大型物流施設の建替え工事における既存杭利用と調査

INVESTIGATION OF EXISTING PILES USED IN RECONSTRUCTING LARGE LOGISTICS WAREHOUSE

勝二理智 * 1 藤森健史 * 1

Michito SHOJI * 1 Takeshi FUJIMORI * 1

キーワード：
既存杭, 杭の弾性波探査試験, 圧縮強度, 中性化, 杭長

Keywords:
Existing pile, Pile integrity test, Compression strength, Neutralization, Pile length

In reconstructing the large logistics warehouse with using existing piles, the piles were investigated. The pile diameter and reinforcement arrangement were as designed, and almost all the piles had no crack. The soundness evaluation by the author's method was equivalent to that of conventional method. The compressive strength was larger than the designed value, and the neutralization depth was smaller than the designed cover thickness. The embedment in the bearing layer was confirmed by the comparison between the core boring through the pile and the standard penetration test. The magnetic exploration was effective on the evaluation of pile length.

1. はじめに

建物の建替え時に既存杭を利用することができれば、環境負荷の低減やコスト削減、工期短縮の効果を期待できる。利用にあたっては既存杭の性能や品質を確認する必要があり、杭の健全性・耐久性・支持力について調査することが一般的である。既存杭利用に関する手引き¹⁾やマニュアル²⁾が発刊されて十数年経過したが、今なお、そこで示された前記3項目の調査を実施するに留まる例が多い。また、その調査方法についても、建物解体中の杭調査に関する報告³⁾、健全性を調べる杭の弾性波探査試験に関する筆者らの研究⁴⁾等があるが、目立った進展は見られない。

今回、某大型物流施設の建替え工事において、既存杭を利用して建物を新築する計画となった。そこで、既存杭の品質確認を高度化することを目的として、健全性評価に筆者らの提案手法を試行するとともに、現行の文献1), 2)では項目として挙がっていない杭の支

持層到達についても調査した。同時に、耐久性調査により既存杭の経年劣化に関する知見も得られたため、ここに報告する。

表1 建物概要

項目	新築建物	既存建物
建物階数	地上6階	地上7階
延床面積	171,000 m ²	174,000 m ²
建物用途	倉庫業を営む倉庫、事務所	同左
竣工年	2017年	1973年
構造形式	柱SRC-梁S造, 基礎免震	RC造, 一部SRC造
基礎形式	既製コンクリート杭 (PRC杭, PHC杭) 500~1200φ, 杭長19~35m 場所打ちコンクリート杭 (既存杭利用) 1200φ, 杭長31m	場所打ちコンクリート杭 1200~1400φ, 杭長19~31m 設計基準強度18N/mm ²

図1 新築建物の杭伏図

図2 既存建物の杭伏図

¹⁾ 榎大林組技術研究所 博士 (工学)
(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

¹⁾ Technical Research Institute, OBAYASHI CORPORATION, Dr. Eng.

2. 構造計画

建物概要を表1, 新築建物の杭伏図を図1, 既存建物の杭伏図を図2, 土質柱状図と杭深度の関係を図3~4に示す。新築建物は、既製コンクリート杭で支持された地上6階の柱SRC-梁S造の基礎免震建物である。杭支持層の深度が敷地の南北で異なっており、杭基礎の水平剛性のバランスを取ることが構造的な課題であった。水平剛性確保のため、敷地南側に新設杭を増打ちすることも考えられたが、環境配慮・コスト低減・既存杭の利用促進の点から、敷地に存在する既存杭84本を利用する計画とした。既存杭はアースドリル工法で築造された場所打ちコンクリート杭であり、直径1200mmの直杭である。杭頭深度はGL-1.2m, 杭先端深度はGL-32m, 支持層は細砂層である。杭コンクリートの設計基準強度は18N/mm²である。既存建物ではパイルキャップ1基に既存杭3本が接合した基礎形式であったため、新築時の既存杭利用にあたっては、パイルキャップを解体し杭頭を処理した後に、マットスラブを構築した。既存杭頭での負担曲げモーメントを低減するため、杭頭半剛接合工法を採用した。

3. 既存杭調査計画

既存杭利用にあたり、表2に示す杭の健全性、耐久性および支持層到達の調査を実施した。調査方法と調査数量については、文献1), 2)を参考に計画した。健全性調査は利用する杭全数を対象に、耐久性調査は利用する杭から適切にサンプリングして、それぞれ実施した。支持層到達を確認する調査は前記文献1), 2)では挙がっていないが、杭の品質確認にあたり重要と考えて実施した。調査は主に建物解体後に実施したが、既存杭利用の可否をプロジェクト早期に

判断するため、建物解体前に、利用する杭本数の1割を目安に、弾性波探査試験と圧縮強度試験を先行して実施した。なお本件では、既存杭の施工記録は得られず、過去の地震被害は確認されなかった。

杭の健全性について、杭径と配筋状況は杭頭目視、杭のひび割れ有無は弾性波探査試験により確認した。杭頭目視調査は建物解体により露出した杭頭で実施し、杭径(東西, 南北, 45度方向), 配筋状況(鉄筋種別, 鉄筋本数, かぶり厚さ)を確認した。弾性波探査試験は、杭頭をハンマで軽打し低ひずみの弾性波を発生させ、杭体からの反射波を杭頭に取り付けたセンサで測定し、ひび割れの有無や位置を推定する技術である。本調査では露出した杭頭で試験を実施したが、建物解体前に調査した杭については、1階床スラブから杭頭まで鉛直に削孔した孔底で試験を実施した。試験結果については、従来の判定基準^{2), 5)}に基づき評価するとともに、図5に示す筆者らの提案手法⁴⁾による評価も併せて実施した。

杭の耐久性について、杭コンクリートの圧縮強度と中性化深さ、杭主筋の機械的性質(降伏点, 引張強さ, 伸び)を確認した。圧縮強度については、弾性波探査試験用に杭頭部を削孔した鉛直コアから24供試体, 後述する杭長確認のため杭全長を削孔した鉛直コアから19供試体を採取し、試験を実施した。中性化深さについては、露出した杭頭で杭側面から水平に削孔して24供試体を採取し、試験を実施した。試験では、供試体の割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、赤紫色に変色した境界深さを1供試体あたり5箇所測定した。なお、圧縮強度試験と中性化試験で用いた供試体の寸法は、直径100mm, 高さ200mmである。鉄筋引張試験については、露出した杭頭で長さ650mm程度の杭主筋24本を採取し、試験を実施した。

図3 土質柱状図(No. 2)と既存杭深度

図4 土質柱状図(No. 3)と新設杭深度

図5 弾性波探査試験に基づく杭健全性評価法⁴⁾

表2 調査方法と調査数量

分類	調査方法	確認項目	数量	調査概要
健全性	杭頭目視調査	杭径, 配筋状況	84本	測量, 目視観察
	杭の弾性波探査試験	杭のひび割れ有無	84本	弾性波の反射性状から健全性を推定
耐久性	コンクリート圧縮強度試験	杭コンクリートの圧縮強度	9本	圧縮強度試験方法(JIS A 1107)
	コンクリート中性化試験	杭コンクリートの中性化深さ	8本	コンクリートの中性化深さの測定方法(JIS A 1152)
	鉄筋引張試験	杭主筋の機械的性質	6本	金属材料引張試験方法(JIS Z 2241)
支持層到達	杭全長コアボーリング	施工杭長	1本	杭体の貫通ボーリング
	磁気探査	施工杭長	1本	杭鉄筋による磁場の変化の測定
	標準貫入試験	杭支持層の深度	2地点	標準貫入試験方法(JIS A 1219)

杭の支持層到達については、施工された杭の長さや杭支持層の深度を比較することで確認した。施工杭長については、杭全長コアボーリングにより杭体を貫通して確認し、同時に得られるコア試料は前記の通り圧縮強度試験に供した。また、杭全長コアボーリングに比べ簡易性が高く、高精度を期待できる磁気探査も併せて実施した。磁気探査は、杭鉄筋による磁場の変化を測定して杭長を推定する技術であり、ここでは磁気傾度計を用いた⁶⁾。本調査では、対象の杭から1m離れた地点(ほかの近くの杭からは3m程度離れている)で鉛直に掘削し、孔壁保護のため塩ビ管を建込み、センサを孔内に挿入し、杭頭から杭先端より5m深い位置まで連続的に測定した。杭支持層の深度については、磁気探査用の試験孔と貫通後の杭直下で標準貫入試験を実施して確認した。

4. 既存杭調査結果

4.1 杭の健全性

測定した杭径の度数分布を図6に示す。ここで、N: 供試体数、 μ : 平均値、 σ : 標準偏差である。図より、測定値の大半は1.25m~1.45mの範囲に分布しており、平均値は1.37m、標準偏差は0.07mであり、設計径1.2mを上回る値である。また杭頭目視により、杭84本中82本の配筋状況は設計通りであることを確認できた。

弾性波探査試験で得られる波形には、杭頭打撃と杭先端反射による振幅が生じるが、ひび割れのような断面縮小部があれば、その杭体からの反射振幅も生じる。従来の判定基準^{2), 5)}では3つに大別さ

れ、杭頭打撃と杭先端反射がある場合は“健全性が高いと考えられる(○)”, 杭体からの反射もある場合は“部分的な損傷の疑いあり(△)”, 杭先端反射が無く杭頭打撃の重複反射のみ見られる場合は“杭の全断面におよぶ損傷の疑いあり(×)”となる。この判定基準により評価した結果、○の杭は75本、△の杭は9本であった。それらの代表的な1本の試験波形を図7に示す。図の縦軸は振幅、横軸は打撃入力した杭頭からの深度であり、弾性波の伝播速度は文献2)より3800m/sとした。図7(a)の波形には杭頭打撃(深度0m)と杭先端反射(深度31m)の振幅が生じ、その間に負側に有意な振幅が生じていないが、図7(b)の波形には深度5m位置で負側に振幅が生じている。続いて、提案手法による評価結果を図8に示す。図の縦軸と横軸は、杭のひび割れの大きさを示す指標(損傷係数)であり、破線で囲まれた図の左下の範囲は、ひび割れ幅が0.2mm以下の範囲である。図中には、文献4)で検討した実験や現場計測の結果(杭径2m、杭長35mまでの場所打ちコンクリート杭を対象)を併せて示している。図より、左下の範囲に分布する杭は75本、その範囲外に分布する杭は9本であり、前述した従来の判定と等しい結果を与えている。また、既往の調査結果に比べやや左上に分布する傾向があり、文献4)で指摘したように波形の振幅の増幅率によるもので評価には影響しないと考えられるが、今後の検討課題としたい。

このように、従来手法と提案手法の双方で損傷の疑いがあると評価した9本の杭について、さらに考察する。この9本の波形には、図7(b)で示したように杭頭打撃や杭先端反射以外の反射がみられ、深い位置(深度21m)に反射がある杭が1本、浅い位置(深度5~7m)に反射がある杭が8本であった。前者については、損傷または土塊の介在による断面欠損の可能性が考えられる。後者についても同様の可能性はあるが、杭体からの反射の深度が揃っていること、対象の杭が偏って存在せず杭範囲全般に分布していることから、築造時に用いた表層ケーシング下端での断面縮小の可能性が高いと判断した。文献7)によれば、表層ケーシングには次の特徴がある; 1) ケーシング径は杭径より100~200mm程度大きいものを使用する。2) ケーシング長さは通常2~4m程度のものが用いられるが、表層部の土質が埋戻し土や砂のように崩壊性が高い場合には、その層の下端面から0.5m程度根入れできる長さのものが良い。ここで、土質柱状

図6 杭径の度数分布

図7 弾性波探査試験波形

図8 提案手法による杭健全性評価

図(図 3, 4)より表層の埋土層厚は 6m 程度であり、杭築造にあたっては、その下の粘土層・シルト層にケーシングを根入れしたと推察される。ただし、ケーシングによる断面縮小が緩やかな場合は、明確な反射波を得られないため^{5), 8)}、大多数の杭では反応が潜在化したと考えられる。

以上より、杭 84 本中 81 本が健全であり、配筋状況から 2 本、弾性波探査試験から 1 本が健全でない可能性がある結果を得た。これらの状況から、安全をみて 81 本を有効とし、当初設計にて性能を確保できることを確認した。なお、この結果による設計変更や杭の再施工は生じなかった。

図 9 圧縮強度の度数分布

図 10 密度の度数分布

4.2 杭の耐久性

杭頭部コアと杭全長コアより採取した供試体を用いて試験を行い、得られたコンクリートの圧縮強度と密度の度数分布を図 9～10 に示す。ここで、 N : 供試体数、 μ : 平均値、 σ : 標準偏差である。図 9 の圧縮強度について、度数の分布形状は概ね山形であり、杭頭部コアの平均値(32.3N/mm^2)より杭全長コアの平均値(35.4N/mm^2)の方がやや大きい。供試体全体の圧縮強度の平均値は 33.7N/mm^2 、構造強度⁹⁾(平均値 $-0.5 \times$ 標準偏差)は 31.1N/mm^2 であり、いずれも設計基準強度 $F_c(18\text{N/mm}^2)$ より十分大きい。図 10 の密度について、度数の分布形状は概ね山形であり、杭頭部コアと杭全長コアで平均値や標準偏差にほとんど差は無い。

さらに、コンクリートの圧縮強度と密度の深度分布を図 11～12 に示す。図の縦軸は杭頭からの深度である。図 11 より、杭頭の圧縮強度は軸部や杭先端に比べ小さく、ばらつきも大きい。これは、地下水位の変動により杭頭ではコンクリートの養生条件が変化するためと考えられる。また、杭先端の圧縮強度と密度は杭頭や軸部に比べ若干大きい、これは、自重によりコンクリート内部の余剰水が排出され、緻密な構造となるためと考えられる。

続いて、杭頭部で採取した供試体を用いて試験を行い、得られたコンクリートの中性化深さの度数分布を図 13 に示す。図より、度数の分布形状は概ね山形であり、平均値 μ は 9.5mm 、標準偏差 σ は 3.7mm であり、設計かぶり厚より十分小さい。さらに、中性化深さと経過

図 13 中性化深さの度数分布

図 11 圧縮強度の深度分布

図 12 密度の深度分布

図 14 中性化深さと経過年数

年数の関係について、既往の調査結果^{10)~12)}と比較して図14に示す。 $\mu \pm 1\sigma$ の範囲を示しており、大気中における中性化深さの進展予測式(式(1))¹³⁾による値も併せて示している。

$$t = \frac{7.2}{R^2(4.6 \cdot w - 1.76)^2} \cdot x^2 \quad (1)$$

ここで、 t : 深さ x まで中性化する期間(年、経過年数に相当)、 x : 中性化深さ(cm)、 w : 水セメント比(60%を想定)、 R : 中性化率(普通ポルトランドセメントの使用を想定して $R=1$)である。本調査の中性化深さは、大気中における予測値(24.2mm)に比べ小さく、その4割程度である。また、既往の調査結果と比較して同程度であるが、既往調査よりも地表に近い杭頭位置で供試体を採取しており、地下水位の変動により中性化が進行しやすいことを考えると、むしろ良好な結果である。また、鉄筋引張試験により得られた降伏点、引張強さ、伸びは、全供試体で JIS 規格値¹⁴⁾を上回る結果であった。

4.3 杭の支持層到達

施工杭長の確認のため実施した磁気探査結果を図15に示す。図中には、杭全長コアボーリングにより杭体を貫通して確認した杭先端深度(GL-31.9m)を併せて示している。図より、得られた磁気探査波形はGL-10mからGL-30mまであまり変化しないが、GL-30mを超えると急変し、それ以後で再び変化しなくなる。これは、杭先端より深い位置では帯磁した鉄筋が無くなり、磁場に変化が生じるためである。磁気探査結果より推定した杭先端深度はGL-31.9mであり、杭体貫通により確認した深度と一致していた。なお、地表近くの波形は大きく乱れているが、これは探査対象の杭以外に、調査のため地表に設置した仮設ステージや資機材、表層土の崩壊防止のため挿入した鋼管も帯磁しているためと考えられる。

図15 磁気探査結果

図16 標準貫入試験結果

続いて、杭支持層の深度を確認するため、磁気探査用の試験孔と貫通後の杭直下で実施した標準貫入試験結果を図16に示す。図中には、敷地内で実施した標準貫入試験結果(ボーリング No.1, 2, 図1に地点を記載)と、杭体貫通により確認した杭先端深度を併せて示している。図より、 N 値が50以上となる杭支持層の深度はGL-30.8mであり、設計通り杭は支持層に到達していることを確認した。

5. まとめ

大型物流施設の建替えにあたり、次世代の環境配慮型建築として既存杭を利用した建物を計画し、杭の健全性・耐久性・支持層到達の調査を実施した。健全性について、杭径や配筋状況が設計通りであり、杭のひび割れについても問題なく、必要な性能を確保出来ることを確認出来た。また、その際用いた筆者らの提案手法による評価結果は、従来手法と同等の結果を与えた。耐久性について、圧縮強度は設計値より十分大きく、中性化深さは設計かぶり厚より十分小さいことから、品質は良好であると確認出来た。支持層到達について、杭体を貫通するコアボーリング調査により確認した杭先端深度と、標準貫入試験により確認した杭支持層の深度を比較することで、支持層への到達を確認できた。また、磁気探査により推定した杭先端深度は杭体貫通により確認した深度と一致し、有効性を確認できた。本報告が既存杭の利用促進の一助となれば幸いである。

最後に、本調査を実施するにあたり、多大な御協力を頂きました工事事務所ならびに関係各位に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設業協会：既存杭利用の手引き、2003.2
- 2) 構造法令研究会[編]：既存杭等再使用の設計マニュアル(案)、2008
- 3) 掛谷誠、宮田章：都市部における地上構造物解体中の既存杭調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.469-470、2013.7
- 4) 勝二理智、藤森健史：弾性波探査試験に基づく杭健全性の合理的評価法、日本建築学会構造系論文集、Vol.81, No.720, pp.271-280、2016.2
- 5) 建設省土木研究所ほか：インテグリティ試験を用いた橋梁基礎の損傷調査法マニュアル(案)、1999.3
- 6) 建設省土木研究所ほか：磁気探査を用いた橋梁基礎の形状調査法マニュアル(案)、1999.3
- 7) 日本基礎建設協会：場所打ちコンクリート杭の施工と管理、pp.134、2009
- 8) 近藤次郎、宮崎祐助、芳賀孝成、崎本純治：打撃反射波による杭の形状推定手法の研究、大林組技術研究所報、No.39, pp.21-26、1989
- 9) 東京都都市計画局編：建築物の耐震診断システムマニュアル 鉄筋コンクリート、pp.89、1990
- 10) 椿原康則、山田毅、山下清：場所打ちコンクリート杭の中性化調査例、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.563-564、2003.7
- 11) 石井雄輔、西山高士、山下清、桑原文夫、若井修一：昭和30年代に築造されたペント杭の掘出し調査 その1~2、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.405-408、2012.9
- 12) 児島理士、勝二理智、藤井達、奥村豪悠、若井修一、青木雅路：築造後30年の場所打ちコンクリート杭の掘出し調査 その1~2、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.565-568、2017.7
- 13) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性、鹿島出版社、1963
- 14) 日本工業規格、JIS G 3112 鉄筋コンクリート用棒鋼

[2018年1月4日原稿受理 2018年4月11日採用決定]