明石海峡大橋主塔基礎の 水中コンクリートの施工

岡田 凌太^{*1}・坂本 光重^{*2}・井保 武寿^{*3}・中川 良隆^{*4}

概要 明石海峡大橋は中央支間長 1 990 m の 3 径間 2 ヒンジ補剛トラス橋として建設される世界最大の吊橋である。約 300 m の主塔をささえる 2 基の主塔基礎 (2 P, 3 P) は設置ケーソン工法により施工され、ケーソン内には全体で約 50 万 m³ の水中コンクリート (水中不分離性コンクリート) が打設された。この水中不分離性コンクリートには、打設面積が広く、かつ 1 回のコンクリート打設量が約 1 万 m³ に及ぶため、厳しい品質規定が定められた。本稿は、2 P, 3 P で打設した水中不分離性コンクリートの施工概要について報告する。

キーワード：主塔基礎、設置ケーソン工法、水中コンクリート、水中不分離性コンクリート

1. はじめに

明石海峡大橋は、橋長 3 910 m、中央支間長 1 990 m の 3 径間 2 ヒンジ補剛トラス橋として建設される世界最大の吊橋である。架橋ルート上の最大水深は約 110 m、最大潮流は毎秒 4.5 m (約 9 ノット) に達し、かつ航行船舶は 1 日約 1 400 隻に上り、さらに好漁場であるといった厳しい環境のもと、1988 年 3 月に本格的着工となった。

高さ約 300 m の主塔を支える 2 基の主塔基礎 (2 P, 3 P) は、着手して以来、工事が順調に進捗し、2 P は 1992 年 6 月に、3 P は同年 9 月にそれぞれ竣工した。1989 年 3 月に神戸側主塔基礎 (2 P)、同年 6 月に淡路側主塔基礎 (3 P) の鋼ケーソンをそれぞれ設置したのち、2 P 主塔基礎は 1989 年 10 月、3 P 主塔基礎は 1990 年 1 月より水中コンクリートの打設を開始し、2 P は 1990 年 10 月、3 P は同年 12 月に打設を完了した。2 基の主塔基礎で打設した水中コンクリートは約 50 万 m³ に及んだ。

両基礎の施工にあたっては、マスコンクリートであることから、水和熱の発生を低減するために、新たに低発熱型セメントを開発し、コンクリートの水中での分離抵

抗性に優れた水中不分離性コンクリートを採用するとともに、厳しい施工条件を克服するために最新鋭の専用コンクリート製造設備を製作するなど、多くの技術的課題の解決に取り組んだ。

本稿は、2 P, 3 P で打設した水中不分離性コンクリートの施工について報告する。

2. 基礎構造の概要

明石海峡大橋は、図-1 に示すように下部工は 4 つの基礎より構成され、2 基の主塔基礎は海中に設置されている。主塔基礎の寸法は、2 P が直径 80 m、高さ 70 m、3 P は直径 78 m、高さ 67 m である (図-2)。

基礎の施工法は、大水深 (2 P : 60 m, 3 P : 57 m) および強潮流 (2 P : 7 ノット, 3 P : 8 ノット) という厳しい自然条件のもとで確実な施工を行うために、瀬戸大橋で経験のある「設置ケーソン工法」とした。2 P および 3 P ケーソンの構造は鋼製の二重壁形式で (図-3)、内核部と二重壁部を隔てる鋼壁には、最上段に水中不分離性コンクリートの打設設備を搭載する受けげたのほかは、打継目処理で使用する処理機の走行に支障をきたす突起物はすべて取り除いている。一方、二重壁部は全周を隔壁で 16 区画に分割している。

3. 水中不分離性コンクリートの打設計画 とコンクリートの要求品質

(1) 水中不分離性コンクリート採用の経緯

設置ケーソン工法で使用が考えられる水中コンクリートとしては、瀬戸大橋の下部工で実績のあるプレパック

*1 おかだ・りょうた／本州四国連絡橋公団垂水工事事務所 三工事 工事長

*2 さかもと・みつしげ／ 同上
機械電気課長

*3 いは・たけひさ／明石海峡大橋 2 P 下部工 JV 所長

*4 なかがわ・よしたか／ 同上 3 P 下部工 JV 所長
(正会員)

図-1 明石海峡大橋

(注) () 内寸法は3Pを示す。洗掘防止工の形状は2Pを示す。

図-2 2P, 3P主塔基礎一般図

ドコンクリートと、近年実績が増えている水中不分離性コンクリートがあるが、水中不分離性コンクリートについて着工前から本四公団が行ってきた主塔基礎への適用性の検討結果より、以下の理由で水中不分離性コンクリートを採用した。

- ① 水中不分離性コンクリートはプレパックドコンクリートに比べ単位セメント量が少なくなる。
- ② プレパックドコンクリートは層状打設が不可能であるため、ケーソンの打設区画を分割する必要からケーソンの鋼重量が増大する。
- ③ プレパックドコンクリートは、骨材投入とモルタル打設が直列工程となるため工期が長くなる。

(2) 打設計画

水中不分離性コンクリートの打設は内核部と二重壁部に分割し、温度応力、基礎地盤の沈下解析結果にもとづいて内核部を先行して行うものとした(図-4)。

内核部および二重壁部の基本計画は以下のとおりである。

1) 内核部の基本計画

水面下60mから10mまでを、2Pでは14層、3Pでは11層に分けて打設する。1回当たりの打設量は

Construction of the Akashi Kaikyo Bridge Main Tower Foundations with the Antiwashout Underwater Concrete

By R. Okada, M. Sakamoto, T. Iho and Y. Nakagawa

Concrete Journal, Vol. 30, No. 12, pp. 31~42, Dec. 1992

Synopsis The Akashi Kaikyo Bridge, with a center span of 1 990 m, will be the world's longest suspension bridge when it will be completed in 1998. The two main tower foundations (2 P, 3 P) were constructed in deep water by laying-down caisson method. A total volume of about 500 000 m³ of underwater concrete (antiwashout underwater concrete) had been placed. Since this antiwashout underwater concrete had to be placed over a wide area and placed about 10 000 m³ per one pour under sever condition, very strict quality standards of concrete had to be applied. This report describes the results of construction.

Keywords : main tower foundation, laying-down caisson method, underwater concrete, antiwashout underwater concrete

図-3 2P, 3P ケーソンの概要

9 000~1 万 m^3 となることから、24 本の打設管を使用して 3 昼夜の連続打設とする。水平打継目は、コンクリート硬化後、無人の打継目処理機により処理する。

2) 二重壁部の基本計画

ケーソン外側の二重壁部は、16 区画に分割されており、各区画ごとに水面下 60 m より水面下 5 m まで 6 本の打設管を用いて一挙に打設する。なお、二重壁部の 1 区画当たりのコンクリート量は約 9 000 m^3 となっている。

(3) コンクリートの要求品質

前述したような条件下で確実な施工を行うため、水中不分離性コンクリートには、温度応力低減のための温度上昇量の制限、型わくへの側圧低減のための凝結始発時間の制限、および長距離流動性を確保するための流動性の長時間保持等、従来のコンクリート工事ではみられない厳しい品質規定を定めた (表-1)。

これらの規格を定めた背景は以下のとおりである。

1) スランプフロー保持時間

図-5 に内核部打設時の水中不分離性コンクリートの流動の概念を示す。コンクリートの供給能力から計算す

図-4 水中コンクリートの打設順序 (2P)

表-1 要求品質一覧

項 目	要 求 品 質
設計基準強度 (91 日)	$\sigma_{91}=180 \text{ kgf/cm}^2$
水中・気中作製供試体強度比	0.8 以上
スランプフロー	$52.5 \pm 2.5 \text{ cm}$
スランプフロー保持時間	8 時間以上
凝結始発時間	30 時間程度以内
断熱上昇温度	30℃以下
SS	150 ppm 以下
PH	12 以下

図-5 コンクリートの流動モデル

ると、コンクリートが8 m 流動し、隣接する打設管のコンクリートと合流するまでに要する時間は約8時間となる。合流した際にコンクリートが一体となるためには、8時間後でも練上り時と同等の流動性が必要である。

2) 凝結始発時間

内核部においては、水平打継目処理を早期に行い、コンクリートの打設サイクルが長くならないように、一方、二重壁部では打設コンクリートによる側圧が鋼ケーソンの設計荷重 20 t/m² を超えないよう、凝結始発時間に制限を設けた。

3) 断熱温度上昇量

1 回当たりの打設量が最大約 1 万 m³ に及ぶマスコンクリートとなることから、温度応力対策として結合材量 320 kg/m³ で断熱温度上昇量を 30℃以下とした。さらに、コンクリートの打設温度を 20℃以下とすることにより、最高温度を 50℃以下となるように配慮した。この条件下でのひびわれ指数は 1.5 以上となった。

4) 設計基準強度と配合強度

設計基準強度 180 kgf/cm² に対し、品質変動に対する割り増し係数を 1.2、図-6 に示す大規模施工実験のコア強度試験結果より、水中での長距離流動による強度低下率 0.9 を見込んで、配合強度は 240 kgf/cm² とした。

以上述べたように、これらの要求品質のなかにはスランプフロー保持時間と凝結始発時間のように、コンクリートの性質上相反する品質規定も含まれている。

4. 水中不分離性コンクリートの使用材料と配合

(1) 使用材料

① セメント

表-1 の要求品質を満たすよう各種の市販セメントを用いた配合試験を実施したが、これらの条件をすべて満たすセメントが得られなかったため、本工事においては、高炉スラグ微粉末とフライアッシュ

図-6 コンクリートの流動距離と 91 日強度（大規模実験の結果）

表-2 低発熱セメントの品質

項 目	2 P		3 P
	内核部	二重壁部	
比 重	2.70	2.72	2.64
比表面積 (cm ² /g)	4 750	5 450	4 010
凝 結 (時-分)	始発	5-09	4-32
	終結	7-19	6-10
安 定 性	良	良	良
圧縮強さ (kgf/cm ²)	3 日	80	73
	7 日	164	158
	28 日	305	301
	91 日	393	383
化 学 成 分 (%)	強 熱 減 量	0.5	1.4
	不 溶 残 分	22.4	23.0
	酸化カルシウム	35.3	35.6
	酸化マグネシウム	3.0	3.4
	三 酸 化 硫 黄	1.6	2.5
水 和 熱 (cal/g)	7 日	41.4	42.0
	28 日	49.5	50.9
三成分配 割合 (%)	ポルトランドセメント	16.1	21.5
	スラグ粉末	53.9	50.1
	フライアッシュ	30.0	28.4

を多量に混入した低発熱型混合セメントを新たに開発した。2 P では 2 種、3 P では 1 種の表-2 に示す計 3 種類のセメントを使用した。いずれのセメントも、セメントクリンカーが 16～22 % で、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを混入した、いわゆる三成分系の混合セメントとなっている。

② 骨材

粗骨材はすべて碎石で最大寸法は 20 mm であり、細骨材には海砂を用いた。

③ 混和剤

水中不分離性混和剤はセルロースエーテル系のものとし、粉末状態で使用した。コンクリートに流動性を付与するために、流動化剤（高縮合トリアジン系化合物）を用い、流動性の長時間保持および凝結時間調整用として AE 減水剤（リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体）も併用した。

(2) コンクリートの配合

2 P、3 P で使用したコンクリートの示方配合を表-3 に示す。3 P では内核部と二重壁部で流動化剤の使用量を変更しているため、両者の単位水量が異なっている。

表-3 2 P, 3 P の示方配合

基 礎 名		細骨材率 s/a (%)	水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					単位量 (l/m ³)	
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	特 殊 混和剤	流動化 剤	AE 減水 剤
2 P	内 核 部	40	69.7	223	320	644	988	2.3	3.2	0.96
	二重壁部	40	69.7	223	320	644	988	2.3	3.2	0.96
	モルタル	—	69.7	352	505	1 052	—	4.6	14.2	1.08
3 P	内 核 部	40	66.6	213	320	648	1 005	2.3	1.6	0.80
	二重壁部	40	65.0	208	320	658	1 024	2.3	3.2	0.88
	モルタル	—	68.9	348	505	1 099	—	4.6	5.05	1.26

表-4 施工設備一覧

2 P 施工設備

(1) 鋼ケーソン上設備仕様	
ア ジ テ ー タ	40 m ³ ×1 基
コンクリートポンプ	IPK 40 SA-6 N 型, 42 m ³ /時×8 基
分 岐 弁	200 A×18 基 (振動バルブ式)
打設管引上装置	200 A-60 m×24 基
打継目処理装置	走行速度 4 m/分, 排気量 110 m ³ /時×1 基

(2) 資材台船の設備仕様

台 船	1 万 2 000 t 積級
船 体 寸 法	長さ 102.5 m×幅 30 m×深さ 7 m, 吃水 3.6 m
濁水処理設備	清水 10 m ³ /h, 海水 10 m ³ /h×各 1 基 (濁度・脱水・中和処理)
給 水 設 備	海水淡水化 190 m ³ /日×1 基 (逆浸透膜方式)

(3) コンクリートプラント台船の設備仕様

バッチャープラント	プラント能力	最大 180 m ³ /h×2 系列 (計量: 動揺補正装置付)
	ミ キ サ ー	3.0 m ³ (油圧可変速強制 2 軸)×2 系列
	ア ジ テ ー タ ー	7.0 m ³ (パン型)×2 系列
	コンクリートポンプ	IPF 110 S-7 E, 95 m ³ /h×6 台
	冷 水 プ ラ ン ト	35 t/h (+27℃→+5℃), 75 万 kcal/h
	製 氷 プ ラ ン ト	25 t/日×4 基
材料貯蔵供給設備	粗 骨 材	1 100 m ³ /6 基
	細 骨 材	1 050 m ³ ×4 基 (無補給打設量 9 000 m ³)
	セ メ ン ト	1 500 t×4 基
	材料供給能力	(骨材 300 t/h, セメント 75 t/h)×2 系列
船体部	台 船	2 万 4 000 t 積級
	船 体 寸 法	長さ 141 m×幅 36 m×深さ 8.7 m, 吃水 6.9 m

3 P 施工設備

(1) 鋼ケーソン上設備仕様	
ア ジ テ ー タ	40 m ³ ×1 基
コンクリートポンプ	IPK 40 SA-6 N 型, 42 m ³ /時×8 基
分 岐 弁	200 A×6 基 (ロータリー式)
打設管引上装置	200 A-57 m×24 基
打継目処理装置	走行速度 4 m/分, 排気量 110 m ³ /時×1 基

(2) 資材台船の設備仕様

台 船	12 000 t 積級
船 体 寸 法	長さ 94 m×幅 32 m×深さ 7.5 m, 吃水 3.0 m
濁水処理設備	清水 30 m ³ /h, 海水 20 m ³ /h×各 1 基 (濁度・脱水・中和処理)
給 水 設 備	海水淡水化 144 m ³ , 96 m ³ /日×1 基 (真空蒸気圧縮方式)

(3) コンクリートプラント台船の設備仕様

バッチャープラント	プラント能力	最大 200 m ³ /h×2 系列 (計量: 動揺補正装置付)
	ミ キ サ ー	2.5 m ³ (油圧可変速強制 2 軸)×2 系列
	ア ジ テ ー タ ー	7.0 m ³ (パン型)×2 系列
	コンクリートポンプ	IPF 110 S-7 E, 95 m ³ /h×6 台
	冷 水 プ ラ ン ト	42.5 t/時 (+34℃→+3℃) 30 万 kcal/時 2 基, 75 万 kcal/時×1 基
	冷 砂 プ ラ ン ト	サンドスタビライザー SS-24×2 基 25.5 万 kcal/時×4 基
材料貯蔵供給設備	冷 骨 プ ラ ン ト	34 万 kcal/時×4 基 (冷砂設備と兼用) 30 万 kcal/時×2 基 (冷水設備と兼用)
	粗 骨 材	1 189 m ³ ×4 基, 1 085 m ³ ×2 基
	細 骨 材	1 316 m ³ ×4 基
	セ メ ン ト	1 600 t×2 基 (無補給打設量 9 000 m ³)
船体部	材料供給能力	(骨材 500 t/h, セメント 60 t/h)×2 系列
	台 船	2 万 4 000 t 積級
船体部	船 体 寸 法	長さ 150 m×幅 40 m×深さ 8.5 m, 吃水 6.5 m

2 P と 3 P を比較すると、セメントおよび骨材の違いにより単位水量に若干の差が生じている。

5. 工事概要

5.1 施工設備

水中コンクリートの打設に必要な施工設備の一覧を表-4 に示す。基本的には 2 P, 3 P ともおのおの約 9 000 m³ のコンクリートは無補給、かつ連続して打設できるよう計画されている。しかし、部分的には両者に異なる点がある。以下に、それらについて概説する。なお、諸設備はコンクリートプラント台船（以下 CP 台船と称す）、資材台船およびケーソン上にそれぞれ設置されており、ケーソンを中心として CP 台船および資材台船をケーソン両側に写真-1 のごとく係留した。

（1）コンクリートの製造設備

1) バッチャープラント

バッチャープラントは強制 2 軸練ミキサー 2 系列から構成されており、ミキサー容量は 2 P で 3.0 m³、3 P で 2.5 m³ である。なお、3 P では、セメントと水中不分散性混和剤を先練りするのためのミキサー（1 m³）を別途設け、本練時間の短縮を図ったため、両者の時間当たり

の製造能力はほぼ等しい。また、船上での材料の計量精度を向上させるために、計量器にはすべて動揺補正装置を装備した。

2) プレクーリング設備

2 P はフレークアイスの混入により、3 P は骨材の冷却によって、それぞれコンクリートのプレクーリングを実施した。そのため、2 P では製氷設備を、3 P ではサンドスタビライザー（散水に冷水を使用することで砂を冷却）および骨材槽天井からの冷水スプレー散水による冷骨設備を設置した。

3) 製氷設備

水中コンクリートの混練水は、すべて海水を淡水化したものを使用した。海水の淡水化装置には、2 P は逆浸透膜式を、3 P では蒸留式をそれぞれ採用した。

（2）コンクリートの圧送設備

CP 台船で製造されたコンクリートは、いったんケーソン上の 40 m³ アジテータに貯留させたのち、6 台のポンプによって打設管へ圧送した。

内核部の打設では打設管を 24 本配置しており、1 台のポンプが 4 本の打設管を受けもつことになる。この圧送管へコンクリートを分配するために分岐弁を採用し

写真-1 全景

写真-2 2P分岐弁

写真-3 3P分岐弁

た。2Pは写真-2に示す2連の分岐弁3台で4本の打設管に分配しているのに対し、3Pでは4連のロータリー式分岐弁(写真-3)を採用した。また、圧送管はすべて8インチ($\phi=200$ mm)とした。

(3) 作業管理装置

水中不分離性コンクリートの打設は水面下5~60 mで行われるため、作業の安全性を確保し、確実な施工を行ううえでコンクリートの製造からケーソン内でのコンクリートの流動状況に至るまで、リアルタイムでの施工管理が必要である。

作業管理装置(写真-4)は、このような要求から開発した装置であり、表-5に示すような管理項目を主体として、施工管理上必要な情報が監視パネルおよびCRT上に表示される機構となっている。とくに、水中不分離性コンクリートの打上り状況は、2Pでは新たに開発した自動レベル計で、3Pでは水中テレビカメラを打設管先端に取り付け、直接流動状況をモニターすることによってそれぞれ管理した。

5.2 水中不分離性コンクリートの打設

(1) 打設実績

2P、3Pの水中不分離性コンクリートの打設実績は、表-6のとおりであり、2Pは約12か月、3Pは約

写真-4 作業管理装置

表-5 作業管理装置による管理項目

管	理	項	目
コンクリート製造量の経時変化(製造量、製造速度)			
アジテータレベルの経時変化(レベル)			
ポンプ吐出圧、圧送圧			
総打設量の経時変化(打設量、打設速度)			
系統別打設量の経時変化(打設量、ポンプ状況)			
系統別打設量差			
各打設管ごとの打設量、コンクリート高さ、打設管高さ			
各打設管ごとの打設量経時変化			
打設管引上げ管理(かぶり、コンクリート高さ)			
コンクリートレベルの経時変化(高さ)			
コンクリートレベル断面図			
コンクリートレベルレッド測深断面図			

11か月でそれぞれ30回、27回の打設を計画どおりに完了した。

1回当たりの打設時間は平均51時間で、3昼夜連続打設で行われ、総打設量は2Pが26.5万 m^3 、3Pが23.8万 m^3 となっている。

(2) 内核部の打設

内核部の第1層は下端が支持地盤と直接接しており、地盤とのなじみをよくするために、水中不分離性モルタル(層厚2 m)とした。各リフトの水平打継目は硬化後、当工事に開発したブラシ式の打継目処理機(写真-5)により各層ごとにスライムを処理した。また、打設に際しては、厚さ約5 cm相当の敷きモルタル(水中不分離性モルタル)を打設したのち、水中不分離性コンクリートの打設を行った。24本の打設管から排出されたコンクリートは、水平方向に同心円状に流動し、隣接した打設管から排出されたコンクリートと合流一体化する。一方、水中不分離性コンクリートの品質は流動距離が長くなるにしたがって徐々に低下していくことから

表-6 打設実績

	内核部		二重壁部	
	2 P	3 P	2 P	3 P
打 設 回 数	14	11	16	16
1 回当たり平均打設時間(時間)	50.51	54.35	52.55	46.76
1 回当たり平均打設量(m ³)	8 991	9 991	8 723	7 984
時間当たり平均打設量(m ³ /時間)	178	184	166	171
総 打 設 量(m ³)	125 878	109 905	139 569	127 743
打 設 開 始 日	元年 10 月 17 日	2 年 1 月 29 日	2 年 5 月 8 日	2 年 7 月 3 日
打 設 完 了 日	2 年 4 月 23 日	2 年 6 月 21 日	2 年 10 月 22 日	2 年 12 月 12 日

写真-5 打継目処理装置

(図-6), 内核部では過大な流動が生じないよう打設管の配置および各管へのコンクリートの供給管理がきわめて重要となる。

図-7 は、コンクリートの最大流動距離(合流部までの距離)が 8 m 以内となるように計画した打設管配置

図-7 内核部の打設管の配置

の例を示したものである。図中に示した実線が想定合流線であり、これに囲まれた内側の面積がその打設管の受けもつ面積となる。過大な流動が生じないためには、コンクリートが水平に打ち上がっていくことが必要で、そのためには各打設管へ受けもつ面積に応じてコンクリートを供給する必要がある。圧送量は、ポンプ吐出量および分岐弁の切替え時間を調整することによって管理した。また、連続するリフトで合流部が同一箇所に生じるのを避けるため、2 タイプの打設管の配置を考え各層ごとにシフトした。

打設中に計測されたコンクリートの打上り高さの一例を図-8 に示す。打設開始後、水中不分離性コンクリー

図-8 第13回コンクリート打上り高さ

トが 50 cm 程度上昇する間は、下部リフトの影響で打設高さは均一にはならないが、打上り高さが高くなるとほぼ水平になっていくことがわかる。

図-9 は、2P の最終リフト (14 層) の表面をドライアップ後に観察した状況を示したものである。実際に生じた合流部は計画のそれとよく一致しており、計画どおりにコンクリートの打設が行われていたといえる。

(3) 二重壁部の打設

二重壁部では、水面下 60~5 m までの高さ 55 m を一挙に打設するために、型わくであるケーソンに作用する側圧の管理がもっとも重要な管理項目であった。

そのため、最初に打設するブロックに圧力計を取り付け、側圧の作用状況を測し、その結果に基づいて以後の打設速度を決定した。

図-10 は鉛直圧と側圧の関係を 1 時間ごとにプロットしたものである。側圧は、15 時間まではほぼ液圧とし

図-9 内核部最上層断面図

図-10 二重壁内部で計測した側圧

図-11 スランプフロー、スランプの経時変化と管理限界

て作用し、20 時間後で急激に圧力上昇が小さくなる傾向を示している。この結果に基づいて、ケーソンの設計側圧 20 tf/m^2 を上回らない打設速度を決定した。なお、この側圧の作用状況は、打設速度が一定の場合、経時に伴うコンクリートの流動性の変化によって支配されるとの判断から、以後の打設においては図-11 に示すようにコンクリートのスランプフローおよびスランプの長時間変化を測定し、管理限界内にあることを確認することによって、間接的に側圧の管理を実施した。

なお、二重壁部では、6 本の打設管を 6 台のポンプに直結してコンクリートの打設を行った。

各打設管への圧送量の管理方法は、基本的には内核部と同様である。ただし、二重壁部においては、コンクリートの上昇に伴って打設管を順次切り離していく必要があった。

5.3 水中不分離性コンクリートの品質管理とその結果

水中不分離性コンクリートには、3 章で述べたように厳しい品質が定められており、当工事においては品質管理の良否が施工の良否を決定づけるといっても過言ではなく、厳密な品質管理が実施された。

本工事において実施した品質管理のフローを図-12 に示す。品質管理は、基準、定期および日常管理から構成されている。すなわち、基準管理試験で使用材料およびプラントの性能の適否を判断するとともに、示方配合を決定した。コンクリートの打設前には、毎回定期管理試験として入荷材料のチェックを行うとともに、コンクリートの配合試験を実施し、コンクリートの品質の確認を行った。さらに、打設中は、材料およびコンクリートの品質について、表-1 に示す項目を中心としてさまざまな角度から品質の安定に努めた(日常管理試験)。

品質管理の結果についてまとめると以下のようなる。

図-12 品質管理のフロー

1) スランプフロー、空気量

図-13に練り上り直後および8時間後のスランプフローと空気量の測定結果を示す。

水中不分離性コンクリートの練り上り直後および8時間後のスランプフローを 52.5 ± 2.5 cm とするため、練り上り直後のスランプフローを可能なかぎり高めに設定した。

二重壁部のスランプフローの8時間後の低下量は、内核部のそれに比べやや大きくなっているが、これは使用したセメントが両者で異なっていたために生じたものと考えられる。このスランプフローの保持時間は、凝結始発時間と相反する性質で、いずれもAE減水剤の使用量を調整することにより制御した。図-13には二重壁部で8時間後のスランプフローが50 cmを若干下回る場合も見受けられるが、これは二重壁部では前述のように側圧が最重要項目であったことから、これを優先させたためである。一方、空気量は全打設を通じて安定していた。

2) 練り上り温度、凝結始発時間

水中不分離性コンクリートの練り上り温度は、全工期を通じて 20°C 以下となった（図-14）。なお、冷水による冷却も含めプレクーリングは冬を除く全工期にわたって実施した。

図-13 スランプフロー、空気量の測定結果 (2 P)

表-7 コンクリートの強度試験結果

項 目		2 P					3 P				
		試料数	平均値	最大値	最小値	標準偏差	試料数	平均値	最大値	最小値	標準偏差
内 核 部	水中供試体強度(材令91日)	133	248	274	227	8.9	118	238	262	208	10.5
	水中・気中強度比(材令91日)	133	0.86	0.94	0.80	0.03	118	0.89	0.98	0.81	0.04
	ボーリングコアの 圧 縮 強 度	一般部	52	259	302	221	20.3	54	272	355	191
		合流部	6	205	265	182	32.4	13	223	263	201
	ボーリングコアの 引 張 強 度	一般部	15	23.4	27.1	17.4	2.61	12	19.8	24.6	14.3
		合流部	6	6.75	9.83	3.48	2.73	6	10.1	19.3	1.90
二 重 壁 部	水中供試体強度(材令91日)	144	265	298	241	10.0	126	232	269	206	13.3
	水中・気中強度比(材令91日)	144	0.87	0.94	0.82	0.02	126	0.88	0.98	0.80	0.04
	ボーリングコアの 圧 縮 強 度	一般部	12	251	294	220	20.3				
		合流部	12	240	270	205	16.5	13	223	263	202
	ボーリングコアの 引 張 強 度	一般部	3	26.1	27.9	24.5	1.70				
		合流部	3	24.9	25.0	24.7	0.20	3	18.3	21.3	16.8

図-14 凝結時間と練り上がり温度 (2 P)

凝結始発時間は、上述したスランブフローと同様にセメント間で差が生じており、8時間後のスランブフローの低下を小さくする必要のある内核部では凝結始発時間が遅延している。これは、内核部では流動後のコンクリートの品質を確保するために、スランブフローの保持時間を優先させたためである。なお、二重壁部については、凝結始発時間は30時間ときわめて安定した結果となった。

3) 硬化コンクリートの品質

水中不分離性コンクリートの強度試験およびボーリン

グしたコアの強度試験の結果をまとめて表-7に示す。

製造された水中不分離性コンクリートは、2 P、3 Pとも十分な強度を有するとともに、変動も標準偏差で10 kgf/cm²以下ときわめて安定しており、良好な品質管理が行われたものと判断される。一方、コアの強度は、流動距離の長い内核部の合流部で低くなっているものの、設計基準強度180 kgf/cm²は確保されている。

6. 温度測定結果

マスコンクリートである当工事においては、コンクリートの最高温度をひびわれ防止上50℃程度に抑えることが必要であった。そのために、ブレイキングを実施して練り上がり温度を20℃以下とし、新たに開発した低発熱型のセメントを使用して、セメントの水和に伴う温度上昇は30℃以下を目標とした。内核部で図-15の要領で計測した温度の代表的な測定結果を図-16に示す。リフト中央部はほぼ断熱状態であり、最高温度は50℃程度と計画どおりになっている。夏季において、圧送

図-15 温度センサー取付け位置図

図-16 内核部温度上昇履歴

中の温度上昇が予想外に大きくなり、目標値を若干上回るものもあったが、プレクーリングを強化することによって、打設温度を極力低く抑えることで対処した。

7. あとがき

水中不分離性混和剤が西ドイツにおいて開発されたのが本工事着工 15 年前、日本での実用化が 10 年前であり、これまでに例のないマスコンクリートとなる明石海峡大橋の主塔基礎に、このコンクリートを採用すべく計画を始めた当時は、まったくの新材料と同じであった。当工事において、このコンクリートの採用が決定したのち、本工事着工に至るまでの約 3 年間、基礎工事を繰り返しコンクリートの性状を調査する一方、大水深下での施工設備の開発に努め、最終的には大規模実験によって、その施工性を確認したうえで本工事に臨んだ。その結果、約 50 万 m^3 にも及ぶコンクリートの打設を約 1 年間で無事完了させ、水中不分離性コンクリートの優秀な品質および施工法の妥当性が確認された。さらに、低発熱型セメントの開発、大規模なプレクーリング技術等、本工事での実績が今後のマスコンクリート工事に対しても大きく寄与するものと期待している。

最後に、本工事を遂行するにあたり、貴重なご助言、ご助力をいただいた関係各位に対し深謝する次第である。

(投稿受付：1992 年 8 月 5 日)

「お知らせ」

国際会議のための準備セミナー（第 19 回）

—英語によるプレゼンテーションの実際—

主催：(社)日本工学会

日 時：1993 年 2 月 19 日（金）18:00～2 月 21 日（日）17:00
 会 場：海外職業訓練センター研修施設
 [千葉市美浜区ひび野 1-1 / Tel. 043-276-0211 / JR 京葉線・海浜幕張駅 5 分]
 費 用：参加費 80 000 円（資料代、懇親会費等を含む）+ 宿泊費 18 000 円（2 泊、食事付き）
 内 容：
 ・国際会議の概要（参加の目的／参加者の心掛け／日本人に多い問題点の整理）
 ・国際会議参加の準備（オーラルペーパーの書き方／時間配分の心得／AV の用意と利用法）
 ・プレゼンテーションの実際（話しかた／マイク・AV の使い方／質疑応答の処理／表現）
 ・プレゼンテーションの評価と練習法（自己評価／他者評価／効果的練習法）
 申 込 み：下記に詳細パンフレットを請求のうえ、2 月 5 日（金）必着で申し込む。
 連 絡 先：(社)日本工学会 / 〒107 東京都港区赤坂 9-6-41
 Tel. (03) 3475-4621・5618 / Fax. (03) 3403-1738