

## 温度履歴を受ける各種ポルトランドセメントの温度ひずみの影響

名古屋大学 正会員 ○寺本 篤史  
 名古屋大学 正会員 丸山 一平

### 1. はじめに

著者らはマスコンクリートの水和発熱を模擬した温度条件下において、普通ポルトランドセメント（記号-N）及び高炉スラグ混入セメントの線膨張係数の経時変化を実験的に得た。その結果、線膨張係数は昇温時と比較して降温時に大きな値を取ることがあり、結果として温度降下後に収縮ひずみを示す場合があることを明らかにした。この実験結果は温度ひび割れの発生要因として、ヤング係数の経時変化や自己収縮ひずみ以外に、線膨張係数の経時変化がリスクと成り得ることを示すものであった。

一般的に、マスコンクリートでは水和熱による温度ひび割れへの対策として低発熱系のセメントが使用されることが多い。本研究では上述の N に加え、中庸熱ポルトランドセメント（記号-M）、低熱ポルトランドセメント（記号-L）についても、材齢 7 日以前の若材齢における体積変化に関して検討を行った。

### 2. 実験概要

本実験で使用したセメントペーストの水セメント比は 30%、40%、55%の3水準とした。40%、55%のセメントペーストについては、ブリージングの影響が見られなくなるまで4～7時間の間練り返しを行った。

それぞれの試験体について、20℃一定条件（以下、20℃条件）と水和発熱による温度上昇を模擬した最高到達温度 60℃の温度履歴条件（以下、高温履歴条件）を与えた。また、以上の温度履歴中に、線膨張係数測定用の温度パルスを定期的に加え、線膨張係数の経時変化を得た。

全ひずみの測定手法、線膨張係数の算定手法は著者らが過去に行った実験<sup>1)</sup>と同様である。得られた線膨張係数の測定値を式[1],[2]を用いて近似し、式[3]に示す増分による温度ひずみの算定式に供した。

$$t < t_0 \quad \alpha(t) = a \cdot \exp(b \cdot t) + c \cdot \ln(t) + d \quad [1]$$

$$t \geq t_0 \quad \alpha(t) = e \cdot \ln(t - f) + g \cdot t + h \quad [2]$$

$$\Delta \varepsilon_{thermal,i} = \frac{\alpha_i + \alpha_{i-1}}{2} \cdot (T_i - T_{i-1}) \quad [3]$$

ここで、 $t$ : 材齢(h)、 $\alpha(t)$ : 材齢  $t$  における線膨張係数 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )、 $t_0$ : 表現式切替材齢(h)、 $a$ - $h$ : 定数(表 1)、 $\varepsilon_{thermal, n}$ :  $n$  ステップにおける増分温度ひずみ ( $10^{-6}$ )、 $\alpha_n$ :  $n$  ステップにおける線膨張係数 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )、 $T_n$ :  $n$  ステップにおける試験体温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) である。なお、式 [1]、[2]の適用範囲は  $0 \leq t \leq 175$ (h)であるが、L40 の高温履歴条件については、材齢 106h 以降は  $17.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  一定値を使用した。

表 1 線膨張係数式定数

記号	最高温度	$t_0$	a	b	c	d	e	f	g	h
N30	20	-	70	0.3	4	5	-	-	-	-
	60	9.9					4	5	0.05	12
N40	20	56.4	40	0.27	0.1	19	5	40	0.01	6
	60	17.3					5	10	0.07	11
N55	20	-	70	0.25	0.35	19	-	-	-	-
	60	27.6					2	10	0.03	10
M30	20	16.7	60	0.4	0.05	16	4	10	0.02	9
	60	12.8					5	11	0.1	15
M40	20	135.8	70	0.3	1.1	14	2.3	120	-0.03	9
	60	15.8					1.7	15	0.05	19
M55	20	-	15	0.08	0	17	-	-	-	-
	60	25.2	15	0.06	0	15	0.4	25	0.03	20
L30	20	54.8	60	0.4	0.05	16	3.6	35	0.01	6
	60	15.1					3	14	0.06	17
L40	20	-	70	0.25	0.5	17	-	-	-	-
	60	15.7	70	0.25	0.5	17	4.5	8	0.15	13
L55	20	-	50	0.17	-0.4	20	-	-	-	-
	60	42.4	50	0.13	0	16	2	33	0.03	13

### 3. 実験結果

図 1、図 2 に各調合の 20℃条件、高温履歴条件の線膨張係数の経時変化を、式[1],[2]による表現式と併せて示した。図のように、線膨張係数は、全試験体で材齢初期に急激な減少を示し最下点を取る。最下点を取った後の挙動は、自己乾燥の影響を受けるため、セメント種類や水セメント比、温度履歴によって異なる。

N では W/C=40%以下の試験体は、20℃条件、高温履歴条件共に線膨張係数の上昇がみられた。上昇の勾配は高温履歴条件のほうが大きく、材齢約 30 時間（温度ピーク時）に約  $25 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ に到達した。その後は、ほとんど増減が見られなかった。W/C=55%に関しては、いずれの温度条件も最下点後はほぼ一定値を示した。M の 20℃条件は、水セメント比によって上昇の程度が異なり、W/C=30%では材齢 20 時間前後から、W/C=40%では材齢 140 時間前後から緩やかな上昇が確認された。W/C=55%では材齢 7 日まで上昇は確認されなかった。高温履歴条件では W/C=30%、40%が材齢初期から上昇を示したが、最高値は W/C=30%の方が大きく、最高値を迎えた以降はいずれも横ばいもしくは緩やかな減少を示した。以上の傾向は L の高温履歴条件と同様であった。L の 20℃条件では、W/C=30%のもののみ、材齢 50 時間前後から緩やかな上昇を示し、40%、55%では上昇はほとんど見られなかった。

線膨張係数の経時変化が温度ひずみに与える影響に関して考察を行った。温度ひずみの算定には式[3]に示す増分の手法を用いた。

キーワード ポルトランドセメント、線膨張係数、全ひずみ、温度ひずみ、自己収縮ひずみ

連絡先 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院 環境学研究科 TEL 052-789-3764

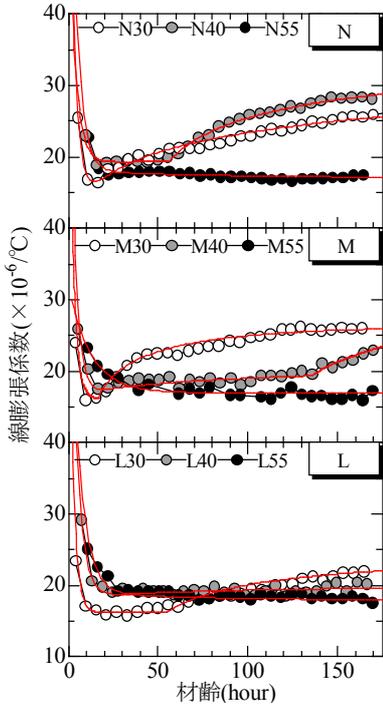


図1 20°C一定条件の線膨張係数の経時変化

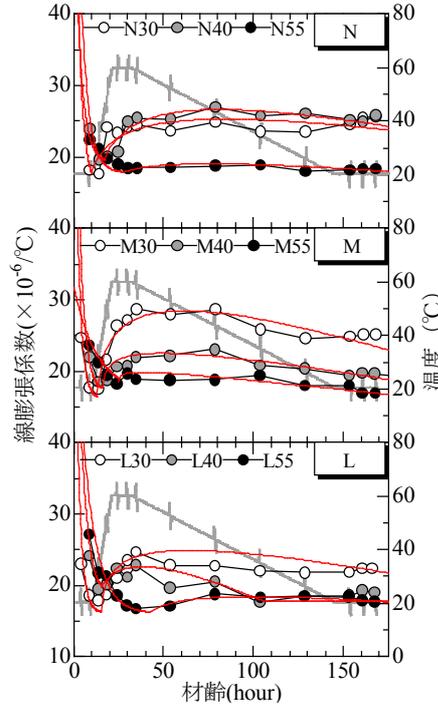


図2 最高到達温度60°C温度履歴の線膨張係数の経時変化

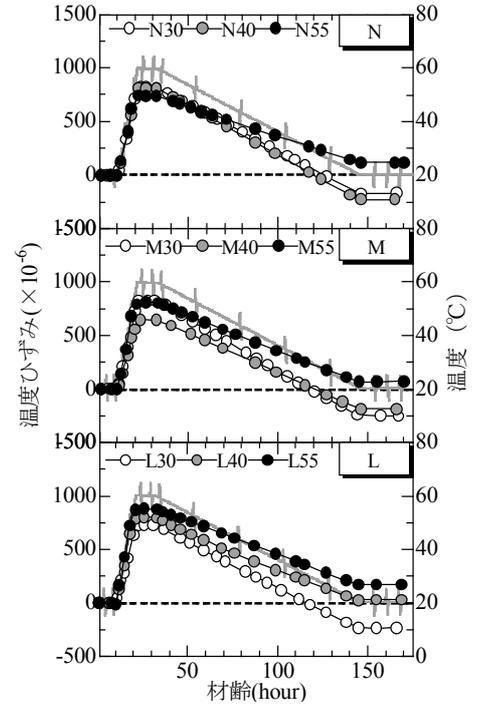


図3 最高到達温度60°C温度履歴の温度ひずみの経時変化

図3に高温履歴条件の温度ひずみの推移を示す。いずれの試験体も温度上昇→下降に伴って膨張→収縮挙動を示すが、図4に示されるように膨張量（ピーク時温度ひずみ）、収縮量（ハッチ部分）は試験体によって差異が見られる。ヤング率が発現した後の収縮量がひび割れ発生の要因に成りやすいことを考慮すると、図4のハッチ部分は重要な意味をもつ。W/C=40%の場合、この値は N:1036 $\mu$ 、M:848 $\mu$ 、L:766 $\mu$ となっており、低発熱系のセメントを使用することで、温度ひずみの低減効果があることが確認される。しかし、W/C=30%では N:985 $\mu$ 、M:1078 $\mu$ 、L:961 $\mu$ となっており温度ひずみの低減効果は小さい。

若材齢時のセメントペーストの体積変化は、温度ひずみと自己収縮ひずみが同時に発生しており、温度応力の把握には全ひずみの評価が必要になる。図5に温度ピーク時、7日時(20°C)の全ひずみと、7日時において温度ひずみが占める割合を示した。7日時における温度ひずみの影響程度は、高水セメント比のものほど大きい。比較的大きい自己収縮ひずみが生じる W/C=30%のものでも、7日時全ひずみ中の N:20%、M:28%、L:86%が温度ひずみによるものであった。また、温度ピーク時からの自己収縮を含む全収縮量を比較すると、N30、N40、M30が1000 $\mu$ を越える値を示す一方、Lは自己収縮ひずみの低減効果が他のセメントより大きいため、N,Mより小さい収縮量を示した。

4. まとめ

各種ポルトランドセメントペーストの線膨張係数を経時的に得ることで、温度履歴中に生じる温度ひずみ量に関して考察を行った。その結果、W/C=40%では低発熱系のセメントを用いた場合、自己収縮ひずみだけでなく温度ひずみの低減効果も期待できることが明らか

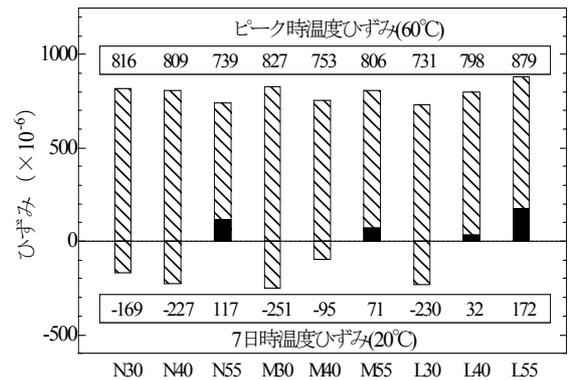


図4 各調合条件の温度ひずみ

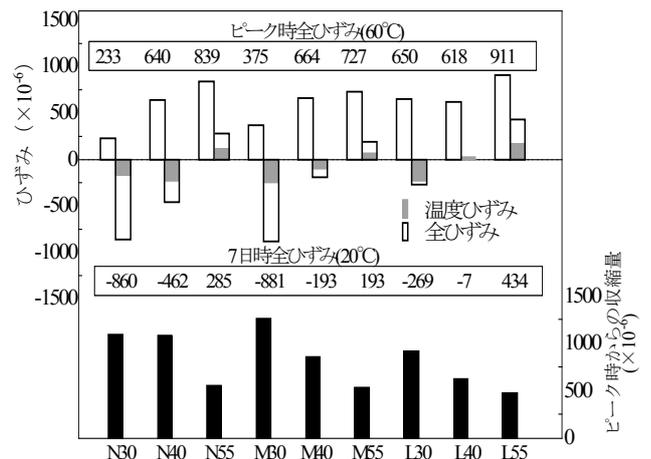


図5 温度ひずみの割合及びピーク時からの収縮量

かになった。一方、W/C=30%では自己収縮ひずみは低減されるものの、温度ひずみの低減効果は小さかった。

参考文献

寺本ら：超低水セメント比シリカフェームコンクリートの自己収縮温度依存性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.634, pp.2069-2076, 2008.12