

# 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

西岡 英俊\* 西村 昌宏\* 神田 政幸\*  
山本 忠久\*\* 樋口 俊一\*\*\* 杉江 茂彦\*\*\*

**Seismic Reinforcement Method for Existing Pile Foundations  
by Installing Sheet Piles around Footing and Connecting them Together**

Hidetoshi NISHIOKA Masahiro NISHIMURA Masayuki KODA  
Tadahisa YAMAMOTO Shunichi HIGUCHI Shigehiko SUGIE

Many old foundations, which need to be reinforced because of being poor in seismic performance, are still in use. Seismic performance of these old existing foundations could be improved by installing sheet piles around footing and connecting them together. Based on this idea, the authors have proposed a new seismic reinforcing method. The following outcomes have been found out. (1) Reduction in the sectional force of the existing pile has been confirmed by adopting the proposed method. This improvement can be expected not only at pile cap, but also at the position deeper than sheet pile depth. (2) Subgrade reaction of the existing pile may be reduced because the sheet pile installed around the footing mainly bears lateral reaction force acting on the foundation replacing piles.

キーワード：基礎の耐震補強，シートパイル，杭，模型実験，耐震設計，骨組み解析

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

建設年代の古い構造物には、現行の耐震標準を満たさず、耐震補強工事の必要なものが多く存在する。1995年の兵庫県南部地震以降、これらの既設構造物についても優先順位を定めて耐震補強工事を実施する必要性が指摘され<sup>1)</sup>、例えば橋脚の場合では、主にせん断耐力が不足する橋脚躯体の補強が優先的に進められている。しかしながら基礎の耐震補強については、橋脚躯体等の地上部分に比べて大掛かりな工事となるために費用面だけでなく施工面からも実施が困難な場合が多い。

今後、効率的に基礎の耐震補強を進めるためには、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。また、橋脚躯体の補強に比べて、補強対象の基礎形式や地盤条件が多様であるため、それらに応じた個別の補強工法の提案・開発が必要となる。近年、このような背景から種々の既設基礎の耐震補強工法(例えば文献2),3),4),5))が提案・研究されている。

### 1.2 シートパイルによる既設杭基礎補強工法の提案

本研究では、鉄道高架橋等の比較的中小規模(フーチン

グ幅で最大10m程度)の既設杭基礎を主な補強対象として、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鋼矢板(シートパイル、以下「SP」と略す)を打設し、既設フーチング上面に増しフーチングを打設してSPを既設橋脚と一体化する耐震補強工法を提案する。これは著者らが主に新設構造物を対象として施工性、経済性、環境調和性に優れた新しい基礎形式として研究、開発を進めてきた「シートパイル基礎」<sup>6)</sup>のコンセプトを、既設の杭基礎補強に適用したものである。

本提案工法と既往の補強工法との主な相違点は、地盤改良を伴わないことと、SPの根入れが比較的短く、既設杭の支持層には到達させないことである。その分大幅な

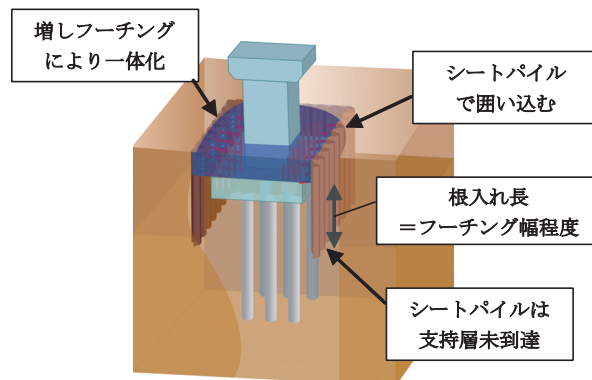


図1 既設杭基礎のシートパイルによる耐震補強工法の概要

\* 構造物技術研究部 (基礎・土構造)  
\*\* 株式会社大林組 (都市土木技術部)  
\*\*\* 株式会社大林組 (技術研究所)

特集：構造物技術

改良効果は望めない（特に鉛直支持力は向上しない）ものの、経済性・施工性に優れており、地盤条件が比較的良好な場合については、費用対効果に優れた補強工法になり得ると考えられる。

本報告では、提案工法の実用化に向けて実施した室内模型実験による補強効果の確認、および実際の補強事例を想定した3次元FEM解析とそれに基づく実務上の骨組み解析手法の提案について報告する。

2. 室内模型実験による補強効果の確認<sup>7)</sup>

杭基礎をSPで補強した場合の耐震補強効果を明らかにするため、約1/10スケールの模型基礎を用いた静的水平交番載荷実験および模型振動実験を実施した。試験パラメータとしてそれぞれSP補強の有無の2ケースを実施し、それらを比較することで補強効果を確認した。

2.1 静的水平交番載荷実験

静的水平交番載荷実験の概要を図2に示す。杭模型には根入れ長 $L=2730\text{mm}$ 、断面形状 $100\text{mm} \times 50\text{mm}$ の角型鋼管を用い、これを載荷方向に2本直列（杭中心間隔 $270\text{mm}$ ）に配置し、1辺 $500\text{mm}$ の鋼製フーチングに結合して群杭基礎を模擬した。地盤との相対剛性を表す指標となる杭の特性値 $\beta L$ については、一般に杭の設計で先端の回転拘束の影響を無視できるとされる $\beta L > 2.5$ を満足している。模型SPは、板厚 $1\text{mm}$ の鋼板に実際のSPと同様の凹凸加工を施した模型（図3）を用い、根入れ長はフーチング幅と同程度の $L=480\text{mm}$ とした。SPの特性値 $\beta L$ を比較すると、実物のIV型鋼矢板がN値10の砂地盤中に $10\text{m}$ 根入れされた場合が $\beta L=2.8$ であるのに対して、杭模型と同様に算定した模型SPは $\beta L=2.7$ と同程度となっている。SPは、隅角部に $10\text{mm}$ 程度の隙間を確保した位置で鋼製フーチングの側面にネジで固定した。模型地盤は乾燥珪砂6号を下端から $600\text{mm}$ までを支持層として相対密度 $D_r=90\%$ 、それより浅い範囲を $D_r=60\%$ となるように作製した。

載荷は図2に示すように、死荷重を想定した一定の鉛直荷重を作用させながら、地震時の上部工（主に桁）の慣性力に相当する水平荷重（および載荷高さに応じたモーメント）を正負交番に作用させた。想定する死荷重は、模型杭の極限支持力の推定値に対して、常時の安全率3相当を確保できる値として、杭2本分で $40\text{kN}$ （載荷治具の自重を含む）に設定した。水平載荷は、変位制御により、正負交番の折り返し変位を漸増させた。

基礎全体の荷重変位特性として、載荷水平荷重 $P$ と載荷点（高さ $700\text{mm}$ ）での水平変位 $\delta$ の関係を図4に示す。SP補強時の方が一回り大きなループとなっており、剛性および抵抗力の上昇が期待できることがわかる。ただ

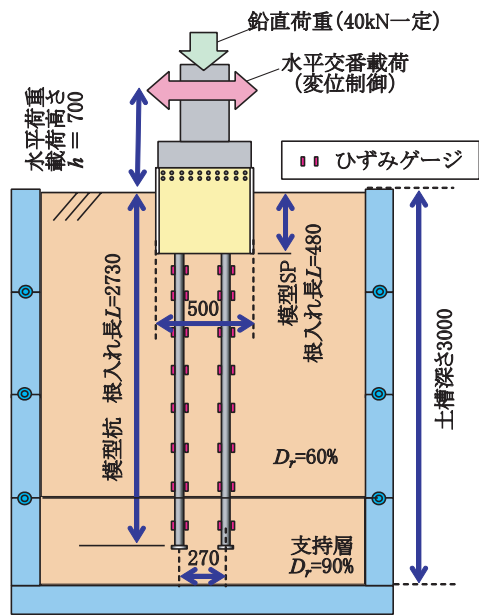


図2 静的水平交番載荷実験の概要（単位：mm）

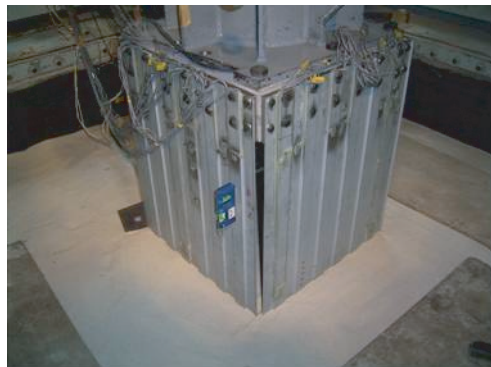


図3 シートパイル模型

し、いずれも載荷点水平変位 $10\text{mm}$ 付近で杭の軸方向の地盤抵抗の降伏（引抜きおよび押し込み）に伴う剛性の低下が生じたことから、SP補強によって鉛直地盤抵抗自体を改善する効果は小さいと考えられる。

杭体のひずみゲージから計測した杭頭せん断力（杭頭と深さ $200\text{mm}$ での曲げモーメントの差分から算出）とフーチング中心位置での水平変位 $\delta_f$ との関係を図5に太線（緑）で示す。また、杭頭せん断力が基礎全体の水平抵抗力のうちどの程度を負担しているかを比較するため、図中に細線（黒、赤）で載荷水平荷重 $P$ とフーチング水平変位 $\delta_f$ の関係を併記している。無補強時には、杭のみが抵抗要素であるため杭頭せん断力と載荷水平荷重は理論上は一致するはずであるが、せん断力算定等に起因した若干の誤差がみられる。SP補強時では杭頭せん断力が概ね半減していることがわかる。

図6は水平荷重による載荷モーメント $M'=5.5\text{kNm}$ 時の杭体の曲げモーメント分布である。ここで $M'$ は軸力によるモーメント成分を補正した。SP補強により杭体の曲げモーメントが低減されているほか、全体として曲

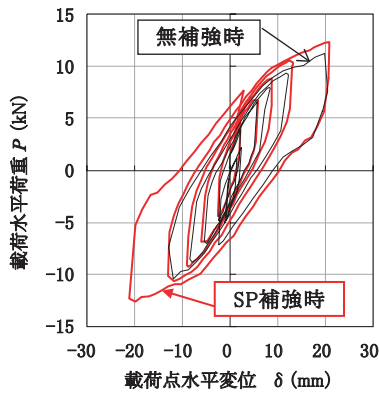


図4 荷重点での水平荷重と水平変位の関係

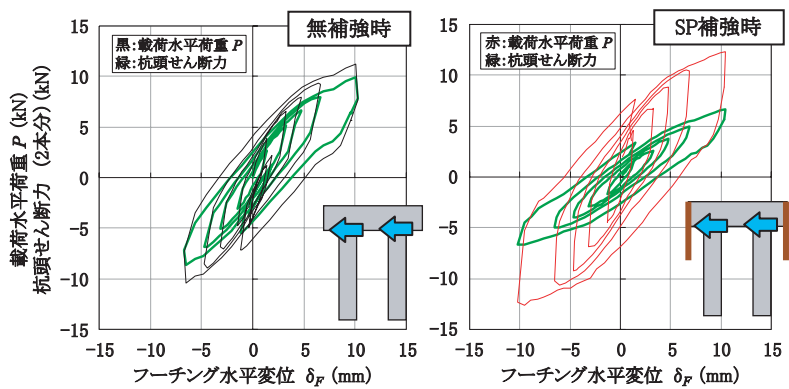


図5 杭頭せん断力とフーチング水平変位の関係

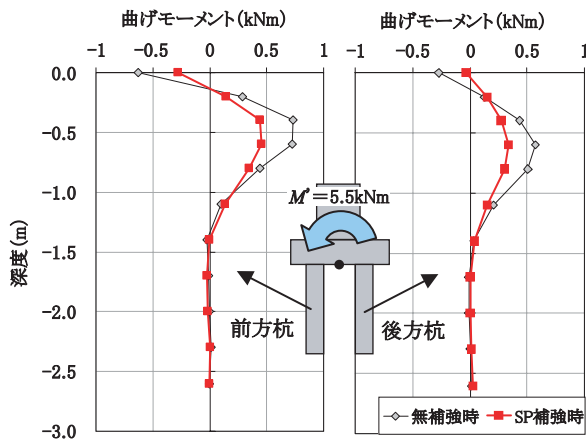


図6 杭体の曲げモーメント分布 ( $M=5.5\text{kNm}$  時)

げモーメントの勾配が小さくなっており、せん断力も低減されていることがわかる。また、その効果はSPの根入れ長500mmよりも深い区間まで表れている。

## 2.2 模型振動実験

前節の静的水平交番荷重実験を受けて、大型振動台を用いた振動実験を実施した。この実験の目的は、静的水平交番荷重実験で確認されたSP補強の効果が、地盤が振動する振動実験下においても表れることを検証することである。

図7に実験模型の概要を示す。大型せん断土槽(長さ・深さ2.5m、幅2m、鋼製枠+リニアベアリング構造)内に乾燥砂地盤を作製し、その内部に、縮尺1/10の杭基礎模型を設置した。模型杭は長さ $L=2100\text{mm}$ (根入れ長 $2000\text{mm}$ 、 $\beta L > 2.5$ を満足)、断面 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ の角型鋼管4本で構成され、杭間隔 $270\text{mm}$ として1辺 $510\text{mm}$ の鋼製フーチングに結合した。振動実験時のねじれモードを抑制する目的から、前節の静的水平交番荷重実験とは杭の構成を変えた(2本→4本)が、全体の曲げ剛性はほぼ等価である。模型SPの根入れ長は $480\text{mm}$ であり、静的水平交番荷重実験で使用した模型を転用した。模型地盤は乾燥珪砂6号により模型地盤下端から $1550\text{mm}$ を相対密度 $D_r=90\%$ 、それ以上を $D_r=60\%$ となるように作製した。フーチング上には上部工の慣性力を

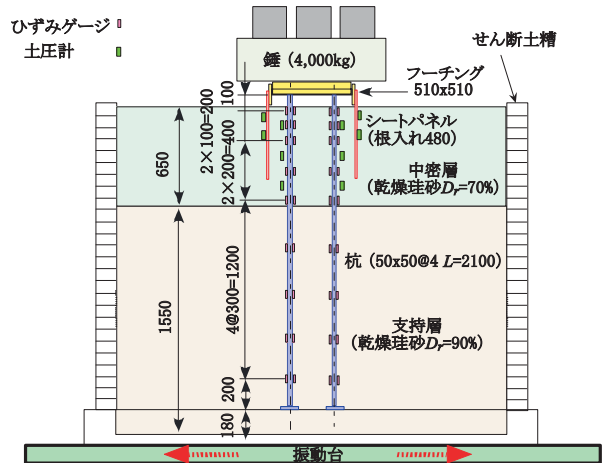


図7 振動実験の模型諸元(単位: mm)

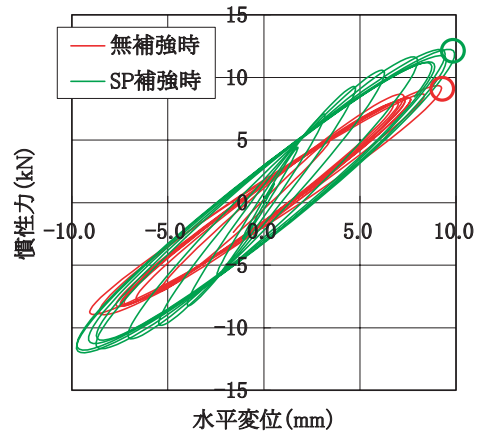


図8 構造物-地盤系の慣性力と水平変位関係

作用させるための鋼製錘(質量 $4000\text{kg}$ )を設置したが、この質量も静的水平交番荷重試験で基礎に作用させた死荷重と同一条件とした。振動実験は常時微動計測により求めた地盤および構造物-地盤系の固有振動数( $f_g=16\text{Hz}$ 、 $V_s=140\text{m/s}$ 相当)よりも低い振動数( $3\text{Hz}$ および $5\text{Hz}$ )に設定した正弦波を用い、振動台の加振加速度レベルを数段階に分けたステージ加振とした。

図8に正弦波 $3\text{Hz}$ 、 $100\text{gal}$ 加振における、慣性力とフーチング水平変位の関係を整理した。無補強時に比べてSP補強時は慣性力と水平変位関係の各ループの勾配が大き

特集：構造物技術

くなっているとともに、慣性力の最大値が増加していることがわかる。履歴ループの水平変位9mmでの水平せん断剛性を履歴ループの割線勾配から算定すると、無補強時の1.0kN/mmに対し、SP補強時では1.2kN/mmと2割の向上となった。一方、過渡応答時のループから、両者とも水平変位の増大にしたがい構造物-地盤系の等価水平せん断剛性が低減していく傾向が認められるが、変位が大きな領域ではSP補強時のほうが繰返しによる履歴面積が大きくなり、吸収エネルギーが大きいことがわかった。

図9に正弦波3Hz、100gal加振のフーチング水平変位の最大時(図8中の○点)での杭の曲げモーメント分布を示す。いずれも最大値は加振方向前方杭が大きく、後方杭が小さい。なお、図6に示した静的実験でのモーメント分布に比べてSP補強の有無でのモーメントの差が小さいが、これは図6は载荷モーメントが同一の時点で比較しているのに対して、振動実験における図9では最大変位時刻での分布であり、SP補強時の方が大きな慣性力が作用していることを考慮すれば、SP補強によって既設杭の断面力を低減する効果が発揮された結果であると解釈できる。

表1に、図9に示した曲げモーメント分布から杭頭せん断力(B)を算定し、同じ時刻での作用せん断力(錘の慣性力(A))と比較した。無補強時では杭頭せん断力と作用せん断力がほぼ同等であり、杭の曲げモーメント分布から杭頭せん断力を比較的高い精度で算定できることを示している。SP補強時では構造物の応答が大きくなったため、作用せん断力が増加している。このとき杭頭せん断力は作用せん断力に比べて半分程度(杭頭せん断力の大きさは無補強時の83%)となっており、SP補強により杭頭せん断力分担が低減されたことがわかる。ま

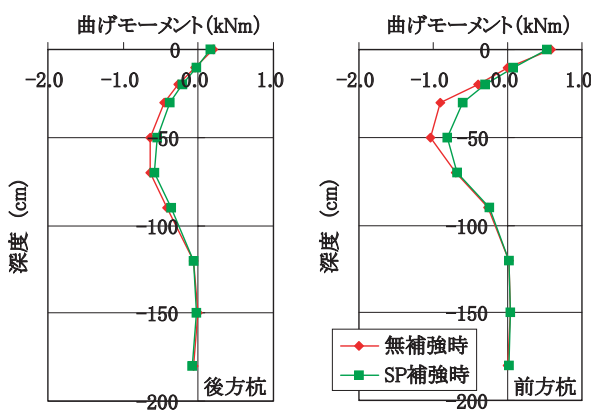


図9 模型杭の曲げモーメント分布

表1 杭及びSPのせん断力分担内訳

	無補強時	SP補強時
鋼製錘加速度 (gal)	227	313
鋼製錘慣性力 (kN) : A	9.1	12.5
杭頭せん断力 (kN) : B	8.1	6.8
前背面SPせん断力 (kN)	-	0.5
B / A (%)	89	54

た、この時の加振方向前背面SPせん断力(SPの曲げひずみ分布から算定したSP-フーチング接続部のせん断力)は全体の5%程度を分担しているに過ぎない。よって、残りのせん断力負担は主に側面SPの水平周面抵抗によるものと考えられる。

2.3 室内模型実験のまとめ

室内模型実験によりSPによる杭基礎の耐震補強効果として大きく以下の2点が期待できることが確認できた。

- ① 基礎の抵抗特性が上昇する
- ② 既設杭に発生する断面力が低減される

このような効果が期待できるのは、SPを介した水平地盤抵抗が発現されることによって杭に作用する地盤反力が低減されることであるためと考えられる。実用化に向けた設計手法を構築する上では、SPで囲まれた範囲の既設杭の地盤抵抗の低減を考慮する必要がある。

3. 設計手法の提案

3.1 設計手法の考え方

既設杭基礎のSPによる耐震補強工法の設計手法として、既往の杭基礎の設計手法とシートパイル基礎(新設構造物を対象として直接基礎とSPを組合せた場合)の設計手法<sup>8)</sup>を組合せ、図10に示すような骨組み解析モデルを提案する。

各部材のモデル化とSPに設定する地盤ばねのモデル化は、既往の設計モデルと同様の扱いが可能である。しかし、SPで囲まれた範囲の既設杭の地盤ばねについては、補強前の状況に比べて何らかの低減が必要となる。そこで、以下では3次元FEM解析によってSP補強による地盤反力の低減状況を明らかにし、その結果に基づき、実用的な地盤ばねの低減方法を提案する。

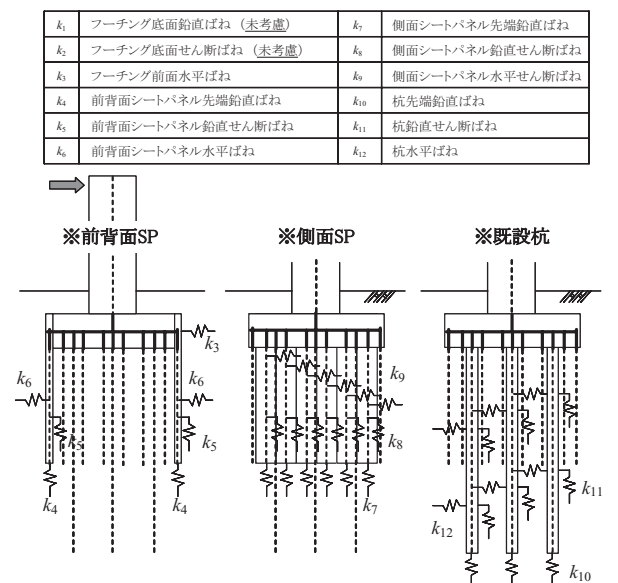


図10 提案する骨組み解析モデル

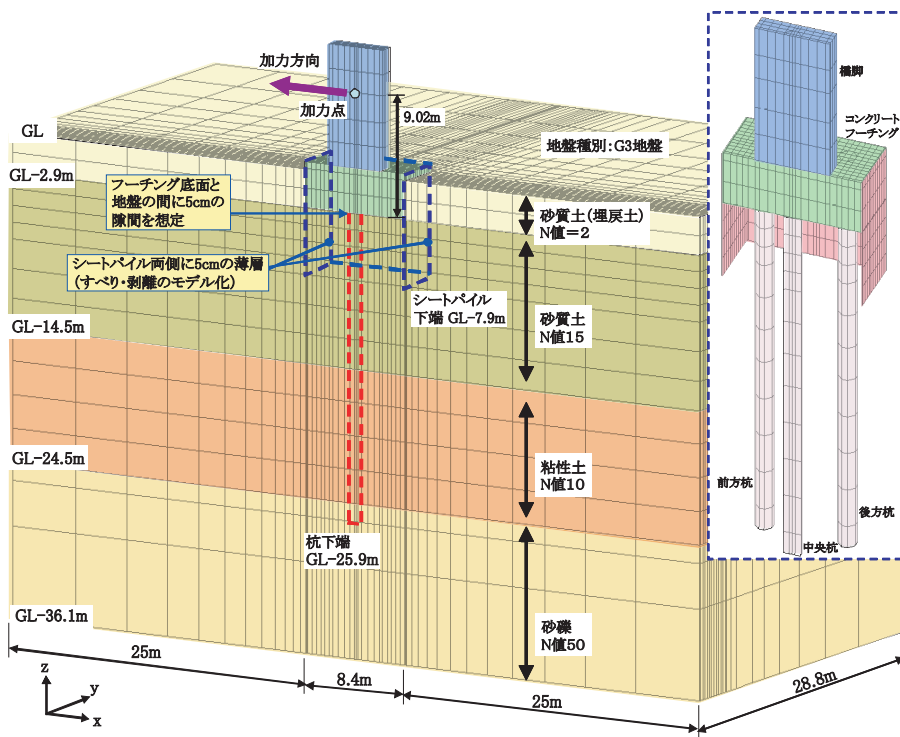


図11 3次元FEM解析モデル

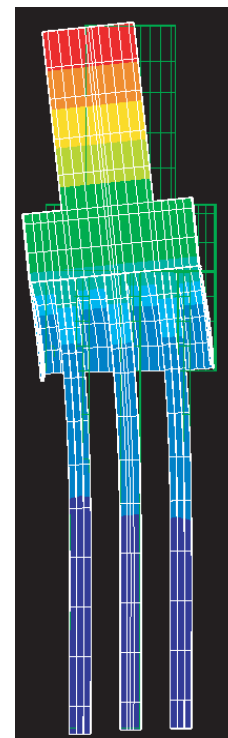


図12 変形図 (SP補強時)

### 3.2 3次元FEM解析による検討<sup>9)</sup>

解析対象は図11に示す杭径 $D_p=1\text{m}$ 、杭長 $L_p=23\text{m}$ の5本杭の群杭基礎を対象とし、SPのフーチング底面からの根入れ長は $L_s=5\text{m}$ である。杭と地盤の相対剛性を表す $\beta L$ は、既設杭が $\beta_p L_p=6.2$ 、SPが $\beta_s L_s=2.9$ となっている。有限要素モデルは、各部材は線形弾性体 (SHELL要素)、地盤のみをDrucker-Pragerモデルによる弾完全塑性体としてモデル化した。载荷は地震時の慣性力を模擬した水平荷重を橋脚および桁の重心位置に作用させ、水平震度1.0相当まで漸増载荷した。

最大荷重時 (水平震度1.0相当) の変形図を図12に示す。SPで囲まれた領域が、杭と一体となって変位していることがわかる。ただし、SPの先端付近での水平変位は小さくなっている。

最大荷重時の前方杭 (図12の左側の杭) に作用する地盤反力 (杭と地盤の境界節点の水平方向節点力を合計して算出) の深度分布を図13に示す。無補強時の分布は杭頭からGL-5m程度まで線形的に増加しており、通常の弾塑性型地盤ばねモデルの上限値である有効抵抗土圧<sup>10)</sup> (図13中の赤線) に到達しているといえる。一方、SP補強時の地盤反力分布については、浅い位置で無補強時よりも小さい値となっているが、SP先端付近まで深度に応じて線形的に増加している。最大値はSPの先端付近であるが、それでも無補強時の最大値と同程度となっている。

次に各杭の杭頭の地盤反力の低下率 $\alpha_{p0}$  (SP補強時の地盤反力÷無補強時の地盤反力) とSPと杭との距離 $X$ の関係を整理した結果を図14に示す。前面SPに近づくほ

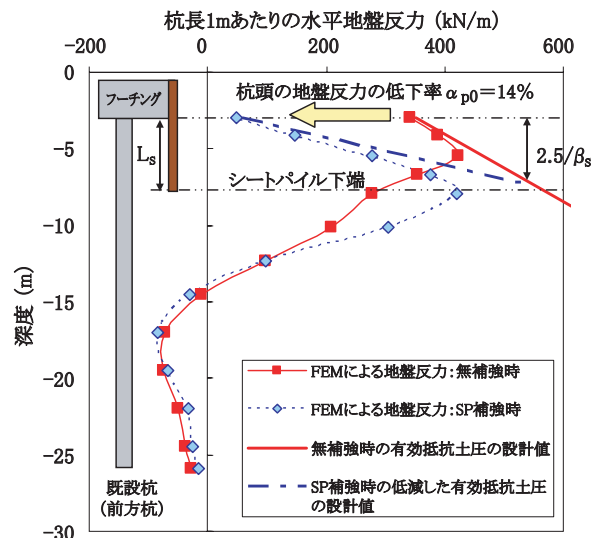


図13 水平地盤反力の深度分布

ど地盤反力が低下しており、図中の実線のようにSPと杭との距離 $X$ と線形的な関係を示し、杭径の10倍程度離れたとSPの影響による地盤反力の低下は無視できるものと想定される。

### 3.3 杭の水平地盤ばねの補正方法の提案

前節の3次元FEM解析の結果から、SPで囲まれた地盤は浅い位置ほど杭とSPが一体的に変位して杭に作用する地盤反力が低減され、深い位置でSPの水平変位が収束するにつれて無補強時と同様の地盤反力が発揮されることが確認できた。このような挙動を弾塑性型の地盤ばねを用いた設計実務用の骨組み解析モデル上で考慮す

特集：構造物技術

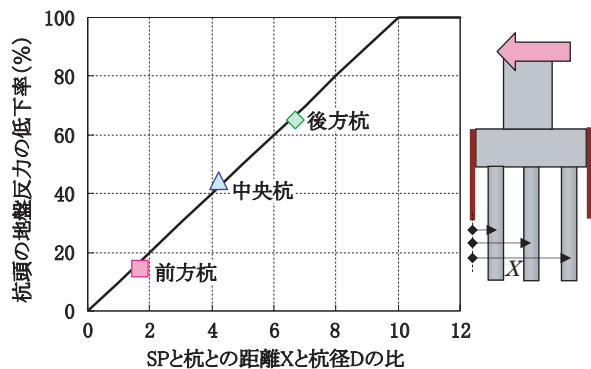


図14 杭頭の地盤反力の低下率とシートパイルと杭との距離 X の関係

るには、水平地盤ばねの上限値である有効抵抗土圧<sup>10)</sup>を低減することで表現できると考えられる。この方法として、以下の有効抵抗土圧低減係数  $\alpha_p$  を提案する。

a) 杭頭部における有効抵抗土圧低減係数

杭頭部における低減係数  $\alpha_{p0}$  は、杭中心から荷重前面側にある SP までの距離 X と杭径 D の比に応じて、図 14 中の直線を表す以下の式 (1) で算定する。

$$\alpha_{p0} = 0.1(X/D) \leq 1.0 \quad (1)$$

b) 深度方向の低減範囲

有効抵抗土圧の低減を行う長さ  $L_{s0}$  は、フーチング下面から SP の水平変位が概ね収束する深度までと考え、以下の式 (2) で算定する。

$$L_{s0} = \min \left( L_s, \frac{2.5}{\beta_s} \right) \quad (2)$$

$$\beta_s = \sqrt[4]{k_h B_s / 4E_s I_s} \quad (3)$$

ここで、 $L_s$ : SP のフーチング下面からの根入れ長さ、 $\beta_s$ : SP の特性値、 $k_h$ : 水平地盤反力係数、 $B_s$ : SP の幅、 $E_s I_s$ : SP の曲げ剛性である。

c) 深度 z における有効抵抗土圧低減係数

有効抵抗土圧の深度方向の低減係数は、杭頭部から  $L_{s0}$  の範囲で線形に低減するものとして、杭頭からの深度 z に対して以下の式 (4) で算定する。

$$\alpha_p(z) = \frac{z + \alpha_{p0}(L_{s0} - z)}{L_{s0}} \leq 1.0 \quad (4)$$

無補強時の有効抵抗土圧 (赤線) に式 (4) の有効抵抗土圧低減係数  $\alpha_p$  を乗じて低減した値を図 13 中に青線で示す。3次元 FEM 解析による SP 補強時の既設杭の地盤反力分布を概ね適切に表現できていることがわかる。

4. まとめ

本研究では、シートパイル補強によって既設杭の地盤反力が低減されることにより杭の断面力低減効果が期待でき

ることを室内模型実験および3次元 FEM 解析によって明らかにした。また、その設計実務上の取扱い方法として、骨組み解析における有効抵抗土圧の低減方法を提案した。

このような抵抗メカニズムから、本提案工法によって効果的に (経済的に) 補強できるのは、主に以下の3つの条件を満足する杭基礎であると考えられる。

- ・ 耐震照査の結果、杭頭付近の断面耐力が不足すると判定されるケース
- ・ 地震時も含めて杭の支持力に余裕があるケース
- ・ 比較的浅い位置の地盤条件が比較的良好な (軟弱粘性土や液状化層でない) ケース

これらは耐震基準改訂以前に建設された構造物においては必ずしも特殊な条件ではなく、本提案工法の補強対象となる事例は多数存在するものと考えられる。その一方で、上記の条件を満足しない場合には、地盤改良を併用するなど、その他の補強工法について検討する必要がある。

今後は実務設計を想定した試算を行い、既設基礎の耐震補強を想定した設計マニュアルの整備を進める予定である。

文 献

- 1) 土木学会阪神・淡路大震災対応技術特別委員会: 土木構造物の耐震基準等に関する提言「第二次提言」, 土木学会, 1996
- 2) 岸上崇裕, 齊藤悦郎, 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
- 3) 磯部公一, 木村亮, 吉澤幸仁, 河野謙治, 原田典佳・榎野健: 鋼管矢板基礎増設による既設橋ケーソン基礎の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集 C, Vol. 62, No. 1, pp. 191-200, 2006
- 4) 深田久, 加藤康司, 青柳守, 大矢勉, 塩井幸武: 固化改良を併用した軟弱地盤上の既存橋梁基礎の補強に関する研究, 第 50 回地盤工学シンポジウム, pp. 319-326, 2005
- 5) 足立有史, 浦野和彦, 竹之下朋章, 丹澤宣彦, 河邑眞: 地盤固化工法を用いた杭基礎の耐震補強工法の実大実験, 土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 3, pp. 752-762, 2007
- 6) 神田政幸, 村田修, 西岡英俊, Pongsakorn Punrattanasin, 日下部治: シートパイルとフーチングを組み合わせたシートパイル基礎の提案, 土と基礎, Vol. 51, No. 11, pp. 8-10, 2003
- 7) 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 回地盤工学シンポジウム論文集, 2009 (投稿中)
- 8) 鉄道総合技術研究所編: 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 2 版), 2006
- 9) 杉江茂彦, 山本忠久, 平尾淳一, 西岡英俊, 神田政幸, 西村昌宏: シートパイルによる杭基礎の耐震補強効果の3次元解析検証, 土木学会第 64 回年次学術講演会, III-106, pp. 211-212, 2009
- 10) 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, 丸善, 1999