

地盤改良を併用した杭基礎の耐震補強に関する研究

木村 亮^{*1}

1. はじめに

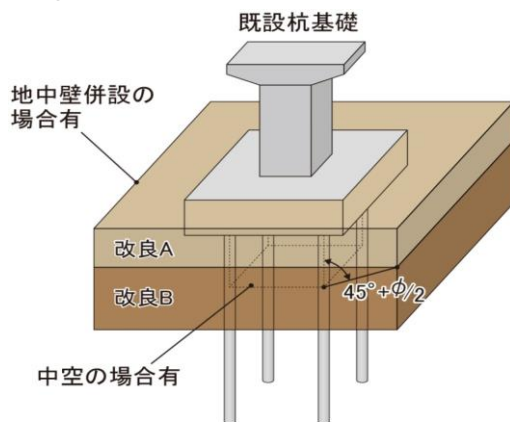
近年大規模地震が多発しており、公共構造物である新設橋梁には所要の耐震性能の確保が求められている¹⁾。その一方で、老朽化が進行し劣化や損傷が生じている既設橋梁も少なくない。そのため、耐震性が著しく小さいと判断された橋梁については上下部工の耐震補強が随時施されているが、既設杭基礎の補強は未対応の場合が多い。これは既設杭基礎に対する耐震診断法や要求性能などが明確化されていないことが主たる要因であるが、狹隘現場などでは既設杭基礎の補強実施が施工上困難なことも事由の一つと考えられる。そこで防災対応の早期実践の主旨より、特に地震時に大変形が想定され耐震補強が必要と判断される脆弱地盤中の既設杭基礎に対し、杭基礎周辺部を地盤改良することで耐震性能を確保させる補強技術（以下、コンポジットパイル工法（図-1））を研究した。

2. 既設杭基礎の耐震補強の必要性

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など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¹⁾のみで設計された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、所要の耐震性を確保されていない可能性があり、大規模地震時に大きく応答変形し橋梁全体の機能を損ねる懸念がある。近年の大規模地震時の事例では既設コンクリート杭などの塑性化が確認されており、今後脆弱地盤中のパイルベント基礎や木杭基礎などでは地震時の損壊が危惧される。そのため、概ね以下の3点の事由より既設杭基礎の耐震補強の必要性および対策を検討すべきと判断する。

- 1) 大規模地震の経験則より新設の橋梁基礎には高い耐震性能の確保が義務付けられている。一方で古い既設橋梁は老朽化が進み幾多の地震履歴を受け、既設杭基礎の現場調査や設計診断結果では、耐震性が劣るものが確認されている。
 - 2) 橋梁下部工である橋台および橋脚躯体に巻立て工法などの耐震補強を先行実施した場合、逆に既設杭基礎への荷重増加や地震時エネルギーの負荷が加わり、大規模地震時に杭体が損傷する懸念がある。
 - 3) 被災教訓よりせん断強度が過小な軟弱地盤や液状化地盤中の既設杭基礎は、地震時に大きな応答変形が想定される。
-

したがって既設杭基礎の耐震補強に際しては、現況変状や現有する耐震性能を把握して補強の必要性を判断しさらに補強方法を選定することが重要となる。その際、特に橋梁構造形式や地盤性状に応じて、既設基礎単体のみでなく橋梁全体の振動系を考慮することが必須と考えられる。



1. 中層地盤改良工法　－　改良Ａ
　　フーチング基部から上部層
2. 深層地盤改良工法　－　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

3. コンポジットパイル工法の開発

既設杭基礎の代表的な耐震補強技術は、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

これらの耐震補強技術は、既設杭基礎に補強部材など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であり、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ために動的力学挙動が煩雑となり、明確な設計照査法が体系化されていない。

そこで、特に耐震補強が必要と判断された軟弱地盤や液状化地盤中の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としてコンポジットパイル工法を研究開発した（図-1）。

杭基礎の力学挙動は周辺体との相対剛性で決定する。そのため同工法の設計コンセプトは、既設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脆弱地盤で根本的な耐震性確保とならない状況において、地盤改良により軟弱地盤および液状化地盤を改善することで地震時の応答変位を抑制し、既設杭基礎の耐震性確保を図る差別化である。つまり、既設杭周辺の人工地盤により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最大の特長である。同工法の耐震設計法は、現行耐震基準に準じレベル 1 地震動に対して改良体をばねモデルとした震度法、レベル 2 地震動に対して地震時保有水平耐力法および実地震波を入力した動的応答解析や非線形有限要素法解析で照査する。地盤改良強度は、改良体を人工地盤の構成則で評価するため一軸圧縮強さを $q_u = 300 \text{ kN/m}^2$ 程度とする。ただし、施工完了後に改良体の $\sigma = 28$ 日強度のばらつきを確認し、その施工強度でレベル 1 地震動およびレベル 2 地震動の再診断を義務化している。

新設杭基礎においても改良体を併用し地盤反力を確保する同種工法は、通常の杭設計法が成立しない特殊地盤において既に設計施工の実績がある²⁾。ただし新設杭は地盤改良後に施工できるために杭間も含めて杭の受働土圧に必要な領域を全て改良する。なお、この際に杭設計法が成立しないとは、躯体が高い橋台設計時では背面土圧が大きく杭許容水平変位量（一般に杭径 1%）を満足させるため多くの杭本数が必要となり、その結果フーチングが剛性確保のため厚くなって荷重増加で杭支持力が不足し、さらに杭本数が増える事例などを意味する。代表的な既往耐震補強技術の増杭でも、脆弱地盤では同様の事象が想定される。コンポジットパイル工法は改良体併設の考え方を既設杭基礎の耐震補強技術に応用したものであるが、フーチング直下の地盤改良は困難なため杭間内側は地盤改良しない中空を原則としている。

同工法の施工コンセプトは、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点である。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のが特長で、近接部周囲を低変位型地盤改良工で初めに施工しその後周辺部の所要範囲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を取る。なお、液状化対策工としてコンパクション系が用いられる場合があるが、原地盤の密度を上げる手法であるため近接構造物を移動させる懸念があり、既設杭基礎の耐震補強には適さないと考えられる。詳細の改良体施工範囲は図-1 に示したように、既設杭基礎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³⁾。図中の地盤改良の地中部（深層地盤改良工 B）とフーチング基盤から上部（中層地盤改良工法 A）は同時一体施工も可能である。そのためコスト面で対比すると基礎規模にもよるが、試算ではコンポジットパイル工法は増杭に対して約 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. 謝 辞

本研究は、株式会社 不動テトラの助成により実施されたものであり、ここに記して謝意を表す。

発 表 論 文

- 1) Tomisawa, K. and Kimura, M. : Experimental Study on Deformation of Improved Soil Used as Seismic Strengthening Material of Existing Pile Foundations, *Proc. of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 1415-1422, 2015.

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.16-131, 2012.
- 2) Tomisawa, K. and Miura, S. : Mechanical behavior of pile foundation constructed in composite ground and its evaluation, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.5, pp.961-972, 2007.
- 3) Tomisawa, K. and Miura, S. : A Design verification Method for Pile Foundation Combined with Solidified Improved Soil, 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, CD-ROM, 2013.