

コンポジットパイル工法による既設杭基礎の耐震補強技術

Seismic reinforcement technique for existing pile foundations with the composite pile method

土木研究所寒地土木研究所 ○正員 富澤幸一 (Koichi Tomisawa)
 同上 正員 山梨高裕 (Takahiro Yamanashi)
 北海道大学名誉教授 フェロー 三浦清一 (Miura Seiichi)

1. 既設杭基礎の耐震補強の必要性

日本に現存する既設橋約 70 万（北海道では約 3,500）の約半数は築後 50 年以上の高度経済成長期に築造されたものであり、老朽化や耐震性が過小なものも認められていることから、厳しい財政状況下においてその膨大な資産を将来的に維持する方策が求められてきている。

2013 年「国土強靱化基本法」が制定され、橋梁やトンネルなどの公共構造物の防災・減災対応は国策となった。具体的には 2014 年 6 月 21 日に国土交通省より「インフラ長寿命化計画」が示され、次世代インフラ構築・地方創生が掲げられている。その一環として、現在既設橋梁の上下部工については必要に応じ調査・診断および耐震補強が施されてきている。ただし、既設杭基礎については適正な健全性の診断法や求める耐震性が不明瞭なことを事由に補強対策がほとんど施されていない実態にある。

しかしながら、2011 年東北地方太平洋沖地震では軟弱地盤中の既設コンクリート杭などが損傷し、長期の国道の通行止めを余儀なくされたことも事実である。この際に筆者らは、特に過去に簡便な震度法¹⁾のみで設計された軟弱地盤や液状化地盤中の既設杭基礎が、地震時に大きく応答変形し橋梁全体の耐震性能を著しく低下させる可能性を問題視している。つまり、大規模地震時に例えば津波や土石流などが発生して、既設杭基礎が損傷に至り橋梁が構造物としての機能を損ねることで、住民の避難路を妨げることがあってはならないと考えている。

なお、仮に基礎が地震時に損傷しても既設橋梁は落橋には至らないという議論もあるが、上下部工補強や落橋防止はあくまでも杭基礎が一定の保有水平耐力を有していることを前提に設計されており、大規模地震時に杭基礎が想定外に大きく変状した場合には、上下部工はせん断破壊し落橋防止工も破断する可能性がある。さらに、落橋防止装置が無理に機能した場合には、逆に地震エネルギーの負荷が全て杭基礎に加わり、既設橋梁全体の機能を損ねる可能性も十分にあると考えられる。

そのため概ね以下の3点の事由より、今後必要に応じた既設杭基礎の耐震補強の実施を検討すべきと判断する。

- 耐震設計法改定で、新設基礎杭はこれまで以上の大規模地震動に対する耐震性確保が求められている¹⁾。
- 軟弱地盤や液状化地盤においては、上下部工の剛性をいくらか上げる補強を施しても、根本的な橋梁全体の耐震性向上とはならない場合がある。
- 下部工に鋼板巻き立てなどの補強を施した場合、逆に既設杭基礎に過大な負荷が生じ、地震時に先行破壊する可能性がある。

2. コンポジットパイル工法の耐震補強

既設杭基礎の耐震補強の必要性の是非は、国策と連動してはいるものの、インフラ整備を念頭にネットワーク・重要度・その後のメンテナンスも踏まえ、求める耐震性に応じて管理者が判断すべきと考える。本論では省略するが筆者らは実務者のための参考指標として、既設杭基礎の耐震診断フロー（案）を提案している²⁾。このフロー（案）は、現行の耐震設計法^{例えは¹⁾}に準拠したものであり、現有の既設杭基礎の耐震性能を再検証することで補強の実施を検討するというものである。主たるターゲットは「地質調査」として主に軟弱地盤・液状化判定、「損傷調査」は既設杭の損傷・劣化・変状の確認である。これらの調査に基づき既設杭基礎の地震時診断を行い、橋梁架替えなどとの費用対効果と対比し、補強実施の是非は関係機関と協議し決定することを主旨とする。

既設杭基礎の耐震補強が現在ほとんど実施されていない背景には、現場条件に応じた施工管理法や建設コストが低廉で合理的な補強技術がないことも要因と考えられる。そこで、特に地震時に大変形が想定されるせん断強度が過小な軟弱地盤および液状化地盤中の既設杭に対して、杭周辺に固化改良体を併設することで不良地盤を改善し杭基礎の地盤反力および耐震性能の向上を図る合理的工法を研究開発した。この他種と差別化を図った技術をコンポジットパイル工法（特許取得済³⁾、新技術情報提供活用システム NETIS 登録済⁴⁾）と称する（図-1）。

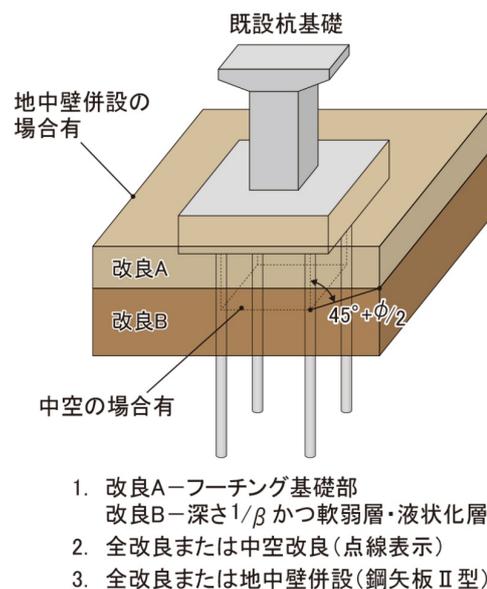


図-1 コンポジットパイル工法

コンポジットパイル工法の最大の特長は、他の既往耐震補強技術の多くが増杭工法のように既設杭基礎に他部材の接合を必要とするのに対し、既設杭周辺に施工する固化改良体の人口地盤により地震動のエネルギー吸収を図り、杭基礎全体の耐震性を向上させる点である。

コンポジットパイル工法における固化改良体の改良範囲は、図示したように既成杭に必要な地盤反力領域として、杭特性長 $1/\beta$ かつ軟弱層および液状化層の深さから受働土圧 $45^\circ + \phi/2$ (内部摩擦角 ϕ は一般に無視) の勾配で立ち上げた3次元範囲とする。図中の地盤改良の地中部 (改良 B) およびフーチング基礎から上部 (改良 A) は中層混合および浅層混合処理工法として同時一体施工が可能である。また、改良範囲を狭くする必要がある現場条件や仮締切りを必要とする場合には、改良体側面に地中壁 (鋼矢板 II 型) を併設する。なお、既成杭基礎に接する近接部は近年低変位型の地盤改良工法が開発されており既設杭に及ぼす影響は少なく問題はない。また、フーチング基礎真下の杭間の地盤改良が困難な現場条件では、杭間の内側は中空としても良い。地盤改良および鋼矢板の施工法は、桁下が低空頭でも種々の機械が開発されており施工性に問題なく、コスト面では基礎の規模にもよるがコンポジットパイル工法は施工条件に制約があるに増杭工法に対して、約 4 割のコスト縮減・5 割の工期短縮が可能となる⁵⁾。

3. 耐震補強実験

種々のモデル実験・解析より、せん断強度が過小な軟弱地盤中の杭周辺に固化改良体の人口地盤を形成することで、静的上部工慣性力の繰返しプッシュオーバーに対して所要の水平地盤反力・受働抵抗が発揮され、杭の降伏耐力が向上することをこれまでに検証している。また、仮に杭のみが想定外に大変形して損傷した固化改良体は、塑性化した自然地盤に反力効果が期待できない場合とは異なり、ひび割れを薬液注入などで再固化が可能であり初期剛性を確保することも確認している⁵⁾。

そこで本論では、コンポジットパイル工法の特に動的力学挙動に注目し、大規模地震動に対する軟弱地盤および液状化地盤中の既設杭の耐震補強効果すなわち同工法の工学的有用性を代表的な大型振動台による加振実験成果を以下に示すことで、検証した。

3.1 大規模加振実験概要

コンポジットパイル工法の耐震性能の検証のために実施した大規模な組杭加振実験の代表的結果を示す。加振実験で使用した大型振動台の全景を写真-1 に示す。大型振動台テーブルは、せん断土槽 (幅 1200mm (加力方向) × 奥行 800mm × 高さ 1000mm, せん断枠 15 段) を載せ、一方向に動的加振する方式である。

本論で示す実験成果は次の 5 ケースである。ケース 1 は杭特性長の $1/\beta$ 相当の上部層深さ 200mm を未対策の代表的軟弱地盤である泥炭性軟弱地盤、中間層深さ 600mm を自然地盤、下部層深さ 200mm を支持地盤の 3 層地盤としたものである。ケース 2 は、ケース 1 に対して上部層深さ 200mm から受働土圧 $45^\circ + \phi/2$ で立ち上げた 3 次元範囲を全改良の固化改良体とし、中間層



写真-1 大型振動台実験装置

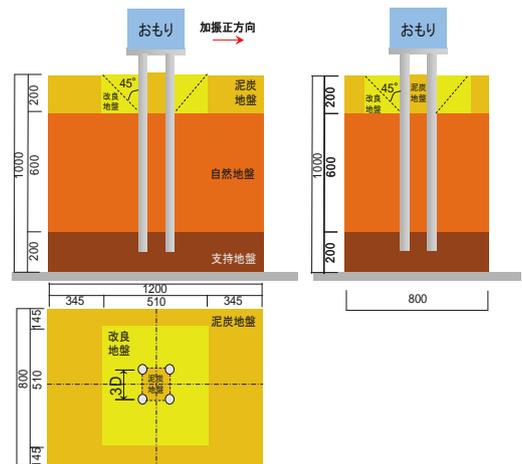


図-2 実験モデル (泥炭性軟弱地盤 中空改良)

深さ 600mm を同様に自然地盤、下部層深さ 200mm も同様に支持地盤としたものである。ケース 3 はケース 2 と同様に上部層深さ 200mm は固化改良体範囲とし、ただしフーチング基礎下の杭間の内側を実現現場では施工ができない場合も想定し中空にさせ、中間層深さ 600mm を同様の自然地盤、下部層深さ 200mm を同様の支持地盤としたものである。試験地盤は、固化改良体の一軸圧縮強さは $q_u=300\text{kN/m}^2$ 相当、自然地盤は N 値 10 相当の砂質土地盤、支持地盤はセメント体とした。

また、ケース 4 は上部層 200mm を未対策の相対密度 $D_r=40\%$ の浜岡砂の緩地盤とし、中間層 600mm を自然地盤、下部層 200mm を支持地盤の 3 層地盤としたものである。ケース 5 は、ケース 4 に対しケース 2 と同様に上部層 200mm 内の組杭側面に $q_u=300\text{kN/m}^2$ 相当の全改良の固化改良体を耐震補強したものである。試験杭は 4 本組杭とし、鋼管杭 (杭長 $L=1000\text{mm}$, 直径 $D=27.2\text{mm}$, 肉厚 $t=2.8\text{mm}$) を使用した。すなわち、ケース 1, 2, 3 の対比で軟弱地盤、ケース 4, 5 の対比で液状化地盤におけるコンポジットパイル工法の動的力学挙動を検証した。図-2 に代表としてケース 3 のモデル図を示した。

加振実験はレベル 1 およびレベル 2 地震動などを用い種々実施したが、本論で示す成果はケース 1, 2, 3 はレベル 2 地震動としプレート境界型の 2011 年東北地方太平洋沖地震動 (タイプ I 新晩翠橋周辺地震動 Max692gal 240sec) (図-3) を上部増幅を考慮し引き戻しはせずにテーブル基盤から直接入射した実験とした。また、ケース 4, 5 の液状化地盤の実験では、最大 500gal の sin 波をモデル地盤の周波数特性に同調させ基盤から入射した。

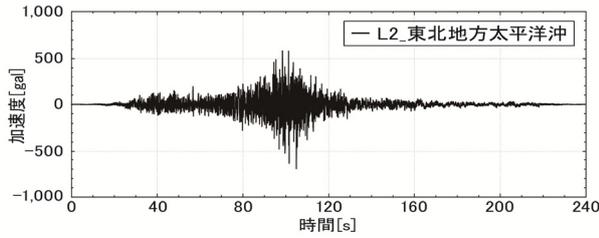


図-3 ケース 1・2・3 の入力地震動

3.2 軟弱地盤の加震実験成果

軟弱地盤の代表である泥炭性軟弱地盤における組杭加振実験の結果、レベル 2 地震動に対して杭頭変位量は、未改良のケース 1 で $y_1=81.05\text{mm}$ であったのに対して、固化改良体の全改良のケース 2 でケース 1 の約半分の $y_2=39.02\text{mm}$ 、中空改良のケース 3 でも $y_3=44.78\text{mm}$ であった。この結果、コンジットパイル工法の地震動に対する既設杭基礎の変位抑制効果が検証されたものと判断する。また、固化改良体が全改良と中空改良で変位抑制に大きな差異は認められていない。次に耐震性能の評価として大規模地震時の杭ひずみの発現に注目した。図-4 に、2011 年東北地方太平洋沖地震動の加震に対するケース 1 の杭 1 本当たりのひずみ分布を示した。図によれば、未改良のケース 1 では中央部の深さ位置で $\varepsilon=4000\sim 5000\mu$ 程度の非常に大きな杭ひずみが発現している。この場合、写真-2 に示したようにレベル 2 加振で鋼管杭が中央部で損傷し大きく変形しているのが分かる。これに対し図-5 に示したように、コンジットパイル工法の全改良のケース 2 および中空改良のケース 3 では杭ひずみの発現が $\varepsilon=2000\mu$ 程度とケース 1 に対して半減しており、固化改良体の損傷もなく健全であった。

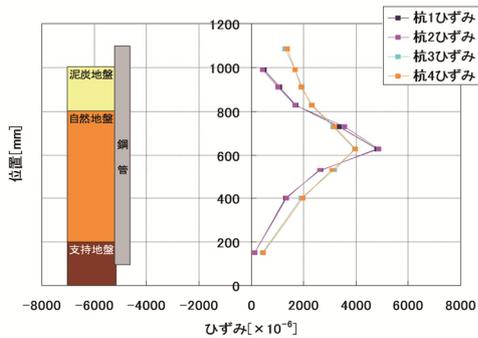
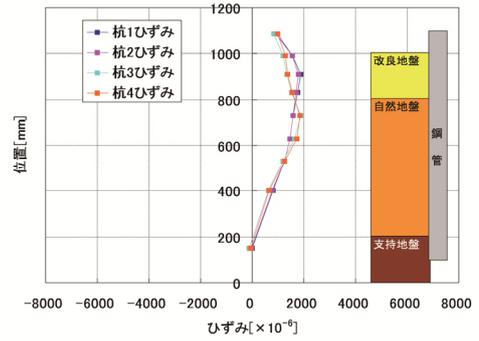


図-4 ケース 1 未改良レベル 2 杭ひずみ



写真-2 レベル 2 加振の杭変形 (ケース 1)

ケース 2 全改良



ケース 3 中空改良

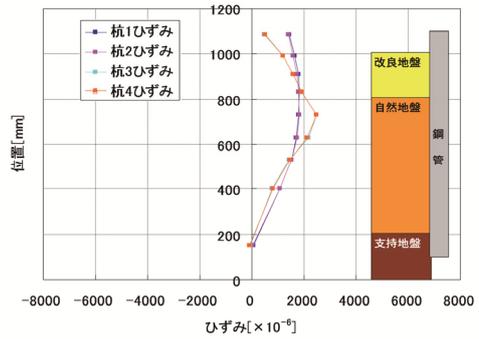


図-5 ケース 2・3 コンジットパイル杭ひずみ

3.3 液状化地盤の加震実験成果

液状化地盤における組杭加振実験のケース 4 (未対策) とケース 5 (コンジットパイル工法) の成果を示す。この際にケース 5 はフーチング下を中空とした。ケース 4 未対策の加振実験状況を写真-3 に示したが、明らかに液状化現象が生じているのが分かる。

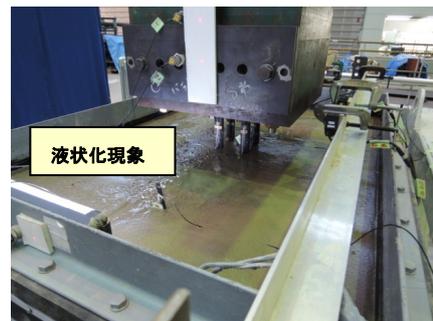


写真-3 未対策ケース 4 液状化実験

実験モデルは省略する。コンジットパイル工法ケース 5 の固化改良体側面部と中空部の時刻歴間隙水圧比 (sec) の変化によれば固化改良体の周辺地盤では液状化は避けられないが、固化改良体の効果で組杭の応答変位が減少し、フーチング下の中空部では設置した間隙水圧計より過剰間隙水圧比は低下し液状化が明らかに抑制された。これを表した代表的な実験成果が図-6 であるが、地盤性状の固有周期に同調させた同一最大加速度の sin 波を入力した場合の杭応答変位をケース 4 とケース 5 で対比した場合、コンジットパイル工法のケース 5 では過

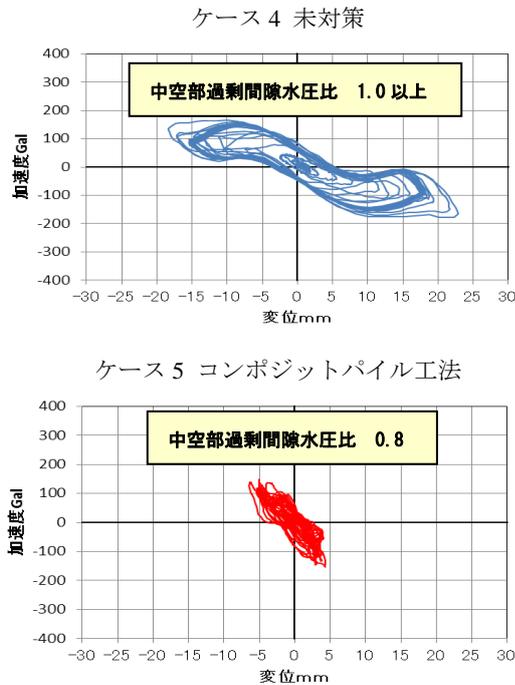


図-6 液状化地盤の加速度～杭応答変位

剰間隙水圧比は 0.8 程度に抑止され、杭最大応答変位は約 1/4 (y_5 =約 5mm / y_4 =約 20mm) に低下した。この際に、ケース 5 では固化改良体は損傷することなく健全であり、杭応答ひずみも未対策のケース 4 に対してほぼ同様の低下傾向であった。

この結果より、コンポジットパイル工法の液状化地盤における既設杭基礎の応答抑制すなわち耐震補強効果についても概ね検証されたものと考えられる。

4. 結論

本研究から得られた知見は、以下のように要約される。

- (1) 既設杭基礎の耐震補強技術の新技术として、杭周辺の杭特性長 $1/\beta$ 相当の 3 次元範囲に人口地盤としての低強度の固化改良体（一軸圧縮強さ $q_u=300\text{kN/m}^2$ 相当）を併設するコンポジットパイル工法を研究開発した。同工法は既設基礎と補強材を一体化する他手法との差別化を図り、地震時の既設杭周辺の地盤反力の向上を主目的とする。同工法は従来の増杭工法に対して、約 4 割のコスト縮減・5 割の工期短縮が可能である⁵⁾。
- (2) 既設杭基礎の耐震補強の必要性および実施は、国策と連動はしているが、現行の耐震設計法および求める耐震性に応じて適正に判断する必要がある。既に既設杭基礎の耐震診断フロー（案）を提案しているが診断では既設杭の損傷・劣化・変状や液状化を重要視する。最終診断はレベル 1 およびレベル 2 地震動に対する主に地震時保有水平耐力照査より、関係機関との協議を踏まえ、必要に応じて補強実施を検討するべきである。
- (3) 本代表成果として示した軟弱地盤である泥炭性軟弱地盤におけるプレート境界型レベル 2 地震動（タイプ I Max692gal 240sec）の組杭加振実験の結果、コンポジットパイル工法の地震動に対して既設杭の最大応答変

位および杭ひずみは半減し、抑制効果が検証された。

- (4) 同様に、本代表成果として示した液状化地盤における大規模地震動（最大 500gal sin 波）の組杭加振実験の結果、コンポジットパイル工法の最大応答変位および杭ひずみは未対策地盤に対して約 1/4 に低減し、フーチング下の中空部の過剰間隙水圧の上昇は抑制され、液状化地盤でも本工法の有用性が概ね確認された。

以上、コンポジットパイル工法の有効性に関する実験および解析は、本論で示した以外にも静的・動的モデルで種々実施しているが、同工法は特にせん断強度が過小で地震時に大変形が想定される軟弱地盤および液状化地盤の既設杭基礎の耐震補強技術として有効と判断される。

同工法の原形となる補強対策は、2003 年十勝沖地震で液状化により変状した鈎路管内の橋梁基礎杭に既に適用しており、その後 10 年の観測より健全性は検証している。また同工法は施工性・建設コストでも大きな利点を有するため、現在 3 業者と業務提携し新技術活用に向け始動しており、今後現場条件に応じた適用が望まれる。

5. 既設杭基礎の耐震補強の方向性と展望

本論の総括として、今後の国土強靱化に向け、既設杭基礎の耐震補強のあるべき方向性を以下に 3 点列記した。

- ① 既設杭基礎の耐震性能

既設杭基礎の耐震性能を再評価・診断する必要がある。地震履歴や変状調査を踏まえ、新設橋と同様の耐震性確保の必要があるかなど要求性能を定める必要がある。
- ② 補強技術の設計施工法

既設杭の耐震補強実施の判断は、適正な設計基盤波を設定し上下部工一体の動的解析で判断すべきであるが、種々提案されている補強技術は設計法が整備されているとは言い難い。既設杭基礎の耐震補強の解析手法および施工条件・施工性の一括した整理が必要である。
- ③ 地震後の再補強・速やかな回復

杭基礎は耐震設計上、液状化地盤などで一定の塑性化を許容している。そのため耐震補強により既設杭基礎の大規模な損傷の回避は可能であるが、大規模地震時には基礎周辺地盤はせん断変形し塑性化する。近年の巨大地震の経験則からも、基礎周辺地盤の復元性や余震に対する再補強も視野におく必要がある。

上記議論および認識共有は技術者倫理上も必須と考える。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，pp.36-147，2012.
- 2) 富澤幸一・西本 聡：既設構造物基礎の耐震診断フロー，土木研究所寒地土木研究所月報 No.705，pp.40-44，2012.
- 3) 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，2012.
- 4) 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.
- 5) (例えば、) 富澤幸一・木村 亮：既設杭の軟弱地盤および液状化地盤における耐震補強技術，第 59 回地盤工学シンポジウム論文集，pp.339-346，2014.