

超高強度コンクリートの自己収縮低減に関する検討

－膨張材がコンクリート性状に与える影響－

A Study on the Decrease of Self-Shrinkage in Super-High-Strength Concrete - The Influence of Expansive Additive on Concrete Properties -

西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO

松田 拓 TAKU MATSUDA

河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI

設計基準強度が 100N/mm^2 を超える超高強度コンクリートでは、単位結合材量が多く、かつシリカフェームの影響により自己収縮が大きくなることが知られている。このため、自己収縮低減対策として膨張材を使用した時のフレッシュ性状および強度発現に与える影響を検討した。さらに、 20°C 養生および温度履歴を与えたときの自己収縮ひずみを測定した。この結果、膨張材を添加することにより、若干の強度低下を起こすが、良好な収縮低減効果を示すことが確認された。また、温度履歴を与えた場合には 20°C 養生より、硬化初期に膨張量が大きくなることを確認した。さらに、単位膨張材量を 30kg/m^3 以上とした場合は、遅れ膨張を示す可能性があることが明らかとなった。

キーワード：超高強度、自己収縮、低熱ポルトランドセメント、シリカフェーム

In super high-strength concrete exceeding 100N/mm^2 , large self-shrinkage is generated. In this study, the influence of expansive additive added as counter measures for self-shrinkage on the fresh properties and strength development of concrete were measured. The results confirmed the following; the addition of expansive additive significantly decreased levels of shrinkage with little loss of strength. The influence of the expansive additive was greater under high temperature curing than curing at 20°C . In addition, when the level of expansive additive exceeded 30kg/m^3 or more, it was observed that delayed expansion could be generated.

Key Words: Super-High-Strength, Self-Shrinkage, Low-Heat Portland Cement, Silica Fume

1. はじめに

近年、都心部における超高層集合住宅など、建築分野で設計基準強度が 100N/mm^2 を超える超高強度コンクリートの適用例が増加しつつある。このような超高強度コンクリートは、所要の強度を確保するために水結合材比を小さくする必要があり、多量の結合材が使用される。また、結合材は低熱系のポルトランドセメントとシリカフェームを併用するが多い。

一般に、コンクリートは水結合材比が小さい（単位結合材量が多い）ほど自己収縮ひずみが卓越する傾向があり、混和材料としてシリカフェームを使用するとさらに自己収縮ひずみは増大すると言われている¹⁾²⁾。また、コンクリートの自己収縮ひずみは、硬化初期の温度履歴

の影響を受けることも指摘されているため¹⁾、水和発熱の大きな超高強度コンクリートでは、初期高温履歴を受ける場合の自己収縮ひずみ特性を把握することが重要となる。

高強度コンクリートの自己収縮低減方法として、セメント種類の検討や膨張材や収縮低減剤の使用など、これまでも様々な検討がなされている³⁾⁴⁾⁵⁾。しかし、これらの検討は、圧縮強度が 100N/mm^2 程度以下のコンクリートに対して行われており、 120N/mm^2 を超える水結合材比が 20% 以下の超高強度コンクリートに対して十分な検討はまだなされていない。

本研究では、結合材として低熱ポルトランドセメントおよびシリカフェームを使用した超高強度コンクリートを対象として、膨張材を混入した場合のフレッシュ性

状、強度発現性および収縮低減効果について確認した。さらに、柱部材の中心温度を想定した温度履歴下における自己収縮ひずみについても確認して、超高強度コンクリートの自己収縮低減方法に関する検討を行った。

2. 試験概要

(1) 試験シリーズと試験水準

実験はシリーズI～IVのステップで実施した。シリーズIでは、膨張材がフレッシュ性状および圧縮強度に与える影響について検討し、シリーズIIでは、20℃養生での自己収縮ひずみについて検討し、シリーズIIIでは実構造物を想定した温度履歴条件下での自己収縮ひずみについて検討した。さらにシリーズIVでは水結合材比の範囲を拡大し、強度発現と自己収縮ひずみを確認した。水結合材比と膨張材添加量との組み合わせならびに確認項目を表-1に示す。

(2) 使用材料および調査

使用材料を表-2に、基本調査を表-3に示す。結合材は、水結合材比25%では低熱ポルトランドセメントと膨張材との組み合わせとし、25%未満ではさらに単位結合材量(LC+SF+Ex)の内割り10%分のシリカフュームを混合した。膨張材は低添加型膨張材を使用し、添加量は単位結合材量の内割り15～30kg/m³とした。化学混和剤は、シリカフュームを混合しない場合はSP1を、混合する場合はSP2を使用した。シリカフュームの混合方法は、シリーズI～IIIではあらかじめ約50%の濃度のシリカフュームスラリーを準備し、C、Ex、SおよびGを空練り後にWならびにSPと同時に投入し、シリーズIVでは粉体のシリカフュームをC、Exと同時に投入して空練した後にWとSPを投入した。単位水量は、シリーズI～IIIの水結合材比25%では145kg/m³、水結合材比16%では160kg/m³とし、シリーズIVではすべて150kg/m³に統一した。

(3) 温度履歴パターン

温度履歴は、筆者らが事前に行った模擬柱試験体の中心温度をモデル化した温度とし、L25では1)打込み温度：20℃、2)前置き：4Hr、3)昇温：14Hr (20→50℃)、4)保持：20Hr (50℃)、5)降温：82Hr (50→20℃)とした。また、LSF16では1)打込み温度：20℃、2)前置き：4Hr、3)昇温：14Hr (20→50℃)、4)保持：6Hr (50℃)、5)降温：84Hr (50→20℃)とし、その後20℃一定で所定材齢まで静置した。その温度履歴を図-1に示す。

表-1 水結合材比と膨張材添加量との組み合わせ

水結合材比 (%)	膨張材添加量 (kg/m ³)				
	0	15	20	25	30
25	●	○	◎	●	●
20	○		○		
16	●	○	◎	●	●
14	◎	◎	◎	◎	
12	○		○		

○：フレッシュ性状および圧縮強度
◎：20℃一定時の自己収縮
●：20℃および初期高温履歴 自己収縮

表-2 使用材料

材 料	記号	諸 物 性
低熱ポルトランドセメント	LC	密度 3.24g/cm ³ 、比表面積 3310cm ² /g
シリカフューム	SF	密度 2.26g/cm ³ 、比表面積 22.5m ² /g
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
細骨材	S	千葉県万田野産山砂、密度 2.63g/cm ³ 、FM6.53
粗骨材	G	茨城県岩瀬産砕石、密度 2.65g/cm ³ 、FM6.76
混和剤	SP1	ポリカルボン酸塩系高性能AE減水剤
	SP2	ポリカルボン酸塩系高性能減水剤

表-3 基本調査

シリーズ	調査記号	W/B (%)	単位容積質量 (kg/m ³)					
			W	C	SF	Ex	S	G
I II III	L25	25.0	165	660	0	0	758	856
	L25Ex15	25.0	165	645	0	15	758	856
	L25Ex20	25.0	165	640	0	20	757	856
	L25Ex25	25.0	165	635	0	25	757	856
	L25Ex30	25.0	165	630	0	30	757	856
	LSF16	16.0	145	816	91	0	595	840
	LSF16Ex15	16.0	145	801	91	15	594	840
	LSF16Ex20	16.0	145	796	91	20	594	840
	LSF16Ex25	16.0	145	791	91	25	594	840
	LSF16Ex30	16.0	145	786	91	30	593	840
IV	LSF20	20.0	150	675	75	0	658	888
	LSF20Ex20	20.0	150	655	75	20	657	888
	LSF16	16.0	150	844	94	0	499	888
	LSF16Ex20	16.0	150	824	94	20	498	888
	LSF14	14.0	150	964	107	0	386	888
	LSF14Ex15	14.0	150	949	107	15	385	888
	LSF14Ex20	14.0	150	944	107	20	385	888
	LSF14Ex25	14.0	150	939	107	25	385	888
	LSF12	12.0	150	1125	125	0	235	888
	LSF12Ex20	12.0	150	1105	125	20	234	888

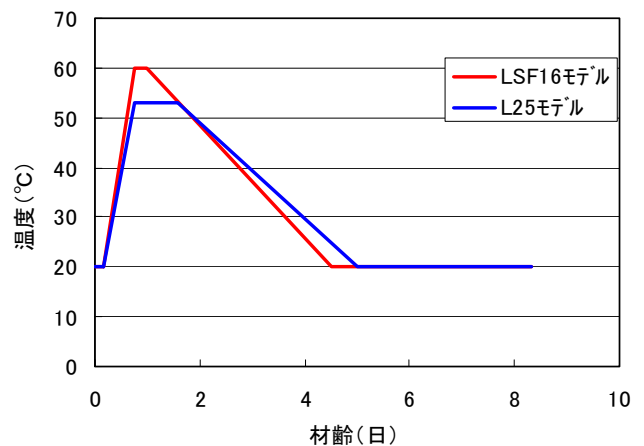


図-1 温度履歴

(4) 自己収縮ひずみ測定

自己収縮ひずみの測定は、文献1)に準拠して、100×100×400mmの型枠中心部に熱電対を備えた低弾性の埋込型ひずみゲージを埋め込んで測定した。基点は20℃養

生の場合は20℃における凝結始発時間とし、温度履歴供試体では打設直後と定めた。20℃養生の条件では凝結始発時間で型枠を緩め、また温度履歴供試体ではコンクリートと型枠の間に緩衝材を配置し、自由膨張を阻害しないようにした。また、JISA 6202 付属書 2（参考）拘束膨張および収縮試験方法（B法）による試験も行った。

3. 試験結果

(1) フレッシュ性状

試験シリーズⅠ～Ⅲではスランプフロー値が65±5cmの範囲内、シリーズⅣではスランプフロー値が70±5cmの範囲内のデータを用いてフレッシュ性状の評価を行った。膨張材添加時における高性能減水剤の使用量を、無添加のコンクリート（以下、プレーンコンクリート）の使用量に対する比として整理した結果を図-2に示す。この結果、シリカフュームを混入していないL25では、膨張材を添加することで混和剤使用量がわずかに減少する傾向がみられた。しかし、シリカフュームを混入したLSF16およびLSF14では、膨張材の添加量に応じて、同一スランプフローを得るのに必要な高性能減水剤の使用量が増加していく傾向にある。

次に、膨張材添加量とスランプフロー 50cm 到達時間（以下、50cm 到達時間）との関係を図-3に示す。L25では、膨張材を添加しても50cm 到達時間はプレーンコンクリートとほとんど変化がない。一方、LSF16やLSF14では、膨張材を添加すると50cm 到達時間は遅くなる傾向がみられるが、添加量と50cm 到達時間の関係については不明瞭であった。

L25では、膨張材を添加してもフレッシュ性状の変化はほとんど確認できなかったが、LSFシリーズでは混和剤使用量の増加や粘性の増大が確認できた。

(2) 圧縮強度

シリーズⅣにおける結合材水比と標準養生供試体強度との関係を図-4に示す。圧縮強度は材齢28日までは順調に増加しているが、それ以降の長期材齢での強度増加は小さく、材齢56日～91日では、圧縮強度の増加はほとんど認められなかった。結合材水比と圧縮強度の関係として、水結合材比14%までは、どの材齢でも結合材水比と圧縮強度の間に直線関係が成立しているが、水結合材比12%で得られた強度は14%とほとんど変わっていない。また、今回の実験の範囲では、圧縮強度は190N/mm²で頭打ちとなっており、骨材強度の限界に到達していると推察される。

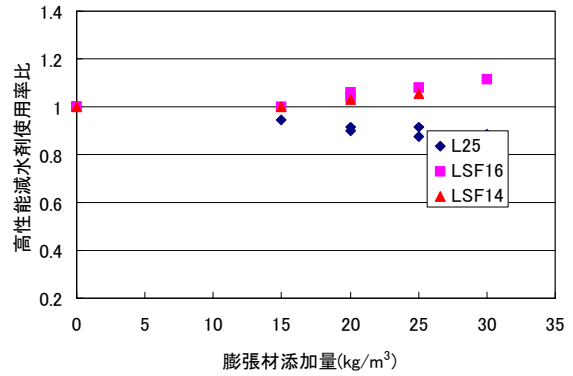


図-2 高性能減水剤使用量

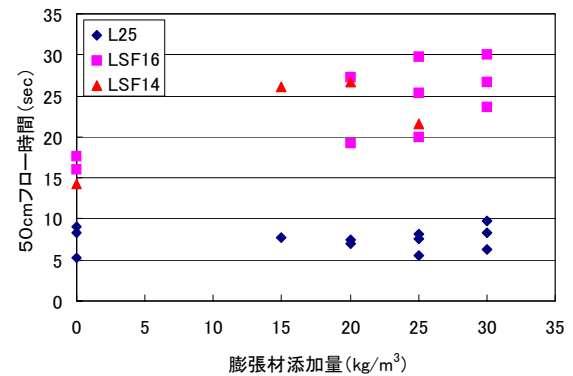


図-3 スランプフロー 50cm 到達時間

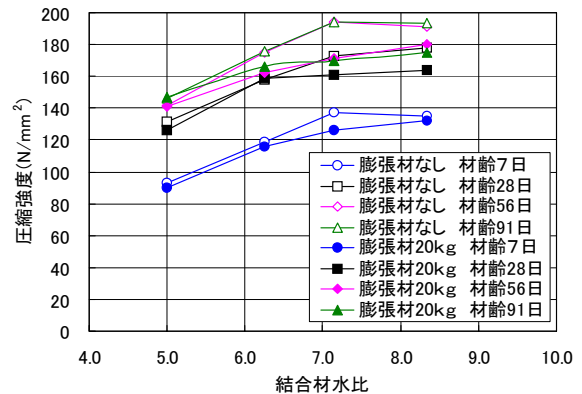


図-4 結合材水比と圧縮強度

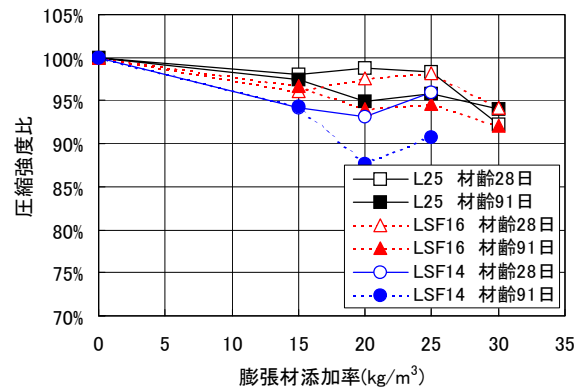


図-5 圧縮強度比

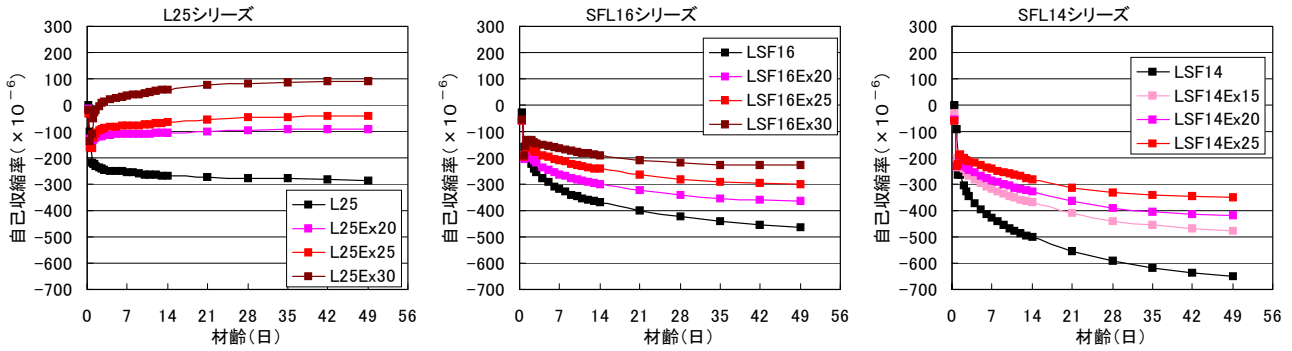


図-6 自己収縮ひずみ測定結果

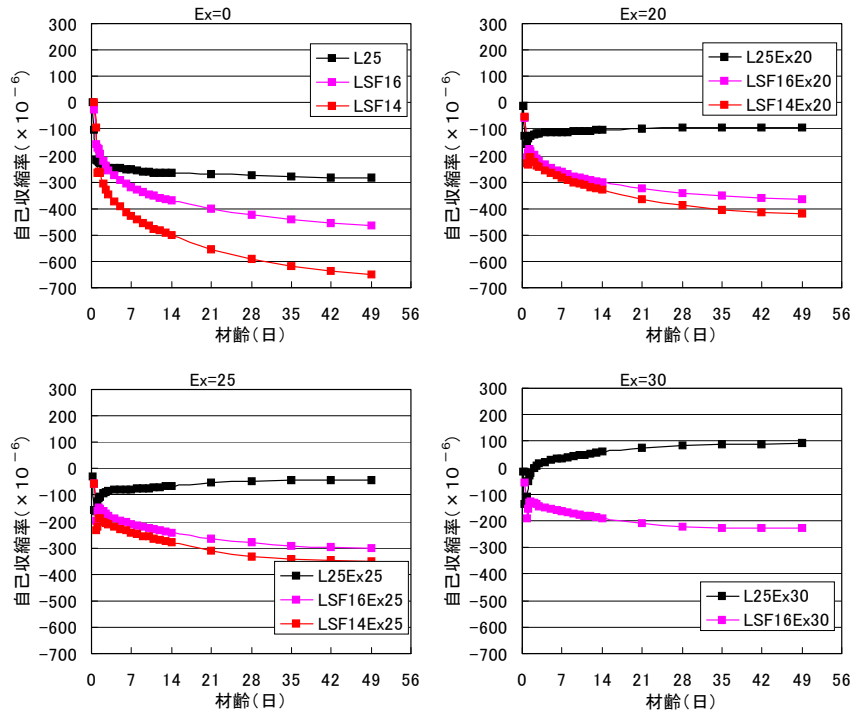


図-7 膨張材添加量と自己収縮ひずみ

プレーンコンクリートの強度を基準としたときの膨張材を添加したコンクリートの圧縮強度比を、膨張材添加量で整理した結果を図-5に示す。全体的に膨張材を添加したコンクリートの圧縮強度はその添加量に応じて強度が低下していく傾向がみられた。低下率は水結合材比により若干異なるものの、おおむね5%程度であった。

(3) 20℃養生での自己収縮

20℃養生での、自己収縮ひずみ測定結果を水結合材比ごとに図-6に示す。自己収縮ひずみは、L25では比較的速やかに進行し、材齢21日頃にはほぼ収束値まで到達しているのに対し、LSF16やLSF14では長期にわたって進行し、材齢49日でも収束する様子はみられない。膨張材の効果を検討すると、いずれのコンクリートであっても膨張材の添加量に応じて自己収縮が低減されていくことを確認できた。また、L25で膨張材を添加した場合は、

ごく初期における急激な収縮の進行の後は膨張する傾向を示し、添加量を30kg/m³とした場合は材齢3日以降は膨張側で推移した。

自己収縮ひずみを膨張材添加量で整理した結果を図-7に示す。膨張材の有無や膨張材の添加量にかかわらず、自己収縮ひずみはL25、LSF16、LSF14の順に大きくなり、水結合材比の低下に伴い収縮量は増大していくことを確認できる。今回の実験では、LSF16とLSF14との自己収縮ひずみの差は、プレーンコンクリートでは200×10⁻⁶程度あったが、膨張材を添加したコンクリートでは50×10⁻⁶程度にまで減少し、LSF14では膨張材を添加することによる自己収縮低減効果がより顕著にみられた。

(4) モデル温度履歴下での自己収縮

モデル温度履歴下における自己収縮ひずみの測定結果を図-8に示す。図中には、温度上昇による膨張を含むひ

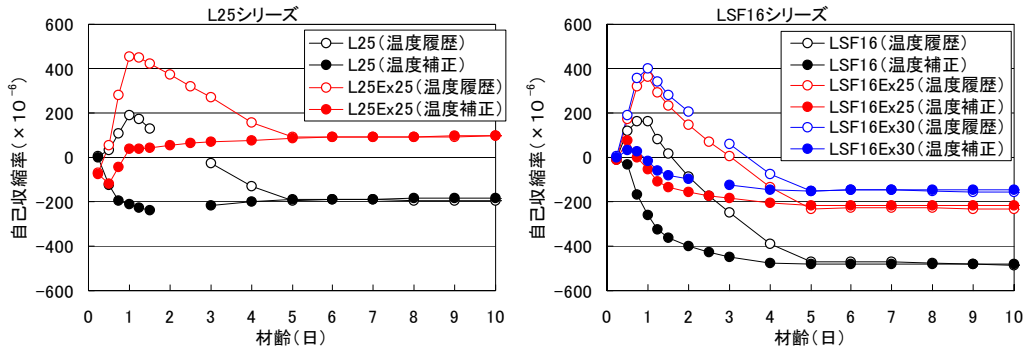


図-8 モデル温度履歴下のひずみ測定結果

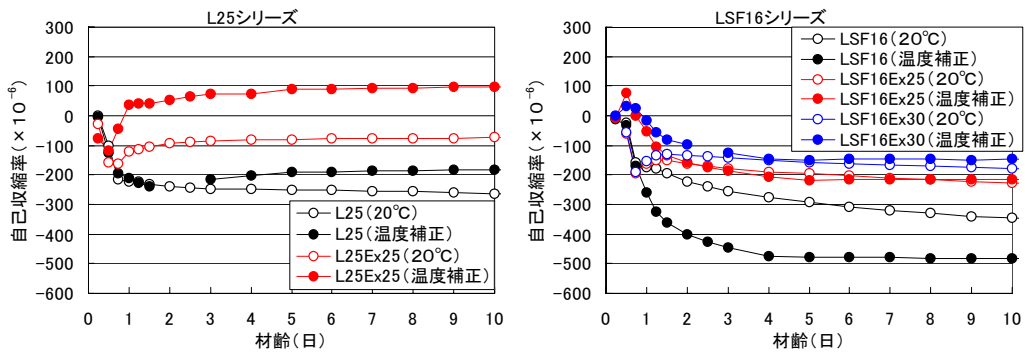


図-9 自己収縮ひずみの進行

ひずみ量の実測値と、コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定して膨張量を補正した値、すなわち自己収縮ひずみを示している。モデル温度履歴では初期にコンクリート温度が上昇しているため、初期材齢でのひずみ実測値は膨張側にあるが、温度補正を行い自己収縮ひずみを算出すると、自己収縮が進行している。なお、自己収縮ひずみはL25シリーズでは材齢1日で、LSF16シリーズであっても材齢4日まではほぼ収束値に到達している。なお、材齢5日以降は 20°C で養生しているため、実測値と補正值が一致している。

20°C 養生での自己収縮ひずみ測定値とモデル温度履歴を与えたときの補正自己収縮ひずみの算出結果を図-9に示す。L25シリーズでは、プレーンコンクリートは温度履歴の影響はあまりなくひずみの履歴はほぼ一致しているが、膨張材添加コンクリートではモデル温度履歴の初期膨張量が大きいため、 20°C 養生と異なり膨張側で推移している。LSF16シリーズでは、プレーンコンクリートはモデル温度履歴養生の自己収縮ひずみが急激に進行し、 20°C 封かん養生の自己収縮ひずみが徐々に追いついていく結果となった。一方、膨張材添加コンクリートではモデル温度履歴を与えるとごく初期にはわずかに膨張側を推移するが急激に収縮し、材齢5日あたりにおける自己収縮ひずみは 20°C 養生とほぼ同値となる。しかし、

温度履歴を与えた場合はその後の変化がごくわずかであるため、自己収縮が少しずつ進行していく 20°C 養生のほうが自己収縮ひずみが増加していく様子がみられた。

(5) 長期測定結果

自己収縮ひずみの長期測定結果を図-10に示す。L25では、プレーンコンクリートの 20°C 養生のみ長期材齢まで収縮が進行していくが、その他のコンクリートや養生条件では材齢30日程度で長さ変化はほぼ収束している。材齢91日で温度履歴による自己収縮ひずみ量の差を比較すると、モデル温度履歴は 20°C 養生に比べ、プレーンコンクリートで 200×10^{-6} 程度、膨張材 $25\text{kg}/\text{m}^3$ 添加では 300×10^{-6} 程度自己収縮ひずみが少ない。

LSF16では 20°C 養生の自己収縮ひずみは長期にわたり緩やかに進行し、特にプレーンコンクリートで顕著となっている。この中で、膨張材を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 添加したコンクリートでは材齢60日頃には自己収縮が収束し、その後は逆に膨張を始めるという遅れ膨張現象を示した。モデル温度履歴を与えた場合、初期の自己収縮ひずみは大きくなるがその後の収縮量は少なく、遅れ膨張を示した LSF16Ex30を除いて、長期材齢では 20°C 養生の自己収縮ひずみと比べて同等以下となる傾向が確認できた。

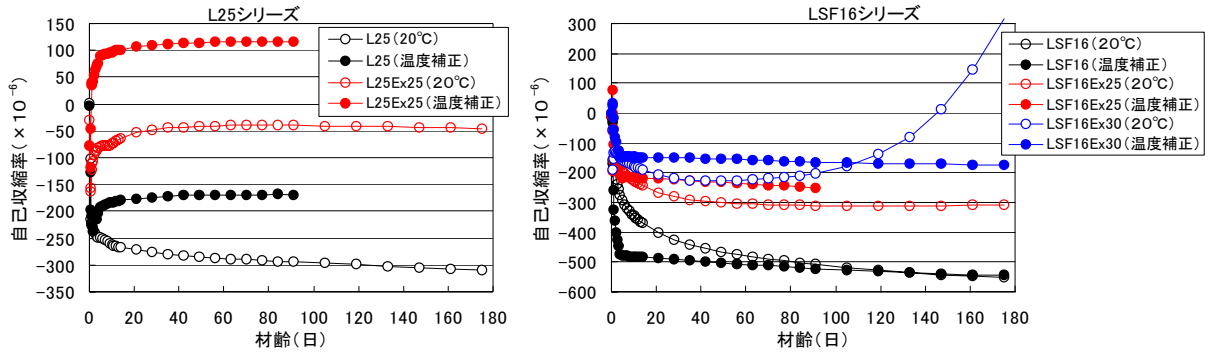


図-10 長期測定結果

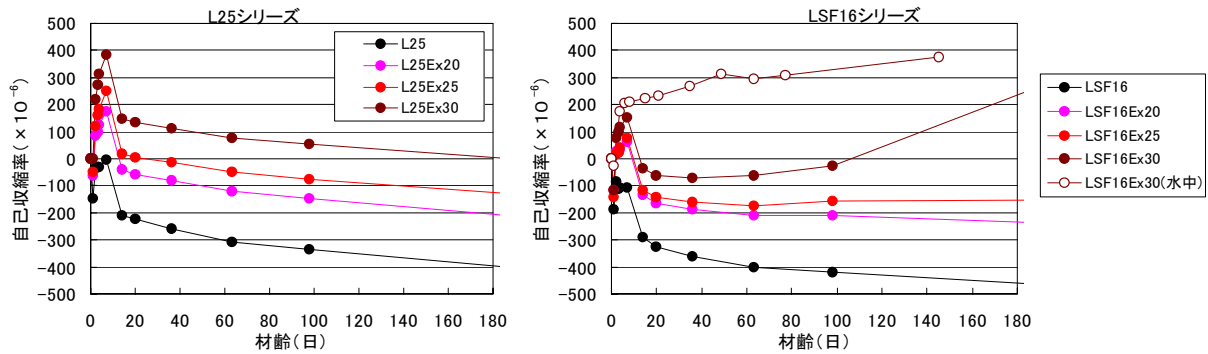


図-11 B法による試験結果

(6) B法による試験結果

B法による試験結果を図-11に示す。材齢7日まで標準養生をしているため、膨張材添加コンクリートでは初期に膨張するが、その後乾燥を与えると収縮側に移行する。この中で、LSF16Ex30では乾燥を与えても材齢100日以降になると遅れ膨張の傾向が確認できた。

確認された。

謝辞：本研究は、住友大阪セメント（株）との共同研究として行われたもので、実験の実施やデータのとりまとめに際して、鈴木康範氏、上原伸郎氏、嶋毅氏には多大なご尽力をいただきました。ここに謝意を表します。

4. まとめ

- 本論で得られた知見を以下にまとめる。
- ① 膨張材を添加した場合、L25ではフレッシュ性状に与える影響はほとんど確認できなかったが、LSF16やLSF14では膨張材を添加することで、化学混和剤の使用量の増加とコンクリート粘性の増加が認められた。
 - ② 膨張材を添加することで、いずれの結合材でも若干の強度低下が認められたが、添加量に応じて自己収縮の低減効果も認められた。
 - ③ 自己収縮はL25では比較的早期に収束するが、LSFシリーズでは長期においても徐々に自己収縮が進行した。
 - ④ 初期高温履歴を受けると、若材齢で急激に自己収縮が進行するが、長期的な収縮量は小さい。
 - ⑤ LSF16で膨張材を 30kg/m³ 添加すると遅れ膨張が

参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，1996.11
- 2) 寺澤貴裕ほか：シリカフェュームを用いた高強度コンクリートの収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.431-436, 2003
- 3) 田沢栄一ほか：自己収縮に及ぼすセメントの化学組成の影響，セメントコンクリート論文集，No.47, pp.528-533, 1993
- 4) 近松竜一ほか：高強度・高流動コンクリートの低収縮化に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.19, No.1, pp.169-174, 1997
- 5) 谷村 充ほか：高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.2, pp.991-996, 2000