

論文 海洋環境下における炭素繊維シート補強部材の耐久性評価

宇治 公隆^{*1}・堀口 賢一^{*2}

要旨：炭素繊維シートによるコンクリート構造物の補修・補強では、シートを樹脂で接着するため、海洋構造物に適用した場合、遮塩性能が期待される。本実験では、炭素繊維シートを巻立てた供試体を海洋環境下で長期間暴露し、性状の変化を確認した。その結果、暴露開始時に炭素繊維シートを巻立てた供試体では、3年経過しても内部への塩分の浸透は認められなかった。また、鉄筋の腐食によりひび割れを生じた部材に適用した場合、塩分等の侵入の防止、ひび割れ拡大の抑制により、腐食の進行を抑制することが明らかとなった。

1. はじめに

高強度かつ軽量である特徴を活かし、炭素繊維シート接着工法による耐震補強や床版補強の施工実績が増加している。また、腐食しないという特徴とともに、接着用樹脂の表面被覆としての遮塩性により、海洋構造物の補修・補強に炭素繊維シート接着工法は効果的であると考えられる。ただし、これまで、海洋環境下での遮塩性能、部材としての劣化の抑制効果、炭素繊維シート自体の耐久性について実環境で検討した研究はない。

そこで本研究では、炭素繊維シートの施工時期を要因とし、塩分浸透特性、ひび割れ発生状況、鉄筋腐食量等を経年的に把握し、海洋構造物の補修・補強に対する炭素繊維シート接着工法の効果を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体

図-1に供試体の形状・寸法および鉄筋の配置状況を示す。供試体寸法は150×150×1200mmで、内部にD13の鉄筋(SD295A)をかぶり20, 30, 40mmで4本配置した。

2.2 検討要因

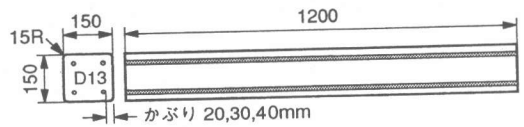


図-1 供試体の形状・寸法

表-1に検討要因の一覧を示す。実験は無補強供試体を用い、かぶりの違いによる鉄筋腐食量を検討するシリーズ1と、炭素繊維シートの施工時期等を要因としたシリーズ2の2種類である。供試体は、無補強6体(No.1-1～No.1-6)、補強8体(No.2-1～No.2-8)とし、鉄筋のかぶり、炭素繊維シートの有無、施工時期および炭素繊維シートの種類を要因とした。

表-1 検討要因一覧

No.	かぶり	シート施工	シート種類	解体調査
1-1	20mm	無補強	—	24カ月, 39カ月
1-2	20mm	〃	—	12カ月
1-3	30mm	〃	—	12カ月
1-4	30mm	〃	—	24カ月, 39カ月
1-5	40mm	〃	—	12カ月
1-6	40mm	〃	—	24カ月, 39カ月
2-1	20mm	暴露開始時	高強度型	24カ月, 39カ月
2-2	20mm	〃	高弾性型	24カ月, 39カ月
2-3	20mm	暴露12カ月	高強度型	24カ月, 39カ月
2-4	20mm	〃	高弾性型	24カ月, 39カ月
2-5	20mm	暴露22カ月	高強度型	24カ月, 39カ月
2-6	20mm	〃	高弾性型	24カ月, 39カ月
2-7	30mm	〃	高強度型	24カ月, 39カ月
2-8	30mm	〃	高弾性型	24カ月, 39カ月

*1：東京都立大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

*2：大成建設（株）技術センター土木技術研究所土木材工研究室研究員（正会員）

表-2 コンクリートの配合

水セメント比 %	細骨材率 %	単位量 (kg/m ³)			
		セメント	水	細骨材	粗骨材
62.5	46.9	252	157	877	1006

表-3 炭素繊維シートの物性

シートの種類	補強量 (g/m ²)	引張強度 (GPa)	弾性係数 (GPa)	伸び率 (%)
高強度型	200	4.12	243	1.70
高弾性型	300	2.60	643	0.40

2.3 使用材料と配合

表-2にコンクリートの配合を示す。コンクリートは、普通21-8-20Nのレディーミクストコンクリートで、標準養生供試体の材齢28日圧縮強度は、34.2N/mm²であった。暴露12ヶ月および24ヶ月で、供試体から採取したコアの圧縮強度は、40.8N/mm²および39.0 N/mm²であった。

表-3に炭素繊維シートの物性を示す。炭素繊維シートは高強度型と高弾性型の2種類である。

2.4 実験方法および測定項目

炭素繊維シートの貼付けは、供試体を28日間封かん養生した後、エポキシ系含浸接着樹脂を用いて、円周方向に巻き付けた。なお、重ね合せ長さは10cmとした。炭素繊維シート貼付けから7日後に暴露を開始した。写真-1に暴露状況を示す。暴露場の床はラス金網となっており、下方からも供試体にしぶきがかかる状況である。

表-4に測定項目を示す。暴露12カ月で、かぶり20mmの無補強供試体（No.1-2）にひび割れ、錆汁が顕在化したため、かぶり20mm（No.1-2）、30mm（No.1-3）、40mm（No.1-5）の3体を用いて各種試験を行った。また、この時点でシリー

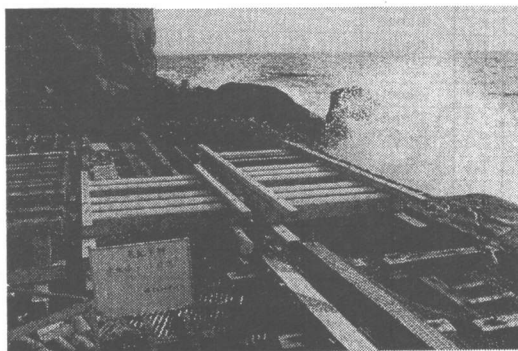


写真-1 供試体暴露状況

表-4 測定項目

試験項目 \ 材齢	12カ月	24カ月	39カ月
外観観察	○	○	○
全塩化物量	○	○	—
鉄筋質量減少率	○	○	—
付着強度	—	—	○
圧縮強度	○	○	—

○：測定実施項目

ズ2の供試体のうち、かぶり20mmの供試体2体（No.2-3、No.2-4）に高強度型、高弾性型の炭素繊維シートを施工し、再び暴露した。

暴露22ヶ月で、かぶり30mmの無補強供試体（No.1-4）にひび割れ、錆汁が顕在化したため、No.2-5～No.2-8に炭素繊維シートを施工し、再び暴露した。

暴露24ヶ月で、暴露している全ての供試体（計11体）を対象に各種試験を行った。なお、試験は供試体の半分（長さ600mm）を用い、残り半分は端面を保護して、暴露を継続した。

暴露39ヶ月で、供試体の長手方向の150mm部分を用いて各種試験を行った。

全塩分量の測定は、JCI-SC4に従い、φ68×150mmのコアを、暴露時の鉛直方向に供試体を貫通させて採取し、深さ方向に厚さ1cmにスライスにして行なった。暴露12ヶ月および24ヶ月では、15スライスのうち、11スライスで測定し、暴露39ヶ月では、7スライスで測定した。全塩分量は、コンクリートの単位容積質量当りに含まれる塩化物イオン量として表した。

鉄筋質量減少率の測定は、JCI-SC1に従い、解体後に鉄筋をクエン酸に浸漬して錆を落とした後の質量と、単位長さ当りの質量を用いて質量減少率を求めた。

付着強度は、JIS A 6909に従い、接着面を□40×40mmとした。なお、測定は炭素繊維シートの重ね合せ部とその対面のそれぞれ2ヶ所で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 外観調査

暴露12ヶ月でかぶり20mmの無補強供試体

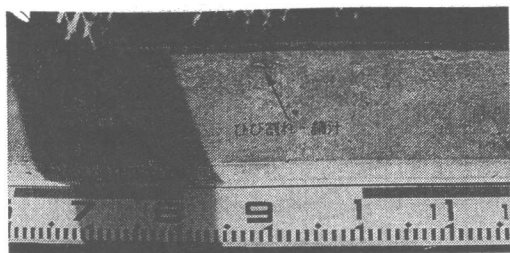


写真-2 ひび割れ状況 (No.1-2, 12 カ月)

(No.1-2) に、写真-2に示すようなひび割れ (最大幅 0.7mm)、錆汁を確認した。なお、かぶり 30, 40mm の無補強供試体 4 体にはひび割れ、錆汁は確認されていない。

暴露 22ヶ月でかぶり 30mm の無補強供試体 (No.1-4) に、ひび割れ (最大幅 0.2mm)、錆汁を確認した。外観調査は、暴露 24ヶ月で供試体を引き上げ、他の測定と合わせて行った。なお、かぶり 40mm の無補強供試体 2 体にはひび割れ、錆汁は確認されていない。

暴露 39ヶ月における、かぶり 20, 30, 40mm の無補強供試体 (No.1-1, No.1-4 および No.1-6) の外観状況を、それぞれ写真-3～写真-5 に示

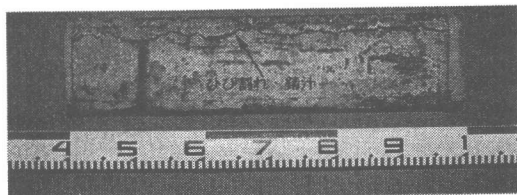


写真-3 外観状況 (かぶり 20mm, 39 カ月)

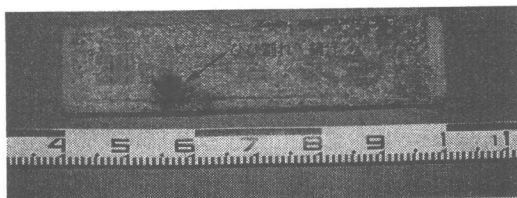


写真-4 外観状況 (かぶり 30mm, 39 カ月)

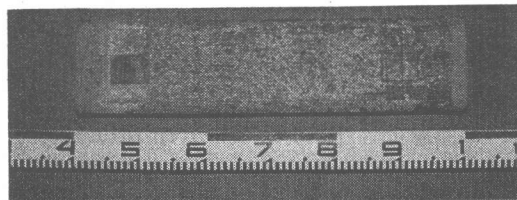


写真-5 外観状況 (かぶり 40mm, 39 カ月)

す。かぶり 20mm と 30mm の供試体では、ひび割れ (それぞれ最大幅 1.0mm, 0.95mm) が進展し、錆汁も多く出ていたが、かぶり 40mm の供試体では損傷は見られなかった。なお、暴露 24ヶ月以降、供試体長さは 600mm としている。

3.2 塩分浸透特性

3.2.1 シリーズ 1

図-2 (1)～図-2 (3) に無補強供試体の全塩分量分布を示す。測定は、暴露 12, 24, 39ヶ月時に行なった。

暴露 12ヶ月では表面から 60mm より内部にはほとんど塩化物イオン (以下、塩分) が浸透していないが、暴露 24ヶ月では表面から 60mm より内部にも塩分が浸透し、かぶり 20mm では、かぶり 30, 40mm に比べ内部の塩分が多い。これは、鉄筋の腐食によるコンクリートのひび割れで、内部に塩分が浸透しやすくなったためと考えられる。暴露 39ヶ月では、かぶり 30mm でもかぶり 40mm に比べ高い塩分量となっており、同様に鉄筋の腐食によるひび割れで塩分の浸透が助長されているものと考えられる。

図-2 (1)～図-2 (3) には、土木学会標準示方書・施工編 (耐久性照査型) にある、「塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に関する照査」, および「塩化物イオンに対する拡散係数の照査」¹⁾ に基づいた全塩分量分布の推定曲線を併記している。また、暴露 12 カ月の全塩分量分布に近似す

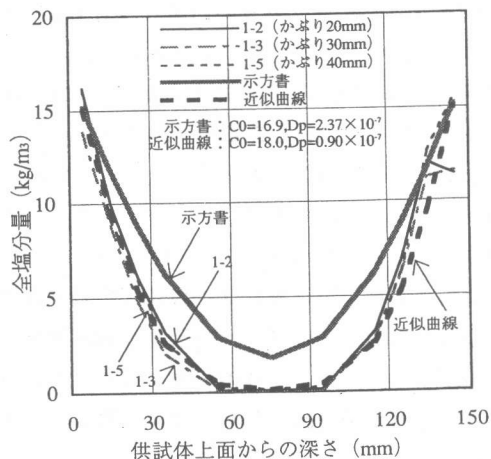


図-2 (1) 全塩分量 (暴露12カ月, 無補強)

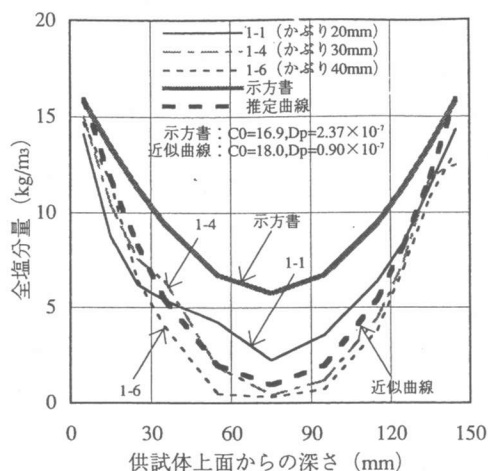


図-2 (2) 全塩分量 (暴露24カ月, 無補強)

るように、表面塩化物イオン濃度、および塩化物イオンの拡散係数を設定し、これを用いた暴露24カ月、39カ月における全塩分量分布の推定曲線も併記した。示方書による推定式では、表面塩分量 $16.9 (= \text{飛沫帯 } 13.0 \times \text{安全係数 } 1.3) \text{ kg/m}^3$ 、塩化物イオンの拡散係数 $2.37 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ とし、暴露12カ月の近似曲線は、表面塩分量 18.0 kg/m^3 、塩化物イオンの拡散係数 $0.90 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ としてそれぞれ分布を求めた。これによると、示方書の推定式に基づく塩化物イオンの分布は、実際より拡散が早い。(設計上で言えば、安全側になる。) また、暴露12カ月の分布を近似させて求めた表面塩分量、塩化物イオンの拡散係数を暴露24カ月、39カ月の推定曲線に用いた場合、24カ月のかぶり30、40mmでは比較的近いと思われるが、かぶり20mmでは、12カ月で既に鉄筋の腐食膨張によるひび割れが発生していたため、推定曲線よりも上方の分布となっている。暴露39カ月になると、かぶり30mmでもひび割れの影響により、実際は推定曲線よりも上方に分布していると考えられる。このことから、ひび割れ発生前に実際の全塩分量分布を求めておけば、その後ひび割れ発生までの分布の変化は、比較的精度よく推定できるが、ひび割れ発生後の分布の推定は難しいと思われる。

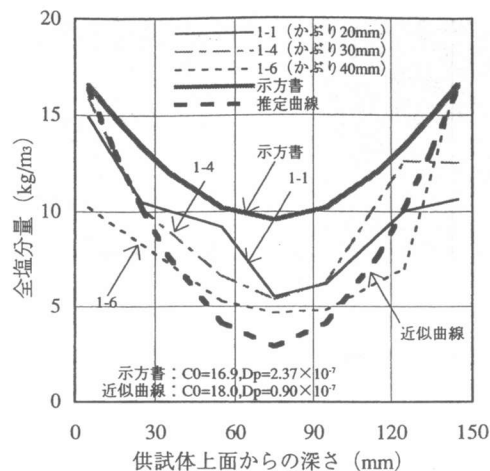


図-2 (3) 全塩分量 (暴露39カ月, 無補強)

3.2.2 シリーズ2

図-3 (1) ~ 図-3 (3) に炭素繊維シートを暴露開始時、暴露12ヶ月、暴露22ヶ月に施工した補強供試体の全塩分量分布を示す。測定は、暴露24、39ヶ月である。

暴露24ヶ月において、暴露開始時に炭素繊維シートを施工した供試体 (No.2-1, No.2-2) は表面部に若干の塩分が測定されているが、内部への浸透は確認されておらず、高い遮塩性能を有していることが分かる。暴露12ヶ月に炭素繊維シートを施工したかぶり20mmの供試体 (No. 2-3, No.2-4) は、表面付近の塩分は減少し、塩分が中央部まで浸透していることが、無補強でひび割れの影響の少ないNo.1-6との比較でわかる。外部からの塩分の供給はなくなるものの、内部に形成されたひび割れも経路となり、シート施工前に浸透した塩分が内部に浸透または移動したものと考えられる。暴露22ヶ月に炭素繊維シートを施工した供試体 (No. 2-5 ~ No.2-8) は、シート施工後2カ月しか経過していないが、暴露12カ月にシート施工した場合と同様に、外部からの塩分の供給がなくなり、内部に浸透していることがわかる。

暴露39ヶ月において、暴露開始時に炭素繊維シートを施工した供試体 (No.2-1, No.2-2) は暴露24ヶ月時点と変わらず、内部への浸透は確認されていない。また、暴露12ヶ月に炭素繊維

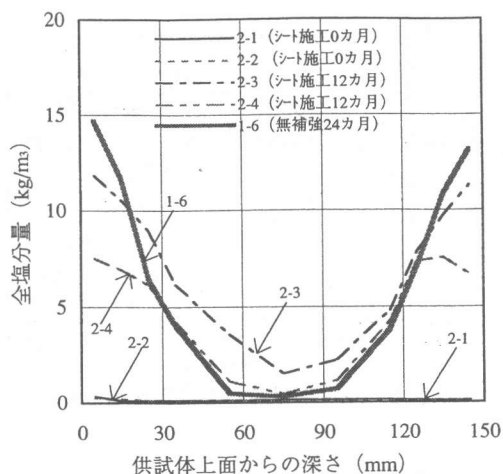


図-3 (1) 全塩分量
(暴露24カ月, 補強0・12カ月)

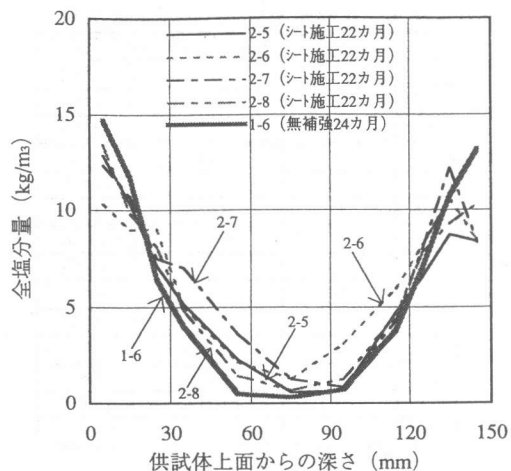


図-3 (2) 全塩分量
(暴露24カ月, 補強22カ月)

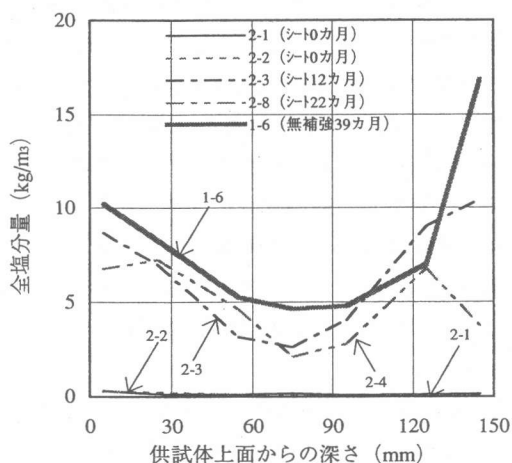


図-3 (3) 全塩分量
(暴露39カ月, 補強0,12カ月)

シートを施工した供試体は、暴露24ヶ月に比べてさらに塩分が表面付近から内部に移動していることが分かる。暴露22ヶ月に炭素繊維シートを施工した供試体も同様の傾向である。

3.3 鉄筋腐食量

表-5および図-4に、暴露12ヶ月および24ヶ月に解体して採取した鉄筋の腐食度²⁾と質量減少率を示す。腐食度の基準は、表-4の脚注に示す。値は鉄筋4本の平均である。暴露開始時に炭素繊維シートを施工したNo.2-1, No.2-2においても0.7%程度の減少率となっている。これは、錆を落とすためにクエン酸に浸漬するため、健全な部分も若干溶解するためである。

暴露12ヶ月でひび割れ、錆汁が観察されたかぶり20mmの供試体(No.1-2)の鉄筋質量減少率はかぶり30, 40mmの供試体(No.1-3, No.1-5)と大きな違いは見られない。ただし、鉄筋腐食度はIIIである。かぶり30mmの供試体(No.1-4)にひび割れ、錆汁が観察された暴露24ヶ月において、かぶり20mmの供試体(No.1-1)の鉄筋質量減少率は1.25%と増加し、鉄筋腐食度もIVと腐食が進んでいることが分かる。一方、暴露12ヶ月で炭素繊維シートを施工した供試体(No.2-3, No.2-4)の暴露24ヶ月における鉄筋質量減少率は1.00%および0.78%、鉄筋腐食度はともにIIIである。このことは、鉄筋の腐食によりひび割れを生じた部材に炭素繊維シートを施工した場合、腐食因子である塩分等の侵入の防止、ひび割れ拡大の抑制による鉄筋腐食の抑制が期待できることを示している。

無補強供試体および暴露22ヶ月で炭素繊維シートを施工した供試体(No.2-5~No.2-8)の、暴露24ヶ月の観察結果から、かぶりのわずかな違いで腐食度に違いが生じているのが分かる。すなわち、かぶり20mmの供試体(No.1-1, No.2-5およびNo.2-6)では鉄筋腐食度がともにIVで、鉄筋質量減少率が1.25%, 1.13%および1.12%であるのに対し、かぶり30mmの供試体(No.1-4, No.2-7およびNo.2-8)では鉄筋腐食度

表-5 鉄筋腐食度・鉄筋質量減少率

No.	鉄筋腐食度	鉄筋質量減少率	試験時期
1-1	IV	1.25%	24カ月
1-2	III	0.66%	12カ月
1-3	II	0.63%	12カ月
1-4	III	0.66%	24カ月
1-5	I	0.55%	12カ月
1-6	II	0.69%	24カ月
2-1	I	0.70%	24カ月
2-2	II	0.63%	24カ月
2-3	III	1.00%	24カ月
2-4	III	0.78%	24カ月
2-5	IV	1.13%	24カ月
2-6	IV	1.12%	24カ月
2-7	III	0.94%	24カ月
2-8	III	1.05%	24カ月

I：腐食なし

II：点錆、部分的かつ表面的な腐食

III：全体的かつ表面的な腐食、浅い孔食

IV：断面欠損に伴う全体的な腐食

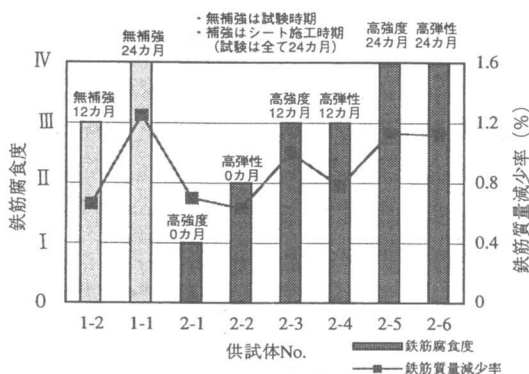


図-4 全塩分量（暴露39カ月，無補強）

がともに III で，鉄筋質量減少率が 0.66%，0.94% および 1.05%，さらにかぶり 40mm の供試体 (No.1-6) では鉄筋腐食度が II で，鉄筋質量減少率が 0.69% であった。

3.4 付着強度試験

暴露 39 ヶ月における付着強度試験の結果を図-5 に示す。試験は重ね合せ部と一般部について実施しており，重ね合せ部の付着強度が一般部の付着強度に比べて小さい傾向が見られ，値のばらつきも大きい。一般部の破壊界面は，ほぼコンクリートの表層部分であったのに対し，重ね合せ部は，部分的にコンクリートとシートとの界面で破壊した。これは，炭素繊維シートの貼付け作業開始時における施工性が原因しているためと考えられる。

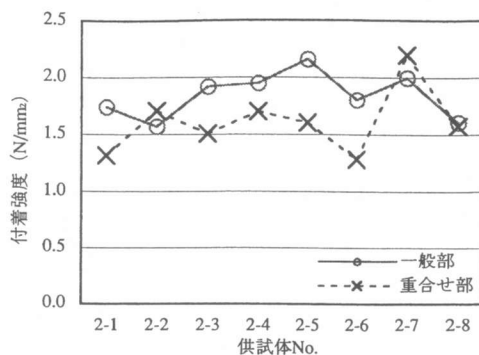


図-5 シート付着強度（暴露39カ月）

4. 結論

本研究から以下のことが明らかとなった。

- (1) 土木学会コンクリート標準示方書・施工編（性能照査型）に従い，塩分量の分布を予測すると，実際よりも塩分の浸透が早い。なお，塩化物イオンの拡散係数を実際の分布に合わせると，その後，ひび割れが発生するまでは比較的精度よく，塩分量の経時変化を予測できる。
- (2) 暴露開始時に炭素繊維シートを施工した供試体では，暴露 39 ヶ月でも内部への塩分の浸透は認められず，高い遮塩性能を有していることが分かる。
- (3) 暴露途中に炭素繊維シートを施工した場合，その後の塩分の侵入を防止できる。なお，表面付近の塩分は減少し，塩分が中央部まで拡散またはひび割れ部を通して移動する。
- (4) 鉄筋腐食によりひび割れを生じた部材に炭素繊維シートを施工した場合，腐食因子である塩分等の侵入の防止，ひび割れの拡大の抑制により鉄筋の腐食の進行を抑制することが期待できる。
- (5) 炭素繊維シートの重ね合わせ部は，一般部に比べて，付着強度が小さく，ばらつきが大きくなる傾向がある。

参考文献

- 1) 土木学会：平成 11 年度版コンクリート標準示方書・施工編，2000
- 2) 建設大臣官房技術調査室：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術，1986.6