

# 論文 高炉セメントの水和反応モデルの開発および温度ひび割れ発生予測への適用

玄 哲\*<sup>1</sup>・友澤史紀\*<sup>2</sup>・野口貴文\*<sup>3</sup>

**要旨：**高炉セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れの発生を予測するため、高炉セメントの水和反応をセメントと高炉スラグの相互反応として表現したモデルを提案した。本提案モデルを用いることにより、高炉セメントの水和発熱速度およびコンクリートの断熱温度上昇を精度よく推定することができた。また、本提案モデルにより計算された水和率をPowers式に導入することにより、コンクリートの圧縮強度発現性状を精度よく推定することができた。最後に、高炉セメントを用いたマスコンクリート部材の温度ひび割れの発生予測への本提案モデルの適用可能性について検討した。

**キーワード：**温度ひび割れ、高炉スラグ、水和反応モデル、強度発現モデル

## 1. はじめに

マスコンクリートにおいては、水和熱によるコンクリートの温度上昇やそれによる温度ひび割れの発生が大きな問題である。コンクリートの温度上昇を抑制する方法として混合セメントの利用が挙げられる。これまでのコンクリートの温度上昇予測においては、実験からコンクリートの断熱温度上昇曲線を求め、それを表面部のような断熱状態にない部分にも適用することが一般的であった。しかしながら、このような手法では温度上昇だけでなく強度発現に関しても精度よく推定することは困難であると考えられる。前報[1]では、混合セメントをセメント単味と考えた場合の水和反応モデルを利用して、コンクリートの温度上昇および強度発現を予測し、実大コンクリート部材の温度ひび割れの発生について検討した。しかしながら、混合セメントの場合には、実際にはセメント単味の反応とは異なり、混和材とセメントとの相互作用により反応が進む。

本研究では、高炉セメントの反応をセメントと高炉スラグの相互作用による反応機構としてモデル化（以下、混合水和モデル）し、それを用いて高炉セメントの水和発熱速度およびコンクリートの断熱温度上昇を計算した結果と実験結果とを比較検討した。また、コンクリートの強度発現は、水セメント比に加えて混合水和モデルから求められるセメントと高炉スラグの反応率を基にPowers式[2]により計算し、実験結果と比較検討した。さらに、高炉セメントを用いたマスコンクリート部材の温度ひび割れの発生予測への混合水和モデルの適用可能性についても検討した。

## 2. コンクリートの温度ひび割れ予測プロセス

コンクリートの温度ひび割れ予測プロセスを図-1に示す。高炉セメントの反応率は、式(1)により表されるセメントの水和反応速度を示す友澤モデル[3]を応用した方法により計算した。

$$-\frac{d\alpha}{dt} = \frac{3C_w}{\nu \rho r_0^2} \left[ \frac{1}{\frac{1}{k_a \Gamma_0 \alpha^{2/3}} + \frac{\alpha^{-1/3} - (2-\alpha)^{-1/3}}{D} + \frac{1}{k_r r_0 \alpha^{2/3}}} \right] \text{----- (1)}$$

\*1 東京大学工学部、外国人客員研究員、博士（工学）（正会員）

\*2 東京大学教授、工学部建築学科、工博（正会員）

\*3 東京大学助手、工学部建築学科、博士（工学）（正会員）

$\alpha$  : 未反応率、 $\alpha^*$  : 反応率 ( $\alpha^*=1-\alpha$ )、 $\rho$  : セメントの密度  
 $C_w$  : 水和生成物の外側の水の濃度、 $r_0$  : 水和開始時の未反応セメントの粒子径  
 $\nu$  : 水とセメントの反応の化学量論比を質量基準で定めたもの  
 $k_r$  : セメントの化学反応速度、 $k_d$  : 外部皮膜内の拡散係数 ( $k_d=B/\alpha^{1.5}+C\cdot\alpha^3$ )

水和反応モデルの各係数への温度の影響は(2)式により表現でき、各係数の値を表-1に示す。

$$\begin{aligned}
 k_r &= k_{20} \exp[-E/R(1/293-1/T)] \\
 B &= B_{20} \exp[-\beta_1(1/293-1/T)] \\
 C &= C_{20} \exp[-\beta_2(1/293-1/T)] \\
 D &= D_{20} \exp[-\beta_3(1/293-1/T)]
 \end{aligned} \quad \text{----- (2)}$$

$k_{20}, B_{20}, C_{20}, D_{20}$  : 20°Cでの各係数の値、 $E/R, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  : 温度関係定数、 $T$  : 温度(K)

また、圧縮強度と静弾性係数の関係は式(3)に示す友澤・野口式[4]を利用した。

$$E = k_1 \cdot k_2 \cdot 33500 \left( \frac{\sigma_B}{60} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \quad \text{----- (3)}$$

$E$  : 弾性係数(MPa)、 $\sigma_B$  : 圧縮強度(MPa)、 $\gamma$  : 単位容積質量(2.35t/m<sup>3</sup>)、 $k_1=k_2=1$

### 3. 高炉セメントの水和反応モデル

#### 3.1 予測モデル

高炉セメントの場合、その水和発熱はセメント部分と高炉スラグ部分の水和の総和で現される。したがって、セメントと高炉スラグの各反応によって全体の反応速度が表現できると考えられる。高炉スラグそれ自体は潜在水硬性物質であり、刺激作用によって反応が覚醒される。刺激剤としてはNa(OH)<sub>2</sub>、Ca(OH)<sub>2</sub>などが挙げられる。高炉セメントの場合は、セメントの反応によって生成するCa(OH)<sub>2</sub>の濃度増加によって高炉スラグの反応も活発化する。

Ca(OH)<sub>2</sub>量と高炉スラグの反応との関係は戸谷ら[5]によると、Ca(OH)<sub>2</sub>を高炉スラグの15%添加すると高炉スラグの反応は頭打ちになるとしているが、同研究の結果からは、7%添加した場合と15%添加した場合には大きな違いは認められない。また、セメントから生成されるCa(OH)<sub>2</sub>量を鉱物組成ごとに重量比で示すと、エーライト48.7%、ビーライト21.5%であり、逆にフェライトは30.5%のCa(OH)<sub>2</sub>を結合し、高炉スラグは長期的にはその質量の約10%に相当するCa(OH)<sub>2</sub>を結合することができる。以上のことを考慮して本研究では、Ca(OH)<sub>2</sub>が未反応の高炉スラグ量に対して重量比で10%以上あれば高炉スラグが反応するのに十分な刺激剤濃度であると考え、刺激剤濃度を1.0とした。本研究で用いた普通ポルトランドセメントの組成から計算すると、セメントが1g反応するとCa(OH)<sub>2</sub>は0.288g生成し、スラグ1gはCa(OH)<sub>2</sub>0.1gと反応する。

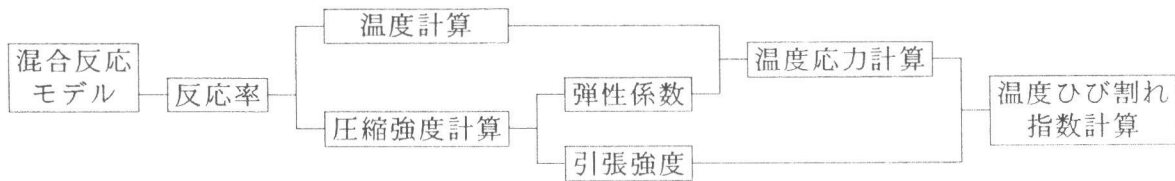


図-1 温度ひび割れ予測プロセス

表-1 セメントの水和反応モデルの各係数

$B_{20}$	$C_{20}$	$D_{20}$	$k_{20}$	$-E/R$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1E-8	8.5E-3	2.9E-10	6.5E-6	-1973	4026	7456	4893

高炉スラグの反応は、初期には初期皮膜が生成するため反応速度が妨げられるが、その後は刺激剤の存在によって反応速度が活発になるものである。したがって、高炉スラグの反応はセメントの水和反応モデルに刺激剤濃度を考慮したモデルで表現できると考えられる。高炉セメント中の高炉スラグの反応モデルを(4)式に示す。

$$S(\alpha_s^*) = \phi(\alpha_s^*) \cdot f(\alpha_s^*) \quad \text{----- (4)}$$

$S(\alpha_s^*)$  : 高炉スラグの反応速度、 $\phi(\alpha_s^*)$  : 有効水酸カルシウム濃度  
 $f(\alpha_s^*)$  : 高炉スラグの水和反応モデル (式(1)と同形式)、 $\alpha_s^*$  : 高炉スラグの反応率

### 3.2 係数の定量化

本研究で用いた高炉セメントの高炉スラグ混入率は42%である。高炉セメント中の高炉スラグの反応速度については、高炉セメントの水和発熱速度試験結果[6]から普通セメントの水和発熱速度を差し引いた残りの部分であると仮定した。水酸化カルシウムの濃度はその時点までのセメントの反応率から求めた。表-2に求めた各係数の値を示す。図-2に高炉セメントの水和発熱速度試験結果と混合水和モデルによる計算値を比較して示すが、両者はよい一致を示している。

### 4. 高炉セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇予測

図-3に混合水和モデルを利用してコンクリートの断熱温度上昇を予測する場合の計算フローを示す。筆者らの既往の研究[6]では高炉セメントを一つのセメント粒子の反応として計算したため、コンクリートの断熱温度上昇を予測する場合、ある反応率以降では反応水量減少モデルを利用する必要があった。しかしながら、混合水和モデルを用いた場合には、反応水量の減少を考慮する必要はなく、図-4に示すように既往の断熱温度上昇実験結果[1]を精度よく表現することができた。これは、高炉スラグの粒径が $4.35 \mu\text{m}$ であり、粒径 $6.18 \mu\text{m}$ の普通セメントと混合すると充填率がよくなり、各粒子の利用可能な水が増大するためであると考えられる。以上のことから、混合水和モデルは高炉スラグの混入率が様々な場合におけるコンクリートの温度上昇を予測することが可能であると考えられる。

表-2 高炉スラグの水和反応モデルの各係数

$B_{20}$	$C_{20}$	$D_{20}$	$k_{20}$
$7.9\text{E-}9$	$0.38$	$7.2\text{E-}12$	$1\text{E-}5$
$-E/R$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
$2585$	$0$	$6000$	$3049$

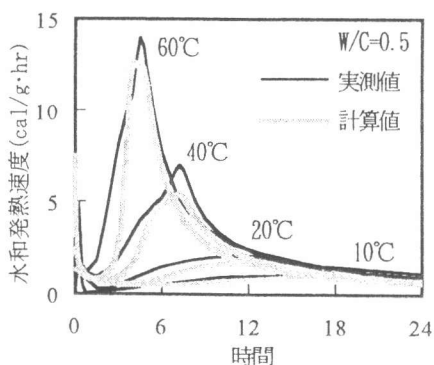


図-2 高炉セメントの水和発熱速度

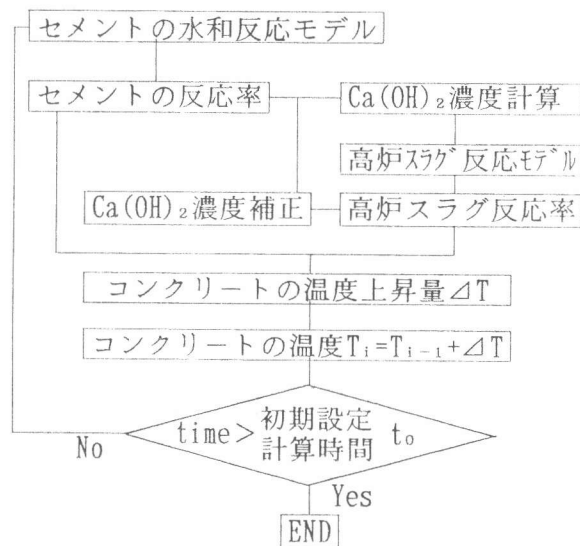


図-3 高炉スラグ反応モデルによるコンクリートの温度予測計算フロー

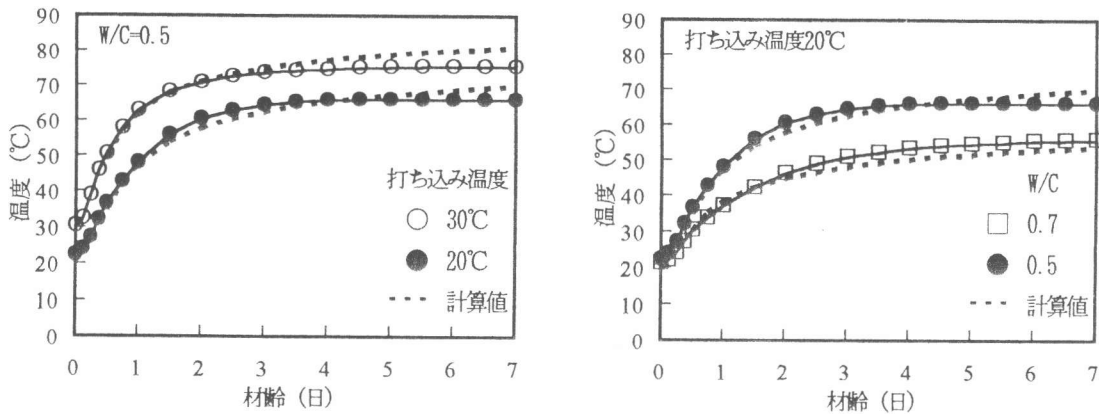


図-4 高炉セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇

### 5. 反応率と圧縮強度

本研究で検討した圧縮強度の予測式は前報[1]と同様にコンクリートの強度発現をセメントの反応率の関数で表現したPowersのモデル[2]を使用した。Powersのモデルを(5)式に示す。

$$f = AX^n \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$X = \frac{(\text{gel volume})}{(\text{gel volume} + \text{capillary space})} = \frac{2(1-\alpha)}{1/C_v - \alpha} \quad \text{-----} \quad (6)$$

$$C_v = 1/\{1 + \rho \cdot (W/C)\} \quad \text{-----} \quad (7)$$

f: 圧縮強度 (MPa)、A, n: 定数、X: ゲルスペース比  
 $\alpha$ : セメントの未反応率、 $\rho$ : セメントの比重、W/C: 水セメント比

高炉セメントを用いた水セメント比51.2%および68.3%のコンクリートを20°Cで養生した場合の圧縮強度試験結果[7][8][9]と、混合水和モデルにより計算される反応率を基に(5)~(7)式から求められる圧縮強度とを比較検討した。表-3に混合水和モデルにより計算された各材齢における高炉セメントの反応率を示す。図-5に示すように、既往の実験データを用いて回帰分析を行ったところ、(5)式の係数の値として A=206および n=3.2が得られた。

表-3 高炉セメントの反応率 (20°C養生)

材齢(日)	3	7	28	91
反応率	0.41	0.51	0.66	0.76

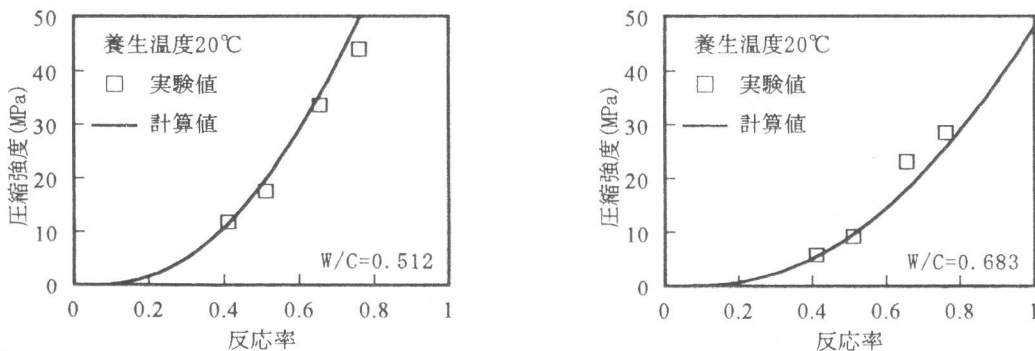


図-5 圧縮強度の計算値と実験値との比較

## 6. コンクリートの温度ひび割れ発生予測

仮想部材を対象として、上記の温度予測手法および強度予測手法を利用し、高炉セメントを用いたマスコンクリート部材の温度ひび割れの発生の可能性について予測を行った。対象とした部材は 2×2m 断面の内部拘束を有する構造物である。図-6 に対象部材の要素分割を示す。また、表-4 に打込むコンクリートの調査を示す。解析手法は、温度履歴については差分法、温度応力については有限要素法とした。温度解析の条件に関しては、打込み温度は20℃とし、コンクリート表面の熱伝達率は8kcal/m<sup>2</sup>h℃、コンクリート内部の熱伝導率は1.7kcal/m<sup>2</sup>h℃とした。図-7 にコンクリート表面部と中央部の温度履歴を、図-8 にコンクリート表面部と中央部の応力および引張強度の発現の計算結果を示す。本研究で検討した部材の場合には、コンクリート打込み後30時間経過後にひび割れ指数[10]が1.0以下となり、温度ひび割れが発生する可能性があることを示している。このように、混合水和モデルは、高炉セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れの発生予測に十分適用可能であると考えられる。

表-4 計算対象のコンクリートの調査

W/C (%)	細骨材率 (%)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
60	43	159	266	804	1092

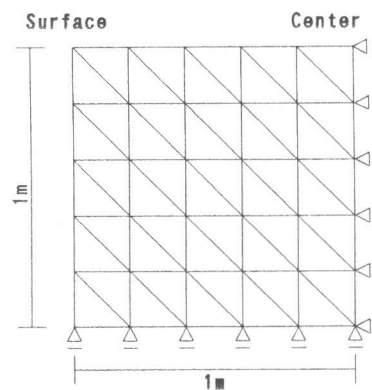


図-6 マスコンクリート部材の要素分割

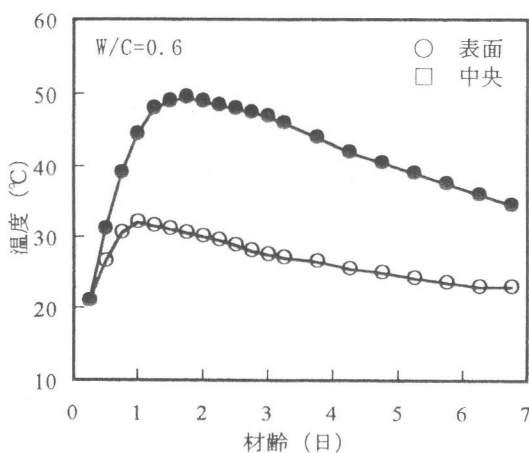


図-7 温度履歴の予測結果

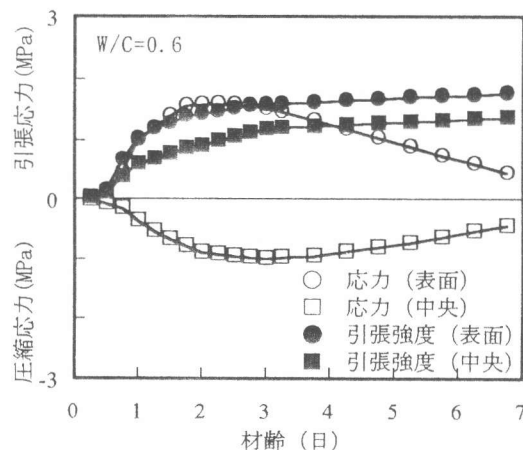


図-8 温度応力の予測結果

## 7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉セメントの水和挙動をセメントと高炉スラグの相互反応として表現した混合水和モデル

- を提案し、高炉セメントの水和発熱速度および高炉セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇に関する実験結果と比較を行ったところ、提案した混合水和モデルの妥当性が確認された。
- (2) 高炉セメントを用いたコンクリートの圧縮強度は、ゲルスペース比に基づいたPowers式により表現できる。ゲルスペース比は、提案した混合水和モデルから計算されるセメントの水和率と高炉スラグの水和率の総和、すなわち結合材全体の水和反応率に水セメント比を考慮して計算することができる。すなわち、本研究で提案した混合水和モデルにより、高炉セメントを用いたコンクリートの圧縮強度を推定することができた。
- (3) 提案した混合水和モデルは、高炉セメントを用いたマスコンクリート部材の温度ひび割れの発生予測に適用可能である。

### 参考文献

- [1] 玄哲ら：セメントの水和反応率によるコンクリートの温度応力予測に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文報告書、Vol.17、No.1、pp.1103-1108、1995
- [2] T.C.Powers: The Chemistry of Cement (edited by H.F.W.Taylor), Chapter 10, pp.414, 1964
- [3] 友澤史紀：セメントの水和反応モデル、セメント技術年報、1974
- [4] F.Tomosawa and T.Noguchi : Proc. of Utilization of High-strength concrete, Vol.2, Norwegian Concrete Assoc., pp.1247-1254, 1993
- [5] 戸谷陽一：高炉セメントの水和熱の研究、セメント技術年報、34、pp.74-77、1980
- [6] 玄哲ら：セメントの水和反応モデルによるコンクリートの温度上昇予測（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、A、pp.839-840、1995
- [7] 塚山隆一：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、p.220-223、1971
- [8] 大塩明：低発熱性セメントの現状と問題点、コンクリート工学、Vol.24、No.8、pp.13-24、1986
- [9] 阪本好史：高粉末度スラグのコンクリートへの利用の現状と展望、コンクリート工学、Vol.29、No.4、pp.17-26、1991
- [10] マスコンクリートの温度応力研究委員会報告集、pp.6、1985.11