

既存杭の再利用と品質調査

勝 二 理 智 藤 森 健 史

Reuse and Quality Survey of Existing Piles

Michito Shoji Takeshi Fujimori

Abstract

When rebuilding buildings, the method to reuse existing piles and underground structures is important. Four methods are available to reuse the existing piles: 1) bearing both vertical and horizontal forces, 2) bearing primarily the vertical force, 3) bearing primarily the horizontal force, and 4) treating the piles and surrounding soil as an artificial ground or improved soil. Herein, recent examples of reusing cast-in-place concrete piles are shown, and a comparative analysis is described on the design policy and preliminary survey for reuse. We found that the adoption of mat slab, the use of reduced concrete strength for existing piles, and the scrutiny of pile stress under long-term loads and seismic forces had been considered in the design. In a preliminary survey, it was revealed whether the piles had reached the bearing layer in addition to the examination of the soundness and durability of the piles. Furthermore, it was shown that a new evaluation method of the pile integrity test result had been applied.

概 要

都市部における建物の建替え案件では、敷地に存在する既存の杭や地下躯体を新築建物においてどう再利用するかが、環境負荷の低減のため重要である。再利用方法としては、1)鉛直力・水平力の両方を負担、2)主に鉛直力を負担、3)主に水平力を負担、4)人工地盤・地盤改良として利用の4つがある。各方法に該当する近年の場所打ちコンクリート杭の再利用事例を対象に、再利用に係る設計方針と実施した事前調査内容について比較分析を行った。分析によれば、設計においては、新築-既存間の応力伝達のためのマットスラブの採用、既存杭の品質や設計手法のグレードに応じたコンクリート強度の低減、および長期荷重時ならびに地震時の杭応力照査を行っている。また、事前調査においては、従来の耐久性等の調査に加えて、大林組開発の健全性評価手法の適用、ならびに施工杭長と支持層深度の比較による支持層到達の確認により、品質確認の高度化を図っている。

1. はじめに

建物の建替え時に既存杭を再利用できれば、環境負荷の低減やコスト削減、工期短縮といった効果を期待できる。Fig. 1に示す都心3区のオフィスビル供給量と供給割合に よれば、2018年以降も建替え案件は5割を占めている。都市部の建替え案件では、今後も、敷地に存在する既存の杭や地下躯体をどう再利用するかが重要になる。

既存杭の再利用にあたっては、既存建物の設計図書や施工記録を確認し、必要に応じて杭を調査し性能と品質を確認したうえで、再利用方法を選定する。多くの場合、新築建物の規模や重量が既存建物と一致する場合は少なく、現行の規基準に適合するよう設計する必要もあることから、既存杭と新設杭を併用し、それぞれが負担する鉛直力・水平力を振り分けることとなる。その際、第一には、新設杭と同等に荷重負担することを考えるが、既存杭の条件(例えば杭径が細い、鉄筋量が十分でない等)によっては、鉛直支持力・水平抵抗力が不足する場合もある。その場合、杭頭に支承を設ける、新設杭や地下躯体の負担を相対的に大きくする等の対応により、既存杭の負担荷重を限定することが必要になる。また、既存杭(場合により既存地下躯体も含む)を人工地盤とみなす方法や、地盤改良を併用する方法²⁾もある。

既存杭の品質を確認するため、文献3),4)で示されている健全性・耐久性・支持力の調査を行うことが一般的である。昨今、杭の品質確認の重要性が高まっていることを鑑みると、従来の調査に留まらず、なお一層精度の高い調査技術を開発する必要がある。

本報では、まず、再利用に係る調査技術として一般的な方法と、品質確認の高度化のため大林組が開発・考案した方法について述べる。次に、異なる方法で場所打ちコンクリート杭を再利用した近年の3事例を対象に、設計方針と実施した調査について述べる。さらに、調査結果の分析を踏まえて、今後の既存杭調査の方針を提案する。

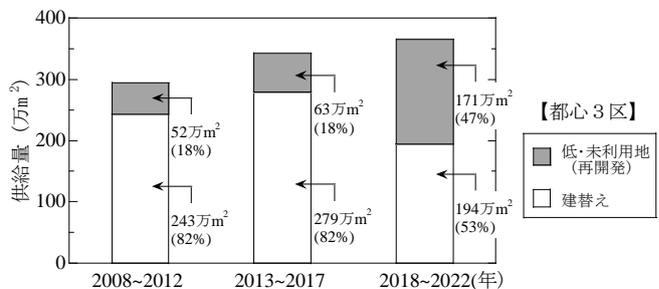


Fig. 1 オフィスビル供給量と供給割合(文献1)に編集・加筆
Supply Amount and Supply Ratio of Office Buildings

2. 既存杭の再利用に係る調査技術

既存杭の再利用にあたっては、杭の健全性や耐久性等を確認することが不可欠となる。一般に実施する調査をTable 1に示す。調査は、杭径・配筋状況といった設計図書で定められた仕様や有害なひび割れの有無を確認する健全性調査、コンクリート強度といった材料の性能を確認する耐久性調査、杭の支持力を直接確認する支持力調査の3つに大別される。

このうち、杭の弾性波探査試験は、ポータブルな計測器とハンドハンマーのみを用いて簡便に実施できるため、既存杭全数に対して実施されることが多く、既存杭を再利用する上で重要な試験となっている。一方で、試験波形の形状から健全性を評価するため、定量的な判断が困難であった。そこで、この試験の有用性を高めるため、Fig. 2に示す、試験結果を合理的に判断できる手法を新たに開発している⁶⁾。本手法では、試験波形の振幅特性を数値化し算出する指標(損傷係数)を用いる。健全杭と損傷

杭に対する数多くの試験結果から、あらかじめ作成した損傷係数の分布図に、評価対象の杭で得られた損傷係数の値をプロットすることで、その杭の健全性を評価する。本手法は、杭の健全性評価技術としては国内で初めて、(一般財団法人)日本建築センターの一般評定を取得した技術である(BCJ評定-FD0445-01)。

また、既存杭の再利用に関する文献^{3), 4)}では示されていないが、杭の支持層到達を調査することも、品質確認上、重要である。そこで、Fig. 3に示す、杭全長コアボーリングや磁気探査⁷⁾により確認した施工杭長と、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、支持層到達を確認する方法を新たに考案している。

3. 既存杭を再利用した事例

3.1 事例1(中層オフィスビル)

3.1.1 概要 建物概要をTable 2, 新築建物の杭伏図をFig. 4, 断面図をFig. 5に示す。新築建物は、場所打ちコ

Table 1 既存杭の再利用に係る一般的な調査方法(文献3), 4)に編集・加筆)

		Investigation for Reusing Existing Piles		
分類	No.	調査方法	調査項目	試験概要
健全性	1	杭頭目視調査	杭径, 配筋状況	杭頭部を露出させ、杭径や配筋状況(鉄筋径, 鉄筋本数等)を確認する。
	2	杭の弾性波探査試験	ひび割れ状況 杭長	杭頭をハンマー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ーで計測することで、健全性を推定する。
	3	全長コアボーリング	ひび割れ状況 杭長	杭体を深さ方向にボーリングし、得られたコア試料を観察して、ひび割れ等の状況を確認する。杭体を貫通させた場合は、施工杭長も確認できる。
	4	ボアホールカメラ	ひび割れ状況	杭体ボーリング孔内にカメラを挿入し、目視観察を行い、ひび割れを確認する。
	5	超音波探査	ひび割れ状況	杭体ボーリング孔内に測定器を挿入し、半径方向に超音波を発生させ、ひび割れを調べる。
	6	ボアホールソナー	杭の断面形状	杭体ボーリング孔内にソナーを挿入し、半径方向に弾性波を発生させ、断面形状を推定する。
	7	傾斜計	杭の曲がり	杭中空部内に傾斜計を挿入し、連続的に角度測定することで、杭の曲がりを推定する。
	8	磁気探査	配筋状況, 杭長	地盤ボーリング孔内にセンサーを挿入し、連続的に磁気量を測定し、鉄筋位置を推定する。
耐久性	1	コンクリート圧縮強度試験	圧縮強度	JIS規格: JIS A 1107-2012(コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法)
	2	コンクリート中性化試験	中性化程度	JIS規格: JIS A 1152-2011(コンクリートの中性化深さの測定方法)
	3	鉄筋目視	鉄筋の腐食	「建築物の耐震診断システムマニュアル ⁸⁾ 」により錆グレード(A~D)を判定
	4	鉄筋引張試験	鉄筋の引張強度	JIS規格: JIS Z 2241-2011(金属材料引張試験方法)
支持力	1	押込み/急速/衝撃荷試験	鉛直支持力	地盤工学会基準: JGS 1811-2002, 1815-2002, 1816-2002(杭の押込み/急速/衝撃荷試験方法)
	2	引抜荷試験	引抜抵抗力	地盤工学会基準: JGS 1813-2002(杭の引抜き試験方法)
	3	水平荷試験	水平抵抗力	地盤工学会基準: JGS 1831-2010(杭の水平荷試験方法)

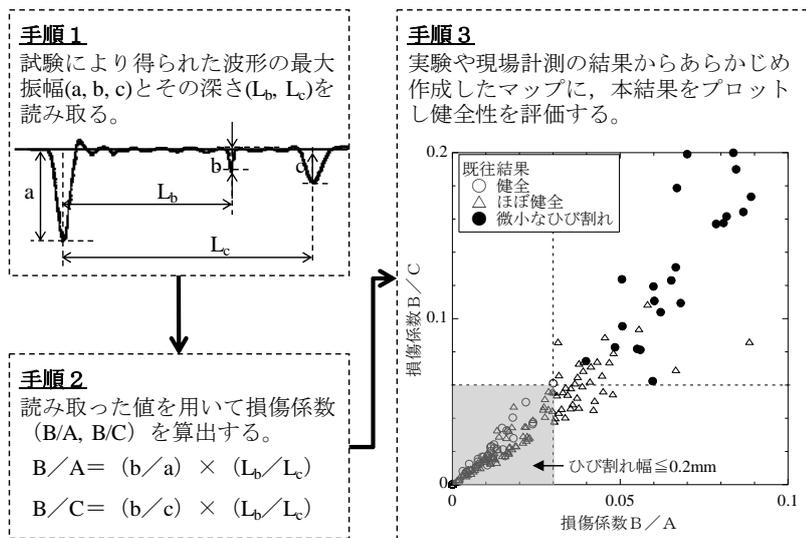


Fig. 2 弾性波探査試験に基づく杭健全性評価⁶⁾
Evaluation of Pile Soundness Based on Pile Integrity Test

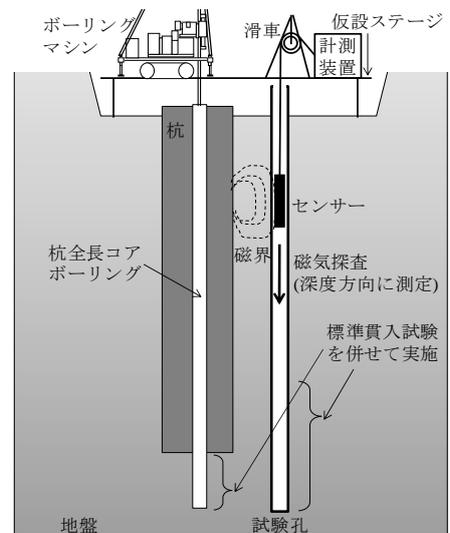


Fig. 3 支持層到達の調査方法
Method for Investigating Pile Reaching Bearing Layer

ンクリート杭で支持された地上10階のS造(一部SRC造)の純ラーメンの耐震建物であり、既存建物と同規模、同用途である。既存建物の杭基礎(杭、基礎スラブ、基礎ブーチング、基礎梁)を新築建物の構造部材として再利用しており、新設杭を増し打つことで地震時にも安全に新築建物を支持できるよう計画している。新築建物と既存建物の柱位置は一致しないため、マットスラブにより新設地下躯体と既存杭基礎を一体化することで、上部構造から杭へのスムーズな応力伝達を図っている。新設地下躯体と既存地下外壁の間にはコンクリートを増し打ちしているが、重量軽減のためスタイロフォームを一部充填している。本計画にあたり、後述する既存杭の調査に加えて、既存の基礎梁や基礎スラブの調査(コンクリート圧縮強度試験、中性化試験、鉄筋引張試験)も行い、性能と品質を確認している。

土質柱状図と既存杭深度の関係をFig. 6に示す。既存杭はオールケーシング工法で築造された場所打ちコンクリート直杭であり、直径は1,200mmまたは2,000mm、杭頭深度はGL-9.2m、杭先端深度はGL-19.9m、支持層はN値50以上の砂礫層、コンクリートの設計基準強度は18N/mm²である。

3.1.2 既存杭の調査計画 健全性について、配筋状況(鉄筋本数、鉄筋径、定着長、かぶり厚)は杭頭目視、ひび割れ有無は弾性波探査試験により確認し、試験結果を従来の判定基準^{4),8)}に基づき評価するとともに、2章で示した手法(Fig. 2)による評価も併せて実施している。さ

らに、施工品質とひび割れ有無を直接確認するため、杭先端近くまで削孔したコアボーリング孔内のカメラ観察を実施し、同時に得られるコア試料は圧縮強度試験に供している。併せて、そのコアボーリング孔を用いて弾性波の伝播速度を実測し、前記の弾性波探査試験で推定する杭長の精度向上を図っている。

耐久性については、コンクリートの圧縮強度と中性化深さ、杭主筋の腐食度、杭主筋と同規格・同径のスラブ小梁筋の降伏点等を確認している。

実施にあたっては、調査可能な範囲など実施条件を考慮して、調査数量を決定している。

3.2 事例2(大型物流施設)

3.2.1 概要 建物概要をTable 3、新築建物の杭伏図をFig. 7、土質柱状図と杭深度の関係をFig. 8~9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

Table 2 建物概要(事例1)
Outline of New and Old Buildings

項目	新築建物	既存建物
建物階数	地上10階, 地下1階	地上13階, 地下2階
延床面積	6,800m ²	6,500m ²
建物用途	事務所	事務所
竣工年	2018年	1975年
構造形式	S造, 一部SRC造, 耐震	SRC造
基礎形式	場所打ち杭(新設杭) 1600φ, 杭長12~14m, 16本 場所打ち杭(既存杭再利用) 1200~2000φ, 杭長11m, 26本	場所打ち杭(オールケーシング) 1200~2000φ, 杭長11m

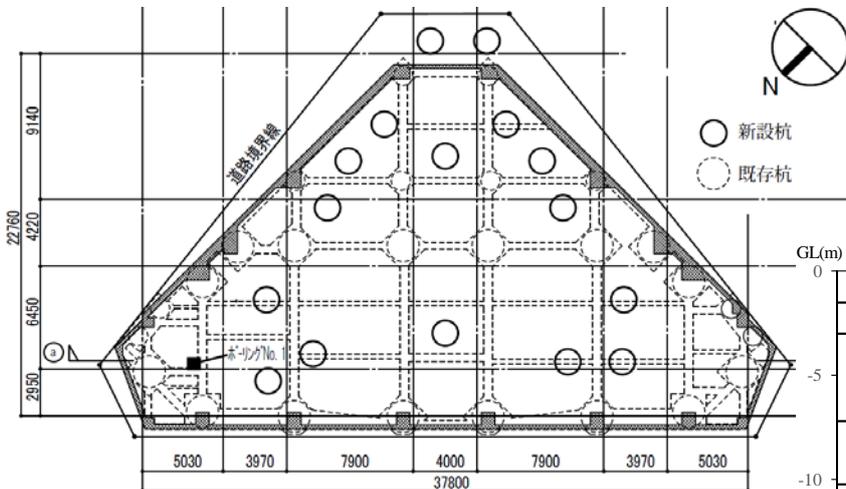


Fig. 4 新築建物の杭伏図(事例1)
Pile Plan of New Building

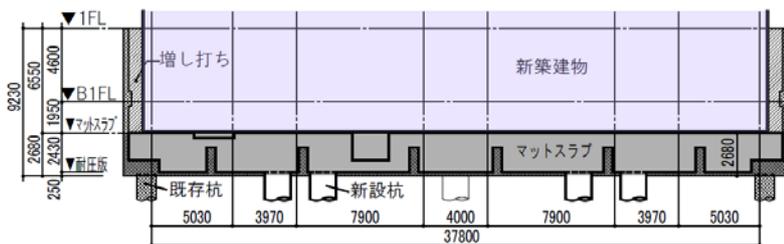


Fig. 5 新築建物の断面図(事例1)
Framing Elevation of New Building

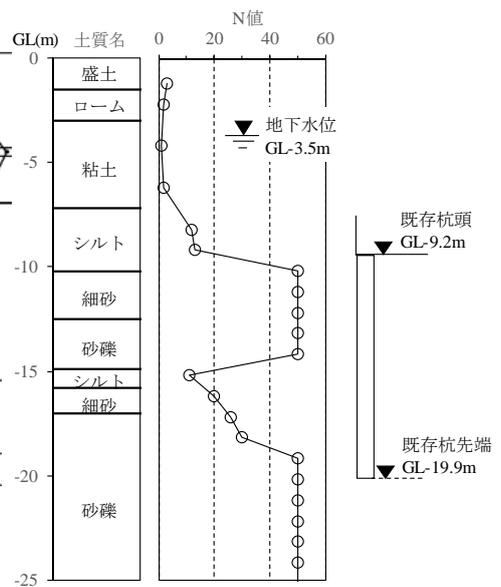


Fig. 6 土質柱状図(No. 1)と既存杭深度
Boring Log and Existing Pile Figure

柱SRC、梁S造の基礎免震建物であり、既存建物と同規模、同用途である。杭支持層が南北に傾斜しており、異なる長さの新設杭を併用する基礎形式である。長尺の杭基礎部分の水平剛性を増加させるため、新設杭を増し打つ代わりに既存杭を再利用している。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直杭であり、直径は1,200mm、杭頭深度はGL-1.2m、杭先端深度はGL-32m、支持層はN値60以上の細砂層、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、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ている。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ている。

3.2.2 既存杭の調査計画 健全性について、杭径と配筋状況（鉄筋本数、鉄筋径、かぶり厚）は杭頭目視、ひび割れ有無は弾性波探査試験と評価手法（Fig. 2）により確認している。

Table 3 建物概要(事例2)
Outline of New and Old Buildings

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	171,000m ²	174,000m ²
建物用途	倉庫業を営む倉庫, 事務所	倉庫業を営む倉庫, 事務所
竣工年	2017年	1973年
構造形式	柱SRC造, 梁S造, 基礎免震	RC造, 一部SRC造
基礎形式	既製杭(新設杭, PRC, PHC) 500~1200φ, 杭長19~35m, 552本 場所打ち杭(既存杭再利用) 1200φ, 杭長31m, 84本	場所打ち杭(アースドリル) 1200~1400φ, 杭長19~31m

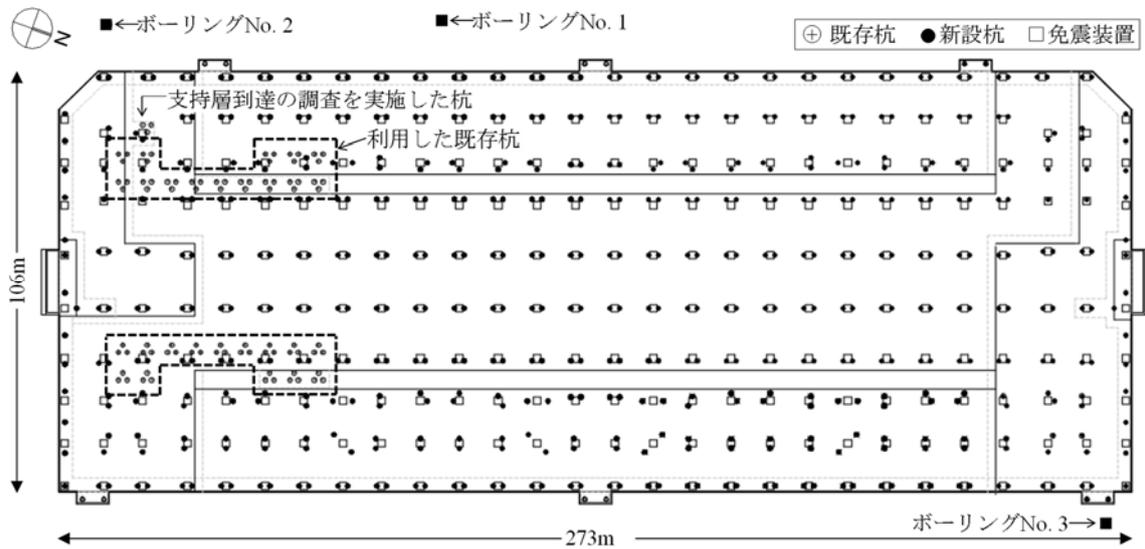


Fig. 7 新築建物の杭伏図(事例2)
Pile Plan of New Building

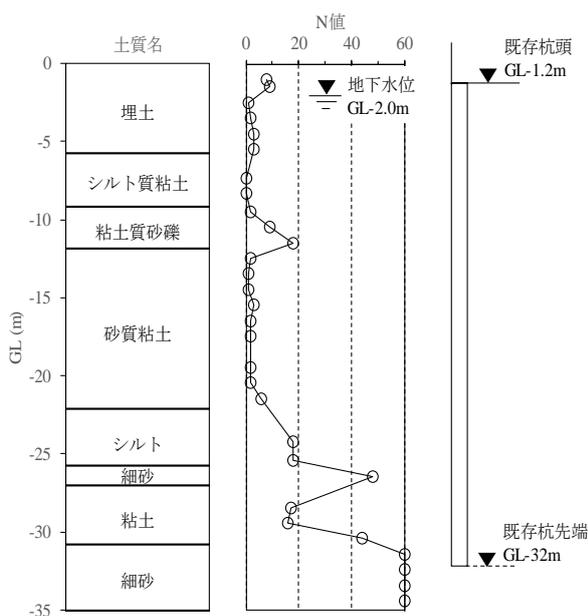


Fig. 8 土質柱状図(No. 2)と既存杭深度
Boring Log and Existing Pile Figure

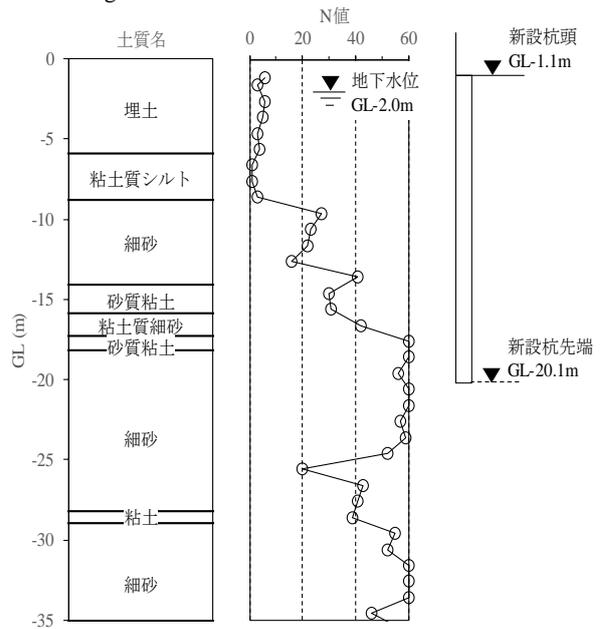


Fig. 9 土質柱状図(No. 3)と新設杭深度
Boring Log and New Pile Figure

耐久性について、コンクリートの圧縮強度と中性化深さ、杭主筋の腐食度、杭主筋の降伏点等を確認している。

杭の支持層到達については、施工された杭の長さと同支持層の深度を比較することで確認している (Fig. 3)。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たほか、杭鉄筋による磁場の変化を測定して杭長を推定する磁気探査も併せて実施している。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ている。

実施にあたっては、健全性調査は再利用する杭全数を対象に、耐久性調査は再利用する杭から偏りなくサンプリングして、それぞれ実施している。支持層到達を確認する調査は再利用しない杭を対象に実施している。調査は主に建物解体後に実施したが、既存杭再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、再利用する杭本数の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ている。

3.3 事例3(高層複合施設)

3.3.1 概要 建物概要をTable 4、新築建物の杭伏図をFig. 10、断面図をFig. 11に示す。新築建物は、地上27階、地下2階の制振建物であり、それぞれの構造形式はTable 4に示した通りである。新築建物の地下部分は既存地下躯体より一回り小さく、その内側に収まっており、既存基礎(杭、基礎梁)を人工地盤とした直接基礎となっている。上部架構の変動軸力による基礎の浮上がりが生

Table 4 建物概要(事例3)
Outline of New and Old Buildings

項目	新築建物	既存建物
建物階数	地上27階、地下2階	地上9階、地下3階
延床面積	36,100m ²	28,200m ²
建物用途	事務所、ホテル、店舗	事務所、駐車場、店舗
竣工年	2019年	1983年
構造形式	地上 柱CFT・S造、梁S造、制振 地下 柱SRC造(一部CFT・RC造) 梁S造(一部SRC・RC造)	SRC造、一部RC造
基礎形式	既存躯体(基礎梁、杭57本)を人工地盤とした直接基礎	場所打ち杭(深礎) 1600~4400φ、杭長6m

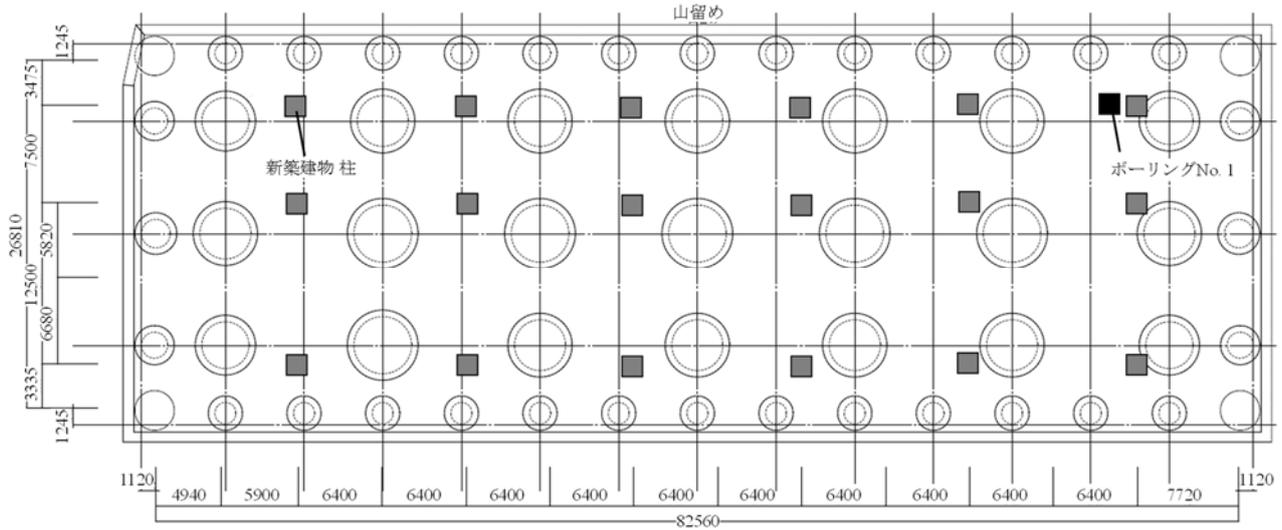


Fig. 10 新築建物の杭伏図(事例3)
Pile Plan of New Building

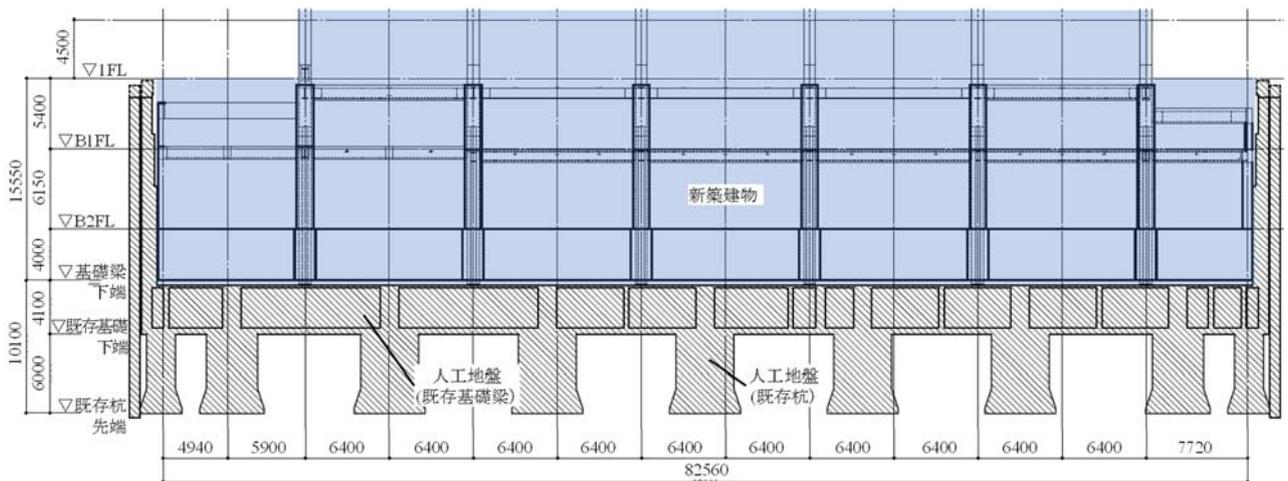


Fig. 11 新築建物の断面図(事例3)
Framing Elevation of New Building

じないように、新設地下外壁と既存地下躯体(柱梁、地下外壁)の間にコンクリートを増し打ちし、それら重量をカウンターウェイトとして利用している。本計画にあたり、後述する既存杭の調査に加えて、既存の基礎梁や基礎スラブ、地下外壁の調査(配筋状況とコンクリート表面の目視調査、コンクリート圧縮強度試験、中性化試験、塩分含有量試験)も行い、性能と品質を確認している。土質柱状図と既存杭深度の関係をFig. 12に示す。既存杭は深礎工法で築造された場所打ちコンクリート拡底杭であり、軸径は1,600~4,400mm(拡底径2,600~5,400mm)、杭頭深度はGL-19.4m、杭先端深度はGL-25.4m、支持層はN値50以上の細砂層、コンクリートの設計基準強度は18N/mm²である。

3.3.2 既存杭の調査計画 健全性について、配筋状況(鉄筋本数、鉄筋径、定着長)は杭頭目視、ひび割れ有無は弾性波探査試験により確認している。さらに、施工品質とひび割れ有無を直接確認するため、杭軸部を削孔して得られたコア試料を観察し、その試料は圧縮強度試験に供している。

耐久性について、コンクリートの圧縮強度と中性化深さ、杭主筋の腐食度、杭主筋と同規格・同径のスラブ小梁筋の降伏点等を確認している。また、コンクリート中に含まれる塩化物量の測定も試行している。

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ている(Fig. 3)。施工杭長は磁気探査により確認し、杭支持層の深度は磁気探査用の試験孔で標準貫入試験を実施して確認している。

実施にあたっては、調査可能な範囲など実施条件を考慮して、調査数量を決定している。

4. 既存杭の再利用に係る設計方針と調査の分析

4.1 設計方針

3章で示した3事例について、既存杭の再利用に係る設計方針と実施した調査をまとめ、Table 5に示す。新築建

物の計画と既存杭の条件を考慮して、既存杭の再利用方法を選定している。事例により再利用方法は異なるが、共通する設計項目として、新築-既存間の応力伝達のためのマットスラブの採用、長期荷重時ならびに地震時の杭応力の照査、および調査で確認した実コンクリート強度の下限値または低減した値の使用が挙げられる。強度の低減については文献4)の方法を用いており、(1)設計情報の充実度、(2)使用材料の品質の確実度(=調査割合)、(3)既存建築物の経年劣化、(4)上部架構の構造検討の確かさ、(5)地盤と杭の構造検討の確かさの5項目で低減割合をそれぞれ設定している。

4.2 調査方法

既存杭の再利用方法、調査に費やせる時間やコストといった実施条件を考慮して、Table 1で示した試験から実施する試験を選定している。そのため事例ごとに内容は異なるが、共通する試験として以下がある。健全性調査

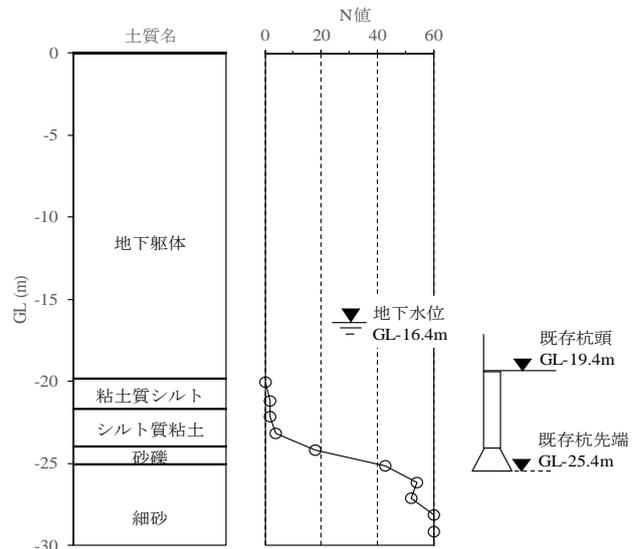


Fig. 12 土質柱状図(No. 1)と既存杭深度 Boring Log and Existing Pile Figure

Table 5 既存杭の再利用に係る設計方針と実施した調査
Seismic Design and Investigation of Reusing Existing Piles

項目	事例1(中層オフィスビル)	事例2(大型物流施設)	事例3(高層複合施設)
設計方針	<ul style="list-style-type: none"> 既存杭は鉛直力と水平力の両方を負担 マットスラブによる基礎の一体化 長期荷重時/地震時の応力照査 実コンクリート強度を低減して使用 	<ul style="list-style-type: none"> 既存杭は主に水平力を負担 マットスラブによる基礎の一体化 長期荷重時/地震時の応力照査 実コンクリート強度の下限値を使用 	<ul style="list-style-type: none"> 既存躯体(基礎梁、杭)を人工地盤として利用 長期荷重時/地震時の応力照査 実コンクリート強度を低減して使用
調査	健全性	<ul style="list-style-type: none"> 杭頭目視調査 84本 杭の弾性波探査試験*1 84本 	<ul style="list-style-type: none"> 杭頭目視調査 1本 杭の弾性波探査試験 39本
	耐久性	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート圧縮試験 9本 コンクリート中性化試験 8本 鉄筋目視 84本 鉄筋引張試験 6本 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート圧縮試験 5本 コンクリート中性化試験 1本 鉄筋目視 1本 鉄筋引張試験 1本(小梁) 塩化物イオン試験 3本
	支持層到達*2	<ul style="list-style-type: none"> 杭全長コアボーリング 1本 磁気探査 1本 標準貫入試験 2地点 	<ul style="list-style-type: none"> 杭全長コアボーリング 1本 磁気探査 1本 標準貫入試験 1地点

*1 大林組開発の健全性評価手法(BCJ評定-FD0445-01)を適用。

*2 大林組考案の調査。杭全長コアボーリングと磁気探査は文献3)では健全性調査に分類されるが、ここでは支持層到達の調査として位置付けている。

において、杭頭が露出しない事例1,3では杭頭目視調査は1本のみとし、露出する事例2では杭全数を調査している。弾性波探査試験は重要と考えて、なるべく多くの杭で実施するよう計画しており、大林組開発の評価手法 (Fig. 2) を適用することで健全性評価の信頼性を高めている。耐久性調査においては、コンクリートの圧縮強度試験と中性化試験を主に計画しており、再利用する杭本数の1割を目安に調査本数を決定している。鉄筋目視については、前述した杭頭目視調査と同様に計画している。鉄筋引張試験は、JIS材料の確認のため1本以上実施している。これら以外に、文献3),4)では示されていない支持層到達を確認する調査 (Fig. 3) も実施しており、代表的な1本について施工杭長と杭支持層の深度を比較している。杭長については、主に杭全長コアボーリングや磁気探査により確認しているが、弾性波の伝播速度を実測して精度良く推定する場合もある。杭支持層については標準貫入試験により確認している。

4.3 杭の健全性

本節では、代表的な調査結果として、事例1の弾性波探査試験で得られた波形をFig. 13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杭全長コアボーリング孔を用いて実測した値 (3,800m/s) とした。図では、杭頭打撃 (深度0m) と杭先端反射 (深度10.8m) の振幅のみが生じ、その間に、ひび割れ等の断面縮小部に起因する下向きの有意味な振幅は生じていない。本件では、スラブから杭頭まで鉛直に削孔し、形成した孔底で打撃入力する方式により試験を実施している。そのため、振動が鉛直下方 (杭先端方向) 以外に上方 (スラブ方向) にも伝わり、スラブからの反射も計測され、深度3m位置に上向きの振幅が生じたと考えられるが、健全性評価には影響しない波形が得られている。

続いて、評価手法による結果をFig. 14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、図の左下の網掛け範囲はひび割れ幅が0.2mm以下

下の範囲である。図中には、文献6)で検討した杭径2m・杭長35mまでの場所打ちコンクリート杭を対象とした実験および現場計測の結果を併せて示している。図の赤色■が本調査結果であり、原点に分布する杭は22本、原点から少し離れた位置に分布する杭は4本あるが、いずれも左下の範囲内にあることを確認できる。以上より、従来手法と評定手法の双方で、利用する既存杭はすべて健全であると判断した。なお、事例2,3についても同様の方法で、既存杭の健全性に問題ないことを確認している。

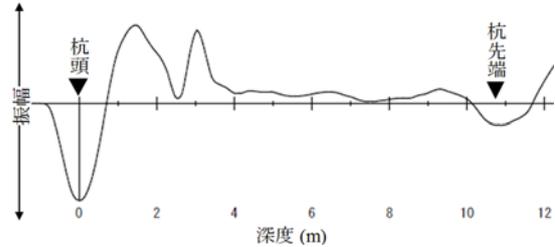


Fig. 13 弾性波探査試験で得られた波形 (事例1)
Wave Obtained from Pile Integrity Test

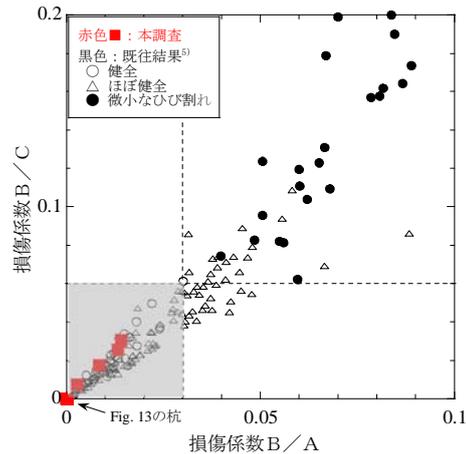


Fig. 14 杭健全性評価結果 (事例1)
Evaluation of Soundness of Existing Piles

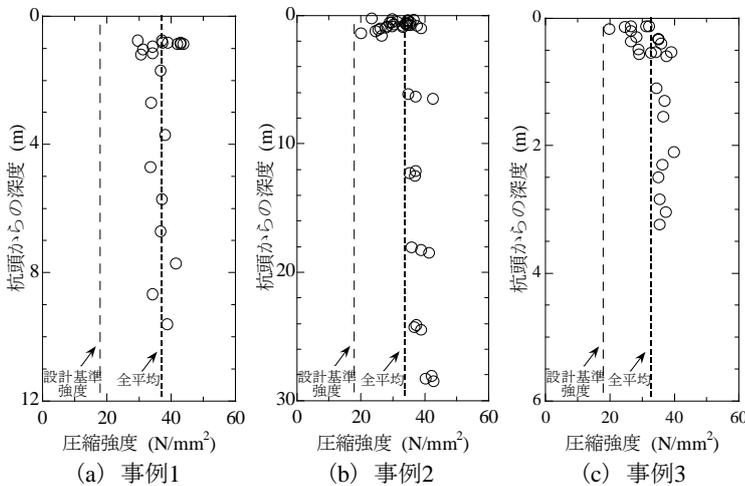


Fig. 15 圧縮強度の深度分布
Depth Distributions of Compressive Strength

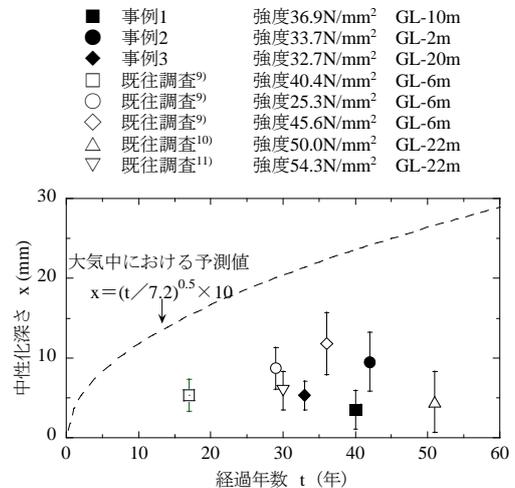


Fig. 16 中性化深さと経過年数の関係
Relation between Neutralization Depth and Elapsed Years

4.4 杭の耐久性

本節では、代表的な調査結果として、事例1~3のコンクリート圧縮強度試験と中性化試験の結果について述べる。事例1~3の既存杭はいずれも場所打ちコンクリート杭であり設計基準強度も同一であるが、施工法が異なる。コンクリートの圧縮強度の深度分布をFig. 15に示す。図の縦軸は杭頭からの深度である。図において、圧縮強度の平均値は、事例1では36.9N/mm²、事例2では33.7N/mm²、事例3では32.7N/mm²であり、設計基準強度(18N/mm²)の約2倍と十分大きい。どの事例においても、杭頭部の圧縮強度にはややばらつきがあるが、それ以外の軸部や杭先端部の強度に差はなく安定した値を示している。

続いて、コンクリートの中性化深さと経過年数の関係について、既往の調査結果^{9)~11)}と比較してFig. 16に示す。 $\mu \pm 1\sigma$ の範囲を示しており(μ : 平均値, σ : 標準偏差), 大気中における中性化深さの進展予測式(式(1))¹²⁾による値も併せて示している。

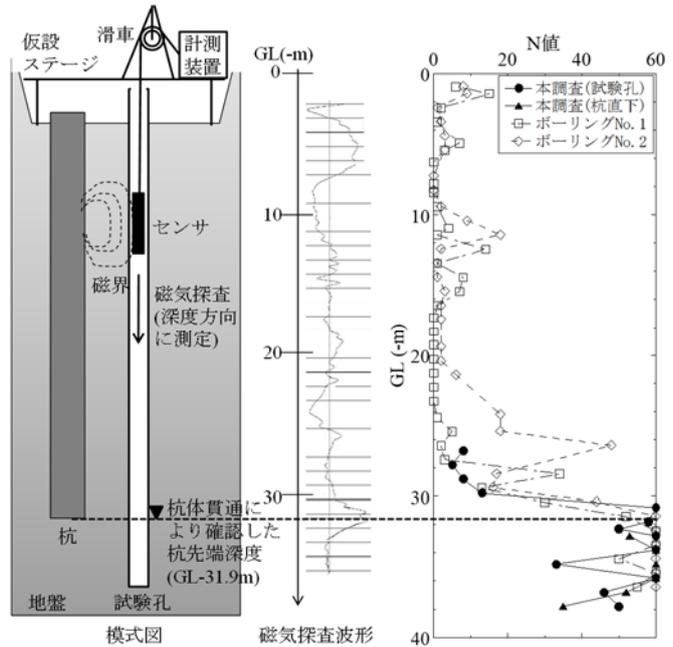
$$t = \frac{7.2}{R^2(4.6 \cdot w - 1.76)^2} \cdot x^2 \quad (1)$$

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。図より、中性化深さの平均値について、事例1では3.5mm、事例2では9.5mm、事例3では5.3mmであり、設計かぶり厚(100~150mm)の1割以下と十分小さい。前記の圧縮強度試験結果と合わせて、杭の品質は良好であると判断した。また、事例1~3の中性化深さは、大気中における予測値と比較して2~4割程度であり、既往の調査結果でも同様の傾向を示している。地中にある杭は地下水により湿潤状態が保たれるため、中性化が進行しにくいと考えられてきたが、今回それを裏付ける実証データを得た。

4.5 杭の支持層到達

本節では、代表的な調査結果として、事例2の磁気探査結果をFig. 17(a)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、それ以深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た。なお、地表近くの波形は大きく乱れているが、これは調査対象の杭以外に、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。

続いて、杭支持層深度の確認のため、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Fig. 17(b)に示す。図中には、敷地内で実施した標準貫入



(a) 磁気探査 (b) 標準貫入試験

Fig. 17 支持層到達の調査結果(事例2)
Investigation Result of Pile Reaching Bearing Layer

試験結果(ボーリングNo.1, 2, Fig. 7に記載)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60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。なお、事例3についても同様の方法で、既存杭の支持層到達に問題ないことを確認している。

5. まとめ

建物の建替え時に、異なる方法で場所打ちコンクリート杭を再利用した近年の3事例を対象に、設計方針と実施した調査について比較分析を行い、以下の知見を得た。

- 1) 設計においては、新築-既存間の応力伝達のためのマットスラブの採用、既存杭の品質や設計手法のグレードに応じたコンクリート強度の低減、および長期荷重時ならびに地震時の杭応力照査を行っている。
- 2) 調査においては、従来の耐久性等の調査に加えて、弾性波探査試験への新たな評価手法の適用、ならびに施工杭長と支持層深度の比較による杭の支持層到達の確認により、品質確認の高度化を図っている。
- 3) 本報で示した調査の範囲では、杭の圧縮強度は杭頭部ではややばらつくが、軸部や杭先端部では安定しており、設計値の約2倍と十分大きかった。中性化深さも設計かぶり厚の1割以下と十分小さく、品質は良好であると判断した。また、その中性化深さは大気中における予測値より十分小さく、地

中では中性化が進行しにくいことを裏付ける実証データを得た。

以上を踏まえて、今後の既存杭調査の方針を提案する。健全性調査では、実施条件にもよるが、弾性波探査試験を杭全数で実施し、大林組開発の評価手法を適用して信頼性をさらに高めることも可能である。耐久性調査では、安全側に評価できるよう杭頭部で採取した試料を用いて圧縮強度試験を行い、調査数量は杭全数の1割程度でよい。中性化試験も同様だが、地中では中性化は進行しにくいことを考慮して、調査数量はより少なくてもよい。支持層到達の調査は代表的な1本で実施し、施工杭長の評価には磁気探査や伝播速度の実測による推定が有効である。また、杭全長コアボーリングは得られる情報が多く有用なため、1本程度実施することが望ましい。

参考文献

- 1) 森トラスト株式会社：東京23区の大規模オフィスビル供給量調査'18，URL：<https://www.moritrust.co.jp/pressrelease/2018/20180425.pdf>(2018/5/25 閲覧)
- 2) 梅野岳，鈴木裕美：歴史的建築物の基礎の補強事例，基礎工，Vol. 39，No. 2，pp. 61-64，2011
- 3) 建設業協会：既存杭利用の手引き，2003.2
- 4) 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
- 5) 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，p. 89，1990
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 石井雄輔，西山高士，山下清，桑原文夫，若井修一：昭和30年代に築造されたベ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
- 11) 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
- 12) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島出版社，1963