

# 異なる補強機構を有する橋台杭基礎の液状化対策の効果に関する実験的研究

楊 勇<sup>1</sup>・谷本 俊輔<sup>2</sup>・桐山 孝晴<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博（工）（国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 専門研究員  
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

<sup>2</sup>正会員（国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員（同上）

<sup>3</sup>正会員 修（工）（国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 耐震研究監（同上）

## 1. はじめに

橋台基礎は地盤の液状化に伴う側方流動が発生すると被害を受ける可能性があり、地震後に通行時の速度制限が行われたり緊急車両の通行が妨げられたりすることが想定される。平成7年（1995年）兵庫県南部地震や平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震においても側方流動が疑われる被害が発生している。そのため、液状化地盤上に建設された既設道路橋に対して、特に地震直後にも緊急輸送道路としての役割を果たす橋梁には、液状化に伴う側方流動による被害を軽減することが非常に重要であると考えられる。

これまで、土木研究所構造物メンテナンス研究センターでは、液状化の影響を考慮した設計がされていなかった時代の既設橋台を対象とし、耐震補強対策の効果に関する検討<sup>1)</sup>を行ってきた。

本報では、液状化層厚が橋台高さと同程度の地盤条件において、動的遠心模型実験を用いて橋台の地震時挙動を分析するとともに、耐震補強対策の効果を検証した結果を報告する。

## 2. 耐震補強対策の概要及び課題

耐震補強対策の検討にあたっては、液状化地盤上の橋台の変位モードやその発生原因に着目し、図-1に示す耐震補強対策を検討対象としている。ここでは、各補強対策の概要と既往の動的遠心模型実験で確認された対策効果について示す。

補強対策[1]は、前面地盤に増設する鋼管矢板壁に

より、液状化地盤の前面への流動を防止し、既設杭に作用する流動力を遮断あるいは軽減することを狙った工法である（以下、鋼管矢板壁による前面分離型の補強対策と呼ぶ）。動的遠心模型実験<sup>1)</sup>においては、液状化地盤の流動を有効に抑制できることにより既設杭の作用土圧が低減されるため、橋台の変位・回転及び既設杭の断面力を大きく軽減することが確認され、鋼管矢板壁による前面分離型の補強対策の効果が明らかになっている。

補強対策[2]は、既設フーチング側面に新たにフーチングと鋼管矢板壁を増設したものである。鋼管矢板壁により、基礎の剛性を高めて躯体の変位を抑制するとともに、既設杭が損傷した場合でも補強鋼管により地震後の橋台の鉛直支持力を確保することを目的としている（以下、鋼管矢板壁による側面一体型の補強対策と呼ぶ）。動的遠心模型実験<sup>1)</sup>においては、橋台の変位や回転への抑制効果が見られたが、加振中に既設杭や増設杭ともに降伏モーメント以上の断面力が発生し、鋼管矢板壁による側面一体型の補強対策の効果が限定的であったことが分かった。

補強対策[3]は既設フーチング側面に新たにフーチングと斜杭を増設した方法である（以下、斜杭による側面一体型の補強対策と呼ぶ）。杭の曲げ剛性抵抗だけでなく杭軸方向の斜角による軸剛性で水平力に抵抗するため、既設橋台杭基礎の剛性向上や変形抑制が期待されるが、動的遠心模型実験<sup>1)</sup>において斜杭による側面一体型の補強対策は、増設杭による橋台の変位や回転への抑制効果が十分に発揮できなかった。その原因は、幾何的要因から通常の直杭と異なる斜杭を用いた杭基礎の変形モードであることが考えられる。

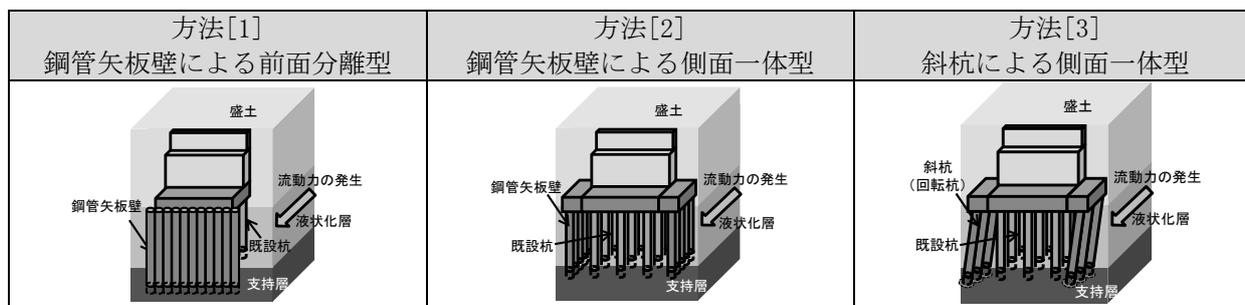


図-1 耐震補強対策のイメージ

表-1 実験ケース (実寸)

Case	盛土層厚 (橋台高さ)	液状化層厚	支持層厚	既設橋台 杭基礎	耐震補強対策
8	12 m	10 m	3.6 m	場所打ち杭 (杭列 4×4) (杭径 1.0 m)	無補強
9-2					鋼管矢板壁による前面分離型 (杭列 1×10, 杭径 1.0 m)
10					斜杭による側面一体型 (片側の杭列 4×1, 杭径 1.0 m)
11					鋼管矢板壁による側面一体型 (片側の杭列 8×1, 杭径 0.8 m)

なお、液状化地盤上の橋台の被害特徴としては、橋台には前面側への水平変位が生じようとする一方、遊間の詰まりや桁・パラペット間の接触によって橋台上部の水平変位が拘束されるため、結果として橋台に後転側の回転が生じることが多い。また、橋台の液状化被害事例に対して換算液状化層厚と橋台被災ランクの関係を橋台高さ別に整理した結果<sup>2)</sup>によると、同じ換算液状化層厚であれば橋台高さが高いほど被災の程度も大きくなり、また、橋台高さと同じであれば換算液状化層厚が大きいほど被災の程度も大きくなる傾向が明らかになった。

上記の動的遠心模型実験<sup>1)</sup>における地盤条件としては、液状化層厚が大きい場合に相当し、これらの補強対策の補強効果は、橋台の被災程度も大きくなる橋台高さが高い場合、まだ不明確な点が残されている。将来、これらの耐震補強対策を既設道路橋梁に適用するため、地盤条件の観点からそれぞれの適用範囲を更に検討する必要があると考えられる。

### 3. 動的遠心模型実験の概要

#### (1) 実験ケースおよび基本条件

本報の報告対象とした実験ケースを表-1に示す。これらの実験ケースは、旧基準<sup>3)</sup>で設計された杭基礎に支持される液状化地盤上の逆T式橋台を対象としたものである。同表に示す各実験ケースにおいては、盛土層と液状化層の層厚をそれぞれ12 mと10 m、

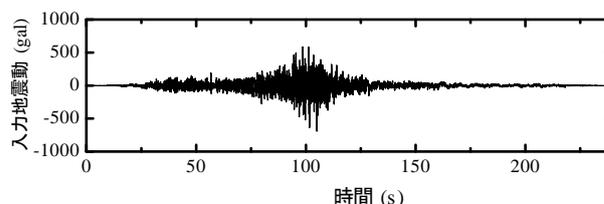


図-2 入力地震動

支持層の層厚を3.6 mとし、既設杭基礎は杭列4×4の場所打ち杭 (杭径1.0 m) とした。

これらの実験ケースは耐震補強対策の有無及びその工法を実験パラメータとしたものである。Case8は無補強ケースである。Case9-2は、10本の鋼管杭 (杭径1.0 m) から構成される前面分離型の鋼管矢板壁による対策を行ったケースである。Case9-2における鋼管杭の諸元は道路橋示方書<sup>4)</sup>に規定される橋脚基礎に作用させる流動力を載荷したときに、鋼管が弾性範囲内に収まるように設定した。Case10は片側に4本の鋼管杭を斜杭 (斜角10° , 杭径1.0 m) として設置される側面一体型の補強対策を有するケースである。Case11は、片側に8本の鋼管杭 (杭径0.8 m) より構成される側面一体型の鋼管矢板壁による対策を行ったケースである。Case10と11における補強鋼管の諸元は道路橋示方書<sup>4)</sup>に規定される液状化地盤における橋台基礎の設計手法に準じ、レベル2地震動に対する基礎の応答塑性率が許容塑性率以下となるように設定した。

なお、入力地震動はH29道示<sup>5)</sup>に規定されるレベル2地震動 (タイプI) の動的解析用時刻歴波形2-I-I-3 (図-2)を相似則に基づいて補正した波形とした。



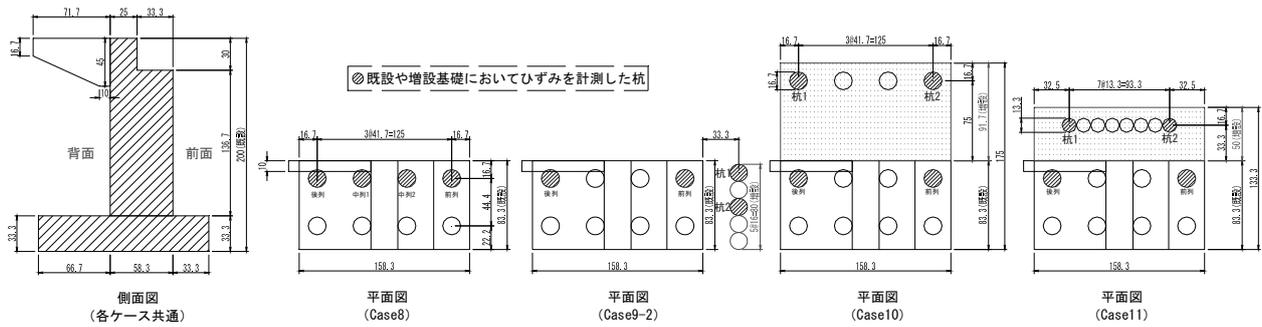


図-4 半断面の橋台模型 (模型スケール, 単位:mm)

なお、全ての実験ケースにおける既設杭は、杭頭をフーチングと剛結させ、杭先端の支持層への根入れを1.0Dとした。増設杭の固定条件については、Case9-2においては、地盤変位の抑制効果を得る上で液状化層下面で深への十分な根入れによって水平抵抗を確保するため、実験条件を単純化し増設鋼管矢板の先端を土槽底面に完全に固定した。Case10やCase11における増設杭の端部固定条件は、既設杭と同様に設定した。

### c) 地盤

支持層には7号珪砂（土粒子密度 $\rho_s = 2.653 \text{ g/cm}^3$ , 50%粒径 $D_{50} = 0.149 \text{ mm}$ , 細粒分含有率 $F_c = 3.5\%$ , 均等係数 $U_c = 1.58$ )を使用し、相対密度 $Dr = 95\%$ を目標として作製した。背面盛土や液状化層には、宇部珪砂6号（土粒子密度 $\rho_s = 2.647 \text{ g/cm}^3$ , 50%粒径 $D_{50} = 0.29 \text{ mm}$ , 細粒分含有率 $F_c = 0.7\%$ , 均等係数 $U_c = 2.08$ )を使用し、相対密度 $Dr = 50\%$ を目標として作製した。

なお、支持層と液状化層は、真空脱気槽を用いて負圧法により飽和させ、地下水位を前面地盤の地表面と一致させた。透水性に関する相似則を満足させるため、地下水位で深の砂の間隙は、水の60倍の粘度に調整したメトロゾ水溶液によって飽和させた。

### (3) 実験方法

遠心加速度上昇による橋台の前面への水平変位（約 0.7 mm, 模型スケール）を考慮した上で、たて壁と桁の遊間を、遠心加速度上昇前に 1.7 mm に調整した。遠心加速度を 60 G まで上昇させた後に、図-2 に示す入力地震動を用いて加振を実施した。加振中に、橋台の前背面地盤の加速度・変位・水圧・土圧や橋台たて壁の変位（計測センサーの位置を図-3 に示す）、また、橋桁の端部や杭の軸方向のひずみ（計測対象杭を図-4 に示す）を計測した。加振後の水圧消散過程においても、加速度以外の地盤や橋台杭基礎の応答を続けて計測した。

## 4. 動的遠心模型実験の結果

本章の実験結果の数値は、相似則に基づき実物スケールに換算した値である。

### (1) 周辺地盤の加速度と液状化の発生状況

Case8を代表として前背面地盤の加速度応答及び過剰間隙水圧の時刻歴（計測位置は図-3参照）を、それぞれ図-5及び図-6に示す。

背面地盤における液状化層上端の加速度は、土槽底面と比べて大きく増幅しているのに対し、前面地盤の地表付近の加速度は、入力地震動とほぼ同程度であることが分かる。これは、地震動による繰返しせん断に伴い、地盤が液状化し剛性低下が生じたことを示すものであり、特に有効拘束圧が小さい前面地盤においてその傾向が強く現れている。

また、背面地盤における液状化層の過剰間隙水圧は、時刻が約75sより上昇し、約105sで過剰間隙水圧比が一時的に1.0に到達したものの、直ちに消散している。それに対して、前面地盤における過剰間隙水圧比は、時刻が約30sの時に上昇し、約80s以降で過剰間隙水圧比が1.0付近で保持されており、液状化していることが分かる。これらの結果は、図-5に示す加速度応答と対応した結果であった。

なお、他のケースにおいて前背面地盤の加速度応答及び過剰間隙水圧の変化傾向はCase8と同様である。

### (2) 橋台の回転角及び杭頭の水平変位

実験データに基づき求めた橋台の回転角と杭頭の水平変位を、それぞれ図-7と図-8に示す。なお、本実験においては、補強対策が加振中だけでなく加振前の実験結果にも影響を与えるため、橋台の回転角及び杭頭の水平変位の絶対値に基づき橋台の挙動を説明する。

図-7に示すように、加振前（時刻が0s）に各実験ケースにおける橋台の初期回転角は、補強対策の

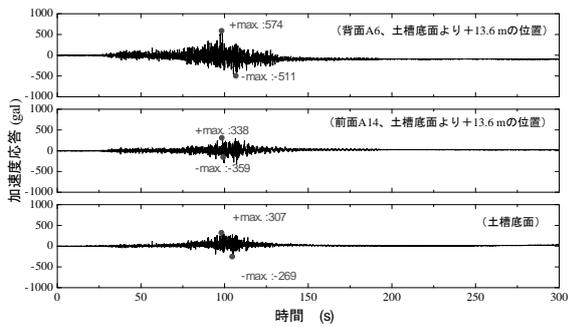


図-5 前背面地盤における加速度応答 (Case8)

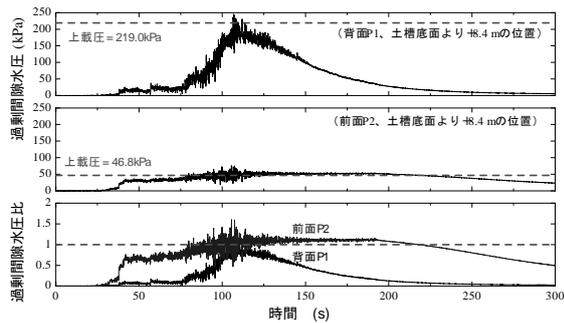


図-6 前背面地盤における過剰間隙水圧 (Case8)

有無により異なる。加振中に、いずれの実験ケースにおいても橋台が液状化の影響により背面側へ回転する挙動が見られる。鋼管矢板壁による前面分離型の補強対策を有するCase9-2においては、加振中の回転角の絶対値が無補強Case8とほぼ同程度であった。それは、Case8及びCase9-2において橋台の水平変位が橋桁に拘束されたため最大値に達したことである。斜杭による側面一体型の補強対策を有するCase10においては、加振中の回転角の絶対値がCase8と比べてやや小さく抑制され、補強効果がある程度発揮できたことが分かる。また、鋼管矢板壁による側面一体型の補強対策を有するCase11においては、加振中に橋台の回転角が明らかに抑制され、補強効果が大きく発揮できたことがわかる。

また、杭頭の水平変位は、図-8に示すようにいずれのケースにおいても加振とともに前面へ大きく増加する傾向が見られる。補強対策による杭頭の水平変位の抑制効果は、図-7に示す橋台の回転角と対応した結果となった。液状化層厚が盛土層より遥かに厚い場合の実験結果<sup>1)</sup>と比べて、特に鋼管矢板壁による前面分離型の補強対策の橋台変位や回転の抑制効果は、地盤条件に大きく依存することが分かる。鋼管矢板壁による前面分離型の補強対策は、液状化層厚が盛土層より遥かに厚い場合、橋台変位や回転を大きく抑制できることに対して、液状化層厚が盛

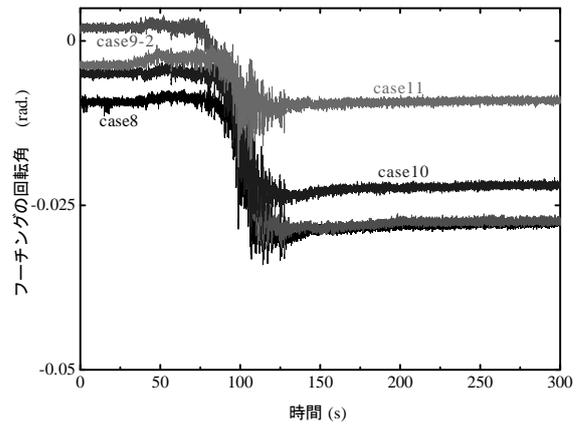


図-7 フーチングの回転角(前面側への回転：正)

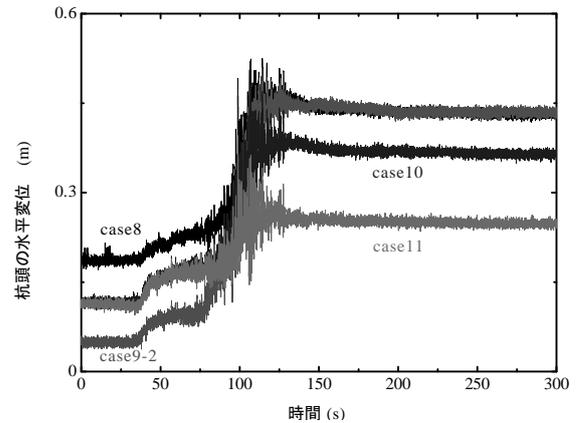


図-8 杭頭の水平変位(前面側向き：正)

土層とほぼ同程度の場合、補強効果がほぼ発揮できなかった。

### (3) 杭の曲げモーメント及び作用土圧

各実験ケースにおける杭の曲げモーメントおよび作用土圧の深さ方向分布を、それぞれ図-9~12に示す。杭の曲げモーメントは前面引張側を正、杭の作用土圧は前面側向きを正としている。また、杭の曲げモーメントは、ひずみの計測値に基づき算出し、杭の作用土圧は、曲げモーメント分布の補関関数を2回微分<sup>6)</sup>することで算出したものである。なお、本実験においては、実杭の降伏モーメントに相当する断面力を超過しても模型杭が弾性挙動を示すため、降伏モーメントを超える曲げモーメントや、それに対応した作用土圧が得られている。

#### a) 曲げモーメント

各実験ケースにおける最大応答時の既設杭の曲げモーメントの大きさは、Case9-2とCase10がcase8とほぼ同程度で、Case11がCase8と比べてやや小さい結果となった。これらの結果は、前述した橋台の回転角及び杭頭の水平変位の結果とほぼ対応した。

また、増設杭の曲げモーメントの分布や大きさは、鋼管矢板壁による前面分離型の補強対策を有するCase9-2において加振により明らかな変化が見られなかった。斜杭及び鋼管矢板壁による側面一体型の補強対策を有するCase10及びCase11においては、最大応答時に増設杭の曲げモーメントが既設杭より小さいことが分かる。その原因は、Case10において斜杭の軸剛性で一部の液状化側方流動圧を抵抗すること、Case11において橋台の回転を大きく拘束し力を再分配することが考えられる。

## b) 作用土圧

各実験ケースにおける最大応答時の既設杭の作用土圧は、補強対策の有無によらず近い結果となった。

増設杭における作用土圧は、Case9-2において加振中に明らかな増加傾向が見られなかった。Case10における最大応答時の増設杭の作用土圧は、特に後列において既設杭より小さい傾向が見られる。その原因は、斜杭である増設杭の軸剛性で一部の液状化側方流動圧を抵抗することが考えられる。また、Case11における最大応答時の増設杭の作用土圧も既設杭より小さい。それは、鋼管矢板壁により橋台の回転を大きく拘束し側方流動圧を再分配することが考えられる。これらの結果は、曲げモーメントの実験結果と対応した。

## 5. 各補強対策の効果

以上の橋台挙動に関する実験結果に基づき、液状化層が盛土層とほぼ同じ地盤条件の場合、各補強対策の効果进行分析する。

### (1) 鋼管矢板壁を用いた前面分離型の補強対策 (Case9-2)

Case9-2においては、加振中の橋台の回転角 (図-7) や杭頭の水平変位 (図-8) は無補強Case8とほぼ

同程度であった。また、既設杭の曲げモーメントや作用土圧は、補強対策により低減効果が見られなかった。液状化層が盛土層より遥かに厚い地盤条件の場合<sup>1)</sup>と比較し、液状化層が盛土層とほぼ同じ地盤条件の場合において鋼管矢板壁を用いた前面分離型の補強対策の効果は、小さく十分に発揮できないと言える。

その原因は、液状化層厚により側方流動圧の分布が異なる可能性が考えられる。最大応答時の既設杭の作用土圧の分布に着目すると、液状化層が盛土層より遥かに厚い地盤条件の場合<sup>1)</sup>には作用土圧の最大値の位置が杭の中央となり、液状化層が盛土層とほぼ同じ地盤条件の場合には作用土圧の最大値の位置が液状化層の中央より上端に近い位置となる。そのため、片持ち梁の構造特徴を有する前面分離型の鋼管矢板壁に対しは、側方流動圧が鋼管矢板壁の上端付近に作用する場合に大きな変位が発生し、地盤変位への抑制効果が小さいことが考えられる。

### (2) 斜杭による側面一体型の補強対策(Case10)

Case10においては、加振中に補強対策により橋台の回転角や杭頭の水平変位の応答値がある程度抑制され、液状化層が盛土層より遥かに厚い地盤条件の場合<sup>1)</sup>と比べて橋台の回転角や杭頭の水平変位の最大応答値を大きく抑制された。

その原因は、通常の直杭と異なる斜杭を用いた杭基礎の変形モードの影響は、液状化層が小さく盛土層とほぼ同じ場合において支配的ではなく、橋台の回転・変位への抑制効果が発揮しやすいことが考えられる。

### (3) 鋼管矢板壁による側面一体型の補強対策 (Case11)

Case11においては、加振中に補強対策により橋台の回転角や杭頭の水平変位の応答値が大きく抑制さ

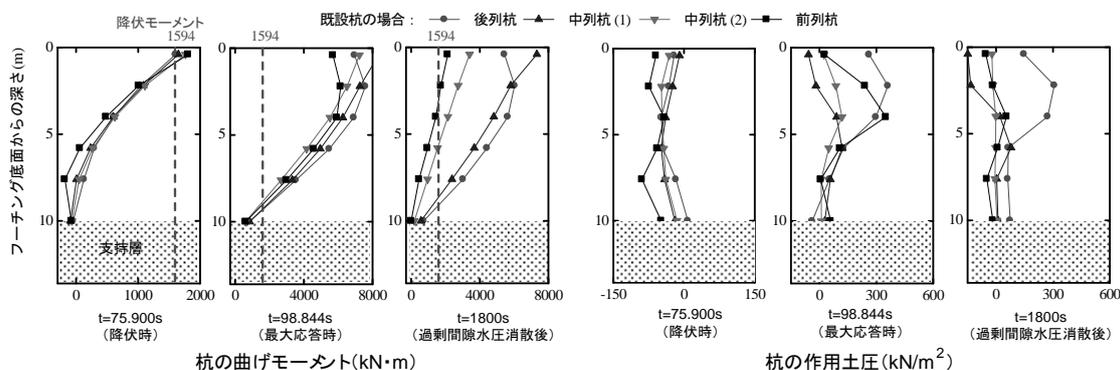


図-9 杭の曲げモーメントと作用土圧 (Case8)

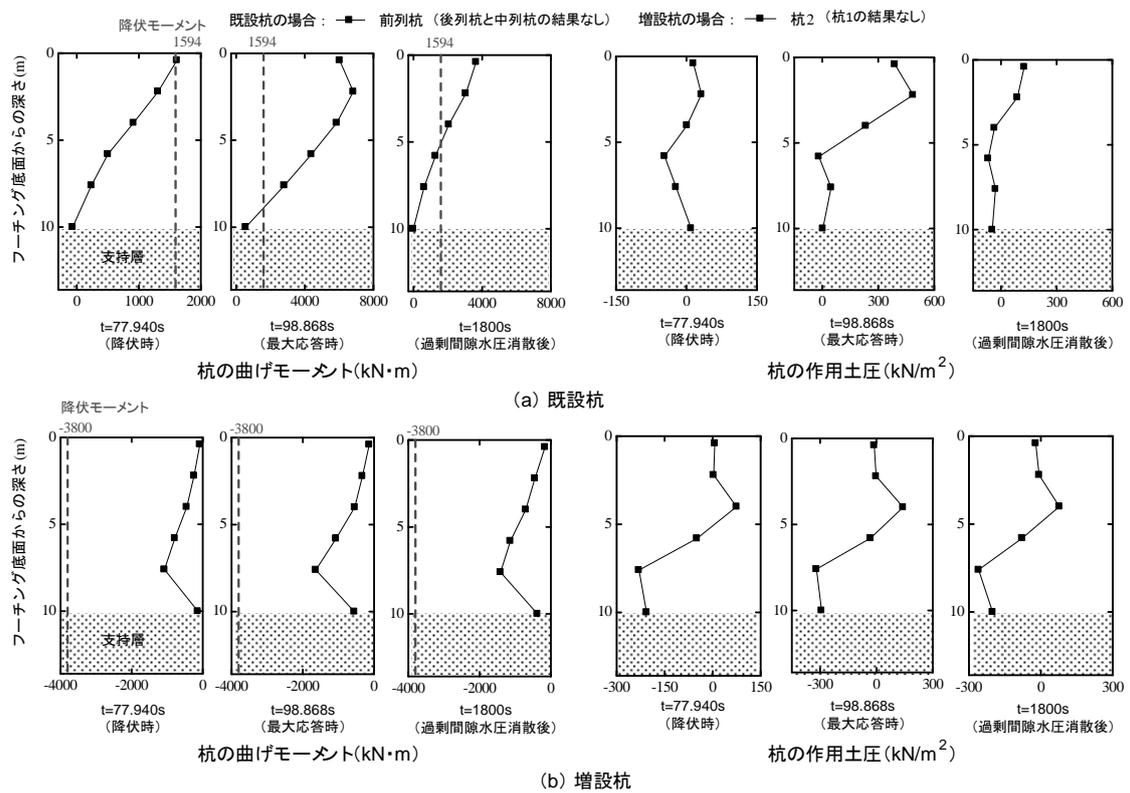


図-10 杭の曲げモーメントと作用土圧 (Case9-2)

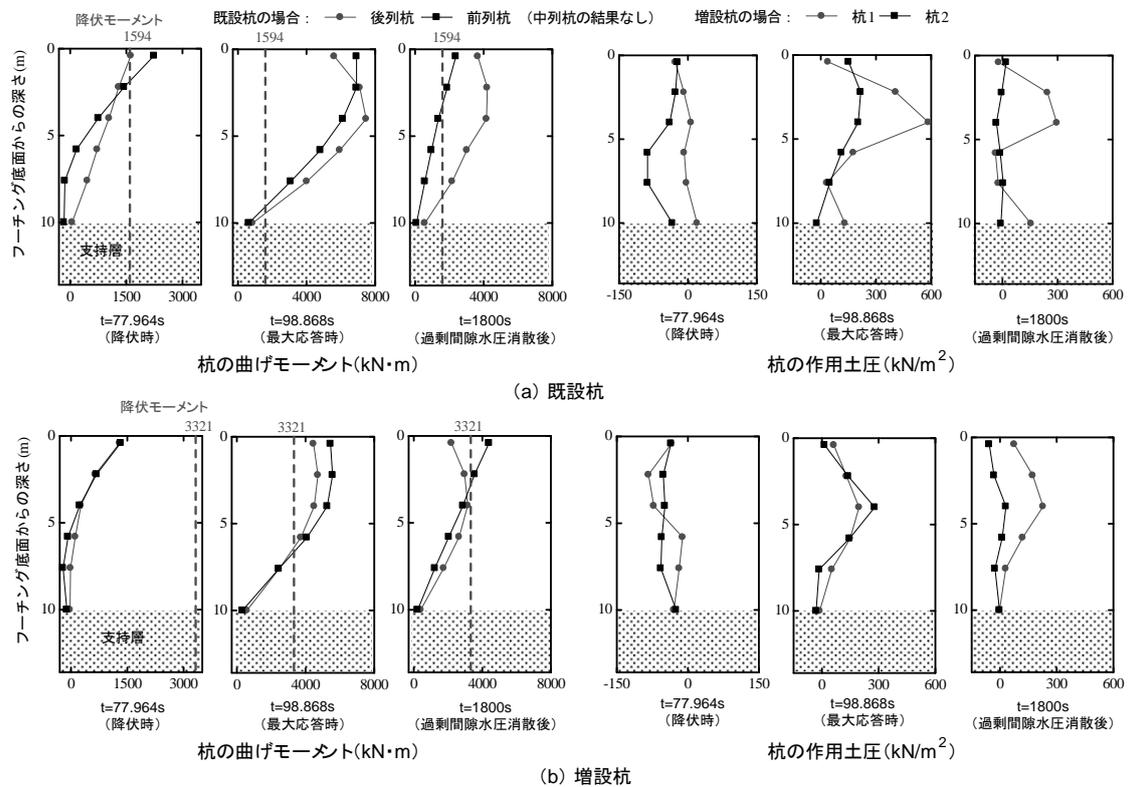


図-11 杭の曲げモーメントと作用土圧 (Case10)

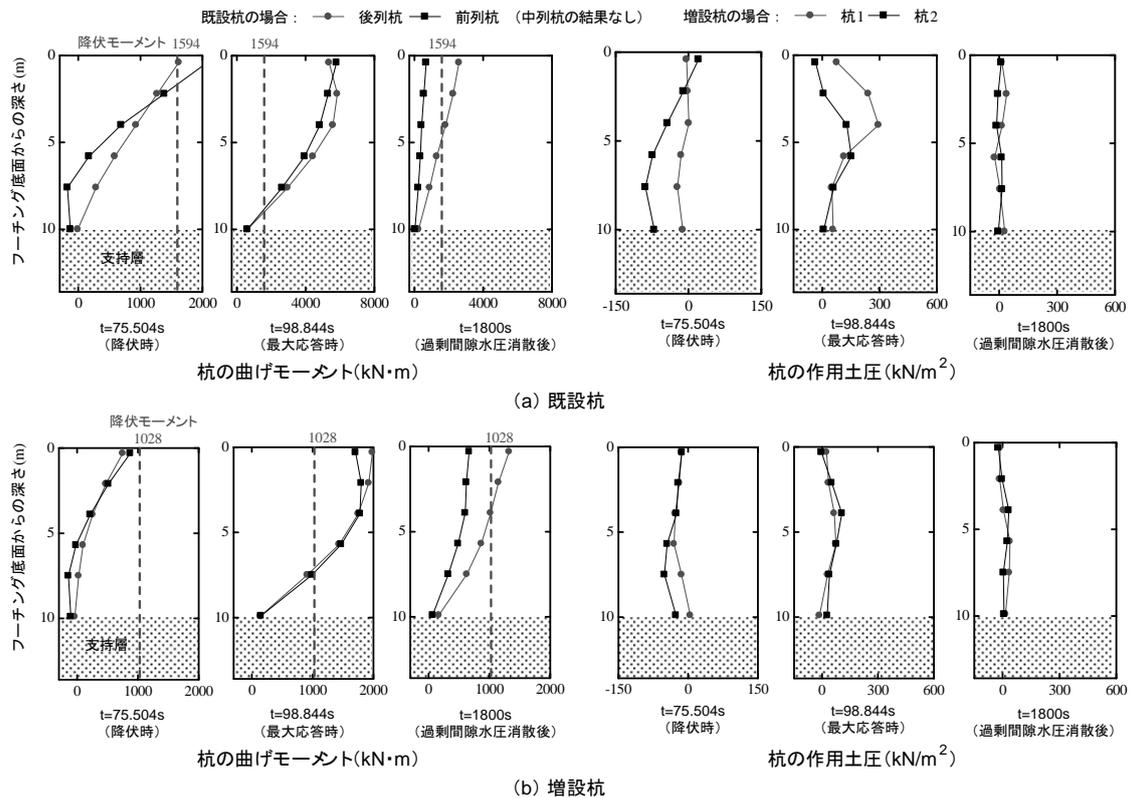


図-12 杭の曲げモーメントと作用土圧 (Case11)

れた。その原因は、鋼管矢板壁による側面一体型の補強対策により橋台杭基礎の剛性が增加されたことが考えられる。また、最大応答時に増設杭の曲げモーメントは、降伏モーメントを超過した結果となった。ただし、鋼管矢板壁の継手を含めると、本実験結果以上の効果が発揮できることが考えられる。

なお、液状化層が盛土層より遥かに厚い地盤条件の場合<sup>1)</sup>においても、橋台の回転や変位への抑制効果が確認された。鋼管矢板壁による側面一体型の補強対策の効果は、液状化層の層厚に大きく依存せず、安定的に発揮できることが分かる。

## 6. まとめ

本研究では、液状化層の層厚が盛土層とほぼ同じ地盤条件で実施した動的遠心載荷実験に基づき、鋼管矢板壁による前面分離型及び斜杭や鋼管矢板壁による側面一体型の補強対策の効果を検証し、得られた知見を以下に示す。

- 鋼管矢板壁による前面分離型の補強対策は、設定した地盤条件において杭の断面力・作用土圧への低減効果や橋台の変位・回転への抑制効果がほとんどなかった。

- 斜杭による側面一体型の補強対策は、設定した地盤条件において増設杭により橋台の変位や回転への抑制効果がある程度発揮できたことが分かる。

- 鋼管矢板壁による側面一体型の補強対策は、設定した地盤条件において加振中に増設杭に降伏モーメント以上の断面力が発生したが、増設杭による杭

基礎の剛性増加のため橋台の変位や回転への明らかな抑制効果が確認できた。

なお、前述したように各種補強対策の効果は地盤条件により異なるため、地盤条件に応じて補強効果を定量的に評価した上で、それぞれの適用範囲を検討する必要があると考えられる。

**謝辞：**本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理法人：JST)の一環として実施したものである。また、東京工業大学大学院高橋章浩教授、ならびに(一社)鋼管杭・鋼矢板技術協会との共同研究として実施したものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 楊勇, 谷本俊輔, 桐山孝晴: 液状化地盤における既設橋台杭基礎の各種補強対策の効果に関する動的遠心模型実験, 第40回地震工学研究発表会, 2020.9.
- (国研)土木研究所: 道路橋橋台およびその基礎の地震被災事例, 土木研究所資料, 第4014号, 2006.
- (公社)日本道路協会: 道路橋下部構造設計指針 くい基礎の設計篇, 1964.3.
- (公社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 2017.
- (公社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 2017.
- 菊池喜昭: 軟弱粘性土地盤着定式くし形構造物の横抵抗特性に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No. 1039, 2003.