

## 報告 補修を施した鉄筋コンクリートの電気化学的測定に関する研究

戸田 勝哉<sup>\*1</sup>・星野 富夫<sup>\*2</sup>・榊原 弘幸<sup>\*3</sup>・魚本 健人<sup>\*4</sup>

**要旨:**本研究は、塩害で劣化したコンクリート構造物に補修を施した後、再劣化が起こる原因の究明とその対策を提案することを目的として5年計画で開始したものである。本研究では、コンクリート中の塩化物イオン量、断面修復深さと範囲等の補修形態の種類を、補修時に想定される条件を変化させたコンクリート床版を模擬した試験体を製作し、海洋環境下および内陸環境下に暴露し、鉄筋の自然電位の変化、分極抵抗、コンクリート抵抗などの電気化学的測定を行い腐食状況の検討を試みた。その結果、塩分の有無、補修形態により電気化学的測定値に差が生じ、鉄筋腐食挙動を数値から推定することが可能であることを示した。

**キーワード:** 塩害、補修、再劣化、非破壊検査、電気化学的測定

### 1. はじめに

近年、劣化したコンクリート構造物の事例が増えるとともに、補修後比較的早期に再劣化に至る事例が報告されている。このような再劣化の進行は、補修材料の性能だけではなく、補修時の構造物の損傷度、補修方法や施工の適切さ等に大きく左右されると考えられるが、その原因やメカニズムについてはほとんど解明されていない。コンクリート中に塩化物イオンなどの劣化因子が進入すると、欠陥部分の鉄筋表面に腐食電流が流れ、電位差が生じ腐食が発生する。

近年、コンクリートの分野においても電気化学的測定が適用され、その優位性は認知され始めている<sup>1)</sup>。本研究では、電気化学的手法を用いて、補修した箇所周辺における腐食メカニズムの解明を目的として、主に自然電位・コンクリート抵抗・分極抵抗の測定を行った。

### 2. 実験概要

塩害の補修工法は多種多様な工法が提案され

ているが、本研究では、断面修復工と表面被覆工による補修工法に限定して検討を行う。

海洋暴露実験は、図1に示すように静岡県伊豆東海岸（伊豆海洋公園内：静岡県伊東市富戸841-1）に設置した暴露場において実施した。この海洋暴露場は波打ち際に設置されており、ここで暴露されている試験体は、写真1に示すように満潮時には波で洗われ、干潮時にも前

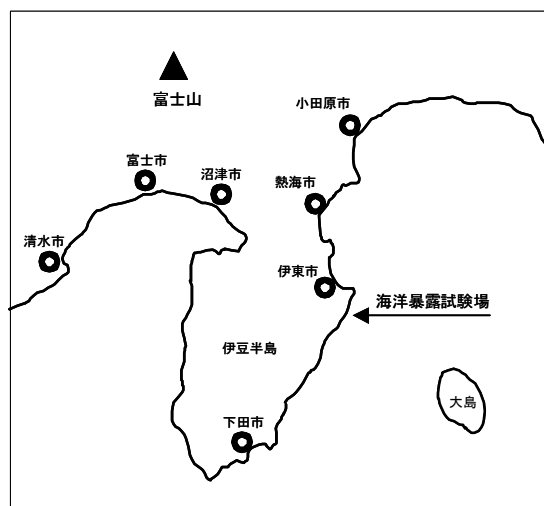


図 - 1 海洋暴露実験場の位置

\*1 石川島播磨重工業(株)基盤技術研究所構造研究部 工修 (正会員)

\*2 東京大学生産技術研究所 技術専門官 (正会員)

\*3 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所関連製品研究グループ主席研究員 (正会員)

\*4 東京大学生産技術研究所 教授 工博 (正会員)

面に岩礁があるため常時海水飛沫を受ける極めて厳しい腐食環境下にある。この暴露場の環境条件を把握するために、暴露場より10m程度内陸よりの岩場に設置した飛来塩分測定器（土研式）により、1993年9月～1996年8月まで測定した年間飛来塩分量は、約400～800Clmg/dm<sup>2</sup>であった。また、近接の網代測候所で記録された月平均気温の変動は、7～24であり、年間の平均気温は18.4であった<sup>2)</sup>。

内陸暴露実験は、写真2に示すように東京大学生産技術研究所・千葉実験所（千葉市稲毛区弥生町1-8）構内の一角に設置した暴露場において実施した。この場所は、海岸より約3km内陸に位置し、飛来塩分はほとんど無い。近接の千葉測候所で調べた1993年9月～1996年8月までの月平均気温の変動は、6～25であり、年間の平均気温は18.1であった。

## 2.1 試験体

### (1) コンクリート配合

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、細骨材として静岡県大井川水系陸砂を、粗骨材として最大寸法が20mmの東京都青海産硬質砂岩砕石を使用した。コンクリートの水セメント比は65%とし、混和剤に標準型AE減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体）ならびにAE剤（アルキルアリルスルホン酸化合物）を使用して、目標スランプ12cm、空気量4.5%に設定した。28日の圧縮強度は32～36N/mm<sup>2</sup>であった。

### (2) 鉄筋

鉄筋は、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」に規定するSD345、D19を使用し、図2に示すように加工し、加工時に鉄筋が腐食したり、傷を付けたりする影響を排除するために、折曲げ部両端にエポキシ樹脂を塗布した。

また、図中のL型鉄筋は電位測定試験体用に加工したものである。鉄筋の両端にはエポキシ樹脂を塗装した後、各々の鉄筋の質量（基準質量）を測定した。

### (3) 試験体形状



写真-1 海洋暴露実験場



写真-2 内陸暴露実験場

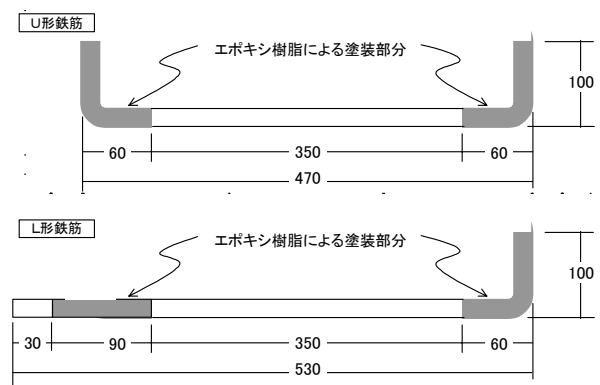


図-2 鉄筋の形状（単位 mm）

試験体の形状は150×150×530mmの矩形梁とし、鉄筋のかぶり厚は30mmとした。模擬はつり部の範囲、深さにより図3に示す様に、補修形態をそれぞれ変化させた6タイプの試験体を作成した。なお、電気化学的測定に使用した試験体は、鉄筋位置までのはつり深さを変化させたことを模擬した試験体B、D、E試験体である<sup>3)</sup>。

### (4) コンクリート試験体の作製

模擬はつり部には、発泡スチロールを設置し、鉄筋の配置は発泡スチロール、木製スペーサー、

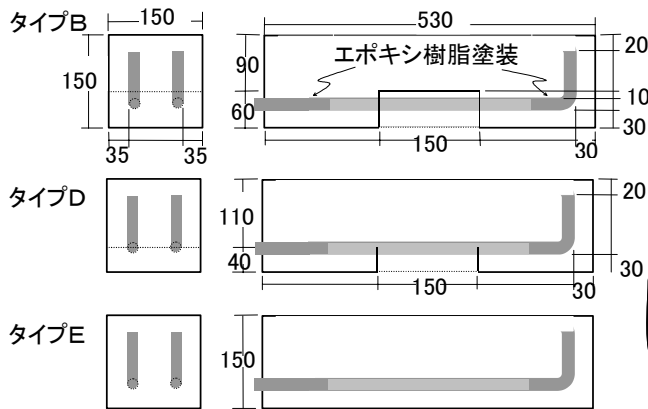


図 - 3 試験体のタイプ

水系を使用して所定の位置に収まるようにしてコンクリートを打設した。

### (5) 補修方法ならびに補修材料

模擬はつり部のコンクリート下地は、エアージェットタガネとワイヤーブラシ等を用い、表面の汚れやレイタンスを取り除き、圧搾空気で埃等を除去した。その後、ポリマーセメントペースト（ベオバ系粉体ポリマー）をコンクリート部分にのみプライマーとして塗布し、断面修復材は同種のポリマーを主成分とするポリマーセメントモルタルを吹き付け施工した。

所定の養生が終了した後、サンダーケレンを行い、エポキシ樹脂系プライマーを塗布して、エポキシ樹脂パテ材でパテ処理を行った。引き続き、柔軟型エポキシ樹脂中塗り剤を2層塗布し（乾燥膜厚 320  $\mu\text{m}$ ）、柔軟型ウレタン樹脂上塗り剤を最終的に1層（乾燥膜厚 30  $\mu\text{m}$ ）塗装した。なお、電位測定用試験体は電極を表面にあてるため、試験体上面は被覆しなかった。

## 2.2 電気化学的測定

自然電位等の測定は、図 4 に示すように端部から 2~3cm 出ている鉄筋にリード線を接続し、コンクリート打設面を開放面とした方向より測定した。測定間隔は、暴露開始時および暴露 0.5 年時では、図中、の 7.5cm 間隔で、暴露 1 年では 2.5cm 間隔で測定した。自然電位の測定に用いた照合電極は、飽和硫酸銅電極(CSE)および銀塩化銀電極(SSCE)の 2 種

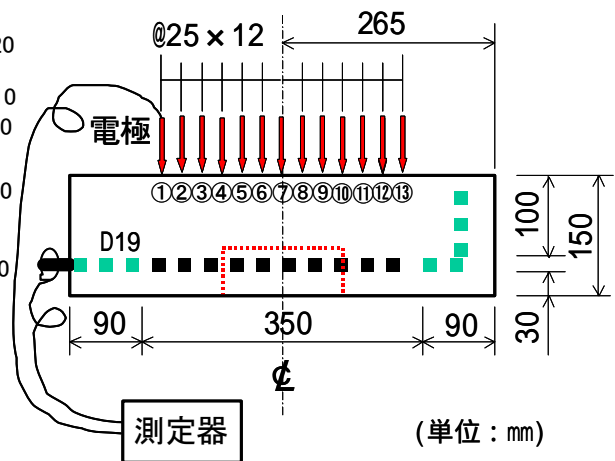


図 - 4 試験体の鉄筋の配置と測定位置



写真 - 3 電気化学的測定

類である。コンクリート抵抗、分極抵抗の測定に関しては、写真 3 に示すように携帯型腐食診断器（S 社製）を用いて行った。測定の際、対局センサーが大きいことから 7.5cm 間隔で測定した。なお、測定時には、前日より塗れウエスで飽水させて、表面乾燥飽水状態として測定した。なお、飽水状態の確認は目視および含水率計で測定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 照合電極による自然電位の検討

飽和硫酸銅電極および銀塩化銀電極の電位差を検討するために、海洋暴露試験体における D 試験体の暴露 1 年目の自然電位測定結果を図 5 に示す。飽和硫酸銅電極の電位が変化する箇所に対応し、銀塩化銀電極の電位も変化していることが分かる。本研究では、全ての箇所両者の電極の比較をしており、ほぼ 100~120mV

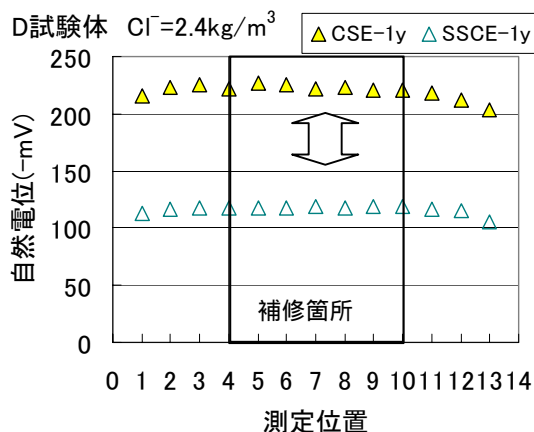


図 - 5 照合電極の電位差検討

の差で収まっているため今回の測定結果のデータへの信頼性は高いと思われる。

### 3.2 暴露試験体における経時変化

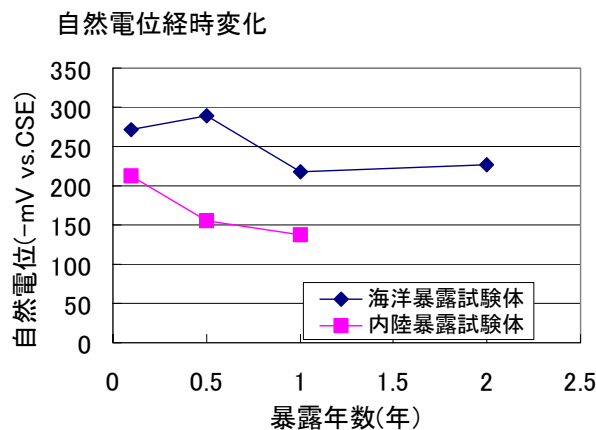
図 6 に B 試験体における梁中央の測定位置 7 での自然電位，コンクリート抵抗，分極抵抗の経時変化の状況を示す。ここで示すコンクリート抵抗と分極抵抗は，かぶりや面積を考慮していない見かけの値を用いている。

自然電位に関しては，海洋および内陸暴露の何れの場合にも，時間の経過と共に貴に変化しているが，内陸暴露試験体の方がより貴となっている。また，コンクリート抵抗は自然電位と対応し，暴露初期よりも年数を経た方が高くなる傾向を示した。この場合にも内陸暴露試験体の方が高い値を示している。一方，分極抵抗に関しても，コンクリート抵抗と同様な傾向を示した。

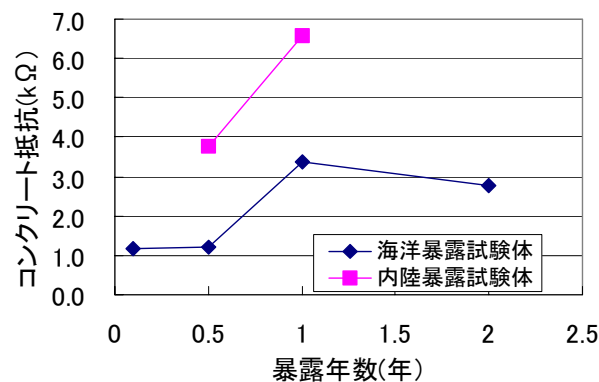
これらの電気化学的測定結果をみると，暴露 2 年程度のものであるが，暴露材令の経過に伴って，暴露初期よりも腐食しにくい傾向を示している。これらのことは，コンクリートが水和反応により緻密になったのが原因と考えられる。しかし，今後の材令の経過にともなう塩分の浸透などにより，電気化学的測定結果に影響すると推測されるので引き続き測定を行う。

### 3.3 コンクリート梁の自然電位

図 7 に補修形態を変えた場合の暴露 1 年に



### コンクリート抵抗経時変化



### 分極抵抗経時変化

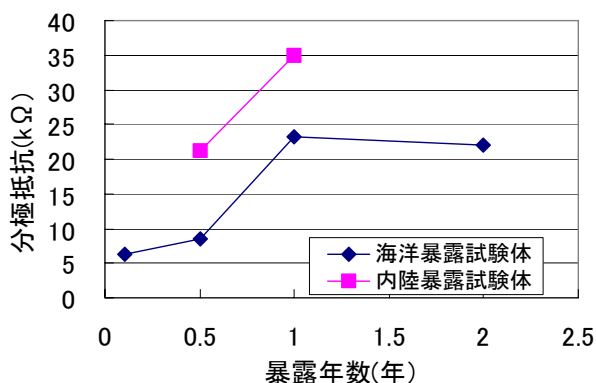


図 - 6 暴露試験体の電気化学的測定における経時変化(B 試験体  $Cl^- = 2.4kg/m^3$  測定位置 7)

における自然電位の測定結果を示す。海洋暴露については，補修形態による自然電位の差は小さいが，内陸暴露の試験体については塩分や補修形態の影響を大きく受け，塩化物イオンが  $2.4kg/m^3$  入った B 試験体の方が D 試験体よりも電位が卑になった。海洋暴露試験体の場合には，外部（解放してあるコンクリートの打設面側）

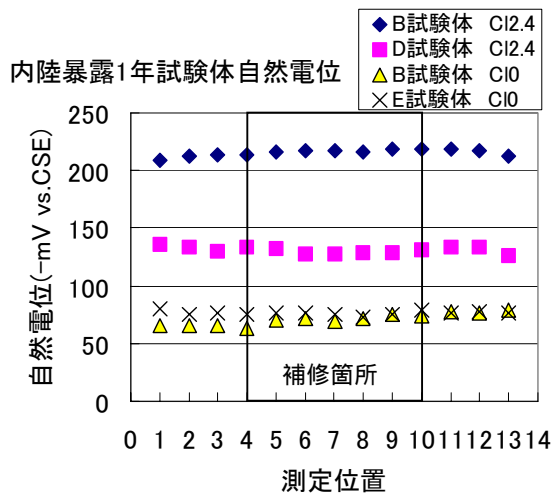
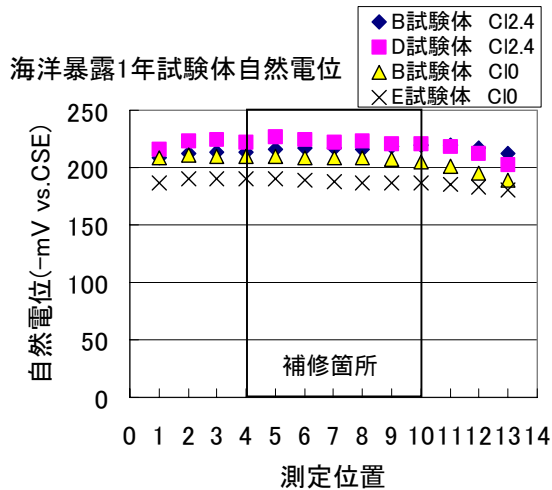


図 - 7 補修形態を変えたときの暴露 1 年における自然電位測定結果

より塩化物イオンがコンクリート内部に浸透したため、補修形態や塩分の有無による差が小さくなったものと考えられる。内陸暴露試験体の場合には、外部からの塩分の浸透がないことから、初期塩分の有無の影響が自然電位の差に現れたものと思われる。

### 3.4 コンクリート梁のコンクリート抵抗

図 8 に補修形態を変えたときの暴露 1 年におけるコンクリート抵抗の測定結果を示す。B 試験体では海洋暴露の方が値は低く、内陸暴露では高くなる傾向を示した。D 試験体および E 試験体ではその差は小さかった。また、海洋暴露の試験体では、補修形態による差は見られなかったが、内陸暴露については B 試験体でコンクリート抵抗が若干高くなる傾向を示した。自然電位と同様に、海洋暴露の場合にはコンクリ

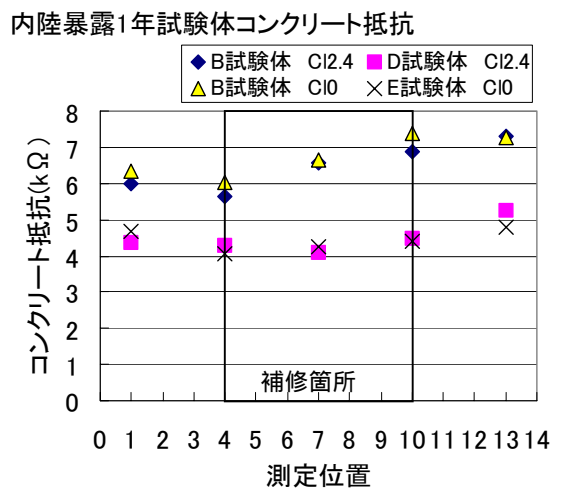
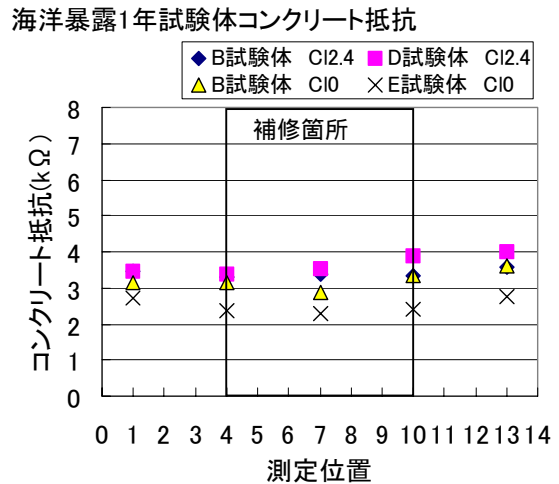


図 - 8 補修形態を変えたときの暴露 1 年におけるコンクリート抵抗測定結果

ート中へ海水の乾湿繰り返しで塩化物イオンが進入するため、補修形態の違いは現れにくく、コンクリート抵抗は小さくなる傾向にあることが分かった。

### 3.5 コンクリート梁中の鉄筋の分極抵抗

図 9 に補修形態を変えたときの暴露 1 年における分極抵抗の測定結果を示す。海洋暴露に関しては、B 試験体で初期塩分が入っていない試験体は、補修部分で分極抵抗が小さく未補修部分で分極抵抗が大きい傾向を示した。補修が施されていない E 試験体に関しても、若干ではあるが両端部で分極抵抗が大きくでている。内陸暴露に関しては、B 試験体の分極抵抗が大きく D 試験体の分極抵抗が最も小さくなった。

海洋暴露と内陸暴露の試験体で比較すると、両暴露環境下で D 試験体の分極抵抗が最も小さ

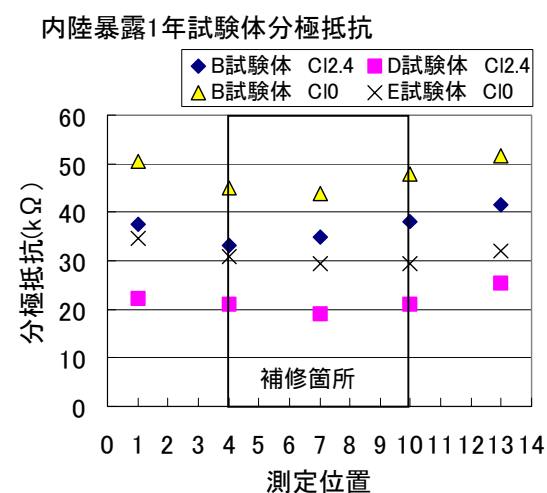
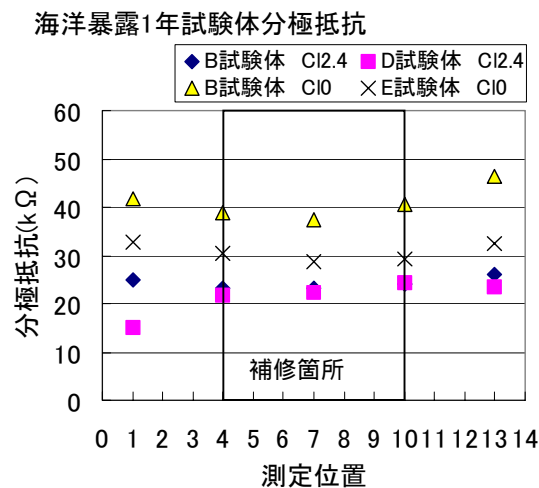


図 - 9 補修形態を変えたときの暴露1年における分極抵抗測定結果

く、B 試験体の塩分無しの分極抵抗が最も高いと言える。

#### 4. まとめ

今回は、飽和硫酸銅電極と銀塩化銀電極による自然電位の測定、コンクリート抵抗の測定、分極抵抗の測定等を行い、補修した箇所の腐食状況の解明を試みた。以下にまとめる。

- (1) 自然電位の測定に関しては、飽和硫酸銅電極と銀塩化銀電極の間に相関性があり、測定値の信頼性を確かめることができた。
- (2) 自然電位、コンクリート抵抗、分極抵抗を経時変化で追ってみると、数値は暴露初期で腐食を抑制する傾向を示した。これは、コンクリートが材齢の経過に伴って緻密になったためと考えられる。

(3) かぶり厚が 100mm と大きい場合でも、暴露環境、補修形態、塩化物イオンの差が自然電位、コンクリート抵抗、分極抵抗の測定値の値に現れているので、電気化学的測定が可能であることが分かった。しかし、自然電位の測定結果をみると、補修界面でのマクロセル腐食が軽微であることから、この現象を明確に検出することは出来なかった。

(4) 海洋暴露した場合には、コンクリートに塩化物イオンが大量に進入し、補修形態の違いが電気化学的測定に与える影響の差は、内陸暴露した場合よりも小さくなる。

#### 5. 終わりに

本試験は暴露 1 ~ 2 年目の結果であり、試験は現在も継続している。今後、さらに継続調査を行い、試験結果の報告を行う予定である。なお、本研究は、東京大学生産技術研究所 魚本研究室と以下に示す産学 18 団体との共同研究として行っているものである。

東急建設(株)、日本化成(株)、ショーボンド建設(株)、オリエンタル建設(株)、芝浦工業大学、コニシ(株)、太平洋マテリアル(株)、大日本塗料(株)、西松建設(株)、飛鳥建設(株)、佐藤工業(株)、ブリヂストン(株)、熊谷組(株)、(株)エヌエムビー、電気化学(株)、前田建設(株)。

#### 参考文献

- 1) コンクリート構造物における自然電位測定方法(JSCE-E601-2000), 2000
- 2) 星野富夫, 魚本健人, 守屋正裕: 海洋暴露環境の評価に関する検討, 土木学会年次学術講演概要集, V-336, pp.732-733, 1997
- 3) 宇野祐一, 魚本健人, 元売正美, 松田敏: 各種要因が補修後の再劣化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25 No.1, pp.1559-1564, 2003