

## 既存杭再利用による持続可能な社会の実現と技術的課題

株式会社 竹中工務店 奥村豪悠  
黒川雄太  
田屋裕司  
濱田純次

### 1. はじめに

多くの建物にはコンクリートが用いられており特に基礎のほとんどはコンクリートで作られている。コンクリートはセメント生産時の CO<sub>2</sub> 排出量が非常に大きく環境負荷が大きい。特に建物の杭基礎構築に起因する CO<sub>2</sub> 排出量は材料生産時、重機稼働時のものがあるが、その約 90%が材料生産時に生じると報告されており<sup>1)</sup>、建築基礎構造に関する分野では、いかにしてコンクリートの使用量を減らすかが課題となっている。一方で当分野には既存杭再利用と呼ばれる技術があり、1980年代から開発、実施されている。当初の主な目的は建替えに伴う杭の引抜きによるトラブル回避やコスト削減だったが、環境負荷低減を求められる昨今では、環境負荷低減に資する有用な技術の一つと考えられる。そこで本論では、近年の既存杭再利用事例や既存杭再利用による CO<sub>2</sub> 削減効果を紹介するとともに、既存杭再利用を推進し持続可能な社会を実現していく上での技術的課題についてまとめる。

### 2. 既存杭再利用技術について

通常、建物の建替えでは既存建物の地下躯体は撤去されるべきというのが基本的な考え方であるが、地下躯体の撤去には周辺地盤を乱す可能性があり、最悪の場合は周辺地盤を巻き込んでの崩壊などのリスクを内包している。また、杭を含めた地下躯体は何万年もかけて堆積した地盤中に構築されるため、撤去後の埋め戻しにおいて原地盤と同等に復元することは困難であり、埋戻しが適切に行われない場合には、地盤沈下など様々な問題が生じる可能性がある。そのため、建設技術者にとって、建替えに伴う既存地下躯体は新設建物に影響しない範囲で手を付けたくない(存置したい)というのが基本的なモチベーションとなる。このような背景から、既存杭再利用技術の開発が1980年代から始められた。図1に既存杭再利用事例の報告数<sup>1)</sup>の時系列変化を示す。図1を見ると論文発表数、アンケート報告数ともに開発が始まった1980年代から2000年代まで右肩上がり件数が伸びている。これは既存杭再利用技術が建設コスト削減にも有効であることから、1990年代、2000年代の利用数については、1990年初頭のバブル崩壊に伴う建設需要の落ち込みや工事価格の締め付けなどにより、既存杭を再利用することで建設コスト削減を狙ったものが多かったためと考えられる。

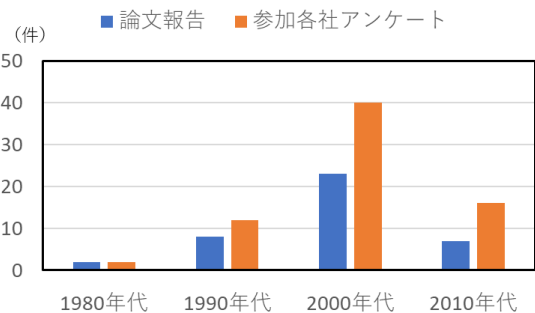


図1 既存杭再利用事例の報告数<sup>1)</sup>に加重

一方で、2010年代になると景気の回復により、やや下火となった既存杭再利用技術であるが、近年の温室効果ガス削減の機運とともに再議論されつつある。2020年に政府が発表したカーボンニュートラル宣言以降、企業にも二酸化炭素排出量削減の動きがある。特に建築物の運用にかかわるオペレーショナルカーボンの削減だけでなく、建設や解体撤去まで含めた建築物のライフサイクル全体の二酸化炭素排出量であるエンボディドカーボン(図2)という考え方が進みつつあるためである<sup>2)</sup>。建築物に多く用いられるコンクリートであるが、セメント製造時に多くの二酸化炭素を排出するため環境負荷の大きい建材の一つといえる。特に、基礎を含む地下躯体にはコンクリートを用いることが多い。そのため、基礎を再利用することができれば大きな環境負荷低減となる。これにより、今までは建設技術者(施工会社)のモチベーションであった既存杭再利用技術が、発注者側企業のモチベーションにも作用しつつあるためと考えられる。

先述の通り、建設技術者にとっては地下工作物を存置したいというモチベーションがある一方、新設建物に関係しない地下工作物を地中に存置すると不法投棄とみなされる可能性があるため、撤去しなければ

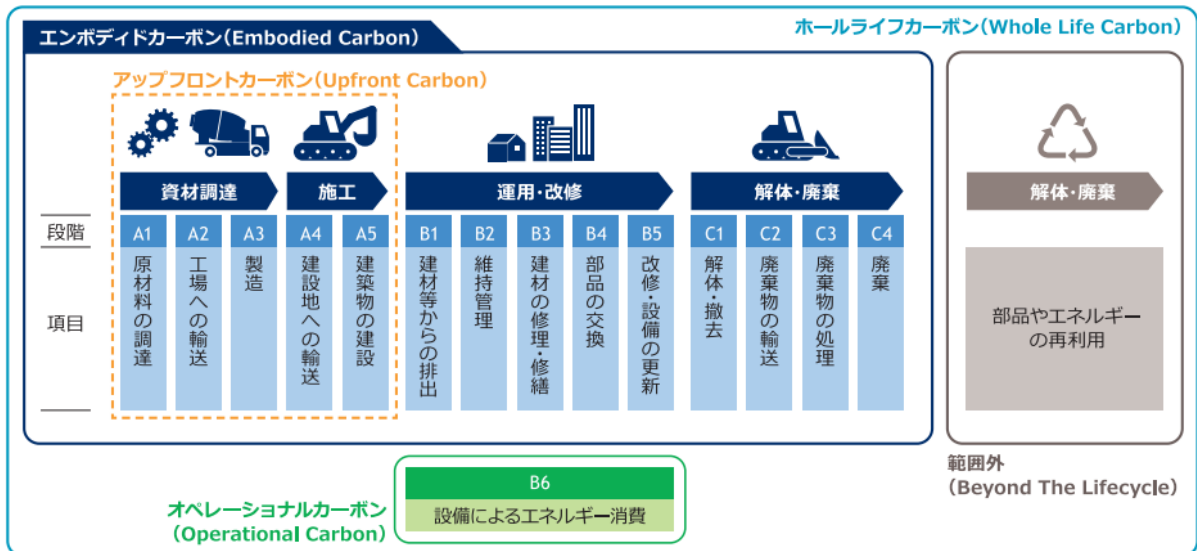


図2 建築物のライフサイクルにおけるエンボディドカーボンの対象範囲

ならない。そのような技術者の葛藤に対し、日本建設業連合会(以下、日建連)から「既存地下工作物の取扱いに関するガイドライン」<sup>3)</sup>が発表され、その線引きが示された。図3に同ガイドライン内に示された既存杭の再利用(本設利用)の形態を示す。図3(a)~(c)のように、新設躯体と一体化し構造部材と利用する方法のほか、図3(d)のように地盤の一部として、新設建物の安定化に資するような再利用方法が示されている。

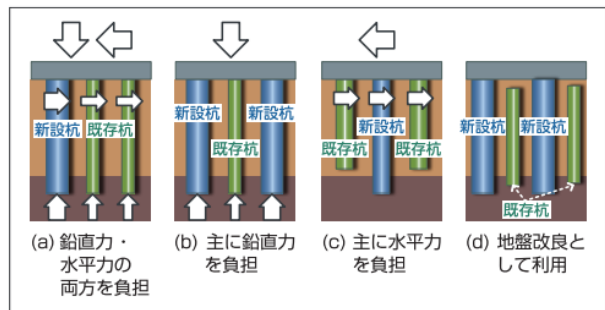


図3 既存杭の再利用形態

### 3. 近年の既存杭再利用事例における二酸化炭素削減効果の算出例

近年の既存杭再利用事例<sup>4)</sup>を図4に示す。本事例は超高層工作物の建替えに際し、基規準類の改訂に伴い図3(a)~(c)に示した積極的な再利用が困難であることから、図3(d)のように地盤の安定、特に地震時の地盤安定性に関して3次元FEM解析を用いた既存杭-地盤系の地震応答解析(図5)を行い、評価した事例である。本解析によって地震時に生じる地盤の変形(せん断ひずみ)が既存杭再利用によって周辺地盤のおよそ半分に抑えられることを確認した(図6)。

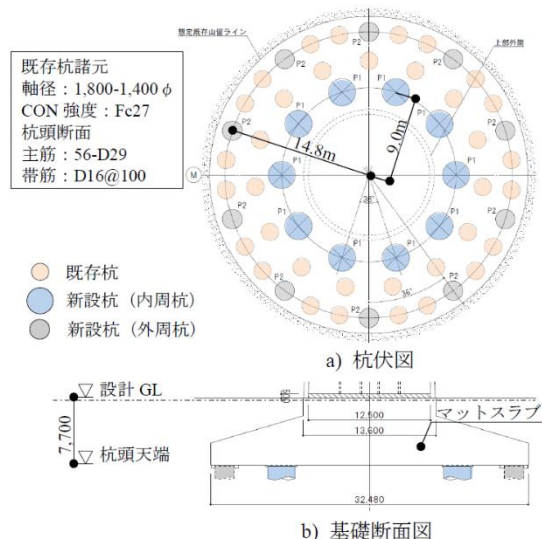


図4 近年の既存杭の再利用事例

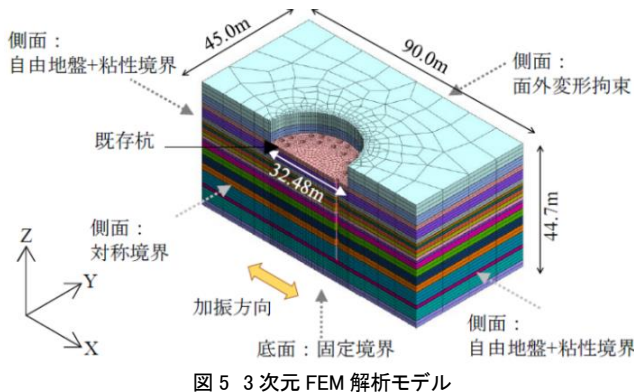


図5 3次元FEM解析モデル

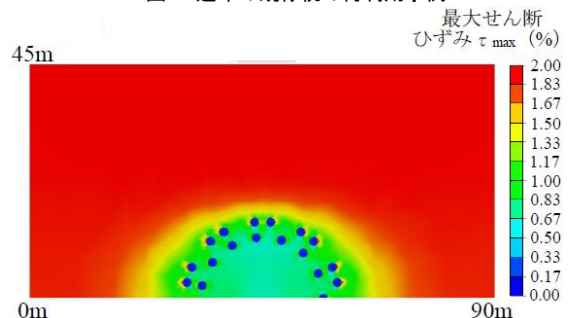


図6 地盤の最大せん断ひずみ分布

本事例について二酸化炭素削減効果を検討する。なお算出根拠については、日建連の「既存杭利用の手引き」<sup>1)</sup>によるものとし、流動化処理土製造時の二酸化炭素排出量については文献<sup>5)</sup>によった。また、本事例は原稿執筆現在(2024年10月)において未だ施工中であり、あくまで事例を基にした試算結果(ケーススタディ)であることを補記しておく。まず、既存杭を再利用しない場合については、技術の進歩により新設杭の本数は削減できることを考慮し、既存杭45本をすべて撤去した後、場所打ちコンクリート杭30本を新たに打設する場合を考える。一方、既存杭を再利用する場合については、図4の通り、新設杭(外周杭)に干渉する既存杭10本のみを撤去し、場所打ちコンクリート杭の20本を新たに打設する場合を考える。

### 1) 既存杭撤去の算出条件

杭の撤去は全周回転型オールケーシング掘削機によるものとする。全周回転型オールケーシング掘削機による既存杭の解体手順を図7に示す。全周回転型オールケーシング掘削機による地中障害撤去工法は比較的大きな杭を撤去する場合に用いられ、使用機械も比較的大きなものである。杭の解体から場外処理までには、①オールケーシング掘削機による杭の解体掘削、②クレーンによる吊り上げ、③バックホウによる解体ガラ積み込み、④ダンプトラックによる解体ガラの運搬、⑤処分場での再資源化、⑥流動化処理土(埋戻し土)の製造、⑦流動化処理土の運搬の7工程についてそれぞれの二酸化炭素排出量を算出した。

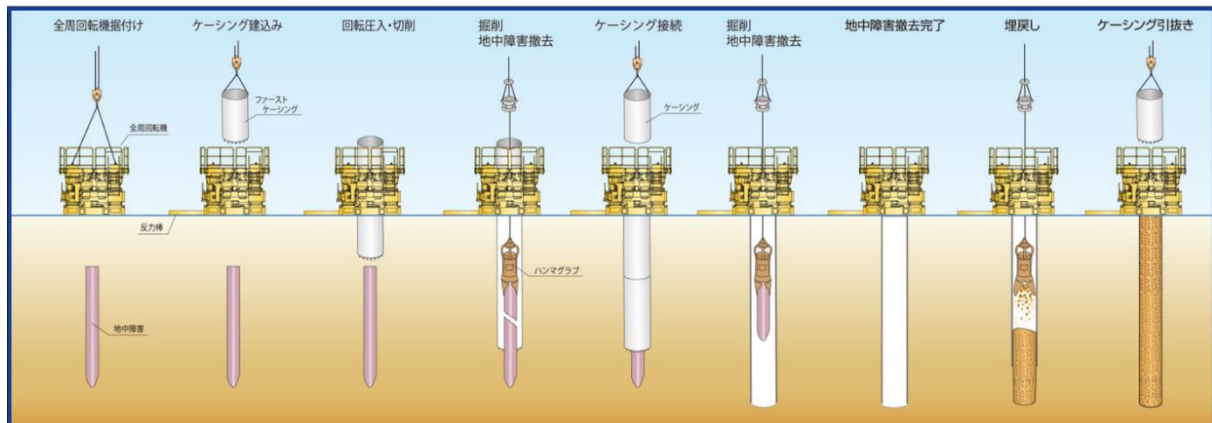


図7 オールケーシング工法による地中障害撤去手順<sup>6)</sup>

### 2) 杭新設の算出条件

杭の新設はアースドリル工法およびオールケーシング工法によるものとする。アースドリル工法による杭の構築方法を図8に示す。アースドリル工法は場所打ちコンクリート杭の施工法の中で一般的なものの一つであり、オールケーシング工法と同様に大型の機械が用いられる。また、掘削中の孔壁を保護するために安定液と呼ばれる高比重にした液体を用いる関係で、場内に安定液プラントが必要になる。一方、オールケーシング工法は図7の撤去工程と概ね同じであるが、埋戻しの工程において、鉄筋カゴを建込み、コンクリートを打設し、杭を構築するものである。杭の新設では①アースドリル/オールケーシング掘削機による掘削、②バックホウによる排出土の積み込み、③ダンプトラックによる排出土の運搬、④生コンクリートの製造、⑤生コンクリートの運搬、⑥クレーンによる鉄筋カゴの建込み、⑦工法全体で使用される発電機の使用(プラント、鉄筋カゴ加工、コンクリートバイブレータなど)について、それぞれの二酸化炭素排出量を算出した。

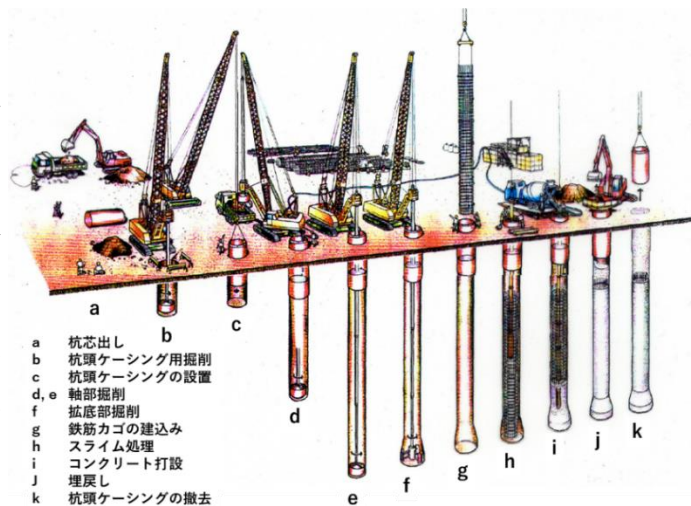


図8 アースドリル工法による杭構築手順

杭の新設では①アースドリル/オールケーシング掘削機による掘削、②バックホウによる排出土の積み込み、③ダンプトラックによる排出土の運搬、④生コンクリートの製造、⑤生コンクリートの運搬、⑥クレーンによる鉄筋カゴの建込み、⑦工法全体で使用される発電機の使用(プラント、鉄筋カゴ加工、コンクリートバイブレータなど)について、それぞれの二酸化炭素排出量を算出した。



### 3) 二酸化炭素排出量算出結果

算出結果を表 1 に示す。表 1 によると既存杭を再利用することで二酸化炭素総排出量の 30% である約 600 tCO<sub>2</sub> が削減されていることがわかる。特に、既存杭撤去においては撤去本数の削減が有効に働き、撤去本数に応じて二酸化炭素排出量が大幅に削減されていることがわかる。一方で、杭の新設に関しては、新設杭の本数が減ったにも関わらず、

本数の削減と同じ割合(30→20 本;0.67)での削減とならなかった。これは、既存杭撤去本数を最小にするため、一部の杭が大径化したことで、新設杭の体積が本数に比例して削減されなかったことに起因する。また、ホールライフカーボン(図 2)に占める資材調達と施工段階の割合が約 3 割とし<sup>2)</sup>、本事例の場合、工事全体のコンクリートボリュームに対する杭の割合が 1/3 程度であることを鑑みると、ホールライフカーボンに対する二酸化炭素排出量の削減効果は約 3%程度( = 0.3×1/3×0.3)と考えられる。

次に表 1 の各工種の二酸化炭素排出量を環境省・経済産業省のガイドライン<sup>7)</sup>内に示された GHG プロトコルにおける Scope 別に再集計する。GHG プロトコルではサプライチェーンの中で、事業者における排出量の範囲を、Scope 1:事業者自らによる温室効果ガスの直接排出、Scope 2:他者から供給された電気、熱・蒸気の使用に伴う間接排出、Scope 3:Scope 2 以外の間接排出(事業者の活動に関連する他者の排出)と定義している。そこで本検討では軽油を用いて機械を動かしているものについては Scope 1 とし、材料(コンクリート、流動化処理土)の製造、調達、運搬に係るものを Scope 3(上流)、廃棄物(解体ガラ、排出土)の運搬・処理に係るものを Scope 3(下流)とした。なお、Scope 2 については、工事に関わる電気は発電機によって賄われているものと仮定しているため、本検討で該当するものがなかった。しかしながら、実際には作業所事務所や作業員休憩所などについては電気を利用しているため Scope 2 も存在しているものと考えられるがデータ不足により検討対象外とした。以上を基に再集計した結果を表 2 に示す。表 2 をみると、既存杭を再利用する/しないに関わらず、Scope 3(上流)の二酸化炭素排出量の割合が 90%以上となっており、建材由来の二酸化炭素排出量が大きな割合を占めていることがわかる。次に再利用する/しない場合の違いを比較する(表 2 中の削減率(b/a))と、Scope 1 が 70%削減されており、大きな削減効果が得られている。前述の通り、既存杭の撤去本数を減らしたことにより大型重機の稼働日数が大きく削減されたことに起因している。同様に、Scope 3(下流)が 47%削減と大きな効果を上げているのは、既存杭の撤去本数が少なくなった結果、解体ガラの処理に関わる二酸化炭素が削減されたことに起因する。

表 1 二酸化炭素排出量の算出結果

工程	再利用しない (tCO <sub>2</sub> )	再利用する (tCO <sub>2</sub> )	比率	Scope	
撤去時	①オールケーシングによる解体	33.8	5.0	0.15	1
	②クレーンによる吊り上げ	28.5	4.2	0.15	1
	③バックホウによる解体ガラの積み込み	20.1	3.0	0.15	1
	④ダンプトラックによる解体ガラの運搬	29.6	9.3	0.31	3(下流)
	⑤処分場での再資源化	17.4	3.9	0.22	3(下流)
	⑥流動化処理土の製造	291.6	43.2	0.15	3(上流)
	⑦流動化処理土の運搬	41.8	6.2	0.15	3(上流)
新設時	①アースドリル/オールケーシング掘削	5.3	4.3	0.81	1
	②バックホウによる排出土の積み込み	4.5	3.0	0.67	1
	③ダンプトラックによる排出土の運搬	34.5	30.1	0.87	3(下流)
	④生コンクリートの製造	1409.4	1231.2	0.87	3(上流)
	⑤生コンクリートの運搬	14.7	12.7	0.87	3(上流)
	⑥クレーンによる鉄筋カゴの建込み	6.3	4.2	0.67	1
	⑦発電機の使用	14.6	9.7	0.67	1
合計	1952.0	1370.0	0.70		

表 2 Scope 別集計結果

Scope	Scope3 (上流)	Scope1	Scope3 (下流)	
本検討における位置づけ	原材料の製造に関わる排出量	重機稼働に伴う軽油消費による排出量	廃棄物の処理に関わる排出量	
再利用しない場合	排出量(a) (tCO <sub>2</sub> )	1757.5	113.0	81.5
	総排出量に対する比率	0.90	0.06	0.04
再利用する場合	排出量(b) (tCO <sub>2</sub> )	1293.3	33.4	43.3
	総排出量に対する比率	0.94	0.02	0.03
削減率(b/a)	0.74	0.30	0.53	

### 4. 既存杭再利用における技術的課題

前章に示した通り、既存杭再利用技術は建設において比較的大きな二酸化炭素排出量削減効果がある技術である。将来、本技術が広く用いられ持続可能な社会を実現するため、現在の技術的課題につい

て以下に述べる。ここで、日建連の「既存杭利用の手引き」においては、既存杭再利用にあたって調査すべき内容を、健全性調査、耐久性調査、支持力調査の3つのカテゴリーに分けている。本論でも、それに倣いそれぞれに関連する内容についての技術的課題を述べる。

### 1) 健全性

既存杭再利用において「健全性」とは、杭径や杭長、配筋、かぶり厚など「設計図面との整合性」や地震やその他理由による「損傷の有無」を指す。上部躯体と違い、杭は直接目視できないため、これらの調査は非常に困難である。IT試験(写真1)<sup>8)</sup>と呼ばれる杭頭部を打撃し、杭体内を伝播する弾性波の反射を利用した技術が一般的に用いられるが、杭体と地盤のインピーダンス比が小さい場合、反射波が明瞭に表れなかったり、波が途中で透過してしまい十分なエネルギーが杭先端まで届かなかったりする。また、コンクリートの剛性(伝播速度)にもばらつきがあるため、その補正が難しいこと、また波長が長く分解能が十分にないなどの問題点がある。その他の調査技術も存在するが、地中を「目視する」ような感覚で行うことができる技術はなく、技術的な飛躍が望まれる状況である。



写真1 IT試験

一方で、現物の確認ではなく、図面や施工記録を十分に残すことで、その証左とすることも可能と考えられる。一度、施工された杭に関しては公共財として、公共のデータベースを整備し残していくとともに第三者にも開示される仕組みの実現が望まれる。

### 2) 耐久性

既存杭再利用における「耐久性」とは、材料の強度や、中性化深さ、鉄の腐食など、材料の劣化の程度を指す。中性化については、現在までの調査で地上躯体と比べて中性化が緩やかであることが確認されている。図9に既往の研究<sup>9)</sup>による調査結果を示す。図9中の黒色破線は上部構造のように気中に晒されているコンクリートの中性化の進行度を示している。図9より、気中のコンクリートに比べ中性化進行の程度が遅いことがわかる。これは、杭が地下水位以深にあり、常に水が供給される湿潤環境下において中性化が進行しにくく、特に経過年数30、50年のものは採取した試料の位置が深かったため、地下水位の変動の影響が小さく中性化の進行が抑えられたことが考えられる<sup>9)</sup>。このように、既存杭は施工時の品質が十分であれば、比較的良好な環境にあるため、耐久性が問題になることは少ないものと考えられる。一方で、硫化物イオンなどコンクリートや鉄に対する腐食性が強いものが地盤に含有している地域では注意が必要と考えられる。

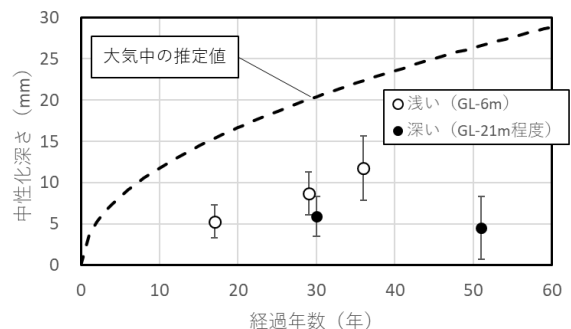


図9 既存場所打ちコンクリート杭の中性化の進行

### 3) 支持力

既存杭再利用における「支持力」とは、図3に示したように建物の重量を支える鉛直支持力と、地震時に生じる地震力に対する水平支持力がある。支持力に関する問題の一つに、既存から新設への建物規模の変化に依存することが挙げられる。すなわち、建物規模が小さくなる場合に、既存杭再利用は比較的容易になるが、建物規模が大きくなる場合には杭の支持力が不足するため、そのままでは再利用できない。また、先述の事例のように基規準類の改訂により、既存不適格となる問題もある。さらに、既存杭を再利用する際には、新設建物の柱位置と既存杭の位置が一致しないことが多く、柱荷重の処理の仕方が複雑になる問題がある。このように、既存杭再利用では、建物規模が大きくなる場合は既存杭が負担する荷重をコント

ロールしたり、柱位置と既存杭の位置が異なる場合は柱荷重を効率的に既存杭に流したりするなど、設計的な工夫が必要になる場面が多く、このような制約下においても新設建物の設計自由度が失われない構工法の確立が課題となっている。例えば、過去の事例<sup>10)</sup>では、地上9階から29階への建替えにあたり、建物の地上高層部分の荷重は新設杭に負担させ、地下部分の荷重は既存杭に負担させるようにして杭が負担する鉛直荷重をコントロールしたり、免震構造を採用することで既存杭が負担する地震時の水平荷重を低減したりするような設計的な工夫を行っている。一方で、このような工夫が難しい場合、杭の補強技術が必要になってくる。現在、高圧噴射攪拌改良と呼ばれる地盤改良工法を用いて、杭の水平抵抗を補強する方法が検討されている<sup>11)</sup>が、今後、様々な既存杭の補強方法が開発されることが望まれる。

前章で示した事例のように、基礎の範囲に多くの既存杭が存在する場合、図3(d)で示したように直接、基礎構造に接続して積極的に使用するのではなく、地盤を通じて間接的に利用するような使い方が可能となる。地盤工学分野における、既存の理論的な手法は地盤を均質で成層な状態で評価するものが多いため、水平面内で不均質な地盤の評価には工夫が必要で、既存杭が地盤内にあるような状態の直接的な検討は難しかった。このような問題に対して、前章の事例のように3次元FEM解析等を用いて、比較的容易にその効果を算出することが可能になりつつある。このように、最新の評価・解析技術を用いて、様々なシミュレーションに対応した既存杭再利用事例、評価方法が増えることが望まれる。

## 5. おわりに

本論文では、持続可能な社会の実現に資する技術の一つとして、既存杭再利用技術を紹介し、今後の発展に対する課題を述べた。第2章では歴史的な背景や近年の社会動向などを、第3章では近年の事例とそれに対する二酸化炭素排出量の算出のケーススタディを、第4章では既存杭再利用をより広く実施するにあたり考えられる課題を示した。2024年現在、高度経済成長期から60年近く経過し、その当時に建設された建物の建替えも多く進みつつあり、2050年のカーボンニュートラル達成に向けて、既存杭再利用についてもより一層注目されていくものと推察される。一方で、既存杭再利用技術は、古くから実施されていたものの、一旦下火になった時期もあったことから、当時に残された課題の多くが未解決のままであり、今後の技術的な飛躍が望まれる。本論文がその一助となることを期待したい。

### 【参考文献】

- 1) 日本建設業連合会:既存杭利用の手引きー現在と将来の利用に向けてー, 2018.11
- 2) 早川梨穂、大江秀明:建築物分野におけるエネルギー評価の転換, NRI パブリックマネジメントレビュー, No.243, 2023.10
- 3) 日本建設業連合会:既存地下工作物の取扱いに関するガイドライン, 2020.2
- 4) 黒川雄太、奥村豪悠、小倉史崇、チャオディ、山下真吾、濱田純次:存置する既存杭による地盤変形抑制効果を評価した設計事例, 日本建築学会学術講演会梗概集, 構造 I, pp.555-556, 2023.7
- 5) 大嶺聖、落合秀俊:リサイクル材の二酸化炭素排出量と再資源化効率の算定について, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.601-602, 2004.9
- 6) 東洋テクノ株式会社:全周回転式掘削機による障害撤去,  
[https://www.toyotechno.co.jp/business/other\\_construction/obs\\_rem](https://www.toyotechno.co.jp/business/other_construction/obs_rem)
- 7) 環境省、経済産業省:サプライチェーンを通じた温室効果ガス排出量算定に関する基本ガイドライン(ver.2.4), pp. I -8, 2022.3
- 8) 東京ソイルリサーチ:杭の健全性試験(IT 試験), <https://www.tokyosoil.co.jp/technology/it/>
- 9) 若井修一、奥村豪悠、青木雅路、勝二理智、西山高士、佐原守:筑後30年の場所打ちコンクリート杭の掘出し調査(その2)コンクリート調査及び土の化学的調査, 日本建築学会学術講演会梗概集, 構造 I, pp.567-568, 2017.7
- 10) 島野幸弘、澤井祥晃、内田明彦、椿原康則:中高層オフィスビルにおける既存場所打ち杭の再利用事例, 基礎工, No.451, pp.53-56, 2011.2
- 11) 島村淳:高圧噴射攪拌式の地盤改良による既存杭の補強・補修, 基礎工, No.589, pp.91-95, 2022.8