

横浜港横断橋（横浜ベイブリッジ）ができるまで

Construction of Yokohama Bay Bridge

くら 倉 ばやし 林 みのる 稔* もり 森 かわ 河 ひまし 久**

1. まえがき

近年、大都市周辺の開発が進み、比較的地盤の悪い沿岸地帯にも都市機能が移りつつある。それに伴い交通網の整備が進められ、航路、河川および運河を交差する部分には大規模な橋梁が建設されている。横浜においても、世界最大級の斜張橋となる横浜港横断橋(通称横浜ベイブリッジ)の建設が進められている。架橋地点は横浜港内であり、軟弱層が厚く堆積し、しかも支持層は起伏に富んでおり、橋梁基礎の構築にとっては極めて条件の悪い場所である。

本文では、地盤の悪い場所に大規模海中橋梁基礎を建設している例として横浜港横断橋を取り上げ、その計画、調査、設計および施工について紹介する。

2. 計画

2.1 位置

横浜港横断橋は図-1に示すように、東京湾環状道路の一部を構成すると共に横浜市高速道路網および首都高速道路網の一部をも構成し、横浜港の本牧ふ頭と大黒ふ頭を結び、国際航路を跨ぐ主要な構造物である。東京湾環状道路は、東京湾を取り巻く神奈川県、東京都、千葉県の湾岸線沿いに主として埋立地を連ねながら、神奈川県横須賀市から横浜市、東京都、千葉市を経て富津市に至る延長約160kmの「東京湾岸道路」と、浦賀水道を横断して横須賀市と富津市を連絡する延長約10kmの「湾口部横断道路」、および東京湾の中央部で川崎市と木更津を結ぶ延長約15kmの「東京湾横断道路」の3つの部分からなる東京湾を取り囲む8字形の道路であり、東京外郭環状道路および東関東自動車道等に連係して全国的な幹線道路網を構成するとともに、首都圏における基幹的な道路網の中核となる路線である。

2.2 構造規格および設計諸元

横浜港横断橋の構造規格および設計諸元は下記のようなものである。

- ① 道路規格：上路 第2種1級
下路 第3種1級
- ② 車線数：上路 6車線

下路 6車線

- ③ 設計速度：80 km/h～100 km/h
- ④ 設計荷重：TL-20～TT-43
- ⑤ 橋の等級：1等橋
- ⑥ 橋長：860m
- ⑦ 支間割：200m+460m+200m
- ⑧ 橋種：上部工 3径間連続トラス斜張橋（鋼床版ダブルデッキ形式）

下部工 多柱基礎

横浜港横断橋の全体一般図を図-2に示す。

3. 調査

3.1 調査経緯

横浜港横断橋の調査は、昭和37年度から東京湾環状道路の一環として建設省において始められている。横浜港横断橋の着工までの経緯は下記のようなものである。

- ① 昭和37年 東京湾環状道路の調査開始
- ② 昭和39年 横浜市港湾局を中心に横浜港横断橋の調査開始
- ③ 昭和44年 建設省が横浜市より調査資料を引き継ぎ、調査開始
- ④ 昭和47年 建設省において斜張橋として技術検討開始
- ⑤ 昭和52年 都市計画決定
- ⑥ 昭和54年 首都高速道路公団に基本計画の指示
首都高速道路公団が建設省より引き継ぐ
- ⑦ 昭和55年 工事着工

3.2 調査内容

調査としては、経済調査のように道路網として実施するものを含め、下記に示す種々な内容の調査を実施している。

- ① 経済調査（道路網の一環）
- ② 自然条件調査（気象、海象、地震および船舶航行）
- ③ 地質調査（実施したボーリング本数40本）
- ④ 測量調査
- ⑤ 路線調査
- ⑥ 上部工設計調査（上部工の比較検討）
- ⑦ 下部工設計調査（下部工の比較検討）
- ⑧ 施工調査（アーム式水中掘削機の開発）
- ⑨ 環境影響調査

*首都高速道路公団神奈川建設局横浜港横断橋工事事務所 所長

**首都高速道路公団神奈川建設局設計課 課長補佐

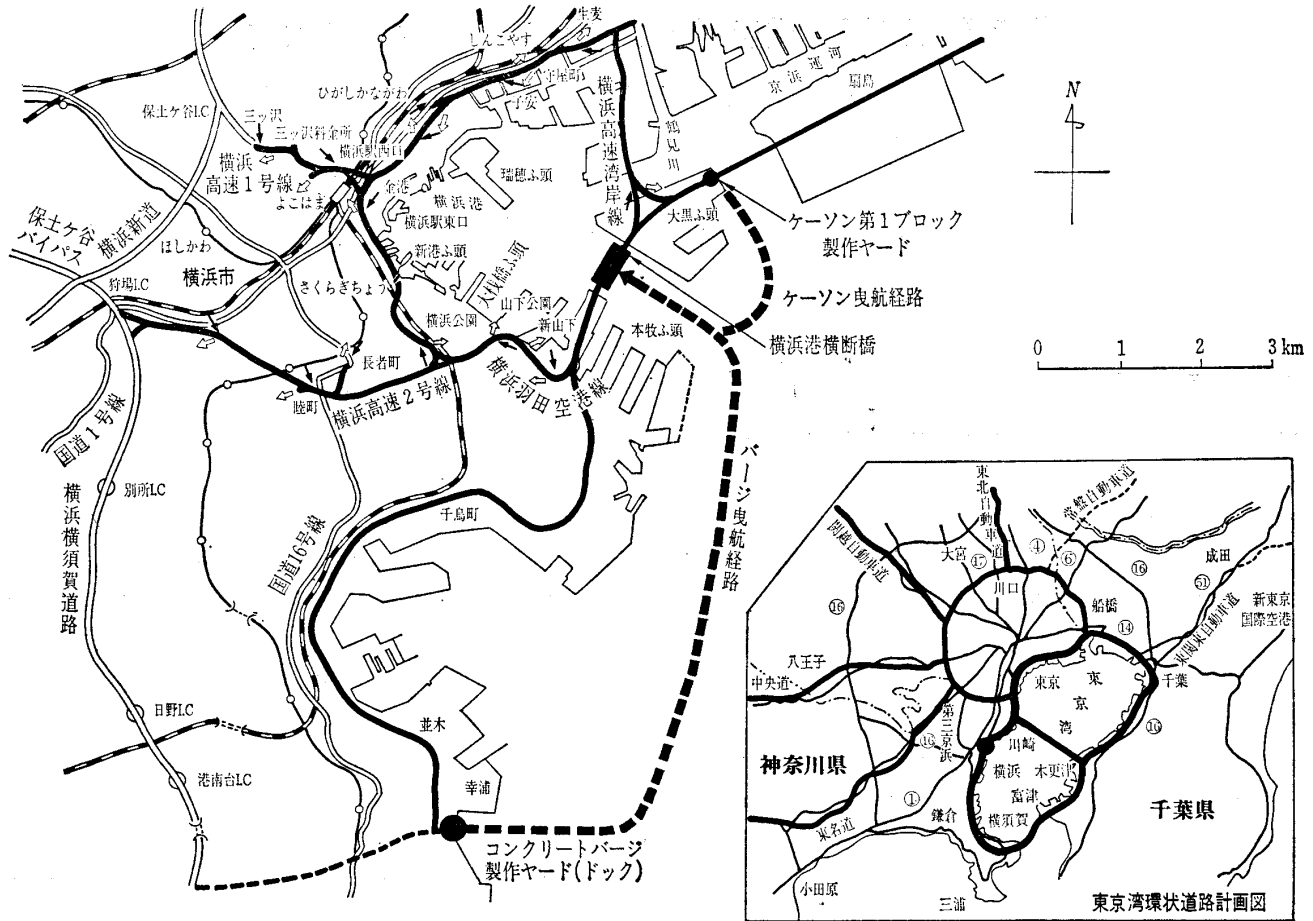


図-1 位置図

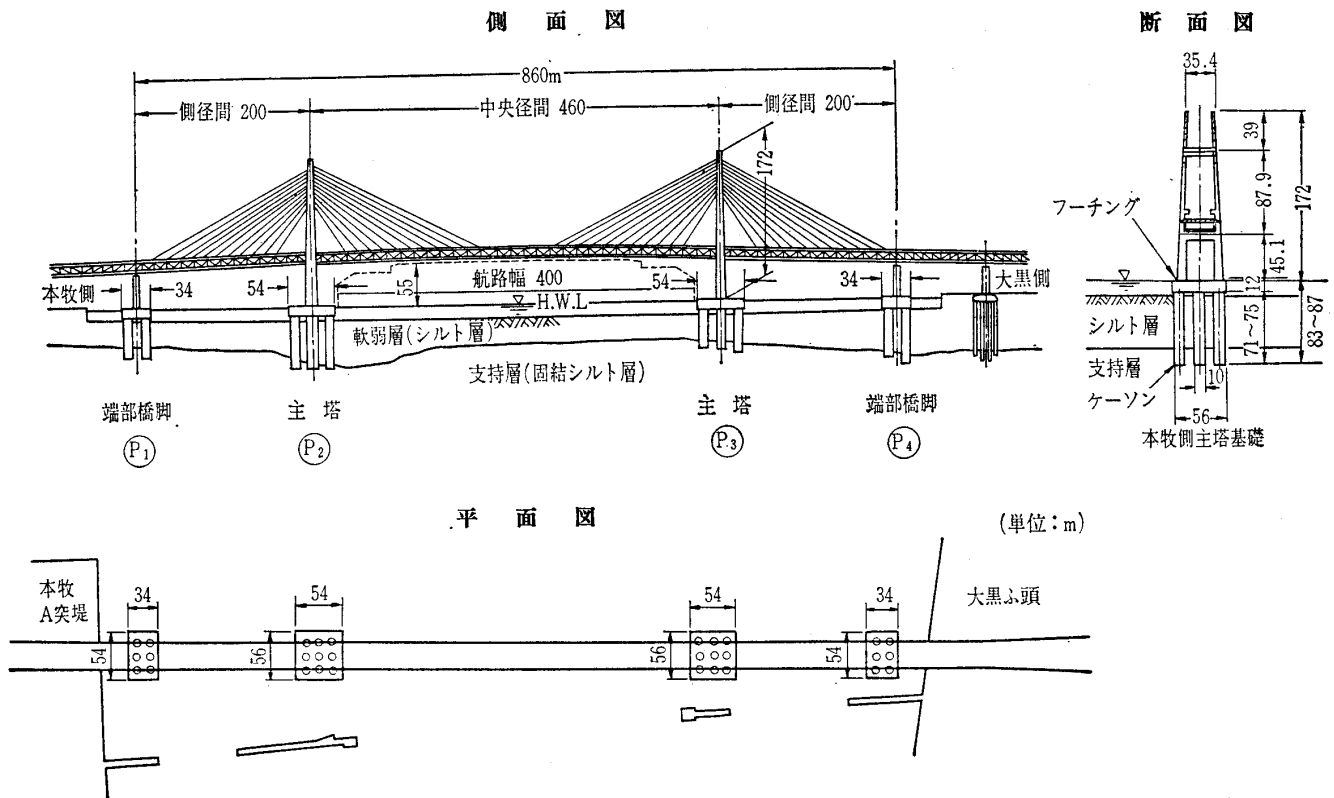


図-2 全体一般図

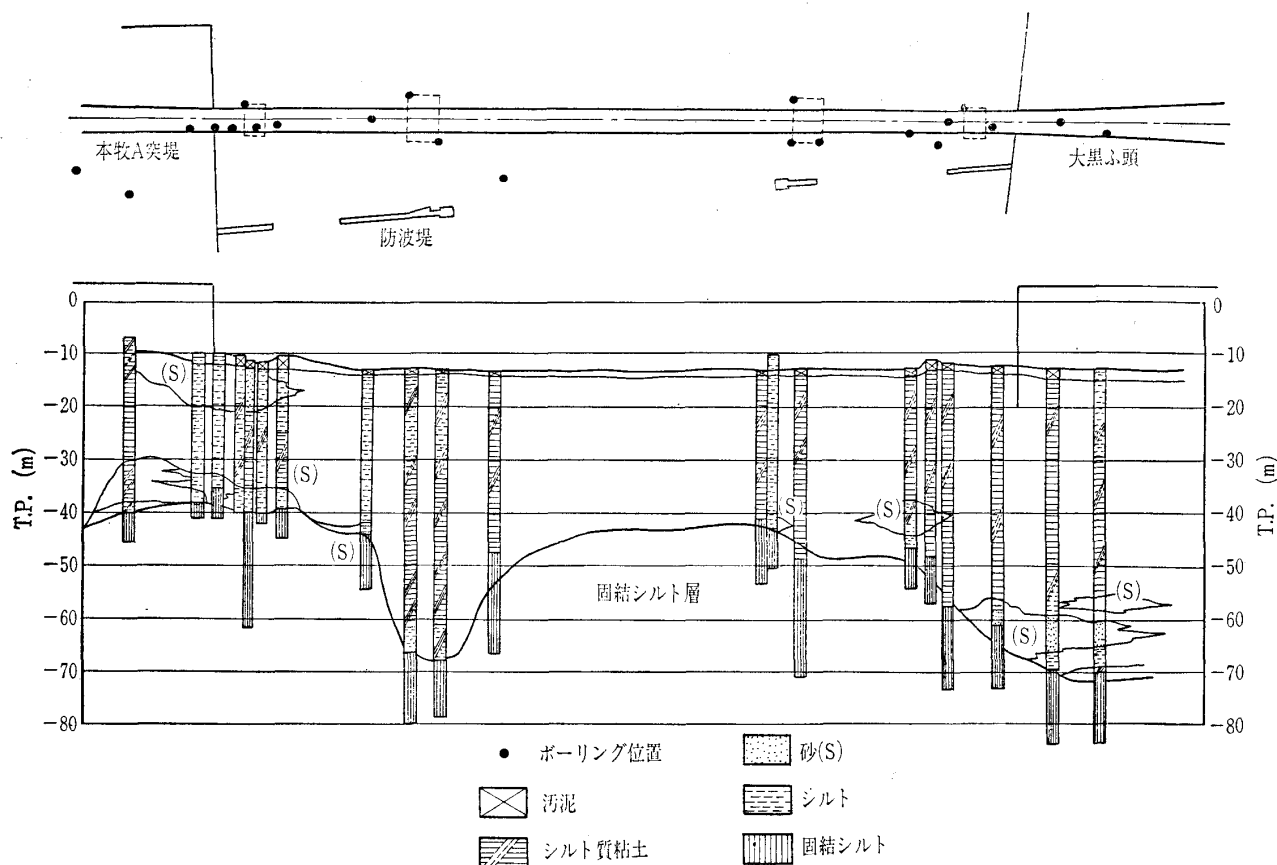


図-3 地質縦断面図

3.3 地質調査

橋梁下部工、特に基礎構造形式の選定の際に、更には基礎構造物の設計および施工の際に、地質条件が重要な項目となることから、架橋地点の地質調査の結果について述べる。

調査地域の地盤の概要図を図-3に示す。調査地域の地形は水深11m~13mで平坦な地形である。また、地盤は新第三紀の上総(かずさ)層群を基盤としている。その基盤上から海底面までは、基盤の上総層群を不整合で覆う内湾性堆積からなる屏風ヶ浦(びょうぶがうら)層や下末吉(しもすえよし)層の洪積世と、最後の氷期が終わり洪積世から沖積世に移り変わる時期の気候の温暖化による大規模な海進(有楽町海進)によってもたらされた有楽町層の厚い粘土からなる。

各地質の特徴は下記のとおりである。

(1) 沖積粘土層

i) 上部粘土層

シルトおよび粘土が主体となっており、細粒分の含有率は80%以上を示している。 N 値は0~3、および一軸圧縮強度 q_u は $0.4 \text{ kgf/cm}^2 \sim 0.6 \text{ kgf/cm}^2$ というような極めて軟弱な粘性土で、層厚30m~34mを有している。

ii) 下部粘土層

シルトおよび粘土が主体をなし、そのほか腐食土お

よび砂を含み、かなり不均一な層相を呈している。 N 値はシルトおよび粘土の部分で6~9程度、砂分を含むと15程度を示している。

(2) 固結シルト層

本層は、調査地域の基盤となる第三紀上総層群に属し、 N 値は50、一軸圧縮強度 q_u は $15 \text{ kgf/cm}^2 \sim 50 \text{ kgf/cm}^2$ の広範囲に分布し、高圧三軸試験による粘着力 c は $13 \text{ kgf/cm}^2 \sim 28 \text{ kgf/cm}^2$ および内部摩擦角 ϕ は $0^\circ \sim 12^\circ$ の範囲に分布している。また、深さはT.P.-40m~T.P.-65mというように層上面は起伏に富んでいる。ただし、層上部2m~3mは風化によりかなり軟質化している。

4. 橋梁形式の選定

4.1 橋梁

前述したような多岐にわたる調査に基づいて、横浜航路横断方式の検討を行っている。まず横断方法として橋梁案と沈埋トンネル案が考えられる。橋梁案は沈埋トンネル案に比して

① 横浜航路横断部のアプローチ(本牧ふ頭および大黒ふ頭)の土地利用を阻害する割合が低い。

② 工事費および維持費等が安い。

という特徴があり、航路横断方法として橋梁案を採用している。

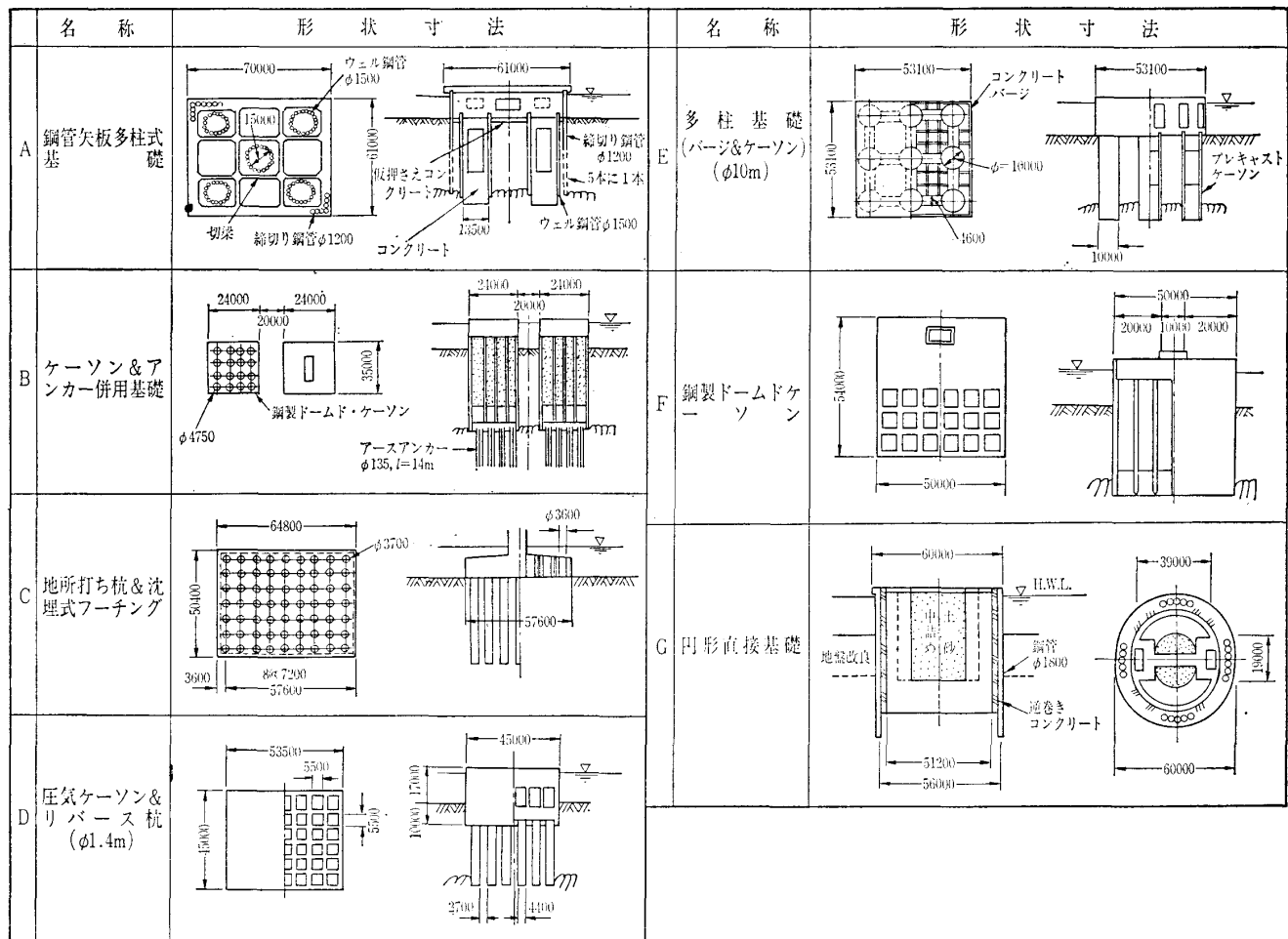


図-4 比較検討の対象基礎形式

4.2 斜張橋

橋梁案のうち上部構造については、航路幅 400m を跨ぐために長大スパンとなることから、対象となる上部構造形式としてゲルバートラス橋案、吊橋案および斜張橋案が考えられる。3形式案の比較検討の結果、

- ① 斜張橋案が最も鋼重が少ない。
- ② 路面計画高はゲルバートラス橋案に比べて、吊橋案および斜張橋案の方が約10m低くなる。
- ③ 吊橋案にするとケーブルアンカレイジが必要になり、アプローチ部の高度な土地利用が阻害される。
- ④ 横浜港の景観保護上、ゲルバートラス形式よりもスレンダーな吊橋案および斜張橋案の方が優れている。
- ⑤ 斜張橋はゲルバートラス橋案および吊橋案と異なり、長大スパンの施工実績はないが、技術的には可能である。

以上のことを総合的に勘案して、上部構造形式として斜張橋案を採用している。

4.3 多柱基礎

前述したように、架橋地点は厳しい地形および地質条件のもとにある。すなわち

- ① 水深が11m~13mと深い。
- ② 基礎の支持層となる固結シルト層は、海底面下27m

~52mというように深く、しかも層上面は起伏が激しく最大1:2の傾斜がある。

また架橋地点は横浜国際航路に隣接し、大型船舶の航行が非常に多く(1日平均約 800 隻)、施工条件としても厳しい。すなわち施工時には、

- ① 航路占用区域
- ② 航路占用期間

の厳しい制限が課せられている。

以上のような条件を克服するとともに経済的な下部工、特に基礎構造の形式を選定する必要がある。検討対象とした大規模基礎構造形式を図-4に示す。なお、このほかに水中基礎として多く採用されている鋼管矢板基礎についても検討したが、本橋ぐらゐに大規模な基礎となると、その直径も60m程度となる。長さに対して直径の大きい鋼管矢板基礎や、大きな水平力を受ける鋼管矢板基礎は、載荷試験により設計法との対応がなされている比較的小規模な鋼管矢板基礎より不明な点が多いことから、検討対象基礎から除外している。図-4に示す基礎形式のうち、形式A、Cは基礎の平面形状が大きくなり過ぎ不経済となること、形式Bは近接ケーソン施工による相互干渉、アースアンカーの耐久性の面で不明なこと、また、形式Dは圧気ケーソン内のリバース杭の施工法およびリバース杭施工中の圧

気ケーソンの固定法などに困難な点があること等により詳細な検討から除外している。

図-4の形式E, FおよびG, すなわち多柱基礎, 鋼製ドームドケーソン基礎および円形直接基礎について, 詳細な設計および施工法の検討を行っている。以下, 各基礎形式の概略の施工法およびその特徴を述べる。

(1) 多柱基礎

i) 施工法

あらかじめ製作されたフーチングの外枠(バージュと称す)を海上足場として使用し, ケーソンを建て込み海上部でバージュとケーソン頂部を連結して一体の基礎構造とする。

ii) 長所

- ① バージュを作業台として使えるので特別の締切りが不要である。
- ② 支持層上面の傾斜に対処し易い。
- ③ プレキャスト工法を組み合わせることによって, 海上工期が短くなる。
- ④ ほかの基礎形式に比べて基礎自重が小さい。

iii) 短所

- ① ケーソンに比べ柔構造であり耐震上の配慮が必要である。
- ② バージュと多柱基礎頭部の連結部に応力集中の発生が予想され, これに対する配慮が必要である。
- ③ 支持層内にケーソンを貫入させるために, 大型掘削機の開発が必要となる。

(2) 鋼製ドームドケーソン基礎

i) 施工法

架橋地点は水深が深くかつ軟弱層が厚いので, 通常のニューマチックケーソンでは作業気圧が大きくなり, 施工不可能である。本工法はケーソン頂部に, 各部屋ごとに半球状のドームを取り付け, シリンダー内の気圧を調整することによりケーソンの沈下および傾斜制御をしながら, オープンでケーソン内を掘削し, 所定の位置にケーソンを設置する。

ii) 長所

- ① 多柱基礎に比べて設計法が明確である。
 - ② オープンケーソンに比べて, 沈下制御が確実である。
- ##### iii) 短所
- ① 大型ケーソンを沈設することにより, ドーム数が多いため, 気圧調整システムの開発が必要となる。
 - ② 支持層の傾斜により沈下中のケーソンが傾斜しないように地盤を改良して平坦にする必要がある。
 - ③ ケーソン刃口下の掘削に新しい掘削機の開発が必要である。
 - ④ 鋼製外枠を使用するので経済的に不利である。

(3) 円形直接基礎

i) 施工法

リバース工法で掘削した後, 鋼管矢板を建て込み, モルタルを流し込み, 鋼管による1次の締切り壁を完成させる。更に締切り内を掘削しながら, 逆巻き工法でコンクリート壁を鋼管と一体に構築し, 所定の位置まで掘削して最終仮締切り壁を完成させる。その後仮締切り内で直接基礎を構築する。

ii) 長所

- ① 直接基礎で, 設計法が明確である。
- ② 基礎底面の施工が気中で確実に行える。
- ③ 在来の工法で施工が可能であって, 新しい機械の開発が不要である。
- ④ 支持層の傾斜に自由に対処できる。

iii) 短所

- ① 円形基礎で設計上平面寸法が大きくなる。
- ② 仮締切り内部を掘削するときは, 作業員が孔底にいるので, 底面地盤からの湧水および底面地盤の崩壊に対して, 格別の配慮が必要である。
- ③ すべてが現場作業なので, 工期が長くなる。

以上の検討結果から, 多柱基礎が最も経済的であり, 施工上も問題が少ないので, 本橋梁の基礎形式として採用している。

5. 設計

5.1 設計方法

多柱基礎の設計は, 柱とフーチングの変形を考慮するために, 立体フレームモデルによる静的な弾性解析を行っている。地震時の沖積粘性土の影響については, 三角形の変位分布に地震ばね定数を乗じた水平力として作用させている。また, 地震時の地盤支持条件としては, 弾性ばねを用いて部材断面力および地盤反力を算出して, 別途決めている許容値と比較し許容値内にあることを確認している。特に, 安定条件の照査を必要とするケースについては平面フレームによる弾塑性解析を行っている。

5.2 地盤定数

設計計算をする場合, 前述の土質調査において実施している原位置試験およびサンプリング試料による土質試験から得られた土質定数を総合的に判断し, 例えば表-1に示すように架橋地点の地盤定数を設定して, 設計計算をして

表-1 地盤定数(本牧側主塔基礎)

地 層	単位体積重量 (tf/m ³)	粘着力 (tf/m ²)	内部摩擦角 (度)	変形係数 (tf/m ²)
海 水 T. P. -14.0	-	-	-	-
沖積上部粘土層 T. P. -40.0	1.5	4.0 T. P. -27.0	0	960
		4.5 T. P. -37.0		
		6.0		
沖積下部粘土層 T. P. -67.0	1.5	8.5	0	4560
固結シルト層	1.8	120	0	25000

いる。

5.3 支持力

本橋の基礎形式は多柱基礎であるため、多柱の各柱を構成しているケーソン底面に作用する荷重が大きくなり、地盤の支持力および変形特性を求めることが重要となる。支持層である固結シルト層の、より真実に近い地盤特性を得る目的で、比較的地表面より浅い所に支持地盤同質の固結シルト層が現れる場所を架橋近辺に選定し、直接載荷試験を行っている。長期支持力を降伏荷重の1/2および破壊荷重の1/3の小さい方とした場合、直接載荷試験の結果、長期支持力は225 tf/m²~366 tf/m²の範囲で得られている。この支持力の値は、載荷幅および根入れ深さが実際の基礎

の条件とは異なるので、そのまま適用できない。本橋の設計では、根入れ効果がある程度期待できることから、常時の許容支持力（長期支持力と同様）として250 tf/m²を採用している。

6. 施工

横浜港横断橋における多柱基礎工法の大きな2つの特徴は、“部材のプレキャスト化”および“アーム式水中掘削機の実用化”にある。そのうちのひとつ、“部材のプレキャスト化”とは、フーチング部のバジ（コンクリートバジと称す）およびケーソンの第1ブロック（プレキャストケーソンとも称す）を指している。プレキャスト化を採用し

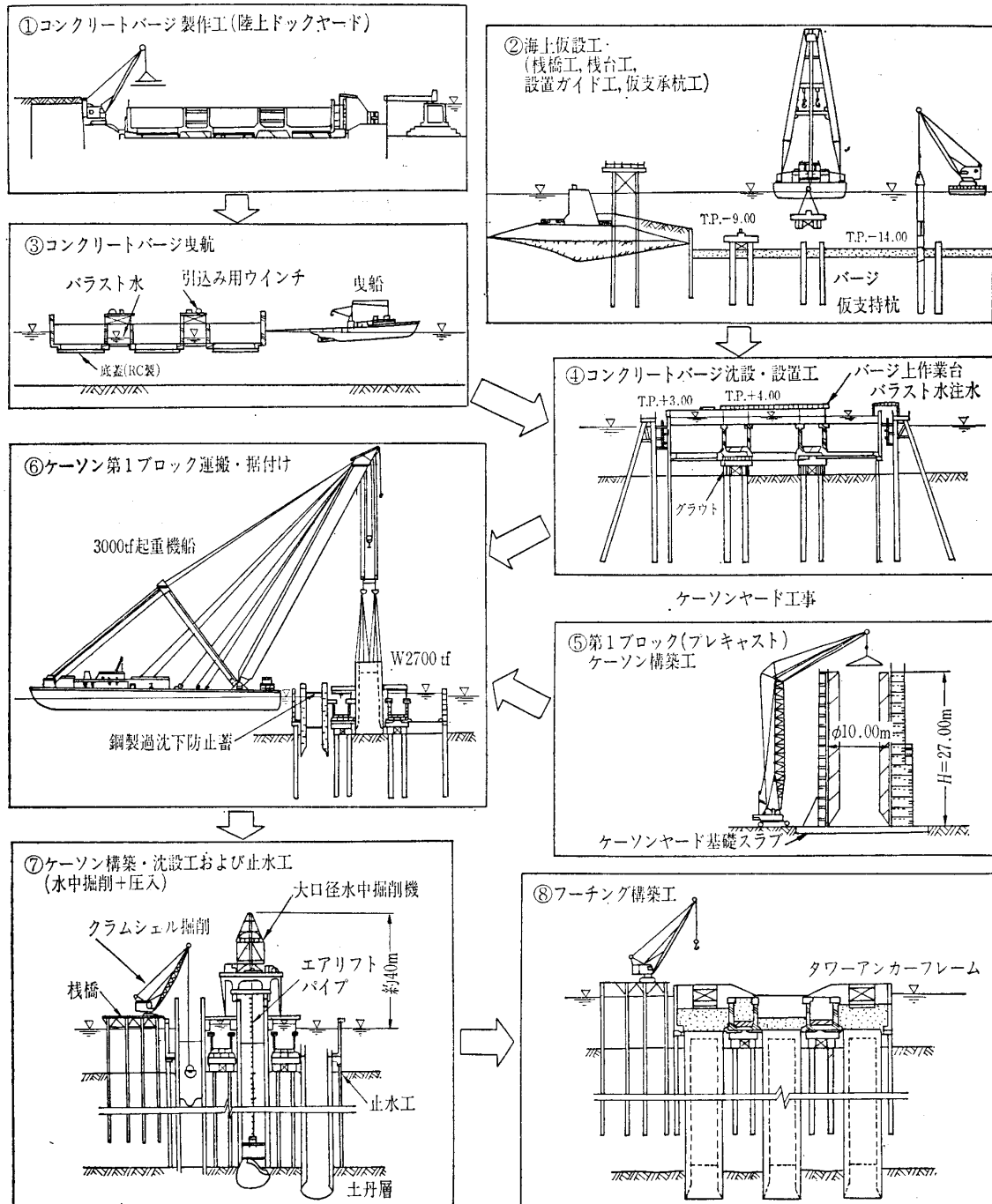


図-5 多柱基礎施工順序

たのは、架橋地点が横浜航路に隣接した狭い作業海域であること、および海上工事の施工期間の短縮を配慮したためである。本橋の基礎にあたってのもう一つの特徴であるアーム式水中掘削機の実用化については、既に報告¹⁾されている。

本橋の多柱基礎施工順序を図-5に示す。すなわちコンクリートバージ（主塔基礎2基：形状寸法は56m×54m×12m，端部基礎2基：形状寸法は54m×34m×12m）は、図-1に示す陸上ドックヤードでその70%を製作，架橋地点へ曳（えい）航後，海上で残りの部分を製作し，完成後仮支持杭上に設置する。設置したコンクリートバージは，各種工事の作業足場，ケーソン沈設用の定規，ケーソン沈設時の押込み荷重のための反力架台，およびフーチングコンクリート打設時の型枠というように多目的構造物となる。更に最終的にはフーチング本体の一部として設計上考慮している。

一方コンクリートケーソン（径10m，厚さ1.5m，長さ47m～75m，主塔基礎9本1基，端部基礎6本1基，計30本）については，第1ブロック（高さ27，重量2700tf）をやはり図-1に示す陸上ヤードで製作後，3000tf吊起重機船で運搬し，コンクリートバージ内の所定位置に据え付ける。据付け後のケーソンに，現場で5mごとのロッドを構築して継ぎ足し，掘削そして圧入という一連の作業を繰り返すことにより所定の深さまでケーソンを沈設する。掘削については，上層の粘土層はクラムシェルを使用するが，支持層の固結シルト層は，新たに本工事のために開発されたアーム式水中掘削機を使用する。ケーソンを所定位置に沈設した後，ケーソン内に，ケーソンの支持層内に貫入している長さと同程度，すなわち15m程度中詰めコンクリートを打設し，また，ケーソン沈設促進のために設置したフ

リクションカットにより生じたケーソンと地盤（支持層となる固結シルト層）とのすき間にグラウトを注入する。その後，ケーソン頂部とコンクリートバージ底版開口部のすき間に止水用コンクリート（高分子系混和剤を添加した水中コンクリート）を打設して止水し，コンクリートバージ内を排水後，中詰めコンクリートを施工して多柱基礎は完成する。

現在（昭和61年5月31日），本工事はケーソン30本の内28本を所定の位置まで沈設完了し，コンクリートバージ内へ中詰めコンクリート打設を開始している。今秋には斜張橋主塔のアンカーフレームをフーチング内へ吊り込む予定である。口絵写真-8および口絵写真-9には，既に完了しているコンクリートバージの曳航およびケーソン第1ブロックの吊込み状況を示す。

7. あとがき

深い軟弱地盤中への大規模海中橋梁基礎の例として，横浜港横断橋基礎工事を紹介してきた。本橋基礎工事も既に5年余を経過し，一年余を残し上部工事に引き継がれようとしている。大規模な海洋工事にもかかわらず，本工事は現在まで，幸いにも順調に進捗し，無事故，無災害を続けている。これも本工事に参加している多くの方々の並々ならぬ努力の賜物であり，敬意を表するとともに，いずれ港ヨコハマのシンボルとなるであろう横浜港横断橋の雄姿を頭に描きながら，本稿を閉じたい。

参考文献

- 1) 矢作 枢・大塚昭夫・東海林良美：ケーソン工事とロボット化，土と基礎，Vol. 32，No. 1，pp. 29～33，1984。
(原稿受理 1986.6.10)

学会発行図書案内

現場技術者のための土と基礎シリーズ

5.『ケーソン工法の調査・設計から施工まで』

A 5判 410ページ 送料 350円
定価 4,900円 会員特価 3,800円

発行：土質工学会

東京都千代田区神田淡路町2-23(菅山ビル4階)
〒101 電話 03-251-7661(代)