

シートパイル基礎の地震時挙動と耐震性に関する検討

樋口 俊一¹・田中 浩一¹・伊藤 政人¹・平尾 淳一²・西岡 英俊³・神田政幸³

¹(株)大林組 技術研究所 土木構造研究室 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)

²(株)大林組 東京本社 土木技術本部 技術第1部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB棟)

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

シートパイル基礎は、直接基礎のフーチング4辺にシートパイル(鋼矢板)を配置、結合した新しい基礎形式であり、地中に貫入、結合されたシートパイルの地盤拘束効果によるフーチング直下地盤の支持力向上と、地震時の基礎の転倒および滑動耐力増加が期待できる。本基礎は対象地盤が直接基礎の支持地盤としての条件を満たさない場合においても適用性があるとともに、施工性、経済性、環境調和性にも優れた基礎形式である。また、既存直接基礎の耐震補強工法としての適用が期待できる。本論文は、シートパイル基礎の地震時挙動を実験的、解析的に明らかにすると共に、シートパイルの曲げ負担メカニズムについて整理した。

Key Words : Sheet Pile, Spread Foundation, Seismic Performance

1. はじめに

シートパイル基礎は、直接基礎のフーチング4辺にシートパイルを配置、結合した基礎形式であり(写真-1, 図-1), 地震時には基礎の転倒および滑動に対し、フーチング直下地盤の鉛直・滑動抵抗力と、シートパイルと地盤との相互作用が抵抗要素として想定できる¹⁾。一方、これらの抵抗メカニズムの地震時荷重分担を明らかにすることは、本基礎の地震時安定性評価上重要である²⁾。そこで、シートパイル基礎の模型振動実験を実施すると共に、数値解析によりその地震時挙動を調べた。

2. 模型実験

(1) 実験概要

図-1に試験体ならびに実験装置概要を示す。模型地盤は礫層(円礫, 最大粒径25mm)と砂層で構成され、砂には岐阜珪砂7号($D_{50}=0.16\text{mm}$)を用いた。地盤は、せん断土槽内に締め固めた礫地盤を作成後、乾燥砂を投入し、相対密度 $D_r=90\%$ になるよう転圧して締め固めて作製した。実験は構造物天端に水平力を加える静的載



写真-1 シートパイル基礎(模型)

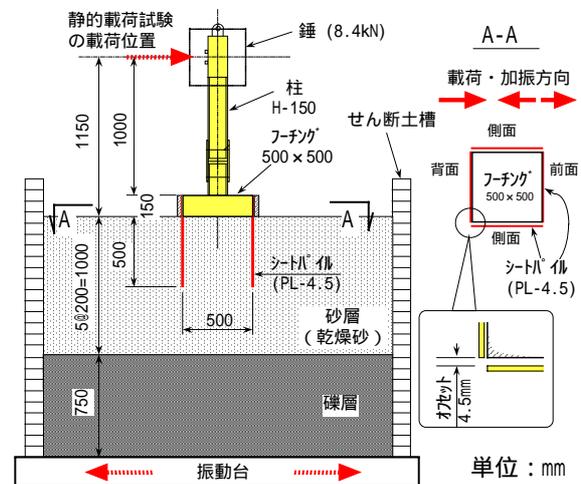


図-1 試験体および実験装置概要

荷試験と、振動台による振動実験を実施した(表-1)。静的載荷実験における載荷方法は単調載荷とした。振動実験の加振波はsin波(20波)を用いた。振動台加速度 20cm/s^2 のホワイトノイズ加振より、基礎-構造連成系の固有振動数(直接基礎:5Hz シートパイル基礎:7Hz)、地盤の固有振動数(15Hz)を得た。加振振動数は基礎-構造物連成系の固有振動数の変動を考慮して設定した(表-1)。シートパイルは厚さ4.5mmの鋼板(SS400)で作製した。これは、実物基礎の大きさを $5\text{m} \times 5\text{m}$ と想定した場合、N値30の地盤に型鋼矢板を配置した場合と同等のLを与える厚さである。フーチング側面シートパイルと前・背面のシートパイルはオフセットした(図-1:A-A)。シートパイルは予め地盤中に埋設しておき、フーチング設置時にフーチング下面の土圧計(2点)により地盤へのフーチング底面の接地を確認後、シートパイルとフーチング側面とをボルトにより接合した。その後上部工死荷重として錘(鉛)をセットした。フーチング底面に作用する死荷重は 10.7kN で、模型地盤の極限支持力の約2%に相当する。

(2) 静的載荷試験結果

静的載荷試験で得られた基礎底面中心周りの曲げモーメント(以下、作用曲げモーメントとする。)と回転角の関係を図-2に示す。図中には前・背面に配置されたシートパイルの曲げ負担分と、それに側面シートパイルの曲げ負担分も示す。前・背面のシートパイル曲げ負担は、押し込み、引抜き軸力による曲げ抵抗とシートパイル結合部の面外曲げ抵抗からなり、いずれもシートパイル両面に貼付したひずみゲージの計測値から算定した。曲げ負担は部材角0.02で前・背面シートパイルが全体の80%以上を占める結果となった。即ち、このモデルではシートパイルの荷重分担が大きく、フーチング直下地盤や側面シートパイルの曲げ負担は小さいものと推察される。これは、模型シートパイルの板厚が縮尺比で決まる値より大きく、先端支持力が過大となったことが原因と考えられる。

(3) 振動実験結果

地表面の最大加速度と柱天端の応答加速度の関係を図-3に示す。応答加速度は直接基礎では約 180cm/s^2 で降伏するのに対し、シートパイル基礎では約 330cm/s^2 で降伏する。この降伏点は静的載荷実験での降伏点に相当し、シートパイルが基礎の降伏震度を向上させることが確認された。地表面加速度に対する基礎の鉛直及び水平残留変位の累積の一例を図-4に、応答回転角の一例を図-5に示す。シートパイル基礎では直接基礎よりも残留変位、応答回転角ともに抑制され、耐震性能が向上していることが確認できる。図-6に地表面加速

表-1 静的載荷実験と振動実験のケース

	直接基礎	シートパイル基礎
静的載荷試験	-	
振動実験	3Hz	
	4Hz	
	5Hz	
	6Hz	-

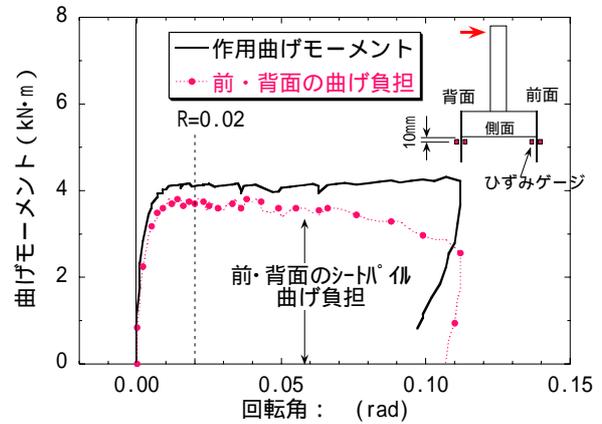


図-2 基礎のM-θ関係(静的載荷試験)

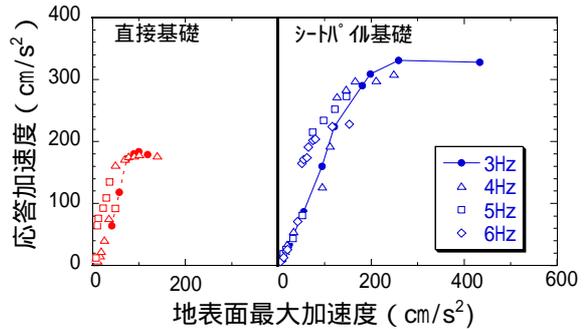


図-3 柱天端の応答加速度

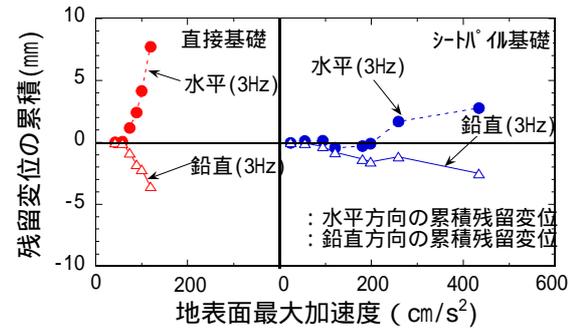


図-4 基礎の累積残留変位

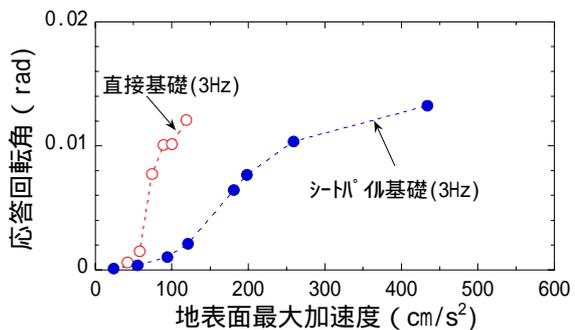


図-5 基礎の応答回転角

度 (PGA) 100cm/s^2 での実験ケースにおける, 模型の作用曲げモーメントと応答回転角の関係を示す. 直接基礎と比較してシートパイル基礎の回転剛性が大きく, エネルギー吸収にも優れることがわかる. 同様の結果が水平剛性 (滑動) についても見られた. 振動実験における曲げ負担の一例を図-7に示す. シートパイルの曲げ負担は静的载荷実験の場合と同様に算出した. 振動実験による動的時での曲げ負担においても, 静的载荷試験同様, 前・背面シートパイルの曲げ負担が大きい. 但し, この実験では拘束圧が小さい事, 実シートパイルのように表面に凸凹を設けていない事などから, 側面シートパイルのせん断抵抗が実物よりも過小評価される可能性がある. 一方, フーチング直下地盤の荷重分担は2.(1)と同様, 小さいことが推察される.

3. 数値解析

(1) プッシュオーバー解析

本項では3次元FEMによる静的载荷試験のシミュレーションについて述べる. 図-8に解析モデルの概要を示す. 地盤及びフーチングはソリッド要素で, シートパイルはシェル要素でモデル化し, 模型加力方向に対し砂層のみの1/2モデルとした. 地盤要素の解析定数を表-2に示す. 地盤の初期剛性は模型地盤作製後, ベンダーエレメントを用いて計測した地盤のせん断波速度 (図-12で後述) から設定した. 地盤材料の非線形特性はDrucker-Pragerモデルである. 加力は橋脚天端に水平力を作用させた時と等価なせん断力及び曲げモーメントをフーチングに単調载荷した,

図-9に解析により得られた荷重 - 変位 (橋脚天端変位) 関係を示す. 基礎の荷重 - 変位関係と最大耐力は実験値に対して良い一致を示している. 図中に併記したように, 作用力に対する曲げ負担割合は前・背面のシートパイルがおよそ60%であり, フーチング直下地盤25%, 側面シートパイル15%であった.

(2) 動的応答解析

振動台実験のシミュレーションとして, 2次元FEMによる動的解析を実施した. 図-10に解析モデルの概要を示す. 解析モデルは加振方向に1/2モデルで, 地盤は砂層のみの1mとした. 地盤はソリッド要素で, シートパイル及びフーチングは梁要素でモデル化した. 側面 (面内) シートパイルはソリッド要素でモデル化し, 地盤と側面シートパイルには別々に節点を設けた. 側面シートパイルとフーチングとは節点を連結 (変位拘束) するが, 前面 (面外) シートパイルとは連結しない

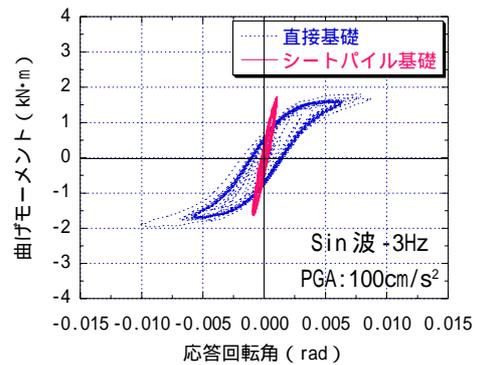


図-6 曲げモーメント - 応答回転角関係

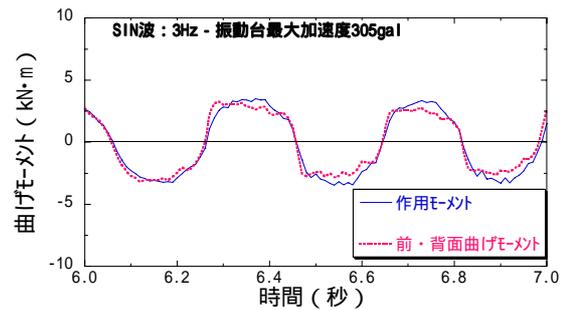


図-7 振動実験におけるシートパイル曲げ負担

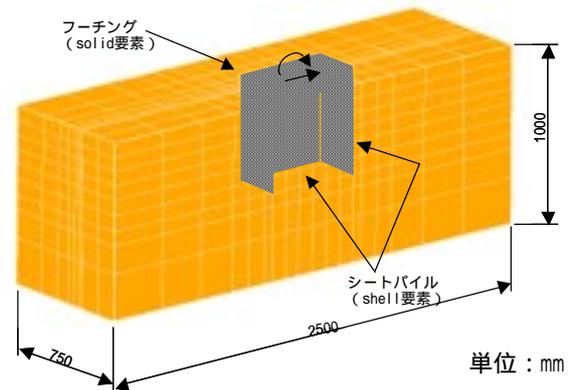


図-8 プッシュオーバー解析モデル (3D-FEM)

表-2 地盤の解析定数

密度 (kN/m^3)	内部摩擦角 (deg)	粘着力 (kN/m^2)
15.0	43.0	0.0

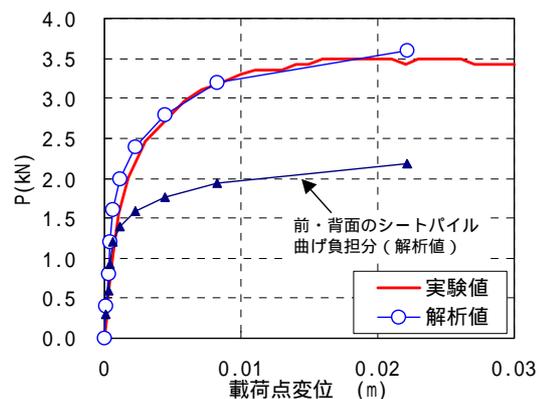


図-9 シートパイル基礎の荷重 - 変位関係

い 地盤の非線形性は等価線形化手法により評価した。図-11, 図-12に砂のひずみ依存非線形特性と地盤のせん断波速度分布を示す。入力地震動は振動台実験の礫層上での実測波(振動数3Hz)を用いた。

図-13に基礎の地表面最大加速度と応答回転角の関係を示す。解析では面内シートパイルの影響について検討するため、これが無いモデルも計算も実施した。地表面最大加速度と応答回転角の関係は、実験、解析ともほぼ一致し、シートパイル基礎の地震時の動的応答特性は2次元FEMで評価できることがわかった。また、面内シートパイルの有無では応答に大きな差異は見られず、影響は小さいことがわかった。シートパイルの断面力より算定した面外(前面)シートパイルの曲げモーメント分担率は、面内(側面)シートパイルが無い場合、作用曲げモーメントの97%であり、作用曲げモーメントのほとんどを分担する結果となった。面内シートパイルがある場合では同86%であり、面内シートパイルの荷重分担率は高々10%程度である。

4. まとめ

シートパイル基礎の成立性を確認するための静的・動的模型実験及びシミュレーション解析より、以下の事がわかった。

- (1) 直接基礎にシートパイルを配置することにより、基礎の曲げ耐力の増加、変形抑制効果が期待でき、耐震性が向上する。
- (2) 基礎の曲げ負担は前・背面に配置されたシートパイルが支配的であった。この実験では基礎底面地盤の曲げモーメント分担率は小さかった。
- (3) 3次元非線形FEM解析によるシミュレーション解析より、シートパイル基礎の荷重-変位関係と最大耐力が予測できた。また、2次元等価線形FEMによりシートパイル基礎の動的応答特性が評価できた。
- (4) 側面シートパイルの影響は、地盤の拘束圧が実地盤と同等な遠心実験等で確認する必要がある。

5. おわりに

今後、設計法の構築に向け、シートパイルの剛性、長さ、継手等の影響を解明する必要がある。なお、本研究は、財団法人鉄道総合技術研究所と(株)大林組による共同研究「シートパイル基礎の支持力および変形性能に関する研究」の成果の一部を取りまとめたものである。

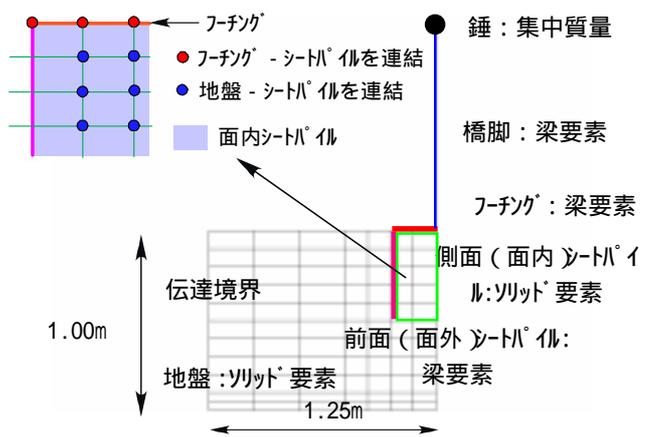


図-10 動的解析モデル(2次元FEM)

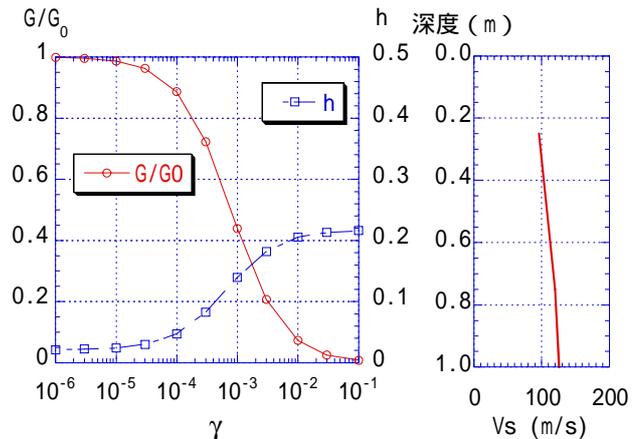


図-11 砂の動的変形特性 (7号珪砂; Dr=90%)

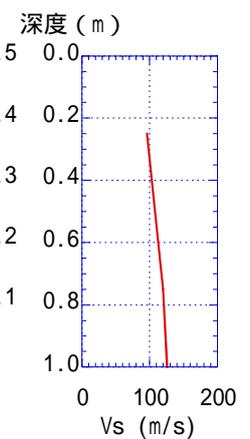


図-12 地盤のせん断波速度分布

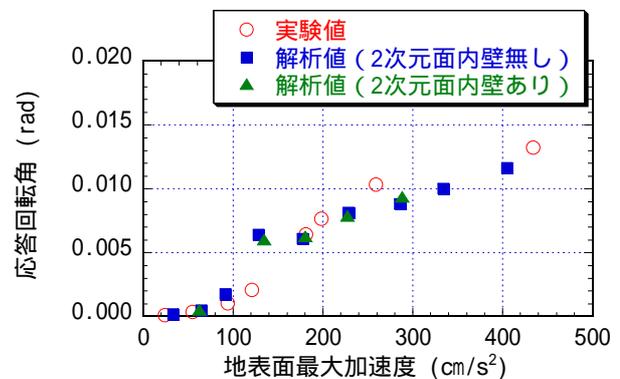


図-13 地表面最大加速度と応答回転角の関係

参考文献

- 1) 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, 799, 地盤工学会, 2003.7.
- 2) 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, 第58回土木学会年次学術講演会概要集, 252, 土木学会, 2003.9.

(2003.10.01 受付)