

◇論文◇

シリカフュームプレミックスセメント(SFPC[®])を用いた超高強度コンクリートの自己収縮低減

Reduction of Autogenous Shrinkage of Ultra-High-Strength Concrete Containing Silica Fume-Premix Cement (SFPC[®])

前 堀 伸 平*, 三 谷 裕 二*,
中 崎 豪 士*, 谷 村 充**

MAEHORI, Shimpei*; MITANI, Yuji*;
NAKAZAKI, Takeshi*; TANIMURA, Makoto**

要 旨

シリカフュームプレミックスセメント(SFPC[®])を用いた, 水結合材比が13~20%の超高強度コンクリートを対象として, 膨張材, 収縮低減剤あるいは収縮低減型高性能減水剤を単独使用もしくは併用した場合について, それぞれ自己収縮の挙動および低減効果を検討した。

その結果, 実部材を想定して高温度履歴を与えた場合の自己収縮性状は20℃の場合とは異なる挙動を示すこと, 膨張材, 収縮低減剤あるいは収縮低減型高性能減水剤の単独使用または併用により温度条件によらず明らかな自己収縮の低減効果を有すること, 収縮低減剤あるいは収縮低減型高性能減水剤を膨張材と併用した場合の効果は各々を単独で用いた場合の効果を足し合わせたものと同等以上であること, などの知見を得た。

キーワード: シリカフュームプレミックスセメント, 超高強度コンクリート, 自己収縮, 膨張材, 収縮低減剤, 収縮低減型高性能減水剤

* 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 TBCチーム

TBC Team, Research & Development Center

** 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 TBCチーム リーダー

Manager, TBC Team, Research & Development Center

ABSTRACT

This paper investigates autogenous shrinkage behavior of ultra-high-strength concrete containing silica fume-premix cement (SFPC®) with a water-to-binder-ratio of 0.13 to 0.20. The concrete mix was added with expansive admixture (EX), shrinkage reducing agent (SRA) or shrinkage-reducing type superplasticizer (SRSP) solely or in combination of EX and SRA or EX and SRSP, and effects of these admixtures in reducing autogenous shrinkage were examined.

The ultra-high-strength concrete specimens subjected to high temperature to simulate actual temperature conditions in massive columns exhibited distinct differences from those cured at a constant temperature of 20°C in autogenous shrinkage/expansion strain behavior and resultant stress induced. Significant reduction in autogenous shrinkage was noted in all specimens, irrespective of the temperature conditions. Further investigation revealed that the effect of combined use of EX and SRA, or of EX and SRSP, was greater than the sum of their individual effects.

Keywords : *Silica fume-premix cement, Ultra-high-strength concrete, Autogenous shrinkage, Expansive admixture, Shrinkage reducing agent, Shrinkage-reducing type superplasticizer*

1. はじめに

構造物のさらなる高層化・長スパン化等への要求が高まるなか、設計基準強度 150N/mm² 級の超高強度コンクリートが実用化され^{例え 1) 2)}、最近では 200N/mm² クラスの開発が進められている^{例え 3) 4)}。一方、このような超高強度コンクリートは極端に水結合材比が低くなるため、自己収縮が顕著に大きくなる。自己収縮が鋼材等の拘束を受けるとコンクリートには引張応力が生じ、それに起因したひび割れ発生の可能性が懸念されている⁵⁾。

高強度コンクリートの材料的アプローチによる自己収縮低減策として、膨張材や収縮低減剤が効果的であることは過去に多く報告されているが^{例え 6)}、水結合材比が極端に低い領域での適用性についての検討は少なく、まだ十分な知見を得ていないのが現状である。特に実部材レベルではセメントの水和反応による温度履歴を受けるが、このような条件下における膨張材、収縮低減剤の作用については不明な点が多い。

本報告では、シリカフュームプレミックスセメント（以下、SFPC®）を用いた低水結合材比の超高強度

コンクリートを対象として、膨張材の混和による自己収縮・膨張ひずみ、さらには鉄筋拘束条件下で生じる自己収縮・膨張応力の挙動を実験的に検討した（シリーズⅠ）。

また、収縮低減剤による自己収縮の低減効果について、膨張材と併用する場合も含めて検討した（シリーズⅡ）。同様に、近年開発された収縮低減型高性能減水剤⁷⁾による自己収縮の低減効果も検討した（シリーズⅢ）。

2. 膨張材の効果検証（シリーズⅠ）

2.1 試験概要

(1) 使用材料および配(調)合

Table 1に使用材料を示す。セメントにはSFPC®, 膨張材には汎用品より比表面積が大きい膨張材（市販品）を用いた。既往の研究において、超高強度コンクリートに膨張材を多く混和した場合、後々になって強度への影響が無視し得ない異常な膨張を生じる場合のあることが報告されている^{8)~11)}。一方で、比表面積が大きい膨張材を用いることにより、異常膨張が生じない結果も既に示されている^{10) 11)}。

Table 1 Constituent materials (series I)
(コンクリートの使用材料 (シリーズ I))

Material	Symbol	Properties of material
Cement	C	Silica fume-premix cement (SFPC [®]) Density: 3.07g/cm ³ , Specific surface area: 6160cm ² /g
Expansive admixture	E	Lime based type Density: 3.19g/cm ³ , Specific surface area: 4920cm ² /g
Fine aggregate	S	Pit sand (Kakegawa) Density*: 2.56g/cm ³ , Water absorption: 2.24%
Coarse aggregate	G	Sandstone, crashed stone (Sakuragawa) Density*: 2.64g/cm ³ , Water absorption: 0.51%, Solid content: 60%
Chemical admixture	SP1	High-range water-reducing admixture: Polycarboxylate type
	SP2	Air-entraining and high-range water-reducing admixture: Polycarboxylate type

*Density in saturated surface-dry condition

Table 2 Mix proportion of concrete (series I)
(コンクリートの配 (調) 合 (シリーズ I))

Symbol	W/B (%)	Bulk volume of coarse aggregate (m ³ /m ³)	Unit Content (kg/m ³)				
			W	C	E	S	G
PL13	13.0	0.53	150	1154	-	349	840
EX13			150	1124	30	349	
PL16.5	16.5		155	939	-	515	
EX16.5			155	909	30	516	
PL20	20.0		155	775	-	652	
EX20			155	745	30	653	

*B=C+E

Table 2にコンクリートの配(調)合を示す。水結合材比 (W/B) は13.0, 16.5, 20.0%とし、それぞれ膨張材無混和のコンクリート (記号: PL) と膨張材を30kg/m³混和したコンクリート (記号: EX) を検討した。

コンクリートのスランプフローが W/B=13.0%では70±5cm, W/B=16.5, 20.0%では60±5cm, 空気量が2.0%以下となるように減水剤の添加量を調整した。なお, W/B=13.0, 16.5%には超高強度コンクリート用高性能減水剤SP1, W/B=20.0%には高強度コンクリート用高性能AE減水剤SP2を使用した。

(2) 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、水平二軸形強制練りミキサを用い、20℃, R.H. 80%の試験室内で行った。練混ぜ手順は、『C+E+Sを30秒間空練り→W+SPを投入して W/B=13.0, 16.5, 20.0%でそれぞれ240秒間、120秒間、90秒間モルタル練り→Gを投入して90秒間コンクリート練り→300秒間静置→30秒間コンクリート練り→排出』とした。

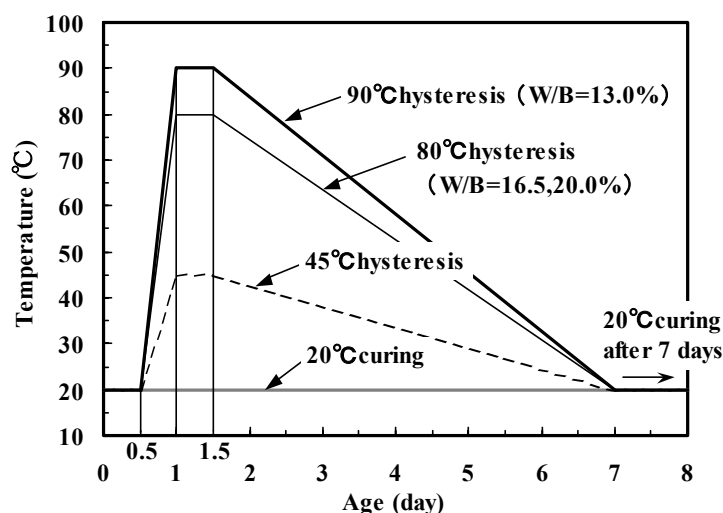


Fig. 1 Pattern of curing temperature
(養生温度条件)

(3) 養生条件

Fig. 1に養生温度条件を示す。1m角の柱部材の中心部で生じる温度履歴を想定し、W/B=13%では最高温度90℃ (90℃履歴), W/B=16.5, 20%では最高温度80℃ (80℃履歴) の温度履歴を設定した。同じく

柱部材の表層部での温度履歴を想定し、最高温度45℃の温度履歴(45℃履歴)を設けた。また、20℃一定で養生(20℃養生)を行う場合も実施した。

(4) 供試体および試験方法

(a) 強度特性

所定の温度条件下で封緘養生した円柱供試体(φ10×20cm)を用いて、材齢1, 3, 7, 28日の圧縮強度および静弾性係数を実施した。試験方法はそれぞれ JIS A 1108, JIS A 1149に準拠した。

(b) 自己収縮・膨張ひずみ特性

10×10×80cmの供試体中央部に設置した低弾性型の埋込み型ひずみ計(見かけの弾性係数40N/mm²)を用いて測定し、コンクリートの線膨張係数を10×10⁻⁶/℃と仮定して温度ひずみを補正した。JCIコンクリートの自己収縮研究委員会の試験方法(改訂版2002)¹²⁾ JCI-SAS2-2を参考に、型枠内側の底面にテフロンシート、端面にポリスチレンボードを入れ、その内側および側面にポリエステル

フィルムを敷設してコンクリートの自由な変形を型枠が拘束することを防いだ。また、打設面は乾燥防止のためにポリエステルフィルムで覆った。材齢7日で脱型した後は、供試体全面をアルミ箔粘着テープ(厚さ0.1mm)で密封し、20℃の恒温室内で養生した。

(c) 自己収縮・膨張応力特性

10×10×80cmの断面中心部にPC鋼棒を配置した拘束供試体を作製した。PC鋼棒はJIS G 3109に規定される呼び名17, 23, 32mmを用い、鋼材比は3水準設定した。鋼棒のひずみは、鋼棒軸方向の対称面に設けた幅4mm、深さ3mm、長さ80cmのねじ切削部の中央にひずみゲージを貼付して測定した。なお、測定値に及ぼす温度ひずみを取り除くために、貼付したひずみゲージについては、事前に温度補正カーブを求めておいた。鋼材比は呼び名17, 23, 32mmに対して、それぞれ2.0, 3.8, 8.0%である。ひずみ特性と同様、材齢7日で脱型した後、供試体全面を密封し、20℃の恒温室内で養生した。

Table 3 Experimental results of fresh concrete and setting time
(フレッシュ性状および凝結時間)

Symbol	SP1 or SP2 (B×%)	Slump flow value (cm)	50cm-flow time (s)	Air content (%)	Concrete temperature (°C)	Setting (h-m)	
						Initial	Final
PL13	1.20 (SP1)	74.0	11.2	1.2	23.4	11-45	13-50
EX13	1.60 (SP1)	75.0	13.2	1.4	24.1	8-45	11-00
PL16.5	0.80 (SP1)	57.0	18.4	1.5	23.2	9-00	10-55
EX16.5	0.90 (SP1)	61.0	15.1	1.5	23.9	5-50	7-30
PL20	1.35 (SP2)	61.5	9.8	1.5	22.0	13-35	15-45
EX20	1.50 (SP2)	61.0	12.9	1.3	22.9	10-15	12-15

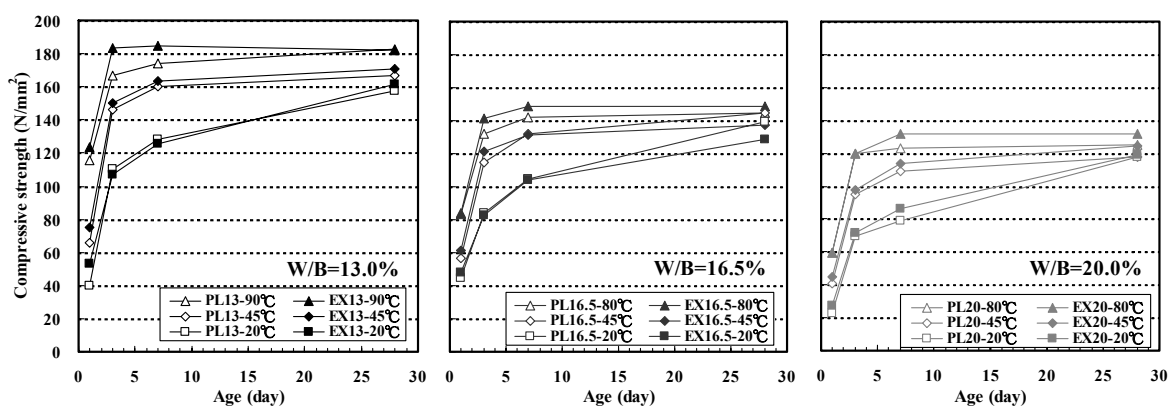


Fig. 2 Relation between age and compressive strength
(圧縮強度の経時変化)

2.2 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状および凝結時間

Table 3にフレッシュ性状および凝結時間の結果を示す。いずれのW/Bにおいても、膨張材を混和したEXシリーズの場合、SP添加量を増加することによりPLと同等のスランプフローが得られた。凝結時間についてはW/Bにかかわらず、EXシリーズがPLより3時間程度早かった。

(2) 強度性状

Fig. 2に圧縮強度と材齢の関係を示す。膨張材混和の影響は、W/Bおよび温度条件にかかわらず、材齢3～7日程度までの圧縮強度の増進に現われており、これは、比表面積が大きく初期反応性の高い膨張材の作用によるものと考えられる。材齢28日の強度は、EXとPLでほぼ同等であった。

温度条件別にみると、膨張材の有無にかかわらず、材齢28日までの圧縮強度は、80・90℃履歴 > 45℃履歴 > 20℃養生の順に高い傾向があった。80・90℃履歴下の強度発現性は材齢初期に大きく進展し、材齢7日付近でほぼ最大値に達する傾向が認められる。そのため、80・90℃履歴と20℃養生の強度差は、材齢7日で35～55%程度、材齢28日で5～15%程度となり、材齢の進行に伴って強度差は小さくなる。

Fig. 3に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図中には日本建築学会の関係式¹³⁾を併記している。

膨張材の有無や温度条件にかかわらず、両者には良い相関性があり、建築学会式ともおおむねよく対応していた。

(3) 自己収縮・膨張ひずみ

Fig. 4に自己収縮・膨張ひずみと有効材齢(式(1))の関係を示す。ひずみの起点は凝結の始発とした。

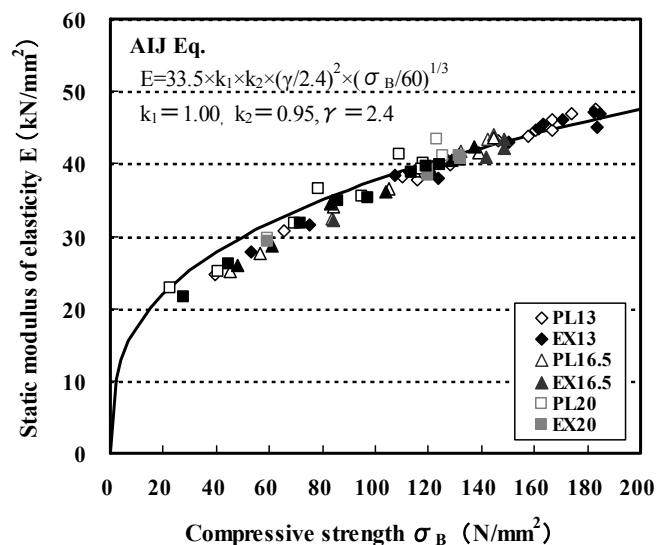


Fig. 3 Relation between compressive strength and static modulus of elasticity (圧縮強度と静弾性係数の関係)

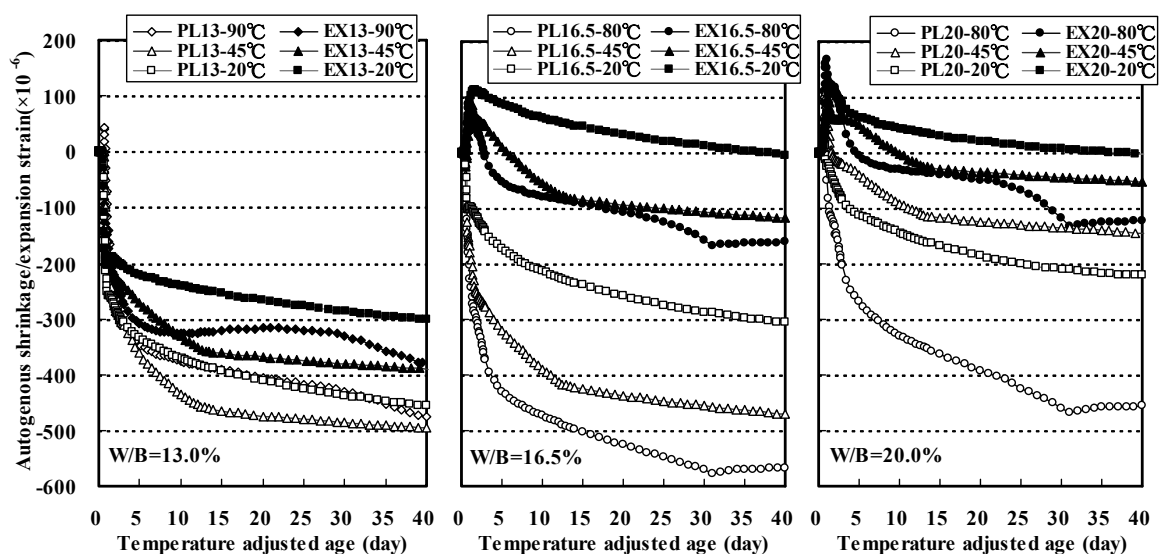


Fig. 4 Relation between autogenous shrinkage/expansion strain and temperature adjusted age (自己収縮・膨張ひずみと有効材齢の関係)

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad \dots\dots (1)$$

t_e : 有効材齢

Δt_i : 温度が T °C である期間の日数

T_0 : 1°C

自己収縮・膨張ひずみは、膨張材の有無にかかわらず、材齢初期に高い温度履歴を受けるほど、膨張・収縮の速度が大きくなり、最終値も異なる傾向があることから、有効材齢で一義的に表現することは難しいことがわかる。既往の研究¹⁴⁾でも同様の結果が報告されており、温度条件に伴うシリカフェームの反応速度の変化が影響しているものと考えられる。

膨張材の有無で比較すると、いずれのW/B、温度条件においても、EXシリーズがPLより自己収縮ひずみが小さくなっており、温度履歴を受けても膨張材の自己収縮低減効果は明確に生じることがわかる。EXとPLのひずみ差は、80・90°C履歴においてW/B=13.0, 16.5, 20.0%でそれぞれ 100×10^{-6} , 400×10^{-6} , 330×10^{-6} 程度であり、W/B=16.5%の場合が20.0%よりも自己収縮の低減量が大きい傾向が認められた。20°C養生においては、W/B=13.0, 16.5, 20.0%でそれぞれ 150×10^{-6} , 300×10^{-6} , 220×10^{-6} 程度であった。

なお、W/B=13.0%で90°C履歴のPLにおいて、温度上昇時に膨張ひずみが生じているが、この一因としては線膨張係数を一律で $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ としていることが考えられる。すなわち、セメントペースト量が多い超高強度コンクリートは、特に若材齢時の線膨張係数が大きく、これを $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 一定として計算した場合、初期温度上昇時の自己収縮を過小評価している可能性がある¹⁵⁾。

Fig. 5に有効材齢40日（実材齢は90°C履歴で7日、80°C履歴で16日、45°C履歴で35日、20°C養生で40日）における、EXのPLに対する自己収縮ひずみの低減率を示す。温度履歴下の低減率はW/B=13.0, 16.5, 20.0%でそれぞれ約20, 70, 70%であり、45°C履歴と80・90°C履歴では低減率に顕著な差が認められなかった。一方、20°C養生下における低減率は、W/B=13.0, 16.5, 20.0%でそれぞれ約35, 98, 98%であり、温度履歴の場合より大きい結果となった。温度履歴を受ける場合、PLの自己収縮ひずみが、特にW/B=16.5, 20.0%において20°C養生下より大きくなる傾向（約1.5～2.0倍）にあるため、

低減率でみると、20°C養生下の場合により大きく現われたと考えられる。W/Bや温度条件の組み合わせによって、膨張材の効果が異なって現われることについては、セメントおよび膨張材の水和反応メカニズムの観点から、より詳細に検討する必要がある。

(4) 自己収縮・膨張応力

Fig. 6に自己収縮・膨張応力と有効材齢の関係を示す。自己収縮・膨張応力は、鋼材ひずみを基に鋼材とコンクリートの力の釣り合い式(2)より算出した(正：引張、負：圧縮)。

$$\sigma_c = -E_s \varepsilon_s A_s / A_c \quad \dots\dots\dots (2)$$

σ_c : コンクリートの自己収縮・膨張応力

E_s : 鋼材のヤング係数

ε_s : 鋼材ひずみ

A_c, A_s : コンクリートおよび鋼材の断面積

膨張材の有無にかかわらず、W/Bが低いほど、また材齢初期に高い温度履歴を受けるほど大きな自己収縮応力が生じた。

EXによる自己収縮応力の低減量について、PLとの差をみると、W/Bによらず、鋼材比2.0, 3.8, 8.0%でそれぞれ0.5～1.0, 0.7～1.5, 1.2～1.8 N/mm²程度の明らかな低減効果が認められ、80・90°C履歴下のほうが20°C養生より大きい傾向であった。

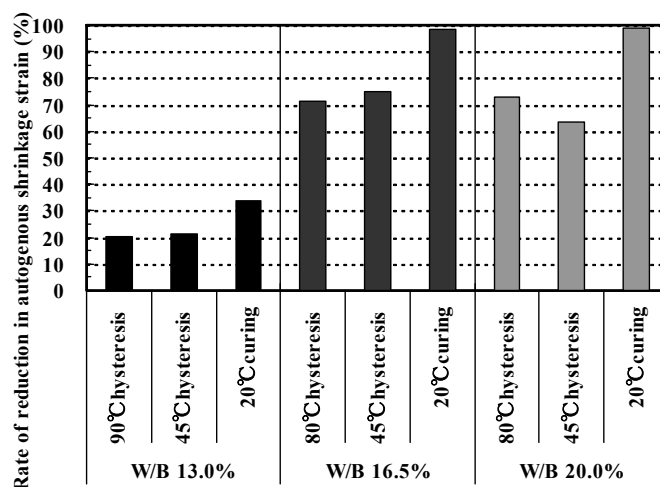


Fig. 5 Rate of reduction in autogenous shrinkage strain
(自己収縮ひずみの低減率)

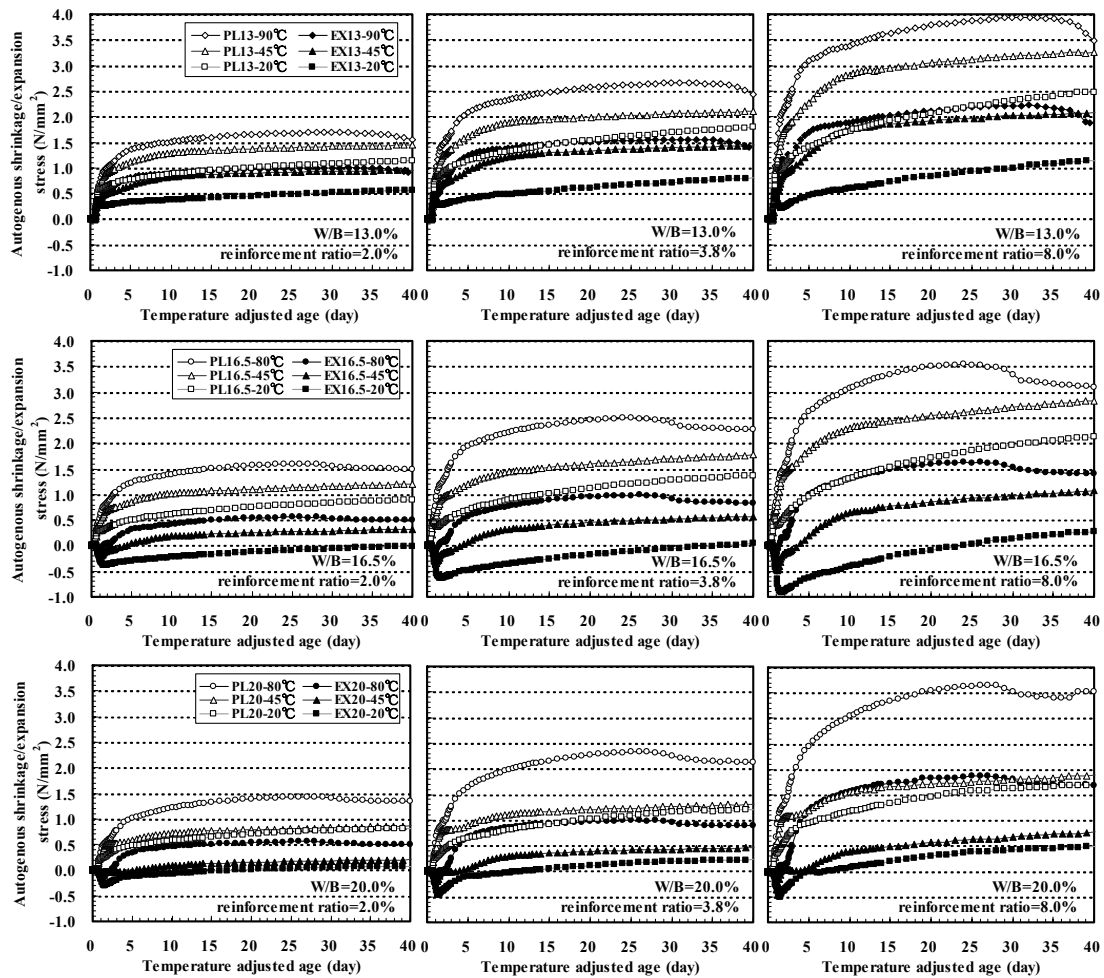


Fig. 6 Relation between autogenous shrinkage/expansion stress and temperature adjusted age
(自己収縮・膨張応力と有効材齢の関係)

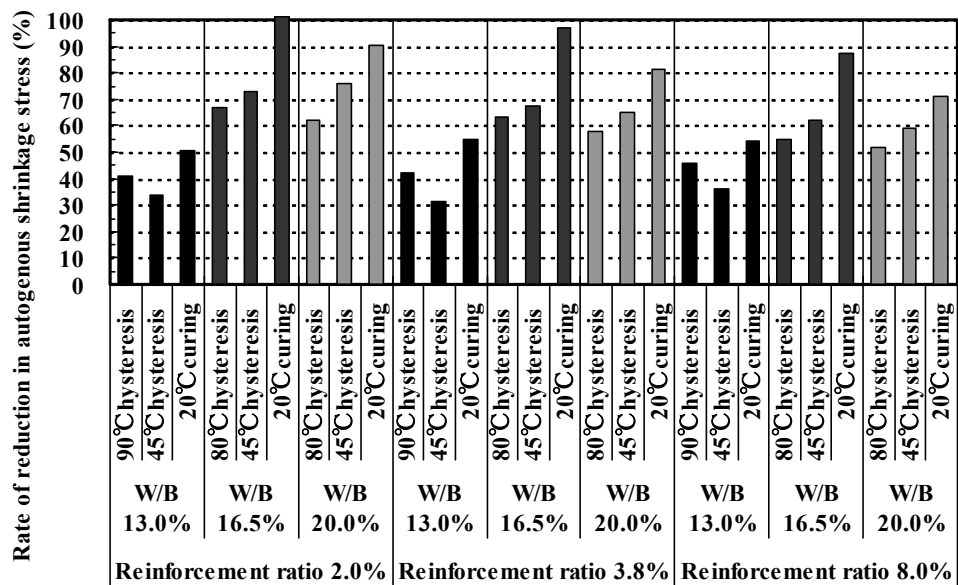


Fig. 7 Rate of reduction in autogenous shrinkage stress
(自己収縮応力の低減率)

Fig. 7に有効材齢40日でのEXによる自己収縮応力の低減率を示す。温度履歴下における低減率は、W/Bと鋼材比の組み合わせにおいて一定の傾向が認められないものの、W/B=13.0, 16.5, 20.0%でそれぞれ30~45, 55~70, 50~75%程度が得られている。

拘束の有無による膨張材の作用効果を検討するため、自己収縮応力の低減率と自己収縮ひずみの低減率とを対比してFig. 8に示す。W/B=16.5, 20.0%では、温度条件および鋼材比にかかわらず、自己収縮ひずみの低減率が自己収縮応力の低減率より0~20%程度大きい傾向が見られた。一方、W/B=13.0%の場合は、自己収縮応力の低減率が大きく現われており、他の場合と傾向が異なった。これより、自己収縮ひずみの低減率と自己収縮応力の低減率は1:1の関係ではなく、実際のRC部材で生じる応力の挙動をひずみの挙動から一義的に評価することは難しいことがわかる。

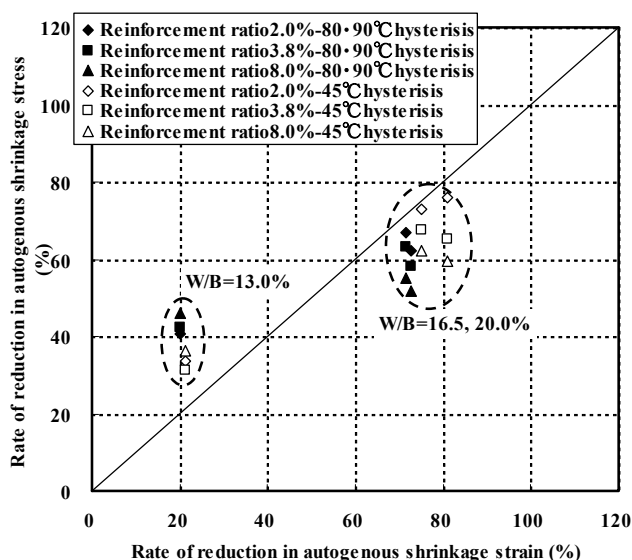


Fig.8 Comparison between the rate of reduction in autogenous shrinkage stress and strain (自己収縮応力の低減率と自己収縮ひずみの低減率の比較)

Table 4 Constituent materials (series II)
(コンクリートの使用材料(シリーズII))

Material	Symbol	Properties of material
Cement	C	Silica fume-premix cement(SFPC [®]) Density: 3.07g/cm ³ , Specific surface area: 6160cm ² /g
Expansive admixture	E	Lime based type Density: 3.19g/cm ³ , Specific surface area: 4920cm ² /g
Shrinkage reducing agent	SR	Lower alcohol alkylene oxide adduct type
Fine aggregate	S	Pit sand (Kakegawa) Density*: 2.56g/cm ³ , Water absorption: 2.24%
Coarse aggregate	G	Sandstone, crashed stone (Sakuragawa) Density*: 2.64g/cm ³ , Water absorption: 0.51%, Solid content: 60%
Chemical admixture	SP1	High-range water-reducing admixture: Polycarboxyrate type

*Density in saturated surface-dry condition

Table 5 Mix proportion of concrete (series II)
(コンクリートの配(調)合(シリーズII))

Symbol	W/B (%)	Bulk volume of coarse aggregate (m ³ /m ³)	Unit Content (kg/m ³)					
			W	C	E	SR	S	G
PL	13.0	0.53	150	1154	-	-	349	840
EX			150	1124	30	-	349	
SR			144	1154	-	6	349	
ES			144	1124	30	6	349	

*B=C+E

自己収縮応力の挙動が、W/B、膨張材の有無、温度条件、鋼材比の相違によって変化することは、諸々の要因を含む時間依存性の現象であり、機構の解明を進めるためには、クリープ特性を明確にするなどの検討が必要になると考えられる。

3. 収縮低減剤の効果検証（シリーズⅡ）

3.1 試験概要

(1) 使用材料および配(調)合

Table 4に使用材料を示す。収縮低減剤には、主成分が低級アルコールアルキレンオキシド付加物の市販品を用いた。**Table 5**にコンクリートの配(調)合を示す。水結合材比(W/B)は13.0%とし、コンクリートの種類は、膨張材および収縮低減剤の使用有無をパラメータにして、膨張材混和(30kg/m³、記号：EX)、収縮低減剤添加(6kg/m³、記号：SR)、膨張材・収縮低減剤併用(記号：ES)および膨張材・収縮低減剤を使用しない配(調)合(記号：PL)の計4水準とした。コンクリートのスランプフロー：75±7.5cm、空気量：2%以下となるように高性能減水剤の添加量を調整した。

(2) 練混ぜおよび養生条件

コンクリートの練混ぜは、シリーズⅠのW/B=13.0%と同様に行った。

養生温度条件は、シリーズⅠの**Fig. 1**に示す最高温度90℃(90℃履歴)の温度履歴および20℃一定養生(20℃養生)とした。

(3) 供試体および試験方法

(a) 強度特性

20℃標準水中養生および90℃履歴条件下で封緘

養生した円柱供試体(φ10×20cm)を用いて、それぞれ材齢28日の圧縮強度試験を実施した。試験方法はJIS A 1108に準拠した。

(b) 自己収縮・膨張ひずみ特性

10×10×40cmの供試体を用い、シリーズⅠと同様の方法で測定した。20℃養生では材齢1日、90℃履歴では材齢7日で脱型した後は、供試体全面を密封し、20℃の恒温室内で養生した。

(c) 自己収縮・膨張応力特性

10×10×80cmの供試体の断面中心部にD22異形鉄筋(軸方向に溝切り加工し中央部にひずみゲージを貼付)を配置した拘束供試体を作製した。鋼材比は3.8%である。ひずみ特性と同様、20℃養生では材齢1日、90℃履歴では材齢7日で脱型し、供試体全面を密封して20℃の恒温室内で養生した。

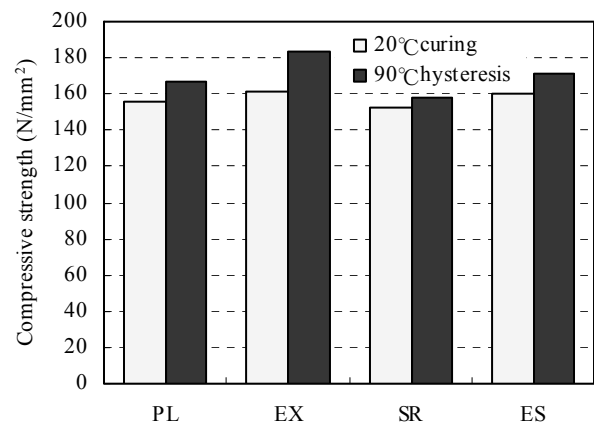


Fig. 9 Experimental results of compressive strength at age of 28 days
(材齢28日での圧縮強度試験結果)

Table 6 Experimental results of fresh concrete and setting time
(フレッシュ性状および凝結時間)

Symbol	SP1 (B×%)	Slump flow value (cm)	50cm-flow time (s)	Air content (%)	Concrete temperature (°C)	Setting (h-m)	
						Initial	Final
PL	1.20	80.5	10.24	1.2	24.3	12-05	14-05
EX	1.45	79.0	12.12	1.0	24.8	8-20	10-10
SR	1.20	78.5	9.13	1.1	22.9	14-40	17-00
ES	1.45	78.5	9.31	1.2	23.9	10-25	12-45

3.2 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状および凝結時間

Table 6にフレッシュ性状および凝結時間の結果を示す。膨張材を混和したEXおよびESの場合、SP添加量を増加することによりPLと同等のスランブフローが得られた。凝結時間についてPLと比較すると、EXは早くなり、収縮低減剤を添加したSRの場合は遅くなった。両者を併用したESの場合は膨張材による影響が大きく、PLと比較して凝結時間は早まる結果となった。

(2) 強度性状

材齢28日での圧縮強度試験結果を**Fig. 9**に示す。いずれの配(調)合においても、圧縮強度はPLと同等以上であった。

(3) 自己収縮・膨張ひずみ

Fig. 10に自己収縮・膨張ひずみと有効材齢の関係を示す。ひずみの起点は凝結始発とした。

20℃養生においては、PLの自己収縮ひずみが 500×10^{-6} 程度に達する一方で、EXは約 220×10^{-6} 、SRは約 310×10^{-6} となっており、PLに対する収縮低減率はそれぞれ55%および35%程度と明らかな収縮低減効果が認められた。ESについては凝結始発からおよそ30時間経過後に膨張ひずみ約 100×10^{-6} を生じ、その後は収縮が進むが、有効材齢40日の時点において自己収縮・膨張ひずみはほぼゼロとなった。

90℃履歴においては、20℃養生と比較して材齢初期に自己収縮が急激に進行する傾向がみられ、いずれの配(調)合においても収縮側のひずみとなっている。有効材齢40日における収縮低減率はEXで

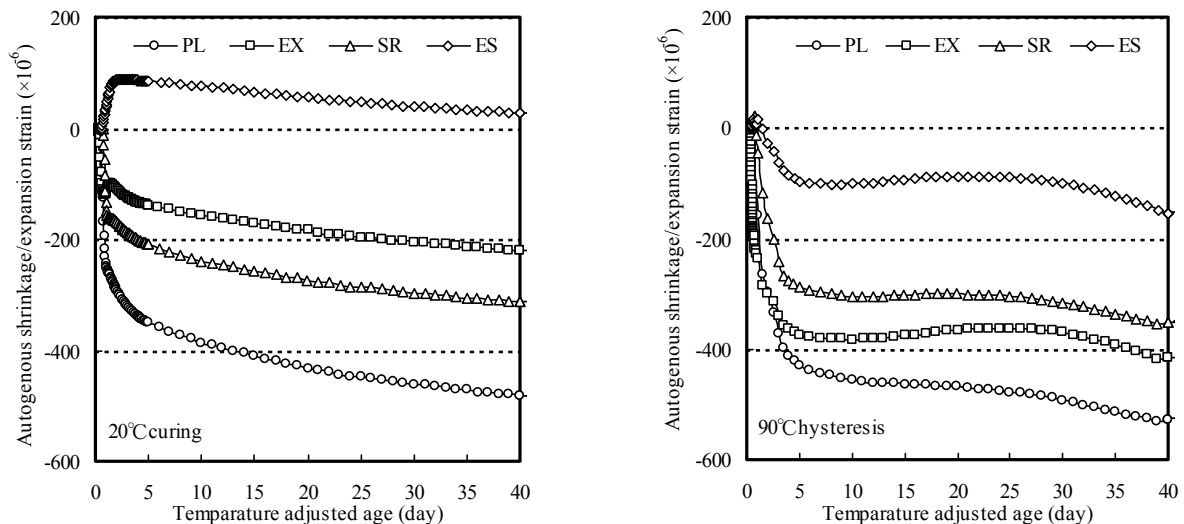


Fig. 10 Relation between autogenous shrinkage/expansion strain and temperature adjusted age

(自己収縮・膨張ひずみと有効材齢の関係)

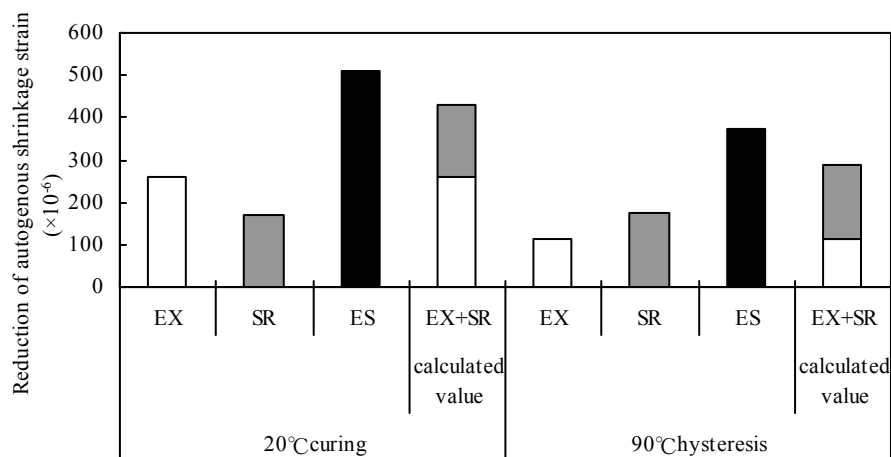


Fig. 11 Amount of reduction in autogenous shrinkage strain (自己収縮ひずみの低減量)

約20%, SRで約35%, さらにESでは70%程度となり, 90℃履歴においても有効に作用した。

また, それぞれの条件下における有効材齢40日(実材齢は20℃養生で40日, 90℃履歴で7日)時点での自己収縮ひずみ低減量(PLを基準)をFig. 11に示す。図中には, EXとSRの収縮低減量を足し合わせた値も併記した。ESの収縮低減量はいずれの条件下においても, EXとSRの収縮低減量を単純に足し合わせた値より 80×10^{-6} 程度大きかった。すなわち, 膨張材と収縮低減剤を併用した場合, 個々の材料の効果が損なわれることなく, その両者を足し合わせたのと同程度以上に自己収縮ひずみの低減効果が期待できると考えられる。

(4) 自己収縮・膨張応力

Fig. 12に自己収縮・膨張応力と有効材齢の関係を示す。20℃養生における有効材齢40日での自己収縮・膨張応力を比較すると, PLは約 1.7 N/mm^2 に達したのに対し, SRは約 1.2 N/mm^2 (応力低減率: 約30%), EXは 0.8 N/mm^2 (応力低減率: 約55%), ESは約 0.3 N/mm^2 (応力低減率: 約80%)となった。

90℃履歴では, 自己収縮・膨張ひずみと同様に, 20℃養生と比較して材齢初期の収縮速度が増大する傾向がみられた。また有効材齢40日(実材齢: 7日)における自己収縮応力は, いずれの配(調)合においても20℃養生の場合より $0.2 \sim 0.4 \text{ N/mm}^2$ 大きかった。自己収縮応力はPLで約 2.1 N/mm^2 ,

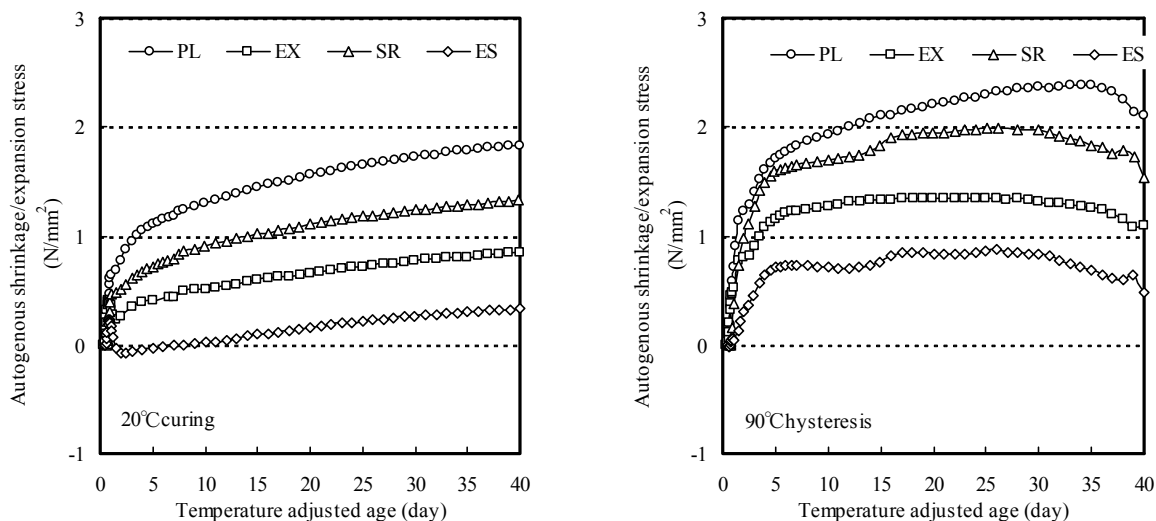


Fig. 12 Relation between autogenous shrinkage/expansion stress and temperature adjusted age
(自己収縮・膨張応力と有効材齢の関係)

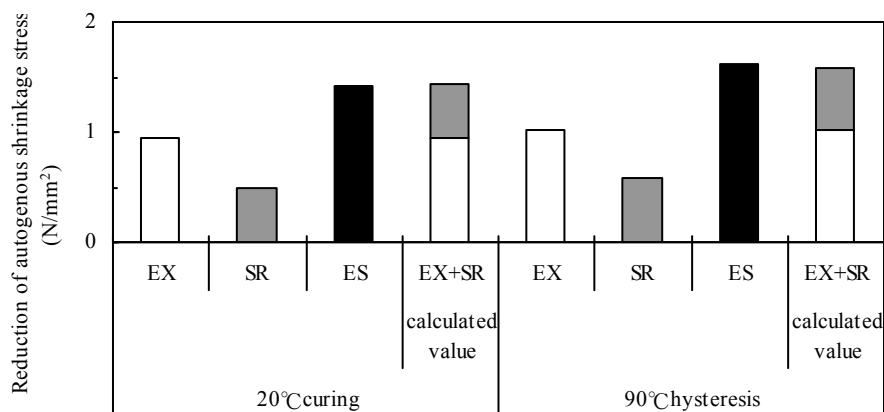


Fig. 13 Amount of reduction in autogenous shrinkage stress
(自己収縮応力の低減量)

SRで約 1.5 N/mm^2 (応力低減率: 約25%), EXで約 1.1 N/mm^2 (応力低減率: 約50%), ESで約 0.5 N/mm^2 (応力低減率: 約75%) であり, 90°C 履歴においても収縮低減剤・膨張材の効果が明確に現われた。

Fig. 13に各条件下での有効材齢40日におけるPLに対する自己収縮応力低減量を示す。図中には, EXとSRの低減量を足し合わせた値も併記した。各条件下において, ESの低減量はEXとSRの低減量を単純に足し合わせた値とほぼ同等であった。これより, 収縮低減剤・膨張材を併用した場合, 個々の材料の効果を単純に足し合わせたのとほぼ同等の自己収縮応力の低減効果が期待できると考えられる。

4. 収縮低減型高性能減水剤の効果検証 (シリーズⅢ)

4.1 試験概要

(1) 使用材料および配(調)合

Table 7に使用材料を示す。混和剤には, シリーズⅠ, Ⅱで用いた超高強度コンクリート用の高性能減水剤 (SP1) および収縮低減型高性能減水剤 (SP3) を用いた。**Table 8**にコンクリートの配(調)合を示す。水結合材比 (W/B) はシリーズⅡと同様に13.0%とし, 混和剤の種類 (SP1およびSP3) および膨張材の混和量 (0, 20, 30 kg/m^3) をパラメータにした

Table 7 Constituent materials (series Ⅲ)
(コンクリートの使用材料(シリーズⅢ))

Material	Symbol	Properties of material
Cement	C	Silica fume-premix cement(SFPC [®]) Density: 3.07 g/cm^3 , Specific surface area: $6160\text{ cm}^2/\text{g}$
Expansive admixture	E	Lime based type Density: 3.19 g/cm^3 , Specific surface area: $4920\text{ cm}^2/\text{g}$
Fine aggregate	S	Pit sand (Kakegawa) Density*: 2.56 g/cm^3 , Water absorption: 2.24%
Coarse aggregate	G	Sandstone, crashed stone (Sakuragawa) Density*: 2.64 g/cm^3 , Water absorption: 0.51%, Solid content: 60%
Chemical admixture	SP1	High-range water-reducing admixture Polycarboxyrate type
	SP3	High-range water-reducing admixture (shrinkage-reducing type) Polycarboxyrate type and glycolic type complex

*Density in saturated surface-dry condition

Table 8 Mix proportion of concrete (series Ⅲ)
(コンクリートの配(調)合 (シリーズⅢ))

Symbol	W/B (%)	Bulk volume of coarse aggregate (m^3/m^3)	Unit Content (kg/m^3)				
			W	C	E	S	G
SP1	13.0	0.53	150	1154	-	351	840
SP1-EX20			150	1134	20	352	
SP1-EX30			150	1124	30	352	
SP3			150	1154	-	351	
SP3-EX20			150	1134	20	352	
SP3-EX30			150	1124	30	352	

計6水準とした。コンクリートのスランプフロー：75±7.5cm，空気量：2%以下となるようにそれぞれ高性能減水剤の添加量を調整した。

(2) 練混ぜおよび養生条件

コンクリートの練混ぜおよび養生温度条件は，シリーズⅡと同一とした。

(3) 供試体および試験方法

(a) 強度特性

90℃履歴条件下で封緘養生した円柱供試体(φ10×20cm)を用いて，材齢7日の圧縮強度試験を実施した。試験方法はJIS A 1108に準拠した。

(b) 自己収縮・膨張ひずみ特性

自己収縮・膨張ひずみ特性は，シリーズⅡと同様の供試体を用いて測定した。

4.2 試験結果および考察

(1) フレッシュ性状・凝結時間および強度特性

Table 9にフレッシュ性状・凝結時間および強度特性の結果を示す。凝結時間は，混和剤の種類によらず膨張材を混和した配(調)合が早まる傾向(始発・終結とも2.5～3.5時間程度)となった。材齢7日での圧縮強度は，SP3シリーズが幾分小さくなる傾向が認められた(2～6%程度)。

Table 9 Experimental results of fresh concrete, setting time and compressive strength
(フレッシュ性状，凝結時間および圧縮強度試験結果)

Symbol	SP1 or SP3 (B×%)	Slump flow value (cm)	Air content (%)	Concrete temperature (℃)	Setting (h-m)		Compressive strength at age of 7 days (N/mm ²)
					Initial	Final	90℃ hysteresis
SP1	1.05 (SP1)	75.0	1.4	24.5	11-05	14-05	186
SP1-EX20	1.20 (SP1)	77.0	1.4	25.0	8-30	11-25	191
SP1-EX30	1.30 (SP1)	78.0	1.2	25.4	8-20	11-10	194
SP3	1.13 (SP3)	75.0	1.5	23.8	11-40	14-50	175
SP3-EX20	1.28 (SP3)	78.0	1.4	25.2	8-50	12-10	189
SP3-EX30	1.33 (SP3)	78.5	1.3	24.4	8-25	11-25	182

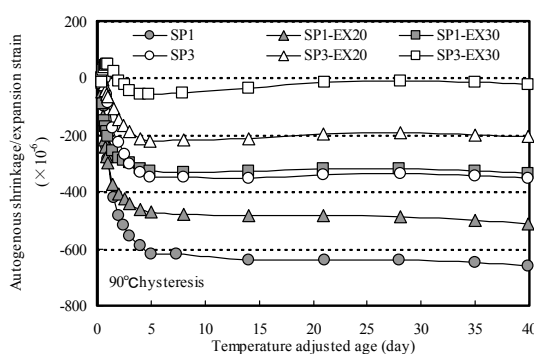
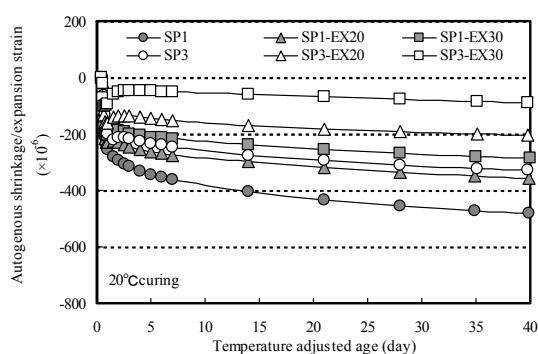


Fig. 14 Relation between autogenous shrinkage/expansion strain and temperature adjusted age
(自己収縮・膨張ひずみと有効材齢の関係)

(2) 自己収縮・膨張ひずみ

自己収縮・膨張ひずみの経時変化を Fig. 14 に示す。自己収縮・膨張ひずみの起点は凝結始発とした。20℃養生における SP1 の自己収縮・膨張ひずみは、有効材齢 40 日の時点で約 480×10^{-6} に達した。一方、SP3 では約 330×10^{-6} であり、自己収縮ひずみが約 150×10^{-6} 低減された（低減率：約 30%）。膨張材は混和剤種類によらず、20kg/m³ 混和で約 120×10^{-6} （低減率：約 30%）、30kg/m³ 混和で約 200×10^{-6} （低減率：約 40%）の自己収縮低減効果を発揮した。

90℃履歴における SP1 の自己収縮・膨張ひずみは、有効材齢 40 日（実材齢 7 日）で 660×10^{-6} を生じ、20℃養生の場合より大きくなった。一方、SP3 の自己収縮ひずみは約 300×10^{-6} にとどまり、20℃養生の場合よりも低減効果が大きく表われた（低減率：約 50%）。膨張材を使用した場合、混和剤種類によらず、自己収縮ひずみは 20kg/m³ 混和で約 150×10^{-6} （低減率：約 20%）、30kg/m³ 混和で約 300×10^{-6} （低減率：約 50%）低減され、20℃養生の場合よりも大きな効果が得られた。

シリーズⅡで実施した収縮低減剤添加コンクリート（添加量：6 kg/m³、記号：SR および ES）と SP3 シリーズの比較を Fig. 15 に示す。膨張材の有無によらず、SP3 シリーズは SR あるいは ES と比較して遜色のない収縮低減効果を有していることが明らかとなった。

5. ま と め

SFPC®を用いた超高強度コンクリート（W/B=13.0～20.0%）へ膨張材、収縮低減剤および収縮低減型高性能減水剤を適用した場合の自己収縮ひずみ・応力の低減効果を検討し、以下の知見を得た。

- ・ 実部材を想定した温度履歴を与えた条件下の自己収縮・膨張ひずみおよび応力の挙動は 20℃養生下と明らかに異なり、有効材齢による一義的な評価は難しい。
- ・ 20℃養生下だけでなく、温度履歴下においても、膨張材の使用は自己収縮ひずみを明らかに低減する効果を有していた。また、鋼材による拘束を受けた条件下で生じる自己収縮応力に対しても、膨張材は明確な低減効果を発揮し、自己収縮ひずみの場合と同等以上の効果が認められた。
- ・ 収縮低減剤の使用により、いずれの条件下においても、明らかな自己収縮ひずみおよび自己収縮応力の低減効果が発揮された。

- ・ 収縮低減剤あるいは収縮低減型高性能減水剤を膨張材と併用した場合の効果は、各々を単独で用いた場合の効果を足し合わせたものと同等以上であった。

水結合材比が極端に小さい領域においても、既存の収縮低減材料を適切に用いることによって、SFPC®を用いた超高強度コンクリートの自己収縮を制御できることが明らかになった。

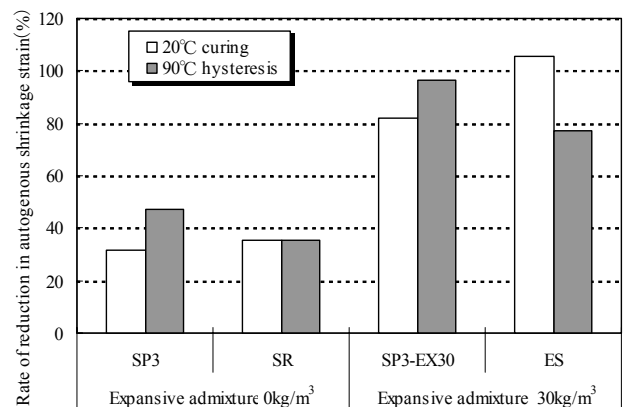


Fig. 15 Rate of reduction in autogenous shrinkage strain
(自己収縮ひずみの低減率)

参 考 文 献

- 1) 陣内 浩, 黒岩秀介, 寺内利恵子, 阿部剛士, 設計基準強度 150N/mm²の低収縮型超高強度コンクリートの製造と施工, セメント・コンクリート, 2007, 723, p. 18-24
- 2) 三井建郎, 小島正朗, 高尾 全, 佐藤敏之, 設計基準強度 150N/mm²超高強度コンクリートによる超高層集合住宅の施工, セメント・コンクリート, 2007, 723, p. 25-31
- 3) 渡邊悟士, 陣内 浩, 黒岩秀介, 山本佳城, 並木 哲, 寺内利恵子, 設計基準強度 200N/mm²の超高強度コンクリートの開発に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, 2008, p. 1077-1078
- 4) 蓮尾孝一, 松田 拓, 小出貴夫, 柴田 要, 勝呂 昇, 松丸 真, 200N/mm²級超高強度PCaコンクリートの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, 2010, p. 991-994

- 5) 丸山一平, 鈴木雅博, 中瀬博一, 佐藤良一, 温度履歴がRC柱の初期応力・初期欠陥に及ぼす影響に関する実験的検討—超高強度コンクリートを用いたRC柱の初期応力・初期欠陥に関する研究その1—, 日本建築学会構造系論文集, 2008, 73(629), p. 1035-1042
- 6) 谷村 充, 兵頭彦次, 大森啓至, 佐藤良一, 高強度コンクリートの収縮応力の低減化に関する実験的検討, コンクリート工学年次論集, 2001, 23(2), p. 1075-1080
- 7) 小泉信一, 菅俣 匠, 阿合延明, 超高強度コンクリート用高性能減水剤(収縮低減タイプ)を使用したコンクリートの自己収縮低減効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, 2010, p. 1005-1006
- 8) 鈴木雅博, 中瀬博一, 丸山一平, 佐藤良一, 超高強度膨張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, 2005, 59, p. 375-382
- 9) 陣内 浩, 黒岩秀介, 並木 哲, 渡邊悟士, 超高強度コンクリートの長さ変化に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, 2005, p. 393-394
- 10) 郭度連, 谷村 充, 佐竹紳也, 柴垣昌範, 膨張材による超高強度コンクリートの収縮低減, コンクリート工学年次論文集, 2008, 30(1), p. 471-476
- 11) 谷村 充, 藤田 仁, 三谷裕二, 兵頭彦次, 郭度連, 超高強度コンクリートの自己収縮制御における膨張材の適用性, 日本建築学会大会学術講演梗概集A-1, 2009, p. 277-278
- 12) 日本コンクリート工学協会, コンクリートの自己収縮研究委員会報告書, 2002, p. 51-54
- 13) 日本建築学会, 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2009, p. 185-186
- 14) 松田 拓, 嶋 毅, 河上浩司, 西本好克, 初期高温履歴を受けた超高強度コンクリートの自己収縮特性, コンクリート工学年次論文集, 2006, 28(1), p. 1247-1252
- 15) 楊 楊, 佐藤良一, 高強度コンクリートの長さ変化の成分分離とその評価, セメント・コンクリート, 2002, 665, p. 41-46