

橋梁基礎の変遷

京都大学工学部教授 柴田 徹

1 はじめに

橋はかごや舟にたよる渡河に代って、道路の延長としての役割を担うもので、かなり古い時代から造られていたと思われる。我が国では、大阪市猪飼野付近に猪甘津橋(いかいのつばし)という名の橋が324年に架けられたと日本書記にあるようで、これが文献に現れた日本最初の橋といわれる。

明治以降は、経済の急速な発展に伴う道路整備によって、橋もいろいろな地形、地質条件のもとで造られるようになってきた。橋の上部工については、材料の開発と設計手法の進歩に促されて長大スパン橋の建設ができるようになり、最近では明石海峡大橋のように主径間長約2kmのものまである。橋の基礎は、上部工の長大化と様々な地盤に対応するため、より深い基礎や大きな基礎が求められるようになり、その形式や施工法が多種多様化してきた。

本文は、このような橋梁基礎の発展についてすべてを網羅するのではなく、比較的新しい話題を拾って述べようとするものである。

2 橋梁基礎の変遷のあらまし

橋梁基礎の変遷に関連して、歴史的に意義のあると思われる事項を年代順に並べてみた(表-1)。杭とケーソンに限っても、明確に時代分けすることは難しいが、あえてI~IVに分類して、そのあらましを以下に説明する。

(1) 1995年頃まで(区分I)

明治以降、大正に入るまでは、木杭とオープンケーソン(井筒基礎)の程度であった。松材を主体とする木杭がほとんどで、まれにオープンケーソンが利用されていた。

1891年の濃尾地震や1923年の関東大地震は、基礎に対する考え方を一変させたようである。それ以来、地震に対する設計が一般に取り入れられるようになり、1926年には、内務省土木局通達で地震設計が指示されている。この頃から、耐震対策として、深い基礎および大きい基礎の必要性が認識され、関東大地震の復旧工事として永代橋、清洲橋、言問橋などの工事にニューマチックケーソン工法が採用されている。

表-1では、打撃貫入式場所打ち杭(コンプレッソル杭)が導入されてから、騒音・振動等の公害問題がクローズアップされるまでの時代として、区

分Ⅰに分類している。ケーソン基礎の分野では、上に述べたようにオープンケーソン、ニューマチックケーソンが導入され、特に後者に関しては白石基礎工業の創立（1933年）以来、その実績が飛躍的に増大した。

表-1 橋梁基礎の年表

期区分	杭 基 礎	ケーソン基礎
Ⅰ	1907年 場所打ち杭の前身 コンプレッソル杭（衝撃式）導入	1913年 愛知県肱川橋基礎 日本最初OC 1923年 関東大震災復興工事にNCが大々的に採用
	1929年 深礎特許取得 1934年 深礎杭基礎として最初に採用 1954年 ベノト杭日本に導入	
	1955年 RC杭、JIS制定 1958年 八間堀川橋梁基礎に日本最初に鋼管杭を 採用 1960年 アースドリル杭を導入 1961年 既成コンクリート杭埋込み工法開発 1962年 琵琶湖大橋にて大口径鋼管杭採用 多柱式基礎のはしり 1963年 リバース・サーキュレーション杭導入	1959年 中部電力畑薙ダムにて日本最初の連壁
	1968年 PC杭、JIS制定 1969年 深礎杭、中央自動車道にて本格的に採用	1965年 LNGとして連壁採用多し 1969年 石狩河口橋に日本最初の鋼管矢板井筒基 礎が採用
Ⅲ	1970年 PHC杭開発	1971年 首都高速道路5号線にて日本最初の連壁 基礎採用 1972年 広島大橋基礎にPCケーソン採用
	1977年 荒川湾岸橋基礎の水中ピアケーソン採用 1978年 大島大橋基礎の鋼管杭による多柱式基礎 採用	
	1980年 大鳴門橋主塔基礎に大口径場所打ち杭に よる多柱式基礎採用	1982年 瀬戸大橋にて設置ケーソン基礎が本格的 に採用 1984年 横浜ベイブリッジに大型OC採用 1985年 阪神高速湾岸線東神戸大橋魚崎浜側主塔 基礎にフローティング・NC採用
Ⅳ	1990年 東京湾連絡橋（レインボーブリッジ）ア ンカレッジに本格的な無人掘削システム を採用したNCを採用	

(2) 1955年～1970年頃(区分Ⅱ)

騒音・振動等の公害問題が表面化したために、打撃貫入式場所打ち杭に代って機械掘削場所打ち杭(ベノト杭、アースドリル杭、リバースサーキュレーション杭)が相次いで導入された時代である。また、既成杭としてRC杭およびPC杭のJISが制定され、鋼管杭が橋梁基礎として本格的に採用されはじめた。この頃より、ニューマチックケーソンは機械掘削場所打ち杭に圧されて、施工件数が減少の傾向をみせている。

(3) 1970年～1980年頃(区分Ⅲ)

コンクリート既成杭のRC・PC杭に代って、PHC杭(Pretensioned spun High strength Concrete piles)が構造物基礎に多用されはじめた。鋼管杭や場所打ち杭は大口径化、長尺化する一方、鋼管矢板を組み合わせた鋼管矢板井筒基礎が開発され、橋梁基礎として本格的に採用されることとなった。またこの時代に、地中連続壁基礎が開発されている。

(4) 1980年以降(区分Ⅳ)

本四連絡橋にはじまり、横浜ベイブリッジ、東京湾連絡橋(レインボーブリッジ)等の長大橋梁が相次いで建設され、それらの基礎として設置ケーソン、フローティングニューマチックケーソン、大口径オープンケーソン、無人掘削システムによるニューマチックケーソン、地中連続壁基礎、多柱式基礎などの施工法が開発され完成をみた時代である。

3 特殊杭基礎の変遷

ここでは、多柱式と水中ピアケーソンをとり上げる。

(1) 多柱式基礎

水面上で基礎杭を頂版(フーチング)により結合する基礎形式である。柱材としての杭(多柱杭ともよばれている)はその自由長が長くなるため、通常は水平抵抗の大きい大口径鋼管杭を用いるが、大鳴門橋主塔基礎のように、大口径場所打ち杭が採用されることもある。

大口径鋼管杭(ϕ 1.5m)の打込み工法による多柱式基礎としては、琵琶湖大橋基礎(1962年)にそのはしりをみることができる。鋼管杭の建込み工法による多柱式基礎としては、本四連絡橋尾道・今治ルートの大島大橋基礎(1978年)があり、そこでは ϕ 3.6m大口径リバースサーキュレーション工法で削孔し、 ϕ 3.5m鋼管杭を建込む施工法を採用している。

大鳴門橋の場所打ち杭による多柱式基礎は、大口径リバースサーキュレーション工法の技術が集結されたものである。この工法による岩盤のラップ掘削技術は、関東奥多摩の小河内ダム取水立杭の掘削でほぼ完成を見、その技

術が大鳴門橋基礎に生かされたといわれている。

(2) 水中ピアケーソン基礎

水深が深い上に支持層そのものが深い場合には、締切り工法や築島工法が採用できず、また水中フローティングケーソンによるニューマチック工法も、沈設深度の関係で困難な場合がある。鋼管矢板井筒基礎の可能性はあるが、船舶航行のはげしい海域での採用は不利である。このような特殊条件下における海中（水中）基礎の施工法として開発されたのが、水中ピアケーソンである。

施工手順は、あらかじめ基礎杭（鋼管杭）を海上から打設し、打設後海底（水底）近くで切断した後に、陸上で製作したベルタイプの鋼製橋脚をクレーン船にて設置し、水中コンクリート（不分離性水中コンクリートあるいはプレパクトコンクリート）を打設するものである。

荒川湾岸橋（1977年）では、当時は不分離性水中コンクリートがまだ開発されておらず、水中ピアケーソン基礎の水中コンクリートとして、プレパクトコンクリートが用いられている。東京湾横断道路橋梁基礎（1992年）の水中ピアケーソンでは、不分離性水中コンクリートが使用されており、本基礎の施工法は、関西国際空港連絡橋基礎（1989年）において完成したといえる。

4 地中連続壁基礎の変遷

地中連続壁工法（以下連壁と略称）は、最初ヨーロッパにおいて矢板や杭の打込みが困難な砂礫や石灰岩盤を機械掘削し、コンクリートを打設して連続的な土留壁や地下壁を建設する目的で考案されたものである。その技術は、井戸や石油削孔技術をベースにしており、1950年頃から普及してきた。

我が国には、1959年にイコス工法が導入され、中部電力畑薙ダムの止水壁として初めて施工された。その後、建設会社や機械メーカーが中心になって各社独自の工法開発や技術導入が進められ、主として仮設目的の止水壁や山留め壁等に用いられてきた。

地中連壁の本体構造物への利用は、土木分野では営団地下鉄4号線方南町トンネルの側壁に用いられたのが最初とされている。建築分野では1970年代前半に、耐震壁などに連壁を利用する場合の（財）日本建築センター評定制度が発足した。この制度により、建築における連壁の本体利用に関しては、同センターの評定取得が義務づけられ、これが連壁本体利用に関する研究開発を進展させる契機ともなった。

連壁が土木構造物の基礎として本格的に採用されたのは、1971年首都高速道路5号線アンダーパス兼高架橋工事が最初とされている。本工事では連壁を閉

合断面の基礎とし、ケーソンの代替工法として利用している。1975年頃から、LNG地下タンクを対象として掘削機械の開発が進むにしたがい、施工精度や品質が飛躍的に向上した。さらに「地中連続壁基礎」という名称のもとに、エレメント間の継手を剛結とした新しい基礎構造が出現し、鉄道・道路の橋梁基礎や重要構造物の基礎に利用されるようになった。

地中連続壁基礎設計施工指針・同解説（（社）日本道路協会）によると、その定義は次のとおりである。

「隣接する地中連続壁間を継手を用いて連結し、平面形状が閉合断面になるように築造し、その頭部に頂版を設けた弾性体基礎」。

しかしながら、基礎に作用する荷重が小さい場合には必ずしも閉合断面にする必要がなく、単に連壁1枚でも構造上十分な場合もある。また剛結継手の施工は経済的に不利であることから、剛結継手をもたない単独壁を適当に組合わせた基礎形式の方が有利なこともある。

連壁基礎は従来工法であるニューマチックケーソン、オープンケーソンと比較して、地盤との密着性に優れており、任意の大きさ、断面形状の基礎を選定することができる。また軟弱地盤から岩盤まで適用範囲が広く、100m級の大深度まで施工可能である等の優れた特徴を有している。したがって、高架橋基礎、煙突・高架水槽の基礎、その他大型構造物の基礎に幅広く採用され、その実施例は200基を越えている。

多径間高架橋の構造形式を選定する場合、橋梁形式は耐震性の向上、走行性の確保、維持補修の軽減などを理由に、連続桁が基本となっている。この多径間連続桁橋の基礎工に対して、首都高速道路公団では図-1に示すような複数枚の地中連続壁を平行に配置し、頂版により結合した地中多連続壁基礎（多壁基礎と略称）を提案した¹⁾。多壁基礎の特徴としては、

- ①橋軸方向と直角方向とで、異なる支持機構および変形性状を示す。
- ②地中連壁の形状、配置および組合せ枚数などを調整することにより、基礎に求められる支持機構や変形性状に対して合理的な設計が可能になる。
- ③地中連壁は最大で1エレメント約10mまで施工可能なことから、構造上の弱点となる継手が不要となり、施工の面からも効率的である。
- ④杭基礎と比較して、平面寸法を小さくできる。

などが挙げられる。

実施例として、神奈川県道高速湾岸線（4期）・横浜市鶴見区大黒埠頭において、9径間連続桁橋にこれが採用された（1992年）。今後の地中連続壁基礎の方向を示すものとして興味深い。

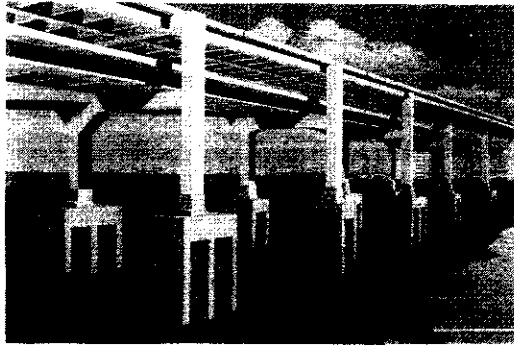


図-1 地中多連続壁基礎

5 設置ケーソン基礎の変遷

この基礎は、支持層が水面下浅い場合に水中掘削で支持盤を露出させ、陸上部で既製の鋼製ケーソン・RCケーソンを曳航あるいはフローティングクレーンにて設置・沈設し、ケーソン内に水中コンクリートを打設して水中橋脚とするものである。

設置ケーソンは、本四連絡橋児島・坂出ルート（通称瀬戸大橋）の海中基礎において、本格的に採用され完成された工法である。瀬戸大橋で経験を積んだこの工法は、その後神戸・鳴門ルートの明石大橋主塔基礎、および尾道・今治ルート来島大橋海中基礎にも若干の修正を経て採用された。表-2には本四連絡橋海中基礎における設置ケーソン工法の比較を示しており、時代とともに工法の内容が変化してきている点が注目される。

表-2 本四連絡橋・海中基礎設置ケーソン工法の比較

本四連絡橋ルート名 (橋梁基礎名)	施工年	材料・形状	海中掘削方法	海底仕上げ掘削法	ケーソン内・中詰コンクリート
児島・坂出ルート (瀬戸大橋海中基礎)	1979 ＼ 1985	鋼製・長方形	水中発破と大型グラブバケット	大口径ボーリング掘削機	プレバクトコンクリート
神戸・鳴門ルート (明石大橋主塔基礎)	1989 ＼ 1993	鋼製・円形	大型グラブバケット	平バケットとエアリフトによるロボット	不分離性水中コンクリート
尾道・今治ルート (来島大橋海中基礎)	1992 ＼ 1994	鋼製 コンクリート製 円形、長方形	同上	同上	不分離性水中コンクリートあるいはドライアップ後、気中コンクリート

6 鋼管矢板井筒基礎の変遷

近年、構造物の大型化に伴って大水深、軟弱地盤での施工を余儀なくされるケースがふえている。しかし仮締切工、築島工、ケーソンなど一連の従来工法で

は工期、工費、作業の安全性の面で困難が予想され、このような設計・施工条件下でも合理的に対応できるものとして、鋼管矢板基礎が開発された。

そのアイデアは、1930年に西ドイツのパイネ社がパイネパイルと称するBox pile（H形鋼矢板）を用いて、橋梁基礎やドルフィンを築造したのが発端である。我が国には、1960年頃に鋼矢板の利用技術の一つとして導入され、1966年にはこのこのBox pileを矢板式基礎とする金城大橋が建設された。一方、鋼管矢板を用いる鋼管矢板基礎は1964年頃から川崎製鉄(株)で開発され、3年後には大型の高炉基礎が、また1969年には石狩河口橋の基礎が初めて建設されている。

この工法に関する指針では、1981年度に日本国有鉄道(現JR)が「鋼管矢板井筒の設計施工指針(案)」を作り、また日本道路協会では1980年から指針作りの作業を進め、1984年に「鋼管矢板基礎設計指針・同解説」を作成した。

これらの指針が契機ともなって、この基礎形式の採用件数は順次増加し、最近では1,000基を越える実績を挙げ、大型橋梁基礎の一つとして欠かせないものになってきた。そして1990年道路橋示方書の改定では、「道路橋示方書・同解説IV下部構造編」に鋼管矢板基礎の章を設けて、他基礎形式と設計上の考え方の統一が図られた。

7 おわりに

本文では触れなかったが、設置ケーソンと場所打ち杭を組合せた脚付き設置ケーソン(瀬戸大橋櫃石大橋3P)や、鋼管杭とニューマチックケーソンを組合せた脚付きニューマチックケーソン等が出現しており、今後このような合成基礎をはじめとして、新しい形式や施工法が開発される可能性は十分にありうる。

国内では東京湾口、伊勢湾口、紀淡海峡等の架橋計画、国外ではジブラルタル海峡、ベーリング海峡等の海峡横断計画が進められており、橋梁はますます長大化するとともにその基礎は大型化し、かつ大水深が対象となる。したがって、従来規模の延長線上では考えられないような、全く新しいタイプ(例えば海中に浮かんでいるフローティング基礎)や施工法が開発される日も間近いものと期待される。

最後にではあるが、この稿をまとめるに当たって細井 武氏(西松建設)に多くの資料提供を受けた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 和田克哉, 菅原 聡, 若林 登; 地中多壁基礎の設計と施工、基礎工、工、Vol. 20, No. 2, pp. 46-52, 1992.