

V-80 セメントの初期水和発熱過程の数理モデル

舞鶴工業高等専門学校 正会員 岡本寛昭
 舞鶴工業高等専門学校 伊藤直人
 東京都立大学工学部 正会員 國府勝郎
 セメント協会・研究所 高橋 茂

1. まえがき

セメントの初期水和反応に関する情報は、フレッシュコンクリートや若材令コンクリートの挙動を理解するためには極めて重要となる。セメント初期水和の代表的性質は水和発熱速度であり、近年、接水直後からの水和発熱量を精度良く測定できる微量熱量計が開発されている。ポルトランドセメントの水和発熱速度の経時変化は、二つのピークを持つ曲線で表せるが、現在までにこの曲線に対し数理モデルを導入して関数表示した研究は見当たらない。

本研究は、セメント初期水和特性の定量化を目的として、微量熱量計によって測定された水和発熱速度試験結果に双曲線と対数を組み合わせた関数の数理モデルをあてはめて、その適合性を検討し、さらに、この関数を数値積分して得られる累積発熱量と強度の関連についても検討する。

2. セメントの水和発熱速度の数理モデル

一般に、普通ポルトランドセメントの初期水和発熱速度の時刻歴曲線は、図1に示すとおりである[1]。この図は、第一段階のC₃Aによるエトリンガイトの生成、第二段階の誘導期で水和が一時停止し、第三段階のC₃Sによる加速期、第四段階のC₃Aによるモノサルフェートの生成、第五段階の水和減速期に分けられる。

微量熱量計によって測定された水和発熱速度 V_h と経過時間 t の一例を片対数紙にプロットすると図2のようである。現象の定式化については、自然界の一般法則を用いた基礎式より理論的に得られる合理式を適用するか、あるいは、理論的根拠はないが実験結果を忠実に表現することができる実験式を適用するかの二通りの方法がある。本研究では後者により検討した。その結果、この曲線はピークが二つ存在することが特徴であり、これを表すことができる数理モデルとして次の関数を適用する。

$$V_h = a_1 \cdot \operatorname{sech}\left\{b_1 \cdot \log\left(\frac{t}{c_1}\right)\right\} + a_2 \cdot \operatorname{sech}\left\{b_2 \cdot \log\left(\frac{t}{c_2}\right)\right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 a_1 :第一ピークにおける最大発熱速度、 b_1 :第一ピークの上昇率を表す係数、 c_1 :第一ピークに到達する時間、 a_2 :第二ピークにおける最大発熱速度、 b_2 :第二ピークの上昇率を表す係数、 c_2 :第二ピークに到達する時間である。

3. 実験概要

普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比50%のセメントペーストについて、双子型微量熱量計によって、48時間までの発熱速度を自動計測した。環境温度は、20、30、40℃の3水準である。

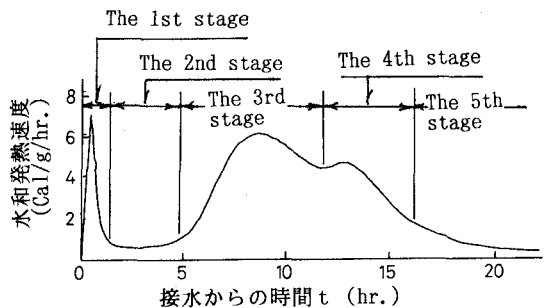


図1 普通セメントの水和発熱速度模式図[1]

4. 曲線あてはめ結果および
累積水和発熱量

(1)式の6個のパラメータ a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 は、発熱速度試験結果から非線形最小二乗法により計算した。発熱速度試験結果および計算結果は、図3に示すとおりである。これより、実験値と計算値は極めてよく合っている。提案した水和発熱速度の数理モデルは、よく適合することが認められる。パラメータと環境温度 T の関係は表1に示すが、発熱速度に及ぼす温度の影響を明確に表している。

(1)式をシンプソン公式により数値積分して得られる累積水和発熱量は図4に示し、これと20℃で水セメント比50%のセメントペースト、モルタルおよびコンクリートの強度の関係は、材令1~10時間の範囲内で、図5に示すとおりである。ほぼ比例関係が認められるが、粉粒体特性が加わるため複雑であり、今後の課題としたい。

表1 パラメータ計算結果

T(℃)	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2
20	3.041	1.764	0.1246	0.657	1.881	12.974
30	3.699	2.118	0.1112	1.186	2.258	9.023
40	4.172	1.889	0.0850	1.915	2.615	6.391

参考文献

[1] 荒井康夫：セメントの材料科学、大日本図書、1984

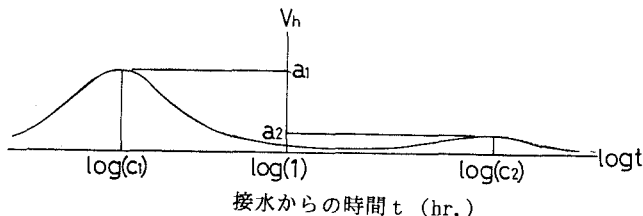


図2 水和発熱速度曲線のモデル化

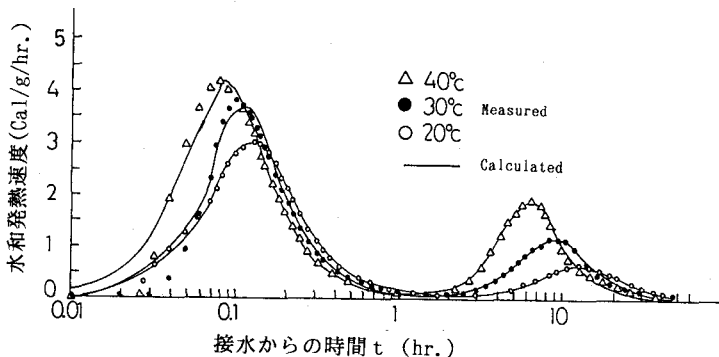


図3 水和発熱速度曲線のあてはめ

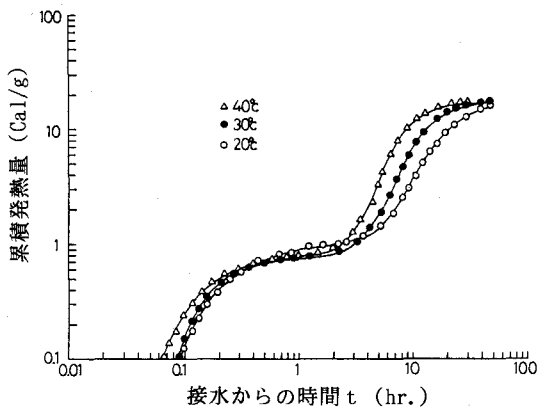


図4 累積水和発熱量

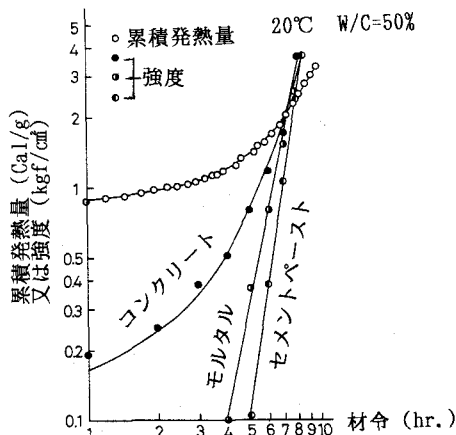


図5 累積水和発熱量と若材令強度の関係