

# 論文 低発熱形セメントを用いた膨張コンクリートの温度応力評価

三谷 裕二\*1・大野 拓也\*1・谷村 充\*2

**要旨:** 中庸熱および低熱ポルトランドセメントを用いた膨張コンクリートを対象に、種々の温度下におけるPC鋼材およびインバー鋼材を用いた一軸拘束試験を行い、温度応力の低減効果や拘束膨張・収縮特性の温度依存性について検討した。また、鋼材ひずみと鋼材比の関係より応力解析用の膨張ひずみおよびヤング係数を算出し、各々について温度依存性を考慮した材料モデルを構築した。さらに、このモデルを適用した応力評価法により、マスコンクリートを想定した温度履歴を受ける膨張コンクリートの応力挙動を概ね良く推定できる可能性を示した。

**キーワード:** 膨張コンクリート, マスコンクリート, 低発熱形セメント, 温度応力, 材料モデル

## 1. はじめに

近年、膨張コンクリートの効果を解析的に評価するための材料モデル、とりわけ、有限要素法を用いた解析に取り入れるための膨張ひずみやヤング係数をはじめとする物性値に関する検討が進んでいる<sup>1)</sup>。また、日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」では、セメント種類ごとに膨張ひずみの設計用値を提示している<sup>2)</sup>。しかしながら、これまでの検討の多くは、普通セメントや高炉セメントを用いた膨張コンクリートを対象としたものであり、低発熱形のセメントなど異なるセメント種類については、実験データの蓄積・整備とともに、材料モデルの拡充およびその検証が求められている。

本研究では、中庸熱セメントおよび低熱セメントを用いた膨張コンクリートについて、種々の温度下におけるPC鋼材およびインバー鋼材を用いた一軸拘束試験を行い、拘束膨張・収縮特性の温度依存性を検討した。さらに、筆者らが過去に提示した手法<sup>3)</sup>により、応力解析に用いるための膨張ひずみおよびヤング係数に関する材料モデルを構築し、そのモデルを用いた応力評価法の適用性について検討を加えた。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配(調)合

表-1に使用材料、表-2にコンクリートの配(調)合を示す。セメントには中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメント、膨張材には低添加型の石灰系膨張材を用いた。水/(セメント+膨張材)比は50%、膨張材の混和量は20kg/m<sup>3</sup>とした。AE減水剤の使用量(結合材量×%)は一定とし、スランブが15±2.5cm、空気量が4.5±1.0%の範囲内になるように単位水量および

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	MC	中庸熱ポルトランドセメント/ 密度:3.21g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3250cm <sup>2</sup> /g
	LC	低熱ポルトランドセメント/ 密度:3.22g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3350cm <sup>2</sup> /g
膨張材	EX	低添加型石灰系膨張材/ 密度:3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3450cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	静岡県掛川市産山砂/表乾密度: 2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.85%
粗骨材	G	茨城県桜川市産砕石(砕石2005)/表 乾密度:2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.58%
混和剤	AD	AE減水剤/リグニソルホン酸系
	AE	空気量調整剤

表-2 コンクリートの配(調)合

記号	W/B* (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C		EX	S	G
				MC	LC			
MEX	50	45	168	316	-	20	792	991
M				336	-			
LEX			166	-	312	20	796	996
L				-	332			

\* B(結合材量)=C+EX

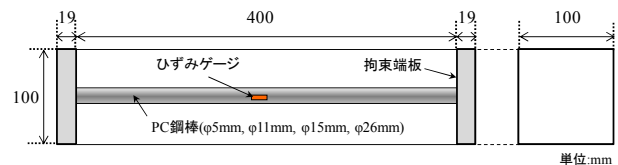


図-1 PC鋼材を用いた拘束供試体

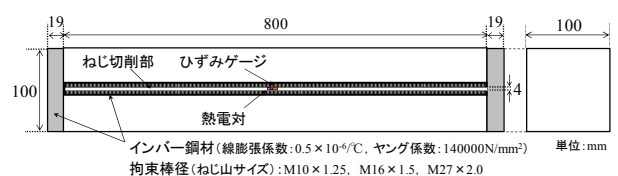


図-2 インバー鋼材を用いた拘束供試体

\*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 工修(正会員)

\*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 博士(工学)(正会員)

空気量調整剤の添加量を調整した。

## 2.2 作製供試体

図-1にPC鋼材を用いた拘束供試体の形状・寸法を示す。中央に鉄筋を配置した100×100×400mmの供試体とし、配置する丸鋼の直径を5, 11, 15, 26mmとすることで鋼材比を0.2, 1.0, 1.8, 5.5%に変化させた。本供試体では、初期に生じる膨張ひずみのみを測定対象としているため、PC鋼材に丸鋼を用いた。

図-2にインバー鋼材を用いた拘束供試体の形状・寸法を示す。インバー鋼材は線膨張係数が一般の鋼材の約1/20(0.5×10<sup>-6</sup>/°C)であるため、膨張材による膨張ひずみと温度ひずみの双方の作用を受ける状態での拘束膨張・収縮ひずみを測定することができる。本供試体では膨張と収縮の双方を測定するため、中央に配置したインバー鋼材にはねじ仕様に加工したものをを用い、長さを800mmとすることにより、鋼材とコンクリートの定着を確保した。鋼材比は0.7, 1.7, 5.7%の3水準とし、比較用として表-2に示す膨張材無混和コンクリートの供試体も作製した。

各供試体の鋼材ひずみは鋼材中央部の対称面に貼付した自己温度補償型ひずみゲージを用いて測定した。また、同じ位置に熱電対を設置し、温度を測定した。

なお、全ての供試体において、型枠の底面にテフロンシート、側面にポリエステルフィルムを設置し、コンクリートと型枠の摩擦を極力抑制した。

## 2.3 養生方法

PC鋼材を用いた拘束供試体の養生温度は一定温度20, 40, 60°Cの3水準とした。

インバー鋼材を用いた拘束供試体は、マスコンクリートの部材内部を想定した温度履歴下で養生した。設定した温度履歴は、厚さ2.5m、高さ2m、長さ15mの壁部材の3次元FEM温度解析より求めた部材中心位置における温度履歴とした(後掲図-4参照)。なお、解析における断熱温度上昇特性などの特性値にはひび割れ制御指針<sup>2)</sup>で提示されている値を用いた。

コンクリートの練混ぜは、20°C、R.H.80%の室内で行い、材齢4時間まで同室内に静置した後、仕上げ面にポリエステルフィルムを被せ、その上を湿布とラップで覆い、所定の温度に制御された恒温槽内に投入した。いずれの供試体も脱型しない状態で養生した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 拘束膨張特性

図-3に、20, 40, 60°C下におけるPC鋼材のひずみ(以下、膨張ひずみ)と鋼材比の関係を示す。材齢の起点は注水時点とし、各温度下におけるプロットの最終材齢は、膨張ひずみが最大値となった時点である。

MEX, LEXともに、膨張ひずみと鋼材比の関係は下に凸の曲線となり、養生温度が高いほど膨張の速度が大きく、早期に膨張ひずみが最大値に達している。これは、普通セメントや高炉セメントを用いた膨張コンクリートの場合と同様の傾向であった<sup>3), 4)</sup>。また、膨張ひずみの最大値は、鋼材比0.2%では養生温度が高いほど明確に大きい傾向があり、60°C下に対する20°C下の比率はMEXで約55%, LEXで約45%であった。しかしながら、鋼材比が大きくなるにしたがって養生温度による差は小さくなり、鋼材比1.8%, 5.5%では最大で10%程度であった。

MEXとLEXを比較すると、いずれの温度下においても、MEXの方が早期に膨張ひずみが最大値に達していた。また、20°C下での最大値は、鋼材比によらず、MEXとLEXがほぼ同等であった。一方、40°C, 60°C下においては、LEXの膨張ひずみが5~25%程度大きくなっており、鋼材比が小さいほどその差は顕著であった。なお、単位膨張材量が同一の場合、低熱セメントを用いた膨張コンクリートの膨張ひずみ(JIS A 6202 付属書の拘束試験)は、中庸熱セメントを用いた場合より大きい結果も報告<sup>2), 5)</sup>されており、セメント間での膨張ひずみの差については、養生条件の違いや脱型時期の違いなどの影響を含め、さらにデータを収集し、検討する必要がある。

### 3.2 温度履歴下における拘束膨張・収縮特性

図-4に、中庸熱セメントを用いたコンクリート(MEX, M)および低熱セメントを用いたコンクリート(LEX, L)について、インバー鋼材を用いた拘束試験に

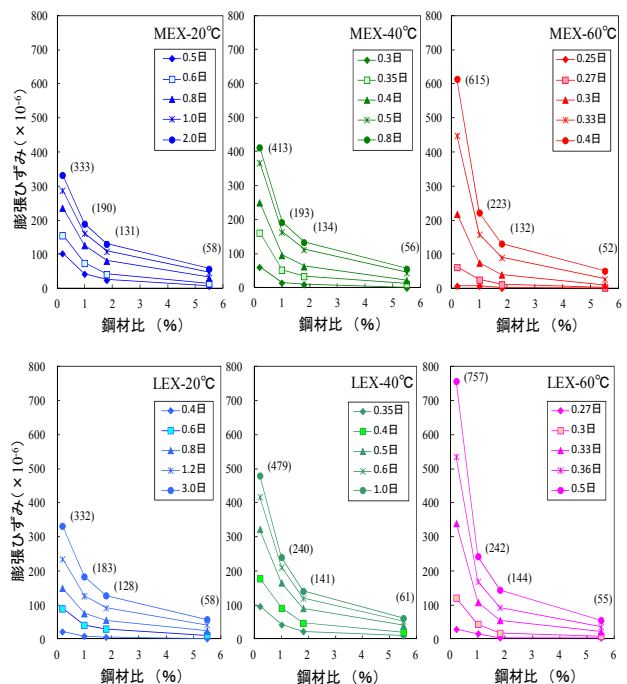


図-3 膨張ひずみと鋼材比の関係

よる拘束膨張・収縮ひずみおよび内部温度の経時変化を示す。

供試体の温度は、中庸熱セメントを用いた場合には、材齢3日付近で最高温度52℃、低熱セメントの場合には、材齢3日付近で最高温度42℃となり、その後、20℃程度まで徐々に温度が低下する履歴を示した。

膨張コンクリートの膨張ひずみを膨張材無混和コンクリートと比較すると、鋼材比0.7, 1.7, 5.7%について、MEXが約1.9, 1.7, 1.6倍、LEXが約2.0, 1.7, 1.8倍であった。

図-5は、膨張コンクリートと膨張材無混和コンクリートの拘束応力の差を示したものである。拘束応力は、コンクリートと鋼材の力の釣合い式から算出しており、この差は、膨張材によってもたらされた温度応力低減効果(以下、膨張応力)と考えることができる。鋼材比0.7, 1.7, 5.7%に対する膨張応力の最大値は、MEXが約0.2, 0.35, 0.6N/mm<sup>2</sup>、LEXが約0.2, 0.3, 0.6N/mm<sup>2</sup>であり、MEXとLEXは同程度であった。また、材齢4日付近で最大となった膨張応力は、MEXの鋼材比5.7%で0.1N/mm<sup>2</sup>程度低下していたものの、温度低下後においても保持される傾向が認められた。

#### 4. 材料モデルの検討

以下では、上記の試験結果を基に、筆者らが過去に提示した手法<sup>3)</sup>を適用し、応力解析に用いるための膨張ひずみおよびヤング係数について温度依存性を考慮した材料モデルを検討する。

図-6に両物性値を算定する方法の概要を示す。すなわち、膨張ひずみと鋼材比の関係をコンクリートと鋼材の力の釣合いとひずみの適合条件に基づく式(1)で回帰し、最小二乗法により式中の未知数である見かけの膨張ひずみ( $\epsilon_{cfa}$ )と見かけのヤング係数( $E_{ca}$ )を算出する。ここで、見かけの膨張ひずみは、拘束下での膨張ひずみより推定した鋼材比0%での膨張ひずみを示す。また、見かけのヤング係数は、刻々と変化する応力に対する弾性ひずみとクリープひずみの双方の影響が加味されたヤング係数と見なすことができる。

$$\Delta \epsilon_s(t_i) = \Delta \epsilon_{cfa}(t_i) / \{1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i)\} \quad (1)$$

ここに、 $\epsilon_s(t_i)$ : 時間ステップ  $t_i$  における鋼材ひずみの変化量、 $\Delta \epsilon_{cfa}(t_i)$ : 時間ステップ  $t_i$  における見かけの膨張ひずみの変化量、 $E_{ca}(t_i)$ : 時間ステップ  $t_i$  における見かけのヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $E_s$ : 鋼材のヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $p$ : 鋼材比

#### 4.1 見かけの膨張ひずみ

図-7に、MEXおよびLEXについてPC鋼材の拘束試験結果より算出した $\epsilon_{cfa}$ と有効材齢の関係を示す。有効材齢は式(2)で表す積算温度に基づくものとした。図中には、両者の関係を式(3)で回帰した結果も併記する。図-8は、各回帰係数と温度の関係および回帰式を示したものであり、この回帰式により、任意の温度下

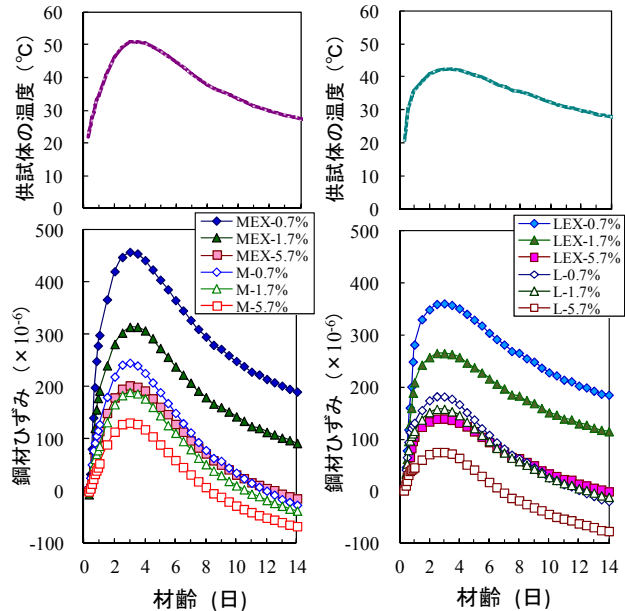


図-4 拘束膨張・収縮ひずみの経時変化

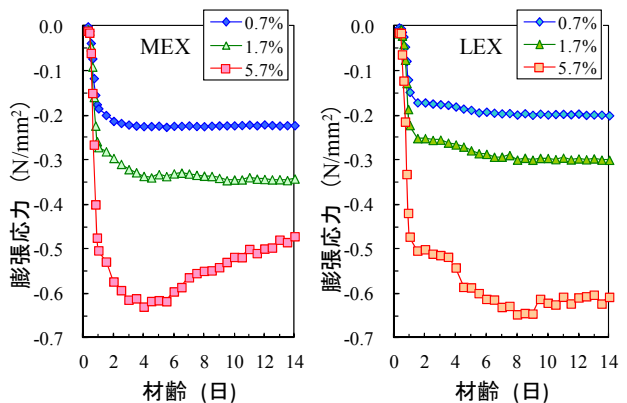


図-5 膨張応力の経時変化

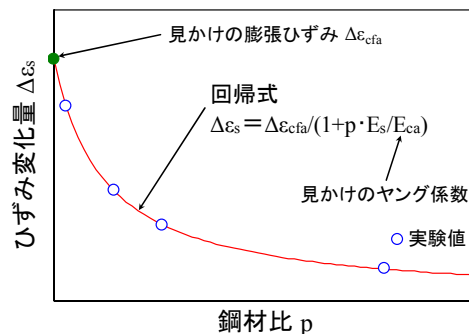


図-6 見かけの膨張ひずみ・ヤング係数の算出方法

における  $\varepsilon_{cfa}$  曲線を定めることができる。

$$t_e = \sum (T_i + 10) \cdot \Delta t_i / 30 \quad (2)$$

ここに、 $\Delta t_i$ ：温度が  $T_i$  である期間(日)

$$\varepsilon_{cfa}(t_e) = \varepsilon_{cfa\infty} [1 - \exp\{-\alpha(t_e - t_{e0})^\beta\}] \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_{cfa}(t_e)$ ：見かけの膨張ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )、 $\varepsilon_{cfa\infty}$ ：見かけの膨張ひずみの終局値 ( $\times 10^{-6}$ )、 $\alpha$ 、 $\beta$ ：見かけの膨張ひずみの進行速度を表す係数、 $t_e$ ：有効材齢(日)、 $t_{e0}$ ：凝結始発時点の有効材齢(実験結果より MEX, LEX ともに 0.3 日とした)

#### 4.2 見かけのヤング係数

図-9に、MEX および LEX について膨張ひずみがほぼ最大に達するまでの  $E_{ca}$  と有効材齢の関係を示す。養生温度にかかわらず、 $E_{ca}$  の発現は有効材齢により評価することが可能であり、これは過去に示した普通セメントや高炉セメントを用いた場合<sup>3),4)</sup>と同様の傾向であった。図中には、20℃下における結果に対する回帰式を示しているが、本式により、膨張材による膨張ひずみがほぼ最大になるまでの期間(以下、膨張過程)における  $E_{ca}$  の温度依存性を評価した。セメント種類で比較すると、MEX の最大値が LEX より 1.5 倍程度大きかった。

次に、膨張過程後の  $E_{ca}$  については、インバー鋼材の拘束試験における拘束膨張・収縮ひずみと鋼材比の関係を、式(1)に温度ひずみ分を加味した式で回帰することにより算定した。

図-10は、インバー鋼材を用いた拘束試験より求めた  $E_{ca}$  と有効材齢の関係を示したものである。図中には、前述の膨張過程における回帰式および別に円柱供試体で測定したヤング係数の結果とその回帰式を併記した。MEX, LEX ともに、有効材齢 2 日付近までの膨張過程における  $E_{ca}$  は PC 鋼材の拘束試験に基づく回帰式と概ね対応していた。また、膨張過程が終了してから最高温度に達するまでの有効材齢 2~5 日程度の期間(以下、膨張過程終了後の昇温過程)に  $E_{ca}$  が大きく増大し、温度が降下する期間(以下、降温過程)における有効材齢 5~10 日付近で、円柱供試体により測定したヤング係数とほぼ同等となった。

$E_{ca}$  と円柱供試体によるヤング係数 ( $E_c$ ) の比  $E_{ca}/E_c$  を見ると、膨張過程では、MEX が 0.2 程度、LEX が 0.35 程度、降温過程では、MEX, LEX ともに 0.7~1.0 程度であり、過去に示した普通セメントおよび高炉セメントの値<sup>3),4)</sup>と大差なかった。一方、ひび割れ制御指針で提示されているクリープの影響を考慮したヤング係数の補

正係数(最高温度に達するまでの有効材齢：0.42, 最高温度に達する有効材齢+1日有効材齢以降：0.65)と比較すると、膨張過程では若干小さく、降温過程では大きい結果であった。

以上の検討を踏まえ、 $E_{ca}$  については、有効材齢 2 日ま

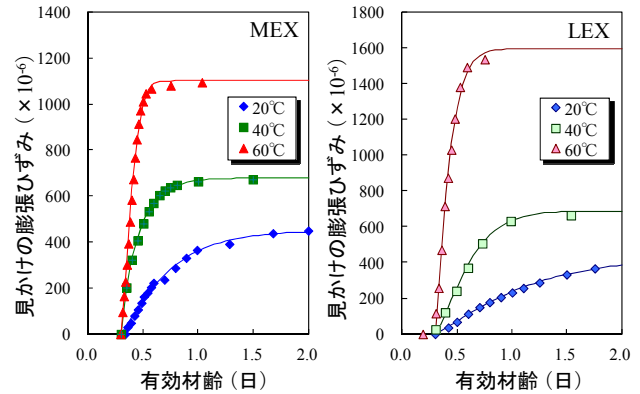


図-7 見かけの膨張ひずみと有効材齢の関係

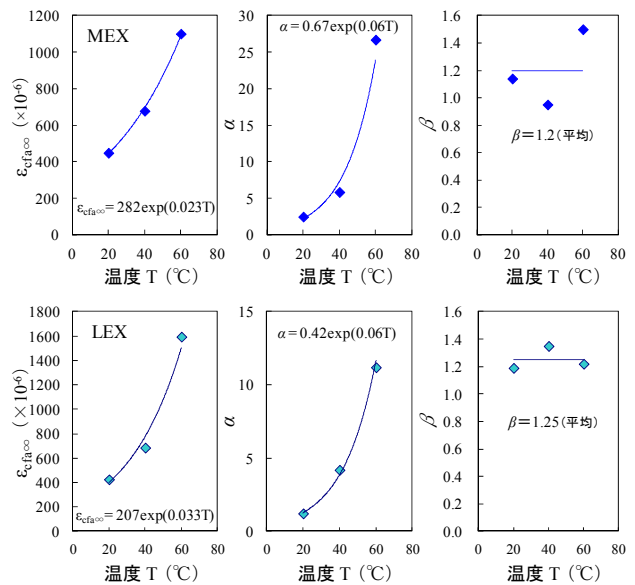


図-8 回帰係数と温度の関係

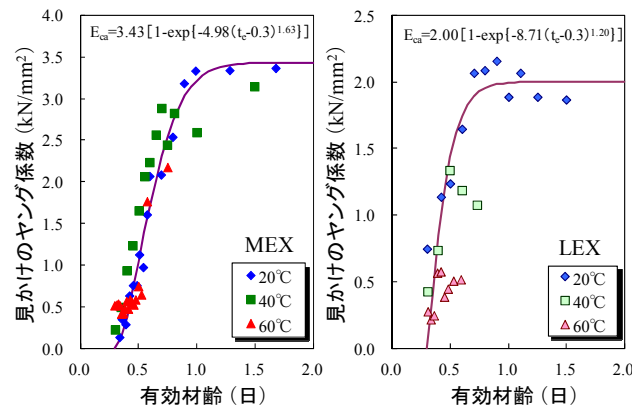


図-9 膨張過程における見かけのヤング係数



での膨張過程は PC 鋼材の拘束試験に基づく回帰式 (図中の式①), それ以降についてはインバー鋼材の拘束試験による回帰式 (図中の式②) をそれぞれ用いて表現した。

### 5. 材料モデルの検証

以下では, インバー鋼材を用いた拘束試験より得た拘束応力について, 実験値と上記でモデル化した  $\epsilon_{cfa}$  および  $E_{ca}$  を用いた計算値を比較し, 材料モデルの適用性を検討する。

#### 5.1 応力評価法の概要

膨張コンクリートの拘束応力は式 (4) を用いて算出した。ここで, 温度履歴下における  $\epsilon_{cfa}$  は, 筆者らが過去に提示している一定温度下の膨張ひずみ曲線を重ね合わせる方法 (図-11)<sup>6)</sup> により推定した。すなわち, 有効材齢  $t_{en}$  までは温度  $T_1$  の膨張ひずみ曲線  $\epsilon(t_e, T_1)$  をひずみが増大し, 次に温度が  $T_2$  となった後は, 温度  $T_2$  の膨張ひずみ曲線  $\epsilon(t_e, T_2)$  をひずみが増大する。その際, 温度が変化し直後の膨張速度は, その時点の温度と有効材齢に依存するとした。また,  $E_{ca}$  は上記でモデル化したとおり, 有効材齢 2 日を境界とした 2 つの関係式を用いて推定した。ヤング係数については, 拘束試験によって算出した  $E_{ca}$  と円柱供試体で測定した  $E_c$  の関係 ( $E_{ca}/E_c$ ) を比較した結果より, 独自に定めたヤング係数の補正係数を用いる方法についても検討した。表-3 に独自に定めたヤング係数の補正係数を示す。なお, 補正係数を加味する前のヤング係数には, 円柱供試体による測定値と有効材齢の回帰式 (図-10 中の式③) を用いた。また比較として, ひび割れ制御指針で提示された膨張ひずみの設計用値を用いた場合についても検討した。その際には, 圧縮強度, ヤング係数およびヤング係数の補正係数にはひび割れ制御指針で提示されている式を用い, 自己収縮についても考慮した。

$$\sigma_c = -p \cdot E_s \cdot \Sigma \left[ \frac{\Delta \epsilon_{cfa}(t_i) + \Delta \epsilon_{cT}(t_i) + \Delta \epsilon_{sT}(t_i)}{1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i)} \right] \quad (4)$$

ここに,  $\sigma_c$ : コンクリートに生じる拘束応力 ( $N/mm^2$ ),  $\Delta \epsilon_{cT}(t_i)$ : 時間ステップ  $t_i$  におけるコンクリートの温度ひずみの変化量 (コンクリートの線膨張係数は  $10 \times 10^{-6}/^\circ C$  一定とした),  $\Delta \epsilon_{sT}(t_i)$ : 時間ステップ  $t_i$  における鋼材の温度ひずみの変化量,  $E_{ca}(t_i)$ : 見かけのヤング係数または補正係数を乗じたヤング係数 ( $N/mm^2$ )

#### 5.2 解析結果と考察

図-12 に, MEX, LEX の拘束応力について, 実験値と計算値を比較した結果をまとめて示す。

本研究で提示した材料モデルを用いた計算値は, MEX, LEX とともに, 鋼材比 5.7% の温度上昇時に生じる圧縮応力を若干小さく評価しているものの, 温度上昇~降下までの応力挙動が実験値と概ね良く対応していた。また, 独自に定めたヤング係数の補正係数を用いた場合に

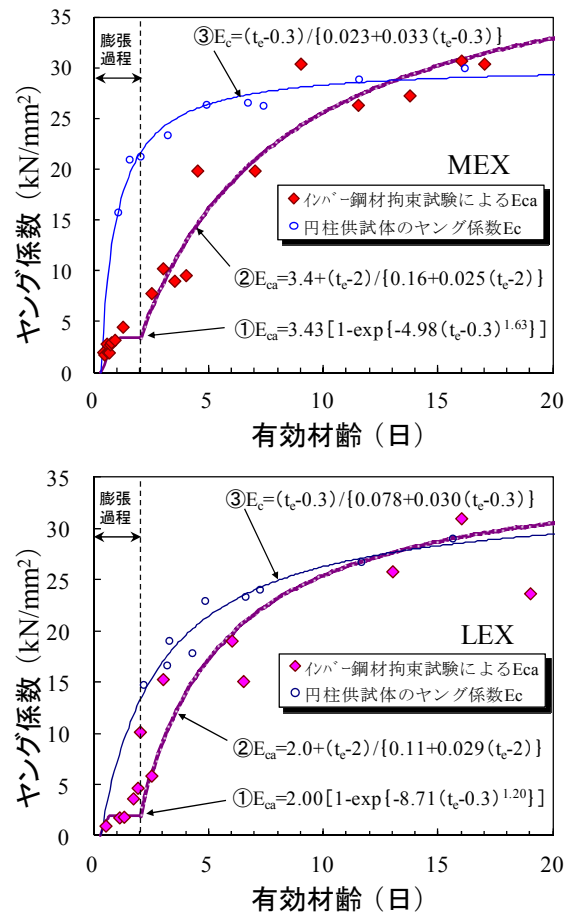


図-10 見かけのヤング係数と有効材齢の関係

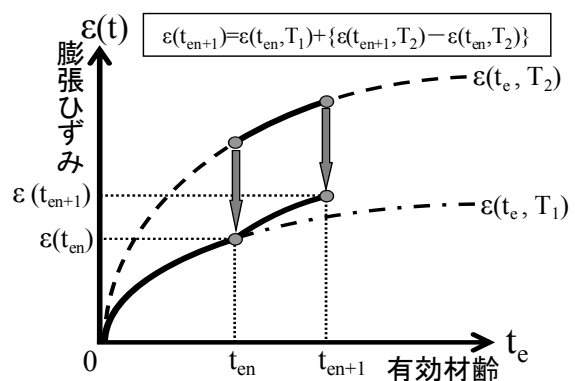


図-11 膨張ひずみの重ね合わせ方法

表-3 独自に定めたヤング係数の補正係数

	MEX	LEX
膨張過程 ( $t_e < 2$ 日)	0.2	0.35
膨張過程終了後の昇温過程	直線補間	直線補間
降温過程	1.0	1.0

いても、ほぼ同等の精度で推定できていた。

ひび割れ制御指針の設計用値を用いた場合、温度上昇時に生じる圧縮応力の最大値は実験値と良く対応しているものの、その発生速度は実験値より遅い傾向が認められた。これは、膨張ひずみの設計用値が 20℃下での実験値に基づいて定められており、膨張ひずみが緩やかに発現する式となっているためだと推察される。また、LEX の圧縮応力が実験値より大きめに評価されているが、これは、本実験では MEX と LEX の膨張応力がほぼ同程度であったのに対し、設計用値における膨張ひずみの最大値は、LEX ( $315 \times 10^{-6}$ ) が MEX ( $220 \times 10^{-6}$ ) より約 1.5 倍大きいことが要因と考えられる。

今後は、本研究で構築した材料モデルを実際のマスコンクリート構造物の応力解析に取り入れ、適用性を検証する予定である。

## 6. まとめ

本研究では、中庸熱および低熱ポルトランドセメントを用いた膨張コンクリートについて、拘束膨張・収縮特性の温度依存性を実験的に検討した。また、応力解析に用いるための膨張ひずみならびにヤング係数に関する材料モデルを構築し、その適用性を検討した。以下に得られた知見をまとめて示す。

- (1) 温度上昇時に、膨張材によってもたらされた膨張応力(膨張コンクリートと膨張材無混和コンクリートの拘束応力の差)は、温度降下後においても保持されていた。
- (2) PC 鋼材およびインバー鋼材の拘束試験から得た、鋼材ひずみと鋼材比の関係より、応力解析に用いるための膨張ひずみとヤング係数を算出し、各々について温度依存性を考慮した材料モデルを構築した。
- (3) 構築した材料モデルを用いることで、マスコンクリート内部を想定した温度履歴下における応力挙動を概ね良く評価できる可能性を示した。また、独自に定めた補正係数を加味したヤング係数を用いた場合においても、ほぼ同等の精度で推定できた。

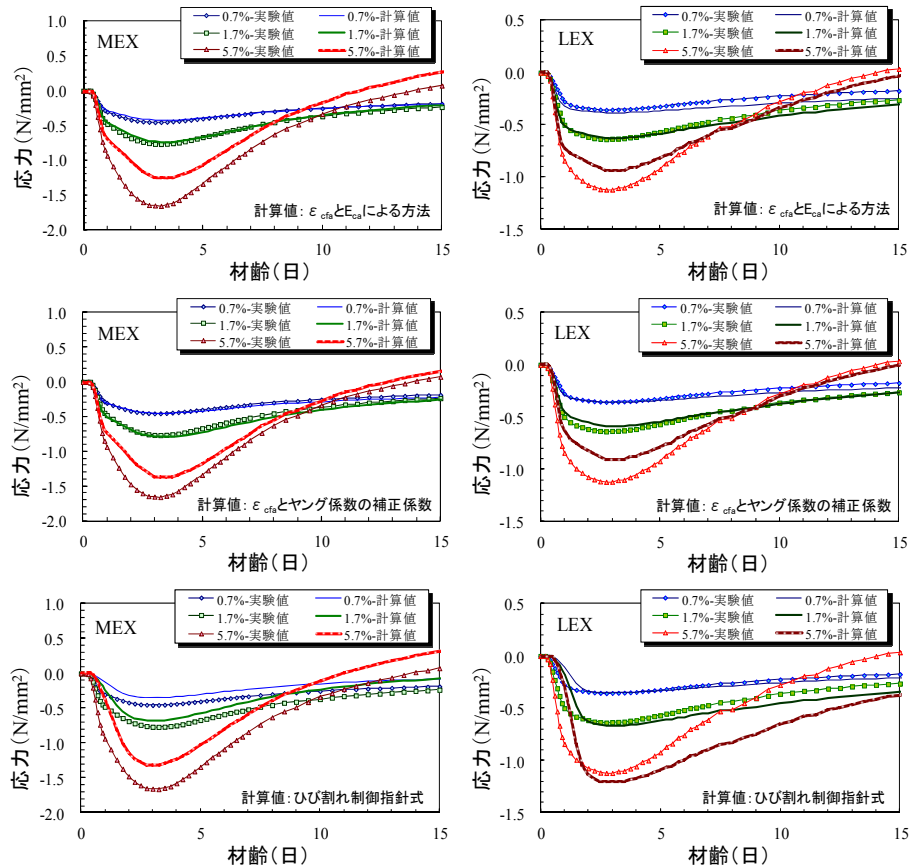


図-12 拘束応力の解析結果

## 参考文献

- 1) コンクリート工学会：高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会報告書，pp.158-172，2011.9
- 2) コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008.11
- 3) 三谷裕二，谷村充，松本健一，佐竹紳也：マス養生温度履歴下における膨張コンクリートの応力評価法，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1295-1300，2006.7
- 4) 三谷裕二，谷村充，松本健一，佐竹紳也：高炉セメントを用いた膨張コンクリートのマス養生温度履歴下における応力評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.175-180，2007.7
- 5) 谷村充，兵頭彦次，杉山真悟，中崎豪士：各種セメント・骨材を使用した膨張コンクリートの拘束膨張試験，高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会シンポジウム論文集，pp.369-372，2011.9
- 6) 三谷裕二，谷村充，佐久間隆司，佐竹紳也：膨張コンクリートのマス養生温度履歴を考慮した膨張応力算定法，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1141-1146，2005.6