

傾斜地盤の側方流動量の予測法に関する 実験的研究

濱田 政則¹・柳瀬 和俊²・河野 暁²・那須 太郎²

¹フェロー会員 工博 早稲田大学理工学部 (〒169-0072 東京都新宿区大久保三丁目4-1)

²学生会員 早稲田大学大学院 (〒169-0072 東京都新宿区大久保三丁目4-1)

模型実験結果を用いて液状化地盤の側方流動量を予測する場合、模型地盤と実地盤の間にどのような相似則が成立しているかは、極めて重要な問題である。濱田らは¹⁾流動中の液状化土が擬塑性流体の性質を示すこと、また、模型地盤と実地盤の間にレイノルズの相似則を適用すれば、流動速度が液状化層厚の平方根に比例して増大することを示している。本研究では液状化層厚を変化させた模型実験を行い、提案されている相似則の妥当性を検証し、さらに相似則を用いて模型実験結果から実地盤の流動量の予測を試みる。

Key Words : Liquefaction, Lateral Spread, Model Test, Viscous Flow, Similitude Law

1. 液状化土の流動に関する相似則の検証

(1) 実験の方法と条件

模型地盤材料は、平均粒径0.19mm、均等係数1.9の遠州灘の浜砂で、その粒径加積曲線を図1に示す。図2に示す流動方向の長さ3m、幅1mの剛土槽を用い、底部からの注水によるボイリングおよび攪拌の後、予備加振によって所定の相対密度(35~44%)を有する均一な飽和地盤を作成した。土槽を6%の角度で傾斜させ、流動方向と直交水平方向に振幅約400(cm/s²)の正弦波で加振することにより、液状化を生じさせて側方流動を発生させた。模型地盤表面の標的の動きをビデオカメラにより撮影し、地表面変位の時刻歴を求めた。液状化層の厚さは約15、25、35cmの3種類で総計12ケースの実験を行った。

(2) 実験結果の整理方法

実験結果の一例を図3に示す。図中、■印はビデオカメラによって測定された地表面変位の時刻歴で、○印は連続した5点の変位の観測値を2次関数で補間し、これを微分することによって得た速度の時刻歴である。

地表面の速度は、図中A点で最大値を記録し、その後B点に向かって減少する。B-C間ではほぼ一定速度で流動し、C点で加振が停止すると流動が停止する。A点からB点に向け

て流動速度が減少する理由として、模型実験では液状化後、排水が急激に生じ、地盤の締め固めが起こっていることが考えられる。

図4は加振前後の模型地盤の相対密度の比較を示すが、加振前後で相対密度に大きな差異が見られる。B~C間で速度が一定であることから模型地盤の締め固めは、AからBに向かう過程で生じているものと考えられる。

一方、図5は小泉ら²⁾による新潟地震における液状化前後のN値の変化を示す。これによれば実地盤のN値の変化は顕著ではない。そこで、本実験では流動速度に関して以下のように整理を行い、以下の考察に用いた。

模型地盤の中央点での流れを図6に示すように1次元の粘性流体とすると、非定常状態の地表面の流動速度 $v_s(t)$ は式(1)によって表される。

$$v_s(t) = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} 16 \frac{H^2}{(i\pi)^3} \frac{\rho g}{\mu} \theta \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{i\pi}{2H} \right)^2 \frac{\mu}{\rho} t \right\} \right] \sin \frac{i\pi}{2} \quad (1)$$

上式において μ 、 ρ 、 g は粘性係数、液状化土の密度、重力加速度を示し、 H 、 θ は液状化層の厚さと地表面勾配を示す。A点までは相対密度に変化がなく粘性係数が一定として、A点での速度 V_A とその観測時刻 t_A より、A点での速度を説明し得る粘性係数 μ_A を求める。

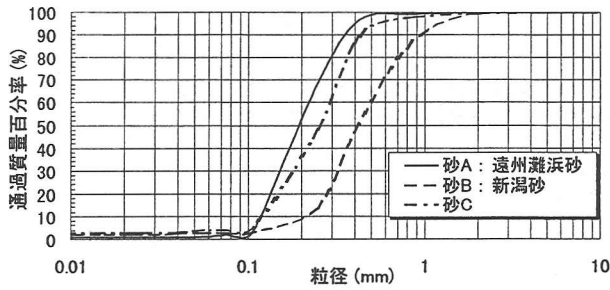


図1 土質材料の粒径加積曲線

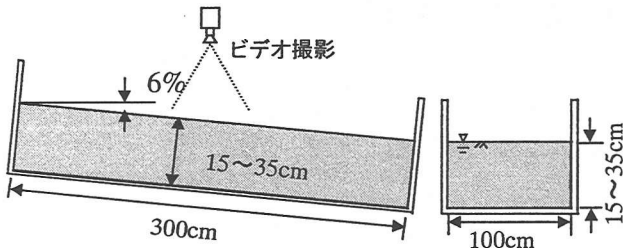


図2 実験に用いた土槽の概要

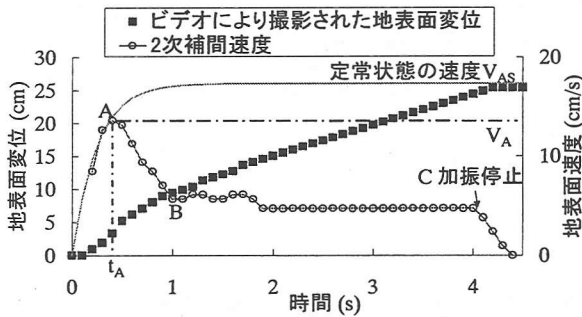


図3 地表面変位の時刻Tと速度および推定された定常状態の速度

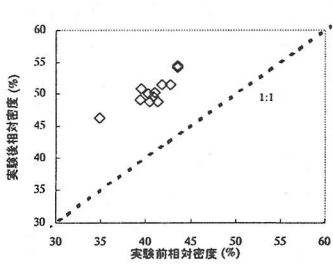


図4 実験前後の相対密度の変化

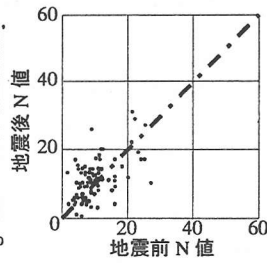


図5 新潟地震前後におけるN値の変化(地下5.0~10.0m)²⁾

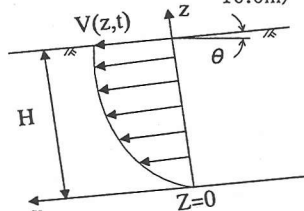


図6 傾斜地盤における一次元粘性流体の流れ

この μ_A を用いて定常状態の流動速度 V_{AS} を求めれば下式のようなになる。

$$V_{AS} = \frac{1}{2} \frac{H^2}{\mu_A} \rho g \theta \quad (2)$$

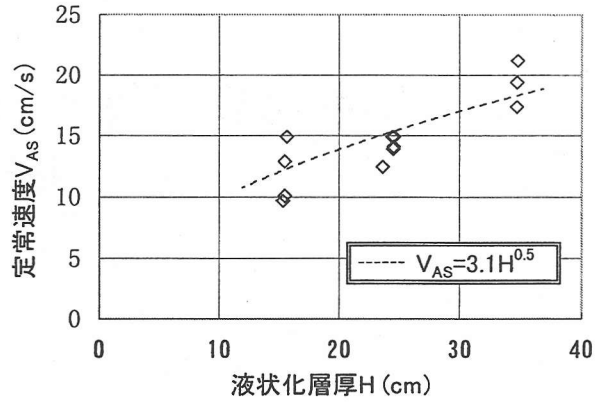


図7 地表面定常速度と液状化層厚の関係

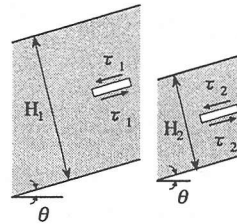


図8 2種類の層厚の実験におけるせん断応力

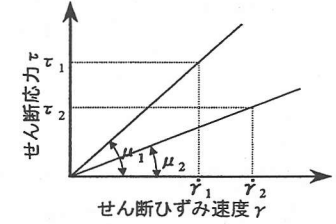


図9 2種類の層厚の実験におけるせん断応力とせん断ひずみ速度の関係

これは模型地盤の締固めが生じず相対密度が変化しないとの前提で得られる定常状態の速度と解釈することができる。図3にこのようにして求めた定常速度の一例を示す。

(3) 相似則の妥当性の検証

以上のようにして求めた定常状態の速度 V_{AS} と模型地盤の層厚(液状化層厚) H との関係を図7に示す。式(2)において粘性係数 μ_A が液状化層厚 H に無関係に一定とすれば定常状態の速度 V_{AS} は液状化層厚の2乗に比例して増大することになる。しかしながら図7の結果はこれと矛盾している。図中の点線は流動速度が仮に液状化層厚の平方根に比例するとして最小2乗法により引かれたものであるが、実験結果はこの線にほぼのっていることができる。この実験事実については以下のような説明が可能である。

図8に示すように層厚の異なる2種類の実験を行い、それぞれの流動が1次元の粘性流体の流れとして表わされるとする。傾斜地盤において重力の傾きによるせん断応力が作用し、定常状態で流動しているとすれば、せん断応力 τ とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係は図9に示すように下式で表される。

$$\tau_1 = \mu_1 \dot{\gamma}_1 \quad (3) \quad \tau_2 = \mu_2 \dot{\gamma}_2 \quad (4)$$

上式において μ_1, μ_2 はそれぞれの実験における粘性係数を示す。図8において液状化層厚の比 $H_2/H_1 = \lambda$ とすれば、せん断応力比 τ_2/τ_1 は式(5)に示すように λ となる。従って式(3)、(4)より式(6)が得られる。

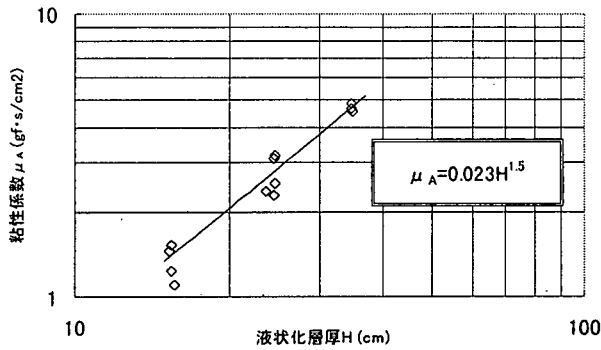


図10 粘性係数 μ_A と液状化層厚の関係

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{H_2}{H_1} = \lambda \quad (5) \quad \frac{\mu_2 \cdot \dot{\gamma}_2}{\mu_1 \cdot \dot{\gamma}_1} = \lambda \quad (6)$$

時間を表す記号を T とすれば式(7)が得られ、無次元量のせん断ひずみ γ_1, γ_2 が二つの実験が等しいとすれば、式(8)が得られる。

$$\frac{\mu_2 \cdot \gamma_2 \cdot T_1}{\mu_1 \cdot \gamma_1 \cdot T_2} = \lambda \quad (7) \quad \frac{\mu_2 \cdot T_1}{\mu_1 \cdot T_2} = \lambda \quad (8)$$

一方、液状化層厚の異なる2種類の実験においてレイノルズ数 Re が等しいとすれば、

$$Re = \rho_1 V_1 L_1 / \mu_1 = \rho_2 V_2 L_2 / \mu_2 \quad (9)$$

上式において ρ, V, μ はそれぞれ密度、速度、粘性係数を表す。L は長さを表す記号でこれを液状化層厚 H とし、さらに2つの実験での密度がほぼ等しいため、 $\rho_1 \doteq \rho_2$ とすれば、

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = \lambda \cdot \frac{V_2}{V_1} \quad (10)$$

が得られる。式(8)および式(10)より、液状化層厚比 $H_2/H_1 = \lambda$ とすれば、

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\lambda} \quad (11) \quad \frac{\mu_2}{\mu_1} = \lambda^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

が得られる。式(11)によれば定常状態は液状化層厚の平方根に比例して増大することを示している。このことは図7に示す実験結果をよく説明している。また図10に示すように粘性係数は液状化層厚のほぼ $3/2$ 乗に比例しており、式(12)が成立していることを示している。

2. 流動速度に及ぼす相対密度と加振加速度の影響

(1) 実験条件

模型地盤材料は図1に示す粒径を有する砂 A(豊州磯崎砂)、砂 B(新潟砂)、砂 C の3種類であり、模型地盤の相対密度は30~50%、土槽の加振加速度は100~700gal である。また地表面勾配は6%と一定とした。

(2) 実験結果

砂 A について定常速度 V_{AS} と加振加速度 A (gal) 及び相対密度 Dr (%) の関係を図11、12に示す。図示した結果によれば、流動

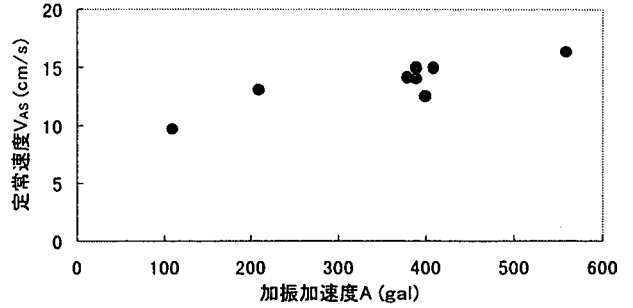


図11 定常速度 V_{AS} と土槽の加振加速度の関係(砂 A)

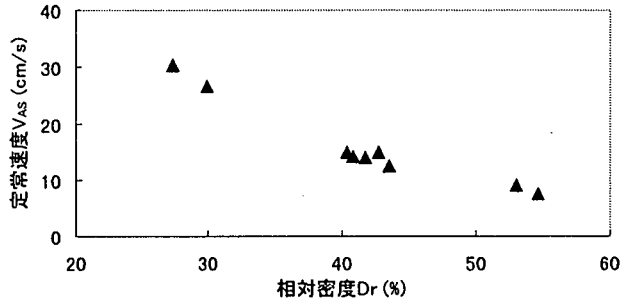


図12 定常速度 V_{AS} と相対密度の関係(砂 A)

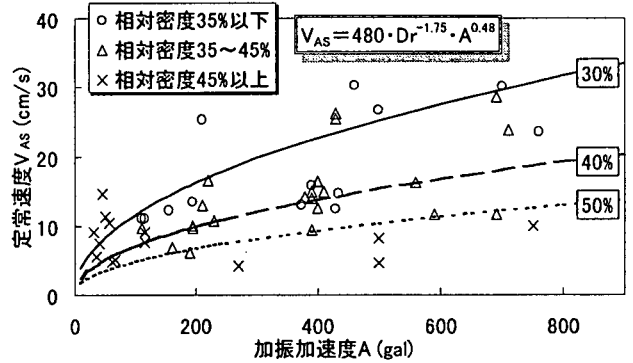


図13 定常速度 V_{AS} と加振加速度・相対密度の関係(砂 A, B, C)

速度は加振加速度および相対密度によって変化している。特に相対密度が流動速度に及ぼす影響が大きい。流動速度に対する相対密度および加振加速度の影響の割合について3種類の地盤材料でほぼ同様な結果が得られたので、砂 A, B, C の全ての実験データを用いて定常速度 V_{AS} と相対密度 Dr および加振加速度 A の関係を最小2乗法によって求めた。この結果を式(13)に示す。ここで V_{AS} (cm/s)、Dr (%), A (cm/s²) である。

$$V_{AS} = 480 \cdot Dr^{-1.75} \cdot A^{0.48} \quad (13)$$

実際の実験データと式(13)による加振加速度と定常速度の関係を図13に示す。

3. 模型実験結果の实地盤への適用

前述したように、液状化土の流動に関してレイノルズの相似則が成立し、流動速度が液状化層の平方根に比例して増大する。ここでは、この相似則を用いて模型実験結果を事例調査対象の地盤へ適用し、水平変位量の予測を試みる。式(13)で示され

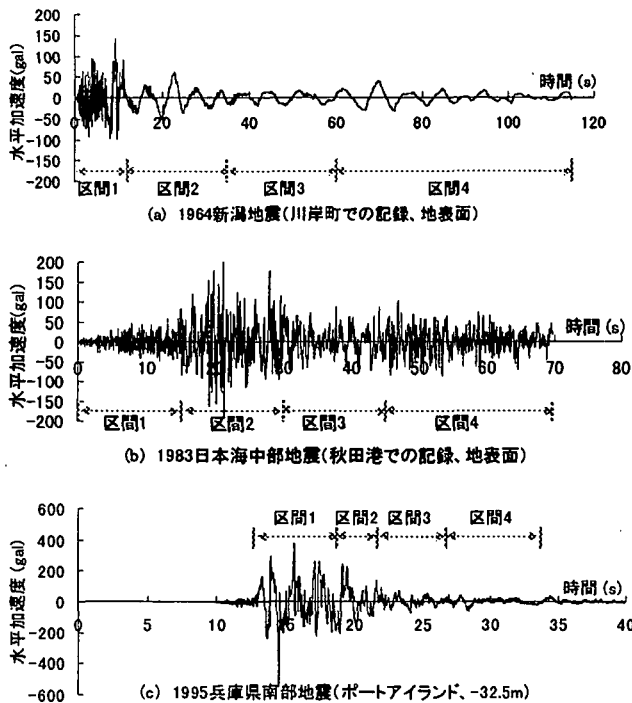


図14 既往地震の加速度波形

る速度 V_{A5} は液状化層厚 25cm、地表面勾配 6% の模型地盤の速度である。相似則を用いて層厚 H (m)、地表面勾配 θ (%) の実地盤へ拡張すると、実地盤での地表面速度 V_R (cm/s) は

$$V_R = 480 \cdot \frac{\sqrt{H}}{0.25} \cdot \frac{\theta}{6} \cdot D_r^{-1.75} \cdot A^{0.48} \quad (14)$$

$$= 160 \sqrt{H} \cdot \theta \cdot D_r^{-1.75} \cdot A^{0.48}$$

となる。これに流動継続時間 T (s) を乗じて実地盤での地表面変位 D (m) を表すと、下式が得られる。

$$D = 1.6 \cdot \sqrt{H} \cdot \theta \cdot D_r^{-1.75} \cdot A^{0.48} \cdot T \quad (15)$$

相対密度 D_r と N 値の関係をマイヤーホッフの式を用いて

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}} \quad (16)$$

と表す。ここで σ_v' (kgf/cm²) は上載圧である。一方、上載圧による補正 N 値 (\bar{N}) は

$$\bar{N} = \frac{1.7N}{\sigma_v' + 0.7} \quad (17)$$

とすれば式(15)および式(16)、(17)より

$$D = 0.0125 \sqrt{H} \cdot \theta \cdot A^{0.48} \cdot \frac{T}{\bar{N}^{0.875}} \quad (18)$$

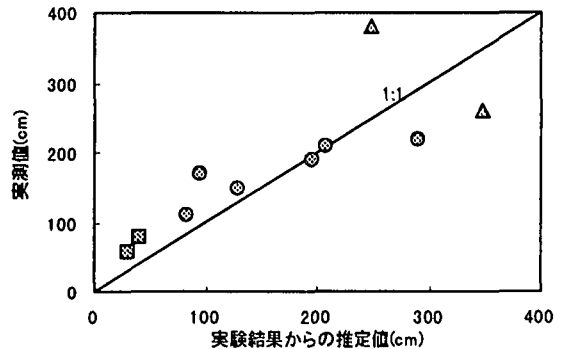
が得られる。上式において T (s) は地震動の継続時間、 A (gal) は継続時間内での加振加速度である。

既往地震による側方流動の事例解析において地表面変位 (D)、液状化層厚 (H)、地表面勾配 (θ)、補正 N 値 (\bar{N}) については表1のような結果が得られている¹⁾。

式(18)を用いて地表面変位を推定するには加振継続時間 (T :s) と加振加速度 (A :cm/s²) が必要であるが、これらについては

表1 既往地震での事例

地震名	地表面変位量 (m)	液状化層厚 (m)	地表面勾配 θ (%)	補正平均 N 値
日本海中部地震 (1983年)	1.50	4.3	0.8	14
	1.90	2.9	0.9	8
	2.10	2.5	2.0	17
	2.20	2.0	2.3	12
	1.70	2.6	0.8	15
兵庫県南部地震 (1995年)	1.10	1.0	1.0	13
	0.59	12.8	0.2	11
新潟地震 (1964年)	0.80	9.3	0.6	20
	3.80	11.9	0.8	14
	2.60	12.4	0.9	12



● 日本海中部地震 △ 新潟地震 □ 兵庫県南部地震

図15 模型実験結果より推定された地表面変位と実測値との比較

以下のように推定した。図14は既往事例における3地震の加速度記録を示す。新潟地震では川岸町での地表面記録³⁾、日本海中部地震では秋田港の地表面記録⁴⁾、兵庫県南部地震ではポートアイランドの地表面下-32.5mでの記録を用いている。これらの記録を図14に示すように加速度がほぼ一定値を保っていると考えられる複数の区間に分割し、それぞれの区間の継続時間 T_i とその区間における最大の加速度の大きさ A_i を求め、全地盤変位を各区間での変位の総和として下式より求めた。

$$D = \frac{0.0125 \cdot \sqrt{H} \cdot \theta}{\bar{N}^{0.875}} \cdot \sum A_i^{0.48} \cdot T_i \quad (19)$$

以上の方法によって算定した地表面変位と実測値との比較を図15に示す。模型実験結果を用いた相似則によって推定された地盤変位と観測値は良好な一致を示しており、模型実験結果を用いて実地盤の変位を推定することが可能であることが示された。

4. まとめ

模型地盤と実地盤の流動に関してはレイノルズに基づく相似則が成立していることが示され、模型実験結果を用いた実地盤の変位の推定値は観測値と良好な一致を示した。

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) 小泉安則：建築研究報告第42号、1965
- 3) 東京大学 工藤一嘉助教授提供
- 4) 倉田栄一、福原哲夫、野田節男：昭和58年日本海中部地震の港湾地域における強震観測、港湾技術資料 No.458, 1983