

論文 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

庄野 秀^{*1}・吉田 幸弘^{*2}・上田 隆雄^{*3}・芦田 公伸^{*4}

要旨：チタンメッシュと炭素繊維にアクリル樹脂を含浸させた CFRP 板を組合わせて作製した CFRP 複合電極を用いて、電気化学的脱塩工法であるデサリネーションを適用した時の補強効果に関して実験的検討を行った。鉄筋コンクリート供試体に CFRP 複合電極を接着してデサリネーションを適用した後に CFRP 複合電極とコンクリートとの接着強度試験および静的曲げ載荷試験を行った。この結果、通電処理により接着強度は低下したが、接着に用いたアクリル樹脂の吸水率が大きいほど通電処理後の接着強度は大きくなった。また、通電処理後の曲げ補強効果も接着樹脂の吸水率が大きいほど大きくなった。

キーワード：CFRP 複合電極，デサリネーション，アクリル樹脂，補強効果，接着強度

1. はじめに

塩害により劣化したコンクリート構造物の補修工法として電気防食工法や電気化学的脱塩工法（デサリネーション）といった電気化学的補修工法が開発され、実構造物への適用実績も増加しつつある。一方で、これら補修工法の目的は構造物の耐久性を向上させることであり、鉄筋腐食により力学的性能が低下した場合には補強工法の適用を別途検討する必要がある。

そこで著者らは、コンクリート構造物の補強材料として最近注目を集めている炭素繊維を陽極システムに組み込むことにより、補強効果やコンクリート片のはく落防止効果を有するデサリネーションの可能性を検討してきた。これまでの検討の結果、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 20%としたアクリル樹脂で接着した供試体にデサリネーションを適用したところ、炭素繊維の酸化消耗を防ぎつつ、十分な脱塩効果が得られることが明らかになった¹⁾。

そこで本研究では、接着型 CFRP 複合電極を用いてデサリネーションを適用したときの補強

効果を明らかにすることを目的として、接着用アクリル樹脂の吸水率を要因として実験的検討を行うこととした。

2. 実験概要

実験に用いた供試体は、100×100×400 mm の鉄筋コンクリートはりとし、かぶり 30 mm の位置に異形鉄筋 D10(SD295A)を 1 本配した(図-1 参照)。本実験に用いたコンクリートの示方配合を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度: 3.16 g/cm³)、細骨材は徳島県那賀川産川砂(密度: 2.62 g/cm³)、粗骨材は徳島県那賀川産玉砕石(密度: 2.62 g/cm³)を用いた。また、コンクリートには Cl⁻量が 8.0 kg/m³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。

コンクリートおよびモルタルの打設日翌日に脱型した供試体は 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。

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻

*3 徳島大学 工学部建設工学科助教授 工博 (正会員)

*4 電気化学工業(株) セメント・特殊混和材研究所主任研究員 工博 (正会員)

表-1 示方配合表

W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量 (kg/m ³)					
			C	W	S	G	NaCl (Cl ⁻)	減水剤
55	45.8	15	318	175	800	972	13.2 (8.0)	1.6

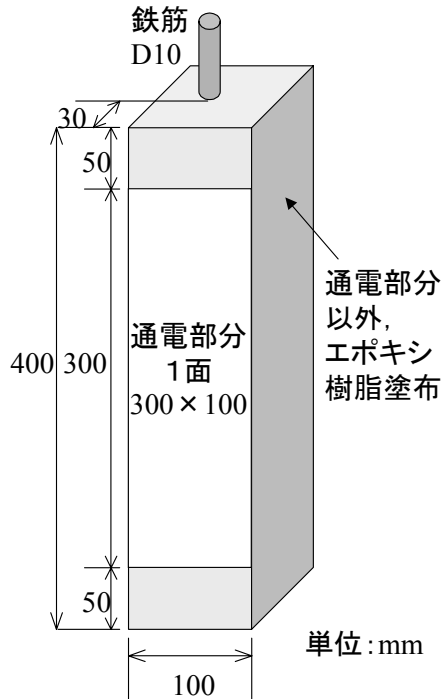


図-1 供試体図

炭素繊維シートは2方向織りで炭素繊維目付量 200 g/m²のシートを 100×300 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。陽極システムの断面構成図を図-2に示す。

以上の処理終了後に CFRP 複合電極を供試体に接着し、デサリネーションを適用した。CFRP 複合電極を接着した供試体の外観を写真-1に示す。接着に用いたアクリル樹脂は吸水率をそれぞれ 5%, 10%, 20%に調整した3種類とした。なお、比較用に CFRP 複合電極を接着しない無補強供試体を別途作製した。

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

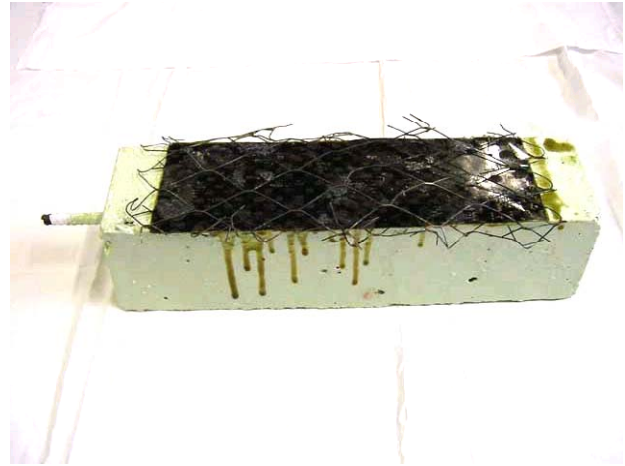


写真-1 CFRP 複合電極を接着した供試体

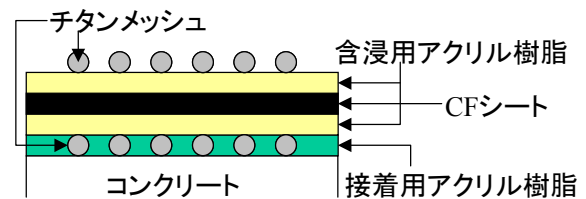


図-2 陽極システムの断面構成図

した。電流密度は、コンクリート表面に対して 1.0 A/m²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 Li₃BO₃ 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、接着用樹脂の異なる3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℃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。

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、化学分析用の供

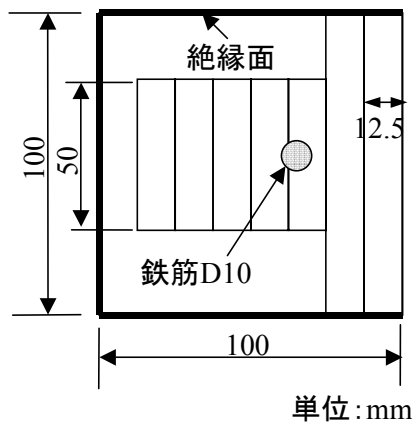


図-3 化学分析用供試体切断図

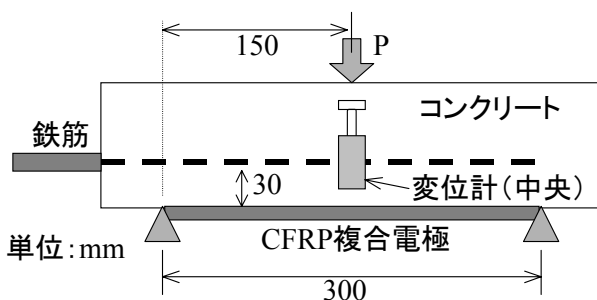


図-4 静的曲げ载荷試験状況

試体の通電部分中央付近を図-3に示すようにコンクリートカッターで切断し、切り出した各コンクリートプレートの平均 Cl^- 濃度を求めることで、供試体中の Cl^- 濃度分布を測定した。 Cl^- 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、通電供試体お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载荷試験を行った。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。静的曲げ载荷試験は、図-4に示すようにスパン長 300 mm、中央 1 点集中载荷で行った。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。

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载荷試験を行い、残りの 2 体を用いて接着強度試験および化学分

表-2 供試体一覧

電流密度 (A/m^2)	接着用樹脂吸水率 (%)	供試体名	本数
0.0	5	N5	5
	10	N10	5
	20	N20	5
1.0	5	D5	5
	10	D10	5
	20	D20	5
0.0	—	無補強(NR)	5

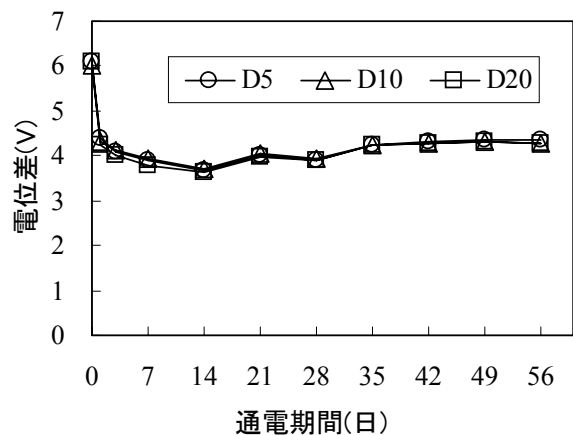


図-5 陽極-鉄筋間電位差の経時変化

析を行った。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。

3. 通電状況

8 週間の通電処理期間中における、陽極材と供試体中鉄筋との電位差の経時変化を図-5に示す。これによると、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 4V 程度の電位差でほぼ一定していることがわかる。この結果から、電解液中において通電処理を行う場合には、接着用樹脂の吸水率が約 5% と比較的小さい値であっても、既往の検討²⁾に見られる、通電処理時の電圧上昇など電流供給性能の低下は発生しないものと考えられる。

著者らの過去の検討¹⁾では、通電処理により、炭素繊維が酸化消耗すると電解液が黒色や褐色に変色する現象が見られたが、今回の実験では、

すべての供試体について、電解液はほぼ透明で通電処理による変色は認められなかった。これより、CFRP 複合電極を用いた場合には、アクリル樹脂含浸の効果により炭素繊維の酸化消耗および溶出が防止できたと思われる。ただし、通電処理後の CFRP 板は、通電処理前の深緑色からやや褐色を帯びた色に変色しており、表面には多数の小さなふくれが確認された。このようなアクリル樹脂の変質は、電解液によるアルカリ劣化と考えられ、著者らによる既往の検討¹⁾でも観察されたため、今回の実験では含浸用には吸水率 0% のアクリル樹脂を用いたが、顕著な改善は見られなかった。今後は CFRP 板のアルカリ耐久性をさらに向上させる必要があるものと考えられる。

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。今回の供試体に用いたコンクリートにあらかじめ、内在塩分として 8.0 kg/m^3 という、発錆限界を大幅に上回る 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³⁾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。

通電処理が終了した後の各種供試体中における全塩分量分布を図-6に示す。なお、初期混入 Cl^- 量は 8.0 kg/m^3 である。横軸の供試体中の位置で 0 mm が通電表面であり、かぶり 30 mm で鉄筋が配されている。図-6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、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。鉄筋近傍部分の Cl^- 量は 2.0 kg/m^3 程度まで減少していることから、脱塩率は約 75% と計算できる。この値は、チタンメッシュを陽極としたデサリネーションで得ら

表-3 通電前後の供試体中鉄筋自然電位 (V vs Ag/AgCl)

	D5	D10	D20
通電前	-0.469	-0.412	-0.496
通電後	-1.359	-1.312	-1.302

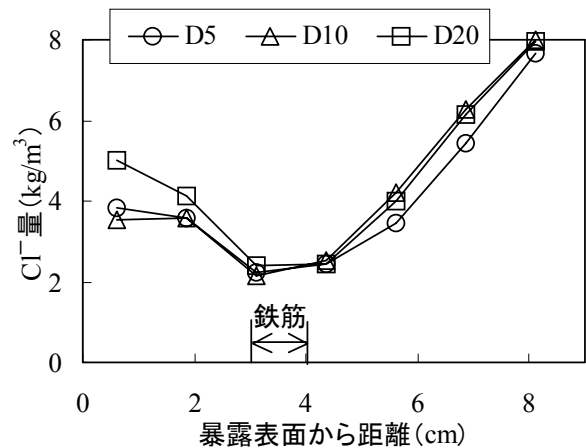


図-6 通電処理後の供試体中全塩分量分布

れた既往の検討結果¹⁾と同程度であることから、今回検討を行った陽極システムでも、従来型のデサリネーション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

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 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て変動係数とともに表-4中に示した。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、それ以外を部分界面剥離と表した。

表-4によると、無通電供試体では、接着用アクリル樹脂の吸水率が 10% および 20% の場合は接着強度が 2.0 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、十分な接着強度を有していたと判断できる。これに対して、樹脂吸水率が 5% の場合には、部分界面剥

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 ²)	剥離状況
N5	1.25 (25.0%)	部分界面剥離
N10	2.16 (10.1%)	母材破壊
N20	2.08 (14.4%)	母材破壊
D5	—	界面剥離
D10	0.98 (22.3%)	部分界面剥離
D20	1.41 (18.9%)	母材破壊

離となり、接着強度も他の場合よりも若干小さくなっている。これは、吸水率 5%の樹脂は、他の場合よりも粘性が高く、接着施工性が悪かったために、接着層が比較的粗になったことが原因と考えられる。一方、通電供試体の場合には、同じ接着樹脂を用いた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、このような傾向は樹脂の吸水率が小さいほど顕著に見られる。特に樹脂吸水率が 5%の場合には、ほぼ完全な界面剥離であり、引張荷重として有意なデータを得ることができなかった。

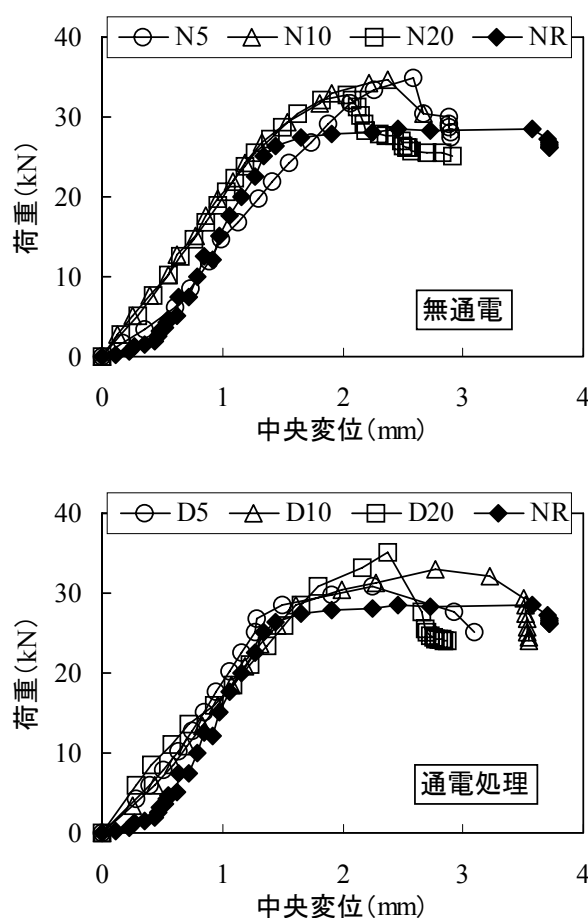
このような、通電処理による接着強度の低下は、接着樹脂中に埋め込まれたチタンメッシュにおいて発生する電極反応により、接着樹脂が劣化したことが原因と考えられる。アクリル樹脂は基本的に絶縁性が高いが、今回実験に用いた接着用樹脂は吸水率を高めることで導電性を付与している。一方、デサリネーションではアノード反応により酸素が発生するが、吸水率の小さい樹脂を用いた場合には、酸素のガス圧によってチタンメッシュ近傍の樹脂が劣化したものと推測できる。これに対して、吸水率 20%の場合には、発生した酸素の抜け道が確保できたために、樹脂の劣化が小さく、比較的大きな接着強度が得られたものと考えられる。

6. 曲げ載荷試験

通電供試体および無通電供試体を用いて行った静的曲げ載荷試験結果を表－５に、荷重－中央変位曲線を図－７に示す。なお、表－５に示した最大荷重は 3 体の供試体から得られた値の

表－５ 静的曲げ載荷試験結果

供試体名	平均最大荷重 (kN)	破壊モード
無補強 (NR)	28.6 (0%)	曲げ
N5	35.3 (11.5%)	せん断
N10	35.1 (13.7%)	せん断
N20	33.1 (18.4%)	せん断
D5	31.3 (16.3%)	曲げ
D10	34.0 (0.9%)	せん断
D20	35.5 (9.3%)	せん断



図－７ 荷重－中央変位曲線

平均値とし、変動係数とともに示した。破壊モードはコンクリートのひび割れ状況から判定した。図－７に示した荷重－中央変位曲線は、中央変位が同一時の 3 体の供試体の荷重値を平均して求めた。また、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、無補強供試体 (NR) の耐力を計算すると、曲げ耐力は 23.5 kN、せん断耐力は 32.9 kN となった。この際、コンクリートの圧縮強度は、実測の 28

日強度である 35.5 kN を用いた。また、炭素繊維シートとコンクリートが完全に付着していると仮定して CFRP 複合電極を接着したときの曲げ耐力を計算すると、25.7 kN となった。この際、炭素繊維シート厚を 0.0565 mm、引張強度を 2900 N/mm² とした。

表-5によると、曲げ破壊をした無補強供試体に対して、CFRP 複合電極を接着した供試体は、最大荷重が大きくなっており、特に無通電供試体については、全てのケースで破壊モードがせん断に変化している。これは、CFRP 複合電極の接着により曲げ耐力が大きくなることで破壊モードが変化したものと考えられる。これに対して、通電供試体については、接着樹脂の吸水率が大きい場合には、無通電供試体と同程度の最大荷重が得られたが、吸水率が 5% の場合には、無補強供試体との最大荷重の差は小さく、破壊モードも曲げ破壊を示している。これは、接着強度試験で示したように、接着樹脂の吸水率が 5% の場合には通電処理により、CFRP 複合電極の接着強度が低下したことが原因と考えられる。図-7によると、無補強供試体は中央変位が 4 mm 程度に達するまで荷重が低下していないのに対して、せん断破壊した補強供試体は 2 から 3 mm 程度の変位で荷重が低下している。また、初期剛性も無補強供試体より若干大きくなっている。ただし、接着樹脂の吸水率が 5% および 10% の通電供試体の場合には、無補強供試体に近い曲線形状を示しており、補強効果は比較的小さくなっていると考えられる。

7. まとめと今後の課題

本研究から得られた結果を以下に要約する。

- (1) 吸水率を変化させたアクリル樹脂を用いて CFRP 複合電極を供試体に接着し、これを陽極としてデサリネーションを適用したところ、所定の電流を供給するための電極間電位差は接着用アクリル樹脂の吸水率の違いに関わらずほぼ一定であり、安定した電流供給性能を示した。

(2) 8 週間の通電処理を適用した結果、コンクリートからの脱塩量は接着用アクリル樹脂の吸水率の違いに関わらずほぼ同程度であり、従来型のデサリネーションにより得られる脱塩効果ともほぼ同程度であった。また、供試体中の鉄筋自然電位からも十分な防食効果が得られていることがわかった。

- (3) 通電処理後は無通電の場合と比較して、CFRP 複合電極とコンクリートとの接着強度が低下しており、この傾向は接着用アクリル樹脂の吸水率が小さいほど顕著に見られた。
- (4) 無通電の場合には、CFRP 複合電極の接着により、RC はりの曲げ補強効果が見られたが、通電処理を行った場合には、特に接着用アクリル樹脂の吸水率が小さい場合に、得られる補強効果の低下が見られた。

本研究の結果、比較的大きな吸水率を有するアクリル樹脂を用いて CFRP 複合電極をコンクリート表面に接着することにより、補修効果と補強効果を同時に有するデサリネーションの適用可能性が示されたといえる。今後はより実構造に近いケースで検討を行うとともに、補修効果および補強効果の持続性についても検討を進める予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、京都大学大学院の宮川豊章教授から貴重なご助言をいただいた。また、炭素繊維材料は新日本石油㈱からご提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 上田隆雄, 庄野 秀, 芦田公伸, 宮川豊章: CFRP 複合電極を用いたデサリネーションに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1493-1498, 2003.6
- 2) 山本貴士, 中村亮太, 小澤一宏, 伊藤秀治: 電気防食機能を付与した炭素繊維シート補強に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1695-1700, 2002.6
- 3) 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