

非液状化層を有する地盤の液状化流動を受ける杭基礎構造物の模型振動実験

足立有史¹・三浦均也²・三原正哉³・浦野和彦⁴

¹ハザマ技術研究所 主任研究員
(〒305-0822 つくば市苅間515-1)

E-mail: adachi@hazama.co.jp

²豊橋技術科学大学建設工学系助教授 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: k-miura@tut.ac.jp

³ハザマ技術研究所 技術研究部長 (〒305-0822 つくば市苅間515-1)

E-mail: mihara@hazama.co.jp

⁴ハザマ技術研究所 主任研究員 (〒305-0822 つくば市苅間515-1)

E-mail: ab8601@hazama.co.jp

兵庫県南部地震をはじめとする大規模地震では、地盤の液状化や流動により杭基礎の被害が多く発生した。本研究では、地表面非液状化層を有する傾斜地盤の液状化による流動時の杭基礎被災メカニズムを調査することを目的に一連の1g場模型振動台実験を実施した。その際、非液状化層は透水性の高い材料を用いることで低透水性の影響は排除した。実験結果から、杭基礎に作用する地盤外力は、液状化に至る過程での共振現象によるものと、地盤流動時のサイクリックモビリティによる周期的な地盤剛性の回復によるものがあり、また、地表面非液状化層の存在が杭基礎被害に大きく関係していることが明らかになった。

Key Words : Shaking table test, Earthquake-induced liquefaction, Lateral flow of liquefied ground, Non-liquefaction layer, Pile foundation,

1. はじめに

過去の大規模な地震では、橋梁や建物の杭基礎、埋設管等多くの構造物が液状化による被害を受けており、河川周辺や港湾地域で発生する液状化地盤の流動によるものもその一つである。1964年の新潟地震以来、地盤の液状化による流動化現象による橋梁や建物の杭基礎の被害事例が大地震発生の際に報告され、被害メカニズムや対策工についての様々な調査研究が行われてきた¹⁾²⁾³⁾。

しかしながら、地盤流動や地中構造物に作用する流動圧、さらには流動地盤と構造物の相互作用の評価に関する適切なモデルは確立されていないのが現状である。また、実際に被害が発生した地盤の多くは、植生や舗装、路盤処理あるいは年代効果や不飽和サクシオンによってある程度固結した非液状化層で覆われている。このような地表面非液状化層は、流動時にも剛性の低下は小さく、透水係数が低いために液状化の継続時間を拡大するのみならず、杭基礎などへの外力を増大させる直接的な効果があると考えられる。しかしながら、地盤流動による杭基礎

の被災メカニズムにおいて、地表面非液状化層の影響はこれまで十分に検討されていないのが現状である。

本研究は、地盤流動と地表面非液状化層との相互作用に着目し、液状化傾斜地盤における地盤流動によって生じた杭基礎の被災メカニズムを明らかにすることを目的とし、3 タイプの地盤モデルに対して1g 場振動台実験を実施したものである。

2. 実験概要

図-1 に振動台模型の概要を示す。杭基礎模型は4本の鋼管と質量 10.13kg の剛なフーチングからなる。杭下端は土槽底面に溶接され、上端はフーチングとねじで固定されている。地盤傾斜上流側の杭の1 つには、曲げモーメントを計測するための9組のひずみゲージを設置している。ここで測定された全曲げモーメント M_t は2つの成分に分けることができる。1 つは地盤から受ける外力による曲げモーメント M_e で、他の1 つはフーチング部の慣性力によ

る曲げモーメント M_i である。 M_i はその質量に杭基礎の応答加速度を乗じることで計算でき、また、外力による曲げモーメント M_e は全曲げモーメント M_t から慣性力による曲げモーメント M_i を差し引くことで求めることができる。なお、杭基礎振動モデルの詳細については文献 4) を参照されたい。また、事前に実施した自由振動試験から杭基礎の固有振動数は約 10Hz であった。

土槽は鋼製で、土槽の前面と背面には強化ガラスを設置している。また、土槽長辺方向の端部には、土槽の振動による地盤への影響を低減させるためのスポンジゴム ($t=5\text{cm}$) を設置している。地盤材料は平均粒径 $D_{50}=0.54\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=2.11$ 、最大乾燥密度 $\gamma_{\max}=1.745\text{g/cm}^3$ 、最小乾燥密度 $\gamma_{\min}=1.475\text{g/cm}^3$ の珪砂 (5号) である。液状化地盤は、乾燥した珪砂を均質に投入するための移動式スリットを用い、水中落下法によって層厚 5cm ごとに土層を作成し、所定の相対密度 $Dr=50\%$ (誤差 3%) を確認した。この材料の $Dr=50\%$ における液状化強度比は繰返し非排水三軸試験結果より $R_{L20}=0.17$ ($\Delta u/\sigma'_0=95\%$) であった。計測器は加速度計、間隙水圧計、非接触型の変位計および杭のひずみゲージを図-1に示すように配置した。本研究では、非液状化層の低透水性の影響を除去して剛性の影響のみを調べるため、地表面非液状化層には平均粒径 $D_{50}=6.3\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=3.55$ の角張った川砂利を用いた。川砂利は目が粗く細長い綿製の袋30個に分けて密に詰め、図-2に示すように隙間なく地表面上に配置した。また、すべての袋詰め川砂利が密着するように杭基礎近傍では小さな袋12個を用い隙間を調整した。なお、非液状化層の変位が土槽の壁によって拘束されないよう、非液状化層を土槽両端部から 10cm 程度離している。

基本ケース (Case st) は図-1のように、地盤傾斜 5° 、非液状化層厚 3.5cm である。これに対して、非液状化層の影響、地盤傾斜の影響を比較検討する目的で、その他 2 ケースを実施した (図-3)。

地盤の固有振動数は、事前に実施した正弦波 (振幅 5Gal) のステップ加振試験では約 40Hz であった。振動台入力加速度はすべてのケース共通で、最大振幅 150Gal 、周波数 4Hz の正弦波とした。継続時間は前後 1 秒間のテーパ部を含めた 12 秒間である。

3. 実験結果及び考察

(1) 各ケースにおける全般的な挙動

図-4~6に各ケースの地盤および杭基礎の主な挙動を示す。グラフ (a) は地盤中央部の過剰間隙水圧の時刻歴である。加振開始約 1.3 秒後にはすべての深度で過剰間隙水圧は初期鉛直有効応力に達し、液状化に至った。その状態は約 5 秒間継続した。その後、地盤深部の過剰間隙水圧 (p_{3c}) は減少し始め、加振終了後にはすべての点で過剰間隙水圧は静水圧の状態まで急速に減少した。この傾向は、地盤傾斜や地表面非液状化層の条件の違いにかかわらずほぼ同様

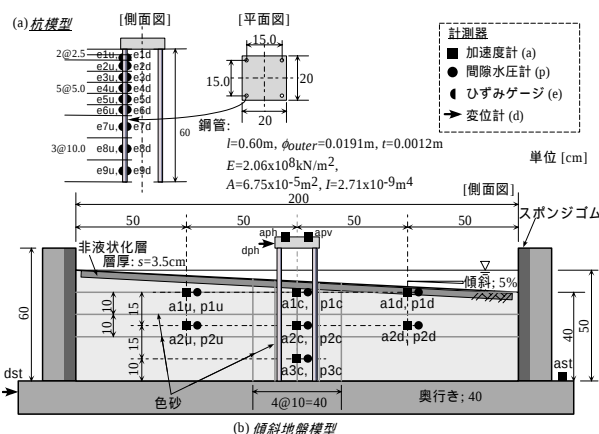


図-1 振動台模型の概要図【Case st】; (a) 杭基礎, (b) 傾斜地盤模型及び計測器

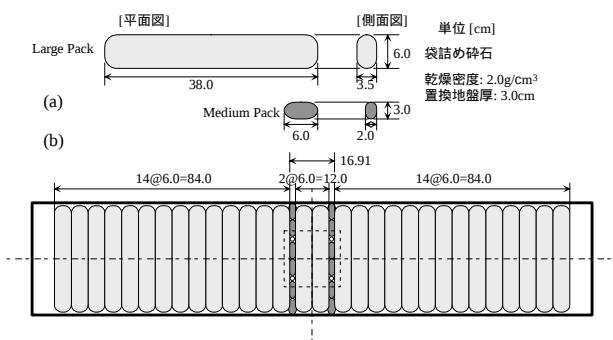


図-2 非液状化層; (a) 袋詰め砕石の形状, (b) 袋詰め砕石配置図

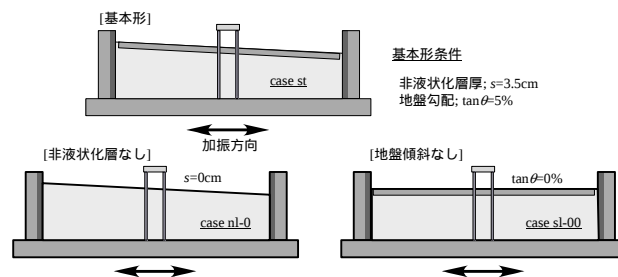


図-3 実験ケース

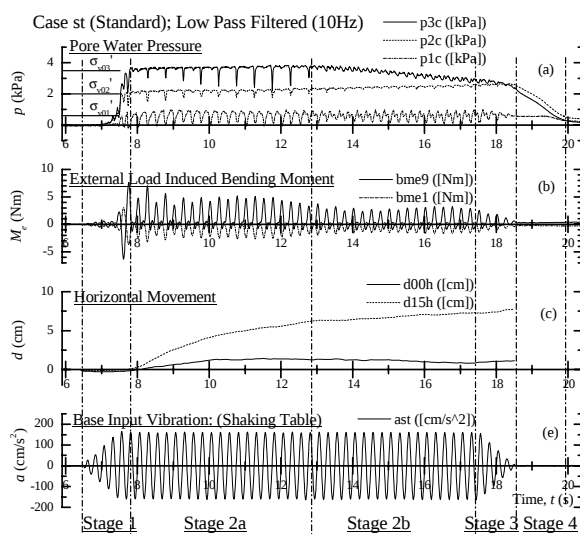


図-4 地盤及び杭基礎の挙動 (Case st)

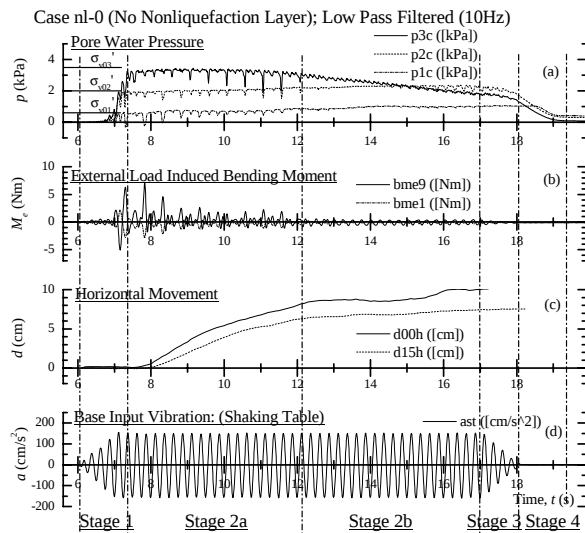


図-5 地盤及び杭基礎の挙動 (Case nl-0)

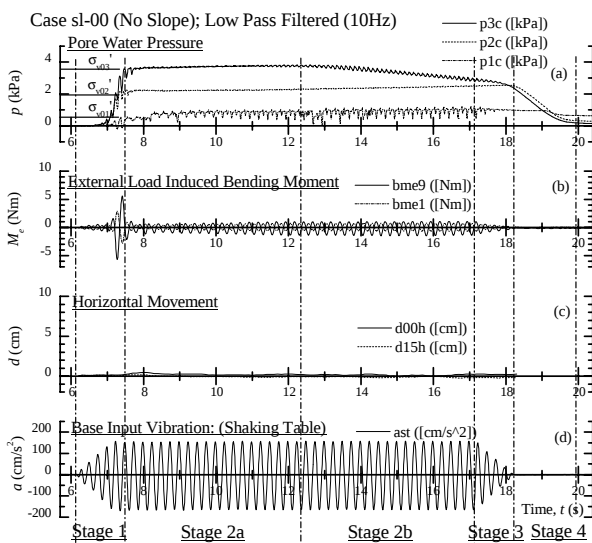


図-6 地盤及び杭基礎の挙動 (Case sl-00)

であった。

2番目のグラフ(b)は地盤から作用する外力によって発生する杭の曲げモーメント M_e の時刻歴である。各ケースとも過剰間隙水圧の上昇に伴い曲げモーメント M_e は増加し、液状化に至る直前で一時的に大きな値を示している。その後、 M_e は減少するが、地盤傾斜がある場合、下流方向に繰り返し荷重が作用するのに対し、平坦な地盤では左右対称に作用し、その値は小さい。また、傾斜地盤で非液状化層を有する場合、より大きな地盤外力が作用している。

3番目のグラフ(c)はビデオ画像から観測された色砂の地盤水平変位である。地盤中央部の地表面(非液状化層ありの場合はその直下)およびGL-15cmの位置における結果を示している。地盤傾斜がないCase sl-00では水平変位はほとんど生じていない。一方、地盤傾斜を有するCase st, Case nl-0では、地盤が液状化に至った時点から流動しはじめたことがわかる。また、Case stでは、地表面からGL-15cmの位置での変位量が約10cm生じたのに対して、地表面では杭基礎により水平変位が抑えられ2cm以下にとどまっている。この変形挙動から、傾斜地盤の液状化時

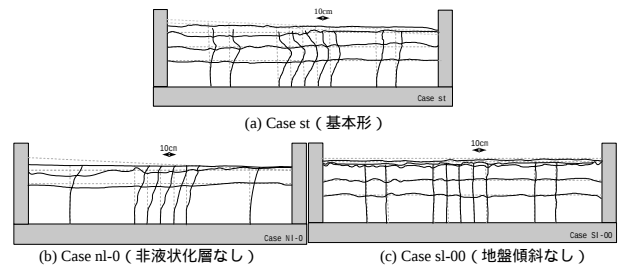


図-7 加振終了後色砂変形スケッチ
の流動により、地表面非液状化層周辺からの外力が杭基礎に作用したものと推察できる。また、各ケースにおける加振終了後の変形スケッチ(図-7)を表-1 ステージ区分

区分	内容
Stage 1	加振開始から液状化に至るまでの範囲
Stage 2a	Stage1 終了後、過剰間隙水圧(p3c)減少開始まで
Stage 2b	Stage2a 終了後、一定振幅をとまう加振終了まで
Stage 3	Stage2b 終了後、加振終了まで(入力加速度がテーパ部範囲)
Stage 4	加振終了後、静水圧状態になるまで(過剰間隙水圧が消散するまでの範囲)

ら、Case stでは、非液状化層の影響によると考えられる大きなせん断変形が地表面非液状化層直下で生じていることがわかる。

最下段のグラフ(d)は振動台の絶対加速度時刻歴、すなわち入力加速度である。

上述した加振時の挙動を詳細に検討するため、加振過程を図-4~6中の点線で区切られる5つのステージに分類した。各ステージ区分を表-1に示す。

以下では、Case stの詳細な挙動(Stage 1および2a)について分析し、地表面非液状化層および地盤傾斜の影響について考察する。

(2) 液状化に至るまでの過程(Stage 1: 図-8)

Stage 1 の最初の部分では、過剰間隙水圧の上昇がほとんどなく地盤剛性の低下も小さいため、地盤の変位は極めて小さい。また、杭基礎と地盤の位相もほぼ一致している(図-8 a,b)。この段階での杭基礎の振動は健全な地盤に支えられている影響で、地盤がない状態で振動させた場合と比べ小さくなっている。その後、過剰間隙水圧の増加による地盤有効応力および剛性の低下に伴って、地盤の固有振動数も低下し、液状化に至る直前で振動台と地盤の絶対加速度の位相差は約 $\pi/2$ となっていることから、共振現象が生じたものと考えられる。共振状態を示す数サイクル間で、杭に発生する曲げモーメント M_e は最大値を生じている(図-8 c,d)。この時点で、地盤剛性はかなり低下しているものの、地盤の初期形状は保持されており、杭基礎は地盤とほぼ同様に振動していることがわかる。なお、Stage 1における現象は、他の2ケースについてもほぼ同様に生じていることがわかった。

(3) 液状化継続状態(Stage 2a: 図-9)

Stage 2a では、地盤と杭基礎との相互作用が液状

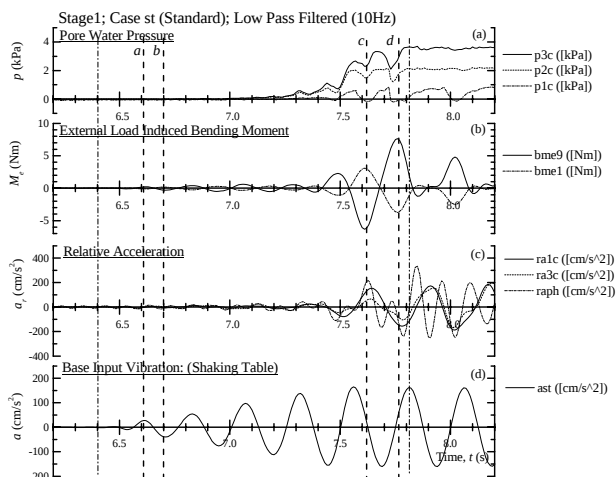


図 - 8 地盤及び杭基礎の挙動 (Stage 1; Case st)

化地盤の相対変位の増大と地盤流動の発生によって顕著に現れている。曲げモーメント M_e の時刻歴から、地盤外力は上流側からのみ作用し、下流側からはほとんど作用していないことがわかる。各サイクルにおいて曲げモーメント M_e の最大値は杭基礎と地盤の両方が、同時に下流側に向けた際（フェーズ b）に生じている。また、この最大曲げモーメントの発生と同時に過剰間隙水圧の低下するサイクリックモビリティ現象が確認できる。これは杭基礎周辺部でより顕著に生じているとともに上流側の一部の領域でも確認することができた。このサイクリックモビリティにより地盤は一時的に有効応力及び剛性を回復し、杭に作用する外力を増大させる要因となったものと考えられる。逆にこの剛性の回復がなければ、液状化した地盤は杭の間をすり抜け、曲げモーメントの発生は小さいものと考えられる。これらの特徴的な挙動は地表面非液状化層とその下部の液状化地盤との相互作用の効果によるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、一連の模型振動実験により液状化地盤中の杭基礎の挙動について検討した。以下に結果をまとめる。

非液状化層、地盤傾斜の有無によらず地盤の共振現象は液状化に至る直前で生じた。そして共振状態にある数サイクルの間に、非液状化層や地盤傾

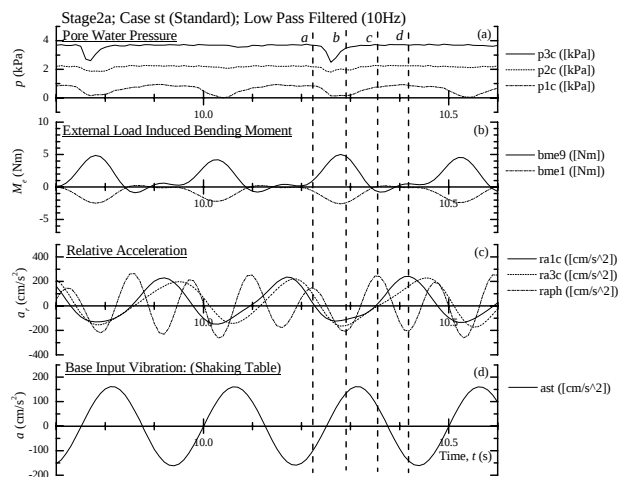


図 - 9 地盤及び杭基礎の挙動 (Stage 2a; Case st)

斜の有無によらず大きな外力が杭に作用したことが確認された。

傾斜地盤の場合、液状化中、下流側へ向かって移動する際にのみ生じるサイクリックモビリティに連動し、地盤から作用する外力は周期的に下流側へ向かってのみ生じた。特に非液状化層を有する地盤では、加振中、常に有効上載圧として作用しているため、サイクリックモビリティが継続しやすい状態にあったと考えられる。

平坦な地盤の場合では、外部荷重は正弦波形であり、傾斜地盤と比べ、極端に小さかった。

参考文献

- 1) 浜田政則・安田進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察，土木学会論文集，土木学会，No.376，-6, pp.211-220, 1986.
- 2) Inagaki, H., Iai, S., Sugano, T., Yamazaki, H. and Inatomi, T. (1996). "Performance of caisson type quay wall at Kobe port, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, Soils and Foundations, pp.119-136
- 3) 兵庫県南部地震 道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における調査報告書，1995.
- 4) 三浦均也，三原正哉，浦野和彦・足立有史：側方流動実験における杭模型の振動特性とバネモデルによる解析，第38回地盤工学研究発表会発表講演集，地盤工学会，pp.1915-1916, 2003.

(2003. 9. 12 受付)

Model Shaking Table Test on the Behavior of Pile Foundation Subjected to Earthquake-Induced Lateral Flow of Ground with Non-liquefied Surface Layer

A series of shaking table tests was conducted on three types of model sloping ground with pile foundation. This study aims to reveal the mechanism of damage to pile foundation induced by the lateral flow of liquefied sloping ground, with special attention on the interaction between the pile foundation and the surface non-liquefaction layer. As the result of comparative examination of the observed behaviors, the significant combined effect of surface non-liquefaction layer and lateral flow on the damage to pile foundation was clarified.