

# 論文 塩害劣化コンクリートに対する CFRP 複合電極を用いたデサリネーションの適用

山口 圭亮<sup>\*1</sup>・上田 隆雄<sup>\*2</sup>・黒川 通<sup>\*3</sup>・七澤 章<sup>\*4</sup>

**要旨**：塩害により劣化したコンクリート構造物の耐久性と耐荷性の回復を目的としたリハビリテーション手法として、接着型 CFRP 複合電極を用いたデサリネーションに関する検討が行われてきた。本研究では、小型 RC 供試体を用いた基礎的検討を行うとともに、暴露実験により塩害劣化した大型 RC はり供試体への適用を試みた。通電処理後に曲げ載荷試験を行った結果、小型供試体の場合は接着樹脂の吸水率が小さい場合に、通電処理により補強効果が低下する傾向を示したが、吸水率 20% の樹脂で CFRP 複合電極を接着した大型供試体の場合には、CFRP 板の破断に伴う曲げ破壊を示し、十分な補強効果が確認できた。

**キーワード**：塩害，CFRP 複合電極，デサリネーション，補強効果，接着強度

## 1. はじめに

デサリネーションは塩害により劣化したコンクリート構造物からの塩化物イオン（以下  $\text{Cl}^-$ ）の抽出を目的とする電気化学的補修工法として開発され、実構造物への適用実績も増加しつつある。デサリネーションの適用によりコンクリート中の鉄筋腐食環境が改善されれば、構造物としての劣化速度は低下し、長寿命化が期待できるが、構造物の力学的性能が低下している場合にはこれを回復させることはできない。

そこで著者らは、デサリネーションの陽極システムによる補強効果の付与を目的として、接着型 CFRP 複合電極（炭素繊維シートにアクリル樹脂を含浸させた CFRP 板にチタンメッシュを組合わせた CFRP 複合電極を、導電性を付与するために吸水率を高めたアクリル樹脂でコンクリートに接着したもの）を用いたデサリネーションについて検討を進めてきた。この結果、通電処理に伴い、陽極材接着強度が低下する傾向を示したものの、十分な脱塩効果と、ある程度の曲げ補強効果も確認された<sup>1)</sup>。

そこで本研究では、せん断補強筋を配した小

型 RC 供試体を用いて、本工法による曲げ補強効果を明らかにするとともに、約 3 年間の促進暴露で塩害劣化した大型 RC はり供試体を用いて、本工法の実構造物への適用性を評価することを目的として実験的検討を行うこととした。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の作製と養生および暴露

小型供試体は、 $100 \times 100 \times 400$  mm の RC はりとし、かぶり 20 mm の位置に異形鉄筋 D10 (SD295A) を 1 本配した（図-1 参照）。主筋のみに電流を供給するため、せん断補強筋にはエポキシ樹脂塗装鉄筋 D6 (SD295A) を図-1 に示すように配した。コンクリートの示方配合および 28 日強度は表-1 に示す通りであり、W/C は 55% とし、セメントは普通ポルトランドセメント（密度： $3.16 \text{ g/cm}^3$ ）を用いた。また、コンクリートには  $\text{Cl}^-$  量が  $8.0 \text{ kg/m}^3$  となるように、コンクリートの練混ぜ水に溶解した形であらかじめ NaCl を混入した。

一方、大型供試体は  $100 \times 200 \times 1600$  mm の RC はりとし、かぶり 20 mm の位置に異型鉄筋

\*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 徳島大学 工学部建設工学科助教授 工博 (正会員)

\*3 日本道路 (株)

\*4 電気化学工業 (株) 青海工場無機材料研究センター

表-1 コンクリートの示方配合表および28日強度

	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							f <sup>c</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
				C	W	S	G	NaCl	減水剤	AE剤	
小型供試体	55	46	15	318	175	796	946	13.2	0.3	0.02	37
大型供試体	60	44	15	308	185	757	1013	10.0	0.77	0.07	25

D13 (SD295A) を2本配した (図-2 参照)。せん断補強筋には防錆剤を塗布した鉄筋 D6 (SD295A) を図-2 に示すように配した。コンクリートの示方配合は表-1 に示す通りである。コンクリート中の鉄筋腐食を促進させるため、W/C は60%とし、セメントは早強ポルトランドセメント (密度: 3.13 g/cm<sup>3</sup>) を用いた。また、コンクリートの練混ぜ水に溶解した形であらかじめ 10.0 kg/m<sup>3</sup> の NaCl を混入した。これは、Cl<sup>-</sup>量に換算すると 6.07 kg/m<sup>3</sup> となる。

コンクリートの打設日翌日に脱型した小型供試体は 20℃ の恒温室中で 28 日間の封緘養生を行った後に、通電処理面1面の CFRP 複合電極接着部分 (100×300 mm) を残してエポキシ樹脂を塗布した。さらに、供試体から露出する鉄筋もリード線接続部分以外はビニールテープを巻きつけることにより絶縁した。

一方、コンクリートの打設日翌日に脱型した大型供試体は 20℃ の恒温室中で 28 日間の湿布養生を行った後に、健全時の曲げ載荷試験に供する2体以外の供試体については1年間の乾湿繰返しの鉄筋腐食促進環境に移した。乾湿繰返しは、高温多湿状態 (60℃, R.H.90%) 3日間、低温乾燥状態 (15℃, R.H.60%) 4日間で1サイクルとした。さらにこの後、2年間の屋外暴露を行って鉄筋腐食を促進させた。暴露場所は茨城県稲敷郡美浦村の内陸環境とした。屋外暴露終了後の供試体ひび割れ状況例を図-3 に示す。1.0 mm のひび割れ幅を超える大きなひび割れも数多く見られ、塩害の劣化過程としては加速期後期程度まで劣化が進行していた。電流の短絡を防ぐためにセメントペーストによるひび割れ注入を行った後に、通電処理面1面の CFRP 複合電極接着部分 (100×1400 mm) を残してエポキシ樹脂を塗布した。

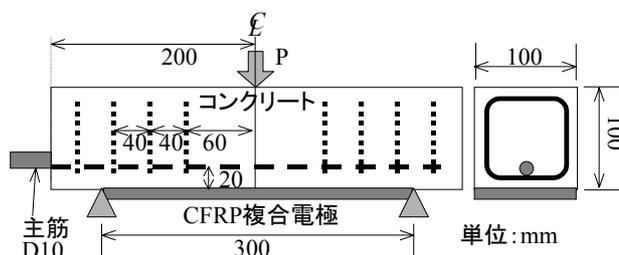


図-1 小型 RC 供試体図

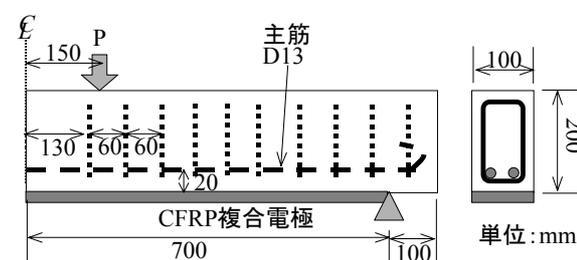


図-2 大型 RC 供試体図

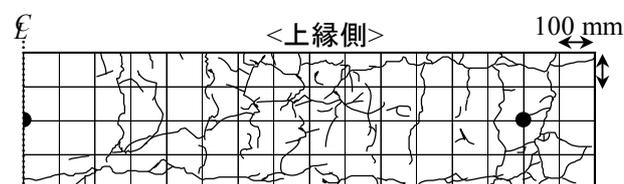


図-3 大型 RC 供試体の劣化状況例 (側面)

## 2.2 通電処理

2方向織りの炭素繊維シート (目付量: 200 g/m<sup>2</sup>, 引張強度: 3200 N/mm<sup>2</sup>, 弾性係数: 2.3 × 10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>) を 100×300 mm, または, 100×1400 mm の大きさで切り出し, 炭素繊維に直接電流が流れることを防止するために, 吸水率 0% のアクリル樹脂を含浸した。このようにして作製した CFRP 板を電流供給用のチタンメッシュで挟み込み, CFRP 複合電極とした。

作製した CFRP 複合電極を供試体に接着し, 20℃ 雰囲気中で 7 日間養生後にデサリネーションを適用した。小型供試体の接着に用いたアクリル樹脂は, 吸水率を 10% と 20% に調整した 2 種

類とした。大型供試体の接着には吸水率 20%の  
アクリル樹脂を用いた。なお、CFRP 複合電極  
を接着しない無補強供試体も別途用意した。

通電処理方法は、電解液を満たしたポリ容器  
に供試体を浸漬し、CFRP 複合電極のチタンメ  
ッシュを陽極、鉄筋を陰極として直流電流を流  
した。電流密度は、通電面の面積に対して 1.0  
A/m<sup>2</sup>を採用し、通電期間は 8 週間連続通電とし  
た。また電解液としては、0.1 N の Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 溶液  
を用いた。通電処理期間中は 1 週間間隔で陽極  
材と鉄筋との間の電位差をテスターにより測定  
した。なお、小型供試体は接着用樹脂の異なる  
2 種類の供試体それぞれについて無通電供試体  
を別途設け、通電期間中は 20°C の恒温室中で湿  
空静置した。また、無補強供試体についても通  
電処理は行わなかった。陽極システムと通電処  
理方法の詳細は参考文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

小型供試体は、各要因に対して 5 体ずつ作製  
し、この内、3 体を用いて静的曲げ載荷試験を  
行い、残りの 2 体を用いて接着強度試験および  
化学分析を行った。大型供試体は、各要因に対  
して 2 体ずつ作製した。本実験で作製した供試  
体の一覧を表 2 に示す。なお、これ以降の実  
験結果を示す図表における凡例は表 2 に示し  
た供試体名を用いることとする。

### 2.3 各種試験

通電処理の前後において、コンクリート中鉄  
筋の自然電位を JSCE-E601-2000「コンクリート  
構造物における自然電位測定方法」にしたがっ  
て測定した。自然電位測定時の照合電極として  
は飽和銀/塩化銀電極を用いた。

所定の通電処理終了直後に、化学分析用の小  
型供試体の通電部分中央付近を図 4 に示すよ  
うにコンクリートカッターで切断し、切出した  
各コンクリートプレートの平均 Cl<sup>-</sup>濃度を求め  
ることで、供試体中の Cl<sup>-</sup>濃度分布を測定した。  
Cl<sup>-</sup>濃度（全塩分量）の測定は、JCI-SC4 に準拠  
した方法で、塩化物イオン選択性電極を用いた  
電位差滴定法により行った。

通電処理期間終了後に、小型の通電供試体お

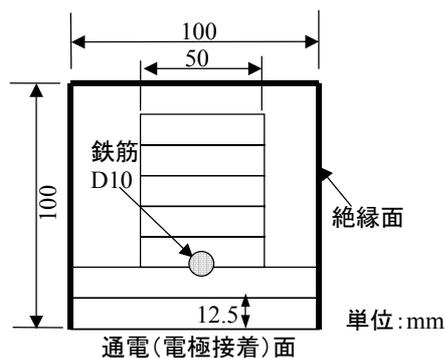


図 4 化学分析用供試体切断断面図

表 2 供試体一覧

供試体名	形式	電流密度 (A/m <sup>2</sup> )	接着樹脂 吸水率 (%)	本数
N(無補強)	小型	0.0	—	5
N10			10	5
N20			20	5
D10		1.0	10	5
D20			20	5
C (健全)	大型	0.0	—	2
N(無補強)				2
D				1.0

よび無通電供試体を用いて、接着強度試験お  
よび静的曲げ載荷試験を行った。接着強度試験は、  
建研式の接着強度試験機を用いて、CFRP 複合  
電極とコンクリートとの接着強度を測定した。  
測定項目は、最大引張荷重と試験後の剥離状況  
とした。静的曲げ載荷試験は、図 1 に示すよ  
うにスパン長 300 mm、中央 1 点集中載荷で行  
った。測定項目は、荷重、スパン中央変位、お  
よび、コンクリートひび割れ状況とした。

一方、大型供試体は、主鉄筋に沿った腐食ひ  
び割れが大きく進展しており、曲げ載荷試験を  
行えば、載荷の初期段階でかぶりコンクリート  
が剥落することが懸念されたため、通電供試体、  
無通電供試体ともに、剥落防止工としてはり側  
面にビニロン繊維シートを接着することとした。  
剥落防止工の施工後に静的曲げ載荷試験を実施  
した。図 2 に示すようにスパン長 1400 mm、  
2 点集中載荷で行った。測定項目は、荷重、ス  
パン中央変位、および、CFRP 板ひずみとした。

### 3. 通電状況

8週間の通電処理期間中における、小型供試体の陽極材と供試体中鉄筋との電位差の経時変化を測定した結果、接着用アクリル樹脂の吸水率の違いに関わらず、いずれの供試体の場合も4~5V程度の電位差でほぼ一定していた。これより、本手法により安定した電流供給が可能であることがわかる。また、電解液は通電期間を通じてほぼ無色であり、通電に伴う炭素繊維の酸化劣化も防止できたものと考えられる。大型供試体の場合は、通電面積が大きいことから、通電初期の電位差は25V程度と大きかったが、1週間程度の通電処理経過後は、小型供試体と同程度の電位差で安定した。

### 4. 通電処理による補修効果

デサリネーションを適用する前後における供試体中鉄筋の自然電位測定結果を表-3に示す。なお、ここで示した値は同一要因の供試体における測定値の平均である。小型供試体に用いたコンクリートには、あらかじめ内在塩分として $8.0 \text{ kg/m}^3$ という、発錆限界を大幅に上回る $\text{Cl}^-$ をコンクリートに混入していることから、通電処理前の自然電位はASTM規準の腐食領域の値を示しているが、通電処理終了後は接着用樹脂の吸水率の違いによらず、防食領域<sup>2)</sup>の値を示している。このことから、今回の実験で用いたいずれの供試体にも同程度の防食電流が供給されていたものと考えられる。大型供試体の場合、図-2に示したように屋外暴露により、厳しい劣化状態を示していたにも関わらず、通電前の自然電位はASTM規準の不確定領域の値を示している。これは、暴露終了後に通電処理を開始するまで約2ヶ月間屋内に供試体を保管したことから、コンクリートの乾燥が進んだことが原因と考えられる。なお、通電処理後は大型供試体の場合も小型供試体の場合と同程度の防食領域の値を示している。

通電処理が終了した後の小型供試体中における全塩分量分布を図-5に示す。なお、初期混

表-3 通電前後の供試体中鉄筋自然電位 (V vs Ag/AgCl)

	D10 (小型)	D20 (小型)	D (大型)
通電前	-0.436	-0.417	-0.173
通電後	-1.14	-1.12	-1.14

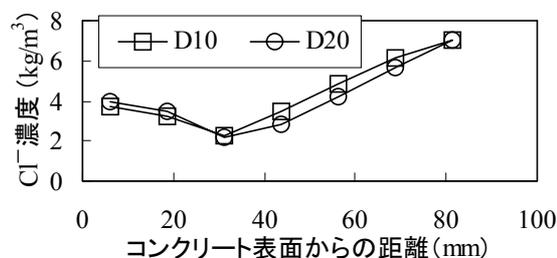


図-5 通電処理後の供試体中全塩分量分布

入 $\text{Cl}^-$ 量は $8.0 \text{ kg/m}^3$ である。横軸の0mmが通電表面であり、かぶり20mmで鉄筋が配されている。図-5によると、接着用樹脂の吸水率の違いによる、コンクリート中の全塩分量分布の変化は小さく、吸水率が10%、20%のいずれの場合にも、陰極である鉄筋を中心に脱塩効果が得られていることがわかる。脱塩量も既往の検討結果<sup>1)</sup>と同程度であることから、今回の検討においても従来と同程度の脱塩効果が得られたと言える。

### 5. 接着強度試験

小型の通電供試体および無通電供試体を用いて行ったCFRP複合電極の接着強度試験結果を表-4に示す。接着強度は、最大引張荷重を接着面積である $1600 \text{ mm}^2$  ( $40 \times 40 \text{ mm}$ )で除した値とし、3点以上の平均値を平均接着強度とした。また、剥離状況として、接着面積の80%以上でコンクリートが剥離した場合を母材破壊、アクリル樹脂とコンクリートとの界面剥離部分が80%以上の場合を界面剥離とした。

表-4によると、無通電供試体(N10, N20)では、接着用アクリル樹脂の吸水率によらず、接着強度が $1.5 \text{ N/mm}^2$ 以上であり、剥離状況も母材破壊を示していることから、十分な接着強

表－４ CFRP 複合電極の接着強度試験結果

供試体名	平均接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	剥離状況
N10	1.72	母材破壊
N20	1.68	母材破壊
D10	0.43	界面剥離
D20	1.49	母材破壊

度を有していたと判断できる。

一方、通電供試体の場合には、無通電供試体の場合と比べて、全体的に接着強度が低下しており、特に樹脂の吸水率が小さい10%の場合に顕著な低下が見られる。このような、通電処理による接着強度の低下は、著者らによるこれまでの検討<sup>1)</sup>においても認められた。従来の検討でも吸水率の小さい樹脂で顕著な接着強度の低下が認められたため、今回は比較的大きな吸水率を選定したが、吸水率10%の場合には、チタンメッシュとアクリル樹脂との密着性が高いことから、通電処理に伴うアノード反応の影響を強く受け、樹脂の劣化が進行したものと思われる。樹脂劣化の詳細なメカニズムについては、さらに検討が必要であるが、吸水率20%の場合には、チタンメッシュにおけるアノード反応で発生した酸素などの抜け道が確保できたために、樹脂の劣化程度が小さく、比較的大きな接着強度が得られたものと考えられる。

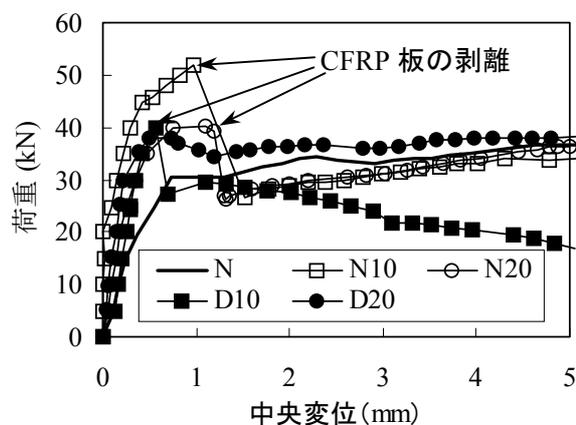
## 6. 曲げ載荷試験

小型供試体および大型供試体を用いて行った静的曲げ載荷試験結果を表－5に、小型供試体と大型供試体の荷重－中央変位曲線をそれぞれ図－6および図－7に示す。なお、表－5に示した最大荷重は同一要因のすべての供試体から得られた値の平均値とした。また、破壊形態はコンクリートのひび割れ状況から判定した。同一要因であれば、荷重－中央変位関係のばらつきは小さいため、図－6および図－7には、各要因の実験結果例を示して比較している。

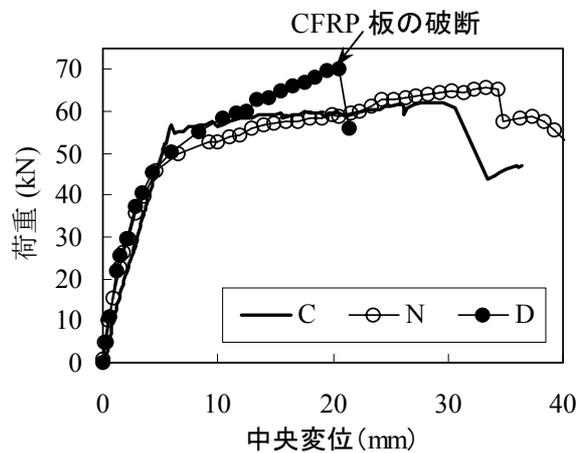
表－5によると、小型供試体の場合は、曲げ破壊をした無補強供試体に対して、CFRP 複合

表－5 静的曲げ載荷試験結果

供試体名	平均最大荷重 (kN)	破壊形態
小型		
N	36.8	曲げ
N10	52.0	せん断 (CFRP 剥離)
N20	39.8	せん断 (CFRP 剥離)
D10	40.2	せん断 (CFRP 剥離)
D20	38.3	せん断 (CFRP 剥離)
大型		
C	62.9	曲げ
N	65.1	曲げ
D	71.7	曲げ (CFRP 破断)



図－6 荷重－中央変位曲線（小型供試体）



図－7 荷重－中央変位曲線（大型供試体）

電極を接着した供試体は、すべて CFRP 板の剥離に伴うせん断破壊を示している。著者らの既往の検討<sup>1)</sup>においても、CFRP 複合電極で補強した場合にせん断破壊したため、今回の検討では、せん断補強筋を配し、計算上は曲げ破壊することを想定していたが、CFRP 板が端部から剥離

した際に付着していたコンクリートが剥離し、これに伴って急激に斜めひび割れが進展した。図-6によると、CFRP 複合電極を接着した供試体は、初期剛性が大きく、CFRP 板が剥離するまで荷重が増大するが、剥離後は急激に荷重が低下している。剥離前の荷重は N10 が最も大きく、その他は同程度であるが、通電処理を行うことにより、剥離時の変位が無通電の場合より小さくなっている。これは、5.で示したような通電処理に伴う CFRP 板の接着強度の低下が影響しているものと考えられる。

一方、大型供試体の場合、表-5に示したように、吸水率 20%の樹脂で CFRP 複合電極を接着した通電供試体 (D) が、CFRP 板の破断を伴う曲げ破壊を示した。小型供試体の場合は、CFRP 板の定着長が短いために、CFRP 板の高い引張強度が発揮される前に剥離したが、大型供試体の場合は、定着長が十分であったために、通電処理によって接着強度が多少低下しても、CFRP 板の引張強度を 100%利用できたものと考えられる。図-7において、健全供試体 (C) の曲線と無補強供試体 (N) の曲線を比較すると、無補強供試体は鉄筋腐食による劣化が相当進んでいるはずであるが、剥落防止工を施したために、降伏荷重が若干低下している以外は健全供試体とほぼ同様の曲線となっていることがわかる。無補強供試体と通電・補強供試体を比較すると、補強することによって、最大荷重は増大しているが、じん性は低下している。土木学会「コンクリート標準示方書[構造性能照査編]」にしたがって計算すると、無補強供試体 (N) の曲げ耐力は 60.0 kN となり、CFRP 複合電極とコンクリートが完全に付着していると仮定して計算した通電・補強供試体 (D) の曲げ耐力は 68.6 kN となった。これらの理論値はほぼ実験値と等しいことから、CFRP 板は破断する直前まで、コンクリートと一体化していたものと思われる。各荷重レベルにおける CFRP 板ひずみ分布を図-8に示す。この図からも、曲げスパン全域において CFRP 板が引張応力を負

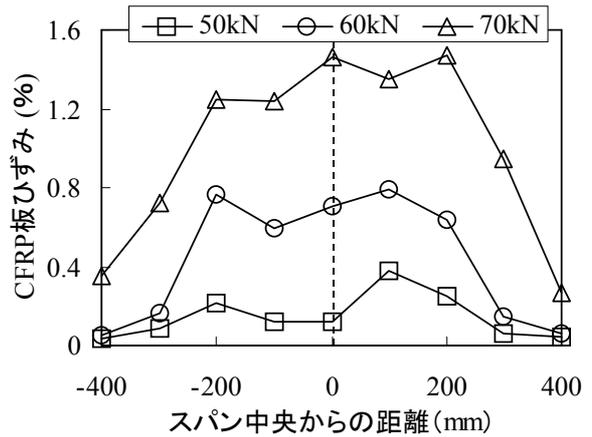


図-8 CFRP 板のひずみ分布 (大型供試体)

担していることが分かり、高い補強効果が得られていると言える。

## 7. まとめ

本研究から得られた結果を以下に要約する。

- (1) 通電処理前後の鉄筋自然電位の値や、コンクリートからの脱塩状況から、本手法による補修・防食効果は十分であると判断できる。
- (2) 小型供試体を用いた検討の結果、接着樹脂の吸水率が 10%の場合には、通電処理に伴い接着強度が低下するとともに、曲げ載荷試験における、初期剛性や最大荷重の増加といった補強効果も通電処理に伴い低下した。
- (3) 塩害で劣化した大型供試体に対して本手法で補強し、通電処理後に曲げ載荷試験を行った結果、CFRP 板の破断に伴う曲げ破壊を示し、十分な補強効果が得られた。

## 謝辞

本研究で用いた大型はりの暴露に関して、東洋建設㈱にご協力いただき、炭素繊維材料は新日本石油㈱からご提供いただきました。京都大学大学院の宮川豊章教授からは貴重なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 庄野 秀, 吉田幸弘, 上田隆雄, 芦田公伸: CFRP 複合電極を用いたデサリネーションによる補強効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp. 1731-1736, 2004.7
- 2) 日本コンクリート工学協会: 海洋コンクリート構造物の防食指針 (案), 1983.2