

液状化地盤における橋台基礎の耐震性能評価方法と耐震対策技術の開発

大住道生・谷本俊輔・加藤篤史

古い年代の既設道路橋は、液状化を考慮した設計が行われておらず、一部では地震時の地盤の液状化に伴う側方流動等により甚大な被害が生じている。一方で、一般に基礎の耐震補強には多大なコストを要することから、補強を行うべき基礎を絞り込むため、精度の高い耐震性能評価手法の開発が求められている。また、既設基礎の補強は、通行機能の確保や施工空間上の制約等の課題が多い。本稿では、こうした課題への対応として、液状化地盤にある既設橋台基礎の性能評価及び耐震補強効果に関する大規模実証実験等の結果について示すとともに、耐震補強工法の施工における留意点等を示す。

キーワード：液状化、橋台基礎、耐震補強技術、施工

1. はじめに

発生の切迫性が指摘されている首都直下地震等では、強い揺れに伴い、臨海エリアや河川沿いを中心に、液状化による地盤沈下や側方流動などにより広域的に幹線道路等が通行不能となるような被害を受けることが想定されている^{1), 2)}。発災後の救命・救助活動への支援はもとより、被災地への緊急物資輸送、そしてサプライチェーンの早期回復のために、こうした液状化被害の防止、軽減は、大規模地震対策の重要課題の1つとされており、それに応える確実かつ実用的な技術開発が急務となっている。

本研究で対象としている液状化地盤における橋については、過去の地震において落橋や長期間の通行止めを要するような致命的な被害が生じた事例がある³⁾。このような震災経験を踏まえ、これまでに地盤の液状化を考慮した橋の耐震設計技術に関する研究が実施され、その成果が設計基準にも導入されてきたところであるが、液状化の影響を考慮していない時代に設計された既設橋の中には、地震による液状化に対して脆弱なものがあると考えられる。しかし、既設道路橋の約3割は液状化に関する規定が道路橋の基準に入る以前に建設されたと考えられ³⁾、また、基礎の補強には多くの費用を要することから、耐震補強の必要性の高い条件の基礎を適確に抽出し、効率的に順次対策を進めていく必要がある。

このようなニーズに応えるためには、個々の既設橋が有している耐震性能の真の実力を精度よく評価でき

るようにし、液状化に伴って致命的な被害が生じる可能性のある橋を適確に評価することができる技術が必要である。その上で、被害の発生メカニズムに応じた合理的な耐震補強技術を開発していく必要がある。

本研究は、このような現場のニーズに対応していくため、合理的で信頼性の高い耐震補強技術の開発を目的としている。

2. 耐震補強技術の提案

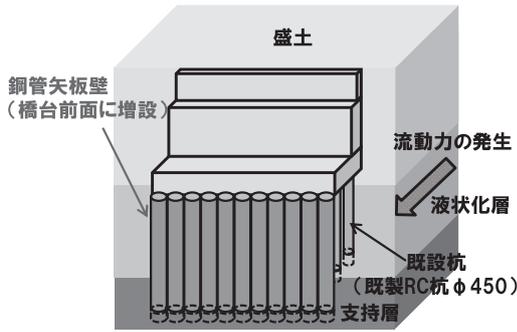
(1) 耐震補強技術の提案

液状化地盤における橋台基礎の耐震補強技術については、液状化地盤における基礎の地震時挙動や被害の生じるメカニズムを踏まえ、さらに供用中の道路橋であるという施工上の制約条件をも考慮した上で選定していく必要がある。この様な観点を踏まえ、液状化による流動力を受ける橋台等の補強工法・構造として次の2つの工法を検討対象としている。

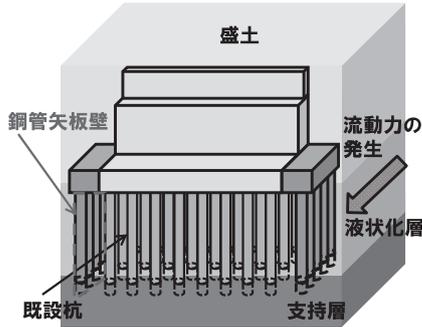
- ①鋼管矢板壁（前面分離型）による補強工法
- ②鋼管矢板壁（側面一体型）による補強工法

(2) 鋼管矢板壁（前面分離型）による補強工法

図—1に示す鋼管矢板壁（前面分離型）補強は、液状化に伴う地盤変位を抑制し、杭に作用する流動力を軽減することを期待して、既設橋台前面の液状化層に鋼管矢板壁を増設するものである。鋼管矢板壁は、既設基礎への影響を抑えるために橋台と一体化せず、分離した構造としている。また、増設位置を橋台の前



図一 鋼管矢板壁 (前面分離型) による補強工法



図二 鋼管矢板壁 (側面一体型) による補強工法

面としているのは、背面地盤と比較して液状化しやすい前面地盤の変位を抑制すること、対策工事施工中の道路の通行機能を確保することを意図したものである。

(3) 鋼管矢板壁 (側面一体型) による補強工法

図一 2 に示す鋼管矢板壁 (側面一体型) 補強は、既設フーチング側面に新たにフーチングと鋼管矢板壁を増設するものである。鋼管矢板壁により躯体の変位を抑制するとともに、既設杭が損傷した場合でも、補強鋼管により地震後の橋台の鉛直支持力を確保することを目的としている。増設位置を橋台の側面としているのは、流動力の受圧面積の増加を抑えつつ基礎の剛性を高めること及び対策工施工中の道路の通行機能を確保することを意図したものである。

3. 既設橋台及び対策技術に対する振動台実験

(1) 実験の概要

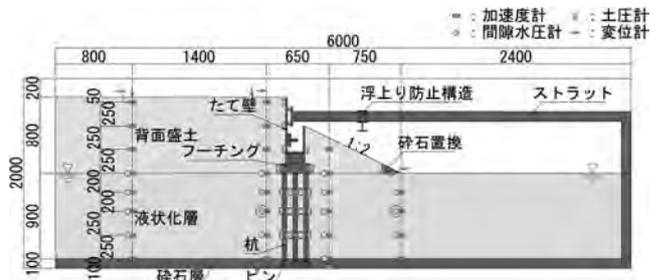
液状化地盤における橋台基礎の地震時挙動の把握、耐震補強工法の効果検証を目的として振動台実験を実施した。従来のこの種の研究では、予算や試験装置の性能等の制約から実橋の規模に比して非常に小さな模型による検証が中心となっており、検証結果の実橋への適用性という観点から明確にできていない課題も残されている。このため、本研究では、土木研究所が所

有する三次元大型振動台を用いた振動台実験を実施するとともに、最終的には防災科学技術研究所が所有する実大三次元震動破壊実験施設 (E-ディフェンス) による大規模実証実験も行うことにより、信頼性の高い検証データを収集した。

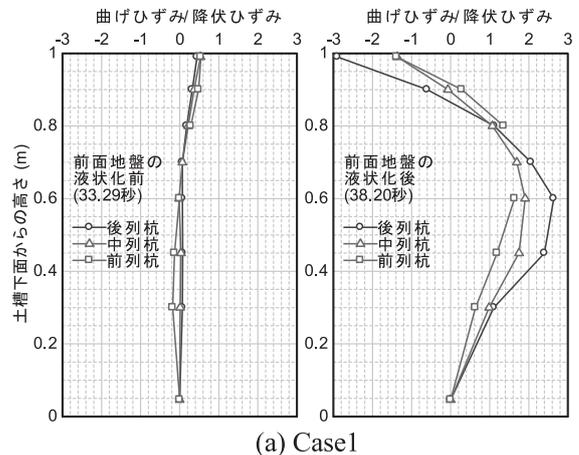
(2) 振動台実験

はじめに、液状化地盤における橋台基礎の地震時挙動の把握及び耐震補強効果の確認を目的とした振動台実験を行った。実験は土木研究所の三次元大型振動台と大型土槽を用いて行った。図一 3 に実験模型概要図を示す。3列の杭基礎に支持された高さ 8 m の橋台を対象とし、液状化層厚は 10 m、模型の縮尺スケールは 1/10 である。縮尺が小さいため杭模型は鉄筋コンクリートではなく、鋼材で受圧面積と曲げ剛性が縮尺に合うように製作した。ここでは、液状化の影響が考慮されていなかった時代の基準⁴⁾に基づいて設計された橋台を対象とした Case1 と、Case1 の橋台を鋼管矢板壁 (前面分離型) により補強した Case4、鋼管矢板壁 (側面一体型) により補強した Case5 に関する実験結果を紹介する。

Case1 (旧基準) の杭の降伏比 (曲げひずみ / 降伏ひずみ) を図一 4 に示す。



図一 3 振動台実験模型概要図 (Case1 の例)



図一 4 振動台実験における杭の曲げひずみ分布図

補強ケースに対する振動台実験の結果としてCase4の鋼管矢板壁（前面分離型）により補強した場合の既設杭，Case5の鋼管矢板壁（側面一体型）により補強した場合の既設杭及び鋼管矢板壁を構成する補強鋼管の降伏比(曲げひずみ/降伏ひずみ)を図-5に示す。

Case4では，液状化層の変形が抑制され，橋台の水平変位，回転及び杭の曲げひずみが低減される効果が確認された。一方，Case5では，既設杭の曲げひずみは降伏ひずみを大きく超過するものの，4本配置した補強鋼管の曲げひずみは概ね弾性範囲にとどまり，基礎全体としては耐震性が確保される結果となった。

(3) E-ディフェンスによる大規模振動台実験

次に，液状化地盤における既設道路橋基礎の地震時挙動の解明と耐震対策技術の効果検証を目的として，防災科学技術研究所所有の実大三次元震動破壊実験施設（E-ディフェンス）を活用して行った大規模実証実験

について紹介する。土木研究所振動台実験において，鋼管矢板壁（前面分離型）は既設杭への損傷を低減させることは確認されたが，降伏ひずみを超える結果となったため，本実験においては，液状化の影響を考慮した設計がなされていない橋台の模型（無補強供試体）とそれを鋼管矢板壁（側面一体型）により補強した橋台の模型（補強供試体）を土槽内に設置し，同時加振を行った。模型概要図を図-6に示す。E-ディフェンスによる大規模振動台実験では，模型の縮尺スケールは1/4.5であり，橋台基礎の塑性化後の挙動を再現できるように，既設杭模型は鉄筋コンクリートにより製作した。

本加振は計2回にわたって行った。1回目の加震においては，道路橋示方書に規定されるレベル2地震動（タイプI）に適合させた地震動波形を入力した。2回目の加震においては，1回目の波形と同一の波形で，加速度振幅を150%とした。

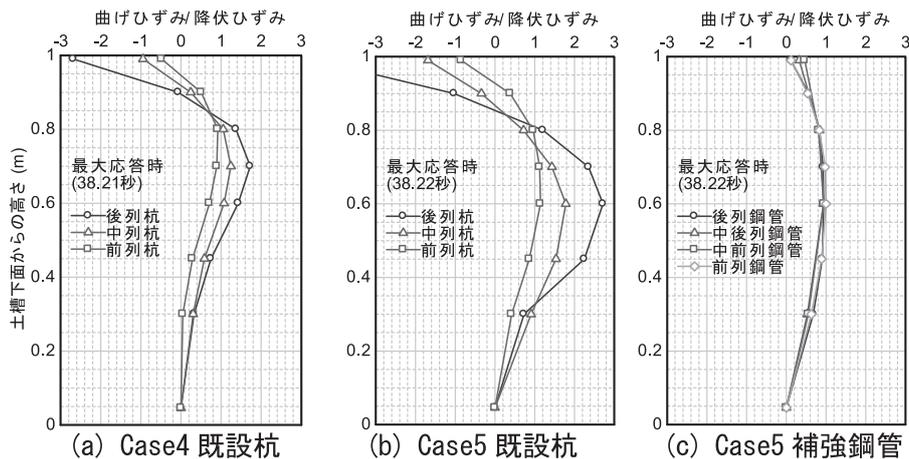


図-5 補強ケースの杭の曲げひずみ分布

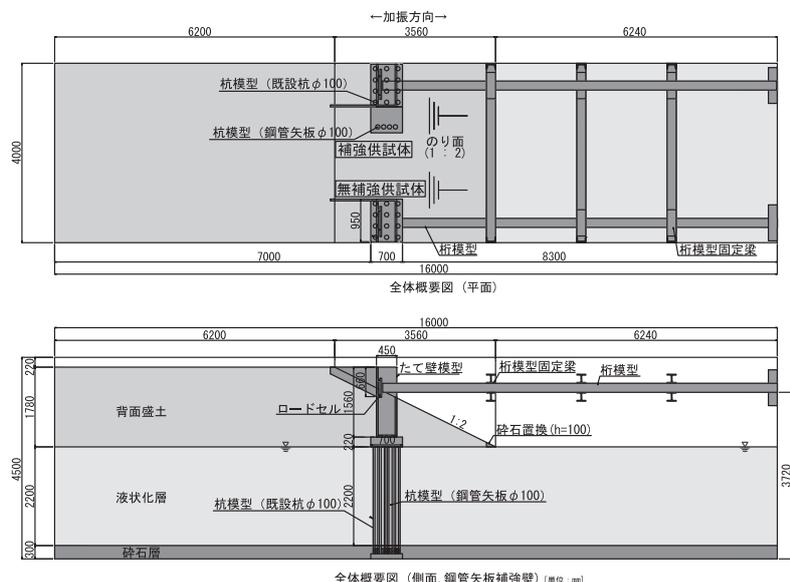


図-6 E-ディフェンス実験模型概要図

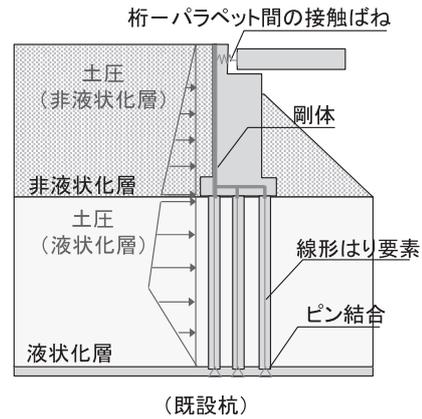
150%加振における既設杭軸方向鉄筋及び補強鋼管の最大引張ひずみ分布を図一7に示す。既設杭軸方向鉄筋のうち、後列杭背面側鉄筋の杭頭及び前列杭前面側鉄筋の広い範囲で降伏ひずみを超過し、降伏ひずみを超過した箇所ではひび割れの発生が確認された。無補強、補強の両供試体で降伏ひずみを超過する範囲に差は見られなかったが、無補強供試体の方が一部で大きなひずみが生じた。一方、補強鋼管のひずみは弾性範囲内にとどまっておき、損傷も確認されなかったため、補強供試体は、既設杭に損傷はあったものの、基礎全体としては耐震性が確保される結果であったと評価できる。

また、既設杭は、背面からの土圧と基礎の後転側への回転の影響を受けることで、曲げ変形と引き抜き力を同時に受ける前列杭において、損傷が顕著となるという損傷メカニズムが確認された。

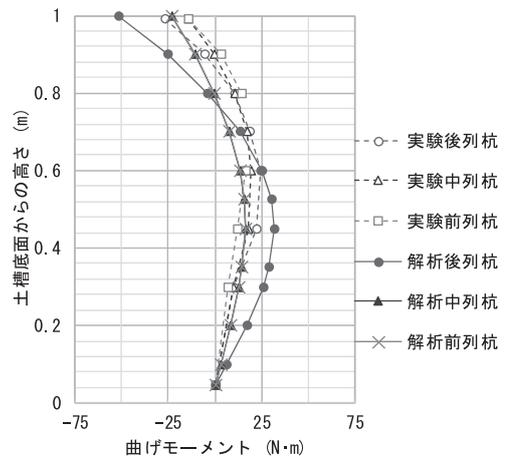
4. 液状化地盤における橋台基礎を対象とした振動台実験の再現解析

設計実務への適用が可能な簡易解析モデルの検討を目的として、振動台実験の再現解析を行った。解析モデルは、図一8に示す通り、2次元はり・ばねモデルとし、橋台及びフーチングは剛体、杭は線形はり要素とした。解析方法としては、橋台及び杭基礎が液状化地盤から受ける流動力を荷重（土圧）としてモデル化し、静的に作用させる方法を用いた。

再現解析における既設杭の曲げひずみ分布を図一9に示す。再現解析の結果、杭の曲げモーメント分布を概ね安全側に評価できることが明らかとなり、解析モデルの妥当性が確認された。



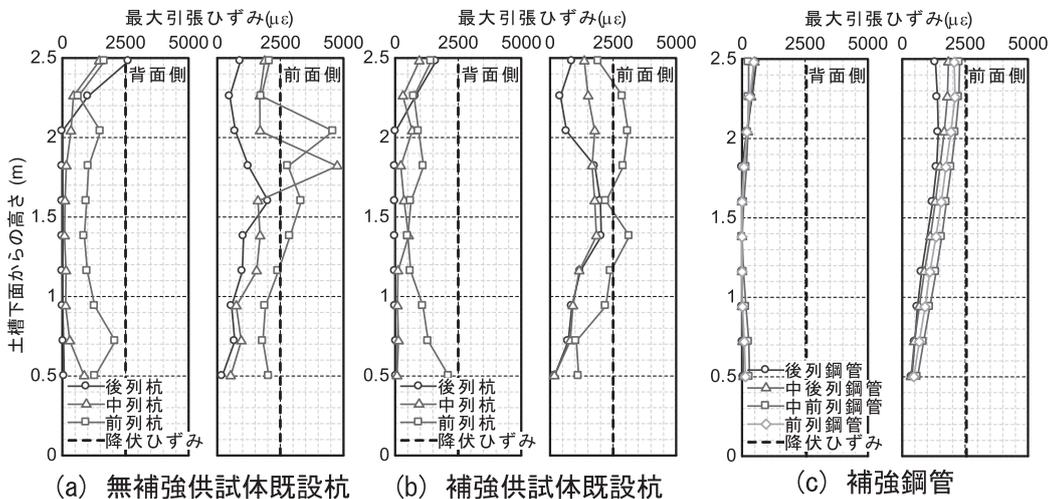
図一8 解析モデル概要図



図一9 再現解析における既設杭の曲げひずみ分布

5. 耐震補強技術の施工方法

振動台実験において補強効果が確認された鋼管矢板壁（前面分離型）による補強及び鋼管矢板壁（側面一体型）による補強、さらに橋台背面からの流動力に対して抵抗する斜杭（側面一体型）による補強を想定する場合、施工の実現性も重要なポイントとなる。地盤



図一7 150%加振の既設杭軸方向鉄筋・補強鋼管の最大引張ひずみ分布

の液化に伴う側方流動に対する対策技術については研究開発の途上であるが、施工の実現性について検討した結果を以下に示す。

既設橋の補修・補強は新設橋と異なり、各種の制約がある中での施工となる。よって、計画段階から現場の施工条件をよく把握し、施工性や施工手順に十分配慮した上で施工方法の検討を進めることが重要である。特に既設橋への近接施工となるため、施工スペースや空頭制限、既設基礎への施工影響等の検討が必要となる。表一1に施工制約と検討ポイントの例を示す。

上記制約に対応する施工方法として、鋼管杭工法では、(1)回転杭工法、(2)圧入工法、(3)中掘り杭工法などが適用できると考えられる。以下に各工法の特徴と施工事例を示す。また、表一2に施工制約と各工法の対応範囲の目安を示す。各工法の特徴を把握し、施工可否、経済性、周辺環境・道路交通への影響度等を総合的に判断して、施工方法の選定を行う必要がある。

(1) 回転杭工法

先端部に羽根を有する鋼管杭に回転力を付与することで地盤に貫入させる工法である。木ネジのように地盤に回転貫入させて沈設するため、掘削残土の排出が無く地盤の緩みが生じにくいこと、低振動・低騒音で施工ができること、セメントプラント等の設備が不要で狭隘な施工スペースで施工ができることなどの特長

を有している。また、斜杭を比較的精度よく施工することも可能である。

施工機械は鋼管杭の径に合わせて2種類ある。鋼管径600mm以下では、三点式杭打ち機や小型杭打ち機で鋼管杭の杭頭部分を掴んで回転させる。また、鋼管径500mm以上になると、全周回転機で鋼管杭本体を回転させて貫入させる。既設橋の補修・補強では、省スペースかつ低空頭施工が求められるため、クレーン等の重機で回転反力を取る全周回転機よりも三点式杭打ち機や小型杭打ち機の適用性が高いと考えられる。写真一1に斜杭の施工例を、写真一2に小型杭打ち機による空頭制限下での施工例を示す。

施工時の留意点は、鋼管径より大きな羽根径を考慮して施工離隔を検討すること、斜杭の場合には、設計上の杭頭レベルと施工機械据え付けレベルの差を考慮



写真一1 斜杭の施工例⁶⁾

表一1 施工制約と検討ポイントの例

施工制約	検討ポイント
現道交通への影響	・供用中の橋梁であることを踏まえ、現道交通への影響を考慮
施工スペース	・確保できるスペースと施工に必要となるスペース
空頭制限	・各施工方法の最小施工高さ
施工離隔	・既設基礎からの施工離隔（どこまで既設基礎に近づけるか） ・既設基礎への施工影響（周辺地盤への影響）

表一2 施工制約と各工法の対応範囲の目安^{5) ~8)}

補強方法	前面分離型		側面一体型	
	鋼管矢板壁補強	斜杭補強	鋼管矢板壁補強	
耐震対策	鋼管矢板壁補強	斜杭補強	鋼管矢板壁補強	
施工方法	圧入工法	回転杭工法	中掘り杭工法	圧入工法
適用杭径 (mm)	600 ~ 1,500	杭径：400 ~ 1,200 羽根径：杭径×1.5 or 2.0	500 ~ 1,000	600 ~ 1,500
施工機	低空頭専用機	・小型杭打ち機 ・3点式杭打ち機 ・全周回転機	アースオーガ 中掘機等	垂直圧入専用機
離隔距離	機械幅 + 1.0 m 程度	5.0 m 程度	2.0 m 程度	機械幅 + 1.0 m 程度
最小施工高 (基面以上)	3.0 m 程度	5.0 m 程度	20 m 程度	5.0 m 程度



写真一 2 空頭制限下での回転杭工法施工例⁹⁾

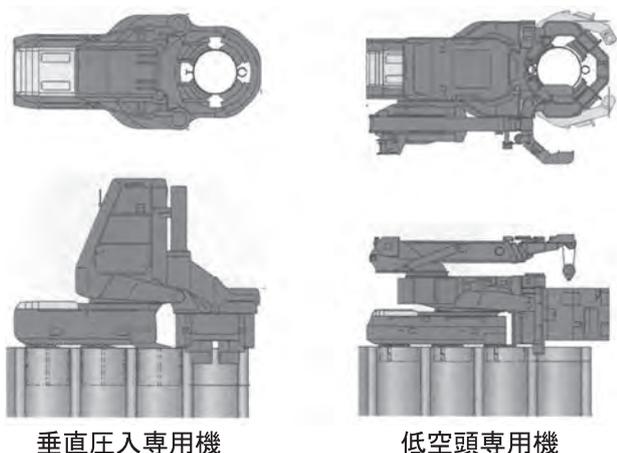
することなどが挙げられる。特に、作業構台から斜杭を施工する場合は、直杭施工に対して構台の大きさや位置が異なるため、施工状況に合わせて事前検討する必要がある。

(2) 圧入工法

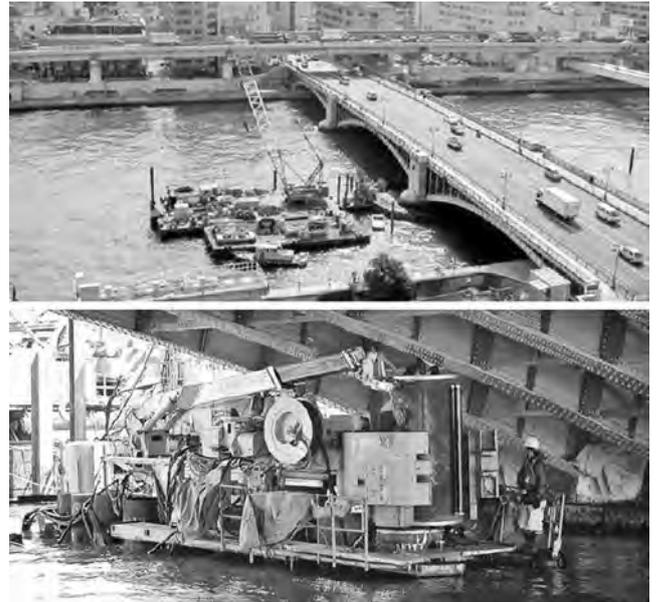
すでに地中に押し込まれた鋼管杭・鋼管矢板を数本つかみ、その引抜抵抗力を反力として次の鋼管杭・鋼管矢板を油圧による静荷重で地中に押し込んでいく工法である。大規模な作業構台を必要とせず、狭隘地や空頭制限のある場所で施工ができる特長を有している。また、低騒音・低振動工法のため、鉄道や民家への近接工事の事例もある。

施工機械は、チャック部上部から鋼管矢板を挿入する垂直圧入専用機が一般的で、チャック部が観音開きして横から鋼管矢板を抱きかかえる低空頭専用機などもある。図一 10 に施工機の概要を、写真一 3 に耐震補強工事における空頭制限下での施工例を示す。

圧入工法の留意点は、道路橋示方書で支持力特性が評価されておらず、所定の支持力を発揮するための施工管理方法も確立していないことが挙げられる。よっ



図一 10 圧入工法の施工機械¹⁰⁾



写真一 3 圧入工法による桁下施工例¹⁰⁾

て、鋼管杭・鋼管矢板に支持力を期待する鋼管矢板壁（側面一体型）への適用にあたっては、載荷試験等でその支持力特性を確認するとともに、併せて施工管理方法も検討する必要がある。また、静的に圧入するため比較的硬い地盤では施工に難渋する可能性がある。

(3) 中掘り杭工法

先端開放の鋼管矢板の内部にスパイラルオーガ等を挿入し、これにより地盤を掘削しながら杭を所定深度まで沈設したのち、所定の支持力を得るために杭先端にセメントミルクを噴出し、地盤と攪拌混合して根固め球根を築造する工法である。低振動・低騒音工法のため市街地での施工実績が多く、比較的硬い地盤で施工ができる特長を有している。一方、セメントプラント等の設備が必要となるため、前述の 2 工法に比べて施工スペースを必要とすることがある。

施工機械は、3 点支持式のアースオーガ中掘機を使用し、新設基礎ではリーダ長 24 m ~ 27 m 程度での施工が一般的であるが、現場に合わせて施工機を小さ



写真一 4 鋼管杭増杭基礎の桁下施工例¹¹⁾

くしリーダ長を15m程度にすることもできる。また、全周回転機を使用し、低空頭で中掘り杭を施工した事例もある。写真—4に桁下にて鋼管杭を打設した耐震補強の施工例を示す。

6. おわりに

本研究で得られた液状化地盤における既設橋の基礎の耐震性能評価手法及び耐震補強技術については、既設橋の基礎の耐震補強のためのガイドラインや参考資料として公表することにより、国等が実施する耐震補強に関する施策を技術的に支援する資料として広く活用されることを目標としている。

謝 辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「レジリエントな防災・減災機能の強化」（管理法人：JST）の一環として実施したものである。また、対策工の設計、実験条件や計測計画の検討は、東京工業大学大学院高橋章浩教授との共同研究として実施しているものである。ここに記して謝意を表す。

JCMA

《参考文献》

- 1) 若松加寿江：首都直下地震による液状化の発生と被害，地学雑誌 116 巻，3-4号，pp.480-489，2007.
- 2) 東京都防災会議，首都直下地震等による東京の被害想定報告書，pp.1-190，2012.
- 3) 玉越隆史，横井芳輝：平成 25 年度道路構造物に関する基本データ集，国総研資料第 822 号，2015.

- 4) (社) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針 くい基礎の設計篇，1964.
- 5) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，IV 下部構造編，2017.
- 6) 回転杭工法施工管理要領，(一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会，2017.
- 7) 鋼管杭基礎・鋼管矢板基礎の中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）施工管理要領（標準版），(一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会，2017. (http://www.jaspp.com/shiryu/pdf/nakabori_2017mar.pdf?date=20170315)
- 8) 圧入工法設計・施工指針，国際圧入学会，2015.
- 9) NS エコパイル小径中径カタログ，NS エコパイル工法協会，2017. (https://www.nsec-steelstructures.jp/data/ns_ecopile/catalog_SMALLeco2015_3.pdf)
- 10) 鋼管矢板圧入工法カタログ，(一社) 全国圧入協会，2018. (http://www.atsunyu.gr.jp/files/catalog/Press-in_Tubular_ver030ja03_s.pdf?1901081723)
- 11) 既設橋基礎の補強には鋼管杭・鋼管矢板を，(一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会，2006.

【筆者紹介】



大住 道生（おおすみ みちお）
1964
(国研) 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
上席研究員



谷本 俊輔（たにもと しゅんすけ）
(国研) 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
研究員



加藤 篤史（かとう あつし）
(一社) 鋼管杭・鋼矢板技術協会
技術委員