

論文 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

玄 哲^{*1} 友澤史紀^{*2} 野口貴文^{*3}

要旨：コンクリートの温度応力予測のため、セメントの反応率によるコンクリート強度発現予測モデルについて検討した。セメントペーストの強度をセメントの反応率で表現できるPowers式の各係数を、各種セメントを利用したコンクリート強度実験を通じ、コンクリート強度モデルとして定量化した。そして、著者らの研究を通じてセメントの水和反応モデルを利用したコンクリートの温度上昇予測の精度が確認されたため、セメントの反応率からコンクリートの温度上昇および強度発現を予測し、この結果からコンクリートの温度応力予測への適用可能性について検討した。

キーワード：温度応力、セメント反応率、水和反応モデル、強度発現モデル、各種セメント

1. はじめに

高強度コンクリートや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。この問題に対処するためには、部材の温度上昇および温度応力予測モデルが必要である。温度予測においては、これまでには断熱温度上昇試験からコンクリートの断熱温度上昇曲線を求め、表面部のような断熱状態にない部分にも適応したため温度上昇予測だけでなく、強度発現予測の精度にも影響を及ぼしている。著者らの研究[1]で水和反応モデルを利用して環境温度変化によるセメントの水和発熱速度変化および断熱状態のコンクリートの温度上昇の予測可能性が確認された。温度応力予測のためにはコンクリートの物性変化を予測する必要があるが、諸性質は圧縮強度で大抵把握できるため、ここではコンクリートの圧縮強度発現モデルを確立し、引張強度及び引張弾性係数予測を推定するとする。積算温度によるコンクリートの強度発現予測は養生条件により予測の精度低下が指摘されており[2]養生条件に関係なく予測できるモデルの確立が必要である。コンクリートの強度発現は基本的にセメントの水和反応に依存しており、コンクリートの強度発現を理論的に扱うにはセメントの水和反応とコンクリート強度発現の関係を表現するモデルが必要である。

従って、本研究では、断熱温度上昇試験結果からのコンクリート温度上昇を予測することではなく部材各部の温度状況によりセメントの反応速度変化を考慮し温度履歴を行った。また、セメントの反応率によるコンクリートの強度発現予測法を提案し、これにより各部のセメントの反応率に基づいて各部の強度発現を予測して、実大部材の温度応力予測への適用可能性を検討した。

2. コンクリートの温度応力解析方法

図-1にコンクリートの温度応力予測プロセスについて示している。セメントの反応率はセメントの水和反応速度を示す友澤モデル[3]を利用し計算した。友澤モデルは式(1)で表わされる。

*1 東京大学大学院、工学系研究科建築学専攻、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）

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

ρ : セメントの密度 C_w : 水和生成物の外側の水の濃度 α^* : 反応率 α : 未反応率
 ν : 水とセメントの反応の化学量論比を質量基準で決めたもの k_r : セメントの化学反応速度
 r_0 : 水和開始時の未反応セメントの粒子径
 k_d : 外部皮膜内の拡散係数 ($k_d = B / \alpha^{1.5} + C \cdot \alpha^{3/2}$)

各係数は温度の影響を次の式で表現した。水和反応モデルの各係数は表-1に整理した[1]。

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

k_{20} 、 B_{20} 、 C_{20} 、 D_{20} : 20°Cでの各係数値

E/R 、 β_1 、 β_2 、 β_3 : 各係数の温度関係定数 T : 温度 (°K)

表-1 水和反応モデルの各係数

	B	C	D	K
OP	1E-8	8.5E-3	2.9E-10	6.5E-6
-E/R	β_1	β_2	β_3	
OP	-1973	4026	7456	4893

W/C=50%

セメント粒子周りの反応水量がある反応率以降は反応の進行にともなって1より小さくなると仮定し[1]、反応水量減少モデルを利用しコンクリートの温度上昇予測を行った。

$$\begin{aligned} \alpha^* &\leq m \\ C_w &= 1 \\ \alpha^* &> m \\ C_w &= e \times p [-n(\alpha^* - m)] \end{aligned} \quad (3)$$

C_w : 水の濃度 n 、 p : 定数 (普通セメント W/C=60%、 $n=0.6$ $p=15$)
 α^* : 反応率 $m = p \cdot (W/C)^{1/3}$ W/C : 水セメント比

解析プロセスは、部材各部分を要素分割し各時間間隔毎に各要素の温度によるセメントの水和反応速度変化を水和反応モデルで計算しその部分のコンクリートの温度を算定した。また各要素のセメントの反応率からPowers式により圧縮強度を求めた。

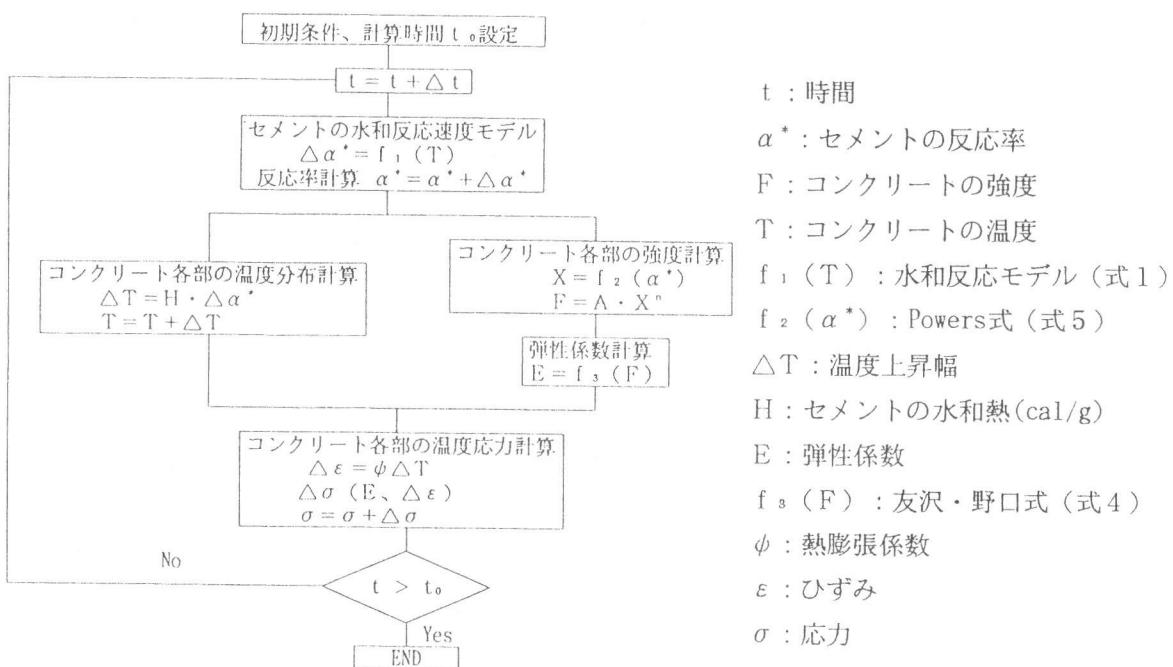


図-1 温度応力計算フロー

圧縮強度と静弾性係数の関係は下記の友澤・野口式[4]を利用した。この式は断熱養生の場合もよい一致を示すのが確認された[5]。竹下らの研究[6]によって圧縮弾性係数と引張弾性係数がほぼ同等となっていることが確認されているため、ここではこの式で弾性係数の計算を行った。

$$E = k_1 \cdot k_2 \cdot 33500 \left(\frac{\sigma_B}{60} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \quad \text{---(4)}$$

E: 弹性係数(MPa) σ_B : 圧縮強度(MPa) γ : 単位容積質量(2.35t/m³) $k_1 = k_2 = 1$

温度解析は差分法により、応力計算は有限要素法により計算した。なお、本論文の応力計算ではコンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響は考慮しなかった。

3. 実験概要

3. 1 材料

セメントは普通セメント(OP)、早強セメント(HP)、中庸熱セメント(MP)、ビーライトセメント(BE)、高炉セメント(BS)およびフライアッシュセメント(FA)を用いた。細骨材は小笠産陸砂(表乾比重 2.60、FM 2.80、吸水率 1.48%)を、粗骨材は岩瀬産砕石(表乾比重 2.65、FM 6.72、吸水率 0.87%)を用いた。

表-2 コンクリートの調合

セメント種類	W/C %	s/a %	単位量(kg/cm³) ²			
			W	C	S	G
OP	25	43	170	680	687	910
OP	35	43	175	500	711	961
HP, OP, MP, BE, FA, BS	50	43	184	368	795	1060

3. 2 実験方法

1) 圧縮強度及び弾性係数測定試験

供試体は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱体とした。養生は、恒温養生で封緘養生とし、養生温度は

10°C, 20°C, 30°Cとした。試験は7日、28日の2材齢について実施した。

2) セメントペーストの反応率測定

セメントペーストの反応率は粉末X線回折法[7]によって測定した。セメントを水セメント比50%（普通セメントの場合は25%、35%添加）で混練し、10°C、20°C、30°Cの条件下で7日および28日間封緘養生した。水和停止はアセトンに浸したのち、真空乾燥器で乾燥することで行った。水和が停止した試料を110°Cで1日乾燥し、内割10%のコランダムを内部標準として加え、ボールミルで混合粉碎した。これを200°Cで6時間以上保持した後、X線回折装置によってセメントの各成分の未反応率を測定した。強熱減量は110°Cで乾燥した試料を1000°C、1時間焼成して測定した。

4. 反応率と圧縮強度

図-2には、著者らの研究[5]の断熱養生時の圧縮強度試験結果と本研究の恒温養生の試験結果をセメントの反応率とコンクリートの強度発現の関係で整理しているが、よい相関関係があると考えられる。ここでセメントの反応率は、断熱養生の場合、断熱状態のため供試体内部で均一であると仮定し、温度上昇量から計算により求めた（コンクリートの比熱は 0.28kcal/kg°C[8]）。各セメントの水和熱は各セメントの組成から早強セメント112.2cal/g、普通セメント106.2cal/g、中庸熱セメント95.1cal/g、ビーライトセメント84.5cal/g、フライアッシュセメント96.7cal/g、高炉セメントは112.8cal/gとした。恒温養生の場合は粉末X線回折法によるセメントの反応率の測定結果と同じ養生条件のコンクリートの中のセメントペーストは反応率が同じと仮定し求めた。また、水和熱による水和率の測定値とX線回折による水和率の測定値が同一という仮定の下で圧縮強度との関係を求めた。養生による影響は、恒温養生した供試体が断熱養生した方よりすこし高い傾向を示すが、全体として恒温養生の温度条件および断熱養生の打込み温度など養生の影響と関係なく、強度発現を反応率の関数で表現

できると考えられる。したがって、本研究ではコンクリート強度発現をセメントの反応率の関数で表現するため、セメントペースト強度を（5）式に示したゲルースペース比で表現した Powers のモデルを使用した[9]。

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

f : 耐圧力 A 、 n : 定数 X : ゲルースペース比

$$X = (\text{gel volume}) / (\text{gel volume} + \text{capillary space}) \quad \text{----- (6)}$$

ここで、 A は調合および骨材などの影響を含めた係数と考える。ゲル容積がもとのセメント容積の 2 倍になると仮定した場合、（6）式をセメントの反応率で整理すると（7）式となる[3]。

$$X = \frac{2(1-\alpha)}{1/C - \alpha} \quad \text{----- (7)}$$

$$C = 1/(1 + \rho \cdot W) \quad \text{----- (8)}$$

α : セメントの未反応率 ρ : セメントの比重 W : 水セメント比

(5) 式の係数 A 、 n を各実験値の回帰分析で求めたところ、 n が 3 前後であった。そこで、各セメントの反応率の強度発現への影響を見るため n を 3 とし、あらためて A の値を回帰分析から求めた。その結果を表-3 に整理した。その結果、ビーライトが多いセメントほど、 A の値が大きくなっていることが分かった。これは同じ反応率の場合、ビーライトが多い方が強度増進が大きいことを示している。また低水セメント比ほど A の値が大きくなっている。セメントの反応率による強度発現予測と Powers 式は大体よい一致を示す。

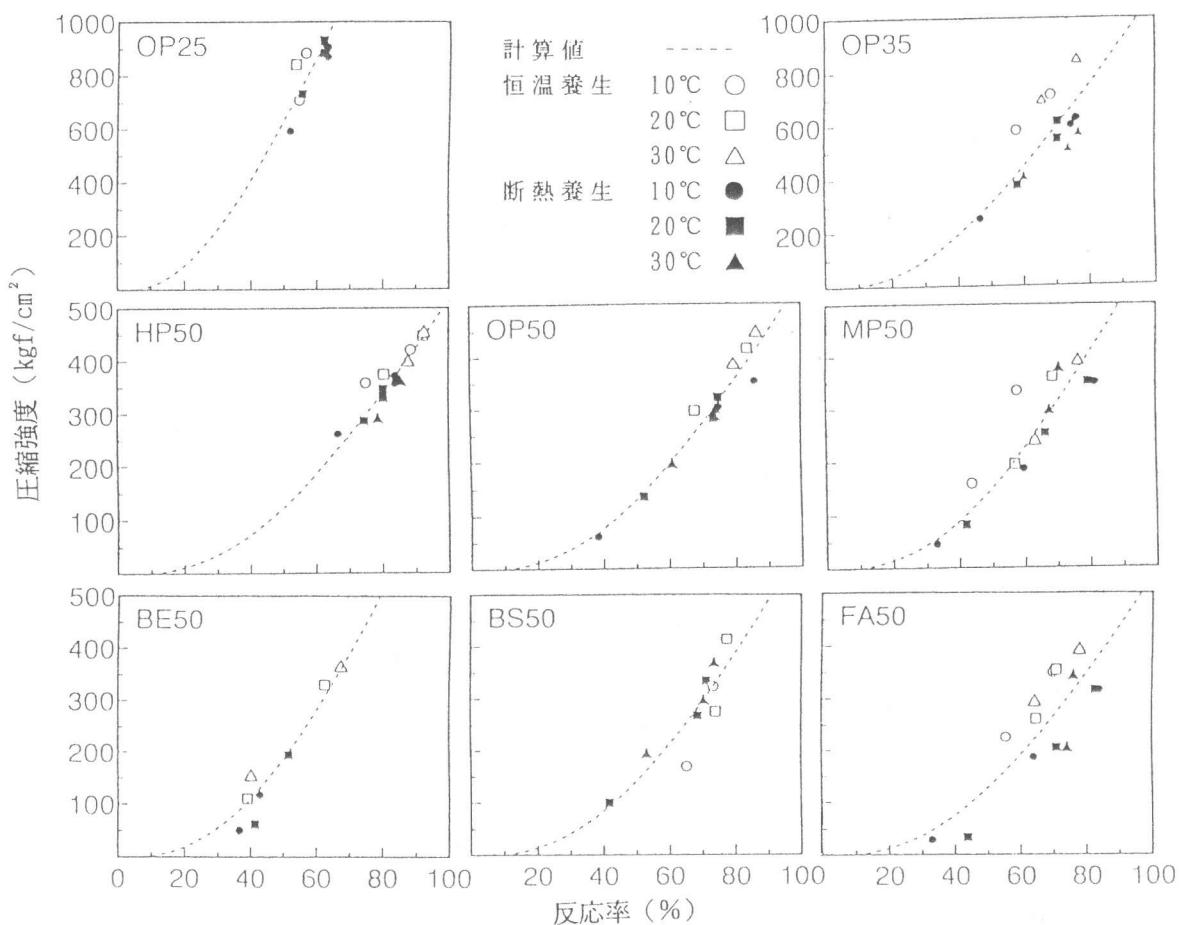


図-2 セメントの反応率とコンクリートの圧縮強度

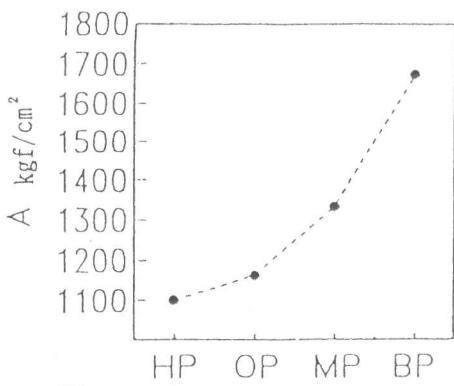


図-3 各種セメントのA値

表-4 応力計算対象のコンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	unit weight(kg/m³)			
		W	C	S	G
60	43	159	266	804	1092

5. コンクリートの温度応力予測

実大部材の温度履歴および温度応力の実験値と予測値の比較は、佐藤らによるマスコンクリート壁体のデータ[10]を利用した。対象構造物はスラブ打設後1か月経過してから打設したマスコンクリート壁体で内部拘束及び打設されたスラブによる外部拘束の影響を受ける。表-4にコンクリートの調合を示す。温度解析は差分法、温度応力解析は有限要素法で行い、図-4に温度上昇及び温度応力を検討した時の要素分割を示す。温度解析はコンクリート表面の熱伝達率 $8 \text{ kcal}/\text{m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ 、熱伝導率 $1.7 \text{ kcal}/\text{m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ で行った。温度上昇予測は友澤モデルで行ったが、図-5で示すように解析値は実測値とよい一致を表していることが認められる。次に、図-6に応力の実測値と解析値との比較を示す。ここでは引張強度は圧縮強度の1/10で計算しクリープの影響は考慮しない。計算値の方が実測値より引張応力が多少小さい傾向を示すが、実測値の傾向を一応示していると考えられる。この計算では引張応力が材令8日で引張強度より大きくなりひび割れが生じることになる。実際は材令12日にひび割れが生じているが材令は異なるがひび割れ発生の傾向は推定されると考えられる。従ってセメントの水和反応速度モデルから計算されたセメントの反応率およびPowers式によりコンクリートの温度上昇および温度応力予測の可能性が確認された。

表-3 係数Aの定量化

セメント	HP50	OP50	MP50	BP50
A	1100	1163	1333	1674
セメント	OP25	OP35	FA50	BS50
A	1352	1263	1135	1271

HP50, OP50, MP50, BP50, FA50, BS50は W/C=50%

OP25は W/C=25% OP35は W/C=35%

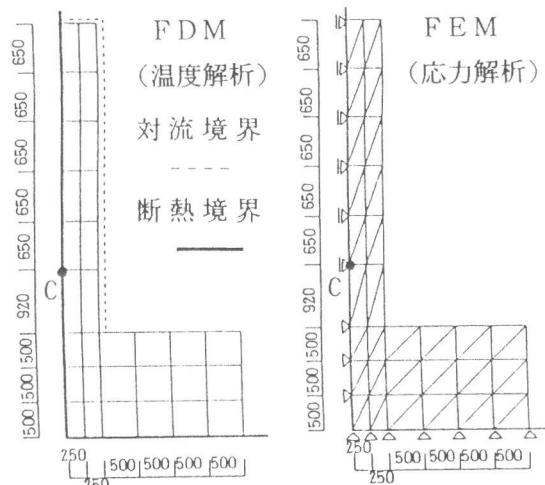


図-4 要素分割図

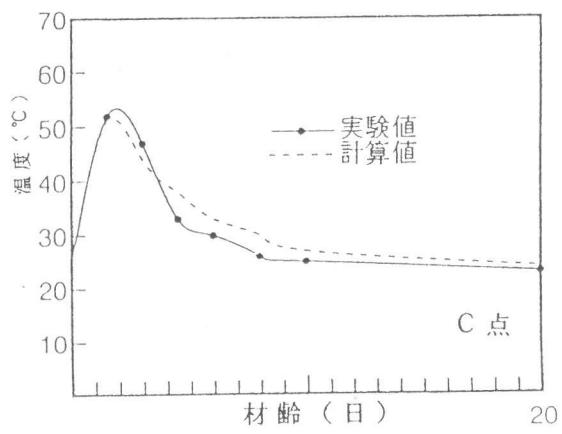


図-5 温度履歴

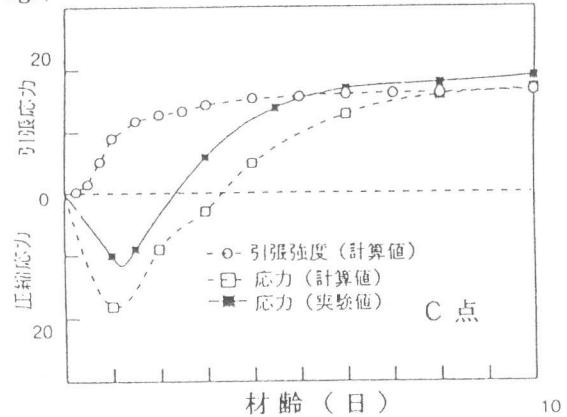


図-6 温度応力

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 恒温養生の圧縮強度試験結果をセメントの反応率とコンクリートの強度発現の関係で整理した結果、よい相関関係が認められた。
- (2) 断熱養生および恒温養生した供試体の圧縮強度発現と反応率との関係は、養生条件と関係なく、Powers式で一応表現できた。そして各セメントに対する係数Aは、ビーライトが多いセメントほど大きい値を示し、同じ反応率ならビーライトが多い方が強度増進が大きいと考えられる。またw/c比のが低いほど係数Aの値大きくなつた。
- (3) セメントの水和反応速度モデルから計算されたセメントの反応率およびPowers式によりコンクリートの温度上昇および温度応力予測の可能性が確認された。

「謝辞」

本研究に際して、秩父小野田（株）セメント・コンクリート研究所、大塙 明所長および岡村隆吉氏の協力を得た。ここに、深く感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 玄哲、友澤史紀、野口貴文：「セメントの水和反応モデルを利用したコンクリートの温度上昇予測に関する研究」日本建築学会構造系論文集投稿中
- [2] 高 熱範ら：「水和熱による初期高温度履歴を考慮したコンクリートの強度発現則に関する研究」セメント・コンクリート論文集 No. 46, 1992
- [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, Norwegian Concrete Assoc. vol. pp. 1247-1254 1993
- [5] 玄哲ら：「各種セメントを用いたコンクリートの断熱養生時の強度・弾性係数発現に関する研究」セメント・コンクリート論文集 1994 pp. 446-451
- [6] 竹下治之ら：「マスコンクリートの物性の基礎的特性について」、マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp. 27-34 1982. 9
- [7] 石崎倫郎ら：「ポルトランドセメントの水和反応における各構成鉱物の反応率の測定」セメント技術年報 42 pp. 40-43 1988
- [8] マスコンクリートの温度応力研究委員会報告集 1985. 11 pp. 6
- [9] T. C. Powers: The Chemistry of Cement (edt. by H. F. W. Taylor), Chapt. 10 pp. 414 1964
- [10] 佐藤孝一ら：「マスコンクリートの温度応力に関する研究」、第7回コンクリート工学年次論文報告集 1986, pp. 21-28