

論文 連続繊維シート接着によるコンクリート中への塩分侵入抑制効果の定量評価

笠原 裕子^{*1}・下村 匠^{*2}・Y Chenna^{*3}

要旨: 表面に連続繊維シートを接着したかぶりコンクリートの塩化物イオン等の鋼材腐食物質に対する遮蔽効果について、電位差を与えてイオンを透過させる実験法により、系統的に検討した。実験と数値解析を併用し、連続繊維シートと接着樹脂より成る層の塩化物イオン拡散係数を定量化した。その結果を用いて、連続繊維シートを接着したコンクリート構造物の寿命に関する数値シミュレーションを行い、従来法により予測した結果と比較した。

キーワード: 連続繊維シート, 塩化物イオン, 拡散係数, 腐食, 補修補強

1. はじめに

炭素繊維やアラミド繊維の連続繊維シートをコンクリート構造物の表面に接着する補修補強工法は、主として既設構造物の力学性能を向上させることを目的として適用されている。しかし同時に、シート接着には樹脂を使用するため、外部からコンクリート中への物質侵入を抑制する効果も期待できると考えられる。近年、この効果を積極的に評価する試みがなされている。

著者らの既往の研究¹⁾では、シートと接着樹脂より成る層の物質透過抵抗性をコンクリートのその100倍と仮定して、シート補強構造物の寿命に関する数値シミュレーションを行った。また、土木学会「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」²⁾では、シートの塩化物イオン遮蔽効果が一定期間は完全であるとモデル化して、シート接着後のコンクリート中の鋼材腐食開始時期を予測する方法が採用されている。しかし、いずれの方法もシート of 物質透過抵抗性は実験データに基づくものではなく、定量的な根拠が不十分である。

そこで本研究では、コンクリート表面に接着した連続繊維シートの物質遮蔽効果について室内実験により検討を加えるとともに、実験と数

値解析を併用し、シートと接着樹脂層の塩化物イオン拡散係数を定量化する。また、その結果に基づき既往の方法の妥当性も検証する。

2. 連続繊維シートの物質遮蔽効果に関する実験

2.1 実験概要

中心に鉄筋を1本埋め込んだコンクリート円柱供試体の側面に連続繊維シートを接着し、塩水中において鉄筋と供試体外部との間に一定の電位差を与え、電流を測定する実験を行った。本実験では、塩化物イオンなど種々の荷電粒子が、電位勾配を駆動力として供試体中を移動する。測定結果として得られる電流および積算電流量は、その供試体のかぶりコンクリートおよび連続繊維シート層が有する、イオンレベルの物質の移動に対するトータルの抵抗性を表すと考えることができる。

表 - 1 コンクリートの配合

W/C	単位量[kg/m ³]				混和剤[g]		
	W	C	S	G	AE	SP	増粘材
60	175	292	855	1069	438	-	875
50	165	330	855	1069	495	-	-
40	151	376	855	1069	564	752	-
30	131	437	855	1069	656	3059	-

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 工博 (正会員)

*3 元長岡技術科学大学大学院

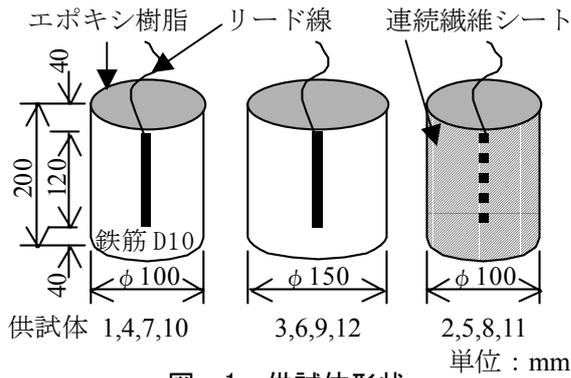


図 - 1 供試体形状

表 - 2 実験ケース

供試体	W/C [%]	鉄筋	かぶり [mm]	シート
1	60	D10	45	なし
2	60	D10	45	全面
3	60	D10	70	なし
4	50	D10	45	なし
5	50	D10	45	全面
6	50	D10	70	なし
7	40	D10	45	なし
8	40	D10	45	全面
9	40	D10	70	なし
10	30	D10	45	なし
11	30	D10	45	全面
12	30	D10	70	なし

コンクリートの配合を表 - 1 に、実験ケースを表 - 2 に、供試体形状を図 - 1 に示す。

供試体はコンクリート打設後 1 日で脱枠し、28 日間水中養生を行った。供試体の上下面には、絶縁のためシート接着用のエポキシ樹脂を塗布した。連続繊維シートは、炭素繊維シート（厚さ 0.111mm）を用いた。

通電試験では、供試体を 3%NaCl 溶液に入れ鉄筋を陽極、供試体外部の銅板を陰極として、直流電源装置を接続し、30V の定電圧を 10 日間加えた。供試体を通る電流の経時変化を測定した。

2.2 実験結果

全供試体の電流の経時変化を図 - 2 に示す。供試体 1 と 4 では、途中で鉄筋の腐食膨張により腐食ひび割れが発生し、その後電流が増加した。腐食ひび割れが発生するとかぶりコンクリートの物質透過抵抗性が著しく損なわれてしまうことがわかる。

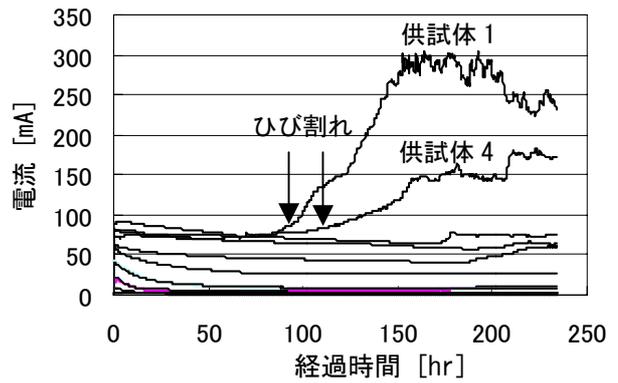


図 - 2 電流の経時変化

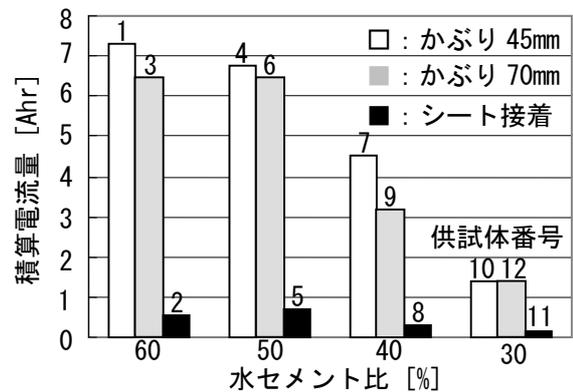


図 - 3 通電開始から 90 時間までの積算電流量

統一的な条件の下で、各供試体のかぶりコンクリートの物質透過抵抗性を比較するために、いずれの供試体にも腐食ひび割れが発生していない、通電開始から 90 時間までの積算電流量を指標とすることにした（図 - 3）。

図 - 3 によると、シートを接着していない供試体では、水セメント比が高いシリーズ (W/C=50,60%) においても、また低いシリーズ (W/C=30%) においても、かぶり厚さの違いによる影響は小さく、それらの中間の水セメント比 40% のシリーズにおいて、かぶり厚さの違いの影響が最も大きく現れた。

シートを側面全体に接着した場合、もとのコンクリートの水セメント比にかかわらず、積算電流量は小さくなった。シート接着により、かぶりコンクリートの物質透過抵抗性はたしかに改善されることが確認できる。本実験の条件下では、その改善効果は、30~60%の範囲でコンクリートの水セメント比を小さくするよりも、

45～70mm の範囲でかぶり厚さを大きくするよりも、大きいといえる。

3. 連続繊維シートによる塩化物イオン遮蔽効果の定量化

3.1 方法論

一般環境下におけるコンクリート中の塩化物イオン移動流束の成分は、液状水の移動に伴うバルク移動（移流）と液状水中の塩化物イオンの濃度拡散がある。いま、コンクリートが飽水状態で海中にあるような理想的な条件下にあると考えると、塩化物イオンの移動流束は濃度拡散が支配的となる。

さて、2章で述べた実験では、電位勾配を駆動力として、コンクリート中を塩化物イオン等の荷電粒子を移動させた。これと、濃度勾配を駆動力とした塩化物イオンのコンクリート中の拡散移動とは、異なる現象であるが、コンクリート中のイオンレベルの物質の移動という点では共通しており、それぞれの現象に影響するコンクリートの物質移動抵抗性は相互に関連が深いと考えられる。

そこで、本研究では、まず、先述した実験結果と拡散移動を仮定した数値解析結果とを比較し、両者の相関性を確認する。その後、その相関性を利用し、連続繊維シートの塩化物イオン透過抵抗性を同定する。

3.2 連続繊維シートの塩化物イオン透過抵抗性のモデル化

コンクリート表面が液状水に接する条件下における塩化物イオンの移動に関する境界条件は、熱伝導問題における熱伝達境界と類似の考え方を適用し、表面より出入りする塩化物イオンの流束を式(1)で表すことにする。

$$J_{difCl} = -D_{Cl} \frac{C_{free(0)} - C_{ext}}{h_{Cl}} \quad (1)$$

ここに、 J_{difCl} ：境界における塩化物イオンの流束（流入を正とする） $[\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}]$ 、 D_{Cl} ：水中における塩化物イオンの拡散係数 $[\text{m}^2/\text{s}]$ 、 $C_{free(0)}$ ：コ

ンクリート表面の自由塩化物イオン濃度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 C_{ext} ：コンクリート外部の液状水中の自由塩化物イオン濃度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 h_{Cl} ：コンクリート表面近傍に形成される塩化物イオン濃度勾配の層（境界層）の厚さ $[\text{m}]$ である。 h_{Cl} は表面近傍における液状水の対流の状況等に依存すると考えられる量である。

コンクリート表面に連続繊維シートを接着した場合、シートと接着樹脂より成る層が塩化物イオンのコンクリート中への侵入に抵抗する。この効果を、式(1)における表面の境界層の厚さ h_{Cl} を仮想的に増加させることで表現することにする。

$$h'_{Cl} = h_{Cl} + h_{cf} \cong h_{cf} \quad (2)$$

ここに、 h_{cf} ：シートと接着樹脂より成る層の仮想厚さ $[\text{m}]$ であり以下で定義する。

$$h_{cf} = t_{cf} \frac{D_{Cl}}{D_{cf}} \quad (3)$$

ここに、 t_{cf} ：シートと接着樹脂より成る層の実際の厚さ $[\text{m}]$ 、 D_{cf} ：シートと接着樹脂より成る層の塩化物イオンの拡散係数 $[\text{m}^2/\text{s}]$ である。以下、本論文では、 D_{cf} を単にシートの拡散係数と称することがある。

3.3 円柱供試体の解析方法

続いて、水中に置かれたコンクリート円柱供試体内の半径方向（側面より中心部に向かう方向）の塩化物イオンの拡散移動を解析する。供試体の高さ方向には現象が一様であるとする、軸対象問題となる。計算は差分法により行う。

表面（側面）では3.2節で述べた境界条件を用いる。供試体周囲の水溶液の自由塩化物イオン濃度は、海水を想定して $C_{ext}=19\text{kg}/\text{m}^3$ とする。シートを接着していない場合の、塩化物の移動に関する境界層の厚さを $h_{Cl}=0.00075\text{m}$ とする。この値は、物理的意味が類似していることから、大気中におけるコンクリートの乾燥現象の解析の際にコンクリート表面の湿度勾配層の厚さとして用いた値³⁾を、準用したものである。

濃度拡散による移動では、円柱供試体の中心で塩化物イオンは消費されず蓄積される。しかし、2章で述べた実験では、供試体中心の電極（鉄筋）でイオンの消費・生成が生じる。この状況を、拡散移動の数値解析において擬似的に表現するために、供試体中心に埋め込まれた鉄筋表面においても、3.2節で述べた境界条件を適用することにする。この境界において仮想的に与えるコンクリート外部の液状水中の自由塩化物イオン濃度は $C_{ext}=0\text{kg/m}^3$ 、境界層の厚さは外部境界と同じく $h_{Cl}=0.00075\text{m}$ とする。

3.4 実験結果と解析結果の相関性の検討

まず、シートを接着しないシリーズの結果を用いて、実験結果と解析結果の相関性を検討する。コンクリート中の塩化物イオンの移動は、細孔構造に基づく解析法¹⁾を用いて行った。コンクリートの細孔構造および物質移動抵抗係数は、配合より予測される値を用いた³⁾。

各供試体の実験結果の代表値として、通電開始から90時間における積算電流量 $Q[\text{Ahr}]$ を用いる。解析結果の代表値として、定常状態において供試体中心の鉄筋表面の境界を通過する塩化物イオン流束 $J[\text{kg/m}^2/\text{s}]$ を選ぶ。水セメント比30, 40, 50, 60%, かぶり45, 70mmの計8個の供試体について、 Q を横軸に J を縦軸にプロットした結果を図-4に示す。図には近似直線も記入した。

図-4を見ると、水セメント比、かぶり厚さによらず、実験結果と解析結果には相関性が認められる。このことは、3.1節で述べた仮説が正しいことを示唆していると判断できる。つまり、実験と解析とでは、想定した現象は同じではないものの、コンクリート中のイオンレベルの物質の移動という点では類似性がある。したがって、両現象に関与するコンクリートの物質移動抵抗性は相互に関連が深いと考えられる。

図-4に示した実験結果と解析結果の関係を表す近似直線の式は(4)である。

$$J = 2 \times 10^{-10} Q + 3 \times 10^{-10} \quad (4)$$

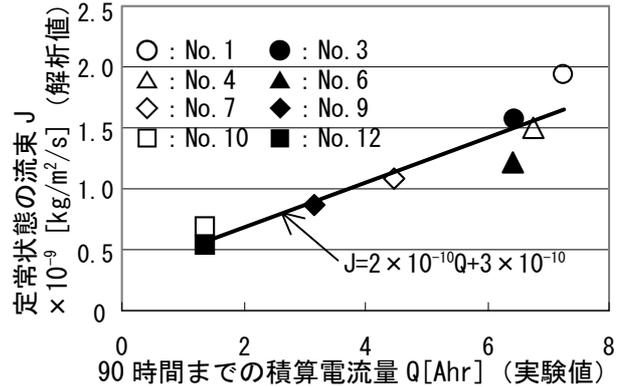


図-4 実験結果 Q と解析結果 J の相関性

表-3 シートの拡散係数の解析結果

供試体	11	8	5	2
W/C [%]	30	40	50	60
Q (実験値) [Ahr]	0.13	0.28	0.68	0.56
$J \times 10^{-10}$ (推定値) [$\text{kg/m}^2/\text{s}$]	3.26	3.56	4.36	4.12
$D_{cf} \times 10^{-14}$ (同定値) [m^2/s]	4.69	3.03	2.99	2.29

式(4)は、コンクリートの種類、かぶり厚さによらず、本実験結果と解析結果の相関関係を表していると考えられる。そこで、次節では、シートを接着した場合にもこの関係式が成り立つものと仮定し、シートの塩化物イオン拡散係数を同定する。

3.5 連続繊維シートの拡散係数の同定

実験結果と解析結果の関係式(4)に、シートを接着した供試体の実験結果 Q を代入し、対応する流束 J を求める。次に、シートの拡散係数 D_{cf} の値を仮定して塩化物イオンの拡散移動解析を行い、定常状態において供試体中心の鉄筋表面の境界を通過する塩化物イオン流束を求める。これが J に一致するまで、シートの拡散係数 D_{cf} の値の仮定・修正を繰り返す。なお、本研究では、連続繊維シートと接着樹脂より成る層の厚さ t_{cf} は、実測値ではないが近似的な値として1mmと仮定した。このようにして求めた D_{cf} を表-3に示す。

拡散係数 D_{cf} はシートと接着樹脂に固有の物性値である。表-3の結果を見ると、母材のコンクリートの水セメント比により多少異なった値が同定されているが、オーダー的には一致した拡散係数を求めることができたといえる。

次にシートの拡散係数 D_{cf} をどの程度とする
と、すべての水セメント比のケースの結果を平均
的に予測し得るかを調べるために、 D_{cf} を 2×10^{-14} , 3×10^{-14} , $4 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ とし、各水セメント
比のケースを計算した。結果を図 - 5 に示す。

図 - 5 中の直線は先に求めた関係式(4)を表し
ている。プロットした点の集合がこの直線に近
いほど実験結果を平均的に再現しているといえ
る。図 - 5 の結果より、 $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ を本実験に
用いたシートの拡散係数と決定した。

4. 既往の方法との比較

4.1 連続繊維シートの塩化物イオン拡散係 数の値に関する検討

本研究で同定したシートの拡散係数の値を、
既往の研究に照らし合わせて検討する。比較の
ための値として、JCI コンクリート構造物の補
修工法研究委員会⁴⁾において補修工法の性能評
価に関する解析で使用された各種補修材の拡散
係数の値を参照する。表 - 4 に、当該解析で用
いられたモルタルと塗膜の塩化物イオン拡散係
数の値と、本研究で用いたコンクリートと連続
繊維シートの塩化物イオン拡散係数の値を示す。

比較のために、本研究で用いた拡散係数の値
は、報告書⁴⁾の定義と同じく、コンクリート細
孔溶液中の塩化物イオン濃度を勾配基準とした
拡散係数に換算してある。

本研究で同定された連続繊維シートの拡散係
数は、コンクリートの拡散係数の約 1/300, JCI
委員会で用いられた塗膜の拡散係数の値の約
1/20 となった。大略的に見れば、コンクリート
やモルタルの拡散係数の 2~3 オーダー小さい
値という点で、連続繊維シートの拡散係数は塗
膜の拡散係数と共通した結果となっている。

なお、JCI 委員会の解析で用いられた塗膜の
拡散係数の値は、実験結果に基づくものではな
く、モルタルの 1/100 と仮定して設定した値と
のことである。また既述したように、著者らも
既往の研究¹⁾において、シートの物質透過抵抗
性をコンクリートの 100 倍と仮定した。本研究

において求めた拡散係数が正しいとすれば、こ
れら既往の研究において用いられた仮定が概ね
妥当であったことになる。

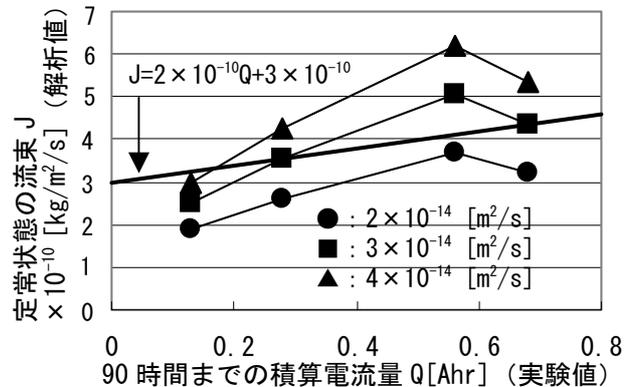


図 - 5 実験結果 Q と解析結果 J の関係

表 - 4 拡散係数の比較

JCI委員会	普通モルタル	塗膜 (ポリマーセメント系)
	$7.38 \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{s}]$	$7.38 \times 10^{-14} [\text{m}^2/\text{s}]$
本研究	コンクリート	シート (炭素繊維)
	$1.07 \times 10^{-12} [\text{m}^2/\text{s}]$	$3.27 \times 10^{-15} [\text{m}^2/\text{s}]$

4.2 シートを接着した構造物中の塩化物イ オン移動解析法に関する検討

(1) 概要

本研究において提案した方法による場合と、
既往の方法による場合とで、シート接着後のコ
ンクリート中の鋼材位置における塩化物イオン
濃度の経時変化を予測した結果を比較した。

比較を行った既往の解析法は、著者らが既往
の研究¹⁾において用いた、シートの物質透過抵
抗性を単純にコンクリートの 100 倍とする方法
(以下従来法と記す)、土木学会「連続繊維シー
トを用いたコンクリート構造物の補修補強指
針」²⁾に採用された、シートの塩化物イオン遮
蔽効果が接着後一定期間は完全に保たれ、それ
以降は全く期待しないとする方法 (以下土木学
会法と記す) の二種類である。

構造物の供用開始時にシートを接着した場合
について解析した。コンクリートの水セメント
比は 50% (W=165, C=330kg/m³), かぶり厚さは
45mm とした。

構造物表面の境界条件は、提案法および従来

法では、3.3 節と同じく構造物周囲の水溶液の自由塩化物イオン濃度は、海水を想定して $C_{exr}=19\text{kg/m}^3$ とした。これと計算条件を統一するため、土木学会法では構造物表面における塩化物イオン濃度 C_0 を 5.414kg/m^3 とした。

土木学会法では、各種安全係数を 1.0 として計算し、シートの遮蔽効果が持続する期間は、指針²⁾に従い 10 年とした。

土木学会法では、半無限領域を対象とした計算を行うことになるが、提案法と従来法では有限領域を計算対象としなければならない。計算条件をなるべく近づけるために、提案法と従来法では、コンクリート表面からかぶり厚さの 3 倍の位置を仮想的な境界とし、その境界において塩化物イオンの流束を $0\text{kg/m}^2/\text{s}$ とした。

(2) 解析結果

鉄筋位置における全塩化物イオン量の経時変化を解析した結果を図 - 6 に示す。

工学的に興味があるシート接着後数十年の範囲では、鉄筋位置における塩化物イオン濃度は、土木学会法による予測結果が最も高く、次いで従来法、提案法の順となっている。土木学会法は、計算が簡便、かつ安全側の結果を算出していることが確認できる。実験結果より導いたシートの拡散係数を用いた提案法の計算結果によると、土木学会法で予測されるよりも、実際にはシートによる鋼材の腐食抑制効果を期待できる可能性を示唆している。

しかし、ここでの数値実験では、供用期間中のシートの剥離や樹脂そのものの劣化を想定していないので、この結果が直ちに実構造物に適用できるわけではないことに留意しなければならない。これらを考慮することが、今後の課題であると考えている。

5. まとめ

本研究において以下の知見が得られた。

- (1) 連続繊維シートをコンクリート表面に接着することにより、コンクリート中の鉄筋に腐食物質が到達するのを抑制する効果があ

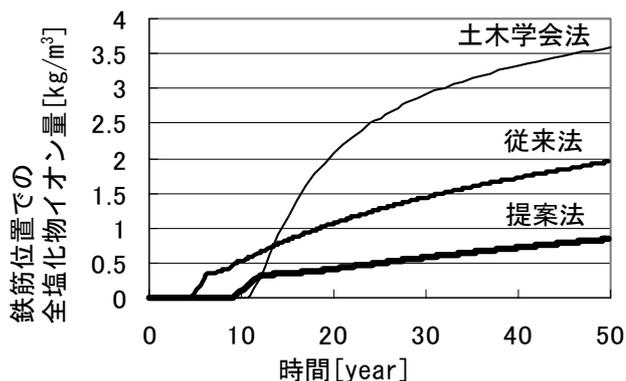


図 - 6 鋼材位置における塩化物イオン濃度の経時変化の解析結果

ることが実験により確かめられた。その効果は、30~60%の範囲でコンクリートの水セメント比を小さくするよりも、45~70mmの範囲でかぶり厚さを大きくするよりも、大きい。

- (2) 実験結果と数値解析を併用することにより、連続繊維シートと接着樹脂より成る層の塩化物イオン拡散係数を定量化することができた。連続繊維シートの拡散係数は、コンクリートの拡散係数の約 1/300 であった。
- (3) 土木学会指針の連続繊維シートの塩化物イオン遮蔽効果評価法は、簡便かつ安全側の結果を算定することが確認できた。

参考文献

- 1) T.Shimomura and K.Maruyama: Service life prediction of concrete structures subjected to chloride attack by numerical simulation, RILEM Proceedings PRO 16, pp.25-34, Oct. 2000.
- 2) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー101，2000.7
- 3) 下村 匠・福留和人・前川宏一：微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析，土木学会論文集，No.514/V-27，pp.41-53，1995.5
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書（III），1996.10