

# 論文 高炉セメント用温度ひび割れ抑制剤を添加したコンクリートの温度ひび割れ抑制効果に関する検討

川上 博行\*1・佐川 桂一郎\*2・橋本 学\*3・水野 浩平\*4

**要旨：**高炉セメントは製造時の CO<sub>2</sub> 排出量が少なく、化学抵抗性が高い材料として広く使用されているが、普通ポルトランドセメントと比較して断熱温度上昇量と線膨張係数が大きく、条件次第では温度ひび割れの発生リスクが高くなる傾向にある。これら 2 つの課題を解決する新たな混和剤型の温度ひび割れ抑制剤を開発し、それらの評価を行った。その結果、乾燥収縮の抑制、断熱温度上昇量の低下、線膨張係数の低下、の 3 つの効果を確認でき、コンクリートの温度ひび割れを大きく緩和できることが確認できた。また温度応力解析の結果からも、これらの効果によってひび割れリスクを低減できることが確認できた。

**キーワード：**温度ひび割れ、高炉セメント、マスコンクリート、水和反応、温度ひび割れ抑制剤

## 1. はじめに

高炉セメントは製造時の CO<sub>2</sub> 排出量が少なく<sup>1),2),3)</sup>、かつ化学抵抗性の高い高耐久な材料として<sup>2)</sup>、主に土木構造物に広く使用されている<sup>4)</sup>。一方、高炉セメント B 種は断熱温度上昇量が普通ポルトランドセメントとほぼ同等である点<sup>5)</sup>、かつ線膨張係数が普通セメントよりも大きい点から<sup>6)</sup>、普通セメントを用いた場合と比較して、高炉セメントを用いたコンクリートは温度ひび割れの発生確率が高くなる場合があることが知られている<sup>3),7),8)</sup>。温度ひび割れを抑制する従来技術として、膨張材や低発熱型高炉セメント<sup>2),3),8)</sup>、水和発熱抑制剤が研究<sup>9),10),11)</sup>されている。これらの技術の中で水和発熱抑制剤に着目すると、既存の水和発熱抑制剤はいずれも多価アルコール、オキシカルボン酸等の凝結遅延剤のエステル化物の加水分解によって経時的に水和反応を抑制し、終局断熱温度に至るまでの時間を遅らせる技術である。一方で、温度ひび割れを防止する手段としては水和発熱を抑制する以外に、線膨張係数のみを低下する方法も挙げられる<sup>12)</sup>。そこで本検討では、水和発熱を抑制しつつ、コンクリートの線膨張係数を低下させる効果を有する混和剤型の温度ひび割れ抑制剤を開発し、この抑制剤を高炉セメントコンクリートに添加した際のコンクリートの諸物性、並びに温度ひび割れ抑制効果の評価を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

セメントは高炉セメント B 種 (密度 3.04g/cm<sup>3</sup>) を使用し、細骨材は城陽産山砂 (S<sub>1</sub>, 密度 2.56g/cm<sup>3</sup>)、揖斐川産川砂 (S<sub>2</sub>, 密度 2.60g/cm<sup>3</sup>)、粗骨材は西島産碎石 (密

度 2.60g/cm<sup>3</sup>) を使用した。混和剤は温度ひび割れ抑制剤 (液状特殊界面活性剤系、以下、TC)、AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸化合物の複合体、以下、Ad) を使用し、空気量は AE 剤 (陰イオン界面活性剤) および消泡剤 (シリコーン系) で調整した。温度ひび割れ抑制剤、AE 減水剤、AE 剤および消泡剤は水の一部として内割にて添加した。目標スランブは 12cm、目標空気量は 4.5% とした。配合を表 1 に示す。

なお、本検討で使用した温度ひび割れ抑制剤は水に添加すると乳化する疎水性の高い界面活性剤であり、また減水性を有しているため、減水剤を併用することなく目標のスランブを得ることが可能であった。

### 2.2 評価項目

#### (1) フレッシュ物性、硬化体物性の測定

コンクリートの混練には強制二軸型ミキサを用い、粗骨材、細骨材 (S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>)、セメント、細骨材の順に材料を投入後、空練を 10 秒行い、練水投入後 90 秒混練した。1 バッチあたりの混練量は 40L とした。スランブ測定は JIS A 1101、空気量測定は JIS A 1128、圧縮強度測定は JIS A 1108、乾燥収縮量測定は JIS A 1129 (コンタクトゲージ法) にそれぞれ準じて行った。コンクリートの混練は 20 ± 2°C の環境下で行った。圧縮強度用供試体、線膨張係数測定用供試体、乾燥収縮測定用供試体、簡易断熱測定試料は 20 ± 2°C の室内で作成し、静置した。供試体は型枠の上部に湿布を乗せて 2 日間養生を行った後に脱型し、所定の材齢まで 20°C 水中養生を行った。

#### (2) 簡易断熱温度の測定

簡易断熱温度は、図 1 に示す発泡スチロール製断熱試験容器にコンクリート 30L を充填し、20°C ± 2°C の環

\*1 花王 (株) テクノケミカル研究所 第 1 研究室 工修(正会員)

\*2 花王 (株) テクノケミカル研究所 第 1 研究室 理修(正会員)

\*3 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 工修 (正会員)

\*4 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 研究員 工修 (正会員)

表-1 コンクリート配合

配合	水セメント比 (%)	細骨材比 (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤添加量 (kg/m <sup>3</sup> )	
			W	C	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	G	Ad	TC
配合 1	50	46	165	330	562	245	957	3.3	-
配合 2								-	3.3
配合 3								-	4.95

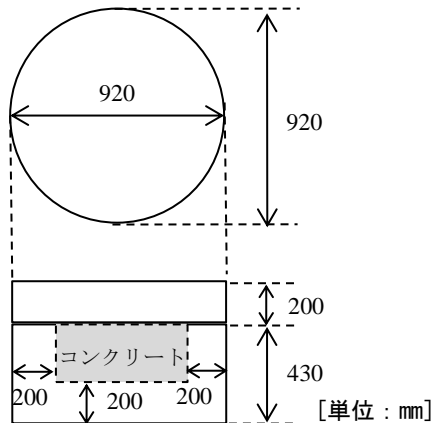


図-1 簡易断熱試験で使用した断熱容器の外寸法

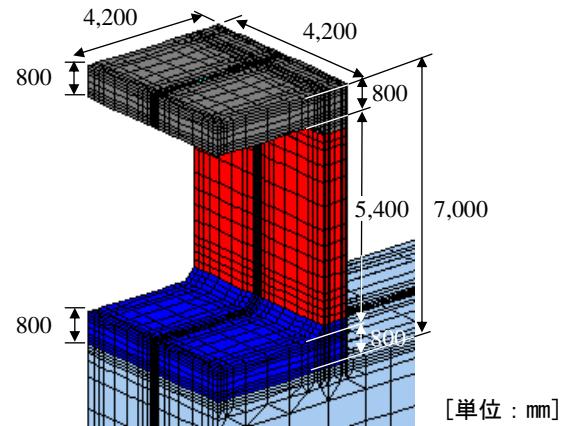


図-2 温度応力解析を適用したボックスカルバートのモデル

境下で、中心部の温度を熱電対にて測定した。温度の測定間隔は10分とした。

### (3)熱膨張量・収縮量の測定

以下の手順でコンクリートの熱膨張量および収縮量を求めた。まず、10×10×40cm コンクリート供試体に埋込み型ひずみゲージと熱電対を埋め込み、2日間湿布養生後脱型し、7日間20℃水中養生を行った。養生後、供試体を水槽に沈めた状態で20℃→55℃→20℃の温度履歴を与えた際のひずみ量を測定した。昇温、冷却速度は2℃/hrとした。

### 2.3 温度応力解析

ボックスカルバートを対象に3次元FEM非定常熱伝導解析を実施した。解析対象は図-2の様な高さ7,000mm、横4,200mm、部材厚800mm、打設長4,200mmのボックスカルバートとし、底版、側壁、頂版の3回の打込みを想定した。打込み期間は1ヵ月とし、表-2の解析条件にて温度応力解析を行った。なお終局断熱温度上昇量および断熱温度上昇速度は式(1)に従うこととし、断熱容器固有の熱損失量を考慮して、簡易断熱試験の結果に最も合致する様に式(1)中のK、α、β値を定めた<sup>13)</sup>。

$$T = K[1 - \exp\{-\alpha(t - t_0)^\beta\}] \quad (1)$$

ここで、T: 温度 (°C)、K: 終局断熱温度上昇量 (°C)、t: 材齢 (hr)、t<sub>0</sub>: 昇温開始材齢 (hr)、α、β: 定数である。

引張強度および弾性係数は圧縮強度の測定値から「マ

表-2 温度応力解析条件

項目	単位	設定値
打込みの初期温度	°C	16.7
終局断熱温度上昇量	°C	実験データより算出
断熱温度上昇速度	°C/hr	実験データより算出
比熱	kJ/kg°C	1.15
熱伝導率	W/m°C	2.70
密度	kg/m <sup>3</sup>	2259
圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>	実験データ
引張強度	N/mm <sup>2</sup>	マスコン指針
弾性係数	N/mm <sup>2</sup>	マスコン指針
ポアソン比	-	マスコン指針
線膨張係数	μ/°C	実験データ
自己収縮	-	マスコン指針
表面熱伝導率	W/m <sup>2</sup> °C	マスコン指針

スコンクリートのひび割れ制御指針 2016 (以下マスコン指針と略記)<sup>6)</sup>の計算式を用いて算出した。ポアソン比、自己収縮量および表面熱伝導率もマスコン指針に準じる値を用いた。

## 3. 結果および考察

### 3.1 断熱温度測定結果

簡易断熱温度の測定結果を図-3に示す。この結果から配合1の最高温度は47.4℃、配合2の最高温度は42.7℃、配合3の最高温度は40.1℃であることが確認され、温度ひび割れ抑制剤の添加によってコンクリートの最高温度

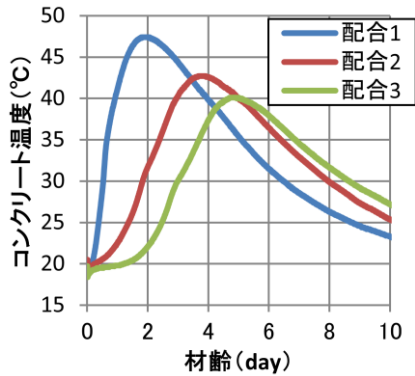


図-3 簡易断熱試験結果

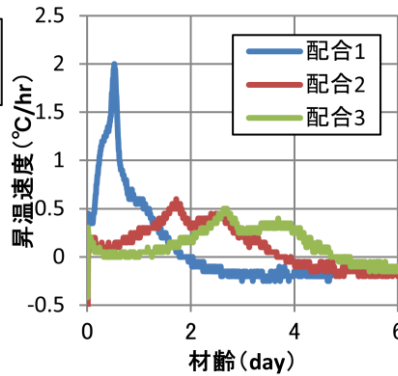


図-4 昇温速度の経時変化

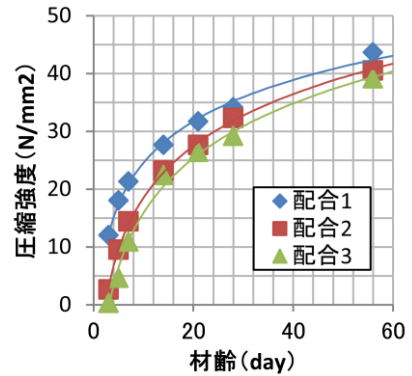


図-5 圧縮強度の経時変化

表-2 逆解析で得られた各種パラメーター

	K	$\alpha$	$\beta$
配合1	66.5	0.65	1.30
配合2	65.0	0.10	2.05
配合3	63.0	0.03	2.50

が低下することが確認できた。また最高温度を記録した材齢  $t_{MAX}$  に着目すると、温度ひび割れ抑制剤の添加によって  $t_{MAX}$  が遅れる傾向が確認された。続いて、簡易断熱試験における昇温速度の経時変化を確認することとした。なお本論文では、各材齢における温度と、その1時間後の温度との差を昇温速度 (°C/hr) と定義した。結果を図-4に示す。この図から、配合1の昇温速度の最高値が2.0°C/hr、配合2が0.6°C/hr、配合3が0.5°C/hrとなり、温度ひび割れ抑制剤の添加量の増加に伴って昇温速度が低下する傾向が確認された。ここで、コンクリートの比熱が経時的に変化せず一定だと仮定すると、コンクリートの昇温速度は水和発熱速度と容器の放熱速度に依存することが考えられる<sup>13)</sup>。

$$\frac{dT_{t_i}}{dt} C_c \propto \frac{dQ_c(t_i)}{dt} - \frac{dQ_b(t_i)}{dt} \quad (2)$$

ここで、 $dT_{t_i}/dt$ : 材齢  $t_i$  におけるコンクリートの昇温速度 (°C/hr),  $C_c$ : コンクリートの比熱 (J/kg/°C),  $dQ_c(t_i)/dt$ : 材齢  $t_i$  におけるコンクリートの水和発熱速度 (J/hr),  $dQ_b(t_i)/dt$ : 材齢  $t_i$  における断熱容器からの放熱速度 (J/hr) である。断熱容器からの放熱速度はニュートンの冷却法則により以下の式で表される。

$$\frac{1}{S} \frac{dQ_b(t_i)}{dt} = A(T_{t_i} - T_m) \quad (3)$$

ここで、 $S$ : 表面積 (m<sup>2</sup>),  $A$ : 定数,  $T_m$ : 外気温 (°C) である。また、式(3)から式(4)の関係が導出される。

$$Q_b(t_{MAX}) \propto \int_0^{t_{MAX}} T(t) dt \quad (4)$$

ここで、 $Q_b(t_{MAX})$ : 接水から材齢  $t_{MAX}$  までの断熱容器からの総放熱量 (J),  $T(t)$ : 温度の時間変化を表す関数である。各配合において接水から材齢  $t_{MAX}$  までの温度積分値を計算した結果、配合1: 797°C/hr, 配合2: 945°C/hr, 配合3: 856°C/hrとなった。この計算結果から、最高温度の低下には放熱の影響が寄与していることが推察された。

一方、配合1、配合2、配合3の簡易断熱温度履歴から逆解析によって得られた終局断熱温度上昇量  $K$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  値は表-2に示す値となる。この表から配合1、配合2および配合3の終局断熱温度はそれぞれ66.5°C, 65.0°C, 63.0°Cとなり、温度ひび割れ抑制剤の添加によって終局断熱温度が低下する傾向が確認できた。断熱条件では式(2)の放熱が0となることから、終局断熱温度の低下は水和発熱量の低下を意味すると言える。

以上の結果から、温度ひび割れ抑制剤の添加による最高温度の低下には、水和発熱量の低下と放熱量の増加の両方が寄与していることが示唆された。なお、完全断熱条件では簡易断熱試験での結果と比較して、温度ひび割れ抑制剤の効果が小さくなることから、本検討で使用した温度ひび割れ抑制剤は、放熱の影響が比較的大きな構造に対してより効果的に作用することが示唆された。

### 3.2 圧縮強度試験結果

水和発熱抑制剤の添加が圧縮強度に与える影響を確認するために、圧縮強度の測定を行った。圧縮強度の経時変化を図-5に示す。この結果から、温度ひび割れ抑制剤を添加した配合2および配合3は、配合1と比較して、同一材齢における強度が低い傾向を示した。一方、横軸の材齢を対数目盛にした際の圧縮強度の経時変化を図-6に示す。この結果から、圧縮強度と材齢との間には直線関係が確認され、また、直線の傾きは配合2、および配合3の方が配合1と比較して大きい傾向が確認でき、かつ配合2、配合3の直線は材齢100日あたりで収束している傾向が確認できた。このことから、温度ひび割れ抑制剤を添加したコンクリートの圧縮強度は、長期的には温度ひび割れ抑制剤を添加していない配合1と同程度になると推察した。

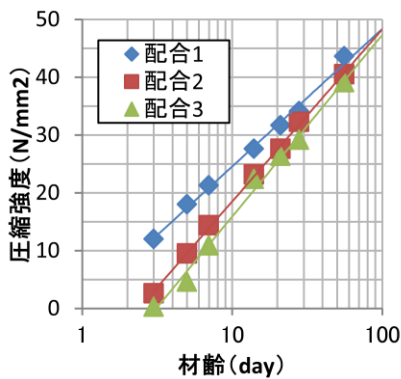


図-6 圧縮強度の経時変化  
(横軸対数)

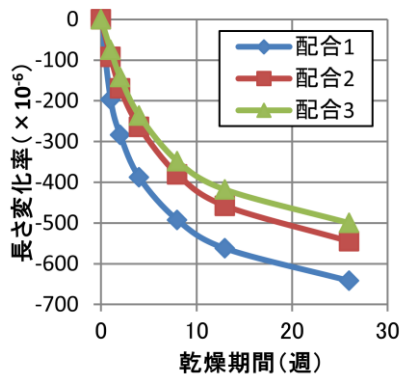


図-7 乾燥収縮量の経時変化

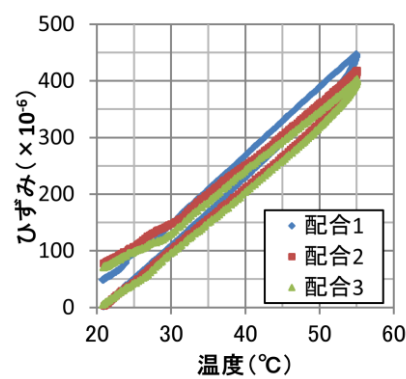


図-8 温度とひずみの関係

表-3 線膨張係数一覧

	線膨張係数(×10 <sup>-6</sup> /°C)		
	昇温	冷却	平均
配合1	12.64	11.75	12.20
配合2	11.84	9.87	10.86
配合3	11.48	9.67	10.58

また、添加量が多いほど乾燥収縮抑制効果が大きい傾向が確認された。既往の研究では、低級アルコールのアルキレンオキサイド付加物等の親水基と疎水基を持つ低分子量有機化合物に乾燥収縮を低減する効果があることが知られている<sup>14)</sup>。本検討で用いた温度ひび割れ抑制剤は既存の技術と同様、親水基と疎水基を持つ特殊界面活性剤であることから、既存の収縮低減剤と同様の作用機構を有していると考察した。

### 3.4 線膨張係数測定結果

図-8にコンクリート温度とひずみの関係を示す。この図から、昇温と冷却においてヒステリシスを描いており、昇温開始時と冷却終了時のひずみ量が一致しない傾向が確認された。この理由に関しては、水和反応が十分に進行しきっていないために、自己収縮や、温度変化に伴う水和生成物の構造変化等の影響を受けたためだと推察している。続いて、温度とひずみの直線の傾きから求めた各配合での線膨張係数を表-3に示す。この表から、温度ひび割れ抑制剤の添加によって昇温条件、冷却条件の両方で線膨張係数が低下する傾向が確認され、特に冷却過程における線膨張係数の低下効果が大きいことが確認できた。この特性はコンクリートが最高温度に達してから温度が低下していく過程におけるひずみ量を低減することを意味する事から、温度ひび割れを抑制する上で非常に効果的だと言える。また、先に述べた断熱温度の低減効果と併せる事で、より大きな温度ひび割れ抑制効果が期待できる。

なお既往の研究では、乾燥収縮や自己収縮を抑制する一部の水溶性有機化合物に線膨張係数を低下させる効果があることが報告されているが<sup>15),16),17)</sup>、その作用機構の

### 3.3 乾燥収縮測定結果

長さ変化の経時変化を図-7に示す。この結果から、温度ひび割れ抑制剤の添加によって乾燥収縮が抑制される傾向が確認され、また、

詳細は明らかになっていない。一方で、セメント硬化体中の水の統計的吸着厚さ(セメント硬化体の質量含水率を水蒸気吸着法で求めた硬化体の比表面積で除した値)が大きくなるほど、セメント硬化体の線膨張係数は小さくなることが実験的に示されている<sup>16)</sup>。本検討で用いた温度ひび割れ抑制剤は疎水性の界面活性剤であり、長期的に自由水中に残存することが予想される。また、活性剤の一部はセメントペースト相の空隙表面に配位し、空隙表面が疎水的にふるまうと推察される。そのため、温度ひび割れ抑制剤を添加したコンクリート中では水分子が吸着できる場が相対的に少なくなり、水分子が多層吸着することで吸着厚さが大きくなることが予想される。前述の通り、水の統計的吸着厚さが大きいほどセメント硬化体の線膨張係数が小さくなる傾向にあるため、温度ひび割れ抑制剤を添加したコンクリートの線膨張係数は低下すると考えられる。なお、これらの考察に関しては今後セメント硬化体を用いて検証を行う予定である。

### 3.5 温度応力解析結果

3次元FEM非定常熱伝導解析で求めたボックスカルバート断面の最高温度分布を図-9に示す。この図から、温度ひび割れ抑制剤の添加による最高温度の低下が確認され、特に効果が高い側壁の下部に着目すると、温度ひび割れ抑制剤1%添加で最高温度が50.7°Cから42.4°Cに8.3°C低下し、1.5%添加で最高温度が50.7°Cから40.0°Cに10.7°C低下することが確認できた。また、最大主応力の分布を図-10に、最小ひび割れ指数の分布を図-11に示す。この図から、温度ひび割れ抑制剤の温度抑制効果、線膨張係数低減効果によって最大主応力が低下し、ひび割れのリスクを低減できることが明らかとなった。特に効果が高い側壁の下部では温度ひび割れ抑制剤を添加していない場合と比較して、温度ひび割れ抑制剤1%添加でひび割れ指数が1.60倍、1.5%添加で1.87倍増加することが確認できた。ここで、線膨張係数の低下と断熱温度上昇量の低下のそれぞれの寄与を確認するために、配合1の断熱温度・圧縮強度条件で線膨張係数を配合2の条件にした場合(図-12)と、配合2の断熱温度・

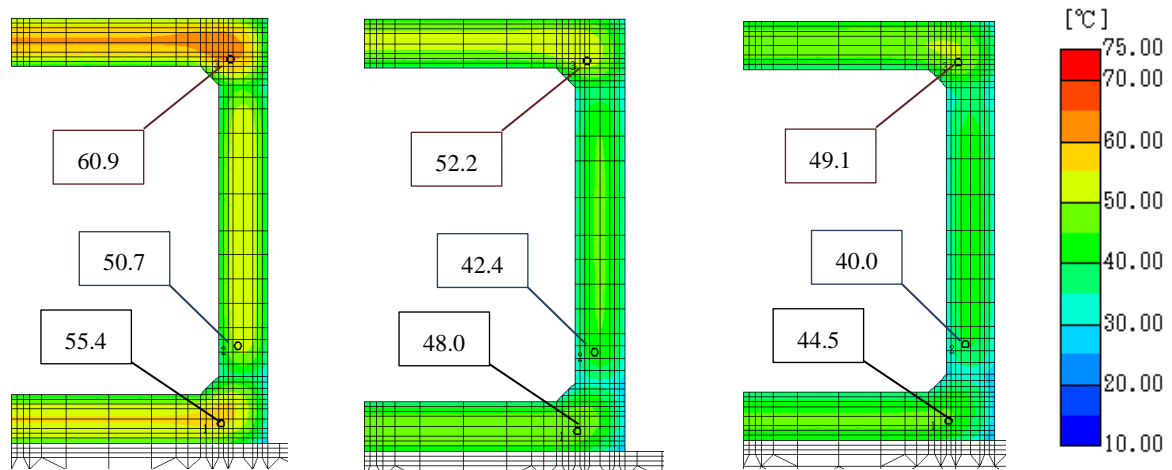


図-9 温度応力解析で得られた最高温度分布 (左: 配合1, 中: 配合2, 右: 配合3)

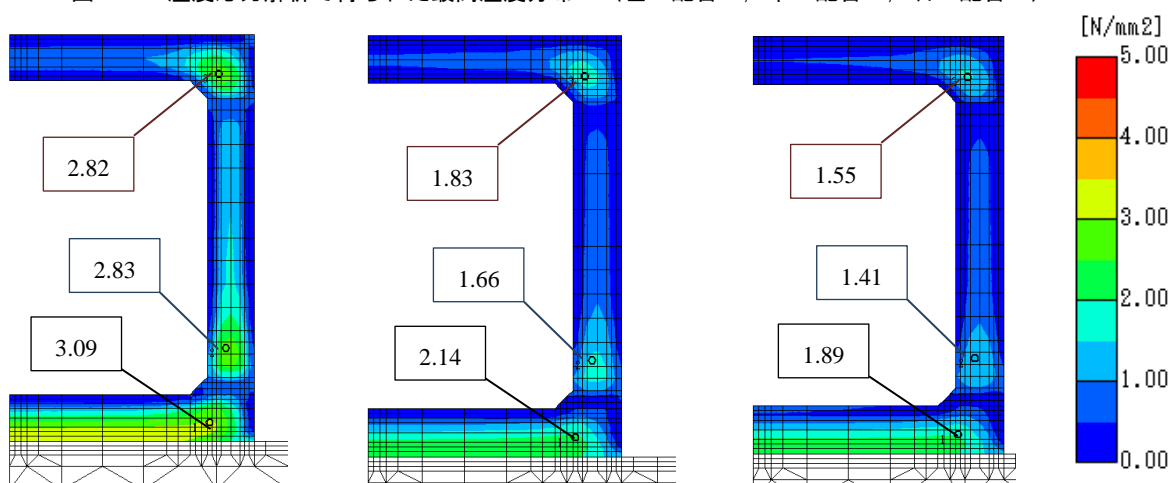


図-10 温度応力解析で得られた最大主応力分布 (左: 配合1, 中: 配合2, 右: 配合3)

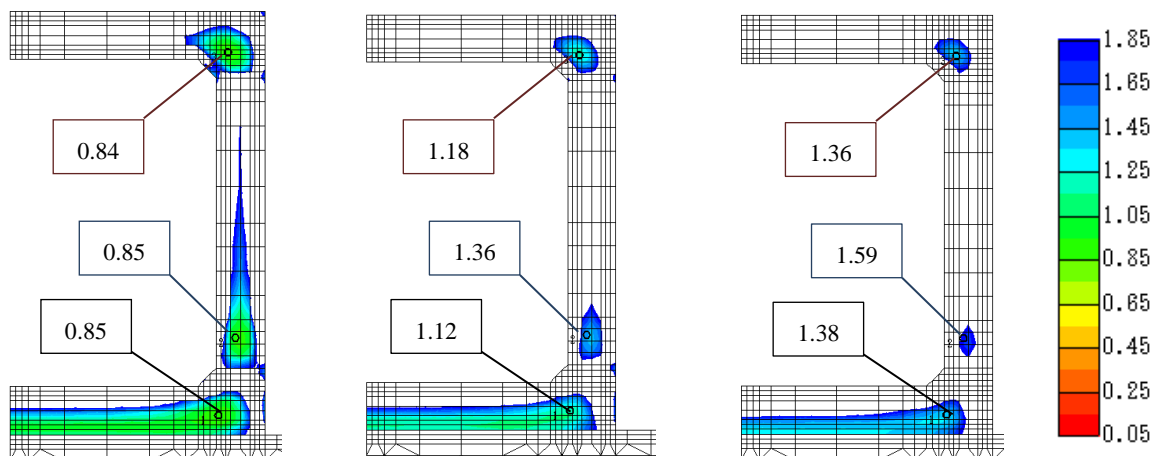


図-11 温度応力解析で得られた最小ひび割れ指数の分布 (左: 配合1, 中: 配合2, 右: 配合3)

圧縮強度条件で線膨張係数を配合1の条件にした場合(図-13)の、ひび割れ指数の分布をそれぞれ求めた。底版部のひび割れ指数に着目すると、温度ひび割れ抑制剤を添加していない場合のひび割れ指数0.85と比較して、線膨張係数のみを低下させた場合のひび割れ指数は0.97(無添加の1.14倍)、断熱温度上昇量のみを低下させた場合のひび割れ指数は0.98(1.15倍)となり、線膨張係数と断熱温度上昇量の両方を低下させた場合の1.12

(1.32倍)と比較して効果が小さいことが確認された。また上記の結果から、温度ひび割れ抑制剤は線膨張係数低下と断熱温度上昇量低下の両方の効果が併用されることによって、ひび割れのリスクを低減していることが確認できた。

#### 4. まとめ

本論文での検討結果および考察を以下にまとめる。

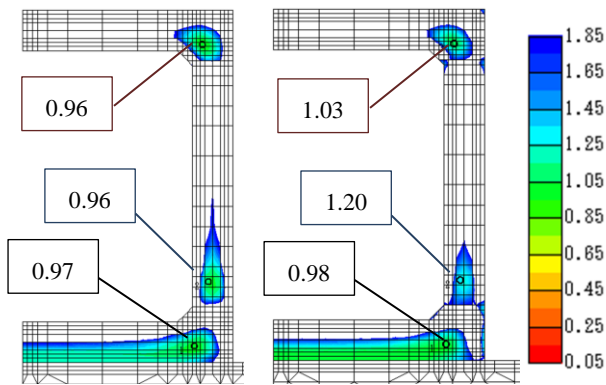


図-1 2 (左) 最小ひび割れ指数の分布  
(線膨張係数のみ低下)

図-1 3 (右) 最小ひび割れ指数の分布  
(断熱温度上昇量のみ低下)

- 高炉セメントの課題である線膨張係数と断熱温度の2点に着目し、それらを低下させる新たな温度ひび割れ抑制剤を開発した。上記ひび割れ抑制剤の効果を確認した結果、簡易断熱試験における最高温度の低下、乾燥収縮の抑制、線膨張係数の低下、の3つの効果が確認できた。
- 本検討で使用した温度ひび割れ抑制剤は親水基と疎水基を持つ界面活性剤であることから、既存の収縮低減剤と同様の作用機構によって乾燥収縮抑制効果と線膨張係数低下効果が発現したと考察した。
- 温度ひび割れ抑制剤の添加によって同一材齢における圧縮強度が低下する傾向を示したが、長期的には温度ひび割れ抑制剤を添加していないコンクリートと同等の水準に追いつくことが推察できた。
- 温度応力解析を行った結果、温度ひび割れ抑制剤の添加によってコンクリート部材の最高温度が低下し、最大主応力が低下することによってひび割れのリスクを低減できることが確認できた。特に効果が高い箇所では、温度ひび割れ抑制剤1%添加でひび割れ指数が1.60倍、1.5%添加で最高温度が1.87倍増加することが確認できた。また、線膨張係数の低下、断熱温度の低下それぞれ単独では効果が小さく、それらを併用することによって高い温度ひび割れ抑制効果が得られていることが確認できた。

#### 参考文献

- 寺本篤史, 丸山一平: 人工軽量骨材による高炉セメントコンクリートの線膨張係数制御の検討, セメントコンクリート論文集, Vol. 63, No.1, pp.107-113, 2009
- 藤原稔, 行徳爲己, 久保田賢, 新崎義幸: 低発熱型高炉セメントB種の特性と施工例, コンクリート工学, Vol. 47, No.3, pp10-15, 2009

- 檀康弘, 竹内一真, 伊代田岳史: 低発熱型高炉セメントB種の歴史とその性能, セメントコンクリート, No.733, pp.17-23, 2008
- 鉄鋼スラグ協会: 鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用, p.11, 2017
- 太田実, 小野金造, 佐取一男: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質に関する一試験, 土木技術資料, Vol. 19, No. 2, 1977
- 日本コンクリート協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, pp.41-82, 2016
- 山本修平 他: 高炉セメントコンクリートの断熱温度上昇と強度発現に関する研究, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp.441-442, 2003
- 亀山敬宏, 田邊大樹, 伊与田岳史: 温度ひび割れ抑制効果の高い低発熱型高炉セメントの考案, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.387-388, 2014
- 川中政美 他: 水和熱抑制剤を用いたコンクリートの特性～基礎的性状と温度応力解析の一考察～, 安藤建設技術研究所報, Vol.18, pp.27-31, 2012
- 東邦和, 上西隆, 起橋孝徳, 廣中哲也: 水和発熱抑制剤の部分使用による温度応力抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.381-386, 1995
- 田中敏嗣, 上野雅之, 下山義秀: 水和熱を抑制する有機物を用いたコンクリートの特性, セメントコンクリート論文集, No.52, pp.218-223, 1998
- 中里剛, 中山英明: 石灰石骨材を用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1294-1299, 2012
- 吉武勇, 中村秀明, 谷本俊夫, 浜田純夫: 現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱上昇測定法の提案, 土木学会論文集, No.606, pp.103-110 (1998)
- 後藤孝治, 酒井公式, 佐藤健: セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤, セメント・コンクリート, No.442, pp.9-15, 1983
- 後藤貴弘, 久芳昭二, 高尾昇, 白石良太: 膨張材および収縮低減剤の線膨張係数低減効果, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.861-862, 2008
- 寺本篤史, 丸山一平, 樋口隆行, 盛岡実: 高温履歴を有する高炉セメントペーストの若材齢体積変化に及ぼす収縮低減剤の影響, セメント・コンクリート論文集, No.69, pp.176-182, 2015
- 石関浩輔, 丸山一平, 寺本篤史: 収縮低減剤による若材齢線膨張係数の抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp.485-490, 2011