

# 銘柄および製造ロットが異なるセメントを用いたコンクリートの 断熱温度上昇量

## INFLUENCE OF DIFFERENCE IN BRAND AND LOT OF CEMENT ON ADIABATIC TEMPERATURE RISE

鈴木康範\*・原田修輔\*\*・前川宏一\*\*\*・辻 幸和\*\*\*\*

By Yasunori SUZUKI, Shusuke HARADA, Koichi MAEKAWA and Yukikazu TSUJI

This paper presents the comparison of adiabatic temperature rise among concrete specimens. Seventeen brands of ordinary portland cement and two lots each of four types of cement are used in the experiments.

The adiabatic temperature rise was also measured with concrete specimens of different AE water reducing agents.

After reviewing the applicability to different concrete specimens of the equation for approximating adiabatic temperature rise, which was proposed by the authors, methods are proposed to find coefficient of the approximation equation that match the concrete of various compositions.

*Keywords*: adiabatic temperature rise, brand, lot, AE water reducing agents

### 1. ま え が き

コンクリートの断熱温度上昇量に関する貴重な研究成果は、これまで数多く報告されている。著者らもセメントの種類、単位セメント量および打込み温度を要因にとった実験結果とその定量化について報告した<sup>1)</sup>。しかしながら、同じ種類のセメントでも、市販の銘柄や製造ロットの相違が、コンクリートの断熱温度上昇量に及ぼす影響については、これまでほとんど検討されていない。また、前報文では<sup>1)</sup>、遅延形のAE減水剤を用いたコンクリートの断熱温度上昇量を測定し、その定量化を行ったが、プレーンコンクリートを含めて、他のタイプのAE減水剤を用いたコンクリートへの適用性を検討する必要がある。

本研究では、17銘柄の市販の普通ポルトランドセメントと、それぞれ製造ロットが異なる普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、高炉セメント

およびフライアッシュセメントを用いた場合における、コンクリートの断熱温度上昇量の実験結果を報告するものである。さらに、普通ポルトランドセメントについて、AE減水剤のタイプが異なる場合におけるコンクリートの断熱温度上昇量も併せて報告する。そして、著者らがコンクリートの断熱温度上昇量の定量化に用いた、近似式における各係数に及ぼす上記の要因の影響についても検討するものである。

### 2. 実験の概要

実験は3つのシリーズに分けて行った(表-1参照)。

第1シリーズでは、銘柄の異なる市販セメントが断熱温度上昇量に及ぼす影響を求めるために、市販の17銘柄の普通ポルトランドセメント(OPC)を採取して、配合および打込み温度を一定にした実験を行った。

第2シリーズでは、セメントの製造ロットの相違が断熱温度上昇量に及ぼす影響を求めた。このシリーズでは、打込み温度を20°Cとし、4種類のセメントについて単位セメント量を変化させて実験を行った。セメントの種類は、OPC、中庸熱ポルトランドセメント(MHPC)、高炉セメントB種(BCB)およびフライアッシュセメントB種(FCB)の4水準に変化させた。一方、単位セメント量は、200 kg/m<sup>3</sup>から400 kg/m<sup>3</sup>まで50 kg/m<sup>3</sup>

\* 正会員 住友セメント(株) 技術開発センター  
(〒274 船橋市豊富町 585)

\*\* 正会員 工修 住友セメント(株) 技術開発センター  
(同上)

\*\*\* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科  
(〒113 文京区本郷 7-3-1)

\*\*\*\* 正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科  
(〒376 桐生市天神町 1-5-1)

ごとの5水準に変化させた。

第3シリーズでは、AE減水剤のタイプが断熱温度上昇量に及ぼす影響を求めた。このシリーズでは、OPCを用いて、打込み温度および単位セメント量を一定にし、3つのタイプのAE減水剤と無添加の場合について実験を行った。AE減水剤のタイプは、標準形、遅延形および促進形の3種類である。

各シリーズで使用したセメントの化学成分ならびに水と熱を表-2および表-3に示す。また、AE減水剤の化学成分を表-4に示す。なお、BCBのスラグ混合率は40%、FCBのフライアッシュ混合率は20%である。

コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法が40mmの碎石を用いて、スランプが8cm、空気量が4%となるように定めた。第1シリーズでは、単位セメント量を200kg/m<sup>3</sup>から400kg/m<sup>3</sup>まで50kg/m<sup>3</sup>ごとに変化させているので、水セメント比は81.0%から37.5%まで変化している。第1および第2シリーズでは、混和剤としては、遅延形のAE減水剤を単位セメント量の0.25%、また空気量調整剤を所定の空気量が得られるように、それぞれ用いた。また、第3シリーズで用いた遅延形以外のAE減水剤の使用量は、セメント100kgに対して

250mlとし、他のシリーズと同様に空気量調整剤も併用した。

実験に用いた断熱温度上昇試験装置は、隔壁構造の循環経路を有する熱媒ジャケットを、断熱材を設けずに供試体に密着させて測定する形式のものである<sup>1)</sup>。なお、供試体は直径が60cm、高さが60cmの円柱であり、計測は打込み直後より30分間隔で、7日間行った。

### 3. 断熱温度上昇量の表示式

コンクリートの断熱温度上昇量を表示する近似式は、著者らが測定値を定量化するのに用いた式(1)によった<sup>1)</sup>。式(1)は、土木学会RC示方書等で採用されている式(2)に比べ、より正確に実験値を表示できると考えられるものである。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - \exp(-rt^s)) \dots \dots \dots (1)$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - \exp(-rt)) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $Q(t)$ : 材令  $t$  日における断熱温度上昇量

$Q_{\infty}$ ,  $r$ ,  $s$ : 実験より求まる係数

### 4. 銘柄の異なる市販セメントが断熱温度上昇量に及ぼす影響

銘柄の異なる市販の普通ポルトランドセメントが、式(1)の各係数に及ぼす影響を、それぞれの度数分布で示したものが図-1である。17銘柄についての結果であ

表-1 実験の要因と水準

シリーズ	要 因	水 準
第1シリーズ	セメントの銘柄	市販OPC 17銘柄
	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	300
	打込み温度 (°C)	20
第2シリーズ	セメントの製造ロット	OPC, MHPC, BCB, FCBの各2ロット
	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	200, 250, 300, 350, 400
	打込み温度 (°C)	20
第3シリーズ	混和剤のタイプ	無添加, 遅延形, 標準形, 促進形
	セメントの種類	OPC
	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	300
	打込み温度 (°C)	20

表-4 AE減水剤の主成分

遅延形	標準形	促進形
リグニンスルホン酸 カルシウム	リグニンスルホン酸 化合物及びポリオール 複合体	リグニンスルホン酸 化合物及びロダン化 合物

表-2 第1シリーズおよび第3シリーズで用いた普通ポルトランドセメントの化学成分および水と熱

セメントの 銘柄	化 学 成 分 (%)										水 和 熱 (cal/g)		
	ig.loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	合計	3日	7日	28日	
A	0.7	0.6	22.0	5.9	2.8	63.6	1.3	1.9	98.8	56.6	72.2	84.6	
B	1.3	0.4	21.1	6.2	2.9	64.1	1.1	1.8	98.9	63.5	80.9	94.1	
C	1.3	0.2	21.8	5.1	2.7	64.6	1.6	1.7	99.0	60.5	72.2	83.5	
D	0.5	0.4	22.4	5.9	2.8	63.2	2.0	1.9	98.6	61.1	73.5	86.5	
E	0.3	0.4	21.9	6.3	2.9	63.7	2.0	1.5	99.0	54.5	73.8	91.5	
F	0.3	0.1	22.4	6.0	2.8	64.4	1.7	1.3	99.0	55.5	73.2	91.5	
G	0.8	0.3	21.1	5.2	3.0	65.0	1.6	1.9	98.9	68.6	76.9	87.2	
H	0.9	0.3	21.5	5.4	2.8	64.1	1.8	2.1	98.9	64.0	73.8	86.9	
I	1.0	0.1	21.8	5.0	3.0	65.2	0.9	1.8	98.8	57.7	71.1	84.6	
J	1.5	0.2	21.6	5.6	2.8	64.2	1.2	2.0	99.1	57.0	72.4	90.0	
K	0.8	0.2	21.2	5.9	2.8	64.5	2.4	1.6	99.4	57.7	75.8	92.4	
L	0.5	0.3	21.8	5.9	3.1	64.4	1.2	1.8	99.0	61.2	73.8	92.0	
M	1.0	0.1	21.5	6.0	2.4	64.2	2.1	2.1	99.4	60.7	74.0	88.8	
N	1.9	1.6	21.1	5.2	2.8	62.5	1.7	2.0	98.8	57.8	69.2	80.8	
O	0.9	0.1	21.9	5.1	2.6	64.1	1.9	2.2	98.8	62.1	75.8	88.5	
P	2.2	0.1	21.2	5.1	2.8	64.0	1.7	1.8	98.9	62.3	73.4	87.7	
Q*	0.9	0.8	21.7	6.0	2.5	63.5	1.8	1.9	99.1	61.9	75.8	87.4	

\* 第3シリーズにも使用した。

表-3 第2シリーズで用いたセメントの化学成分および水と熱

セメント の種類	化 学 成 分 (%)										水 和 熱 (cal/g)		
	ig.loss	insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	合計	3日	7日	28日	
OPC	0.7	0.6	22.0	5.9	2.8	63.6	1.3	1.9	98.8	56.6	72.2	84.6	
	0.5	0.3	21.8	5.9	3.1	64.4	1.2	1.8	99.0	61.2	73.8	92.0	
MHPC	0.4	0.1	23.4	4.6	3.6	64.0	1.2	1.8	99.1	48.9	63.2	81.5	
	0.5	0.2	23.4	4.0	4.1	63.9	1.4	1.8	99.3	50.4	68.5	81.0	
BCB	0.6	0.6	24.6	7.9	2.1	57.2	3.4	2.1	98.5	55.4	70.1	89.7	
	0.4	0.5	26.4	8.8	1.9	56.0	3.1	2.0	99.1	58.0	75.6	90.1	
FCB	0.8	10.6	20.5	5.1	2.6	55.6	1.3	2.0	98.5	52.9	66.5	82.7	
	1.0	11.8	19.5	4.8	2.7	56.4	1.2	1.8	99.2	53.4	69.6	83.0	

るが、銘柄が異なると、各式の係数はかなり大きな変動幅が認められる。

材令 28 日の各セメントの水和熱  $H_{28}$  と係数  $Q_{\infty}$  の関係を、断熱温度上昇量を定量化する際に用いた基準値である銘柄 L のセメント<sup>1)</sup>に対する比率で、それぞれ示したのが図-2 である。係数  $Q_{\infty}$  の基準値に対する比は、多少のばらつきはあるが、材令 28 日における銘柄 L の水和熱の基準値に対する比の一次式で式 (3) のように示される。なお、両者の相関係数がやや小さいのは、水和熱に及ぼす温度履歴の影響を考慮していないことが一因である。今後この面から両者の関係を検討する必要がある。

$$Q_{\infty}/Q_{\infty s} = 0.442 + 0.569 \times (H_{28}/H_{28s}) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、添字  $s$  は基準値である銘柄 L のセメントの値であることを示す。

しかし、セメントの試験成績表には、通常水和熱は記載されておらず、上記の水和熱による補正はできない。そこで、セメントの化学分析値からボーグの式により鉱物組成を求めて、材令 28 日の水和熱を式 (4) で推定した<sup>2),3)</sup>。

$$H_{28}^* = 80 \times C_3S + 25 \times C_2S + 329 \times C_3A + 118 \times C_4AF \dots\dots\dots (4)$$

そして、水和熱の推定値  $H_{28}^*$  と係数  $Q_{\infty}$  の関係を、基

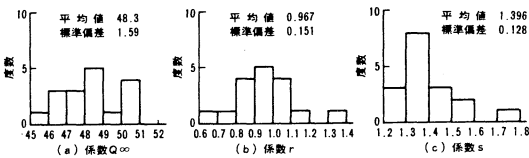


図-1 セメントの銘柄が断熱温度上昇量の各係数に及ぼす影響

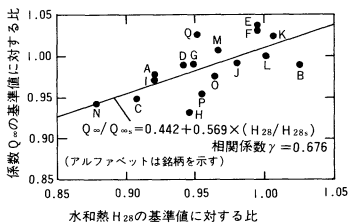


図-2 材令 28 日のセメントの水和熱  $H_{28}$  と係数  $Q_{\infty}$  の関係

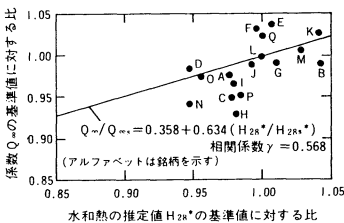


図-3 材令 28 日のセメントの水和熱の推定値  $H_{28}^*$  と係数  $Q_{\infty}$  の関係

準値である銘柄 L に対する比で求めたのが図-3 である。両者の関係は式 (5) で示される。ただし、水和熱の実測値を用いた場合と比較して、相関係数は小さくなっている。この原因として、OPC には 5% 以内の混合材が含まれており、セメントの化学分析値から算定した鉱物組成には、かなりの誤差が含まれていたことが考えられる。

$$Q_{\infty}/Q_{\infty s} = 0.358 + 0.634 \times (H_{28}^*/H_{28*_s}) \dots\dots\dots (5)$$

係数  $r$  および  $s$  に対しては、係数  $Q_{\infty}$  のように水和熱あるいは鉱物組成に対して相関関係が認められなかった。そこで、セメントの銘柄の相違による係数  $r$  および  $s$  の補正方法については、今後とも検討を続けるものとし、ここでは係数  $Q_{\infty}$  に対してのみ上記の水和熱による補正を行い、 $r$  と  $s$  に対しては、既報の値<sup>1)</sup>を用いて、断熱温度上昇量を推定してみた。

実験値との誤差の標準偏差を、セメントの銘柄ごとに示したのが図-4 である。上記の水和熱による補正を

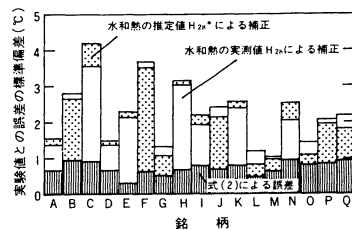


図-4 水和熱による補正を行った場合の実験値との誤差

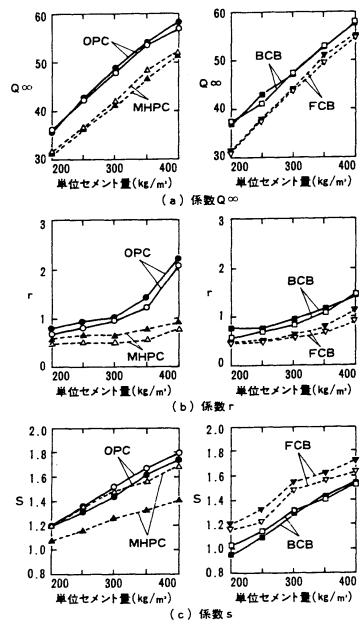


図-5 製造ロットの相違が断熱温度上昇量の各係数に及ぼす影響

表—5 AE 減水剤のタイプが断熱温度上昇量に及ぼす影響

係 数		無添加	遅延形	標準形	促進形	
$Q_{\infty}$		49.6	50.6	51.0	51.1	
$r$		1.118	1.198	1.190	1.274	
$s$		1.167	1.359	1.292	1.340	
断 熱 温 度 上 昇 量 ( $^{\circ}$ C)	経 過 時 間 (日)	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
		0.125	2.2	1.7	1.4	1.4
		0.250	8.4	7.7	6.6	6.2
		0.375	14.2	13.3	12.4	13.7
		0.500	18.8	18.7	17.4	20.1
		0.625	23.7	24.6	23.7	26.1
		0.750	28.3	30.0	29.6	31.4
		0.875	31.9	33.8	33.7	35.1
		1.0	34.6	36.7	36.5	37.9
		1.5	41.5	44.2	43.7	45.1
		2.0	45.1	47.3	46.8	47.8
		3.0	47.9	49.6	49.1	49.9
4.0	49.1	50.6	50.0	50.8		
5.0	49.7	51.3	50.5	51.5		
6.0	50.2	51.8	51.0	52.0		
7.0	50.5	52.2	51.3	52.4		

行っても、実験値を単に式(1)により近似した場合と比較して誤差の標準偏差はかなり大きい。しかしながら、2~3の銘柄を除けば、誤差の標準偏差は $2.5^{\circ}$ C以内に収まっている。したがって、上記の水和熱の補正によりセメントの銘柄の相違を考慮して、断熱温度上昇量を推定することは、ある程度有効と思われる。

### 5. 製造ロットが異なるセメントを用いた断熱温度上昇量

2つの製造ロットから得たそれぞれの断熱温度上昇量の係数を、単位セメント量を横軸にとって対比して示したものが図—5である。製造ロットが異なると、各係数とも多少のばらつきは生じている。しかし、係数 $Q_{\infty}$ に及ぼす影響はほとんど認められず、MHPCの場合の係数 $s$ を除いては、断熱温度上昇量の速度を支配する係数の $r$ や $s$ についても、さほど大きな差は生じていない。

また、製造ロットの相違が断熱温度上昇量の各係数に及ぼす影響は、銘柄の異なる市販セメントより小さい。これは、一工場では焼成および粉砕方式が一定であり、しかもセメントの原材料も大きな変動がないためと思われる。

### 6. 異なるタイプのAE減水剤を用いた断熱温度上昇量

OPCを用いて、打込み温度を $20^{\circ}$ Cおよび単位セメント量を $300\text{ kg/m}^3$ 一定とした場合に、AE減水剤のタイプの相違が、コンクリートの断熱温度上昇量に及ぼす影響を求めたのが表—5である。メーカーが指定した標準量を使用した場合には、AE減水剤のタイプの相違により、コンクリートの断熱温度上昇量は若干異なるが、経時変化の全体的傾向には大差がないといえる。なお、無添加のコンクリートの断熱温度上昇量がAE減水剤を添加した場合と比較してやや小さいのは、セメント粒

子の分散の程度が異なることも一因と考えられる。

本実験結果は、セメントの種類、単位セメント量、および打込み温度が一水準に限られている。しかしながらこの結果は、既報<sup>1)</sup>で提示した断熱温度上昇量を表示する式の各係数が、AE減水剤のタイプが異なる場合にも適用できることを示唆するものである。

## 7. 結 論

本研究では、市販セメントの銘柄、製造ロットおよびAE減水剤のタイプの相違が断熱温度上昇量に及ぼす影響についての実験結果を報告した。本研究の範囲から、以下の知見が得られた。

(1) 銘柄の異なる市販の普通ポルトランドセメントが、式(1)で示す断熱温度上昇量の近似式の係数 $Q_{\infty}$ 、 $r$ 、 $s$ に及ぼす影響を求めたが、銘柄によりかなりの変動幅が認められた。

(2) 係数 $Q_{\infty}$ に及ぼす銘柄の影響は、材令28日におけるセメントの水和熱の実測値を用いて式(3)により、あるいはセメントの化学成分からボーグの式を用いて算出した鉱物組成に基づき、式(4)で推定した水和熱を用いて式(5)により、それぞれある程度の推定が可能である。一方、係数 $r$ および $s$ については、水和熱あるいは鉱物組成との相関関係はほとんど認められなかった。

(3) セメントの製造ロットの相違が断熱温度上昇量を表示する各係数に及ぼす影響は、銘柄の異なる市販セメント間の影響よりも小さいといえる。

(4) AE減水剤のタイプが異なっても、断熱温度上昇量には大きな影響を与えない。このことは、既報<sup>1)</sup>で提示したコンクリートの断熱温度上昇量を表示する式の各係数が、AE減水剤のタイプが異なる場合にも適用できることを示唆するものである。

謝 辞：本研究を行うにあたり、東京大学 岡村 甫教授には、有益なご助言、ご指導を頂きました。また、住友セメント(株)横田紀男氏、佐藤利幸氏には、実験の実施や論文の作成にあたり、適切なご助言、ご助力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 鈴木康範・原田修輔・前川宏一・辻 幸和：新試験装置によるコンクリートの断熱温度上昇量の定量化，土木学会論文集，第396号/V-9，pp.109~117，1988.8.
- 2) Bouque, R.H. : The Chemistry of Portland Cement, pp. 245~267, 1955.
- 3) Taylor, H.F.W. : The Chemistry of Cements, Vol. 1, pp. 363~364, 1964.

(1988. 4. 19・受付)