

構造物基礎の耐震補強技術—シートパイル基礎補強—

Seismic Reinforcement Technology for Structural Foundation 'SHEET PILE REINFORCEMENT'

神 田 政 幸 (こうだ まさゆき)

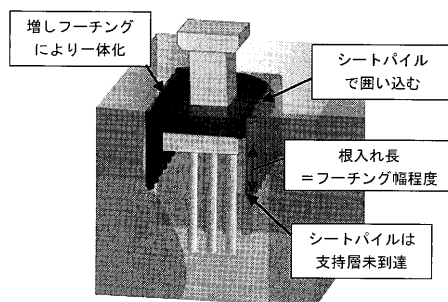
(公財) 鉄道総合技術研究所 基礎・土構造研究室 室長

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、新設の鉄道構造物に対して中規模地震（L1地震動）では無損傷であること、大規模地震（L2地震動）では復旧が速やかに行える程度の変形と損傷を許容することを基本とした2段階の耐震設計が義務づけられた。一方、既設構造物については、主として構造物の柱・橋脚のせん断破壊により甚大な被害につながったことから、柱・橋脚のせん断補強を目的とし、新幹線や都市内鉄道を中心に鋼板巻きなどによる耐震補強が行われてきた。最近では既設構造物の柱・橋脚だけでなく構造物基礎の補強に関しても着目されつつある。以下に想定される基礎の補強例を示す。

- (1) 既設構造物・駅施設のリニューアル工事に伴う基礎の補強
- (2) 既設鉄道の大規模線増工事や既設構造物直上工事に伴う基礎の補強
- (3) 既設構造物の柱・橋脚の補強に伴う基礎の補強
- (4) 列車走行安全性向上のための既設基礎の補強

既設構造物基礎の補強の特長として、営業線近傍で掘削工事を伴う場合が多いこと、桁下での空頭制限のある場所での施工となることなど、新設構造物基礎の施工以上に困難な課題が存在する。効率的に構造物基礎の耐震補強を進めるには、経済性及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



図—1 シートパイル基礎補強の概要

た。

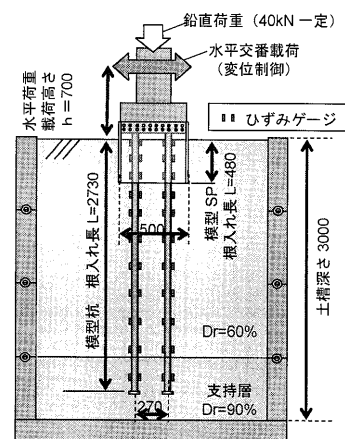
本報では、提案方法の実用化に向けて実施した模型実験による補強効果の確認、及び既設杭基礎の補強を想定した3次元FEM解析とそれに基づく骨組み解析手法について説明する。

2. 補強効果に関する模型実験¹⁾

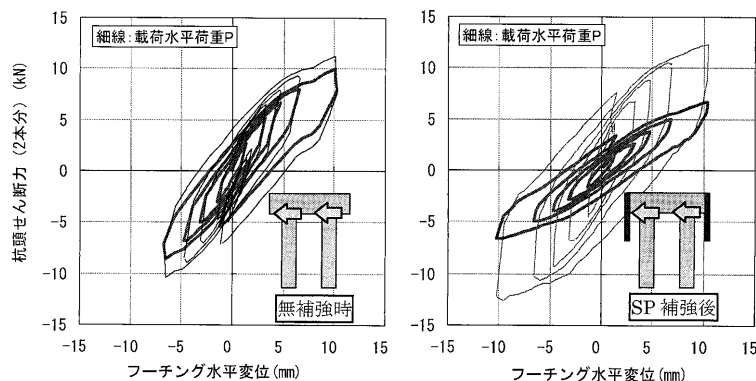
既設杭基礎をSPで補強した場合の耐震補強効果を明らかにするため、約1/10スケールの模型基礎を用いた静的水平交番載荷実験及び模型振動実験を実施した。

静的水平交番載荷実験では、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

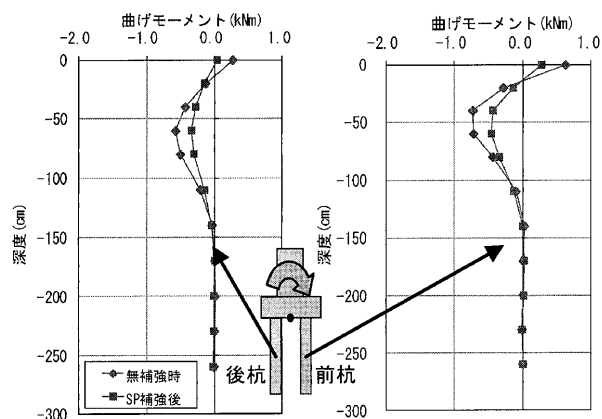
て、杭2本分で40kNとした。杭体のひずみゲージから計測した杭頭せん断力とフーチング中心位置での水平変位との関係を図—3に太線で示す。ここには、図中に細線で載荷水平荷重 P とフーチング水平変位の関係を併記している。SP補強後では、無補強時と比較して杭



図—2 静的水平交番載荷実験（単位：mm）



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)

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 $M' = 5.5 \text{ kNm}$ 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 500 mm よりも深い領域まで表れている。なお、同規模の模型振動実験についても同様の結果が得られた。

3. 補強設計手法の提案

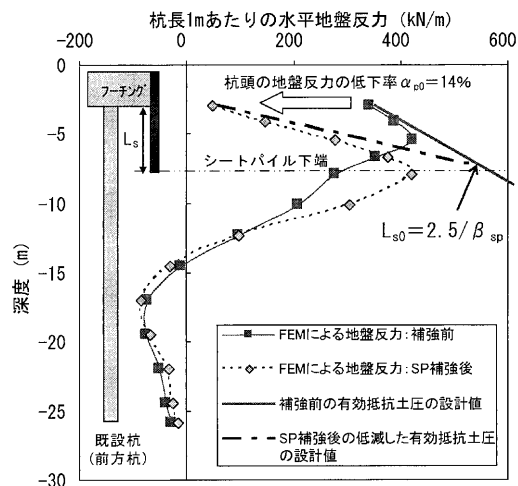
3.1 補強設計の考え方

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、骨組み解析モデルを提案した。しかし、SP で囲まれた既設杭の地盤抵抗については、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、実用的な地盤抵抗の設定方法を提案した。

3.2 3次元 FEM 解析による検討³⁾

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 βL は、既設杭が $\beta_p L_p = 6.2$ 、SP が $\beta_s L_s = 2.9$ 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及び桁の重心位置に作用させ、水平震度 1.0 相当 (7400 kN) 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—5に示す。無補強時の水平地盤反力分布は杭頭から $GL-5 \text{ m}$ 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—5中の太実線) 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

図—5 杭の水平地盤反力分布 (7400 kN 载荷時)

が、それでも無補強時の最大値と同程度となっている。一方、各杭の杭頭の地盤反力の低下率 (SP 補強後の地盤反力 $\div$ 無補強時の地盤反力) と SP と杭との距離 X の関係では、前面 SP に近づくほど地盤反力が低下し、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。なお、これらの基礎補強の設計の考え方は参考文献 4) にまとめた。

4. おわりに

シートパイル基礎補強が有効となる条件は、以下の三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、杭頭付近の杭部材の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、シートパイル基礎補強の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(株)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, 地盤工学ジャーナル, Vol. 5, No. 2, pp. 251~262, 2010.
- 2) (公財) 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, pp. 211~212, 2009.
- 4) (公財) 鉄道総合技術研究所・(株)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 (案) (第2版), 2011.

(原稿受理 2011.11.28)