

液状化地盤の水平変位量の予測法に関する研究

濱田 政則¹・若松 加寿江²・島村 一訓³・楡 達郎⁴

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

² 工博 東京大学 生産技術研究所 研究員 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

³ 東京ガス(株) 導管部 (〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20)

⁴ 早稲田大学大学院 理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

濱田らによる模型地盤の流動実験および中空ねじり試験から液状化土の粘性係数が液状化層厚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。本論文では重力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、相対密度が液状化土の流動特性に与える影響を検討する。これらの実験的研究の成果をもとに、既往地震における水平変位量とのキャリブレーションを行い、液状化地盤の水平変位量の予測式を提案する。

Key Words: Liquefaction, Ground flow, Model test, Viscosity

1. まえがき

液状化地盤の水平変位量の予測法については、既往地震における事例分析にもとづいた予測式が提案されている¹⁾²⁾。これらの予測式による水平変位量は、いずれも1/2から2倍の精度で実測値を説明しており実用的な観点からは有用であると考えられるものの、液状化土の流動のメカニズムや液状化土の流動中の物性に関する知見が反映されておらず、多くの場合、事例分析のみにもとづいていることが問題点として挙げられる。

本論文では、重力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、相対密度が液状化土の流動特性に与える影響を検討する。これらの実験的研究の成果をもとに、地盤の水平変位量推定のための理論式を構築し、既往地震における水平変位量とのキャリブレーションにより、予測式を提案する。

2. 液状化土の流動特性に与える相対密度の影響

(1) 重力場の流動実験による検討

図1に示す模型地盤(流動方向 300cm、水平幅 100cm、地盤層厚 25cm および 35cm、地表面勾配 6%)を流動方向と直交水平方向に正弦波加速度で加振して、液状化による地盤下方への流動を生じさせる。地表面の流動変位の時刻歴を測定し、これを数値微分することにより流動速度を求め、液状化土の粘性係数を算定する。模型地盤材質は遠州灘の浜砂で、平均粒径、均等係数はそれぞれ 0.19mm、1.88 である。

表1に示すように、模型地盤の相対密度を 40～55%に変化させ、相対密度が液状化土の流動特性に与える影響を検討する。

ここで、模型地盤中央での流れを図2に示すように 1次元の粘性流体の流れと考えれば、時間 $t = t_{j+1}$ における地表面の流動速度 $V_s(t_{j+1})$ は、時間

$t = t_j$ における地表面の流動速度 $V_s(t_j)$ を用いて、

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

と表される³⁾。上式において、 μ は時間 $t = t_j \sim t_{j+1}$ 間の液状化土の粘性係数であり、図3に示す実験値を $V_s(t_j)$ 、 $V_s(t_{j+1})$ に代入することにより算定できる。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る。 H 、 ρ は液状化土の層厚と密度、 g 、 θ は重力加速度と地表面勾配である。

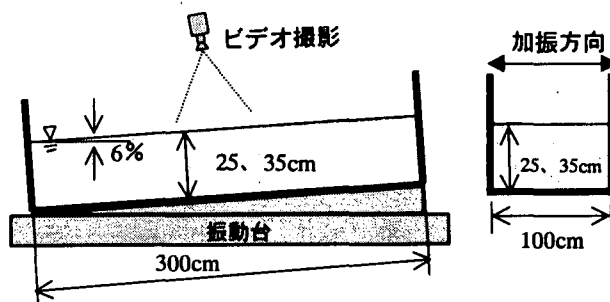


図1 重力場の流動実験に用いた土槽および模型地盤

表1 液状化土の流動特性に与える相対密度の影響 (重力場の流動実験)

実験名	模型地盤層厚(cm)	実験回数	相対密度(%)	地表面勾配(%)	加振加速度 (cm/s ²)	振動数 (1/s)
GD1	24~25	4	40~44	6	390~410	5
GD2	23	2	53~55	6	380~400	5
GD3	34~35	2	39~41	6	390~430	5
GD4	34	3	45~50	6	420~460	5

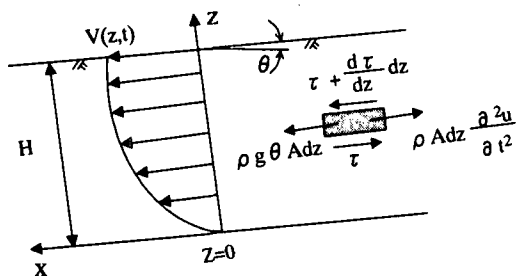


図2 傾斜地盤における1次元の粘性流体の流れ

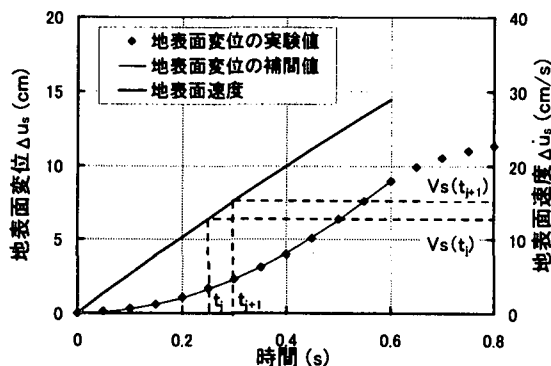


図3 重力場の流動実験の事例:GD3
(模型地盤層厚 35cm, 相対密度 40%)

このようにして求めた粘性係数とせん断ひずみ速度の関係の例を図4に示す。なお、せん断ひずみ速度は、模型地盤層厚全体の平均的なせん断ひずみ速度として、各時間区間の平均地表面速度を模型地盤層厚で除した値としている。図4によれば、いずれの実験においても、せん断ひずみ速度の増大に応じて粘性係数が減少する、いわゆる擬塑性流体の性質を示すことが分かる。また、模型地盤の相対密度の増大に伴って粘性係数が増大し、さらに、模型地盤層厚の増大に伴って粘性係数が増大することも分かるが、このことについては、著者らは既に液状化土の流れがレイノルズの相似則に従い、粘性係数が液状化層厚あるいは全鉛直応力の $3/2$ 乗に比例して増大することを示している³⁾。

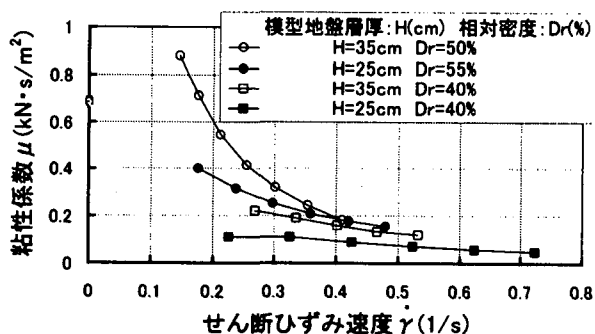


図4 粘性係数とせん断ひずみ速度の関係

相似則によれば、せん断ひずみ速度が液状化層厚の平方根の逆数に比例することが示されている。そこで液状化層厚 25cm および 35cm の場合の等価なせ

ん断ひずみ速度をそれぞれ $0.40^{1/3}/s$, $0.35^{1/3}/s$ とし、図4から粘性係数を読み取り、相対密度に対してプロットした結果を図5に示す。図の縦軸は相似則に従って粘性係数を液状化層厚の $3/2$ 乗で除して正規化している。粘性係数が相対密度のべき乗に比例するものとして最小2乗法で近似すれば、図中の式が得られる。重力場の流動実験によれば、粘性係数は相対密度の 2.3 乗に比例して増大している。

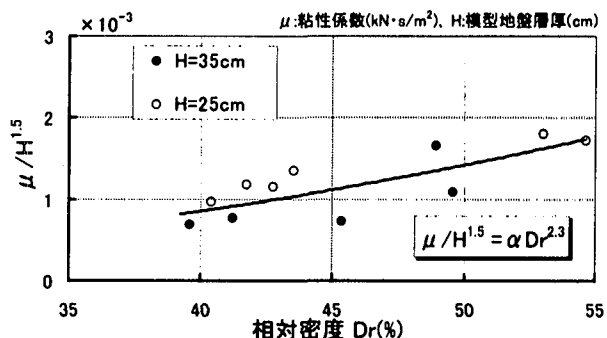


図5 粘性係数と相対密度の関係(重力場の流動実験)

(2) 液状化土の中空ねじり試験による検討

中空供試体(外径7.0cm, 内径3.0cm, 高さ7.0cm)を図6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させ、過剰間隙水圧が有効鉛直応力の95%に達した後、一方方向に一定せん断応力速度でせん断することにより、液状化土の粘性係数を測定する。供試体の材料は新潟市の川岸町より採取した砂で、平均粒径、均等係数はそれぞれ0.33mm, 1.69である。

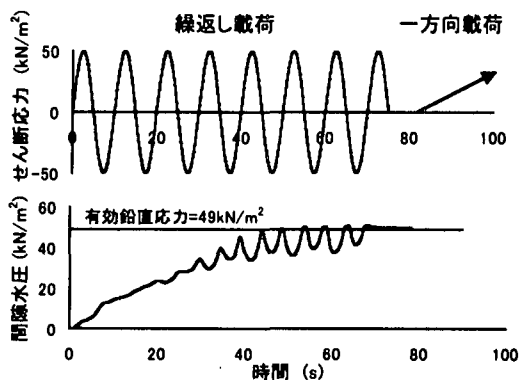


図6 中空ねじり試験の載荷方法

表2 液状化土の流動特性に与える相対密度の影響
(中空ねじり試験)

実験ケース No.	全鉛直応力 kN/m²	相対密度 %	過剰間隙水圧比
T13	49	42	0.97
T14	49	44	0.99
T15	49	42	0.97
T16	49	43	0.96
T17	49	50	0.98
T18	49	59	0.97
T19	49	59	0.96
T20	49	60	0.97
T21	49	69	0.99
T22	49	69	0.99
T23	49	68	0.97

表2に示すように、供試体の相対密度を42～69％に変化させ、相対密度が液状化土の流動特性に与える影響を検討する。なお全鉛直応力は各供試体とも49kN/m²であり、供試体を一方向にせん断する直前の過剰間隙水圧比は0.95～0.99である。中空ねじり試験によって得られた、せん断応力とせん断ひずみ速度の関係の例を図7に示す。

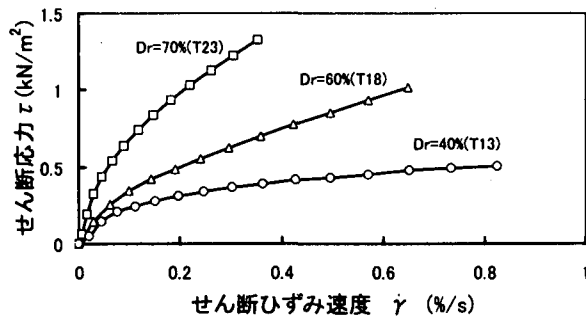


図7 せん断応力とせん断ひずみ速度の関係

図7によれば、いずれの試験においても、せん断ひずみ速度の増大に応じて粘性係数が減少する、いわゆる擬塑性流体の性質を示すことがわかる。また、供試体の相対密度の増大に伴って、せん断応力が増大しており、粘性係数も増大する。図7からせん断ひずみ速度0.28(%/s)、0.42(%/s)での粘性係数を読み取り、相対密度に対してプロットした結果を図8に示す。

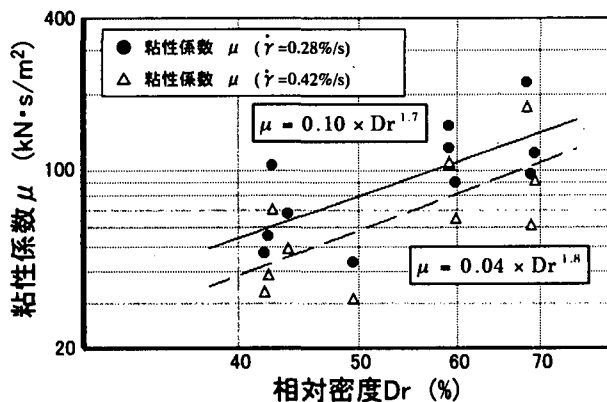


図8 粘性係数と相対密度の関係(中空ねじり試験)

粘性係数が相対密度のべき乗に比例するものとして、最小2乗法で近似すれば、図中の式が得られる。中空ねじり試験によれば、粘性係数は相対密度の1.7～1.8乗に比例して増大している。

3. 水平変位量の予測式の提案

本論文では、液状化土の流動特性に関する実験的研究の成果をもとに、地盤の水平変位量推定のための理論式を構築し、既往地震における水平変位量とのキャリブレーションにより、予測式を提案する。

実地盤への適用性を考慮して、図9に示すように液状化層が複数層で構成されている場合を想定する。ここで予測式を作成するために以下の仮定条件を設定する。

- 1) 各液状化層は定常状態で流動しているものとし、非液状化層は下部の液状化層の上に乗って剛体として流動しているものとする。すなわち、非液状化層のせん断変形は無視し得るほど小さいものとする。
- 2) 各液状化層の粘性係数は全鉛直応力の3/2乗に比例し、また相対密度の2乗に比例して増大するものとする。粘性係数が相対密度の2乗に比例すると仮定したのは、前述した重力場の流動実験および中空ねじり試験の結果を参考にしている。

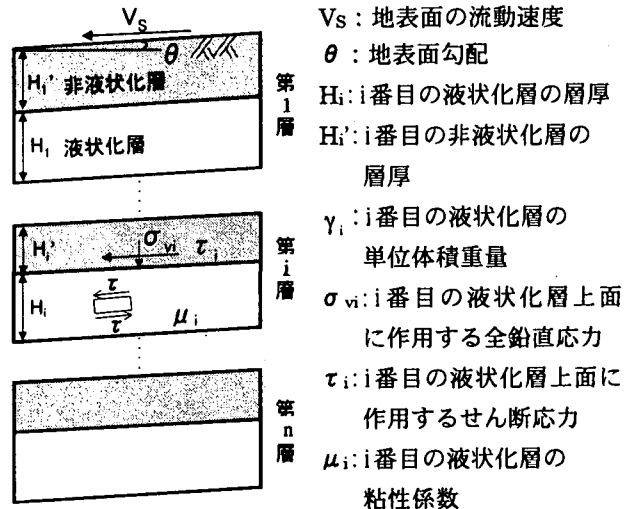


図9 傾斜地盤における液状化層の流れ

第i層の下端で流動速度を0とした場合の第i液状化層上面での定常状態の流動速度は

$$V_{si} = \left(\sigma_{vi} H_i + \frac{1}{2} \gamma_i H_i^2 \right) \frac{\theta}{\mu_i} \quad (2)$$

と表される。ここで、 μ_i は第i液状化層の粘性係数であるが、上述した仮定条件をもとに

$$\mu_i \propto \left(\sigma_{vi} + \frac{1}{2} \gamma_i H_i \right)^{\frac{3}{2}} \cdot Dr_i^2 \quad (3)$$

とする。上式の()の中の値は第i液状化層中央深さにおける全鉛直応力であり、 Dr_i は第i液状化層の相対密度である。

マイヤーホフによれば相対密度とN値の関係は、有効鉛直応力 σ'_v (kN/m²)を用いて、

$$Dr = 21 \sqrt{\frac{N}{\frac{\sigma'_v}{98} + 0.7}} \quad (4)$$

と表され、さらに有効鉛直応力によって補正されたN値($\bar{N}$)は、次式によって表される。

$$\bar{N} = \frac{1.7N}{\frac{\sigma'_v}{98} + 0.7} \quad (5)$$

式(4)、(5)の関係をを用いれば第i液状化層の相対密度 Dr_i は補正N値($\bar{N}_i$)を用いて、以下のように表すことができる。

$$Dr_i = 21 \sqrt{\frac{\bar{N}_i}{1.7}} \quad (6)$$

式(6)を式(3)に代入し、地表面速度を各液状化層上面の流動速度の総和と考えれば次式を得る。

$$V_s \propto \sum_{i=1}^n \frac{\left(\sigma_{vi} H_i + \frac{1}{2} \gamma_i H_i^2 \right) \theta}{\left(\sigma_{vi} + \frac{1}{2} \gamma_i H_i \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \bar{N}_i} \quad (7)$$

上記の地表面速度に流動継続時間を乗じれば、水平変位量が求まる。しかし現時点において、この流動継続時間を信頼性高く推定するための知見と情報は十分ではない。実地盤における間隙水の上方への浸透に要する時間を考えれば、液状化層上部では液状化状態が地震動停止後も維持され、流動が継続している可能性も否定できない。

しかしながら、式(7)の右辺は模型地盤の流動実験および中空ねじり試験によって明らかにされた液状化土の流動特性にもとづいたものであり、液状化土の流れやすさを表す指標としては信頼することができる。このような観点に立てば水平変位量も式(7)の右辺に比例すると考えることが出来る。水平変位量を D_s とすれば、

$$D_s \propto \sum_{i=1}^n \frac{\left(\sigma_{vi} H_i + \frac{1}{2} \gamma_i H_i^2 \right) \theta}{\left(\sigma_{vi} + \frac{1}{2} \gamma_i H_i \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \bar{N}_i} \quad (8)$$

が得られる。

著者らは 1964 年新潟地震、1983 年日本海中部地震および 1995 年兵庫県南部地震の液状化土の流動について、地震前後の航空写真による水平変位量の測定およびボーリングデータの収集による液状化層の判定を行い、水平変位量に与える諸要因についての分析を行っている。²⁾

これらの既往地震での事例による諸数値を用いて計算された式(8)の右辺と既往地震において実測された地表面の水平変位量との関係を図 10 に示す。この関係を最小 2 乗法により直線近似すると、その傾きは $36[(\text{kN}/\text{m}^2)^{1/2}/\%]$ と求まる。従って

$$D_s = 36 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\left(\sigma_{vi} H_i + \frac{1}{2} \gamma_i H_i^2 \right) \theta}{\left(\sigma_{vi} + \frac{1}{2} \gamma_i H_i \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \bar{N}_i} \quad (9)$$

となり、式(9)が予測式として得られる。上式における、各パラメータの単位は、 D_s (m)、 σ_{vi} (kN/m^2)、 H_i (m)、 γ_i (kN/m^3)、 θ (%) である。本予測式による値と実測値との関係は図 11 に示す通りであり、ごく一部のデータを除けば、良好な精度で実測値を説明していることがわかる。

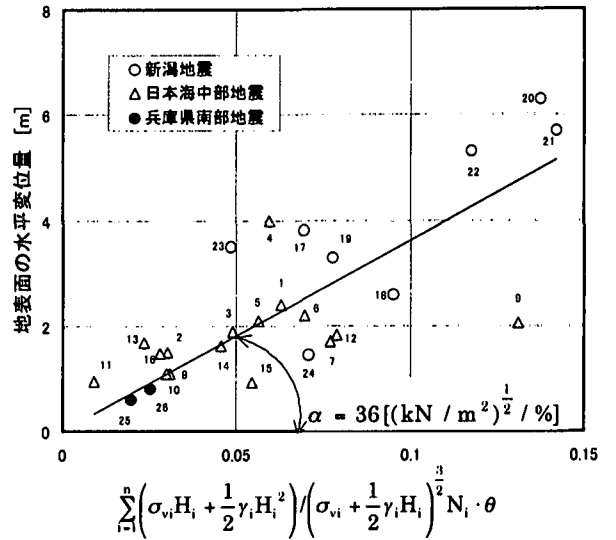


図 10 式(8)の右辺の値と実測された地表面の水平変位量の関係

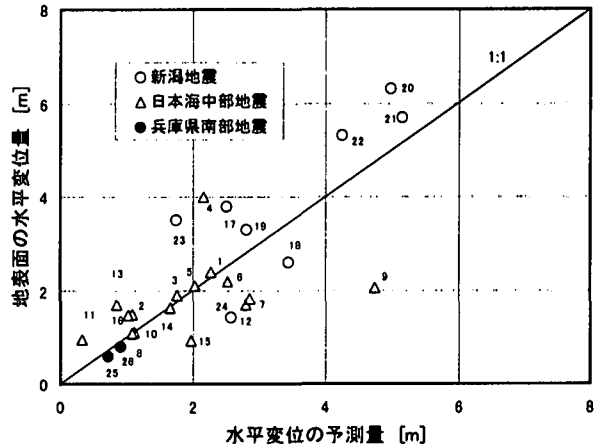


図 11 式(9)による水平変位の予測値と実測された地表面の水平変位量の関係

4.まとめ

液状化土の流動特性に関する模型地盤の流動実験および中空ねじり試験の結果をもとに提案された予測式は、良好な精度で実測値を説明した。

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, 安田進: 液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究, 土木学会論文集 No. 376/Ⅲ-6, pp. 221-229, 1986. 12
- 2) 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
- 3) 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