

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 —

河野 克哉*1・川口 哲生*2・武者 浩透*3・小林 忠司*4

200 N/m² 以上の高い圧縮強度を発現する超高強度繊維補強コンクリートは、高じん性、高流動性および高耐久性を兼ね備えた材料である。このような材料的な特長によって、構造物に薄肉軽量化、遮塩性、意匠性といった性能ならびに機能を付与できることから、今日まで適用事例が増加している。本稿では、2002 年 10 月竣工の日本で初めて超高強度繊維補強コンクリートが適用されたプレストレストコンクリート歩道橋「酒田みらい橋」の供用 10 年までの耐久性を、橋梁の箱桁内に暴露した供試体ならびに実橋ウェブから抜き取ったコア供試体を試験・分析することで考察した。その結果、10 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、実橋のウェブ部材から採取したコア供試体における塩化物イオンの浸透深さは 10 年経過時で 1 mm 程度とさわめて小さいことなどが明らかになった。これらは、10 年を経過した超高強度繊維補強コンクリートにおいても体積の約 20 % を占める形で残存した未水和セメントが長期的な圧縮強度の増進や外部からの塩化物イオン浸透の抑制に寄与できることを示唆しており、酒田みらい橋に適用された超高強度繊維補強コンクリートは長期的な耐久性が確保できていることを実証した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、耐久性、EPMA、反射電子像

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）は、200 N/mm² 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、流動性と耐久性を兼ね備えたセメント系材料であるが、すでにその開発・商品化から 10 年以上が経過している。

この材料開発の当初、UFC の優れた材料特性を活用した新しい橋梁（歩道橋）の建設によって UFC の構造物に対する適用性を検証することを目的に、酒田みらい橋プロジェクトが企画された¹⁾。この建設プロジェクトの実施によって、UFC を用いた構造物の設計・施工に対する基礎データを得ることとなり、2004 年には土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」が発刊された。その結果、現在では歩道橋だけでなく道路橋・鉄道橋などの橋梁や、空港滑走路などの床版にも UFC を適用した構造形式が広がるとともに、その規模も大型化している²⁾。また、水路や橋脚などのコンクリート劣化に対して、表層部に UFC 製パネルを用いた補修・補強など、UFC の高い耐久性に着目した用途にも利用されるようになってきている²⁾。

酒田みらい橋プロジェクトでは、UFC の耐久性を継続して追跡調査できるように、本橋の箱桁内に多数の暴露供試体を設置し、これまでも定期的に試験を実施してきた経緯がある²⁾。本稿は、供用開始から 10 年目となる 2012 年 10 月に実施した酒田みらい橋の耐久性に関する調査結果

を取りまとめたものであり、UFC の長期耐久性について考察した内容となっている。

2. 酒田みらい橋に適用された UFC の調査概要

2.1 調査橋梁の概要⁴⁾

酒田みらい橋（2002 年 10 月竣工）は、写真 - 1 ならびに図 - 1 に示すように山形県酒田市内を流れる新井田川の河口から約 2 km の位置に架設され、日本で初めて UFC が適用されたプレストレストコンクリート橋である。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る橋梁である。表 - 1 は、酒田みらい橋の諸元を示したものであり、



写真 - 1 供用 10 年を経過した酒田みらい橋

*1 Katsuya KONO：太平洋セメント（株）中央研究所

*2 Tetsuo KAWAGUCHI：太平洋セメント（株）中央研究所

*3 Hiroyuki MUSHA：大成建設（株）技術センター

*4 Tadashi KOBAYASHI：前田製管（株）品質・安全管理部

○ 研究報告 ○

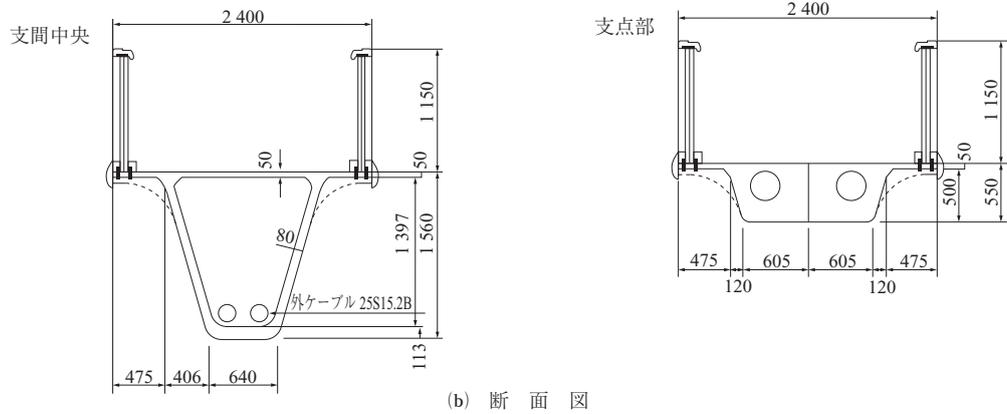
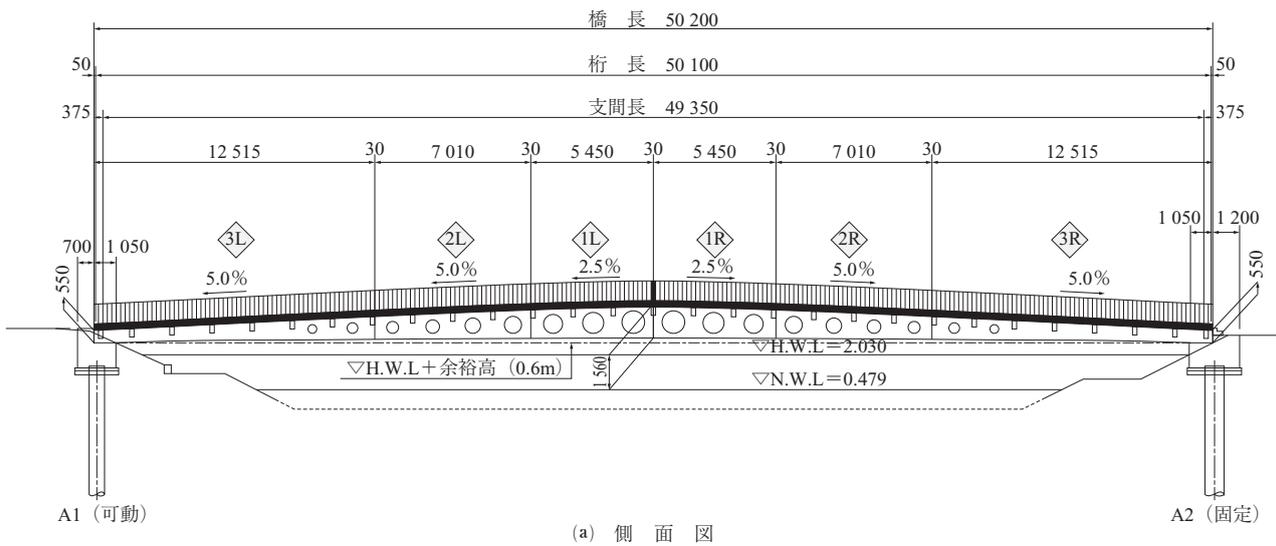


図 - 1 酒田みらい橋の一般図

表 - 1 酒田みらい橋の橋梁諸元

橋種	歩道橋
構造形式	単径間 PC 箱桁橋 (外ケーブル方式)
橋長	50.200 m (支間長 49.350 m)
桁高	0.55 m (端部), 1.56 m (中央部)
幅員	2.4 m (全幅), 1.6 m (有効)

桁高（端部 55 cm）が低いにもかかわらず長スパン化（50 m）できていることが特長となっている。これは UFC を適用することで、鉄筋を一切使用しない形で部材の薄肉化（上床版厚 5 cm，ウェブ厚さ 8 cm）が可能になったことから、大幅な軽量化（従来のコンクリート橋に対して約 5 分の 1 の重量）を実現したものである。また、ウェブに数多く円形の開口部を設けることで、部材の薄さを強調するとともに反対側の景色を見通せるような開放感を演出した景観デザインが取り入れられている。

UFC は、セメント、シリカフェーム、珪石微粉末、珪砂などを最適に処方したプレミックス粉体に、水、高性能減水剤とともに短繊維を分散させた材料である。なお、酒田みらい橋では、表 - 2 に示すような配合の UFC が適用されており、体積で 2% の鋼繊維（直径 0.2 mm，長さ 15 mm）が混合され、90℃ の熱養生が行われている。こ

表 - 2 酒田みらい橋に適用された UFC の配合

W ^{*1}	単用量 (kg/m ³)			フロー (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)
	P	F ^{*2}	SP		
175	2254	157	24	220 ~ 270	200 ~ 220

*1 W の一部に SP を含む *2 鋼繊維混入率 2 vol.%
(凡例) W: 水, P: プレミックス粉体, F: 鋼繊維, SP: 高性能減水剤

のような材料、配合および製造方法によって、UFC は 200 N/mm² 以上の高い圧縮強度を有し、さらに高じん性かつ高流動性を有するため、上述した部材の軽量性や意匠性に寄与した材料である。

2.2 橋梁に適用された UFC の調査方法

(1) 表面変化 (点錆の発生状況)

箱桁端部ウェブの下流側ならびに上流側において、外表面ならびに内表面の定位置における点錆の発生状況について、定期的な観察を実施した。点錆は UFC の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 箇所あたりの測定面積を 7.5 cm × 10 cm に固定してデジタルカメラにて撮影を行った。

(2) 強度変化

写真 - 2 に示すように実橋の施工で用いた UFC と同一配合の円柱供試体（寸法 φ 5 × 10 cm）ならびに角柱供試



写真 - 2 箱桁内における UFC 供試体の暴露状況

体（寸法 $4 \times 4 \times 16$ cm）を箱桁内に暴露し、所定の供用期間にて各供試体を回収し、それぞれ圧縮強度試験ならびに曲げ強度試験を行い、材齢経過にともなう各強度の変化を得た。

圧縮強度は、耐圧機を用いて JSCE-G-505-1999 に準じて測定した。また曲げ強度は、万能試験機（荷重容量 100 kN）を用いて JIS A 1106 に準じて測定しており、支点間距離 12 cm、等曲げモーメント区間距離 4 cm の 4 点曲げ試験（3 等分点曲げ試験）とした。

(3) 塩化物イオンの浸透状況

供用 7.5 年ならびに供用 10 年まで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 $4 \times 4 \times 16$ cm、写真 - 2 の手前）、写真 - 3 ならびに写真 - 4 に示すように供用 10 年の実橋端部の上流側ウェブと下流側ウェブをそれぞれ貫通させる形で採取したコア供試体（寸法 $\phi 2.5$



写真 - 3 実橋ウェブからのコア抜きの作業の状況

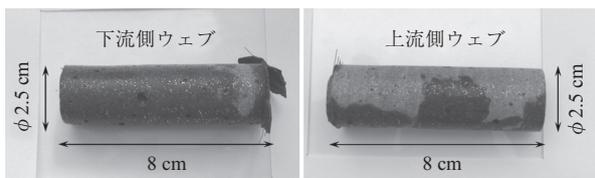


写真 - 4 実橋ウェブから採取した UFC コア供試体

$\times 8$ cm) を用い、土木学会規準（案）JSCE-G574-2005 に準じて塩化物イオンの浸透状況を分析した。暴露供試体の場合は断面 4×4 cm を、コア供試体の場合は断面 2.5×8 cm 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。面分析のデータは塩化物イオンの浸透方向、すなわち表面からの深さ方向に平均化することで、全塩化物イオン濃度分布を求めた。また、この濃度分布データを用いて Fick の拡散方程式の解に対する回帰分析を行い、塩化物イオンの見掛けの拡散係数（以下、 D_{ap} ）ならびに表面塩化物イオン濃度（以下、 C_{ao} ）を算出した。なお、計算のために初期塩化物イオン濃度（以下、 C_i ）は深さ 5 ~ 10 mm 区間の平均値を採用した。

(4) 反射電子像の観察

観察に供した SEM 試料は、図 - 2 に示すように EPMA 分析後の暴露供試体ならびにコア供試体の分析試料から切り出したものを利用した。それぞれの供試体で浸透深さ方向に 2 cm の断面、すなわち、暴露供試体の場合は断面 4×2 cm を、コア供試体の場合は断面 2.5×2 cm 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観察対象物の平均原子番号に依存するため、このグレイレベルの差を利用して、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（なお、ステオロジー理論では面積率と体積率は等しくなる）。

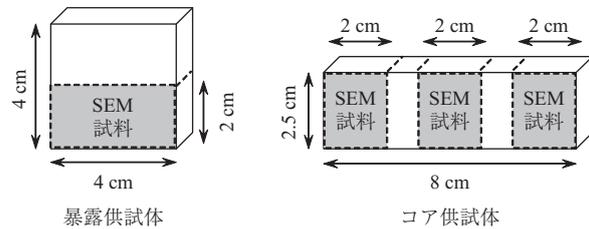


図 - 2 EPMA 試料から切り出した SEM 試料の作製方法

3. 酒田みらい橋に適用された UFC の調査結果

3.1 UFC の表面変化（点錆の発生状況）

写真 - 5 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 10 年まで安定した状態となっていることがわかる。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、このような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。このことは、後述する実橋ウェブのコア供試体の EPMA 分析から、UFC の表面のみに塩化物イオン濃度の高い領域が集中しており、表面以外には塩

○ 研究報告 ○

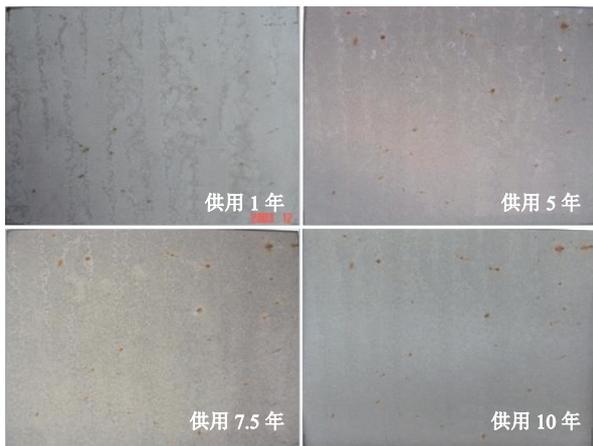


写真 - 5 箱桁端部の下流側ウェブ外表面での点錆変化

化物イオンが浸透していないことで裏付けられるものと考ええる。

3.2 UFC の強度変化

図 - 3 は、箱桁内に暴露した UFC 供試体の圧縮強度の変化を示したものである。この暴露供試体の圧縮強度は、建当初 210 N/mm² 前後であったが、供用 10 年で 220 N/mm² 以上となっており、10 年間に渡って徐々に増加する傾向を示した。このように UFC 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 像の観察結果を勘案して考察する。

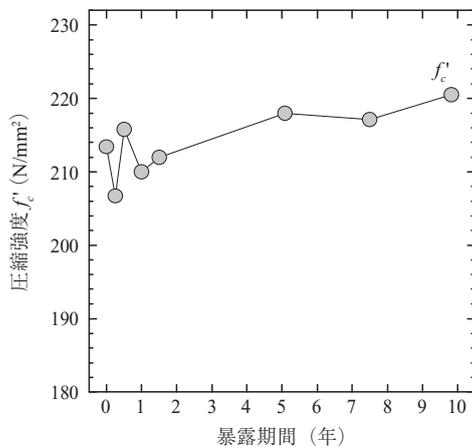


図 - 3 箱桁内に暴露した UFC 供試体の圧縮強度の変化

図 - 4 は、箱桁内に暴露した UFC 供試体の曲げひび割れ発生強度ならびに曲げ強度の変化を示したものである。この暴露供試体の曲げひび割れ発生強度ならびに曲げ強度は、10 年間であまり変化せず、ほぼ一定となっている。一般に乾燥を受ける普通コンクリート製の梁供試体では、収縮の拘束によって供試体下縁に引張応力を生じ、曲げ強度は徐々に低下する⁵⁾。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ことが多い。しかし、UFC は製造時における熟養生を終了した時点からの乾燥収縮が 50×10^{-6} 程度ときわめて小さいため⁶⁾、UFC 供試体は長期的な曲げ強度の低下を生じにくい結果になっ

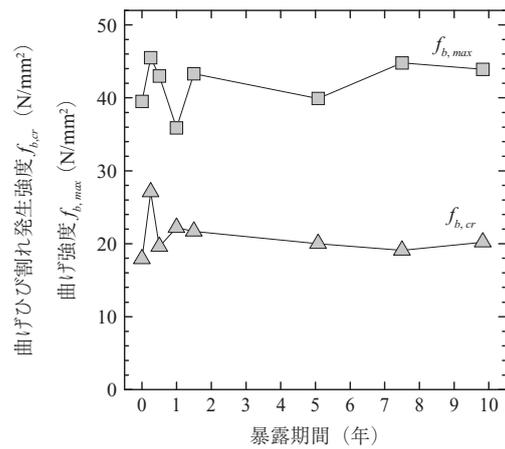


図 - 4 箱桁内に暴露した UFC 供試体の曲げ強度の変化

たものと考ええる。

3.3 UFC の EPMA 分析 (塩化物イオンの浸透状況)

図 - 5 は、箱桁内で 10 年間暴露した UFC 供試体の塩素マッピング画像を示したものであり、塩化物イオンは断面の外周部 (表層部) のみに高濃度に存在するものの、断面の内部まで浸透していないことがわかる。図 - 6 は、供試体断面の側面 (左) と底面について、塩素マッピング画像データから求めた全塩化物イオン濃度分布を示したものである。10 年間で UFC 表面から塩化物イオンが到達した深さは、4 面のうちでもっとも塩分が浸透したと側面 (左) で 3 mm 程度、もっとも塩分が浸透していない底面で 1 mm 程度となっており、いずれもわずかなものといえる。

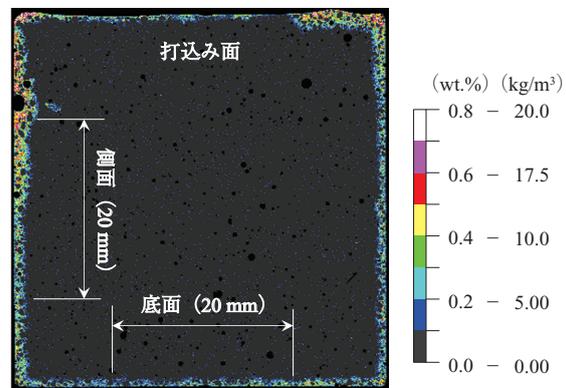


図 - 5 10年間暴露した UFC 供試体の塩素マッピング画像

図 - 7 は、供用 10 年が経過した実橋の下流側ウェブならびに上流側ウェブを貫通して採取した UFC コア供試体の塩素マッピング画像を示したものであり、箱桁外表面のごく表層部のみに塩化物イオンが存在していることがわかる。図 - 8 は、下流側ならびに上流側の UFC コア供試体について、塩素マッピング画像データから求めた全塩化物イオン濃度分布を示したものである。ウェブ部材の C_{a0} は、上流側よりも下流側のウェブの方で、箱桁内部面よりも外表面の方で高くなっており、飛来塩分の影響を受けやすい部位ほど高濃度であった。なお、上流側ウェブの箱桁内では塩化物イオンがほとんど浸透しておらず、もっとも厳し

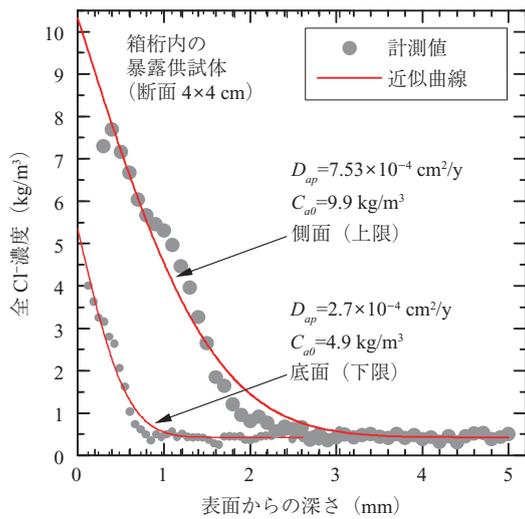


図 - 6 箱桁内に暴露した UFC 供試体の全 Cl⁻ 濃度分布

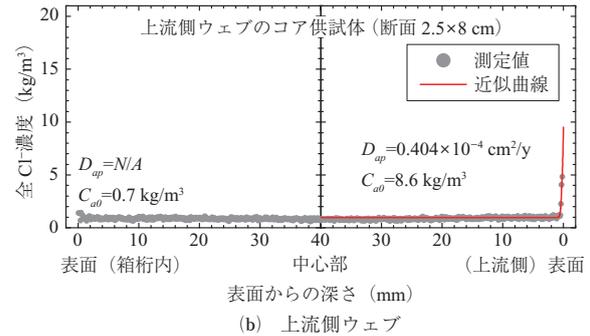
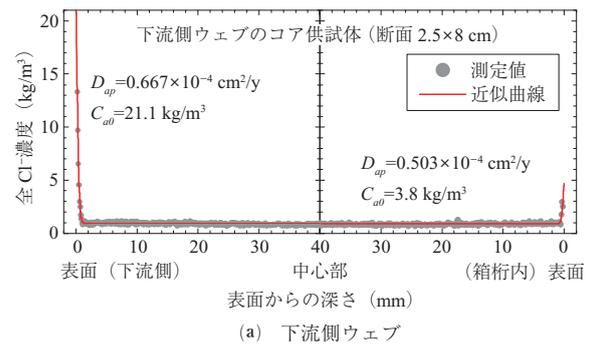
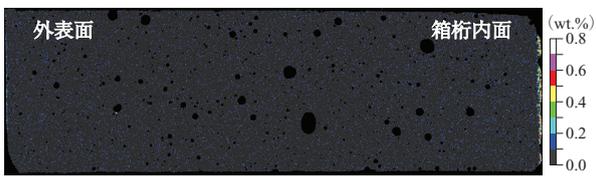


図 - 8 実橋の UFC コア供試体の全 Cl⁻ 濃度分布



(a) 下流側ウェブ



(b) 上流側ウェブ

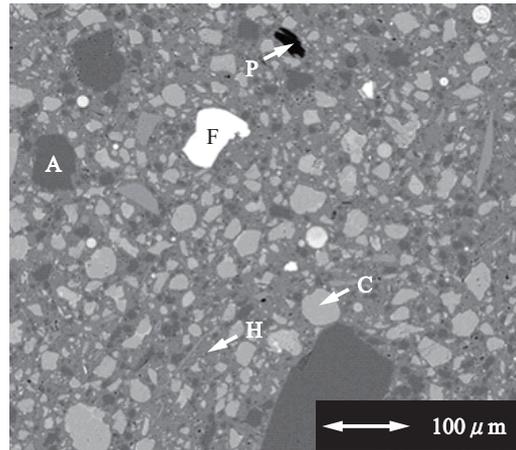
図 - 7 実橋の UFC コア供試体の塩素マッピング画像

い環境条件といえる下流側ウェブの外表面でも塩化物イオンの到達深さは 1 mm 以下であることがわかった。 D_{ap} は箱桁内の暴露供試体から算出した場合の方が実橋のウェブ部材から算出した場合よりも 1 オーダーほど大きい値となっている。箱桁内部は本橋梁のウェブに設けられた大きな開口部から飛来塩分が流入して吹き溜まりを生じること、ウェブは雨水の流下による洗い出しを生じることなどから、暴露供試体では実橋ウェブのデータにくらべて安全側の評価を与えたのではないかと考える。

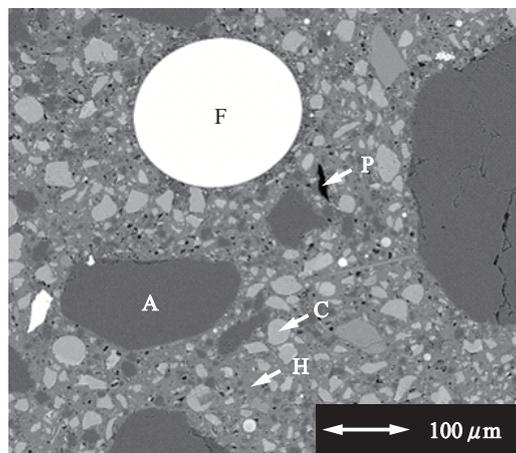
UFC は、きわめて低い水結合材比と高い養生温度によって、当初から硬化体の細孔構造の緻密化が進んでいる²⁾。さらに UFC は、単位セメント量が多いこと、また後述するように内部に未水和セメントを豊富に含んでいることから、塩化物イオンの固定能力が高い材料である。これらに起因して、UFC 内部への塩化物イオン浸透が抑制されているものとする。

3.4 UFC の BSE 像観察

図 - 9 は、箱桁内に 10 年間暴露した UFC 供試体ならびに供用 10 年が経過した下流側ウェブの UFC コア供試体において、それぞれ外表面から深さ 0.5 ~ 1.0 mm 付近の



(a) 箱桁内に暴露した UFC 供試体



(b) 実橋の下流側ウェブから採取した UFC コア供試体

図 - 9 UFC の BSE 像

○ 研究報告 ○

BSE 像を示したものである。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、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になり、10 年を経過した UFC 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明らかになった。

表 - 3 は、BSE 像の画像解析から算出された UFC 中の未水和セメントならびに空隙の体積含有率を示したものである。箱桁内で 10 年間暴露した UFC 供試体の場合、未水和セメントの体積含有率は 19.9 %、空隙率は 5.7 %であった。また 7.5 年間暴露した UFC 供試体における画像解析の結果も表中に併記したが、この場合には未水和セメントの含有率は 21.2 %、空隙率は 7.8 %であった。このことから、UFC は材齢が 7.5 年から 10 年まで経過しても、まだ未水和セメント量が減少し続けており、それにとまって空隙率が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 の内部にはセメントの未水和粒子が多く存在し、これらがゆっくりと反応し続けることを表しており、それが図 - 3 に示したような圧縮強度の長期継続的な増進を生じさせたのではないかと考える。また、供用 10 年のウェブ部材に用いた UFC の未水和セメントの体積含有率は下流側の外表面で 18.5 %、中心部で 22.3 %、箱桁内の表面で 19.2 %を示し、部材内部であるほど未水和セメントの量が多くなっており、ウェブ部材の空隙率はそれらの位置によらず 7.0 %で一定であった。これは、部材の熱養生で部材表面に近い位置ほど、水分や熱が供給されやすく、製造当初からセメントがよく反応していたことに起因するのではないかと考えている。

4. ま と め

酒田みらい橋に適用された UFC は、10 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となった。また実橋のウェブ部材から採取した UFC

表 - 3 UFC の BSE 像の画像解析結果

供試体の種類	供用年数	SEM 試料*1	体積含有率*2	
			未水和セメント	空隙
暴露 (箱桁内)	7.5 年	2 分の 1 断面	21.2 %	7.8 %
	10 年	2 分の 1 断面	19.9 %	5.7 %
コア (下流側 ウェブ)	10 年	箱桁の内表面部	18.5 %	7.0 %
		部材内の中心部	22.3 %	7.0 %
		箱桁の外表面部	19.2 %	7.0 %

*1 分析断面：4 × 2 cm（暴露供試体）、2.5 × 2 cm（コア供試体）

*2 各分析断面において任意 10 視野のデータを平均化

コア供試体における塩化物イオンの浸透深さは 10 年経過時で 1 mm 程度ときわめて小さく、BSE 像からは多くの未水和セメント粒子が観察された。その画像の解析から、10 年を経過した UFC においても体積の約 20 %が未水和セメントで占められており、この豊富な未水和セメントが長期的な強度の増進や塩化物イオン浸透の抑制に寄与できることで、UFC の長期耐久性が確保されていることを実証した。

参考文献

- 1) 下山善秀, 武者浩透, 中村裕: 200m/mm² 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, 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
- 3) 松岡彰博, 西場 猛: 超高強度繊維補強コンクリートパネルによる水路トンネル補修, 農業土木学会誌, 75 巻, 1 号, pp.29-30, 2007
- 4) 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
- 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

【2013 年 7 月 8 日受付】