

論文 押出成形された高靱性繊維補強セメント複合材料により被覆された鉄筋コンクリートの中酸化に対する耐久性

西松 英明^{*1}・梨本 竜太郎^{*2}・宮里 心一^{*3}・柳井 直樹^{*4}

要旨：押出成形により作製された高靱性繊維補強セメント複合材料（押出成形-DFRCC と略記する）のひび割れ分散性状に着目し、鉄筋コンクリート被覆材に使用した場合の中酸化深さ、および鉄筋腐食性状を観察した。その結果、(1) 押出成形-DFRCC により被覆されたコンクリートの曲げひび割れ部では、コンクリートのみの供試体に比べ中酸化の進行が抑制される。また、(2) 押出成形-DFRCC により被覆されたコンクリートの曲げひび割れ部では、コンクリートのみの供試体と比較し内部鉄筋の腐食速度が低下する。以上のことから、押出成形-DFRCC をコンクリート表面保護材に利用することで構造物の高耐久化が期待できる。
キーワード：押出成形、短繊維補強、マルチプルクラック、中酸化、物質浸透性、鉄筋腐食

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高機能化、高寿命化を目的とした短繊維混入による高靱性繊維補強セメント複合材料（DFRCC：Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite）の研究・開発が数多くなされている。これら材料の特徴として、曲げ、引張応力下での擬似ひずみ硬化挙動、複数の微細なひび割れ（マルチプルクラック）の発生などが挙げられる¹⁾。一方、押出成形法は外装用パネルなどに代表されるセメント系材料の工業的製造方法の一つであり、押出機先端の金型を変更することで断面形状の選択が可能であること、一貫した連続生産が可能であり品質の安定化を図れることなどの特徴が挙げられる。押出成形-DFRCC では上述の特徴に加え、施工面での合理化といった点から永久型枠など表面材用途への展開が期待される。ここで、これらの用途では耐用年数に応じた耐久性評価が重要となる。

当研究では前回までに RC 構造物の主たる劣化要因の一つである塩害に関し、押出成形-DFRCC

を表面材に用いた鉄筋コンクリート供試体を作製し、予め曲げひび割れを導入したケースでの評価を行った。その結果、押出成形-DFRCC により被覆された鉄筋コンクリート複合体では、ひび割れ分散性状など DFRCC の材料特性によりコンクリートのみの供試体に比べ、塩化物イオンの浸透、および鉄筋腐食を抑制できることが確認された^{2) 3)}。そのため、塩害同様に RC 構造物の劣化要因とされる中酸化においても同様の効果が期待される。しかしながら、現状ではこれらの報告例、とりわけひび割れ性状に着目した報告例は少ない。

以上の背景を踏まえ、本研究では押出成形-DFRCC により被覆された鉄筋コンクリート複合体の中酸化に対する耐久性を評価した。実験 1 として、押出成形-DFRCC により被覆された鉄筋コンクリート複合体（図表中では DFRCC 複合体と略記する）の曲げひび割れ部における中酸化深さを確認し、鉄筋コンクリートのみの供試体（図表中では ORC 供試体と略記する）と比較した。また、実験 2 として、押出成形-DFRCC

*1 倉敷紡績（株） 技術研究所 工修（正会員）

*2 金沢工業大学大学院 工学研究科（非会員）

*3 金沢工業大学 環境・建築学部 助教授 工博（正会員）

*4 倉敷紡績（株） 技術研究所 工修（非会員）

により被覆された鉄筋コンクリート複合体の曲げひび割れ部における腐食状況を確認し、鉄筋コンクリートのみの供試体と比較した。

2. 押出成形-DFRCC について

押出成形-DFRCC の使用材料および配合を表-1 に示す。補強繊維には、ビニロン繊維(繊維長 6mm, 繊維径 0.04mm)を用いた。パルプ, 鉱物繊維(含水マグネシウム珪酸塩; 繊維径 0.1~0.5 μ m, 密度 2.67g/cm³), 増粘剤は押出成形助剤として添加した。各原料種はミキサー内で混合された後, ニーダー内で混練され, 粘土状となり押出に適当な可塑性および流動性が得られる。さらに, 原料生地は真空の押出機内でスクリーンにより圧縮しながら十分に締め固められ, 押出機先端に取り付けられた金型の形状どおりに押出成形される。試験体は金型に W250mm×T15mm の平板形状を取付け押出成形された後, 約 60℃で 1 日間蒸気養生を行い作製された。表-2 に押出成形-DFRCC の基本物性を示す。曲げ, 引張強度において高い性能が得られた。

3. 押出成形-DFRCC により被覆された鉄筋コンクリート複合体の中性化深さ

3.1 実験概要

コンクリートの配合を表-3 に示す。供試体概要を図-1, 2 に示す。ここで, 押出成形-DFRCC は W100mm×T15mm×L400mm に切断し, コンクリート型枠内(W100mm×T100mm×L400mm)下面に設置後, 上部よりコンクリートを打設し作製された。ここで, 供試体は各 6 体作製され, 打設後 28 日間の標準養生を実施した。その後, 3 点曲げ載荷により予め曲げひび割れを導入し, 最大荷重と最大ひび割れ幅の関係を確認した。

表-1 使用材料および配合例 [質量比]

セメント	珪石粉	ビニロン	パルプ	鉱物繊維	増粘剤
1	0.6	0.05	0.01	0.05	0.01

* ビニロン : 4vol%, W/C=0.5

表-2 基本物性

項目	試験方法 (供試体寸法)	単位	測定値*
密度	アルキメデス法	g/cm ³	1.80
圧縮強度	JIS K 6811 (15×15×30mm)	N/mm ²	91.0 (74.6)
曲げ強度	JIS A 1408 (80×15×250mm)	N/mm ²	31.0 (12.4)
引張強度	直接引張法 (40×15×200mm)	N/mm ²	10.7 (4.6)

* 測定値は繊維配向方向の値
括弧内の値は繊維配向直角方向の値

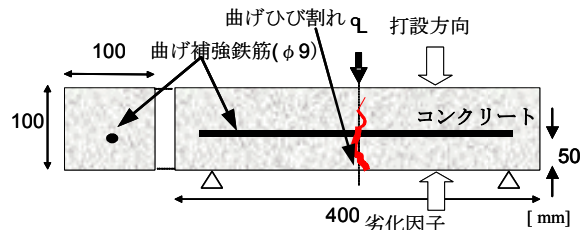


図-1 ORC供試体

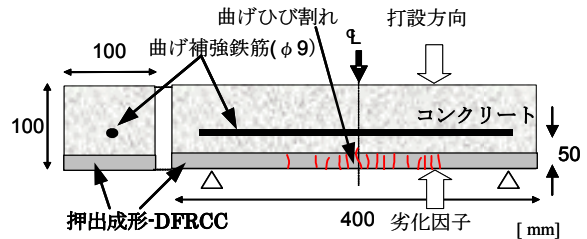


図-2 DFRCC複合体

なお, ひび割れ幅の測定にはクラックゲージを使用した。表-4 に実験ケースを示す。両供試体は 10~25kN までの 6 水準となるよう曲げ荷重を導入した。なお, 後述の暴露期間中においてひび割れ幅を保持させるため専用の治具³⁾をセットし, 各測定時にひび割れの変動がないよう調整した。ここで, 中性化の進行はひび割れ面からのみとなるように側面はエポキシ樹脂で被覆した。試験条件は中性化促進装置内 (CO₂ 濃度

表-3 コンクリート配合

G.max (mm)	W/C	s/a (%)	スラン プ(cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)			
					W	C	S	G
20	0.5	44.9	5.0	4.0	180	360	782	970

表-4 実験ケース

材料	測定項目	測定値					
		ORC 供試体	最大荷重(kN)	10.8	12.0	12.8	15.0
	最大ひび割れ幅(mm)	0.04	0.40	0.08	0.90	1.00	4.00
DFRCC 複合体	最大荷重(kN)	10.8	12.0	12.8	15.0	17.0	24.0
	最大ひび割れ幅(mm)	0.01	0.01	0.01	0.04	0.04	0.10

5%、室温 20℃、湿度 60%) で 56 日間の暴露を行った。暴露後の供試体は長軸方向に割裂し、鉄筋を取り除いた後、割裂面に 0.1%のフェノールフタレイン溶液を噴霧した。その際、赤色に変色しない部分をノギスで測定し、中性化進行深さとした⁴⁾。本試験では、曲げひび割れが発生していない「健全部」、および「ひび割れ部」を対象として測定した。なお押出成形-DFRCC の場合、複数のひび割れが発生しているため、中性化の進行も複数箇所で起こる。そのため、最大ひび割れ幅の箇所で測定された値を用いた。

3.2 実験結果

曲げ荷重載荷時において、押出成形-DFRCC により被覆された鉄筋コンクリート複合体では層間剥離のような現象は発生していない。また、最大荷重が 17.0kN、24.0kN の場合のみ、コンクリート内部に及ぶひび割れが観察された。それ以外では目視にて観察されていない。

(1) 「健全部」の中性化深さ

測定結果を図-3 に示す。「健全部」を比較した場合、鉄筋コンクリートのみの供試体では中性化の進行が平均 6.0 mm 程度であるのに対し、押出成形-DFRCC が被覆された鉄筋コンクリート複合体では最大で 1.5 mm と中性化深さが浅くなることが認められる。

(2) 「ひび割れ部」の中性化深さ

測定結果を図-4、及び写真-1、2 に示す。「ひび割れ部」を比較した場合、鉄筋コンクリートのみの供試体ではひび割れ開口幅の増加に伴い、中性化深さが急激に増加する。一方で、押出成形-DFRCC により被覆された鉄筋コンクリート複合体では、鉄筋コンクリートのみの供試体における最大荷重(17.0kN)までの範囲内で中性化深さは浅く、押出成形-DFRCC 内部 (t15mm) までの進行に留まることが確認された。ただし、

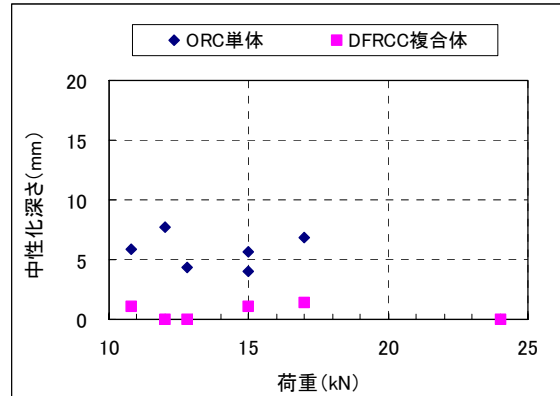


図-3 「健全部」における中性化深さ

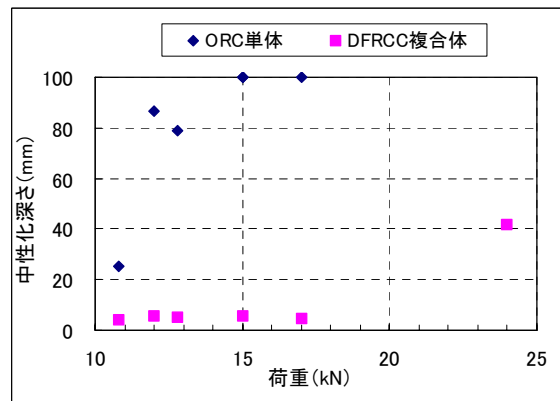


図-4 「ひび割れ部」における中性化深さ



写真-1 「ひび割れ部」DFRCC 複合体
(荷重 17.0kN, ひび割れ幅 0.04mm)
※中央部に見られるひび割れは割裂時のもの



写真-2 「ひび割れ部」ORC 複合体
(荷重 17.0kN, ひび割れ幅 4.00mm)

最大荷重 24kN（最大ひび割れ幅 0.10mm）まで荷重を載荷したケースでは、内部コンクリート（40mm 程度）までの進行が確認された。

3.3 考察

押出成形-DFRCC では、ひび割れ分散性状（マルチプルクラック）、および繊維の架橋効果の影響により、鉄筋コンクリートのみの供試体に比べ、ひび割れ開口幅が狭く、またひび割れ深さが浅くなる²⁾。そのため、ひび割れを有する場合において、鉄筋コンクリートのみの供試体と比較し、押出成形-DFRCC により被覆された鉄筋コンクリート複合体では中性化の進行が抑制されたと考えられる。

4. 押出成形-DFRCC により被覆された鉄筋コンクリート複合体の腐食性状

4.1 実験概要

配合、打設方法およびひび割れの導入方法は、第 3 章の実験と同様である。ただし、押出成形-DFRCC では複数の微細ひび割れが発生する影響で最大ひび割れ開口幅は変動している。供試体概要を図-5、6 に示す。供試体内部には、マクロセル腐食電流とマイクロセル腐食電流を区別

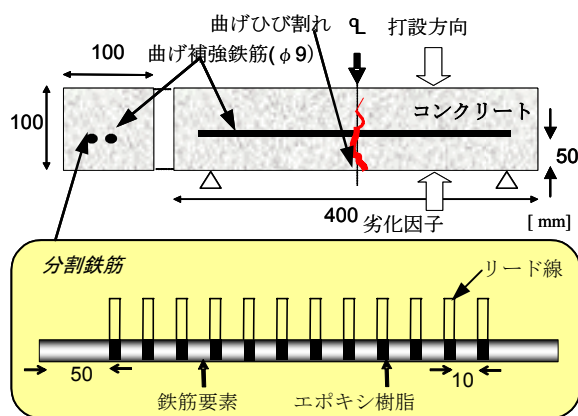


図-5 ORC供試体

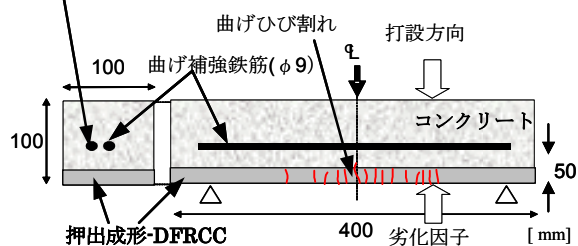


図-6 DFRCC複合体

して測定するため、分割鉄筋を埋設した⁵⁾。暴露条件として、CO₂濃度 5%の中性化装置内に 3 日間+RH90%の湿潤状態 4 日間を 1 サイクルとした。本報告では、56 日間（合計 8 サイクル）までの結果を報告する。腐食形態および腐食速度評価は、以下に示す評価方法を用いてマクロセル腐食電流とマイクロセル腐食電流を測定し算出した。

(1) マクロセル腐食速度

本研究では、鉄筋要素間を流れる電流をマクロセル腐食電流と定義し、図-7 に示す方法で測定した。すなわち、隣接する鉄筋要素間に無抵抗電流計を接続し、電流(マクロセル腐食電流)を求めた。次に、対象とする鉄筋要素の両端から流入する電流を合計した。この電流を鉄筋要素の表面積で除することにより、鉄筋要素表面でのマクロセル腐食電流密度を算定した。すなわち、鉄筋要素 i のマクロセル腐食電流密度 I_{macro} は式(1)で表せる。

$$I_{macro} = \frac{I_{i-1,i} + I_{i+1,i}}{S_i} \quad (1)$$

ここで、 I_{macro} は鉄筋要素 i のマクロセル腐食電流密度(A/cm²)、 $I_{i-1,i}$ は鉄筋要素 i-1 から鉄筋要素 i へ流れる腐食電流(A)、 $I_{i+1,i}$ は鉄筋要素 i+1 から鉄筋要素 i へ流れる腐食電流(A)、 S_i は鉄筋要素 i の表面積(cm²)を示す。

そして、対象とする鉄筋要素がアノードの場合、腐食電流密度は正として表した。一方、対象とする鉄筋要素がカソードの場合、腐食電流密度は負として表した。

最後に、100μA/cm² のマクロセル腐食電流密度

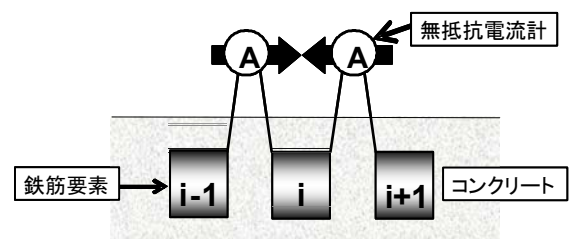


図-7 マクロセル腐食電流測定

を 1.16mm/年に換算し、マクロセル腐食速度を算定した。

(2) ミクロセル腐食速度

単一の鉄筋要素内のみを流れる電流をミクロセル腐食電流と定義し、分極抵抗より算定した。そのため、先ず鉄筋要素間を接続するリード線を一度切断した。この時、異なる鉄筋要素間では電流の出入りがない。この状態で、図-8に示すとおり各鉄筋要素毎に鉄筋表面の分極抵抗を周波数応答解析装置[FRA(Frequency Response Analyzer)]を用いた交流インピーダンス法により求めた。測定は、5kHz から 5mHz の範囲において、振幅 50mV の電圧を与えて行った。また、分極抵抗は、ボード線図およびコイルコイルプロットを用いて算定した。さらに、水流らの研究⁶⁾を参考に、ミクロセル腐食電流密度 I_{micro} は式(2)より求めた。

$$I_{micro} = \frac{K}{R_{pi}} \quad (2)$$

ここで、 I_{micro} は鉄筋要素 i におけるミクロセル腐食電流密度(A/cm²)、 R_{pi} は鉄筋要素 i における分極抵抗($\Omega \cdot \text{cm}^2$)、 K は定数(0.0209V)を示す。

最後に、100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ のミクロセル腐食電流密

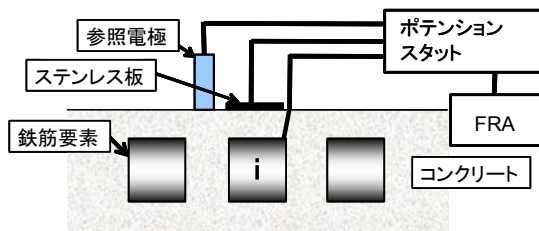


図-8 分極抵抗の測定

度を 1.16mm/年に換算し、ミクロセル腐食速度を算定した。

(3) 総腐食速度

マクロセル腐食速度とミクロセル腐食速度の和を総腐食速度とした。

4.2 実験結果

測定結果の例を図-9, 10 に示す。また、各試験ケースおよび最高総腐食速度の測定結果を

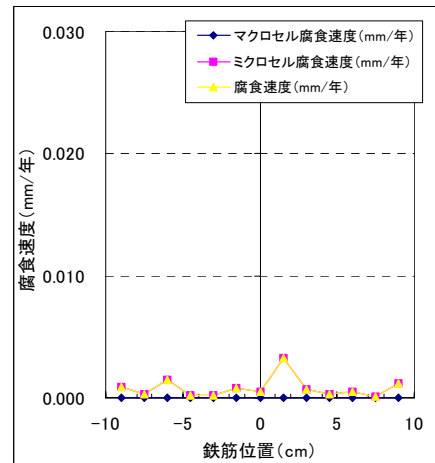


図-9 ORC 供試体の腐食速度分布
(荷重 18.0kN, ひび割れ幅 0.30mm)

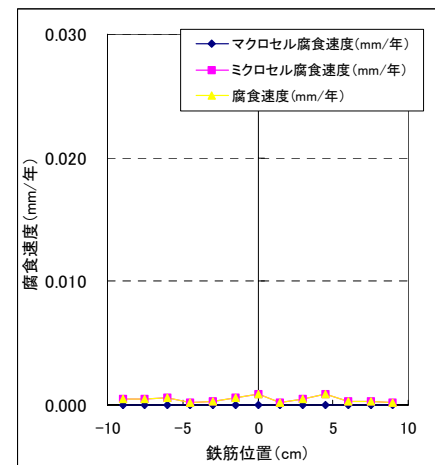


図-10 DFRCC 複合体の腐食速度分布
(荷重 18.0kN, ひび割れ幅 0.01mm)

表-5 最高総腐食速度の結果

ORC 供試体				DFRCC 複合体			
最大荷重 (kN)	最大ひび割れ開口幅 (mm)	腐食箇所	最高総腐食速度 (mm/年)	最大荷重 (kN)	最大ひび割れ開口幅 (mm)	腐食箇所	最高総腐食速度 (mm/年)
13.0	0.45	中央	0.0038	13.0	0.01	複数	0.0006
13.5	0.10	中央	0.0025	18.0	0.01	複数	0.0009
18.0	0.30	中央	0.0033	22.5	0.01	複数	0.0012

表-5に示す。鉄筋コンクリートのみの供試体の場合、ひび割れが観察された中央部付近において腐食速度の極大化が確認できる。また、押出成形-DFRCCが被覆された鉄筋コンクリート複合体では微小であるが複数箇所腐食速度が現れる傾向が得られている。ここで、鉄筋コンクリートのみの供試体と押出成形-DFRCCにより被覆された鉄筋コンクリート複合体の最高総腐食速度を比較した場合、後者の方が遅くなることを確認できる。一方で、腐食形態に関しては、56日間までの測定において、両供試体ともマクロセル腐食電流値が非常に低い値となったため十分に比較できていない。

4.3 考察

鉄筋コンクリートのみの供試体では、ひび割れ部より局所的に中性化が進行する。したがって、ひび割れ部より局所的にアノードが発生し、腐食速度の極大化が現れたものと推察される。また、押出成形-DFRCCが被覆された鉄筋コンクリート複合体ではひび割れが複数発生する影響で、中性化も複数箇所で行進する。したがって、全面的にアノード反応が進行し、腐食速度が現れたものと考えられる。しかしながら、第3章で確認したとおり、押出成形-DFRCCが被覆された鉄筋コンクリートのみの供試体と比較して、ひび割れ幅が狭く、またひび割れ深さが浅くなる影響で物質透過性が抑制される。その結果、押出成形-DFRCCが被覆された複合体では、酸素の供給量が減少し、カソード反応($O_2+2H_2O+4e^- \rightarrow 4OH^-$)が抑制されるため、総腐食速度は遅くなったと考えられる。

一方、各供試体の腐食形態の比較に関し、中性化評価では塩害評価に比べ、供試体含水率が低いため、コンクリート比抵抗が上昇する影響で腐食の増進が遅れる傾向がある。本報告においても、上述の理由から、マクロセル腐食が明確に現れていない可能性が高い。そのため、今後56日間目以降の評価を継続し、各供試体の腐食性状を観察していきたい。

5. まとめ

押出成形-DFRCCを鉄筋コンクリート被覆材に適用した場合の中性化深さ、および鉄筋腐食評価を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 押出成形-DFRCCにより被覆された鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部では、鉄筋コンクリートのみの供試体の曲げひび割れ部と比較して、中性化深さが極めて浅い。
- (2) 押出成形-DFRCCにより被覆された鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部では、鉄筋コンクリートのみの供試体の曲げひび割れ部と比較して総腐食速度が遅い。
- (3) 以上のことから、押出成形-DFRCCと鉄筋コンクリートを一体とすることにより、曲げひび割れ部における中性化に対する耐久性の向上が期待できる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書(II)，2004
- 2) 久保田憲ほか：押出成形された HPRCC 板の拡散セル法による塩化物イオン拡散係数，第 60 回年次学術講演会講演概要集 V，pp.615-616，2005.9
- 3) 西松英明ほか：高靱性押出材料により被覆された鉄筋コンクリートの耐塩害性，コンクリート工学年次論文報告集，vol.27，No.1，pp.331-336，2005.6
- 4) 喜多達夫ほか：コンクリート構造物耐久性シリーズ 中性化，技報堂，pp.5-7，1986
- 5) 大即信明，宮里心一，鈴木裕隆，木村勇人：曲げひび割れ近傍に生じる主鉄筋とスターラップの塩化物腐食形成機構，土木学会論文集，No.627，pp.161-177，1999
- 6) 水流徹，前田龍，春山志郎：交流法腐食モニターの局部腐食への適用，防食技術，No.28，pp.638-644，1979