

招待講演

「低発熱コンクリート開発の現状」

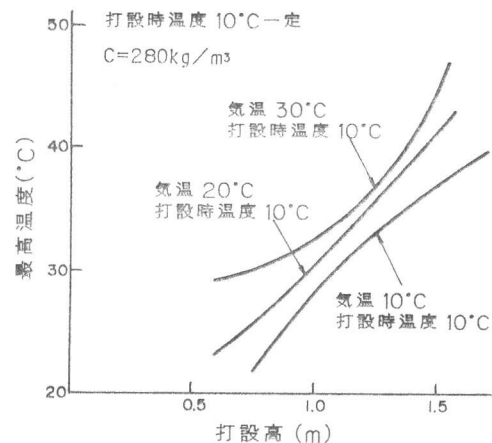
正会員○加島 聡 (本四公団第一建設局建設部)

野村 直茂 (本四公団設計部設計第三課)

1. はじめに

マスコンクリート構造物の場合、セメントの水和熱に起因する温度ひびわれに対する制御は材料、設備、施工法によって実施されている。マスコンクリート用のセメントとして、ダムでは中庸熱セメントが約30年前から用いられ、大規模な橋梁基礎には高炉セメントB種が従来低発熱セメントとして用いられてきた。〔1〕

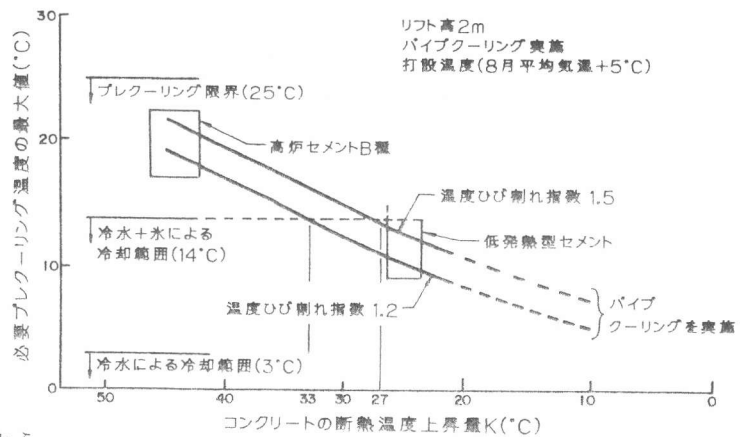
瀬戸大橋の吊橋基礎等には高炉セメントB種を用いて施工したが、その断熱温度上昇は約40℃である。コンクリート打設高と内部の最高温度は図-1に示すような相関関係があり、工程的に余裕のある場合は1回のコンクリート打設高を小さくして内部の最高温度を抑えた。しかし、工程に余裕がなく、夏場でも打設高を1.5m確保する場合は練混ぜ水を冷水とし、さらに氷と置換する



事により打設温度を下げ、内部の最高温度を抑えた。〔図-1 内部最高温度と打設高の関係〔2〕〕

経験的に内部最高温度を50℃以下に抑えると温度のひびわれを防止できることから、夏場には最大60%の氷を混入した。

コンクリート打設高が大きくなるに従って内部温度は断熱温度状態に近づく。打設高を2mとした場合の温度上昇量と必要プレクーリング量の関係は図-2のよう



になる。従来用いてきた高炉セメントB種の場合、25℃のプレクーリ

図-2 内部温度上昇量と必要プレクーリング温度の関係〔3〕〔4〕

ングが必要となり（冷水＋氷）によるプレクーリングの範囲を越え、特殊なクーリング法が必要になる。これに対して低発熱セメントを使用して断熱温度上昇量を低減する事ができれば、従来の（冷水＋氷）によるプレクーリングで十分となる。

低発熱セメントは各セメントメーカーによって開発され、現在施工中の明石海峡大橋（全体のコンクリート量：約140万m³）等の吊橋基礎にも用いられている。ここでは橋梁用マスコンクリートにおける低発熱コンクリート開発の現状についてまとめている。

2. 低発熱コンクリートの特性

低発熱セメントは従来の高炉セメントB種に比べてスラグの量を増やした二成分系のものと、セメント、スラグとフライアッシュを混合した三成分系のものに大別される。

低発熱セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇は図-3に示すように既存のセメントを用いたコンクリートのそれに比べてかなり小さい。又、低発熱セメントを用いたコンクリートの強度発現は図-4に示すように遅いが、長期的にはかなりの強度増進を示している。さらに、セメントのブレン比を上げて初期強度の発現を図っている。それ故、超低発熱セメントを用いたコンクリートの方が高いひびわれ抵抗を示している。

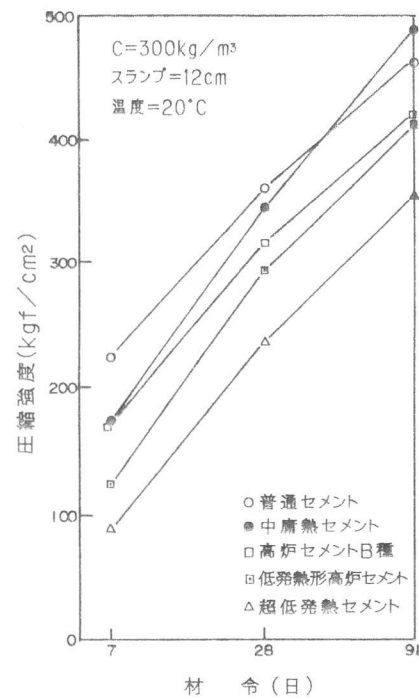
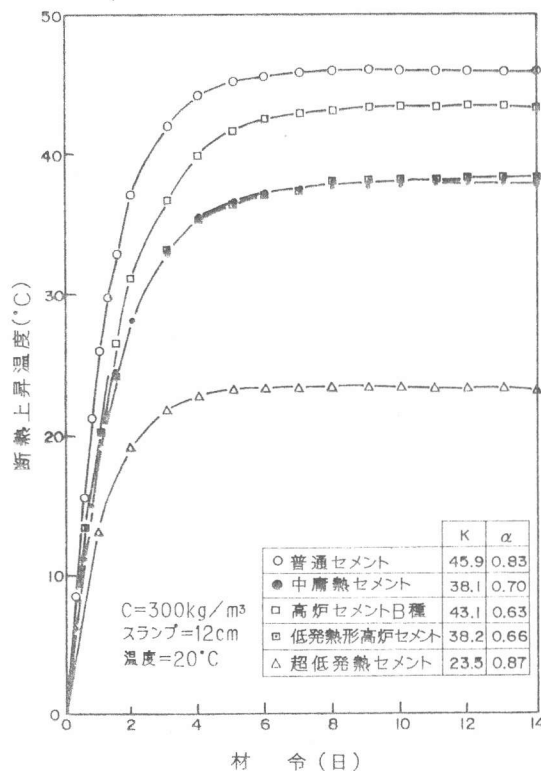


図-4 低発熱コンクリートの圧縮強度特性〔5〕

図-3 低発熱コンクリートの断熱温度上昇〔5〕

乾燥収縮については単位水量の影響がより大であり、中庸熱セメントや普通セメントを用いたコンクリートに比較して10～20%小さくなっている。〔5〕

低発熱セメントを用いたコンクリートの中性化はスラグやフライアッシュの混入によって普通セメントを用いたコンクリートに比べて水酸化カルシウム生成量が少なくなるので速くなる。しかし、土木構造物は部材が大きく、かぶりも大きい場合にはかぶり部分が中性化するのに長期間を要する。

海洋構造物の場合は遮塩性を要求されるが、塩分浸透試験によると、低発熱セメントのコンクリートの塩素イオンの浸透は高炉セメントB種よりさらに小さくなっているのが有利である。

3. 低発熱コンクリートに関する検討

3. 1 気中コンクリート

一般のマスコングクリートの低発熱コンクリートに関する調査研究は昭和62年度から始め、その成果をもとに（財）海洋架橋調査会に構造用マスコングクリート委員会（長瀧重義委員長）を設置し低発熱型コンクリートの仕様、高性能AE減水剤品質規格ならびに橋梁用マスコングクリート設計・施工基準について検討を行った。（4）（6）（7）。

低発熱コンクリートの仕様におけるセメント混合割合は表-1に示す。ポルトランドセメントはJISを満足する普通、早強、および中庸熟の3タイプを用いる。

表-1 低発熱型セメント混合割合〔3〕

混 合 物	2成分系	3成分系
ポルトランドセメント	15%以上	15%以上
フライアッシュ	———	40%以下
高炉スラグ微粉末	85%以下	60%以下

高炉スラグとフライアッシュに関する規格値は表-2、表-3に示す。

細骨材に使用する海砂は微粒分が乏しく、それを補うために石粉を使用する事とし、その品質を表-4に示す。

表-2 高炉スラグ微粉末の規格〔3〕

比 重	比表面積 (cm^2/g)	塩基度	活性指数SAI(%)		モルタルフロー比 (%)	強熱減量 (%)	湿 分 (%)	化学成分 (%)		
			28日	91日				S	SO ₃	MgO
≥2.8	≥3500	≥1.7	≥75	≥95	≥95	≤3.0	≤1.0	≤2.0	≤3.0	≤10.0

表-3 フライアッシュの規格〔3〕

比 重	比表面積 (cm^2/g)	単位水量 比 (%)	湿 分 (%)	強熱減量 (%)	SiO ₂ (%)	圧縮強度比		メチレンブルー 吸着量 (mg/g)
						28日	91日	
≥2.00	≥2800	≤100	≤0.5	≤4.0	≥45	≥65	≥80	≤0.4 (標準)

単位セメント量は発熱量を抑えるために260kg/m³とした。必要な強度を確保するにはW/Cの関係

表-4 石粉の品質〔3〕

比 重	水 分 (%)	石灰純度 (%)	ふるい目の通過重量百分率 (%)		
			590μm	149μm	74μm
≥2.60	≤0.5	≥90	100	≥90	≥70

から固練りのコンクリートとなる。そしてワーカビリティを得るた

表-5 コンクリートの種別 使用区分および品質基準〔3〕

コンクリートの種別	使用区分	設計基準強度 (kgf/cm ²)	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	*但しAE減水剤のみを使用したベーススランプは、5±1.5cmとする。
L	アンカレイジ等一般部	240 (法令91日)	40	11±2.5*	4±1	

め混和剤は流動化剤またはAE高性能減水剤を用いた。

表-6 試験練りコンクリートの規格〔3〕

項 目	規 格 値	備 考
断熱温度上昇量	K≤25	T(t)=K(1-e ^{-αt}) 式
温度上昇係数	α=0.4~0.8	
圧縮強度	材令7日 ≥160kgf/cm ²	・φ150×300mm ・標準水中養生 ・供試体作成方法はJIS A1108による。
	材令91日 ≥300kgf/cm ²	
単位容積重量	≥2300kg/m ³	

試験は、コンクリートの練上がり温度を20±1℃として行うものとする。

図-5には明石海峡大橋主塔基礎の一般図を示す。その気中コンクリートの示方配合は表-7に示す。低発熱セメントの混合割合は表-8に示すようにポルトランドセメント分を約30%確保している。

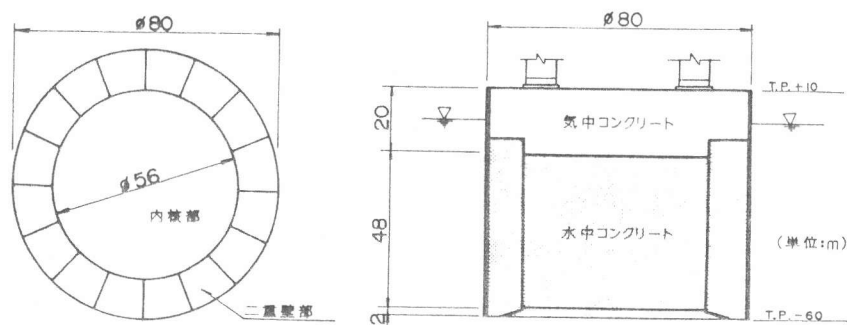


図-5 明石海峡大橋主塔基礎一般図(2P)

3.2 水中コンクリート

明石海峡大橋の主塔基礎は設置ケーソン工法によって施工される。

直径80mのケーソン設置後、その内部に水中コンクリートを施工し、水中コンクリート打設完了後、内部を排水して気中コンクリートを施工する。

水中コンクリートの総量は26万m³である。コンクリートの打設は内核部、二重壁部の順に施工した(図-5参照)。1回当たり約9000m³のコンクリートを連続打設するシステムとし、内核部は約3.5mの層厚で打ち継ぎ、二重壁部は各区分毎に施工した。その打設システムは写真-1に示す。水中コンクリート打設は平成元年10月から開始し、約1年かけて実施した。

水中コンクリートに、ついては事前の調査試験にもとづいて低発熱高流動不分離性コンクリートを採用した〔8〕〔9〕。その品質基準を表-9に、示方配合の一例を表-10に示す。表-11にはセメントの混合割合を示す。コンクリートの打込温度は20℃以下とし、ブレイキングとしては(冷水+氷)

表-7 主塔基礎気中コンクリートの示方配合

細骨材率 (%)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)											
		水 W	セメント C	細骨材		石粉 L	粗骨材			混和剤			
				粗砂	細砂		40	20	13	SP-9N		AE776S	
										t/c	(kg/m ³)		A
41.0	51.9	135	260	360	360	50	572	294	294	1.2	3.90	7.0	2.73

表-8 主塔基礎気中コンクリートのセメント混合割合(%)

基礎	ポルトランドセメント	フライアッシュ	高炉スラグ微粉末
2P	32	20	48
3P	30	0	70

表-9 不分離性水中コンクリートの品質基準

設計基準強度(91日)	180kgf/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±2.5cm
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

表-10 不分離性水中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 (kgf/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		

表-11 主塔基礎水中コンクリートのセメント混合割合(%)

施工場所		ポルトランドセメント	フライアッシュ	高炉スラグ微粉末
2 P	内 核 部	16. 0	30. 0	54. 0
	二重壁部	22. 0	28. 0	50. 0
3 P	内 核 部	25. 0	30. 0	45. 0
	二重壁部	22. 5	30. 0	47. 5

あるいは冷骨を採用した。その結果、内部の最高温度50℃程度とほぼ計画通りの結果を得た。



写真-1 明石海峡大橋主塔基礎水中コンクリートの施工状況

3. 3 地下連続壁用水中コンクリート

明石海峡大橋の4つの吊橋基礎のうち、神戸側で主ケーブルを固定するアンカレイジ基礎(1A)の支持地盤は非常に深く、T. P. -6.2mに基礎が設置され、平面寸法も大断面である(図-6参照)。

そのアンカレイジ基礎は、 $\phi 8.5$ mで厚さ2.2mの地下連続壁を施工後、その内部を側壁で補強しながら掘削する。そして内部にコンクリートを打設して基礎を完成させる。

地下連続壁の壁厚はコンクリート強度と関連し、過去の実績をもとにコンクリートの設計基準強度を 370 kgf/cm^2 とし、壁厚を2.2mとした。

地下連続壁は92角形で、先行エレメントは連続する三辺とし、後行エレメントは先行エレメントにはさまれた一辺とした。先行エレメントのコンクリート量は約 1300 m^3 、後行エレメントのコンクリート量は約 500 m^3 である。

この地下連続壁コンクリートの品質基準および現場配合を表-12および13に示す。セメントの混合割合は表-14に示すように三成分系の低発熱セメントを使用した。コンクリート内部の温度上昇は最大約 44°C で温度ひびわれに対して安全であった。事ができた。

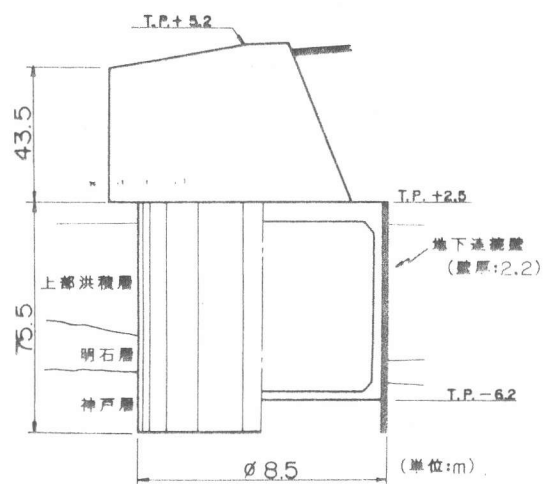


図-6 アンカレイン基礎一般図

表-12 地下連続壁コンクリートの品質基準

スランプ (cm)		空気量 (%)	ブリーディング率 (%)	断熱温度上昇		コンクリート 打込温度(℃)	配合強度(kgf/cm ²)	
ベース	流動化			K	α		材令28日	材令91日
8±2.5	24±1.5	4±1	3以下	50 以下	0.4~ 0.8	22以下	400	560

表-13 地下連続壁コンクリートの現場配合

骨材最大 寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m ³)							
			水 W	セメント C	細骨材		粗骨材	高性能AE 減水剤	流動化剤	AE助剤
					海砂	砕砂				
20	33	45	142	430	501	270	965	4.73	2.58 ~ 3.44	0.034~ 0.073

表-14 セメントの混合割合 (%)

ポルトランドセメント	フライアッシュ	高炉スラグ
40	20	40

4. おわりに

マスコンクリートの温度ひびわれを制御するために低発熱セメントが開発され、効果的である。この低発熱セメントはポルトランドセメント、スラグとフライアッシュを混合したものであるため、普通セメントに比べて強度発現が遅く、中性化も速いので使用については十分な検討が必要である。将来、それらも改良した低発熱セメントを開発される事が望まれる。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団、(株)本州四国連絡橋エンジニアリング：マスコンクリートのひびわれ制御方法に関する検討報告書、平成元年3月
- 2) 加島 聡・藤田時男：吊橋下部工マスコンクリートのクーリングによる温度制御、コンクリート工学、Vol. 24, No. 6, pp. 21~31, June 1986
- 3) 本州四国連絡橋公団：低発熱コンクリート仕様について、第4回海洋架橋技術委員会資料、1990. 11
- 4) 山田勝彦・新田篤志・二宮仁司：低発熱コンクリート、本四技報、Vol. 14, No. 54, pp. 2~10, 1990
- 5) 長瀧重義・曾根徳明・大塩 明：低発熱形セメントを使用したコンクリートの特性と大型モデル実験、セメントコンクリート、No. 522, pp. 32~42, Aug. 1990
- 6) 金沢克義・二宮仁司・十河茂幸・新開千弘：超低発熱コンクリートの橋りょう構造物への適用性、コンクリート工学、Vol. 27, No. 5, pp. 31~37, May 1989
- 7) 本州四国連絡橋公団：橋梁用マスコンクリート設計・施工基準、平成2年8月
- 8) 加島 聡・坂本光重・平野 茂・岡田凌太：水中不分離性コンクリートによる橋梁基礎の合理化施工、セメントコンクリート、No. 523, pp. 98~107, Sept. 1990
- 9) 樋口康三・佐々木雅敏・北口雅章：海洋架橋における水中コンクリートの施工計画（明石海峡大橋）、橋梁、pp. 2~6, 1989. 5