

論文 膨張材による超高強度コンクリートの収縮低減

郭度連*1・谷村充*2・佐竹紳也*3・柴垣昌範*4

要旨: 超高強度コンクリートの自己収縮抑制対策として膨張材を用いる場合の膨張材の適切な添加量, 膨張材の有効性について確認するとともに再膨張現象について検討を行った。その結果, 水セメント比が極度に低い超高強度コンクリートの特性上, 過添加の場合は未反応の膨張材が残存し再膨張する可能性があることが示され, 超高強度コンクリート用の膨張材としては, 出来るだけ未水和の膨張材が残存しないような膨張材, すなわち, 膨張性能を十分有しながら, 水和反応の早い早強性の比表面積の大きい膨張材が望ましいことを提案している。

キーワード: 超高強度コンクリート, 早強性膨張材, 自己収縮, 比表面積, 圧縮強度, 収縮低減

1. はじめに

構造物の高層化・高耐久化・スリム化等の要望に伴い, コンクリートの高強度化が要求されており, 圧縮強度 150N/mm² クラスの超高強度コンクリートが実用化されている。一方で, 超高強度コンクリートは, 低水結合材比, シリカフェーム等を用いたリッチな単位結合材量により, 自己収縮ひずみが顕著に大きくなる。超高強度コンクリートの自己収縮抑制対策の一つとして膨張材が検討されており, 収縮低減に効果が認められているが, その基礎データが十分とは言えない現状である。

既往の研究からは, 超高強度コンクリートに膨張材を用いる場合, 原因不明の異常膨張が生じたケースについても報告されている。例えば, 鈴木らの研究では²⁾, 水セメント比 15%, 単位膨張材量 35kg の場合, 材齢 100 日を越えてから急激な再膨張が生じていることを確認している。また, 松田らの研究では³⁾, 水セメント比 16%, 単位膨張材量 30kg の場合, 材齢 60 日以降再膨張傾向が現われている。この両者の研究は封緘状態での再膨張であることに対して, 陣内らの研究では⁴⁾, 水セメント比 15%, 単位膨張材量 40kg の場合, 7 日封緘後気中環境において再膨張現象が生じている。共通点としては, 極

低水セメント比の超高強度コンクリートであること, 膨張材の使用量が標準使用量より多いことが挙げられるが, 同量の使用量でも再膨張の生じるケースと生じないケースがあり, 再膨張の生起条件, メカニズムについては不明なところが多い現状である。

そこで, 本研究は超高強度コンクリートにおいて膨張材の適正な添加量, 膨張効果等を確認するとともに, 再膨張現象について検討することで, 水セメント比が極度に低い超高強度コンクリートの特性上, 適切な膨張材の使用についての提案を行っている。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に使用材料を, 表-2 にコンクリートの配合を示す。セメントは, 低発熱系のセメントとシリカフェームを混合したシリカフェームプレミックスセメント (SFPC) を用いている。膨張材は, 石灰系 2 種類, エトリンガイト・石灰複合系 1 種類を用いており, 3 種類はそれぞれ比表面積が異なるものである。膨張材の添加量は一般コンクリートの標準使用量 20kg/m³ から使用量を増加させた 40kg/m³ まで検討している。コンクリー

表-1 使用材料

材料	記号	物性
シリカフェームプレミックスセメント	SFPC	密度3.07g/cm ³ 、比表面積6160cm ² /g
膨張材	EX I	石灰系、密度3.16g/cm ³ 、比表面積3280cm ² /g
	EX II	早強性石灰系、密度3.19g/cm ³ 、比表面積4920cm ² /g
	EX III	エトリンガイト・石灰複合系、密度3.09g/cm ³ 、比表面積3904cm ² /g
粗骨材	G	密度2.64g/cm ³ 、吸水率0.67%、F.M.6.74
細骨材	S	密度2.61g/cm ³ 、吸水率1.66%、F.M.2.88
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤

*1 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 太平洋セメント株式会社 中央研究所 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*3 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 グループリーダー 工修 (正会員)

*4 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 主任研究員 (正会員)

トの水結合材比 W/B は 16.5%，単位水量は 155kg/m³ 一定にした。目標スランプフローは 65±10cm，空気量は 2%以下とし，目標スランプフローを満足するように高性能減水剤の使用量を調整した。

2.2 実験方法

(1) フレッシュ性状

スランプフロー試験は「コンクリートのスランプフロー試験および 50cm フロー到達時間の測定」(JIS A 1150) に，空気量試験は「フレッシュコンクリート量の圧力による試験方法 (空気室圧力方法)」(JIS A 1128) に準じて行った。練り上がり温度は棒状温度計を用いて練混ぜ後測定した。

(2) 凝結試験

凝結試験は，「コンクリートの凝結時間試験方法」(JIS A1147) に準じて行った。

(3) 圧縮強度

コンクリートは打設 24 時間後脱型し，水中養生，封緘養生，封緘養生 7 日後気中養生の 3 種類を行った。水中養生は 20±1℃の水中で，封緘養生は脱型後直ちにポリプロピレンシートおよびアルミ箔で完全に密封し，20±1℃の恒温室で行った。また封緘養生 7 日後気中養生は封緘 7 日後封緘を解除し，20±1℃，相対湿度 60%の恒温恒湿室で行った。圧縮強度の測定は，表-3 に示すように，それぞれの養生につき所定の材齢で行った。

(4) 自己収縮

自己収縮ひずみの測定は，「(仮) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法」⁵⁾ に準じ，低弾性型の測温機能付きの埋込み型ひずみ計を用いて行った。図-1 に示すように，10×10×40cm の鋼製の型枠を作製し，埋込み型ひずみ計を中央に設置した。型枠の内側と供試体との摩擦抵抗を低減するため，型枠の内側にはテフロンシートとポリエステルフィルムをすき間なく敷設し，両端部はフリーになるように緩衝材を設けた。コンクリート打設 24 時間後脱型し，ポリプロピレンシートおよびアルミ箔で完全に密封し，20±1℃の恒温室で測定を行った。供試体は 1 水準当たり 2 体とし，2 体の平均値を測定値とした。

自己収縮ひずみは，コンクリートの線膨張係数を 10×10⁻⁶/℃と仮定し，自己収縮試験体の全ひずみから温度ひずみを差し引いて求めた。自己収縮ひずみの起点は，注水後の測定

値が著しく変化を示す時点と凝結試験の始発がほぼ同等であることから，凝結試験の始発時刻を起点とした。

(5) 乾燥収縮

埋込み型ひずみ計を用いて作製した自己収縮試験体の一部は，封緘材齢 7 日後封緘を解除し，20±1℃，相対湿度 60±5%の恒温恒湿室で引続き乾燥収縮の測定を行った。



図-1 試験体の作製

表-2 コンクリートの配合

記号	W/B (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	SFPC	EX	S	G
PL	16.5	155	939	0	518	839
EX I-20			919	20	526	
EX I-40			899	40	526	
EX II-20			919	20	526	
EX II-30			909	30	526	
EX II-40			899	40	527	
EX III-40			899	40	526	

表-3 試験水準および試験材齢

記号	試験水準				
	自己収縮	乾燥収縮	圧縮強度		
			水中	封緘	封緘7日後気中
PL	○	○	28, 91日	7, 28, 91, 440日	28, 91, 440日
EX I-20	○	—		28, 91, 440日	—
EX I-40	○	○		7, 28, 91, 440日	28, 91, 440日
EX II-20	○	—		28, 91, 440日	—
EX II-30	○	—		28, 91, 440日	—
EX II-40	○	○		7, 28, 91, 440日	28, 91, 440日
EX III-40	○	○		7, 28, 91, 440日	28, 91, 440日

表-4 コンクリートのフレッシュ性状

記号	SP/ (SFPC+EX)	フレッシュ性状				凝結(h-m)	
		スランプフロー		空気量 (%)	Temp (°C)	始発	終結
		(cm)	sec				
PL	0.80%	69.0	10.6	1.0	23.0	9-07	11-32
EX I-20	0.85%	61.0	17.5	1.4	22.5	6-51	8-59
EX I-40	0.90%	74.0	12.2	1.1	22.3	6-40	8-55
EX II-20	0.85%	59.5	17.2	1.6	24.5	6-57	9-07
EX II-30	0.90%	66.0	11.7	1.0	24.5	6-20	8-15
EX II-40	0.95%	73.5	11.3	1.3	24.0	6-52	8-45
EX III-40	0.90%	63.5	14.4	1.3	23.5	5-49	7-55

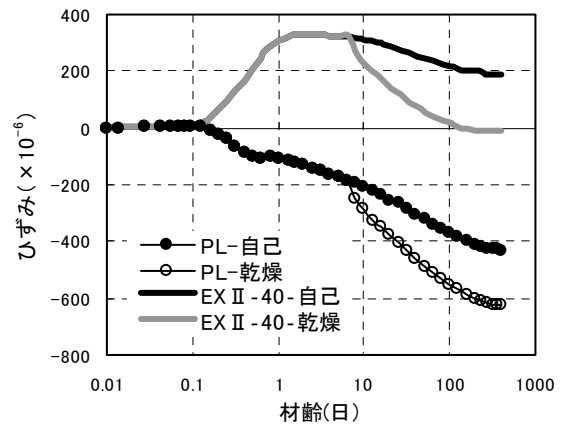
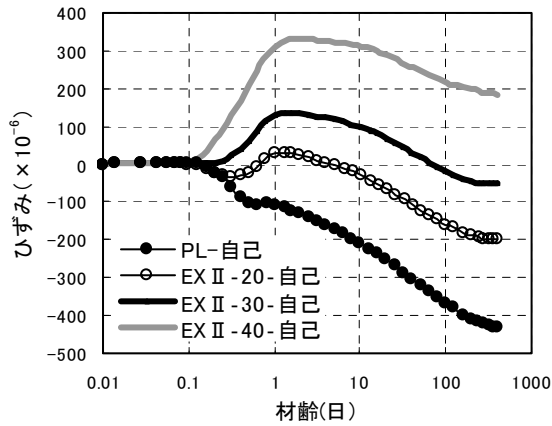


図-2 膨張材による収縮ひずみの低減効果

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状および凝結特性

表-4にコンクリートのフレッシュ性状および凝結試験結果を示す。目標スランプフローは $65 \pm 10\text{cm}$ 、空気量は2%以下であり、全水準において目標値を満足している。

目標スランプフローを満足するための高性能減水剤量は、膨張材を用いた場合、PLの0.8%に比べて若干増加する傾向にあり、膨張材の種類による差は大きくない。

凝結時間は、膨張材の添加により若干早くなる傾向にあり、膨張材の種類および添加量による影響はそれほど大きくはない。

3.2 膨張材による収縮低減効果

図-2の左図にプレーンおよび早強性膨張材 EX II を用いたコンクリートの自己収縮ひずみを示す。プレーンコンクリートの自己収縮は、材齢 10 日で総ひずみの約半分に達しており、材齢 400 日で約 430×10^{-6} になっている。一方、膨張材の添加によって、単位膨張材量 20kg/m^3 では約 30×10^{-6} 、 30kg/m^3 では約 140×10^{-6} 、 40kg/m^3 では約 330×10^{-6} 膨張しており、材齢 400 日の自己収縮は、 20kg/m^3 では約 200×10^{-6} 、 30kg/m^3 では約 50×10^{-6} の収縮、 40kg/m^3 では約 185×10^{-6} の膨張になっている。最大膨張量に達する時間は、 20kg/m^3 で 26 時間、 30kg/m^3 で 40 時間、 40kg/m^3 で 49 時間になっており、膨張材量が多いほど、膨張量も大きく、膨張持続時間も長くなる。一方、最大膨張量に達した後収縮に転じてからの勾配は、膨張と収縮のポテンシャルが拮抗することにより、膨張材の添加量が多いほど、緩やかである。したがって、最大膨張時点からの自己収縮量は、プレーンコンクリートに比べて少なくなる。言い換えれば、超高強度コンクリートにおいては、可視的な膨張量は少なくとも収縮低減効果は膨張量以上に発揮されるといえる。

材齢 7 日で気中に曝露した試験体の全収縮ひずみの測

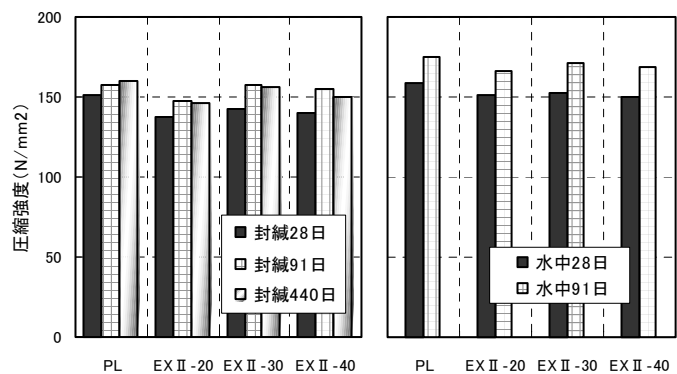


図-3 早強性膨張材 EX II による圧縮強度

表-5 圧縮強度

養生方法	圧縮強度 (N/mm2)				
	7日	28日	91日	440日	
PL	封緘	114	151	158	160
	封緘7日後気中	—	149	161	154
	水中	—	159	175	—
EX I -20	封緘	—	141	154	134
	水中	—	157	175	—
EX I -40	封緘	108	141	111	25
	封緘7日後気中		139	131	41
	水中	—	153	90	—
EX II -20	封緘	—	137	147	146
	水中	—	151	166	—
EX II -30	封緘	—	143	158	156
	水中	—	153	172	—
EX II -40	封緘	110	140	155	150
	封緘7日後気中		141	158	143
	水中	—	150	168	—
EX III -40	封緘	107	142	103	36
	封緘7日後気中		137	121	52
	水中	—	144	85	—

定結果を自己収縮と比較して図-2の右図に示す。ここでは自己収縮との区分の便宜上、自己収縮を含めた乾燥下の全収縮ひずみを乾燥収縮と称する。プレーンコンクリートの乾燥収縮ひずみは、材齢 400 日で約 600×10^{-6} になっている。膨張材 EX II を 40kg/m^3 添加したコンクリートの収縮ひずみは、材齢 400 日で約 0×10^{-6} になっており、自己収縮同様に膨張材の混和による収縮の低減効果が認められる。

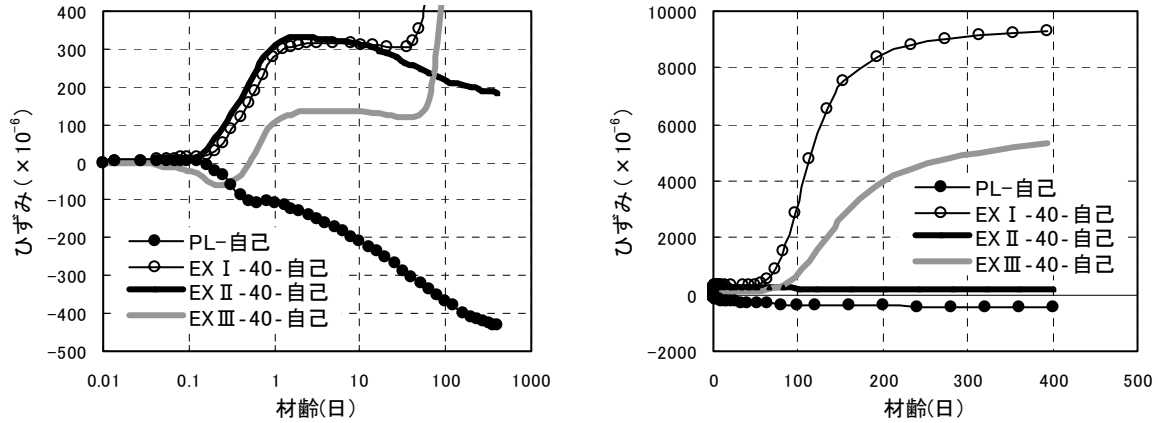


図-4 膨張材の種類による自己収縮の変化

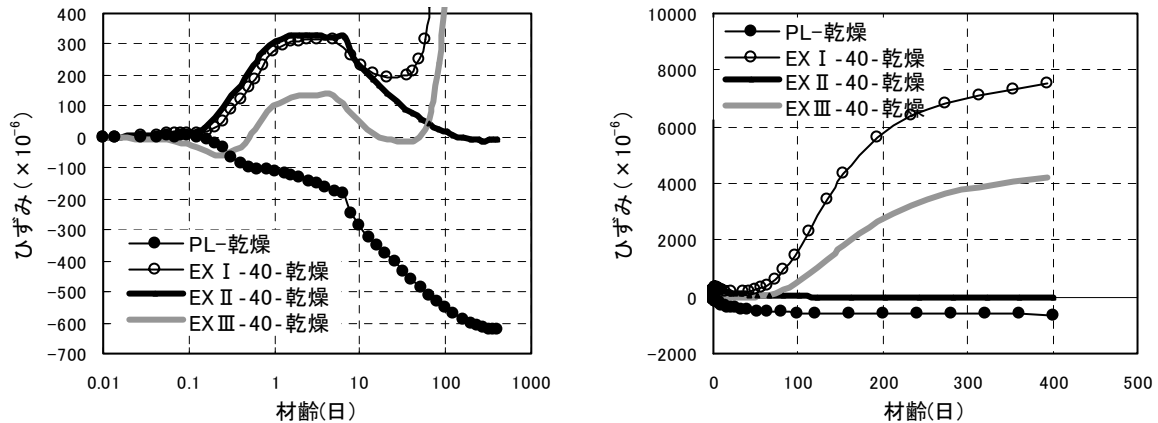


図-5 膨張材の種類による乾燥環境下のひずみの変化

図-3に膨張材 EX IIの添加による圧縮強度の変化を養生条件ごとに示す。添加量に関わらず、封緘、水中養生ともにプレーンに比べてほぼ同等の圧縮強度を示しており、膨張材の添加が圧縮強度に及ぼす影響はほとんど認められない。

3.3 超高強度コンクリートにおける再膨張現象

再膨張現象を検討するため、それぞれ比表面積の異なる3種類の膨張材を用い、標準添加量の2倍の40kg/m³を添加して行った自己収縮測定結果を図-4に示す。測定材齢400日までの結果を示しており、左図は初期材齢の変化を検討するため、横軸を対数軸で示している。前述のように、早強性膨張材 EX IIは材齢初期に有効に膨張し、自己収縮低減効果が認められる。一方、EX IおよびEX IIIは、初期の膨張量は異なるものの、材齢50日程度から再膨張を生じている。盛岡らは⁶⁾、水結合材比20~30%のモルタルに膨張材を用いた実験から、膨張材を混和した低水結合材比モルタルでは継続的な膨張が顕在化すると指摘している。一般に、セメントの完全水合に必要な水量はセメントの約40%で、約25%がセメントと化学的に結合し、残りの約15%がゲル水として存在すると知られており⁷⁾、水結合材比25%を割るような超高強度コンクリートでは、未反応の結合材が多く存在す

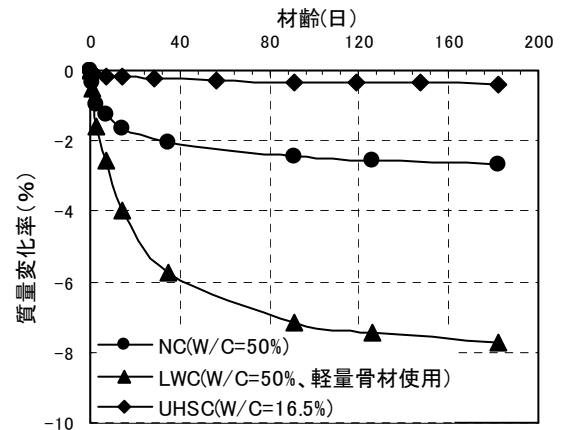


図-6 質量変化率の一例

るか、あるいは結晶水の不足した結晶が出来ていると推測される。このように残存する未反応の膨張材によって再膨張が生じていると考えられる。

しかし、自己収縮試験体のような水分の出入りのない封緘状態で材齢50日以上も経過してから再膨張が生じるためには、何らかの水分の供給源が必要である。極低水結合材比の超高強度コンクリートの内部は、自己収縮の原因にもなる自己乾燥 (self desiccation) が激しく、内部湿度は極限まで低下すると考えられる。そのような状態で骨材の含水状態以下まで自己乾燥が進み内部湿

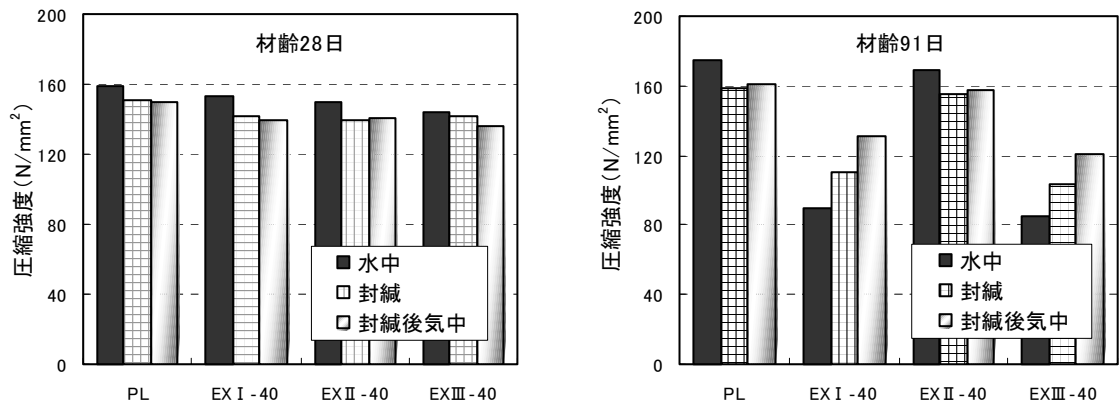


図-7 膨張材の種類による圧縮強度の変化

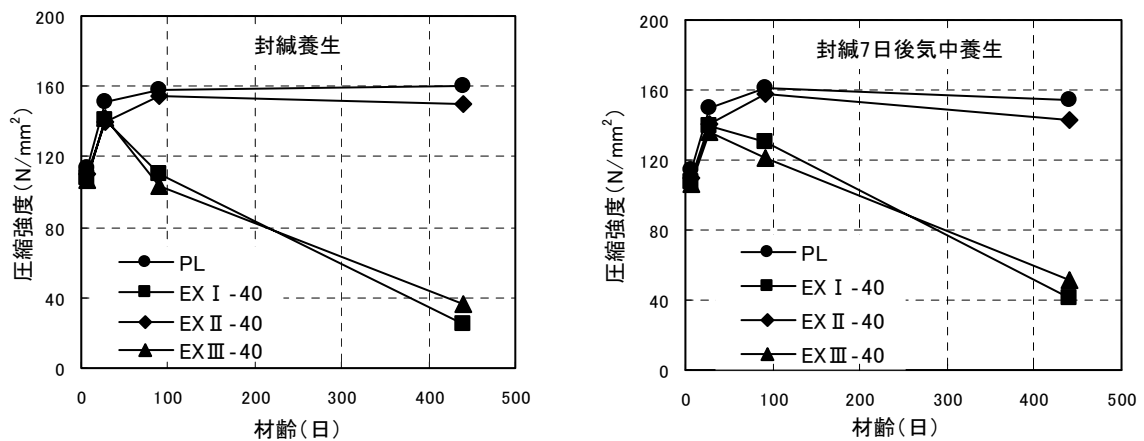


図-8 膨張材の種類による長期材齢の圧縮強度

度が低下すると、湿度勾配がドライビングフォースになり、骨材内部の水分を引っ張り出すような形で水分が強制的に供給されることも可能であると考えられる。本研究の配合から、粗骨材と細骨材の吸水率を水量として換算すると約 14kg/m^3 になり、封緘状態の試験体内部から約 14kg/m^3 の水が供給されるポテンシャルをもっていることになる。

図-5に封緘養生7日後気中養生した試験体のひずみの測定結果を示す。封緘の除去後、材齢約50日までは乾燥に伴う収縮を示しているが、その後EX IおよびEX IIIにおいて再膨張が生じている。超高強度コンクリートは、非常に緻密なコンクリートであり、水分の逸散、浸透は極めて少ない。図-6に水分逸散量の一例を示す。超高強度コンクリートの水分逸散量は、水セメント比50%のコンクリートの約1/7~1/8に満たない。すなわち、気中養生であっても表層部を除いた試験体の内部は、封緘養生とそれほど変わらないと考えられ、前述の封緘養生と同様のメカニズムで再膨張は生じると推測される。水中養生については、本研究でひずみの測定は行っておらず、推測の域を出ないが、再膨張は最も生じやすく、早い段階で生じると考えられる。水中養生でも養生水の浸透速度は追いつかず、自己乾燥は生じており⁸⁾、未反

応の膨張材が残存し、ゆっくりコンクリートの内部に浸透する水分によって再膨張が生じると考えられる。

一方、同量の膨張材添加量でもEX IIは材齢初期で有効に膨張し、養生条件に関わらず、再膨張は生じなく収縮低減効果が認められる。膨張材の粒度はコンクリートの膨張特性に大きく影響を及ぼしており⁹⁾、膨張率のみならず、反応速度等も大きく左右される。表-1に示したように、EX IIは比表面積が最も大きく、水和反応の早い早強性の膨張材であり、未水和の膨張材が残存する可能性が低いと考えられる。つまり、極低水セメント比の超高強度コンクリートには、出来るだけ未水和の膨張材が残存しないような膨張材、すなわち、膨張性能を十分有しながら、水和反応の早い早強性の比表面積の大きい膨張材が望ましいといえる。

図-7に材齢28日および91日の圧縮強度を、図-8に材齢440日の長期材齢の圧縮強度を養生方法別に示す。材齢28日の水中養生、封緘養生、封緘後気中養生の養生方法による圧縮強度の差はそれほど大きくなく、前述のような水分の移動、供給が少ないことを裏付けている。材齢28日から材齢91日の間で再膨張が生じたEX IおよびEX IIIは、材齢28日から91日にかけて大幅な強度の低下が生じている。水中養生の強度低下が最も大きく、

早い段階で再膨張が生じていることが推察される。440日の長期材齢においても再膨張に伴う圧縮強度の低下は継続的に進行している。一方、早強性膨張材 EXIIは、水分の供給があり最も再膨張が生じやすいと考えられる水中養生においても、材齢28日から91日にかけて圧縮強度は増加しており、今後も再膨張が生じる恐れはないといえる。

以上のように、超高強度コンクリートは水セメント比が極端に低いために、未反応の結合材が多く存在することから、膨張材の過添加には注意し、膨張材が残存する可能性の低い早強性の粉末度の高い膨張材の使用が望ましいといえる。

但し、本研究で述べた未反応膨張材の残存による再膨張現象は、あくまでも超高強度コンクリートのような極低水セメント比の特殊なコンクリートならでは限られた現象であり、一般的なコンクリートにおいては、生じ得ない現象である。なお、本研究の考察は無拘束状態から得られた結果であり、実際の拘束条件下では異なる様相を示すことも考えられ、今後拘束条件下の検討が必要である。

4. まとめ

超高強度コンクリートの収縮低減策として膨張材を検討し、その適切な使用について以下の知見が得られた。

- (1) 早強性膨張材は、超高強度コンクリートの収縮低減に有効であり、コンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響は軽微である。
- (2) 極低水セメント比のコンクリートで比表面積の小さい膨張材の添加量が多い場合は、未水合の残存膨張材による再膨張が生じる可能性もあり、超高強度コンクリート用の膨張材としては、水和反応の早い早強性の比表面積の大きい膨張材が望ましい。
- (3) 再膨張を生じさせる駆動力になる水分は、超高強度コンクリートの自己乾燥による湿度勾配に起因し、内部の骨材から供給される可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 例えば、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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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概要集, pp.393-394, 2005
- 5) 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
- 6) 盛岡実, 坂井悦郎: 膨張材を混和した低水結合材比モルタルの膨張挙動, 膨張コンクリートによる構造物の高機能化/高耐久化に関するシンポジウム, pp.103-108, 2003
- 7) 荒井康夫: セメントの材料化学, 大日本図書, pp.170, 1984
- 8) 田澤榮一, 宮澤伸吾: 水和による自己収縮, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.25-30, 1994
- 9) 栖原健太郎, 芦田公伸, 吉野亮悦, 辻幸和: 膨張材の粒度がコンクリートの膨張特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.255-260, 2007
- 10) 郭度連, 國府勝郎, 宇治公孝: コンクリートの乾燥化における水分の存在状態および経時変化, コンクリート工学論文集, Vol.16, No.3, pp.1-10