

## 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\*1・加藤佳孝\*2・前川宏一\*3

**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<sub>3</sub>S)、ビーライト(C<sub>2</sub>S)、アルミネート相(C<sub>3</sub>A)、フェライト相(C<sub>4</sub>AF)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]。

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

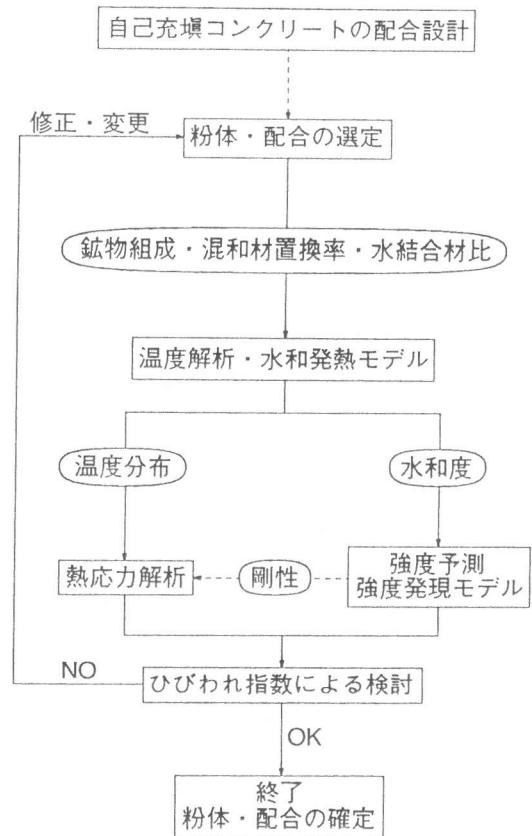


図1 温度ひびわれ照査システムのフロー