

各種収縮低減材料が繊維補強ポリマーセメントモルタルの硬化収縮性状に及ぼす影響

その他（別言語等）のタイトル	Influence of Various Shrinkage Reducing Materials on Setting Shrinkage Characteristics of Fiber Reinforced Polymer Cement Mortar
著者	乙茂内 郁美, 川村 和史, 崔 亨吉, 濱 幸雄
雑誌名	コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集 Proceedings of the Concrete Structure Scenarios, JSMS
巻	18
ページ	721-726
発行年	2018-10
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010343

論文

各種収縮低減材料が繊維補強ポリマーセメントモルタルの硬化収縮性状に及ぼす影響

乙茂内 郁美^{*1}, 川村 和史^{*2}, 崔 亨吉^{*3}, 濱 幸雄^{*4}

Influence of Various Shrinkage Reducing Materials on Setting Shrinkage Characteristics of Fiber Reinforced Polymer Cement Mortar

Ikumi OTOMONAI^{*1}, Kazusi KAWAMURA^{*2}, Choi HYEONGGIL^{*1} and Yukio HAMA^{*3}

要旨：著者らが開発した環境負荷低減型繊維補強ポリマーセメントモルタル (ECO-FRPCM) には収縮低減剤と膨張材が併用されている。しかし、収縮低減剤と膨張材の併用効果の適切な評価、収縮低減剤のコストダウン、高炉スラグ微粉末混入による中性化抵抗性低下に対する対策が課題となっている。そこで本研究では、膨張材による収縮補償効果を適切に評価するとともに、収縮低減効果のある安価な材料としての尿素および中性化抑制効果が期待できるシリコーンオイルが硬化収縮性状に及ぼす影響を把握することを目的とした実験的検討を行った。

キーワード：繊維補強ポリマーセメントモルタル、硬化収縮、収縮低減材料、尿素、シリコーンオイル

1. はじめに

近年、環境負荷低減の観点から産業副産物である高炉スラグ微粉末 (BFS) の利用が進んでいる。また、コンクリート構造物の高耐久化・長寿命化が求められ、劣化部位の補修の重要性が増している。代表的な補修材料として、優れた付着性と劣化因子に対する高い遮断性能を有するポリマーセメントモルタル (PCM) がある。また近年では、PCM に繊維を混入した繊維補強ポリマーセメントモルタル (FRPCM) の利用が拡大している。この補修材は、硬化収縮が小さく、付着性に優れ、繊維によりひび割れ分散性や靱性の向上が期待される材料である。また、収縮によるひび割れは、補修材の性能として重大な問題であることから、FRPCM において収縮性状に関する研究が行われている^{1), 2)}。

先行研究³⁾において、耐塩害性、耐凍害性、化学抵抗性に優れ、ひび割れ抑制も可能な、環境負荷低減型 FRPCM (ECO-FRPCM) の基本調合を提示した。この ECO-FRPCM は、結合材および細骨材には BFS を用い、収縮低減材料として膨張材と収縮低減剤を用いている。硬化収縮性状において、補修材の寸法安定性を評価する際の標準温湿度条件 (20℃, 60%RH) での長さ変化率が、基準値である 500×10^{-6} 以下を満足することが確認されている。また、幅広い温湿度条件での ECO-FRPCM の硬化収縮性状に関

する研究も行われている⁴⁾。それらの研究により、ECO-FRPCM の硬化収縮性状が基準値を満たすことが確認されている³⁾。

しかし、従来の硬化収縮性状の評価方法では、脱型までの膨張過程を考慮しておらず、膨張材が硬化収縮性状に及ぼす影響を評価していなかった。そこで、膨張材による収縮補償効果を評価するとともに、膨張材と収縮低減剤との併用効果が硬化収縮性状に及ぼす影響を把握する必要がある。

また、先行研究の基本調合において、収縮低減剤はコストが高いことが問題の一つであり、BFS を使用した場合、中性化が増すことが確認されていることから⁵⁾、ECO-FRPCM においても中性化抵抗性に関する検討が必要となる。一方、近年では、収縮低減効果に寄与し、コストが比較的安い混和材料として、尿素の利用や、収縮低減効果や中性化抵抗性の向上が確認されている混和材としてシリコーンオイル (SO) の利用を検討する研究が進んでいる^{6, 7, 8)}。

そこで本研究では、新たに収縮低減材料として期待される尿素と SO に着目し、膨張材と収縮低減剤の代用および併用により、硬化収縮性状や中性化抵抗性に及ぼす影響を把握する。また、尿素および SO の膨張材・収縮低減剤に対する代用効果の検討から、代用することで硬化収縮性状およびコストに期待ができる ECO-FRPCM の調合を提案する。

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士前期課程

*2 北電総合設計 (株) 修士 (工学)

*3 慶北大学校 建築学部 助教授 博士 (工学)

*4 室蘭工業大学大学院 工学研究科 暮らし環境系領域 教授 博士 (工学)

2. 実験計画および方法

2-1 使用材料

表 2-1 に使用材料を示す。実験のシリーズを、各収縮低減材料が ECO-FRPCM の物性に及ぼす影響の把握 (I-EX, I-U, I-SO,) と各種収縮低減材料の代用および併用効果の検討 (II-U, II-SO) とした。実験計画を表 2-2, 表 2-3, 表 2-4, 表 2-5, 表 2-6 に示す。水結合材比 (W/B) で 36% を基準とし、砂結合材比 (S/B) を 1.0, ポリプロピレン繊維を体積あたり 0.5vol.% 混入した。養生温湿度条件は、全て 20°C, 60%RH の標準養生とした。

シリーズ I-EX では、膨張材による収縮補償効果および収縮低減剤との併用効果を評価する。既調合 ES, 収縮低減材料無混入の P を基準に収縮低減材料の混入量を振り分けた供試体、全 6 水準を選定した。

シリーズ I-U では、尿素が ECO-FRPCM の物性に及ぼす影響を把握する。尿素を練り混ぜ水に置換し、混入量は標準混入量 (20kg/m³) を含む 5 水準とした。

シリーズ I-SO では、SO が ECO-FRPCM の物性に及ぼす影響を把握する。SO の添加率を通常の混和剤と同様に、結合材に対して 0~10% の 5 水準設けた。また、中性化抵抗性の評価を行った。

シリーズ II-U では、尿素と収縮低減材料の代用・併用効果を検討する。尿素混入量を 40 kg/m³ 一定とし、収縮低減材料の混入量を振り分け 6 水準とした。

シリーズ II-SO では、SO と収縮低減材料の代用・併用効果を検討する。SO 添加量を 3% 一定とし、収縮低減材料の混入量を振り分け 6 水準とした。

表-1 使用材料

材料	
結合材 (B)	OPC : 普通ポルトランドセメント (密度 : 3.17g/cm ³ , 比表面積 : 3500cm ² /g)
	BFS : 高炉スラグ微粉末 (密度 : 2.98g/cm ³ , 比表面積 : 3930cm ² /g)
	C : セメント混和用ポリマー (密度 : 1.05g/cm ³ , 酢酸アクリル系)
	シリカヒューム (密度 : 2.25g/cm ³)
細骨材 (S)	EX : 膨張材 (密度 : 2.93g/cm ³ , エトリンサイト系)
	高炉スラグ細骨材 (密度 : 2.66g/cm ³ , 粒径 : 0.6~1.2mm および 0.6mm 以下)
繊維	ポリプロピレン繊維 (PP : 密度 : 0.91g/cm ³ , 長さ 6mm)
混和材料	収縮低減剤 (SRA) (粉末特殊非イオン配合物)
	U : 尿素
	SO : シリコンオイル (粘度 : 20cst/25°C)
	減水剤 (ポリカルボン酸系) 消泡剤 (ポリエーテル系)

2-2 試験項目および方法

(1) 空気量およびフロー

練り混ぜ直後に空気量およびフローを、JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 (空気室圧力方法)」および JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」に準じて行った。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、φ50×100mm の円柱型枠を用い、20°C 封緘養生として、材齢 3, 7, 28, 91 日で、JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」の 5.試験

表-2 実験計画 (シリーズ I-EX)

記号	W/B (%)	S/B	繊維 (vol.%)	EX (%)	SRA (B×wt.%)	試験項目
P*	36.0	1.0	0.5	0	0	空気量 フロー 練り上がり温度 圧縮強度 膨張率* 硬化収縮
E1/2*				4		
E*				8		
S				0	4	
ES1/2*				4	2	
ES*				8	4	

表-3 実験計画 (シリーズ I-U)

記号	W/B (%)	S/B	繊維 (vol.%)	U (kg/m ³)	試験項目
U0	36.0	1.0	0.5	0	空気量 フロー 練り上がり温度 圧縮強度 硬化収縮
U10	34.7			10	
U20	33.5			20	
U40	31.3			40	
U60	29.1			60	

表-4 実験計画 (シリーズ I-SO)

記号	W/B (%)	S/B	繊維 (vol.%)	SO (B×wt.%)	試験項目
SO0	36.0	1.0	0.5	0	空気量 フロー 練り上がり温度 圧縮強度 硬化収縮 促進中性化
SO1				1	
SO3				3	
SO5				5	
SO10				10	

表-5 実験計画 (シリーズ II-U)

記号	W/B (%)	尿素 (kg/m ³)	EX (%)	SRA (B×wt.%)	試験項目
P-U0*	36.0	0	0	0	空気量 フロー 練り上がり温度 圧縮強度 膨張率* 硬化収縮
ES-U0*			8	4	
P-U40	31.3	40	0	0	
E-U40*			8	0	
S-U40			0	4	
ES1/2-U40*			4	2	

*膨張率試験を行う供試体

表-6 実験計画 (シリーズ II-SO)

記号	W/B (%)	SO (B×wt.%)	EX (%)	SRA (B×wt.%)	試験項目
P-SO0*	36.0	0	0	0	空気量 フロー 練り上がり 温度 圧縮強度 膨張率* 硬化収縮
ES-SO0*			8	4	
P-SO3*		3	0	0	
E-SO3			8	0	
S-SO3			0	4	
ES1/2-SO3*			4	2	

*膨張率試験を行う供試体

方法に準じて行った。

(3) 膨張率試験

図-1 に膨張率試験の概要を示す。膨張率試験は、φ100×200mm の円筒型枠を用い、20℃封緘養生を行い、JCI S 009 2012「円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法」に準じて行った。

(4) 硬化収縮試験

硬化収縮試験では、40×40×160mm の角柱供試体を用い、打込みから2日後に脱型し、20℃60%RHの恒温恒湿室で28日後（乾燥26日後）までの長さ変化率と質量変化率をJIS A 1129-3「モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法—第3部：ダイヤルゲージ法」に準じて測定した。

(5) 促進中性化試験

促進中性化試験は、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じ、40×40×160mm の角柱供試体を用いた。四面をブチルゴム付きアルミテープで覆い、二面開放状態にし、促進期間4, 8, 13週で割裂断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し中性化深さを測定した。促進条件は、温度20±2℃、湿度60±5%、CO₂濃度5±0.2%とした。

3. 実験結果および考察

3-1 膨張材の収縮補償効果と収縮低減剤との併用

シリーズI-EXのECO-FRPCMの膨張率試験の結果を図-2に示す。膨張材の混入量に応じて膨張ひずみが増大することを確認した。また、膨張材のみを混入した供試体E1/2、Eよりも膨張材と収縮低減剤を併用した供試体ES1/2、ESの方が膨張ひずみは大きくなる傾向となった。併用していない供試体は、材齢2日以降から収縮挙動を示しているが、円筒型枠を用いた膨張率試験では、収縮ひずみを測定することは出来ないため、初期膨張を終え、元の長さに戻ったことが考えられる。これまでも併用による膨張挙動は確認されており、収縮低減剤そのものは膨張作用に関与しないが、収縮低減剤には膨張材の膨張作用を高めるものと、阻害するものが存在することが明らかとなっている⁹⁾。しかし一般には、膨張材と収縮低減剤を併用すると、単体での使用よりも収縮ひずみが小さくなることが確認されている¹⁰⁾。本実験より、膨張材と収縮低減剤を併用することで膨張挙動に影響を及ぼすことから、硬化収縮試験において、膨張材の収縮補償効果を考慮して評価する必要がある。ここで、図-3に材齢28日までの収縮ひずみを収縮補償の有無で示す。材齢2日までの膨張ひずみにその後の収縮ひずみを結合させた結果を、収縮補償を考慮した収縮ひずみとして示す。膨張材を混入していない供試体は、供試体Pの膨張率試験

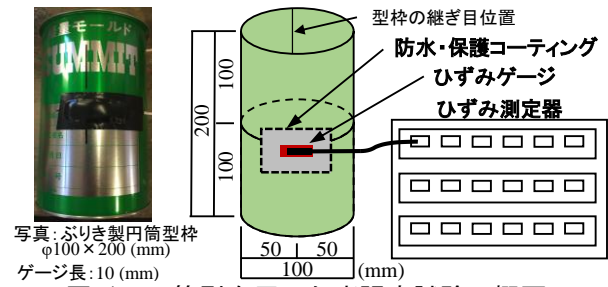


図-1 円筒型を用いた膨張率試験の概要

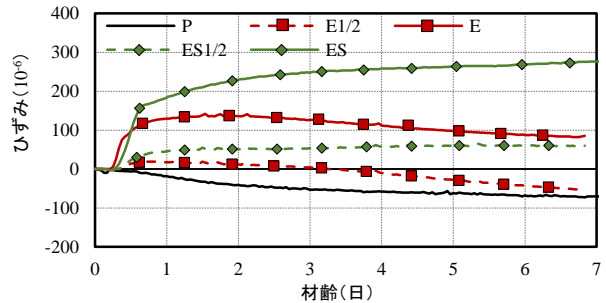


図-2 シリーズ I-EX の膨張率試験結果

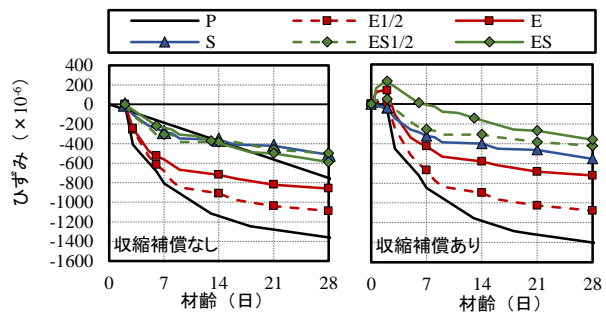


図-3 収縮補償の有無と長さ変化率

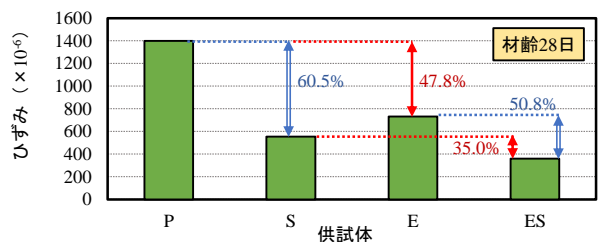


図-4 膨張材と収縮低減剤の併用効果

結果を用いた。膨張率試験結果より、ESでは200×10⁻⁶程度の収縮補償効果により収縮ひずみが低減したと考えられる。なお、図-3は拘束状態での膨張率試験結果に、自由状態での硬化収縮試験結果を結合した結果である。本実験では、拘束状態での硬化収縮の測定は困難であり、拘束状態での収縮量は自由状態での収縮量と同等あるいは小さい結果になると考えられる。従って、硬化収縮の結果が自由状態ではあるが、拘束条件での膨張および収縮によるひずみが、同程度の変化または小さくなるのであれば、相対比較を行う上では、問題はないと判断している。

図-4に膨張材と収縮低減剤の併用効果を示す。膨張材および収縮低減剤を併用したESが最も収縮ひ

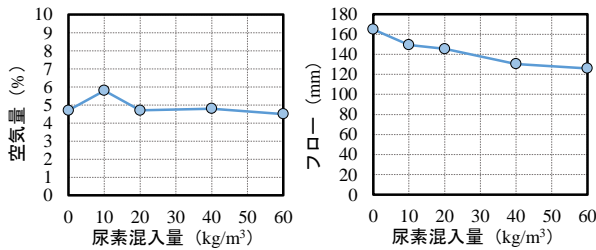


図-5 シリーズ I-U のフレッシュ性状

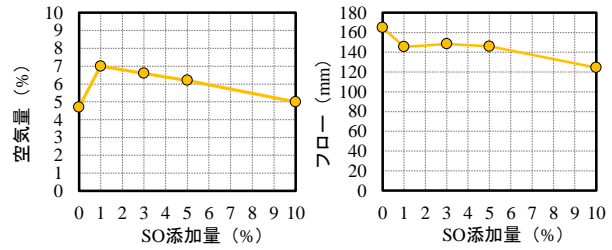


図-9 シリーズ I-S0 のフレッシュ性状

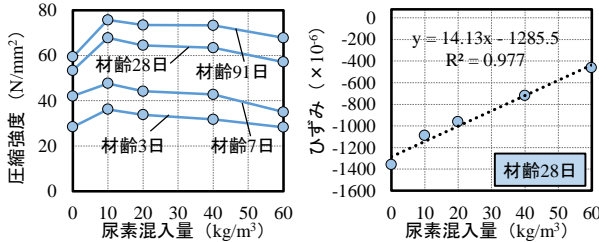


図-6 尿素混入量と圧縮強度の関係

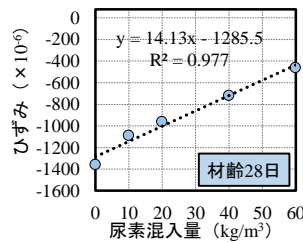


図-7 尿素混入量と長さ変化率の関係

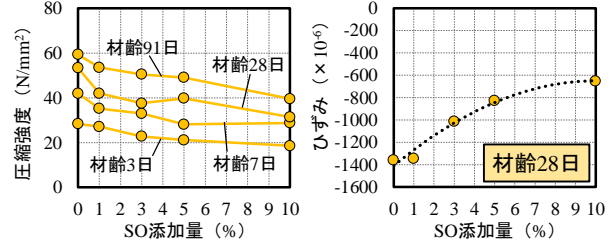


図-10 SO添加量と圧縮強度の関係

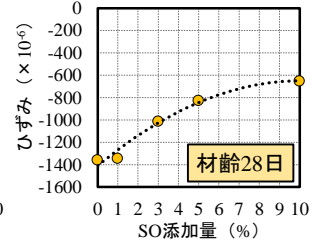


図-11 SO添加量と長さ変化率の関係

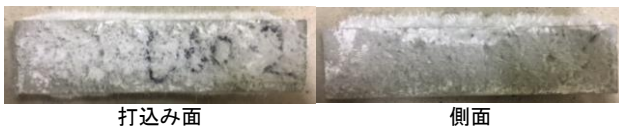


図-8 尿素結晶の析出

ずみを低減させる結果となった。しかし、単体での使用による収縮低減率よりも、S に膨張材を併用した場合と E に収縮低減剤を併用した場合の収縮低減率が低く、既往研究¹⁰⁾にあるような、併用により更なる収縮低減率が向上する併用効果は確認されなかった。

3-2 尿素が ECO-FRPCM の物性に及ぼす影響

シリーズI-U の ECO-FRPCM のフレッシュ性状試験の結果を図-5 に示す。尿素による空気量への影響は小さいが、フローでは、混入量の増加に伴い低下する傾向となった。これは尿素を練り混ぜ水に置換するため、単位水量が低下し、実質の水結合材比 (W/B) が低下するためだと考えられる。

図-6 に尿素混入量と圧縮強度の関係を示す。コンクリートにおいて尿素を混入するほど初期強度が低くなる⁵⁾ことが懸念されていたが、ECO-FRPCM の場合、値にばらつきはあるが大きな強度差は見られず、圧縮強度への影響は小さいことを確認した。

図-7 に尿素的の混入量と収縮ひずみの関係を示す。材齢 28 日における尿素的の混入量と収縮ひずみの関係を見ると、両者は比例関係となっている。このことから、尿素的の混入量の増加に伴い収縮は低減されることが推測できる。尿素が収縮低減効果を有する理由として、単位水量の低減により、水分の逸散量が低減し、収縮低減効果に寄与したと考えられる⁵⁾。

図-8 に尿素結晶の析出の写真を示す。脱型から 2

日目 (乾燥 2 日目) に尿素 60kg/m³ 混入した供試体表面から白色の尿素結晶の析出を確認した。これは尿素の水に対する溶解率が高く、ヘンリー定数が非常に小さいため⁵⁾、非揮発性であることから、尿素を混入した水溶液の水のみが蒸発し、尿素が再結晶して表面に析出したことが考えられる。したがって、尿素的の混入量に応じた収縮低減効果が期待できるが、60kg/m³ 以上混入すると表面に尿素が結晶として析出する。尿素混入において最も懸念されるアンモニアの排出につながる可能性もあるため、十分に注意して使用する必要がある。

3-3 SOが ECO-FRPCM の物性に及ぼす影響

シリーズI-SO の ECO-FRPCM のフレッシュ性状試験の結果を図-9 に示す。SO は消泡剤を混入したため、その他の供試体と比較すると、SO の添加量に応じて空気量は低下する結果となった。フローにおいても、SO の添加により低下する傾向となり、特に添加量が 5%~10% までの間で低下が大きくなった。

図-10 に SO 添加量と圧縮強度の関係を示す。SO 添加量の増加に伴い圧縮強度は低下し、材齢を重ねるにつれその低下率が大きくなる傾向が見られた。

図-11 に SO 添加量と収縮ひずみの関係を示す。尿素とは異なり曲線で表せ、SO 添加量の増加に伴い収縮が低減する結果となった。しかし、添加量 10% 以上で低減の限界値があることが推測される。

促進中性化試験では、促進期間を 4, 8, 13 週設けたが、13 週においても、SO0 での中性化を確認できなかった。そのため本実験では、ECO-FRPCM への SO 添加による中性化抵抗性の影響は把握できなかった。

3-4 尿素的の代用および併用効果の検討

図-12 にシリーズII の膨張率試験結果を示す。尿素

と膨張材を併用した条件において、 200×10^{-6} 程度の膨張ひずみを示すことを確認した。また、シリーズI-EXの収縮低減剤と同様に、膨張材単体の場合に比べ膨張挙動を維持した状態でその後の収縮性状に影響していることが考えられる。

図-13 にシリーズII-U の収縮補償を考慮した収縮ひずみをシリーズI-EX と同様の手法で示す。E-U40, S-U40, ES1/2-U40 が既調合のES-U0 と同等またはそれ以上の収縮低減率であることを確認した。

図-14 に尿素と膨張材および収縮低減剤の併用効果の検討を示す。尿素を単体で使用した場合と、S に尿素を併用した場合の収縮低減率は同程度であり、E に尿素を併用した場合の収縮低減率が最も大きい結果となった。

3-5 SO の代用および併用効果の検討

図-12 のシリーズII-SO の膨張率試験結果から、SO と膨張材を併用した条件において、既調合 ES 以上の膨張挙動を示すことを確認した。また、収縮低減

剤および尿素と同様に、膨張材単体の場合に比べ膨張挙動を維持した状態でその後の収縮性状に影響していることが考えられる。

図-15 にシリーズII-SO の収縮補償を考慮した収縮ひずみをシリーズI-EX と同様の手法で示す。E-SO3, ES1/2-SO3 が既調合のES-SO0 と同等またはそれ以上の収縮低減率であることを確認した。

図-16にSOと膨張材および収縮低減剤の併用効果の検討を示す。SOを単体で使用した場合よりも、EにSOを併用した場合の収縮低減率の方が大きい結果となった。一方、SOと収縮低減剤を併用した条件では、収縮低減率が低下し、収縮低減剤を単体で使用する場合よりも収縮ひずみが増大する結果となった。ここでは、SOと膨張材および収縮低減剤の併用による相乗効果を期待して評価を行ったが、SOと収縮低減剤の併用は収縮低減に対して逆効果となった。

3-6 代用および併用に期待できる調合の検討

図-17に、代用することで硬化収縮性状に期待できる供試体の、収縮補償を考慮した材齢28日までの収縮ひずみを示す。代用に期待できる供試体には、収縮補償を考慮した収縮ひずみにおいて、既調合であるESと比較して、同程度あるいはそれ以上の収縮低減効果を確認した供試体を選別した。また、補修材の寸法安定性（長さ変化率）の評価材齢が28日であることから、材齢28日の長さ変化率で評価することとする。その結果、尿素を混入した供試体において、E-U40, S-U40, ES1/2-U40, SOを添加した供試体においてE-SO3, ES1/2-SO3がESと同程度またはそれ以上の収縮低減効果を確認した。

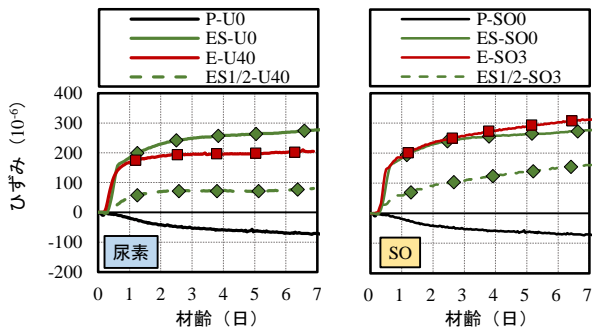


図-12 シリーズIIの膨張率試験結果

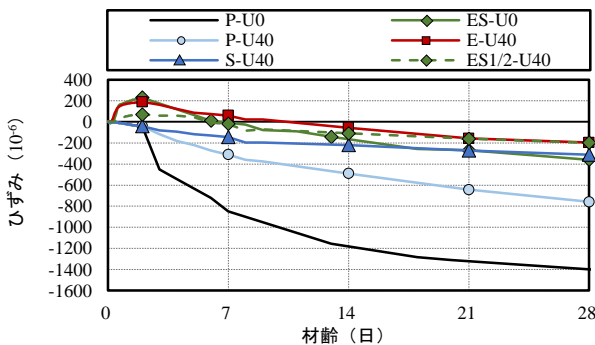


図-13 シリーズII-Uの収縮補償を考慮した長さ変化率

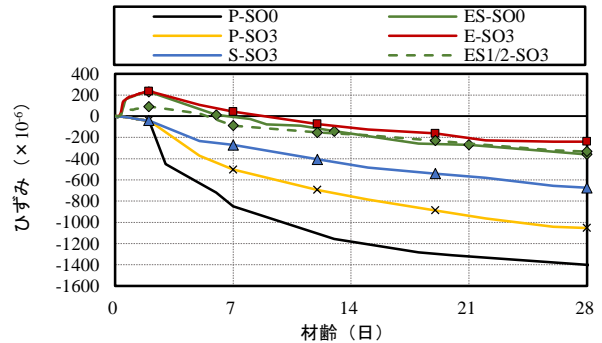


図-15 シリーズII-SOの収縮補償を考慮した長さ変化率

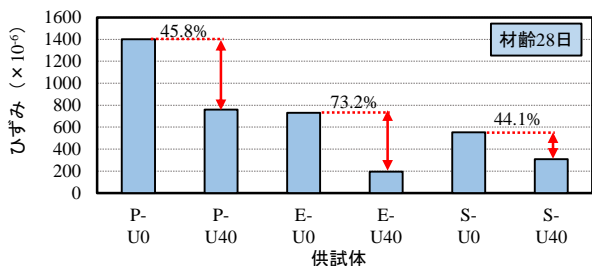


図-14 尿素と膨張材・収縮低減剤の併用効果

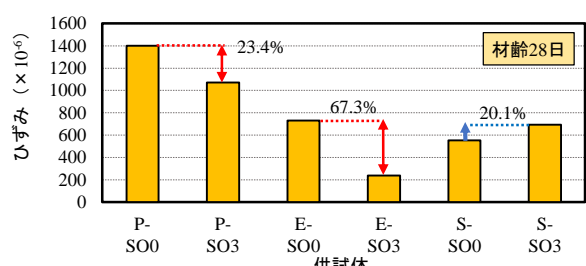


図-16 SOと膨張材・収縮低減剤の併用効果

表3-1に代用が期待される供試体の各種性能評価を示す。本実験の試験結果から評価項目を、施工性（フロー）、強度性能（圧縮強度）、収縮性能（硬化収縮）、経済性（コスト比較）として検討を行った。評価方法としては、既調合であるESと各試験結果を比較して性能が優れている場合は◎，同程度である場合は○，劣っている場合は×とした。よって本研究の結果から、現時点での最適調合として提案できる調合は、最もコスト削減が可能なE-U40（膨張材8%，尿素40kg/m³）であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、先行研究において開発されたECO-FRPCMに収縮低減材料として用いられる膨張材と収縮低減剤について、膨張材による収縮補償効果を評価すると共に、安価な尿素や中性化抑制効果にも優れるSOでの代用および併用による硬化収縮性状への影響を把握するための実験的検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 膨張材による収縮補償効果を考慮して硬化収縮を評価する必要がある。
- (2) 尿素、SOともに混入量に応じて収縮低減効果が期待できるが、フローや圧縮強度の低下が懸念される。
- (3) 尿素、SOともに単体で使用するよりも、膨張材と併用することで更なる収縮低減効果が期待できる。
- (4) SOと収縮低減剤の併用は単体での使用よりも収縮が増大する。
- (5) 尿素、SOともに膨張材、収縮低減剤の代用材料として期待できる調合を提案した。

【参考文献】

- 1) 大濱嘉彦, 白井篤, 熊谷慎祐: ビニロン繊維補強ポリマーセメントモルタルの曲げ性状に及ぼす調合要因の影響, 日本建築学会東北支部, 研究報告会, 2002
- 2) 槇島修, 魚本健人: 断面修復材の品質と耐久性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 3) 山科祐太: 材料組成の異なる断面収縮用FRPCMの基礎性状・施工性・耐凍害性に関する研究, 室蘭工業大学修士論文, 2011
- 4) 川村和史, 長谷川諒, 崔亨吉, 濱幸雄: 繊維補強ポリマーセメントモルタル(FRPCM)の硬化収縮に及ぼす養生温湿度条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1711-1716, 2017

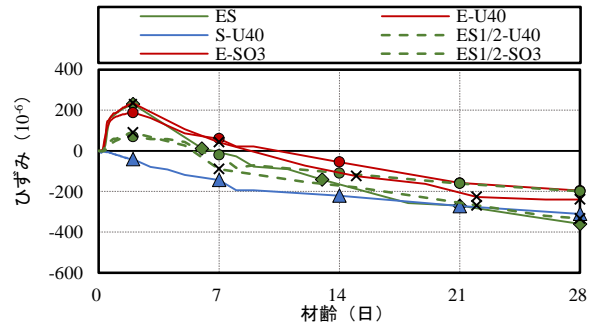


図-17 代用が期待される供試体の長さ変化率

表-7 代用が期待される供試体の性能評価

供試体名	性能評価			
	施工性	強度性能	収縮性能	経済性
E-U40	○	◎	◎	◎
S-U40	○	◎	◎	○
ES1/2-U40	○	◎	◎	○
E-SO3	○	○	○	×
ES1/2-SO3	○	○	○	×

ESと比較して、◎:ES以上 ○:ESと同程度 ×:ES以下

- 5) 土木学会編: 混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会報告書 pp.204-205.2007
- 6) 河井徹, 阪田憲次: 尿素を用いたコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp639-644, 2007
- 7) 田中博一, 三島英将, 野田宏昭, 綾野克紀: 尿素を用いたひび割れ低減コンクリートの配合選定試験, 土木学会, 2011
- 8) 岸本豪太, 金準鎬, 崔亮吉, 濱幸雄: SOが高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの中性化抵抗性, 乾燥収縮および耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.351-356, 2017
- 9) 樋口隆行, 吉野亮悦, 盛岡実: 膨張材を混和したモルタルの物性におよぼす収縮低減剤種の影響, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.196-202, 2011
- 10) 大野吉昭, 榊田佳寛, 鹿毛忠継: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす膨張材と収縮低減剤の影響, セメント・コンクリート論文集, No.65, pp.233-238, 2011
- 11) 丸山一平, 岸直哉: 収縮低減剤の作用機構, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.645, pp.1895-1903, 2009
- 12) 斎藤耕治, 山本昭, 菊池雅史, 小山明男, 矢野宇三郎: シリコン系撥水剤の吸水抑制性能に関する基礎的研究, 日本建築仕上学会大会学術講演会, pp.71-74, 2003