

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・田島 幸治⁴・楡 達郎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 工博 東京大学 生産技術研究所 研究員 (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

³ 東京ガス(株) 導管部 (〒105-0022 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 (〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1)

The fluid properties of liquefied soil were studied by flow tests of model grounds and hollow-cylindrical shear tests of liquefied soil. Based on these experimental results and the case studies on the liquefaction-induced permanent ground displacements during past earthquakes a theoretical and empirical formula was proposed for the estimation of the magnitude of the ground displacement in the horizontal direction.

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、既往地震における変位量と液状化層厚や地表面勾配などの諸要因との相関解析に基づく経験式¹⁾および液状化土の剛性低下を考慮した有限要素法などの数値解析手法が提案されている。著者らも1964年新潟地震や1983年日本海中部地震における事例分析に基づいて液状化層厚、N値、地表面勾配による経験式を提案している。この他、米国と日本での既往地震での事例分析による予測式なども提案されている。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、事例分析のみに立脚していることが問題点として挙げられる。

本研究では、相対密度が液状化土の粘性係数に与える影響を重力場における模型地盤の流動実験と中空ねじり試験により検討する。さらに、加振加速度および地表面勾配が液状化土の粘性係数に与える影響についても、重力場における模型地盤の流動実験により検討を加える。これらの模型実験および中空ねじり試験の結果をもとに、液状化層が複数層の場合の水平変位量算定法について考察し、既往地震における水平変位の測定値とのキャリブレーションにより、液状化地盤の流動による水平変位量の予測手法を提案する。

2. 液状化土の流動特性に影響を与える諸要因

(1) 相対密度の影響(重力場の流動実験)

図1に示す模型地盤(流動方向3.0m、水平幅1.0m、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側方流動を生じさせる。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と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。

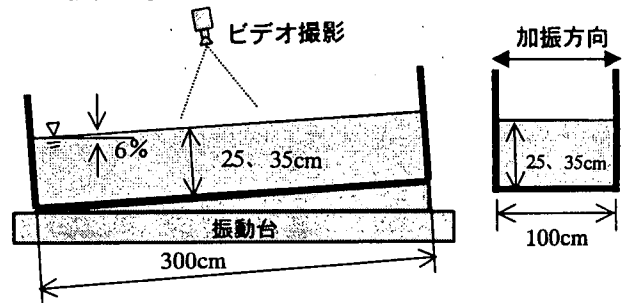


図1 重力場における模型地盤の流動実験

表1 液状化土の粘性係数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

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²⁾。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。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。

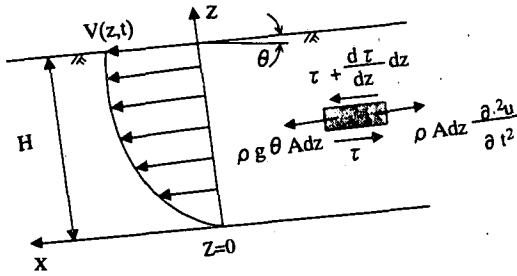


図2 傾斜地盤における1次元の粘性流体の流れ

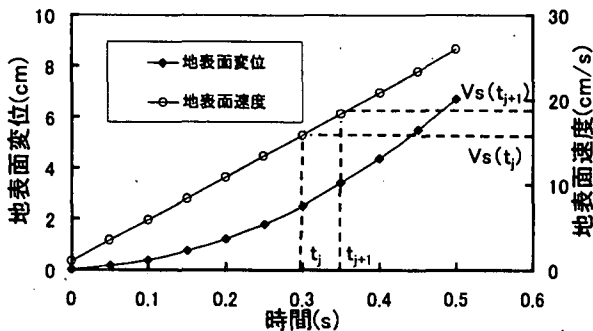


図3 重力場の流動実験の事例:GD3 (模型地盤層厚 35cm, 相対密度 40%)

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うことを示し、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²⁾。

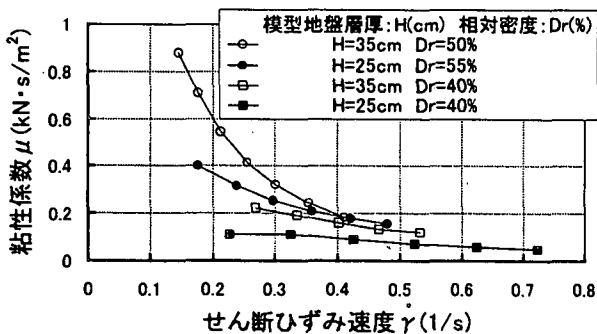


図4 粘性係数とせん断ひずみ速度の関係 (相対密度の影響)

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 0.40¹/s, 0.35¹/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ことが分かる。

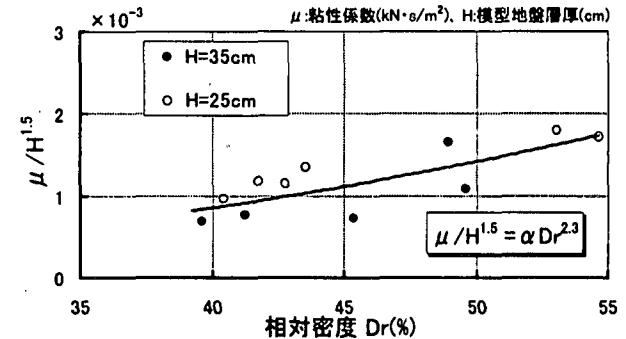


図5 粘性係数と相対密度の関係(重力場の流動実験)

(2) 相対密度の影響(中空ねじり試験)

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あり、平均粒径と均等係数はそれぞれ0.33mm, 1.69である。

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。

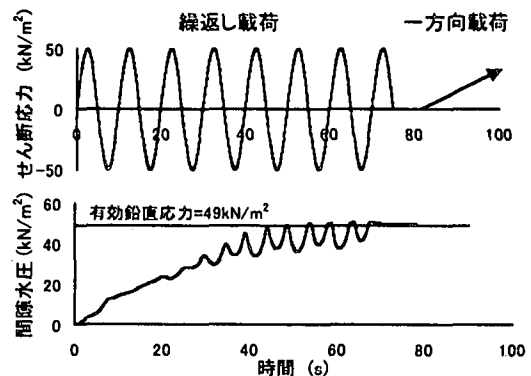


図6 中空ねじり試験の載荷方法

表2 液状化土の粘性係数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/m ²	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

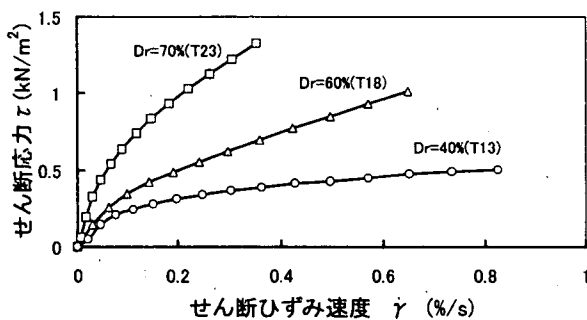


図7 せん断応力とせん断ひずみ速度の関係
(相対密度の影響)

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。

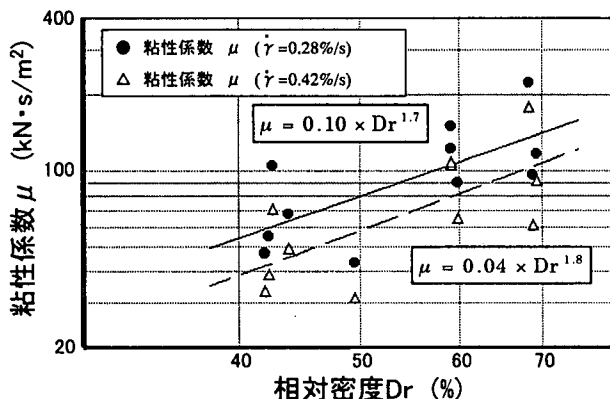


図8 粘性係数と相対密度の関係 (中空ねじり試験)

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ことが分かる。

(3) 加振加速度の影響(重力場の流動実験)

前述した重力場の流動実験において、液状化土の流動中も振動台の加振を継続している。表3に示すように、加振加速度の振幅を210～560cm/s²と変化させ、加振加速度が液状化土の流動特性に与える影

響を検討する。なお、模型地盤層厚は25cm、相対密度は40%を目標値としている。

表3 液状化土の粘性係数に与える
加振加速度の影響

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)
GA1	24	1	38	6	210	5
GA2	24～25	4	40～43	6	390～410	5
GA3	24	1	43	6	560	5

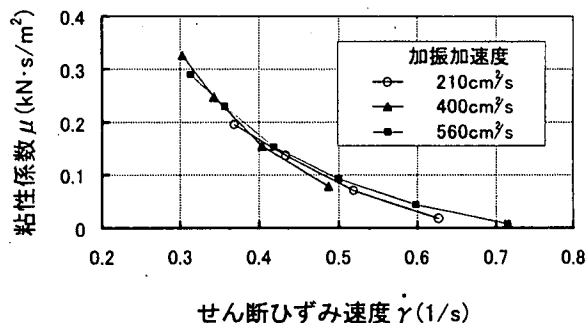


図9 粘性係数とせん断ひずみ速度の関係
(加振加速度の影響)

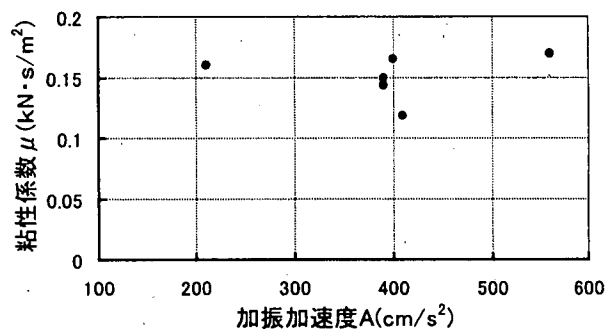


図10 加振加速度が粘性係数に与える影響

粘性係数とせん断ひずみ速度の関係の例を図9に、せん断ひずみ速度0.401/sとした場合の粘性係数と加振加速度の関係を図10に示す。

図9によれば、加振加速度の違いによってせん断ひずみ速度の領域は異なるものの、粘性係数とせん断ひずみ速度の関係はほぼ同一と考えられる。また図10によれば、加振加速度が液状化土の流動特性に与える影響は顕著には認められない。

(4) 地表面勾配の影響(重力場の流動実験)

表4に示すように模型地盤の地表面勾配を4～6%と変化させ、地表面勾配が液状化土の流動特性に与える影響を検討する。なお、模型地盤の層厚は35cm、相対密度は40%を目標値としている。

表4 液状化土の粘性係数に与える
地表面勾配の影響

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)
GK1	34	2	40～41	4	430～450	5
GK2	34	3	40～41	5	390	5
GK3	34～35	2	39～41	6	390～430	5

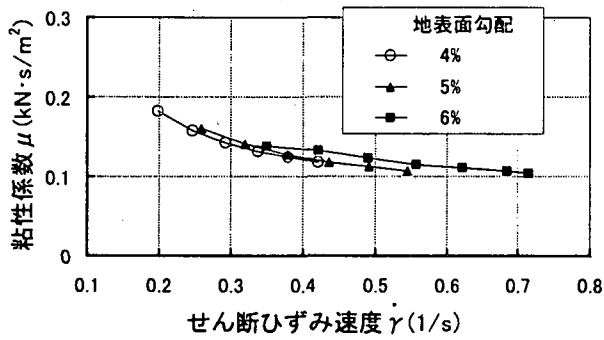


図11 粘性係数とせん断ひずみ速度の関係 (地表面勾配の影響)

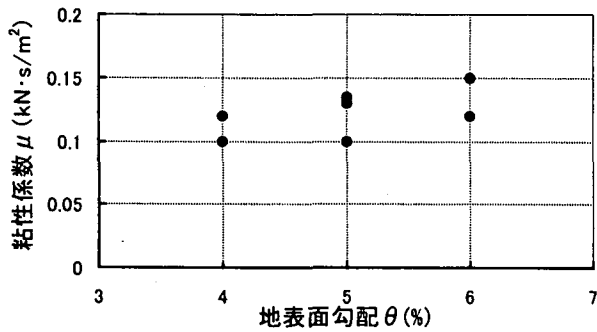


図12 地表面勾配が粘性係数に与える影響

粘性係数とせん断ひずみ速度の関係の例を図11に、せん断ひずみ速度を0.351/sとした場合の粘性係数と地表面勾配の関係を図12に示す。

図11によれば、地表面勾配の違いによってせん断ひずみ速度の領域は異なるものの、それぞれの実験による粘性係数は概ね連続性を有しており、液状化土の物性、すなわち擬塑性流体としての性質には変化がないことが分かる。また、図12によれば、地表面勾配の増大に応じて若干粘性係数が増大している傾向はあるものの、実験値のばらつきを考えると、地表面勾配が液状化土の流動特性に与える影響は顕著には認められない。

3. 液状化土の流動による水平変位量の予測式の提案

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、液状化の流動特性に関して次のことが明らかにされた。

- 1) 流動中の液状化土は擬塑性流体としての性質を示し、その粘性係数はせん断ひずみ速度の増大とともに減少する。
- 2) 液状化土の粘性係数は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。このことは液状化土の流動においてレイノルズの相似側が成立していることを示している。
- 3) 重力場の流動実験によれば、液状化土の粘性係数は相対密度の 2.3 乗に比例して増大する。また中空ねじり試験によれば、液状化土の粘性係数は相対密度の 1.7~1.8 乗に比例して増大する。
- 4) 重力場の流動実験によれば、加振加速度および

地表面勾配が液状化土の流動特性に与える影響は顕著でない。

液状化土の流動による水平変位量の予測については、主として既往地震における事例分析結果に基づいた経験式が提案されている。これらの経験式は、単に水平変位量と液状化層厚などの諸要因との相関分析に基づくもので、経験式の力学的な合理性についての説明が十分になされたものではない。

本論文では上述した液状化土の流動特性に関する知見をもとに水平変位量の予測式を構築し、これを既往地震において測定された水平変位の実測値とキャリブレーションすることにより、傾斜地盤を対象に新たな水平変位量の予測式の提案を行う。

実地盤への適用性を考慮して、図13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。

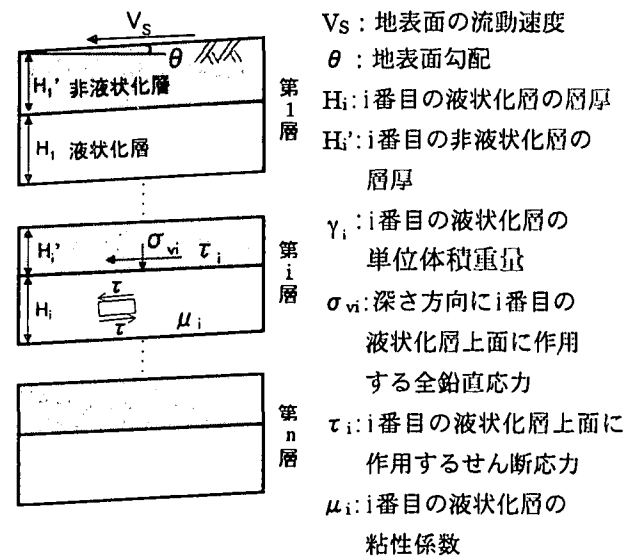


図13 傾斜地盤の液状化層の流れ

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

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

と表される。ここで、 μ_i は第 i 層の粘性係数であるが、上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 番目の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/m^2) 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)の関係を用いれば第 i 番目の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。

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

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、現時点においてはこの流動継続時間を精度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と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基づいたものであり、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よう。水平変位量を Ds とすれば、

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

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-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。このうち傾斜地盤における測定の対象とした地点を図 14 に、液状化の判定結果およ

び地表面勾配などを表 5 に示す。液状化の判定は道路橋示方書 (V 耐震設計編, 1996) とし、地表面加速度は表 5 に示す値としている。

表 5 に示した液状化層厚 (H_i)、地表面勾配 (θ) および補正 N 値 (\bar{N}_i) を用いて計算された式(8)の右辺と既往地震の事例において実測された地表面の水平変位量との関係を図 15 に示す。



図 14 既往地震における側方流動の事例分析位置

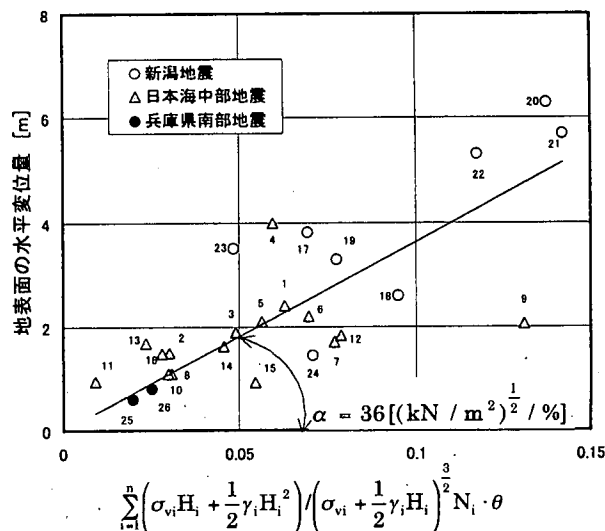


図 15 式(8)の右辺の値と実測された地表面の水平変位量の関係

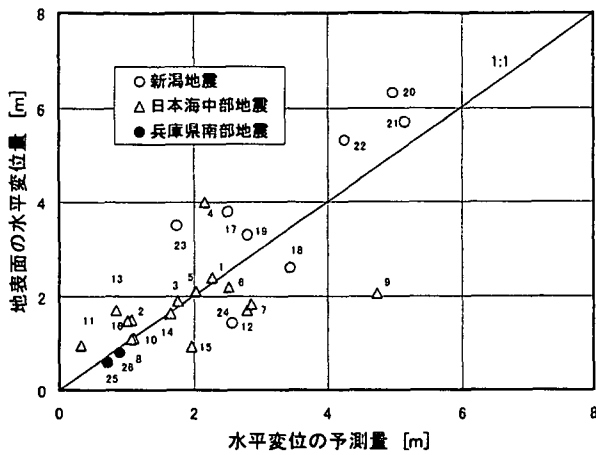


図 16 式(9)による水平変位の予測量と実測された地表面の水平変位量の関係

図 15 に示した式(8)の右辺の値と地表面の水平変位量の関係を最小 2 乗法により直線近似すると、その傾きは、 $36[(\text{kN/m}^2)^{1/2}/\%]$ と求まる。従って

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

となり、式(9)が予測式として得られる。本予測式による値と実測値との関係は図 16 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。

4.まとめ

重力場の流動実験および中空ねじり試験により、液状化土の粘性係数は相対密度のほぼ 2 乗に比例して増大することが示された。また、液状化土の流動特性に関する模型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る。

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
- 2) 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, 2001. 3

表 5 既往地震における液状化地盤の流動事例の分析

データ番号	Ds [m]	θ [%]	A [cm/s ²]	第1層				第2層				第3層				第4層				
				H _i [m]	H' _i [m]	N _i	σ_{vi} [kN/m ²]	H _i [m]	H' _i [m]	N _i	σ_{vi} [kN/m ²]	H _i [m]	H' _i [m]	N _i	σ_{vi} [kN/m ²]	H _i [m]	H' _i [m]	N _i	σ_{vi} [kN/m ²]	
日本海中部地震	1	2.40	1.90	250	4.50	1.80	16.5	28												
	2	1.50	0.80	250	4.00	2.30	13.9	36	1.00	2.00	21.8	142								
	3	1.90	0.90	250	3.40	2.90	9.4	46	2.00	1.00	13.2	123								
	4	4.00	2.40	250	4.70	3.60	19.1	57												
	5	2.10	2.00	250	0.35	0.95	17.0	15	0.60	3.80	12.5	88	1.10	0.70	11.0	111	1.25	1.70	10.3	161
	6	2.20	2.30	250	1.35	1.95	10.4	31	0.70	6.50	5.1	169								
	7	1.70	0.80	250	1.80	0.70	7.2	11	1.80	2.80	6.9	92	2.35	1.00	8.0	142				
	8	1.10	1.00	250	0.95	0.35	14.1	5	2.00	1.00	20.3	40								
	9	2.05	2.35	250	7.90	2.90	13.2	46												
	10	1.08	3.17	250	1.10	2.70	16.1	42												
	11	0.94	1.02	250	1.00	1.80	18.0	28												
	12	1.83	1.61	250	2.19	1.12	15.5	18	4.10	1.30	14.8	79								
	13	1.69	1.45	250	0.85	0.95	17.0	15	0.60	3.30	11.0	88								
	14	1.63	1.30	250	4.00	2.80	13.9	44	0.80	2.00	21.8	150								
	15	0.92	1.63	250	1.00	0.80	15.5	13	1.70	2.00	15.3	66	1.45	1.20	17.9	117				
	16	1.48	0.50	250	3.60	2.90	9.4	46	2.10	1.30	13.2	132								
新潟地震	17	3.80	0.80	200	11.15	1.15	11.9	18												
	18	2.60	0.90	200	13.00	0.15	11.9	2	1.20	1.00	16.3	250								
	19	3.30	0.60	200	0.60	2.30	4.7	36	1.30	0.25	6.2	51	7.85	0.35	8.1	80	1.00	3.00	15.9	272
	20	6.30	1.20	200	6.60	0.70	10.6	11	2.00	1.00	18.9	145	8.00	1.00	15.5	198				
	21	5.70	1.60	200	5.30	0.00	9.1	0	1.00	3.00	22.1	147								
	22	5.30	0.90	200	7.00	1.30	7.6	20	5.50	1.00	13.1	162								
	23	3.50	1.20	200	2.98	2.52	10.6	40	1.00	13.00	9.7	322								
	24	1.43	0.56	200	9.35	0.30	7.9	5												
兵庫県南部地震	25	0.59	0.22	500	12.80	3.20	11.0	50												
	26	0.80	0.60	500	9.30	2.50	20.0	39												

Ds: 地表面の水平変位量 θ : 地表面勾配 A: 地表面加速度 H_i: i 番目の液状化層厚 H'_i: i 番目の非液状化層厚
N_i: i 番目の液状化層の補正 N 値 σ_{vi} : i 番目の液状化層上面に作用する全鉛直応力