

# 論文 複合水和発熱モデルに基づく温度ひびわれ制御設計

岸 利治<sup>\*1</sup>・加藤佳孝<sup>\*2</sup>・前川宏一<sup>\*3</sup>

**要旨：**従来の温度ひびわれ解析では、コンクリートの発熱特性および強度発現特性を予め実験により同定するのが一般的である。本研究では、使用粉体のクリンカー鉱物組成・混和材置換率・水結合材比を入力とする水和発熱モデルと、水和発熱モデルから算出される鉱物ごとの水和度と鉱物ごとに拡張されたセメント水比則により定式化された強度発現モデルを用いた温度ひびわれ照査システムを提案し、温度ひびわれ制御における粉体設計について論じている。

**キーワード：**温度ひびわれ照査システム、水和発熱モデル、強度発現モデル

## 1. はじめに

マスコンクリート構造物では、温度ひびわれを回避するためにセメントの一部を高炉スラグやフライアッシュにより置換した混合セメントを使用することが多い。従来の温度ひびわれ解析では、断熱温度上昇試験によって求めた発熱性状を材料の発熱特性とした温度解析を行い、続いて温度解析結果を基にした構造物の応力解析を行うのが一般的である。そして、引張強度の予測は、積算温度法によるか、もしくは断熱温度上昇と同じ温度履歴を与えた供試体の引張強度により与えられる。しかし、放熱を伴う構造物の温度予測において、断熱温度上昇試験による測定結果をコンクリートの発熱特性値として与えることは不適切であることから、鈴木らは、コンクリートの水和発熱過程の定量化手法を開発した[1]。これにより、セメントの水和反応の温度依存性を考慮した温度解析が可能となった。ただし、検討する材料・配合ごとに、打ち込み温度を変えた2ケース以上の高精度の温度上昇試験を実施する必要がある。そこで著者等は、鈴木等の研究を基礎として、ポルトランドセメントの種類や混和材の置換率の変化に対応した水和発熱モデルを提案した[2][3]。また、セメント反応の温度依存性により、水和の進行に伴う強度の発現は温度履歴の影響を著しく受ける。そこで、水和の進行を間接的に反映した積算温度が考案され、強度予測に用いられている。積算温度による強度予測では、基本的に材料・配合ごとに基準となる積算温度と強度の関係を実験に基づき与える必要がある。著者等は、強度におけるセメント水比則を鉱物ごとに拡張し、水和発熱モデルによって算出される鉱物ごとの水和度を用いた強度発現モデルを提案した[4][5]。本研究では、筆者らが開発した水和発熱モデルと強度発現モデルを採用した設計照査システム[6][7]を用いて、温度ひびわれ制御のための粉体設計について論じた。

## 2. 混合セメントの温度ひびわれ照査システム

一般に耐久性の検討では、設定した材料・配合等により要求性能を満足することができなければ、それぞれの設定に戻ることになる。しかし検討する材料・配合が異なるごとに、諸特性値を

\*1 東京大学助手 工学部総合試験所、工修（正会員）

\*2 東京大学大学院 工学系研究科土木工学専攻（正会員）

\*3 東京大学助教授 工学部総合試験所、工博（正会員）

実験により求めることは簡便ではない。このことは、自己充填コンクリートの耐久性照査において一層重要である[6][7]。自己充填コンクリートは、自己充填性能を実現するために、一定の単位セメント量を確保する必要がある。すなわち、配合上の制約からダムコンクリートの温度ひびわれ対策として有効な単位セメント量の削減を行うことができない。したがって、使用する結合材種類の変更により対応しなければならない。言い換えれば、自己充填性ハイパフォーマンスコンクリートにおける温度ひびわれ照査とは温度ひびわれを抑制する使用粉体の選定ということである。また、耐久性の検討が多岐にわたる場合ほど、照査プロセスが材料・配合の選定に立ち戻った際の材料特性の同定が容易であることが望ましい。したがって、耐久性の検討が材料設計という意味で成り立つためには、材料の特性値を、モデルにより同定することが必要である。

図1に提案する温度ひびわれ照査システムのフローチャートを示す。まず、材料・配合

の選定を受けて構造物の温度解析が行われる。入力としては一般の温度解析に必要な設計諸元および熱定数に加えて、水和発熱過程を与える複合水和発熱モデルに必要なクリンカーの鉱物組成、混和材の置換率、水結合材比がある。次に温度解析の結果を受けて、温度応力解析が行われる。温度応力解析では、応力の算出の他に、強度発現モデルにより強度の予測を行う。強度の算出には、温度解析において水和発熱モデルにより与えられる各鉱物の水和度が用いられる。また、コンクリートの弾性係数および引張強度は算定された強度より算定する。算定された引張強度と応力の比であるひびわれ指数が所定の要求を満足していないければ、使用材料の選定に立ち返ることになる。温度ひびわれ照査システムにおいては、要求性能を満足する材料・配合が確定するまで、この過程を繰り返す。

### 3. 複合水和発熱モデル

水和発熱モデルでは、セメントのクリンカー鉱物として、エーライト( $C_3S$ )、ビーライト( $C_2S$ )、アルミネート相( $C_3A$ )、フェライト相( $C_4AF$ )と、混和材として高炉スラグとフライアッシュを構成要素として取り上げ、これらの水和発熱過程をモデル化している。混合セメント総体の水和発熱速度は、構成要素の発熱速度を組成・配合比率に応じて足し合わせて、式(1)のように与えられる[2]。

$$\overline{H} = p_{mono}\overline{H}_{mono} + p_{C_3A}\overline{H}_{C_3A} + p_{C_3S}\overline{H}_{C_3S} + p_{C_4AF}\overline{H}_{C_4AF} + p_{C_2S}\overline{H}_{C_2S} + p_{SG}\overline{H}_{SG} + p_{FA}\overline{H}_{FA} \quad (1)$$

$$p_{mono} + p_{C_3A} + p_{C_3S} + p_{C_4AF} + p_{C_2S} = 1 \quad (2)$$

ここで、 $\bar{H}$ :セメントの水和発熱速度、 $\bar{H}_i, p_i$ :鉱物*i*の水和発熱速度、構成比率である。

ただし、個々の鉱物の発熱速度については、鉱物間の相互依存性を別途考慮する必要がある。複合水和発熱モデルでは、各反応間の相互依存性として、水和に要する練り混ぜ水の共有、高炉スラグとフライアッシュによるCa(OH)<sub>2</sub>の消費、さらに、セメントとスラグに対するフライアッシュの反応遅延効果を考慮している。また、各反応からの発熱により変化する系の温度も共通環境である。各要素の発熱速度は、式(3)のように与えられる[3][5]。

$$\bar{H}_i = \beta_i \cdot \Omega_i \cdot \gamma_i \cdot F(Q_i) \cdot \exp\left\{-\frac{E_i}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\} \quad (3)$$

ここで、 $\beta_i$ :未水和鉱物と水との接触機会を表わす係数、 $\Omega_i$ :フライアッシュによる遅延効果を表わす係数、 $\gamma_i$ :Ca(OH)<sub>2</sub>の供給状態を表わす係数、 $F(Q_i), Q_i, E_i$ :鉱物*i*の基準温度 $T_0$ における基準発熱速度、積算発熱量、温度活性、 $R$ :気体定数、 $T$ :系の温度である。複合水和発熱モデルでは、結合材の種類の相違はセメントの鉱物組成及び混和材の構成比率により表現される。

#### 4. 水和発熱モデルに基づいた強度発現モデル

コンクリートの強度増分は、水和発熱モデルから算出される各構成鉱物の水和度を用いて式(4)のように表わされる[4][5]。

$$df'_c = 25 \frac{p_{C_3S} C}{W} d\phi_{C_3S} + 40 \frac{p_{C_2S} C}{W} d\phi_{C_2S} + 27 \frac{p_{SG} C}{W} d\phi_{SG} + 40 \frac{p_{FA} C}{W} d\phi_{FA} \quad (4)$$

$$\phi_i = \frac{Q_i}{Q_\infty} \quad (5)$$

ここで、 $f'_c$ :圧縮強度(Mpa)、 $\phi_i, Q_\infty$ :水和発熱モデルより求まる鉱物*i*の水和度と完全水和時の発熱量、 $C$ :単位セメント量、 $W$ :単位水量である。提案している強度予測モデルでは、セメント水比則を各鉱物に拡張し、水和の進行に伴う強度の増加を、水和度に基づいて表現している。なお、アルミニネート相とフェライト相の強度に対する貢献分は比較的小さいとして無視している。各鉱物の強度に対する貢献はそれぞれ独立として扱っているが、水和の進行における鉱物反応間の相互依存性は水和発熱モデルにおいて考慮される。

#### 5. 温度ひびわれ制御設計

図2に示す硬化コンクリート基礎に新たに大型基礎マットを打設する場合を例にとり、温度ひびわれ照査システムを用いた使用粉体設計を行う。使用するコンクリートは自己充填性ハイパフォーマンスコンクリートを想定した。使用粉体は、中庸熱ポルトランドセメントを母材とし、母材の一部を高炉スラグもしくはフライアッシュにより置換した2成分系の混合セメントを検討した。温度及び温度応力解析は有限要素法によって行った。応力解析では、打設コンクリートの剛性増加を最終発熱量の10%までは無視した。解析に用いた条件を表1に示す。本解析において

てはクリープを考慮していないため、応力が高めに見積もられている。そこで、ひびわれ指数 1.0 を以ってひびわれ発生に対する適否の目安とした。まず、母材である中庸熱セメント単味の場合の検討を行った。図 2 に斜線で示した断面の材令 2 日における応力分布を図 3 に示す。解析の結果、応力が最も高いのは、図 2 に示す A の位置であった。そこで、A 点における主応力、引張強度およびひびわれ指数について検討することとし、それぞれの解析結果の履歴を図 4 に示す。応力は引張強度を大きく上回っており、ひびわれ発生確率は極めて高いことが伺える。そこで、コンクリートの低熱化を図るために、混和材として高炉スラグおよびフライアッシュでそれぞれ置換した 2 成分系の混合セメントを用いた場合の検討を行った。高炉スラグで検討した置換率は、60、70、80% であり、それぞれの解析結果を図 5～図 7 に示す。また、図 8 は、履歴において最も小さいひびわれ指数と置換率との関係を示したものである。高炉スラグは、置換率が低い場合には低熱化にとって必ずしも有効ではなく、本解析においても置換率 60% では、ひびわれ指数の向上は少ない。しかし、置換率を 70%、80% と上げていくと、温度上昇が抑制されるために応力の発生も抑制され、ひびわれ指数は向上している。水和発熱モデルでは、置換率が大きくなかった場合にはスラグの反応に必要な  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が、クリンカー成分の水和反応の生成物として十分に供給されないために、スラグの反応が停滞するとモデル化している。ただし、応力が減少する一方で、置換率の増加に伴い引張強度も減少している。ひびわれ指数の増加は、置換率の増加に伴う応力の減少が強度の減少よりも大きいことによる。つづいて、フライアッシュにより 30、40、50% と置換した場合の解析結果を図 9～図 11 に示す。また、図 12 は、履歴において最も小さいひびわれ指数と置換率との関係を示したものである。フライアッ

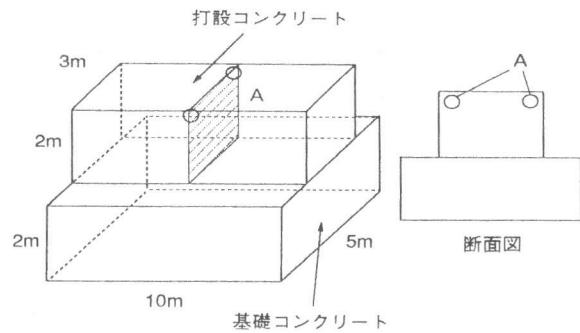


図 2 解析対象構造物（大型基礎マット）

表 1 解析条件

母材	中庸熱セメント			
鉱物組成	C3S	C2S	C3A	C4AF
	46	31	4	12
水粉体容積比	80%			
単位粉体容積	233 l			
熱伝導率	65 kcal/m/day/°C			
熱伝達率	120 kcal/m²/day/°C			
熱膨張係数	$1.0 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$			
基礎の弾性係数	30000 MPa			
拘束条件	基礎底面変位完全拘束			
打設温度	25°C			
外気温	20°C			

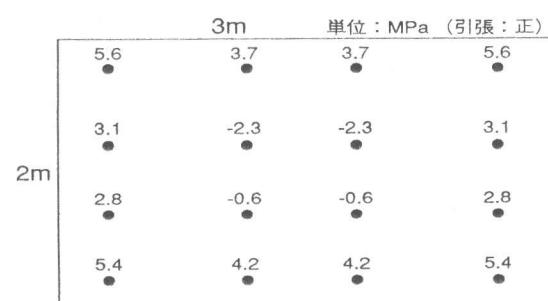


図 3 斜線断面における応力分布（2日）

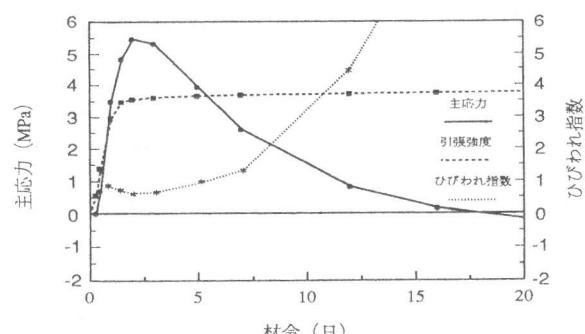


図 4 中庸熱セメントの解析結果

シューを30%置換したものは、フライアッシュセメントC種に相当するが温度ひびわれ抑制の観点からは、フライアッシュによる置換が不十分である。置換率を40%、50%とすることで、ひびわれ指数が1.0以上になった。解析では、フライアッシュのセメントに対する遅延効果を考慮しており、フライアッシュの反応は、スラグと同様に  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の供給量により規定している。以上の検討により、大型基礎マットでは、中庸熱セメントを高炉スラグの場合では70%以上、フライアッシュの場合では40%以上置換することにより、要求性能を満たすことになる。また、この他にも3成分系の混合セメントや低発熱ポルトランドセメントの使用などが考えられる。要求性能を満足する配合群からどの配合を選定するかは、他の耐久性能、フレッシュ時の性状、費用などの面から多角的に判断されることになるが、検討項目が多いほどモデルを用いて検討する効用は大きいといえる。将来的には提案する照査システムにより材料の選定を行うことが望まれるが、採用した各モデルは未だ開発途上であり、改良と検証を重ねる必要がある。また、応力解析においてクリープも考慮していない。現状では、配合の選定において安全側の判断をした上で、最終的に実験により性状を確認する必要がある。

## 6.まとめ

本研究では、温度ひびわれ制御における粉体設計法を提案した。温度ひびわれは、水和が活発に進行する若材令における現象であるので、水和の進行を考慮した検討が必要である。そこで、本研究では、水和発熱および強度の発現を水和の進行に基づいて算定することとした。今後、照査システムの信頼性を向上させるためには、水和発熱および強度発現モデルの一般化と精度の向上を図ること、および応力解析結果に大きな影響を与える若材令クリープを水和の進行を考慮した形で定式

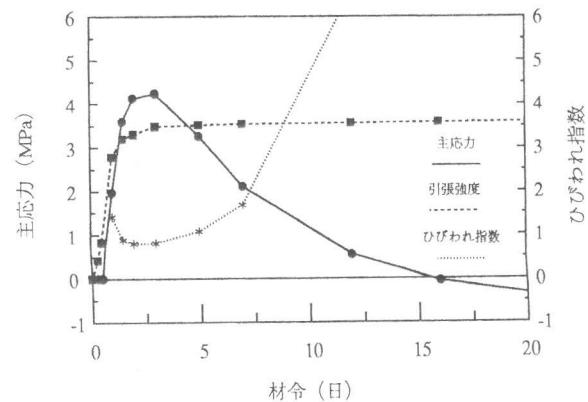


図5 スラグを60%置換した場合の解析結果

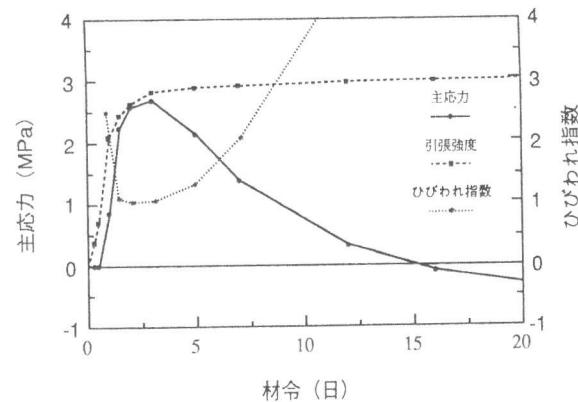


図6 スラグを70%置換した場合の解析結果

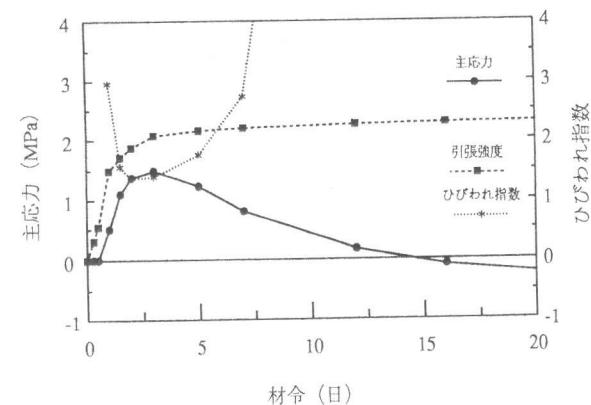


図7 スラグを80%置換した場合の解析結果

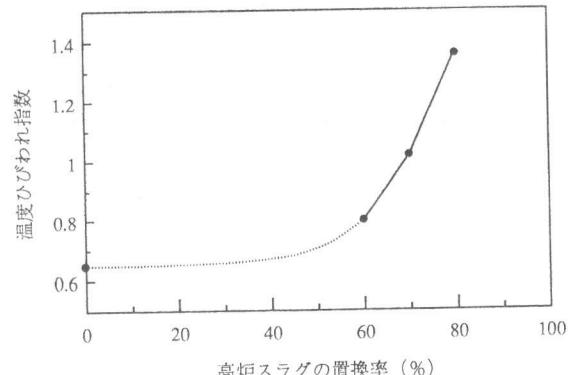


図8 スラグ置換率とひびわれ指数の関係

化し、解析に取り込むことが不可欠である。

### 参考文献

- 1) 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、第 414 号  
／V-12, pp.155-164, 1990.2
- 2) Kishi, T., Ozawa, K. and Maekawa, K. :  
Multi-component Model for Hydration Heat  
of Concrete Based on Cement Mineral  
Compounds、コンクリート工学年次論文報告  
集、Vol. 15, No.1, pp1211-1216, 1993.6
- 3) Santhikumar, S. Kishi, T. and Maekawa,  
K. : Heat Generation Model for Mixed  
Portland Cement, Blast Furnace Slag and  
Fly-ash Concrete, Proceedings of The  
Fourth East Asia-Pacific Conference, Vol.2,  
pp1449-1454, Sep.1993
- 4) 加藤佳孝、岸 利治：構成鉱物の水和に  
基づく若材令コンクリートの強度発現モデル、  
コンクリート工学年次論文報告集、  
Vol.19, No.1 pp503-508, 1994.6
- 5) Kishi, T. and Maekawa, K. : Thermal and  
Mechanical Modelling of Young Concrete  
Based on Hydration Process of Multi-  
Component Cement Minerals, Proc. of Int.  
RILEM Symp. on Thermal Cracking in  
Concrete at Early Ages, Munich, pp11-18,  
1994
- 6) 岡村 甫・前川宏一・小沢一雅：ハイパ  
フォーマンスコンクリート、技法堂出版、1993
- 7) Kishi, T. Shimomura, T. and Maekawa,  
K. : Thermal Crack Control Design of High  
Performance Concrete, Concrete 2000,  
pp447-458, Sep. 1993
- 8) 原田修輔・前川宏一・辻 幸和・岡村 甫：  
温度依存性を有するセメントの水和発熱過程  
と熱伝導との連成を考慮した非線形温度解析、  
土木学会論文集、第 426 号／V-14, pp.167-176,  
1991.2

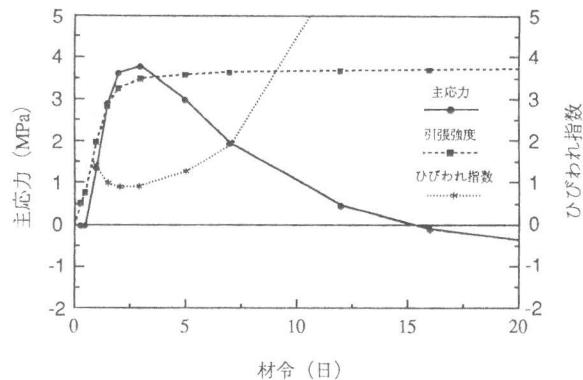


図 9 フライアッシュ 30% 置換の解析結果

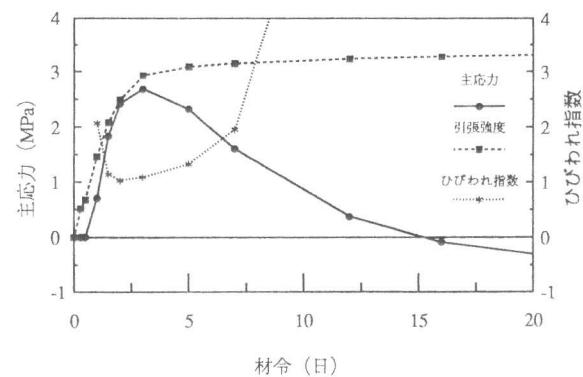


図 10 フライアッシュ 40% 置換の解析結果

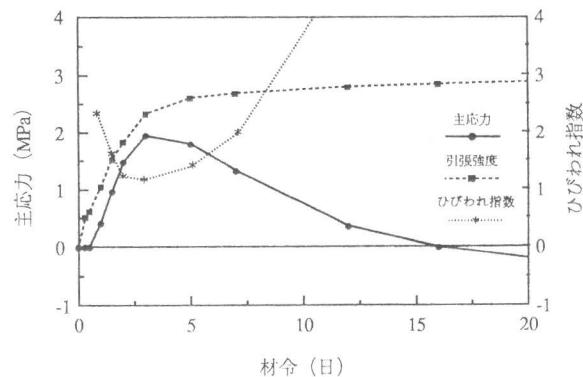


図 11 フライアッシュ 50% 置換の解析結果

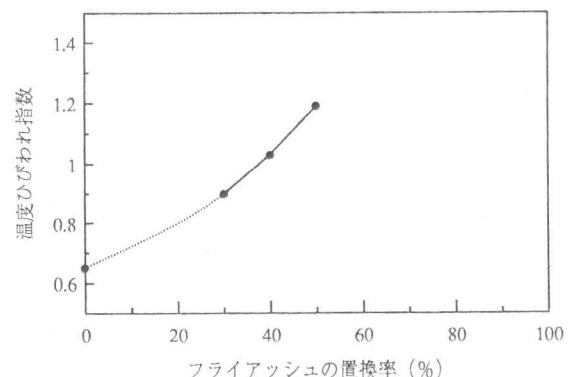


図 12 フライアッシュ置換率とひびわれ指数  
の関係