

# 超高強度コンクリートの自己収縮ひび割れ抑制方法の検討

石川 伸介\* 立山 創一\*

## Experimental Study on the Prevention Method of Cracking by the Self-shrinkage of Super High-strength Concrete

by Shinsuke ISHIKAWA and Sohichi TATEYAMA

### Abstract

By the construction of the super high-rise building, super high-strength concrete comes to be required. However, crazing by self-shrinkage distortion becomes a problem by the increase of the quantity of cement which increases its strength. We grasped the crazing situation by making actual materials in this study and examined the restraint method. As a result, we used expansion materials and showed that self-shrinkage crazing was reduced by using a shrinkage reducing agent or good management of temperature regulation.

### 要 旨

RC造建築物に使用されるコンクリートの強度は、高層化、長スパン化にともない、高強度化が進んでいる。しかし、高強度化にともなうセメント量の増加により、自己収縮ひび割れによるひび割れの発生が問題となっている。本研究では、実大部材を作成することにより、ひび割れ発生状況を把握するとともに、その抑制方法の検討を行った。その結果、膨張材を使用するとともに、収縮低減剤の使用や、養生温度の管理などを行うことにより自己収縮ひび割れを大幅に低減できることが示された。

キーワード：超高強度コンクリート／自己収縮／ひび割れ／膨張材／蒸気養生

### 1. はじめに

RC造建築物に使用されるコンクリートは、建築物の高層化、長スパン化に対応し、高強度化が進んでいる。現在では、設計基準強度が $100\text{N/mm}^2$ を超える超高強度コンクリートも使用されるようになってきている。

しかし、設計基準強度が $100\text{N/mm}^2$ を超えるような超高強度コンクリートでは、硬化に伴う自己収縮による内部にひび割れの発生が大きな問題となる。

自己収縮の低減には、膨張材や収縮低減剤の使用が有効であることが知られているが、実際の部材レベルでのひび割れの発生については、メカニズム、

抑制方法とも充分には明らかになっていない。

そこで、実大の試験体により、各種材料および養生方法条件を変化させることにより、自己収縮量の経時変化、ひび割れの発生状況を観察することにより、自己収縮によるひび割れの低減方法について検討を行った。

### 2. 実験概要

実験は、3シリーズに分けて行った。実験条件概要を表1に示す。

シリーズ1は、膨張材の使用と、保温材による養生の効果を検討した。

\* 技術研究所材料施工研究室

シリーズ2では、保温養生期間を短縮するとともに、膨張材の他、収縮低減剤、膨張材と収縮低減剤の併用について検討を行った。また膨張材の効果を高めるため、膨張材の使用量をシリーズ1の20kg/m<sup>3</sup>から30kg/m<sup>3</sup>に増やした。

表1 実験条件概要

シリーズ	調合	記号	養生
1	PL1	PL1	翌日脱型
		PL1-保温	断熱養生 91日
	EX	EX	翌日脱型
		EX-保温	断熱養生 91日
2	PL2	PL2	断熱養生 7日
	EX2	EX2	断熱養生 7日
	SR	SR	断熱養生 7日
	EX-SR	EX-SR	断熱養生 7日
	EX-SR	EX-SR-1日	断熱養生 1日
3	EX-SR	EX-SR 2-蒸気	蒸気養生
	EX-SR	EX-SR 2-保温	断熱養生 7日

表2 使用材料

材料	記号	物理的特性など
セメント	C	シリカフェームプレミックスセメント 密度：3.05g/cm <sup>3</sup> 比表面積：6190cm <sup>2</sup> /g
粗骨材	G	山梨県大月市産石 表乾密度：2.56g/cm <sup>3</sup> 吸水率：2.45%
細骨材	S	山梨県大月市産砂 表乾密度：2.55g/cm <sup>3</sup> 吸水率：2.61%
膨張材	EX	石灰系膨張材 密度：3.19g/cm <sup>3</sup> 比表面積：4920cm <sup>2</sup> /g
収縮低減剤	SR	低級アルコールアルキレンオキシド付加物
繊維	F	ポリプロピレン繊維
減水剤	SP	ポリカルボン酸系 高性能減水剤

表3 コンクリートの調合

シリーズ	調合名	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								コンクリート温度 (°C)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)
			W	C	EX	SR	S	G	F	SP			
1	PL1	14	155	1108	-	-	366	850	3	C×0.9%	21	74	1.8
	EX	14	155	1088	20	-	366	850	3	C×1.2%	24.5	72	2.1
2	PL2	14	155	1108	-	-	366	850	3	C×1.0%	14	57	2.4
	EX2	14	155	1078	30	-	366	850	3	C×1.1%	16.0	75	2.0
	SR	14	155	1108	-	6	366	850	3	C×1.1%	15	73	1.7
	EX-SR	14	155	1078	30	6	366	850	3	C×1.1%	16	72	1.8
3	EX-SR	14	155	1078	30	6	366	850	3	C×1.1%	13	71.5	2.1

シリーズ3では、蒸気養生による温度制御の効果について検討を行った。

### 2.1 使用材料および調合

使用材料を表2に示す。

セメント、骨材、減水剤はこれまでの実験で高強度コンクリートの材料として適していると思われるものを選定した。

混和材料として、自己収縮の低減に効果があると考えられる膨張材および収縮低減剤を使用した。

調合は、設計基準強度150N/mm<sup>2</sup>を目標として水粉体比14%とした。調合を表3に示す。

目標スランブフローは65cm±10cm、目標空気量は2%±1%とした。

### 2.2 練混ぜ

練り混ぜは、1.5m<sup>3</sup>練り強制2軸ミキサーを使用した。練り混ぜはモルタル先練りとし、全体で約5分間の練り混ぜとした。

### 2.3 基礎物性の測定

基礎物性を把握するため、φ100×200mm円柱供試体による各種養生における圧縮強度、および100mm×100mm×400mmの小型試験体による20°C封緘養生によるひずみ量の測定を行った。

### 2.4 試験体

試験体形状を図1に示す。

試験体は、高層RC造建築物下層の柱部材を模擬し、900mm角、高さ1,100mmとした。上下は厚さ100mmの発泡スチロール板で断熱を行った。主筋はD41×20本（鉄筋比3.3%）、帯筋にD13（帯筋比0.56%）を用いた。

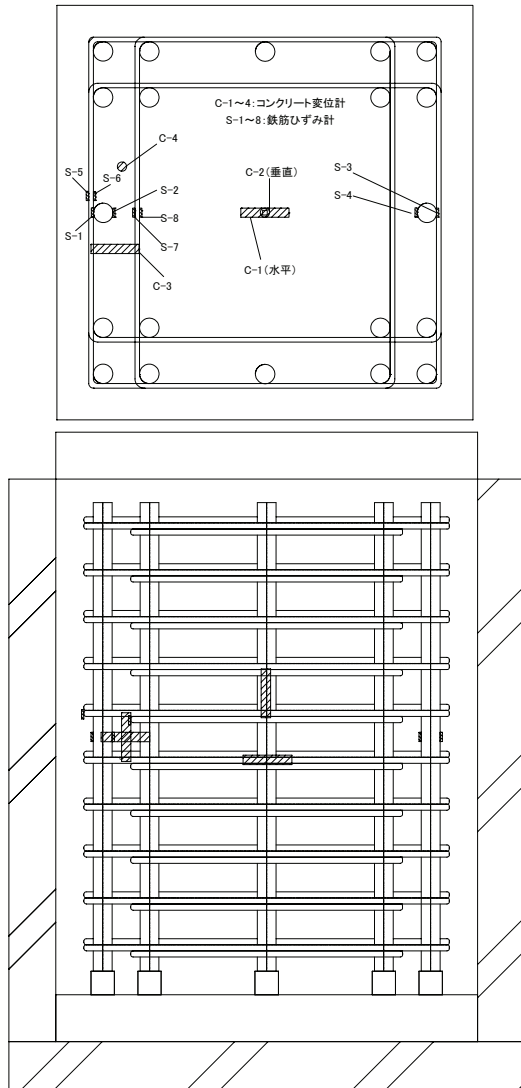


図1 試験体概要

## 2.5 養生方法

シリーズ1では、厚さ50mmの発泡スチロール板で型枠を保温し、翌日脱型したものと、材齢91日まで存置し比較した。シリーズ2では、7日脱型とした。

シリーズ3では、外周部の温度を上げることにより、中心部との温度差を小さくすることを目的に蒸気養生を行い、ひずみおよびひび割れ発生状態について検証した。

蒸気養生は6時間前置きした後、12時間かけて槽内温度を55℃まで上昇させ、8時間保持した。その後30時間かけて40℃まで降下させた。

## 2.6 ひずみ計

試験体の各部分には、コンクリートひずみ計、鉄

筋ひずみゲージおよび熱電対を設置し各部分の温度およびひずみを計測した。測定位置は図1に示す。測定は打設時から材齢91日まで行った。

## 2.7 ひび割れ状況の確認

### (a) 表面ひび割れ状況

各面をカメラで撮影し、ひび割れを確認・記録した。

### (b) 切断面ひび割れ状況

切断は、水平、垂直の各中心部付近で、ワイヤソーによって各1面を切断し、断面のひび割れを観察した。また、主筋のうち1本については、ウォールソーにより縦方向に切断し鉄筋近傍のコンクリートのひび割れ状況について確認した。

## 3. 実験結果

### 3.1 強度性状

図2にシリーズ1, 2の圧縮強度測定結果を示す。膨張材および収縮低減剤を添加することによる圧縮強度への影響は見られなかった。

また、養生方法による強度差は、材齢91日においてはほとんど見られなかった。

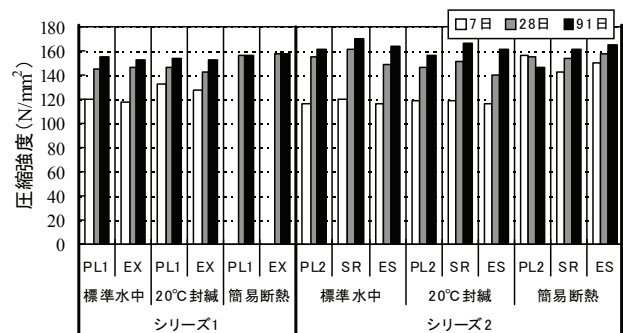


図2 圧縮強度結果 (シリーズ1, 2)

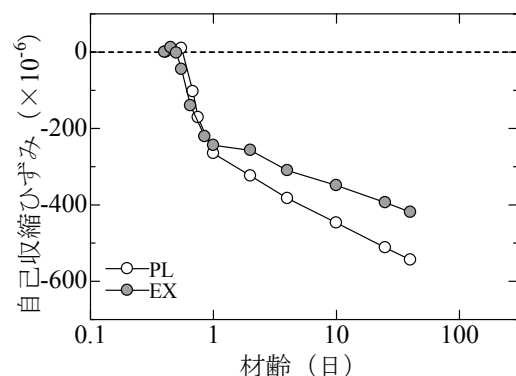


図3 小型試験体におけるひずみの変化 (シリーズ1)

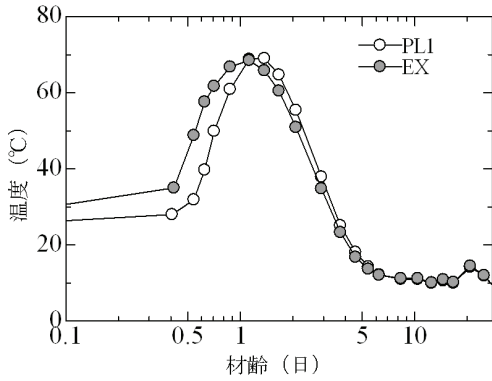


図4 試験体中央部の温度比較 (PL と EX)



図5 試験体中心部の温度比較 (保温養生の有無)

### 3.2 シリーズ1の結果

図3に小型供試体における自己収縮ひずみの変化を示す。膨張材、収縮低減剤を加えていない PL では 600 $\mu$  程度のひずみが観察された。膨張材を 20kg/m<sup>3</sup> 添加した EX では 150 $\mu$  程自己収縮ひずみは小さくなっている。

図4, 5に各試験体の中心部の温度履歴を示す。

この実験で使用した膨張材は長期材齢における遅れ膨張による部材の破壊を防ぐため、早期に反

応するタイプを使用しており、コンクリートに早強性を与える性質がある。このため、膨張材を使用しない調合と比較するとやや温度上昇が早い傾向を示した。しかし最高温度についてはあまり大きな変化はなかった。

91日まで断熱材で保温養生を続けた試験体では、温度上昇が長時間続き最高温度は高くなる傾向を示した。また保温することで温度降下速度は緩やかになった。

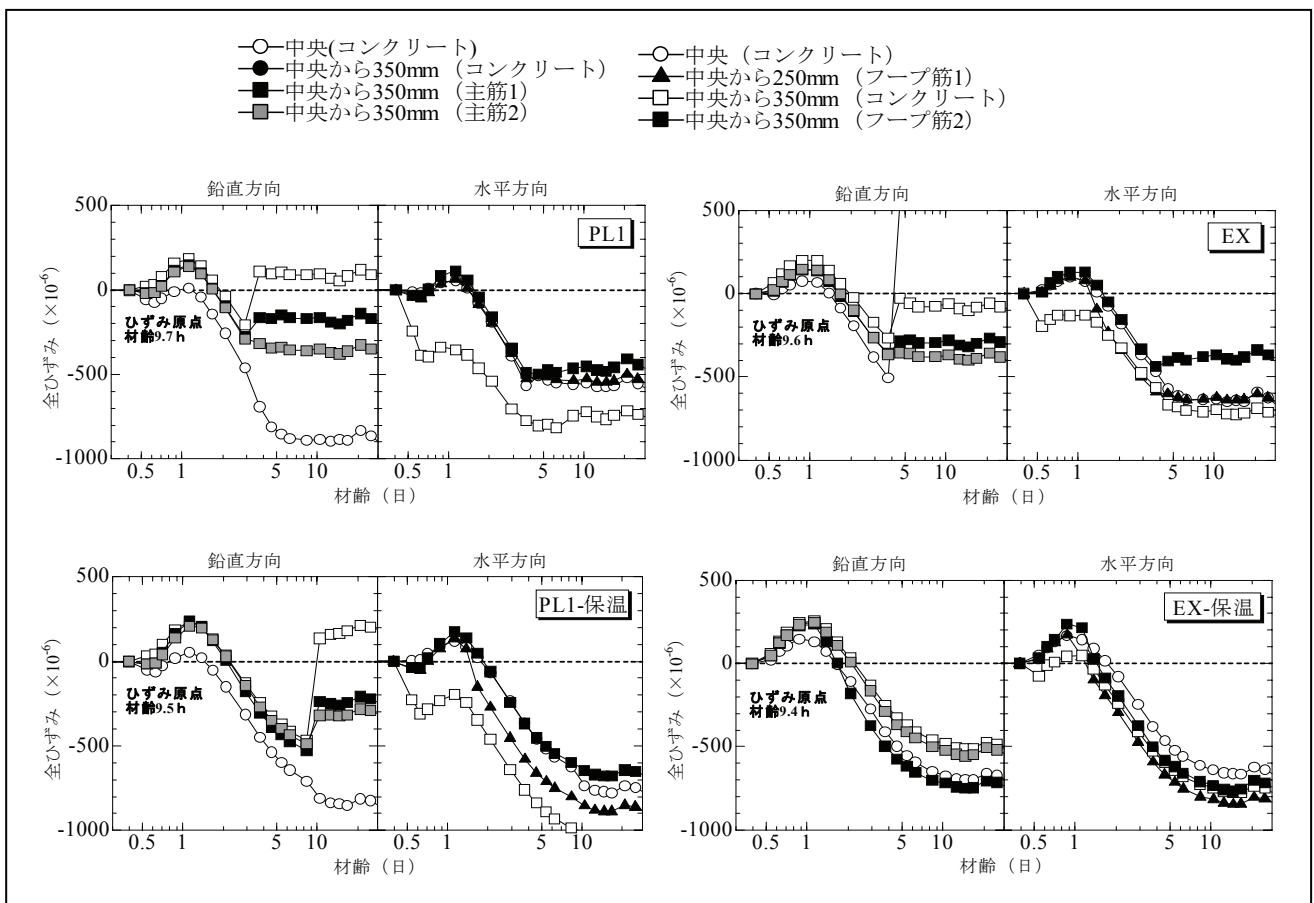


図6 各部のひずみの履歴の一例 (シリーズ1)

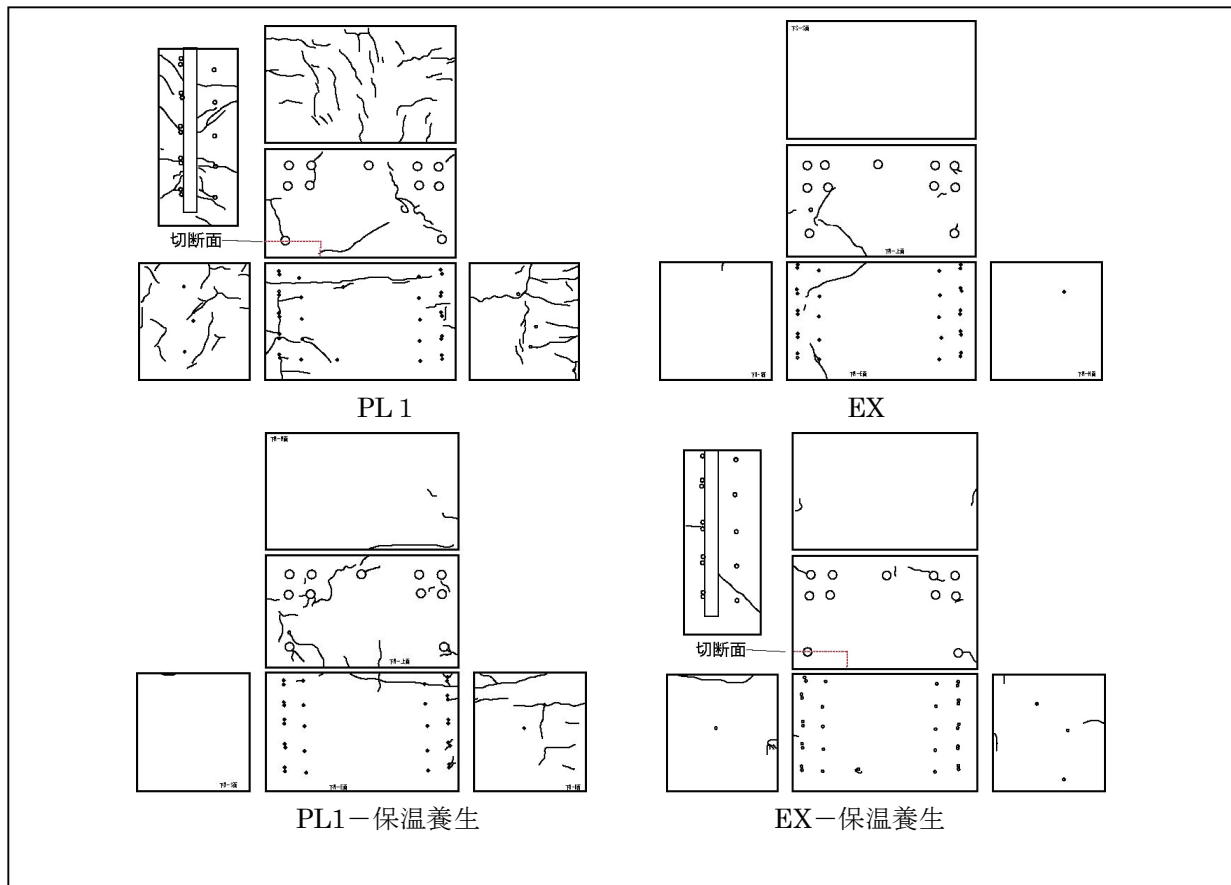


図7 ひび割れ状況の一例 (シリーズ1)

図6にひずみ分布の一例を示す。

PLの図においては、材齢3日でひび割れを生じたことによる、大きなひずみ量の変化が見られるが、EX-断熱養生ではこのようなひずみの変化は見られない。また、収縮量の変化が緩やかで、中心部と外周部のひずみの差が少ないことが見られた。

ただし、試験体間のひずみ量の差については、ひび割れの影響により比較することはできなかった。

表面および切断面のひびわれの状況の一例を図7に示す。

基本調合 (PL1) では自己収縮ひずみや温度ひずみといった体積変化が鉄筋や内部コンクリートに拘束されることによって、鉄筋近傍やコンクリート内部、表層にひび割れが発生したことが観察された。膨張材を $20\text{kg/m}^3$ 混和することで、無混和の場合より、表層部および鉄筋近傍のひび割れを大幅に抑制することができた。

また、初期保温養生を施すことによって、材齢1日で脱型した場合より表層部のひび割れを大幅に低減でき、特にEX-保温養生においては、主筋周辺にごく少量のひび割れを生じたただけであった。

### 3.3 シリーズ2の結果

シリーズ2では、収縮低減剤および収縮低減剤と膨張材の併用時のひび割れ低減について検討を行った。また膨張材の効果を高めるため、膨張材の使用量をシリーズ1の $20\text{kg/m}^3$ から $30\text{kg/m}^3$ に増やした。

図8に各調合の $20^\circ\text{C}$ 一定で養生した、小型試験体におけるひずみの変化を示す。PL2においては、シリーズ1とほぼ同じ傾向を示し材齢91日で $600\mu$ 程度

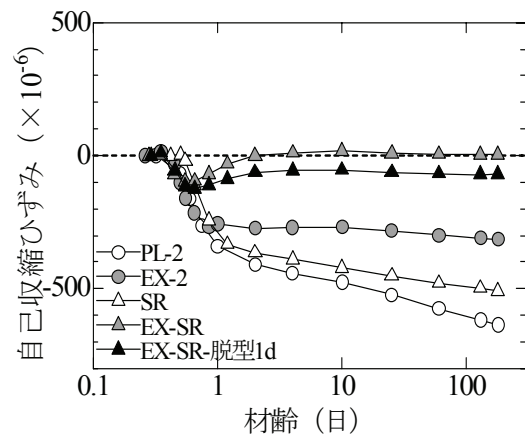


図8 小型試験体におけるひずみの変化 (シリーズ2)

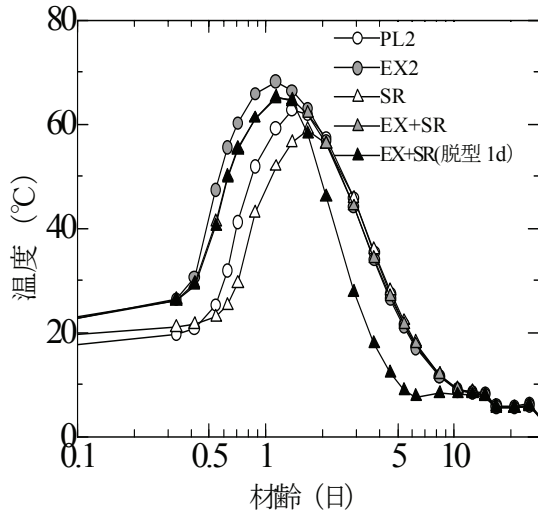


図9 試験体中心部の温度履歴

のひずみが観察された。膨張材を $30\text{kg/m}^3$ 添加したEX2では $300\mu$ 程自己収縮ひずみは小さくなっており、シリーズ1のEXに比べ効果はかなり大きくなっ

ている。収縮低減剤を $6\text{kg/m}^3$ 添加したSRでは $100\mu$ 程度自己収縮ひずみは小さくなっている。膨張材と収縮低減剤を併用したEX-SRでは、 $500\mu$ 程度的大幅な改善効果が見られ $100\mu$ 程度の収縮量となった。

図9に各試験体の中心部の温度履歴を示す。収縮低減剤添加した調合(SR)では、凝結が遅れ最高温度が低くなる傾向が見られた。膨張材を $30\text{kg/m}^3$ 加えたEX-2では、PL2と比較して $3.5^\circ\text{C}$ の温度上昇が見られた。膨張材と収縮低減剤を併用した調合(EX-SR)では、凝結が早くなり、最高温度もやや高くなる傾向が見られた。

図10にEX2とEX-SRの全ひずみの履歴を示す。シリーズ1では、ひび割れの影響で正確なひずみ量はわからないが、 $500\mu \sim 800\mu$ 程度であった収縮量が、EX2でもあまり変わっていないと考えられる。EX-SRでは $300\mu$ 以下に収まっており、膨張材と収縮低減剤を併用した場合の収縮低減効果が大きいことが

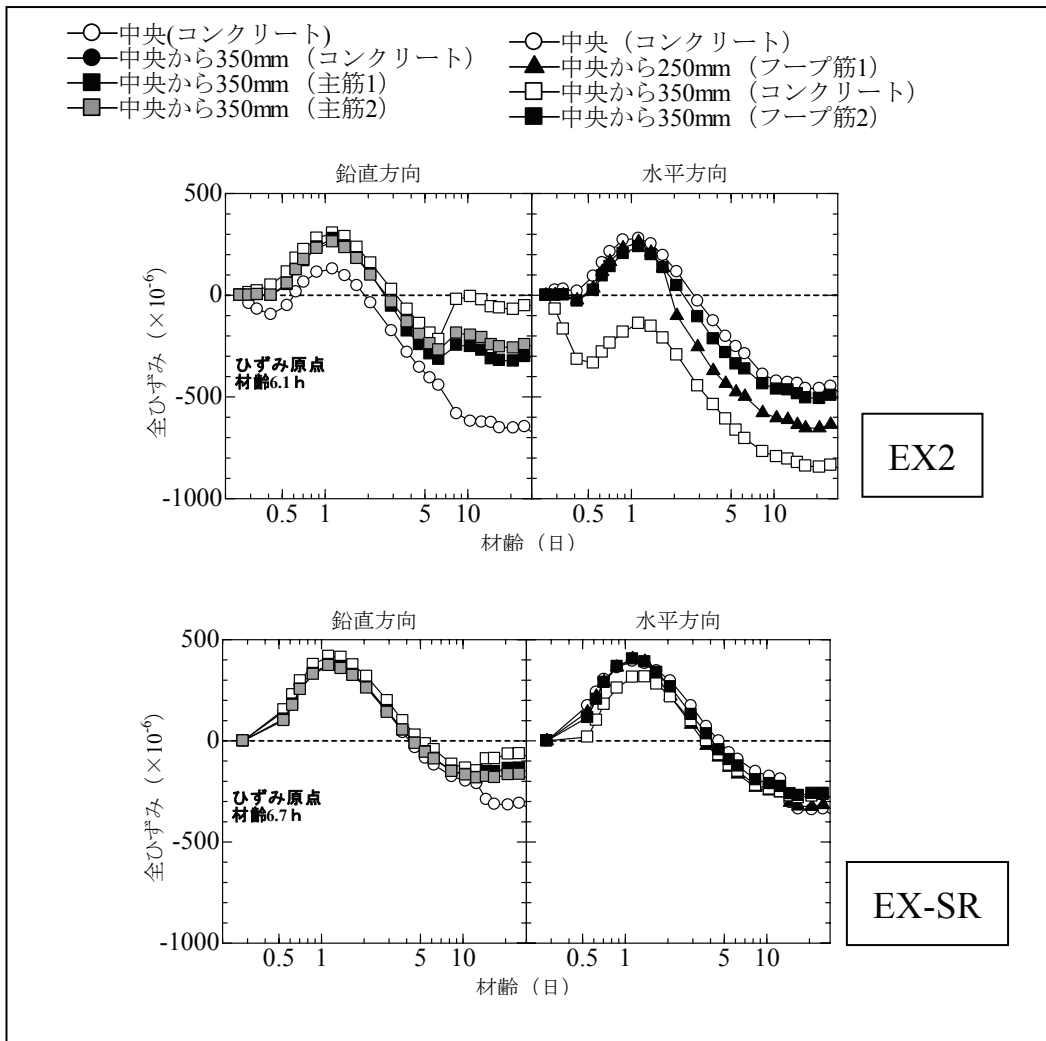


図10 ひずみの変化の一例 (シリーズ2)

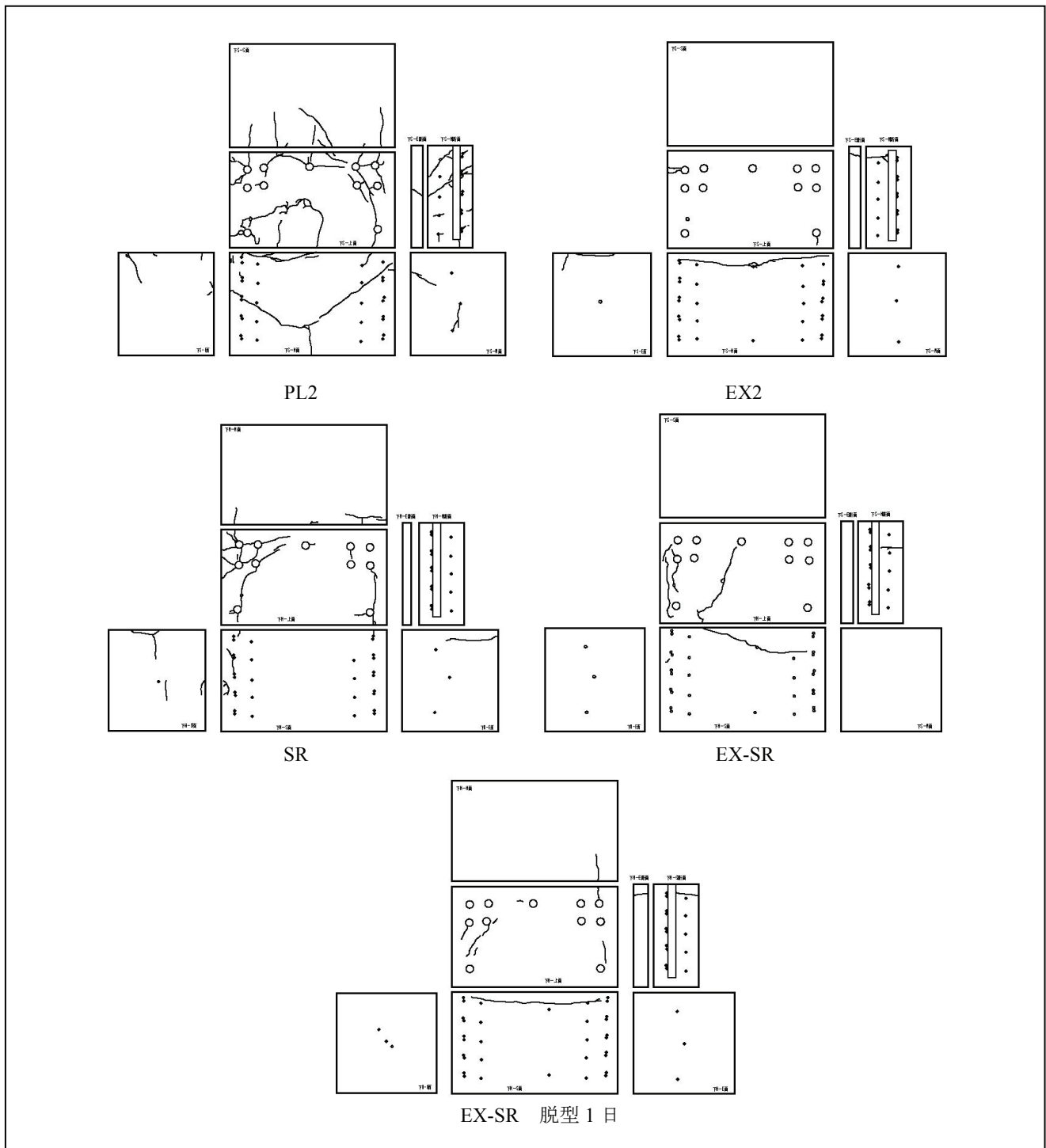


図 11 断面および表面のひび割れの一例 (シリーズ 2)

わかる。また各部分のひずみが同一の挙動をしていることが分かる。

図11にひび割れの状況を示す。膨張材の量をシリーズ1から増加させた試験体 (EX2) では、水平方向のひび割れが多少残ったものの、大幅なひび割れの改善が見られた。収縮低減剤を加えた試験体(SR)では、表面部のひび割れが低減されるが、主筋近傍のひび割れが抑制しきれていない。収縮低減剤を添

加したSRでは、表面部のひび割れ、水平方向のひび割れは減少したが、鉄筋周辺のひび割れは多く発生した。膨張材と収縮低減剤を併用したEX-SRではほとんどのひび割れを防止できたが、温度応力によると見られる水平方向のひび割れが残った。

EX-SRの脱型を7日から1日に早めた試験体 (EX-SR 脱型1日) では鉄筋周りのひび割れが、EX-SRよりも増加していた。

### 3.4 シリーズ3

シリーズ3では、蒸気養生を行い、内部と外部の温度差を低減した場合の効果を調べた。

調査は、シリーズ2の膨張材と収縮低減剤を併用したEX-SRと同じとした。

試験体の温度履歴を図12に示す。蒸気養生を行った試験体では、中心部外部とも保温養生を行った試験体に比べ高い温度を示したが、中心部と外周部の最高温度の差は保温養生を行った試験体では約12℃に対して蒸気養生を行った試験体は約7℃と小さくすることができた。

全ひずみの履歴を図13に示す。最高温度が上昇したことにもない、熱膨張により初期の膨張が大きくなっているが、最終的な収縮量はほぼ同じであった。また、中心部と外周部のひずみの差が小さくなっている。

シリーズ3では、いずれの試験体にも、表面、内部ともひび割れは見られなかった。

### 4. 考察

3シリーズの実験により、超高強度コンクリートのひび割れの特徴、抑制方法について検討を行った。

超高強度コンクリート部材に生じるひび割れは、自己収縮によるひび割れと、大きな水和熱による、温度差によるひび割れであると考えられる。

自己収縮に伴うひび割れは、主に主筋近傍から発生し、主筋をつなぐように延びていた。一方、温度差に起因するひび割れは、試験体の高さ方向の中央付近に水平に発生した。

自己収縮ひび割れの抑制には、膨張材の使用が効果的であったが、温度上昇を伴うため、温度差により発生したと思われるひび割れは、抑制しきれなかった。

このため、膨張材の使用に加え、収縮低減剤、保温養生や蒸気養生などを併用することにより、温度差によるひび割れも抑

制することが必要であり、今回の実験においてその効果を確認することができた。

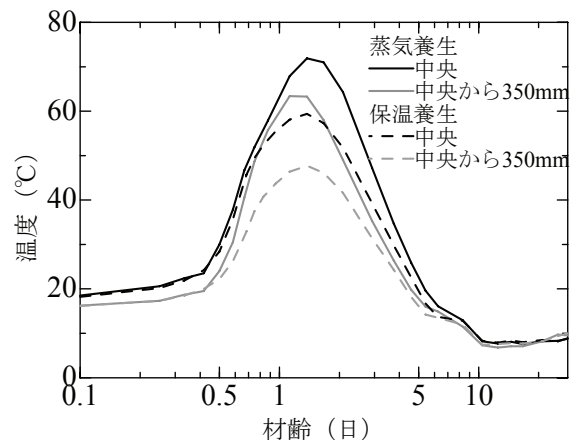


図12 試験体の温度履歴 (シリーズ3)

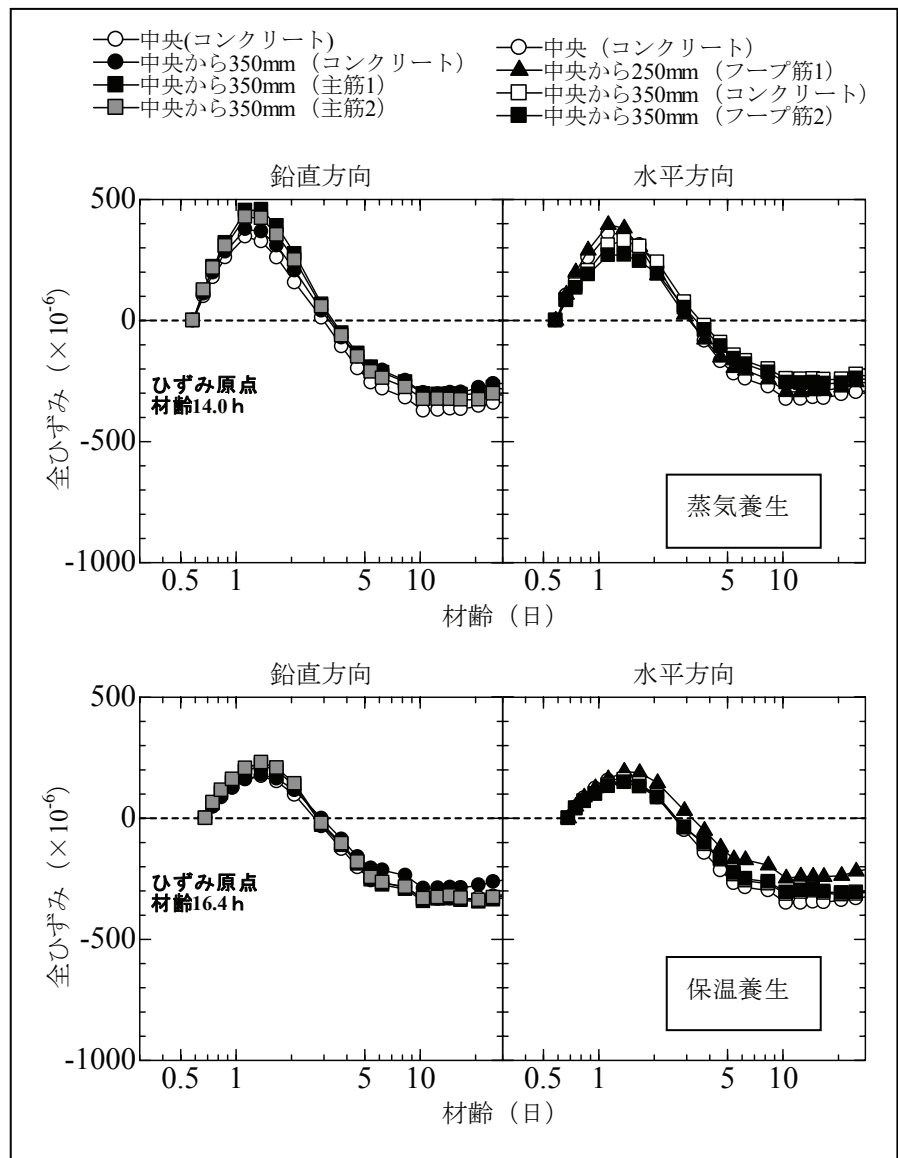


図13 ひずみの変化の一例 (シリーズ3)



## 5. おわりに

建物の高層化や超スパンの確保のため今後設計基準強度 $150\text{N/mm}^2$ を超える超高強度コンクリートの使用も増えてくると考えられるが、強度が高くなるにつれて、普通強度のコンクリートとはかなり異なった性状を示すようになる。各種ひび割れ抑止策を行い良好な構造体を作製する必要がある。

この研究のシリーズ1および2は名古屋大学大学院環境学研究科 都市環境学専攻 丸山研究室、太平洋セメント株式会社と共同で行ったものです。

