

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

山口 晶¹・飛田善雄²・風間基樹³

¹正会員 博士 (工学) 東北学院大学工学部環境土木工学科 (〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1)
E-mail:yamaguti@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

²正会員 工学博士 東北学院大学大学院工学研究科 (〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1)

³正会員 博士 (工学) 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

緩傾斜地盤の地震動後の流動現象のメカニズムは、間隙水の浸透を考慮すると合理的に説明できる。しかし、非排水繰返しせん断後に間隙水が流入する砂の変形特性を詳細に調べた研究は少ない。本研究では、初期せん断応力を与えた供試体に非排水繰返しせん断履歴を与え、その後に間隙水注入実験を行った。この実験から非排水繰返しせん断履歴が、間隙水流入時に発生する流動現象に与える影響を検討した。その結果、間隙水流入時のダイレイタンス係数は、非排水繰返しせん断履歴中のせん断変位量の影響を受けることが分かった。初期せん断応力の作用方向の反対方向において正のダイレイタンスが発生した場合、砂の骨格構造が損傷することが示された。

Key Words: initial shear stress, slope, liquefaction, effective stress path, shear strain, dilatancy

1. はじめに

1964年新潟地震、1983年日本海中部地震、1995年兵庫県南部地震等の大地震では、液状化現象により土木構造物に大きな被害が発生した。これらの被害の原因の一つは、液状化に伴う側方流動現象である。現在地震時に発生する流動変形のメカニズムとして、地震後の間隙水の移動を考慮したものが二つ提案されている。一つは、透水性の低い土層の下に薄い水膜が生じることにより、水膜面がすべり面になるとする水膜現象^{1),2),3)}である。もう一つは、地震によって発生した過剰間隙水圧の深さ方向分布の違いによる浸透流によって破壊を起こす現象^{4),5)}である。この二つの流動メカニズムは、地震動後に発生する側方流動の時間遅れを伴う変形や数mに及ぶ大変位を無理なく説明できる可能性を有している。

これら二つの流動のメカニズムは、液状化による二次的な変形破壊現象を対象としている。ただし、現状ではこれらのメカニズムの発生条件や変形形態が整理されていない。また、特に浸透流を考慮したメカニズムについては、繰返し履歴後に間隙水の流入を受

ける砂の変形特性が実験的に十分に明らかにされていない。これらは、液状化後の地盤挙動や再液状化に対する地盤の安定性を求める上で重要な土の特性である。

本研究では、傾斜地盤を想定し、繰返し履歴を受けた砂地盤の変形特性の解明と流動現象の整理を目的とした。用いた試験は、簡易型単純せん断試験である。地震動とその後の間隙水の流入は、初期せん断応力を与えた供試体に非排水繰返しせん断応力履歴を与えた後間隙水の注入をすることでモデル化した。供試体の相対密度、初期せん断応力の大きさ、非排水繰返しせん断履歴時の応力振幅・最大せん断ひずみ量・過剰間隙水圧比をパラメータとして、間隙水流入時のせん断挙動を検討した。

なお、本研究で対象としている現象は、地震動の後に間隙水の流入を受ける土の流動現象である。一般的に砂地盤の液状化に関して問題となるのは緩い砂である。しかし、緩い砂は基本的に負のダイレイタンスが大きく、繰返し時の破壊問題の方が重要である。今回の実験においては、地震動の後に間隙水の流入によって破壊する土の挙動を対象としているため、

中密から密な砂を対象として実験を行った。なお流入する間隙水は、液状化に伴う排水のみではなく、斜面の亀裂から浸透する雨水、池・水田の水等も考えられる。

2. 既往の研究

地盤の流動現象のほとんどは傾斜した地盤に発生する。従って、その駆動力となる初期せん断応力を受けた土の挙動が重要である。また、流動メカニズムを考える上で液状化した土を液体と固体のどちらとして考えるべきかという問題もある。ここでは、初期せん断応力を受ける土の繰返し載荷時の挙動に関する研究と、液状化した土の取り扱いに関する既往の研究を述べる。また、現在提案されている間隙水の流入を考慮したメカニズムを説明する。

(1) 初期せん断応力を受ける土の繰返し載荷に関する研究

兵動ら^{9,10)}は、繰返し三軸試験を用いて、初期せん断応力をかけた砂の液状化強度や初期せん断応力とせん断ひずみ・過剰間隙水圧比との関係を詳細に検討している。繰返しせん断応力の反転の有無が、非排水繰返し載荷時の砂の液状化挙動に大きな影響を及ぼすことが示された。また、相対密度が大きいかもしれないが初期せん断応力が大きい場合、液状化によるひずみの発生は小さいことが示された。

(2) 液状化した砂の計算上の取り扱い

液状化した砂地盤の挙動を検討する上で、液状化した砂を数値計算上どのように扱うかについて多くの議論がある。

安田ら^{9,11)}は、液状化した砂は固体として扱うことができるという立場から、ねじりせん断試験を用いた実験を行い検討している。いくつかの F_L 値で定義された非排水繰返しせん断応力を載荷して両振幅ひずみが7.5%になるまで液状化させ、その後非排水条件のまま単調せん断試験を行っている。その実験から、液状化とみなされるひずみに達した後の繰返しせん断回数が多いほど、その後の単調せん断において極めて剛性の低い領域が広がることを示した。せん断履歴とその後のせん断における剛性の関係という点では、Vaid・Sivathayalan¹⁰⁾が繰返しせん断ひずみを停止する位置とその後のせん断の方向によって剛性が回復するか低下するかが異なることについて考察している。

濱田ら^{11,12)}は、液状化した砂は粘性流体として扱う

ことができるという立場から、振動実験や模型実験を行っている。側方流動が模型杭に及ぼす外力に関する実験を行い、杭に流体的な外力が作用していることを示している。しかし、地震動が停止して一定のせん断変形(限界せん断ひずみ)を受けると剛性が回復して固体的な挙動を示すとしている。また、吉田¹³⁾は、液状化した土は、固体の状態と液体の状態が存在するとし、これを固→液→固挙動と名づけた。固→液→固挙動は、砂が液状化することによって流動化するもののダイレイタンスの発現により固体的性質を回復するという考えである。流動変形の多くは液体的性質の時に起こるとしている。

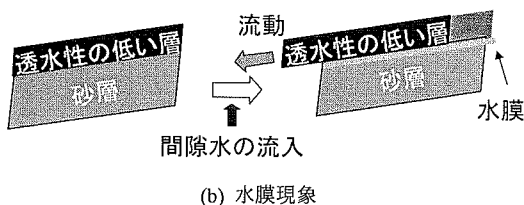
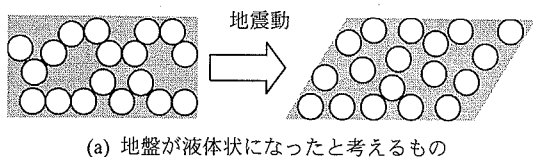
(3) 間隙水の移動に基づく流動メカニズムに関する研究

これまでの液状化に関する研究では、地震動中から地震動終了後まで非排水条件を仮定した考え方が一般的であった。ただし、非排水を仮定した多くの実験で繰返し載荷を停止すると変形が停止することが確認されている。非排水を仮定した考え方では変位の発生が時間遅れを伴うこととその量が極めて大きいことの説明が難しい。これらの現象を説明するために、主要動後の弱い地震動を考慮した研究も行われている¹⁴⁾。それに対して、近年流動問題を境界値問題としてとらえ、間隙水の上下方向の流れを考慮したメカニズムが提案されている。このメカニズムは、地震動終了後に発生する時間遅れを伴った数%に及ぶ進行的な地盤の流動現象を、流動過程における地震動を考慮せずに説明することができる。

国生ら^{11,15)}は、液状化層の中にシルト等の透水性の低い層が存在していた場合に、透水性の低い層の下部に液状化によって発生した過剰間隙水が蓄積して水膜が発生し、その水膜が滑り面となって地盤変位が発生するメカニズム(水膜現象)を考えた。このメカニズムにより、地盤流動が発生することを種々の実験と解析により確かめている。

時松ら⁹⁾は、傾斜した地盤のように初期せん断応力が作用した地盤が地震後に遅れを伴って大変形を生じるような問題は、下部からの過剰間隙水の移動によって上部で吸水状態が生じたためと考えた。仙頭ら⁹⁾は、このメカニズムに関して、間隙水の流入・流出を考慮した新しい実験手法を開発し、定量的に流動変形量を求められるようにした。これは浸透解析と要素試験を組み合わせたハイブリッド・オンライン試験であり、浸透解析により求めた間隙水の移動量を実際に供試体に間隙水を注入し、その際に発生する変位量を求めようとするものである。

これらの二つのメカニズムは、間隙水の流入によっ



・図-1 セン断抵抗を持たない変形形態

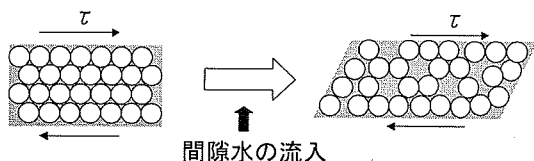


図-2 セン断抵抗を持つ変形形態

て透水性の低い層の下層に間隙水が貯留されるという点は同じであるが、その後の変形形態の考え方が次章で詳細に議論する様に異なっている。

これらの研究から、地震によって発生する飽和砂地盤の変形挙動は、地震動中に発生するものと地震動終了後に間隙水の流入によって発生する二次的なものに分けて考えることができる。特に地震動終了後に発生する二次的な変形については、土の材料特性に加えて地盤の境界条件を考慮する必要がある。

3. 液状化現象による変形形態の分類

本研究では、既往の研究から、地震動中及び地震動終了後に発生するせん断変形を二つに分類した(図-1及び図-2参照)。一つは、地盤が固体(粒状集合体)の性質を持たずに流動現象が発生するという考え方で、土はせん断抵抗を持たない(図-1)。もう一つは、地盤が粒子集合体としての構造を保ったまま変形するものでせん断抵抗を保つ変形形態である(図-2)。二つの形態の特徴を以下に述べる。

(1) セン断抵抗を持たない変形形態

図-1(a)は、粒子同士の接触を保っていた砂が地震動によってかみ合わせがはずれ液体として挙動するという考え方を模式的に図に示した。また、図-1(b)に水膜現象の模式図を示した。これは地震動中及び

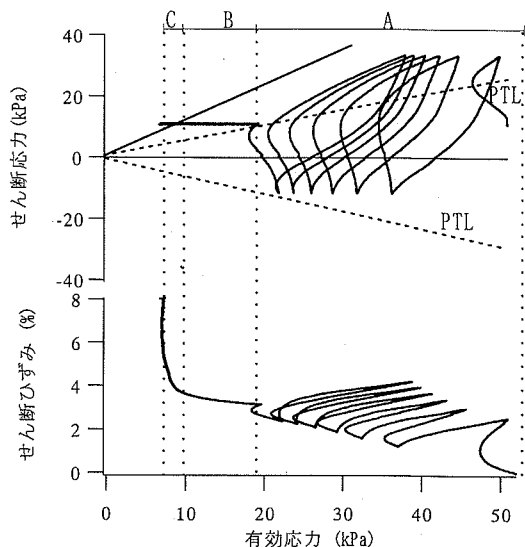


図-3 想定した流動メカニズムのせん断ひずみ、せん断応力と有効応力の関係の模式図

地震動終了後に発生した間隙水の上下方向の流れによって透水性の低い層の下部に間隙水が貯留されて水膜が生成され、その水膜を滑り面として変位が生じるという考え方である。

これら二つの考え方では、全体が液体状になるか局部的に液層ができるかという差異はあるものの、流動現象が発生した時には砂粒子の有効な骨格構造を持たず、従ってせん断抵抗を持たないという点で共通点がある。

(2) セン断抵抗を持つ変形形態

せん断抵抗を持つ変形形態としては、間隙水の流入によって体積を増加させながら発生するせん断変形を対象にしている。図-2に模式図を示す。ある一定のせん断応力 τ が作用している状態下で、ある層に間隙水が流入すると、有効応力が減少すると同時に間隙が増加していく。さらに間隙水が流入すると有効応力経路が破壊線に至る。図-3にこのときのせん断応力、せん断ひずみと有効応力との関係の模式図を示す。図中の区分Aは繰返しによる有効応力の低下とせん断ひずみの発達を示す。区分Bは間隙水の流入による有効応力の低下を示している。区分Cでは有効応力経路が破壊線に達し、有効応力の低下が収まり、せん断変形が発達している。区分Cの状態の間隙水の注入を続けても有効応力は減少せず、体積の増加とともにせん断変形が増大する。この条件下では、ある一定のせん断応力に対して抵抗しなければならないため、砂粒子同士の接触は保たれたままである。従って、過剰間隙水圧比が1.0にならない状態でせん断変

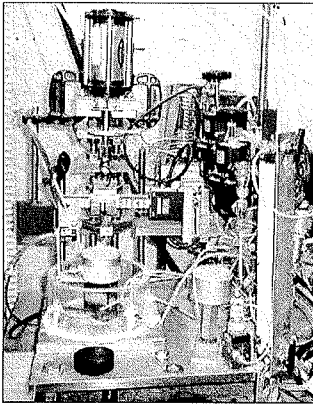


図-4 簡易型単純せん断試験機

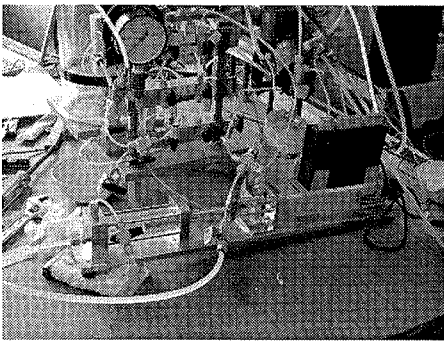


図-5 注入装置の写真

形が進行するという特徴がある。一般に言われているような「過剰間隙水圧比が1.0となり、地盤が支持力を失う」という狭義の液状化の定義からいうと、このようなメカニズムで生じるせん断変形は液状化ではないと言える。

4. 繰返し単純せん断 - 間隙水流入試験

本研究では、間隙水の流入を考慮した流動メカニズムを対象にしている。非排水繰返し単純せん断を行った後、間隙水を注入することによって生じる変形について考察を行うとともに、流動メカニズムの整理を試みる。つまり図-3で示した、区分Aの挙動が、区分B及び区分Cの挙動に与える影響を検討する。ここでは、繰返しせん断応力履歴や供試体の相対密度をパラメータとした。

(1) 試験装置概要

本研究では、日下部ら¹⁵⁾が開発した簡易型単純せん断試験機と間隙水注入装置⁹⁾を使用した。図-4に使用

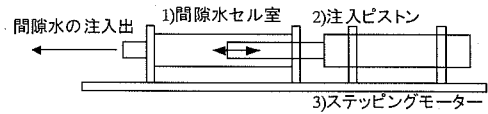


図-6 注入装置の模式図

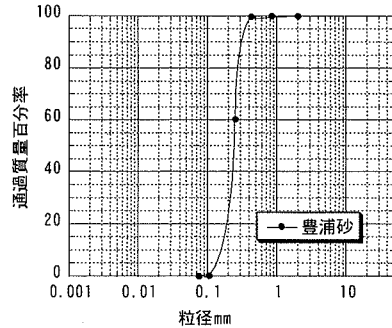


図-7 豊浦砂の粒径加積曲線

した試験機の写真を示す。供試体直径60mm、高さは20mmで、ゴムスリーブの厚さは0.3mmである。等方圧は供試体内の負圧と大気圧との差圧により与え、垂直圧は供試体上部にあるペロフラムシリンダーにより与える。本試験ではパーソナルコンピュータにより計測・制御を行った。計測項目は、供試体内と大気圧の差圧、せん断変位、鉛直荷重、せん断荷重の4項目である。steppingモータを用いて供試体にせん断変位を与えた。steppingモータの制御は、RS232Cによりモーターコントローラを介して制御を行った。なお、steppingモータの仕様とプログラミング上の問題から、せん断試験の際の載荷周波数は制御していない。図-5及び図-6に間隙水注入装置の写真と模式図を示す。間隙水セル室、注入ピストン、steppingモータの3部分で構成されている。steppingモータに接続されたスチール製のピストンがアクリル水槽に挿入されることにより間隙水を供試体に注入する。間隙水押し出し(吸い込み)ピストンは、 $\phi=15\text{mm}$ (断面積 1.767cm^2) の硬質クロムメッキが施された鉄製である。注入量の制御はsteppingモータを用いたコンピュータ制御であり、1ステップは $1.934 \times 10^{-3}\text{mm}$ (体積ひずみに換算して約 1.18×10^{-5}) の精度で制御した。この装置を用いて間隙水を供試体に注入して、間隙水の移動を表現した。注入時は1秒当たり2ステップで行っている。

(2) 試験手順

試料は豊浦砂を用いた。図-7に使用した豊浦砂の粒径加積曲線を示す。供試体作製方法は、空中落下法である。供試体の相対密度(D_r)は落下高さを変えることで調節を行った。供試体作製後、二重負圧法で供試

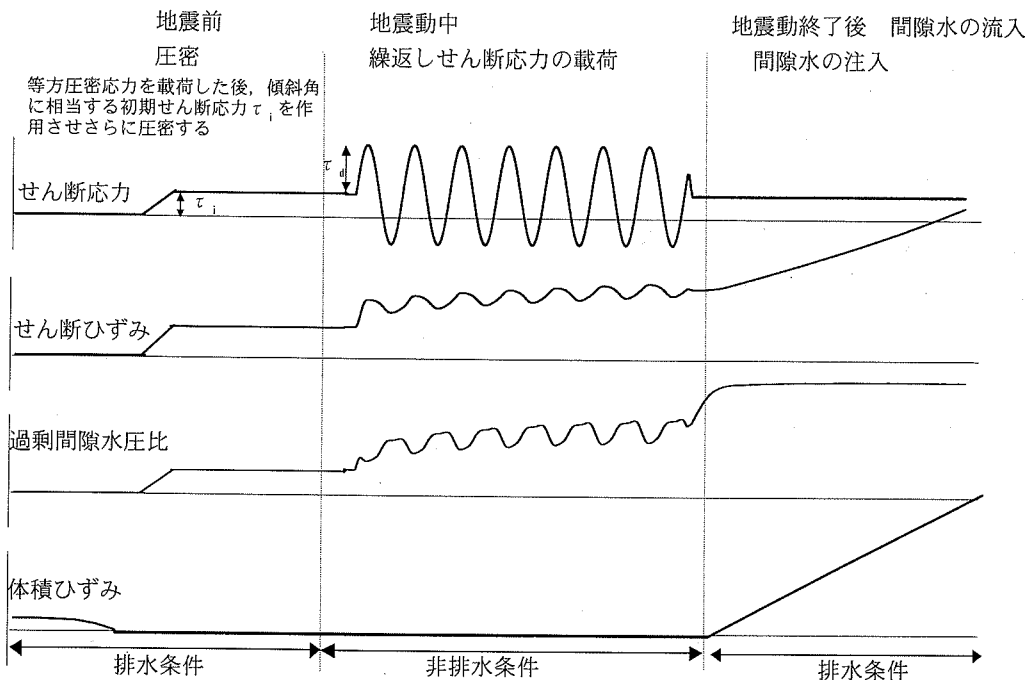


図-8 実験手順の模式図

表-1 実験条件

Test No.	D_r (%)	応力振幅 (τ_d) (kPa)	初期せん断応力 (τ_i) (kPa)	繰返し時の目標過剰間隙水圧比 u_0 / σ'_{m0}
1	80	19.6	10.9	0.6
2		22.5		
3		24.5		
4		26.5		
5	80	22.5	0	1.0
6		22.5	3.3	
7		22.5	5.8	
8		22.5	8.4	
9	60	0	10.9	0
10		19.6	10.9	0.9
11		22.5	0	1.0 (注入なし)
12		22.5	10.9	1.0
13	80	14.5	10.9	0.4
14		19.6		
15		26.5		
16		29.4		
17	80	0	10.9	0
18		29.4		1.0

体の飽和を行った。以後の実験手順の模式図を図-8に示す。圧密は等方圧力で行った。圧密終了後、実地盤の傾斜角に相当する初期せん断応力を与えながらさらに10分程度圧密した。その後、地震動履歴を考慮するために所定のせん断応力振幅で正弦波による非排水繰返しせん断を行う。非排水繰返し载荷中は過剰間隙水圧比(以下 ppr と略記)を計測し、所定の ppr に達した時点で繰返し応力を停止する。次に実験開始

時の初期せん断応力を载荷する。変形が発生しないことを確認した後に、初期せん断応力を保ったまま間隙水の注入を行う。注入中に、せん断ひずみが7-10%程度発生したら実験を停止している。なお、試験時の供試体の上下方向の変位は拘束している。

(3) 実験条件

表-1に実験条件を示す。目標とした相対密度は80% (密詰め) と60% (中密) である。拘束圧は全ての条件で等方圧49kPaで行った。これは概ね地盤深さ5m程度に相当する。想定した地盤の図を図-9に示す。透水性の低い層が斜面中に存在すると、その直下で間隙水が貯留され、その間隙水を消費しながらせん断ひずみが発生する。従って想定した土要素は図中の透水性の低い層の直下である。図から初期せん断応力 τ_i は

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

として計算した。傾斜角度は12°, 9°, 6°, 0° で、これに対応する初期せん断応力はそれぞれ、10.9kPa, 8.4kPa, 5.8kPa, 0kPa である。

5. 実験結果

本章では、実験パラメータとした相対密度や繰返し

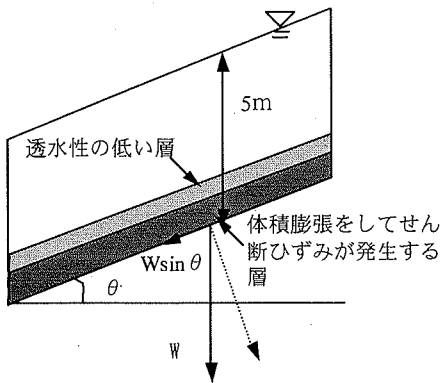


図-9 想定した地盤の図

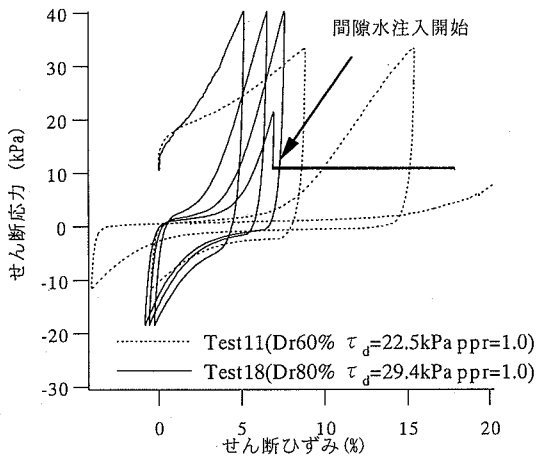


図-10 相対密度が異なる条件のせん断応力-せん断ひずみ関係

履歴の大きさから実験結果を整理する。

(1) 繰返し载荷時の挙動

a) 相対密度の違い

図-10に非排水繰返しせん断時に過剰間隙水圧比が1.0に達したTest11($D_r=60\%$)とTest18($D_r=80\%$)のせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。Test11 ($D_r=60\%$)については、間隙水の注入は行っていない。相対密度の低い砂ほど、せん断応力がゼロの時に発生するひずみは多くなっている。またそのひずみの値は、繰返し回数の増加に伴って大きくなっており、いわゆるサイクリックモビリティ現象を表している。

図-11に同実験のせん断ひずみ-有効応力関係を示す。Test11($D_r=60\%$)では繰返しせん断中に有効応力がゼロ付近で発生するひずみが最終的には15%程度になるが、Test18 ($D_r=80\%$)では、有効応力がゼロ付近で発生するひずみは2%程度となっている。有効応力がゼロとなりせん断抵抗を持たないような液体状態

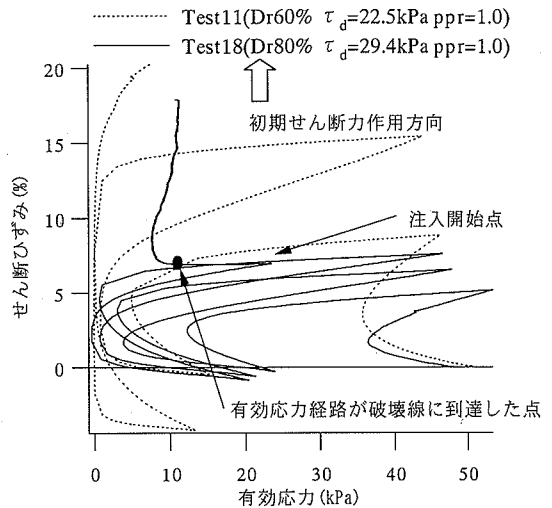


図-11 相対密度が異なる条件のせん断ひずみ-有効応力関係

で発生するせん断ひずみは、相対密度が高いと小さくなるのがわかる。

b) 繰返しせん断応力振幅の違い

図-12にTest2とTest18の有効応力経路を示す。なお、この二つは供試体の相対密度は同じ $D_r=80\%$ であるが、繰返しせん断応力振幅と繰返し载荷停止時の過剰間隙水圧比の値が異なっている。図中の点線は変相線(PTL)である。兵動ら⁹⁾が指摘しているように、初期せん断応力の作用方向に対して反対方向の変相線に達した場合にその後の载荷においては有効応力の低下が著しい。図-13には同実験のせん断ひずみ-有効応力関係を示す。この図から、Test2とTest18では、有効応力が回復し始めるひずみ点(以下有効応力回復ひずみと呼ぶ、白丸(○)及び黒丸(●)で表示)が存在し、繰返し载荷に伴って有効応力回復ひずみ量が増加していることがわかる。なお、ここでは有効応力回復ひずみを、初期せん断応力と反対方向にひずみが生じたときに有効応力が回復したひずみ量と定義した。正のダイレイタンスにより有効応力が回復するということは、その時点で砂同士の粒子が強く接触し、構造を回復したことを意味している。従って1サイクルにおける有効応力回復ひずみの増加分は繰返し履歴による砂骨格の乱された程度を反映していると考えることができる。

(2) 間隙水注入時の挙動

図-11のせん断ひずみ-有効応力関係の中には有効応力経路が破壊線に達した点を示してある。この図から、間隙水の流入により有効応力経路が破壊線に達するまでは、せん断ひずみの発生がほとんどない

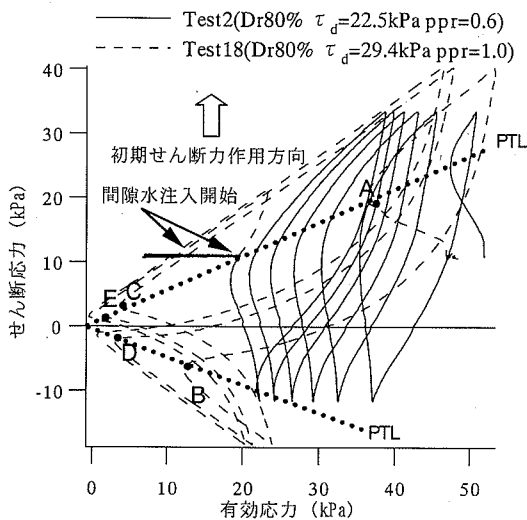


図-12 $D_r=80\%$ の実験条件の有効応力経路

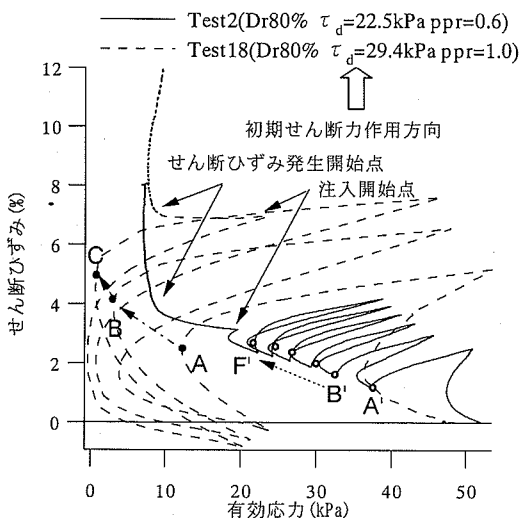


図-13 せん断ひずみ-有効応力関係

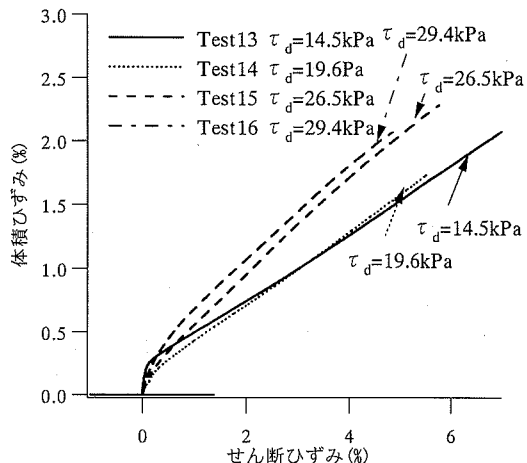


図-14 $D_r=80\%$ ppr=0.4 の体積ひずみ-注入時のせん断ひずみ関係

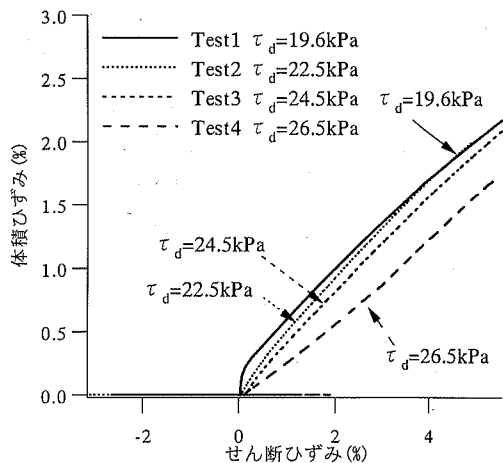


図-15 $D_r=80\%$ ppr=0.6 の体積ひずみ-注入時のせん断ひずみ関係

ことがわかる。

図-14にTest13-16($D_r=80\%$, ppr=0.4), 図-15にはTest1-4($D_r=80\%$, ppr=0.6)の注入時の体積ひずみ-せん断ひずみ関係をそれぞれ示す。ただし、ここでは、非排水繰返しせん断履歴終了時のひずみを差し引いてゼロとし、注入に伴って発生したせん断ひずみ量を表している。本研究では、間隙水の流入によって発生したせん断ひずみ分は6%程度であった。実際の地盤流動は数十%に至るものであり、実際の被害と一致していない。ただし、本研究で検討した現象は、以下の点から現実に起こりうる現象である。

- ・間隙水の流入は液状化によって発生した水のみではなく、地震によって発生した亀裂から雨水、池・河川からの水の浸透も考えられる。雨水による浸透に

よって発生する変位を研究した事例¹⁶⁾も存在する。

また2003年宮城県北部地震では、高速土砂流動が発生した人工造成地上の水田の水が影響を与えた可能性もある¹⁷⁾。

- ・斜面の変形は透水性の低い層の下層付近に集中すると考えられるため、極めて狭い範囲の層に間隙水が流入した場合、数十%のひずみが発生する可能性がある。

この図から、ppr=0.4と0.6では、せん断応力振幅の大きさによって体積ひずみ-せん断ひずみ関係が異なることがわかる。そこで、図-16に、 $D_r=80\%$ において ppr=0.4, 0.6, 1.0 のときの繰返しせん断応力振幅とダイレイタンス係数((体積ひずみ)/(せん断ひずみ)すなわち、図-14, 図-15の各直線の傾き)

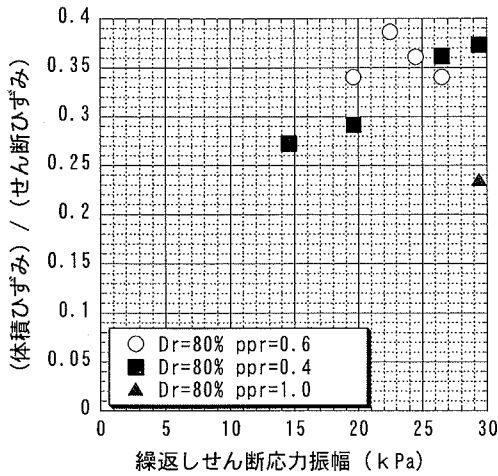


図-16 $D_r=80\%$ せん断応力振幅-ダイレイタンスー係数関係

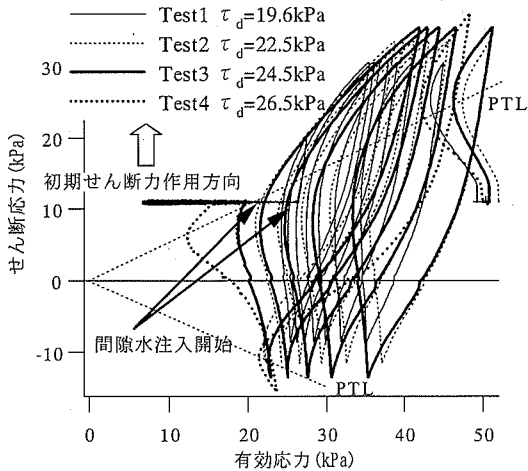


図-17 $D_r=80\%$ $ppr=0.6$ の有効応力経路

の関係を示した。ダイレイタンスー係数は、間隙水の注入量とせん断ひずみの発生量の関係であり、砂の骨格構造の強さを表す指標の一つと考えることができる。 $ppr=0.4$ の条件では、繰返しせん断応力振幅が大きい条件ほどダイレイタンスー係数が大きくなっている。それに対して、 $ppr=0.6$ では、ダイレイタンスー係数は繰返しせん断応力振幅が 22.5kPa の Test2 までは増加するが、それ以上応力振幅が増加すると減少する。図-17 に $D_r=80\%$ で $ppr=0.6$ の条件の有効応力経路を示す。 $ppr=0.6$ の実験では、Test2 より応力振幅が小さい条件では初期せん断応力と反対方向の変相線と交わらず、それより大きいせん断応力振幅になると交わっている。初期せん断応力に対して反対方向で正のダイレイタンスーが発揮される(変相線に交わる)条件では、せん断応力が大きいほどダイレイタンスー係数が低下する傾向にあることがわか

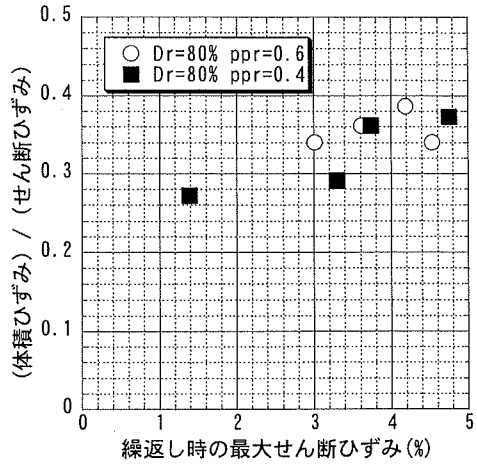


図-18 $D_r=80\%$ 繰返し時の最大せん断ひずみ-(体積ひずみ/せん断ひずみ)関係

る。初期せん断応力と反対方向において、正のダイレイタンスーが発揮されるような大きなひずみを受けた場合、初期せん断によって形成された砂骨格構造が乱されたため、ダイレイタンスー係数が低下したと考えられる。また、このようなことが起きない場合は、砂骨格構造が解消されることがなく、初期せん断応力方向にせん断ひずみが発生することによって砂の異方性構造が強くなり、ダイレイタンスー係数が増加すると考えられる。

図-18 に $D_r=80\%$ の繰返し時の最大せん断ひずみとダイレイタンスー係数の関係を示す。この図から、 ppr に関係なく繰返し時の最大せん断ひずみの増加に伴って、ダイレイタンスー係数が増加傾向にあることがわかる。

図-19 に $D_r=60\%$ の繰返し時の最大せん断ひずみとダイレイタンスー係数の関係を示す。この図をみるとダイレイタンスー係数の値は繰返し時の最大せん断ひずみの値に関係なくほぼ一定値である。また、 $D_r=60\%$ の実験のダイレイタンスー係数の値は 0.2 以下であり、ほぼ 0.3 程度である $D_r=80\%$ の実験よりも低めの値となっている。相対密度が高いほど繰返し時の最大せん断ひずみの影響を受け、最大せん断ひずみが大きいほど、ダイレイタンスー係数が大きくなった。この結果は、図-16 で述べた繰返しせん断応力が大きいとダイレイタンスー係数が低下するという結果と矛盾するように見える。しかし、本実験は、所定の過剰間隙水圧比に達したときに繰返しせん断応力の載荷を停止している。従って、必ずしも繰返しせん断応力振幅が大きいからといって最大せん断ひずみが大きいというわけではない。

ここで、繰返し載荷時に発生したせん断ひずみがダ

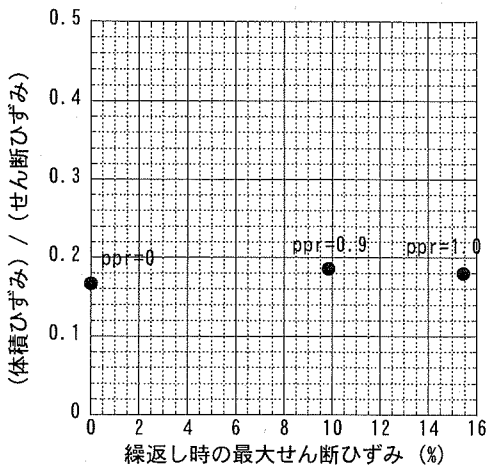


図-19 $D_r=60\%$ 繰返し時の最大せん断ひずみ - (体積ひずみ / せん断ひずみ) 関係

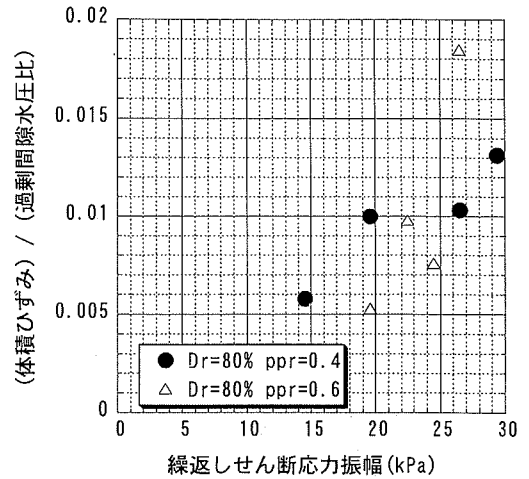


図-21 $D_r=80\%$ 繰返しせん断応力振幅 - (体積ひずみ / 過剰間隙水圧比) 関係

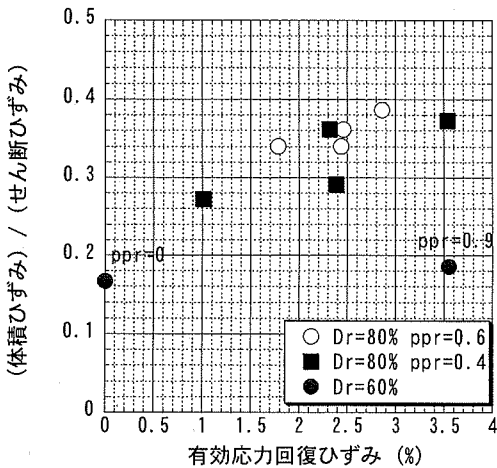


図-20 繰返し時の有効応力回復ひずみ - (体積ひずみ / 過剰間隙水圧比) 関係

イレイトンシー係数に与える影響を考慮するために、間隙水注入直前の有効応力回復ひずみとダイレイタンシー係数の関係を考える。 $D_r=80\%$ と $D_r=60\%$ 実験における有効応力回復ひずみとダイレイタンシー係数の関係を図-20に示す。 $D_r=80\%$ では $ppr=0.6$ と $ppr=0.8$ の両方の実験で、ダイレイタンシー係数は有効応力回復ひずみの増加に伴って増加している。それに対して、 $D_r=60\%$ の $ppr=0$ (履歴なし)、 $ppr=0.9$ では、繰返しせん断応力の載荷を停止した過剰間隙水圧比の値が異なるにも関わらず、ダイレイタンシー係数はほぼ一致している。相対密度が高いほど、ダイレイタンシー係数は注入直前の有効応力回復ひずみの影響を受けることがわかる。なお、 $D_r=60\%$ の実験結果は、繰返しせん断履歴を与えていないTest9と有効応力回復ひずみが明確に観察できたTest10のみを

示した。

図-21に $D_r=80\%$ の条件で $ppr=0.4$ と 0.6 の繰返しせん断応力振幅と(体積ひずみ)/(過剰間隙水圧比)の関係を示す。この体積ひずみと過剰間隙水圧比の関係は、体積ひずみ-過剰間隙水圧比関係における間隙水注入開始時($ppr=0.4$ 及び 0.6)から過剰間隙水圧比が一定値を示すまでの平均的な傾きから求めた。(体積ひずみ)/(過剰間隙水圧比)の関係は、過剰間隙水圧比の上昇に対して必要な間隙水の流入量の割合を表している。この値が大きいのことは、過剰間隙水圧比の上昇に多くの間隙水が必要ということであり、逆に言うと間隙水の流入による液状化が発生しにくくなっていることを示している。つまり、液状化において水の流れを考慮した場合、流入した間隙水量と過剰間隙水圧比の関係が重要であり、この値は液状化のしやすさに影響を与える一つの要因として考えることができる。また、砂粒子の構造の堅固さを表す一つの指標として捉えることもできる。この図を見ると、 $ppr=0.4$ や 0.6 を発生させた場合でも、せん断応力振幅が大きい方が同じ間隙水の注入量で過剰間隙水圧比の上昇が大きくなる傾向にある。この傾向は、初期せん断応力と反対方向の変相線に交わるかどうかで、傾向に変わりはない。図-22にこれらの実験の最大せん断ひずみと(体積ひずみ)/(過剰間隙水圧比)の関係を示す。これを見ると、繰返し載荷時に発生した最大せん断ひずみの増加に比例して、(体積ひずみ)/(過剰間隙水圧比)の値が増加している。これは最大せん断ひずみが大いほど、過剰間隙水圧比が上昇しにくいことを表している。つまり、構造が堅固になったことを表しており、図-18で求めた結果と整合している。

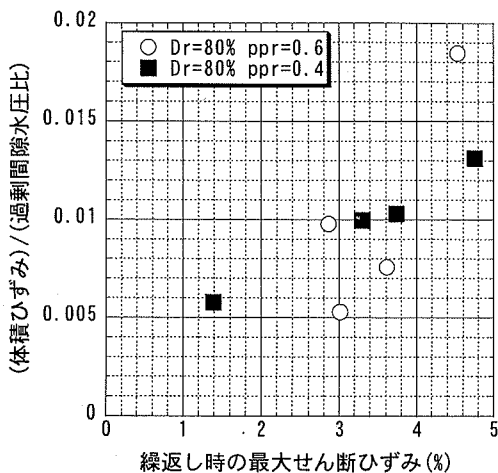


図-22 $D_r=80\%$ 繰返し時の最大せん断ひずみ - (体積ひずみ / 過剰間隙水圧比) 関係

なお、本研究で用いた試験機は簡易単純せん断試験機であり、単純せん断状態を目指すためのワイヤメンブレン等を使用していない。垂直方向の変位を拘束することによって単純せん断を目指した。しかし、10%を越えた程度からひずみのすべり面が目立つようになった。従って、体積ひずみ-せん断ひずみ関係や、体積ひずみ-過剰間隙水圧比関係は、あくまで供試体全体でみた平均的な値であることに注意が必要である。単純せん断試験における局地的なひずみの集中がどの程度実験に影響を与えているかについては今後の検討課題とする。

6. 考察

ここでは繰返しせん断履歴載荷過程と、間隙水の注入過程について検討する。特に砂の粒子構造について、ダイレイタンス係数から検討を行った。

(1) 繰返しせん断履歴の載荷中の挙動

本研究では、せん断変形が発生している時にせん断抵抗を保持しているかどうかで流動現象を区別する。実験結果から、せん断抵抗を保持しない変形形態は、図-10と図-11で見られた通り、相対密度が中密で負のダイレイタンス特性が比較的大きい砂で発生した。

繰返し履歴載荷中に発生するせん断抵抗を保持しない変形形態は、負のダイレイタンス特性の大きい砂が完全に有効応力を失って液体状になった場合のみで発生すると言える。

(2) 間隙水の流入時の挙動

a) 流動形態について

本研究から、有効応力が破壊線に至るまでは、注入した間隙水に対する過剰間隙水圧比の上昇の割合は比例関係となった。また、有効応力経路が破壊線に達した後では、体積ひずみ量とせん断変位の関係は比例関係となった。このことは、間隙水の注入による過剰間隙水圧上昇過程とせん断ひずみ発生過程の両過程に渡って、骨格構造を喪失するような崩壊にいたっていないことを示している。従って本研究においては、間隙水の流入を受ける砂供試体では砂の骨格構造を保ったまま変形が発生した。

b) 砂の構造に関する考察

ダイレイタンス係数は、間隙水の注入量とせん断ひずみの発生量の関係であり、砂の骨格構造の強さを表す指標の一つと考えることができる。図-16と図-17で見た通り、初期せん断応力と反対方向の変相線と交わらない条件では、繰返しせん断応力振幅が大きいほどダイレイタンス係数は大きくなった。また、初期せん断応力と反対方向の変相線と交わる条件では、繰返しせん断力が大きいほどダイレイタンス係数は低下した。これは、初期せん断応力と反対方向において正のダイレイタンスが発揮されるようなせん断ひずみが発生した場合には、砂の骨格構造が弱くなるということを示唆している。

図-18と図-19では繰返し履歴時の最大せん断ひずみの発生量からデータを整理した。 $D_r=80\%$ では最大せん断ひずみの発生量が大きいとダイレイタンス係数が大きくなった。これは最大せん断ひずみが増加することにより、間隙水の流入に対してせん断変位が発生しにくい構造に変化したことを示している。 $D_r=60\%$ では最大せん断ひずみの発生量に対してダイレイタンス係数は変化しなかった。また $D_r=80\%$ のダイレイタンス係数に対して小さい値を示した。相対密度が高いほど、繰返し時のせん断ひずみの影響により骨格構造が変化し、ダイレイタンス係数に影響を与えている。同じ過剰間隙水圧比の発生量であっても大きい繰返しせん断ひずみが発生した方が砂の骨格構造が堅固になることを示している。

ダイレイタンス係数を有効応力回復ひずみとして定義した値から考えると、有効応力回復ひずみが大きいほど、ダイレイタンス係数は増加した。ダイレイタンス係数の変化から、砂の骨格構造の変化を考えると次のようになったことが推測できる。すなわち、初期せん断応力作用方向側への変位が発生することによって供試体の異方性が発達する。間隙水の注入に対して変位を発生させにくい砂の構造になり負のダイレイタンスを減少させたと考えられる。繰返しせん断

によって構造が強くなる理由は次のことが考えられる。繰返しせん断応力によって正のダイレイタンスーが発生すると有効応力が回復する。このとき、過圧密と同様のメカニズムで砂粒子同士が強くかみ合わされる。そのため、砂の構造が強化されたと考えられる。

以上のことから、初期せん断応力と反対方向の変相線と交わる場合、初期せん断応力方向のせん断ひずみによって形成された異方性構造が損傷すると考えることができる。土に繰返しせん断力が載荷される場合、初期せん断応力と反対方向の変相線と交わらない場合は異方性構造の形成が続く。除荷によって初期せん断応力と反対方向で正のダイレイタンスーが発揮されると砂の構造が損傷することを示している。

7. 結論

本研究では、地震動終了後に間隙水の流入を受ける地盤を想定し、初期せん断応力を与えた供試体に繰返しせん断応力振幅を与えた後、間隙水を注入する実験を行った。実験結果をせん断変位や砂の骨格構造から検討を行った。その結果、以下のことが言える。

- (1) 繰返しせん断履歴後に間隙水の流入によって発生するせん断変形においては、砂の骨格構造は保持されるものと考えられる。
- (2) 砂の骨格構造は、初期せん断応力方向の繰返しせん断履歴によって異方性構造が発達し、構造が堅固になる。また、初期せん断応力と反対方向へのせん断により正のダイレイタンスーが発揮されるようなせん断ひずみを受けた場合、砂の骨格構造が損傷を受ける。従って地震動終了後に間隙水の流入によって変形が生じる場合、地震時に受けた繰返しせん断応力履歴によって粒子構造が異なり、変形量も異なることが予想される。ただし本実験の場合は、非排水せん断によって発生したせん断ひずみが正のダイレイタンスーにより停止した後に、間隙水の流入を受けた場合の変形であることに注意が必要である。
- (3) 初期せん断応力が大きく繰返し応力振幅がそれに比較して小さいと、有効応力経路は初期せん断応力と反対方向の変相線に交差しない。従って、このような場合は、過剰間隙水圧比が1.0となり液体状となる液状化現象は発生しにくい。つまり、初期せん断応力の反対方向で正のダイレイタンスーが生じない場合、砂の構造の損傷がおきないために不安定な挙動に至らない。
- (4) ダイレイタンスー係数や体積ひずみ-過剰間隙水

圧比関係は、非排水繰返しせん断履歴時の最大せん断ひずみ量の影響を受けることがわかった。また、それらの値は、間隙水を注入する際の過剰間隙水圧比が同じであっても最大せん断ひずみ量の大きさに依存した。過剰間隙水圧は砂の骨格構造の損傷程度を表す指標としては適切ではないといえる。

本研究では、せん断抵抗を持たない液状化による流動変形は緩い砂の非排水繰返し履歴中のみに発生し、間隙水の流入時にはせん断抵抗を持つ変形のみが発生した。また、そのとき本実験では、繰返しせん断履歴と間隙水の流入に依存した変位が発生した。なお、本研究では、土要素に浸透する間隙水として雨水、池・水田由来の水や液状化によってある層から排水された間隙水を想定した。特に液状化における間隙水を流出する側の土要素については、不明確な部分が多く、今後の課題である。

謝辞: 本研究の実験は、東北学院大学工学部土木工学科の相原光貴君、佐藤功太郎君の力によるものです。両名に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国生剛治, 野中のぞみ, 倉田康二, 坂本栄太: 水膜現象が液状化地盤の側方流動メカニズムに及ぼす影響に関する模型実験, 第34回地盤工学研究発表会, pp.2065-2066, 1999.
- 2) 国生剛治, 横澤和宏, 野中のぞみ, 松下良子: 水膜を生成する低透水性シルトの組成の違いによる液状化砂地盤の側方流動現象の比較実験, 第35回地盤工学研究発表会, pp.2253-2254, 2000.
- 3) 国生剛治, 澤野珠輝, 故島哲朗, 野中のぞみ: 液状化砂層の水膜現象と側方流動メカニズム, 液状化メカニズム予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集, pp.561-568, 1999.
- 4) 時松孝次, 若井修一, 岸本道太: 間隙水の転移による吸水が傾斜砂地盤の流動特性に与える影響, 第34回地盤工学研究発表会, pp.1019-1020, 1999.
- 5) 仙頭紀明, 大村洋史, 赤堀一彦, 風間基樹: 地震後の浸透破壊を考慮した新しい流動変形予測法, 土と基礎, Vol.50, No.2, pp.13-15, 2002.
- 6) Hyodo, M., Murata, H., Yasufuku, N., and Fujii, T.: Undrained cyclic shear strength and residual shear strain of saturated sand by cyclic triaxial tests, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.3, pp.60-76, 1991.
- 7) Hyodo, M., Tanimizu, H., Yasufuku, N., and Murata, H.: Undrained cyclic and triaxial behavior of saturated loose sand, *Soils and Foundations*, Vol.34, No.1, pp.19-32, 1994.
- 8) 安田進, Ayfer Erken, 寺内哲也, 森本弘光: 液状化後の変形特性に与える粒度の影響, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.1355-1358, 1995.

- 9) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.71-89, 1999.
- 10) Vaid, Y.P. and Sivathayalan, S.: Post liquefaction behavior of saturated sand under simple loading, *Proc. of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Hamburg, 1997.
- 11) 濱田政則, 坂口拓己, 吉田誠, 志摩美裕貴, 山田隆一, 三原正哉, 渦岡良介: 液状化土の流動特性とその外力特性に関する実験的および数値解析的研究, 第34回地盤工学研究発表会, pp.2009-2010, 1999.
- 12) 濱田政則, 柳瀬和俊, 甲村雄一: 遠心载荷実験による液状化土の流動特性の研究, 第35回地盤工学研究発表会, pp.2029-2030, 2000.
- 13) 吉田望: 液状化解析は実現象をシミュレートできるか, 建築基礎の設計施工に関する研究資料4, 液状化地盤における基礎設計の考え方, 日本建築学会構造委員会基礎構造運営委員会編, 日本建築学会, pp.47-92, 1998.
- 14) Okamura, M., Abdoun, T., Dobby, R., Sharp, M. and Taboada, V.: Effect of sand permeability and weak after shocks on earthquake-induced lateral spreading, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.6, pp.63-77, 2001.
- 15) 日下部伸, 森尾敏, 岡林巧, 藤井照久, 兵動正幸: 簡易単純せん断試験装置の試作と種々の液状化試験への適用, 土木学会論文集, No.617/III-46, pp.299-304, 1999.
- 16) Farook, K., Orense, R. and Towhata, I.: Response of unsaturated sandy soils under constant shear stress drained condition, *Soils and Foundations*, Vol.44, No.2, pp.1-13, 2004.
- 17) 地盤工学会2003年三陸南地震および宮城県北部地震災害調査委員会: 2003年三陸南地震・宮城県北部地震災害調査報告書, 2003.

(2003. 12. 17 受付)

SHEARING DEFORMATION CHARACTERISTICS OF THE SOIL SUBJECTED TO WATER INJECTION AFTER UNDRAINED CYCLIC SHEAR HISTORY

Akira YAMAGUCHI, Yoshio TOBITA and Motoki KAZAMA

Recently, ground flow deformation mechanism considering pore water migration has been proposed. The mechanism is able to explain ground flow failure reasonably. However, there is a few study about the characteristic of soil that were injected pore water after cyclic shear histories. In this study, we injected the pore water to the specimen after giving the undrained cyclic shear stress using simple shear test. According to these experiments, it is shown that the characteristic of soil deformation after the cyclic shear history greatly depends on the magnitude of the shear strain during cyclic shear. And, it is shown that the soil skeleton is damaged by a positive dilatancy of opposite direction of initial shear stress.