

# 論文 高強度繊維補強モルタルの材料特性

桜田 道博\*1・雨宮 美子\*1・大山 博明\*2・森 拓也\*3

**要旨:** 粗骨材を使用せず代わりに鋼繊維補強材を混入した高強度繊維補強モルタルを開発するため各種強度試験, クリープ・乾燥収縮試験, 促進中性化試験, 凍結融解試験および塩分拡散係数試験を実施した。その結果, 本モルタルの設計基準強度は 120MPa 程度まで可能であり, 通常の PC 構造物に使用する普通コンクリートに比べ耐久性も高いことが確認された。  
**キーワード:** 圧縮強度, 曲げ強度, クリープ, 乾燥収縮, 中性化, 凍結融解, 塩分拡散係数

## 1. はじめに

近年, 設計基準強度が 100MPa を超える高強度コンクリートが実用化されている。高強度コンクリートにおいて粗骨材は流動性の低下, 強度のばらつき, および強度の頭打ち現象の原因となることがあり, 高強度になるほど粗骨材を厳選する必要がある。そこで, 粗骨材を使用せず, 代わりに鋼繊維補強材を混入したモルタル(以降, 高強度繊維補強モルタル)を開発することとした<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。高強度繊維補強モルタルは, 粗骨材を使用しないため, 砕砂を使用すれば, 骨材をそれほど厳選することなく, 優れた流動性, 自己充填性および高強度が得られる。また, 鋼繊維補強材を添加していることから収縮ひび割れの抑制および高強度コンクリート特有の脆性的な破壊形態の改善が可能となる。

本モルタルは低桁高のプレストレストコンクリート(以降, PC)橋や塔状構造物に適用されたが<sup>5), 6), 7)</sup>, 本モルタルを PC 構造物に適用するには各種強度, クリープおよび乾燥収縮に関する特性を把握する必要がある。また, 本モルタルの高い耐久性を実構造物の設計に反映するには, 中性化, 凍結融解および塩分拡散係数などに対する特性も確認する必要がある。そこで, 高強度繊維補強モルタルの各種強度試験, クリープ・乾燥収縮試験, 促進中性化試験, 凍結融解試験および塩分拡散係数試験を行った。

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料

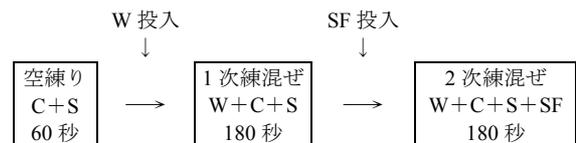
高強度繊維補強モルタルの使用材料, 示方配合, 練混ぜ方法および養生方法をそれぞれ, 表-1, 表-2, 図-1 および図-2 に示す。示方配合の水準は, 水セメント比および鋼繊維補強材の混入率が強度特性に及ぼす影響を確認できるように設定した。

表-1 使用材料

材 料	記号	摘 要
セメント	C	シリカフェュームセメント, 密度 3.08g/cm <sup>3</sup>
水	W	上水道水
鋼繊維補強材	SF	引張強度 2000MPa 以上 長さ 13mm, 径 0.16mm, 密度 7.85g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	砕砂(東根市産), 表乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.59%, 最大寸法 5mm, アル骨無害
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表-2 示方配合

配合 No.	W/C (%)	Air (%)	SF 混入率 (vol.%)	スランブ フロー (mm)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				SP/C (%)
					W	C	S	SF	
1	17	2.0	0.0	750	210	1235	948	0	3.0
2	17	2.0	0.5	750	210	1235	948	40	3.0
3	17	2.0	1.0	750	210	1235	948	79	3.0
4	17	2.0	2.0	580	210	1235	948	157	3.0
5	16	2.0	0.0	—	210	1313	904	0	3.0
6	20	2.0	0.0	—	200	1000	1186	0	3.0
7	23	2.0	0.0	—	200	870	1293	0	3.0



\*強制練りミキサ(水平2軸形またはパン形)を使用

図-1 練混ぜ方法

\*1 (株)ピーエス三菱 技術本部土木技術第一部 (正会員)

\*2 (株)ピーエス三菱 技術本部土木技術第一部 グループリーダー (正会員)

\*3 (株)ピーエス三菱 技術本部土木技術第一部長 (正会員)

## 2.2 各種強度試験

強度試験として、圧縮強度試験、静弾性係数試験、割裂引張強度試験および曲げ強度試験を行った。試験方法は表-3のとおりとした。

## 2.3 クリープ試験

クリープ試験は JIS 原案:コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案)を準用して行った<sup>8)</sup>。クリープ試験供試体を図-3に示す。供試体は、一辺が 100mm の正方形断面で長さが 320mm の角柱とし、断面の中心に PC 鋼棒を貫通させるための孔(φ36mm)をあけた。荷重は、孔に貫通させた PC 鋼棒(φ32mm)により載荷し、載荷荷重は約 450kN とした。この載荷荷重は、供試体に発生する圧縮応力度が載荷時の圧縮強度(150MPa)の 1/3 になるように決定した。載荷は、蒸気養生終了後の材齢 3 日から行った。載荷荷重の管理は PC 鋼棒に貼付したひずみゲージにより行い、ひずみゲージの値が初期値に対し±2%以内となるよう定期的に緊張した。供試体のひずみはコンタクトゲージにより測定した。

## 2.4 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、JIS A 1129 に準拠して行った。供試体は、クリープ試験と同様とし、供試体断面の中心部には直径 36mm の孔をあけた。これは、供試体の乾燥状態をクリープ試験と同一にするためである。乾燥収縮ひずみは蒸気養生終了後の材齢 3 日より測定を開始した。

## 2.5 促進中性化試験

促進中性化試験は、JIS A 1153 に準拠して行った。供試体は、一辺が 100mm の正方形断面で、長さが 400mm の角柱とし、蒸気養生終了後、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室に 4 週間静置した後に中性化を促進させた。促進中性化の条件は、温度 20℃、相対湿度 60%、CO<sub>2</sub>濃度 5%とした。

## 2.6 凍結融解試験

凍結融解試験は、JIS A 1148 に準拠した。供試体は一辺が 100mm の正方形断面で長さが 400mm の角柱とし、蒸気養生終了後、4 週間 20℃ の水中で養生した後に凍結融解試験を行った。

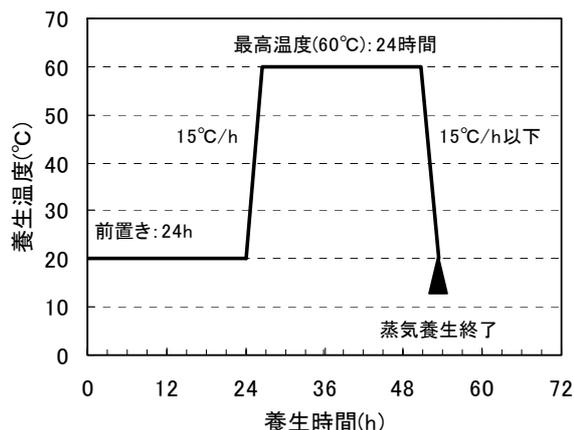


図-2 養生方法

表-3 強度試験方法

試験項目	試験方法
①圧縮強度	JIS A 1108 に準拠, 供試体: φ10×20cm, 材齢: 3日(蒸気養生直後), 28日
②ヤング係数	JIS A 1149 に準拠, 圧縮強度試験時に測定
③引張強度	JIS A 1113 に準拠, 供試体: φ10×20cm, 材齢3日(蒸気養生直後)
④曲げ強度	JIS A 1106 に準拠, 供試体: 10×10×40cm, 材齢3日(蒸気養生直後)

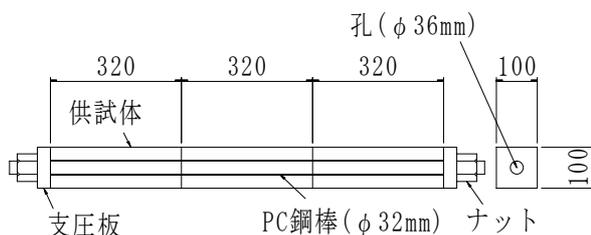


図-3 クリープ試験供試体

試験条件は水中凍結水中融解の A 法とした。所定のサイクルになった段階で、供試体の相対動弾性係数と質量減少量を測定した。

## 2.7 塩分拡散係数

見掛けの塩分拡散係数は、JSCE-G572-2003:浸漬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)に準拠して求めた。供試体は直径 100mm、高さ 200mm の円柱とし、供試体の上下 25mm を切断し、試験面以外をエポキシ樹脂でコーティングした後に 10%の塩化ナトリウム水溶液に 13 ヶ月浸漬した。13 ヶ月後のモルタル中の塩化物イオン濃度を蛍光 X 線分析装置(XRF)により測定し、塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めた。

### 3. 試験結果

#### 3.1 圧縮強度およびヤング係数

セメント水比 C/W と圧縮強度との関係を図-4に示す。C/W と圧縮強度との関係は圧縮強度が150MPaを超えても直線関係であり、強度の頭打ち現象は認められない。また、最もデータ数が多い C/W が 5.88 の場合、材齢 3 の圧縮強度(平均値)、標準偏差および変動係数はそれぞれ、152MPa、4.9MPa および 3.2%であり、材齢 28 日の圧縮強度(平均値)、標準偏差および変動係数はそれぞれ、157MPa、6.5MPa および 4.1%であった。粗骨材を使用していないため、圧縮強度のばらつきは比較的小さいと考えられる。この結果より高強度繊維補強モルタルは配合強度で150MPa程度まで、設計基準強度で120~125MPaまで可能と考えられる。なお、この設計基準強度は圧縮強度が設計基準強度を下回る確率を5%とし、圧縮強度の変動係数を10%と安全側に仮定した場合の値である。

材齢 3 日(蒸気養生直後)のヤング係数の測定結果を表-4に示す。高強度繊維補強モルタルのヤング係数は鋼繊維補強材混入率の影響はほとんど受けず、おおむね38GPa程度となっている。

#### 3.2 割裂引張強度

鋼繊維補強材(以降、SF)の混入率と割裂引張強度との関係を図-5に示す。ここでの引張強度は水セメント比が17%、蒸気養生直後(材齢3日)で圧縮強度が150MPa程度の場合のものである。本モルタルの引張強度はSF混入率の影響をほとんど受けず、8MPa程度となっている。

#### 3.3 曲げ強度

SFの混入率と曲げ強度との関係を図-6に示す。ここでの曲げ強度は、曲げ強度試験において荷重が最大になった時点のものであり、供試体にひび割れが発生した時点のものではない。この図からわかるとおり、SFの混入率が大きくなるほど、曲げ強度は直線的に大きくなっている。しかしながら、本モルタルは鉄筋を配置することを前提としており、SFの混入は収縮ひび割れの防止と高強度材料特有の脆性的な破壊を

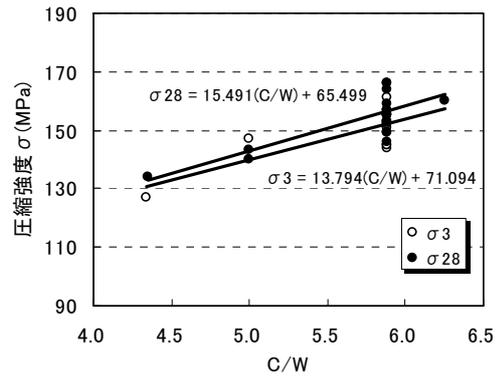


図-4 セメント水比 C/W と圧縮強度との関係

表-4 ヤング係数の測定結果

配合	W/C (%)	SF 混入率 (vol.%)	圧縮強度 $\sigma_3$ (MPa)	ヤング係数 $E_3$ (GPa)
No.1	17	0.0	161	37.3
No.2	17	1.0	152	37.8
No.3	17	2.0	153	37.6

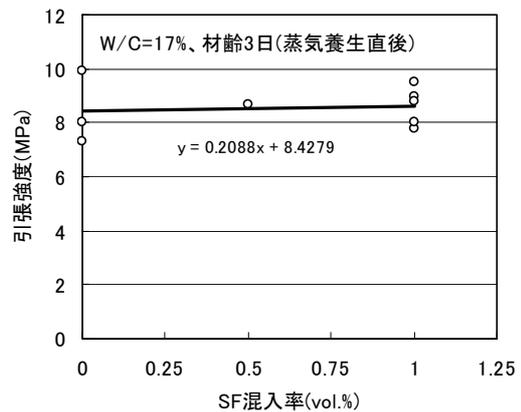


図-5 SF 混入率と引張強度との関係

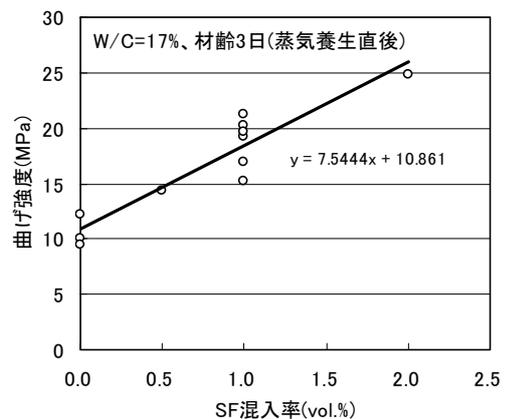


図-6 SF 混入率と曲げ強度との関係

防止するためであり、必要以上に曲げ強度を大きくする必要はないと考えられる。なお、本モルタルに関する既往の研究により、SFの混入率が0.5vol%であれば部材の破壊形態が脆性的に

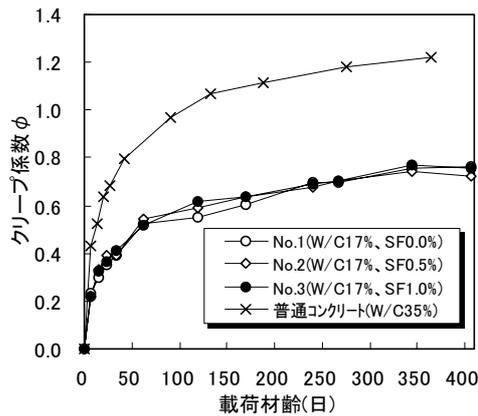


図-7 クリープ試験結果

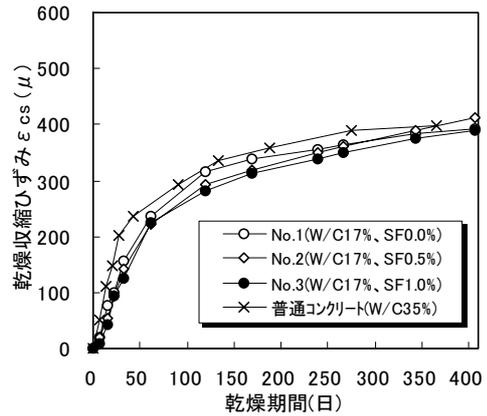


図-8 乾燥収縮試験結果

ならないことが確認されている<sup>7)</sup>。

### 3.4 クリープ・乾燥収縮

クリープ試験および乾燥収縮試験の結果をそれぞれ、図-7および図-8に示す。これらの試験結果は、水セメント比が17%、SF混入率が0vol.%、0.5vol.%および1.0vol.%のものである。比較のため通常のPC構造物に使用される普通コンクリート(W/C35%)の試験結果も示した<sup>9),10)</sup>。高強度繊維補強モルタルのクリープ係数は、荷重載荷から1年程度で0.75程度であり、普通コンクリートに比べ小さいことがわかる。一方、蒸気養生後の乾燥収縮ひずみは、400μ程度であり、普通コンクリートと同程度となっている。また、クリープ係数および乾燥収縮ともに、SF混入率による差はほとんど認められず、SF混入率はクリープおよび乾燥収縮特性にほとんど影響しないことがわかる。

### 3.5 中性化

促進中性化試験の結果を図-9および写真-1に示す。高強度繊維補強モルタルは、促進中性化試験を6ヶ月実施しても中性化深さは0mmであり、中性化に対し、十分な耐久性を有していると考えられる。

### 3.6 凍結融解

凍結融解試験後の相対動弾性係数を図-10に示す。一般に、普通コンクリートの凍結融解試験では、300cycで相対動弾性係数が60%以上あればよいとされているが、高強度繊維補強モルタルは480cycでも相対動弾性係数はほとんど低下していない。また、供試体にスケーリングや

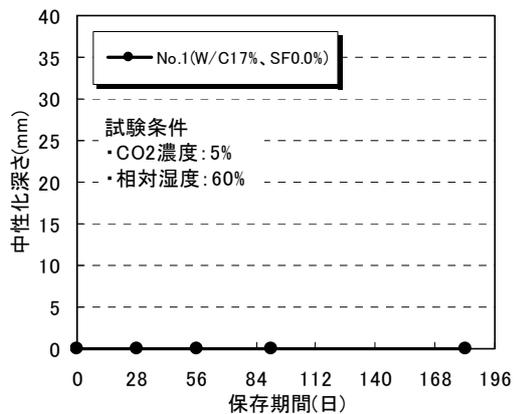


図-9 促進中性化試験結果

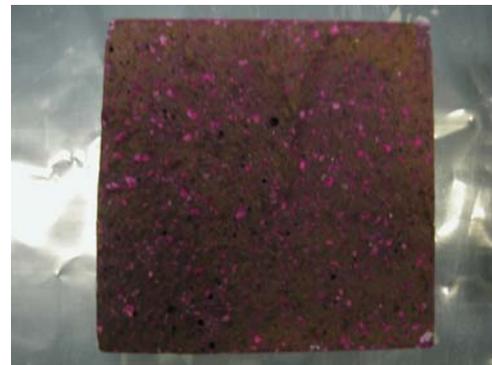


写真-1 フェノールフタレイン噴霧状況

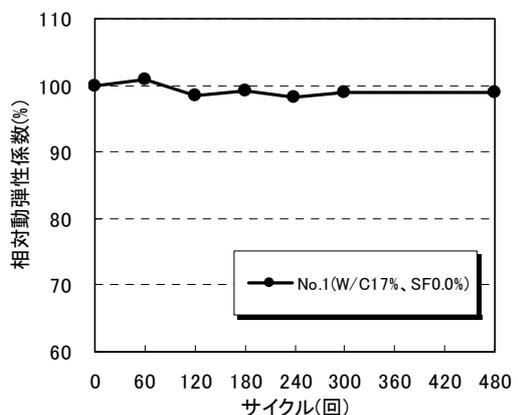


図-10 相対動弾性係数試験結果

ひび割れは全く認められなかった。高強度繊維補強モルタルは、空気量が 2~3%と少ないが十分な凍結融解抵抗性を有していると考えられる。

### 3.7 塩分拡散係数

浸漬期間 13 ヶ月後における供試体内部の塩化物イオン濃度の分布を図-11 に示す。塩化物イオン濃度は XRF により求めたものである。浸漬した供試体は、水セメント比が 17%のもので、分析の障害となるため SF は混入しなかった。

図-11 より、式(1)に準じて求めた見掛けの塩分拡散係数を表-5 に示す<sup>11)</sup>。算出した見掛けの塩分拡散係数は  $0.0217\text{cm}^2/\text{年}$  となった。

試験で求めた見掛けの塩分拡散係数を使用し、塩化物イオン濃度の経時変化を算出した結果を図-12 に示す。塩化物イオン濃度は、式(2)により算出し、算出条件は、飛沫帯、かぶり 37mm、とした<sup>12)</sup>。比較のため通常の PC 構造物に使用される普通コンクリート(W/C=36%)の塩化物イオン濃度の経時変化も示す<sup>10)</sup>。普通コンクリートの見掛けの塩分拡散係数( $0.463\text{cm}^2/\text{年}$ )はコンクリート標準方書に準拠し、式(3)により求めた。図-12 より、通常のコンクリートでは 5 年程度で発錆限界を超えているのに対し、高強度繊維補強モルタルでは、100 年後においても鉄筋位置の塩化物イオン濃度は、 $1.08\text{kg}/\text{m}^3$  であり、発錆限界  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$  以下となっている。したがって、高強度繊維補強モルタルは、通常のコンクリートに比べ塩害に対する耐久性が高く、かぶりが 37mm あれば、飛沫帯においても塩害に対して 100 年の耐久性を有すると考えられる。

$$C(x,t) - C_i = C_{ao} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 $x$ : 暴露面からの距離(cm),  $t$ : 浸漬期間(年),  $C(x,t)$ : 距離  $x$ (cm), 浸漬期間(年)において測定された塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C_{ao}$ : 浸漬試験によるコンクリート表面の全塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C_i$ : 初期に含有されるコンクリート中の全塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $D_{ap}$ : 浸漬試験に

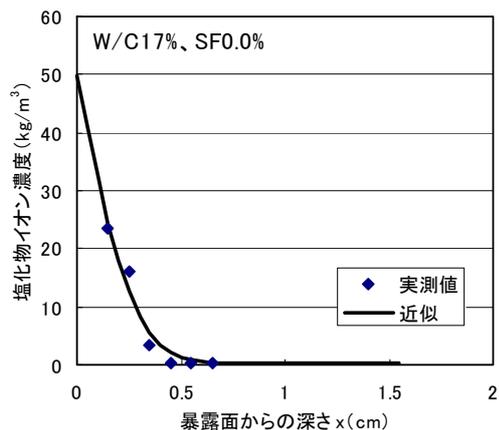


図-11 塩化物イオン濃度の分布

表-5 見掛けの拡散係数(W/C=17%)

表面の塩化物イオン濃度 $C_o(\text{kg}/\text{m}^3)$	見掛けの拡散係数 $D_{ap}(\text{cm}^2/\text{年})$
49.6	0.0217

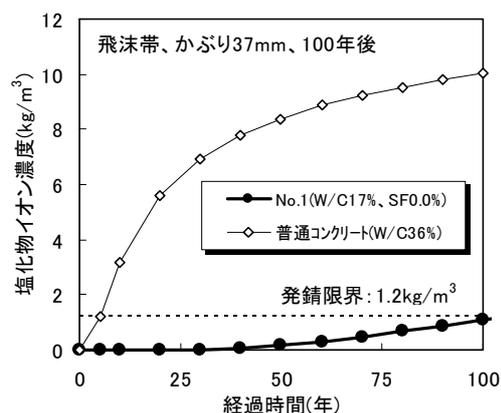


図-12 塩化物イオン濃度の計算値

よる見掛けの拡散係数,  $\operatorname{erf}$ : 誤差関数

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_o \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1 \cdot c}{2 \sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right] \quad (2)$$

ここに、 $C_o$ : コンクリート表面における塩化物イオン濃度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $c$ : かぶりの期待値(mm),  $t$ : 耐用年数(年),  $\gamma_{cl}$ : 濃度のばらつきを考慮した安全係数(高流動 1.1としてよい),  $D_d$ : コンクリートの見掛けの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ )

$$\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (3)$$

ここに、 $D_p$ : コンクリートの拡散係数の予測値

#### 4. まとめ

粗骨材を使用しない高強度繊維補強モルタルの各種強度試験、クリープ・乾燥収縮試験および各種耐久性試験を行った。その結果、高強度繊維補強モルタルの設計基準強度は 120MPa 程度まで可能であり、通常の PC 構造物に使用される普通コンクリート(W/C=36%程度)に比べ、耐久性も高いことが確認された。各試験結果の要点は以下のとおりである。

- (1) 高強度繊維補強モルタルの圧縮強度は 150MPa を超えても強度の頭打ち現象は認められず、設計基準強度は 120MPa 程度まで可能と考えられる。
- (2) 引張強度は鋼繊維補強材の混入率によらず 8.0MPa 程度で一定であった。
- (3) 曲げ強度は鋼繊維補強材の混入率に比例して大きくなった。
- (4) 中性化および凍結融解に関しては、十分な耐久性を有していることが確認された。
- (5) 蒸気養生後のクリープ係数は、1 年後で 0.75 程度であり、普通コンクリートより小さいことが確認された。
- (6) 蒸気養生後の乾燥収縮ひずみは、1 年後で 400 $\mu$  程度であり、普通コンクリートと同程度であることが確認された。
- (7) 浸漬法により求めた見掛けの塩分拡散係数は 0.0217cm<sup>2</sup>/年であり、この拡散係数によりかぶりの照査を行ったところ、かぶりが 37mm 以上であれば飛沫帯においても塩害に対して 100 年程度の耐久性を有する結果となった。

#### 参考文献

- 1) 桜田道博, 雨宮美子, 渡辺浩良, 森拓也: ダックスビーム工法(超高強度低桁高 PC 橋)の開発, ピーエス三菱技報, 3 号, 2005.10
- 2) 雨宮美子, 桜田道博, 渡辺浩良, 森拓也: 超高強度繊維補強モルタルの性状とそれを用いた低桁高 PC 橋の試設計, プレストレストコンクリート技術協会, 第 13 回シンポジウ

ム論文集, pp.585-588, 2004.10

- 3) 雨宮美子, 桜田道博, 森拓也, 二羽淳一郎: 超高強度繊維補強モルタルを用いた PC 梁の性状, コンクリート工学年次論文集, pp.1657-1662, 2005.7
- 4) 雨宮美子, 桜田道博, 森拓也, 二羽淳一郎: 超高強度繊維補強モルタルを用いた PC 梁の載荷実験, プレストレストコンクリート技術協会, 第 14 回シンポジウム論文集, pp.101-106, 2005.11
- 5) 宮前俊之, 菊池拓夫, 木村和典, 小西隆宏: 豆飼橋の設計, プレストレストコンクリート技術協会, 第 15 回シンポジウム論文集, pp.29-32, 2006.10
- 6) 岩井利裕, 亀沢直弘, 藤岡靖, 石田邦洋: 超高強度繊維補強モルタルを用いた PC プレテンション桁の施工-皆喜橋-, プレストレストコンクリート技術協会, 第 15 回シンポジウム論文集, pp.33-36, 2006.10
- 7) 桜田道博, 大山博明, 森拓也, 二羽淳一郎: 超高強度繊維補強モルタルを使用した塔状構造物に関する実験的研究, プレストレストコンクリート技術協会, 第 15 回シンポジウム論文集, pp.449-454, 2006.10
- 8) JIS 原案: コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案), コンクリート工学, vol.23, No.3, pp.55-56, 1985.3
- 9) 桜田道博, 渡辺浩良, 大浦隆, 鈴木基行: 石炭灰を主原料とする高性能人工骨材を用いた PC はり部材の力学的特性に関する研究, 土木学会論文集, No.774/V-65, pp.27-37, 2004.11
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲ, コンクリート橋編, pp.171-175, 2002.3
- 11) 土木学会: JSCE-G572-2003 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), コンクリート標準示方書【規準編】, pp.275-279, 2005.3
- 12) 土木学会: コンクリート標準示方書【施工編】, 2002.3