

非液状化層の流動力低減による杭基礎構造物の側方流動対策に関する遠心模型振動実験

佐藤清¹・樋口俊一²・松田隆³

¹株式会社大林組 技術研究所 土木構造研究室 主任（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

E-mail:sato.kiyo@obayashi.co.jp

²株式会社大林組 技術研究所 土木構造研究室 副主査（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

E-mail:higuchi.shunichi@obayashi.co.jp

³株式会社大林組 技術研究所 土木構造研究室 室長（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

E-mail:matsuda.takasi@obayashi.co.jp

護岸背後地盤や傾斜地盤における杭基礎構造物の地震被害として、地盤の側方流動による基礎杭の変形や損傷を挙げることが出来る。本研究では、杭基礎構造物の側方流動による被害を防止するために、地下水位面以上の非液状化層による流動力を低減する方法に着目して、3種類の対策工法を選定し、遠心模型振動実験により基礎杭の被害低減効果を評価した。その結果、土留・トレンチを設置する工法や、フーチング断面形状を流線形にする工法などにより非液状化層の流動力を低減することで、フーチングの残留変形や杭の曲げひずみを効果的に低減できることを確認した。特に土留と流線形モデルでは、フーチングの残留変位は未対策の30%以下に、杭頭部の曲げひずみは未対策の60%以下に低減された。

Key Words : *liquefaction, lateral flow, pile foundation, centrifuge test, drain, trench, earth retaining, streamline shape*

1. はじめに

護岸背後地盤や傾斜地盤における杭基礎構造物の地震被害として、地盤の側方流動による基礎杭の変形や損傷を挙げることが出来る。これまでの研究^{1)~3)}により、側方流動の発生メカニズムや杭基礎構造物に対する外力特性などが明らかにされ、また、各種設計指針類^{4)~5)}でも、その評価法が示された。

側方流動により杭基礎構造物が受ける流動力は、地盤と構造物の相対変位に地盤バネを乗じたものとして表される。したがって、指針類にも示されるように、地盤が地下水位面以上の上部非液状化層と水位面以下の液状化層によって構成される場合、剛性低下率の大きい液状化層よりも、比較的高い剛性が維持される上部非液状化層の方が、構造物により強い流動力を及ぼすと考えられる。すなわち、非液状化層による流動力を低減することが、杭基礎構造物の被害を効果的に抑制することにつながると考えられる。

そこで本研究では、非液状化層の流動力の低減に着目して3種類の対策工法を選定し、遠心模型振動実験により、各工法の被害低減効果を評価した。本報では、実験結果と各工法の被害低減メカニズムについて述べる。

2. 対策工法の選定

対策工法として選定したのは、「ドレーン工法」、「土留工法」、「フーチングの形状を流線形にする工法」の3種である。図-1に各工法の基本モデルを示す。

ドレーン工法では、基礎構造物周辺にドレーン杭を配置する。ドレーンの排水効果が地下水位面以下の液状化を防止することにより、側方流動を抑制する。さらに、下部層からの排水を地下水位面以上に供給することにより、上部非液状化層の剛性（バネ値）の低下、すなわち流動力の低減を期待する。

土留工法では、基礎構造物背面に地下水位面までの深さのトレンチを掘削し、解放面を土留により保持する。これにより、基礎構造物に作用する上部非液状化層の流動力が直接遮断される。

フーチングの形状による対策工法では、フーチングの上流側の面を三角形（流線形）にする工法である。この断面形状により、フーチングに作用する流動力が上下に分散されることを期待する。本報ではこの工法を「流線形」と称す。

以上の3工法を対象に遠心模型振動実験を実施し、その対策効果の評価を試みた。

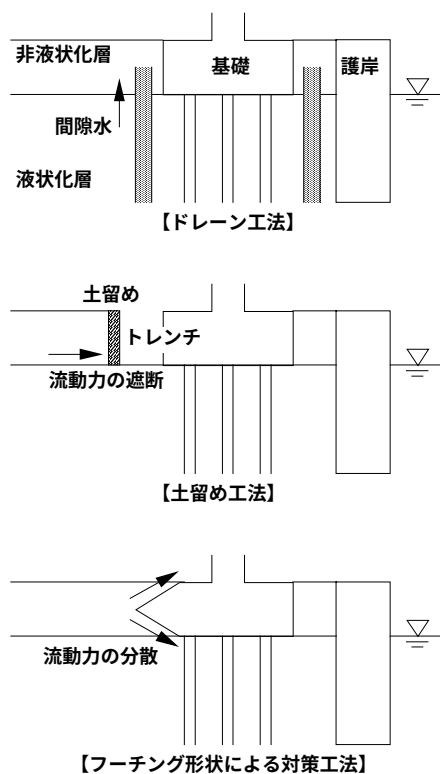


図-1 実験対象とした側方流動対策工法

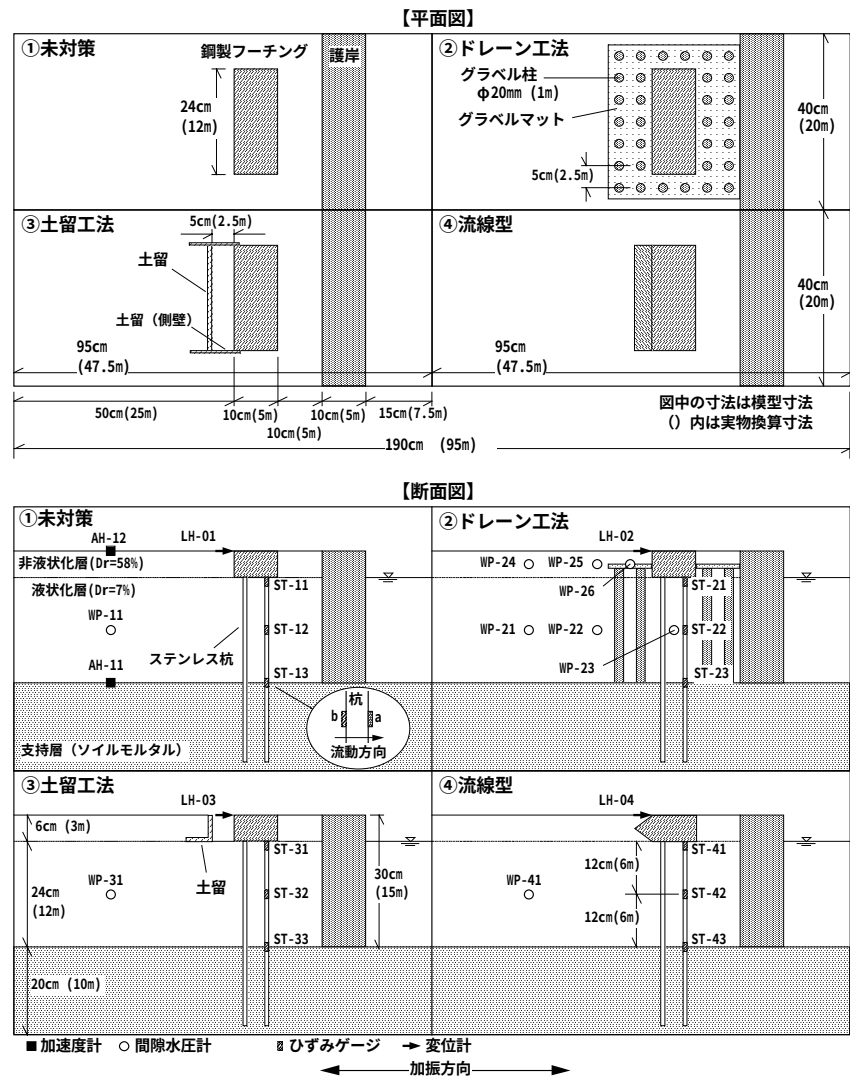


図-2 遠心実験模型（平面図および断面図）

表-1 8号硅砂の物理諸量

土粒子密度 $G_s(t/m^3)$	2.650	最大間隙比 e_{max}	1.403
最大粒径 $D_{max}(mm)$	0.25	最小間隙比 e_{min}	0.705

表-2 模型地盤の諸元

項目	密度 (t/m^3)	相対密度 (%)	透水係数 (m/s)
上部非液化化層	1.33(乾燥)	58	—
下部液化化層	1.70(飽和)	7	1.7×10^{-4}
ケーソン護岸	2.16	—	—

※透水係数は模型地盤での値

3. 遠心模型振動実験手法

図-2 に実験模型の断面図および平面図を示す。

実験は 50g 場の遠心重力場で実施した。長さ 190cm×幅 80cm×深さ 60cm の大型鋼製剛土槽を 4 区画に分割し、「①未対策」および 3 種の対策工モデル（②ドレーン工法，③土留工法，④流線形）の模型を各区画に作製した。1つの区画の大きさは、長さ 95cm×幅 40cm×深さ 60cm となる。1つの土槽

に 4 つの模型を同時に作製するので、各模型を同時に加振することができ、各工法の性能を直接比較できるメリットがある。

模型は護岸とその背後地盤，および杭基礎構造物によって構成し，背後地盤の液化化と護岸の海側への移動によって側方流動を発生させた。

モルタル製護岸模型は，支持層との摩擦により常時土圧に抵抗するよう設計した。護岸模型と土槽側壁との間には 5mm の隙間を設け，隙間にはグリースを充填して砂の流出を防いだ。なお，護岸模型はクレーンによって土槽内に設置した。

背後地盤は厚さ 6cm（実物換算 3m；以下，括弧内は実物換算値）の非液化化層，厚さ 24cm（12m）の液化化層からなり，どちらも 8 号硅砂を空中散布して作製した。上部層と下部層の密度の違いは，砂を散布する際の落下高さや単位時間当たりの落下量によって調整した。間隙水には脱気水を使用し，間隙空気を二酸化炭素に置換したのちに注水した。液化化層の下には，ソイルモルタルにより厚さ 20cm（10m）の支持層を設けた。表-1 に 8 号硅砂の諸元，表-2 に模型地盤の諸元を示す。

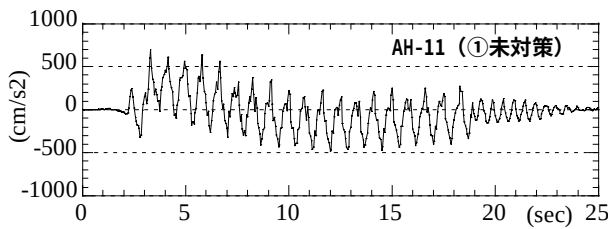


図-3 入力加速度波形

表-3 護岸の残留水平変位量

モデル	護岸の残留水平変位量(m)
①未対策	3.3
②ドレーン工法	4.0
③土留工法	3.8
④流線形	5.0

杭基礎構造物は厚さ 3m の鋼製フーチング（中実）と、フーチングに剛結したステンレス杭（SUS304）とし、杭は支持層に 18cm（9m）根入れした。杭の外径は $\phi 20\text{mm}$ （1m）、肉厚 0.5mm（25mm）である。

対策工モデルのうち「②ドレーン工法」では、粒径 1mm（50mm）の粗粒砂により $\phi 20\text{mm}$ （1m）のドレーン杭を地盤中に作製した。杭は構造物周りにピッチ 5cm（2.5m）で 32 本配置した。ドレーン杭は液状化層下端から上部非液状化層の途中まで作製し、非液状化層内に作製したグラベルマットと一体にした。「③土留工法」では、フーチング上流面に幅 5cm（2.5m）のトレンチを作製し、6cm $\times$ 6cm の鋼製アングルによって土留とした。今回の実験では理想的な状態を再現するために、鋼製アングルはワイヤーにより土槽に固定し、フーチング側へは移動しないようにした。

計測は加速度（AH-11 他）、間隙水圧（WP-11 他）、フーチング水平変位（LH-01 他）、および杭のひずみ（ST-11 他）である。「②ドレーン工法」では地盤内の水圧の増減に特徴が現れるため、特に多くの間隙水圧計を配置した。ひずみゲージは杭頭部、中間部、および支持層境界部に表裏 2 枚ずつ貼付した（図-2 参照）。

入力波は振幅 30g（600cm/s²）を目標に、60Hz（1.2Hz）20波の正弦波を入力した。

4. 遠心模型振動実験結果

(1) 入力加速度

ここからは、実験結果を実物換算値で示す。入力波は振幅 600(cm/s²)を目標に、1.2(Hz)・20 波の正弦波を入力した。図-3 に支持層上面での加速度波形を示す。

(2) 変位

表-3 に護岸の残留水平変位量を示す。この変位は、実験開始前後の護岸天端位置を実測して、算出した

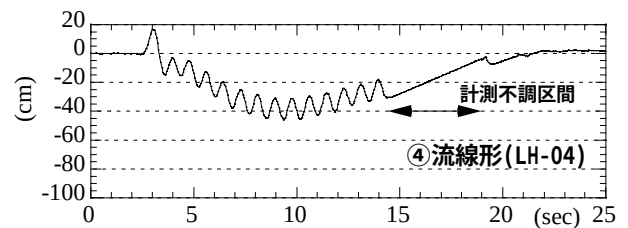
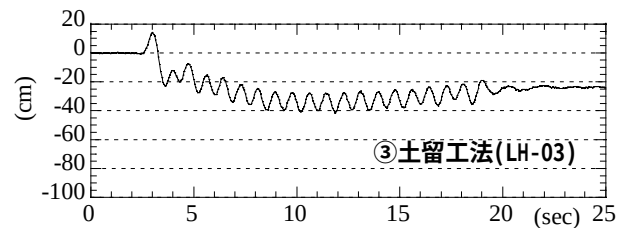
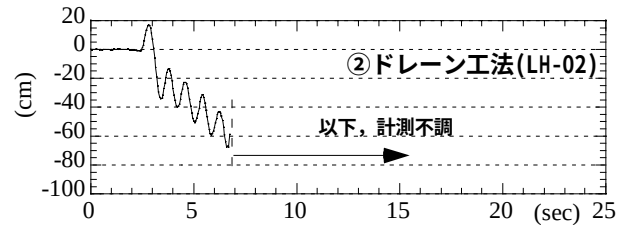
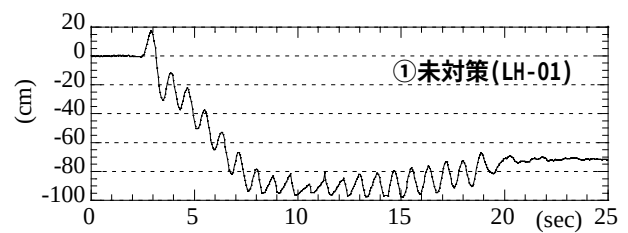


図-4 フーチング水平変位

値である。同時加振にも関わらずケース毎にばらつきがあるが、護岸設置時の模型作製精度の影響と考えられる。具体的には、支持層の不陸や護岸設置時のゆがみなどが影響因子として挙げられる。

図-4 に加振中のフーチング水平変位時刻歴を示す。変位は(一)側が護岸方向である。「②ドレーン工法」では計測途中で計器不調となり、7 秒以降のデータが得られていない。また、「④流線形」でも計測途中（14～19 秒）で計器不調となったが、19 秒以降は正常に機能した。

フーチングの護岸側への変位は入力開始から始まり、10 秒前後から内陸側へ戻る傾向が見られる。これは液状化により地盤剛性が低下し、杭基礎への拘束力やフーチング底面の摩擦が喪失することにより、杭の曲げモーメントの反発として復元したと考えられる。また、下部が液状化し流動した場合、上部層にも顕著な剛性低下が生じることが既往の実験で示されている⁶⁾。そのためフーチングに対する地盤バネが低減し、フーチングが内陸側へ戻りやすくなったと考えられる。

加振中の最大変位、残留変ともに未対策が最も多く、「③土留工法」と「④流線形」では対策による変位抑制の効果が顕著に示されている。「②ドレーン工法」では計器不調のため加振途中までしかデー

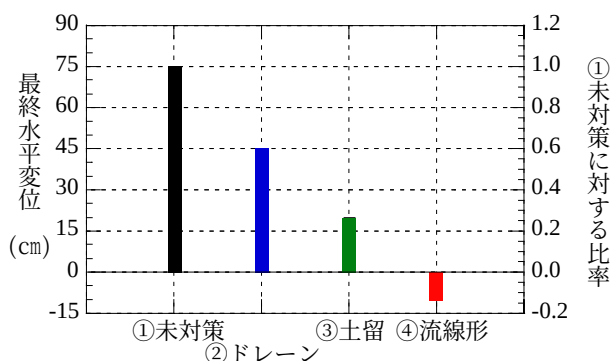


図-5 フーチングの残留水平変位の比較

タが得られていないが、7秒までの挙動については「①未対策」よりやや少ない変位量を示している。

「①未対策」が非液状化層と液状化層の両方の流動力を受けているのに対して、「③土留工法」では非液状化層の流動力を受けていない。両者の変位挙動を比較すると、「③土留工法」の変位量は最大値、残留値ともに「①未対策」の50%未満に抑えられており、非液状化層の流動力低減が、基礎構造物の損傷防止に大きな効果を有することがわかる。

「④流線形」に対して「③土留工法」では10秒以降の変位の回復量が少なく、結果として残留変位量が多くなっている。これは土留（側壁）が抵抗となって、基礎の内陸側への変位が妨げられた可能性が考えられる（図-2参照）。

変位時刻歴に見られる振動成分は、対策の有無や対策工法に関わらず 15～20cm 程度を示しており、対策効果は流動による変位量の抑制にのみ作用していることになる。

図-5 は、各ケースのフーチングの残留水平変位量を比較している。「①未対策」では護岸変位量が最少であったにも関わらず 75cm と大きな変位が生じているのに対して、3種類の対策工法はいずれも水平変位が抑制された。最も変位が少ない「④流線形」では、「①未対策」の12%となっているが、地盤が液状化した時点でのリバウンドが大きく、最終的に内陸側に変位している。

(3) 間隙水圧

図-6 に「②ドレーン工法」における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。図中のドレーン杭から離れた位置で計測された WP-21 では値が 1.0 に達し、地盤が液状化していることがわかる。杭基礎構造物から離れた位置については、他の工法（WP-11, 31, 41）でも同様に液状化した。一方、ドレーン杭近傍の WP-22 や WP-23 では過剰間隙水圧比が 1.0 に達しておらず（振動成分を除いた場合）、ドレーンの効果を確認することができる。ただしドレーン杭の内部（WP-23）に比べて、杭の外側（WP-23）では水圧抑制効果は小さい。

非液状化層に配置した水圧計の計測結果を見ると、ドレーン材から離れた WP-24 および WP-25 では、25 秒以降にわずかに水圧上昇が記録されている。一

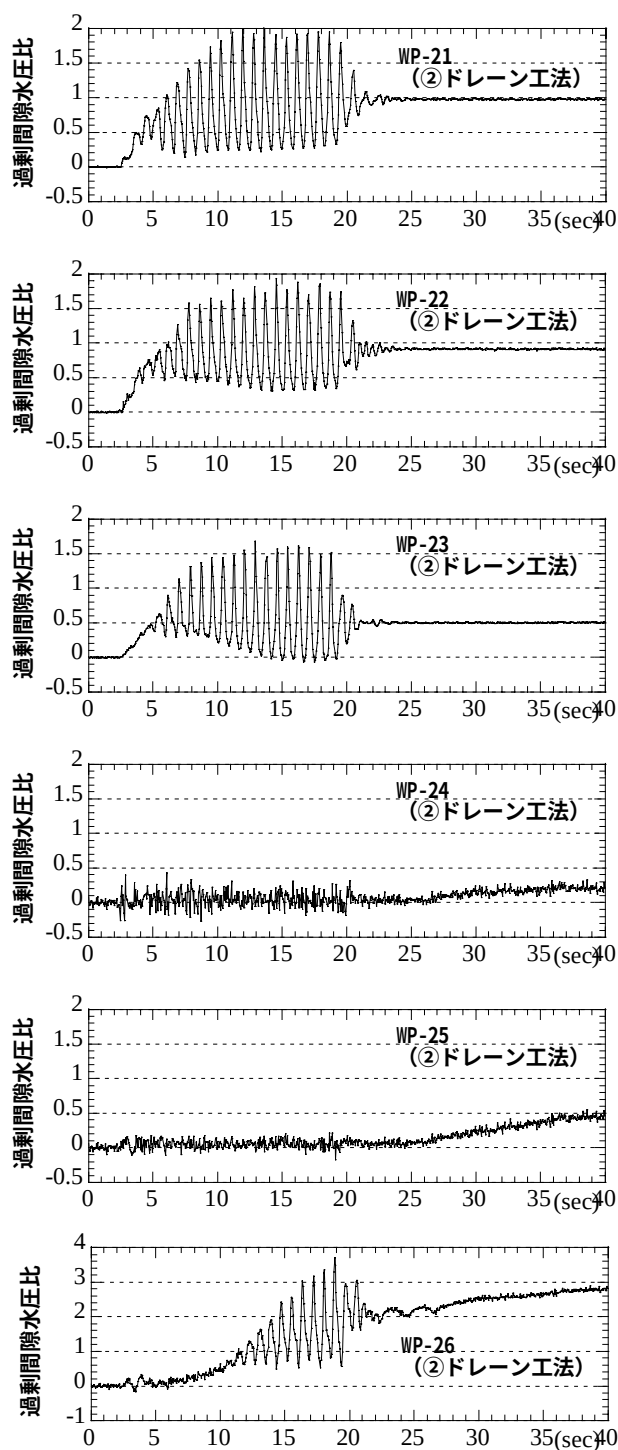


図-6 「②ドレーン工法」における過剰間隙水圧比

方、グラベルマット上に配置された WP-26 では、7 秒以降に水圧が急増しており、ドレーン材によりフーチング周辺に間隙水が供給されたことがわかる。

これらのことから、フーチング近傍の非液状化層では、間隙水により剛性が低下したと推定されるが、図-5 に示されるように、7 秒の段階において、フーチングの水平変位は既に最大値近くに達しており、フーチングの変位を抑制するには至らなかったと考えられる。

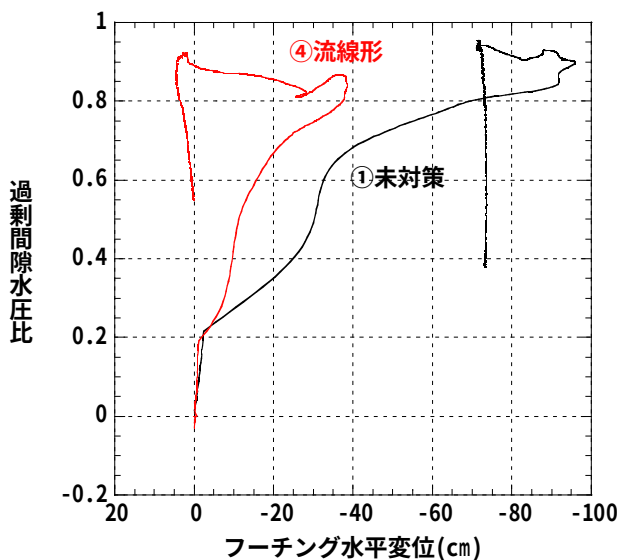


図-7 過剰間隙水圧比とフーチング水平変位の関係

図-7は「①未対策」と「④流線形」について、液状化層の過剰間隙水圧比とフーチングの水平変位の関係を示したものである。ただし、水圧比と変位はどちらも0.4Hz以上の成分をフィルターカットし、振動成分を除去している。「①未対策」と「④流線形」のいずれも、過剰間隙水圧の上昇と共にフーチングが護岸側（一侧）に変位するが、過剰間隙水圧比が0.2まではほとんど変位していない。どちらのモデルも、最大変位の50%が生じるときの過剰間隙水圧比は約0.7であり、その後の水圧上昇に伴い水平変位が大きく進行する。水圧比が0.9になった時点で最大水平変位が生じ、その後、水平変位は内陸側へリバウンドする。過剰間隙水圧の消散時は、微小であるが護岸側へ変位が進行する。また、「①未対策」と「④流線形」の変位量の差は、水圧比0.2～0.9において生じる変位量の差であり、特に水圧比が0.7以上の時に変位の抑制効果が高いことがわかる。

(4) 杭のひずみ

図-8 に各モデルの杭の曲げひずみを示す。図には降伏ひずみ（ $=1400 \mu$ ）の概略値を一点鎖線で示している。降伏ひずみは杭の降伏応力を 280N/mm^2 、ヤング率 196kN/mm^2 として算出した。「①未対策」では杭頭部で 2000μ 、支持層と液状化層の境界で 4000μ を超える曲げひずみが発生しているのに対して、「③土留工法」および「④流線形」でひずみの低減が顕著であり、降伏ひずみ以下となっている。「②ドレーン工法」では、杭頭部のひずみは低減されているが、支持層と液状化層の境界においてひずみが低減されていない。

図-9に各モデルの残留曲げひずみを比較する。図中には、「①未対策」の値を1.0とした時の、各工法での値を示した。杭頭部のひずみについては、いずれの対策工法も「①未対策」の60%以下に抑制されている。

液状化層と支持層の境界部については、「②ドレ

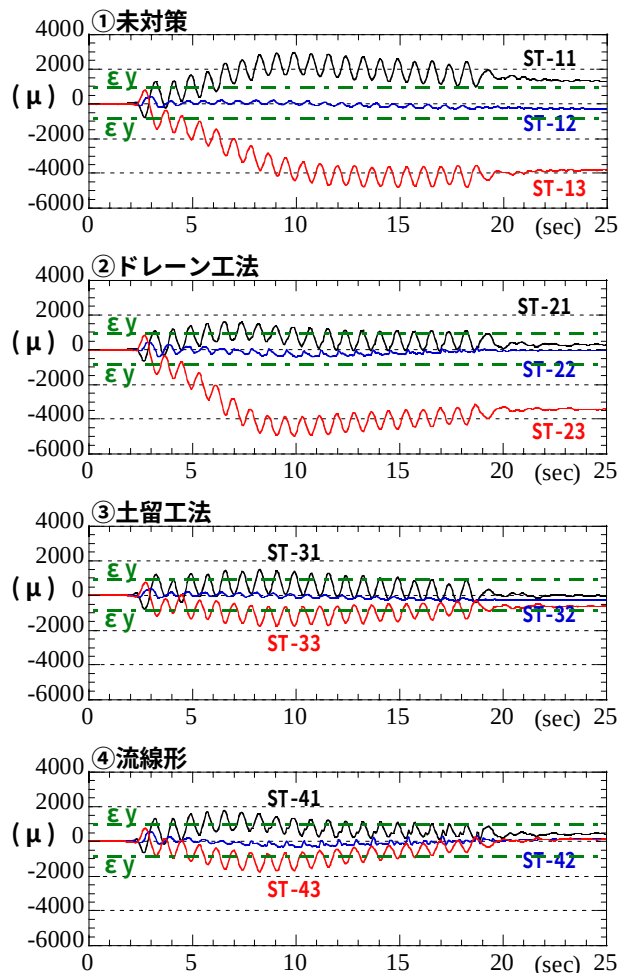


図-8 杭の曲げひずみ時刻歴

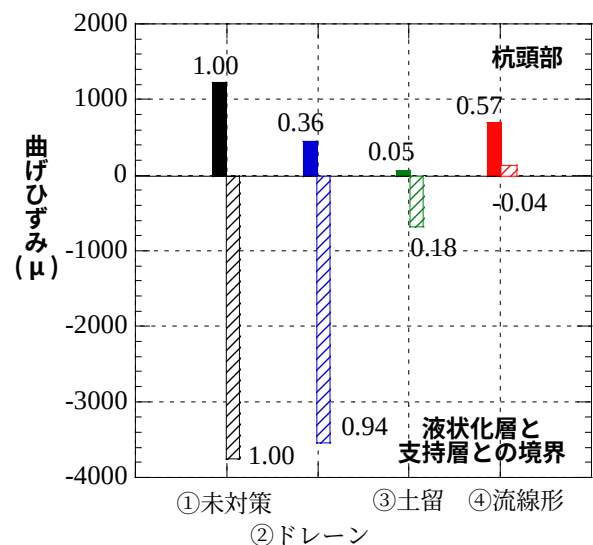


図-9 残留曲げひずみの比較

ーン工法」ではほとんど効果が見られないが、「③土留工法」および「④流線形」のように非液状化層の流動力を効果的に低減することで、ひずみを「①未対策」の20%以下に抑制できることがわかる。

5. まとめ

非液化化層の流動力の低減に着目して3種類の側方流動対策工法を選定し、遠心模型振動実験により、その被害低減効果を評価した。その結果、フーチング背後への土留およびトレンチの設置や、フーチング断面形状を流線形にすることにより、基礎構造物への流動力が低減され、側方流動対策として高い効果が得られることがわかった。特にフーチング断面形状を流線形にする工法は、地盤改良など周辺地盤への対策を行うことなく、フーチングの残留変位を未対策の1割程度まで減じることができ、効果的な対策工法であると言える。

ドレーン工法においては、ドレーン杭による液化化層の排水効果だけでなく、非液化化層への間隙水の供給が確認されたが、供給が始まった段階で既にフーチング変位はほぼ最大値に達しており、他工法に比べると対策効果を発揮することができなかった。ただし、フーチング水平変位は未対策の60%であった他、杭頭部のひずみは他工法と同程度に低減されており、ある程度の抑制効果は示された。杭配置や透水係数などを工夫することにより、効果をさらに高めることができると考えられる。

また、フーチングの水平変位について、液化化層の過剰間隙水圧比が0.2まではほとんど変位しないこと、過剰間隙水圧比が0.7の段階では最終的な変位量の50%程度であることが示された。地盤条件などによって異なるが、地盤改良などにより側方流動

対策を行う場合に、設計における一つの目安になると考えられる。ただし、基礎構造物の変位は護岸の変位量とも大きく関係していると考えられ、これらの関係も明らかにすることが必要である。

参考文献

- 1) 濱田政則, 若松加寿江: 液化化による地盤の側方流動のメカニズム(その2) 模型地盤と実地盤間の相似則と地盤変位量の予測, 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集, pp.309-312, 1998.
- 2) 濱田政則, 飯田康史, 志摩美裕貴, 山田隆一: 側方流動地盤が杭に及ぼす外力に関する模型実験と数値解析, 第25回地震工学研究発表会論文講演集, pp.373-376, 1999.
- 3) 樋口俊一, 松田隆, 三浦房紀: 側方流動地盤中の杭に作用する外力特性, 第26回地震工学研究発表会論文講演集, pp.661-664, 2001.
- 4) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, pp.85-90, 平成8年12月.
- 5) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, pp.123-139, 平成11年10月.
- 6) 佐藤清, 松田隆: 護岸背後地盤の側方流動と埋設管に関する遠心模型振動実験, 大林組技術研究所報, No. 63, pp.33-40, 2001.

(2003. 6. 27 受付)

A STUDY ON EFFECTS OF COUNTERMEASURES FOR PILE FOUNDATION UNDER LATERAL FLOW CAUSED BY GROUND LIQUEFACTION USING DYNAMIC CENTRIFUGE TESTS.

Kiyoshi SATO, Syunichi HIGUCHI and Takashi MATSUDA

Three countermeasures for lateral flow caused by ground liquefaction during and after large earthquakes were developed by the authors. In this development, the dynamic centrifuge test, the shaking table test and the numerical investigation were carried out. The countermeasures consist of drain system, stream line shape of footings and front shield system. A dynamic centrifuge test under centrifugal acceleration field of 50g was carried out to investigate effect of these countermeasures.

The results of the test, the effect of countermeasures were obviously indicated. Especially, the models of front shield system and stream line shape of footings indicated that the residual deformation of footings decreased by 30% and less, and strains of the pile head decreased by 60% and less for that of the original model.