

小径杭による直接基礎の支持地盤の改良効果 に関する解析的検討

土井 達也¹・日野 篤志²・室野 剛隆³

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²正会員 株式会社ジェイアール総研エンジニアリング
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 博士(工学) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

1. はじめに

表層地盤が比較的軟弱な地点に構造物を建設する場合、基礎形式として杭基礎を用いる方法がある。しかし、杭基礎を用いる場合、大規模地震時における上部構造物の慣性力に抵抗することも期待され、水平方向にも相応の耐力を有する部材として設計されるため、杭部材の大口径化や杭頭の過密配筋と、それに伴う施工コストの増大がしばしば問題となる。また、別の方法としては、表層土を掘削または地盤改良して直接基礎を構築する方法がある。直接基礎構造とすることにより、地震時にフーチングの浮上りが生じ、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類似した効果が期待できる¹⁾ことが知られており、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。ただし、表層土の層厚が大きくなるほど掘削または地盤改良を行う範囲が増大し、結果として施工コストの増大につながる。

一方、鉄道構造物では表層地盤が軟弱な地点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、当時の設計基準²⁾では杭基礎の1つとして分類されていたが、現在では、木杭を基礎構造として評価するのではなく、地盤改良の1つとして考えることが多い³⁾。こうした木杭基礎のように支持地盤に安価な小径杭を挿入することにより、直接基礎の支持地盤相当の地盤改良を行うことができれば、表層が比較的軟弱な地盤に対しても低コストで直接基礎を構築できる可能性がある。その結果、杭頭構造の省略や杭の簡素化、地震時のフーチングの浮上りによ

る構造物の応答の低減を図ることが可能となる。

小径杭による地盤改良を行うにあたり、小径杭の杭配置に留意する必要がある。杭を多数挿入すれば支持力の増加は大きいと考えられるが、施工コストの面で必ずしも望ましくなく、効率的に地盤改良効果が得られる杭配置に関する検討が必要である。しかし、小径杭を地盤改良に用いる場合の杭配置と地盤改良効果との関係について考察した研究は少ないのが現状である。そこで、本稿では小径杭による直接基礎の支持地盤の改良効果について FEM 解析により検討を行う。最初に、鉛直荷重が作用した場合について、直接基礎の支持地盤相当の地盤改良効果が得られる杭配置について検討し、効率的に地盤改良効果が得られる杭配置について検討を行う。次に、水平荷重が作用した場合について、効率的に地盤改良効果が得られる杭配置について検討を行う。最後に、双方の検討を踏まえ、鉛直荷重、水平荷重に対して最適な杭配置に関して考察する。

2. 鉛直荷重に対する地盤改良効果の検討

本章では、鉛直荷重に対する小径杭の地盤改良効果について検討した結果について述べる。まず、鉄道の設計標準⁴⁾ではN値30以上の砂質土地盤を直接基礎の支持層と見なせることから、N値30の砂質土地盤相当の鉛直荷重－鉛直変位関係を再現できる杭本数、杭径について検討する。さらに、複数の杭配置

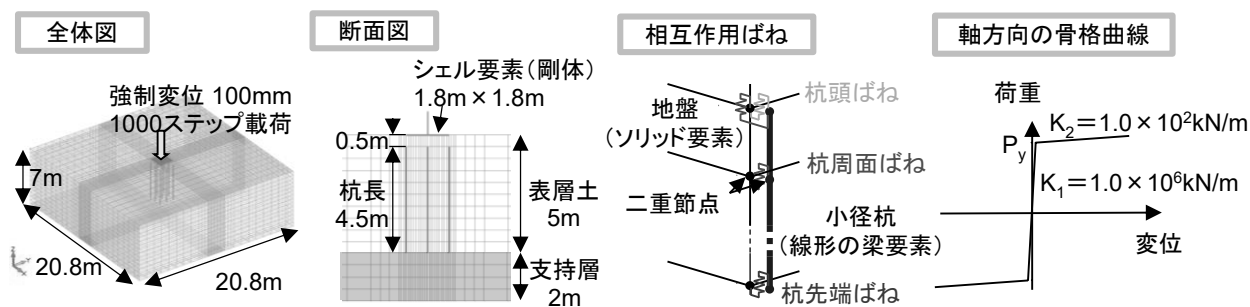


図-1 解析モデル（鉛直荷重に対する検討）

表-1 地盤に関するパラメータ

	単位体積重量 γ_t [kN/m ³]	ポアソン比 ν	初期せん断剛性 G_0 [kN/m ²]	粘着力 c [kN/m ²]	内部摩擦角 ϕ [deg]	規準ひずみ $\gamma_{0.5}$
N値5粘性土	16	0.49	47710	31.25	0	2.620×10^{-4}
N値30砂質土	18	0.49	113425	0	39	1.285×10^{-4}

表-2 小径杭1本あたりの鉛直支持力度

杭径[mm]	杭種	周面支持力度[kN]	先端支持力度[kN]	鉛直支持力度（周面＋先端）[kN]
100	打込み杭	42.41	78.54	121.00
300	（先端閉塞）	127.24	706.86	834.10

表-3 解析ケース

ケース	原地盤	杭本数※	杭径 [mm]	杭間隔 [mm]
杭なし(N値5)	N値5粘性土	—	—	—
杭なし(N値30)	N値30砂質土	—	—	—
Case 1	N値5粘性土	9(2.78)	100	3D=300
Case 2	N値5粘性土	25(7.72)	100	3D=300
Case 3	N値5粘性土	49(15.1)	100	3D=300
Case 4	N値5粘性土	9(2.78)	100	9D=900
Case 5	N値5粘性土	9(2.78)	300	3D=900
Case 6	N値5粘性土	13(4.01)	300	1.89D=566

※ () 内は載荷板 1m²あたりの本数

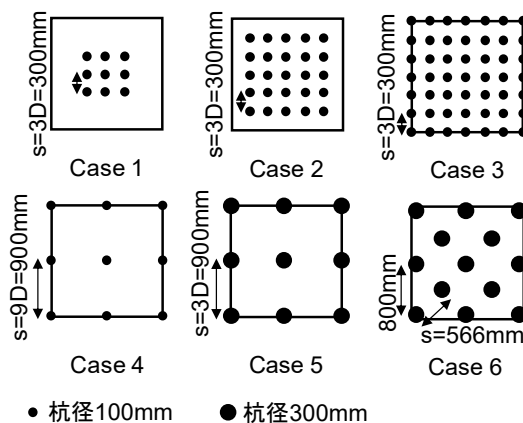


図-2 杭配置図（鉛直荷重に対する検討）

を対象として鉛直荷重－鉛直変位関係を求め、より効率的に地盤改良効果が得られる杭径、杭配置の条件について明らかにする。

(1) 解析モデルおよび条件

本章の解析はモデルの地表面上の剛な載荷板を鉛直方向に強制変位させる静的非線形解析とした。ここで、剛な載荷板は直接基礎のフーチングを計算時間の制約上1.8m×1.8mに縮小したものとした。解析手法は、奥行方向の杭の軸力分担を表現するため3次元FEM解析とした。解析モデルを図-1に示す⁵⁾。対象地盤は比較的軟弱な地盤としてN値5の粘性土とし、層厚は5mとした。地下水位は考慮しないモデルとした。また、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^{6), 7)}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⁷⁾を使用した。規準ひずみは地盤のせん断強度 τ_f と初期せん断剛性 G_0 の比から求めた。表-1に地盤に関するパラメータを示す。小径杭は線形の梁要素としてモデル化した。杭頭と載荷板は地震時のフーチングの浮上りによる構造物の長周期化を期待することを想定して連結せず、層厚0.5mの地盤を介して小径杭に荷重が伝達するモデルとし、杭先端は支持層上にあるものとした。なお、本モデルは小径杭を梁モデルとしているので、小径杭の鉛直支持力を評価するために、小径杭と地盤の節点は支持力の上限値を表現するばねで接続した。鉛直方向には、杭頭、杭周面、杭先端について、上限値到達前は十分に大きい剛性、上限値到達後は剛性が低下する非線形ばねを設定した。鉛直支持力に着目することから水平方向は剛と

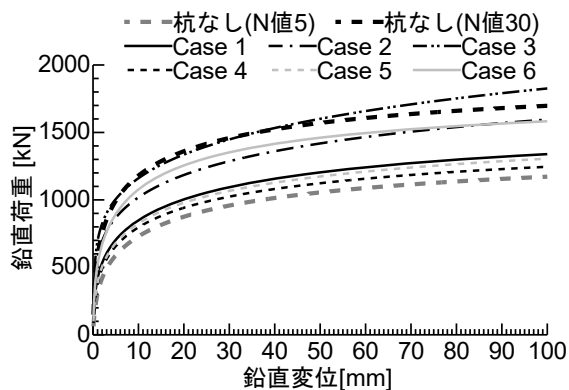


図-3 鉛直荷重－変位関係

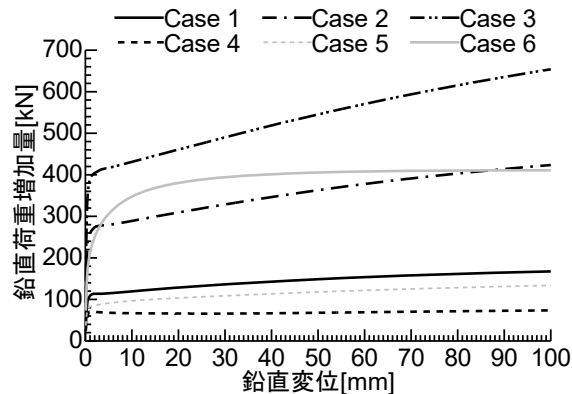


図-4 鉛直荷重増加量－変位関係

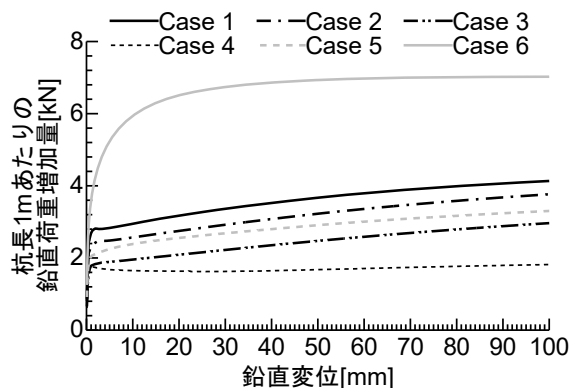


図-5 杭長 1m あたりの鉛直荷重増加量－変位関係

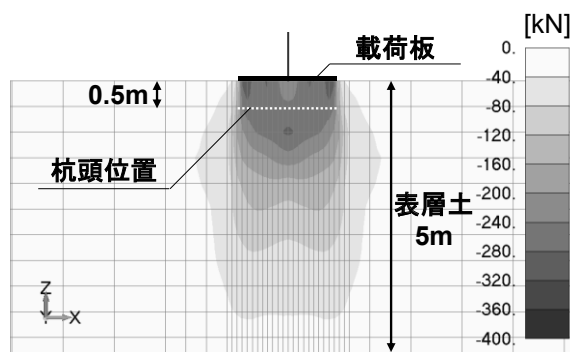


図-6 杭なし (N値5) 鉛直応力コンター図 (強制変位100mm時)

した．ばねの上限値 P_y は設計標準⁴⁾に準拠し，打込み杭（先端閉塞）の先端支持力度および周面支持力度により算出した．表-2にばねの上限値 P_y の算出に使用した小径杭1本あたりの鉛直支持力度を示す．

鉛直方向の強制変位は，杭径の10%変位時の支持力（杭の基準支持力に相当⁴⁾）を超えた大ひずみ領域まで解析するために100mmとし，載荷ステップ数は1000ステップとした．解析は表-3に示す8ケースを実施した．図-2に杭配置図を示す．杭なし（N値5）および杭なし（N値30）は，それぞれ未改良地盤の鉛直荷重－鉛直変位関係，地盤改良の目標となる鉛直荷重－鉛直変位関係を求める目的で実施した．Case 1～Case 3は杭径100mm，杭間隔300mmで杭本数が異なるケース，Case 4, 5は杭本数9本，杭間隔900mmで杭径が異なるケースである．また，Case 1, 4は杭本数9本，杭径100mmで杭間隔が異なるケースである．Case 6は杭径300mmの杭を13本，千鳥配置で配置したケースである．

(2) 解析結果

図-3に各ケースの鉛直荷重－鉛直変位関係を示す．図中には，N値30砂質土地盤およびN値5粘性土地盤

に対する鉛直荷重－鉛直変位関係も併せて示している．図-3より，杭径100mmの小径杭を300mm間隔で25本配置したCase 2および杭径300mmの小径杭を566mm間隔で13本配置したCase 6で，鉛直荷重－鉛直変位関係がN値30の砂質土と概ね等価となった．

図-4に鉛直荷重増加量（小径杭配置時の鉛直荷重と，小径杭を配置しないN値5の地盤での鉛直荷重の差）と鉛直変位の関係を示す．図-5に杭長1mあたりの鉛直荷重増加量と鉛直変位の関係を示す．なお，ここでは杭長1mあたりの鉛直荷重増加量を地盤改良の効率を表す指標として考える．図-4, 5より，鉛直荷重増加量の大きい杭配置が必ずしも杭長1mあたりの鉛直荷重増加量が多いとは限らない．例えば，最も鉛直荷重増加量が多いCase 3は，杭長1mあたりの鉛直荷重増加量については2番目に小さい．そこで，以下では，より効率的に地盤改良効果が得られる条件について考察を行う．

(3) 考察

小径杭の挿入による鉛直荷重増加量に対する杭本数，杭径，杭間隔の影響を考察し，効率的に地盤改良効果が得られる条件を明らかにする．

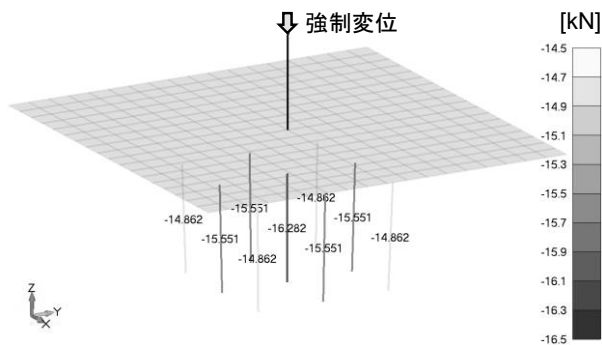


図-7 Case 1 の杭頭の軸力分布図

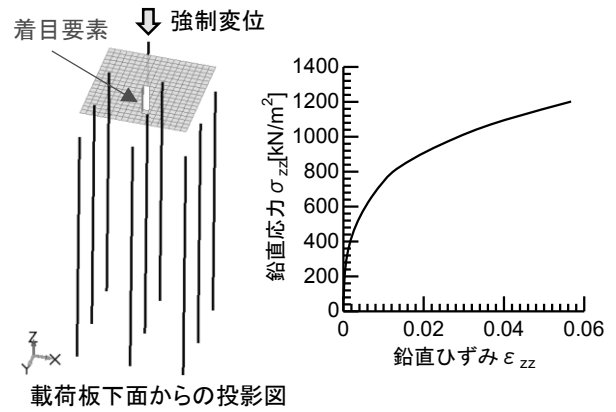


図-8 載荷板直下の地盤の鉛直応力ー鉛直ひずみ関係 (Case 5)

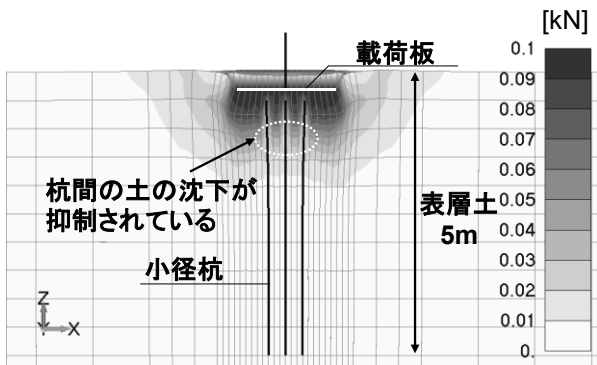


図-9 Case 1 の変位コンター図
(杭径 100mm, 杭間隔 300mm)

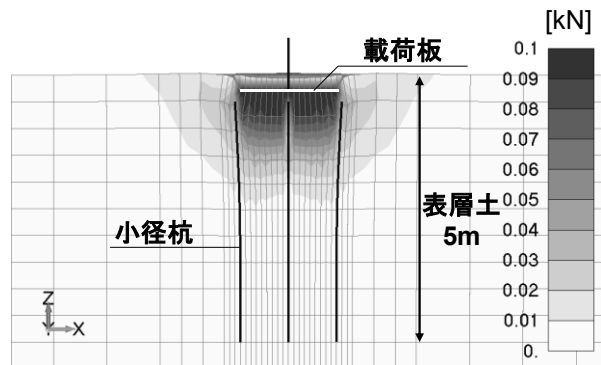


図-10 Case 4 の変位コンター図
(杭径 100mm, 杭間隔 900mm)

a) 杭本数の影響

杭間隔が300mm, 杭径100mmで, 杭本数が異なる Case 1, 2, 3に着目する. 図-4より, 杭を多数挿入したケースほど鉛直荷重の増加量は大きくなるが, 図-5より, 杭長1mあたりの鉛直荷重の増加量は逆に杭本数が少ないケースほど大きいことがわかる. 図-6に示す杭なし (N値5) ケースにおける強制変位100mm時の土に発生する鉛直応力のコンター図より, 載荷板の中央付近ほど鉛直応力が大きくなっている. その結果, 図-7に示すCase 1の杭頭の軸力分布図からわかるように, 小径杭の軸力分担が載荷板中央付近ほど大きい. 結果は示していないが, 同様の傾向がCase 2, 3でも確認できた. このように, 載荷板中央付近の小径杭が軸力を多く分担することと, 今回の検討では杭本数が少ないケースほど載荷板中央付近に杭を配置したため, 杭本数が少ないケースほど杭長1mあたりの鉛直荷重の増加量が大きくなったと考えられる.

b) 杭径の影響

杭本数が9本, 杭間隔が900mmで杭径が異なる Case 4, 5に着目する. 図-4より, 杭径300mmのCase 5では杭径100mmのCase 4の最大2倍程度, 鉛直荷重の増加量が大きい, 表-2より杭径300mmの小径杭の鉛直支持力度が杭径100mmの約7倍であることを

考慮すると, 杭径300mmの小径杭の支持力が十分に活かされていない. 図-8に示すCase 5における載荷板直下の地盤の鉛直応力ー鉛直ひずみ関係から, 載荷板直下で鉛直ひずみの増大とともに地盤の非線形化が進行していることがわかる. 同様の傾向はCase 4でもみられる. このような地盤の非線形化に伴い, 小径杭に十分な鉛直荷重が伝達しなかったことにより, 杭径300mmの小径杭の支持力が十分に活かされない結果となったと考えられる.

c) 杭間隔の影響

杭本数が9本, 杭径が100mmで杭間隔が異なる Case 1, 4に着目する. 図-4より, 同じ杭本数9本, 杭径100mmの条件でも杭間隔を300mmとしたCase 1のほうが, 鉛直荷重の増加量が大きい結果となった. 原因としては, a)で考察したように載荷板中央付近の直下ほど小径杭が大きな軸力を負担することに加え, 図-9, 図-10に示すCase 1とCase 4の変位コンター図からわかるように, 杭間隔が狭いほど杭が周辺の土の沈下を抑制する効果が重なり合い, 杭間で土の沈下が抑制されることが考えられる.

(4) まとめ

鉛直荷重に対する小径杭による直接基礎の支持地盤の改良効果についてFEM解析により検討を行った.

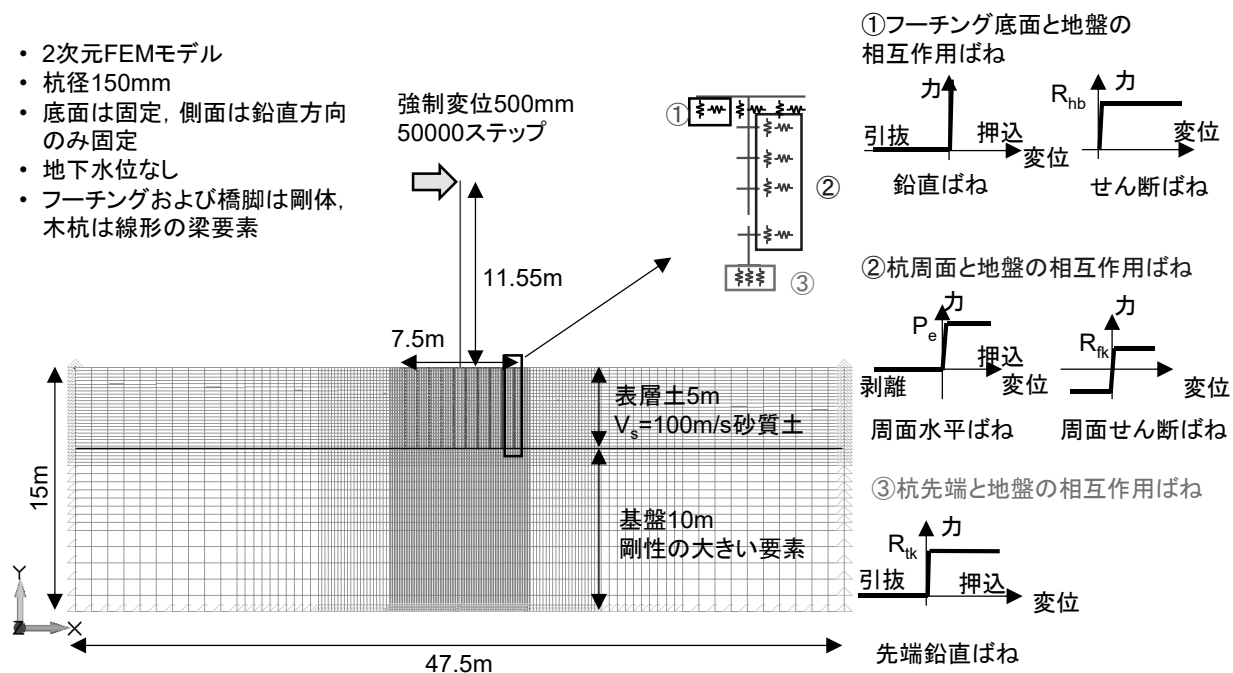


図-11 解析モデル（水平荷重に対する検討）

得られた知見を以下に示す。

- 今回検討した杭配置について、小径杭の挿入前後の載荷荷重の増加量と、載荷荷重の増加量を杭1mあたりに換算した値を比較した。その結果、①載荷板の中央付近に杭が配置されているほど、②杭間隔が小さいほど、③杭径が大きいほど、対策効率が大きいことがわかった。
- 杭径を大きくする効果は、載荷板の中央付近に杭を配置する効果や杭間隔を小さくする効果に比べると小さい。
- 今回検討した地盤、載荷板の大きさの条件では、杭径100mmの小径杭を300mm間隔で配置するか、杭径300mmの小径杭を566mm間隔で配置すれば、 N 値30の砂質土地盤とほぼ等価な荷重－変位関係が得られたため、小径杭を用いて直接基礎相当の地盤改良が可能であることがわかった。

3. 水平荷重に対する地盤改良効果の検討

本章では、水平荷重に対する小径杭による地盤改良効果について検討した結果について述べる。まず、複数の杭配置に対して水平荷重－フーチング回転角関係を求め、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。

(1) 解析モデルおよび条件

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。解析手法は、解析時間や解の安定性を考慮して2次元FEM解析とした。ここで、本検討では小径杭の剛性および支持力の上限值については奥行1mあたりに換算した値で計算した。解析モデル⁸⁾を図-11に示す。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。ただし、本検討では液状化に対する検討は行わない。表-4に地盤に関するパラメータを示す。小径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。

本モデルは小径杭を梁モデルとしているので、杭の鉛直支持力および水平支持力を評価するために、杭と地盤の節点は支持力の上限值を表現するばねで接続した。鉛直方向には、杭周面、杭先端について、上限値（杭周面は R_{fk} 、杭先端は R_{tk} ）到達前は十分に大きい剛性、上限値到達後は剛性が低下する非線形ばねを設定した。同様に、水平方向には杭の有効抵抗土圧から定まる上限値 P_e 到達前は十分に大きい剛性、上限値到達後は剛性が低下する非線形ばねを設定した。ここで、ばねの上限値は設計標準⁴⁾の打込み杭（先端閉塞）に基づき算出した。表-5にばねの上限値の算出に使用した小径杭1本あたりの支持力度を示す。フーチングと地盤は、鉛直方向には押込側のみに抵抗し、水平方向にはフーチング底面の水平支持力 R_{hb} に到達すると剛性が低下するばねを設定した。ここで、杭頭とフーチングの結合部につ

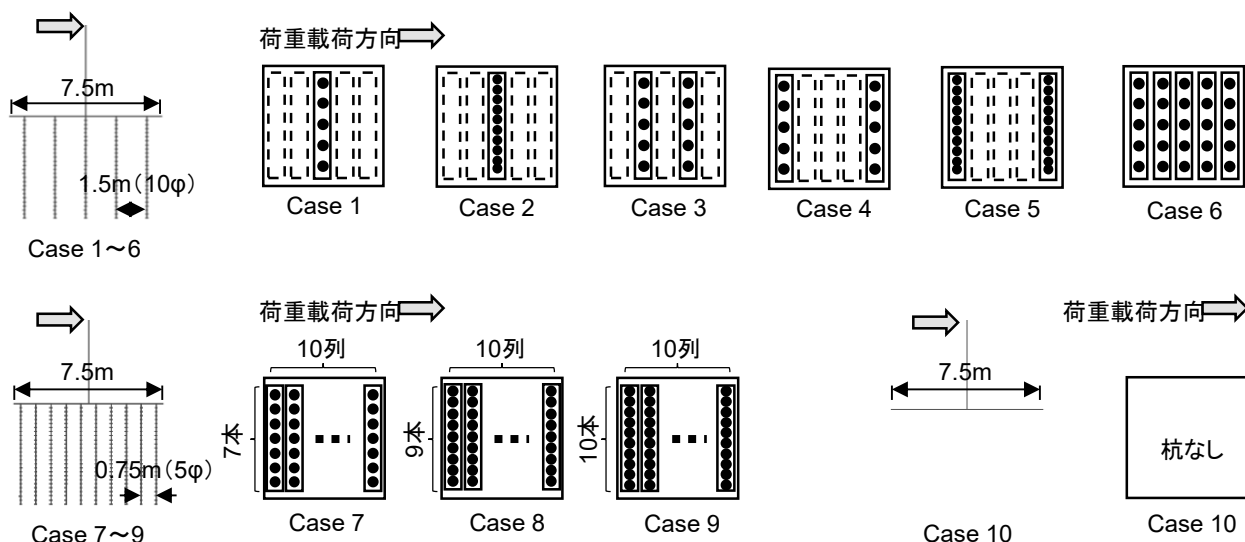


図-12 杭配置図（水平荷重に対する検討）

いても、フーチング底面のばねと同様に押し込み側のみに抵抗するばねで結合し、杭の引抜側の抵抗を見込まないモデルとした。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^{6), 7)}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⁷⁾を使用した。規準ひずみ $\gamma_{0.5}$ は安田・山口⁹⁾の式から求めた。また、水平方向の強制変位量は、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 0.03rad ⁴⁾を超えるよう500mmとした。

杭配置図を図-12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。

(2) 解析結果

図-13に代表ケースの水平荷重－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（以下、水平荷重増加量）を図-14に、水平荷重増加量を杭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-15に示す。なお、ここでは杭1本あたりの水平荷重増加量を支持力の増加の効率を表す指標として考える。図-13、図-14より、杭本数の多いCase 9では水平荷重は大きい、図-15より、杭1本あたりの水平荷重の増加量は大きくないことがわかる。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が最も大きく、フーチング中央のみに

表-4 地盤に関するパラメータ

地盤 種別	V_s [m/s]	N 値	γ_t [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-5 小径杭1本あたりの支持力度
(ばねの上限値算出用)

杭径 [mm]	杭種	周面 支持力度 [kN]	先端 支持力度 [kN]	鉛直支持力度 (周面＋先端) [kN]
150	打込み杭 (先端閉塞)	42.45	185.55	228.00

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。

フーチング端部に杭を10本ずつ配置したCase 5では、図-14に示す水平荷重増加量の折れ曲がり点までは、図-15に示す杭1本あたりの水平荷重増加量がCase 4とほぼ同じである。一方で、折れ曲がり点以降では水平荷重増加量が頭打ちになるため、図-15に示す杭1本あたりの水平荷重増加量はCase 4より小さくなっている。なお、図-16に示す押し込み側の杭先端鉛直ばね力－回転角関係より、水平荷重の増加量が頭打ちになるとき（回転角 0.0026rad のとき）に押し込み側の杭先端のばねが上限値に達していることがわかる。

Case 1, 3, 4の杭配置をあわせたCase 6では、杭1本あたりの水平荷重増加量はCase 2とCase 4の概ね中間の値となっている。結果は示していないがCase 1の水平荷重の値はCase 2とほぼ同じであった。このため、Case 6では、フーチング中央から近い小径杭、

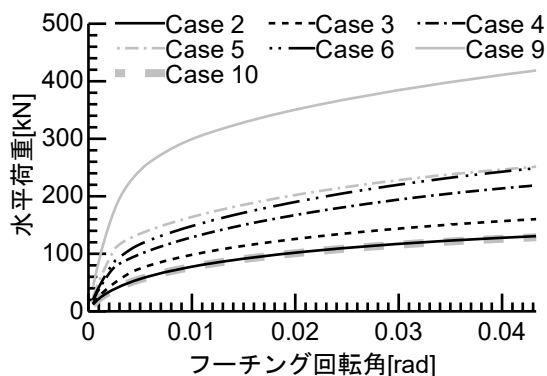


図-13 水平荷重－フーチング回転角関係

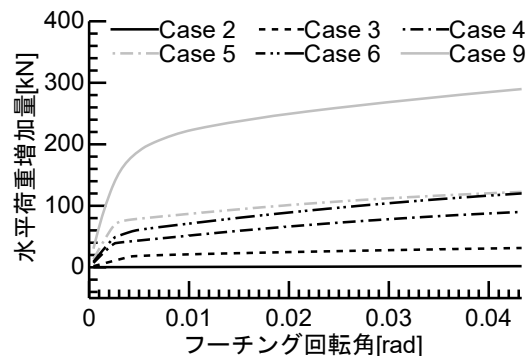


図-14 水平荷重増加量

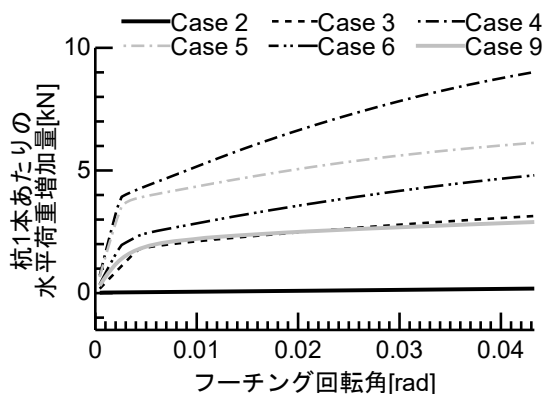


図-15 杭1本あたりの水平荷重増加量

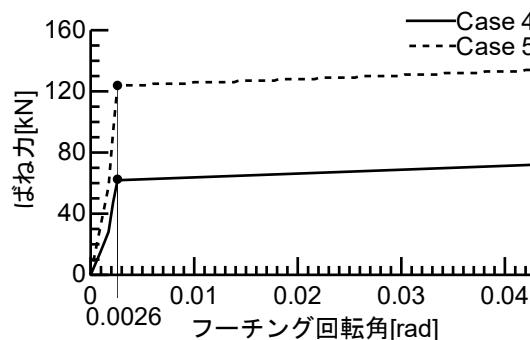


図-16 押込み側の杭先端鉛直ばね力－回転角関係
(Case 4およびCase 5)

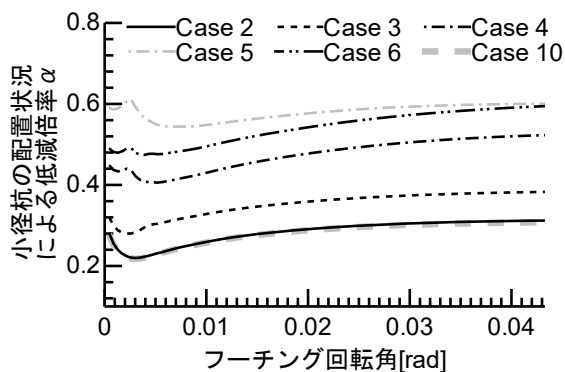


図-17 小径杭の配置状況による低減倍率 α

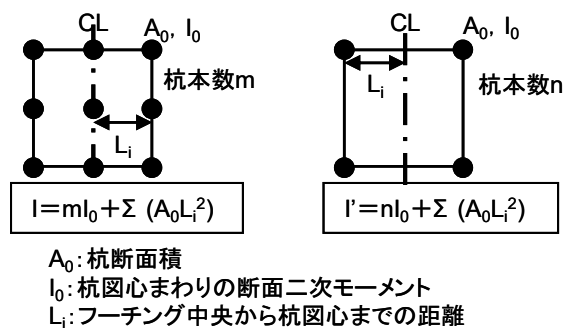


図-18 断面二次モーメント比 I'/I の概要

遠い小径杭の地盤改良効果への寄与度が平均化されていると解釈できる。

(3) 杭配置と支持力との相関性

最も密に小径杭を配置したCase 9の水平荷重で正規化したCase 1～8, 10の水平荷重を小径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-17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-18に示す。

図-17の小径杭の配置状況による低減倍率 α 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-19に示す。ここで、0.0026radは4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

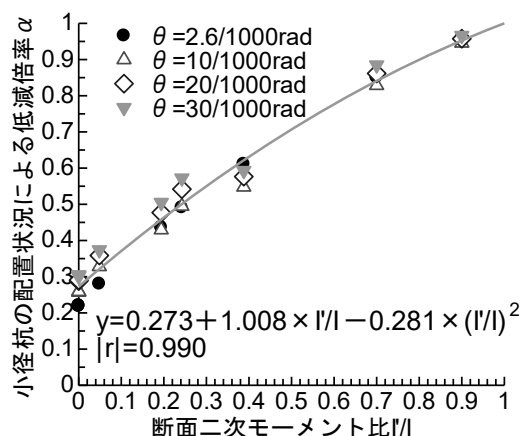


図-19 α と I/I の相関

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-19より， I/I と α の間に強い相関関係があるため， 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一回転角関係がわかれば，別の杭配置の水平荷重一回転角関係を I/I によって定量化できるといえる．

(4) まとめ

水平荷重に対する小径杭による直接基礎の支持地盤の改良効果について，FEM解析により検討を行った．得られた知見を以下に示す．

- ・小径杭を配置した直接基礎に水平荷重が作用する場合，フーチング端部に杭を配置するほど，地盤改良の効率が高い．
- ・小径杭の配置状況による補正係数 α とフーチング中心まわりの杭の断面二次モーメント比 I/I の間には強い相関関係がある．また，その結果を用いて， I/I から α を求める関係式を提案した．

4. おわりに

本稿では，鉄道構造物で古くから木杭基礎が用いられてきたことに着目し，小径杭で改良された地盤上に直接基礎を構築する基礎形式の確立を目指し，基礎的な検討として，小径杭による直接基礎の支持地盤の改良効果について FEM 解析により検討を行

ったものである．まず，小径杭を配置した直接基礎に鉛直荷重を作用させた場合を対象として，直接基礎相当の地盤改良効果が得られる杭配置について検討を行った．その結果，小径杭を用いて直接基礎の支持地盤相当の地盤改良を行うことができることがわかった．次に，小径杭を配置した直接基礎に鉛直荷重が作用した場合と，水平荷重が作用した場合を対象として，効率的に地盤改良効果が得られる杭配置について検討した．その結果，鉛直荷重に対してはフーチング中央部，水平荷重に対してはフーチング端部に小径杭を配置するほど地盤改良の効率が高いことが明らかとなった．

以上の検討より，死荷重などの鉛直荷重に対しては主としてフーチングの中央部の小径杭に抵抗させ，地震荷重などの水平荷重に対しては主としてフーチングの端部に小径杭に抵抗させることが効果的であるといえる．今後は同一のモデルに対して鉛直荷重，水平荷重に対する解析を行い，最適な杭配置について検討を行うことが課題である．

参考文献

- 1) 西村隆義，本山紘希，井澤淳，室野剛隆：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），Vol.68，No.4（地震工学論文集第31-b巻），2012．
- 2) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説 基礎構造物及び抗土圧構造物，1974．
- 3) 羽矢洋，峯岸邦行：旧式基礎を有する組積橋脚のL2耐震補強工法，鉄道総研報告，Vol. 22，No. 3，2008．
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物，丸善出版，2012．
- 5) 土井達也，日野篤志，室野剛隆：直接基礎を支持する地盤に対する小径杭を用いた地盤改良効果の評価，第52回地盤工学研究発表会，2017（投稿中）．
- 6) 野上雄太，室野剛隆：S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定，土木学会地震工学研究発表会論文集，Vol.27，2003．
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版，2012．
- 8) 土井達也，日野篤志，室野剛隆：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，第72回土木学会年次学術講演会，2017（投稿中）．
- 9) 安田進，山口勇：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．