

# 連続繊維シートによるコンクリート構造物の補修補強効果の定量評価

コンクリート研究室 笠原裕子  
指導教官 下村 匠  
丸山久一

## 1. はじめに

近年，コンクリート構造物の補修補強材料として適用されている連続繊維シートは，補修（物質遮蔽）効果と補強（引張り負担）効果を兼ね備えた材料である．この連続繊維シートの補強効果については数多く研究がなされているが，内部鋼材が腐食した RC 部材にシート接着を行った場合の力学性能については，まだ研究の余地が残されている．補修効果については，近年積極的に評価する試みがなされている．土木学会指針<sup>1)</sup>や本研究室における既往の研究<sup>2)</sup>において物質遮蔽効果の評価が行われているが，どちらも定量的な根拠が不十分である．すなわち，現段階では定量評価法が確立されていないと言える．

一方，深刻な構造物の劣化を背景として，最近では構造物の補修補強に関する研究が数多くなされている．しかし，どんなに優れた技術が開発されても，既設構造物の劣化度合いや補修補強による効果が評価できなければその技術を有効に使うことはできない．従って，補修補強効果を考慮できる構造物の経時変化予測手法の開発が必要であると言える．

以上の背景を踏まえ，本研究では補修補強工法としてシート接着工法を取り上げ，補修補強効果を定量的に評価できる構造物の経時変化予測システムの構築を目的とした．

## 2. 連続繊維シートの補修効果の定量評価

### 2.1 シートの物質遮蔽モデルの定式化

コンクリート表面が液状水に接する条件下において，コンクリート表面より出入りする塩化物イオンの流束は次式で表すことができる．

$$J_{diffCl} = -D_{Cl} \frac{C_{freeCl(0)} - C_{freeCl(0)}}{h} \quad (1)$$

ここに， $J_{diffCl}$ ：境界における塩化物イオンの流束[kg/m<sup>2</sup>/s]， $D_{Cl}$ ：水中における塩化物イオンの拡散係数[m<sup>2</sup>/s]， $C_{freeCl(0)}$ ：コンクリート表面の自由塩化物イオン濃度[kg/m<sup>3</sup>]， $C_{freeCl(0)}$ ：コンクリート外部の液状水中の自由塩化物イオン濃度[kg/m<sup>3</sup>]， $h$ ：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層（境界層）の厚さ[m]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，シートと接着樹脂の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  $h$  を仮想的に増加させることで表現することにした．(図 1 参照．)

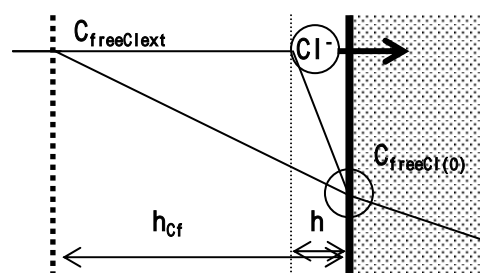


図 1 塩化物イオン移動モデル

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

ここに、 $h_{cf}$ ：シートと接着樹脂層の仮想厚さ[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、 $t_{cf}$ ：シートと接着樹脂層の実際の厚さ[m]、 $D_{cf}$ ：シートと接着樹脂中の塩化物イオン拡散係数[m<sup>2</sup>/s]である。材料に固有の物性値である拡散係数を導入したことにより、合理的な根拠をもってシートの物質遮蔽効果の値を実験結果より同定することができる。また、シートや樹脂の種類およびシートの厚さによる物質遮蔽効果の違いも表現できる。

## 2.2 既往の連続繊維シート of 物質遮蔽効果に関する実験

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。

供試体は、水セメント比 60, 50, 40, 30% の各コンクリートに対し、図 2 に示す 3 種類の供試体を設けた。供試体の上下面には、絶縁のため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。

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。

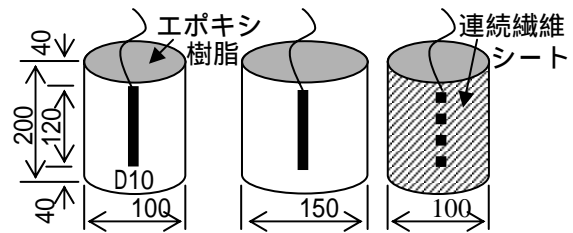


図 2 供試体形状

## 2.3 実験結果と解析結果の相関性の検討

2.1 で定式化を行ったシートの物質遮蔽効果評価法は、濃度勾配を駆動力として塩化物イオンを移動させている。一方、2.2 で述べた実験では、電位差を駆動力として塩化物イオンを移動させており、両者は塩化物イオン移動の駆動力が異なる。しかし、ともにコンクリート中の物質移動現象であり両者の相関性は深いと考えられる。そこで、拡散係数の同定の前に、先述した実験結果と提案法を用いた解析結果を比較し、両者の相関性を確認する。

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  $Q$ [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  $J$ [kg/m<sup>2</sup>/s]を選ぶ。水セメント比、30, 40, 50, 60%ごとにかぶり 45, 70mm の 8 つの供試体について、実験結果  $Q$  を横軸に、解析結果  $J$  を縦軸にプロットした結果を図 3 に示す。図には両者の近似直線も記入した。

図 3 をみると、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、解析で想定した塩化物イオン移動の駆動力（濃度勾配）と実験における駆動力（電位差）は異なるが、両者の類似性が強いことを意味している。図 3 に示した実験結果と解析結果の近似直線の式は(4)である。

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

この関係式は、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、シートを接着した場合にもこの関係式が適用できるものと仮定し、シートの塩化物イオン拡散係数  $D_{cf}$  を同定することとした。

#### 2.4 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。このようにして求めた  $D_{cf}$  を表 1 に示す。

拡散係数  $D_{cf}$  はシートに固有の値である。表 1 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るものの、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。

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

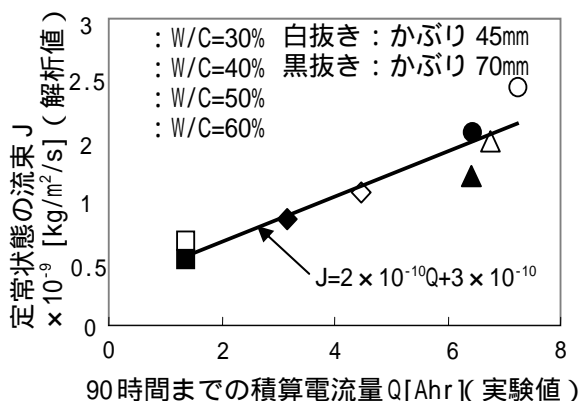


図 3 実験結果  $Q$  と解析結果  $J$  の相関性

表 1 シートの拡散係数の解析結果

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) [kg/m <sup>2</sup> /s]	3.26	3.56	4.36	4.12
$D_{cf} \times 10^{-14}$ (同定値) [m <sup>2</sup> /s]	4.69	3.03	2.99	2.29

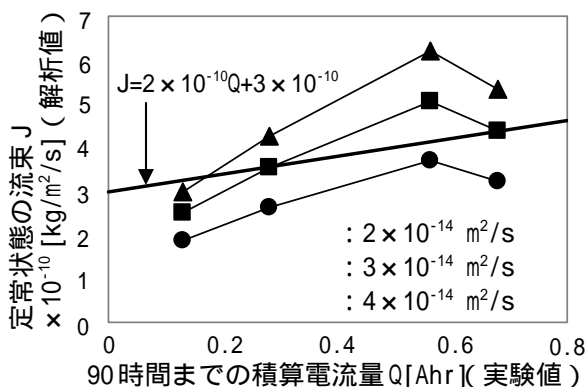


図 4 実験結果  $Q$  と解析結果  $J$  の関係

に、 $D_{cf}$  を  $2 \times 10^{-14}$  ,  $3 \times 10^{-14}$  ,  $4 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$  とし、各水セメント比のケースを計算した。結果を図 4 に示す。

図 4 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 4 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同定した。

### 3. 内部鋼材が腐食した連続繊維シート補強 RC 部材の一軸引張試験

#### 3.1 実験概要

図 5 に示す供試体を用いて、一軸引張試験を行った。供試体は、 $100 \times 100 \times 1000\text{mm}$  のコンクリート角柱の中心に D19 異形鉄筋を 1 本埋め込んだものを基準とし、コンクリートの側面にシートを接着したものの、内部鉄筋を腐食させたもの、内部鉄筋を腐食させコンクリートの側面にシートを接着したものの計 4 本である。本実験では、鉄筋に直接引張力を作用させる方法で加力するため、コンクリート部材両端部において鉄筋を露出させている。

内部鉄筋の腐食は、供試体の養生終了後、電食により行った。シートの接着は、養生終了後、もしくは内部鉄筋の腐食終了後それぞれ行った。なお、シートには炭素繊維シート（厚さ  $0.111\text{mm}$ ）を用いた。

#### 3.2 実験データ処理方法

実験結果より得られる鉄筋とコンクリート、シートの分担荷重を図 6 に示す。

実験より、荷重 ( $P_s + P_{cf} + P_c$ ) と供試体の上下に取り付けた変位計の測定値より算出される平均ひずみの関係が得られる。この値から、事前に行っておいた単体鉄筋の引張試験結果を引くことによりシートとコンクリートの負担荷重 ( $P_{cf} + P_c$ ) が得られる。この値から、シートの表面に接着したひずみゲージより算出されるシートの負担荷重を引くことによりコンクリートの負担荷重が得られる ( $P_c$ )。

#### 2.3 実験結果

内部鉄筋の腐食していない場合のコンクリートの平均応力 平均ひずみ関係を図 7 に、内部鉄筋の腐食している場合のコン

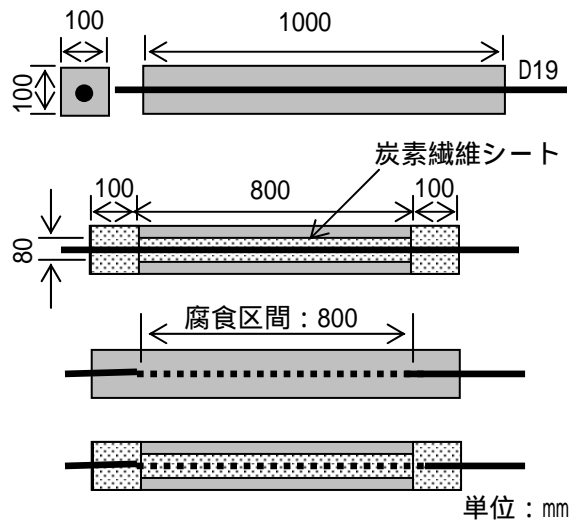


図 5 供試体形状

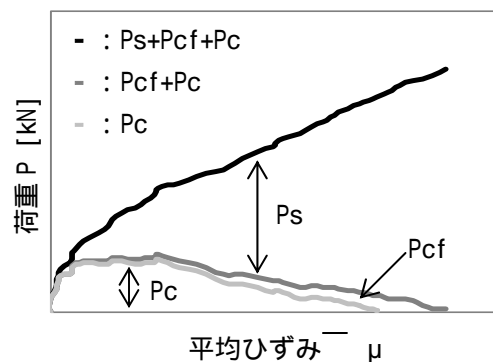


図 6 鉄筋、コンクリート、シートの分担荷重

クリートの平均応力 平均ひずみ関係を図 8 に示す。

まず、内部鋼材が腐食していない場合について検討する。図 7 を見ると、シート接着の有無にかかわらずほぼ同様な結果が得られている。このことより、内部鋼材が腐食していない供試体では、コンクリートのテンションスティフニング効果はシート補強下においても十分機能することが確認できる。

次に、内部鋼材が腐食している場合について検討する。シート接着がない場合、内部鋼材の腐食に伴いコンクリートの平均応力は低下する。しかし、表面にシートを接着することにより、コンクリートの平均応力は内部鋼材が腐食していない場合と同程度の値まで回復するという結果となった。このことより、シートは鋼材腐食によるコンクリートのテンションスティフニング効果の低下を回復できることが確認できる。

#### 4. 連続繊維シートによる補修補強効果を考慮した構造物の数値実験

2 で定量評価を行ったシートの補修効果と、3 でその評価法を検証したシートの補強効果を用いて数値実験を行い、実環境下におけるシート補修補強コンクリート構造物の耐久性（鉄筋位置での全塩化物イオン量）と力学性能（曲げ耐力）の経時変化を試算した。構造物の耐久性能と曲げ耐力の経時変化に影響を及ぼす要因として、シート接着時期の影響について検討した。解析対象構造物は、鉄筋コンクリート単純桁（高さ：1400mm、幅：400mm、かぶり：45mm、鉄筋：8@D32）とした。環境条件は、塩分の飛来する大気中を想定した。耐久性能の解析結果を図 9 に、曲げ耐力の解析結果を図 10 に示す。

まず、耐久性向上効果の数値実験結果について検討する（図 9）。シートを接着していない場合、供用開始から 20 年目以降で鉄筋位置での全塩分量は鋼材腐食発生限界濃度を超えてしまった。しかし、新設時、10 年目、20 年目にシートを接着した場合は、十分時間が経過しても鉄筋位置での全塩分量は鋼材腐食発生限界濃度よりも小さい値

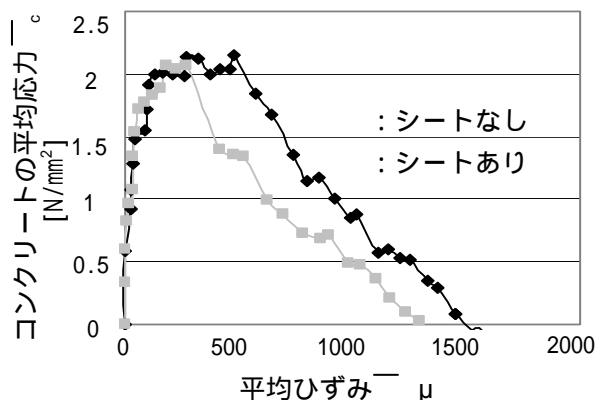


図 7 コンクリートの平均応力 平均ひずみ関係（内部鋼材の腐食なし）

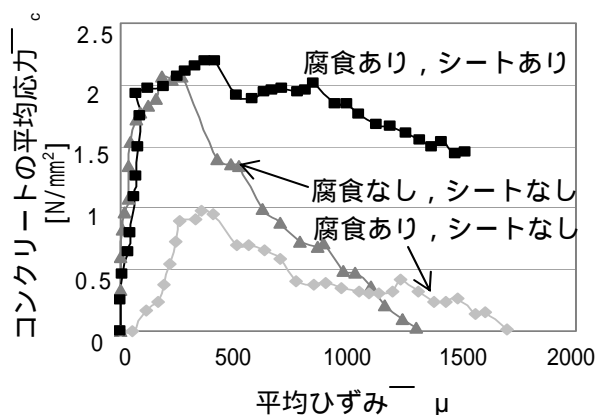


図 8 コンクリートの平均応力 平均ひずみ関係（内部鋼材の腐食あり）

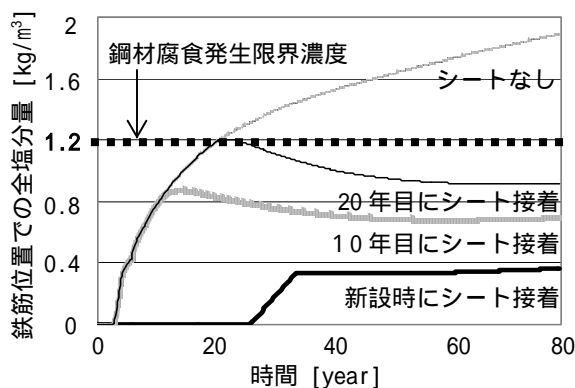


図 9 鉄筋位置での全塩分量解析結果

のままであった。このことより、シートを接着した場合、シートの劣化さえなければ数十年間塩化物イオンによる鋼材の腐食を防げることが確認できる。

次に、力学性能向上効果の数値実験結果について検討する(図 10)。シートを接着していない場合と新設時よりシートを接着した場合を比較した場合、シートを接着することにより曲げ耐力が増大する結果となった。また、シートを接着していない場合は、時間の経過に伴い曲げ耐力は低下していくが、新設時よりシートを接着した場合は時間が十分経過しても曲げ耐力はシート接着時とほぼ同程度の値であった。このことは、10年目、20年目にシートを接着した場合にも同様の傾向が見られた。このことより、シートの劣化さえなければ、シート接着を行うと、シート接着時期にかかわらず構造物の曲げ耐力を向上できること、数十年間曲げ耐力をシート接着時の値に維持できることが確認できる。

## 5. 結論

本研究では、鉄筋コンクリート構造物の補修補強工法としてシート接着工法を取り上げ、連続繊維シートの補修(物質遮蔽)効果と補強(引張力負担)効果を実験に基づき定量評価し、その成果を構造物の経時変化予測システムに導入した。本研究により、以下の知見を得た。

- (1) 材料に固有の物性値であるシートの拡散係数  $D_{cf}$  を用いて、シートの物質遮蔽モデルの定式化を行った。
- (2) 実験結果に基づき、シートの拡散係数  $D_{cf}$  を同定した。(  $D_{cf} = 3 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$  )

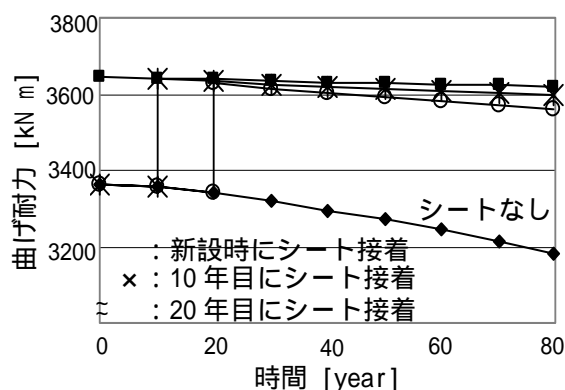


図 10 曲げ耐力解析結果

- (3) シートを接着しても、コンクリートのテンションスティフニング効果が機能することが確認できた。
- (4) 鋼材の腐食した RC 部材にシート補強した場合、腐食によるコンクリートのテンションスティフニング効果の低下が回復されることが確認できた。
- (5) 本研究で定量化したシートの補修補強効果を用いて、構造物の性能の経時変化に関する数値シミュレーションを行った。

## 参考文献

- 1) 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，pp39-40，2000.7
- 2) 土木学会：性能照査型システムにおけるコンクリート構造物の補強，-185-196，2001.6
- 3) Y Chenna：連続繊維シート補強コンクリート構造物の耐久性，長岡技術科学大学修士論文，2002.2