

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

シートパイル補強工法で液状化の被害から基礎構造物を守る

これまでに既設基礎構造物の耐震補強工法として提案されていた増し杭工法や地盤改良工法では、基礎寸法の大幅な拡幅が必要であったため、とくに狭隘区間の構造物においては施工が困難でした。ここでは、寸法の大幅な拡幅が不要で、かつ施工性・経済性にも優れた基礎構造物の耐震補強工法として鉄道総研が開発したシートパイル補強工法について紹介します。

はじめに

地震時に地盤の液状化が発生した場合、地盤は急激に剛性ならびに強度を失うため(図1)、橋りょうに大きな被害が発生した事例がこれまでに報告されています。たとえば、1964年に発生した新潟地震では、液状化による振動応答の増幅ならびに橋脚が大変位したことにより昭和橋にて落橋が発生しました(図2(a))¹⁾。また、1995年に発生した兵庫県南部地震でも液状化に起因する杭基礎構造物の被害が多くみられました。とくに、西宮港大橋では、液状化とこれにともなう地盤の側方流動により基礎が変位し、桁一連が落下する被害が生じました(図2(b))²⁾。このような被災事例の発生を背景に、鉄道構造物の設計においては、液状化の影響を考慮して基礎構造物の設計を実施する設計体系に移行されたものの、建設年代の古い構造物の中には液状化の影響が反映

されていないものが少なくありません。そのため、このような構造物に対しては、液状化対策の実施が求められています。

シートパイル補強工法

従来実施されてきた基礎構造物の耐震補強工法のうち代表的なものを図3に示します。もっとも一般的である増し杭工法を実施する場合には、橋脚基礎の平面寸法を大幅に拡幅する必要があります。このため、都市部におい



佐名川 太亮
Taisuke Sanagawa
構造物技術研究部
基礎・土構造研究室
副主任研究員
[専門分野] 基礎工学



神田 政幸
Masayuki Koda
構造物技術研究部
部長
[専門分野] 地盤工学、
基礎工学



図1 液状化による基礎構造物の被害

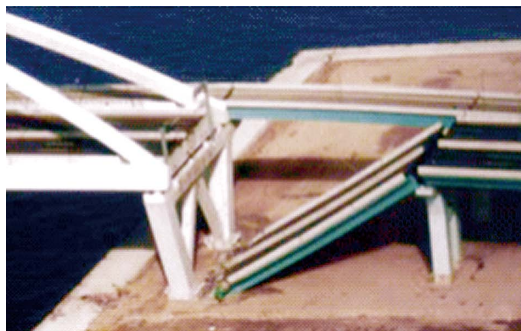
て構造物が隣接しているような狭隘地^{きょうあい}に位置する橋脚については、施工が不可能であり、対策を実施することが困難でした。また、施工が可能な場合であっても、基礎構造物の耐震補強工法全体に共通して施工コストに課題を有していました。

そこで鉄道総研では、平面寸法の拡幅を抑制でき施工コストにも優れた工法として、シートパイル補強工法³⁾(図4)を開発しました。この工法では、既設フーチングを取り囲むように鋼矢板(シートパイル)を打設し、既設フーチングと一体化することで、基礎構造物の地震に対する抵抗力の向上を期待しています。既設フーチングから最低で500mm程度の拡幅で済むため、用地制限のある狭隘箇所の構造物にも適用可能です。また、空頭制限下においても施工可能な油圧式杭圧入引抜機(図5、図6)を用いることで、桁下や高圧電線下など施工困難な条件においても鋼矢板の打設が可能です。さらには、低騒音・低振動による施工が可能であり、掘削汚泥や泥水などの産業廃棄物の排出がなく、建設発生土も少ないことから環境にやさしい工法となります。

開発当初は比較的中小規模(フーチング幅で5~10m程度)の既設杭基礎橋脚を主な対象としており、かつ地盤条件が比較的良好な場合については費用対効果に優れることが確認されました。一方で、都市部においては地震時に液状化の発生が懸念される地域が存在するため、早急な耐震補強の実施が望まれています。そのため、狭隘地に位置しかつ液状化地盤中の基礎構造物へのシートパイル補強工法適用のニーズが高まっていました。そこで、模型実験などを通じて液状化地盤中の基礎構造物への適用に関する検討を実施しました。

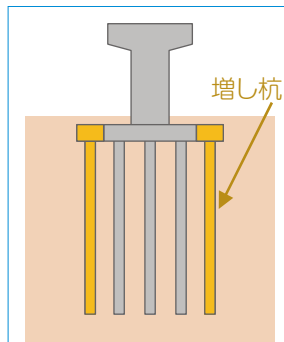


(a)昭和大橋の落橋¹⁾

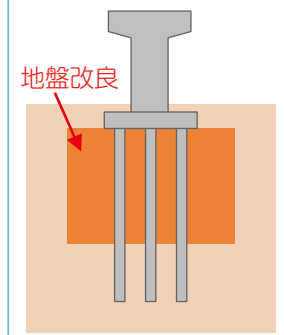


(b)西宮港大橋の落橋²⁾

図2 液状化による橋りょうの被災事例



(a)増し杭工法



(b)地盤改良工法

図3 従来の基礎構造物の耐震補強工法

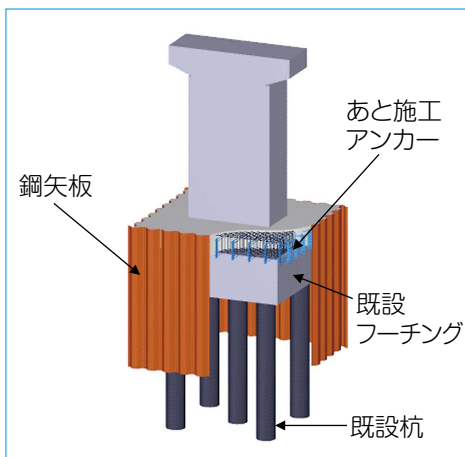


図4 シートパイル補強工法の概要



図5 油圧式杭圧入引抜機⁴⁾

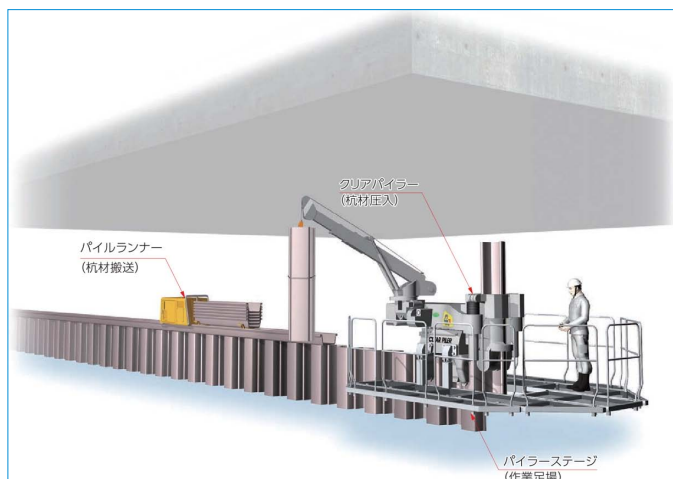


図6 低空頭地に対応した油圧式杭圧入引抜機⁵⁾

模型実験による液状化地盤中の補強効果の検討

液状化地盤中の基礎構造物についてもシートパイル補強工法による耐震補強効果が発揮されるか検証するため、さまざまな実験を行いました。ここでは、鉄道総研が所有する大型振動試験装置を用いた模型振動実験⁶⁾の概要を紹介します。

この模型振動実験では、実物の1/10スケールの橋脚模型を作成し、せん断土槽内に設置した後に模型地盤を構築しました。また、模型構築後に土槽底面から水を注入することで、模型地盤を飽和させました。この模型に対して鉄道構造物の耐震設計で用いられるいくつかの地震動を用いて加振を行いました。

模型実験結果の概要を図8に示します。レベル2地震動（最大級の強さをもつ地震動）加振時の最大応答値を示していますが、橋脚の回転角ならびに杭頭断面力（せん断力・軸力）が大きく低減することが明らかになりました。また、本実験ならびに遠心場における模型振動実験⁷⁾の結果から、鋼矢板の内部と外部で液状化に至る挙動に有意な差はみられませんでした。すなわち、シートパイル補強工法は、橋脚上部工慣性力に対して鋼矢板の鉛直地盤抵抗が^く発揮され、杭体断面力の発生が抑制されることが明らかになりました。

なお、これらの模型実験から得られた知見を基に構造解析手法を提案しており、模型実験結果を精度よく再現できることを確認しています。また、この手法を用いて実構造物を対象とした試算を実施しており、一般的な構造・地盤条件において十分な補強効果が期待できることまで確認しました。

ただし、シートパイル補強工法の適用範囲には限界があることが試算から明らかになっています。たとえば、液

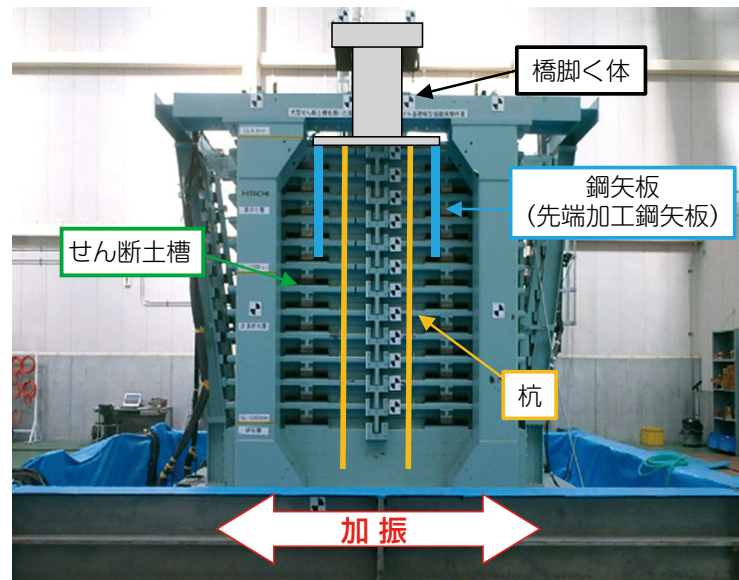


図7 大型模型振動実験の概要

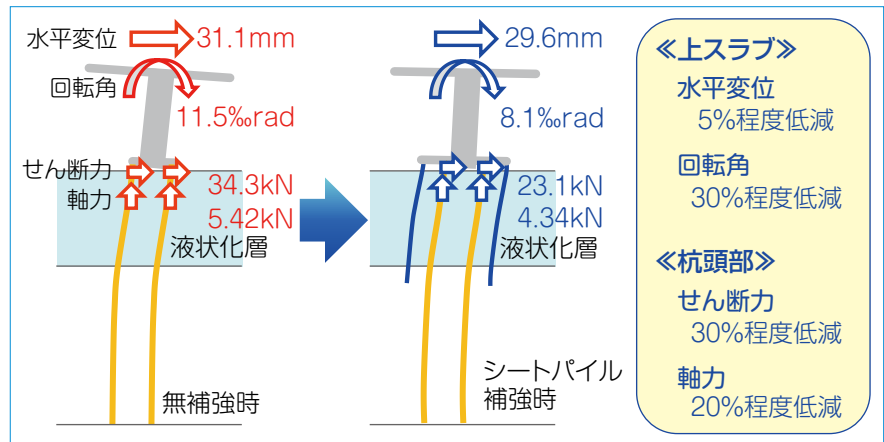


図8 模型振動実験結果の概要（模型縮尺で記載）（文献6）に追記

状化程度が著しい場合や側方流動が発生する場合、また長大橋のように上部工慣性力が著しく大きい場合にはシートパイル補強工法では補強効果が十分ではないため、地盤改良のような補助工法の併用が必要となります。たとえば、本四^{びさん}讃線の大東川橋りょうにおける耐震補強工法の検討⁸⁾においては、橋りょうが埋立地に位置しており液状化程度が大きかったことと上部工が桁長300mの4径間連続橋であったことから、シートパイル補強工法のみでは耐震性能が十分ではありませんでした。そこで、鋼矢板内部の地盤改良を併用することを計画しました。既設フーチ

ング周囲に鋼矢板を打設後、鋼矢板内部を高圧噴射工法により地盤改良を行い、既設フーチングと鋼矢板を接合しました。この方法により、補強による平面寸法の拡幅を可能な限り抑制した上で、構造物に要求される耐震性能を満足することを設計で確認しました。現在、施工まで完了しています。

設計・施工マニュアル(案)⁹⁾

模型実験や数値解析から得られた知見を基に、液状化地盤に対応したシートパイル補強工法の耐震設計手法を提案しました。提案した設計手法は「シートパイルを用いた既設鉄道構造物基礎

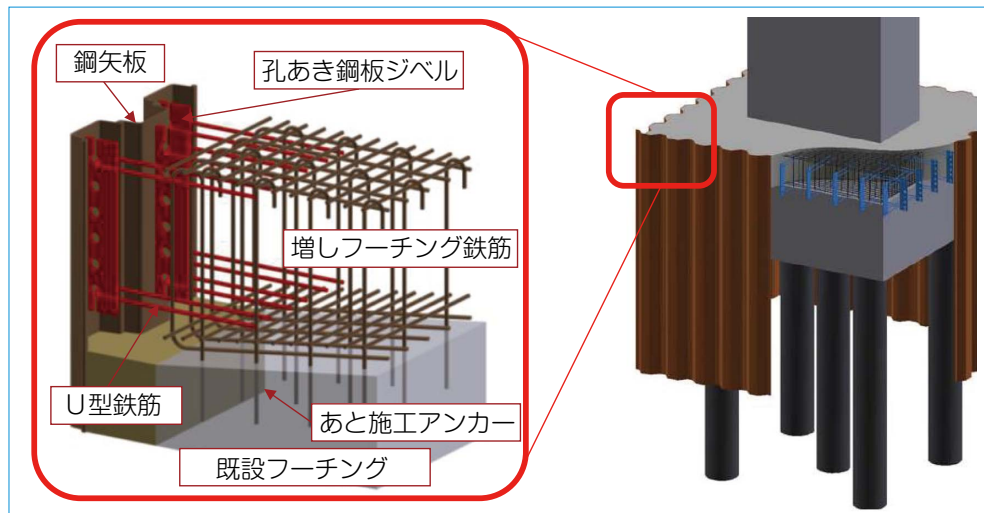


図9 鋼矢板と既設フーチングとの接合部の概要

の耐震補強工法（シートパイル補強工法）設計・施工マニュアル（案）」で取りまとめています。2011年に「シートパイルを用いた既設鉄道構造物基礎の耐震補強設計マニュアル（案）第2版」を発行していましたが、2016年に改訂した第3版では、以下の点が改訂されました。

- ・2012年に「鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）」が性能照査型に改訂されました。第3版では、この改訂に完全対応するとともに、より実務者向けに具体的な設計・施工の取り扱いを掲載しました。
- ・模型実験などから得られた知見を基に液状化時の構造解析モデルを示しました。基本的には、「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」に準拠した設計応答値の算定法が適用できます。

また、鋼矢板と増しフーチングとの接合部に孔あき鋼板ジベル（図9）を活用した場合の設計法についても改訂しました。これを活用することで、接合部における配筋の煩雑さを解消し施工性を改善するとともに、補強にともなう基礎平面寸法の拡幅量を最小限に抑えることができます。

おわりに

ここでは、液状化地盤中の基礎構造物の耐震補強工法として、シートパイル補強工法を紹介しました。この工法を活用することで、既存の基礎構造物の寸法を大幅に拡幅することなく耐震補強を実施することが可能となります。現在、数橋脚を対象に詳細設計が実施されており、また近年では鉄道分野以

外の構造物においても適用される事例¹⁰⁾が増加しつつあり、現在では計90基以上の施工実績となっています。

ただし、構造条件や地盤条件によっては適切な補強形式が異なり、設計のモデル化にも注意が必要です。場合によっては補助工法が必要となるため、本工法の適用を検討する際には十分注意ください。[RRR]

文献

- 1) 土木学会：倉西茂氏「新潟地震」写真集，土木学会附属土木図書館デジタルアーカイブス，http://library.jsce.or.jp/Image_DB/shinsai/niigata/kuranishi/index.html（入手日：2019/7/24）
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会編：阪神・淡路大震災調査報告 1 土木構造物の被害 橋梁，土木学会，1996
- 3) 西岡英俊，西村昌宏，神田政幸，山本忠久，樋口俊一，杉江茂彦：鋼矢板とフーチングの一体化による既設杭基礎の耐震補強工法，鉄道総研報告，Vol.23，No.12，pp.23-28，2009
- 4) 技研製作所：サイレントパイラーF101 U形鋼矢板400mm幅専用機，https://www.giken.com/ja/wp-content/uploads/SilentPiler_F101.pdf（入手日：2019/7/24）
- 5) 技研製作所：工法革命 上部障害クリア工法，https://www.giken.com/ja/wp-content/uploads/press-in_overheadclearance.pdf（入手日：2019/7/24）
- 6) 戸田和秀，佐名川太亮，西岡英俊，樋口俊一，松浦光佑，妙中真治，乙志和孝：液状化地盤におけるシートパイル補強工法の耐震設計法の提案，鉄道総研報告，Vol.30，No.5，pp.47-52，2016
- 7) 松浦光佑，西岡英俊，妙中真治，樋口俊一，戸田和秀，乙志和孝：液状化地盤において杭基礎に適用したシートパイル補強の効果検証に関する遠心模型実験（その1：実験概要と加速度・応答変位），第51回地盤工学研究発表会，pp.1729-1730，2016
- 8) 笠原康平，佐名川太亮，笹岡良治，中田裕喜：大東川橋梁における耐震補強，基礎工，Vol.45，No.12，pp.79-81，2017
- 9) 鉄道総合技術研究所，大林組，新日鐵住金：鋼矢板を用いた既設鉄道基礎構造物の耐震補強工法（シートパイル補強工法）設計・施工マニュアル（案）（第3版），2016
- 10) たとえば，木村和之，坂村和俊，加藤剛，神田政幸，西岡英俊：シートパイル補強工法による道路橋基礎の保護対策，土木学会第66回年次学術講演会，pp.893-894，2011