

# 地震による液状化土の物性評価に関する研究

服部憲嗣<sup>1</sup>・川村淳<sup>2</sup>・赤木寛一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生 早稲田大学大学院 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>学生 早稲田大学 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)

The earthquake induces liquefaction of saturated loose sand. In Hanshin-Awaji great earthquake 1995, many revetments and foundations of structures were seriously collapsed by liquefaction at the seaside reclaimed ground and the ground lateral flow caused the damage of buried pipelines of lifeline and foundation piles. Therefore, study on the prediction of ground lateral flow due to earthquake is necessary for geotechnical engineering. Recently, liquefied sand is said to behave like viscous fluid from the model test results. The purpose of this study is to evaluate the physical properties of liquefied sand by obtaining the apparent coefficient of viscosity of liquefied sand with measuring shear resistance of liquefied sand using hollow cylindrical torsion shear test.

**Key Words** :Fully saturated soil, Sand, Liquefaction, Torsion, Pore pressure

## 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に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による変位が生じる現象のことをいう。この液状化にともなう側方流動による変位は10m以上にもなる例があり、液状化層の巨視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ゆる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。

既に、濱田等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、変位量を予測することが提案されている<sup>1)</sup>。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が、模型実験では液状化土の物性の詳細な測定に限界がある。そこで、本研究では中空ねじりせん断試験を行うことで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物性評価を行った。

## 2. 試験概要

### (1) 試料および実験装置

表 1. 試料の物理的性質

試料	豊浦砂標準砂
土粒子密度	2.639 g/cm <sup>3</sup>
砂	94.8 %
シルト分	1.82 %
粘土分	3.38 %
最大粒径	0.85 mm
最大密度	1.646 g/cm <sup>3</sup>
最小密度	1.353 g/cm <sup>3</sup>

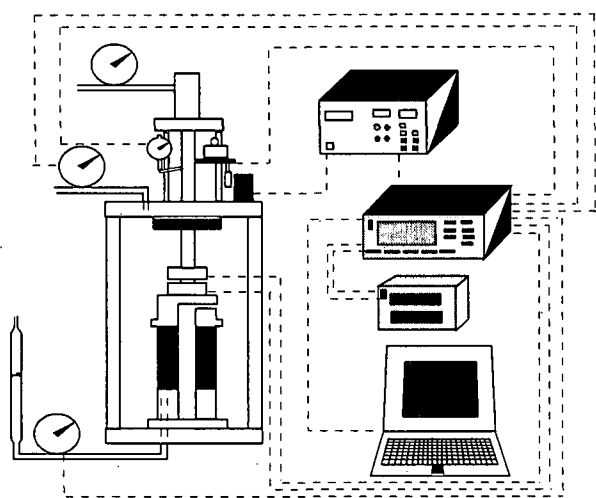


図 2. 試験装置システム図

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。試料の物理的性質は表 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 1μm 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。

中空ねじりせん断試験装置では、ゴムスリーブの張力がせん断応力測定データに対して大きく影響しているという問題点がある。ここでは、ゴムスリーブ張力補正の方法として、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とし、ゴムスリーブがねじれることなく試験ができるように試験器を改良した。ペDESTALの外周部を回転させる機械的構造が図 1 に示されている。

測定データとして垂直圧、垂直変位、トルク、回

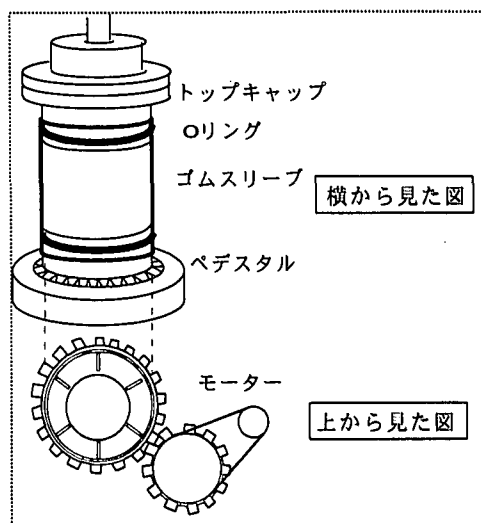


図 1. ペDESTALの構造

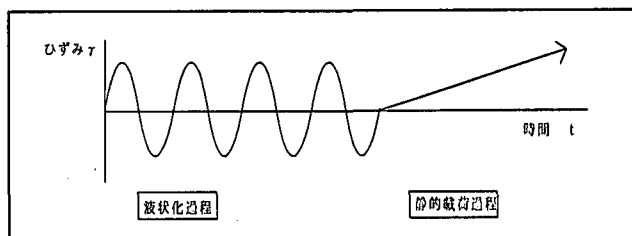


図 3. 載荷過程模式図

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した。試験のシステム図を図 2 に示す。

## (2) 実験方法

以下に実験方法を簡単に記す。

1) 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一定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。

2) 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。

3) 融解後に負圧を拘束圧に置換し、CO<sub>2</sub> で供試体内部の空気を入れかえた後、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

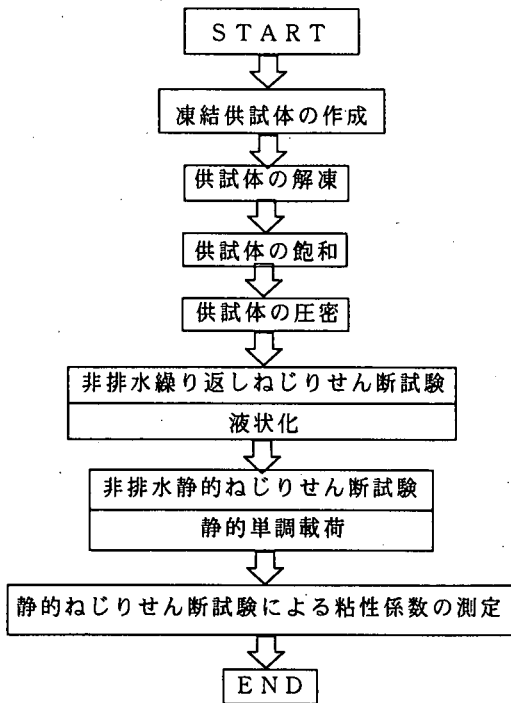


図4. 実験方法フローチャート

以上とした。

4)所定の拘束圧をかけて等方圧密を行い垂直変位と体積変化を測定した。

5)非排水繰り返しせん断試験を行うことにより、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。

6)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3に、実験方法のフローチャートを図4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。

### (3) 実験条件

実験条件のパラメータとしてせん断ひずみ速度、拘束圧、またペDESTAL回転によるゴムスリーブ張力補正の比較検討を行うためペDESTAL回転の有無とブランク試験を実験条件に加えた。供試体の相対密度はすべての試験で40%を用いて行なわれた。今回用いた実験条件を表2に示す。ここで試験は再現

表2. 実験条件

試料	拘束圧 (MPa)	ひずみ速度 (%/min)	回転補正
豊浦標準砂	0.05	10	○
	0.1	20	
	0.2	30	
水	×	30	×
ダミー供試体	0.1	30	×
ダミー供試体	0.1	30	○
ダミー供試体のみ	×	30	×

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。

表2にある水というのは砂試料を使用せずに脱気水のみをゴムスリーブ内に充填させた状態でのブランク試験である。ダミー供試体はゴム製で、寸法は試験で用いているものと同じあり、試験方法は液状化過程の繰り返しねじりせん断荷重を省略した以外は砂試料を用いたときと同様の手順で行われた。また、ダミー供試体のみというのはゴムスリーブとメンブレンフィルターシートを装着せずに純粋にゴム製のダミー供試体をねじりせん断させた実験である。したがって水とダミー供試体のみの実験条件に関しては、拘束圧を荷重できないため×で表している。

ペ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ケースは回転補正の欄で○で表した。

拘束圧は0.05, 0.1, 0.2MPaを用い、ひずみ速度は10,20,30%/minと設定した。それぞれ3種類ずつの実験条件で試験を行っているので計9個の実験条件となる。

### 3. 実験結果および考察

(1) ペDESTAL外周部回転に伴うゴムスリーブ張力補正の検討

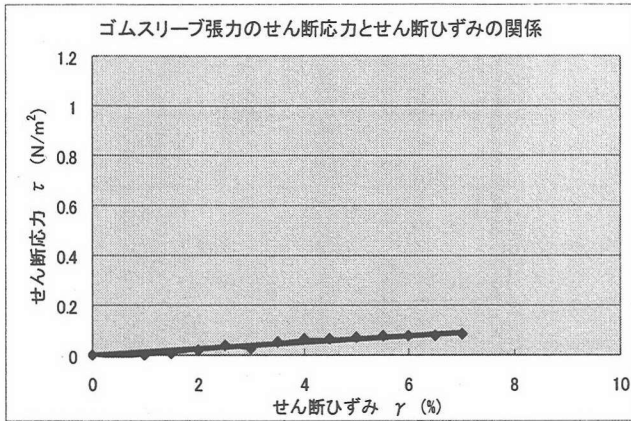


図 5. ダミー供試体を用いたブランク試験によるゴムスリーブ張力

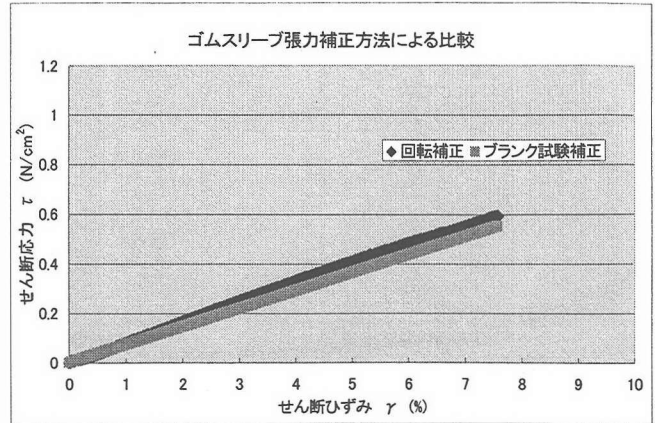


図 6. ダミー供試体での補正方法比較図

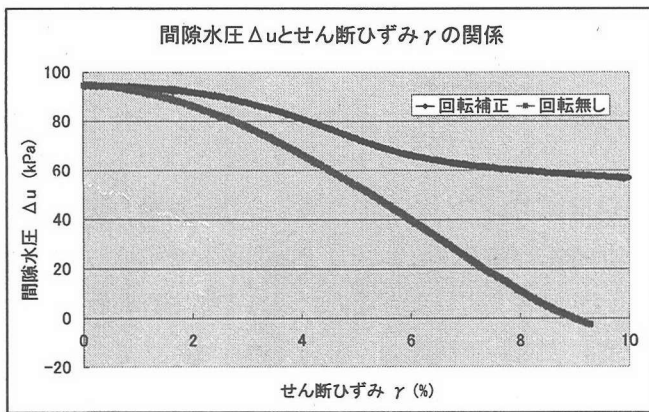


図 7. ペDESTAL回転の有無による実験結果の比較

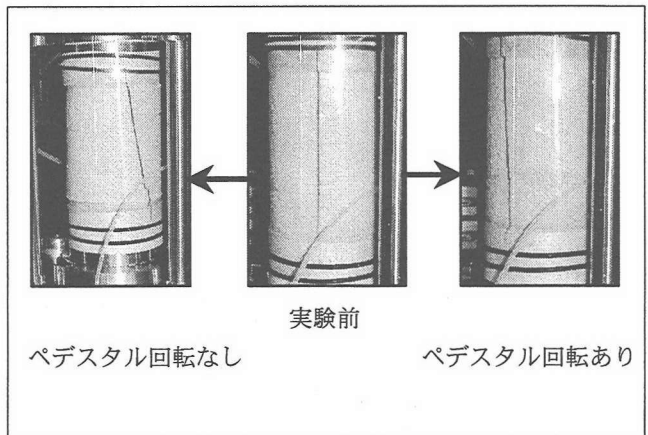


図 8. ペDESTAL回転の有無による実験後の供試体の比較

ダミー供試体のみをせん断した実験と、ダミー供試体をペDESTAL外周部の回転なしでせん断した実験の、せん断応力とせん断ひずみの関係図において各値の差をとって表したものが図5である。これがダミー供試体によるブランク試験から求めたゴムスリーブの張力に対応しており、図よりせん断応力がせん断ひずみに対して比例関係にあることがわかる。

ダミー供試体をペDESTAL回転がある状態で実験した結果が図6に示されている。ここでダミー供試体を用いたブランク試験により得られた結果と比較することで、今回のゴムスリーブの張力補正方法について検討すると、ほぼグラフは重なっており、両

方の補正方法が同様の値になることがわかった。これにより、ペDESTALの外周部を回転させることによってゴムスリーブ張力の影響を取り除くことができるということがわかった。

図7は拘束圧0.1MPa、ひずみ速度30%/minの同じ実験条件でペDESTAL外周部を回転させる点のみ異なった、回転ありと回転なしの静的せん断試験結果の間隙水圧とせん断ひずみの関係をそれぞれ表したグラフである。ゴムスリーブ張力に関する実験ではお互いの値に差は見られなかったが、実際の飽和砂試料を用いた試験では結果に大きな差が現れた。回転ありの実験結果では間隙水圧は初めほぼ横軸に対して水平であり、途中からゆるやかに減少していく。

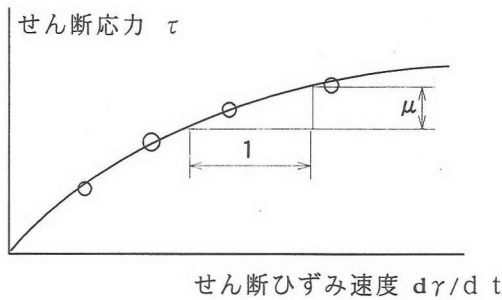


図9. 粘性係数  $\mu$  の模式図

回転なしの実験結果ではせん断を始めると同時に間隙水圧が減少し、かなり急な傾きで下降しながら最終的に負の値まで達している。既往の研究では液状化土のせん断抵抗は初め微小抵抗が続き、あるひずみ以上になると剛性が回復して抵抗が増加することが指摘されている。このことから、供試体内部の間隙水圧の変化に注目するとせん断初期より急激に下がって負の値になることは考えにくく、回転ありの結果の方がより妥当な結果と言える。

次に回転の有無によって実験結果に差がでる原因を考察する。図8に示されるように実験後の供試体の様子を観察すると、回転ありのケースでは実験前と実験後で供試体の様子は外見上変化がほとんど見られないが、回転なしのケースではゴムスリーブのねじれにより供試体が側面部分において変形してしまっているのがわかる。このようなゴムスリーブのねじれによる外周部の変形が供試体内の間隙水圧に変化をもたらしていると考えられるので、ペDESTAL外周部の回転による実験結果の方がより妥当な値であると言える。

表3. 粘性係数

拘束圧 (MPa)	粘性係数(N·sec/cm <sup>2</sup> )		
	1	3	5
0.05	1.8	4.8	9.6
0.1	2.4	9	18
0.2	3.6	11.4	21.6

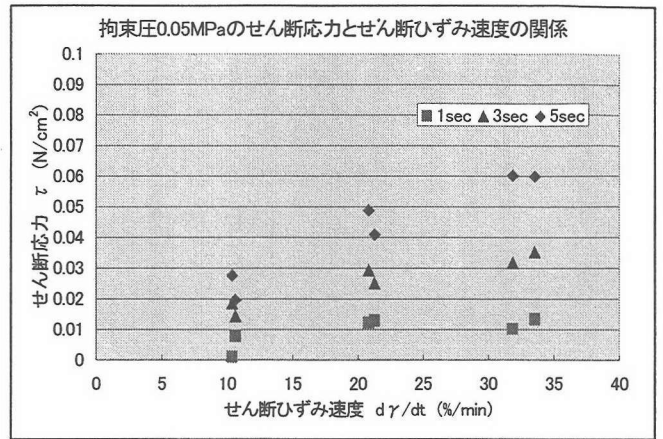


図10. せん断応力とせん断ひずみ速度の関係

## (2) 液状化土の粘性係数の検討

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9はそれを模式的に説明したものである。

今回求める液状化土のみかけの粘性係数はすべてペDESTAL外周部を回転させてゴムスリーブ張力を補正した実験結果から求めた。

粘性係数は以下の手順で求めた。静的せん断開始から所定の時間(1, 3, 5sec)経過時の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10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。各拘束圧で求められた粘性係数を表3に示す。

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。今回求めた粘性

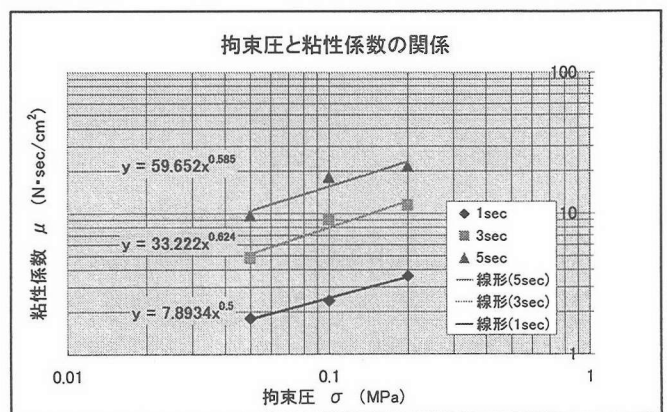


図11. 粘性係数と拘束圧の関係

係数と拘束圧の関係を示したものが図 11 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った。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言え、累乗指数の値は 0.5 や 0.6 である。さらに、粘性係数は液状化後の時間経過とともに増大する。

これにより粘性係数と液状化後の経過時間の関係

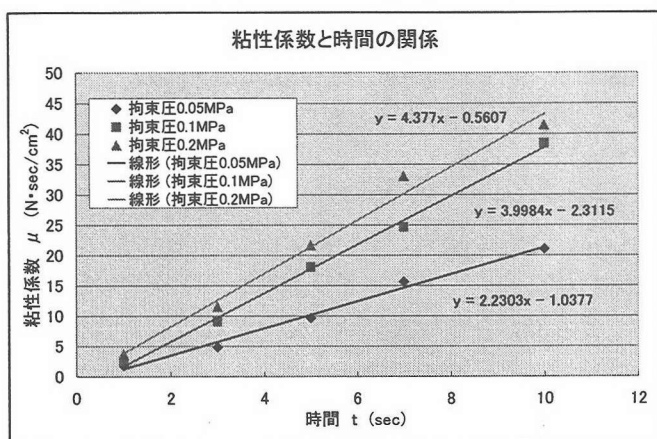


図 12. 粘性係数と時間の関係

を表したグラフが図 12 である。このグラフより粘性係数が液状化後の経過時間に対して比例している、拘束圧が大きいくほど傾きも大きくなっていることがわかった。

#### 4. まとめ

- (1) 中空ねじり試験時のペDESTAL外周部の回転によるゴムスリーブの張力補正が、ブランク試験によるものより有効である。
- (2) 液状化土の見かけの粘性係数は、拘束圧依存性を持つことが言える。
- (3) 液状化土の見かけの粘性係数は液状化後の経過時間に対して比例している。

謝辞: 本研究は平成 13 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。

#### 参考文献

1) 濱田政則, 河野暁, 那須太郎, 柳瀬和俊: 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 1 回構造物の破壊現象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