

遠心模型振動実験による傾斜地盤の側方流動特性

今村眞一郎¹・石原研而²・今 広人³・平田吉伸³・塚本良道⁴・萩原敏行⁵

¹正会員 西松建設株式会社 技術研究所 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4054)

²正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

³学生会員 東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻修士課程 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁴正会員 Ph. D. 東京理科大学講師 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁵正会員 工博 西松建設株式会社 技術研究所 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4054)

本研究では、液状化に伴う傾斜地盤の側方流動のメカニズムや流動特性の把握を目的として、層厚 10m を対象とした単層・2 層傾斜地盤モデルの流動特性に関する遠心模型振動実験を実施した。実験は、単層地盤モデルでは砂層の相対密度を変化させ、2 層地盤モデルでは上層 5m のシルト層の相対密度を変化させ、応答加速度、間隙水圧および側方変位を計測した。実験結果をもとに、地盤密度の違いが液状化過程、流動特性に及ぼす影響を定量的に明らかにした。特に流動特性に関しては、単層地盤モデルでは地盤密度に依存せず地表から深さ 3m 付近までが剛体的に流動すること、2 層地盤モデルでは下層の砂層の液状化に伴い上層のシルト層が剛体的に流動し、2 層の境界部付近の流動速度が地表面に比べて相対的に大きくなることが明らかにされた。

Key Words: Centrifuge model testing, Earthquake, Liquefaction, Lateral flow, Dynamic characteristics

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震、海外では1999年トルコ・コジャエリ地震、台湾・集々地震など相次いで地震が発生し、これらの地震では液状化に伴い側方流動が発生し、構造物基礎に甚大な被害を与えた。特に兵庫県南部地震では、多くの杭基礎が被害を受けたことから、近年では大地震に対する杭基礎の耐震性評価や側方流動に関する実験的・解析的研究が盛んに実施されている。

杭基礎の耐震設計にあたっては、最近の大地震における被害事例を踏まえ地盤内の変形を考慮し、損傷レベルに応じた合理的な設計法の確立が望まれる。よって、液状化流動地盤における杭の耐震設計法を確立するためには、杭基礎に大きな被害をもたらす要因である側方流動のメカニズムを解明し、この現象メカニズムや流動特性を考慮した構造物基礎の経済的かつ合理的な設計法や対策工を検討することは、耐震設計において最も重要な課題である。

東畑ら¹⁾、濱田ら²⁾やDobryら³⁾の研究にも挙げられるように、既往の地震の事例分析、数値解析および模型実験などの研究から、側方流動のメカニズムや流動量の推定式がこれまで数多く提案されているが、地盤条件や地盤構成に応じた側方流動特性、地震後の地盤の残留強度などに関して十分な解明が進んでいないのが実状である。

そこで本研究では、傾斜地盤の側方流動特性に関する基礎研究の一環として、液状化に伴う単層・2 層傾斜地盤モデルの側方流動特性に関する遠心模型振動実験を実施し、地盤の相対密度や地盤構成が液状化発生・消散過程、側方流動特性などに及ぼす影響について検討した。

2. 遠心模型振動実験

図-1に、側方流動実験システムの全体概要図および各センサーの設置位置を示す。実験には、遠心模型実験用に開発した大型せん断土槽⁴⁾ (内寸法: 幅650mm、奥行400 mm、最大深さ500mm、) を使用した。この土槽は、厚さ15mmの剛な積層板 (アルミニウム製) をベアリングを介して積み上げた構造をしており、深さ方向に変化する内圧に対し、平面ひずみ条件を維持するため3種類の積層板で構成されている。本土槽は、各積層板の最大変位量±15mmまで可能とし、実験条件に合わせて土槽深さを自在に変更できる構造にしている。さらに積層板の重量を下層の積層板へ一様に伝達し、安定した波形を得るための工夫としてプリテンション機構を採用している。なお、土槽の詳細な設計仕様および応答特性等については、文献⁴⁾を参照されたい。

模型地盤は、試料に豊浦砂 ($D_{50}=0.17\text{mm}$ 、 $e_{\text{max}}=0.976$ 、 $e_{\text{min}}=0.606$) を用いて所定の密度となるように層厚200mmの

飽和砂地盤モデルを水中落下法によりせん断土槽内に作製した。この飽和地盤モデルの作製では、相似則に基づき、粘性抵抗を高めたグリセリン水溶液を間隙水として用いた。

実験ケースを、表-1に示す。実物のスケールで地盤層厚10mを想定し、相対密度が側方流動特性に及ぼす影響を調べるため、単層傾斜地盤モデルでは、相対密度を3種類 ($D_r=25, 45, 65\%$) に変化させた。2層傾斜地盤モデルでは、下層5mの豊浦砂の相対密度は $D_r=45\%$ と固定し、上層5mには鳥取県境港市竹内団地で採取したシルト ($D_{50}=0.06\text{mm}$, $e_{\text{max}}=1.586$, $e_{\text{min}}=0.858$) からなる層を、相対密度を2種類 ($D_r=45, 65\%$) に変化させて作成した。さらに、間隙流体の影響を調べるため、間隙水に脱気水を使用したケース、傾斜角0度とした水平地盤のケースも併せて実施した。

遠心模型実験は、模型地盤を 50G の遠心力場で 2 度 (3.5%) 傾斜させた状態で、水平加速度 9g、周波数 100Hz、加振時間 0.2sec の正弦波 (実物換算にて 180gal、卓越周波数 2Hz、加振時間 10sec) を模型地盤の底面から斜面と平行に 20 波与えた。なお実験には、西松建設愛川衝撃振動研究所の遠心振動載荷実験装置³⁾ (有効半径 3.8m、最大遠心加速度 150G) を用いた。以下の図では、実物のスケールに換算したものをを用いている。

3. 実験結果および考察

(1) 過剰間隙水圧の上昇・消散過程

a) 単層傾斜地盤モデル (IKH-1, IKH-2, IKH-3)

測定点 P3 (2.5m)、P7 (7.5m) における過剰間隙水圧比の時刻歴を、図-2 に示す。P7 (7.5m) では、いずれも加振終了時付近 (0.2sec) で、また P3 (2.5m) では、加振終了後に過剰間隙水圧比が 0.8~1 に達しており、液状化に至るまでの時間に差があるものの、少なくとも地表から地盤深さ 7.5m までおぼろげに液状化していると判断できる。また、いずれの深さにおいても、相対密度が低いほど過剰間隙水圧比の初期の上昇勾配が大きく、地盤浅部ほど完全液状化に至るまでの時間が短いことから、地盤の密度との相関性が窺われる。また、傾斜地盤モデル (IKH-2) での間隙水圧の上昇過程は、加振開始直後に深部から順に完全液状化に早期に達する水平地盤モデル (IKH-4) との傾向とは明らかに異なり、傾斜勾配の影響を受けていることが判る。

一方、過剰間隙水圧の消散過程における P7 (7.5m) では、相対密度が小さいほど過剰間隙水圧の消散が大きく、P3 (2.5m) では IKH-2 と IKH-3 においては過剰間隙水圧の消散がほとんどなく液状化が継続していることが判る。ここでは図示していないが IKH-1 では、過剰間隙水圧の消散は地盤深部から生じ、浅部になるにしたがい消散が遅れていたが、IKH-2 と IKH-3 でみられた、最深部を除く各位置において加振後長時間にわたり液状化が継続するような傾向は見られなかった。

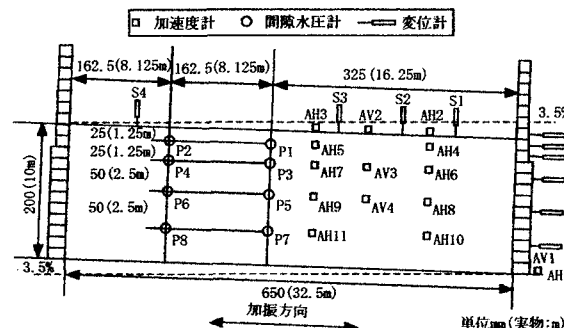


図-1 実験システム概要図およびセンサー設置位置

表-1 実験ケース

ケース	層厚 (mm)	試料	相対密度 (%)	傾斜勾配 (%)	間隙流体粘性 (cst)	備考
IKH-1	200	豊浦砂	25	3.5	50	相対密度の影響
IKH-2	200	豊浦砂	45	3.5	50	
IKH-3	200	豊浦砂	65	3.5	50	
IKH-4	200	豊浦砂	45	0	50	傾斜勾配の影響
IKH-5	200	豊浦砂	45	3.5	1	間隙流体の影響
IKH-6	200	シルト	45	3.5	50	地盤構成の影響
IKH-7	200	シルト	45			
IKH-8	200	シルト	65			

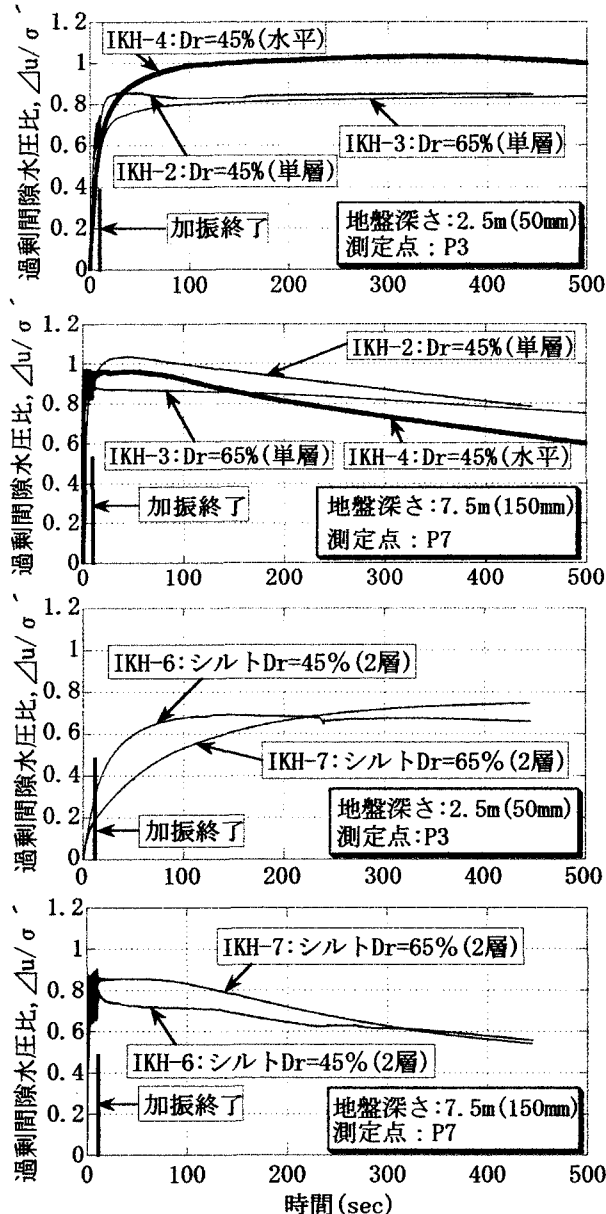


図-2 過剰間隙水圧比の時刻歴

b) 2層傾斜地盤モデル (IKH-6, IKH-7)

上層のシルト層中のP3(2.5m)に着目すると、図-2に示すように加振終了時点で過剰間隙水圧比が0.2~0.4を示し、加振後ではその比が0.65~0.7となるまでかなり長い時間を要して上昇していく様子が判る。一方、下層の砂層中のP7(7.5m)では、2ケース (IKH-6, IKH-7) ともに加振初期の過剰間隙水圧比の上昇割合はほぼ同じであった。加振終了時(10sec)の過剰間隙水圧比は0.8~0.9に達していることから、下層の砂層においてほぼ液状化していると判断できる。上層のシルト層の密度が大きいIKH-7の消散過程では、加振が終了してからしばらくして消散を始めるのに対し、上層のシルト層の密度が小さいIKH-6では、やや複雑な挙動を示しながら消散していく様子が判る。このような挙動を示すのは、加振終了後、下層の砂層の過剰間隙水圧の低下は砂層の透水係数に影響され、次に起こる過剰間隙水圧の低下は砂層に発生した余剰水がシルト層の密度の大小に応じて上方へと浸透が進行するにつれて消散していくためと考えられる。また、2層地盤モデルの下層の砂層の過剰間隙水圧の消散は、いずれのケースにおいても単層モデルのIKH-2に比べ早く進んでいることから、単層地盤モデルとの違いをここに明確に確認することができる。

(2) 側方変位分布

a) 単層傾斜地盤モデル (IKH-1, IKH-2, IKH-3, IKH-5)

加振中における側方変位分布について波数毎に整理したものを、図-3に示す。右図の加振10波目以降の側方変位は各ケースともほぼ同じ変位形状を示し、相対密度の違いが読みとることができない。そこで、左図に示す加振初期における側方変位分布では、加振直後 $t=1.0\text{sec}$ (2波目) から $t=2.0\text{sec}$ (4波目) の間では地表から深さ3m付近までが剛体的に流動し、その側方変位分布から相対密度の違いを明確に読みとれることが判る。なお、間隙水に脱気水を使用したIKH-5の結果は、Dobryら³⁾の実験結果とよく一致しており、当実験システムの信頼性が示唆される。

b) 2層傾斜地盤モデル (IKH-6, IKH-7)

2層地盤モデルでは、加振開始直後($t=1.0\text{sec}$)において地盤全体が剛体的に大きく流動し、さらに加振後 $t=2.0\text{sec}$ から加振終了時 $t=10\text{sec}$ (20波目) までは、上層のシルト層とその下層との境界部近傍を含めた範囲が剛体的に流動していることが判る。このことから、2層地盤モデルの上下層境界付近 (深さ5.0m付近) が、地表面に比べ大きく流動する結果となった。また、加振後における単層・2層地盤モデルの側方流動は相対密度や地盤構成の違いにもよるが、加振終了時の形状をほぼ保ちながら流動し続けていたことから、間隙水圧の計測結果と整合性があることも確認された。

(3) 地盤内の流動速度

加振初期に見られた側方流動の挙動を詳細に調べるた

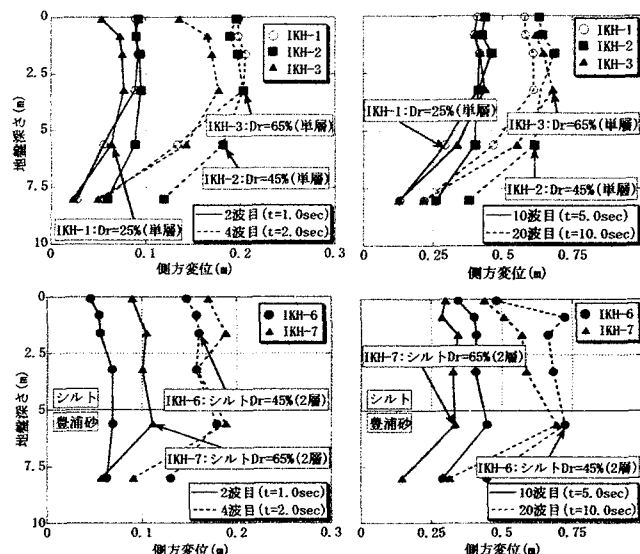


図-3 加振中における側方変位分布

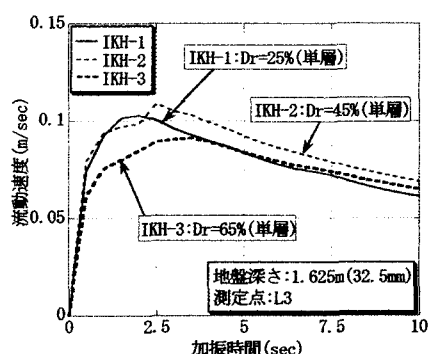


図-4 加振中の地盤流動速度

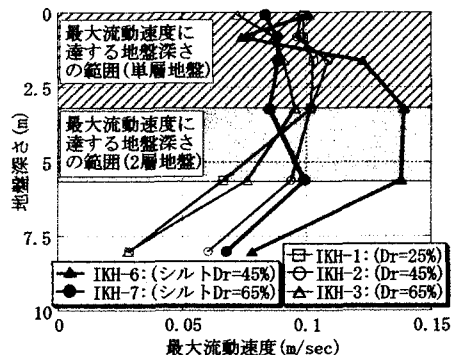


図-5 地盤深さと最大流動速度の関係

めに、ここでは単層地盤モデルの加振中における流動速度の経時変化を、図-4に示した。図から、加振を開始してから比較的早い時期に地盤の流動速度が最大に達し、加振直後と最大流動到達後の流動速度は、地盤密度に依存せずほぼ同じであることが確認できる。さらに最大流動速度に達する波数 ($Dr=25\%$: 4波目, $Dr=45\%$: 5波目, $Dr=65\%$: 7波目) を調べると、地盤密度の違いによって明らかに異なり、地盤の剛性との関連性が良いことが判る。

次に、地盤深さ方向の最大流動速度分布について比較したものを、図-5に示す。なお各ケースとも、地盤深さに依らず、最大流動速度になる波数は同じであった。単層地盤モデルでは、深さ約1.0m~3.5m付近と地表面付近に最大流動速度が生じているのに対し、2層地盤モデルでは上層のシ

ルト層と下層の砂層との境界面付近（深さ約3.0m～5.5m）において、最大流動速度が著しく大きいことが判る。国生⁶⁾やDobryら³⁾の研究からも、液状化層の上部にシルト薄膜や難透水層があると、液状化の発生に伴い水膜層を生じ、地盤の安定性を著しく低下させることが判っている。よって今回の実験結果においても、最大流動速度が2層地盤モデルの上下層の境界部付近に発生した一因として、液状化発生に伴い発生した上下層の境界部での水膜現象が考えられる。このことを踏まえると、2層地盤モデルの上下層の境界部での変位は、加振波数の増加につれ地表面に対する相対変位が徐々に大きくなっていることから判るように（図-3参照）、2層地盤モデルの側方流動現象は上層のシルト層の変形特性¹⁾よりも、むしろ水膜現象が側方流動に及ぼす影響が大きいことが言えると考えられる。

(4) 加振中および加振後の流動量の関係

単層・2層地盤モデル^{7), 8)}では各ケースともに、全側方変位のほぼ80%が加振中に発生し、加振終了後にも側方変位が漸増していた。そこで、加振中の側方変位から流動面積増分量を波数毎に整理しプロットしたものを、図-6に示す。

単層地盤モデルでは、加振直後に下層が液状化に至る付近の4～7波目にて流動増分量がピークに達し、このピーク以降の流動増分量は徐々に減少し、加振後も流動し続けていることが判る。また、相対密度の違いにより過剰間隙水圧の消散の程度が異なるため、この図からその流動特性の違いを明確に把握することができる。

2層地盤モデルでは、加振直後に下層が液状化に至る付近の4～5波目にて流動増分量がピークに達し、ピーク以降は単層地盤モデルと同じ傾向を示す。特に、上層のシルト層の透水係数が小さなIKH-7ケースでは、IKH-6ケースに比べ下層の砂層の過剰間隙水圧の消散に時間を要するため、流動面積増分量も大きくなっていると判断できる。

4. 結 論

本研究より得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 液状化時の傾斜地盤モデルにおける側方流動特性に関して、地盤の相対密度や地盤構成の違いが過剰間隙水圧の上昇・消散過程、側方変位分布などの流動特性などに及ぼす影響を定量的に明らかにすることができた。
- (2) 傾斜地盤モデルの側方流動は、全側方変位のほぼ80%が加振中に発生し、加振終了後においても間隙水圧の消散に伴い加振終了時の形状をほぼ保ちながら側方変位が漸増し、流動し続けることが確認された。
- (3) 液状化に伴う側方流動は、単層地盤モデルでは地盤密度に依存せず地表から深さ3m付近までが潤滑的に流動すること、2層傾斜地盤モデルでは上層のシルト層と下層の砂層との境界面付近において最大流動速度が発生し、上下層の境界部の変位は地表面に対して相対的に大きな変位

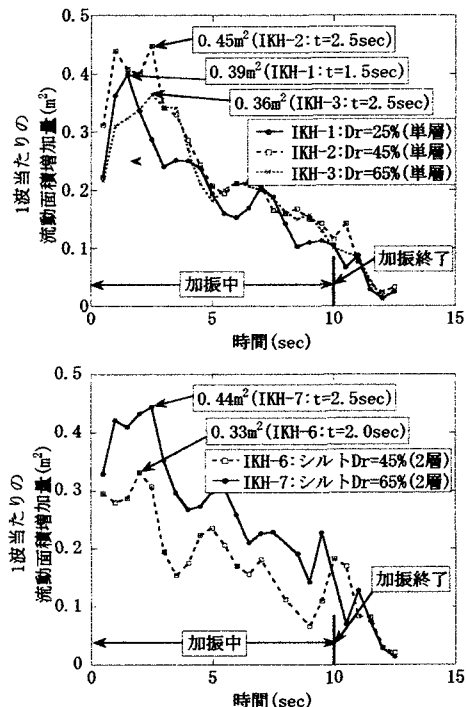


図-6 波数毎の流動面積増分量

が発生することが確認された。

今後は、傾斜地盤モデルにおける液状化時の側方流動に関して、傾斜角、加振レベルおよび非液状化層の厚さが流動特性に及ぼす影響について詳細に調べていく予定である。

謝 辞：本研究を実施するにあたり、貴重な資料、ご助言を頂いた西松建設土木設計部 平野孝行氏、西松建設技術研究所 宮崎啓一氏に対し謝意を表します。

参考文献

- 1) Towhata, I. et al. : Mathematical Principles in Prediction of Lateral Ground Displacement Induced by Seismic Liquefaction, 土木学会論文報告集, Vol. 39, No. 2, pp. 1～19, 1999.
- 2) 濱田ら：液状化による地盤の水平変位の研究, 地盤工学会論文報告集, No. 596/III-43, pp. 189～208, 1998.
- 3) Dobry, R., Taboada, T. & Liu, L. : Centrifuge modeling of liquefaction effects during earthquakes, *Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.1291～1321, 1997.
- 4) 今村ら：せん断土槽の違いが動的応答特性に及ぼす影響, 第35回地盤工学会研究発表会, pp2221～2222, 2000.
- 5) Imamura, S. et al. : Nishimatsu dynamic geotechnical centrifuge facility, *Proceeding of Centrifuge 98*, pp. 19-24, 1998.
- 6) 国生剛治：水膜現象が液状化砂層の側方流動に与える影響, 地盤工学会誌, 土と基礎 Vol. 47, No. 4, pp. 11～14, 1999.
- 7) 今村眞一郎・萩原敏行・石原研而・塚本良道・今 広人：傾斜地盤の側方流動特性に関する遠心振動模型実験, 第36回地盤工学会研究発表会発表講演集, 2001 (投稿中)。
- 8) 今村眞一郎・萩原敏行・石原研而・塚本良道・平田吉伸：遠心模型振動実験による液状化時の2層傾斜地盤の側方流動性, 土木学会第56回年次学術講演会, 2001 (投稿中)。