

液状化土の流動特性に関する研究

濱田 政則¹・島村 一訓²・柳瀬 和俊³・中村 正樹³・田中 淳寛³

¹工博 早稲田大学 理工学部 土木工学科 教授 (〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1)

²東京ガス(株) 導管部 (〒105-0022 東京都港区海岸 1-5-20)

³早稲田大学大学院 理工学研究科 (〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1)

The fluid properties of the liquefied soil during its flow is investigated by flow tests of model ground under 1G and centrifuge conditions as well as by hollow-cylindrical shear tests of liquefied soil. It was found that the liquefied soil behaves as a pseudo-plastic flow and that the viscosity of the liquefied soil is in proportion with the square root of the total overburden pressure cubed.

Key Words: Liquefaction, Liquefaction-induced ground displacement, Viscosity

1. はじめに

側方流動の発生メカニズムについては、①液状化地盤を固体ととらえ、地盤の剛性が著しく低下することによって大変位が生ずるとの考え方、②地盤の側方流動が液状化土の流体的振舞いによって生ずるとの考え方、③液状化地盤中に形成された水膜上を上部の地盤が滑り、大変位が生ずるとの考え方、などが提案されている。濱田らは、既往地震における側方流動事例の分析¹⁾および流動中の地盤から基礎杭に作用する外力に関する模型実験の結果に基づき、数mもの地盤変位が液状化土の流体による挙動によって生じているとの立場から液状化土の流動特性に関する研究を行ってきた。

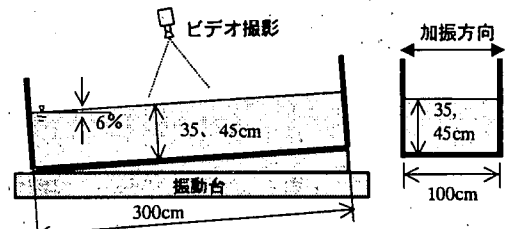
本論文は、重力場と遠心载荷場での模型地盤の流動実験および液状化土の中空ねじり試験により液状化土の流動特性を明らかにして、側方流動による地盤変位予測のための基本的な知見を得ようとするものである。

2. 重力場における模型地盤の流動実験

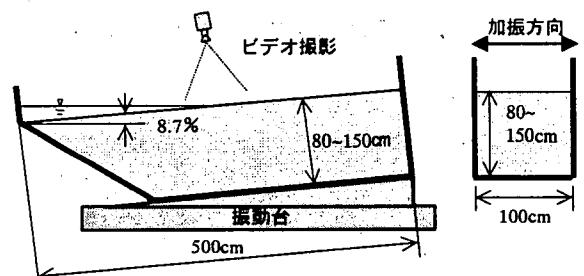
(1) 実験の方法

重力場の実験に用いた土槽および模型地盤の概要を図1に示す。図1(a)の模型地盤Aによる模型地盤は流動方向の長さ3.0m、幅1.0m、地盤厚は35cmおよび45cmである。図1(b)の模型地盤Bによる模型地盤は流動方向の長さ5.0m、幅1.0m、地盤厚は80~150cmである。いずれの土槽も剛土槽である。また、土槽は模型地盤Aでは6.0%、模型地盤Bでは8.7%の勾配で振動台に固定されている。模型地盤Aの地盤材料は遠州灘の浜砂、模型地盤Bはケイ砂5、6号であり、それぞれの平均粒径および均等係数を表1に、また粒径加積曲線を図2に示す。図2には、後述する

中空ねじり試験に用いた新潟市の砂の粒度分布も示している。後述の中空ねじり試験の供試体を含め模型地盤の相対密度の目標値を40%としたが、模型地盤Bの相対密度は35%前後とやや緩詰めである。



(a)地盤層厚35、45cmの実験(模型地盤A)



(b)地盤層厚80~150cmの実験(模型地盤B)

図1 重力場の流動実験に用いた土槽及び模型地盤

表1 重力場での流動実験の条件

| 実験名 | 模型地盤層厚 (cm) | 実験回数 | 相対密度 (%) | 平均粒径 (mm) | 均等係数 | 地表面勾配 (%) | 加振加速度 (cm/s ²) | 振動数 (1/s) | 加振時間 (s) |
|-----|-------------|------|----------|-----------|------|-----------|----------------------------|-----------|----------|
| A1 | 34~35 | 4 | 39~41 | 0.19 | 2.1 | 6.0 | 360~400 | 5 | 4 |
| A2 | 45~46 | 3 | 39~40 | 0.19 | 2.1 | 6.0 | 380~400 | 5 | 4 |
| B1 | 84 | 1 | 34 | 0.40 | 2.4 | 8.7 | 600 | 6 | 6 |
| B2 | 100 | 1 | 33 | 0.40 | 2.4 | 8.7 | 590 | 6 | 6 |
| B3 | 119 | 1 | 33 | 0.40 | 2.4 | 8.7 | 650 | 6 | 6 |
| B4 | 151 | 1 | 35 | 0.40 | 2.4 | 8.7 | 620 | 6 | 6 |

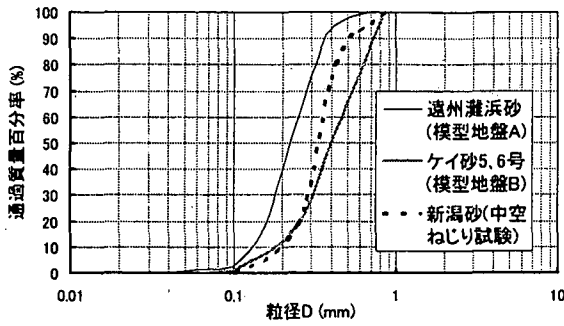


図2 重力場の実験に用いた砂の粒径加積曲線

傾斜した模型地盤を流動直角方向に表1に示す振幅と振動数をもつ正弦波加速度により加振して液状化させ、模型地盤下方への流動を生じさせた。その際土槽中央部地表面に設置したマーカーの変位をビデオカメラによって撮影した。

(2) 液状化土の粘性係数の算定

図3に模型地盤Aを用いた実験による地盤厚45 cmの場合の地表面マーカーの変位と速度の時刻歴の例を示す。図には流動の初期の部分のみを示している。地表面速度は変位を原点を通る3次関数で補間し、これを微分することにより求めている。3次関数による変位の補間は実験値と良好な一致を示している。

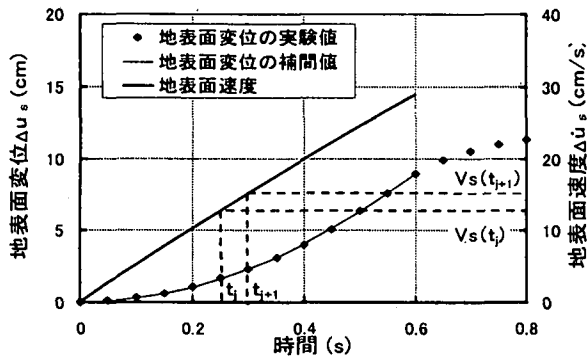


図3 重力場の流動実験の事例(層厚45cm)

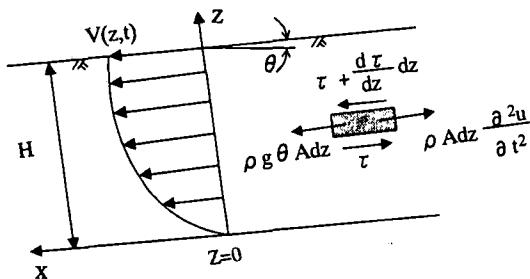


図4 1次元の粘性流体の流れ

土槽の中央部の地盤の動きを図4に示すような1次元の粘性流体の流れとすれば地表面(z=H)の時刻tにおける速度 $V_s(t)$ について式(1)が得られる。

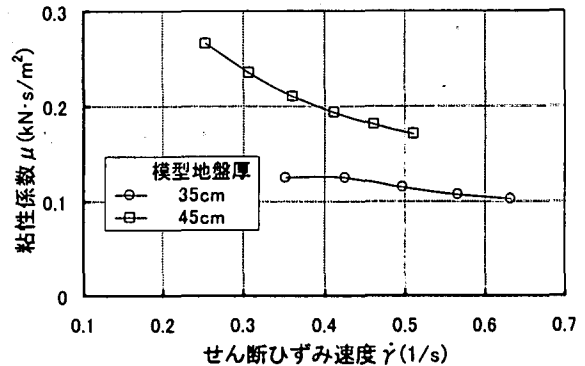
$$V_s(t) = C \exp \left\{ - \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \frac{\mu}{\rho} t \right\} + 16 \frac{H^2}{\pi^3} \frac{\rho g}{\mu} \theta \quad (1)$$

ここに z は深さ、 μ は粘性係数、 ρ, θ, g はそれぞれ液状化土の密度、地表面勾配および重力加速度であ

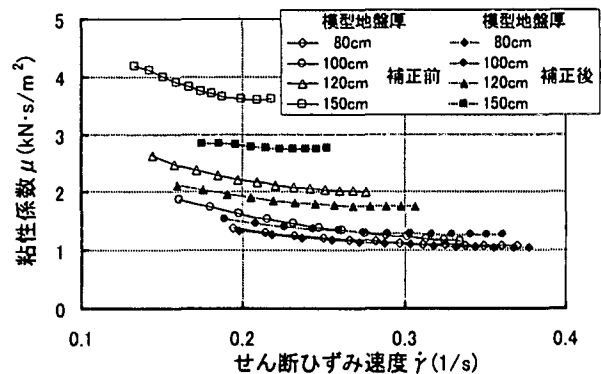
り、 C は初期条件により定まる定数である。 $t=t_j, t=t_{j+1}$ の速度 $V_s(t)$ をそれぞれ $V_s(t_j), V_s(t_{j+1})$ とすれば

$$V_s(t_{j+1}) = V_s(t_j) \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \frac{\mu}{\rho} (t_{j+1} - t_j) \right\} + 16 \frac{H^2}{\pi^3} \frac{\rho g}{\mu} \theta \cdot \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\pi}{2H} \right)^2 \frac{\mu}{\rho} (t_{j+1} - t_j) \right\} \right] \quad (2)$$

が得られる。実験によって得られた t_j, t_{j+1} のそれぞれの時刻の地表面速度 $V_s(t_j), V_s(t_{j+1})$ を用い上式より $t_j \sim t_{j+1}$ 間の粘性係数 μ を算定する。このようにして求めた粘性係数と同一時間内でのせん断ひずみ速度との関係を図6に示す。



(a) 模型地盤Aによる実験



(b) 模型地盤Bによる実験

図6 重力場の流動実験によって同定された粘性係数

図6(b)において“補正後”と示した粘性係数は模型地盤Bにおいて有限である流動方向の長さを無限として1次元粘性体として取り扱うための補正を行ったもので、これについては後述する。

図6に示すように、模型地盤A,Bの結果とも、液状化土の粘性係数はせん断ひずみ速度の増大に伴い減少しており、液状化土が非線型の性質を有する粘性流体であることを示している。一般に粘性係数がせん断ひずみ速度の増加とともに減少するような流体は擬塑性流体と呼ばれ、せん断応力 τ とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ との関係は図7のように示され、この関係の一つの定式化として

$$\tau = \frac{\mu_0 \dot{\gamma}}{1 + \dot{\gamma} / \dot{\gamma}_c} + \mu_\infty \dot{\gamma} \quad (3)$$

などが用いられている。上式において μ_0 は初期粘性係数、 μ_∞ はせん断ひずみ速度が無限大での粘性係数である。また $\dot{\gamma}_y$ はせん断ひずみ速度の単位を有し、非線型性の度合を表すパラメータである。

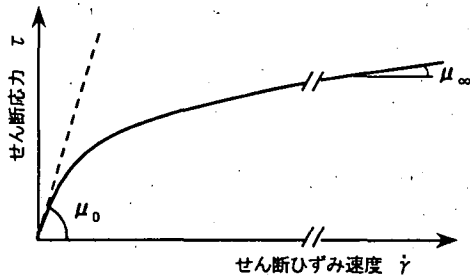


図7 擬塑性流体におけるせん断応力～せん断ひずみ速度の関係

図6の結果によれば実験によって得られた粘性係数は模型地盤の層厚の増大によって増加していることが分かる。これは液状化土の流動特性が液状化層の厚さによって変化する非線型性を有していることを示唆している。このことは次に述べる液状化土の流動に関する相似則を考えることで説明が可能となる。

(4) 液状化土の流動の相似則に関する考察

図8に示すような2つの層厚 H_1, H_2 をもつ地表面勾配が同一の傾斜地盤の1次元の流動を考える。層厚の比を $\lambda = H_2/H_1$ とすれば幾何学的に相似な位置のせん断応力 τ_1 と τ_2 の比も

$$\tau_2/\tau_1 = (\mu_2 \dot{\gamma}_2)/(\mu_1 \dot{\gamma}_1) = \lambda \quad (4)$$

となる。

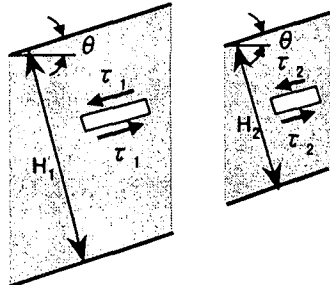


図8 流動の相似則の考察

ここで、 μ_1, μ_2 はそれぞれ地盤層厚 H_1, H_2 の場合の粘性係数、同じく $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2$ はせん断ひずみ速度である。一方2つの流動においてレイノルズ数が等しいと仮定すれば

$$\frac{\rho_1 V_1 H_1}{\mu_1} = \frac{\rho_2 V_2 H_2}{\mu_2} \quad (5)$$

上式で ρ_1, ρ_2 は密度、 V_1, V_2 は流動速度である。ここで流動速度の比は

$$V_2/V_1 = \lambda \cdot (\dot{\gamma}_2/\dot{\gamma}_1) \quad (6)$$

と表されるので、相似則を考慮することの結果として

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{1/2}, \frac{\mu_2}{\mu_1} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{3/2}, \frac{\dot{\gamma}_2}{\dot{\gamma}_1} = \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{-1/2} \quad (7)$$

が得られる。式(7)は層厚の異なる二つの液状化の流れにおいてレイノルズ数が一定に保たれていると仮定すれば流動速度、粘性係数およびせん断ひずみ速度がそれぞれ層厚の1/2乗、3/2乗、-1/2乗に比例することを示している。

液状化土のせん断応力とせん断ひずみ速度の関係を式(3)で表現するとすれば、粘性係数は

$$\frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \frac{\mu_0}{(1 + \dot{\gamma}/\dot{\gamma}_r)^2} + \mu_\infty \quad (8)$$

となる。上述の相似則によれば上式において、 μ_0, μ_∞ は幾何学比 λ の3/2乗に、また基準せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_r$ は λ の平方根の逆数に比例することになる。

層厚の異なる複数の実験において粘性係数を比較するためには、粘性係数を求めるせん断ひずみ速度も相似則に従った値でなければならない。すなわち式(8)の右辺の分数の分子の値は同一でなければならない。そこで層厚35cmの実験でのひずみ速度を $0.4^{1/3}$ として、層厚の異なるそれぞれの実験において相似則による等価なひずみ速度を求めれば、層厚45cm, 80cm, 100cm, 120cm, 150cmのそれぞれにおいて $0.35^{1/3}, 0.26^{1/3}, 0.24^{1/3}, 0.22^{1/3}, 0.19^{1/3}$ となる。図6に示した実験結果からこれらのひずみ速度の値における粘性係数を読み取り、液状化層厚に対してプロットした結果を図9に示す。模型地盤Bについては、流動方向の境界の影響を考慮して補正した値も併せて示している。

図中の破線および一点鎖線は模型地盤A, Bそれぞれの実験結果に対して粘性係数が液状化層厚の3/2乗に比例するとして引いたものである。これによれば、模型地盤A, Bそれぞれについて粘性係数が液状化層厚のほぼ3/2乗に比例していることが分かる。しかし、模型地盤Aによる粘性係数は模型地盤Bによる粘性係数に比較して小さめの値を与えている。このことの原因の一つとして、図2に示すように模型地盤Aの地盤材料の平均粒径は模型地盤Bのそれよりも小さいことが考えられる。

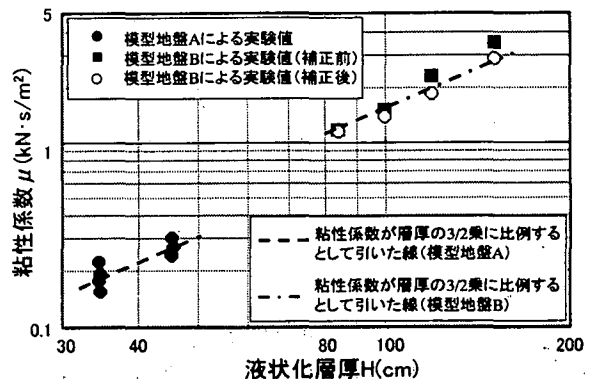


図9 粘性係数と液状化層厚の関係

(5) 1次元粘性流体として取扱うことの誤差に関する検討

前述したように、実験結果より粘性係数を推定するための式(2)は液状化土の流れを1次元粘性流体として求められたものである。模型地盤A,Bとも流動方向に固定境界を有しており実験結果より粘性係数を算定する場合この影響を検討しておかなければならない。

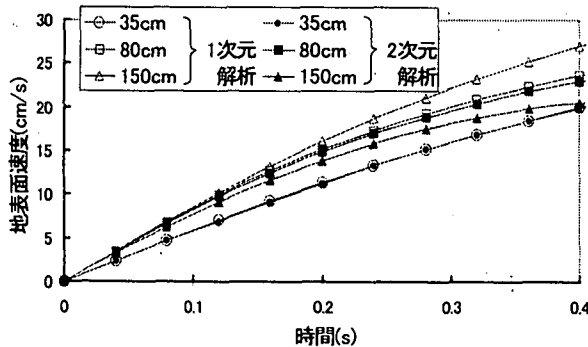


図10 流動方向の境界が流動速度に与える影響 (重力場の実験, 模型地盤 A,B)

図10は模型地盤A,Bのそれぞれについて流動方向の境界の存在を考慮した2次元流体解析と1次元解析による模型地盤中央の流動速度を比較したものである。この場合粘性係数は流動中一定すなわち線型粘性流体と仮定し、粘性係数の値は図9に示した実験値(補正前)を用いている。模型地盤Aでは同一実験条件で複数の粘性係数が得られているが、平均値を用いている。2次元流体解析では流体解析プログラム「PHOENICS」を用いている。

図10の結果によれば、模型地盤Aの層厚35cmの場合においては1次元解析と2次元解析でほとんど差がなく、模型地盤が流動方向に十分な長さを有していると判断することが出来る。しかしながら、模型地盤Bにおいては層厚が大きい場合には1次元解析と2次元解析では相当な差が見られ、模型地盤Bの流動方向の長さが十分でないことを示している。

そこで、模型地盤Bについて各時刻における1次元の流動速度に対する2次元の流動速度の比を算出し、その比を用いて実験によって得られた速度を各時刻で補正し、この値を用いて粘性係数を求めた。その結果を補正前の値と比較して図6に示す。また、前述した等価なせん断ひずみ、すなわち層厚80, 100, 120, 150 (cm)のそれぞれに対してせん断ひずみ速度を 0.261/s , 0.241/s , 0.221/s , 0.191/s とした場合の補正後の粘性係数を図9に補正前の値と併せて示す。

3. 遠心載荷場における模型地盤の流動実験

(1) 実験の方法

前述した液状化土の流動に関する相似則によれば、液状化土の粘性係数は液状化層の層厚の $3/2$ 乗に比例して増大することが示された。このことは、粘性係数が全鉛直応力の $3/2$ 乗に比例して増大すること

を示している。これを検証するため遠心載荷装置を用い、遠心重力を変化させ模型地盤の流動実験を行った。

図11に示す2種類の模型地盤を用いた。地盤材料は遠州灘の浜砂であり、重力場の流動実験における模型地盤Aと同一材料である。模型地盤Cは流動方向長さ70cm, 水平幅40cm, 模型地盤Dは同じく100cm, 40cmである。いずれの実験も固定土槽を用いている。液状化層厚はいずれの実験の土槽中央においても約20cmである。それぞれの実験における遠心載荷の条件および加振条件を併せて表2に示す。加振は流動方向と直角の水平方向に行っている。

土槽中央部の地表面のマーカの変位をビデオカメラおよび非接触式のレーザー変位計によって測定し、これを数値微分することにより地表面速度の時刻歴を求め、重力場の流動実験と同様式(2)によって粘性係数を算定する。

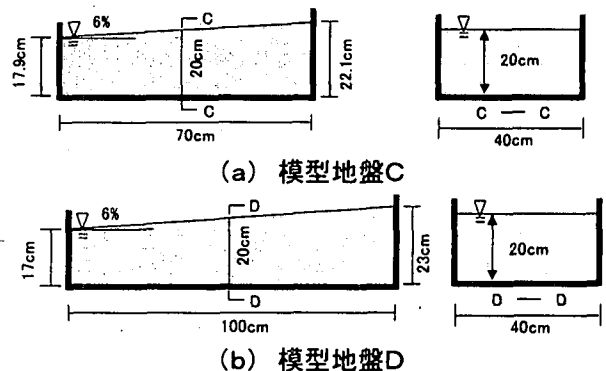


図11 遠心載荷場実験に用いた土槽及び模型地盤

表2 遠心載荷場での流動実験

| 実験名 | 模型地盤層厚(cm) | 遠心場(G) | 相対密度(%) | 平均粒径(mm) | 均等係数 | 加振加速度(cm/s^2) | 周波数(Hz) | 加振時間(s) |
|-----|------------|--------|---------|----------|------|--------------------------|---------|---------|
| C1 | 20 | 10 | 35 | 0.22 | 1.9 | 270 | 50 | 1.60 |
| C2 | 20 | 20 | 37 | 0.22 | 1.9 | 340 | 100 | 0.80 |
| C3 | 20 | 30 | 35 | 0.22 | 1.9 | 370 | 150 | 0.53 |
| D1 | 20 | 10 | 36 | 0.22 | 1.9 | 390 | 50 | 1.60 |
| D2 | 20 | 20 | 37 | 0.22 | 1.9 | 250 | 100 | 0.80 |
| D3 | 21 | 30 | 38 | 0.22 | 1.9 | 260 | 150 | 0.53 |
| D4 | 20 | 40 | 40 | 0.22 | 1.9 | 270 | 200 | 0.40 |

遠心載荷場における実験においても模型地盤中央の流れを1次元の粘性係数の流れとして取扱う。図11に示すように模型地盤の流動方向の長さは有限であり、1次元流体として取扱うためには重力場の実験と同様、実験によって得られた地表面の流動を境界の影響によって補正する必要がある。そこで模型地盤Bの実験において行った補正と同じ方法で速度の補正を行い、これをもとに粘性係数を算出した。

このようにして算定された粘性係数をせん断ひずみ速度に対してプロットした結果を図12に示す。いずれの実験においても粘性係数はせん断ひずみ速度の増加とともに減少してかつ一定値に漸近する傾向を見せており、重力場の実験と同様、液状化土が擬塑性流体としての特性を有していることが分かる。また、遠心載荷場の遠心重力が大きいほど粘性係数が増大していることが分かる。

前述の相似則によれば液状化層厚の異なった2種類の流動においてせん断ひずみ速度の比は液状化層

厚の比の平方根の逆数に比例することが示されている。このことは、せん断ひずみ速度が全鉛直応力の比の平方根の逆数に比例することを示唆している。そこで、10Gの遠心载荷場の実験でのせん断ひずみ速度を基準の値 $0.17^{1/3}$ とし、20G, 30G, 40Gの場合のせん断ひずみ速度を相似則に従ってそれぞれ $0.12^{1/3}$, $0.10^{1/3}$, $0.09^{1/3}$ として図12の結果より粘性係数を読み取り、全鉛直応力にたいしてプロットした結果を図13に示す。図中に示した直線は粘性係数が全鉛直応力の3/2乗に比例するとして最小2乗法により引いたものであるが、実験によって得られた粘性係数はほぼこの直線上にあり、前述の相似則が成立していることを示している。

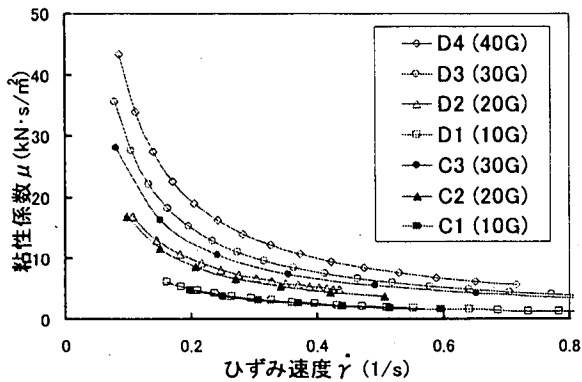


図12 遠心载荷場での流動実験による粘性係数

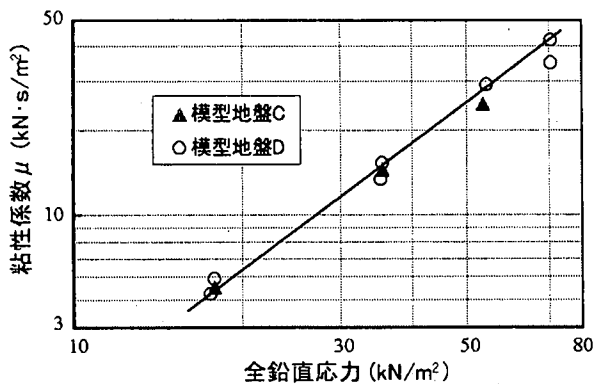


図13 遠心载荷場の流動実験による粘性係数と全鉛直応力との関係

4. 中空ねじり試験による粘性係数の推定

重力場および遠心载荷場での液状化土の流動実験によって液状化土が擬塑性流体としての性質を有し、かつその粘性係数が液状化層の厚さあるいは全鉛直応力の3/2乗に比例して増大することが示された。

中空ねじり試験に用いた供試体は高さ7.0cm, 外径7.0cm, 内径3.0cmのものであり、図14に示すような一定応力振幅の正弦波加振 (0.1Hz) の繰返しせん断応力によって液状化を生じさせた後、一方向に一定のせん断応力速度で载荷することによりせん断応力とせん断ひずみ速度の関係を求め、液状化土の粘性係数を測定した。本試験において液状化状態とは過剰間隙水圧が有効鉛直応力の95%以上に達した状態を意味している。一方向にせん断応力を载荷する直前の過剰間隙水圧比は表3に示す通りで0.96~

0.99の範囲である。

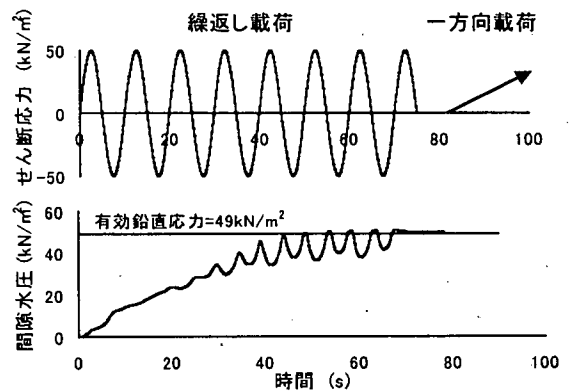


図14 中空ねじり試験における载荷方法

表3 中空ねじり試験の実験条件

| 実験ケース No. | 全鉛直応力 kN/m ² | 相対密度 % | 過剰間隙水圧比 |
|-----------|-------------------------|--------|---------|
| T1 | 49 | 42 | 0.97 |
| T2 | 49 | 44 | 0.99 |
| T3 | 49 | 42 | 0.97 |
| T4 | 49 | 43 | 0.96 |
| T5 | 98 | 42 | 0.98 |
| T6 | 98 | 41 | 0.98 |
| T7 | 196 | 45 | 0.99 |
| T8 | 196 | 48 | 0.98 |
| T9 | 196 | 43 | 0.97 |
| T10 | 196 | 45 | 0.96 |
| T11 | 196 | 46 | 0.97 |
| T12 | 196 | 45 | 0.96 |

中空ねじり試験の供試体の材料は新潟市川岸町で採取したものであり、平均粒径0.33mm, 均等係数1.69でその粒径加積曲線を図2に示す。表3に示すように全鉛直応力を49kN/m², 98kN/m², 196kN/m²の3種類とし、全鉛直応力が液状化土の粘性係数に与える影響を検討する。初期の水圧は静水圧で、供試体に作用させる鉛直応力と比較して著しく小さく、初期の有効鉛直応力は全鉛直応力にほぼ等しい。全水平応力は全鉛直応力の1/2としている。相対密度は重力場および遠心载荷場の流動実験と同様に40%前後を目標とした。

図15にせん断応力とせん断ひずみの時刻歴の例を示す。せん断応力は、別途実施したメンブレンと水のみ試験によって測定されたメンブレンによる抵抗分を差し引いた値である。せん断ひずみの時刻歴よりせん断ひずみ速度の時刻歴を求め、これをもとに得られたせん断応力とせん断ひずみ速度の関係の例を図16に示す。

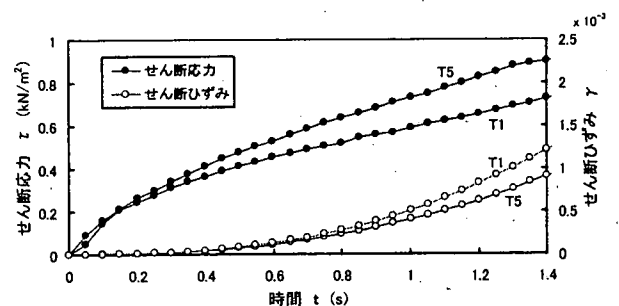


図15 中空ねじり試験によるせん断応力、せん断ひずみの時刻歴

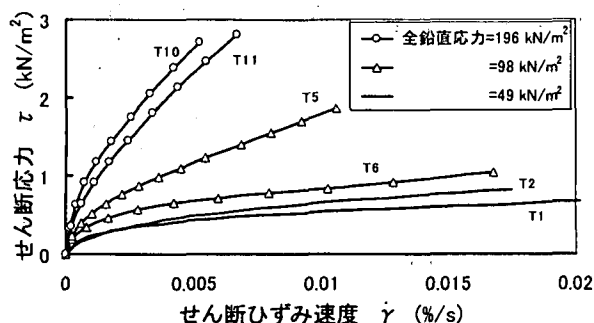


図16 中空ねじり試験によるせん断応力とせん断ひずみの関係

図16によればせん断ひずみ速度の増大とともに粘性係数が減少し、重力場および遠心载荷場の流動実験で示されたように液状化土が擬塑性流体の性質を持つことが分かる。また、せん断応力は全鉛直応力の増大によって増加しており、液状化土の粘性係数が全鉛直応力増加に伴って増大することが分かる。

全鉛直応力98kN/m²の場合のせん断ひずみ速度を0.2(%/s)とし、49kN/m²、196kN/m²の場合のせん断ひずみ速度を相似則に従ってそれぞれ0.28(%/s)、0.14(%/s)として、図16に例を示したせん断応力とせん断ひずみ速度の関係から接線粘性係数を読み取り、鉛直応力との関係を求めた。これを図17に●印で示す。図中の実線は粘性係数が鉛直応力の3/2乗に比例するとして最小2乗法で引いたものであるが、実験値は概ねこの直線上にあると考えられる。

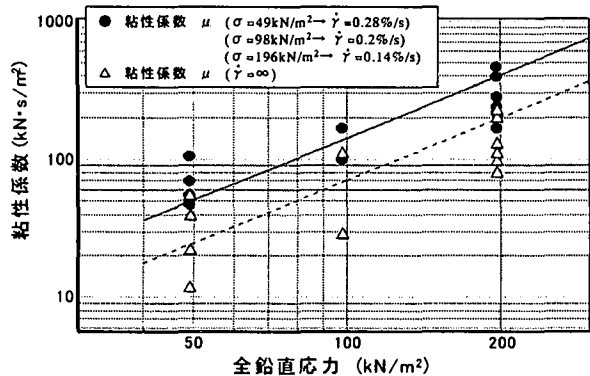


図17 粘性係数と全鉛直応力の関係

また、図16に示した結果によれば、せん断ひずみ速度が十分に大きい場合にはせん断応力とせん断ひずみ速度の関係はほぼ直線と見なすことが出来る。この直線の傾きは式(8)におけるせん断ひずみ速度が無限大になった場合の接線粘性係数 μ_{∞} と見なすことが出来る。この値を図17に△印で示す。

せん断ひずみ速度が無限大とした場合の粘性係数 μ_{∞} は実験値にかなりのばらつきはあるものの全鉛直応力の増加に伴って増加している。図中の点線は相似則が示すように粘性係数が全鉛直応力の3/2乗に比例して増大するものとして引いたものであるが、実験値が概ねこの直線の間を満たしていると考えられることが出来る。

5. まとめ

重力場と遠心载荷場における模型地盤の流動実験、および液状化土の中空ねじり試験により、液状化土の粘性係数を測定した。この結果をまとめて図18に示す。この場合、重力場および遠心载荷場における実験についてはそれぞれ模型地盤の中央深さ位置での全鉛直応力に対して粘性係数をプロットした。

重力場の液状化層厚35cmの場合のせん断ひずみ速度を0.401/sとして、他の重力場の実験、遠心载荷場の実験については、前述した相似則による等価なせん断ひずみ速度における接線粘性係数を求めて示している。ただし中空ねじり試験については等価なせん断ひずみ速度が0.051/s~0.101/sと実験によるせん断ひずみ速度の範囲を大きく超えている。このため、図18に示す実験結果において、せん断応力とせん断ひずみ速度の関係がほぼ直線となる領域での傾き、すなわちせん断ひずみ速度が無限大となる場合の粘性係数 μ_{∞} を示した。

図中の直線は重力場と遠心载荷場の流動実験および中空ねじり試験によって求められた粘性係数が全鉛直応力の3/2乗に比例するものとして引いたものである。実験に用いた地盤材料や相対密度に若干の差異はあるものの、液状化土の粘性係数は全鉛直応力のほぼ3/2乗に比例して増大することを示している。

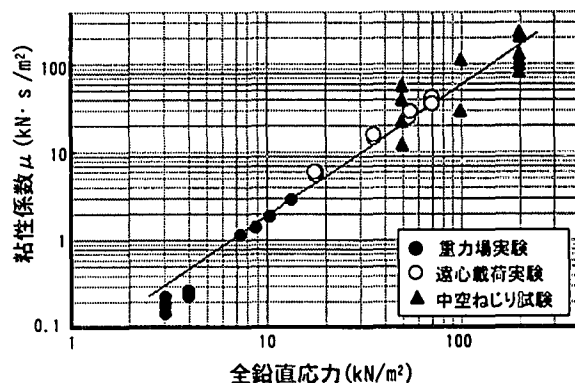


図18 液状化土の粘性係数と全鉛直応力の関係

謝辞:本研究では、経済産業省資源エネルギー庁が(社)日本ガス協会に委託し、平成8年度から12年度に調査研究を実施した「ガス導管液状化対策調査」の成果の一部を引用した。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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, 1998.6