

連続繊維シートによるコンクリート構造物の補修補強機構のモデル化

Modeling of upgrading of concrete structures by externally bonded continuous fiber sheet

下村 匠*, 笠原裕子**

Takumi Shimomura and Hiroko Kasahara

*博士 (工学), 長岡技術科学大学助教授, 工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

**工修, 新構造技術, 北陸支店 (〒951-8067 新潟市本町通七番町 1153 番地 新潟本町通ビル 6F)

Effectiveness of continuous fiber sheet to protect concrete from aggressive materials and to strengthen concrete members was investigated. Diffusion coefficient of the layer of continuous fiber sheet and epoxy resin was quantified by coupling erosion test and numerical transport analysis. Mechanical behaviors of corroded reinforced concrete members with continuous fiber sheet were examined. It was clarified that continuous fiber sheet can not only carry tensile stress in the member but also recover the tension stiffening effect of concrete that had been deteriorated by corrosion. Numerical life predictions of concrete structures were demonstrated taking upgrading by continuous fiber sheet into account.

Key Words: continuous fiber sheet, upgrading, corrosion, life prediction, maintenance

1. はじめに

社会, 経済の流れを受けて, 既設の社会基盤構造物のメンテナンスが重要視されるようになって久しい。これにもなう技術的課題のひとつに, 信頼性が高く汎用性に富む構造物の劣化予測技術の開発が挙げられる。構造物の使用材料の性質, 形状・寸法等の初期条件, 供用期間中の荷重条件, 環境条件を入力情報として, 構造物の性能の経時変化を, 科学的方法論に則り客観的に予測する技術が確立されれば, 構造物の耐久設計, 維持管理を合理的かつ効率的に行うための強力な支援ツールとなり得ると考えられるからである¹⁾。特に既設構造物の維持管理を考えた場合, 種々の補修補強工法の効果を定量的に考慮できる構造物の寿命予測システムの確立が望まれる。その流れのもと, 本研究は, 連続繊維シート接着によるコンクリート構造物の補修補強効果を数値解析に取り入れるためのモデルの開発に取り組んだものである。

周知のように, 鉄筋コンクリート構造物は内部鋼材の腐食に代表されるように, 供用期間中の経時的な劣化が問題となることがある。その対策として, 既設構造物を対象として脱塩工法や表面塗膜などの補修工法が適用されている。一方, 供用開始後の耐震補強や活荷重の増加に対応するための補強事例も多く, そのための補強工法も種々ある。このように, 目的からみれば補修と補強は区別できるものの, どちらも供用中の構造物に施す維持管理上の対策であり, 構造物の性能の時間変化を制御するという点においては共通している (図-1)。したがって, 汎用的な構造物の寿命予測システムの確立のためには, いわゆる補修工法も

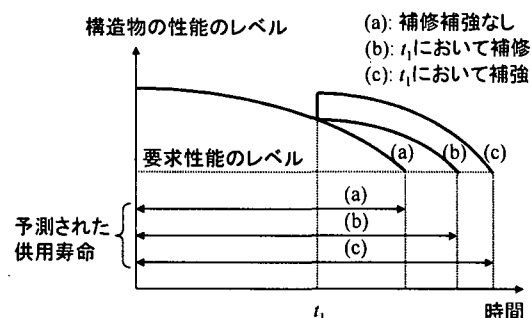


図-1 構造物の性能の経時変化のイメージ図

補強工法も, 齊しく, その効果を定量的に評価する技術を開発することが望ましい。

本研究で取り上げる補修補強材料である連続繊維シートは, 布状に編んだ炭素やアラミド繊維であり, 樹脂を用いて既設コンクリート構造物の表面に接着することにより実用される。連続繊維シートは補修効果と補強効果を兼ね備えた材料であるといえる。なぜなら, 構造物表面に接着された連続繊維シートは, 引張力を負担する外部補強材として効果と, コンクリート内部に有害物質の侵入を防ぐことにより構造物の劣化の進行を抑制する効果の双方が期待できるからである²⁾。本研究では, 独自に行った室内試験により, 連続繊維シートの補修効果, 補強効果双方を定量化し, 数値解析に適用可能なモデルを提案する。

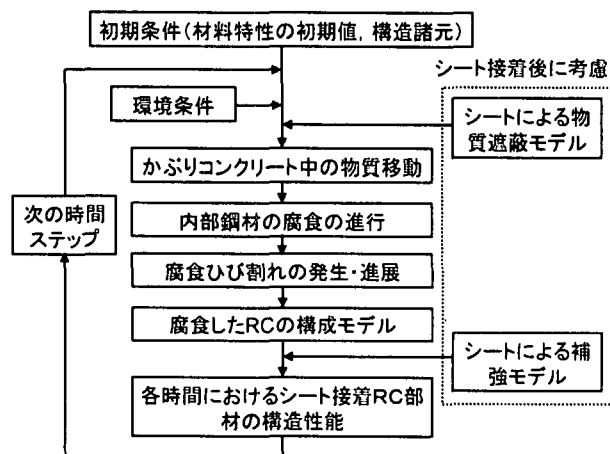


図-2 シート接着RC 構造物の性能の経時変化解析フロー

2. 本研究の概要

図-2は連続繊維シート接着による補修補強を考慮した、コンクリート構造物の性能の経時変化予測フローである。本研究では、このような数値解析に適用可能なシートによる補修補強モデルの開発を目的としている。

連続繊維シートは炭素繊維やアラミド繊維で形成されており、一般には、その高い引張強度を利用して、外部補強材として、鉄筋コンクリート部材の耐力やじん性の向上などの補強目的に用いられている。連続繊維シートによる補強効果に関しては研究例も多く、実用的な補強設計を可能とする指針が体系化されるに至っている²³⁾。しかし、シートの補強効果に関する研究のほとんどが、劣化していない健全な既設コンクリート部材への適用を念頭においたものである。そこで本研究では、劣化した部材へのシート接着をも視野に入れ、内部鋼材の腐食の程度を実験パラメータとしてシート補強鉄筋コンクリート供試体の一軸引張試験を行う。実験結果をもとに、部材中におけるシートの平均引張剛性、すなわち、シートの付着区間、剥離区間を含む領域平均的な引張力負担特性に着目してシートの補強効果の定量化を試みる⁴⁾。

一方、連続繊維シートには塗膜のように塩化物イオンや水分などの鋼材腐食促進物質のコンクリート中への侵入を防ぐ効果もある。これは、シート接着の際に、コンクリート表面にエポキシ樹脂を塗布して硬化させることによるものであり、正確には、シートではなくむしろ樹脂の物質遮蔽効果であるが、本論文では、樹脂を含める場合も、単に、連続繊維シートと称している。連続繊維シートの物質遮蔽効果、換言すれば補修効果、に関する研究例は少ない。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」では、シートによる塩化物イオン遮蔽効果の照査が取り入れられたが、まだ十分な研究実績がないので、その効果を具体的に表す物性値には、安全を見込んだ値が推奨値として掲載されている。本研究では、シートを接着した鉄筋コンクリート供試体の通電試験を行い、実験結果と数値解析結果を比較することにより、連続繊維シートの塩化物イオン拡散係数を同定する⁹⁾。

本論文の最後では、提案した連続繊維シートによる補修補強モデルを用いて、シート接着による補修補強を考慮した構造物の性能の経時変化の数値シミュレーションを行い、その有効性を総合的に検証する。

3. 連続繊維シートの塩化物イオン遮蔽性の定量化

3.1 実験および解析の概要

連続繊維シート（接着樹脂層を含む）の物質透過抵抗性を実験的に定量化した研究は少ない。その理由のひとつは、接着樹脂の物質透過抵抗性はコンクリートに比べてかなり大きく、コンクリートと同様の試験法を用いたのでは、実際に物質を透過させることが困難であるためと考えられる。そこで著者は、通電実験と塩化物イオン拡散移動の数値解析を併用することにより、連続繊維シートの塩化物イオン拡散係数を同定する方法を開発した⁹⁾。

通電試験では、表面に連続繊維シートを接着したコンクリート供試体に電解液中で一定電圧を加え、電流を流す。本試験では、塩化物イオンだけでなく、種々の荷電粒子がシートとコンクリート中を通過することになる。したがって、測定された電流は、シートとかぶりコンクリートより成るシステムの、イオンレベルの物質透過抵抗性を巨視的に表す指標と考えることができる。

一方、実構造物のシートおよびかぶりコンクリート中において現実に生じるのは、主として、濃度勾配を駆動力とした塩化物イオン等の物質の拡散移動である。

通電試験と拡散移動とでは、物質移動の駆動力は異なるので厳密には同じ現象ではないが、シートおよびコンクリート中のイオンレベルの物質の移動現象という点では共通している。そこで、「両現象におけるコンクリートの物質移動抵抗性は相関が深い」との仮説を設け、まずこの仮説が妥当であることを検証する。仮説の妥当性が検証されたなら、この相関関係がシート接着時にも成立するものと仮定し、シート接着供試体の実験結果と解析結果の比較からシートの拡散係数を決定する。

3.2 シート接着コンクリート供試体の通電によるイオン透過試験

(1) 供試体

通電試験に用いた供試体の形状、寸法を図-3に、供試体の種類を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。供試体は、中心に鉄筋を1本埋め込んだコンクリート円柱とした。コンクリートは水セメント比が30, 40, 50, 60%の4種類を用いた。コンクリートの配合、供試体寸法（かぶり厚さ）、シート接着の有無を実験パラメータとして、全部で12種類の供試体を試験した。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。通電時に円柱の半径方向の電流が卓越するように、シートを接着しない供試体では、上下面にシート接着用のエポキシ樹脂を塗布した。シートを接着する供試体は、エポキシ樹脂を用いて全面（側面および上下面）に炭素繊維シート（厚さ0.111mm）を接着した。

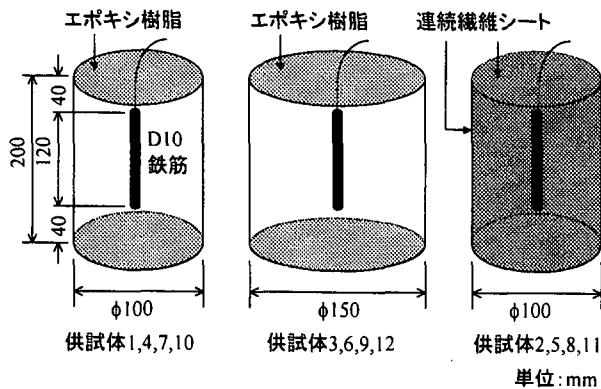


図-3 通電試験に用いた供試体の形状、寸法

表-1 通電試験に用いた供試体の種類

供試体 No.	W/C[%]	かぶり[mm]	シート
1	60	45	なし
2	60	45	あり
3	60	70	なし
4	50	45	なし
5	50	45	あり
6	50	70	なし
7	40	45	なし
8	40	45	あり
9	40	70	なし
10	30	45	なし
11	30	45	あり
12	30	70	なし

表-2 通電試験に用いたコンクリートの配合

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

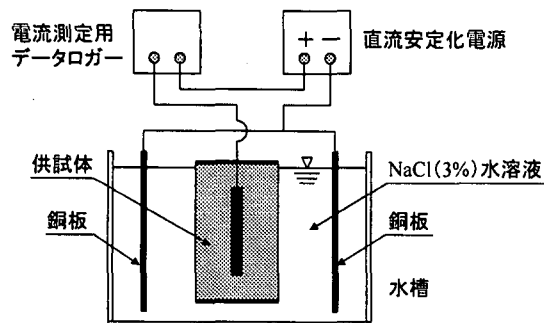


図-4 通電試験装置の概略

(2) 通電方法

図-4 に示すように、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、一定の電圧を加えた。試験中は供試体を通る電流の経時変化を測定した。流れる電流が大きく供試体ごとの差が明確になるように、試行錯誤の結果、加える電圧を 30V に設定した。

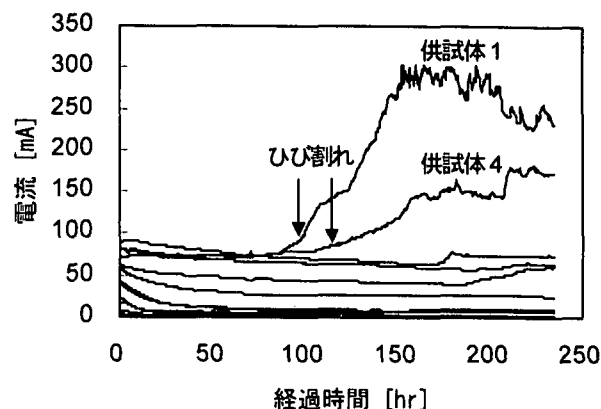


図-5 供試体を通る電流の経時変化

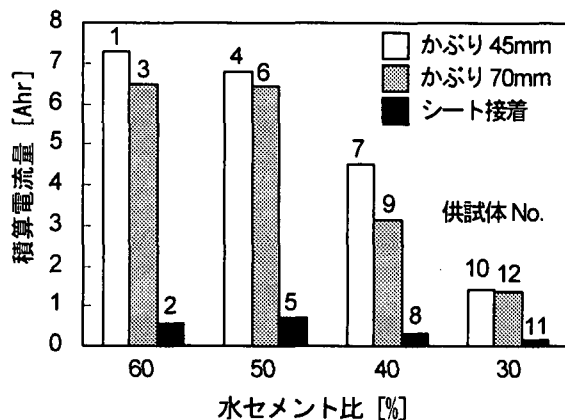


図-6 通電開始から 90 時間までの積算電流量

(3) 実験結果

全 12 体の供試体の電流の測定結果を図-5 に示す。供試体 1 と 4 では、途中で鉄筋の腐食膨張によりコンクリートに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。

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-6)。

図-6 において、まずシートを接着していない供試体の結果に着目すると、水セメント比が小さくなるにつれ、積算電流量が小さくなる傾向が現れている。とくに、水セメント比が 30% から 50% の範囲では、水セメント比の変化に対する積算電流量の変化が大きい。この範囲において、コンクリートの配合による物質透過抵抗性のコントロールが意味を持つといえる。

かぶり厚さに着目すると、いずれの水セメント比のシリーズにおいても、かぶり厚さ 70mm の方が 45mm よりも積算電流量は小さくなっているが、水セメント比 40% のシリーズにおいて、両者の違いが最も大きくなった。このことは、水セメント比が小さい 30% のシリーズでは、コンクリートが十分緻密であるために、かぶり厚さによらず鉄筋が保護され、一方水セメント比が大きい 50、60% のシリー

ズでは、コンクリート組織の緻密さが低いいため、かぶり厚さを大きくしても鉄筋の保護性能はあまり向上しないということを示唆している。換言すれば、かぶり厚さを変化させることで、鉄筋コンクリート部材の鉄筋保護性能が実質的に左右されるのは、40%程度の中間的な水セメント比のコンクリートを用いた場合においてであることが、本実験結果より推察できる。しかし本実験のみではデータ数が少ないので、このことは、今後さらなる検討を加えたい。

さて、図-6において、シートを接着した場合の供試体の結果に注目すると、母材となるコンクリートの水セメント比に関わらず、積算電流量が著しく小さくなっている。本実験結果より、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確かに改善されることが確認できる。シート接着によるかぶりコンクリートの物質透過抵抗性の向上効果は、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、また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。

3.3 シート接着コンクリート部材中における塩化物イオン拡散移動の数値解析

(1) コンクリート中の塩化物イオン移動モデル

シートを接着していない、コンクリート中の塩化物イオンの移動に関しては、著者らが開発したコンクリートの細孔構造に立脚した解析手法を用いる⁶⁷⁾。本法は、コンクリート細孔組織中の気液二相水分移動と塩化物イオンの移動の連成解析手法である。水分および塩分の質量保存則の一般表示を、式(1)(2)にそれぞれ示す。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\text{div}(J_v + J_l) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_{cl}}{\partial t} = -\text{div}\left(J_{cl\text{diff}} + \frac{C_{clf}}{\rho_l} J_l\right) \quad (2)$$

ここに、 w : コンクリート単位体積中の水分量[kg/m³]、 t : 時間[s]、 J_v : 水蒸気の流束[kg/m²/s]、 J_l : 液状水の流束[kg/m²/s]、 C_{cl} : コンクリート単位体積中の全塩分量[kg/m³]、 $J_{cl\text{diff}}$: 塩化物イオンの拡散流束[kg/m²/s]、 C_{clf} : コンクリート単位体積中の自由塩化物イオン量[kg/m³]、 ρ_l : 液状水の密度[kg/m³]である。式(1)(2)中の各流束成分は、それぞれの物質のコンクリート細孔組織中における移動メカニズムに基づき定式化されているが、本論文では割愛する。

式(2)の右辺は、一般環境下におけるコンクリート中の塩化物イオンの移動流束の成分には、右辺第1項の液状水中の塩化物イオンの濃度拡散移動と、第2項の液状水の移動に伴うバルク移動(移流)があることを表している。第2項を評価するには、水分移動との連成解析が必要となる。しかし、いま、コンクリートが飽水状態で海水中にあるような理想的な条件下を考えると、コンクリート中の液状水は静止しているとみなせるので、塩化物イオンの移動流束は濃度拡散が支配的となる。著者らは、コンクリート中の塩化物イオンの濃度拡散による流束を以下のようにモデル化した⁸⁾。

$$J_{cl\text{diff}} = -K_{cl} D_{cl} \text{grad } C_{clf} \quad (3)$$

ここに、 K_{cl} はコンクリート細孔組織中の塩化物イオンの拡散移動特性を表す無次元材料係数であり、細孔組織構造に依存する。 D_{cl} は一般液状水中における塩化物イオンの拡散係数であり、20℃では $1.39 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ である。

コンクリート表面が液状水に接する条件下では、境界において、塩化物イオンの濃度拡散による流入が生じる。この境界条件に対して、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流束(流入を正とする)を以下のように表す。

$$J_{cl\text{diff}} = -D_{cl} \frac{C_{clf}(0) - V_o \cdot C_{ext}}{h_{cl}} \quad (4)$$

ここに、 $C_{clf}(0)$: コンクリート表面における自由塩化物イオン濃度[kg/m³]、 V_o : コンクリート単位体積中の総細孔量[m³/m³]、 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[kg/m³]、 h_{cl} : コンクリート表面近傍に形成される塩化物イオンの濃度勾配の層(境界層)の厚さ[m]である。外部の塩化物イオン濃度 C_{ext} に V_o を乗じるのは、コンクリート単位体積中の濃度に変換するためである。式(4)中の 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物理量である。

(2) 連続繊維シートの塩化物イオン遮蔽効果のモデル化

コンクリートの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コンクリート中への塩化物イオンの侵入に抵抗する効果を、本研究では、式(4)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。

$$\begin{aligned} h'_{cl} &= h_{cl} + h_{cf} \\ &\equiv h_{cf} \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$h_{cf} = t_{cf} \frac{D_{cl}}{D_{cf}} \quad (6)$$

ここに、 t_{cf} : シートと接着樹脂より成る層の実際の厚さ[m]、 D_{cf} : シートと接着樹脂より成る層の塩化物イオン拡散係数[m²/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) 円柱供試体中の塩化物イオン拡散の解析法

続いて、塩化物イオンを含む水溶液中に浸漬さ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ためのいくつかの準備を行う。

供試体の高さ方向には現象が一様であると仮定すると、軸対象問題と考えることができる。数値計算は差分法により行う。解析モデルの概念図を図-7に示す。

供試体表面(側面)では3.3(2)で述べた境界条件を用いる。供試体周囲の水溶液の塩化物イオン濃度は $C_{ext}=19 \text{ kg/m}^3$ とする。シートを接着していない場合の、塩化物イ

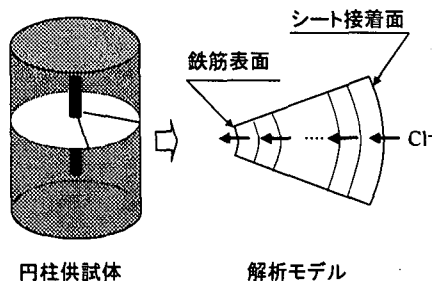


図-7 円柱供試体中の塩化物イオン移動解析の概念図

オンの移動に関する境界層の厚さを $h_c=0.00075\text{m}$ 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⁶⁾を準用したものである。

濃度拡散による移動では、供試体内部で塩化物イオンは消費されず蓄積される。しかし、3.2で述べた通電実験では、供試体中心の電極（鉄筋）で電荷のやりとりがある。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、供試体中心部に埋め込まれた鉄筋表面においても、3.3(2)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 $C_{eq}=0\text{kg/m}^3$ 、境界層の厚さは外部境界と同じく $h_c=0.00075\text{m}$ とする。

3.4 連続繊維シートの塩化物イオン拡散係数の導出

(1) 通電試験結果と拡散移動解析結果との相関に関する検討

シートの拡散係数を同定する準備として、まずシートを接着しないシリーズについて、3.2で述べた通電試験の結果と、3.3で述べた拡散移動解析結果との相関を検討する。

3.3(3)で述べた解析条件のもとで、各供試体中の塩化物イオンの拡散移動過程を解析した。解析に必要なコンクリートの細孔構造のパラメータ、物質移動係数等の材料特性は、コンクリート中の水分移動に関する著者らの既往の実験データをもとに、コンクリートの配合より推定した⁶⁾。

各供試体の解析結果を統一的な条件で比較するための指標値として、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 $J[\text{kg/m}^2/\text{s}]$ を選ぶことにする。一方、通電試験結果については、3.2(3)ですでに取上げた、通電開始から90時間までの積算電流量 $Q[\text{Ahr}]$ を指標値とする。図-8に、シートを接着しない水セメント比30, 40, 50, 60%, かぶり厚さ45, 70mmの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。

図-8に明らかなように、水セメント比、かぶり厚さによらず、8個の供試体の実験結果と解析結果との間には一定の関係が認められる。このことは、3.1で述べた仮説が妥当であることを示している。すなわち、通電試験と拡散移動は同じ現象ではないが、どちらもコンクリート中のイオンレベルの物質の移動現象であるため共通性があり、定量的にも相関があるといえる。

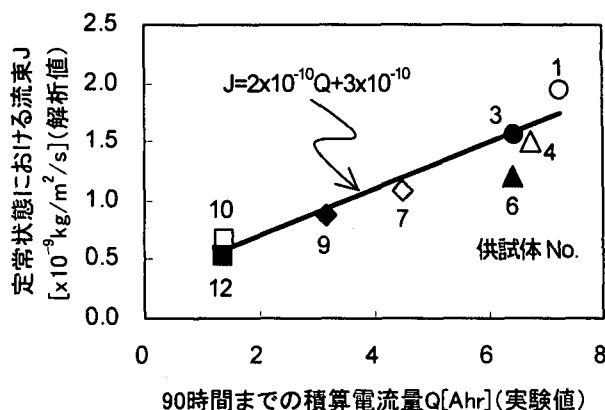


図-8 通電試験結果と拡散移動解析結果の相関性

表-3 シートの拡散係数の同定結果

供試体 No.	11	8	5	2
W/C [%]	60	50	40	30
Q (実験値) [Ahr]	0.13	0.28	0.68	0.56
$D_g [\times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}]$	4.69	3.03	2.99	2.29

図-8 には、8 個の供試体の結果から導き出した、近似直線を描き入れてある。この直線の式は以下である。

$$J = 2 \times 10^{-10} Q + 3 \times 10^{-10} \quad (7)$$

この式は、コンクリートの品質、かぶり厚さによらず、本研究で用いた通電試験結果と拡散移動解析結果との間に成り立つ関係式であるといえる。

(2) 逆解析によるシートの塩化物イオン拡散係数の同定

まず、式(7)は、連続繊維シートを接着した供試体にも成り立つものと仮定する。

連続繊維シートの塩化物イオン拡散係数 D_g の値を仮定すると、シート未接着の供試体の場合と同様の手順により供試体中の塩化物イオン拡散移動解析を行うことにより、シート接着供試体の定常状態における流束 J を求めることができる。この J と、当該供試体の通電試験結果 Q が、式(7)の関係を満たすまで、シートの拡散係数 D_g の値の、仮定、修正を繰り返す。なお、連続繊維シートと接着樹脂より成る層の実厚さ t_g は、実測値ではないが、近似値としてすべての供試体で 1mm として計算する。このような手順により、4 個のシート接着供試体について求めたシートの拡散係数 D_g の値は、表-3 のようになった。

拡散係数 D_g は、その定義により連続繊維シートと接着樹脂に固有の物性値である。表-3 の結果をみると、コンクリートの水セメント比が異なる 4 個の供試体について、 $2 \sim 5 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$ の範囲に収まる拡散係数が得られている。コンクリートの塩化物イオンの拡散係数の一般的なばらつき¹⁰⁾と比較すると、この範囲に収まっていれば工学的には十分な精度であるといえる。したがって本結果は、シートと接着樹脂に固有の塩化物イオン拡散係数を、導出し得ていると判断してよいと思われる。表-3 の結果より、本実験に用いた連続繊維シートの塩化物イオン拡散係数を $3 \times 10^{-14} \text{m}^2/\text{s}$ と同定する。

なお、本実験では、連続繊維シート、接着樹脂ともに1種類しか使用していないので、現実には、シートの拡散係数 D_g がシートや接着樹脂の種類によってどの程度変わり得るのか、明らかではない。

本研究により得られた連続繊維シートの塩化物イオン拡散係数の値は、一般的なコンクリートの拡散係数より2～3オーダー小さい¹⁰⁾。連続繊維シートや塩害対策の塗膜の拡散係数の実測例は僅少であるが、既往の研究にはポリマーセメント系塗膜の拡散係数を普通モルタルの1/100と仮定した解析例¹¹⁾もあり、本研究の結果と整合している。

4. 鋼材が腐食したRC部材に対する連続繊維シート補強効果に関する検討

4.1 実験目的

連続繊維シート接着による鉄筋コンクリート部材の、各種耐力およびじん性については研究例が多い。しかし、多くが、その研究目的から、劣化の生じていない鉄筋コンクリート部材へのシート接着を対象としたものである。本研究では、鋼材腐食などにより劣化した既設構造物の補修補強、および補修補強後の劣化をも研究対象とするので、シート接着による補強効果に関しても、母材であるコンクリート部材の劣化と関連づけて定量化する必要がある。そのような観点からは、研究例が少ない。

そこで本研究では、内部鋼材の腐食の有無とシート接着の有無を実験パラメータとして、鉄筋コンクリート供試体の一軸引張試験を行う。鉄筋、コンクリート、シートの力学特性の定量化の指標として、実験より得られる、部材中での平均応力-平均ひずみ関係、すなわち数十センチオーダーの領域の空間平均化した応力-ひずみ関係を用いる。これは、コンクリートの引張剛性モデル (tension stiffening model) 等のように、鉄筋コンクリートの有限要素解析に用いる構成モデルとして概念が確立されている分散ひび割れモデル (smeared crack model) の考え方¹²⁾をシート補強鉄筋コンクリートに対して応用したものである。平均応力-平均ひずみ関係には、材料単体の局所的な応力-ひずみ関係だけでなく、領域内の力学現象の影響が空間平均化された形で反映されることとなる。

各供試体の、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係、シートの平均応力-平均ひずみ関係、鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係を実測し、鉄筋の腐食およびシート接着の影響がそれらにどのように影響するか検討する。

4.2 実験概要

(1) 供試体

一軸引張試験に用いた供試体の形状、寸法を図-9に、供試体の種類を表-4に示す。供試体は、100×100×1000mmのコンクリート角柱の中心にD19鉄筋を1本埋め込んだものである。コンクリートは、水セメント比55%、単位水量165kg/m³の普通コンクリートを用いた。コンクリート打設後、実験室内において4週間湿布養生を行った。

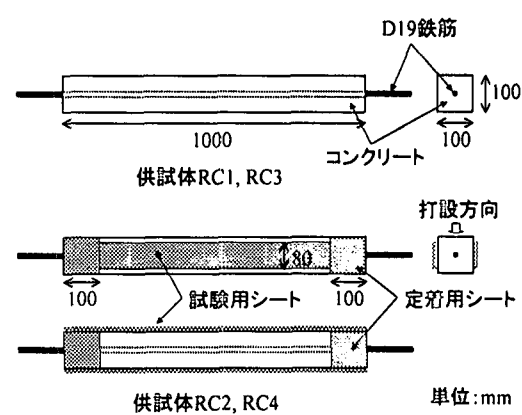


図-9 一軸引張供試体の形状、寸法

表-4 一軸引張供試体の種類

供試体名	鉄筋の腐食	シート接着
RC1	なし	なし
RC2	なし	あり
RC3	あり	なし
RC4	あり	あり
単体鉄筋 A	なし	—
単体鉄筋 B	あり	—

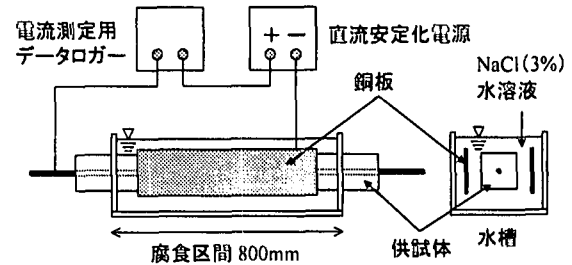


図-10 一軸引張供試体の通電試験

(2) 通電試験

養生終了後、供試体 RC3, RC4 は、3%NaCl 溶液中で通電試験を行うことにより、内部鉄筋を腐食させた(図-10)。

引張試験の際に端部からの鉄筋の抜け出しがなるべく生じないようにするため、供試体の端部100mmは腐食させないようにした。このため、図-10に示すように、通電試験では、供試体の端部100mmを水槽から出した。通電試験では電流の大きさを0.7Aに設定した。腐食ひび割れが生じるレベルの腐食量となるように、既往の研究¹³⁾を参考に、腐食区間における目標平均腐食量が約1mg/mm²となるように通電した。実際に、供試体 RC3, RC4 には、この通電試験により、腐食区間ほぼ全長にわたって、側面の一面に、鉄筋に沿って腐食縦ひび割れが生じた。なお、実際の腐食量は、引張試験終了後に、コンクリートから鉄筋をはつり出し、10%クエン酸アンモニウム水溶液に浸して錆を落とし、重量を測定することにより、実測した。

コンクリート中の腐食鉄筋の力学特性の参考値を得るため、単体鉄筋 B も同じ積算電流量の通電試験を行い、腐食させ、引張試験を行った。

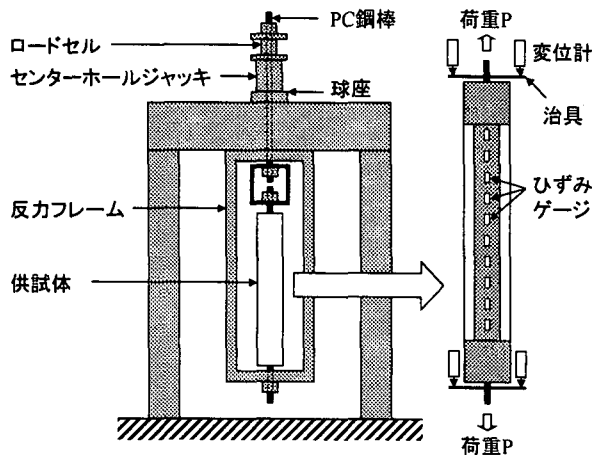


図-11 一軸引張試験の載荷装置

(3) 連続繊維シートの接着

供試体 RC2 は養生終了後、供試体 RC4 は通電試験終了後、連続繊維シートを接着した。図-9 に示したように、シートはコンクリート打設面から見て側面の二面に接着した。供試体 RC4 では、側面のひとつに腐食ひび割れが発生していたので、ひび割れの上にシートを接着した。

シート接着に際しては、まず、コンクリート表面のレイタンス層をディスクサンダーにより除去し、プライマーを塗布して下地処理を行った。プライマーの触手乾燥後、エポキシ接着樹脂を用いてシートを接着した。

試験用シートには、炭素繊維シート（目付量 200g/m²、厚さ 0.111mm、引張強度 3500N/mm²、弾性係数 2.70 × 10⁵N/mm²）を用いた。引張試験の際に端部からのシートの剥離を防ぐために、供試体の両端部には幅 100mm の定着用シートを巻立てて接着した。定着用シートには、成形性に優れたアラミド繊維シートを用いた。

(4) 一軸引張試験

図-11 に示す載荷装置で、供試体の一軸引張試験を行った。供試体の自重による曲げの影響を極力排除するために、鉛直方向に加力した。供試体の平均ひずみは、供試体両端部において鉄筋の左右に取り付けたアルミ製の治具を介して測定した変位より求めた。連続繊維シートの表面には 50mm 間隔でひずみゲージを接着し、ひずみ分布を測定した。載荷パターンは、単調載荷とした。腐食させていない単体鉄筋 A、および供試体 RC3、RC4 と同程度腐食させた単体鉄筋 B の引張試験も、この装置を用いて行った。

(5) シート補強 RC 部材中の鉄筋、コンクリート、シートの平均応力-平均ひずみ関係の算定方法

シート補強一軸引張供試体における、供試体の全荷重 P と、軸方向の任意の断面での鉄筋の負担荷重 $P_s(x)$ 、コンクリートの負担荷重 $P_c(x)$ 、シートの負担荷重 $P_f(x)$ の間には以下の関係が成り立つ。

$$P = P_s(x) + P_c(x) + P_f(x) \quad (8)$$

供試体には、載荷によるひび割れ、シートの剥離が生じるので、断面によって、鉄筋の負担荷重 $P_s(x)$ 、コンクリートの負担荷重 $P_c(x)$ 、シートの負担荷重 $P_f(x)$ の値は異なる。

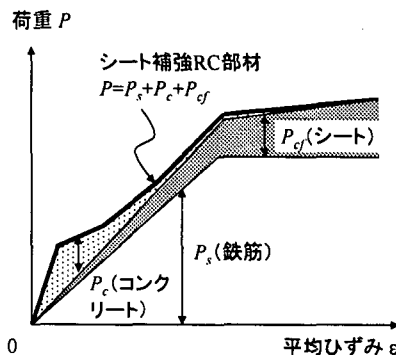


図-12 シート補強 RC 供試体中の荷重の内訳

表-5 鉄筋の力学的性質

鉄筋	腐食量 [mg/mm ²]	断面剛性 $A_s E_s$ [kN]	降伏荷重 P_s [kN]	断面積 A_s [mm ²]
単体鉄筋 A	0	54500	97.8	286.5 ^{*)}
単体鉄筋 B	1.18	44700	94.2	277.5 ^{**)}
RC3 中の鉄筋	1.27	—	—	276.8 ^{**)}
RC4 中の鉄筋	1.12	—	—	277.9 ^{**)}

*) 公称断面積

**) 腐食前の公称断面積と腐食量より計算した断面積欠損より計算した値

式(8)の両辺を部材軸に沿って供試体全長にわたり積分し、供試体長で割ることにより、鉄筋の負担荷重の平均値 P_s 、コンクリートの負担荷重の平均値 P_c 、シートの負担荷重の平均値 P_f の間に成り立つ次式を得る。

$$P = P_s + P_c + P_f \quad (9)$$

P_s 、 P_c 、 P_f をそれぞれの断面積で割ると、鉄筋、コンクリート、シートの平均応力 σ_s 、 σ_c 、 σ_f となる。

図-12 はシート補強一軸引張供試体中における、 P_s 、 P_c 、 P_f の内訳を模式的に表したものである。一軸引張試験では、供試体の全荷重 P と平均ひずみ ϵ を実測している。以下、本実験における P_s 、 P_c 、 P_f の求め方を示す。

すべての位置において降伏前であれば、鉄筋の平均負担荷重 P_s は次式で求めることができる。

$$P_s = A_s E_s \epsilon_s \quad (10)$$

ここに、 A_s ：鉄筋の断面積、 E_s ：鉄筋の弾性係数、 ϵ_s ：鉄筋の平均ひずみである。本研究では、鉄筋が腐食した供試体、腐食していない供試体ともに、それぞれに対応する単体鉄筋の引張試験結果より断面剛性 $A_s E_s$ を定める。その結果は表-5 のようになった。

供試体 RC3、RC4 中の鉄筋の腐食量は、載荷試験後にコンクリートよりはつり出した鉄筋から実測した値である。これらの腐食量が単体鉄筋 B とほぼ同じであることが確認できたので、供試体 RC3、RC4 の計算には単体鉄筋 B の断面剛性を用いることにする。鉄筋のひずみは実測していないので、鉄筋の平均ひずみ ϵ_s は供試体の平均ひずみと等しいと仮定し、変位計により測定した供試体の平均ひずみを用いる。なお、式(10)は鉄筋降伏後には適用できないので、鉄筋降伏前のデータのみを用いて P_s を求める。

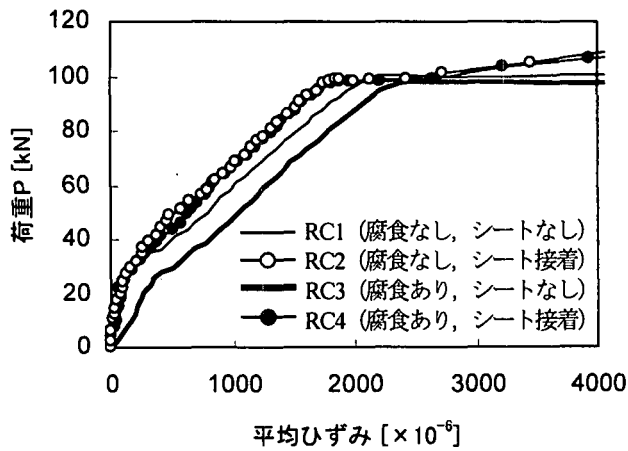


図-13 一軸引張供試体の荷重－ひずみ関係

連続繊維シートは弾性材料であるので、平均負担荷重 P_{cf} は次式で表される。

$$P_{cf} = A_{cf} E_{cf} \varepsilon_{cf} \quad (11)$$

ここに、 A_{cf} : 連続繊維シートの断面積、 E_{cf} : 連続繊維シートの弾性係数、 ε_{cf} : 連続繊維シートの平均ひずみである。荷重によるひび割れ発生後は、シートの剥離が開始し、シートのひずみは場所により一様ではなくなるが、ひずみ分布の形状によらず、軸方向の平均値に関しては式(11)が成り立つ。シートの平均ひずみは、ひずみゲージによる実測ひずみ分布の平均値を用いる。シートの断面積 A_{cf} は公称厚さに幅を乗じて 17.76mm^2 とし、シートの弾性係数 E_{cf} は $2.70 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ とする。

以上により、供試体の全荷重 P 、鉄筋の平均負担荷重 P_s 、シートの平均負担荷重 P_{cf} が求まるので、これらを式(9)に用いると、コンクリートの平均負担荷重 P_c を求めることができる。 P_c をコンクリートの断面積で割ると、コンクリートの平均応力 σ_c となる。

4.3 実験結果

(1) 一軸引張供試体の荷重－ひずみ関係

4 体の一軸引張供試体の荷重－ひずみ関係を図-13 に示す。載荷試験時のコンクリートの圧縮強度 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$ 供試体 3 体の平均値) は、供試体 RC1, RC3, RC4 では 30N/mm^2 、供試体 RC2 では 27N/mm^2 であった。

鉄筋の腐食がなく、シートを接着していない供試体 RC1 の実験結果を基準として、図-13 の各供試体の結果を比較検討する。

シートを接着した供試体 RC2 は、荷重によるひび割れ発生以降の引張剛性が RC1 よりも高く、シートによる補強効果が確認できる。鉄筋降伏以降もシートの負担荷重は増加するため、供試体の全荷重も漸増している。

鉄筋の腐食した供試体 RC3 は、初期段階から明らかに引張剛性が低い。腐食による断面欠損により鉄筋の荷重負担能力が低下していることがわかる。

この RC3 と同程度に鉄筋を腐食させ、シートを接着した供試体 RC4 は、腐食していない状態でシートを接着した供試体 RC2 とほぼ同じ荷重－ひずみ曲線を辿っている。

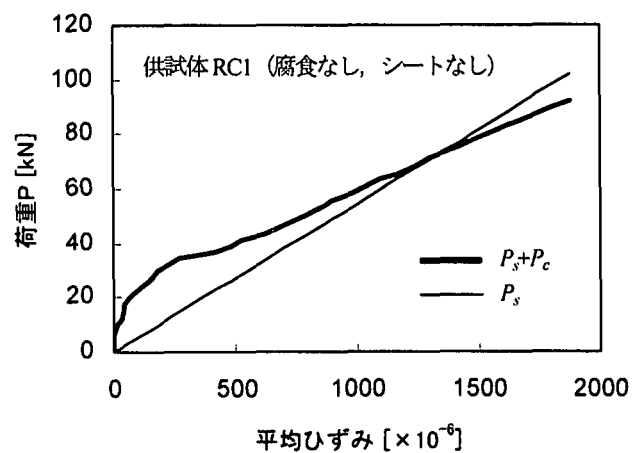


図-14 一軸引張供試体 RC1 中の荷重分担

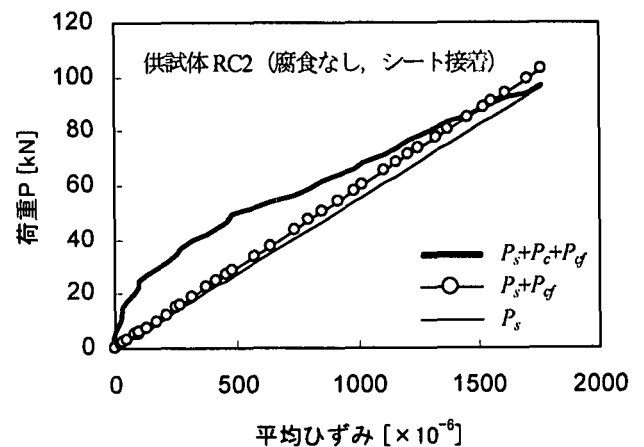


図-15 一軸引張供試体 RC2 中の荷重分担

この結果は、鋼材腐食により劣化した鉄筋コンクリート部材にシートを接着した場合、健全部材へのシート接着と同様の補強効果があるだけでなく、母部材の腐食による性能低下自体がシート接着により回復した可能性を示唆している。この仮説を検証するため、部材中の鉄筋、コンクリート、シートの負担荷重の内訳が、鉄筋の腐食、およびシートの接着によりどのように変化するのかが、実測値をもとに検討することにする。

(2) シート補強 RC 部材中の鉄筋、コンクリート、シートの負担荷重

4.2(5) に述べた方法にしたがって実験結果の処理を行い、各時点における供試体中の鉄筋の負担荷重の平均値 P_s 、コンクリートの負担荷重の平均値 P_c 、シートの負担荷重の平均値 P_{cf} を算出し、供試体の平均ひずみを横軸としてそれらをプロットした結果を図-14～17 に示す。計算仮定は、鉄筋降伏前についてのみ成立するので、その範囲の結果を示している。なお、シートを接着した供試体 RC2 と RC4 の実験結果より、ひずみゲージによるシートのひずみ分布より求めた平均ひずみは、変位計により求めた供試体の平均ひずみとほぼ一致することを確認している。

図-14 の供試体 RC1 の結果において、ひずみ 1500×10^{-6} 付近から鉄筋の負担荷重 P_s が供試体の全荷重を上回っているのは、降伏前の鉄筋の応力－ひずみ関係を直線でモデ

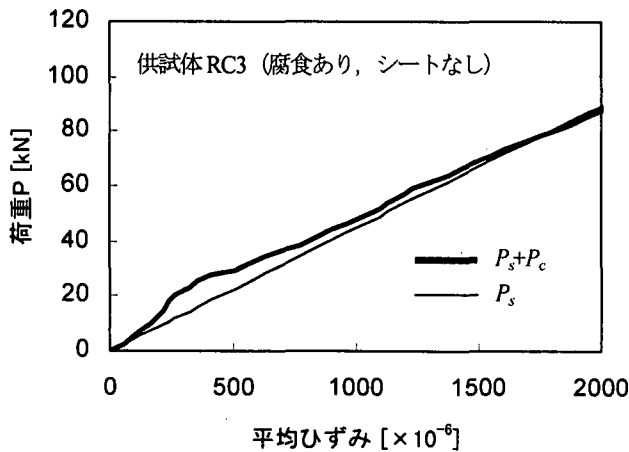


図-16 一軸引張供試体 RC3 中の荷重分担

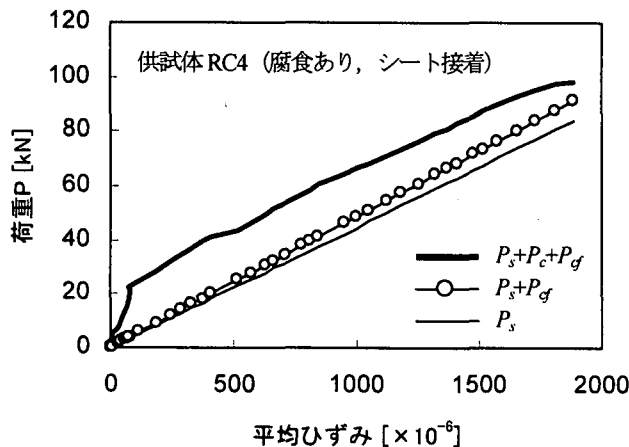


図-17 一軸引張供試体 RC4 中の荷重分担

ル化したことに起因している。単体鉄筋 A の引張試験結果によると、本実験に用いた鉄筋の応力-ひずみ関係は、実際にはひずみ 1500×10^6 近辺以降の範囲では曲線状となっていた。しかしここで興味の対象としている、コンクリートの Tension Stiffening 効果が実質的に有効であるのは、概ねひずみ 1500×10^6 以下の範囲においてであるので、ここでの処理方法でも問題はないと考えている。

図-14～17 より、以下がいえる。

供試体 RC3 (図-16) および RC4 (図-17) では、鉄筋腐食によって断面欠損が生じるため鉄筋の負担する荷重 P_s が、腐食のない供試体 RC1 (図-14), RC2 (図-15) よりも小さいことがわかる。

シートを接着した供試体 RC2 (図-15), RC4 (図-17) の結果を比較すると、シートの負担する荷重 P_g が同程度であることがわかる。したがって、シート接着による補強効果のうち、部材中でシートが荷重を負担する効果自体は、母材となる部材に鉄筋腐食が生じているかどうかの影響を受けないといえる。

部材中においてコンクリートの分担する荷重 P_c は、4 体の供試体で、かなり異なっている。つまり、コンクリートの Tension Stiffening 効果は、鉄筋腐食およびシート接着によって変わり、このことが、図-13に見られたシート補強部材全体の挙動に影響を及ぼしていたと推察できる。

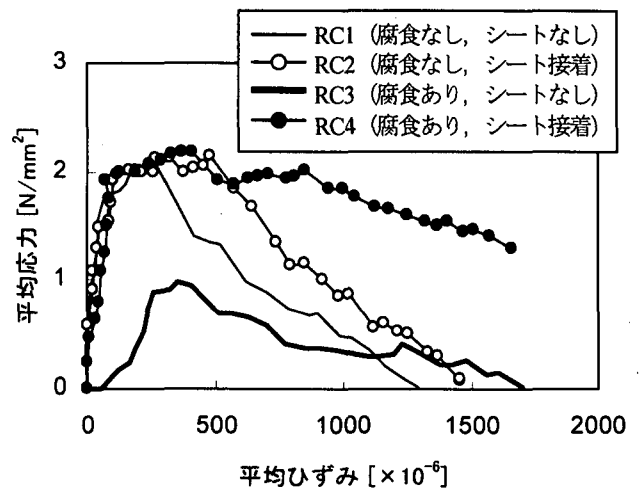


図-18 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

(3) シート補強 RC 部材におけるコンクリートの Tension Stiffening 効果

図-18 は、4 体の供試体中におけるコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を比較したものである。コンクリートの平均応力はコンクリートの負担荷重 $P_c (=P - P_s - P_g)$ をコンクリートの断面積で割ることにより求めた、平均ひずみは、供試体の実測平均ひずみである。なお、コンクリートの平均応力の値は、鉄筋、シート、供試体全体の荷重の値から間接的に求めたものであるため、それらの算定精度の影響を受けることに留意しなければならない。

供試体 RC1 (腐食なし, シートなし) の結果と RC2 (腐食なし, シート接着) の結果を比較すると、酷似したコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係が得られている。本実験条件下では、鉄筋腐食が生じていない供試体では、シート接着は、コンクリートの Tension Stiffening 効果にほとんど影響を及ぼさないといえる。

供試体 RC1 (腐食なし, シートなし) の結果と RC3 (腐食あり, シートなし) の結果を比較すると、明らかに、鉄筋腐食によりコンクリートの Tension Stiffening 効果が低下していることがわかる。この結果は著者らの既往の研究¹³⁾においても見られた。この原因は、鉄筋表面の錆や鉄筋に沿ったコンクリートの腐食ひび割れにより、鉄筋とコンクリートとの付着が損なわれたからであると考えられる。

供試体 RC4 (腐食あり, シート接着) の結果を他の供試体の結果と比較すると、鉄筋腐食が生じているにも関わらず、健全な場合と同等のコンクリートの Tension Stiffening 効果があることがわかる。これは、鉄筋腐食にともなう腐食ひび割れ等で損なわれた付着が、シートを接着することにより、回復したことを示唆している。その原因は、シート接着の際のプライマーと接着樹脂が腐食ひび割れ中に浸透し、ひび割れを修復したのと同じ効果をもたらしたこと、鉄筋に引張力が加えられた際の腐食ひび割れの開口が、シートにより抑えられ、その結果鉄筋とコンクリートの付着が確保されたこと、などが考えられる。なお、平均ひずみが $500 \sim 1500 \times 10^6$ の範囲において、供試体 RC4 のコンクリートの平均応力が 4 供試体中最も大きくなっているのは、RC4 中の腐食した鉄筋の負担荷重の算定誤差に起因

していると考えている。現時点では、RC4 が RC2（腐食なし、シート接着）以上に、コンクリートの平均応力が高くなる理由が考えられない。

以上の検討結果をまとめると、内部鉄筋の腐食により劣化した鉄筋コンクリート部材に対して、連続繊維シート接着を行った場合の補強メカニズムとして、第一に、健全部材の場合と同様に、シートが外部補強材として引張力の一部を負担する効果、第二に、鉄筋腐食によるコンクリートの Tension Stiffening 効果の低下をシートが防ぐ効果があるといえる。

5. 連続繊維シートによる補修補強を考慮した構造物の性能の経時変化の数値シミュレーション

5.1 概要

本論文の3章4章において定量化した連続繊維シートの物質透過抵抗性および力学性状を踏まえて、連続繊維シートの補修補強効果をモデル化する。これらのモデルを、図-2 に示したような数値解析プログラムに組み込み、連続繊維シート補強コンクリート構造物の性能の経時変化の数値シミュレーションを行う。

解析対象は、図-19 に示す鉄筋コンクリート単純桁とする。使用材料の物性値等は表-6 に示す。供用開始時点解析の始点とする。強度等、セメントの水和によるコンクリートの物性の発現は終了しているものとする。

環境条件は、塩分の飛来する気温 20℃、相対湿度 60% の大気中とする。水分、塩化物イオン、酸素の鋼材腐食物質は、桁底面のみから出入りするものとする。物質移動現象は部材軸方向にわたって一様であるとする。

連続繊維シートを接着するケースでは、桁底面に全面接着するものとする。

構造物の性能として、断面の曲げ耐力を取り上げる。すなわち、鋼材の腐食、シートによる補修補強を考慮しながら、構造物の曲げ耐力を時間の関数として出力することとをここでの計算目的とする。

解析は、表-7 に示す6 ケースを行う。ケース1, 2, 3, 4 を比較することにより、シート接着による補修補強時期が構造物の性能（曲げ耐力）の経時変化に及ぼす影響を検討する。また、ケース1, 2, 5, 6 を比較することにより、シートの補修効果（物質遮蔽効果）と補強効果のそれぞれが曲げ耐力の経時変化に及ぼす感度を数値実験的に個別に抽出することができ、双方を考慮することの有効性を検証することができる。

5.2 解析方法

(1) コンクリート中の物質移動

構造物表面に到達する飛来塩分量は、構造物に接する外部環境の塩化物イオン濃度（式(4)における C_{en} ）により表現する⁸⁾。季節風が卓越する地域の飛来塩分の測定データを参考に、 C_{en} を一年を周期とした三角関数として表す。

コンクリート中の水分、塩化物イオン、酸素の移動は、著者らが開発したコンクリートの細孔構造に立脚した解

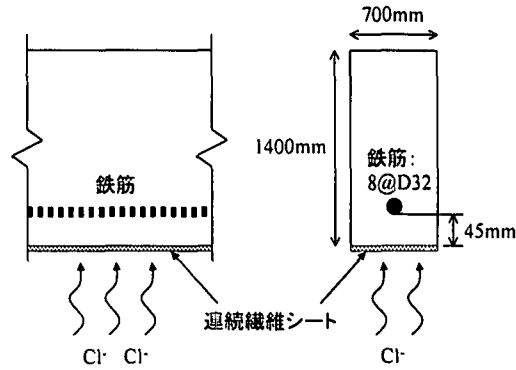


図-19 解析対象シート補強鉄筋コンクリート桁

表-6 使用材料の物性値

材料	物性値など	
コンクリート	単位水用量	165 kg/m ³
	水セメント比	50 %
	圧縮強度	38 N/mm ²
	その他の力学特性	圧縮強度より推定される値
	各種物質移動特性	配合より推定される値
鉄筋	降伏強度	400 N/mm ²
	弾性係数	200000 N/mm ²
連続繊維シート	厚さ	1.0mm (樹脂を含む)
	引張強度	390 N/mm ²)
	弾性係数	30000 N/mm ²)
	塩化物イオン拡散係数	3 × 10 ⁻¹⁴ m ² /s

シートの引張強度と弾性係数は、シートの厚さを 1.0mm としたときの値に換算してある。

表-7 解析ケース

ケース	シート接着	備考
1	なし	基準ケース
2	新設時に接着	シートの補修補強効果を考慮
3	供用開始から 10 年目に接着	シートの補修補強効果を考慮
4	供用開始から 20 年目に接着	シートの補修補強効果を考慮
5	新設時に接着	シートの補修効果のみを考慮
6	新設時に接着	シートの補強効果のみを考慮

析手法を用いる⁹⁾。このうち塩化物イオンの拡散移動については3章で述べた。ここでは、大気中におかれたコンクリートを考えているので、コンクリート中の水分の移動も生じるため、水分、塩化物イオンの連成解析を行う。

コンクリート中の物質の移動は、桁底面を一端の境界として上下次元方向に生じるとする。数値解析法は差分法を用いる。桁底面から侵入した塩化物イオンは、半無限領域中の移動に近い状態でコンクリート中を移動する。この状態を数値解析において再現するために、表面からかぶりの3倍の位置、つまり表面から 135mm の位置を仮想的にもう一端の境界とみなして解析を行う。この仮想境界における境界条件は、流束を 0 とする。

シート接着後には、塩化物イオンの拡散による侵入を表す境界条件において、本研究3章で定量化したシートと接着樹脂層の塩化物イオン拡散係数を用いる。

(2) コンクリート中の鉄筋の腐食

各時間におけるコンクリート中の鉄筋の腐食速度は、鉄筋位置における塩化物イオン濃度、酸素供給量、pH を入

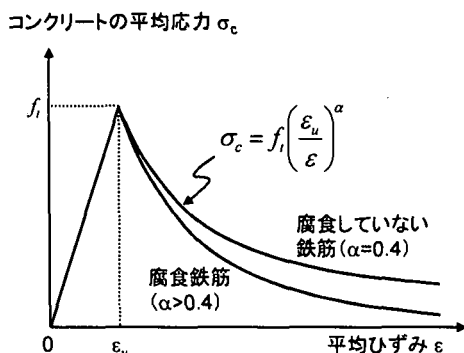


図-20 コンクリートのTension Stiffeningモデル

力値として、一様腐食を仮定した電気化学的モデル¹⁴⁾により算定する。各時間における腐食量は、腐食速度を時間積分することにより求める。軸方向にも周方向にも一様腐食を仮定することで、腐食量より、鉄筋の断面欠損、残存している断面積を求める。

(3) 鉄筋の腐食したシート補強RC部材の力学性能

桁の曲げ耐力は、断面解析により求める。コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係は、コンクリート標準示方書¹⁵⁾に示されたRCの曲げ耐力算定用の曲線を用いる。

鉄筋の引張応力-ひずみ関係は、ひずみ硬化域を考慮した3直線モデルを用いる。腐食による鉄筋の引張力負担能力の低下は、鉄筋断面積の減少により考慮される。

鉄筋とコンクリートの付着による、鉄筋周辺のコンクリートの引張応力負担効果は、図-20に示すTension Stiffeningモデルを用いる¹²⁾。

$$\sigma_c = f_t \left(\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon} \right)^\alpha \quad (12)$$

ここに、 σ_c : コンクリートの平均応力、 f_t : コンクリートの引張強度、 ε_u : ひび割れひずみ、 ε : 平均ひずみ、 α : 付着の程度を表すパラメータである。パラメータ α は、腐食していない一般の異形鉄筋の場合0.4程度であるが¹²⁾、ここでは、鉄筋の腐食の程度に応じて増大させ、鉄筋腐食によるコンクリートのTension Stiffening効果の低下を表現することにする¹⁶⁾。また、本論文の4章の実験で得られた知見に基づき、鉄筋が腐食していても、シート接着後は、コンクリートのTension Stiffening効果を腐食していない場合と同じとする。なお、桁の断面内において、引張応力を負担するコンクリートの断面積は、引張主鉄筋より下方のかぶりコンクリートの断面積の二倍とする。

連続繊維シートの、端部からの剥離は生じないものとする。このときシートの平均ひずみは、桁下縁の平均ひずみと一致することになるので、シートの平均ひずみは、はり理論により算定する。これに弾性係数を乗じて、シートの平均応力を算定する。

各時間において、桁の曲げ解析を行い、曲げ耐力を求める。シート接着の有無により、曲げ破壊モードは、上部コンクリートの圧縮破壊か、シート破断のどちらかになる。

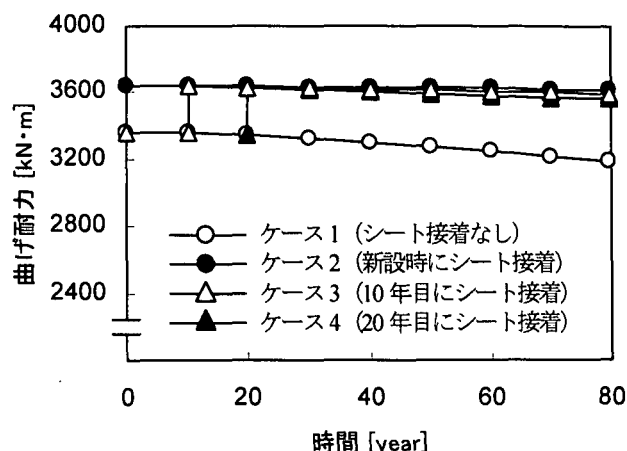


図-21 桁の曲げ耐力の経時変化の解析結果1

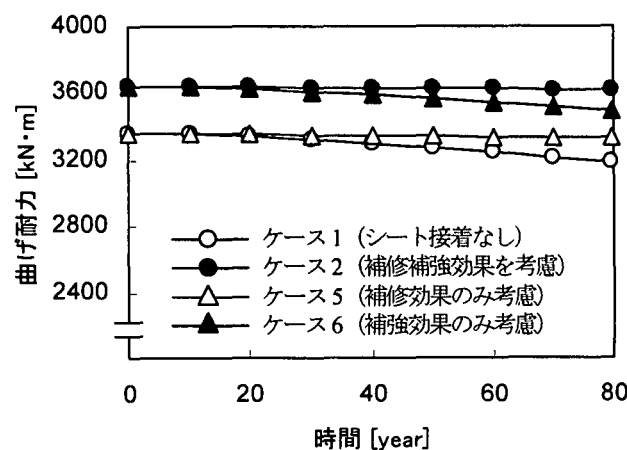


図-22 桁の曲げ耐力の経時変化の解析結果2

5.3 解析結果

図-21に解析ケース1,2,3,4の、図-22にケース1,2,5,6の曲げ耐力の経時変化を示す。

まず図-21の結果より検討する。シート接着を行わないケース1では、鉄筋の腐食により、曲げ耐力が時間とともに低下している。新設時にシートを接着したケース2では、シートが塩化物イオンの侵入を遮蔽する効果により、時間が経過してもほとんど鉄筋の腐食が生じていない。10年目にシートを接着したケース3、20年目に接着したケース4では、ともにシート接着時には、ケース2と同じレベルの曲げ耐力が得られている。しかし、その後、時間の経過とともに、鉄筋の腐食が進行し曲げ耐力が徐々に低下している。これは、シート接着前に侵入していた塩分による。

続いて図-22の解析結果を検討する。計算上シートの補修効果(物質遮蔽効果)のみを考慮したケース5、補強効果のみを考慮したケース6ともに、数十年経過後にはケース1よりも高い曲げ耐力が予測されている。補修効果と補強効果の双方を考慮したケース2では最も高い曲げ耐力が予測されている。本結果より、連続繊維シート接着による、補修効果、補強効果、およびその双方を考慮することが、構造物の性能の経時変化の計算結果に差を生じさせる場合のあることが確認できる。

なお、ここでの計算では、連続繊維シートおよび接着樹脂そのものの劣化を考慮していないので、予測された性能の経時変化曲線が、ただちに実構造物に適用できるわけではない。今後はそれらも考慮することが課題である。

6. まとめ

本研究では、コンクリート構造物の補修補強工法として連続繊維シート接着工法を取り上げ、その補強効果、補修効果（物質遮蔽による劣化抑制効果）を、実験により定量化し、その結果を、補修補強を考慮した構造物のライフスパンシミュレーションに適用した。本研究において以下の知見を得た。

- (1) コンクリート表面に連続繊維シート接着することにより、塩化物イオンが鉄筋に到達するのを抑制する効果が通電試験により確認された。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) 通電試験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した。得られた拡散係数の値は、コンクリートの約1/300であった。
- (3) 鉄筋コンクリート部材の表面に接着した連続繊維シートが外部補強材として引張力を負担する効果は、腐食ひび割れが発生する程度にコンクリート内部の鉄筋の腐食した部材においても発揮されることが、室内試験により確認された。
- (4) 鉄筋コンクリートにおけるコンクリートの Tension Stiffening 効果は、内部鉄筋の腐食により低下する。しかし、連続繊維シートを接着することにより、Tension Stiffening 効果は、鉄筋が腐食していない場合と同程度に回復する。その理由は、シート接着の際のプライマーや接着樹脂が腐食ひび割れを修復する効果、および鉄筋に引張力が作用した際の腐食ひび割れの開口をシートが拘束する効果によると考察した。
- (5) 連続繊維シート接着による補強効果、補修効果（物質遮蔽による劣化抑制効果）ともに、コンクリート構造物の力学性能の経時変化に影響を及ぼすことを、数値計算によって確認した。よって、これらいずれの効果も、定量的に考慮することが構造物の経時変化予測において意義のあることと考えられる。

謝辞

本研究の実験の一部は、長岡技術科学大学大学院（現富士ビー・エス）岡崎雅弘氏と共同で行った。本研究の実施にあたって、長岡技術科学大学丸山久一教授の有益な助言をいただいた。本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号 14750386）の助成を受けて行った。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 下村 匠：コンクリート構造物のライフスパンシミュレーション，土木学会誌，Vol.86, No.12, pp.59-61, 2001.
- 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.
- 3) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針，コンクリートライブラリー95，1999.
- 4) 庄司和晃，前田敏也，佐藤靖彦，上田多門，角田與史雄：炭素繊維シートで補強した RC 部材の一軸引張挙動，コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像，コンクリート技術シリーズ 28，土木学会，pp.II-89-II-100，1998.
- 5) 笠原裕子，下村 匠，Y Chenna：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的評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.311-316，2003.7
- 6) 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
- 7) Shimomura, T. and Maruyama, K.: Service life prediction of concrete structures subjected to chloride attack by numerical simulation, RILEM Proceedings PRO 16, pp.25-34, Oct. 2000.
- 8) 西 利明：ひび割れを有するコンクリート中における水分移動現象のモデル化，長岡技術科学大学修士論文，1999.3
- 9) Bazant, Z.P. and Najjar, L.J.: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, Materials and Structures, Vol.5, No.25, pp.3-10, 1972.
- 10) 土木学会：2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料，コンクリートライブラリー108，2002.3
- 11) 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
- 12) 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991
- 13) 松尾 洋，五角 亘，下村 匠：鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の引張剛性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1327-1332，2001.7
- 14) 小林悟志，下村 匠：コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.831-836，2002.7
- 15) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2002.3
- 16) 青山敏幸，下村 匠，丸山久一：塩害により鉄筋が腐食した RC 部材の曲げ性状，コンクリート工学年次論文報告，Vol.20, No.2, pp.883-888, 1998.6

（2003 年 4 月 18 日 受付）