

鋼製フローティングケーソンによるニューマチックケーソン基礎 2 基の同時施工 (六甲アイランド橋) Construction of a Pneumatic Floating Caisson Method (Rokko Island Bridge)

小倉 正*
Tadashi Ogura
佐藤 靖彦***
Yasuhiko Sato

石田 弘之**
Hiroyuki Ishida

要 約

阪神高速道路・大阪湾岸線六甲アイランド橋の橋脚基礎工事は、鋼製フローティングケーソンによるニューマチックケーソン工法で施工された。本工事では、2基の大型ニューマチックケーソンを製作から沈下掘削・躯体構築の施工を同時に行った。本報告では、鋼製ケーソンの製作・施工、海底面地盤改良、マスコンクリート対策、沈下掘削、計測管理システムに関して得られた留意点や問題点などについて述べる。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 概要
- § 3. 鋼製ケーソンの製作および施工
- § 4. 海底面地盤改良
- § 5. マスコンクリート対策
- § 6. 沈下掘削
- § 7. 計測管理システム
- § 8. まとめ

§ 1. はじめに

阪神高速道路・大阪湾岸線はりんくうタウンから、神戸市六甲アイランドまでの大阪湾岸部59.9kmを結ぶもので、路線の大部分が埋立地および海上を通るため長支間

の橋梁が連続する。本工事の六甲アイランド橋は、神戸市東灘区魚崎浜町と六甲アイランドを結ぶ、中央径間217mのダブルデッキローゼ橋である。

当工事ではこのうち、魚崎側のRP5・RP6の橋脚基礎2基の施工を行った。水路巾約400m、水深約12mという厳しい条件のため、比較的狭い範囲内で施工ができ、支持力確認も容易な鋼製フローティングケーソンによるニューマチックケーソン基礎が採用された。工事箇所位置図を図-1、六甲アイランド橋全景を写真-1に示す。

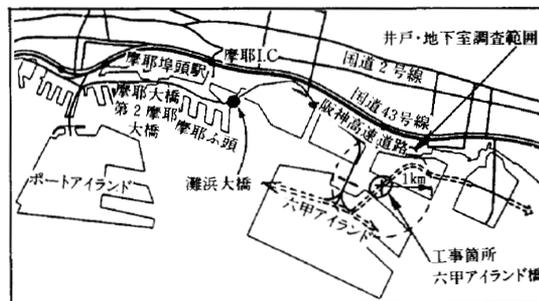
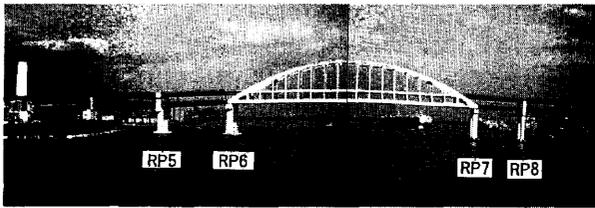


図-1 工事箇所位置図(神戸市東灘区)

* 関西(支)南港トンネル(出)副所長
** 関西(支)綾部(出)所長
*** 技術研究所地質研究課



写真一 六甲アイランド橋全景（当社はRP5,RP6を担当）

なお、当社施工の同種工事には灘浜大橋¹⁾、第2千歳橋²⁾などがある。

§ 2. 概要

2-1 工事概要

工 事 名：六甲アイランド橋（その1）下部工事
 企 業 先：阪神高速道路公団
 工 事 場 所：神戸市東灘区魚崎浜町地先
 工 期：平成2年9月30日～平成5年6月15日

橋梁基礎寸法：RP5ケーソン部；22m×25m×21m(H)
 橋脚部 ；12m×20.75m×15.4m(H)
 RP6ケーソン部；30m×26m×21m(H)
 橋脚部 ；13.5m×26m×15.4m(H)

鋼 殻 工：RP5;567.5t, RP6;809.4t

コンクリート：25,585.6m³

鉄 筋：1,779.5t

型 枠：10,640.3m²

沈下掘削工：30,590m³，沈下完了深さ：OP-32.7m

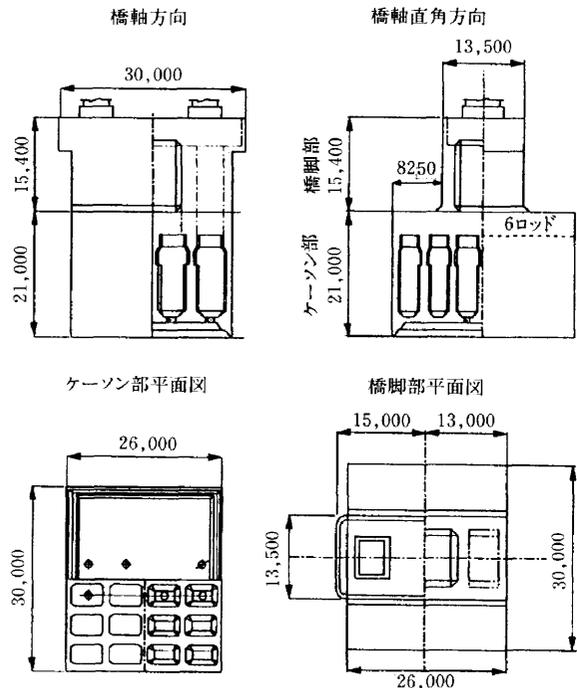


図-2 RP6橋脚構造図

地盤改良工：サンドコンパクションパイル（S.C.P）工
 $\phi 2000$ L=12.0～12.5m 578本
 （ピッチ2.0m×2.0m 改良率71.2%）

仮 棧 橋 工：覆工板2,716m²，鋼杭（H-400）1,523t
 仮設トラス橋 巾8m×長さ30m，

橋脚構造図を図-2に示す。

2-2 地質概要

施工地点の水深は約12 mあり、地層は海底面より約12m までがN値0の沖積シルト層で12～16.5mが平均N値20程度の沖積砂質土層、16.5 m以深がケーソンの支持地盤となるN値10～50以上の砂、砂礫、粘土の互層で構成される洪積砂質土層である。

2-3 施工手順

(1) 鋼製ケーソン製作・運搬

鋼製ケーソンは兵庫県加古川市の鉄構工場で作成した。写真-2に鋼製ケーソン組立状況を示す。鋼殻部分の組立作業と平行して、刃口、天井スラブ、外周壁および隔壁の鉄筋を鋼殻内に組込んだ。製作完了後、マンシャフトおよびマテリアルシャフトを犠装した。犠装後、2000tf（19.6MN）吊クレーン船にて吊出し、現場まで運搬し、到着後、仮棧橋内へ吊込み着水させた。

(2) 海底面地盤改良

ケーソン着底時および初期沈下掘削時の地盤支持力不足のため、サンドコンパクションパイル（ $\phi 2000$ ）により地盤改良を施工した。図-3に地盤改良状況を示す。チェックボーリングの結果、N=10～30で改良効果を確認した。改良後、使用した砂量約24,000m³に相当するシルトの盛上がり（最大約5m）が発生したため、所定の深さまで浚渫した。その後、マウンド工として碎石（厚さ50cm）を投入し、 ± 10 cmの精度で着底面を均した。

(3) 仮棧橋設置

地盤改良後、仮棧橋のH鋼杭打設・覆工を行った。仮棧橋進入路の既設護岸横断部分は、護岸の捨石部への支持杭打設を避け、長さ30 mの仮設トラス橋を設置した。写真-3に仮棧橋作業状況全景を示す。

(4) 沈下掘削・構築

鋼製ケーソンは仮棧橋内へ着水後、コンクリートを打設しながら沈下重量を増加させ海底面へ着底させた。その後、圧気工法による沈下掘削作業と並行して躯体構築作業を進め、深度（OP-32.7m）まで沈設した。地盤支持力を確認し、中詰コンクリート打設後、断気した。

以上の作業をRP5、6と並行して実施した。

2-4 施工上の留意点

(1) ケーソン位置の確保

仮棧橋内に浮いている鋼製ケーソンの位置はケーソン



写真-2 鋼製ケーソン製作状況 (RP5)

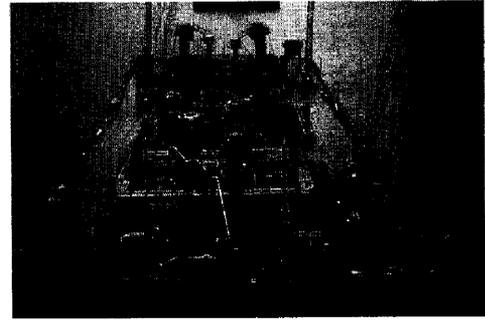


写真-3 仮栈橋作業状況全景

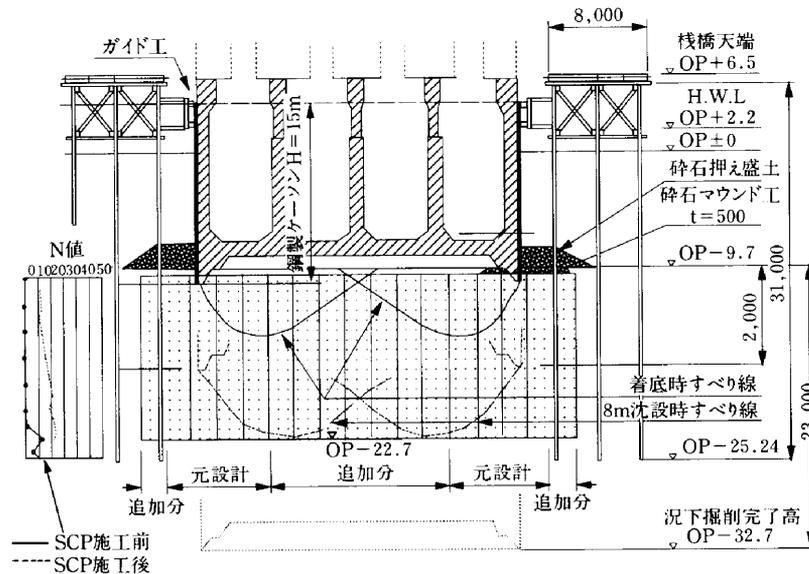


図-3 地盤改良状況 (RP6)

外周面と100 mmの間隔で、H鋼と角材を組合わせたガイド材により保持する計画であった。しかし、ケーソンが波浪で動揺し、仮栈橋への衝撃が大きくなった。このため、キリンジャッキを用いてケーソンを押さえ込み動揺を抑制したが、部分的にケーソン鋼板の変形が生じた。今後、ローラー状ガイドを使用する等の工夫が必要と思われる。

海底面着底のためのコンクリート打設作業では、着底位置確保のためにケーソンの水平度保持に留意した。その結果、着底時のケーソン位置の誤差は、RP5、6ともガイド材の余裕(100 mm)の中に収まり、この誤差は沈下掘削時に修正した。

(2) 井戸および地下室等の調査

「酸素欠乏症等防止規則」では圧気工事を施工する場合、半径1 km (図-1参照) 以内の井戸・地下室等の調査が義務付けられている。事前調査で対象となった井戸および地下室の中から井戸9井、地下室10箇所を選定し、定期的(1回/月)に調査を行った。調査の結果、工事中

および工事完了後においても、異常は認められなかった。

§ 3. 鋼製ケーソンの製作および施工

3-1 鉄骨材と鉄筋の取合いについて

(1) 鋼製ケーソンの構造

鋼製ケーソンは、スキンプレート (t=6~9mm) の裏側を平鋼、山型鋼等の骨材 (ほねざい) で補強したブロックを接続し所定の形状にしたものである。特に、ケーソンの形状保持のために、骨材は縦、横、斜めに密に配置されている。(図-4、写真-2参照)

(2) 鉄筋組立の施工性

このような複雑な骨材の配置のため、1mの壁の中に主鉄筋、スターラップ、巾止めなどを設計図面どおりに配筋する事は困難であった。その対策として、鉄筋の1m当たりの所要本数は確保し、さらに加工形状の変更や巾止めの分割、フックの角度変更等に対応した。

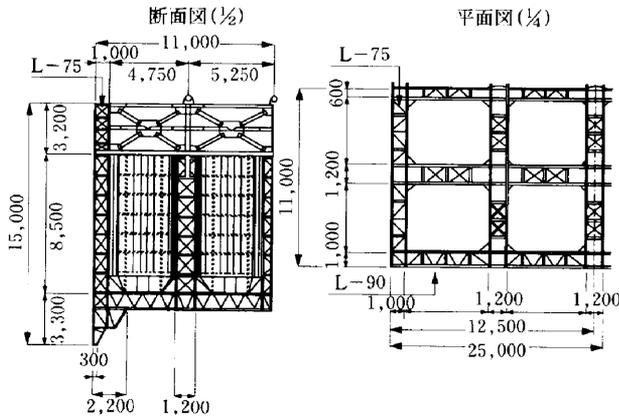


図-4 鋼製ケーソン構造図 (RP5)

3-2 ダブルスキンプレート構造の問題点とその対策

(1) ダブルスキンプレート構造の問題点

鋼製ケーソンの製作方法には次の3種類がある。

- ①外周壁の外側鋼板のみ取付, 他は骨組だけ
- ②外周壁の外側鋼板および隔壁は片面だけ鋼板取付
- ③外周壁, 隔壁とも両面に鋼板取付

本工事で採用した③のダブルスキンプレート構造は, 現場へ運搬後の型枠組立作業が軽減されるものの, 以下のような問題点がある。

- a. 狭い空間での鉄筋組立作業が困難で作業能率が著しく悪い。
- b. 刃口部および壁(高さ8.5m)のコンクリート打設作業が狭い空間のため困難である。また, 鉄骨・鉄筋の密な配置のためコンクリートの充填性が悪く, 骨材の下側については特に問題となる。

(2) コンクリート打設時の対策

コンクリート打設に際し以下の対策を講じた。

- ①生コンスランプを当初設計の8cmから10cmに変更した。
- ②天井スラブ上のハンチ部分の鋼板にバイブレーター差込みのための開口部を設けた。
- ③高さ8.5mの外周壁および隔壁部分は途中で打継ぎ目を作ると, 天端高さの管理, レイタンス処理が困難なため1回打設とした。この時, 巾止め鉄筋を一部外して, 壁の中に作業員が入りバイブレーターをかけた。外した鉄筋はコンクリートの打上がりに合わせて復旧した。

(3) 今後の同種工事への対応

- ①鉄筋組立の容易さと生コンの品質管理の面から, 壁の鋼板は片面だけにし, もう一面は現地で高さ4mずつ程度の型枠組立とする方が十分なコンクリートの締固め管理ができる。
- ②バイブレーターによる締固めが不要な高流動化コンク

リートを使用する。

- ③鋼材とRC構造の合成構造にして鉄筋量の節減を考慮する。

§ 4. 海底面地盤改良

4-1 設計検討

ケーソン着底地盤の支持力を確保するために, 以下のような検討により, 当初計画された改良範囲を拡大した(図-4参照)。

(1) 複合地盤の支持力³⁾

S・C・Pで改良される複合地盤では, ある q の大きさの荷重が作用すると, 砂杭の方に応力が集中する。この砂杭部の主働土圧 σ_{hs} が地山の粘土部の受働土圧 σ_{hc} 以上となるときに地盤が破壊すると考える。すなわち,

$$\sigma_{hs} (=K_a \cdot \sigma_s) \geq \sigma_{hc} (= \sigma_c + 2c)$$

のときに破壊する。

ここで, σ_s, σ_c : 砂杭部, 粘土部の鉛直土圧

K_a : 砂杭部の主働土圧係数

c : 粘土部の粘着力

砂杭の改良率が70%の場合, 複合地盤の支持力 q は,

$$q = 0.7 \sigma_s + 0.3 \sigma_c$$

となり, 鉛直応力の分担比 $n = \sigma_s / \sigma_c = 3.38$ と $\sigma_c = 5.7c$ を用いて, 複合地盤の支持力を算定した。

(2) ケーソン内部の改良範囲について

極限支持力状態におけるケーソン内部の滑り線の範囲は, 図-5に示すように γ' で与えられ, γ' は地盤の内部摩擦角から求められる⁴⁾。すなわち, 改良必要巾は $B = B' + \gamma'$ となる。図-5の B' は複合地盤の式より $q = q_u$ (地盤の極限支持力) となる貫入深さを求めて算定した。この時, 複合地盤の内部摩擦角は $\phi = 25^\circ$ とした。

(3) 側方(外周)安定確保のための改良範囲

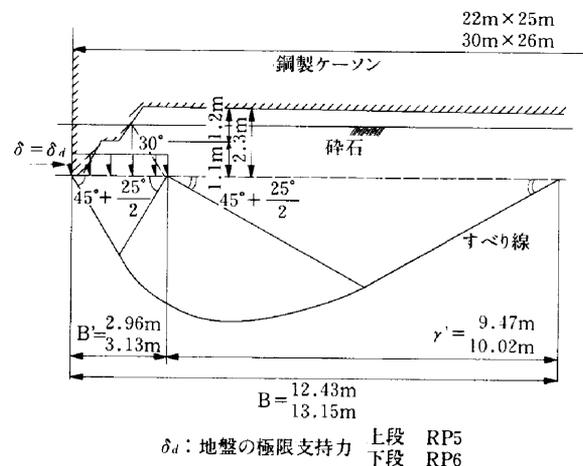


図-5 S・C・P改良範囲の決定

外周部の安定は、図一 6 に示すように改良部分の主働土圧がシルト部の受働土圧を下回る範囲まで改良部分を拡大した。

以上の検討結果から、ケーソン内側部は全面改良、外周部は当初計画に1列追加した範囲とした。

4-2 着底結果

鋼製ケーソンの着底は大きなトラブルもなく完了した。着底時の刃口貫入量と極限支持力の予測値と実績値、刃口荷重計の実績値を表一に示す。刃口貫入量は予測値と実績値がほぼ一致したが、刃口荷重計の値は極限支持力の2倍以上を示した。今後、より実態に即した算定手法の確立が望まれる。

§ 5 マスコンクリート対策

5-1 温度応力解析

本工事の構造物は、厚さ1m以上のスラブ・壁が大半を占めるため、マスコンクリートの温度応力解析⁵⁾を行い温度ひび割れ指数を算定し、温度ひび割れ発生の可能性を評価した。解析の対象箇所は6ロッドの頂版より上

部の橋脚部分とした（図一 2参照）。解析結果として、以下の結果が得られた。

- ① 6ロッドの頂版では、ひび割れ発生の可能性が少ない。
- ② 橋脚部は、ひび割れ発生の可能性が非常に高い。

5-2 ひび割れ防止対策

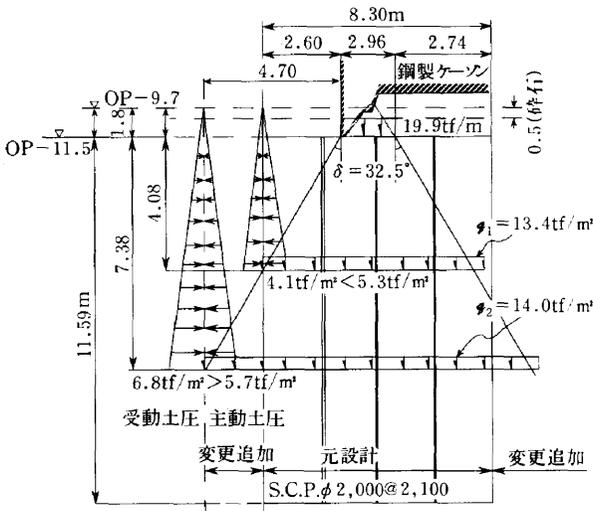
対策方法として、①配合の変更（単位セメント量の低減、低発熱セメントの使用）、②夏期のコールドジョイント発生防止のために凝結遅延剤を使用することにした。

①に対しては目標強度が σ_{28} 管理であったが、 σ_{91} 管理に変更することによって単位セメント量を約30 kg/m³減少させ、打設時のコンクリート温度を3度下げて、温度ひび割れ応力の低減が可能となった。②に対しては生コンプラントで凝結遅延剤を添加した。

5-3 施工結果

6 ロッド頂版についてはコンクリート打設後、ケーソン沈下により水没するまで（約3週間）頂版表面にクラックは発生せず、事前の解析結果が裏付けられた。

一方、橋脚部については、早い場合にはコンクリート打設後10日前後でひび割れが発生したが、ひび割れ巾はいずれも0.25mm以下で、補修の必要なものではなかった。ただし、最終ロッドの天端では、コンクリート打設量大きいことと打設時期が夏期であったことから、ひび割れが発生したため注入による補修をした。



図一6 側方安定確保のための改良範囲（RP5）

表一 ケーソン着底結果

| | | 刃口貫入量 (m) | 極限支持力 (tf/m ²) | 刃口荷重計の値 (tf/m ²) |
|-----|----|-----------|----------------------------|------------------------------|
| RP5 | 予測 | 1.5 | 16.3 | |
| | 実績 | 1.3 | 逆算→ 17.8 | 約 40 |
| RP6 | 予測 | 1.6 | 17.7 | |
| | 実績 | 1.7 | 逆算→ 17.0 | 約 50 |

§ 6 沈下掘削

6-1 概要

RP5は、送気を開始してから函内の段取り後、本掘削を開始した。途中、構築作業の遅れで19日の手待ちとなったが、全体的には大きなトラブルもなく順調に進み約5ヶ月間で沈設が完了した。その後地耐力試験で地盤の支持力を確認し、中詰めコンクリートを打設してシャフト内で異常の無いことを確認したのち断気した。

RP6は、RP5と約1ヶ月遅れて掘削を開始し、RP5と平行作業で沈下掘削作業を進めた。ケーソン2基の掘削稼働率および1日当たりの沈下量は、表一2に示すとおりであり、ほぼ順調な施工状況であった。

6-2 作業時間帯

作業気圧が1.0~2.2 kgf/cm² (98.07~215.75kPa)の間は途中で休憩して2回作業を採用したが、2.2kgf/cm² (215.75 kPa) を越えてからは減圧時間の関係で1回作業の後、函内交替または函外交替とした。

6-3 コンプレッサー稼働台数

RP5、RP6同時掘削のため電動コンプレッサー(150KW)を6台設置したが、常時は4台稼働で施工可

表一 掘削稼働率および1日当たりの沈下量

| | 単位 | RP5 | RP6 |
|------------|------|------|------|
| ① 全工程直数 | 直 | 308 | 229 |
| ② 潜函作業直数 | 直 | 208 | 153 |
| ③ 掘削直数 | 直 | 181 | 123 |
| ④ ②/① | % | 67.5 | 66.8 |
| ⑤ ③/② | % | 87.0 | 80.4 |
| ⑥ 掘削深さ | m | 23.0 | 23.0 |
| ⑦ 掘削日のみの日数 | 日 | 102 | 100 |
| ⑧ 潜函作業日数 | 日 | 157 | 164 |
| ⑨ ⑥/⑦ | cm/日 | 22.5 | 23.0 |
| ⑩ ⑥/⑧ | cm/日 | 14.6 | 14.0 |

能であった（最大稼働台数は5台）。また、停電時の予備設備として190PSのディゼルコンプレッサーを4台設置したが、一度だけ起きた停電に対して十分対応できた。

6-4 函内圧

当工事は理論気圧で3.49kgf/cm²（342.25kPa）の圧気が必要であったが、200～250m離れた対岸のRP7、RP8のケーソンにおいてディーブウエルが使用された影響で、最終の函内圧は3.1～3.2kgf/cm²（304.01～314.81kPa）となり、当初想定した気圧よりも多少低くなった。

6-5 エアブローについて

エアブローは、RP5、RP6ともS.C.Pによる改良層を抜けるまではケーソン周囲に激しく発生したが、この層を抜けた時点ではほぼおさまった。その後ケーソンの壁面より50m程度の範囲内でエアブローが発生し、このエアブローは断気完了まで継続した。当初懸念していたRP5、RP6相互の函内へのエアブローは発生しなかった。また対岸のRP7、RP8の施工業者とも毎日連絡を取り合い、函内へのエアブローおよび酸欠現象の無いことを確認しあった。

6-6 使用空気量と電力使用量の関係

(1) 空気流量計およびデマンドコントローラーの設置

予定空気量と実績空気量の確認およびコンプレッサー能力の確認のため、空気流量計を設置した。また、予定以上の電力使用に対して警報を発するデマンドコントローラーも設置し、時間毎の電力量とピーク電力量を確認した。このデータにより適切な電力契約を結び、最大契約電力量（高圧乙）を1,050KWhに抑えることができた。

(2) 空気使用量の実績

最大空気使用量は124m³/分を記録した。これは当初予定していた166m³/分に対して75%程度の値であった。

また、掘削休止時間も含めて平均した1分間当たり空気使用量は27.2 m³/分であった。その測定結果をまとめ、図一にRP5、RP6の電力量合計と空気使用量の関係を示す。この図より次のことがわかる。

①初期掘削時のH3/12、H4/1の段階では地盤改良部からのエアブローが大きく、また函内の段取り作業も多いため電力量、空気量とも掘削土量に対して大きな値となった。

②H4/2、3、4、5の函内気圧を考慮した電力使用量は安定しているが、空気使用量はH4/4に多くなっている。これはこの時期になってエアブローが激しくなったためである。

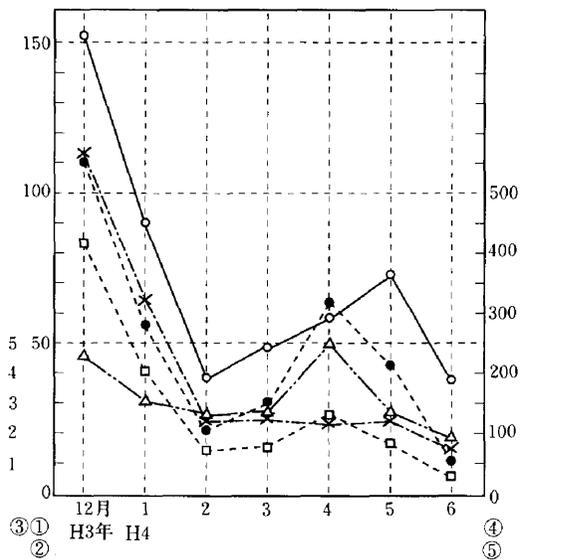
③RP5（面積550m²）とRP6（面積780m²）の面積差230 m²と空気使用量、電力量の相関関係は明確でない。この程度の面積差では土質状態、掘削方法による差の方が大きいと考えられる。

§ 7. 計測管理システム

7-1 計測目的

本工事ではケーソン沈設時に計測管理を行った。その内容は、以下のとおりである。

- ①ケーソンの姿勢を把握し、沈設精度を確保する。
- ②刃口反力、周面摩擦力等の沈下抵抗力を把握する。
- ③側壁に作用する土水圧を把握する。



凡例
 ① 月当たり総電力量÷月当たり総掘削量 —○— kWh/掘削 m³
 ② 月当たり総電力量÷月当たり(総掘削量×函内気圧) —×— kWh/掘削 m³×気圧
 ③ (1日当たり空気量÷1日当たり電力量)の平均値 —△— 空気 m³/kWh
 ④ 月当たり総空気量÷月当たり総掘削量 —●— 空気 m³/掘削 m³
 ⑤ 月当たり総空気量÷月当たり(総掘削量×函内気圧) —◇— 空気 m³/掘削 m³×気圧

図一 使用電力量と空気使用量の関係

④ 函内気圧を管理する。

7-2 計測結果

(1) 沈下姿勢

ケーソンの姿勢管理では、ケーソンの傾斜量等をリアルタイムで測定し、監視システムによってケーソンの姿勢を即時に把握した。沈設管理の結果、最大傾斜量は約1% (不等沈下量30cm)、最終的な傾斜量は橋軸直交方向で0.03% (不等沈下量0.8 cm)、橋軸方向で0.02% (不等沈下量0.6 cm) と非常に精度良く沈設できた。

(2) 刃口反力分布

図-8はRP6沈設中の刃口反力分布である。着底時(a)では、傾斜等によって刃口反力がある方向に集中するようなことはなく、刃口荷重が一様に作用していたことがわかる。沈下掘削中(b)においても、刃口反力は比較的一様に分布し、躯体の傾斜の影響はみられない。ただし、(c)の深度が大きくなると、周面摩擦力が増加し、刃口反力が小さくなる傾向にあり、場所によるバラツキも大きくなる。刃口反力は、隅角部付近で応力集中し辺中央部よりも大きくなると予想したが、実測では隅角部付近でも中央部と同程度の刃口反力を示した。

(3) 周面摩擦力

図-9には、RP5、RP6の沈設中の周面摩擦力の深度変化を示す。図中の破線は道路橋示方書⁶⁾により想定した予測値である。実測による周面摩擦力は概ね1~2tf/m² (9.81~19.61 kPa) を示し、全般的には予測値に近い値を示した。ただし、RP5のOP-20m以下で側壁下部(刃口から1.8m位置)における周面摩擦力は4tf/m² (32.23kPa) 以上と予測値を大きく上回ったり、RP6では最終深度まで1tf/m² (9.81kPa) 程度で予測値より

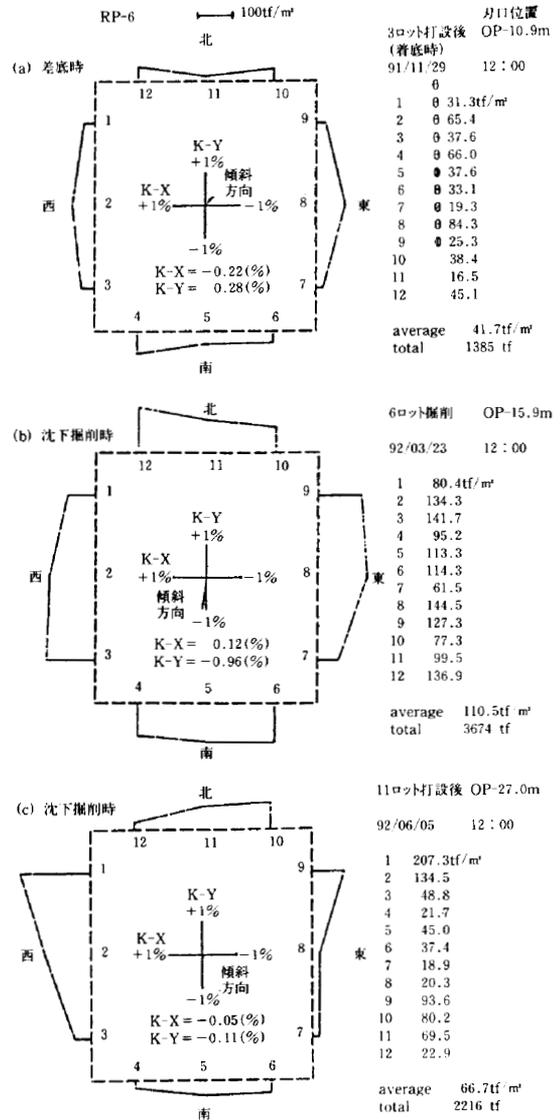


図-8 刃口反力分布 (RP6)

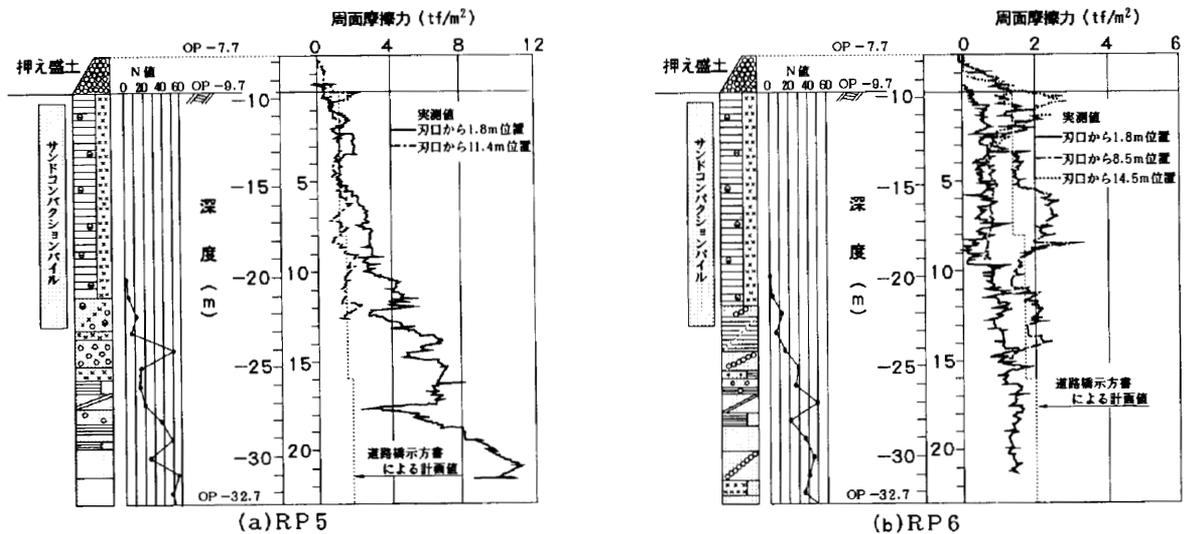


図-9 周面摩擦力の深度分布

小さな値を示した。隣接した場所でありながら、周面摩擦力に差が現れたのは、地盤条件、沈設条件の違いが影響したものと思われる。実測の周面摩擦力は多少のばらつきを示したが、沈下荷重(躯体重量等)は十分に大きかったことから、ケーソン沈設に対して支障はなかった。

(4) 水圧

対岸ケーソンRP7のディーブウェル使用がRP5, RP6に及ぼす影響を把握するために、側壁に作用する水圧を測定した。図-10に水圧の深度変化を示す。OP-25mまでは深さに比例して水圧が増加しており、ほぼ静水圧に近い値であった。OP-25m以深では、ディーブウェルの影響により、静水圧よりも低い水圧を示し、OP-30mでは約 0.4kgf/cm^2 (3.92kPa)低く、函内気圧も同様な傾向を示した。このようにディーブウェルの効果は砂礫層を通じて200mもの広範囲に及ぶことが確認された。

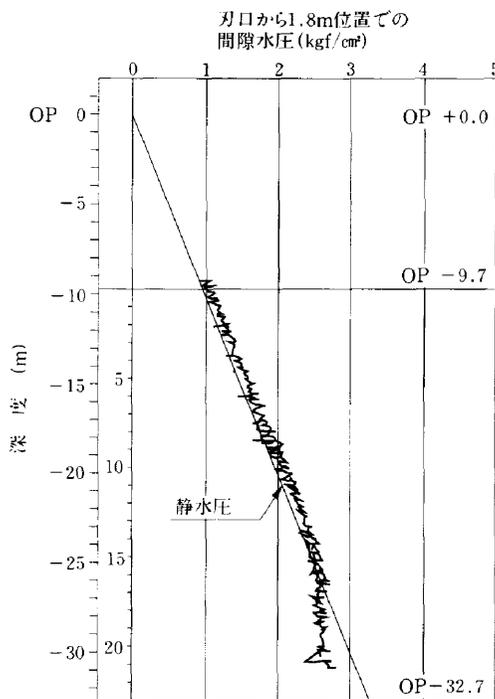


図-10 水圧の深度分布

§ 8. まとめ

今回の施工での注目点は以下のとおりである。

- (1) 鋼製ケーソンは、骨材と鉄筋の取り合いが考慮されていない設計のため、鉄筋の組立能率が大幅に低下した。また、鉄筋加工形状の変更を余儀なくされた。今後の同種工事では対策が必要である。
- (2) 鋼製ケーソン内のコンクリート打設では、打設時の作業性が非常に悪く、品質管理上の問題が多い。今後コンクリートの材料を含め設計段階での十分な検討を要する。
- (3) 仮栈橋内面のガイド材は、ケーソンの動揺を最小限に押さえるための工夫が必要である。
- (4) 鋼製ケーソンの海底面への着底は、ほぼ予測通りの結果となり、平面位置、水平度確保等もほぼ満足のいくものであった。しかし、刃口面の地盤支持力の算定方法はさらに検討が必要である。
- (5) 沈下掘削は、計測管理システムの活用の結果、順調に施工でき、掘削稼働率も順調な値を示した。

以上、全体としては大きな問題もなく、無事竣工することが出来た。この報告が今後の同種工事の施工に役立てば幸いである。

最後に、本工事の施工でご指導ご協力を頂いた阪神高速道路公団、本社土木部の故鶴見副部長、土木設計部、技術研究所、労務安全部の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 小倉 正・黒田荘輔・佐藤靖彦・平野舜一：鋼製フローティングケーソンによるニューマチックケーソンの施工，西松建設技報 Vol.14, pp.117~129, 1991.
- 2) 山本伸一：鋼製ケーソン設置工法によるニューマチックケーソン基礎の施工，西松建設技報 Vol.14, pp.219~222, 1991.
- 3) 土質工学会：軟弱地盤対策工法—調査・設計から施工まで—, 127p., 昭和63年.
- 4) 日本道路公団：設計要領・第2集・第6編.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編), 1991.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 1990.