

横浜ベイブリッジの基礎構造

平林 泰明*1・松本 修一*2

横浜ベイブリッジは平成元年に供用が開始され24年が経つ。本橋で採用した多柱式基礎の施工では、PCバージ、プレキャストケーソンなど、プレキャスト部材を積極的に利用した。PCバージは多柱式基礎フーチングの一部をドライドックで製作したもので、海上を曳航して基礎位置に据え付け、作業台、型枠として利用したのち、コンクリートを打設して本体構造とした。多柱式基礎の柱は、オープンケーソン工法で沈設したが、第一ロッドの27mはヤードで製作し、3000tクレーン船で吊り込んだ。多柱式基礎の柱、フーチングにもプレストレスを導入して基礎としての一体化を図るとともに、効果的にひび割れを制御した。

キーワード：多柱式基礎、PCバージ、プレキャストケーソン、ドライドック

1. はじめに

横浜ベイブリッジは、東京湾岸道路および横浜環状道路の一部を構成する重要な橋梁として平成元年に供用が開始され、今年で24年が経つ。本橋の基礎構造である多柱式基礎は、部材をプレキャスト化して高い施工精度と品質を確保するとともに、プレストレスを導入して耐久性を高めた。腐食環境にある海中構造物に積極的にプレストレストコンクリートを用い、その利点を最大限活用した例は少ない。

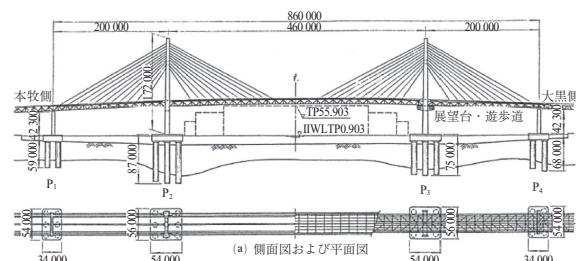


図 - 1 横浜ベイブリッジの全体図

本稿は横浜ベイブリッジの基礎構造について、当時を振り返り、創意工夫した技術をあらためて紹介するものである。

2. 横浜ベイブリッジの概要

横浜ベイブリッジは、横浜港港口部の国際航路を横断する中央径間460m、側径間200m、橋長860mの3径間連続鋼斜張橋である。主桁はトラス形式のダブルデッキ構造を採用し、上層は横浜市道高速湾岸線、下層は国道357号線が通る。桁下高は大型客船が航行できるよう海面上55mを確保している。基礎位置は水深14mの海中にあり、海底面以下にはN値3以下の軟弱な沖積粘土層が厚く堆積している。支持層である土丹層は海底面下30～60mの深さに存在し、起伏はかなり激しい。このような条件下において、基礎形式として多柱式基礎を選定し、PCバージを利用した施工法を採用した。

3. 基礎形式の検討経緯

横浜ベイブリッジの基礎構造は、昭和50年度に設置された「大規模海中基礎構造の施工に関する調査研究委員会」（大橋昭光委員長）において本格的な検討が開始され、その後、「横浜港横断橋下部構造の設計施工に関する調査研究委員会」（浅間達雄委員長）において、詳細な設計施工法の検討が進められた。支持層が深く、軟弱地盤が厚く堆積している海中基礎として、ケーソン基礎、鋼管矢板井筒基礎、多柱式基礎などの基礎形式が検討された。

ケーソン基礎は、オープンケーソン工法によるドーム式ケーソン基礎、ニューマチックケーソン工法によるRCケーソン基礎などが検討された。ケーソン基礎は傾斜している土丹層の低い位置に基礎底面を置く必要があり、基礎が深くなる。側面は軟弱な粘性土であるため直接基礎に近い挙動を示し、地震時の安定条件を満足させるためには非常に大きな平面寸法が必要になった。

鋼管矢板井筒基礎は、鋼管矢板を止水壁とし、コンクリートの逆巻工法により躯体の側壁を製作するもので、土丹



*1 Yasuaki HIRABAYASHI

現職 首都高速道路(株)
本社保安・交通部長

当時 首都高速道路公団
神奈川建設局
特殊設計課 技師



*2 Shuichi MATSUMOTO

首都高技術(株) 執行役員

(株) オリエンタルコンサル
タンツ
本社 技術第二部 課長

層の傾斜に合わせて基礎底面を構築できるが、基本的にはケーソン基礎と同様、直接基礎に近い形式で、平面寸法もかなり大きなものとなった。

多柱式基礎は、比較的大径の柱をフーチングで結合した基礎形式で、自重はケーソン基礎に比べかなり軽くなるため、基礎の規模を縮小することが可能である。とくに基礎底面の支持層の掘削面積は、ケーソン基礎に比べはるかに小さい。しかしながら可撓性の高い構造であるため、その特性を考慮した安定照査、部材断面照査が必要になった。

4. 多柱式基礎の構造概要

支持層の傾斜に対応できる基礎形式として、多柱式基礎を選定し、詳細な検討を進めた。国際航路に隣接しているために架橋位置における施工スペースに制約を受けること、水深 14 m の海中に建設するため締切などの止水が必要であること、軟弱な沖積粘土層が厚く堆積していること、支持層である土丹層は深い位置にあることなど、架橋位置の条件に適合できる構造を検討した。

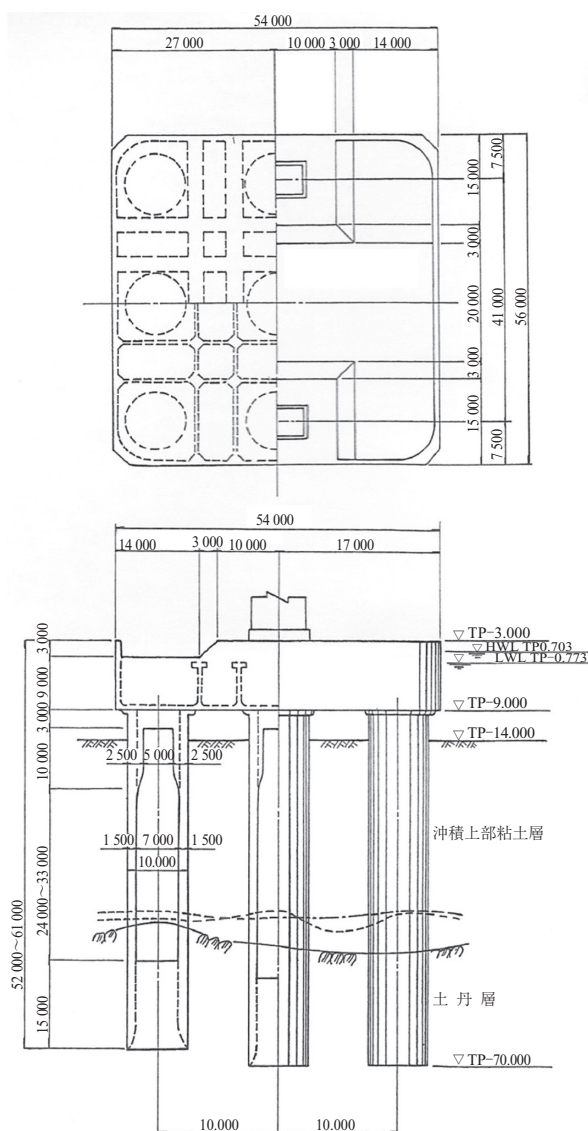


図 - 2 多柱式基礎の構造 (主塔基礎)

多柱式基礎の弱点であるトップヘビーな構造をできるだけ解消するため、フーチングは、柱径より薄い 9 m の厚さとするともに、その位置を低くし大部分を海中に置いた。柱は直径 10 m の太径とし、柱間隔を柱径の 2 倍まで狭めて、フーチングの縮小化を図った。このため、フーチングは剛体として扱わず、立体の骨組構造にモデル化して安定の照査、部材応力度照査を行った。柱間隔を狭めたことにより群ぐい効果が考えられたため、最前列を除く後列の柱については柱前面地盤水平ばね値を基準ばね値の 1/2 に低下させたケースについても照査を行った。

5. PC バージの構造・施工

5.1 PC バージの役割

バージとは荷物を積み平底の船舶のことで、エンジンなどは積んでおらずタグボートなどにより牽引されながら航行するものである。鋼製のものが多いが、プレストレストコンクリートで作られたものを PC バージと呼ぶ。

基礎位置の海上では、施工時に大きなスペースが確保できないため、多柱式基礎フーチングの一部をあらかじめドライドックで PC バージとして製作し、海上を曳航して現地に据え付ける工法を採用した。この PC バージは、柱をケーソン工法で沈設するための作業台としても利用した。ケーソンの沈設には沈下力が不足するため、圧入が必要であった。この圧入荷重は最大で 3 600 t であり、作業台の自重で反力をとらせた。

PC バージは、プレストレスの導入によりひび割れの発生を制御することができるため、フーチング本体構造の一部として利用した。これにより多柱式基礎のフーチングは、プレストレスが導入された比較的小さい部材で側面と底面が覆われた構造となる。表面のひび割れ発生を極力抑えることが可能で、大型海中構造物に対し合理的に耐久性を高めることが可能となった。

5.2 PC バージの構造

PC バージは、図 - 3 に示すように、多柱式基礎フーチングの外形寸法をもち、側壁、底板、隔壁より構成される。多柱式基礎の柱を沈設する位置には円形の開口部を設け、曳航時には軽量コンクリート製の仮蓋をして浮力を確保した。

PC バージは、ひび割れを許容するⅢ種プレストレストコンクリートとして設計を行った。作業台として利用する場合はひび割れ幅を 0.2 mm に制御し、多柱式基礎フーチングとして本体構造の一部となる場合はひび割れ幅を 0.15 mm に制御した。PC 鋼材は、水平方向には SWPR 7B19 φ 15.2 (側壁、底板) と SWPR 7B12 φ 15.2 (隔壁) を約 1.0 m 間隔で配置し、鉛直方向には SBPR 80/95 φ 32 アンボンド PC 鋼棒を約 1.0 m 間隔で配置した。導入したプレストレス量は 20 ~ 40 kgf/cm² と比較的小さいが、多柱式基礎フーチングの耐久性を高めるためには多大な効果がある。さらに海中構造物としての耐久性を高めるため、フーチングの外面になる部分は鉄筋の純かぶりを 7 cm 以上確保するとともに、PC 鋼材の定着部はすべてフーチングの中詰めコンクリート内に埋まるように配置した。

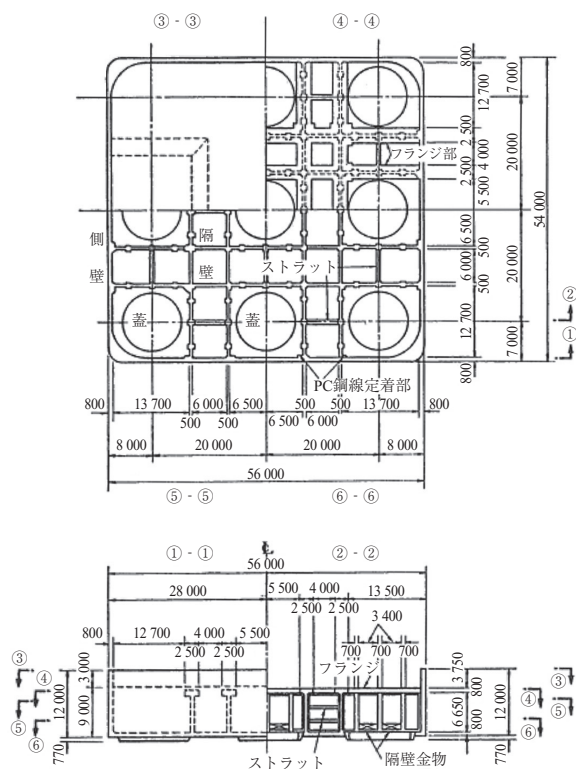


図 - 3 PC バージの構造

5.3 ドライドックにおける施工

当初、PC バージは造船ドックにおいて一括施工し、海上を曳航するものとして計画した。しかしながら、喫水が7m 程度必要であり、製作できる造船ドックがかぎられてしまうこと、海上を長距離曳航するため天候によるリスクが大きいことなどを考慮し、ドライドックを架橋位置に近い横浜市金沢区幸浦に新設することになった。ドライドック渠口部は水深が5.5 m であるため、PC バージの喫水は5.0 m に制限された。このためPC バージを水平に2分割し、ドライドックでは一次施工分として曳航に必要な剛性を保持する高さまで製作し、残りの二次施工分は、基礎位置の海上で浮上させたままコンクリートを打ち足すものとした。

ドライドック内で製作される PC バージに要求された性能は以下のとおりである。

- ① 曳航時の喫水は 5.0 m 以下とする
- ② 側壁部は海上における施工時の乾舷を 3.0 m 以上とする
- ③ 隔壁は曳航時の波高 2.0 m（波長＝バージ長）に耐える耐力と剛性を保持する

5.4 海上における二次施工

基礎位置の海上に浮かせたまま、二次施工として側壁 3.75 m、隔壁 2.85 m のコンクリートを打ち足し、PC バージを完成させた。PC バージに配置した PC 鋼材を図 - 4 に示す。ドライドック内で施工した一次施工の断面には、曳航時の波力により隔壁上側に引張応力が発生するため、これに対応する最小限の PC 鋼材を配置した（一次プレストレス）。残りは海上においてコンクリートを打設したの

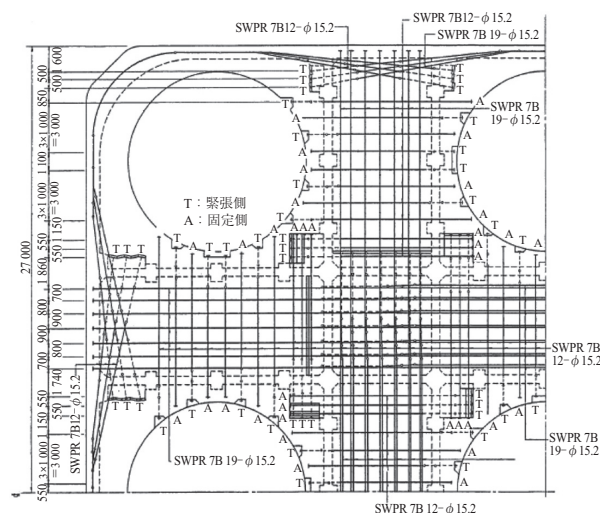


図 - 4 PC バージの PC 鋼材配置 (底版)

ちにプレストレスを導入し（二次プレストレス）、二次施工断面にも有効にプレストレスが導入されるよう配慮した。この海上施工は3カ月を要し、PCバージの施工では一番不安定な状態となるが、運悪く側壁コンクリート打設前に大型の台風が直撃した。浮遊状態では、うねりによるローリング、ピッチングで仮支持杭に衝突する危険があるため、側壁に高さ1.2mの鋼製仮遮水壁を設置し、PCバージ内に注水をして仮支持杭上に沈設した。このときの側壁の高さはTP-0.75mであり、PCバージ本体は完全に水没した状態となった。PCバージ本体は台風の被害は免れたが、仮遮水壁は波浪で破損した。このままだとPCバージは漁礁にしかかなりえないため、仮遮水壁を補修したうえで干潮時を見計らって排水し、潮位が回復するまでの間に浮上させた。施工時の台風などのように確率的に小さいとはいへ起こり得る事象に対しては設計時点で十分な対策を立てておくべきであった。

5.5 構造系の変化によるクリープの影響

PC パージはドライドック内と海上において分割施工され、それぞれプレストレスが導入された。このため構造系の変化に伴い材齢差が生じ、クリープによる二次応力が発生する。これらの影響も考慮した解析が必要となったため、図 - 5 に示す三次元有限要素モデルにより解析を行った。クリープの影響は次式で考慮した。

$$M_{\phi} = \{M_0 - (M_1 + M_2)\} (1 - e^{-\phi}) \quad (1)$$

ここに M_ϕ : クリープによる応力の変化量

M_0 : 最終構造系を一度に施工すると仮定した場合の持続荷重による応力

M_1 : 最終構造系になる前の構造における持続荷重による応力

M_2 : 最終構造系において、最終構造系になる前の持続荷重より増加した分の持続荷重による応力

ϕ : 最終構造系が完成したのちの各部材におけるクリープ係数の平均値

最終構造系のモデルで M_0 , M_1 を解析し, ドライドック

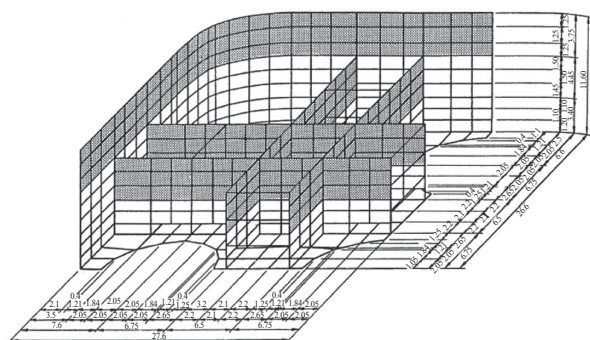


図 - 5 PC バージの 3 次元解析モデル

内の一次施工時のモデルで M_2 を解析した。それらの結果を式 (1) により合成し、 M_ϕ を求める手法をとった。当時これらの解析は、大型コンピュータを用いなければならなかった。今ではコンピュータも解析ソフトも進歩しているため、PC バージの全体モデルをスペックの高いパソコンで解析ができる。しかも解析ソフトには段階施工を考慮できるものもある。便利にはなったが、原理原則に基づいたモデル化技術や創意工夫を忘れてはならない。

5.6 フーチングの応力

多柱式基礎のフーチングは、プレストレスが導入された PC バージと中詰コンクリートとの合成断面になる。合成断面の一体化を目的とし、フーチングの水平方向に SWPR7B19 $\phi 12.7$ の PC ケーブルを配置し、平均 6 kgf/cm^2 のプレストレスを導入した。これらは、あらかじめ PC バージの側壁に PC 鋼材の固定定着具を埋設しておき、フーチングの中央部に接続のためのピットを設け、両端から引きよせた PC ケーブルをピット内でカップリングしながらプレストレスを導入したものである。フーチングの曲げ応力度は以下のように算定した。

- ① ねじり力は中立軸からの距離に比例するものとするが、PC バージに導入されているねじり差を考慮する。
- ② コンクリートの引張強度は無視する。

6. 基礎柱の構造・施工

多柱式基礎の柱頭部は、地震時において曲げ引張応力が発生する。これに対処するため、柱頭部の壁厚を 2.5 m に拡張し、外縁に D51 を 2 段配置するとともに PC ケーブル (SWPR7B $\phi 12.7$) 92 本を配置して軸圧縮応力 33 kgf/cm^2 与えた。これらについては、高軸圧縮力下で曲げとせん断の繰返し载荷を受ける円環柱の模型実験を行い、柱頭部の拡張の必要性和、プレストレスを導入することにより、復元力がきわめて良好な性能を示すことを確認した。

多柱式基礎の柱は、先端部の 27 m を大黒埠頭の製作ヤードでプレキャストケーソンとして製作し、 3000 t クレーン船で架橋位置に曳航し、PC バージを作業台として沈設した。その上部には 5 m ロットの場所打ちコンクリートを打設し、オープンケーソン工法により最大 86 m の深さまで到達させた。厚く堆積した沖積粘土層はクラムシェルとバケットで掘削し、支持層である土丹層は、新たに開発した水中アーム式掘削機を用い有効根入れ長 12 m 以上を確

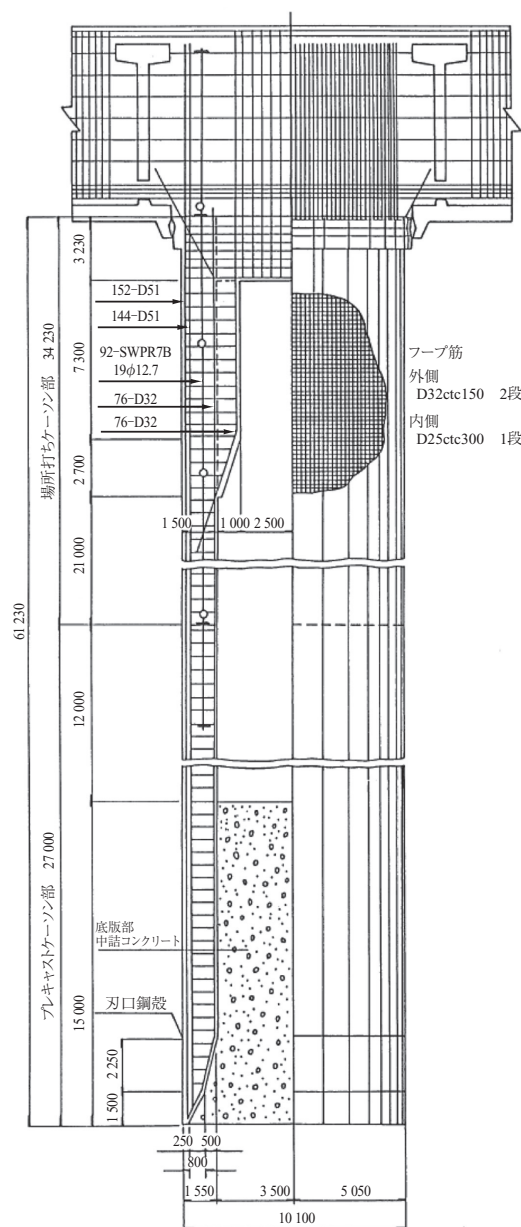


図 - 6 基礎柱の鋼材配置

保するまで掘削した。自重だけでは沈下力が不足するため、PC バージ上に設置した加圧桁を用いて圧入した。

7. おわりに

横浜ベイブリッジの基礎工事は昭和 56 年に着工されて以来、無事故無災害でその工事を終えている。大規模な海中構造物としてプレキャスト化を進めたことがその大きな要因であると認識しているが、その背景には、この工事の計画・設計・施工に携わった大勢の技術者の技術力と創意工夫と熱意があった。筆者らがこのプロジェクトの計画・設計・施工管理に携われたことを誇りに思うとともに、指導していただいた諸先輩、協力していただいた関係者の方々に、あらためて感謝したい。

【2012 年 9 月 2 日受付】