大規模海洋コンクリート構造物における 水中コンクリートの施工

—明石海峡大橋を中心として—[†]

加 島 聰* 樋 口 康 三*
坂 本 光 重* 岡 田 凌 太*

Underwater Concreting Work for Large Scale Offshore Structure

by

Satoshi KASHIMA*, Kozo HIGUCHI*, Mitsushige SAKAMOTO*
and Ryota OKADA*

1 ま え が き

本州四国連絡橋は道路と鉄道で本州と四国を結ぶもので、神戸—鳴門ルート、児島—坂出ルート（通称、瀬戸大橋）、尾道—今治ルートの3本のルートが計画されている。そのうち、瀬戸大橋が昭和63年4月に全通し、他の2ルートにおいても平成9年度および平成10年度の完成をめざして鋭意、事業を進めている。

本事業の大きな特徴は、海峡部を中心に、厳しい自然条件や社会条件下で長大橋を建設することである。海峡部の吊橋、斜張橋等の長大橋の基礎には多くの海中基礎が施工されている。

昭和63年5月に現地工事に着手した明石海峡大橋にも2基の海中基礎がある。その海中基礎の施工法確立にあたっては、大鳴門橋、瀬戸大橋における海峡部の橋梁建設等の経験を踏まえつつ、積極的に工法の改良や技術の開発を行ってきたが、大水深、強潮流下の厳しい自然条件のもと、安全、確実、迅速な工法として設置ケーソン工法を採用した。

基礎のコンクリートは水中部と気中部に分けて施工されるが、明石海峡大橋ではマスコンクリートの内部温度上昇を抑えるために低発熱セメントを使用し、更に水中部ではコンクリートの分離を防ぐために水中不分離性コンクリートを使用した。本稿では明石海峡大橋の海中基礎を中心に水中コンクリートの大量施工の概要を紹介する。

2 海中基礎の施工法

本四架橋の海中基礎としては大鳴門橋の多柱基礎、

瀬戸大橋（図1参照）や明石海峡大橋（図2参照）における設置ケーソン工法による直接基礎が代表的である。

図1 瀬戸大橋（手前の吊橋は
南北備讃瀬戸大橋）

図2 明石海峡大橋完成予想図

[†] 原稿受理 平成3年7月5日 Received July 5, 1991

* 本州四国連絡橋公団第一建設局 〒651 神戸市中央区浜辺通, First Constr. Bureau, Honshu-Shikoku Bridge Authority, Chuoh-ku, Kobe, 651

表Ⅰ 瀬戸大橋における海峡部橋梁の海中基礎¹⁾

	櫃石島橋 185-420-185 m		岩黒島橋 185-420-185 m			南北備讃瀬戸大橋 264-990-264-264-1100-264 m						計
	HB2P	HB3P	IB2P	IB3P	IB4P	BB2P	BB3P	BB4P	BB5P	BB6P	BB7A	
基礎寸法 (長×幅×高)(m)	25×46 ×36.4	29×46 ×33.4	18×46 ×23.5	22×46 ×32.5	36×32 ×19	23×57 ×20	23×57 ×20	57×62 ×15	27×59 ×12	38×59 ×60	75×59 ×55	
水中コンクリート (m ³)	29140	18500	11680	22700	12860	12600	11920	34660	45740	111900	218300	530000
気中コンクリート (m ³)	9530	27270	6820	8370	7970	12770	12790	253520	15500	16900	185970	557410

(注) 海峡部橋梁(6橋)の気中コンクリート全体数量: 949千m³.

表Ⅱ 明石海峡大橋の基礎

スパン割	960 — 1990 — 960 m				計
基礎名	1A	2P*	3P*	4A	
基礎寸法 (長×幅×高)(m)	基礎部 φ85×64.5 軀体部 84.5×63×47.5	φ80×70	φ78×57	80×63×71	
水中コンクリート (m ³)	42400	265000	238000	0	545400
気中コンクリート (m ³)	480500	88700	84000	240000	893200

*海中基礎.

設置ケーソン工法は図3に示すように海底を基礎支持面まで事前に掘削し, 別途工場で製作した鋼ケーソンを現地に曳航・設置してその中に水中コンクリートおよび気中コンクリートを施工して基礎を完成させる工法である.^{1),2)}

表Ⅰ, Ⅱに海峡部橋梁の寸法, 水中および気中コンクリート量を示す. それによると瀬戸大橋の6橋と明石海峡大橋とのコンクリート量がほぼ同じである. 明石海峡大橋の各基礎の規模は図4に示すように非常に大きく, 瀬戸大橋と同程度の工期で施工するには各

基礎のコンクリート打設のスピードアップを計る必要がある.

3 水中コンクリート

水中コンクリート工法の一覧を図5に示すが, 一般的な施工法としてトレミー工法とプレパックドコンクリート工法がある.

トレミー工法は水中コンクリートの施工法として最も標準的なもので, 防波堤や防護岸の基礎などの海岸工事や場所打杭基礎, 地下連続壁基礎など施工面積が小さく, 連続して短時間に打込みができる場合に適している.^{4),5)}トレミー工法はφ15~30 cmのトレミー管を継ぎ足したものを水底付近まで降ろし, 上部にロート状のホッパーを連結し, そのホッパーに投入したコンクリートが自重で水底から連続して打設する工法である. その際, トレミー管の先端は常にまだ固まらないコンクリート中に突っ込み, 新しく供給されるコン

図3 設置ケーソン工法(瀬戸大橋)

図4 明石海峡大橋下部構造の一例

図5 水中コンクリートの施工方法³⁾

図6 プレパックドコンクリートの原理

クリートを直接水にさらさないようにする。広い面積にコンクリートを打込む場合はトレミー管の移動を必要とし、種々の工法が開発され、実用に供されてきたが、打設したコンクリートが流動する過程で分離しやすい欠点を有している。⁵⁾

プレパックドコンクリート工法は1930年代の後半に開発された工法で、1957年に完成した米国の吊橋(マキノ橋)で本格的に使用された。

プレパックドコンクリート工法は図6に示すようにあらかじめ粗骨材を投入し、その空げきにセメントと砂と水を練り混ぜたモルタルを注入してコンクリートにする工法である。

瀬戸大橋を対象にした実験を1965年に開始したが、当時のプレパックドコンクリートの日本での施工例は、大半が港湾工事における数10m³程度の規模であり、本四架橋の施工規模とはかけ離れているため、本工事に向けては次に示すような課題があげられた。

- (1) 施工規模の大型化
- (2) 海中におけるコンクリート性状の確認
- (3) 施工管理方法の合理化
- (4) 施工設備の開発

このため、数十m³程度の規模の施工実験から始め、コンクリートの品質を確認しながら、粗骨材の大径化(8~15cm)と注入モルタルの改良を行い、最終的には1973年に3000m³の大規模実験を行って本工事に備えた。表Iに示す瀬戸大橋の水中コンクリートを打設したのは1981年2月から1984年10月までの45カ月間で、我国での本格的な海中コンクリート工事となった。図7にはケーソンの横に配置したモルタルプ

図7 プレパックド工法による水中コンクリートの施工

ラント船による施工状況を示す。モルタルプラント船の材料の貯蔵能力は500m³程度であり、モルタル注入の間、砂やセメントの補給を連続して行なった。プレパックドコンクリートの場合には打継ぎを作ることができないので、4日間の連続注入や注入速度による制限から、注入面積が500~1000m²、注入量が1万m³になるようにケーソンを平面的に仕切って各区画ごとにモルタル注入を行った。なお、最大流動距離は5m以下として注入管を配置した。^{6)~8)}

明石海峡大橋の主塔基礎にプレパックドコンクリートを採用した場合、

- (1) 大規模なプレパックドコンクリート用骨材の製造、貯蔵、積出設備を架橋地点周辺で確保するのが困難である。
  - (2) 水中打継目の処理が不可能なことから鋼ケーソンの平面的な区画割が増加し、鋼重増になる。
- 等の問題があげられる。

一方、1970年代の前半に西ドイツで開発された水中不分離性コンクリートはコンクリート材料の性質を混和剤によって大幅に改良したものであり、図8に示すように水中に落下させても分離しない特徴がある。混和剤によってコンクリートそのものに粘調性を付与して水の洗い作用に対する材料分離抵抗をもたせたも

図8 シリンダーにコンクリートを落下させた際の状況

表Ⅲ 水中不分離性コンクリート用混和剤の主成分⁹⁾

種 類	主 成 分
セルロース系	ヒドロキシプロピルメチルセルロース (HPMC)
	ヒドロキシエチルメチルセルロース (HEMC)
	ヒドロキシエチルセルロース (HEC) など
アクリル系	ポリアクリルアミドの部分加水分解物
	アクリルアミドとアクリル酸ソーダの共重合体など

のである。⁹⁾ 水中不分離性コンクリート用混和剤は水溶性高分子を主成分とした粉体で、セルロース系とアクリル系の2種類がある。その主成分を表Ⅲに示す。セルロース系混和剤の主成分は、木材や綿の繊維成分であるセルロースに各種置換基を導入した、非イオン性のセルロースエーテルである。アクリル系の主成分は、アクリルアミドを主体とした合成共重合体である。

コンクリートの強度、ブリージング率、水の濁りやpHは水中不分離性コンクリート用混和剤の添加量によって変化する。図9には水中不分離性コンクリート用混和剤量と水中自由落下前後のコンクリートの配合の変化を示しているが、混和剤の添加によって配合に大きな変化がなく、その効果が明らかである。

水中不分離性コンクリートには不分離用混和剤の他に水中での流動性を確保するために流動化剤や減水剤を使用し、その流動性はコンクリートのスランプフロ

(注) 図中の数値は各材料の容積百分率を示す。

図9 水中自由落下前後の水中不分離性コンクリート洗い分析試験結果¹⁰⁾

図10 水中不分離性コンクリートのスランプロー試験

図11 港湾関連施設における水中不分離性コンクリートの使用量¹²⁾

ー (スランプコーンを使用) によって判定される (図10参照)。

水中不分離性コンクリートが日本に1979年に導入されて以来、各建設会社において技術開発が進められ、実用化され、1986年に特殊水中コンクリートマニュアル¹¹⁾が作成され、1991年5月には土木学会によって水中不分離性コンクリート設計施工指針 (案) が制定されている。

水中不分離性コンクリートを明石海峡大橋に用いた場合、次のような利点がある。

- (1) 基本的には普通のコンクリート材料であり、材料および設備の開発が容易である。
- (2) ブリージング量が少ないのでレイタンスの発生が少なく、水中での打継目の処理が容易である。

等の利点がある。

しかし、1985年ごろまでの水中不分離性コンクリートの施工量は30万m³程度で (図11参照)、主に港湾関連施設の基礎根固め補強、間詰コンクリートや基礎ベースコンクリートに用いられ、工事当りの使用量は100m³以下のケースが多い。¹²⁾

図12 水中不分離性コンクリートの調査実験

図13 明石海峡大橋主塔基礎一般図(2P)

図14 ケーソン内への水中コンクリートの施工

そこで、1986年以来、明石海峡大橋主塔基礎の施工規模との間のギャップを埋めるために施工性とコンクリートの品質を確認しながら適用性を確認するため、図12に示すような各種の実験を実施した。

そして各種調査実験結果をふまえ、品質、工期、工費、施工性等を総合的に検討し、主塔基礎の水中コンクリートとして水中不分離性コンクリートを採用することとした。

明石海峡大橋主塔基礎一般図を図13に示す。二重壁部は外壁、内壁およびバルクヘッドによって16分割されており、この各区画をそれぞれ一括打設する。内核部は打継面の処理を行なうものとして、3~4m程度のリフトで層打ちすることを基本とした。それ故、1回当たりの打設量は3日連続で9000m³程度とし、基礎地点の潮流が厳しく、打設と平行して材料を補給することは不可能なために打設量相当の材料をコンクリートプラント台船と資材台船(海水を淡水化して貯蔵したり、資材を仮置する)に貯蔵できる設備とした。図14はケーソン内への水中コンクリート施工の状況を示している。ケーソンをはさんで手前がコンクリートプラント台船で、後方が資材台船である。このような体制で約55万m³の水中コンクリートを1989年10月中旬から1990年12月初旬にかけて施工した。

3・1 水中不分離性コンクリート施工実験^{(13)~(15)}

水中不分離性コンクリートに関しては大規模な施工例がなく、本工事の施工規模との間に大きいギャップがあり、そのギャップを埋めるために図12に示す各種の実験を実施した。

(注) Vは、コンクリート(モルタル)の上昇速度

図15 大規模施工実験における水中不分離性コンクリートの打設概要

図16 大規模施工実験の状況

施工実験は、特殊混和剤の基本性状の確認、最適配合の検討など室内実験レベルの実験から開始し、徐々に実験規模を大型化しながら、最終的には品質、施工設備、施工管理方法等の確認を得るための実際の施工規模を想定した大規模施工実験を行った。表IVには実験の概要を示す。図15、16には大規模施工実験の概要を示す。実験は内核部と二重壁部を対象として行った。型枠の大きさは内核部では約30×30×3.5m、二重壁部では約5×12×16mとした。内核部については打設管を流動距離が約10mになるように配置して、モルタルおよび低発熱セメントを使用したコン

表Ⅳ 水中不分離性コンクリートの実験検討

実験名	主な内容	主な結果
配合実験	基本的な特性確認	スランプフロー, 空気量, 凝結特性, 圧縮強度等を満足する配合が得られた。
小規模実験	流動性実験〔Ⅰ〕 ・トレミー管底位置(突込み, 自由落下高 30, 100 cm) ・粗骨材の最大寸法 (20, 40 mm)	・トレミー管底位置は水中自由落下高が 30 cm 以下になるよう管理する必要がある。 ・10 m 程度の流動を期待する場合, 粗骨材の最大寸法は 20 mm が好ましい。
	流動性実験〔Ⅱ〕 長距離流動に関する品質調査(扇形(2~10)×30×2.65 m の型枠を使用)	流動距離とともに強度低減の傾向が確認された。また, 流動距離 10 m 程度までの流動に対し, 所要の品質が得られた。
	流動性実験〔Ⅲ〕 流動による品質の変化および合流部の品質の確認(扇形(2~10~2)×24×2.65 m の型枠を使用)	流動距離 10 m 程度までの流動, 合流に対し, 所要の品質が得られた。ただし, 合流部では強度のバラツキがあった。
	打継ぎ性能実験 実験〔Ⅲ〕のコンクリート上に打継ぎ, 打継面の強度調査	打継面のスライム吸引処理を行うことによって引張強度が期待でき, コンクリートとしての一体性が確保され, 打継ぎ施工が可能ながことが判明した。
	側圧実験 型枠にかかるコンクリート側圧の調査(φ5×10 m の型枠を使用)	7 時間程度まではコンクリート側圧は液圧となっており, それ以降は減少することが判明した。
大規模実験	充てん性実験 鋼ケーソン二重壁部および刃口下における充てん性の確認(5×1.5×4 m の型枠を使用)	鋼ケーソン内補強部材に適切な水抜き孔等を設けることによってケーソン内の充てん性を十分確保できることが判明した。
	ポンプ圧送性試験 吸込効率, 圧送抵抗等のポンプ圧送性の調査(圧送距離 100 m)	ポンプの圧送性を確認し, 打設主要設備計画の基礎資料を得た。
	ミキサー練り混ぜ試験 ミキサーの最適練り混ぜ方法の検討, 練り混ぜ性能の確認	コンクリートについては 90 秒, モルタルについては 120 秒の混練で所要の品質が得られることを確認した。
	品質	流動性 打設管から半径 6~6.5 m の範囲はほぼ平坦で良好なコンクリート打上り面となっていた。合流部では深さ最大 15 cm 程度の溝が形成された。
		強度特性 コンクリートコア強度は, 流動距離 5 m 程度以内では距離による低下がなかった。流動距離 8 m 程度を想定した場合, 合流付近においてもおおむね設計基準強度 180 kgf/cm ² を確保する見通しを得た。
		打継性状 打継目処理機によって表面のレイトレスを除去した結果, 打継面を含むコアの純引張強度は, コンクリート~モルタルでは 3~20 kgf/cm ² , コンクリートでは 0.6~8 kgf/cm ² であった。
		温度特性 断熱温度上昇を 30℃ 程度に抑えられる見通しを得た。
実験	施工設備	各種製造, 打設設備に関し, 基本的に問題のないことが確認された。ただし, 打継目処理装置については合流部の溝を考慮した移動装置の改良が必要となった。
	施工管理方法, 施工体制	本工事における施工管理方法, 施工体制の見通しが得られた。

リートを打継目処理を行いながら, 計 4 回に分けて打設した。二重壁部は打設管を流動距離が 3 m となるように配置してコンクリート 1 回の打設とした。実験でのコンクリートの打設速度は本工事に合わせて内核部コンクリート 6 cm/h, 二重壁部コンクリート 80 cm/h とした。

施工実験のうち, 主な結果はつぎのとおりである。

3・1・1 流動性 水中不分離性コンクリートは, 自重でゆっくり流動するというセルフレベリング性を有しており, この性質を活用すれば打設管 1 本当りの受け持ち範囲を広くすることが可能であり, 施工上の利点となる。しかし, コンクリートの流動は基本的に品質の低下を招き, 例えば流動距離とともに強度が低下する傾向もみられる。その程度は配合, 施工速度等の影響を受けるが, 結論として流動性の評価はスランプフロー値およびスランプフローの保持時間で行うものとした。流動距離に関しては基礎的な流動性実験の結果, 流動距離が十数 m を過ぎると急にモルタル部

分が多くなり, 強度も低下することより, 大規模実験では流動距離を 10 m 以下とした。そして, 合流に伴う品質の確認や最大流動距離を大規模実験により決定した。大規模実験における流動距離と圧縮強度の関係を図 17 に示すが, 半径 6~6.5 m の範囲はコンクリート面もほぼ平坦で強度の低下もなかった。本工事においては打設設備の関係から最大流動距離は 8 m と

図17 水中不分離性コンクリートの
流動距離とコア強度

図18 水中不分離性コンクリートの
ポンプ圧送試験結果

り、合流部でも所定の強度が得られるように配合強度を設定した。

3・1・2 打継特性 層打ちするコンクリートの打継特性の評価は施工計画を支配する問題の一つである。すなわち、従来の水中コンクリートでは表面処理を的確に実施しないと著しい強度低減を招き、また表面処理が非常に困難なこともあり、打継ぎ施工を行った例は長島連絡橋において人力施工を行った程度である。基礎実験において打継面無処理ではコアの採取が不可能であったが、打継面のスライムを吸引処理した範囲では $2.2 \sim 5.0 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の引張強度が得られ、表面処理の有効性とともコンクリート基礎としてのある程度の一体性が確保できる見通しを得た。

そこで大規模施工実験では打継面の表面については、回転ブラシと吸引装置を組合せた打継目処理装置を用いて処理を行った。打継面を含むコアの純引張強度は $0.6 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

以上より打継ぎ面処理装置の使用によって基本的に主塔基礎内核部の層打設の可能なことが確認された。

3・1・3 充てん性 鋼ケーソン刃口部および二重壁部の H 型鋼や I 型鋼の補強鋼材の多く入っているところへのコンクリートの充てん性の確認を行った。刃口部への充てんは特に問題がなかった。二重壁部の補強鋼材周辺でコンクリート流動前後のコアボーリングによる強度試験や鋼材とコンクリートの接触面の調査を行ったところ、構造上可能な限り補強鋼材に水抜き用の開口部を設けることによって十分な充てん性が得られた。

3・1・4 圧送抵抗 水中不分離性コンクリートは、

粘性が高いため、コンクリートポンプで圧送する場合、普通コンクリートに比べて 2～4 倍の圧送抵抗を示すと言われている。このため、配管径と圧送速度を変えて圧送抵抗を求めた。その結果は図 18 に示すが、本工事では $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度の圧送を計画しているため、 $\phi 200 \text{ mm}$ の圧送管が必要となった。また、ケーソン上に配置した各打設管からのコンクリートの流動距離が異なっており、それに応じてコンクリートを分配する必要がある。そこで、容積効率が安定していてピストン数で容量をコントロールできる貫入シリンダー型コンクリートポンプを圧送用のポンプに使用することとした。

3・2 水中不分離性コンクリートの大量施工

水中不分離性コンクリートの要求品質は施工実験結果をもとにして表 V のとおり定めた。要求品質の特徴は次のとおりである。

- (1) 流動性を確保するためにスランプフローおよびその保持時間を規定した。
- (2) 鋼ケーソンへの側圧の観点から凝結始発時間を規定した。
- (3) マスコンクリートとしての温度ひびわれを防止する観点からコンクリートの断熱温度上昇を規定した。なお、この値はコンクリートの打設温度を 20°C 以下に管理することを前提にコンクリートの最大温度を 50°C 以下にするように規定したものである。

スランプフローの保持時間は凝結始発時間との関連があり、しかも低発熱セメントを前提とした品質のものを確保することは非常に困難であった。その結果として得られた水中コンクリートの示方配合は表 VI に示す。各種セメントを用いたコンクリートの断熱上昇温度の一例を図 19 に示す。水中コンクリートにおいては断熱上昇温度を 30°C 以下に抑えるために低発熱セメントを使用した。低発熱セメントとしてはボルト

表 V 水中不分離性コンクリートの品質基準

設計基準強度 (91 日)	180 kgf/cm^2
水中・気中供試体強度比	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°C 以下

表 VI 水中不分離性コンクリートの示方配合の一例 (2P 内核部)

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
40	69.7	223	320	644	988	2.3	3.2	0.96

図19 各種セメントを用いたコンクリートの断熱上昇温度¹⁶⁾

図20 コンクリートの練り混ぜ水に混入する氷の細片

ランドセメントをベースとして高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを大量に混入した三成分系セメントを使用した。三成分系低発熱セメントは、国内ではLNG地下式貯槽などの重要構造物に相当量の実績があり、優れたひびわれ抑制効果を発揮している。耐久性に関しては、塩分の浸透、乾燥収縮など¹⁷⁾に対して優れた特性を有していることが確認されている。コンクリートの打設温度は夏場でも20°C以下とするためにコンクリートの練り混ぜ水として冷却水(約5°C)を用いたり、それに1.5~2mm厚の氷(図20参照)を混入して練り混ぜた。

ケーソン内への水中コンクリート打設の全景は図14に示す通りで、図21にはケーソン上の打設設備を示す。コンクリートプラント船から送られるコンクリートを受け、下層のポンプへ分配するアジテーター

図21 ケーソン内核部への水中コンクリート打設状況

図22 水中コンクリート打設後にドライアップした状況

(写真の手前)、コンクリートを圧送するコンクリートポンプ、コンクリートをケーソン内へ送る輸送管、打設管、および打設管の引揚装置を配備している。ケーソン内におけるコンクリートの最大流動距離は、先に述べた大規模実験の結果から8m以下に制限したため、打設管数が24本となる。このため、コンクリートの打設は6台のコンクリートポンプで圧送(時間当たり平均打設量:180m³/h)するものとし、輸送管路途中に配管切換え装置を設け、4本の打設管にコンクリートを均等に圧送するものとした。このようなシステムは今回初めて採用したが、打設管位置と合流部とのコンクリート高さの差は10cm以下であり、全面積水平にコンクリートが上昇し計画通りの成果となった。最終リフトの合流面は図22に示す。

内核部各リフト打設完了後、図13に示す二重壁部16区画を点対称の順に、各ブロックのケーソン底板からT.P.-5mまでコンクリートを一括打設した。各ブロック内に6本の打設管を建込み、新規に開発した打設管引揚装置により、コンクリート打設面の上昇に合わせ、打設管を引揚げながら、3~4mごとに打設管を順次取外した。

水中不分離性コンクリートの品質管理試験結果を表Ⅶに示す。

表Ⅶ 明石海峡大橋主塔基礎水中コンクリートの品質

(強度: kgf/cm^2
スランプフロー: cm)

項 目		2P		3P		管理基準値
		平均 値	標準偏差	平均 値	標準偏差	
内 核 部	水中供試体強度(91日)	248	8.72	238	10.5	—
	水中強度(91日)/気中強度(91日)	0.86	0.04	0.89	0.04	0.8以上
	ボーリングコアの 圧縮強度(91日)	一 般 部	258	20.5	271	40.1
		合 流 部	205	32.4	採取なし	
	ボーリングコアの 引張強度(91日)	一 般 部	23.4	2.61	19.8	5.40
		打 継 部	5.75	2.83	10.1	7.23
	スランプフロー(練上り)	53.3	0.89	53.8	1.0	52.5 ± 2.5
	スランプフロー(8時間後)	51.7	1.13	52.2	1.6	52.5 ± 2.5
二 重 壁 部	水中供試体強度(91日)	265	9.46	237	14.2	—
	水中強度(91日)/気中強度(91日)	0.87	0.02	0.88	0.03	0.8以上
	スランプフロー(練上り)	53.9	0.85	53.6	1.1	52.5 ± 2.5
	スランプフロー(8時間後)	50.6	1.15	51.3	1.3	52.5 ± 2.5

(1) 強度特性および水中不分離性

内核部および二重壁部の水中供試体およびボーリングコアの圧縮強度試験結果によると土木学会・水中不分離性コンクリート設計施工指針(案)に定められている品質基準値, 91日圧縮強度(180 kgf/cm^2), 水中強度比(0.8)を下回るものではなく安定した品質を確保することができた。

(2) 打継ぎ特性

コンクリート打継部の引張強度は $3.5 \sim 9.8 \text{ kgf/cm}^2$ で, 構造上満足する強度であった。

(3) 流動性

流動性に影響を及ぼすスランプフロー値およびその保持時間は, それぞれ 50 cm 以上, 8 時間以上あれば, 所要の流動距離とコンクリート強度が確保できるが, 練上り時および8時間後のスランプフロー値は管理基準値を満足している。

図22に内核部最上層の打上り状況を示している。大規模実験同様, 打設管から半径 6 m の範

囲での勾配は $1/50 \sim 1/70$ でほぼ平坦であったが, 合流部では $15 \sim 20 \text{ cm}$ のくぼみがあった。

(4) コンクリートの内部温度

コンクリートの内部最高温度を 50°C 以下とし, 打込温度を 20°C 以下としたが, ほぼ計画通りの結果が得られた。その一例を図23に示す。

4 あ と が き

水中不分離性コンクリートは1979年に導入されて以来, 主に港湾構造物に使用されていたが, 信頼できる水中コンクリートであることより, 1985年以降橋梁の海中基礎への適用も増えている。水中不分離性コンクリートの使用箇所は設置基礎の置換および均しコンクリート^{18)~24)}, 鋼製橋脚等の杭とフーチングの結合部等である。それらの水中コンクリートの施工はコンクリートミキサー船等よりポンプ圧送によっており, 1橋脚当りの最大打設量は 5000 m^3 程度のものである。

明石海峡大橋主塔基礎の水中コンクリートについては, 量が多く, 品質条件の厳しいものであったが, セメントや骨材の産地を一定にして品質のバラツキを抑えた結果, 所定の成果が得られた。今後の大量施工時にはこの経験が役立つものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 本州四国連絡橋公団, 瀬戸大橋工事誌, p. 83 (1988)。
- 2) 吉田 巖, 桜井紀朗, 加島 聡, 坂本光重, 土木学会論文集, 第390号, V-8, p. 35 (1988)。
- 3) 関 博, コンクリート工学, 28, 3, 10 (1990)。
- 4) 武川恵之助, 姫路昭夫, 材料, 29, 318 (1980)。
- 5) 中原 康, 福手 勤, 基礎工, 19, 8, 18 (1991)。
- 6) 桜井紀朗, セメントコンクリート, No. 440, p. 6 (1983)。

図23 水中コンクリートの内部温度上昇

- 7) 本州四国連絡橋公団第二建設局, (財)海洋架橋調査会, 児島一坂出ルート・プレバックドコンクリート施工記録 (1986).
- 8) 加島 聰, 坂本光重, コンクリート工学, **28**, 3, 37 (1990).
- 9) 和泉 隆, コンクリート工学, **28**, 3, 27 (1990).
- 10) 小谷一之, 和泉 隆, セメントコンクリート, No. 418, p. 41 (1981).
- 11) (財)沿岸開発技術センターおよび(財)漁港漁村建設技術研究所, “特殊水中コンクリート・マニュアル (設計・施工)” (1986) 山海堂
- 12) 中田博昭, コンクリート工学, **28**, 3, 86 (1990).
- 13) 坂本光重, 樋口康三, 北口雅章, 本四技報, **13**, 51, 21 (1989).
- 14) 加島 聰, 樋口康三, 北口雅章, 第17回日本道路会議論文集, p. 866 (1987).
- 15) 加島 聰, 坂本光重, 樋口康三, 北口雅章, セメントコンクリート, No. 508, p. 6 (1989).
- 16) 長瀬重義, 曾根徳明, 大塩 明, セメントコンクリート, No. 522, p. 32 (1990).
- 17) 中川良隆, 大友 健, 中平 淳, 松岡康訓, コンクリート工学論文集, **1**, 1, 95 (1990).
- 18) 平山嘉一, 青山実伸, 基礎工, **16**, 1, 46 (1988).
- 19) 徳永忠彦, 長谷川義矩, 広林日出男, 玉田信二, 金井恵嗣, 基礎工, **15**, 1, 44 (1987).
- 20) 山城多朗, 保坂鉄夫, 基礎工, **19**, 8, 51 (1991).
- 21) 篠原洋司, 田中武夫, コンクリート工学, **28**, 3, 59 (1990).
- 22) 中村 隆, 大我龍樹, 青木良雄, コンクリート工学, **28**, 3, 100 (1990).
- 23) 浜口義之, 中釜建治, コンクリート工学, **28**, 3, 76 (1990).
- 24) 山崎和夫, コンクリート工学, **28**, 3, 70 (1990).

書 評

先端材料シリーズ

“電気伝導の基礎と材料”

日本材料科学会 (編)

坂 田 亮 (編集)

(1991年, 裳華房発行, A 5 判, 371ページ, 5400円)

物質の電気伝導現象は, 物性物理学においても, 材料科学においても, もっとも魅力あるテーマの一つである。特に最近における高温超伝導体の出現は, 材料開発と応用の広い分野へ多くの研究者の目を振り向けさせた。

本書はこのような時期にあたり, 電気伝導をこれから学ぼうとする初心者用に書かれたもので, 電気伝導を軸にして, 金属, 半導体, アモルファス材料, 有機材料などとの関係をわかりやすく解説している。

第1章は, 単純な金属の電気伝導基礎を扱っている。ここでは, 自由電子模型が適用し得る単純な金属のみを対象にし, 電気伝導を量子論の立場から解説している。

第2章は, 半導体の電気伝導基礎について述べている。半導体の電気伝導を理論的に理解するには, まず, バンド端付近の電子エネルギー構造を決定し, 状態密度を算出する。続いて, 起り得る種々の散乱機構を検討した後に, ボルツマン輸送方程式を解いて, 電気伝導率や移動度などの輸送定数を求める。これら3つの主題を結びつけるのに, エネルギーと波数の分散関係および電子状態密度とともに詳細に解説している。

第3章は超伝導材料の伝導を扱っている。

ここではまず, 超伝導材料の基本的特性として, 低温とその利用および超伝導研究の経過を解説している。続いて, 超伝導材の特性測定法, 金属系超伝導材料, 酸化物超伝導材料およびこれらの応用が詳細にまとめられている。

第4章はアモルファス材料の電気伝導が述べられている。ここではまず, 理想結晶中での電気伝導について何がわかっているかをまとめ, 次に結晶の中で電子がどのような散乱を受けているかを考え, これらと比較してアモルファス構造の中では電気伝導が何によって支配されているかをまとめている。

第5章は有機材料の電気伝導についてまとめられている。ここでは, 導電性を有する有機化合物の必要条件から分子性結晶の伝導までを系統的に説明している。さらに広範囲な応用の可能性を解説している。

本書は電気伝導現象の性質上, 第1, 第2章はやや理論的記述が主で, 理解するには専門的知識を要するが, 全体としてよくまとめられており, 理工系学生, 若い技術者の入門の書としては良書である。

(奈良工業高等専門学校 有間 淳一)