論文　有機繊維補強セメント複合材料の耐久性評価に関する研究

林　大介[*1]・芦澤　良一[*2]・横関　康祐[*3]・坂田　昇[*4]

要旨：ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよび ECC の塩化物イオン浸透性と凍結融解抵抗性について，室内試験を基に検討した。その結果，ポリプロピレン繊維補強コンクリートの塩化物イオン浸透性は普通コンクリートと同等であることや, ECC の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は水セメント比 50%の普通コンクリートの 1/10 程度であり，固定化される塩化物イオン量の割合が普通コンクリートよりも高いことが分かった。また，いずれの材料も，繊維の架橋効果による高い凍結融解抵抗性を有し，凍結融解試験の 780 サイクルまで相対動弾性係数がほとんど低下しないことを確認した。

キーワード：ポリプロピレン繊維，ECC，塩化物イオン浸透性，凍結融解抵抗性

1. はじめに

近年，有機繊維補強セメント複合材料に関する研究が数多く進められている。例えば，フレッシュコンクリートにポリプロピレン繊維を0.2～0.5Vol.%程度混入させることにより, コンクリート片の剥落防止効果が得られることが明らかとなっている[1)]。また，先端の力学モデルを用いて材料設計されたモルタル中に PVA などの短繊維を 1～2Vol.%程度混入させる ECC（Engineered Cementitious Composite）が実用化され，その優れた引張ひずみ性能が注目を集めている[2)]。数年来，コンクリート構造物の設計は性能照査型に移行しており，これらの優れた力学特性を有する新材料の耐久性に関する検討が必要とされている[3)]。

本報では，有機繊維補強セメント複合材料として，ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよび ECC を取り上げ，塩化物イオン浸透性および凍結融解抵抗性について室内試験を基に検討した結果を示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料およびコンクリート配合を，それぞれ**表－1** および**表－2** に示す。本研究では，普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 50%の普通コンクリート，その普通コンクリー

表－1　使用材料

材料	記号	摘要
ｾﾒﾝﾄ	C	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ，密度 3.16g/cm^3
細骨材	S	山砂，密度 2.64g/cm^3
粗骨材	G	砕石，Gmax20mm,密度 2.65g/cm^3
混和剤	Ad1	AE 減水剤（高変性ﾎﾟﾘｵｰﾙ複合体）
	Ad2	AE 助剤（変性ﾛｼﾞﾝ酸化合物系陰ｲｵﾝ界面活性剤）
ﾎﾟﾘﾌﾟﾛﾋﾟﾚﾝ繊維	PF	密度 0.91g/cm^3，繊維長 30mm，繊維径 6400d（真円とした場合 1.00mm），波形形状，強制二軸ﾐｷｻでｺﾝｸﾘｰﾄを練混ぜ後に繊維を投入し, 60 秒間の練混ぜ後，流し込み
ECC	ECC	ﾌﾟﾚﾐｸｽﾀｲﾌﾟ，普通ｾﾒﾝﾄにﾌﾗｲｱｯｼｭを 30%置換した結合材, W/B＝0.32, 砂結合材比＝0.41, 径 0.04mm および長さ 12mm の PVA 繊維を 2.1Vol.%混入，ﾎﾊﾞｰﾄﾐｷｻで練混ぜ後，吹付け
補修用ﾎﾟﾘﾏｰｾﾒﾝﾄﾓﾙﾀﾙ	PCM	ﾌﾟﾚﾐｸｽﾀｲﾌﾟ，ｱｸﾘﾙ系ﾎﾟﾘﾏｰを使用，（水+ﾎﾟﾘﾏｰ）/粉体＝0.192，ﾊﾝﾄﾞﾐｷｻで練混ぜ後，流し込み

表－2　コンクリート配合（普通コンクリート）

Gmax (mm)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3）					
					W	C	S	G	Ad1	Ad2
20	12±2.5	50.0	4.5±1.5	42.0	170	340	751	1041	0.85	0.34

*1 鹿島技術研究所　材料･ＬＣＥグループ　研究員　(正会員)
*2 鹿島技術研究所　材料･ＬＣＥグループ　研究員　工修　(正会員)
*3 鹿島技術研究所　材料･ＬＣＥグループ　上席研究員　工博　（正会員）
*4 鹿島技術研究所　材料･ＬＣＥグループ　チーフ兼上席研究員　工博　（正会員）

トにポリプロピレン繊維を混入させた繊維補強コンクリート[1)], ECC[2)] および補修用のポリマーセメントモルタルを対象とした。ポリプロピレン繊維補強コンクリートは，普通コンクリートの容積に対して波型形状のポリプロピレン繊維[1)]を外割で 0.35Vol.%および 0.5Vol.%混入させる 2 配合を設定した。また，ECC は，普通ポルトランドセメントにフライアッシュ（JIS A 6201 に規定するⅡ種）を 30%添加した結合材を用い，水結合材比が 32%の配合のものである[2)]。

2.2 試験方法

(1)塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法

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）」に準じて 180 日間の浸漬試験を行い，塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。塩化物イオン量の分析は，表面より 0-10mm，10-20mm，20-30mm および 30-40mm の試験片を採取し，JIS A 1154-2003「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて行った。また，その際，JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準じて可溶性塩化物イオン量の分析も行った。分析された塩化物イオンの濃度分布より，Fick の第 2 法則に基づいた拡散方程式の解に合致する表面塩化物イオン量および見掛けの拡散係数を算出した。

(2) 凍結融解試験方法

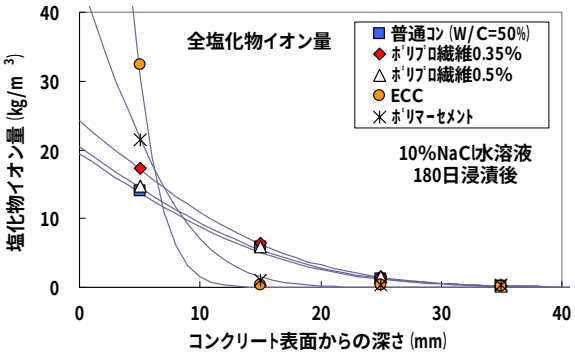
JIS A 1148-2001「コンクリートの凍結融解試験方法」に準じて凍結融解試験を行った。ここで，通常の試験終了サイクルは, 300 サイクルであるが，本研究では，普通コンクリートの相対動弾性係数が計測不能となるまで試験を継続した。

3. 塩化物イオン浸透性に関する検討

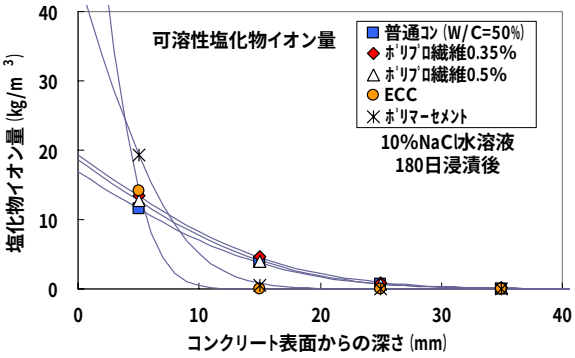
3.1 塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験結果

(1) 塩化物イオン量の分析結果

全塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量の分析結果を，それぞれ**図－1** および**図－2** に示す。図中には，Fick の第 2 法則の解によって回帰した曲線を示してある。同図より，普通コンクリートと，0.35Vol.%および 0.5Vol.%のポリプロピレン繊維補強コンクリートの全塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量は，ほぼ同程度となった。コンクリートにポリプロピレン繊維を混入することにより，繊維の界面を通じた塩化物イオン浸透が考えられたが，この影響は認められず，本試験では普通コンクリートと同等の結果となった。



図－1　全塩化物イオン量の分析結果



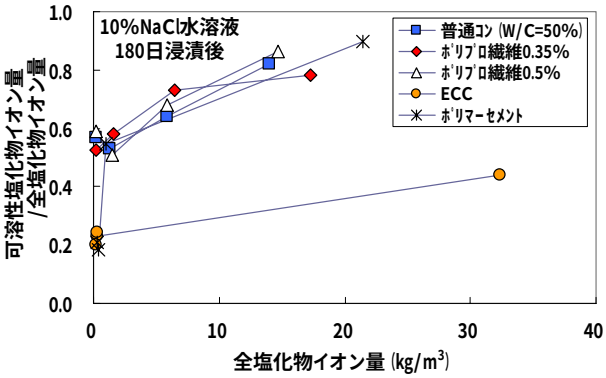
図－2　可溶性塩化物イオン量の分析結果

ECC の全塩化物イオン量は, 表面より 0-10mm の範囲が極めて多く，それより内部の範囲には，ほとんど浸透していない結果となった。また，可溶性塩化物イオン量は, 表面より 0-10mm の値が，普通コンクリートおよびポリプロピレン繊維補強コンクリートと同程度となり，それより内部の範囲では，ほとんど含有されない結果となった。既往の研究[4)]によれば，水セメント比の低い密実なコンクリートほど表面の塩化物イオン量が多くなることが確認されている。ECC は，水結合材比が 32%と低く，さらに PVA 繊維やフライアッシュ，膨張剤などの使用によって緻密化されたために，同様の傾向が認められたものと考えられる。

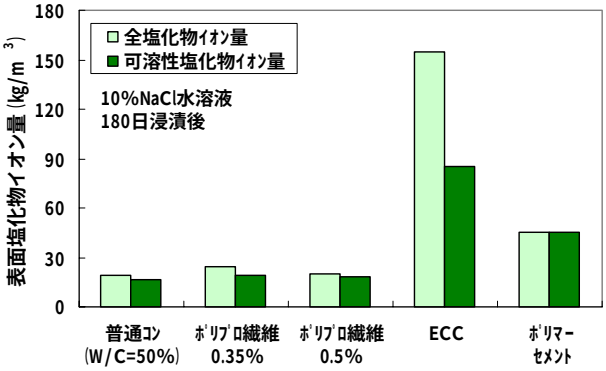
補修用ポリマーセメントモルタルの全塩化物イオン量および可溶性塩化物イオン量は，普通コンクリートに比べて，表面より 0-10mm の範囲が多く，それより内部の範囲が少ない結果となった。これは，水セメント比が低いことや，連続した網状構造のポリマーフィルムが形成されたこと[5]によるものと考えられる。ECC と比較すると，補修用ポリマーセメントモルタルの方が，表面より 0-10mm の範囲の全塩化物イオン量は少なく，可溶性塩化物イオン量は多い結果であり，それより内部の範囲では，いずれも若干多くなった。全体的には，補修用ポリマーセメントモルタルよりも ECC の方が塩化物イオン浸透を抑制する傾向が認められた。

(2) 可溶性塩化物イオン量の割合

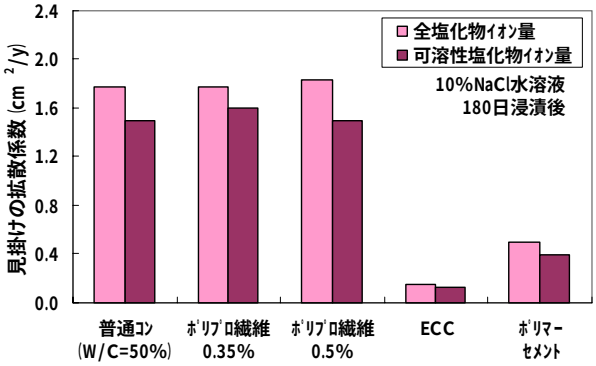
全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量の割合の関係を**図－3** に示す。同図より，普通コンクリート，ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよび補修用ポリマーセメントモルタルの可溶性塩化物イオン量の割合は，全塩化物イオン量の増加に伴って増加する傾向があった。これは，全塩化物イオン量が少量であれば，固定化される塩化物イオンの割合が高くなり，全塩化物イオン量が多量になると固定化される塩化物イオンの割合が低くなることを示している。一方，ECC の全塩化物イオン量に対する可溶性塩化物イオン量の割合は 0.2～0.4 程度の範囲にあり，普通コンクリートの 0.6～0.8 程度に比べて小さな値を示した。これは，ECC の単位セメント量が多く，また膨張剤などを使用しているため，フリーデル氏塩などとして固定化される塩化物イオンが多くなったことによるものと考えられる。このことは，ECC に浸透した塩化物イオン量のうち，鉄筋腐食に影響を及ぼす塩化物イオンの割合が低いことを示唆しており，普通コンクリートよりも腐食発生限界塩化物イオン量が多くなる可能性があることを示すものである。ECC の鉄筋腐食抑制効果について，既往の研究[6]において，ECC の優れたひび割れ分散性により，腐食の形態がマクロセル腐食ではなく



図－3　可溶性塩化物イオン量の割合



図－4　表面塩化物イオン量の評価結果



図－5　見掛けの拡散係数の評価結果

ミクロセル腐食となるために腐食速度が低減されることが報告されているが，固定化される塩化物イオンの割合が高いことも腐食速度の低減に影響を及ぼす可能性があるものと考えられる。

(3) 表面塩化物イオン量および見掛けの拡散係数の評価結果

Fick の第 2 法則の解に合致する表面塩化物イオン量および見掛けの拡散係数の評価結果を**図－4** および**図－5** にそれぞれ示す。同図より，普通コンクリートとポリプロピレン繊維補強コンクリートの表面塩化物イオン量および見掛けの拡散係数は，ほぼ程度となった。

ECC の表面塩化物イオン量は，表面より

0-10mm の塩化物イオン量が内部に比べて極端に多かったために大きな値となった。既往の研究 [7] によれば，表面塩化物イオン量は，経年とともに多くなり，やがて一定値に収束していく傾向を示すことが明らかとなっている。一定値に収束していく期間は材料によって異なるものと考えられ，本試験では ECC の表面塩化物イオン量が他の材料よりも早く収束していく傾向になったものと考えられる。すなわち，ECC のように緻密化が図られている材料は，塩化物イオンが内部に浸透しにくく，表面に留まりやすいため，収束するまでの期間が短いことが考えられる。一方，普通コンクリート，ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよび補修用ポリマーセメントモルタルの表面塩化物イオン量は，10%の塩化ナトリウム溶液に浸漬したことを考慮すると少ない値であり，さらに試験を継続した場合，経時とともに増加し，やがて一定値に収束していく可能性が高いと考えられる。

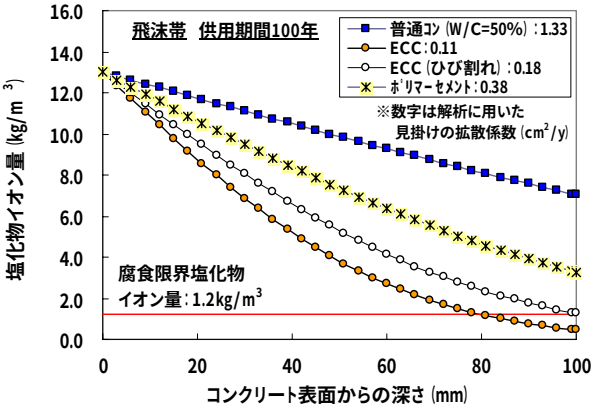
一方，ECC の見掛けの拡散係数は，普通コンクリートの 1/10 程度の小さな値であった。土木学会コンクリート標準示方書 [3] の推定式によれば，普通コンクリートの水セメント比が 50%から 32%まで低くなると，見掛けの拡散係数は 1/5 程度となる。ECC の試験結果は，普通コンクリートの水セメント比の低減効果よりも小さな値を示しており，PVA 繊維やフライアッシュ，膨張剤などによる緻密化の影響を受けていることが伺える。

補修用ポリマーセメントモルタルは，普通コンクリートよりも表面塩化物イオン量が多く，見掛けの拡散係数が 3/10 程度の値となり，本試験では，ECC の方が見掛けの拡散係数を低減できる結果となった。

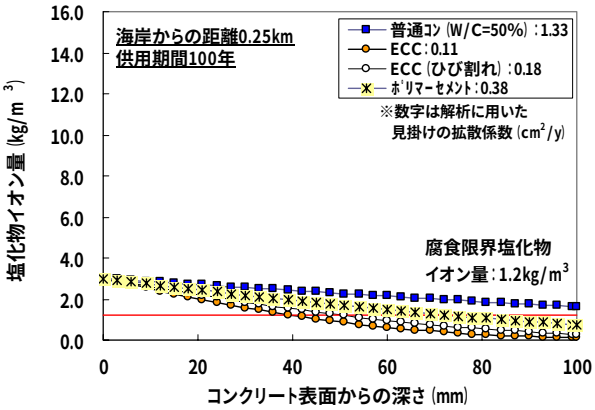
3.2 実構造物を想定した塩化物イオン浸透予測

(1) 塩化物イオン浸透予測方法

Fick の第 2 法則の解により，普通コンクリート，ECC および補修用ポリマーセメントモルタルを，実構造物に適用した場合の塩化物イオン浸透予測を行った。ポリプロピレン繊維補強コンクリートについては，普通コンクリートと同等の塩化物イオン浸透性であったため，予測から除いた。ここで，予測で想定した環境条件は，飛沫帯および海岸から 0.25km の距離の 2 ケースとした。予測に用いた表面塩化物イオン量は，室内試験で収束値を得られなかった可能性も考慮し，材料間に差異がないものと仮定して，それぞれ土木学会コンクリート標準示方書 [3] に示される 13.0kg/m^3 および 3.0kg/m^3 とした。また，見掛けの拡散係数については，室内試験の値をそのまま予測に適用することはできないと考えられるが，材料間の相対的な比は変わらないものと考え，土木学会コンクリート標準示方書 [3] に示される式によって水セメント比が 50%の普通コンクリートの値を推定した後，室内試験の比によって他の材料の値を推定した。



図－6　飛沫帯における予測結果



図－7　海岸から 0.25km における予測結果

また，既往の研究 [8] では，梁試験体の静的加力試験によって，ECC の優れたひび割れ分散性が確認されている。このひび割れ分散性が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を把握するため，

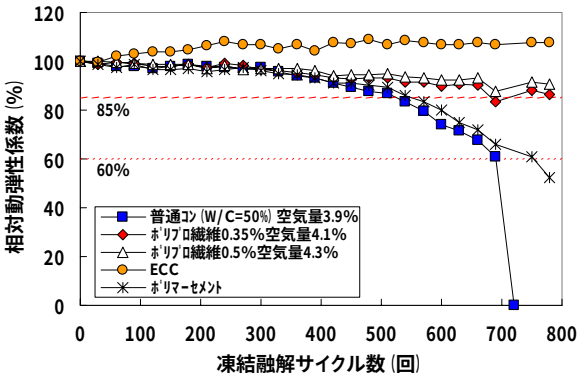
静的加力試験で得られたひび割れ分布における予測を行った。静的加力試験で得られた ECC 試験体の平均ひび割れ幅および平均ひび割れ間隔は，それぞれ 0.07mm および 25mm であった。以上のデータを基に，土木学会コンクリート標準示方書 [3] の方法によって，ひび割れ発生状態における見掛けの拡散係数を算出した。ここで，土木学会コンクリート標準示方書 [3] の推定式はコンクリートの平均的な見掛けの拡散係数を推定するものであり，ひび割れ位置における直接の値を求めるものではないことに留意する必要がある。

(2) 塩化物イオン浸透予測結果

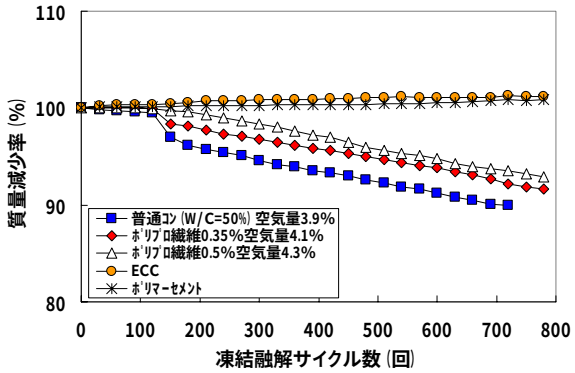
供用期間 100 年における塩化物イオン浸透予測結果を，**図－6** および**図－7** にそれぞれ示す。同図より，いずれの環境条件においても，普通コンクリート，補修用ポリマーセメントモルタル，曲げひび割れ有りの ECC および曲げひび割れ無しの ECC の順に塩化物イオンの浸透を抑制できる結果となった。飛沫帯において，普通コンクリートおよび補修用ポリマーセメントを適用する場合，かぶりを 100mm としても鉄筋が腐食する結果となった。それに対し，ECC を適用する場合には，かぶりを 80mm 程度確保すれば鉄筋腐食を生じず，さらに曲げひび割れが発生する場合であっても，かぶりを 100mm 程度とすれば鉄筋腐食を生じない結果となった。

海岸から 0.25km の距離において，普通コンクリートを適用する場合，かぶりを 100mm としても鉄筋腐食を生じる結果となった。一方，ECC を適用する場合には，曲げひび割れ無しおよび有りの場合において，かぶりをそれぞれ 40mm 以上および 50mm 以上とすれば鉄筋腐食を生じない結果となった。また，補修用ポリマーセメントモルタルの場合，かぶりを 75mm 以上とすれば鉄筋腐食を生じない結果であった。

ここで，いずれの環境条件においても，ECC を適用する場合には，腐食発生限界塩化物イオン量が多くなる可能性があり，かぶりをより小さくできる可能性が高いものと考えられる。



図－8　相対動弾性係数



図－9　質量減少率

4. 凍結融解抵抗性に関する検討

4.1 凍結融解試験結果

相対動弾性係数および質量減少率をそれぞれ**図－8** および**図－9** に示す。同図より，凍結融解試験を 780 サイクルまで継続した結果，普通コンクリートおよび補修用ポリマーセメントモルタルの相対動弾性係数は 60%以下まで低下した。それに対し，ポリプロピレン繊維補強コンクリートは，0.35Vol.%および 0.5Vol.%のいずれも 85%程度を保持し，ECC はほぼ 100%のままであった。これは，有機繊維の架橋によって，微細ひび割れの発生が抑制されたことによるものと考えられる。この結果より，ポリプロピレン繊維補強コンクリートは，塩化物イオン浸透性が普通コンクリートと同程度であるが，凍結融解抵抗性に優れる特長があることが確認された。

一方，質量減少率については，普通コンクリート，ポリプロピレン繊維補強コンクリートの 0.35Vol.%および 0.5Vol.%の値が低下する傾向があり，ECC および補修用ポリマーセメントモルタルは低下しない結果となった。この理由とし

て，ECC は，ポリプロピレン繊維補強コンクリートよりも細く短い繊維を多量に使用するために架橋効果が高かったことが考えられ，補修用ポリマーセメントモルタルについては，連続した網状構造のポリマーフィルムの形成[6]によって表面の損傷が抑制されたことが考えられる。加えて，いずれの材料も低水結合材比であることが影響を及ぼした可能性もある。

4.2 凍結融解抵抗性に関する考察

土木学会コンクリート標準示方書[3]では，凍結融解作用に関する照査方法として，相対動弾性係数の最小限界値を示している。この最小限界値は，気象条件，断面および構造物の露出状態に応じて設定されるものであり，例えば，水で飽和される条件において，断面の厚さが200mm以下と薄い場合に最も高い85%に設定され，水で飽和されない一般的な断面の場合には60%に設定される。本試験において，相対動弾性係数が 60%を下回ったのは，普通コンクリートおよび補修用ポリマーセメントモルタルであった。普通コンクリートの相対動弾性係数が85%および 60%を下回ったサイクル数は，それぞれ 540 サイクルおよび 720 サイクルであり，補修用ポリマーセメントモルタルでは，それぞれ 570 サイクルおよび 780 サイクルであった。ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよびECC は，先に示したとおり，780 サイクルにおいてほぼ 85%以上を保持することができる。この結果より，いずれの材料も 300 サイクルの段階では相対動弾性係数 85%以上を保持しており，一般的な凍害環境における耐久性を確保していることが考えられる。さらに凍結融解作用条件が厳しい場合や設計耐用期間を長く設定する場合には，780 サイクルにおいて 85%以上の相対動弾性係数を保持していたポリプロピレン繊維補強コンクリートおよびECCが有効と考えられる。特にECCは780サイクルにおいて100%近い値を保持しており，重要構造物への適用性も高いものと考えられる。

5. まとめ

有機繊維補強セメント複合体の塩化物イオン浸透性および凍結融解抵抗性について，本実験の範囲では，以下のことが明らかとなった。

(1) 剥落防止を目的として適用されるポリプロピレン繊維補強コンクリートの塩化物イオン浸透性は，普通コンクリートと同等である。

(2) ECC は，表面の塩化物イオン量が多くなる傾向があるものの，塩化物イオン浸透を抑制することができる。その見掛けの拡散係数は，普通コンクリートの 1/10 程度の値である。また，固定化される塩化物イオン量の割合が高く，腐食限界塩化物イオン量が多くなる可能性がある。

(3) ポリプロピレン繊維補強コンクリートおよび ECC とも，繊維の架橋によって微細ひび割れを抑制できるため，凍結融解抵抗性に優れている。特に ECC は，繊維の高い架橋効果により，凍結融解試験の 780 サイクルまで，表面の損傷もほとんど生じない。

参考文献

1) 平石剛紀，坂田昇，矢吹増男，細田常正：剥落防止を目的とした有機系繊維補強コンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.469-474，2001.7
2) 閑田徹志，斉藤忠，坂田昇，平石剛紀：PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による吹付け補修材料の基礎的特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.475-480，2001.6
3) 土木学会：コンクリート標準示方書［施工編］，2002
4) 岡田浩司，堤知明，横関康祐，本橋賢一：コンクリート中への塩化物イオンの浸透速度の定量化に関する実験的検討，土木学会年次学術講演会，Vol.50，pp.286-287，1995.9
5) 出村克宣：セメント混和用ポリマー，コンクリート工学，Vol.33，No.3，pp.25-29，1995.3
6) 宮里心一ほか：高靱性セメント複合材料の曲げひび割れ部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度，JCI 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，pp.141-148，2003.12
7) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向（その２），2000.12
8) 一宮利通ほか：ECC の道路橋床版への適用性に関する検討，土木学会年次学術講演会，Vol.56，2001.9