既設杭基礎の地盤改良併設による耐震補強技術

磯部 公一* 富澤 幸一**

Seismic Reinforcement Technology for Existing Pile Foundation Utilizing Ground Improvement

by

Koichi ISOBE* and Koichi TOMISAWA**

Reinforcement of superstructures and substructures is being carried out for existing bridges which are judged to have low earthquake resistance. However, reinforcement techniques are not systematized because the seismic diagnosis method and required performance are not clarified for existing pile foundations. One of the reason is that no reasonable reinforcement technology under construction constraints are established. Therefore, reinforcement technology, that ensures seismic performance by improving ground around the pile, is examined for the existing pile foundation in the soft ground against large-scale earthquakes. In this paper, its seismic reinforcement effect for the existing pile foundation in extreme soft ground and liquefiable ground is shown based on representative experimental results.

Key words:

Pile foundation, Seismic reinforcement, Ground improvement, Soft ground, Liquefaction, Model test

1 緒言

公共構造物である新設橋梁には、大規模地震に対する耐震性能の確保が求められている。一方で、老朽化し劣化が生じている既設橋梁も少なくない。そのため、耐震性が過小と判断された橋梁は上下部工の補強・補修が随時施されているが、既設杭基礎は未対応の場合が多い。これは既設杭基礎に対する耐震診断法や要求性能が明確化されていないことが主たる事由であるが、狭隘現場などでは補強施工が困難なことも理由の一つと考えられる。そこで防災対応の主旨より、特に地震時に大変形が想定され耐震補強が必要と診断された脆弱地盤中の既設杭基礎に対して、杭周辺に地盤改良を併設することで耐震性能を確保させる補強技術を研究した。この実務の合理化を図った地盤改良併設補強技術をコンポジットパイルと仮称している^{1), 2)}。以下、本補強技術と称す。

本論では、まず既設杭基礎の耐震補強の必要性を整理した。それを踏まえ、超軟弱地盤および液状化地盤中の既設杭基礎における本補強技術の代表的実験成果より、大規模地震動に対する補強効果を検証した^{3)~5)}。

2 既設杭基礎耐震補強の必要性

既設橋梁の耐震補強は、大規模地震時の致命的な損壊を回避するため落橋防止設置や下部工躯体補強が先行的に実施されているが、これは既設杭基礎が一定の地震時保有水平耐力を有していることを前提としている。ただし、過去に震度法のみで設計された超軟弱地盤および液状化現象を設計時に考慮していない地盤中の既設杭基礎は、大規模地震に対して所要の耐震性が確保されていない可能性

があり、地震時に橋梁全体が大きく応答変形することが懸念される。近年の大規模地震時の事例では、橋脚損壊と同時に既設コンクリート杭の塑性化などが確認されている。

そのため概ね以下の3点の事由より、既設杭基礎の耐震性能を検証し、関係機関との協議を踏まえ、必要に応じて適切な補強対策を講じるべきと判断される。

- (1)大規模地震の教訓・経験則より、各機関(道路、建築、港湾、鉄道等)の新設橋梁の設計基準では所要の耐震性確保を義務化している。一方で古い既設橋梁は老朽化が進行し、地震履歴より防災点検等では高度経済成長期造成の既設杭基礎には耐震性が劣るものが確認されている。
- (2)基礎の降伏耐力は一般に上下部工を上回るよう副次的塑性に留まる範囲で設計されている。ただし、橋台および橋脚躯体に無理な巻立て工法等の補強を先行実施した場合、逆に既設杭基礎に対する荷重が増加し、杭体に地震時応答を含め負荷が卓越する可能性が考えられる。
- (3)阪神淡路大震災(1995年)や東日本大震災(2011年)の被災事例や既往研究成果より、せん断強度が過小な超軟弱地盤や液状化地盤中の既設杭基礎は地震時に変状・変形し、橋梁全体系の耐震性に及ぼす影響の懸念がある。

3 地盤改良併設技術の設計施工コンセプト

既設杭基礎の代表的な耐震補強技術は、これまでに増杭、フーチング補強、地中連続壁増設、鋼管矢板基礎増設、ケーソン基礎増設などとされている。ただし、これらの耐震補強技術は、既設杭基礎に他部材を接合することになるために土被り撤去や交通遮断などが必要であり、適用できる現場施工条件が限定される。

† 原稿受理 平成29年 Received June 12, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 北海道大学大学院工学研究院 〒062-8628 札幌市北区

Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Kita-ku, Sapporo 062-8628.

** (国)土木研究所寒地土木研究所 〒062-8602 札幌市豊平区平岸

Civil Engineering Research Institute for Cold Region, PWRI, Toyohira-ku, Sapporo 062-8602.

Fig. 1 Schematic diagram of seismic reinforcement technology for existing pile foundation utilizing ground improvement.

また、基礎を複合構造の異種基礎に変更させるため動的挙動が煩雑となり、その耐震照査法は体系化されているとは言いがたい。そこで、耐震照査を現行設計基準⁹⁾に準じ、同時に狭隘等の施工制約を受けない既設杭耐震補強とし、一般に土工部の盛土沈下対策等で実施される地盤改良工を活用した既設杭耐震補強技術を研究開発した (Fig. 1)。

本補強技術の設計コンセプトは、既設杭基礎の剛性向上による耐震補強対策が不成立あるいは地震時応答が過大な脆弱地盤で根本的な基礎耐震補強とならないと判断された際に、杭周辺地盤を端的に改良することで既設杭基礎の耐震性確保を図ることであり、他工法とは差別化される。これは、杭の力学挙動が周辺体との相対剛性で決定⁷⁾する事象に基づいている。なお、この際の剛性向上対策が不成立つまり耐震補強技術が成立しないとは、例えば増杭対策で地震時の既設基礎の水平応答軽減の耐震補強を実施した際、フーチングは杭頭結合などで剛性を確保するために非現実的に厚くなり、そのため杭鉛直支持力も不足し更に杭本数増加が必要の繰り返しとなる様なケースである。

なお、浅層混合処理工・中層混合処理工・深層混合処理工の各地盤改良工法は従来から土工部も含めて実施され、多くの実績を有している。そのため既設基礎の耐震補強工法として、地中構造物である既設杭周辺にコンクリートに近い高強度の固化改良体を併設する手法や既設基礎杭周辺を乖離した改良体壁で格子状等に囲む手法も提案されている。ただし前者は、脚付きケーソン等の複雑な照査が必要であり如何に高強度でも地盤改良体を基礎の代用と扱うのは困難と判断される。また後者は、概ね地震時の液状化対策に特化したもので、上部工荷重に抵抗する基礎本体近接の水平地盤反力の向上にはならないと考えられる。

それに対して本補強技術は、既設杭周辺に (人工) 地盤と見なし得る低強度改良体を造成し、地震時のエネルギー吸収を図り、既設杭基礎さらには橋梁全体の耐震性を向上させる点が技術の新規性である。つまり、既設杭周辺の脆弱地盤の改善を図ることが他手法と異なる最大の特長である。そのため本補強技術の耐震設計法は、改良体を地盤と扱うため、現行耐震基準⁹⁾に準じレベル 1 地震動では低強度固化改良体をばねモデルとした震度法、レベル 2 地震動に対しては地震時保有水平耐力法や実波による応答変位法・非線形有限要素法解析で照査することが可能である。

また本補強技術の施工コンセプトと特徴は、桁下が 2 m 程度の低空頭や狭隘な現場制約条件下および杭種や杭諸元に関係なく適用できることである。さらに地盤改良時に既設杭基礎に影響を及ぼすことが無いよう接触部周囲を低変位型地盤改良工で囲むように施工し、その後側面部に中層地盤改良工および深層地盤改良工を実施する手順となる。ただし、フーチング直下の地盤改良は一般に困難なため杭間内側は地盤改良しない中空を基本としている。なお、液状化対策としてコンパクション系が用いられる場合があるが、原地盤を強制的に密度増加させる手法のため近接構造物つまり対象既設杭を移動させる懸念があり、現時点では既設杭基礎の耐震補強に適さないと考えられる。

詳細の改良体施工領域は Fig. 1 に示すように、既設杭基礎の必要な地盤反力領域である杭特性長 $1/\beta$ かつ超軟弱層および液状化層の深さから受働土圧 $45^\circ + \phi/2$ (せん断抵抗角 ϕ は一般に無視) の勾配で立ち上げた 3 次元範囲とする。この際の杭特性長 $1/\beta$ ⁹⁾は、上部工慣性力作用を主体とする現行杭基礎の静的および動的設計法において、各機関設計基準では杭頭からの杭水平抵抗の関与深さとされている。なお、杭特性値 β は杭剛性 $E_p I$ を考慮した杭水平地盤反力係数 k 値の 4 乗根つまり $\beta = \sqrt[4]{(kD)/4E_p I}$ (D : 杭径) で算定される。 $1/\beta$ は、脆弱地盤では一般に約 5~10 m 程度である。

図中の地盤改良の地中部 (深層地盤改良工 B) とフーチング基礎から上部 (中層地盤改良工法 A) は同時一体施工もできる。そのためコスト面では対比すると規模にもよるが、試算では本補強技術は、増杭を基礎回りに施工するのに対し約 4 割のコスト縮減および 5 割の工期短縮が可能である。

4 本耐震補強工法に関する模型実験の成果

せん断強度が過小な脆弱地盤中の杭基礎周辺に低強度固化改良体を形成することで、常時荷重および地震動加震に対し既設杭基礎の所要の水平地盤反力と受働抵抗が発揮され、杭の降伏耐力が一定量向上することは現場試験・遠心力模型実験・動的非線形解析等で概ね検証しており、本補強技術は特許取得 (第 5077857 号)¹⁾および新技術情報提供活用システム (HK-130008-A)²⁾登録に至っている。そのため本補強技術の耐震性能確保に関しては、各種実験・解析で確認しているが、大規模地震時の杭と改良体の相互作用特に加振中の変形・損傷メカニズムの詳細を検証するため、実大の約 1/30 スケールの振動台実験を実施した。

そこで本論では、本補強技術の超軟弱地盤および液状化

Fig. 2 Schematic view of model tests (Case 3) and all tests detail.

Fig. 3 Input wave used for Case 1, 2 and 3.

地盤における既設杭基礎の耐震補強効果の検証成果として、レベル 2 相当の大規模実地震動に対する代表的実験結果を示す^{3)~5)}。実験はせん断土槽（幅 1200 mm×奥行 800 mm×高さ 1000 mm）を用いた一方向振動台加震とした。

加震実験は Fig. 2 に示した 5 ケースである。図中にはその代表として実験ケース 3 のモデルを示した。全ケースの試験杭は杭中心間隔 $3D$ (D : 杭径) の 4 本組杭とし、既製鋼管杭（杭長 $L=1000\text{mm}$, $D=27.2\text{mm}$ ）を使用した。杭先端は固定条件とし支持杭を想定した。試験地盤の構成は図示のとおりであり、上層部固化改良体は低強度 $q_u=300\text{ kN/m}^2$ とした。ケース 1, 2, 3 の超軟弱地盤実験では泥炭地盤を用い、レベル 2 地震動とし 2011 年東北地方太平洋沖地震動（タイプ I 地震動, Max 692 gal, 240 sec）を振動台基盤から入射した（Fig. 3）。ケース 4, 5 の緩砂の液化地盤実験はレベル 2 相当地震動の最大 500 gal の sin 波（20 波）の加振とした。ケース 3, 5 のフーチング直下杭間は本補強技術の基本モデルに沿って中空とした。

4・1 超軟弱地盤の耐震補強（実験検証事例 1）

超軟弱地盤の代表である泥炭地盤における 4 本組杭加震実験の結果、レベル 2 地震動において、杭頭最大応答変位 y は、未改良のケース 1 で $y_1=81.05\text{ mm}$ であるのに対して全改良のケース 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。つまり、本補強技術では固化改良体が全改良と中空改良状態のどちらでも地震時応答変位の抑制効果に大きな差異は認められていない。

(1) Case 1 (Before improvement)

(2) Case 2 (Full improvement)

(3) Case 3 (Hollow improvement)

Fig. 4 Reinforcement effect of seismic reinforcement technique

大規模地震時の既設杭基礎の耐震性能評価として、ケース 1, 2, 3 の杭 1 本当たりの最大ひずみ ϵ 分布を Fig. 4 に示した。未改良の超軟弱地盤のケース 1 では杭中央部の深さ位置で最大 4000~5000 μ 程度の非常に大きな杭ひずみ ϵ が発現しているが、全改良のケース 2 およびフーチング直下杭間を改良しない中空のケース 3 では杭ひずみ ϵ 発現が 2000 μ 程度と未改良のケース 1 に対し概ね半減していることがわかる。これは各ケースの対比で、4 本組杭のすべての杭（Pile No.1, 2, 3, 4 各杭ひずみ）で同様の傾向である。なお、ケース 1 では Photo.1 に示したように大規模地震動の加震により鋼管杭が中央部で損壊し変形したが、ケース 2, 3 では既設杭基礎の応答変位が抑制され杭および固化改良体は損傷なく健全であった。つまり、超軟弱地盤である泥炭地盤においてフーチング直下杭間が未改良（中空）でも全改良と同等の耐震補強効果が発揮されている。

Photo.1 Deformation of pile after L2 ground motion (Case 1).

4・2 液状化地盤の耐震補強（実験検証事例2）

液状化地盤における4本組杭加震実験のケース4（未改良）と本補強技術であるケース5（フーチング直下杭間中空）の成果を示す。ケース4未改良の加震実験では明らかに液状化現象が生じた。一方で、ケース5では固化改良体側面の周辺地盤の液状化は避けられないが既設4本組杭基礎の応答変位が減少し、フーチング直下の中空部では過剰間隙水圧比は低下し、液状化が抑制される結果を得た。これを端的に表した実験結果が Fig. 5 である。加震前のせん断土槽の固有周期に同調させた同一最大加速度 500gal の sin 波を入力した場合の応答杭変位量をケース4とケース5で対比した場合、ケース5では過剰間隙水圧比は 0.8 以下に抑止され杭最大応答変位は約 1/4 (y_3 =約 5 mm / y_4 =約 20 mm) に低下した。ケース5で固化改良体は損傷することなく健全で、応答杭ひずみも未対策のケース4に対して、事例1とほぼ同様の低下傾向を示した。

(4) Case4 (Before improvement)

(5) Case5 (Hollow improvement)

Fig.5 Relationship between response acceleration and lateral displacement at pile head in liquefiable sand (Case 4 and 5).

5 結 言

本補強技術の代表的実験成果およびその考察から得られた知見を、以下に要約した。

- (1)既設杭基礎の新たな耐震補強技術として、増杭などの既往技術の実対策および耐震設計照査法が困難な状況において、特に超軟弱層および液状化層中の杭周辺（杭特性長 $1/\beta$ の 3 次元範囲）に低強度固化改良体の（人工）地盤を併設する地盤改良併設補強技術を研究開発した。
 - (2)超軟弱地盤の泥炭地盤におけるレベル2地震動（タイプ I, Max 692 gal, 240 sec）の4組杭加震実験の結果、未改良地盤つまり未補強に対し、本補強技術（全改良および中空改良）を用いることで、地震時の既設杭基礎の応答変位および杭ひずみは概ね半減する耐震性向上効果を得た。
 - (3)液状化地盤における大規模地震動（500 gal, sin 波 20 波）の4組杭加震実験の結果、本補強技術（中空改良）では最大応答変位と杭ひずみは未対策（液状化現象有り）に対して約 1/4 に低減し、フーチング直下杭間中空部の過剰間隙水圧の抑制効果つまり耐震性確保が確認された。
- 以上、本論の代表的な加震実験成果（ケース 1, 2, 3, 4, 5）より、超軟弱地盤および液状化地盤中の既設杭基礎において、地盤改良併設補強技術を対策工法とした際の耐震性向上効果ならびに工学的有用性が概ね検証されたものと判断される⁸⁾。今後、既設杭基礎の要求性能に応じた耐震技術とし、本補強技術を実現場に活用していく考えである。

参 考 文 献

- 1) Patent No.5077857 “Aseismic reinforcement structure using composite pile foundation technology”, Japan (2012).
- 2) NETIS (New Technology Information System) Registration number HK-130008-A, Composite-Pile Method (2013).
- 3) K. Tomisawa and S. Nishimoto “Seismic reinforcement technology of existing pile foundation with improved soil column—verification of seismic capacity of composite pile”, Proceedings of 10th ground improvement symposium, pp.329-336 (2012).
- 4) K. Tomisawa, T. Yamanashi and S. Miura “Seismic reinforcement technology of existing pile foundation with improved soil column (Part2: Diagnostic flow and group piles)”, Proceedings of 11th ground improvement symposium, pp.215-220 (2014).
- 5) K. Tomisawa, K. Isobe and S. Miura “Seismic reinforcement technology of existing pile foundation with improved soil column (Part3: Need practice and construction management method)”, Proceedings of 12th ground improvement symposium, pp.73-78 (2016).
- 6) Japan Road Association, “Specifications for highway bridges and instruction manual-V. seismic design”, pp.6-56 (2012).
- 7) W. D. Guo and M. F. Randolph “Vertically loaded piles in non-homogeneous media”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.21, pp.507-532 (1997).
- 8) Tomisawa, S. Nishimoto and M. Kimura “Seismic strengthening technique for existing pile foundation in soft and liquefiable ground”, 19th ICSMGE, CD-ROM (2017).