

各論 建築分野における新技術

真島 正人*

1. はじめに

建築系の基礎分野でも、「低コスト」「短工期」「高性能」「安全」などをキーワードとして、さまざまな技術開発に取り組んできた。最近では、受注環境の悪化に伴う業績の低下により研究開発費は低下傾向にあるが、それでも地球環境問題への意識の高まり、相次ぐ災害の発生や企業責任などの世情を反映して、「低コスト」「防災」「環境」「高性能」「高品質」に応える技術を開発し、他社との差別化を図ろうとする動きは活発化している。

本書では、このような課題に応えることを目的として、開発された技術のうち、実用化されて間もない技術やいまだ実用化には至っていない技術ではあるが、今後発展が期待されるハード技術のいくつかを紹介する。

2. 地震に強い基礎

地震に強い基礎として、大きな地震力にも耐えられる基礎、大きな地震力に逆らわない基礎、大きな地震力を吸収する基礎が開発されている。ここでは、基礎免震工法の新技術について紹介する。

基礎免震工法はわが国でも20年以上以前から採用され、既に一般工法になっている。通常の基礎免震工法は、建物の上部構造と基礎を切離して地下空間を設け、その間に積層ゴム、すべり支承、ダンパーなどの免震装置を組込んで建物を支える。最近の工法として、この上部構造と基礎の間に貯水槽にして、免震装置と建物の一部を水に浮かすことによって、免震効果を確保しながら同時に建物を水の浮力でも支える技術が開発された¹⁾。浮力は建物の重さの半分程度を支え、地盤上で支持する重量を減らすことによって、免震ゴムの小型化などで支持構造部

分の剛性を低くして、地盤との絶縁性を高めることができる。また、地震時には浮力の効果が固有周期が長くなり、建物の揺れの加速度が軽減される。試算によると、6～8階の建物では、固有周期を最大5秒以上にすることが可能となり、都市湾岸部などの軟弱地盤帯でも高い免震性能を得られるとのことである。さらに、貯水槽内部の水は、災害時の消火用水や生活用水としても利用できる。

一方、基礎免震構法では、上部構造を支える基礎のほかに免震装置を受ける基礎が必要となる。つまり、二重の基礎を設けなければならない、掘削や基礎工事費がアップとなる。免震装置を受ける基礎を省略し、杭の頭部に直接免震装置を取付ける、いわゆる「杭頭免震」工法が開発されている²⁾。その概念を図-2に示す。

杭頭免震工法を採用することによって、これまで必要であった基礎梁（地中梁）やフーチング基礎、耐圧版などを大幅に省略し、この結果、一般的な建物でのコスト比較では、掘削工事とともに特に基礎工事での大幅なコストダウンが可能となる。

ただし、留意すべき点もある。つまり、一般的な基礎免震では、免震装置を支える基礎の回転はほとんど生じず、杭と基礎が一体化しており、免震装置もほぼ平行移動で変位するが、杭頭免震では杭頭が拘束されていないため回転しやすく、免震装置や杭が複雑な挙動を示すことになる。したがって、免震装置—杭頭接合部の回転性能を適切に評価したうえでの検討が不可欠である。

3. 既存杭の再利用

既存杭の再利用は、工事に伴う環境負荷低減に貢献できるだけでなく、工期の短縮やコスト縮減にも大きな効

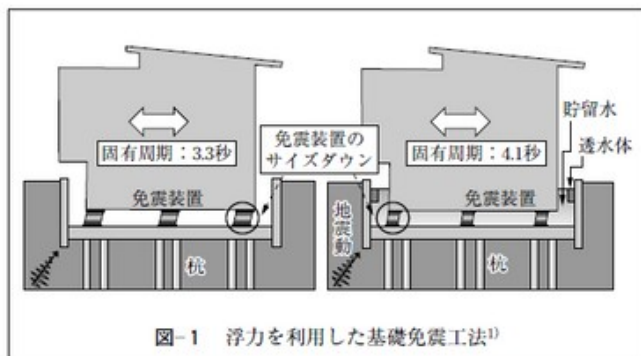


図-1 浮力を利用した基礎免震工法¹⁾

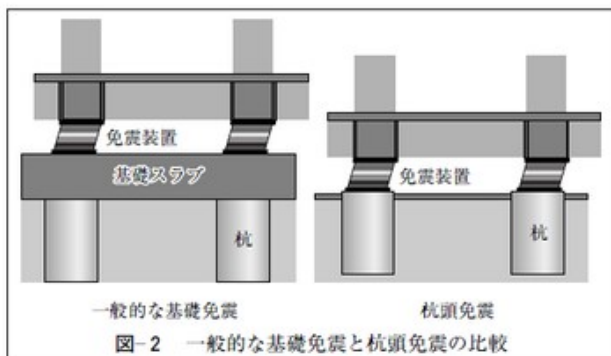


図-2 一般的な基礎免震と杭頭免震の比較

果がある。特に既存杭が場所打ちコンクリート杭の場合には、その解体・撤去には多大な労力と時間が必要であり、新たな杭の構築と比較してもより多くのCO₂が排出されるといわれている。そのため、場所打ちコンクリート杭や鋼管杭を主体として、既存杭の再利用に向けた健全性や性能評価のための調査や研究が行なわれ、その成果を反映した再利用のためのマニュアルや技術基準なども整備され、再利用の実績は年を追うごとに増加している。

一方、杭の鉛直支持力算定式は時代が移っても大きく変動しているわけではなく、杭の健全性を確認できれば鉛直支持性能は既存杭と新設杭で基本的にはほぼ同等であるのに対して、耐震性能はその杭が設計された時代の影響を強く反映している。杭が設計されたのが1981年のいわゆる新耐震設計法以前の場合には、地震時に受ける水平力に対する十分な検討がなされていないことが多く、また鋼管杭や既製コンクリート杭では、杭頭接合部の力学特性を十分把握しないまま杭頭をピンとして設計している場合も多い。また、既存杭を利用できる場合でも、

旧建物と新築建物の規模や平面計画の違いなどにより、新設杭との併用になることも多く、新築建物の要求性能によっては、新設杭の径や強度が既存杭と異なることはむしろ通例であるといえる。このような既存杭を利用するためには、その性能を十分に活用できる設計上や構造上の工夫が必須となる。

一方、兵庫県南部地震以降、杭頭接合部の回転を許すことによって、杭頭部に生じるモーメントと基礎梁に生じるモーメントを低減し、基礎の耐震性を高めたり、コストダウンを図るいわゆる杭頭半剛接合法が開発され、既に数多くの物件に適用されている³⁾。この杭頭半剛接合法を既存杭に適用する工法の開発されている⁴⁾。図-3と写真-1に適用例を示す。既存杭と新設杭それぞれの負担する水平力を各杭の耐震性能以下に抑えるため、杭頭接合部の回転性能（固定度）を調整できるように工夫されている。具体的には、パイルキャップと杭頭部の接触面積を調整している。

杭頭固定度を調整する半剛接合法は、今後広く利用されると予想される。ただし、杭の挙動は複雑で未解明な点も多く、複雑な回転性能を有する接合部と組合わせて使用するためには、安全側への配慮と解析技術の高度化が望まれる。

4. パイルドラフト基礎（併用基礎）

パイルドラフト基礎とは、直接基礎と沈下抑止杭とを併用した基礎であり、わが国では1980年度後半より主に中低層建物を中心に採用されてきた。パイルドラフト基礎の使用目的は、いうまでもなく長期鉛直荷重に対する建物の（不同）沈下量を抑制することであり、当初は鉛直荷重に対する挙動予測手法に関する研究に主眼がおかれ、適用物件も中低層の建物を中心であった。

その後、地震時つまり水平力を受ける基礎の挙動予測のための解析手法の開発や実大実験・模型実験などが行なわれて、建屋—ラフト—杭—地盤の動的解析などを駆使した耐震設計法が構築され、高層～超高層建物にも適用されるようになった。

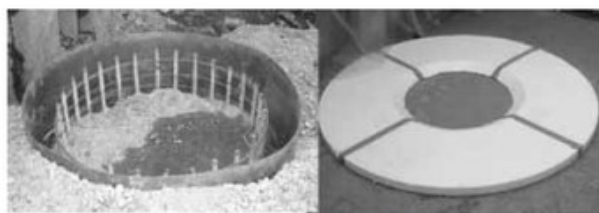
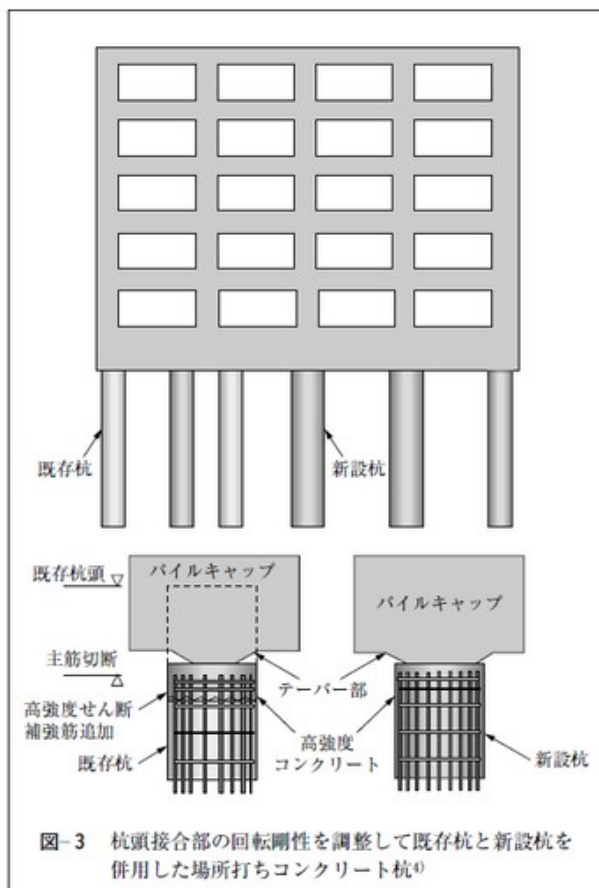
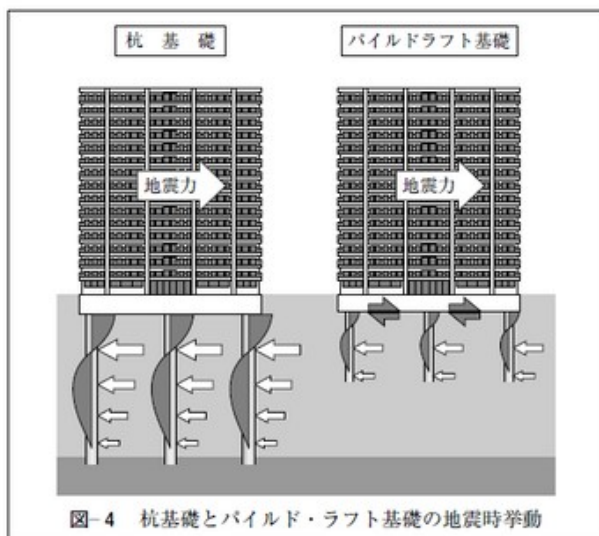


写真-1 既存杭の杭頭処理状況



ただし、わが国の地盤は複雑で、特に平野部では表層部に軟弱な粘性土層や液状化の可能性がある緩い砂質土層が堆積しているため、常時および地震時の（直接基礎としての）鉛直支持力を確保できないことが多く、設計法は整備されたものの採用実績は思ったほどは伸びていない⁵⁾。

しかし、この数年、補助工法と併用したパイルド・ラフト基礎の解析的かつ実証的な研究が進み、液状化防止対策としての地盤改良工法、あるいは鉛直支持力を向上させるための柱状地盤改良工法と沈下抑止杭を併用した

パイルド・ラフト基礎が試験建物を含めて実用化されている（図-5、図-6参照）^{5)~9)}。実施物件の常時および地震時における観測データが公表されれば、パイルド・ラフト基礎の適用件数は大幅に拡大するものと予想される。

5. 低排土を指向した杭工法

基礎工事に伴う掘削排出土の処理は、環境面とコスト面の双方から大きな課題となっている。ここでは、単位支持力当りの掘削排出土量の削減を目的として開発されている杭工法を紹介する。

5.1 高支持力杭

基礎の低コスト化や掘削残土削減を目的として、1本の杭に高支持力を期待した先端拡大根固めセメントミルク工法、回転翼付き鋼管杭などの既製杭工法が数多く開発され、一般工法化されつつある。一方、場所打ちコンクリート杭については拡底杭が定着して久しいが、近年、都市の高層化に伴い、1本当りの杭にさらなる高支持力と高引抜き抵抗力を期待する物件が増えており、この期待に応えるため、多段拡径場所打ちコンクリート杭工法が開発された¹⁰⁾。この工法は図-7に示すように、円筒状の杭の軸部に拡径部と呼ぶ円錐状の節を複数設けることによって、杭の拡径部直下の地盤が大きな抵抗力を発揮し、通常の拡底杭に比べて約1.3倍以上の鉛直荷重支持能力を期待できる。拡径部の位置を任意に選択でき、これを増やすことによって、さらに大きな支持力を確保できる。高支持力以外にも、多段削孔容積の削減と掘削土排出量の削減、孔壁崩壊防止用の安定液の削減、コンクリート量・鉄筋量の削減、浮上がり対策の地盤アンカーの削減などから、掘削汚泥処理や資材運搬によるエネルギー使用など環境負荷を大幅に削減できる。

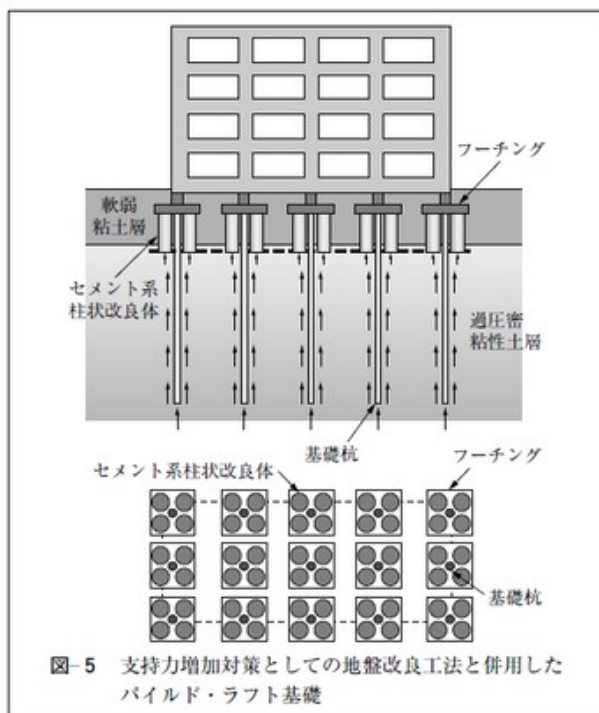


図-5 支持力増加対策としての地盤改良工法と併用したパイルド・ラフト基礎

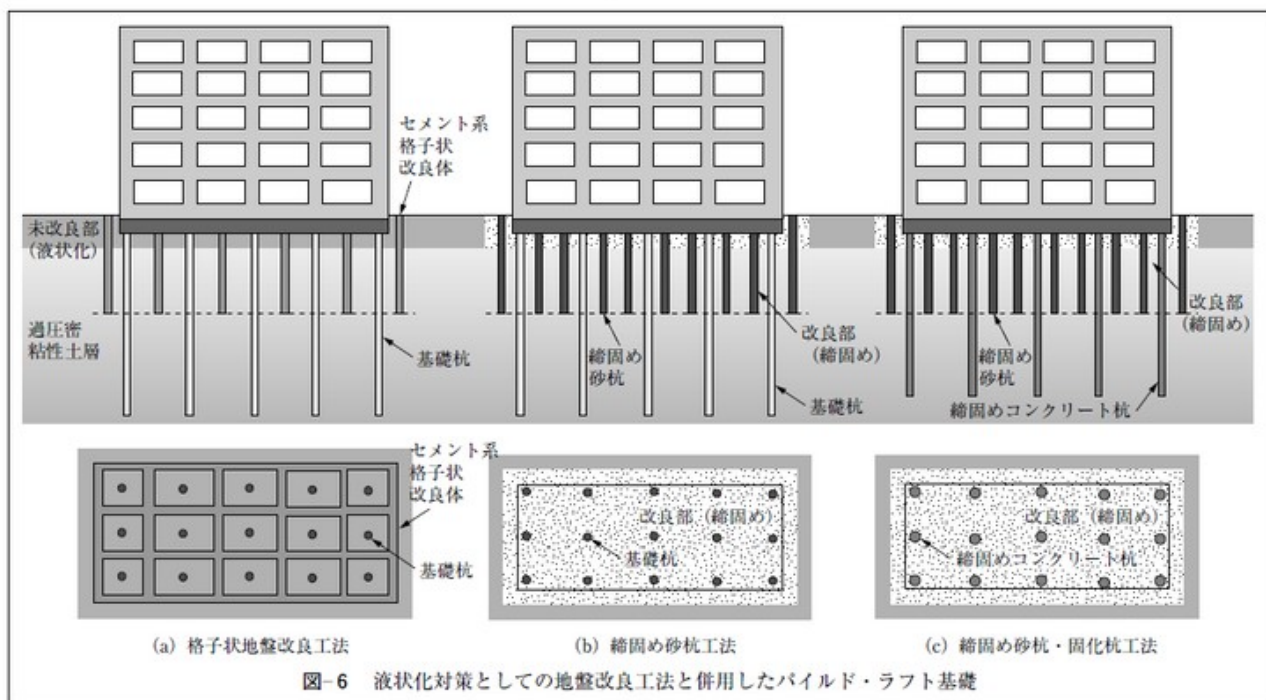
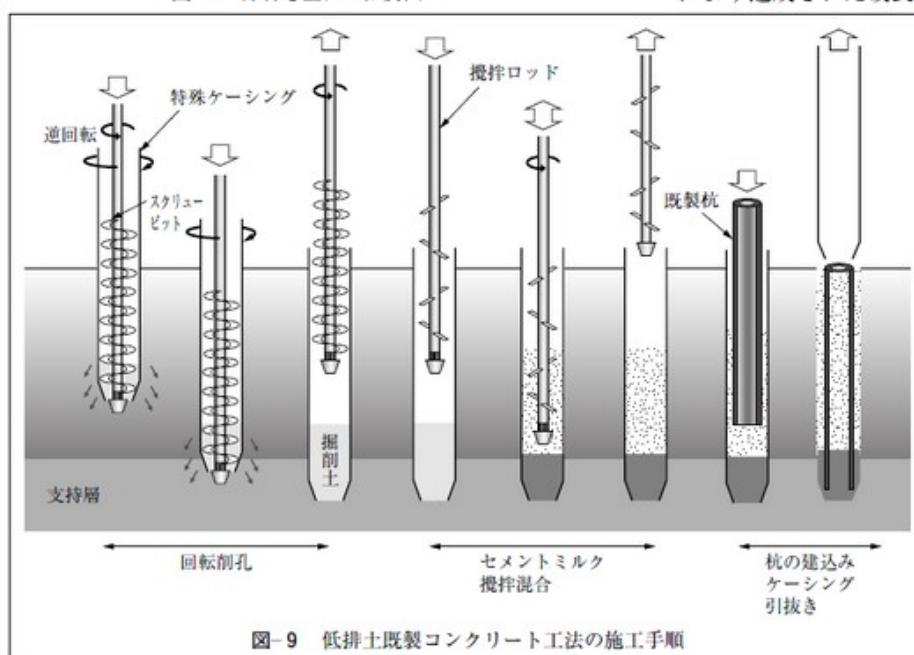
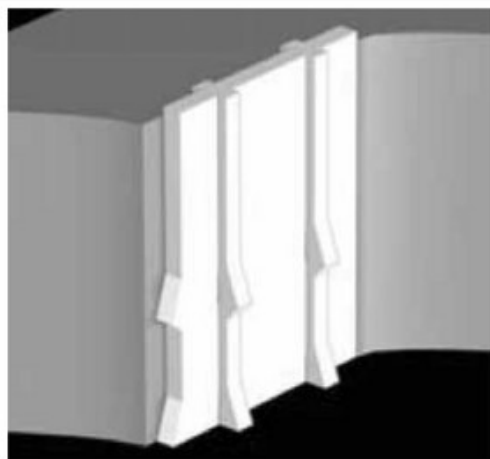
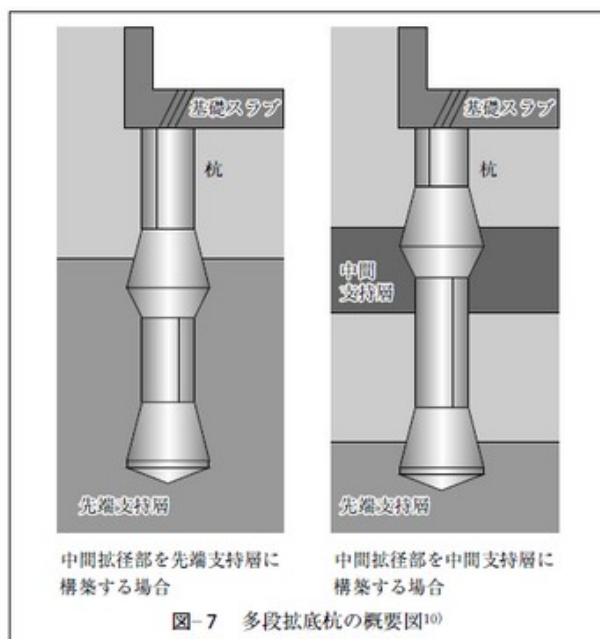


図-6 液状化対策としての地盤改良工法と併用したパイルド・ラフト基礎



5.2 節付き壁杭

この杭工法は、図-8に示すように、高層ビルなどに用いられるRC連続地中壁兼用の杭に、矢じりのように張出した節を設けている¹¹⁾。節部は先端部が広がる構造になっている特殊掘削機を利用して構築される。押し込みや引抜きに対する抵抗力が大幅に増大するので、硬質地盤に打込む杭の長さを短くすることができ、コストダウンと工期の短縮を実現できる。特に塔状比の大きな高層建物に効果的で、従来の壁状の杭に比べ硬質地盤への打込みの長さが2/3程度で同レベルの性能が見込まれ、工期・コストも最大で2割程度の削減を期待できるとのことである。近年増加している超高層ビルや逆打ち工法の基礎工法として有効と考えられる。

5.3 その他の工法

従来の既製コンクリート杭埋込み工法や場所打ちコンクリート杭では大量の掘削土が排出されるが、この問題点を解決するため、先端部をテーパ加工した特殊なケーシングを用いて地盤を削孔する際に、このケーシングで土を周辺に押しつけながら施工する低排出工法が開発中である。図-9は、既製コンクリート杭を対象とした施工手順の概要を示したものである。同図において、削孔時には特殊ケーシングの内部にスクリービットが挿入されており、それぞれを逆転することにより、ケーシング内に取込む土量が調整される。削孔終了後にスクリービットを抜いて攪拌ロッドを挿入して、セメントミルクと土とを攪拌し、先端根固め部と杭周固定部を構築するもので、掘削土の排出量が大幅に削減できる。この技術は場所打ちコンクリート杭にも応用できる。

一方、杭基礎ではないが、深層混合処理工法による柱状地盤工法でも、節付き柱状改良体を構築することにより高支持力を期待でき、かつ施工時に発生する泥土を削減可能な工法が開発されている。写真-2に、この工法により造成された改良体の掘出し状況を示す。従来の柱

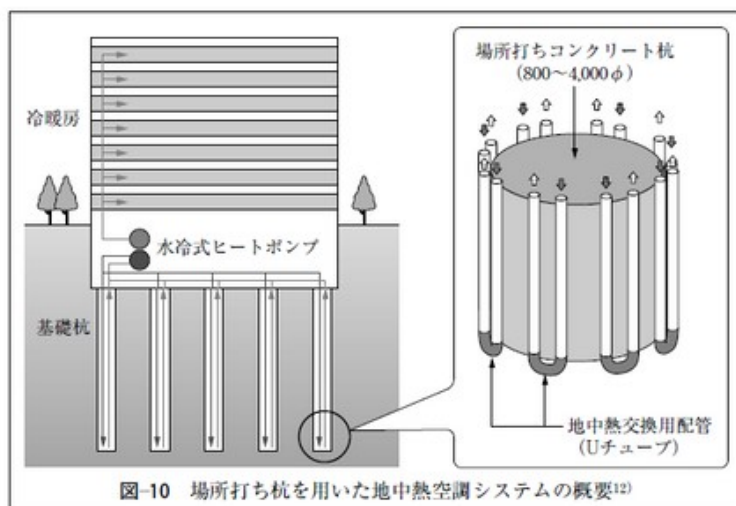


図-10 場所打ち杭を用いた地中熱空調システムの概要¹²⁾



写真-3 熱交換用配管の設置状況¹²⁾

状改良体に軸部より直径で200mm大きい2カ所の節をつけることにより、支持力を従来の約2倍まで高めることが可能になり、泥土の削減だけでなく施工コストも10%程度低減可能とのことである。

6. 杭基礎を用いた地中熱利用システム

杭の本来の機能は、長期荷重や地震時荷重に対して建物を安全に支持することであるが、この機能に加え、地球環境負荷の低減を目的として、地中に埋設した杭に熱交換器としての機能を付加した地中熱利用システムが開発されている。

地中の温度は年間を通じて10～15℃と安定しており、地中の熱エネルギーを有効利用とする試みは欧米諸国を中心に行なわれており、既に実用化されている。わが国でも、日本海側や北海道で融雪対策として利用されている。近年、地中熱をビル空調に利用するシステムが実用化された¹²⁾。具体的には、夏季冷房時に地盤をヒートポンプの放熱源、冬季暖房時には採熱源として利用することで、季節間を通じた排熱の有効利用を図り、省エネルギーやCO₂排出削減に貢献する空調システムである。

また、建物からの空調排熱を大気に放熱しないため、都市部におけるヒートアイランド防止にも寄与するものと期待されている。これまで、地中熱交換器を埋設するための地盤掘削費などのインシタルコストが高く、単純投資回収年数の面で従来の空調システムと比較するとかなり不利になっており、普及の阻害となっていた。しかし、基礎杭を熱交換器として利用することにより、設置費の削減が図られ実用化に至った。図-10、写真-3は場所打ち杭を使用した事例であるが、熱交換用の配管（U字型チューブ）は場所打ち杭では杭の外側、鋼管杭では管の中空部に設置されている。現状では解決すべき課題がいくつか残されているようであるが、杭基礎を構造的な用途以外の用途に利用する点で注目される。

7. あとがき

建築分野において実用化されて間もない技術や現在開発中の技術について、将来の社会ニーズにとって有望なものを独断と偏見をもって紹介した。現状では、改良の余地を残していたり、データ不足のために当初想定した数値目標をクリアできていない技術もあるが、今後さらなる発展に向けて開発者や技術者の努力に期待したい。

最後に、使い古された言葉ではあるが、地盤は複雑であり、地盤—基礎—建物の挙動も複雑である。したがって、建築基礎分野におけるハード技術の開発から実用化に当っては、より高精度なソフト技術の整備、実証データの蓄積、余裕度の確保に配慮すべきと考えられる。

■参考文献

- 1) 大山、猿田：浮力を利用した免震構造システムの開発と実現、建築雑誌、日本建築学会、2007. 8.
- 2) 宮崎、西村：杭頭免震の現状と動向、建築技術、2006. 7.
- 3) 大杉文哉：杭頭接合の新技術、基礎工、2001. 12.
- 4) 堀井、長尾他：既存杭の再利用時における杭頭半剛接合の適用事例、日本建築学会技術報告集、2007. 6.
- 5) 財団法人建築コスト管理システム研究所新技術調査検討会：新技術レポート「パイルド・ラフト基礎」の調査報告、建築コスト研究、2007.
- 6) 渡邊、長尾他：沈下低減杭を併用した独立基礎建物の沈下挙動 その1—その2、日本建築学会2006年大会.
- 7) 伊勢木、大西他：沈下低減のための締固め固化杭工法の開発 その1—その5、日本建築学会2007年大会.
- 8) 建つパイルド・ラフト基礎建屋の挙動 その1—その5、日本建築学会2007年大会.
- 9) 日本建築学会：建築物を対象とした締固め地盤改良工法の適用事例集、2002. 2.
- 10) 平井、若井他：多段掘削場所打ちコンクリート杭の研究 その1—その3、日本建築学会2007年大会.
- 11) 技術フラッシュ、建設技術新聞、第652、2006. 7.
- 12) 関根、大岡他：コンクリート杭を熱交換器とした地中熱ヒートポンプシステム、省エネルギー、2007. 6.