

## 特殊土における既設杭基礎の要求性能に応じた耐震補強技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 27～平 31

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ  
(寒地地盤)

研究担当者：林 宏親、冨澤幸一、江川拓也

### 【要旨】

本研究テーマは、今後想定される大規模地震に対する公共構造物の減災・防災および健全性の確保・延命化を目的に、橋梁などの既設杭基礎の合理的な耐震補強技術の構築を目指すものである。特に地震時にせん断強度が過小となる泥炭性軟弱地盤および液状化が想定される火山灰質土の特殊土を対象に、既設橋脚基礎杭ならびに橋台基礎杭に対する要求性能に応じた補強技術の提案を必須とする。その際、基礎単体のみでなく橋梁全体系の耐震照査を評価することが重視と考えられる。本研究では実現場の施工制約条件を想定し、既設杭基礎周辺に地盤改良の固化改良体を併設する耐震補強技術の組杭静的載荷試験を実施し、同時に既往研究成果との対比と同技術の数値解析でシミュレーションより、既設杭基礎の耐震補強効果の解明に資する基礎資料を得る。

キーワード：特殊土、地震動、既設杭基礎、耐震補強

### 1. はじめに

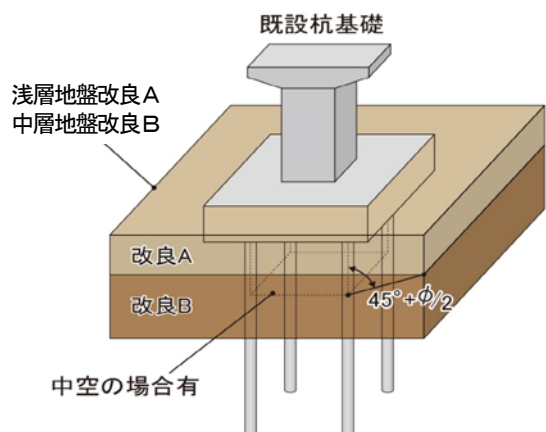
近年、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震の大規模地震が多発しており、橋梁などの公共構造物には所要の耐震性能の確保が求められてきている。日本の橋梁は高度成長期に架橋されたものも多く存在し、老朽化が進んでいるもある。その対策として既設橋梁の上下部工については随時耐震補強が施されているが、既設杭基礎の補強対応は未整備の状況にある。これは地盤性状や応答特性に応じた既設杭基礎の耐震補強技術が体系化されておらず施工性上合理的な対策技術が確立されていないことが主たる要因と考えられる。ただし、今後橋梁の機能を維持し延命させるためには、著しく耐震性がないと判断された既設杭基礎は対策工を講じる必要がある。

そこで研究テーマは、特に地震時にせん断強度が過小である泥炭性軟弱地盤および液状化が想定される火山灰質土の特殊土を対象に、既設橋脚基礎杭ならびに橋台基礎杭に対する要求性能に応じた橋梁全体の振動特性を考慮した耐震補強技術の構築を目標とする。本研究では、実現場の施工制約条件を想定し、既設杭基礎周辺に地盤改良の固化改良体を併設する合理的耐震補強技術の組杭静的載荷試験を実施し、同時に同技術の既往研究成果との対比および数値解析でシミュレーションより、既設杭基礎の耐震補強効果の解明に資する基礎資料を得るものである。

### 2. 特殊土に地盤改良を増設する既設杭基礎耐震補強 (コンポジットパイル工法)

既設杭基礎の代表的な耐震補強技術は、現在、増杭、フーチング補強、地中連続壁増設、鋼管矢板基礎増設、ケーソン基礎増設とされている。ただしこれらの耐震補強技術は、既設杭基礎に補強部材を接合することになるため土被り撤去や交通遮断が必要となり、適用できる現場条件が限定される。また、現況の既設杭基礎を複合構造の異種基礎に変更させることになるため静的および動的力学挙動が煩雑となり、要求性能に応じた明確な設計照査法が体系化されているとは言い難い。

そこで、特に耐震補強が必要と判断された特殊土（泥炭性軟弱地盤および液状化が想定される火山灰質土）における既設杭基礎に対して、既設杭周辺部に改良体を併設することで主に水平地盤反力の増加を図り、大規模地震時の杭応答変位を抑制する耐震補強技術（コンポジットパイル工法）を検討した<sup>2,3)</sup> (図1)。この手法は杭基礎の剛性のみを上げる既往技術では耐震性が過小な特殊土で根本的な耐震性確保とならないと判断された状況での活用性を提案するものであり、レベル1地震動およびレベル2地震動の加振実験よりその効果を精査している。ただし現行杭設計法は上部工慣性力を作用させる設計体系が主であるため、泥炭性軟弱地盤を対象に組杭静的載荷試験より補強効果および保有水平耐力を確認した<sup>4)</sup>。



1. 改良A—フーチング基礎部  
改良B—深さ $1/\beta$ かつ軟弱層・液状化層
2. 全改良または中空改良(点線表示)
3. 全改良または地中壁併設(鋼矢板Ⅱ型)

1. 浅層地盤改良工法 — 改良A  
フーチング基部から上部層
2. 中層地盤改良工法 — 改良B  
深さ $1/\beta$ かつ軟弱層および液状化層
3. フーチング直下の杭間は原則改良しない中空

図1 コンポジットパイル工法

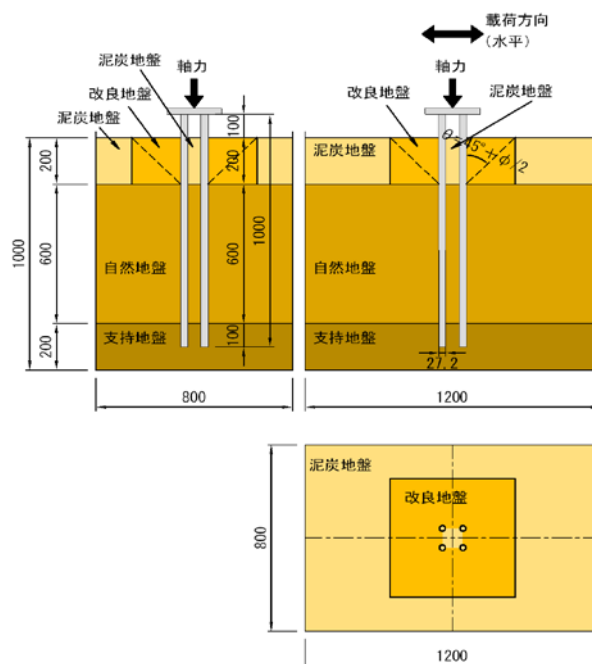


図2 組杭静的水平载荷試験モデル

### 3. 既設杭基礎の耐震補強実験

#### 3.1 静的実験概要(泥炭性軟弱地盤・4本組杭)

既設杭基礎の大規模模型実験として、泥炭性軟弱地盤を対象に、せん断土槽(幅1200mm(加力方向)×奥行800mm×高さ1000mm、せん断枠15段)を用いた杭の静的水平交番载荷実験<sup>5)</sup>を実施した。本実験でせん断土槽を用いるのは、固化改良体外側の泥炭地盤の側面変形挙動を考慮するためである。セットアップは写真1に示す。

図2に4本組杭の模型実験モデルを示したが、フーチング下の杭間を地盤改良しない中空とした(ケースA)。試験地盤は、上部層20cmを未改良部の泥炭地盤、中間層60cmを $N=10$ 相当(単位重量 $\gamma=17.7\text{kN/m}^3$ 、粘着力 $c=22.7\text{N/m}^2$ 、せん断抵抗角 $\phi=37.6^\circ$ 、締固め含水比 $w=5\%$ )、下部層20cmを $N=30$ の支持地盤の3層系地盤とした。上部層の杭側面に深さ $1/\beta$ から受働土圧の作用勾配 $\theta=45^\circ+\phi$ の3次元範囲を、一軸圧縮強さ $q_u=300\text{kN/m}^2$ 相当の固化改良体で補強した。固化改良体は、実現場を想定して事前配合試験の材令および発現強度より設定したが、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験結果より、固化改良体は一般土工部で泥炭性軟弱地盤に施工される改良体と強度特性はほぼ同類と判断される。

試験杭は実大規模を想定した鋼管杭(杭径 $D=27.26\text{mm}$ 、杭厚 $t=2.8\text{mm}$ 、長さ $L=1000\text{mm}$ )とし、下層部に10cm根入れさせた支持杭とした。

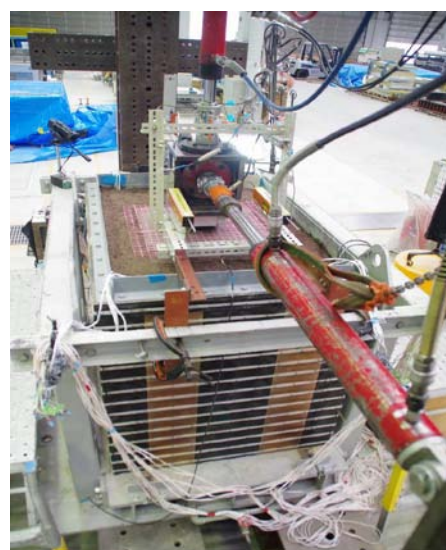


写真1 せん断土槽セットアップ状況

载荷は正負交番の静的水平繰返し载荷とし、変位量は常時および地震時(レベル1、レベル2地震時)を想定し設定した。また杭体には軸力(5kN)を負荷させた。つまり繰返し水平载荷のステップは図3に示したように、杭径27.26mmの0.5%、1.0%、2.5%、5.0%、10%、25%、50%、75%、100%、150%、200%、250%、最大300%≒約80mmまでを各ステップ3回の繰返し(RC部材の繰返し载荷実験を模擬)、組杭の水平荷重 $H$ 〜変位量 $y$ および杭周辺地盤変状などの力学挙動に注目した。

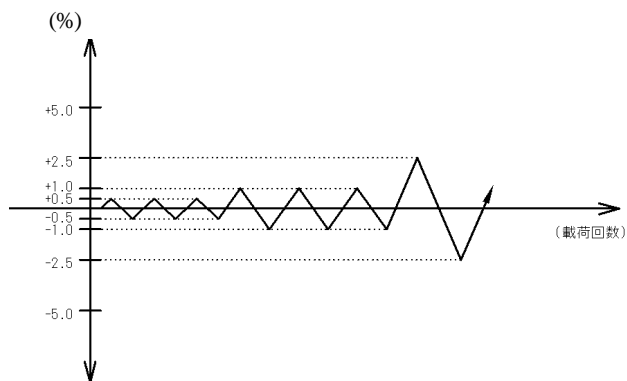


図3 組杭静的水平載試験ステップ

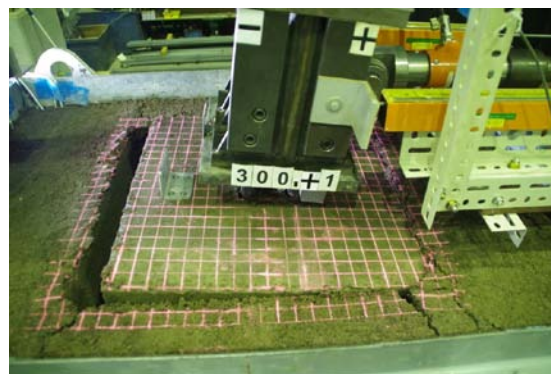


写真2 既設杭周辺地盤状況 (最終変位 300%時)

### 3.2 組杭静的水平載試験実験成果 (既往データとの対比)

本実験の組杭静的水平載荷試験で得られた水平荷重  $H$  ~変位量  $y$  の関係 (ケース A) を、既往試験で得られているフーチング下の杭間を全て  $q_u=300\text{kN/m}^2$  相当で改良したケース B と補強対策を施してしない未改良地盤実験 C とを対比して図 4 に示した。ケース A は杭径相当の約 20~30mm の変位に至る水平荷重ではケース B に対して小さい傾向にあるが、耐震補強で注目している大規模地震時相当と想定される杭径約 300%程度 (約 80mm) の最大変位量では差異は小さく、未対策のケース C に対し大きなエネルギー吸収がされていることがわかる。具体的には、杭径 27.26mm に対してその約 300%相当の最大変位量約  $y=80\text{mm}$  において、水平荷重  $H$  は本実験のケース A で 7.2kN とケース B の 7.7kN とほぼ同等値であり、ケース C は 4.8kN と約半分となっている。そのため、杭間中空としても改良体を杭周辺に併設することで泥炭性軟弱地盤中の既設杭基礎の保有水平耐力すなわち耐震性の向上効果が概ね確認されたものと判断される。

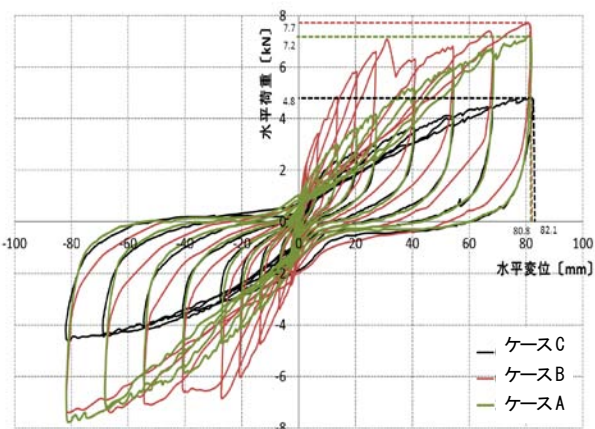


図4 静的水平荷重載  $H$  ~杭変位量  $y$

写真 2 に最終変位である杭径 300%時の地盤変形状況を示した。この杭変位量約 80mm はレベル 2 相当以上の大規模地震時の応答変位に匹敵すると想定されるが、固化改良体および杭体には損傷は認められない。固化改良体と泥炭性軟弱地盤の境界部に隙間が生じているのがわかるが、これは実現場では約 20~30m 四方と既設杭基礎からの距離と考えることができることから、土砂埋め戻しなどの対応は十分に可能と考えている<sup>9)</sup>。また、繰返し水平載荷による 4 本組杭の鉛直沈下量は 1.19mm と過小であり、杭の健全性に及ぼす影響は小さいと判断される。

### 4. 数値シミュレーション

本実験成果を現行杭設計法の基本である保有水平耐力法でシミュレーションした。

本数値解析は道路橋示方書に準じて単調載荷 (プッシュオーバー載荷) とした。解析条件として、杭はファイバー要素 (2 次要素)、載荷位置~杭頭は弾性 (弾性・高剛性)、地盤および改良体は非線形ばね要素 (バイリニア) を適用した。

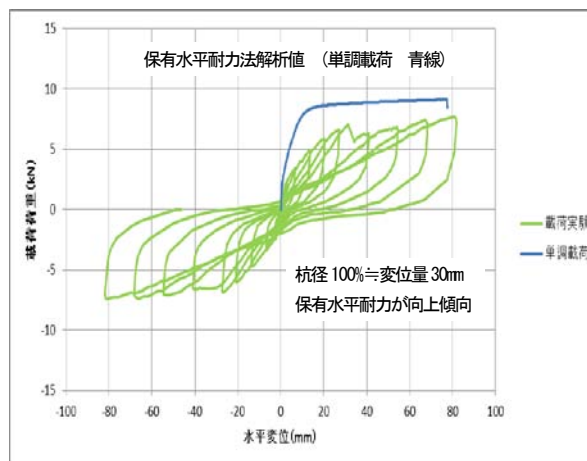


図5 保有水平耐力法解析 ( $H$  ~  $y$ )

改良体ばねのモデル化は一軸圧縮試験結果をもとに設定し、杭先端のばねは前記したように実験後に鉛直支持力降伏が確認されていないことから線形としている。

図5によれば、同技術では杭径27.26mmの約100%つまり大規模地震動相当の30mm程度の杭水平変位量までは、保有水平耐力の向上を再現している。過大評価の傾向にあるのは、現行保有水平耐力照査が地盤大変形時の塑性化を考慮しない一義的不動ばねとしているためと考えられる。本解析は簡便な基礎的考察であり、今後の研究で初期剛性や材料構成則の精査が必要と考えている。

## 5. まとめ

本研究の結果を要約すると以下の通りである。

- (1)特殊土地盤における既設杭基礎の耐震耐補強技術として、杭周辺に改良体を併設し脆弱地盤を改善する手法を検討した。本手法をコンポジットパイル工法と仮称するが、同工法は低施工空間の制約条件下でも適用が可能であり、現況基礎形式を変更させない合理性がある。
- (2)特殊土である泥炭性軟弱地盤において本技術を用いた組杭（橋脚想定）静的水平載荷試験結果より、フーチング下の杭間に地盤改良を施さない場合でも（既往試験との対比より）、耐震性向上の効果が確認された。
- (3)組杭静的水平載荷試験の保有水平耐力法によるプッシュオーバーの簡便なシミュレーションから、同技術が所要の地震時保有水平耐力を確保している再現性の基礎資料を得た。

本研究より、地震時にせん断強度が過小となり地中構造物の大きな応答変形が懸念される特殊土である泥炭性軟弱地盤に対し、脆弱地盤の強度改善を図る技術による既設杭基礎の耐震性向上効果が確認された。

今後はこれらを基礎資料として、行政支援を念頭に、泥炭性軟弱地盤以外の液状化が想定される火山灰質土を含めた特殊土を対象に、既設橋脚および橋台基礎杭に対して、橋梁全体の要求性能に応じた合理的な補強技術の体系化および構築の研究を継続する考えである。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：既設道路橋基礎の補強に関する参考資料、第3章 pp.1-25、2000.
- 2) 特許第5077857号「複合地盤杭基礎技術による既設構造物基礎の耐震補強構造（コンポジットパイル工法）」
- 3) 新技術情報提供活用システム：NETIS 登録番号HK-130008-A 一般、コンポジットパイル工法、2013.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、pp.6-13、2012.
- 5) 地盤工学会：地盤工学会基準 杭の水平載荷試験方法・同解説 第1回改訂版、pp.22-28、2010.
- 6) 富澤幸一、三浦清一：杭相対剛性および地盤修復性に関する基礎的実験（その2：改良体挙動）、土木学会 第71回年次学術講演会概要集（投稿中）、2016.

## SEISMIC REINFORCEMENT TECHNIQUE TO MEET REQUIRED PERFORMANCE OF AN EXISTING PILE FOUNDATION IN UNUSUAL SOIL

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2015-2020

**Research Team** : Cold-Region Construction

Engineering Research Group

(Geotechnical Research)

**Author** : HAYASHI Hirochika

TOMISAWA Koichi

EGAWA Takuya

**Abstract** : In recent years, super- and sub- structure of the existing bridges have been reinforced as needed after large-scale earthquakes, such as Kobe earthquake and the Tohoku region Pacific Ocean earthquake, but seismic reinforcement for the existing pile foundation of the bridges has not been conducted. The main objective of this research is to establish seismic reinforcement technique considering the vibration system of the entire bridge to meet required performance of an existing pile foundation in special soil, such as soft peaty ground and liquefiable volcanic sandy ground which do not have enough dynamic shear strength.

**Keywords** : unusual soil, earthquake, pile foundation, reinforcement against earthquake