

平成25年度

既設杭基礎の耐震補強技術 —耐震診断フロー（案）・コンポジットパイル工法—

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地地盤チーム ○富澤 幸一
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地地盤チーム 山梨 高裕
北海道大学大学院 名誉教授 三浦 清一

日本の高度経済成長期に施工された既設橋梁は、老朽化対策や多発する大規模地震に対する耐震性の必要性より、現在国策として橋脚補強や落橋防止設置などが施されている。ただし、既設基礎については、対策のための必要予算および求める耐震性能が明確でないことや合理的対策工が体系化されていないなどの事由より、耐震補強がほとんど図られていない実態にある。そこで本論では、まず実務者のための既設基礎の耐震診断フローを提案し、軟弱地盤や液状化地盤中の既設杭基礎周辺を地盤改良し耐震性能の向上を図る新技術として研究開発したコンポジットパイル工法の実験検証を踏まえた有用性を示す。また同種工法の適用事例を紹介し、今後議論すべき既設基礎の耐震補強の方針およびあるべき方策を列記する。

キーワード：危機管理、健全度、技術開発、耐震補強

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震などの被災経験を踏まえ、新設の橋梁には大規模地震動に対する所要の耐震性の確保が求められている。そのため、道路橋では耐震基準改定に伴い耐震性能の目標として、安全性・供用性・修復性を掲げている¹⁾。

その一方で、全国の国道には約 68 万橋（北海道は約 3,500 橋）の既設橋が存在するが、築後 30～40 年の高度経済成長期のものが半数以上あり、深刻な劣化や損傷が生じている事例も数多くある。そのため、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できる方策が求められている。その対策として、現在橋梁の上下部工については随時必要に応じた耐震補強が施されてきているが、既設基礎補強について未整備の状況にある²⁾。

そこで本論では、まず既設基礎の耐震補強の必要性を精査するために実務者のための耐震診断フローを提案する³⁾。また、軟弱地盤や液状化地盤中の既設杭基礎の耐震補強の新技術としてコンポジットパイル工法（特許取得済⁴⁾、NETIS 登録済⁵⁾）の実験検証を踏まえた有用性を示す。また同種工法の適用事例を紹介し、今後技術者が議論すべき既設基礎の耐震補強の考え方を示す。

2. 既設基礎の耐震補強の必要性

現在、既設橋梁の耐震補強は橋脚補強や落橋防止設置を国策として先行実施している。この際に、損傷や劣

化が著しい場合には架け替えに至る例もある。ただし、新設の橋梁基礎ではレベル2相当の大規模地震動に対し（主たるまたは副次的な）塑性化を許容していることもあり、また既設基礎については下部工に対し先行破壊をするケースは少なく、診断の結果ダンパー設置や受働土圧を考慮することで耐震補強を不要とできる場合が多くある。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やケーソン頂版部が損傷し、長期の国道の通行止めを余儀なくされたケースがあったことも事実である。そのため、構造メンテナンス研究センターや国土技術政策総合研究所では、既設基礎の耐震性の判定手法をなど整理し、既設基礎に求める耐震性能を重要度別に再検討しているところである⁶⁾⁷⁾。

また、基礎が仮に地震時に損傷しても橋梁は落橋には至らないという議論もあるが、橋脚補強や落橋防止はあくまでも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、大規模地震時に基礎が想定外に大きく変形した場合は、橋脚は応答してせん断破壊し落橋防止も破断する可能性もあり、仮に落橋防止装置が無理に機能した場合には、地震力の負荷が全て基礎に加わり、既設基礎の崩壊につながることも想定される。

そのため、概ね以下の3点の事由により、今後、必要に応じた既設基礎の耐震補強は検討すべきと判断する。

- (a) 耐震設計基準改定により、新設の橋梁基礎にはこれまで以上の耐震性の確保が求められてきている¹⁾。
- (b) 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上げても、根本的な橋梁全体系の耐震性の向上とはならない場合がある。
- (c) 橋脚を鋼板巻き立てなどの補強を施した場合、基礎に負荷が生じ、地震時に先行破壊する可能性がある。

3. 既設基礎の耐震診断フロー（案）

既設基礎の耐震補強の必要性の有無は、現行の耐震耐震設計法¹⁾および求める耐震性に応じて判断する必要がある。特に自治体などでは既設橋梁の耐震診断すらも遅れており、国土強靱化に向け早期の対応が求められている。その際に、適正な耐震診断のためには当然土木技術者の判断能力の向上が必要なことは言うまでもない。そのため、本論では実務者のための参考指標として、既設基礎の耐震診断フローを提案する（図-1）。

この耐震診断フローは、現行の耐震設計法¹⁾に準拠したものであり、現有の既設基礎の耐震性能を検証することで補強の有無を判断するというものである。具体的には、レベル1およびレベル2地震動に対する保有水平耐力照査を上下部工の補強同様に、過大な補強対策とならないように部材の降伏耐力の確保を念頭に置いている。診断の結果、フロー下にあるように、既設基礎が上下部工に対して先行破壊の可能性がある場合には、関係機関

との協議を踏まえ補強実施の有無を検討するというものである。このフローにおいて、地質調査は主に液状化判定、損傷調査は基礎の具体的な劣化・変状などの確認を意味する。この耐震診断フローは4つのフローで構成されているが、他は紙面の関係で省略するため詳細は参考文献3)を参照されたい。

耐震診断の結果、既に変状をきたしている基礎や著しく耐震性がない場合（常時で既に杭支持力・変位・応力が許容値以下やレベル1地震動の液状化で耐震性が過小なケースなど）、また耐震性能に懸念があるパイルベント基礎などについては、他機関（NEXCO、鉄道など）と同様に下部工補強と連動した大規模修繕の中で、基礎補強を実施すべきと考える。ただし、既設基礎に求める耐震性能と橋梁架け替え費との対比も必要となることから、今後、このフローを参考に耐震補強の必要性を関係機関と協議することを前提とする。

なお、この既設基礎の耐震診断フローは、必ずしも基礎補強の実施を強要とするものではなく、まず適正な診断の必要性を共有するという主旨と理解されたい。

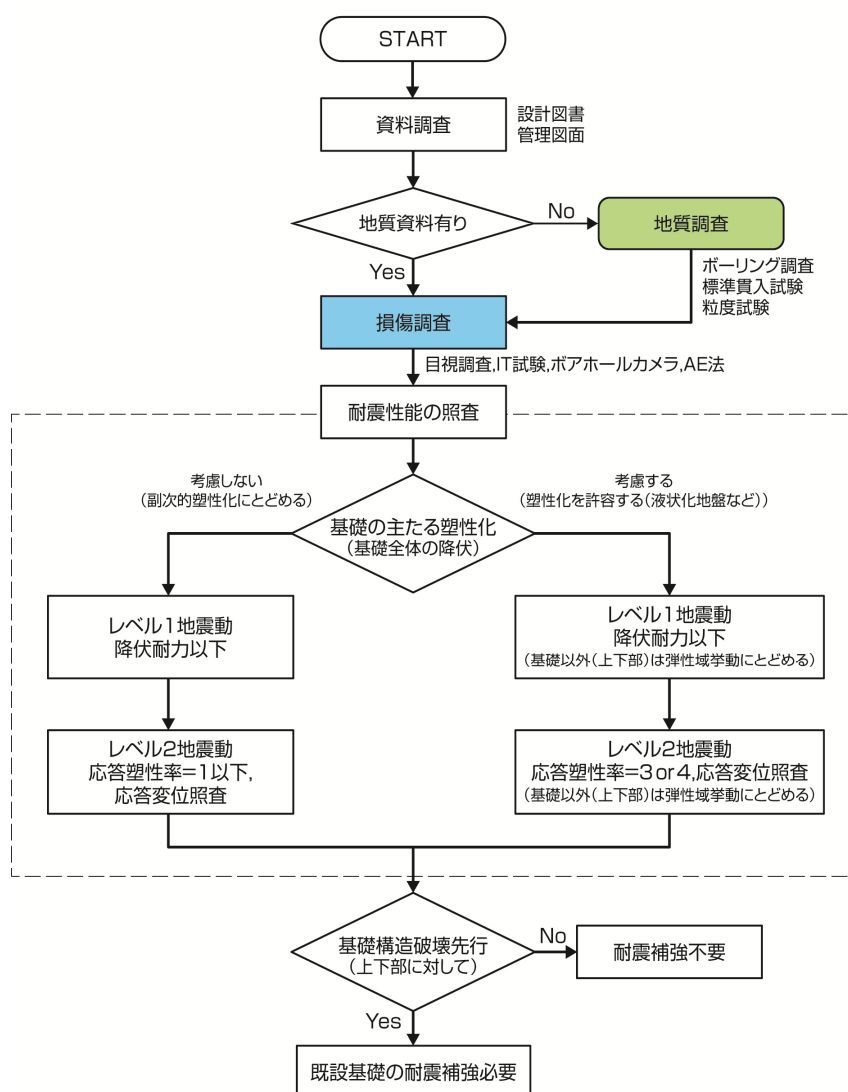


図-1 既設基礎の耐震診断フロー（案）

4. 既設基礎の耐震補強概要

既設基礎の耐震補強にあたっては、現行の耐震耐震設計基準¹⁾が定める耐震性能が不足しているものを前提に、以下の2点を検討すべきと考えられる。

- ①基礎の耐力および変形性能が著しく小さいもの
(木杭基礎や変形能の乏しいRC杭など)
- ②液状化に伴う流動化が生じるもの

この際、耐震補強の検討にあたっては耐震性能のレベルに加えて、橋梁の重要度や道路ネットワーク機能などについても十分に考慮する必要がある。なお、耐震補強以外に損傷度が著しいものや洗掘などにより支持力・地盤反力が低下したものに対しては、補修・補強が必要となる場合もある。

また、既設基礎の耐震補強技術の基本的な考え方は次の方法に大別される²⁾。

①基礎の耐力を増加させる方法

この方法には、既設基礎に新たな構造部材を付加し基礎の耐力を向上させる手法と、基礎周辺地盤のせん断強度を地盤改良工法などで増加させる手法がある。

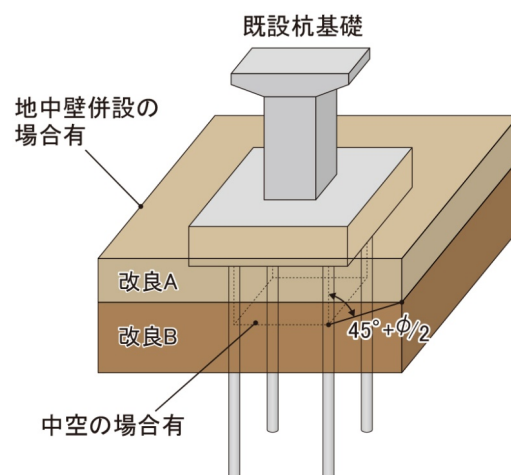
②良質な地盤に地震時荷重を伝達させる方法

この方法は、支持層への既設構造物基礎の根入れを確認し、必要に応じて増杭などを行う手法である。

③基礎周辺地盤の液状化によるせん断強度低下を防止する方法

この方法には、間隙水圧の増加を抑制する手法と、矢板などを併設して地盤のせん断応力およびせん断ひずみを減少させる手法がある。

そのため、現行の代表的な既設基礎の耐震補強技術は、概ね、フーチング補強、増杭、地中連続壁増設、鋼管矢板基礎増設、ケーソン基礎増設、砕石置換工、地盤固化処理などとされている。ただし、これらを含め、現在各機関で種々提案されている耐震補強技術は、既設基礎との複合構造体となる場合が多く、挙動が煩雑なため明瞭なそれぞれの設計照査が体系化されているとは言い難い。



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)

図-2 コンポジットパイル工法の概要図

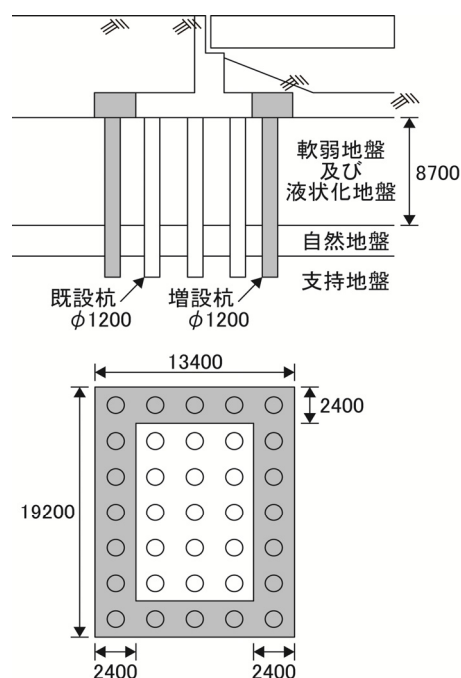


図-3 増杭工法との対比

5. コンポジットパイル工法

(1) 工法の特長

既設基礎の耐震補強が実施されていない背景には、既設基礎に求める耐震性が不明瞭という以外に、交通供用しながらあるいは低空頭などの現場条件での合理的な補強手法がないことも要因と考えられる。

そこで、せん断強度が過小な軟弱地盤や液状化地盤において、杭に改良体を併設する複合地盤杭基礎技術³⁾を活用した既設杭基礎の耐震補強工法を研究開発した。この補強構造をコンポジットパイル工法と称する(図-2)。

コンポジットパイル工法は、増杭などのように補強材と既設基礎を一体化させる従来手法とは異なり、既設杭基礎の周辺地盤を改善すなわち改良体の反力効果で地震動のエネルギー吸収を期待し、耐震性能の確保を図る技術である。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、図示したように杭特性長 $1/\beta$ かつ軟弱層および液状化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。地盤改良は地中部(改良B)およびフーチング基礎から上部(改良A)を一体施工するのが特徴である。フ

ーチング基礎部で地盤改良を施すことで受働土圧も期待できる。この際に、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する。フーチング下の杭間の内側を中空としても周辺の固化改良体により基礎全体の地震時のせん断変形が抑制されるため、中空部にある地盤の液状化時の過剰間隙水圧についても拘束できると考えられる。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。

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（図-3）。

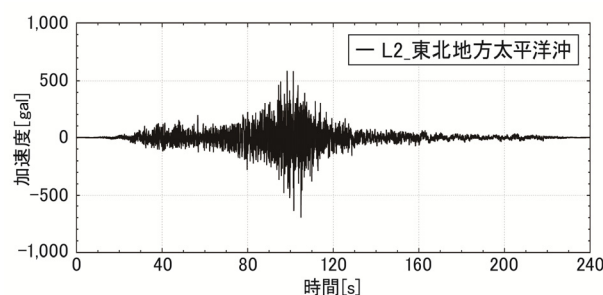
コンポジットパイル工法は、求める既設基礎の耐震性に応じて改良体の強度を設定されるが、概ね一軸圧縮強さを $q_u=300\text{kN/m}^2$ 以上とする。また、本工法の耐震設計法は現行の耐震設計法¹⁾に準拠し、レベル 1 地震動に対しては改良体をばねモデルとした震度法、レベル 2 地震動に対しては地震時保有水平耐力法および実地震波を入力した動的応答解析・動的非線形 FEM 解析で照査する。

(2) コンポジットパイル工法の実験成果

コンポジットパイル工法の耐震性能検証の一事例として、大規模な組杭加振実験の結果を示す。紹介する試験は以下の 3 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 を未対策の泥炭地盤性軟弱地盤、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 200cm は固化改良体範囲とし、ただしフーチング基盤下の杭間の内側を実現現場では施工ができないこともあることから中空にさせ、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。モデル図は省略する。試験杭は 4 本組杭とし、鋼管杭（直径 27.2mm、肉厚 2.8mm）を使用した。加振実験で使用した大型振動台の全景を写真-1 に示した。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。実験地震波は、レベル 2 地震動としプレート境界型の大規模地震である 2011 年東北地方太平洋沖地震動（タイプ I）240sec（図-4）をテーブル基盤から直接入射した。



写真-1 大型振動台実験装置



新晩翠橋周辺地震動 Max692gal 240sec

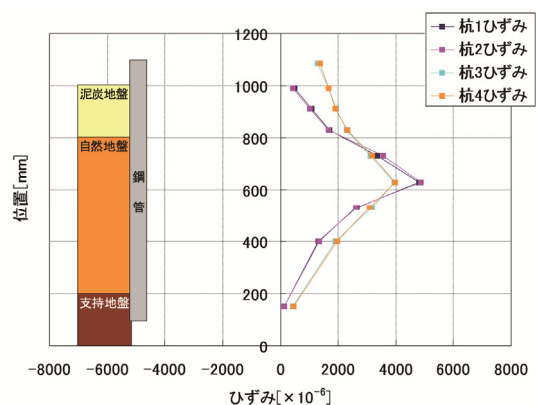
図-4 組杭加振実験入力地震動

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、コンポ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。

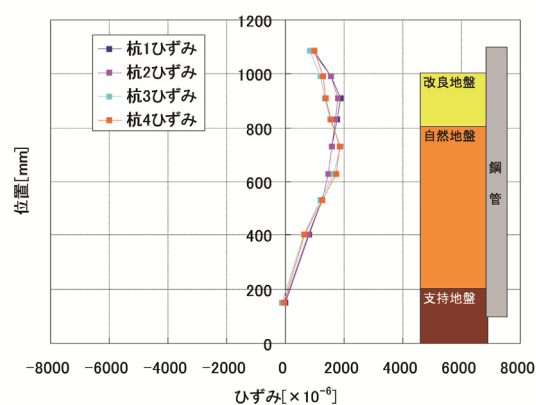
次に、耐震性能の評価として大規模地震時の杭ひずみの発現に注目した。図-5 に、2011 年年東北地方太平洋沖地震動の加震に対するケース 1、2、3 の杭 1 本当たりのひずみ分布を示した。図によれば、未改良のケース 1 では中央部の深さ位置で $\varepsilon=4000\sim5000\mu$ 程度の非常に大きな杭ひずみが発現している。この場合、写真-2 に示したように、レベル 2 加振で鋼管杭が中央部で損傷し大きく変形しているのが分かる。

これに対して、コンポ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。

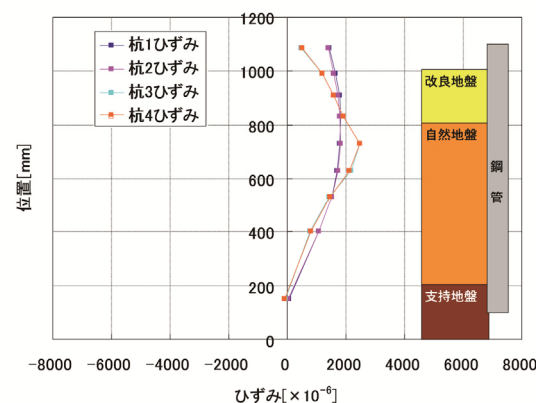
この結果以外にも実験は種々実施しており、コンポジットパイル工法の既設杭基礎の補強技術の有用性が検証されたものと考えている。同時に、設計法の整備も終わっており工法の確立は概ね図られたと判断している¹⁰⁾。



(a) ケース 1 未改良 (未対策)



(b) ケース 2 全改良 (コンポジットパイル工法)



(c) ケース 3 中空改良 (コンポジットパイル工法)

図-5 レベル 2 加振時の杭ひずみ分布

6. 同種工法の事例

コンポジットパイル工法と同種の過去の現場実施事例を示す。写真-3は2003年9月26日に発生したマグニチュード8相当の十勝沖地震の際に、既設橋梁の周辺で発生した液状化現象およびそれに伴う杭基礎の変状の状況である。写真上より、 $N=15$ 以下のルーズな砂質土層の液状化現象による噴砂跡が確認される。写真下より、液状化現象の流動荷重により既設杭基礎が前趾側に変状したため、ゴム支承が内側に大きく変形していることが分かる。すなわち、1スパン36mの高架橋のA1橋台がフーチング位置で $y_1=74\text{mm}$ 、A2橋台で $y_2=121\text{mm}$ 程度前趾側に変位した。

この対策とし、液状化現象が生じた場合には水平地盤反力が過小となるため、増杭などで基礎の剛性を上げても根本的な対策工とならないという判断から、本現場ではコンポジットパイル工法と同種の工法である既設基礎の周辺地盤を地盤改良で固化する手法を講じた¹⁾。具体的には、発生した基礎変形に相当する強制変位を外力として鋼管杭 $\phi 600\text{mm}$ (A1橋台 $L=20\text{m}$ $N=6 \times 15$ 本、A2橋台 $L=18.5\text{m}$ $N=5 \times 15$ 本) の応力照査をし健全性を診断した後に、 $1/\beta$ 相当の杭前背面の液状化範囲を 300kN/m^2 相当の高圧噴射攪拌工法 (2重管) で固化する対応をした。

耐震設計は、杭周辺の改良体を地盤反力として、レベル1地震動では震度法により杭変形および応力照査し、レベル2地震動に対する応答塑性率を検証した。本橋梁



写真-2 レベル 2 加振による杭の変形 (ケース 1 未改良)



写真-3 2003 年十勝沖地震時の液状化現象・基礎変状

はその後10年経過しているが特に変状はなく、多くの地震履歴に対しても健全性を確保している。なお、本橋梁の橋梁一般図などを紙面の関係で省略するため、詳細は参考文献11)を参照されたい。

既設杭基礎の耐震補強として、杭に固化改良体を併用する対策は、東京モノレール基礎杭の補強など全国的にも実現場で多様されていると聞いているが、確立化はされていない。そのため、本論で紹介したコンポジットパイル工法は、その必要性から特許およびNETIS取得を踏まえ設計施工法を体系化・実用化を図ったものである。

7. 既設基礎補強の今後の方針

本論では、今後の適正な診断の必要性を念頭に既設基礎の耐震診断フローを提案した。また、既設杭基礎の耐震補強の一手法として、これまでの同種手法の実施事例を踏まえ、軟弱地盤や液状化地盤中の既設杭基礎周辺を地盤改良し耐震性能の向上を図る新技術として研究開発したコンポジットパイル工法を紹介した。

最後に、国土強靱化に向け、既設基礎の耐震補強を実施するにあたっての考えられる今後の方針を以下に示す。

①既設基礎の耐震性能

現橋の既設基礎の耐震性能を再評価する必要がある。地震履歴や変状調査結果を踏まえ、新設橋と同様の耐震性を確保させる必要があるかなど、橋梁の架け替え対応も含めて、既設基礎の要求性能を定める。

②補強技術の設計施工法

基礎の耐震補強の有無の判断は上下部工一体の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いえない。そのため、既設基礎の耐震補強時の解析手法および施工条件・施工性など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

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基礎の大規模な損傷の回避は可能であるが、地震時に基礎周辺地盤はせん断変形し塑性化する。基礎周辺地盤の修復性や余震に対する再補強も視野におく必要がある。また、繰り返しになるが、現在既設橋梁の老朽化対策および大規模地震に対する耐震性の必要性より現在上下部の補強が実施されているが、既設基礎についても必要に応じた対応は不可欠と判断する。そのため、今後議論すべき既設基礎の耐震補強のあるべき方策を列記する。

- (a) 道路橋の震災経験を踏まえ、落橋防止対策と橋脚補強を優先する。
- (b) 既設基礎の補強対策を他の対策と同時に実施するかどうかは、地震後の道路ネットワーク・橋梁の重要度などに応じて個々に判断する。

- (c) 既設基礎の補強に先行して橋脚の補強を実施する場合は、将来的に基礎の耐震性の照査を行い必要に応じて既設基礎の補強の実施を行うことを前提とする。
- (d) 既設基礎以外の補強を先行する場合は、橋梁全体の耐震性能の確保を考慮し、基礎への影響をできるだけ小さくするよう配慮する。

8. おわりに

2013年12月4日に「国土強靱化基本法」は制定され、今後、防災・減災は国策となる。土木技術者は科学技術の発展に寄与すると同時に、人命を守る義務があることは言うまでもない。そのため、昨今の多発する災害を考慮すれば想定外を享受するという認識も不可欠と考える。一口に安全・安心というが、安全は技術力で守れても一度失った安心を取り戻すのは容易ではない。本テーマに限らず公共構造物に対する信頼性やリスク管理を議論する時期に、まさに今来ていると強く考える次第である。

なお、コンポジットパイル工法は今後必要に応じた活用が望まれるが、詳細は参考文献4)、5)を参照し適用に際しては発注者および寒地土木研究所と協議されたい。

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.6-13、2012.
- 2) 土木研究所寒地土木研究所：既設橋梁の耐震補強マニュアル（案）、2008.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 土木研究所資料：既設道路橋の耐震性能簡易評価手法に関する研究、2010.
- 7) 国土技術政策総合研究所資料：既設橋の耐震補強設計に関する技術資料、2012.
- 8) 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.
- 9) 土木研究所寒地土木研究所：北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドライン、189p、2010.
- 10) 例えば、富澤幸一、西本 聡：固化改良体を併設する既設杭基礎の耐震補強技術ーコンポジットパイルの耐震効果の実験検証一、第 10 回地盤改良シンポジウム論文集、pp.329-336、2012.
- 11) 堀越弘美、田中正敏、富澤幸一：平成 15 年度十勝沖地震による橋梁基礎杭変状及び対策検討事例紹介、第 48 回北海道開発局技術研究発表会、2003.