

# 論文 高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの温度上昇予測に関する検討

太田 達見<sup>\*1</sup>・名和 豊春<sup>\*2</sup>・山崎 庸行<sup>\*3</sup>・江口 仁<sup>\*4</sup>

**要旨:** 高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートの断熱温度上昇試験を行った。その結果に対して、既往の推定式を参考として、セメントの水和反応による発熱特性を考慮した温度上昇推定式を新たに提案した。この推定式により、打込み温度、単位セメント量、混和剤量が与えられれば、高ビーライト系セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇曲線が推定できることが明らかになった。

**キーワード:** 断熱温度上昇試験、高ビーライト系セメント、温度上昇推定式

## 1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の高層化に伴い、設計基準強度が500kgf/cm<sup>2</sup>を上回る高強度コンクリートが採用されるようになってきた。高強度コンクリートは単位セメント量が多く、水和発熱による温度ひび割れや長期強度の伸びの鈍化が問題となるため、高ビーライト系ポルトランドセメントを適用する例が増えつつある。しかし、高ビーライト系セメントに対しては、構造体コンクリートの強度発現予測や温度ひび割れ解析に必要な断熱温度上昇に関する検討は十分になされていない。そこで、高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートの断熱温度上昇試験を行い、その結果に基づき、既往の推定式を参考とした新たな断熱温度上昇推定式を提案した。本報はその概要を記したものである。

## 2. 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験は、表-1に示す18ケースについて行った。以下に、試験の詳細を示す。

### 2.1 使用材料

セメントは、高ビーライト系ポルトランドセメントを用いた。セメントの粉末度ならびに構成化合物を表-2に示す。骨材には、君津産陸砂と大船渡産砕砂の混合砂および両神産7号碎石を用いた。これらの骨材の物理試験結果を表-3に示す。また、混和剤はポリカルボン酸系の高性能AE減水剤（A社とB社の2製品）を使用した。

表-1 断熱温度上昇試験条件

ケース No.	単位セメント量 C (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	設定打込み温度 T <sub>s</sub> (℃)	混和剤の種類	混和剤量 (C×%)
5-A-400	400	41.3	5	A社製 ポリカル ボン酸系	1.35
5-A-450	450	36.7			1.45
5-A-500	500	33.0			1.65
5-A-550	550	30.0			1.65
20-A-400	400	41.3	20		1.25
20-A-450	450	36.7			1.30
20-A-500	500	33.0			1.45
20-A-550	550	30.0			1.45
35-A-400	400	41.3	35		1.25
35-A-450	450	36.7			1.30
35-A-500	500	33.0*			1.00
35-A-550	550	30.0*			1.20
5-B-400	400	41.3	5	B社製 ポリカル ボン酸系	1.35
5-B-450	450	36.7			1.45
5-B-500	500	33.0			1.65
5-B-550	550	30.0			1.65
35-B-400	400	41.3	35		1.25
35-B-450	450	36.7			1.30

\*のみコンクリート、他はモルタル  
混和剤は単位セメント量C (kg/m<sup>3</sup>) に対して表中の%を添加している。

- \* 1 清水建設（株）技術研究所建設技術研究部、工修（正会員）
- \* 2 秩父小野田（株）中央研究所セメント・コンクリート研究所参事補、工博（正会員）
- \* 3 清水建設（株）技術研究所建設技術研究部主任研究員、工修（正会員）
- \* 4 秩父小野田（株）中央研究所セメント・コンクリート研究所

## 2.2 試験方法

断熱温度上昇は、4点式断熱温度上昇試験装置にて測定した。本装置は、デュア瓶と銅製の円筒からなる試料を収納する容量3ℓの容器と空気循環式の可変恒温槽で構成されている。試料は、装置の容量が小さいことから基本的には表-4に示すモルタルを用い、スランプフローで60±5cmの流動性が得られた調合において、粗骨材を同一重量の7号碎石に置換して全体の熱容量が同じになるようにした。なお、打込み温度が35℃、水セメント比が30%と33%の場合に、最高温度が装置の設定上限温度を超えたため、コンクリート用の装置（空気循環式・容量33.5ℓ）を用い、表-5に示すコンクリートにて断熱温度上昇を測定した。（試料の試験開始時（練上り直後）の温度を表-6に示す。）

## 2.3 試験結果

断熱温度上昇試験結果の一例を図-1に示す。各ケースの断熱温度上昇曲線はS字型を示し、材齢初期の温度上昇が鈍る傾向が見られた。なお、打込み温度が低いと、初期の断熱温度上昇速度は低下する傾向が認められたが、材齢7日における温度上昇量は打込み温度にかかわらずほぼ同じ結果であった。

## 3. 温度上昇推定式に関する考察

### 3.1 既往の温度上昇推定式の適用性

図-1のような断熱温度上昇曲線に対して、コンクリート標準示方書に示されている式(1)と、初期の発熱量が少ないセメントの場合の近似に適するとされている式(2)に基づき、断熱温度上昇の推定を行った[1][2]。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (1)$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t^{\beta}}) \quad (2)$$

ここで、 $Q(t)$ ：材齢 $t$ での断熱温度上昇量、 $Q_{\infty}$ ：終局断熱温度上昇量、 $\gamma$ ：温度上昇速度定数、 $t$ ：材齢、 $\beta$ ：材齢 $t$ のべき乗項。図-2と図-3に上記2式による近似結果例を示す。両図とも、材齢がほぼ1日以降については推定値と実測値とは概ね一致しているが、初期材齢において推定値と実測値とは大きく異なっており、推定値では実測値に見られ

表-2 高ビーライト系セメントの物性値

比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	構成化合物(%)			
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
3.20	4210	33	49	4	9

表-3 骨材の物性値

記号	骨材の種類	表乾比重	粗粒率	吸水率(%)
S1	君津産陸砂	2.60	2.58	1.49
S2	大船渡産砕砂	2.64	4.04	0.87
S3	両神産7号碎石	2.64	4.92	1.81
G	両神産2005碎石	2.70	6.66	0.50

表-4 モルタルの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S1	S2	S3
41.3	44.5	165	400	719	80	1010
36.7	43.3	165	450	683	76	1010
33.0	41.9	165	500	646	72	1010
30.0	40.5	165	550	609	68	1010

表-5 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S1	S2	G
33.0	43.0	165	500	662	74	1014
30.0	41.0	165	550	619	69	1023

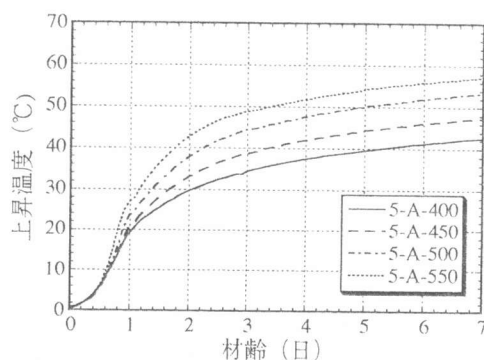


図-1 断熱温度上昇試験結果

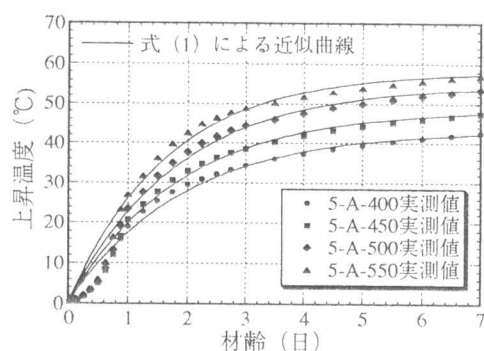


図-2 式(1)による近似結果

たようなS字型曲線を再現することはできなかった。

### 3.2 断熱条件下での水和発熱の解析

断熱温度上昇量はセメントの水和発熱に起因するため、まず断熱温度上昇曲線を微分した断熱温度上昇速度曲線により、どのような水和反応が生じているのかを検討した。結果を図-4に示す。設定練上り温度が35℃では、接水後の小さい発熱ピークIと主要な発熱ピークIIが認められる。一方、設定練上り温度が5℃と20℃では、断熱温度条件下でのポルトランドセメントの水和発熱ピークは三つあり、加藤ら [3] によれば、接水直後の発熱ピークIはアルミネートの水和、その後の発熱ピークIIはシリケート相の水和、発熱ピークIIIはモノサルフェートへの転移にそれぞれ起因すると判断される。ただし、図-4から、いずれの場合も断熱過程での水和発熱はシリケート相の発熱に大きく支配されるものと考えられる。

このうち、シリケート相の水和反応は5段階に分けられるとされている。すなわち、①接水直後に  $Ca^{2+}$  および  $OH^-$  が  $C_3S$  の水和表面から溶出する段階、②加水分解の速度が急速に遅くなる誘導期、③  $Ca^{2+}$  および  $OH^-$  のイオン濃度が臨界値に達し、 $Ca(OH)_2$  の析出および  $CSH$  の生成が同時に起こり、 $C_3S$  の水和反応が加速度的に進行し反応速度が最大となる加速期、④  $Ca(OH)_2$  は液相中で析出するが、 $CSH$  はトポ化学的反応をし  $C_3S$  表面に生成するため、水和が進むにつれて  $CSH$  の皮膜の厚さが増大し、未水和の  $C_3S$  への水の透過やイオンの拡散が阻害されるようになる減速期、⑤減速期以降の終結期である。このように、水和反応過程は各反応期で異なり、後藤ら [4] が示すようにその水和反応速度は、横軸に材齢をとり両軸を対数で表した場合、S字型を描く。

一方、セメントの水和反応速度は、経験的に次式のように表されることが多い。

$$[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^n = (K_D / R_0) t \quad (3)$$

ここで、 $R_0$ ：元のセメントの粒子平均半径、 $\alpha$ ：水和反応率、 $K_D$ ：拡散係数。式(3)で、 $n < 1$  の場合は自触反応、 $n = 1$  の場合は界面反応、 $n = 2$  の場合は拡散律速反応とされている。ところで、水和反応率が小さい場合は  $(1 - \alpha)^{1/3} \cong 1 - \alpha/3$  と近似され、式(3)から水和反応率  $\alpha$  は、

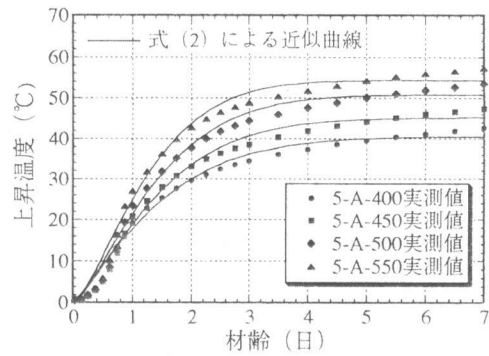


図-3 式(2)による近似結果

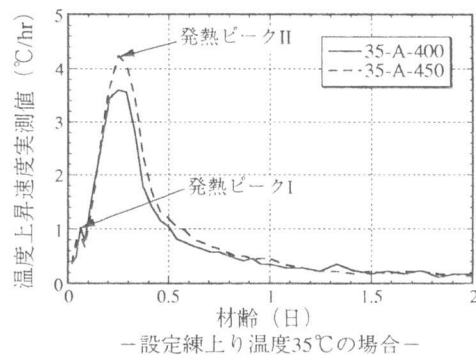
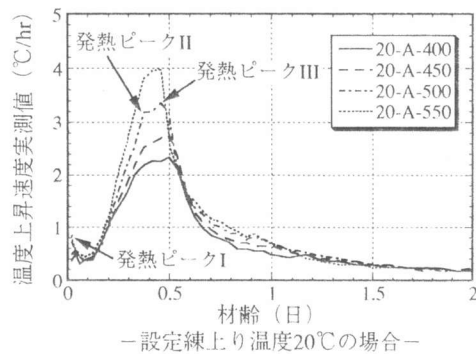
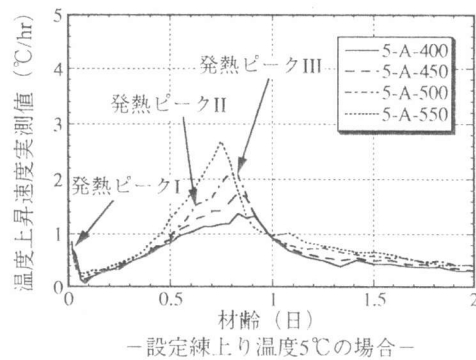


図-4 断熱温度上昇速度実測値

$$\alpha = 3(K_p / R_0)^{1/n} t^{1/n} \quad (4)$$

となり、時間 $t$ の $1/n$ 乗に比例することになる。

図-5は、断熱温度上昇量と時間の関係を対数表示したものであるが、後藤らの結果 [4] とよく一致し、水和初期の誘導期では反応速度は時間の約 $1/2$ 乗に比例し、加速期では時間のほぼ $2$ 乗に比例しているのがわかる。なお、水和反応率が大きくなると単位セメント量にかかわらず温度上昇量がある値を上回ると上昇量は時間の $1/2$ 乗に比例し、拡散律速過程の減速期に移行していくのがわかる。既往の式 (1) と式 (2) は反応速度を単調減少の式で表したもので、図-2 と図-3 に示すように、材齢1日以降の減速期の水和発熱を再現することはできるが、高強度コンクリートの初期の断熱温度上昇、すなわち加速期の水和発熱を十分には追従できないと考えられる。

### 3.3 初期水和を考慮した温度上昇推定式の提案

前項で示したように、水和反応速度を既往の提案式で表すには限界があることが判明した。そこで、ここでは、シリケート相の加速期と減速期の水和反応速度を考慮した断熱温度上昇推定式について検討を行った。

図-4から、断熱温度上昇曲線は概ね極大値前後の加速期と減速期の二つの曲線に近似できることがわかる。図-6は、断熱温度上昇速度の極大値以降での減速期の断熱温度上昇曲線を式 (1) で近似した結果を示したもので、式 (1) は材齢が1日程度経過すると、実測値をほぼ近似することができ、減速期の発熱性状をよく再現していることがわかる。

図-7は、断熱温度上昇試験の実測値 $T$ と、図-6に示した式 (1) に基づく推定値 $Q$ との比 ( $T/Q$ ) を示したもので、 $T/Q$ はごく初期に極小値があり、その後急速に1に近づき、材齢が1日以降の減速期では前述のようにほぼ1に収束する。材齢1日までの $T/Q$ を近似すると、関数  $f(t) = 1 - e^{-\phi t^2}$  が得られる。この関数  $f(t)$  は、時間 $t$ が微小のとき  $f(t) \cong \phi t^2$  となり、加速期の断熱温度上昇速度と同じく時間の2乗に依存することから、加速期の水和発熱性状を表していると言える。

以上の結果より、加速期および減速期の発熱特性を考慮した断熱温度上昇推定式としては、式 (1) に  $f(t) = 1 - e^{-\phi t^2}$  を乗じた次式が得られる。

$$Q(t) = (1 - e^{-\phi t^2}) Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma t}) \quad (5)$$

ここで、 $\phi$ ：加速期の温度上昇速度定数。式 (5) による推定値は実測値とほぼ一致するが、材齢が進むに従い実測値との誤差が生じる結果となったため、式 (5) に定数項 $\delta$ を加えて式 (6)

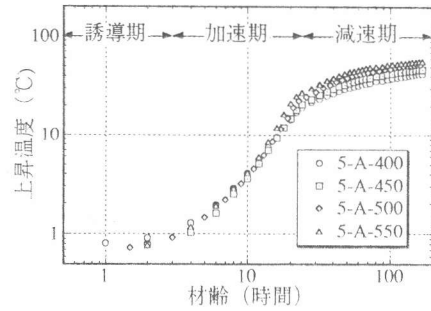


図-5 断熱温度上昇試験結果 (対数表示)

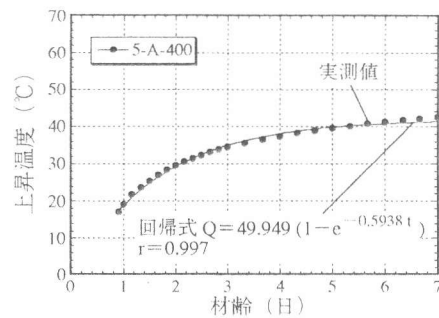


図-6 断熱温度上昇曲線の近似結果 (材齢1日以降)

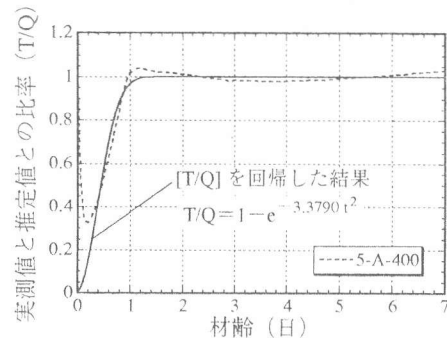


図-7 実測値/推定値の近似結果

とし、実測値との適合性の向上を図った。

$$Q(t) = (1 - e^{-\phi t^2}) Q_{\infty}' \{ (1 - e^{-\gamma t}) + \delta \} \quad (6)$$

ここで、 $Q_{\infty}'$ は終局断熱温度上昇量に関する項で、 $Q_{\infty}' = Q_{\infty}'(1 + \delta)$ となる。各ケースの実測値に対して、式(6)による近似結果の一例を図-8に示す。また、各ケースに対して得られた定数 $\phi$ 、 $Q_{\infty}'$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ を表-6に示す。いずれのケースも相関係数がほぼ0.999で、式(6)によって良好な近似結果が得られていることがわかる。

### 3.4 各定数に対する重回帰分析

表-6に示した式(6)における各定数 $\phi$ 、 $Q_{\infty}'$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ と、打込み温度実測値 $T_p$ ( $^{\circ}\text{C}$ )、単位セメント量 $C$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、混和剤量 $Ad$ ( $C$ に対する%)との関係の一例を図-9に示す。図-9によると、各定数は $T_p$ 、 $C$ 、 $Ad$ との相関性があると考えられる。ただし、同一条件下での試験を繰返し実施しておらず、これら

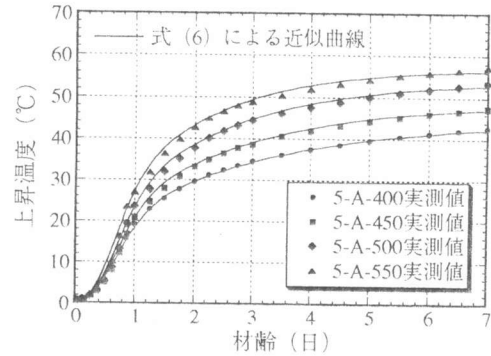
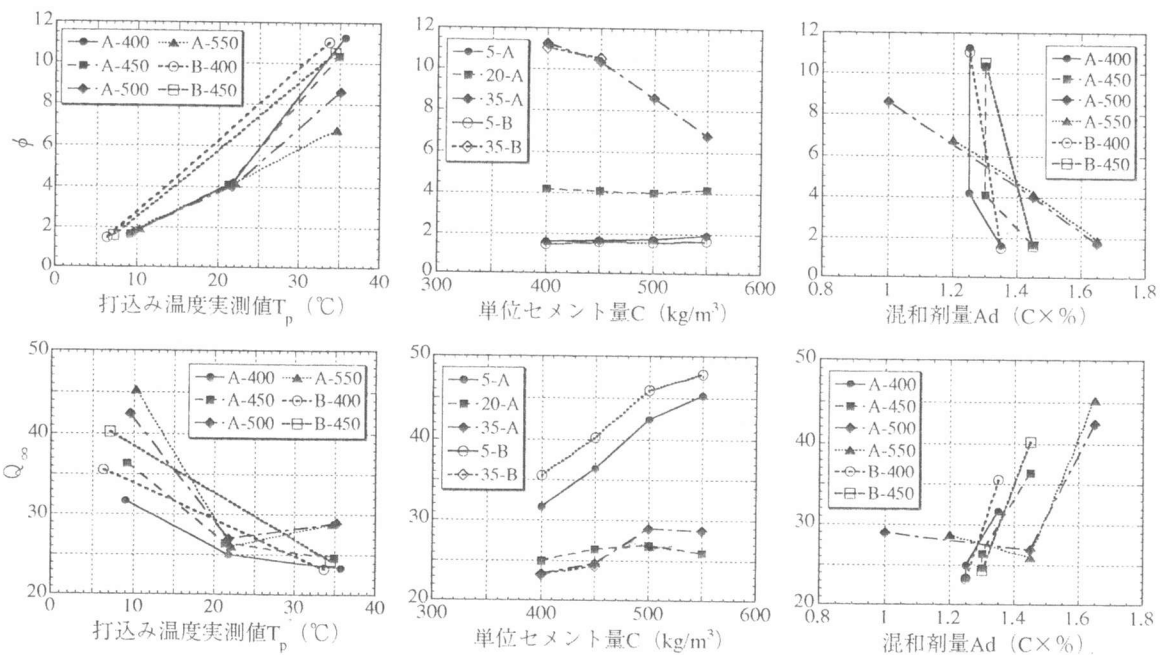


図-8 式(6)による近似結果

表-6 式(6)による近似結果

ケース No.	打込み温度実測値 ( $^{\circ}\text{C}$ )	式(6)における定数				相関係数 r
		$\phi$	$Q_{\infty}'$	$\gamma$	$\delta$	
5-A-400	9.01	1.6082	31.587	0.3725	0.4100	0.999
5-A-450	9.16	1.6803	36.381	0.4379	0.3405	0.999
5-A-500	9.60	1.7188	42.388	0.4967	0.2774	0.999
5-A-550	10.26	1.9001	45.235	0.5856	0.2628	0.999
20-A-400	21.75	4.1881	24.932	0.4571	0.7798	0.999
20-A-450	21.25	4.0815	26.389	0.5132	0.8298	0.999
20-A-500	21.72	3.9862	26.877	0.5231	0.9630	0.999
20-A-550	22.06	4.1504	25.960	0.5220	1.1656	0.999
35-A-400	35.75	11.2470	23.306	0.5504	0.8975	0.999
35-A-450	34.93	10.3430	24.619	0.6077	0.9578	0.999
35-A-500	35.20	8.5908	28.898	0.6005	1.0099	0.999
35-A-550	34.70	6.7591	28.731	0.6220	1.1195	0.998
5-B-400	6.31	1.4872	35.516	0.3606	0.2450	0.999
5-B-450	7.12	1.5941	40.232	0.4273	0.2027	0.999
5-B-500	7.12	1.5626	45.942	0.4548	0.1890	0.999
5-B-550	7.18	1.6547	47.856	0.5165	0.2241	0.999
35-B-400	33.70	11.0360	23.255	0.5668	0.9079	0.999
35-B-450	34.45	10.5250	24.281	0.6095	0.9916	0.999

表中の $\phi$ 、 $Q_{\infty}'$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ は材齢 $t$ (日)における上昇温度 $Q(t)$ ( $^{\circ}\text{C}$ )を求めるときの数値、また、打込み温度実測値は試験開始時の試料の温度を表す。



図中の凡例は、20-Aの場合  $T_p$ が $20^{\circ}\text{C}$  混和剤がA社を、A-500の場合 混和剤がA社  $C$ が $500\text{kg}/\text{m}^3$ を表す。

図-9 式(6)の各定数と打込み温度実測値・単位セメント量・混和剤量との関係 ( $\phi$ と $Q_{\infty}'$ の例)

の交互作用と誤差との分離ができないため、 $T_p$ 、 $C$ 、 $Ad$ のみを独立変数として、式(6)における各定数に対して変数減少法ならびに変数増加法 ( $F_{in}=F_{out}=2$ ) による重回帰分析を行った。結果を表-7に示す。いずれの手法を用いても同じ結果となり、次式が得られた。

$$\phi = -2.8525 - 0.0174 \times C + 0.3611 \times T_p + 6.2582 \times Ad \quad (7)$$

$$Q_{\infty}' = 17.940 + 0.054 \times C - 0.566 \times T_p \quad (8)$$

$$\gamma = -0.1143 + 0.0006 \times C + 0.0073 \times T_p + 0.1592 \times Ad \quad (9)$$

$$\delta = 0.0996 + 0.0276 \times T_p \quad (10)$$

これら4式による定数の推定値と表-6に示した定数とを比較して、図-10に示す。図において、いずれの定数も若干のばらつきはあるものの、式(6)の各定数は、打込み温度、単位セメント量および混和剤量により概ね推定できると判断される。ただし、今後はより多くのデータに対する適用性検討が必要である。

#### 4. 結論

高ビーライト系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に基づき、ごく初期の材齢におけるセメントの水和反応による発熱特性を考慮した温度上昇推定式を提案した。提案式の各定数は、打込み温度実測値、単位セメント量および混和剤量が与えられれば求めることができ、これらの定数を用いた断熱温度上昇曲線は概ね実測値を再現することが可能となった。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕、1991
- 2) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書、(社)日本コンクリート工学協会、1985
- 3) 加藤 和巳・沢木 省一郎・深谷 泰文：高炉セメントの断熱温度上昇に及ぼすせつこうの影響、セメント・コンクリート論文集、pp.72-77、1989
- 4) 後藤 孝治・魚本 健人：エーライトの水和反応速度、セメント・コンクリート論文集、pp.40-45、1993

表-7 重回帰分析結果

式(6)の定数	重回帰係数				重回帰式に対する分散比 $F_0$	相関係数 $r$
	切片	単位セメント量 $C$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	打込み温度実測値 $T_p$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	混和剤量 $Ad$ ( $\text{C}\times\%$ )		
$\phi$	-2.8525	-0.0174	0.3611	6.2582	89.96**	0.975
$\phi$ のF値		14.05	139.22	7.91		
$Q_{\infty}'$	17.940	0.054	-0.566	————	29.17**	0.892
$Q_{\infty}'$ のF値		9.54	43.77	0.61		
$\gamma$	-0.1143	0.0006	0.0073	0.1592	43.62**	0.950
$\gamma$ のF値		15.98	63.87	5.77		
$\delta$	0.0996	————	0.0276	————	69.49**	0.915
$\delta$ のF値		1.25	69.49	0.05		

\*は有意水準5%で、\*\*は有意水準1%で有意差ありを意味する。  
 ———は変数が棄却されたことを意味する。

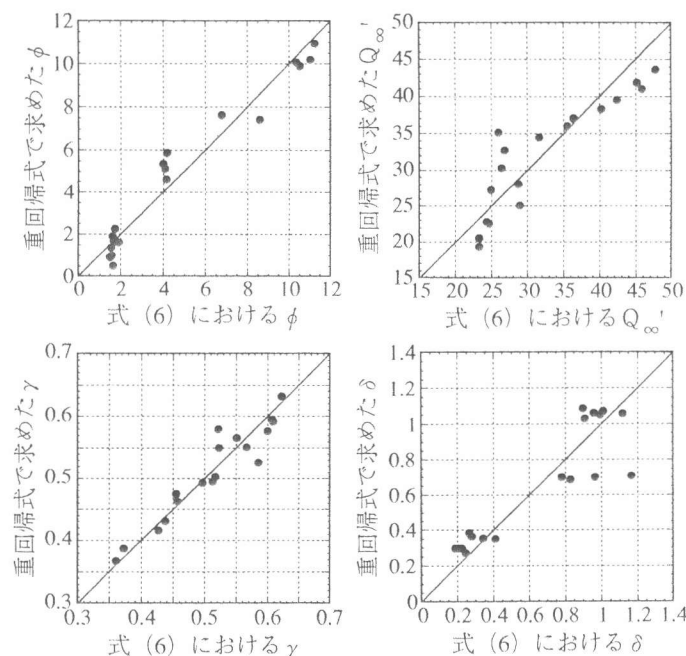


図-10 式(6)における各定数と重回帰式で求めた定数との比較