

# 論文 左官モルタルのひび割れリスクに及ぼす収縮低減剤及び外壁温度の日変動の影響

張 玉露\*1・寺本 篤史\*2・大久保 孝昭\*3・森元 悠太\*4

**要旨:** 外壁温度の日変動及び収縮低減剤が、左官モルタルの線膨張係数及び温度ひずみに及ぼす影響に関して実験的検討、並びに FEM による解析的検証を実施した。研究結果から、1)モルタル施工直後の線膨張係数が大きい材齢で上昇方向の温度履歴を受ける場合、ひび割れ発生リスクを低減できる可能性があること、2)収縮低減剤の混和によって、モルタル施工直後の温度の影響を、より鋭敏に受けること、3)収縮低減剤の混和により乾燥収縮が低減された場合、長期的な引張応力が低減されること、4)モルタル剛性の発現と直後躯体の温度の変動によっては 0.20MPa 程度の拘束応力の差異が生じることが確認された。

**キーワード:** 外壁温度、左官モルタル、収縮低減剤、線膨張係数、温度ひずみ、応力解析

## 1. はじめに

本研究は、建築物の長寿命化を実現する方法として、外壁に施す左官モルタルの調合設計や施工時刻がその後のひび割れやすさに及ぼす影響に着目したものである。

RC 造建築物に用いられる左官モルタルは、乾燥収縮ひずみや温度ひずみの影響を受け、下地コンクリートとのディファレンシャルムーブメントによってひび割れを起こす可能性がある<sup>例えは1)</sup>。表層仕上げ材を含む左官モルタルに生じるこのようなひび割れは、外壁の美観性、耐久性の低下、タイルなどの仕上げ材の剥落などを招く要因となる。下地コンクリートとのディファレンシャルムーブメントによってモルタルに生じる拘束応力を予測し、制御していくためには、コンクリート、モルタルそれぞれに発生するひずみ成分に加えて、ヤング係数の発現、クリープ性状を把握することが求められる。

左官モルタルに拘束応力を生じさせる体積変化のうち、モルタルの乾燥収縮ひずみに関する実験値は過去に複数報告<sup>例えは2), 3)</sup>されており、また、セメントペーストの乾燥収縮メカニズムと骨材の複合則理論に立脚した予測手法に関する研究も進んでいる<sup>4)</sup>。

一方で、躯体温度の年変動によって生じる温度ひずみについては報告事例が存在するものの数は少ない。著者らは既往の研究<sup>5)</sup>において、左官モルタル施工後の季節変動による温度低下によって乾燥収縮ひび割れの発生が助長されることを報告している。この現象は、季節変動によりモルタルの温度が昇降する時期のヤング係数発現の相違によって生じるもので、モルタル硬化時の温度が左官モルタルのひび割れリスクに大きく関与していることを意味する<sup>5)</sup>。

一方で、躯体温度は日変動レベルでも温度変化が生じているが、日レベルの短期的な温度変化が左官モルタルのひび割れリスクに及ぼす影響については既往の知見がほとんどない。そこで本研究では、左官モルタルの施工時刻、すなわち 1) 午前中を想定した、施工直後に躯体温度が上昇する場合と、2) 夕方を想定した、施工直後に躯体温度が下降する場合と比較し、温度ひずみが左官モルタルのひび割れリスクに及ぼす影響について検討を行う。また、左官モルタルの乾燥収縮ひずみを低減する目的で収縮低減剤を使用した場合に、上記温度ひずみがどのような影響を受けるかについても併せて議論する。

## 2. 実験概要

モルタルの温度ひずみを適切に評価するためには、モルタルの線膨張係数を取得する必要がある。一般に、モルタルの線膨張係数は  $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  の一定値が使用されることが多いが、実際には骨材種類や量の影響を受け<sup>6)</sup>、また硬化過程並びに内部の含水状態変化によって経時的にも変動する<sup>7) 8)</sup>。そこで本実験では、外壁温度の日変動を模擬した温度履歴を与えた条件において、モルタルの線膨張係数の経時変化ならびに温度ひずみの経時変化を取得することを目的とする。また、収縮低減剤を添加した系についてもこれら諸物性を実験的に取得する。

### 2.1 使用材料及び調合条件

本実験で使用したモルタルは、収縮低減剤無混和 (PL) と混和 (SR) の 2 種類である。表-1、表-2 に、それぞれの使用材料と調合の概要を示す。

それぞれの試験体にはセメント混和用ポリマーディスパーションとして EVA をセメント重量に対して 10%

\*1 広島大学 工学研究科 修士(正会員)

\*2 広島大学 工学研究科社会環境空間部門 助教 博(工)(正会員)

\*3 広島大学 工学研究科社会環境空間部門 教授 博(工)(正会員)

\*4 広島大学 工学研究科

表-1 使用材料

使用材料	材料概要
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (密度: 3.15g/cm <sup>3</sup> )
細骨材 (S)	広島県東広島市黒瀬産砕砂 (表乾密度: 2.58g/cm <sup>3</sup> )
EVA	主成分: エチレン酢酸ビニル, 共重合同エマルジョン
収縮低減剤 (SRA)	主成分: 低級アルコール アルキレンオキシド付加物

表-2 実験調査条件

調合名	W/C (Mass)	S/C (Mass)	混和材料(Mass)	
			EVA/C	SRA/C
PL	0.52	2.4	0.1	-
SR			0.1	0.03

混和している。収縮低減剤はセメント重量に対して 3% 混和し、計量時には EVA の場合は 55% を、収縮低減剤の場合は 100% を水に置換して計量を行った。モルタルの練上り温度を統一するため、計量前の使用材料はすべて 27.5℃ とした。

モルタルの練り混ぜにはホバートミキサを使用し、低速で 1 分間、高速で 3 分間練混ぜ、掻き落としの後さらに 1 分間高速で練り混ぜた。結果として左官モルタルの練り上がり温度は 21.8~23.6℃ であったが、その後の養生により、注水後 40 分以内に 27.5℃ に到達した。

## 2.2 温度条件

本研究では、RC 外壁温度の日変動を想定した温度履歴下におけるモルタルのひずみの経時変化を取得するため、それぞれのモルタルに図-1、図-2 に示す温度履歴（実線）を与えた。図-1、図-2 の温度履歴は、9 月の東広島市における RC 建建築物（南側）の外壁温度の日変動履歴の結果を参考に最高温度（35℃）と最低温度（20℃）を決定し、変動の履歴を単純化したものである。図-1 は午前中に施工し、施工後に外壁温度が上昇する想定、図-2 は午後施工し、施工後に外壁温度が下降する想定である。本実験では、モルタルの諸物性に及ぼす練上がり温度の影響を極力取り除くため、最高温度と最低温度の平均値である 27.5℃ を初期温度に設定し、27.5℃ から温度が上がる場合と下がる場合（以下、昇温、降温と称する）の 2 種類の温度条件を設けた。なお、試験体設置から温度上昇、下降が開始されるわずかな時間の差異が実験結果に影響しないよう、注水時刻から 1 時間までは 27.5℃ 一定で養生を行い、その時点から、図-1、図-2 に示す温度履歴を与えた。以下、本論文に示す全ての図において、原点の材齢は温度上昇あるいは下降を開始した材齢（注水後 1 時間）である。

また、線膨張係数の経時変化を取得するため、実線で

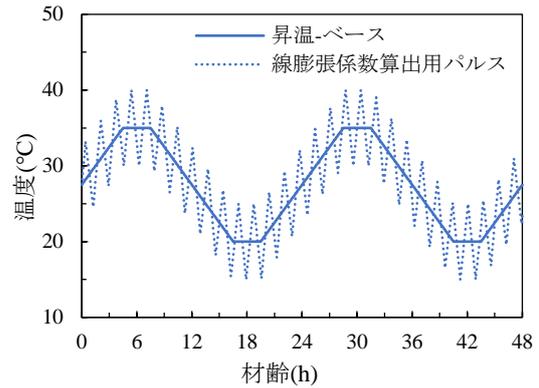


図-1 外壁温度の日変動を模擬した温度履歴（午前施工想定）

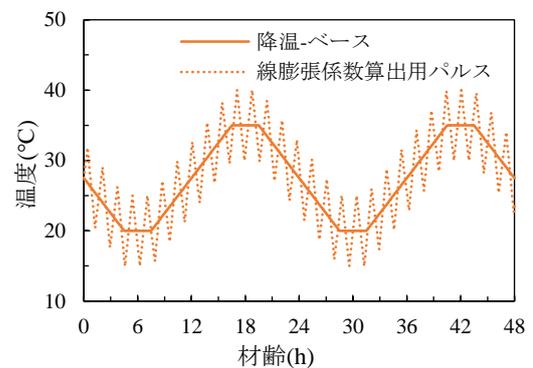


図-2 外壁温度の日変動を模擬した温度履歴（午後施工想定）

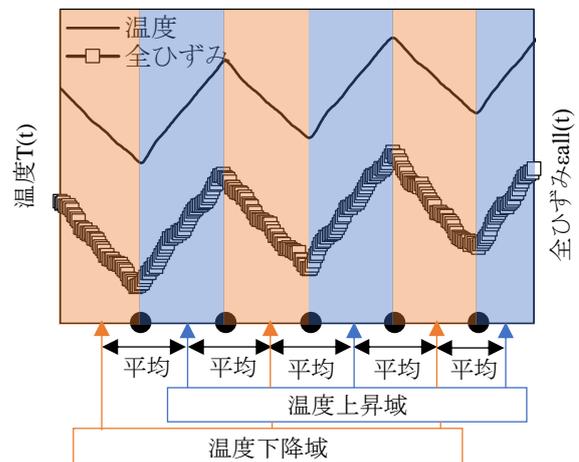


図-3 線膨張係数算出方法の模式図

示すベース温度に加えて、点線で示す±5℃の温度パルスを有する履歴を与えた。

線膨張係数の経時変化に及ぼすベース温度の影響を確認するため、図-1、図-2 の温度履歴とは別に、20℃ 一定温度を基準として 130 分毎に±5℃の温度パルスを有する温度履歴（以下、20℃一定と称する）についても実験を実施した。

以上を整理すると、実施したベースとなる温度履歴は、

昇温, 降温, 20°C一定 3種類であり, それぞれのベース履歴について, 線膨張係数測定用の温度パルスの有無で, 計 6 種類の温度履歴を, 各調合のモルタルに与えた。本実験ではそれぞれの調合と温度履歴の組み合わせについてそれぞれ 1 体ずつ試験を実施した。

### 2.3 温度ひずみ及び線膨張係数の測定方法

温度制御したモルタルの体積変化を測定する手法としては, 寺本らが提案した非接触変位計による体積変化測定試験装置<sup>9)</sup>を用い, 注水時から材齢 48 時間までのモルタルのひずみを取得した。

線膨張係数の経時変化は, 2 通りの方法により算出した。まず, 20°C一定温度を基準として±5°Cの温度パルスを与えたものについては, 著者らが実施した既往の研究に多数の実績があるため, 従来の方法を踏襲した。すなわち, 所定材齢で導入される 1) +5°C, 2) -5°C, 3) -5°C, 4) +5°Cという 4 つのステップのうち, 1), 2) ならびに 3), 4) の区間において, 自己ひずみが線形に進行すると仮定した場合, 温度上昇域・温度下降域の時間が同じであるため, それぞれの自己ひずみは, 符号が逆で同じ量を持つ値になる。そのため, 全ひずみを平均化することで自己ひずみの影響をキャンセルすることができ, 温度ひずみを抽出できる。取得した温度ひずみと温度の関係から線膨張係数を得た。

一方, 図-1, 図-2 に示すような常に温度が昇降している条件では, 上記の方法を採用することが難しいため, 図-3 の模式図に示す方法を採用した。本実験で設定した温度履歴は, 図-3 中の●印で示す材齢を基準とすると, その前後の材齢は温度上昇域と温度下降域に分けられる。本研究では, ある材齢における線膨張係数の値を, その前後の温度上昇域と温度下降域それぞれの温度とひずみの関係から得られる傾きの平均値を採用した。

上記の方法で得られた線膨張係数の経時変化から式(1)に示す増分法により, 1 分ごとの温度ひずみの増分を算出し, 増分ひずみを合算することで各材齢の温度ひずみを得た。

$$\Delta \varepsilon_{thermal,i} = \frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2} (T_i - T_{i-1}) \quad (1)$$

ここで,  $\Delta \varepsilon_{thermal,i}$ :  $i$ ステップにおける増分温度ひずみ( $\times 10^{-6}$ ),  $\alpha_i$ :  $i$ ステップにおける線膨張係数( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ),  $T_i$ :  $i$ ステップにおける試験体温度( $^\circ\text{C}$ ), 1ステップは1分間である。その後, 計測で得られるひずみの増分から温度ひずみの増分を差し引くことで自己ひずみの増分を得た。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 線膨張係数

本実験で得られた各温度履歴の線膨張係数の経時変化を, PL については図-4 に, SR については図-5 にそれ

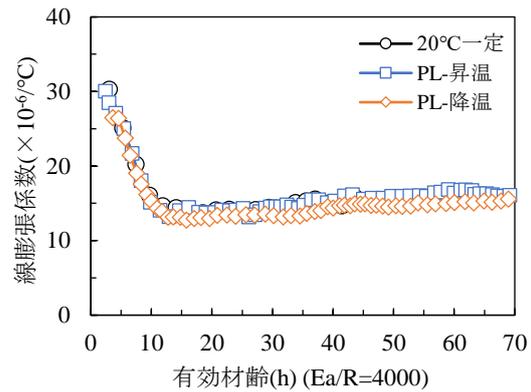


図-4 PL の線膨張係数の経時変化

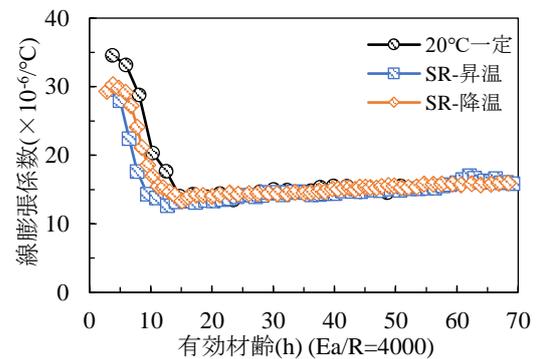


図-5 SR の線膨張係数の経時変化

ぞれ示す。横軸は温度履歴の影響を取り除くため, 式(2)に示すアレニウス則による有効材齢で整理している。

$$t_e = \sum \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_k} \right) \right\} \cdot \Delta t \quad (2)$$

ここで,  $t_e$ : 有効材齢(h),  $E_a$ : みかけの活性化エネルギー (kJ/mol),  $R$ : ガス定数(8.31J/(K·mol)),  $T_0$ : 基準温度 (293K),  $T_k$ : 試験体温度(K),  $\Delta t$ : 単位時間 (ここでは 1分) であり,  $E_a/R=4000$  K である。

図-4 から, PL については初期に約  $30 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  という高い線膨張係数を取った後に急激な減少を示し, 有効材齢 16 時間程度で極小値を取り, その後緩やかに上昇し, 材齢 48 時間で  $16 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  程度の値を示した。既往の研究<sup>10)</sup>により, 初期の減少段階は, セメントの水和に伴うモルタルマトリクスの形成によるもの, 極小値以降の緩やかな増大はセメント硬化体中の含水率が気液界面に生じる収縮駆動力の差異によるものであることが分かる。

次に, 図-4 の PL と図-5 の SR を比較すると, SR は PL とほぼ同様の傾向を示しているが, 初期の減少傾向が PL と比較して緩やかであることが分かる。これは, 収縮低減剤によるセメントの水和の遅延効果によるものと考えられる。また, SR では, ベース温度の違いによる線膨張係数の経時変化を, 式(2)の有効材齢式で十分に補正できていないことが分かる。このことは, 収縮低減剤の

混和によって、モルタルマトリクス形成過程が、より温度の影響を受けやすくなったことを意味している。

極小値以降の線膨張係数は、モルタル中の含水率変化に伴い上昇傾向を示し、この上昇傾向は収縮低減剤の混和により抑制可能であることが明らかにされているが、本実験は水セメント比が 0.52 で、材齢 48 時間未満の計測であったため、自己乾燥による影響が小さく、PL, SR ともにほぼ同様の測定値を示した。

### 3.2 温度ひずみ

気温の季節変動や日変動等により、モルタルが温度変化を有する場合、線膨張係数の経時変化は大きな意味を持つ。温度上昇時と下降時の線膨張係数が異なる場合、同一量の温度変化であってもモルタルに温度収縮或は温度膨張ひずみが発生する。このような線膨張係数の経時変化によって発生する温度ひずみは例えば、水和発熱により高温履歴を有するマスコンクリートなどのひび割れリスクを高める可能性があることが報告されている<sup>11)</sup>。

図-6 は、各調合のモルタルにベースとなる温度履歴を与えた場合の全ひずみの経時変化であり、図-7 は、全ひずみと線膨張係数の経時変化を用いて、2.3 節で説明した方法によって得られた各モルタルの温度ひずみの経時変化である。図-8 は材齢 48 時間に、初期温度と同じ 27.5°C に戻ってきた時点における全ひずみと温度ひずみを示したものである。

図-6 の全ひずみの経時変化をみると、PL, SR いずれの調合についても、山型の履歴を繰り返しており、全ひずみに及ぼす温度ひずみの影響が大きいことが分かる。本実験の条件では、自己収縮ひずみは小さく、乾燥収縮も生じないであるのでこの結果は妥当である。

また、図-8 より、施工直後に温度上昇を受ける場合と、温度下降する場合には、48 時間後の 27.5°C に戻ってきた場合に、PL で  $1.94 \times 10^{-4}$ 、SR で  $2.6 \times 10^{-4}$  の全ひずみ差が生じている。これは、線膨張係数が大きな値を有する材齢 5 時間以前における温度の上昇また下降が大きく影響するためである。

この間の温度ひずみの経時変化に着目して、収縮低減剤の影響を見てみると、SR は 3.1 節で述べたように線膨張係数の減少段階がより緩やかに進行するため、初期の温度変化の影響をより大きく受けることが確認できる。即ち、収縮低減剤を使用した場合、施工直後に温度下降を受ける条件では、より多くの温度収縮ひずみを生じさせる要因になり得る。一方で、自己ひずみを含めた全ひずみの傾向を見ると、いずれの温度履歴でも SR は PL より収縮が小さい結果となっており、本実験程度の躯体温度の日変動では収縮低減剤の使用によってひび割れリスクが増大する可能性は小さいと考えられる。

以上、極若材齢時のひずみ挙動を述べたが、ひずみ挙

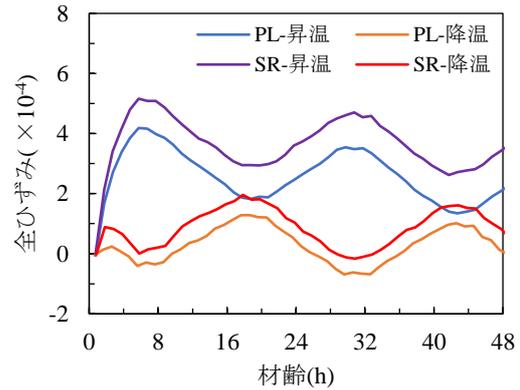


図-6 外壁温度の日変動を模擬した温度履歴中に生じた全ひずみの経時変化

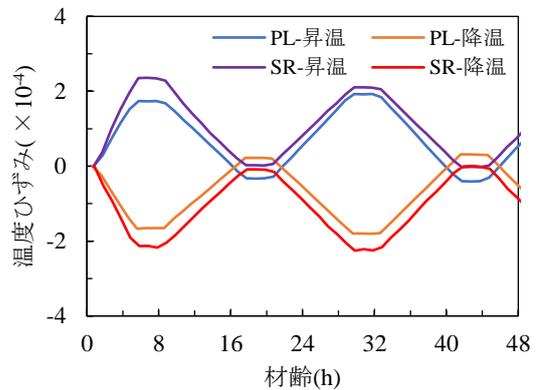


図-7 外壁温度の日変動を模擬した温度履歴中に生じた温度ひずみの経時変化

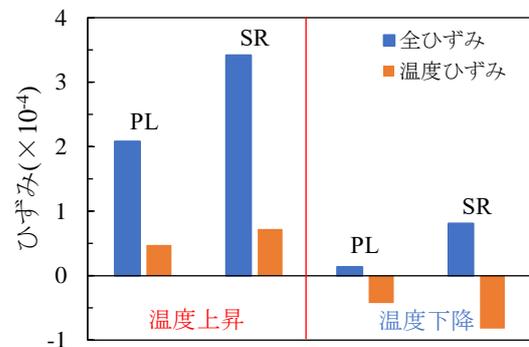


図-8 材齢 48 時間時点の全ひずみと温度ひずみ

動はその大小が直接ひび割れリスクに直結するものではなく、ヤング係数の発現や、クリープ性状を正しく把握し応力解析を実施する必要がある。

## 4. 応力解析

本章では、左官モルタルに生じる拘束応力に対して、若材齢時の温度の日変動による影響について解析的検討を行う。応力解析には 3 次元温度応力解析プログラム JCMAC3 を使用した。

### 4.1 モデル概要及び解析条件

本研究では RC 構造物における壁厚 300mm の耐震壁

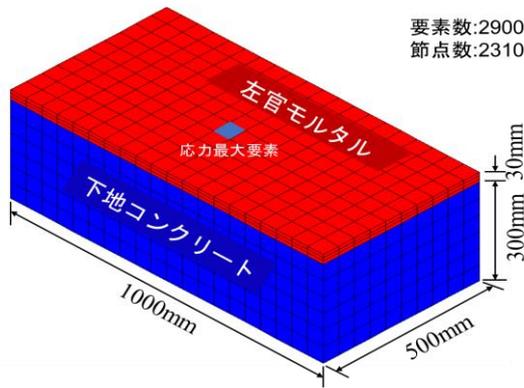


図-9 解析モデル概要

表-3 解析用伝熱物性<sup>11)</sup>

伝熱物性	解析対象	
	下地コンクリート	左官モルタル
熱体条件	非発熱体	発熱体
初期温度(°C)	27.5	27.5
線膨張係数( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	10	15
熱伝達率( $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	3	2.8
比熱( $\text{KJ}/\text{Kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	1.02	0.928
密度( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	2300	2100

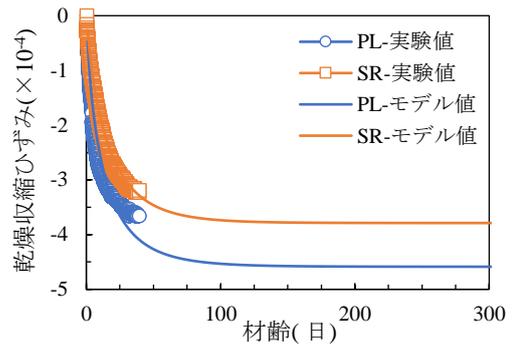


図-10 解析用乾燥収縮ひずみ<sup>12)</sup>

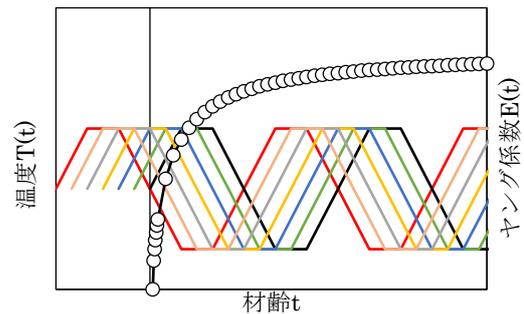


図-11 モルタルのヤング係数と温度変動の関係

面に施工された左官モルタルを想定して、図-9 に示す単純な解析モデルを作成した。また、本モデルにおいて最大主応力が発生する要素は図-9 の青いマークで示したのになるため、以降の考察はこの要素の解析結果を示す。

解析のパラメータとしては、収縮低減剤の有無を想定した異なる乾燥収縮ひずみ2種類と、施工時刻の違いを考慮した外気温の日変動履歴である。

モルタルの乾燥収縮ひずみは、収縮低減剤の有無を対象として、片側乾燥条件で実施した松本ら<sup>12)</sup>の実験を参考に図-10 のようなモデルを採用した。

モルタルの外気温条件は、躯体温度の日変動を考慮した27.5°Cから上昇の履歴(図-1のベースと同じ)を設定し、この温度履歴を、モルタルのヤング係数の発現に対して2時間ずつらした複数の条件(図-11)で実施した。この時間のずれが12時間に達したときが図-2の下降のベースと一致する。

また、長期的な乾燥収縮の影響をみるため、材齢10日以降は、27.5°C一定として300日まで解析を実施した。

コンクリート及びモルタルの伝熱物性は「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 日本コンクリート工学会」<sup>13)</sup>(以下「マスコン指針」と称する)を参考に表-3の通り設定し、下地コンクリートの応力物性は、ヤング係数:22GPa, ポアソン比:0.2, 線膨張係数:10( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )を使用した。クリープ特性については、有効ヤング係数法を採用した。セメント系材料のクリープは、セメ

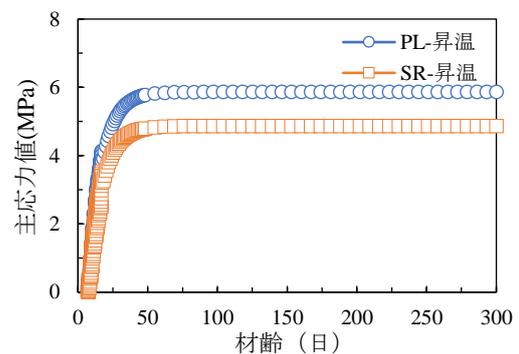


図-12 モルタルに生じる主応力の経時変化に及ぼす収縮低減剤の影響

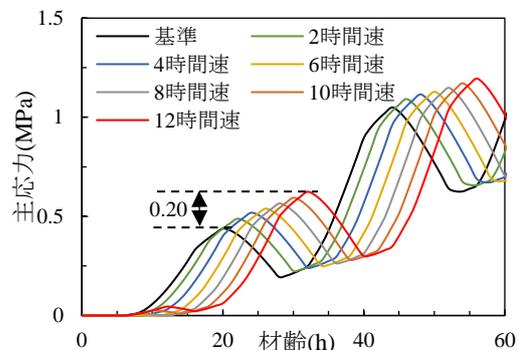


図-13 モルタルの主応力に及ぼす温度変動の影響

ントペーストの量が多いほど大きくなる特性<sup>14)</sup>を考慮して、「マスコン指針」で採用されているコンクリートのクリープ係数の5/6の値を採用した。

なお、本解析は、乾燥収縮ひずみに対する温度の日変動影響の程度を見るために実施したものであり、ひび割れ発生によるひずみ軟化を考慮していないため、解析値は参考値である。

#### 4.2 解析結果

図-12 に解析による得られた左官モルタルに生じる主応力の経時変化を示す。収縮低減剤により低減された乾燥収縮ひずみ量の影響によって、材齢 300 日時点で、1MPa 程度の引張応力の低減が認められた。

一方、温度変動はモルタルが応力伝達を行えるようになる凝結始発材齢の影響を受けるため、図-13 のように主応力の発現が日変動履歴によって異なる。今回の解析条件ではその差分は最大で 0.20MPa 程度であった。

この結果より、モルタルの剛性が発現する材齢において、温度下降が生じる温度履歴を有する場合に、より大きな拘束応力が導入されることがわかる。このことは左官モルタルの施工時間の考慮により、ひび割れリスクを低減できることを示している。

#### 5. 結論

本研究では、RC 外壁に使用する左官モルタルのひび割れ低減手法の一つとして、収縮低減剤の使用および施工時刻による RC 躯体温度の日変動の変化を想定した検討を実施した。その結果得られた知見を以下にまとめる。

- 1) モルタルの線膨張係数は経時変化するため、施工直後の温度変化によって温度ひずみ量が変化する。施工直後の線膨張係数が大きい材齢で上昇方向の温度履歴を受ける場合、温度ひずみが膨張方向に増大するため、ひび割れ発生リスクを低減できる可能性がある。
- 2) 収縮低減剤の混和により、モルタルの降下に伴う線膨張係数の低下速度が遅延するため、収縮低減剤を混和したモルタルは施工直後の温度の影響をより鋭敏に受ける。
- 3) 収縮低減剤の混和により乾燥収縮が低減された場合、長期的な拘束応力が低減される。
- 4) モルタルのヤング係数の発現を固定して、温度上昇、低下の時間を変化させた場合、剛性の発現直後に温度上昇が生じる場合と、直後に温度下降する場合で 0.20MPa 程度の拘束主応力の差異が生じる。すなわち、左官モルタルの施工時刻を考慮することで、ひび割れリスクを低減できる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 名知博司, 小野正: タイル直張り仕上げのひずみ追従性に及ぼすタイル要因の影響, 日本建築学会構造

系論文集, 第 68 巻, 第 563 号, pp.15-22, 2003

- 2) 出雲健司: 各種モルタルの乾燥収縮について, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp. I 301-1302, 2002
- 3) 蔣海燕, 佐藤嘉昭, 大谷俊浩, 上田賢司: 各種骨材を用いたモルタルの収縮ひび割れ特性に関する研究, セメント・コンクリート論文集, 第 66 巻, pp.103-110, 2012
- 4) 田中希枝, 島弘: 骨材の乾燥収縮とヤング係数を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する複合則モデルの検証, 土木学会論文集, 第 68 巻, pp.78-82, 2012
- 5) 大久保孝昭, 猪原崇, 松本慎也: 下地コンクリートに拘束される左官モルタルのひび割れにおよぼす施工時期の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 673 号, pp.333-340, 2012
- 6) 寺本篤史, 丸山一平: 人工軽量骨材による高炉セメントモルタルの線膨張係数の制御, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 677 号, pp.1007-1014, 2012
- 7) Meyers, S. L.: Thermal Expansion Characteristics of Hardened Cement Paste and of Concrete, Highway Research Board Proceedings, Vol. 30, pp. 193-203, 1950
- 8) 丸山一平, 岸直哉, 猪飼陽子: セメント硬化体中の水分と体積変化に関する研究, セメント・コンクリート論文集, 第 62 巻, pp.115-121, 2009
- 9) 寺本篤史, 五十嵐豪, 丸山一平: 温度履歴を受ける各種ポルトランドセメントペーストの若材齢体積変化, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 672 号, pp.153-159, 2012
- 10) Sellevold, E.J. and Ø. Bjontegaard: Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: Mechanisms of moisture interaction, Materials and Structures, Vol. 39, pp.809-815, 2006
- 11) 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, 第 69 巻, pp.176-182, 2016
- 12) 松本慎也, 大久保孝昭: 下地コンクリートに拘束される仕上げモルタルにおいて乾燥収縮ひび割れ発生しやすい位置の予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 648 号, pp.241-249, 2010
- 13) 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, 日本コンクリート工学会, pp.41-66, 2012
- 14) 入矢桂史郎, 平本昌生, 服部達也, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの圧縮クリープに関する研究, 土木学会論文集, 第 599 号, pp.1-14, 1998