

# 論文 既存陸上鉄筋コンクリート部材を用いた電着工法のひび割れ補修に対する適用性の検討

西田孝弘\*1・大即信明\*2・皆川浩\*3・Wanchai Yodsudjai\*3

**要旨：**本研究では、既存陸上鉄筋コンクリート部材に存在するひび割れを電着工法により補修し、その適用性を検討した。特に、本研究では、中性化している部材および漏水している部材に存在するひび割れを対象とした。検討の結果、電着工法により既存陸上鉄筋コンクリート部材に存在するひび割れを閉塞できることが確認された。さらに、中性化している部材においては再アルカリ化効果および腐食抑制効果が、漏水している部材においては止水効果および腐食抑制効果がそれぞれ確認された。

**キーワード：**既存陸上鉄筋コンクリート部材, 電着工法, 中性化, 漏水, ひび割れ補修

## 1. はじめに

現在、陸上鉄筋コンクリート部材の補修に関する研究および施工事例が多数報告されている。これは、社会的に鉄筋コンクリート部材の維持管理が強く求められているためである。特に、陸上鉄筋コンクリート部材の補修工法の中で、現在注目されているものに電着工法が挙げられる。図-1 に電着工法の概要を示す。まず、内部鉄筋を陰極とし、コンクリート表面近傍に陽極を設置する。その後、外部溶液を介し直流電流を通ずることにより、外部溶液中の陽イオンをひび割れ部およびコンクリート表層部へ移動させる。その結果析出する物質(「電着物」と略記)によりひび割れの閉塞および表層部の改質を図る。電着工法の特長としては、(1)ひび割れの補修と同時にコンクリートの再アルカリ化および脱塩ができること、(2)湿潤状態のコンクリートを補修できること、(3)微細なひび割れを閉塞できること、(4)複数のひび割れを同時に閉塞できること、等が挙げられる。電着工法の適用事例としては、海中鉄筋コンクリート構造物に対するものがある<sup>1)</sup>。また、陸上鉄筋コンクリート部材への電着工法の適用に関しては、著者らの実験室レベルでの研究を通し適切な外部溶

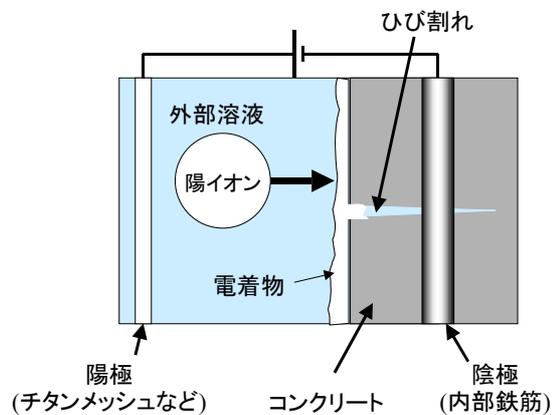


図-1 電着工法の概要

液を用いることにより、可能であることが示されている<sup>2)</sup>。しかしながら、既存陸上鉄筋コンクリート部材に対する適用事例はない。

したがって、本研究では、既存陸上鉄筋コンクリート部材に存在するひび割れを電着工法により補修し、その適用性を検討する。なお、本研究では、中性化している部材および漏水している部材に存在するひび割れを対象とする。

## 2. 実験概要

本章では、既存陸上鉄筋コンクリート部材の概要、電着方法、電着条件および適用性に関する検討項目を示す。

\*1 東京工業大学大学院助手 国際開発工学専攻 工修 (正会員)

\*2 東京工業大学大学院教授 国際開発工学専攻 工博 (正会員)

\*3 東京工業大学大学院博士課程 国際開発工学専攻 工修

表-1 中性化している部材の概要

実施場所	東京都目黒区地上 20m
部材の種類	陸上鉄筋コンクリート部材 屋上欄干, 竣工後 35 年経過
ひび割れ	中性化に起因するひび割れが存在 鉄筋長手方向に幅 0.3mm 程度の ひび割れ 中性化深さ : 35mm



図-2 中性化している部材の全景

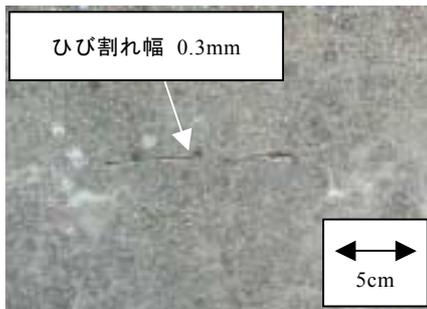


図-3 電着工法適用前のひび割れの様子  
(中性化)

## 2.1 既存陸上鉄筋コンクリート部材の概要

### (1) 中性化している部材の概要

表-1 に中性化している部材の概要を示す。また、図-2 に中性化している部材の全景を示す。本部材は、東京都目黒区の地上 20m に存在する屋上欄干であり、竣工後 35 年が経過している。ひび割れ幅は、0.3mm 程度である。図-3 に電着工法適用前のひび割れの様子を示す。なお、シュミットハンマー法によるコンクリートの推定圧縮強度は 35MPa であり、かぶりは 30mm である。また、フェノールフタレイン法による電着工法適用前の中性化深さは 35mm である。

### (2) 漏水している部材の概要

表-2 に漏水している部材の概要を示す。ま

表-2 漏水している部材の概要

実施場所	東京都目黒区
部材の種類	陸上鉄筋コンクリート部材 トンネル壁面, 竣工後 50 年以上経過
ひび割れ	ひび割れからの漏水 縦方向に 0.5mm~1.2mm のひび割れ



図-4 漏水している部材の全景

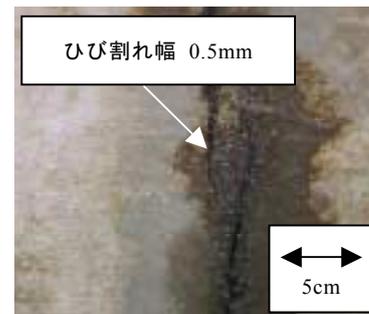


図-5 電着工法適用前のひび割れの様子  
(漏水)

た、図-4 に漏水している部材の全景を示す。本部材は、東京都目黒区に存在する鉄道下のトンネルカルバート壁面であり、竣工後 50 年以上が経過している。ひび割れ幅は狭い部分で 0.5mm 程度、広い部分で 1.2mm 程度である。図-5 に電着工法適用前のひび割れの様子を示す。なお、シュミットハンマー法によるコンクリートの推定圧縮強度は 28MPa であり、かぶりは 60mm である。また、フェノールフタレイン法による電着工法適用前の中性化深さは 0 mm である。

## 2.2 電着方法

現在、電気化学的防食工法を陸上鉄筋コンクリート部材に適用する場合、外部溶液の供給方法には、パネルを用いた方式、またはセルロー

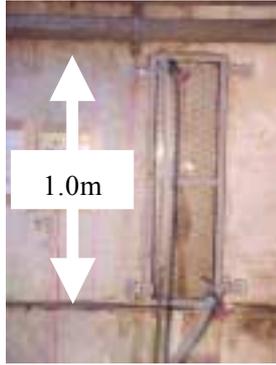


図-6 パネル取り付け後の部材の様子

スファイバーを用いた方式が一般的に用いられている<sup>3)</sup>。パネルを用いた方式では、対象面にパネルを設置し、このパネル内部に外部溶液を封入する。これにより外部溶液を対象面に保持する。一方、セルロースファイバーを用いた方式では、対象面に水分保持材（セルロースファイバー）を吹き付け、そこに外部溶液を散布する。これにより外部溶液を対象面に保持する。本研究では、(ア)電着工法適用中の維持管理が容易であること、(イ)既往の検討で用いられた溶液の供給方法に近いこと、等の理由から、パネルを用いた方式を採用した。パネルの取り付け方法を以下に示す。まず、陰極となるコンクリート中鉄筋にリード線を接続するため、ひび割れから 50cm 程度離れた場所でコンクリートをはつり取り、コンクリート中鉄筋を露出させた。次に、パネルを取り付ける個所にマーキングしドリルで穴をあけ、そこにナットを埋め込んだ。その後、陽極となるチタンメッシュをあらかじめ取り付けしたパネルを所定の位置に設置し、ボルトにより留めた。図-6 にパネルを取り付け後の部材の様子を示す。

また、電着期間中はポンプによる外部溶液の循環供給を行った。外部溶液の交換に関しては、中性化している部材に対しては 1 週間毎に、漏水している部材に対しては毎日行った。

表-3 に本研究で使用した電着条件を示す。特に、外部溶液種類に関しては、既往の検討<sup>4)</sup><sup>5)</sup>より適切と判断されたものを使用した。

表-3 電着条件

	中性化	漏水
外部溶液種類	Mg(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> ZnSO <sub>4</sub>	Mg(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub>
外部溶液濃度 (mol/l)	0.10	0.50
電流密度 (A/m <sup>2</sup> )	1.0	2.0
電着期間 (日)	7 および 28 (溶液交換 7 日毎)	7 (溶液交換毎日)

## 2.3 適用性に関する検討項目

### (1) ひび割れの閉塞状況

電着物によるひび割れの閉塞状況を把握するため、電着工法適用後のひび割れ部およびコンクリート表面部の目視観察、写真撮影を行った。

### (2) 再アルカリ化効果（中性化）

電着工法適用前、電着工法適用後、および電着工法適用後 2 年間放置した後のかぶりコンクリートの中性化深さを測定し、電着工法による再アルカリ化効果を評価した。中性化深さの測定にはフェノールフタレイン法を用いた。

### (3) 止水効果（漏水）

電着工法適用前後の漏水部を目視観察、写真撮影し、電着工法による止水効果を評価した。

### (4) 腐食抑制効果

電着工法適用後の腐食抑制効果をコンクリート中鉄筋の自然電位および分極抵抗を測定することにより評価した。コンクリート中鉄筋の自然電位の測定に際しては、照合電極として飽和硫酸銅電極を使用した。なお、腐食程度の判定は、ASTM C876 に準じて行った<sup>6)</sup>。また、コンクリート中鉄筋の分極抵抗は、FRA (Frequency Response Analyzer) を使用した交流インピーダンス法により測定した。なお、分極抵抗の測定時の条件は、5000Hz~0.05Hz の範囲において、振幅 50mV の電圧を与えることとした。そして、水流らの研究<sup>7)</sup>を参考とし、得られた分極抵抗を基にマイクロセル腐食電流密度を算出した。算出には式(1)を用いた。

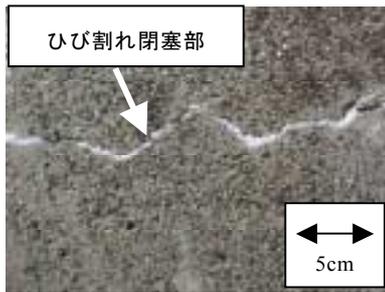


図-7 7日間電着工法適用後のひび割れの様子  
( $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  水溶液)

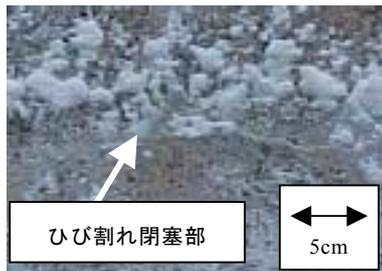


図-8 28日間電着工法適用後のひび割れの様子  
( $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  水溶液)

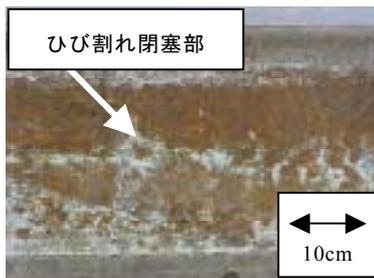


図-9 28日間電着工法適用後のひび割れの様子  
( $\text{ZnSO}_4$  水溶液)

$$i_{cor} = \frac{k}{R_p} \quad (1)$$

ここで、 $i_{cor}$  : ミクロセル腐食電流密度( $\text{A}/\text{cm}^2$ )

$k$  : 定数  $=0.0209(\text{V})^7$

$R_p$  : 分極抵抗( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )

その後、得られたミクロセル腐食電流密度よりミクロセル腐食速度を算出した。この際、ミクロセル腐食電流密度が  $100 \mu \text{A}/\text{cm}^2$  の時、ミクロセル腐食速度は  $1.16 \text{mm}/\text{年}$  とした<sup>8)</sup>。

### 3. 電着工法の適用性に関する検討

#### 3.1 中性化している部材

##### (1) ひび割れの閉塞状況

図-7 に外部溶液として  $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  水溶液を用い7日間電着工法適用後のひび割れの様

子、図-8 に外部溶液として  $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  水溶液を用い28日間電着工法適用後のひび割れの様子を示す。これらより、電着工法を適用することにより、既存陸上鉄筋コンクリート部材に存在するひび割れを閉塞できることが確認される。また、7日間電着工法適用後のコンクリート表面と28日間電着工法適用後のコンクリート表面の様子を比較すると、前者はひび割れに集中して電着物が析出しているのに対し、後者はコンクリート表面にも電着物が析出していることが確認される。この理由としては、電着工法適用初期において、ひび割れ部の抵抗が小さく、ひび割れ部に多くの陽イオンが供給されることが挙げられる。すなわち、電着期間の増加に伴い、ひび割れが電着物により閉塞され、ひび割れに卓越して供給されていた陽イオンがコンクリート表面部にも供給されるようになったためと考えられる。

一方、図-9 に外部溶液として  $\text{ZnSO}_4$  水溶液を用い28日間電着工法適用後のひび割れの様子を示す。図-8 と図-9 のコンクリート表面を比較した場合、外部溶液として  $\text{ZnSO}_4$  水溶液を用い電着工法を適用した場合、電着期間の増加に伴う外部溶液の pH 低下により、コンクリート表面が酸荒れすることが確認された。また、外部溶液交換時(電着期間7日間)のそれぞれの外部溶液の pH を測定したところ、 $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  水溶液を用い電着工法を適用した場合、pH は6程度であったのに対し、 $\text{ZnSO}_4$  水溶液を用い電着工法を適用した場合、pH は3以下に低下することが確認された。これは、 $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  水溶液が有する緩衝作用のためと考えられる<sup>5)</sup>。したがって、外部溶液として  $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2$  水溶液を用いることにより、電着期間の増加に伴うコンクリート表面の酸荒れを防止できることが確認された。

また、図-10 に電着工法適用後2年間放置した後のひび割れの様子を示す。これより、電着工法適用後2年間放置した後も電着物はひび割れ部を閉塞し続けていることが確認される。

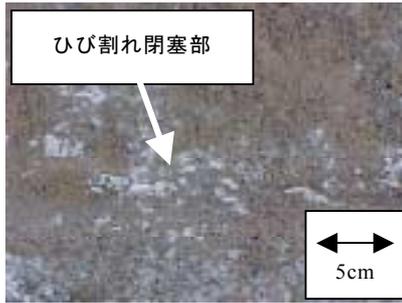


図-10 電着工法適用後2年間放置した後のひび割れの様子 (Mg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>水溶液)

表-4 電着工法適用前後の中性化深さ (Mg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>水溶液)

	中性化深さ (mm)
電着工法適用前	35.0
電着工法適用後	15.5
電着工法適用後2年後	16.7

## (2) 再アルカリ化効果

表-4 にフェノールフタレイン法による電着工法適用前後の中性化深さを示す。これより、中性化している部材に対し電着工法を適用した場合、コンクリートは再アルカリ化され、電着工法適用後2年間放置した後もその効果は保たれることが確認される。

## (3) 腐食抑制効果

図-11 に自然電位と放置期間の関係、表-5 に電着工法適用前後のコンクリート中鉄筋のマイクロセル腐食速度を示す。これらより、電着工法適用後2年間放置した後も、自然電位は貴な状態であり、マイクロセル腐食速度は低いことが確認される。したがって、電着工法適用後2年間放置した後も電着工法による腐食抑制効果は保たれることが確認される。これは、表-4 に示したように、中性化した鉄筋近傍のコンクリートが電着工法により再アルカリ化されたためと考えられる。

## 3.2 漏水している部材

### (1) ひび割れの閉塞状況

図-12 に7日間電着工法適用後のひび割れの様子を示す。これより、漏水している部材に存在するひび割れを閉塞できることが確認される。

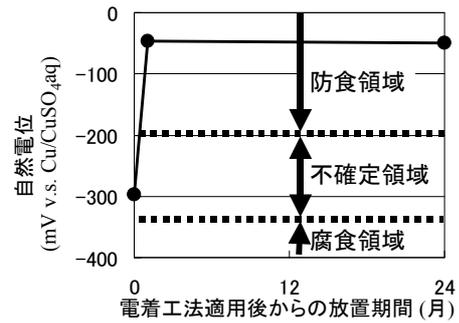


図-11 自然電位と放置期間の関係 (Mg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>水溶液)

表-5 電着工法適用前後のコンクリート中鉄筋のマイクロセル腐食速度 (Mg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>水溶液)

	マイクロセル腐食速度 (mm/年)
電着工法適用前	$6.06 \times 10^{-4}$
電着工法適用後	$1.62 \times 10^{-4}$
電着工法適用後2年後	$1.89 \times 10^{-4}$

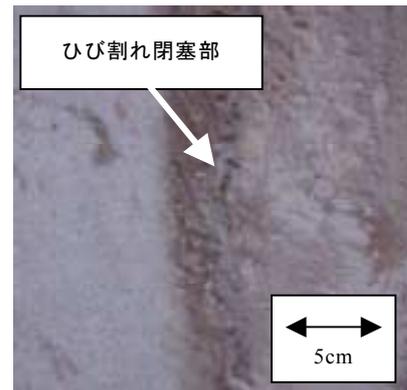


図-12 7日間電着工法適用後のひび割れの様子 (Mg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>水溶液)

表-6 電着補工法適用後のコンクリート中鉄筋のマイクロセル腐食速度 (Mg(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>水溶液)

	マイクロセル腐食速度 (mm/年)
電着工法適用前	$2.69 \times 10^{-4}$
電着工法適用後	$1.86 \times 10^{-4}$

## (2) 止水効果

図-5 と図-12 を比較した場合、電着工法適用前のひび割れでは漏水が確認されるが、電着工法適用後のひび割れでは漏水が確認されない。これより、電着工法により、漏水している部材に存在するひび割れからの漏水を防止できることが確認される。

### (3) 腐食抑制効果

表-6 に電着工法適用前後のコンクリート中鉄筋のマイクロセル腐食速度を示す。これより、電着工法により既存鉄筋コンクリート部材中鉄筋のマイクロセル腐食速度を低下できることが確認される。これは、電着工法によりひび割れが閉塞され、鉄筋の腐食に必要な酸素が鉄筋近傍へ供給されなくなったためと考えられる。

### 4. 結論

本研究により得られた主な知見を以下に示す。

- (1)電着工法により中性化している部材に存在するひび割れを閉塞できることが確認された。また、外部溶液として緩衝作用を有する  $Mg(CH_3COO)_2$  水溶液を用いることにより、電着期間の増加に伴うコンクリート表面の酸荒れを防止できることが確認された。さらに、中性化している部材においては、電着工法による鉄筋近傍のコンクリートの再アルカリ化効果およびコンクリート中鉄筋の腐食抑制効果が確認された。これらの効果は電着工法適用後 2 年間放置した後でも保たれることが確認された。
- (2)電着工法により漏水している部材に存在するひび割れを閉塞できることが確認された。また、漏水している部材においては、電着工法によるひび割れ部での止水効果およびコンクリート中鉄筋の腐食抑制効果が確認された。

### 謝辞

本論文を作成するにあたり、電気化学工業株式会社宇田川秀行氏、戸田建設株式会社倉林清氏、田中徹氏にご援助を頂いた。また、本研究は、平成 13 年度科学研究費補助金基盤研究

(B)(2)「土中および陸上鉄筋コンクリート構造物のひび割れ補修に対する電着工法の実用化、No.13555122」の一部として行った。ここに感謝の意を示す。

### 参考文献

- 1) 横田優, 佐々木晴敏, 福手勤: 電着工法による港湾コンクリート構造物の補修と防食について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.849-854, 1992
- 2) 大即信明, 宮里心一, 柳在碩, 西田孝弘, 久田真: 乾燥収縮ひび割れにより劣化したモルタルの補修に対する電着工法の適用可能性, 材料, 第 49 巻, 第 2 号, pp215-221, 1999.2
- 3) 土木学会: 電気化学的防食工法設計施工指針 (案), 2001.11
- 4) 平山周一, 大即信明, 久田真, 番匠谷英司: 通電による鉄筋コンクリートのひび割れ閉塞のフィジビリティスタディ, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.332-333, 1997
- 5) 西田孝弘, 大即信明, 宮里心一, 柳在碩: 陸上鉄筋コンクリート部材のひび割れに補修に対する電着条件の選定, 第 54 回セメント技術大会演要旨, pp. 392-393, 2000.5
- 6) ASTM C876-91 : Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 1991
- 7) 水流徹, 前田龍, 春山志郎: 交流法腐食モニターの局部腐食への適用, 防食技術, No.28, pp.638-644, 1979
- 8) 腐食防食協会: 腐食・防食ハンドブック, 丸善(株), pp.140-141, 2000