

プレストレストコンクリート沈埋トンネル工事

島 村 久*
田 村 富 雄**

1. はじめに

本工事は、西部瓦斯（株）のガス供給のための横断トンネルである。このトンネルは、若戸大橋の下流約 300 m に位置し、若松航路（航路幅 250 m、計画水深 DL-12 m）の水面下を、延長 432 m で結んだものである。

工法については、数種の案を比較検討したが、地形、地質、工期および若松航路を航行する船舶の安全確保などの諸条件を満たすために他の工法より優れていると判断された沈埋トンネル工法が採用された。

本工事の大きな特徴は、沈埋トンネルエレメントをプレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリート（以下 P C という）構造で製作したことである。

以下本工法による沈埋トンネル工事の計画から製作、計測までの概要を報告し、将来の展望について述べる。

2. 工事概要

2.1 工事内容

工事内容は、表-1 に示すとおりである。トンネル内部は図-3 の構造図に示されるように $\phi 600$ mm と

施 主	西部瓦斯株式会社
工 事 区 間	起点：北九州市若松区北浜町地先 終点：北九州市戸畑区川代岸壁地先
工 期	着工：昭和 51 年 7 月 1 日 竣工：昭和 52 年 9 月 30 日
トンネル延長	432 m
外 径 寸 法	外径 $\phi 3.2$ m、内径 $\phi 2.6$ m（壁厚 30 cm） 長さ 45 m \times 9 エレメント、27.0 m \times 1 エレメント
施 工 水 深	浚渫深さ D.L.-19.2 m（水平部） 管布設深さ D.L.-18.2 m（水平部）
航路部最小土かぶり	3.0 m
沈埋管構造形式	プレストレストコンクリート構造
沈埋管製作方式	ゼロ目地接着によるプレキャストブロック工法
沈埋管製作場所	三井鉱山コークス（株）響灘工場敷地内
P C 工 法	MDC 工法および SEEE 工法
沈埋管進水方式	700 t 吊りフローティングクレーンによる吊り上げ進水
沈設および基礎施工	大型自撈式作業台（SEP）使用
若松側（発進）立坑	開削工法 幅 5.7 m \times 奥行 8.0 m \times 深 8.0 m
戸畑側（到達）立坑	オープンケーソン工法 幅 6.4 m \times 奥行 4.4 m \times 深 11.6 m

$\phi 300$ mm のガスパイプが布設され、将来 $\phi 600$ mm のガスパイプが増設されるスペースをとってある。

2.2 地形および地質

地形的には洞海湾の中でも特に対岸距離の接近した場所であり、航行する船舶も非常に輻輳し、また両岸の立坑は非常に狭隘な場所に位置している。

地質構造は砂質土層、礫岩風化帯、古第三紀頁岩、砂岩などより構成されており、若松側では砂質土層内に粘性土層が介在し、基盤は戸畑側に比べかなり深くなっている。したがって地形、地質両面からみてシールド工法、トンネル工法ならびに海底配管工法などは施工上困難が予想され、工事費の増大、工期

の延長にもつながるものと思われる、総合的に判断した結果、施工性、経済性、工期、安全性等の面から沈埋トン

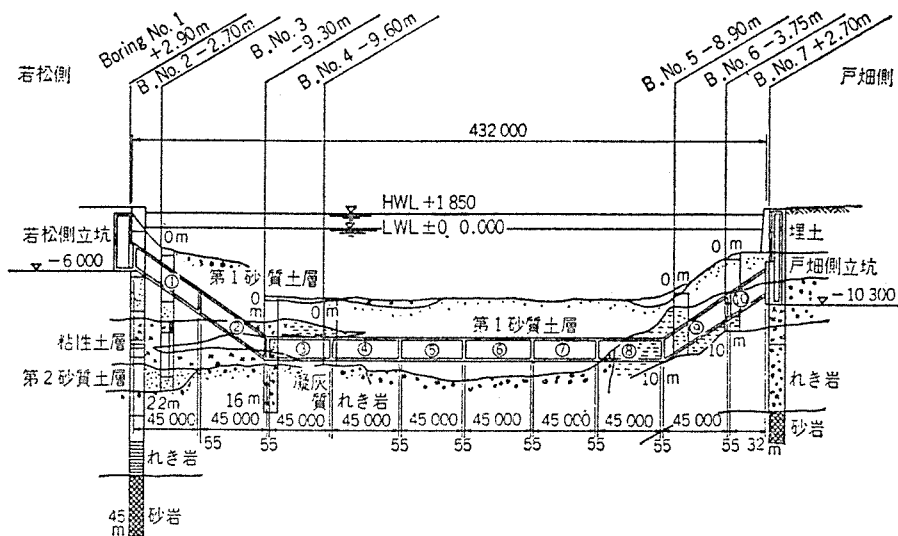


図-1 沈埋トンネル縦断面図

* 三井建設（株）土木技術部、部長代理
** " 技術研究所、主任研究員

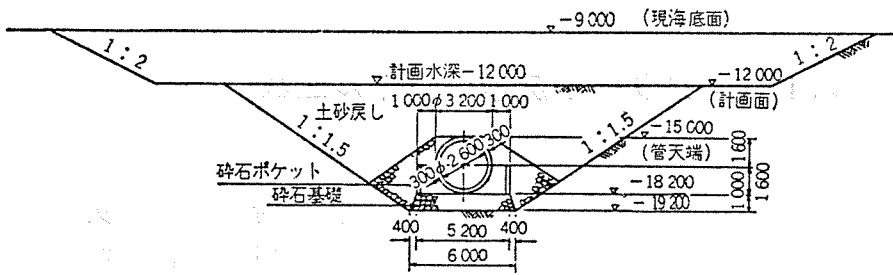


図-2 沈埋トンネル標準断面図

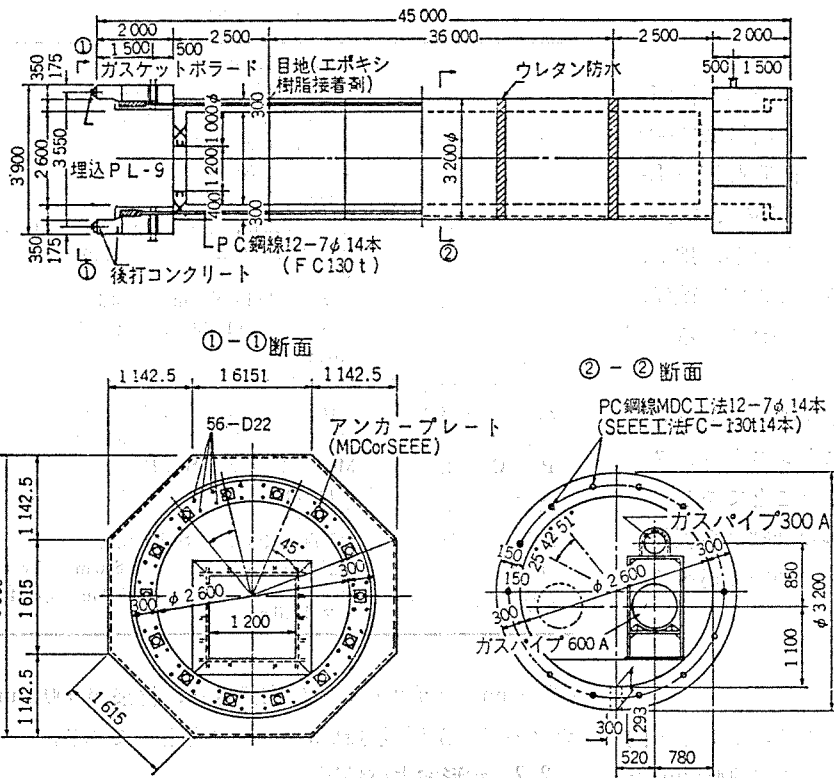


図-3 沈埋管構造図

ネル工法が優れていると判断した。

2.3 沈埋トンネル構造の選定

沈埋トンネル工法の採用が決定し、次にトンネルの構造および製作方法についてあらゆる角度から検討を進めた。

今回の沈埋トンネルは、ガスパイプ布設用の産業トンネルであり断面形状は、従来の沈埋トンネルに比べ小断面なものである。この場合、函体に浮力を与えるために断面厚さを小さくする必要性から、構造的に有効な円形断面形状を採用した。

円形断面とすることで函(管)体の断面応力は、円周方向圧縮力が支配的となり、コンクリートの特性を生かせるため、断面厚さは矩形断面より小さくすることができた。

次に円形断面とした沈埋管の主要構造部材として、

RC構造、PC構造、合成鋼管構造の三つのタイプについて、構造上、施工上の問題について比較検討をした。

(1) 構造部材に対する検討

沈埋トンネルの構造部材を選定するうえで次の2点について特に配慮した。まず第1に沈埋トンネルは、周知のとおり水底横断トンネルとしてその機能を果たすことから、トンネルの構造部材は特に水密性を要求される。いままでにRC構造で製作された沈埋トンネルはコンクリートのもつ乾燥収縮クラックなどが避けられず外面に止水鉄板、または樹脂系の防水工などを施している。

第二に沈埋トンネルは一般の山岳トンネルなどに比べ軟弱地盤層に建設されることが多いため、地震の影響を受けやすい。特に我が国のような地震国では耐震性に対する配慮が必要であり、耐震設計の結果ではトンネル軸方向に大きな引張力が作用するのでこれに抵抗しうる構造部材を必要とする。

以上の点に対しPC構造や合成鋼管構造とすることで水密性が高く、耐震性に優れたトンネル構造が得られるが、合成鋼管構造とした場合腐食などによる耐久性が問題となることと経済性を考慮して、PC構造形式の採用となった。

(2) 施工性に対する検討

沈埋トンネルの場合、管体の製作場所や製作方法についても工費や工期の面で大きなウエイトを占める。一般に管体の製作は、仮設のドライドックを建設して製作するか、既設の造船所の設備を利用して鋼殻を製作し、沈設現場付近まで曳航し、艀装さん橋で鋼殻内に鉄筋コンクリート管体を製作する方法がとられている。しかしこうした場合、ドライドックの建設コストおよび造船会社の管理工程に左右されるなどの問題があるため、今回は管体断面が小さいこともあって吊上げ進水方式を採用した。次に製作方法であるが、沈埋トンネルのように長い構造物の場合、ブロック工法を採用することにより、工

費、工期の大幅な節減になる。特にPC構造物の場合は、プレキャストブロック化して製作するメリットは大きい。

以上、今回の沈埋トンネルの計画にあたって比較検討した結果、プレキャストブロック工法によるPC沈埋管を採用した。一般にこのようなブロックの接合法としてはブロックの製作を重ね打ちで行って、相接する二つのブロック端面を同一形状にしたり、あるいは接合目地部に一定の間隔を設け、間詰めコンクリートを打設する方法などがとられている。しかしこのような方法ではブロックの移動回数が多くなり、養生にも多くの日数が必要となるため、工程が厳しくかつ接合個所の強度や水密性を高めるためには好ましくない。これらを解決するため特殊な機械によってブロック端面を切削仕上げをしたうえで、両部材を接合するゼロ目地工法を採用した。

この機械は上端面を±0.2mm以上の精度で整正できるために、エポキシ樹脂による接着効果を高めるとともに工程を大幅に短縮することができた。

一方、本工法の採用にあたり、ブロック接合部の施工方法または、使用材料についての基礎実験（強度、漏水試験など）を行い、プレキャストブロック工法採用への裏付けをとった。

3. 設 計

3.1 設計外力と応力解析

トンネルエレメントは製作されてから進水→曳航→沈設→埋戻しが行われて完成する。この間に吊上げ進水時に応力を受け、さらに進水後は波浪、潮流などによる応力を、そして完成後は約 2 kg/cm^2 の水圧を受けることになる。また将来基礎地盤の不等沈下、地震、航行する船舶の投錨による衝撃力などの外力を受ける。したがってこれらに対して十分検討を行い、安全な断面設計を行わなければならない。今回の沈埋トンネル設計において考慮した外力の内容は、以下のとおりである。

〔施工時〕

施工時に応力の発生が考えられるケースとして次のようなものがある。

- 1) 管体仮置時
- 2) 管体吊上げ時
- 3) 曳航時
- 4) 沈設時

この中で管体仮置時については、プレストレス導入後ブロックをセットしている移動台車はずし、仮置台上に管体がセットされる。この時の管体に生ずる応力を仮置台上にバネ支持された梁として応力解析を行った。

管体吊上げ時は、45メートルエレメントを4点吊り

したときの4点に生ずる反力を求め、この反力により沈埋管を円筒シェルとして三次元FEMで応力解析を行った。管体に発生する応力としては地震時応力を除いて、このケースが最も大きく、その安全を確認のため、管体内に鉄筋計、ひずみ計を埋め込み応力測定を行った。

曳航時の応力検討は設計波高70cm、波長38mの波を受けるものとして、Sagging, Hoggingに対して検討した。実際には、管体の進水は波の穏やかな時に行い、また進水後の管体の繫留場所や沈設現場は洞海湾奥に位置するので、ほとんど波浪による影響はなかった。

沈設時に管体に生ずる応力の最大は、バルクヘッド付近に生ずる。これは水圧を外面より受けバルクヘッドを取り壊す前、この部分に円筒シェルとしての固定端モーメントが発生するので、これに十分耐えるよう考慮した。

以上は施工時における一時的な荷重であり、完成後はほとんどが消滅する応力である。

〔完成後〕

完成後の断面設計としては、水圧や土圧などの長期的な応力と地震や船舶の投錨など短期的な応力とに分けられ、次の各ケースについて検討した。

- | | |
|------------|--------|
| 1) 水圧および土圧 | } 長期応力 |
| 2) 不等沈下 | |
| 3) 地震時 | } 短期応力 |
| 4) 船舶の投錨時 | |

水圧および土圧によって管体に生ずる応力は、管体断面方向に発生する。この場合水圧は既往最高潮位および異常高潮位を対象とし、これに予想される波高を考慮した。そして土圧は震度法による地震時土圧を考慮して設計した。

沈埋トンネルのように、比較的軟弱な地盤に建設される長大構造物は地盤の不等沈下、土かぶり厚さの不均等などにより管体長手方向に応力が発生するので、弾性支承上の梁として応力解析を行った。

次に耐震設計であるが、ここでいう耐震設計とは主に地震時にトンネル軸方向に発生する軸力、曲げモーメント、せん断力などに対して検討を行った。一般に沈埋トンネルは山岳トンネルなどに比べ、軟弱地盤上に建設されることが多く、特に我が国のような地震国では耐震設計は重要であり、今回の沈埋トンネルの主要構造もこれによって決定されている。我が国においては、沈埋トンネル耐震設計指針（案）が土木学会で昭和50年3月にまとめられ、ようやく一つの方向づけがなされた段階である。今回の耐震設計では、設計スペクトルを用い静的に計算を行う変位法と、地盤を多質点系にモデル化し、地震波による応答解析を行う方法とにより検討した。変

位法による解析は BART トンネルで用いられたスペクトル法を一部修正して、トンネル自身の変位をも考慮に入れた衣浦港方式により計算した。次に応答解析は代表的な地震波である EL CENTRO 1940 NS と八戸 1968 EW を用いた。

耐震設計に対する地盤条件を決定するために、現地において PS 検層、常時微動測定を行ってその数値を把握した。

次に船舶の投錨によって管体に生ずる応力の検討は若松航路を航行し得る最大対象船舶を 20 000 DW/T とし、この船舶が緊急停船するとき、ウインドラスブレーキをかけないで投錨し、管体上に自由落下するものと想定して管体に生ずる応力の検討を行った。

3.2 断面算定と有効プレストレス量

以上の各ケースについての応力の算定を行い、管体の設計を行った。この結果トンネル軸方向には地震時荷重が断然大きく、この方向にプレストレスを導入して断面設計を行い、また管体断面方向は円形断面のため、軸圧縮力によって支配されることになり、鉄筋コンクリート構造とした。

耐震設計において変位法と応答解析の結果にかなりの差を生じたが、両者の値を満足し得る数値を設計に取入れた。

管軸方向に導入するプレストレス量は、前述したように地震時で決定される。若松側 2 エlement に対しては SEEE 工法により FC 130 T を 14 本配置して有効プレストレス量 37 kg/cm² を導入し、またその他の Element については MDC 工法により 12-7φ を 14 本配置して有効プレストレス量 21 kg/cm² を導入した。

PC の設計はフルプレストレスングで行い、地震時応力が発生しても残留圧縮応力が残るように設計した。

有効プレストレス量の算定にあたり、ゼロ目地接着工法であるので、接着剤の変形は考慮せず、コンクリートの弾性変形、乾燥収縮、クリープまた PC 鋼線のレラクセーションに対して補正を行った。これ以外に緊張台車のころがり摩擦として摩擦係数 0.05 を考慮した。

管体内には鉄筋計、ひずみ計を挿入して、緊張時の計測を行い、有効プレストレス量の補正を行ったが、設計プレストレス量よりも大きめの値となった。

4. 沈埋管 Element の製作

4.1 製作ヤードおよび製作諸設備

製作ヤードは三井鉱山コークス(株)響灘工場の敷地の一部を借用して、プレキャストブロック工法によって PC 沈埋管 Element を製作した。製作ヤードのレイアウトを図-4 に示す。また製作ヤードの主要諸設備は次のようなものがある。

鉄筋編成機	1 基
ブロック製作架台	2 基
ブロック端面切削機	1 基
ブロック転傾台	1 基
接合および緊張台	5 基
30 t 吊りガントリークレーン	1 基
サブクレーン	2 基

4.2 Element 製作手順

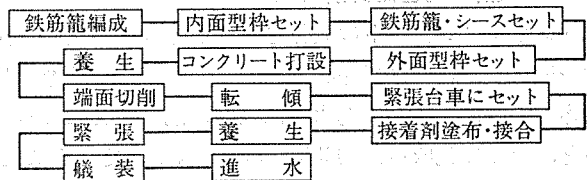


図-5 Element 製作手順

Element の製作手順は図-5 のとおりである。

4.3 製作工程

ブロックの製作個数は次のとおりである。

- 標準ブロック (l = 4 m) 86 個
- バルクヘッドブロック (l = 2.5 m) 20 個
- 端部ブロック (l = 2.0 m) 19 個

製作架台は 2 基セットされ、型枠は標準ブロックおよびバルクヘッドブロック兼用に 2 セット、端部ブロック用に 1 セット

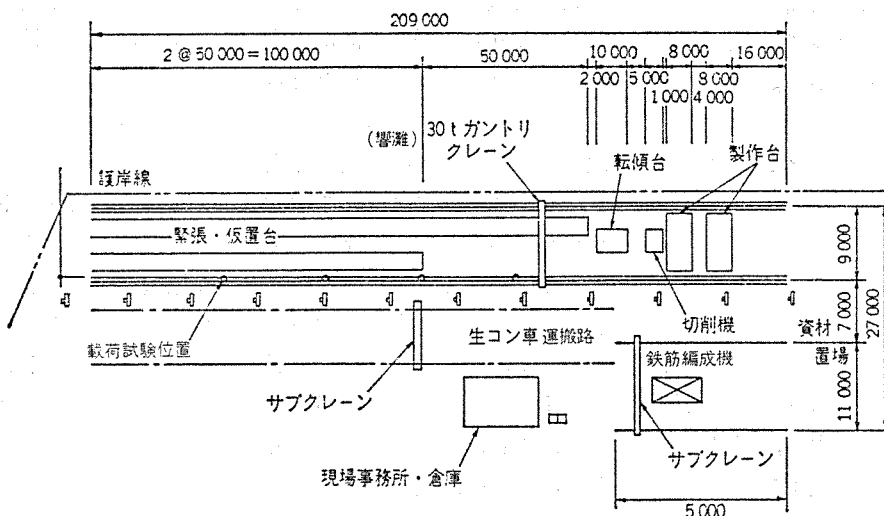


図-4 製作ヤードレイアウト

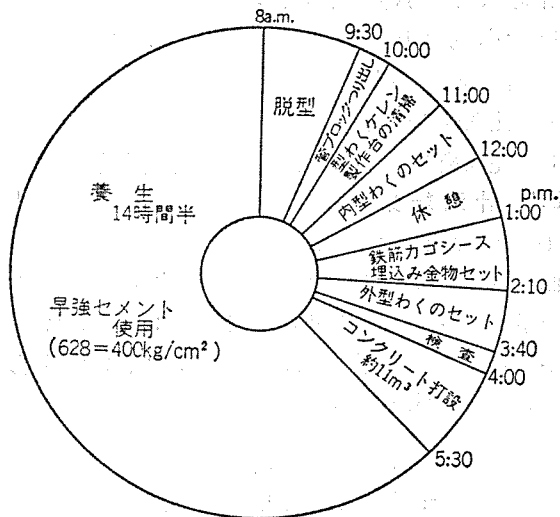


図-6 標準管製作サイクルタイム

用意した。そして図-6 に示されるサイクルタイムで製作し、ロスタイムなどを見込んで2日で3ブロックの工程を考えた。

コンクリートは早強セメントを使用して、約15時間の養生でコンクリート圧縮強度 160 kg/cm² 程度で脱型して移動した。移動する際ブロックに無理な応力が発生しないような治具を使用した。

脱型されたブロックは端面切削機で上端面を切削して、ブロック転傾台で横向きにされ、緊張台にセットされる。セットされた13ブロックの端面に接着剤を塗布して約5 kg/cm² 程度の面圧をかけ48時間の養生をした後、本緊張を行った。1エレメントを製作するのに必要な実日数は約45日であった。実際には平行作業が可能であったので、10エレメント製作するのに約6か月

の工程で完了した。

4.4 使用材料

使用するコンクリートの配合は表-2 に示す。

接着剤はトーホーダイト AC 731-P を使用した。作業性を考えて可使時間は7~8時間とし、鉛直面に塗布するので粘性の高い調合とした。

5. 沈設施工

製作されたトンネルエレメントは前述したように、1エレメントずつフローティングクレーンにより吊込み進水され、沈設現場付近の牧山岸壁まで曳航され、仮保留した。そこで SEP に1エレメントずつ抱きかかえられ、内部に沈設荷重を兼ねたインパートコンクリートを打設して、沈設準備を完了した。

水中接合法は、ゴムガスカートで一次止水を行い水中圧接工法で接合した。ゴムガスカートは東京ファブリック製の PES-TYPE を使用した。

基礎工法は1エレメントに2個所の砕石ポケットを設けて(図-7 参照)管体の一次据付けを行った。この時点で SEP は離脱できるので SEP の航路内滞船時間を短縮し、航行する船舶への影響が避けられ、また同時に基礎工事の作業性、施工精度を高めることができた。また円形トンネルであるため、砕石投入後、管底に未充填部分が生ずるので、埋戻し後管内よりの作業によって基礎工の仕上げを行うことが必要である。このためあらかじめトンネル底部に埋め込んだパイプを通して砂の注入を行い、未充填部の閉塞をして基礎の施工を完全にした。

表-2 コンクリート配合表

設計基準強度 (kg/cm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤
400	20	11	4	39.6	40.5	178	450	681	1066	P. No. 5 L 1125 g/m ³

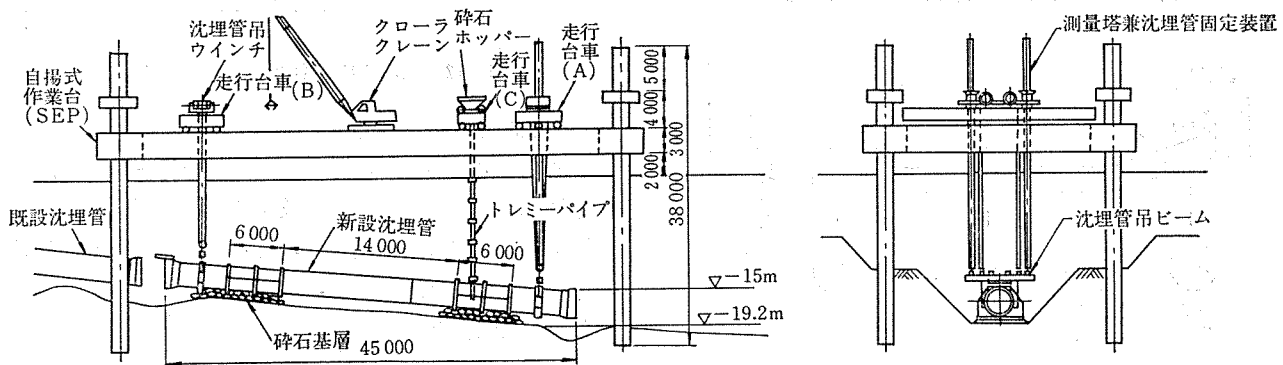


図-7 沈埋管沈設施工図

6. 計 測

6.1 概 要

本工法は、国内でも初めての試みであるために、慎重な施工が要求され、また今後の設計・施工上の資料を得る目的で沈埋管に各種の計器を埋設し、計測を行った。

使用した計器の一覧表を表-3 に示す。

表-3 計器一覧表

測定項目	計器名	台数	仕様	設置位置
鉄筋応力	鉄筋計	72 台	BF-10 C	沈埋管躯体
コンクリート応力	ひずみ計	4 台	BS-25 A	〃
コンクリート表面ひずみ	〃	26 台	BS-25 A	ブロック接合部
温度	熱電対	18 点	CC	沈埋管海水中

鉄筋計、ひずみ計、温度計の設置位置を図-8, 9, 10 に示す。

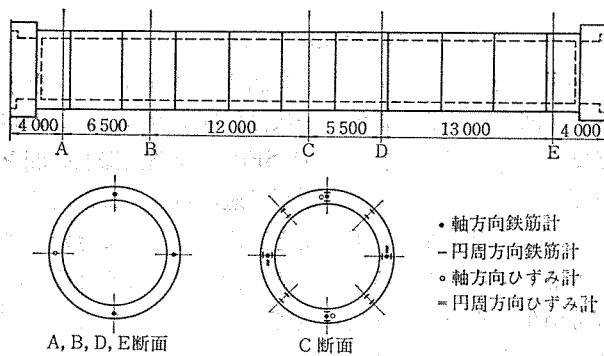


図-8 鉄筋計・ひずみ計設置位置図 (3号管)

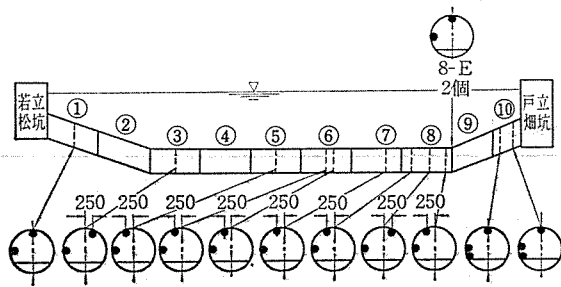


図-9 コンクリート表面ひずみ計位置図

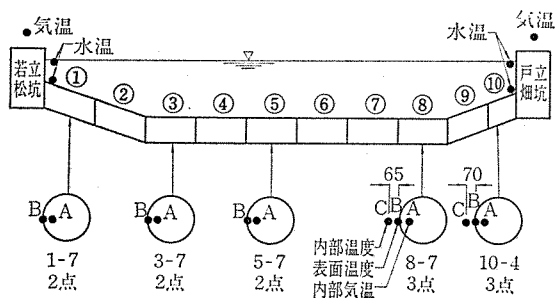


図-10 温度計設置位置図

計測は、次の段階で行った。

- 1) ブロック接合時、プレストレス導入時
- 2) 沈埋管の吊上げ時、曳航時
- 3) 沈埋管の沈設時
- 4) 完成後クリープ、乾燥収縮、温度応力作用時

6.2 計測結果

(1) プレストレス導入

図-11 にプレストレス導入時の管体軸方向の応力分布を示す。底部で台車の摩擦によるプレストレス量の低下がみられるが、全体的に均一にプレストレスが導入されていることがわかる。

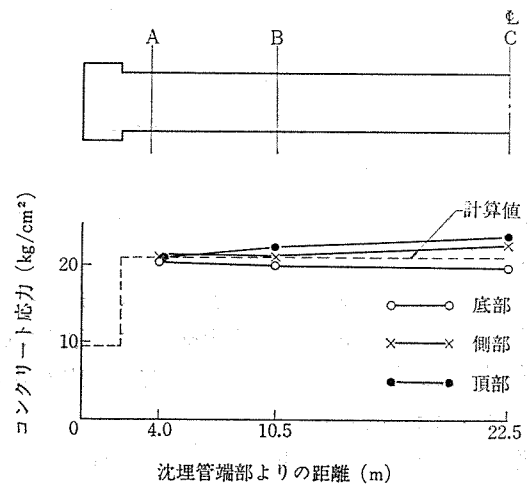


図-11 プレストレス導入時の管体軸方向応力

(2) 曳航時

沈埋管の曳航時に波浪により管体に正負の繰返し応力が生じる。設計上は、最大波高 70 cm、波長 38 m を想定したが、実測では、図-12 のような応力となり、この結果より波高 26 cm、波長 39 m となった。

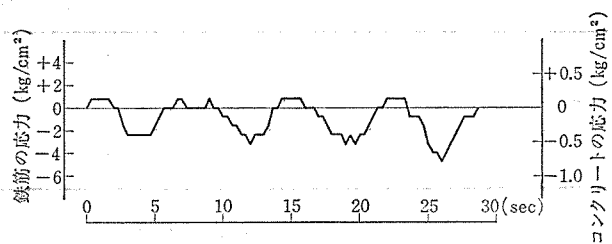


図-12 沈埋管曳航中の管体軸方向応力

(3) 沈設時の管体応力

沈埋管の沈設時の管体応力の実測例を図-13 に示す。円周方向は、ほぼ計算値と一致するが、管軸方向の頂部に大きい圧縮応力が発生した。これは、海底地盤の不均一性によるものと思われる。

(4) 乾燥収縮とクリープ

ダミーブロックを用いてコンクリートの乾燥収縮とクリープを測定した結果を図-14 に示す。この結果より

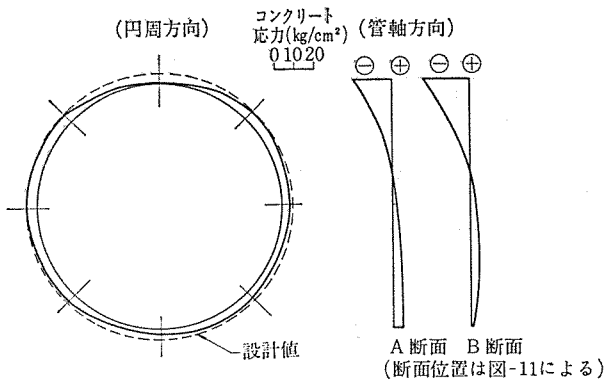


図-13 沈設時の管体応力

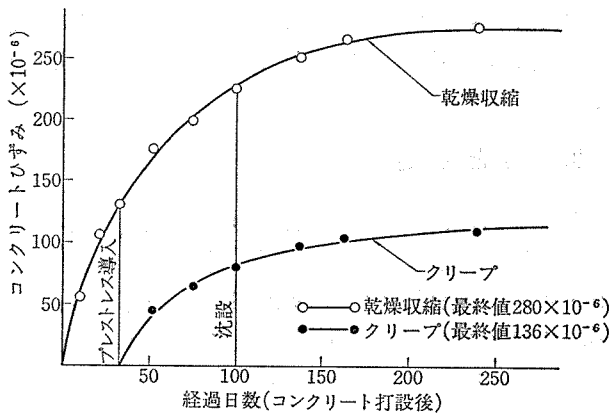


図-14 乾燥収縮とクリープ曲線

最終を推定すれば、乾燥収縮 280×10^{-6} 、クリープ 136×10^{-6} (クリープ係数 2.1) となった。

(5) 沈埋管の温度変化と管体ひずみ

沈埋トンネル完成後に沈埋管の管体ひずみを長期測定

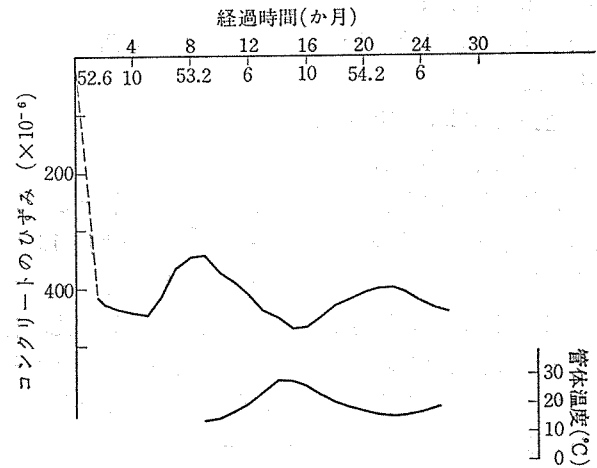


図-15 管体温度と管軸ひずみ

した。その結果の一例を図-15 に示す。この結果より沈埋管は、外気温の変化に敏感に反応していることがわかる。特に完成後の初期にはエキスパンションの機能が十分に発揮していなかったために冬期に多少の引張ひずみが記録された。しかし、2年目の冬より順調にエキスパンションが作動し、引張ひずみが減少した。

7. 将来の展望

以上より本工法の海洋構造物への適応性が確認されたので将来の展望について事例をあげて述べる。

7.1 大規模海底トンネルの例

〔PC沈埋トンネルの概要〕

1) ブロック寸法

内径 5 000 mm, 外径 6 200 mm, 長さ 5 000 mm

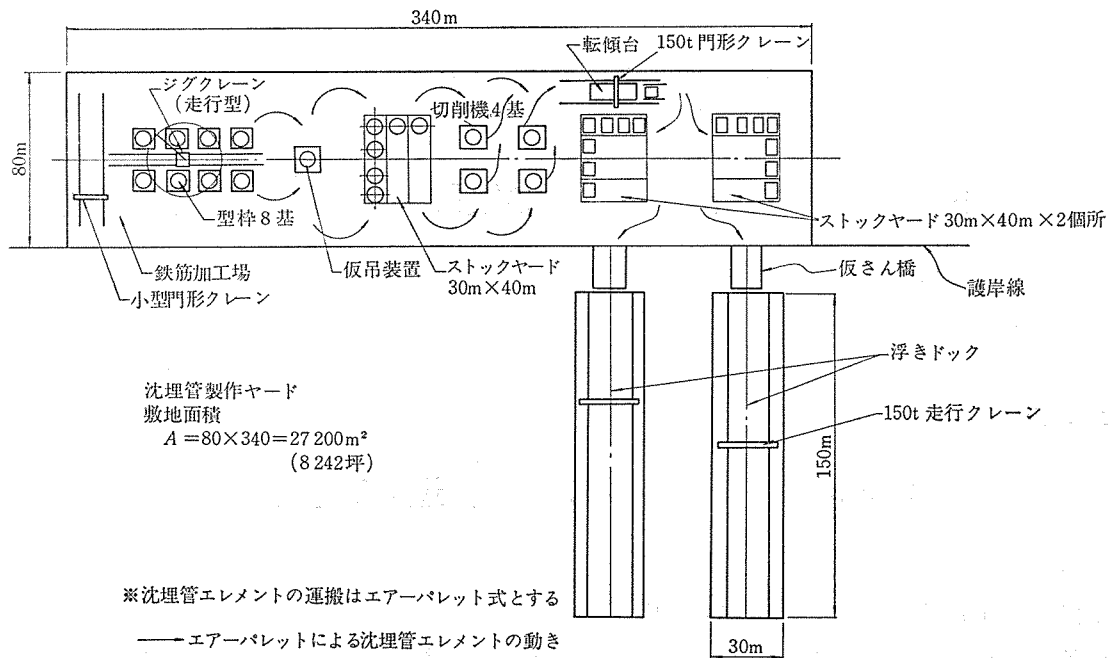


図-16 沈埋管製作ヤード

報 告

2) 沈埋管寸法

長さ 120 m, 重量 3 187 t, ブロック数 25 個

3) 沈埋トンネル

総延長約 12 km, 沈埋管数 100 管

4) 沈埋管製作方法

1 か月当りの沈埋管製作数, 沈設管数を 4 管とし, 総工期を 3 年とした場合の製作ヤードの概要を 図-16 に示す。特徴は, ブロックの接合を 6 000 t の浮きドックを 2 基準備し, この浮きドック内で同時に 4 管の沈埋管の製作が可能となる。また製作ヤード内のブロックの運搬をエアパレット方式で行い, 作業の迅速化と設備投資の減少を狙っている点も特徴の一つである。

5) 沈 設 工

沈埋管の沈設には, 沈埋管 1 管に 2 基の作業台船を用い, 両岸より沈設してゆき, 海の真中で接合させる。1 月当り 4 管を沈設し, 沈設の総工期は 25 か月である。

6) 工 事 費

工事費は, 海底地盤, 海象, 気象, 水深条件により左右されるが, 今回のケースでは 1 m 当り約 200 万円の工事費となった。

2.7 セミサブ方式プラットフォームの例

アメリカの海軍土木技術研究所で開発中の浮上式空港の例を紹介する。

デッキ面積 4 200 m² のセミサブ方式の浮上式空港のカラム, フロート部をすべてプレキャストコンクリートで製作しようとするもので, このために 図-17 のようなモデルを製作した。カラムおよびフロート部は, PC 沈埋と同様のプレキャスト PC 工法を採用し, 形状は円筒である。現在このモデルを海上に浮上させて試験中で

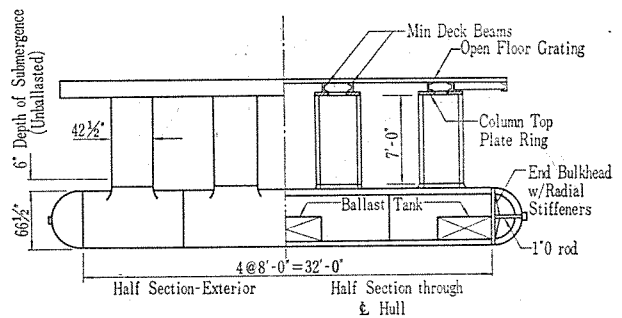


図-17 コンクリート製セミサブモデル

ある。将来のコンクリート製海洋構造物の方向を示唆している。

本工法をさらに発展させて, 魚礁, パージ, 大型港湾施設, 海洋備蓄施設, 人工浮き地盤など幅広く活用することが可能である。

8. あとがき

以上 PC 沈埋トンネルの計画から完成後の計測に至るまでの大要を述べた。今後海洋構造物に PC プレキャストブロック工法がますます活用されることと思われるが, 各方面において, より進んだ研究開発がなされることを望むとともに, 本文が多少なりと御参考になれば幸いである。

最後に, 本工事が極めて順調に完了したのも適切な御指導を賜った西部ガス K. K., 関係諸官庁ならびに, ブロック製作を担当されたオリエンタルコンクリート K. K., の理解ある御協力援助のお蔭であり, 本誌上を借りて厚く敬意を表するものである。

◀刊行物案内▶

プレストレスト コンクリート橋の設計・施工上の最近の諸問題

体 裁 : A 4 判 116 ページ
定 価 : 1 500 円 送 料 : 400 円

◀刊行物案内▶

プレストレスト コンクリート構造の高層建築設計例

体 裁 : B 5 判 63 頁
頒布価格 : 1,000 円 送 料 : 200 円
申 込 先 : 社団法人 プレストレスト コンクリート技術協会