

V-197 セメントの水和熱からのコンクリートの断熱温度上昇量の予測

東京工業大学 井上 毅

東京工業大学 長滝重義

1. まえがき

マスコンクリートの温度上昇を予測することは、温度ひびわれを制御する上で極めて重要である。現在、温度上昇の予測は、コンクリートの断熱温度上昇試験に基づいて行われているが、この断熱温度上昇試験は、装置の大型化や測定期間が長い等の問題点がある。本来コンクリートの温度上昇はセメントの水和熱に起因するため、水和熱からの予測が可能であると考えられ、また、この手法が確立されればセメントの水和熱はカロリーメーターによって容易に、しかも短時間で測定結果が得られる等、メリットが大きい¹⁾。そこで本研究では、セメントの水和熱からコンクリートの断熱温度上昇を予測する手法を導き、断熱温度上昇の実測値と比較検討した。

2. 予測式の誘導

一般にセメントの水和熱試験は、養生温度一定のもとで行われるため、測定される水和熱は断熱状態における水和熱ではない。そのため、図-1に示すように、発熱速度は養生温度が高くなるほど、そのピークは大きくなり、ピークの現れる時間は養生温度が高いほど早くなる点に着目して任意の養生温度および時刻、すなわち断熱状態での発熱速度を求める式を導く必要がある。本研究では発熱速度曲線を最小2乗法によって直線と曲線(指数関数)に分けて近似した。(図-1参照)

養生温度が T のとき、ある時間(t)における発熱速度(h_t)が増加する場合においては、

$$h_t = A + B \cdot t$$

なる式で仮定し、低減する場合は、

$$h_t = C \cdot t^D$$

で近似できると仮定する。ここで、係数 A 、 B ならびに C 、 D は養生温度によって変化するため、養生温度(T)と定数 A および B さらには C および D との関係を最小2乗法で求めると、 A と B は T の2次関数で、 C 、 D は T の指数関数で表すことができると仮定する。この関係を用いれば次のようにして水和熱からの断熱温度上昇の予測が可能となる。

すなわち、初期養生温度(断熱温度上昇試験では練り上がり温度に相当)を T_0 とし、任意の時刻(t_i)における養生温度(T_i)から微小時間(Δt_i)後の発熱速度(h_{ti})は、

$$h_{ti} = A(T_i) + B(T_i) \cdot \Delta t_i \quad (\text{発熱速度が増加の場合}) \quad \text{--- ①}$$

$$A(T_i) = a_A \cdot T_i^2 + b_A \cdot T_i + c_A, \quad B(T_i) = a_B \cdot T_i^2 + b_B \cdot T_i + c_B$$

(a_A , b_A , c_A および a_B , b_B , c_B は定数)

あるいは

$$h_t = C(T_i) \cdot \Delta t_i^D(T_i) \quad (\text{発熱速度が低減の場合}) \quad \text{--- ①'}$$

$$C(T_i) = a_C \cdot T_i^b, \quad D(T_i) = a_D \cdot T_i^b \quad (a_C, b_C \text{ および } a_D, b_D \text{ は定数})$$

ここで、 $A(T_i)$ 、 $B(T_i)$ および $C(T_i)$ 、 $D(T_i)$ は養生温度(T_i)を変数とする係数で表される。

h_{ti} が求まると、微小時間(Δt_i)に生ずる発熱量(ΔH_{ti})は、

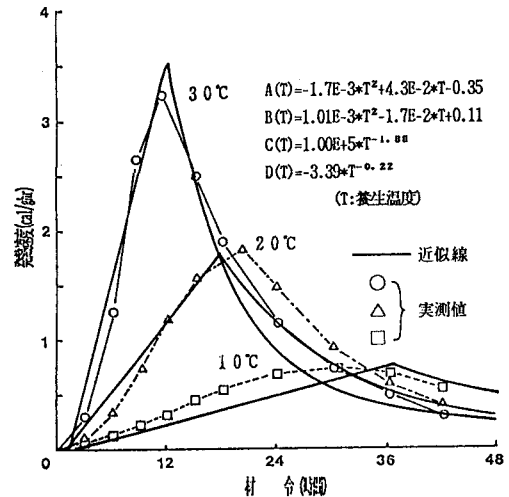


図-1 各養生温度における発熱速度の経時変化

$$\Delta H_{ti} = \int h_{ti} dt \quad \text{--- ②}$$

$$\text{より求まる。よって、} t \text{ 時間後に生ずる積算発熱量} (H_{ti}) \text{ は、} H_{ti} = \sum \Delta H_{ti} \quad \text{--- ③}$$

となる。この H_{ti} からコンクリートの断熱温度上昇量 (ΔT_i) は、④式²⁾で求められ、

$$\Delta T_i = [C / (\rho \cdot c)] \cdot H_{ti} \quad \text{--- ④}$$

(C : 単位セメント量 ρ : コンクリートの単位容積質量

C : コンクリートの比熱)

さらに t 時間後の温度 (T_i) は

$$T_i = T_0 + \Delta T_i \quad \text{--- ⑤}$$

となる。この T を①および①' の $A(T_i)$ 、 $B(T_i)$ および $C(T_i)$ 、 $D(T_i)$ を求める式に代入して $A(T_i)$ 、 $B(T_i)$ および $C(T_i)$ 、 $D(T_i)$ の値を決定し、発熱速度が増加にある場合には ①式により、逆に低減する場合には①' 式により h_{ti} を求め、さらに②、③、④および⑤式に順次繰返し代入して計算することにより、 t 時間後の温度 (T_i) が求められる。

3. 実測値との比較

図-1に示す近似式によりコンクリートの断熱温度上昇量を計算し、実測値と比較したものが、図-2である。図-2は $W/C=50\%$ 、 $C=330\text{kg/m}^3$ で練り上がり温度を10, 20, 30℃と変化した時の断熱温度上昇の実測値とその予測値を示している。これより練り上がり温度が10℃の場合、予測値は実測値よりもかなり小さい値となっているが、20℃および30℃の場合、予測値は実測値と比較的によく一致していることがわかる。また、図-3および図-4は上記のコンクリートにセメント重量に対してフライアッシュを20% 置換およびスラグを50% 置換し、練り上がり温度を20℃および30℃と変化した時の実測値と予測値を比較したものである。これより練り上がり温度が20℃の場合、実測値と予測値はよい整合性を示しているが、30℃の場合、予測値は実測値を大きく上回っている。

4. 結論

以上、本研究では3種類程度の養生温度の異なるセメントの発熱速度曲線を実験によって求め、これを直線と曲線で近似し、任意の養生温度および時刻における発熱速度を定式化し、断熱温度上昇を予測する方法を示した。その結果、本方法は、初期養生温度の相違および水和熱試験結果の精度が予測値に影響を及ぼす等の問題を有するものの、水和熱試験結果から断熱温度上昇を予測する手法の一可能性を見出したと考えられる。

【参考文献】

- 1) 内田他: 積算発熱量に基づくセメントの水和発熱速度の定式化と温度上昇の予測, コンクリート工学 Vol.24, No.4, pp.105-113, April 1986
- 2) 塚山他: 各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇, セメント技術年報25, pp.220-224, 1971

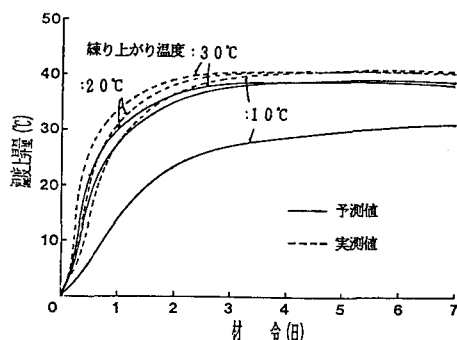


図-2 セメントの水和熱から求めた断熱温度上昇量 (予測値と実測値の比較)

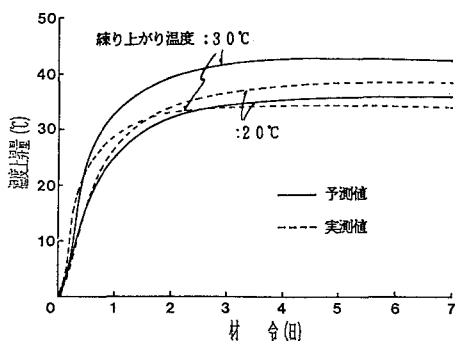


図-3 セメントの水和熱から求めた断熱温度上昇量 (予測値と実測値の比較) (フライアッシュ20%置換)

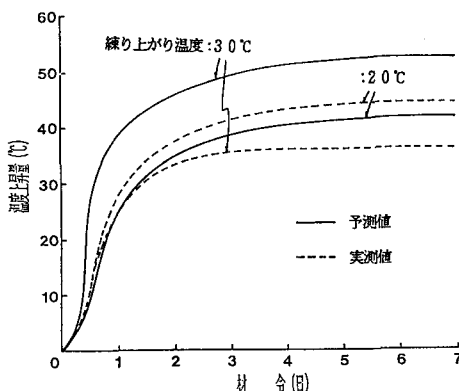


図-4 セメントの水和熱から求めた断熱温度上昇量 (予測値と実測値の比較) (スラグ50%置換)