大規模水中構造物に適用する水中不分離性コンクリートの研究

THE STUDY OF ANTIWASHOUT UNDERWATER CONCRETE
FOR LARGE UNDERWATER STRUCTURES

平野 茂*・中川良隆**・中平 淳***・大友 健****

By Shigeru HIRANO, Yoshitaka NAKAGAWA, Jun NAKAHIRA and Takeshi OHTOMO

Antiwashout underwater concrete is recently used due to the demand for speedy marine construction work of large structures.

Antiwashout underwater concrete was also used for the construction of foundation for the main towers of the Akashi Kaikyo Bridge and its excellent properties have been verified. The antiwashout underwater concrete, for large-scale pouring, must retain its consistency for long hours, have low heat of hydration and stable placing properties.

This study clarifies the effect of aggregate, sand, cement, and admixture on the flowability and setting time of concrete, and a better mixing method was developed to improve the quality of the antiwashout underwater concrete.

Keywords: antiwashout underwater concrete, admixture, flowability

1. 序 論

水中不分離性コンクリートは、混和剤として混入した粘調剤の作用によりコンクリートの構成材料が粘着され、フレッシュコンクリートの状態で周りの水から洗い作用を受けても分離しにくい特性をもっている。また、セルフレベリング性より、自重で平滑に仕上がる特性をもっている。

近年、わが国における建設工事の大型化、大深度化、急速化および合理化の要請から、水中コンクリートが多量に使用されるようになり、特に水中不分離性コンクリートは、その優れた特性、信頼性により明石海峡大橋主塔基礎等重要な大規模水中構造物に使用されている。

明石海峡大橋主塔基礎のような大規模水中構造物を、水中不分離性コンクリートにより施工する場合、一般の構造物と大きく異なるのは以下の点である。

- ① 広い面積を限られた数の打設管で打設するため、コンクリートに長距離流動性が要求される。
- ② マスコンクリートとなるため、セメントの水和熱による温度応力が問題となる。
- ③ 多量のコンクリートを安定した品質で製造、打設する設備が必要なこと。

一般に水中コンクリートを大規模打設する場合、a) 高流動性（大きなスランプフローをもつ。たとえばスランプフロー 50 cm 以上）のコンクリートを、b) 短時間で打設することが望ましい。しかし、水中不分離性コンクリートに高流動性を具備させるために、単位水量を大きくしていくと、分離抵抗性、強度の問題が発生する。

この問題を克服するには、水中不分離性混和剤量、セメント量を増やせば良いが、その場合②の問題が発生する。したがってセメントの低発熱化、プレクーリングの実施が必要となる。

一方、多量のコンクリートを短時間に打設するには、コンクリートの製造、打設設備を大規模にする必要があり、経済性の面から制限がある。そこで、コンクリートを長い時間を掛けて（製造、圧送能力の制限）、長距離流動（打設設備の数の制限）させる必要がある。すなわち①の問題が発生する。したがってコンクリートは長時間の流動性の保持、流動に伴う材料分離、品質変動が少

* 正会員 本州四国連絡橋公団垂水工事事務所技術課長
(〒655 神戸市垂水区平磯 1-1-66)

** 正会員 明石海峡大橋 3P 下部工大成・間・佐藤・東洋・日本国土共同企業体所長 (〒655 神戸市垂水区平磯 3-1-50)

*** 正会員 明石海峡大橋 3P 下部工大成・間・佐藤・東洋・日本国土共同企業体 (同上)

**** 正会員 大成建設(株)技術研究所 (〒245 横浜市戸塚区名瀬町 344-1)

ないことが要求される。

また、実施工においては③に示すように安定した品質のコンクリートを製造、打設できる設備を作る必要がある。

本研究の目的は以上の問題点を解決することであり、具体的には以下の2点である。

- ④ 低発熱，混合セメントを使用した水中不分離性コンクリートの流動性，凝結等の性質に及ぼす構成材料および配合の影響を明らかにする。
- ⑤ 水中不分離性コンクリートは，水中不分離性混和剤を分散させるため，通常，空練りをするので普通コンクリートよりも練りまぜ時間が長い。また，この際，骨材に表面水がある場合，団粒状になり練上りコンクリートの品質が安定しないことがある。したがって，練りまぜ時間が短く安定した品質のコンクリートが製造できる新しい練りまぜ方法の開発。

本研究に対応する既往の研究としては，水中不分離性コンクリートの流動性について田沢ら¹⁾が，練上りスランプフローに及ぼすコンクリート構成材料の影響について検討をしている。しかし，流動性の長時間保持および凝結の関係についての研究は，なされていない。

練りまぜ方法については，松井ら²⁾が連続練りミキサーで水中不分離性混和剤のプレミックスセメントが有効であること，および，宮野ら³⁾がベースコンクリートへの水中不分離性混和剤，流動化剤の添加時期によりフレッシュコンクリートの性状があまり変化しないことを明らかにしている。しかし，練りまぜ方法による品質の変動について十分検討されているわけではない。

ここでは本研究の成果をもとに施工した明石海峡大橋3P主塔基礎の水中コンクリート工事についても紹介する。

2. 水中不分離性コンクリートの品質に関する研究

(1) 概 要

水中不分離性混和剤として水溶性セルロースエーテルを使用する水中不分離性コンクリートは凝結遅延することが知られている。水溶性セルロースエーテルは非イオン性で一般にメチルセルロース（以下MCと略す）とよばれる。図—1に分子式を示す。分子の平均的長さは約1μm，太さは約0.001μmの鎖鎖状高分子で，セメント粒子等に吸着するとともに，粒子間隙に存在し，水溶液粘度を高めるものと考えられている。この粘性と凝結遅延性が流動性の長時間保持をもたらしていると考えられる。MCの存在により練りまぜ時の材料の投入順序，練りまぜ時間が，コンクリートの品質に大きく影響する。水中不分離性コンクリートの以上の特徴をふま

図—1 セルロース系水中不分離性混和剤の化学構造式

表—1 水中不分離性コンクリートの現場配合および要求品質

最大粗骨材寸法 (mm)	水 結 合 材 比 (%)	細骨材 率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					単位量 (t/m ³)
			水	結合材	細骨材	粗骨材	水中不分離性混和剤	
20	67	40	213	320	648	1006	2.3	

結合材：三成分系セメント
スランプフロー：52.5±2.5cm(8時間保持)，空気量：5％以下
設計基準強度：f_{ck}=180kgf/cm²(水中，材料91日)，水中強度比 0.8 以上
凝結始発時間：30時間程度以内，水中分散抵抗性 SS<150mg/L，pH<12
塩素イオン濃度：0.6kg/m³以下，断熱温度上昇量 30℃以下(断熱温度上昇試験による)

表—2 検討項目および実験内容

検 討 項 目	実 験 内 容
I 構成材料及び配合が水中不分離性コンクリートの凝結、流動性の長時間保持に及ぼす影響	
i) 構成材料の産地等材料の違いが凝結及び流動性の長時間保持に及ぼす影響	・ 結合材として高炉スラグ微粉末、フライアッシュの銘柄を変えた場合、細骨材として海砂、川砂を使用した場合の凝結、流動性の長時間保持について検討した。(実験シリーズ①)
ii) 結合材の品質、配合比率が凝結及び流動性の長時間保持に及ぼす影響	・ 結合材のどのような品質が、凝結、流動性の長時間保持に影響を与えるかを調査する為、結合材の物理的性質の測定を行った。 ・ セメント単味、高炉セメント、フライアッシュセメント、三成分系セメントについて配合比率を変えたもの15種類について凝結、流動性の長時間保持について検討し配合比率の影響について調査した。(実験シリーズ②)
iii) 細骨材の品質及び表面水が凝結及び流動性の長時間保持に及ぼす影響	・ 細骨材として海砂を使った場合と、川砂を使った場合に於いて凝結、流動性の長時間保持に大きな差異がある事を明らかにする為、微粒子の量と質を変えた場合及びDf値を変えた場合の影響について検討した。(実験シリーズ③) ・ 通常混練の場合、細骨材の表面が濡れた状態と空練りすると、水中不分離性混和剤が団粒になり付着する現象が認められるので、細骨材の表面水がコンクリートの性質に及ぼす影響について検討した。 検討ケースとして(水中不分離性混和剤を細骨材にまぶす、結合材にプレミックス)×(パン型強制ミキサー、水平二軸強制ミキサー)の4ケースで差違を明らかにした。(実験シリーズ④)
iv) 粗骨材の粒度が凝結及び流動性の長時間保持に及ぼす影響	・ 粗骨材の粒度が凝結、流動性の長時間保持に及ぼす影響について5種類検討した。(実験シリーズ⑤)
v) 混和剤が凝結及び流動性の長時間保持に及ぼす影響	・ 混和剤(AE減水剤、流動化剤)の使用量が凝結、流動性の長時間保持に及ぼす影響について検討した。(実験シリーズ⑥)
II 練りまぜ方法が水中不分離性コンクリートの品質に及ぼす影響	
vi) 練りまぜ方法の影響	・ 水中不分離性混和剤の投入方法、空練りの有無、水練り時間がコンクリートの性質に及ぼす影響について検討した。(実験シリーズ⑦) ・ 水練り時間を一定として練りまぜ方法(通常、プレミックス、トリプル)がコンクリートの性質に及ぼす影響について検討した。(実験シリーズ⑧) ・ 空練り時間或いは、モルタル練り時間を一定として練りまぜ方法(通常、プレミックス、トリプル)がコンクリートの性質に及ぼす影響について検討した。(実験シリーズ⑨) ・ トリプル混練に於ける水の分割投入がモルタル、コンクリートの性質に及ぼす影響について検討した。(実験シリーズ⑩)

え，序論で述べた④，⑤について検討した。

検討にあたり，大規模水中コンクリートに適用する水中不分離性コンクリートの仕様例として，明石海峡大橋3P主塔基礎の水中コンクリートの現場配合と，要求品質を表—1に示す。

(2) 実験内容

(1)で述べた2つの検討項目の実験内容を表—2に示す。また，それぞれの実験シリーズを表—3に示す。

ここで，水中不分離性コンクリートの流動性はスランプフローで評価する。すなわち，練上りの流動性は分離しない範囲でスランプフローが大きい方が良い，流動性の長時間保持はスランプフローの経時低下量が少ないの

表-3 実験シリーズ

実験要因	結合材種類 *1	混合比率 P:BS:FA *1	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m³) *1				単位量 (c×%)	練りませ方法 *3	USCA	空練り	木練り	ミキサー	概要		
					C	W	S	G									
実験シリーズ① 使用材料の品質	OP0 BS-a, BS-b FA-A, FA-B	30:40:30	65	40	328	213	635	984	2.5	1.0	0.25	通常	砂混入	60S	180S (120S後5分投入)	パン	AE調整剤 (GA)を使用
実験シリーズ② 結合材の物理的性質																	BS, FAの物理 的性質の測定
実験シリーズ③ 結合材混合比率	MP6:BS6:FA6	15種類	65	40	320	208	645~ 673	1002~ 1044	2.3	1.0	0.125	トリプル	フルミックス		(25S) 45S	二軸	1次水量0.8
実験シリーズ④ 細骨材の粒 度、形状分 布、微粉分 布	MP1:BS3:FA1	30:40:30	68	40	320	219	640	982	2.3	1.0	0.25	通常	砂混入	30S	90S	二軸	1次水量0.8
	MP4:BS5:FA6	25:40:35	65	40	320	208	650	1021	2.3	1.0	0.15	トリプル	フルミックス	—	(25S) 45S	二軸	1次水量0.8
	OP0:BSa:FAA	30:40:30	65	40	328	213	636	991	2.5	1.0	0.25	通常	砂混入	60S	180S	パン	細骨材中の微 粉分をばら
実験シリーズ⑤ 細骨材の表面水	MP1:BS1:FA1	27:40:33	66	40	320	210	640	994	2.3	1.0	0.25	通常	砂混入	60S	120S	パン	
	MP1:BS3:FA1	30:40:30	68	40	320	219	640	982	2.3	1.0	0.25	通常	砂混入	30S	90S	二軸	
実験シリーズ⑥ 粗骨材粒度	MP6:BS6:FA6	25:45:30	65	40	320	208	650	1013 粒度 違い 5種類	2.3	1.0	0.125	トリプル	フルミックス		(25S) 45S	二軸	1次水量0.8
実験シリーズ⑦ 混和剤の使用量	MP1:BS1:FA1	27:40:33	66	40	320	210	640	994	2.3	1.0	0.0 2.0 ~0.4	通常	砂混入	60S	120S	パン	
実験シリーズ⑧ ・水中不分離性混和 剤の投入方法 ・空練りの有無 ・本練り時間	MP1:BS3:FA1	30:40:30	68	40	320	219	630	984	2.3	1.0	0.25	フルミックス	フルミックス	0.15S	25~90S	二軸	
												通常	砂混入	0.15S	25~90S	二軸	
実験シリーズ⑨ ・練りませ方法 (通 常・プレミックス・ トリプル) ・接水時間一定	OP1:BS3:FA1	20:50:30	67	40	320	215	633	990	2.3	1.0	0.25	通常	砂混入	15S	75S	二軸	
												フルミックス	フルミックス	0	75S	二軸	1次水量 0.8~1.0
実験シリーズ⑩ ・練りませ方法 (通 常・プレミックス・ トリプル) ・本練り時間	OP1:BS3:FA1	20:50:30	67	40	320	215	633	990	2.3	1.0	0.25	通常	砂混入	30	25~90S	二軸	
												フルミックス	フルミックス	0	25~75S	二軸	1次水量 0.85
実験シリーズ⑪ ・トリプル混練 ・練りませ水の分別 投入	MP4:BS5:FA6	25:40:35	65	40	320	208	650	1021	2.3	1.0	0.15	トリプル	フルミックス	—	(25S) 45S	二軸	1次水量 0.25~1.0
			66.9	—	505	338	1074	—	4.6	0	0				(35S) 55S	二軸	

*1 凡例
OP 普通ポルトランドセメント
MP 中熱ポルトランドセメント
BS 高炉スラグ微粉末
FA フライアッシュ
*2 パン: T社パン型強制 100ℓ (40ℓ/バッチ)
*3 本練り時間(℃) はモルタル練り時間

P ポルトランドセメント
C 結合材
W 練りませ水
S 細骨材
G 粗骨材
USCA 水中不分離性混和剤
S.P. 流動化剤
AEAd AE減水剤

① 通常混練

② プレミックス混練

③ トリプル混練

C: 結合材, USCA: 水中不分離性混和剤, S: 細骨材, G: 粗骨材
W: 混練水, W1: 一次水, W2: 二次水, Ad: 混和剤

図-2 水中不分離性コンクリートの練りませ方法

が良く、8~17 時間後の低下量が評価した。凝結特性については、凝結始発時間で評価し、流動性の長時間保持が得られる範囲で始発時間が早い方がよい。

(3) 練りませ方法および試験方法

練りませ方法については、図-2 に示す 3 つの方法に

ついて実施した。

コンクリートの試験は主に、スランプフロー、凝結始発時間、圧縮強度の測定を行い、その方法は JIS あるいは、水中不分離性コンクリートマニュアルによった。コンクリート構成材料の物性試験は JIS によった。

(4) 実験結果および考察

a) 構成材料の産地等材料の違いが凝結および流動性の長時間保持に及ぼす影響 (実験シリーズ①)

結合材として、三成分系セメントを使用し、セメントのロット 2 種 (表、図中では記号 OP 0, OP 2 で示す。以下結合材の種類はすべて記号を用いる)、高炉スラグ微粉末 2 種 (a, b)、フライアッシュ 6 種 (A, B, C, D, E, F) を組み合わせた 9 ケースの配合について、凝結特性を調査した。各検討材料の組合せ、およびこれによる水中不分離性コンクリートの凝結始発時間の測定値を表-4 に示す。配合①~⑨の凝結始発時間は、使用する材料の組合せにより 29.5~52.5 時間の間で変化している。

凝結始発時間に大きな差異を示したフライアッシュ A と B、海砂と川砂および参考として凝結始発時間では大きな相違のない高炉スラグ微粉末 a と b のロット違い (a', b')(A', B')(海砂', 川砂') を使用して水中

図一七 三成分系セメントの結合材の混合比率と凝結，流動性の長時間保持の関係

図一八 細骨材の微粒分量と凝結始発時間の関係

なるほど凝結始発時間は遅れる。練上り時流動性と流動性の長時間保持には最適置換率があり，実験範囲で，フライアッシュ置換は45%，高炉スラグ微粉末置換は60%程度の置換率が最適である。

⑤ 三成分系混合セメント

図一七に示すように，三成分系混合セメントはセメント単味に比較して，練上り時の流動性および流動性の長時間保持に優れている。

中庸熟ポルトランドセメントを25%混入したMP25系と10%混入したMP10系はフライアッシュ混入比率が同じなら練上りの流動性はあまり変わらない。しかし，フライアッシュ混入比率が同じならMP25系はMP10系に比較して流動性の長時間保持に優れており，かつ凝結始発時間が早い。三成分系混合セメントは，フライアッシュ混入比率が大きくなるほど凝結始発時間が遅れ，流動性の長時間保持性が良くなる。

c) 細骨材の品質および表面水が凝結および流動性の長時間保持に及ぼす影響

① 細骨材の品質 (実験シリーズ④)

図一九 細骨材の粒度および微粒分量がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響

実験④-⑥の結果を示した図一八より微粒分の量が多くなるほど，凝結始発時間が早くなる傾向はどの材料についてもみとめられるが，川砂を使用した場合が一番早い。粘土鉱物であるカオリンで置換すれば，少量で凝結始発時間が早くなることから，凝結遅延の程度は混入する鉱物の組成にも影響を受けるものと考えられる。

X線回折による定性分析によれば，使用した海砂は白雲母，石英が主体であるが，川砂には粘土鉱物である緑泥石が含まれており，この影響により凝結が早くなっていることが考えられる。細骨材が水中不分離性コンクリートの凝結特性に及ぼす影響については，物理的，化学的の両面があるものと推察される。

図一九よりFMが小さいほど，また細骨材中の微粒分量が多いほどスランプフローの低下量が大きくなる傾向が認められる。

凝結始発時間については，細骨材中に含まれる微粒分の量が多いほど凝結始発時間が早くなる傾向にあるが，この実験の範囲では，その差は3時間程度であり，細骨材の微粒分の及ぼす影響は，スランプフローの低下現象に，より顕著に現われるものと考えられる。

② 細骨材の表面水の影響 (実験シリーズ⑤)

図一十に示すように表面水のある細骨材に水中不分離性混和剤をまぶして投入した場合は，表乾の細骨材の場合に比較して練上りのスランプフローのばらつきが大きく，スランプフローの低下量が大きい。

図一〇 細骨材の表面水率および水中不分離性混和剤の投入方法がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響

図一〇 粗骨材粒度と凝結始発時間、スランプフローの関係

図一二 混和剤の使用量がフレッシュコンクリートの特性に及ぼす影響

水中不分離性混和剤を結合材にプレミックスして投入した場合、スランプフロー、凝結始発時間に関して細骨材の表面水の影響は少ない。したがって水中不分離性混和剤を結合材にプレミックスする方法はコンクリートの品質安定に有効である。

d) 粗骨材粒度が凝結および流動性の長時間保持に及ぼす影響 (実験シリーズ⑥)

図一〇に示すように粗骨材粒度が細かいと練上りスランプフローが小さく、スランプフローの長時間保持能力が低く、凝結始発時間が早い。

e) 混和剤が凝結および流動性の長時間保持に及ぼす影響 (実験シリーズ⑦)

図一二に示すように練上りスランプフローの改善には流動化剤、スランプフローの長時間保持には AE 減水剤が有効である。

スランプフローの長時間保持能力は AE 減水剤の使用量が多くなるほど良くなるが、凝結始発時間も遅くなる。

f) 練りませ方法の影響

① 水中不分離性混和剤の投入方法と空練りの有無、本練り時間がコンクリートの性質に及ぼす影響 (実験シリーズ⑧, 図一三参照)

i) 通常混練

空練りをしないと材料分離が生じる。すなわち、練上り時の見掛けのスランプフローは大きくなる。これは水中不分離性混和剤がコンクリート中に均等に分散しないことにより、必要な増粘効果が得られないためと考えられる。この場合水中不分離性混和剤が有効に作用していないのでスランプフローの低下量が大きくなる。また水

図一三 練りませ時間および水中不分離性混和剤の投入方法がコンクリートの性質に及ぼす影響

中圧縮強度も小さくなる。練りませ時間を長くした場合でも改善の傾向は認められない。空練りを 15 秒程度でも行えばスランプフローの 8 時間後の低下量の改善は、約 2 cm 程度であるが、水中圧縮強度および水中／気中圧縮強度比が大幅に改善される。

ii) プレミックス混練

空練りをしなくても材料の分離は生じず、空練りをした場合とほぼ同様なフレッシュコンクリートの特性および強度となる。ただしバッチ間でのばらつきが空練りをしたものに比較して若干大きい。

水中不分離性混和剤をプレミックスし空練りを実施し

た場合、本練り時間とコンクリートの性質の間には次の関係が認められる。

本練り時間を長くすると、

- ・練上りのスランプフローが大きくなる。ただし、60秒を過ぎると頭打ちとなる。
- ・スランプフローの低下量が大きくなる。
- ・凝結が促進される。
- ・強度が増進する。

iii) 水中不分離性混和剤の投入方法の比較

c) の②でプレミックス混練は、細骨材に表面水のある場合、通常混練に比較してスランプフローの長時間保持が良いことを明らかにした。また、図—13でプレミックス混練は若干ばらつきがあるが空練りをしなくても良い品質のコンクリートが得られることを明らかにした。

したがって、プレミックス混練は通常混練より短い練りまぜ時間で安定したコンクリートを作る可能性がある。

② 練りまぜ方法（通常、プレミックス、トリプル）がコンクリートの性質に及ぼす影響

i) 接水後の練りまぜ時間（75秒）を一定にした実験⑨の結果を示した図—14からプレミックス混練およびトリプル混練は通常混練に比較して練上りスランプフローが1~2cm大きく、8時間後のスランプフローの低下量は逆に4~6cm小さいことがわかる。しかし、水中圧縮強度については、練りまぜ方法による差異は少ないことから、接水後の練りまぜ時間が一定の場合、練りまぜ方法による影響は、スランプフローに及ぶものと思われる。ここではトリプル混練が優れている。

ii) 各練りまぜ方法で、練りまぜ時間を変化させた実験⑩の結果を示した図—15から以下のことがわかる。

- ・練上りスランプフローは通常混練はばらつきが多く、プレミックス混練では、実験⑧図—13で示したのと同様、本練り時間が長くなるとスランプフローの大きさは頭打ちの傾向がある。一方、トリプル混練では、モルタル練り時間一定で、本練り時間を変化させた（A）および本練り時間一定で、モルタル練り時間を変化させた（B）とも練りまぜ時間が長くなると練上りスランプフローは大きくなる。この結果から、トリプル混練およびプレミックス混練が通常混練に比較して優れているといえる。

・スランプフローの長時間保持については、10時間後のスランプフローの低下量で示すが、通常混練では練りまぜ時間とともに増大するが、プレミックス混練、トリプル混練では減少している。この結果から、トリプル混練および、プレミックス混練が通常混練に比較して優れているといえる。

- ・凝結始発時間については、通常混練では練りまぜ時

図—14 混練方法がコンクリートの性質に及ぼす影響

図—15 混練方法と本練り時間およびモルタル練り時間がコンクリートの性質に及ぼす影響

間とともに、凝結始発時間は短くなるが、プレミックス混練、トリプル混練ではあまり変化しない。

・水中圧縮強度については、通常混練およびプレミックス混練は、練りまぜ時間が長くなると強度が増進するが、トリプル混練はあまり変わらない。強度は、通常混練<プレミックス混練≤トリプル混練となっている。

・水中／気中圧縮強度比については、通常混練は、練りまぜ時間が長くなると大きくなるが、プレミックス、トリプル混練は練りまぜ時間にあまり依存していない。

以上、i), ii) に示すようにトリプル混練およびプレミックス混練は、通常混練に比較して短時間の練りまぜで流動性の長時間保持が良いコンクリートが得られ

る。また、トリプル混練で得られたコンクリートの品質は安定しており、図-13に示すプレミックス混練で得られるコンクリートのようにはばらつきがない。したがって、トリプル混練は他の練りませ方法に比較して短時間で、流動性の長時間保持の良い、安定した品質のコンクリートが得られる。

③ 練りませ水の分割投入がモルタルおよびコンクリートの性質に及ぼす影響を検討した実験⑨および⑪の結果を示した図-16から以下のことがわかる。

・練りませスランプフローについては、モルタルは $W_1/W = 0.5 \sim 0.8$ 、コンクリートは $W_1/W = 0.8 \sim 1.0$ の近傍で練りませスランプフローが極小となっている。

・スランプフローの低下量については、モルタルは $W_1/W = 0.75 \sim 1.0$ 、コンクリートは $W_1/W = 0.75 \sim 0.9$ の近傍で練りませスランプフローの低下量は極小となる。

・水中圧縮強度、水中／気中圧縮強度比は、モルタル、コンクリートともに $0.5 \sim 0.9$ の近傍で極大値となって

いる。

・凝結始発時間は1次投入水量によらない。

練りませ水の分割投入効果は、モルタルを硬練りにし、練りませ初期における練りませ効率を向上させ、水中不分離性混和剤-結合材-細骨材の接水時の分散効率を高める意味があるものと推察される。

すなわち、通常、水中不分離性コンクリートは単位水量が多いため、モルタル分はきわめて軟練りであるためミキサーの羽根がモルタルに与えるせん断摩擦力およびモルタル中の細骨材相互のせん断摩擦力が小さい。ここで練りませ水を分割して投入することにより硬練りとし、せん断摩擦力を増すことができ、短時間に練りませができるものと思われる。

したがって、 $W_1/W = 0.25$ および 1.0 の近傍では練りませ効率が不良のため、練りませのスランプフローが不安定で、スランプフローの長時間保持、強度の発現が悪いものと思われる。

3. 本研究の実施例（明石海峡大橋3P主塔基礎水中コンクリート工事）

（1）概 要

本研究成果を実施工に適用した事例として、明石海峡大橋3P主塔基礎水中コンクリート工事を紹介する。

主たる適用項目は以下の2点である。

① 流動性の長時間保持を得るために良質なコンクリート構成材料の選定

② 練りませ方式としてトリプル混練方式の採用

（2）3P主塔基礎水中コンクリート（水中不分離性コンクリート）の施工法

明石海峡大橋は図-17に示すように、橋長3910m、中央支間長1990m、3径間2ヒンジ補剛トラス形式の世界最長の吊橋である。

主塔基礎の施工法としては、支持地盤まで掘削した後、鋼ケーソンを設置し、中詰コンクリートを打設して基礎を構築する設置ケーソン工法である。

淡路側の主塔基礎である3Pの水中コンクリートの型枠となる鋼製ケーソンは図-18に示すように直径78m、高さ62mで、2重壁構造となっている。内側の直径54mの内核部は、TP-57mよりTP-10mまで約

図-16 練りませ水の分割投入がモルタルコンクリートの性質に及ぼす影響

図-17 明石海峡大橋計画図

図-18 鋼ケーソン内打設ブロック割

11 万 m^3 を 11 層に分けて打設した。打設は 1 回当たり約 10 000 m^3 で、3 昼夜連続打設した。第 1 層目は海底地盤とのなじみ、ケーソン刃口下充填のため、水中不分離性モルタルを約 2 m の高さまで打設した。それ以降の各層は水中不分離性コンクリートを打設した。コンクリートは 6 台のコンクリートポンプと分岐弁を使用し、 $\phi 200$ の打設管 24 本で圧送した。打設管 1 本当たりの受持面積は約 100 m^2 である。コンクリートの硬化後、無人の水中打継目処理機で打継目処理をした。外側の二重壁部は 16 区画に別れ、TP-57 m から TP-5 m まで 1 区画約 8 000 m^3 を 6 本の打設管で一気に打設した。総打設量は、約 237 000 m^3 であった。

(3) コンクリートの配合および品質

コンクリート構成材料の品質として研究結果より、結合材の品質、混合比率および骨材の品質がコンクリートの流動性に大きく影響することから以下の配慮をした。

① 結合材 流動性の長時間保持および発熱，圧縮強度を考慮に入れて三成分系混合セメントとし，特に流動性に大きな影響を与えるフライアッシュについては良質のものを使用。

② 細骨材 海砂とし、微粒分量が少なく、粒度の比較的大きく(FM 2.6~3.1)かつ、粘土分が少ないものを使用.

③ 粗骨材 標準粒度から少し粗めの骨材を使用.

(4) 水中コンクリートの施工設備

水中コンクリートの施工設備は写真-1 に示すように大きく分けて3つに別れる。

a) コンクリートプラント台船「海神」

コンクリート材料の荷役、貯蔵、コンクリートの製造、
圧送する設備を搭載した 25 000 t 台船で 8 本のチェーン
によりケーソン東側に係留した。表—5 に主要艀装品を
示す。主な特徴を以下に列記する。

① 無補給打設能力約 10 000 m³，最大製造能力約 260 m³/h(水中不分離性コンクリート)を有する。

② トリプル混練により、流動性に優れた水中不分離性コンクリートの製造が可能である。

写真—1 資材台船-3 P ケーソン-CP 台船の全景

表—5 コンクリートプラント台船主要艀装品

[illegible]

③ 細骨材の表面水安定装置（サンドスタビライザ）の使用により、練上りコンクリートの品質が安定する。

④ 冷水により骨材を冷却するプレクーリング設備を使用し、コンクリートの練上り温度を 20℃ 以下にすることが可能。

⑤ 明石海峡の 8 knot の急潮流でも作業可能な係留設備を搭載。

b) 3P 鋼ケーソン上打設設備

3基のタワークレーン(400 t_m)、中継用アジテータ(40 m³)、および、コンクリート圧送用の8台のコンク

図一19 AE減水剤(POZ, No.70)使用量とスランプフローおよび凝結始発時間の関係

図一20 練りませ方法、練りませ時間と圧縮強度の関係

リートポンプ(予備2台を含む)、φ200圧送管、分岐弁、打設管、打設管先端監視用テレビカメラ、打設管引揚装置、打継目処理設備、濁水処理設備を設置した。

c) 資材台船

海水の淡水化装置、清水、濁水の貯蔵、濁水処理設備、資機材の貯蔵設備を有する12000t台船で8本のチェーンによりケーソン西側に係留した。

(5) 水中不分離性コンクリートの品質

a) 試験練

本工事に先立ち、平成元年12月に600m³の試験打設を行いコンクリートの品質の確認を行った。この試験で標準混練(空練り20s、本練り70s)とトリプル混練(モルタル練り25s、本練り45s)の比較を行った。この結果は以下に述べるとおりであり、トリプル混練が在来空練り方式(標準混練)に比較して短い練りませ時間にもかかわらず優れた品質が得られる事が確認できた。

① フレッシュコンクリートの性状

AE減水剤量を変化させ、スランプフローの経時変化と凝結始発時間を調査した。図一19から、凝結始発時間は練りませ方法による差異はみられないが、スランプフローの保持はトリプル混練が良い結果を得た。

② 強度

練りませ時間を変えて強度の比較を行ったのが、図一20である。トリプル混練の方が若干強度が高い。

b) 本工事

平成2年4月22日～24日に打設した、第7回打設時の練り上げ品質状況を図一21に示す。サンドスタビライザーを使用することで、砂の表面水率は処理前平均4.8%、標準偏差0.74%から処理後はおのおの3.3%、0.18%と安定している。コンクリートのスランプフローは練り平均53.8cm、標準偏差0.70cmから、8時間後はおのおの51.7cm、0.97cmと安定しており、本研究の適用による良質なコンクリート材料の採用、トリプル混練の採用に合わせて、サンドスタビライザーの使用が好結果をもたらしたと思われる。

図一21 コンクリートの品質(第7回コンクリート打設、H 2.4.22～24)

4. あとがき

この研究の成果を以下に列記する。

- (1) 水中不分離性コンクリートの流動性の長時間保持および、凝結特性は、コンクリートの構成材料であるフライアッシュ、細骨材の品質に特に影響を受ける。
- (2) 練りませ方法の違いで水中不分離性コンクリートの品質が変化し、今回提案したトリプル混練方式では、短い練りませ時間で流動性の良い安定したコンクリートが得られた。

今後、ますます、この種のコンクリートが時代の要請とともに使用されていくものと思われる。われわれの研究がその一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 田沢ほか：骨材および混和剤の種別が水中不分離性コンクリートの流動性および強度に及ぼす影響，水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集，1990年8月。
- 2) 松井ほか：特殊水中コンクリートの製造方法に関する実験，土木学会第42回年次学術講演会，1987年9月。
- 3) 宮野ほか：練りませ手順が特殊水中コンクリートの特性に及ぼす影響，土木学会第42回年次学術講演会，1987年9月。
- 4) 大友・松岡・中川・中平：特殊水中コンクリートの凝結特性に及ぼす材料の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集11-1，1989年。
- 5) 中川・大友・中平・松岡：低発熱高流動性特殊水中コンクリートに関する研究，コンクリート工学論文集，第1号，第1巻，1990年1月。
- 6) 坂本・平野・中川・山田・白木：コンクリートプラント台船「海神」による明石海峡大橋3P主塔基礎水中コンクリートの施工，建設の機械化，1990年6月。
- 7) 中川・大友・中平・松岡：水中不分離性コンクリートの品質，特に分離抵抗性と凝結，流動性の長時間保持に関する研究，水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集，1990年8月。

(1990.12.10・受付)