

本コーナーでは、PC 構造物やその技術に関して会員の知見をより広げるために、社会インフラとして幅広く利用されているさまざまな PC 技術を紹介します。

# PC 杭

津田 和義\*

## 1. PC 杭の開発と施工法の変遷

わが国における既製コンクリート杭は、1934年にRC杭（Reinforced Spun Concrete Piles）（遠心力鉄筋コンクリート杭）が製造されたのが初めてです。

RC杭のJIS（日本工業規格）が制定されたのは、戦後の1955年です。その後、高度成長の時代背景とともに本格的な工場生産品として需要が増大し、1965年頃には出荷量が、年間200万トンを超えるようになりました。しかし、RC杭は、その構造特性から、運搬時や打込み施工時にひび割れが発生し易いという欠点があり、1970年頃からPC杭（プレストレストコンクリート杭）にとって代われ、現在ではごく一部で使用されるのみです。

PC杭は、1962年に開発され、首都高速道路1号線の東京都東品川地区の海中橋脚で使用されたのが最初です。鋼管杭と比して腐食が無く、耐久性に優れていることが採用の理由でした。このときは、プレテンション方式のPC杭（Pretensioned Spun Concrete Piles：プレテンション方式遠心力プレストレストコンクリート杭）とともにポストテンション方式のPC杭（Posttensioned Spun Concrete Piles：ポストテンション方式遠心力プレストレストコンクリート杭）も使用されています。しかしこの後、需要のほとんどは大量生産方式に利点のあるプレテンション方式PC杭となり、現在ではポストテンション方式のPC杭は生産されていません。

これらの杭は、施工後32年を経た1994年の調査で杭体コンクリートの劣化などは認められず、十分な耐久性を保持していることが確認されています。なお、ポストテンション方式による基礎・脚柱用プレキャスト部材としては、PC杭より大口径で一般的なケーソンより小口径の外径φ1600～φ4000mm程度のサイズでPCウエルが使用されています。

PC杭は、杭体にプレストレスを導入してRC杭の欠点を解消するとともにコンクリートの圧縮強度をRC杭の40N/mm<sup>2</sup>から50N/mm<sup>2</sup>にアップすることにより高強度の製品として急速に普及し、年間出荷量が150万トン程度に達した1968年にはJISが制定されました。その後も需要は増加を続け、1973年には400万トンを超えましたが、オイルショックの影響で建設需要が大きく落ち込んだ1974年以降は300万トン前後の年間出荷量となりました。

その後、1980年頃からPHC杭（Pretensioned Spun High

Strength Concrete Piles：プレテンション方式遠心力高強度プレストレストコンクリート杭）にとって代われ、急速に需要が減少して1990年頃にはほとんど使用されることが無くなり、1993年にはJISも廃止されました。

PHC杭は超高強度コンクリートを使用したPC杭で、1970年頃から使用されるようになりました。コンクリートの圧縮強度はそれまでのPC杭の50N/mm<sup>2</sup>から80N/mm<sup>2</sup>にアップし、高軸方向耐力であることや施工時の打撃抵抗性が高いことから設計・施工上の利点が大きく、急速に需要が増大しました。

1980年に年間出荷量が約300万トンに達したのち、JISが制定された1982年以降は急速にPC杭と置き換わり1987年以降には既製コンクリート杭全体の出荷量の90%以上をPHC杭が占めるようになりました。既製コンクリート杭の年間需要は、1990年に約800万トンを記録したのち、経済不況や建設投資抑制などの影響で大きく減少し、近年は300万トン前後となっていますが、PHC杭の占有割合は変わらず90%以上となっています。現在ではPC杭というとPHC杭のことを指します。JIS体系が変更された2000年のJIS A 5373（プレキャストプレストレストコンクリート製品）においては、「PCくい」の詳細区分として、附属書5に「PHCくい」が規定されました。

現在、PC杭の範疇に入るものとしては、PHC杭のほかにはPRC杭（Pretensioned & Reinforced Spun High Strength Concrete Piles：プレテンション方式遠心力高強度プレストレスト鉄筋コンクリート杭）などがあります。このほか、PHC杭に接続して使用されるSC杭（Steelpipe & Concrete Composite Piles：外殻鋼管付きコンクリート杭）がありますが、これらについては、「3. PC杭の構造と特徴」の章で記述します。

PC杭は、建築・道路・鉄道など各種構造物の基礎として使用されます。その設計は、建築構造物では「建築基礎構造設計指針」にしたがいが、道路の橋梁構造物では「道路橋示方書」にしたがうというように、適用する構造物で規定された基準にしたがって行います。これらの各種基準は、主として過去の大地震を契機として制定や改訂が行われてきましたが、PC杭などの既製コンクリート杭もそれらの基準に適合する形で各種の杭が開発されてきました。近年では、1995年に発生した兵庫県南部地震の被災経験を基に、道路橋示方書などの各種設計基準が改定されたことを受けて、PC杭の地震時変形性能を改善するために、

\* Kazuyoshi TSUDA：日本ヒューム(株) 理事

せん断補強を施した JIS 強化 PHC 杭や CPRC 杭が開発されています。

一方、既製コンクリート杭の施工法も施工環境の変化、構造物の大型化や杭の大径化・長尺化および性能の向上に伴い変化してきました。1960 年代中頃までは、ディーゼルハンマなどを使用した打撃工法が、一般的な工法として採用されていました。その後、打撃時の騒音・振動や油煙などの建設公害が問題となり、都市部では実施が困難となってきました。とくに、1968 年の騒音規制法と 1976 年の振動規制法によって、打撃工法を採用できる地域が限定されるようになりました。この様な状況のなか、公害対策工法として、プレボーリング工法や中掘り工法といった埋込み工法が開発されました。今日ではこれらの埋込み工法のなかで、プレボーリング拡大根固め工法、中掘り拡大根固め工法などの大きな鉛直支持力を得られる工法が主流となっています。

PC 杭に関連する各種既製コンクリート杭とその施工法の開発の変遷を建築・土木関係の主な設計・施工基準類の制定・改訂状況とともに表 - 1 に示します。

表 - 1 既製コンクリート杭と施工法の開発の変遷

年代	基準・示方書類等	杭および工法
(昭和 9)		・ RC 杭の開発 (1934)
1950 (25)	・ 建築基礎構造設計基準 (A) 制定	・ ディーゼルバイルハンマ国産化
(27)	・ RC 杭 JIS 制定 (1955)	・ アースオーガ開発
(31)	(コンクリートボール・バイル協会設立)	・ 埋込み工法の開発
1960 (35)	・ (A) 改訂	・ PC 杭の開発
(36)	・ 杭施工 JIS 制定 (1962)	
(37)	《新潟地震》	
(39)	・ 道路橋下部構造設計指針 (D) 制定	
(41)	《十勝沖地震》	・ セメントミルク工法の開発
(43)	・ PC 杭 JIS 制定 (1968)	・ 高強度 RC 杭の開発
	・ 騒音規制法	
1970 (45)	・ 建設省告示 111 号 (支持力の取扱い)	・ PHC 杭の開発
(46)		・ SC 杭の開発
(47)	(石油危機)	
(49)	・ (A) 改訂 (杭に水平力負担)	
(50)	・ 負の摩擦力に対する設計指針	・ コンクリート SL 杭の開発
(51)	・ 振動規制法	・ PHC 杭 B 種以上の開発
	・ (D) 改訂	・ 油圧バイルハンマの開発
(53)	《宮城県沖地震》	
	・ 建設省告示 111 号改正	
(54)	・ 埋込み杭施工指針 (セメントミルク)	
	・ SC 杭設計指針	
1980 (55)	・ 道路橋示方書 (D) 改訂 (下部構造編, 耐震設計編)	・ 中掘り拡大根固め工法の開発
(56)	・ 新耐震基準 (建築基準法改正)	
(57)	・ PHC 杭 JIS 制定 (1982)	・ 中大径杭の開発 (φ700 ~ φ1000)
(58)	《日本海中部地震》	・ プレボーリング拡大根固め工法の開発
		・ PRC 杭, ST 杭の開発
(59)	・ 地震力に対する建築物の基礎の設計指針制定	
(62)	・ PHC 杭, PC 杭, RC 杭 JIS 改訂	
(63)	(コンクリートバイル建設技術協会設立)	
	・ (A) 書名・内容変更 → 建築基礎構造設計指針 (B) 制定	
(平成 1)	《ロマ・プリータ地震 (サンフランシスコ)》	
1990 (2)	・ (D) 改訂 (下部構造編, 耐震設計編)	・ 大径杭の開発 (φ1100, φ1200)
(4)		・ 無溶接継手杭の開発
(5)	・ 中掘り打撃工法設計・施工指針	
(6)	・ (D) 一部改訂 (下部構造編)	
(7)	《兵庫県南部地震》	
(8)	・ (D) 改訂 (下部構造編, 耐震設計編)	・ せん断補強杭 (JIS 強化 PHC 杭) の開発
		・ コピタ型 PRC 杭 (CPRC 杭) の開発
2000 (10)	・ 建築基準法改正	
(12)	・ プレキャスト鉄筋コンクリート製品及びプレキャストプレストレストコンクリート製品 JIS 制定 (2000)	
(13)	・ 国土交通省告示 1113 号	
	・ (B) 改訂	
(14)	・ (D) 改訂 (下部構造編, 耐震設計編)	
2010 (22)	《東北地方太平洋沖地震》	
(23)		・ コピタ型プレボーリング杭工法の開発
(24)	・ (D) 改訂 (下部構造編, 耐震設計編)	

## 2. PC 杭の製造

PC 杭の製造は、鋼製の円筒型枠内に軸方向 PC 鋼材と円周方向スパイラル鉄筋で組立てた鉄筋籠を配置し、PC 鋼材の緊張・定着、コンクリート投入の後、型枠を高速で回転させて成形する方法で行います。回転による遠心力を利用してコンクリートを締め固めるとともにコンクリート中の余剰水を脱水することによって高強度で中空形状の製品を製造します。この技術は遠心力製法と呼ばれ、長尺、中空円筒形の杭のほか、コンクリートボール、ヒューム管を効率的に製造するうえで必要不可欠なものとなっています。

遠心力製法は、1910 年にオーストラリアのヒューム兄弟によって発明されました。わが国ではヒューム管の製造に 1925 年に使用されたのが最初で、杭の製造に使用されるようになったのは 1934 年です。

杭体コンクリートの強度は、RC 杭の頃から工場製品として一般のコンクリートよりも高強度でしたが、混和剤や養生方法の開発によってさらに高強度へと変化してきました。PC 杭の養生方法は常圧蒸気養生と水中養生の組合せが一般的で、コンクリート強度は 50 N/mm<sup>2</sup> 程度でしたが、1966 年にオートクレーブ養生 (高温高压蒸気養生) が実用化されたのち、80 N/mm<sup>2</sup> の超高強度杭が一般的となりました。このオートクレーブ養生による製造方法によって、杭の出荷材齢は、それまでの 28 日から 3 日に大幅に短縮され、製造の効率化、需要の増大に大きな影響を与えました。

この後、新しい高強度混和剤が開発され、オートクレーブ養生を用いなくても超高強度杭の製造が可能となりました。この高強度混和剤による方法は、オートクレーブ養生装置が不要で、出荷材齢も 7 日で可能なことから、φ700 mm 以上の大口径杭の製造に採用されるのが一般的となっています。さらに近年では 100 N/mm<sup>2</sup> 以上の杭も一般的に使用されるようになっていきます。

PHC 杭の製造フローを図 - 1 に示します。

写真 - 1 に鉄筋籠の編成工程、写真 - 2 に PC 鋼材緊張工程、写真 - 3 に遠心力成形工程、写真 - 4 にオートクレーブ養生工程を示します。

## 3. PC 杭の構造と特徴

本章では PC 杭の代表である PHC 杭とともに、それに接続して使用される PRC 杭と SC 杭についても記述します。これらの杭の構造概要を図 - 2 に示します。

### 3.1 PHC 杭

PHC 杭は、コンクリートの圧縮強度が 80 ~ 100 N/mm<sup>2</sup> 程度で、軸方向鋼材として PC 鋼材 (異形 PC 鋼棒または異形 PC 鋼線) が使用されます。杭径は φ300 mm ~ φ1200 mm (φ300 mm ~ φ500 mm は 50 mm 間隔, φ500 mm 以上は 100 mm 間隔)、単体の杭長は 5 m ~ 15 m (1 m 間隔) が標準です。PHC 杭には、プレストレス量によって A 種, B 種, C 種の 3 種類があり、それぞれのプレストレス量は  $\sigma_{cc} = 4 \text{ N/mm}^2, 8 \text{ N/mm}^2, 10 \text{ N/mm}^2$  です。プ

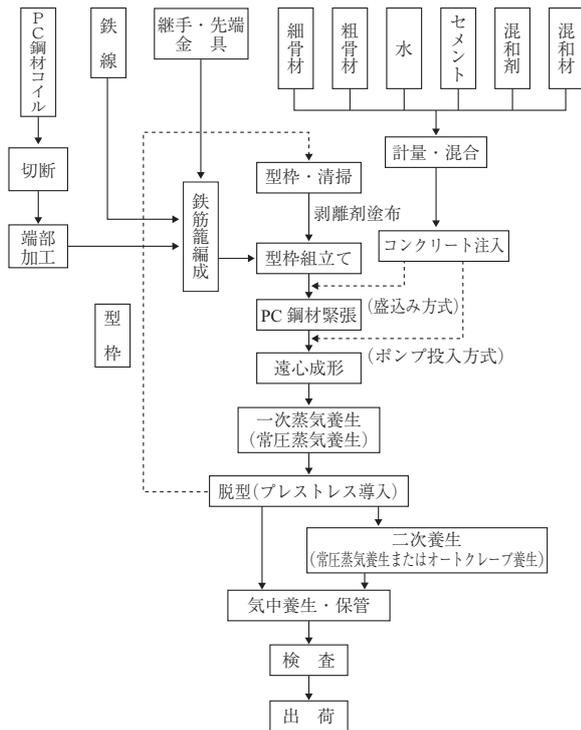


図 - 1 PHC 杭の製造フロー



写真 - 3 遠心力成形工程



写真 - 4 オートクレーブ養生工程



写真 - 1 鉄筋籠の編成工程



写真 - 2 PC 鋼材緊張工程

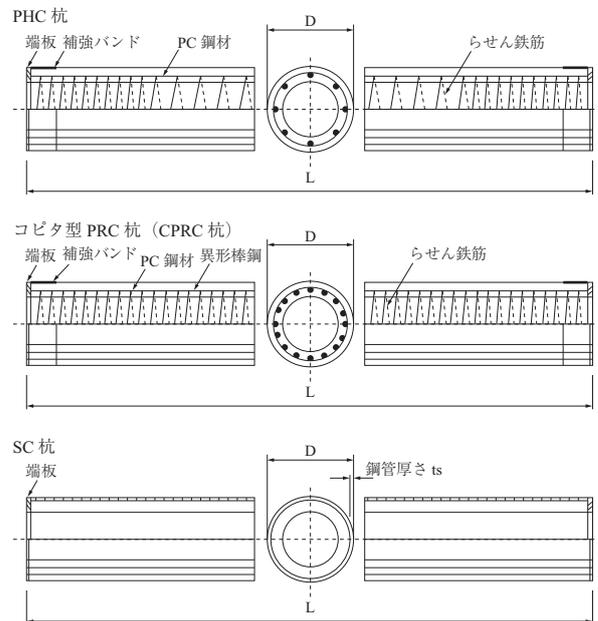


図 - 2 PHC 杭, PRC 杭, SC 杭の構造概要

レストレス量が多いほど PC 鋼材量も多く、ひび割れ耐力および曲げ耐力が大きい構造となっています。杭の両端部には端部金具が配置され、この金具によって PC 鋼材の

定着および杭同士の接続を行います。

### 3.2 PRC 杭

PRC 杭は、軸方向鋼材として PC 鋼材に加えて异形鉄筋を補強した杭です。PRC 杭の代表的なものは、杭メーカーの団体である (一社) コンクリートパイル建設技術協会 (COPITA) で仕様を統一した CPRC 杭です。CPRC

杭は、PHC杭よりも杭周方向のらせん鉄筋を多く配置し、曲げ耐力とともにせん断耐力もPHC杭より大きくなっています。杭径、杭長の規格はPHC杭と同一ですが、軸方向鉄筋の量によってI種からVI種があり、曲げ耐力が順次大きくなる構造となっています。PRC杭は、単独でも使用できますが、地震時の水平力が作用したときに、大きな曲げモーメントやせん断力が発生する杭の上杭部分にPHC杭と接続して使用されるのが一般的です。

### 3.3 SC杭

SC杭は、コンクリートに膨張性混和材を添加することにより、外殻鋼管とコンクリートを一体化した鋼管とコンクリートの複合杭です。SC杭は、引張りに強い鋼管と圧縮に強い高強度コンクリートの長所を併せ持ち、PHC杭やPRC杭と比較して高曲げ耐力、高せん断耐力および高じん性の特長を有しています。杭径、杭長の規格はPHC杭と同一ですが、鋼管の厚さによって曲げ耐力が変化します。SC杭は、PRC杭と同様に、単独でも使用できますが、地震時の水平力が作用した時に、大きな曲げモーメントやせん断力が発生する杭の上杭部分にPHC杭と接続して使用されるのが一般的です。

### 3.4 PC杭の継手

既製コンクリート杭の継手は、PC杭が開発される頃までは鉛直荷重のみを伝達する「ほぞ式継手」や一定の曲げ応力を伝達できる「ボルト式継手」などが使用されていました。しかし、いずれの継手も応力の伝達や打撃施工時における破損などの課題が残されていました。これらの課題を解消する信頼性の高い継手として、「溶接式継手」がPC杭と同じ頃に開発されました。この継手は、種々の試験研究成果から、杭本体と同等以上の強度が保証され、PC杭の標準継手は溶接式継手となりました。

しかし、溶接式継手は、施工現場での溶接作業となるため、現場の環境や溶接技能者の技量に影響を受け易いことや大口径杭では特に溶接作業に長時間を要するなどの問題があり、これらを解決する継手として1994年に「無溶接継手」が開発されました。現在、PC杭の無溶接継手は、ベアリングジョイントとT・Pジョイントの2種類の方式があります。これらの継手は、溶接継手と比較して、施工管理の容易さと施工速度の速さを主な利点として、特に大口径杭での採用が増加し、近年では既製コンクリート杭の約半分は無溶接継手が採用されています。

図-3に溶接式継手を示し、図-4にベアリングジョイントを、図-5にT・Pジョイントを示します。

## 4. PC杭の施工

PC杭の施工法は、大別すると打込み工法と埋込み工法に分類されます。

打込み工法は、杭頭をハンマで打撃することによって杭を設置する工法です。この工法は、打込みに伴う地盤の圧密効果で大きな支持力が得られ、施工管理が明確で、残土も発生せず、経済的にも優れた工法ですが、打込み時に騒音・振動が発生するために、適用地域が限定されています。埋込み工法は、主として騒音・振動対策工法として開

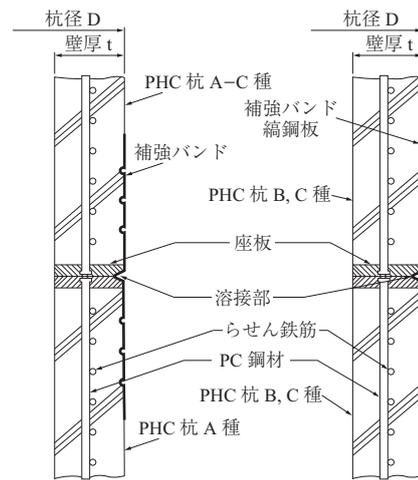


図-3 溶接式継手

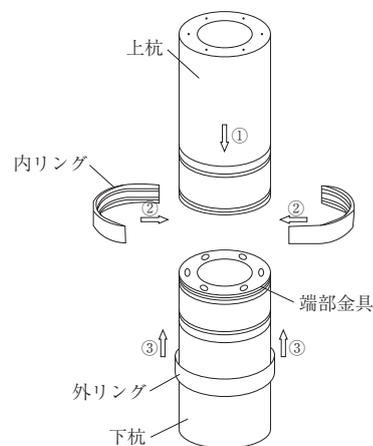


図-4 ベアリングジョイント

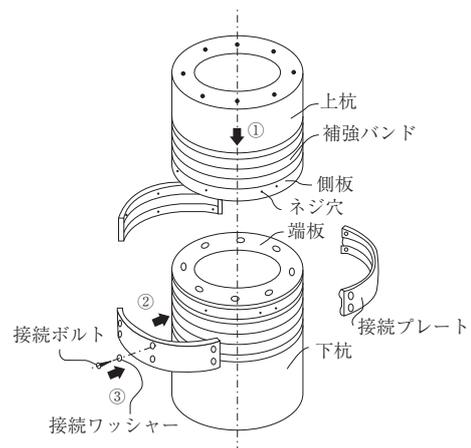


図-5 T・Pジョイント

発された工法で、掘削、沈設の方法によってプレボーリング、中掘り、回転の3つの方法に分けられ、さらに、先端支持力の発現方法により、打撃方式と根固めおよび拡大根固め方式に区別されます。

施工可能な標準杭径は、PC杭が開発された頃はφ600mm以下でしたが、1980年頃から大口径化に対応する

埋込み工法が開発され、今日では杭径φ1200mmまで拡大しています。また、杭長も70～80mの長尺杭も可能となっています。PC杭の施工法分類を図-6に示します。

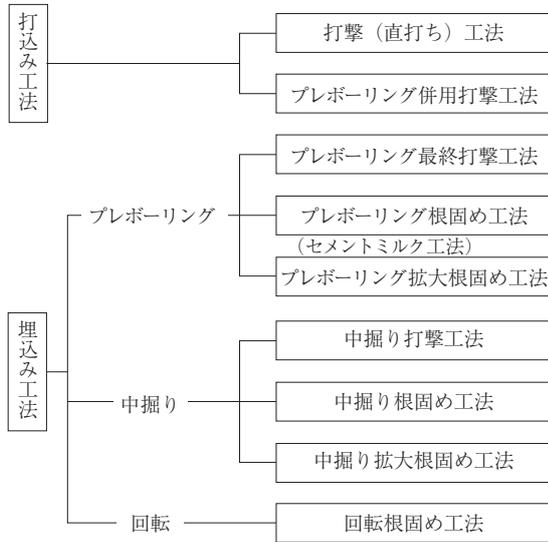


図-6 PC杭の施工法分類

近年では、プレボーリング工法または中掘り工法による埋込み工法が、PC杭の施工法の約95%を占め、打込み工法は4%程度となっています。なお、埋込み工法の中の回転根固め工法はごく一部で使用されるのみです。

また、打込み工法のほとんどはプレボーリングを併用する工法で、打撃のみの工法は採用される例がほとんど無い状況です。

埋込み工法の内では代表的なプレボーリング拡大根固め工法と中掘り拡大根固め工法の標準的な施工順序は、以下のとおりで、その例を図-7と図-8に示します。

[プレボーリング(拡大)根固め工法の施工順序]

①オーガ駆動装置と掘削装置(掘削ビット、掘削ロッド)を装備した杭打ち機を杭の施工位置に設置する。②～③掘削装置により所定の深さまで地盤を掘削(プレボーリング)する。先端部では掘削ビットの拡大翼を拡翼させ拡大球根部を掘削する。④掘削孔の先端部に掘削装置の先端から根固め液(セメント+水)を注入・攪拌する。⑤掘削装置の先端から杭周固定液(セメント+水)を注入・攪

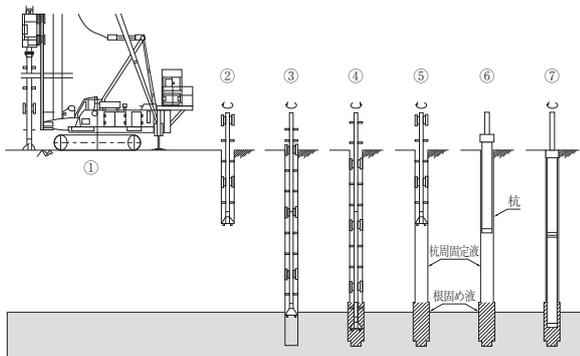


図-7 プレボーリング拡大根固め工法の施工順序

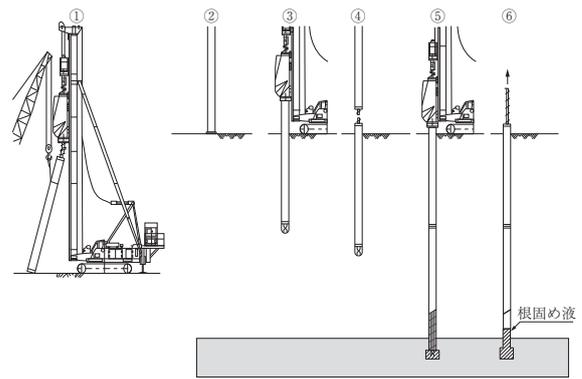


図-8 中掘り拡大根固め工法の施工順序

拌しながら掘削装置を上げる。⑥～⑦掘削孔に杭を建て込み、鉛直度を確認しながら所定の深さに定着する。

[中掘り拡大根固め工法の施工順序]

①オーガ駆動装置を装備した杭打ち機を杭の施工位置に設置する。あらかじめ中空部にスパイラルオーガを挿入した杭を建込み、オーガ駆動装置とスパイラルオーガおよび掘削ビットを接続する。②杭を施工位置に設置し鉛直度を調整する。③～④掘削・排土装置(掘削ビット、スパイラルオーガ)により杭先端地盤を掘削(中掘り)する。掘削土をスパイラルオーガにより杭頭部から排土しながら杭を所定の深さまで沈設する。⑤杭沈設後、掘削ビットの拡大翼を拡翼させ拡大球根部を掘削し、掘削・排土装置の先端から根固め液(セメント+水)を注入・攪拌する。⑥根固め液の注入完了後、杭中空部に注水し、掘削・排土装置を引き上げる。

## 5. あとがき

PC杭に関する開発の変遷や最近の技術動向について概説しました。近年、公共建設事業費削減などの影響で、PC杭を含む既製コンクリート杭の年間需要は約300万トンと最盛期の半分を割り込む状況となっています。

しかしながら、PC杭は各種構造物を支え、その安全性を確保するという重要な役割を担っていることに変わりはありません。われわれは今後もさらなる技術開発によって、より安全で経済的な製品・工法を提供することにより、社会に貢献する責務があると考えています。

## 参考文献

- 1) (社)セメント協会：セメント・コンクリート No.672, 2003.2
- 2) (社)コンクリートパイル建設技術協会：既製コンクリート杭の施工管理, 2013年5月
- 3) (社)コンクリートパイル建設技術協会：既製コンクリート杭一建築編一, 2009年5月
- 4) (社)コンクリートパイル建設技術協会：COPITA, NO1, 1989.11
- 5) (社)コンクリートポール・パイル協会, (社)コンクリートパイル建設技術協会, (社)セメント協会：港湾構造物に用いる既製コンクリート杭, 平成7年4月
- 6) 財団法人規格協会：JIS A 5336-1968, 昭和43年12月
- 7) 財団法人規格協会：JIS A 5373: 2000, 平成12年7月

[2015年12月21日受付]