

# 論文 膨張材によるマスコンクリートの温度ひび割れ対策に関する検討

北澤 真\*<sup>1</sup>・羽瀧貴士\*<sup>1</sup>・村松道雄\*<sup>1</sup>・守分敦郎\*<sup>2</sup>

**要旨:** 室内実験によって膨張材の温度依存性を確認すると共に, 実構造物における計測データをもとに, 膨張材を用いた場合のマスコンクリートの温度応力解析手法について検討を行った. その結果, 膨張材を使用したコンクリートの無拘束膨張量は, 打設温度と温度上昇量によって異なることを確認した. さらに, 膨張によるひずみの変化を温度応力解析に取り込む方法について検討し, 解析結果が実測データよく一致する事を確認した.

**キーワード:** マスコンクリート, 膨張材, 温度応力解析, 無拘束膨張, 温度応力計測

## 1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れ対策の一つとして, 膨張材を用いてコンクリートに発生する引張応力を低減する方法がある. 膨張材による引張応力の低減効果としては, これまでの実構造物における計測結果によると, 0.5~1.5N/mm<sup>2</sup>程度低減させることが可能であることが報告されている<sup>1)2)3)</sup>. しかし, 膨張材による温度応力の低減効果に関する定量的な評価方法が確立されておらず, 事前に膨張材の効果を解析的に検討する手法も確立されていないようである. このためには, 結合材の種類や使用量によって水和発熱量が異なることや<sup>4)</sup>, 水和生成物の種類と生成量が異なることにより膨張量が変化すること<sup>5)</sup>さらには養生温度や水の供給量などより著しく膨張特性が変化すること<sup>6)</sup>等を把握することが重要である.

本研究では, 室内試験によって初期の養生条件, 特に温度に関する養生条件を変化させて, コンクリートの無拘束状態の膨張特性を確認した. さらに, 膨張材の膨張量を温度応力解析に反映させる手法について検討を行い, 室内実験と同配合のコンクリートで施工された構造物の計測結果と比較した.

構成されている. シリーズ1は, 表-1に示す配合のコンクリートを用いて, 無拘束状態の膨張特性の測定を行った. 使用したセメントは三成分系セメント(高炉セメントB種にスラグ45%, フライアッシュ20%を混和), 膨張材は主に水酸化カルシウムの結晶生成力によって膨張するタイプのものであり, その化学成分を表-2に示す. 無拘束膨張量の測定は, 自己収縮試験方法<sup>7)</sup>にしたがって, 図-2に示すように底面にテフロンシート敷いた100×100×400mmの鋼製型枠を用い, 埋込み型ひずみ計によって無拘束膨張量を測定した. なお, 端面には厚さ20mmの発泡スチロールを設置し, 端面が膨張を拘束しないようにし, 打設後直ちに型枠全体をポリエチレンフィルムで覆った後, プログラム制御の

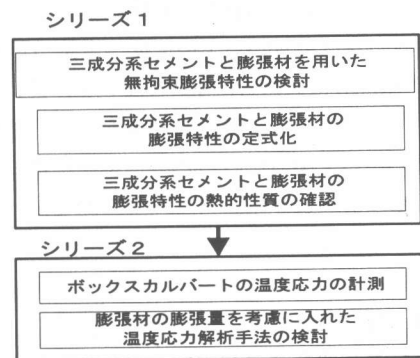


図-1 研究のフロー

## 2. 実験方法

本実験は, 図-1に示すように2シリーズから

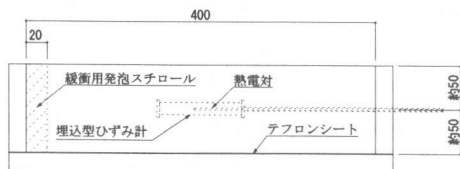
\* 1 東亜建設工業(株) 技術研究所 材料・構造研究室 (正会員)

\* 2 東亜建設工業(株) 技術研究所 材料・構造研究室室長 工博(正会員)

表-1 コンクリートの配合

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				セメント	水	膨張材	細骨材	粗骨材	AE減水剤
12	4.5	48.8	46.2	263	143	30	829	1038	2.63

< 側面図 >



< 平面図 >

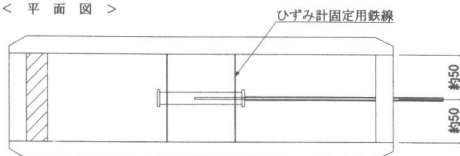


図-2 無拘束膨張を計測した試験体の概要

環境試験機内にて養生し、7 日間に渡って計測を行った。

コンクリートに与えた温度履歴を表-3 及び図-3 に示す。実験ケースとしては、打込温度 30、20、10℃、温度上昇量 10、20℃とし、比較のために打込温度 20℃については温度上昇量の無いケース、さらには膨張材を使用しないケースについても検討を行った。

シリーズ2では、JCI 温度応力解析プログラム<sup>8)</sup>を用いて温度応力解析を行い、膨張材の影響を解析に反映させる手法を検討した。図-4 に示すボックスカルバートの側壁(全長 57.5m、壁厚 1.5m)に熱電対、埋込み型ひずみ計、無応力計、有効応力計を設置し計測を行い、解析の精度について検討を行った。使用されたセメント、膨張材およびコンクリートの配合は、先のシリーズ1と同様である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 無拘束膨張量測定結果(シリーズ1)

無拘束膨張量の測定結果の例を図-5 に示す。ここで言う膨張材を混入したコンクリートの無拘束膨張量は、予め膨張材無しで計測した無拘束膨張量を差し引き、これを無拘束膨張量とし

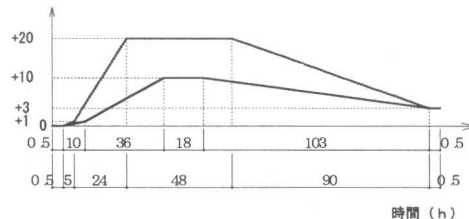
表-2 三成分系セメントおよび膨張材の化学成分

種類	化学成分(%)						
	ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
セメント	1.22	26.6	10.33	1.39	39.4	4.00	1.64
膨張材	2.80	17.5	7.20	1.90	51.7	0.70	17.9

表-3 コンクリート打設温度と養生温度

①	コンクリート打込温度(°C)	最高温度(°C)	最高温度到達時間(h)	温度上昇量(°C)	膨張材の有無
		②	③	④	
1	30	50	29.5	20	有
		40	46.5	10	
2	20	40	29.5	20	有
		30	46.5	10	
		20	-	0	無
		20	-	0	
3	10	30	29.5	20	有
		20	46.5	10	

温度上昇量(°C)



— 温度上昇量20°Cのケース  
— 温度上昇量10°Cのケース

図-3 温度履歴パターン

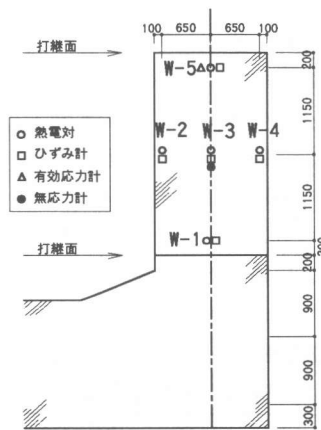


図-4 シリーズ2計測位置断面図

た。これは打設温度 20°C で温度上昇が 10, 20°C 及び温度上昇無しの場合を示したものである。なお、比較のために温度上昇無しで膨張材を使用していないケースのひずみの変化も併せて示してある。なお測定結果の温度変化に伴うひずみの変化はコンクリートの線膨張係数を  $1 \times 10^{-5}$  として除いてある。

実験の結果、打設後の温度上昇量が大きいほど無拘束膨張量が大きく、またその発生時期も早くなる傾向が確認された。すなわち、温度上昇量が 20°C のケースは打設後 33 時間で  $545 \mu\text{m}$  に達し、10°C 上昇させたケースでは 48 時間後に  $345 \mu\text{m}$ 、20°C 一定のケースには 52 時間後に  $270 \mu\text{m}$  となった。

コンクリートの打設温度と無拘束膨張量の最大値の関係を図-6 に示す。この膨張材の場合、温度上昇量が 10, 20°C のいずれの場合も、打設温度 20°C において最も大きい無拘束膨張量を示している。また、無拘束膨張量の最大値を温度上昇量との関係は図-7 のように表すことができる。無拘束膨張量の最大値は、温度上昇無しの場合で  $290 \mu\text{m}$ 、温度上昇量 10°C で  $350 \mu\text{m}$ 、温度上昇量 20°C で  $550 \mu\text{m}$  と、実験の範囲では温度上昇量が大きいほど膨張材によるコンクリートの無拘束膨張量は大きくなること分かる。

このように、膨張材を使用したコンクリートの膨張特性は温度依存特性が高いため、温度応力解析にはそのような特性を十分考慮に入れて検討を行うことが不可欠である。そこで、膨張材の膨張曲線を図-5, 6, 7 より、以下に示す式によって近似した。この式において打設温度は  $\alpha$  に、温度上昇量は  $\beta$  によって、また本配合における打設温度 20°C 標準養生時の最大無拘束膨張量は  $\epsilon'_{\text{max}}$  によって表現されている。

$$\epsilon_{\text{free}}(t) = \epsilon'_{\text{max}} \times (1 - e^{-\alpha \times t^\beta}) \quad (1)$$

ここに

$\alpha$  : 打設温度に関する係数

$$\alpha = (0.2 \times T_1 - 1) / 10000$$

$T_1$  : 打設温度(°C)

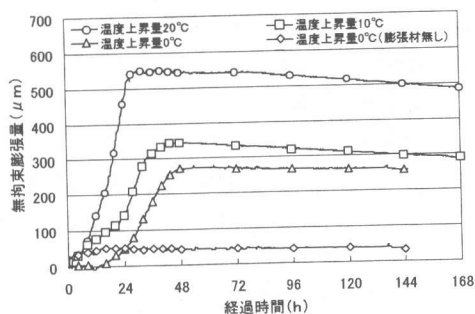


図-5 打設温度 20°C の無拘束膨張量

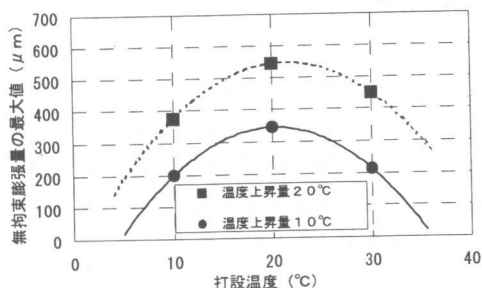


図-6 打設温度と無拘束膨張量の最大値

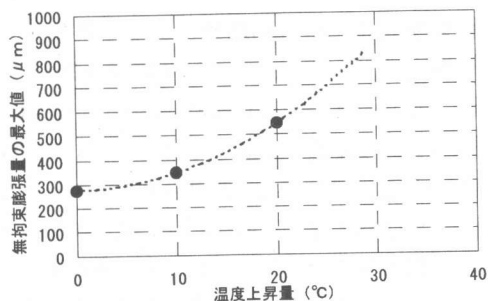


図-7 温度上昇量と無拘束膨張量の最大値

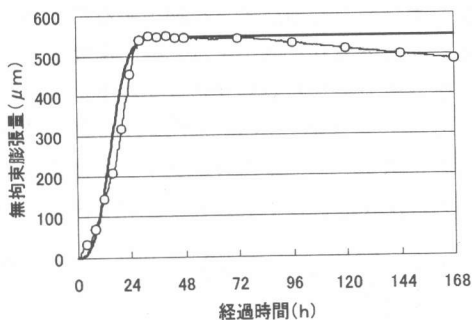


図-8 計測した無拘束膨張量と膨張曲線近似式 (打設温度 20°C, 温度上昇量 20°C の例)

$\beta$  : 温度上昇量に関する係数

$$\beta = 0.001 \times T_2^2 + 2.45$$

$T_2$  : 温度上昇量(°C)

$\epsilon_{\max}$  : 最大無拘束膨張量( $\mu$  m)

$$\epsilon_{\max} = -1.36T_1^2 + 57T_1 - (50 + \epsilon'_{\max} - 0.65T_2^2 - 0.5T_2)$$

$\epsilon'_{\max}$  : 打設温度20°C標準養生時の

最大無拘束膨張量

$T_1$  : 打設温度(°C)

$T_2$  : 温度上昇量(°C)

上式のうち、 $\epsilon'_{\max}$  は今回の実験において 275  $\mu$  mであった。

室内実験各ケースの膨張曲線近似式は温度上昇量 20°Cのものを例に、図-8のように表される。

また時間  $t$  における膨張材を 30kg/m<sup>3</sup> 混入したコンクリートの断熱温度上昇量  $T_{30}(t)$  は代表例として打設温度 20°Cの場合、以下に示す式によって表現することができる。

$$T_{30}(t) = 30.99 \times (1 - \exp(-0.411 \times t^{1.465})) \quad (2)$$

### 3.2 実構造物の計測結果 (シリーズ2)

実構造物における温度計測の結果を図-9に示す。コンクリートの打設温度は平均 12.5°C、断面中央部の温度上昇量は、打設後約 61 時間後で 16.4°C程度であった。冬場の施工であったために、いずれの温度も低く、ピークに達するまでの時間が長くなった。コンクリートに発生したひずみは、断面中央に設置したひずみ計の読み値から、同じ位置に設置した無応力計のひずみを差引くことによって、応力に与えるひずみ、すなわち有効ひずみを抽出することができる。ここで言う有効ひずみとは、温度ひずみと膨張ひずみを足しあわせたひずみである。このようにして求めた有効ひずみの計測結果を図-10に示す。ここで、コンクリートに発生する応力は次式によって求めることができる。

$$\sigma_i(t) = \sum_0^t \Delta \epsilon_{ef}(t_i) \times E_c(t_i) \quad (3)$$

ここに

$\sigma_i(t)$ : 時間  $t$  に発生する応力(N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta \epsilon_{ef}(t_i)$ : 時間  $t_i$  における有効ひずみの変化

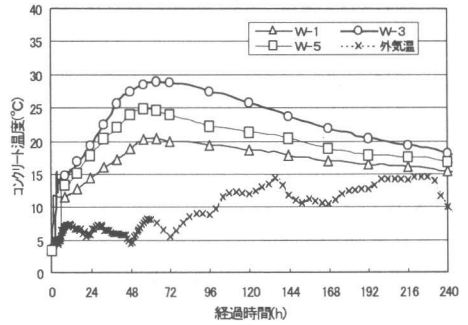


図-9 シリーズ2の温度計測結果

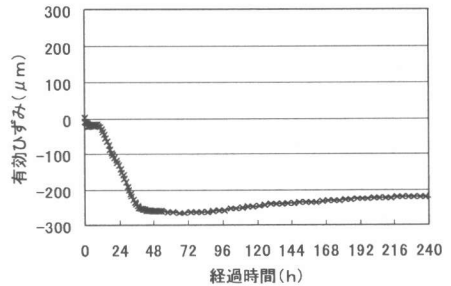


図-10 シリーズ2の断面中央における有効ひずみの計測結果

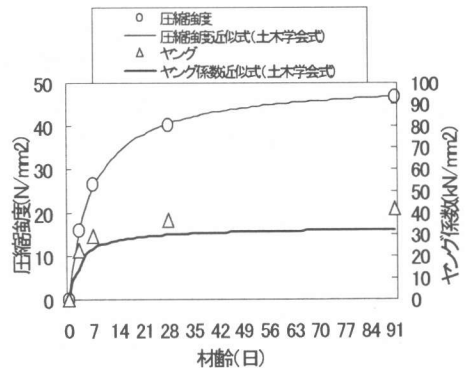


図-11 圧縮強度と有効ヤング係数

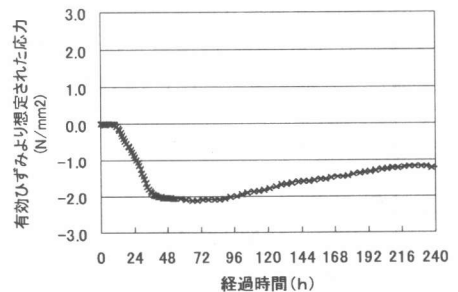


図-12 有効ひずみから想定される応力

$E_c(t_i)$ : 時間 $t_i$ における有効ヤング係数( $N/mm^2$ )

また、圧縮試験結果を基に有効ヤング係数を土木学会コンクリート標準示方書(施工編)<sup>9)</sup>に示される式によって求めた。

強度発現特性は、示方書に示される中庸熟セメントを用いると、図-11に示すように、測定値とよく一致することが確認された。しかし、ヤング係数については、実測値の方が若干大きい値を示した。ここで得られたヤング係数を用いて、式(3)よりコンクリートに発生する応力を求めると、図-12のようになる。

これによると初期に圧縮側の応力が $2.1N/mm^2$ 程度発生し、その後緩やかに圧縮応力が低減する傾向が見られたが、ここでの計測の範囲では計測終了時まで圧縮側にあった。また、構造物には温度応力によるひび割れは全く見られなかった。

### 3.3 温度応力解析検討結果

膨張材によるコンクリートのひずみは、水和熱によって発生するひずみと異なり、内部に配置されている鉄筋による拘束を受ける。したがって、式(1)によって得られる無拘束膨張は、構造物の配筋状態によって異なることになる。文献によると、本構造物の拘束鉄筋比0.4%程度では、無拘束膨張量の0.7程度までに低下することが示されている<sup>10)</sup>。一方、外部拘束の受け方は、膨張材によるひずみであっても水和熱の場合と同様と考えられる。

そこで、実構造物であるボックスカルバートの壁中央部について、打設温度の補正を行った断熱温度上昇を基に図-13に示すモデルを用いて、JCI温度応力解析プログラムに従って温度応力解析を実施し、温度測定結果と一致することを確認した後、温度応力の解析を行った。一方膨張材による外部拘束応力を算定するために、打設時の側壁中央部の打設温度、温度上昇量から式(1)を用いて以下のように無拘束膨張量近似式を求めた。

$$\varepsilon_{free}(t) = 362 \times (1 - e^{-0.00015 \times t^{2.719}}) \quad (4)$$

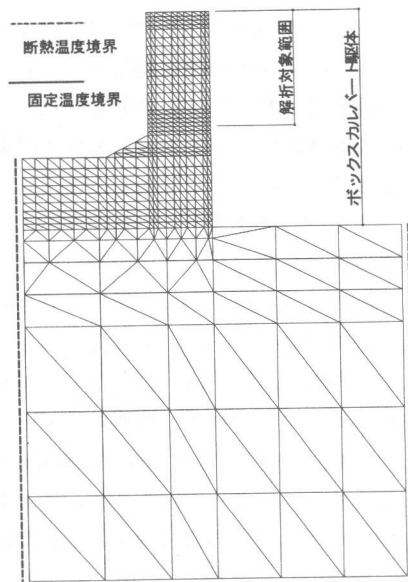


図-13 温度応力解析 解析モデル図

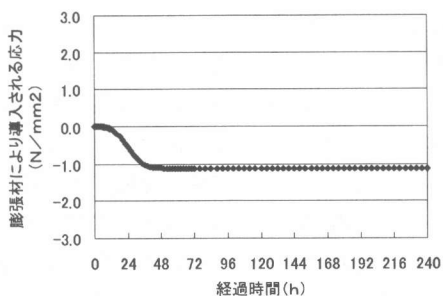


図-14 解析結果より得られる膨張応力

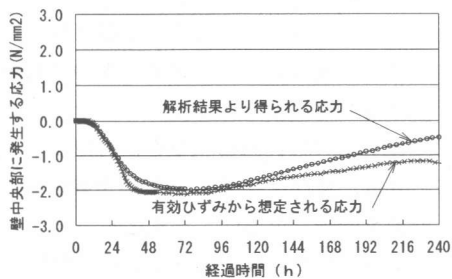


図-15 解析結果より得られる応力と有効ひずみから想定される応力の比較

この近似式の値に 0.7 をかけた膨張材によるひずみの変化を線膨張係数で除して温度変化に換算し、解析範囲が断熱状態にあるとして温度応力解析を行った。解析結果を図-14 に示す。

また、温度解析は「2次元FEM温度解析」を、温度応力解析は「CP法」を使用し、膨張材による膨張量の影響を除いた温度応力解析および膨張材の膨張量による応力解析いずれの場合も外部拘束係数は同じ値を用いた。このような2種類の解析によって得られた応力を加合わせたものを「解析結果より得られる応力」として、図-15 示す。解析の結果、膨張材によって応力分を考慮した解析値は、初期に 2.0N/mm<sup>2</sup> 程度の圧縮応力を示すことが分かった。その後は膨張材により導入される応力増分がないため、圧縮応力が減少している。

解析結果を先の実測データと比較すると両者は良く一致している。したがって、温度ひび割れ対策として膨張材を使用する場合、上記の解析手法を用いることによって、十分な精度で温度ひび割れ発生の予測を行うことが可能と考えられる。なお、本解析では無拘束膨張量は側壁全体において一定として解析している。これは全ての測定点において解析を行うことは、労力がかかり現実的ではなく、また本解析の結果は非常に実測値と一致する結果を得たことから、簡易的に解析を行うという意味で、この手法は有効であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の結果以下のことが確認された。

1. 膨張材を用いたコンクリートの無拘束膨張量は温度の影響をうける。
2. 配合毎の無拘束膨張量を、打設温度と温度上昇量、及び打設温度 20℃標準養生時の最大無拘束膨張量を用いて定式化し、これを温度に換算し断熱温度状態として同じ解析モデルの温度応力解析に導入することより、温度ひび割れ対策のための膨張材の効果を定量的に評価することができる。

#### 【参考文献】

- 1) 玉野富雄・福井聡・青景平昌・広野三夫：膨張コンクリートを用いたマスコンクリートの施工，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13, No. 1, pp. 911-916, 1991.
- 2) 中村時雄・斎藤文男・湯室和夫・佐野隆行：高ビーライト系低発熱セメントと水和熱抑制型膨張材を併用した高度浄水処理施設の側壁部マスコンクリート対策，コンクリート工学，Vol. 36, No. 9, pp. 28-34, 1998. 9
- 3) 辻幸和・玉木俊之・五味秀明：膨張材を使用したマスコンクリートの温度応力とケミカルプレストレス，セメント技術年報，No. 36, pp. 159-162, 1982.
- 4) 保利彰宏・盛岡実・坂井悦郎・大門正機：膨張材を混和した各種高流動モルタルの事故収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 2, pp. 163-168, 1998.
- 5) 盛岡実・萩原宏俊・坂井悦郎・大門正機：膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 2, pp. 169-174, 1998.
- 6) 辻幸和：コンクリート工学における膨張エネルギーの評価方法，コンクリート工学，Vol. 26, No. 10, pp. 5-13, 1988. 8
- 7) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II)，pp. 209-210, 1994. 5
- 8) 日本コンクリート工学協会マスコンクリートの温度応力研究委員会：ユーザーズマニュアルマスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム集，1996. 7
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書施工編(平成8年制定)，pp. 190-191, 1996. 3
- 10) 長滝重義・米山絃一・後藤祐司・八巻光晴：拘束を受けた膨張セメントコンクリートの基礎的性状，セメント技術年報，No. 24, pp. 219-223, 1970.