

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04777

研究課題名（和文） 掘底場所打ちコンクリート杭の群杭効果に関する研究

研究課題名（英文） Study on pile group effect of belled concrete pile

研究代表者

下村 修一（SHIMOMURA, Shuichi）

日本大学・生産工学部・准教授

研究者番号：50443726

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では掘底杭の群杭効果を考慮した設計に資する知見を得ることを目的として、掘底杭と直杭の群杭効果のメカニズムを模型実験とFEM解析を基に分析した。その結果、模型実験では直杭と掘底杭で群杭効果は異なることを明らかにした。この結果に対し、鉛直载荷中の杭先端付近の地盤の挙動を観察可能な模型実験を実施し、画像解析から得られたせん断ひずみ分布から両杭で地盤挙動に相違があることを確認した。しかし、群杭効果のメカニズムを地盤挙動から十分に説明できてはいない。これについては、杭径や杭心間隔をパラメータとした追加の検討が必要である。一方、現状の簡易な群杭効果の評価式は実験結果を概ね説明できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

掘底杭に関する群杭効果を考慮した設計法は確立されておらず、学術的背景のない根拠に基づき、設計者の裁量に委ねられた設計がされており、合理性の欠如、安全面のリスクが潜在している状況にある。本研究は最終的な設計法までには至っていないものの、実験データに基づき定量的に群杭効果を示すとともに、地盤挙動に基づく分析も行っている。また、現行の簡易な群杭効果の評価法との定量的な比較も行っている。簡易な設計法はコストが高く、本研究では社会的要求に対応した設計法の確立に向けて有益な知見を得ている点でその意義は大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the mechanism of the group pile effect of belled piles and straight piles was analyzed based on model experiments and FEM analysis in order to obtain knowledge that contributes to the design considering the group pile effect of piles. As a result, it was clarified that the group pile effect was different due to pile bottom shape in the model tests. In response to this result, model tests were conducted to observe the behavior of the ground near the pile tip during vertical loading, and by the shear strain distribution obtained from the image analysis was confirmed that there was a difference in the ground behavior between the two piles. However, the mechanism of the group pile effect has not been fully explained by the ground behavior. On the other hand, it was confirmed that the current simple evaluation formula for the group pile effect can generally explain the experimental results.

研究分野：建築構造

キーワード：場所打ちコンクリート掘底杭 群杭効果 鉛直支持力 画像解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

軟弱地盤で建物を支持する場合、杭基礎の採用が多い。杭基礎は建物重量を杭の周面と先端から地盤に確実に伝達させる。杭が大きな耐力を持っている場合、杭基礎の支持力は地盤の変形、強度で決まる。杭が隣接して打設された場合(群杭と呼ぶ)、杭から地盤に伝達された荷重が重なりあい地盤の応力状態が複雑となるため、隣接杭がない場合(単杭と呼ぶ)と比べて杭1本あたりの支持力は異なる。この効果を群杭効果と呼び、群杭効果に関する研究は古くから行われている。近年は経済性の観点から杭1本あたりの支持力が極めて大きい高支持力杭が台頭している。高支持力杭は杭の大径化だけでなく、効率的に大きな先端抵抗力を得るために杭先端径を拡大する方法が主流(拡底杭)である。これまでの群杭効果に関する研究は比較的小口径の直杭が対象であり、拡底杭を対象とした群杭効果に関する知見はない。

拡底杭は一つの柱に1本の杭が打設されることが多いが、建物の高層化、重量化に伴い、拡底杭を近接して打設する事例が増えている。拡底杭の群杭効果は、杭の施工性に配慮した杭の最小間隔に基づき、最小間隔よりも狭い間隔で杭を打設する場合の支持力の評価方法を示す報告が見られるが、杭から地盤への荷重伝達のメカニズムに基づく根拠は見当たらない。すなわち、設計法は確立されておらず、学術的背景のない根拠に基づき、設計者の裁量に委ねられた設計がされており、合理性の欠如、安全面のリスクが潜在している状況にある。

2. 研究の目的

杭の耐力が十分に大きい場合は、地盤の変形、強度が支持力に大きな影響を及ぼすため、杭から地盤への応力伝達のメカニズムを把握することが重要である。拡底杭は直杭と杭先端付近の形状が異なるため、杭周面から地盤に伝達した応力が杭先端付近の地盤に及ぼす影響が異なる。また、拡底杭は杭周面摩擦抵抗を期待する区間の杭径、杭長が同じでも直杭に比べて大きな建物荷重を負担できるため、杭間の先端地盤の応力は大きく、荷重に対する杭体剛性の割合が小さくなるため杭体の変形が異なる。この点も地盤への応力伝達メカニズムが異なる要因になり得る。しかし、杭先端形状が異なることによる群杭効果の知見は認められない。そこで、本研究は拡底場所打ちコンクリート杭の鉛直支持力における群杭効果を考慮した設計に資する知見を得ることを目的としている。

3. 研究の方法

杭の鉛直支持力は施工法に大きく依存するため、原位置で施工した実大杭の鉛直載荷試験に基づき鉛直支持力を評価することが理想的である。しかし、鉛直支持力の評価には数多くのデータを蓄積する必要があり、実大杭での試験のみで本研究を実施することは現実的ではない。一方、室内実験の手法として模型実験がある。杭の鉛直支持力は地盤の拘束圧の影響を強く受ける。そのため、模型実験では地盤の拘束状態を再現することが必須である。その手法の一つとして遠心載荷実験がある。この手法は縮小模型を用いた実験ではあるが、遠心力を活用することで原位置の応力状態を杭全長にわたって再現することが可能である。一方、特定の深度範囲の応力状態を再現する手法として加圧土槽実験がある。例えば、杭先端部付近のみであれば、模型地盤に杭先端付近の原位置の圧力を加えることで杭先端の支持力を評価することができ、検討対象に限られていると遠心載荷実験に比べて研究コストを抑えられる。本研究では加圧土槽実験を主たる検討方法としてFEM解析も併用することで拡底杭の鉛直支持力における群杭効果を検討した。

(1) 円形加圧土槽を用いた鉛直載荷実験に基づく検討

砂地盤を対象に加圧土槽を用いた模型杭の鉛直載荷試験を実施した。模型地盤は上載圧100kPa、相対密度80%(豊浦砂)とした。模型杭には直杭(直径24mm)、拡底杭(軸径24mm、拡底径35mm)を用いた。

実験は杭本数と杭芯間隔と杭先端形状をパラメータとした計6ケース行った。杭本数は単杭と2本杭とし、2本杭の支持力を単杭の支持力と比較することで群杭効果の検討を行う。2本杭(軸部径 $d=24\text{mm}$)の杭芯間隔は杭芯間隔4.0d(GWシリーズ)と1.7d(GNシリーズ)とした。なお、各実験とも2回試行して再現性を確認している。

(2) FEM解析に基づく検討

加圧土槽実験では限られた条件下での知見のみが得られるため、条件の拡張を最終目的としてFEM解析による実験結果のシミュレーション解析を試みた。

(3) 地盤の可視化実験に基づく検討

杭先端付近の地盤挙動から群杭効果を考察する目的で、鉛直載荷試験中の地盤挙動の可視化実験を実施した。実験には加圧土槽を用いた。土槽は高さ600mm、半径300mmの半円形であり、高さ595mm、幅600mmの亚克力板がついている。模型杭は円形加圧土槽実験と同じ外径の直杭と拡底杭であるが、円柱を縦半分に割った形状である。なお、密実の杭を使用し、軸力分布を評価するひずみゲージは貼り付けていない。実験は拡底杭、直杭ともに単杭1ケースと群杭3ケース(杭芯間隔4.0d、2.44d、1.7d)の計8ケース行った。上載圧は100kPa、目標相対密度は80%である。試料土は、豊浦砂と染色した豊浦砂を4.5:5.5の比率で混合したものをを用いた。地盤挙動は鉛直載荷試験中に地盤挙動を一眼レフカメラで一定杭頭変位毎に撮影し、撮影画像を市販の解析ソフト(Strain-mp)で解析することでせん断ひずみ分布として評価した。

4. 研究成果

(1) 円形加圧土槽を用いた鉛直載荷実験に基づく検討

杭先端形状が単杭の鉛直支持力に及ぼす影響

図1に先端支持力度-基準化変位関係を示す。先端支持力度-基準化変位関係は杭形状によらない結果が得られている。また、軸力深度分布から杭先端付近の周面抵抗力の違いが認められたが、全体の周面抵抗力に対して差が小さく、本実験で使用する模型杭においては杭形状の違いが支持力に及ぼす影響は小さいと判断した。

杭先端形状が2本群杭の鉛直支持力に及ぼす影響

図2に(a)杭頭荷重、(b)先端支持力、(c)周面抵抗力～杭頭変位関係を示す。

杭頭荷重と先端支持力は、単杭、群杭いずれも直杭より拡底杭が大きい。拡底杭において、杭頭荷重と先端支持力いずれも、杭芯間隔の広いケースは杭頭変位の小さい範囲では単杭和と同程度であるが、変位が増加すると単杭和より大きくなる。一方、杭芯間隔の狭いケースは変位の大きさによらず単杭和より小さい。群杭同士では、変位の大きさによらず杭芯間隔が広いケースが大きい。

直杭において、杭頭荷重では、杭芯間隔の広いケースは変位の大きさによらず単杭和より小さい。杭芯間隔の狭いケースは杭頭変位の小さい範囲では単杭和より小さいが、変位が増加すると単杭和と同程度となる。群杭同士では杭頭変位の小さい範囲では杭芯間隔が広いケースが大きい。変位が増加すると杭芯間隔が狭いケースが大きくなる。先端支持力は、杭頭変位の小さい範囲では群杭はいずれも単杭和と同程度であるが、変位が増加すると単杭和に対して杭芯間隔の狭いケースは大きく、杭芯間隔の広いケースは小さくなる。群杭同士ではいずれの変位でも杭芯間隔が狭いケースが大きい。以上より、杭頭荷重と先端支持力において、拡底杭と直杭では単杭和と群杭の大小関係が異なる。

周面抵抗力は、単杭和、群杭いずれも拡底杭と直杭が概ね同じ結果である。杭形状によらず群杭はいずれも単杭和より小さく、群杭同士だと杭芯間隔が狭いケースが小さい。また、最大周面抵抗力に達する杭頭変位は杭芯間隔が狭いケースで大きく、隣接杭の影響が認められる。この傾向は直杭より拡底杭の方が顕著である。

図3に(a)杭頭荷重、(b)先端支持力、(c)周面抵抗力の群杭効率(群杭/単杭和)～杭頭変位関係を示す。先端支持力について、直杭は杭芯間隔が狭いほど群杭効率が大きい傾向があるが、拡底杭は杭芯間隔が狭いと群杭効率が小さい。拡底杭は杭芯間隔が狭い場合、隣接杭の傾斜部における地盤の緩みの影響が出ている可能性がある。周面抵抗力について、杭形状によらず杭芯間隔が狭いほど、周面抵抗力の群杭効率が小さく、最大周面抵抗力に達する杭頭変位が大きい。最大周面抵抗力に達する杭頭変位が大きいのは、杭同士の杭周辺地盤沈下の相互作用により杭頭変位が増加するためと推察される。

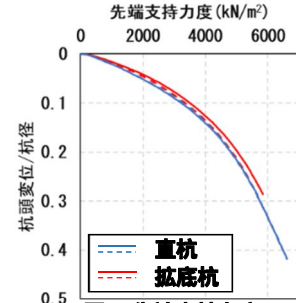


図1 先端支持力度～杭頭変位/先端径

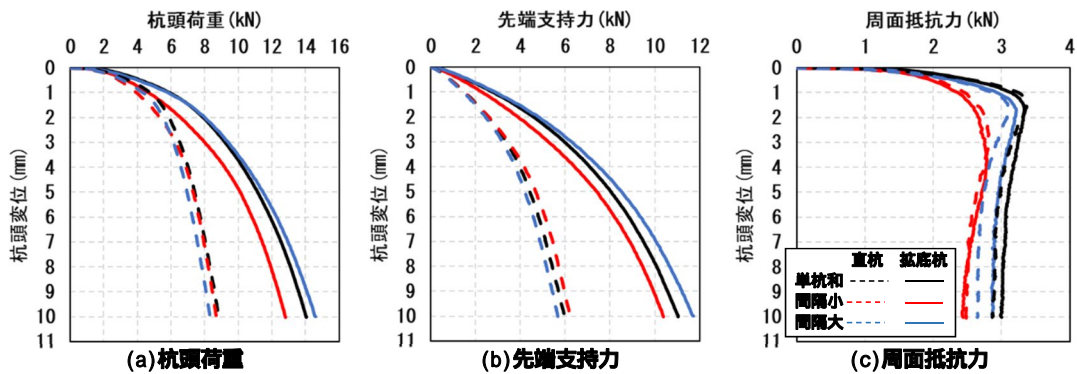


図2 群杭効率～杭頭変位

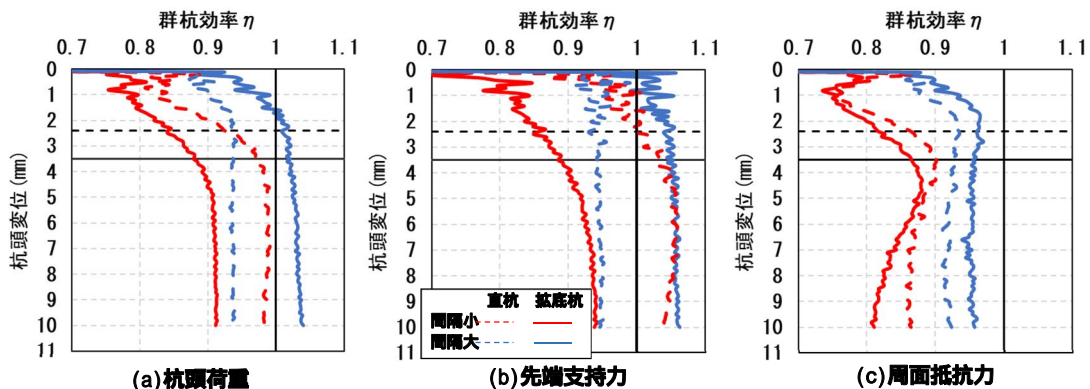


図3 群杭効率～杭芯間隔/先端径

群杭効率

図4に杭先端径に対する杭頭変位10%時(拡底杭は3.5mm、直杭は2.4mm)の(a)杭頭荷重、(b)先端支持力、(c)周面抵抗力の群杭効率-杭芯間隔/先端径関係を示す。本実験結果は赤マーカーで、既往の砂地盤を対象とした加圧土槽を用いた直杭の模型実験結果を黒マーカーで示した。

(a)杭頭荷重において、既往の研究では、杭芯間隔の狭い範囲では $\approx 0.6 \sim 1.0$ であり、杭本数が少ない、拘束圧が大きい、杭間隔が広いほど ≈ 1.0 に近づく傾向がある。本実験は杭芯間隔によらず 1.0 に近い傾向があり、本実験とほぼ同じ上載圧(拘束圧)であるプロットよりも群杭効率は小さい。これは本実験の杭本数が少ないためと考えられる。

(b)先端支持力において、既往の研究では杭芯間隔によらず $\approx 0.8 \sim 1.3$ と影響が様々である。既往の群杭効率は、杭芯間隔が広がるほど小さく、杭本数が少ない、拘束圧が大きいほど大きい傾向がある。本実験結果は杭形状・杭芯間隔によらず群杭効率が概ね 1.0 前後と影響が小さいが、直杭は杭芯間隔が広いほど群杭効率が小さくなっており既往の傾向と対応している。一方、拡底杭は杭芯間隔が広いと群杭効率が大きいため、群杭効率と杭芯間隔の関係が杭形状により異なる結果を示した。

(c)周面抵抗力において、既往の研究では杭芯間隔が狭い範囲では $\approx 0.4 \sim 1.0$ であり、杭本数が少ない、拘束圧が大きい、杭間隔が広いほど ≈ 1.0 に近づく傾向がある。本実験結果は杭形状によらず杭芯間隔が狭い範囲でも群杭効率は小さいが、杭芯間隔が広がるほど ≈ 1.0 に近づいており、上載圧(拘束圧)と杭本数が同じであるプロットと同程度である。

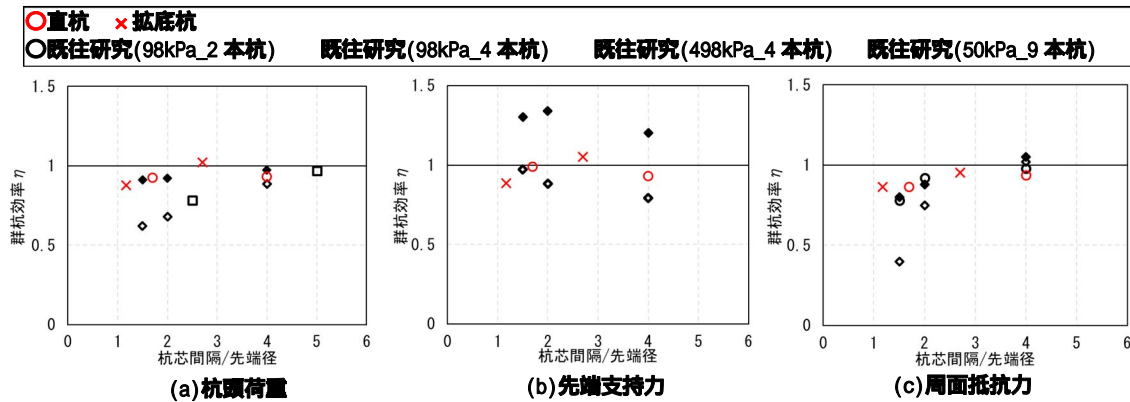


図4 群杭効率-杭芯間隔/先端径

拡底杭の群杭の支持力評価として、軸部径 d + 拡底径 d_1 の範囲を支持力の影響範囲として、影響範囲が重複した面積分だけ支持力を低減する手法がある。この手法には明確な根拠が見当たらないが、本実験の群杭で支持力を評価した場合、杭芯間隔が狭い場合は概ねこの手法と同程度の支持力であった。

(2)FEM 解析に基づく検討

FEM 解析により、実験のシミュレーションを試みており、概ね荷重～変位関係を追うことはできたが、群杭効果を再現するには至らなかった。特に周面抵抗力と実験結果が乖離しており、適切な構成則の選択と杭周面と地盤間のモデル化が課題として残った。

(3)地盤の可視化実験に基づく検討

図5に主に発生しているせん断ひずみのイメージを示す。図6、7に杭頭変位1、2、5mm時の拡底杭と直杭の最大せん断ひずみ分布を示す。単杭では拡底杭、直杭ともに杭先端隅部に楕円状のせん断ひずみ(図5(a)ひずみ)、先端面に球根状のせん断ひずみ(図5(a)ひずみ)がほぼ左右対称に発生している。これらの値は杭頭変位の増加に伴い、ひずみ、の順で増大している。また、杭先端以浅の杭形状の影響は、明確に確認はできない。これらの傾向は群杭も同様である。

群杭では、間隔が狭い場合に各杭先端の杭間地盤側隅部のひずみがほとんど発生せず、反対側の隅部のせん断ひずみが単杭よりも大きく生じる(図5(b)ひずみ)。また、杭先端面の球根状のせん断ひずみは径が大きい1本杭と見なすように発生している(図5(b)ひずみ)。杭間隔が広くなるにつれ先端隅部のせん断ひずみ(ひずみ)は左右の差が縮まって単杭の傾向に近づき、先端直下の球根状のせん断ひずみ(ひずみ)も各杭独立して発生している。そのため、杭間隔が狭いとせん断ひずみの発生深さは深い。なお、深い深度の球根状のせん断ひずみ(ひずみ)は、杭間隔が広

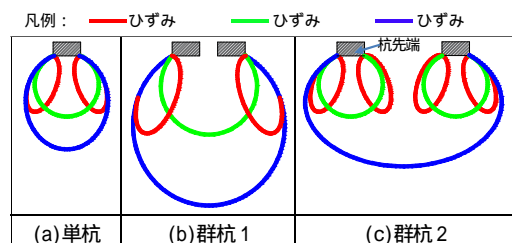


図5 主な発生せん断ひずみイメージ

い場合にも応力伝播範囲が重なり一体となって地盤が挙動している傾向が伺える(図5(c))。

直杭と拡底杭を比べると同一杭芯間隔でもせん断ひずみの発生状況は異なる。直杭の間隔中と拡底杭の間隔中を杭頭変位 5mm で比較すると、図5(b)、(c)に示すひずみは拡底杭では隅部左右のせん断ひずみの広がり範囲に差があり隣接杭の影響が大きい、直杭では差は小さく単杭の挙動に近づいて、杭芯間隔ではなく先端隅部の間隔が影響していると考えられる。

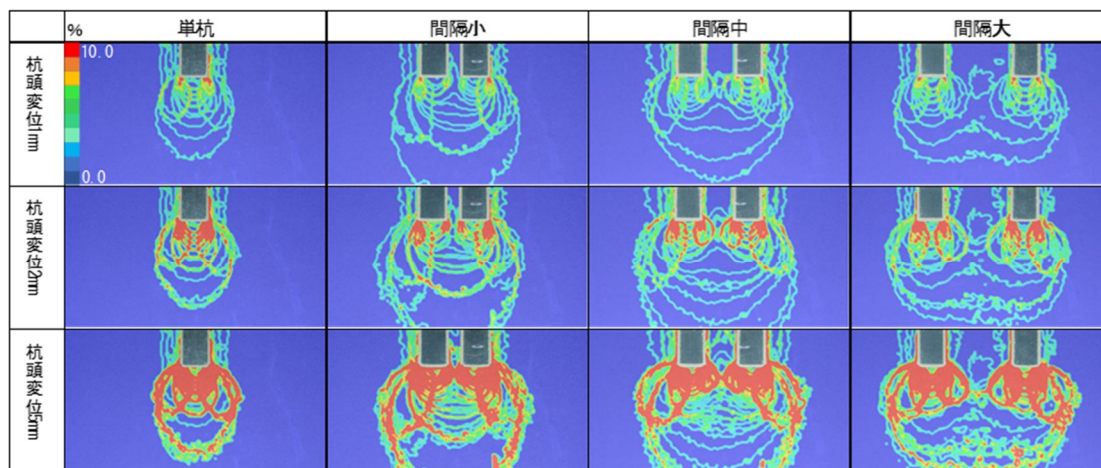


図6 直杭の最大せん断ひずみ分布

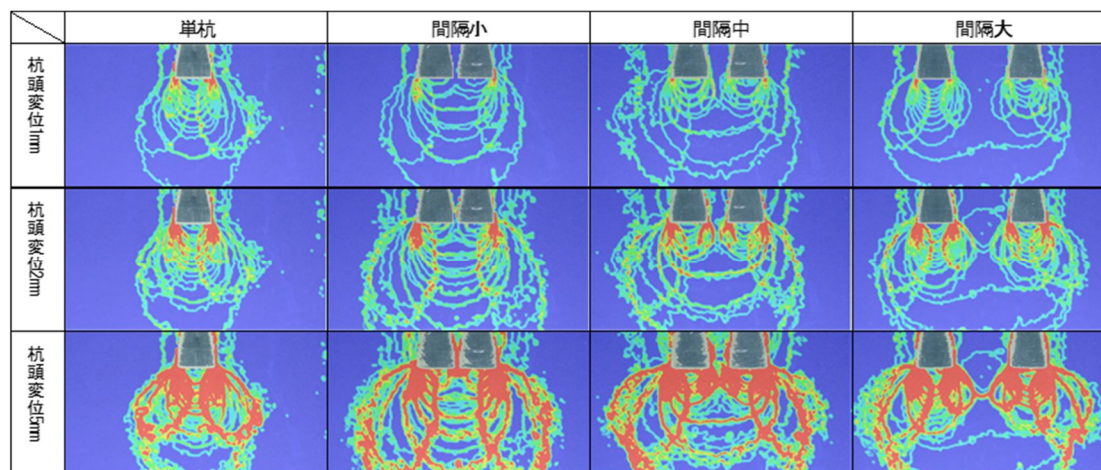


図7 拡底杭の最大せん断ひずみ分布

(6) 上記(1)～(5)に基づく今後の展望

本研究では加圧土槽実験、地盤の可視化実験及び FEM 解析により拡底杭の鉛直支持力に及ぼす群杭効果の影響を検討した。加圧土槽実験では杭先端形状の違いが群杭効果に影響を及ぼすことが確認できたとともに、地盤の可視化実験でも両者の違いが確認できている。しかしながら、群杭効率と地盤挙動を直接結び付ける成果は得られておらず、今後は実験条件の追加並びにさらなる分析を進める必要がある。

本研究では FEM 解析によるパラメトリックスタディも目的としていたが目標の達成には至らなかった。一方で複雑な条件下では FEM 解析が有効なツールにもなる。今後は解析手法の高度化も含めた検討が必要となる。

設計においては簡易な群杭評価法が求められている。支持力の影響面積を用いた群杭効果の評価は、本研究で行った実験結果と概ね対応しており、今後は上記の課題を解決することで根拠が明確になれば有用の手法の一つと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小島健吾、下村修一、新井寿昭、郡司康弘、熊田健太
2. 発表標題 隣接する拡底場所打ち杭の杭芯間隔が鉛直支持力に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小田切智也、下村修一、小島健吾、新井寿昭、郡司康弘、熊田健太
2. 発表標題 加圧土槽を用いた模型杭の鉛直載荷試験に基づく杭先端形状が2本群杭の支持力に及ぼす影響に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会関東支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊田健太、新井寿昭、郡司康弘、下村修一、小島健吾
2. 発表標題 隣接する場所打ちコンクリート杭の先端形状が鉛直支持力に及ぼす影響 その1 単杭に関する考察
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小島健吾、下村修一、新井寿昭、郡司康弘、熊田健太
2. 発表標題 隣接する場所打ちコンクリート杭の先端形状が鉛直支持力に及ぼす影響 その2 群杭に関する考察
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小田切智也、下村修一、新井寿昭、郡司康弘、熊田健太
2. 発表標題 群杭の鉛直載荷時における杭先端地盤挙動の画像解析
3. 学会等名 日本建築学会学術講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	新井 寿昭	西松建設株式会社(技術研究所)・技術研究所建築技術グループ・主席研究員	
	(Arai Toshiaki)		
	(40511390)	(92640)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------