大型橋りょうマスコンクリートに適した 超低発熱型セメント

金沢 克義^{*1}・山田 勝彦^{*2}・新田 篤志^{*3}

二宮 仁司^{*4}・十河 茂幸^{*5}

概要 コンクリートの温度上昇が高いと、温度ひびわれが生じやすいばかりか、大型橋りょう基礎においては温度収縮が完成後の打継ぎ鉄筋に過大な温度応力を生じさせる。そこで、筆者らは、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを多量に混和した超低発熱型セメントを用いて、大型橋りょう基礎に適した超低発熱型コンクリートの基礎的研究を行った。本報告は、各種の超低発熱型セメントを用いたコンクリートの基礎実験の結果を示すもので、単位セメント量が 260 kg/m^3 の条件において所要強度を満足したうえ、断熱温度上昇量を 22°C 程度まで低減できたことのほか、凝結時間、ブリージングの発生状況、硬化コンクリートの諸性質、練上り温度による影響、スランプロスの程度などについても示した。

キーワード：マスコンクリート、低発熱セメント、断熱温度上昇量、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、石灰石粉

1. ま え が き

大型橋りょう基礎は、ダムコンクリートと同等の規模のマスコンクリート構造物となるが、ダムコンクリートと異なり、鉄骨や鉄筋を含んだコンクリート構造で、かつ、急速に施工される例が多い。そのため、コンクリート配合も、ダムコンクリートに比べ富配合となり、打ち込まれたコンクリートの内部温度も高くなる。そのため、セメントの水和熱による温度ひびわれの発生する危険性が大きい。さらに、このような大型橋りょう基礎は、海洋環境下に施工されることが多く、耐久性の観点からもひびわれの制御は不可欠となる。

金沢らは、橋りょう用マスコンクリートに適した超低発熱型セメントの研究を進めてきた¹⁾が、ポンプ圧送の観点から必要と判断された最少単位セメント量 260 kg/m^3 の配合において、発現強度に余裕があり、さらに低発熱性のセメントを目指すことが可能と考えられた。そこで筆者らは、明石海峡大橋アンカレイジ（写真-1）

を対象として、これに適した超低発熱型セメントを用いたコンクリートの検討を引き続いて行うこととした。

写真-1 明石海峡大橋アンカレイジの完成予想図

*1 かなざわ・かつよし／本州四国連絡橋公団 第一建設局 垂水工事事務所 副所長

*2 やまだ・かつひこ／(株)構造技研 技師長（前本州四国連絡橋公団 設計第三課長）

*3 につた・あつし／(財)海洋架橋調査会企画部 企画課長

*4 にのみや・ひとし／本州四国連絡橋公団 第一建設局 垂水工事事務所工務課

*5 そごう・しげゆき／(株)大林組技術研究所 土木第三研究室 主任研究員（正会員）

2. 超低発熱型コンクリートの必要性の検討

アンカレイジは、打設面積が大きいことと、ケーブルを固定するアンカーフレームの設置の都合上、平面的に4～6ブロックに分けて層打ちされる。1ブロックのリフト高さが小さいと内部温度の拡散がなされるため、温度ひびわれ制御上は有利となるが、工期短縮の必要上から1.5 m以上のリフト高を採用することが多い。そのため、温度ひびわれはさらに入りやすくなり、超低発熱型セメントの適用が必要となる。また、ブロック施工した躯体は、温度低下とともにブロック個々が別々に収縮

図-1 解析モデル

し、ブロック間の鉄筋は過大な引張応力を受けることになる。この点からも、超低発熱型セメントは必要となる。

そこで、明石海峡大橋のアンレイジを想定した温度応力解析により、超低発熱型セメントの効果を評価してみた。

解析上のリフト分割は、超低発熱型セメントの使用が工期短縮に有効と考え、従来より高いリフト厚の2.0 mとし、従来実績の中庸熱高炉セメントを用いた場合に

表-1 解析に用いるコンクリートの諸物性

検討ケース	Case 1	Case 2
セメントの種類	低 発 熱	中庸熱高炉B種
発 熱 関 数* $T=K(1-e^{-\alpha t})$	$K=25.0^{\circ}\text{C}$ $\alpha=0.60$	$K=41.2^{\circ}\text{C}$ $\alpha=0.41$
単位容積重量 (kg/m^3)	2 300	2 300
熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{mh}^{\circ}\text{C}$)	2.00	2.00
比 熱 ($\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)	0.25	0.25
線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	10.0	10.0
圧縮強度 (kgf/cm^2)	$f'_c=159 \log M-435$	$f'_c=196 \log M-591$
弾性係数 (kgf/cm^2)	$E_c=34\,400 f'_c{}^{0.407}$	$E_c=28\,500 f'_c{}^{0.402}$
引張強度 (kgf/cm^2)	$f_t=0.143 f'_c{}^{0.936}$	$f_t=0.182 f'_c{}^{0.878}$
ポアソン比	0.167	0.167
クリープ係数	CEB-FIP コード	CEB-FIP コード
備 考	打設時期7～8月、コンクリート打込み温度23℃、外気温は明石地区の平均気温(3.9～27.7℃)、パイプクーリング1次、1'次ともに23℃(30日間)、2次16℃(冬期30日間)	

* 発熱関数の K , α は、コンクリート温度20℃の値

Study on Super Low-Heat Cement Application to Mass Concrete for Anchorage of Suspension Bridge

By K. Kanazawa, K. Yamada, A. Nitta, H. Ninomiya and S. Sogo

Concrete Journal, Vol. 29, No. 4, pp. 27～36, April 1991

Synopsis Thermal stress due to heat of hydration of cement causes serious cracking in massive concrete like anchorages for a suspension bridge. Furthermore, excessive stresses occur in reinforcing bar near the cracks. The authors studied the basic properties of super low-heat cement concrete containing large amounts of fly ash and pulverized blast-furnace slag in the cement. It was concluded from the experimental study that the strength would satisfy the design criteria of the bridge and that adiabatic temperature rise to less than 22°C is achieved with unit cement content of $260 \text{ kg}/\text{m}^3$. In addition, time of setting, bleeding, mechanical behaviours, loss of workability, and the effect of placing temperature are described in this paper.

Keywords : mass concrete, low-heat cement, adiabatic temperature rise, blast-furnace slag, fly ash, pulverized limestone

は、1.5 m リフト厚とした。また、各層間の打継ぎサイクルは 11 日とした。解析モデルと解析条件をそれぞれ図-1 および表-1 に示す。温度解析結果、応力解析結果および温度ひびわれ指数をそれぞれ図-2、図-3 および図-4 に示す。

従来実績の Case 2 の中庸熱高炉セメントでは、最高温度は 47℃ まで上昇し、温度ひびわれ指数は 1.0 を下

図-2 中心温度の経時変化

図-3 温度応力経時変化

図-4 温度ひびわれ指数の比較 (打込み温度 23℃ の場合)

図-5 断熱温度上昇量と必要プレクーリング温度の最大値の関係

回った。Case 1 の超低発熱型セメントを用いたコンクリートは断熱温度上昇量を 25℃ と設定したが、この場合でもコンクリートの内部温度は 41℃ まで上昇し、従来程度のプレクーリングおよびパイプクーリングを行う条件では、冬期の温度降下時あるいはコンクリート内部が最終安定温度に近づくにつれ、温度応力が引張側に大きく上昇し、ひびわれ指数はやっと 1.2 を上回る状態である。

図-5 は、コンクリートの断熱温度上昇量を変化させた場合に、温度ひびわれ指数を 1.2 および 1.5 とするために必要なプレクーリング量を求めたものである。仮定条件のもとではあるが、コンクリートの断熱温度上昇量を 25℃ 程度以下まで低減し、可能な限りフレークアイスを用いてプレクーリングを行うことによって、特殊なプレクーリング工法（たとえば、液体窒素を用いた冷却²⁾ など）を行わなくとも、ひびわれ制御可能な範囲に温度ひびわれ指数を改善することができることが分かる。また、温度上昇量の低減は、コンクリートの温度降下にもなう収縮量を低減させるため、躯体が最終安定温度に近づくにつれて生ずるブロック間の継目の開きを小さくする。この点は、従来ブロック間の継ぎ鉄筋に非常に大きな引張応力度が実測されており、構造上の信頼性を高めることになる。

以上の結果、超低発熱型セメントを用いることによって、従来の施工法を大きく変えないで温度ひびわれや継ぎ鉄筋の応力を低減することが可能となると考えられる。

3. 各種の超低発熱型セメント

超低発熱型セメントは、ダム、地下式大型貯槽、原子力発電所のベースマットなどに使用されていたフライアッシュや高炉スラグ微粉末を混入した混合セメントをさらに低発熱するように改良されたものである。表-2 に試験に用いた 9 種類のセメント、および比較のため

表-2 供試セメントの概要

No.	セメント の略号	セメントの成分割合 (%)			比重	ブレン (cm ³ /g)
		セメント	スラグ	フライアッシュ		
A	MS 70	30 (M)	70	0	3.00	4 040
B	HS 80	20 (H)	80	0	2.94	5 250
C	HS 85	15 (H)	85	0	2.95	4 220
D	NS 85	15 (N)	85	0	2.92	6 630
E	NS 48-F 20	32 (N)	48	20	2.82	4 280
F	MS 55-F 20	25 (M)	55	20	2.80	3 800
G	MS 60-F 20	20 (M)	60	20	2.78	4 740
H	MS 50-F 27	23 (M)	50	27	2.77	5 470
I	MS 52-F 30	18 (M)	52	30	2.74	3 680
BB	NS 50	50 (N)	50	0	3.03	3 630

(注) セメント N: 普通クリンカー, M: 中庸熱クリンカー, H: 早強クリンカー

表-3 供試セメントの化学成分

No.	セメント の略号	化 学 成 分 (%)									アルカリ量 (%)			塩素量 (%)
		強熱 減量	不溶 残分	二酸化 ケイ素	酸化アル ミニウム	酸化第 二鉄	酸化カル シウム	酸化マグ ネシウム	三酸化 硫黄	合計	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O	
A	MS 70	1.9	0.1	29.1	9.5	1.5	48.4	4.7	2.4	97.6	0.29	0.47	0.60	0.004
B	HS 80	0.5	0.5	30.1	11.6	0.9	45.2	6.2	2.6	97.6	0.26	0.33	0.48	0.004
C	HS 85	1.6	0.8	30.4	11.5	0.8	47.0	5.6	0.5	98.2	—	—	0.40	0.010
D	NS 85	0.9	0.2	30.7	12.8	0.6	44.3	5.8	2.1	97.4	0.22	0.25	0.38	0.005
E	NS 48-F 20	0.8	15.0	25.5	9.7	1.2	40.4	4.3	2.1	99.0	0.38	0.23	0.53	0.007
F	MS 55-F 20	1.7	15.8	22.8	8.6	2.8	39.8	3.9	2.8	98.2	0.12	0.38	0.37	0.006
G	MS 60-F 20	0.9	14.5	26.2	11.4	1.3	38.7	3.8	2.2	99.0	0.25	0.43	0.53	0.008
H	MS 50-F 27	1.5	21.7	22.5	8.8	1.4	35.1	4.4	2.9	98.3	0.12	0.28	0.30	0.010
I	MS 52-F 30	1.0	22.8	22.4	8.7	1.8	36.7	4.2	2.1	99.7	0.29	0.24	0.45	0.007
BB	NS 50	0.8	0.1	27.1	9.0	1.9	53.5	4.0	1.5	97.9	0.21	0.36	0.45	0.008

表-4 供試セメントの物理的性質

No.	セメント の 略 号	比重	比表面積 ブレン (cm ² /g)	凝 結			安定 性	曲 げ 強 さ (kgf/cm ²)				圧 縮 強 さ (kgf/cm ²)				水 和 熱 (cal/g)			
				水量 (%)	始発 h-min	終結 h-min		3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日
A	MS 70	3.00	4 040	31.5	4-47	6-56	良	17	33	68	71	57	142	272	351	33.1	40.2	47.3	49.0
B	HS 80	2.94	5 250	30.4	5-35	7-40	良	33	56	70	72	120	245	412	549	43.2	52.5	60.1	64.7
C	HS 85	2.95	4 220	30.4	4-05	5-35	良	19	29	61	66	59	149	304	375	36.6	42.7	51.3	56.9
D	NS 85	2.92	6 630	33.5	5-30	7-50	良	30	42	71	79	96	167	396	512	28.1	34.6	39.2	43.2
E	NS 48-F 20	2.82	4 280	30.6	5-55	7-46	良	20	35	61	73	65	135	320	511	—	57.5	62.2	74.0
F	MS 55-F 20	2.80	3 800	30.9	7-30	9-45	良	18	31	63	68	63	130	310	384	39.0	47.5	63.1	64.9
G	MS 60-F 20	2.78	4 740	28.6	6-50	8-45	良	18	35	54	64	66	155	292	368	31.3	38.2	49.8	52.0
H	MS 50-F 27	2.77	5 470	33.5	5-44	8-24	良	20	34	66	70	84	163	293	390	32.0	41.0	49.5	51.4
I	MS 52-F 30	2.74	3 680	29.9	7-45	11-51	良	13	23	45	55	31	94	205	296	—	31.0	38.8	44.1
BB	NS 50	3.03	3 630	30.2	3-14	4-52	良	28	40	66	81	103	189	415	573	47.5	63.2	83.1	88.8

に用いた高炉セメントB種の合計10種類のセメントの概要を示す。超低発熱型セメントは、高炉スラグを多量に混合した二成分系の超低発熱型セメントと、それにさらにフライアッシュを混合した三成分系の超低発熱型セメントに大別され、供試セメントの化学的性質および物理的性質を表-3、表-4に示す。

超低発熱型セメントは、高炉スラグや、フライアッ

シュの混合割合が大きいと、コンクリートの凝結が遅れがちで、ブリージングが増大する傾向にある。そのため、セメントの粉末度を高くしているものが多い。ベースセメントが早強・普通・中庸熱と使い分けられているが、これらは、高炉スラグやフライアッシュの反応刺激剤としての役目もあり、セメントの設計上、混合後のセメントの反応性と水和熱を考慮して設計されている。

4. 超低発熱型コンクリートの基礎的性質

4.1 実験概要

超低発熱型セメントを用いたコンクリートが橋りょうマスコンクリートに適切であることを、試験により確認した結果を以下に述べる。

(1) 使用材料

使用したセメントは、前記の9種類の超低発熱型セメントと、比較のために加えた高炉セメントB種の10種類とした。細骨材は大型橋りょうが海洋環境で構築されることが多いため、海砂を用いた。海砂は、塩分を水洗い除却するため、粒径0.15 mm以下の微粒子が不足し、コンクリートのブリージングが多くなる。そこで、粒度調整のために石粉を使用することを考え、石灰石粉を細骨材の一部に置換した。なお、石粉は、細骨材に混入すると粒径の違いから移動中に分離することが予測され、セメントにプレミックスすることを前提として、乾燥粉碎したアスファルト舗装用のフィラー（JIS A 5008に規定される舗装用石灰石粉）を用いた。

碎石、海砂、石粉の性質を、それぞれ表-5、図-6、表-6に示す。

(2) 配合

前述した各種の超低発熱型セメント9種と高炉セメントB種を用いて、表-7に示す配合条件のもとに、室内試験により示方配合を定めた。各セメントを用いた配合を表-8に示す。なお、石粉の必要量は、セメントの種類によって異なるものと考えられるが、比較しやすくするために一定量とした。

(3) 試験項目

比較した試験の項目は、ブリージング性状、凝結時間などのフレッシュ性状のほか、圧縮強度、引張強度、断熱温度上昇特性などである。また、断熱温度上昇特性の

温度依存性を調べるために、二成分系と三成分系の低発熱型セメントの代表サンプル（H, C）を用いて、10, 20, 30℃の練上り温度によって断熱温度上昇試験を実施し、その影響を調べた。

4.2 超低発熱型コンクリートのフレッシュな状態における性質

各セメントを用いた超低発熱型コンクリートのフレッシュコンクリートの試験結果を、表-9に示す。

各セメントとも、所定の配合条件を満足するスランプ、空気量のコンクリートとした状態で、十分にプラスチックに富んでおり、ポンプ施工が可能と判断された。これは、細粒分の少ない海砂に石粉を置換したことによる効果と思われる。ブリージング率は高炉セメントB種で約2%であるのに対し、各低発熱型コンクリートにおいても2%前後の値となり、最大でも3.5%と比較的小さな値となった。凝結時間が始発で8時間20分から15時間50分と遅延性が大きいにもかかわらず、ブリージング率が小さいのは、細骨材の一部に石粉を置換したことによる効果と思われる。

図-6 骨材の粒度分布

表-5 骨材の物性

種類	分類	産地	比重	吸水率 (%)	粗粒率	備考
細骨材	海砂	香川県広島沖	2.55	2.18	2.75	絶乾塩分量 0.01%
	砕砂	兵庫県西島	2.52	3.45	2.32	海砂: 砕砂=8.5:1.5 混合
細骨材	碎石 4020	兵庫県赤穂	2.62	0.66	7.95	4020:2005=4:6 混合
	碎石 2005		2.62	0.76	6.56	

表-6 石粉の物性

	比重	水分 (%)	石灰純度 (%)	ふるい目通過重量百分率 (%)			
				590 μm	297 μm	149 μm	74 μm
石灰石粉 JIS 規格	2.73	0.1	91	100	100	94	82
	2.60 以上	1.0 以下	—	100 以上	—	90 以上	70 以上

表-7 配合条件

骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)		空気量 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位石粉量 (kg/m ³)	単位容積重量 (t/m ³)	練上り温度 (℃)
	ベース	流動化					
40	5±1.5	11±2.5	4±1	260	75	2.3 以上	20±1

表-8 各種セメントを用いたコンクリートの配合

No.	セメント の略号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									
				W	C	石粉	S	G ₁	G ₂	ベース混和剤		流動化剤	
										No.70*	303 A	NP-30	AE-775 S
A	MS 70	56.2	39.0	146	260	75	653	465	697	0.65	6.0 A	1.53	7.5 A
B	HS 80	57.3	37.0	149	260	75	612	477	716	0.65	8.0 A	1.53	6.5 A
C	HS 85	54.6	38.0	142	260	75	637	477	711	0.65	7.0 A	1.53	7.0 A
D	NS 85	56.2	37.0	146	260	75	614	479	718	0.65	7.0 A	1.53	10.0 A
E	NS 48-F 20	53.8	38.0	140	260	75	635	473	709	0.65	7.0 A	1.53	7.0 A
F	MS 55-F 20	52.7	39.0	137	260	75	656	467	700	0.65	10.0 A	1.53	8.0 A
G	MS 60-F 20	53.5	38.0	139	260	75	635	473	709	0.65	13.0 A	1.53	9.0 A
H	MS 50-F 27	55.4	37.0	144	260	75	611	477	715	0.65	12.0 A	1.53	9.0 A
I	MS 52-F 30	51.2	38.0	133	260	75	639	476	714	0.65	7.5 A	1.40	6.0 A
BB	NS 50	54.6	39.0	142	260	75	658	468	702	0.65	4.0 A	1.98	5.0 A

(注) G₁: 砕石 4020, G₂: 砕石 2005, 303 A, AE-775 S: 空気連行助剤, * 単位: l/m³

表-9 フレッシュコンクリート試験結果

No.	セメント の略号	スランブ (cm)		空気量 (%)		単位容積 重量 (t/m ³)	練上り 温度 (℃)	ブリージング 量 (cc/cm ³)	ブリージング 率 (%)	凝 結 時 間	
		ベース	流動化	ベース	流動化					始 発 (h-min)	終 結 (h-min)
A	MS 70	4.0	10.5	4.4	4.6	2.31	19.5	0.09	2.21	11-30	20-25
B	HS 80	5.0	10.0	4.5	4.4	2.31	19.0	0.07	1.62	9-40	15-10
C	HS 85	5.0	12.0	4.5	4.4	2.32	20.5	0.05	1.17	8-20	17-10
D	NS 85	5.0	10.5	4.4	4.1	2.32	20.0	0.07	1.83	13-10	20-55
E	NS 48-F 20	5.5	12.5	3.7	4.7	2.31	20.0	0.13	3.46	13-30	18-50
F	MS 55-F 20	4.5	10.5	4.6	4.1	2.33	20.5	0.09	2.49	15-50	26-00
G	MS 60-F 20	5.5	11.5	4.5	3.5	2.33	20.5	0.09	2.24	10-40	16-30
H	MS 50-F 27	3.5	10.5	3.4	3.3	2.32	19.0	0.06	1.65	11-30	18-20
I	MS 52-F 30	5.0	12.0	3.9	3.7	2.31	20.0	0.09	2.43	15-25	24-25
BB	NS 50	4.5	11.0	4.2	4.0	2.33	21.0	0.08	1.97	6-30	9-20

練上り温度が低い場合、凝結はさらに遅れ、ブリージング率が増大するのが一般的傾向である。そこで、低発熱型コンクリートの練上り温度がブリージングに及ぼす影響について調べた。配合条件を一定とした場合、練上り温度が 10℃ 増減するにつれ、単位水量が 1~2 kg/m³ 増減する。図-7 に示すように、コンクリート温度が下がるにつれ凝結は大幅に遅れるが、ブリージング率はあまり増加せず、三成分系超低発熱型セメント (H) はやや増加する程度で、二成分系超低発熱型セメント (C) の場合には温度による違いはほとんどなく (図-8)、低温時においても、石粉がブリージングを抑止する効果が認められた。

図-9 は、凝結始発時間とブリージング率の関係を示

図-7 コンクリート温度と凝結時間

図-8 コンクリート温度とブリージング率

図-9 始発時間とブリージング率の関係

したものであるが、相関性は小さく、凝結の遅れが必ずしもブリージングの増加の主要因とはなり得ないことが認められた。そこで、セメントの粉末度がブリージング率に及ぼす影響について、図-10にその関係を示した。石粉を用いたコンクリートにおいては、相関性はあまり強くないが、砕砂と海砂の混合砂を用いた場合は、粉末度が4500 cm²/g付近で変曲点をもち、それ以下の粉末度のセメントでブリージング率が急激に増加した。セメントの粉末度の影響は大きい、石粉を混合することによって、相対的にブリージング率が減少するものと考えられる。各セメントを用いたコンクリートのスランプ、空気量の経時変化を図-11に示す。一般的傾向として二成分系セメントのほうがスランプの経時低下が大きく、三成分系は比較的経時低下が小さいが、必ずしもそれは、セメントの成分だけでは定まらず、凝結時間にも影響されるものと思われる。

4.3 超低発熱型コンクリートの硬化後の性質

超低発熱型コンクリートの配合条件として、単位セメント量を260 kg/m³と一定とし、単位水量をAE減水剤標準形を用いてスランプ5 cmが得られる値としたため、水セメント比は51~57%の範囲となった。この範囲において、図-12に示すように、コンクリートの圧縮強度は材令7日で150~252 kgf/cm²、材令28日で243

図-10 セメントの粉末度とブリージング率の関係（混合砂）

図-11 スランプ、空気量の経時変化

図-12 圧縮強度と材令の関係

～310 kgf/cm²、91 日で 292～390 kgf/cm² となり、材令 91 日ではセメントの種類によって約 100 kgf/cm² の差が生じた。この値は、単位セメント量 260 kg/m³ における圧縮強度としては十分に高い値であり、設計基準強度 240 kgf/cm² に割増し係数 1.2 を乗じた配合強度 (290 kgf/cm²) をすべて満足する結果であった。なお、低発熱型セメントは、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを高添加しており、さらに、長期材令において強度の増加が期待できるものと考えられるため、セメント量を低減できるセメントもあるが、耐久性、施工性などから、単位セメント量はこの程度が最低限度と考えるほうがよいと思われる。

圧縮強度を材令 91 日の強度に対する発現率としてセメントの粉末度との関係を図-13 に示した。セメントの粉末度が高いほど、若材令での強度発現率が増加する傾向が認められる。また、コンクリートの圧縮強度は図-14 に示すように、セメントの圧縮強さと強い相関性が

図-13 圧縮強度発現率とセメントの粉末度の関係

認められ、同一配合条件においては、セメントの強さ試験を頻繁に行うことによってコンクリートの品質変動を小さく管理することができるものと考えられる。

引張強度、静弾性係数については、図-15、図-16 に圧縮強度との関係で示したが、二成分系、三成分系セメントを問わず、圧縮強度との高い相関性が認められた。この関係は、従来のセメントを用いたコンクリートと同様である。

4.4 超低発熱型コンクリートの断熱温度上昇特性

各超低発熱型セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇試験結果を、図-17、図-18 に示す。断熱温度上昇量 (K 値) は、21.8～33.2℃の範囲で、25℃を下回るものは二成分系で 2 種、三成分系で 4 種類であった。従来型の高炉セメント B 種を用いたコンクリートが 42℃であることを考えると、同一単位セメント量でも、セメントの成分によって約 20℃の断熱温度上昇量の低減がはかれることが認められた。

温度ひびわれに対する抵抗性は、発生応力と引張強度の関係から求められる。引張強度と圧縮強度に高い相関性が認められることから、圧縮強度 (材令 91 日) と断熱温度上昇量の関係を、便宜上、温度ひびわれ抵抗性の 1 つの指標と考えることができる。この関係を図-19 に示す。図-19 に示すように、圧縮強度と断熱温度上昇量は、ある程度の相関性は認められるものの、断熱温度上昇量に対して強度が高いものもあり、温度ひびわれ抵抗性がセメントによって若干異なることが推察される。

セメントの混和材置換率とコンクリートの断熱温度上昇量の関係を、図-20 に示す。混和材の置換率が大きいほど断熱温度上昇量が小さくなる傾向である。

また、断熱温度上昇量は、図-21 に示すように、練上り温度が高いと小さく、低いと大きくなる。また、温度上昇速度は、練上り温度が高いと早く、低いと遅くなる。このような練上り温度による断熱温度上昇特性の影響は、通常のセメントを用いた場合も同様であるが、変

図-14 セメントの圧縮強さと圧縮強度の関係

図-15 圧縮強度と引張強度の関係

図-17 断熱温度上昇量と材令の関係 (二成分系)

図-19 圧縮強度と断熱温度上昇量の関係

図-16 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-18 断熱温度上昇量と材令の関係 (三成分系)

図-20 断熱温度上昇量とセメントの混和材添加量の関係

図-21 K, α の補正値と打込み温度の関係

図-22 セメントの水和熱と断熱温度上昇量の関係

化量が若干大きくなる傾向が認められた。これらの傾向は、少ないデータによるものであり、推定式を定めるにはさらに多くのデータを必要とするので、ここでは傾向だけを示した。なお、セメントの水和熱試験結果から、コンクリートの断熱温度上昇量を予測するには、図-22に示すように、相関性は認められるものの、正確に予測することは困難と判断される。

5. あとがき

本研究で検討した各種の超低発熱型セメントは、水和熱を大幅に低減できるため、温度ひびわれが懸念されるマスコンクリートに適しているが、超低発熱型であるた

めに、ブリージングの増加や初期強度の遅れが危惧される¹⁾。そのため、ここでは、石灰石粉を標準的に使用しており、ブリージングは大幅に抑制された。また、初期強度についても、セメントの粉末度と石粉の効果によって改善され、実用に支障のない範囲と考えることができる。今後、超低発熱型セメントが一般化し、JIS化に進むとしたら、ブリージングを抑制するための超微粉材料の混合を義務づけるか、あるいはコンクリートのブリージング率の上限を定めるなどの配慮が必要と思われる、提言したい。

なお、今後施工されるマスコンクリート工事に、超低発熱型セメントが有効に利用されることを期待する一方、超低発熱型セメントは、通常のセメントと比較してコンクリートの中性化速度が速くなることや、表面の肌あれ（アプサンデン現象）などが懸念されるため、耐久設計上の対策について別途検討する予定である。

最後に、本報告をまとめるにあたって貴重なご意見、ご助言をたまわった長瀧重義東京工業大学教授をはじめとする、構造マスコンクリート委員会の委員各位に対して本誌面をお借りして心から感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 金沢・二宮・十河・新開：超低発熱セメントの橋りょうマスコンクリート構造物への適用性，コンクリート工学，Vol. 27, No.5, 1989.5
- 2) 十河・中根・浅井・直井：液体窒素により冷却されたコンクリートの基礎的性質，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 329～332, 1986
- 3) 長瀧・曾根・大塩：低発熱型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, 1990.8
- 4) 山崎：鉱物質微粉末がコンクリートのワーカビリティおよび強度に及ぼす効果に関する基礎研究，コンクリートライブラリー，No. 8, 土木学会

(投稿：1991年1月18日受付)