

論文 高緻密性材料の塩分浸透性評価に関する研究

坂本 淳^{*1}・新藤 竹文^{*2}・丸屋 剛^{*2}・杉山 隆文^{*3}

要旨：本論文は，超高強度繊維補強コンクリート等の高緻密なコンクリートの実効拡散係数を電気泳動法により測定した結果と乾湿繰返しかつ塩水噴霧条件下における促進腐食試験結果を報告するものである。試験の結果から，超高強度繊維補強コンクリートの実効拡散係数は水セメント比 35% の高強度コンクリートに対して 1/100 以下であり，2 年近く経過した促進腐食試験においても塩化物イオンの浸透はみられず，同コンクリートの遮塩性能が極めて高いこと等が明らかとなった。

キーワード：実効拡散係数，超高強度繊維補強コンクリート，電気泳動法，促進腐食試験

1. はじめに

近年，高強度，高じん性，高耐久性などの特徴を有する超高強度繊維補強コンクリート（以下，UFCと記す）が開発され，PC橋梁構造物などに適用されている¹⁾。UFCにおいては，鋼繊維の健全性が構造耐力に直結することから，塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維および内部鋼材の腐食に関する耐久性照査を行う上で，塩化物イオンに対する拡散係数を適切に評価する必要がある。

しかし，UFCの水結合材比は 22%以下と極めて低いことから，JSCE-G572 等に規定される浸せき方法による評価試験から塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価するには極めて長期の試験期間を要する²⁾。このため，比較的短期間で塩化物イオンの実効拡散係数の評価が可能な電気泳動法による評価試験³⁾の適用が考えられるが，鋼繊維を混入した水結合材比の極めて低い配合であるため，JSCE-G571 に規定された試験方法では適切な評価が行えないことが予想される。

そこで，本研究では JSCE-G571 に規定された電気泳動法を参考に，UFC など高緻密性材料を対象とした塩化物イオンの実効拡散係数の評価を試みた。また，乾湿繰返しかつ塩水噴霧条件

下で行う過酷な促進腐食試験を同時に実施し，同材料の遮塩性能を併せて評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究で対象とした，UFC および水セメント比 35% の高強度コンクリートの配合と使用材料を表 - 1，表 - 2 に示す。

UFCに用いたプレミックス粉体材料は，セメント，シリカフューム，珪石微粉末などがあらかじめ混合されたものである。電気泳動法による塩化物イオンの実効拡散係数の測定では，印加に伴う鋼繊維の腐食が予想されたため，鋼繊維無混入配合を標準としたが，試験的に鋼繊維混入配合も対象とした。また，促進腐食試験では文献⁴⁾に示される標準量（2vol%）の鋼繊維を添加した。供試体打込み後の養生は，20（48 時間）の湿潤養生を行った後，90（48 時間）の蒸気養生を施した。

高強度コンクリートについては表 - 2 に示す配合を標準とし，促進腐食試験においてはコンクリート中の鋼繊維腐食状況を UFC と比較するため，コンクリート配合を 5mm ふるいによりウェットスクリーニングしたモルタルに対して，

*1 大成建設（株） 技術センター 土木技術開発部 主任研究員 工修（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター 土木技術研究所 主席研究員 工博（正会員）

*3 群馬大学 工学部 建設工学科 工博（正会員）

UFC に用いた鋼繊維を 0.5vol% 添加した配合で試験を行った。

2.2 試験項目および方法

(1) コンクリートの品質確認試験

各コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサを用いて行った。練上がり後、UFC については JIS R 5201 に規定されるフロー試験（落下なし）によりフローを、JIS A 1116 により空気量を測定した。高強度コンクリートについては、JIS A 1101 によりスランプを、JIS A 1128 により空気量を測定した。促進腐食試験開始前には 100 × 200mm 供試体による圧縮強度（JIS A 1108）、40 × 40 × 160mm 供試体による曲げ強度（JIS A 1106）を測定した。これらの試験結果を表 - 3 に示す。この内、各種強度試験結果については UFC は所定の養生終了から 67 日後、高強度コンクリートについては材齢 78 日における結果である。

(2) 電気泳動法による実効拡散係数の測定

コンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数は、JSCE-G571 に規定される電気泳動法を参考にして測定した。試験装置、供試体の前処理などは同規準に準拠したが、UFC は緻密性が高いため、測定に要する時間が著しく長くなるものと予想された。また、同規準は鋼繊維を混入したコンクリートは対象としていないことから、供試体の厚さ、印加電圧、および鋼繊維混入の有無については事前に検討することとした。

検討内容は表 - 4 に示すように、供試体の厚さは 20、50mm とし、電位勾配が一定となるよう（1.2V/mm）、印加電圧を各々 24、60V とした場合を比較した。また、鋼繊維を標準量混入した UFC についても試験を行い、供試体がどのような状態になるかを確認した。この場合、供試体は鋼繊維混入配合で打ち込んだ供試体から測定用供試体をカット成形したものの他に、鋼繊維無混入配合で鋼繊維混入配合を挟み込むように打ち重ねた供試体からカット成形した測定用供試体（厚さ 30mm = 中央部に鋼繊維混入部 20mm + 上・下に鋼繊維無混入部 5mm ずつ）を用いた。

高強度コンクリートについては JSCE-G571 に

表 - 1 UFCの配合 (kg/m³) および使用材料

対象試験	水	プレミックス粉体	鋼繊維	高性能減水剤 ^{注)}
実効拡散係数測定	160	2300	0	24
促進腐食試験	157	2254	157	23
・プレミックス粉体：密度2.82g/cm ³				
・鋼繊維： 0.2 × 15mm				

注) 高性能減水剤は水の一部とした。

表 - 2 高強度コンクリートの配合 (kg/m³) および使用材料

水	普通ポルトランドセメント	細骨材	粗骨材	高性能減水剤
164	469	764	937	4.5
・普通ポルトランドセメント：密度3.15g/cm ³				
・細骨材：砕砂と山砂の混合砂，表乾密度2.63g/cm ³				
・粗骨材：碎石，Gmax20mm，表乾密度2.67g/cm ³				

表 - 3 コンクリートの品質

配合	ワ- (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
UFC (鋼繊維無混入)	257	-	5.1	182	19.6
UFC (鋼繊維混入)	232	-	4.9	194	45.5
高強度コンクリート	-	15.5	5.7	76	9.0 ^{注)}

注) 高強度コンクリートの曲げ強度は、5mm ふるいでウェットスクリーニングした試料に鋼繊維を添加した配合に関する測定値

表 - 4 実効拡散係数測定に関する事前検討内容

配合	供試体の作製方法	供試体厚 (mm)	印加電圧 (V)
UFC (鋼繊維無混入)	一層打ち	20	24
		50	60
UFC (鋼繊維混入)	一層打ち	20	24
		50	60
UFC (鋼繊維無混入 + 混入)	打重ね ^{注)}	30	40

注) 鋼繊維無混入配合で混入配合 20mm 厚を挟み込むように打ち重ねた。

準じた試験条件で測定し，試験開始時の材齢は44日または52日とした。

(3) 促進腐食試験

促進腐食試験は，雰囲気温度および塩水の噴霧を自動的に制御可能な複合サイクル試験機を使用して行った。試験条件は表 - 5 に示すように，湿潤状態と乾燥状態の繰返しを8時間/サイクルで行い，湿潤状態時には3%食塩水を噴霧させた。供試体は40×40×160mmとし，塩分の浸透を一方向からとするため，型枠の一側面(40×160mm)を暴露面として残り5面に同様なシーリングを施した。また，UFCは前記の条件で湿潤・蒸気養生を施し，高強度コンクリートは試験開始材齢(55日)まで標準水中養生とした。

試験開始から適当な時期に供試体を試験機から取り出し，曲げ強度試験の他に，JCI-SC4による全塩化物イオン濃度分布の測定，電子線マイクロアナライザ(EPMA)による塩化物イオンの濃度分布の観察，フルオレセインナトリウム溶液法による腐食深さの測定，およびフェノールフタレイン法による中性化深さの測定を行った。

3. 実験結果

3.1 電気泳動法による実効拡散係数の測定結果

(1) 試験条件に関する事前検討結果

鋼繊維無混入のUFCを対象に電位勾配を一定(1.2V/mm)として，供試体の厚さと印加電圧の組合せを検討した事前検討試験の結果を図 - 1 に示す。供試体の厚さ50mmの場合は測定に163日要したのに対し，厚さ20mmの場合はその約1/4である40日で測定を終了することができた。電位勾配を一定としたため，供試体の厚みが厚いほど塩化物イオンの電気泳動が定常化するのに時間を要したためと考えられる。しかし，水セメント比55%の一般的なコンクリートをJSCE-G571に規定される試験条件下で測定する場合は11日程度⁵⁾で済むことに比べると，UFCについては長期の測定時間を要することがわかった。

また，算出された実効拡散係数は印加電圧60V

表 - 5 促進腐食試験の試験条件

環境状態	温度	湿度	付与時間 (温度上昇・ 降下時間含む)
湿潤	35	100% (3%食塩水を噴霧)	3hr/サイクル
乾燥	50	100%未満	5hr/サイクル

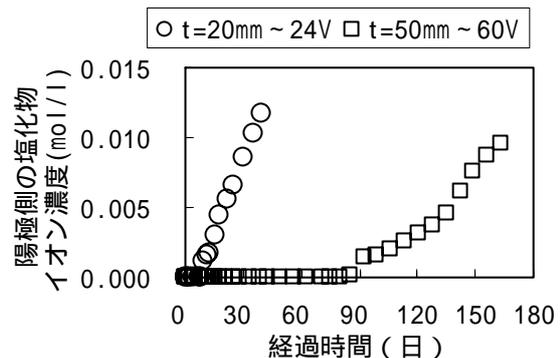


図 - 1 電気泳動試験における供試体の厚さ・印加電圧に関する事前検討試験結果(UFCの鋼繊維無混入配合)

(厚さ50mm)の場合が $3.23 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{年}$ ，印加電圧24V(厚さ20mm)の場合は $7.00 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{年}$ であり，2倍程度の差が生じた。水セメント比55%のコンクリートを対象にした既往の研究では，印加電圧が大きいほど実効拡散係数は大きくなることが報告されており⁵⁾，本試験では両ケースで供試体の厚さは異なるものの，印加電圧と実効拡散係数との関係において逆の傾向がみられた。この要因として，供試体の厚さ50mmのケースでは試験前の真空吸水が不十分であったことなどが考えられるが，この事前検討試験では各ケース共に供試体数は1体としたことや，後記の試験結果でも $3 \sim 9 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{年}$ 程度の範囲でデータがばらついていることなどを考慮すると，本試験におけるUFCの両ケースの差はばらつきの範疇であるとも考えられる。

次に，鋼繊維を混入したUFCで打ち込んだ供試体を使用した場合は，供試体の厚さと印加電圧の組合せに関わらず，試験開始から数時間後に鋼繊維に錆が発生し，陰極側のNaCl溶液中に

茶褐色の鉄錆が沈殿し始め、塩素ガスの発生が懸念されたため、試験を中止した。

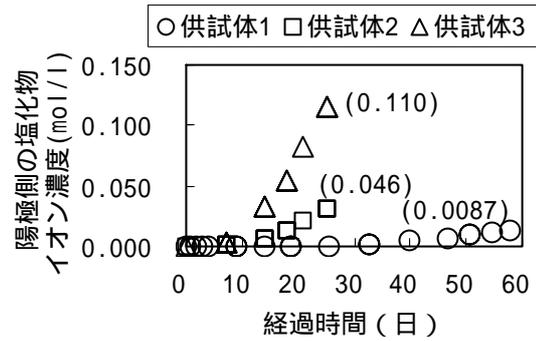
鋼繊維無混入配合で鋼繊維混入配合を挟み込むように打ち重ねて作製した供試体の場合は、試験開始初期にこのような変状は発生せず、図-2に示す試験結果が一応は得られたが、3体の供試体について測定された実効拡散係数には大きなばらつきが生じた。供試体2および3では試験の途中で内部の鋼繊維が腐食してひび割れが生じており、その程度に応じて塩化物イオンの泳動が容易になった結果、このようなデータのばらつきが生じたものと考えられる。また、供試体1では鋼繊維の腐食によるひび割れは観察されず、前記した鋼繊維無混入の場合の実効拡散係数に比較的近い値であった。したがって、打重ねにより作製したUFC供試体を電気泳動試験に適用することの妥当性については、現状では明確でなく、今後も引き続き検討していく必要があると思われる。

以上の検討結果より、UFCについては鋼繊維混入配合では試験途中で鋼繊維の腐食が生じる場合があり、妥当な試験データが得られないことから、繊維無混入配合の供試体を用いることとした。また、供試体の厚さおよび印加電圧は、測定時間の短縮化を考慮し、厚さ20mm、印加電圧24Vを採用することとした。

(2) UFCおよび高強度コンクリートの実効拡散係数

鋼繊維無混入のUFCおよび高強度コンクリートの電気泳動試験結果を図-3に示す。事前検討試験の結果と同様に、UFCの場合は測定に40日程度を要した。得られたデータを基に算出した実効拡散係数を表-6に示す。

高強度コンクリートに比べてUFCは1/100程度小さい値となっており、浸せき試験により評価された一般のコンクリートと鋼繊維を混入したUFCの見掛けの拡散係数でも同等の相対差であることが報告されている²⁾。したがって、本試験では鋼繊維無混入配合とし、供試体厚や印加電圧をJSCE-G571に規定される試験条件から



注) カッコ内数値は実効拡散係数 (cm²/年) を示す
 図-2 鋼繊維無混入・混入配合を打ち重ねて作製した供試体の電気泳動試験結果

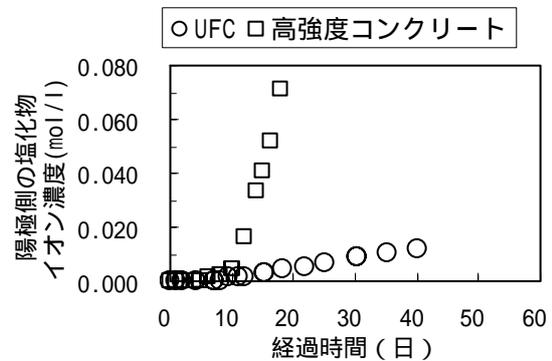


図-3 電気泳動試験結果

表-6 実効拡散係数測定結果

配合	実効拡散係数 (cm ² /年)	
	測定値	平均値
UFC	3.05×10^{-3}	6.38×10^{-3}
	6.91×10^{-3}	
	9.18×10^{-3} (注)	
高強度 コンク リート	9.05×10^{-1}	8.47×10^{-1}
	7.98×10^{-1}	
	8.39×10^{-1}	

注) 印加電圧 40V で測定

変更して実施したが、UFCの塩化物イオンに対する拡散係数について妥当な評価が行えたものと考えられる。なお、表-6に示すように一定の印加電圧24Vとした場合、および印加電圧の異なる場合(24V, 40V)の各々について測定結果に数倍の差が生じた。UFCの拡散係数は高強度コンクリートの100分の1程度と著しく小さいために、供試体の作製方法や試験条件などの影響が比較的大きく結果に反映されたものと思わ

れる。

3.2 促進腐食試験結果

(1) 塩化物イオンの浸透状況

促進腐食試験の開始から 2 週間程度で両配合共に、供試体の暴露表面の鋼繊維に点錆が生じた。図 - 4 は、試験開始から 96 週間経過した時点で調べた、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ 供試体内部の全塩化物イオン濃度測定結果である。高強度コンクリートは暴露表面から 15mm 程度までが鋼材腐食発生限界濃度 (1.2kg/m^3) に達しているのに対し、UFC は暴露表面のごく近傍数 mm であり、それより深い位置では試験開始から全塩分量の変化はみられない。また、UFC については暴露表面近傍の鋼繊維のみ腐食しただけで、供試体内部の鋼繊維に腐食は全くみられなかった。高強度コンクリートの場合は暴露表面から 20mm 程度までの鋼繊維に軽微な腐食がみられた。

EPMA による $40 \times 40\text{mm}$ 断面の塩化物イオン濃度を観察した結果を写真 - 1 に示すが、この結果からも図 - 4 に示した全塩分量分布と同様に、両配合の塩化物イオン浸透深さに顕著な差が生じていることがわかる。さらに、フルオレセインナトリウム溶液を供試体断面に噴霧し、目視により確認した腐食深さについても、同等の結果が得られている。中性化については、両配合共に試験開始から 96 週間経過した時点では生じていなかった。以上のように、塩化物イオンの浸透深さについて数種類の方法により評価したが、UFC と高強度コンクリートの遮塩性能には顕著な差があることが確認された。

次に、図 - 4 に示した全塩化物イオン濃度分布を基に JSCE-G573 に準じて回帰分析により見掛けの拡散係数を求めた。回帰分析結果は図 - 5 に示すとおりであり、高強度コンクリートの見掛けの拡散係数は $0.18\text{cm}^2/\text{年}$ 程度であった。一方、JSCE-G571 付属書では電気泳動法により求められた実効拡散係数にコンクリートの空隙率や塩化物イオンの固定化に関する換算係数 ($k_1 \cdot k_2$) を乗じることにより、電気泳動試験による見掛けの拡散係数を求める方法が示され

ている。これによれば、普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比 35% 配合の ($k_1 \cdot k_2$) は、0.3 程度であることから、これと表 - 6

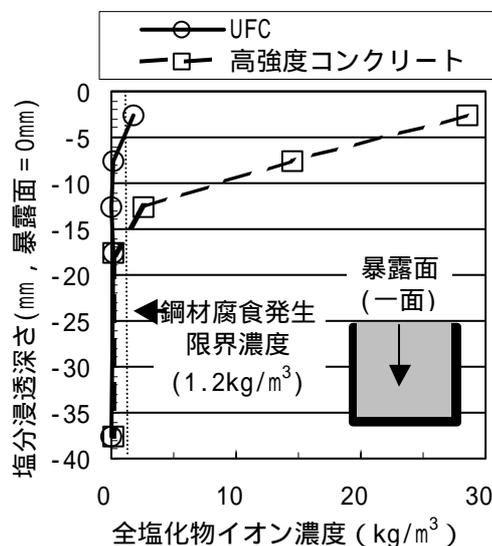


図 - 4 促進腐食試験における塩分浸透分布状況 (試験開始から 96 週間後)

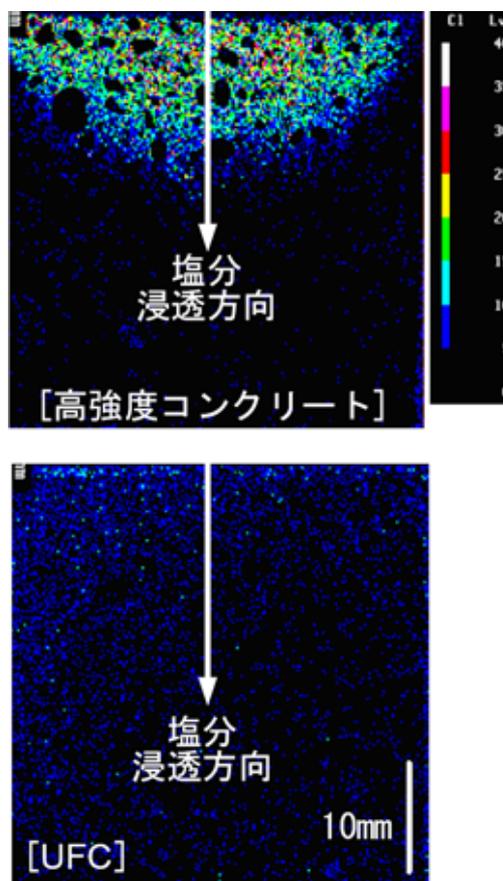


写真 - 1 促進腐食試験における EPMA 分析結果

に示した電気泳動法による高強度コンクリートの実効拡散係数測定結果から、電気泳動試験による同コンクリートの見掛けの拡散係数を求めると、 $0.25 \text{ cm}^2/\text{年}$ 程度となった。

2種類の試験方法により評価した見掛けの拡散係数に差が生じた要因の一つとしては、試験時の材齢が挙げられる。すなわち、電気泳動法の場合は試験の特性上、材齢44~70日程度の短期間で測定を行ったのに対し、促進腐食試験の場合は材齢55~672日の長期間にわたって評価した結果であり、この試験時の材齢の違いは硬化体の空隙構造や塩化物イオンの固定化に影響するものと考えられる。比較的若材齢時に試験を行った前者の方が後者に比べて空隙も粗く、塩化物イオンを固定化する水和生成物も比較的少ないと考えられる⁵⁾ことから、電気泳動法により評価した場合の方が若干大きくなったものと考えられる。

以上より、促進腐食試験の試験条件は適切なものであり、本試験によりコンクリートの遮塩性能を適切に評価することが可能であると考えられる。

(2) 強度特性の変化

試験開始から96週間後の時点で曲げ強度試験を行ったが、どちらの配合も促進腐食試験に供した後の曲げ強度には大きな変化がみられず、試験開始前と同等の強度であった。前記のように、高強度コンクリートの場合は鋼繊維に軽微な腐食がみられたが、曲げ強度の低下が生じるほどの腐食ではなかったものと推察される。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

(1) UFCを対象として電気泳動による塩化物イオンの実効拡散係数試験を実施する場合には、鋼繊維無混入配合とし、JSCE-G571に規定される供試体の厚さや印加電圧を適切に変更して実施することにより、比較的短期間で妥当な試験結果が得られた。

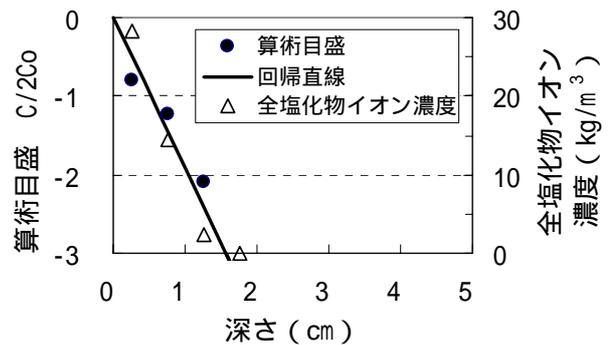


図 - 5 正規確率紙を用いた回帰分析結果

- (2) UFCの塩化物イオンの実効拡散係数は $6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{年}$ 程度であり、水セメント比35%の高強度コンクリートと比較すると、1/100以下の値であった。
- (3) 乾湿繰返しおよび3%食塩水の噴霧を伴う促進腐食試験を2年間近く実施した結果、UFCへの塩化物イオンの浸透はほとんどみられず、水セメント比35%の高強度コンクリートに比べて極めて遮塩性能の高いことが確認された。

参考文献

- 1) 田中良弘ほか：PC 橋梁に用いた超高強度繊維補強コンクリートの用途開発，コンクリート工学，Vol.41，No.3，pp.26-32，2003.3
- 2) 兵頭彦次ほか：超高強度繊維補強コンクリートの塩分浸透性と鋼繊維の腐食に関する実験的検討，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，No.V-506，pp.1009-1010，2004.9
- 3) 杉山隆文：コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験を算定するための電気的手法を用いた新しい促進試験方法，コンクリート工学，Vol.35，No.5，pp.29-32，1997.5
- 4) 土木学会コンクリート委員会：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.1，2004.9
- 5) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート技術シリーズ55 コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向，pp.5-65，2003.9