

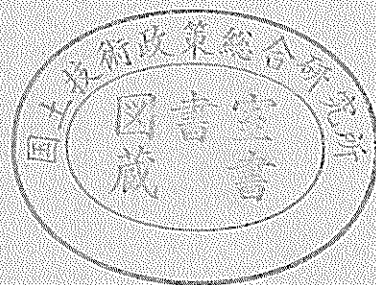
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 30 NO. 3 SEPT. 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第30巻 第3号 (Vol.30, No. 3) 1991年9月 (Sept.1991)

目次 (CONTENTS)

1. 沖積粘土地盤に対する定率ひずみ圧密試験の適用性
.....水上 純一・小林 正樹・小泉 和広..... 3
(Constant Rate of Strain Test of Undisturbed Alluvial Marine Clay
..... Jun-ichi MIZUKAMI, Masaki KOBAYASHI and Kazuhiro KOIZUMI)

2. 港湾コンクリート構造物の補修方法としての電着工法の適用性
.....阿部 正美・福手 勤・横田 優・佐々木晴敏.....25
(Applicability of Electrodeposition as a Repairing Method
for Deteriorated Marine Structures
..... Masami ABE, Tsutomu FUKUTE, Masaru YOKOTA and Harutosi SASAKI)

3. 水中施工管理用小型計測機の開発
.....石塚 浩次・根本 孝志.....65
(Development of Small-size Measuring Instrument for Underwater execution control
..... Koji ISHIZUKA and Takashi NEMOTO)

2. 港湾コンクリート構造物の補修方法としての 電着工法の適用性

阿部正美*・福手 勤^{2*}・横田 優^{3*}・佐々木晴敏^{4*}

要 旨

電着工法によるコンクリート構造物への補修効果や適用性を検討するために、実構造物試験と室内試験を実施した。

試験結果等より得られた主な点は以下の通りである。

- 1) コンクリート表面には1～2mm程度の厚さの電着物が認められ、ひびわれ部へは優先的に電着物が充填された。
- 2) 電着工法を行うことによりコンクリートの透水性は5か月通電後で1/40程度に低下し、水密性の向上が認められた。
- 3) コンクリート中の塩化物イオン量の減少が認められた。
- 4) 通電によるコンクリート中の鉄筋の付着強度は通電適用範囲の電流密度(0.5～0.75A/m²程度)では付着強度の低下は見られなかった。

キーワード：電着技術，鉄筋コンクリート構造物，補修

* 構造部 主任研究官(防食担当)

2* 構造部 材料研究室長

3*(株)四国総合研究所・土木技術部

4*三井造船(株)・沿岸開発事業部

2. Applicability of Electrodeposition as a Repairing Method for Deteriorated Marine Concrete Structures

Masami ABE*
Tsutomu FUKUTE*²
Masaru YOKOTA*³
Harutosi SASAKI*⁴

Synopsis

Applicability of electrodeposition method for repairing method of deteriorated by sea water was studied. A series of in site and laboratory test were carried out. From these study, the following conclusion were obtained.

(1) One to two millimeter thick dense electrodeposit which consist of mainly CaCO_3 and $\text{Mg}(\text{OH})_2$ was observed on the concrete surface after appropriate amount of direct current was supplied.

Cracked portion of concrete were filled preferentially with electrodeposition of minerals.

(2) After current supply, the coefficient of water permeability of concrete was improved to 1/40 of the value of original concrete.

(3) The procedure of electrodeposition has effects on reduction of chloride content in concrete around reinforcing bars.

(4) The procedure of electrodeposition method did not affect the bond strength of reinforcing bar embedded in concrete in the limit of current density below $0.75\text{A}/\text{m}^2$ which is the range of practical use.

Key Words : Electrodeposition method, Marine concrete structure, Repair

* Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

2*Chief of Materials Lab., Structural Engineering Division

3*Civil Engineering Department, Shikoku Research Institute Inc.

4*Coastal Development Division, Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.

目 次

要 旨	25
1. まえがき	29
2. 試験の概要	30
2.1 実構造物試験の試験場所および試験対象構造物	30
2.2 実構造物の事前調査	31
2.3 試験対象構造物への通電方法	31
2.4 実構造物試験の調査および測定項目	32
2.5 付着強度試験（室内試験）	36
2.6 接着力試験（室内試験）	38
3. 試験結果および考察	39
3.1 試験期間中の電圧、電流値	39
3.2 電着物の析出状況および電位の傾向	39
3.3 電着物の組成	41
3.4 コンクリートの透水性	42
3.5 コンクリートの空隙率	44
3.6 コンクリート中の塩化物イオン量	48
3.7 海水の組成および海水温度	48
3.8 鉄筋とコンクリートとの付着強度	48
3.9 接着力試験	50
4. 電着工法の適用方法	50
5. 結 論	54
6. あとがき	54
7. 参考文献	54

1. まえがき

近年、港湾コンクリート構造物において、外部から侵入した塩分の影響で鉄筋などの鋼材が腐食し、構造物の機能を損なういわゆる塩害が問題となっている。

塩害対策として、新しい構造物の設計・施工の段階では、かぶりを十分に確保する、ひびわれ幅を制限する、耐久性のある良質な材料を用いていねいな施工をする、などが挙げられる。またさらに、環境条件が厳しかったり補修が困難な場所、特に耐久性が必要な構造物などには、コンクリートの表面被覆工法や防食鉄筋、電気防食などのいわゆる「第2種防食法」の適用が検討されることもある。

現在ほど塩害に対する認識が深まる以前に設計された構造物の中には、すでに劣化が顕在化しているものもある。このような場合には補修・補強が必要となるが、現在最も一般的に用いられているものは、劣化コンクリートをはつり、鉄筋を露出して防錆処理を施した後に、断面修復、表面塗装をして仕上げる方法である。さらに劣化が低い段階では簡便な補修方法として、ひびわれ部に充填したり、単に表面を被覆するだけの場合もある。これらの工法は、構造物の劣化の程度や、補修に用いられ

る材料の種類や施工のていねいさなどによって、その効果が大きく異なるため、それらの評価はまだ定まっていない。

これらの補修工法とはその原理が異なる方法として、電着工法が提案されている。この工法は海水中に配置した陽極からコンクリート構造物中の鉄筋（陰極）へ微弱な直流電流を流すことにより、コンクリート表層部およびひびわれ部に電着物を析出させ、より緻密なコンクリートに仕上げるものである。析出する電着物は海水中に溶存しているCaイオンやMgイオンの化合物である炭酸カルシウムや水酸化マグネシウムである。電着工法の概念図を図-1～図-2に示す。図-2に示すように、電着物はコンクリートの表面に析出するとともにひびわれ部にも充填される。この工法は数年前より供試体を用いての試験が実施されており、それらの成果が発表されている^{1,2)}。写真-1に室内試験による電着物の析出状況を示す。写真-1に示すように、ひびわれ部への電着物の充填は十分に行われている。

今回、実構造物への適用性を検討する目的で、実海域の実証試験を松山港の大可賀埠頭において実施した。また、コンクリート中の鉄筋へ電流を流した場合のコンクリートと鉄筋との付着強度の変化や電着物のコンクリー

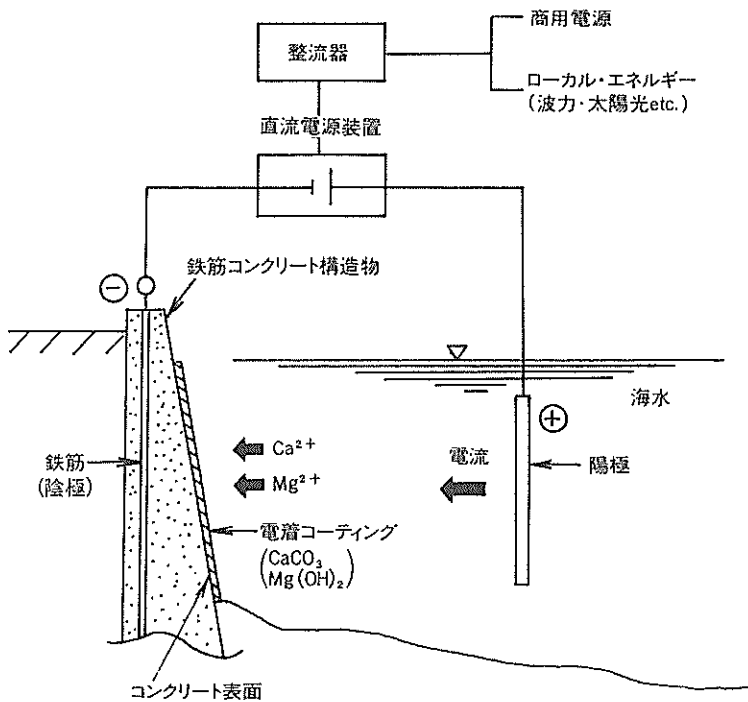


図-1 電着工法の概念図 (1)

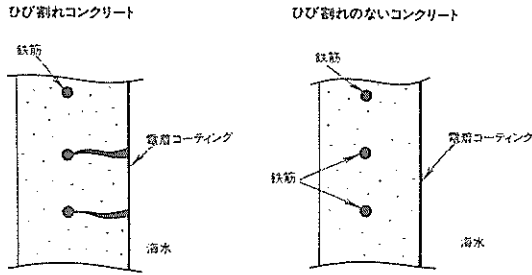


図-2 電着工法の概念図(2)

ト表面への接着力を測定するための室内試験も併せて行った。

本報告は実構造物の実証試験結果および室内試験の試験結果をとりまとめたものである。

2. 試験の概要

実構造物への実証試験は、試験対象となるケーソン中の内部鉄筋を陰極とし、ケーソン両側の海底に設置した陽極との間に陸上部の直流電源を介して微弱な直流電流をケーソンコンクリートへ流した。その後、コンクリート表面に析出する電着物の析出状況を調査した。試験後、コンクリートコアを採取して電着物の組成分析、ひびわれ部への充填効果、コンクリートの透水試験、空隙率試験および塩化物イオン量の測定等を行いコンクリートに対する補修や改質効果を評価した。

また、室内試験では供試体を製作し、通電条件の違いがコンクリートと鉄筋の付着強度に及ぼす影響を調べるとともに、電着物のコンクリート表面への接着力も調べた。

2.1 実構造物試験の試験場所および試験対象構造物

実構造物試験を実施した対象構造物は松山港の大可賀埠頭2号岸壁のコンクリート構造物である。図-3および図-4に対象岸壁構造物の位置図と断面図を示す。また、写真-2に対象岸壁を示す。構造は鉄筋コンクリート製(ケーソン)であり、幅4m×奥行き8m×高さ9mのものが図-4に示すように14個設置されている。今回は、その中のケーソンNo. 13を用いて試験を実施した。

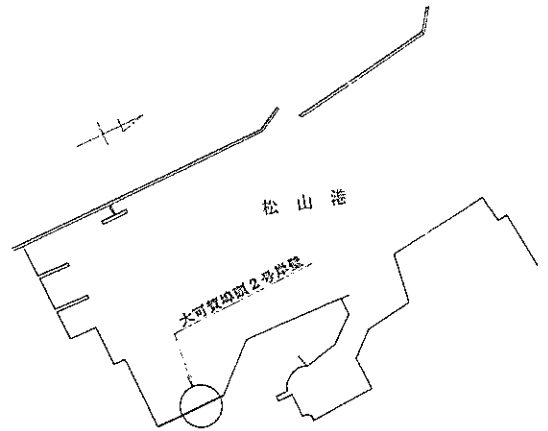


図-3 試験対象構造物位置図

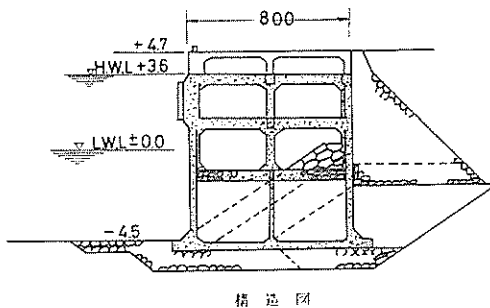
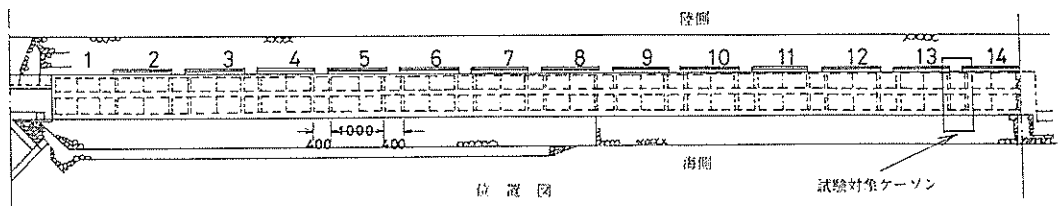


図-4 試験対象構造物

写真-3に試験対象ケーソンを示す。この岸壁の竣工は昭和38年で、試験まで約25年を経過している構造物である。上部工スラブの部分は塩害による鉄筋の腐食が激しく、コンクリートが剥離している所が認められた。

2.2 実構造物の事前調査

試験を実施する前に、外観調査など構造物の現状調査が行われた。

まず、コンクリート表面に付着している付着物の除去を行い、コンクリート表面に発生しているひびわれの有無および発生状況等の調査と同時に通電前のコンクリート表面の写真撮影を行った。調査結果より、対象ケーソンの劣化度の判定を劣化防止・補修マニュアル(案)³⁾の劣化度の判定基準(表-1)によって判定した。その結果、上から二段目の梁の下面(+1.0m)を境界として、

それより上を水上部、下を水中部とした場合に、表-2のように判定された。すなわち水上部においては鉄筋の腐食、ひびわれに関しては劣化度IV、かぶりコンクリートの剥離・剥落については劣化度IIIであった。水中部については、いずれも劣化度IIであった。また、干満帯に位置する柱および壁との接合付近の梁にひびわれが多く見られ、ひびわれ部には錆汁が見られた。

通電前にはコンクリート中の鉄筋の電位測定およびコンクリートのコアを採取し、塩化物イオン量や透水試験を行った。その後、コンクリート中の鉄筋へ電流を流すために鉄筋の導通をテスターにより調べた。

2.3 試験対象構造物への通電方法

本試験に用いた陽極および試験設備の配置概略図を図-5、図-6に示す。また、試験設備の名称および仕様を

表-1 劣化度の判定基準

劣化度	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆が見られる。	一部に錆汁が	錆汁多し	浮き錆多し	浮き錆著しい
ひび割れ		一部にひび割れが見られる。	ひび割れ多し	ひび割れ多し。ひび割れ幅数mm以上のひび割れ含む。	ひび割れ幅数mm以上のひび割れ多数	
かぶりコンクリートの剥離、剥落	なし	なし	一部に浮きが見られる。	一部に剥離、剥落が見られる。	剥離、剥落多し	剥離、剥落著しい

*港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書(劣化防止・補修マニュアル(案)) 助沿岸開発技術研究センターによる

表-2 No.13ケーソンの劣化度の判定

項目	水上部	水中部
鉄筋の腐食	IV	II
ひびわれ	IV	II
かぶりコンクリートの剥離、剥落	III	II

*2段目の梁の下面(LWL+1.0m)を境界としてそれより上を水上部とした。

表-3に示す。

試験期間中の電流密度はおおむね、コンクリート表面積当たり0.5A/m²となる時の電圧8.6Vを採用した。

干満帯部の柱については、北側の柱1本について実施した。干満帯の補修部が干潮時にも常時海水に接するように、水中ポンプにより海水を供給する設備を取り付けた。その電着施行要領図を図-7に、設備の取り付け状況を写真-4に示す。施行後の干満帯部の柱は常時海水で浸漬されているために、定電流制御(電流一定)による通電を行った。実際の設定値としては、柱4面の総面積約1.74m²に対して電流密度0.5A/m²(30日間)、0.7A/m²(95日間)を採用した。

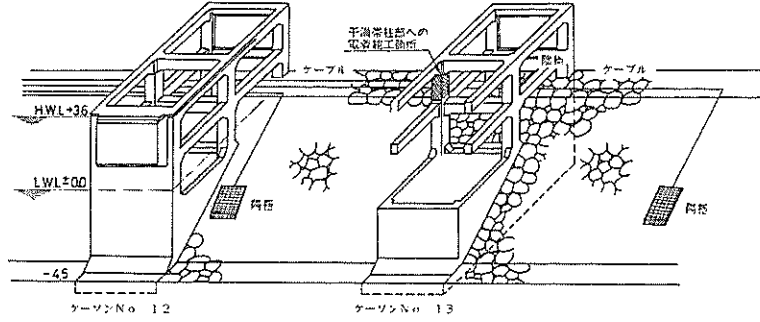


図-5 試験対象ケーソン構造図および陽極配置概略図

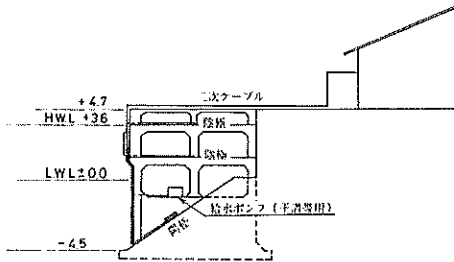
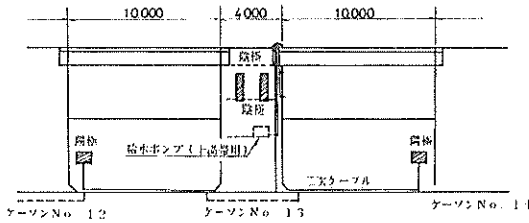


図-6 試験設備の配置概略図

2.4 実構造物試験の調査および測定項目

実構造物への実証試験においては以下に示す(1)～(8)の項目について調査、測定を行った。

実構造物試験のフロー図を図-8に示す。

(1) 電着物の析出状況調査

ケーソン本体における電着物の析出状況の経時的な変化を調査するために、約1.5～2カ月ごとに目視観察を中心にカメラやビデオによる影響等を行った。ケーソン本体の水中部、干満帯部のコンクリート表面の正常な部分をはじめ、ひびわれ等の劣化部分に応じて、コンクリート表面に析出した電着物をケレンにより剥離し、ノギスにより電着物の析出厚さを測定した。さらに、採取した電着物の化学組成分析を行った。

干満帯部の柱については、約1.5～2カ月ごとに電着装置の保護カバーを取り外して、柱の表面の状況を観察

した。

(2) コンクリート中の鉄筋の電位測定

試験対象構造物全体への電流分布を把握するために、コンクリート中の鉄筋の電位を測定した。電位の測定は通電時の電位(On-Potential)について行った。測定には海側壁面の陰極ケーブル接続用ピースに測定端子を接続し、電位差計を介してコンクリート表面に照合電極を押し当て測定した。照合電極には銀-塩化銀電極(Ag/AgCl EL)を使用した。測定要領を図-9に示す。

(3) 電着物の組成分析

試験期間中および通電終了時にケーソン本体および干満帯の柱に析出した代表的な部分の電着物を採取し、組成分析を行った。

電着物の主成分である CaCO_3 および $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の定量分析は、採取した電着物を 110°C で2時間乾燥し、乾燥ベース重量を測定して分析に供した。分析はJIS K 1051に従い試料を 900°C で2時間燃焼し、水分および有機物を除去(強制加熱減量: Ig. loss%)した燃焼残渣をベースとして、 CaO および MgO の定量値を求め分子量換算して乾燥ベース重量(100wt%)に対する CaCO_3 および $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の重量%を求めた。

なお、採取した電着物には海水中の砂泥等が存在するために CaCO_3 および $\text{Mg}(\text{OH})_2$ の合計は100%にならない。

(4) 電着物の断面観察

コンクリートのコアを採取してケーソン本体の正常部、劣化部および干満帯柱部の代表的な箇所について断面観察を行った。

ケーソン本体の正常部および干満帯柱部の試料は図-10に示すように、深さ方向に沿って2分割し、目視および実体顕微鏡により断面観察を行った。

ケーソン本体のひびわれ部より採取した試料は、試料

表-3 試験設備の名称および仕様

名称	ケーソン本体への通電試験	干潮帯の柱への通電試験
直流電源	入力：AC200V, 3φ 出力：DC20V, 750A	入力：AC100V, 1φ 出力：DC15V, 20A
陽極	DSE電極 2基 (ケーソン両側の海底に設置)	DSE電極 4枚 (柱の周囲4面に設置)
陰極	海側, 陸側壁コンクリート中の鉄筋(2箇所)	柱つけ根のコンクリート中の鉄筋(1箇所)
2次ケーブル その他	100sq×100m, 4本	38sq×100m, 2本 水中ポンプ 250W 保水材, 外装用ラバー
1次電源受電設備	電柱, ブレーカー, 積算電力計他	
受電盤	漏電ブレーカー, 分電盤	
記録計	12打点	
海水温度計	測温抵抗体(50°C/10mV)	
計測小屋	プレハブ: W2700×L1200×2200mm	

*DSE電極：酸化ルテニウム (RuO₂) と酸化チタン (TiO₂) との混合物の薄膜をチタンの薄板の上に焼き付けた電極で, 不溶性電極あるいはルテニウム酸化物電極ともされる。通常, 商品名を使って DSA もしくは DSE 電極と言われる。

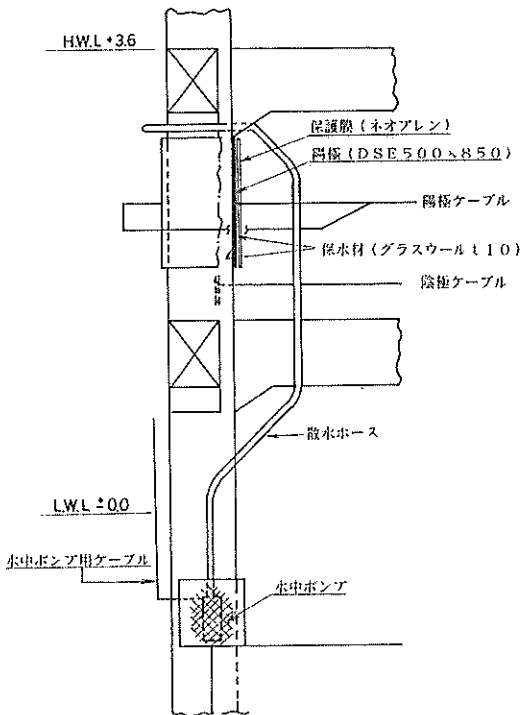


図-7 干満帯柱部への電着施工要領図

をひびわれ部より2分割して目視によって, 断面観察を行った。表-4に断面観察用コンクリートコア採取位置を示す。

(5) コンクリートの透水試験

電着通電によるコンクリートの表面へのコーティングおよびコンクリート中の空隙充填効果を把握するために, コンクリートのコアを採取して透水試験を行った。

透水試験の供試体は, 構造物から採取した直径10cmの表面から2cmまでのコンクリート切片(φ10cmの円板状)である。試験方法は圧力水を供試体に加えて, その浸透流量を測定して透水性を求める方法(アウトプット法)による。すなわち, 一定圧力(1.5kgf/cm²)で供試体に加えた水が単位時間に単位面積から流出する量を計り, その流出量が一定になるまで測定を続け, その時の流出量を用いて, 次式から透水係数を計算した。

$$K = \rho \cdot h / p \cdot Q / A$$

ここに, K=透水係数 (cm/s)

ρ = 水の単位体積重量 (kgf/cm³)

h = 供試体の高さ・厚さ (cm)

P = 水圧 (kgf/cm²)

Q = 流出量 (ml/s)

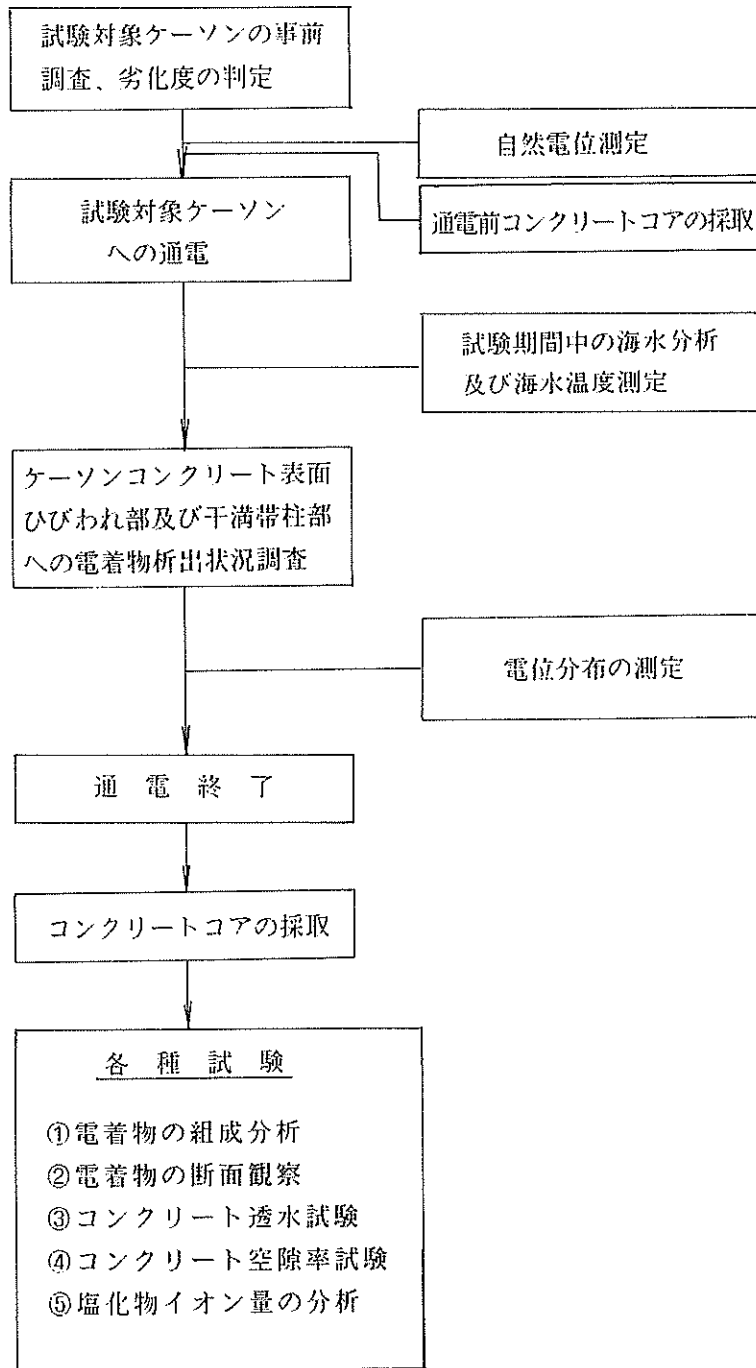


図-8 実構造物試験のフロー図

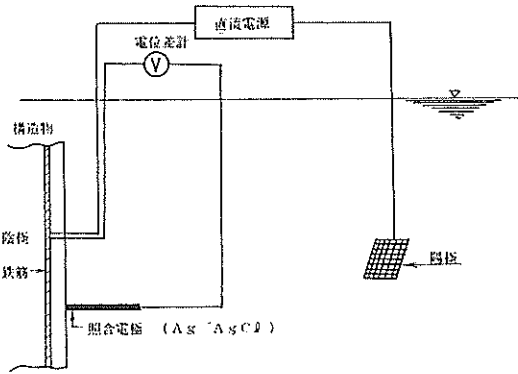


図-9 電位測定要領図

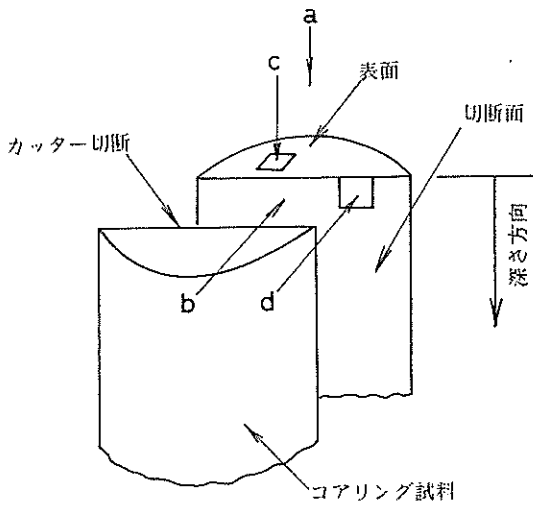


図-10 コンクリートコアの断面観察位置 (図中の a~d は写真-12の撮影位置を示す)

表-4 断面観察用コンクリートコア採取位置

通電期間	番号*	採取位置
3 か月	12	南梁側面+1.25m
5 か月	15	海側壁面表側-2.0m
	24	干満帯柱南側側面+2.2m

*番号は図-13を参照のこと。

A = 供試体の断面積 (cm²)
 透水試験装置の概要を図-11に示す。

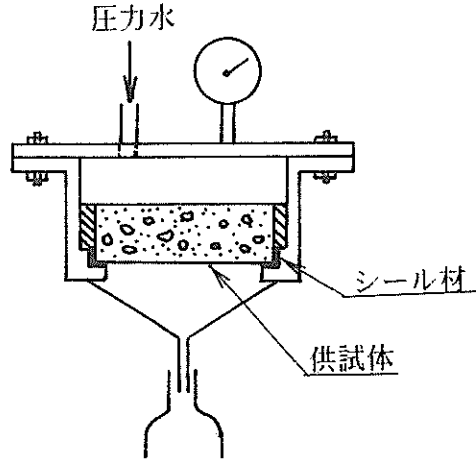


図-11 円板形供試体を用いた透水試験、アウトプット (外圧) 方式

(6) コンクリートの空隙率試験

透水試験と同様に電着通電によるコンクリート中の空隙充填効果を把握するために、コンクリート表面から20mmの部分の細孔径分布を5mm厚さごとに測定した。

試験には透水試験を終えた供試体から採取した2~3g程度のモルタル塊を50°Cで48時間乾燥させたものを試料として用いた。

測定には水銀圧入式ポロシメーターを用い、注入圧力を2,000kgf/cm²までとして、細孔半径が37.5オングストローム (Å) 以上の細孔量 (以下空隙量という) ならびに細孔径分布を測定した。なお、注入圧力と水銀が圧入される細孔半径との関係は次式によった。

$$r = 75,000 / P$$

ここに、r = 細孔半径 (Å)

P = 加えられた絶対圧 (kgf/cm²)

(7) コンクリートの塩化物イオン量

鉄筋腐食の原因となる塩化物イオン (Cl⁻) がコンクリート内部にどのように分布しているかを把握するために通電前と通電後にコアを採取し、塩化物イオン量を測定した。

塩化物イオン量を測定する試料は試験対象構造物よりφ7cm×ℓ20cm程度のコアを取り、図-12に示すようにコンクリート表面から2cmずつ切断し14cmまでの7個について、それぞれコンクリート中に含まれている塩化物イオン量の分析を行った。なお、塩化物イオン量の分析

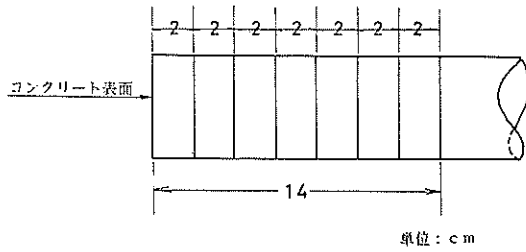


図-12 コンクリートコアの切断方法

は(社)日本コンクリート工学協会から提案されている「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の分析方法」に準拠して行った。

各種試験のためのコンクリートコアの採取位置を図-13および表-5に示す。

(8) 試験期間中の海水の分析および温度測定

電着反応による試験海域の海水への影響の有無を確認するために、電着析出に影響のある試験海域の海水の分析および海水温度の測定を行った。

通電期間中の海水分析は、調査日に試験対象ケーソンより沖合5m(水深-2m)と陽極付近(水深-2m, 陽極より50cm上部)の2カ所の海水を採取して分析試料に供した。

海水の分析方法は、JIS K 0102に準拠して行った。

また、海水の温度測定はケーソンNo. 12とNo. 13の中

央陸側壁面(水深±0m)に温度センサーを取り付けて、試験期間中の海水温度を陸上の記録計により連続記録した。

2.5 付着強度試験(室内試験)

電着通電が鉄筋とコンクリートとの付着強度におよぼす影響を把握するために、φ15cm×h15cmの円柱の中心に鉄筋(D16)を埋込んだ供試体を作成し、内部の鉄筋を陰極として所定の電流密度で所定期間通電を行った後に、付着強度試験を実施した。供試体へ流す電流は0.5, 0.75, 1.0, 2.0 A/m²(コンクリート表面積当たり)の4種類とし、通電期間は約60日~120日間とした。また、コンクリート中の塩分量も変化させた。表-6に付着強度試験ケース一覧表を示す。

(1) 供試体の製作

供試体を製作するに当たって、セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。骨材はアルカリ反応性試験(モルタルバー法)の結果、無害のものを用いた。コンクリートの示方配合を表-7に示す。供試体の形状は図-14に示すように円柱の供試体の中心には実構造物をシミュレートする意味から、JIS G 3112「コンクリート用棒鋼」に定める異形棒鋼SD30, D16を用い、黒皮付きのまま用いた。鉄筋とコンクリートとの付着区間は棒鋼に文字などの特別な圧延マークのないものとした。

また、鉄筋とコンクリートとの表面積比を0.46(松山

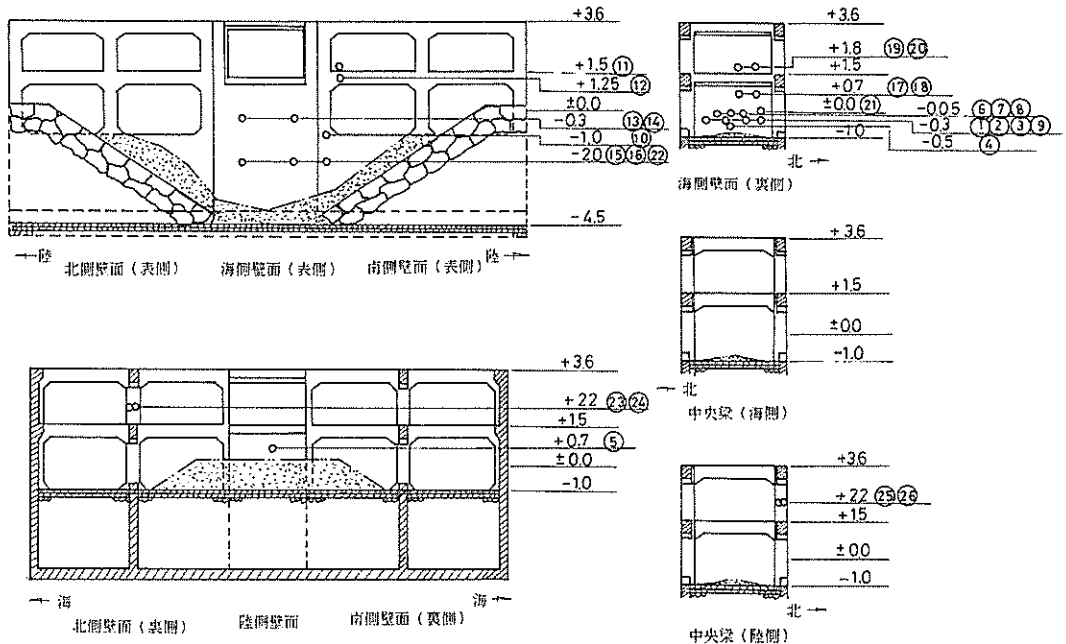


図-13 コンクリートコアの採取位置(○数字箇所)

港湾コンクリート構造物の補修方法としての電着工法の適用性

表-5 コンクリートコアの採取位置一覧表

区分	番号	コア採取位置
通電前	1	海側壁面裏側 -0.3m
	2	海側壁面裏側 -0.3m
	3	海側壁面裏側 -0.3m
	4	海側壁面裏側 -0.5m
	5	陸側壁面 +0.7m
通電3か月後	6	海側壁面裏側 -0.05m
	7	海側壁面裏側 -0.05m
	8	海側壁面裏側 -0.05m
	9	海側壁面裏側 -0.3m
	10	南側壁面 -1.0m
	11	南側梁上部 -1.5m
	12	南側梁側面 +1.25m
通電5か月後	13	海側壁面表側 -0.3m
	14	海側壁面表側 -0.3m
	15	海側壁面表側 -2.0m
	16	海側壁面表側 -2.0m
	17	海側壁面裏側 +0.7m
	18	海側壁面裏側 +0.7m
	19	海側壁面裏側 +1.8m
	20	海側壁面裏側 +1.8m
	21	海側壁面裏側 ±0.0m
	22	南側壁面 -2.0m
	23	干満帯柱部南側 +2.2m
	24	干満帯柱部南側 +2.2m
	25	干満帯柱部陸側 +2.2m
	26	干満帯柱部陸側 +2.2m

表-6 付着強度試験ケース一覧表

試供体No.	NaCl添加量 (kg/m ³)	電流密度 (A/m ²)	積算電流量 (A・h/m ²)
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0.5	1,596
5	0	0.5	3,061
6	0	0.75	2,394
7	0	0.75	4,592
8	0	1.0	1,517
9	0	1.0	2,250
10	0	1.0	3,192
11	0	1.0	6,122
12	0	2.0	3,035
13	0	2.0	4,500
14	0	2.0	6,383
15	3	0	0
16	3	0	0
17	3	0	0
18	3	0	0
19	3	0	0
20	3	0.5	1,596
21	3	0.5	1,596
22	3	0.5	3,061
23	3	0.75	1,570
24	3	0.75	1,570
25	3	0.75	2,394
26	3	0.75	2,394
27	3	0.75	4,592

表-7 コンクリートの示方配合

粗量材の 最大寸法 Gmax (mm)	目標 スランブ (cm)	目標 空気量 (%)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)							測 定 結 果		
					水 W	セメ ント C	細 骨材 S	粗 骨材 G	混 和 剤 (cc)		NaCl 添加量	スラ ンブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材令28日 (kgf/cm ²)
									減水剤	AE剤				
20	8±2	5±1	55	44.8	174	317	783	983	CX0.25% 792 ポゾリス No.8imp	-	0	8.6	4.3	428
			55	44.8	174	317	783	983	CX0.25% 792 ポゾリス No.8imp	-	3	7.9	4.7	428

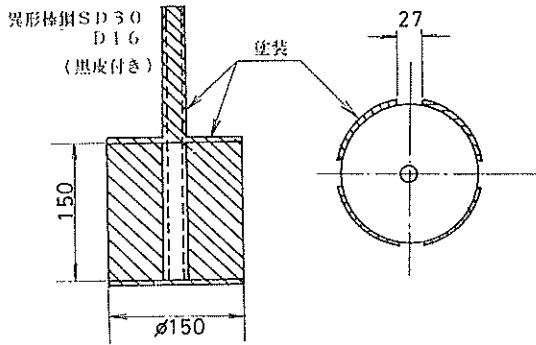


図-14 付着強度試験に使用した供試体の形状寸法
(単位: mm)

港大可賀埠頭ケーソンの値)に合わせるために、写真-5に示すように供試体側面のうち、幅2.7cm×高さ15cm×4箇所を除く、全てのコンクリート面および突き出た鉄筋部分についてエポキシ樹脂塗装(2回塗り)を施し、絶縁処理した。

型枠は材令2日において取り外し、その後水道水で湿した布で供試体を覆い、ビニール袋に入れて材令28日まで封かん養生を行った。養生後、2日間室内で乾燥させた後、上記のエポキシ樹脂塗装を施し通電試験に供した。

通電方法は図-15に示すように、常時海水が交換されるように設備された水槽に供試体を浸漬し、不溶性陽極

(チタン材)を対極として通電した。

(2) 付着強度試験の要領

付着強度試験は、(社)土木学会から提案されている基準「引き抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」に準じて行った。

付着強度は次式により求めた。

$$\tau = P / \pi D \ell$$

ここに、 τ : 付着強度 (kgf/cm²)

P : 最大引張荷重 (kgf)

D : 鉄筋の直径 (公称直径: 1.59cm)

ℓ : 鉄筋の埋め込み長さ (cm)

2.6 接着力試験(室内試験)

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、付着強度試験用供試体を製作し、表-8に示す条件で通電を行い、通電後の接着力試験を実施した。

通電は0.65A/m²の条件で96日間行った、その後、1年間無通電のまま海水中に浸漬されていたものを回収して接着力試験に供した。

接着力試験は図-16に示すように、建研式接着力試験器を用い、供試体の6地点について行った。

建研式接着力試験の手順を以下に示す。

① 電着析出面の清掃

② アタッチメントの取付け、4 cm×4 cmアタッチメントを2成分エポキシ樹脂接着剤を使用し接着する。

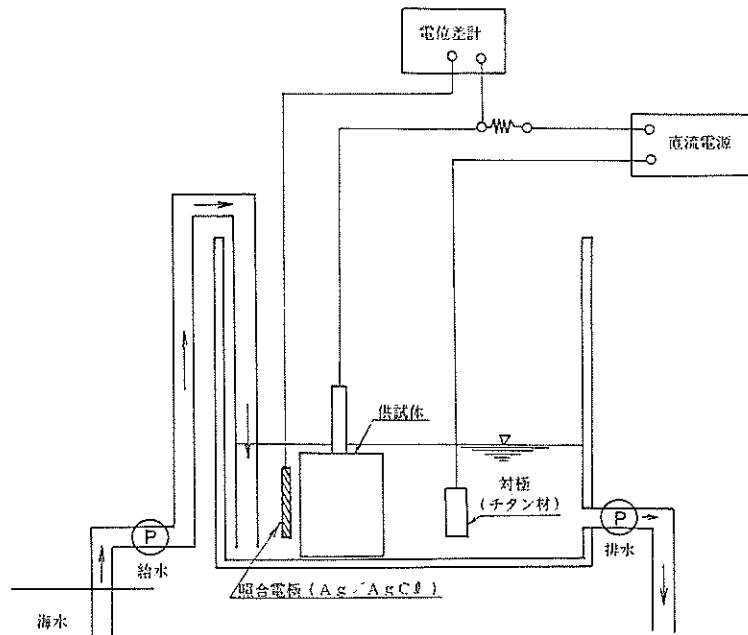


図-15 付着強度試験用供試体への通電方法

表-8 接着力試験の条件

供試体の形状寸法	横70×長さ100×厚さ20cmの直方体
鉄筋の配筋状況	SD30, D16, 100mmメッシュに配筋
通電条件	電圧制御(印加電圧一定) 通電期間中の平均電流密度 =0.65A/m ² 通電期間: 96日間

③周囲の切断, 接着後(翌日)アタッチメントの周囲をカッターでコンクリートに届くまで電着物に溝を入れる。
④測定を行い, コンクリートから剥離した時の圧力(剥離数値)を読み取り, 次式より1cm²当たりの接着力を求める。

$$\text{接着力 (kgf/cm}^2\text{)} = \text{剥離数値 (kgf)} / \text{アタッチメントの面積 (cm}^2\text{)}$$

3. 試験結果および考察

実構造物試験結果, 室内試験結果および, その考察を以下に示す。

3.1 試験期間中の電圧, 電流値

通電条件および試験期間中の電圧, 電流値を表-9に示す。試験期間中, 干満帯の柱については当初目標の0.5A/m²を満足していたが, ケーソン本体への電流密度は予想に反し, 潮位により変動し干潮時には目標の電流密度より大きくなり, 満潮時には小さくなる傾向が認められ。この原因としては満潮時になるとコンクリートの面積が大きくなるためと考えられる。図-17に潮位と電流密度の関係を示す。

表-9 電着通電条件および試験期間中の電圧・電流値の測定結果

項目	ケーソン本体		干満帯柱部	
	目標電流密度	0.5A/m ²	0.5A/m ²	0.7A/m ²
制御方法	電圧制御		電流制御	
設定値	8.6V*	0.85A**	1.20A***	
測定結果	電圧	8.6±0.2V	3.9~10.3V	3.9~13.6V
	電流	35.5~54A	0.85A	1.2±0.02A
	通電日数	145日間	30日間	95日間

* 潮位+1.5mの時, コンクリート表面積93m², 0.5A/m²にするための電流値46.5Aの時の電圧値

** 柱周囲4面の総面積約1.7m², 0.5×1.7=0.85

***柱周囲4面の総面積約1.7m², 0.7×1.7=1.2

3.2 電着物の析出状況および電位の傾向

a) ケーソン本体正常部への析出状況

ケーソン本体正常部については通電3ヶ月後では-1m以下の海側壁面, 陽極に面した南北壁面の表面に約1mmの厚さで膜状の電着物が析出しているのが確認された(写真-6)。通電5ヶ月後では陸側壁面+1.0m付近まで約1mmの厚さの電着物が認められるようになった。構造物全体への析出分布は, 図-18に示すように陽極に面した北側壁面表側, 南側壁面表側(平均厚さ2mm)および海側壁面表側(平均厚さ1.5mm)に析出量が多い。一方, 海側壁面裏側, 陸側壁面および南北壁面の裏側面への析出量は平均厚さ1mm以下であった。すなわち陽極の反対側には電着物の析出が少なかった。

なお, 各部分の電位を測定してみると, 海側壁面表側が最も卑な値を示し, 南北壁面表側, 海側壁面裏側, 陸

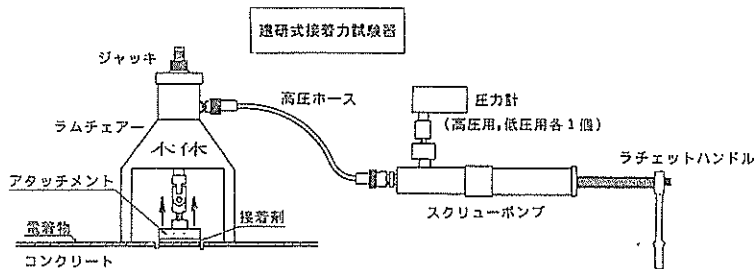


図-16 電着物とコンクリート表層部との接着力試験概要図

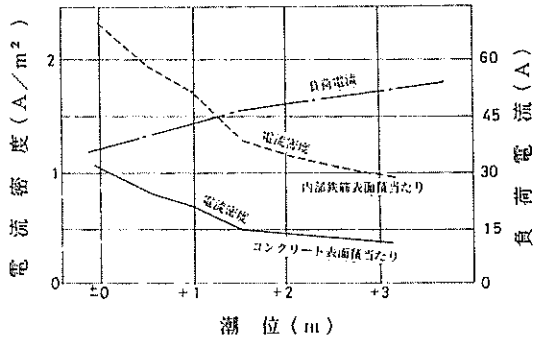


図-17 ケーソン本体における潮位と電流密度の関係

側壁面の順に貴となっており、電位の単なる箇所ほど析出量の多い傾向が認められた。この電位の差は陽極の配置(図-5参照)の影響を受けている。すなわち、陽極に近い部分が最も単なる電位を示し、陽極から離れるに従い貴な値を示す傾向がある。

したがって、電位分布のバラツキを少なくするためには極間距離をなるべく均等にするように、陽極の配置を検討する必要がある。

深さ別に見た電着物の析出状況は、水中部で析出量が多い傾向にあった。+1.5mを境にして、上の部分では析出量は急激に減少している。これは、潮位の変動による浸水時間(通電時間)の差によるものと考えられる。

また、コンクリートの打ち継ぎ目に電着物が帯状に析出する(写真-7)ことが認められたので、コンクリート構造物の不連続面における充填効果が高められることも考えられる。

b) ケーソン本体ひびわれ部への析出状況

通電開始後、1.5カ月の比較的早い時期に、予め目視で確認されたひびわれ部の他に、当初確認されなかったひびわれ部にも電着物の析出が確認された。このひびわれ部における電着物の析出箇所は、水中部をはじめ、+3m付近の干満帯上部にも見られた。通電5ヶ月後の状況を写真-8に示す。

電着物はひびわれ部に沿って析出し、通電後3~5ヶ月には、厚さ3mm以上の電着物とそのひびわれ部を覆うようにして成長するのが確認された(写真-9)。

このように、ひびわれ部に干満帯部を含む広い範囲にわたって比較的早い時期から電着物の析出が認められた理由は、ひびわれ部は正常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、そ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。

c) 干満帯の柱部への析出状況

陽極および保水材を干満帯の柱に巻き付けて、ポンプにより海水を補給しながら電着施工を行った結果、通電後1.5カ月の調査では電着物の析出がはっきり認められなかった。しかし、通電後3カ月の調査では、柱の表面に最大1mm程度の膜状の電着物が対象面積の40%程度の

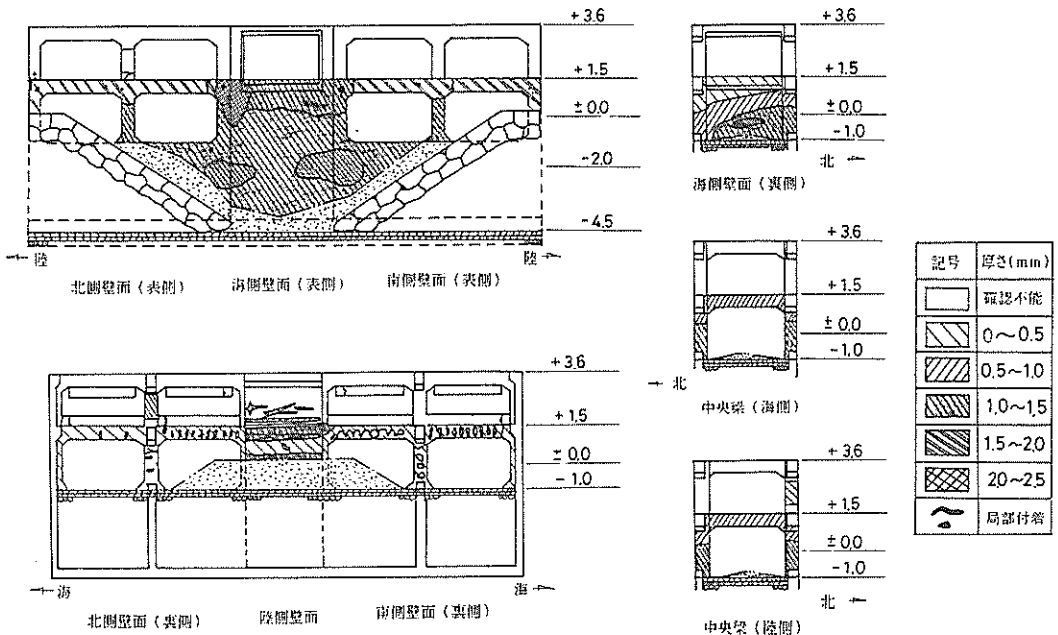


図-18 ケーソンへの電着物の析出分布状況(通電5か月)

範囲で認められるようになった(写真-10)。通电後5か月の調査では柱の表面に直接巻き付けた保水材をコンクリート表面に密着させるようにして電着物が析出していた。析出量は対象面積のほぼ全面にわたって厚さ1mm程度の比較的硬い電着物が確認された(写真-11)。

また、電着物は乳白色であるため、電着物の析出箇所が外部から容易に確認できることから、電着物の析出状況を調査することにより構造物のひびわれ箇所やひびわれの大きさ、目視ではわかりにくい小さなひびわれの発生状況も知ることが出来た。そのため、電着工法は、コンクリート構造物における劣化の程度の把握にも利用できるものと思われる。

電着物の断面観察の結果、正常部の表面は平均1mm程度の電着物によってほぼ全面が覆われていた(写真-12)。

ひびわれ部の試料では、電着物の析出状況は表面に沿って幅約25mm、厚さ約4mmの電着物が析出しており、ひびわれ内部にも電着物がひびわれを埋めるように析出していた。

干満帯柱部においては、保水材を巻き込むように電着物が析出していた(写真-13)。

3.3 電着物の組成

電着物の組成分析結果を表-10に示す。

表-10より電着物の組成は、ケーソン本体の正常部とひびわれ部を比較すると、ひびわれ部の方がCaCO₃が少ない反面Mg(OH)₂が多く、CaCO₃/Mg(OH)₂比(以下Ca/Mg比と呼ぶ)の小さいことが分かる。ケーソン本体の正常部および干満帯柱部に析出した電着物のCa/Mg比は1.7~3.5であるのに対し、ひびわれ部のCa/Mg比は0.2と小さかった。一般に電着物の主成分であるCaCO₃およびMg(OH)₂の割合は、電流密度によって変化し、低電流密度ではCaCO₃の割合が高く、高電流密度ではMg(OH)₂の割合が高くなると言われている⁴⁾。

これは電着物の析出がコンクリート表面と海水の界面に生じる化学反応(表-11)によって起こるためであり、CaCO₃はpH8~9、Mg(OH)₂はpH9~10で析出する

表-10 電着物の化学組成分析結果(単位:重量%)

試料区分 分析項目	ケーソン本体正常部		ケーソン本体ひびわれ部		干満帯柱部
	海側壁面表側		北側中央梁		
	-2.0m		+1.5m		+2.2m
	通电5か月		通电3か月	通电5か月	通电5か月
CaCO ₃	53.6	8.49	17.3	68.5	
Mg(OH) ₂	31.1	86.8	76.2	19.8	
Ig. loss	40.7	33.2	36.0	31.3	
Ca/Mg比*	1.72	0.10	0.23	3.46	

*Ca/Mg比とは、CaCO₃/Mg(OH)₂比である。

表-11 電着物の析出反応

電気化学反応	液相反応
<u>アノード反応</u>	
$2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 \uparrow + 2\text{e}^-$	$\phi_0 \text{ (V. s. SHE)}$
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$+1.36$
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$+1.23$
<u>カソード反応</u>	
$2\text{H} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$\text{MgCl}_2 \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2\text{Cl}^-$
$1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$	$\text{CaCl}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{Cl}^-$
$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$	$\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$
	$\text{NaHCO}_3 \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$
	$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$
	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Mg(OH)}_2 \downarrow$

(注) ϕ_0 : 標準単極電位

V. s. SHE : 標準水素電極(Standard Hydrogen Electrode)に照合した電位(volt)

が、高い電流密度で通電するとコンクリート表面のpHが増加してMg(OH)₂の析出する割合が多くなり、Ca/Mg比が小さくなる。Humble⁵⁾は鋼材に付着する電着物の組成について表-12に示すように電流密度が大きくなるほどMgやOH⁻の成分が多くなり、逆に電流密度が少ないとCaやCO₃の成分が多く生成することを示している。また、図-19に示すように硬さ、曲げ強さなどは低電流密度では大きく、高電流密度では小さい傾向がある。

表-12 電着物の組成例

各成分の比率 (%)	電流密度 (A/m ²)			
	0.54	1.08	1.85	4.31
Na	0.72	0.85	0.78	1.03
Fe	3.78	3.46	2.60	2.12
Si	0.65	1.77	1.30	0.41
Cl	0.44	0.84	0.76	0.55
CO ₃	44.62	32.62	29.66	14.70
Ca	28.91	20.88	17.54	6.73
Mg	6.51	13.53	18.00	29.47
Sr	0.14	0.06	0.04	0.006
OH	8.37	18.18	23.55	38.52
Total	94.14	92.19	94.03	93.536

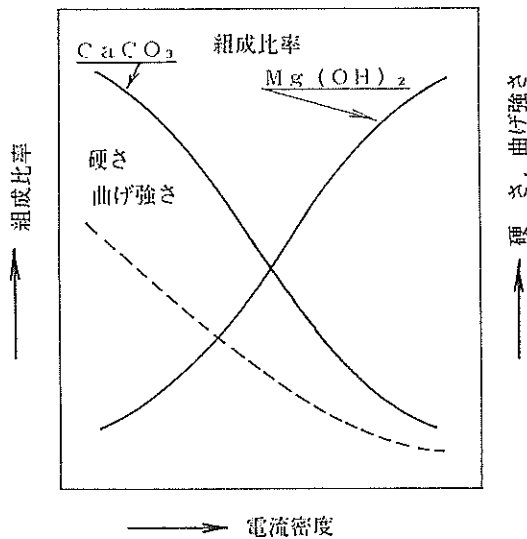


図-19 電着物の組成比率、硬さ、曲げ強さと電流密度との関係

上記のことを考慮して正常部とひびわれ部の電着物の組成の違いの原因を考えると、ひびわれ部はひびわれによる抵抗の減少によって、ひびわれ部に流れる電流密度が正常部に比べ高くなり、その結果、Ca/Mg比の小さい電着物が生成したものと考えられる。そのため、Ca/Mg比の大きい電着物を析出させるためには電流密度を低く抑えるような適切な電流制御を行うことが必要である。

力学的強度として硬さが一つの目安となるが、Ca/Mg比が5以上と0.3以下(マイクロピッカース硬さ試験, 300g)の電着物ではHv200とHv50と4倍もの差がある結果が得られている。なお、サングのHvは320、アサリの貝殻のHvは250である⁶⁾。

したがって、施工時の電流密度が高いと電着物の析出速度は早くなるが、力学的強度は低下する。ある程度の強度を保持する電着物を生成するためには工期は長くなるが、電流密度の低い施工方法が望ましいと考えられる。

3.4 コンクリートの透水性

表面から2cmまでのコンクリートの透水試験結果を表-13に示す。通電前(試料採取深度-0.3m)

表-13 透水試験結果

区分	コア採取箇所	透水係数(cm/s)
通電前	海側壁面裏側-0.3m ①	1.08×10 ⁻⁹
	海側壁面裏側-0.3m ②	1.18×10 ⁻⁹
	海側壁面裏側-0.3m ③	7.04×10 ⁻¹⁰
	平均値	9.88×10 ⁻¹⁰
通電 3か月	海側壁面裏側-0.05m ⑥	9.65×10 ⁻¹¹
	海側壁面裏側-0.05m ⑦	1.05×10 ⁻¹⁰
	海側壁面裏側-0.05m ⑧	1.73×10 ⁻¹⁰
	平均値	1.25×10 ⁻¹⁰
通電 5か月	海側壁面表側-0.3m ⑬	3.22×10 ⁻¹¹
	海側壁面表側-0.3m ⑭	2.13×10 ⁻¹¹
	平均値	2.68×10 ⁻¹¹
	海側壁面裏側+0.7m ⑰	4.57×10 ⁻¹¹
	海側壁面裏側+0.7m ⑱	2.03×10 ⁻¹¹
	平均値	3.30×10 ⁻¹¹
	海側壁面裏側+1.8m ⑲	5.47×10 ⁻¹¹
	海側壁面裏側+1.8m ⑳	8.85×10 ⁻¹¹
	平均値	7.16×10 ⁻¹¹
	干満帯柱部 +2.2m ㉓	3.73×10 ⁻¹¹
干満帯柱部 +2.2m ㉔	6.80×10 ⁻¹¹	
平均値	5.27×10 ⁻¹¹	

通電3か月（試料採取深度-0.05m）、通電5か月（試料採取深度-0.3m）における透水係数を比較すると図-20のようになる。通電前のケーソンコンクリートの透水

係数は約 $1 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ であった。これに対して、3か月通電後の透水係数は $1.25 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$ と約 $1/8$ に、5か月通電後の透水係数は $2.68 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$ と約 $1/40$ にそれぞれ透水性が小さくなっていった。通電5か月における深度別の透水係数を比較してみると図-21のようになる。+1.8mの箇所と-0.3mの箇所とは透水係数に差が見られ、-0.3mの方が透水係数は小さかった。この現象は海水の浸漬時間の違いによる電着物の析出量の差に起因しているものと思われる。

一般に、コンクリートの透水係数の大小を判断するものとして、表-14や表-15に示すような値が報告されている。^{7, 8)}。一方、表-13によれば、-0.3mの海側壁面

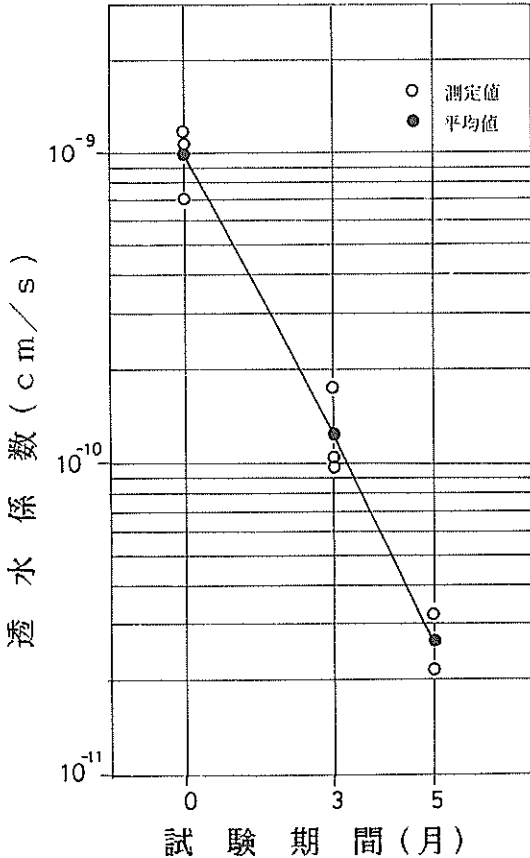


図-20 通電前、通電後のコンクリートの透水係数

表-14 コンクリートの透水係数（代表値）(1)

コンクリートの透水性	透水係数 (cm/s)
低い (Low)	$< 10^{-10}$
普通 (Average)	$10^{-10} \sim 10^{-8}$
高い (High)	$> 10^{-8}$

表-15 コンクリートの透水係数（代表値）(2)

コンクリートの区分	透水係数 (cm/s)
スリップフォーム法によるコンクリートで気乾状態の場合	1×10^{-8}
高品質のコンクリート	1×10^{-10}
超高品質のコンクリートで湿潤養生された場合	1×10^{-12}

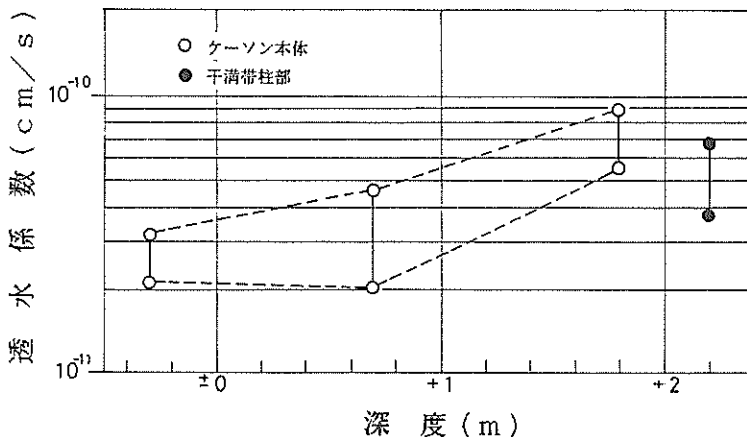


図-21 潮位とコンクリートの透水係数の関係（通電5か月）

から採取した通電前のコンクリートの透水係数は約 1×10^{-9} /sであった。この透水性は表-14では普通にランクされ、表-15ではスリップフォーム法で気乾状態の場合あるいは高品質のコンクリートと区分される。これに対して、3カ月通電後のコンクリートの透水係数は 1.25×10^{-10} cm/sと約 $1/8$ に、5カ月通電の場合には 2.68×10^{-11} cm/sと約 $1/40$ にそれぞれ透水性が低減しており、表-15に示す高品質コンクリートあるいは超高品質コンクリートに区分されることになり、コンクリートの品質の向上が確認されたと考えられる。

また、干満帯の透水係数を見た場合（表-13）、常時海水に浸漬している箇所と比べると低下率は小さいものの、浸漬時間の短い干満帯においても透水性の低減が認められた。例えば、通電5カ月後において+1.8m付近での透水係数は 7.16×10^{-11} cm/sであり、LWL以下（-

0.3m）の 2.68×10^{-11} cm/sに比べると約2.7倍ではあるが、通電前の 1×10^{-9} cm/sに対して $1/14$ と透水性の改善が認められた。

ポンプにより常時海水を供給した干満帯の柱の透水係数（表-13）は海水供給に伴う電着コーディングの効果が見られ、常時海水を供給することによって 5.3×10^{-11} cm/sと透水性が改善されている。

したがって、このようにコンクリート表面に電着層が形成されると、コンクリートのみかけの透水性が低下することがわかる。

3.5 コンクリートの空隙率

通電前および通電後のコンクリート中の半径 7.5 \AA 以上の空隙量および50%細孔半径の測定結果を表-16に示す。細孔径分布（細孔構造）のうち代表的な例を図-22

表-16 空隙量測定結果

区 分	コア採取箇所	空 隙 量 (mm ³ /g)				50%細孔半径 (Å)			
		コンクリート表面からの距離 (mm)				コンクリート表面からの距離 (mm)			
		0~5	5~10	10~15	15~20	0~5	5~10	10~15	15~20
通電前	海側壁面裏側 -0.3m	94.0	81.4	78.0	396	420	369		
		90.5	—	63.6	360	—	540		
	海側壁面裏側 -0.3m	84.4	75.4	80.0	348	387	341		
		79.3	—	76.5	336	—	519		
	海側壁面裏側 -0.3m	94.3	63.1	73.7	75.2	400	533	424	395
		—	—	—	—	—	—	—	—
	各区間の平均	88.5	73.4	75.2	368	441	393		
	全区間の平均	79.0				400			
通電 3カ月	海側壁面裏側 -0.05m	88.0	74.8	65.6	360	—	423		
		—	—	—	—	—	—	—	
	海側壁面裏側 -0.05m	91.4	70.5	78.4	66.2	404	317	470	553
		—	—	—	—	—	—	—	—
	海側壁面裏側 -0.05m	104.9	71.3	61.5	328	—	414		
		—	—	—	—	—	—	—	—
	各区間の平均	94.8	73.8	64.4	364	394	463		
	全区間の平均	77.6				407			
通電 5カ月	海側壁面表側 -0.3m	91.9	73.8	76.7	72.2	395	263	292	269
		91.6	68.7	68.2	70.3	434	263	250	269
	海側壁面表側 -0.3m	93.8	80.3	74.1	71.9	393	259	379	313
		88.8	79.1	70.7	57.1	305	245	266	374
	各区間の平均	91.5	75.5	72.4	67.9	382	258	297	306
	全区間の平均	76.8				310			
通電 5カ月	干満帯柱部南側 +2.2m	80.1	49.6	50.4	57.1	448	—	362	411
		76.9	48.6	41.7	56.9	458	353	483	386
	干満帯柱部南側 +2.2m	67.2	48.2	59.2	59.1	413	335	321	373
		—	—	—	—	—	—	—	—
	各区間の平均	74.7	48.8	50.4	57.7	440	344	389	390
	全区間の平均	57.9				390			

～図-25に示す。さらに、電着物そのものの細孔径分布(細孔構造)を図-26に示す。

表-16より、干満帯部を除いた0～20mm区間の空隙量を比べると、通電前では79.0mm³/g(全区間の平均)であるのに対し、通電3カ月では77.6mm³/g(全区間の平均)。通電5カ月では76.8mm³/g(全区間の平均)とほとんど差は認められなかった。しかし、個々の区間で比較すると0～15mmの区間ではほぼ同じであるが、鉄筋に近い15～20mmの区間では通電前が75.2mm³/gに対し通電後では64.4～67.9mm³/gと低下していた。この原因としては、通電開始と同時にコンクリート表面のみならずコンクリート内部においても電着物の生成が始まり、陰極近傍から優先的に電着物が析出し、空隙を充填していくものと考えられる。

コンクリート表面付近は海水中の電着物の生成に必要な物質(Mg²⁺, Ca²⁺等)の補給が十分に行われているため、通電時間の経過とともに電着物が析出しはじめ、電着物が膜状にコンクリート表面を覆う状態となり、コンクリートのみかけの透水性を徐々に下げていくこととなる。透水性の低下に伴い、コンクリート内部での電着はコンクリート表面からの電着生成物質の補給が低下し、もしくは補給が断たれるとコンクリート内部に封じ込まれた海水およびイオン物質の閉鎖的な環境での電着が支配的となる。このような状況では、コンクリート内部の

Mg²⁺, Ca²⁺等は陰極側に誘引され、電着物として析出することになる。その結果、コンクリート内部の陰極に近い部分(15～20mm)の空隙量が小さくなったものと考えられる。

50%細孔半径は、0～5mmの区間では通電前と通電後であまり差が見られないが、5～15、15～20mmの区間では通電前より通電後5カ月でやや小さくなる傾向が見られた。

また、図-22～図-25の細孔分布(細孔構造)で50%細孔径を比較すると、0～5mmの区間では通電前後であまり差が見られないが、15～20mm区間においては通電前が369Åに対して通電後では269Åと減少する傾向が認められた。

一方、表面に析出した電着物の空隙量および細孔径分布を図-26に示す。コンクリートに見られたような10⁵Å付近のピークは確認されないなど、コンクリートの細孔分布と異なっている。空隙量は70mm³/g程度で内部コンクリートとほとんど変わらないが、細孔径分布は細孔径がより小さい方に位置している。すなわち、400Å以下の空隙量が全体の80%強もあり、50%細孔半径も150Åと非常に緻密であった。

したがって、以下のことを考慮すると電着通電による透水性の低下・水密性の向上は主に、コンクリート表面と鉄筋近傍のコンクリート中に形成された電着物層によるものと判断できる。

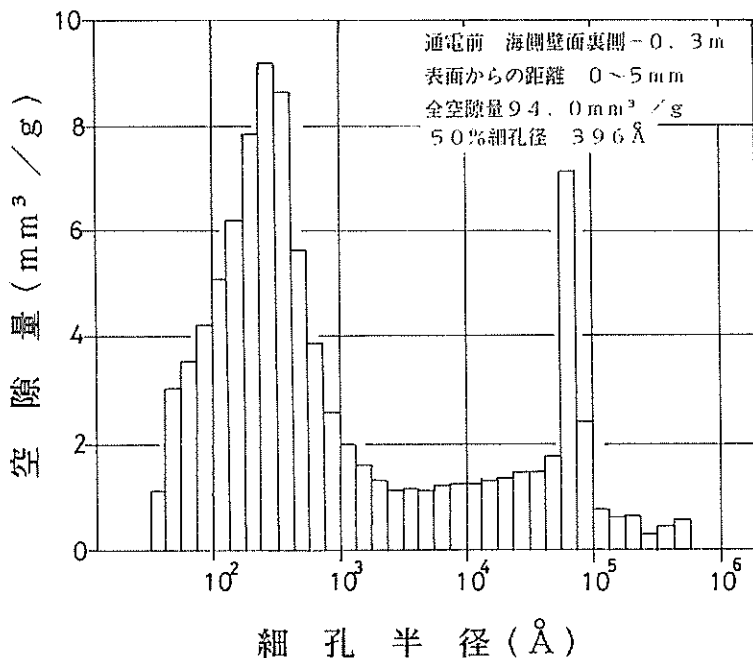


図-22 通電前のコンクリートの細孔構造(表面～5mmの区間)

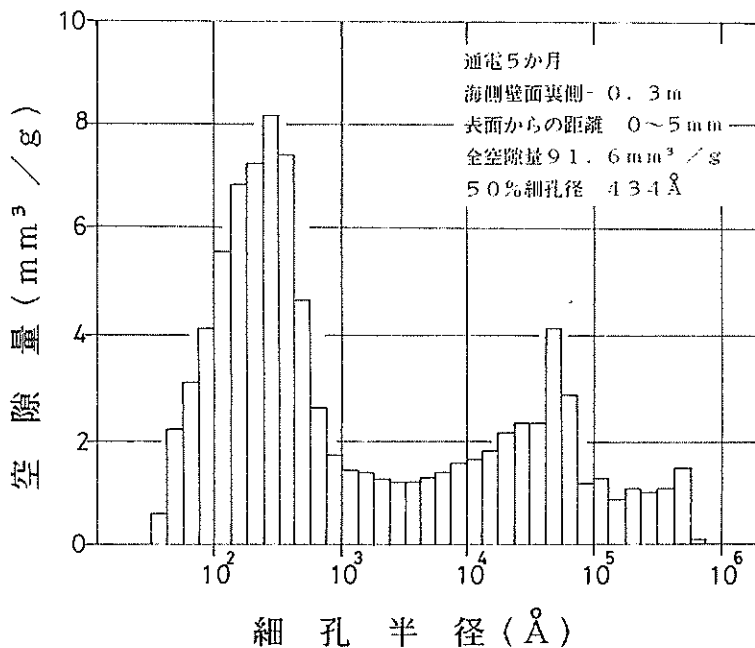


図-23 通電後のコンクリートの細孔構造 (表面~5mmの区間)

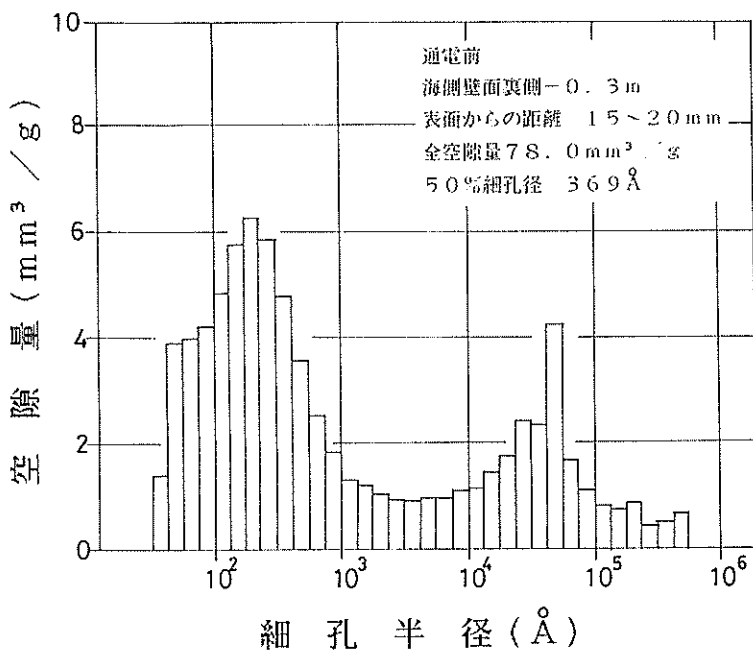


図-24 通電前のコンクリートの細孔構造 (15~20mmの区間)

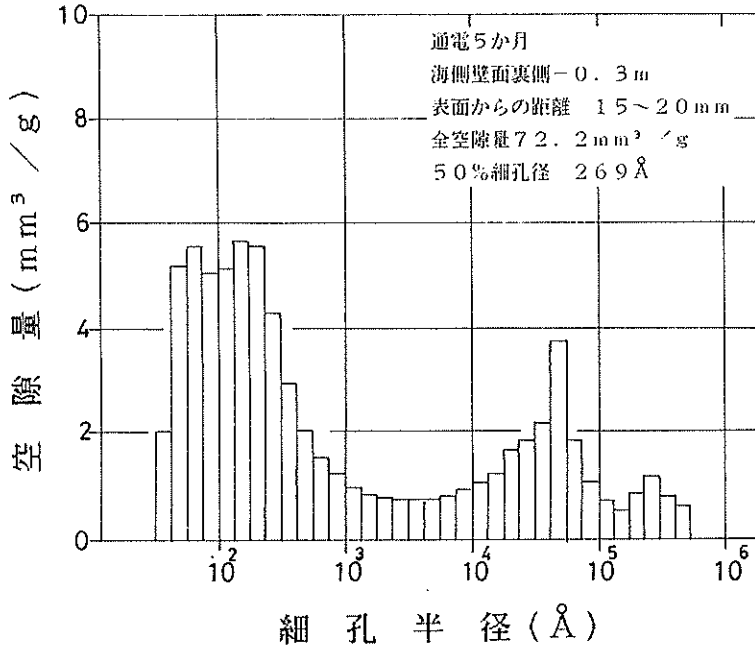


図-25 通电後のコンクリートの細孔構造 (15~20mmの区間)

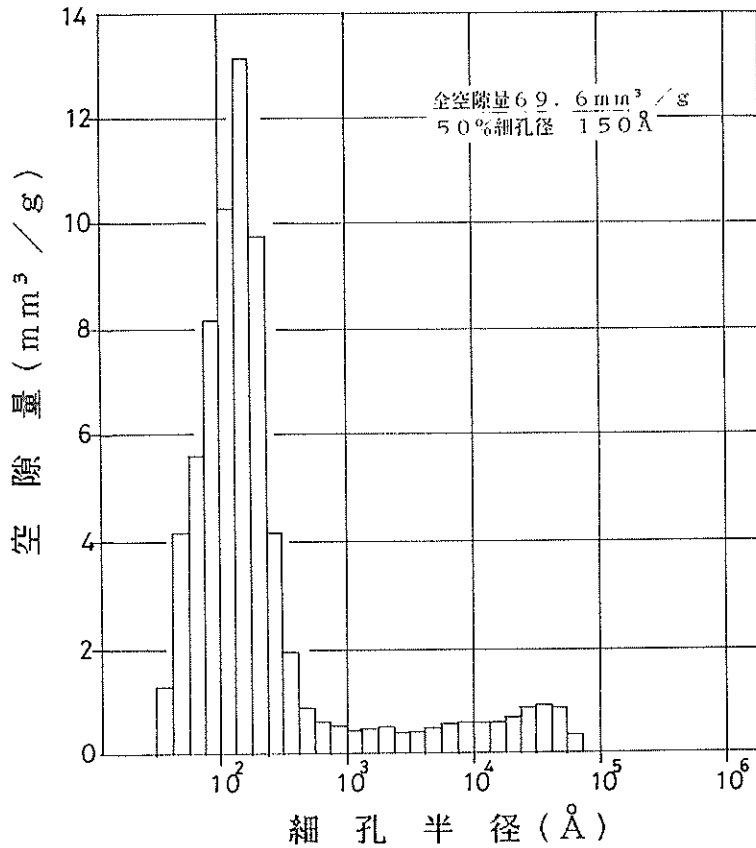


図-26 電着物の細孔構造

3.6 コンクリート中の塩化物イオン量

コンクリート中の塩化物イオン量の分析結果を図-27に示す。

通電前の塩化物イオン量はコンクリートの表層部において最も多く、深くなるに従い減少する傾向を示した。既往の報告⁹⁾と同様に建設後、海水、波浪等により外部から多量の塩化物イオンが浸透、蓄積したことが分かる。通電後(5か月)では鉄筋付近の塩化物イオン量は約50%に減少していた。これは塩化物イオンが陰イオンであるために陽極側に引き寄せられたものと考えられる。このような傾向は図-28に示すようにコンクリート中の鉄筋への電気防食試験によっても、鉄筋周辺における塩化物イオン量が無通電のものに比べて低減することが認められている¹⁰⁾。

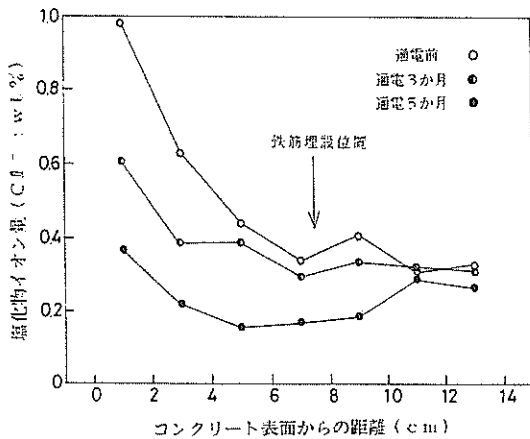


図-27 コンクリート中の塩化物イオン量の分布状況

したがって、電着工法は電気防食と同様にコンクリート中へ浸透した塩化物イオンを取り除く効果があり、コンクリート中の塩化物イオンの除去法としても利用出来るものと考えられる。

3.7 海水の組成および海水温度

採取した海水の分析結果を表-17に示す。

試験期間中の海水の組成は、沖合および陽極付近とも多少の変動はあるもののほぼ一定しており、陽極反応による海水への影響はほとんど認められなかった。また、試験期間中の海水温度は図-29に示すように21.0℃~11.5℃の範囲であった。

3.8 鉄筋とコンクリートとの付着強度

表-18に付着強度試験結果を示す。また、図-30に積算電流量と付着強度との関係を示す。

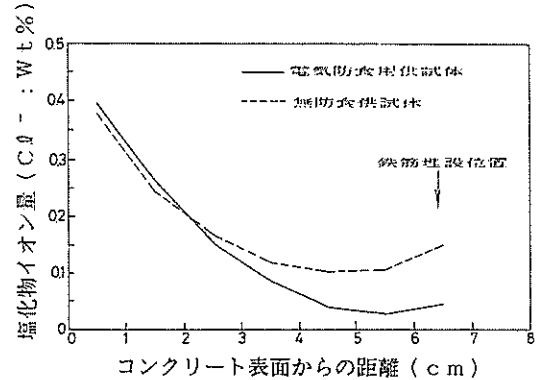


図-28 コンクリート中の塩化物イオン量の分布状況

表-17 海水の分析結果

採取日	採取場所	pH (25℃)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	電気伝導度 (Ω-cm)
88/10/14	沖合い ¹⁾	8.2	414	1,300	18,600	10,630	52.5	—
88/12/01	沖合い ¹⁾	8.2	399	1,200	19,300	10,380	44.8	22.0
	陽極 ²⁾	8.0	405	1,190	19,100	10,480	26.7	21.7
89/1/14	沖合い ¹⁾	8.1	397	1,300	19,100	10,350	45.6	22.2
	陽極 ²⁾	8.2	398	1,300	19,000	10,600	52.6	20.4
89/3/08	沖合い ¹⁾	8.0	400	1,320	19,000	10,520	47.5	22.0
	陽極 ²⁾	8.1	402	1,310	19,100	10,490	45.4	21.0

*1) は試験対象ケーソンより沖合5m, 水深-2m

2) は陽極付近, 水深-2m

**pH, 電気伝導 以外の単位: mg/ℓ

港湾コンクリート構造物の補修方法としての電着工法の適用性

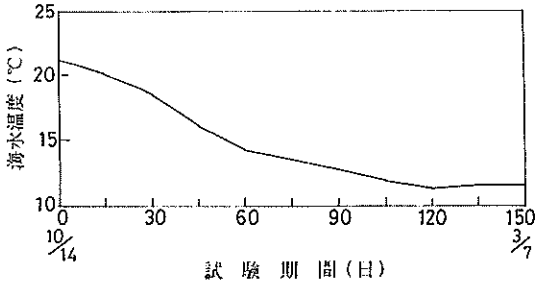


図-29 試験期間中の海水温度の経時変化

電流密度が $0.75\text{A}/\text{m}^2$ 以下では付着強度の有意な低下は見られない。また、通電を行った場合のNaClの添加、無添加による差もあまり見られない。しかし、電流密度が $1\text{A}/\text{m}^2$ で積算電流量が $2,250\text{A}\cdot\text{hr}/\text{m}^2$ および電流密度が $2\text{A}/\text{m}^2$ で積算電流量が $6,300\text{A}\cdot\text{hr}/\text{m}^2$ では若干、低下傾向が見られる。

高電流密度で電着通電することは、表-10や図-19に示すように析出する電着物Ca/Mg比が小さくなることが考えられるので、あまり高い電流密度で通電することは避けるべきである。

表-18 付着強度試験結果

供試体 No.	NaCl添加量 (kg/m ³)	電流密度 (A/m ²)	積算電流量 (A·h/m ²)	付着強度	
				平均値 (kgf/cm ²)	
1	0	0	0	93.1	88.1
2	0	0	0	83.2	
3	0	0	0	88.1	
4	0	0.5	1,596	76.7	77.8
5	0	0.5	3,061	78.8	
6	0	0.75	2,394	71.5	73.2
7	0	0.75	4,592	74.8	
8	0	1.0	1,517	85.3	
9	0	1.0	2,250	65.2	75.9
10	0	1.0	3,192	75.6	
11	0	1.0	6,122	77.3	
12	0	2.0	3,035	94.9	81.5
13	0	2.0	4,500	80.7	
14	0	2.0	6,383	68.9	
15	3	0	0	65.5	75.2
16	3	0	0	77.2	
17	3	0	0	80.9	
18	3	0	0	76.1	
19	3	0	0	76.1	
20	3	0.5	1,596	60.0	72.3
21	3	0.5	1,596	63.9	
22	3	0.5	3,061	93.1	
23	3	0.75	1,570	69.9	72.4
24	3	0.75	1,570	67.2	
25	3	0.75	2,394	66.3	
26	3	0.75	2,394	74.5	
27	3	0.75	4,592	84.3	

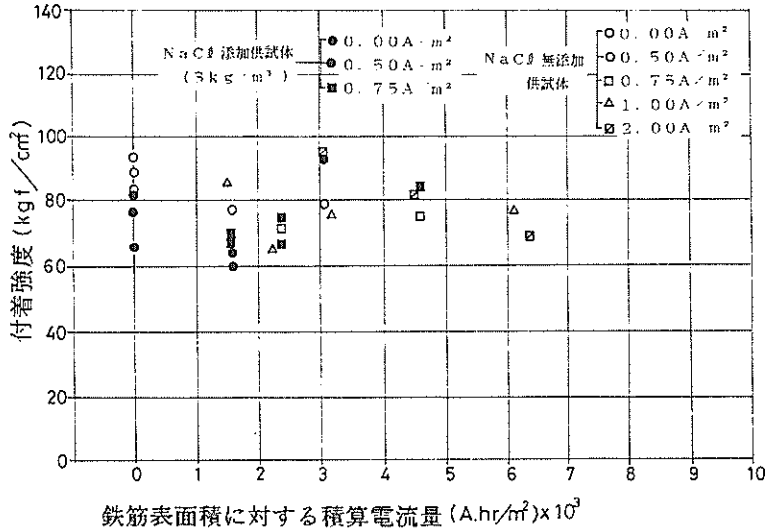


図-30 積算電流量と付着強度との関係

したがって、電着通電を行う場合には、 $0.75A \cdot hr/m^2$ 以下の電流密度で通電することが望ましいと考えられる。

3.9 接着力試験

電着物とコンクリートとの接着力の試験結果を表-19に示す。また、この試験に使用した供試体に析出した電着物の化学組成の分析結果を表-20に示す。

表-19より、接着力の平均値は $26.5kgf/cm^2$ 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に相当する¹¹⁾。したがって、この試験に適用した電流密度 $0.65A/m^2$ は実際に必要な硬さを持つ電着物を生成するためには適当な電流密度であると思われる。

表-19 電着物とコンクリートとの接着力試験結果

測点 No.	剥離数値 (kgf)	接着力 (kgf/cm²)	コンクリート表層部内での破断の割合(%)
A	445	27.8	45
B	445	27.8	44
C	480	30.0	70
D	420	26.3	67
E	450	28.1	87
F	300	18.8	73
平均	423	26.5	—

表-20 接着力試験に使用した供試体に析出した電着物の化学組成分析結果

分析項目	分析 (1)	分析 (2)
Ig. loss	33.3%	40.6%
CaCO ₃	60.7%	52.7%
Mg (OH) ₂	30.8%	36.3%
Ca/Mg	1.97	1.44

分析 (1): 通電停止時に分析







分析 (2): 通電停止後1年間海水中へ浸漬後分析

表-20より、この試験ではCa/Mg比が1.5~2程度であったことを考慮すると、表-10に示すケソン本体正常部におけるCa/Mg比が1.72という値は、そこに生成した電着物の硬さが適当なものであると考えられる。

接着試験における破断状況は、図-31に示すようにコンクリート表面での破断の割合が44~87%の範囲であったことから、電着物とコンクリートと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うかがえる。

4. 電着工法の適用方法

実構造物における試験結果および室内試験結果等により実構造物への電着工法の適用方法をまとめると以下の

測点 No.	破断状況
A	
B	
C	
D	
E	
F	

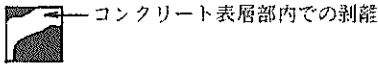


図-31 電着物とコンクリート表層部との接着力試験における破断状況

ようになる。

4.1 設計手順

図-32に設計手順に対するフロー図を示す。

- ①補修電流密度は、コンクリート構造物の劣化度により異なるが、通常コンクリート表面積当たり $0.5A/m^2$ を基準とし、これに補修面積を乗じて所要補修電流量を求める。ただし、補修構造物が補修対象範囲外に連続している場合は、補修対象範囲外の近接部の構造物表面に流入する電流量をロス電流量として考慮する必要がある。
- ②補修構造物に対向して海水中に設置される陽極の表面積は、所要補修電流に対して陽極材料の許容電流量に応じて定める。
- ③陽極の材料は、施工環境に適合したものを選択する。一般には鉄系、白金系のものである。耐久性、可搬性、加工性等に優れた白金族被覆チタンメッシュ電極が望ましい。
- ④補修構造物の形状や大きさに対して補修構造物表面の電流密度分布が均一になるように、陽極の配置や数量を決める。また、補修構造物周囲の電位勾配が海水中で $10V/m$ 以下となるように解析して決定する。
- ⑤陰極となる補修構造物の内部鉄筋への排流端子は、1箇所当たり $30\sim 60A$ 程度の排流電流となるように配置す

る。

⑥陰極および陽極の配線材料は、JIS規格に適合したもので、各電気回路の許容電流値が電気設備技術基準で定められた許容範囲以内のものを選定し、それぞれの陰極および陽極ごとにケーブルサイズを決定する。

⑦直流電源装置は、通産省電気設備基準第248条などに準じて設計するものとする。電圧は $60V$ 以下とする。また、直流電源装置は、潮位が変動しても常に一定電流を制御できる機能を備えたものとする。

4.2 施工手順

図-33に施工に対するフロー図を示す。図-34に電着工法の施工設備の構成を示す。

①補修構造物の調査および検査

補修構造物のひびわれの度合い（劣化度）やひびわれ箇所について外観観察を行うとともに、照合電極を用いて内部鉄筋の自然電位を測定する。また、補修構造物の表面の電着コーティングの効果を高めるために、ひびわれ箇所を中心に補修対象表面に付着している貝類等を除去する。

②マーキング

コンクリート構造物の配筋図面にに基づき、陰極となる補修構造物の内部鉄筋への排流装置の設置箇所にマーキングを行う。

③排流装置の設置

コンクリートの被り部分をコアリングして内部鉄筋を露出させ、内部鉄筋に丸鋼（通常 $\phi 22\sim 25mm$ 程度）を溶接して立ち上げる。

④配管工事

配管工事に使用する電線管は、硬質塩化ビニル電線管または厚鋼電線管を使用する。電線管が通路等を横断する場合にはさらに外部の荷重や衝撃に十分耐えられる構造のもので保護する。

⑤陽極の設備

電極装置は、設計図に基づき潮流や波浪等の海象条件に対して十分な重量構造もしくは係留構造のものを製作し、海水中または海底の所定の場所に設置する。なお、電極装置には、ダイバーが直接触れることのないよう電極の周りに非導電性の健固な防護ネットを予め取り付け、安全対策を施するものとする。

⑥直流電源装置の設置

直流電源装置は、設計図に基づき所定の位置に設置し、アンカーボルト等を用いて完全に固定する。なお、直流電源装置は電気設備技術基準に準拠し、第3種設備工事を施するものとする。

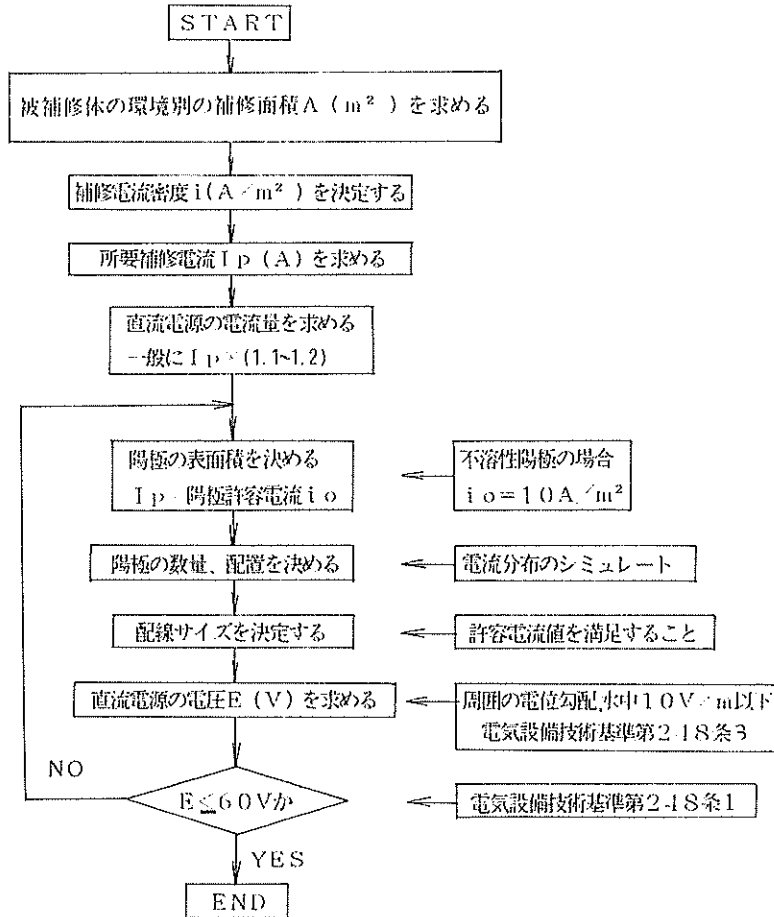


図-32 電着工法の設計手順フロー図

⑦配線工事

使用する電線は、JIS規格に適合した600Vビニル絶縁電線、クロロプレン外装ケーブル、ビニル外装ケーブル、ポリエチレン外装ケーブル等を使用する。また、電線の接続は接続箱内で行い、接続部は絶縁材等を使用して完全な水密処理を施すものとする。

⑧通電調整

直流電源装置の運転は、通電開始時においては定格の1/2程度の負荷で運転を行い、徐々に装置を調整し定格運転を行う。定格運転後、補修構造物の内部鉄筋の電位を測定し、所定の電流密度になるように通電電流を調整する。

⑨通電

通電開始後、直流電源装置の電流および電圧を自記記録計により収録するとともに、定期的に直流電源装置などの通電設備を点検し、積算電流量に応じて補修構造物

の鉄筋電位を測定する。

⑩検査

補修構造物の電流量が所定の積算電流量に達したのち竣工検査を行い、補修構造表面に析出した電着物の状況を観察する。また、必要に応じて補修構造物をモデル化した小型のコンクリートピースを利用して、電着物の組成や強度（硬度、接着力等）をはじめコンクリートの透水性等を試験分析する。

⑪設備の撤去

竣工検査が完了した後通電を停止し、直流電源装置、電極装置、通電ケーブル等の通電設備を撤去する。特に、排流装置の撤去については、内部鉄筋に溶接して取り付けられた丸鋼を取り除いた後、コアリングしたコンクリートの箇所をモルタルで復旧する。

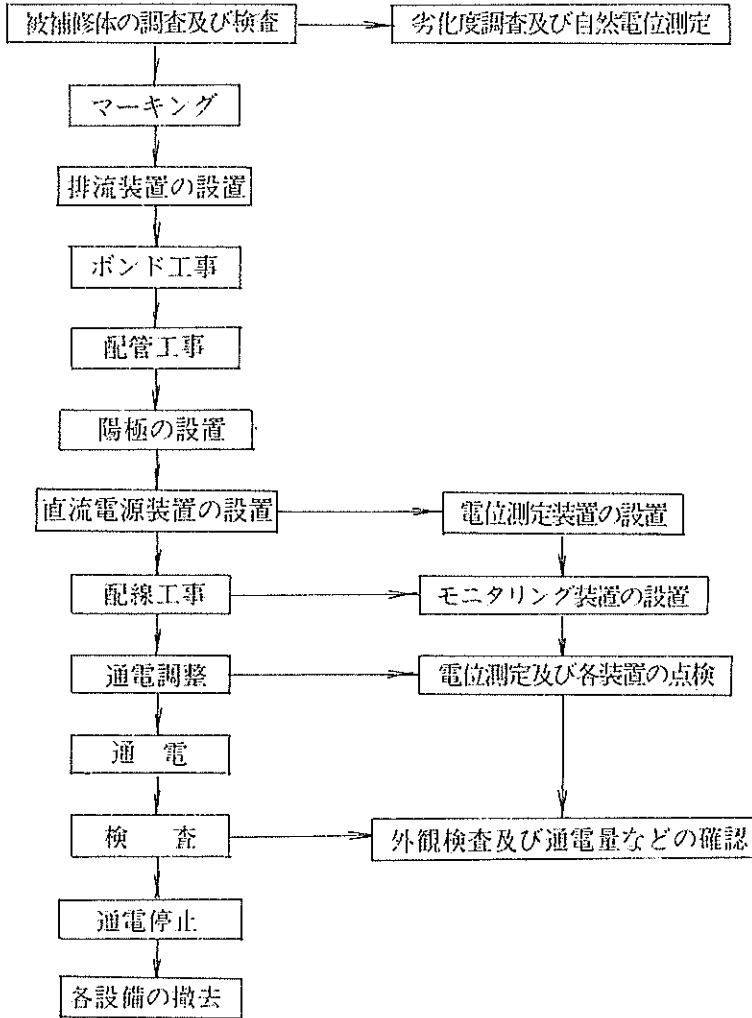


図-33 電着工法の施工手順フロー図

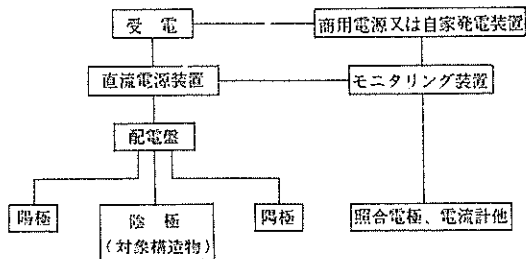


図-34 電着工法の施工設備の構成

5. 結 論

電着工法によりコンクリート構造物への補修効果や適用性を検討する目的のために、実構造物試験および室内試験を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

1) 電着物は、通電時間の増加とともに析出量が増加し、ケーソン本体の正常部の陽極に近い部分には平均1~2mmの厚さで析出した。一方、陽極から遠い部分での析出は平均1mm以下であった。このような電着物の析出厚さの違いは、陽極の配置による極間距離の差違により生じる電位分布の差によるものと思われる。

また、ひびわれ部には正常部に比べて早い時期から電着物の析出が認められた。

2) 電位測定結果より、電位の分布は陽極に近い部分は卑な値を示し、遠い部分では貴な値を示した。

また、電着物の析出分布と電位測定の分布を対比してみると、電位が卑の箇所ほど析出量が多い傾向を示した。

3) ひびわれ部には高電流密度が流れたため、析出した電着物は正常部および干満帯の柱部に析出した電着物よりも力学的強度は小さかった。したがって、このような箇所へは初期の電流密度を低く抑えるような適切な電流制御をする必要があることがわかった。

4) コンクリートの透水性は電着通電することにより低下し、海水中のコンクリートでは通電後3カ月で約1/8に、通電後5カ月では約1/40に、海水の浸漬時間の短い干満帯のコンクリートにおいても1/14にそれぞれ低下し、水密性の向上が認められた。

5) 表面に析出した電着物の空隙量は70mm³/g程度で内部コンクリートと大差なかったが、400Å以下の細孔半径が全体の80%強、50%細孔半径も150Åと細孔半径がより小さい方に位置しておりコンクリートに比べ非常に緻密であった。したがって、電着物はコンクリートの透水性の低下に寄与することが明らかになった。

6) 干満帯以上の部材への電着工法の適用については、コンクリート表面に海水の保持および置換ができていれば電着物の析出は可能であることが確認できた。したがって、海水を常時保持および置換できるような工夫を行うことにより干満帯部以上の部材への電着工法の適用も可能と考えられる。

7) ひびわれ発生箇所等の劣化部については通電開始後の早い時期から電着物の析出が認められていたこと、また、ダイバー等の目視による劣化調査では見過ごしていたひびわれ箇所も電着物の生成により発見出来たことより、本技術は劣化の程度の把握にも利用できるものと考

えられる。

8) 電着工法によりコンクリート中の塩化物イオン量の減少が認められ、鉄筋付近の塩化物イオン量は約50%に減少したことから、本工法はコンクリート中の塩化物イオンの低減方策としても適用できることがわかった。

9) 電着物とコンクリート表層部との接着力は26.5kgf/m²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はほぼ同じであった。

10) コンクリートと鉄筋の付着強度は、通電適用範囲内の電流密度(0.5~0.75A/m²程度)では付着強度の低下は見られなかった。

6. あとがき

今回の実験の主な目的としては、実海域での実際の構造物に電着工法を適用した場合に、電着物がどのように析出するかを確かめることと、電着工法を行うことによってコンクリートの品質がどのように改善されるかを確かめることであった。また、室内試験において、通電と付着強度との関係について検討した。ひびわれの発生している箇所における電着物はCa/Mg比が小さく強度の低いものであったことからみて、劣化度に応じて適正な通電条件の検討が必要と考えられる。

今後の課題としては、干満帯、飛沫帯への適正な施工法の確立について検討を行う必要があるものとする。

なお、本研究は、昭和63年10月より平成3年3月まで、(株)四国総合研究所および三井造船(株)からの受託研究として行ったものである。

最後に、本研究を行うにあたり、浮田和明氏(株)四国総合研究所)には本研究の総合的な計画の立案および取り纏めについてご協力いただいた。熊田 誠氏(三井造船(株))、多田東臣氏(株)四国総合研究所)には実験の計画および研究の技術的な助言をいただいた。宮崎芳明氏(三井造船(株))には現地での試験施工ならびに計測にご協力いただいた。また、第三港湾建設局工務第一課、神戸調査設計事務所ならびに松山港工事事務所の関係各位には現地実験の場所の提供と本研究を行うにあたり、有益なご教示を賜った。ここに、本研究にご協力頂いた関係各位に感謝の意を表する次第である。

7. 参考文献

1) 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および補修について、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集、V-233、PP.

504~505, 1987. 9.

2) 重松俊一, 横田 優, 熊田 誠, 三浦健蔵, 佐々木晴敏: 電着技術を利用した鉄筋コンクリート構造物の防食と補修, 第34回腐食防食討論会予稿集, C-308, PP. 223~226, 1987. 10.

3) 沿岸開発技術研究センター: 港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修に関する技術調査報告書, 1987. 9.

4) 例えば, 福沢秀刀: 電気防食法におけるエレクトロコーティングの効果, 防錆管理, Vol. 27, No. 10, 1983.

5) H. A. Humble: Corrosion, Vol. 4, No. 7, pp. 358, 1948.

6) 山里 清, 中村英雄, 熊田 誠, 宮崎芳明, 佐々木晴敏: 沖縄海域における電着構造物の製造とその応用, 第33回腐食防食討論会予稿集, C-303, pp. 372~375, 1985. 10.

7) Report of A Concrete Society Working Party Final draft: Permeability Testing of Site Concrete—A Review of Methods and Experience, Permeability

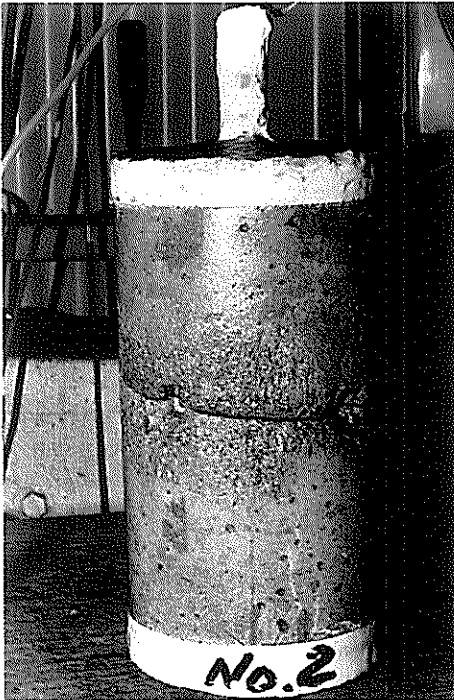
of Concrete and its control, Paper for a one-day Conference, London, 1985, 12.

8) R. D. Browne: Mechanisms of Corrosion of Steel in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structures. ACI SP-65, pp. 169~204, 1980, 8.

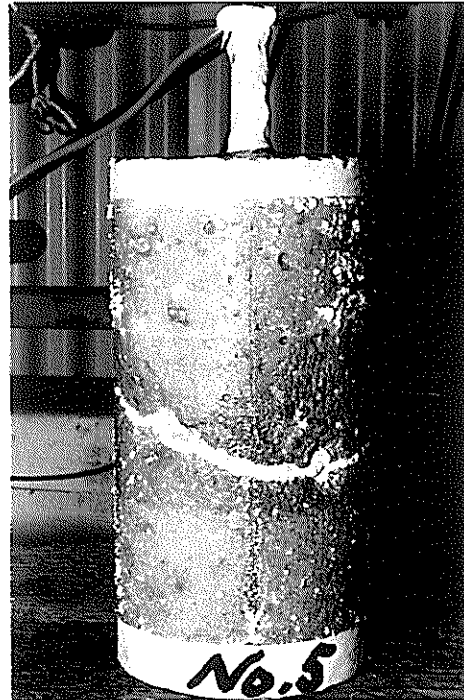
9) 武若耕司, 松本 進: 海洋環境下におけるコンクリート中の塩分浸透量推定に関する数値解析結果, 土木学会第42回年次学術講演概要集第5部, V-222, pp. 482~483, 1987.

10) 阿部正美, 福手 勤, 浜田秀則, 山本邦夫: 海水飛沫を受ける鉄筋コンクリート構造物への電気防食工法の適用に関する基礎的研究, 港湾技研資料, No. 965, pp. 1~14, 1990, 12.

11) 笠井芳夫, 長野基司, 佐藤孝一, 菅 一雅: 表層部コンクリートの品質判定方法に関する研究, 第11回コンクリート工学年次論文報告集, pp. 177~182, 1989.



通電前



通電後

写真-1 電着工法による電着物の析出状況 (室内試験)

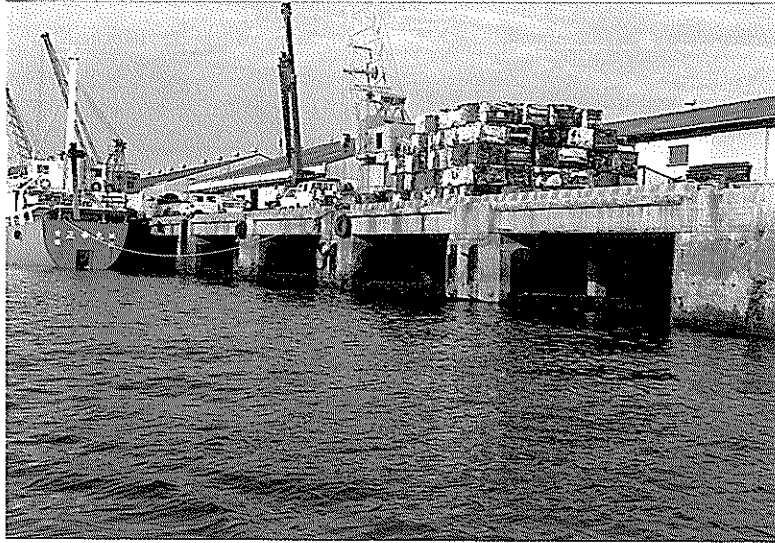


写真-2 実構造物試験対象岸壁

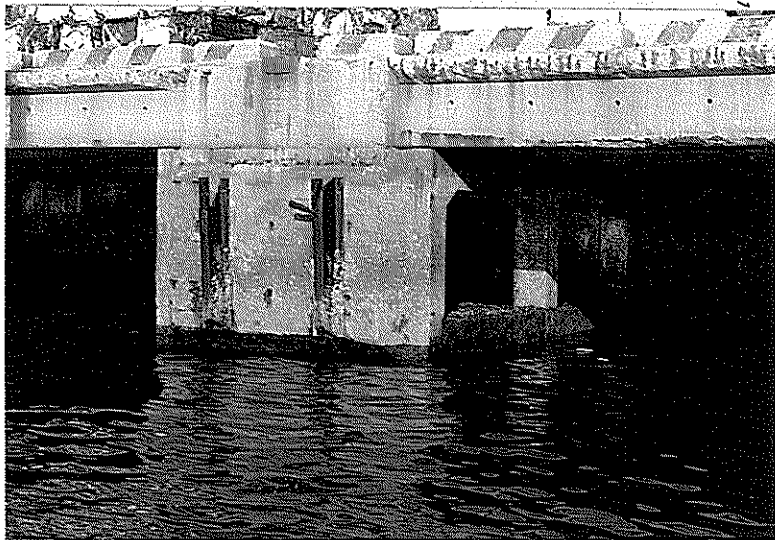
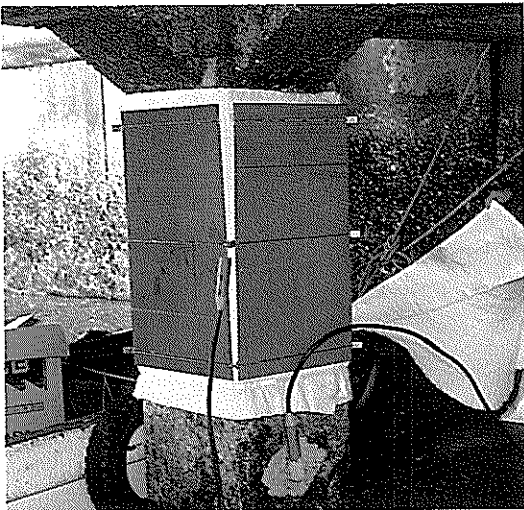


写真-3 試験対象ケーソン (No. 13)



通電前の干満帯柱部の外観



保水材（白）および陽極（黒）取付け状況



外装用ラバー、海水注水パイプ取付け状況

写真-4 干満帯柱部への電着施工状況

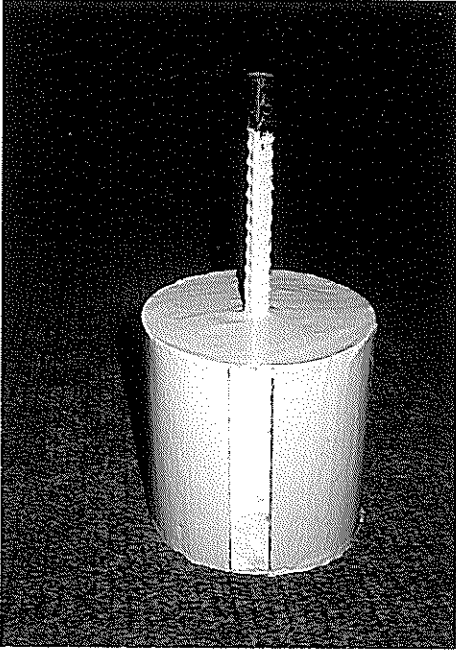


写真-5 付着強度試験に用いた供試体

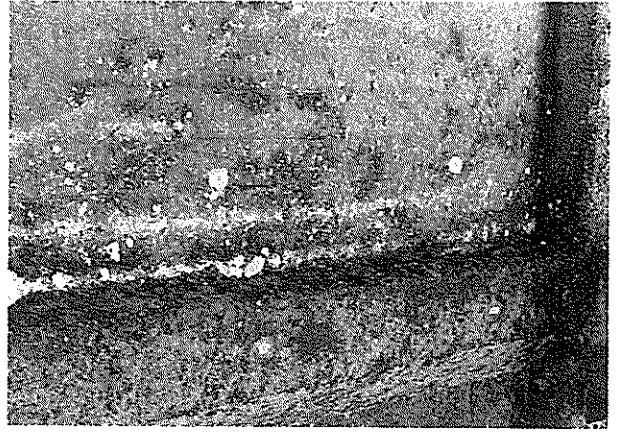
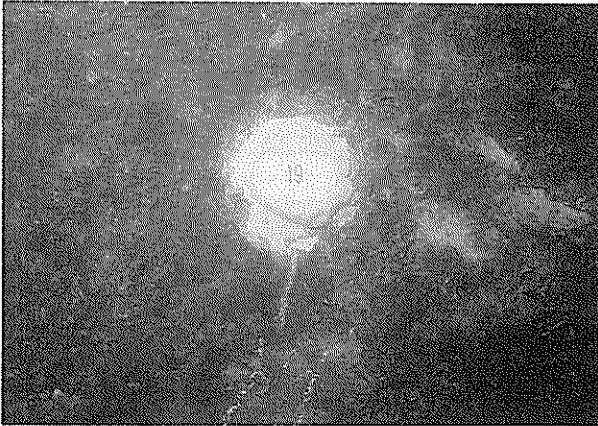
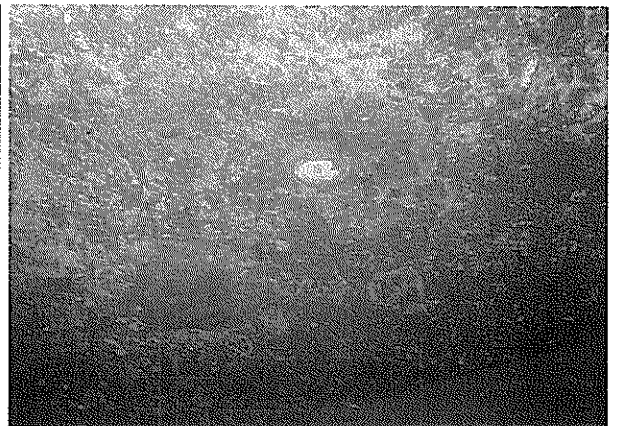


写真-7 電着物の帯状析出（陸側壁面+1.5m）
通電5か月



通電前

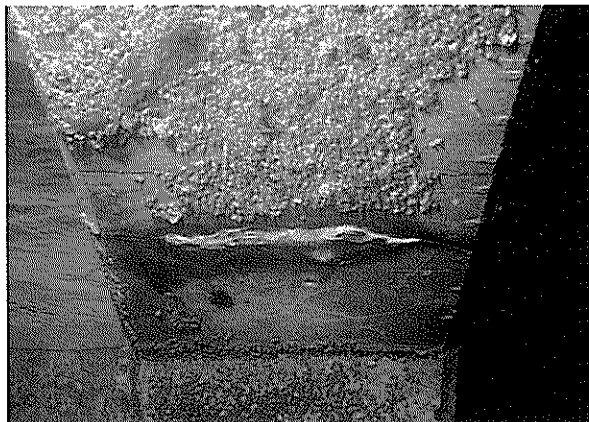


通電後

写真-6 ケーソン本体正常部への電着物の析出状況



通電前

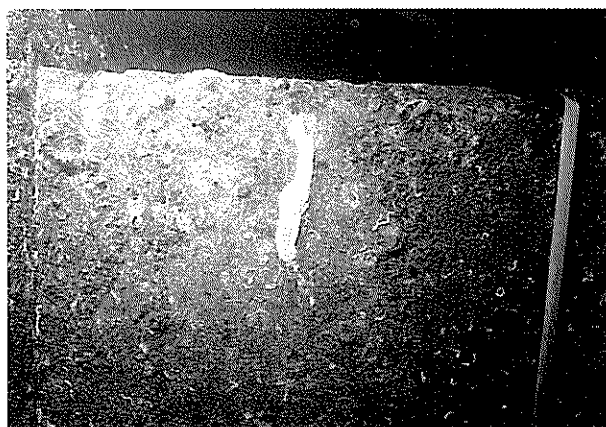


通電後

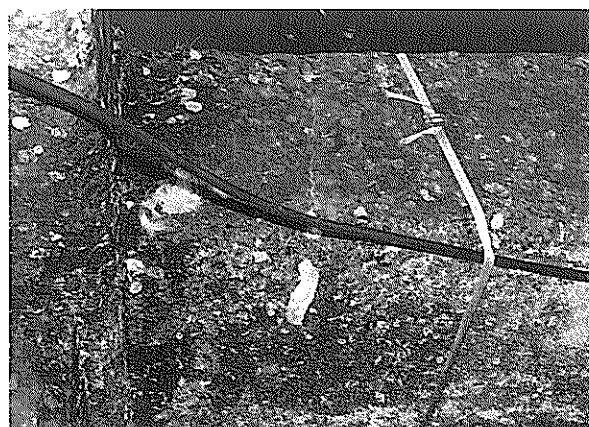
写真-8 ケーソン本体ひびわれ部への電着物の析出状況（南側梁+3.1m）



通電前



通電3か月後

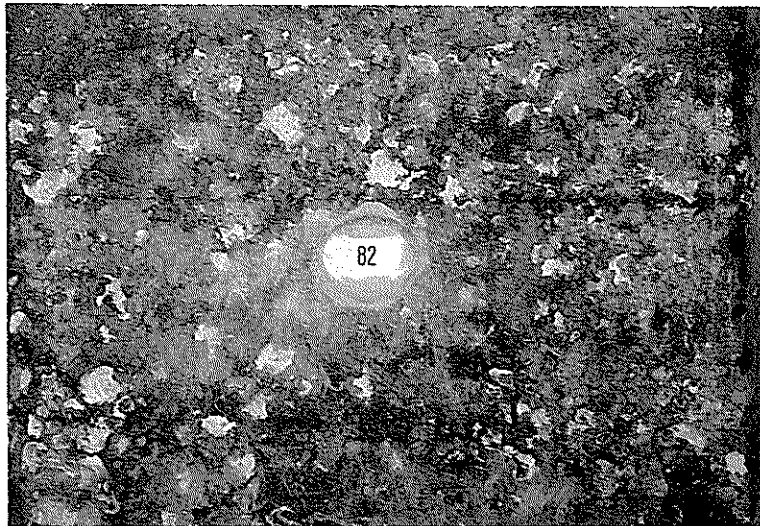


通電5か月後

写真-9 ケーソン本体ひびわれ部への電着物の析出状況（北側梁+1.5m）

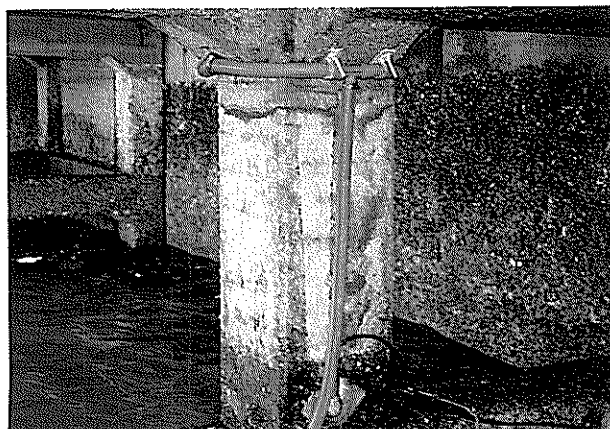


通電 3 か月後の外観



通電 3 か月後の表面状況

写真-10 千満帯柱部への電着物の析出状況（北側柱）



通電5か月後の外観



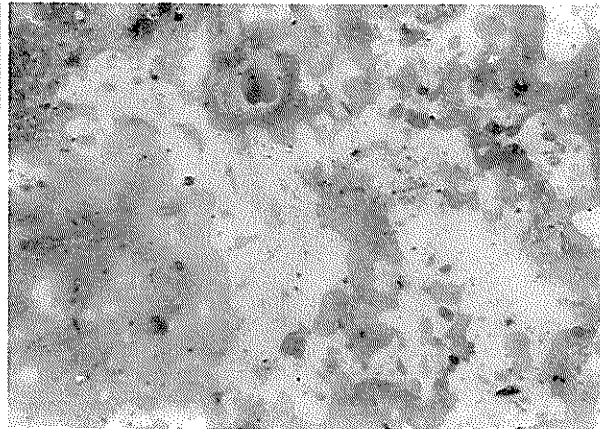
通電5か月後の表面状況

通電5か月後の電着物の析出状況

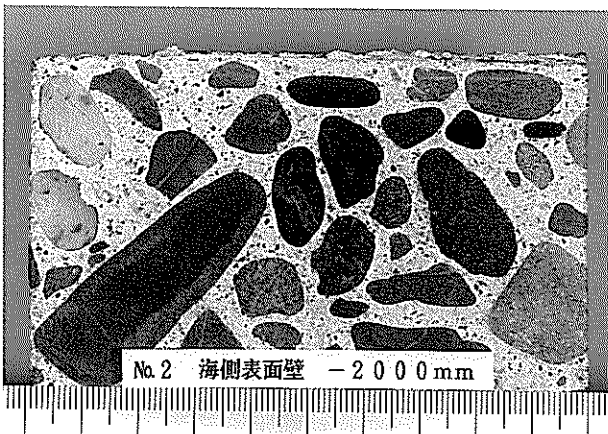
写真-11 干満帯柱部への電着物の析出状況（南側柱）



a) 表面外観



c) 表面拡大写真

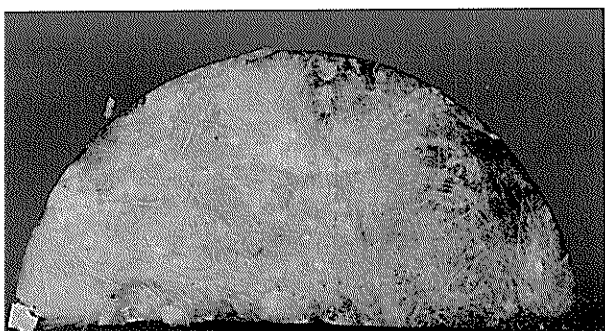


b) 断面外観

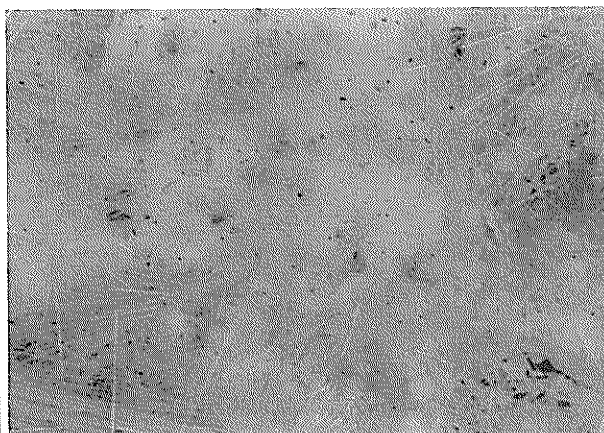


d) 断面拡大写真（表面付近）×20

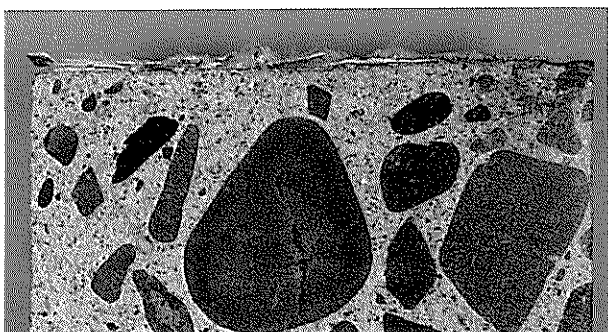
写真-12 正常部に析出した電着物の断面観察（海側壁面表側，-2m）通電5か月



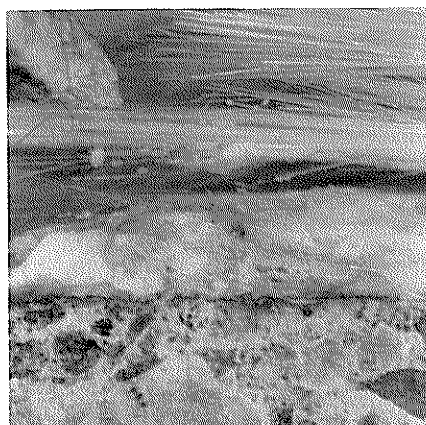
a) 表面外観



c) 表面拡大写真

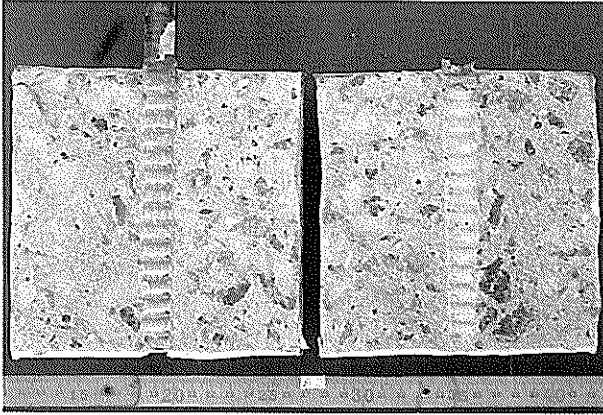


b) 断面外観

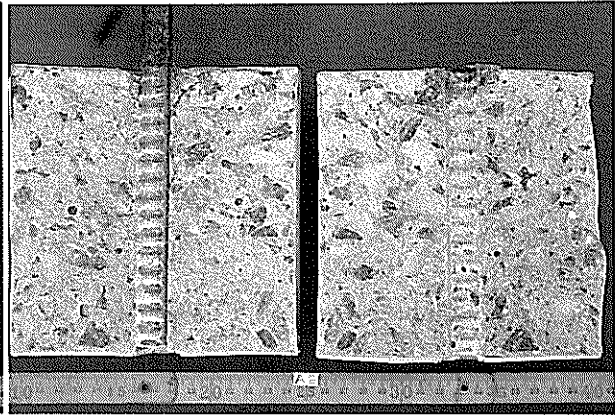


c) 断面拡大写真（表面付近）×20

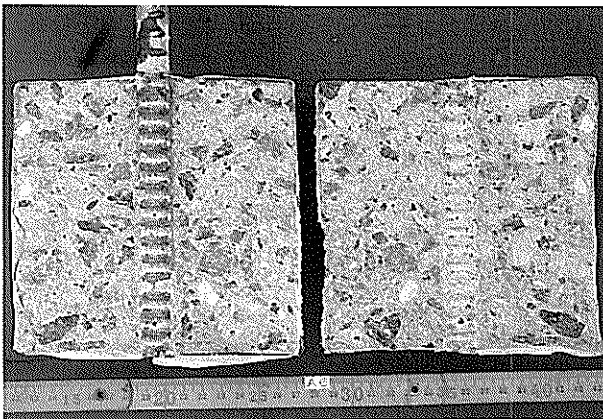
写真-13 干満帯柱部に析出した電着物の断面観察（北側柱部、+2.2m）通電5か月



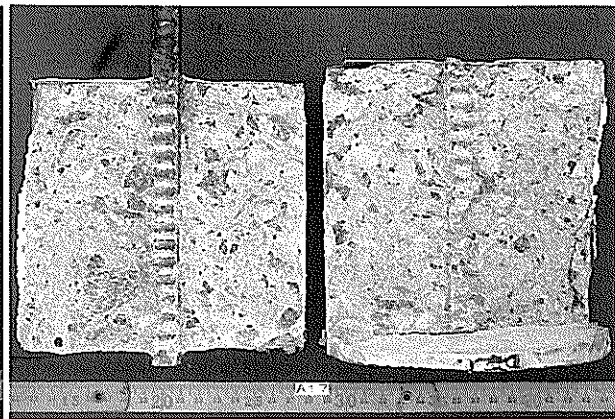
a) 無通電



c) 通電, 電流密度 $0.75\text{A}/\text{m}^2$



b) 通電, 電流密度 $0.5\text{A}/\text{m}^2$



d) 通電, 電流密度 $1.0\text{A}/\text{m}^2$

写真-14 付着強度試験後の破壊面の状況 (NaCl 無添加供試体)