

論文 CFRP 複合電極を用いたデサリネーションに関する研究

上田 隆雄^{*1}・庄野 秀^{*2}・芦田 公伸^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨：電気化学的脱塩工法であるデサリネーションの陽極材として、従来から用いられてきたチタンメッシュに炭素繊維にアクリル樹脂を含浸させた CFRP 板を組み込んで作製した CFRP 複合電極を用いることで、補修効果と補強効果を兼ね備えたりハビリテーション手法の開発を試みた。CFRP 複合電極を用いてあらかじめ塩分を混入した鉄筋コンクリート供試体にデサリネーションを適用したところ、炭素繊維の消耗を防ぎつつ、所定の通電処理を完了させることができた。また、その脱塩効果は従来のチタンメッシュを単体で用いた場合と同等であり、十分な補修効果を有していることが確認された。

キーワード：CFRP 複合電極，デサリネーション，炭素繊維，アクリル樹脂，脱塩効果

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の塩害による劣化過程は一般に、潜伏期，進展期，加速期，劣化期に分類され，加速期や劣化期まで劣化が進行した場合には，構造物としての耐荷力やじん性も低下することから，耐久性を向上させるための補修工法の適用のみでは不十分であり，力学的性能を向上させるための補強工法や，かぶりコンクリートのはく落防止工法などを併用させる必要がでてくる。

電気化学的脱塩手法である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の補修工法として実績を挙げつつあるが，デサリネーションの効果は，コンクリート中の塩化物イオン（以下 Cl^- ）を除去することにより，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を別途考える必要がある。

そこで本研究では，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電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することとした。

著者らのこれまでの検討結果¹⁾によると，炭素繊維材料を陽極材として直接電流を流すと陽極反応により炭素繊維が著しく酸化消耗することが確認された。そこで今回は，炭素繊維を消耗させることなく補修効果が得られるような陽極システムについて主として検討を行った。

2. 実験概要

実験に用いた供試体は， $100 \times 100 \times 150$ mm の角柱コンクリートの中央部分に異形鉄筋 D13 (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/cm^3 ），細骨材は徳島県那賀川産川砂（密度： 2.62 g/cm^3 ），粗骨材は徳島県那賀川産玉砕石（密度： 2.62 g/cm^3 ）を用いた。また，コンクリートには Cl^- 量が 8.0 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。

28 日間の封緘養生後に通電処理面 1 面を残してエポキシ樹脂を塗布した供試体に対してデサリネーションを適用した。通電処理時の陽極システムとしては，以下の 5 種類を設定した。

*1 徳島大学助教授 工学部建設工学科 工博（正会員）

*2 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻

*3 電気化学工業(株) 特殊混和材部 工博（正会員）

*4 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 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

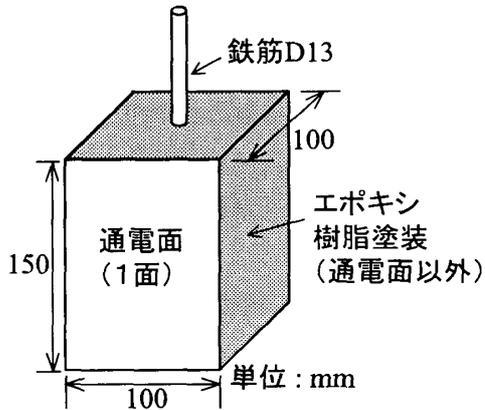


図-1 供試体図

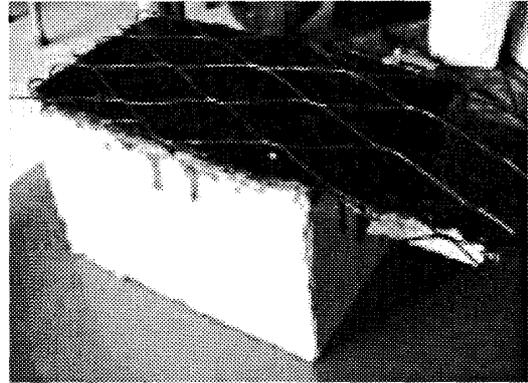


写真-2 接着型 CFRP 複合電極

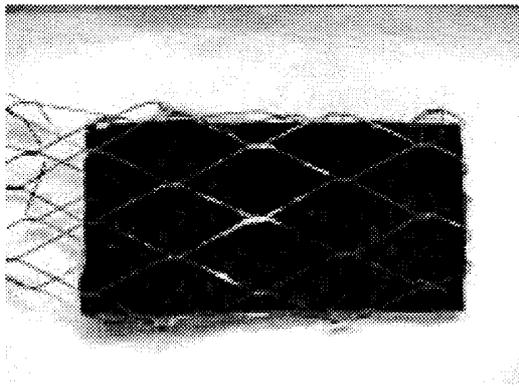


写真-1 CFRP 複合電極

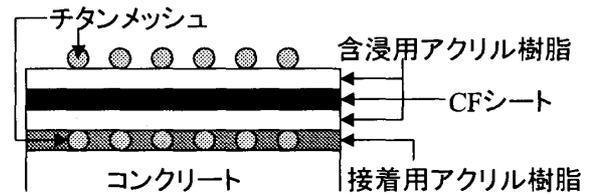


図-2 接着型 CFRP 複合電極の断面構成図

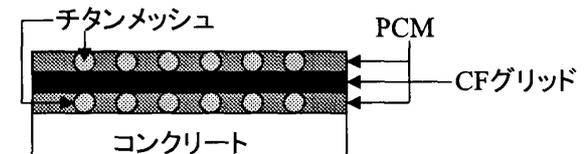


図-3 接着型 CF グリッド複合電極の断面構成図

(1) 非接着型炭素繊維シート (以下 CF シート)

2方向織りで炭素繊維目付量 200 g/m² の CF シートを 100×200 mm の大きさに切り出した。

(2) 非接着型 CFRP 複合電極

炭素繊維に直接電流が流れることを防止するために、(1)に示した CF シートに吸水率 10% のアクリル樹脂を含浸して作製した CFRP 板をチタンメッシュで挟み込み、CFRP 複合電極とした (写真-1 参照)。

(3) 接着型 CFRP 複合電極

導電性を高めるために吸水率 20% に調整したアクリル樹脂を用いて、(2)で示した CFRP 複合電極を供試体通電面に接着した (写真-2

参照)。陽極システムの断面構成を図-2 に示す。

(4) 接着型 CF グリッド複合電極

炭素繊維目付量 100 g/m² の CF グリッドを 100×200 mm に切出した後にチタンメッシュで挟み込み、ポリマーセメントモルタル (以下 PCM) で供試体の通電面に接着した。陽極システムの断面構成を図-3 に示す。

(5) 非接着型チタンメッシュ

一般にデサリネーションの陽極材として用いられてきたチタンメッシュを比較用に設定した。

上記5種類の陽極システムの中で従来型の非接着型陽極材は供試体の通電面から約 50 mm 離れた位置に対向するような形で電解液中に設置した。接着型の陽極は上記の方法で供試体の通電面に接着した上で電解液中に設置した。

通電処理は鉄筋を陰極として1面通電で直流電流を流した。電流密度は、コンクリート表面に対して 1.0 A/m^2 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_3BO_3 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、接着型、非接着型それぞれについて無通電供試体を別途作製し、通電期間中は 20°C の恒温室中で湿空静置した。

所定の通電処理終了直後に、化学分析用の供試体を図-4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。また、通電処理が終了した非接着型 CFRP 複合電極から CFRP 板を取り出し、幅約 25 mm のストラップ状に切り出したものを用いて引張強度試験を行った。さらに、接着型供試体の陽極部分を含む通電面から切出した観察用プレートを用いてデジタルマイクロスコープによる陽極システムの拡大観察を行った。

処理後の供試体は1週間サイクルの乾湿繰返し環境（温度： 20°C 、相対湿度： 95% と 60% の繰返し）に静置し、定期的に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。

3. 通電状況

各種陽極材を用いて8週間の通電処理を行ったときの、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

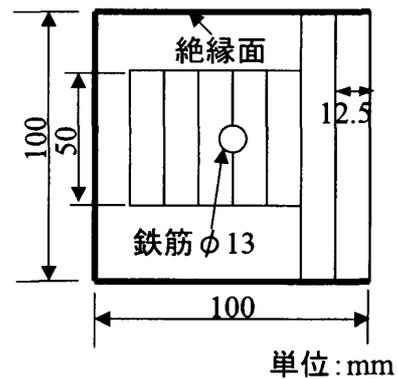


図-4 化学分析用供試体切断図

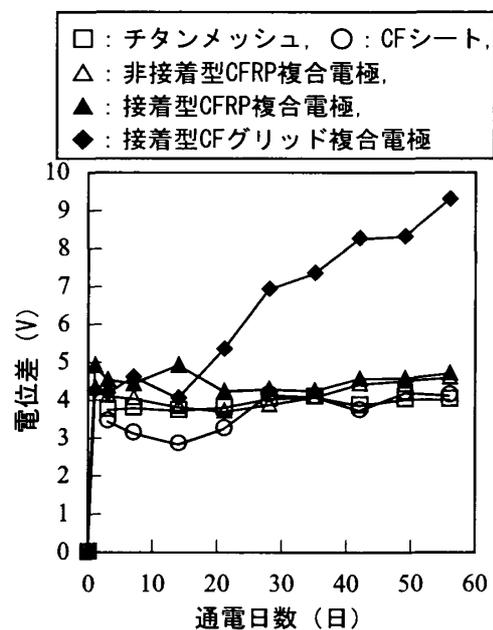


図-5 陽極-鉄筋間電位差の経時変化

型 CF グリッド複合電極の場合のみ、通電期間の増加と共に電位差が増大していることが分かる。図-3に示したように CF グリッド複合電極はチタンメッシュが直接炭素繊維と接触する構造となっているために、炭素繊維の消耗が避けられず、電気抵抗の増大につながったものと考えられる。このような現象は電気防食レベルの通電処理でも確認されている²⁾。著者らの過去の検討¹⁾では、炭素繊維グリッドに直接電流を供給した場合には、3週間程度で通電処理の継続が不可能となったが、今回はチタンメッシュとの複合電極としたことから、炭素繊維への直接的な電流供給が緩和され、8週間の通電

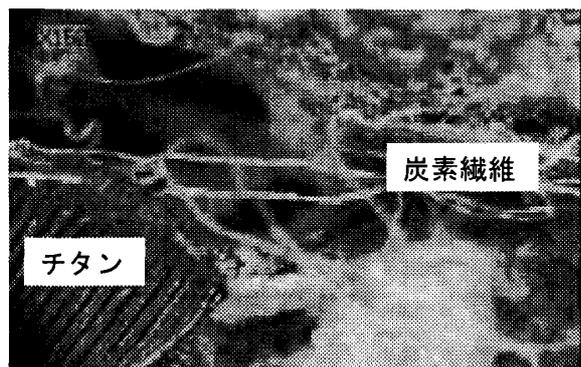


写真-3 通電処理後の炭素繊維グリッド



写真-4 樹脂中の炭素繊維（無通電）

処理を完了することができたと考えられる。

炭素繊維の消耗程度を目安となる電解液の着色状況としては、CFシートに直接電流を流した場合は濃い黒色となり、接着型CFグリッド複合電極を用いた場合は薄い褐色、その他の場合はほぼ透明であった。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。また、接着型CFRP複合電極を用いた場合も安定した電流供給ができたことから、今回供試体との接着に用いた吸水率20%のアクリル樹脂は良好な導電性を有していると考えられる。

4. 通電処理後の陽極材変質状況

4.1 外観観察

通電処理前のCFRP複合電極は写真-1に示したような状況であり、CFRP板は深緑色をしており、表面は光沢を帯びていた。これに対して、通電処理後のCFRP板は、接着型、非接着型のいずれの場合もやや褐色を帯びたような色に変色するとともに、表面の光沢が失われていた。また、CFRP板の表面には多数の小さなふくれが確認された。今回のCFRP複合電極は炭素繊維には直接的に電流が流れないようなシステムとなっていることから考えると、このような変質は通電処理の影響ではなく、アルカリ性の電解液による樹脂の変質が原因と考えられる。今回用いたアクリル樹脂は導電性を高めるために吸水率を増大させているために、電解液の樹

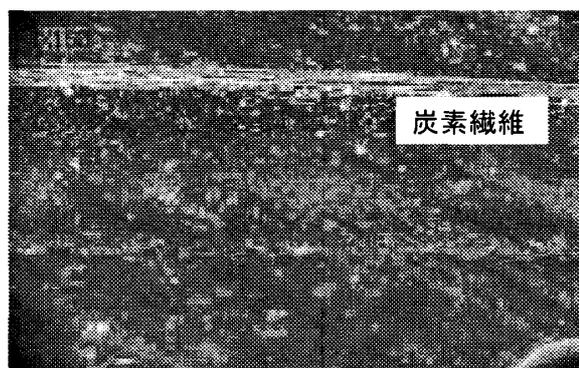


写真-5 樹脂中の炭素繊維（通電後）

脂への浸透が容易であったものと考えられる。本システムでは炭素繊維に含浸させる樹脂は導電性を高める必要はないため、今後は吸水率の小さい樹脂で検討する必要があると考えられる。

4.2 マイクロスコープ観察

通電処理終了後の接着型供試体について、接着界面や陽極部分のマイクロスコープ観察を行った。写真-3から写真-6はいずれも150倍観察の画像である。

通電処理後の接着型CFグリッド複合電極の様子を写真-3に示す。写真に示されるようにチタンメッシュ付近の炭素繊維は電流の影響を受けて著しく消耗しており、図-5に示したような電圧上昇の原因になったものと思われる。これに対して、チタンメッシュから離れた部分においては電流の影響が小さいことから比較的健全な炭素繊維部分も見られた。

無通電の接着型CFRP複合電極を写真-4に、通電処理後の接着型CFRP複合電極を写真-5に示す。写真中で白い線状に見えるのが炭素繊維

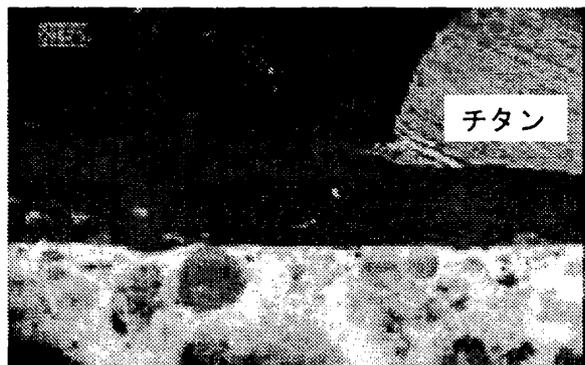


写真-6 樹脂-コンクリート界面 (通電後)

維である。これによると、炭素繊維はアクリル樹脂に保護されていることから、通電処理の有無による変化は認められない。また、通電処理後の供試体コンクリートと CFRP 複合電極の接着界面の様子を写真-6に示す。写真-6に見られるように、接着界面の様子も概ね良好であったが、部分的には、樹脂がコンクリートからはく離している部分も見られた。ただし、このようなはく離部分は無通電の供試体にも部分的に見られたことから、通電処理の影響ではなく、樹脂の体積変化や初期の接着処理不良などが原因と考えられる。

4.3 CFRP 板の引張強度試験

非接着型 CFRP 複合電極の中の CFRP 板を幅約 25 mm のストラップ状に切り出したものを用いて、直接引張試験を行った。試験結果を表-2に示す。なお、表中の引張強度は CF シート厚をカタログ値の 0.0565 mm で一定として計算した。これによると、通電処理により CFRP 板の引張強度が低下する現象は見られない。また、いずれの場合も CF シートのカタログ値である 2900 N/mm² 以上の引張強度を示している。CFRP 板の引張強度を支配するのは炭素繊維であることから、アクリル樹脂中の炭素繊維は通電処理により力学的性能は低下していないことがわかる。

以上より、CFRP 複合電極を用いた場合、アクリル樹脂中の炭素繊維は健全であると考えられるが、アルカリ性電解液あるいは通電処理の影響でアクリル樹脂が変質している可能性もあ

表-2 CFRP 板引張試験結果

	引張強度 (N/mm ²)
無通電	3181 (>2900)
通電処理後	3264 (>2900)

□ : チタンメッシュ, ○ : CFシート,
△ : 非接着型CFRP複合電極,
▲ : 接着型CFRP複合電極,
◆ : 接着型CFグリッド複合電極

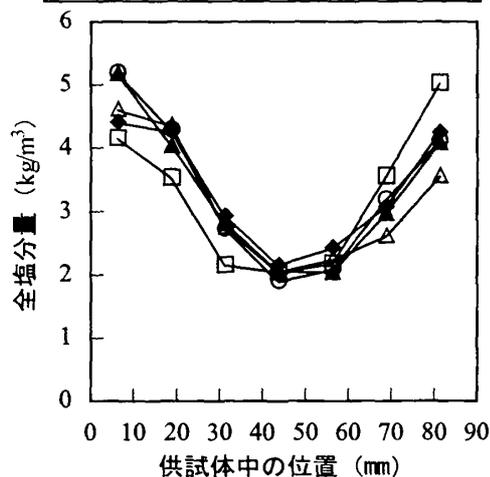


図-6 通電処理後の供試体中 Cl 濃度分布

ることから、アクリル樹脂の力学的性能について確認する必要がある。

5. 通電処理による補修効果

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/m³ である。横軸の供試体中の位置で 0 mm が通電表面、50 mm が鉄筋中心位置を示している。チタンメッシュを陽極材として用いた場合が従来の通電処理であることから、このケースを基準で考えると、今回の炭素繊維を用いた各種陽極による脱塩効果は、チタンメッシュを陽極とした場合と大差はないことが分かる。また、接着型 CF グリッド複合電極を接着していた PCM 中の全塩分濃度は 0.117wt% (PCMの密度を 2.0 g/cm³ とすると 2.34 kg/m³)、接着型 CFRP 複合電極を接着していたアクリル樹脂中の全塩分濃度は 0.063wt% (アクリル樹脂の密度を 1.1 g/cm³ とすると 0.7 kg/m³) となつて

表-3 通電前後の供試体中鉄筋自然電位 (V vs Ag/AgCl)

	チタンメッシュ	CFシート	非接着型CFRP 複合電極	接着型CFRP 複合電極	接着型CFグリ ッド複合電極
通電前	-0.4345	-0.4395	-0.479	-0.479	-0.5085
通電後	-1.0445	-1.0545	-1.072	-1.072	-1.028

おり、供試体表面部分の全塩分濃度よりも小さい値となっている。これより、接着型の陽極システムを用いても陽極部分に高濃度のClが蓄積することはなく、電気泳動で陽極付近に移動したClは電解液に溶出しているものと考えられる。

通電処理前後における各種供試体中鉄筋の自然電位を表-3に示す。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、通電処理終了後はいずれの陽極システムの場合においても防食領域の値を示しており、このことから、陽極システムによらず十分な鉄筋防食効果が得られていることが分かる。

6. まとめと今後の課題

本研究から得られた結果を要約すると、以下の通りである。

- (1) CFグリッドに直接チタンメッシュを組み合わせて作製したCFグリッド複合電極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圧が上昇した。これに対し、CFシートにアクリル樹脂を含浸させて作製したCFRP板をチタンメッシュと組み合わせたCFRP複合電極は、導電性アクリル樹脂で供試体に接着した場合も含めて安定した電流供給性能を示した。
- (2) 通電処理後のCFグリッド複合電極を観察した結果、チタンメッシュとCFグリッドが接する部分で炭素繊維の顕著な酸化消耗が認められた。これに対して、CFRP複合電極の場合は、CFシートがアクリル樹脂によって保護されていることから、炭素繊維の通電処理による消耗は認められなかった。また、

CFRP板の引張試験からも、通電処理による炭素繊維の強度低下は認められなかった。

- (3) 各種陽極システムにより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従来型のチタンメッシュを陽極とした場合と同程度であり、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。

本研究の結果、CFRP複合電極をコンクリート表面に接着することにより、補強効果や落防止効果を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。ただし、今回用いたアクリル樹脂は通電処理後に若干の変質が認められており、樹脂としての強度やコンクリートとの接着強度に関して検討を行う必要がある。また、導電性を高めるために吸水率を増大させたアクリル樹脂で接着した場合に、どの程度の補強効果を有しているのかという点についても引き続き確認していく予定である。

謝辞

本研究における実験で用いた炭素繊維材料は新日本石油(株)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, 長尾賢二, 芦田公伸, 宮川豊章: 炭素繊維電極を用いたデサリネーションの適用に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol.2, pp.143-148, 2002.10
- 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