

# 基礎工法の発展経緯と今後の動向

岡原 美知夫

我が国は、地形が急峻で多数の河川を擁し、また多くの島から成る国土の自然条件を持ち、また地震、洪水など世界有数の自然災害の脅威にさらされている。これらの厳しい設計・施工の要求に応じて構造物の基礎を建設してきたため、我が国の基礎工法に関する技術は世界的に見ても独自の工夫が加えられて発展してきたものが多い。従来からの基礎形式といえば、浅い基礎の直接基礎、深い基礎の杭基礎とケーソン基礎である。比較的新しい主な基礎工法としては、鋼管矢板基礎工法、多柱式基礎工法、地中連続壁基礎工法、フーチング設置式杭基礎工法、大口径深礎基礎工法などがある。また杭基礎には多種多様な杭工法が開発されている。本報文では、設計と施工の観点から基礎の種類と分類の考え方、主な基礎形式の発展の経緯、さらに最近の注目すべき基礎技術の動向を述べる。

キーワード：直接基礎、杭基礎、ケーソン基礎、鋼管矢板基礎、地中連続壁基礎、鋼管ソイルセメント杭、鋼管回転杭、マイクロパイル

## 1. はじめに

我が国の地形は急峻で多数の河川を擁し、また多くの島から成る国土の自然条件から、道路を始めとする交通インフラストラクチャ整備における橋梁の占める割合は大きい。これらの橋梁は、例えば、海峡部においては潮流と水深を克服する基礎工法を必要とし、都市部においては軟弱地盤に対応した深い基礎工法で騒音・振動や近接施工対策を必要とし、また山地部においては斜面対策を必要とするなど、建設地点の条件に応じた種々の工法が要求される。加えて我が国は地震、洪水など世界有数の自然災害の脅威にさらされた国である。これらの厳しい設計・施工の要求に応じて構造物の基礎を建設してきたため、我が国の基礎工法に関する技術は独自の工夫が加えられて発展してきたものが多い。

本報文では、設計と施工の観点から基礎の種類と分類の考え方、主な基礎形式の発展の経緯、さらに最近の注目すべき基礎技術の動向を述べる。

## 2. 基礎の種類と分類

従来からの基礎形式といえば、浅い基礎の直接基礎、深い基礎の杭基礎とケーソン基礎である。比較的新しい主な基礎工法としては、鋼管矢板基礎工法、多柱式

基礎工法、地中連続壁基礎工法、フーチング設置式杭基礎工法、大口径深礎基礎工法などがある。また杭基礎には表—1に示すように多種多様な杭工法が開発されている。

表—1 地盤の支持機構、設計上の特性、施工法による基礎の分類

地盤の支持機構	設計上の特性 (形式と構造)	施工法
浅い基礎	直接基礎	<ul style="list-style-type: none"> <li>フーチング基礎工法（独立・連続・複合）</li> <li>設置式フーチング基礎工法</li> </ul>
深い基礎	柱状体基礎	<ul style="list-style-type: none"> <li>ケーソン基礎工法（オープンケーソン・ニューマチックケーソン・設置式ケーソン）</li> <li>鋼管矢板基礎工法（井筒型・脚付き型）</li> <li>地中連続壁基礎工法（井筒型・壁式・連続土留め壁基礎）</li> <li>大口径深礎基礎工法</li> <li>PCウェル基礎工法</li> </ul>
	群杭基礎	<ul style="list-style-type: none"> <li>打込み杭工法</li> <li>埋込み杭工法（中掘り・プレボーリング）</li> <li>鋼管ソイルセメント杭工法</li> <li>鋼管回転杭工法</li> <li>場所打ち杭工法（オールケーシング・リバーズ・アースドリル）</li> <li>マイクロパイル工法</li> <li>深礎工法</li> <li>多柱式基礎</li> <li>ジャケット式基礎工法</li> </ul>
	複合基礎	<ul style="list-style-type: none"> <li>フーチング設置式基礎工法</li> <li>脚付きケーソン工法</li> </ul>

基礎の分類には、設計上の区分と施工上の区分がある。まず施工法の開発が行われて、ある程度の施工実績を踏まえて、技術基準を定めるのが通常であるので、技術基準は施工法により分類された基礎形式に対応して設計法を規定しているのが一般的である。

表一は基礎形式を、地盤の支持機構、設計上の特性（形式と構造）、施工法の面から分類を試みたものである。ここで柱状体基礎とは複数本で用いられる群杭基礎とは異なり、単柱の基礎躯体で荷重に抵抗する比較的剛性の高い柱状の基礎の総称であり、設計法の統合化を計るために導入された設計区分の概念である。設計上の特性に基づいて、すなわち、直接基礎、柱状体基礎、群杭基礎、複合基礎として、設計区分の集約化を図ることが可能である。

平成2年に改訂された道路橋示方書ではこの考え方が一部取入れられ、設計手法の整合性を図るための各基礎形式の設計体系整理の契機になった。さらに、阪神・淡路大震災後、道路橋示方書（平成8年）において各基礎形式に対して地震時保有水平耐力照査が規定され、深い基礎形式については群杭基礎と柱状体基礎の設計区分に統合された。

### 3. 主な基礎

#### （1）直接基礎

直接基礎は一般に、地盤を比較的浅く広く掘削し、フーチングを構築する基礎形式で、荷重を直接良質な支持層に伝える浅い剛体基礎であると定義される。地下水位が高いところや、支持層が比較的深い場合には土留めや止水を行った後、掘削施工される。

直接基礎は一般に深い基礎に比べて施工が確実で経済的であるので古くから構造物の基礎として用いられてきた。

我が国では山岳部の斜面上に構造物を建設する機会も多い。構造物としては橋梁、送電用鉄塔などがある。斜面に通常の水平な底面を持つ直接基礎を設置すると、非常に掘削量が多くなり問題が生じる可能性が高い。一方、根入れが浅いと斜面地盤の崩壊など安全性に問題が生じる。このような問題を解決するために段切り基礎が開発された。フーチングの底面を斜面に沿って段切り形状とすることにより掘削土量の低減を計るとともに、基礎底面部内の水平となる部分をできるだけ多く確保して支持力の減少を抑えるという特徴を持つ。

直接基礎は橋梁以外の構造物の基礎にも多く用いられている。原子力発電所、ダム、LNG地下タンク、高層建築物等、岩盤上に建設される大型構造物の基礎のほとんどは直接基礎である。

#### （2）杭基礎

地盤が軟らかい場合、基礎に木杭を用いた例は太古からあり杭の歴史は古い。杭が本格的に構造物基礎に

用いられるようになってきたのは大型構造物が地盤の悪いところに建設され始めてからであり、特に戦後に著しい発展をみた。

明治末期から昭和の初期にかけて、外国から鋼杭、既製鉄筋コンクリート杭や場所打ちコンクリート杭工法が導入されたが、相変わらず松杭の使用が多い状態であった。

場所打ちコンクリート杭は当初無筋であったが、関東大震災以降は鉄筋を入れるようになったようである。

道路橋基礎の約6割を杭基礎が占めており、コストの優位性から今後さらに増える傾向がある。表一に示すように、従来の打込み杭工法、中掘り杭工法、場所打ち杭工法に加えて、新しく開発された鋼管回転杭工法、マイクロパイル工法など多種類の杭工法があり、さらに各種の杭工法の中に民間各社が独自に開発して技術審査証明を取得した多くの工法がある。

多種多様な杭工法による杭の支持力評価を道路橋示方書でどのように規定するかが従来からの課題であるが、道路橋示方書では、多くの載荷試験データに基づく施工法別の支持力推定式を規定している。また、軟弱地盤で橋梁基礎の杭本数が多くなりすぎるという実務技術者からの指摘、軟弱地盤上の橋台の杭基礎が偏土圧の作用による相次ぐ変状報告などを受けて、杭の合理的な水平抵抗評価についても検討されてきた。道路橋示方書では、鉛直支持力の場合と同様に、多くの載荷試験データに基づいて杭の水平抵抗の評価を行うことを基本にしている。

なお、社団法人地盤工学会で定められた「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」（平成14年）では、相対的な載荷時間に基づいて分類された、静的・動的・急速の各載荷試験法の基準化が計られている。適切に載荷試験を選択して従来に比べて安価かつ信頼性の高い支持力を決定することが可能となっている。

#### （3）ケーソン基礎

ケーソンを施工法によって分類すると、オープンケーソン、ニューマチックケーソン、および設置ケーソンの3種類に分類される。

オープンケーソンは昔から井戸を掘るのに使われていたので古い歴史を持つといわれている。一般に機械により筒状構造物の底面地盤を水中掘削・排土しながら、主としてその自重を利用して所定の深さまで沈設して基礎とするものである。オープンケーソンの施工実績は、揚水井戸などに利用する小規模なものから、橋梁・建物基礎、炭坑用立坑、地下タンク、建物地下室などがある。

ニューマチックケーソン工法とは、圧縮空気を用いる工法であるので圧気ケーソン工法とも呼ばれた。筒状構造物の底部にスラブを設け、スラブ下を作業室として水圧に見合う圧縮空気を送り、この作業室を完全にドライにして掘削作業を行い所定の深さまで沈下させる工法である。

ニューマチックケーソン工法は、1830年にトーマス・コ克蘭により考案され、1872年、ニューヨーク市にあるブルックリン橋の基礎はニューマチックケーソン工法により施工された。また、20世紀初頭、ニューヨーク市マンハッタン島に超高層ビルが多数建設されたが、それらの多くは、ニューマチックケーソン工法による基礎が用いられた。その後も大型構造物の基礎にはニューマチックケーソン工法が用いられてきた。

ニューマチックケーソンの施工実績から、橋梁基礎を始めあらゆる構造物基礎のほかに地下タンク、トンネル、立坑等の地下構造物や岸壁、ドライドックなどの土留め構造物として用いられているが、杭基礎、鋼管矢板基礎等との競争でコスト的に不利になる場合が多く、全体的に施工実績が減ってきている。

本州四国連絡橋プロジェクトにおいて設置ケーソンは多く用いられてきたように、設置ケーソンは水深が深くかつ支持層が浅い場合には有力な工法である。本四プロジェクトの場合よりもさらに水深が深くなる次期海峡横断道路プロジェクトでは、コスト縮減を計るため、特に海底地盤の掘削量を減らすとともに、地震時の慣性力を抑えるため基礎の質量を少なくするような工夫が不可欠となる。

#### (4) 鋼管矢板基礎

鋼管矢板基礎は、昭和39年ごろより開発に着手され、昭和42年に溶鋳炉基礎に用いられたのが最初であることから分かるように、その開発はいくつかの製鉄メーカーの手によって行われてきた。溶鋳炉基礎のほか、製鉄所内の土木構造物の基礎にも適用され、橋梁基礎に用いるための基礎的な技術が培われた。

この基礎の最大の特徴は、水中で締切り工が不要な仮締切り兼用工法を採り得ることであり、仮設コストが縮減できること、河川占有面積が小さいことなど大きな利点を持つ。鋼管矢板基礎は、各鋼管矢板が継手により相互に連結されていること、施工時の水圧により発生する応力が完成後鋼管矢板に残留すること等により力学的挙動が複雑であり、力学的挙動の解明と設計法の確立が大きな課題であった。

基準化に向けて各機関で研究が続けられ、例えば、昭和56年には日本国有鉄道において、「鋼管矢板井筒

の設計施工指針」、昭和59年には日本道路協会において、「鋼管矢板基礎設計指針」がそれぞれ刊行された。これら一連の基準化により鋼管矢板基礎の施工実績は着実に増加してきており、鋼管杭協会によれば、現在2,000基を超える実績を持つに至っている。

#### (5) 地中連続壁基礎

地中連続壁工法は、ヨーロッパにおいて考案され、その後我が国に導入された。建設工事における騒音・振動に対する対策工法として積極的に用いられるようになり発展を遂げてきた。

当初、地中連続壁は仮設目的の利用が多かったが、その後の技術進歩により地下構造壁などを対象に本体への利用が増加してきた。

地中連続壁の機械掘削の進歩により、大規模な壁厚や深度に対する施工能力が高まるとともに、継手をはじめとする構造機能に関する研究開発の進展によって、工法の信頼性が高くなった。さらに地中連続壁を井筒状に構築し、橋梁などの大型構造物の基礎として利用する地中連続壁基礎が案出された。

地中連続壁基礎は、隣接する地中連続壁エレメントを相互に継手を用いて連結して一体閉合断面を形成し、その頭部と頂版が一体となるように構築した構造形式のため耐力が大きく耐震性に優れている。

施工機械が大型であること、安定液の処理が必要であること、工費が高いことなどから、近年地中連続壁基礎はほとんど施工されなくなってきたようである。

地中連続壁の施工実績としては、外郭放水路立坑、人工島、LNG地下タンク、変電所、橋梁など多くの大型構造物に使われている。なお、現在、国内で使用されている主な壁式連壁掘削機によれば、最大壁厚として3.2m、最大深度としては170mを超える掘削および連壁の構築が可能である。

### 4. 新しい基礎技術の動向

#### (1) 鋼管杭

高度経済成長時代に登場した鋼管杭は、打撃杭工法から中掘り杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法、そして鋼管回転杭工法へと発展してきた。開発経緯を見ると、騒音振動対策、低排土対策、高支持力化等、環境対策・コスト競争力の強化を目指してきている。この結果、基礎杭（土木建築分野）のシェアでは鋼管杭が上昇基調にあるようである。

##### (a) 鋼管ソイルセメント杭

平成14年の道路橋示方書の改訂で基準化された鋼

管ソイルセメント杭は、オーガにより地盤を掘削しながらセメントミルクを注入・混合攪拌して築造したソイルセメント柱の内部に、リブ付き鋼管を埋設して一体化した合成杭である（図-1）。

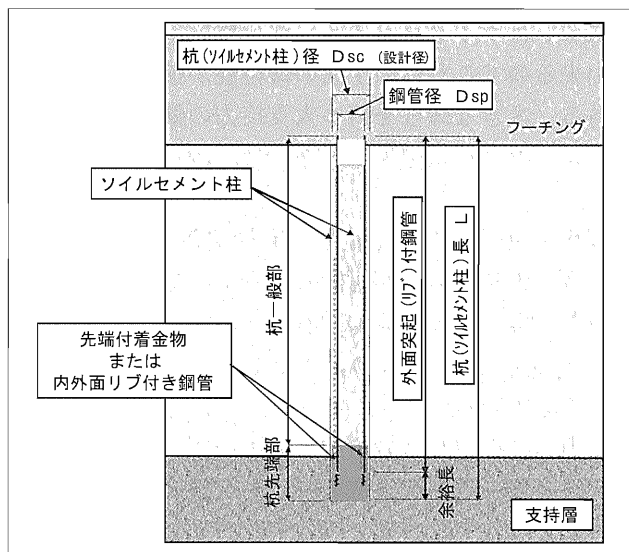


図-1 鋼管ソイルセメント杭概要図

地盤とソイルセメントとの密着度が高く、中掘り杭に比べて大きな周面摩擦が期待できる。また建設発生残土は場所打ち杭に比べて約80%程度低減可能とされている。

鋼管ソイルセメント杭、例えばガンテツパイルは年々実績が増えており、平成17年度は36件の施工を実施した（新日鉄の資料から）。

#### (b) 鋼管回転杭

従来の鋼管杭工法と大きく異なり、またコンクリート杭工法の追随を許さない新しい施工方法として開発されたのが回転杭工法である。本工法は杭先端に螺旋状の羽根を設けた鋼管杭を回転圧入させることにより、地盤中に杭を貫入させる工法である。

杭先端に取付けられた羽根の形状は、写真-1に示すとおり3種類開発され、技術審査証明が取得されている。先端羽根の効果で、大きな鉛直支持力と引抜き抵抗が期待でき、また低振動、低騒音に加えてほとんど排土が伴わない特徴をもつ。

本工法は社団法人日本道路協会から改訂・刊行される「杭基礎便覧」に新たに記述された。

例えば、鋼管回転杭で先行するエコパイルの施工実績は、平成18年10月現在、土木分野で90件に達していて今後も着実な成長が見込まれるようである（新日鉄の資料から）。

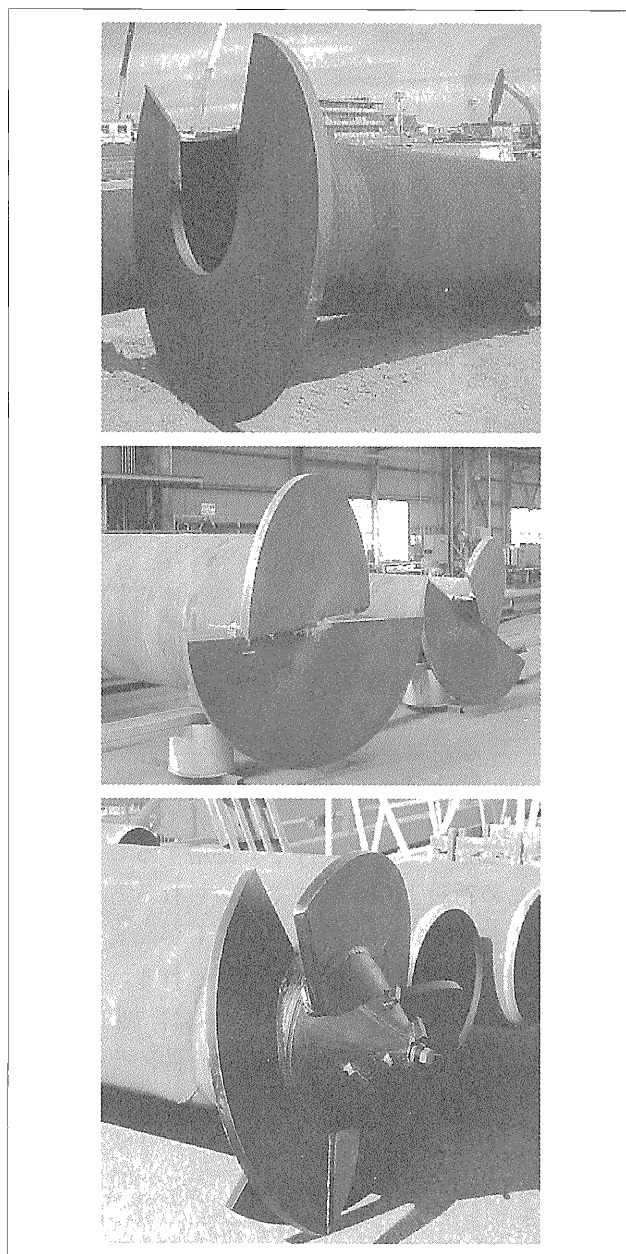


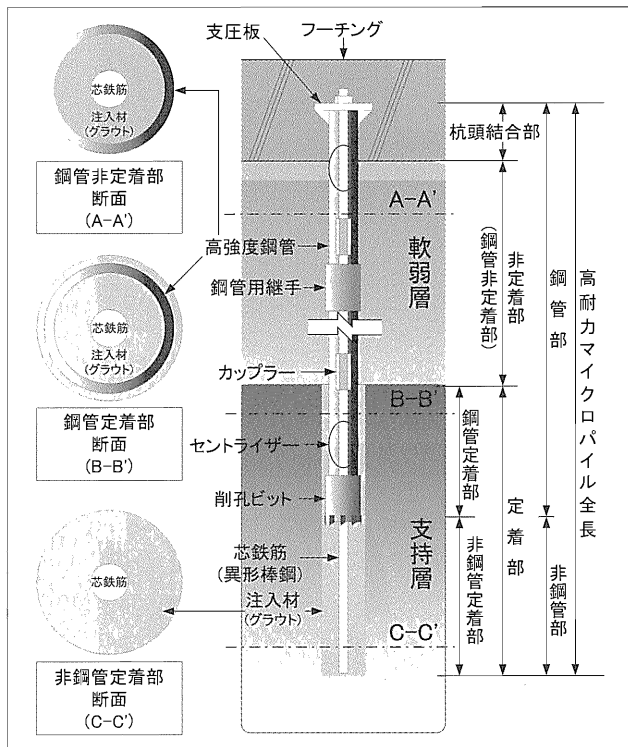
写真-1 回転杭の先端羽根形状の例

#### (2) マイクロパイル

マイクロパイルは、杭径が300mm以下の場所打ち杭、埋込み杭の総称である。高耐力マイクロパイル工法は、従来のマイクロパイルの技術にグラウンドアンカー工法の削孔技術やグラウト加圧注入技術を取入れ、芯材として太径の異形棒鋼を使用し、杭本体に高強度鋼管を用いた高耐力、高支持力のマイクロパイルを築造する（図-2）。

高耐力マイクロパイルは開発されてから着実に施工実績を積上げてきており、特に、

- ・ 施工ヤードが狭い
- ・ 埋設物により杭配置が困難
- ・ 低杭頭施工である
- ・ 運搬条件が悪い



図—2 高耐力マイクロパイルの概念図

など、様々な厳しい施工条件下で使用することができる。このため新設よりも補強で用いられる方が多い。社会資本における維持管理のウェイトが高まるにつれ本工法の出番は増加することが予想される。

高耐力マイクロパイル研究会によれば、施工実績は、平成 18 年 5 月時点で、国土交通省 10 件、その他公共機関 55 件、民間 14 件の計 79 件である。

## 5. おわりに

独立行政法人土木研究所と鋼管杭協会は共同で斜杭の適用について精力的に研究を進めてきており、斜杭

基礎の耐力と変形性能を確認するため大規模な模型実験が実施された。その実験結果から斜杭基礎は変形性能が若干劣るとしても水平抵抗を大きく評価できることが確認された。

従来、斜杭の施工に難点があったが、鋼管回転杭工法あるいはマイクロパイル工法は精度よく斜杭の施工が出来るのでこれらの工法の優位性が拡大する可能性がある。大きな球根を持つ大支持力の鋼管杭も開発されているが、特に施工管理技術に課題があると考えられる。

鋼管矢板基礎では高耐力の継手が開発され、井筒断面形状の大幅な縮小が可能となっており、コスト競争力の向上に繋がるのは間違いない。その他小型ケーソンも実用化されており、ケーソンの適用範囲の拡大が図られている。

技術開発を怠れば競争力の低下を招くことは必定であり、今後の各基礎工法の継続的な技術開発を期待したい。

### 《参考文献》

- 1) 例えば、山口 昭：特集「鋼管杭が新しい」鋼管杭を知る—経済的で環境に配慮された基礎工法材料、土木施工、pp.1-81、山海堂、2006. 2
- 2) 例えば、井落久貴ほか：鋼管杭斜杭基礎の保有水平耐力に関する研究（その 1）、第 41 回地盤工学研究発表会、2006. 7

J C M A

### 〔筆者紹介〕

岡原美知夫（おかはら みちお）  
財団法人先端建設技術センター  
専務理事

