

Development of new experiment for prediction of ground defromation due to earthquake :  
Development of hybrid on-line experiment for ground displacement

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-10-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 山口, 晶, 仙頭, 紀明, 風間, 基樹, 飛田, 善雄 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://tohoku-gakuin.repo.nii.ac.jp/records/24768">https://tohoku-gakuin.repo.nii.ac.jp/records/24768</a>

# 地震による地盤変形量を予測する新しい実験手法の開発

## - 地盤流動ハイブリッドオンライン実験の開発 -

### Development of new experiment for prediction of ground deformation due to earthquake

#### -Development of hybrid on-line experiment for ground displacement -

山口 晶      仙頭 紀明\*      風間 基樹\*\*      飛田 善雄  
Akira YAMAGUCHI      Noriaki SENTOH      Motoki KAZAMA      Yoshio TOBITA

#### Abstract

A new testing method has been developed for analyzing the flow failure of gently inclined layered ground. The method is the sophisticated hybrid testing system that can analyze the progressive failure due to seepage after liquefaction. Using this developed system, the ground displacement was calculated under some conditions. As the result, it was shown that the ground condition affected lateral displacement. And, we can reproduce the ground deformation with time delay using this system.

Key Words: hybrid on-line experiment, ground displacement, seepage, liquefaction

#### 1 研究の背景と目的

1964年新潟地震, 1983年日本海中部地震においては液状化に伴う地盤の側方流動が生じ, 建築物や土木構造物に多大な被害をもたらした。これらの被害を契機に, 液状化に伴う側方流動現象に関する研究が精力的に行なわれてきた<sup>1)2)3)</sup>。しかし, これまでの研究では過去の事例から報告されている数mオーダーの地盤変位を説明できないばかりでなく, 時間遅れを伴った進行性破壊現象が説明されておらず, 未だにこの流動のメカニズムは良くわかっていない。最近, 著者らはこの側方流動の主因が地震時に生じた過剰間隙水圧が地震後に浸透する過程において地盤に浸透破壊が生じることでありとらえ, 研究を進めている<sup>4)5)</sup>。この考え方によると, 数mオーダーの変位量を考慮できるだけでなく, 時間遅れを伴うせん断変形を再現することが可能である。

そこで本研究では, ある境界条件の基で, 圧密・浸透の支配方程式を逐次解きながら, 現位置の応力状態を再現した土要素に過剰間隙水圧の勾配に応じた間隙水を移動させることで給排水時の土の圧縮・せん断変形挙動を反映した流動変形解析システム(地盤流動ハイブリッドオンライン実験システム)を開発した。

#### 2 開発したシステムの概要

##### 2.1 着目した流動メカニズム

ここでは, 風間らが検討を行っている間隙水の流れを考慮

した流動のメカニズム<sup>4)5)</sup>の概要を説明する。

Fig.1に概要を示す。図に示すように傾斜地盤でかつ層序として透水性の悪い層を有する砂地盤を想定する。この地盤に地震動が入力されると, 過剰間隙水圧が発生する(Fig.1a)。過剰間隙水圧の分布が不均一であった場合, 間隙水の上下方向の流れが発生する。すると, 透水性の悪い層序の下層では, 間隙水がたまり, 有効応力が減少する(Fig.1b)。その部分の土要素の有効応力経路が破壊線に到達した場合, 体積変化を伴うせん断変形を起こし, 間隙水を吸収しながら膨張する(Fig.1c)。せん断変形を起こす土要素に対して間隙水の供給がなくなると, 体積変化を伴うせん断変形が発生しなくなる。本メカニズムでのポイントは, 間隙水の不均一分布によって間隙水の上下方向の流れが発生し透水性の悪い層の下層に間隙水が貯留されることと, 貯留された間隙水を消費する形で体積変化を伴うせん断変形が発生することである。し

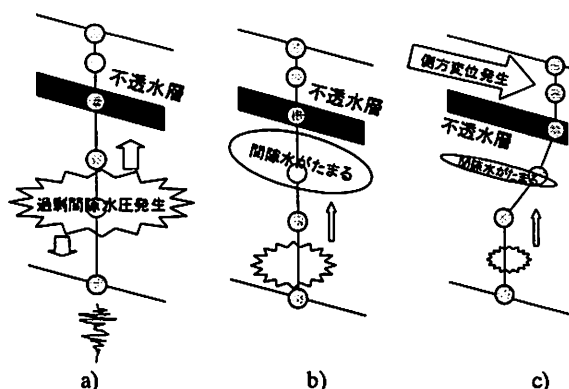


Fig.1 地盤流動の概要

\* 東北大学大学院工学研究科 助手

\*\* 東北大学大学院工学研究科 教授

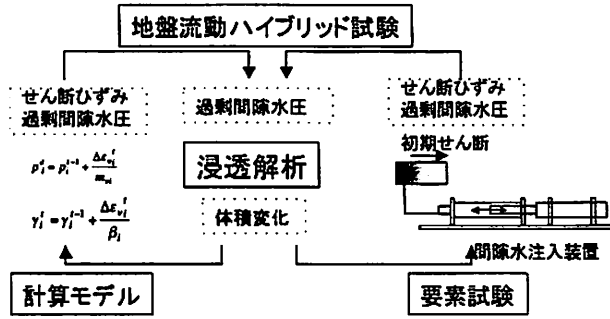


Fig.2 地盤流動ハイブリッド実験と計算モデルとの関係模式図

しかし、この研究において流動地盤の物性評価に未解明の部分が多く、物性評価の確立が地盤変位量を予測する手法としての精度のかぎを握っている。

本研究で開発を行うハイブリッドオンライン実験は、この未解明部分を数式でモデル化するのではなく、直接要素試験とオンラインでつなぐことによって計算と要素試験を組み合わせた実験を行おうというものである。

### 2.2 地盤流動ハイブリッド実験システム

本研究で開発した地盤流動ハイブリッドシステムは、Fig.1で示したような傾斜した一次元多層地盤圧密・浸透現象を要素試験から得られる変形特性を基に逐次解いていくシステムである。このシステムでは、通常の数値解析に利用される材料非線形性のモデル化が必要なく、現位置の土の挙動を直接的に反映した解が得られることが特徴である。

Fig.2に地盤流動ハイブリッド実験と計算モデルとの関係模式図を示す。傾斜地盤について、1次元浸透流解析を解いていく過程で、まず過剰間隙水圧の各層の分布を求める。次に過剰間隙水圧の分布を用いて浸透流解析を行い、各層の体積変化を求める。要素試験部分では、間隙水の流れを実際に供試体に注入し、各層のせん断変形量と過剰間隙水圧を求める。これをもとに次ステップの間隙水の流れを求めるというものである。なお、Fig.1c)で示したように、せん断変形が卓越する地層は透水性の悪い層の下層のみと考えられるため、その部分のみを要素試験により他層は計算によりモデル化する(サブストラクチャ法)と、作業量が煩雑にならず、また、全層要素試験としたハイブリッド実験と大差のない結果が得られる。

### 3 開発した流動破壊実験システム

#### 3.1 ハイブリッド実験システムの流れ

Fig.3に本システムの供試体作成後に行う作業のフローチャートを示す。ここでは、計算を行う層と要素試験を行う層を組み合わせたサブストラクチャ法について示した。なお、数式モデルを用いた流動変形予測法に関する詳細は参考文献<sup>9)</sup>に詳しい。本システムは、設定した時間ステップ毎に計算・計測を行い、次ステップのパラメータを求める時間領域の逐次計算により実験を進める。

- a) 解析対象地盤を空間的に離散化し、パラメータとしてそれぞれの層の単位体積重量、層厚、透水係数、傾斜角度などを与える。
- b) 間隙水圧自由度間の平均透水係数を求める。

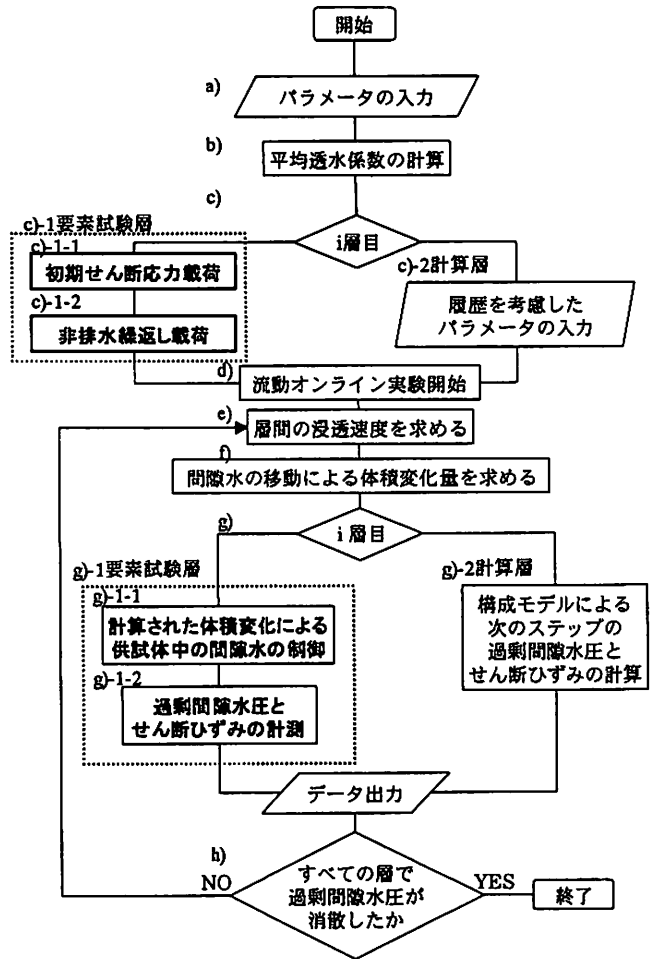


Fig.3 地盤流動ハイブリッド実験のフローチャート

- c) 初期条件として、初期せん断応力、初期過剰間隙水圧の設定をする。

#### c)-1 要素試験層の場合

供試体に所定の初期せん断応力を作用させたまま、履歴を与え、過剰間隙水圧を発生させる。

#### c)-1-1 初期せん断応力载荷

(緩い傾斜地盤に作用している初期せん断応力の再現)  
要素試験層に設定した層に対して式(1)より計算された初期せん断応力を排水条件下で载荷する。所定の初期せん断応力に達したらコックを閉じて非排水状態にする

$$\tau_{initial} = \sigma'_{vi} \tan \theta \quad (1)$$

ここに、 $\tau_{initial}$ ：初期せん断応力、 $\sigma'_{vi}$ ：初期有効応力、 $\theta$ ：傾斜角度

#### c)-1-2 非排水繰返し载荷

(地震動による過剰間隙水圧上昇のシミュレーション)

通常地震動による過剰間隙水圧は非排水条件下での繰返しせん断によって発生する。ここでは、所定の初期せん断応力状態を作用させた上で地震応答ハイブリッド実験を行う方法、応力振幅一定のsin波を入力し所定の過剰間隙水圧まで上昇させる方法、ランダム波を応力制御で入力する方法が可能である。供試体にこれらの履歴を作用させることにより非排水せん断時の履歴の影響を考慮に入れることができる。

#### c)-2 計算層の場合

計算層では、アプリケーション上のフォームに手動で過剰間隙水圧を入力する。

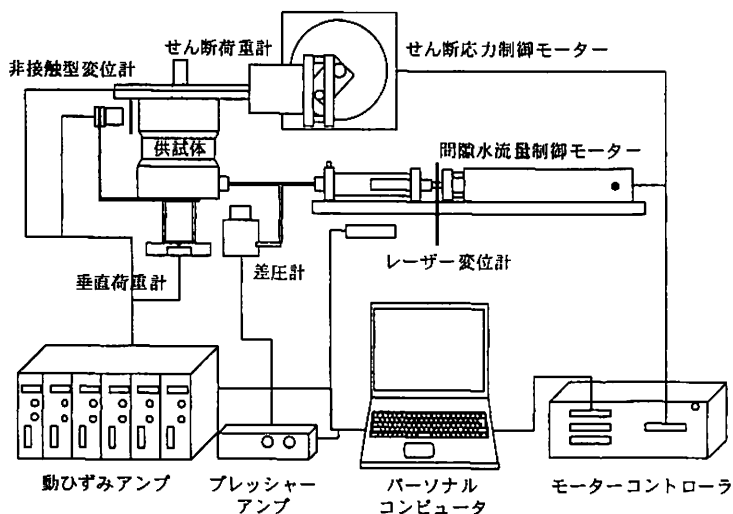


Fig. 4 システム構成模式図

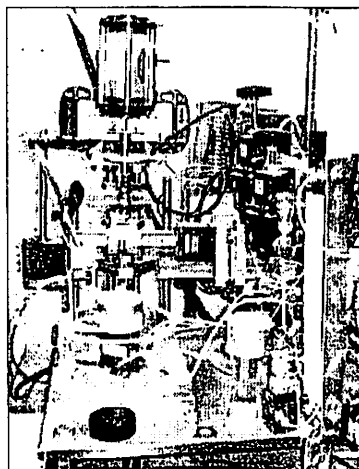


Fig. 5 簡易単純せん断試験機

- d) 以降より流動ハイブリッド実験を開始する
- e) 各層間の浸透速度を求め、間隙水の流入出を求める。
- f) 各層の間隙水の移動量から体積ひずみを求める。
- g) 各層の過剰間隙水圧とせん断ひずみを求める。

#### g)・1 要素試験層の場合

##### g)・1-1 間隙水の制御

f)で求めた体積ひずみ分の間隙水を間隙水注入装置を用いて供試体に注入・排水する。間隙水注入時は、初期せん断応力を載荷した状態を保つ。

##### g)・1-2 計測

所定の体積ひずみを供試体に注入・排水し、かつ、所定の初期せん断応力と計測されるせん断応力が釣り合ったとき過剰間隙水圧とせん断ひずみを計測する。

##### g)・2 計算層の場合

過剰間隙水圧とせん断ひずみは構成モデルによって求める。この詳細は参考文献りに詳しい。

- h) 全層で過剰間隙水圧が消散したら終了とし、消散していないならば次のステップへ進む (dへ戻る)。

### 3.2 システムを構成する装置

システムの構成模式図をFig.4に示す。それぞれの装置についての詳細を以下に示す。

#### 3.2.1 簡易単純せん断試験装置

本実験では供試体にせん断履歴、初期せん断応力を載荷する装置として、日下部ら<sup>6)</sup>が開発した簡易単純せん断試験装置を用いた。Fig.5に使用したせん断試験機の写真を示す。本試験は、供試体内部を負圧で吸引することにより擬似的に拘束圧をかけている。またベロフラムシリンダーを介して空圧により鉛直荷重を載荷することができるため、地盤の異方圧密状態を再現できる。しかし、負圧により拘束圧をかけているため拘束圧を98kPa以上かけることができない。

#### 3.2.2 間隙水注入装置

間隙水注入装置は、地盤流動ハイブリッド実験を開発するにあたり、新たに開発した装置である。Fig.6に間隙水注入装置の模式図を示す。本装置は、1)間隙水セル室、2)間隙水注

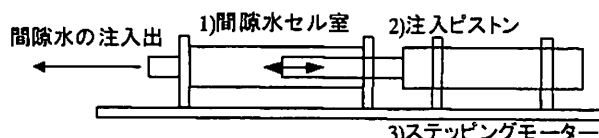


Fig. 6 間隙水注入装置の模式図

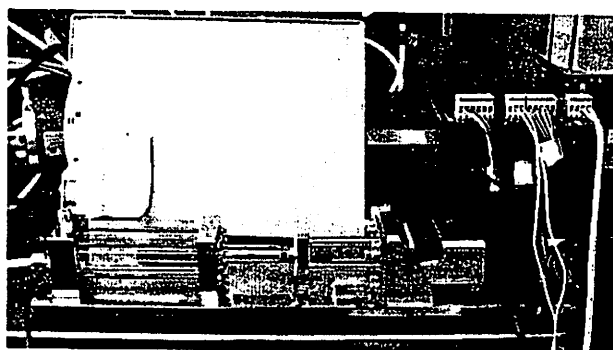


Fig. 7 間隙水注入装置

入ピストン、3)直動ステッピングモーターにより構成される。Fig.7に間隙水注入装置を示す。

##### 1)間隙水セル室

セル室は透明アクリル(内径20mm、外形30mm、長さ160mm、肉厚5mm)で作製され、水圧に対する十分な剛性が確保されている。アクリルは黄銅製の側板によりOリングを介して固定されており、止水を考慮している。また先端にエア抜きバルブを設けているため、気泡を取り除くことが可能である。

##### 2)間隙水注入ピストン

直径15mm、断面積1.767cm<sup>2</sup>の、長さ160mmの硬質クロムメッキが施された鉄で作製した。本ピストンが間隙水セル室に入出入りすることにより、セル室に挿入された体積分の間隙水が押し出され、供試体に注入される仕組みとなっている。

##### 3)直動ステッピングモーター

本試験では、間隙水の流入制御を行うため、精度が良く制御が簡単な直動型のステッピングモーターを採用した。本システムで用いたモーターはオリエンタルモーター社製の小型直動ステッピングモーターCPL42T2-1Dである。最

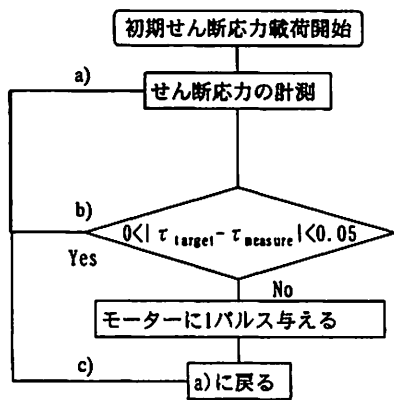


Fig.8 初期せん断応力を与えるフローチャート

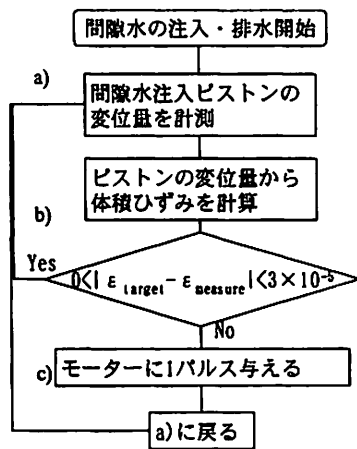


Fig.9 間隙水の流入・流出を制御するフローチャート

大ストロークは10cm, 最大推力は60N, 分解能は0.004mm/stepである。供試体(直径60mm, 高さ20mm)に対して体積ひずみは, 最大31%発生させることができる。また体積ひずみに換算した最小分解能は, 0.0012%である。本モーターの推進軸に1)の間隙水注入ピストン(断面積1.767cm<sup>2</sup>)をとりつけることにより34N/cm<sup>2</sup>の圧力下での動作が保証されている。

4)モーターコントローラー

ステッピングモーターコントローラーは, 直動モーターとモータードライバーを介して接続されており, RS232C回路を通してコンピューターにより制御が可能である。本システムでは, シーク電子工業株式会社製のAS-8200を用いた。本試験では, 流動ハイブリッド実験の計算制御アプリケーションとしてVisual Basicを用いている。直動モーターもコントローラーを介してVisual Basicで作製したプログラムで精密な位置決めを行っている。ユニットにはモーターを2台制御可能な独立2軸NCユニット(STD-100L)を使用した。

5)AD変換器

AD変換器はNational Instruments社製のノートパソコン用PCMCIA(PCカード)対応のDAQCard-AI-16XE-50を用いた。本変換器では最大16チャンネルのアナログ電圧記号を16ビット分解能で, プログラミングにより最大200kS/秒のサン

表-1 地盤物性とパラメータ

	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	k	$\phi$ (°)	$\beta$	$\epsilon_{vmax}$
砂層	19.6	$1.0 \times 10^{-3}$	35	0.1	0.03
シルト層	15.68	$1.0 \times 10^{-4}$	35	0.1	0.03
要素試験層	19.6	$1.0 \times 10^{-3}$	---	---	---

プリングレートでパソコンに取りこむことが可能である。

3.3 ハイブリッド実験中の装置の制御

本研究で開発した流動オンラインシステムでは, ノート型パーソナルコンピュータを用い, Visual Basic6.0により浸透流解析, モーターの制御, データ計測を行なうプログラムを製作し組み込むことにより一連の実験が可能となっている。

本システムで作製したプログラムを大きく分けて考えると, 3つに分類される。せん断応力と間隙水注入の制御, データの計測, 浸透流解析である。ここでは, せん断応力と間隙水注入制御及びデータ計測に関して説明する。

3.3.1せん断応力の制御方法

本試験で使用したステッピングモーターは与えたパルス数に応じた変位を発生させるため, 基本的には所定のひずみを与えることにより応力を制御する方式である。Fig.8にせん断応力制御のフローチャートを示す。

a)せん断応力を計測する ( $\tau_{measure}$ )

b) 目標とするせん断応力 ( $\tau_{target}$ ) との差を算出する。

$0 \leq |\tau_{target} - \tau_{measure}| \leq 0.05$  (k Pa) のときモーターを停止させ, (a)に戻る。

$|\tau_{target} - \tau_{measure}| > 0.05$  (k Pa) のとき1パルス送ってモーターを動かす。

c)a)に戻る。

なお, 供試体に過剰間隙水圧を発生させるための履歴を与える際は, 所定の応力に達したと判断されa)に戻る際に, ステップが更新されるとともに  $\tau_{target}$  も更新させる。ただし, 初期せん断応力は常に一定値を保っており, 流動ハイブリッド実験中は初期せん断応力のみによってステップ更新の判断は行わない。

3.3.2間隙水注入の制御方法

間隙水の流量制御はロッドにアルミ板のターゲットを取りつけ, 据え付けのレーザー変位計とアルミ板の間の距離から算定される体積ひずみ  $\epsilon_{measure}$  が, 計算により求められている体積ひずみ  $\epsilon_{target}$  に近づくように制御している。設置したレーザー変位計の最小分解能は0.010mm, ピストンの断面積は1.767cm<sup>2</sup>, 供試体(直径60mm, 高さ20mm)体積から体積ひずみに換算すると, 分解能は  $3 \times 10^{-5}$  である。Fig.9に間隙水の流入・流出を制御するフローチャートを示す。

a)間隙水注入ピストンの変位を計測する。

b)ピストンの変位量から体積ひずみを計算する ( $\epsilon_{measure}$ )。

c) 目標とする体積ひずみ ( $\epsilon_{target}$ ) との差を算出する。

$0 \leq |\epsilon_{target} - \epsilon_{measure}| \leq 3 \times 10^{-5}$  のときモーターを停止させ, a)に戻る。

$|\epsilon_{target} - \epsilon_{measure}| \geq 3 \times 10^{-5}$  のとき1パルス送ってモーターを動かす。

d)a)に戻る。

表-2 実験条件

実験名	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8
層番号	層種類	層種類	層種類	層種類	層種類	層種類	層種類	層種類
1	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層
2	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層
3	砂層	砂層	シルト層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層
4	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層
5	シルト層	砂層	砂層	シルト層	シルト層	シルト層	シルト層	シルト層
6	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層
7	砂層	シルト層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層
8	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層
9	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層
10	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層	砂層
傾斜角	3°	3°	3°	0°	5°	3°	3°	3°
相対密度	中密	中密	中密	中密	中密	緩	密	密
履歴	液状化	液状化	液状化	液状化	液状化	液状化	液状化	液状化後も載荷

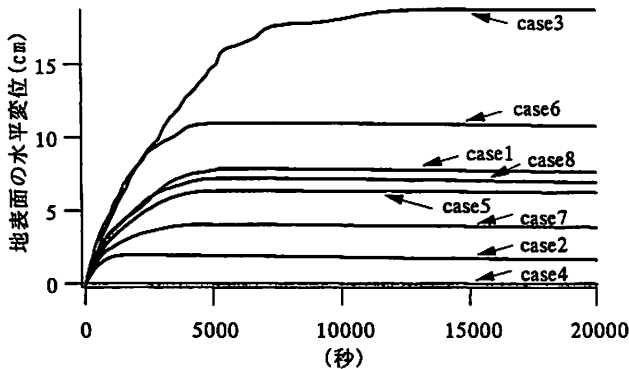


Fig.10 地表面水平変位

#### 4 開発した流動ハイブリッド実験システムの検証

##### 4.1 実験条件

開発した流動ハイブリッドシステムを用いて、モデル地盤に対して流動量予測実験を行った。ここでは、深さ10mの地盤を1m毎の層に分割し、1層をシルト層、その下層を要素試験、それ以外の層は砂層の計算層に置き換える流動ハイブリッド実験を行った。地盤物性および計算に用いたパラメータを表-1に示す。また、計算層は全層が液状化したと仮定し、要素試験層は応力履歴を与えることによりあらかじめ液状化させている。

表-2に実験条件を示す。実験は、透水係数の低いシルト層の深さを変えたもの（case1, case2, case3）、傾斜角を0°、3°、5°に設定したもの（case4, case1, case5）、供試体の密度を緩、中密、密にしたもの（case6, case1, case7）、要素試験層の載荷を液状化した直後に停止したものと液状化後数回繰返したもの（case1, case8）、をそれぞれ比較した。

##### 4.2 実験結果

Fig.10に傾斜方向に対する地表面水平変位の時間変化を示す。水平変位はどの条件においても、概ね5000秒-10000秒（1時間23分-2時間47分）で変位が終了している。また、0秒から5000秒までは変位が徐々に進行しており、本システム

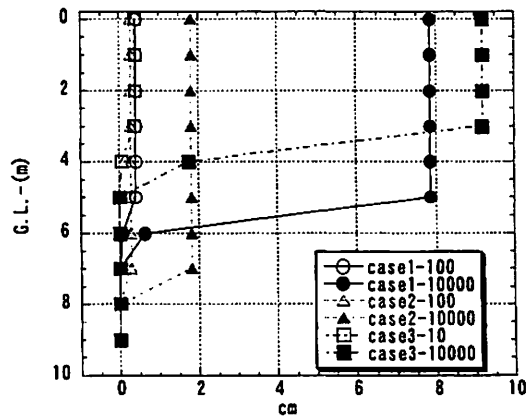


Fig.11 シルト層の位置が異なる条件の地盤変位量

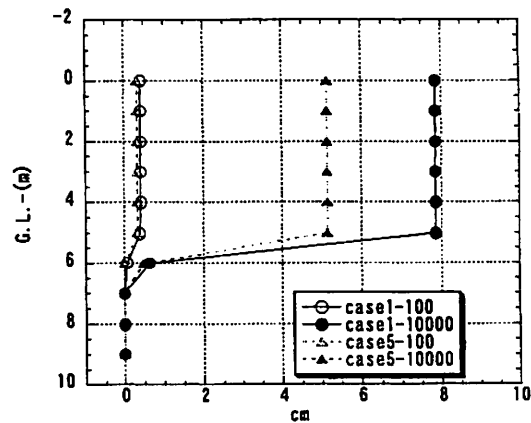


Fig.12 地盤の傾斜角が異なる条件の地盤変位量

において時間遅れを伴う側方流動が表現されていることがわかる。

Fig.11にシルト層の位置が異なる条件、Fig.12に傾斜角が異なる条件、Fig.13に供試体の密度が異なる条件、Fig.14に非排水履歴が異なる条件の、地盤変位量の深さ方向をそれぞれ示す。なお、変位量は、100秒後（1分40秒後）と、10000秒後（2時間47秒）の値を示した。

シルト層の位置が異なる条件のFig.11をみると、シルト層

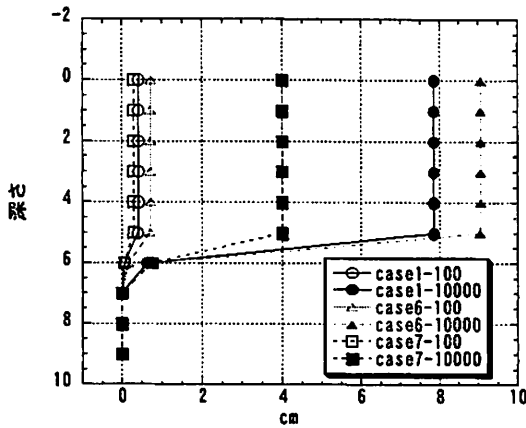


Fig.13 供試体密度が異なる条件の地盤変位量

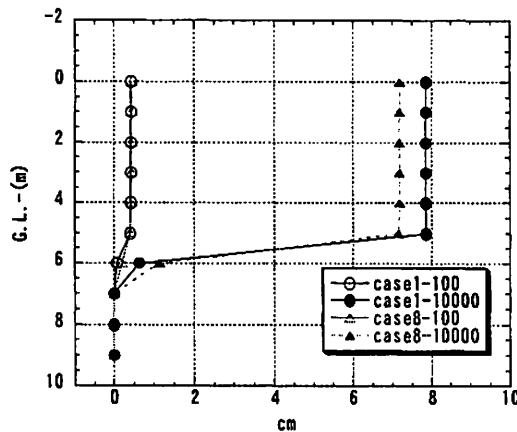


Fig.14 履歴が異なる条件の地盤変位量

の位置が浅い条件の方が地表面の変位量が大きいたことがわかる。これは、間隙水圧を流出する層がシルト層下部に多くあるとシルト層下部に貯留される間隙水の量が増え、従って間隙水を消費する形で発生するひずみ量が増えるためである。また、要素試験を行った層の位置が深くなると拘束圧が大きくなるために変形量が減少したことも原因と考えられる。

地盤の傾斜角が異なる条件のFig.12を見ると、傾斜角が大きい条件で、必ずしも変位量が増加するわけではないことがわかる。なお、case4については、変位が発生しなかったため、グラフ上から省いている。傾斜角が大きい場合、非排水状態で発生する変位が大きくなるため、ダイレイタンシが発生し、地震後の変位量が減少したと考えられる。

Fig.13の供試体密度が異なる条件を見ると、供試体密度が密な状態の方が地盤変位量が少なくなっている。他の条件はおなじため、間隙水の流入量はあまりかわらないが、せん断変形の際に必要な間隙水の量が密な供試体の方が多いためである。

Fig.14の履歴が異なる条件を見ると、液状化後も応力履歴を載荷したcase8の方が変位量は小さくなっているが、その差は数mm程度であり、履歴の影響が大きいとはいえない。

## 5 まとめ

本研究では、風間らが考案した流動破壊理論を参考に、間隙水の流入とせん断変位の発生を要素試験から求めたハイブリッドオンライン実験を開発した。また、開発したシステム

を用いて簡単な地盤を仮定し、ハイブリッドオンライン実験を行った。開発したハイブリッドオンライン実験では、時間遅れを伴う側方変位を再現することができた。また実験結果から、地層構成、地盤の傾斜角度、密度、地震履歴の影響を受け、側方変位量が異なることがわかった。

本研究で開発したシステムでは、地震後の過剰間隙水圧分布を与えれば、その後の圧密・浸透過程での過剰間隙水圧の再配分が表現可能であり、ある層で発生する時間遅れを伴う浸透破壊現象を室内実験で再現できる。よく知られているように、土の種類は地域特性が大きいため、ハイブリッド実験は土要素のモデル化を経ずに地盤の応答が得られるため、このような地域特性を対象地点の土供試体を用いることで計算結果に反映でき、定量的な評価が可能になる。今後の設計仕様の中で利用できる可能性を持った試験方法である。

## 謝辞

本システムの開発にあたっては、社団法人東北建設協会の建設事業の開発に関する助成による助成金援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 吉田望, 安田進, 規矩大義: 砂の液状化後の挙動のモデル化, 第30回地盤工学研究発表会, pp.789-792, 1995.
- 2) 濱田政則, 若松加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp.189-208, 1998.
- 3) 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.
- 4) 風間基樹, 仙頭紀明, 赤堀一彦, 大村洋史: 地震後の浸透破壊に関する流動変形メカニズム, 第36回地盤工学研究発表会, pp.2415-2416, 2001.
- 5) 赤堀一彦, 大村洋史, 風間基樹, 仙頭紀明: 地震後の浸透破壊による流動変形予測法, 第36回地盤工学研究発表会, pp.2417-2418, 2001.
- 6) 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.