

論文 高温度履歴を受けた超高強度コンクリートの膨張材による自己収縮制御

三谷 裕二*1・中崎 豪士*1・谷村 充*2・丸山 一平*3

要旨: シリカフュームプレミックスセメントを用いた水結合材比 13~20%の超高強度コンクリートを対象に、材齢初期に高温度履歴を与えた場合の膨張材による自己収縮の制御効果を検討した。その結果、実部材を想定した温度履歴を与えた条件下において、膨張材の使用による明らかな自己収縮ひずみの低減効果を有すること、拘束条件下で生じる自己収縮応力についても明確な低減効果を有し、鋼材比 2~8%の範囲での応力の低減率は 30~75%程度であること、また、温度履歴下の自己収縮ひずみ・応力の挙動は 20℃一定で養生した場合と異なること、などの知見を得た。

キーワード: 超高強度コンクリート, 膨張材, 温度依存性, 自己収縮, 強度特性

1. はじめに

建造物のさらなる高層化・長スパン化等への要求が高まる中、設計基準強度 150N/mm²級の超高強度コンクリートが実用化され^{1) 2)}、最近では 200 N/mm²クラスの開発が進められている。一方、このような超高強度コンクリートは極端に水結合材比が低くなるため、自己収縮が顕著に大きくなり、それに起因したひび割れ発生の可能性が指摘されている³⁾。

高強度コンクリートの自己収縮抑制策として、膨張材が効果的であることは過去に多く報告されている^{例え 4)}。しかしながら、水結合材比が 20%を下回るような超高強度領域を対象とした知見は少なく、特に実部材レベルではセメントの水和反応による高温度履歴を受けるが、このような条件における膨張材の作用については不明な点が多い。

本研究では、シリカフュームプレミックスセメントを用いた超高強度コンクリートを対象に、材齢初期に高温度履歴を与えた場合の膨張材による自己収縮・膨張ひずみ、さらには鉄筋拘束条件下で生じる自己収縮・膨張応力の挙動を実験的に検討した。

を用いることにより、異常膨張が生じない結果も既に示されている^{7), 8)}。

表-2にコンクリートの配(調)合を示す。水結合材比(W/B)は 13, 16.5, 20%とし、それぞれ膨張材無混和のコンクリート(PL)と膨張材を 30kg/m³混和したコンクリート(EX)を検討した。

コンクリートのスランプフローが W/B=13%では 70±5cm, W/B=16.5, 20%では 60±5cm, 空気量が 2.0%以下となるように高性能減水剤の添加量を調整した。なお、W/B=13, 16.5%には SP1, W/B=20%には SP2 を使用した。

表-1 使用材料

材料	記号	物理的特性など
セメント	C	シリカフュームプレミックスセメント ／密度: 3.07g/cm ³ , 比表面積: 6160cm ² /g
膨張材	EX	石灰系膨張材/ 密度: 3.19g/cm ³ , 比表面積: 4920cm ² /g
細骨材	S	静岡県掛川市産山砂/ 表乾密度: 2.56g/cm ³ , 吸水率: 2.24%
粗骨材	G	茨城県桜川市産碎石 / 表乾密度: 2.64g/cm ³ , 吸水率: 0.51%, 実積率: 60%
減水剤	SP1	ポリカルボン酸系高性能減水剤
	SP2	

2. 実験概要

2.1 使用材料および配(調)合

表-1に使用材料を示す。セメントには市販のシリカフュームプレミックスセメント、膨張材には汎用品より比表面積が大きい膨張材(市販品)を用いた。既往の研究において、超高強度コンクリートに膨張材を多く混和した場合、後々になって強度への影響が無視し得ない異常な膨張を生じる場合のあることが報告されている^{5), 6), 7), 8)}。一方で、著者らにより、比表面積を高めた膨張材

表-2 コンクリートの配(調)合

	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	EX	S	G
PL13	13.0	44.5	150	1154	-	349	840
EX13			150	1124	30	349	
PL16.5	16.5	38.7	155	939	-	515	
EX16.5			155	909	30	516	
PL20	20.0	30.0	155	775	-	652	
EX20			155	745	30	653	

※B=C+EX, 単位粗骨材かさ容積=0.53m³/m³

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 工修 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 博士(工学) (正会員)

*3 名古屋大学 環境学研究科都市環境学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

2.2 練混ぜ

コンクリートの練混ぜは20℃、R.H.80%の試験室内で行った。練混ぜ手順は、『C+EX+Sを30秒間空練り→W+SPを投入してW/B=13, 16.5, 20%でそれぞれ240秒間, 120秒間, 90秒間モルタル練り→Gを投入して90秒間コンクリート練り→300秒間静置→30秒間コンクリート練り→排出』とした。

2.3 フレッシュ性状

スランプフロー・50cm フロー到達時間, 空気量, および20℃下における凝結時間を, それぞれJIS A 1150, JIS A 1128, JIS A 1147に準拠して測定した。

2.4 養生条件

図-1に養生温度条件を示す。1m角の柱部材の中心部で生じる温度履歴を想定し, W/B=13%では最高温度90℃(90℃履歴), W/B=16.5, 20%では最高温度80℃(80℃履歴)の高温度履歴を設定した。同じく柱部材の表層部の温度履歴を想定し, 最高温度45℃の温度履歴(45℃履歴)を設けた。また, 20℃一定で養生(20℃養生)を行う場合も実施した。

2.5 供試体および試験方法

(1) 強度特性

所定の温度条件下で封緘養生した円柱供試体(φ10×20cm)を用いて, 材齢1, 3, 7, 28日の圧縮強度, 静弾性係数, および割裂引張強度試験を実施した。試験方法はそれぞれJIS A 1108, JIS A 1149, JIS A 1113に準拠した。

(2) 自己収縮・膨張ひずみ特性

10×10×80cmの供試体中央部に設置した低弾性型の埋込み型ひずみ計(見かけの弾性係数40N/mm²)を用いて測定し, コンクリートの線膨張係数を10×10⁻⁶/℃と仮定して温度ひずみを補正した。JCI 自己収縮研究委員会の試験方法(案)⁹⁾を参考に, 型枠内側の底面にテフロンシート, 端面にポリスチレンボードを入れ, その内側および側面にポリエステルフィルムを敷設してコンク

リートの自由な変形を型枠が拘束することを防いだ。また, 打設面は乾燥防止のためにポリエステルフィルムで覆った。材齢7日で脱型した後は, 供試体全面をアルミ箔粘着テープ(厚さ0.1mm)で密封し, 20℃の恒温室内で養生した。

(3) 自己収縮・膨張応力特性

10×10×80cmの断面中心部にPC鋼棒を配置した拘束供試体を作製した。PC鋼棒はJIS G 3109に規定される呼び名17mm, 23mm, 32mmを用い, 鋼材比は3水準設定した。鋼棒のひずみは, 鋼棒軸方向の対称面に設けた幅4mm, 深さ3mm, 長さ80cmのねじ切削部の中央にひずみゲージを貼付して測定した。なお, 測定値に及ぼす温度ひずみを取り除くために, 貼付したひずみゲージに

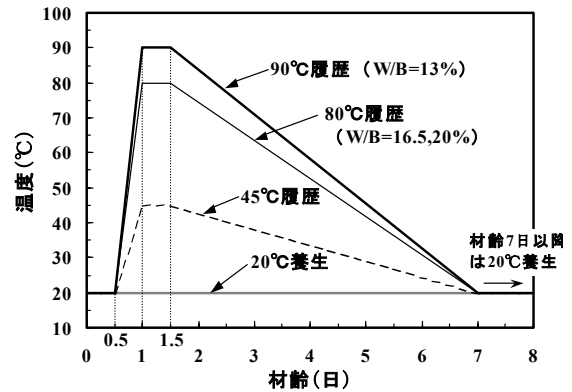


図-1 養生温度条件

表-3 フレッシュ性状および凝結時間

	SP量 (B%)	スランプフロー		空気量 (%)	凝結時間(h-m)	
		(cm)	50cm到達 時間(sec)		始発	終結
PL13	1.2	74.0	11.2	1.2	11-45	13-50
EX13	1.6	75.0	13.2	1.4	8-45	11-00
PL16.5	0.8	57.0	18.4	1.5	9-00	10-55
EX16.5	0.9	61.0	15.1	1.5	5-50	7-30
PL20	1.35	61.5	9.8	1.5	13-35	15-45
EX20	1.5	61.0	12.9	1.3	10-15	12-15

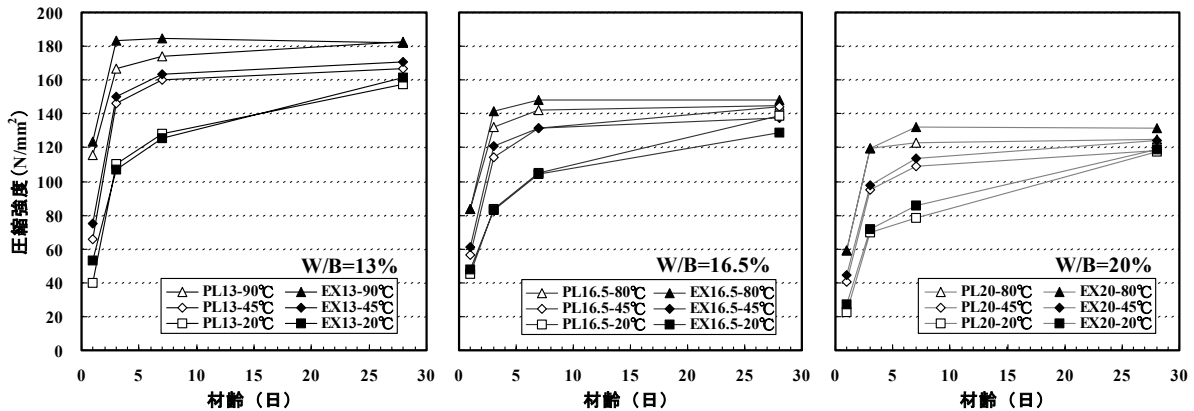


図-2 圧縮強度の経時変化

については、事前に温度補正カーブを求めておいた。鋼材比は呼び名 17mm, 23mm, 32mm に対して、それぞれ 2, 3.8, 8%である。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状および凝結時間

表-3 にフレッシュ性状および凝結時間の結果を示す。いずれの W/B においても、膨張材を混和した EX シリーズの場合に SP 添加量が増加したが、SP 量の調整により PL と同等のスランプフローが得られた。凝結時間については W/B に拘わらず、EX シリーズが PL より 3 時間程度早かった。

3.2 強度特性

図-2 に圧縮強度と材齢の関係を示す。膨張材混和の影響は、W/B および温度条件に拘わらず、材齢 3~7 日程度までの圧縮強度の増進に現れており、これは比表面積が大きく、初期反応性の高い膨張材の作用によるものと考えられる。材齢 28 日の強度は EX と PL でほぼ同等であった。

温度条件別に見ると、膨張材の有無に拘わらず、材齢 28 日までの圧縮強度は 80℃・90℃履歴 > 45℃履歴 > 20℃養生の順に高い傾向があった。80・90℃履歴下の強度発現性は材齢初期に大きく進展し、材齢 7 日付近でほぼ最大値に達する傾向が認められる。そのため、80・90℃履歴と 20℃養生の強度差は、材齢 7 日で 35~55%程度、材齢 28 日で 5~15%程度となり、材齢の進行に伴って強度差は小さくなる。

図-3 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図中には日本建築学会の関係式¹⁰⁾を併記している。膨張材の有無や温度条件に拘わらず、両者には良い相関性があり、建築学会式とも概ね良く対応していた。

図-4 に割裂引張強度と圧縮強度の関係を示す。膨張材の有無による傾向の差異はなく、圧縮強度 100N/mm²程度までは両者の関係に概ね良い相関性が認められた。それ以上の圧縮強度領域になると、同一圧縮強度における引張強度に 2~2.5N/mm²程度のバラツキが見られ、図

中に併記した野口ら¹¹⁾の提案式による場合よりも実測値が低くなる傾向となった。

3.3 自己収縮・膨張ひずみ

図-5 に自己収縮・膨張ひずみと有効材齢 (式 (1)) の関係を示す。ひずみの起点は凝結の始発とした。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (1)$$

t_e : 有効材齢, t_e : 温度が T ℃である期間の日数
 T_0 : 1℃

自己収縮・膨張ひずみは、膨張材の有無に拘わらず、材齢初期に高い温度履歴を受けるほど、膨張・収縮の速

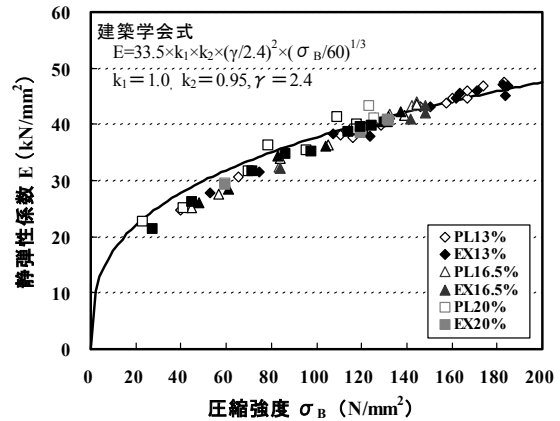


図-3 静弾性係数と圧縮強度の関係

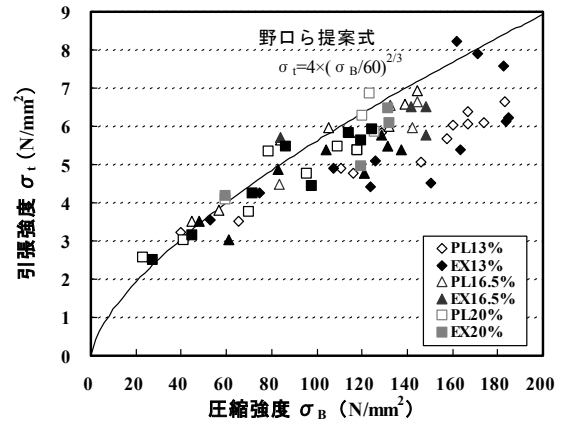


図-4 引張強度と圧縮強度の関係

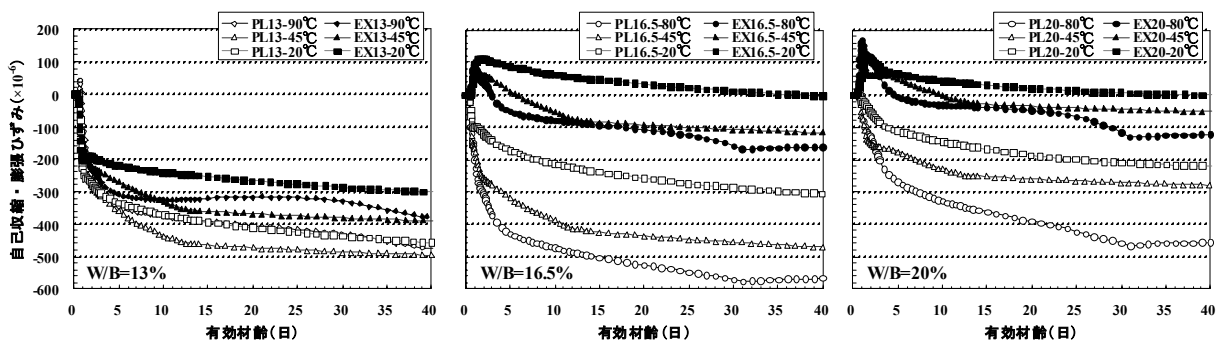


図-5 自己収縮・膨張ひずみと有効材齢の関係

度が大きくなり、最終値も異なる傾向があることから、有効材齢で一義的に表現することは難しいことが分かる。既往の研究¹²⁾でも同様の結果が報告されており、温度条件に伴うシリカフェームの反応速度の変化が影響しているものと考えられる。

膨張材の有無で比較すると、いずれの W/B、温度条件においても、EX シリーズが PL より自己収縮ひずみが小さくなっており、高温履歴を受けても膨張材の自己収縮低減効果が明確に生じることが分かる。EX と PL のひずみ差は、80・90℃養生において W/B=13, 16.5, 20%でそれぞれ 100, 400, 330×10⁻⁶程度であり、W/B=16.5%の場合が20%よりも自己収縮の低減量が大きい傾向が認められた。20℃養生の場合は、W/B=13, 16.5, 20%でそれぞれ 150, 300, 220×10⁻⁶程度であった。

なお、W/B=13%・90℃履歴の PL において、温度上昇時に膨張ひずみが生じているが、この一因としては線膨張係数を一律で10×10⁻⁶/℃としていることが考えられる。すなわち、セメントペースト量が多い超高強度コンクリートは、特に若材齢時の線膨張係数が大きく、これを10×10⁻⁶/℃一定として計算した場合、初期温度上昇時の自己収縮を過小評価している可能性がある¹³⁾。

図-6 に有効材齢 40 日（実材齢は 90℃履歴で 7 日、

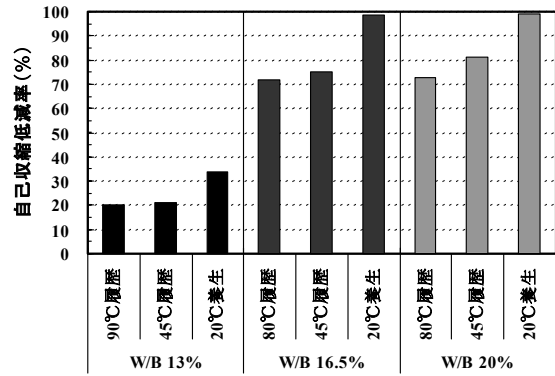


図-6 自己収縮ひずみの低減率

80℃履歴で 16 日、45℃履歴で 35 日、20℃養生で 40 日)における、EX の PL に対する自己収縮ひずみの低減率を示す。温度履歴下の低減率は W/B=13, 16.5, 20%でそれぞれ約 20, 70, 70%であり、45℃履歴と 80・90℃履歴では低減率に顕著な差が認められなかった。一方、20℃養生下における低減率は、W/B=13, 16.5, 20%でそれぞれ約 35, 98, 98%であり、温度履歴の場合より大きい結果となった。高温履歴を受ける場合、ベース配合 PL の自己収縮ひずみが、特に W/B=16.5, 20%において、20℃養生下より大きくなる傾向(約 1.5~2.0 倍)にあるため、

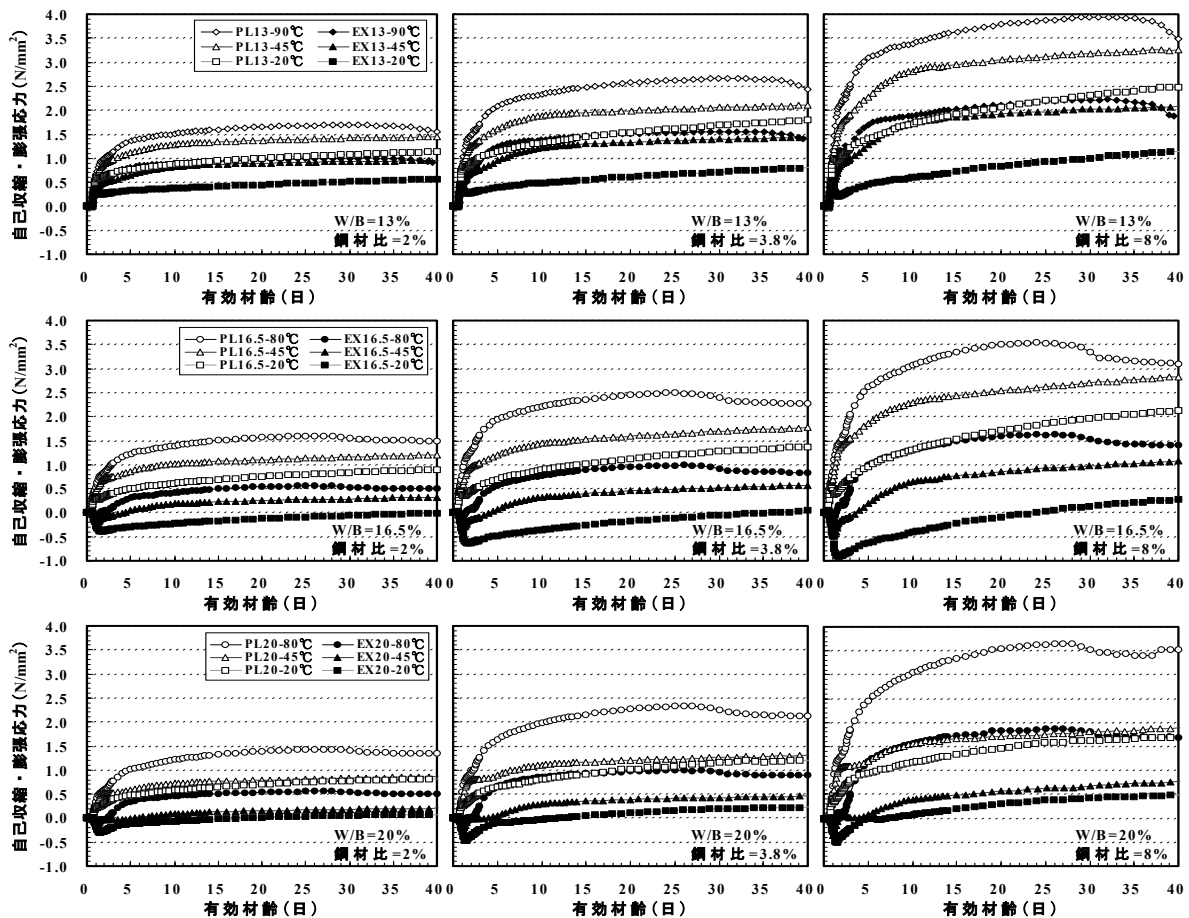


図-7 自己収縮・膨張応力と有効材齢の関係

低減率で見ると、20℃養生下の場合により大きく現れたと考えられる。W/B や温度条件の組み合わせによって、膨張材の効果が異なって現れることについては、セメントおよび膨張材の水和反応メカニズムの観点から、より詳細に検討する必要がある。

3.4 自己収縮・膨張応力

図-7に自己収縮・膨張応力と有効材齢の関係を示す。自己収縮・膨張応力は鋼材ひずみを基に鋼材とコンクリートの力の釣り合い式より算出したものである。なお、応力の起点はひずみの場合と同様に凝結の始発とした。

膨張材の有無に拘らず、W/B が低いほど、また材齢初期に高い温度履歴を受けるほど大きな自己収縮応力が生じた。

EXによる自己収縮応力の低減量について、PL との差を見ると、W/B によらず、鋼材比 2, 3.8, 8%でそれぞれ 0.5~1.0, 0.7~1.5, 1.2~1.8N/mm² 程度の明らかな低減効果が認められ、80・90℃履歴下の方が20℃養生より大きい傾向であった。

図-8に有効材齢40日でのEXによる自己収縮応力の低減率を示す。温度履歴下における低減率は、W/B と鋼材比の組み合わせにおいて一定の傾向が認められないものの、W/B=13, 16.5, 20%でそれぞれ 30~45%, 55~70%, 50~75%程度が得られている。

拘束の有無による膨張材の作用効果を検討するため、自己収縮応力の低減率と自己収縮ひずみの低減率とを対比して図-9に示す。W/B=16.5, 20%では、養生条件および鋼材比に拘わらず、自己収縮ひずみの低減率が自己収縮応力の低減率より 0~30%程度大きい傾向が見られた。一方、W/B=13%の場合は、自己収縮応力の低減率が大きく現れており、他の場合と傾向が異なった。これより、自己収縮ひずみの低減率と自己収縮応力の低減率は1:1の関係にはなく、実際のRC部材で生じる応力の挙動をひずみの挙動から一義的に評価することは難しいことが分かる。ただし、本検討で得られたW/Bによる傾向の違いについては、詳細な検討が必要である。

自己収縮応力の挙動が、膨張材の有無、温度条件、鋼材比の相違によって変化することは、諸々の要因を含む時間依存性の現象であり、今後、クリープ特性を明確にするなど、機構解明を進めたいと考えている。

なお、80・90℃履歴を与えた場合のひずみ(図-5)および応力(図-7)の挙動について、変曲点が生じる

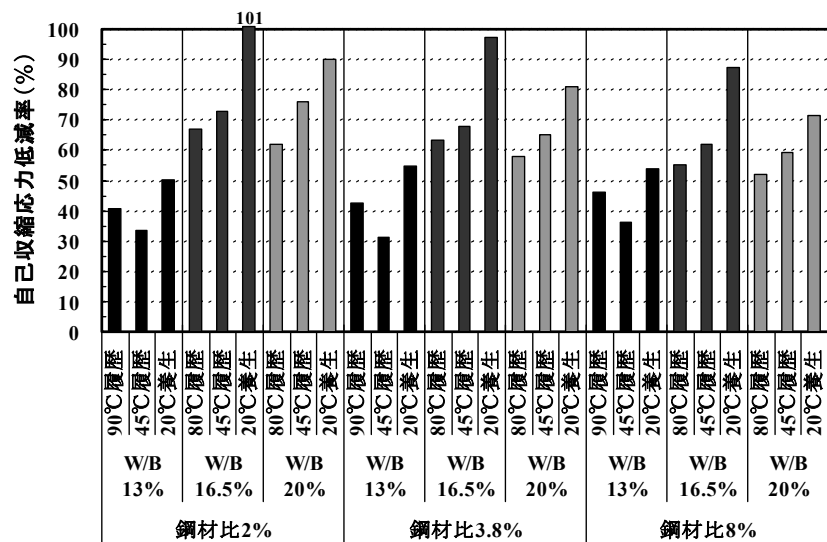


図-8 自己収縮応力の低減率

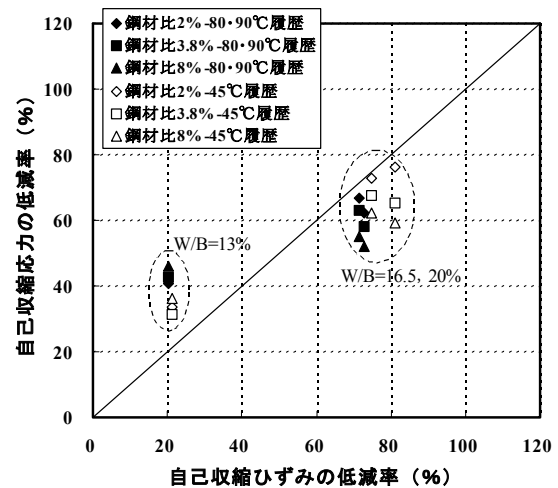


図-9 自己収縮応力の低減率と自己収縮ひずみの低減率の比較

現象が有効材齢 25~35 日付近で認められた。この点について、寺本ら¹⁴⁾もシリカフェームを混和した低水結合材比のセメントペーストを用いた検討において、同様の結果を示しており、この理由として、高温下でエトリンガイトから転化したモノサルフェートが、常温へ降下した際にエトリンガイトへ再生成することにより膨張圧が生じた可能性を考察している。コンクリートレベルでの長期挙動を把握するとともに、セメント化学的な視点からも検討を加える予定である。

4. まとめ

シリカフェームプレミックスセメントを使用したW/B=13~20%の超高強度コンクリートへの膨張材の使用効果を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 圧縮強度は、膨張材の混和により、若材齢時では若干高く、長期強度はほぼ同等になる傾向があった。静弾性係数は、温度条件に拘わらず、圧縮強度と良

い相関性があった。

- (2) 実部材を想定した温度履歴を与えた条件下においても、膨張材の使用は自己収縮ひずみを明らかに低減する効果を有していた。低減率は水結合材比によって異なったが、20～75%の範囲であった。
- (3) 鋼材による拘束を受けた条件下で生じる自己収縮応力に対しても、膨張材は明確な低減効果を発揮した。低減率は鋼材比 2～8%において 30～75%程度であり、自己収縮ひずみの場合と同等以上の効果が認められた。
- (4) 膨張材の有無に拘わらず、温度履歴下の自己収縮・膨張ひずみおよび応力の挙動は 20℃養生下と明らかに異なり、有効材齢による一義的な評価は難しい。

謝辞：本研究は平成 21 年度国土交通省住宅局「住宅・建築関連先導技術開発助成事業」の一環として実施したことを付記する。

参考文献

- 1) 陣内浩，黒岩秀介，寺内利恵子，阿部剛士：設計基準強度 150N/mm²の低収縮型超高強度コンクリートの製造と施工，セメント・コンクリート，No.723，pp.18-24，2007.3
- 2) 三井建郎，小島正朗，高尾全，佐藤敏之：設計基準強度 150N/mm² 超高強度コンクリートによる超高層集合住宅の施工，セメント・コンクリート，No.723，pp.25-31，2007.3
- 3) 丸山一平，鈴木雅博，中瀬博一，佐藤良一：温度履歴が RC 柱の初期応力・初期欠陥に及ぼす影響に関する実験的検討—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 1—，日本建築学会構造系論文集，第 73 巻，第 629 号，pp.1035-1042，2008.7
- 4) 谷村充，鶴田昌宏，三谷裕二，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.1013-1018，2003.7
- 5) 鈴木雅博，中瀬博一，丸山一平，佐藤良一：超高強度膨張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
- 6) 陣内浩，黒岩秀介，並木哲，渡邊悟士：超高強度コンクリートの長さ変化に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.393-394，2005
- 7) 郭度連，谷村充，佐竹紳也，柴垣昌範：膨張材による超高強度コンクリートの収縮低減，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.471-476，2006
- 8) 谷村充，藤田仁，三谷裕二，兵頭彦次，郭度連：超高強度コンクリートの自己収縮制御における膨張材の適用性，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.277-278，2009.8
- 9) 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.51-54，2002
- 10) (社)日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事，pp.185-186，2009
- 11) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 472 号，pp.11-16，1995.6
- 12) 松田拓，嶋毅，河上浩司，西本好克：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集，Vol.28，No.1，pp.1247-1252，2006
- 13) 楊楊，佐藤良一：高強度コンクリートの長さ変化の成分分離とその評価，セメント・コンクリート，No.665，pp.41-46，2002
- 14) 寺本篤史，丸山一平，三谷裕二，谷村充：低水結合材比シリカフェームセメントペーストの自己収縮性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.601-606，2009