

### 地中梁のない杭基礎における群杭効率の評価

土井 一朗\* 野原 隆雅\*\* 山本 剛史\*\*\*  
佐名川 太亮# 田村 修次##

#### Evaluation of Pile Group Efficiency in Pile Foundations without Footing Beams

Ichiro DOI Ryuga NOHARA Takeshi YAMAMOTO  
Taisuke SANAGAWA Shuji TAMURA

When designing pile foundations against lateral forces, pile group efficiency is considered when evaluating lateral subgrade reaction. Pile group efficiency is generally assessed under the assumption that footing beams or footings are used. However, in some cases, such as pile foundations for over-tracks buildings, neither footing beams nor footings are used. Therefore, this study investigates the influence of footing beams on pile group efficiency through centrifuge model tests and 3D elasto-plastic finite element analysis. The results indicate that the absence of footing beams enhances the pile group efficiency. The mechanism is elucidated by examining the pile deformation modes and the stress distribution in the surrounding soil.

キーワード：群杭効率，線路上空建築物，水平抵抗，有限要素法，遠心力模型実験

#### 1. はじめに

水平力に対する杭基礎の設計においては、弾性支承上梁理論<sup>1)</sup>や、杭を梁要素、地盤をウインクラ―ばねでモデル化した梁ばねモデルによる解析によって応力を評価することが多い。これらの杭の評価方法では、地盤ばねを水平地盤反力係数で与えるが、一般に水平地盤反力係数を評価する際には、群杭効率と呼ばれる群杭効果による低減係数が掛けられる。群杭効果は、地盤を介した杭同士の相互干渉の影響で、単杭に比べて杭1本あたりの支持力が小さくなる現象である。群杭効率は、単杭の支持力に対する、群杭全体の支持力を杭本数で除した杭1本あたりの支持力の割合である。すなわち、群杭効果が大きくなるほど群杭効率は小さくなる。水平抵抗においては、群杭の1本あたりの杭頭割線剛性の低減率で群杭効率が評価される。水平抵抗に関する群杭効果を対象とした研究は、理論的研究<sup>例え2) 3)</sup>から実験的研究<sup>例え4) 5) 6)</sup>、解析的研究<sup>例え7) 8)</sup>など、幅広く実施されている。また、各設計基準において群杭効率の評価方法が提案されている。建築分野では建築基礎構造設計指針<sup>9)</sup>、鉄道土木分野では鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物<sup>10)</sup>、道路分野では道路橋示方書・同解説 IV下部構造編<sup>11)</sup>に群杭効率の評価式が示されている。

しかし、これらの研究のほとんどは、地中梁もしくはフーチングがあることを想定して、突出がない杭頭固定の条件で検討されている(図1(a))。しかし、図1(b)に示すような鉄道軌道上に建設される線路上空建築物<sup>12)</sup>は、杭間に線路が通っているため、施工上の理由で地中梁を設けられない場合が多い。また、他にもフーチングや地中梁がないパイルベント構造を用いた構造物も存在する。これらの構造形式における杭基礎は、杭頭が固定されていないため、上部構造と下部構造を一体としたモデルで設計されることが一般

\* 構造物技術研究部 駅空間研究室  
\*\* 元 東京科学大学  
\*\*\* 元 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室  
# 旧 構造物技術研究部 基礎・土構造研究室(現 橋りょう研究室)  
## 東京科学大学

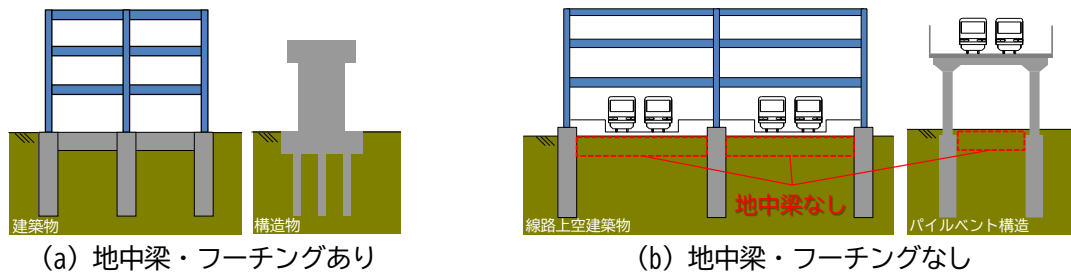


図1 杭基礎の形式

的である<sup>12)</sup>。このような1柱1杭形式の場合、地上部の柱と杭が一体となり柱を突出部とみなした突出杭として挙動すると考えられるが、突出杭における群杭効果に関する研究は、ほとんど行われていない。

そこで、本研究では地中梁の有無が群杭効率に与える影響を調べることを目的に、突出杭を対象とした遠心載荷実験および3次元弾塑性有限要素法による解析を行い、群杭効率の変化のメカニズムについて考察した<sup>13)</sup>。

## 2. 遠心載荷実験

図2に、模型の概要と計測器の配置図を示す。図中の括弧内の寸法は実大スケールを示す。実験は京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用いて、50G場で行った。表1に、本実験に関する遠心力場の相似則を示す。遠心実験では遠心力によって重力を増加させることで、寸法を小さくしながらも実物と同じ応力場を再現することができる。実験は地中梁の有無が群杭効率に与える影響を調べるために、表2に示す4ケースを行った。Case A-Sは、地中梁なしの単杭を想定したケースで、群杭と杭頭固定度を揃えるために杭間隔を10D(Dは杭径)とった2本杭とした。Case A-Gは、載荷方向および載荷直交方向の杭間隔が3Dの6本杭で、同様に地中梁なしのケースである。地中梁なしのケースは、前述のように杭と柱が一体として挙動するため突出杭としている。Case B-S、Case B-GはそれぞれCase Aの地中梁ありのケースである。ただし、実際には模型製作の都合上、地中梁はフーチングで表現し、地表面から10mm高い位置にある。また、Case Aと根入れ深さが揃うように杭先端を固定する金属板をかき上げしている。杭は、全てのケースで、外径10mm(実大スケール0.5m)、肉厚1mm(50mm)、のアルミ製パイプとした。曲げ剛性は、別途実施した気中1G場での曲げ試験をもとに計算した。

土槽は剛土槽で、内寸は350mm×450mm×150mmである。杭先端は、土槽底面に設置した金属板にボルトで固定した。杭頭は無収縮モルタルでフーチングに固定した(図2(d))。模型作製は、杭先端の固定、地盤作製、杭頭の固定の順に行った。ひずみゲージは、地中部は杭の内側に、突出部は杭の外側に貼付し、地中部5深度、突出部2深度で曲げひずみを計測した(図2(b))。Case A-S、Case B-Sは2本ともひずみゲージを貼付した。なお、Case A-GはG1、G2、G3、G6(図2(c))の4本にひずみゲージを貼付し、Case B-Gについてはひずみを測定していない。また、レーザー変位計によって、G.L+10mm(0.5m)の前方杭の水平変位およびフーチングの加力方向前面側、背面側の水平変位を測定した。Case Bは突出がほとんどないため、杭の水平変位は測定していない。なお、杭の水平変位は地表面よりも若干高い位置であるが、ここではG.L+10mm(0.5m)の水平変位を地表面変位と呼ぶ。載荷は一方単調載荷で、アクチュエータを用いてフーチングをワイヤロープで引っ張り、杭の地表面変位が0.1Dに達するまで載荷した。載荷速度は1mm/1minとした。荷重はロードセルによって測定している。なお、以降の結果は全て実大スケールで示し、解析結果も含めて、特記なき限り変位は全て水平変位を示す。

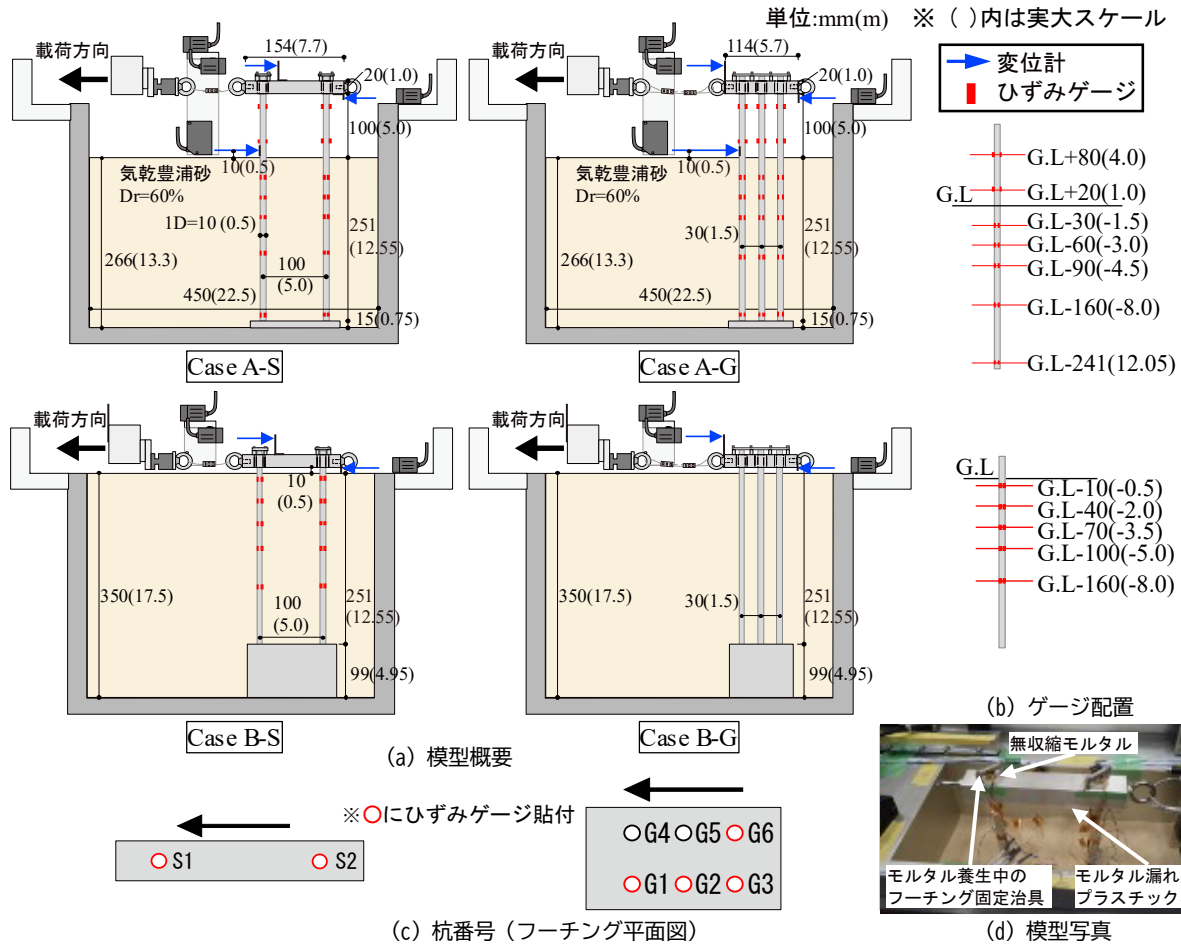


図2 模型の概要と計測器の配置図

表1 N(G)場における相似則

項目	模型	プロトタイプ
長さ	1	N
応力	1	1
ひずみ	1	1
力	1	N <sup>2</sup>
質量	1	N <sup>3</sup>

表2 実験ケースの概要 (実大スケール)

ケース名	杭本数 (本)	杭径 D (m)	肉厚 t (mm)	杭長 L (m)		杭間隔 (m)
				地中部	突出部	
Case A-S	2 (1×2)	0.5	50	12.55	5	10D
Case A-G	6 (2×3)	0.5	50	12.55	5	3D
Case B-S	2 (1×2)	0.5	50	12.55	0.5	10D
Case B-G	6 (2×3)	0.5	50	12.55	0.5	3D

### 3. 3次元弾塑性有限要素法による解析手法

解析には、SoilPlusを用いた。解析モデルを図3に示す。解析領域は、実験で用いた土槽の実大スケールと同様として、対称条件を考慮した1/2モデルとした。境界条件は、底面を固定条件、側面を鉛直ローラ条件、対称面を対称境界条件とした。杭は、曲げを表現する弾性梁要素と杭の体積を表現する剛な板要素を用いたハイブリッドモデル<sup>14)</sup>を用いてモデル化した。また、杭一地盤間には、摩擦および剥離を考慮するジョイント要素を、剛な板要素と地盤のソリッド要素間に設けた。実験でフーチング自体を固定していないため、解析でもフーチングには境界条件を与えていない。地盤は弾完全塑性のソリッド要素として、降伏条件にはMohr-Coulomb条件を用いた。荷重方法は、自重解析を行った後、フーチング側面に集中荷重を加える単調荷重とした。なお、自重解析は弾性解析で行った。

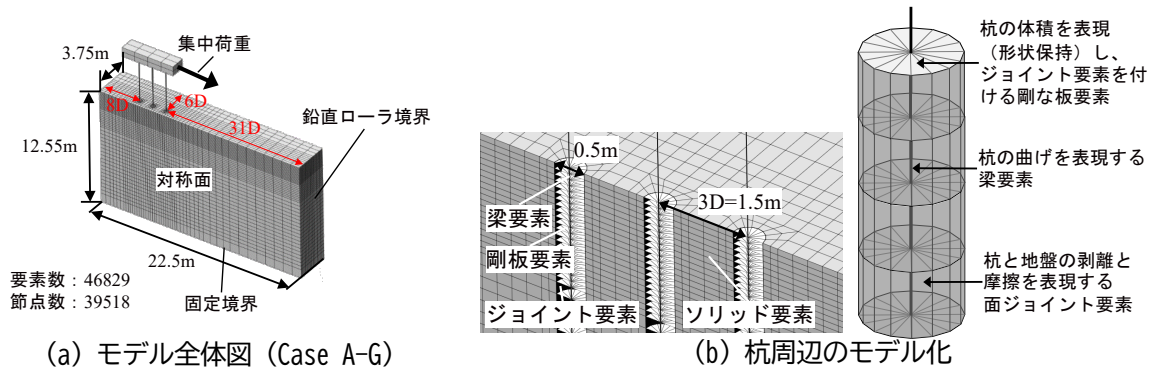


図3 解析モデルの概要図

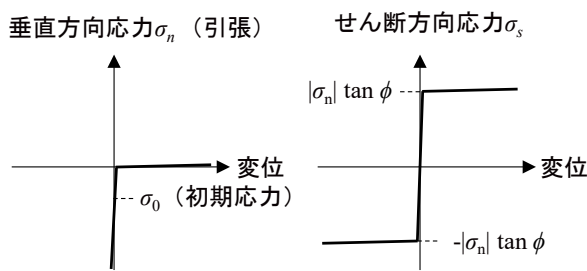


図4 ジョイント要素のモデル化

表3 解析モデルのパラメータ

杭 (Case A-S)	曲げ剛性 $EI_p$ (kN*m <sup>2</sup> )	$1.22 \times 10^5$
地盤	弾性係数 $E_s$ (kN/m <sup>2</sup> )	$2618\sigma_m^{0.5}$ (*)
	ポアソン比 $\nu$	0.4
	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.53
	静止土圧係数 $K_0$	0.5
	降伏条件	Mohr-Coulomb
	内部摩擦角 $\phi$ (°)	40
	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$1.0 \times 10^{-5}$
	膨張角 $\psi$ (°)	$0.1\phi$

\* $\sigma_m$ : 平均応力(kN/m<sup>2</sup>)

表3に、解析に用いたモデルのパラメータを示す。杭の曲げ剛性は、前述の曲げ実験で得られた値を用いた。地盤の弾性係数については、拘束圧を考慮して地盤の平均垂直応力の0.5乗に比例するものとして、Case A-Sの荷重—変位関係が実験と一致するように試行錯誤的に比例係数を設定した。内部摩擦角およびポアソン比については既往研究<sup>15)</sup>を参考にした。膨張角については、 $0.1\phi$ <sup>7)</sup>とした。杭—地盤間のジョイント要素は、図4に示す垂直方向は引張カットの剛塑性型、せん断方向は地盤の内部摩擦角 $\phi$ を用いたクーロン摩擦による剛塑性型の応力—変位関係でモデル化した。

## 4. 遠心載荷実験および解析の結果

### 4.1 荷重—変位関係

図5に、各ケースで得られたフーチングでの荷重—変位関係を示す。実験におけるフーチングの変位は、加力方向前面側、背面側の2箇所で測定していたが、Case A-Sの背面側の変位に乱れが生じていたため、全てのケースで前面側の変位を用いた。前章で述べたように、解析で用いた地盤の弾性係数は、Case A-Sの荷重—変位関係が一致するように設定しているため、Case A-Sについては当然実験結果と対応する解析結果が得られているが、その他のケースについても概ね対応する結果が得られている。なお、実験では杭の地表面変位を基準に載荷を行っているため、Case AとCase Bでフーチング変位の最大値が異なっている。

図6に、Case Aにおける各杭の杭頭せん断力と杭の地表面変位の関係を示す。杭頭せん断力は、突出部の2点の曲げひずみから計算した曲げモーメントをもとに算出した。杭の変位は、前方杭 (Case A-S1, Case A-G1) しか測定していないため、ここでは杭頭せん断力のみ杭位置で変えている。Case A-Sをみると、前方杭と後方杭で杭頭せん断力がほとんど同じだが、変位が大きくなるとわずかに前方杭の方が大きくなっている。この杭頭せん断力の差は、実験と解析の両者で見られるため、杭間隔を10Dとっていたがわずかに

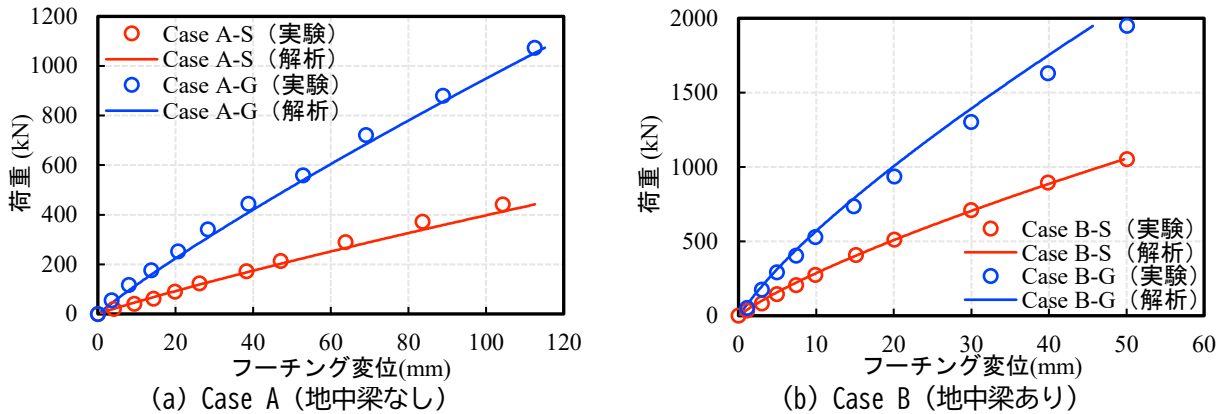


図5 フーチングでの荷重—変位関係

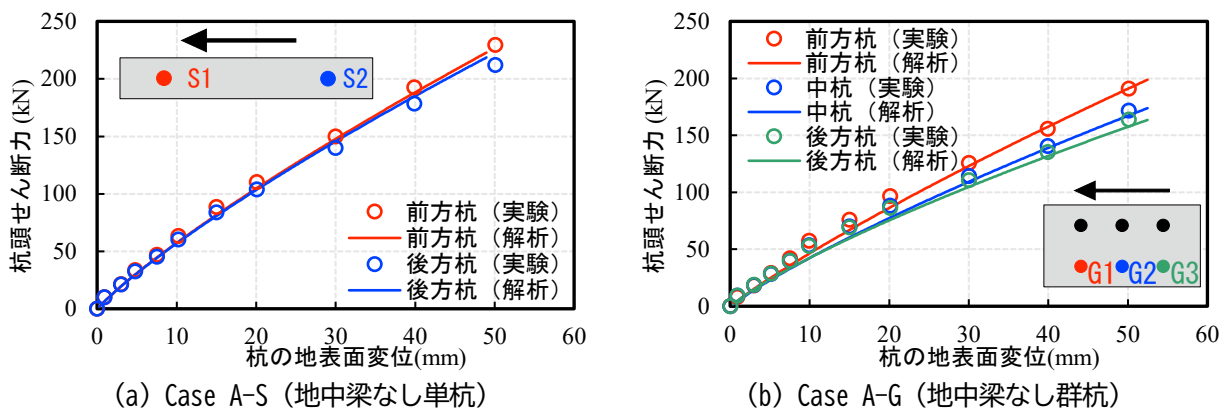


図6 Case A の杭頭せん断力—杭の地表面変位関係

に群杭効果が生じたことに起因すると考えられる。Case A-G では、前方杭 (G1)、中杭 (G2)、後方杭 (G3) の順で杭頭せん断力が大きく、全て Case A-S よりも小さい。こちらも実験結果と対応する解析結果が得られており、群杭の杭頭せん断力の分担についても概ね再現されている。

#### 4.2 群杭効率

群杭効率  $e$  は、一般的に式(1)、式(2)のどちらかで定義される。

$$e_1 = \frac{\text{基準変位時の群杭の荷重}}{\text{基準変位時の単杭の荷重} \times \text{杭本数}} \quad (1)$$

$$e_2 = \frac{\text{一定荷重に対する単杭の変位}}{(\text{一定荷重} \times \text{杭本数}) \text{に対する群杭の変位}} \quad (2)$$

設計においては、ある変位に対する割線剛性を基準に水平抵抗を評価する機会が多いため、式(1)の定義が用いられることが多い。そのため、本研究でも式(1)の定義を用いることとする。ただし、これらの定義は、地中梁やフーチングのある杭を対象としているため、全ての杭の地表面変位が同一である。一方で、地中梁のない杭は杭ごとに地表面変位が異なる。そのため、基準とする杭の地表面変位については、全杭の地表面変位の平均値などをもとに計算するのが適切だと考えられる。しかし、本実験では前方杭の地表面変位しか測定していないため、代表として前方杭の地表面変位を用いる。

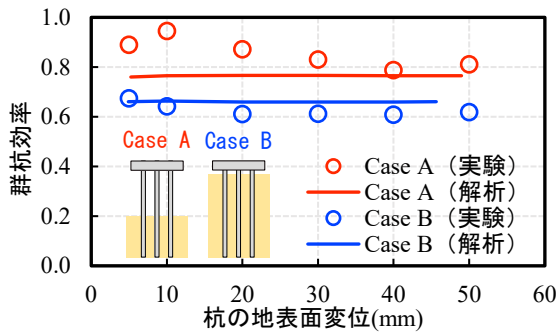


図7 式(1)で計算した各ケースの群杭効率

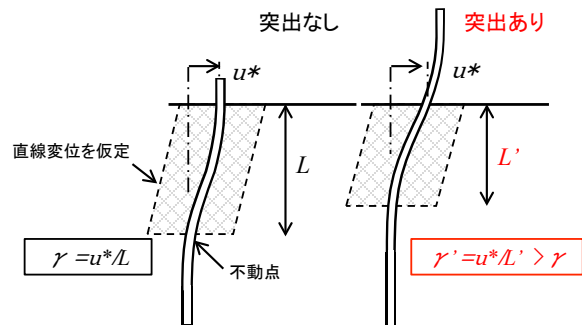


図8 突出による杭周地盤のせん断ひずみの差 (文献16に加筆)

図7に、各ケースの群杭効率を示す。実験と解析の両者で、地中梁のないCase Aの群杭効率が、地中梁のあるCase Bのそれよりも大きくなっている。この結果から、地中梁がないことで群杭効率が大きくなる、すなわち群杭効果が小さくなると考えられる。

また、特にCase Aの実験結果において、変位の増大に伴って群杭効率が小さくなる傾向が見られる。変位レベルと群杭効率の関係については、杭頭変位が進むにつれて局所的な応力集中による地盤非線形性の影響で群杭効率は増加するが、更に杭頭変位が進行すると、杭間を含む杭周地盤全体が杭に拘束されせん断変形することにより生じる、地盤全体の剛性低下の影響で群杭効率は低減するとされている<sup>16)</sup>。既往研究と今回の実験で杭や地盤の条件は異なるが、既往研究において群杭効率が增加から低減に転じる杭頭変位は、杭間隔比2.5、杭本数9本の条件でおよそ10mm付近であり、今回の実験結果と調和的である。地中梁のないCase Aにだけこの傾向が顕著に見られたことは、図8に示すように、突出がある場合は突出がない場合と比較して杭の不動点深さが浅いことでせん断ひずみが大きくなるため、地盤全体の剛性低下が大きくなるのが原因と考えられる。

その一方で、解析ではこの傾向がほとんど見られていない。全体的に実験結果に対応する解析結果が得られているが、解析では地盤特性を完全には再現することができていないことが原因であると考えられる。再現精度低下の一因として、地盤を弾完全塑性でモデル化しているため、せん断ひずみの増加による地盤の剛性の低下まで再現できていないことが考えられる。図8に示すような、杭周辺の広い範囲における地盤のせん断ひずみの増加による剛性の低下は、ひずみレベルが小さい段階から徐々に現れる。一方で、弾完全塑性モデルでは降伏条件を満たすまでは弾性挙動を示すため、ひずみレベルに依存した広域的な非線形特性の表現が難しいと考えられる。

### 4.3 曲げモーメント分布

実験の曲げモーメント分布は、地中部5深度、突出部2深度 (Case Aのみ) で測定した曲げひずみと、曲げ実験で得られた曲げ剛性から算出した。曲げひずみは1ゲージ法で測定した杭の両側のひずみから計算しているが、一部片側のひずみしか有効な結果が得られなかった (Case A-S1 深度-8m, Case A-S2 深度-3m,-12.55m, Case A-G1 深度-8m, Case A-G2 深度-3m,-4.5m,-8m, Case A-G3 深度-3m)。そこで、その箇所については参考値として、試行的に測定点近辺の深度における軸ひずみを線形外挿もしくは内挿することで曲げひずみを算出した。

図9に、各ケース各杭の曲げモーメント分布を示す。凡例には結果を算出した時の杭の地表面変位を示しており、以降の結果も同様である。Case B-Gについては、実験でひずみを計測していないため、解析結果のみ示している。実験結果の中で塗りつぶしが無いプロットについては、前項で述べた軸ひずみを外挿・

内挿で算出した参考値である。また、解析結果をもとに杭の地表面変位 0.1D 時の地中部曲げモーメント最大深さを黒点線で示している。全体を通して、実験と解析の結果が一致している。参考値の実験の曲げモーメントについても解析と概ね一致しているため、前項の方法で算出した曲げモーメントも一定の精度はあると思われる。Case A-S1 と Case A-S2、また Case B-S1 と Case B-S2 を比較すると、いずれの場合もほとんど差がないことから、4.1 で述べたように杭頭せん断力に若干の差はあったものの、Case A-S、Case B-S とともにほぼ単杭として挙動していると考えられる。また、Case A-G および Case B-G において、杭位置ごとに曲げモーメント最大深さを比較すると、両者とも前方杭、中杭、後方杭の順に深くなっており、前方杭と単杭は概ね同じ深さである。これは、杭位置によって群杭効果の大きさが異なり、前方杭の群杭効果は小さく、後方になるにつれて群杭効果が大きくなり水平地盤反力が小さくなることに起因する。また、Case Bの方がCase Aよりも曲げモーメント最大深さが深い。

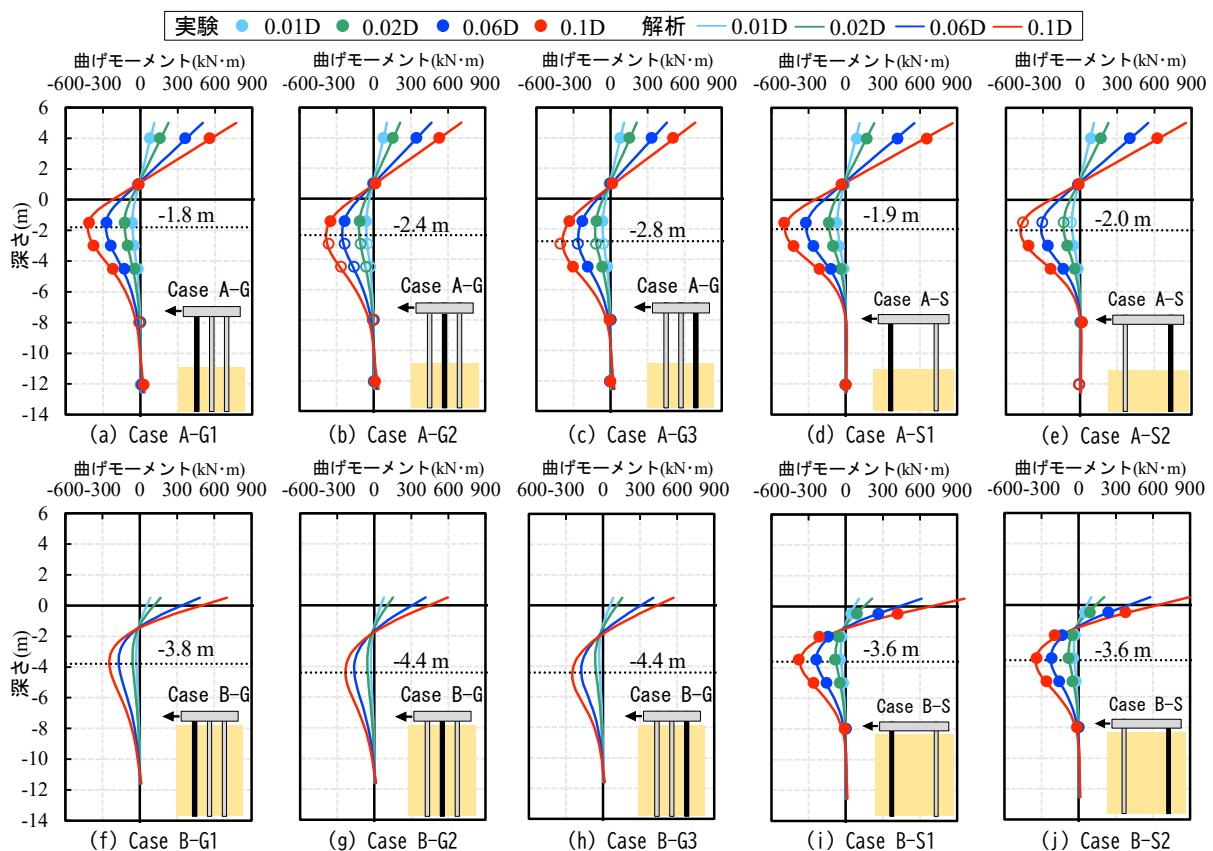


図9 各変位レベルにおける実験と解析の曲げモーメント分布

#### 4.4 杭頭せん断力

図10に、Case A-G および Case B-G について、前方杭 (G1) を1とした各杭の杭頭せん断力の分担率を示す。杭頭せん断力は突出部の2点の曲げモーメントから計算しているため、実験で曲げモーメントを測定していない Case B-G については解析結果のみ示している。

Case A-G について見ると、実験と解析の両者で変位の増大に伴い、中杭 (G2)、後方杭 (G3) の分担率が減少している。また、変位が比較的小さい段階では中杭の分担率が最も小さいが、変位が大きくなると後方杭の分担率が最も小さくなる傾向が見られる。この傾向は既往の研究<sup>17)</sup>でも見られる。これらの傾向は Case B-G の解析結果でも同様であるが、Case B-G の方が全体的に中杭、後方杭の分担率が小さくなっている。4.3 節で述べたように前方杭は群杭効果が小さいため、地中梁の有無によって群杭効果が変わる。

らないが、中杭と後方杭は群杭効果が顕著に表れるため、地中梁の有無による群杭効果の変動の影響を大きく受ける。そのため、群杭効果が大きい Case B-G の方が中杭，後方杭の分担率が小さいと考えられる。

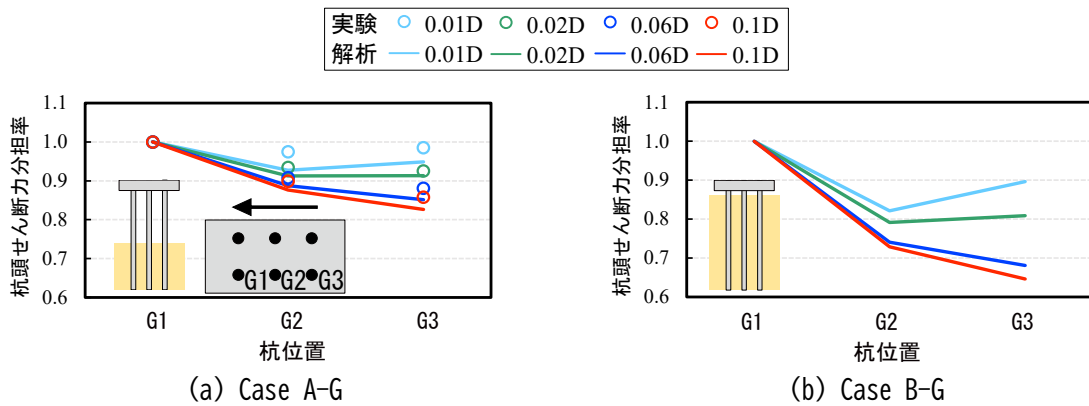


図 10 各変位レベルにおける杭頭せん断力の分担率

### 5. 地中梁が群杭効率に与える影響の考察

前章では、解析モデルの妥当性を確認するとともに、地中梁がないことで群杭効果が小さくなる結果が得られた。ここでは、その群杭効果の変化のメカニズムを地盤の応力分布などの解析結果から考察する。

図 11, 図 12 に、Case A-G および Case B-G について、杭の地表面変位が 10mm (0.02D) 時の深度-0.5m および深度-1.0m における地盤要素の von Mises 応力分布を示す。図 13 には、杭の地表面変位が 10mm(0.02D) 時の杭中心を通る鉛直断面における地盤の von Mises 応力分布を示す。図中端部の破線で囲まれた分布は自重応力分布を示している。図 14 は、図 13 の杭周辺部分の拡大図である。深度-0.5m と-1.0m は、図 14 に示すようにそれぞれのケースにおける杭前方地盤の応力が最大となる深さである。深度-0.5m における地盤応力分布は、Case A-G の中杭および後方杭の前方地盤の応力が Case B-G と比べて若干大きい程度の差である。深度-1.0m における地盤応力分布も、Case B-G の前方杭の前方地盤の応力が Case A-G と比べて若干大きい程度の差である。このように少しの差はあるが、水平断面における応力分布の形状は 2 ケースで概ね同じである。

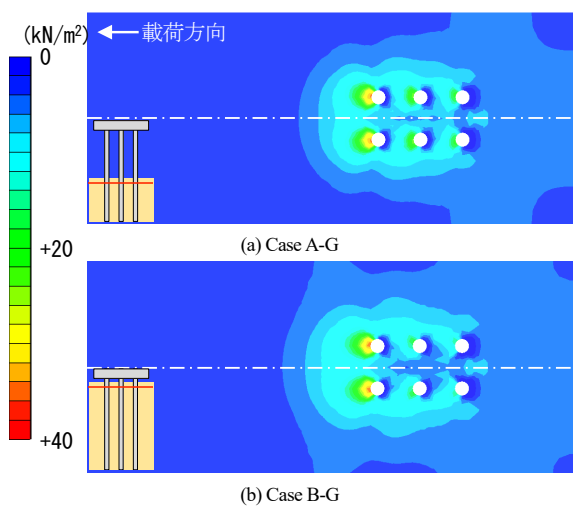


図 11 深度-0.5m における地盤の von Mises 応力分布 (杭の地表面変位 10 mm(0.02D)時)

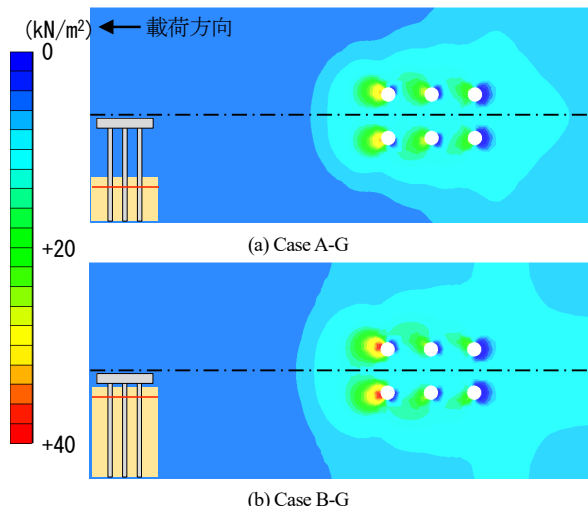


図 12 深度-1.0m における地盤の von Mises 応力分布 (杭の地表面変位 10 mm(0.02D)時)

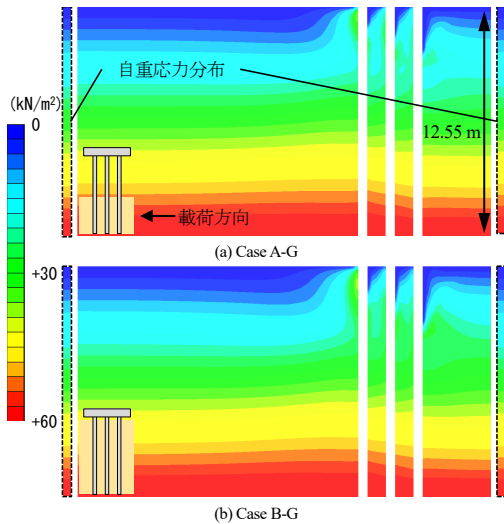


図 13 鉛直断面における地盤の von Mises 応力分布 (杭の地表面変位 10mm(0.02D)時)

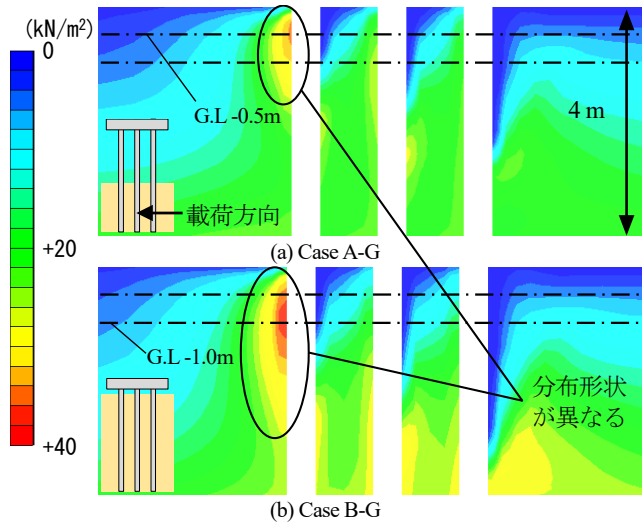


図 14 杭周辺の von Mises 応力分布の拡大図 (杭の地表面変位 10mm(0.02D)時)

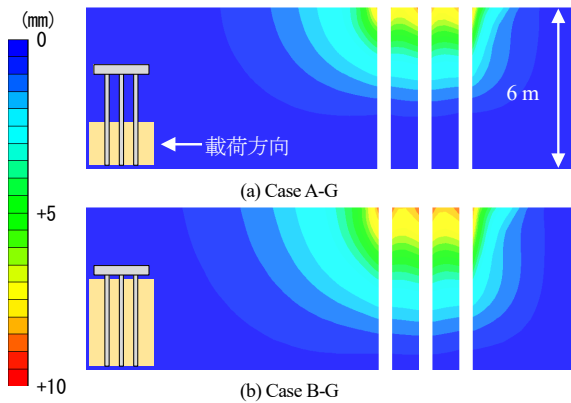


図 15 鉛直断面における地盤の荷重方向変位分布 (杭の地表面変位 10 mm(0.02D)時)

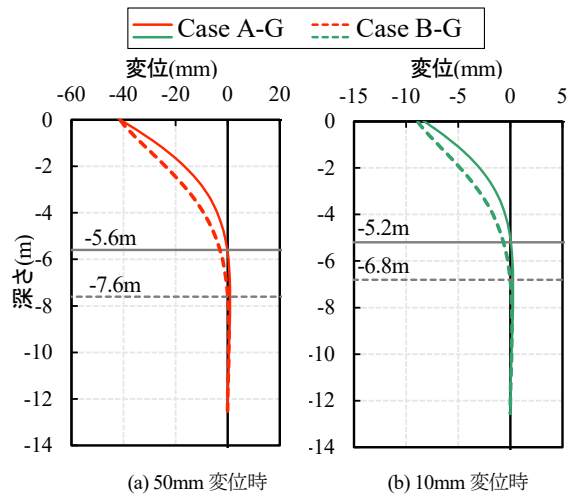


図 16 前方杭の地中部の変位分布

鉛直断面の応力分布については、まず図 13 の境界部の応力分布と自重応力分布を比較すると、加力方向背面側の境界部に多少差は見られるが、概ね自重応力分布と変わっていないことから、境界条件の影響は小さいと考えられる。また、杭周辺の拡大図を見ると、Case A-G は深度-1.5m 程度にのみ大きな応力が発生しているのに対して、Case B-G は深度-3.0m 程度まで大きな応力が発生している。群杭効果は、各杭の杭周地盤応力が干渉することで生じるため、杭同士の間隔が狭いほど、また杭本数が多いほど地盤応力が干渉する領域が増えて群杭効果が大きくなる。杭間隔や杭本数による群杭効果の増加は、主に水平方向の地盤応力の干渉に関係するため、図 11～図 12 を見ても、杭本数と杭間隔比が同一であるこれら 2 ケースは、応力の大きさは若干異なるが応力の分布形状自体は概ね同じである。一方で、鉛直断面の応力分布については、明らかに Case B-G の方が深度方向に広く分布しており、分布形状が異なっている。このことから、地中梁のない Case A-G の群杭効果が小さい原因は、応力分布が浅い範囲に集中することで各杭の杭周地盤応力が干渉する領域が減ることであると考えられる。

ここで、地中梁の有無で深度方向の応力分布が変わる根本的な原因は、杭の変形モードが変わることによる影響と考えられる。図 15 に、杭の地表面変位が 10mm (0.02D) 時の、解析で得られた杭中心を通る鉛直断面における地盤の変位分布を示す。図 16 には、杭の地表面変位 50mm (0.1D) , 10mm (0.02D) 時の

前方杭の地中部の変位分布を示す。同図には第一不動点（変位が初めて 0 になる点）の深さも併せて示している。地盤の変位分布は、地中梁のない Case A-G の方が特に鉛直方向に変位の分布が狭く、杭の変位をみると地中梁の無い Case A-G の方が、第一不動点の深さが浅いことがわかる。また、変位が大きくなると地盤剛性の低下によって第一不動点が深くなる傾向も見られ、変位の増大によって群杭効率が低下する一因として変形モードの影響もあると考えられる。この変形モードの違いは、地中梁がある杭の杭頭固定度の影響と類似しており、地中梁がない場合は杭頭固定度が低い場合と捉えることができる。実際に、杭頭固定度をパラメータとした既往の群杭効率の実験式<sup>4)</sup>では、杭頭固定度が低いほど群杭効率が大きくなっており、同様の傾向である。以上のことから、群杭効率には杭本数および杭間隔比のほかに杭の変形モードが影響すると考えられる。

## 6. まとめ

本稿では、地中梁の有無が群杭効率に与える影響を調べることを目的に、50G 場での群杭の遠心載荷実験を行った。さらに、3次元弾塑性有限要素法によるシミュレーション解析を行い、群杭効率が変化するメカニズムについて考察した。

以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 地中梁の無い群杭は、地中梁がある場合と比較して群杭効果が小さくなる、すなわち群杭効率が大きくなる。群杭効果は中杭、後方杭に顕著に表れるため、杭頭せん断力の分担率は中杭、後方杭が低くなるが、群杭効果が小さい地中梁の無い群杭は杭位置による分担率の差が地中梁のある場合と比較して小さい。
- 2) 弾塑性有限要素法解析によって、およそ杭径の1%~10%の変位レベルにおいて、遠心載荷実験の断面力や群杭効率を精度よく再現することができた。
- 3) 地中梁の無い場合に群杭効果が小さくなるメカニズムは、地中梁が無いことで突出杭の挙動を示すため浅い深度にのみ変位が生じるような杭の変形モードに変わり、それによって応力分布が浅い範囲に集中することで各杭の杭周地盤応力の干渉する領域が減ることと考えられる。

## 文 献

- 1) Chang, Y. L., "Discussion on "Lateral Pile Loading Tests" by L. B. Feagin," A.S.C.E Transaction, Vol.102, pp.272-278, 1937.
- 2) Poulos, H. G., "Behavior of laterally loaded piles II - pile groups," Journal of Soil mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97, SM5, pp.733-751, 1971.
- 3) 小坪清真, 高西照彦: 横方向群杭効果の理論的考察, 土木学会論文報告集, No.241, pp.13-23, 1975
- 4) 玉置脩, 三橋晃司, 今井常雄: 水平抵抗における群杭効果の研究, 土木学会論文報告集, No.192, pp.79-89, 1971
- 5) McVay, M., Casper, R., Shang, T. I.: Lateral response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing, J. Geotech. Eng., ASCE, Vol.121, No.5, pp.436-441, 1995.
- 6) 藪内彰夫, 土方勝一郎, 杉山達也, 伊藤賢伸, 藤原一成, 酒向裕司: 静的水平載荷試験結果による場所打ち鋼管コンクリート群杭基礎の水平耐力と変形性能, 日本建築学会構造系論文集, No.617, pp.111-119, 2007
- 7) 井原和弘, 柳下文雄, 間瀬辰也, 土方勝一郎: 群杭の極限地盤反力分布の簡便評価法に関する一提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.729, pp.1851-1858, 2016
- 8) Tamura, S., Ohno, Y., Shibata, K., Funahara, H., Nagao, T., Kawamata, Y., "E-Defense shaking test and pushover analyses for lateral pile behavior in a group considering soil deformation in vicinity of piles," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.142:106529, 2021.
- 9) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2019
- 10) 国土交通省鉄道局監修, 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, 丸善出版, 2012

- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，2017
- 12) 鉄道総合技術研究所編：線路上空建築物（低層）構造設計標準 2009，鉄道建築協会，2009
- 13) 土井一郎，野原隆雅，山本剛史，佐名川太亮，田村修次：突出杭の群杭効果に関する遠心載荷実験および解析的検討，地盤工学ジャーナル，Vol.20，No.3，pp.353-365，2025
- 14) 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杭効果の評価，日本建築学会技術報告集，Vol.17，No.37，pp.855-860，2011
- 15) 柏尚稔，勝二理智，林康裕：砂質地盤における杭一地盤系の強非線形性を考慮した群杭の杭頭水平地盤ばね評価手法，日本建築学会構造系論文集，Vol.75，No.651，pp.957-965，2010
- 16) 土方勝一郎，井原和弘，柳下文雄，間瀬辰也：非線形群杭係数の変動特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.80，No.709，pp.411-418，2015
- 17) 斉藤亮，飯古道則，五瀬伸吾，易鋒：杭基礎の水平方向大変形時の挙動に関する研究，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1395-1408，1993