

# 液状化土の粘性評価とそれに基づく側方流動 のシミュレーション

川村淳<sup>1</sup>・伊藤健<sup>2</sup>・赤木寛一<sup>3</sup>・小宮一仁<sup>4</sup>

<sup>1</sup>早稲田大学大学院学生 理工学研究科建設工学専攻(〒169-8555 東京都新宿区大久保3丁目4-1)

<sup>2</sup>早稲田大学学生 理工学部土木工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保3丁目4-1)

<sup>3</sup>工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保3丁目4-1)

<sup>4</sup>工博 千葉工業大学教授 千葉工業大学工学部土木工学科(〒275-8588 千葉県習志野市津田沼2-17-1).

Earthquakes cause liquefaction of saturated loose sand. In the great Hanshin-Awaji earthquake of 1995, many retentions and foundations of structures were seriously collapsed by liquefaction in seaside reclaimed ground, and lateral flow damaged buried pipelines of lifeline and foundation piles. Therefore, studies on predicting lateral flow are vital for geotechnical engineering. Recently, the results of model tests are employed to point out that liquefied sand behaves like a viscous fluid. The purpose of this study is to evaluate the physical properties of liquefied sand through changes in the apparent coefficient of viscosity of liquefied sand. The shear resistance of liquefied sand was measured with a hollow cylindrical torsion shear test. The finite element simulation of lateral flow was carried out by using the experimental results.

**Key Words** : Fully saturated sand, liquefaction, torsion, lateral flow, finite element method

## 1. 研究目的

地震時の地盤災害の一つに、地盤の液状化とそれともなう側方流動が挙げられる。液状化現象とは、地震による地盤の振動のため砂の粒子が間隙水に浮遊した状態になり泥水のような現象のことをいう。また側方流動とは、傾斜した緩い砂地盤が液状化することによりせん断ひずみが生じる現象のことをいう。この液状化ともなう側方流動による変位は10 m以上にもなる例があり、液状化層の平均的なせん断ひずみは数10%から100%を超えている。このような大変位は、地震時ばかりでなく地震の振動終了後にも生じており、また斜面崩壊のような現象とは違い、地表面勾配が1~2%以下の工学的にほとんど水平と考えられるような地盤でも生じているのが特徴である。

このように地盤が大変位を起こすことで、地盤内にある上下水道管やガス導管、構造物の杭基礎などが破断して大きな被害を被る。大都市の大部分は液状化の起きやすい緩い堆積地盤の上に存在しているため、側方流動による都市の構造物への被害は計り知れないものがある。事実日本は世界有数の地震国であり、地震によって発生する液状化現象と側方流動によって多大な被害を受けてきた。よって液状化に伴う側方流動現象のメカニズムを解明し、この現象に対する対策を行うことが耐震工学上の重要課題となっている。

濱田等<sup>1)</sup>により既往地震による事例の分析、液状化土の物性に関する実験および模型地盤による流動実験の結果をもとに、液状化による地盤の水平変位発生メカニズムを探り、変位量を予測する方法が提案されている。また、液状化地盤の抵抗力には速度依存性があるという模型実験の結果より液状化した砂は粘性流体的にふるまうことが指摘されている。

本研究では中空ねじりせん断試験により液状化土のねじりせん断抵抗を測定し、液状化土を粘性流体と見立てたときの粘性係数を求めることで液状化土の粘性評価の検討を行った。特に既往の実験より圧密後の相対密度が拘束圧によって大きく変化することから、相対密度の違いが液状化土の見かけの粘性係数に及ぼす影響を調査した。

加えて1995年に発生した神戸の地盤断面を用い、パラメーターとして本実験で得られた粘性係数を使用することで、有限要素法によるシミュレーションを行った。

## 2. 中空ねじり試験概要

### (1) 試料

試料には豊浦標準砂を用いて、高さ10cm、内径3cm、外径7cmの中空円筒形供試体で実験を行った。試料の物理特性は表1、図1に示すとおりである。

供試体にはゴムスリーブと試料との摩擦軽減のために厚さ $1\mu\text{m}$ のメンブレンフィルターという滑らかなシートを間に巻くことにした。供試体形状は図2に示した。また供試体は空中落下法を用いて作成し、繰り返しせん断試験開始直前の供試体の相対密度が40%になるよう実験的に砂の乾燥状態の質量を決定し作成した。

表1 試料の物理特性

土粒子密度	最小密度	最大密度
$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )
2.682	1.330	1.641

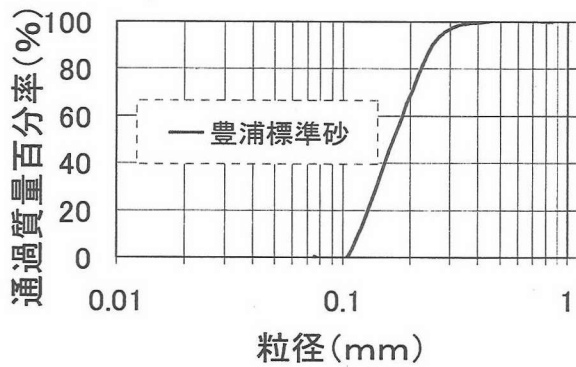


図1 試料の粒径加積曲線

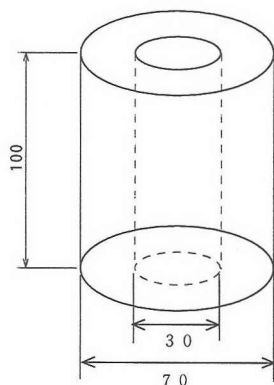


図2 供試体形状

## (2) 実験装置

本実験ではモーターでひずみ速度を一定に保ちせん断を行うひずみ制御方式の試験機と空気圧による載荷でせん断を行う応力制御方式の試験機を用いて試験を行った。

ひずみ制御方式においては、ゴムスリーブの張力が得られた実験データに対して大きく影響しているという問題点を解決するため、ペDESTALの外周部をトップキャップのねじりせん断と同調して回転する構造にし、ゴムスリーブがねじれることなく試験を行った。ペDESTALの外周部が回転する構造は図3に示されている。

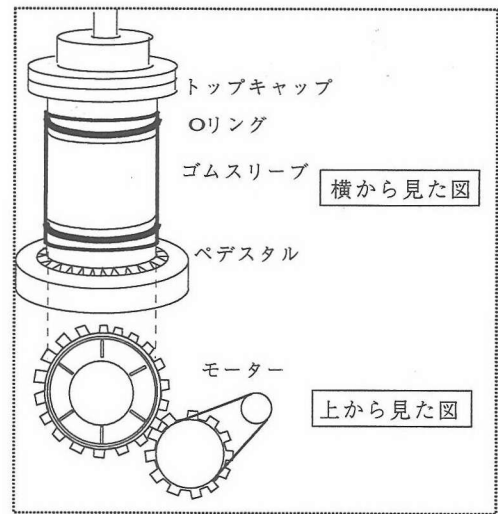


図3 ペDESTAL模式図

実験データとして軸圧、軸変位、トルク、回転変位、側圧、間隙水圧の6項目をデジタル動ひずみアンプ計を用いて測定し、得られたデータは直接パソコンに記録された。試験のシステム図を図4に示す。

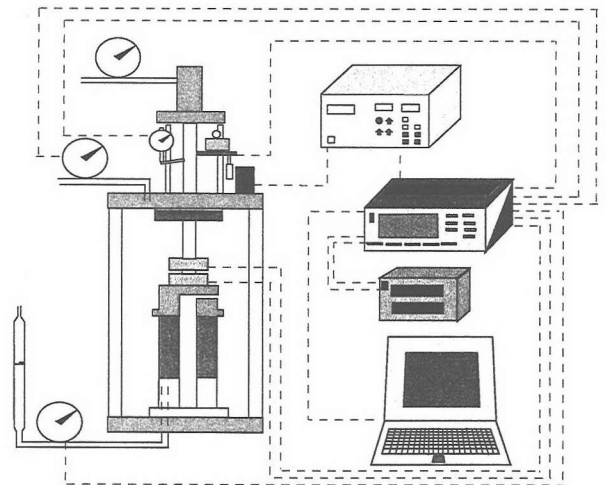


図4 試験機概要

## (3) 供試体作成方法

中空ねじりせん断試験では載荷前の圧密によって供試体の相対密度が変化してしまうことから実験的に推定された圧密量を用いてあらかじめ乾燥質量を実験条件によって変化させた供試体を作成し実験を行った。相対密度は定義から導いた式(1)を用いて算出した。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad \text{に}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \\ e_{\max} = \frac{\rho_s}{\rho_{d \min}} - 1 \\ e_{\min} = \frac{\rho_s}{\rho_{d \max}} - 1 \end{array} \right. \quad \text{を代入し}$$

$$\therefore D_r = \frac{\rho_{d \max} \left( \frac{m_s}{V} - \rho_{d \min} \right)}{m_s (\rho_{d \max} - \rho_{d \min})} \times 100 \dots (1)$$

表2 圧密終了時の相対密度の比較

	今年度のデータ			昨年度のデータ <sup>2)</sup>		
	拘束圧 (MPa)					
	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2
相対密度	37.95	42.63	37.47	47.99	48.15	46.46
	42.93	35.77	41.12	46.63	66.10	58.43
	42.97	37.35	35.11	48.46	62.43	49.05
	35.14	46.01	39.07	39.48	52.95	55.09
	38.76	43.94	38.71	36.62	50.07	54.33
	39.56	31.55	34.35	54.09	51.74	52.17

40%からの誤差

5%以内
5~10%
10~15%
それ以上

表2より事前に必要質量を計算し供試体を作成した今年度の結果のほうが目標としているDr=40%に近い値を示していることがわかる。

#### (4) 実験方法

以下に実験方法を簡単に記す。

供試体は空中落下法を用いて凍結用モールドで相対密度が目標値になるように作成され、一度水を浸透させた後に冷凍庫で完全に凍結させた。

モールド解体後、供試体は試験装置にセットされて負圧によって自立させた状態で融解する。

融解後に負圧を拘束圧に置換し、脱気水を供試体内に十分浸透させた。バックプレッシャーを0.2MPa 載荷してB値を測定し、このときのB値の目標値は0.95以上とした。

所定の拘束圧をかけて等方圧密を行い軸変位と体積変化を測定した。

非排水繰り返しせん断試験を行うことで供試体を液状化させた。過剰間隙水圧が拘束圧の95%に達したときに試料が液状化したものとみなし、繰り返しせん断試験を終了させる。

非排水静的せん断試験を行い、各データをパソコンに記録した後、データの整理をした。

このときの試験の荷重過程を図5に、実験方法のフローチャートを図6に示す。実験は以上の手順で行われ、データ整理より液状化土の見かけの粘性係数を算出した。

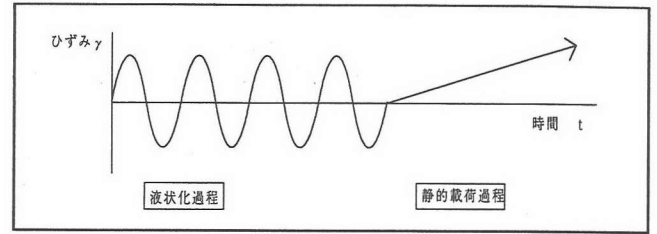


図5 荷重過程

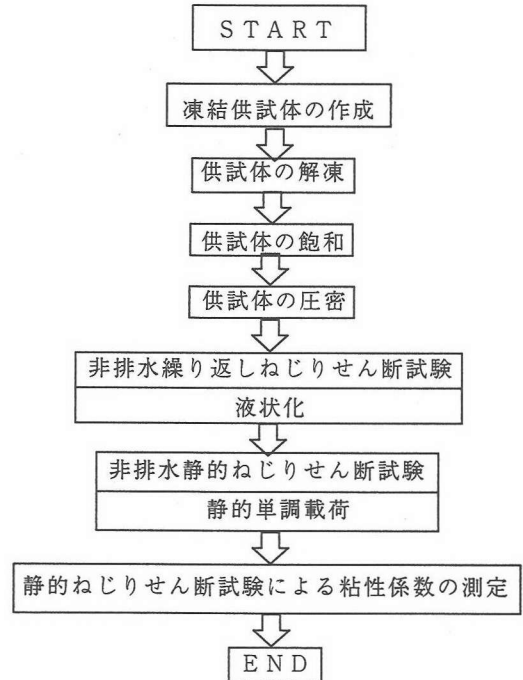


図6 実験手順

#### (5) 実験条件

実験条件は、ひずみ制御は、せん断ひずみ速度、拘束圧、応力制御は拘束圧を変化させて行った。供試体の相対密度はすべての試験で40%を目標値として行なわれた。今回用いた実験条件を表3に示す。ここで試験は再現性を確認するために各実験条件に対して複数回行われた。

なお、ひずみ制御においてはベDESTAL外周部の回転によるゴムスリーブの張力補正を行った。

拘束圧はひずみ制御、応力制御ともに0.05, 0.1, 0.2MPaを用い、ひずみ制御の場合に限りひずみ速度は10,20,30%/minと設定した。

表3 実験条件

拘束圧 (MPa)	ひずみ制御		応力制御 拘束圧 (MPa)
	せん断ひずみ速度 (%/min)		
0.05	10	0.05	
	20		
	30		
0.1	10	0.1	
	20		
	30		
0.2	10	0.2	
	20		
	30		

### 3. 中空ねじりせん断試験結果と考察

#### (1) 繰り返しせん断試験

以下に繰り返しせん断試験の結果を示す。グラフより繰り返しせん断試験によって間隙水圧が上昇し、せん断抵抗が減少していく様子がわかる。また、間隙水圧が拘束圧の95%に達した時点で液状化とみなし単調載荷を行った。拘束圧0.2MPaの例を図7から図11に示した。

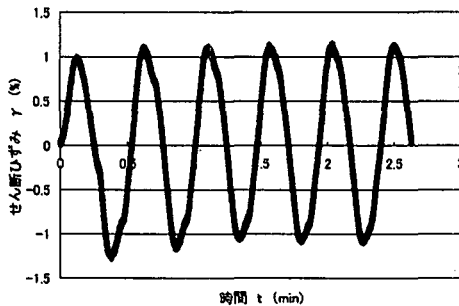


図7  $\gamma - t$  図

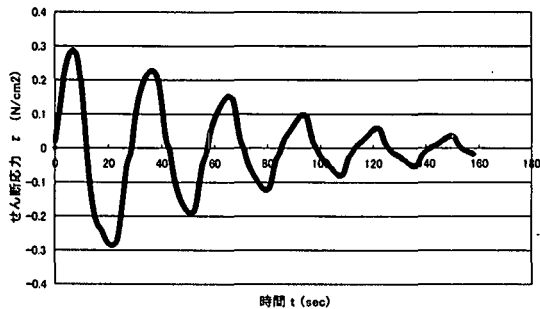


図8  $\tau - t$  図

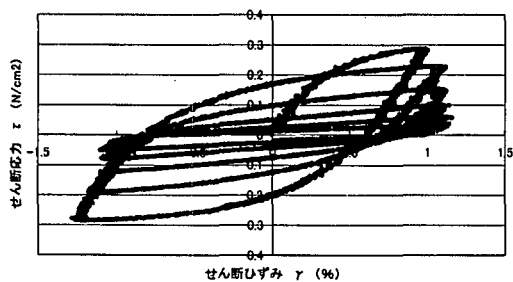


図9  $\tau - \gamma$  図

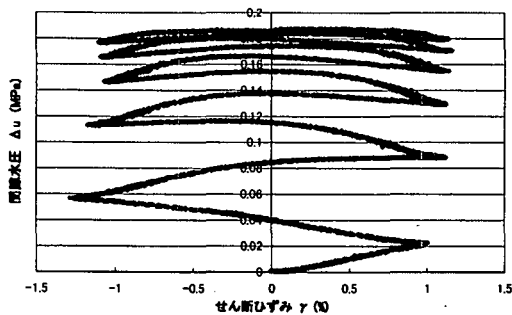


図10  $u - \gamma$  図

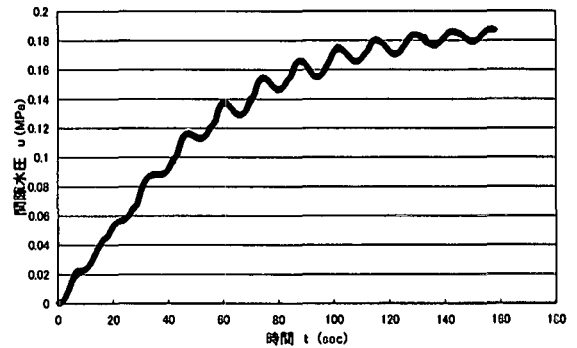


図11  $u - t$  図

#### (2) 粘性係数算出方法

液状化土の粘性係数は実験結果からせん断応力とせん断ひずみ速度の関係図を作成し、そのグラフの傾きから求めた。図12はそれを図で簡単にまとめたものである。

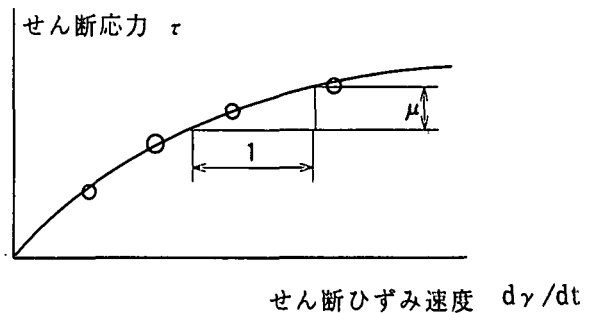


図12 粘性係数算出方法

粘性係数は以下の手順で求めた。液状化後一定時間経過後におけるせん断応力を読みとり、横軸にせん断ひずみ速度をとった座標上に、読みとったせん断応力をプロットした。その一例が図13である。このプロットの傾きが液状化土の粘性係数となる。各拘束圧の下で求められた粘性係数を表4に示す。また、今回求める液状化土のみかけの粘性係数はすべてペダスタル外周部を回転させてゴムスリーブの張力を補正した実験結果から求めた。

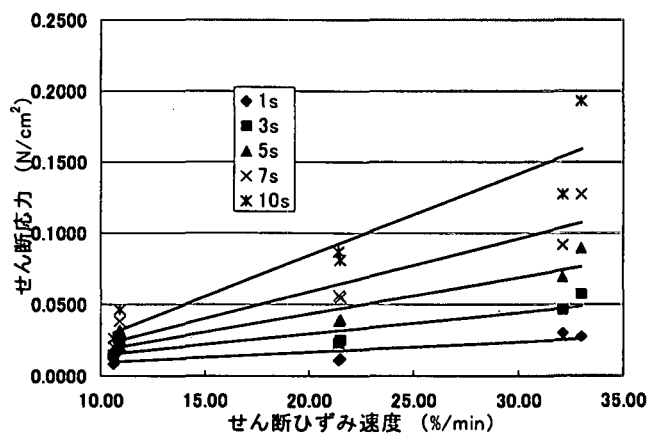


図13 拘束圧0.1MPaにおける粘性係数算出例

表4 粘性係数の値

昨年度のデータ					
拘束圧 (MPa)	粘性係数(N·sec/cm <sup>2</sup> )				
	1	3	5	7	10
0.05	1.8	4.8	9.6	15.6	21.0
0.1	2.4	9.0	18.0	24.6	38.4
0.2	3.6	11.4	21.6	34.8	53.4

今年度のデータ					
拘束圧 (MPa)	粘性係数(N·sec/cm <sup>2</sup> )				
	1	3	5	7	10
0.05	1.2	2.4	4.8	6.6	9.6
0.1	4.2	9.0	15.0	22.2	34.2
0.2	5.4	13.2	22.8	33.0	47.4

(3) 相対密度が粘性係数に及ぼす影響

図14は横軸に相対密度、縦軸に粘性係数をとったグラフである。グラフより液状化後の経過時間が同じであれば右上がりの傾向が見られ相対密度の増加とともに粘性係数も増加していることがわかる。

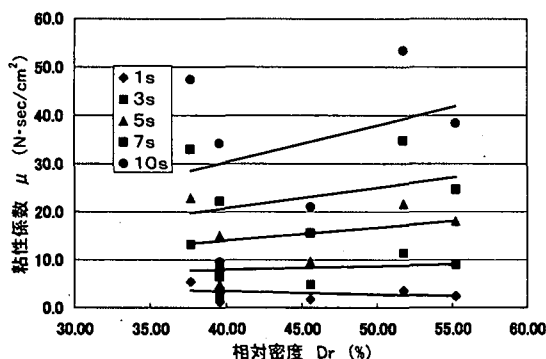


図14 相対密度と粘性係数の関係

(4) 拘束圧と粘性係数の関係

液状化土の粘性係数は拘束圧に依存することが模型実験の結果より報告されている。濱田等は液状化土の粘性係数は拘束圧の3/2乗に比例すると実験から指摘した。本研究で求めた粘性係数と拘束圧の関係を示したものが図15と図16である。図15は今年度のデータで図16は昨年度のデータである。図より拘束圧が増加すると粘性係数も増加することがわかる。グラフは両対数で表しており、直線で結ぶことができるといえる。

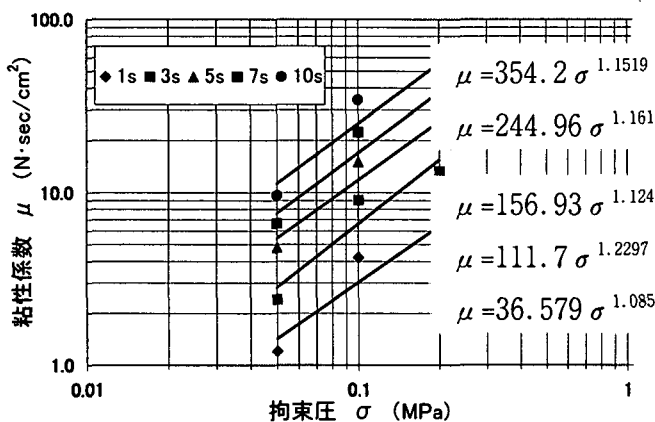


図15 拘束圧と粘性係数の関係

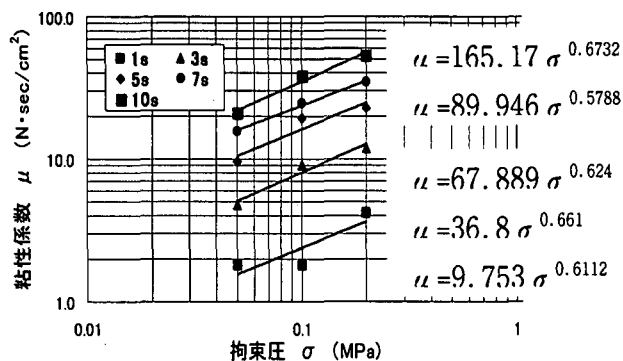


図16 拘束圧と粘性係数の関係<sup>2)</sup>

グラフより今年度の相対密度をそろえた結果のほうが3/2乗に比較的近い値を出している。

(5) 経過時間と粘性係数の関係

また液状化後の経過時間と粘性係数の関係を図17に示した。時間と粘性係数は比例していることが確認できる。時間に応じて粘性係数が増加する要因としては、砂粒子の沈降に伴って相互にかみ合い始めていることが原因だと考えられる。

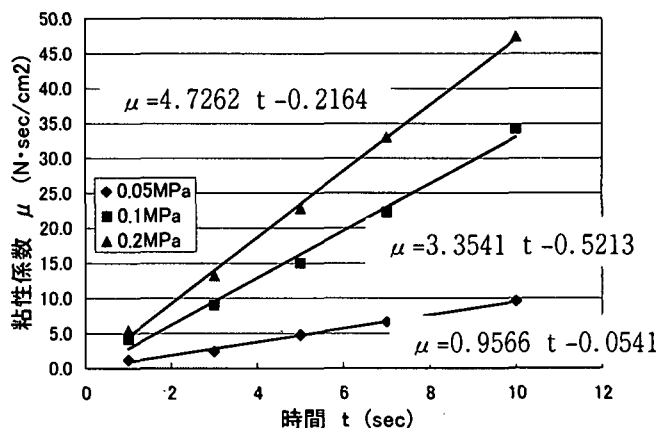


図17 経過時間と粘性係数

(6) ひずみ速度とせん断応力の関係

試験中にせん断ひずみ速度の変化する応力制御を用いてせん断試験を行ったため、1ケースの応力制御試験で異なるせん断ひずみ速度のデータを得ることができた。またひずみ制御と比較し、せん断ひずみ速度の大きな領域に関しても測定することができた。図18は応力制御試験機で液状化後0.1秒で急速にせん断した時のせん断応力とせん断ひずみ速度の関係である。この結果で見える限り広範囲のひずみ速度で式(2)のニュートンの粘性法則が適用できる。

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad \dots (2)$$

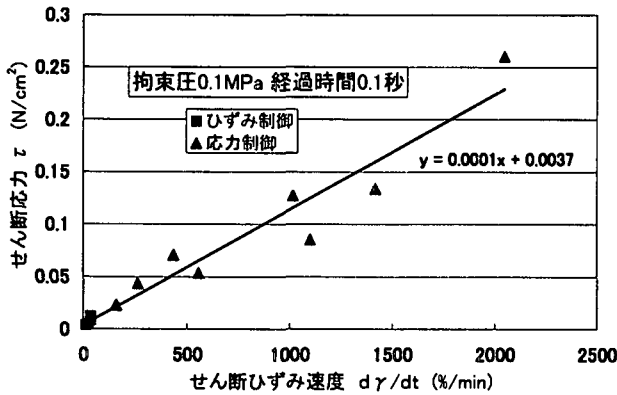


図18 せん断ひずみ速度とせん断応力

#### 4. 有限要素法による側方流動のシミュレーション

##### (1) 解析断面

実験結果から得られた図17の液状化後の経過時間と粘性係数の関係と、独自の解析プログラム<sup>3)</sup>及び神戸の実地盤データを用いた有限要素法シミュレーションから求めた地盤変位量と実際の震災時の変位を比較検討した。

地盤断面メッシュ図は図19に示した。

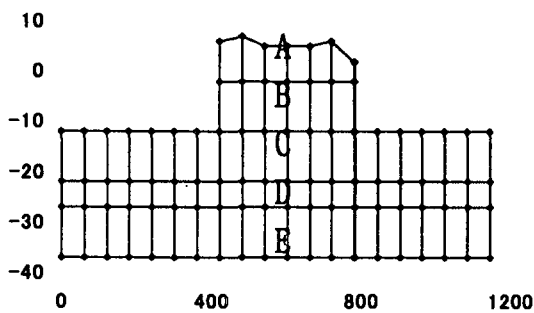


図19 断面要素図

##### (2) 解析条件

入力パラメーターを表5に示す。ここで粘性係数は実験結果図17より求めた式を用いた。

表5 入力パラメーター

矢板	E=1.00E+14	$\nu=0.33$
地盤A	E=17500	$\nu=0.38$
地盤B	E=5000	$\nu=0.45$
地盤C	E=20000	$\nu=0.38$
地盤D	E=75000	$\nu=0.35$
地盤E	E=1.00E+12	$\nu=0.35$

##### (2) 解析結果の考察

解析結果を図20に示す。変位は実現象に対して大きな値が出たが三次元と二次元の解析においては二次元断面を考慮したほうが変位量が大きく出るので実地盤の変位データよりも大きな変位が発生したと考えられる。また時間効果を考慮した解析では振動後に急激な変位が発生するのではなく振動後も変位が生じていることがわかる。

この結果より振動後も液状化地盤の変位が発生するという実現象を忠実に再現できたことがわかる。実現象における変位は4mほどであるが比較して大きな値がでてしまったことに対しては今後さらなる検討が必要である。

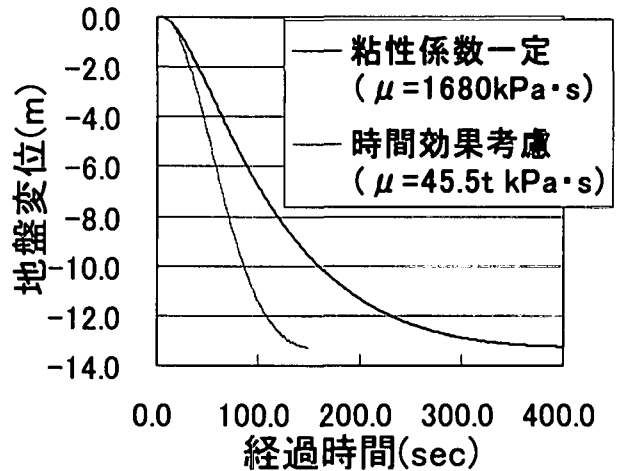


図20有限要素法による側方流動変位

#### 5. 結論

- (1) 供試体の相対密度の増加と共に粘性係数は増加する。
- (2) 拘束圧の増加と共に粘性係数は増加する。
- (3) 液状化後の経過時間の増加と共に粘性係数は増加する。
- (4) 液状化直後の砂に対してはニュートンの粘性法則が成り立つ。
- (5) 有限要素法側方流動シミュレーションにおいて、粘性係数の時間効果を考慮することで実現象に近い挙動を示すことができる。

謝辞：本研究は平成14年度文部科学省科学技術振興調整費による総合研究の一環として行われたものである。記して、謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 濱田政則ほか：傾斜地盤における側方流動のメカニズムと変位量の予測，第一回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.235-240，2000年3月
- 2) 赤木寛一ほか：地震による液状化土の物性評価に関する研究，第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.265-270，2002年3月
- 3) 小宮一仁ほか：粘塑性有限要素法による液状化時の地盤の側方流動シミュレーション，第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.273-276，2001年3月