

時間係数を用いた液状化土の粘性評価について

川村淳¹・伊藤健²・塩津洋介³・赤木寛一⁴

¹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)

²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)

³早稲田大学学生 理工学部社会環境工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保3丁目4-1)

⁴工博 早稲田大学教授 理工学部社会環境工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保3丁目4-1)

Earthquakes have induced liquefaction of saturated loose sand. In the Hanshin-Awaji earthquake of 1995, revetments 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. The results of model tests are employed to point out that liquefied sand behaves like a viscous fluid. In this study, the shear resistance of liquefied sand was measured with a hollow cylindrical torsion shear test. As a key parameter which evaluates a variation of viscous coefficient after the liquefaction, the consolidation time factor is adopted in order to consider the height of specimen and the sand properties.

Key Words : Fully saturated sand , liquefaction , torsion , lateral flow , time factor

1. 目的

地震時の地盤災害の例として地盤の液状化現象と側方流動が1964年の新潟地震以来問題になっている。地震動による繰り返し荷重を受けたゆるい層の粒子の配列は、より安定的になろうとし、負のダイレイタンス特性により収縮しようとする。しかし、非排水状態にある飽和砂のように体積が一定であるならば、これが間隙水圧の上昇に転化されることになる。従って砂層を支えるために上昇し、累積した間隙水圧に伴って有効応力が減少し、せん断抵抗を失った粒子間の噛みあわせが外れることとなる。結果として砂粒子は間隙水に浮遊した状態になり泥水のようなになる。液状化現象とはこ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。

本研究においては昨年度既に1995年に発生した阪神淡路大震災のデータを用い、パラメータとして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い90%の精度で変位量の値を求めることに成功している。しかし実験による試料が一種類だけであったこと、供試体高さが一条件だけであったため、液状化層厚や砂の種類に対する考察が不十分であった。

ここでは、三種類の試料を用い、供試体高さも二種類に変化させた中空ねじり試験を実施した。また、液状化土の粒子の噛み合いに関して、液状化土は液状化後に沈下を伴うため、本研究ではこの液状化後の沈下時における水の流れに注目することにした。すなわち、液状化後に生じる土粒子の沈降現象は、粒子の沈降に伴って上向きの浸透水流が同時に生じ、粒子に対して間隙水が上方に出ていくという観点から圧密と似通った現象であると考えた。

以上の考察をもとに、圧密理論の時間係数を用いて液状化土の粘性係数の回復現象の評価を行うことで、供試体高さ、砂の種類の違いに対応した粘性係数の回復評価を試みた。この結果をもとに、砂層の層厚や種類の異なる飽和砂地盤における側方流動シミュレーションを行うことができる。

2. 中空ねじりせん断試験の概要

(1) 試料の物理的特性

試料には豊浦標準砂，珪砂7号+8号混合砂(質量比1:3)，成田砂を用いて，高さ5cmまたは10cm，内径3cm，外径7cmの中空円筒形の供試体で実験を行った。試料の物理的特性は表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 μ 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に示したとおりである。試料は空中落下法により，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 供試体の密度

	土粒子密度(g/cm ³)	最大密度(g/cm ³)	最小密度(g/cm ³)
成田砂	2.66	1.49	1.098
豊浦標準砂	2.68	1.64	1.330
珪砂	2.63	1.55	1.157

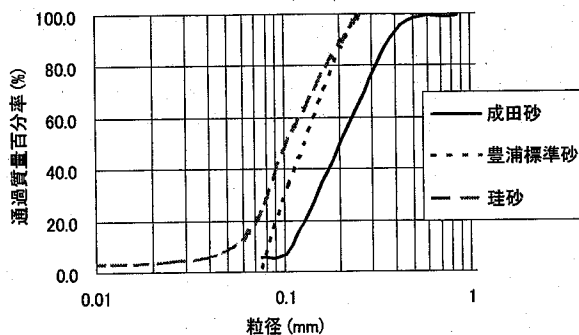


図-1 試料の粒径加積曲線

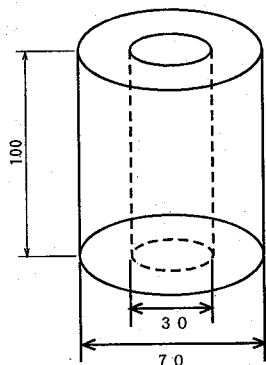


図-2 供試体形状(mm)

(2) 試験装置

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を用いて試験を行った。

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る。試験のシステム図は図3に示すとおりである。

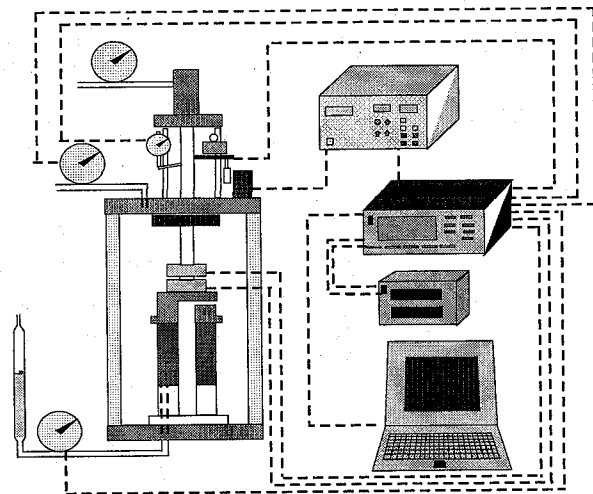


図-3 試験機概要

(3) 供試体作成方法

中空ねじりせん断試験では载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(2a)を用いて算出した。

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

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

$$\therefore D_r = \frac{\rho_{d \max} \left(\frac{m_s}{V} - \rho_{d \min} \right)}{\frac{m_s}{V} (\rho_{d \max} - \rho_{d \min})} \times 100 \quad (2a)$$

(4) 実験方法

以下に実験方法の手順を簡単に記す。

- 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目標値になるように作成し，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，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 载荷して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。
- 4) 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。

5)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。

6)液状化後の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。

このときの試験の载荷過程を図4に、実験手順のフローチャートを図5に示す。実験は以上の手順で行われ、データ整理により液状化土の見かけの粘性係数を算出した。

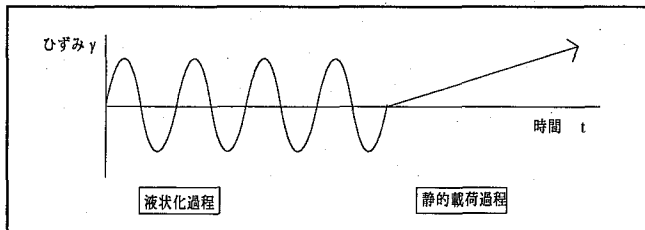


図-4 载荷過程

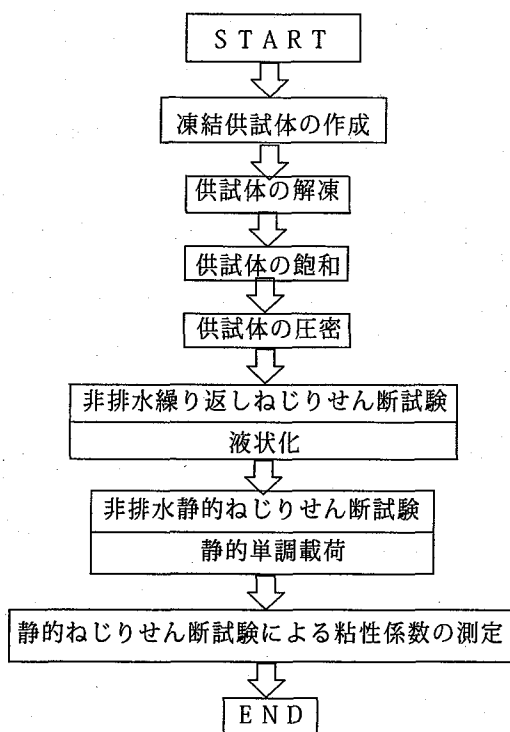


図-5 実験手順

(5) 実験条件

実験条件は、せん断ひずみ速度、試料の種類、供試体高さを変化させた。供試体の相対密度は、すべての試験で40%を目標値とした。今回用いた実験条件を表2に示す。

拘束圧は0.2MPa、ひずみ速度は10,20,30%/minの3ケース、供試体高さは5cm、10cmの2ケースとした。

表-2 実験条件

拘束圧(MPa)	せん断ひずみ速度(%/min)	砂の種類	高さ(cm)
0.2	10	珪砂	5,10
		豊浦	
		成田砂	
	20	珪砂	5,10
		豊浦	
		成田砂	
	30	珪砂	5,10
		豊浦	
		成田砂	

3. 供試体の高さと砂の種類が液状化土の粘性係数に及ぼす影響

(1) 圧密の時間係数導入の考え方

液状化後の土の挙動を沈下時の土粒子から見ると、間隙水は上方に移動し、液状化土は時間と共に粘性が回復していく。これは、一次元圧密に伴う土粒子と間隙水の相対的な移動と同等の現象である。ここでは、一次元圧密理論に用いられる時間係数を利用して、液状化後の経過時間に代わり時間係数に基づく液状化土の粘性係数の変化の評価を試みることにした。

時間係数を算出するため、本研究では供試体と同じ相対密度で定水位透水試験を行い、相対密度 $Dr=40\%$ の時の透水係数 k を算出した。また体積圧縮係数 m_v は 0.1MPa から 0.3MPa までの等方圧密時の、それぞれの供試体の体積ひずみを測定してもとめた。

(2) 時間係数の導入

T_v の算出方法

- 三種類の砂それぞれの供試体について、0.1MPa から 0.3MPa までの等方圧密時の体積変化を求め、体積ひずみ ε (%) を算出する

表-3 圧密時の体積変化量

	圧密前の体積 V (cm ³)	体積変化量 ΔV (cm ³)
成田砂	283	3.9
豊浦標準砂	306	0.7
珪砂	296	2.4

- 体積ひずみから $m_v = (\varepsilon/100)/\Delta P$ より体積圧縮係数 m_v を算出する

表-4 体積圧縮係数

	増加圧力 ΔP (MPa)	体積圧縮係数 m_v (1/MPa)
成田砂	0.2	0.0688
豊浦標準砂	0.2	0.0114
珪砂	0.2	0.0405

- 相対密度 40% で行った定水位透水試験よりもとめた透水係数 k と先ほどの計算で求めた体積圧縮係数 m_v より対応する圧密係数 $c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w}$ を算出する

表-5 透水係数

	15°Cに対する透水係数 $k_{15}(\text{cm/s})$
成田砂	0.139
豊浦標準砂	0.143
珪砂	0.128

表-6 圧密係数

	水の単位体積重量 $\gamma_w(\text{kN/m}^3)$	圧密係数 $C_v(\text{cm}^2/\text{s})$
成田砂	9.81	20157
豊浦標準砂	9.81	124937
珪砂	9.81	31696

・液状化後の経過時間 t に対応する時間係数

$$T_v = \frac{c_v \times t}{H^2} \text{ を、それぞれ算出する。}$$

(3) 供試体の高さが液状化土の粘性に及ぼす影響

図-6に珪砂の供試体の高さを変えた二つの実験結果を示す。図より横軸に液状化後の経過時間 t をとり整理した場合は、高さ5cmの方が早くせん断応力が増加し、粘性の回復が速いことが分かる。

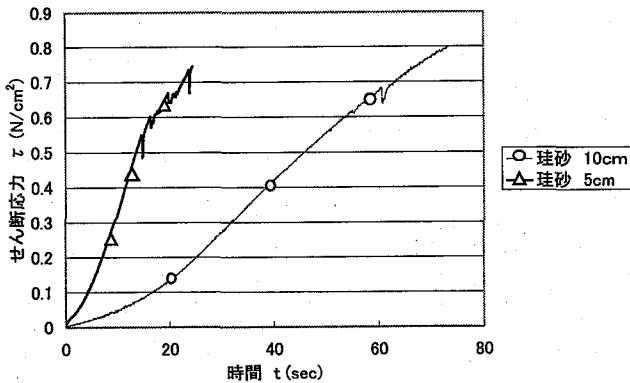


図-6 拘束圧 0.2MPa せん断ひずみ速度 30%/min の $\tau-t$ 図

同じ実験結果について、前述の計算から求めた時間係数 T_v を横軸にとってグラフを作成したものを図-7に示す。図-7では高さによる違いはあまり見られず、粘性の回復は経過時間ではなく時間係数に支配されているものであることがわかる。

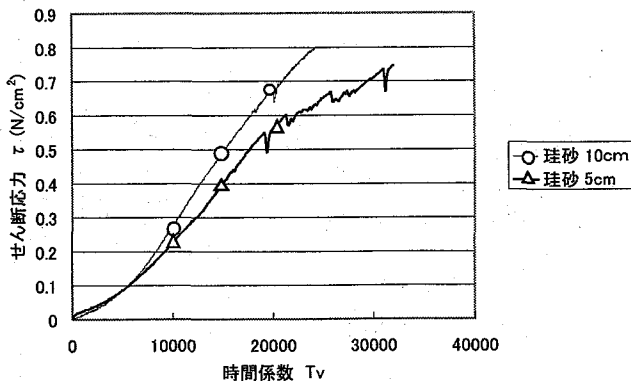


図-7 拘束圧 0.2MPa せん断ひずみ速度 30%/min の $\tau-T_v$ 図

(4) 砂の種類が液状化土の粘性に及ぼす影響

図-8は異なる試料から作成された高さ10cmの供試体による同条件の試験結果である。時間を横軸にとったグラフでは豊浦標準砂、珪砂、成田砂の順にせん断応力が増加し粘性が回復していることが分かる。これは、表-6の C_v の順であり、液状化土の粘性回復は試料の圧密係数 C_v の影響を受けていると推定される。

C_v は透水係数に比例し、体積圧縮係数に反比例するため、透水性が大きく圧縮性が小さいと大きな値になり、沈下は早く進み粘性の回復も早くなる。

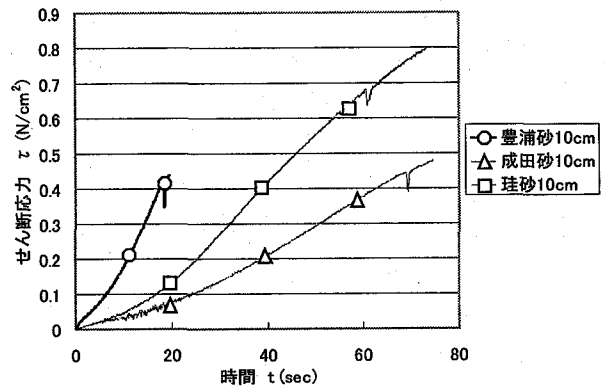


図-8 三種類の試料の $\tau-t$ 図(10cm)

ここで図-8のグラフの横軸を時間係数で書き直すと、図-7よりばらつきは大きいですが、試料によらずほぼ同じグラフになることがわかり、異なる試料を用いた際にも時間係数を利用した評価方法が有効であることがわかる。

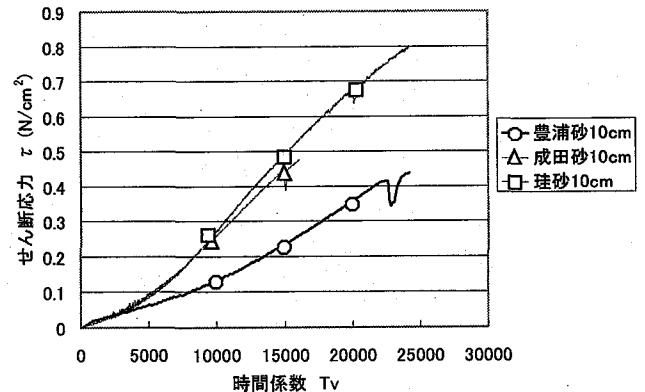


図-9 三種類の試料の $\tau-T_v$ 図(10cm)

図-10, 11は図-8, 9と同様に高さ5cmの供試体に対し異なる試料を同条件で実験を行った結果であるが、10cmの供試体と類似した結果を得ることができた。

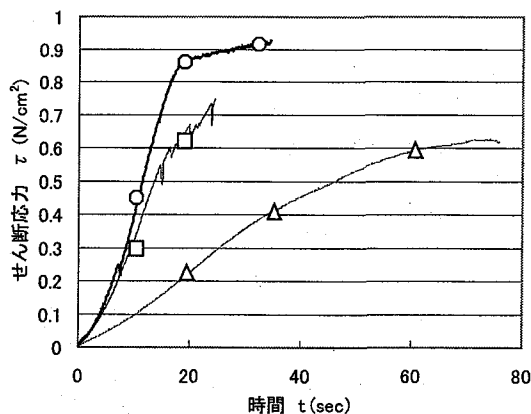


図-10 三種類の試料の $\tau-t$ 図(5cm)

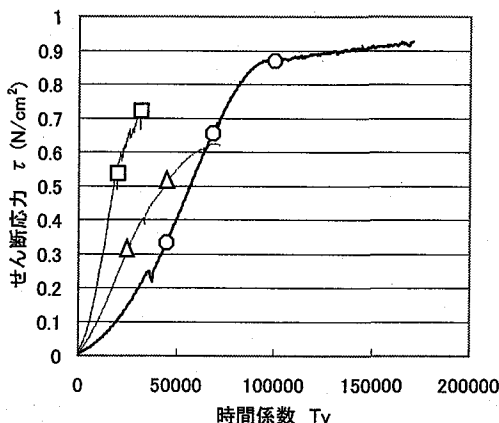


図-11 三種類の試料の $\tau-T_v$ 図(5cm)

4. 見かけの時間係数を用いた液状化土の粘性評価

(1) 見かけの粘性係数算出方法

液状化土の見かけ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、それを模式的に示したものである。

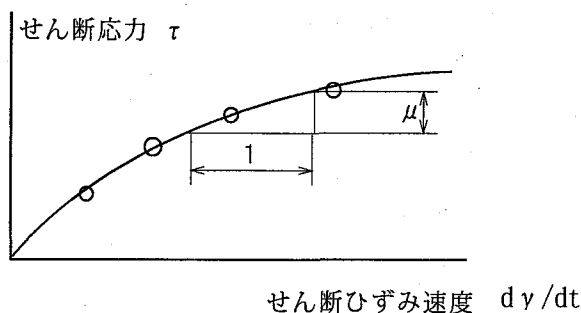


図 12 見かけの粘性係数算出方法

見かけの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対応する時間係数($T_v=1000$, 3000 , 5000 , 10000)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。その結果

が図-13 から図-16 である。このプロットの傾きが液状化土の見かけの粘性係数となる。この作業で求められた見かけの粘性係数をそれぞれ表-7 に示す。

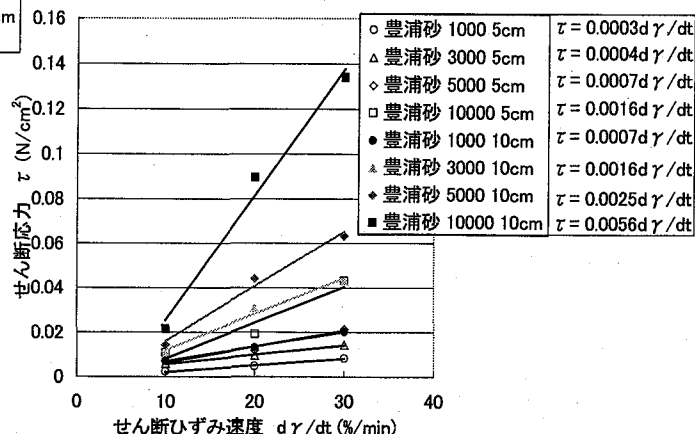


図-13 豊浦標準砂における見かけの粘性係数算出

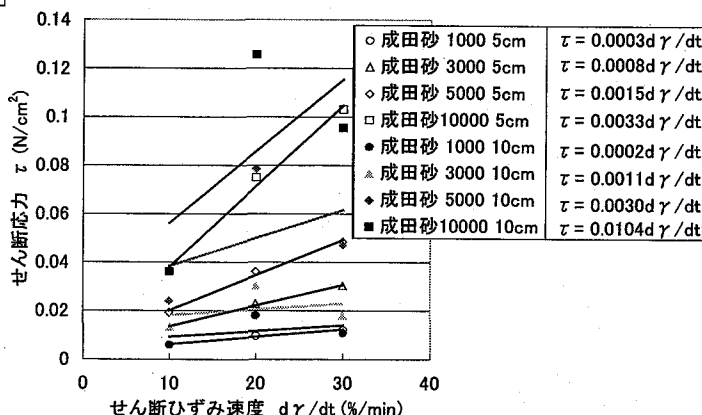


図-14 成田砂における見かけの粘性係数算出

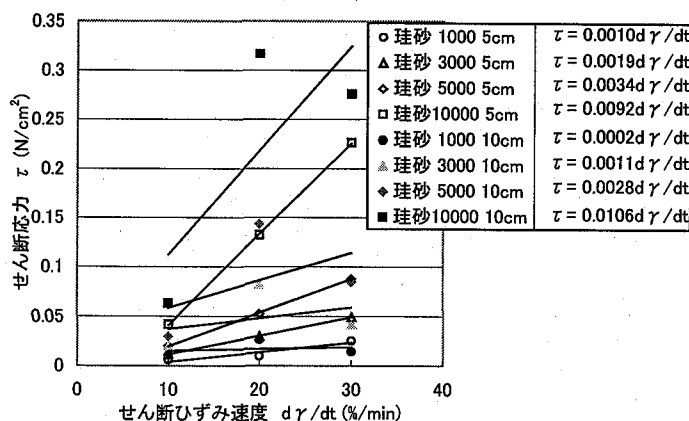


図-15 珪砂における見かけの粘性係数算出

表-7 粘性係数

	豊浦標準砂		成田砂		珪砂	
	時間係数	粘性係数	時間係数	粘性係数	時間係数	粘性係数
10cm	1000	4.2	1000	1.2	1000	1.2
	3000	9.6	3000	6.6	3000	6.6
	5000	15	5000	18	5000	16.8
	10000	33.6	10000	62.4	10000	63.6
5cm	1000	1.8	1000	1.8	1000	6
	3000	2.4	3000	4.8	3000	11.4
	5000	4.2	5000	9	5000	20.4
	10000	9.6	10000	19.8	10000	55.2

図-17 に、表 7 で得られた粘性係数と時間係数の関係を示す。

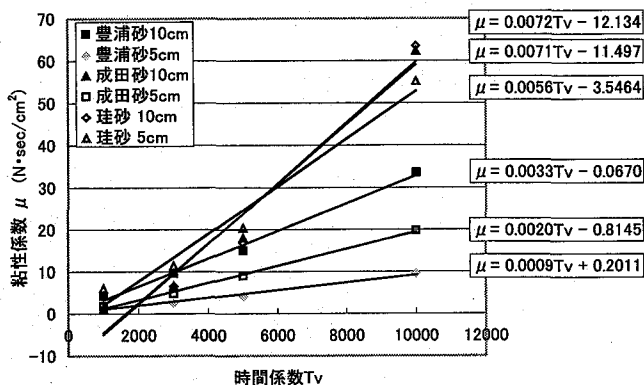


図-17 μ - T_v 図

(2) $\mu = \mu_0 + k \cdot T_v$ の近似が成り立つ適用範囲

液状化土は粒子の沈降にともなって、粒子が噛み合うことにより剛性が回復する。剛性が回復した後はせん断応力は一定の値をとるため、図-17 に示すような $\mu = \mu_0 + k \cdot T_v$ の一次関数で表すことはできなくなる。本研究では全ての条件において剛性が回復する前のデータを用いている。

また、図-17 に示すように試料の違い、供試体高さの違いにより、また $T_v = 10000$ 程度になると、 μ と T_v の関係は異なっていて必ずしも一義的に決まっていない。しかしながら、 T_v が 5000 以下の領域に着目すると、そのばらつきは比較的小さいので $\mu = \mu_0 + k T_v$ で近似的にあらわすことは可能と言える。

また、 T_v の大きさには k 、 m_v の大きさが直接関係している。 k 、 m_v の値を適切に評価することも重要である。

5. まとめ

液状化後の経過時間の代わりに時間係数を用いることによって、供試体の高さの違いや異なる試料にを考慮したより一般的な液状化土の粘性回復の評価方法を適用範囲は限定されるが提案することができた。これにより、層厚や異なる土の種類に対して、液状化時の側方流動シミュレーションに有効なデータを得ることができる。

6. 今後の課題

適用範囲を明らかにした上でグラフより求められた式で層厚や、試料の特性を考慮し、シミュレーションを行っていくことが今後の課題である。

データ数が少なかったため異なる拘束圧に対しての式を得ることができなかったが、一次近似の切片 μ_0 、傾き k には拘束圧の影響があるものと予想される。拘束圧の違いを考慮できる液状化土の粘性係数回復モデルを求めていく予定である。

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：液状化土の粘性評価とそれに基づく側方流動シミュレーション，第 4 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. 241-246，2003 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