

## PC橋に用いた超高強度コンクリートならびに短繊維の長期耐久性

太平洋セメント(株)	正会員	博(工)	○河野 克哉
太平洋セメント(株)		修(工)	森 香奈子
太平洋セメント(株)	正会員	修(工)	前堀 伸平
(株)クラレ			末森 寿志

Abstract : The durability and the mechanical properties of the 15 year old ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) bridge has been studied by using exposed specimens in the girder. The main results are shown below. (1) The compressive strength of the field specimen increases gradually up to the age of 15 years. (2) The chloride ions penetrated into just the surface of the specimen (1.5 to 3 mm). (3) Examination of exposed specimens and by scanning electron microscopy revealed the presence of many unhydrated cement particles.

Key words : Ultra high strength concrete, Fiber reinforcement, PC bridge, Durability

## 1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート(以下、UFC)は、200N/mm<sup>2</sup>程度の高い圧縮強度を有しながら短繊維の混入によって引張軟化特性を改善し、さらに流動性と耐久性を備えた新材料として15年以上前に開発された。このUFCの構造物に対する適用性を検証する目的で、UFCの優れた材料特性を活用できるPC橋として酒田みらい橋の建設プロジェクトが企画された<sup>1),2)</sup>。このプロジェクトによって得ることができたUFC構造の設計・施工に対する基礎データを反映させる形で、2004年に土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」が発刊されている。酒田みらい橋の建設プロジェクトでは、日本で初めてPC橋に適用されたUFCの耐久性を継続して追跡調査できるように、橋の箱桁内に多数の暴露供試体を設置し、定期的に試験を実施している<sup>3),4)</sup>。本報告では供用開始から15年目となる2017年8月に実施した耐久性調査結果にもとづいて、UFCならびに短繊維の長期耐久性について考察した。

## 2. UFCならびに短繊維の耐久性調査の概要

### 2.1 UFCを用いたPC橋の概要

図-1に示した酒田みらい橋は、山形県酒田市内を流れる新井田川の河口から約2kmの位置に架橋され、2002年10月に竣工された。満潮時には河川の架橋位置まで海水が逆流し、冬季はとくに飛来塩分が多いことから、塩害環境下で供用されている。この橋は、外ケーブル方式単径間PC箱桁橋で、低い桁高(端部55cm)にもかかわらず長スパン(橋長50.20m, 支間長49.35m)であることを特長とする。橋の構造材料にUFCを適用したことで、鉄筋を一切使用しない形で部材の薄肉化(上床版厚5cm, ウェブ厚さ8cm)が可能となり、橋本体の大幅な軽量化(従来のRC橋に対して約5分の1の重量)を実現できた。

UFCは、セメント、シリカフェーム、珪石微粉末、珪砂などを最適に配合したプレミックス粉体(P)に、水(W)、高性能減水剤(SP)とともに短繊維(F)を分散させた材料で、酒田みらい橋では、表-1に示す2種類のUFCが用いられた。箱桁にはビーライト系ポルトランドセメントと鋼繊維(直径0.2mm, 長さ15mm)を組み合わせた配合(以下、UFC-STE)が、高欄には白色ポルトランドセメントとポリビニルアルコール(PVA)繊維(直径0.3mm, 長さ15mm)を組み合わせた配合(以下、UFC-PVA)が適用されている。いずれの配合もコンクリート体積に対して2%の短繊維を混合し、90°Cの蒸気養生を行っている。

## 2.2 UFCの耐久性調査の方法

### (1) 圧縮強度ならびに曲げ強度の経時変化

図-2に示すように、実橋のUFCと同一配合の円柱供試体(寸法φ5×10cm)ならびに角柱供試体(寸法4×4×16cm)を箱桁内に暴露し、所定の供用期間にて、それぞれ圧縮試験ならびに曲げ試験に供した。なお、曲げ試験は、支点間距離12cm、等曲げモーメント区間距離4cmのなる4点曲げとした。

### (2) 塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)浸透の状況

箱桁内にて鉛直軸方向に縦置きで暴露した角柱供試体(寸法4×4×16cm)を用い、JSCE-G574-2010に準じて、断面4×4cmを電子線マイクロアナライザ(以下、EPMA)にて塩素の面分析に供した。

### (3) 反射電子像の観察

SEM用試料は、図-3に示すようにEPMA分析後の暴露供試体の試料片から切り出したものを利用し、浸透深さ方向に2cmの断面をSEM観察に供して反射電子像(以下、BSE像)を得た。BSE像のグレイレベルは平均原子番号に依存するため、この差を利用して、未水和セメントと空隙が占める面積領域を抽出・2値化し(1試料につき10視野を観察)、それぞれの体積率(含有率)をステオロジー理論から算出した。



図-1 酒田みらい橋の外観

表-1 酒田みらい橋に用いたUFCの配合

種類	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				Flow * <sup>2</sup> (mm)	圧縮強度 * <sup>3</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
	W * <sup>1</sup>	P	F	SP		
UFC-STE	175	2254	157	24	270	213
UFC-PVA	200	2187	26	48	266	134

\*<sup>1</sup> Wの一部にSPを含む \*<sup>2</sup> 落下振動なし \*<sup>3</sup> 養生後



図-2 箱桁内の暴露供試体

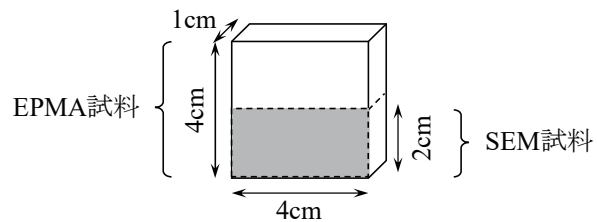


図-3 EPMA試料とSEM試料

## 2.3 短繊維の耐久性調査の方法

### (1) 鋼繊維の腐食

箱桁端部ウェブに用いたUFC-STEの下流側ならびに上流側における外表面ならびに内表面の定位置で点錆の発生状況を定期的に観察した。点錆はごく表面に露出した鋼繊維の腐食によるもので、定位置1か所当りの測定面積を7.5cm×10cmに固定してデジタルカメラにて撮影を行った。

### (2) PVA繊維の変質

高欄に用いたUFC-PVAの表面に露出したPVA繊維を供用15年で採取し、室内にて同じ15年間保管した未使用のPVA繊維と比較する形で、ゲル浸透クロマトグラフィー(GPC)による分子量、核磁気共鳴(NMR)による1,2-グリコールの生成量、および示差走査熱量計(DSC)による融解温度と融解熱量を測定した。

### 3. UFCならびに短繊維の耐久性調査の結果

#### 3.1 UFCの耐久性

##### (1) 強度変化

図-4は、箱桁内に暴露したUFC-STE供試体の圧縮強度ならびに曲げ強度の変化を示したものである。暴露供試体の圧縮強度は、建設当初210N/mm<sup>2</sup>程度であったものの、供用期間の経過とともに徐々に増加し、供用15年では220N/mm<sup>2</sup>以上となった。このようにUFC-STEの圧縮強度が長期的に増進する理由については、後述するBSE像の観察結果から考察しているが、豊富に含まれた未水和セメントの長期的な反応によって内部空隙が減少しつづけていることによるものと考えられる。

図-5は、箱桁内に暴露したUFC-STE供試体の曲げひび割れ発生強度( $f_{b,cr}$ )ならびに曲げ強度( $f_{b,max}$ )の変化を示したものである。 $f_{b,cr}$ ならびに $f_{b,max}$ はいずれも15年間にわたり変化が少なく、大幅な低下はない。一般に乾燥を受ける普通コンクリート梁供試体では、収縮の拘束によって供試体下縁に引張応力を生じ、曲げ強度が低下する<sup>5)</sup>。そのため、長期材齢を経過した供試体の曲げ強度は減少する傾向を示す。しかし、UFC-STEは製造時における蒸気養生を終了した時点からの乾燥収縮が $50 \times 10^{-6}$ 程度ときわめて小さいため<sup>6)</sup>、UFC-STE供試体は長期的な曲げ強度の低下を生じにくかったものと考えられる。

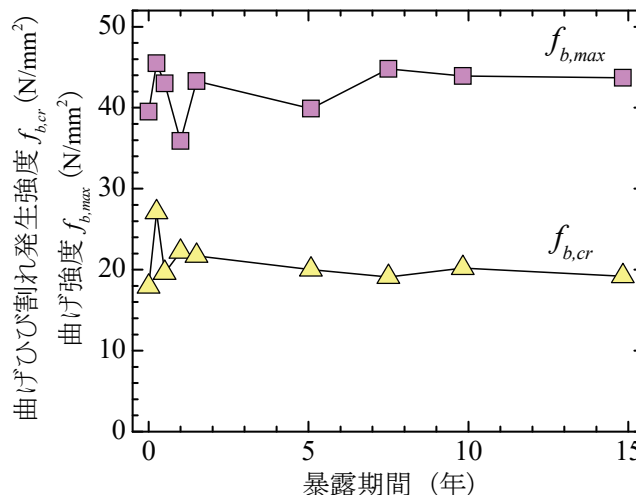
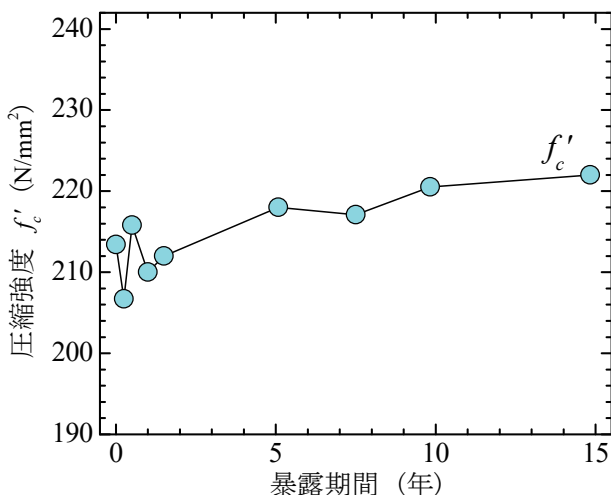
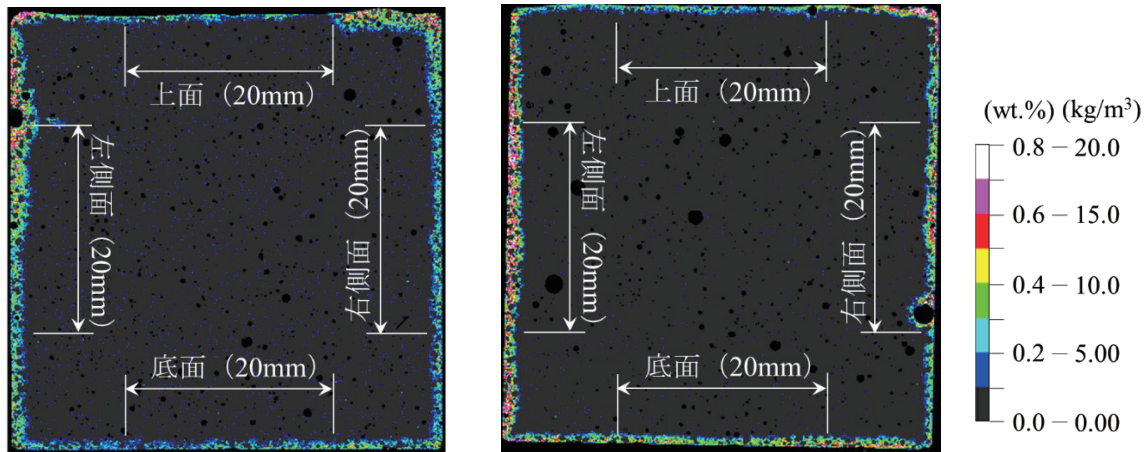


図-4 箱桁内に暴露したUFC-STEの圧縮強度変化

図-5 箱桁内に暴露したUFC-STEの曲げ強度変化

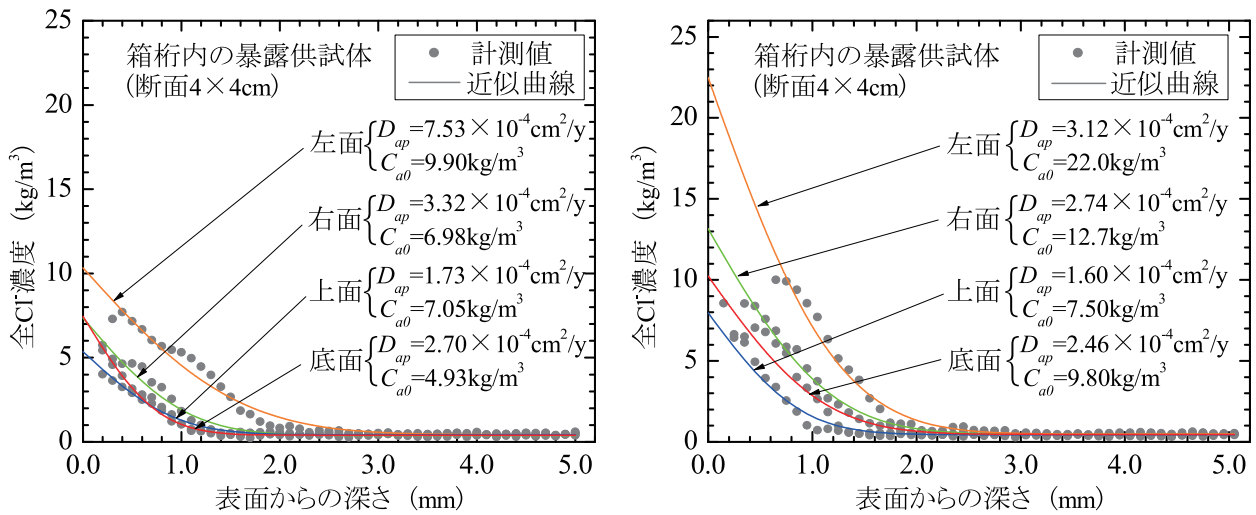
##### (2) 塩化物イオン浸透性

図-6(a)ならびに(b)は、箱桁内で10年間ならびに15年間の暴露を行ったUFC-STE供試体の塩素マッピング画像をそれぞれ示したものである。いずれもCl<sup>-</sup>は断面の外周囲(表層部)のみに高濃度に存在し、断面の内部までは浸透していないことがわかる。図-7(a)ならびに(b)は、暴露期間10年ならびに15年のUFC-STE供試体の塩素マッピング画像の各データから供試体隅角部の影響を除いた各4面中央部20mmの範囲からの浸透について全Cl<sup>-</sup>濃度分布を求めたものである。なお、図中には拡散係数(D<sub>ap</sub>)と表面濃度(C<sub>a0</sub>)の算定値を併記した。供用10年の場合にくらべて供用15年の場合にはC<sub>a0</sub>の値が2倍程度まで増加しているものの、UFC-STE表面からCl<sup>-</sup>が到達した深さは、4面のうちでもっとも塩分が浸透した左面で3mm程度、もっとも塩分が浸透していない底面で1.5mm程度であり、いずれも変化していないことがわかった。UFC-STEは、きわめて低い水結合材比と高い養生温度によって、当初から硬化体の細孔構造の緻密化が進んでいる<sup>2)</sup>。さらに、UFCは単位セメント量が多いことから、Cl<sup>-</sup>の固定能力が高い材料である。これらに起因して、UFC-STE内部へのCl<sup>-</sup>浸透が抑制されたものと考えられる。



(a) 暴露期間10年 (b) 暴露期間15年

図-6 箱桁内で暴露したUFC-STEの塩素マッピング画像



(a) 暴露期間10年

(b) 暴露期間15年

図-7 箱桁内で暴露したUFC-STEの全Cl<sup>-</sup>濃度分布

(3) 組成変化

図-8(a), (b)および(c)は、箱桁内に7.5年間、10年間および15年間の暴露を行ったUFC-STE供試体において、外表面から深さ0.5~1.0mm付近のBSE像の例をそれぞれ示したものである。BSE像では、FeやCaのような重元素を含むものは明るく、Cのような軽元素を含むものは暗く表示される。すなわち、鋼繊維(凡例:F)は白く、次いで未水和セメント(凡例:C)、セメント水和物(凡例:H)、骨材(凡例:A)の順に暗くなり、空隙(凡例:P)はもっとも黒く表示される。したがって、撮影されたBSE像を画像解析することでUFCの組成の判別や定量が可能であり、15年を経過したUFC-STEであっても、その内部には未水和セメント粒子が多く残存していることがわかった。

図-9は、BSE像の画像解析から算出されたUFC-STE中の未水和セメントならびに空隙の体積含有率の経時変化を示したものである。箱桁内で暴露したUFC-STE供試体では、材齢の進行にともなって未水和セメント量が減少しており、同様に空隙量も徐々に低下していることを確認できた。このことは、長期材齢を経てもUFC-STEの内部にはセメントの未水和粒子が多く存在しており、これらがゆっくりと反応し続けることを意味している。そして、このことは、図-4に示した圧縮強度の長期的な増進を生じさせており、また、曲げ強度を長期的に低下させにくくした原因にもなっていると考える。

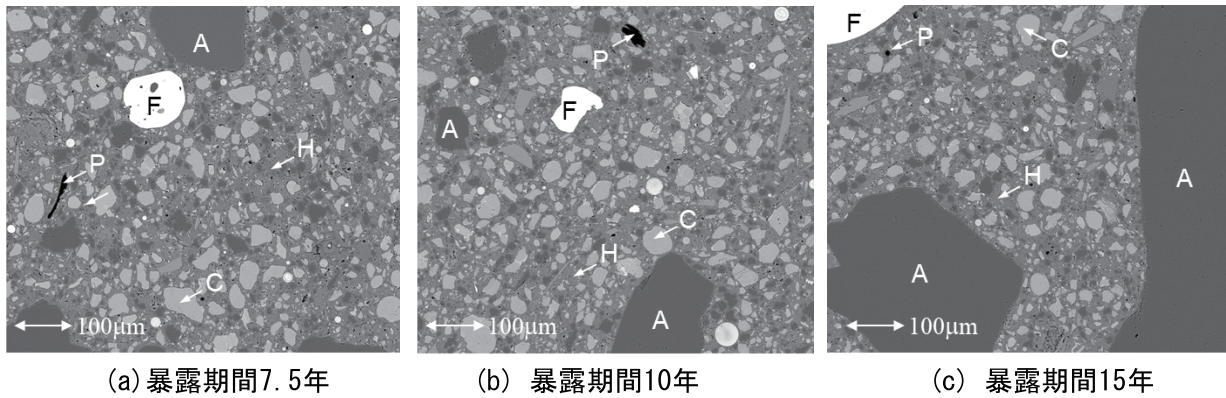


図-8 箱桁内に暴露したUFC-STEのBSE像

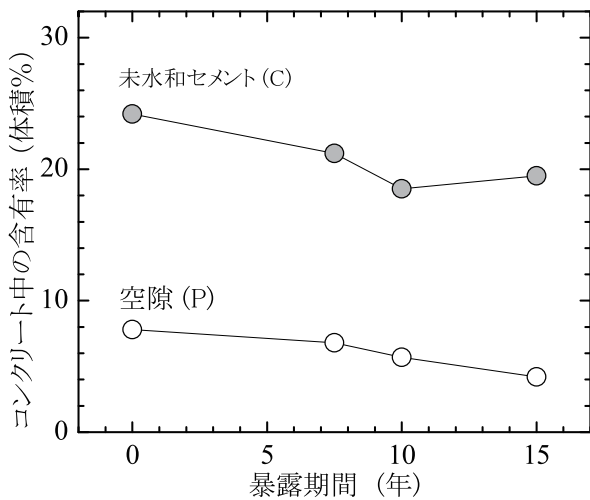


図-9 未水和セメント量と空隙量の変化

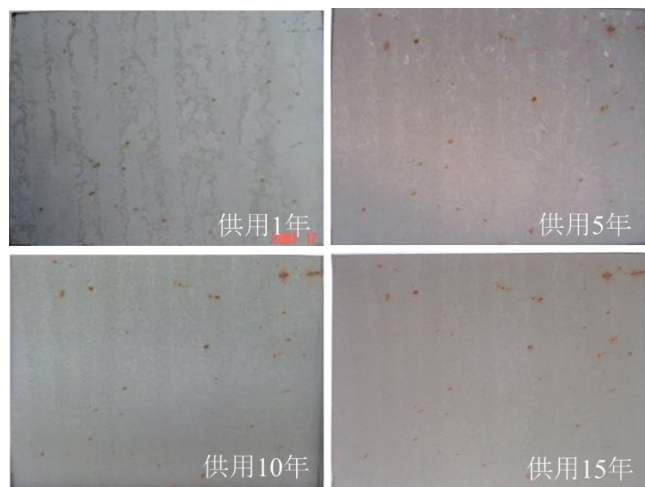


図-10 下流側ウェブの外表面の点錆変化

表-2 供用15年の高欄表面部から採取したPVA繊維の分析結果

	分子量	1,2-グリコール生成量 (mol%)	融解温度 (°C)	融解熱量 (J/g)
15年供用PVA繊維	194360	1.70	234.5	108.9
未使用PVA繊維	197022	1.70	234.6	110.7

### 3.2 短繊維の耐久性

#### (1) 鋼繊維

図-10は、箱桁端部における下流側ウェブの外表面に生じた点錆の供用15年までの変化を示したものである。この部位は、飛来塩分の影響をもっとも受けやすく、他の部位にくらべて点錆が多く観察された。供用1年までに点錆の発生が確認されており、同一の観察範囲では供用5年までの間に点錆の数と大きさがやや増加している。ただし供用5年以上が経過すると大きな変化は認められなくなり、供用15年まで安定した状態となっている。なお、上流ウェブの外表面や箱桁の内表面などにも若干の点錆は認められるものの、ごく軽微なものであった。ただし、前述したEPMA分析結果からUFC表面のみにCl<sup>-</sup>濃度の高い領域が集中しており、表面以外にはCl<sup>-</sup>が浸透していないことから、鋼繊維の腐食による点錆は表面的なもので内部までは進行していないと考える。

## (2) PVA繊維

表-2は、供用15年の高欄表面部から採取したPVA繊維と未使用のPVA繊維の分析結果を比較したものである。一般に高分子材料であるPVA繊維の物性値はその分子量の大きさに依存するが、表-2に示すように、実環境における15年間の供用でほとんど変化を生じておらず、経年劣化にともなう分解反応で生成する1,2-グリコールの量も変化していない。また、一般にPVA繊維の分解が進むと融解温度の低下が認められるが、15年間供用しても融解温度ならびに融解熱量のいずれも変化していない。これらのことから、実環境での15年間の供用中に受けた太陽光、アルカリ性、温度変化、乾湿繰返し、飛来塩分などの影響によって、PVA繊維が変質していないと推察できる。

## 4. まとめ

日本で初めてUFCが適用されたPC橋「酒田みらい橋」について、供用15年にわたるUFCの耐久性を箱桁内に暴露した供試体ならびに箱桁・高欄の調査を実施した。その結果、箱桁内に暴露されたUFC供試体は、15年間に渡って圧縮強度が徐々に増進し、曲げ強度は大きく変化せずにはほぼ一定であること、15年間の暴露によるCl<sup>-</sup>浸透深さは1.5~3.0mm程度であること、豊富に含まれた未水和セメント粒子が15年間にわたって徐々に反応していることがわかった。また、U鋼繊維は、外表面のみで点錆を生じて内部まで腐食は進行していないものと推察できること、PVA繊維は分子量に変化を生じず変質が認められないこともわかった。UFCの15年間にわたるコンクリートの強度・物質透過性・組成の変化や、短繊維、とくにPVA繊維の組成変化に関するデータは、これまで取得されておらず、いずれも新しい知見を与えるものとなった。

## 5. 謝辞

本報告の耐久性調査に当たっては、前田製管(株)ならびに大成建設(株)の関係者の皆様にご協力を頂きました。ここに記して深謝致します。

## 6. 参考文献

- 1) 下山善秀, 武者浩透, 中村 裕: 200N/mm<sup>2</sup>級セメント系新素材ダクトルを用いた国内初のPC歩道橋酒田みらい橋プロジェクト, セメント・コンクリート, No. 671, pp. 35-42, 2003
- 2) 武者浩透, 大竹明朗, 児玉明彦, 小林忠司: 超高強度コンクリート系新素材「ダクトル」を用いたPC橋梁の設計・施工 -酒田みらい橋-, プレストレストコンクリート, Vol. 45, No. 2, pp. 40-48, 2003
- 3) 武者浩透, 一宮利通, 芦田公伸, 田中敏嗣: 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)の耐久性とPC構造物への適用, プレストレストコンクリート, Vol. 52, No. 2, pp. 80-86, 2010
- 4) 河野克哉, 川口哲生, 武者浩透, 小林忠司: 超高強度繊維補強コンクリートの長期耐久性-供用10年を経過した酒田みらい橋における調査-, プレストレストコンクリート, Vol. 55, No. 5, pp. 35-40, 2013
- 5) A. M. Neville: Properties of Concretes (Fourth and Final Edition), Prentice Hall, pp. 600-601, 1995
- 6) 土木学会: コンクリートライブラリー113 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), pp. 20-21, 2004