分離低減型水中コンクリートによる マスコンクリートの施工

徳永忠彦^{*1}・長谷川義矩^{*2}・広林日出男^{*3}・堅川孝生^{*4}

概要 分離低減型水中コンクリートのもつ、水中での強度低下が少なく品質が均一で施工性に優れている、周辺の水質を汚濁することなく施工できる等の特徴を生かし、設置ケーソン工法による橋りょう下部工の施工を行った。本工事は、設置ケーソン工法に分離低減型水中コンクリートを大量に使用した初めてのケースである。本稿は、施工に際し行ったコンクリートの流動勾配の調査、コンクリートの水和熱による温度上昇の計測、コンクリートプラント船の施工能率調査等の調査結果を中心に報告するものである。

キーワード：分離低減型水中コンクリート、分離低減剤、設置ケーソン工法、マスコンクリート、温度応力、流動勾配、音響測深機

1. ま え が き

長島連絡橋は、広島県中部の瀬戸内海に位置する大崎上島と、さらにその離島である中国電力大崎発電所建設地点の長島を結ぶ渡海橋りょうであり、橋りょう下部工には分離低減型水中コンクリートを使用した設置ケーソン工法を採用した。

海洋におけるコンクリート施工では、海象条件が不安定なため急速施工が必要とされ、従来からプレパックドコンクリート工法が主流をしめてきた。設置ケーソン工法による橋りょう基礎コンクリートに用いられる水中コンクリート施工法は、本州四国連絡架橋に代表されるように、そのほとんどがプレパックドコンクリート工法である。

近年、セルロースエーテルなどの高分子化合物を主成分とする分離低減剤を混入した分離低減型コンクリートが開発され、水中でも分離しない特殊水中コンクリートとして使用実績が年々増加しつつある。

本工事は、設置ケーソン工法による橋りょう下部工コンクリートとして分離低減型水中コンクリート（「アクアコンクリート」、以下、特殊水中コンクリートと称す）を大量に採用した初めてのケースである。

2. 工事概要

長島連絡橋は橋長 400 m、中央径間 200 m、幅員 7 m の下路式 3 径間連続トラス橋である。長島連絡橋全体図を図-1 に、P2 橋脚の構造を図-2 に、橋りょう諸元を表-1 に示す。

表-1 橋りょう諸元

道路規格	第3種第4級
橋 格	2等橋
形	上部工 3径間連続下路式トラス橋 橋長 100m+200m+100m=400m
式	下部工 橋脚 鋼わくケーソン直接基礎、壁式躯体2基 橋台 直接基礎、逆T式躯体2基

図-1 長島連絡橋全体図

*1 中国電力大崎発電所工事所長

*2 同 上 工事課長

*3 大林組大崎上島工事事務所長

*4 同 上 技術開発本土土木技術部（正会員）

水中コンクリートの打設量は2基で8200 m³であり、コンクリートの最大打設水深は25 mである。

2.1 工事数量および工程

下部工事の工事数量を表-2に示す。工事は昭和60年9月に床掘を開始し、水中コンクリートは60年11月から12月にかけて打設した。

2.2 施工順序

P2 橋脚の施工順序を図-3に示す。

2.3 特殊水中コンクリート採用の経緯

本工事は当初、プレパックドコンクリート工法によって昼夜連続作業を計画していたが、深夜作業について付近住民の了承を得るのが困難となったので、最近使用実績も多かった特殊水中コンクリートによる工法と比較

表-2 工事数量

工	種	数 量	備 考
下 部 工	海 底 床 掘	10 640 m ³	土砂・風化軟岩
	鋼わくケーソン	680 t	P1=260 t, P2=420 t
	水 コン ク リ ー ト	8 200 m ³	P1=1 850 m ³ P2=6 350 m ³ フライアッシュセメント B種、分離低減剤
	(普 通) コン ク リ ー ト	2 780 m ³	フライアッシュセメント B種、防せい剤
	鉄 筋	235 t	SD-35
工 橋 台	掘 削	14 250 m ³	土、岩
	(普 通) コン ク リ ー ト	2 300 m ³	フライアッシュセメント B種、防せい剤
	鉄 筋	100 t	SD-35

図-2 P2 橋脚構造図

Mass Underwater Concrete with Segregation Control Admixture

By T. Tokunaga, Y. Hasegawa, H. Hirobayashi, T. Tatekawa

Concrete Journal, Vol. 24, No. 9, pp. 43~51, Sept. 1986

Synopsis For the first time, mass underwater concrete with S.C.A. (Segregation Control Admixture) was used for a substructure of a bridge on laying-down Caisson method. The underwater concrete with S.C.A. has the following advantages. First, it keeps strength deterioration under water at minimum. Second, it is uniform in quality; that is good for execution of work. Third, it hardly makes water turbid, for it is controlled to prevent segregation under water. The present paper refer mainly to the result of examination on such as the flow gradient, temperature rise of the concrete caused by heat of hydration, execution efficiency of the concrete plant, and so on.

Keywords : underwater concrete with segregation control admixture, laying-down caisson method, mass concrete, thermal stress, flow gradient, echo-sounder

図-3 橋脚の施工順序

検討した結果、

- 1) 特殊水中コンクリートは、凝結時間が数時間遅れるため、深夜作業を中止してもコンクリート打継ぎに問題がない。
- 2) 施工現場付近は海苔および鯛の養殖も行われており良好な漁場であるが、特殊水中コンクリートは分離が少ないため、水質汚濁の問題がほとんどない。
- 3) 特殊水中コンクリートは、水中打設による強度低下が少なく、しかも品質が均一で施工性に優れている。
- 4) 本工事の施工条件においては、両工法の工費、工期はほぼ同等である。

の理由から、本工事においては断続施工が可能なアクアコンクリート（特殊水中コンクリート）を採用した。

3. 特殊水中コンクリートの施工

3.1 使用材料

使用材料を表-3に示す。ケーソン中詰めコンクリートはマスコンクリートであり、水和熱による温度ひびわれ防止対策が必要となる。本工事では、水和熱低減および海洋環境下における耐久性を考慮して、セメントはフライアッシュB種を使用した。

3.2 配合の選定

コンクリートの配合は、施工性、水中における水平流動距離と圧縮強度の関係、水中打設による強度低下等を

表-3 使用材料

材 料	品 名	質 量
セメント	フライアッシュセメントB種、比重 2.96	
細骨材	広島県高根沖海砂、比重 2.52、FM 2.74	
粗骨材	広島県蒲刈産砕石、 $G_{max}=20\text{mm}$ 、比重 2.75、FM 6.9	
混和剤	AE 減水剤無塩化タイプ	
分離低減剤	セルロースエーテル系分離低減剤	

考慮して試し練りを行い決定した。分離低減剤（以下、SCA と称する）の使用量については過去の実績等から判断し、鋼わくのない基礎部については潮流（0.9m/s）の影響や海水の汚濁等を考慮して 3.0kg/m^3 とし、鋼わく内ではほぼ静水中に近い中詰め部分については、 2.0kg/m^3 とした。なお、P2 橋脚中詰めコンクリートは打設量が $3\,300\text{m}^3$ に及び、かなりのマスコンクリートとなるため、水和熱の面からも単位セメント量をできるだけ低減する必要がある、工事工程も考慮して強度管理材令を 56 日とした。

示方配合を表-4に示す。

3.3 コンクリートの製造

特殊水中コンクリートの製造・打設には、 $90\text{m}^3/\text{h}$ の打設能力をもつコンクリートミキサー船を使用した。

SCA は自動計量とし、セメントと同時にミキサに投入して練りまぜる方式を採用した。使用ミキサは 1.75m^3 パン型強制練りミキサである。特殊水中コンクリートは粘性が高く、SCA を十分に分散させ均一化するた

表-4 示 方 配 合

施 工 場 所	W/C (%)	s/a (%)	フ ロー (cm)	空 気 量 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					W	C* ¹	S	G	SCA* ²	Ad* ³
基礎コンクリート	57.9	40	45±5	2.0	220	380	638	1 042	3.0	0.95
中詰めコンクリート	56.6	40	45±5	2.0	215	380	643	1 051	2.0	0.95

*1 フライアッシュセメントB種 *2 分離低減剤 *3 AE 減水剤

図-4 コンクリートの打設方法

めには、練りまぜ時間を普通コンクリートに比べ長くする必要がある。本工事においては、ミキサの改造を行った後、ミキサの練りまぜ性能試験（ミキサの4箇所から採取した試料による試験）を行い、スランプ、スランプフロー、空気量、圧縮強度を調査して、練りまぜ時間を65秒と定めた。

3.4 水中コンクリートの打設および管理

(1) 基礎コンクリートの打設

基礎コンクリート打設に先だって、エアリフトにより岩着部の清掃を行った。コンクリート打設は、まず300t台船上にてコンクリート輸送管を組み立て、ミキサー船ラダーのポンプ配管先端に接続し、ミキサー船のポンプにより圧送する方式とした。水中コンクリートでは、コンクリートの打設状況を直接目視して管理することが困難であるため、本工事においては、1箇所の輸送管の分担範囲を半径3mの円内、打上り高さの自然流動勾配を1/10として予定打設数量を設定し、輸送管1箇所当りの打上り高さと打設量を算出した。打設量または高さが管理値に達した場合は、ミキサー船を次の打設箇所に6m移動し打設した。管の先端位置は施工性を考慮し、潜水夫により打設面より20~30cm離れた状態にした。

輸送管の高さ管理は、陸上部より輸送管に取り付けた指標をレベルで視準する方法で行った。さらに各リフトの天端高さ管理として、予定数量打設後、レッド(重錘)による天端測定を行った。打設工程は、コンクリートの粘性、移動速度、段取り等を考慮して50~60m³/h、1日の打設量を約600m³として計画した。基礎コンクリー

図-5 リフト割り図

写真-1 中詰めコンクリート打設状況

写真-2 中詰めコンクリート打設状況

トおよび中詰めコンクリートのリフト割り図を図-5に示す。

(2) 中詰めコンクリートの打設

基礎コンクリートおよび受け台コンクリートの打設が終了して2週間後、ケーソンの据付けを行った。ケーソン内作業足場の設置の後、ケーソン中詰めコンクリート

の打設を行った。コンクリート打設にあたっては、鋼わくケーソン内が切ばりによって仕切られているため、施工能率を考慮して輸送管を前もって設置しておき、移動時にはポンプ配管と輸送管を順次継ぎかえる方法とした。打設管理方法については基礎コンクリートとほぼ同様とした（写真—1, 2 参照）。

3.5 品質管理

特殊水中コンクリートの打設に際し、フレッシュコンクリートの試験として、コンクリート温度、スランプ、スランプフロー、空気量および単位容積重量試験を、また、硬化コンクリートの試験として圧縮強度試験を行った。

(1) フレッシュコンクリートの試験結果

1) コンクリート温度 施工時期が天候によって気温変化の大きい11月～12月であったため、日変化が大きく、コンクリート温度は外気温プラス 5℃ 程度で変化した（図—6 参照）。

図—6 コンクリート温度測定結果

図—7 圧縮強度試験結果（水中作成供試体、材令 56 日）

2) スランプフロー 特殊水中コンクリートは流動性が高く、スランプではワーカビリティの測定を行うことが困難なため、スランプ試験後のコンクリートの広がり測定してスランプフロー値とした。スランプフロー値は、基礎部 (SCA=3 kg/m³)、中詰め部 (SCA=2 kg/m³) ともバラツキが少なく 45±2 cm の値が得られた。

(2) 硬化コンクリートの試験結果

1) 圧縮強度 $\phi 10 \times 20$ cm の円筒形型わくを水槽に沈め、型わく上 10 cm の水面より特殊水中コンクリートを自由落下させて作成したコンクリート供試体（以後、水中供試体と称す）の強度試験結果を図—7 に示す。

分離低減剤の多い基礎部 (SCA=3 kg/m³) の水中供試体強度は、材令 7 日で 100 kgf/cm²、材令 28 日で 191 kgf/cm²、強度管理材令である材令 56 日において 241 kgf/cm² (上限値 261 kgf/cm²、下限値 216 kgf/cm²) であり、設計基準強度 180 kgf/cm² を十分に満足する値が得られ

た。

分離低減剤の少ない中詰め部 ($SCA=2\text{ kg/m}^3$) の水中供試体強度も、材令 7 日で 107 kgf/cm^2 、材令 28 日で 191 kgf/cm^2 、強度管理材令である材令 56 日において 238 kgf/cm^2 (上限値 276 kgf/cm^2 、下限値 220 kgf/cm^2) であり、設計基準強度 180 kgf/cm^2 を十分に満足する値が得られた。

4. 施工性調査

4.1 特殊水中コンクリートの打設実績

本工事における特殊水中コンクリートの打設実績を表—5 に、基礎および中詰めコンクリート打設中のタイムスタディーの結果の一例を図—8 に示す。平均時間打設量は基礎部で $54\text{ m}^3/\text{h}$ 、中詰め部では段取替えの時間を含めて $47\text{ m}^3/\text{h}$ であった。また、コンクリートポンプの圧力は、SCA 添加量が 3 kg/m^3 の基礎コンクリートでは $125\sim 160\text{ kgf/cm}^2$ の範囲で変動し、SCA 添加量 2

表—5 打設実績一覧表

打設日	打設場所	打設量 (m^3)	打設時間	平均打設速度 (m^3/h)	SCA (kg/m^3)
11. 5	P2 基礎①	382.25	8 : 02	47.6	3
11. 6	P2 基礎②	638.0	11 : 46	54.2	3
11. 7	P2 基礎③	844.5	15 : 04	56.1	3
11. 8	P2 基礎④	550.5	9 : 11	59.9	3
11.14	P2 受け台	17.0			3
11.18	P1 受け台	18.0			3
12. 9	P2 基礎⑤	706.25	13 : 50	51.1	3
12.10	P2 中詰め①	515.5	11 : 30	44.8	2
12.11	P2 中詰め②	508.5	10 : 46	47.2	2
12.12	P2 中詰め③	610.0	11 : 58	51.0	2
12.13	P2 中詰め④	615.25	12 : 56	47.6	2
12.14	P2 中詰め⑤	589.0	11 : 10	52.7	2
12.17	P2 中詰め⑥	321.25	7 : 01	45.8	2
12.18	P2 中詰め⑦	99.0	3 : 51	25.7	2
12.19	P1 基礎①	632.75	15 : 34	40.6	3
12.20	P1 中詰め①	645.0	12 : 38	51.1	2
12.21	P1 中詰め②	505.0	11 : 08	45.4	2
計		8 203.25

図—8 コンクリート打設タイムスタディー
(中詰めコンクリート)

表—6 打設時の流動勾配測定結果

水深 (m)	SCA (kg/m^3)	流動勾配		
		1	2	平均
24.5	3	1/17	1/7	1/12
18.0	2	1/12	1/8	1/10
10.5	2	1/20	1/12	1/18

図—9 P2 基礎コンクリート打設時流動状況
(水深 24.5 m, SCA 3 kg/m^3)

kg/m^3 の中詰めコンクリートでは $120\sim 130\text{ kgf/cm}^2$ となり、ほとんど変動しなかった。

4.2 水中における流動性

特殊水中コンクリートの水中における流動性状 (主として流動勾配) を測定するために、標尺として鉄筋わくを設置し、潜水夫により流動状況を測定した。図—9 に水深 24.5 m における流動勾配、表—6 に各水深における流動勾配測定結果を示す。打設時の流動勾配は、水深 18 m 以深では $1/10\sim 1/12$ 、水深 10.5 m では $1/18$ である。今回の測定は測定点数も少なくバラツキも大きいいため、水深と流動勾配の関係については今後さらに調査が必要と考えられる。

4.3 コンクリート打設時の水質

基礎コンクリートおよび中詰めコンクリート打設時の周辺海域における材料分離による水質汚濁状況を調査するため、海水の濁度、pH の測定を行った。調査回数はコンクリート打設前・中・後の 1 日 3 回で、調査地点は、基礎コンクリート打設時には潮流方向に沿って 7 点、中詰めコンクリート打設時にはミキサ船、台船の船尾とケーソンの通水口の 3 点とした。測定水深は、水深 0.5 m、2.0 m および海底より 1.0 m 上方の 3 水深とした。測定の結果、濁度および pH は打設前・中・後で大きな差が見られず、潮流による下流方向への濁りの移動も確認されなかった。そのため、特殊水中コンクリート打設による水質汚濁はほとんどなかったと判断される。

4.4 音響測深機を用いたコンクリート天端面の測定結果

大水深下におけるコンクリート天端管理手法を確立するため、P2 橋脚中詰めコンクリート打設中に、水深 20 m 付近において音響測深機を用いた打設面天端高さの測定実験を行った。使用した音響測深機は本来浚渫等に用いられているものであり、特にコンクリート用ではない。調査項目として、①ケーソン内の側壁、切ばりおよび輸送管の影響、②水の濁りおよび気泡の影響、③周波数

(200 kHz, 400 kHz) による精度の相違, について調査を行った。測定を始める前に反射板を水面から 2 m 間隔で降ろし, パーチェックによりキャリブレーションを行った。測定の結果, 以下のことが明らかになった。

- 1) 感度は中程度で記録でき, 感度を上げると雑音が発生する。
- 2) 気泡は大きなものより小さなものが問題になる。また, 水の濁りによる障害はない。
- 3) 構造物の反射波は重なって現れるが, コンクリート天端の読取りは可能である。
- 4) 周波数は 200 kHz, 400 kHz とも, 精度に大きな相違はない。
- 5) 測定精度はレッド (重錘) と比較して $\pm 5 \sim 10$ cm の範囲である。

以上の結果, さらに深い水深でコンクリート天端を測定する場合でも, 記録のデジタル化, 水中の温度および塩分濃度の変化の補正を行えるように改良すれば, 音響

写真-3 音響測深機設置状況

図-10 コンクリート表面調査結果

図-11 コンクリート表面横断面図 (A-A)

測深機による方法で十分な測定精度が得られると考えられる。

4.5 硬化した中詰めコンクリートの表面調査

養生期間が終了した後, 鋼わくケーソン内部を排水し中詰めコンクリート表面の調査を行った。P2 橋脚中詰めコンクリート表面の等高線を 図-10 に, 断面を 図-11 に示す。今回の施工ではケーソン内に切ばりがあり, 6 箇所から打設したにもかかわらず, 表面は若干の凹凸は見られるものの, 高低差は ± 10 cm の範囲に入っており, コンクリート天端表面の平坦性は十分に確保されたといえる。

5. 温度応力の計測

P2 橋脚中詰めコンクリートは, 底面積 345 m^2 , 高さ 12m, 打設量 3300 m^3 に及ぶマスコンクリートであり, セメントの水和熱に起因した温度応力ひびわれについて検討する必要がある。しかし, 中詰めコンクリートは分離低減剤を用いた水中コンクリートであり, その特殊性から考えて, 温度応力の計測例は非常に少ない。したがって, 今後, 同種の温度応力解析における熱定数および応力の発生傾向についての資料を得る目的で, 温度応力の計測を行った。

5.1 計測項目および計器の位置

計測項目および計器の設置位置を 表-7 および 図-12 に示す。

5.2 計測結果

代表的な計測位置における温度およびコンクリート応力の計測結果を 図-13~図-15 に示す。最高温度上昇が生ずる位置は基礎コンクリート天端から 4.6 m (AT 12) であった。打込み温度 16.4°C に対して最高温度は 74.6°C であり, 上昇量は 58.2°C であった。これをセ

表-7 計測項目

測定項目	計器名称	個数
温度	C-C 熱電対	25 点
コンクリートひずみ	コンクリートひずみ計 (KM-100 F)	10 点
コンクリート有効応力	有効応力計 (GK-100)	2 点

図-12 計器の設置位置

メント 1 kg 当りの発熱量に換算すると 85.8 kcal/kg であり、フライアッシュセメント B 種の発熱量としては若干高い値である。温度上昇量が高い原因として、セメントおよび配合のバラストの影響、分離低減剤の影響が考えられる。応力の発生傾向は、鋼わく付近については、急激な温度勾配のため、比較的若材令時に引張応力が生じ、ひびわれの危険性が高い。シミュレーションの結果でも、鋼わくを介して海水に接する部分の熱伝達率は $20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ となり、この値は大気と接する場合の熱伝達率の 2 倍程度であり、鋼わく付近では大きな温度差ひびわれが生ずる危険性の高いことを示した。しかし、

図—13 温度計測結果（中央部）

図—14 温度計測結果（周辺部）

図—15 応力計測結果

中詰めコンクリートの大部分は、コンクリート打設後 2 か月経過した時点でも圧縮ゾーンにある。この応力は、全体の温度が低下するにつれて引張方向に転ずると思われる。今回の施工では作業時間の制限からリフト打設を行ったが、最大温度の低減という観点からは、顕著にその差は現れていない。最終安定温度に至った際の安全性については設計段階で検討し、ひびわれに対する安全性を確認しているため問題はないが、シミュレーションの結果、最終安定温度に至るには約 2 年かかると考えられる。

6. 品質確認試験

実際に水中で打設した特殊水中コンクリートの品質を確認するため、ボーリングコアによる強度試験を行った。コアの採取位置および強度試験結果を図—16 に示す。

6.1 目視観察結果

採取したコアの目視観察結果をまとめて以下に示す。

(1) コアには、ポーラスな部分や材料分離のあとは見られず、全体的に気中コンクリートと変わらないものであった。

(2) 打継目には、若干微粒分の沈殿が認められたものもあった。

(3) 採取位置（輸送管からの離れおよび鉛直方向）による変化は認められなかった。

6.2 圧縮強度特性

圧縮強度試験は、工程の都合により材令 110 日で行っ

図—16 ボーリングコア圧縮強度試験結果

た。ボーリングコアの試験の結果、多少のバラツキがあるものの、基礎部コンクリート強度の平均値は 242 kgf/cm^2 、中詰め部コンクリート強度の平均値は 251 kgf/cm^2 を示し、いずれも設計基準強度 (180 kgf/cm^2) は十分に満足していることが確かめられた。

コアの圧縮強度および単位容積重量試験結果には、水深（水圧）の影響は顕著に現れていない。圧縮強度についてみると、流水下打設の基礎コンクリートと比較的静水下に打設した中詰めコンクリートにも、顕著な差は生じていない。この傾向は品質管理試験の結果とほぼ一致しており、SCA の混入量の差が潮流の影響を相殺したものと考えられる。

7. あ と が き

長島連絡橋下部工工事も水中コンクリート工事を無事終了し、現在、橋脚・橋台の躯体コンクリート工事の最盛期である。本工事においては、施工性および品質の確保という点においてはほぼ満足のゆく結果が得られたと思われ、また今回の調査において、分離低減型水中コンクリートに関する施工性および水中マスコンクリートの温度応力の把握という点においても貴重なデータが得られた。

本報告が今後の大型橋りょう基礎への分離低減型水中コンクリートの適用にあたり一助となれば幸いである。

（投稿：昭和 61 年 6 月 12 日受付）