

論文 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

西松 英明^{*1}・宮里 心一^{*2}・本間 貴光^{*3}

要旨：押出成形された高靱性セメント複合材料（高靱性押出材料）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適用した場合の塩害に対する耐久性を評価した。その結果、(1)高靱性押出材料が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部材と比較して、塩化物イオン浸透深さが極めて浅い。また、(2)高靱性押出材料が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部材と比較して、腐食速度が遅い。以上のことから、高靱性押出材料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耐塩害性の向上が期待できる。

キーワード：押出成形，短繊維補強，マルチプルクラック，塩害，物質浸透性，鉄筋腐食

1. はじめに

押出成形法はセメント系材料の工業的な製造方法の一つであり、外装用パネル、型枠材、床板などの製造に広く利用されている。その特徴として、型枠成形法などに比べ一貫した連続生産が可能であり、かつ緻密な製品が得られることが挙げられる。しかしながら、得られる製品は脆弱的な性質を有するため、用途の拡充を図る上では高靱性が求められる。

近年、補修材や補強材などへの用途を目的とした高靱性セメント複合材料の開発や研究が数多く為されている。押出成形されたセメント系材料においても、短繊維を混入し、マルチプルクラック現象（複数の微細なひび割れ）の発生を利用した高靱性化に関する配合設計、開発がなされてきた¹⁾。これら高靱性押出材料の用途として、その優れた構造特性を活かし、かつ施工時の合理化を図るため、永久型枠などの表面被覆材への適用が検討されている。ただし、コンクリートの主たる劣化要因の一つである塩害に対する耐久性についての報告例は少ない。

そこで本研究では、高靱性押出材料が被覆された鉄筋コンクリート部材における、塩害に対

する耐久性を評価した。実験 1 として、高靱性押出材料が被覆された鉄筋コンクリート部材（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塩化物イオン浸透状況を確認し、鉄筋コンクリートのみの部材（図表中では ORC 供試体と略記する）の曲げひび割れ部における塩化物イオン浸透状況と比較した。また、実験 2 として、高靱性押出材料が被覆された鉄筋コンクリート部材の曲げひび割れ部における腐食状況を確認し、鉄筋コンクリート部材のみの曲げひび割れ部における腐食状況と比較した。

2. 高靱性押出材料

2.1 製造方法および基礎物性

高靱性押出材料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

表 - 1 使用材料および配合例 [質量比]

セメント	珪石 紛	ビニロン	パルプ	鉱物 繊維	増粘 剤
1	0.6	0.5	0.01	0.05	0.01

* ビニロン：4vol%，W/C = 0.5

*1 倉敷紡績（株） 技術研究所 工修（正会員）

*2 金沢工業大学 環境・建築学部 助教授 工博（正会員）

*3 金沢工業大学大学院 工学研究科 工修（非会員）

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後，ニーダーにて混練される。混練後の原料生地は粘土状となり，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により圧縮しながら締め固められ，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。押出後の製品は60℃で約1日間蒸気養生された。表-2に高靱性押出成形材料の基本物性を示す。曲げ，引張強度において高い性能が得られている。

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

2.1 塩化物イオン浸透性

表-3に高靱性押出材料の電気泳動法による塩化物イオン実効拡散係数を示す。評価はJSCE-G571に準拠し実施した。高靱性押出材料の場合，同水比の普通モルタルに比べ，塩化物イオン実効拡散係数が大きくなる²⁾。これらの原因として，(1)高靱性押出材料の空隙率は，普通モルタルに比べ高いこと，(2)補強繊維，パルプなどの有機分がマトリックス中の欠陥となり，塩化物イオンの浸透を容易にしていることが考えられる。一方，マトリックス中の有機分は塩化物イオンなどの物質を吸着するが，電気泳動法では塩化物イオンが強制的に移動される影響でこ

れらの効果が無視されている可能性も考えられる。現状，濃度勾配を駆動力とする拡散セル法，浸せき法にて検証実験を実施中である。

表 - 3 塩化物イオン実効拡散係数

材料	D _e (cm ² /year)	空隙率
普通モルタル材料	5.8 × 10 ⁻²	13%
高靱性押出材料	13.0 × 10 ⁻²	24%

* 100mm × 厚み 15mm で実施

* 空隙率(%) = (g₁-g₃) / (g₁-g₂) × 100 より算出
ただし，g₁は表乾質量(g)，g₂は水中質量(g)，g₃は絶乾質量(g)

3. 高靱性押出材料により被覆された鉄筋コンクリート部材の塩化物イオン浸透性

3.1 実験概要

コンクリートの配合を表-4に示す。供試体概要を図-1，2に示す。ここで，高靱性押出材料はW100mm × T15mm × L400mmに切断後，コンクリート型枠(W100mm × T100mm × L400mm)下面に設置されコンクリートを打設した。打設後28日間，全ての供試体は，水中で初期養生された。その後，3点曲げ載荷により曲げひび割れ

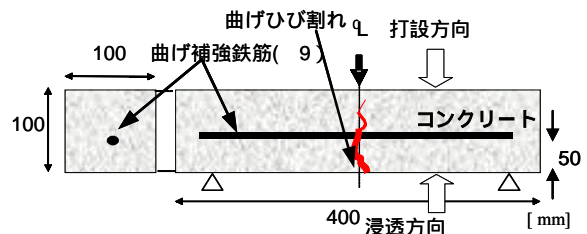


図 - 1 ORC供試体

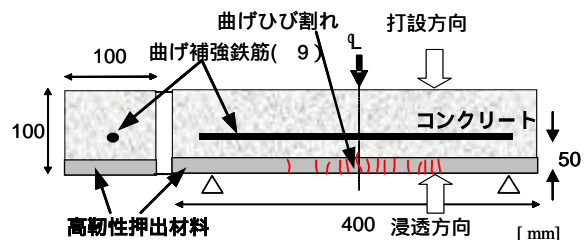


図 - 2 DFRCC複合体

表 - 4 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

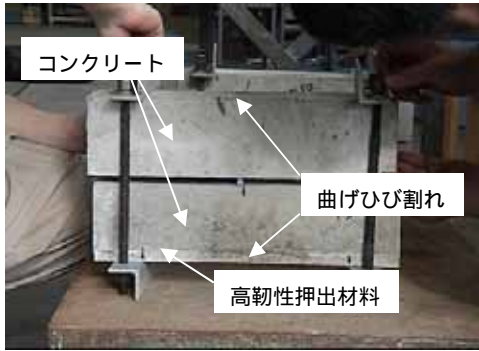


図 - 3 ひび割れ開口保持具
(上：ORC 供試体，下：DFRCC 複合体)

を導入し，最大載荷荷重とひび割れ幅の関係を確認した。表 - 5 に実験ケースを示す。両供試体は同等の荷重(最大荷重 10~20kN 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開口幅を保持させ

るため，図 - 3 に示す治具をセットした。この状態にて，開口面からのみ塩化物イオンを浸透させるために側面を被覆し，海水と同等の 3%NaCl 水溶液中に 28 日間あるいは 140 日間の暴露を行った。塩害暴露させた供試体は長軸方向に割裂し，鉄筋を取り除いた。その後，割裂面に 0.1N の硝酸銀水溶液を噴霧し，銀白色に変色した部分をノギスで測定し，塩化物イオン浸透深さとした³⁾。本試験では，「ひび割れ面」を対象として測定した。なお高靱性押出材料の場合，複数のひび割れが発生しているため，塩化物イオンの浸透も複数箇所で起こる。よって，最大ひび割れ幅の個所のみ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，高靱性押出材料が

表 - 5 実験ケース

材料	最大荷重 (kN)	最大ひび割れ開口幅(mm)
ORC 供試体	10 ~ 20	0.04 ~ 1.80
DFRCC 複合体	10 ~ 20	0.01 ~ 0.08

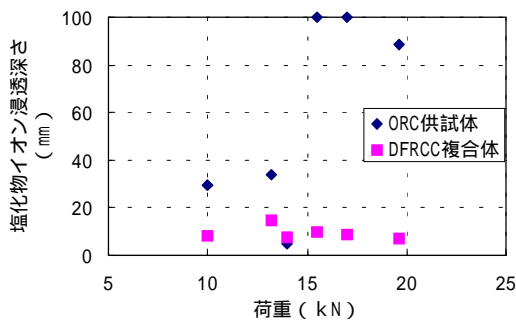


図 - 4 荷重と塩化物イオン浸透深さの関係
(暴露期間 28 日)

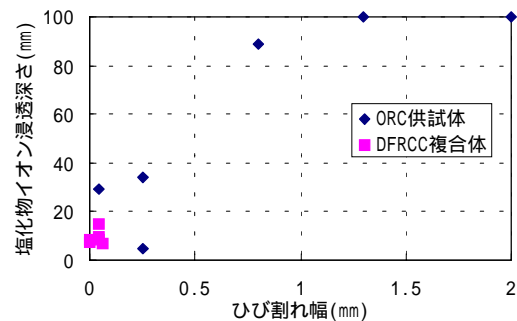


図 - 6 ひび割れ幅と塩化物イオン浸透深さ
の関係 (暴露期間 28 日)

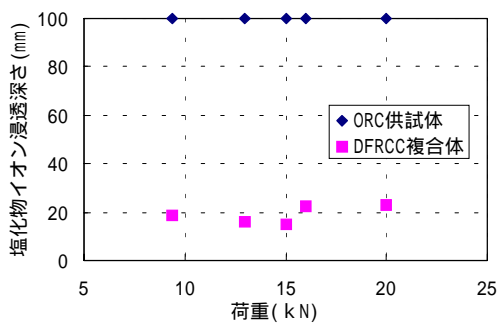


図 - 5 荷重と塩化物イオン浸透深さの関係
(暴露期間 140 日)

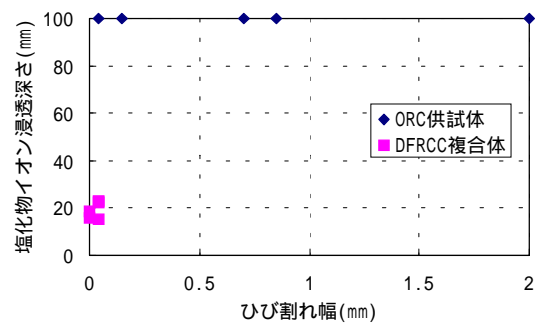


図 - 7 ひび割れ幅と塩化物イオン浸透深さ
の関係 (暴露期間 140 日)

被覆された 6 体の供試体では層間剥離のような現象は発生していない。また、コンクリート内部に及ぶひび割れは目視にて観察されていない。測定結果を図 - 4 ~ 図 - 7 に示す。これらによれば、高靱性押出材料が被覆された部材では、コンクリートのみの部材と比較して、ひび割れ部を通じての塩化物イオン浸透深さは浅くなるということが認められる。

3.3 考察

高靱性押出材料のひび割れは、分散する性質がある（マルチプルクラック）。すなわち、高靱性押出材料では、普通コンクリートと比較して、ひび割れ開口幅が狭くなる。また、高靱性押出材料では、架橋効果により、ひび割れ深さが浅くなる¹⁾。以上のことから、ひび割れを有する場合には、普通コンクリートのみの部材と比較して高靱性押出材料を表層部に設置した部材では、塩化物イオンの浸透が抑制されたと考えられる。

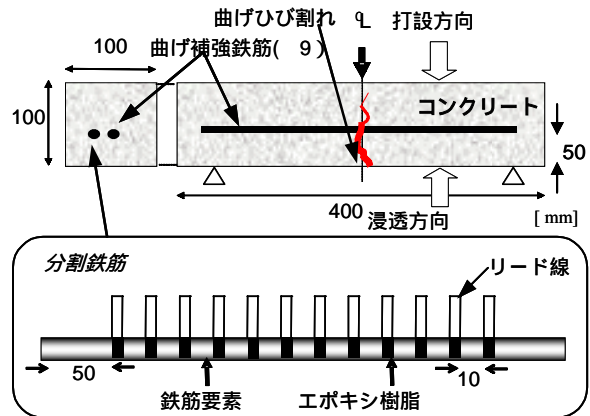


図 - 8 ORC供試体

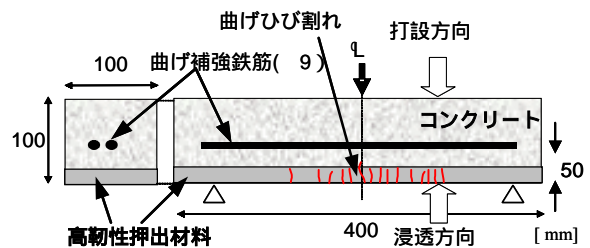


図 - 9 DFRCC複合体

4. 高靱性押出材料が被覆された鉄筋コンクリート部材の腐食性状

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 章の実験で使用したものと同様である。供試体概要を図 - 8, 9 に示す。供試体内部には、マクロセル腐食電流とミクロセル腐食電流を区別して測定するため、分割鉄筋を埋設した⁴⁾。28 日間の塩害促進暴露（Cl⁻濃度 3%の塩水中に 2 日間 + RH60%乾燥気中に 5 日間を 1 サイクルとして、合計 4 サイクル）後、マクロセル腐食電流とミクロセル腐食電流を測定し、腐食形態および腐食速度を評価した。

(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 - 10 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

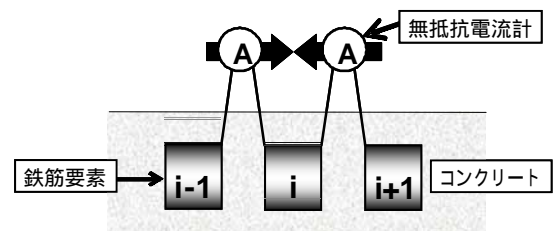


図 - 10 マクロセル電流測定

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。

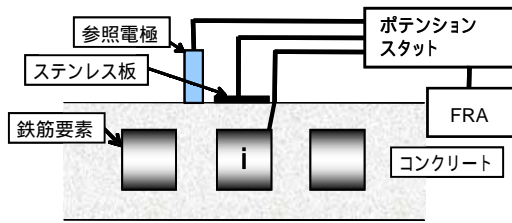


図 - 11 分極抵抗の測定

最後に、 $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ のマクロセル腐食電流密度を $1.16\text{mm}/\text{年}$ 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無い。この状態で、図 - 11 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ールコールプ

ロットを用いて算定した。さらに、水流らの研究⁵⁾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。

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

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/cm^2)、 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度を $1.16\text{mm}/\text{年}$ 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 - 12, 13 に示す。これらによれば、鉄筋コンクリートのみでの部材では 1 箇所のみにおいて腐食速度が極大化し、一方高靱性押出材料が被覆された部材では複数箇所でも微小ではあるが正の腐食速度が現れることが認め

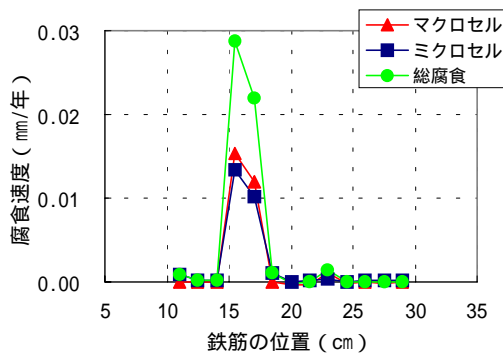


図 - 12 ORC 供試体の腐食速度分布 (荷重 15.3kN, ひび割れ幅 0.80mm)

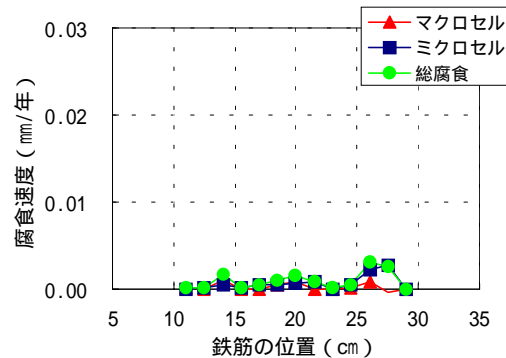


図 - 13 DFRCC 複合体の腐食速度分布 (荷重 15.8kN, ひび割れ幅 0.01mm)

表 - 6 最高総腐食速度の結果

最大荷重 (kN)	ORC 供試体			DFRCC 複合体		
	最大ひび割れ開口幅 (mm)	腐食箇所	最高総腐食速度 (mm/年)	最大ひび割れ開口幅 (mm)	腐食箇所	最高総腐食速度 (mm/年)
15.3	0.80	1	0.0288	0.01	2	0.0054
15.8	0.04	1	0.0240	0.01	1	0.0030
18.0	1.80	1	0.1054	0.04	2	0.0035

られる。ここで、鉄筋コンクリートのみの部材の最高総腐食速度が現われた位置での、マクロセル腐食速度とマイクロセル腐食速度を比較すると、前者が僅かに高いことが認められる。したがって、マクロセル卓越型腐食と判定できる。一方、高靱性押出材料が被覆された部材の最高総腐食速度が現われた位置での、マクロセル腐食速度とマイクロセル腐食速度を比較すると、後者が高いことが認められる。したがって、マイクロセル卓越型腐食と判定できる。また、表-6に最高総腐食速度の結果を示す。高靱性押出材料が被覆された部材の最高総腐食速度が、鉄筋コンクリートのみの部材の最高総腐食速度と比較して、遅いこととなる。

4.3 考察

鉄筋コンクリートのみの部材では、ひび割れ部より局所的に塩化物イオンが浸透する。したがって、局所的にアノード反応が起こり、マクロセルが形成される。また、一般的にマクロセル腐食の場合、局所的な腐食速度は速い⁶⁾。一方、高靱性押出材料が被覆された部材では、複数箇所において塩化物イオンが浸透する。したがって、全面的にアノード反応が進行するため、マイクロセルが形成される。また一般的にマイクロセル腐食の場合、腐食速度は遅い⁶⁾。

さらに、第3章で確認したとおり、高靱性押出材料が被覆された部材では、鉄筋コンクリートのみの部材と比較して、物質透過性が抑制される。その結果、高靱性押出材料が被覆された部材では、普通コンクリート部材と比較して、酸素の供給量が減少し、カソード反応($O_2+H_2O+2e^- \rightarrow 4OH^-$)が抑制されるため、腐食速度は遅くなったと考えられる。

5. まとめ

高靱性押出材料を鉄筋コンクリート被覆材に適用した場合の塩化物イオン浸透性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)高靱性押出材料自身では、同水比の普通モル

タルと比較して、塩化物イオン実効拡散係数(電気泳動セル実験により求めた拡散係数)が大きい。ただし、拡散セル試験により検証中である。

- (2)高靱性押出材料が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部材の曲げひび割れ部と比較して、塩化物イオン浸透深さが極めて浅い。
- (3)高靱性押出材料が被覆された鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部では、腐食形態はマイクロセル卓越型となる。また、鉄筋コンクリートのみの部材の曲げひび割れ部と比較して、総腐食速度が遅い。
- (4)以上のことから、セメント系繊維複合材料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塩害に対する耐久性性能向上が期待できる。

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()，2004
- 2) 本間貴光ほか：押出成形されたDFRCC板の塩化物イオン拡散係数，第59回年次学術講演会講演概要集，pp.313 - 314，2004
- 3) Otsuki, N. Nagataki, S. and Nakashita, K. :Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials, ACI Mater. J, 89(6), pp.587-592, 1992
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 社団法人腐食防食協会：腐食を理解するための電気化学入門，第23回技術セミナー資料，pp.13-25，2000