

研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	地盤環境保全に資する「地中既存杭」の処理技術開発とグランドデザインの創造
研究者名※	稲積 真哉
所属組織※	芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授
研究種別	研究助成
研究分野	都市環境工学
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

（ ）は、報告書提出時所属先。

大林財団 2022 年度研究助成実施報告書

所属機関名 芝浦工業大学
申請者氏名 稲積真哉

研究課題	地盤環境保全に資する「地中既存杭」の処理技術開発とグランドデザインの創造
(概要) ※最大 10 行まで 高度経済成長期に建設された多くの都市構造が老朽化しており、特に杭基礎の適切な管理が急務となっている。地中に残る既存杭の撤去や再利用は、都市再生における大きな課題である。本研究では、既存杭を撤去せずに補強し再利用する技術を提案し、3 次元弾塑性有限要素法 (FEM) を用いてその支持力を解析した。解析の結果、補強杭の支持力が不健全な杭の約 3 倍に回復することが確認され、補強により杭径が増加することが支持力向上の主要因であることが示された。再利用と補強の手法は、既存杭の物理的状态に応じて選択されるべきであり、このアプローチにより建設コストの削減、工期の短縮、CO2 排出量の低減が可能である。また、不健全な杭を利用することによるリスクを軽減し、持続可能な都市基盤の構築に寄与すると考えられる。これらの成果は、将来の都市開発における資源の有効活用と環境負荷の低減につながり、SDGs の達成にも貢献する可能性がある。	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
本研究の目的は、高度経済成長期に建設され老朽化した杭基礎の持続可能な管理手法を開発することである。具体的には、地中に残る既存杭の撤去ではなく、これを補強し再利用する技術を提案する。有限要素法 (FEM) を用いて、補強後の杭の支持力を解析し、再利用可能性とその経済的及び環境的利益を評価する。これにより、都市基盤の再生と持続可能な開発目標 (SDGs) に寄与することを目指す。	

2. 研究の経過	(注) 必要なページ数をご使用ください。
(1) 研究の背景・目的 我が国においては、高度経済成長期に整備された社会基盤構造物が老朽化しており、その持続可能な維持管理が急務となっている。東日本大震災などの自然災害、建物の再建、少子高齢化と人口減少による世帯数や公共施設数の減少に伴い、建物の解体や再利用の需要が増加している。多くの都市が軟弱地盤上に存在し、杭基礎が採用されているため、建物の解体後には地中既存杭の適切な処理が課題となっている。撤去処理と同時に地中既存杭の再利用も検討されるべきである。そのためには、地中既存杭の状態に応じた撤去処理あるいは再利用の可能性を見極め、それに基づいた適切な対処方法確立する必要がある。現在、撤去処理技術の進歩は見られず、地中残置や埋戻し処理材による問題が未解決のままである。また、地中既存杭の再利用に関しても、	

明確な提案や検証が行われていない状況にある。

既存杭を適切に再利用できた場合、建設コストや工期の削減効果が大きい。さらに、環境負荷の低減効果も期待でき、撤去や埋め戻し、新設杭の施工に伴う建設廃棄物の削減が挙げられる。特に、杭工事における CO₂ 排出量の削減効果は、材料生成時の割合が大きいため、リユースによる CO₂ 排出量の削減効果も大きい。しかし、既存杭の再利用がまだ一般的でないため、再利用の提案が必要である。

本研究では、地中既存杭の処理に際して、撤去ではなく補強して再利用することを目的としている。これは、SDGs の目標である「住み続けられるまちづくり（目標 11）」の観点とも合致すると考えられる。

(2) 地中既存杭の再利用の現状の整理

現在の既存杭の再利用方法では、全ての既存杭を利用することは困難である。この困難の原因として、新設建物の規模や柱配置が過去の建物と異なるためが挙げられる。したがって、既存杭の利用に際しては、新設建物の柱配置を考慮して利用可能な杭を選定し、その利用方法を十分検討する必要がある。既存杭の再利用工法¹⁾は 4 つ存在し（図-1 参照）、工法 1 は鉛直力と水平力の両方を負担することが可能である。工法 2 は主に鉛直力を負担し、水平力に対する検討が不十分な場合に用いられる。工法 3 は主に水平力を負担し、新設杭の水平力に対する余力分として利用される。工法 4 は新設建物の杭としてではなく、地盤改良体として利用されたり、地盤改良工法と組み合わせて利用される。

これらの方法を組み合わせるなどして、適切な利用方法を選択する必要がある。健全性および耐久性を確認するために、既存杭に関連する記録や圧縮試験、中性化試験を行う。杭体の健全性と耐久性が確認できた場合、図-1 の再利用工法に応じて検討を行う。この再利用方法では、既存杭がある程度劣化していると再利用が困難になることが予測される。また既存杭と新設杭の併用となる場合、性能差が生じることが考えられるため、既存杭の負担を低減するような新設杭の配置検討も再度行わなければならない。そのため現在の再利用工法は既存杭を再利用するまでの工程数が多く感じる。災害による建物の再建や建物の解体、再利用の需要が増加している現状において、現行の工法よりも革新的な再利用工法の提案が求められている。

(3) 地中既存杭の補強・再利用工法の提案

提案される地中既存杭の補強方法の一例の手順を図-2 に示す。まず、杭芯にケーシングの中心を合わせ、掘削を開始し、杭の下までケーシングで覆う。その後、ケーシングの先端から地中下部に向けて補強材を流し込みながらケーシングを引き抜き、ケーシングを抜いた後に補強を行う。この工程により、ケーシングは地中に残らず、不健全な杭の周囲は補強材で覆われる。この工法により、新設杭を既存杭の周囲に打設を行うことや、工法の組み合わせを考えると既存杭を再利用できる。既存杭を再利用するまでの工程数も減らし鉛直力および水平力の両方の支持力が得られると考えられる。さらに、この方法による補強作業では新たな新設杭の打設や、建設発生土が発生しないため撤去される杭の数が減少し、結果として環境負荷の低減に貢献すると考えられる。

(4) 有限要素法による提案工法の効果検証

有限要素法（FEM）は、変形が大きく弾塑性（非線形）挙動を示す場合に厳密解を得ることが難しいため、近似解を求める際に用いられる有効な手段である。

解析対象地盤の寸法は縦 20m、横 20m、高さ 30m であり、材料モデルはモール・クーロンモデル²⁾を採用した。各層のパラメータは表-1 に示されている。健全杭と不健全杭はコンクリート製と想定し、不健全杭の補強材には流動性の高いセメントミルク³⁾を使用することを想定している。杭とセメントミルクの材料モデルはそれぞれコンクリート、線形弾性体とし、それらのパラメータは表-2 に示されている。

解析では、図-3 および図-4 のとおり、健全な状態の地中既存杭（径 0.5m）、劣化した状態の地中既存杭（径 0.5m）を不健全杭と仮定したもの、および不健全杭の周囲を補強材で覆った補強杭の 3 パターンについて解析を行う。なお補強杭については、径 0.5m の地中既存杭に対して補強材の厚さのみを変化させ、全体の杭径が 0.7m、1.0m および 1.5m のモデルで比較する。解析は「杭の押込み試験方法（JGS1812）」⁴⁾を基に、各杭頭面に最大荷重 10MN の鉛直載荷試験を行った。

本研究では、極限支持力を杭頭の沈下量が杭径の 10%の時の荷重として定義する。図-5 には解析結果として、各種類の杭の支持力の変化が示されている。不健全杭と各補強杭の支持力を比較した場合、支持力が約 3 倍以上に回復していることが確認される。補強杭の杭径が大きくなるにつれて、支持力が増加する傾向が観察された。しかし、補強杭は健全杭の支持力まで完全に回復することはできなかったものの、一定の支持力までは回復させることが可能であった。補強材の厚さが増すと支持力が向上するため、必要な支持力に応じて杭径を調整することが可能であると推測される。不健全杭の周囲を補強材で覆うことにより、杭径が増加し、地盤への圧力が分散される結果、支持力が向上した。

(5) 研究の結論

- 補強材の厚さを増加させると、支持力も向上し、緩やかな右肩上がりの傾向を示すことが確認された。
- 不健全杭を補強材で覆うことにより、支持力の向上が確認できた。これにより、不健全杭を撤去せずに補強することによる再利用の有意性が確認された。

参考文献

(1) 既存杭利用の手引き—現在と将来の利用に向けて：

<https://www.nikkenren.com/sougou/10thaniv/pdf/07-05-12.pdf>, 2024 年 3 月 18 日.

(2) 浦野和彦, 足立有史, 河邑眞：地盤固化体を用いた杭基礎の耐震補強工法に関する 3 次元 FEM 解析, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 1075-1087, 2010.

(3) 清原千鶴, 永松静也, 佐藤嘉昭, 上田賢司：コンクリートのヤング係数の推定式, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 601-606, 1999.

(4) 杭の鉛直載荷試験方法・同解説編集委員会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説〔第一回改訂版〕, 丸善, 2002.

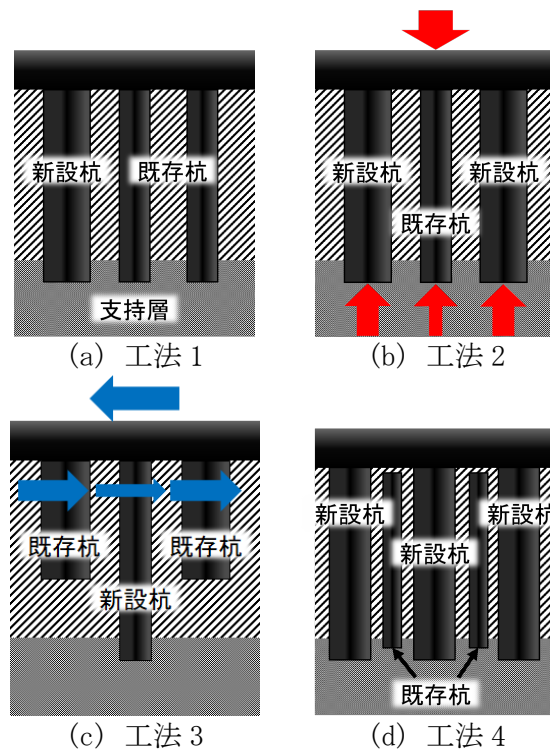


図-1 地中既存杭を再利用するための各種工法

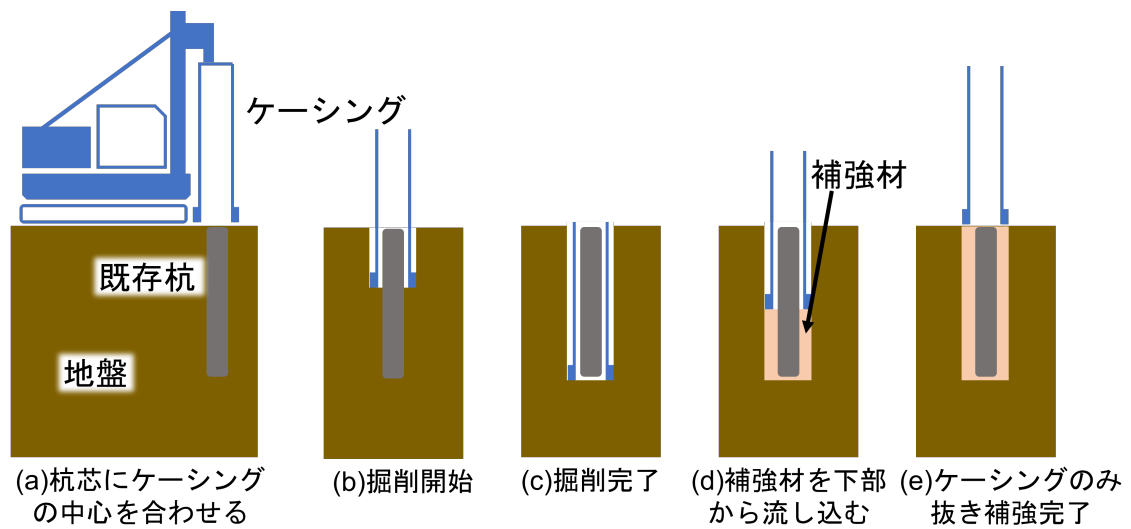


図-2 地中既存杭補強工法の手順の一例

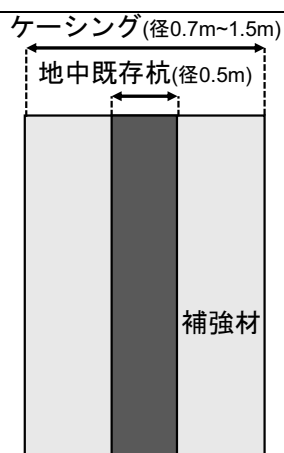


図-3 解析モデル断面図

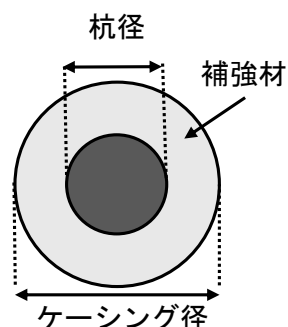


図-4 解析モデル上面図

表-1 解析に用いた地盤のパラメータ

	盛土	ローム	粘土	砂まじり粘土	中砂
各層の位置 (m)	0~4	4~8	8~16	16~19	19~30
単位体積重量 (kN/m ³)	17.6	12.5	15.1	15.7	17.6
ヤング係数 (kN/m ²)	6.9×10^4	6.7×10^4	4.0×10^4	15.4×10^4	25.3×10^4
ポアソン比	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
粘着力 (kN/m ²)	19	19	7	43	150
内部摩擦角 (°)	23	23	19	27	37

表-2 杭と補強材のパラメータ

	健全杭	不健全	セメントミルク
単位体積重量 (kN/m ³)	23	23	1.81
ヤング係数 (kN/m ²)	3.1×10^7	9.0×10^5	1.2×10^7
圧縮強度 (kN/m ²)	5.4×10^4	1.5×10^4	—

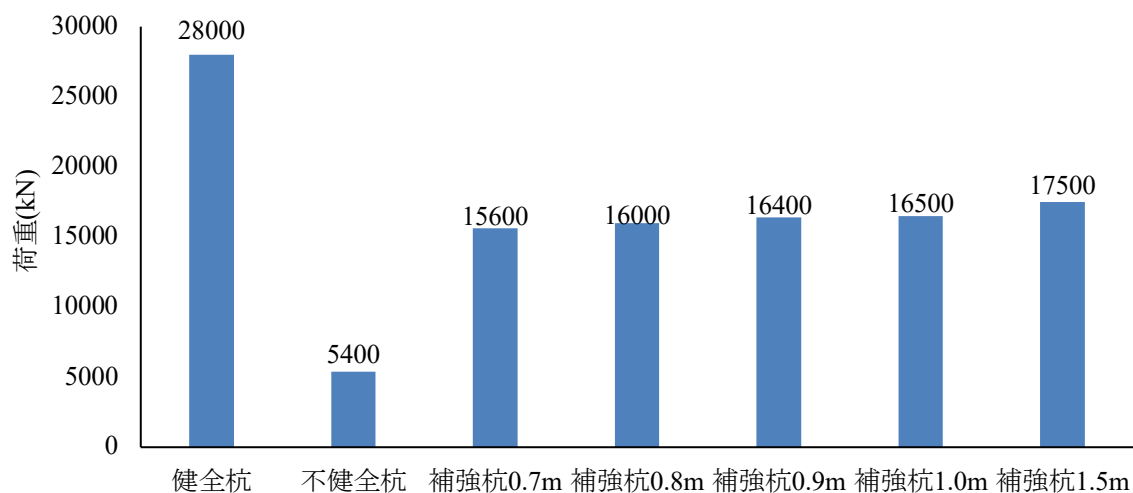


図-5 各杭種の支持力

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では、地中既存杭の再利用と補強に関する新たな技術を提案し、3次元弾塑性有限要素法（FEM）を用いてその効果を検証した。解析結果から、補強された杭は不健全な杭に比べて支持力が約3倍に向上し、特に補強杭の杭径が増加することが主要な要因であることが明らかになった。この技術により、杭の撤去を避けることができ、建設コストの削減、工期の短縮、CO2排出量の低減が実現可能であることが確認された。

さらに、本研究は、都市基盤の再生における環境負荷の低減と資源の有効活用を図るものであり、持続可能な開発目標（SDGs）に貢献する可能性がある。具体的には、杭の再利用が可能となることで、新たな建設材料の需要を減少させ、廃材の発生を抑制することができる。また、既存の杭を活用することで、土木工事における環境への影響を最小限に抑えることが可能となる。

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究で提案された地中既存杭の再利用と補強技術について、多くの成果が得られたものの、いくつかの課題が残されている。まず、補強された杭の長期的な耐久性と安定性に関する評価が不足している。今後は、長期間にわたる実地試験を行い、気候変動や地震などの自然災害がこれらの杭に与える影響を詳細に調査する必要がある。

また、補強技術の経済性と実施の実用性についてもさらなる研究が必要である。具体的には、様々な地盤条件や建築要件に対応するための技術の柔軟性を高め、コスト効果の分析を深化させることが求められる。これには、材料選択の最適化、施工方法の改良、作業時間の短縮に関する研究が含まれる。

さらに、再利用された杭の構造的な挙動を模擬するための高度な数値モデルの開発も重要な課題である。これにより、設計段階での精度を向上させ、より安全で効率的な杭の再利用が可能となる。また、補強杭の標準化に向けたガイドラインの策定も必要であり、業界全体での合意形成を促進するための取り組みが期待される。

最後に、この技術の普及と社会への受け入れを促進するために、関連する法規制や建築基準の見直し、関係者間の協力体制の構築も重要である。これらの課題に対処することで、持続可能な都市開発と都市基盤の再生に向けた本研究の技術が、より広範に適用されるようになることが期待される。