

表層地盤改良による群杭内分担水平力の均等化に関する基礎的研究

渡辺 和博 鈴木 直子
佐原 守

Equalizing Lateral Load Sharing of Group Piles using Shallow Soil Improvement

Kazuhiro Watanabe Naoko Suzuki
Mamoru Sahara

Abstract

The lateral load shared by each pile in a group pile depends on its position. Its size is the largest at the corner piles and decreases in the order of the side and center piles. By equalizing load sharing, the foundation may resist lateral loads more efficiently. This paper presents an approach to equalize load sharing in a group pile. Shallow soil improvement was applied to the ground near the center piles. The effect was estimated using nonlinear FEM analysis. First, we validated the FEM analysis by simulating the two lateral loading test results. We then demonstrated the effect of our approach by equalizing load sharing.

概要

群杭における各杭の分担水平力は杭の平面位置によって異なり、その大きさは、建物隅部で最も大きく、辺部、中央部の順に小さくなることが知られている。その分担水平力を均等化できると、杭や基礎梁の断面設計の合理化が期待できる。そこで本研究では、分担水平力が小さい建物中央部の杭周辺のみを表層地盤改良を施し、水平地盤反力を高めることで建物中央部の杭の分担水平力を増加させ、建物辺部・隅部の杭の分担水平力を低下させることによって、各杭の分担水平力の均等化を図る方法に着目した。その均等化の効果を非線形FEMにより検討した。本研究では、まず、解析手法の妥当性の検証として、既往試験の再現結果を示す。ついで、分担水平力の均等化を図るための一案として表層地盤改良を施した場合の解析的検討の結果を示す。

1. はじめに

群杭における各杭の分担水平力は、杭の平面位置によって異なることが知られており、その大きさは、建物隅部で最も大きく、辺部、中央部の順に小さくなる。これは、群杭効果により群杭の内部では水平地盤反力が低下するためと考えられる。一方、実務設計においては、各杭の分担水平力の差異は考慮せず、各杭に乗じる群杭効果による低減係数は一律とする考え方が一般的である。

杭基礎の合理化に関しては、杭の周辺に地盤改良を施すことにより、水平地盤反力を高めて杭の水平変位を抑制する方法¹⁾⁶⁾や、既存杭の補修・補強を行う工法⁷⁾¹¹⁾が報告されている。これらは、深度方向の一部の範囲のみを改良する、あるいは、杭間を格子状に改良するなど、改良範囲に違いがあるものの、すべての杭の周辺に地盤改良を施している。

そこで本研究では、建物中央部の杭の周辺地盤のみを表層地盤改良を施して水平地盤反力を高め、杭の分担水平力を均等化する方法に着目した。建物中央部の杭の分担水平力を増加させ、建物隅部・辺部の杭の分担水平力を低下させることができれば、杭や基礎梁の断面の縮小や鉄筋量の削減により、地盤改良のコスト以上の合理化

効果が得られる可能性がある。その均等化の効果を把握するための基礎的研究として、非線形FEM(有限要素法)による解析的検討を行った。杭の耐震設計には、地震時の建物慣性力と地盤変位の影響を考慮する必要があるが、ここでは建物慣性力のみに着目した。本研究ではまず、解析手法の検証を目的とした再現解析の結果を示す。検証対象は既往の群杭の水平載荷試験結果¹²⁾や表層地盤改良を施した地盤における単杭の水平載荷試験結果¹³⁾である。ついで、再現解析と類似の地盤条件を想定したモデルケースの解析結果に基づき、表層地盤改良による群杭内分担水平力の均等化の効果を評価する。

2. 非線形 FEM 解析手法の検証

2.1 63本群杭の水平載荷試験結果に基づく検証

検討に用いる非線形 FEM による、群杭基礎の水平挙動の再現性を検証するため、既往試験の再現解析を実施した。検証対象として、解体途中の LNG タンクの基礎を利用して実施された 63 本群杭の水平載荷試験結果¹²⁾を用いた。Fig. 1 に土質柱状図と杭を示す。地表面から深度 2m まで N 値 15 程度の砂礫層が堆積し、そこから深度 8m まで N 値 0~7 のシルト混り砂・シルト質細砂・シルト質粘土が堆積している。杭先端深度は 22m であ

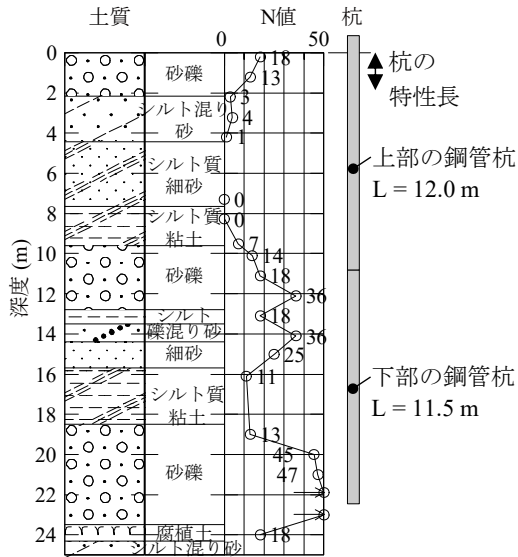


Fig. 1 土質柱状図と杭
Soil Profile and Pile

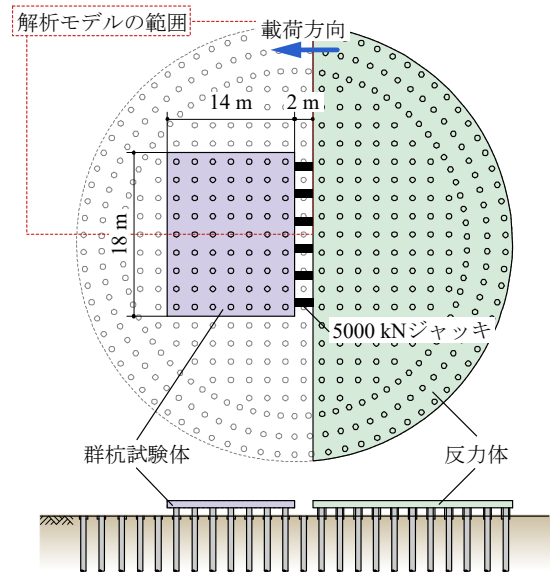


Fig. 2 群杭の水平荷重試験の概要
The Outline of the Lateral Loading Test of Group Piles

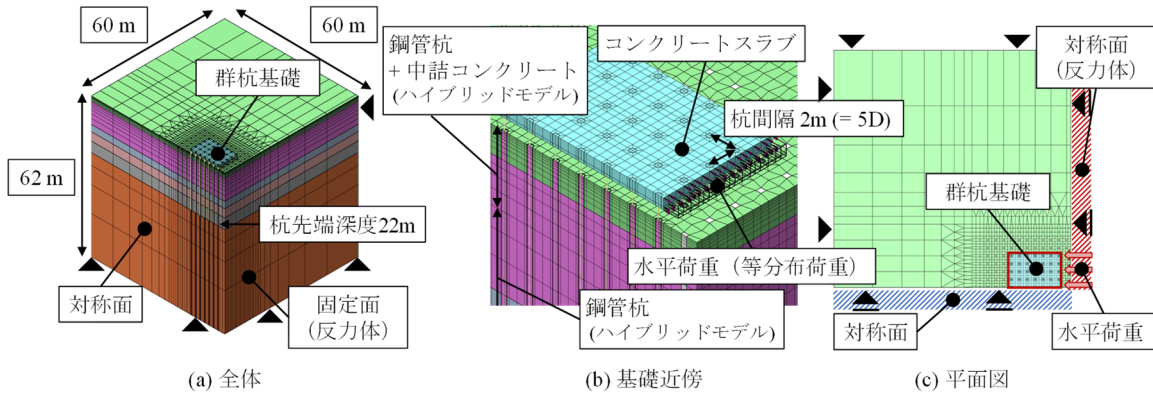


Fig. 3 解析モデルの概要

The Outline of the FEM Analysis Model

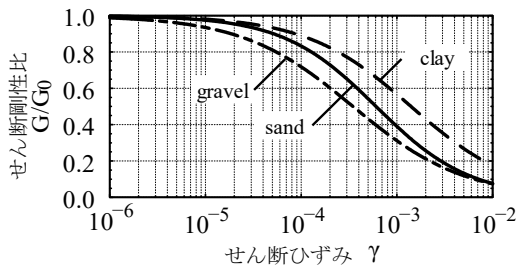


Fig. 4 地盤のせん断剛性比-せん断ひずみ関係¹⁴⁾
Shear Strain and Shear Stiffness Ratio of Soil

Table 1 解析に用いた地盤定数
Soil Properties of the Analysis

下端深度 (m)	せん断波速度 (m/s)	初期変形係数 (kN/m ²)	ポアソン比	G/G ₀ -γ 関係	N 値	極限摩擦力度 f _{max} (kN/m ²)
11.0	160	132,000	0.33	sand	5	10
13.9	300	505,000	0.33	gravel	35	70
17.5	220	245,000	0.45	clay	13	81
62.0	340	642,000	0.33	gravel	50	100

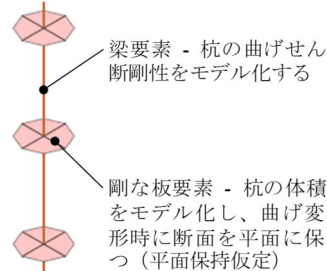


Fig. 5 杭のハイブリッドモデル
Hybrid Pile Model

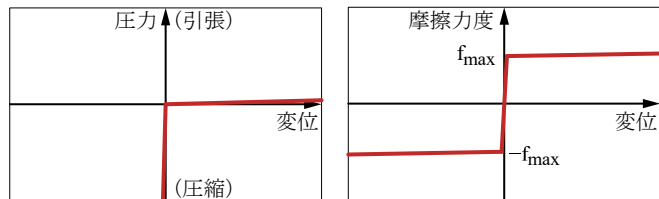


Fig. 6 インターフェース要素の荷重度-変位関係
Stress and Displacement of Interface Element

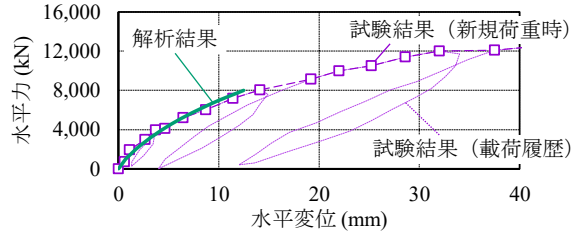


Fig. 7 杭頭の水平力-変位関係
Lateral Load and Displacement of Pile Head

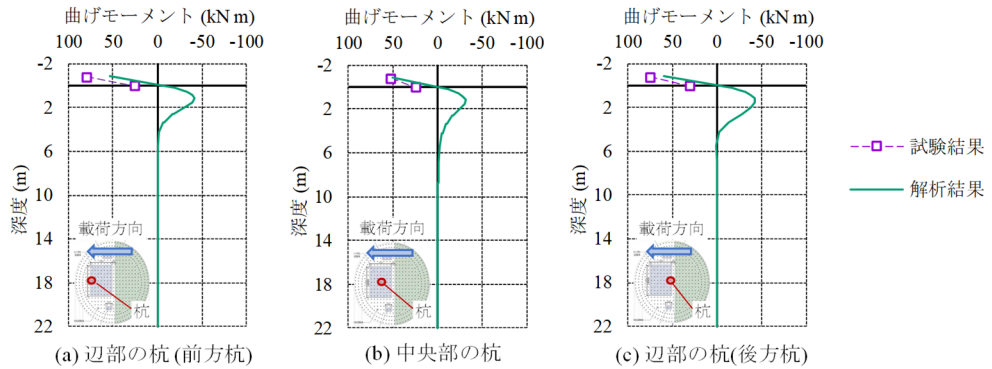


Fig. 8 曲げモーメントの深度分布(水平力4,000kN時)
Bending Moment Distribution (Under the 4,000 kN of Lateral Load)

り、杭先端はN値50以上の砂礫層に支持されている。杭の水平挙動に支配的な影響を及ぼす地盤の深度範囲は、地表面から杭の特性長程度までと言われているが¹⁴⁾、文献¹²⁾から推察される杭の特性長はおよそ2mである。杭は鋼管杭で、その直径は406mm、鋼管の厚さは上部の杭が12.7mm、下部の杭が9.6mmである。杭頭部は地表面から0.9m上方の位置にあり、厚さ0.8mの鉄筋コンクリートスラブにアンカー筋を介して定着されている。杭頭から6m下方までの杭内部には、中詰めコンクリートが充填されている。Fig. 2に群杭の水平載荷試験の概要を示す。63本(7×9)の群杭試験体と反力体の間に油圧ジャッキを配置して静的水平載荷試験が行われている。

解析には、汎用の非線形FEM解析プログラムSoilPlus¹⁵⁾を用いた。Fig. 3に解析モデルの概要を示す。対称性を考慮し、群杭試験体の半分のみをモデル化した1/2モデルとした。載荷方向に対し背面側地盤の解析領域は、反力体の前面までとした。これは、文献¹²⁾において解析領域を遠方まで確保した場合と同等の解析結果が得られていることによる。地盤は非線形ソリッド要素でモデル化し、その非線形性としてFig. 4に示すせん断剛性比-せん断ひずみ関係(G/G_0 - γ 関係)¹⁴⁾を与えた。Table 1に解析に用いた地盤定数を示す。初期変形係数はPS層から得た値を用い、極限摩擦力度は、原位置のN値に基づき、文献¹⁴⁾に示される鋼管杭の算定値を与えた。杭体にはFig. 5に示す梁要素と剛な板要素を組合せたハイブリッドモデル¹⁶⁾を採用した。杭と地盤の境界には、Fig. 6に示す剛塑性型の荷重度-変位関係を持つインターフェース要素を設け、接触・剥離と摩擦挙動を表現した。

Fig. 7に杭頭の水平力-水平変位の解析結果を試験結果と比較して示す。解析結果は水平力8,000kN、水平変位12.5mmまでの範囲で、試験結果とよく対応している。Fig. 8に、水平力4,000kN、水平変位4.5mmにおける曲げモーメントの深度分布の解析結果を試験結果と比較して示す。曲げモーメントの深度分布の試験結果は、杭頭部の2深度のみで計測されている。解析で得た曲げモーメントの大きさは、Fig. 8 (a), (c)に示す辺部の杭よりも(b)に示す中央部の杭で小さくなっている。この大小関係は、試験結果と対応している。しかし、これを越える水平変位では、解析結果と試験結果が乖離する傾向が認められたことから、水平変位のみならず曲げモーメントの対応も良い範囲を併せると、水平変位4.5mm(杭径の1.4%)が本解析手法を適用可能な水平変位の限界と考えられる。

2.2 表層地盤改良を施した単杭の水平載荷試験結果に基づく検証

検討に用いる非線形FEMによる、表層地盤改良を施した杭の水平挙動の再現性を検証するため、既往試験の再現解析を実施した。検証対象として、格子状の表層地盤改良を施した単杭の水平載荷試験結果¹³⁾を用いた。文献¹³⁾には、表層改良を行わない自然地盤での結果も示されており、両ケースに対しての再現解析を実施した。Fig. 9に水平載荷試験の概要を示す。地表面から深度6mまでN値3程度の有機質シルト層が、そこから深度10mまでN値14~19の細砂層が堆積している。杭先端深度は9.1mであり、N値19の細砂層に杭先端が支持されている。

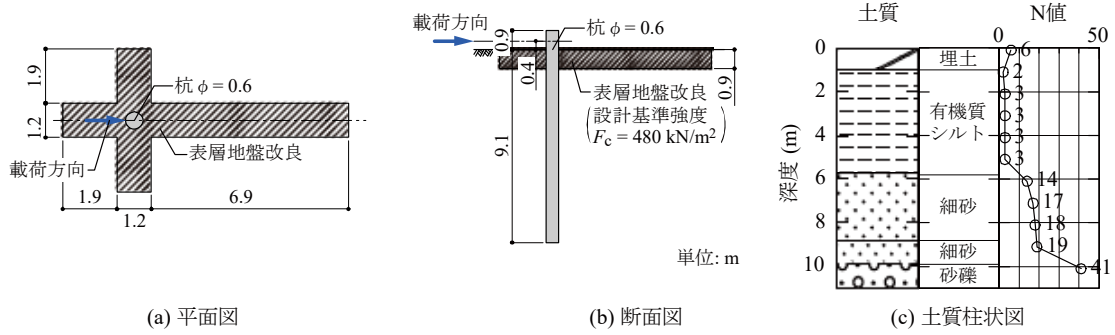


Fig. 9 表層地盤改良を施した単杭の水平載荷試験の概要
The Outline of the Lateral Loading Test of Single Pile with Soil Improvement

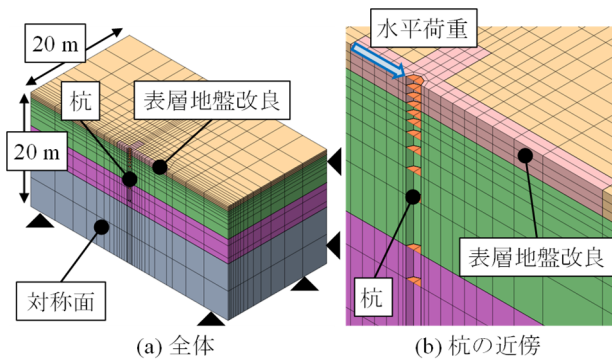


Fig. 10 解析モデルの概要
The Outline of the FEM Analysis Model

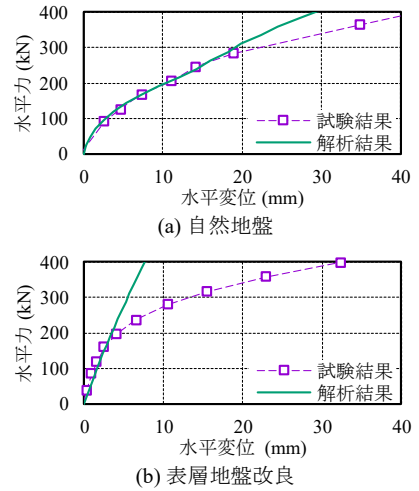


Fig. 11 杭頭の水平力-変位関係
Lateral Load and Displacement of PileHead

Table 2 解析に用いた地盤定数
Soil Properties of the Analysis

地層名	下端深度 (m)	せん断波速度 (m/s)	初期変形係数 (kN/m ²)	ポアソン比	G/G ₀ -γ 関係	N値	極限摩擦力度 f _{max} (kN/m ²)
埋土	0.9	145	106,000	0.30	sand	4	12.5
有機質シルト	5.8	115	59,000	0.40	clay	3	12.5
細砂	9.1	200	197,000	0.30	sand	19	25.0
砂礫	20.0	315	589,000	0.30	gravel	41	25.0

Table 3 解析に用いた地盤改良体の定数
Improved Soil Properties of the Analysis

等価変形係数 (kN/m ²)	ポアソン比	設計基準強度 F _c (kN/m ²)
86,000	0.25	480

また、文献¹³⁾から推察される杭の特性長はおよそ1.6mである。杭は既製コンクリート杭であり、直径は0.6m、長さは10mである。杭頭部は地表面から0.9m上方の位置にあり、地表面からの加力点高さは0.4mである。表層地盤改良の厚さは0.9m、平面形状はFig. 9(a)に示すような格子状であり、設計基準強度 F_c は480kN/m²である。

利用した解析手法は2.1で示した手法と同じ非線形FEMである。Fig. 10に解析モデルの概要を、Table 2およびTable 3に解析に用いた定数を示す。地盤のせん断波速度および初期変形係数は、地盤のN値に今井の式¹⁷⁾を適用して推測した。極限摩擦力度には文献¹⁴⁾に示される埋込み杭の算定値を採用した。地盤改良体は弾性体とし、

その等価変形係数は、文献¹⁸⁾に示される一軸圧縮強さ q_u (= 設計基準強度 F_c)と等価変形係数 E_{50} の関係式($E_{50} = 180 q_u$)による算定値86,000kN/m²を採用した。この値は、文献¹³⁾で示される表層地盤改良体の上で実施した急速平板載荷試験より得られた変形係数95,000kN/m²に近い。

Fig. 11に杭頭の水平力-水平変位関係の解析結果を試験結果と比較して示す。(a)は自然地盤の場合、(b)は表層地盤改良を施した場合である。自然地盤の場合は水平力240kN、水平変位14.3mm(杭径 D の2.3%)までの範囲、表層地盤改良を施した場合は水平力180kN、水平変位3.5mm(杭径の0.6%)までの範囲で、解析結果は試験結果と対応している。これは、解析では地盤改良体を

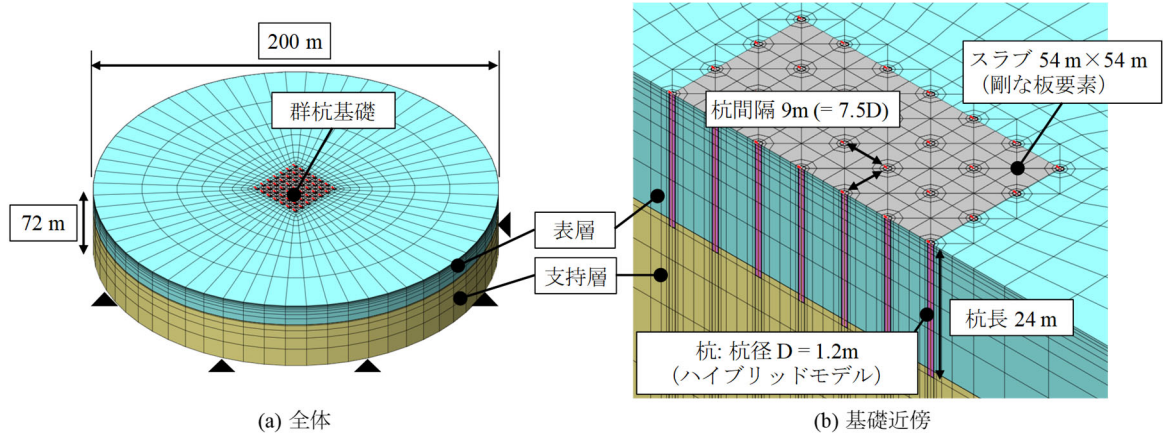


Fig. 12 解析モデルの概要
The Outline of the FEM Analysis Model

Table 4 解析に用いた地盤定数
Soil Properties of the Analysis

地層名	せん断波速度 (m/s)	初期変形係数 (kN/m ²)	ポアソン比	G/G ₀ -γ 関係	N 値	極限摩擦力度 f _{max} (kN/m ²)
表層	130	81,000	0.40	clay	3	18
支持層	340	624,000	0.30	sand	50	125

Table 5 杭の断面性能
Cross-Sectional Performance of Pile

換算断面積 (m ²)	換算断面二次モーメント (m ⁴)	弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比
0.515	7.25×10 ⁻²	4.00×10 ⁷	0.2

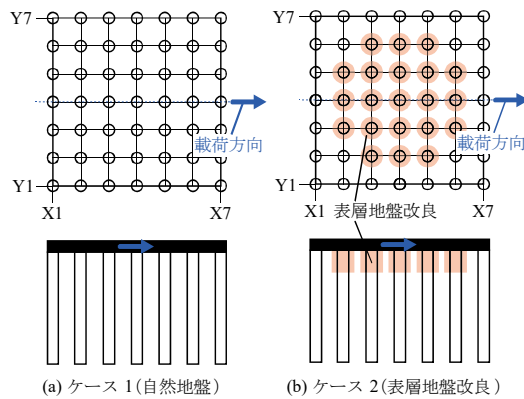


Fig. 13 解析ケース
Analysis Cases

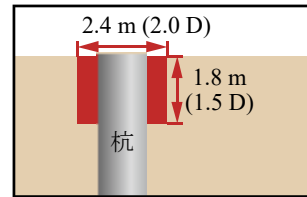


Fig. 14 表層地盤改良の範囲
Soil Improvement Extent

Table 6 地盤改良体の定数
Material Property of Improved Soil

変形係数 (kN/m ²)	ポアソン比	一軸圧縮強さ (kN/m ²)
90,000	0.25	500

弾性体でモデル化しているため、水平変位が大きな領域では、地盤改良体の非線形性が著しくなり、解析値が試験値と乖離するためと思われる。

2.3 試験結果を再現可能な水平変位の範囲および地盤条件

再現解析において、解析結果と試験結果が対応した条件を整理する。

試験結果との対応を確認できた水平変位の範囲は、自然地盤に対しては、水平変位が杭径の1.4%以下、表層地盤改良を施した地盤では水平変位が杭径の0.6%以下である。したがって、対応を確認できた杭の特性長までの深度範囲の地盤条件は、平均N値15前後の砂質土、または平均N値4前後の粘性土である。

3. 分担水平力の均等化に関する検討

3.1 解析条件

2.3で整理した条件を基本として、解析的検討のためのモデルケースを設定し、表層地盤改良による群杭内分担水平力の均等化の効果を検討する。Fig. 12に解析モデルの概要を示す。スラブの平面寸法は54m×54m、杭本数は49本(7×7)である。軟弱地盤上に建つ杭基礎建物を想定し、表層がN値3のシルト層、支持層がN値50の砂層からなる地盤モデルを作成した。Table 4に解析に用いた地盤定数を示す。杭は既製コンクリート杭であり、直径は1.2m、長さは24mである。杭先端は支持層に1.2m(杭径D)に対して1.0D)根入れした。Table 5に杭の断面性能を示す。杭の断面積および断面二次モーメントは、それぞれ

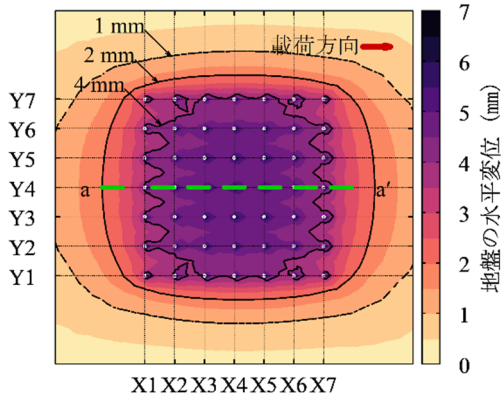


Fig. 15 地盤の水平変位(ケース1, 深度2m)

Lateral Displacement of Soil (Case 1, 2 m Below the Surface)

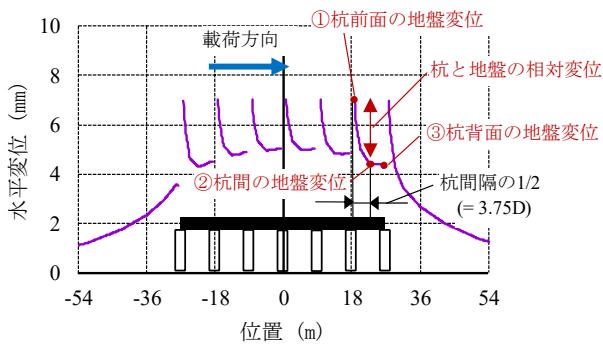


Fig. 17 地盤の水平変位(ケース1, a-a'断面, 深度2m)

Lateral Displacement of Soil (Case 1, a-a' Cross Section, 2 m Below the Surface)

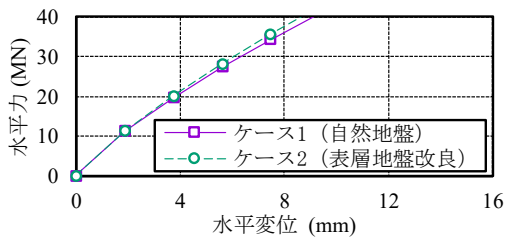


Fig. 19 杭頭の水平力-変位関係

Lateral Load and Displacement of Pile Head

PC鋼材を考慮した換算断面面積および換算断面二次モーメントである。スラブを剛な板要素でモデル化していることより、剛床仮定が成立し、各杭頭の水平変位は等しい。スラブの鉛直変位は拘束し、載荷時にスラブには水平変位のみが生じる条件とした。建物はRC造4階建を想定し、これに水平震度0.2に相当する水平力33.6MNをスラブに作用させた。水平力は、偏心なくスラブの重心位置に集中荷重として与えた。建物幅に対する建物高さの比となる塔状比は0.3を想定し、発生する変動軸力の影響は無視した。

Fig. 13に解析ケースを示す。ケース1が自然地盤、ケース2が表層地盤改良を施した場合を想定した解析ケースである。Fig. 14に表層地盤改良の範囲を、Table 6に地盤改良体の定数を示す。

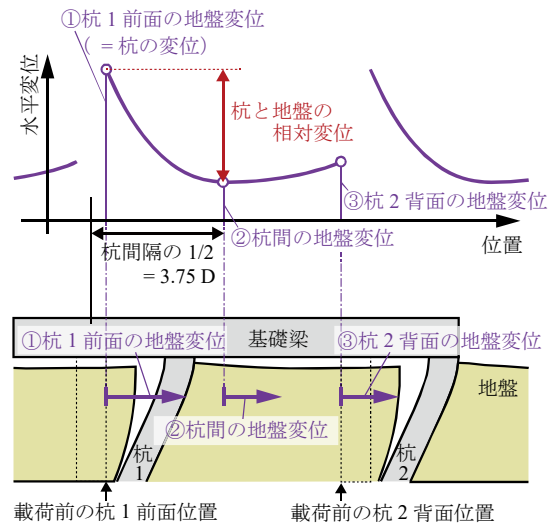


Fig. 16 地盤の水平変位の模式図

Schematic Diagram of Lateral Displacement of Soil

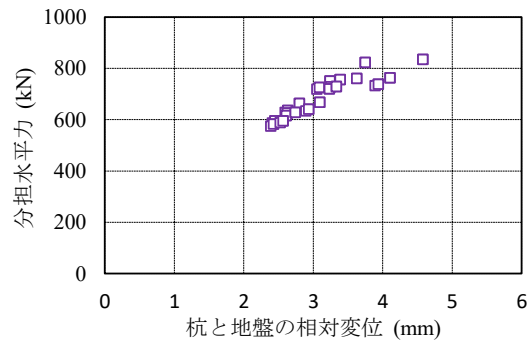


Fig. 18 深度2mにおける杭と地盤の相対変位と杭の分担水平力

Pile-soil Relative Displacement on 2 m Below the Surface and Lateral Load

3.2 解析結果

まず、自然地盤であるケース1における、群杭効果についての結果を示す。Fig. 15に水平地盤反力が最大となる深度2mにおける地盤の水平変位のコンターを示す。全体の水平変位分布の傾向を見ると、中央部の杭(X4, Y4)付近で最大値が発生し、そこから同心円状に低下するような平面分布が認められる。

Fig. 16に地盤の水平変位と杭の水平変位の関係を模式的に示す。ここで、本研究では杭前面の地盤変位と杭間の地盤変位の差を杭と地盤の相対変位と定義する。Fig. 17に、ケース1におけるa-a'断面 (Fig. 15中に図示) の地盤の水平変位を示す。各杭の近傍について見ると、杭の前面で水平変位が大きく、杭の背面で小さい。これは、杭の前面では地盤が杭に押し出されるのに対して、

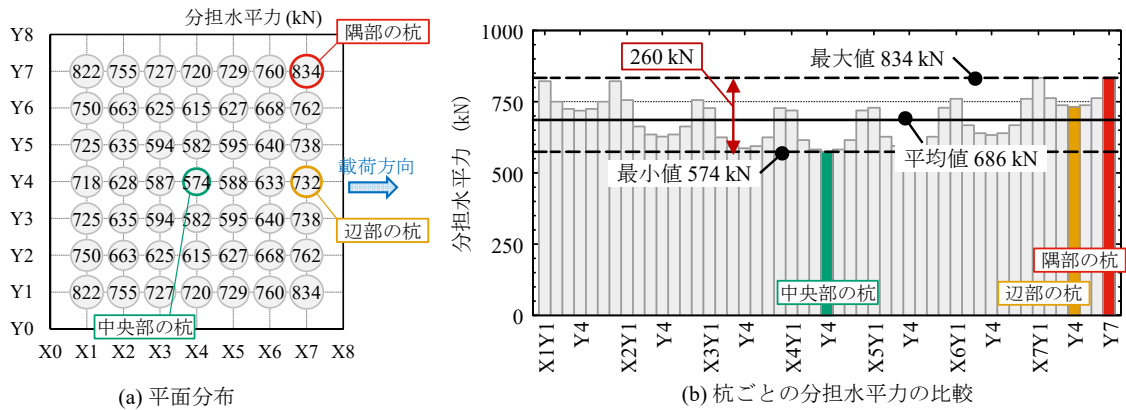


Fig. 20 各杭の分担水平力(ケース1 自然地盤)
Lateral Load for Each Pile (Case 1)

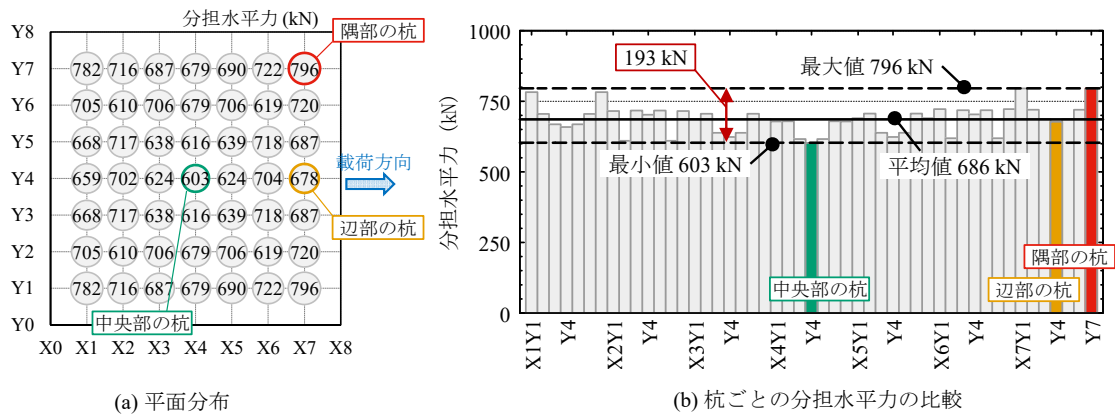


Fig. 21 各杭の分担水平力(ケース2 表層地盤改良)
Lateral Load for Each Pile (Case 2)

杭の背面では地盤と杭が剥離しているためである。群杭全体について見ると、群杭の中央部では杭と地盤の相対変位が小さく、辺部では大きい。その分布は、杭の平面位置による分担水平力の違いと対応している。Fig. 18に杭と地盤の相対変位と分担水平力の関係を示す。両者に強い相関があることから、群杭内の各杭の分担水平力の差異は、杭の位置によって杭と地盤の相対変位が異なるために生じていると考えられる。たとえば、建物中央部では、杭間の地盤が杭とともに動くことで群杭効果が大きくなり、水平地盤反力が低下している。

続いて、自然地盤であるケース1と、表層地盤改良を施したケース2を比較し、分担水平力の均等化の効果についての結果を示す。Fig. 19に杭頭の水平力-水平変位関係を示す。いずれのケースも水平力33.6MNにおける水平変位は7.5 mm (杭径の0.6%)で、表層改良の有無による群杭全体の水平力-水平変位関係に差は生じていない。

Fig. 20およびFig. 21に杭の分担水平力の平面分布と、杭ごとの分担水平力の比較を示す。自然地盤であるケース1を見ると、分担水平力は隅部の杭が最も大きく、次いで辺部の杭、中央部の杭の順に大きい。最大分担水平

力は荷重方向前面側の隅部の杭(X7, Y1)と(X7, Y7)に発生し、総水平力を杭本数で除した分担水平力の平均値に対して148kN(22%)大きい。最小分担水平力は中央部の杭(X4, Y4)に発生し、平均値に対して112kN(16%)小さい。

表層改良を適用したケース2でも、分担水平力は隅部の杭が最も大きく、中央部の杭で最も小さい。最大・最小分担水平力ともに発生している杭の位置はケース1と同じである。一方で、個々の杭の平均値からの差異はケース1よりも小さくなっている。具体的には、最大分担水平力は荷重方向前面側の隅部の杭(X7, Y1)と(X7, Y7)で発生しているが、平均値に対して110kN(16%)大きな値に留まっている。最小分担水平力も中央部の杭(X4, Y4)で発生しているが、平均値に対して83kN(12%)小さな値に留まっている。

均等化の効果の指標として、Fig. 20 (b)およびFig 21 (b)に図示した分担水平力の最大値と最小値の差に着目すると、ケース1ではその差が260kNであるのに対し、ケース2では193kNである。検討モデルでは、表層改良を適用することにより、分担水平力の最大値と最小値の差が自然地盤の場合の7割程度に低減された。

4. まとめ

本研究では、群杭基礎において建物中央部の杭周辺のみならず表層地盤改良を施すことにより、各杭の分担水平力を均等化する方法について、49本群杭のモデルケースを対象とした非線形FEMによる解析的検討を行った。

解析的検討に先立ち、採用する解析モデルの適用範囲について自然地盤における群杭の載荷試験、および表層地盤改良を適用した単杭の水平載荷試験の再現解析で検証した。その結果、解析モデルの適用範囲は、地盤条件ではN値15前後の砂質土もしくはN値4前後の粘性土、建物条件では剛床仮定が成立する変動軸力の小さな建物、杭の水平変位の範囲では杭径の0.6%以下となった。

以下に、モデルケースの解析的検討で得た群杭の分担水平力の均等化に関する知見を示す。

- 1) 水平荷重の加力方向に対し、杭前面の地盤変位と杭間の地盤変位の差に着目すると、その差と群杭における各杭の分担水平力には相関がある。たとえば、建物中央部のように杭が密集する部分では、杭間の地盤が杭とともに動くことで群杭効果が大きくなり、水平地盤反力が低下した結果、中央部の杭の分担水平力も低下する。
- 2) 表層地盤改良のない自然地盤のケースでは、各杭の分担水平力は総水平力を杭本数で除した平均値に対して、最大分担水平力は22%大きな値、最小分担水平力は16%小さな値となった。
- 3) 中央部の杭周辺のみならず表層地盤改良を施したケースでは、自然地盤のケースと比較して、各杭の分担水平力が均等化された。均等化の効果の指標として分担水平力の最大値と最小値の差を取ると、その差は自然地盤のケースの7割程度に低下した。

本研究では表層地盤改良を用いて、群杭を構成する各杭の分担水平力を均等化できる可能性を見出した。ただし、均等化の効果は地盤条件や杭仕様によっても異なる。モデルケース以外の条件や、より大きな水平変位における均等化の効果の定量評価は、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 濱田純次, 土屋富男, 加倉井正昭, 山下清, 河合栄作, 桑原文夫: 表層地盤改良を施した杭の水平載荷実験, 第36回地盤工学研究発表会(徳島), pp. 1663-1664, 2001
- 2) 本間裕介, 富永晃司, 小椋仁志, 永井及: 鉄鋼スラグによる改良地盤中杭の水平抵抗増大効果確認実験, 第49回地盤工学シンポジウム, 2004
- 3) 富澤幸一, 三浦清一, 渡辺忠朋: 複合地盤の改良範囲および改良強度が杭の地震時挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集C, Vol.164, No.1, pp. 127-143, 2008
- 4) 前田良刀, 市川晃央, 鶴窪誠司, 齋藤雄也, 広瀬剛, 坂手道明: 地盤改良複合杭基礎の支持力特性と実務

への適用性の検討, 地盤工学会, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.1, pp. 37-54, 2008

- 5) 永井宏, 土屋勉, 池田篤則, 佐藤雄太, 島田正夫: 杭頭周囲に柱状地盤改良を併用した回転貫入杭の水平抵抗力特性, 地盤工学会, 地盤工学ジャーナル, Vol. 11, No. 2, pp. 127-137, 2016
- 6) 松村聡, 松原宗伸, 藤井愛彦, 水谷崇亮, 森川嘉之, 佐藤真: 杭間地盤をセメント固化改良した組杭の横抵抗特性, 港湾空港技術研究所報告, 第56巻第3号, pp. 3-27, 2017.9
- 7) 塩井幸武, 瀬川信弘, 稲川浩一, 加藤康司: 地盤改良を併用した杭基礎構造物の耐震補強工法(In-Cap工法)の開発, 第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 1-8, 2004.1
- 8) 足立有史, 浦野和彦, 竹之下朋章, 丹澤宣彦, 河邑眞: 地盤固化工法を用いた杭基礎の耐震補強工法の実大実験, 土木学会論文集C, 第63巻3号, pp. 752-762, 2007
- 9) 富澤幸一, 西本聡: 固化改良体を併設する既設杭基礎の耐震補強技術—コンポジットパイルの耐震効果の実験検証—, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 329-336, 2012
- 10) 西遥輝, 岡良亮, Kheradi Hamayoon, 張鋒: 既設群杭基礎の地盤部分改良工法の耐震補強効果に関する研究, 第27回中部地盤工学シンポジウム, pp. 108-113, 2015
- 11) 島村淳, 久世直哉, 鎌田敏幸, 楠浩一, 井上波彦, 柏尚稔, 二木幹夫: 高圧噴射攪拌式の地盤改良による既存杭の補修・補強に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp. 643-648, 2019.9
- 12) 寺本俊太郎, 木村亮, 西崎丈能, 新村知也, 井上昭生, 阿久津富弘: 既設のLNGタンク基礎を用いた63本群杭基礎の水平載荷試験に基づく群杭の挙動に対する考察, 土木学会論文集C, Vol. 70, No. 2, pp. 275-289, 2014
- 13) 伊勢本昇昭, 保井美敏, 金子治, 佐野大作, 成田修英: 格子状地盤改良杭(Head Lock Pile)工法の開発, 戸田建設技術研究報告, 第35号, pp. 8-1-8-9, 2009
- 14) 日本建築学会, 建築基礎構造設計指針, 2001
- 15) 伊藤忠テクノソリューションズ: SoilPlus 2017, 2017.10
- 16) 小西厚夫, 渡辺一成, 鈴木直子, 関崇夫, 佐藤清, 茶谷文雄: 超高層タワーを支持する壁節杭の群効果の評価, 日本建築学会技術報告集, Vol. 17, No. 37, pp. 855-860, 2008
- 17) Imai: T. P-and S-wave velocities of the ground in Japan, Proc. 9th ICSMFE, vol. 2, pp. 257-260, 1981
- 18) 日本建築センター, 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—, 第3版, pp. 49-50, 2012