

電着による鉄筋コンクリートの ひび割れ閉塞と表面改質に関する研究

大即信明¹・久田 真²・番匠谷英司³・平山周一⁴・柳 在碩⁵

¹正会員 工博 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 博(工) 新潟大学助教授 工学部建設学科 (〒950-2188 新潟県新潟市五十嵐二の町 8050)

³正会員 修(工) 日本舗道(株) (〒104-8380 東京都中央区京橋 1-19-11)

⁴学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

⁵学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

近年、脱塩工法や再アルカリ化工法に代表される電気化学的手法を用いた鉄筋コンクリート構造物の補修工法が注目を集めている。これらは通電によってコンクリート中の各種イオンを移動させる電気化学的な補修工法と言える。しかし、コンクリート表面のひび割れ等の補修に対して電気化学的手法を用いた例は検討がされていない。そこで、本研究では海中でひび割れの閉塞や表面改質を目的として用いられている電気化学的手法の一つである電着を改良し、陸上の鉄筋コンクリート構造物に生じたひび割れの閉塞や表面改質を行うことを目的とし、一旦低下したコンクリート部材の性能の電着による回復程度および電着適用の劣化抑制について検討を行った。

Key Words: *electro-deposition, solution, current density, charging term, crack closing, improvement on surface*

1. はじめに

今日、コンクリートは建設材料のとして重要な役割を持っており、社会資本の形成および経済成長の支えとなったと言っても過言ではない。従来、コンクリートは一度施工を行えば、半永久的に機能を持ち続けるものとして昨今まで位置づけられていた。ところが、1980年代より鉄筋コンクリート構造物においては、中性化や塩害、アルカリ骨材反応などの外的要因によって早期に劣化が進行し、本来有すべきコンクリートの機能が著しく低下する現象が報告されるようになった。

特に、鉄筋コンクリート構造物に対して、外的な物理的要因や乾燥収縮などが原因によるひび割れが存在すると、ひび割れ部から有害物質が容易に侵入しやすくなり、これによって鉄筋の腐食やこれに起因するコンクリートのひび割れ、更にはかぶりコンクリートの剝離現象が生じ、構造物の耐荷力や耐久性などの性能を有し続けることが非常に困難になる。このように、コンクリートの劣化要因となる

有害物質の攻撃を受ける箇所は、主に大気や液体と直に接触可能なコンクリート表面およびひび割れ部であり、コンクリート構造物が本来有している機能を低下させないためには、コンクリート表面やひび割れ部に対して有害物質の接触抑制、さらには侵入抑制をすることが必要不可欠と言える。

現在行われているひび割れ補修・補強工法には、断面修復工法やひび割れ注入工法、表面被覆工法などがあり、構造物の種類・劣化形態によって様々な補修・補強工法が適用されており、非常に多くの報告がある。しかし、これら補修・補強工法の中には劣化因子の不完全な除去によって劣化部分の機能を十分回復できないものや、補修後に新たな腐食機構が現れるなど、必ずしも完璧なひび割れ補修工法とは言い難い場合があり得る。

ところで、電気化学的手法とは、“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”という原理に基づいており、これを応用することによって、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い、コンクリート内外のイオン

の移動に着目して化学的に補修を行うものである。しかし、これら電気化学的手法は、いずれもひび割れのない部材を対象としたものであり、本研究におけるひび割れの閉塞および表面改質に対して、ひび割れ補修工法として適用するにはまだ不十分な点が多いと考えられる。

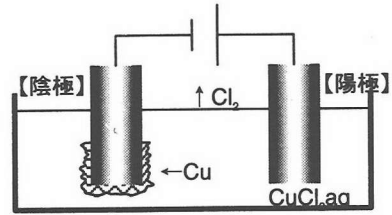


図-2.1 電着の基本原理

2. 本研究の目的

本研究では、海中でのひび割れの閉塞や表面改質を目的として用いられている電着を改良し、陸上の鉄筋コンクリート構造物に生じたひび割れの閉塞による鉄筋コンクリートの機能回復およびコンクリート表層部の改質による機能の向上を目的とした。特に、外部溶液や電流密度・通電期間の違いがこれら機能の回復および向上におよぼす影響について基礎的かつ定量的な検討を行い、電着適用後における各種劣化に対する抑制効果に関する検討も加えて評価を行った。

3. 電着の原理

(1) 電着の定義

電着 (Electrodeposition) とは、電気分解によりある物質が析出して、電極の表面に付着することである¹⁾。分野によっては電解析出 (Electric Deposition)、電析とも呼ばれる。陰極は $M^{n+} + ne^{-} \rightarrow M$ により金属を析出させることが多いが、二酸化マンガンを二酸化鉛などは、 $Mn^{2+} + 2H_2O \rightarrow MnO_2 + 4H^{+} + 4e^{-}$ のように酸化物を陽極に析出させるものもある²⁾。

(2) 鉄筋コンクリートへの電着の応用

図-2.1～図-2.2 に示すように、コンクリート構造物を対象とした電着とは、「電着技術は電解質であるコンクリートにも適用可能なはずである」との発想^{3), 4), 5)}を基に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し、陽極とコンクリート表面の間に電解質水溶液 (以降、外部溶液と記す) を介することによって電気回路を形成し、直流電流を通ずることによってひび割れ部やコンクリート表面に電着生成物 (以降、電着物と記す) を析出させ、この電着物によってひび割れ部の閉塞やコンクリート表面の改質をするものである。既往の研究では、海洋構造物を対象に電着工法を適用し、外部溶液として海水を用いており、コンクリート表面には 1～2mm 程度の厚さの電着物が確認され、ひび割れ部へ

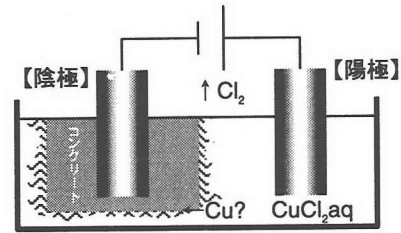


図-2.2 鉄筋コンクリートへの電着の適用

優先的に電着物が充填し、水密性も向上していた。また、コンクリート中の塩化物イオン量の減少も確認されたと報告がなされている^{3), 4), 5)}。そこで、外部溶液を任意の電解質水溶液に替えることによって、陸上の鉄筋コンクリート構造物にも応用することが可能であると考えられる。しかしながら、コンクリート構造物に対する補修工法としての電着の歴史は非常に浅いため、適用事例や研究報告が陸上の適用に関しては皆無であり、まだ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。

4. 実験概要

(1) 概要

本研究では、鉄筋コンクリートに生じたひび割れの閉塞、表面改質を行う目的で、外部溶液や電流密度、通電期間に着目して、以下に示す供試体の重量変化、電着物の同定、電着物およびコンクリートの物性、ひび割れ閉塞および表面被覆状況、透水抵抗性、ピッカース硬さ試験、促進中性化試験、塩化物イオン浸透抑制等の内容についての検討を行った。

(2) 供試体の作製

a) 使用材料

供試体の作製において、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は千葉県小櫃産砕砂、粗骨材は東京都青梅産砕石、練混ぜ水には水道水を使用した。セメントの物理的性質ならびに化学成分を表-

表-3.1 セメントの物理的性質と化学成分

比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性	
		水量 (%)	始発 (h-m)	終結 (h-m)		
3.15	3270	28.1	2-35	3-45	良	
圧縮強さ		MgO (%)	SO ₃ (%)	強熱減量	全アルカリ (%)	Cl ⁻
7d	28d					
43.8	60.9	1.6	1.9	1.4	0.62	0.004

表-3.2 細骨材の物理的性質

比重		粗粒率 (%)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)
表乾	絶乾				
2.59	2.54	2.51	2.08	1.63	64.0

表-3.3 粗骨材の物理的性質

比重		粗粒率 (%)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実積率 (%)
表乾	絶乾				
2.61	2.59	6.85	0.88	1.59	61.6

3.1に、細骨材および粗骨材の物理的性質を表-3.2、表-3.3に示す。また、鉄筋はSR235（直径10mm、磨き丸鋼）を使用した。

b) 配合

コンクリートの配合は、全て水セメント比50%、細骨材率44%一定とし、単位セメント量は365kg/m³とした。また、本研究では目標のスランプ値を8.0±2.0cm、空気量を4.0±1.0%とした。

c) 供試体の作製

コンクリートの練混ぜには、50リットルパン型強制練りミキサを用いた。練混ぜは、まずセメントと細骨材を60秒間空練りした後、あらかじめAE減水剤を含ませた練混ぜ水を次の30秒間で投入し、一旦ミキサを止め、容器の周囲に付着したセメントや細骨材をかき落として均一になるように混ぜ、粗骨材を投入して、さらに120秒間の練混ぜを行った。

練り上がり後のコンクリートは、練り板上で十分に練り返して均一にし、直ちに10×10×20cmの型枠に2層に分けて打設した。締固めには棒状パイプレータを用い、ブリーディングあるいは材料分離が生じないように留意しながら、0.5mm程度以上の気泡の放出が認められなくなるまで締め固めた。締固め後の供試体は、打設面が乾燥しないように濡れ筵をかけ、打設後約4時間で表面成形を行い、24±2時間後に脱型した。

脱型後のコンクリート供試体は、打設日から計算して28日間、20±3℃にて水中養生を行った。

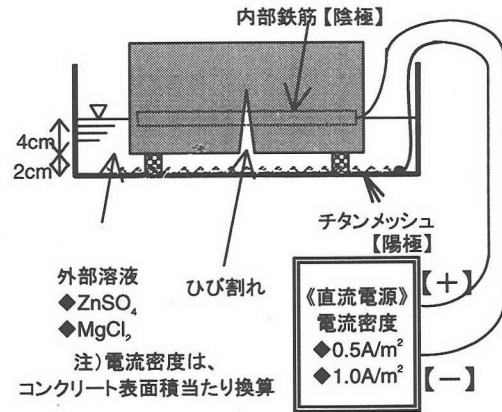


図-3.1 供試体への通電方法

d) 供試体の概要

本研究で使用したコンクリート供試体は10×10×20cmの角柱供試体であり、長手方向に長さ18cmの鉄筋をかぶり3cmの位置に設置した。鉄筋は、通電時の影響等を考慮して、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。鉄筋の両端には2本のリード線をはんだづけにより接続しておき、接続部はエポキシ樹脂により絶縁を施した。供試体の養生が終了した後、供試体下面を除く5面をシーリングし、曲げ載荷による0.5±0.1mmのひび割れを導入した。

(3) 通電方法

供試体への通電方法を図-3.1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き、底面から2cm離してひび割れ面を下側にして設置し、内部鉄筋の高さまで外部溶液1.5lを満たした。また、通電にはガルバノスタット（北斗電工製 HA-301）を用い、常に電流密度が一定になるようにした。

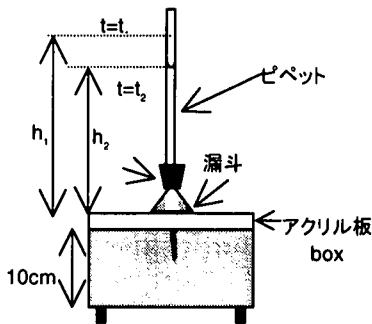
(4) 外部溶液・電流密度および通電期間

外部溶液は、平山らの研究⁶⁾を参考にして電着物の析出が予想されるZnSO₄、MgCl₂（各0.1mol/l水溶液）を使用した。外部溶液は通電を続けていくと酸性を呈してくるために5日ごとに交換し、適宜攪拌を行って常に一定の濃度環境であるようにした。電流密度はコンクリート表面積あたり0.5、1.0A/m²とし、通電期間を4、8、12、20週とした。

(5) 検討項目および測定方法

a) 供試体の重量変化

電着物の析出量を把握するために、通電1週毎に供試体の重量を測定した。



【暴露面全面の透水試験】
対象断面積：表面全体20x10(cm)
図-4.1 透水試験概要

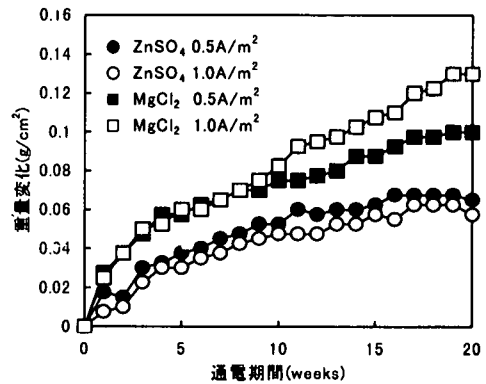


図-5.1 供試体重量の経時変化

b) 電着物の同定

析出した電着物を採取し、105℃の乾燥炉で48時間乾燥させたものを試料とし、粉末X線回折装置（日本電子（株））を用いて析出物の同定を行った。

c) 電着物およびコンクリートの物性

電着物およびコンクリートの細孔量を水銀圧入式ポロシメータ（島津製作所製ポアサイザ9320；細孔直径の測定範囲0.006～500μm）を用いて測定した。試料は析出した電着物および供試体表面から深さ1cm毎にコンクリートを採取し、105℃の乾燥炉で48時間乾燥させたものを用いた。測定値は3回の実測値の平均とした。

d) ひび割れ閉塞および表面被覆状況

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」、電着物によってひび割れが完全に閉塞されている供試体表面からの深さを「閉塞深さ」と定義し、所定の通电が終了後にノギスを用いて測定した。また、供試体表面に析出した電着物をトレーシングペーパーに写し取り、供試体表面積に対する電着物の析出面積を「表面被覆率」として測定した。

e) 透水抵抗性

JIS A 6909「建築用仕上塗材：透水試験B法」⁸⁾および宮川らの研究⁹⁾を参考にし、図-4.1に示すような変水位透水試験を行った。供試体表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、これより透水係数を算出した。また、蒸留水の蒸発を防ぐため、流動パラフィンにより封印した。

f) ビッカース硬さ試験

所定の通电が終了した供試体をひび割れ断面に垂直に切断し、表面から1mm毎に10mmまでの表

層部に対してビッカース硬さを求めた。なお、測定には微小硬さ試験機（Akashi製MVK-H0）を使用した。また、測定に際して粗骨材部分は避けた。

g) 促進中性化試験

12週の通电が終了した供試体について、促進中性化試験（CO₂濃度10%、温度20℃、湿度60%）を行った。管理供試体の中性化深さが約1cmになった時点で試験を終了させ、供試体を割裂して中性化深さを測定した。測定においてはJIS K 8006で規定されている1%フェノールフタレイン溶液を割裂面に噴霧し、コンクリート表面から赤色部分までの距離を5点ノギスで測定し、その平均値を中性化深さとした。

h) 塩化物イオン浸透抑制

供試体の健全部（ひび割れの無い部分）を5×5×10cmに切断し、3.0wt%NaCl水溶液中（20℃）に28日間浸漬した。その後供試体を割裂し、硝酸銀滴定法によってノギスで塩化物イオン浸透深さを測定した。

5. 電着物の析出に関する基礎的検討

(1) 電着による供試体の重量変化

図-5.1に電着による供試体重量の経時変化を示す。MgCl₂においては、通电初期の重量変化が大きく、通电4週以降から単調に増加することがわかる。これに対してZnSO₄の場合には、MgCl₂に比べて重量変化が小さく、一定の重量変化に収束している。これは、先に析出した電着物の膜が電着物の析出のために必要なイオンの供給を阻害しているためにこのような傾向が見られたものと考えられる。また、

表-5.1 電着物の同定結果

【外部溶液】	ZnSO ₄	MgCl ₂
【電着物】	ZnO	Mg(OH) ₂

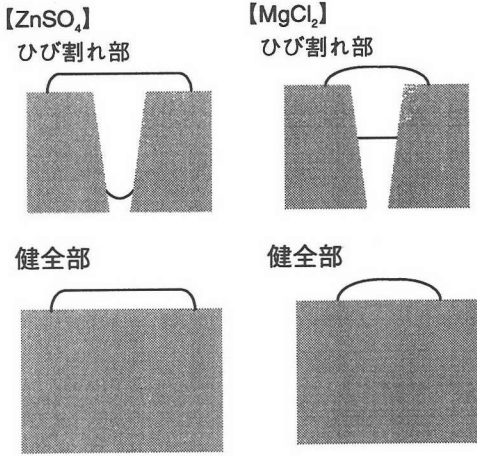
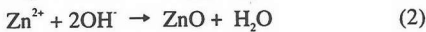


図-5.2 電着物の析出パターン

ZnSO₄はSO₄²⁻イオンの存在によって陽極では水素イオンが生成し、外部溶液のpHを減少させるため酸性状態になりやすく、これによってコンクリート表面のペースト部の溶出が考えられる。

(2) 電着物の同定

通電により析出した電着物の同定結果を表-5.1に示す。これより、電着物は外部溶液の陽イオンと溶液中およびコンクリートの細孔溶液中に存在している水酸化物イオンが結合し、MgCl₂の場合はMg(OH)₂、ZnSO₄の場合ZnOが析出していることがわかる。式(1)、(2)にその反応式を示す。また、電流密度や通電期間が異なっても、電着物の種類に変化が見られないことがわかった。



(3) 電着物の析出パターン

電着物の析出形態は外部溶液の種類によって異なる。図-5.2に示す模式図のように電着物がひび割れ部および健全部へ析出し、ZnSO₄の場合、電着物であるZnOは層状に析出し、供試体表面をほぼ均等に被覆する。これに対しMgCl₂の場合、電着物であるMg(OH)₂はまだら状に析出し、電着物表面に凹凸が見られる。これは外部溶液に固有な析出形態があることを示しており、また、表面近傍に粗骨材が存在するとイオンの移動が阻害され、電着物が析出しにくい特異点となってしまったためと推測される。

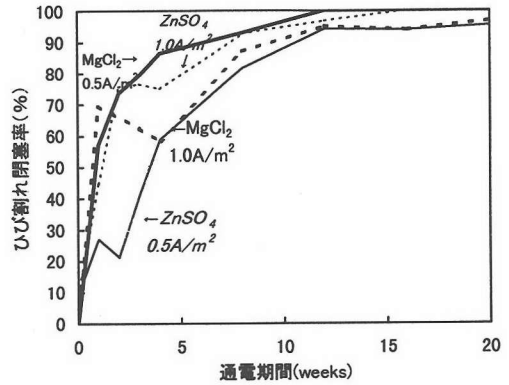


図-6.1 ひび割れ閉塞率の経時変化

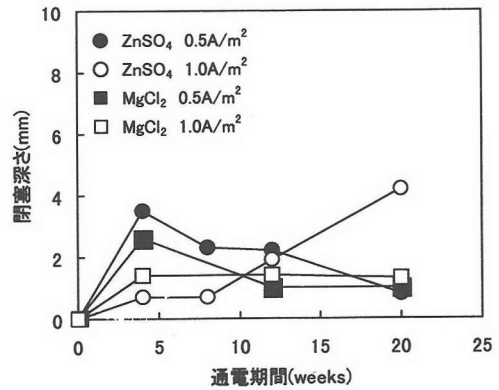


図-6.2 ひび割れ閉塞深さの経時変化

6. 電着によるひび割れ閉塞に関する検討

(1) ひび割れ部への析出に関する検討

本研究では、ひび割れ閉塞の指標として、供試体表面のひび割れ閉塞、ひび割れ深さ方向の閉塞、および透水抵抗性に着目することとした。

供試体表面のひび割れ閉塞率の経時変化を図-6.1に示す。これより、MgCl₂ 0.5A/m²とZnSO₄ 1.0A/m²の場合通電2週前後で、MgCl₂ 1.0A/m²とZnSO₄ 0.5A/m²の場合通電5週で70%以上のひび割れ閉塞が達成されおり、また、いずれの外部溶液においても通電12週前後で90%以上の閉塞が可能である。

供試体を内部鉄筋の方向に沿って切断し、ひび割れ部の深さ方向における閉塞深さの測定結果を図-6.2に示す。これより、通電期間が長期にわたっても閉塞深さの進展は顕著でないことがわかる。これは前述したように、電着物生成のため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、電流密度の小さい場合

表-6.1 電着物の細孔量

外部溶液		ZnSO ₄	MgCl ₂
電着物		ZnO	Mg(OH) ₂
細孔量	0.5A/m ²	0.206	0.087
(cc/g)	1.0A/m ²	0.152	0.186

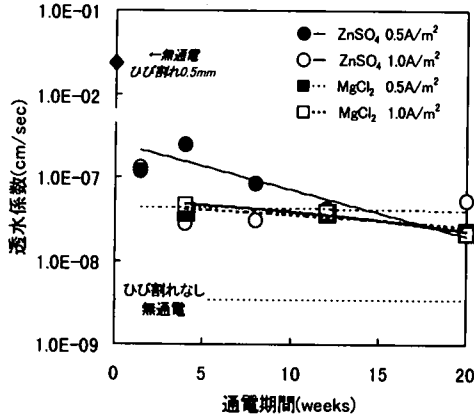


図-6.3 透水試験結果

のほうがこの影響が大きい。また通電期間が長くなるにしたがってひび割れ閉塞深さが小さくなっている場合があるが、これは一旦析出した電着物が溶液中に溶出したものと考えられる。

(2) 透水抵抗性に関する検討

図-6.3 に透水試験の結果を示す。本研究の範囲内では、ひび割れの有無による透水係数の差がおよそ10⁶にも達しており、僅かなひび割れの存在が透水性に大きな影響を及ぼしていることがわかる。これに対して電着を適用すると、通電初期において透水係数が急激に小さくなり、以降、通電期間の増加と共に透水抵抗性の向上が確認できる。通電20週において、透水係数は無通電のものとは比べて1/10⁶程度にまで低下していることが確認でき、電着によるひび割れ閉塞が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。

透水抵抗性が向上するための要因は、ひび割れを閉塞させる電着物の物性に依存するものと考えられる。そこで、通電12週における各電着物の細孔量に着目して検討を行うこととした。表-6.1に電着物の細孔量を示す。ZnSO₄においては電流密度に関係なく細孔量がほぼ同じであるが、MgCl₂においては、電流密度が小さいほど細孔量が小さくなっている。電流密度が低い方が電荷やイオンの移動が穏やかであり、電気化学反応も徐々に進行するため、析出する電着物も密になるように生成されるものと考えられる。つまり低電流密度による通電によ

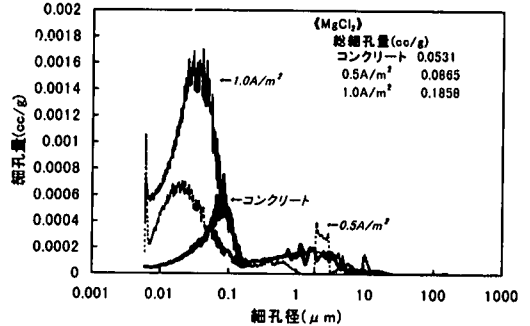
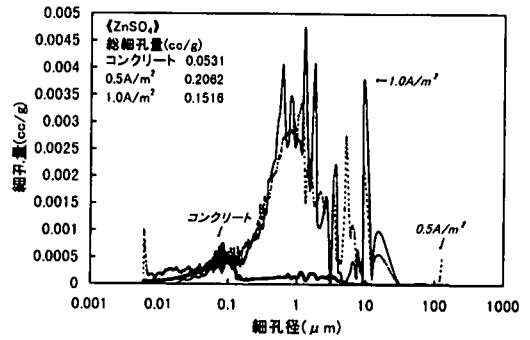


図-6.4 電着物の細孔径分布

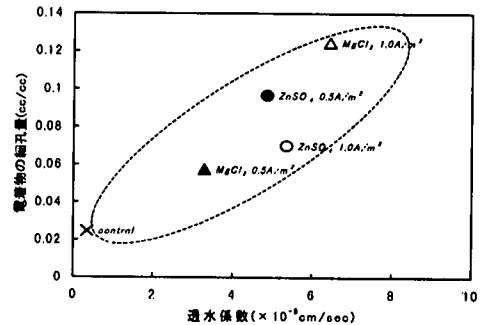


図-6.5 透水係数と電着物の細孔量の関係 (通電4週)

て、電着物が緻密になるように生成されることを意味している。なお、いずれの電着物もコンクリートに比べて細孔量が大きくなっているが、これは電着させる面を下側にして通電を行ったため、陽極で生成される気体を気泡として取り込んでしまったために、細孔量が大きくなってしまったものと考えられる。また、図-6.4に電着物の細孔径分布を示す。コンクリートは0.1μm前後の径を有する空隙が中心となって構成されているが、ZnSO₄においてはコンクリートの約10倍である1μm前後の径を有する空隙で構成されている。つまり個々の空隙が大きいと言える。これに対してMgCl₂においては、0.01~0.1μmの径を有する空隙が中心となっており、個々の空隙に着目すれば、コンクリートのそれよりも小

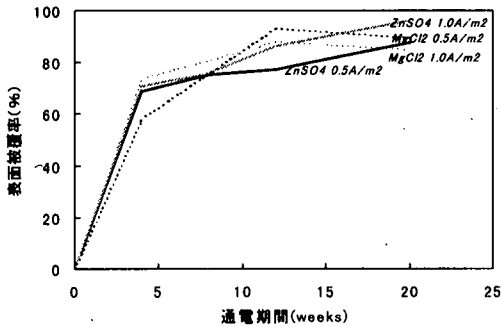


図-7.1 表面被覆率の経時変化

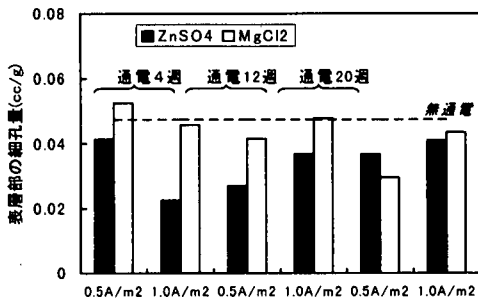


図-7.2 コンクリート表層部の細孔量の比較

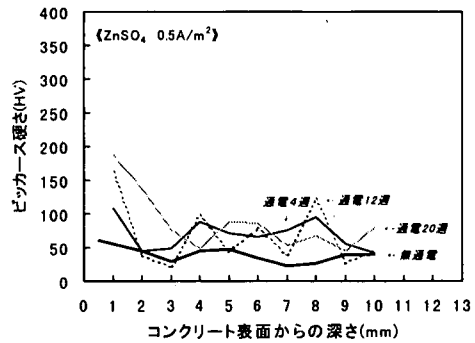


図-7.3 ビッカース硬さ試験結果

化によるペーストの溶出等から、完全に被覆を達成させることは困難である。

(2) コンクリート表層部の細孔量

図-7.2 に電着前後におけるコンクリート表層部の細孔量変化を示す。これより、ZnSO₄においては電着によってコンクリート表層部の細孔量が大幅に減少していることがわかる。しかしながら、電流密度の大小や通電期間の大小に関係は見受けられない。MgCl₂についても同様の傾向が見られるが、通電4週においては逆に細孔量が増大しているものもあり、いずれの外部溶液でもコンクリート表層部の緻密化を求めらるれば、12週以上の通電を行う必要がある。

(3) コンクリート表層部のピッカース硬さ

図-7.3 に供試体表面からコンクリート部分の10mm までの深さにおけるピッカース硬さ試験の結果を示す。これより、電着によって表面から4mm 前後までの硬さが、無通電のものに比べて大幅に増加していることがわかる。また、通電期間が長期になるほど硬さが概ね大きくなっている。両者とも、電流密度による影響はほとんど見られないことか

さいことがわかる。

以上を考慮して、透水係数と電着物の細孔量の関係を図-6.5 に示す。電着物の種類によって密度が異なることを考慮して、ここでは細孔量を単位体積あたりの細孔量とし、cc/cc の単位に換算した。これより、電着物の細孔量が小さいものほど透水係数は減少しており、両者の間に相関関係を見出すことができる。つまり、透水抵抗性の向上のためには、電着物の細孔量を小さくすることが必要であり、そのためには低電流密度による通電が望ましいものと考えられる。

7. 電着による表面改質に関する検討

(1) 供試体表面への析出に関する検討

ここでは、表面改質の指標として供試体表面の表面被覆性状、コンクリート表層部の細孔量変化およびピッカース硬さ変化に着目をした。図7-1に供試体表面の電着物による表面被覆率の経時変化を示す。通電4週までに60%前後の表面被覆が達成されており、通電12週で約80%の表面被覆が可能である。しかし、前にも述べたようにコンクリート表面近傍の粗骨材の存在による影響や、外部溶液の酸性

表-8.1 促進中性化試験結果

外部溶液		control	ZnSO ₄	MgCl ₂
中性化 深さ(mm)	0.5A/m ²	6.06	2.53	1.28
	抑制率(%)	—	58.3	79.0
	1.0A/m ²	6.06	1.59	0.94
	抑制率(%)	—	73.7	84.5

表-8.2 電着物の細孔量の変化

外部溶液		ZnSO ₄	MgCl ₂
0.5A/m ²	中性化前(cc/g)	0.206	0.087
	中性化後(cc/g)	0.177	0.023
1.0A/m ²	中性化前(cc/g)	0.152	0.186
	中性化後(cc/g)	0.090	0.019

ら、低電流密度による通電でも、コンクリート表層部の硬さ向上を達成することが可能である。

8. 電着後の劣化抑制効果に関する検討

(1) 促進中性化試験

電着の適用によって、ひび割れ閉塞および表面改質の可能性を見出すことができた。そこで、ここでは電着適用後の耐久性状の把握として促進中性化試験を行い、CO₂に対する劣化抑制効果の確認を行った。

表-8.1 に促進中性化試験の結果を示す。無通電のものの中性化深さに対して、いずれの外部溶液でも中性化深さが下回っており、電着の適用によって中性化の進行抑制が可能である。特に、MgCl₂ は中性化進行抑制効果が大い。このように、外部溶液によって中性化抑制効果に差が表れる要因として、電着物による表面被覆性状、電着物の物性等が挙げられる。

図-8.1 に電着物による表面被覆率と中性化深さの関係を示す。これより、外部溶液の種類や電流密度に関係なく、表面被覆率が大きいほど中性化深さが小さくなっていることがわかる。すなわち、電着物によるコーティングがCO₂のコンクリート中への浸透を抑制していると言える。

次に、中性化前後における電着物の細孔量の変化に着目すると表-8.2 のようになる。これより、いずれの外部溶液、電流密度においても中性化後の方が電着物の細孔量が減少していることがわかる。また、図-8.2 に示すように中性化前後における電着物の細孔径分布を比較すると、ZnO は中性化前後において大きな変化は見受けられない。Mg(OH)₂ は、中性化前に存在した0.01~0.1μmの径を有する空隙

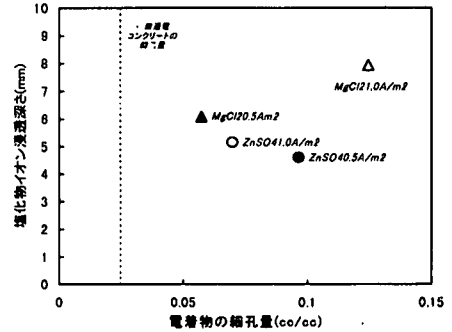


図-8.1 中性化深さと表面被覆率の関係

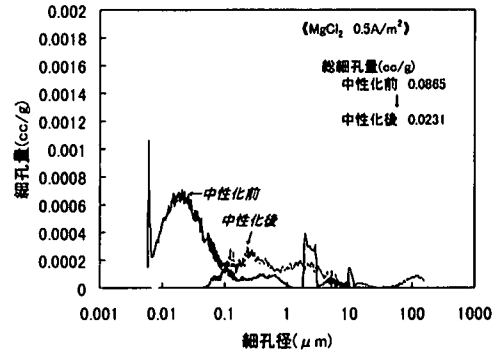
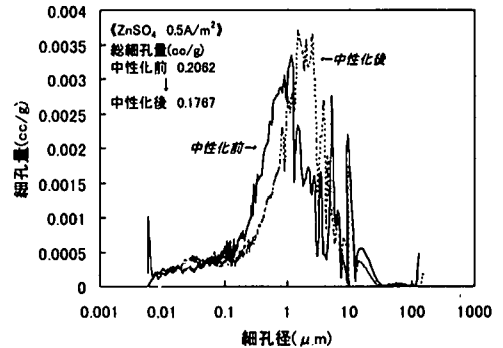


図-8.2 中性化前後の電着物の細孔量の変化

のピークがほぼ消滅している。つまり、Mg(OH)₂ においては中性化の影響によって電着物の空隙構造が大きく変化しており、中性化進行抑制に対して影響を及ぼしているものと思われる。電着物であるZnO や Mg(OH)₂ は水や二酸化炭素と反応して炭酸塩に変化し、電着物の空隙構造という観点から見た緻密性が卓越したものと考えられるが、その確証は得られなかった。

(2) 塩化物イオン浸透試験

鉄筋コンクリート中への塩化物イオンの浸透は、内部鉄筋の発錆を助長し、かぶりコンクリートの崩

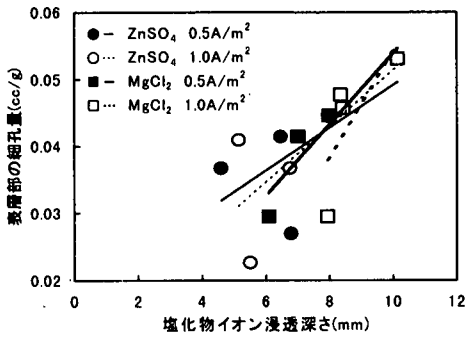


図-8.3 塩化物イオン浸透試験結果

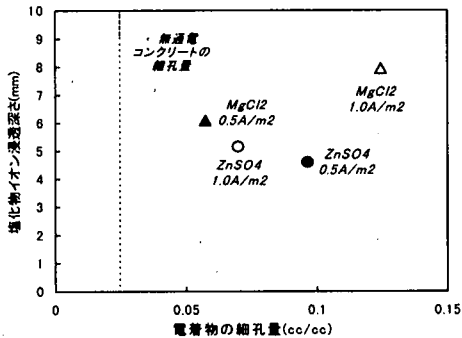


図-8.4 電着物の細孔量と塩化物イオン浸透深さの関係（通電4週）

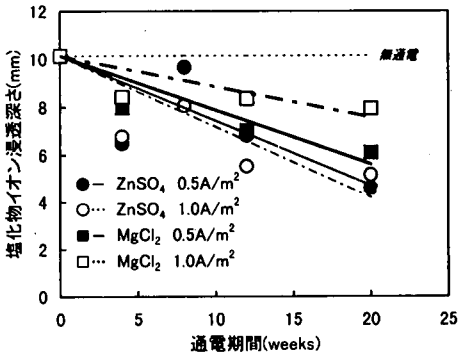


図-8.5 塩化物イオン浸透深さとコンクリート表層部の細孔量との関係

壊を招く。そこで、ここではひび割れのない健全部に対する塩化物イオン浸透性状を、電着適用の有無および外部溶液、電流密度、通电期間の違いによって検討を行い、塩化物イオン浸透抑制に対する電着の有用性について検討を行った。

図-8.3に塩化物イオン浸透試験の結果を示す。これより、いずれの外部溶液においても電着によって塩化物イオンの浸透を抑制可能であることがわかる。特に、通电期間が長くなるにつれてほぼ直線的

に浸透深さが小さくなり、MgCl₂においては電流密度が0.5A/m²のほうが抑制効果大きい。

塩化物イオンの浸透抑制効果が見られた原因として、中性化試験と同じようにコンクリート表層部の細孔量、表面を覆っている電着物の細孔量の変化に着目した。電着物の細孔量と塩化物イオン浸透深さの関係を図-8.4に示す。ここでも、電着物の種類によって密度が異なることを考慮して、細孔量を単位体積あたりの細孔量とし、cc/ccの単位に換算した。これより、電着物の細孔量が大きいものほど塩化物イオンの浸透性は大きく、本研究の範囲内では電着物の細孔量は中性化の抑制に関する検討結果と同様に、電着物自体が塩化物イオン浸透抵抗性の向上に大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

次に、コンクリート表層部の細孔量と塩化物イオン浸透深さの関係を図-8.5に示す。いずれにおいてもコンクリート表層部の細孔量が小さいほど塩化物イオン浸透深さが小さくなっている。つまり、電着によって緻密な空隙構造を有する電着物を析出させ、同時に外部溶液と接するコンクリート表層部の緻密性を向上させることによって、塩化物イオンの浸透を極力抑制できることが明らかとなった。

9. まとめ

本研究を通じて、得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 適当な外部溶液を介して通電を行うことにより、コンクリートのひび割れ部や表面部に電着物を析出させることが可能であり、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可能である。
- 2) 電着物によるひび割れ閉塞が可能であり、これによって大幅な透水抵抗性の改善ができる。これは析出する電着物の空隙構造に大きく影響し、細孔量が少なく、かつ径の小さな空隙で構成されているほうが透水抵抗性に優れている。このためには、概ね低電流密度で通電を行うほうがよい。
- 3) 電着の適用によってコンクリート表層部の細孔量が減少し、かつコンクリート表面から4mm前後の深さにおけるピッカース硬さの増加が確認できたことから、コンクリート表層部の緻密化が可能である。

- 4) コンクリート表面を電着物で覆うことによって、中性化の進行抑制および塩化物イオン浸透抑制が可能である。特に塩化物イオン浸透抑制については、塩化物イオン浸透深さとコンクリート表層部における細孔量の間に関係が見られ、コンクリート表層部の細孔量が少ないほど塩化物イオン浸透抑制効果が大きい。
- 5) 以上の検討結果より、ひび割れ閉塞・表面改質に関する結果をまとめ、目的別に通電条件等を効果に関して評価すると、ひび割れ閉塞、中性化の抑制は、電流密度 $0.5\text{A}/\text{m}^2$ 、外部溶液 MgCl_2 で、表層部の改質、塩化物イオン浸透の抑制は電流密度 $0.5\text{A}/\text{m}^2$ 、外部溶液 ZnSO_4 で通電を行うと効果が大きい。

謝辞：本研究は著者の一人（大即）に与えられた平成9年度文部省科学研究費（芽生的研究：課題番号09875105）によって行われたものである。

参考文献

- 1) 久田 真：通電によるコンクリート中のイオンの移動に関する研究；東京工業大学学位論文，1997.
- 2) 大木道則ほか編集：化学辞典.
- 3) 横田 優，浮田和明，熊田誠：電着技術を利用した

- コンクリート構造物の防食及び補修について；土木学会第 42 回年次学術講演会，第 5 部，pp.504-505，1987.
- 4) 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.
 - 5) 武山正人，横田 優，井上芳樹：電着工法を利用した海洋コンクリート構造物の補修と防食について；土木学会四国支部第2回技術研究発表会講演概要集，pp.402-403，1996.
 - 6) 平山周一：鉄筋コンクリート部材のひび割れの電着によるリハビリテーションに関する基礎的検討；東京工業大学卒業論文，1997.
 - 7) 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.
 - 8) JIS ハンドブック 24-1，建築・材料編；pp.764-765，1995.
 - 9) 宮川豊章，久田 真，井上晋，藤井 学：コンクリートの表面処理による ASR 膨張の抑制効果について；コンクリート工学論文集，Vol.2，No.1，pp.135-148，1991.

(1998. 4. 14 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON CRACK CLOSING AND SURFACE IMPROVEMENT OF REINFORCED CONCRETE BY ELECTRO-DEPOSITION METHOD

Nobuaki OTSUKI, Makoto HISADA, Eiji BANSHOYA, Shuichi HIRAYAMA
and Jae-Suk RYU

In this paper, the electrodeposition method for the rehabilitation of cracked reinforced concrete, based on the electrochemical technique, is presented. The main purpose of this paper is to apply this technique to reinforced concrete members on land. After cracking with a specified load (crack width 0.5mm), $10 \times 10 \times 20\text{cm}$ concrete specimens with embedded steel bars were immersed in several solutions, then a constant current density between the embedded steel in concrete and an electrode in the solution was applied for 4-20 weeks. The results indicate that electrodeposits formed in this process are able to close concrete cracks and to coat the concrete surface and that formation of these electrodeposits is confirmed to have an effect of protection against detrimental materials. Therefore, it is demonstrated that the electrodeposition method can be usefully applied for the rehabilitation technique of concrete.