

## 超高強度コンクリートの遮塩性および収縮特性とその実用化

(株)富士ピー・エス 正会員 修士(工学) ○正木 守  
 (株)富士ピー・エス 正会員 博士(工学) 徳光 卓  
 太平洋セメント(株) 正会員 修士(工学) 前堀 伸平  
 太平洋セメント(株) 博士(工学) 谷村 充

Abstract : This paper investigates resistance to chloride ion penetration, autogenous shrinkage and its reduction of ultra-high-strength concrete using silica fume-premix cement (SFPC). The experimental results demonstrated that the chloride ion penetration depth of investigated mixtures is approximately 0.025 to 0.05 times lower than that of ordinary prestressed concrete with water-to-binder-ratio of about 0.45. That also revealed significant reduction in autogenous shrinkage by means of combined use of expansive additive and shrinkage-reducing type superplasticizer, about  $350 \times 10^{-6}$  and below. In addition, this paper shows application example of the proposed mixture for prestressed concrete thin member.

Key words : Silica fume-premix cement, Ultra-high-strength concrete, Chloride ion penetration depth, Autogenous shrinkage, shrinkage reducing admixtures

### 1. はじめに

近年、土木分野において部材の薄肉化や長スパン化、景観性と耐久性の向上を目的として高強度コンクリートが用いられるようになってきた。特に、海水や路面に散布される凍結防止剤に含まれる塩分によるコンクリート中の鉄筋などの腐食が深刻な問題となっており、高強度コンクリートの優れた耐久性によって社会資本の長寿命化を図ることで、ライフサイクルコストを低減することが期待されている。PC分野においてもプレストレストコンクリート技術協会（現プレストレストコンクリート工学会）より「高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工規準」<sup>1)</sup>が2008年10月に刊行され、高強度コンクリートをPC構造物に適用する環境が整備されている。

設計基準強度が $100\text{N/mm}^2$ を超えるような高強度領域では、シリカフュームを結合材の一部に置換したセメントを使用することが一般的である。シリカフュームプレミックスセメント（以下、SFPC）を用いた高強度コンクリートの基本特性については既往の研究によって確認されているが<sup>2)</sup>、SFPCを用いた高強度コンクリートにおける遮塩性に関する検討は少なく、まだ十分な知見は得られていないのが現状である。本検討では、SFPCを使用した水結材比25%～13%の高強度コンクリートを対象として、塩水浸漬による遮塩性の検討を行った。また、SFPCを用いた高強度コンクリートおよびモルタルについて、フレッシュ性状や収縮特性について検討を行った。本稿ではその検討結果と実構造物への適用事例について報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料および示方配合

表-1に使用材料を示す。セメントにはSFPCを使用し、膨張材には超高強度コンクリートへの適用性

が検証されている<sup>3),4)</sup>比表面積の大きい石灰系膨張材を使用した。化学混和剤は高強度用の高性能減水剤および収縮低減型高性能減水剤を使用し、空気量調整のために適宜消泡剤を使用した。

表-2に遮塩性の検討、表-3に収縮特性の検討用の供試体に用いたコンクリートの示方配合を示す。遮塩性の検討では、水結合材比を25%~13%まで変化させた5水準の配合とした。収縮特性の検討は、遮塩性の検討の中央値である水結合材比17%を基本とし、粗骨材の最大寸法を13mmとした配合(記号：G)と粗骨材を用いないモルタル配合(記号：M)について検討した。モルタル配合については、ベースコンクリートの粉体量が多いことからペースト量をコンクリートの場合と変化させず、粗骨材をすべて細骨材に置換する配合とした。また、自己収縮低減を目的として化学混和剤には収縮低減型高性能減水剤を使用し、膨張材を20kg/m<sup>3</sup>(記号：EX20)および30kg/m<sup>3</sup>(記号：EX30)を使用した計4水準について検討した。

2.2 実験方法

2.2.1 遮塩性の検討

供試体は円柱供試体(φ100×200mm)とし、28日間標準養生した後、20℃10%NaCl水溶液中に浸漬した。塩化物イオン浸透深さは、円柱供試体を用いたことより打設面および底面を測定対象とし、割裂した断面に硝酸銀水溶液を噴霧し、黒色に変色した部分の深さより求めた。塩化物イオン浸透深さの測定は浸漬15ヶ月目と30ヶ月目で行った。

また、30ヶ月間浸漬した円柱供試体について電子線マイクロアナライザー(以下、EPMA)による面分析を実施し、土木学会「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)(JSCE-G572-2003)」の6.見掛けの拡散係数の求め方<sup>5)</sup>に準拠して、打設面および底面について塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算出を行った。なお、塩化物イオン濃度分布は、空隙および骨材部分を除いたセメントペースト相当部分の平均とした。

2.2.2 収縮特性の検討

試験項目は、フレッシュ性状、圧縮強度、自己収縮ひずみとした。

(1)フレッシュ性状

フレッシュ性状はスランプフロー、空気量、Vロート流下試験によって確認した。

表-1 使用材料

材料	記号	種類/物性
セメント	C	シリカフェームプレミックスセメント/ 密度 3.07g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 6160cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S1	福島県東白河郡棚倉産 硬質砂岩 砕砂/ 表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.02%
	S2	福岡県北九州産 硬質砂岩 砕砂/ 表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.81%
粗骨材	G1	福島県東白河郡棚倉産 硬質砂岩 砕石 2005/ 表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.21%
	G2	福岡県朝倉産 結晶片岩 砕石 1305/ 表乾密度 2.77g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.71%
膨張材	EX	石灰系膨張材/ 密度 3.19g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4920cm <sup>2</sup> /g
化学混和剤	SP1	高性能減水剤/ ポリカルボン酸系
	SP2	収縮低減型高性能減水剤/ ポリカルボン酸系とグリコール系の複合体

表-2 遮塩性検討用供試体の示方配合

配合名	W/B (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				C	W	S1	G1	SP1
SFPC25	25.0	20	48.5	620	155	785	850	5.09
SFPC20	20.0	20	44.9	755	151	681	850	6.20
SFPC17	17.0	20	41.2	876	149	585	850	7.15
SFPC15	15.0	20	37.5	980	147	502	850	8.00
SFPC13	13.0	20	32.0	1115	145	393	850	9.23

W/B:水結合材比, Gmax:粗骨材最大寸法, s/a:細骨材率, W:水

表-3 収縮特性検討用供試体の示方配合

配合	W/B (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				C	EX	W	S2	G2	SP2
EX20G	17.0	13	41.8	856	20	149	616	881	13.14
EX30G	17.0	13	41.8	846	30	149	616	881	13.14
EX20M	17.0	-	100.0	856	20	149	1474	0	21.02
EX30M	17.0	-	100.0	846	30	149	1474	0	21.02

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験は円柱供試体 (φ100×200mm) を用いて、JIS A 1108に従って測定した。円柱供試体の養生方法は標準養生と高温養生の2種類とした。標準養生の供試体については打設後材齢2日まで恒温室 (20℃) で養生し、脱型後20℃水中で所定の材齢まで養生した。高温養生の供試体については打設後材齢2日まで恒温室 (20℃) で養生し、シリカフュームのポゾラン反応を活性化させるため<sup>6)</sup>脱型後蒸気養生槽内 (80℃20時間保持) で養生した。高温養生完了後は恒温室 (20℃) で所定の材齢まで養生した。圧縮強度試験は材齢7日、28日で実施した。

(3) 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみは角柱供試体 (100×100×400mm) の中央に埋込み型ひずみ計 (モールドゲージ) を設置して測定した。打設後材齢2日まで恒温室 (20℃) で養生し、脱型後アルミテープで供試体を封かんし、恒温室 (20℃) にて材齢18日まで測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 遮塩性の検討

3.1.1 塩化物イオン浸透深さ

図-1に結合材水比と塩化物イオン浸透深さの関係を示す。全般的な傾向としては、結合材水比と塩化物イオン浸透深さの関係は線形であり、結合材水比が大きいほど塩化物イオン浸透深さが小さくなることを確認された。15ヶ月と30ヶ月を比較すると、結合材水比が6.0付近より大きい領域では30ヶ月のほうが塩化物イオン浸透深さが1mm程度小さくなっているが、非常に浅いレベル (6mm程度未満) の評価であり、変色域の判定に伴う誤差等を含んだ結果であると考えている。

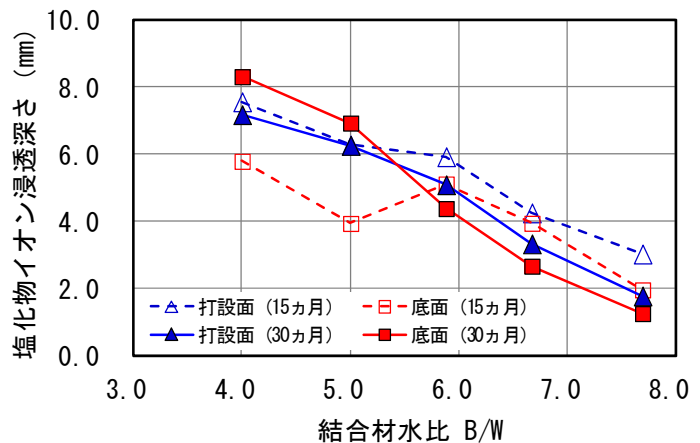


図-1 結合材水比と塩化物イオン浸透深さの関係

3.1.2 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

EPMAによる各配合における塩化物イオン濃度分布を図-2に示す。いずれの配合においても試料表面の濃度が高く、試料内部方向に向かって濃度が低くなる傾向が見られた。高い塩化物イオン濃度を示した範囲は、水結合材比が高くなるにつれて深くなる傾向を示した。また、一部の試料では、粗骨材の周囲の濃度が高く、粗骨材の周囲を塩化物イオンが拡散する傾向を示した。

表-4に塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算出結果を示す。見掛けの拡散係数はSFPC13の打設面で最も小さく0.0282cm<sup>2</sup>/yであった。見掛けの拡散係数は、おおむね水セメント比に比例して大きくなる傾向が確認されたが、W/C=17%以下の配合では、0.0282~0.0428cm<sup>2</sup>/yであり、大きな差は認められなかった。

表-4 見掛けの拡散係数の算出結果

配合名		見掛けの 拡散係数 $D_{ap}$ (cm <sup>2</sup> /y)	表面 Cl濃度 $C_{a0}$ (kg/m <sup>3</sup> )	初期 Cl濃度 $C_i$ (kg/m <sup>3</sup> )
SFPC25	打設面	0.0825	12.6	0.108
	底面	0.112	11.4	0.153
SFPC20	打設面	0.122	7.82	0.0963
	底面	0.140	10.2	0.103
SFPC17	打設面	0.0344	18.8	0.117
	底面	0.0401	10.7	0.0998
SFPC15	打設面	0.0347	12.3	0.173
	底面	0.0383	13.3	0.104
SFPC13	打設面	0.0282	11.2	0.188
	底面	0.0428	13.3	0.144

今回の試験から得られたW/B=17%以下の配合 (圧縮強度にして120~130N/mm<sup>2</sup>以上) の見掛けの拡散係数は、PC用の普通コンクリート (W/C=45%程度) と比較した場合、1/20~1/40程度であり、十分な遮塩性を期待できるものと考えられる。また、すべての配合で「打設面」に比べ「底面」の拡散係数が大きくなり、その差は0.004~0.03 cm<sup>2</sup>/yであった。低水結合材比のコンクリートでは、打設面に粗骨材の少ない緻密なモルタル層が形成されたために、底面よりも拡散係数が小さくなったものと考えられる。なお、15ヶ月と30ヶ月の塩化物イオン浸透深さに有意な差が認められなかったことから、さらに塩水浸漬を継続しても塩化物イオンの浸透は限定的であることが想定される。より長期的には、見掛けの拡散係数がさらに小さく評価される可能性が高い。

### 3.2 収縮特性の検討

#### 3.2.1 フレッシュ性状および圧縮強度

フレッシュ性状試験および圧縮強度試験結果を表-5に示す。スランプフローは配合によらずほぼ同じであったが、粗骨材を使用したEX20GとEX30GはVロート流下時間がモルタル配合であるEX20MとEX30Mに比べ非常に長くなった。高温養生した供試体の圧縮強度はコンクリート配合で120N/mm<sup>2</sup>程度、モルタル配合で150N/mm<sup>2</sup>程度となった。標準養生による場合、EX20GとEX30Gの材齢28日の圧縮強度は高温養生した場合とほぼ同等であったが、それ以外の圧縮強度は高温養生した場合よりも小さかった。高温養生した場合の圧縮強度が標準養生よりも大きくなった理由は、高温養生によってシリカフェュームのポズラン反応が活性化されたためと考えられる。

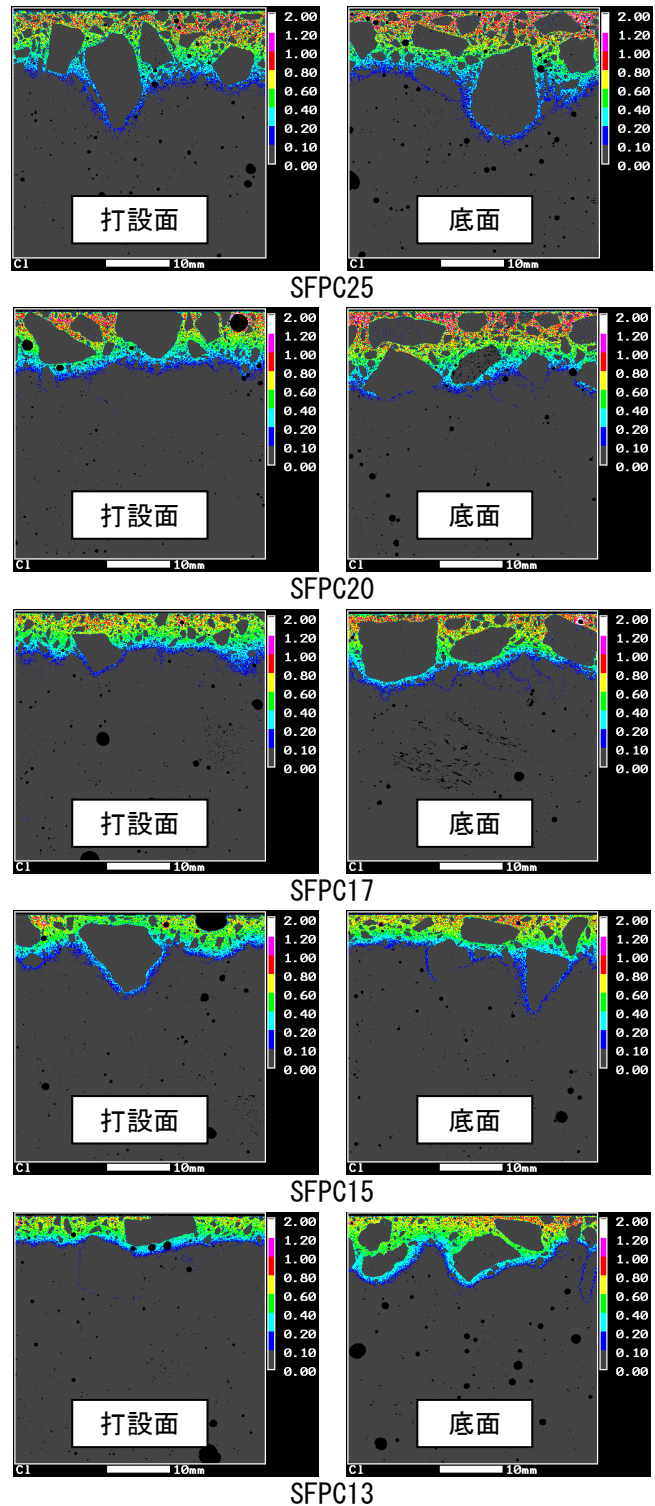


図-2 塩化物イオン濃度分布

表-5 フレッシュ性状試験および圧縮強度試験結果

配合名	スランプフロー (cm)			空気量 (%)	Vロート流下時間	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
						標準養生		高温養生	
						σ7	σ28	σ7	σ28
EX20G	82.0	×	80.0	0.7	4分42秒	97.8	120.9	124.3	116.8
EX30G	80.5	×	79.5	0.5	2分41秒	98.0	120.0	130.0	128.8
EX20M	78.5	×	78.0	2.4	1分6秒	113.9	142.8	139.0	150.7
EX30M	79.0	×	78.5	2.4	1分5秒	112.4	140.9	156.4	154.8

### 3.2.2 自己収縮ひずみ

20℃恒温室内で封かん養生した供試体の自己収縮ひずみの測定結果を図-3に示す。最も収縮ひずみが小さく抑えられたのはEX30Gであり、材齢18日において $-90\mu$ 程度であった。膨張材使用量の少ないEX20Gは $-220\mu$ 程度であり、膨張材量を $10\text{kg}/\text{m}^3$ 大きくすることで $130\mu$ 程度の収縮低減効果が確認された。最も収縮ひずみが大きかったEX20Mでも $-350\mu$ 程度に抑えられていた。EX30MについてはEX20Mに比べて $50\mu$ 程度の収縮低減効果が確認されたが、コンクリート配合に比べると膨張材の添加量に対する収縮低減効果は小さかった。

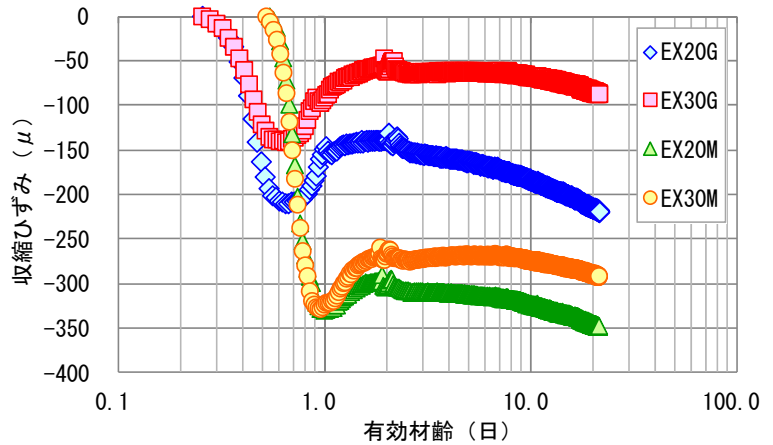


図-3 自己収縮ひずみ

また、コンクリート配合とモルタル配合の収縮ひずみの差は、EX30GとEX30Mで $200\mu$ 程度、EX20GとEX20Mで $130\mu$ 程度に抑えることができた。これは、今回用いたモルタル配合が単位水量、単位結合材料を変化させず、粗骨材を100%細骨材に置きかえた配合としたためと考えられる。一般に、コンクリートに比べるとモルタルの収縮量は非常に大きくなると認識されているが、今回の結果より、高強度コンクリートの自己収縮量は粗骨材量よりもペースト容積の影響が大きいものと推察される。高強度モルタルを用いる場合、自己収縮低減対策を施すことにより自己収縮を小さく抑えることができ、実構造物へ適用可能であることが示唆された。

## 4. 実構造物への適用事例

### 4.1 適用構造物の概要

高強度コンクリートを適用した洋上風力発電試験施設の概要を図-4に示す。本施設は「風レンズ風車」を用いた洋上風力発電の実証実験を行うための試験施設である。本試験施設の浮力体部分に使用するコンクリートは、設計基準強度が $100\text{N}/\text{mm}^2$ であり、コンクリートを打込む部材厚さがわずか $40\text{mm}$ の直径 $3.5\text{m}$ 円筒部材であったため、充填性と自己収縮を考慮した配合を選定する必要がある。また、本施設は洋上風力発電を目的とした施設であるため、使用するコンクリートに遮塩性が要求された。そこで、本施設の浮力体部分に本検討で示したEX20Mの配合を適用した。

### 4.2 部材の製作と現場設置

全6基ある円筒浮力体を各3分割、計18分割して工場で製作を行った。本検討の配合 (EX20M) をもと

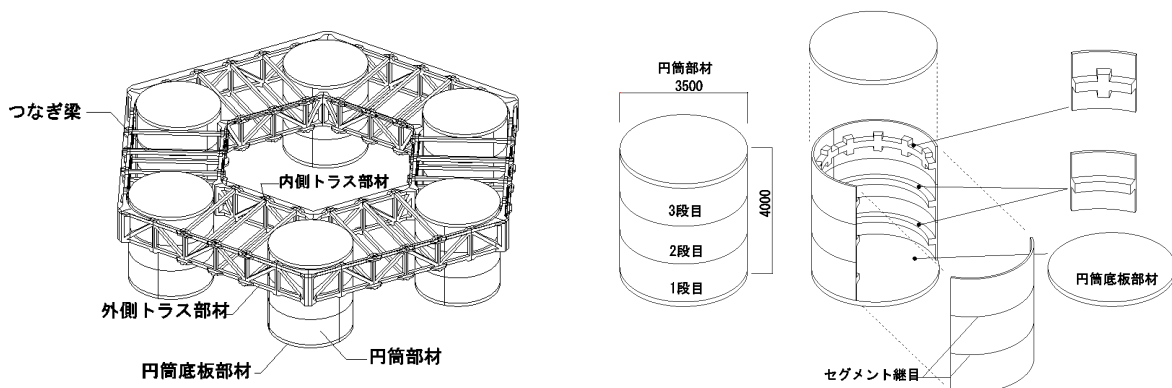


図-4 試験施設概要図

に、実機ミキサーによる試験練りおよび試験打設を行い、表-6に示すようにフレッシュコンクリートの品質管理値を設定し製作を行った。製作したすべての部材においてモルタルの材料分離や充填不良はなく、ひび割れの発生も確認されなかった。本検討の高強度モルタルの良好な充填性と、収縮低減効果が十分に発揮されたものと考えられる。完成部材を写真-1に示す。

製作した部材は試験施設設置場所付近の現場ヤードで組立を行い、博多湾に設置された。進水状況を写真-2に示す。

5. まとめ

本検討では、土木部材への高強度コンクリートの実用化を目的として、SFPCを用いた高強度コンクリートの遮塩性の検討、収縮特性の検討を行った。今回の実験より得られた知見を以下に示す。

- (1) 硝酸銀水溶液噴霧によって測定した塩化物イオン浸透深さは、結合材水比が大きいほど小さくなることが確認された。塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、おおむね水結合材比に比例して大きくなる傾向が確認されたが、W/B=17%以下の配合では大きな差はなかった。PC用の普通コンクリートに比べ、十分な遮塩性を期待できることが確認された。
- (2) 高強度モルタル配合でも膨張材と収縮低減型高性能減水剤を併用することにより、自己収縮を小さく抑えられることが確認された。
- (3) 収縮低減対策を行った高強度モルタルは、実構造物に十分適用可能であることが確認された。

参考文献

- 1) 社団法人プレストレストコンクリート技術協会：高強度コンクリートを用いたPC構造物の設計施工規準，2008.10
- 2) 前堀伸平・藤田仁・三谷裕二・谷村充：シリカフェ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の基本特性，第18回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.295-298，2009
- 3) 前堀伸平・中崎豪士・三谷裕二・谷村充：超高強度コンクリートの自己収縮制御に関する検討，第19回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.353-356，2010
- 4) 中崎豪士・前堀伸平・三谷裕二・谷村充：収縮低減型高性能減水剤による超高強度コンクリートの自己収縮低減，第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.515-518，2011
- 5) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書[規準編]土木学会規準および関連規準，pp.321-323，2010.11
- 6) 三谷裕二・番地成朋・谷村充・丸山一平：高温履歴を受けた低水結合材比シリカフェーム混和セメントの強度および水和反応特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1495-1500，2009

表-6 品質管理項目

項目	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	Vロート 流下時間 (秒)
規格値	80	2.0	40
管理値	±10	±1.5	±20



写真-1 完成部材



写真-2 試験施設進水状況