

# 汎用三次元 FEM に二相系支配方程式を導入した液状化解析手法

## その2 杭基礎を対象とした遠心力载荷実験の再現シミュレーション

岩井 創<sup>\*1</sup>・柴田 景太<sup>\*1</sup>・宇野 浩樹<sup>\*2</sup>・船原 英樹<sup>\*1</sup>

Keywords : liquefaction, pile foundation, centrifuge test, u-w formulation, Stress-Density model, 3D effective stress analysis  
 液状化, 杭基礎, 遠心力载荷実験, u-w 定式化, Stress-Density モデル, 三次元有効応力解析

### 1. はじめに

臨海部の埋立地や河口付近の沖積地盤などの、砂質土が緩く堆積し、地下水位が高い地盤では、地震時に液状化が発生する可能性がある。このような液状化地盤中に杭基礎構造物を計画する場合、杭の損傷による上部構造物の沈下や傾斜が生じないように、液状化地盤及び杭の挙動を正確に評価して締固め改良などの適切な対策を行う必要がある。

液状化地盤と杭の地震時挙動を評価する有力な手法として、地下水の存在を考慮した三次元有効応力解析（液状化解析）がある。その2<sup>1)</sup>では、その1<sup>1)</sup>で紹介した有効応力解析機能（二相系支配方程式及び三次元弾塑性構成則）を導入した汎用構造解析プログラム TDAPIII を用いて、地盤と杭基礎を対象とした遠心力载荷実験<sup>2)</sup>の再現シミュレーションを実施する。そして、地盤における過剰間隙水圧の上昇過程や杭に作用する力を実験結果と比較することによって、新規導入機能による実現現象の再現性を検証する。

1/50) であり、寸法は実スケールで示している。

地盤材料には豊浦砂を用い、締固め改良部分及び深部地盤の相対密度を  $Dr=90\%$ 、未改良部分の相対密度を  $Dr=60\%$  としてせん断土槽中に作製した。飽和地盤の間隙流体にはシリコンオイルを用い、粘性を水の 50 倍とした。上部構造物（質量：約 3.9kg）を支える 4 本の杭は中空のステンレス製であり、杭径は 500mm、板厚は 15mm である。入力地震動には、最大加速度を約  $120\text{cm/s}^2$  に調整した臨海波を用いた。図-2 に改良なしのケースで計測した振動台の加速度時刻歴を示す。

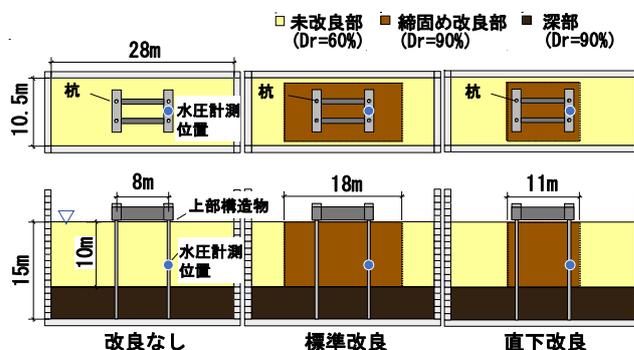


図-1 試験体概要

Fig.1 Outline of test models

### 2. 実験概要

実験は、表層地盤の締固め改良範囲が杭の地震時挙動に及ぼす影響を調べるために実施したものであり、未改良地盤から締固め改良地盤への透水や、杭と液状化地盤の相互作用を検証するために解析対象として選定した。改良範囲の異なる 3 つのケースを対象とし（図-1）、締固め改良を施さないケースを「改良なし」、構造物の外側に改良深さの 1/2 の余改良を施したケースを「標準改良」、構造物直下のみを締め固めたケースを「直下改良」と呼ぶ。遠心加速度は 50G（模型縮尺

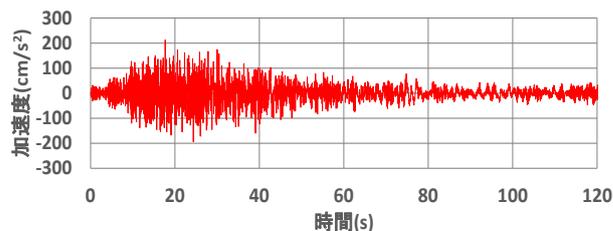


図-2 振動台で計測した加速度時刻歴

Fig.2 Acceleration time history measured on the shaking table

\*1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

\*2 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

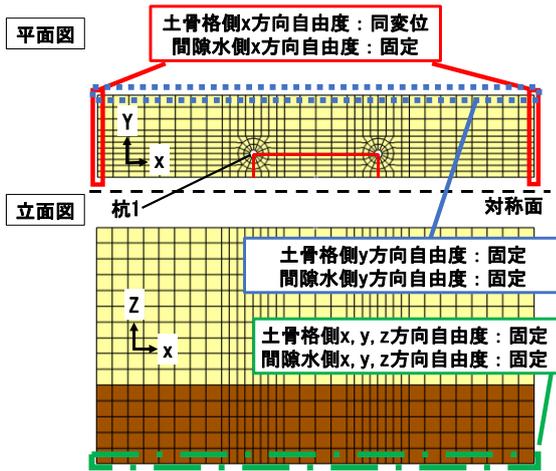


図-3 解析モデル  
Fig.3 Numerical model

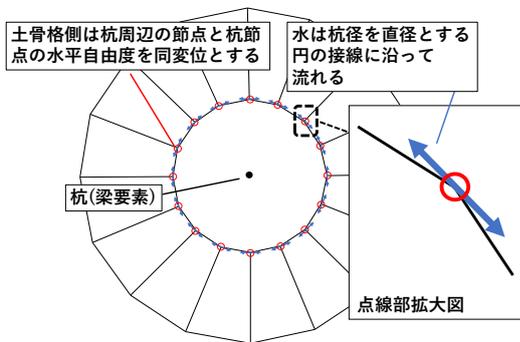


図-4 杭-地盤間の境界条件  
Fig.4 Boundary condition between pile and soil

### 3. 解析概要

改良なしの解析モデルを図-3 に示す。地盤を八節点六面体要素で、杭と上部構造物を梁要素でモデル化した。また、対称性を考慮してハーフモデルとしている。

せん断土槽のフレームを模擬するために設定した境界条件を以降に示す。ただし、間隙水の自由度は土骨格に対する間隙水の平均相対変位<sup>1)</sup>で表している。土骨格側については、図-3 実線部分に位置する同深度の節点の x 方向自由度を同変位とし、図-3 点線部分に位置する節点の y 方向自由度を固定とした。間隙水側についてはフレーム外に水が移動しないよう、実線、点線部分の x, y 方向の自由度を固定とした。底面境界は、節点の土骨格側と間隙水側の x, y, z 方向自由度を全て固定している（一点鎖線部）。

杭-地盤間の境界条件を図-4 に示す。杭に隣接する地盤要素の節点の土骨格側自由度と、同じ深度における梁要素の節点の自由度を x 方向, y 方向でそれぞれ同変位とし、杭径の影響を考慮できるようにした。また、杭径を直径とする円の接線に沿って水が流れるように、

表-1 Sc の値  
Table 1 Value of Sc

Dr=60%の要素のSc	Dr=90%の要素のSc
0.00148~0.00176	0.00136~0.00276

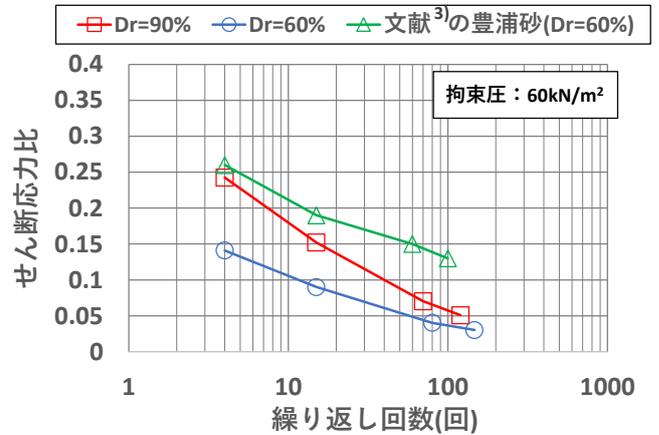


図-5 液状化強度曲線  
Fig.5 Liquefaction strength curve

杭に隣接する地盤要素の節点の間隙水側自由度 (x 方向, y 方向) を設定した。土骨格側も間隙水側も、z 方向自由度には特に制限を設けていない。なお、杭先端条件はピンとした。

弾塑性構成則である Stress-Density モデル（以下、SD モデル）のパラメータは、ダイラタンシーパラメータの Sc を除き文献<sup>3)</sup>のものを用い、Sc は実験で得られた過剰間隙水圧比をある程度再現できるように設定し、深度ごとに Sc を変更した。Sc の値を表-1 に示し、モデルの中央深度付近の拘束圧で評価した液状化強度曲線を図-5 に示す。また、豊浦砂 (Dr=60%) の液状化試験結果<sup>3)</sup>も併せて示している。本解析ではモデルの液状化強度は結果的に小さめになっている。

### 4. 解析結果

#### 4.1 過剰間隙水圧

図-6 に地盤の過剰間隙水圧の時刻歴を実験と解析と比較して示す。改良なし、標準改良については間隙水の平均相対変位を考慮する排水条件の解析結果を示しており、直下改良については排水条件の結果に加え、間隙水の平均相対変位を考慮しない非排水条件の結果も示している。実験では G.L.-6.75m の水圧計のデータ、解析では水圧計と概ね同深度の要素（中心深度 G.L.-6.5m）の応答を示している。実験結果をケースごとに比較すると、締固めの有無による水圧上昇の差異が小さい。これは実験で意図したものではなく、締固め改

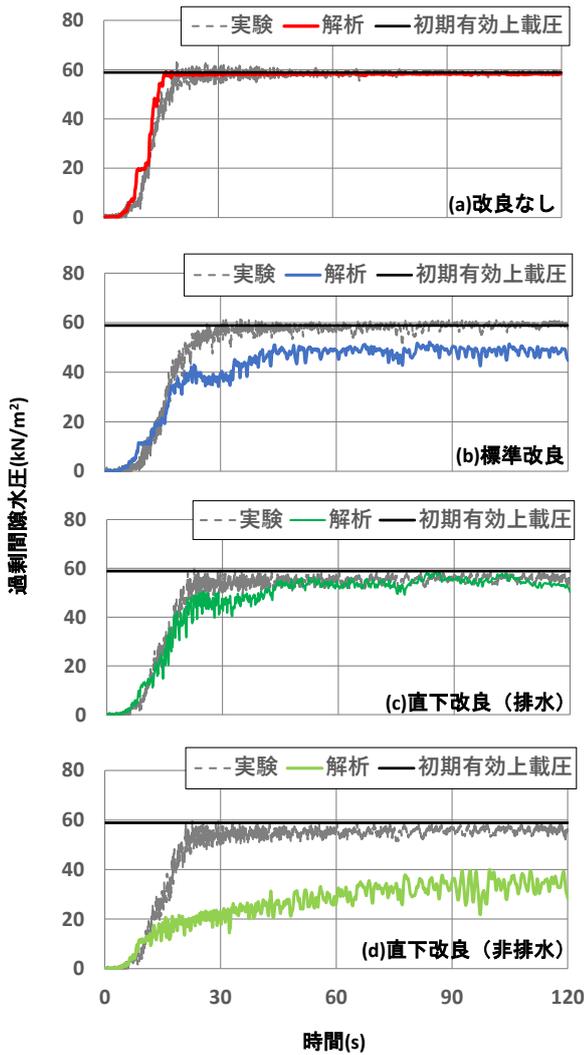


図-6 過剰間隙水圧の時刻歴  
Fig.6 Excess pore water pressure time histories

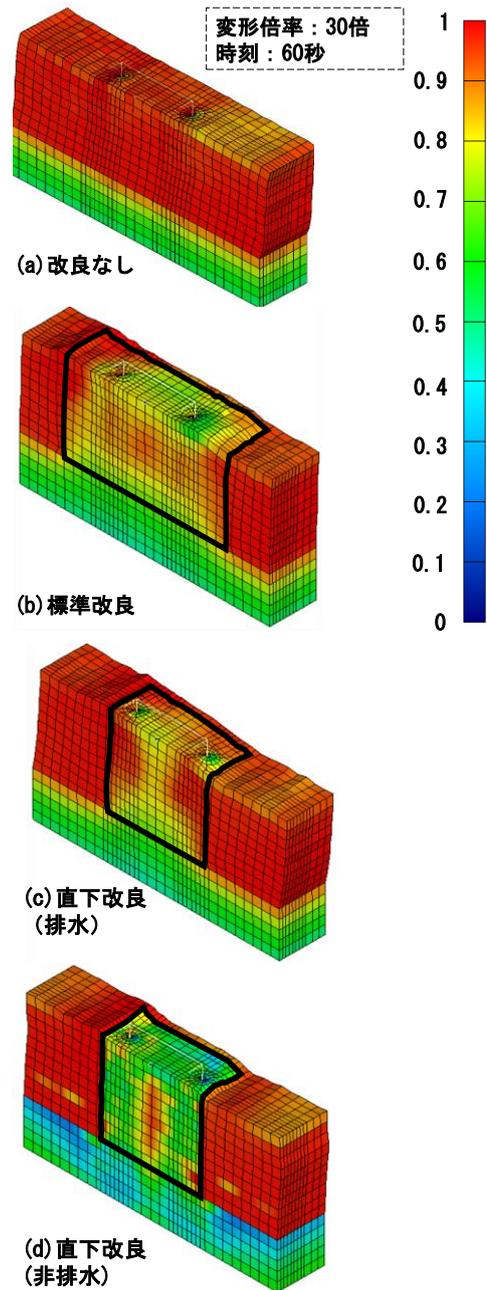


図-7 過剰間隙水圧比のコンタ  
Fig.7 Contour of excess pore water pressure ratio

良をした模型地盤の作製過程で密度が想定よりも小さくなっていった可能性があると考えている。一方、排水条件の解析結果を見ると、改良なしのケースで最も早く、次いで改良範囲の狭い直下改良のケースで若干遅れて水圧が初期有効上載圧に概ね達している。これら2つのケースの排水条件下における最終的な水圧上昇は、概ね実験結果を再現できている。それに対し、改良範囲が広い標準改良のケースでは水圧が初期有効上載圧に達しておらず、実験の水圧上昇と差がみられる。締め固め改良をした2ケースにおいて、同じ液状化強度を与えている改良地盤の水圧上昇が異なった要因について以下で考察する。

図-7に各解析ケースにおける過剰間隙水圧比のコンタ(時刻60s)を示す。直下改良のケースについては、時刻歴と同様に非排水条件下の解析結果も示す。手前に表示している面は、モデルの対称面である。図-

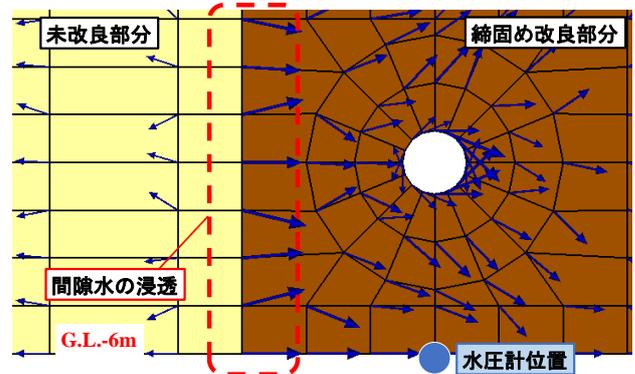


図-8 間隙水の平均相対変位ベクトル  
Fig.8 Average relative displacement vector of pore water

7(b)(c)より、標準改良、直下改良（排水）ともに締固めた範囲（黒枠）の中央部分で過剰間隙水圧が上昇しきっていない領域がある一方で、未改良部分に近い領域では水圧が上昇しきっている領域も見受けられ、未改良部分の過剰間隙水圧が伝わっている影響が示唆される。非排水条件のコンタ（図-7(d))を見ると、未改良部分と締固め改良部分の間で過剰間隙水圧の上昇に明瞭な差がみられ、時刻歴（図-6(d))において非排水条件の解析結果と実験結果に差異があることから、排水条件の計算において間隙水の浸透が再現できていると考えられる。解析における間隙水の浸透の方向を把握するために、図-8 に直下改良のケースにおけるG.L.-6.0mの間隙水の平均相対変位ベクトルを示す。未改良部分から締固め改良部分に向かって間隙水が移動しており、ここまでの考察と調和的である。

なお、実験の水圧上昇過程をより高い精度で再現するためには、パラメータ決定の際に液状化強度のみではなく、液状化に伴う透水係数の変化等も考慮する必要があると考えられ、更なる検討が必要である。

4.2 杭の曲げモーメント

図-9 に杭頭曲げモーメントの時刻歴を実験と解析で比較して示す。時刻30s以降に着目すると、改良なしでは解析と実験の振幅に差異がみられるものの、他のケースでは振幅、位相共に両者は概ね対応している。図-10 に杭頭に作用する慣性力に対応する上部構造物の加速度時刻歴（時刻60sから80sを抽出）を示す。特に差異が大きい時刻67s付近において、実験での改良なしの上部構造物加速度が締固め改良をした2 ケースよりも大きくなっており、これが差異の要因と考えられる。

図-11 に杭の最大曲げモーメントの深度分布を示す。実験、解析ともに分布形状は概ね対応しており、地中部において改良による曲げモーメントの低減効果が見られる。これは、締固め改良により地盤変位が抑制された影響と考えられる。杭頭部に着目すると、実験では改良の有無による杭頭曲げモーメントの差がみられるのに対し、解析では差が小さい。解析の杭頭曲げモーメントが最大となる時刻75s付近について、解析の上部構造物加速度を見ると、改良なし、直下改良、標準改良の順に加速度が大きくなっている（図-10）。すなわち、改良に伴って構造物慣性力が大きくなり、杭頭曲げモーメントを増大させる効果があることが分かる。一方で、改良に伴って地盤変位は抑制され、杭頭曲げモーメントを低減させる効果もあると考えられ、前述の増大効果と打ち消しあって差が小さくなったと考えられる。

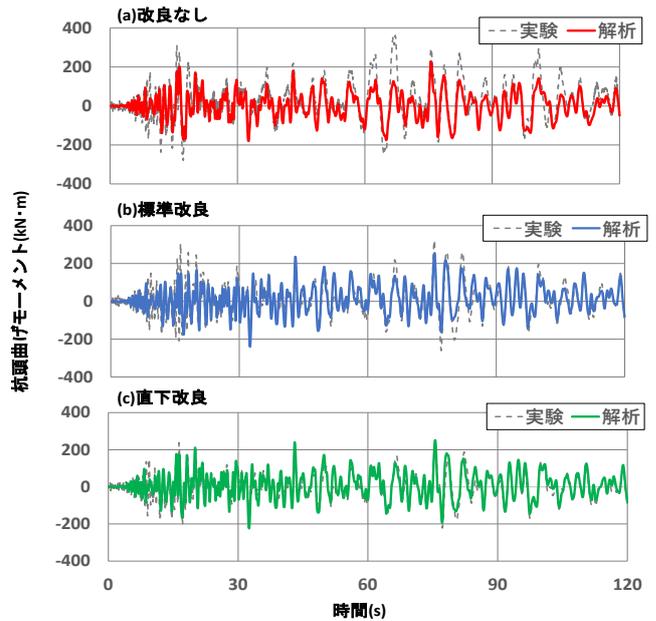


図-9 杭頭曲げモーメントの時刻歴  
Fig.9 Pile head bending moment time histories

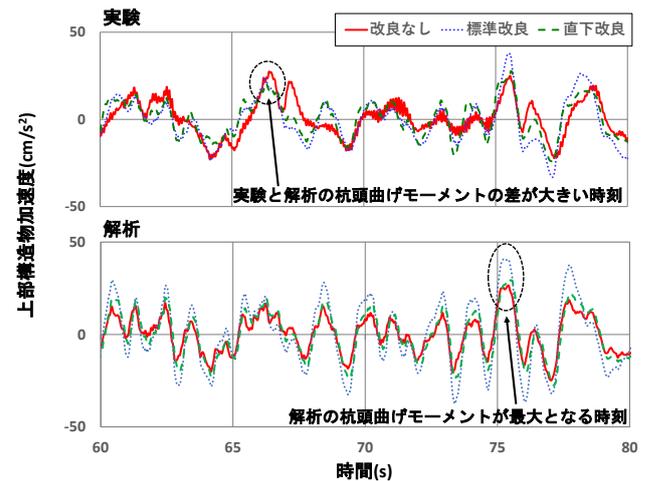


図-10 上部構造物の加速度時刻歴  
Fig.10 Acceleration time histories of superstructure

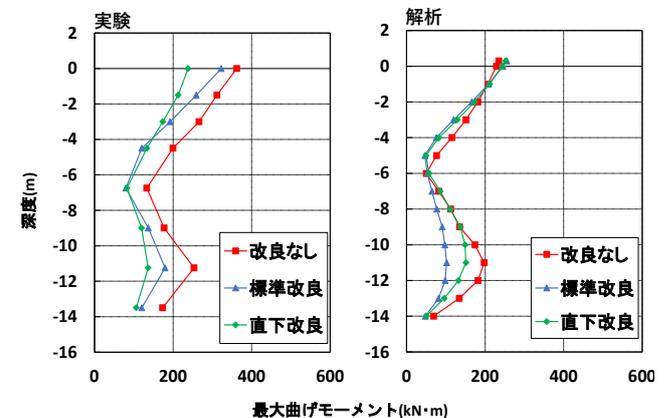


図-11 最大曲げモーメントの深度分布  
Fig.11 Depth distribution of maximum bending moment

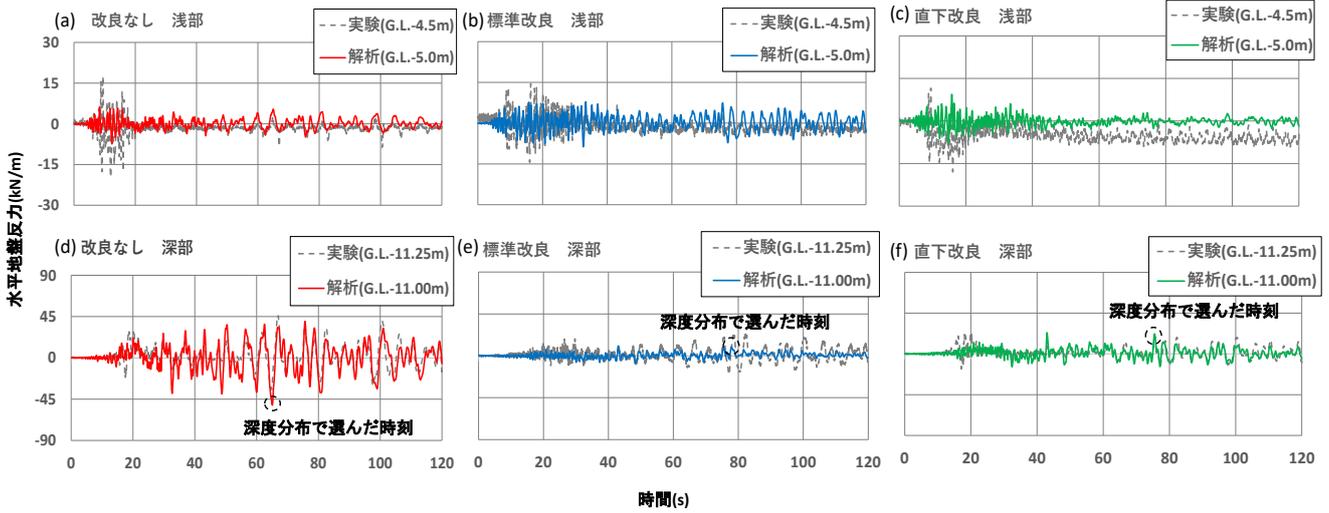


図-12 水平地盤反力の時刻歴  
Fig.12 Horizontal subgrade reaction time histories

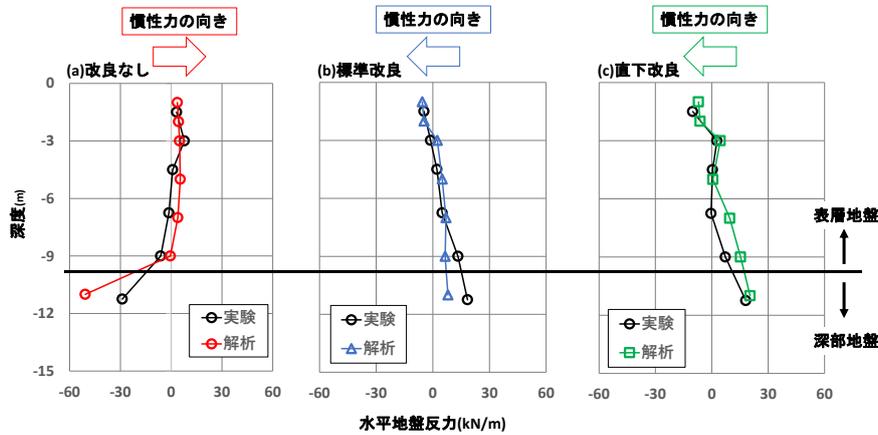


図-13 水平地盤反力の同時刻深度分布  
Fig.13 Depth distribution of horizontal subgrade reaction at the same time

### 4.3 杭に作用する水平地盤反力

最後に、液状化地盤と杭の地震時の力のやり取りをより詳細に把握するため、杭に作用する水平地盤反力に着目する。水平地盤反力は、実験では杭の曲げモーメントを深度方向に2回微分することによって算出し、解析ではせん断力を深度方向に1回微分することによって算出した。図-12に地盤の浅部と深部における水平地盤反力の時刻歴を実験と解析で比較して示す。ここでは、地盤が杭を右向きに押す力を正としている。液状化後の時刻に着目すると、直下改良の浅部で実験の地盤反力が負の方向にドリフトしていることを除き、振幅、位相ともに実験と解析が概ね対応している。実験でドリフトが起こった要因としては、地盤の微小な傾きや、改良地盤の側方へのはらみだし等が考えられる。

図-13に水平地盤反力の同時刻深度分布を示す。深部

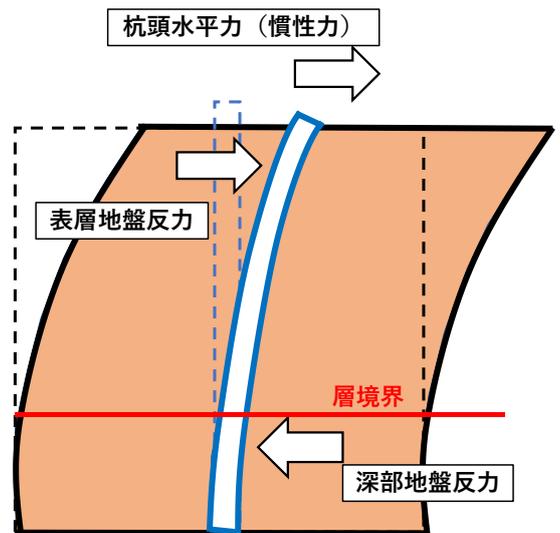


図-14 上部構造物慣性力と水平地盤反力の方向の関係  
Fig.14 Relation between direction of superstructure inertia force and horizontal ground reaction force

の解析結果(図-12(d)(e)(f))で液状化後に地盤反力が最大になるピークに着目している。なお、標準改良の実験結果のG.L.-3m, G.L.-4.5m, G.L.-6.75m及び直下改良の実験結果のG.L.-4.5m, G.L.-6.75mについては、基線補正を行って振動成分のみを抽出したものをを用いている。3ケースとも分布形状が実験と解析で概ね一致している。上部構造物の加速度(図-10)に着目すると、選んだ時刻では、加速度の正負より改良なしで右向きに、標準改良及び直下改良で左向きに慣性力が働いている。図-13より、杭頭直下では慣性力と同じ向きに地盤反力が作用しており、深部地盤の地盤反力はそれと逆向きに作用していることが分かる。よって、図-14に示すように、液状化した表層地盤は慣性力と同じ向きに杭を押しており、深部地盤は慣性力と表層の地盤変位に起因する力に抵抗していると考えられる。ここでは詳細を割愛するが、杭周辺の表層地盤変位と上部構造物の変位に着目すると、どちらの変位も同方向であり、かつ表層地盤変位の方が大きいという結果が得られており、表層地盤が慣性力と同じ向きに杭を押しているという考察と調和的である。

また、締固め改良をしたケースよりも改良なしのケースで深部の地盤反力が大きくなっているのは、改良なしでは表層地盤が全面的に液状化したことによって、より深い深度まで地盤が杭を慣性力と同じ方向に押ししており、それに抵抗したためと考えられる。

## 5. まとめ

二相系支配方程式と三次元弾塑性構成則を導入したTDAPIIIを用いて、締固め改良によって液状化対策した杭基礎を対象に遠心力载荷実験の再現シミュレーションを行い、実験結果と比較することで新規導入機能による実現象の再現性について検証した。二相系支配方程式の導入により要素間の間隙水の浸透を表現できるようになったことで、液状化した未改良地盤から締固め改良地盤に間隙水が移動する現象を再現可能となった。また、地盤の過剰間隙水圧、杭の曲げモーメント、杭に作用する水平地盤反力について実験結果を概ね再現できていることを確認した。

今後は、格子状地盤改良など他の液状化対策工法も対象に解析を行うことで、解析機能を更に検証し、合理的な液状化対策の設計や新工法の開発に活用していく予定である。また、引き続きプログラムの改良を重ねることにより、解析精度の向上を図り、より大規模なモデルを対象とした解析の実現を目指す。

## 参考文献

- 1) 宇野浩樹ほか：汎用三次元 FEM に二相系方程式を導入した液状化解析手法 その1 二相系支配方程式の定式化と液状化地盤の弾塑性構成則，大成建設技術センター報，第56号，31，2023.
- 2) 船原英樹，柴田景太，長尾俊昌，真島正人：締固めによる液状化対策の施工範囲が杭の地震時挙動に及ぼす影響に関する遠心力载荷実験(その1)実験の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-1，pp.533-534，2007.
- 3) Cubrinovski, M. and Ishihara, K : State concept and modified elastoplasticity for sand modelling, Soils and Foundations, Vol. 38, No4, pp.213-225, 1998.