

論文 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの塩分浸透に対する抵抗性に関する研究

石関 嘉一^{*1}・平田 隆祥^{*2}・玉滝 浩司^{*3}・吉田 浩一郎^{*4}

要旨: 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートは、超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete : 以下 UFC と表記) と呼ばれる材料に含まれる。現行の UFC は給熱養生を行うのに対して、常温硬化型 UFC は給熱養生を行わない。そのため、常温硬化型 UFC は現行の UFC と比較して、塩分浸透抵抗性に影響を及ぼすマトリックスの細孔構造が異なる可能性がある。そこで、常温硬化型 UFC の塩分浸透抵抗性を確認する目的で、モルタルの細孔径を測定し、各種の塩化物イオンの浸入試験を実施した。その結果、常温硬化型 UFC は現行の UFC と比較して同等以上の塩分浸透抵抗性を有していることが確認できた。

キーワード: 常温硬化型, 超高強度, 繊維補強, UFC, 塩分浸透, 鋼繊維, 細孔径, オートグレーブ, EPMA

1. はじめに

近年、超高強度かつ高じん性な超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength Fiber reinforced Concrete : 以下 UFC と表記) は、優れた材料特性を生かして構造部材に適用することにより、構造部材の断面縮小、使用材料の減少、長期耐久性の向上など多くの合理化が図られている次世代の建設材料として期待されている¹⁾。

UFC は、超高強度モルタルと高強度鋼繊維で構成²⁾されており、 150N/mm^2 以上の圧縮強度と 5N/mm^2 以上の引張強度を持つ材料と定義されている。2004年には、土木学会より超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)²⁾ (以下「指針」と表記) が発行されており、今後、これらの材料を使用した構造物は増加すると予想される。しかし、既存の UFC は給熱養生が必要なため、工場生産が基本であり、設計や施工に大きな制限を生じてしまう。また、給熱養生に必要な設備の建設コストや熱養生のエネルギーコスト、運搬コスト等により通常のコンクリート構造物と比較してコストの増加となる。そこで、著者らは、設計や施工に影響が少なく、現場での施工が可能な常温で硬化する UFC 材料を開発した³⁾。常温硬化型 UFC は常温で高強度を発現するプレミックス材⁴⁾を使用するため、給熱養生が不要となり製造場所を選ばなくなる。また、給熱養生のコストや運搬コストが削減されたことにより、大幅なコスト縮減に寄与している。さらに、常温硬化型の UFC はレディーミクストコンクリートと同様に、施工場所の近隣の生コンプラントで製造⁵⁾できるため、施工可能な地域が増大し、既存の UFC と比較して施工性が飛躍的に向上することが期待されている。

UFC はマトリックスが緻密な構造のため、中性化、凍結融解抵抗性、塩分浸透性抵抗性等の耐久性が、普通コンクリートや高強度コンクリートと比較して著しく向上する。特に塩分浸透抵抗性は著しく高い²⁾ため、設計耐用年数を100年に設定することが可能となった。そのため、塩害による鉄筋腐食が激しい飛沫帯などの鉄筋コンクリート構造物および劣化補修やリニューアルに用いる断面修復材等に適している。しかし、現行の UFC は給熱養生により硬化させるのに対して、常温硬化型の UFC は給熱養生を行わない。そのため、常温硬化型の UFC は現行の UFC と比較して、塩分浸透抵抗性に影響を及ぼすマトリックスの硬化の過程が異なると考えられる。そこで、常温硬化型の UFC の塩分浸透抵抗性が現行の UFC と比較して、同等以上であることを確認する必要があると考えた。なお、現行の UFC と常温硬化型の UFC の強度レベルは同程度であることから、マトリックスの構造は、同様であると思われるため、マトリックスの構造に起因する細孔径が同程度であれば、現行の UFC と常温硬化型の UFC の塩分浸透抵抗性は同程度であると考えた。

本論は常温硬化型の UFC の塩分浸透抵抗性を確認する目的で、モルタルの細孔径を測定し、各種の塩化物イオンの浸入試験を実施した結果について論述した。

2. 実験概要

2.1 使用材料の諸物性

(1) 構成材料

常温硬化型の UFC のモルタル部分は、セメント等の反応性微粉末と微粉細骨材を混合したプレミックス粉体、水、細骨材、および特殊高性能減水剤 (SP) で構成され

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 工博 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 工博 (正会員)

*3 宇部興産(株) 建設資材カンパニー 技術開発研究所 コンクリート開発部 工修 (正会員)

*4 宇部興産(株) 建設資材カンパニー 技術開発研究所 コンクリート開発部 主席研究員 (正会員)

ている。また、空気量は消泡剤を用いて、3.5%以下に調整した。配合を表-1に示す。

鋼繊維には一般建設用鋼繊維とは異なる高強度鋼繊維を使用した。使用した鋼繊維を写真-1に示す。高強度鋼繊維は、延伸製法により製造された自動車タイヤに使用するスチールコードである。表面は真ちゅうでメッキされている。一般的な建設用鋼繊維の引張強度1,000N/mm²に対して、引張強度は2,000N/mm²以上で、形状はすべて直線である。

(2) フレッシュ性状および硬化物性

モルタルのフレッシュ性状は、鋼繊維 2%混入後モルタルフロー値が 260±30 mmで、鋼繊維 2%混入後スランプフロー値が 800±100 mmの範囲で流動性が良好であり、間隙が 30 mm以下の偏狭部においても閉塞することなく充填が可能である。なお、モルタルの品質試験項目および判定基準を表-2、モルタルフローを写真-2に示す。

常温硬化型の UFC は高じん性高強度であり、圧縮強度 180N/mm²以上、引張強度 8.8N/mm²以上の材料強度を有している。また、収縮ひずみは材齢 190 日において 660×10⁻⁶程度である。なお、常温硬化型の UFC の特性値を表-3に示す。

2.2 試験項目と試験方法

(1) 細孔構造

細孔構造をコンクリート中の細孔分布から判断した。細孔分布の測定は水銀圧入法とし、ポロシメーターで実施した。測定に影響を及ぼす鋼繊維を排除する目的で、鋼繊維を添加していないモルタルを用いた。養生方法は標準養生とした。なお、試験は表-4に示す条件で実施した。

(2) 塩化物イオンの拡散係数

JSCE-G572-2010「浸せき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法(案)」を参考に、

表-1 配合

W/B (%)	単体量 (kg/m ³)				補強繊維 (kg)
	水	プレミックス	細骨材	減水剤	
15.5	230	1830	330	32	157

表-2 品質試験項目および判定基準

試験項目	判定基準
モルタルフロー(mm) (鋼繊維混入率2%)	260mm±30mm
スランプフロー(mm) (鋼繊維混入率2%)	800mm±100mm
空気量(%)	3.5%以下

常温硬化型の UFC を塩水に浸せきさせ、試験体に浸入した塩化物イオンを EPMA 法により測定した。なお、拡散方程式の近似範囲およびコンクリートの表面塩分濃度の設定は UFC 指針に示す森らの方法⁶⁾に準拠した。また、試験条件を表-5に示す。



写真-1 高強度鋼繊維

写真-2 モルタルフロー

表-3 常温硬化型の UFC の特性値

試験項目	特性値	試験方法
圧縮強度	180N/mm ²	JIS A 1108
ひび割れ発生強度	8.0 N/mm ²	JIS A 1113
引張強度	8.8 N/mm ²	JSCE127-3.2.3
ヤング係数	4.6×10 ⁴ N/mm ²	JIS A 1149
ポアソン比	0.2	ゲージ貼り付けにより測定
熱膨張係数	10.7×10 ⁻⁶ /°C	JCI「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」に準拠
クリープ係数	0.7	指針に準拠

表-4 細孔構造試験条件

養生方法	標準養生
試験方法	水銀圧入法
試験機名	オートポアⅢ (マイクロメリテックス社製, 型番 9420)
測定条件	測定範囲 (μm) 0.003~120
	サンプルセル 固体用, 試料室容積 15cm ³ ステム容積 1.1cm ³

表-5 塩化物イオン拡散係数試験条件

養生方法	標準養生 28 日
促進腐食試験方法	塩化物イオン濃度約 6%に浸せき
塩化物イオン濃度の分析方法	電子線マイクロアナライザ (EPMA)
試験体寸法 (mm)	100×100×400
浸せき期間 (月)	6, 9, 12
回帰計算範囲	拡散支配域 6ヶ月: 1.48~1.6mm 9ヶ月: 1.56~1.74mm 12ヶ月: 1.30~1.40mm
初期含有塩化物イオン濃度 Ci	原材料からの持込 Cl 量 (Ci=0.202kg/m ³)

(3) 塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食

塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食に対する抵抗性を評価する目的で、UFC 指針で実施されているオートクレーブ法による促進腐食試験および温海水乾漆繰返しによる促進腐食試験を実施した。

(a) オートクレーブ法による促進腐食試験

塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食に対する常温硬化型の UFC の抵抗性を評価するため、ひび割れ無しとひび割れ有りの試験体を用いて、オートクレーブ法による促進試験を実施した。なお、ひび割れ有り試験体は、アムスラーを用いて、3等分点載荷を実施してひび割れを導入した。ひび割れの制御は試験体底部にパイ型ゲージを設置して行った。試験条件を表-6 に示す。

表-6 オートクレーブ法による促進腐食試験条件

試験条件	ひび割れ無し	ひび割れ有り	
		残留ひずみ 200×10 ⁻⁶	残留ひび割れ幅 0.1mm
養生方法	標準養生 28 日		
試験方法	JCI-SC2 を参照		
曲げ試験方法	3 等分点載荷, アムスラー		
試験体寸法 (mm)	40×40×160	100×100×400	
塩化物イオン量 (kg/m ³)	ひび割れ無し : 0, 6, 13 ひび割れ有り : 13		
促進条件	180°C, 10 気圧, 8 時間保持 (×5, 10 サイクル)		

表-7 温海水乾湿繰返しによる促進腐食試験条件

試験条件	常温硬化型の UFC		比較用 ^{*1} ひび割れ無し
	ひび割れ無し	ひび割れ有り 残留ひずみ 200×10 ⁻⁶ 残留ひび割れ幅 0.1mm	
鋼繊維混入率 (%)	2.0		
養生方法	標準養生 28 日		
促進条件	60°C 海水浸せき 3.5 日 → 送風乾燥 3.5 日 (×15, 30 サイクル)		
塩化物イオン濃度分布分析方法	電子線マイクロアナライザ (EPMA) 塩化物イオン量 0kg/m ³ を対象		
曲げ試験方法	3 等分点載荷, アムスラー		
試験体寸法 (mm)	40×40×160	100×100×400	40×40×160
添加した塩化物イオン量 (kg/m ³)	ひび割れ無し : 0, 6, 13 ひび割れ有り : 0		

※1 配合は繊維無し, 水セメント比 40%, 単位水量 165kg/m³, 単位セメント量 413kg/m³, 細骨材率 43.3%

(b) 温海水乾湿繰返しによる促進腐食試験

塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食に対する常温硬化型の UFC の抵抗性を評価するため、ひび割れ無しとひび割れ有りの試験体および比較試験体を用いて、温海水乾湿繰返しによる促進試験を実施した。なお、ひび割れの導入方法は、オートクレーブ法による促進腐食試験と同様に行った。試験条件を表-7 に示す。

3. 試験結果

3.1 細孔構造

UFC 指針に示されるように、高強度コンクリート (W/C 30%, 標準養生 91 日) の空隙率が 9% 程度であるのに対し、常温硬化型の UFC は、空隙率が材齢 7 日で 7.9% であり、比較的早い時期に緻密な組織が形成されていることがわかる。材齢の経過とともに毛細管空隙に相当する 10~100nm の大きさの空隙は減少し、材齢 91 日では全体の空隙率が 4.1% となり、UFC 指針に示される標準材料の 4% とほぼ同等の値となっている。なお、材齢と空隙率の関係を図-1 に示す。

3.2 塩化物イオンの拡散係数試験

図-2 に示すように浸せき期間が 6 か月から 1 年にかけて、塩化物イオン濃度分布はほとんど変わらず、塩化物イオンの侵入深さはほぼ 2mm 以下である。

また、UFC 指針参考資料 6.3.1 に準じて算出した浸せき期間 6 か月、9 か月および 1 年における塩化物イオンの見かけの拡散係数は、図-3 に示すように、それぞれ 0.0073, 0.0051 および 0.0034 cm²/年と、ほぼ浸せき期間に伴って減少し、浸せき期間 1 年の塩化物イオンの見かけの拡散係数は UFC 指針に示される標準材料の浸せき期間 1 年における見かけの拡散係数と同等の値となっている。よって、浸せき期間の経過に伴う塩化物イオンの侵入は認められないため、拡散係数はさらに小さくなると考えられる。

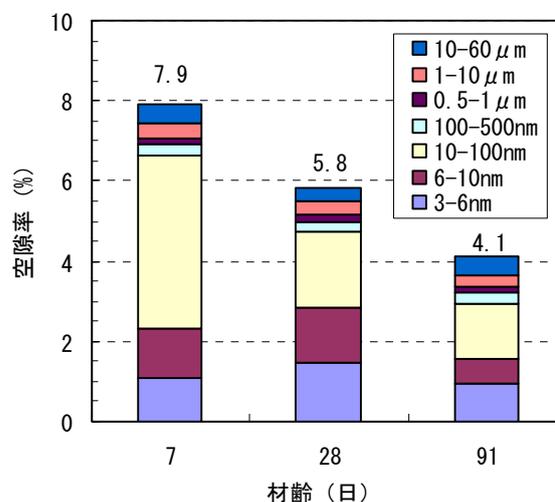


図-1 材齢と空隙率

3.3 塩化物イオンの侵入に伴う鋼繊維の腐食

(1) オートクレーブ法による促進腐食試験

(a) ひび割れ無し

促進サイクル数と曲げ強度の関係を図-4 に示す。促進サイクル数や硬化体中の塩化物イオン量の違いにかかわらず、促進腐食試験後の常温硬化型の UFC の曲げ強度の低下はほとんど認められず、塩化物イオンの侵入に対する鋼繊維の腐食に対して高い抵抗性を示している。

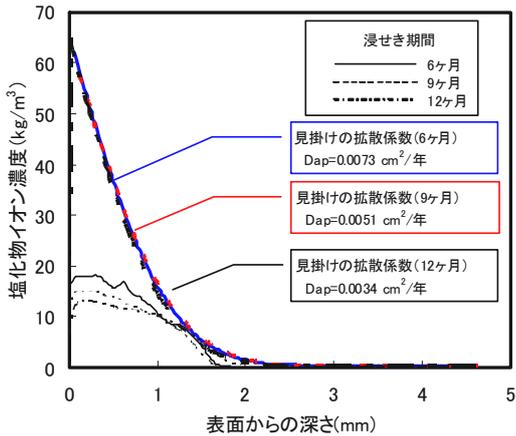


図-2 表面からの浸入深さと塩化物イオン濃度の関係

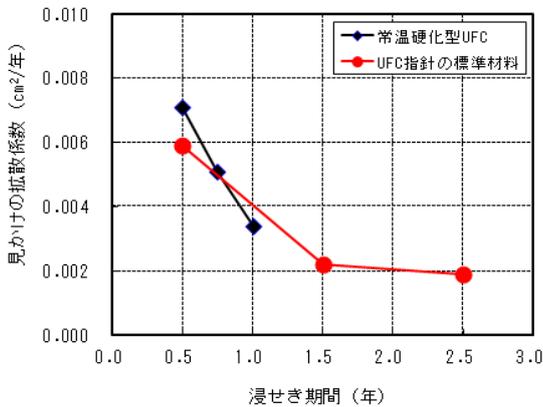


図-3 浸漬期間と見かけの拡散係数の関係

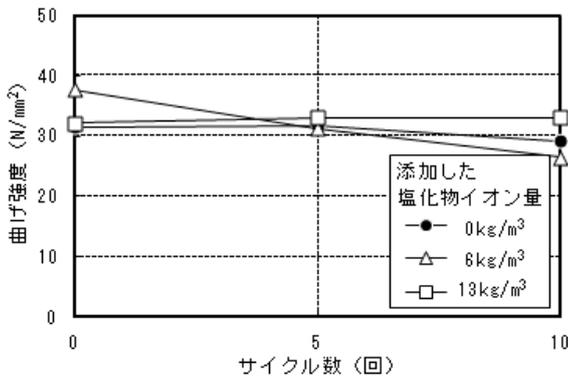


図-4 オートクレーブ法による促進サイクル数と曲げ強度の関係 (ひび割れ無し)

(b) ひび割れ有り

試験結果を図-5 に示す。ひび割れを有する状態で促進腐食養生された常温硬化型の UFC の曲げ強度の低下はほとんど認められなかった。よって、常温硬化型の UFC のマトリクスに混入された鋼繊維は、UFC 指針に示す試験結果と同様に、塩化物イオンの侵入に対して高い腐食抵抗性を示している。

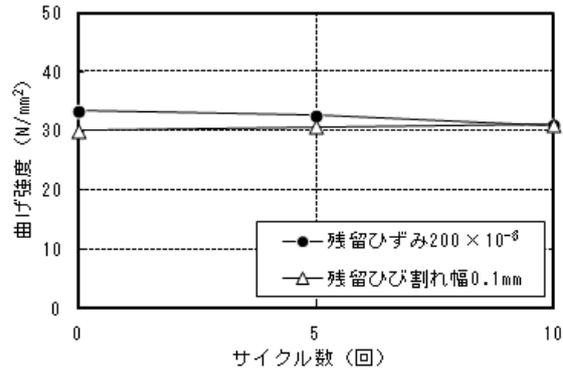


図-5 オートクレーブ法による促進サイクル数と曲げ強度の関係 (ひび割れ有り)

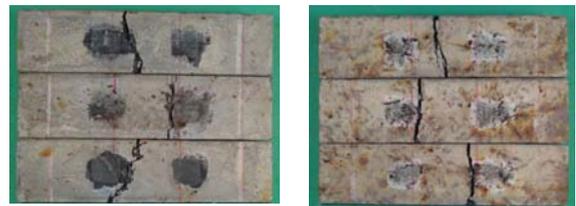


写真-3 温海水乾湿繰り返し 30 サイクル後、型枠底面

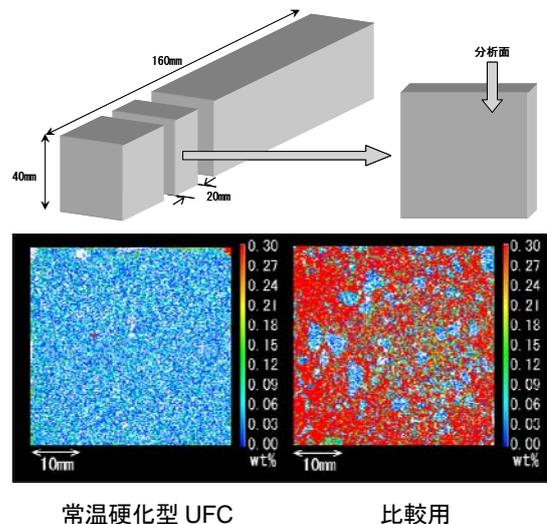


図-6 試験体の形状および温海水乾湿繰り返し 30 サイクル経過後の EPMA による塩化物イオンの浸透状況

(2) 温海水乾湿繰返しによる促進腐食試験

(a) ひび割れ無し

温海水乾湿繰返し30サイクル後の型枠底面の発錆状況を写真-3に、試験体の形状および分析面のEPMA画像を図-6に、線分析の結果を図-7に示す。温海水乾湿繰返しによって、初期塩分量が0kg/m³の比較用試験体表面部のさびの発生や断面中心部までの塩化物イオンの浸透が見られるのに対し、初期塩分量が0kg/m³の常温硬化型のUFCは表面のさびが少なく、塩化物イオンの浸透もごく表層部に限られている。また、常温硬化型のUFCでは、促進サイクル数や硬化体中の塩化物イオン量の違いにかかわらず、図-8に示すとおり曲げ強度はほぼ同等で、塩化物イオンの侵入に対する鋼繊維の腐食に対して高い抵抗性を示している。

(b) ひび割れ有り

残留ひずみ、残留ひび割れを有する試験体が温海水乾湿繰返し試験に供された後に、曲げ強度試験を実施した。図-9に曲げ強度試験の結果を示す。

ひび割れを有する状態で促進腐食養生された常温硬化型のUFCの曲げ強度には大きな低下が認められず、常温硬化型のUFCに混入された鋼繊維は、塩化物イオンの侵

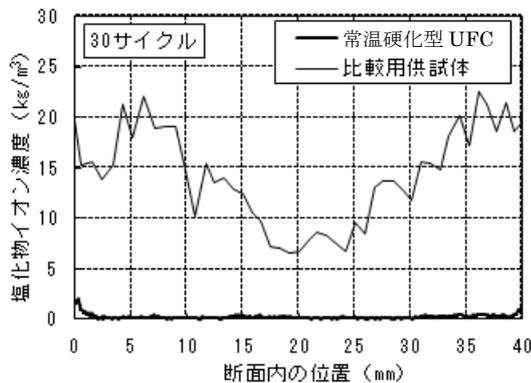


図-7 温海水繰返し 30 サイクル経過後の線分析による塩化物イオンの浸透状況 (ひび割れ無し)

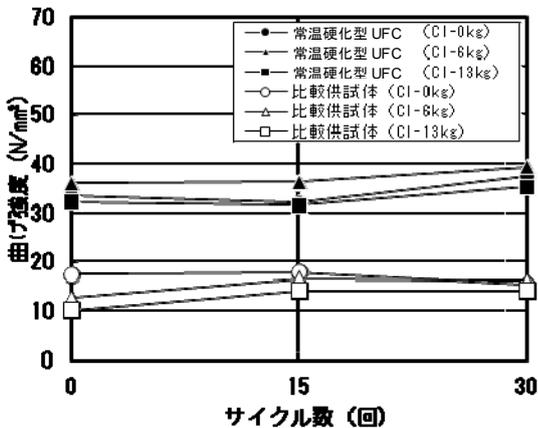


図-8 温海水繰返しによる促進サイクル数と曲げ強度の関係 (ひび割れ無し)

入に対して高い腐食抵抗性を示している。

次に、図-10に示すとおり、温海水乾湿繰返し試験が行われた試験体を対象に、EPMAを用いてひび割れ内部への塩化物イオンの浸透性を確認した。残留ひずみが 200×10^{-6} (実測 260×10^{-6}) の場合、ひび割れが発生した箇所はひび割れに沿って塩化物イオンの浸透が認められる (図-10 中のひび割れの終点まで約 50mm)。しかしながら、ひび割れからの塩化物イオンの浸透は、 0.8kg/m^3 (約 0.03wt%) 程度であり、引張縁の 7kg/m^3 (約 0.26wt%) と比較して、著しく低いものである。残留ひび割れ幅が 0.1mm (実測 0.15mm) の場合、分析範囲である 75mm の深さまで塩化物イオンの浸透が認められ、ひび割れ幅が大きい箇所では、 7kg/m^3 (約 0.26wt%) を超える高い塩化物イオン濃度となっている。これらのことから、常温硬化型のUFCを用いた構造物において、微細なひび割れが発生した場合でも、短期間のうちに構造性能や耐久性

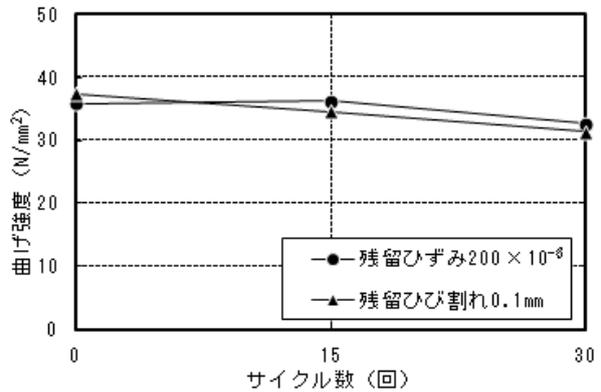


図-9 温海水繰返しによる促進サイクル数と曲げ強度の関係 (ひび割れ有り)

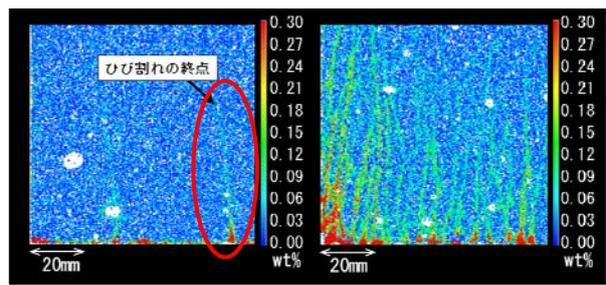
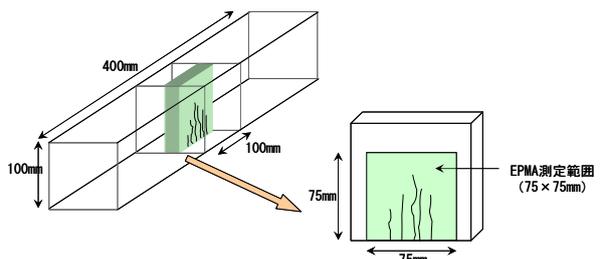


図-10 温海水繰返し 30 サイクル経過後のひび割れ内部の EPMA による塩化物イオン浸透状況

が損なわれる可能性は低いと判断できる。

3.2 鋼材腐食時期の検討

塩化物イオンの拡散係数より、常温硬化型の UFC 内に鋼材を敷設した場合の腐食開始時期を検討した。検討は、「コンクリート標準示方書【設計編】2007」8.3.7 の式(8.3.6)に従って、常温硬化型の UFC を用いた部材の表面から鋼材までの距離と鋼材腐食開始時期の関係(計算値)を試算した。なお、試算にあたっては、かぶり、表面の塩化物イオン濃度および初期塩化物イオン量は UFC 指針 9.2 に示される値を用い、塩化物イオンの拡散係数は1年の結果を採用した。試算条件を表-8に示す。試算結果を図-11に示す。試算結果より、ひび割れが無く鋼材のかぶりを20mmと仮定した場合、鋼材の腐食開始時期は200年となる。よって、ひび割れの無い条件では、UFC 指針の標準材料と同様に鋼材の腐食開始時期は100年で12mm程度なので、塩化物イオンの侵入に伴うコンクリート中の鋼材の腐食に関する照査は行わなくてよいと判断できる。

表-8 鋼材腐食時期の試算条件

限界腐食塩化物イオン量 (kg/m ³)	1.2
初期塩化物イオン量 (kg/m ³)	0.202
表面塩化物イオン量 (kg/m ³)	13
塩化物イオン拡散係数 (cm ² /年)	0.0034

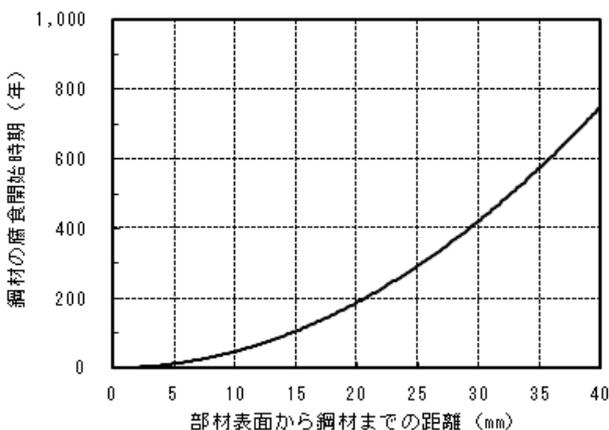


図-11 常温硬化型の UFC を用いた部材の表面から鋼材までの距離と鋼材腐食開始時期の関係

4. まとめ

本研究により、以下の事象が解明され、常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートは塩分浸透抵抗性に対して、

著しく優れていくことが、確認された。

- 1) 常温硬化型の UFC は、材齢 91 日において全体の空隙率が 4.1%となり、UFC 指針に示される標準材料の 4%とほぼ同等の値となっている。
- 2) 塩分浸漬 1 年における、常温硬化型の UFC の塩化物イオンの侵入深さは、ほぼ 2mm 以下である。
- 3) 塩分浸漬 1 年における塩化物イオンの見かけの拡散係数は、0.0034cm²/年であり、浸せき期間の経過に伴う塩化物イオンの侵入は認められない。
- 4) オートグレーブ促進腐食試験後の常温硬化型の UFC の曲げ強度の低下が、ほとんど認められないので鋼繊維は、塩化物イオンの侵入に対して高い腐食抵抗性を示している。
- 5) ひび割れを有する状態で温海水促進腐食養生された常温硬化型の UFC の曲げ強度には、大きな低下が認められないので、常温硬化型の UFC に混入された鋼繊維は、塩化物イオンの侵入に対して高い腐食抵抗性を示している。
- 6) ひび割れが無く鋼材のかぶりを 20mm と仮定した場合、鋼材の腐食開始時期は 200 年となるので、ひび割れの無い条件では、UFC 指針の標準材料と同様に鋼材の腐食開始時期は 100 年で 12mm 程度なので、塩化物イオンの侵入に伴うコンクリート中の鋼材の腐食に関する照査は行わなくてよいと判断できる。

参考文献

- 1) 武田篤史, 他: 常温硬化型高じん性高強度モルタル「スリムクリート®」の屋内ブリッジへの適用, 大林組技術研究所報, No.74, 2010 年
- 2) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, (2004)
- 3) 石関嘉一, 他: 鋼繊維の種類が高強度高じん性セメント複合材料の引張特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol31, No.1, 2010 年 9 月, pp215-pp220
- 4) 玉滝浩司, 他: 超高強度繊維補強コンクリートによる大型部材製造(その1 製造方法の検討), 土木学会第 66 回年次学術講演会, 2011 年 9 月, pp413-PP414
- 5) 吉田浩一郎, 他: 超高強度繊維補強コンクリートによる大型部材製造(その2 実機プラントでの製造), 土木学会第 66 回年次学術講演会, 2011 年 9 月, pp415-PP416
- 6) 森大介, 他: RPCM の塩化物浸透に関する拡散理論による考察, 第 56 回セメント技術大会講演要旨, 2002 年 5 月, pp.176-177