

## 委員会報告 マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会活動

佐藤 良一<sup>\*1</sup>・十河 茂幸<sup>\*2</sup>・金津 努<sup>\*3</sup>・溝渕 利明<sup>\*4</sup>・野口 貴文<sup>\*5</sup>・岸 利治<sup>\*6</sup>

**要旨**：マスコンクリート構造物に発生するひび割れは、耐久性低下の原因の一つとして、古くから、またしばしば問題とされ、今日においても新しい課題と認識されている。温度ひび割れの解析技術、制御技術の進歩によって、予測精度、制御効果は向上してはいるが、一般的には、いまだ温度ひび割れが必ずしも減少しているとは言い難い。そこで、本研究委員会では、ひび割れへの認識、解析方法、制御方法とその効果などの実情についてアンケート調査を行った。次いで、既存の材料モデルや解析モデルを整理した。さらに、多数の感度解析を実施して各種モデル、周辺温度条件などの相違が発生応力に及ぼす影響を定量評価するとともに、最近の制御技術などについて検討を行い、これらの成果を報告書に取りまとめた。

**キーワード**：マスコンクリート、温度ひび割れ、温度解析、応力解析、ひび割れ制御

### 1. はじめに

わが国では高度経済成長期に多数の大型構造物が建設される中で、コンクリート構造物の水和熱による温度ひび割れ問題が顕在化し、その発生機構の解明、予測技術や制御技術の確立が強く求められた。この要請に応えるために、1985年に、日本コンクリート工学協会のひび割れ調査研究委員会（委員長：長瀧重義・東京工業大学教授）から「マスコンクリートのひび割れ制御指針」が発刊された。この指針は広く活用され、設計段階、施工計画段階、施工段階において様々な対策がとられるようになった。

その後、解析、制御技術も時代とともに進歩し、今や解析ソフトの普及によって事前解析も容易に行われるようになった。しかし、このような進歩にもかかわらず、一般的には温度ひび割れは必ずしも減少しているとは言い難く、制御対策の効果が発揮されていない場合もあるのが実情である。

温度ひび割れの原因としては、材料特性、配合（調合）、施工によるものなど多種多様であるが、効果的な対策をとるためには、事前の解析は欠かせない。しかし、解析においても、適切な判断に不可欠な、使用するモデルや周辺環境条件などの相違の影響度は、必ずしも体系的に明らかにされていない。また、解析の前提条件を無視した評価がなされる場合もある。さらに、近年では、粉体量の増大や低水セメント比化による自己収縮の影響が無視し得ない場合があるなど、新たな検討の必要性も明らかになってきた。

このような現状を踏まえて、温度ひび割れ制御技術の現状の把握と高度化を目的に「マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会（委員長：佐藤良一・広島大学大学院教授）」が設置され、調査、評価、解析、制御の4作業部会を設け、2004年4月から2年間の活動を開始した。表-1.1に委員構成を示す。

\*1 広島大学大学院 工学研究科 教授 工博（正会員）

\*2 大林組 技術研究所 副所長 工博（正会員）

\*3 電力中央研究所 地球工学研究所 副所長 博士（工学）（正会員）

\*4 法政大学 工学部 教授 博士（工学）（正会員）

\*5 東京大学大学院 工学系研究科 助教授 博士（工学）（正会員）

\*6 東京大学 生産技術研究所 助教授 博士（工学）（正会員）

表-1.1 委員構成

役職	氏名	所属
委員長	佐藤良一	広島大学
副委員長	十河茂幸	大林組
幹事	金津 努	電力中央研究所
	岸 利治	東京大学
	野口貴文	東京大学
	溝渕利明	法政大学
委員	石川靖晃	名城大学
	稲葉洋平	鹿島建設
	伊藤 始	前田建設工業
	浦野知子	大林組
	大友 健	大成建設
	小野聖久	中日本高速道路
	小山宣治	東電設計
	佐々木彰	宇部三菱セメント研究所
	嶋 毅	住友大阪セメント
	鈴木康範	住友大阪セメント
	高瀬和男	駒井鉄工
	谷村 充	太平洋セメント
	檀 康弘	新日鐵高炉セメント
	津吉 毅	東日本旅客鉄道
	中村成春	宇都宮大学
	西岡真帆	清水建設
	保利彰宏	電気化学工業
	丸山一平	名古屋大学
	三島徹也	前田建設工業
	三谷裕二	太平洋セメント
	三橋博三	東北大学
	宮澤伸吾	足利工業大学
	守分敦郎	東亜建設工業
	横田 弘	港湾空港技術研究所
	渡邊弘子	月の泉技術士事務所
	渡辺博志	土木研究所
事務局	大野一昭	日本コンクリート工学協会

調査WG（主査：金津 努）では、この分野に関わる技術者と研究者に対して行ったアンケート調査から、温度ひび割れへの認識や解析、制御の実情を明らかにした。

評価WG（主査：野口貴文）、解析WG（主査：溝渕利明）では、温度ひび割れ解析に関わる種々のモデルや評価技術の現状を整理し、約1000ケースの感度解析に基づき種々の要因の影響度を検討した。

制御WG（主査：岸 利治）は、低発熱セメントや膨張材等の新しい材料による制御効果と材

料特性のモデル化を行うなど、ひび割れ制御にとって有用な最新の知見をまとめた。

## 2. 温度ひび割れに関する実態調査

### 2.1 アンケート調査

#### (1) 技術者の意識調査

施工現場に従事する技術者の意識は、直接的に構造物の品質に反映されるため、ひび割れ制御に対する影響は大きい。その現状を把握するためアンケートを行い、発注者、設計コンサルタント、施工現場等に従事する技術者約220人から回答を得た。

マスコンクリート業務を遂行する上で、温度ひび割れを（強く、よく）意識しているのは約90%で、かなりの高率である。この内、民間技術者93%は、国、地方自治体技術者85%とほぼ同じ意識レベルである。

意識する理由は、構造物の耐久性低下への懸念（60%）、補修費用負担（31%）であり、施工技術者としての責任という回答もあった。意識しない理由は、ひび割れはやむを得ない、重要構造物でない、補修すればよい等であった。

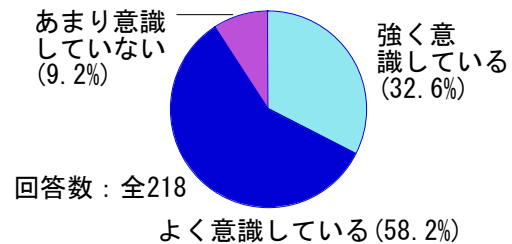


図 2.1 温度ひび割れに対する意識

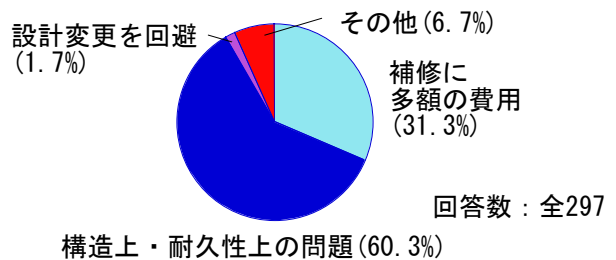


図-2.2 意識する理由

#### (2) 施工時対策

施工管理指標についての回答（103）によれば、

温度管理 30%，ひび割れ指数管理 17%，養生管理 17%，施工方法（リフト高さ，打設時間など）9%，材料・配合 5%が主なもので，ひび割れ幅管理も 4%あった。ひび割れ対策は，回答数（193）の 70%で実施されており，その方法には，低熱セメントの使用 24%，目地の設置 23%，セメント量低減 5%，ケミカルプレストレス 6%，ひび割れ制御鉄筋 6%，打込み温度低減 5%，強制冷却 4%，リフト変更 3%など，種々の方法があった。これらの方法の効果は 97%で確認されており，92%が費用との関係で満足できるという結果であった。ただし，この結果は，ひび割れに対する技術や意識レベルの高い技術者の回答に基づくものであることを認識しておく必要がある。

### (3) 事前解析

事前解析では，温度解析で有限要素法（以降，FEM）99%，応力解析で FEM76%，CP 法 20%，CL 法 4%が用いられており，FEM による検討も 2 次元，3 次元の割合は同じ 45%であった。3 次元の FEM も実務にかなり採り入れられている。しかし，計算の推定精度になると，必ずしも満足できるレベルには達していないと判断される。

### (4) 事後検討

事後検討では，ひび割れ発生原因究明，予測精度や対策の有効性の確認を目的として，温度計測 62%，ひずみ計測 26%，応力計測 18%，ひび割れ幅計測 24%が行われており，計算結果との比較では，一致している比率は 50%程度であった。

### (5) 断熱温度上昇特性評価

セメントメーカーを対象としたアンケートの結果，普通強度のコンクリートでは，いずれのメーカーも土木学会標準示方書の評価式による値と比較して断熱温度上昇量はおよそ 5°C 高くなり，同じ種類のセメントであっても，メーカーごとに異なるとの意見が多い。

## 2.2 温度ひび割れ簡易制御の実施例

温度ひび割れの発生予測に，FEM などの精算法が普通に適用される趨勢にはあるが，すべて

の構造物に精算法を用いることは実務的には合理性に欠ける。類似の構造物に対しては，既往の施工実績の蓄積情報を分析し，適切な管理指標とその閾値を設定して，簡易に温度ひび割れを制御する技術を整備することも重要である。外部および内部拘束それぞれが卓越する場合の事例を以下に紹介する。

### ①外部拘束が卓越するボックスカルバートの事例[1]

誘発目地間と構造物高さの比が 0.9 以下であることを前提に，コンクリートの温度降下量 35°C 未満をひび割れ防止のための制御目標値とする事例がある。

### ②内部拘束が卓越する地下タンク底版（直径約 70m，厚さ約 6m）の事例[2]

土木学会標準示方書（平成 8 年版）に示されるひび割れ指数（1.5 以上）を制御目標とし，内外面の温度差の事前解析値がそれを満足するように，材料・配合，養生方法を選定している。温度計測から得られるひび割れ指数は，制御目標値を満足し，施工後の調査では有害なひび割れは確認されなかった。

## 2.3 温度ひび割れが耐久性に及ぼす影響

温度ひび割れ制御の主な目的の一つは鉄筋腐食の防止であるが，体系的な調査結果も少なく，その影響は必ずしも明らかになっていない。しかし，貴重な調査結果が提供されたので，ここではこれを紹介する。

対象構造物は，厳しい腐食環境にある港湾の津波防波堤（大型ケーソンに消波機能を備えた構造物）で，完成後 15 年程度経過している。単位セメント量 330kg/m<sup>3</sup>，W/C45%のコンクリートが使用されている。消波のためのスリット部のはり，柱は，部材厚 80cm，かぶり 8.5cm である。パイプクーリングによる温度ひび割れ対策を施したが，0.04~0.25mm の温度ひび割れが確認された。また，およそ 15 年後の調査では，海洋環境暴露にあっても，錆汁，内部鉄筋腐食は観察されていない状況である。温度ひび割れが発生しても幅を小さく制御すれば，耐久的な構造物とする

ことができることを示す事例である。

## 2.4 諸外国のひび割れ制御基準

ACI で示されている基準ならびに英国の道路構造物の技術基準の2つを紹介する。

### (1) ACI 207 シリーズ

ACI207 に示されている手法の特徴は、以下に示すように、拘束条件の定め方、ならびにひび割れ幅制御のための鉄筋量算出にある。

- ①長さ変化量を算出のための温度変化量決定
- ②拘束条件の決定（拘束率  $K_R$  を定義）
- ③コンクリートの物性値の決定
- ④許容される最大ひび割れ幅の決定
- ⑤許容ひび割れを満たす制御鉄筋量の決定  
（鉄筋の引張応力度とひび割れ幅の関係は Gergely and Lutz によって提案された関係式を根拠）

ACI207 の方法は、曲げ拘束が考慮されていないこと、RC の曲げひび割れ幅を対象とする Gergely and Lutz の式を用いているために、ひび割れ幅を過小評価する可能性があることなどの問題があるため、今日ではほとんど用いられていない。

### (2) 英国道路構造物の設計基準

BD28/87, ならびに BA24/87 に” Early Thermal Cracking of Concrete” としてひび割れ制御方法が示されている。荷重条件から定められる鉄筋量に温度応力によるひび割れ制御鉄筋が付加されひび割れ幅が制御される。鉄筋とコンクリートの付着強度を考慮して最大ひび割れ間隔を算定し、拘束ひずみとコンクリートのひび能力からひび割れ幅を算出する。

## 3. 温度ひび割れの評価技術

### 3.1 温度の評価技術

マスコンクリートの温度上昇・下降速度と量の評価するためには、温度に影響を与える物性を適切に設定する必要がある。温度解析に不可欠な要因は、(1) 水和発熱、(2) 打込み温度、(3) 熱伝導率、(4) 熱伝達率、(5) 比熱、(6) 外気温の日変動、(7) 日射の7因子である。

### (1) 水和発熱

水和発熱を定量評価する方法として、断熱温度上昇式 ( $T=K(1-e^{-at})$ ) を用いる方法と水和反応モデル (HYMOSTRUC, 複合水和発熱モデル, CEMHYD3D, CCBM など) に基づく水和発熱量を積算する方法がある。

### (2) 打込み温度

打込み温度は、マスコンクリートの中心部など断熱に近い状態では直接的に影響する。そのため、打込み温度は、使用材料の温度、練混ぜ時の摩擦熱、外気温、運搬による温度変化などを考慮して、適切に設定する必要がある。

### (3) 熱伝導率

一般的に熱伝導率は  $2.6\sim 2.8\text{W/m}^\circ\text{C}$  と考えてよいが、骨材の種類・量、コンクリートの含水状態・温度などにより変化する。

### (4) 熱伝達率

露出したコンクリートの熱伝達率は  $12\sim 14\text{W/m}^2$  としてよいが、コンクリートの表面の粗滑状態・湿潤状態、風速、周辺環境との温度差、部材の向き（垂直面、水平面、傾斜面）、熱流方向、輻射率などにより変化する。

### (5) 比熱

一般的に比熱は  $1.05\sim 1.26\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$  としてよい。骨材の種類の影響は小さいが、セメントの水和進行度により比熱は変化する。

### (6) 外気温の日変動

通常は、外気温の日変動は考慮せず、一日の平均気温とすることが多い。しかし、外気温の日変動幅は地域、季節によっては  $4^\circ\text{C}\sim 15^\circ\text{C}$  程度もあり、コンクリート温度に影響を与える。

### (7) 日射

日射の影響は、現在ほとんど考慮されていない。しかし、日射を受けるコンクリート表面の温度は、日射を受けていない場合とは大きく異なるため、構造物の状況によってはその影響を取り入れる必要がある。

## 3.2 膨張・収縮の評価技術

### (1) 若材齢コンクリートの熱膨張係数

コンクリートの熱膨張係数は  $10\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  とさ

れることが多い。しかし、若材齢時におけるコンクリートの熱膨張係数は、図-3.1に示すように、十分硬化したコンクリートに比べてかなり大きく、材齢の経過に伴い変化する。これを無視すると、引張応力を小さく評価するという報告がある[3]、[4]。

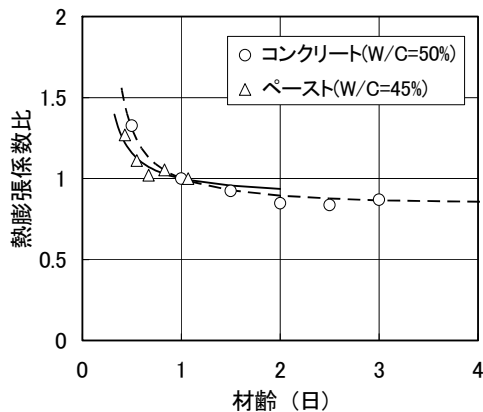


図-3.1 熱膨張係数比の経時変化

## (2) 自己収縮ひずみの予測

コンクリートの自己収縮の大きさは、セメントの種類の影響を大きく受ける。間隙相の含有量が多いセメントほど自己収縮が大きく、セメントの種類の影響は式(3.1)中の係数  $\gamma$  (表-3.1)により評価される[5]が、高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮予測式については、更なるデータの蓄積が必要である。

コンクリート温度が自己収縮に及ぼす影響については、まだ統一的な見解はない。これは、温度上昇開始までの前置き時間、温度上昇速度、最高温度等の実験条件の設定が研究者により異なっていることが原因である。

$$\varepsilon_c(t) = \gamma \cdot \varepsilon_{c0}(W/B) \cdot \beta(t) \quad (3.1)$$

$\varepsilon_c(t)$  : 材齢  $t$  の自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )

$\gamma$  : セメント・混和材の影響を表す係数

$\varepsilon_{c0}(W/B)$  : 自己収縮ひずみの終局値 ( $\times 10^{-6}$ )

$\beta(t)$  : 自己収縮の進行を表す関数

$W/B$  : 水結合材比

表-3.1 自己収縮に及ぼすセメントの影響

セメントの種類	$\gamma$
普通ポルトランドセメント	1.0
早強ポルトランドセメント	1.2
中庸熱ポルトランドセメント	0.85
低熱ポルトランドセメント	0.4

## (3) 膨張材の効果

膨張材の効果は、熱膨張係数を経験的に与える、あるいは自由膨張ひずみを与え、かつクリープ影響を取り入れることにより考慮されている。

## 3.3 温度応力の評価技術

ヤング係数およびポアソン比を温度応力解析に入力する材齢は、打込み直後、または凝結開始時とされる。打込み直後とすると、温度上昇時の圧縮応力を大きく評価し、危険側の結果を与えるため、単位セメント量が多く、温度上昇が速い場合は凝結直後にするのが望ましい。

拘束には、内部拘束および外部拘束の2種類がある。内部拘束は内外面の温度差とその分布の影響を受け、外部拘束の程度は拘束体と被拘束体の水平境界面の一体性と温度勾配に大きく依存する。水平境界面におけるすべりや剥離を厳密に考慮する場合は、高度な非線形解析手法を用いる必要があるが、実務上は大きな問題とならないので、通常、すべりや剥離は生じないものとして温度応力解析を行うことが多い。

クリープの影響を温度応力解析に導入する方法として、ヤング係数を低減する有効ヤング係数により評価する方法とクリープひずみを直接算定する方法がある。有効ヤング係数は、式(3.2)に示すように、ヤング係数 ( $4700\sqrt{f'_c(t)}$ ) を低減する形でクリープの影響を考慮したものである[6]。

$$E_e(t) = \phi(t) \times 4700 \sqrt{f'_c(t)} \quad (3.2)$$

$E_e(t)$  : 材齢  $t$  における有効ヤング係数

$\phi(t)$  : クリープの影響を考慮するための補正係数

$f'_c(t)$  : コンクリートの圧縮強度

### 3.4 温度ひび割れの評価技術

#### (1) ひび割れ発生条件

ひび割れ発生条件は、次の4種類に大別できる。なお、リファレンスの引張強度とは、基準としたい測定可能な引張強度のことであり、水中養生供試体の割裂引張強度などを指す。

- 1) 拘束引張応力 > リファレンスの引張強度
- 2) 拘束引張応力がリファレンスの引張強度の一定割合に達する
- 3) 拘束引張ひずみ > 引張伸び能力
- 4) 破壊力学に基づくひび割れ発生・進展条件を満たす

#### (2) ひび割れ発生確率

コンクリートの品質、周囲環境条件、拘束条件などには不確定な要因が含まれる。そのため、応力強度比に基づきひび割れ発生を予測したとしても、必ずひび割れるとは限らない。そこで、どの程度の確からしきでひび割れ発生するのかを表すひび割れ発生確率を用いて検討される。

#### (3) ひび割れ幅

ひび割れ解析手法には、付着損失を考慮したFEM、簡易法としてCPひび割れ幅法、CP表面ひび割れ幅法およびHybrid CP/FEM法がある。

### 3.5 温度ひび割れの影響評価と制御目標

本来は、温度ひび割れが構造物の性能に及ぼす影響を評価したうえで制御すべきであるが、その影響度が定量的に示されている学会規準・指針類はほとんどない。

一般に、温度ひび割れが構造物の性能に及ぼす影響は、ひび割れの状態およびひび割れ幅によって評価され、ひび割れの有無およびひび割れ幅で制御されることが多い。ひび割れの有無については、表-3.2のように、ひび割れ発生確率を設定して検討するのが一般的である。

表-3.2 ひび割れ発生確率の設定目安[6]

設定目安	ひび割れ発生確率
ひび割れを防止したい	5%以下
ひび割れの発生をできるだけ制限したい	25%以下
ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大にならないように制限したい	85%以下

### 4. 温度ひび割れの解析技術

#### 4.1 温度ひび割れ解析技術の現状

現状の温度応力解析技術は、解析手法自体非常に高度化しており、大容量解析を比較的容易に行えるようになっている。しかし、解析モデルが相違したり、材料モデル（各種熱特性値および力学的特性値）が使用する材料・配合、打込み後の養生条件、環境条件、施工条件などによって異なれば、解析値に無視しえない影響を与えることもあるため、現実的には精度よく予測することは難しい。さらに、ひび割れ判定で多く用いられているひび割れ発生確率についても、その適用範囲を無視した利用も見受けられる。

この現状を踏まえ、本章では、温度応力に及ぼす影響要因の感度解析を行い、種々のモデルや解析条件が解析結果に及ぼす影響度について検討する。この検討に際しては、解析モデルの影響や個人的判断を避けるために、種々の要因に対する標準を提案し、ひび割れ発生確率の高精度化の可能性も合わせて検討している。

#### 4.2 解析モデルと解析条件の影響

温度応力解析を実施する場合、上述したように、数多くの解析条件を選定する必要がある。その多くは、土木学会コンクリート標準示方書に示されているが、すべてを網羅している訳ではなく、また必ずしも実際の現象と一致する条件を示していない場合もある。実際に解析を行う技術者がその選定や判断を行う必要があるが、解析ソフトの充実に伴い、それらのモデルの条件を十分に判断できない場合でも温度応力や解析結果は得られないため、妥当な評価がされていない可能性もある。

そこで、温度応力解析を実施する場合の条件に対して、個人的な判断による差異などないように、温度応力解析に用いる標準的な解析モデル（3次元FEM、全体要素図）、解析条件（材料モデル、周辺環境、地域）を本委員会にて提案し、それらと異なる場合の影響度を検討することとした。表-4.1の構造物を標準とし、表-4.2の要因について標準を定めた。具体的な提案内容

に関しては、委員会報告書を参照されたい。

#### 4.3 ひび割れ発生に及ぼす各種要因の感度解析

これまで曖昧であった各種要因の影響度を数値解析的に明かにし、さらにこれに基づくひび割れ発生確率図の高精度化の一環として、解析条件および解析モデルが温度応力の解析値に及ぼす影響について検討を行った。これは、多用されているひび割れ発生確率図について、それが得られた解析の前提条件を踏まえて、より実情に近い条件を考慮することによって高精度化を目指すものである。

影響要因の感度解析では、構造物の種類、セメントの違い、熱特性、対象地域（打込み温度

および外気温変動）、脱枠時材齢の違い、材料モデル（強度、クリープ、自己収縮の有無等）の違い等を解析条件として解析を行った。本委員会では温度解析、応力解析ともに3次元FEM解析を標準とし、温度解析を3次元FEM、応力解析をCP法とする解析結果と比較することにより解析モデルの相違の影響を検討した。

構造物としては、スラブ状構造物、壁状構造物および柱状構造物の3種類とした。表-4.1に各構造物の標準寸法を示す。また、各要因に対する解析条件の検討数を表-4.2に示す。

3次元解析の実施数は900を超え、CP法による解析数を加えると1300ケース以上となる。

表-4.1 構造物種別ごとの標準形状

対象構造物	形状(m)								
	地盤			底板			壁または柱		
	長さ	幅	高さ	長さ	幅	高さ	長さ	幅	高さ
スラブ状構造物	40	30	15	20	14	3.5	—	—	—
壁状構造物	40	30	15	20	9	1.3	20.0	1.0	4
柱状構造物	40	30	15	20	9	3.5	8.0	4.0	5×3

表-4.2 検討要因と解析ケース

No.	検討項目	ケース数	解析条件										
			構造物形状	水セメント比 (%)	セメント種別	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	断熱温度上昇特性	対象地域	打込み時期	比熱 (kJ/kg°C)	熱伝導率 (W・m°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	
1	構造物形状の違いの影響	56	14	1	2	1	1	1	2	1	1	1	
2	セメント種別の違いの影響	72	1	1	4	1	2	3	3	1	1	1	
3	断熱温度上昇特性の影響	57	1	1	4	1	5	1	3	1	1	1	
4	対象地域及び打込み温度の影響	33	1	1	1	1	1	11	3	1	1	1	
5	熱特性値の影響	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	養生方法の違い	567	2	1	3	1	1	3	3	1	1	1	
7	自己収縮の影響	72	1	1	4	1	1	3	3	1	1	1	
8	地盤特性の違い	18	3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	
9	圧縮強度の温度依存性の有無	72	1	1	4	1	1	3	3	1	1	1	
10	クリープ式の違い	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
計		954											

No.	検討項目	解析条件									
		線膨張係数 (×10 <sup>-6</sup> /°C)	表面熱伝達係数(W/m <sup>2</sup> °C)		養生期間 (日)	自己収縮	地盤剛性 Ec/Er	圧縮強度	引張強度	弾性係数	クリープ
			上面	側面							
1	構造物形状の違いの影響	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	セメント種別の違いの影響	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	断熱温度上昇特性の影響	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	対象地域及び打込み温度の影響	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	熱特性値の影響	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	養生方法の違い	1	4	3	3	1	1	1	1	1	1
7	自己収縮の影響	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
8	地盤特性の違い	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1
9	圧縮強度の温度依存性の有無	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
10	クリープ式の違い	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4

委員会報告書では、整理できた各要因での影響解析において、比較的高い相関関係のあった温度降下量と最小ひび割れ指数との関係およびCPMとの比較結果について述べている。図-4.1に温度降下量と最小ひび割れ指数との関係、図-4.2に最小ひび割れ指数に関してCP法と3次元FEMとを比較した結果を示す。

3次元FEMによる影響解析では、最新の断熱温度上昇特性の導入、自己収縮、圧縮強度の時間依存性、圧縮強度および引張強度における硬化原点の導入など、現状において極力実現現象に近い解析を実施し、現行のひび割れ発生確率曲線を算定した時と同様の解析方法（コンクリート標準示方書の解析条件を用いてCPMによる応力解析を実施して算定したひび割れ指数）で求めた結果と比較を行った。その結果、最小ひび割れ指数において、両者に差異が見られる結果となったが、これらの差異がより実現現象に近い結果かどうかについては、実構造物との比較検討を行う必要がある。これらの検討・評価に関しては、指針作成時に実施する。

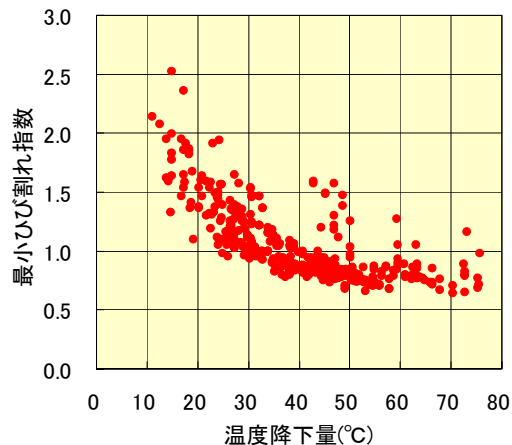


図-4.1 温度降下量と最小ひび割れ指数との関係

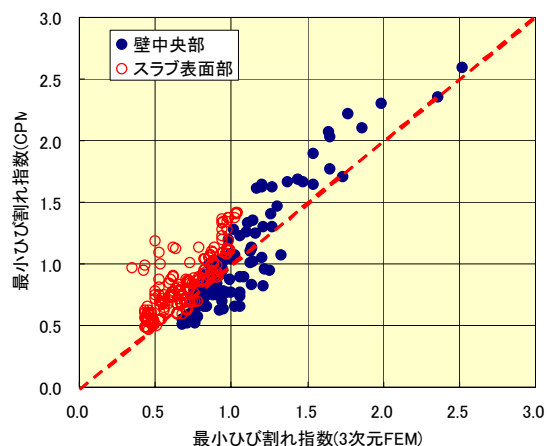


図-4.2 CPMと3次元FEMとの関係

## 5. 温度ひび割れ制御技術

### 5.1 低熱ポルトランドセメントの断熱温度上昇と強度発現特性の推奨値

低熱ポルトランドセメントの使用は、温度ひび割れ制御に有効である。流動性や高温履歴下の強度発現が良好なこともあって、マスコンクリートのみならず、高流動・自己充填コンクリートおよび高強度コンクリートにも近年多用されるようになってきた。しかし、普通・中庸熱等の汎用的なセメントに対しては、設計・施工段階で用いることのできる断熱温度上昇式および強度発現特性が指針等に示されているものの、低熱ポルトランドセメントについては推奨式が与えられていない。そこで、低熱ポルトランドセメントの製造実績が多いメーカー数社の技術資料に基づいた検討を行い、最近の品質を反映させた低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇推奨式および強度発現特性

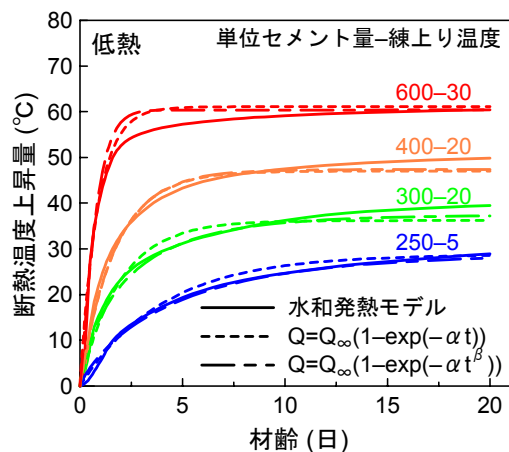


図-5.1 提案式による低熱ポルトランドセメントの断熱温度上昇の適合状況

算定式を提示した。図-5.1は、精度の検証を経て感度解析に用いた複合水和発熱モデルによる断熱温度上昇の解析結果と提案式との適合性の



一例を示したものである。また、図-5.2には、有効材齢の関数として定式化した提案式による圧縮強度発現率の適合状況の一例を示す。

### 5.2 混合セメントによる温度ひび割れ制御

マスコンクリート用の低発熱形高炉セメントは汎用の高炉セメントとは若干異なり、低発熱を目的として粉末度を小さくし置換率を高め設定している。従来、温度ひび割れを抑制する目的で高炉セメントを用いるのは、温度上昇量を下げることが意図されたものであったが、最近では、高炉セメントを用いても温度ひび割れの抑制にはほとんど効果がなく、むしろ温度ひび割れが発生しやすいという逆の傾向も指摘されている。その理由については、ひび割れ感受性や収縮量の観点からの説明が試みられているものの、最近のデータでは高炉セメントを用いた場合の収縮量はそれほど大きくないという報告もあり、まだ明確な結論を見るに至っていない。

なお、最近では、収縮量の低減を目的として、粉末度を小さくし、セッコウ量を増加させた収縮抑制形の高炉セメントも製造されており、温度ひび割れの抑制に対する一定の効果が確認されている。

### 5.3 膨張材による温度ひび割れ制御と評価

膨張材は、ケミカルプレストレスの導入による曲げ強度の増加、あるいは乾燥収縮の補償によるひび割れの低減を主な用途としているが、温度ひび割れ制御にも用いられる。最近では、温度収縮を補償することによって温度収縮ひび割れ低減に効果を発揮する膨張材（マスコン用膨張材）も使用されている。図-5.3は、熱履歴を受けた場合のマスコン用膨張材の効果を膨張材無しの場合と比較したものである。

膨張材を温度ひび割れ制御に用いた事例は多く、普通コンクリートとの相対比較を行った多くの事例で温度応力抑制効果が確認されている。しかし、温度変化が大きい場合には、乾燥収縮補償を目的とした一般の膨張材を標準添加量使用する程度ではその効果は限定的なようである。適切な膨張材タイプを選定し、その効果の評価

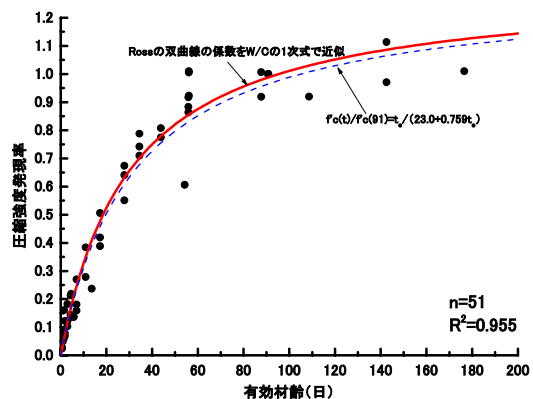


図-5.2 提案式による低熱ポルトランドセメントの強度発現率の適合状況

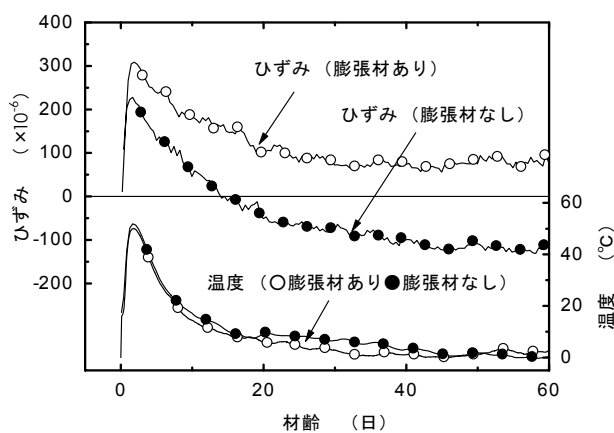


図-5.3 熱履歴を受けた場合のマスコン用膨張材の効果

は相対的に行うよう留意すべきである。

### 5.4 材料・配合による温度ひび割れ制御

材料・配合による温度ひび割れの制御対策としては、部材の温度変化を少なくすること、発生する温度応力を緩和すること、コンクリートの抵抗力を増加させることなどが考えられる。セメント種別を変更することによる温度ひび割れ制御では、発熱の小さいセメントに変更することになるが、若材齢時での温度変化などによって生じる引張応力に抵抗するだけの引張強度の発現にも注意が必要である。同一の配合条件でセメントの種類をパラメータとした温度応力感度解析を行ったところ、低熱ポルトランドセメントの大きな効果が確認された。また、配合面で大きな効果が期待できるのは、温度上昇の元となる単位セメント量の低減であり、単位セメント量が  $10\text{kg/m}^3$  低減すると終局断熱温度上

昇量で約 1°C の低減効果がある。

### 5.5 施工法による温度ひび割れ制御

施工法による温度ひび割れ制御対策としては、プレクーリング、パイプクーリング、打設リフト厚さの低減、ひび割れ誘発目地の設置、ひび割れ制御鉄筋の配置などがある。

プレクーリングは、打込み温度を低く抑えるために実施され、冷却水、氷、液体窒素などが用いられる。パイプクーリングは、1 m 前後の間隔で躯体内に配置されたクーリングパイプに冷却水を流し、躯体内の温度を低下させるもので、従来からコンクリートダムや大型橋脚基礎などの大規模なコンクリート構造物に適用されている。部材厚が大きい場合には層状に分割して施工することになるが、1 回当たりの打設リフト厚さを低減することで、ひび割れ指数の改善が期待できる。ひび割れ誘発目地は、あらかじめ止水板などを躯体内部に設置した箇所に計画的にひび割れを発生させることで、目地部以外でのひび割れの発生を抑制する方法である。図-5.4 は、温度応力解析によって評価された誘発目地間隔を変化させた場合のひび割れ指数の改善効果の一例を示したものである。この場合には、誘発目地間隔を 10m 以下にすることで、ひび割れ指数が大幅に改善している。ひび割れ制御鉄筋は、ひび割れ幅を制御する目的で配置される。ひび割れに直交する鉄筋量が増加すれば、ひび割れが分散してひび割れ幅は小さくなるので、ひび割れによる性能低下を抑制することが

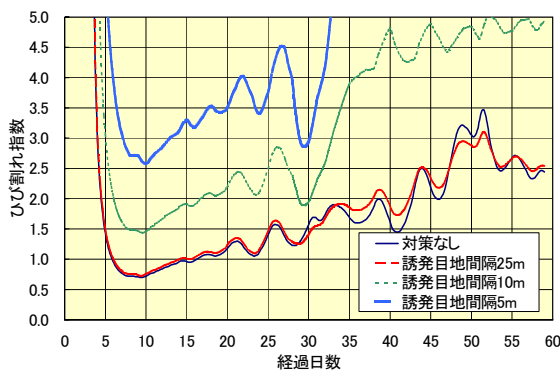


図-5.4 誘発目地間隔を変化させた場合のひび割れ指数の改善効果の例

できる。

### 6. おわりに

マスコンクリート構造物に発生するひび割れを抑制することは、コンクリート技術者にとっては大きな課題であり、本研究委員会では最新の情報を元に、評価技術、解析技術、制御技術を調査し、それぞれ WG において検討を重ね、研究委員会報告書として取りまとめた。この報告は、その概要をまとめたものであるため、詳細は研究委員会報告書を参照されたい。

末筆となりましたが、本委員会の調査にご協力いただいたアンケート回答者の皆様、委員会活動に献身的に尽力して下さった委員各位に厚く御礼申し上げます。

### <参考文献>

- [1] 田附他：ボックスラーメン構造物における温度ひび割れの制御方法に関する調査研究，土木学会論文集，No.739/V-60, pp265-272, 2003.8
- [2] 井上他：高炉スラグ粗骨材を用いた LNG 地下タンク底版コンクリートの施工，コンクリート工学 Vol.38, No.8, pp56-61, 2000.8
- [3] 楊楊ほか：若材齢におけるセメントペーストの熱膨張係数に関する研究，セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.209~214, 2000
- [4] 国森亮平ほか：若材齢コンクリートの熱膨張係数に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告書, Vol.22, No.2, pp.1033~1038, 2000
- [5] 川合雅弘ほか：コンクリートの自己収縮ひずみの予測式に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告書, Vol.25, No.1, pp.491~496, 2003
- [6] 土木学会編：コンクリート標準示方書 2002 年制定版