

論文 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

川村 和史*1・長谷川 諒*2・崔 亨吉*3・濱 幸雄*4

要旨: 繊維補強ポリマーセメントモルタル (FRPCM) はコンクリート構造物の断面補修材料として広く用いられている。本研究では、実環境を想定した温湿度条件における FRPCM の硬化収縮特性を検討し、硬化収縮に及ぼす要因を把握することを目的とした実験を行い、重回帰分析による検討を行った。その結果、FRPCM の硬化収縮試験における質量変化率は養生環境の温度と相対湿度の両方の影響を受けるが、長さ変化率については相対湿度の影響が卓越していることがわかった。また、温湿度が変化する実環境では温度変化による線膨張係数の影響を考慮しなければならないことを確認した。

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, 養生温度, 養生相対湿度, 重回帰分析

1. はじめに

近年、環境負荷低減の観点から、コンクリート構造物の高耐久化・長寿命化が求められており、断面欠損や劣化部分を補修し、健全化を図る必要がある¹⁾。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) や PCM に繊維を混和し、ひび割れ抑制効果および靱性を向上させた繊維補強ポリマーセメントモルタル (FRPCM) が開発・実用化されている。

著者らはこれまでに、収縮低減性および耐久性に優れ、ひび割れ発生抑制が可能な FRPCM の基本配合を検討してきた²⁾。その中で、収縮特性については、JISA1171 (ポリマーセメントモルタルの試験方法) および NEXCO 試験法 432 (断面修復用吹付けモルタルの試験方法) に規定されている 20℃, 60%RH 環境下での材齢 28 日における長さ変化率を性能値として評価している。これは、薄塗り施工等の FRPCM の施工条件を考慮したものである。しかし、実際の施工環境の温湿度条件は広範に変動するため、実施工での硬化収縮挙動は 20℃, 60%RH 環境での試験結果とは異なる³⁾。また、材齢 28 日以降の収縮挙動を把握することも重要と思われる。

そこで本研究では、実環境を想定した温湿度条件における FRPCM の硬化収縮特性を検討し、硬化収縮に及ぼす要因を明らかにすることを目的とした実験を行った。

2. 実験計画および方法

2.1 使用材料

本研究で使用した材料を表-1に示す。結合材として、普通ポルトランドセメント (OPC) と高炉スラグ微粉末

(BFS) を用いるとともに、セメント混和用ポリマー、シリカフューム、膨張材を用い、骨材には高炉スラグ細骨材を用いた。ここで、BFS および高炉スラグ細骨材は環境負荷低減を目的として採用している。また、繊維はポリプロピレン繊維 (PP) を使用し、混和材料として収縮低減剤 (SRA) と減水剤、AE 剤、消泡剤を用いた。

表-1 使用材料

	材料
結合材 (B)	C: 普通ポルトランドセメント (OPC) (密度: 3.17g/cm ³ , 比表面積: 3500cm ² /g)
	BB: 高炉スラグ微粉末 (BFS) (密度: 2.98g/cm ³ , 比表面積: 3930cm ² /g)
	P: セメント混和用ポリマー (密度: 1.05g/cm ³ , 酢酸アクリル系)
	SF: シリカヒューム (密度: 2.25g/cm ³)
	EX: 膨張材 (密度: 2.93g/cm ³ , エトリンガイト系)
細骨材 (S)	高炉スラグ細骨材 (密度: 2.66g/cm ³ , 粒径mm: 0.6~1.2および0.6以下)
繊維	PP: ポリプロピレン繊維 (密度: 0.91g/cm ³ , 長さ6mm)
混和材料	SRA: 収縮低減剤 (A種: ポリオキシアルキレン化合物, B種: 粉末特殊非イオン配合物)
	減水剤 (ポリカルボン酸系) AE 剤 (脂肪族アルコール系) 消泡剤 (ポリエーテル系)

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科環境創生工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科工学専攻 博士後期課程 (学生会員)

*3 室蘭工業大学 大学院工学研究科 助教 工博 (正会員)

*4 室蘭工業大学 大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)

表-2 実験計画

供試体名	W/B (%)	S/B	繊維 (vol%)	収縮低減剤		目標物性		養生条件	測定項目
				A種	B種	空気量 (%)	練り上がり温度 (℃)	温度 (相対湿度)	
EA	33	1	0.5	○	-	8±0.5	20±2	5℃ (20,60,90%RH) 20℃ (40,60,95%RH) 30℃ (40,60,75%RH) 屋外	空気量 フロー スランプ 練り上がり温度 圧縮強度 (封緘養生) 長さ変化率 質量変化率
EB				-	○				
EA4				○	-	4±0.5			
EB4				-	○				
EA12				○	-	12±0.5			
EB12				-	○				

表-3 調合

供試体名	W (kg/m³)	繊維 (kg/m³)	B (kg/m³)					S (kg/m³)		混和材料 (kg/m³)				
			OPC	BFS	P	SF	EX	粒径 (mm)		SRA		減水剤	消泡剤	AE剤
								0.6~1.2	0.6以下	A種	B種			
EA	313	4.6	475	332	19	47	76	570	380	38	-	0.6	16	1.7
EB										-	38			
EA4										38	-			0.7
EB4										-	38			
EA12										38	-			2.4
EB12										-	38			

2.2 実験計画および調合

表-2 に実験計画を、表-3 に調合を示す。著者らの既往研究より、FRPCM の調合は水結合材比 (W/B) を 33%, 砂結合材比 (S/B) を 1.0 とし、繊維を 0.5vol%混入した。また、混和材料として主成分の異なる SRA (A 種およびB種)を用いた。目標空気量 8.0±0.5%を基準とし、空気量の変動を考慮した 4.0±0.5%および 12.0±0.5%の条件を加えて、AE 剤および消泡剤の添加量により空気量の調整を行った。目標練り上がり温度は、20±2°Cとした。

2.3 試験項目および方法

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状として空気量、フロー、スランプ、練り上がり温度を測定した。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験は、φ50×100mm の円柱供試体を用い、5°C、20°C、30°Cでの封緘養生を行い、材齢 3, 7, 28 日で行った。

(3) 硬化収縮 (長さ変化率の測定)

硬化収縮試験は、40×40×160mm の角柱供試体を用い、打設後 20°Cで封緘養生を行い、材齢 2 日で脱型し、脱型後直ちに所定の温湿度環境に移動し基長を測定した。長さ変化率の測定は JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法) に準じて行った。測定本数は各水準で 3 本 (計 96 本) とし、供試体 3 本の平均値を実験結果に用いた。なお、脱型前後の養生温度が異なるため、線膨張率を $9.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とし

表-4 飽和塩水溶液

温度 (°C)	塩	相対湿度 (%RH)	目標 (%RH)	溶解度 (g/100gH ₂ O)
5	よう化リチウム LiI	21.5	20	171
	塩化カリウム KCl	87.5	90	30
20	炭酸カリウム K ₂ CO ₃	43	40	111
	硝酸カリウム KNO ₃	97	95	31.6
30	炭酸カリウム K ₂ CO ₃	43	40	114
	塩化コバルト CoCl ₂	61	60	59.7
	塩化ナトリウム NaCl	75	75	36.1



写真-1 屋外条件の供試体

表－5 各材齢までの平均温湿度

設定温湿度	材齢28日		材齢182日	
	温度(℃)	相対湿度(%RH)	温度(℃)	相対湿度(%RH)
5℃20%RH	5.5	46	5.3	24
5℃60%RH	5.0	54	5.5	62
5℃90%RH	5.3	91	5.5	88
20℃40%RH	19.2	50	19.5	43
20℃60%RH	19.1	55	19.3	55
20℃95%RH	18.9	98	19.6	96
30℃40%RH	29.7	42	29.6	36
30℃60%RH	29.8	67	29.8	55
30℃75%RH	30.2	79	29.8	76
屋外	3.5	76	3.4	74

て基長を補正した。測定期間は、材齢 182 日までとした。

脱型後の養生環境の温湿度条件は、屋外を含めた 10 水準とした。温度条件は一般的な外気温を想定して 5, 20, 30℃の 3 水準とした。湿度条件は国内の気象データを参考に、各養生温度において 3 水準とし、5℃で 20, 60, 90%RH, 20℃で 40, 60, 95%RH, 30℃で 40, 60, 75%RH とした。養生温湿度の制御は、所定の温度の恒温室内にデシケーターを設置し、表－4 に示す各温湿度条件に用いる塩（JIS A 1475 附属書 3）をイオン交換水に溶かし、飽和塩水溶液を作製し、湿度調整を行った。なお、5℃、20℃の 60%RH の条件については、恒温恒湿室で供試体を養生した。また、実環境での温湿度が変動する影響を把握するために、屋外（室蘭工業大学構内：北海道室蘭市）にも供試体を設置した。屋外では降雨、降雪の影響を避け、温湿度のみの変動を与えるために写真－1 のようにブロックで供試体の周囲を囲み、上から蓋をして養生を行った。すべての養生条件で温湿度の測定を継続的に行った。表－5 に養生期間中の平均温湿度を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状および圧縮強度

表－6 にフレッシュ性状を示す。各配合条件で、目標としたフレッシュ性状を満足している。

図－1 に積算温度と圧縮強度の関係を示す。養生温度が異なる条件の FRPCM の強度増進は、一般のコンクリートと同様に積算温度で一意的に表すことができる。

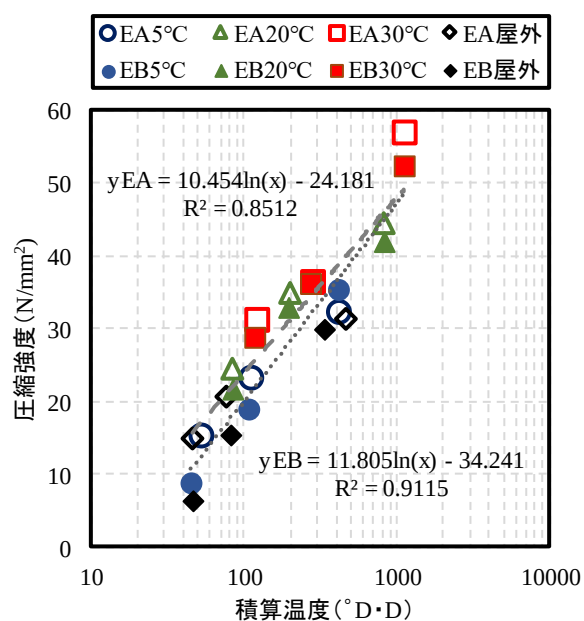
3.2 硬化収縮

(1) 硬化収縮挙動

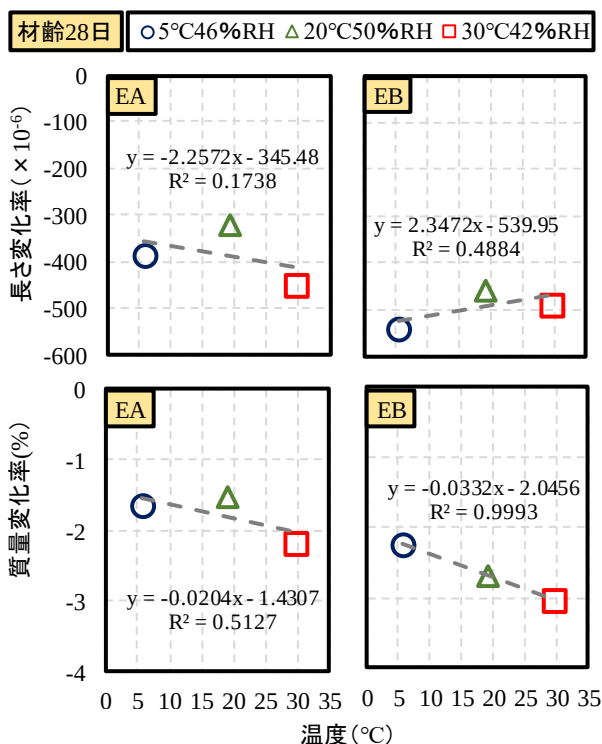
図－2 に材齢 28 日における長さ変化率および質量変化率と温度の関係を示す。養生温度が高いほど長さ変化率、質量変化率ともに増加する傾向にあるが、相関はそれほど高くない。

表－6 フレッシュ性状

供試体名	測定結果			
	空気量(%)	フロー(mm)	スランプ(mm)	練上がり温度(℃)
EA	8.4	137.5	31.0	19.5
EB	8.4	131.5	13.0	22.0
EA4	3.9	130.0	12.0	21.0
EB4	4.2	113.0	5.0	20.0
EA12	12.5	146.5	30.0	18.0
EB12	12.5	131.5	21.0	18.0



図－1 積算温度と圧縮強度の関係



図－2 温度と長さ変化率および質量変化率の関係

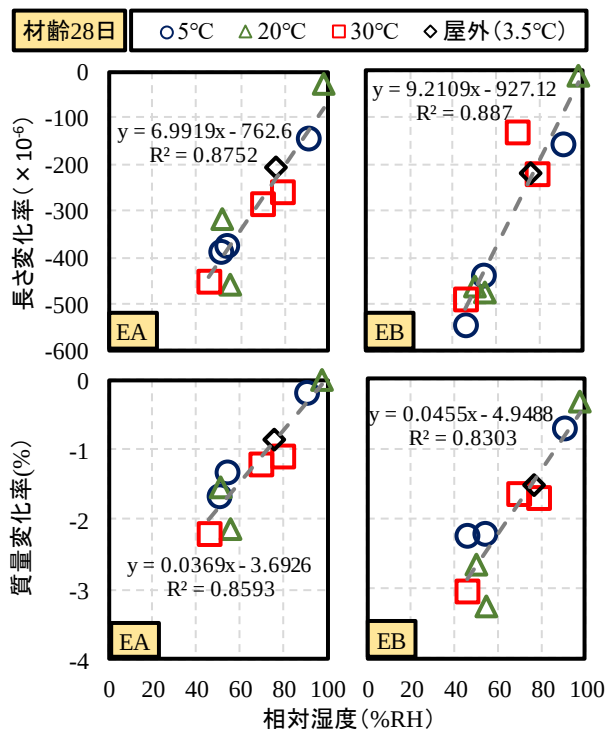


図-3 相対湿度と長さ変化率および質量変化率の関係

図-3 に材齢 28 日における長さ変化率および質量変化率と相対湿度の関係を示す。養生温度、SRA の種類によらず、養生相対湿度が低いほど長さ変化率、質量変化率ともに大きくなっている。この理由としては、相対湿度により乾燥する空隙径が決定するため⁴⁾、相対湿度が低いほど小さな空隙中の自由水が逸散することで、毛細管張力が大きくなることで説明できる。

図-4 に材齢 28 日における長さ変化率および質量変化率と空気量の関係を示す。空気量が多いほど長さ変化率および質量変化率ともに大きくなった。これは、空隙量が多いほど、乾燥しやすく、自由水の逸散量が多くなることで説明できる⁹⁾。

図-5 に材齢 28 日における長さ変化率と質量変化率の関係を示す。長さ変化率と質量変化率の関係は、ほぼ比例関係にあるが、SRA の種類によって両者の相関に差があり、本研究で用いた 2 種類の SRA では EA の方が両者の相関係数が高くなっている。

図-6 に 20°C、60%RH 環境での材齢 182 日までの長さ変化率の変化を示す。JIS A 1171 や NEXCO 試験法 432 では、材齢 28 日の長さ変化率で性能評価しており、材齢 28 日の長さ変化率は EA、EB とも 500×10^{-6} 程度でほぼ同じである。しかし、材齢 182 日では EA は 760×10^{-6} 、EB は 570×10^{-6} まで長さ変化率が増加している。このことから、長期的な長さ変化率は SRA 種類やその他の使用材料により異なる可能性があるといえる。したがって、FRPCM の性能評価において、施工する部材の寸法や塗厚等の条件によりひび割れ防止のために必要と

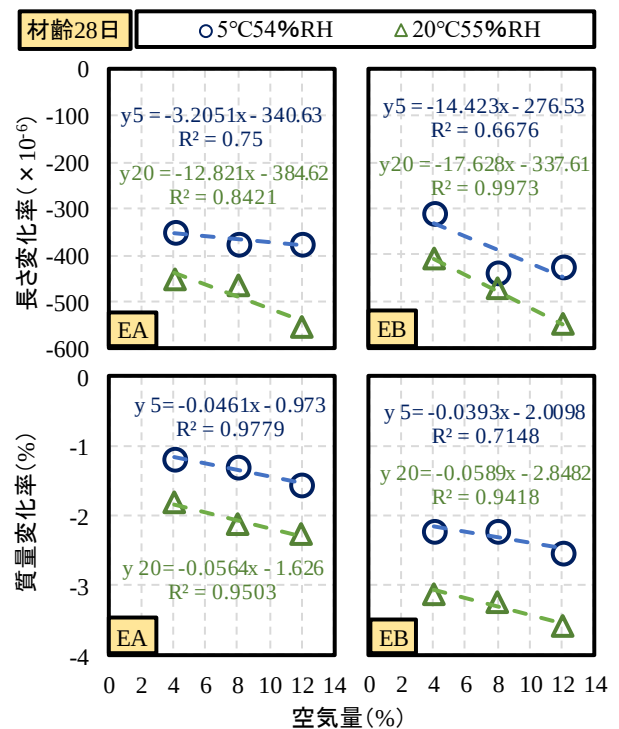


図-4 空気量と長さ変化率および質量変化率の関係

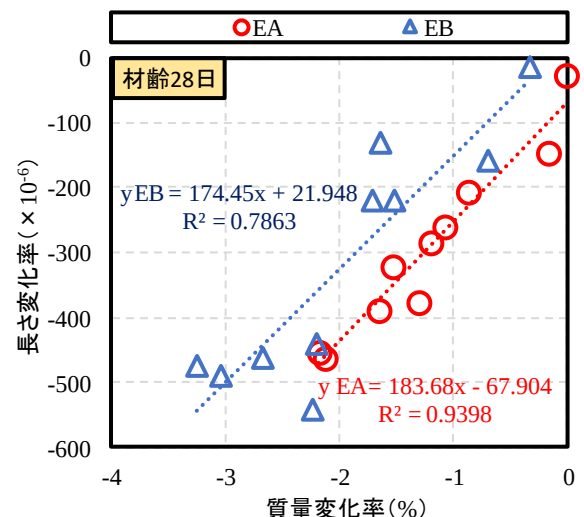


図-5 長さ変化率と質量変化率の関係

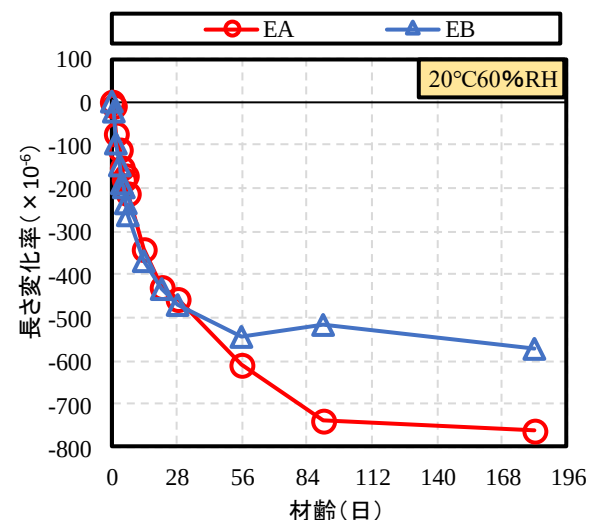


図-6 材齢 182 日までの長さ変化率

表－7 材齢 28 日での分散分析表

材齢28日	Y1:長さ変化率				Y2:質量変化率			
	自由度	変動	分散	有意F	自由度	変動	分散	有意F
回帰	4	549234.7	137308.7	5.98×10^{-10}	4	20.73	5.18	4.04×10^{-11}
残差	27	114367.8	4235.8		27	3.40	0.13	
合計	31	663602.5			31	24.13		
	標準誤差	t	P-値	判定	標準誤差	t	P-値	判定
X1:温度	1.11	0.202	0.841	-	0.0061	-2.9	0.0074	**
X2:相対湿度	0.768	11.04	1.63×10^{-11}	**	0.0042	10.4	5.51×10^{-11}	**
X3:空気量	4.44	-2.59	0.015	*	0.0242	-2.00	0.056	-
X4:収縮低減剤	23.02	0.287	0.776	-	0.125	6.63	4.08×10^{-7}	**

**:1%有意 * :5%有意

表－8 材齢 182 日での分散分析表

材齢182日	Y1:長さ変化率				Y2:質量変化率			
	自由度	変動	分散	有意F	自由度	変動	分散	有意F
回帰	4	1315694.2	328923.5	2.68×10^{-10}	4	36.29	9.07	1.08×10^{-13}
残差	27	254855.0	9439.1		27	3.61	0.13	
合計	31	1570549.2			31	39.90		
	標準誤差	t	P-値	判定	標準誤差	t	P-値	判定
X1:温度	1.61	0.66	0.518	-	0.0060	-4.7066	6.7×10^{-5}	**
X2:相対湿度	1.03	11.56	5.83×10^{-12}	**	0.0039	14.1539	5.2×10^{-14}	**
X3:空気量	6.63	-1.63	0.115	-	0.0250	-2.0119	0.054	-
X4:収縮低減剤	34.36	-1.97	0.060	-	0.1293	6.2974	9.7×10^{-7}	**

**:1%有意 * :5%有意

なる性能値は異なる⁹⁾ため、その設定は試験材齢の延長も含めて検討する必要がある。

(2) 硬化収縮に及ぼす要因の重回帰分析による検討

ここでは、実験結果を用いた重回帰分析により、長さ変化率および質量変化率に及ぼす各種要因の検討を行う。

a) 材齢 28 日の長さ変化率と質量変化率

目的変数に長さ変化率 (Y1) および質量変化率 (Y2)、説明変数に養生温度 (X1)、養生相対湿度 (X2)、空気量 (X3)、SRA の種類 (X4) を設定した。X4 については数量化 I 類により、ダミー変数として数量化して分析を行った。式(1)、式(2)に重回帰式を、表－7 に分散分析表を示す。各説明変数の有意性の有無は、「P-値」による有意水準の判定から決定した⁷⁾。

$$y_1 = 8.5x_2 - 11.5x_3 - 776.1 \quad (1)$$

$$y_2 = -0.02x_1 + 0.04x_2 + 0.8x_4 - 3.4 \quad (2)$$

長さ変化率を目的変数とした場合、養生相対湿度と空気量を説明変数とした重回帰式の式(1)で、決定係数 $R^2 = 0.83$ の相関となった。この式から、相対湿度が低いほど、空気量が多いほど長さ変化率は大きくなることわかる。

質量変化率を目的変数とした場合、養生温度と養生相対湿度ならびに SRA の種類を説明変数とした重回帰式の式(2)で、決定係数 $R^2 = 0.86$ の相関となった。この式か

ら、温度が高いほど、相対湿度が低いほど、質量変化率は大きくなることわかる。

b) 材齢 182 日の長さ変化率と質量変化率

前項と同様に、材齢 182 日の長さ変化率および質量変化率に及ぼす各種要因の検討を重回帰分析により行った。得られた重回帰式を式(3)、式(4)に示し、分散分析表を表－8 に示す。

$$y_1 = 13.9x_2 - 1258.7 \quad (3)$$

$$y_2 = -0.03x_1 + 0.06x_2 + 0.8x_4 - 5.5 \quad (4)$$

長さ変化率を目的変数とした場合、養生相対湿度を説明変数とした重回帰式の式(3)で、決定係数 $R^2 = 0.76$ の相関となった。材齢 28 日では、説明変数に空気量に加わっていたが、材齢 182 日では養生相対湿度のみになっている。このことから、長さ変化率に対して相対湿度の影響が卓越しているといえる。

次に、質量変化率を目的変数とした場合には、養生温度と養生相対湿度ならびに収縮低減剤の種類を説明変数とした重回帰式は式(4)となり、決定係数 $R^2 = 0.89$ の相関となった。この式から、材齢 28 日の場合と同様に、温度が高いほど、相対湿度が低いほど、質量変化率は大きくなり、SRA の主成分の違いによる影響も大きいことがわかる。

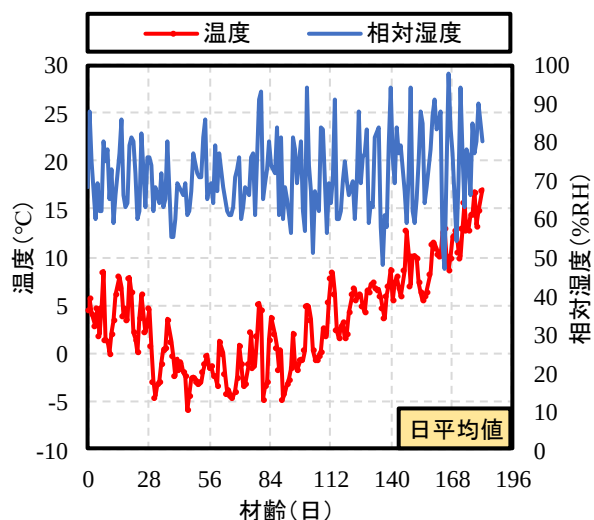


図-7 屋外の温湿度変動

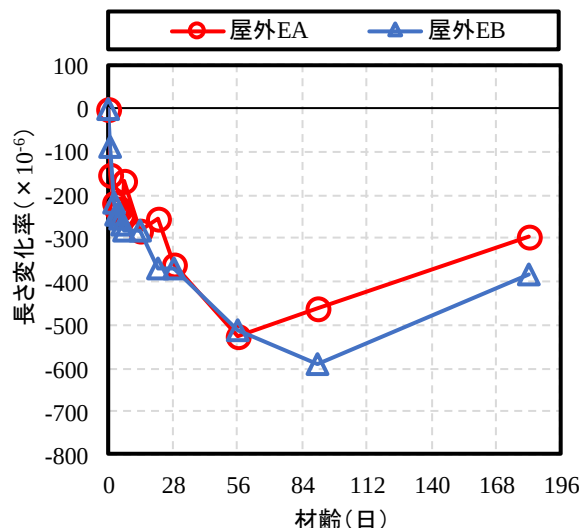


図-8 屋外の供試体の長さ変化率

3.3 屋外の温湿度変動と硬化収縮挙動の関係

図-7 に屋外の温湿度変動を示す。試験期間中（2015 年 11 月 26 日～2016 年 5 月 26 日）の温度は $-6\sim 17^{\circ}\text{C}$ で季節変動しているが、相対湿度は $47\sim 98\%\text{RH}$ の振幅で変動し、振幅は広いものの季節による差は大きいといえる。

図-8 に同一期間の屋外に設置した供試体の長さ変化率を示す。なお、長さ変化率は実測値を示している。これまでの実験室実験の検討で、長さ変化率に対しては温度ではなく相対湿度の影響が大きいことが明らかになっている。しかし、今回得られた実験結果は温湿度変動がある時間毎に長さ変化を測定したのではなく、変動がある中である材齢で測定したものであるため、相対湿度の変動による長さ変化率の変動は見られなかった。一方、屋外環境の供試体では 56 日までは実験室実験の場合と同様に材齢の進行とともに収縮挙動を示しているが、それ以降は膨張に転じている。これは、季節変動による気温の上昇と対応しており、FRPCM 自身の熱膨張による現象である。このことから、温湿度が変化する実環境での長さ変化率を評価する場合は、温度変化による線膨張係数の影響を考慮する必要があることを改めて確認した。

4 まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) FRPCM の硬化収縮試験における質量変化率は、養生環境の温度と相対湿度の両方の影響を受ける。
- (2) FRPCM の硬化収縮試験における長さ変化率に対しては、温度ではなく相対湿度の影響が卓越している。
- (3) FRPCM の性能評価において、施工する部材の

寸法や塗厚等の条件によりひび割れ防止のために必要となる性能値は異なるため、試験材齢の延長も含めて検討する必要がある。

参考文献

- 1) 新井泰, 有賀貴志, 平野勝義, 渡辺忠朋: 断面欠損が生じた RC はりの補修効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1525-1530, 2006
- 2) 長谷川諒, 坂口朗央, 崔亨吉, 濱幸雄: 繊維補強ポリマーセメントモルタルの高靱性化に及ぼす繊維種類および砂結合材比の影響, 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.15, No.78, pp.441-446, 2015
- 3) 岩城一郎, 木村悠一郎, 三浦尚: 周囲の温湿度条件が高強度コンクリートの収縮挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.472-478, 2003
- 4) 鳴海玲子, 張文艶, 岸本嘉彦, 濱幸雄: 収縮低減剤を用いたモルタルの収縮性状と耐凍害性に及ぼす空隙構造の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.148-153, 2012
- 5) 林信嘉, 寺西浩司, 前田大介: モルタルの乾燥収縮に対する空気量および化学混和剤の影響, 日本建築学会学術講演梗概集(東海), pp.101-102, 2003
- 6) 浅沼潔, 竹下治之, 藤井学: 部材厚さが乾燥収縮に及ぼす影響とその評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.621-626, 1995
- 7) 田畑美紀, 森勇介, 古谷治昭, 高海克彦: モルタルフローによる研磨砕砂の粒子性状評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.95-100, 2006