

論文

[1158] 水和熱による温度上昇の推定に関する基礎的研究

正会員 〇田中敏嗣 (日本セメント㈱中央研究所)
 正会員 下山善秀 (日本セメント㈱中央研究所)
 正会員 富田六郎 (日本セメント㈱中央研究所)
 正会員 西岡耕一郎 (日本セメント㈱中央研究所)

1. はじめに

マスコンクリートにおいて温度ひびわれの問題を検討するためには、コンクリートの発熱特性を把握する必要がある¹⁾。コンクリートの発熱特性は、実際に現場で使用する材料および配合を用いたコンクリートの断熱温度上昇試験を行って確認しているのが現状である。

この様な試験によらず、間接的に断熱温度上昇を推定する方法はいくつか提案されている。これらは、断熱温度上昇式の実験定数をセメントの種類及び単位セメント量別に予め求める方法とセメントの水和熱を基に計算する方法とに大別できる。前者については数多くの研究が行われている²⁾。一方、後者の方法については幾つかの検討例^{3) 4) 5)}が報告されているが、さらに検討を行う必要があると考えられる。

そこで本研究は、温度依存性を考慮したセメントの水和熱から、コンクリートの断熱温度上昇の実用的な推定法を確立することを目的として実施した。すなわち、発熱レベルの異なるセメントについて環境温度を変化させた場合の水和熱の測定結果から、水和反応の温度依存性を評価し、これを考慮した比較的精度のよいコンクリートの断熱温度上昇の推定方法について検討したものである。

2. 解析方法

図-1に実験および解析の流れを示す。実験および解析は以下の通りである。

2.1 セメントの水和熱の測定

水和環境温度 θ を変化させた場合のある時間 t の水和熱 $H(t)$ の測定を行い、結果を曲線回帰する。回帰させる曲線にはいくつかの種類があるが、本研究では $H(t) = H_0 (1 - \exp(-\alpha t))$ を用いた。

回帰曲線の定数 H_0 および α と θ との関係を求めることにより、水和反応の温度依存性の評価を行う。測定方法は、3.2 ①に示す通りである。

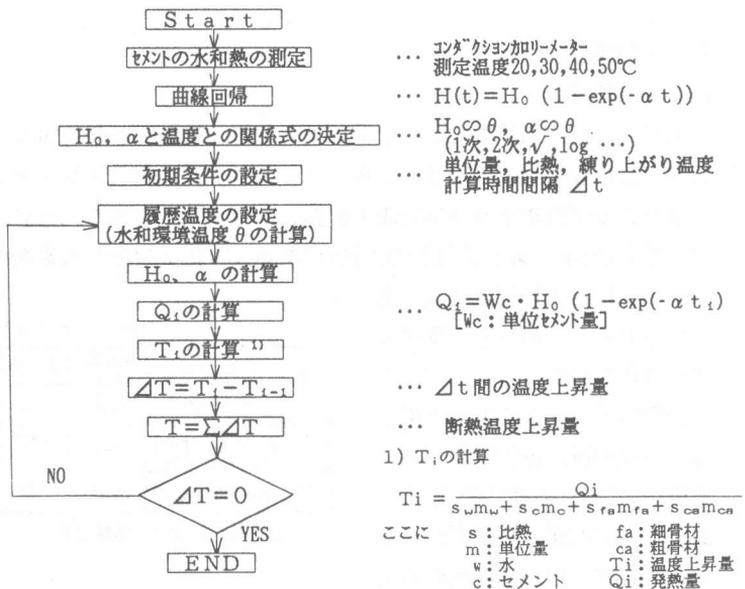


図-1 実験および解析の流れ

2.2 使用材料の比熱の測定

材料によっては比熱の温度依存性が無視できない場合があるので、これを確認するために、使用材料の比熱の測定を行う。測定方法は、3.2 ②に示す通りである。

2.3 初期条件の設定

推定計算に必要な条件、すなわち、使用材料の単位量(kg/m³)、2.1で求めたH₀およびαとθとの関係式、2.2で求めた比熱、練り上がり温度および計算時間間隔Δtの入力を行う。

2.4 コンクリートの断熱温度上昇量の計算方法

ある時間t_i(=t_{i-1}+Δt)の履歴温度θ_iにおけるH₀およびαを求め、セメントの発熱量Q_iを計算する。次に、Q_iを構成材料の熱容量(比熱×質量)で除して時間t_iの温度上昇量T_iを計算する。次に温度上昇量ΔT=T_i-T_{i-1}を計算し、ΔT=0となれば計算を終了する。ΔT≠0の場合は、平均的な履歴温度を与えらる以下の方法で次のステップすなわちt_{i+1}の履歴温度を設定して同様にT_{i+1}の計算を行う。

①計算開始時の環境温度(θ₀)と現時点の温度(T_i+θ₀)の平均値

$$[\theta_{i+1} = \{\theta_0 + (T_i + \theta_0)\} / 2]$$

②1ステップ前の平均環境温度((θ_i+θ_{i-1})/2)と現時点の温度(T_i+θ₀)の平均値

$$[\theta_{i+1} = \{(\theta_i + \theta_{i-1}) / 2 + (T_i + \theta_0)\} / 2]$$

③現時点の環境温度(θ_i)に1/2ΔTを加えた温度

$$(\theta_{i+1} = \theta_i + 1/2\Delta T)$$

履歴温度の設定方法は、推定結果に影響を及ぼすので、実際の温度履歴をよく表現するものを選択する必要がある。本研究では暫定的に③を用いた。

3. 実験概要

3.1 使用材料

セメントは、高発熱および低発熱型として、それぞれ普通ポルトランドセメント(N)およびスラグ高混和セメント(S)を用いた。スラグ高混和セメントとは、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を80%内割で置換したセメントである。なお、高炉スラグ微粉末には刺激剤としてSO₃量がスラグ重量の2.5%になるように天然無水石膏を内割で添加した。

表-1に使用したセメントおよび高炉スラグ微粉末の物理化学的性質を示す。

表-1 セメントの物理化学的性質

記号	種類	粉末度 (cm ² /g)	比重	塩基度	ガラス化率	水和熱(cal/g) ¹⁾	
						7日	28日
N	普通セメント	3260	3.13	-	-	77.1	90.4
S	スラグ高混和セメント (N:Sg=8:2)	3720	2.97	-	-	46.6	53.8
SG	高炉スラグ微粉末	3780	2.94	1.87	93.1	-	-

1) JIS R 5201 溶解熱法

細骨材は、コンクリート用として富士川産川砂(70%)と木更津産山砂(30%)の混合砂(比重2.60, FM2.86, 吸水率1.66%)

を、粗骨材は青梅産硬質砂岩系

碎石(比重2.64, FM6.77, G_{max}=20mm, 吸水率0.87%)を用いた。混和剤は、遅延形AE減水剤(主成分:リグニンスルホン酸塩化合物)をセメント量の0.25%添加した。

3.2 熱特性試験条件および方法

表-2に熱特性試験条件および方法を示す。測定した熱特性は、セメントの水和熱、使用材料の比熱およびコンクリートの断熱温度上昇である。以下に試験方法について述べる。

表-2 実験計画

使用材料			コンダクションカロリメータ				比熱		コンクリート	
セメント	混和剤 (%)	W/C (%)	測定温度				30~80℃	単位セメント量		
			20℃	30℃	40℃	50℃		250	350	
Nセメント	0	50	○	○	○	○	○	○		
		60		○						
	0.25	50		○						
		60		○				○	○	
Sセメント	0	50	○	○	○	○	○	○		
		60								

① セメントの水和熱の測定方法

水和熱の測定には、伝導熱量計

(コンダクションカロリメータ：溶解熱法とは異なり、注水時から発熱量を連続的に測定できる装置)を使用し、測定時間は発熱がほぼ安定する96時間とした。水和環境温度は20,30,40,50℃とし、混和剤の添加率を0および0.25%、W/Cを50および60%とした。水和熱に及ぼす混和剤およびW/Cの影響はNセメントの水準で調べた。

② 材料の比熱の測定方法

比熱は、示差走査型熱量計(DSC: Differential Scanning Calorimeter)を用いて測定した。試料は、細骨材および粗骨材については100℃の乾燥炉でセメントペーストの場合は真空乾燥炉で24時間乾燥させた後、乳鉢で粉状にしたものを用いた。セメントペーストのW/Cは、60%とした。セメントペーストの比熱測定は、材令7日で行った。

③ コンクリートの断熱温度上昇試験方法

断熱温度上昇量を変化させるために、単位セメント量を250, 350kg/m³とした。断熱温度上昇試験に用いたコンクリートの配合を表-3に示す。

断熱温度上昇試験は、空気循環式の断熱温度上昇試験装置を用いて行い、試料容量は43ℓとした。また、測定は昇温量が0.2℃/日以下となるまで行った。

表-3 コンクリートの配合

配合名	設定スランブ(cm)	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュコンクリートの性質				
					水 W	セメント C	スラグ slag	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	
コンクリート	N-250-0	—	60	48	—	150	250	0	961	1057	0	1.0	1.0	21.9
	N-250-0.25	6.5	60	48	4.0	150	250	0	911	1002	0.25	5.8	4.7	21.2
	N-350-0.25	—	60	50	—	190	350	0	882	895	0.25	21.0	2.0	20.9
	S-250-0	—	60	48	—	150	50	200	959	1050	0	1.0	1.0	20.8

4. 結果および考察

4.1 セメントの水和熱曲線の回帰結果

水和熱曲線を最小2乗法で回帰した結果を、表-4に示す。相関係数(r)は0.997~0.953の範囲にあり全体として良い相関を示した。これより、つぎのことが考察される。

① H₀(cal/g)およびαは、環境温度が高くなるほど大きくなる傾向が認められる。

② 水和熱に及ぼすW/Cの影響はほとんどないことが報告されているが^{4) 6)}、本研究でもその影響はほとんど認められなかった。

また、混和剤を用いた場合にH₀の値が100前後の大きな値を示したが、これは発熱が比較的緩やかに生じ、測定終了時ではまだ平衡状態に到達していなかった状況で推定したことが原因と考えられる。

表-4 セメントの水和熱の曲線回帰結果

使用材料			水和環境温度 (°C)				
セメント	混和剤 (%)	W/C (%)	係数				
			20	30	40	50	
N	0	50	H ₀	72.97	69.76	73.89	83.52
			α	0.7134	1.178	1.810	2.240
	60	H ₀	-	72.21	-	83.34	
		α	-	0.9962	-	2.157	
0.25	50	H ₀	-	103.6	-	96.34	
		α	-	0.4784	-	0.9639	
60	H ₀	-	101.2	-	-		
	α	-	0.478	-	-		
S	0	50	H ₀	48.72	44.78	51.54	62.40
			α	0.3848	0.7638	1.347	1.566
			r	0.988	0.967	0.955	0.967

回帰式: $H(t) = H_0 (1 - \exp(-\alpha t))$

4.2 使用材料の比熱測定結果

表-5に、実験に用いた材料およびセメントペーストの比熱の測定結果を示す。なおセメント(粉体)以外の値は、乾燥中に逸散した水分を自由水と考え、その水量に相当する比熱の補正を行った結果である。本試験に用いた細骨材およびセメントペーストは、他の材料と比較して比熱の温度依存性が高いことが認められた。細骨材および粗骨材の値は、文献値⁷⁾と比較的よく一致している。

セメントペーストの比熱は水和の進行と共に減少することが知られているが³⁾、本研究においてもその傾向が認められた。

表-5 比熱の測定結果

材料名	W/C (%)	材令 t (日)	温度 θ (°C)				比熱 Cp = aθ + bt + c ³⁾			
			20 ²⁾	35	60	85	a	b	c	
水 ¹⁾	-	-	0.999	0.999	1.000	1.000	0	0	1.00	
セメント(粉体)	-	-	N	0.154	0.156	0.158	0.161	0.00010	0	0.1523
			S	0.157	0.160	0.157	0.164	0.00008	0	0.1555
細骨材	-	-	0.174	0.181	0.199	0.209	0.00056	0	0.1627	
粗骨材	-	-	0.182	0.181	0.173	0.173	-0.00016	0	0.1853	
セメントペースト	-	N	60	0	0.473	—	—	—	—	—
			7	0.418	0.441	0.446	0.495	0.00118	-0.00786	0.4493
		S	60	0	0.475	—	—	—	—	—
			7	0.436	0.465	0.418	0.566	0.00200	-0.00557	0.4350

- 1) 日本化学会: 化学便覧(1966)、丸善、P.157
- 2) 計算値 : セメントペースト; 20°Cの水とセメントの比熱と混合割合から計算で求めた。
 その他 ; 温度と比熱を1次関数で近似し、外挿法で求めた。
- 3) 計算に用いた座標 : セメントペースト; (θ, t) = (20, 0), (20, 7), (85, 7)、t : 材令
 その他 ; θ = 35, 60, 85°C

4.3 解析結果

H₀およびαと水和環境温度θの関係を求めることにより、セメントの水和反応の温度依存性を評価した。H₀およびαと水和環境温度θの関係は、様々な場合が考えられるが、H₀、αとθは単純に1次関係と仮定して、表-4よりH₀、αとθの関係式を求めた。その結果を、図-2に示す。これより、H₀およびαと環境温度θの関係はほぼ直線で近似できることが認められた。

また、4.2の結果から使用材料の比熱には温度依存性のあることが認められたので、これを考慮して検討を行う。表-5に、比熱と時間および温度の関係は1次関数であると仮定して係数を求めた結果を示す。

これらの関係を用いて、まず断熱温度上昇の推定結果に及ぼす水和熱測定用試料のW/Cの影響を配合条件N-250-0で検討した。計算時間間隔Δtは、1時間とした。

図-3に推定値に及ぼす水和熱測定用試料のW/Cの影響の検討結果を示す。これより推定結果に及ぼす水和熱測定用試料のW/Cの影響は、W/C=50~60%の範囲ではほとんどないと考

えられる。

このことは、ある一定のW/C（例えば50%程度）で行ったセメントの水和熱測定結果を用いて、幅広い推定計算が可能であることを示していると考えられる。

したがって、以下の計算はW/C=50%の水和熱の結果を用いて行った。

次に、コンクリートの断熱温度上昇を推定した結果を図-4（混和剤なし）、5（混和剤混入）に示す。これらより、推定値は実測値の昇温傾向を全体的によく表現していることが認められる。

N-250-0のように発熱速度が比較的大きい配合の場合に、水和初期において推定値が実測値と比較してかなり大きくなっている。これは、2.4の③の方法

では履歴温度を高めめに推定しており、セメントの発熱量の推定値が、実際の値より大きくなるためと考えられる。そこで、N-250-0の場合について履歴温度の設定方法について2.4で述べた①および②の方法で検討した。②の方法は③の方法とほぼ同じ推定値を与えたので、①の方法で計算した結果を図-6に示す。これより、適切な履歴温度を設定すれば、実測値と推定値は全体的によく一致することが認められる。

セメント	W/C (%)	混和剤 (%)	$H_0 (=A\theta + B)$			$\alpha (=C\theta + D)$		
			A	B	r	C	D	r
N	50	0	0.3578	62.51	0.780	0.05214	-0.3400	0.997
		0.25	-0.363	114.49	1.00	0.02428	-0.2499	1.00
S	50	0	0.5565	55.52	1.00	0.05804	-0.7450	1.00
		0.25	0.4780	35.13	0.817	0.04127	-0.4290	0.987

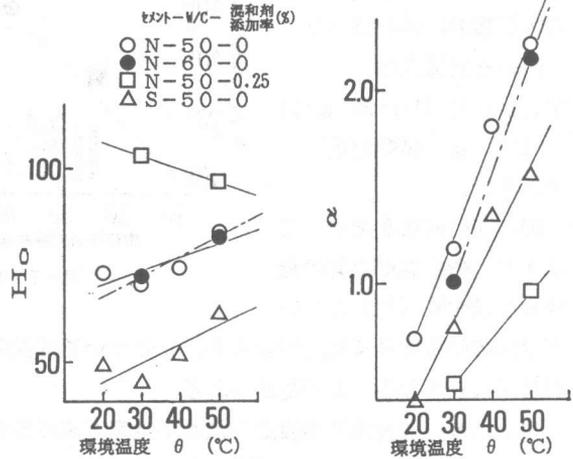


図-2 環境温度と H_0 および α の関係

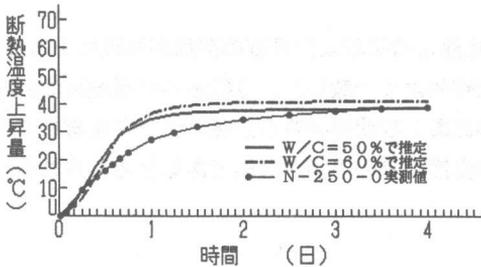


図-3 推定値に及ぼす水和熱測定用試料のW/Cの影響

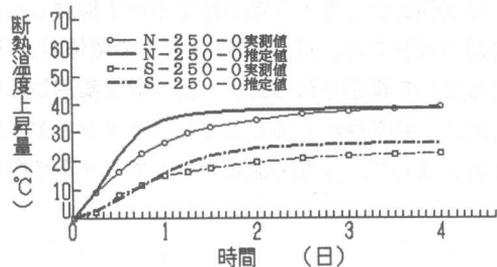


図-4 コンクリートの断熱温度上昇量の推定結果（混和剤なし）

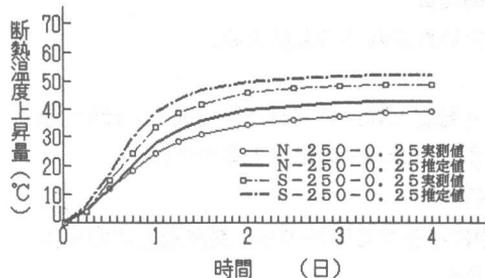


図-5 コンクリートの断熱温度上昇量の推定結果（混和剤混入）

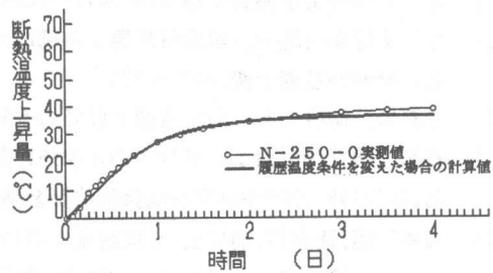


図-6 コンクリートの断熱温度上昇量の推定結果

つぎに、コンクリートの断熱温度上昇の実測値と推定値の回帰曲線を求めそれらの定数の比較を行った。

用いた回帰式は、
 $T(t) = K (1 - \exp(-\alpha t))$
 [K, α : 実験定数]
 である。

図-7に結果を示す。これより、断熱温度上昇の最終値を示すK (°C) について

では比較的精度良く推定できるが、 α については前記③の履歴温度の設定方法では推定値のほうが若干大きくなることが認められる。

以上より、履歴温度の設定方法が本推定方法の重要な要因の1つであることが確認できた。今後、セメントの水和熱および様々な配合のコンクリートの断熱温度上昇のデータを蓄積し、適切な履歴温度の設定方法について一層検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究は、セメントの水和熱からコンクリートの断熱温度上昇を推定する方法を確立することを目的に、発熱レベルの異なるセメントについて環境温度を変化させた場合の水和熱の測定結果から、水和反応の温度依存性を評価し、これに加え比熱の温度依存性の両者を考慮したコンクリートの断熱温度上昇の推定方法について検討した。

今回の検討では、 H_0 および α と θ の関係および比熱と時間および温度の関係が単純に1次関係と仮定して推定を行ったが、推定値と実測値は比較的よく一致した。今後さらに履歴温度の設定方法について検討するとともに、セメントの水和熱および使用材料の比熱のデータを蓄積すること等によって、任意の配合のコンクリートの断熱温度上昇の予測が可能であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひびわれ制御指針
- 2) たとえば塚山隆一、宮地日出男：各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇、第25回セメント技術年報、p220~224
- 3) 斎藤豊、榊原弘幸、内田清彦：セメントの水和熱と温度上昇、第38回セメント技術大会、p66~69
- 4) 長瀬重義、井上毅：セメントの水和熱に起因するマスコンクリートの温度上昇の予測、第14回セメント・コンクリート研究討論会講演概要集、P47~50
- 5) 鈴木康範、辻幸和、前川宏一、岡村甫：コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化、土木学会論文集No.414/V-12 1990-2、P155~164
- 6) 柳田力、太田実：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質に関する一試験、コンクリート工学 Vol.15 No.4 1977、p20~26
- 7) 岡田清：コンクリート工学ハンドブック(1981)、朝倉書店、p558

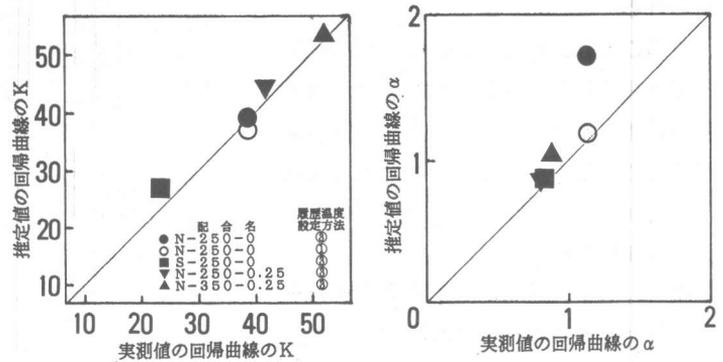


図-7 実測値および推定値の回帰曲線定数の比較