

非液化化層を有する地盤の液化化流動を受ける杭基礎構造物の模型振動台実験

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

足立有史 (あたち ゆうし)

ハサマ技術研究所 主任研究員

三原正哉 (みはら まさや)

ハサマ技術研究所 技術研究部長

三浦均也 (みうら きんや)

豊橋技術科学大学助教授 建設工学系

浦野和彦 (うらの かずひこ)

ハサマ技術研究所 主任研究員

1. はじめに

大規模な地震では、多くの構造物が液化化による被害を受けるか、河川周辺や港湾地域で発生する液化化地盤の流動によるものもその一つである。1964年の新島地震以来、地盤の液化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)~4)}。

実際に被害が発生した地盤の多くは、植生や舗装、路盤処理また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化化層で覆われている。このように流動時にも剛性を失わない地表面非液化化層は、透水係数が低いために液化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、地表面非液化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、杭基礎と地表面非液化化層との相互作用に着目し、液化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振動台実験を実施した。その結果、杭基礎の被害に関して非液化化層および地盤流動の複合的な効果が明らかになったので報告する。

2. 実験概要

図-1に杭基礎模型と土槽内の傾斜地盤模型を示す。杭基礎模型は4本の鋼管と質量10.13 kg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して固定されている。地盤傾斜上流側の杭の一つには、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 は二つの成分に分けることかできる。一つは地盤から受ける外力による曲げモーメント M_e と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 はその質量に直接測定できる杭基礎の応答加速度を乗することで計算することかでき、外力による M_e は計測結果から得られた全曲げモーメント M_t から M_i を差し引くことにより求めることかできる。なお、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10 Hzであった。

土槽は長さ200 cm、深さ60 cm、奥行き40 cmの鋼製で、土槽の前面と背面には強化ガラスを設置している。地盤材料は平均粒径 $D_{50} = 0.54$ mm、均等係数 $U_c = 2.11$ 、最大乾燥密度 $\rho_{max} = 1.745$ g/cm³、最小乾燥密度 $\rho_{min} = 1.475$ g/cm³の珪砂(5号)である。液化化地盤は、乾燥した珪砂を均質に投入するために準備した移動式のスリットを用い、水中落下法によって層厚5 cmごとに土層を作成し、所定の相対密度 $D_r = 50\%$ (誤差3%)を確認した。この材料の $D_r = 50\%$ における液化化強度比は繰返し非排水三軸試験結果より $R_{L20} = 0.17$ ($\Delta u/\sigma'_v = 95\%$)であった。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て地盤および杭基礎の挙動を観察した。本研究では、非液化化層の低透水性の影響を除去して剛性のみを調べるため、地表面非液化化層には平均粒径 $D_{50} = 6.3$ 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。

基本ケース (Case st) は図-1に示すとおりで、地盤傾斜は5%、非液化化層の厚さは3.5 cmである。これに対して、非液化化層の影響、地盤傾斜の影響を比較検

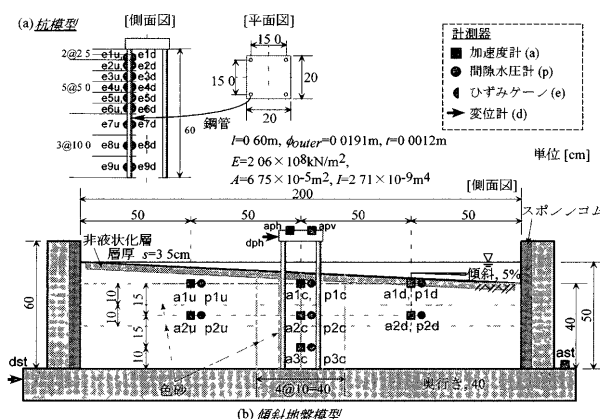


図-1 振動台模型の概要図【Case st】、(a)杭基礎、(b)傾斜地盤模型および計測器

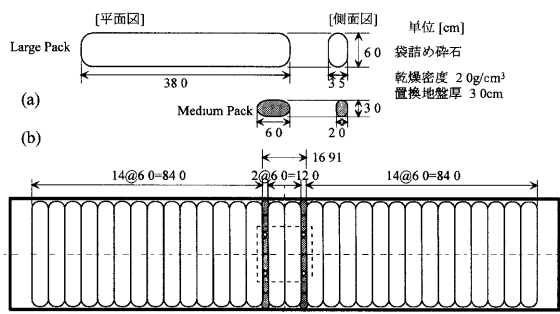


図-2 非液化化層, (a)袋詰め碎石の形状, (b)袋詰め碎石配置図

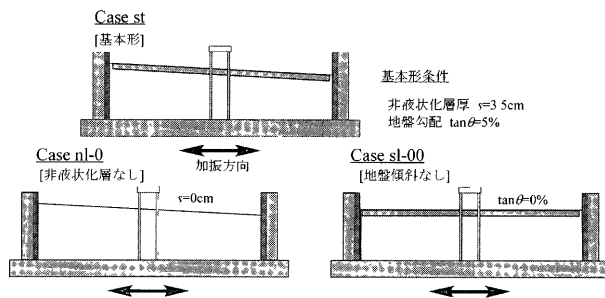


図-3 実験ケース

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5 Gal)のステップ加振試験では約40 Hzであった。振動台入力加速度はすべてのケースで共通で, 最大振幅150 Gal, 周波数4 Hz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. 実験結果および考察

3.1 非液化化層を伴う地盤流動時の挙動 (Case st)

図-4にCase stで観察した地盤および杭基礎の挙動を示す。1番上の図-4(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, 液化化状態となっている。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(p3c)は減少し始めた。加振終了後は, 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化化層の条件の違いにかかわらずほぼ同様であった。

図-4(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。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, 液化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 は液化化が継続している間はほぼ一定の振幅を示しており, 地盤外力の作用方向は杭を下流側に変形させる方向に限られていることがわかる。図-4(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り, 地盤中央部の地表面(非液化化層ありの場合はその直下)およびGL-15 cmの位置における結果を示している。地盤の水平変位は, 地盤が液化化に至った時に始まったことがわかる。地表面からGL-15 cmの位置での変位量が約

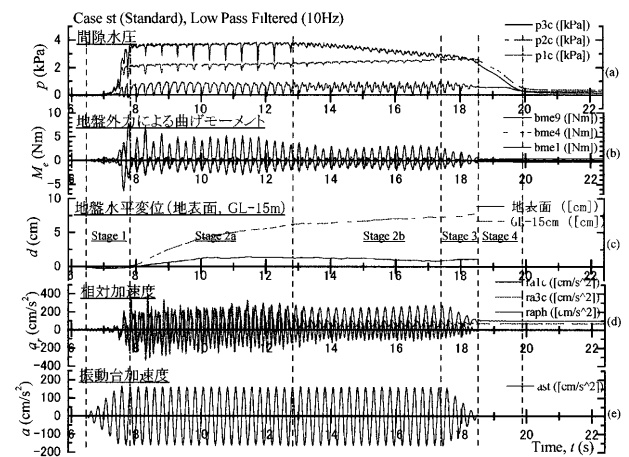


図-4 地盤および杭基礎の挙動 (Case st)

10 cm 生じたのに対して, 地表面では杭基礎により変位は抑えられ2 cm 以下にとどまっている。この変形挙動から, 傾斜地盤の液化化による流動圧が地表面の非液化化層を介して杭基礎に作用したことがわかる。また, 各ケースにおける加振終了後のビデオ画像および写真口絵-1, 2, 3から, Case stでは, 非液化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化化層直下で生じていることがわかる。

図-4(d)は地盤およびフーチングの相対水平加速度時刻歴を示している。この図より液化化時における杭基礎の変形を知ることができる。

最下段の図-4(e)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(c)の点線で区切られる五つのステージに分類した。この分類は他の2ケースについても同様に適用した。以下では, 主にステージ1(液化化発生まで)とステージ2a(液化化時)において, 他の2ケースとの比較を行いながら, 地盤と杭基礎の挙動を考察する。

3.2 地表面非液化化層 (Case nl-0) と地盤流動 (Case sl-00) の影響

図-5は3ケースの挙動を比較して示している。

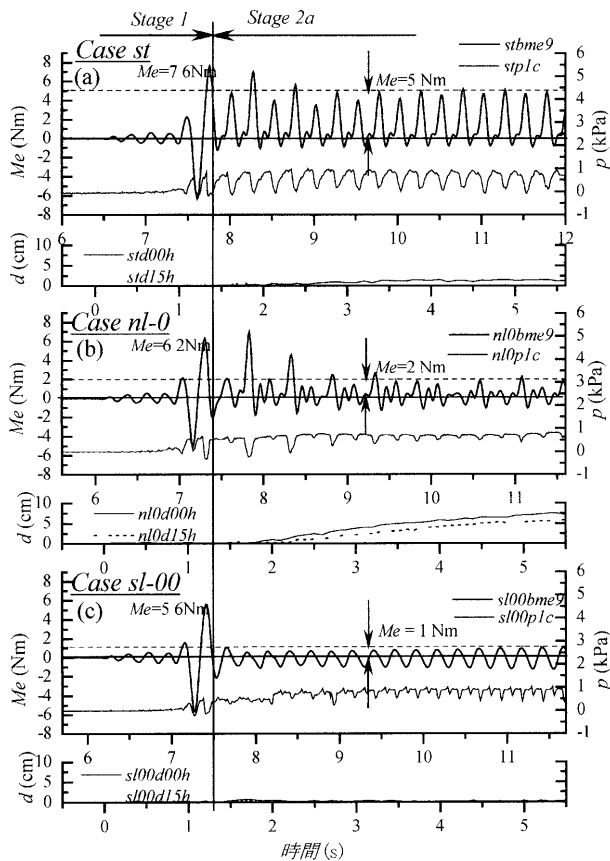
3.2.1 液化化直前の共振現象 (ステージ1)

すべてのケースに共通して, 液化化に至る直前で曲げモーメントが両方向に大きく発生しているのがわかる。初期状態では, 地盤の固有振動数(40 Hz)は杭基礎の固有振動数(10 Hz)よりも大きいので, 加振直後の杭基礎の振動は地盤によって抑制されて比較的小さい。一方, 液化化に至る過程では, 間隙水圧の発生に伴い地盤剛性が徐々に減少し, ある段階で地盤の固有振動数が入力振動数(4 Hz)に一致して地盤が共振現象を生じ, これに伴い地盤の振動が増大し, 一時的に杭基礎に大きな外力が作用したと考えられる。この時の最大曲げモーメント M_e はCase st, Case nl-0, Case sl-00においてそれぞれ, 7.6, 6.2, 5.6 Nmであり, 地表面非液化化層と地盤傾斜の影響により外力が増大する傾向が見られる。

3.2.2 液化化地盤の流動

傾斜地盤の場合 (Case st, Case nl-0), 液化化に至る

論文

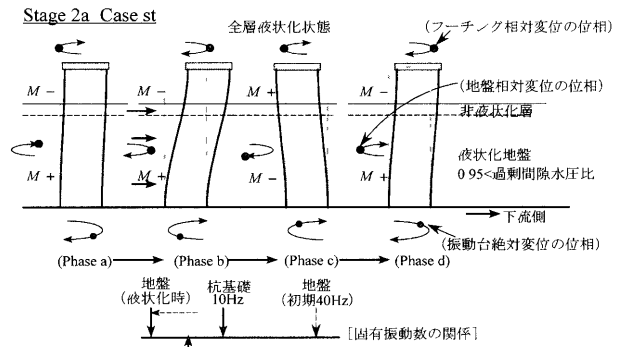


図—5 曲げモーメント，過剰間隙水圧，側方変位の比較，(a) 基本条件 Case st, (b) 非液状化層無し Case nl, (c) 水平地盤 Case sl-00

のと同時に地盤流動が発生したのに対し，地盤傾斜がないケース (Case sl-00) では地盤の水平永久変位は無視できるほどである。また，地表面非液状化層がない場合 (Case nl-0)，水平変位量は地表面で最大となり，その量は10 cmを超えた。一方，非液状化層を有する地盤 (Case st) の場合，地表面水平変位量が小さかったことは，地表面非液状化層の変位が杭により抑制され，反作用として杭基礎には非液状化層から大きな外力が作用したことを示唆している。

3 2 3 液状化時の杭基礎への地盤外力

地盤が液状化に至った後 (ステージ 2a) は，基本ケース Case st では杭を下流側に変形させる方向へのみ大きな水平荷重が繰返し作用した (杭下部での $Me = 約 5 \text{ Nm}$ ，およそ100 Nの水平荷重に相当)。フーチング部の相対加速度と全曲げモーメント Mt から推定した杭基礎の変形，および地盤外力によるモーメント Me から推定した地盤外力の関係を図—6に模式的に示す。ここでは，振動1サイクルを等分する四つの位相 (Phase a～d) を示している。杭基礎と液状化地盤，非液状化層の相互作用により，杭基礎は不規則に2サイクル振動している。地表面非液状化層を有しない Case nl-0 においても荷重は主に杭を下流側に変形させる方向へ作用しているが，その値は小さい ($Me = 約 2 \text{ Nm}$)。また，地盤傾斜かない Case sl-00では，外力は両側に繰返し作用



図—6 杭変形と地盤外力の関係 (Case st, ステージ 2a)

するがその値はさらに小さい ($Me = 約 1 \text{ Nm}$)。

この载荷サイクルにおいて，過剰間隙水圧の減少，すなわち有効応力と地盤剛性の回復によるサイクリックモヒリティー現象が認められるのは興味深い。有効応力の回復量に対応して外力も一時的に増大している。

3 2 4 杭基礎の残留曲げモーメント

非液状化層および地盤傾斜を有する Case st の場合，過剰間隙水圧消散後の残留曲げモーメント Me は加振時の最大値の1/10以下であった。また，非液状化層の無い (Case nl-0) 場合にその値はさらに小さく，水平地盤 (Case sl-00) の場合，地盤流動が発生しないために残留曲げモーメントはほとんど発生しなかった。

4 おわりに

一連の模型振動実験により地表面非液状化層を有する液状化地盤中の杭基礎挙動を観察した。その結果，地盤の流動が生じる場合，杭基礎の被害発生に地表面非液状化層が深く関与していることが明らかになった。今後は，非液状化層の厚さ，剛性，地盤傾斜および加振方向を変化させたケースについて実験を実施するとともに，地震時に杭に作用する外力を詳細に調査し，杭基礎の被害メカニズムを定量的に検討する予定である。

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，No 376, III-6, pp 211～220, 1986
- 2) Inagaki, H, Iai, S, Sugano, T, Yamazaki, H and Inatomi, T 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, 1996
- 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) Hamada, M, Ohtomo, K, Sato, H, Iwatate, T Experimental Study of Effects of Liquefaction-induced Ground Displacement on In-ground Structures, Proc., 4th Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-92-0019, Vol 1, pp 481～492, 1992

(原稿受理 2003 2 10)