

鋼矢板を用いた既設基礎の簡便な耐震補強工法

構造物技術研究部 基礎・土構造
研究室長 神田政幸

1. はじめに

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も耐震補強の必要性が指摘され、例えば橋脚の場合、橋脚躯体の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、橋脚躯体等の地上部分に比べて大規模な工事となるため、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。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。そこで、比較的中小規模の既設杭基礎を主な補強対象とし、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の増しフーチングを介してSPと既設杭基礎を一体化する耐震補強工法を提案した。

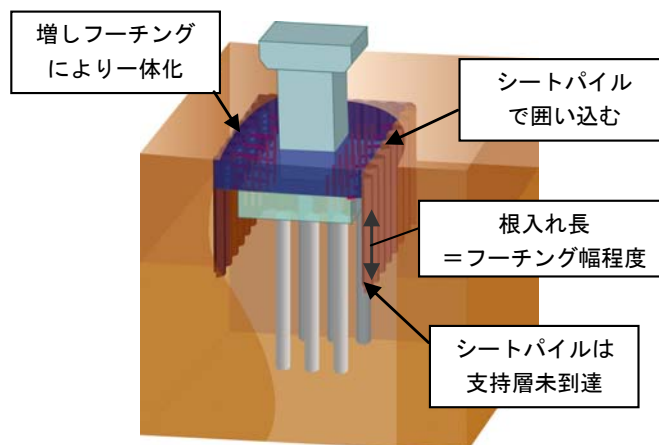


図1 シートパイルによる耐震補強工法の概要

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、および既設杭基礎の補強を想定した3次元FEM解析とそれに基づく骨組み解析手法について説明する。

2. 室内模型実験による補強効果の確認¹⁾

既設杭基礎を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载荷実験および模型振動実験を実施した。それぞれSP補強の有無の2ケースを選定した。

2.1 静的水平交番载荷実験

静的水平交番载荷実験では、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、地震時の上部工慣性力に相当する水平荷重を正負交番に作用させ、水平変位を漸増させた。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

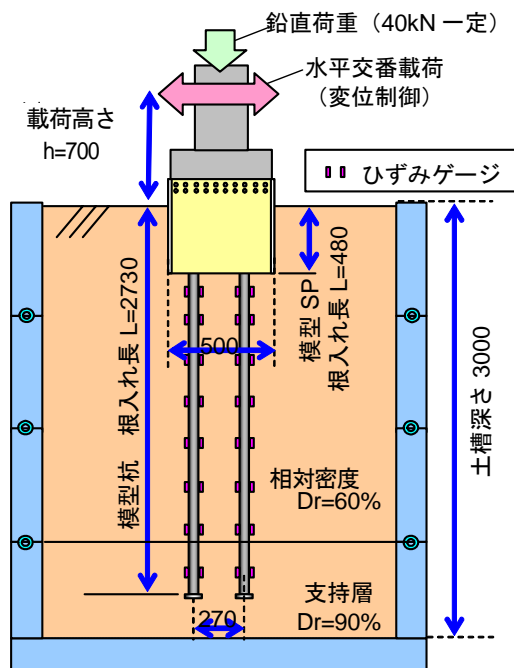


図2 静的水平交番载荷実験の概要（単位：mm）

て、杭2本分で40kNとした。杭体のひずみゲージから計測した杭頭せん断力とフーチング中心位置での水平変位との関係を図3に太線(緑線)で示す。ここでは、図中に細線で載荷水平荷重Pとフーチング水平変位の関係を併記している。SP補強後では、無補強時と比較して杭頭せん断力が概ね半減していることがわかる。図4は水平荷重による載荷モーメント M' =5.5kNm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ている。SP補強により杭体の曲げモーメントが低減されるほか、全体として曲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よりも深い領域まで表れている。

2.2 模型振動実験

SP補強効果を模型振動実験により確認することを目的として、大型土槽を用いた振動実験を実施した。模型振動実験では、図5に示すように杭断面積当たりの死荷重を静的水平載荷実験と同一とした4本杭模型に、3Hzの正弦波加振を与えた。

図6に正弦波3Hz、100gal加振のフーチング水平変位最大時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杭が大きく、後杭が小さい。また、SP補強後には、無補強時と比較して、曲げモーメント分布が小さくなっている。なお、図4に示した静的水平交番載荷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、図6では最大変位時刻での分布であり、SP補強後の方が大きな慣性力が作用しているためと考えられる。

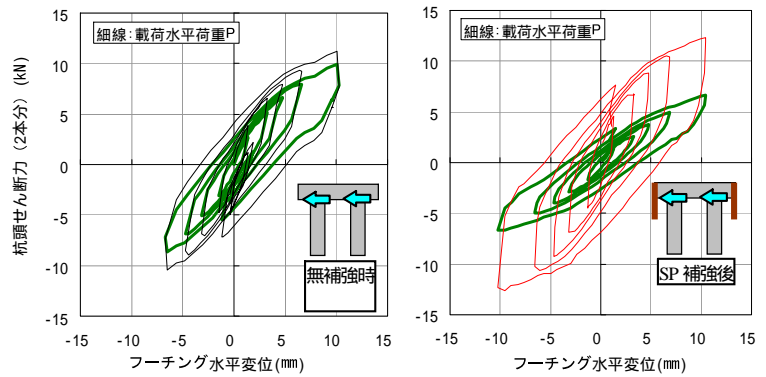


図3 杭頭せん断力とフーチング水平変位の関係

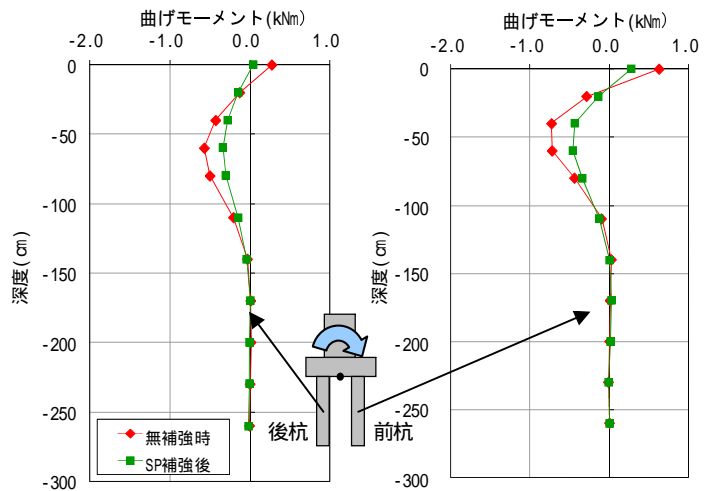


図4 杭体の曲げモーメント分布 ($M' = 5.5\text{kNm}$ 時)

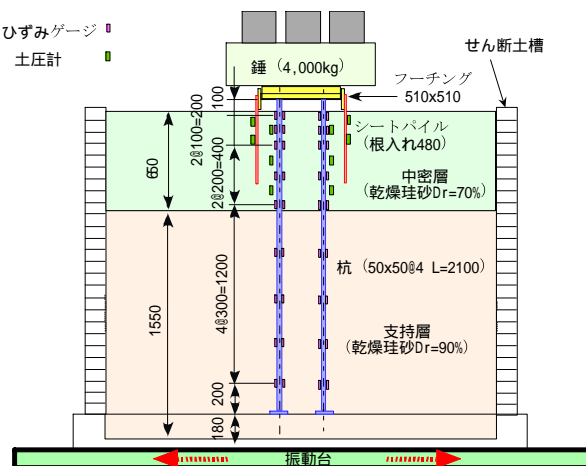


図5 振動実験の概要 (単位: mm)

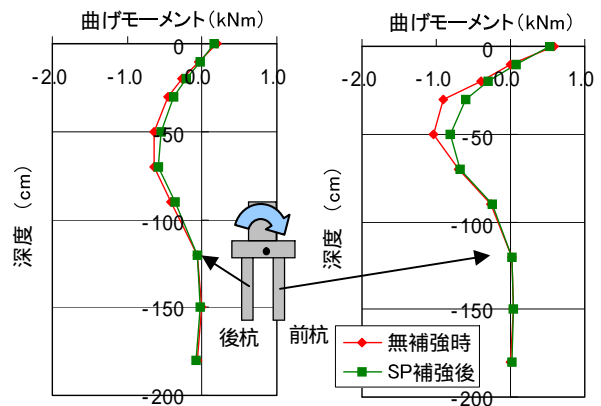


図6 杭体の曲げモーメント分布 (3Hz, 100gal 加振時)

3. 補強設計手法の提案

3.1 補強設計の考え方

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の設計手法²⁾を組合せ、図7に示すような骨組み解析モデルを提案する。しかし、SP で囲まれた既設杭の地盤ばねについては、無補強時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 解析により 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設定方法を提案した。

3.2 3次元FEM解析による検討³⁾

図8に示す解析対象は杭径 $D_p=1\text{m}$ 、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 L は、既設杭が $pL_p=6.2$ 、SP が $sL_s=2.9$ である。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。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 (7400kN) まで漸増载荷した。

最大荷重時の前杭に作用する地盤反力の深度分布を図9に示す。無補強時の水平地盤反力分布は杭頭から GL-5m 程度まで線形に増加しており、通常の弾塑性型の地盤ばねモデルの上限値である有効抵抗土圧 (図9中の赤太実線) に到達しているといえる。一方、SP 補強後の地盤反力分布については、浅い位置で無補強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 (SP 補強

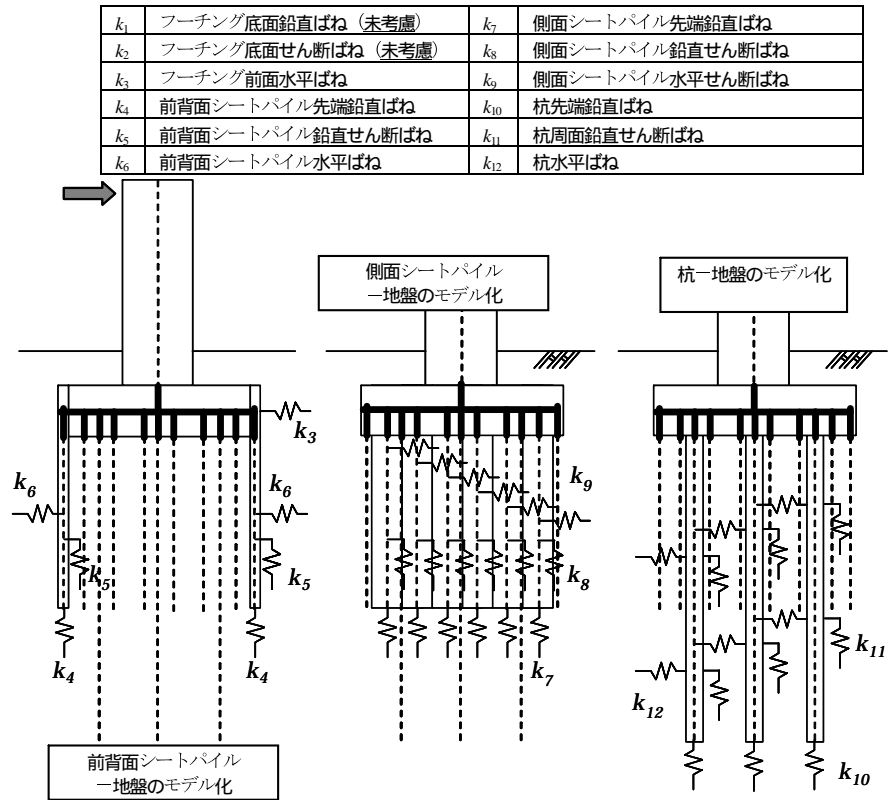


図7 提案する骨組み解析モデル

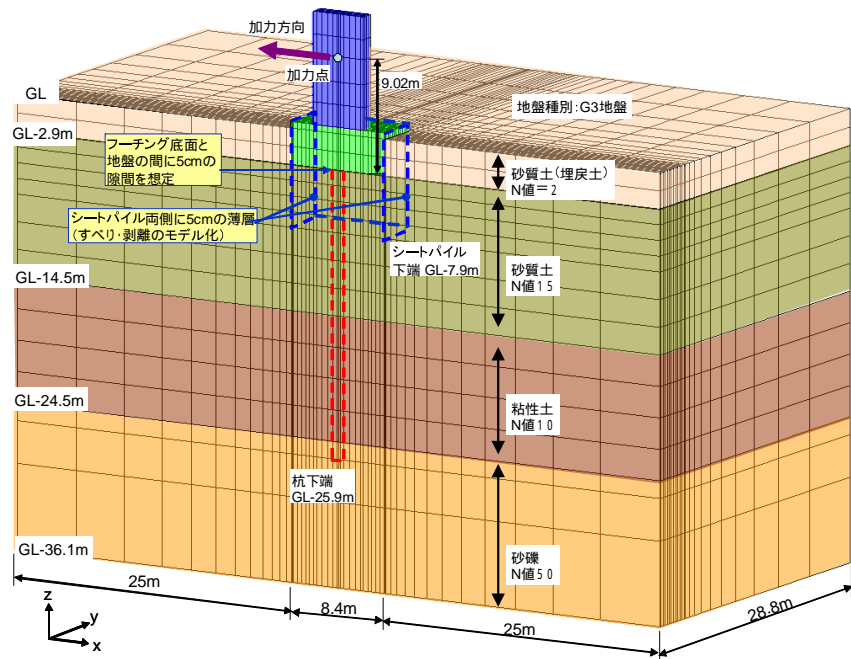


図8 杭基礎 (無補強時, SP 補強後) の3次元 FEM 解析

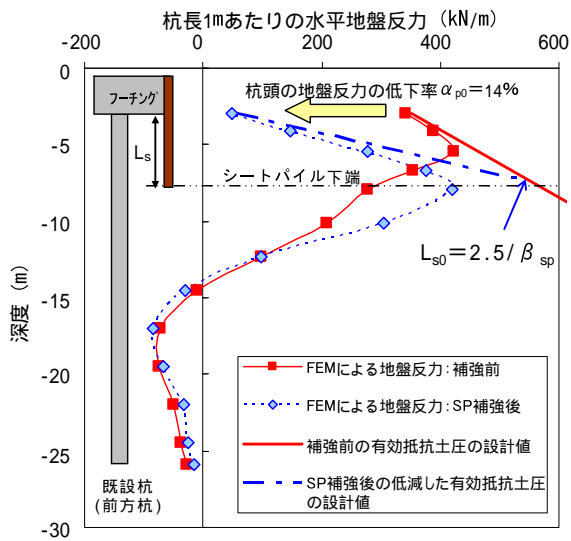


図9 杭の水平地盤反力分布 (7400kN 載荷時)

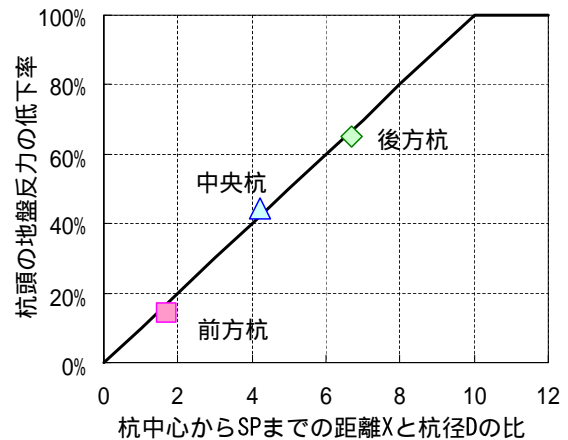


図10 杭頭の地盤反力の低下率とシートパイルと杭との距離Xの関係

後の地盤反力÷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10に示す。前面SPに近づくほ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と線形な関係を示し、杭径の10倍程度離れると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

以上の3次元FEM解析結果から、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るには、水平地盤ばねの上限値である有効抵抗土圧を低減することで表現できると考えられる。

4. おわりに

本報告では、既設杭のフーチング周りをSPで取り囲み、増しフーチングを介して既設杭基礎と一体化することで、既設杭の地盤反力が低減されることで杭の発生断面力を低下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、本提案工法が適用できる条件は、以下の3つの条件を満足する既設杭基礎であると考えられる。

- (1)地震時も含め、杭の支持力に余裕がある場合
- (2)比較的浅い位置(杭の $1/\beta$ 程度)の地盤条件が良好な場合
- (3)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場合

これらは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。なお、本研究は、大林組との共同研究の一部をまとめたものである。

参考文献

- 1)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.
- 2)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.
- 3)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, 2009.