

超高強度コンクリートの収縮応力低減化に関する研究

技術研究所 材工研グループ 鈴木雅博
技術研究所 材工研グループ 中瀬博一
技術研究所 藤井和俊

概要：シリカフュームと低熱ポルトランドセメントとのプレミックス材を用い、水結合材比 15%のコンクリートについて、膨張材と収縮低減剤を併用した収縮応力低減効果の有効性を実験的に検討した。また、本試験では、練上がり温度を 10、20 および 30℃とした簡易断熱養生により柱部材と同一の温度履歴を再現した供試体と 20℃封緘養生の供試体をそれぞれ作製し、収縮応力の比較検討を行った。その結果、超高強度コンクリートの膨張材と収縮低減剤との併用による収縮応力低減効果が認められた。しかし、その低減量は、温度履歴供試体と 20℃封緘養生とでは異なることなどが明らかになった。

Key Words：超高強度コンクリート、自己応力、水和発熱、膨張材、収縮低減剤

1. はじめに

都市建築における超高層建築や橋梁桁高制限あるいは構造物の高耐久化からコンクリートの高強度化が要求され、近年の技術進歩により、圧縮強度 150N/mm²クラスの構造物の構築も可能となってきている。しかし、超高強度コンクリート(以下UHSCと示す)は、水和熱に起因した温度上昇量が高く、かつ、自己収縮ひずみも大きくなることが知られており、コンクリートが鉄筋や部材の拘束などを受けた場合にひび割れのリスクが生じる。こうした理由から、収縮応力の低減は、超高強度コンクリートを有効に活用するための課題の1つである。

収縮応力低減の方法には、低熱ポルトランドセメントに膨張材や収縮低減剤を混入する方法¹⁾や人工軽量骨材内部の保有水によるセメント硬化体の自己乾燥を減少させる方法²⁾などが提案されている。しかし、膨張材の有効性の検討は圧縮強度 100N/mm²以下の範囲であり、圧縮強度 120 N/mm²を超えるUHSCに用いた場合の検討はほとんどない。また、人工軽量骨材を用いた場合は、圧縮強度の低下や乾燥収縮の増大が懸念される。これまで、温度履歴を考慮した検討はいくつか実施³⁾されており、温度履歴を与えた供試体と 20℃封緘養生供試体とでは、自己収縮ひずみの発生量が異なることが示されている。しかし、膨張材や収縮低減剤による収縮低減効果に関しては、実構造物に生じるような高温履歴を受けた場合の検討はほとんどないのが現況である。

そこで、本研究では、練上がり温度を 10、20 および 30℃とし、膨張材と収縮低減剤を混入した場合と混入しない場合のUHSCの自己応力供試体をそれぞれ作製し、柱部材に実際に生じる温度履歴を再現する簡易断熱養生と 20℃封緘養生との比較により、収縮応力低減効果を確認する実験を行った。また、セメントの種類を普通ポルトランドセメントと低熱ポルトランドセメントの2種類とし、セメント種別による自己応力の差を比較検討した。なお、本報告は、有効材齢を 100 日までの既報⁴⁾の検討を有効材齢 500 日とした場合に新たに得た知見をとりまとめたものである。



鈴木雅博



中瀬博一



藤井和俊

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。セメントには、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームとのプレミックス材(SFLC)および普通ポルトランドセメントを使用した。混和材には、シリカフェーム(SF)および標準使用量 20kg/m^3 の石灰系低添加型膨張材をそれぞれ使用した。収縮低減剤には、低級アルコール系を使用した。細骨材には、山梨県大月産の砕砂を、粗骨材には、岩手県盛岡産の砕石をそれぞれ使用した。

2.2 配合

配合表を表-2に示す。検討する配合は3種類とし、水結合材比、単位水量および単位粗骨材量を同一とし、それぞれ15%、155および 940kg/m^3 とした。配合名SFLCではセメント種類SFLC単体、配合名SFLC-E-RではSFLCに膨張材と収縮低減剤を混入した配合、SFNCではセメント種類Nの重量の10.5%を混和材SFに置換した配合とした。高性能減水剤はスランプフローが $60\pm 10\text{cm}$ となるように調整し、消泡剤を用いて空気が $2\pm 1\%$ となるようにした。部材に引張応力を極力発生させないことを目標とすることから、本研究での膨張材量は、水結合材比20%とし、高ビーライトセメントをシリカフェームで5%置換したコンクリートの自己収縮ひずみが、約 700×10^{-6} となる報告³⁾や低熱ポルトランドセメントを用いた水セメント比30%のコンクリートにおいて、標準量の収縮低減剤と標準量の1.67倍の膨張材量を併用した場合の自己収縮低減量が約 650×10^{-6} となる報告^{5) 6)}を参考に、ここでは、膨張材量を標準量の1.75倍とした。なお、膨張材は結合材に含めることとした。収縮低減剤は標準使用量 6kg/m^3 とし、単位水量に含めることとした。コンクリートの練混ぜは、 20°C 一定の室内で実施し、結合材と細骨材との空練りを15秒、その後水と混和剤と投入してモルタル練りを実施し、最後に粗骨材を投入し、60秒練り混ぜた。なお、モルタル練りの時

表-1 使用材料

材料	種別	特性	記号
結合材	低熱ポルトランドセメント +シリカフェーム	密度: 3.08 g/cm^3 , 比表面積: $6330\text{cm}^2/\text{g}$	SFLC
	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16 g/cm^3 , 比表面積: $3300\text{ cm}^2/\text{g}$	N
細骨材	砕砂	表乾密度: 2.62 g/cm^3 , 吸水率: 2.50 % F. M.: 2.53, 実積率: 54.0 %	S
粗骨材	砕石	表乾密度: 2.94 g/cm^3 , 吸水率: 0.38 % F. M.: 6.19, 実積率: 59.9 %	G
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	消泡剤	ポリアルキレングルコール誘導体	D
	収縮低減剤	低級アルコール系	SRA
混和材	膨張材	密度: 3.08 g/cm^3 , 石灰系	EX
	シリカフェーム	密度: 2.23 g/cm^3 , 比表面積: $18.6\text{ m}^2/\text{g}$	SF

表-2 配合

配合名	セメント 種別	(W+SRA)/ (C*+ EX+SF)	単位量 (kg/m^3)							C.T. ($^\circ\text{C}$)	SP**/(C*+ EX+SF)	D***/(C*+ EX+SF)
			W	C*	EX	SF	S	G	SRA			
SFLC	SFLC	0.15	155	1033	-	-	451	940	-	10	0.027	0.00010
										20,30	0.027	0.00002
SFLC-E-R	SFLC	0.15	149	998	35	-	450	940	6	10	0.032	0.00010
										20,30	0.030	0.00002
SFNC	N	0.15	155	925	-	109	436	940	-	10	0.035	0.00020
										20,30	0.035	0.00010

C*:SFLC or N.SP**:高性能減水剤.D***:消泡剤.SFLC:低熱ポルトランドセメント+SFのプレミックス材

間は、配合名 SFLC180 秒, SFLC-E-R で 240 秒, SFNC で 360 秒とした。

2.3 試験方法

2.3.1 試験条件と供試体寸法

試験条件を表-3に示す。養生種別は簡易断熱養生と封緘養生とし、簡易断熱養生供試体の練上がり温度は 10, 20 及び 30℃として実施した。また、試験は、すべての試験条件において、配合 SFLC, SFLC-E-R および SFNC について実施した。本試験では、予備試験において 3 本の測定結果にほとんど差違が生じなかったことから、簡易断熱養生条件で練上がり温度 10℃とした D13 を用いた自己応力供試体を 1 体というように各試験条件で 1 体とした。

20℃封緘養生の自己収縮ひずみ供試体寸法は、JCI 自己収縮委員会の試験方法 7) に準拠し、100×100×400mm とした。

練上がり温度 10, 20℃, 30℃の封緘養生および簡易断熱養生した自己応力供試体と簡易断熱養生した自己収縮ひずみ供試体の寸法は、125×125×1200mm とした。この供試体寸法は、後述する発泡スチロール厚 400mm の簡易断熱養生箱を用いた自己収縮・自己応力試験体の中心部と 900×900×1100mm の柱模擬部材中心部のコンクリート温度の最大値がほぼ一致するように、事前の温度解析から決定した。

自己応力試験で埋設する鉄筋は、D13, D16, D22 の 3 種類とし、JCI 自己収縮委員会の試験方法 8) に準拠し、中央 100mm の区間はリブと

ふしを取り除いた円形断面とした。鉄筋とコンクリートとの付着応力の影響を取り除くため、試験区間にはテフロンシートを巻き付けることにより、コンクリートとの付着を無くした。その鉄筋比の平均値は、D13 では 0.608%, D16 では 0.985%, D22 では 2.01%であった。

なお、柱部材で発生する温度履歴を把握するため、配合 SFLC を用いて 900×900×1100mm の柱模擬部材を作製し、部材中心部の温度測定を実施した。

2.3.2 温度条件

全ての配合で練上がり温度を 10, 20 および 30℃として試験を行った。自己応力試験と自己収縮試験の養生条件は 20℃封緘養生と簡易断熱養生の 2 種類とした。ここでは、簡易断熱養生は、外気との遮断性の高い発泡スチロールを型枠とし、結合材の自己発熱により温度履歴を与える方法と定義することとし、外気との遮断を完全とした断熱養生と区別することとした。図-1 に簡易断熱養生した自己応力供試体の試験状況を示す。厚さ 400mm の発泡スチロールの型枠を用い、コンクリートと発泡スチロールとの拘束を防止するため、テフロンシートとポリエステルフィルムを設置し、打設した。材齢 7 日で脱枠し、その間の供試体はビニールで覆い、乾燥を防止した。脱枠後の養生は、全面を厚さ 0.05mm のアルミ箔テープで覆い、温度 20℃, 60%R.H.の室内にて静置した。20℃封緘養生の供試体は、脱枠を材齢 2 日で実施し、脱枠後の養生は簡易断熱養生をした供試体と同様とした。

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して実施した。圧縮強度供試体の寸法は φ100×200mm とした。各強

表-3 試験条件

養生種別	簡易断熱養生			封緘養生
練上がり温度(℃)	10	20	30	20
自己応力	D13	○	○	○
	D16	○	○	○
	D22	○	○	○
自己収縮ひずみ	○	○	○	○

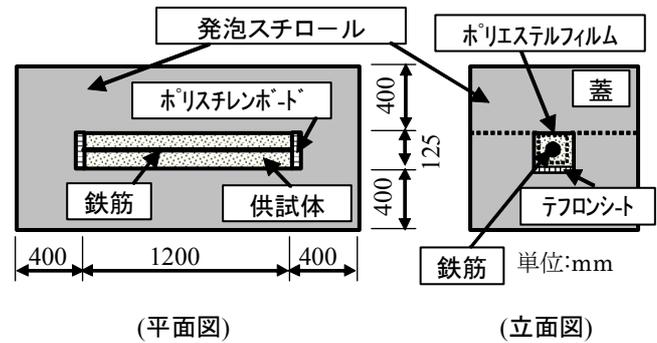


図-1 簡易断熱養生自己応力供試体

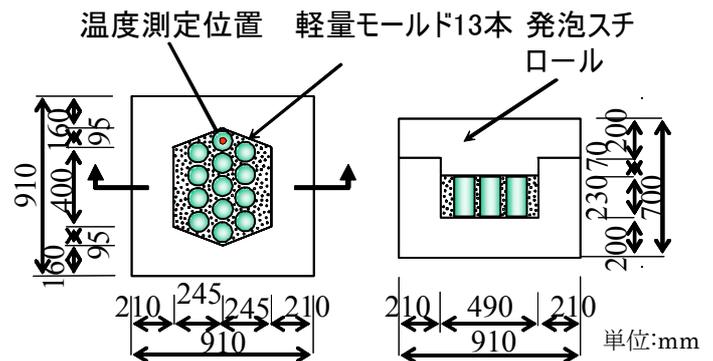


図-2 圧縮強度用簡易断熱養生方法(JASS 5T-705)⁹⁾

度試験用供試体の養生条件は自己収縮ひずみと自己応力供試体と同様に 20℃封緘養生と簡易断熱養生とした。図-2に圧縮強度用簡易断熱養生状況を示す。圧縮強度用簡易断熱養生は建築学会の高強度コンクリート施工指針(案)・同解説⁹⁾に準拠して行った。簡易断熱養生した供試体の脱枠は、材齢7日で実施し、その後の養生は20℃室内にて封緘養生とした。試験材齢は7, 28, 56, 91日とした。また、練上がり温度20℃では、材齢7日以前の圧縮強度供試体は、簡易断熱養生箱とは別にプログラムで槽内温度を制御できる装置を用いて別個作製した。槽内温度の制御は、簡易断熱養生した自己収縮、自己応力試験用供試体の温度履歴をプログラムして実施した。

2.3.3 測定方法

自己応力試験で使用した鉄筋は、あらかじめ「荷重とひずみ」と「鉄筋温度とひずみ」の関係を試験により求め、自己応力算出に反映した。ここでは、温度履歴を有する自己応力供試体の鉄筋ひずみ測定値は、温度ひずみと弾性ひずみとの和と仮定した。自己応力は、測定値から温度ひずみを差し引いた弾性ひずみを算出し、この弾性ひずみの相当する荷重をコンクリート断面積で除して求めた。自己収縮ひずみの測定は、供試体中央部に埋設した低弾性型(弾性係数：約40N/mm²)の埋込みひずみ計によって測定した。コンクリートの温度変化に伴う体積変化は、コンクリートの中心部に設置した熱電対にて測定した温度変化をJCI案⁸⁾に準拠し、線膨張係数10×10⁻⁶/℃として補正した。

圧縮強度、自己収縮ひずみおよび自己応力のデータ整理で用いる材齢は、CEB-FIP MC90¹⁰⁾の式(1)有効材齢とし、測定したコンクリート温度を用いて算出した。

$$t = \sum \Delta t_i \cdot \exp \left\{ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / t_0} \right\} \dots\dots(1)$$

ここに、 t : 有効材齢(日), Δt_i : 温度がT℃である期間の日数, t_0 : =1℃

3. 試験結果および考察

3.1 温度履歴供試体のコンクリート温度

簡易断熱した供試体の温度履歴の配合 SFLC の場合を例として図-3に示す。図中の模擬部材では部材中心温度を、簡易断熱圧縮では図-2の簡易断熱養生した圧縮供試体温度を、自己応力・自己収縮平均では自己収縮ひずみと自己応力の供試体4体の平均温度をそれぞれ示す。コンクリート打ち込みからコンクリート温度が最大となる時点までの簡易断熱した供試体と柱模擬部材のコンクリート温度の経時変化がほぼ一致したが、コンクリート温度最大から雰囲気温度になる温度下降領域では、簡易断熱養生供試体の方が柱模擬部材と比較して、コンクリート温度下降速度が遅い結果となった。しかし、自己収縮ひずみは材齢初期での発現量が大きく、簡易断熱養生した供試体の材齢初期の温度履歴が柱模擬部材とはほぼ等しいことから、柱模擬

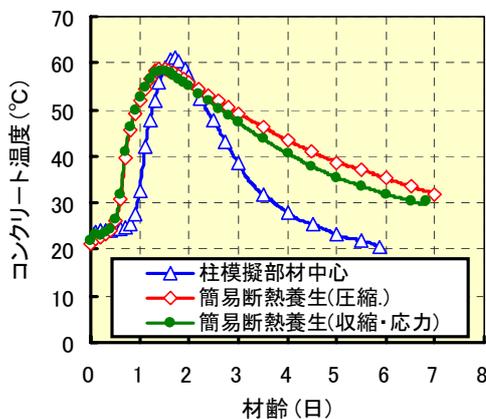


図-3 各養生条件の温度履歴(20℃)

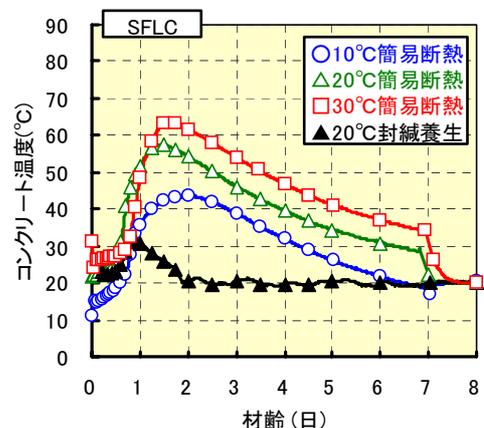


図-4 SFLCの自己応力供試体の温度履歴

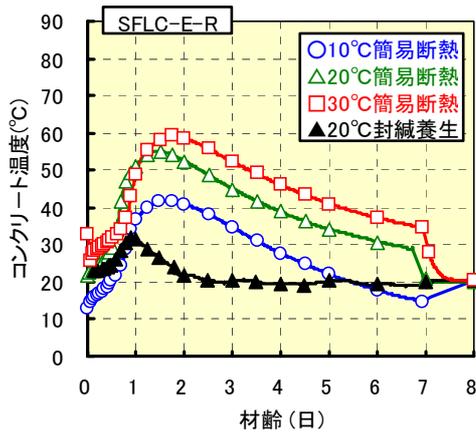


図-5 SFLC-E-R の自己応力供試体の温度履歴

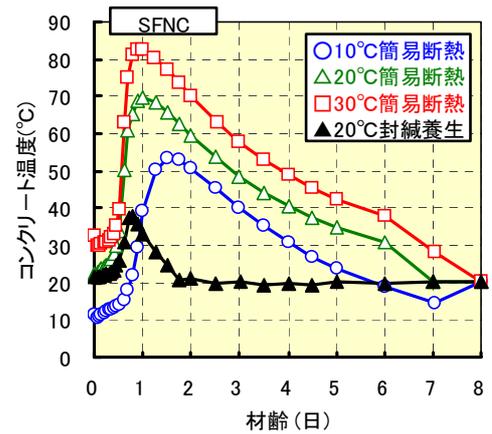


図-6 SFNC の自己応力供試体の温度履歴

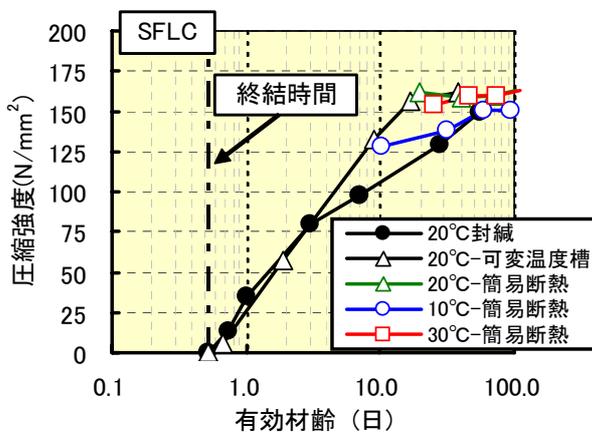


図-7 SFLC の強度発現

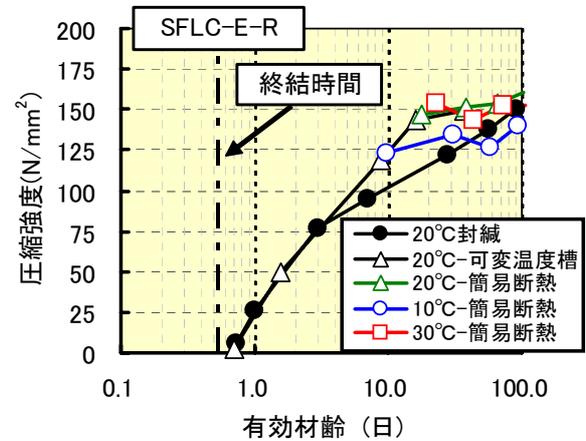


図-8 SFLC-E-R の強度発現

部材で発生している自己収縮ひずみと自己応力の発現は、簡易断熱した供試体で模擬していると考えられる。また、簡易断熱養生した圧縮強度と自己応力供試体では異なる養生箱を使用したか、コンクリート温度履歴はほぼ等しい結果となった。配合 SFLC, SFLC-E-R, および SFNC の各練混ぜ温度の温度履歴を図-4, 図-5 および 図-6 にそれぞれ示す。

3.2 強度発現

配合 SFLC, SFLC-E-R および SFNC の圧縮強度発現を図-7, 8 および 9 にそれぞれ示す。各図のそれぞれの配合における 20°C 封緘養生供試体の終結時間を 1 点鎖線で示す(終結時間: SFLC-0.524 日, SFLC-E-R-0.528 日, SFNC-0.444 日)。

簡易断熱養生した供試体の圧縮強度は全配合とも有効材齢 40 日で約 150N/mm² を超える結果となった。膨張材と収縮低減剤を混入することにより、無混入供試体と比較して若干強度の低下が認められた。

本試験では、有効材齢約 40 日より前の材齢において、簡易断熱供試体の圧縮強度と有効材齢の関係は、20°C 封緘養生供試体の圧縮強度と有効材齢の関係と合致しない結果となったが、有効材齢 100 日では、ほぼ同じ圧縮強度を示した。有効材齢 40 日より前の材齢で一致しない理由として、有効材齢を算出する CEB-FIP

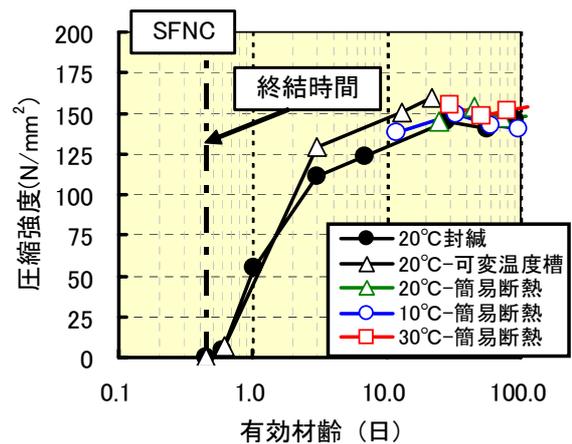


図-9 SFNC の強度発現

MC90 式は、式(2)のアレニウス式において、セメント種別ごとに活性化エネルギー(化学反応エネルギー)が異なるが、セメントの種別によらず活性化エネルギーを一定としているためと考えられる。

$$t = \sum \Delta t_i \cdot \exp\left\{\frac{E}{R}\left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T}\right)\right\} \dots\dots(2)$$

ここに、E：活性化エネルギー、R：8.314J/mol(気体定数)、T：コンクリート温度

また、可変温度槽と簡易断熱それぞれの圧縮強度は同一材齢となる有効材齢約 11 日と有効材齢約 40 日ではほぼ合致しており、可変温度槽による供試体の材齢 7 日以前の圧縮強度発現をほぼ模擬できたと考えられる。

練上がり 20°C の場合には各配合とも圧縮強度発現は終結時間以降で発生する結果となった。このことから、自己応力の発生は概ね凝結終結時間以降と考えられる。同様に練上がり温度 10 および 30°C についても同様になると考えられる。

圧縮強度とヤング係数の関係を図-10に示す。図中の実線は回帰線を示す。圧縮強度とヤング係数の関係はセメント種別や膨張材と収縮低減剤の添加による差はほとんど認められない結果となった。

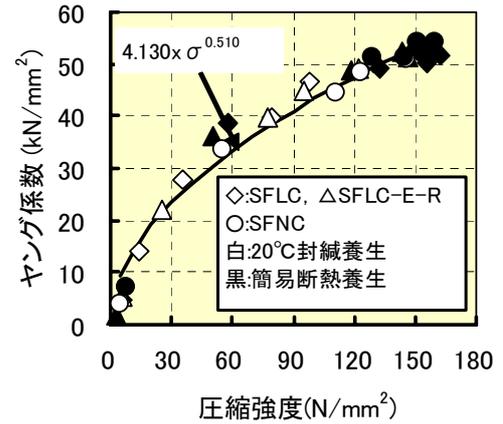


図-10 圧縮強度とヤング係数の関係

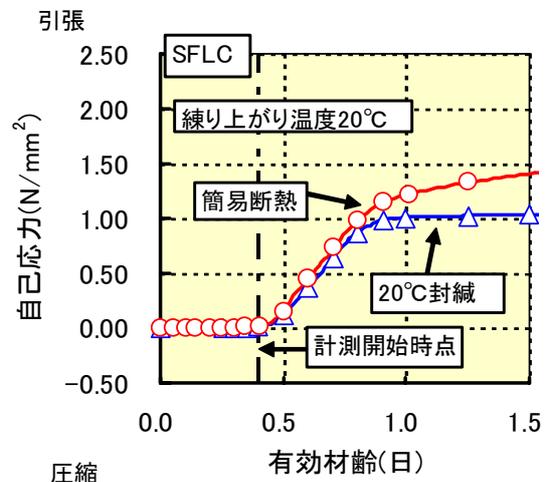


図-11 自己応力の経時変化(注水原点)

3.3 自己収縮ひずみ

図-11に自己応力の発現を配合 SFLC の鉄筋 D22 を例に練混ぜ時の水注入を原点とした場合の経時変化を示す。自己収縮ひずみの開始時点は凝結始発時間であるが、本研究では、コンクリート内部に発生する応力の基礎データを得ることを目的としているため、図-11に示すように自己応力の発現が開始する時点を実測開始の原点とした。計測開始時点は凝結終結時間と合致し、圧縮強度の発現開始時点と自己応力開始時間は同じ時刻になると考えられる。

3.3.1 各配合の自己収縮ひずみ温度依存性

配合 SFLC と配合 SFNC の各練上がり温度における自己収縮ひずみの経時変化を図-12と図-13にそれぞれ示す。配合 SFLC と配合 SFNC の封緘養生供試体と簡易断熱した供試体をそれぞれ示す。有効材齢 500 日における配合 SFLC の簡易断熱養生供試体のひずみは 840×10^{-6} に対して、20°C封緘養生供試体は 670×10^{-6} を示し、簡易断熱供試体の方が大きくなる結果を示し、自己収縮ひずみの温度依存性が認められた。配合 SFNC の簡易断熱供試体は、有効材齢約 100 日程度までは簡易断熱養生の方が大きくなり、配合 SFLC 同様に温度依存性が認められた。しかし、高ピーライトセメントの質量の 5% をシリカフューム(SF)で置換した結合材を用いた水結合材比 20% の比較結果³⁾では、簡易断熱した供試体の自己収縮ひずみは、20°C封緘養生供試体と比較して収縮量が 15% 小さくなる傾向が述べられている。一方、本試験では、SF 混入量が 10.5% と文献³⁾の試験の約 2 倍使用としており、SF 量が異なる場合の温度履歴の影響であるかは不明であり、今後、さらにデータを蓄積する必要があると考える。

20°C封緘養生した SFLC と SFNC の自己収縮ひずみを比較した場合では、配合 SFNC の自己収縮ひずみの方が大きくなった。自己収縮ひずみは、低熱ポルトランドセメントを使用することにより低減することができるとする研究¹⁾と合致する結果となった。しかし、簡易断熱した供試体では配合 SFLC は配合 SFNC

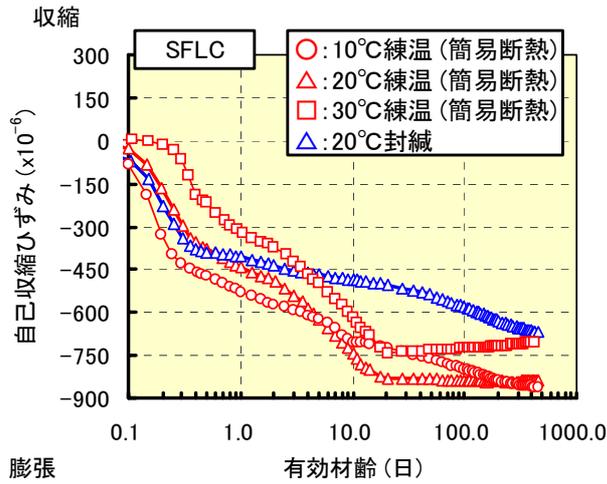


図-12 SFLCの自己収縮ひずみ経時変化

と比較してやや大きくなる傾向を示した。高温履歴を受けた場合には、エトリンガイトからモノサルフェートへの転化がおきるとする報告¹²⁾がある。低熱ポルトランドセメントのC₃A量は普通ポルトランドセメントと比較して少ないため、エトリンガイトとC₃Aとの反応量が少なくなり、低熱ポルトランドセメントの残存するエトリンガイトは普通ポルトランドより多くなる。この残存するエトリンガイトが、高温履歴を受け、エトリンガイトよりモル体積の小さいモノサルフェートに転化するため、空隙が大きくなり、それまでエトリンガイトで受け持っていた圧縮力が消失する。このため、転化が起きる以前より毛細管径が小さくなり、毛細管張力が増加し、低熱ポルトランドセメントの自己収縮ひずみの増加を誘発したと考えられる。また、本試験において、配合SFNCの簡易断熱養生供試体の自己収縮ひずみは、時間経過とともに増加傾向にあることが認められた。その理由として、配合SFNCはSFLCと比較して高温履歴を受けるため、組織空隙の粗大化がおき、自己収縮の低減につながったものと考えられる¹³⁾。このことは図-7および9の温度履歴を受けた供試体の圧縮強度の発現において、SFLCは経時変化に伴う強度低下はないが、SFNCはわずかではあるが低下していることから空隙の粗大化が推定される。以上より、自己収縮ひずみの温度依存性の現象については、SF量の影響やセメント種別の影響などをさら検討していく必要があると考える。

図-14に配合SFLCとSFLC-E-Rの各練上がり温度の自己収縮ひずみを示す。膨張材と収縮低減剤を併用することにより、自己収縮ひずみは、大きく低減する結果を示した。配合SFLCの簡易断熱養生した自己収縮ひずみは、有効材齢10日までは練上がり温度が大きいほど自己収縮ひずみが小さくなる傾向を示したが、有効材齢100日ではほとんど差が生じない結果となった。この理由の1つに本試験では線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定していることが挙げられる。初期材齢の線膨張係数は 10×10^{-6} より小さいとする研究³⁾もあり、この場合には、コンクリート温度上昇量が大きいほど自己収縮ひずみを過小に評価することとなる。このことから、練上がり温度が高いほどコンクリート温度上昇量が大きくなるために自己収縮ひずみを過小に評価したと考えられる。

表-4にコンクリート温度最大値と後膨張の有無の関係を示す。コンクリート温度が58℃以上の場合に後膨張せず、それを下回る場合には後膨張をした。膨張材による膨張量は練上がり温度と温度上昇量による影

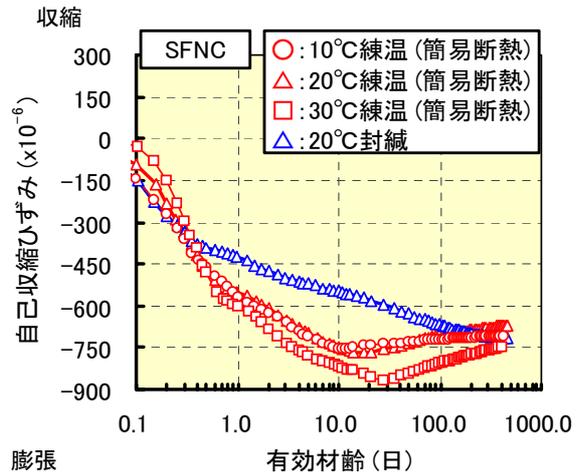


図-13 SFNCの自己収縮ひずみ経時変化

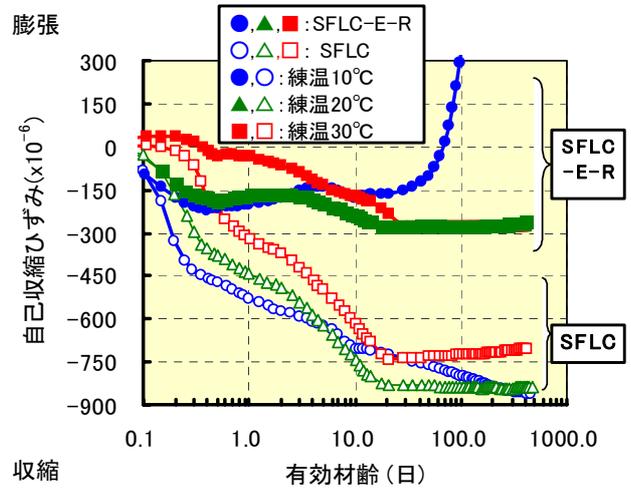


図-14 SFLCとSFLC-E-Rの自己収縮ひずみ

響を受け、両者の温度が高いほど膨張材の反応が早く、かつ、大きくなるとする報告¹⁴⁾や膨張材の作用機構は膨張材による水和反応生成物による毛細管空隙生成であるとする報告がある¹⁵⁾。このことから、練上がり温度が高く、温度上昇量が高い場合には、膨張材の水和反応が速く、コンクリートの剛性が比較的小さい若材齢時で膨張材による毛細管空隙を生成したのに対して練上がり温度が低く、温度上昇量が低い場合には、コンクリート水和がほぼ終了した時点においても、膨張材の水和が進行したため、膨張圧が増加し、膨張材周辺にマイクロクラックが発生したことが推定される。このため、剛性が低下し、膨張ひずみが増加したことが考えられるが、今後さらに検討していく必要があると考える。

表-4 コンクリート温度最大値と後膨張の関係

供試体	養生	練温 (°C)	コンクリート温度最大(°C)	後膨張の有無
SFLC-E-R-10°C	簡易断熱	12.5	42.9	有り
SFLC-E-R-20°C	簡易断熱	22.5	58.6	無し
SFLC-E-R-30°C	簡易断熱	33.0	66.0	無し
SFLC-E-R-封緘	20°C封緘	21.0	25.0	有り

3.3.2 収縮低減効果のコンクリート温度依存性

図-15に配合SFLC-E-Rの自己収縮ひずみと配合SFLCの自己収縮ひずみを差し引き、収縮低減剤と膨張材との効果の経時変化を示す。膨張材と収縮低減剤を混入することにより、自己収縮ひずみの低減効果が20°C封緘養生供試体と簡易断熱供試体の両方で認められた。ただし、収縮低減量においても温度履歴の影響が認められ、簡易断熱供試体は20°C一定供試体と比較して大きくなる結果を示した。このことから、膨張材量は結合材単身の温度履歴による発生ひずみ量だけで判断できず、膨張材の温度依存性も考慮する必要があると考えられる。また、膨張材を混入した供試体内、練上がり温度10°Cの場合の簡易断熱養生した供試体と練上がり温度20°C一定の封緘養生した供試体において材齢30日以後に後膨張する傾向を示した。

3.4 自己収縮応力

練上がり温度20°CのD22(鉄筋比約2.0%)における各配合の自己収縮応力の封緘養生と温度履歴供試体の経時変化を図-16、17にそれぞれ示す。有効材齢の時間軸原点は自己応力が発生した時点とした。鉄筋比2.0%の範囲内において、自己応力は割裂引張強度より低くなり、目視においてもひび割れの発生は認められなかった。自己収縮応力もまた自己収縮同様に温度履歴の影響が認め

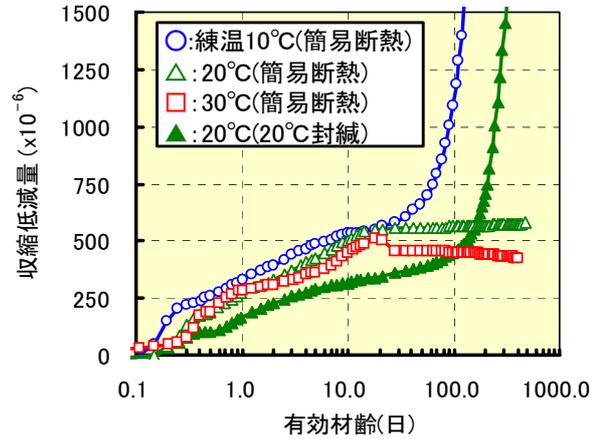


図-15 収縮ひずみ低減量の経時変化

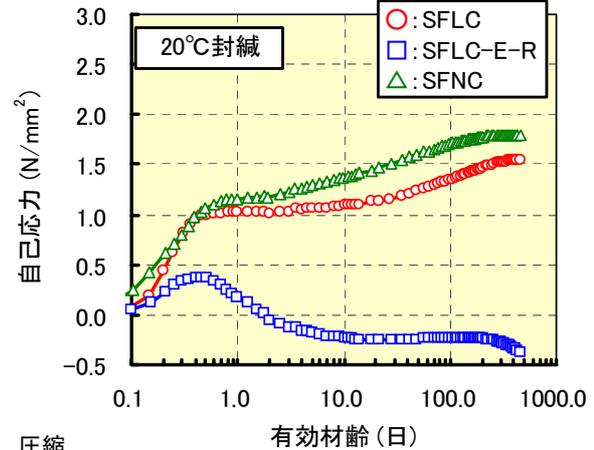


図-16 20°C封緘養生の自己応力経時変化

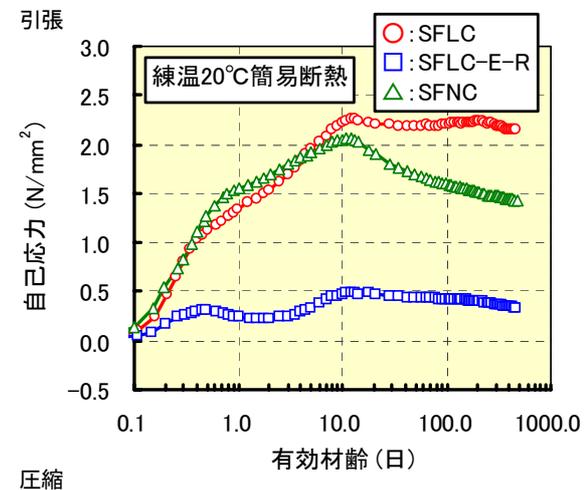


図-17 簡易断熱養生の自己応力経時変化

られ、簡易断熱養生供試体は 20℃封緘養生と比較して大きくなる結果となった。また、膨張材と収縮低減剤を混入することによる自己収縮応力の低減も認められた。

図-18に配合 SFLC と SFLC-E-R の各練上がり温度の自己収縮応力の経時変化を示す。練上がり温度 10℃の簡易断熱養生した供試体の自己応力は圧縮側に増進した。この傾向は自己収縮ひずみの傾向と同様であった。しかし、図-16に示すように、配合 SFLC-E-R の 20℃封緘養生の自己応力は、後膨張したにもかかわらず圧縮応力の増加が練上がり温度 10℃と比較して小さくなる結果となった。この点についてはさらに計測を持続して、検討を加える必要がある。

図-19に全自己応力供試体の後膨張がおこる前の有効材齢 100 日の自己収縮ひずみと自己応力の関係を示す。圧縮強度のほぼ一致した状態では、同一鉄筋において自己収縮ひずみと自己応力は 1 次の関数で示せる結果となった。本試験条件では自己収縮ひずみが約 100×10^{-6} より小さくなる場合に自己応力が圧縮側に転じる結果となり、配合 SFLC-E-R の 20℃一定の自己応力では D13~D22 まで全て圧縮応力となった。このことから、自己収縮ひずみの収縮量が小さい場合には自己応力が圧縮側に転じる結果を示した。

以上のことから、自己収縮ひずみの比較的大きな超高強度コンクリートにおいても、膨張材と収縮低減剤を併用することにより、自己応力を大きく低減することが可能であり、ひび割れを抑制することが可能であると考えられる。

4. まとめ

超高強度コンクリートの自己応力低減のために膨張材と収縮低減剤を併用した場合の練上がり温度と温度履歴の影響を実験的に検討し、以下のことが明らかになった。

- (1) 自己収縮ひずみと自己収縮応力は簡易断熱と 20℃一定養生で発生量に差が生じる。発生量は温度履歴を受けた供試体の方が大きくなる結果となった。
- (2) 簡易断熱供試体においても、膨張材と収縮低減剤を混入することにより、自己収縮ひずみと自己収縮応力を低減することができた。ただし、膨張材と収縮低減剤の効果においても温度履歴の影響が認められ、簡易断熱養生した場合の方が大きな収縮低減効果を示した。
- (3) 20℃一定養生の SFLC の自己収縮ひずみおよび自己応力は、SFNC と比較して小さくなったが、簡易断熱養生では反対の結果となった。
- (4) 収縮ひずみ量 100×10^{-6} 以下の場合には、自己応力が圧縮応力に転じる結果となった。また、20℃封緘養生の配合 SFLC-E-R は膨張コンクリートとなった。
- (5) 簡易断熱養生した配合 SFLC の自己収縮ひずみは有効材齢 10 日以降の変動が小さくなったが、配合

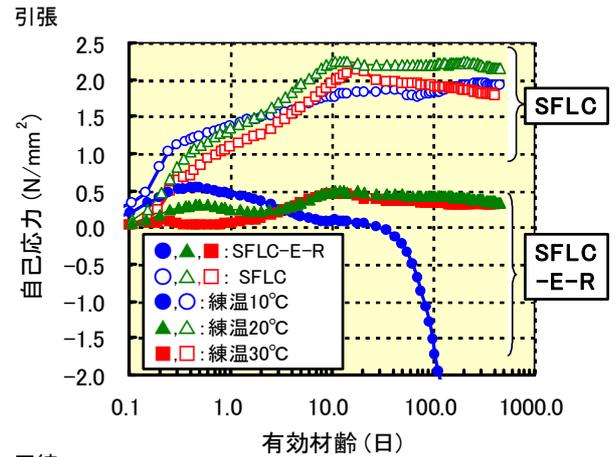


図-18 SFLC と SFLC-E-R の自己応力経時変化

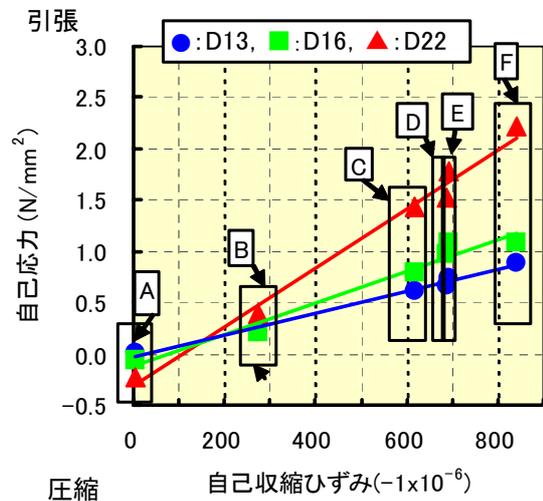


図-19 自己収縮ひずみと自己応力の関係
A から F は以下を示す
1) 練上がり温度 20℃ 封緘養生供試体
A: SFLC-E-R, C: SFLC, E: SFNC
2) 練上がり温度 20℃ 簡易断熱供試体
B: SFLC-E-R, F: SFLC, D: SFNC

図-19 自己収縮ひずみと自己応力の関係

SFNCの自己収縮ひずみは有効材齢10日以降において収縮量が低減する傾向が認められた。

- (6) 配合 SFLC-E-R の練上がり温度 10℃の簡易断熱供試体と練上がり温度 20℃の封緘養生供試体は有効材齢約 100 日後に後膨張した。
- (7) 圧縮強度は簡易断熱供試体の今回の配合条件全てにおいて有効材齢 40 日で約 150N/mm² 以上となったが、配合 SFLC-E-R の圧縮強度は、SFLC と比較して小さくなった。

謝辞

本研究は、広島大学大学院佐藤良一教授および名古屋大学大学院丸山一平助教授にご指導頂きました。本試験の実施にあたり、宇部三菱セメント株式会社および株式会社ポゾリス物産に試験支援や材料提供をして頂きました。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 谷村充・三谷祐二・鶴田昌宏・佐藤良一：高強度コンクリートの自己収縮応力の低減化における膨張材の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1013-1018，2003
- 2) 高田和法・柳井修司・渡部貴裕・一宮利通：超高強度コンクリートの自己収縮低減に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1007-1012，2003
- 3) 橋田浩・山崎庸行：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，第13巻第1号，pp.25-32，2002
- 4) 鈴木雅博・中瀬博一・丸山一平・佐藤良一：超高強度コンクリートの自己応力に及ぼす温度履歴の影響，セメント・コンクリート論文集，No.59，pp.375-382，2005
- 5) 谷村充・兵藤彦次・佐藤達三・佐藤良一：高強度コンクリートの収縮応力の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
- 6) 兵藤彦次・谷村充・大森啓至・中西博・石森正樹：膨張材を混和した高強度コンクリートの長さ変化に及ぼすセメント種類の影響，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，V-337，pp.674-675，2000
- 7) 日本コンクリート協会：自己収縮研究委員会報告書，PP.51-54，2002
- 8) 日本コンクリート協会：自己収縮研究委員会報告書，PP.58-60，2002
- 9) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針（案）・同解説，pp.228-229，2005
- 10) CEB-FIP：Model Code 1990，Thomas Telford，1991
- 11) 谷村充・兵藤彦次・佐藤良一：膨張材を用いた高強度コンクリートの自己膨張・収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.951-956，2002
- 12) 名和豊春・江口仁・大久保正弘・坂部大：高ピーライト系ポルトランドセメントを用いたモルタル・コンクリートの流動性と蒸気養生下での強度発現について，セメント・コンクリート論文集，No.48，PP.136-141，1994
- 13) 森本丈太郎・魚本健人：初期高温養生したポルトランドセメントの水和に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.1，pp.651-654，1995
- 14) 北沢真・羽淵貴士・村松道雄・守分敦郎：膨張材によるマスコンクリートの温度ひび割れ対策に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1117-1122，2001
- 15) 盛岡実・萩原宏俊・坂井悦郎・大門正樹：膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.169-174，1998