

小径杭の杭配置に応じた支持力の変化に関する解析的検討

鉄道総合技術研究所 正会員 ○土井 達也

鉄道総合技術研究所 正会員 日野 篤志, 室野 剛隆

1. はじめに 直接基礎構造は、地震時にフーチングの浮上りが生じることにより、上部構造物に入力される地震作用が頭打ちとなる免震特性に似た効果が期待できることが知られており¹⁾、地震時における構造物の応答の低減に寄与すると考えられる。直接基礎を適用する際に表層地盤の支持力が不足する場合には、表層地盤の掘削または地盤改良などの対策が必要である。ところで、鉄道構造物では、このような地盤に対して古くから木杭基礎が用いられてきた。木杭基礎は、設計当時は杭基礎として評価されたが、現在では、木杭により地盤改良された支持地盤上の直接基礎として評価される場合が多い。このため、木杭基礎は、小径杭を用いて表層地盤を地盤改良し、直接基礎を構築する手法の1つと考えることができる。そこで本稿では、木杭基礎に水平力が作用した場合を対象として、効率的に基礎の支持力が増加する杭配置について検討する。さらに、杭配置と基礎の支持力との相関関係について考察し、杭配置の違いに応じた支持力の変化について評価する。

2. 解析モデル 解析モデルを図1に示す。対象構造物は、フーチング下端～天端まで11.55m、フーチング幅および奥行7.5mのRC橋脚とした。解析は2次元有限要素法による静的非線形解析とした。水平方向の強制変位量は、直接基礎の回転安定の照査(地震時)におけるフーチング天端の回転角(以下、回転角)の安定レベル3に対応する設計限界値0.03rad²⁾を包含するよう500mmとした。対象地盤はせん断弾性波速度 $V_s=100\text{m/s}$ の砂質土地盤、層厚は5mとした。表1に地盤に関するパラメータを示す。木杭は線形の梁要素としてモデル化し、杭径は150mm、杭長は5mとした。また、杭を梁部材でモデル化しているため、杭の鉛直支持力および水平支持力については、杭と地盤の節点を降伏荷重到達前は十分に大きい剛性、降伏荷重到達後は剛性が低下する非線形ばねで連結することにより評価した。ここで、ばねの上限値 P_y は設計標準²⁾の打込み杭(先端閉塞)に基づき算出した。表2にばねの上限値 P_y の算出に使用した杭の支持力度を示す。また、杭頭とフーチングはピン結合を仮定した。土の非線形モデルは、マルチスプリングモデルとGHE-Sモデル³⁾を組合せた構成則を用い、規準ひずみ以外のパラメータは標準値³⁾を使用した。規準ひずみ $\gamma_{0.5}$ は安田・山口⁴⁾の式から求めた。

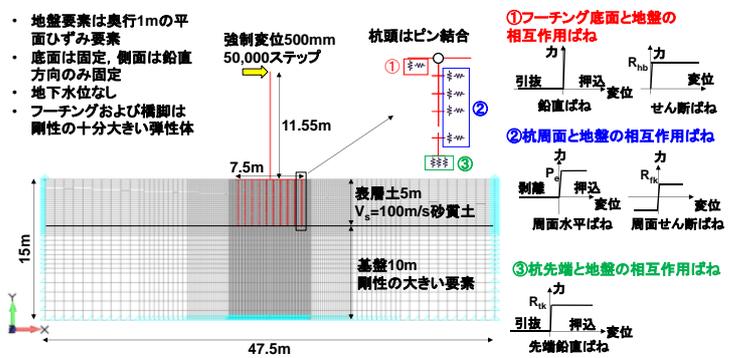


図1 解析モデル

表1 地盤に関するパラメータ

地盤種別	V_s [m/s]	N値	γ [kN/m ³]	ν	G_0 [kN/m ²]	$\gamma_{0.5}$
砂質土	100	2	18	0.49	18400	7.54×10^{-4}

表2 杭の支持力度(ばねの上限値算出用)

杭径 ϕ [mm]	杭種	周面支持力度[kN]	先端支持力度[kN]	鉛直支持力度[kN] 周面+先端
150	打込み杭(先端閉塞)	56.6	247.4	304.0

表1に地盤に関するパラメータを示す。木杭は線形の梁要素としてモデル化し、杭径は150mm、杭長は5mとした。また、杭を梁部材でモデル化しているため、杭の鉛直支持力および水平支持力については、杭と地盤の節点を降伏荷重到達前は十分に大きい剛性、降伏荷重到達後は剛性が低下する非線形ばねで連結することにより評価した。ここで、ばねの上限値 P_y は設計標準²⁾の打込み杭(先端閉塞)に基づき算出した。表2にばねの上限値 P_y の算出に使用した杭の支持力度を示す。また、杭頭とフーチングはピン結合を仮定した。土の非線形モデルは、マルチスプリングモデルとGHE-Sモデル³⁾を組合せた構成則を用い、規準ひずみ以外のパラメータは標準値³⁾を使用した。規準ひずみ $\gamma_{0.5}$ は安田・山口⁴⁾の式から求めた。

解析ケースを図2に示す。Case 2~4は杭本数が10本で荷重載荷方向の杭配置が異なるケースである。Case 1, 2・Case 4, 5・Case 7, 8, 9は荷重載荷方向の杭配置が同じで、奥行方向の杭本数が異なるケースである。Case 6はCase 1, 3, 4の杭配置をあわせたケースである。Case 10は杭を配置しないケースである。

3. 解析結果および考察 図3に全ケースの水平荷重-回転角関係を示す。また、杭を配置したケースと配置しないケースの水平荷重の差を水平荷重増加量と定義し、これを杭1本あたりに換算した値(以下、杭1本あたりの水平荷重増加量)を図4に示す。ここで、杭1本あたりの水平荷重増加量は支持力の増加の効率を表す指標の1つと考えられる。図4, 5より、杭本数の多いCase 7~9では水平荷重は大きい、杭1本あたりの水平荷重の増加量は大きくない。そこで以下では、効率的に支持力を増加させる杭配置を検討する。

杭本数を10本としたCase 2~4の比較より、フーチング端部に杭を配置しているCase 4で杭1本あたりの水平荷重増加量

キーワード 小径杭, 杭配置, 支持力

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7336

重増加量が最も大きく、フーチング中央のみに杭を配置した Case 2 では水平荷重はほとんど増加していない。このため、フーチング端部の杭ほど支持力の増加に寄与していると考えられる。また、フーチング端部に杭を 10 本ずつ配置した Case 5 では、図 3 の水平荷重の折れ曲がり点付近までは杭 1 本あたりの水平荷重増加量が Case 4 とほぼ同じであるが、それ以降は水平荷重の増加が頭打ちになり、杭 1 本あたりの水平荷重増加量が Case 4 より小さくなっている。なお、

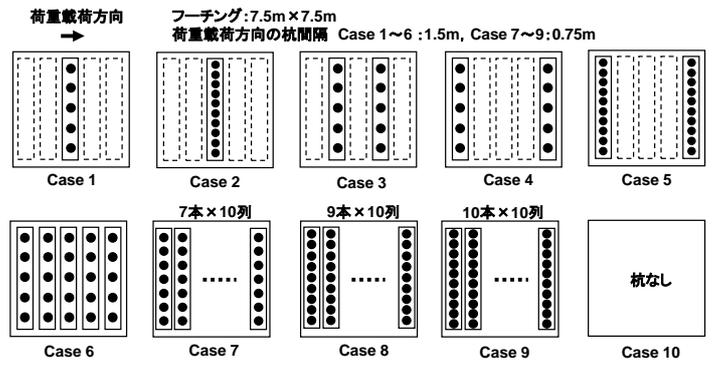


図 2 解析ケース

水平荷重増加量が頭打ちになる際に右側の杭先端のばねが上限値に達していることを別途確認している。また、Case 6 では、杭 1 本あたりの水平荷重増加量は Case 1 と Case 3 の概ね中間の値となっており、支持力の増加効果への寄与度が平均化されていると解釈できる。

4. 杭配置と木杭基礎の支持力との相関性 ここでは、最も密に木杭を配置した Case 9 の水平荷重で正規化した Case 1~8, 10 の水平荷重を木杭の配置状況による低減倍率 α と定義し、 α を杭配置に応じた支持力の変化を表す指標として用いる。図 5 に α と回転角の関係を示す。また、解析結果より支持力の増加効率率は杭本数だけでなくフーチング中央から杭中心までの距離にも依存することがわかったため、双方を考慮できる指標として、Case 9 で正規化したフーチング中央まわりの杭の断面二次モーメント（以下、断面二次モーメント比 I'/I ）を用いる。 I'/I の概要を図 6 に示す。図 5 に対して、一例として回転角 0.0026rad, 0.01rad, 0.02rad, 0.03rad に着目し、 α と I'/I の関係を整理したものを図 7 に示す。ここで、0.0026rad は 5 つの杭配置について α がピークとなる回転角、0.02rad および 0.03rad はそれぞれ地震時の安定レベル 2, 安定レベル 3 に対応する照査指標である。また、図中の近似曲線は、2 次近似によって十分な精度が得られたことから、2 次近似としている。図 7 より、 I'/I によって杭配置に応じた支持力の変化を精度良く評価できている。このため、ある杭配置での水平荷重—回転角関係がわかれば、別の杭配置の水平荷重—回転角関係を I'/I によって定量化できるといえる。

5. まとめ 複数の木杭配置について 2 次元有限要素法解析により水平荷重—フーチング回転角関係を求めた。その結果、フーチング端部に杭を配置するほど効率的に支持力が増加することがわかった。また、杭配置に応じた支持力の変化は、フーチング中央まわりの杭の断面二次モーメントの比によって精度良く評価できることがわかった。

参考文献 1) 西村ら：地盤改良併用型直接基礎の免震効果に関する実験的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 2012. 2) 鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物), 丸善出版, 2012. 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善出版, 2012. 4) 安田ら：種々の不攪乱土における動的変形特性, 第 20 回土質工学研究発表会, 1985.

