

合理的でコストダウン可能な新しい基礎形式 シートパイル基礎工法

平尾淳一¹・辻奈津子¹・崎本純治¹ 神田政幸²・西岡英俊³・舘山勝²

¹正会員 工修 株式会社大林組 土木技術本部 技術第一部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

²正会員 工博 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 工修 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

開発した「シートパイル基礎」は、従来、土留め用に打設していた仮設のシートパイル（鋼矢板）を、フーチング部分と連結して本設構造に活用することで、構造物の水平抵抗力を増加させる工法である。打設したシートパイルがその内側にある地盤を拘束するとともに、シートパイルに接する周囲の摩擦力が加わることで耐震性能が向上する。種々の室内実験に加えて、今回、シートパイル基礎の実大試験体による水平載荷試験を行い、支持力特性を確認した。また、当試験結果を踏まえて、提案する設計手法の適用性についても報告する。なお、支持層が深い場合、従来の杭基礎また、当試験結果に比べて、当工法では、2～3割程度のコスト削減が可能となっている。

キーワード：基礎構造，鋼矢板，支持力，コストダウン，本体利用

1. 開発の背景

兵庫県南部地震以降、耐震設計が整備され新設構造物において、L1地震動およびL2地震動に対する安全性の確保が必要となった^{1), 2)}。また近年、都市環境の改善に着目した既設鉄道の連続立体交差化事業が数多く実施され、踏切を解消することで交通渋滞の緩和、鉄道および道路の安全性の向上が図られつつある。このような状況の中で、基礎構造物に要求される社会的ニーズとして、(1)基礎構造物の低コスト化、(2)狭隘区間での施工性の向上、そして(3)環境調和性（低騒音、低振動および産業廃棄物発生量の低減）が挙げられている。

また、基礎構造物の選定にかかわる地盤条件に関しては、臨海部では軟弱な粘性土層が厚く堆積しているため、杭基礎形式が多用されている。一方、内陸部などでは比較的 support 層が浅く、その上に標準貫入試験のN値が10～20程度と従来の support 層とするには不十分ながらもある程度の中間的な支持力が期待できる地盤（本報告ではそのような地盤を「中間支持地盤」と呼ぶ）が存在する地盤条件も比較的多く見受けられる。しかしながらそのような中間支持地盤であってもその支持力を有効利用することな

く、より深部の support 層に定着させる杭基礎形式が多く適用されているのが現状であり、より合理的な基礎形式の開発が望まれている。

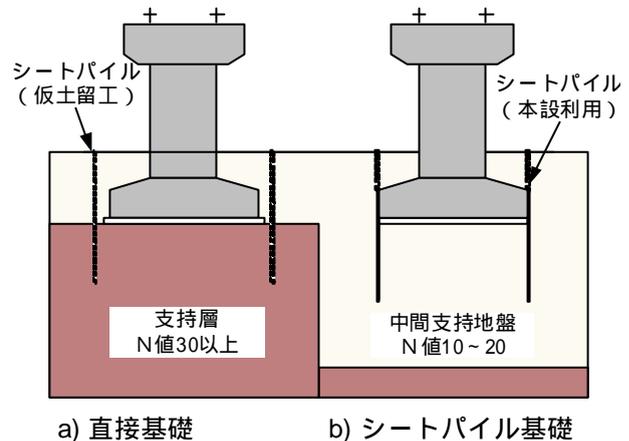


図-1 直接基礎とシートパイル基礎の概要・適用地盤

以上のような背景から、都市部の狭隘な箇所においても十分な「施工性」および「環境調和性」が望め、「中間支持地盤」の支持力を有効に利用して十分な耐震性を有する「低コスト」な基礎構造物を提供することが必要となってきている。

2. シートパイル基礎の提案

低コストで施工できる既存の基礎形式としては、直接基礎が挙げられるが、その適用範囲は浅い位置に良好な支持層（砂質土でN値30以上）が現れる地盤条件に限られている¹⁾（図-1 a）。一方、杭基礎は我が国のように厚い軟弱層が堆積する地盤条件では最も適用性の高い基礎形式であるが、一般的に施工機械の規模が大きく、小規模の基礎工事、狭隘区間や近接施工には不向きである。また掘削に伴う泥土、泥水や安定液は産業廃棄物となり環境調和性にも問題を残す。このように都市部の狭隘な箇所においても十分な「施工性」および「環境調和性」が望め、高い耐震性を有する基礎構造物は、直接基礎と杭基礎の両者の優位点を有しながら「低コスト化」を図ることが肝要と考えられる。以上述べた直接基礎および杭基礎の課題を克服した中間支持地盤に適用する合理的な基礎形式として、筆者らはシートパイル基礎を提案している^{3),5)-16)}。

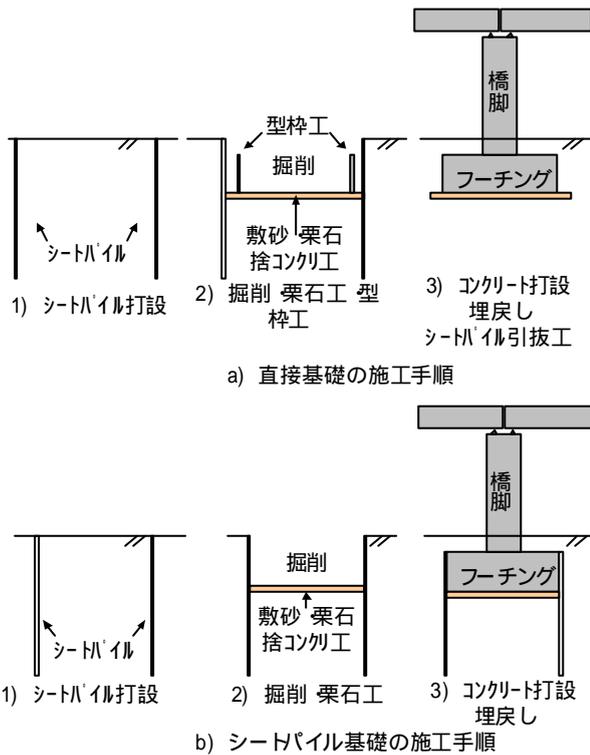


図-2 直接基礎とシートパイル基礎の施工手順

シートパイル基礎は図-1 b)に示すように直接基礎とその仮土留めに用いるシートパイル（鋼矢板）を組み合わせた基礎形式であり、図-2に示すようにフーチングの型枠工や仮土留め工の撤去が不要になるほか、掘削面積の削減により建設発生土の低減が可能になる。また、中間支持地盤において、直接基礎では基礎直下地盤の降伏による沈下、傾斜が問題と

なるが、シートパイル基礎は地盤の拘束効果やひずみの局所化の抑制効果により過大な沈下や傾斜を防ぐ特長を有する。

当基礎工法は、以後に記述する種々の実験による支持性能の検証、実験結果に対するシミュレーション解析、および設計法の確立により今後の展開が期待されている。

3. 各種実験の成果

(1) 室内模型実験

図-3に示すような試験体（フーチング幅100mm，載荷高さ230mm，シートパイル根入れ50～100mm）を製作し、水平交番載荷試験^{4),5),6),9),10)}を行った。その結果、図-4に示すように同規模の直接基礎に比べてシートパイル基礎の支持性能の向上が認められた。

一方、土槽側面からの地盤の変形の観測結果（写真-1参照）から、直接基礎では円弧すべり的な地盤の軌跡が見られるのに対して、シートパイル基礎ではシートパイルが地盤の水平方向の変形を抑制することも観測されている。なお、試験地盤には乾燥豊浦砂を用い、シートパイルはリン青銅板で模擬した。

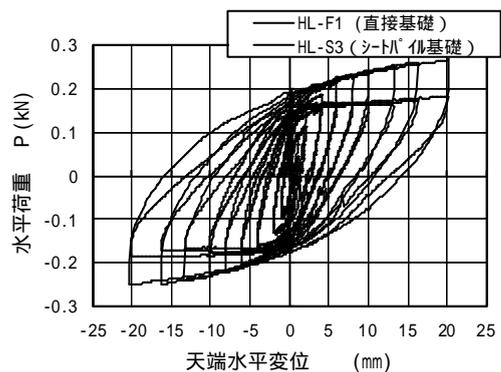
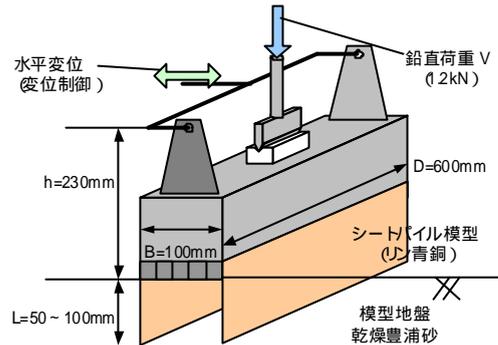


図-4 水平交番載荷実験の実験結果

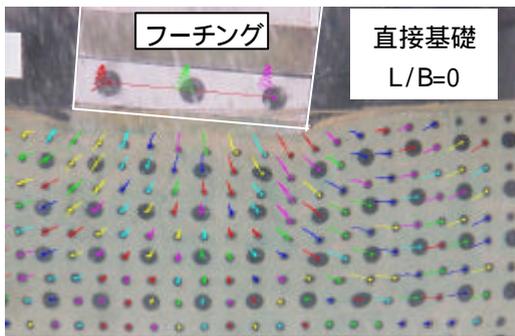


写真-1 載荷時の画像解析により求めた地盤変位（各標点の軌跡を表示）

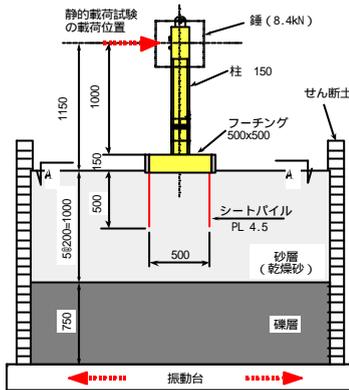
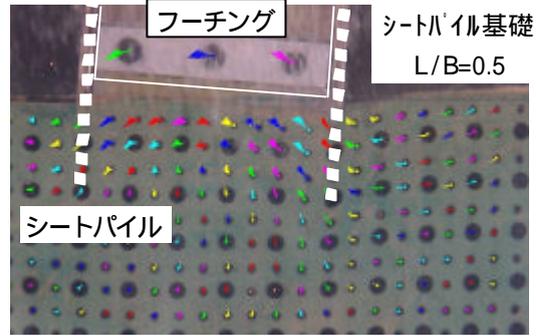


図-5 室内模型実験



写真-2 室内模型実験

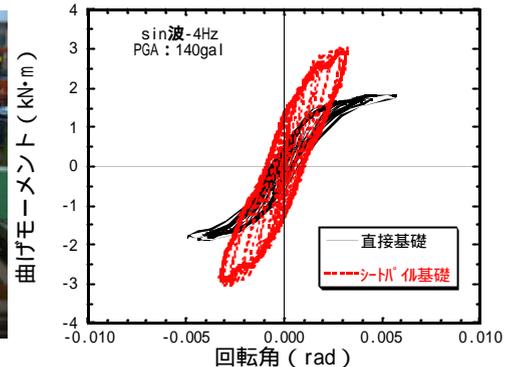
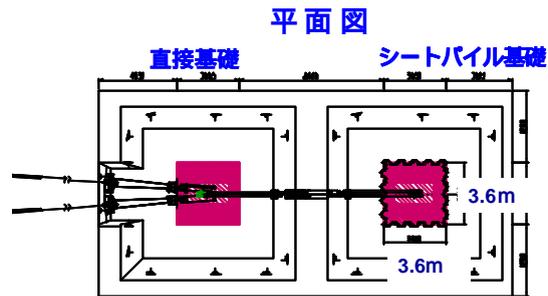


図-6 振動実験の結果

(2)室内模型実験

図-5に示すように試験体（フーチング幅500mm，載荷高さ1150mm，シートパイル根入れ500mm）を製作し，せん断土層を用いた振動実験^{7),8)}を行った（写真-2参照）。実験結果（図-6）から測定された基礎底面での曲げモーメントは，直接基礎に比べてシートパイル基礎の方が大きく，同一変形量での高い抵抗特性を有する特長が得られている。



(3)実大規模実験

試験体は鉄道高架橋（単線）を想定し，試験体サイズ（幅・奥行き 3.6m，高さ 6m）を設定して実大規模の静的一方水平載荷実験^{15),16)}を行った。

図-7に試験体の形状および配置を示す。直接基礎は，シートパイル基礎の支持力特性と比較する目的と，その載荷試験を行った後に，グラウンドアンカー2本で補強し，シートパイル基礎の反力体として使用する目的で製作した。また，地震時の高架橋においては，上部工位置で慣性力が発生し，基礎底面に水平変位と回転変位が生じる。その挙動を再現するため，載荷装置（油圧ジャッキ）は地上 6.5m の位置に設置した。

実験場所の土質構成は，表層 0.7m までは埋戻し土，その下に約 6m の関東ローム層，更に下層には砂混じりの締まった礫層がある。シートパイル基礎の鋼矢板先端は，上層の関東ローム層内に留めている。図-8に水平荷重と水平変位関係（P-曲線）

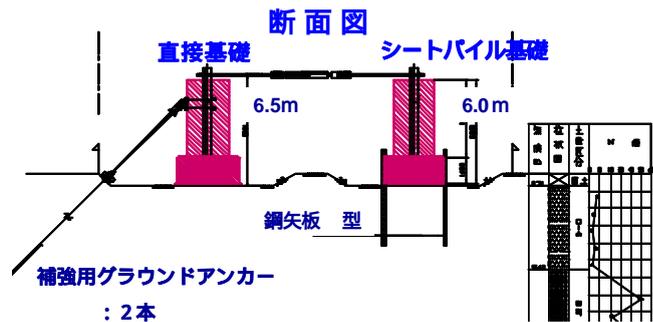


図-7 実大試験体の形状および配置

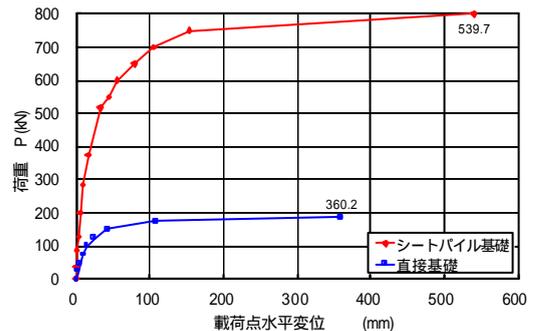


図-8 P - 曲線

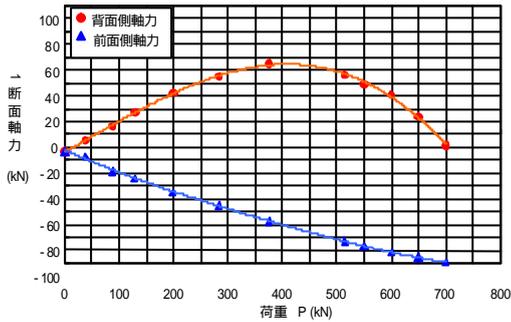


図-9 前背面のシートパイル頭部軸力



写真-4 実験状況

を示す。直接基礎は載荷荷重 187kN で、シートパイル基礎は載荷荷重 800kN で終局状態に至った。また、その際の載荷点位置における最大水平変位量は、直接基礎が 360mm、シートパイル基礎は 540mm であった。

図-9 に前背面シートパイルの頭部軸力の載荷中の変化を示す。載荷前に圧縮力を受けているシートパイルは載荷初期の段階では圧縮力と引張力がそれぞれ増加していく。その後、背面側シートパイルの頭部軸力は、載荷荷重約 400kN でピークを迎え、その後減少する。その時点では背面側シートパイル外側と地盤の間に空隙が生じていた。なお、載荷に伴い前面側シートパイルの先端軸力は増加し、600 kN 付近で降伏していた。図-10 は、載荷方向に平行な側面シートパイル頭部の軸力と載荷荷重を示したものである。前面側の側面シートパイルは圧縮力、背面側の側面シートパイルは引張力とフーチングの鉛直変位を反映した状況となっている。載荷荷重 515kN ~ 650kN 付近で側面シートパイルの引張力および圧縮力はそれぞれ最大値に達し、最大荷重 800kN では側面に沿って地盤のクラックが生じており、このことが側面シートパイルの分担荷重を減少させた原因と考えられる。

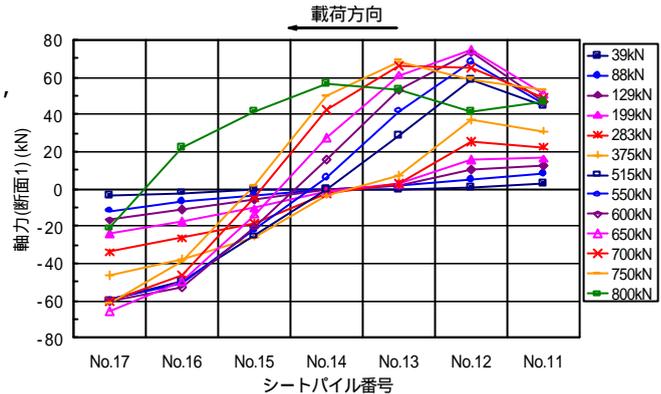


図-10 側面シートパイルの頭部軸力

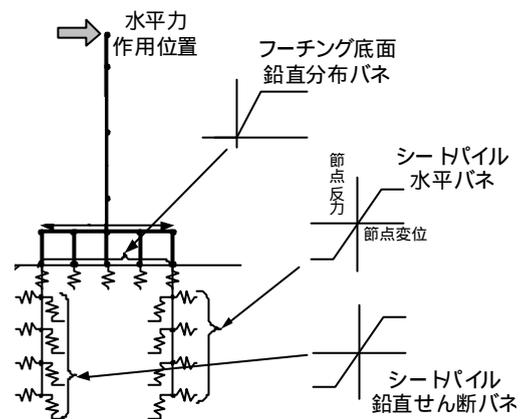


図-11 骨組み解析モデル

4. 設計手法 (シミュレーション)の概要

当基礎の設計に用いる解析モデルとして、バイリニア型の非線形地盤ばねを用いた二次元骨組みモデルを既に提案してきている^{3),9),11)} (図-11参照)。

各種バネの算定には、鉄道構造物等設計標準¹⁾の杭の水平地盤反力係数などの算定式から求めることが可能である。ここでは、今回の載荷試験条件 (関東ローム地盤、一方向載荷) に特有と考えられるシートパイルと地盤の剥離及びそれに伴う背面側シートパイルの軸力低下を反映した修正モデルを用いてシミュレーション解析を行った。シートパイルと地

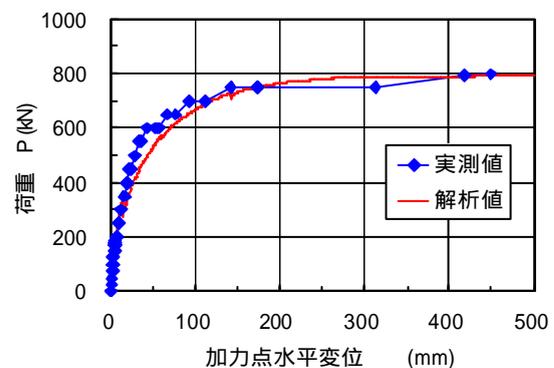


図-12 荷重変位関係

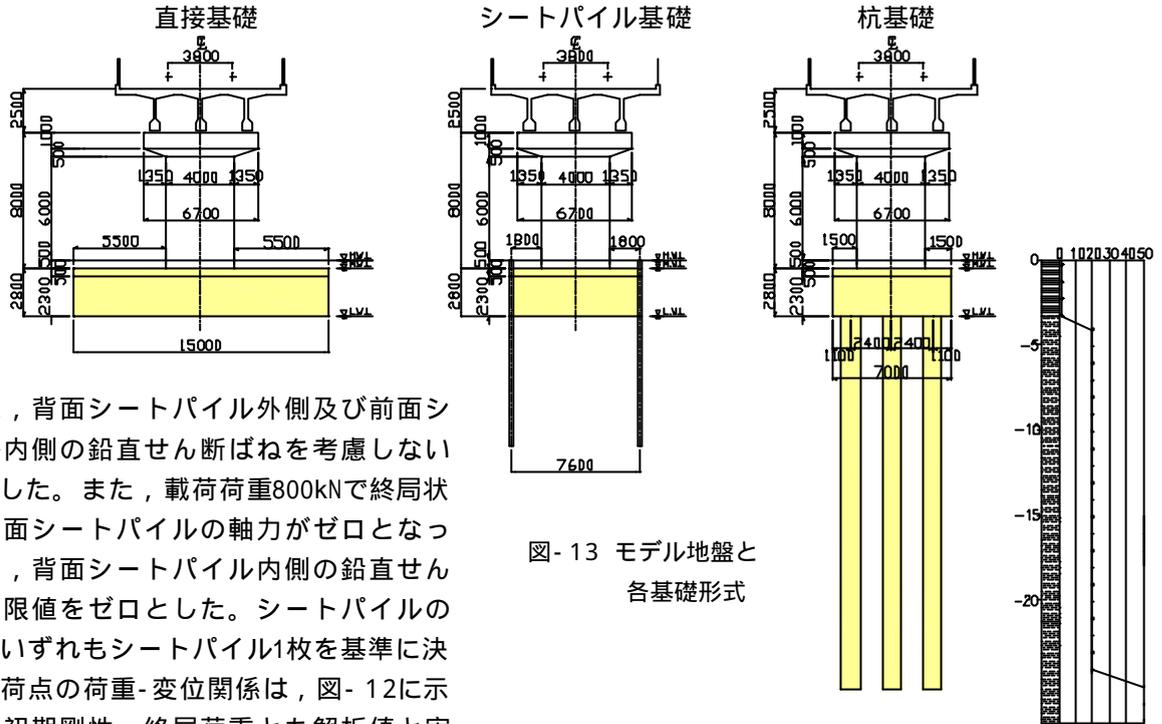


図-13 モデル地盤と各基礎形式

盤の剥離は、背面シートパイル外側及び前面シートパイル内側の鉛直せん断ばねを考慮しないことで表現した。また、載荷荷重800kNで終局状態に至り背面シートパイルの軸力がゼロとなったことから、背面シートパイル内側の鉛直せん断ばねの上限値をゼロとした。シートパイルのばね特性はいずれもシートパイル1枚を基準に決定した。載荷点の荷重-変位関係は、図-12に示すように、初期剛性、終局荷重とも解析値と実測値がよく一致していることがわかる。初期剛性は主にシートパイルの鉛直せん断ばねと水平ばねの設定に影響を受けると考えられ、今回の載荷試験に対する設定方法は概ね適切であると判断される。一方、終局荷重はシートパイルと地盤の剥離を考慮することによって表現できている。以上、二次元骨組モデルが実大規模の水平載荷実験の実測値に対して十分適用性があり、解析モデル（設計手法）として有効であることが確認された。

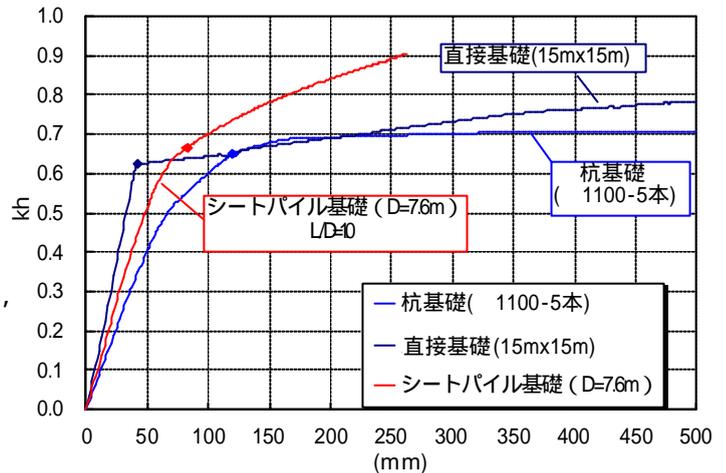


図-14 耐震性能の比較

5 コストスタディ

図-13のように深さ20mまで支持層がない地盤条件下での高架橋基礎の設計を、杭基礎、直接基礎、シートパイル基礎の各種の基礎構造で行った。通常の設計では杭基礎が選定されるような土質構成であることから、杭基礎による耐震性能をまず評価し、それと同等の支持性能を発揮できる基礎を目標に設計した(図-14)。参考までに、図中には設計されたシートパイル基礎と平面規模が同一な直接基礎の支持性能も示した。

さらに、それぞれの基礎形式の工費算出結果を、表-1および図-15に示す。表中の単位は、杭基礎の総工事費を1.00とした場合に、各基礎形式毎に工種別の工費算定を表記している。当該ケースの杭基礎では、工費の半分近くが杭基礎工となっている。一方、シートパイル基礎では、

表-1 工費比較

単位：杭基礎を1.00とした比率

ケース	土工費 (シートパイル基礎は埋殺し)	土工	フーチング工	杭基礎工	杭基礎との工費比較 (リバース)
直接基礎 (15mx15m)	0.25	0.50	1.05	0.00	1.81
杭基礎 (H-ス杭 L=2.2m)	0.13	0.16	0.25	0.47	1.00
シートパイル基礎 根入れ長7.6m	0.33	0.09	0.33	0.00	0.75

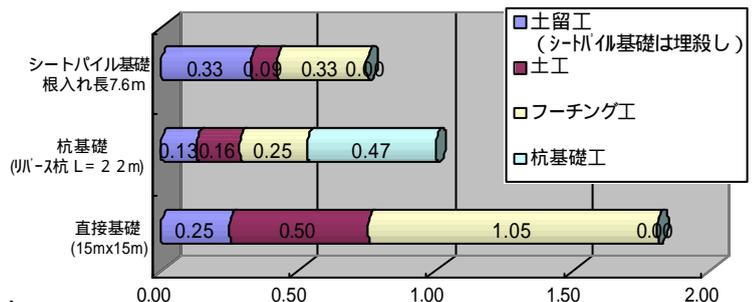


図-15 工費の比較

残置するシートパイルの費用によるコストアップのため工費の4割近くが土留工で占めているものの総工費では杭基礎に比べて21%のコストを縮減できる。すなわち、シートパイル残置によるコスト増加分を含めても杭施工費が不要になる当工法のメリットが大きいことがわかる。一方、異なる条件の地盤条件での試設計では33%のコストダウンとなった事例もあることから、当工法は2～3割のコストダウンが見込める工法と考えられる。

6.まとめ

実大規模の載荷試験と種々の室内実験の結果、「シートパイル基礎は高い水平支持力特性を保有していること」が実証されてきている。さらに、室内実験のシミュレーション結果と鉄道標準を基本にした設計手法^{1),2),3),9),11)}を用いた事前解析を用いると今回の実大試験結果を推定できたことから、提案した設計モデルは妥当であると判断できる。今後も検討を加え、より合理的でコストダウン可能な基礎工法の確立に努めたいと考えている。

参考文献

- 1) 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，2000.6.
- 2) 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，1999.10.
- 3) 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，地盤工学会誌 土と基礎，Vol.51，No.11，pp.8-10，2003.11.
- 4) 渡辺健治，館山勝：画像解析システムを用いた模型擁壁実験に関する考察，鉄道総研報告，Vol.17，No.3，pp.19～24，2003.3
- 5) 西岡英俊，神田政幸，村田修，崎本純治，伊藤政人：シートパイル基礎の支持力特性に関する模型実験，第38回地盤工学研究発表会，講演集，pp.1597-1598，2003.7.
- 6) 西岡英俊，神田政幸，村田修，伊藤政人，田中浩一：シートパイル基礎の水平抵抗特性に関する静的模型実験，土木学会第58回年次学術講演発表会講演集，pp.501-502，2003.9.
- 7) 田中浩一，樋口俊一，伊藤政人，平尾淳一，西岡英俊：シートパイル基礎の耐震性に関する模型実験，土木学会第58回年次学術講演発表会講演集，pp.503-504，2003.9.
- 8) 樋口俊一，田中浩一，伊藤政人，平尾淳一，西岡英俊，神田政幸：シートパイル基礎の地震時挙動と耐震性に関する検討，土木学会地震工学論文集，2003.12.
- 9) 西岡英俊，神田政幸，館山 勝，村田 修，平尾淳一，東野光男：シートパイルとフーチングを組み合わせた新しい基礎形式の適用に関する研究，総研報告，vol.18，No.4，pp.35-40，2004.4.
- 10) 西岡英俊，神田政幸，村田 修，田中浩一，樋口俊一：緩い砂地盤上のシートパイル基礎模型の水平載荷実験，第39回地盤工学研究発表会講演集，pp.1421-1422，2004.7
- 11) 神田政幸，西岡英俊，村田 修，平尾淳一，東野光男：シートパイル基礎の設計に用いる解析モデルの提案，第39回地盤工学研究発表会講演集，pp.1423-1424，2004.7.
- 12) 樋口俊一，松田 隆，田中浩一，神田政幸，西岡英俊：遠心模型実験によるシートパイル基礎の耐震性能に関する研究（その1），第39回地盤工学研究発表会講演集，pp.1815-1816，2004.7.
- 13) 松田 隆，田中浩一，樋口俊一，神田政幸，西岡英俊：遠心模型実験によるシートパイル基礎の耐震性能に関する研究（その2），第39回地盤工学研究発表会講演集，pp.1817-1818，2004.7.
- 14) 神田政幸，西岡英俊，村田 修，松田 隆，平尾淳一：シートパイル基礎の接合方法に関する模型実験，第49回地盤工学シンポジウム，平成16年度論文集，pp.275-282，2004.11
- 15) 辻奈津子，平尾淳一，崎本純治，神田政幸，西岡英俊，館山 勝：シートパイル基礎の実大水平載荷試験（その1），第40回地盤工学研究発表会講演集，2005.7.
- 16) 喜多直之，東野光男，田中浩一，西岡英俊，神田政幸，館山 勝：シートパイル基礎の実大水平載荷試験（その2），第40回地盤工学研究発表会講演集，2005.7.