本州四国連絡橋工事用 PC バージの設計と建造

金井壮次*¹・中川良隆*²・松岡康訓*³・浅井有一郎*⁴

概要 この度、本州四国連絡橋児島～坂出ルートの南北備讃瀬戸大橋の両吊桁の主アンカーケーブルを定着する 4 A アンカレイジの気中コンクリート（約 25 万 m³）を海上打設するため、コンクリートパッチャープラント（150 m³/h）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、この PC 函体の設計と施工の概要について報告する。

キーワード：プレストレストコンクリート、高強度軽量コンクリート、格子構造、水密性、疲労強度、衝撃耐力、ひびわれ耐力、流動化剤、コンクリート温度上昇、着底管理計測システム

1. ま え が き

本 PC 函体は、本四架橋の南北備讃瀬戸国際航路の中央に位置する高さ 86 m（海上部）、体積約 25 万 m³ の巨大な 4 A アンカレイジのコンクリート打設用の洋上コンクリートプラントとして、広島県三原市の造船所のドック内で建造し、昭和 57 年 6 月、4 A 西側^{えいさう}に曳航、沈設した。そして、9 月末から 4 A 気中コンクリート打設に使用し、現在に至っている。この PC 函体は、コンクリート材料としての骨材および練りませ水（清水）の貯蔵と、ベルトコンベヤその他、プラント設備の一部を内蔵するなど、函体内部を立体的に使用した。さらに、上甲板上には、パッチャープラント、セメントサイロ、製氷プラント、鋼製骨材倉、その他、各種プラント設備を搭載しており、PC 函体全体が有効に活用されている。このような用途としての PC コンクリート製海洋プラント設備（着底式）は世界でも初めてであり、今後、このような耐久性、経済性に優れているプレストレストコンクリートを用いた各種海洋コンクリート構造物が、ますます建造されると思われる。以下、本 PC 函体における設計および施工について、その概要を報告する。

2. 設 計

本 PC 函体は、建造後、浮上、曳航したのち海底に沈設され、プラント稼動時には着底構造物として使用される。また、工事が終了した後は再び浮上、撤去が可能な構造でなければならない。つまり、プラント稼動時は着

写真1 着底完了後の PC 函体

底式海洋構造物であり、その他はフローティング式海洋構造物と考えられる。したがって、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ジ基準」（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）や諸外国の基準を参考とした。

今回の設計にあたって問題となったのは、プラント稼動時における約 2 万 t 強の荷重に対して、いかなる着底構造とするか、また、PC 函体の主体構造形式をどのようにするかということであった。そこで、種々の着底工法や構造形式を検討した結果、着底方式は捨石マウンド方式とし、主体構造は、壁部材による格子構造とした。また、着底後のプラント稼動時の荷重による全体曲げに関しては、縦強度部材および横強度部材ともに引張力を生じない、いわゆるフルプレストレスとした。ただし、PC 函体と捨石マウンドとの接地パターンによる弾性ばね支承の分布により、全体曲げの大きさは左右されるが、

*1 大成建設（株）土木設計部設計長

*2 大成建設（株）四国支店本四瀬戸大橋作業所係長

*3 正会員 大成建設（株）技術研究所係長

*4 大成建設（株）土木設計部主任

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 (m³)					
					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)

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

捨石マウンドを±10 cm程度の精度でならすことを考慮して、その大きさの最大値を予測した。弾性ばねは、骨材倉周辺底版下に配置された刃口（高さ 40 cm，幅 60 cm）の部分に働き、そのばね定数は、刃口貫入実験から $k=0.75 \text{ kg/cm}^3$ とし、断面力を格子解析により算定した。また主要局部部材、たとえば舷側版、底版等は、全体曲げによる応力度と局部荷重による応力度を組み合わせるうえで、約 -19 kg/cm^2 の引張応力度を許すパーシャルプレストレスとなるようプレストレスの計画をした。なお、甲板等の一部の局部部材はRC構造とした。

海洋コンクリート構造物に適用するコンクリートは、強度はもちろんのこと、高い水密性が要求される。さらに今回は、パッチャープラント設置海域の水深からPC 函体の吃水に制限があり、したがって、PC 函体自重の軽量化も大きな要素である。このため、軽量化には人工軽量骨材（粗骨材のみ）を用い、また高強度および水密性の確保には、水セメント比を極力低減させ、設計基準強度 450 kg/cm^2 ，比量 1.90 を目標とし、なおかつ乾燥収縮が少なく、またワーカビリティのよい高強度軽量コンクリートを採用した。

なお、プラント稼動時のPC 函体の安定、つまり波浪潮流、風、地震等による滑動については、観測データから外力を決定し、その安全を確認した。

以上の基本的な考えに沿った本PC 函体の設計フローチャートを図—1 に示す。

図—1 設計のフローチャート

Design and Construction of Prestressed Concrete Barge using in Construction of Bridges between Honshu and Shikoku

By Souji Kanai, Yoshitaka Nakagawa, Yasunori Matsuoka and Yuuichiro Asai

Concrete Journal, Vol. 21, No. 8, pp. 42~49, Aug. 1983

Synopsis The light-weight prestressed concrete barge equipped a concrete batcher plant (150 m³/h) was built for the construction of northern and southern Bisan Seto Bridges between Honshu (Kojima) and Shikoku (Sakaide). At the present time it has been used to construct the over-sea portion of "4 A-anchorage", which is a 250 000 m³ concrete structure for anchoring main cables of the suspension bridges. This report shows the summary of design and construction of the prestressed concrete barge.

Keywords : prestressed concrete, high strength lightweight concrete, grille structure, watertightness, fatigue strength, impact strength, cracking resistance, superplasticizer, temperature rise in concrete, computerized installation monitoring system

図-2 一般構造図

3. 建 造

3.1 建造概要

コンクリートで海洋のフローティング構造物（供用時は着底して使用し、大きな載荷荷重を受ける）を建造するには、高強度で水密性の高いコンクリートを、適切な補強鋼材との組み合わせで、ひびわれの発生しにくい、耐久性の高い部材で製作しなければならない。また、材料そのものの軽量化、高強度の材料を使用した構造断面の縮小化による軽量化が行われているため、高度な施工技術と管理が要求された。そこで、今まで研究開発してきた強度、比重（空気量、軽量骨材の吸水量）、水密性等の材料そのものの性能試験のほかに、コンクリートポンプ圧送性、スランプダウンの経時変化と高性能減水剤の後添加（流動化剤として使用）、打設、締固め、打継目処理、養生等の施工方法について、実物大模型による製作実験も含めて種々の施工実験を行った。

今回のコンクリートは、人工軽量骨材を用い、単位水量を極力低減させた高強度コンクリートを採用した。しかし、このような特殊コンクリートを使用するには、材料面でも十分な品質管理が必要であり、また、構造形式、部材寸法、鉄筋やPC配置などからみて、従来の場所打ち工法の限界とも言えるものであったが、入念な施工管理のもとにドライドック内における場所打ち工法によるブロック施工を採用した。その他、主な施工管理として、コンクリートの中に設置された熱電対、高感度ひずみ計によりコンクリートの温度上昇やひずみを計測することで、養生方法や脱型時期、またプレストレス導入

図-3 着底構造概略図

図-4 コンクリート吐出量とポンプ吐出圧の関係

時期（一次緊張）、導入量を確認決定し、施工時におけるひびわれを防止した。これは、PC函体完成時における函体内およびドック内水張試験でも確認された。

3.2 施工実験

(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。そこで、現地において実際の条件に応じた確認実験を実施した結果、吐出量は 40 m³/h 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まったく問題がなかった。そのときの吐出量とポンプ吐出圧の関係を 図-4 に示す。

(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約 40 分を要する。適切なワーカビリティをもつ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

図—5 スランプダウンの経時変化と高性能減水剤の後添加

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 $325 \text{ cc/スランプ(cm)}/\text{m}^3$ となり、実施施工でもほぼ一致した。また 2) については図—5 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、規定量全量を練りませ時に添加したものと差は認められなかった。

3.3 製作

(1) 場所打ち工法によるブロック施工

1) コンクリート打設

本コンクリート打設は、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。

打設方法については、流動化されたコンクリートをスクイズ式ポンプ車 2 台を用い、ポンプ車ブームを施回しながら行った。とくに壁部材の打設においては、コールドジョイントを防止するため、打継時間を最大 40~50 分以内となるよう打設量、打設順序を考慮し、境界面には十分パイプレータをかけて締め固めた。

養生方法は、コンクリートの温度およびひずみの測定を行いながら決定した。スラブについては、散水養生とマット養生を併用し、壁部材については、コンクリート強度も考慮して、脱型時期を打設後 4 日目とした。また、最高温度の低減のためにシースを利用したエアクーリングも試験的に行ったが、これも有効な方法と考えら

写真—2 コンクリート打設状況

写真—3 建造中の PC 函体

れる。今回行ったのは、縦方向にセットされた空シースの片側からコンプレッサーによって空気を送り込む方法を用いた。また、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ピング、ワイヤブラシなどにより十分処理した。

2) プレストレス（一次緊張）による施工時のひびわれ防止

施工時のひびわれの主な原因として温度応力、乾燥収縮等が考えられるが、このひびわれを防止するためにはプレストレスを導入する方法が一番有効と考えられる。本構造物では、縦方向を 5 ブロックに分割施工し、そのうち 1, 3, 5 ブロックを 2, 4 ブロックより先行して製作していく方法を採用したため、2, 4 ブロックのコンクリート打設後 2 日目に一次緊張を行った。また横方向については、PC 定養端応力とコンクリート強度の関係から、打設後 4 日目に一次緊張を行い、両方向の一次緊張力については、コンクリート応力度で $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ とした。

3) 最終緊張

最終緊張の緊張順序は、横方向ケーブルについては、各ブロックが最終 6 リフトまで打ち上がった段階で各々約半分のケーブルの本緊張を、各ブロックおよびブロッ

写真-4 底版のPCケーブル布設状況

クジョイント面に有害な応力が生じないよう行い、全ブロック打設終了後に、残りのケーブルをすべて本緊張した。縦方向ケーブルについては、全ブロック打設終了後、全ケーブルを本緊張した。また舷側版や、水槽周壁のアンボンドPC鋼棒による鉛直締めは、各ブロックが最終6リフトまで打ち上がった段階で、ブロックジョイント面に有害な応力が生じないよう緊張した。

プレストレス量は、各部材設計荷重に応じ、PCケーブルにより $50 \sim 90 \text{ kg/cm}^2$ 、またPC鋼棒により $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ とした。本PC函体は、プレストレスを多く用いた版構造であるので、これらプレストレスを導入するにあたっては、緊張順序等に細心の注意を払って施工し、構造全体として非常に強固なものを建造することができた。

3.4 コンクリートの品質管理

本コンクリートは設計基準強度 450 kg/cm^2 、比重 1.9 以下の人工軽量骨材を用いた高強度軽量コンクリートであり、性能的には限界に近い高品質なコンクリートで、施工実績もきわめて少ない。そのため、施工に際しては検査を重視し、品質管理を従来以上に厳密に行った。

品質管理試験項目としては、①まだ固まらないコンクリートのスランプ、フロー、空気量、単位容積重量および温度、②硬化したコンクリートの圧縮強度、気乾状態における重量変化（比重管理）、③人工軽量骨材の吸水率、等であり、いずれも JIS の試験方法に準拠した。上記①、②の試験の測定頻度は、圧縮強度試験を除いて、いずれも 25 m^3 （5台）ごとに行うことを原則とした。また、測定時期は生コンプラント出荷時、現場到着時および流動化剤添加後の3回とし、コンクリートの品質の時間的変化の把握と、それに伴う流動化仕様の適正化を図った。

以下に、コンクリートの圧縮強度、比重およびスランプに関する品質管理の結果について簡単に述べる。

(1) コンクリートの圧縮強度

図-6 コンクリート圧縮強度の頻度分布

図-7 コンクリート強度経時変化

図-8 コンクリート圧縮強度と空気量との関係

本コンクリートは 23 回に分けて打設しており、1回の平均打設量は 140 m^3 （最大 220 m^3 ）である。供試体の採取は 100 m^3 につき 1 回を原則とし、出荷時 6 本、流動化後 12 本の合計 18 本/回を採取した。試験材令は 3 日、7 日、28 日で、 σ_3 は 1 次緊張におけるプレストレス量および導入時期の管理に使用した。図-6 は、材令 28 日におけるコンクリートの圧縮強度の度数分布を示したものであるが、40 回の測定結果の平均値は 485 kg/cm^2 、標準偏差 19 kg/cm^2 、変動係数 3.9% であり、この種コンクリートとしては、きわめてばらつきの小さい、安定したコンクリートが得られた。本コンクリートの空気量と圧縮強度の関係を求めると図-8 に示すよう

図-9 コンクリートの単位容積重量の経時変化

図-10 コンクリートの単位体積重量と空気量の関係

になり、ばらつきはあるが、空気量 $\pm 1\%$ の変化に対して圧縮強度 $\pm 5\%$ 変化している。

(2) コンクリートの比重

本構造は浮体構造である。この比重管理は、コンクリート中の空気量の管理にも直接関与する。空気量の設計値は5%であるが、運搬、流動化等による損失を考慮して、出荷時の目標空気量を7%とした。この空気量の管理は、打設時期に応じてAE剤量を変化させることで対処した。コンクリートの比重測定にはφ15×30cm 供試体を標準とし、一部 0.5m³ 程度の供試体を本構造と同一養生条件下で保存し、脱型直後から最終安定状態に達するまでの重量変化を測定した。

その結果は図-9に示すとおりであり、材令8週で安定状態に達している。この状態での重量減は約4%であり、また、この重量減少量の50%は初めの一週間で進行している。コンクリートの単位容積重量(γ)と空気量の関係を求めると図-10のようであり、両者は直線関係にある。これによると、空気量1%の変化に対して γ は0.03変化している。この傾向は流動化剤添加後も同様であり、流動化剤の添加によって空気量が減少し、 γ は増加している。

図-11は γ の経時変化を示した結果であるが、生コンプラントからの運搬(約40分)によって、 γ は0.03

図-11 単位容積重量の変動 (No. 1~23 平均)

図-12 スランプの経時変化

図-13 コンクリートの静弾性係数と静ポアソン比

程度増加している。これは、空気量1%減に相当する。また、流動化剤を添加することによって γ は約0.015増加している。

(3) スランプ

本コンクリートの特徴は流動化剤の使用方法にある。それは、出荷時のスランプを18cmにするためにセメント量の2%を高性能減水剤として使用し、さらに、運搬によるロスを補償するために現場で流動化剤として添加する2段階投入である。スランプ18cmは、ポンプ圧送性および密に配置された鉄筋やP.C鋼材をもつ部材の施

工性を考慮して決定した。図-12 はスランプの 経時変化を示した結果であるが、現地到着までの 40 分間の平均スランプロスは約 5 cm で、これを所定のスランプに流動化するために必要な流動化剤の量は約 1.63 l/m^3 であった。また、出荷時スランプと流動化剤の総添加量（プラント+現場）との関係を調べた結果、出荷時のスランプを 20 cm 程度とした場合に流動化剤の使用量がもっとも少なく経済的であるばかりでなく、現場到着時のスランプのばらつきも小さくなった。

3.5 進水・曳航

本 P C 函体の進水方法としては、一般的なドック内注水方式とし、一部のプラント設備を搭載した状態で行った。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、浮上過程において、マイクロコンピュータを応用した傾斜管理システムを用いてバラスト水量の微調整を行い、速やかに完全な水平バランスを取ることもできた。

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、警戒船等の船団を組み、坂出までの約 50 マイルの

写真-5 曳航中の P C 函体

距離を曳航した。

4. 沈 設

本 P C 函体は、曳航の後、岸壁にて残りの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 で、平均潮位時で P C 函体と捨石マウンドとのクリアランス

図-14 着底管理システム

写真-6 マイコンシステムによる施工管理状況

が 40 cm 程度しか余裕がないので、高潮位時を利用して実施した。

バラストスペースとしては骨材倉、水槽を利用し、プラント稼動時には、水バラストを骨材、練りませ水と置き換えることにより、PC 函体の安定を確保した。なお、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動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で開発した (図-14)。

5. あとがき

本構造物は、本格的なプラント機能をもつ大型海洋コンクリート構造物として、わが国では初めてのものでは

写真-7 マイコンシステムによる函体応力表示

る。また、着底式洋上プラントとして機能させようえ、浮上、撤去を可能にしたことは、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。今後さらに研究開発に努め、よりいっそう優れた海洋コンクリート構造物を造り出せるものと考えている。

なお、当 PC バージは、設計、建造中および曳航について、日本海事協会 (NK) の検査を受け、船級 NS* (Smooth Water Service, P.C. Barge) を付与された。

参考文献

- 1) Det Norske Veritas : Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures
- 2) U.S.S.R. Register : Rules for the Construction of Sea-going Reinforced Concrete Ships and Floating Docks
- 3) American Bureau of Shipping

《お知らせ》

第 8 回 複 合 材 料 シ ン ポ ジ ウ ム

——論文および参加募集——

主 催 : 日 本 複 合 材 料 学 会

協 賛 : 日本コンクリート工学協会ほか

会 期 : 昭和 58 年 11 月 1 日 (火), 2 日 (水) 10:00~17:00

会 場 : 日本化学会講堂 [〒101 千代田区神田駿河台 1-5, 電話 (03) 292-6161]

テ マ : 1. 基材, 力学的特性, 2. 応力解析, 3. 物性および機能, 4. 環境特性 (耐薬品性, 耐水性, 耐候性, 耐熱性), 5. 試験法および評価法, 6. 加工, 成型法, 7. 最適構造設計, 8. 応用, 9. コストおよびコストパフォーマンス, 10. その他

論文申込 : 「会員・非会員の別, テーマ番号, 演題とその英訳, 氏名・所属とその英訳, 抄録 (180 字以内)」を明記して, 8 月 31 日 (水) までにお申込み下さい (原稿は 9 月 30 日まで)。

参加申込 : 下記の参加費を同封してお申込み下さい。

会 員 3000 円 (予稿集を含む)

非会員 4000 円 (")

申 込 先 : 日本複合材料学会 [〒113 文京区弥生 2-4-16 学会センタービル内, 電話 (03) 815-1903]