

洋上コンクリートバッチャープラントを搭載する PC 函体の設計と施工について

後 藤 英 一*
松 元 和 彦**

1. ま え が き

昭和 53 年に工事を開始した本州四国連絡橋児島～坂出ルートの南北備讃瀬戸大橋下部工建設工事は、予定どおり昭和 63 年度の開通に向けて工事は進められている。

このうち、4 A は南北の備讃瀬戸大橋を結ぶ両吊桁のアンカレッジ部で、海面上の躯体はおよそ 25 万 m³ のコンクリートに及ぶ。このコンクリートを供給する設備としてコンクリートバッチャープラント (150 m³/hr) を搭載するプレストレストコンクリート製函体 (PC 函体) を建造した。ここに PC 函体の設計・施工の概要について報告する。

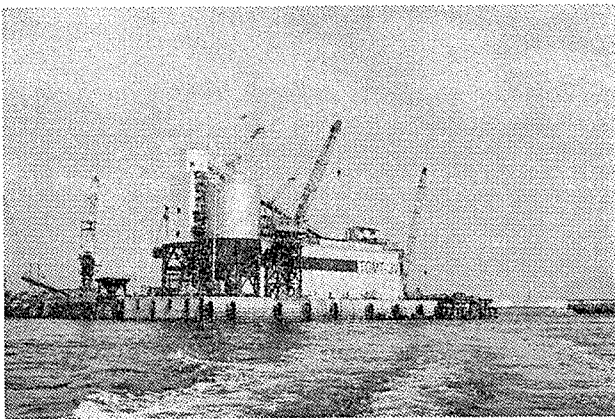


写真1 着底完了後の PC 函体

この PC 函体はコンクリート材料としての骨材および練混ぜ水 (清水) の貯蔵と、ベルトコンベアーその他プラント設備の一部を内蔵し、上甲板にはバッチャープラント、セメントサイロ、製氷プラント、鋼製骨材倉、その他各種のプラント設備を搭載した構造である。

2. 設計の基本的考え方

この PC 函体は、建造後、浮上、曳航したのち海底に沈設し、プラント稼働時には、着底構造物として使用するものである。すなわちプラント稼働時は着底式海洋構

造物、曳航時はフローティング式海洋構造物と両機能をもつものとして取扱われる。

設計の特種な条件として、次の項目があげられる。

- ① 浮上構造物にもなるため重量の制限を受け、大幅な軽量化が必要になる (1 に対し 55% の吃水率)。
- ② 稼働時に最大約 2 万 t の大容量荷重を支持する着底構造物。
- ③ 着底する地盤の支持機構の程度が、PC 函体の強度に大幅に影響を与える。
- ④ 波浪、潮流、地震等による着底時の滑動、浮上りに対する安定。

これら相反する条件をもとに、PC 函体の使用材料の強度を選定し、構造形式、着底構造を決定しなければならない。

コンクリート材料を海洋構造物に適用する場合、従来の陸上構造物に対し、耐久性の点が新しく注目される。

函体本体を構成する全部材に、良品質の高強度軽量コンクリートを使用、ハイグレードのプレストレスで全方向を補強することが設計の基本構想である。設計にあたっては現行の「プレストレストコンクリートバース基準」(日本海事協会) のほかに「プレストレストコンクリート標準示方書」(土木学会)、「本四連絡橋下部構造設計基準」(本四公団) および「DNV」、「ABS」、「U.S.S.R. REGISTER」などの諸外国の規則を参考とした。PC 函体の設計フローチャートを 図-1 に示す。

2.1 設計の概要

(1) 主 要 目

本 PC 函体の主要目は以下に示すとおりであり、その一般構造を 図-2 に示す。

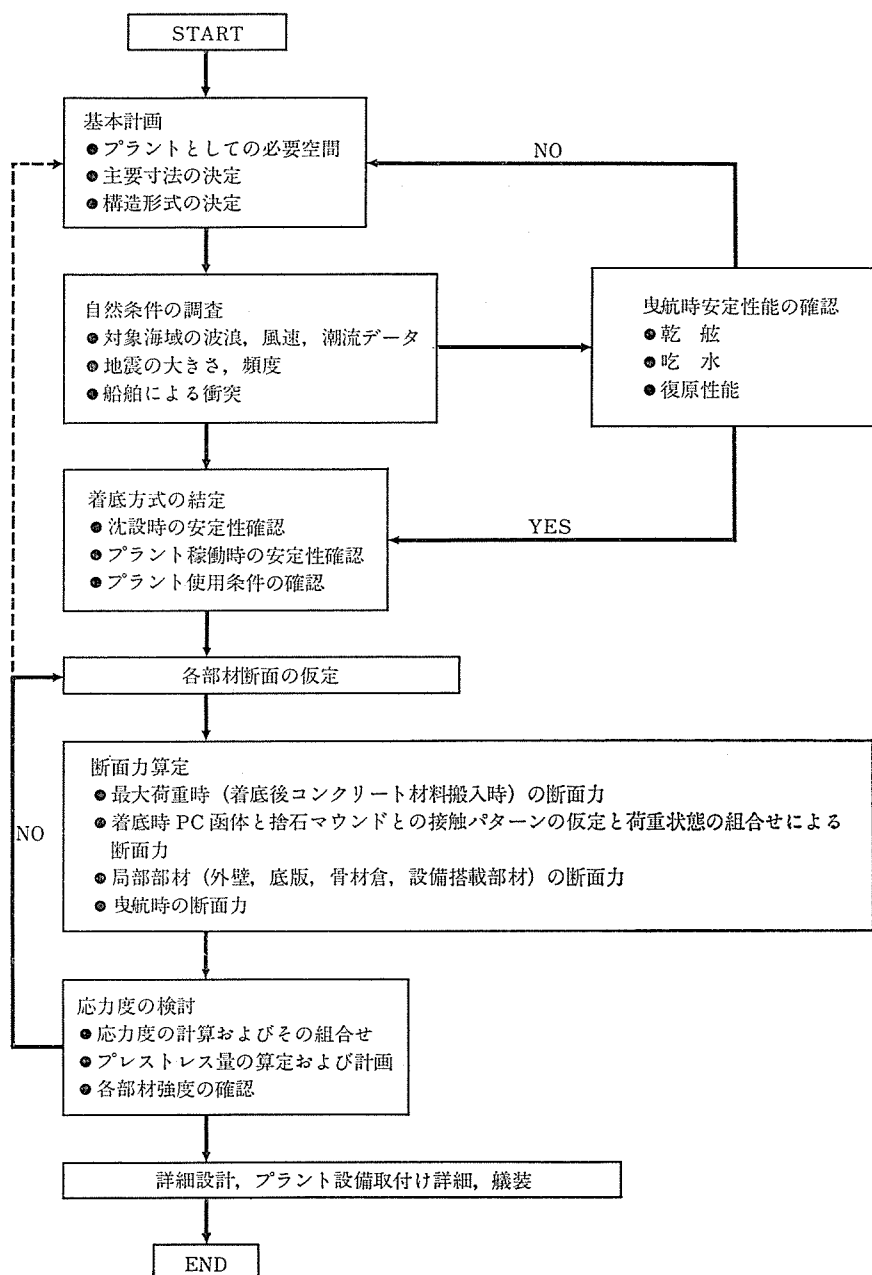
1) 主要寸法

全 長 : 62.0 m
全 幅 : 23.0 m
全 高 : 10.0 m
曳航時吃水 : 5.45 m

2) 主体構造

縦方向 PC 構造 (VSL ケーブル)
横方向 PC 構造 (VSL ケーブル)

* 南北備讃瀬戸大橋下部工北工区工事共同企業体所長
** 大成建設 (株) 土木本部土木部技術課長



図一 設計のフローチャート

鉛直方向 PC 構造 (アンボンド PC 鋼棒)

3) プラント設備

a. バッチャープラント設備

プラント能力 150 m³/hr
 コンクリートミキサー 2軸強制練り 2.5m³ 1基

b. コンクリート主要材料貯蔵施設

骨材 PC 函体内および鉄骨上屋内骨材倉
 (40m×17.6m×6.5m) (40m×17.6m×10m)
 約 16000 t

セメント 鋼製サイロ 1000 t
 混練ぜ水等 PC 函体内水槽 2000 t

c. その他搭載設備

骨材搬入設備, 濁水処理設備, 製氷プラント設備,
 給気・給水設備・残コン処理設備, 中央制御室,
 コンクリート試験室, 非常用発電機・変電設備等。

4) 艀装

ボラード, ゴム防舷材, ハッチ, ウインチ, その他。

5) 使用材料

コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck} = 450 \text{ kg/cm}^2$
 軽量コンクリート 比重 $\gamma = 1.90$
 普通ボルトランドセメント
 鉄筋 異形鉄筋 SD 30
 PC 鋼材 PC 鋼より線 SWPR 7 B $\phi 12.7 \text{ mm}$
 (VSL) 7本より

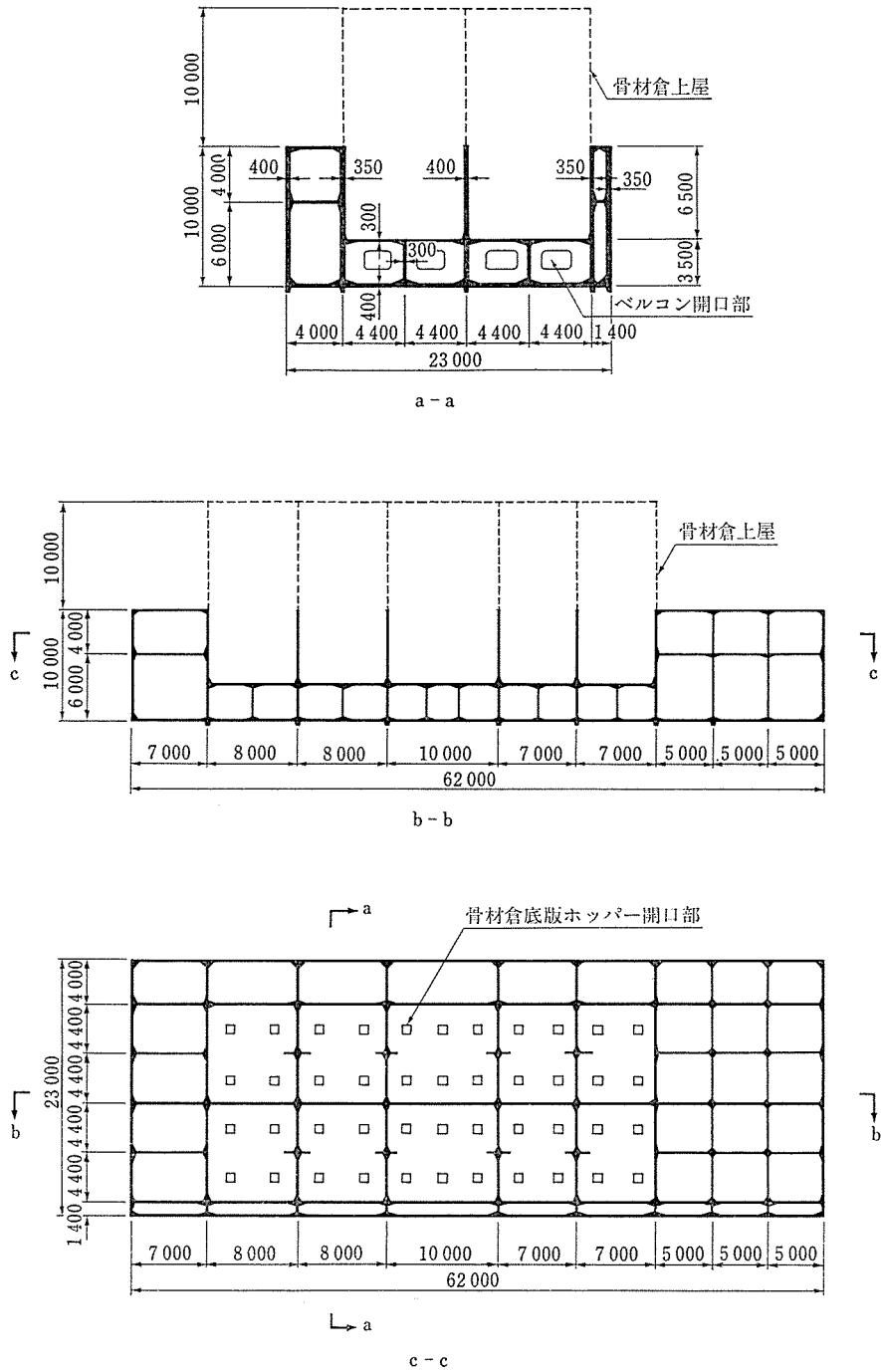


図-2 一般構造図

PC 鋼棒 SBPR 95/110 ϕ 32
(アンボンド被覆)

(2) 設計荷重

本 PC 函体の主設計荷重は、プラント稼働時、すなわち捨石マウンド上に着底し、約 2 万 t のコンクリート材料（骨材・セメント・水等）を積載したときである。最大荷重および各載荷荷重の分布と、捨石マウンドと PC 函体との接地パターン、すなわちバネ支承の大きさ、分布とを組合せ、各ケースの最大値を常時の設計荷重とした。

さらに、潮の干満差による浮力が、平均潮位時に比較し、約 2500 t 増減するので、この荷重も考慮した。

その他プラント稼働時の安定に関しては、バラストとしての、コンクリート材料の最小計画残量を以下に示す気象海象条件で検討した。

- 最大波高 4.1 m
- 最大潮流速 5.0 knot
- 最大風速 46.5 m/sec

また、耐震設計として水平震度 0.1 として検討するほか、EL CENTRO, TAFT, HACHINOHE 等の地震

波を用いた動的な滑動についても検討を加えた。

以上プラント稼働時が主設計荷重であるが、曳航時、沈設時については、以下に示す条件にて検討した。

〔曳航時〕

曳航時は静水圧のほか波浪による変動水圧、潮流圧を受ける。波浪に関しては、 $H_{max}=3.0\text{ m}$ とし浮体の長手方向を1本のはりと考え、波長が浮体の長さ62 m、波の峰または谷が浮体中央にきて最大曲げモーメントを受ける場合と、振りモーメントが最大となる入射方向 67° 、波長 35 m の場合とについて検討を行った。

〔沈設時〕

気象海象条件として、波浪・潮流・風速は観測データの統計値を考慮し決定した。

- 最大波高 1.1 m
- 最大潮流速 5.0 knot
- 最大風速 15 m/sec

なお、着底時には波浪による揚圧力も考慮した。さらに、潮の干満差約 $\pm 1.5\text{ m}$ に相当する浮力等を考え、PC 函体の安定（滑り）に必要な水バラスト量を決定した。

(3) 構造解析および部材の設計

PC 函体は構造全体の縦曲げと、骨材圧、水圧等により版構造として生ずる面外曲げとが加算された構造系で応力を受ける。全体形の縦曲げについては、本体構造を壁部材から構成された骨組格子構造とし、捨石マウンドをバネ支承とした弾性支承上の平面骨組格子構造として弾性解析を行った。バネ値については $k=0.75\text{ kg/cm}^3$ の全域均等バネのほか、捨石マウンドに $\pm 10\text{ cm}$ の不陸に相当するバネ値の変動を見込み、支持パターンの違いによる影響も考慮した。部材の設計に当っては海洋構造物であることを踏まえ、骨組構造により生ずる応力に対し、曲げ引張りを許さないプレストレス構造で設計し、面外応力が重ね合わさる船側板、底版については範囲が局部であるので、約 19 kg/cm^2 の曲げ引張りを許すパーシャルプレストレス構造とした。これら強度上の条件と函体の軽量化の条件を加え構造体の最適部材厚を定めた。その結果、部材厚は $20\text{ cm}\sim 40\text{ cm}$ 、コンクリートは設計基準強度 450 kg/cm^2 の軽量コンクリート ($\gamma=1.9\text{ t/m}^3$) を適用、プレストレスの量は $50\sim 90\text{ kg/cm}^2$ の軸プレストレスが主体的な高強度 PC 構造物となった。

なお、コンクリートの配合および強度結果を表-1、図-3 に示す。

(4) 着底構造

本 PC 函体は、着底後の供用時には約 2 万 t 強のコンクリート材料による荷重を受け持ち、工事終了後は再び

表-1 コンクリート配合

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨材 率 S/a (%)	単 位 量 (m ³)					
					水 W (kg)	セメン ト C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 G (kg)	混 和 剤	
									ポリリス No. 8 (kg)	流動化 剤 (kg)
15	18±2.5	5±1	34	41	170	500	648	587	(C× 0.4%) 2	10

セメント：普通ポルトランドセメント
細骨材：海砂
粗骨材：人工軽量骨材

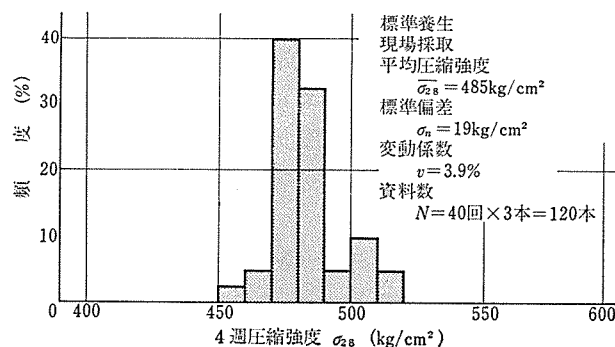


図-3 コンクリート圧縮強度の頻度分布

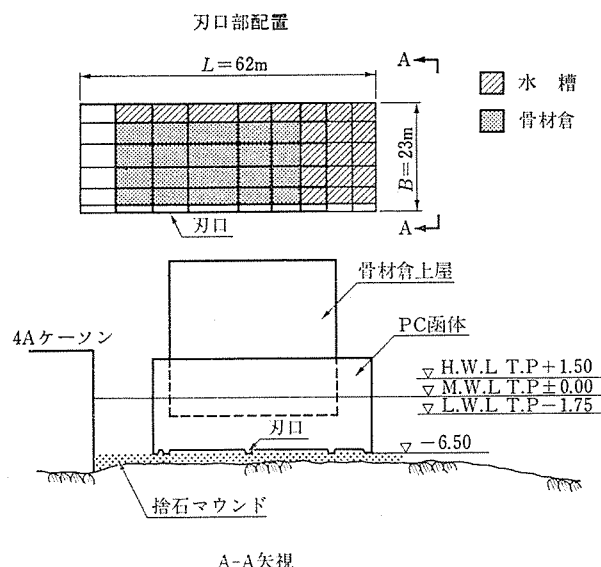


図-4 着底構造概略図

浮上させるものである。

着底工法を各種検討した結果、露出した海底岩盤上に約 1.0 m 厚の捨石マウンドを設け、その上に水バラストにより PC 函体を沈設着底させる工法を採用した。

この工法の特徴は、高さ 10 m の壁部材から構成されている PC 函体の底版の下に突起部（以下刃口と称する）を設けて、それを捨石マウンドに貫入させることでマウンド表面の不陸（均し精度 $\pm 10\text{ cm}$ ）を吸収し、刃口部全面がマウンド面に接地して全荷重を支持するとこ

ろにある。

刃口の配置は、図-4 に示すとおりである。この刃口配置は全壁部材の下に配置せず、積載荷重が集中する骨材倉隔壁周辺に配置した。その形状は最大荷重時で10数センチの貫入を想定し、高さ40cm、幅60cmのテーパ状のものとした。

3. 建 造

3.1 建造概要

函体本体の建造に対する要件として、次の3項目があげられる。

- ① 強度的要件として、設計上満足する高強度軽量コンクリートおよびプレストレスの品質管理。
- ② 浮上構造物である機能上の要件として、重量に対する制限、すなわち部材厚の製作精度とコンクリート素材の比重管理。
- ③ 製作されたコンクリート構造物が海洋構造物として耐久性があること。

これらの要件に対し、満足する具体的施工法および管理の基準を定めるため、本体施工に先立ち、事前の施工実験を実施した。流動化剤を添加した高強度軽量コンクリートの強度確認は勿論のこと、ポンプ打設による圧送性、締固め度合の確認、後添加流動化剤の必要量を定めるところにある。耐久性に最も関連のあるひびわれは、構造形状が複雑な場合、温度応力、乾燥収縮等の要因により、製作途上で発生するのが主である。函体のプレストレス構造を有効に活用し、函体をブロック分割し、製作と共にプレストレスの一部を逐次導入する施工法を採用し、ひびわれ制御に対処した。函体の施工法として、場所打ちと、プレキャストの両方式があるが、既設のドック内の製作条件を加味し、場所打ちの建造法を採用した。

諸外国の実例をみると、1976年アメリカ・タコマで建造されたLPGプラント兼貯蔵バージはプレキャストブ



写真-2 建造中のPC函体

ロック工法と場所打ち工法の併用、1979年イタリア・ジェノバで建造されたフローティングドックは場所打ち工法で分割建造したのち洋上で接合、その他、北海油田関係の海底石油掘削リグ兼貯油タンクは場所打ち工法等、建造方法は建造施設および構造形式により種々様々である。その他、補助的な施工管理として、函体のコンクリート中に熱電対、高感度歪計を埋設し、打設したコンクリート温度の観測、分割プレストレスの導入力確認等を行い、養生の方法と期間、一次プレストレス量の設定等に用いた。PC函体完成時には、水密性を確認するため函体の内外部について水張試験を実施した。

3.2 施工実験

施工実験は主にコンクリートの施工上の問題点を確認・解決するために行ったものであり、そのいくつかについて述べる。

(1) 高強度軽量コンクリートのポンプ圧送

一般に高強度軽量コンクリートのポンプ圧送は、圧送管内の閉塞のため難しいとされているうえ、今までこの種の実績はほとんどない。したがって今回の施工にあたっては、水平換算距離にして約170m相当の圧送実験のほかに、現地において実際の条件に応じた確認実験を実施した。

現地での実験内容としては、

- ① 吐出量 (m³/hr) 4 inch 管

- ② 圧送を停止した場合の許容停止時間

等である。使用したコンクリートポンプは、スクイーズ式PH14-70を用いた。

実験の結果、吐出量は40m³/hrでも十分余裕があり、圧送停止を約40分程度した後でも圧送には全く問題がなかった。そのときの吐出量とポンプ吐出圧の関係を図-5に示す。

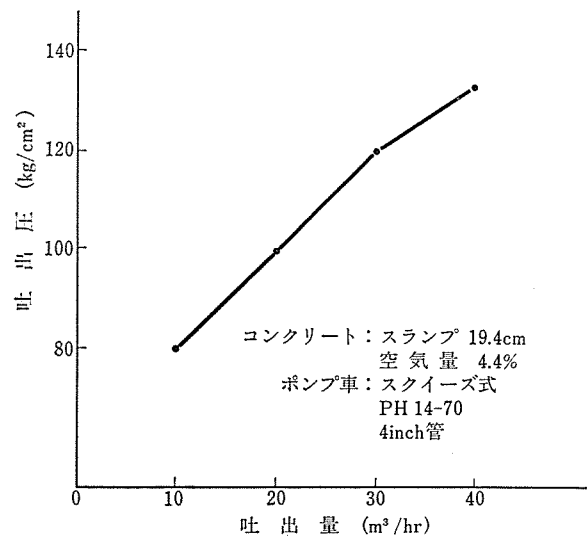


図-5 コンクリート吐出量とポンプ吐出圧の関係図

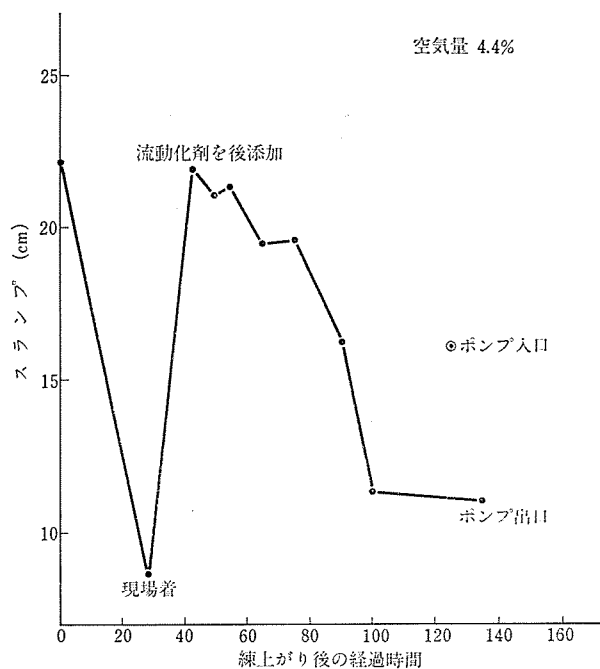


図-6 スランプダウンの経時変化と高性能減水剤の後添加

(2) スランプダウンの経時変化と流動化剤の後添加
本コンクリートは、特殊な配合のうえに、コンクリートプラントから打設現場までの運搬時間が 25~30 分を要する。適切なワーカビリティを有するコンクリートを施工するため、運搬途上のスランプダウンを考え、流動化剤の規定量の一部をコンクリート打設現場で後添加する流動化コンクリートを採用し、その施工性を確認した。その主な内容としては、

- ① スランプの違うコンクリートを適正スランプにするための後添加量
- ② 後添加した流動化コンクリートのスランプの経時変化

等である。①については約 65 cc/スランプ(cm)/m³ となり、実施施工でもほぼ一致した。また②については図-6 からわかるように後添加後 45~50 分が打設の許容範囲であった。また、さらに打設までの時間が延びると考えられた場合には、再後添加(リテンパリング)する方法もある。なお、この流動化剤を後添加したコンクリートの圧縮強度は、規定量全量を練混ぜ時に添加したものと差は認められなかった。

(3) 打設時のコンクリート温度

最近、工事例が増加してきた大規模の土木構造物にはダム構造物と同様に、温度拘束により生ずるひび割れが問題にされることがある。このような温度ひび割れは、強度の低い若材令時に発生し、致命的な障害となり得ることがある。特に本 PC 函体においては、温度ひび割れは以下のような不利な点が考えられる。

- ① セメント量が多く、水和熱によって大きな温度上昇が予想される。
- ② 軽量コンクリートであるので、コンクリート引張強度が普通コンクリートより小さい。
- ③ 壁、スラブが一体構造であるので、拘束度は大きいと思われる。
- ④ 壁、スラブともに薄い部材であるので、冷却速度が通常より大きいと予想される。

したがって、実物大の供試体を造り実際の温度上昇を測定し、施工管理に応用した。

3.3 製作

(1) ブロック割り

函体の製作は、図-7 に示すごとく、縦方向に 5 ブロック、高さ方向に 6 リフトに分割して行った。

縦方向の 1・3・5 ブロックは、2・4 ブロックより先行し、1 ブロック単位は 1 リフト同時施工である。

コンクリートの打設は、スクイーズ式ポンプ車 2 台を用い、ポンプ車のブームのみで行った。

養生期間はコンクリートの温度および歪の測定をもとに調整し、スラブについては散水とマット養生、壁部材については型枠存置期間を打設後 4 日間とした。打設されたコンクリート温度の低減のためにシーすを利用したエアークーリングも試験的に行ったが、これも有効な方法で効果があった。各ブロックおよびリフト間の打継目は、レイタンスの除去と目荒しを兼ねてチップング、ワイヤーブラシなどによる通常の方法で処理した。

(2) プレストレッシング

PC 補強として用いられている鋼材は、ストランドから構成された PC ケーブルと、アンボンド型 PC 鋼棒の 2 種である。前者は版あるいは壁の水平 2 方向に用い、後者は壁の鉛直方向のみである。長手方向の PC ケーブルは両引構造とし、コンクリート打設後、ストランドを挿入する後挿入方式を採用し、短手方向の PC ケーブルは片端固定の埋込み方式である。製作途上のひび割れ制

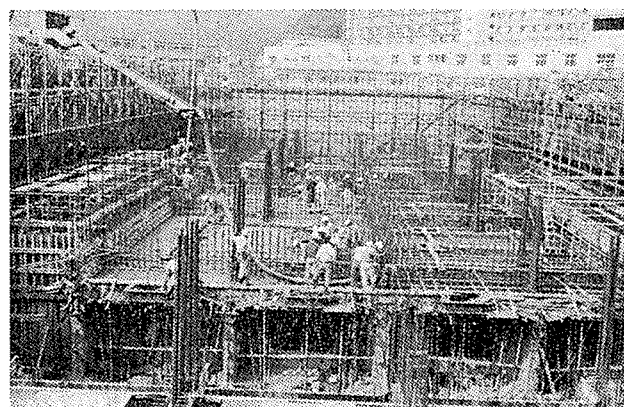


写真-3 コンクリート打設状況

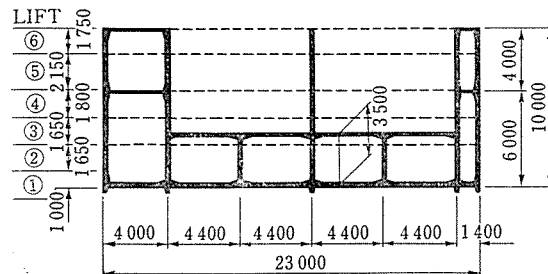
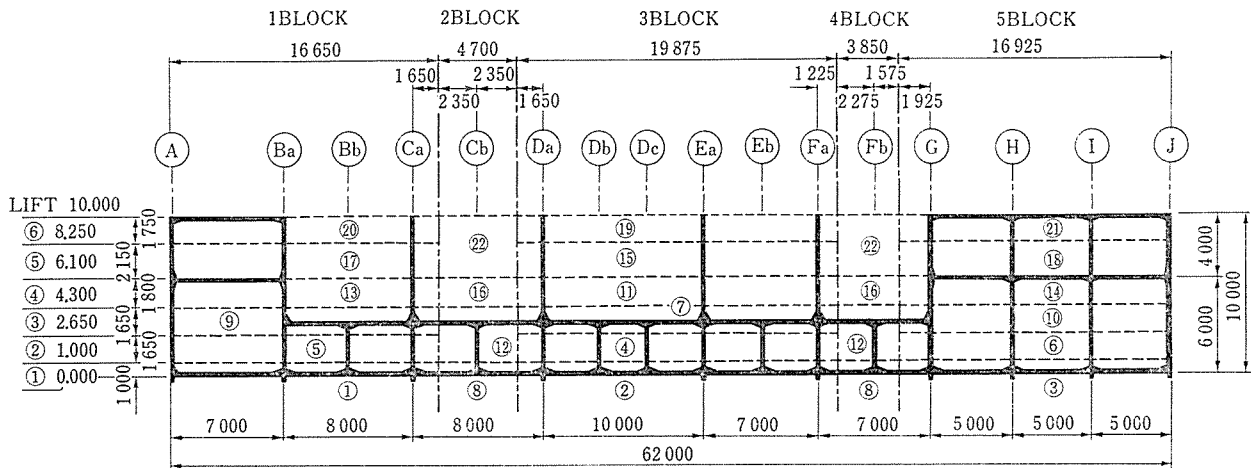


図-7 ブロック施工割図

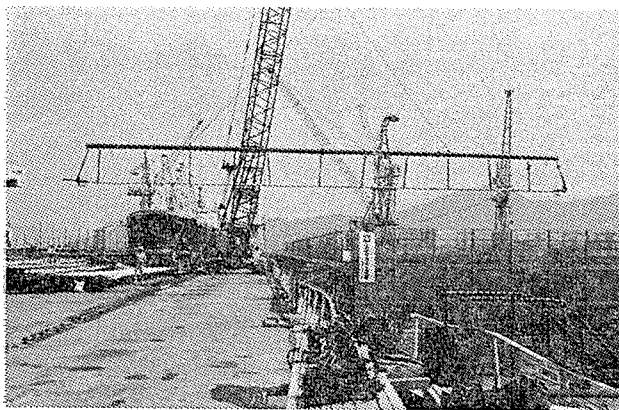


写真-4 横締め PC ケーブルの吊込み

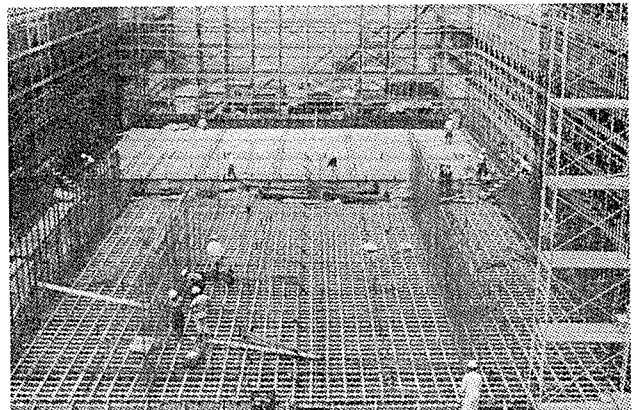


写真-5 底版の PC ケーブル布設状況

御として入れる一次緊張は両ケーブルについて行い、そのプレストレス量は全量の 1/5 相当である 10~20 kg/cm² とした。横方向のプレストレスは、各ブロック単位に行い、1 リフト打設と共にその所要量を単独に導入し、長手方向は各ブロックのリフトが一致した段階でケーブルの後挿入を行い緊張力を与えて、ブロック相互の一体化を行った。それぞれのプレストレスの時期は長手方向で打設後 2 日目、横方向で 4 日目である。鉛直方向のアンボンド鋼棒は分割プレストレスはなく、

函体が全体に出来上がったあと全域にわたって導入した。

(3) コンクリート温度の管理

施工実験によっても、大きな温度上昇が確認されたので各ブロックのコンクリート中に熱電対や高感度歪計を設置して、温度上昇や歪を計測した。図-8, 9 に示すのは、2 ブロック 2・3 リフトにおける計測結果である。図-9 より最大温度は、打設後 24~48 時間後に生じ、最大 23°C 上昇している。なお、隅角部などの部材拡幅

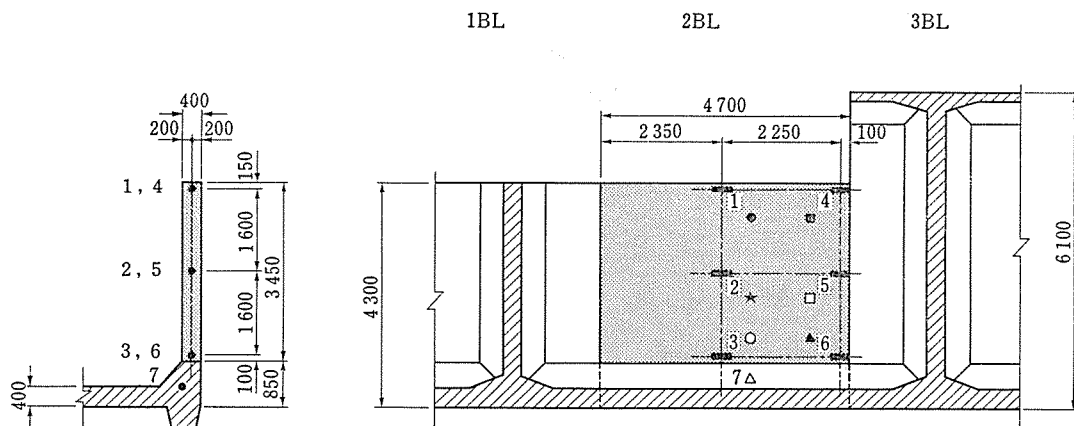


図-8 ゲージ配置図(2ブロック 2.3リフト)

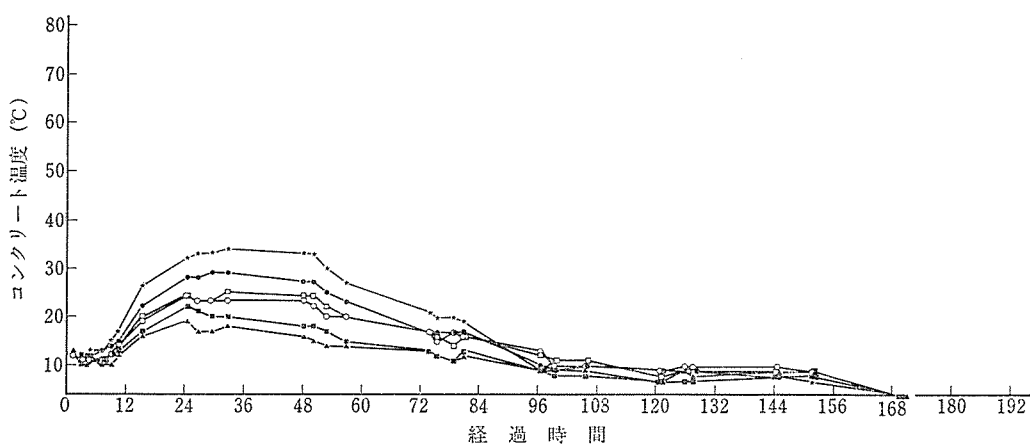


図-9 打設時のコンクリート温度上昇

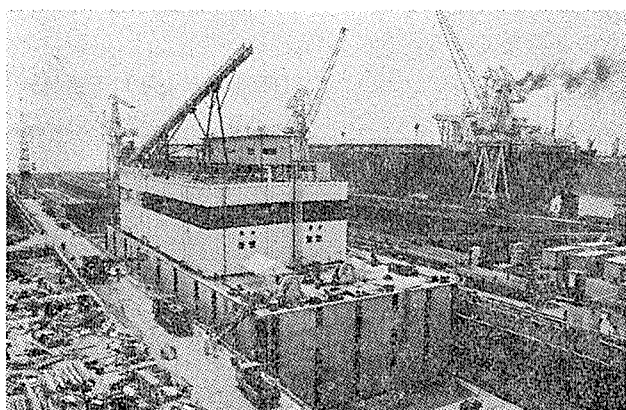


写真-6 進水直前の PC 函体

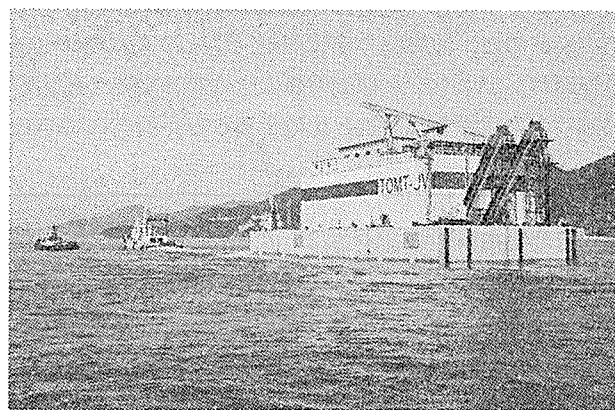


写真-7 曳航中の PC 函体

部で約 40°C の温度上昇が認められた個所もある。

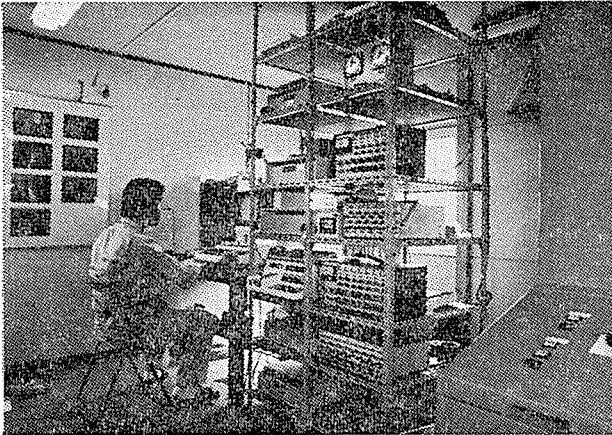
3.4 進水, 曳航

本 PC 函体の進水は, 一部のプラント設備を搭載した状態で行われた。進水方法としては, ドライドック内で建造したので, 一般的なドック内注水方式により進水させた。

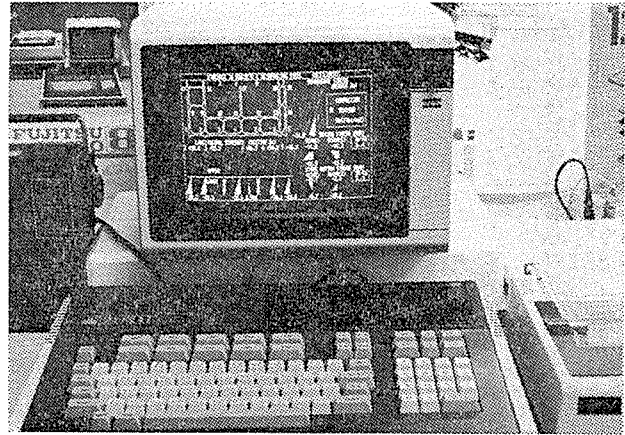
なお本構造物は, 自重およびプラント設備重量が偏心

しているため, 浮上時には, あらかじめ計算したバラスト水(海水)を張り, 浮上過程においては, マイクロコンピュータを利用した傾斜管理システムを用いて, バラスト量の微調整を行い, 速やかに完全なバランスを取ることができた。

曳航は出渠後直ちに開始し, 瀬戸内海の非常に速い潮流(4~5ノット)を考慮して主曳船3隻と補助曳船警



写真—8 マイコンシステムによる施工管理状況



写真—9 マイコンシステムによる函体応力表示

戒船等の船団を組み、坂出までの約 50 マイルの距離を曳航した。

4. 沈設およびコンクリート材料の搬入

本 PC 函体は曳航の後、岸壁にて残りプラント設備を搭載し（一部は着底後に搭載）、4 A アンカレイジ西側の海底に設けられた捨石マウンド上に、海水バラストにより無事沈設した。沈設場所は水深約 6.5 m、PC 函体と捨石マウンドとのクリアランスが平均潮位時で 40 cm 程度しか余裕がないので、高潮位時を利用してこの作業を実施した。

バラストスペースとしては、骨材倉、水槽を利用し、プラント稼働時には、水バラストを骨材、混練ぜ水と置換えることにより安定を確保した。また本 PC 函体着底工事のために、沈設時の函体傾斜、吃水、水バラスト量の管理およびプラント稼働時の大きな荷重に対する主要部材の応力状態を設計値と比較することが瞬時にできる

着底管理システムを、各種センサーとマイクロコンピュータを組み合わせることで開発した。

5. あとがき

本構造物は、本格的なプラント機能を有した大型海洋コンクリート構造物として、我が国では初めてのものである。特に着底式の洋上プラントとしたことで、材料供給船の直接接舷が可能な係留設備も兼ねることができ、また波浪による動揺がないこと等、機能的なメリットも多く、今後の各種海洋コンクリート構造物の応用範囲を大きく広げるものと考えられる。今後さらに海洋コンクリート構造物の設計、材料、施工の研究開発を進める一方、他の種々の着底工法や浮上係留工法の研究開発も行い、より一層優れた海洋コンクリート構造を造り出せるものと考えている。

【昭和 58 年 1 月 11 日受付】

◀刊行物案内▶

プレストレストコンクリート構造物設計図集（第 2 集）

本書は協会設立 20 周年行事の一環として、前回発行した設計図集の様式にならい編集した、その第 2 集です。協会誌第 10 巻より 21 巻に亘る巻末折込付図を主体とし、写真ならびに説明を付し、その他参考になる PC 構造物についてとりまとめた設計図集で、PC 技術者の座右に備え付けるべき格好の資料と考えます。

希望者は代金（現金為替または郵便振替 東京 7-62774）を添え、下記宛お申し込みください。

体 裁：B 4 判 224 頁

定 価：9,000 円（会員特価 7,000 円） 送 料：1,000 円

内 容：PC 橋梁（道路および鉄道）74 件、PC 建築構造物 25 件、その他タンクおよび舗装等 10 件

申 込 先：（社）プレストレストコンクリート技術協会

〒102 東京都千代田区麹町 1-10-15（紀の国やビル）電話 03 (261) 9151