

シートパイル補強工法の既設道路橋基礎への適用 に関する基礎的検討

京田英宏¹・斉藤聡彦²・西岡英俊³・佐名川太亮⁴・松浦光佑⁵・喜多直之⁶

・戸田和秀⁷・妙中真治⁸

¹正会員 博（工） 北武コンサルタント株式会社（〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7-4-7）

²正会員 北武コンサルタント株式会社（〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7-4-7）

³正会員 博（工） 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

⁴正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38）

⁵正会員 株式会社大林組（〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2）

⁶正会員 博（工） 株式会社大林組（〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2）

⁷正会員 新日鐵住金株式会社（〒100-8071 東京都千代田区丸の内 2-6-1）

⁸正会員 Ph.D 新日鐵住金株式会社（〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1）

1. はじめに

建設年代の古い既設構造物には、現行の耐震基準を満足しておらず耐震補強の必要なものが存在する。兵庫県南部地震以降、これらの既設構造物について耐震補強の必要性が指摘され、例えば橋脚については、段落し補強やせん断補強が優先的に進められてきた。しかしながら、基礎の耐震補強については、一般的に橋脚などの地上部分に比べて大規模な工事となることから、経済性だけでなく施工性の面からも実施が困難な場合が多い。したがって、効率的に基礎の耐震補強を進めるには、経済性および施工性に優れた基礎の耐震補強工法の確立が急務となっている。

上述の課題を解決する工法の一つとして、掘削時の仮土留め工として用いる鋼矢板（シートパイル）をフーチングと一体化するシートパイル補強工法¹⁾²⁾が開発されており、既設鉄道橋基礎を補強する際の実務的かつ鉄道構造物等設計標準³⁾⁴⁾に対応した設計手法⁵⁾⁶⁾が提案されている（以下、「鉄道標準モデル」と称す）。既設道路橋基礎へのシートパイル補強工法の適用事例⁷⁾⁸⁾も徐々に増えつつあるものの、

その実務的な設計手法は系統的には整理されていないのが実情である。

シートパイル補強工法は、橋梁などの比較的中小規模（フーチング幅：最大 10m 程度）の既設杭基礎を主な補強対象としており、図-1 に示すように既設フーチングを取り囲むようにフーチング幅程度の根入れのシートパイルを打設し、既設フーチングの上面に増しフーチングを打設することでシートパイルを既設橋脚と一体化する耐震補強工法である。図-2 に、シートパイルと増しフーチングとを剛結とみなせる性能を確保するための接合部構造を示す。既設杭基礎の補強工法についてはシートパイル補強工法以外にも提案されているが、本工法と既往の耐震補強工法との主な相違点は、地盤改良などの補助工法を伴わないことと、シートパイルの根入れが比較的短く既設杭の支持層まで到達させないことである。ただし、鉛直支持力は向上しないなどその補強効果は限定的であるものの、経済性および施工性に優れるため有効な補強工法になり得ると考えられる。

そこで、本検討ではシートパイル補強工法の既設道路橋基礎へ適用する際の実務的な設計法を整理・構築することを目的として、道路橋基準準拠モデルを提案し、実構造物を対象とした検証を行った。

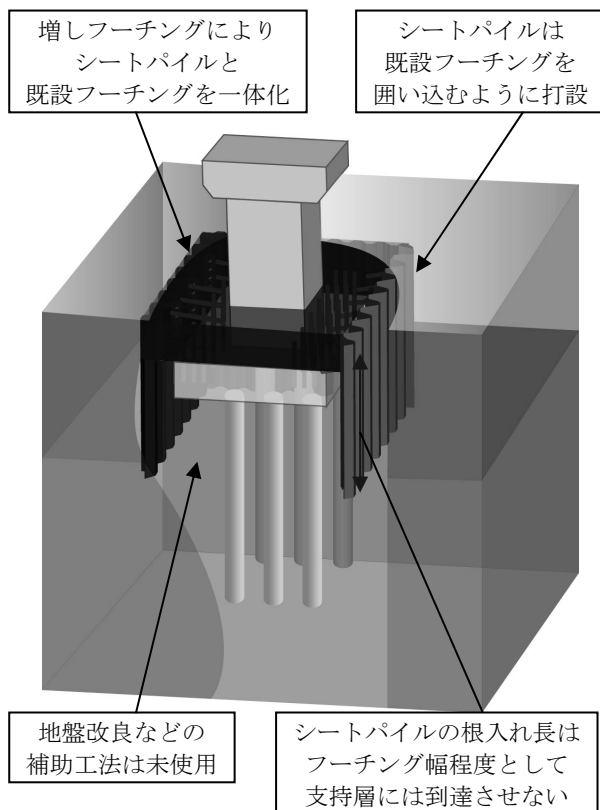


図-1 既設杭基礎のシートパイル補強工法

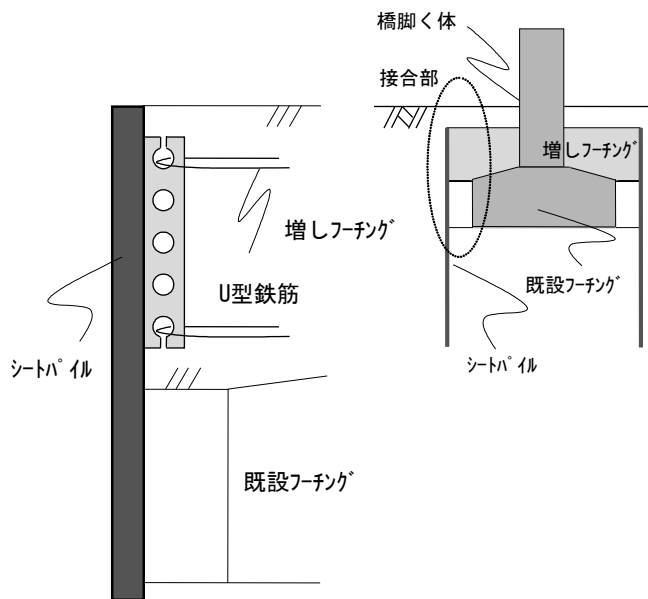


図-2 シートパイルと増しフーチングとの接合部構造

2. 検討概要

(1) 解析対象

本検討では、鉄道標準モデルと道路基準準拠モデルの地盤抵抗モデルの違いによるシートパイル補強

の補強効果に着目することから、既設鉄道構造物基礎に対するシートパイル補強工法の試設計事例⁹⁾に示されている橋脚を対象とした。図-3に構造一般図を示す。下部構造形式はRC矩形橋脚、基礎構造形式は $\phi 1,000\text{mm}$ の場所打ち杭基礎である。橋脚は、橋長30.0mのPRC単純桁2連を支持しており、支承条件は固定・可動である。

検討対象橋脚は耐震診断の結果、橋脚耐力を向上させる必要があり、橋脚躯体に対して厚さ250mmのRC巻立て補強を施している。しかし、この橋脚補強により橋軸直角方向において基礎が降伏に達してしまうことから、既設杭に対する荷重低減を目的として、シートパイル補強を行う必要がある。図-4に鉄道標準モデルで設計されたシートパイル補強の補強一般図に示す。ここで、使用鋼材はシートパイルⅢ型(SYW295, 400タイプ)である。

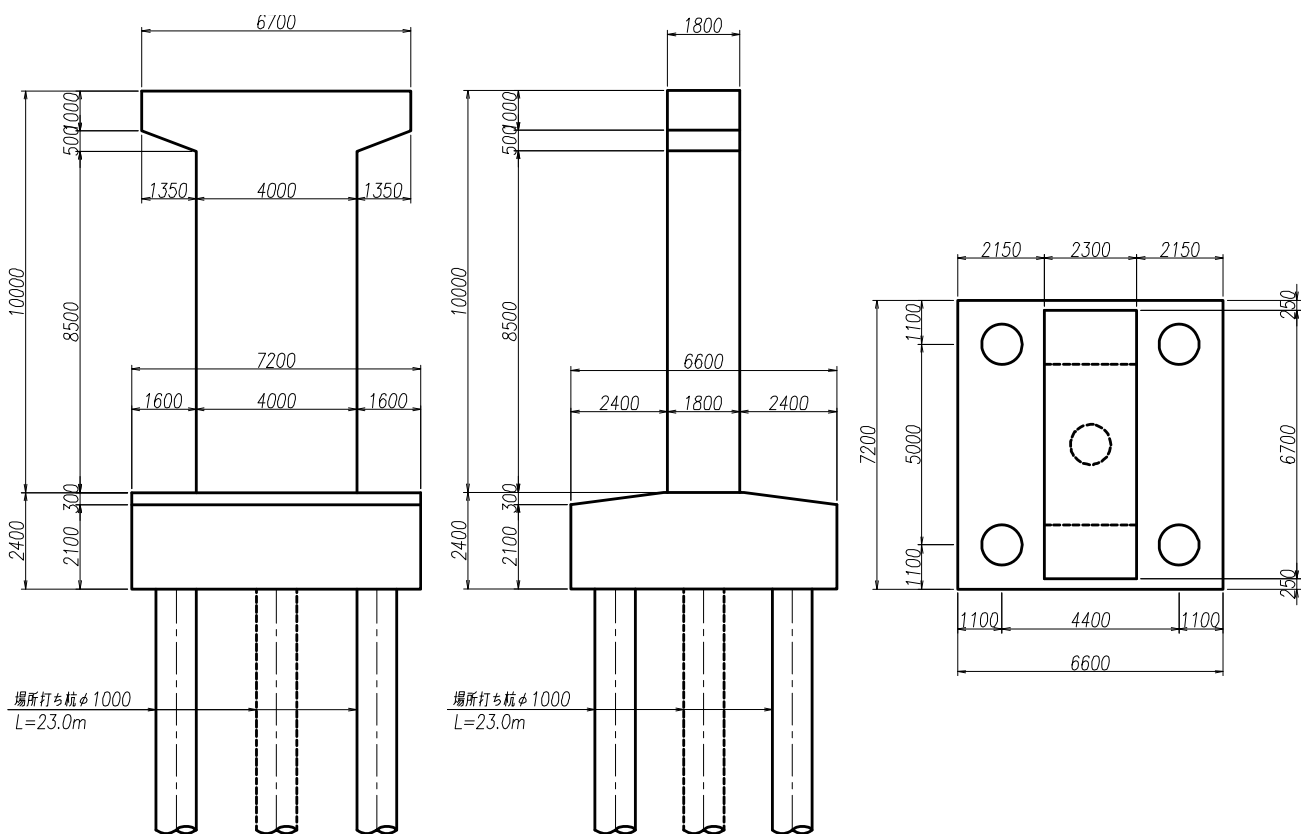
(2) 解析モデル

解析モデルは、橋脚と基礎を一体とする二次元骨組みモデルとし、橋脚、フーチング、既設杭およびシートパイルは線材、フーチングおよびフーチングとシートパイルの接合部は剛域とする。

本検討は基礎の非線形挙動を検証することを目的とすることから橋脚躯体は線形要素とする。既設杭は非線形M- ϕ モデルとする。

シートパイルは、設計上、非線形域までの性能を期待しないことから線形要素とする。ここで、荷重方向と直交する面に配置されたシートパイルは線材でモデル化し、シートパイル間の継ぎ手効率を考慮した曲げ剛性を用いるものとする。荷重方向と平行な面に配置されたシートパイルは、1列ずつ線材でモデル化し、シートパイル間の継ぎ手はせん断力を伝達しないものとする。

ここで、提案する道路橋示方書^{10),11)}に準拠した地盤抵抗モデル(以下、道路基準準拠モデルと称す)について概説する。地盤抵抗は非線形ばねでモデル化し、杭の水平・鉛直地盤抵抗、増しフーチング前面の水平地盤抵抗、シートパイルの水平・鉛直地盤抵抗をそれぞれ考慮する。図-5に道路基準準拠モデルの概要図を示す。杭の地盤抵抗のうち鉛直地盤抵抗は道路橋示方書に基づいて杭頭に集約してモデル化している。シートパイルの地盤抵抗については水平地盤反力係数および先端地盤反力係数を道路橋示方書の鋼管矢板基礎に準じて算定し、鉛直せん断地盤反力係数は水平地盤反力係数の0.3倍としている。なお、鉛直地盤抵抗は、フーチング下面への集約は行わず深さ方向に分散配置することとした。図-6にシートパイル補強前後の解析モデルを示す。

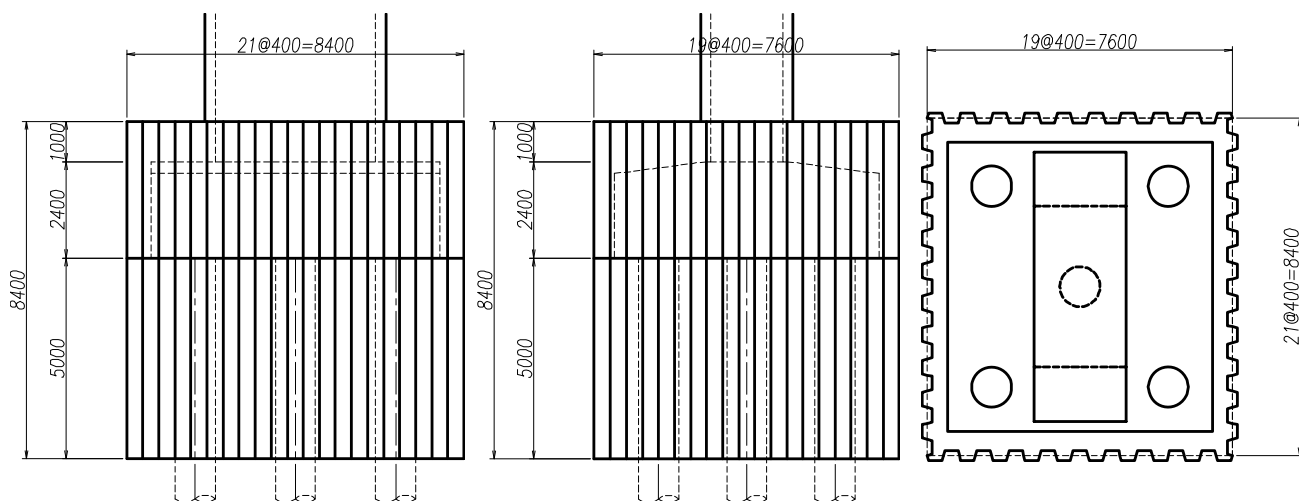


(a) 正面図

(b) 側面図

(c) 平面図

図-3 既設構造一般図



(a) 正面図

(b) 側面図

(c) 平面図

図-4 補強構造一般図

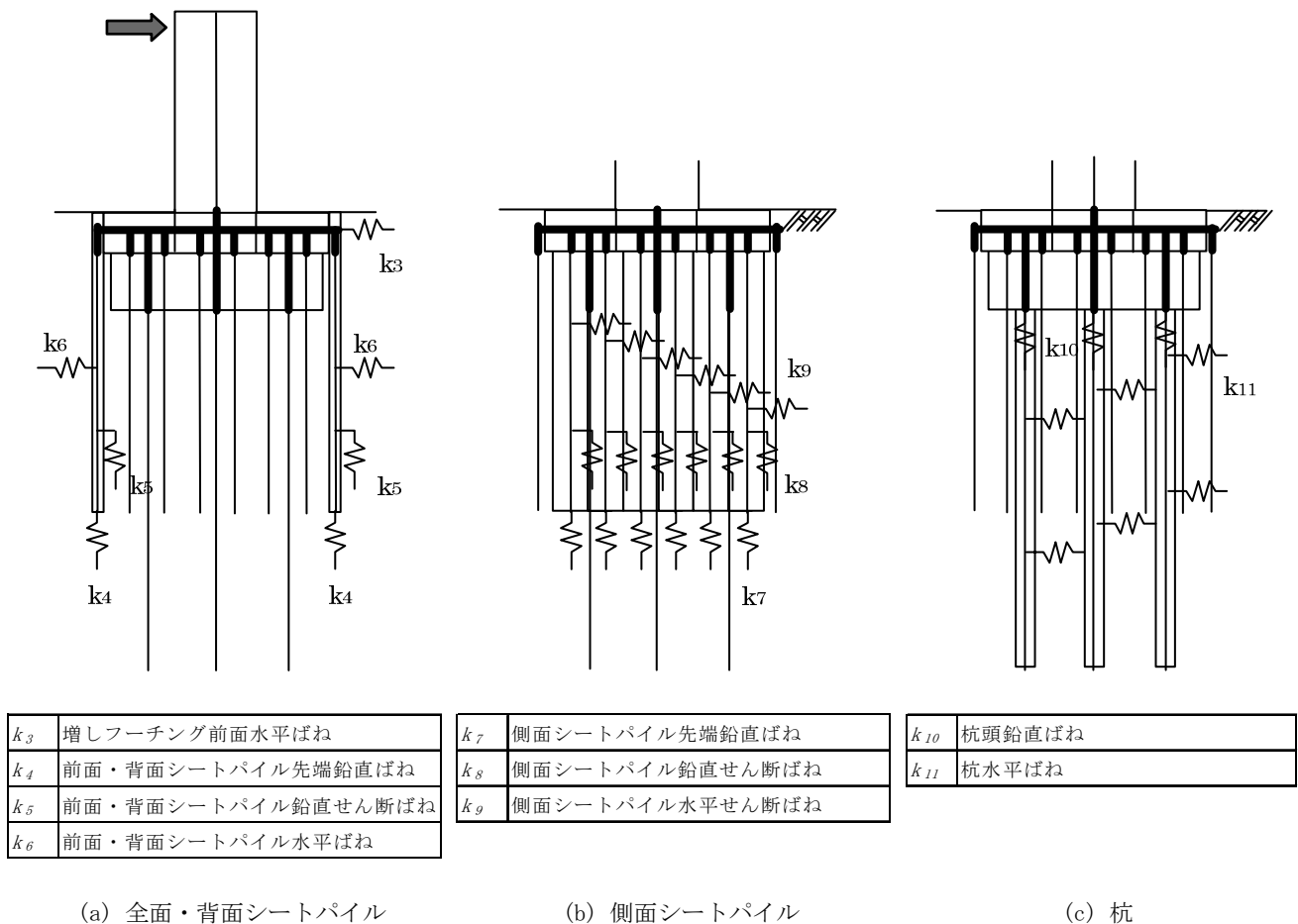


図-5 シートパイル補強杭基礎の地盤抵抗モデル（道路基準準拠モデル）

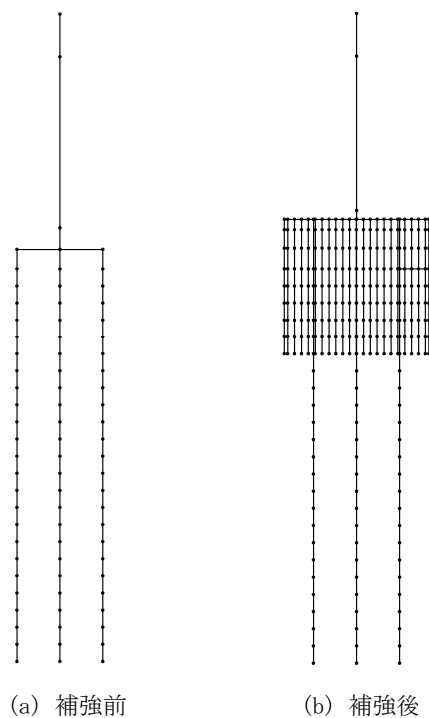


図-6 解析モデル（橋軸直角方向）

(3) 解析方法

解析方法は、鉄道構造物の一般的な地震応答解析法であるプッシュオーバー解析とする。まず、死荷重解析を実施し、次に、载荷方向に対し上部構造重心位置を制御点とする変位制御による漸増载荷を行う。なお、载荷方向は基礎補強の必要な橋軸直角方向の1方向とする。

なお、本解析には鉄道総合技術研究所で開発された静的非線形解析プログラムである JRSNAP Ver4.1-L04 を使用した。

3. 解析結果および考察

ここでは、鉄道標準モデルと道路基準準拠モデルの地盤抵抗モデルの違いがシートパイル補強の補強効果に及ぼす影響について、補強前後の震度－水平変位関係、既設杭に生じる断面力（曲げモーメント、せん断力）を指標として、比較・検証を行うこととする。

(1) 耐力・変形性能

図-7 に、鉄道標準モデルと道路基準準拠モデルによるシートパイル補強前後の震度－水平変位関係を示す。

鉄道標準モデルについては、補強前後のいずれも最外縁の杭頭反力が押込み支持力の上限值に達し降伏している。基礎補強の効果については、初期剛性は3倍程度、降伏震度は40%程度向上しており、さらに、許容変位時の最大耐力については40%程度向上していることがわかる。

道路基準準拠モデルについては、鉄道標準モデルと同様、補強前後のいずれも最外縁杭頭反力が押込み支持力の上限值に達し降伏している。基礎補強の効果については、初期剛性は6倍程度、降伏震度は55%程度向上しており、さらに、許容変位時の最大耐力については80%程度向上していることがわかる。

鉄道標準モデルと道路基準準拠モデルを比較すると、補強後の降伏変位、降伏震度、最大耐力は概ね同様に推移しており、道路基準準拠モデルにおいてもシートパイル補強杭基礎の地震時変形性能が適切に評価できていると考えられる。

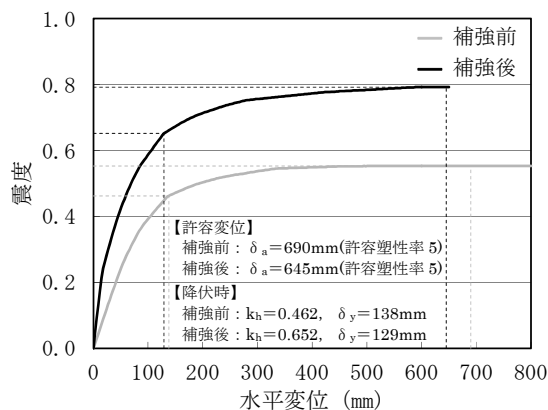
(2) 許容変位量

図-7 に示している道路基準準拠モデルおよび鉄道標準モデルによるシートパイル補強後の許容変位量について比較すると、道路基準準拠モデルの方が制限値が厳しいことから安全側に評価されることがわかる。

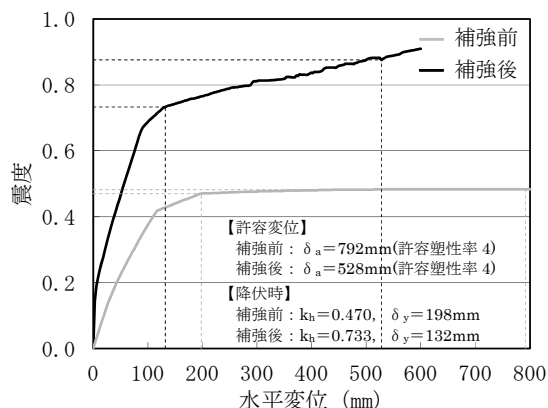
(3) 杭発生断面力

図-8 に、道路基準準拠モデルによるシートパイル補強前の最大震度時 ($k_h=0.480$) の杭の発生断面力分布について、補強前後を比較して示す。また、図-9 に、各震度レベルにおける補強前後の杭の発生断面力の割合を示す。

杭の発生断面力分布については、曲げモーメントとせん断力のいずれについても地盤中の発生断面力レベルが大幅に低下するとともに、そのピーク位置が杭頭側へとシフトしていることがわかる。次に、各震度レベルにおける補強前後の杭の発生断面力を比較すると、曲げモーメントとせん断力のいずれについても、震度レベルに関わらず補強後の断面力は補強前の20%程度まで低下していることがわかる。以上の道路基準準拠モデルによる杭の発生断面力の低減効果は、鉄道標準モデルと同等の低下割合である。

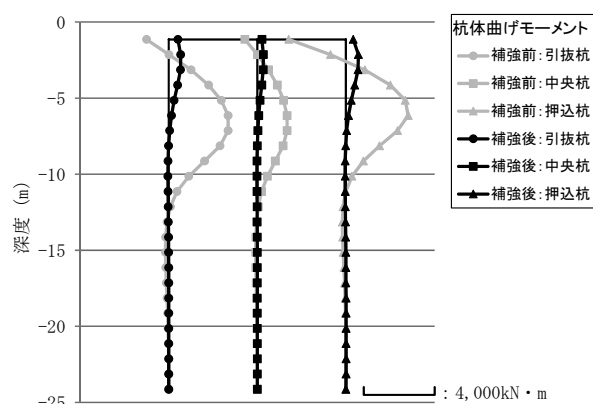


(a) 鉄道標準モデル

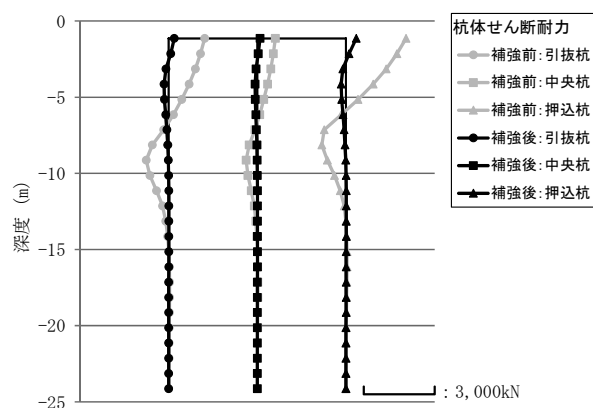


(b) 道路基準準拠モデル

図-7 震度－水平変位関係

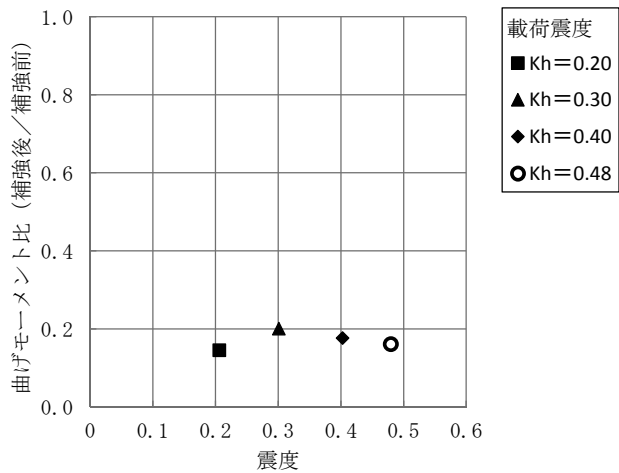


(a) 曲げモーメント分布: $k_h=0.480$

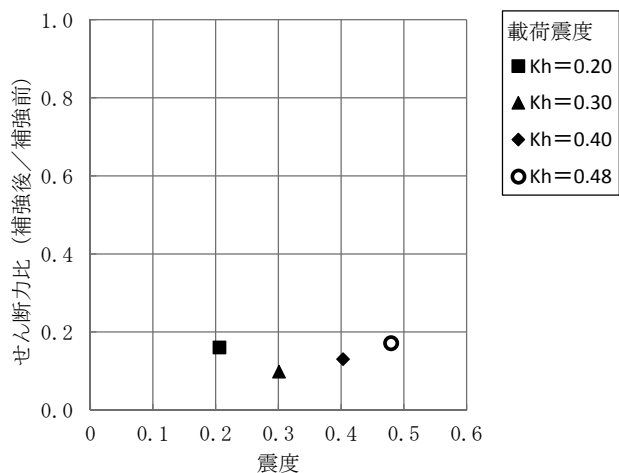


(b) せん断力分布: $k_h=0.480$

図-8 杭の断面力分布 (道路基準準拠モデル)



(a) 曲げモーメント比



(b) せん断力比

図-9 各震度レベルにおける補強前後の
既設杭の最大断面力比（道路基準準拠モデル）

したがって、道路基準準拠モデルにおいても既設杭体および既設杭体および既設フーチングに対する十分な補強効果が評価できている。

4. まとめ

本検討では、シートパイル補強工法を既設道路橋基礎へ適用するため、道路基準準拠モデルを整理した。さらに、実構造物を対象とした補強計算を実施し、既設道路橋基礎に対する耐震補強に対しても鉄道構造物基礎の場合と概ね同程度の補強効果が得られることを確認した。

本検討により得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 1) シートパイル補強により、道路基準準拠モデルにおいても、初期剛性、降伏耐力、最大耐力が向上する。

- 2) シートパイル補強杭基礎の地震時変形性能については、道路基準準拠モデルにおいても鉄道標準モデルと概ね同等である。
- 3) 許容変位量については、道路基準準拠モデルの方が鉄道標準モデルよりも制限値が厳しいため安全側の評価となる。
- 4) シートパイル補強による杭の発生断面力低減効果については、道路基準準拠モデルにおいても鉄道標準モデルと概ね同等である。

今後、既設道路橋基礎に対するシートパイル補強工法の実務的な設計手法などを詳細に整理のうえ、シートパイル補強工法を用いた既設道路橋基礎の耐震補強マニュアルを整備する予定である。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所・大林組・新日鐵住金：鉄道構造物に適用するシートパイル基礎の設計・施工マニュアル（第3版），2006.
- 2) 西岡英俊，樋口俊一，西村昌宏，神田政幸，山本忠久，平尾淳一：シートパイルによる既設杭基礎の耐震補強効果に関する模型実験，第54回地盤工学ジャーナル，Vol5，2009.12
- 3) 運輸省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物，2000.
- 4) 運輸省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999.
- 5) 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，Vol23，2009.12
- 6) 鉄道総合技術研究所・大林組：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，2011.
- 7) 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，I-447，2011.
- 8) 斉藤聡彦，渡辺忠朋，関根悦夫，神田政幸，西岡英俊，松浦光佑：シートパイル補強工法を用いた既設道路構造物基礎の耐震補強に対する適用，土木学会第66回年次学術講演会，III-168，2013.
- 9) 松浦光佑，西岡英俊，平尾淳一，山本忠久：既設杭基礎鉄道橋脚に対するシートパイル補強工法の試設計事例，第9回地盤工学会関東支部発表会，2012.10
- 10) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，2012.3
- 11) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012.3