

報告 海岸擁壁の補修パネルに適用された各種繊維で補強した無孔性コンクリートの製造ならびに性能

河野 克哉^{*1}・安田 瑛紀^{*2}・小亀 大佑^{*2}・多田 克彦^{*3}

要旨：最近開発した流し込み成型で 400N/mm^2 程度のきわめて高い圧縮強度が得られる無孔性コンクリート (PFC) を各種繊維で補強することで、激しい浸食を受けた海岸擁壁の補修パネルに適用した。鋼繊維で補強した PFC は、製品工場における製造で $330\sim 360\text{N/mm}^2$ 程度の圧縮強度を発現し、超高強度繊維補強コンクリート (UFC) の場合にくらべて曲げ強度とすり減り抵抗性が向上するとともに海水に 1 年間浸漬したときの塩化物イオン浸透性は同等以下となった。また、海水に対する耐食性をもつステンレス鋼繊維や集束 PBO 繊維で補強した PFC の場合にも、UFC の場合にくらべて圧縮強度の増大やすり減り抵抗性の向上が確認できた。

キーワード：超高強度、繊維補強、海岸擁壁、補修、すり減り抵抗性、塩化物イオン浸透

1. はじめに

超高強度コンクリートは、土木構造物のスパン長大化や建築物の高層化のほか、高耐久化を可能にする材料である。近年では、圧縮強度 200N/mm^2 程度の超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) が歩道橋、道路橋および鉄道橋の桁や空港滑走路の床版にも利用されるようになった¹⁾。また最近では、設計基準強度 300N/mm^2 の超高強度コンクリートが柱部材に実用化されたことも報告されている²⁾。これまでに筆者らは、型枠に流し込んで製造するコンクリートにおいて、世界最高水準の圧縮強度を発現させることを目標に、最密粒度の結合材の適用ならびに脱型後の吸水処理と 2 段階の熱養生の採用により、硬化組織中の空隙を微細化して減少させることで、約 400N/mm^2 の圧縮強度を発現できる無孔性コンクリート (Porosity Free Concrete) (以下、PFC) を開発した^{3),4)}。

きわめて高い圧縮強度を有する PFC は、その破壊に際して著しく脆化するため、圧縮強度が若干低下したとしても短繊維を混入してマトリクスを補強することで初めて実用化が可能となる。これまで、超軽量性や超高耐久性の観点から、繊維補強 PFC の PC 桁への応用⁵⁾や海岸構造物への部分適用⁶⁾に関して検討を行ってきた。

本報告では、各種繊維で補強した PFC を激しい浸食を受けた海岸擁壁の補修パネル全体に適用した事例を取り上げ、製品工場における繊維補強 PFC パネルの製造ならびにそのコンクリートの性能について述べる。

2. 浸食を受けた海岸擁壁のパネル補修の概要

2.1 海岸擁壁コンクリートの浸食の状況

図-1 は、国道 336 号 (北海道浦河郡浦河町から同道釧路市に至る一般国道) において黄金道路と呼ばれる太平



図-1 黄金道路における落石と越波の状況



図-2 海岸擁壁コンクリートの浸食の状況

洋に面した区間に建設された覆道と擁壁の状況を示したものである。この黄金道路は、日高山脈の南端部 (最南端部は襟裳岬) に位置し、海岸沿いの断崖絶壁を切り開く難工事によって開通したものである。山側の急斜面では崩落による落石が起り、海中に落下した石は波によって運ばれ、擁壁に衝撃や磨耗を与えている。さらに海水の作用下における凍結融解なども加わって、擁壁は激しい浸食を受けている。この擁壁は、1970 年ごろに施

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

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

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 チームリーダー (正会員)

表-1 使用材料

種類	名称	略号	成分ならびに物性
結合材 (B)	プレミックス粉体	B _{pfc}	PFC 専用, 最密粒度粉体の開発品
		B _{ufc}	UFC 専用, 標準配合粉体の市販品
細骨材	高強度砂	S	最大寸法 0.3mm, 密度 2.63 g/cm ³
混和剤 (AD)	高性能減水剤	SP _{pfc}	PFC 専用, ポリカルボン酸系
		SP _{ufc}	UFC 専用, ポリカルボン酸系
	消泡剤	DF _{pfc}	PFC 専用, ポリグルコール系
短繊維 (F)	鋼繊維	STE	寸法 φ0.20×15mm, 密度 7.84g/cm ³ , 引張強度 2.8kN/mm ² , 引張弾性率 200kN/mm ²
	ステンレス鋼繊維	SUS	寸法 φ0.30×15mm, 密度 7.93g/cm ³ , 引張強度 0.6kN/mm ² , 引張弾性率 193kN/mm ²
	集束 PBO 繊維	PBO	寸法 φ0.23×15mm, 密度 1.51g/cm ³ , 引張強度 3.5kN/mm ² , 引張弾性率 140kN/mm ²

表-2 配合

配合名	W/B (%)	V _f * ¹ (%)	単位量 (kg/m ³)									Flow* ³ (mm)	f' _c (N/mm ²)	f _b (N/mm ²)	
			W* ²	B		S	AD			F					
				B _{pfc}	B _{ufc}		SP _{pfc}	SP _{ufc}	DF _{pfc}	STE	SUS				PBO
PFC-STE2.0	15	2.0	193	1279	—	934	B×2.0%	—	B×0.02%	157	—	—	270	324	48.6
PFC-SUS2.5	15	2.5	193	1279	—	934	B×1.6%	—	B×0.02%	—	198	—	240	270	35.4
PFC-PBO2.0	15	2.0	193	1279	—	934	B×2.5%	—	B×0.02%	—	—	30	251	240	34.4
UFC-STE2.0	14	2.0	180	—	1278	934	—	B×1.3%	—	157	—	—	277	216	39.7

*¹ PFC は外割体積比, UFC は内割体積比。*² Wの一部に AD を含む。*³ 落下振動無し。

工されたものと推定されているものの, 浸食が顕著になったのは 2003 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震(マグニチュード 7.1)以降と考えられている。この地震によって, 海底地形が変動したことや沖合の消波ブロックが流失したことなどから, 擁壁に対する波の当たり方が変化し, 図-2 に示すように擁壁に用いられたコンクリートの浸食が急激に進行したのではないかと考えられている。

2.2 海岸擁壁コンクリートの補修の概要

図-3 は, 黄金道路の海岸擁壁コンクリートの補修について概要を示したものである。既存擁壁の前方(海側)に元々の仕様であった UFC 製に加え, 更に高性能な PFC 製のパネルを, L 形鋼を介してボルトならびに溶接で接合する形で斜めに設置する。その上で, 既存擁壁とパネルとの空間に裏込め材としてレディーミクストコンクリートを打ち込み, アンカー鉄筋にて既存擁壁と固定する補修工法となっている。なお, パネルに用いるコンクリートは, 設計基準強度が圧縮強度で 180N/mm² かつ曲げ強度で 22.5N/mm², 設計耐用年数がすり減り作用を受けるパネルの断面が残存するまでの 15 年となっている。

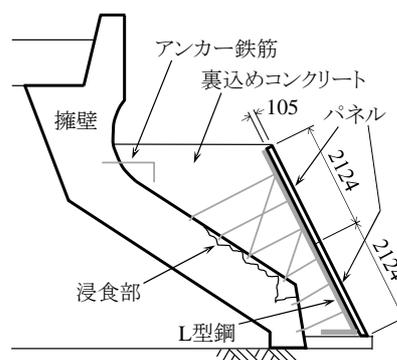


図-3 海岸擁壁コンクリートの補修の概要

3. 補修パネルの製造と施工

3.1 補修パネルのコンクリートの材料と配合

パネルに用いたコンクリートの材料ならびに配合をそれぞれ表-1 ならびに表-2 に示す。PFC の結合材(以下, B_{pfc})は, 最大粒子の低熱ポルトランドセメント(比表面積 3500cm²/g)と最小粒子のシリカフェーム(比表面積 20m²/g)に対し, 鈴木らの多成分粒子ランダム充填シミュレーション⁷⁾にて算出される混合物の空間率が最小となるように粒子径と粒度分布を調整した SiO₂ 微粉末

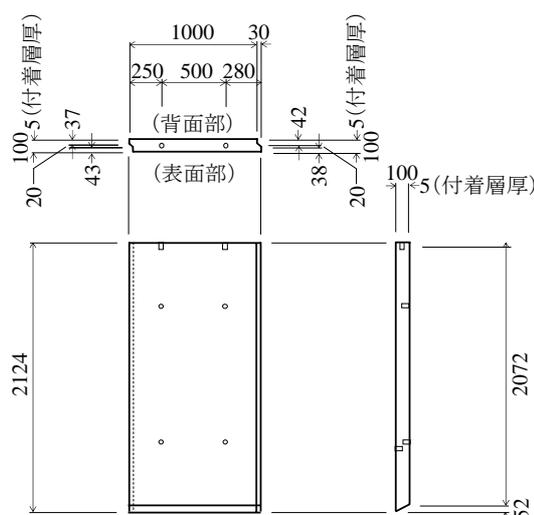


図-4 補修パネルの形状

を中間粒子として添加することで, 最密粒度としたプレミックス粉体である。また, UFC の結合材(以下, B_{ufc})



図-5 繊維補強 PFC の打込み



図-6 凸型付着層の形成と仕上げ



図-7 脱型後の煮沸吸水処理

は、中庸熟ポルトランドセメントを主原料とした市販の標準配合プレミックス粉体である。細骨材はいずれの場合にも同じ高強度砂(以下、S)とし、混和剤(以下、AD)は PFC ならびに UFC のそれぞれの結合材に適した高性能減水剤(以下、それぞれ SP_{pfc} 、 SP_{ufc})を用い、さらに PFC の場合には消泡剤(以下、 DF_{pfc})を併用した。

PFC に組み合わせる短繊維(以下、F)は、高強度な材質として高炭素鋼繊維(以下、STE)を、海水による腐食を生じにくい材質としてステンレス鋼繊維(以下、SUS)ならびに合成繊維の中で最高の引張強度と引張弾性率をもつポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール(以下、PBO)を集束した繊維を採用し、計3種類とした。なお、集束 PBO 繊維は、細径のフィラメント($\phi 12\mu\text{m}$)を集めて束にしたものを樹脂で固定して切断し、UFC マトリックスの補強用短繊維として開発したものである⁸⁾。

PFC に対する各繊維の体積混入率(以下、 V_f)は、STE 繊維ならびに PBO 繊維の場合は 2.0%(外割)とし、引張強度が他の繊維よりも低い SUS 繊維の場合には 2.5%とした。また、UFC に組み合わせる繊維は、STE 繊維の1種類のみとし、 V_f を 2.0%(内割)で用いた。

フロー(落下振動無し)は、表-2中に併記したように、AD の添加量を調整することで自己充填性による流し込み成型が可能になる 240~280mm の範囲とした。

3.2 補修パネルの形状と製造

補修パネルの形状は、図-4に示すように幅 1030mm ×高さ 2124mm ×厚さ 105mm の外寸法であり、背面に裏込め材との接着を強くするため、凸型の付着層(厚さ 5mm)が設けられている。

PFC ならびに UFC は、製品工場のオムニミキサ(容量 150L)内に材料ならびに水(以下、W)を投入して4分間ほど練り混ぜ、さらに繊維を投入してから2分間ほど練り混ぜた(計6分間の練混ぜ)。練り上がったコンクリートをミキサからバケットに移し、図-5のように型枠内へ一方向から流し込む形で打ち込み、さらに図-6のように打込み面を所定の形状に開口されたゴム板で押さえながら仕上げで硬化させ、凸型の付着層を形成した。

打込み翌日の脱型を実施するため、打込み終了後から



図-8 繊維補強 PFC パネルで補修した海岸擁壁

工場内の外気温下で 6h ほど静置し、一次蒸気養生(最高温度 40℃、最高温度保持時間 12h)に供した。なお、PFC-PBO2.0 の場合には、この条件で脱型可能な強度に達しなかったため、さらに蒸気養生(最高温度 50℃、最高温度保持時間 4h)を追加し、翌日脱型を可能にした。

材齢 1d で脱型後は、以下に述べるように、i)煮沸吸水処理、ii)二次蒸気養生、iii)三次加熱養生を配合ごとに選択して実施した。すなわち、PFC-STE2.0 ならびに PFC-SUS2.5 の場合は、i)煮沸吸水処理、つづいて ii) 二次蒸気養生ならびに iii) 三次加熱養生を行った。また、PFC-PBO2.0 の場合には、煮沸による飽水かつ高温の下での繊維変質を防ぐ目的で煮沸吸水処理は実施せず、ii) 二次蒸気養生ならびに iii) 三次加熱養生を行った。なお、UFC-STE2.0 の場合は、UFC の標準的な熱養生として ii) 二次蒸気養生のみを行った。

i) 煮沸吸水処理：図-7のように貯水容器内で脱型後のパネル全体を水中に浸漬し、養生用ボイラーからホースにて蒸気を水中に吹き込み、昇温速度 20℃/h で 100℃に達してから 30 分間煮沸した。その後、外気温まで水中にて自然冷却して、パネル内部に水分を吸収させた。
ii) 二次蒸気養生：昇温・降温速度 15℃/h、最高温度 90℃、最高温度保持時間 48h、1 気圧の条件とした。
iii) 三次加熱養生：昇温・降温速度 60℃/h、最高温度 180℃、最高温度保持時間 48h、1 気圧の条件とした。

さらに円柱供試体、角柱供試体および平板供試体採取し、パネルと同じ養生を行って所定の試験に供した。

3.3 補修パネルの施工

本来採用されていた STE 繊維で補強した UFC パネルに加えて、STE 繊維、SUS 繊維および集束 PBO 繊維で補強した PFC パネル(計3種類)を新しく適用し、いずれもパネル背面に L 形鋼をボルト接合して、クレーンにて吊り上げて海岸の所定位置に降した。各パネルは、既存擁壁に設置されたアンカー鉄筋と L 形鋼を溶接して固定し、永久埋設型枠として組み立てた。その後、裏込め材としてレディーミクストコンクリートをポンプ車のブームを延ばして鉛直下向きに圧送し、現地にて養生を行ってから、図-8 のように供用を開始した(2018 年 10 月)。

4. 補修パネルに用いた各種繊維補強 PFC の性能

4.1 各種繊維で補強した PFC の試験概要

(1) 圧縮強度

圧縮強度(以下、 f'_c)は、3.2 に示す所定の養生を行った円柱供試体(寸法 $\phi 50 \times 100\text{mm}$)を用いて測定した。なお、PFC-STE2.0 の場合は、所定養生後に水中 20°C、気中 20°C で相対湿度 80% および気中 20°C で相対湿度 60% の各条件にて長期保管したときの f'_c の変化も測定した。

(2) 曲げ強度

曲げ強度(以下、 f_b)は、所定の養生を行った角柱供試体(寸法 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$)を用いて測定した。万能試験機(荷重容量 100kN)を用いて、支点間距離 120mm、等曲げモーメント区間距離 40mm の 4 点曲げ試験(3 等分点曲げ試験)を行い、ロードセルで荷重を検出しながら試験体の中央変位を測定した。

(3) すり減り抵抗性

所定の養生を行った平板供試体(寸法 $300 \times 300\text{mm}$ 、厚さ 60mm)に ASTM C779 に準じる形で回転ディスクを用いて摩耗作用を与えた。固定した平板供試体に対して一定荷重を作用させた磨耗板との間に研磨材を定量供給しながら回転(自転 280rpm)させ、さらにこれを円周運動(公転 12rpm)させることで表面に平行な磨耗を与えた。平板供試体の削り取られた深さをマイクロメータにて測定し、その平均値をすり減り深さとした。すり減り試験は 60 分間継続して行い、試験開始から試験終了まで 10 分経過ごとにすり減り深さを測定した。

(4) 塩化物イオンの浸透性

所定の養生を行った PFC-STE2.0、PFC-PBO2.0 および UFC-STE2.0 の角柱供試体(寸法 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$)を $40 \times 40\text{mm}$ の 2 面以外はエポキシ樹脂を塗布して外部からの物質浸透を防止し、人工海水(塩化物イオン(以下、Cl)濃度 3%)に浸漬した。所定期間が経過した後、JSCE-G574 に準じる形で電子線マイクロアナライザー(以下、EPMA)にて供試体断面の塩素(以下、Cl)の面分析を行い、浸透深さ方向に対して全 Cl 濃度分布曲線を算出した。

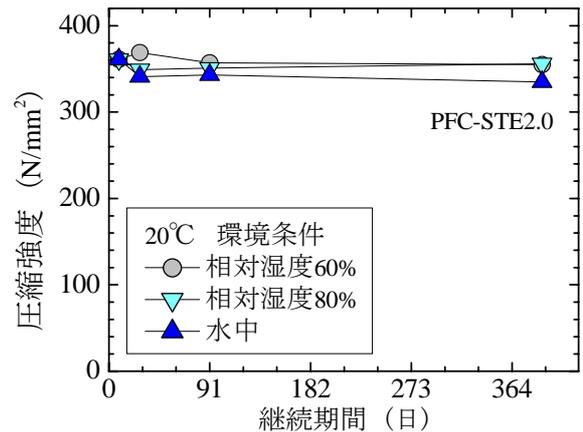


図-9 異なる湿度下における繊維補強 PFC の f'_c の変化

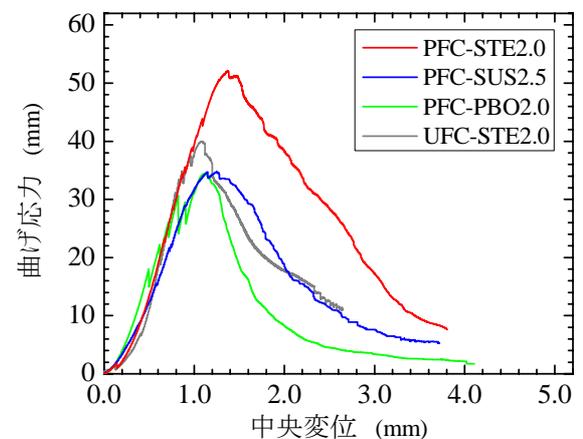


図-10 各種繊維補強 PFC の曲げ応力-中央変位曲線

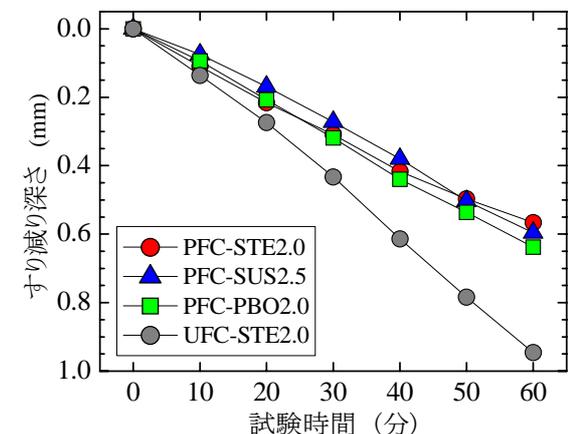


図-11 各種繊維補強 PFC のすり減り抵抗性

4.2 各種繊維で補強した PFC の性能

(1) 圧縮強度

各種繊維で補強した PFC の f'_c は、表-2 中に併記した。PFC-STE2.0 の場合は 324N/mm^2 となり、UFC-STE2.0 の場合の 216N/mm^2 に比べて 1.5 倍ほど向上した。このような PFC-STE2.0 の f'_c の増加には、最密粒度とした結合材の粉体充填効果のほか、脱型後の吸水処理にて内部に含んだ水分を利用した蒸気養生(90°C)での水和物

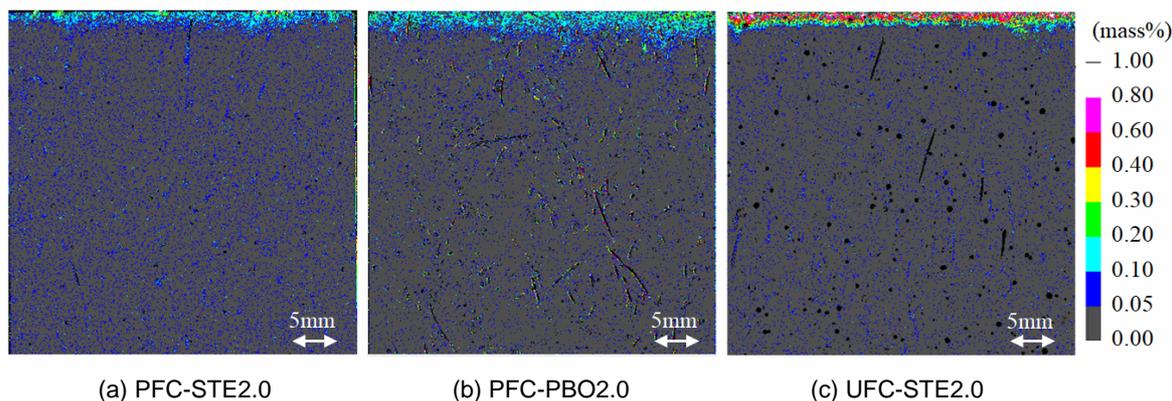


図-12 EPMAによる各種繊維補強 PFC ならびに UFC の CI マッピング画像

生成による空隙充填効果³⁾, さらに加熱養生(180°C)による空隙内余剰水分の逸散効果がそれぞれ関与したものと考えられる⁴⁾。また, PFC-SUS2.5 の f'_c は 270N/mm², PFC-PBO2.0 の f'_c は 240N/mm² となり, PFC-STE2.0 の場合よりは低いものの, いずれも UFC-STE2.0 の場合にくらべてかなり高い値となった。

図-9 は, 水中(相対湿度 100%), 気中(相対湿度 80% ならびに 60%)の各条件で 1 年以上保管したときの PFC-STE2.0 の f'_c の変化を示したものである。この期間中の f'_c は, いずれの相対湿度下においても 350N/mm² 前後の値でほぼ一定であった。硬化マトリクスが吸湿することで, 空隙に浸透した水の表面張力による強度低下⁹⁾, 水と未水和セメントが反応した空隙充填による強度向上¹⁰⁾といった 2 つの相反する効果が想定される。しかしながら, PFC マトリクスはきわめて緻密であるために吸湿性が低く, 1 年程度の期間では, これらの効果がいずれも顕著に働いていないのではないかと考えている。

(2) 曲げ強度

各種繊維で補強した PFC の f_b は, 表-2 中に併記した。PFC-STE2.0 の f_b は $V_f=2.0\%$ で 48.6N/mm² となり, 同じ V_f である UFC-STE2.0 の f_b の 39.7N/mm² にくらべて 1.2 倍ほど向上した。なお, SUS 繊維は引張強度が低いため $V_f=2.5\%$ とすることで PFC-SUS2.5 の f_b を 35.4N/mm² に維持し, また, PBO 繊維は湿熱下で変質の懸念があるために煮沸吸水処理を省くことで PFC-PBO2.0 の f_b を $V_f=2.0\%$ で 34.4N/mm² に維持した。

図-10 は, 各種繊維で補強した PFC の 3 等分曲げ試験における曲げ応力-中央変位曲線を示したものである。PFC-STE2.0 と UFC-STE2.0 のそれぞれの曲線を比較すると, ピークまでの初期剛性はほぼ同等であるものの, ピーク応力は PFC-STE2.0 の方が高く, ピーク以降はいずれも同様な応力低下傾向といえる。また, PFC マトリクスに STE 繊維を用いた PFC-STE2.0 の場合に対して, 異なる繊維を混入した PFC-SUS2.5 の場合や PFC-PBO2.0 の場合を比較すると, SUS 繊維を $V_f=2.5\%$ で用いた場合

はピークまでの初期剛性が低下すること, 集束 PBO 繊維を $V_f=2.0\%$ で用いた場合は曲げ応力が一時的に急な低下と回復を繰り返しながらピークに至ることがわかった。

(3) すり減り抵抗性

図-11 は, 各種繊維で補強した PFC のすり減り抵抗性試験の結果を示したものである。試験時間 60 分におけるすり減り深さは, PFC-STE2.0 の場合に最小で, UFC-STE2.0 の場合が最大となり, 同じ V_f で STE 繊維を用いても PFC マトリクスの方がすり減り抵抗性は 1.4 倍ほど向上した。また, PFC マトリクスに異なる繊維を混入した PFC-SUS2.5 や PFC-PBO2.0 の場合, いずれも STE 繊維を混入した場合よりも耐摩耗性がやや低下するものの, ほぼ同程度といえる結果となった。なお, 補修パネルは, 海岸線のスプラッシュゾーンに位置する厳しい塩害環境下で供用されることから, SUS 繊維や集束 PBO 繊維のように海水による腐食を生じにくい材質を用いた PFC の場合と海水で腐食を生じる鋼繊維を用いた PFC の場合とでは, 実環境条件下と室内試験条件下ですり減りの状況が異なることも考えられる。

(4) 塩化物イオン浸透性

図-12 は, 人工海水に 1 年間浸漬した PFC-STE2.0, PFC-PBO2.0 および UFC-STE2.0 の各供試体の EPMA から得られた CI のマッピング画像であり, いずれの場合も CI 浸透はごく表層部に限られている。図-13 は, 各供試体の浸透深さ方向に対する全 CI 濃度分布曲線を示したものである。PFC-STE2.0 の表面における全 CI 濃度は, UFC-STE2.0 の場合よりもかなり低く, PFC-STE2.0 の場合の CI 到達深さは 1mm 程度で UFC-STE2.0 の場合と同等以下の値となった。PFC マトリクスは低熱ポルトランドセメントを, UFC マトリクスは中庸熱ポルトランドセメントをそれぞれ主原料としており, CI の固定化能力は中庸熱ポルトランドセメントよりも低熱ポルトランドセメントの方が低いため¹¹⁾, 使用したセメント種類の違いが表面における全 CI 濃度に影響したことが考えられる。なお, この場合の PFC マトリクスは空隙率が体積

で 1%未満となるような著しい緻密組織であり³⁾、UFCマトリックスの空隙率が5~7%で程度あること¹⁰⁾を勘案すると、長期的には PFCの方が Cl⁻が浸透しにくくなる結果が得られることも考えられる。また、PFC-PBO2.0の場合は、PFC-STE2.0の場合にくらべて、表面の全 Cl⁻濃度がやや低く、Cl⁻は表面から 2mm 程度まで浸透している。これは、PFC-PBO2.0の場合、脱型後の吸水処理を行っておらず緻密化が PFC-STE2.0の場合ほど進んでいないことや、細い繊維フィラメントの集束の隙から透過が生じることなどの関与が指摘されるものの、今後の浸漬試験を経過観察することで明確になると考えている。

5. まとめ

海岸擁壁の補修パネルに適用された鋼繊維、ステンレス繊維および集束 PBO 繊維で補強した PFC に関して、本報告の検討で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 鋼繊維で補強した PFC は、工場製造においても 330N/mm²程度のさわめて高い圧縮強度を発現し、水中における圧縮強度は 1 年以上に渡って 350N/mm²前後の値で安定した。
- (2) 海水に対する耐食性をもつステンレス鋼繊維ならびに集束 PBO 繊維で補強した PFC は、工場製造において、それぞれ 270N/mm²程度、240N/mm²程度の圧縮強度を発現し、いずれも UFC の場合よりも高い強度が得られた。
- (3) 鋼繊維で補強した PFC の曲げ強度は他の繊維で補強した PFC の場合にくらべて大幅に高くなり、ステンレス鋼繊維ならびに集束 PBO 繊維で補強した PFC の曲げ強度は UFC の場合とほぼ同程度であった。
- (4) いずれの繊維で補強した PFC の場合でも、すり減り抵抗性は UFC の場合にくらべて大幅に向上した。
- (5) 鋼繊維で補強した PFC の 1 年経過後の Cl⁻浸透は、UFC の場合にくらべて表面 Cl⁻濃度が低く、Cl⁻到達深さは約 1mm で同程度以下であった。

謝辞

本報告における検討の実施に当たっては、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部広尾道路事務所ならびに(株)構研エンジニアリング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。

参考文献

- 1) Hiroyuki Musha, Hikari Ohkuma, Takeshi Kitamura : Innovative UFC structures in Japan, Proceedings of RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, pp.17-26, 2013

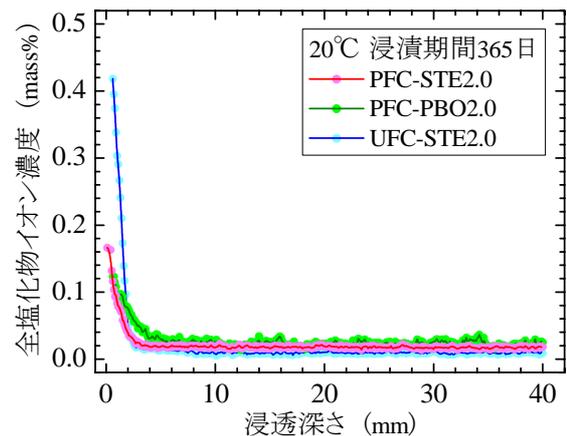


図-13 各種繊維補強 PFC の全 Cl⁻濃度分布曲線

- 2) 今井和正, 山本佳城, 加藤雅樹, 村松晃次: 設計基準強度 300N/mm²のコンクリートを用いた RC 細柱の開発と適用, コンクリート工学, Vol.51, No.12, pp.959-966, 2013
- 3) 河野克哉, 中山莉沙, 多田克彦, 田中敏嗣: 450N/mm²以上の圧縮強度を発現するセメント系材料の製造方法と硬化組織の変化, コンクリート工学年次論文集, pp.1443-1448, Vol.38, No.1, 2016
- 4) 河野克哉, 森香奈子, 安田瑛紀, 多田克彦: PFC[®](無孔性コンクリート)の開発とそのマトリックスの繊維補強による実用化, セメント・コンクリート, pp.28-36, No.857, 2018
- 5) 柳田龍平, 中村拓郎, 河野克哉, 二羽淳一郎: 繊維補強した無孔性コンクリートに用いた外ケーブル方式セグメントはりの耐荷性能, コンクリート工学年次論文集, pp.41-54, 第 29 巻, 2018
- 6) 安田瑛紀, 森香奈子, 河野克哉, 多田克彦: パネルによる護岸補修工事に適用した圧縮強度 350N/mm²を有する繊維補強コンクリートの基礎性状, コンクリート工学年次論文集, pp.2119-2124, Vol.39, No.1, 2017
- 7) 鈴木道隆, 市場久貴, 長谷川勇, 大島敏男: 粒度分布のある多成分系ランダム充填層の空間率, 化学工学論文集, 第 11 巻, 第 4 号, pp.438-443, 1985
- 8) 森香奈子, 河野克哉, 奥山幸成, 榎本弘: 集束 PBO 繊維を使用した超高強度繊維補強コンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.244-249, 2012
- 9) 堀素夫: 表面エネルギーから見たセメント硬化体の強さ, 窯業協会誌, Vol.70, No.7, pp.54-59, 1962
- 10) 河野克哉, 川口哲生, 武者浩透, 小林忠司: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.262-267, 2014
- 11) 平尾宙, Hassan ZIBARA, 高橋晴香, 山田一夫: 塩化物イオンの固定に及ぼすセメント組成の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.855-860, 2004