

論文 RC はりの補修手法としての電着工法の特性に関する研究

柳 在碩^{*1}・大即信明^{*2}・宮里心一^{*3}・久田 真^{*4}

要旨: 電気化学的補修手法の一つである電着工法は、コンクリート中の鉄筋を陰極とし、コンクリート表面に陽極材を設置して通電することにより、コンクリート表層部の改質およびひび割れの閉塞を行う技術である。本研究ではコンクリートはりに対する電着工法の適用性を実験的に検討した。このために、ひび割れを有するはり供試体に通電を行い、電着物の析出状況、電着による透水抵抗性、電着後の付着性状および曲げ性状などについて評価した。その結果、電着工法はコンクリート表面に析出物を生成し、または透水抵抗性および曲げ性状を改善することによって、コンクリートはり部材の補修に有効であることが確認された。

キーワード: 電着工法、鉄筋コンクリートはり、透水抵抗性、付着性状、曲げ性状

1. はじめに

近年、電気化学的手法を用いて、鉄筋コンクリート（以下「RC」と略す）構造物の機能を回復させる試みがなされている。“電場において陽イオンは陰極へ、陰イオンは陽極へと泳動する”この原理に基づき、コンクリート内部の鉄筋と外部に設置した電極の間で通電を行う。電気化学的補修手法とは、通電に伴うコンクリート内のイオンの移動に着目して、電気化学的にコンクリート構造物の補修を行う技術である。

この電気化学的手法の一つである電着工法は、コンクリート中の鉄筋を陰極とし、コンクリート表面に陽極材を設置して通電する。このことにより、コンクリート表面に移動した陽イオンは、化学反応によって析出される。析出された電着物はひび割れの閉塞・表面被覆に寄与し、劣化したコンクリートの機能を回復させる。従来の電着工法は、海水を外部溶液として通電を行い、海洋構造物の機能回復を目的に用いられていた¹⁾。しかしながら、コンクリート構造物の補修に対する電着工法の歴史は非常に浅く、適用

事例や研究報告が少ない。したがって、十分有用な工法として確立されていないのが現状である。さらに、現状の電着工法を応用することによって、海洋構造物だけでなく陸上構造物にも適用することが可能と考えた。

以上のことから、本研究では陸上コンクリート構造物に対する電着工法による機能回復性について調べることとした。このため、ひび割れを有するRCはり供試体に通電を施し、1. ひび割れ幅と電着物の析出状況の関係、2. ひび割れ幅と透水抵抗性の関係、3. 電着物と母材コンクリートとの付着性状、4. 電着後の曲げ性状などについて実験的に検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用したセメントは普通ポルトランドセメント（日本セメント社製）である。また、細骨材は千葉県小櫃産陸砂（表乾比重 2.59、吸水率 2.08%）、粗骨材は東京都奥多摩産碎石（表乾比重 2.61、吸水率 0.88%、最大寸法 20mm）を

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 工修（正会員）

*2 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科 工博（正会員）

*3 東京工業大学助手 工学部開発システム工学科 工修（正会員）

*4 新潟大学 工学部建設学科 工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad.
20	10	4±1	50	45	165	330	803	989	1.23

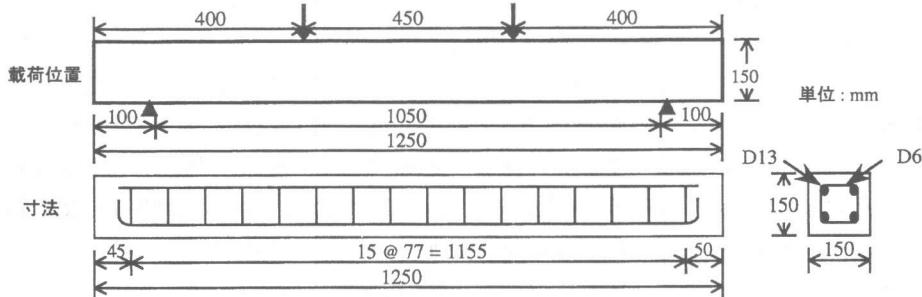


図-1. 供試体の寸法および載荷方法

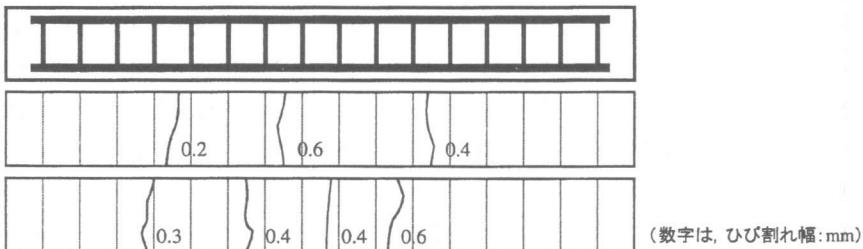


図-2. 供試体のひび割れ発生状況

用いた。鋼材は、主筋にD13(SD295A)、スターラップにD6を用いた。なお、あらかじめ錆や汚れをサンドペーパー、アセトンを用いて完全に除去した。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-1に示す。水セメント比は50%，細骨材率は45%，単位セメント量は330 kg/m³とした。また、材齢28日においてのコンクリートの圧縮強度は33.7 MPaであった。

2.3 供試体の作製

本実験に用いたコンクリート試験体は15×15×125cmの梁供試体である。その内部には、主筋および補強筋が埋め込まれている。主筋の両端にはリード線をはんだづけにより接続した。なお、接続部はエポキシ樹脂により被覆した。供試体の寸法および載荷方法を図-1に示す。供試

体は、打設1日後脱型し、20±3°Cの室内で28日間湿布養生を行った。その後、ひび割れを発生するために載荷を行った。載荷は単純支持中央2点集中荷重(純曲げ区間45cm)による1方向載荷で行った。なお、載荷は梁中央の変位が5mmに達するまでとした。この時の供試体下面のひび割れ幅は0.2~0.6mmであった。その後、各供試体のひび割れ面を除く他面にエポキシ樹脂を塗布し、通電を行った。また、曲げ載荷終了時における二つの供試体下面のひび割れ発生状況を図-2に示す。

2.4 通電方法

供試体への通電方法を図-3に示す。塩化ビニル製の容器に陽極となるチタンメッシュを敷いた。供試体を底面から2cm離し、ひび割れ面を下側にして設置した。外部溶液は内部鉄筋の高

さまで浸した。なお、外部溶液は、平山らの研究²⁾を参考にして、電着物の析出が予想される硫酸亜鉛 ($ZnSO_4$ 0.1mol/l) 水溶液を用いた。また、電源の陰極はコンクリート試験体内部の鉄筋に、陽極は電解質溶液中の底に設置した外部電極に接続した。通電は、コンクリート表面積当たり $0.5A/m^2$ の直流電流を 8 週間行った。この電流密度は比較的小さいので、鉄筋近傍への OH の発生やコンクリートと鉄筋の付着強度の低下は起こらないと予想される³⁾。なお、外部溶液は、1 週間に交換し、濃度を一定に保持した。

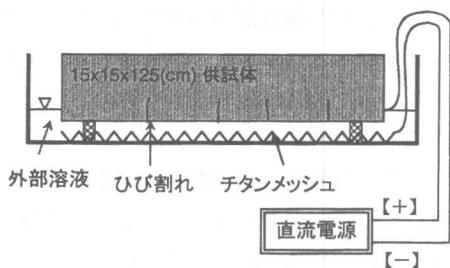


図-3. 供試体への通電方法

2.5 測定項目

(1) 電着物の析出状況

電着物の析出状況を把握するために、供試体表面のひび割れ長さに対する閉塞長さをひび割れ閉塞率と定義し、測定した。また、通電を終了した供試体を主鉄筋方向に切断した。ひび割れ部において、電着物が閉塞している表面からの深さを閉塞深さと定義し、測定した。

(2) 透水抵抗性

JIS A 6909 「建築用仕上塗材：透水試験 B 法」⁴⁾を参考にし、 $15 \times 20\text{cm}$ のコンクリート表面を対象にして、変水位透水試験を行った。すなわち、供試体のひび割れ面を上にして、アクリル製の試験装置をシリコンシーリング材によって高さ 2cm 程度止め付け、蒸留水を注入した状態で所定の時間における水頭の高さを比較した。

(3) コンクリートと電着物との接着力試験

コンクリート表面へ析出した電着物の接着力を測定するために、通電を終了した供試体に対

して建研式接着力試験機により接着力試験を実施した¹⁾。試験は、電着物が析出された表面に $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ のアタッチメントをエポキシ樹脂で接着して、コンクリート表面から垂直に剥離した時の圧力を読み取り、 1cm^2 当たりの接着力を求めた。

(4) コンクリート梁の曲げ載荷試験

電着処理後の RC はり供試体に対して、静的曲げ載荷試験を行った。測定項目は載荷荷重、スパン中央たわみおよび曲げひび割れ幅とした。ひび割れ幅は、曲げスパンに検長 10cm の π 形ゲージを 8 個連続させて貼り付けることにより測定した。加力は、先行載荷と同様に 2 点集中による載荷を行った。曲げひび割れが発生するまでは荷重制御とし、曲げひび割れ発生後は純曲げ区間中央の変位により制御した。

3. 実験結果および考察

3.1 電着物析出状況

電着によるひび割れ閉塞率の経時変化を図-4 に示す。この図から、電着物は通電直後から析出され、8 週間の通電によってコンクリート表面のひび割れ部が 90%以上閉塞されることが可能であることがわかる。特に、通電初期におけるひび割れ閉塞率は、いずれのひび割れ幅においても急激に増加し、通電 2 週間後で 50%以上となることがわかる。このように、ひび割れ部には通電初期から電着物の析出が認められた。これは、ひび割れ部は健全部よりも陰極となる内部鉄筋までの電気抵抗が小さいため、この部分への電着物の析出が容易に行われたためと考えられる。また、ひび割れ閉塞率はひび割れ幅が小さいほど大きくなることがわかる。一方、通電開始後、2 週間の比較的早い時期に、予め目視で確認されたひび割れ部の他に、当初確認されなかった 0.1mm 以下のひび割れ部にも電着物の析出が確認された。この様に、目視では観察されない微少なひび割れの閉塞にも電着工法が有効であると思われる。

ひび割れ部の閉塞深さを測定した結果、①最

大 1cm の深さまで電着物が析出されること、②ひび割れ幅の大きいほうがひび割れの閉塞深さが深くなることが確認された。これは、ひび割れ幅が小さい場合、電着物の生成に必要なイオンの供給が先に析出した電着物によって阻害されているためと考えられる。

次に、健全部についての析出状況を記す。コンクリート表面全体にわたって、膜状の電着物が析出していた。8週間の通電終了後には、供試体表面積の70%程度の範囲で認められていた(写真-1)。電着物の断面観察の結果、健全部の表面は約1mm程度の電着物によって覆われていた。しかしながら、コンクリート表面近傍に粗骨材が存在する場合、電着物は析出しにくい。また、電解質溶液の酸性化による電着物の溶出も生じる。このことから、コンクリート表面を完全に電着物で被覆することは困難であると考えられる。

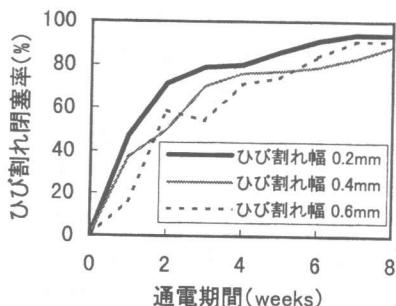
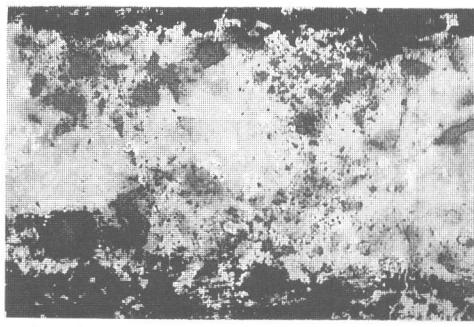


図-4. 電着によるひび割れの閉塞率



(白い部分が電着物)

写真-1. 供試体表面の電着物の析出状況

3.2 透水性

図-5 に透水試験の結果を示す。電着を施す以前は、ひび割れ部分と健全部での透水係数は大きな差が見られる。しかしながら、電着を施した後は、いずれのひび割れ部でも透水係数が減少していることがわかる。例えば、0.6mm のひび割れ幅の場合、通電 8 週間後において、透水係数は無処理のものと比べて約 $1/10^5$ に低下することが確認できる。また、ひび割れ幅の相違によって、電着後の透水係数は 10^1 程度の差が認められる。ただし、何れも電着前と比較すると著しく減少していることがわかる。すなわち、電着によって、ひび割れ部の透水性は顕著に低減することが明らかとなった。電着によるひび割れ閉塞は、透水抵抗性という観点においては、十分な機能回復が達成されていると判断できる。また、通電 2 週間後と通電 8 週間後の透水係数は概ね等しい。すなわち、通電 2 週間ににおいて充分な透水抵抗性の改善が得られることがわかる。電着による透水抵抗性の向上の要因としては、①電着物がひび割れを物理的に閉塞すること、②電着によるコンクリート表層部の緻密化などの影響が考えられる⁵⁾。

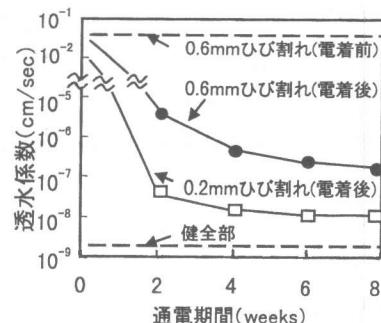


図-5. 電着による透水係数の経時変化

3.3 コンクリートと電着物との接着性状

コンクリートと電着物との接着力の試験結果を表-2 に示す。これによると、接着力の平均値は約 23.5 kg/cm^2 であることがわかる。この値は通常のコンクリート表層部の引張強度に相当しており、電着物とコンクリートとの付着が良好なことが確認できた。したがって、この試験に

表-2 電着物とコンクリートとの接着力試験結果

測点	剥離数値 (kg)	接着力 (kg/cm ²)	コンクリート表層部内 での破断の割合(%)	破断状況
A	370	23.1	41	
B	420	26.3	46	
C	362	22.6	60	
D	288	18.0	62	
E	443	27.7	75	
平均	377	23.5	-	-

(白部分は、コンクリート表層部内での剥離)

適用した外部溶液・電流密度は、強固な電着物を生成する点において適当な通電条件であると思われる。

また、接着試験における破断状況は、コンクリート表面での破断の割合が40~75%の範囲であったことからも、電着物の接着力とコンクリートの引張破断強度がほぼ同程度であったことがわかる。

3.4 はりの曲げ性状

(1) 荷重-たわみ関係

電着終了後の供試体の荷重とスパン中央のたわみの関係を図-6に示す。電着を施したはり供試体のたわみは、ひび割れを有する無処理はりの同一荷重におけるたわみと比べ、小さいことがわかる。すなわち、電着により、曲げ剛性や耐力が無処理より増加する傾向が見られる。これは、電着によりコンクリートの表層部が改質され、コンクリートの曲げ剛性が増加したこと、当初確認されなかった微細なひび割れ部にも電着物が析出したためと考えられる。なお、電着処理の有無が最大荷重に及ぼす影響は小さい。

(2) ひび割れ挙動

曲げひび割れ発生荷重を図-7に示す。なお、供試体には、先行載荷によって発生したひび割れがある。このため、曲げひび割れ発生荷重は、はり供試体の引張縁に貼付したワイヤストレインゲージの引張ひずみが 200×10^{-6} に達した時点として、判断した。曲げひび割れ発生荷重は、電着を行った場合が無処理より増加することが

わかる。これは、通電前に先行載荷を行って曲げひび割れを発生された部分が電着により閉塞されたこと、表層部改質により強固になったためと考えられる。

ひび割れの分散状況を図-8に示す。無処理のRCはりでは、曲げひび割れの本数が多く、各のひび割れ幅が大きい。これに対して、電着を施したRCはりは、曲げひび割れの本数が多いことがわかる。

(3) 最大および総曲げひび割れ幅

電着処理の有無による供試体下面の最大曲げひび割れ幅と荷重の関係を図-9示す。これによると、電着を施したRCはりでは、同一荷重に対する最大曲げひび割れの幅が無処理に比べて小さいことがわかる。これは、電着処理を施したRCはりの引張剛性が無処理のものと比べて大きく、ひび割れの分散性が増加したためである。

図-10に、総曲げひび割れ幅と荷重の関係を示す。総曲げひび割れ幅とは、供試体下面にゲージ長100mmのパイゲージを設置し、供試体中央から両支点方向へ400mmまでの合計80cmの区間を計測した曲げひび割れ幅を含む伸びの総和である。無処理のRCはりと比較すると、総曲げひび割れ幅は、全ての電着処理供試体において補強効果が見られる。これは、供試体のひび割れ部や表面に析出された電着物が、曲げ荷重に対するコンクリート下縁の引張力を増加させたためと考えられる。

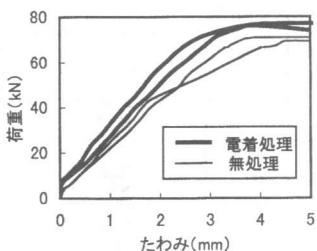


図-6 荷重-たわみ曲線

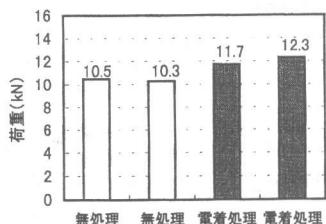


図-7 曲げひび割れ発生荷重

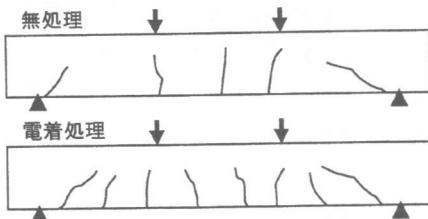


図-8 ひび割れの分散状況

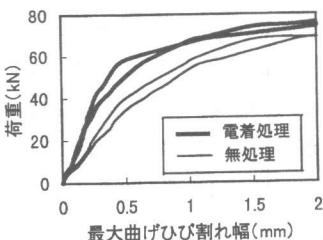


図-9 最大曲げひび割れ幅と荷重の関係

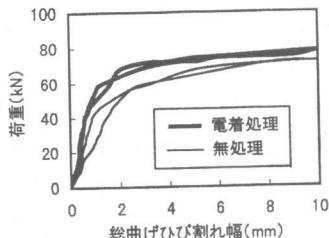


図-10 総曲げひび割れ幅と荷重の関係

4.まとめ

RCはりの補修手法として、電着工法を用いた場合の電着物生成状況と曲げ性状などの実験結果を報告した。本研究で、次のことがいえる。

1) 適当な外部溶液を介して通電を行うことにより、RCはり供試体の曲げひび割れ部や表面部に電着物を閉塞させることができ、特に、ひび割れ部においてはひび割れを塞ぐように、また、表面部では、コーティングするように析出させることができる。

2) 電着物によりひび割れが閉塞された部分では、大幅な透水抵抗性の改善ができる。

3) 電着物とコンクリート表層部との接着力は 23.5 kg/cm^2 程度であった。この値は通常のコンクリート表層部の引張強度と同等であり、電着物とコンクリートとの付着が良好なことが確認できた。

4) 電着工法をRCはりの補修に用いることで、無処理に比べ、同一荷重に対するたわみ、最大曲げひび割れ幅、総曲げひび割れ幅が減少することが明らかとなった。また、ひび割れの分散性も良好となった。

参考文献

- 1) 阿部正美、福手 勤、横田 優、佐々木晴敏：港湾コンクリート構造物の補修工法としての電着の適用性；港湾技術研究所報告、Vol. 30, No. 3, pp. 25~64, 1991
- 2) 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、第5部, pp. 332~333, 1997
- 3) Van der Hondel, A. J., and Polder, R. B. : Electrochemical Realkalisation and Chloride Removal of Concrete ; Concrete Repair, September /October, pp. 19~24, 1992
- 4) JISハンドブック24-1, 建築・材料編；pp. 764 ~765, 1995
- 5) 柳 在穎、大即信明：コンクリート構造物の機能回復に対する電着工法の適用性、コンクリート構造物のリハビリテーションに関するシンポジウム論文集, pp. 81~86, 1998