

論文 プレストレストコンクリート橋に日本で初めて適用された超高強度繊維補強コンクリートの供用 10 年間の耐久性

河野 克哉^{*1}・川口 哲生^{*2}・武者 浩透^{*3}・小林 忠司^{*4}

要旨: プレストレストコンクリート歩道橋「酒田みらい橋(2002年10月竣工)」に日本で初めて適用された超高強度繊維補強コンクリートの供用10年間の耐久性を、橋梁箱桁内に暴露した供試体ならびに実橋ウェブから採取したコア供試体を用いて調査した。その結果、10年間に渡って圧縮強度は徐々に増進し、曲げ強度はほぼ一定であること、実橋ウェブのコア供試体における塩化物イオン浸透深さは供用10年で1mm未満ときわめて小さいこと、材齢10年が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強度増進や塩化物イオンの浸透抑制に寄与していること、を確認した。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 長期耐久性, 圧縮強度, 曲げ強度, 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, 高い圧縮強度(200N/mm²以上)を有しながら鋼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10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プレストレストコンクリート(以下, 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¹⁾。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。

現在では, 歩道橋だけでなく道路橋・鉄道橋などの橋種や空港滑走路などの床版にもUFCを適用した新構造が普及し, その規模も大型化している²⁾。またUFCの高い耐久性に着目する形で, 水路や橋脚などの既存コンクリートの劣化に対してUFC製パネルを用いた補修・補強などの用途にも利用されるようになってきている³⁾。

酒田みらい橋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, 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²⁾。本研究では, 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に対する調査結果を取りまとめ, UFCの長期耐久性について考察したものである。なお, 供用10年目で実施した調査の対象は, 本橋に適用されたUFCの材料的な耐久性に関するものであり, 本橋の構造的な変状(変形, たわみ, 緊張力など)に関する計測は実施していない。



図-1 供用10年が経過した酒田みらい橋

表-1 酒田みらい橋に適用されたUFCの配合

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

^{*1} Wの一部にSPを含む ^{*2} F混入率2vol.%

^{*3} 落下振動を与えないフロー試験による(JIS A 5201 準拠)
(凡例) W:水, P: Premix 粉体, F: 鋼繊維, SP: 減水剤

2. UFCの耐久性調査の概要

2.1 UFCが適用されたPC橋の概要⁴⁾

酒田みらい橋は, 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2kmの位置に架橋され, その竣工は2002年10月である。本橋は, 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。酒田みらい橋は, 外ケーブル方式単径間PC箱桁橋であり, 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。これはUFCの適用によって, 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)が可能になり, 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)を実現できたためである。また, ウェブに数多く円

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 (株)太平洋コンサルタント コンクリート技術部 博(工) (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター 土木開発部 土木技術開発プロジェクト室 室長 M.S.C.E (正会員)

*4 前田製管(株) 品質・安全管理部 部長 工博 (正会員)



図-2 箱桁内における UFC 供試体の暴露状況



図-3 実橋ウェブからのコア抜きの作業状況

形の開口部を設けて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開放感を演出した意匠が採用されている。

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-1 に示した配合の UFC が適用され、コンクリート体積に対して2%の鋼繊維(直径0.2mm, 長さ 15mm)を混合して 90℃の熱養生が行われている。このような材料、配合および製造方法によって、UFC は 200N/mm² 以上の高い圧縮強度のほか、高靱性や高流動性を有し、上述した構造部材の軽量性や意匠性に大きく寄与している。

2.2 UFC の耐久性調査の方法

(1) UFC の表面変化

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 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。また箱桁に生じたひび割れについても、定期的にクラックスケールにてひび割れの幅と長さを測定した。

(2) UFC の強度変化

実橋の施工で用いた 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)を実験室で作製し、図-2 に示すように箱桁内に暴露した。各供試体を所定の供用期間にて回収し、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-505-2010 に準じて測定した。また、曲げ強度は万能試験機(荷重容量 100kN)を用いて JIS A 1106 に準じて測定しており、支点間距離 12cm, 等曲げモーメント区間距離 4cm の 4 点曲げ試験(3 等分点曲げ試験)とした。

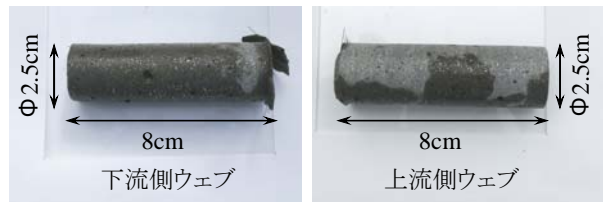


図-4 実橋ウェブからの採取した UFC コア供試体

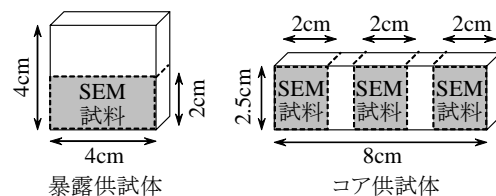


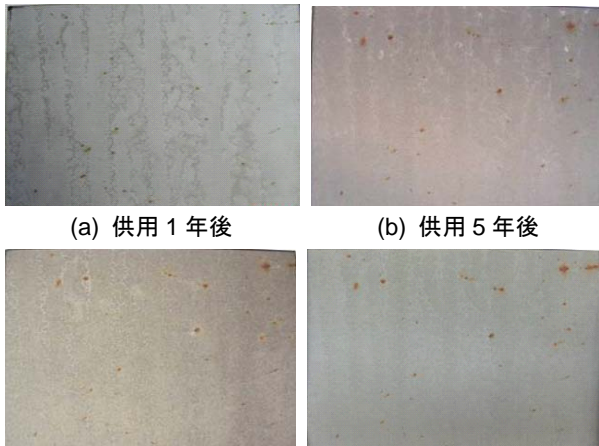
図-5 EPMA 用試料からの SEM 用試料の切出し方法

(3) UFC の塩化物イオンの浸透状況

図-2 に示したように供用 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 4×4×16cm)と、図-3 ならびに図-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 φ2.5×8cm)を用い、土木学会規準(案)JSCE-G574-2010 に準じて塩化物イオン(以下、Cl⁻)の浸透状況を分析した。暴露供試体の場合は断面 4×4cm を、コア供試体の場合は断面 2.5×8cm を樹脂含浸、湿式研磨、真空乾燥および炭素蒸着による試料の前調整(鋼繊維を含んだ形で影響は無い)ならびに電子線マイクロアナライザ(以下、EPMA)を用いた塩素の定量分析(面分析)に供した。面分析のデータは Cl⁻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 Cl 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、Cl⁻の見掛けの拡散係数(以下、D_{ap})ならびに表面 Cl 濃度(以下、C₀)を算出した。なお、計算のために初期 Cl 濃度(以下、C_i)は深さ 5~10mm 区間の平均値を採用した。

(4) UFC の反射電子像の観察

SEM 観察用試料は、図-5 に示すように EPMA 分析後



(a) 供用 1 年後 (b) 供用 5 年後
(c) 供用 7.5 年後 (d) 供用 10 年後
図-6 下流側ウェブの外表面に生じた UFC の点錆変化



図-7 ウェブ開口部の両側に生じた橋軸方向のひび割れ

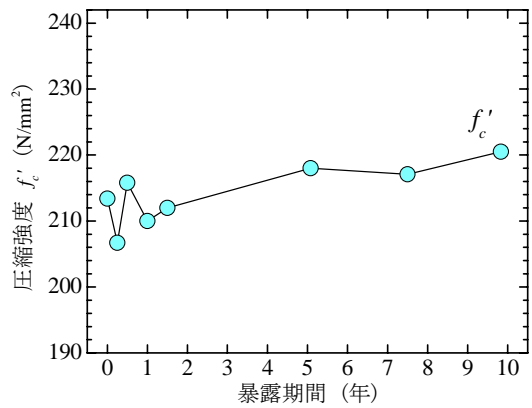
の暴露供試体(供用 7.5 年と供用 10 年)ならびにコア供試体(供用 10 年)の試料片から切り出したものを利用した。それぞれの供試体で浸透深さ方向に 2cm の断面、すなわち、暴露供試体の場合は断面 4×2cm を、コア供試体の場合は断面 2.5×2cm を SEM 観察に供して反射電子像(以下、BSE 像)を得た。なお、暴露供試体のデータと比較するため、表-2 に示した施工当時と同じ配合となる UFC を実験室にて製造し、供用開始 0 年の試料として SEM 観察に供した。

また、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)。

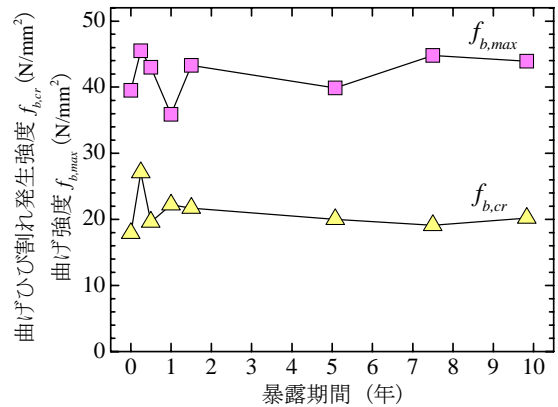
3. PC 橋に初めて適用された UFC の耐久性調査の結果

3.1 UFC の表面変化

図-6 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



(a) 圧縮強度



(b) ひび割れ発生強度ならびに曲げ強度

図-8 箱桁内に暴露した UFC の強度変化

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 Cl 濃度の高い領域が集中しており、表面以外には Cl が浸透していないことから裏付けられる。

また、ウェブに設置された開口部には建設当時のプレストレス導入によって橋軸方向に微細なひび割れが発生していた。これらのひび割れは、図-7 に示すように下流側ならびに上流側ウェブのすべての開口部(計 36 か所)の左右にそれぞれ 1 本ずつが水平に分布しており(計 72 本)、供用 1 年から供用 10 年まで経過しても、その発生本数は変化していない。供用 1 年におけるひび割れは幅 0.04~0.06mm、長さ 2~56cm であったものの、供用 10 年におけるひび割れは幅 0.01~0.04mm、長さ 2~57cm で、ひび割れ幅がやや減少し、ひび割れ長さはあまり変化しないといった傾向が認められた。

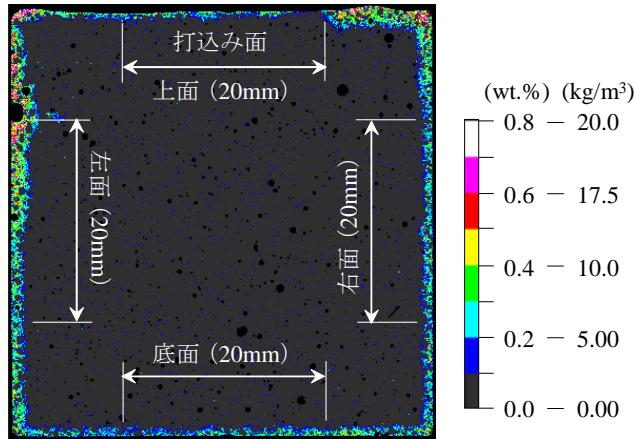


図-9 箱桁内で 10 年間暴露した UFC の塩素マッピング画像

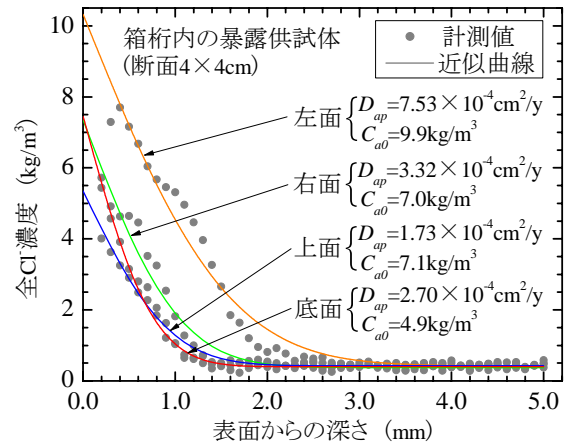
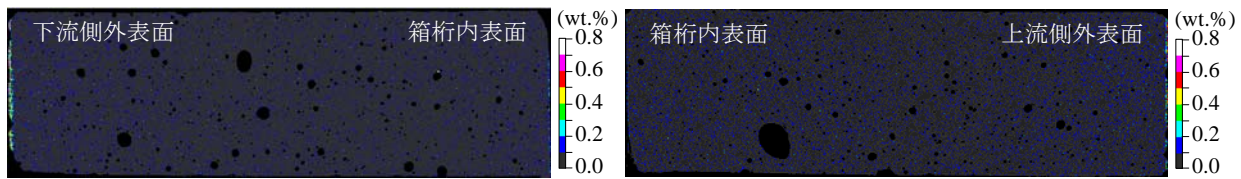


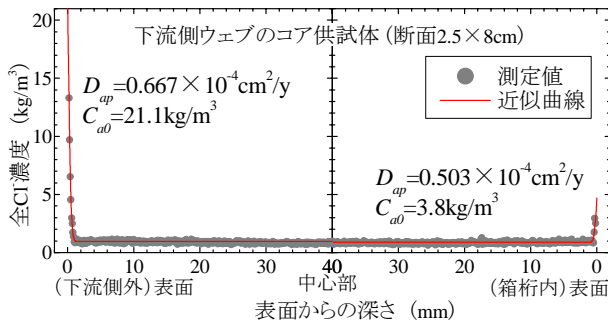
図-10 箱桁内で 10 年間暴露した UFC の全 Cl 濃度分布



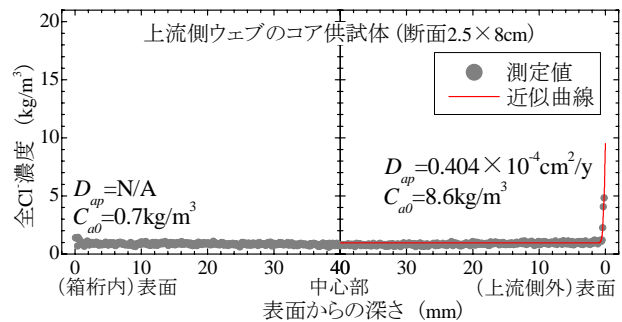
(a) 下流側ウェブ

(b) 上流側ウェブ

図-11 実橋ウェブに 10 年間供用された UFC の塩素マッピング画像



(a) 下流側ウェブ



(b) 上流側ウェブ

図-12 実橋ウェブに 10 年間供用された UFC の全 Cl 濃度分布

3.2 UFC の強度変化

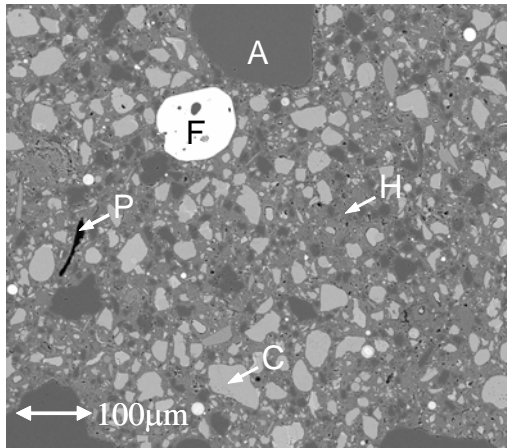
図-8 は、箱桁内に暴露した UFC 供試体の圧縮強度ならびに曲げ強度の変化を示したものである。この暴露供試体の圧縮強度は、建設当初 210N/mm^2 前後であったが、供用 10 年で 220N/mm^2 以上となっており、10 年間に渡って徐々に増加する傾向を示した。このように UFC の圧縮強度が長期的に増進する理由については、後述する BSE 像の観察結果を勘案して考察する。

また、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

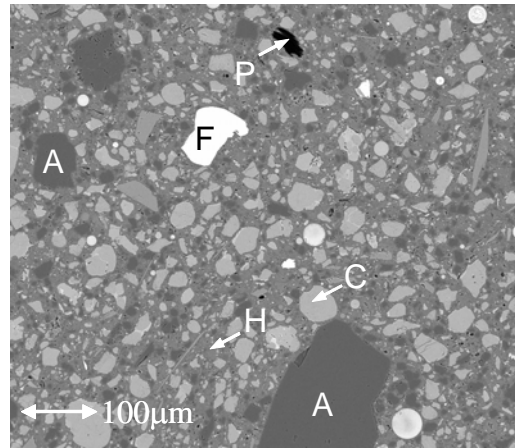
る熟養生を終了した時点からの乾燥収縮が 50×10^{-6} 程度ときわめて小さいため⁶⁾、UFC 供試体は長期的な曲げ強度の低下を生じにくい結果になったものと考えられる。

3.3 UFC の EPMA 分析

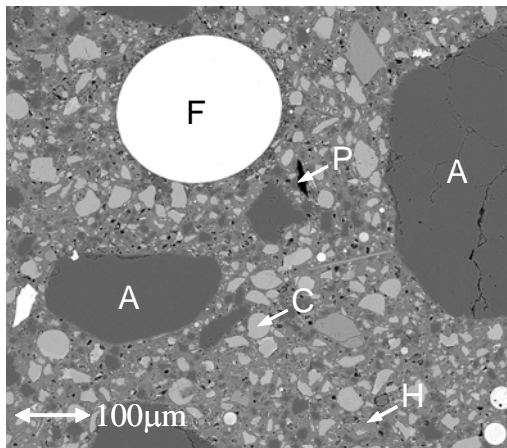
図-9 は、箱桁内で 10 年間暴露した UFC 供試体の塩素マッピング画像を示しており、Cl は断面の外周囲(表層部)のみに高濃度に存在するものの、断面の内部までは浸透していないことがわかる。図-10 は、図-9 に示した塩素マッピング画像データから供試体隅角部の影響を除いた各 4 面中央部 20mm の範囲からの浸透について全 Cl 濃度分布を求めたものである(図中には拡散係数 D_{ap} と表面濃度 C_{a0} の算定値を併記)。10 年間で UFC 表面から Cl が到達した深さは、4 面のうちでもっとも塩分が浸透した左面で 3mm 程度、もっとも塩分が浸透していない底面で 1.5mm 程度であり、いずれもわずかとはいえる。



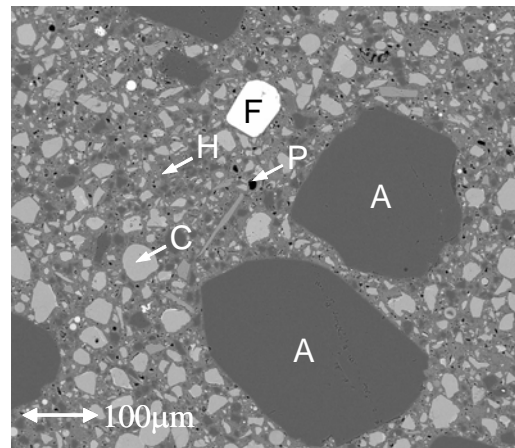
(a) 箱桁内に7.5年間暴露したUFC



(b) 箱桁内に10年間暴露したUFC



(c) 下流側ウェブに10年間供用したUFC



(d) 上流側ウェブに10年間供用したUFC

図-13 箱桁内に暴露されたUFC供試体ならびに実橋ウェブから採取されたUFCコア供試体のBSE像

図-11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Cl⁻が存在していることがわかる。図-12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Cl⁻濃度分布を示したものである(図中には拡散係数 D_{ap} と表面濃度 C_{a0} の算定値を併記)。ウェブ部材の C_{a0} は、上流側よりも下流側のウェブの方が高く、箱桁内部面よりも外表面の方が高くなっており、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Cl⁻がほとんど浸透しておらず、もっとも厳しい環境条件といえる下流側ウェブの外表面でも、Cl⁻の到達深さは1mm未満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ほう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、暴露供試体から算出された D_{ap} は、実橋ウェブのコア供試体から算出された D_{ap} にくらべて大きい値にな

っ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、Cl⁻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Cl⁻浸透が抑制されているものとする。

3.4 UFCのBSE像観察

図-13は、箱桁内に7.5年間ならびに10年間暴露したUFC供試体、供用10年が経過した下流側ウェブならびに上流側ウェブのUFCコア供試体において、それぞれ外表面から深さ0.5~1.0mm付近のBSE像の例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、10年を経過したUFCであっても、その内部には未水和

表-2 UFC の BSE 画像解析結果

供試体の種類	供用年数	SEM 試料の分析対象範囲 *1	体積含有率 *2	
			未水和セメント	空隙
暴露 (箱桁内)	0年	角柱断面の半分	24.0%	7.8%
	7.5年		21.2%	6.8%
	10年		19.9%	5.7%
コア (下流側ウェブ)	10年	箱桁内の表面部	18.5%	7.0%
		ウェブ部材中心部	22.3%	7.0%
		箱桁外の表面部	19.2%	7.0%
コア (上流側ウェブ)	10年	箱桁内の表面部	20.4%	7.2%
		ウェブ部材中心部	22.5%	6.9%
		箱桁外の表面部	19.6%	6.7%

*1 分析断面積: 4×2cm(暴露供試体), 2.5×2cm(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

セメント粒子が多く残存していることがわかった。

表-2 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、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、同様に空隙率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 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-7(a)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 年を経た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、下流側ならびに上流側のウェブ部材のいずれも未水和セメント量は部材中心部で多く、部材表面部では若干少なくなっており、空隙率はウェブ部材の空隙率はそれらの位置で大きな違いは無かった。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いため、部材内部よりも製造当初からの水和反応が進行しやすかったことに起因するのではないかと考えている。

また、前述したように、緊張作業で開口部を設けたウェブの橋軸方向に生じたひび割れの幅は 10 年間で減少していたが、これは、UFC のひび割れ部に含まれる未水和セメント成分が、外部から供給される水分を利用して表面から徐々に反応する再水和を生じて、ひび割れを自的に閉塞した可能性も示唆される。なお、本橋における気温、湿度、飛来塩分量など環境条件、振動、荷重などの外力条件は計測していないため、その生成条件は明確ではない。ただし、UFC 自体は、筆者の既往の研究において予めひび割れを導入した UFC を海水にさらすことでひび割れが閉塞する機能を有していることが実験的に確認されている⁷⁾。

4. まとめ

UFC が日本で初めて適用された PC 橋「酒田みらい橋」

について、供用 10 年に渡る UFC の耐久性を箱桁内に暴露した供試体ならびに実橋ウェブから採取したコア供試体を用いて調査した。本研究で得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 箱桁内に暴露された UFC 供試体は、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ほぼ一定であった。
- (2) 箱桁内に 10 年間暴露された UFC 供試体における CI の浸透深さは 1.5~3.0mm 程度であった。
- (3) 実橋のウェブ部材から採取した UFC コア供試体における CI の浸透深さは 10 年経過時で 1mm 未満ときわめて小さかった。
- (4) 箱桁内の暴露供試体ならびに実橋ウェブ部材から採取した UFC コア供試体の BSE 像からは多くの未水和セメント粒子が観察され、その画像の解析にて 10 年経過した UFC の体積の約 20% が未水和セメントで占められていることがわかった。
- (5) UFC は、豊富に含有する未水和セメントが長期的な強度増進や CI の浸透抑制に寄与できることで、10 年間に渡って高い耐久性を示すことがわかった。

参考文献

- 1) 下山善秀, 武者浩透, 中村 裕: 200N/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, Vol.75, No.1, 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
- 7) 橋本勝文, 横田弘, 豊田昂史, 河野克哉: ひび割れを有する超高強度繊維補強コンクリートの海水浸漬後の引張軟化特性およびひび割れ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.220-225, 2012