

低発熱水中不分離性コンクリートの大型海中基礎への適用に関する研究

樋口康三¹・加島聡²・石川計臣³・安井成豊⁴

¹ 正会員	本州四国連絡橋公団 坂出管理事務所長	(〒762 坂出市川津町下川津4388-1)
² 正会員 工博	本州四国連絡橋公団 第1建設局長	(〒651 神戸市中央区浜辺通り5-1-14)
³ 正会員	建設機械化研究所 専門課長	(〒417 静岡県富士市大淵3154)
⁴ 正会員	建設機械化研究所 主任研究員	(同上)

水中不分離性コンクリートを明石海峡大橋主塔基礎のような大型海中基礎に適用する場合、温度上昇を低くする観点から高炉スラグ微粉末、フライアッシュを混入した低発熱セメントを用いる必要がある。

本研究では低発熱セメントの適用に当たっての課題としてコンクリート側圧の評価、スランプフローの保持特性の確保および耐久性の確認を取りあげ各種の実験研究を実施した。

その結果①コンクリート最大側圧は凝結始発時間で概ね管理できること、②適切な材料・配合により所要の凝結始発時間とスランプフローの保持を両立できること、および③耐久性に特に問題のないことが確認され、低発熱セメントを用いた水中不分離性コンクリートの大型海中基礎への適用が可能なが明らかとなった。

Key Words: antiwashout underwater concrete, lateral pressure, lowheat cement, durability, slag, flyash, setting time, slumpflow, adiabatic temperature rise

1. 序論

本州四国連絡橋の吊橋主塔基礎等の大型海中基礎の施工法は設置ケーソン工法が用いられている。設置ケーソン工法ではケーソン沈設後ケーソン内部に水中コンクリートを打設するが、このコンクリートとして瀬戸大橋まではプレパッドコンクリートが用いられてきた。

一方、近年開発された水中不分離性コンクリートはプレパッドコンクリートに比べ①大規模な骨材貯蔵設備が不要である、②打設に当たり特殊な設備を要しない、③流動性を活用すれば打設管本数を減らせる、④水中下で施工可能な打継ぎ処理である程度の強度を確保できる等の利点がある。したがって水中不分離性コンクリートをケーソン内部への水中コンクリートとして適用できれば施工の大幅な合理化に繋がる。

このため、水中不分離性コンクリートの大型海中基礎への適用性の確認を目的として研究を実施した。

適用に当たって確認すべき水中不分離性コンクリートの課題としては、流動性および流動に伴うコンクリートの品質、打継ぎ特性、充填性に加え、特に大型基礎への適用ということで温度ひび割れの防止が重要となり、このため低発熱セメントの使用が必要となる。

本論文は水中不分離性コンクリートの大型海中基礎への適用に当たっての基本的な評価を行った後、低発熱セメントの適用に当たっての課題として①コンクリート側圧の評価、②スランプフローの保持特性および③耐久性を取り上げ報告するものである。

これらの課題に関し、コンクリート側圧についてはこれまでの使用例が比較的小規模であるため一般に余裕ある設計法としてコンクリートを流体として評価する方法が採られているため研究例は見受けられない。

高炉スラグ微粉末を大量に添加したセメントや3成分系セメント等の低発熱セメントの適用については中川ほか²⁾、大友ほか³⁾の研究があり、結合材等の品質がスランプフローの保持特性や凝結始発時間に影響を及ぼすことが報告されている。本論文ではこれらの特性に加え、温度特性や強度特性と併せ低発熱セメントの水中不分離性コンクリートへの基本的な適用可能性の検討を実施した。

低発熱セメントを用いた水中不分離性コンクリートの耐久性に関しては大倉ほか⁴⁾、大友ほか⁵⁾により基礎的な研究がなされているが、本論文では特に水セメント比の大きい場合の耐久性に着目した。

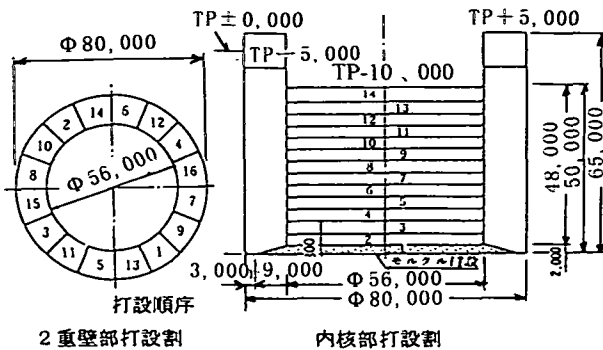


図-2・1 明石海峡大橋主塔基礎（2P）

2. 主塔基礎への適用性

調査研究の内容を明確にするために研究の対象とした明石海峡大橋の基礎形状と水中コンクリートの施工計画を図-2・1に示す。

明石海峡大橋の2つの主塔基礎2P（3P）は直径80m（78m）・高さ70m（67m）であり、水中コンクリートの型枠となる鋼ケーソンは外径80m（78m）・内径56m（54m）・高さ65m（62m）の2重円筒形である。2重壁部は浮体安定のため底板を有しているとともに、沈設時の注水時の傾斜補正のためパルクヘッドで16分割されている。このため、水中不分離性コンクリートは2重壁部ではTP-5mまで各区画ごとに鉛直方向に一括打設、内核部はTP-10mまで層打ちで計画した。コンクリート打設は1回当たり3日連続で約9000m³で計画しており、コンクリートの打ち上がり高さは2重壁部では約0.8m/hr、内核部では約0.1m/hrになる。

筆者らは研究の結果、特にまだ固まらないコンクリートの段階で適切な要求品質を規定することで水中不分離性コンクリートを主塔基礎に適用できることを確認した¹⁾。

明石海峡大橋主塔基礎での水中不分離性コンクリートの要求品質を表-2・1に示すが、コンクリートとしては設計基準強度180kgf/cm²（17.6MPa）を確保することが最終目標であるが、施工に伴う品質の低下を抑制するために各種の性能を要求している。

（1）まだ固まらないコンクリートに対する品質

a) 流動性の確保のため、練混ぜ時のスランブフローは50cmを下回らないようにするのみならず各打設管から打ち込まれたコンクリートが合流するまでの時間（流動勾配、流動距離、打設速度から決まりここでは8時間）スランブフローの保持を図る。

b) 水中不分離性は水中不分離性混和剤に支配され、

表-2・1 コンクリートの要求品質

項目	水中不分離性コンクリート
設計基準強度（91日）	$\sigma_{91} = 180 \text{ kgf/cm}^2$
水中・気中供試体強度比	0.8以上
スランブフロー	$52.5 \pm 2.5 \text{ cm}$
スランブフロー保持時間	8時間以上
SS	150 ppm以下
pH	12以下

分離抵抗性は水中不分離性混和剤量の減少に伴って指数関数的に悪くなるため、強度比（水中供試体強度と気中供試体強度の比）、pH、SSを規定した。

（2）硬化後のコンクリートに対する品質

a) 設計基準強度に対し材料・製造の変動を考慮した割増し係数を乗じて配合強度を設定する方法は通常コンクリートと同じであるが、固有の課題として水中施工による強度低減を考慮する必要がある。この低減の程度はコンクリートの性能、施工法（特にコンクリートの流動距離）によって異なるため、流動実験によって決定する必要がある。明石海峡大橋を対象とした実験結果からは水中不分離性混和剤量2.3kg/m³（22.5N/m³）で、最大流動距離の8m付近でのコア強度は水中供試体強度の1/0.9程度であった⁶⁾。

b) 打継ぎ面強度の確保に関しては水中不分離性混和剤量が大きく影響するが、水中不分離性混和剤の量を2.3kg/m³（22.5N/m³）とすることで打継ぎ面に沈殿するスライムの除去程度の簡易な方法で引張強度で4~10kgf/cm²（0.4~0.98MPa）と一体化を図れる程度の打継ぎ面強度が確保される。

3. コンクリート側圧の評価

セルロース系の水中不分離性混和剤を使用した場合、水中不分離性コンクリートの凝結始発時間は普通コンクリートに比べて遅延し、さらに低発熱セメントの使用によりこの傾向は助長される。このため、型枠に作用するコンクリートの側圧が液圧として作用する期間は通常コンクリートに比べ相当長いと推察される。

しかし大規模海中基礎では型枠も大型化しており、単にコンクリート側圧を液圧として評価することは大幅な工費増を招くため、型枠に作用するコンクリート側圧の合理的な評価が必要となる。

表-3・1 コンクリートの配合

スランフ ローの範囲 (cm)	空気量 の割合 (%)	水/セメ ント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kgf/m ³)						
				水 W	セメン ト C	細骨材 S	粗骨材 G	水中不分離性 混和剤	流動化剤	AE減水剤 ml/m ³
52±2.5	5以下	60	40	220	367	652	1008	2.0	3.67	918

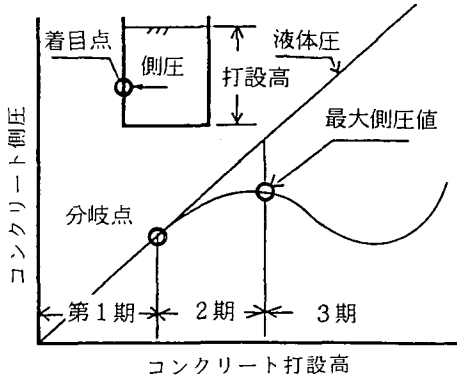


図-3・1 コンクリート側圧の概念

(1) コンクリート側圧

水中不分離性コンクリートのように高い流動性を有するコンクリートを打設した場合に、コンクリート側圧はコンクリートの時間経過に対応する側圧特性、コンクリートの打上り速度により決まるが、上昇速度を一定とすると図-3・1に示すようになる。

第1期は打込み高さに比例して側圧が増加する期間であり、コンクリートを流体と仮定した値に等しい圧力となる。第2期は側圧係数の減少が進む期間であり、打込み高さが増加しても徐々に側圧の増加量が少なくなり、側圧は最大値を示した後、減少を始める。第3期はコンクリートの打込み高さに関わりなくブリーディング、乾燥収縮、温度膨脹によりコンクリート側圧は減少と増加を繰り返す。型枠の設計には第2期のピーク値が必要になる。

(2) コンクリート側圧実験 I

水中不分離性コンクリートの側圧の評価を目的として、直径5m・高さ12.5mの円筒形の型枠内に水中不分離性コンクリートを打設しコンクリート側圧の計測を実施した。

使用したコンクリートの配合、まだ固まらないコンクリートの性能をそれぞれ表-3・1、表-3・2に示す。使用セメントは高炉B種セメントである。コンクリートの打ち上がり速度は実工事での2重壁での

表-3・2 コンクリートの品質

スランフ ロー(cm)	単位体積重量 (kgf/m ³)	温度 ℃	凝結時間(時:分)	
			始発	終結
52.8	2323	17.0	14:40	17:50

表-3・3 側圧特性値

特性値	測定区分	側圧実験 I	側圧実験 II	実施工	
				2P	3P
分岐発生時間(h)		3.2	10.2	16.9	14.4
側圧係数低減率(1/h)		0.025	0.022	0.015	0.012
最大側圧発生時間(h)		6.5	14.7	20.4	19.3
最大側圧時側圧係数		0.92	0.91	0.95	0.93
凝結始発時間(h)		14.5	35.2	30.1	28.4

計画打上り高さに合わせて概ね0.8m/hrとした。

底から0.5m、2.0mの型枠位置にそれぞれ2台配置した計4台の土圧計で計測された側圧から求めた側圧係数の時間経緯を図-3・2に示す。

ここで、側圧係数は次式で定義した。

$$K = Ph/P_v \quad (1)$$

$$P_v = h_w \cdot 1 + h_c \cdot \gamma_c$$

ここに K : 側圧係数

Ph : 側圧

P_v : 鉛直圧

h_w (h_c) : 水、(コンクリート)の高さ

γ_c : コンクリートの単位重量

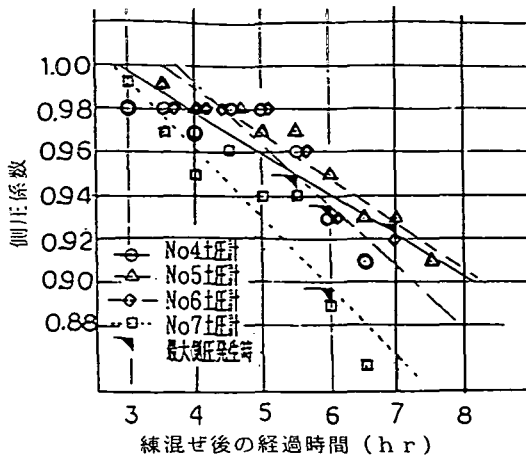
図-3・2に示すように、側圧係数はコンクリートの練混ぜから3~4時間後から1時間当たり0.02~0.03の割合で直線的に減少している。側圧は練混ぜ後6時間前後に最大値に達しており、最大側圧時の側圧係数は0.9~0.95である。

図-3・1の第1期から第2期に移りコンクリートの側圧係数が1.0を下回り始める時間を分岐発生時間と定義すると、コンクリートの側圧係数は一般的に次式で表される。

$$K = 1 - a(t - t_i) \quad (t \geq t_i) \quad (2)$$

$$K = 1.0 \quad (t < t_i)$$

ここに a : 側圧係数低減率



図一 3・2 練混ぜ後の経過時間と側圧係数

t : 練混ぜ後の経過時間
 t_i : 分岐発生時間

(3) 最大コンクリート側圧の推定

側圧値を決定する要因は式(2)で表わされるコンクリートの特性値 (a , t_i) とコンクリートの上昇速度であり、それに応じて最大側圧発生時間、最大側圧も変動する。最大側圧の発生時間は側圧係数低減率が緩やかなほど、分岐発生時間が遅いほど、またコンクリート上昇速度が早いほど遅くなる。

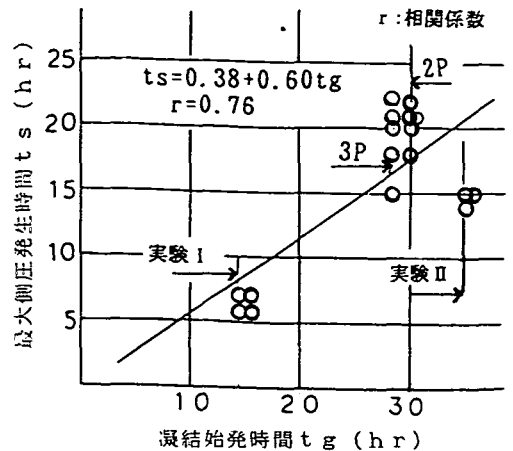
前述の側圧実験Ⅰに加え、コンクリート上昇速度は概ね 0.8 m/hr の条件で実施した凝結始発時間の遅い低発熱水中不離性コンクリートでの実験(側圧実験Ⅱ)および実施工で計測した結果得られた側圧特性値を表一 3・3 に示す。

最大側圧時の側圧係数 K_{\max} は $0.91 \sim 0.95$ の範囲にある。分岐発生時間 t_i は $3.2 \sim 16.9$ 時間、また最大側圧発生時間 t_{\max} は $6.5 \sim 20.4$ 時間とコンクリートによって変動の幅が広いが、これは凝結始発時間が大幅に異なるためであり、凝結始発時間と最大側圧発生時間との関連を図一 3・3 に示すが、両者の間には概ね直線回帰の関係が認められる。

しかし、実験と実施工では差が認められ、実験では分岐発生時間は凝結始発時間の $0.2 \sim 0.3$ 、最大側圧発生時間は凝結始発時間の $0.42 \sim 0.45$ であるのに対し、実施工の結果ではこれらの値はそれぞれ $0.5 \sim 0.56$, 0.68 となっている。

まず実施工の方が実験に比べて分岐発生時間が凝結始発時間との関連で遅れている原因の1つとしては練混ぜから凝結始発に至る間のコンクリートの性能の差、例えばスランプフローの保持特性の差が考えられる。

実施工では特に良好なスランプフローの保持特性を



図一 3・3 凝結始発時間と最大側圧発生時間

確保するため低発熱セメントの高炉スラグ微粉末やスラグの混入率・品質を実験段階からは変えており、同程度の凝結始発時間でも側圧特性が異なることが推測される。

また、最大側圧発生時間の遅れについてはこれに加え実工事でのコンクリートの打上がり速度が $0.8 \sim 1.2 \text{ m/hr}$ と実験より早かったことが考えられる。

コンクリート側圧の推定を行う場合、コンクリートの側圧特性値から推定する方法もあるが、施工で必要なのは最大側圧であり、側圧特性値計測の実験の煩雑さを考えると実用的な方法として最大側圧発生時間を図一 3・3 に示した凝結始発時間からの回帰式で求め、ほぼ一定値を示す最大側圧時の側圧係数(ここでは 0.93) から最大側圧を推定する方法が提案される。

この場合、海中基礎の型枠に作用するコンクリートの最大側圧は次式で求められる。

$$P_{H_{\max}} = (\gamma_w \cdot h_{w1} + \gamma_c \cdot R \cdot t_{\max}) K_{\max} - \gamma_w \cdot h_0 \quad (3)$$

ここに $P_{H_{\max}}$: 最大側圧 (tf/m^2)
 $\gamma_w (\gamma_c)$: 海水 (コンクリート) の単位体積重量
 t_{\max} : 最大側圧発生時間
 R : コンクリートの上昇速度
 K_{\max} : 最大側圧時の側圧係数
 h_{w1} : 内面のコンクリート上部の水位
 h_0 : 外水位

この推定式を用いた場合の側圧の予測値と実測値を図一 3・4 に示す。

実測側圧 $15 \sim 20 \text{ tf/m}^2$ ($147 \sim 196 \text{ kPa}$) の範囲に対し誤差が 5 tf/m^2 (49 kPa) と比較的大きいが、工事において側圧の計測が簡易に実施でき、かつ側圧管理が打設速度の調整で実施できることから予測式としては実

表-4・1 コンクリートの配合

配合	W/(C+B+F) (%)	S/a (%)	単 位 量 (kgf/m ³)							単 位 量 (cc/m ³)		
			W	C	B	F	S	G	A	流動化剤	E減水剤	遅延剤
HB80	70	40	243	347			625	987	2.3	3470		1735
B90	62	40	233	38	338		615	972	2.3	3760		1504
OB F 20	75	40	225	120	120	60	646	1020	2.3	3000		1500
OB F 30	66	40	234	107	142	107	610	964	2.3	3550	888	

W:水 C:ポルトランドセメント B:高炉スラグ微粉末 F:フライアッシュ
S:細骨材 G:粗骨材 A:水中不分離性混和剤

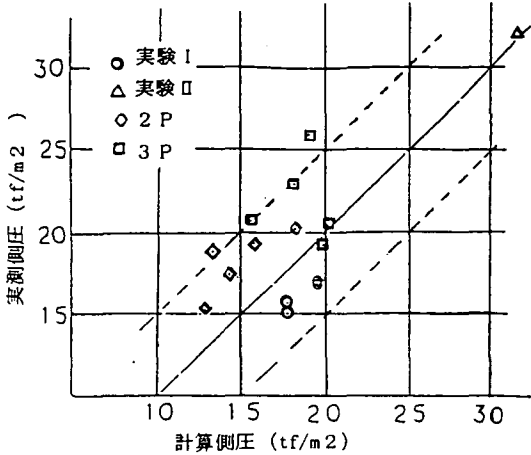


図-3・4 計算側圧と実測側圧

用上問題のない範囲といえる。誤差の大きい要因としては指標とした凝結始発時間のデータが15時間付近と30時間付近に偏っていることも1つの要因と考えられ、今後この間のデータが補充されればより正確になると考えられる。また本研究では凝結始発時間を1つの指標と考えたが、練混ぜから凝結に至るまでの間のコンクリートの性能を表す指標としてはスランプフローの経時変化、貫入抵抗値、せん断特性値等も考えられ、例えばスランプフローの低下開始時間等と側圧特性値との関係等今後のデータの蓄積によってよりさらに精度の向上は図られると考えられる。

4. 低発熱セメントの適用とスランプフローの保持

(1) 低発熱セメントの適用

海中大型基礎においては温度ひびわれに対する配慮が必要である。水中コンクリートでの現実的なクーリングとしては材料クーリングが可能であるが、経済的に妥当な範囲としては夏場での練り上がり温度を概ね20℃以下にする程度となる。したがって、コンクリートの最大上昇温度を50℃以下に抑えるためには断

熱温度上昇が30℃程度以下の低発熱水中不分離性コンクリートの開発が必要となる。

水中不分離性コンクリートではスランプフロー確保のための単位水量と強度確保のための水セメント比から単位セメント量が決まるが、概ね単位セメント量は320kg/m³(3136N/m³)程度の量になる。したがって、検討の対象とするセメントはJIS規格にとらわれず、高炉スラグ微粉末を大量添加した高スラグ添加系と3成分系を対象とした。

具体には4種類のセメントHB80(HP:B=20:80)、B90(OP:B=10:90)、OB F 20(OP:B:F=40:40:20)、OB F 30(OP:B:F=30:40:30)(ここにHP:早強ポルトランドセメント、B:高炉スラグ微粉末、OP:普通ポルトランドセメント、F:フライアッシュ)を対象として低発熱セメントを適用した水中不分離性コンクリートの基礎的な特性を調査した。

水中不分離性コンクリートに要求した所要性能を表-2・1に加え、コンクリート最大側圧を抑制するため凝結始発時間を30時間程度以内、コンクリートの断熱温度上昇を30℃以内とした。水セメント比は強度発現の推定曲線から所要の設計基準強度(ここでは91日強度21.6kgf/cm²(21.2MPa))を満足する7日強度を推定し決定した。

各セメントに対応する各示方配合を表-4・1、強度特性を図-4・1、断熱温度上昇特性を図-4・2に示す。なお、表-4・1の配合はスランプフロー保持以外の性能の確保を優先させて決定した。

使用したセメントはHB80では高炉スラグ混入早強ポルトランドセメント(比重2.94、比表面積5270cm²/g)、他は普通ポルトランドセメント(比重3.16、比表面積3190cm²/g)である。

高炉スラグ微粉末は製造元の異なる2種類について3成分系にはスラグa(比重2.9、粉末度4360cm²/g)、2成分系にはスラグb(比重2.89、粉末度4570cm²/g)を、フライアッシュはフライアッシュ2(比重2.03、粉末度3140cm²/g)を使用した。

強度に関しては高炉スラグ微粉末混入率が80%を越えても水中不分離性コンクリートにおいては水中不

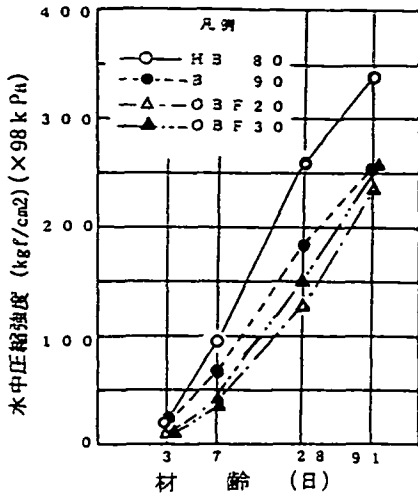


図-4-1 圧縮強度

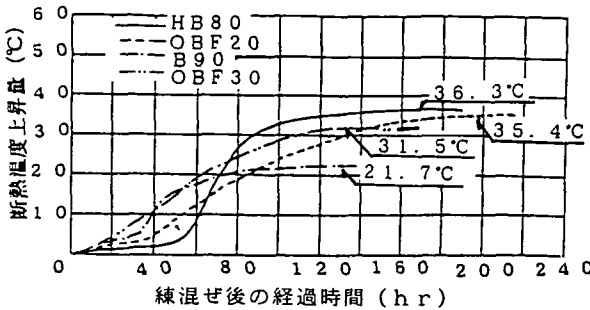


図-4-2 断熱温度上昇

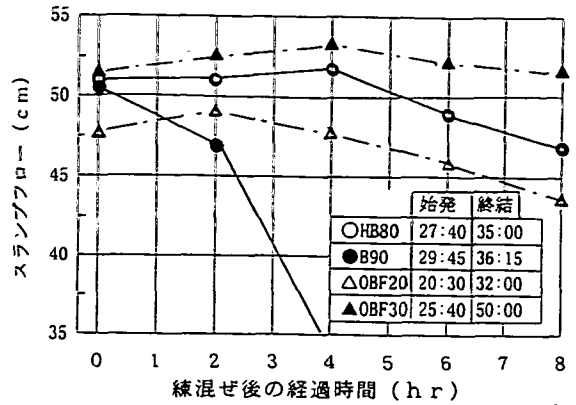


図-4-3 経過時間とスランプフロー

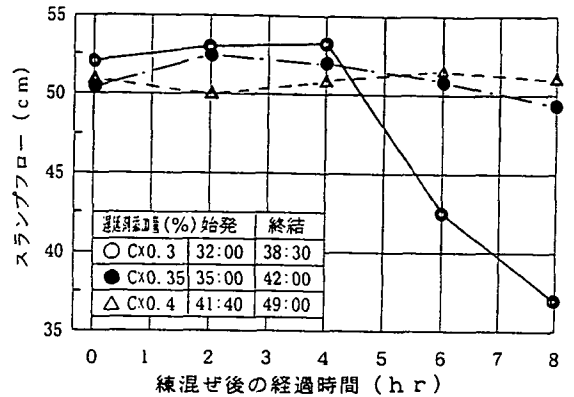


図-4-4 経過時間とスランプフロー (B90)

離性混和剤の添加により高炉スラグ微粉末の水和が促進され気中コンクリートに見られる強度低下は見られない。HB80の強度は7日以降は大きな伸びを示しているが、3日時点ではB90と大差のない強度である。

コンクリートの断熱温度上昇はB90が21.7°Cと優位性が高い。3成分系ではOBF30の方が31.5°CとOBF20の35.4°Cに比べて優位性が高い結果が得られている。

(2) スランプフローの保持特性と凝結始発時間

表-4-1の配合に対するコンクリートのスランプフローの保持特性を図-4-3に示す。この試験はコンクリートの練上がり温度約8°Cの状態で行った。

図より中川ほか²⁾の指摘のように同程度の凝結始発時間を有してもセメントの結合材の種類でスランプフローの保持特性が大きく異なることが判る。表-4-1の配合・材料でスランプフローの保持と凝結始発時間の両規定を満足しているのはOBF30のみである。

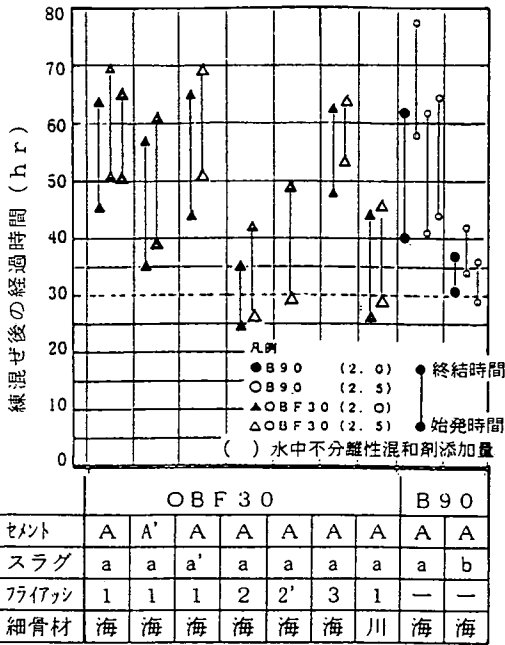
スランプフローの保持を8時間確保するため、AE

減水剤を遅延型に変更することで保持特性の改良を試みた。B90での試験結果例を図-4-4に示すが、スランプフロー保持8時間を確保するにはHB80、B90、OBF20に対し、遅延剤の添加量はそれぞれ単位セメント量あたり0.5%、0.35%、0.5%必要であり、かつその場合の凝結始発時間はそれぞれ約40時間、35時間、30時間となる。すなわち、同一材料下ではスランプフロー保持は減水剤の種類・量で改良できるが同時に凝結始発時間も遅延する。コンクリート側圧の制御のため凝結始発時間を制限する必要がある場合は、単純に遅延剤の添加のみでは性能を満たすことが出来ない場合も生じる。

そこでB90、OBF30を対象として高炉スラグ微粉末、フライアッシュの品質が凝結始発時間、スランプフロー保持特性におよぼす影響を調査した。

a) 凝結始発時間への影響

水中不分離性コンクリートの凝結特性におよぼす材料の影響については大友ほか³⁾によりセメント、スラグ、フライアッシュ、細骨材の種類で凝結始発時間に変動することは報告されている。



：ロットの違い

図一 4・5 結合材の品質と凝結時間

ここでは実工事への適用の観点から、入手可能な結合材として高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、細骨材の種類に対しコンクリートの凝結始発時間に及ぼす影響を調査した。試験結果を図一4・5に示すが、結合材の種類により凝結時間は大幅に変化することが確認される。

この図からB90では高炉スラグ微粉末として種類bを、OBF30ではフライアッシュとして種類2を選定するかあるいは川砂を使用することで凝結始発時間を30時間程度に制御できる。

b) スランプフローの保持特性への影響

OBF30では基本的にスランプフローの保持が良好でありB90を対象に高炉スラグ微粉末の種類の影響を調査した。試験結果を表一4・2に示す。高炉スラグ微粉末aを使用した場合には、スランプフローの保持特性は著しく悪くなるとともに凝結始発時間も高炉スラグ微粉末b使用に比べて遅延している。一般には凝結始発時間の遅くなるほどスランプフローの保持は良くなるが、高スラグ系では必ずしもそうならない場合もあり結合材の品質には特に留意する必要がある。

以上より、高スラグ系、3成分系とも結合材等の品質を選定することで水中不分離性コンクリートへの適用は可能である。この場合、特にスランプフローの保持特性、凝結特性、断熱温度上昇特性を考慮すると高スラグ系ではB90、3成分系ではOBF30が基本

表一4・2 高炉スラグ微粉末の種類とまだ固まらないコンクリートの特性 (B90)

スラグの種類	水中不分離性 混和割合 kgf/m ³	スランプフロ ー保持時間 (時間)	凝結始 発時間 (時間)	凝結始 発時間 (時間)
a *1	2.0	1	40:00	62:00
	2.5	1	53:00	77:30
b *2	2.0	8	34:30	40:00
	2.5	8	31:30	38:30

* 1 : 凝結試験はW/C65%の配合で実施

* 2 : 凝結遅延剤をC×0.35~0.4%添加

になると考えられる。

さらに、スランプフローの保持特性、凝結始発時間は養生温度の影響も受けるため、工事においては結合材の選定・品質管理は特に重要な管理項目となる。

5. 低発熱セメントを使用した水中不分離性コンクリートの耐久性

海洋コンクリートでは海水中に含まれる各種塩類に因る化学的作用を受ける恐れがあることから耐久性の確保のため最大水セメント比あるいは最小単位セメント量の規定が設けられている。コンクリート標準示方書⁷⁾では無筋コンクリートでの最大水セメント比は60%、最小単位セメント量は300kg/m³ (2940N/m³) が規定されている。

普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの耐海水性で問題となるのはCa(OH)₂が溶出して組織がルーズになることである。この点に関しては、低発熱水中不分離性コンクリートでは高炉スラグ微粉末やフライアッシュのポゾラン反応が長期に渡って継続するためCa(OH)₂の溶出を防ぎ、さらに水和反応によって組織が緻密化すると考えられるとともに化学的知見からはその水和生成物は長期的に安定と判断される。

一方大規模海中基礎に適用する水中不分離性コンクリートの場合、必要強度からの水セメント比は70%近い値になり、単位セメント量は320kg/m³ (3136N/m³) 程度になる。

温度ひびわれ防止の観点からも単位セメント量を増やすことは好ましくなく水セメント比70%程度の低発熱セメントを用いた水中不分離性コンクリートの耐久性の確認が要求される。

(1) 試験方法

耐久性試験はJIS原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法(案)」に準じ、硫酸マグ

表一五・一 浸せき材齢と圧縮強度の伸び率

セメント の種類	水結合 材比 (%)	標準水中養生			硫酸マグネシウム浸せき			高濃度人工海水浸せき		
		初期値	浸せき	浸せき	初期値	浸せき	浸せき	初期値	浸せき	浸せき
		28日	1ヶ月	3ヶ月	28日	1ヶ月	3ヶ月	28日	1ヶ月	3ヶ月
B90	60	1.00	1.16	1.40	1.00	1.25	1.42	1.00	1.26	1.46
	70	1.00	1.19	1.46	1.00	1.37	1.40	1.00	1.23	1.41
OBF 30	60	1.00	1.30	1.57	1.00	1.33	1.47	1.00	1.32	1.63
	70	1.00	1.30	1.60	1.00	1.42	1.64	1.00	1.45	1.77
普通	60	1.00	1.14	1.23	1.00	1.09	1.18	1.00	1.15	1.19
	70	1.00	1.13	1.24	1.00	1.03	1.20	1.00	1.12	1.13

表一五・二 浸せき材齢と動弾性係数 (×10⁻⁵kgf/cm²)

セメント の種類	水結合 材比 (%)	標準水中養生				硫酸マグネシウム浸せき			高濃度人工海水浸せき		
		初期値	浸せき	浸せき	浸せき	初期値	浸せき	浸せき	初期値	浸せき	浸せき
		7日	28日	1ヶ月	3ヶ月	28日	1ヶ月	3ヶ月	28日	1ヶ月	3ヶ月
B90	60	1.78	2.49	2.75	2.94	2.48	2.78	2.85	2.42	2.72	2.91
	70	1.62	2.37	2.56	2.74	2.18	2.45	2.56	2.26	2.47	2.57
OBF 30	60	1.93	2.75	2.97	3.12	2.63	2.92	3.04	2.67	2.96	3.10
	70	1.67	2.59	2.83	2.98	2.50	2.86	2.91	2.44	2.76	2.95
普通	60	2.60	3.05	3.23	3.29	3.07	3.23	3.30	2.99	3.19	3.25
	70	2.41	2.89	3.01	3.05	2.79	2.96	2.98	2.73	2.93	3.00

ネシウム10%溶液および高濃度(5倍)人工海水を試験溶液として実施した。なお比較のため標準水中養生でも実施した。

試験ケースはセメントについては普通ポルトランドセメントと低発熱セメントとして2種類(OBF30, B90)の計3種類とし、それぞれに対しW/Cを60%, 70%とした6ケースである。

試験材齢は28日(初期値), 2ヶ月(1ヶ月浸せき), 4ヶ月(3ヶ月浸せき)であり, 試験項目は外観観察, 質量変化, 長さ変化, 圧縮強度, 動弾性係数, 中性化深さである。

(2) 試験結果

a) 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度試験結果として, 各ケースの圧縮強度の伸び率を表一五・一に示す。

初期強度に対する伸びに着目すると, 普通セメントでは高濃度人工海水浸せきにおいて強度の伸びが小さくなる傾向があるが, 低発熱セメントでは各水セメント比とも溶液浸せきにおいても標準水中養生における強度の伸びに対する有意な差は見られず, 両溶液による劣化は認められない。

b) 動弾性係数

動弾性係数の試験結果を表一五・二に示す。

普通セメント, 低発熱セメントとも両溶液浸せきでの動弾性係数の伸びは水中標準養生と同等であり, 両

表一五・三 浸せき材齢と中性化深さ (mm)

使用 セメント	水結合 材比 (%)	硫酸マグネシウム浸せき			高濃度人工海水浸せき		
		初期値	浸せき	浸せき	初期値	浸せき	浸せき
		28日	1ヶ月	3ヶ月	28日	1ヶ月	3ヶ月
B90	60	0	2	4	0	0	3
	70	0	3	5	0	2	4
OBF 30	60	0	1	2	0	0	2
	70	0	2	3	0	0	2

液浸せきによる影響は認められない。また, 水セメント比の差による影響も認められない。

c) 中性化深さ

普通セメントを用いた場合は標準養生, 両溶液浸せきとも中性化が全く認められなかった。また, 低発熱セメントも標準水中養生では中性化が全く認められなかった。

低発熱セメントでの溶液浸せきでの中性化深さの結果を表一五・三に示す。

硫酸マグネシウム溶液浸せきでは浸せき3ヶ月でB90では4~5mm, OBF30では2~3mmの中性化が認められ, 高濃度人工海水浸せきでも同様の傾向を示している。水セメント比60%に対し70%では中性化深さが約1mm深くなっている。

d) 長さ変化, 質量変化

試験結果を表一五・四に示す。

表一五・４ 浸せき材齢と長さ変化・質量変化
(硫酸マグネシウム溶液浸せき)

セメントの種類	水結合材比 (%)	長さ変化率 ($\times 10^{-4}$)		質量変化率 (%)	
		浸せき 1ヶ月	浸せき 3ヶ月	浸せき 1ヶ月	浸せき 3ヶ月
		B90	60	0	0.3
	70	0	0.3	1.12	1.73
OB F 30	60	0.3	0.5	0.23	0.55
	70	0.3	0.4	0.30	0.56
普通	60	0.1	0.4	0.06	0.27
	70	0	0.2	-0.04	0.20

(高濃度人工海水浸せき)

セメントの種類	水結合材比 (%)	長さ変化率 ($\times 10^{-4}$)		質量変化率 (%)	
		浸せき 1ヶ月	浸せき 3ヶ月	浸せき 1ヶ月	浸せき 3ヶ月
		B90	60	-1.4	-2.0
	70	-1.6	-2.1	0.55	1.09
OB F 30	60	-1.0	-1.5	0.25	0.54
	70	-1.1	-1.5	0.33	0.66
普通	60	0	-0.1	0.29	0.52
	70	-0.1	0	0.27	0.50

硫酸マグネシウム溶液浸せきでは、どのコンクリートも浸せき材齢とともに長さ質量が漸増する傾向があり、浸せき3ヶ月で長さは $0.2 \sim 0.5 \times 10^{-4}$ 増大、質量は $0.2 \sim 2.3\%$ 増加している。長さ変化ではOB F 30は浸せき材齢1ヶ月で明らかな膨脹を示すが、その後の進行は緩慢であるのに対し、普通セメント、B90では浸せき1ヶ月では殆ど変化せずその後徐々に膨脹する傾向を示しており、浸せき3ヶ月ではどのセメントも同じ程度の膨脹になっている。

質量変化では浸せき3ヶ月で普通セメントでは $0.2 \sim 0.27\%$ 、OB F 30が 0.55% 、B90が $1.2 \sim 2.27\%$ である。

高濃度人工海水浸せきでは長さ変化は収縮側に、質量は増大傾向を示す。

長さ変化では浸せき3ヶ月で普通セメントが $0 \sim 0.1 \times 10^{-4}$ と最も小さく、低発熱セメントでは $1.5 \sim 2.0 \times 10^{-4}$ 程度であった。質量変化は硫酸マグネシウム溶液浸せきの結果と比べるとOB F 30は同程度、B90が約 $1/2$ 、普通セメントが2倍になっている。

長さ・質量変化については水結合材比の違いによる影響は認められない。

e) 外観観察

硫酸マグネシウム溶液浸せきでは、普通セメントでは異常はみとめられなかった。低発熱セメントを用い

たコンクリートは浸せき1ヵ月で表層部のモルタルないしセメントペーストに富む部分が脆弱化して浮き上がり、隅角部から欠損し、この欠損が浸せき材齢とともに拡大する傾向が認められた。この傾向は水セメント比による差異は認められなかった。

欠損部の成分組織の分析から、劣化の原因は硫酸マグネシウムの浸透によって生成した石こう、エトリンガイト等による膨脹と、この膨脹によって生じた表層部の欠損部から侵入した空气中または溶液中に溶解した炭酸ガスによる水酸化カルシウムの炭酸化によるものと考えられる。ただし、この低発熱セメントでの表面組織の劣化は浸せき時の強度が小さく水和反応が依然として活発に行われ、緻密性にかかる時期であったために生じたと考えられる。

高濃度人工海水溶液浸せきでは、どのコンクリートも供試体の組織には殆ど異常は認められないが、表面に針状結晶が生成していた。針状結晶の主成分は無水硫酸(SO_3)と酸化カルシウム(CaO)であり、赤外線分光分析および粉末X線回折でも石こう半水塩と同一チャートを示しており、析出物は石こう半水塩($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)と認められる。

以上、浸せき3ヵ月の結果から、低発熱セメントを使用した水中不分離性コンクリートの耐酸性、耐海水性については標準水中養生の場合と試験溶液浸せきでの差が特に認められず、酸および海水による影響は受けにくいと考えられる。また、水セメント比60%、70%における差があまりないことからW/C70%でも耐久性に問題はないと考えられる。

6. 結語

水中不分離性コンクリートを主塔基礎のような大規模構造物に適用する場合特有の課題としてコンクリート側圧の評価、低発熱セメントの適用を抽出し検討の結果下記の知見が得られた。

(1) コンクリート最大側圧はコンクリートの側圧特性(コンクリート側圧係数の分岐発生時間と低減率)およびコンクリートの打ち上がり速度によって決定される。

側圧係数の低減率および最大側圧時の側圧係数はほぼ一定値を示しているのに対し、側圧係数の分岐発生時間および最大側圧発生時間はコンクリートの種類によって変動するが凝結始発時間との関連が見受けられる。

したがって側圧の抑制は打設速度のみでなくコンクリートの凝結始発時間を制御することで行える。また同じ打設速度の条件下ではコンクリートの最大側圧は簡易な方法として凝結始発時間から概ね推定すること

が可能である。

(2) 断熱温度上昇30℃程度以内を満足するためには高炉スラグ微粉末を大量混入した高スラグ系セメントまたは3成分系セメントの適用が必要である。

これらの低発熱セメントを使用した水中不分離性コンクリートは普通セメントを使用した場合に比べて凝結始発時間が遅延する傾向があり、流動性確保のためのスランブフローの保持とコンクリート側圧抑制のための凝結始発時間の両規定を満足させることが重要な課題となる。

スランブフロー保持特性、凝結始発時間は高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の結合材の品質、骨材の品質等の影響を受けることから、まずスランブフローの保持特性が良くかつ凝結始発時間の遅くならない結合材の品質、骨材の品質等の選定が重要である。

同一材料下でスランブフローの保持特性を改良するには減水剤を遅延形に変更することで可能であるが、この場合、同時に凝結始発時間が遅延することに留意する必要がある。

すなわち、適正な材料・配合でスランブフロー保持と凝結始発時間の両規定を両立することが可能となる。

低発熱セメントとしては、高スラグ系ではB90(高炉スラグ微粉末混入率90%)が、3成分系ではOBF30(高炉スラグ微粉末40%、フライアッシュ30%程度の混入率)が断熱温度上昇、凝結始発時間およびスランブフローの保持特性の点から総合的に好ましい。

また、基本的にはB90は断熱温度上昇、OBF30はスランブフロー保持の点で優れていると言える。

(3) 硫酸マグネシウム溶液浸せき、高濃度人工海水浸せき試験の結果から、低発熱セメントを用いた水中不分離性コンクリートの耐酸性、耐海水性には特に問題は見られず、水セメント比を70%程度にしても特段の問題はないと考えられる。

以上の知見を基本として施工された明石海峡大橋主塔基礎工事の結果は良好であり⁸⁾、低発熱セメントを用いた水中不分離性コンクリートの大規模構造物への適用性が確認された。

参考文献

- 1) 加島聡, 樋口康三, 坂本光重, 岡田凌太: 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, 材料, 第41巻, 460号, pp. 1-10, 1992.1.
- 2) 中川良隆, 大友健, 中平淳, 松岡康訓: 低発熱高流動特殊水中コンクリートに関する基礎研究, コンクリート工学論文集, 第1巻, 第1号, pp. 95-108, 1990.1.
- 3) 大友健, 松岡康訓, 中川良隆, 中平淳: 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, II-1, pp. 385-390, 1989.
- 4) 大倉真人, 小林茂敏, 森濱和正, 高橋弘人: 水中不分離性コンクリートの強度および耐久性に関する実験, 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, pp. 93-100, 1990.8.
- 5) 大友健, 松岡康訓, 中川良隆, 中平淳: 高炉スラグ微粉末とフライアッシュを大量に添加した水中不分離性コンクリートの特性, 大成建設技術研究所技報第24号, 1991.11.
- 6) 樋口康三, 坂本光重, 北口雅章: 明石海峡大橋大規模水中コンクリート実験, 本四技報, Vol. 13, No. 51, pp. 21-26, 1989.
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書, 1981.
- 8) 岡田凌太, 上田忠夫, 那須清吾: 明石海峡大橋2P・3P主塔基礎特殊水中コンクリートの施工, 本四技報, Vol. 15, No. 59, pp. 31-41, 1991.

(1996.11.22 受付)

STUDY ON APPLICATION OF ANTI-WASHOUT UNDERWATER CONCRETE TO LARGE SCALE OFFSHORE STRUCTURES

Kozo HIGUCHI, Satoshi KASIMA, Kazuomi ISHIKAWA and Shigetoyo YASUI

It needs to use low-heat cement mixed a large quantity of blast-furnace slag and flyash to secure low adiabatic temperature rise of concrete in order to use antiwashout underwater concrete for the large scale off-shore structures.

In this study, lateral pressure, long-term flowability and durability of underwater concrete using low heat cement has been examined. As a result, ① maximum lateral pressure can be controlled by setting time, ② required long-term flowability can be secured by using adequate materials and mix, ③ it is no problem for the durability.