

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

Autogenous Shrinkage Characteristic of Ultra High-Strength Concrete under High-Temperature Career at an Early Age

松田 拓 TAKU MATSUDA
河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI
西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO

水和発熱による初期高温履歴条件下での、超高強度コンクリートの自己収縮特性および膨張材による自己収縮低減効果を確認すべく、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°C一定条件下に比べ大きく、最高温度が高いほど大きいこと、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同様に得られることを確認した。一連の検討結果より、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。

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

A series of tests to evaluate the autogenous shrinkage characteristics and the effect of expansive additive under high-temperature career due to heat hydration at early age were carried out. The test results showed the followings; Autogenous shrinkage under high-temperature career was larger than under the 20°C career and was increased as the maximum temperature increased, and the expansive additive had also the shrinkage reduction effect. In addition, the prediction method of the autogenous shrinkage due to heat hydration evaluating maximum temperature and maturity was proposed.

Key Words: Ultrahigh-Strength Concrete, Autogenous Shrinkage, Temperature Career at Early Age, Maturity, Expansive Additive

1. はじめに

構造物の大型化や長寿命化および部材断面縮小への要求の高まり等により、設計基準強度（以下Fc）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²⁾や圧縮強度200N/mm²クラス³⁾の超高強度繊維補強コンクリート³⁾が開発され、さら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く、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ほかに、混和材としてのシリカフェ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、シリカフェームを使用した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ともに、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、①②を確認するとともに、初期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

(1) 使用材料および調査

使用材料を表-1に、コンクリート調査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ェームを質量比で10%置換したもの（以下LSF）を使用した。

(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°C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での自己収縮ひずみの確認を目的とした。

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 3.24g/cm ³ , 比表面積 3310cm ² /g	1, 2, 3
シリカフェーム	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	W/B (%)	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°C一定は全調合, パターンAはLSF16, LSF16Ex25, LSF16Ex30に関し実施
	LSF16Ex20	16	145	796	91	20	594	-	840	
	LSF16Ex25	16	145	791	91	25	594	-	840	
	LSF16Ex30	16	145	786	91	30	593	-	840	
シリーズ2	LSF14	14	150	964	107	0	386	-	888	20°C一定
	LSF14Ex15	14	150	949	107	15	385	-	888	
	LSF14Ex20	14	150	944	107	20	385	-	888	
	LSF14Ex25	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
	LSF16Ex20	16	150	824	94	20	333	229	827	
	LSF14	14	150	966	107	0	273	182	827	
	LSF14Ex20	14	155	976	111	20	242	165	827	

シリーズ2は、Fc150N/mm²級のコンクリートの20°C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。

初期高温履歴条件下では、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。

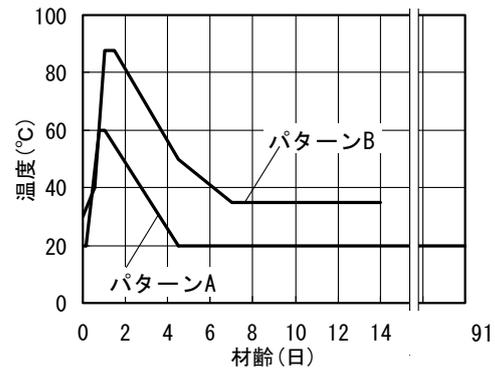


図-1 温度履歴パターン

表-3 凝結試験結果

調合記号	凝結(始発)(h-m)	調合記号	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

3. 試験結果

(1) 養生温度20°C一定条件の結果

表-3および図-2に、凝結試験結果および20°C一定条件下の試験体の自己収縮ひずみと温度の測定結果を示す。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、埋込み型ひずみ計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時刻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。

いず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

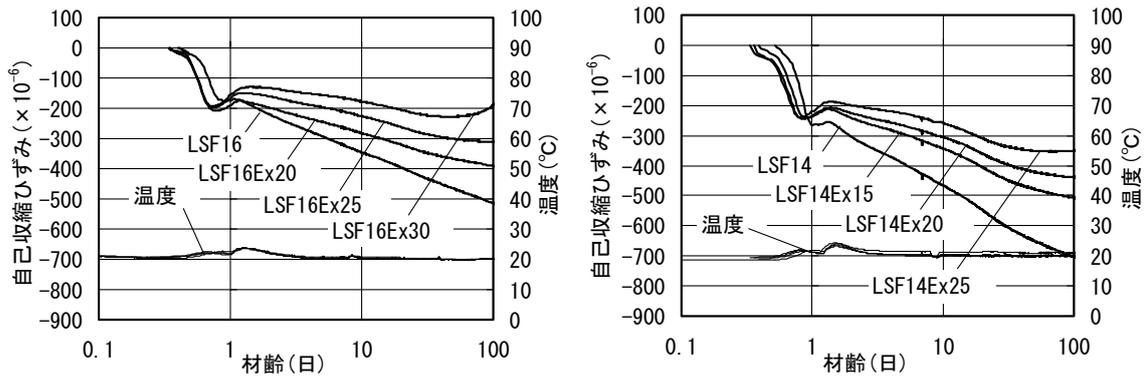


図-2 20℃一定条件下の自己収縮ひずみ

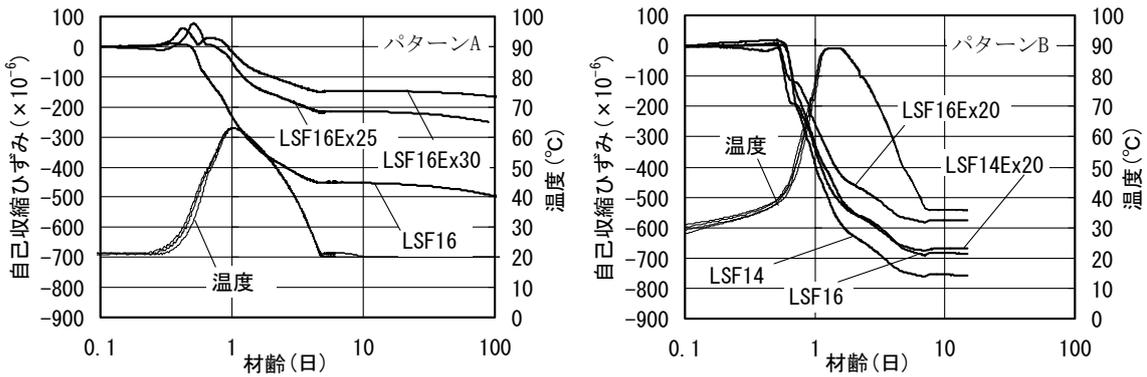


図-3 初期高温履歴条件下の自己収縮ひずみ

は進行が緩やかに継続した。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⁾。膨張材を添加したコンクリートの自己収縮ひずみは、添加量の増加に伴い小さくなり、LSF16Ex30は材齢60日以降で膨張傾向を示した。

(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、埋込み型ひずみ計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なかった。膨張コンに関して、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。

いずれのコンクリートも、自己収縮ひずみ増進は初期に大きく、温度降下後は非常に緩やかになった。

(3) 膨張材による自己収縮ひずみ低減効果

図-4に、材齢14日における自己収縮ひずみと単位膨張材量との関係を示す。水結合材比(W/B) = 16%の20℃一定条件下の場合に若干折れ線になるものの、いずれの養生温度条件でも、自己収縮ひずみと単位膨張材量との関係はほぼ直線となった。養生温度条件により多少のばらつきはあるものの、単位膨張材量をおおむね20kg/m³増量することにより、自己収縮ひずみを100 × 10⁻⁶低減させる結果となった。

図-5に、各養生温度条件下の材齢1, 2, 3, 7, 14日における膨張コンとプレーンの自己収縮ひずみの比と膨張材添加量の関係を示す。両者の関係における試験ケースによる差異は、材齢1日の時点では大きいものの、材齢2日~14日の範囲では小さくなった。

今回の実験範囲では、膨張材の添加量と自己収縮ひずみ低減率との関係は、養生温度条件によらず材齢2~14日の範囲でほぼ同じであり、膨張材添加量を15~20kg/m³とすることで、プレーンの自己収縮ひずみが約20%低減される結果となっている。

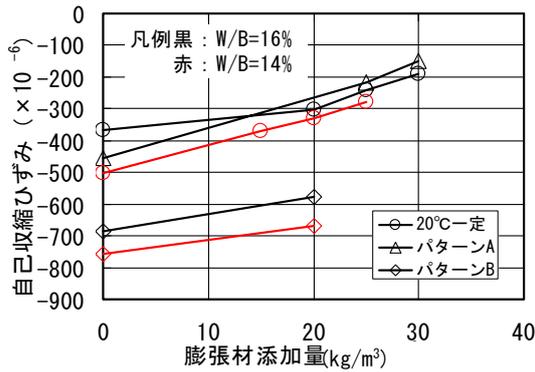


図-4 膨張材添加量と自己収縮ひずみとの関係

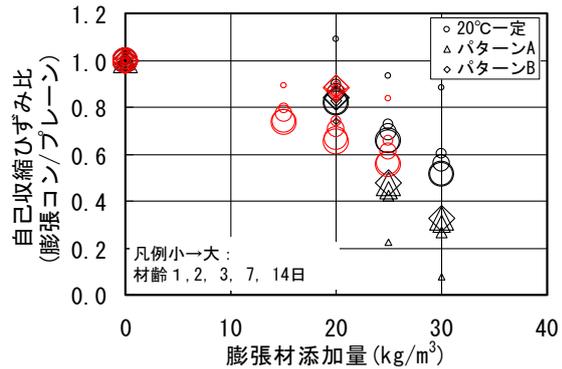


図-5 膨張材添加量と自己収縮ひずみ比との関係

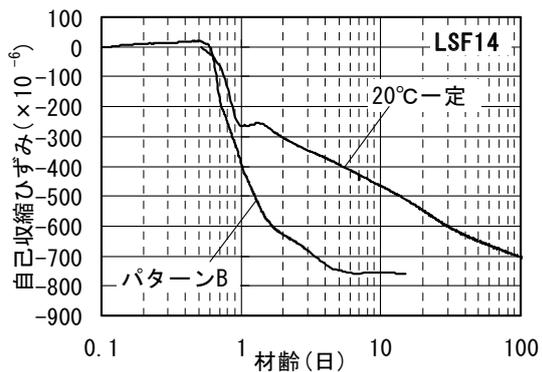
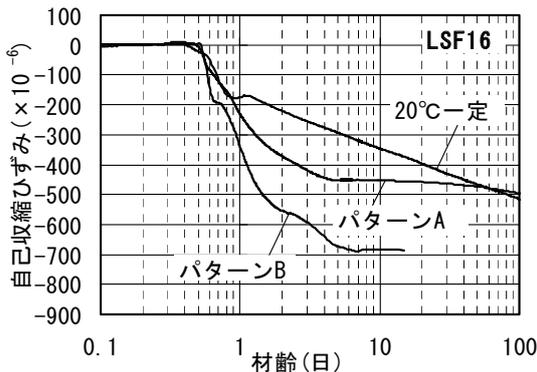


図-6 自己収縮ひずみに与える初期高温履歴の影響

(4) 自己収縮ひずみへの初期高温履歴の影響

図-6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°C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°C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°CであるパターンAに追いついたが、最高温度が90°C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、初期高温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。

4. 自己収縮ひずみ予測手法の検討

(1) 圧縮強度による自己収縮ひずみの評価

図-7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°C封かん養生28日強度に対する比を示す。初期高温履歴条件下における圧縮強度は、材齢3日時点で20°C封かん養生供試体の材齢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-8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た。

(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⁾を独立変数として統一的に評価する方法が知られている。図-9にそれらを独立変数とした整理結果を示す。今回は、いずれも統一的な評価は難しい結果であった。

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)}。これは、初期材齢での実構造物のコンクリートの自己収縮ひずみ増進が、高温履歴により大きくなる影響と考えられ、自己収縮ひずみの予測手法にはこの範囲での精度が特に求められる。

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、初期高温履歴条件下と20°C一定条件下におけるコンクリートの自己収縮ひずみの比 γ を、最高温度をパラメータとして評価することを試みている。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。

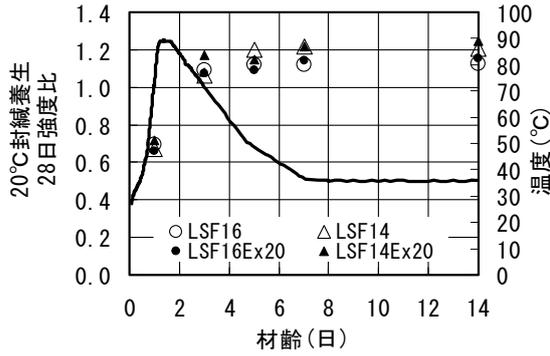


図-7 圧縮強度の発現

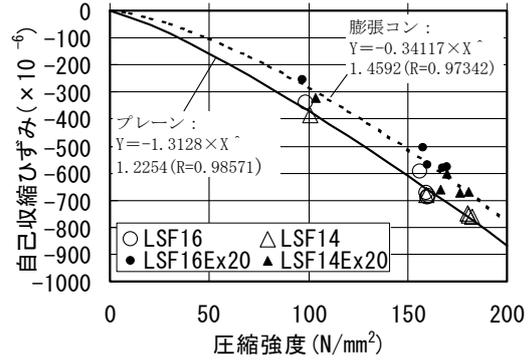


図-8 自己収縮ひずみと圧縮強度

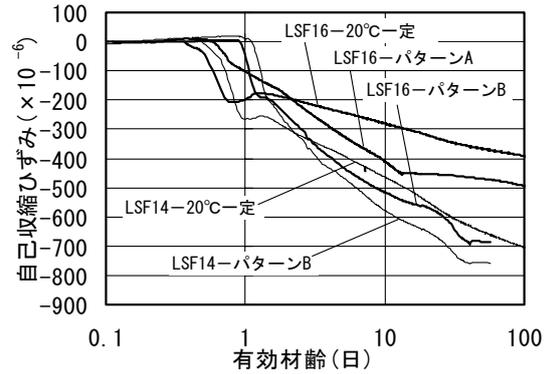
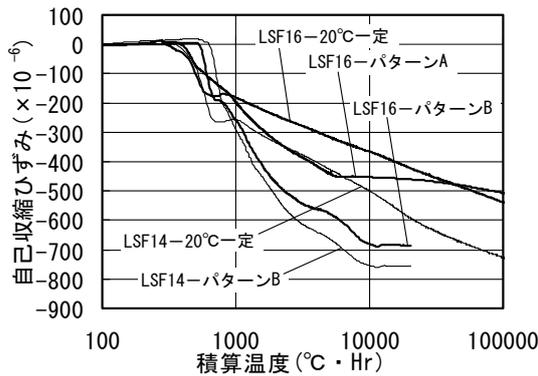


図-9 積算温度および有効材齢による自己収縮ひずみの評価

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

ここに、

ϵ_{14as} 、 ϵ_{14as20} : 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 ($\times 10^{-6}$)

図-10に、今回の実験より得られた $T_{max} - 20$ (°C) と γ_{14} との関係を示す。両者には相関が認められ、今回検討対象とした $W/B = 14 \sim 16$ の範囲では W/B の影響は無視できると仮定し、これらの結果を回帰式 (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} ($\times 10^{-6}$) 予測式として式 (3) を提案する。

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

ここに、

M : 注水時刻を起点とし基準温度を -10 °C 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)

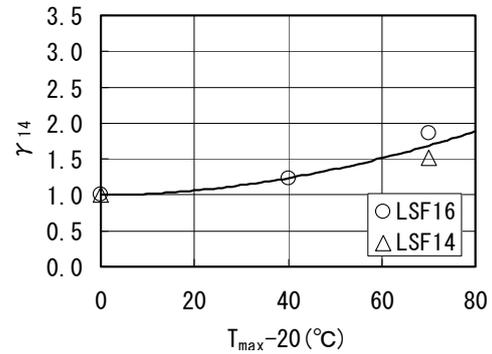


図-10 $T_{max} - 20$ (°C) と γ_{14} との関係

a 、 b : 自己収縮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-11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おおむね表現できていると考えられる。

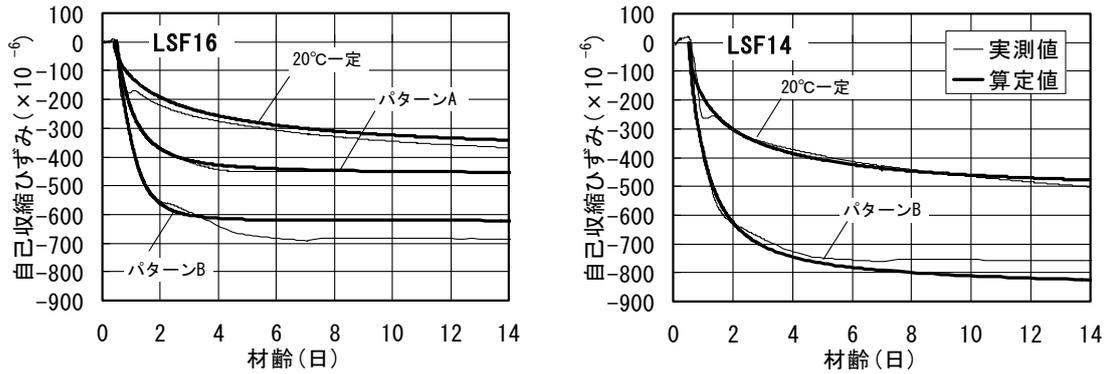


図-11 提案手法による自己収縮ひずみの評価

5. まとめ

初期高温履歴条件下における、 $F_c120 \sim 150N/mm^2$ クラスの超高強度コンクリートの自己収縮特性および膨張材による自己収縮低減効果に関し、以下の知見を得た。

- ① 初期高温履歴下での自己収縮ひずみは20°C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 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でも得られ、添加量に伴い大きくなる。
- ③ 材齢14日時点の初期高温履歴を受けた自己収縮ひずみの20°C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14日までの範囲での初期高温履歴下の自己収縮ひずみの発現は、20°C一定条件下の自己収縮ひずみと最高温度および積算温度で予測できる。
- ⑤ 自己収縮ひずみの予測精度は、a)圧縮強度、b)最高温度と積算温度、それぞれを指標とした予測手法を併用することにより、向上が期待できる。

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られる。

謝辞：本検討の実施にあたり、住友大阪セメント(株)の諸氏には実験計画からまとめまでご協力を頂きました。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松田拓ほか： F_c100N/mm^2 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 $[F_c]150N/mm^2$ 級超高強度コンクリートの性能，セメント・コンクリート，

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°C	-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°C	-501	0	0.017	0.5556	356
LSF14 -パターンB	-501	70	0.017	0.5556	582

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，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