

初期高温履歴を受ける超高強度コンクリートの 自己収縮特性および予測手法

Autogenous Shrinkage Properties of Ultra-High-Strength Concrete Subjected to Early Heat Curing and their Prediction Technique

松田 拓 TAKU MATSUDA
蓮尾 孝一 KOICHI HASUO

自己収縮特性の確認を目的として、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを混合した結合材 (LSF) を用いた設計基準強度 100~150N/mm²級のコンクリートの供試体を、実構造物を模擬した温度で養生した。

その結果、自己収縮ひずみの傾向は、最高温度で 45℃~60℃を超えると、それよりも低い温度で養生された場合と大きく差があることを把握した。また、これらの実験結果を既往の研究と比較することで、初期高温履歴条件下の LSF の自己収縮特性を明らかにした。筆者らは、LSF の自己収縮ひずみを最高温度と有効材齢を用い、従来の予測式を修正することで予測する手法を提案した。また、他の実験結果を用いて、提案手法の適用性を確認した。

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、シリカフェーム

Concrete with design strength of 100 to 150 N/mm² using low-heat portland cement and silica fume (LSF) was subjected to thermal histories simulated as actual structures to examine their autogenous shrinkage properties. The autogenous shrinkage properties were found to change significantly when T_{max} exceeded 45 to 60 degrees. Comparing these results with previous studies on portland cement, the authors clarified the autogenous shrinkage properties of LSF concrete and proposed a technique for their prediction by modifying conventional estimation. Furthermore, the applicability of the proposed method was verified by comparison with previous experiments.

Key Words: Ultra-High-Strength Concrete, Autogenous Shrinkage, Early Heat Curing, Silica Fume

1. はじめに

近年、設計基準強度 (F_c) で 150N/mm² 級の超高強度コンクリートが実用化され、200N/mm² を超えるコンクリートも研究されている。一方、鉄筋コンクリートに生じるひび割れが注目されており、建築材料の品質および施工条件などを予測・評価し、建築物の要求性能を確実に達成することが求められている¹⁾。コンクリートのひび割れの原因として、打設後の乾燥 (乾燥収縮)、水和反応による収縮 (自己収縮)、温度応力などが挙げられる。高強度コンクリートの自己収縮は初期材齢時の水和反応に伴う温度条件 (初期高温履歴) に大きく影響を受け²⁾、その程度は強度が高いほど大きい。このため超高強度コンクリートは初期ひび割れ発生の危険性が高く、その対策には自己収縮ひずみを定量化し、ひび割れ

の発生の有無を検証する必要がある。しかし、初期高温履歴と自己収縮の関係を定量的に評価した研究は少なく、水結合材比 (W/B) が 0.20 未満の領域では一般化された予測手法がない。

これまでに筆者らは、低熱ポルトランドセメント (L) にシリカフェーム (SF) を混入した結合材 (B) による $W/B=0.14\sim0.2$ の超高強度コンクリート ($F_c100\sim150N/mm^2$ 級) の実験により初期高温履歴が強度発現特性と自己収縮特性に及ぼす影響を確認し^{1), 3)}、初期高温履歴の最高温度 (T_{max}) が構造体コンクリート強度特性について支配的要因であることを示し、 T_{max} を取り入れたコンクリート力学特性の予測手法⁴⁾を提案している。

本研究では LSF を用いたコンクリートについて実験的検討を行い、自己収縮特性を明らかにした。さらに従来の自己収縮ひずみ式⁵⁾に T_{max} を取り入れ修正することで

初期高温履歴を受けたコンクリートの自己収縮ひずみを予測できることを示した。

2. 実験概要

(1) 実験の要因と水準

使用材料を表-1 に、コンクリート調合を表-2 にそれぞれ示す。表中の調合記号は、結合材 (B) の種類 (LSF) と W/B との組み合わせを表している。LSF14, 16, 20 は、それぞれ Fc150, 120, 100N/mm² を想定した調合である。試験水準は実構造物の初期高温履歴を考慮し、表-3 のように定めた。

(2) 自己収縮試験体の作製

コンクリートの練混ぜには容量 100L の強制 2 軸練りミキサを使用した。自己収縮試験体 (以下、試験体) は、「(仮) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法⁶⁾」に準拠して作製し、100×100×400mm の角柱の中心部に熱電対内蔵型の埋込み型ひずみ計を設置した。各試験体はコンクリート打設後に封かんにし、最高温度が 35℃以上の履歴を与える試験体は、あらかじめ温度を 20℃に制御された温度可変制御槽の槽内で養生した。また最高温度が 20℃の試験体は、20℃にした室内で養生した。

並行して同じ温度条件下で試験体と同バッチのコンクリートの凝結試験を行った。

(3) 試験体への初期高温履歴の与え方

試験体の養生には温度可変制御槽を用いた。試験体を 20℃で養生した後、凝結始発と同時に昇温を開始した。昇温速度は実構造物の測定結果⁴⁾を参考に、2.92℃/hr とした。各試験体を所定の温度に達した時点で 6 面周囲を断熱材で覆った養生箱に移設することで、コンクリート部材内部の温度履歴を再現した。また断熱型枠を使用した場合を想定した試験体 (以下、断熱模擬) は槽内に存置し、T_{max}=90℃到達後に温度を 0.25℃/hr の速度でゆっくりと温度を下げた。いずれの試験体も温度降下後は、各試験体材齢まで 20℃一定の雰囲気温度条件下に存置した。各コンクリートの温度履歴は、ほぼ計画どおりであった。自己収縮の測定は、LSF20, および LSF14 と LSF16 の T_{max}=45℃の試験ケースは材齢 420 日までとし、その他は材齢 600 日まで実施した。

3. 実験結果

(1) 全ひずみと温度の測定結果

材齢 *t* (日) における、コンクリート打設直後からの

表-1 使用材料

材料		諸物性
結合材 (B)	低熱ポルトランドセメント (LSF)	密度:3.24g/cm ³ ,比表面積:3310cm ² /g
	シリカフェューム (SF)	密度:2.26g/cm ³ ,比表面積:22.5m ² /g
細骨材 (S)		千葉県万田野山砂,表乾密度:2.63g/cm ³ ,FM:2.53
粗骨材 (G)		茨城県岩瀬産硬質砂岩砕石,表乾密度:2.65g/cm ³
化学混和剤 (SP)		ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表-2 コンクリート調合

調合記号	W/B	単位量[kg/m ³]				
		W	B=(L+SF)		S	G
			L	SF		
LSF14	0.14	150	964	107	386	888
LSF16	0.16	150	844	94	499	888
LSF20	0.20	150	675	75	658	888

表-3 試験水準

調合記号	練り上がり温度T ₀ [℃]	最高温度T _{max} [℃]						
		20	35	45	55	60	70	90
LSF14	20	○	-	○	-	○	-	○
LSF16		○	○	○	○	○	○	○
LSF20		○	-	○	-	○	-	○

各試験体の温度 $T(t)$ (℃) と全ひずみ $\epsilon(t)$ ($\times 10^{-6}$) の測定結果を図-1 に示す。図中には、凝結の始発と終結時刻を併記している。実構造物の初期高温履歴条件下の自己収縮ひずみを精度よく再現するためには、自己収縮実験において実際の水和発熱による温度上昇のタイミングを模擬することの重要性が指摘されている⁶⁾。今回の実験ではほとんどの試験体で温度可変制御槽の温度上昇を開始した凝結始発時刻付近で自己発熱が確認されており、温度上昇のタイミングは水和発熱の開始時期を模擬できていると考えられる。T_{max}=20℃の試験体の全ひずみは、材齢 1.5 日から材齢 100 日程度にかけ、材齢の対数に対してほぼ直線的な収縮挙動を示した。その他の試験ケースは温度上昇に伴い初期に膨張し、温度が T_{max} に到達以降収縮した。T_{max} が 60℃以上の試験ケースは、温度が T₀ に降下以降での収縮増進が非常に少なくなり、その傾向は T_{max} が高いほど顕著となった。温度が T₀ に降下後の $\epsilon(t)$ をみると、90℃断熱模擬試験体は T_{max} が同じ温度で断熱のない試験体よりも収縮量が大きい結果となった。

LSF14 について、全ひずみと温度との関係例を図-2 に示す。T_{max}=60℃および 90℃ (断熱模擬) の結果は、温度可変制御槽の温度を上昇させることで初期にコンクリート温度を上昇させた試験ケースの例である。また、T_{max}=20℃の結果は、練上がり温度が雰囲気温度よりも高いためにコンクリートが温度降下することで収縮し、その後自己発熱が確認された試験ケースの例である。T_{max}=60℃と 90℃ (断熱模擬) の全ひずみは、温度が T₀ に降下以降の収縮の増進が非常に少ない。温度降下後から材齢 600 日の両者の収縮量を比べると、T_{max}=60℃の

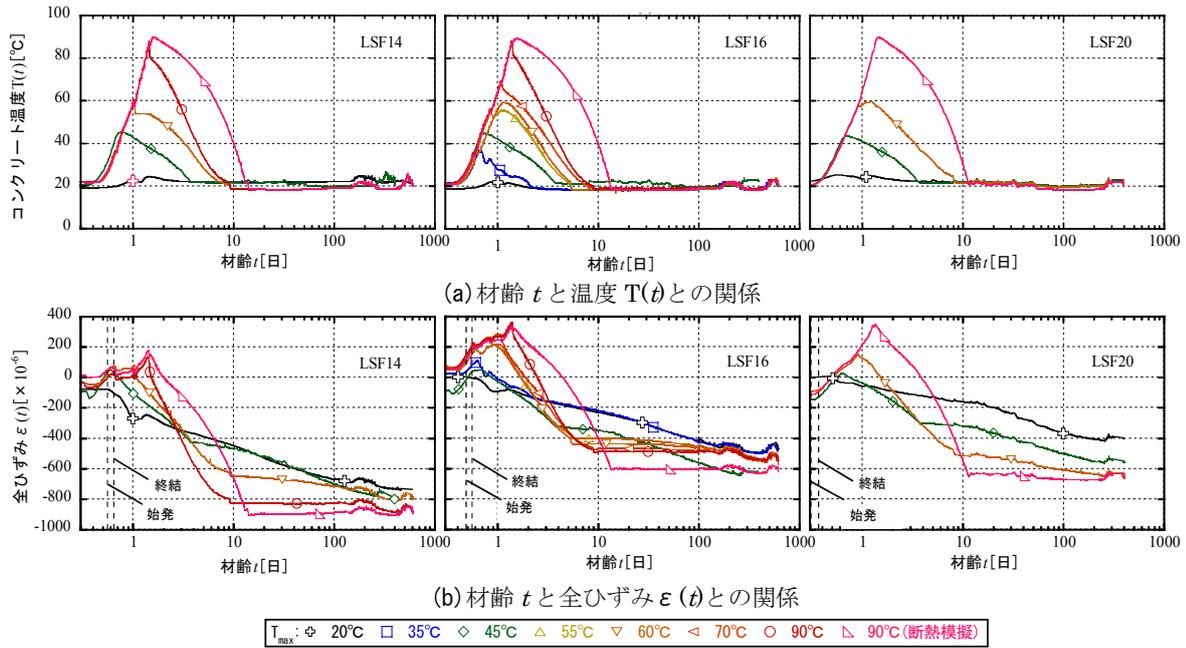


図-1 温度と全ひずみの測定結果

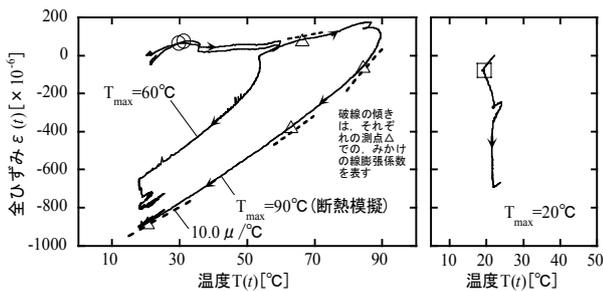


図-2 温度と全ひずみとの関係例

結果は -190μ 程度の収縮が認められるのに対し、 $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)の結果は収縮が認められない。このことから、 $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)の結果は温度が T_0 に降下時点で自己収縮がほぼ終了していると考えられる。また既報⁴⁾に示すように、 $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)の試験ケースは温度が T_0 に降下以降、圧縮強度も増進していない。これら傾向は、LSF16, 20にも共通であった。以上より初期高温履歴を受ける超高強度コンクリートの圧縮強度と自己収縮ひずみは、 $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)の温度履歴によりほぼ終局値が得られたと考えられる。

(2) 線膨張係数

図-2において、温度増分に対する全ひずみの増分は、自己収縮の影響を含んだ「見かけの線膨張係数⁸⁾」を表すと考えられる。 $T_{max}=60^\circ\text{C}$ および 90°C (断熱模擬)の見かけの線膨張係数は、自己収縮の影響を受けるため温度上昇過程の値は「真の線膨張係数」より小さく、温度降下過程での値は真の値より大きくなると考えられる。

また両者ともに T_{max} 到達以降に見かけの線膨張係数の値が徐々に小さくなることから、 T_{max} 到達以降で自己収縮の増進が徐々に小さくなることが確認できる。

$T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)で温度が T_0 に降下時点の接線の傾きは、この時点で自己収縮が停止していることより、真の線膨張係数 (以下、線膨張係数) を表すと考えられる。図中に示すように温度降下時点の接線の傾きは約 $10.0 \mu/^\circ\text{C}$ であったことから、以降の検討では全ひずみ測定値より線膨張係数を $10.0 \mu/^\circ\text{C}$ 一定として温度ひずみを差し引くことで自己収縮ひずみを求めた。コンクリートの線膨張係数は若材齢で大きく材齢に伴い減少し、一定値に収束することが示されており⁷⁾、線膨張係数の厳密な評価は自己収縮ひずみのより高精度な予測に重要である。しかし、温度応力解析の検討においては、実構造物の全ひずみの予測が重要であり、温度履歴と自己収縮の起点を適切に評価すれば、その温度に事前検討に用いた線膨張係数を適用して自己収縮ひずみを求め加算することで全ひずみを評価できる⁹⁾との観点から、今回はこのような整理を行った。

線膨張係数は W/B の低下に伴い若干増加することが知られ¹⁰⁾、本研究と同様の超高強度コンクリートについては一定値に収束した時点で $10 \mu/^\circ\text{C}$ を超える値が報告されている⁷⁾。今回得られた値は、既往の研究に比べ小さいが、今回の結果は温度変化幅が大きく、かつ温度降下時の値で、そのような場合の線膨張係数の測定値は温度上昇時の値よりも小さいとする実験結果¹¹⁾と符合しており、実現象を捉えていると考えられる。硬化コンクリー

トの線膨張係数が温度上昇と降下過程で異なることは、建物供用期間中の温度応力や耐火性能評価に留意すべき事項であり今後検討が必要と考える。

(3) 自己収縮ひずみの起点

図-2 で $T_{max}=60^{\circ}\text{C}$ および 90°C の結果をみると、全ひずみは温度上昇開始直後に膨張挙動を示すものの、 30°C 付近で見かけの線膨張係数が変化する変曲点 (○) が認められた。田澤¹²⁾はこの変曲点をコンクリートの凝結時に対応するとし、大友ら⁸⁾は自己収縮ひずみの起点としている。 $T_{max}=20^{\circ}\text{C}$ の結果をみると、コンクリート温度が降下後に温度膨張が開始する付近で見かけの線膨張係数が急変する変曲点 (□) が認められた。図-3 に材齢と全ひずみとの関係に、前述の変曲点 (○, □) を併記し示す。変曲点はいずれの試験ケースもほぼ同時期に現れており、全ひずみが収縮を開始する、または進行速度が急変する時点であった。そこで、本検討ではこのような変曲点を自己収縮ひずみの起点として取り扱うこととする。自己収縮の起点については、凝結始発とする考え方⁵⁾以外に、終結¹³⁾やそれ以降⁸⁾となることが報告されている。 B/W と自己収縮ひずみの起点 t_{e0} (日) と、凝結の始発・終結の確認された有効材齢 t_e (日) との関係を図-4 に示す。自己収縮ひずみの起点はばらつきが見られるが、平均値でみると既往の研究¹³⁾と同様に終結に近い結果となり、終結時の t_e と B/W との関係を用いて、式(1)が得られた。

$$t_{e0} = 0.132 \times B/W - 0.284 \quad (1)$$

(4) 自己収縮ひずみの測定結果

有効材齢 t_e での、各試験体の温度 $T(t_e)$ と自己収縮ひずみ $\epsilon_c(t_e)$ の測定結果を図-5 に示す。図中には凝結の始発と終結時刻を併記している。また図-5 中には、LSF14 の既報データ結果 (20°C 一定条件)²⁾の材齢 1,800 日までの測定結果を併記している。自己収縮ひずみの増進傾向は、 $T_{max} \leq 45^{\circ}\text{C}$ の試験ケース (以下、CASE-1) と、 $T_{max} \geq 60^{\circ}\text{C}$ の試験ケース (以下、CASE-2) に大別された。主な傾向として、以下が確認された。

- ① CASE-1 の $\epsilon_c(t_e)$ は有効材齢 1.5 日から 100 日程度にかけて有効材齢の対数に対してほぼ直線的な形で増進しており、有効材齢で統一的に表現できる。
- ② CASE-2 の $\epsilon_c(t_e)$ は、 $T(t_e)$ が $45 \sim 60^{\circ}\text{C}$ まで上昇した時点で CASE-1 から乖離して大きくなり、 $T(t_e)$ が T_0 に降下以降では増進が非常に小さくなる。
- ③ 温度が T_0 まで降下以降の $\epsilon_c(t_e)$ 増進は、 T_{max} が高いほど少なく、 $T_{max}=90^{\circ}\text{C}$ (断熱模擬) では増進が

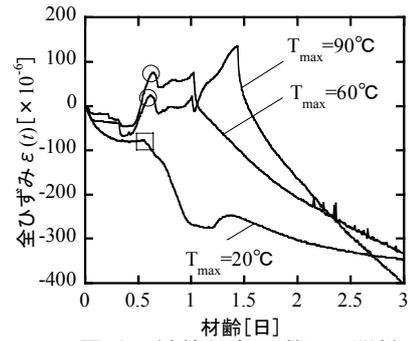


図-3 材齢と全ひずみの関係

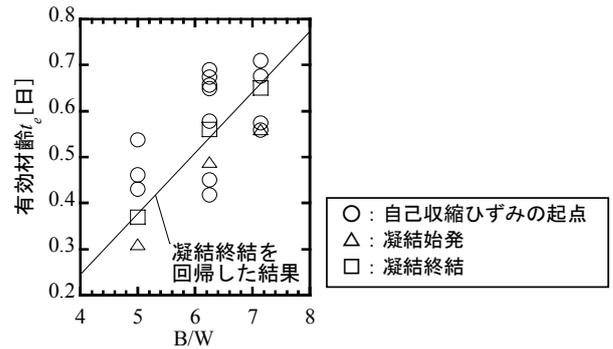


図-4 自己収縮ひずみの起点

見られない。

- ④ 長期材齢の結果をみると、CASE-2 の $\epsilon_c(t_e)$ は CASE-1 の $\epsilon_c(t_e)$ と同等になった以降は CASE-1 と同様の増進傾向を示す。

$\epsilon_c(t_e)$ と既報⁴⁾で示した強度 $f(t_e)$ (N/mm^2) と t_e との関係を、有効材齢 100 日の範囲で後述する回帰曲線と併せて図-6 に示す。ただし $\epsilon_c(t_e)$ の CASE-2 は、 $T(t_e)$ が T_0 まで降下する以前のデータを表示している。 $\epsilon_c(t_e)$ と $f(t_e)$ の特性は、 $T_{max}=45 \sim 60^{\circ}\text{C}$ を境に変化する点や、CASE-1, 2 それぞれの温度履歴範囲で t_e により統一的に表現できる点で同様であった。一方、CASE-2 の $f(t_e)$ が有効材齢 28 日以降ほぼ収束するのに対し、CASE-2 の $\epsilon_c(t_e)$ は温度が T_0 に降下するまで増進する点では、両者の特性は異なった結果となった。

(5) 考察

a) T_{max} による自己収縮特性の変化

伊藤ら¹⁴⁾は、異なる温度条件下で普通ポルトランドセメント (N) による $W/B=0.25$ のセメントペーストを養生し、細孔径分布と密度と結合水量の測定結果から $40 \sim 60^{\circ}\text{C}$ の間を境界として空隙組織構造が大きく変化することを示している。また菅俣ら¹⁵⁾は、高温環境でシリカフェーム自身の反応率が高まり硬化体組織が緻密になることで初期強度が著しく高くなることに加え、強度発現性には組織の緻密化以外の要因も関係していることを考察

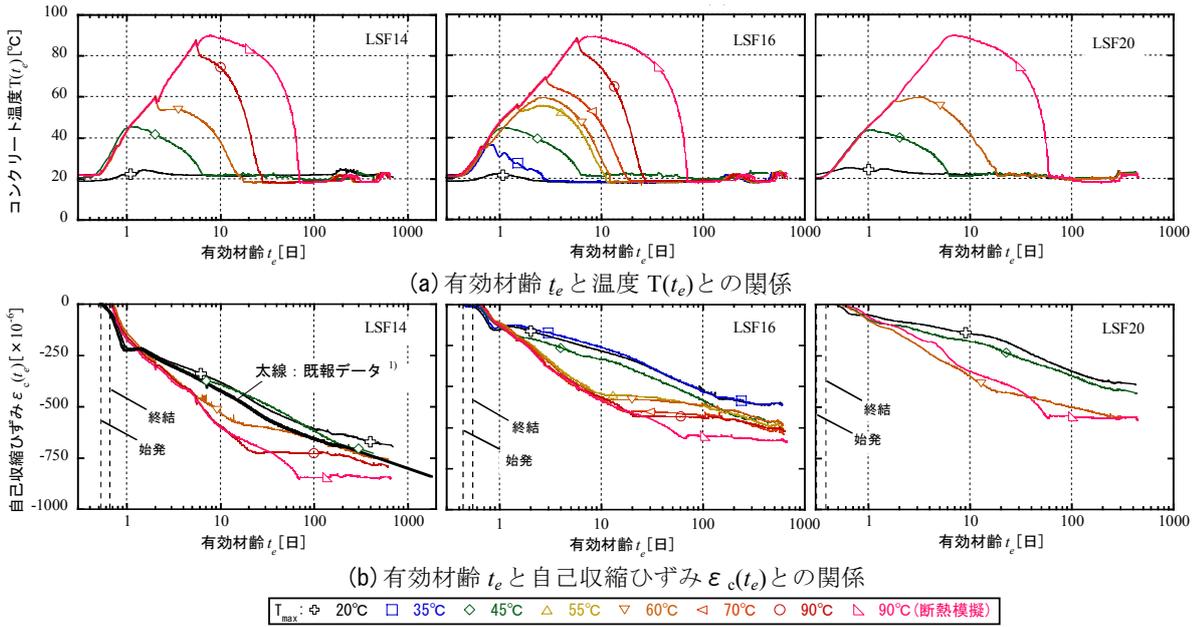


図-5 温度と自己収縮ひずみの測定結果

している。一方で筆者らは、超高強度コンクリートの長期クリープ特性について初期高温履歴を受けたものと受けていないものを比較し、載荷時圧縮強度が同等であっても前者のクリープひずみが後者の60%程度と非常に小さいことを確認している¹⁶⁾。これらのことと今回の実験結果を考察すると、結合材にLSFを使用したコンクリートは、 $T_{max}=45\sim 60^\circ\text{C}$ を境界としてセメント硬化体生成過程が変化し、強度・収縮・クリープそれぞれの特性が異なる空隙組織構造や水和物形態が生成されることが考えられる。従来、高強度コンクリートの強度や自己収縮への温度履歴の影響は、有効材齢 t_e などのマチュリティによる統一の評価が難しい場合があることが知られ²⁾、そうした場合の補正手法が提案されている^{2), 5), 7), 13)}。しかし、上述のように T_{max} により物性が顕著に変化するのであれば、異なる温度履歴の自己収縮ひずみすべてを统一的に扱うよりも温度履歴の範囲で場合分けして評価するほうが妥当であると考えられる。

CASE-2で温度が T_0 まで降下以降に停滞したことについても、 $T_{max}=45\sim 60^\circ\text{C}$ を境界としたセメント硬化体生成過程の変化が原因と考えられるが、 T_{max} が高くて保持時間が長いものほど温度降下までの間にシリカフェームが十分に反応するため、温度降下以降の自己収縮増進が少なくなると考えられる。これについてはポルトランドセメント系コンクリートの特性と併せ、後でも触れる。

図-5の $\varepsilon_c(t_e)$ をみると、有効材齢2日以前の初期材齢で顕著に増進することによる屈曲点が確認され、この時期以降CASE-1とCASE-2が乖離している。初期材齢時で屈曲点が確認される現象はこれまでも報告され⁷⁾、高

橋ら¹⁷⁾はセメント粒子同士が接触して強固な骨格を形成することに起因すると考察しているが、その機構は明らかとされていない。今回得られた傾向は、この時点の T_{max} のセメント硬化体生成過程への影響についてのメカニズムが将来解明されることで説明づけられると考えられる。

b) 長期材齢における自己収縮特性について

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ひずみが長期測定された報告はほとんどない。図-5のLSF14の結果では、 $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)の $\varepsilon_c(t_e)$ は有効材齢2,000日を超える長期材齢でCASE-1と交差すると推定できる。これ以降の傾向として、以下の4通りが考えられる。今後も測定を継続し確認する。

- ① 全試験ケースの $\varepsilon_c(t_e)$ 増進が停止して、終局値が $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)の結果と同じになる。
- ② CASE-1の $\varepsilon_c(t_e)$ は増進を続けるが、CASE-2の $\varepsilon_c(t_e)$ は増進が停止し終局値が $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)の結果と同じになる。
- ③ CASE-1と、 $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)を除くCASE-2の $\varepsilon_c(t_e)$ が同一曲線上で増進を続け、 $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)の $\varepsilon_c(t_e)$ は停止したまま。
- ④ $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬)の $\varepsilon_c(t_e)$ も増進を開始し、全試験ケースの $\varepsilon_c(t_e)$ が同一曲線上で増進する。

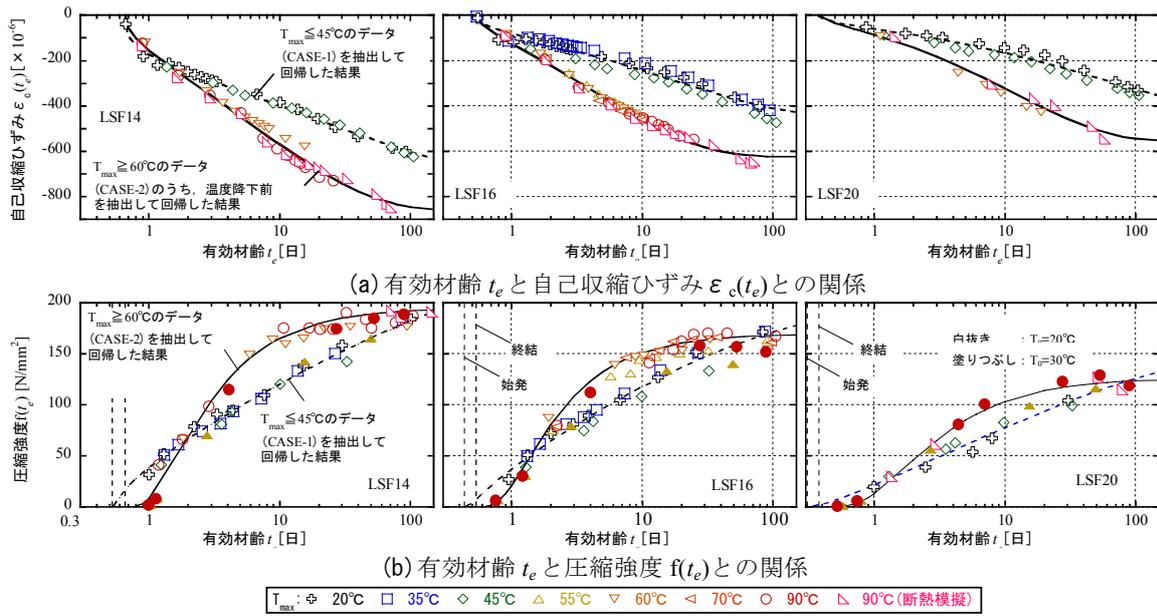


図-6 有効材齢と自己収縮ひずみおよび圧縮強度との関係

4. 自己収縮特性と予測手法の検討

(1) 既往の予測手法

ここでは初期高温履歴を受けるポルトランドセメントの自己収縮特性を整理し、従来予測式の適用性を確認する。次に今回の実験値より従来予測式中の各係数を求め、LSF すなわち低熱ポルトランドセメントにシリカフェームを添加した結合材の特性を考察する。併せて LSF への従来予測式の適用性を検討する。

代表的な従来予測式に、マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008⁵⁾の予測式 (JCI 予測式) (2)~(5)が挙げられる。自己収縮ひずみ $\epsilon_c(t_e)$ は、速度定数 a と b 、補正係数 γ 、終局値 $\gamma \epsilon_{c0}$ を定めることで与えられる。JCI 予測式は、 T_{max} が高くなると自己収縮が若干大きくなるように、式(3)第二項に T_{max} を取り入れているが、進行速度を表す a 、 b は式(5)のように T_{max} によらず与えている。また、普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種以外の結合材については、実験データが十分でなく、適用性が低下する可能性が付記されている。

$$\epsilon_c(t_e) = \gamma \epsilon_{c0} \beta(t_e) \quad (2)$$

$$\epsilon_{c0} = 3070 \exp\left\{7.2(W/B)\right\} + 50 \times \left[1 - \exp\left\{1.2 \times 10^{-6} \times (T_{max} - 20)^4\right\}\right] \quad (20^\circ\text{C} \leq T_{max} \leq 70^\circ\text{C}) \quad (3)$$

$$\beta(t) = 1 - \exp\left\{-a(t_e - t_{c0})^b\right\} \quad (4)$$

$$a = a_1 \exp\left\{a_2(W/B)\right\}, \quad b = b_1 \exp\left\{b_2(W/B)\right\} \quad (5)$$

ここに、普通ポルトランドセメント (N) の場合：

$$\gamma = -1.0, \quad a_1 = 3.7, \quad a_2 = -6.8, \quad b_1 = 0.25, \quad b_2 = 2.5$$

低熱ポルトランドセメント (L) の場合：

$$\gamma = -0.4, \quad a_1 = 2.4, \quad a_2 = -6.5, \quad b_1 = 0.12, \quad b_2 = 2.7$$

(2) 自己収縮特性と JCI 予測式の修正検討

a) ポルトランドセメントの検討

ここでは既往の研究を引用し、初期高温履歴を受けるポルトランドセメントの自己収縮特性を考察し、JCI 予測式の適用性を検討する。

低熱ポルトランドセメント (L) について、 $W/B = 25\%$ 、 $T_{max} = 20^\circ\text{C}$ と 60°C とした上原らの結果¹⁸⁾ (表-4 中の L25) から、3.(2)、3.(3)の手順で自己収縮ひずみを求めた結果を図-7 に示す。図中には JCI 予測式による推定値を併記した。 $T_{max} = 20^\circ\text{C}$ と 60°C の結果は、 $T_{max} = 60^\circ\text{C}$ の温度が T_0 に降下するまでの範囲で、有効材齢で統一的に評価できる。しかし温度降下以降、 $T_{max} = 20^\circ\text{C}$ の結果は緩やかに増進するが、 $T_{max} = 60^\circ\text{C}$ の結果は増進が停滞し、緩やかに膨張挙動を示した。JCI 予測式と比較すると、 $T_{max} = 20^\circ\text{C}$ と $T_{max} = 60^\circ\text{C}$ の結果ともに有効材齢 1 日付近で差異がみられる (これについては 4.(3). b) で考察する) が、それ以降では $T_{max} = 20^\circ\text{C}$ の結果は長期材齢まで、 $T_{max} = 60^\circ\text{C}$ の結果は温度降下までの範囲で対応が良い。ただし $T_{max} = 60^\circ\text{C}$ の値は $T_{max} = 20^\circ\text{C}$ の値よりも大きくはなく、式(3)第二項の補正が必要な結果とはなっていない。また橋田ら¹⁹⁾ は、初期高温履歴を受ける普通ポルトランドセメント (N) および高ピーライト系ポルトランドセメントを用

表-4 実験データの回帰

調査	LSF14		LSF16		LSF20		L25	
温度履歴の範囲	CASE		CASE		CASE		CASE	
CASE-1 : $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$	-1	-2	-1	-2	-1	-2	$T_{max} = 20^\circ\text{C}$	$T_{max} = 60^\circ\text{C}$
CASE-2 : $T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$								
t_{e0} [日]	0.66		0.54		0.38		0.45	
$\gamma \varepsilon_{c0} [\times 10^{-6}]$	-752	-871	-465	-626	-489	-562	-239	-228
a	0.37	0.34	0.27	0.35	0.16	0.22	0.89	0.73
b	0.32	0.51	0.45	0.60	0.42	0.60	0.24	0.25
R^2	0.99	0.99	0.98	0.99	0.97	0.98	0.93	0.91

表-5 各係数の設定方法

各係数の設定方法	γ	T_{max} の範囲 $[\text{C}]$	
		$T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$	$T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$
a		式(6)による	
b		式(8)による	式(10)による
t_{e0}		式(1)による	

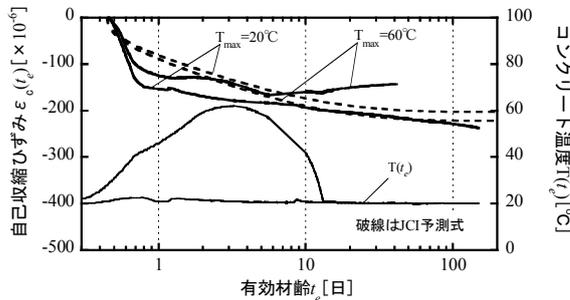


図-7 L25¹⁸⁾の自己収縮ひずみと温度

いた高強度コンクリートの自己収縮ひずみを測定している。その結果、 T_{max} 付近までは初期高温履歴の影響を有効材齢で統一的に表現できるが、温度降下以降では初期高温履歴を受けたものが早期に収束し、前述の L25 と同様な傾向を示したことを報告している。一方、温度降下後の停滞もしくは膨張挙動はこれまでも報告されており^{7),13),20)}、全ひずみから自己収縮ひずみを算出する際に線膨張係数を徐々に大きく設定することでこのような挙動とならない例が示されている¹³⁾。しかし、L25 の線膨張係数は温度降下時の実測値から求めており、温度降下以降の試験体の養生条件は 20°C 封かんで温度変化していないことから、停滞もしくは緩やかな膨張挙動は実際に観測されたと考えられる。早野ら²⁰⁾は、ポルトランドセメント系コンクリートの一軸拘束試験体の鉄筋ひずみから収縮応力低下という形で同様の傾向を示し、X 線回折と SEM 観察により初期高温履歴の水和生成物への影響を調べているが、現象の解明には至っていない。しかし、初期高温履歴を受けることで自己収縮が停滞することは LSF にも見られた傾向であり、こうした取り組みは初期高温履歴の影響メカニズム解明に重要と考えられ、対象を LSF まで広げ今後実施する予定である。

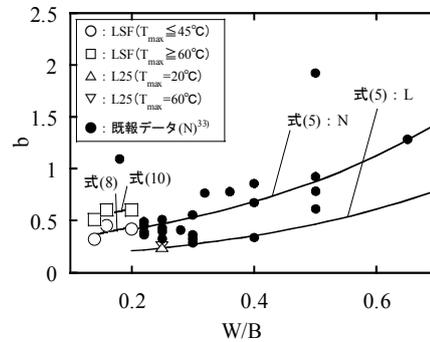
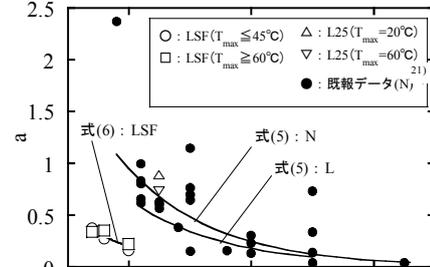
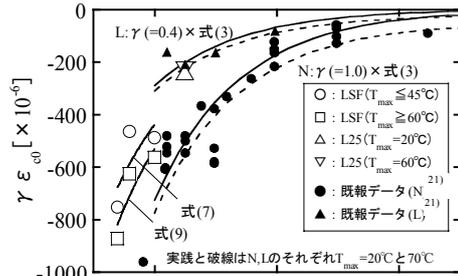


図-8 JCI 予測式の各係数と W/B との関係

以上より、ポルトランドセメントを用いたコンクリートの自己収縮特性は、以下のように考えられる。

- ① 温度が T_0 に降下するまでは初期高温履歴の有無に関わらず、有効材齢で統一的に表現できる。
- ② 初期高温履歴を受けると温度降下後の増進が停滞する。

また、JCI 予測式は L (低熱ポルトランドセメント) にも適用可能であることがわかった。ただし JCI 予測式を用いる場合には、初期高温履歴を受ける場合の式 (3) 第二項の補正の必要性和、温度降下以降の収縮停滞が表現されていない点に留意が必要である。

b) シリカフュームを添加した結合材を含めた検討

LSF について図-6 に示したデータ範囲を $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$ と $T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$ に分類し抽出し、式(3)の第一項および式(4)の形で回帰分析することで、各係数 $\gamma \varepsilon_{c0}$ 、 a 、 b を求めた。また L25 については、 t_{e0} には実測値を用い、 $T_{max} = 20^\circ\text{C}$ と 60°C の結果それぞれについて LSF と同様のデータ整理を行った。ただし、L25 ($T_{max} = 60^\circ\text{C}$) の結果は温度降下以前のデータのみを用いた。LSF の回帰曲線を図-6 (a) に、LSF と L25 の回帰分析結果を表-4 に

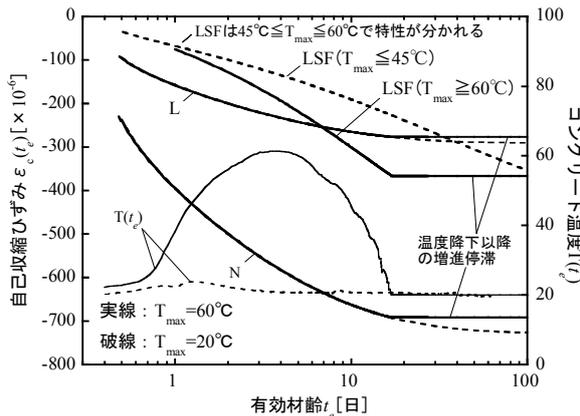


図-9 自己収縮ひずみの算定例 (W/B=0.2)

示す。図-8は各係数のW/Bとの関係を示しており、LSFについて後述する回帰曲線を示している。図-8中には、川合・宮澤らのNとLについての実験結果²¹⁾と、N、LについてのW/Bとの関係式⁵⁾を示している。L25の結果をみると、 $\gamma_{\epsilon_{c0}}$ 、a、bいずれも $T_{max}=60^{\circ}\text{C}$ の結果と 20°C の結果がほぼ同じであり、おおむねJCI予測式の関係式上にあった。LSFの結果をみると、NおよびLとはW/Bの範囲が異なるものの $\gamma_{\epsilon_{c0}}$ はNとLの中間的な値を示している。aは T_{max} の違いによる差異がなく、N、Lより小さい値となった。aの値は小さくなると長期材齢にかけ緩やかに自己収縮が増進する特性を表すことから、LSFはポルトランドセメントに比べてこの傾向が強いと考えられる。bは $T_{max} \geq 60^{\circ}\text{C}$ の場合が $T_{max} \leq 45^{\circ}\text{C}$ の場合より大きく、 $T_{max} \leq 45^{\circ}\text{C}$ はNの関係式の延長にあった。これらの傾向は、実験データのばらつき範囲を考慮してもLSFの自己収縮特性を表すものと考えられる。

次に γ とbは $T_{max} \leq 45^{\circ}\text{C}$ と $T_{max} \geq 60^{\circ}\text{C}$ それぞれの範囲のデータを用い、一方でaはLSFの $T_{max} \leq 45^{\circ}\text{C}$ と $T_{max} \geq 60^{\circ}\text{C}$ 両方のデータを用い、JCI予測式の形で回帰してW/Bとの関係式(6)~(10)を得た。

$$a = 1.51 \times \exp\{-10 \times (W/B)\} \quad (6)$$

CASE-1($T_{max} \leq 45^{\circ}\text{C}$):

$$\gamma_{\epsilon_{c0}} = -0.61 \times 3070 \exp\{-7.2(W/B)\} \quad (7)$$

$$b = 0.24 \times \exp\{3.1 \times (W/B)\} \quad (8)$$

CASE-2($T_{max} \geq 60^{\circ}\text{C}$):

$$\gamma_{\epsilon_{c0}} = -0.73 \times 3070 \exp\{-7.2(W/B)\} \quad (9)$$

$$b = 0.40 \times \exp\{2.2 \times (W/B)\} \quad (10)$$

以上の検討より γ 、a、bに式(6)~式(10)の形で T_{max} を取り入れ修正することで、JCI予測式の適用範囲をLSFのW/B=0.14~0.20まで拡張することができた。各係数の与え方を表-5に示す。図-8においてLSF、N、L

表-6 試験データ概要

試験体記号	W/B	T ₀ (°C)	T _{max} (°C)	試験体形状	養生条件	試験 シリーズ
14-20-20	0.14	20	20	□-100mm× 100mm×400mm	温度可変制御槽内で封かん	既報 ²⁾
14-30-90		30	90			
14-30-20		30	20			
14-30-55		30	55			シリーズ1
14-30-70		30	70			
16-20-20	0.16	20	20	□-500mm× 500mm×400mm	6面を断熱し封かん	既報 ²⁾
16-20-60		20	60			
16-30-90		30	90			
16-20-20		20	20			シリーズ2
20-30-55		30	55			
20-30-90	0.20	30	90	□-100mm× 100mm×400mm	温度可変制御槽内で封かん	シリーズ2
20-30-90D		30	90			

※シリーズ1は実機試験

それぞれのデータのあるW/B=0.20における算定結果を図-9に示す。図中には、初期高温履歴($T_{max}=60^{\circ}\text{C}$ 、 20°C)の例を併記している。ただしN、Lについては式(3)の第二項を考慮していない。また初期高温履歴を受ける場合($T_{max} \geq 60^{\circ}\text{C}$)については、傾向をわかりやすく捉えることを目的とし、温度が T_0 に降下以降の増進がないものとして表記している。LSFの自己収縮特性は、以下のように考えられる。

- ① T_{max} が $45 \sim 60^{\circ}\text{C}$ までは初期高温履歴によらず有効材齢で評価できる。
 - ② T_{max} が $45 \sim 60^{\circ}\text{C}$ を超えると増進速度が速くなる。
 - ③ $T_{max} \leq 45^{\circ}\text{C}$ では長期材齢にかけ増進するが、 $T_{max} \geq 60^{\circ}\text{C}$ では温度が T_0 に降下以降の増進が停滞する。
- また、結合材ごとの差異は、以下のように考えられる。
- ④ 初期材齢の増進速度は、 $N > L > \text{LSF}$ だが、LSFは $T_{max} \leq 45^{\circ}\text{C}$ の場合に長期にかけ増進しLよりも大きくなる。
 - ⑤ T_{max} が 60°C を超えるとLSFの増進速度はNと同等かそれ以上となる。

④の傾向はこれまでも報告されており²²⁾、高温環境でないことからシリカフェームの反応率が低く、長期にかけポズラン反応が緩やかに進行することが考えられる。また⑤については、 T_{max} が $45 \sim 60^{\circ}\text{C}$ を超えるとシリカフェームの反応率が高まる¹⁵⁾ために増進速度が速くなることが考えられる。

(3) 提案手法の適用性の検証

a) 推定値と実測値との比較

別途に実施した自己収縮ひずみ測定結果を用い、提案手法の適用性を検証する。検証に用いた試験データの概要を表-6に示す。試験シリーズには既報¹⁾データに加えて、別途実施した実機試験および追加実施した室内試験

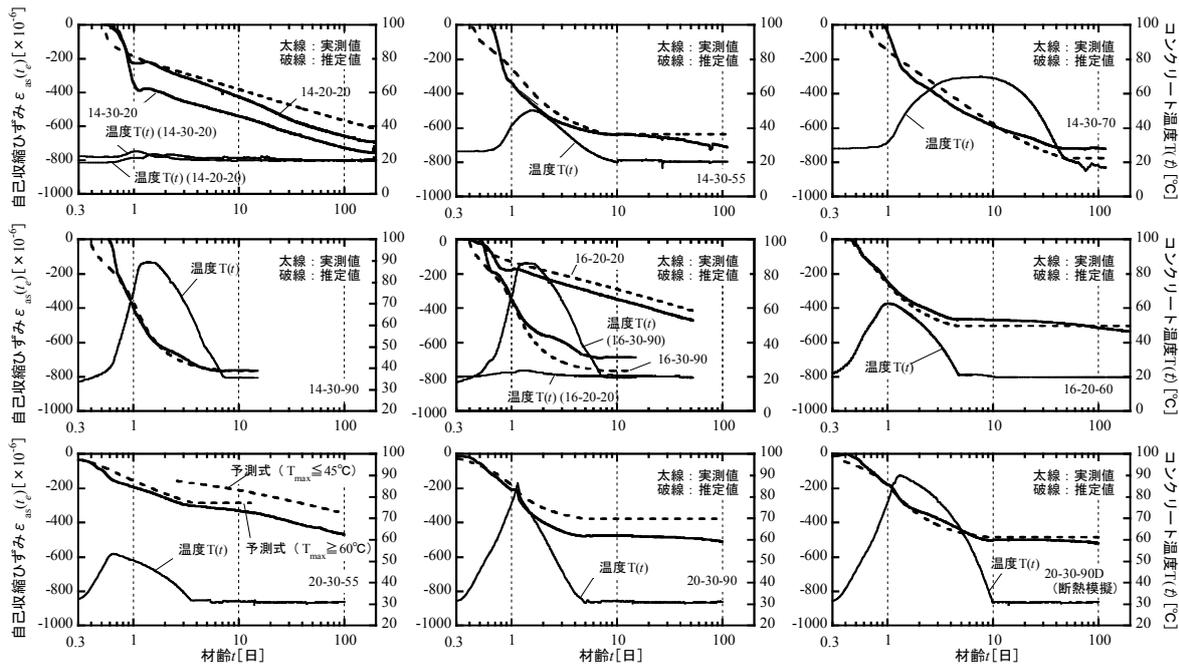


図-10 自己収縮ひずみとコンクリート温度

が含まれる。室内試験の試験体寸法および試験手順は今回の手法と同じであるが、練上り温度を 30℃としたケースが含まれる。また試験体 14-30-70 は、 $\square 500 \times 500 \times 400\text{mm}$ のマスブロックの 6 面周囲を厚さ 200mm の断熱材で覆い、中心部に熱電対内蔵型の埋込み型ひずみ計を設置したものである。各試験体の測定期間は、一部を除き材齢 100 日程度までである。

それぞれの試験体の全ひずみと温度測定結果より、自己収縮ひずみ $\epsilon_c(t_c)$ の起点を 3. (3) の手法で求め、温度の実測値より線膨張係数を $10.0 \mu / \text{°C}$ として温度ひずみを求め全ひずみより差し引くことで、自己収縮ひずみを算出した。ただし $T_{max} \geq 60\text{°C}$ の試験ケースは温度降下以降の自己収縮ひずみを一定値とした。 $\epsilon_c(t_c)$ と温度 $T(t)$ の実測値および $\epsilon_c(t_c)$ 推定値と、材齢 t との関係を図-10 に示す。また $\epsilon_c(t_c)$ 推定値と実測値との関係を、推定値 $\pm 20\%$ の破線と併せ図-11 に示す。

$T_{max} \leq 45\text{°C}$ の試験体の結果を見ると、14-20-20 と 16-20-20 の推定値と実測値はよく対応し、実測値は初期材齢から長期材齢にかけて推定値のおおむね $\pm 20\%$ の範囲にあった。また 14-30-20 では材齢 1 日以前の増進が 14-20-20 に比べその 2 倍程度と大きく、そのために実測値は推定値の $\pm 20\%$ の範囲を外れるが、それ以降の増進量は 14-20-20 とほとんど変わらなかった。 $T_{max} \geq 60\text{°C}$ の試験体の結果を見ると、16-20-60 の推定値が実測値と非常に良く一致している。練上り温度 $T_0 = 30\text{°C}$ であるその他の試験ケースは、自己収縮ひずみの起点の材齢が推定値より遅れたが、自己収縮開始直後の進行速度が推定値よ

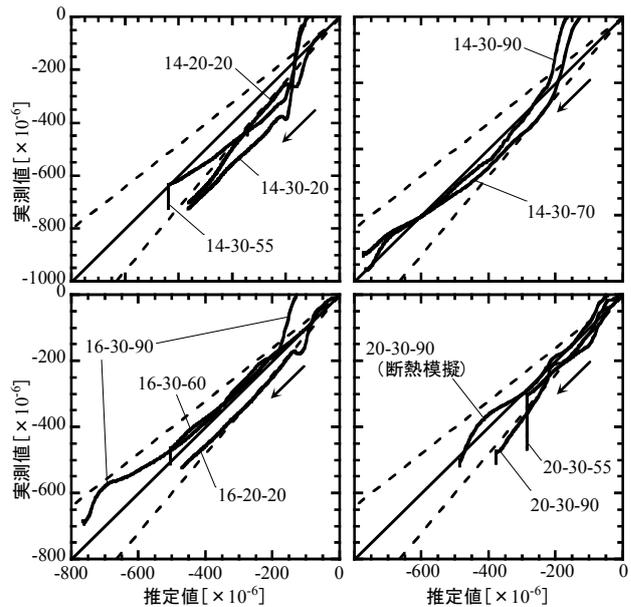


図-11 自己収縮ひずみの推定値と実測値との関係

り速く実測値は材齢 1.5 日以内に推定値と同等となった。また、それ以降は推定値とよく対応し、おおむね $\pm 20\%$ の範囲にあった。各試験ケースとも、温度降下以降についても自己収縮ひずみを一定値として求めた部分の推定値は実測値と良好に対応した。また、マスブロック試験体である 14-30-70 の結果も、推定値と実測値との関係は他と同様であった。 $45\text{°C} \leq T_{max} \leq 60\text{°C}$ である 20-30-55 をみると、温度降下までは $T_{max} \geq 60\text{°C}$ の推定値の適用性が高く、温度降下以降の増進は $T_{max} \leq 45\text{°C}$ の推定値の適用性が高い結果となった。これより $45\text{°C} \leq T_{max} \leq 60\text{°C}$

の場合の自己収縮ひずみは、温度降下前後で $T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$ と $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$ の予測式を使い分けることで予測できると考えられる。

b) 考察

図-7 に示した L25 の結果を含め推定値と実測値とを比較すると、自己収縮ひずみの起点から初期の屈曲点にかけての乖離がある試験ケースがみられる。この原因として、自己収縮ひずみの測定誤差や、自己収縮ひずみの起点が化学混和剤使用量や練上り温度に依存することが考えられる。JCI の調査結果²³⁾によると、材齢 1 日以前の測定値に 200μ に及ぶばらつきが報告されている。また練上り温度が異なる場合には化学混和剤の使用量を調整して所要のフレッシュ性状を確保するために、凝結性状が変化する。自己収縮ひずみの起点を有効材齢で厳密に評価しようとしても、ある程度のばらつきは避けられない。このことは強度の起点についても凝結始発²⁴⁾、終結¹³⁾、もしくはそれ以降¹²⁾と見解が一致していないことから説明される。一方コンクリートは硬化体の骨格が形成され、剛性がある程度高くなるまではヤング係数が小さく、クリープやリラクセーションの影響が大きいため、初期材齢の自己収縮ひずみを拘束しても応力増大には寄与しない。早野ら²⁵⁾は、可変式拘束応力試験機 (VRTM) を用いた擬似完全拘束試験結果から、 $W/B=0.2$ までの高強度コンクリートについて、自己収縮ひずみ 100μ 程度までは拘束応力が発生しないことを示している。また今回の結果では、いずれの試験ケースも屈曲点以降の推定値と実測値それぞれの増分はほぼ一致している。このことに自己収縮ひずみの初期測定値のばらつきを勘案すると、本提案手法による自己収縮応力算定は十分可能と考えられる。今後、自己収縮応力の発生時期の評価について検討していく必要があると考えられる。また今回の検討は練上り温度 $T_0=20\sim 30^\circ\text{C}$ の範囲で実施したが、 $T_0=10^\circ\text{C}$ の低温時に自己収縮ひずみが大きくなる報告⁷⁾があることから、本手法を冬期施工に適用する場合は別途確認が必要である。

5. まとめ

初期高温履歴条件下の、低熱ポルトランドセメントにシリカフェームを混入した結合材 (LSF) を用いた超高強度コンクリートの自己収縮特性およびその推定手法について、本研究で得た知見を示す。

- ① 全ひずみの測定結果より線膨張係数と自己収縮の起点を求めて、自己収縮ひずみを算定する手順を示した。

- ② LSF の自己収縮特性は、初期高温履歴における最高温度 $T_{max}=45\sim 60^\circ\text{C}$ を超えることで顕著に変化し増進が速くなる。
- ③ 自己収縮ひずみは、 $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$ の場合は長期材齢にかけて、 $T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$ の場合は温度が降下するまで、それぞれの温度履歴の範囲で有効材齢 t_e (日) で統一的に評価できる。
- ④ $T_{max} \geq 60^\circ\text{C}$ の自己収縮ひずみは温度降下以降の増進が非常に小さくなり、その程度は T_{max} の高いものほど大きい。かつ長期材齢で $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$ の自己収縮ひずみと同等になった以降は、 $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$ の自己収縮ひずみと同様の増進傾向を示す。また、 $T_{max}=90^\circ\text{C}$ (断熱模擬) の温度履歴により終局値が得られた。
- ⑤ 今回の自己収縮ひずみ測定結果と既往の研究および既往の強度・長期クリープ測定結果より、初期高温履歴を受けることでセメント硬化体生成過程が変化し、強度・収縮・クリープの特性が異なる組織骨格が生成されることが考えられる。
- ⑥ 初期材齢における自己収縮増進速度は、普通ポルトランドセメント (N)、低熱ポルトランドセメント (L)、LSF の順で大きい。LSF の自己収縮は $T_{max} \leq 45^\circ\text{C}$ の場合に長期にかけて増進し、L よりも大きくなる。また T_{max} が 60°C を超えると LSF の増進速度が最も速くなる。
- ⑦ 自己収縮ひずみ予測について、JCI の予測式を T_{max} が 45°C 以下と 60°C 以上に分けてそれぞれ修正することで、LSF を用いた超高強度コンクリートの自己収縮ひずみ挙動を予測できることを示し、他の実験結果を用いてその適用性を確認した。
- ⑧ 提案した自己収縮ひずみ予測式は、自己収縮ひずみ 100μ 程度の初期段階を除き、ほぼ $\pm 20\%$ の精度で予測できることを確認した。

謝辞：本研究の実施にあたり、東京大学大学院工学系研究科 野口准教授の御指導をいただきました。また住友大阪セメント(株)、(株)日本シーカの関係各位に、材料の提供ならびに実験への協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高強度コンクリート技術の現状 (2009), p.268, 2009
- 2) 松田拓ほか：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報告集, Vol.28, No.1, pp.1247-1252, 2006

- 3) 松田拓ほか：初期高温履歴を受ける 200N/mm² 級の超高強度コンクリートの力学特性の発現，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工 pp.889-890，2009
- 4) T. Matsuda, et al. : Development of Mechanical Properties of Ultra-High-Strength Concrete Subjected to Early Heat Curing, Journal of Advanced Concrete Technology Vol.7, pp.183-193, 2009
- 5) (社) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp.53-54, 2008
- 6) (社) 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), pp.209-210, 1994
- 7) 寺本篤史ほか：超低水セメント比シリカフェュームコンクリートの自己収縮温度依存性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.634, pp.2069-2076, 2008.12
- 8) 大友健ほか：マスコンクリートに生じている自己収縮の実態とその制御対策の一例，コンクリート工学，Vol.44, No.3, pp.26-33, 2006
- 9) 丸山一平ほか：鉄筋コンクリート柱の断面内応力に関する解析的検討—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 2—，日本建築学会構造系論文集，No.637, pp.425-431, 2009.3
- 10) (財) 国土開発技術センター：建設省総合技術開発プロジェクト 鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発 平成 4 年度 高強度コンクリート分科会報告書，pp.4-56-1-4-56-2, 1993
- 11) 寺本篤史ほか：線膨張係数の測定方法に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工 pp.335-336, 2009
- 12) 田澤栄一：コンクリートの硬化時温度応力の問題点，コンクリート工学，Vol.24, No.12, pp.11-20, 1986
- 13) 橋田浩ほか：自己収縮と水和熱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，Vol.13, No.1, pp.25-32, 2002
- 14) 伊藤一聡ほか：種々の養生条件下で形成されたセメント硬化体の空隙構造，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24, No.1, pp.489-494, 2002
- 15) 菅俣匠ほか：150N/mm² 級コンクリートの強度発現に及ぼすシリカフェュームの反応率の影響，コンクリート工学論文集，Vol.18, No.2, pp.1-11, 2007
- 16) 松田拓ほか：超高強度コンクリートのクリープ特性に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，Vo.19, No.2, pp.11-19, 2008
- 17) 高橋俊之ほか：セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響，コンクリート工学論文集，Vol.7, No.2, pp.137-142, 1996
- 18) 上原伸郎ほか：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, p.1099-1104, 2005
- 19) 橋田浩ほか：高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造部材の初期ひび割れに関する実験ならびに応力解析，コンクリート工学論文集，Vol.10, No.1, pp.51-63, 1999
- 20) 早野博幸ほか：調合設計および実環境条件を考慮した高強度コンクリートのひび割れポテンシャル評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.62 3, pp.19-26, 2008.1
- 21) 川合雅弘ほか：コンクリートの自己収縮ひずみの予測式に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25, No.1, pp.491-495, 2003
- 22) 今本啓一ほか：高強度・超高強度コンクリートの収縮性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1, pp.1061-1066, 1995
- 23) (社) 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，pp.17-28, 2002
- 24) (社) 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，pp.93-95, 1996
- 25) 早野博幸ほか：擬似完全拘束下における高強度コンクリートの自己収縮によるひび割れポテンシャル評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.6 22, pp.9-16, 2007.12