

# 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

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\*\*\*

Proposal of Seismic Design Method of the Reinforcement of the Existing Pile Foundations  
 by Installing Sheet Piles around Footing and Connecting them Together in the Liquefied Ground

Kazuhide TODA Taisuke SANAGAWA Hidetoshi NISHIOKA  
 Shunichi HIGUCHI Kosuke MATSUURA  
 Shinji TAENAKA Kazutaka OTSUSHI

If the liquefaction has occurred during an earthquake, it may cause severe damage to the foundation structures. Since the existing reinforcement method requires significant widening of footing size, and the execution of the reinforcement work is difficult, in case the peripheral structure exists closely. Therefore, in this study, we examined the applicability of the Sheet-Pile reinforcement method which can be executed with a slight foot widening and excellent economy. The reinforcing effect was verified by the model experiment, and further the validity of 2D beam-spring system as a numerical analysis model was confirmed, Sheet-pile foundation was designed based on these results, and it was confirmed that the proposal method is more economical than the existing reinforcement method (Additional Pile System).

キーワード：液状化，耐震補強，耐震設計法，シートパイル補強工法，先端加工鋼矢板，中間支持

## 1. 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い、基礎構造体に大きな被害が発生する。例えば、1995年兵庫県南部地震では、液状化に起因する杭基礎構造物の被害が多く見られた。その後の調査や研究等から、杭基礎構造物の被害には上部構造体に作用する慣性力の影響のみならず、液状化に起因する地盤変位の増大の影響も大きいことが数多くの研究から明らかになってきた。このような被災事例を背景に、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なく、これらの構造物に対しては液状化対策の実施が必要となる。

既設杭基礎構造物を対象とした従来の液状化対策工法としては、増し杭による構造的な対策<sup>1)</sup>や、地盤改良・薬液注入等により液状化の発生自体を防止する方法<sup>2)</sup>が挙げられる。しかしながら、これらの対策工法は、用

地の大幅な拡幅や補強工事の大規模化に伴うコスト増に加えて、近接構造物が多い都市部や橋桁下においては、施工が困難になる場合が多い。また、地盤改良工法等は、河川中の施工にあたっては、環境面への配慮から適用が不可となる場合がある。このため、狭隘地や空頭制限下における基礎構造物を対象とした、経済性に加えて施工性にも優れた液状化対策工法の開発が望まれている。

一方、比較的中小規模（フーチング幅が5～10m程度）の既設杭基礎を主な対象として、既設フーチングを取り囲むようにシートパイルを打設し、フーチングと一体化

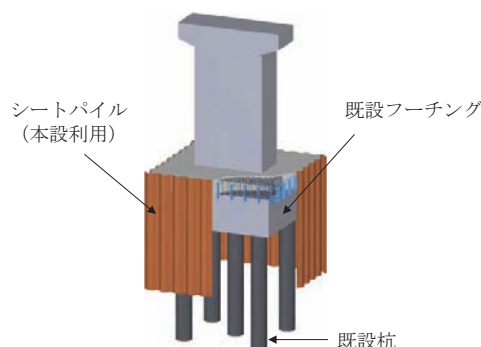


図1 シートパイル補強工法（既設杭基礎補強の例）

\* 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室  
 \*\* 株式会社大林組  
 \*\*\* 新日鐵住金株式会社

特集：地震防災・耐震技術

する耐震補強工法（シートパイル補強工法）<sup>3)</sup>が提案されている（図1）。シートパイル補強工法は、比較的良好な地盤を対象とし、フーチングの大幅な拡幅が不要であることから、経済性・施工性に優れた耐震補強工法であり実構造物へも適用されている。これまで、液状化地盤におけるシートパイル補強工法の効果についての実験的検討は実施されていないが、補強効果が確認できれば液状化地盤における経済性・施工性に優れた耐震補強工法となりうる。

本論文は、狭隘区間に位置する既設杭基礎構造物を対象として、液状化地盤における経済性・施工性に優れた耐震補強工法の開発を目的とし、シートパイル補強工法の耐震補強効果を明らかにするとともに、設計手法を提案するものである。

2. シートパイル補強工法による補強効果

まず液状化地盤におけるシートパイル補強工法の補強効果を明らかにするため、模型振動実験を実施した。

2.1 模型振動実験による補強効果の確認

模型の概要を図2に示す。補強対象構造物のプロトタイプは、杭基礎橋脚（く体高さ6.0m、降伏震度0.586、等価固有周期 $T_{eq} = 1.34\text{sec}$ 、地盤の固有周期 $T_g = 1.95\text{sec}$ ）とした。基礎形式は $\phi 500\text{mm}$ のPHC杭を用いた杭長15.0mの打込み杭とし、杭本数は $2 \times 2$ の4本である。補強に用いるシートパイル（以下、SP）はハット形鋼矢板の25H型を想定し、先端を非液状化層まで打ち込んだ。振動実験で用いた模型はプロトタイプの1/6スケールとし、相似則<sup>4)</sup>を考慮して諸元を設定した。杭模型は $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 、厚さ1.6mmの角型鋼管、SP模型は厚さ4.5mmの鋼板とした。ここで、事前解析により液状化地盤におけるSP補強のメカニズムとしてSPの軸力が支配的であることが確認されたため、SP模型の先端部には、鉛直抵抗に優れる先端加工鋼矢板<sup>5)</sup>を模擬して、高さ33mm、幅88mmのコの字型の先端加工部を300mmの区間に溶接した（図3）。先端加工鋼矢板とは、鉛直支持力の向上を目的に先端部を組合せ加工により閉塞断面を設けた鋼矢板である。

模型振動実験は、鉄道総研が所有する大型振動試験装置およびせん断土槽を用いて実施した。せん断土槽は内寸法が幅3000mm、奥行1100mm、高さ3000mmであり、土槽天端から深さ2400mmの部分が12段のせん断枠で構成されている。各せん断枠はリニアガイドで支持されており、地盤の挙動に追従して変形することができる。せん断土槽の内部にはゴム製のメンブレンを設置しており、この中にSP補強杭基礎模型を設置後、模型地盤を構築した。地盤材料は東北珪砂6号とし、構築後土槽底

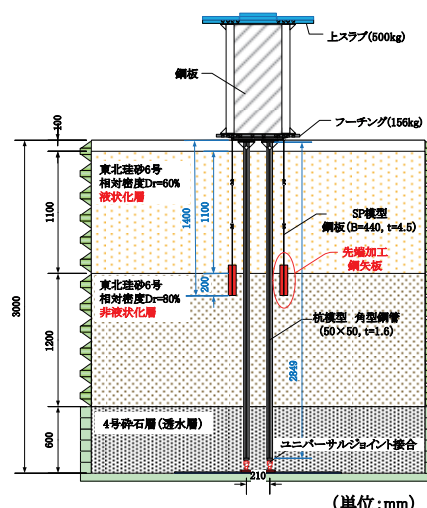


図2 模型実験概要

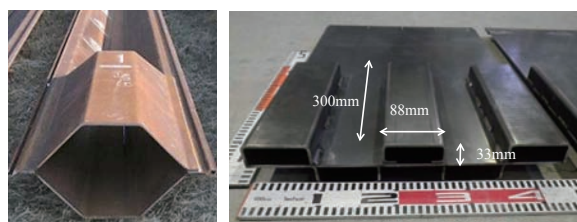


図3 先端加工鋼矢板<sup>5)</sup>と模型

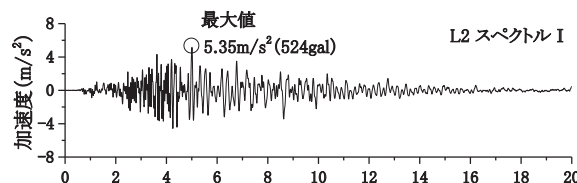


図4 加振波形（基盤入力）

表1 計測項目一覧

計測項目	計測箇所	計測機器
変位	上スラブ、フーチング、地表面、地盤（せん断土層）	変位計・画像解析
加速度	上スラブ、フーチング、地盤	加速度計
過剰間隙水圧	地盤	間隙水圧計
ひずみ	杭体、SP	ひずみゲージ

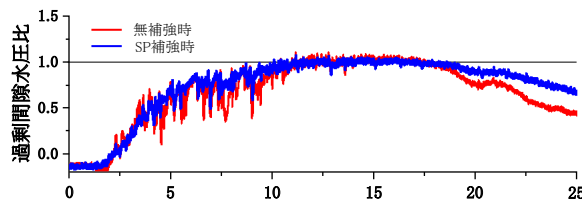


図5 過剰間隙水圧比の時刻歴波形

面から水を注入することで飽和させた。加振波形は、鉄道構造物の設計で用いられるL2地震動（スペクトルI）<sup>7)</sup>の基盤波を相似則に従い時間軸を圧縮したものを用いた（図4）。計測項目の一覧を表1に示す。加振により完全液状化状態となる地盤条件（図5）に対して、先

端加工鋼矢板を用いた補強効果を検証する。

模型振動実験結果の概要を図6に示す。SP補強により、上スラブの回転角が30%程度低減され、また杭頭部ではせん断力が30%程度、軸力が20%程度抑制されることを確認した。これは、地震の慣性力に伴う上部構造物の回転挙動を、鉛直抵抗に優れた先端加工鋼矢板により抑制することで、杭頭部に発生する応力が低減されたためと考えられる。

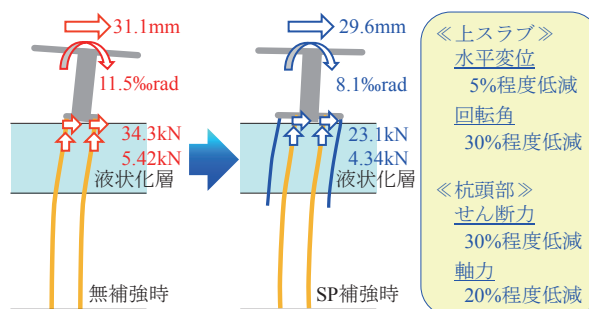


図6 シートパイル補強工法の効果

## 2.2 数値解析モデルの検証

SP補強杭基礎の液状化時の挙動の評価を目的として、一般的な鉄道構造物の構造解析で用いられる2次元の梁ばねモデルを用いた数値解析を実施し、モデルの適用性を検証した。

解析モデルの概要を図7に示す。これは上部構造物—下部構造物—基礎周囲の地盤ばねに加えて、地盤を模擬した土柱モデルと各杭ならびにSPを水平地盤ばねで接続するモデルであり、地盤の応答変位が地盤ばねを介して基礎に入力される。これにより、構造物との間に生じる相互作用の影響を直接動的解析において考慮することができる。水平ばねには変位レベル依存性を考慮するためR-Oモデル<sup>8)</sup>を適用した。液状化層の土質定数は、液状化時の過剰間隙水圧比の値に応じて低減を考慮した<sup>9)</sup>。模型振動実験では、部材の応力が降伏点を越えていなかったことから、部材は線形モデルとした。杭体およびSP部材は、曲げ試験および軸圧縮試験の結果を適用し、スラブ・柱・フーチングは、ヤング率を $2.05 \times 10^8$  (kN/m<sup>2</sup>)として寸法諸元を基に断面剛性を求めた。

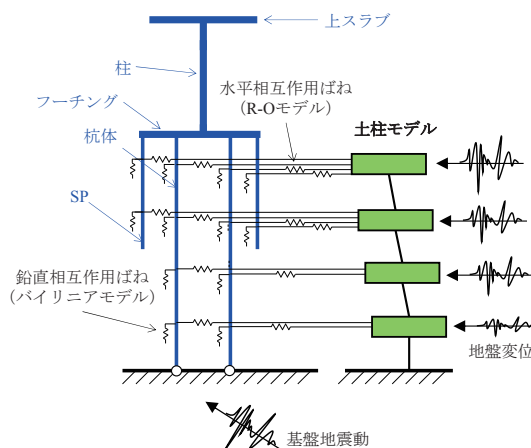


図7 解析モデルの概要

再現解析結果として、時刻歴応答波形を図8に、杭の最大曲げモーメント分布図を図9に示す。いずれのケースも実験結果を精度よく再現できていることから、液状化地盤の動的挙動や相互作用ばねの非線形特性、過剰間隙水圧の上昇による地盤ばねの剛性・強度低下が精度よく得られれば、一般的な鉄道構造物の設計手法と同様に、2次元の梁ばねモデルでも液状化地盤におけるSP補強杭基礎構造物の地震時挙動を評価できることが確認された。

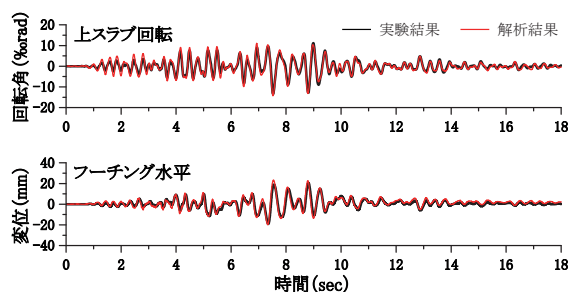


図8 SP補強時の時刻歴応答波形

## 3. 設計手法の提案

SP補強杭基礎の構造解析において、2次元の梁ばねモデルの適用性を確認した。本章では、SP補強杭基礎の設計手法において液状化の影響を考慮する方法を示す。また、実構造物の設計においては先端加工鋼矢板を中間支持させた場合の支持力特性については不明であることから、急速載荷試験を実施し、先端加工鋼矢板を中間層（非液状化層）で打ち止めた場合の支持力特性をもとに支持力算定式を提案するとともに、試設計および従来工法とのコスト比較を実施した。

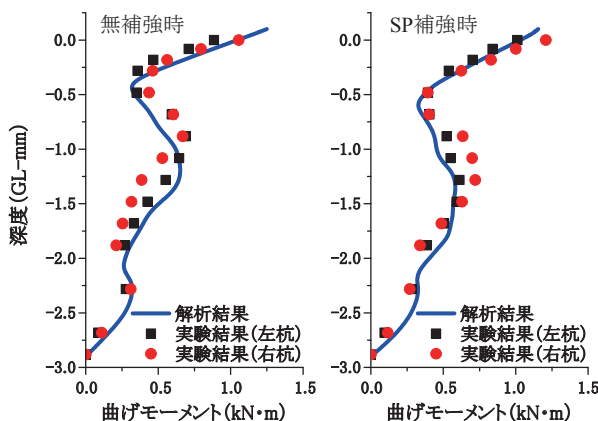


図9 杭の最大曲げモーメント分布

特集：地震防災・耐震技術

3.1 液状化のある地盤における SP 補強工法の応答値算定方法の概要

2章では、一般的な構造物の場合について実験的・数値解析的検討を示したが、既往の研究<sup>10)</sup>では上部構造物が無い構造物の場合、SP補強により地盤変位の影響を受けやすくなり、応答が増加する可能性があることが確認されている。このため、液状化程度に応じて地盤の影響のモデルを検討しなくてはならない。耐震標準<sup>7)</sup>では、液状化Ⅰ ( $5 \leq P_L < 20$ ) では応答変位法により、液状化Ⅱ ( $20 \leq P_L$ ) では振動土圧を考慮することとしており、SP補強工法においてもこの設計方針に従い、図10に示す取り扱いとした。

3.2 先端加工鋼矢板の支持力特性

先端加工鋼矢板を中間層（非液状化層）で打ち止めた場合の支持力性能の確認を目的に、急速载荷試験を実施した。

土質柱状図を図11に示す。今回の試験ではN値20～30程度の中間層に根入れさせた。試験体は先端部を加工したハット形鋼矢板10Hならびに25Hとし、先端加工部の長さ $5D_p$  ( $D_p$ :換算杭径(= $A_p^{1/2}$ ),  $A_p$ :先端閉塞面積) (図12)のうち $3D_p$ を根入れすることとした。打設方法は、低空頭で打設可能な圧入施工とし、補助工法にウォータージェット（以下、WJ）を併用した。WJにより根入れする中間層を乱さないよう、中間層の1m上方でアイドリング程度まで水圧を下げ、所定の深さまで根入れさせ、打設後1ヶ月程度養生した後に、急速载荷試験を実施した。

除荷点法により算定した荷重－変位関係を図13に示す。変位量が換算杭径 $D_p$ の10%時における先端支持力が、「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」<sup>11)</sup>（以下、SP基礎設計マニュアル）により算定した終局先端支持力と同程度以上であることを確認した。ただし、現時点では試験体の本数が2本と少ないことから、中間層での先端加工鋼矢板の先端支持力を算定する際には、基礎標準<sup>12)</sup>に従い、式(1)、(2)により地盤抵抗係数の補正を考慮し、SP基礎設計マニュアルの算定式に90%を乗じて算定するものとした。

$$V' = (V^2 - V_{site}^2)^{1/2} \geq 0.15 \quad (1)$$

$$= 0.16$$

$$\mu' = R^t / R_k \times (1 - k_s' V') \quad (2)$$

$$= 0.92 \times R^t / R_k$$

ここで、 $V'$ :補正した変動係数、 $V$ :変動係数(=22%) (打込み工法(先端開放鋼管杭)),  $V_{site}$ :サイトが異なる影響による変動係数(=15%),  $\mu'$ :当該サイト内における支持力の平均値の推定値、 $R^t$ :基準変位量に到達した時の抵抗荷重の実測値、 $R_k$ :地盤調査結果から

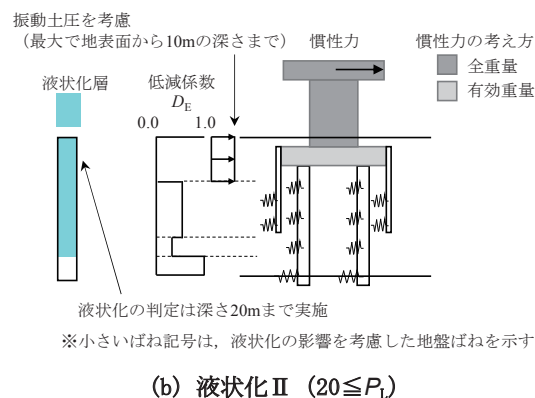
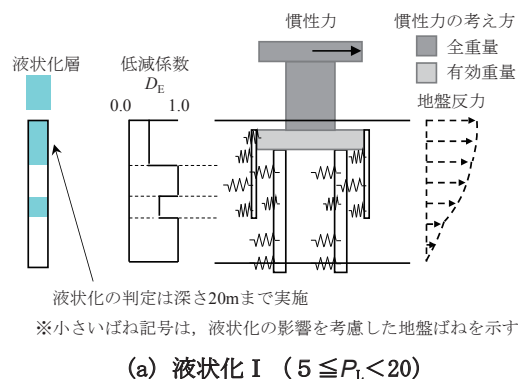


図10 設計条件の概念図

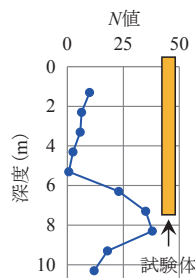


図11 土質柱状図

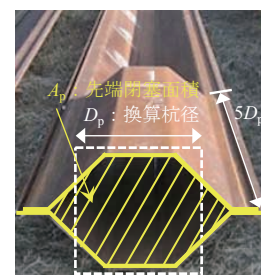


図12  $D_p$ の考え方<sup>6)</sup>に加筆

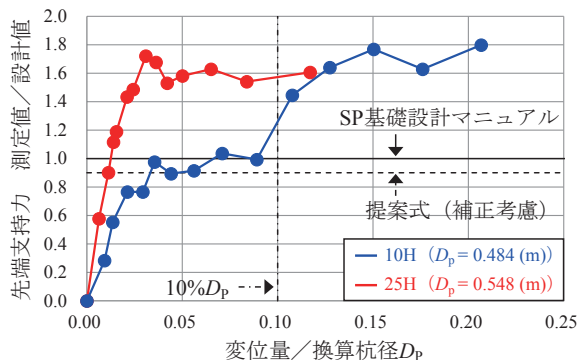


図13 荷重－変位関係

推定した基準支持力、 $k_s'$ :試験杭本数に応じた係数(=0.48) (試験杭の本数が2本の場合)である。

なお、今回の試験のみでは試験体数が少なく、また地盤条件によっても支持力特性が異なるため、今後の適用に際しては現地にて载荷試験を実施し、支持力を確認す

ることが望ましい。ただし、実施が困難な場合には、上述した支持力を低減して適用する必要がある。

### 3.3 試設計結果

液状化地盤における SP 補強工法の効果検証を目的として、SP 補強工法と無対策の2ケースを対象に静的非線形解析 (JR-SNAP) により試設計を実施した。

SP 補強工法の一般図および地盤条件を図 14 に示す。補強に用いる SP は、通常の SP と先端加工鋼矢板を1枚おきに配置した。液状化層は、②砂質土の区間とした (図 14)。

試設計結果として、荷重-変位関係を図 15 に示す。SP 補強により液状化時の最大応答震度は増加する一方、変形が抑制されることで既設杭の支持降伏および杭頭部のせん断破壊を抑制する効果があることを確認した。

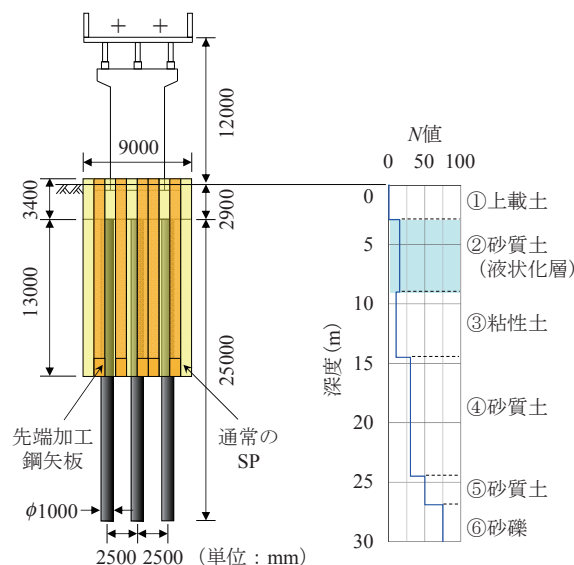


図 14 SP 補強工法の一般図

### 3.4 コスト比較

試設計結果をもとに、用地制約および空頭制限がある条件下において、従来の耐震補強工法である増し杭工法 (場所打ち杭補強 (TBH 工法)) を対象として、コスト比較を実施した。なお、ここでは付帯費用は含まない。

SP 補強工法は、通常の SP のみを用いたケースと、試設計を実施した先端加工鋼矢板を用いたケースの2ケースとした。通常の SP のみを用いたケースの SP の長さは、先端加工鋼矢板の支持力と同等となる長さとした。施工方法は、桁下施工を想定して圧入施工とした。また、空頭制限を考慮し施工時の SP の最大長さを 5m とし、必要に応じて縦継ぎ施工を行うこととした。

コスト比較結果を表 2 に示す。SP 補強工法は、増し杭工法と比較し工事費を 20% 程度縮減可能であることを確認した。また、SP 補強工法について地盤条件に着目すると、中間層が  $N \leq 25$  ( $N$ : 標準貫入試験の  $N$  値) では、WJ 併用が不要な通常の SP のみを使用したケースが最も優位となった。ここで、WJ の併用は一般的には  $25 < N \leq 50$  の場合<sup>13)</sup> に行うが、先端加工鋼矢板は  $N \leq 25$  においても WJ 併用が原則<sup>13)</sup> である。このため、 $N \leq 25$  では、WJ の設備費用や、支持力低減の考慮に伴う根入れ長の増大が不要な通常の SP のみを用いることで、効果的な補強が可能である。一方で、中間層が  $N > 25$  では、先端加工鋼矢板を用いたケースが最も優位となり、通常の鋼矢板のみを用いたケースに対し工事費を 5% 程度、工期を 30% 程度縮減する効果を確認した。これらの結果をもとに、施工制約条件下における耐震補強工法の選定イメージを図 16 に示す。

## 4. おわりに

本論文では、液状化地盤における経済性・施工性に優

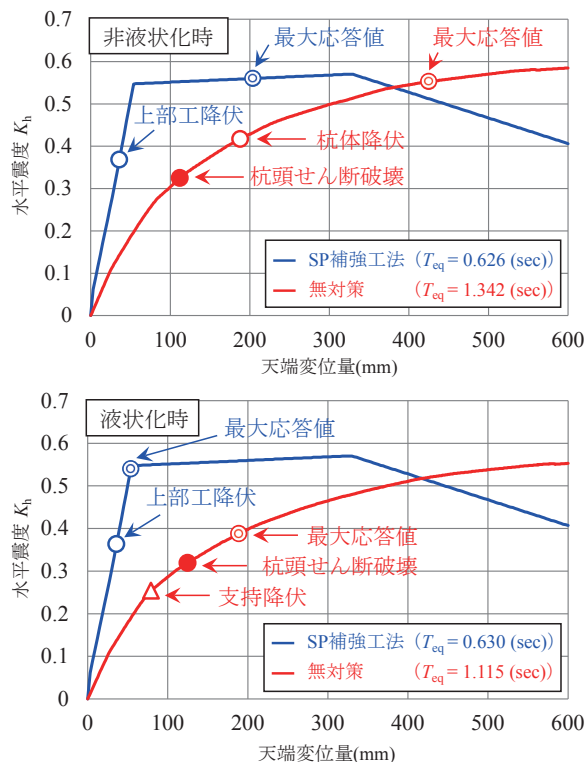


図 15 荷重-変位関係

れた耐震補強工法の開発を目的に、模型振動実験および数値解析によりシートパイル補強工法の効果について検討を行った。以下に、得られた知見について示す。

- (1) 慣性力主体の構造条件の場合、シートパイル補強を実施することで、シートパイルの鉛直抵抗により応答変位量が抑制され、杭頭部の断面力も低減される。このため、鉛直抵抗が大きい先端加工鋼矢板を用いることで効果的に橋脚の補強が可能である。
- (2) 2次元の梁ばねモデルを用いて模型振動実験の再現

表2 コスト試算条件および結果の例

補強工法	増し杭工法 (TBH工法)	SP補強工法			
		通常のSP		先端加工鋼矢板	
中間層（非液化化層）のN値	$N \leq 50$	$25 < N$	$25 < N \leq 50$	$N \leq 50$	
補強概要	$\phi 1.0\text{m} \times 4\text{本}$ , $L=25.5\text{m}$	10H型 $\times 38\text{枚}$ , $L=12.0\text{m}$	10H型 $\times 38\text{枚}$ , $L=15.5\text{m}$	10H型 $\times 38\text{枚}$ , $L=13.0\text{m}$	
工事費 (千円)	仮土留工	4,400	—	—	
	掘削工	1,500	400	400	
	SP（圧入施工） または杭施工	12,600	8,700	14,300 (WJ併用)	
	増しフーチング	9,500	6,100	6,100	
	特許料	—	800	1,000	
付帯費用は 含まない	総額	28,000 (1.00)	16,000 (0.57)	21,800 (0.78)	20,700 (0.74)

解析を行った結果、液状化時の地盤の動的挙動および地盤反力係数を考慮することで実験結果を精度よく再現することができた。これにより、一般的な構造解析モデルを用いた設計計算が可能と考える。

- (3) 先端加工鋼矢板を中間層に支持させる場合、終局先端支持力は従来の設計マニュアルが適用可能である。ただし、現時点では、試験体の本数が2本と少ないことから、算定式に90%を乗じて算定するものとした。
- (4) コスト試算の結果、狭隘地や空頭制限がある条件下では、従来の工法に対して約20%のコスト削減効果を有している。また、中間層（非液化化層）のN値が25以上50未満では、先端加工鋼矢板を用いることで、より合理的な耐震補強が可能である。

文献

- 1) 例えば、岸下崇裕, 斉藤悦郎, 山根隆志, 大谷義則, 三浦房紀, 谷藤正樹: 高耐力マイクロパイル既設構造物基礎の耐震補強, 日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.10-1, pp.161-166, 1998
- 2) 例えば、桐生郷史, 澤田亮: 杭基礎周面に限定した改良による液状化対策工に関する実験的研究, 第28回土木学会地震工学研究発表会論文集, Vol.28, 2005
- 3) 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, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.251-262, 2010
- 4) 香川崇章: 土構造物の振動模型実験における相似則, 土木学会論文報告, 第275号, pp.69-77, 1988
- 5) 中山裕章, 妙中真治, 永津亮祐, 原田典佳, 加藤篤史: 先端部に閉塞断面を設けた鋼矢板の支持力特性評価に関する実験的研究, 第10回地震時保有耐力法に基づく橋梁等の

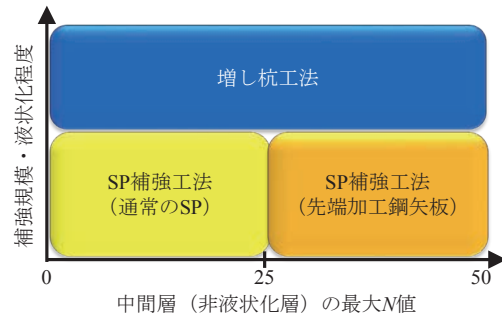


図16 工法選定イメージ

耐震設計に関するシンポジウム, pp.345-350, 2007

- 6) 新日鐵住金株式会社ホームページ  
[http://www.nssmc.com/tech/nssmc\\_tech/construction/02.html](http://www.nssmc.com/tech/nssmc_tech/construction/02.html) (参照日: 2016年2月8日)
- 7) 国土交通省鉄道局監修, 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, 2012
- 8) Jennings, P.C: Periodic Response of a General Yielding Structure, Proc. ASCE, EM2, pp.131-163, 1964.
- 9) 五十嵐治人, 保井美敏, 森利弘, 平出務, 水野二十一: 杭基礎の液状化時の水平地盤反力係数—大型せん断土層実験に基づく—, 第38回地盤工学研究会, 2001
- 10) 例えば, 松浦光佑, 西岡英俊, 佐名川太亮, 喜多直之, 樋口俊一, 田中隆太, 戸田和秀: 液状化地盤における既設杭基礎シートパイル補強工法に関する模型振動実験, 第50回地盤工学研究発表会, 2015
- 11) 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), 2014
- 12) 国土交通省鉄道局監修, 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
- 13) 国土交通省大臣官房技術調査課監修, 建設物価調査会発行: 国土交通省土木工事標準積算基準書 (共通編), 2015