

論文 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

松田 拓^{*1}・嶋 毅^{*2}・河上 浩司^{*1}・西本 好克^{*3}

要旨：低熱ポルトランドセメントにシリカフュームを混合した結合材による超高強度コンクリートの自己収縮特性に及ぼす、水和発熱による初期高温履歴の影響を確認すべく、実構造物を模擬した温度履歴を与えた試験体の自己収縮ひずみを測定した。その結果、初期高温履歴条件下での自己収縮ひずみは 20℃一定条件下に比べ大きくなり、その進行速度は最高温度が高いほど速く、温度降下後は非常に緩やかになることを確認した。一連の試験結果より、初期高温履歴下の自己収縮ひずみを最高温度と積算温度により予測する手法を提案した。また、膨張材による自己収縮低減効果が初期高温履歴条件下でも得られることを確認した。

キーワード：超高強度コンクリート、自己収縮、初期高温履歴、積算温度、膨張材

1. はじめに

構造物の大型化や長寿命化および部材断面の縮小への要求の高まり等により、設計基準強度（以下 Fc）で 100N/mm² 級の超高強度コンクリートが実用化されている¹⁾。最近では、Fc150N/mm² 級のコンクリート²⁾や圧縮強度 200N/mm² クラスの超高強度繊維補強コンクリート³⁾が開発され、コンクリート材料への更なる高強度化の要求は依然高まる傾向にある。一方、こうした超高強度コンクリートは自己収縮ひずみの発現が大きいことが知られ、条件によってはひび割れ発生の危険性が高くなること⁴⁾が指摘されている。この対策を講じるためには、自己収縮ひずみの適切な予測および低減対策が求められるが、現状ではそのためのデータ蓄積が十分とはいえない。

コンクリートの自己収縮ひずみは、水セメント（結合材）比が小さくなるほど大きくなることの他に、混和材としてのシリカフュームの使用や養生温度にも大きく影響されることが知られている⁵⁾。筆者らは、シリカフュームを使用した Fc120N/mm² 級の超高強度コンクリートを対象として、(1)施工時の水和発熱による初期高温履

歴条件下での自己収縮特性と共に、(2)膨張材によるその低減効果を確認してきた⁶⁾。今回、対象範囲を Fc150N/mm² 級のコンクリートまで広げ、(1)(2)を確認するとともに、初期温度高温履歴を受ける超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの予測手法を提案した。

2. 試験概要

2.1 使用材料および調合

使用材料を表 - 1 に、コンクリート調合および試験シリーズを表 - 2 に示す。結合材には低熱ポルトランドセメントにシリカフュームを質量比で 10%置換したもの（LSF）を使用した。

2.2 試験シリーズおよび養生温度条件

シリーズ 1 は、Fc120N/mm² 級のコンクリートの 20℃一定条件下での自己収縮特性と膨張材による低減効果の確認、および標準期施工を模擬した初期高温履歴条件下の自己収縮ひずみの確認を目的とした。シリーズ 2 は、Fc150N/mm² 級のコンクリートの 20℃一定条件下での自己収縮特性および膨張材による低減効果の確認を目的とした。シリーズ 3 は、最も温度が高くなる夏

*1 三井住友建設（株） 技術研究所 工修 （正会員）

*2 住友大阪セメント（株） セメント・コンクリート研究所 工修 （正会員）

*3 三井住友建設（株） 技術研究所 （正会員）

表 - 1 使用材料

材料	記号	諸物性	試験シリーズ
低熱ポルトランドセメント	C	密度 3.42g/cm ³ , 比表面積 3310cm ² /g	1, 2, 3
シリカフェューム	SF	密度 2.26g/cm ³ , 比表面積 22.5mm ² /g	1, 2, 3
低添加型膨張材	Ex	エトリンガイト-石灰複合系, 密度 3.05g/cm ³	1, 2, 3
細骨材	S	千葉県万田野山砂, 密度 2.63g/cm ³ , FM 2.53	1 (S1), 2 (S1)
		千葉県君津産山砂, 密度 2.58g/cm ³ , FM 2.62	3 (S1)
		高知県鳥形山産砕砂, 密度 2.66g/cm ³ , FM 2.73	3 (S2)
粗骨材	G	茨城県岩瀬産砕石, 密度 2.65g/cm ³ , FM 6.76	1, 2, 3
混和剤	SP	ポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤	1, 2, 3

表 - 2 コンクリート調合

試験 シリーズ	調合記号	B/W (%)	単位容積質量(kg/m ³)							自己収縮試験体の 養生温度条件
			W	C	SF	Ex	S1	S2	G	
シリーズ 1	LSF16	16	145	816	91	0	595	—	840	20℃一定は全調合, パターンAは LSF16, LSF16Ex25, LSF16E x 30に関し実施
	LSF16E x 20	16	145	796	91	20	594	—	840	
	LSF16E x 25	16	145	791	91	25	594	—	840	
	LSF16E x 30	16	145	786	91	30	593	—	840	
シリーズ 2	LSF14	14	150	964	107	0	386	—	888	20℃一定
	LSF14E x 15	14	150	949	107	15	385	—	888	
	LSF14E x 20	14	150	944	107	20	385	—	888	
	LSF14E x 25	14	150	939	107	25	385	—	888	
シリーズ 3	LSF16	16	145	816	91	0	359	245	827	パターンB
	LSF16E x 20	16	150	824	94	20	333	229	827	
	LSF14	14	150	966	107	0	273	182	827	
	LSF14E x 20	14	155	976	111	20	242	165	827	

期施工時の初期高温履歴条件下での自己収縮特性の確認を目的とした。初期高温履歴条件では、別途実測した模擬柱部材中心部の温度測定結果より温度履歴パターンをモデル化し、自己収縮試験体に雰囲気温度として与えた。温度履歴パターンを図 - 1 に示す。パターン A は標準期、パターン B は夏期をそれぞれ模擬している。

2.3 試験手順

コンクリートの練混ぜおよび試験手順は既報と同様である⁶⁾。自己収縮試験体は「(仮)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」⁷⁾に準じ作製し、100×100×400mmの角柱の中心部に埋め込み型ひずみ計(KM-100BT)を設置した。各試験体はコンクリート打設後に封緘し、速やかに所定の設定温度条件下に存置した。自己収縮ひずみは、コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定した熱膨張ひずみを温度実測値より求め、自己収縮試験体の全ひずみより差し引き求めた。

シリーズ3においては自己収縮試験体と同バッチのコンクリートよりφ100×200の円柱供試体を採取し、自己収縮試験体と同一温度条件下での封緘養生材齢1, 3, 5, 7, 14日の圧縮強度および20℃一定封緘養生での材齢28日圧縮強度

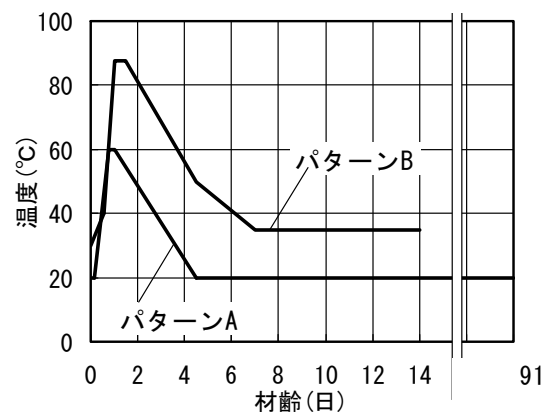


図-1 温度履歴パターン

を確認した。また、20℃一定条件下での試験実施時には、凝結試験を併せて実施した。

3. 試験結果

3.1 養生温度 20℃一定条件の結果

表 - 3 に凝結試験結果を示す。図 - 2 に、雰囲気温度が 20℃一定条件下の試験体の自己収縮ひずみおよび温度測定結果を示す。なお、材齢の起点は注水時刻とし、自己収縮ひずみの起点は、KM-100BT より検出される指示値が自己収縮による急激な変化を示した時刻と凝結始発がほぼ同時刻であったことを確認し、凝結始発時刻とした。

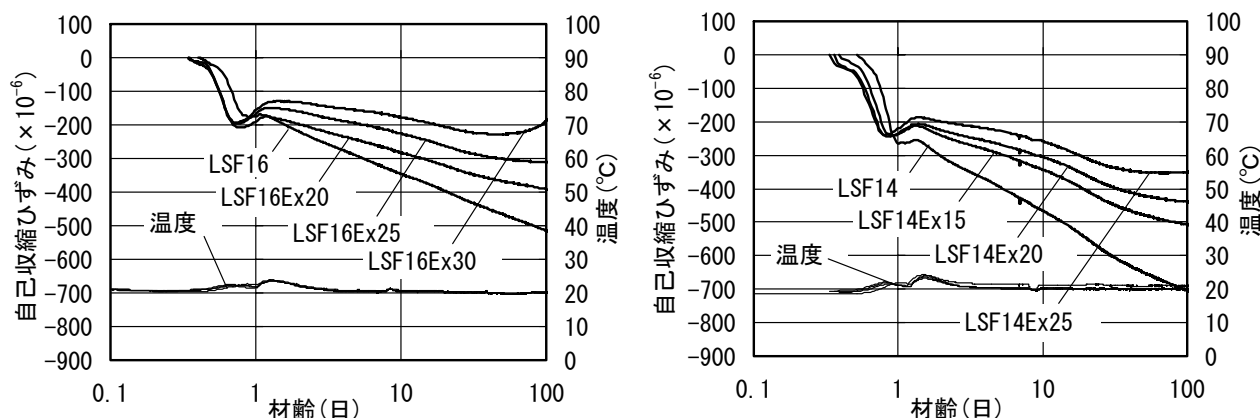


図-2 20℃一定条件下の自己収縮ひずみ

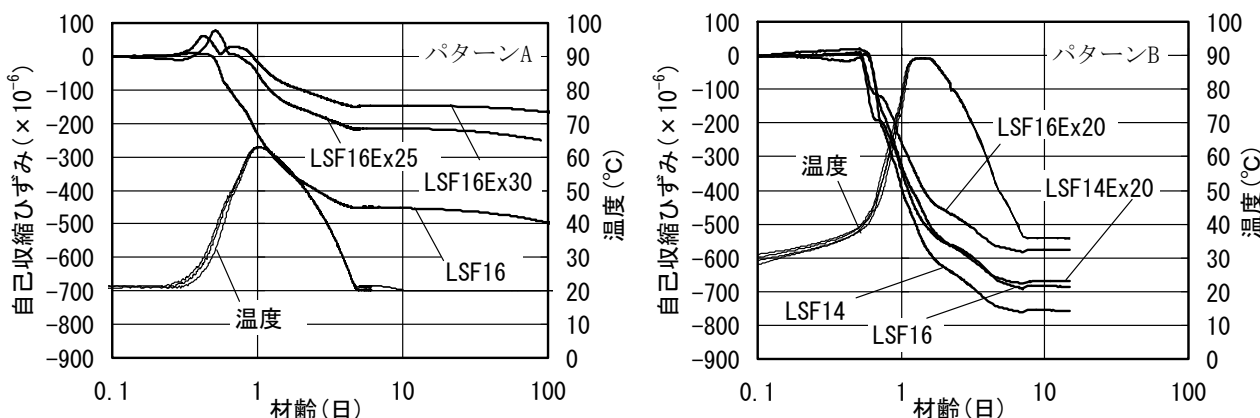


図-3 初期温度履歴条件下の自己収縮ひずみ

何れのコンクリートも、自己収縮ひずみは凝結始発から材齢 1 日弱にかけての収縮量が顕著であり、その後の進行は緩やかに継続した。材齢 1 日付近で自己収縮ひずみ量が減少傾向を示す理由としては、線膨張係数を若材齢時より一定値と仮定したためと考えられる⁴⁾。自己収縮ひずみの膨張材による自己収縮低減効果は、添加量の増加に伴い大きくなり、LSF16Ex30 は材齢 60 日以降で膨張傾向を示した⁶⁾。

3.2 初期高温履歴条件の結果

図 - 3 に、初期高温履歴を与えた試験体の自己収縮ひずみおよび温度測定結果を示す。初期高温履歴を与える試験方法の場合、凝結始発時刻を確認することが困難となるため、自己収縮ひずみ算出の起点は注水時刻として表記している。その結果、20℃一定条件下の試験結果と同様に、KM-100BT より検出される指示値の急激な変化が認められ、この時点が凝結始発でありかつ自己収縮ひずみの発生時刻と推定される。膨張材

表-3 凝結試験結果

調査記号	凝結(始発) (h-m)	調査記号	凝結(始発) (h-m)
LSF16	9-30	LSF14	12-40
LSF16Ex20	8-25	LSF14Ex15	9-25
LSF16Ex25	8-15	LSF14Ex20	8-50
LSF16Ex30	8-15	LSF14Ex25	8-10

を添加しないコンクリート(プレーン)および膨張材を添加したコンクリート(膨張コン)ともに自己収縮ひずみの発生時期は 20℃一定条件下の結果と大差が無かった。膨張コンに関しては、初期に膨張傾向を示すものもあり、膨張材と結合材の温度活性の差や若材齢時の線膨張係数の影響⁶⁾等を考慮した検討が必要と考えられ、今後の課題としたい。

何れのコンクリートの自己収縮ひずみも、初期に大きく増大し、温度降下後の進行速度は非常に緩やかになった。また、膨張材による自己収縮低減効果が確認され、自己収縮低減効果は添加量の増加に伴い大きくなった。

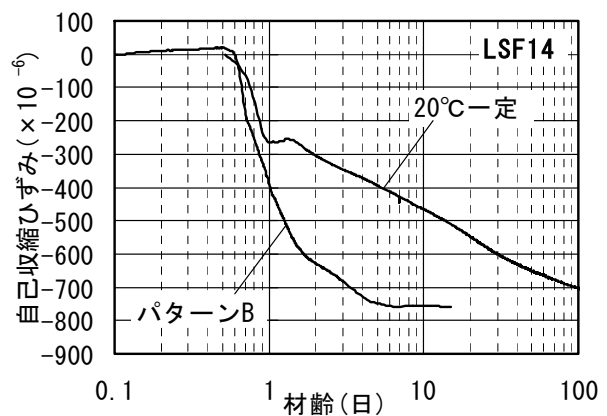
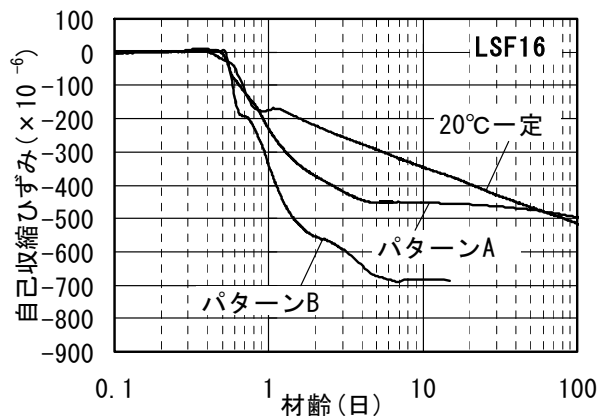


図-4 初期高温履歴の影響

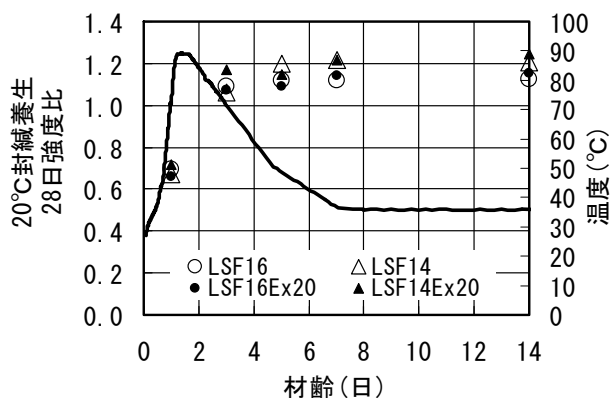


図-5 圧縮強度の発現

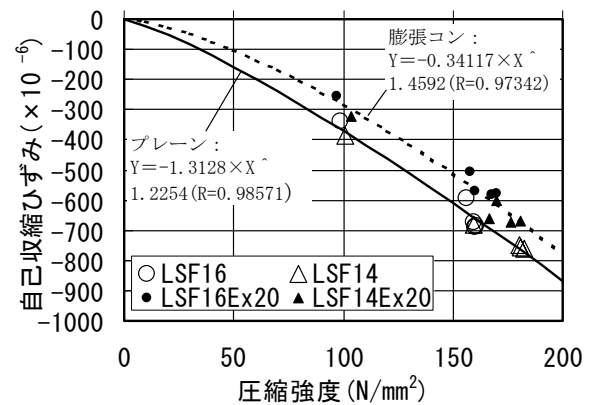


図-6 圧縮強度と自己収縮ひずみ

3.3 自己収縮ひずみへの初期高温履歴の影響

図-4に LSF16 および LSF14 の自己収縮ひずみ測定結果を示す。初期高温履歴下での自己収縮ひずみは 20℃一定条件下に比べ初期に大きく増進し、その進行速度は最高温度が高いほど速くなり、温度降下後は非常に緩やかになった。LSF16 に関し、20℃一定条件下での自己収縮ひずみは材齢 1 日以降一定の速度で進行し、材齢 60 日付近で最高温度が 60℃であるパターン A に追いついたが、最高温度が 90℃であるパターン B には材齢 100 日時点でも達しなかった。LSF14 に関しても、同様の傾向が確認された。今般、シリカフェームを混和材として使用したコンクリートに関して、初期温度履歴下で強度発現や内部組織の緻密化の進行が促進される傾向⁸⁾が指摘されているが、自己収縮に及ぼす初期高温履歴の影響は、それらの傾向と類似している。

また、この様な超高強度コンクリート部材では、温度上昇量の大きい中心部の自己収縮ひず

みが部材表面付近に比べ大きくなり、その差は水和発熱が顕著な初期材齢で特に大きくなるものと考えられる。

4. 自己収縮ひずみ予測手法の検討

4.1 圧縮強度による自己収縮ひずみの評価

図-5に、シリーズ3で得られた同一養生温度条件の円柱供試体より得られた圧縮強度の 20℃封蔵養生 28 日強度に対する比を示す。圧縮強度は、初期高温履歴条件下では材齢 3 日時点で 20℃封蔵養生供試体の材齢 28 日強度と同等以上の発現を示し、材齢 14 日にかけての増進は小さかった。

図-6に、シリーズ3で得られた圧縮強度と自己収縮ひずみの関係を示す。プレーンと膨張コンそれぞれに、水結合材比によらず圧縮強度と自己収縮ひずみには相関が見られ、養生温度条件が同じ場合、圧縮強度は自己収縮ひずみの有効な評価指標のひとつと考えられる。

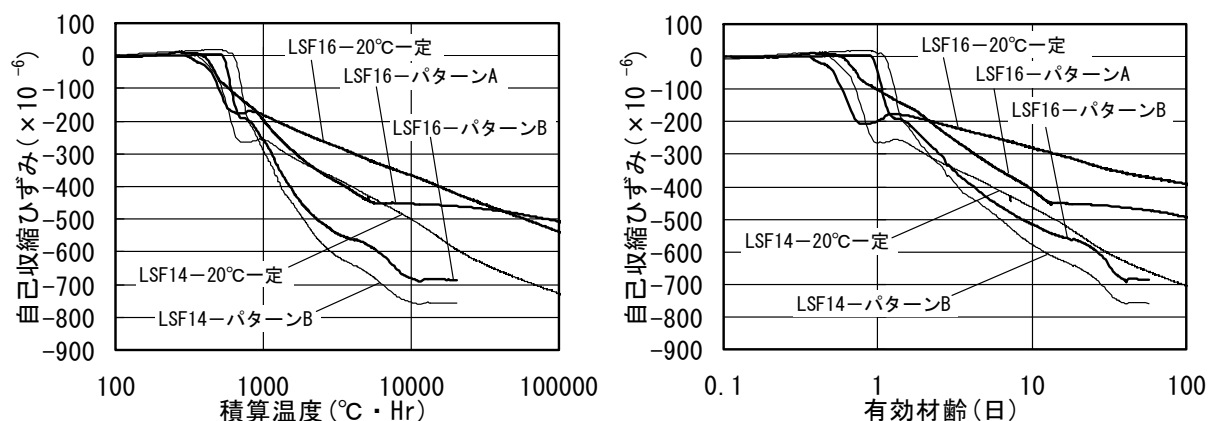


図-7 積算温度および有効材齢による自己収縮ひずみの評価

4.2 最高温度と積算温度による評価

養生温度条件の異なる自己収縮ひずみを、積算温度もしくは有効材齢⁹⁾の適用で統一的に評価する方法が知られている。図-7でそれらによる整理を試みたが、今回の結果では初期高温履歴の影響を除去できなかった。

自己収縮に起因するひび割れ危険性は、比較的初期の材齢で高くなるとされている^{4),10)}。そこで、得られた試験結果より材齢14日以内のデータを抽出し、その範囲で実用的な自己収縮ひずみの予測手法を検討した。橋田ら⁴⁾は、初期高温履歴を受けるコンクリートの自己収縮ひずみの20°C一定条件に対する比 γ は、最高温度をパラメータとして評価できるとしている。本検討では、材齢14日時点での γ_{14} と最高温度 $T_{\max}$ と20°Cの差(°C)の関係に着目した。

$$\gamma_{14} = \varepsilon_{14as} / \varepsilon_{14as20} \quad (1)$$

ここに、 ε_{14as} 、 ε_{14as20} は初期高温履歴および20°C一定条件下の、それぞれ材齢14日での自己収縮ひずみ(×10⁻⁶)を表す。

図-8に、今回の実験より得られた γ_{14} と $T_{\max}-20(^{\circ}\text{C})$ の関係を示す。両者には相関が認められるが、水結合材比の相違による明確な差は確認されず、これらの結果を回帰する事により、式(2)を得た。

$$\gamma_{14} = 1 + 2.0 \times (T_{\max} - 20)^{1.92} \times 10^{-4} \quad (2)$$

この結果より、JCI 自己収縮委員会の提案式¹¹⁾に γ_{14} を導入して拡張し、初期高温履歴の影響を考慮した自己収縮ひずみ ε_{as} (×10⁻⁶)の予測式と

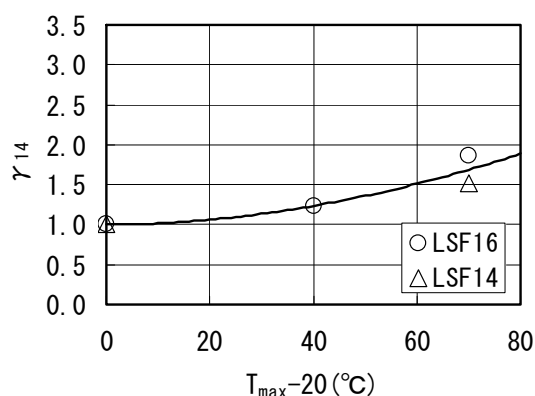


図-8 γ_{14} と $T_{\max}-20(^{\circ}\text{C})$

して式(3)を提案する。

$$\varepsilon_{as} = \gamma_{14} \varepsilon_{14as20} \times [1 - \exp\{-a(M - M_0)^b\}] \quad (3)$$

ここに、 M ：注水時刻を起点とした積算温度(°C・Hr)、 M_0 ：自己収縮起点の積算温度(実測値)、 a 、 b ：自己収縮の進行特性を表す係数、

a 、 b は水結合材比により決定される定数であるため、LSF16およびLSF14それぞれの実測値を式(3)により回帰し、得られた結果の平均値より決定した。図-9に実測値と提案手法による算定結果との比較を、表-4に自己収縮算定に用いたパラメータをそれぞれ示す。提案手法は、材齢14日までの範囲で初期高温履歴を受ける自己収縮挙動を概ね表現できていると考えられる。

5. まとめ

Fc120~150N/mm²クラスの超高強度コンクリートの自己収縮特性に及ぼす初期高温履歴の影響に関し、以下の知見を得た。

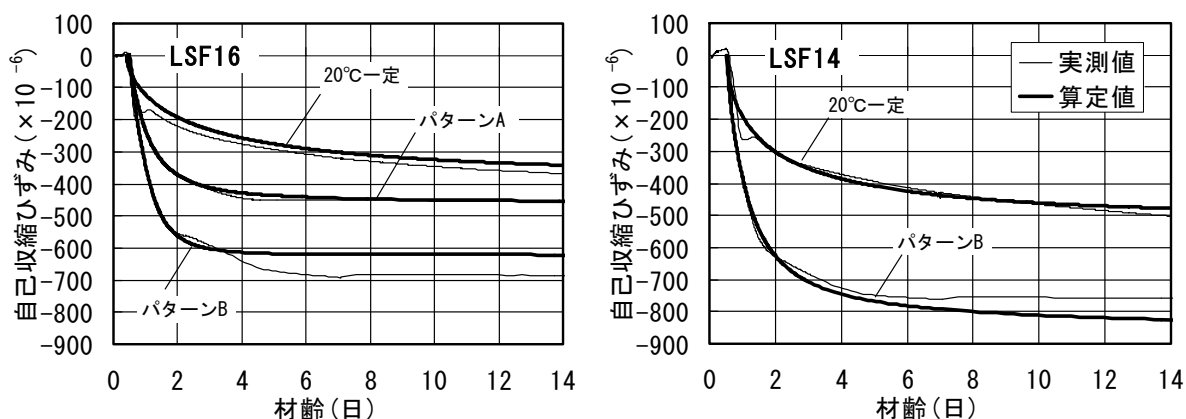


図-9 提案手法による自己収縮発現の評価

- (1)初期高温履歴下での自己収縮ひずみは20℃一定条件下に比べ初期に大きく増進し、その進行速度は最高温度が高いほど速くなり、温度降下後は非常に緩やかになる。
- (2)圧縮強度は自己収縮ひずみの有効な評価指標である。
- (3)材齢 14 日時点における初期高温履歴を受けた自己収縮ひずみの 20℃一定条件に対する比は、最高温度により評価できる。
- (4)材齢の範囲を限定することにより、初期高温履歴下での自己収縮ひずみの発現は、20℃一定条件下の自己収縮ひずみと最高温度とおおよび積算温度によって予測できる。
- (5)膨張材の使用による自己収縮の低減効果は初期高温履歴下においても得られ、添加量に伴い大きくなる。

今回提案した自己収縮ひずみ予測手法は、今後のデータ蓄積により精度の向上および適用範囲の拡大が期待され、汎用性が高まると考える。

参考文献

- 1) 松田拓ほか:Fc100N/mm²クラスの高強度コンクリートの品質管理, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp515-520, 2004.8
- 2) 陣内浩ほか: 実用化を迎えた[Fc]150N/mm²級超高強度コンクリートの性能, セメント・コンクリート, No.678, pp10-16, 2003.8
- 3) 黒岩正ほか: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた国内初の道路橋—東九州自動車道道堀越 C ランプ橋—, コンクリート工学,

表-4 自己収縮ひずみ算定に用いたパラメータ

調査記号	ϵ_{14as20} ($\times 10^{-6}$)	$T_{max}-20$ ($^{\circ}C$)	a	b	M_0 ($^{\circ}C \cdot Hr$)
LSF16 -20℃	-368	0	0.007	0.7016	295
LSF16 -パターンA	-368	40	0.007	0.7016	406
LSF16 -パターンB	-368	70	0.007	0.7016	506
LSF14 -20℃	-501	0	0.017	0.5556	356
LSF14 -パターンB	-501	70	0.017	0.5556	582

2005-10,pp.39-44

- 4) 橋田浩ほか: 自己収縮と水和膨張による高強度コンクリートの連成ひずみ特性に関する検討, コンクリート工学論文集, 第 13 巻第 1 号, pp25-32, 2002 年 1 月
- 5) 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, pp120, 2002.9
- 6) 上原伸朗ほか: 超高強度コンクリートの自己収縮低減, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp1099-1104, 2005
- 7) 日本コンクリート工学協会: 超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ), pp209-210, 1994.5
- 8) 河上浩司ほか: 高強度コンクリートの圧縮強度発現と微細構造に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp1075-1080, 2005
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造的な性能照査編], pp30, 2002
- 10) 今本啓一: 超高強度コンクリート実大柱の自己収縮応力に及ぼす水和熱の影響, 日本建築学会構造系論文集 第 503 号, pp17-22, 1998.1
- 11) 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, pp117, 1996.11