された。また、強制膨張

せん断試験の結果、間隙水流入時のダイレイタンスー特性（せん断ひずみー体積ひずみ関係）は、間隙水注入時の有効拘束圧の影響をほとんど受けないことがわかった。一方、同じ体積ひずみの変化を受けた際のせん断ひずみの発生量は、細粒分含有率が20-30%のケースで最大となり、ダイレイタンスー特性が細粒分の影響を受けることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 吉田雅穂, Hendra SETIAWAN, 宮島昌克, 小野祐輔, 幸左賢二, 芹川由布子, 府坂ひなの: 2018年インドネシア・スラウェシ島地震における液状化による地盤流動の要因に関する考察, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 76, No. 4, pp. I_647-I_655, 2020.
- 2) Kiyota, T., Furuichi, H., Hidayat, R. F., Tada, N. and Nawir, H.: Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia, Soils and Foundations, Vol. 60, No. 3, pp. 722-735, 2020.
- 3) Okamura, M., Ono, K., Arsyad, A., Minaka, U. S. and Nurdin, S.: Large-scale flowslide in Sibalaya caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Soils and Foundations, Vol. 60, No. 4, pp. 1050-1063, 2020.
- 4) Hazarika, H., Rohit, D., Pasha, S. M. K., Maeda, T., Masyhur, I., Arsyad, A. and Nurdin, S.: Large distance flow-slide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia, Soils and Foundations, Vol. 61, No. 1, pp. 239-255, 2021.
- 5) Bradley, K., Mallick, R., Andikagumi, H., Hubbard, J., Meilianda, E., Switzer, A., Du, N., Brocard, G., Alfian, D., Benazir, B., Feng, G., Yun, S.-H., Majewski, J., Wei, S. and Hill, E. M.: Earthquake-triggered 2018 Palu Valley landslides enabled by wet rice cultivation, Nature Geoscience, Vol. 12, No. 11, pp. 935-939, 2019.
- 6) 國生剛治: 水膜現象が液状化砂層の側方流動へ与える影響, 土と基礎, Vol. 47, No. 4, pp. 11-14, 1999.
- 7) Kokusho, T.: Water Film in Liquefied Sand and Its Effect on Lateral Spread, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, No. 10, pp. 817-826, 1999.
- 8) Seed, H. B.: Design Problems in Soil Liquefaction, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 113, No. 8, pp. 827-845, 1987.
- 9) Boulanger, R. W. and Truman, S. P.: Void redistribution in sand under post-earthquake loading, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, No. 5, pp. 829-834, 1996.
- 10) Malvick, E. J., Kutter, B. L., Boulanger, R. W. and Kulasingam, R.: Shear Localization Due to Liquefaction-Induced Void Redistribution in a Layered Infinite Slope, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 10, pp. 1293-1303, 2006.
- 11) Sento, N., Kazama, M., Uzuoka, R., Ohmura, H. and Ishimaru, M.: Possibility of Postliquefaction Flow Failure due to Seepage, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 7, pp. 707-716, 2004.
- 12) 山口晶, 飛田善雄, 風間基樹: 非排水繰返しせん断履歴後に間隙水の流入を受ける土のせん断変形特性, 土木学会論文集, No. 778/III-69, pp. 139-150, 2004.
- 13) Yoshimine, M., Nishizaki, H., Amano, K. and Hosono, Y.: Flow deformation of liquefied sand under constant shear load and its application to analysis of flow slide of infinite slope, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 253-264, 2006.
- 14) 石丸真, 風間基樹, 河井正: 砂質土の間隙水浸透による吸水膨張後のせん断変形に及ぼす細粒分の影響, 土木学会第 67 回年次学術講演会, No. III-018, pp. 35-36, 2012.
- 15) 石原研而, 安田進, 東畑郁生, 古市久士, 若杉護: 地震で長距離流動した砂質土の特性に関する試験, 第 56 回地盤工学研究発表会, 13-9-1-03, 2021.
- 16) 大西宏実, 飛田哲男, 井合進, Irsyam MASHYUR: 緩斜面の遅れ流動破壊現象に対する数値解析的検討, 第 56 回地盤工学研究発表会, 13-9-1-02, 2021.
- 17) 玉泉聡士, 上田恭平, 渦岡良介: 過剰間隙水圧の再分配に着目した細粒分を含む砂質傾斜地盤の側方流動, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 75, No. 4, pp. I_316-I_325, 2019.
- 18) Vargas, R. R., Ueda, K. and Uemura, K.: Influence of the relative density and K0 effects in the cyclic response of Ottawa F-65 sand - cyclic Torsional Hollow-Cylinder shear tests for LEAP-ASIA-2019, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 133, 2020.
- 19) 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, Vol. 1999, No. 624, pp. 113-122, 1999.
- 20) 渡邊真悟, 兵動正幸, 東佳佑, 梶山慎太郎: 広範な粒度から成る砂・細粒土混合土の非排水繰返しせん断特性の評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 71, No. 4, pp. 301-316, 2015.

EFFECT OF FINES CONTENT ON SHEAR DEFORMATION PROPERTIES OF SAND SUBJECTED TO PORE WATER INFLOW AFTER UNDRAINED CYCLIC SHEARING

Kyohei UEDA, Satoshi TAMAIZUMI and Ryosuke UZUOKA

One of the factors that cause flow deformation with a time delay after an earthquake in gently sloping ground is the presence of pore water flowing into the sand layer directly below the impermeable layer from the lower layer. This is caused by the redistribution process of excess pore water pressure, which is increased by the excitation. Although the behavior of clean sand, in which shear deformation develops with

volume expansion due to the inflow of pore water, has been experimentally investigated, few studies have focused on the effect of fines content. In this study, specimens with different fines content ($F_c = 0, 10, 20, 30\%$) were prepared and subjected to undrained cyclic shear history after loading initial shear stress using a hollow torsion shear apparatus, followed by forced expansion shear test by pore water injection. As a result, it was found that the dilatancy characteristics of the specimens under porewater injection were affected by the fines content.