

# 論文 超高強度コンクリートの自己収縮の温度依存性

寺本 篤史\*1・山崎 康太\*2・丸山 一平\*3・鈴木 雅博\*4

**要旨:** 結合材としてシリカフュームプレミックセメントを用いた水結合材比 0.15 のセメントペースト及びモルタルを用いて、冬期・中間期・夏期の打設を想定した練上り温度及びその後の温度履歴を与えた状態で自己収縮ひずみの測定を行った。その結果、自己収縮ひずみは2つの段階をもち、有効材齢 15h 以内の極若材齢では低温のものほど自己収縮が進行し、その後の材齢では供試体温度が 40°C を越えた時点から自己収縮が急激に進行することが分かった。以上の傾向について、高温での反応活性を考慮したマチュリティを作成し、これを利用した自己収縮ひずみ予測式を提案した。

**キーワード:** 超高強度コンクリート, 自己収縮, 温度依存性, 線膨張係数, マチュリティ

## 1. はじめに

温度ひずみ, 自己収縮ひずみなど極若材齢で生じるコンクリートの体積変化は拘束に伴いひび割れを誘発する可能性があり, 構造物の耐久性評価のためには, 以上の性質を的確に予測する必要がある。

超高強度コンクリート(UHSC)に使用されるシリカフュームは, コンクリート温度が 70°C に到達すると反応が活性化すると報告<sup>1)</sup>があるが, 一般に低水結合材比のUHSCは単位セメント量が大きく, 比較的体積が小さい部材においても水和発熱により最高到達温度が 70°C を超える可能性がある<sup>2)</sup>。著者らは, 既報において初期材齢に高温履歴を経たUHSCは, 自己収縮ひずみが卓越しヤング率や線膨張係数が既存の有効材齢式で評価できない可能性があることを示した<sup>3)</sup>。しかし諸物性と温度履歴の関係の定量的に把握するまでには到っていない。

一方, コンクリートの温度履歴は, 水和発熱に限らず周囲の環境から大きく影響を受ける。特に冬期・中間期・夏期など打設時期により, 練上り温度や最高到達温度は大きく異なり, UHSCにおいてはその差が 20°C 以上に達することもある。丸山ら<sup>4)</sup>は, 冬期に打設されたUHSCは夏期のものに比較しひび割れ危険性が高く, その一因として練上り直後の温度履歴が自己収縮に影響をもたらす可能性を指摘しており, UHSCの実用化に際し, 自己収縮の温度依存性の解明は急務である。

本研究では, 鉄筋コンクリート実部材に生じうる温度履歴を模擬し, 冬期・中間期・夏期を想定した練上り温度(10°C, 20°C, 30°C)及びその後の温度変化(+0°C, +25°C, +45°C)をセメントペースト供試体(P)及び模擬コンクリート供試体(C)に与え, 各温度履歴下でひずみの測定を行った。また, 自己収縮ひずみに与え

る温度ひずみの影響誤差を小さくすることで温度履歴が自己収縮に与える影響をより精緻に得ることを目的とし, 同一温度履歴下において線膨張係数を測定した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び調合

本実験で使用したセメントは, 低熱ポルトランドセメントにシリカフュームをプレミックしたセメント(シリカフューム置換率: 10%, 密度: 3.08g/cm<sup>3</sup>, ブレーン値: 5600cm<sup>2</sup>/g)である。ベースセメントの低熱ポルトランドセメントの鉱物組成は C<sub>3</sub>S: 29.1, C<sub>2</sub>S: 50.1, C<sub>3</sub>A: 4.3, C<sub>4</sub>AF: 9.6, ブレーン値は 3600cm<sup>2</sup>/g, 密度は 3.22g/cm<sup>3</sup>であり, シリカフュームは SiO<sub>2</sub> 含有量 95%, 比表面積 17.1m<sup>2</sup>/g, 密度 2.24g/cm<sup>3</sup>である。また, 粗骨材には盛岡産(閃緑岩砕石): 表乾密度 2.95g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.48%, 細骨材には山梨県大月産(砕砂): 表乾密度 2.57g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.62%, 混和剤にはポリカルボン酸系高性能減水剤(SP)及び消泡剤(D)を使用した。

本実験に使用した調合を表-1に示す。練混ぜにはオムニキサを使用し, 練混ぜ時間は(空練り 1分)→3分→掻き落とし→4分であった。

### 2.2 測定装置

#### (1)全ひずみ・線膨張係数

本実験で用いた測定装置は既報<sup>3)</sup>の実験において用いた装置を基にしており測定原理及び算定方法は同様である。測定装置における改良点は, 任意の供試体寸法で測定可能にした点であり, 本実験では供試体内の温度分布を考慮して, 供試体寸法は 10×60×400mm とした。供試体寸法の都合上, 粗骨材最大粒径 5mm とし, このモルタル供試体をコンクリート供試体の代用(以下, 模

\*1 名古屋大学 環境学研究科都市環境学専攻 (正会員)

\*2 名古屋大学 工学部社会環境工学科

\*3 名古屋大学 環境学研究科都市環境学専攻 准教授 博(工) (正会員)

\*4 (株)ピーエス三菱 技術本部技術研究所材料研グループ グループリーダー 工修 (正会員)

擬コンクリート供試体)とした。なお、供試体は各パラメータにつき1体作製した。

### (2)相対湿度

10×60×90mmのプラスチック容器にセメントペースト或いはモルタルを打設し、アルミ粘着テープを用いて封緘した状態で各温度履歴を与え、所定材齢(12h,18h,24h,30h,36h,3d,7d,)において各温度制御チャンバーから取り出し、常温になるまで空冷した後、ハンマーで20mm以下の小片に粉砕し、全量を容積可変のアルミ製袋(最大容積3.3l)に密封した。袋内の相対湿度を一定にする目的で袋内の空気を攪拌し30~45min放置し、相対湿度の平衡を確認した時点で温湿度計(温度精度:±0.5°C,相対湿度精度:±3%)によって袋内の相対湿度を測定した。相対湿度測定時の温度は20±3°Cであった。以上の測定手法は平尾らの実験<sup>5)</sup>を参考としたものである。

### (3)練上り温度

本実験では、練上り温度として10°C,20°C,30°Cを想定して行なった。ここでの練上り温度とは、練混ぜ直後に測定した温度を表わしている。実際の練上り温度と想定温度には最大で9°Cの差が見られたが、その後の温度管理により全ての供試体が打設後40min以内に想定温度に到達した。本論では、各条件における供試体をP(セメントペースト或いは模擬コンクリート供試体)-20(想定練上り温度)-20(最高到達温度)の形で表わす。

## 3 測定結果

想定練上り温度が10°C,20°C,30°Cにおける各測定値((A)温度履歴,(B)ヤング率,(C)線膨張係数,(D)全ひずみ,(E)自己収縮ひずみ,(F)相対湿度)を、セメントペースト供試体は図-4,模擬コンクリート供試体は図-5に示す。なお、ヤング率についてはφ50-100mm供試体3本を測定し平均したものをを用いた。

### 3.1 線膨張係数

セメントペースト供試体では、各練上り温度で、ほぼ同様の傾向を示している。すなわち、材齢16h以前に急激に減少し最下点を取り、その後上昇に転ずる。上昇の程度は温度履歴により異なるが、全体的な傾向として高温履歴を経るほど上昇量は大きくなる事が分かる。既往の研究<sup>6)</sup>において、線膨張係数は相対湿度依存性を持ち、RH=70%で最高点を取ることが指摘されているが、本実験で得られた相対湿度と線膨張係数の関係を図-1に示す。図-1から水和反応による相対湿度の低下に伴い線膨張係数の増加が確認された。一方で、同一相対湿度においても線膨張係数は各温度履歴で異なる値を取ること、P-10-10のように比較的高湿度域で推移する

表-1 調査表

	W/B	水	セメント	細骨材	粗骨材	SP/B (%)	D/B (%)
		(kg/m <sup>3</sup> )					
SF-15P	0.15	316	2108	0	0	1	0.2
SF-15C	0.15	161	1074	456	926	1.5	0.2

表-2 線膨張係数式定数

	t <sub>0</sub> (h)	a	b	c	d	e	f(h)	g	h
P10-10	-								
P10-35	21.4	70	-0.19	1.5	10	0.8	21	-0.02	17
P10-55	17.3					2	16	-0.04	17
P20-20	17.2					1.5	15	-0.02	15
P20-45	17.0	50	-0.22	2	9	1.9	15	-0.03	15
P20-65	16.8					3	15	-0.05	15
P30-30	11.1					3.2	5	-0.04	12
P30-55		70	-0.3	2	10	4	8	-0.07	12
P30-75	12.1								

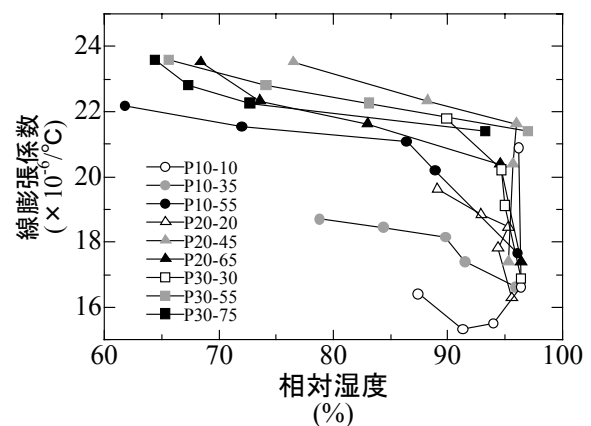


図-1 相対湿度-線膨張係数

供試体は上述の傾向が明確でないことから線膨張係数は相対湿度依存性以外の要因が存在するものと推察される。これについては今後の課題とする。

模擬コンクリート供試体においても、図-5(C)から線膨張係数の傾向はセメントペースト供試体と同様であるが、全体的に値が小さく、時間依存性による変化量も小さい。これは、骨材の線膨張係数がセメントペーストに比較し小さいため、セメントペーストの傾向を反映しにくいことが一因として考えられる。

### 3.2 自己収縮

自己収縮ひずみの算出を目的として、本実験で得られた線膨張係数の時間依存性を以下に示す式(1),式(2)を用いて表現した。式中の各係数を表-2に、実験値との比較を図-4(c)に示す。

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

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

ここで、 $t$ :材齢(h),  $\alpha(t)$ :材齢  $t$  における線膨張係数( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ),  $t_0$ :近似式切替材齢(h),  $a$ - $h$ :定数(表-2)である。

図-2に本実験で得られた各温度履歴下におけるセメントペースト供試体の自己収縮ひずみ及び供試体温度を有効材齢で評価したものを示す。ここで有効材齢は、アレニウス則による CEB-FIP modelcode90 有効材齢式を用いた。

図-2によると、自己収縮ひずみの進行は大きく2つのステージに分けられる。一方は有効材齢約15h以前の急激な進行であり(ステージ1), 他方は、その後の比較的緩やかな進行である(ステージ2)。

ステージ1の収縮量は練上り温度により異なる。すなわち、有効材齢約15hでの自己収縮ひずみは10 $^{\circ}\text{C}$ : -1240 $\times 10^{-6}$  (15.1h), 20 $^{\circ}\text{C}$ : -980 $\times 10^{-6}$  (15.5h), 30 $^{\circ}\text{C}$ : -685 $\times 10^{-6}$  (15.9h)であり、練上り温度が低いものほど収縮量は大きい値を示した。初期収縮量が練上り温度により異なる点に関しては、丸山ら<sup>2)</sup>の研究でも確認されており、冬期に初期収縮量が増大する可能性が考えられた。その原因として高性能減水剤の温度依存性、練混ぜ効率を挙げている。図-3に各練上り温度一定養生の供試体について、1時間当たりの自己収縮進行速度( $\times 10^{-6}/\text{h}$ ) (図中 $v$ で表記)を実在齢(左図)と有効材齢(右図)で評価したものをヤング率(図中 $E$ で表記)と併せて示す。左図から自己収縮の進行が開始する材齢はほぼ同時であるが、養生温度が高い供試体ほど停滞に移行する材齢が早いことがわかる。また、右図から有効材齢50h以前においてヤング率は概ね有効材齢で評価できている一方、自己収縮進行速度は低温のものほど進行開始材齢が早く、収縮を抑制する方向に働くと考えられるヤング率が小さい値をとる期間が相対的に長い。すなわち、極初期材齢におけるヤング率の発現は巨視的収縮を抑制する可能性を示しており、水和の進行に伴い収縮が進行するというアレニウス則による有効材齢式では極初期材齢において

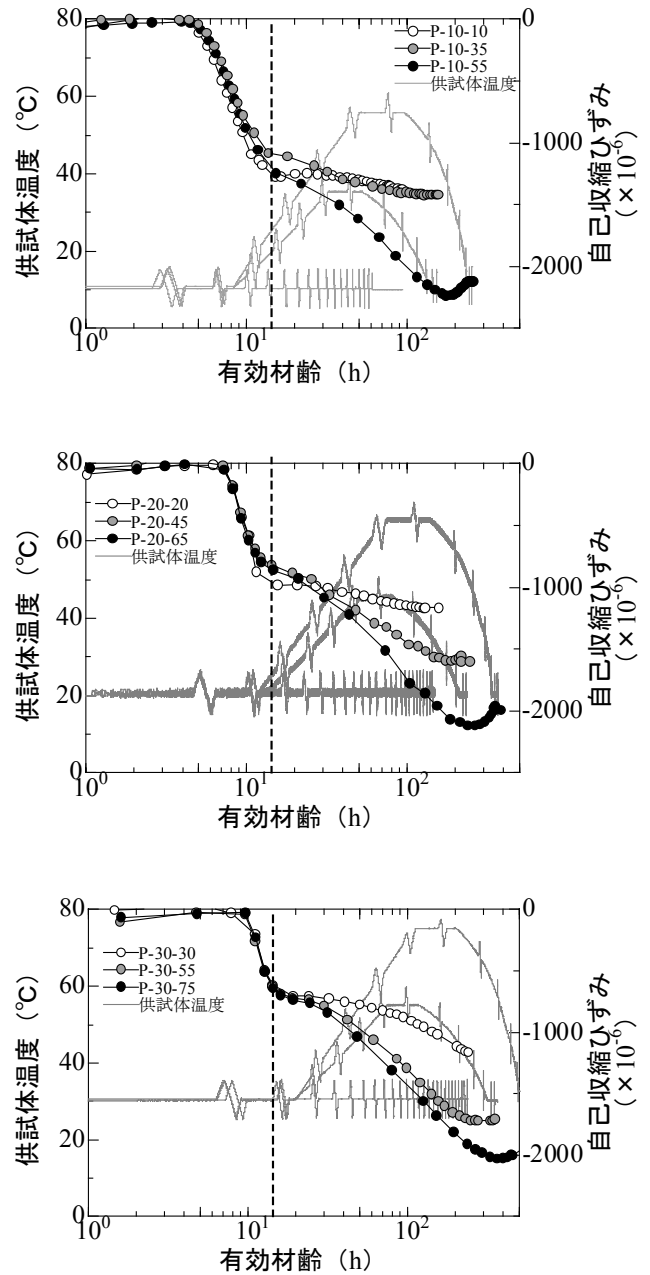


図-2 有効材齢-自己収縮ひずみ

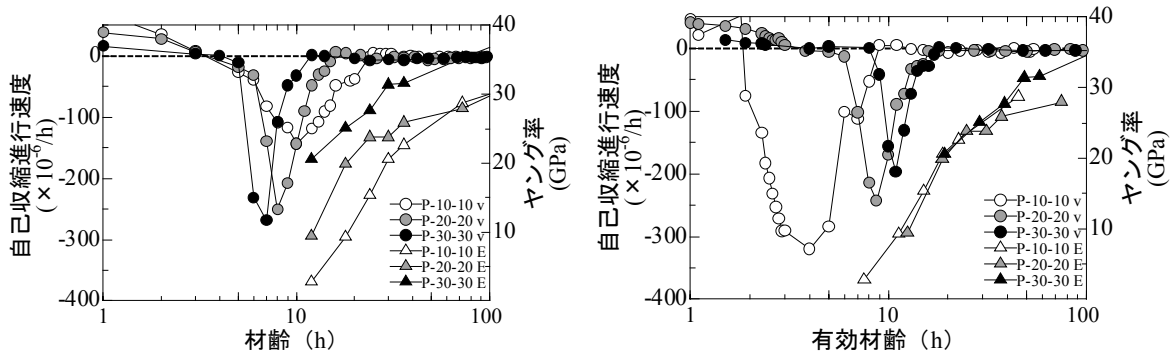


図-3 材齢-自己収縮進行速度(左図), 有効材齢-自己収縮進行速度(右図)

収縮量の適切な評価が難しいと考えられる。

ステージ2では、各供試体の到達温度により自己収縮の進行速度が異なる。すなわち図-2において、同練上り温度で各温度履歴を経た供試体は供試体温度が概ね40℃に到達する時点までは有効材齢式で評価できているが、供試体温度が40℃を越えるものは、その後の温度上昇に伴い自己収縮ひずみが急激に増大し、材齢7日以前においては最高温度が35℃以下の供試体の自己収縮ひずみとは大きく乖離している。この現象は、図-2においてP-10-35ではP-10-10との差がほとんど見られないのに対し、P-30-55ではむしろP-30-75に近い挙動が得られていることから確認できる。以上の傾向は、セメン

トペースト供試体で特に顕著であったが、図-5(E)に示す模擬コンクリート供試体においても概ね同様であった。C-10シリーズでは、他のシリーズほど上述の傾向が見られなかったが、C-10-35,C-10-55では本来収縮が進行する材齢より早く、模擬水和熱による強制的な温度上昇を受けるため、図-5(D)に示すように全ひずみが膨張域で推移する。この膨張が自己収縮メカニズムになんらかの影響を与えた可能性が考えられるが、本実験においては解明に到らなかった。自己収縮の長期的な進行と併せて今後の検討課題としたい。

### 3.3 相対湿度

相対湿度の測定結果をそれぞれ図-4、図-5(F)

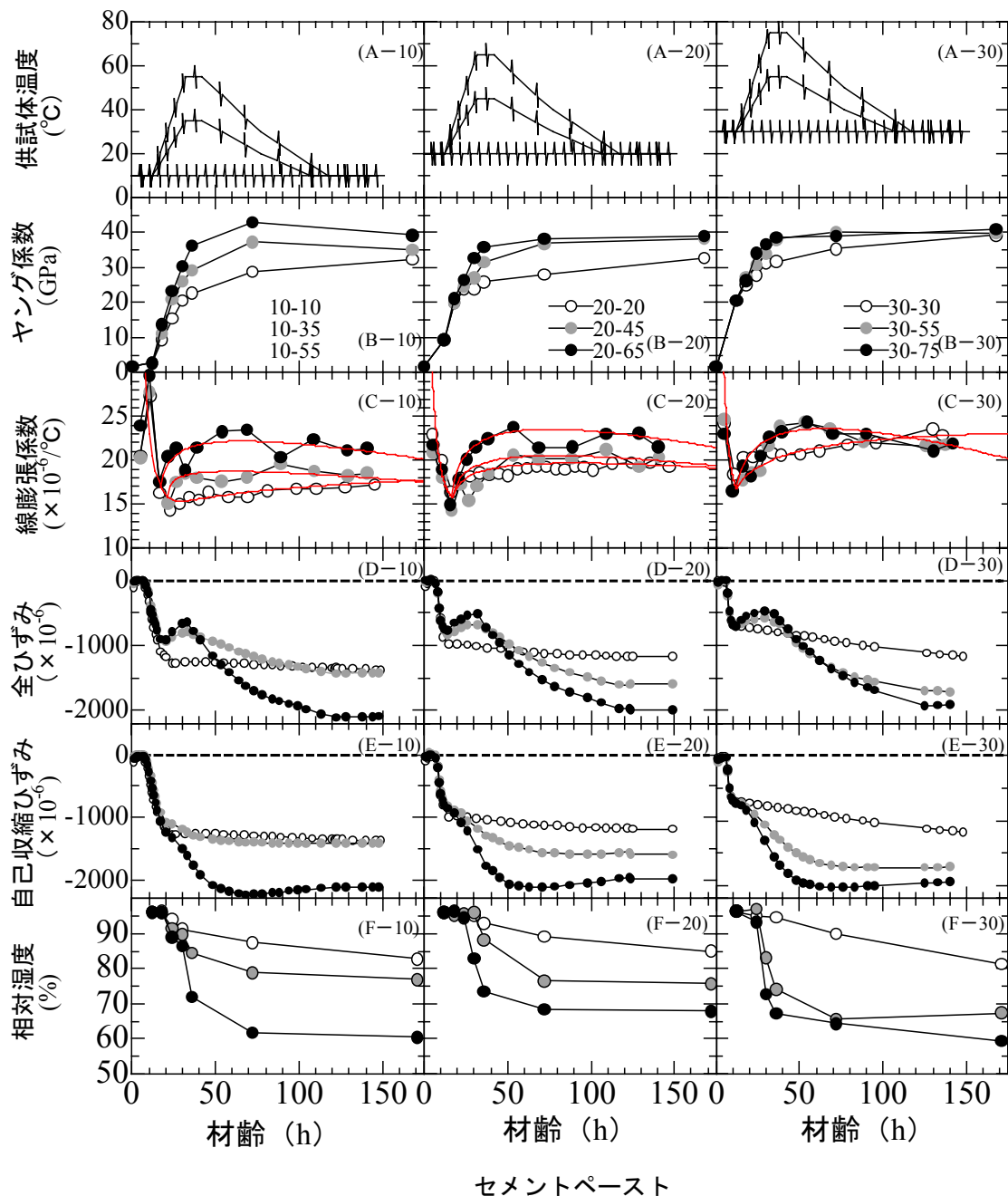


図-4 セメントペースト供試体における諸物性の測定結果

に示す。セメントペースト供試体と模擬コンクリート供試体の傾向に大きな差はなく、高温履歴を経た供試体ほど相対湿度の減少が大きいことが分かる。高温履歴を経た供試体で相対湿度が急激に減少する点は、30h もしくは 36h の測定点であり、これは供試体が最高温度をとる材齢と一致した。

#### 4. 自己収縮ひずみ評価式

シリカフェームを使用した UHSC はアレニウス則による有効材齢式では適切な評価できないことが明らかになった。そこで、高温時のシリカフェームの反応活性を考慮したマチュリティ式 (SFC マチュリティ)、及びこれを用いて水結合材比 0.15 のセメントペーストにおけ

る自己収縮ひずみの表現式をそれぞれ式(3)、式(4)にそれぞれ提案する。

$$M = \sum_{\Delta t_i=0}^t (x \cdot \Delta t_i \times T) \begin{cases} T \leq 40 & x=1 \\ T > 40 & x=6 \end{cases} \quad (3)$$

ここで  $M$  : SFC マチュリティ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ )、 $t$  : 材齢(h)、 $\Delta t_i$  : 時間 (h : ここでは 1 分単位)、 $T$  :  $\Delta t_i$  時間の供試体温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  $x$  : 供試体温度による定数である。式(3)は、本実験で得られた供試体温度が  $40^{\circ}\text{C}$  以上の領域では、自己収縮が急激に進行するという実験的事実を踏まえて、自己収縮ひずみの表現を目的とするものである。以

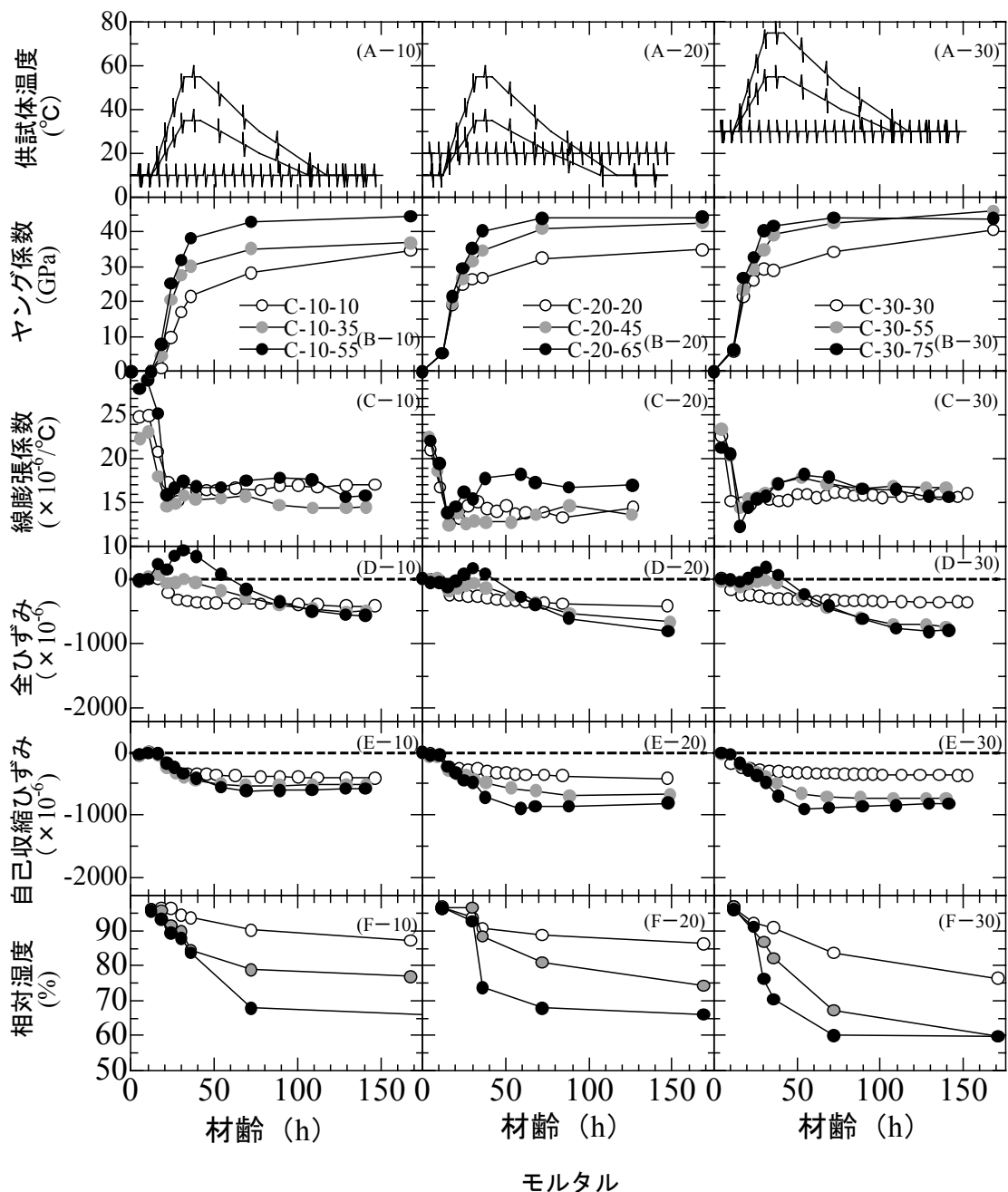


図-5 モルタル供試体における諸物性の測定結果

上の SFC マチュリティを用いて、各練上り温度における自己収縮ひずみの表現式を以下のように提案する。

$$\varepsilon_{Ash} = i \cdot \{j + \exp(m \cdot M' - k)\}^{-1} + l \cdot \exp(-n \cdot M') - 10 \cdot (120 + i) \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon_{Ash}$  : 自己収縮ひずみ( $\times 10^{-6}$ )、 $M'$  :  $M \times 10^{-3}$ 、 $(\text{C} \cdot \text{h})i$  : 練上り温度により決まる定数、 $j-1$  : 定数  $m$ 、 $n$  : 定数 $(\text{C} \cdot \text{h})^{-1}$ (表-3)であり、適用範囲は  $0 < M'$  である。第一項がステージ1における自己収縮ひずみ、第二項がステージ2における自己収縮ひずみ、第三項が自己収縮ひずみの最終値を表現している。ここでは、ステージ2の自己収縮ひずみは練上り温度による影響を受けないと仮定した。

図-6に、表現式の結果を測定値と共に示す。ここで横軸は SFC マチュリティ( $\text{C} \cdot \text{h}$ )である。図より、各練上り温度で精度よく自己収縮ひずみを表現可能であることが確認された。超高強度セメントペーストの自己収縮は、温度履歴以外に水結合材比、混和剤量、シリカフューム置換率などの影響を受けると考えられ、今後は、これらの影響を加味し、式(4)の適用性を検討していく予定である。

## 5. まとめ

混和材としてシリカフュームを使用した水結合材比 0.15 のセメントペースト及びモルタルについて、季節による練上り温度及び水和発熱による温度上昇の相違を想定した温度履歴を与えた状況で諸物性の測定を行った。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 線膨張係数の時間依存性は、供試体内の自己乾燥に起因する相対湿度の減少が一因と推察された。
- (2) 超高強度セメントペーストの自己収縮は2つの段階を持ち、有効材齢 15h 以下の初期材齢では、低温養生のものほど自己収縮ひずみが大きくなり。その後の材齢では供試体温度が  $40\text{C}$  以上の領域で自己収縮の急激な進行がみられる。
- (3) 本調査において、有効材齢 15h 以降の超高強度セメントペーストの自己収縮ひずみは、高温時の反応活性を考慮したマチュリティにより評価することができる。
- (4) (3)の提案マチュリティを用いて各練上り温度による自己収縮ひずみ表現式を提案した。

謝辞：本研究の一部は、平成 18-20 年度文部科学省科学研究費若手研究 A(代表 丸山一平、課題番号：18686045)の補助

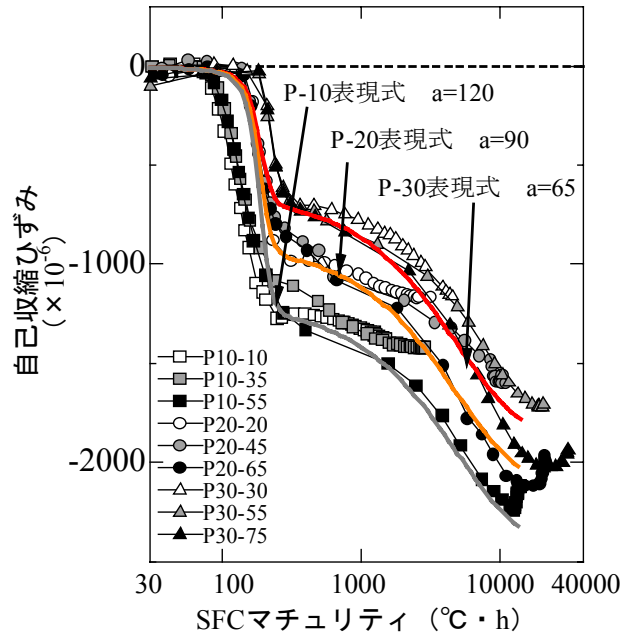


図-6 自己収縮ひずみ表現式と測定値の比較

表-3 自己収縮表現式定数

練上り温度	i	j	k	l	m	n
10°C	120	0.1	11.5	1200	50	0.2
20°C	90					
30°C	65					

を受け実施した。

## 参考文献

- 1) 菅又 匠ほか：セメントーシリカフューム系結合材の水和反応と強度発現の関係に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.1287-1292, 2004.7
- 2) 鈴木雅博ほか：超高強度コンクリートの自己応力に及ぼす温度履歴の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.59, pp.375-382, 2005.7
- 3) 寺本篤史ほか：超高強度コンクリートの若材齢線膨張係数に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.1, pp.633-638, 2007.7
- 4) 丸山一平ほか：超高強度コンクリートを用いた RC 柱部材の初期応力に関する検討，耐久性力学に関するシンポジウム，pp.303-312, 2007.12
- 5) 平尾宙ほか：硬化セメントペーストの湿度及び硬化体構造の変化と自己収縮，コンクリート工学年次論文集，Vol. 18, No. 1, pp. 705-710, 1996
- 6) Meyers, S. L. et al.: Thermal Expansion Characteristics of Hardened Cement Paste and of Concrete, Highway Research Board Proceedings, Vol.30, pp. 193-203, 1950