

## 最近の杭工法と今後の展開

加倉井 正 昭

最近開発された杭工法を中心として、鉛直支持力を増加させるものと地震時の耐震性を向上させるものに分けて施工法も含めて記述した。鉛直支持力は既製コンクリート杭の場合、先端の根固めを大きくした高支持力杭、鋼管杭については回転貫入杭、そして場所打ちコンクリート杭については多段に拡幅させるものと先端地盤を強化させる工法などがある。耐震性の向上は杭体自体の高性能化と杭頭部を工夫する方法がある。また杭工法の特徴として地盤の変化と杭工法のあり方そして品質管理についても述べる。

キーワード：基礎，建築，杭工法，既製コンクリート杭，鋼管杭，場所打ちコンクリート杭，施工法，耐震性向上

### 1. はじめに

杭基礎工事は地盤中に構造体を構築する技術であり、その結果をほとんどの場合直接確認できないという宿命を持っている。このために設計はもちろんのこと、施工においてもその品質をどのように保証するかが重要となる。特に地盤の特性は千差万別であり、地盤条件を勘案した杭の設計とか、可能な施工能力の事前評価などが工事を円滑に遂行するだけでなく、品質確保のためにも重要である。

このような状況に加えてコスト縮減の要望に伴う技術開発競争の結果として、各種杭工法の開発が盛んに行われている。また性能設計における要求性能の高度化により、開発される杭基礎の性能は多様化している。

ここでは杭の種類あるいは施工上の違いによる最近の杭基礎工法の紹介と課題の指摘及びこれからの杭工法の設計及び施工における展望について私見を述べ、関係各位の参考に供することを目的とした。

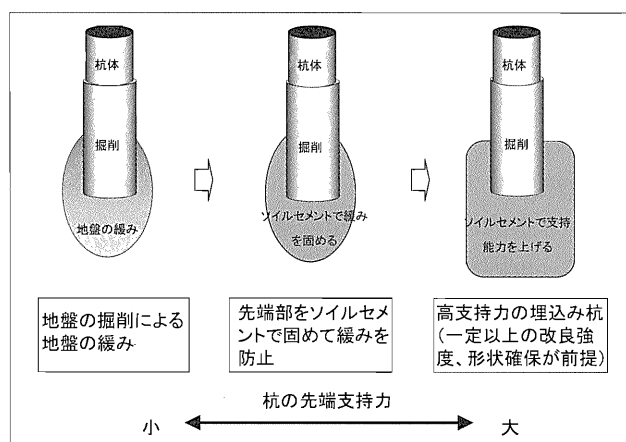
### 2. 杭の鉛直支持力増強技術

杭は構造物の荷重を支持することが元来の目的であり、そのためにより深くまで施工できる技術とか、より大径の杭体を構築するための施工機械などの開発などが行われてきた。最近においてもその技術開発は活発であり、大きな支持力を取るための各種の工夫が行われ実用化されている。ここではそのいくつかを紹介したい。

#### (1) 既製杭の先端支持力増強技術

杭はその支持機構から考えてその先端部の支持が大きなウェイトを占める。そのために杭先端部を工夫することにより、大きな支持力を得るような開発が多い。特に市街地における杭の施工が振動・騒音などの問題から、打込み工法が事実上禁止になってから埋込み工法が主流となっている。この工法はその名称からも分かるように杭体を埋込むために事前あるいは埋込み時に地盤を掘削している。このため、そのままでは杭先端の支持力が小さいので、先端部にセメントミルクを入れて固めることでその弱点を補強してきた。それが最近では杭先端部付近をもっと積極的に改良することにより、より大きな支持力をとることが出来る工法の開発が活発である。その経緯と仕組みを示すと図一1のようになる。

杭体から伝わる鉛直荷重は先端根固め部から地盤へ伝わる。そこで杭先端部の地盤を十分に大きく、強度



図一1 埋込み杭の先端支持力増加法

がある根固め部にできればその下部にある地盤への伝達応力は小さくなり、結果として大きな支持力を得ることが出来る。このために根固め部を、どの程度まで大きくするか、どのくらいの強度が必要か、どのような形状で施工がするか、そして、どのようにして杭体から根固め部へ確実に応力伝達できるかなどが課題になる。根固め部の大きさの効果を実験により求めると図-2のような結果となる<sup>1)</sup>。

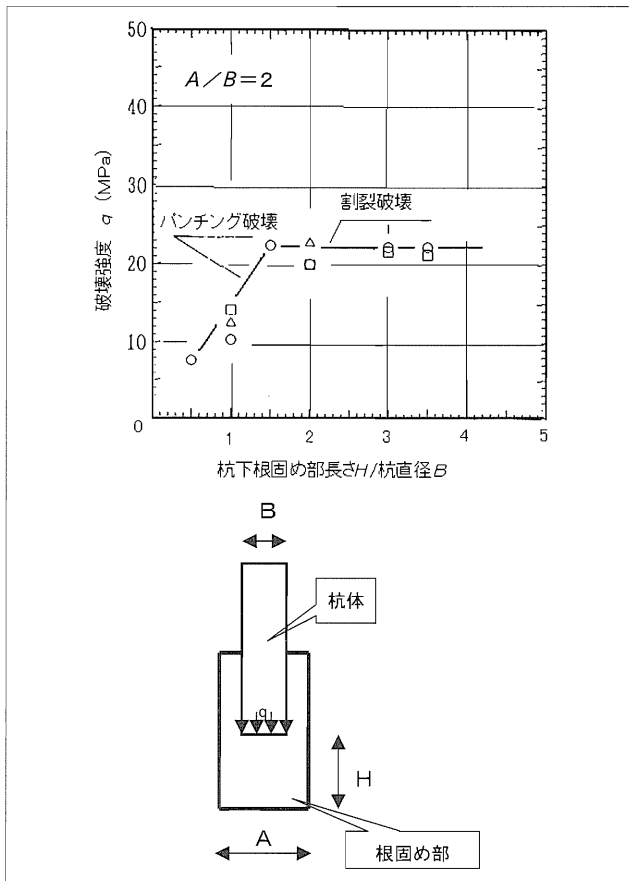


図-2 根固め部の破壊強度と杭下部根固め長さの関係<sup>1)</sup>

根固め部の破壊性状は、杭先端下部の長さ比（図-2の  $H/B$ ）によって変化する。 $H/B$  が 1.5 以下であれば杭先端が根固め部を突き抜けるようなパンチング破壊で、 $H/B$  が 1.5 以上になると根固め部を押し広げるような割裂破壊へ変化する（図-3）<sup>2)</sup>。

この結果から割裂破壊になると  $H/B$  が大きくなっても強度はほとんど増加しないことが窺える。杭体先端部から根固め部への荷重伝達が確実に行われたと仮定して、根固め部が十分な破壊強度を持つようにすると、杭の鉛直支持力は根固め部の径の 2 乗に比例して増加する。例えば杭体の径の 1.5 倍の根固め部の径を施工できれば 2.25 倍の杭体の支持力増加になる。さらに支持地盤内での根固め部の周面抵抗を考慮すると更に大きなものが期待できる。またそのためには杭体

から根固め部への荷重伝達を確実にするための工夫が必要になる。

杭の先端底面だけからの荷重伝達を前提とすると根固め部は図-3のような破壊を示すことを考慮して、杭先端部付近の杭体に節をつけることにより杭体からの荷重伝達を分散させ、根固め部へ無理なく荷重を伝える工夫のなされた工法がいくつか開発され実用化されつつある<sup>3)</sup>。

図-4 はその代表的な工法を示したものであり<sup>4), 5), 6)</sup>、表-1 にはその支持力の数字を示している。この他にも杭体に鋼管杭を使ったものもある。各工法ともいく

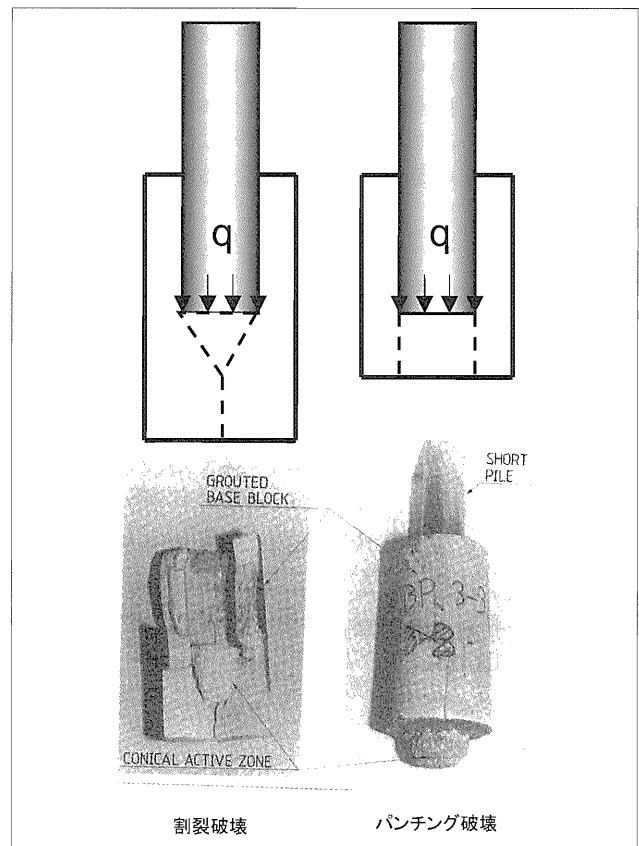


図-3 杭根固め部先端の破壊性状<sup>2)</sup>

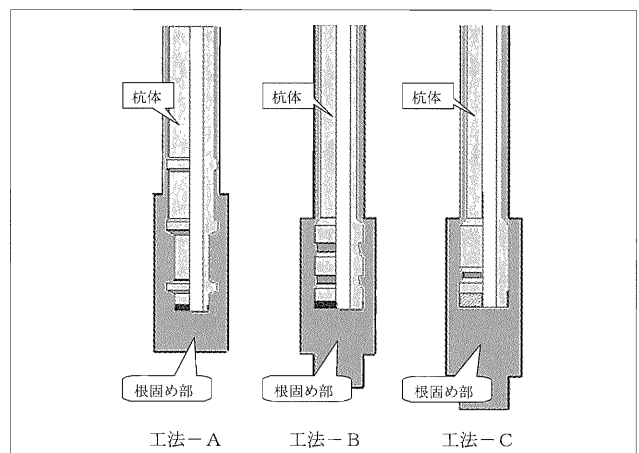


図-4 先端根固め部のある高支持力杭の実例

表一 工法別の支持力

工 法	$A_p$ を求 める径	$\alpha$ 先端	$\beta$ 周面 (砂質土)	$\gamma$ 周面 (粘性土)
従来工法 ( $\alpha$ 250)	杭 径	250	2.0	0.5
工法-A	節部径	430	4.4	0.7
工法-B	杭先端径	400	6.2	0.8
工法-C	杭先端径	490	5.2	0.72

長期： $R_a = 1/3 (\alpha NA_p + (\beta N_s L_s + \gamma q_u L_c) \phi)$  (kN)

$\alpha$ ：杭先端支持力係数， $\beta$ ：砂質地盤の杭周面摩擦係数， $\gamma$ ：粘性土地盤の杭周面摩擦係数

つかの工夫がされているが基本的な原理は同じであり、従来の支持力の2倍近い値をとることが出来る。著者

は個人的な感觸として、このような杭先端にセメントミルクを注入あるいは攪拌する工法は $\alpha$ として500位が確実な品質を確保するものとしては限度ではないかと考えている。これは目に見えない地盤中での施工とそれに伴う不確実性を考えると施工法として抜本的なものが開発されない限り、従来とあまり変わらないような施工手順（実は根固め部の役割は大きく違い、要求される施工品質の格段の向上が必要）においては、その確実な性能確保には限度があると考えている。その施工法のひとつを示すと図-5のようになる。

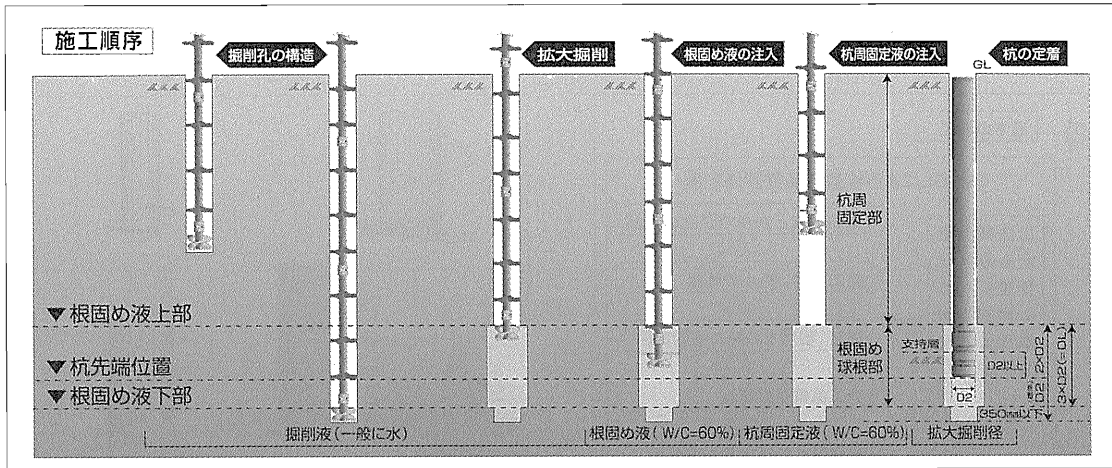


図-5 高支持力杭の施工手順 (工法-B)<sup>9)</sup>

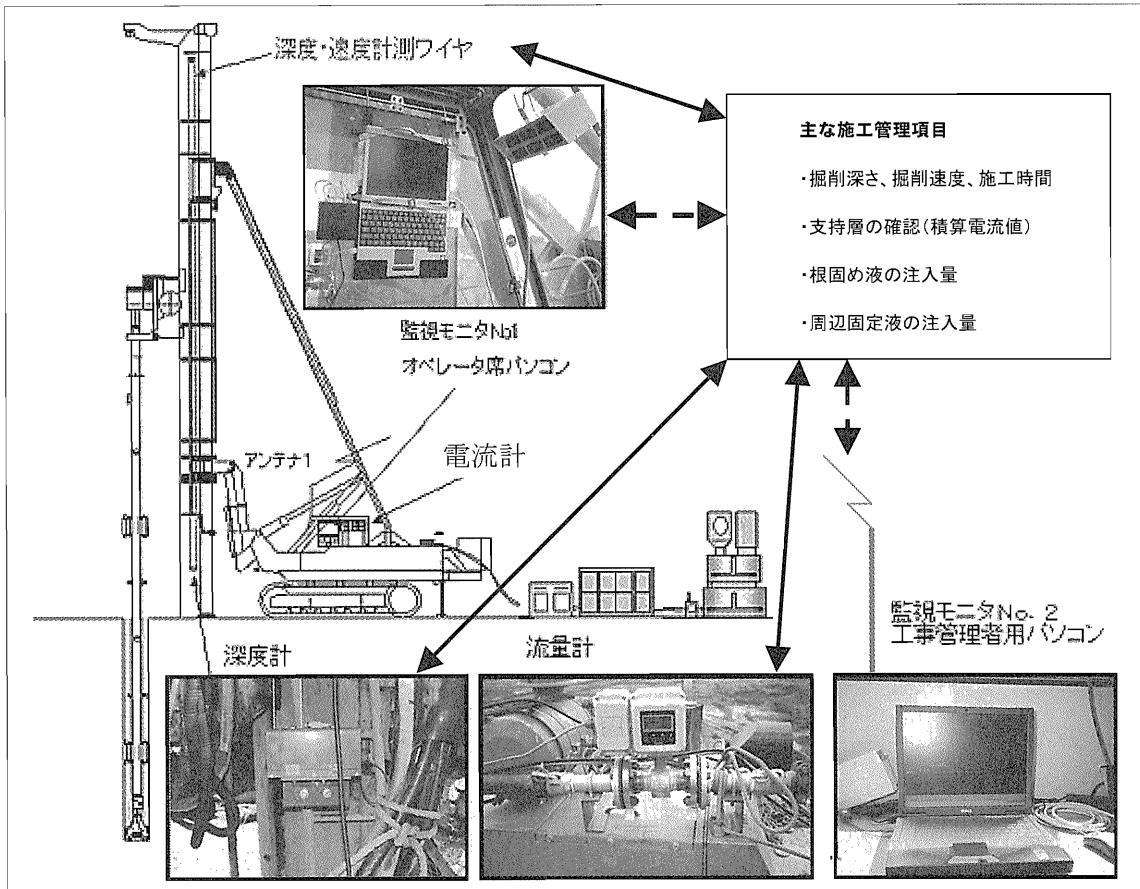


図-6 施工管理装置の例 (工法-A)<sup>9)</sup>

この図からは従来の埋込み杭工法と大きな違いはないように見えるが、そのポイントは杭先端部から根固め部への確実な荷重伝達できる施工の精度と、想定する根固め部の形状と強度の施工である。そのための課題としては、色々な地盤条件において、想定される大きさ、形状、強度の根固め部を確実に構築させる施工とそれを行うための品質管理である。特に確実な拡大掘削の実施とその部分への根固め液の確実な注入と管理は重要である。図-6は深度計と流量計を使った施工管理システムの例である<sup>4)</sup>。

現状は現場での裁量（施工機械の能力、管理装置、管理目標、ほか）に任されていることが多い。その結

果、従来工法との明確な違いを十分に認識した施工と管理が行われないと、不適切なものが出る可能性が指摘される。例えば根固め部に十分なセメントミルクが無かったとか、根固め部の強度が十分出ていないなどのトラブルの可能性も皆無ではない。また根固め部がセメントミルクあるいはソイルセメントで固化したもので、破壊が脆性的なことから、引張り応力とか応力集中に弱いこともあり、形状とか強度が均一に施工できないと大きな欠陥になることも予想される。万が一そのような施工が行われてしまうと、事態を見過ごしてしまうと、後からの対応はほとんど不可能になるし、今までせっかく開発してきたこれらの工法の技術

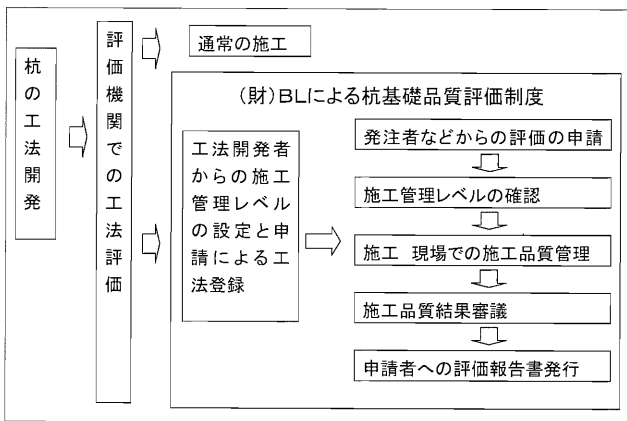


図-7 杭基礎品質評価制度

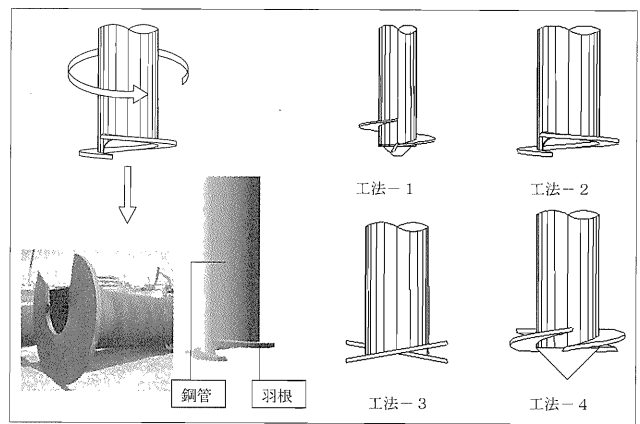


図-8 回転貫入杭とその種類<sup>1)</sup>

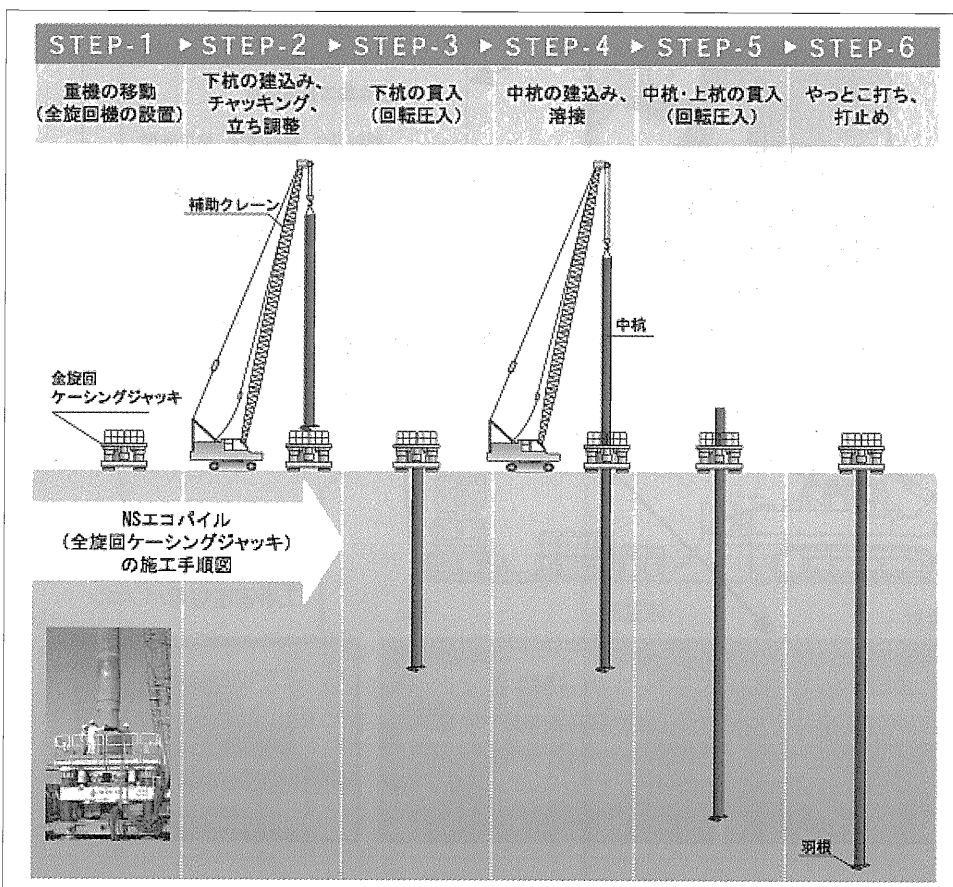


図-9 回転貫入杭（工法-2）の施工手順<sup>2)</sup>

的な信頼が崩壊するだけでなく、建設技術自体の信頼性を大きく低下させる大問題に発展することも懸念される。このような事態は是非とも避けなければならないことであり、大きな潜在的な課題と言える。このような事態が懸念されるのは施工サイドの問題でもあるが、管理サイドの知識不足も指摘されるところである。つまり施工法を十分に理解した施工者とその内容を理解してチェックできる技術者が必要になる。

最近では図-7のような仕組みで一定以上の品質管理を行うシステム<sup>7)</sup>が提案され始めており、今後普及することで正しい技術の普及と高い品質に支えられた信頼性の確保に貢献することを期待したい。

もうひとつの支持力増加技術としては主に鋼管杭で使われている回転杭工法がある。これは鋼管杭の特性を生かして、杭体に回転を与えることにより地盤に杭体を構築するものである。このときに杭先端部に図-8<sup>8), 9), 10), 11)</sup>のような羽根を付けることにより回転貫入力を増加させるとともに先端部の羽根の存在により先端支持力を増加させている。図-9はその施工の様子を示したものである<sup>9)</sup>。

回転貫入用に全周回転式の施工機械を使えば大きな径の施工も可能である。先端の羽根の形状などには図-8のようないくつかの工夫がされている。またこの工法では杭体を地盤中に回転貫入するために、施工においては掘削などで排出される土とか泥水（産業廃棄物扱い）が発生しないために環境問題にたいして負荷を与えない工法として評価されている。ただ大径のものは相当な力で回転圧入が行われるために、地盤（特に礫が多い地盤）では圧入に相当な努力を必要とするので、事前の地盤調査で貫入地盤の特徴を十分に把握しておくことが重要である。

## (2) 場所打ちコンクリート杭の鉛直支持力増強技術

場所打ちコンクリート杭は大きな杭径が施工できることから、大規模構造物を中心として広く利用されている。特に建築を中心としての利用が多い拡底杭工法は杭先端部を拡げることにより、その支持面積を大きくして大きな支持力を得ている。これに最近では複数の拡がり部分をつけて鉛直支持力だけでなく、引抜き力にも抵抗できるような場所打ちコンクリート杭（引抜き仕様の場合はSRC杭）が開発されている<sup>12), 13), 14)</sup>。図-10は開発工法の概要を示したものである<sup>12)</sup>。

このようにすることにより押引きの両方の荷重に対して大きな抵抗を得ることが出来るようにしている。場所打ちコンクリート杭の欠点としては地盤を掘削してからコンクリートを打設するために杭先端地盤の緩

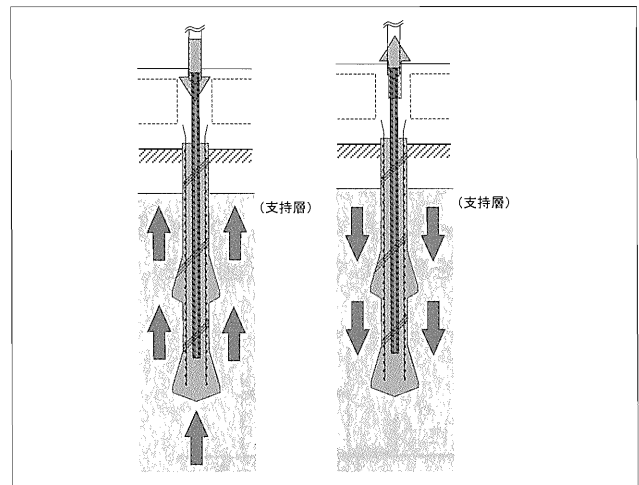


図-10 多段拡径杭<sup>12)</sup>

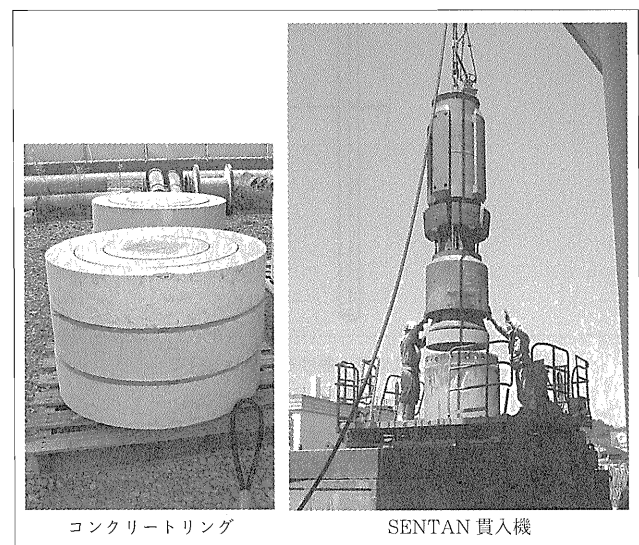


図-11 場所打ち杭先端補強工法（SENTAN パイル；東洋テクノ・宮本和徹氏提供）

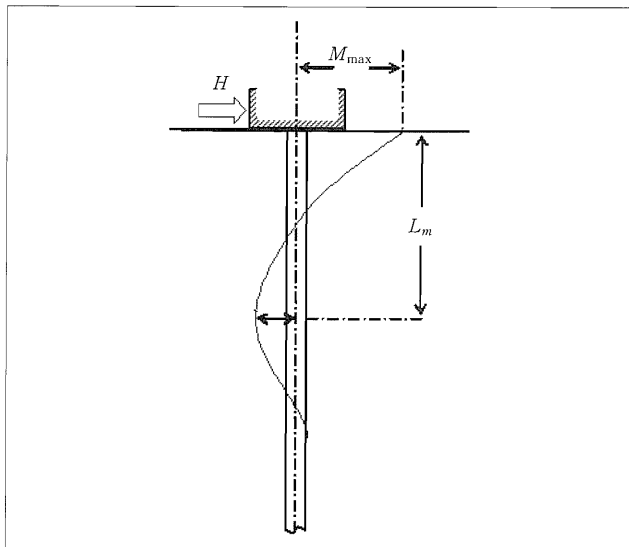
みで杭先端の支持力とか剛性が低下してしまうことである。そこでこの欠点を改善した工法がある。

一つは掘削終了した後に先端貫入機を使って杭底に同心円上にいくつか作られたリング状のコンクリートを貫入させて緩みを修正して杭体のコンクリートを打設するものがある（図-11）<sup>15)</sup>。もう一つは掘削後鉄筋籠に先端プレロードユニットなるものを建込み杭体のコンクリートを打設してから先端のユニットにセメントミルクを加圧注入して地盤を強化するものがある<sup>16)</sup>。

## 3. 耐震性の向上技術

阪神・淡路大震災における被害で今まで以上に目立ったのは杭体が壊れたことである<sup>17), 18)</sup>。杭体に耐震設計が義務付けられたのが遅いためか、昔の杭は鉛直支持性能が重視されて耐震性能について細かく検討される

ようになったのは比較的新しい。これは耐震性について無視されたわけではないが、上部構造並みに靱性も含めて詳しく評価がなされていないことは事実である。現在でも建築基準法において杭の2次設計は義務付けられていないのが現状である。多くの杭の設計では上部構造からの地震力により、杭頭部に最大の負荷がかかることを想定している（図一12）。



図一12 杭に働く曲げモーメント分布

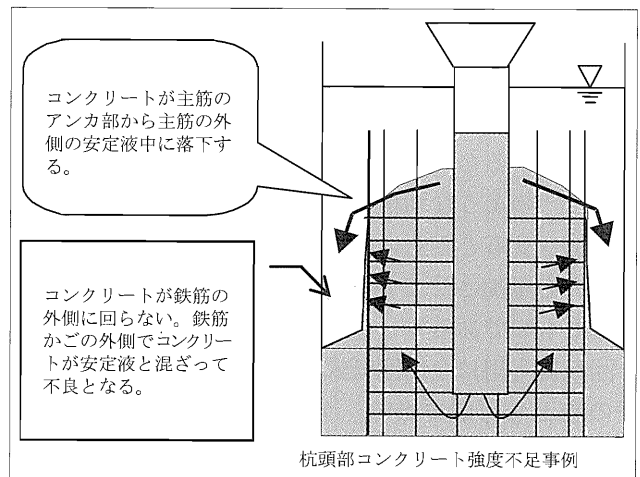
阪神・淡路大震災での被害も杭頭部が一番多く、その強化あるいは対応が指摘された<sup>17)</sup>。そのために杭頭部の杭体の耐震性を向上させるものとしていくつかの対応が行われた。

既製コンクリート杭においてはプレストレスの大きなC種あるいは鉄筋を入れたPRC杭を使うとか、鋼管巻き既製コンクリート杭であるSC杭などが頻繁に使われるようになった。鋼管杭は元来地震力には強いので比較的簡単に対応できる。

場所打ちコンクリート杭は杭頭部に鋼管を設置して場所打ちコンクリートのSC杭として耐震性を高める方法が開発されている。またRC杭で対応する場合、主筋の鉄筋量を大きく増加させるとか、せん断破壊を防止するためにフープ筋の間隔が細くなるなどの設計上の対応が取られ、上部構造の柱並みへの靱性確保が図られている。

また水中コンクリートということからコンクリート自体の強度を増加させる目的でセメント量の増加などが図られた。それらの対応は各々是とするものであるが、施工の視点から見ると従来以上に施工管理に十分な注意とか事前の検討と対応を図らないと想定したような健全な杭体が作れない場合が発生することも危惧される。

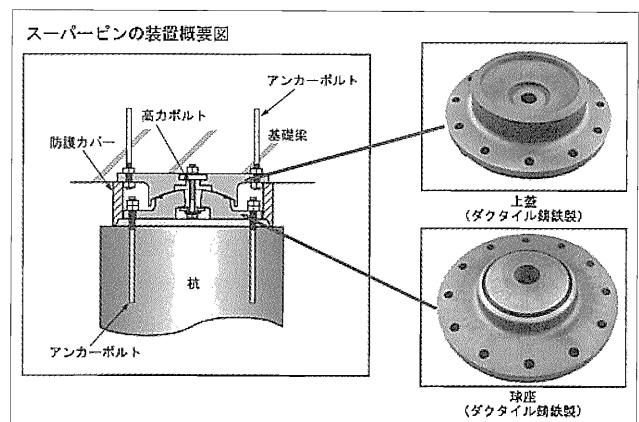
図一13は鉄筋量が多いとか、コンクリートのワーカビリティの不足などが原因でおきやすいトラブル例を示したものである<sup>19)</sup>。また杭体の靱性の評価についても色々な荷重条件下でデータが蓄積されていない状況は詳細かつ合理的な2次設計を行ううえにおいては今後の課題でもある。例えば中空な既製コンクリート杭の高強度化と大径化、場所打ちコンクリート杭の大径での高軸力下における曲げせん断特性の定量的な把握などが課題であろうし、使用コンクリートが高強度化されるとその杭体の強度特性データの不足が問題視されることも十分に考えられる。



図一13 場所打ちコンクリート杭の施工不良例<sup>19)</sup>

地震時の杭体の損傷防止方法としては杭頭部を細工する方法がいくつか実用化されつつある<sup>20)</sup>。簡単に言えば杭頭部を上部躯体にしっかりと固定すると、杭頭部に大きな曲げモーメントが作用して杭頭部を損傷させてしまうし、させないように剛強にするとそこに発生した曲げモーメントが上部躯体に対して曲げ戻しと言われるように基礎梁などを損傷させることも考えられる。

これを防ぐために杭頭部をピン状態のようにすれば



図一14 杭頭ピン構造の例<sup>21)</sup>

杭体の損傷だけでなく躯体の損傷も防ぐことが出来るので、例えば図-14に示すような方法<sup>21)</sup>がいくつか提案されている。

#### 4. 杭基礎の今後の課題

課題のいくつかについては個々のところで既に述べてきたが、それらも加味して杭基礎の今後の課題を述べてみたい。杭は地盤中に構築されて始めて機能する。ところが各種の開発された杭工法が地盤条件の違いにより、その施工品質確保をどのように実施しているかになると十分な情報が少ない。

これはある杭工法が地盤条件に左右されるものであるとすれば、施工法自体の脆弱性を示すことになり、工法選択において不利になるとの考え方でもあるのだろうか？ もちろんあらゆる地盤に対してコストパフォーマンスも含めて最良であれば一番良いに違いないが、現実的にはそのようなことはありえない。また杭の施工品質を確保するためには地盤条件に合ったしっかりと施工管理が必要であり、そのやり方次第で結果つまり杭品質が決まると言っても過言ではない。

ここから先は独断になるが新しく開発された杭工法は地盤条件及び施工経験記録（どのような地盤でどのような環境条件で、どのような能力の機械を使って、どのくらいの時間でなど）を開示していくことが重要であると思う。

特に杭は地盤中に構築されるため、結果を正確に確認することが難しいので、過去の施工記録を一定の項目に対してどのように行ったかの施工実績は施工者あるいは管理者の所有するノウハウとして蓄積するだけでなく、その結果を工法の施工条件、プロセスそして結果の同一基準による開示と評価が行われれば、地盤条件に適合した杭工法の選択と施工管理方法の採用が容易に行えるだけでなく、施工者の能力判断に重要な情報を提供できるのではないかと考える。

その結果として良いものは良いという判断を第三者が容易に行えるベースを提供できると思うが如何なものだろうか。

J C M A

#### 《参考文献》

- 1) O. Kusakabe, M. Kakurai, K. Ueno, Y. Kurachi : Structural Capacity of Precast Piles with Grouted Base, *J. Geotech. Engrg* : ASCE, Vol.120, No.8, pp.1289-1306, 1994
- 2) 加倉井正昭：杭の鉛直荷重伝達挙動に関する研究，東京工業大学学位論文，pp.195-197, 2003年3月
- 3) 桑原文夫：最近の杭の鉛直支持性能と各種基準の役割，日本建築学会PD・基調講演資料，pp.54-74, 2006年9月
- 4) 三谷セキサン株式会社：super ニーディングカタログ
- 5) 日本コンクリート工業株式会社：H・B・M（ハイビーエム工法）カタログ
- 6) 株式会社トーヨーアサノ：高支持力杭工法 MRXX（エムアールダブルエックス）カタログ
- 7) 財団法人ベターリビングホームページ
- 8) 旭化成建材ホームページ，EAZET
- 9) 新日鉄エンジニアリングホームページ，回転圧入鋼管杭「NS エコパイル」
- 10) JFE スチールホームページ，先端翼つき回転貫入杭「つばさ杭」
- 11) 住友金属工業(株)ホームページ，ジオウイング・パイル
- 12) 青木雅路・平井芳雄・丸岡正夫：多段拡張場所打ちコンクリート杭の原位置引抜き試験結果（その1），（その2），日本建築学会学術講演梗概集，pp.545-548, 2003
- 13) 平井芳雄・青木雅路・丸岡正夫：多段拡張場所打ちコンクリート杭の原位置引抜き試験，基礎工，pp.50-54, 2005年2月
- 14) 須藤敏巳・佐藤真弘・吉崎正明・石井雄輔：場所打ち節付き杭の鉛直交番載荷試験（その1），（その2），（その3），日本建築学会学術講演梗概集，pp.579-584, 2005
- 15) 奥村文直・川島真澄・坂 英昌・近藤政弘：先端強化型場所打ち杭工法（SENTAN パイル工法），基礎工，pp.33-35, 2000年2月
- 16) 松尾伸之・中村 宏：先端ブレード場所打ち杭の開発と設計・施工，基礎工，pp.27-31, 2002年11月
- 17) 丸岡正夫・青木雅路・佐藤英二・平井芳雄・宮川治雄・渡辺哲夫：兵庫県南部地震における震災建物基礎の被災度調査，日本建築学会技術報告集，第5号，pp.85-90, 1997年12月
- 18) 建築基礎における液状化・側方流動対策検討委員会（BTL委員会）：兵庫県南部地震における液状化・側方流動に関する研究，建築研究所報告，No.138, 2000
- 19) 加倉井正昭・丸岡正夫ほか：シリーズ建築施工 図解地下工事，東洋書店（2005）
- 20) 梅野 岳：場所打ちコンクリート杭の杭頭処理と接合方法，基礎工，pp.26-29, 2005年2月
- 21) 大槻 明・田蔵 隆・青木 孝・真野英之ほか：球面接触部を有する杭頭接合工法の開発（その1），（その2），日本建築学会学術講演梗概集，pp.451-454, 2001年9月

#### 【筆者紹介】

加倉井 正昭（かくらい まさあき）  
株式会社東京ソイルリサーチ  
常務取締役  
技術本部長  
工博

