

# 論文 マスコンクリートのひび割れ発生に及ぼす自己収縮の影響

筋野 晃司\*1・田澤 栄一\*2・宮澤 伸吾\*3・保明 淳二\*4

要旨：マスコンクリート内部の温度及び応力履歴を再現したモデル実験を行い、拘束応力やひび割れ発生に及ぼす自己収縮の影響について検討した。その結果、コンクリートの自己収縮はマスコンクリートのひび割れ制御を行う上での新たな要因として考慮する必要があることを確認した。

キーワード：マスコンクリート、自己収縮、ひび割れ、温度ひずみ、ひずみの重ね合わせ

## 1. まえがき

従来、マスコンクリート硬化時のひび割れ発生原因は、温度ひずみが拘束を受けることにより自己応力が発生するためと考えられており、コンクリートの自己収縮の影響が考慮されていない。しかし、近年の研究では、使用材料や配合によってはコンクリートに大きな自己収縮が発生し、ひび割れの発生原因となることが報告されている[1]。また、自己収縮がマスコンクリートの自己応力発生及びひび割れに及ぼす影響について拘束実験により検討が行われている[2]。本研究では、さらに高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートについての実験結果を併せて示すと共に、クリープの影響についても検討を加えた。

## 2. 実験概要

### 2.1. 使用材料及び配合

セメントには普通ポルトランドセメント及び高ピーライト系低発熱セメントを使用した。これらの鉱物組成を

表-1 使用セメントの鉱物組成

Type of cement	C <sub>3</sub> S(%)	C <sub>2</sub> S(%)	C <sub>3</sub> A(%)	C <sub>4</sub> AF(%)
Normal	53.2	20.7	9.6	8.5
Low Heat	27.8	56.3	2.4	7.6

表-2 コンクリートの配合

Mix No.	Type of cement	W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )							Slump (cm)	Slump Flow (cm-cm)	Air (%)	Cracking test
				W	C	SF	BS	S	G	Ad				
1	LHC	30	34	160	533	-	-	633	1120	1.60	7	---	1.9	○
2	NPC	20	37	160	720	80	-	502	1012	12.0	23	45-42	2.6	○
3	NPC	30	37	160	160	-	373	610	1102	1.60	23	50-48	1.0	○
4	NPC	30	37	160	533	-	-	633	1120	1.07	5	---	2.0	-
5	NPC	50	43	185	370	-	-	738	1016	1.07	7	---	4.1	-

LHC:Low Heat Cement, NPC:Normal Portland Cement, SF:Silica Fume, BS:Blast furnace Slag

\*1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻(正会員)

\*2 広島大学教授 工学部第四類(建設系)、工博(正会員)

\*3 広島大学助手 工学部第四類(建設系)、工博(正会員)

\*4 広島大学 工学部第四類(建設系)

表-1に示す。混和材料には高炉スラグ微粉末(比重2.90, 粉末度5920cm<sup>2</sup>/g)、シリカフューム(比重2.21, 粉末度140,000cm<sup>2</sup>/g)及び高性能AE減水剤を使用した。骨材として、細骨材には風化花崗岩系山砂(比重2.61, FM 2.88, 吸水率 1.32%)、粗骨材には流紋岩質碎石(比重2.71, FM 6.55, 吸水率 0.32%, Gmax 20mm)を使用した。本実験で使用したコンクリートの配合を表-2に示す。

## 2.2. 自己収縮ひずみの測定

温度一定の恒温室内において、コンクリートの自己収縮ひずみの測定を行った。打ち込み直後から20℃、40℃及び60℃の一定室温で養生した。供試体は10×10×40cmとし、鋼製型枠に打設した。型枠がコンクリートの自由変形を妨げないために、型枠の内側にビニールシートを敷き、水分の蒸発を防ぐために仕上げ面をビニールシートで覆った。長期測定では、材齢24時間で脱型し直ちにアルミ箔粘着テープで全面シールし乾燥を防いだ。ひずみ及び温度の測定は、埋め込みひずみゲージ及び熱電対を供試体中央部に埋め込んで行った。

## 2.3. マスコンクリートを想定したひび割れ試験

### (1) 試験装置の概要

ひび割れ試験装置を図-1に示す。拘束枠は4本の拘束鋼管と2枚の側板より構成される。側板は、ナットにより鋼管と固定されている。鋼管は、管内に所定温度の水を循環させた。供試体は試験断面10×10cm、試験長50cmとなっており、側板間の型枠内に設置する。試験部は、型枠の拘束を受けないように、発泡スチロール製の型枠を用いた。コンクリートのひずみ及び温度の測定は、埋め込みひずみゲージ及び熱電対を供試体中央部に埋め込んで行った。供試体表面は、乾燥を防ぐためビニールシートで覆った。

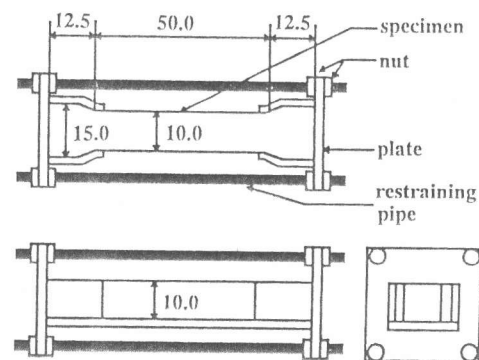


図-1 ひび割れ試験装置

### (2) ひび割れ試験

試験は、まず打設高さ1.5mのスラブ中央部の温度履歴を断熱温度上昇試験結果を用いてFEM温度解析より求めた。この温度履歴と同じになるように温度制御した槽内に拘束枠を静置し、コンクリート打ち込み直後から測定を行った。供試体に発生する応力は、拘束鋼管に貼り付けたひずみゲージより求めた。温度制御槽内には拘束供試体と並行して無拘束供試体を静置し、これらの温度とひずみを一定の間隔で測定した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1. コンクリートの自己収縮ひずみ

図-2に養生温度20℃での自己収縮の測定結果を示す。比表面積の大きなシリカフューム、高炉スラグ微粉末を混入したMix 2及びMix 3の自己収縮が大きくなった[3]。また、水セメント比が小さくなるほど自己収縮が大きくなった[4]。自己収縮は供試体内部の水分移動によるメニスカス形成時の負圧が原因の一つと考えられており、組織が緻密になるほど収縮が大きくなることになる。一

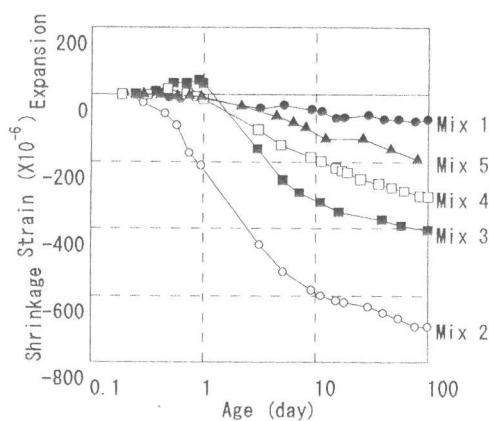


図-2 自己収縮ひずみ(20℃) [2]

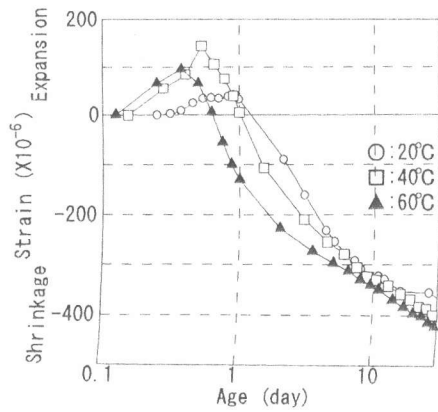


図-3 自己収縮ひずみ(Mix 3)

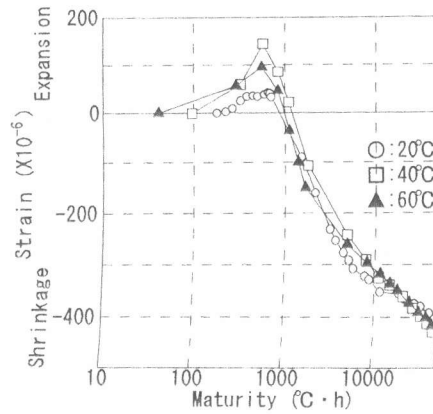


図-4 自己収縮ひずみ(Mix 3)

方、高ビーライト系低発熱セメントを用いた Mix 1では自己収縮が小さくなった。これらは、従来の結果とよく一致し、これらの傾向は養生温度が40°C及び60°Cの場合でも同様であった。

図-3はMix 3の自己収縮に及ぼす養生温度の影響を示したものであるが、図-4に示すように水和反応の指標として用いられるマチュリティで整理すると自己収縮ひずみ量が一致した。また、Mix 1及びMix 2についても同様の傾向がみられた。

### 3.2. ひずみの重ね合わせ理論の適用

温度変化を受ける無拘束供試体のひずみを、以下のように温度ひずみと自己収縮ひずみの和であると仮定する。

$$\varepsilon_f = \varepsilon_T + \varepsilon_A \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_f$  : 無拘束供試体のひずみ

$\varepsilon_T$  : 温度ひずみ

$\varepsilon_A$  : 自己収縮ひずみ

図-5にMix 3について、式(1)を用いてひずみの分類を行ったものを示す。ここで、自己収縮ひずみは3.1節の結果を基にマチュリティより求めている。また、図-6に温度と図-5より求めた $\varepsilon_T$ 及び $\varepsilon_f$ の関係を示す。材齢初期において、温度が上昇しているにもかかわらず $\varepsilon_f$ が減少しているが、式(1)に基づけば、自己収縮の影響であると説明できる。自己収縮ひずみの影響を考慮した $\varepsilon_T$ は線形となり、一部で指摘されていたヒステリシスの影響はでない。このことより、温度ひずみには以下のような理想的な関係が成立すると考えられる。

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

ここに、 $\alpha$  : 熱膨張係数

$\Delta T$  : 温度変化

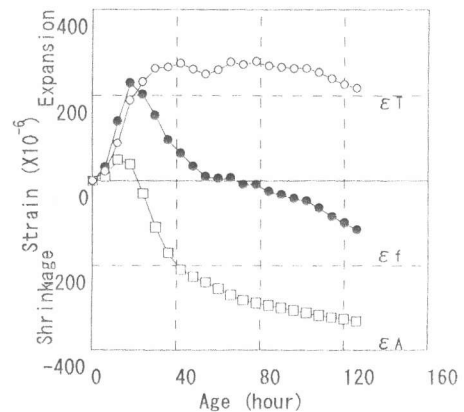


図-5 無拘束供試体のひずみ分類(Mix 3)

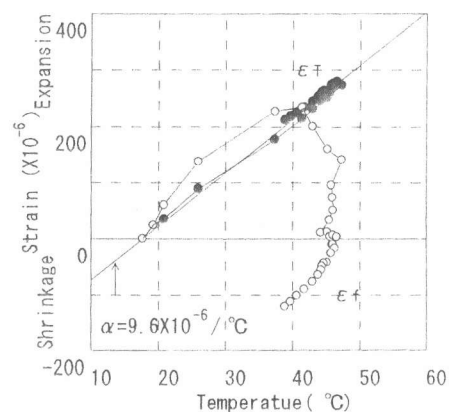
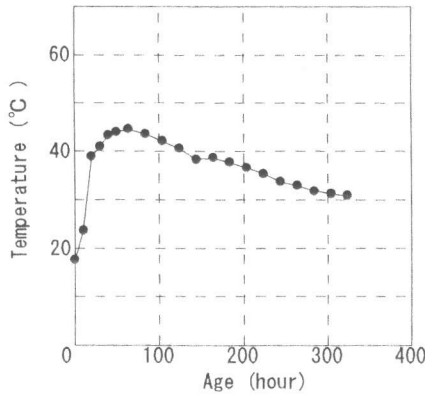


図-6 温度と $\varepsilon_T$ の関係

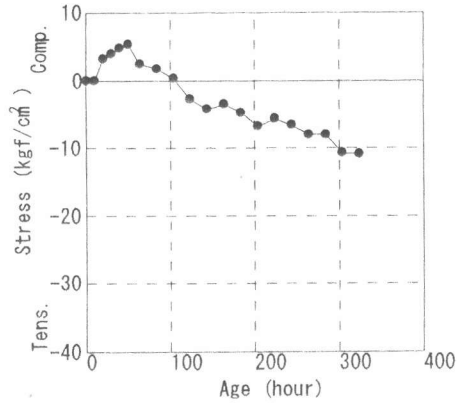
図-6の直線回帰より、 $\alpha=9.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ が得られた。また、Mix 1及びMix 2についても同様の解析を行い、それぞれ $\alpha=8.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 及び $\alpha=10.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ が得られた。

### 3.3. ひび割れ試験結果

図-7、図-8及び図-9に、Mix 1、Mix 2及びMix 3のひび割れ試験における温度及び応力の経時

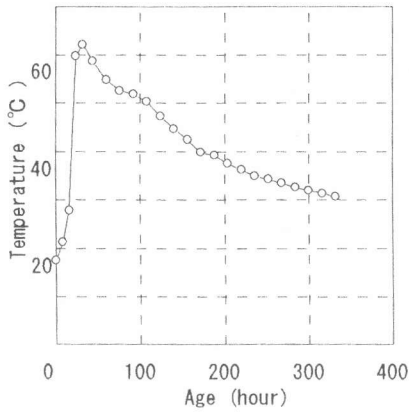


(A) 温度の経時変化

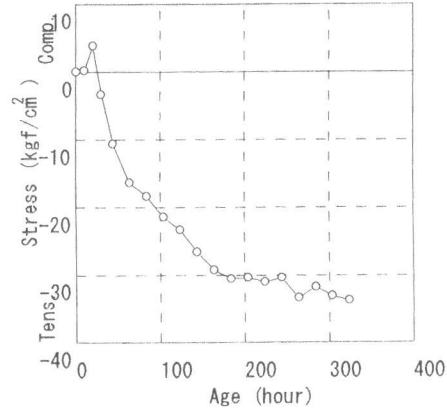


(B) 応力の経時変化

図-7 ひび割れ試験結果(Mix 1) [2]

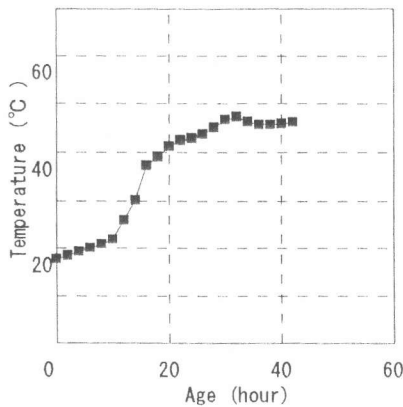


(A) 温度の経時変化

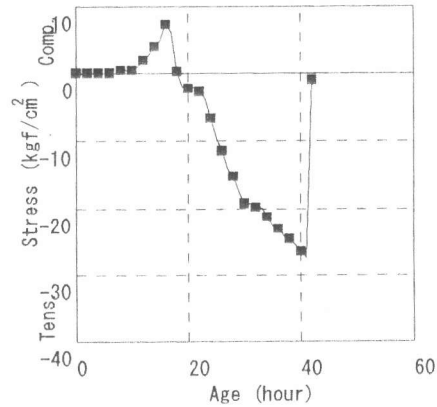


(B) 応力の経時変化

図-8 ひび割れ試験結果(Mix 2) [2]



(A) 温度の経時変化



(B) 応力の経時変化

図-9 ひび割れ試験結果(Mix 3)

変化を示す。 Mix 1及びMix 2は拘束鋼管内の温度を一定としたのに対し、 Mix 3は拘束鋼管の温度を変化させて拘束率をほぼ100%とした。

また、図-10に温度と応力の関係を示す。 Mix 1は、最高温度時に圧縮応力が最大となった。その後、温度下降とともに圧縮応力が減少し長期材齢では引張応力が発生した。これは、従来考えられていた応力変化と一致する。一方、 Mix 2は、温度上昇時にも関わらず、圧縮応力が減少した。最高温度時までには応力が圧縮から引張に反転し、長期材齢では、約34kgf/cm<sup>2</sup>の引張応力が発生した。これは、材齢初期に大きな自己収縮が発生するためと考えられる。さらに、拘束が大きく、自己収縮が大きい Mix 3においては、温度上昇時に約26kgf/cm<sup>2</sup>もの引張応力が発生し供試体が破断した。以上のことから、自己収縮はマスコンクリートのひび割れ発生に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

### 3.4. クリープの影響

拘束供試体については、供試体が拘束を受けることにより自己応力が発生する。この自己応力の影響により、弾性ひずみとクリープひずみが発生するとし、拘束供試体の測定されるひずみは以下のようにこれらの和で表されると仮定する。

$$\varepsilon_r = \varepsilon_T + \varepsilon_A + \varepsilon_E + \varepsilon_C \quad (3)$$

ここに、 $\varepsilon_r$  : 拘束供試体のひずみ

$\varepsilon_T$  : 温度ひずみ

$\varepsilon_A$  : 自己収縮ひずみ

$\varepsilon_E$  : 弾性ひずみ

$\varepsilon_C$  : クリープひずみ

ここで、弾性ひずみは、自己応力を弾性係数で除して求めた。弾性係数については、異なる2材齢において強度試験を行い、その結果を基に各材齢での値を計算で求めた。強度試験供試体は、温度制御槽内に静置し、ひび割れ試験と同一の温度履歴とした。強度試験結果は表-3に、弾性係数算出式は表-4に示す。

また、クリープひずみについては、自己応力が圧縮の時には圧縮クリープ、引張の時には引張クリープが発生し、応力が反転した後のクリープは、それぞれの累積値の代数和とした。

以上のような仮定を基に、拘束供試体につ

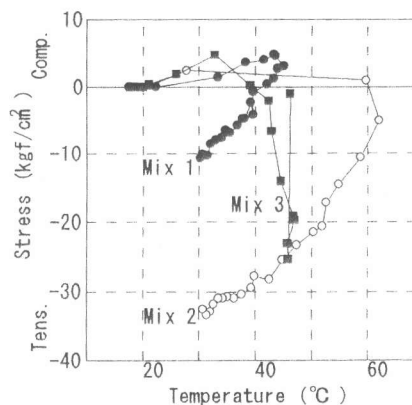


図-10 温度と応力の関係

表-3 強度試験結果

Mix No.	材齢 (hour)	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
1	57	299	2.88
	335	540	3.77
2	27	693	3.48
	335	876	4.44
3	42	413	3.51
	138	453	3.76

表-4 弾性係数の算出式

Mix No.	圧縮強度算出式		弾性係数算出式	
	$\sigma_{(t)} = A * \log_{10} M_{(t)} + B$		$E(t) = C * \sigma_{(t)}^n$	
	A	B	C	n
1	124	350	387	1.04
2	299	-722	20921	0.45
3	157	-118	29525	0.41

いてひずみの分類を行った。図-11に、Mix 3について分類した $\epsilon_E$ 及び $\epsilon_C$ の経時変化を示す。材齢初期に大きなクリープひずみが発生しているが、これは流動ひずみの影響であると考えられる。また、引張応力の増加区間では、弾性ひずみとほぼ同量のクリープひずみが発生している。

図-12に拘束ひずみ(= $\epsilon_E + \epsilon_C$ )と応力の関係を示す。これより、どのケースにおいても引張応力の増加区間では拘束ひずみと応力がほぼ線形関係となった。この区間においてそれぞれ直線回帰を行うことにより、傾きすなわち有効弾性係数として $1.4 \sim 1.8 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ の値が得られた。

#### 4. まとめ

- (1) 自己収縮ひずみは、養生温度に関わらず水セメント比が小さいほど大きくなった。
- (2) 温度変化を受けるコンクリートの自由変形は、温度ひずみと自己収縮ひずみの和で表すことができる。
- (3) 自己収縮の大きなコンクリートが拘束状態で温度変化を受けると温度上昇時に引張応力が発生し、ひび割れが発生する場合がある。また、引張応力が増加する区間における有効弾性係数は、 $1.1 \sim 1.8 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ となった。

#### 謝辞

本研究に際し、大成建設(株)技術研究所の岡本氏、中国電力(株)技術研究所の及川氏及び林氏に多大な御協力を頂きました。また、本研究の一部は、旭硝子財団研究助成金により行われました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 宮澤伸吾・田澤栄一・佐藤剛・佐藤克俊：鉄筋拘束による超高強度コンクリートの自己収縮応力、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 57-62、1993. 11
- 2) E. Tazawa, Y. Matuoka, S. Miyazawa, S. Okamoto : Effect of Autogenous Shrinkage on Self Stress in Hardening Concrete, Int. Symp. on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Munchen, pp. 221-228, Oct. 1994
- 3) 三浦智哉・田澤栄一・宮澤伸吾・保利彰宏：コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17 (現在投稿中)
- 4) 田澤栄一・宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材及び配合の影響、土木学会論文集、Vol. 25、No. 502、pp. 43-52、1994. 11

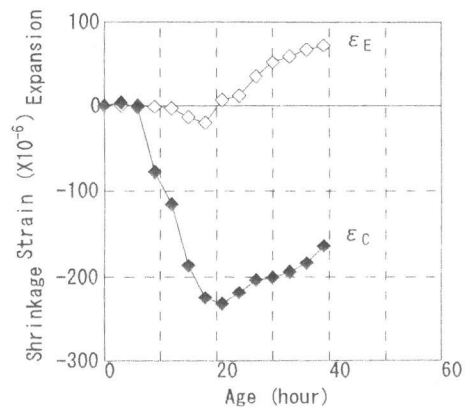


図-11  $\epsilon_E$ 及び $\epsilon_C$ の経時変化(Mix 3)

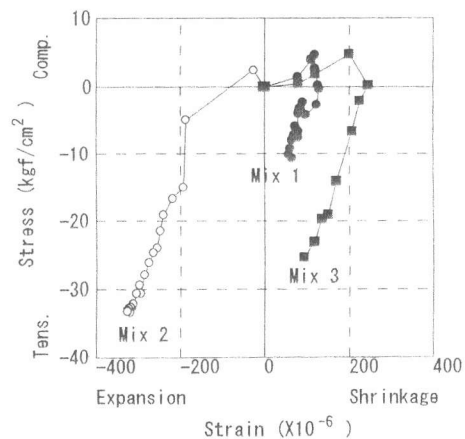


図-12 拘束ひずみと応力の関係