

液状化土の流動特性に関する研究 (2) —遠心載荷場での模型実験および中空ねじり試験—

濱田 政則¹・島村 一訓²・山田 真一³・田中 淳寛⁴

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 (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

³基礎地盤コンサルタンツ株式会社 (〒102-0073 東京都千代田区九段北1-11-5)

⁴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)

遠心載荷場での模型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がせん断ひずみ速度の増加とともに減少するいわゆる擬塑性流体としての性質を有すること、また粘性係数が地盤の全鉛直応力あるいは液状化層厚の3/2乗に比例して増大することを示した。このことは液状化土の流れにレイノルズの相似則が成立していることを示しており、実地盤の液状化による流動量を予測する上で有用な知見と情報を提供するものである。

Key Words: Liquefaction, Liquefaction-induced flow, Viscosity, Pseudoplastic flow

1. 研究の目的

重力場の模型地盤の流動実験により液状化土の流動において液状化土の粘性係数がせん断ひずみ速度の増加とともに減少するいわゆる擬塑性流体としての性質を有すること、また粘性係数が地盤の液状化層厚の3/2乗に比例して増大することが示された¹⁾。粘性係数が液状化層厚の3/2乗に比例することは鉛直応力に対してもその3/2乗に比例して粘性係数が増大することを示唆している。このことを検証するため遠心載荷場での模型実験および液状化土の中空ねじり試験を行った。

2. 遠心載荷場における模型地盤の流動実験

(1) 実験の方法

図1に示す2種類の模型地盤C、D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、平均粒径、均等係数はそれぞれ0.22mm、1.9である²⁾。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。模型地盤C、Dとも地盤厚は土槽中央において約20cmである。間隙液は水を用いているがこれは本実験が砂と水の混合体である液状化土の流動特性に関する要素試験の目的を有しているためであり、間隙水の透水性に関する相似性は考慮されていない。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表1に示す。表1に示す加速度振幅、

周波数の正弦波を用い、流動方向と直角の水平方向に加振している。流動中は加振が継続されている。土槽中央部の地表面のマーカー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た。

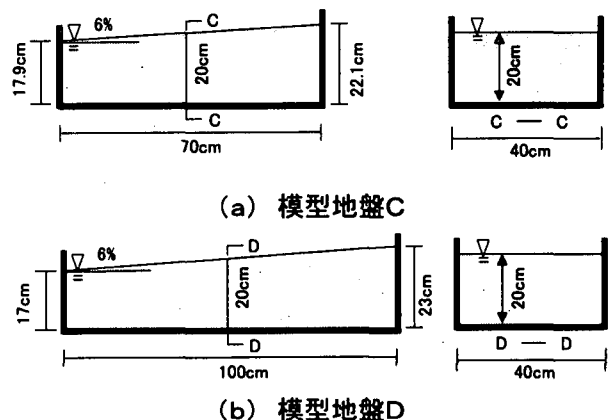


図1 遠心載荷場実験に用いた土槽及び模型地盤

表1 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)	振動数 (1/s)	加振時間 (s)
C1	20	10	35	0.22	1.9	270 × 10	50	1.60
C2	20	20	37	0.22	1.9	341 × 20	100	0.80
C3	20	30	35	0.22	1.9	373 × 30	150	0.53
D1	20	10	36	0.22	1.9	394 × 10	50	1.60
D2	20	20	37	0.22	1.9	246 × 20	100	0.80
D3	21	30	38	0.22	1.9	275 × 30	150	0.53
D4	20	40	40	0.22	1.9	270 × 40	200	0.40
D5	20	10	41	0.22	1.9	380 × 10	50	1.60
D6	20	20	39	0.22	1.9	250 × 20	100	0.80
D7	20	40	39	0.22	1.9	350 × 40	200	0.40

(2) 液状化土の粘性係数の算定

図2に模型地盤Cを用いた10Gの遠心場の地表面マーカーの変位と速度の時刻歴の例を示す。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。

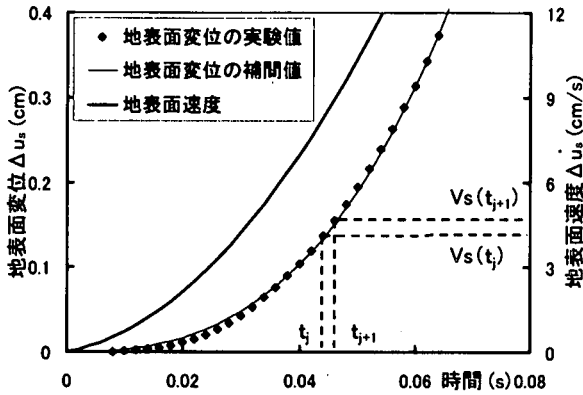


図2 遠心載荷場実験の事例(10G)

重力場の模型地盤の流動実験によって、模型地盤の中央部における流れを1次元の粘性流体による流れと仮定すれば、 t_{j+1} 時刻における地表面速度 $V_s(t_{j+1})$ は t_j 時刻における速度 $V_s(t_j)$ を用いて以下のように表すことが出来る¹⁾。

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

ここで、 H 、 ρ 、 θ 、 g はそれぞれ液状化土の地盤層厚、密度、地表面勾配および重力加速度である。

上式により、実験から得られた地表面速度 $V_s(t_j)$ 、 $V_s(t_{j+1})$ を用いて $t_j \sim t_{j+1}$ 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3に示す。せん断ひずみ速度は地表面を模型地盤厚で除して求めている。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、かつ一定値に漸近する傾向を見せており、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。さらに、模型地盤CとDの実験結果は30Gの場合に若干の差は認められるが10G、20Gの場合にはほとんど同様な粘性係数の推定結果となっている。

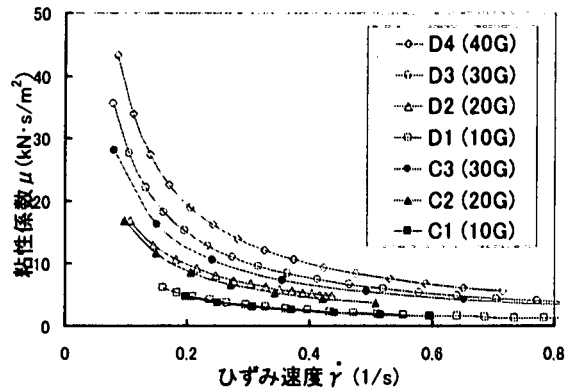


図3 流動実験による粘性係数

(4) 液状化土の流動の相似則に関する考察

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²⁾。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。このため、10Gの遠心載荷場の実験でのせん断ひずみ速度を $0.17^{1/5}$ 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 $0.12^{1/5}$ 、 $0.10^{1/5}$ 、 $0.09^{1/5}$ として図3の結果に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4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、相似則が成立していることを示している。

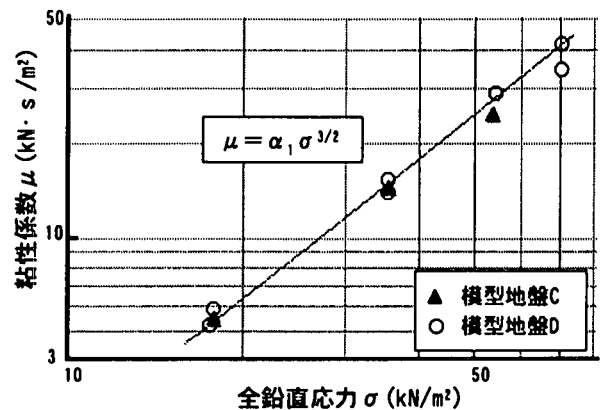


図4 粘性係数と全鉛直応力との関係

3. 中空ねじり試験による粘性係数の推定

(1) 実験の方法

本節では、図5に示す中空の供試体(高さ7.0cm、外径7.0cm、内径3.0cm)を用い、図7に示すような一定振幅のせん断応力の正弦波載荷(0.1Hz)によ

って液状化状態を生じさせた後、一方向にほぼ一定のせん断応力速度で載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する。一方向にせん断応力を載荷する直前の過剰間隙水圧比は表2に示す通りで0.95~0.99の範囲にある。

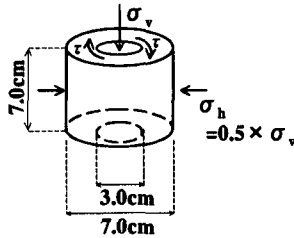


図5 供試体寸法

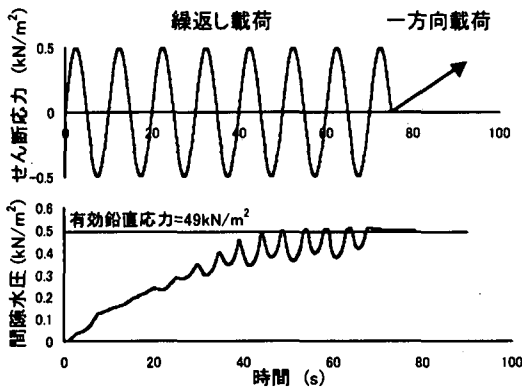


図6 繰り返し載荷による液状化と一方向載荷

表2 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の砂であり、平均粒径0.33mm、均等係数1.69である。表2に示すように供試体に作用させる全鉛直応力を49、98、196kN/m²として、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に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載荷場の流動実験と同様に40%前後を目標としたが表2に示すように若干大きめの供試体も存在する。

(4) 液状化土の流動の相似則に関する考察

図7にせん断応力とせん断ひずみ速度の関係の例を示す。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。

せん断ひずみ速度の増大とともに粘性係数が減少し、重力場¹⁾および遠心載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は全鉛直応力増加に伴って増大していることを示している。

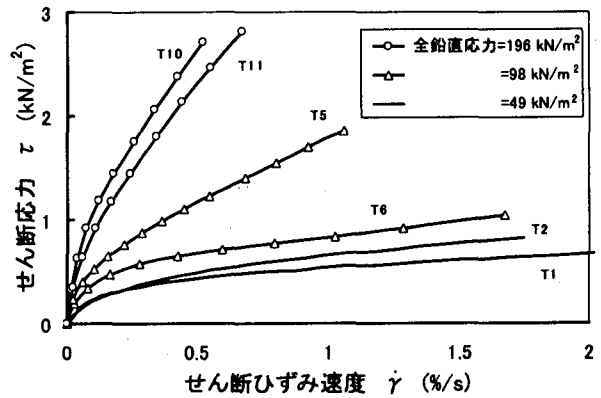


図7 せん断応力とせん断ひずみの関係

相似則によればせん断ひずみ速度は全鉛直応力の平方根の逆数に比例して増大する。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それぞれ0.28(%/s)、0.14(%/s)として、図7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、全鉛直応力との関係を求めた。これを図8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り、相似則が成立していることを示している。

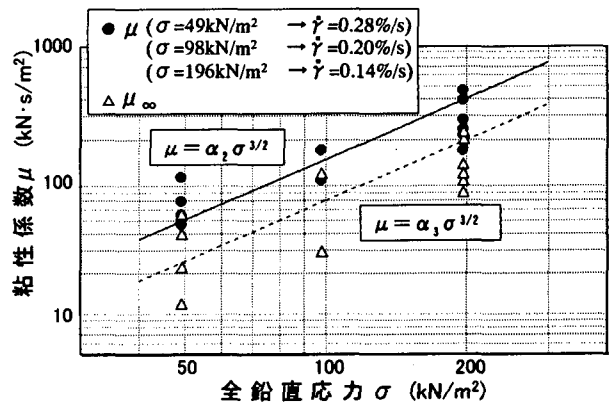


図8 粘性係数と全鉛直応力の関係

図8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。すなわち粘性係数がせん断ひずみ速度の増大とともに一定値に近づくと見なされる。このようなせん断応力とせん断ひずみの関係を模式的に示せば図9となる。また、せん断応力とせん断ひずみ速度の定式化の一つとして次式が用いられている。

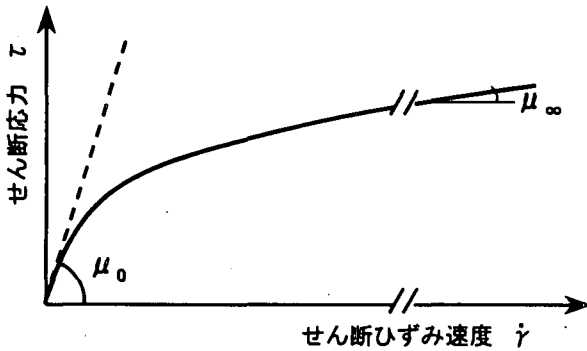


図9 擬塑性流体におけるせん断応力～せん断ひずみ速度の関係

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

ここで 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、 $\dot{\gamma}_r$ 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の結果からせん断応力とせん断ひずみ速度のほぼ直線となった場合の直線の傾きを μ_∞ として図8に△印でプロットした。

実験値にかなりのばらつきはあるものの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、試験値が概ねこの直線の関係を満たしていると考えることが出来る。

4. 液状化土の流動特性に関するまとめ

遠心載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。重力場の実験における模型地盤の流動実験結果²⁾と合わせて図10に示す。この場合、重力場および遠心載荷場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を用いている。また、重力場の模型地盤厚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、遠心載荷場の実験については、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 $0.05\text{1/s} \sim 0.10\text{1/s}$ 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8に示す実験結果において、せん断応力とせん断ひずみ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載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。

重力場の模型地盤厚35cmの場合と遠心載荷場での模型実験は同一模型材料であるものの、それ以外の重力場の模型地盤と中空ねじりの供試体の材料はそれぞれ異なっている。また、模型地盤と中空ねじりの供試体の相対密度が35～45%と幅がある。このように各実験と試験の条件に若干の差異はあるが、図示した結果は液状化土の粘性係数が全鉛直応力のほぼ3/2乗に比例して増大することを示している。

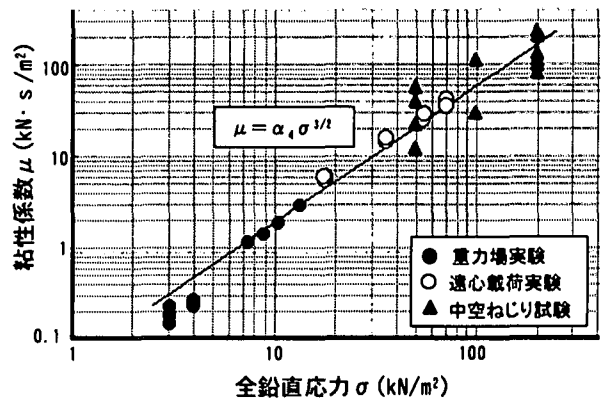


図10 液状化土の粘性係数と全鉛直応力の関係

本研究で実施した遠心載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って、液状化土が擬塑性流体、すなわち液状化土の粘性係数がせん断ひずみ速度の増大とともに減少する非線形粘性流体としての性質をもつこと、また液状化土の粘性係数が地盤の厚さあるいは全鉛直応力の3/2乗に比例して増大し、液状化土の流れには、レイノルズの相似則が成立していることが示された。

参考文献

- 1) 濱田政則, 島村一訓: 液状化土の流動特性に関する研究, 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 pp. 261-266, 2001, 3
- 2) 濱田政則, 中村正樹: 液状化土の流動に関する研究 (1)一重力場での模型実験一, 土木学会第26回地震工学研究発表会論文集, 2001, 8