

3. スーパーフィルクリートの開発

その1 基本性状の確認試験

Development of Super-Fillcrete

Part1. Test of Basic Properties

立松 和彦* 塩浜 圭治*

要 旨

耐震補強工法の一つに、外付けの枠付き鉄骨ブレースによる耐震補強工法がある。スーパーフィルクリートは、この工法の間接接合部に打設する無収縮モルタルの代替に使えることを目指して開発した。フレッシュ時の流動性が高く、硬化後の収縮が小さく、かつ F_c 30N/mm² 以上が主な開発目標である。実験の結果、スランプフロー60cm、長さ変化率では乾燥期間 26 週で 500 μ 以下、圧縮強度では材齢 28 日で 39N/mm² 以上、さらに耐久性（凍結融解作用に対する抵抗性）では 300 サイクルで耐久性指数 60 以上、の目標品質を得られることが確認できた。

キーワード：無収縮モルタル／無収縮高流動コンクリート／耐震補強／長さ変化率／圧縮強度

1. はじめに

耐震補強工事の一つに、外付けの枠付き鉄骨ブレースによる耐震補強工法がある。スーパーフィルクリートは、この外付け枠付き鉄骨ブレースによる耐震補強工法の間接接合部に打設する無収縮モルタルの代替にも使えるよう、流し込みによる打設を前提として、スランプフロー 60cm の高い流動性と、市販の無収縮モルタルと同程度以上の無収縮性が発揮でき、かつ F_c 30N/mm² が可能なことを意図して開発した。なおスーパーフィルクリートは商品名で、より一般的な名称としては「無収縮高流動コンクリート」と呼ぶ。

本報告では、一連の開発実験のうち、圧縮強度、長さ変化率、耐久性などの、基本性状の確認試験結果についてまとめて報告する。

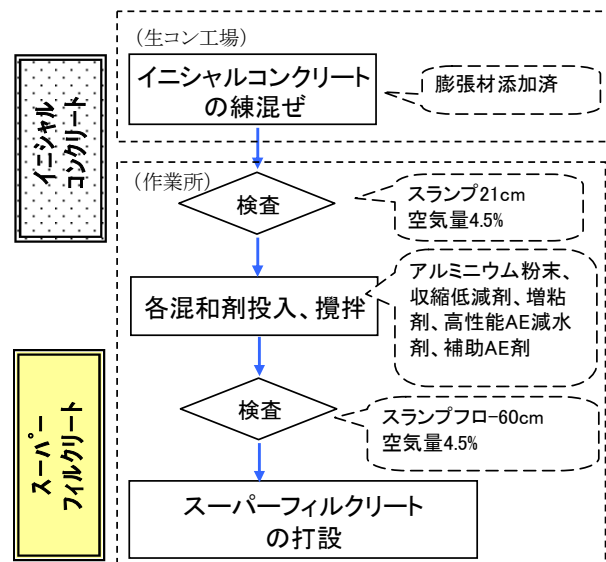


図-1 製造手順

2. 実験概要

2.1 スーパーフィルクリートの製造手順

図-1 にスーパーフィルクリートの製造手順を示す。製造手順は、流動化コンクリートの手順とほぼ同様である。すなわち、生コン工場が出荷するインシャルコンクリートには膨張材が入った状態で（スランプ 21cm）作業所に到着する。作業所到着後、アルミニウム粉末（発泡剤）・収縮低減剤・増粘剤・高性能 AE 減水剤・補助 AE 剤をアジテータ車に所定の手順で直接投入してスランプフロー 60cm のスーパーフィルクリートを製造する。今回の実験は、室内試験練りで、図-1 と同じ手順で実施した。

2.2 目標品質

スーパーフィルクリートの目標品質を表-1 に示す。フレッシュ性状では、スランプフロー 60±10cm、空気量 4.5±1.5%、アルミニウム粉末の発泡にともなうフレッシュ時の自由膨張率 1.0±0.5% である。硬化後の性状では、圧縮強度 39N/mm² 以上、長さ変化率 5.0×10^{-4} 以下、耐久性指数 60 以上としている。

2.3 実験計画および使用材料

表-2 に実験の概要を示す。表中に○印を付した試験項目を実施している。調合記号で、例えば「-4010」は、水結

* 技術研究所環境・生産研究グループ

表－1 スーパーフィルクリートの目標品質

	試験項目	目標品質
フレッシュ性状	スランブフロー	60±10cm
	空気量	4.5±1.5 %
	自由膨張率	1.0±0.5 %
硬化後の性状	圧縮強度 ^{*1}	39N/mm ² 以上 (材齢28日)
	長さ変化率 ^{*2}	5.0×10 ⁻⁴ 以下 (乾燥期間26週)
	耐久性 ^{*3}	耐久性指数 60 以上 (300サイクル)

*1 自由膨張させた標準水中養生供試体

*2 拘束膨張および収縮試験 (JIS A 6202)

*3 凍結融解抵抗性試験 (JIS A 1148)

表－2 実験の概要

調合記号	水結合材比 (%)	目標膨張率 (%)	硬化後の主な試験項目			
			圧縮強度	長さ変化率	耐久性指数	促進中性化深さ
SPFIL-4410	44	1.0	○	—	—	—
SPFIL-4010	40	1.0	○	○	○	○
SPFIL-3610	36	1.0	○	○	○	—
SPFIL-3210	32	1.0	○	○	—	—
SPFIL-3620	36	2.0	○	—	○	—

表－3 使用材料

材料	種類、産地、物性等
セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.16g/cm ³
細骨材	山砂 (京都府城陽産) 表乾密度2.57 g/cm ³ 粗粒率 2.86 吸水率1.57%
	砕砂 (大阪府高槻産) 表乾密度2.66 g/cm ³ 粗粒率 2.83 吸水率1.60%
粗骨材	砕石2005 (大阪府高槻産 硬質砂岩) 表乾密度2.69 g/cm ³ 吸水率0.72% 実積率56.4%
膨張材	石灰系膨張材
スーパー フィルクリート 用混和剤	発泡剤 特殊処理アルミニウム粉末
	収縮低減剤 収縮低減剤 (低級アルコールアルキレンオキシド付加物)
	増粘剤 セルロース系
	化学混和剤 高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系)
	補助AE剤 (空気量調整剤)

合材比 40%、目標膨張率 1.0%を示している。使用材料を表－3 に、調合表を表－4 に示す。使用材料のうち、後添加材料の発泡剤 (アルミニウム粉末)、収縮低減剤、増粘剤、高性能 AE 減水剤、補助 AE 剤を総称して、スーパーフィルクリート用混和剤としている。

2.4 練混ぜ方法および試験方法

コンクリートの練混ぜは温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室で、容量 100 l の 2 軸強制練りミキサーを用いて行った。まず、セメント、骨材および膨張材を、15 秒間空練りした後、練混ぜ水と高性能 AE 減水剤を加えて、2 分間練混ぜ、イニシャルコンクリートを製造した。

次に、スーパーフィルクリート用混和剤を、所定の手順によってイニシャルコンクリートに投入して、SPFIL-4410, SPFIL-4010 では 90 秒間、SPFIL-3610, SPFIL-3620 では 120 秒間、SPFIL-3210 では 150 秒間それぞれ練混ぜた。

コンクリートの自由膨張率は図－2 に示すように、Φ 10cm×20cm の鋼製型枠を用い鉛直方向の膨張変位を高感度変位計あるいはダイヤルゲージで計測した。

圧縮強度試験用供試体は、標準水中養生とした。なおアルミニウム粉末の発泡による初期の膨張を拘束する治具 (写真－1 参照) を取り付け、コンクリートの硬化まで拘束した供試体を<拘束>と表記し、膨張を拘束しない供試体を<自由膨張>と表記している。標準水中養生では、コンクリートの硬化後に拘束治具を取外して型枠を脱型し、試験前まで 20℃の水中で養生した。

長さ変化試験は JIS A 6202 B 法 (膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法) に従い実施した (写真－2 参照)。

凍結融解試験は、JIS A 1148 (コンクリートの凍結融解試験方法) に準拠して試験を行った。供試体は、JIS A 6202 参考 1 の拘束膨張及び収縮試験 (B 法) に示されている一軸

表－4 調合表

調合記号	W/B (wt%)	スランブ (cm)	Air (vol%)	W B						イニシャルコン用 混和剤 (Wに内割)		スーパー フィルクリート 用混和剤*
				水	セメント	膨張材	山砂	砕砂	粗骨材	高性能AE	補助AE	
				(kg/m ³)								(kg/m ³)
SPFIL-4410	44.0	21	4.5	165	389	20	426	441	845	3.7	0.012	—
SPFIL-4010	40.0	21	4.5	165	430	20	409	423	845	4.5	0.014	—
SPFIL-3610	36.0	21	4.5	165	480	20	389	402	845	5.5	0.030	—
SPFIL-3210	32.0	21	4.5	165	543	20	363	376	845	6.8	0.050	—
SPFIL-3620	36.0	21	4.5	165	480	20	389	402	845	5.5	0.030	—

*: 各混和剤の使用量は、目標の性状・性能が得られるように適切に定めた量とする。

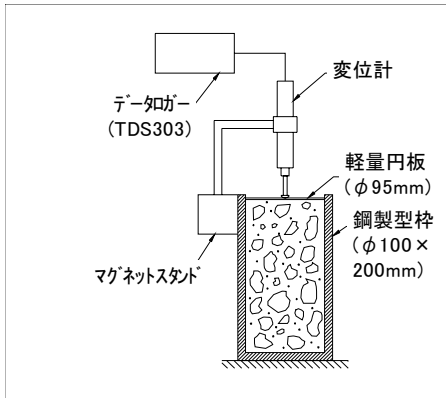


図-2 自由膨張率の測定

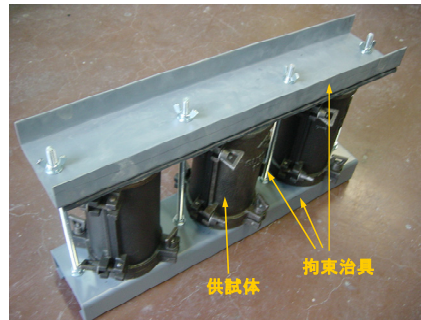


写真-1 拘束治具



写真-2 長さ変化率の測定
(JIS A 6202 B 法)

拘束した 10cm×10cm×40cm の供試体を用いた。

促進中性化試験は、JIS A 1153 に準拠した促進試験 (20℃、60%RH、CO₂ 濃度 5%) を行った。

3. 実験結果

イニシャルコンクリートの試験結果を表-5 に、スーパーフィルクリートの試験結果を表-6 に示す。

3.1 自由膨張率

アルミニウム粉末の発泡にともなう、フレッシュコンクリートの自由膨張率の経時変化の測定結果を図-3 に示す。自由膨張率は、目標膨張率 1.0% の調査では 1.0±0.5% の範囲に、目標膨張率 2.0% としての SPFIL-3620 も 2.0±0.5% の範囲に納まった。膨張のピークは目標膨張率にかかわらず 4 時間から 6 時間程度であった。なお SPFIL-3620 の目標膨張率を 2.0% としたのは、膨張率の管理値を 1.0±0.5% としているが、万が一膨張率が過大になった場合の、膨張率と強度低下の関係を把握しておくためである。

3.2 圧縮強度

(1) スーパーフィルクリートの結合材水比-圧縮強度式

スーパーフィルクリートの、標準養生した供試体の材齢 28 日における結合材水比と圧縮強度の関係を図-4 に示す。目標膨張率はすべて 1.0% である。イニシャルコンクリート、スーパーフィルクリート (図中の「SPFIL 拘束」; 写真-1 参照、および「SPFIL 自由膨張」) とも、比較的良好な相関が認められた。

なお、同図の「SPFIL (自由膨張)」の関係式をもとにして、調合強度を定めている。

表-5 イニシャルコンクリートの試験結果

	SPFIL-4410	SPFIL-4010	SPFIL-3610	SPFIL-3210	SPFIL-3620
スランプ (cm)	21.5	22.5	22.5	22.5	23.0
空気量 (%)	5.7	4.5	4.4	4.0	5.0
圧縮強度 *1 (N/mm ²)	50.0	59.5	67.4	71.6	63.5

*1 標準水中養生、材齢28日

表-6 スーパーフィルクリートの試験結果

	SPFIL-4410	SPFIL-4010	SPFIL-3610	SPFIL-3210	SPFIL-3620
スランプフロー (cm)	53.0×52.0	55.0×53.5	52.0×52.0	60.0×59.0	56.0×53.0
空気量 (%)	4.5	4.1	3.4	3.5	5.0
コンクリート温度 (℃)	19.0	19.0	20.0	20.0	18.0
自由膨張率 (%)	0.72	0.78	0.97	0.85	2.27
圧縮強度 *1 (N/mm ²) <拘束>	48.1	51.0	57.1	65.2	37.6
<自由膨張>	42.6	45.0	48.5	56.7	33.3
長さ変化率 (×10 ⁻⁶) <乾燥26週>	—	319	284	251	—
促進中性化深さ (mm) <促進52週>	—	6.2	—	—	—
耐久性指数 <300サイクル>	—	88	107	—	90

*1 標準水中養生、材齢28日

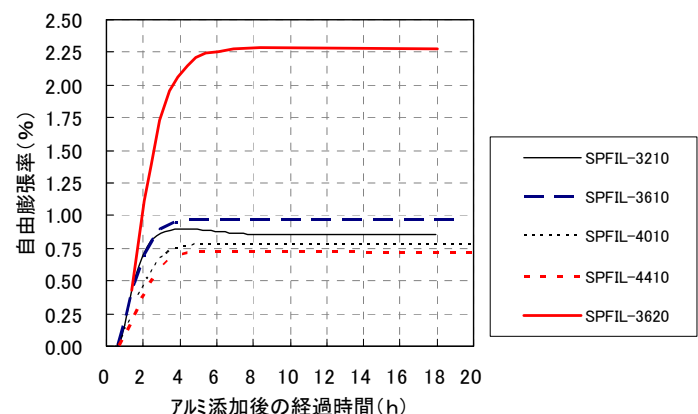


図-3 経過時間と自由膨張率

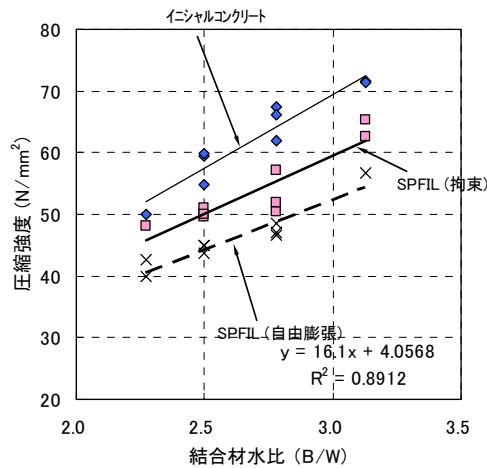


図-4 結合材水比と圧縮強度 (材齢 28 日)

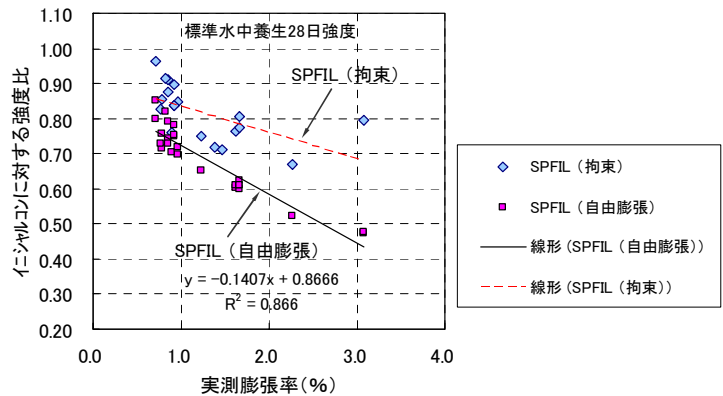


図-5 自由膨張によるスーパーフィルクリートの強度低下

(2) アルミニウム粉末の発泡による膨張に起因する強度低下について

スーパーフィルクリートは、アルミニウム粉末の発泡による膨張が拘束されることによって打継ぎ部の一体性をより確実にできる材料であるが、打設する部位や打設方法・手順によっては、アルミニウム粉末の発泡による膨張が拘束されずに自由膨張となってしまう部分が生じ、その部分（自由膨張が生じた部分）はそれ以外の部分よりも強度が低下してしまう懸念がある。本来は自由膨張する部分が生じないように打設するのが原則であるが、外付け補強工法など大規模な耐震補強工事の接合部の充填材料としてスーパーフィルクリートを用いる場合には、自由膨張してしまう部分が生じる可能性が高いと考えられる。そこで、自由膨張による強度低下を適切に評価するために、スーパーフィルクリートの標準水中養生供試体の材齢 28 日における強度を、実測膨張率とインシャルコンクリートの強度に対する比率で表して整理した。その結果を図-5 および表-7 に示す。アルミニウム粉末の発泡によって生じる膨張を拘束した供試体（図表中では（拘束）と表記）、その膨張を拘束しない供試体（図表中では（自由膨張）と表記）とも、膨張率が大きくなると強度比は小さくなる傾向が認められた。膨張率 1.0% を中心とした場合、実測の膨張率が 0.5% 大きくなると、スーパーフィルクリートの強度（表中の「自由膨張」）は強度比で 0.73 から 0.66 となり約 7% 低下することがわかる。

(3) 設計基準強度と水結合材比の設定例について

図-4 に示した、自由膨張させたスーパーフィルクリートの結合材水比 (B/W) - 圧縮強度式 ($y=16.1x+4.1$) を用いて、設計基準強度 (F_c) と水結合材比の設定を (JASS5-2003

表-7 インシャルコンクリートを 1 とした場合の強度比 (材齢 28 日)

実測膨張率		0.5%	1.0%	1.5%
強度比	インシャルコンクリート	1	1	1
	スーパーフィルクリート (拘束)	0.87	0.84	0.80
	同 (自由膨張)	0.80	0.73	0.66

に準じて) 計算すると、例えば $F_c 30 \text{ N/mm}^2$ の場合、気温補正値が 6 N/mm^2 の時期であれば水結合材比 36%、気温補正値が 3 N/mm^2 の時期であれば水結合材比 39%、となる。すなわち、実験の範囲内の水結合材比で設計基準強度 30 N/mm^2 のスーパーフィルクリートが十分に得られることが確認できた。

3.3 長さ変化率

各調査の材齢 26 週までの、長さ変化試験（拘束膨張収縮試験）の結果を図-6 に示す。SPFIL-4010、SPFIL-3610、SPFIL-3210 とともに乾燥期間 26 週の長さ変化は、収縮率で $2.5 \sim 3.2 \times 10^{-4}$ 程度となり、いずれの調査も目標品質の長さ変化率 5.0×10^{-4} 以下を達成している。なお、図-7 には、無収縮モルタル（プレミックスタイプの市販品 A、B、C）の試験結果例を併せて示した。試験体はすべて $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ とし、JIS A 6202 の拘束膨張収縮試験で測定したものである。図から、市販の無収縮モルタルの長さ変化率は A、B、C の 3 種類とも -5.0×10^{-4} 前後であること、スーパーフィルクリートの長さ変化率はいずれも無収縮モルタルの長さ変化率と比較して小さな値を示していることから同等以上の性能であることがわかる。なお、骨材品質の違いによる長さ変化率の違い等については別の機会に報告する³⁾。

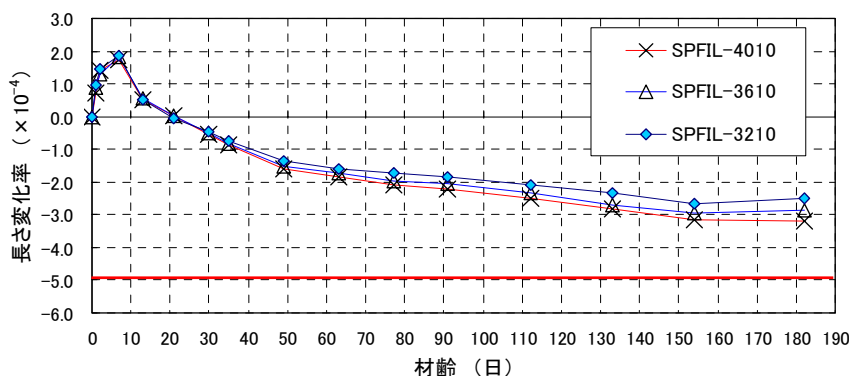


図-6 長さ変化試験結果

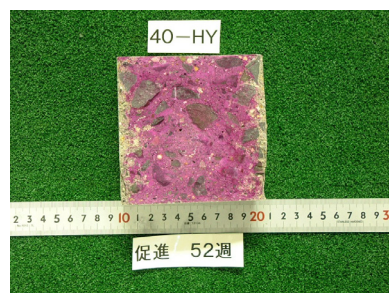


写真-3 促進中性化試験
(SPFIL-4010, 促進材齢 52 週)

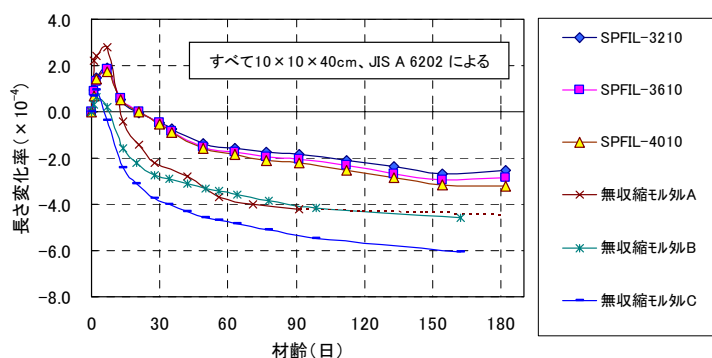


図-7 市販無収縮モルタルなどの長さ変化試験結果

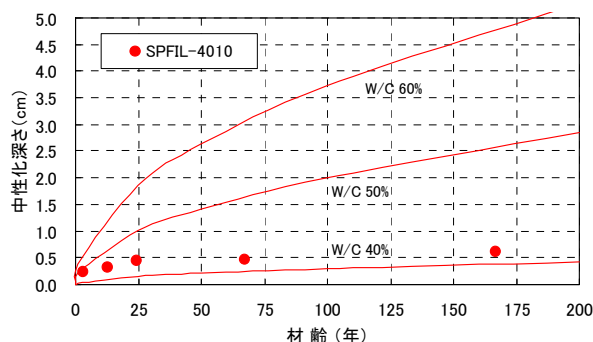


図-8 促進中性化試験結果
(屋外大気中に換算)

3.4 促進中性化深さ

スーパーフィルクリートの中性化について、SPFIL-4010 の試験体を用いて促進試験 (20℃、60%RH、CO₂ 濃度 5%) を行った。試験結果を図-8、写真-3 に示す。図-8 は岸谷式 (図中の W/C ごとの曲線) との比較を試みたものである。すなわち、促進期間 52 週までの測定値を屋外大気中の CO₂ 濃度 (0.03%) に相当するように換算した値をプロットしている (促進期間 52 週は屋外大気中の 167 年に相当する)。

この図から、スーパーフィルクリートの中性化は、同じ水セメント比のコンクリートよりもやや大きいと考えられるものの、Fc30 N/mm² で使用する水セメント比は 40% 程度以下であることから、実用上は (耐用年数を 100 年で設定しても) 問題になることはないと考えられる。

3.5 凍結融解抵抗性

各調査の凍結融解抵抗性試験結果を図-9 に示す。318 サイクル終了時点の相対動弾性係数から耐久性指数を求めると、SPFIL-4010 が最も小さく 88 であったが、SPFIL-4010、SPFIL-3610、SPFIL-3620 とともに 60 を上回っていた。(写真-4 参照) なお耐久性指数 60 とは、2003 年版 JASS5

の 26 節 (凍結融解作用を受けるコンクリート) において、性能区分 A、すなわち、厳しい気象条件の地域で飽水状態で凍結融解作用を受ける部材のコンクリートや長期供用級相当の重要構造物などのコンクリートを対象とした、“300 サイクルで相対動弾性係数 60%” 以上、に等しい評価である。この結果から、スーパーフィルクリートの凍結融解抵抗性は、通常のコンクリートと同様にフレッシュ時の空気量を確保すれば問題ないと考えられる。

4. まとめ

本報告では、スーパーフィルクリートについての一連の開発実験のうち、フレッシュ性状および硬化後の性状など、基本性状の確認試験結果についてまとめた。

その結果、フレッシュ性状ではスランブフロー 60±10cm、空気量 4.5±1.5%、自由膨張率 1.0±0.5% の目標品質が満足できることが確認できた。また、硬化後の性状では、圧縮強度は材齢 28 日で 39N/mm² 以上、長さ変化率は乾燥期間 26 週で 500μ 以下、耐久性 (凍結融解作用に対する抵抗性) は 300 サイクルで耐久性指数 60 以上の目標品質が満足できることが確認できた。

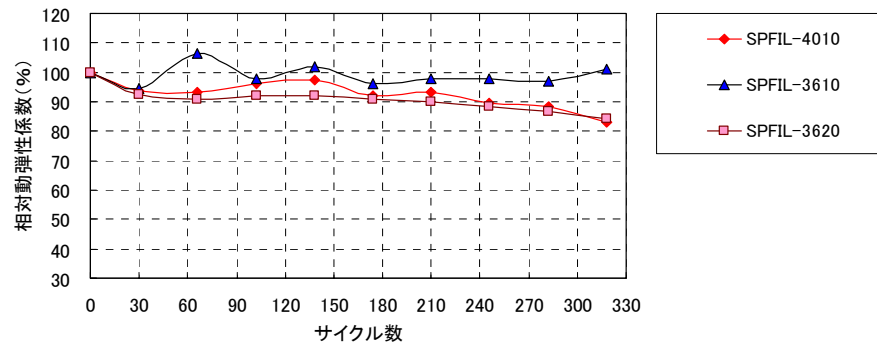


図-9 凍結融解試験結果

なお、このスーパーフィルクリートは、2009年5月に(財)日本建築総合試験所において建築技術性能証明を取得した。

[参考文献]

- 1) 財団法人日本建築センター：建設技術審査証明（建築技術）報告書 無収縮高流動コンクリート「フィルクリート／FILLCRETE」、2005.12
- 2) 石原誠一郎、三橋博三、立松和彦ほか：無収縮高流動コンクリートを用いた逆打ち工法の実大施工実験、日本建築学会技術報告集 No.13、pp.19-24、2001.7
- 3) 立松和彦、石原誠一郎、塩濱圭治：収縮の大きな粗骨材を用いたアルミ添加型無収縮高流動コンクリートの長さ変化試験結果および管理手法について、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.291-292、2009.8

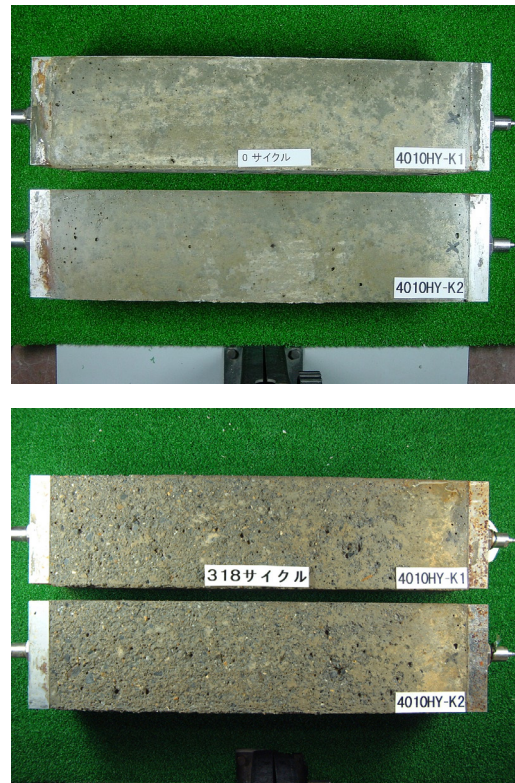


写真-4 凍結融解試験結果（SPFIL-4010, 上:0サイクル時、下:318サイクル時）