

第 88 回

鉄道構造物の 基礎の変遷

はじめに

我が国の平野部は、軟弱な地盤が厚く堆積するため構造物を構築する場合、一般的に杭基礎くわいが用いられます。代表的な基礎の種類を図1に示しました。強固な地盤（支持層とよぶ）が浅い場合、直接基礎が用いられ、支持層が地表から5m程度を超えると杭基礎やケーソン基礎などが用いられます。このうちケーソン基礎は大型基礎の一つで、橋脚と橋脚の間の距離（径間とよぶ）が、50mを超える長大橋のように用いられます。大型基礎にはこのほか、連壁基礎や鋼管矢板基礎があります。

図2は主なトピックスと、基礎工法やこれに関連する鉄道技術基準の変遷を示したものです¹⁾。基礎工法や技術基準は、建設プロジェクトの推進や震災の経験などにともなう技術の進捗により変化してきました。

ここでは、鉄道構造物の基礎の変遷について、明治以降の基準未整備期と

その後の新幹線建設時期をいくつかに分けて紹介します。

明治以降の基準未整備期¹⁾²⁾³⁾

明治以降、鉄道構造物の基礎には早くから松材を用いた木杭が用いられ、まれに煉瓦造のオープンケーソン（当時、井筒基礎とよぶ）が用いられました。その後、コンクリート製のオープンケーソンに変化します。当時、鉄道構造物の設計・施工に関わる技術は、1907年創設の帝国鉄道庁鉄道調査所が担っていました。後に鉄道院鉄道試験所、鉄道省鉄道技術研究所に改組されます。これは鉄道総研の前身となる組織です。1957年には国鉄内に構造物設計事務所が創設され、1964年には同事務所内に、基礎・土構造の技術管理を担当する「基礎・土構造ユニット」が発足します。基準未整備期の基礎の設計や施工の技術の発展は、構造物設計事務所に代表される専門部署の技術管理によってなされました。

1891年の濃尾地震や1923年の関東大震災により、鉄道も含め土木構造物に甚大な被害が発生します。これにより設計の考え方に変化が起こります。耐震設計の導入です。基礎についても杭基礎や大型基礎の必要性

が認識されます。周面地盤を緩めるオープンケーソンに代わり、井筒先端に圧縮空気を加え地下水を排除し、地盤を緩ませずに土を掘削しながら井筒基礎を埋め込むニューマチックケーソンが1923年に登場します。また、遠心力成型RC杭の登場と、施工機械であるディーゼルハンマーの導入により、従来の木杭に代わって、打ち込みRC杭が杭基礎の主流となっていきます。その後、国鉄は打ち込みRC杭以外の場所打ちRC杭として、1954年にオールケーシング工法をフランスのベノト社から導入しました（当時、ベノト工法とよぶ）。国内初の機械掘削による場所打ちRC杭の施工として、川崎発電所構内で試験杭（杭長30m、直径1.24m）を構築しています。さらに1962年にリバース工法を西ドイツのザルツギッター社から導入しました。国鉄青函連絡船の函館棧橋上屋改良工事の基礎杭（杭長52m、直径0.61m）として、ベノト工法による機械掘削も交え、リバース工法による試験杭の施工が実施されています³⁾。一方、1960年にアースドリル工法がアメリカのカルウェルド社から導入されますが、当時は孔壁崩壊防止に用いるベントナイト安定液の品質に課題があり、施工実績は増えませんでした。これらの一連の鉄道建設の土工・基礎工の機械化技術の導入に貢献したのが、1949年創設の国鉄東京操機工事事務所でした。

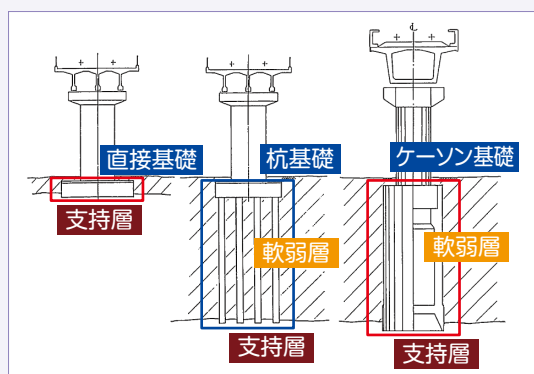


図1 代表的な基礎の種類

世紀	主なトピックス	基礎に関する鉄道の技術基準	基礎工法の技術開発	杭基礎		
				既製杭の種類	既製杭工法	場所打ちRC杭工法
19 後半	'72 夕留-横浜間開業 '89 東海道線開業 '91 濃尾地震		'94 鋼管杭			
20 前半	'07 帝国鉄道庁鉄道調査所創設 '23 関東大震災 '42 鉄道省鉄道技術研究所改称 '45 終戦 '49 日本国有鉄道 '49 東京操機工事事務所発足	基準未整備 '17 土工その他示方書標準(初の施工標準) '47 土工工事標準示方書	'00 オープンケーソン工法 '15 八角形RC杭 '30 木田式深礎工法 '23 ニューマチックケーソン工法 '34 遠心力成型RC杭	木杭 PC杭	打込み工法	ベアスタル杭
20 後半	'57 構造物設計事務所発足 '64 新潟地震 '64 東海道新幹線(東京-新大阪)開業 '64 構造物設計事務所内に「基礎・土構造ユニット」発足 '68 十勝沖地震 '72 山陽新幹線(新大阪-岡山)開業 '74 石油危機 '75 山陽新幹線(岡山-博多)開業 '78 宮城県沖地震 '82 東北新幹線(大宮-盛岡)開業 '82 上越新幹線(大宮-新潟)開業 '83 日本海中部地震 '85 東北・上越新幹線(上野-大宮)開業 '87 国鉄分割民営化 '91 東北・上越新幹線(東京-上野)開業 '92 山形新幹線(福島-山形)開業 '95 兵庫県南部地震 '97 秋田新幹線(盛岡-秋田)開業 '97 北陸新幹線(高崎-長野)開業	'68 土構造物の設計施工指針(案) '69 土木工事標準示方書 '69 場所打ちコンクリートグイの設計施工指針(案) '74 建造物設計標準(基礎構造物) '79 耐震設計指針(案) '81 中掘り先端根固め工法設計施工指針(案) '81 鋼管矢板井筒の設計施工指針(案) '86 建造物設計標準(基礎構造物)改定 '97 鉄道構造物等設計標準(基礎構造物) '99 鉄道構造物等設計標準(耐震設計)	'53 ディーゼルハンマー導入(国鉄) '54 ベント工法導入(国鉄) '55 RC杭JIS制定 '60 アースドリル導入(首都高) '61 プレボーリング工法 '61 拡底場所打ち杭(リバース工法) '62 PC杭 '62 リバース工法導入(国鉄) '63 鋼管杭JIS制定 '67 PC杭JIS制定 '67 PHC杭 '71 SL杭(鋼管杭) '72 SC杭 '76 鋼管矢板基礎(国鉄) '79 連壁基礎(国鉄) '80 中掘り拡大根固め工法 '82 PHC杭JIS制定 '83 プレボーリング拡大根固め工法 '87 SL杭(コンクリート杭) '87 PHC杭, PC杭, RC杭JIS改定 '91 SENTANパイル工法 '95 鋼管ソイルセメント杭 '98 高品質アースドリル杭工法	PC・PHC杭 鋼管杭 SC杭 プレボーリング工法 中掘り工法 回転圧入工法	オールケーシング杭 アースドリル杭 リバース杭 深礎	
21 前半	'02 東北新幹線(盛岡-八戸)開業 '04 九州新幹線(新八代-鹿児島中央)開業 '04 新潟県中越地震 '10 東北新幹線(八戸-新青森)開業 '11 東北地方太平洋沖地震 '11 九州新幹線(博多-新八代)開業 '15 北陸新幹線(長野-金沢)開業 '16 東北新幹線(新青森-新函館北斗)開業 '16 熊本地震	'12 鉄道構造物等設計標準(基礎構造物) '12 鉄道構造物等設計標準(耐震設計)	'01 先端ブロード場所打ち杭工法 '01 回転杭 '03 BCH工法 '04 SC杭JIS制定 '06 シートパイル基礎			

図2 主なトピックスと基礎工法の変遷(参考文献1)を加筆・修正したもの)

東海道新幹線建設期¹⁾

1959年に東海道新幹線の建設が始まります。基礎工法は、ディーゼルハンマーによる遠心力成型RC杭の打ち込み杭工法が主流でした。柳沢高架橋(東京起点120k580m)では、打ち込み鋼管杭を斜杭として用いています(図3)。一方、長大な河川橋りょうの

基礎には(ニューマチック、オープン)ケーソン基礎が用いられています。

山陽新幹線建設期¹⁾

1967年に山陽新幹線(新大阪・岡山・博多間)の建設が始まりました。杭基礎は遠心力成型のRC杭やPC杭による打ち込み杭工法が基本でしたが、当

時、沿線での騒音や振動問題が顕著化してきます。このため、場所打ちRC杭(オールケーシング工法、リバース工法、深礎工法)が本格的に使用されることとなります。しかしながら、場所打ちRC杭の支持力に関する信頼性は低かったようで、沈下制限を有するラーメン高架橋の基礎杭への適用は慎重でした。一方、長大橋りょうの基礎

では、地盤条件や径間に応じて標準寸法が定められたニューマチックケーソンが、標準基礎形式として採用されました(たとえば、図4)。

東北・上越新幹線建設期¹⁾

1971年に東北新幹線(上野・大宮・盛岡間)・上越新幹線(大宮・新潟間)の建設が始まります。標準的な基礎形式として、直接基礎、打ち込みRC杭、場所打ちRC杭が用いられ、場所

打ちRC杭はオールケーシング工法とリバース工法がほぼ二分しました。

圧気環境下での人力掘削のニューマチックケーソンは、労働環境が劣悪な上、施工環境に制約がありました。国鉄では、1970年代からこれに代わる工法として、連壁基礎や鋼管矢板基礎の開発に取り組みました。東北新幹線小野地区の高架橋群(東京起点368k972m付近)の基礎に、22基の鋼管矢板基礎が導入されました(図5)。一方、東北新幹線飯坂街道架道橋(東京起点

369k000m)の基礎として、連壁基礎が採用されました。その後、東北新幹線王子南部架道橋(図6)、新河岸川橋りょう、第一中山道架道橋、

笹目川橋りょうの5橋りょう21基に連壁基礎が採用されています。

整備新幹線建設期¹⁾

1989年に北陸新幹線(高崎・長野間)の建設が始まります。高崎・長野間は振動・騒音問題および地盤中の転石の存在から、場所打ちRC杭(オールケーシング工法)がおもに用いられました。中間層に巨礫きょれきが出現する場合は多く、この場合、揺動式オールケーシング工法では掘削困難となるため、全周回転式オールケーシング工法に切り替える場合もありました。以降の整備新幹線構造物の杭基礎といえば、場所打ちRC杭(オールケーシング工法)が主流となっていきます。

第二千曲川橋りょう(二径間連続PC



図3 柳沢高架橋の打ち込み鋼管杭の施工⁴⁾



図4 神崎川橋りょう
(基礎形式：ニューマチックケーソン)⁵⁾

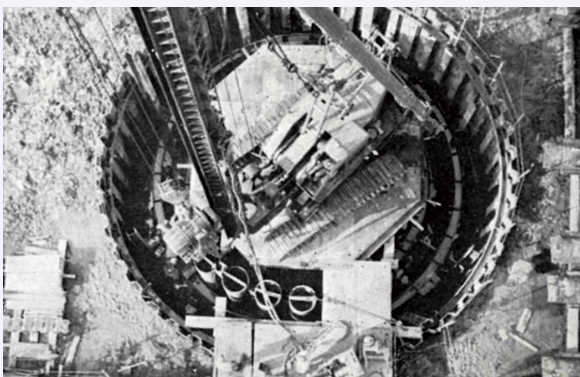
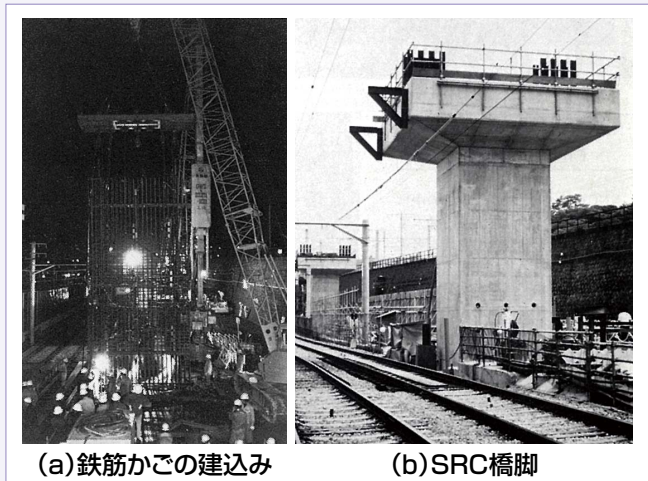


図5 小野地区の高架橋群の鋼管矢板基礎の施工⁶⁾



(a)鉄筋かごの建込み (b)SRC橋脚
図6 王子南部架道橋の施工(基礎形式：連壁基礎)⁷⁾



図7 第二千曲川橋りょう(基礎形式：大口径深礎)⁸⁾



図8 高城高架橋の地盤改良部
(基礎形式：地盤改良併用の直接基礎)⁹⁾



図9 熊本地区の高架橋群の回転杭の施工¹⁰⁾

斜張橋、橋長270m)では、基礎が河川中央に位置するため、河積阻害率を最小とする大口径深礎(直径10.0m, 深礎長さ12.0m)が初めて採用されました(図7)。

1991年に東北新幹線(盛岡・八戸・新青森間)・九州新幹線(博多・新八代・鹿児島中央間)の建設が始まります。基礎形式は、支持地盤が浅い順に直接基礎(地盤改良併用を含む)、場所打ちRC杭(オールケーシング工法)を標準としました。一部の長大橋りょうの基礎には深礎が用いられました。

九州新幹線高城高架橋(新八代起点84k760m, 全長780m)では、支持層が深さ0~20mまで変化することから、直接基礎(地盤改良併用を含む)、場所打ちRC杭を使い分けました。地盤改良併用の直接基礎は、東北新幹線(盛岡・八戸間)で最初に採用して以来、支持層が比較的浅いが、直接基礎の構築には掘削・仮設によりコスト増となる場合の標準基礎形式となりました(図8)。

九州新幹線島田北高架橋(博多起点126k636m~129k315m)は、液状化地盤上で支持層が地表面から30mの位置にあることから、低騒音・低振動・無排土での施工が可能で、杭先端の羽根の引抜き抵抗力や高いじん性能が期待できる回転杭を導入しました。その後、九州新幹線熊本地区の高架橋群の基礎に回転杭が用いられています(図9)。

1998年に北陸新幹線(長野・金沢間)

の建設が、2005年に北海道新幹線(新青森・新函館^{ほこたて}北斗間)の建設が始まります。基礎形式は、東北新幹線(八戸・新青森間)や九州新幹線(博多・新八代間)の考え方を基本とし、直接基礎(地盤改良併用を含む)、場所打ちRC杭(オールケーシング)、鋼管ソイルセメント杭、回転杭、深礎、ケーソン基礎(ニューマチック、圧入併用オープン)、鋼管矢板基礎から選定しました。日本海側の被圧地下水環境では、鋼管ソイルセメント杭や回転杭が限定的に用いられ、地下水が飲料水利用される地区では、回転杭が用いられることになります。場所打ちRC杭が使用できない特殊な施工環境が存在しました。また、周辺地盤の緩み防止にも効果が期待できる、圧入併用オープンケーソンや、小径のニューマチックケーソンも出現し導入されました。

おわりに

鉄道構造物の基礎について、明治以降、現在の整備新幹線建設期までの基礎の変遷を紹介しました。東北新幹線(八戸・新青森間)や九州新幹線(博多・新八代間)の建設期で、地盤条件・施工環境に応じた基礎形式の選定方法がほぼ確立したといえます。

2016年9月に開催された政府主催の未来投資会議では、建設現場の生産性

を2025年までに2割向上を目指すことが示されています。基礎工法も含めた建設現場の飛躍的な生産性向上のためには、省力化・省人化技術の導入や、鉄道の技術基準も含め、新しい技術の導入のしやすい環境整備が求められています。

(神田政幸／構造物技術研究部 部長)

文献

- 1) 神田政幸：新幹線橋梁の基礎の変遷、橋梁と基礎、Vol.52, No.8, Ser. No.620, pp.47-52, 2018
- 2) 構設史編集研究会編：鉄道構造物を支えた技術集団—国鉄構造物設計事務所の足跡—、日本鉄道施設協会、2009
- 3) 逢坂敏夫：建物基礎としてのリバースサーキュレーション工法及び鋼管杭工法の施工例について、技術パンフレット第5号、土質工学会北海道支部、pp.1-11, 1965
- 4) 日本国有鉄道構造物設計事務所：グラフ新幹線柳沢橋梁鋼管くい基礎、構造物設計資料、No.3, 1965
- 5) 日本国有鉄道大阪新幹線工務局：山陽新幹線新大阪・岡山間建設工事誌、日本鉄道施設協会、p.289, 1972
- 6) 日本国有鉄道構造物設計事務所：グラフ鋼管矢板井筒 東北新幹線小野地区、構造物設計資料、No.54, 1978
- 7) 日本国有鉄道構造物設計事務所：グラフ連壁剛体基礎とSRC構造の橋脚—東北新幹線王子南部高架橋—、構造物設計資料、No.77, 1984
- 8) 日本鉄道建設公団北陸新幹線建設局：グラフ第二千曲川橋梁、北陸新幹線工事誌(高崎・長野間)、1998
- 9) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構鉄道建設本部九州新幹線建設局：九州新幹線工事誌(新八代・鹿児島中央間)、p.209, 2005
- 10) 白石秀徳、澤石正道、山下晃、飛松直樹：九州新幹線熊本地区における狭隘箇所の高架橋の回転圧入鋼管杭の設計・施工、基礎工、Vol.39, No.8, pp.83-85, 2011