

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

Vol.48    No.4    December 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 4 号 (Vol. 48, No. 4), 2009年12月 (December 2009)

## 目 次 (CONTENTS)

杭の軸直角方向抵抗性能を推定するための Chang のモデルに用いる地盤反力係数の新たな推定方法の提案 ..... 菊池喜昭.....	3
(Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile ..... Yoshiaki KIKUCHI)	
断面修復を施したコンクリート床版の鉄筋腐食性状に関する検討 ..... 加藤絵万・ 審良善和・ 岩波光保・ 横田弘.....	23
(Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching ..... Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA)	
水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得装置の開発 ..... 松本さゆり・ 片倉景義・ 吉住夏輝.....	53
(Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens ..... Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI)	
空港アスファルト舗装剥離の非破壊探査方法の提案 ..... 前川亮太・ 蘇凱・ 水上純一・ 坪川将丈.....	71
(Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers ..... Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA)	
水中鋼構造物の非接触式肉厚測定器の開発 ..... 吉住夏輝・ 松本さゆり・ 片倉景義.....	89
(Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure ..... Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA)	
流出油回収装置への蒸気エゼクタの応用 ..... 藤田勇・ 吉江宗生・ 竹崎健二.....	109
(Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery ..... Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI)	

## 断面修復を施したコンクリート床版の 鉄筋腐食性状に関する検討

加藤 絵万\*・審良 善和\*\*・岩波 光保\*\*\*・横田 弘\*\*\*\*

### 要 旨

塩害により劣化した鉄筋コンクリート (RC) 部材の一般的な補修工法のひとつである断面修復工法では、断面修復材内部の鉄筋の腐食は抑制されるが、断面修復材とコンクリートの界面近傍において鉄筋のマクロセル腐食が進行することがある。本研究では、塩化物イオン含有コンクリートで作製した試験体の 1/4 および 1/2 に部分断面修復を施した RC 床版におけるマクロセルの形成メカニズムについて実験的に検討を行った。約 2 年にわたって床版試験体中に埋設した分割鉄筋間の腐食電流を測定し、コンクリート-断面修復材間におけるマクロセル腐食電池の形成、鉄筋の交差部がマクロセル形成に与える影響、また、断面修復材中の鉄筋の腐食進行の可能性について考察した。その結果、主として、コンクリート-断面修復材境界部の鉄筋は、初期はカソードとして挙動するが、部材中の電気化学的バランスの変化により、境界部のコンクリート中の鉄筋がアノード化すること、コンクリート中の鉄筋交差部は二次元的な腐食電流の流入出により、初期に著しく腐食が進行すること、また、断面修復材中の鉄筋間に腐食電池が形成される可能性があることなどが分かった。

キーワード：床版，断面修復，マクロセル腐食，腐食電流，塩化物イオン

---

\* 地盤・構造部構造研究領域構造研究チーム 主任研究官  
\*\* 地盤・構造部構造研究領域材料研究チーム 研究官  
\*\*\* 地盤・構造部構造研究領域構造・材料研究チームリーダー  
\*\*\*\* 客員研究官 (北海道大学 教授)  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail:katoh-e@pari.go.jp

## **Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching**

**Ema KATO\***

**Yoshikazu AKIRA\*\***

**Mitsuyasu IWANAMI\*\*\***

**Hiroshi YOKOTA\*\*\*\***

### **Synopsis**

Partial patch repair is one of the most popular countermeasures for reinforced concrete (RC) member deteriorated by chloride attack. When partial patch is applied to a RC member, generally, macro-cell corrosion of embedded steel bar is easily generated at the joint between patched area and chloride-contaminated concrete, though the steel bars in the patched area can be prevented from corrosion. This study was carried out to make clear the behavior of macro-cell corrosion generated in RC slabs repaired by partial patching. Macro-cell corrosion current in patched test slabs were periodically measured for about 2 years using segmented steel bars. Based on the test results, the following topics were particularly discussed: 1) Mechanism of the macro-cell corrosion of steel bars in patched concrete, 2) The effect of intersections of steel bars on the behavior of macro-cell corrosion, and 3) The possibility of corrosion of steel bars in the patched area. Through the analysis of test results, the following conclusions were obtained: 1) The steel bar in chloride-contaminated concrete near the joint acted as macro-cell cathode in the early stage of exposure, however, the electrochemical incompatibility in the RC member made the steel bar anodic. 2) Corrosion currents at the intersections in chloride-contaminated concrete were remarkably large in the early stage of exposure. It was considered caused by the flow of a two-dimensional electrical current. 3) Steel bars in patched area had the possibility of macro-cell corrosion formation.

**Key Words:** RC slab, Partial patching, macro-cell corrosion, corrosion current, chloride ion

---

\* Senior Researcher, Structural Mechanics Group, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Researcher, Materials Group, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\*\* Head of Structural Mechanics and Materials Group, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\*\*\* Visiting Senior Researcher (Professor, Hokkaido University)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:katoh-e@pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	23
1. はじめに .....	27
2. コンクリート中の鉄筋の腐食機構 .....	27
3. 検討の方法 .....	28
3.1 試験体の概要および試験方法 .....	28
3.2 腐食電流密度の測定方法 .....	30
4. 床版試験体の鉄筋腐食状況 .....	30
4.1 鉄筋要素の腐食状況の実測値 .....	30
4.2 各床版試験体の腐食状況の比較 .....	32
4.3 腐食量の実測値と推定値の比較 .....	33
4.4 各床版試験体におけるマクロセル形成の状況 .....	33
5. 部分断面修復を施した床版におけるマクロセル形成に関する検討 .....	37
5.1 コンクリートおよび断面修復材中の鉄筋の腐食性状に関する電気化学的検討 .....	37
5.2 最大腐食電流密度の変化 .....	39
5.3 コンクリートー断面修復材境界部における腐食電流密度の変化 .....	40
5.4 鉄筋の交差部における腐食電流密度の変化 .....	41
6. まとめ .....	43
7. おわりに .....	43
参考文献 .....	43
付録 .....	45



## 1. はじめに

海洋環境下に設置される鉄筋コンクリート（RC）構造物では、陸上のRC構造物と比較して劣化の進行がきわめて速い。特に、栈橋上部工は波浪や海水飛沫等の作用により、鉄筋コンクリート中に塩化物イオンが浸透しやすいだけでなく、水や酸素の供給量も多いことから、塩害による劣化の進行速度が非常に大きいことが知られている。

著者らは、ライフサイクルコストを最適化することで港湾施設の効率的な維持管理を達成するための手法、すなわち、ライフサイクルマネジメント（LCM）の概念に基づく維持管理を提案している<sup>1),2)</sup>。LCMの観点からは、定期的な点検診断に基づいて評価された部位・部材の劣化・変状程度に応じて、適切な補修・補強等の対策を実施し、予定供用期間中の部位・部材の要求性能を確保することが重要である。しかし、実際は、対策後に部位・部材の再劣化が生じた事例が少なからず報告されている<sup>3,4)</sup>。

塩害により劣化したRC部材の最も一般的な補修工法のひとつである断面修復工法については、断面修復材内部の鉄筋の腐食は抑制されるが、断面修復材と母材コンクリートの界面近傍において、鉄筋腐食が進行することが指摘されている<sup>5),6)</sup>。これは、断面修復材と母材コンクリートの界面近傍に生じるマクロセル腐食によるものであることが知られており、その発生メカニズムや影響要因については、長滝ら<sup>7),8)</sup>や守分ら<sup>9)</sup>の研究に代表されるように、これまで多々研究されている。これらの既往の研究によれば、断面修復を施したRC部材のマクロセル腐食の発生は、主として、断面修復材と母材コンクリートの含有塩化物イオン濃度差や導電性の差異、また、断面修復材と母材コンクリートの界面における腐食因子の透過抵抗性の低下に起因する。したがって、断面修復による補修を実構造部材に施す場合は、予定供用期間中のマクロセル腐食の発生の可能性を考慮しながら最適な補修範囲を決定し、断面修復材と母材との一体性を確実にすることが重要である。

既往の研究<sup>7)~9)</sup>では、単純形状のRC試験体を用いて補修後早期におけるマクロセル腐食の発生機構について検討している。しかし、実際のRC部材の補修後の供用期間を考慮すれば、長期的なマクロセル腐食の発生の傾向についても検討する必要がある。また、著者らが行った栈橋上部工の補修事例調査によれば、応急処置的に部材のかぶり剥落部分にのみ断面修復を施した例が、特に床版において多数見られた（写真-1）。このことから、本研究



写真-1 栈橋上部工床版の断面修復の一例

では、栈橋上部工床版を対象として、部分断面修復が、部材中の鉄筋腐食性状に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。多くの既往の研究では、部分断面修復を施したRCはり部材の補修後早期における鉄筋の腐食性状を検討しているが、本研究では、格子状に鉄筋を配置したRC床版の部分断面修復による長期的なマクロセル腐食の発生機構について検討する。本研究では、塩化物イオン含有コンクリートを母材として、試験体の1/4および1/2の範囲にポリマーセメントモルタルによる部分断面修復を施した床版試験体を作製し、部材中に発生するマクロセル電流密度の変化を約2年にわたって把握した。測定結果を基として、部分断面修復を施した床版におけるマクロセルの形成とその経時変化について、メカニズムの解明を試みるものである。

## 2. コンクリート中の鉄筋の腐食機構<sup>10)</sup>

一般に、コンクリート中のpHは12程度であるため、コンクリート中の鉄筋は腐食しないと言われている。鉄筋表面には、鉄イオンが金属鉄に密着したままで酸化された不動態皮膜と呼ばれる薄い酸化膜が形成されるため、腐食速度は著しく低下することになる。しかし、塩素を含む溶液が鉄筋表面に存在すると不動態皮膜が破壊され、腐食が進行することとなる。鉄の腐食反応は式(1)および式(2)で表すことができ、式(1)はアノード反応、式(2)はカソード反応とよばれる。



鉄筋のある部分で不動態皮膜が破壊されると、不動態皮膜が破壊された部分と存在する部分にアノードとカソードが生じ、腐食電池が形成される。腐食機構は、アノードとカソードの距離の大小によって、ミクロセル腐食およびマクロセル腐食に分類される。

ミクロセル腐食は比較的均質な溶媒中にある金属表面

に生じる。ミクロセル腐食においては、アノードとカソードの分布状態がマクロ的に均一であり、腐食状態もマクロ的に均一とみなすことができる。

マクロセル腐食は、アノードとカソードの距離が比較的大きな場合に生じ、鉄筋表面あるいは溶媒（コンクリート）中にマクロ的な不均一性がある場合に形成される。マクロセル腐食には、不均一性の原因により、大きく分けて濃淡電池および活性-不動態電池がある。

濃淡電池は、コンクリート中のpH、塩化物イオン濃度、あるいは酸素濃度が部分的に異なる場合に生じる。pHあるいは酸素濃度が低い部分、あるいは塩化物イオン濃度が高い部分がアノードになりやすい。

後者の活性-不動態電池では、例えば、ひび割れ等の影響によってコンクリート中の塩化物イオン濃度あるいは酸素濃度の分布が特に不均一な場合、鉄筋のある部分には不動態皮膜が存在し、他の部分には存在しない、つまり活性化していることが考えられる。活性-不動態電池では、活性部分の不動態部分に対する面積が小さいほど、活性部分の腐食進行は速くなるといわれている。

本研究では、部分断面修復を施した床版試験体中の鉄筋のマクロセル形成について検討する。部分断面修復を施した部材の場合、断面修復による部材中の塩化物イオン濃度の不均一化、境界部（打継目）からの腐食因子の侵入、断面修復材中の鉄筋の再不動態化の状態が問題となることが予見される。

### 3. 検討の方法

#### 3.1 試験体の概要および試験方法

##### (1) 床版試験体の概要

床版試験体の概要を図-1に示す。床版試験体の断面修復範囲が部材中の鉄筋腐食性状に及ぼす影響を把握するため、試験体の1/4および1/2に断面修復を施した試験体を作製した。また、比較のため、未補修を想定した床版試験体もあわせて作製した。

母材コンクリートの配合を表-1に示す。母材コンクリートの配合は、港湾構造物の旧設計基準<sup>11)</sup>における水セメント比の上限値55%を基準として決定した。また、実際の栈橋上部工における断面修復の適用時期を考慮して、コンクリート中に4.0 kg/m<sup>3</sup>の塩化物イオンを予め混入した。これは、供用30~40年が経過した既存の栈橋上部工の目視点検により劣化度<sup>1)</sup> c および b と判定されたはりおよび床版の下段鉄筋位置におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度の平均値とほぼ等しい<sup>12)</sup>。図-2に母材コンクリートへの塩化物イオン混入量決定の根拠とした

コンクリート中の塩化物イオン濃度（計54データ）のヒストグラムを示す。なお、これまでの栈橋上部工の補修実績調査<sup>13)</sup>、および著者らが構築した栈橋のLCMシステム<sup>14)</sup>によれば、劣化度 c および b と判定された部材の補修工法として、部分断面修復（文献13および14では、小断面修復と記載）を適用することは一般的である。

母材コンクリートは、断面修復材充填部以外の試験体の3/4および1/2に打設し、湿空養生を行った。養生14日後に打継面をワイヤーブラシで清掃した後、栈橋上部工の断面修復として一般的に用いられている無機系ポリマーセメントモルタルを試験体の1/4（300×300×100 mm）、および1/2（600×300×100 mm）に充填した。断面修復後は、14日間の湿空養生を行った。

床版試験体の各部位におけるマクロセル腐食電流密度を把握するため、試験体内部にはφ13 mm、長さ20 mmのみがき丸鋼を計72要素、13 mm×13 mm×13 mmの角鋼を計4要素埋め込んだ。各鉄筋要素の両端部にはリード線をハンダ付けし、それぞれの端部から約5 mmをエポキシ樹脂により被覆した<sup>15)</sup>。

図-3に鉄筋要素の接合の概要を示す。床版試験体は、丸鋼18要素からなる4本の鉄筋が格子状に配置され、各鉄筋の交点が角鋼で繋がれた形状とした。鉄筋要素は隣合う要素とリード線および10Ωのシャント抵抗により接続され、全ての鉄筋要素が試験体内部で電氣的に接続されている状態である。実際の床版では、鉄筋の交差部が存在する。大即ら<sup>16)</sup>はRCはりの主筋とスターラップの交差部の腐食性状に関して検討しており、この箇所ではマクロセル腐食が進行しやすく、主筋と比較するとスターラップのかぶりは小さいため、コンクリート中への腐食因子の侵入の影響を受けやすいことがひとつの要因であると述べている。本研究では、各鉄筋要素のかぶりの違いによる影響を排除することを目的として、丸鋼の直径と角鋼の一辺の寸法を合わせ、角鋼を交差部として各鉄筋要素を接合した。

鉄筋要素の自然電位の測定のため、1本の鉄筋と見なせる鉄筋要素の接合体の中央に酸化イリジウム電極（幅13 mm、長さ30 mm、厚さ1 mm）を埋め込んだ。鉄筋要素と電極の距離はおおよそ10 mmとした。

また、床版試験体にはFRP補強材（非導電性）を格子状に4本埋め込み、試験体の強度を確保した。

##### (2) 暴露試験

床版試験体の暴露試験の状況を写真-2に示す。床版試験体は、1週間毎に海水への浸漬と乾燥を繰り返す屋内暴露を22ヶ月間実施した。環境温度および湿度の調整は行わなかったため、試験環境は久里浜湾近郊の屋外環境に



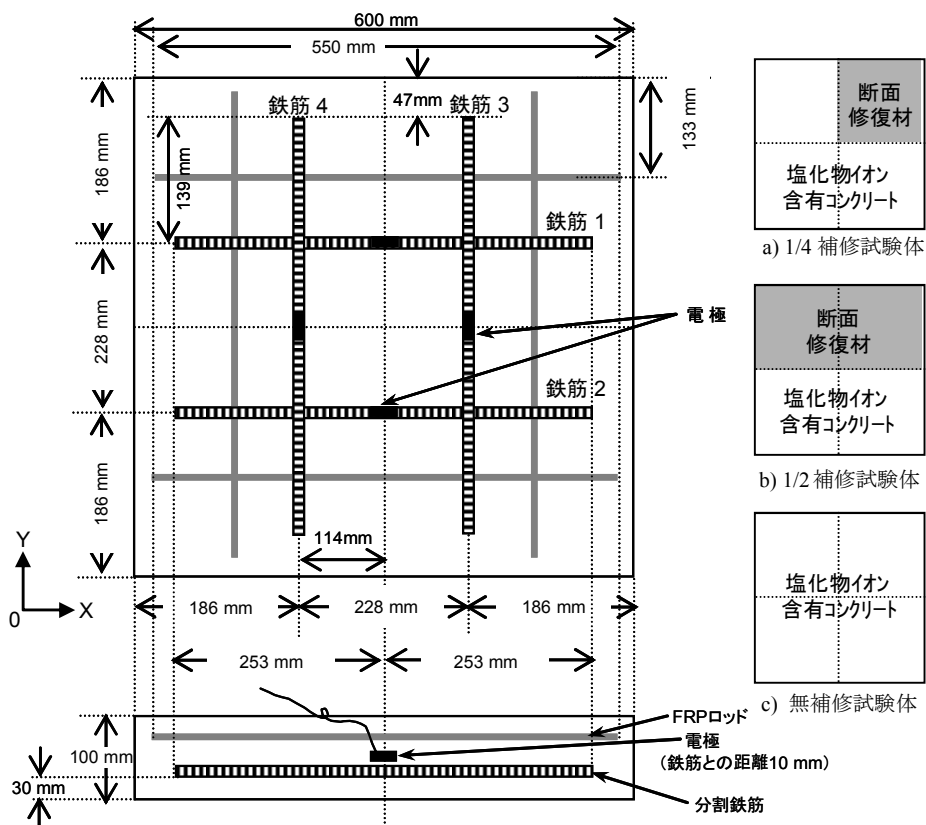


図-1 床版試験体の概要

表-1 母材コンクリートの配合と試験結果

配合										試験結果		
W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤 (C×%)	AE 剤 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
			W	C	S	G	Cl <sup>-</sup>					
55	44	4.5	150	273	822	1087	4	0.3	0.3	9.0	5.3	19.4

W: 水道水, C: 普通ポルトランドセメント, S: 君津産山砂, G: 北斗産碎石, Cl<sup>-</sup>: 塩化物イオン

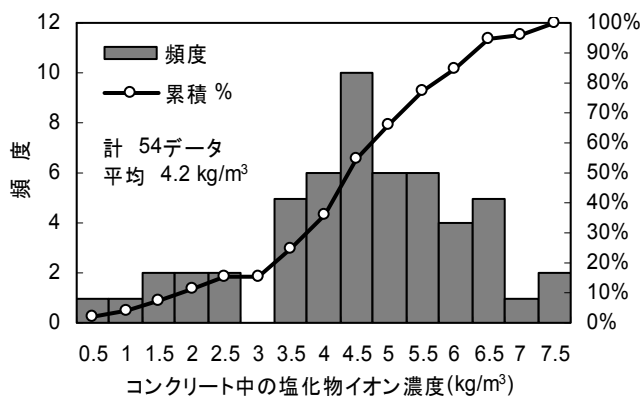


図-2 栈橋上部工下段鉄筋位置におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度

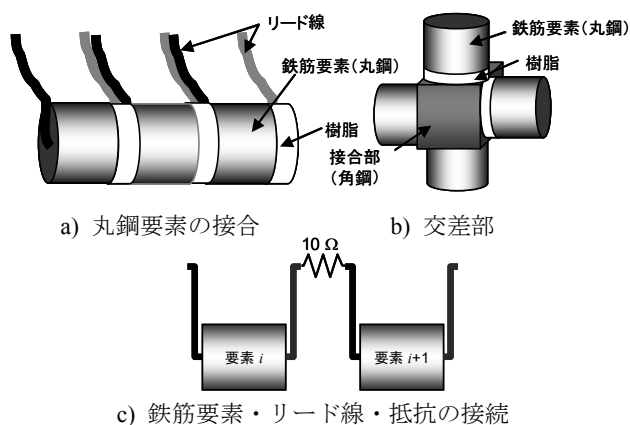


図-3 鉄筋要素の接合



写真-2 暴露試験の状況

ほぼ近い。海水への浸漬は、床版試験体上面から出したリード線の劣化とリード線取出し部から試験体への海水の流入を防ぐため、試験体下面から約 85 mm の高さまでとした。

### (3) 鉄筋要素の腐食性状の把握

暴露22ヶ月後、各床版試験体の鉄筋要素をはつり出し、鉄筋要素の腐食面積率と腐食量を測定した。なお、本研究で用いた床版試験体では、いずれも鉄筋要素の腐食によるコンクリートおよび断面修復材のひび割れの発生は認められなかった。

#### a) 鉄筋要素の腐食面積率の測定

ハンダおよびエポキシ樹脂付着面（丸鋼では両端部、角鋼では4側面）を除いた各鉄筋要素の表面について、目視で発錆が確認された箇所を透明フィルムに写し取り、腐食面積を測定した。腐食面積率の算定に際しては、丸鋼の長さは各鉄筋要素の長さとし、丸鋼の直径および角鋼の一辺については全て 13 mm として取り扱った。なお、床版試験体の端部に位置する鉄筋要素 8 個については、試験体製作時の鉄筋要素の固定治具としての役割を兼ねており、腐食面積率の正確な測定が困難であったため、測定を省略した。

#### b) 鉄筋要素の腐食量の測定

エポキシ樹脂およびハンダを取り除いた鉄筋要素を、60℃の10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液へ約1日浸漬し、腐食生成物を除去した。本研究では、発錆が目視で確認されなかった鉄筋要素については、健全な鉄筋であると判断し、腐食量を 0.0 mg/cm<sup>2</sup> と評価した。除錆した鉄筋要素と健全と判断された鉄筋要素の単位表面積当たりの質量から、各鉄筋要素の腐食量を算出した。なお、床版試験体の端部に位置する鉄筋要素 8 個については、腐食面積率測定と同様の理由により測定を省略した。

## 3.2 腐食電流密度の測定方法

鉄の腐食過程では、アノードからカソードへ電子が受

け渡されるため、電流はカソードからアノードへと流れる。分割鉄筋は、この電流を直接測定できる方法として提案されており、各鉄筋要素間に流れる電流を測定することにより、床版試験体内部で形成されたマクロセル腐食電池の腐食電流密度分布を把握できる<sup>7), 10)</sup>。本研究では、各鉄筋要素の表面積が異なるため、式(3)により各要素のマクロセル腐食電流密度を計算した。

$$a_i = \frac{I_{i,i+1} - I_{i-1,i}}{S_i} \quad (3)$$

ここに、 $a_i$ ：鉄筋要素  $i$  のマクロセル腐食電流密度 (μA/cm<sup>2</sup>)、 $I_{i,i+1}$ 、 $I_{i-1,i}$ ：鉄筋要素  $i$  から  $i+1$  および  $i-1$  から  $i$  に流れる腐食電流 (μA)、 $S_i$ ：鉄筋要素  $i$  の表面積 (cm<sup>2</sup>)、である。

本研究では、式(3)により算出されたマクロセル腐食電流密度の正負により、腐食電流密度をアノード電流密度あるいはカソード電流密度に分類し、以降の議論を進めることとした。式(3)で、アノード電流密度は(-)、カソード電流密度は(+)として算出される。

アノード電流密度が算出されれば、Faraday の法則に基づいた式(4)を用いて腐食量  $w_i$  を計算できる。本来、腐食電流密度は時間の関数として表現されるべきであるが、本研究で用いた測定システムでは連続的に測定することが困難であったため、暴露18ヶ月まで1~2週に約1回の頻度で、また床版試験体の解体直前（暴露22ヶ月）に1回、計53回測定を行った。そのため、腐食電流密度関数を、単純に測定間隔の時間で離散化した。

$$w_i = \sum_{j=1}^k \frac{(a_i)_j \cdot (T_j - T_{j-1}) \cdot M_{mol}}{z \cdot F} \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

ここに、 $w_i$ ：鉄筋要素  $i$  の推定腐食量 (mg/cm<sup>2</sup>)、 $(a_i)_j$ ： $j$  回目の測定結果から計算した鉄筋要素  $i$  のアノード電流密度 (μA)、 $T_j$ ： $j$  回目の測定を実施した時の材齢 (s)、 $M_{mol}$ ：鉄のモル質量 (55.847 g/mol)、 $z$ ：荷電数 (2)、 $F$ ：Faraday 定数 (96,485 C/mol)、である。

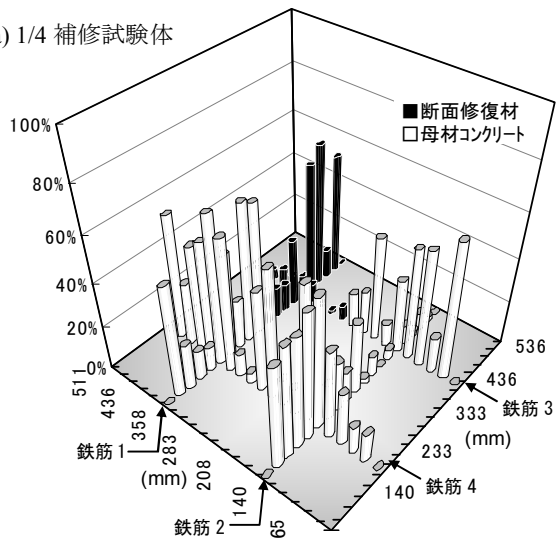
腐食電流密度の測定は浸漬あるいは乾燥期間の中間日に行い、あわせて、鉄筋の自然電位および環境温度を測定した。

## 4. 床版試験体の鉄筋腐食状況

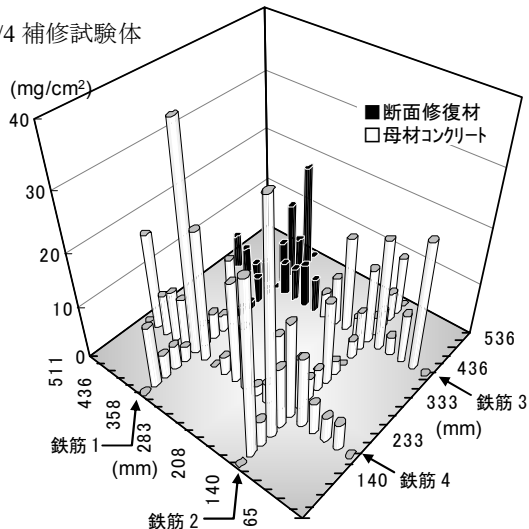
### 4.1 鉄筋要素の腐食状況の実測値

図-4 に各床版試験体の暴露 22 ヶ月後の鉄筋要素の腐食面積率を示す。母材コンクリート、断面修復材の別に関わらず、ほぼ全ての鉄筋要素について目視により発錆が確認された。発錆は、鉄筋要素の上半面（打設面側）と比較して、下半面および両端部に多く確認される傾向

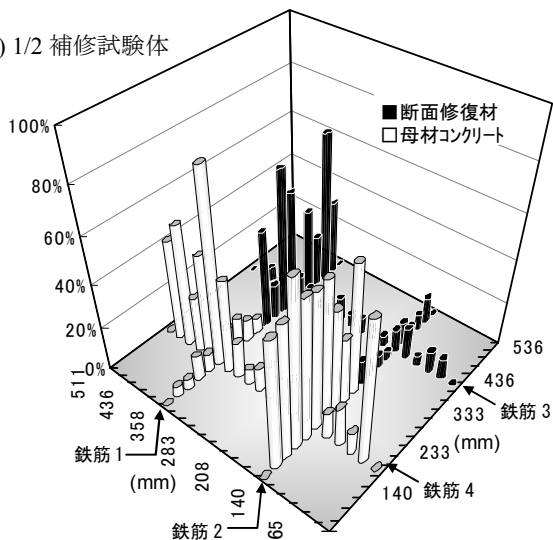
a) 1/4 補修試験体



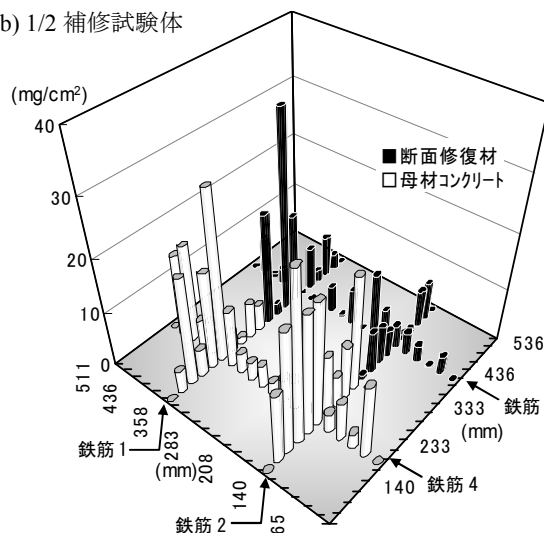
a) 1/4 補修試験体



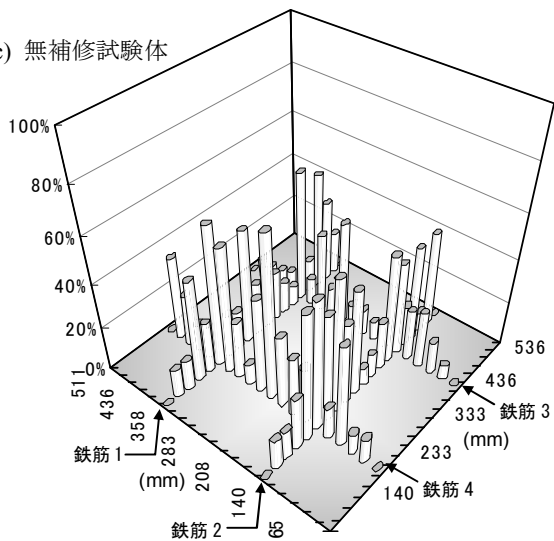
b) 1/2 補修試験体



b) 1/2 補修試験体



c) 無補修試験体



c) 無補修試験体

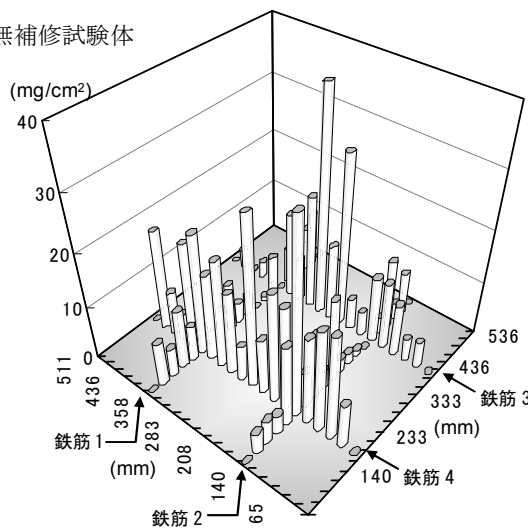


図-4 腐食面積率 (暴露 22 ヶ月)

図-5 腐食量 (暴露 22 ヶ月)

表-2 腐食量の比較

	腐食量 (mg/cm <sup>2</sup> )		
	1/4 補修	1/2 補修	無補修
平均腐食量	9.3	8.1	10.6
コンクリート部 (平均)	10.7	11.6	10.6
コンクリート部 (最大)	43.5	35.8	43.8
断面修復材部 (平均)	4.9	4.7	—
断面修復材部 (最大)	10.9	19.9	—

であった。1/4 補修試験体では、母材コンクリート中の交差部および交差部の中間点（鉄筋 2 中央）で、1/2 補修試験体では、母材コンクリート中の交差部および母材コンクリート-断面修復材を貫くよう配置した鉄筋 3 の母材コンクリート中に著しい発錆が認められた。また、両試験体とも断面修復材中の鉄筋要素にも発錆が認められた。特に、1/2 補修試験体においては、断面修復材中の鉄筋要素のうち、鉄筋 3 側にのみ母材コンクリートと同程度の発錆が認められた。

ここで、腐食面積率は鉄筋要素表面に観察される発錆面積を表しているに過ぎない。そこで、腐食量により床版試験体の腐食性状を把握することとした。

図-5 に各床版試験体の暴露 22 ヶ月後の鉄筋要素の腐食量の実測値を示す。1/2 補修試験体では、母材コンクリート中の交差部、および母材コンクリート-断面修復材界面近傍の鉄筋要素の腐食が著しい。また、断面修復材中の鉄筋要素の腐食量は、腐食面積率と同様の傾向であり、特に、交差部に隣接する位置（鉄筋 4）の腐食量が大きい。1/4 補修試験体においても断面修復部の界面近傍（鉄筋 1）において腐食量が多い箇所が見られるが、1/2 補修試験体と比較すると腐食量は小さい。1/4 補修試験体では、母材コンクリート中の鉄筋の交差部、およびそれに隣接する位置で最大腐食量を示した。また、無補修試験体では、鉄筋 1 および 2 において交差部の中間付近で顕著な腐食が認められた。

#### 4.2 各床版試験体の腐食状況の比較

各床版試験体の全体的な腐食傾向を比較するため、表-2に各床版試験体の平均腐食量を示した。ここで、平均腐食量は、各鉄筋要素の腐食量の単純平均である。鉄筋要素の平均腐食量は無補修試験体で最も大きく、1/2試験体では最も小さい。ここで、床版試験体全体に含まれる総塩化物イオン濃度は、無補修試験体、1/4補修試験体、1/2補修試験体の順に小さくなる。塩化物イオン濃度の異なる2種類のコンクリートを打ち継ぎ、その腐食性状を検討した既往の研究<sup>17)</sup>では、鉄筋の総腐食量は、2種類のコ

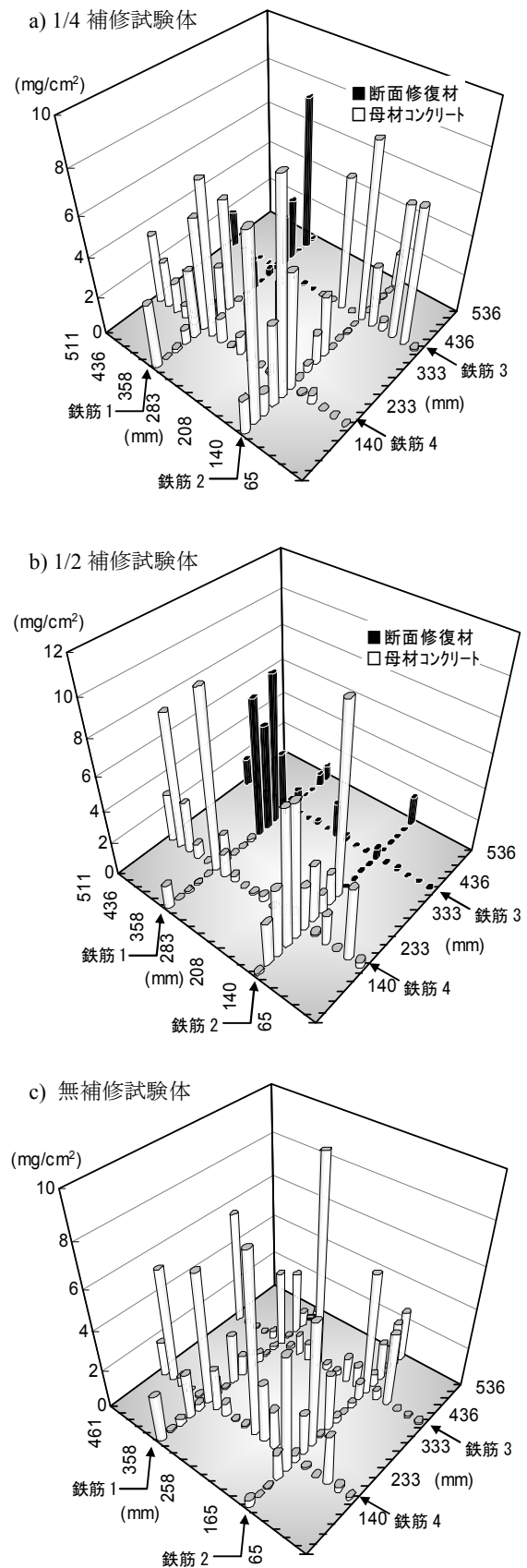


図-6 推定腐食量（暴露 22 ヶ月）

ンクリートの塩化物イオンの濃度差が大きいほど、また、試験体全体に含まれる総塩化物イオン濃度が高いほど多くなることが示されており、本研究でもこれと同様の傾向を示したものと考えられる。

ここで、床版試験体中の鉄筋要素の腐食の発生が主として母材コンクリートが含有する塩化物イオンによるものであると仮定すると、それぞれの試験体で母材コンクリート体積が異なるため、全ての試験体を全平均腐食量で直接比較することは相応しくない。表-2に各床版試験体の母材コンクリート部および断面修復部における平均腐食量および最大腐食量を示す。1/4補修試験体と無補修試験体の平均および最大腐食量はほぼ同程度であり、これより、1/4補修試験体の母材コンクリート中の鉄筋要素の平均的な鉄筋腐食性状は、無補修試験体と類似した挙動を示すことが考えられる。一方、1/2補修試験体では、他と比較して平均腐食量は大きい、最大腐食量は小さくなった。また、断面修復部の平均腐食量は1/4補修試験体と同程度であるが、最大腐食量は2倍程度の値を示した。これより、鉄筋の腐食性状は部分断面修復範囲の違いにより異なる挙動を示すことが考えられる。本研究の範囲では、断面修復範囲が大きいほど、母材コンクリート中の鉄筋の腐食性状はコンクリート単体の場合と差異が生じ、断面修復材中の鉄筋にも局所的な腐食が発生する可能性があることが考えられた。

#### 4.3 腐食量の実測値と推定値の比較

図-6 に式(4)により求めた各床版試験体の推定腐食量を示す。ここで、各床版試験体の推定腐食量は、実測腐食量と比較して小さい。本研究では、各鉄筋要素間を流れる腐食電流のみを測定したため、各鉄筋要素におけるマイクロセル腐食電流、また要素内で発生するマクロセル、すなわちアノードとカソードの距離が20 mm (交差部の場合、13 mm) 以下の状態で発生するマクロセル腐食電流は把握していない。このため、実測値と推定値との差が生じたものと考えられる。しかしながら、推定腐食量は、1/4補修試験体では、鉄筋3および鉄筋4における母材コンクリート中の交差部周辺および断面修復部において、1/2補修試験体では、鉄筋3および鉄筋4における母材コンクリート中の交差部および断面修復部において、無補修試験体では、交差部および鉄筋1および鉄筋2において、実測腐食量における腐食発生の傾向を捉えている。その他の部分についても、実際の腐食発生の傾向(腐食の有無や腐食量の大小)に類似する点が多数見られ、このことから、推定値は各床版試験体における全体的な腐食性状を概ね捉えていると見なすことができる。

したがって、以降、鉄筋要素間を流れるマクロセル電流密度の測定結果を基として、部分断面修復を施した床版におけるマクロセルの形成とその経時変化について考察する。

#### 4.4 各床版試験体におけるマクロセル形成の状況

図-7から図-9に、各床版試験体の代表的な腐食電流密度分布を示す。ここでは、5.2で詳述するように、部分断面修復を施した部材のアノード電流密度が暴露初期を除いて環境温度の変動に対応することを鑑み、各床版試験体の暴露初期においてアノード電流密度が最大となった時点、および最高・最低気温時の腐食電流密度分布を示した。分布図では、縦軸を腐食電流密度の対数で表したため、便宜的に、電流密度 $0.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ を $1.0 \text{ nA}/\text{cm}^2$ として取り扱った。なお、付録Aには、縦軸を腐食電流密度の真数とした分布図を示した。

##### a) 1/4補修試験体

図-7 a)~d) に1/4補修試験体の腐食電流密度分布を示す。a) は暴露初期にアノード電流密度が最大となった時点(暴露6日、湿潤状態)、b) は暴露1年目の最高気温時(暴露160日、湿潤状態)、c) は最低気温時(暴露328日、乾燥状態)、d) は暴露2年目の最高気温時(暴露517日、湿潤状態)である。

図-7 a) では、断面修復材中の全ての鉄筋要素、特に、断面修復材を貫く鉄筋3では全ての要素がカソード化していた。鉄筋1と鉄筋4の交差部が最もアノード電流密度が大きく、その交差部から2つ目や鉄筋4の中央部付近の鉄筋要素等がアノード化しているが、それらの電流密度は小さい。試験体中のカソード電流の大部分が、鉄筋1と鉄筋3の交差部のアノード反応に費やされたことが考えられる。

図-7 b) では、断面修復材中の鉄筋要素の状況は、a) からほとんど変化していないが、母材コンクリート中では、a) でアノードであった箇所ほぼ全てがカソード化していた。また、母材コンクリート中の交差部はカソードに、それらに隣接する要素がアノードとなっていた。母材コンクリート-断面修復材境界部の鉄筋要素は引き続きカソード化していた。

図-7 c) では、腐食電流密度は全体的に小さくなっており、これは環境温度の低下により鉄筋要素の腐食反応が不活性化したためと考えられる。アノードは図-7 a) および b) と異なる箇所に発生しているが、その電流密度は最大でも $0.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度であり非常に小さい。また、断面修復材中の鉄筋要素は、電流密度は微小ではあるが、図-7 a) および b) と比較すると変化に富んでおり、断面

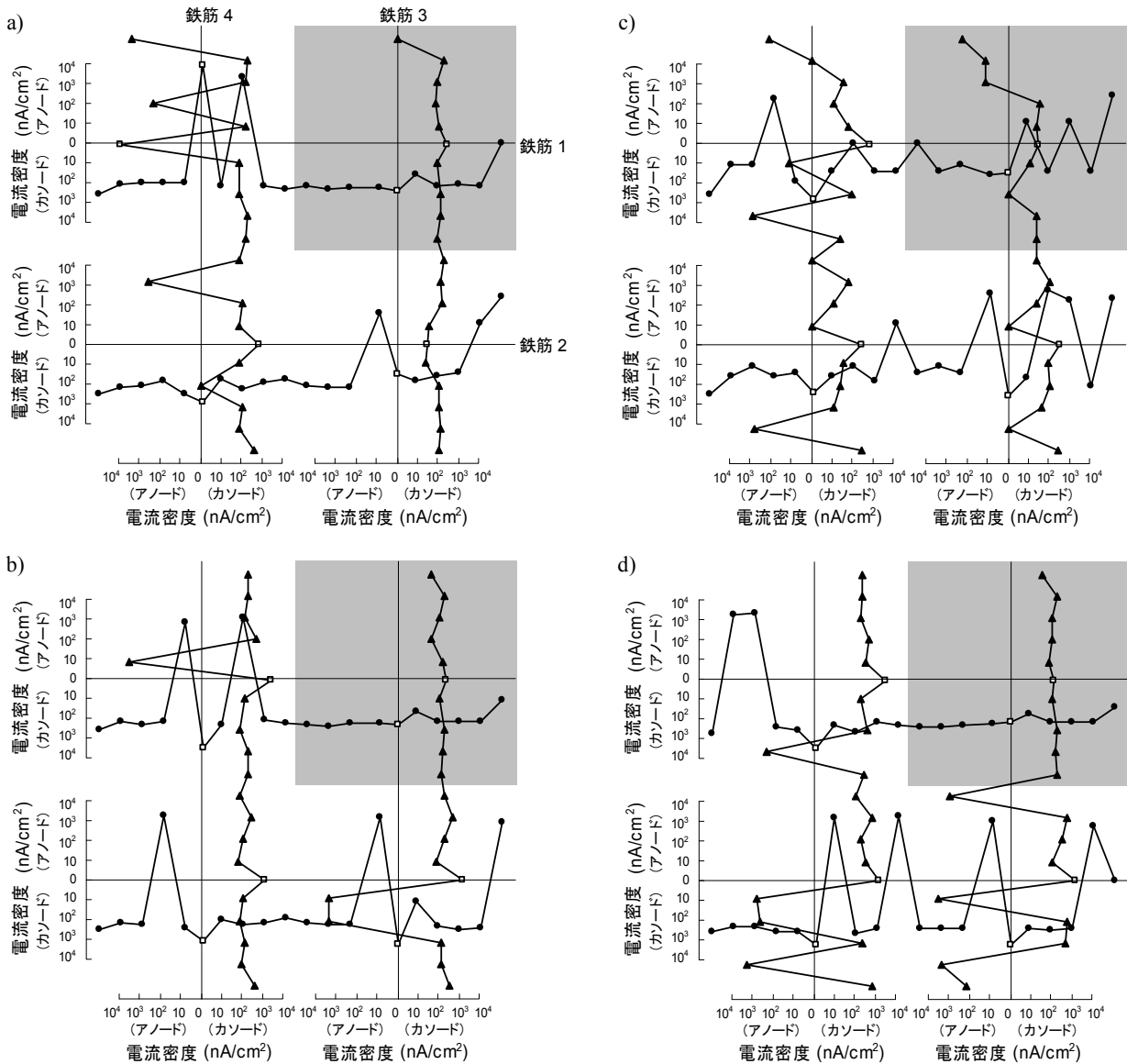


図-7 1/4 補修試験体の腐食電流密度分布

修復材内の鉄筋要素間で腐食電池が形成されている可能性が考えられる。

図-7 d) では、母材コンクリート断面修復材境界部のコンクリート中の鉄筋要素がアノード化していた。また、母材コンクリートを貫く鉄筋2では、交差部間にアノード部があり、これは交差部のカソード化の影響であると考えられる。鉄筋1の端部近傍のアノード部についても、これに隣接する鉄筋要素と交差部のカソード化によるものであることが考えられる。断面修復部においては、a) および b) と同様に、全ての鉄筋要素がカソード化していた。

b) 1/2補修試験体

図-8 a)~d) に1/2補修試験体の腐食電流密度分布を示す。a) は暴露初期にアノード電流密度が最大となった時

点（暴露24日，乾燥状態），b) は暴露1年目の最高気温時（暴露160日，湿潤状態），c) は最低気温時（暴露328日，乾燥状態），d) は暴露2年目の最高気温時（暴露517日，湿潤状態）である。

図-8 a) では、断面修復材中の鉄筋要素は、一部を除きカソード化した。母材コンクリート中の鉄筋2と鉄筋3の交差部が最もアノード電流密度が大きく、次いで、鉄筋4の母材コンクリート断面修復材境界から約40 mm離れた鉄筋要素でアノード電流密度が大きかった。その他の箇所にも微小なアノード化が見られるが、鉄筋2と鉄筋4の交差部に代表される試験体中のカソード部の大部分が、この2箇所のアノードに費やされたことが考えられる。

図-8 b) では、図-8 a) においてアノード化が見られた鉄筋4中の要素はカソード化し、その隣の要素がアノード

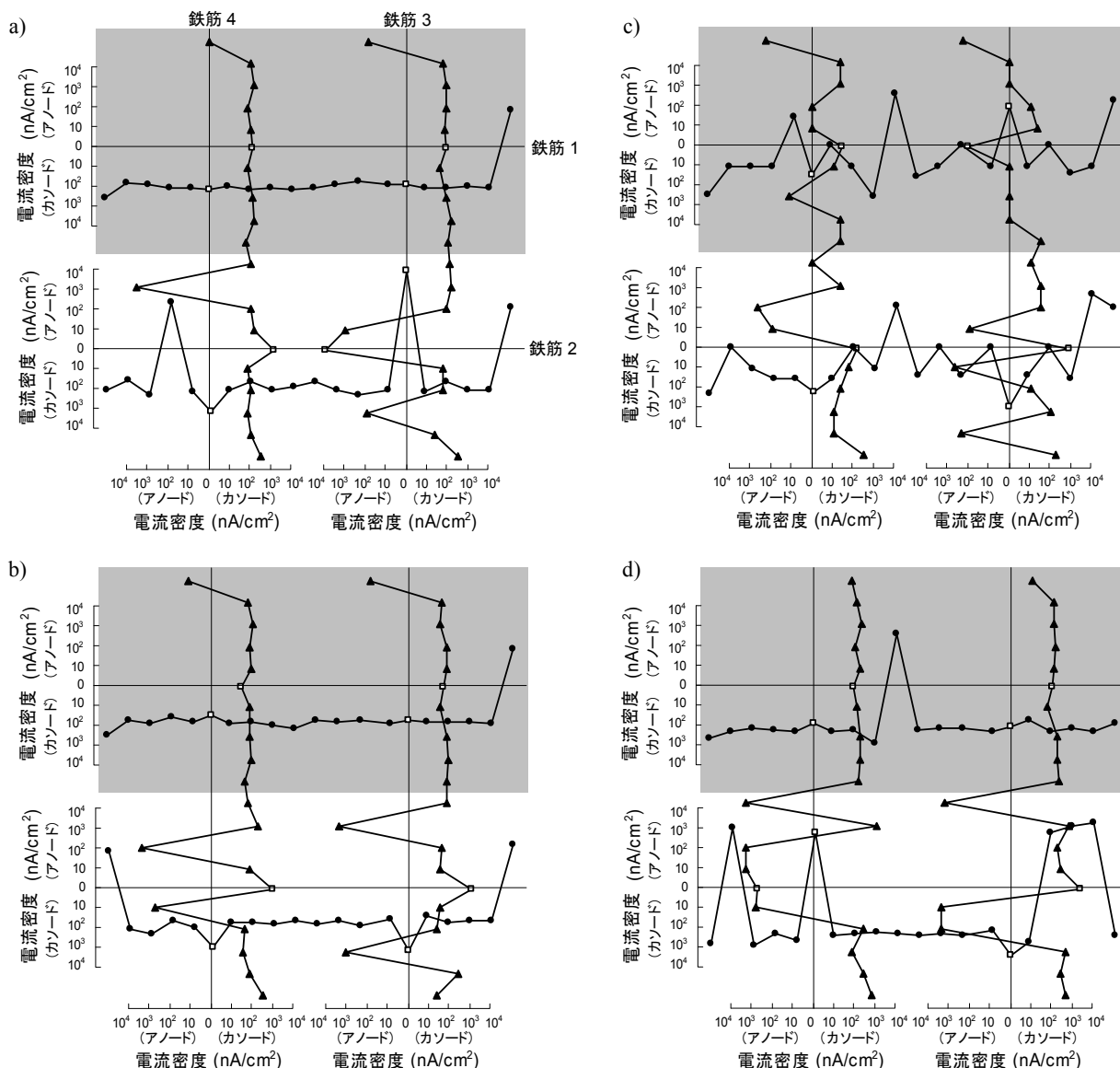


図-8 1/2 補修試験体の腐食電流密度分布

化していた。また、鉄筋3の母材コンクリート-断面修復材界面から約40 mm離れた鉄筋要素がアノード化していた。また、鉄筋2と鉄筋3の交差部は、鉄筋2と鉄筋4の交差部と同様にカソード化していた。断面修復材中の鉄筋要素は、引き続きカソードを示している。

図-8 c) では、環境温度の低下による腐食電流密度の低下が見られる。また、電流密度は微小ではあるが、鉄筋1の中央部においてアノード部の発生が見られる。また、1/4補修試験体と同様に、断面修復材中の鉄筋要素の電流密度は、図-8 a) および b) と比較すると変化に富んでいた。母材コンクリート中の交差部は全てカソード化し、交差部に隣接する要素のアノード化が見られた。

図-8 d) では、鉄筋3および鉄筋4の母材コンクリート-断面修復材境界部のコンクリート中にアノード部が見

れた。また、鉄筋2と鉄筋4の交差部がアノード化していた。鉄筋1の中央部においては、図-8 c) から引き続いて、アノード部の発生が見られた。1/4補修試験体と比較すると、断面修復材中の中央部1箇所のみのアノード電流密度が大きく、それは、最低気温時から暴露2年目の最高気温時まで継続していた。付図-A2 d) に示すとおり、この箇所のアノード電流密度は、隣の鉄筋要素のカソード電流密度とほぼ同程度であり、これより、断面修復材中の鉄筋要素で腐食電池が形成されたことが考えられる。また、これは、4.2で推測したとおり、断面修復範囲が大きいと、断面修復材中の鉄筋に局所的な腐食が進行する可能性があることを示唆するものと考えられる。

c) 無補修試験体

図-9 a)~d) に無補修試験体の腐食電流密度分布を示

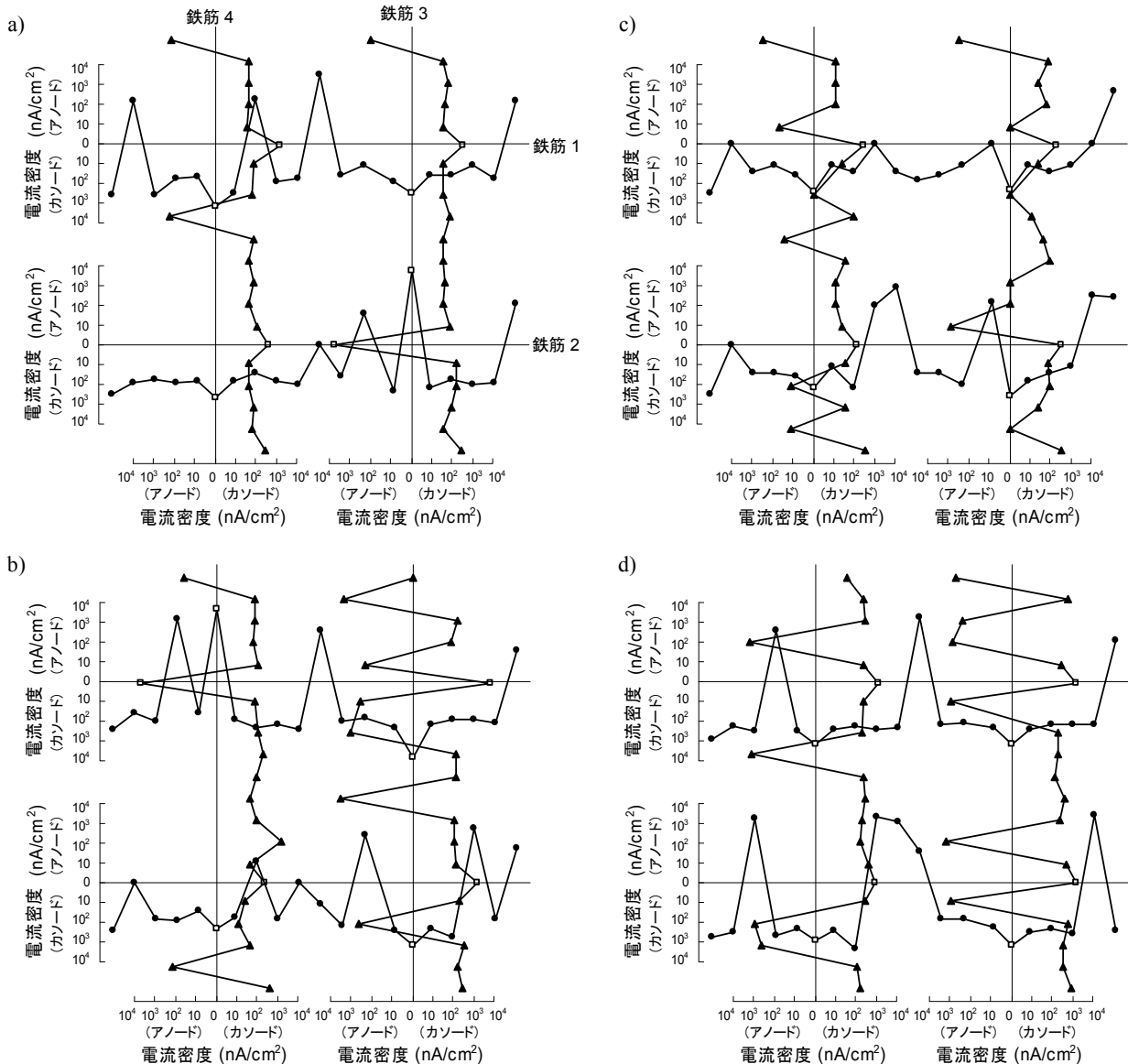


図-9 無補修試験体の腐食電流密度分布

す。a) は暴露初期にアノード電流密度が最大となった時点（暴露69日，湿潤状態），b) は暴露1年目の最高気温時（暴露160日，乾燥状態），c) は最低気温時（暴露328日，湿潤状態），d) は暴露2年目の最高気温時（暴露517日，乾燥状態）である。

図-9 a) では，鉄筋1の中央部および鉄筋2と鉄筋3の交差部に顕著なアノード電流が見られた。その他の交差部については，カソードとして作用していた。

図-9 b) では，図-9 a) と比較すると，鉄筋3における腐食電流密度の変化が大きくなっている。特に，図-9 a) でアノードであった鉄筋2と鉄筋3の交差部がカソード化し，鉄筋3の中央部に新たなアノード部の発生が見られた。また，他と比較すると，鉄筋1と鉄筋4の交差部およびそれ

に隣接する箇所におけるアノード電流密度が大きかった。

図-9 c) では，補修試験体の場合と同様に，環境温度の低下による腐食電流密度の低下が見られた。また，全ての鉄筋交差部がカソード化しており，鉄筋1ではほぼ全ての鉄筋要素がカソード化していた。腐食電流密度は微小であるが，鉄筋2の中央部において，アノード電流密度が最大となる箇所が見られた。

図-9 d) では，鉄筋3以外の鉄筋中央部と端部周辺にアノード部が見られた。交差部のカソード電流密度は，他のカソード鉄筋要素と比較すると1オーダー程度高い値となっていた。約1年前の電流密度分布を示した図-9 b) と比較すると，アノードを示す鉄筋要素数は増えているが，アノード部，カソード部とも電流密度はやや小さく



なるようであった。

d) 床版試験体におけるマクロセル形成の変化

床版試験体の腐食電流密度分布の変化をまとめると、以下のようになる。

母材コンクリート中の鉄筋要素は、断面修復材中の鉄筋要素と比較して、アノード・カソードの移行が激しく、腐食電流密度が大きい。鉄筋の交差部における腐食電流密度は、他の鉄筋要素と比較して概ね大きい。

腐食電流密度の大小と、試験体中の腐食電流密度分布は環境温度の影響を受けて変化した。特に、補修試験体では、環境温度の低下により試験体全体の腐食電流密度が小さくなると、断面修復材中の腐食電流密度分布に変化が生じた。

補修試験体では、母材コンクリートー断面修復材境界部よりも、その近傍に位置する母材コンクリート中の鉄筋要素のアノード・カソードの移行が著しかった。

特に、1/2補修試験体では、暴露約330日以降に断面修復材中の鉄筋要素間で形成されたと考えられる腐食電池が確認され、断面修復範囲が大きい場合、断面修復材中の鉄筋に局所的な腐食が進行する可能性があることが考えられた。

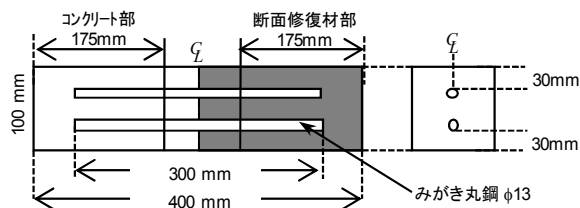


図-10 分極曲線測定用試験体

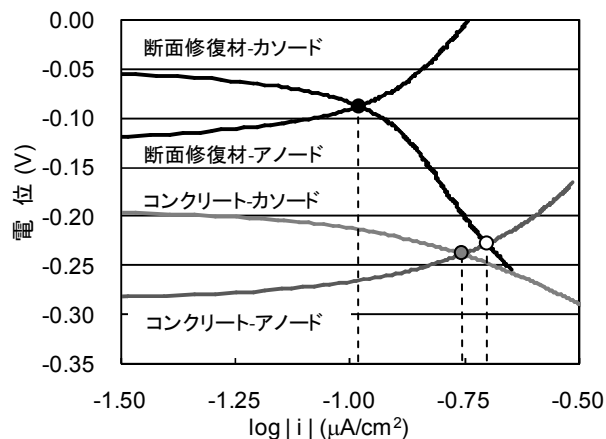


図-11 分極曲線(自然暴露 26 ヶ月)

5. 部分断面修復を施した床版におけるマクロセル形成に関する検討

5.1 コンクリートおよび断面修復材中の鉄筋の腐食性状に関する電気化学的検討

本研究で用いた床版試験体の鉄筋腐食量の実測値では、母材コンクリートー断面修復材の界面近傍だけでなく、断面修復材中の鉄筋要素にいくらかの腐食の発生が認められた。また、腐食電流密度分布図からは、断面修復材中の鉄筋要素間で腐食電池が形成される可能性があることが示された。そこで、コンクリート単体中と断面修復材単体中の鉄筋の分極曲線から、部分断面修復を施した床版試験体の母材コンクリート、断面修復材、および母材コンクリートー断面修復材境界部の腐食性状について考察した。

(1) 試験方法

a) 試験体の概要

ここでは、3.1で述べた床版試験体と同様の材料・方法で作製した断面修復試験体を用いた。図-10に試験体の概要を示す。試験体中央で母材コンクリートと断面修復材を打ち継いだ100×100×400 mmの試験体を、コンクリー

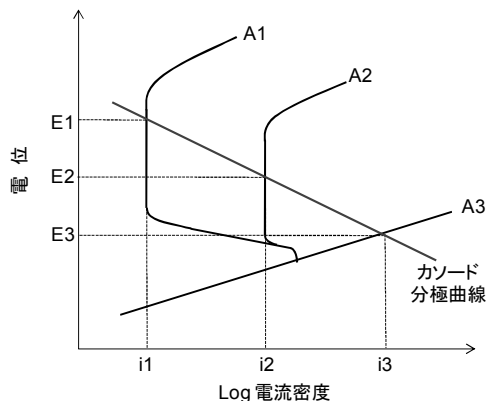


図-12 Clが鉄筋の分極特性に及ぼす影響<sup>18)</sup>

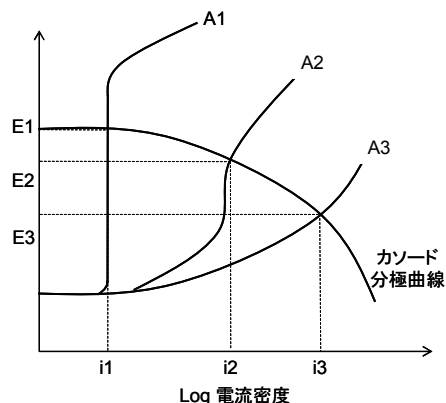


図-13 コンクリート中の鉄筋の分極特性<sup>10)</sup>

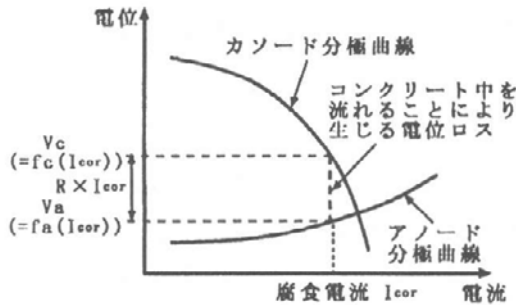


図-14 断面修復部の腐食電池形成の概念<sup>19)</sup>

トでは打設28日後、断面修復材では打設14日後から、久里浜湾近郊の屋外乾湿繰返し環境（海水循環水槽）に26ヶ月間暴露した。海水循環水槽は1日に2回ずつの海水への浸漬と乾燥を繰り返し、海洋環境における干満帯を再現した暴露試験水槽である。26ヶ月暴露後、試験体を両端部から175mmずつ切り出し、これをコンクリート試験体、断面修復材試験体とした。切断面の鉄筋にリード線をハンダ付けし、防水処理を施して測定に供した。なお、試験体の切断前に、海水銀-塩化銀（Ag/AgCl）電極を用いて自然電位を測定したところ、コンクリート部では最卑値で-136mV、断面修復材部では-117mVであり、断面修復材側の鉄筋の自然電位の方が貴であったが、試験体全体としてフラットな自然電位分布を示した。

#### b) 分極曲線の測定

コンクリートおよび断面修復材試験体を海水に浸漬した状態で、参照電極として銀-塩化銀（Ag/AgCl）電極を、対極としてステンレス板を試験体周囲に設置し、それらと試験体中の鉄筋に接続したリード線を測定装置（動電位法用）に接続し、掃引速度を1 mV/sとして、アノードおよびカソード分極曲線を測定した。

#### (2) コンクリートおよび断面修復材中の鉄筋の分極曲線の測定結果および考察

大即<sup>10)</sup>は、溶液中の鉄筋のアノード分極曲線を測定し、電位  $E$  が自然電位  $E_n + 0.2 \text{ V} < E < +0.6 \text{ V}$  の場合の電流密度から、コンクリート中の鉄筋の不動態グレードを6段階で評価することを試みている。これによると、自然暴露26ヶ月後のコンクリート中の鉄筋の電流密度は、上記の電位の範囲で1~2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり、断面修復材では1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下であった。これより、コンクリート中の鉄筋の不動態グレードはグレード3、断面修復材中の鉄筋はグレード5と判定される。グレード5は、鉄筋が良好な不動態状態であると推測されるものであり、グレード3は若干の不動態状態と推測されるものである。このことから、断面修復材中の鉄筋と比較すると、コンクリート中の鉄筋に良好な不動態は形成されておらず、これは、

コンクリートに予め混入した塩化物イオンと、暴露中にコンクリート中に侵入した塩化物イオンによる影響であると考えられる。

図-11にコンクリートおよび断面修復材中の鉄筋の分極曲線を示す。分極曲線は、コンクリートよりも断面修復材の方が貴な電位に位置しており、アノード・カソード分極曲線の交点から、断面修復材中の鉄筋の自然電位は90%以上腐食の可能性なし<sup>1)</sup>と判断される領域にある。しかし、コンクリート中の鉄筋と同様に、断面修復材中の鉄筋間で腐食電池が形成される可能性が示された。ただし、その腐食電流密度は、コンクリート中の鉄筋と比較すると小さい。

図-12はコンクリート中の鉄筋の腐食電流密度-電位関係が、コンクリート中の塩化物イオン濃度により変化する様子を、Evans diagramにより説明した概念図である<sup>18)</sup>。これによれば、コンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度が増えるにしたがって、アノード分極曲線はA1→A2→A3のように変化する。A1は活性-不動態、A3は活性として分類される。カソード分極曲線が一定の場合、コンクリート中に含まれる塩化物イオンが増えると、自然電位はE1→E2→E3のように卑に移行し、腐食電流密度はi1→i2→i3のように大きくなると考えられる。なお、図-12は水溶液中の金属鉄の分極特性から推測されたものであり、コンクリート中の鉄筋のアノード分極曲線は、図-13に示す大即により提案された図（アノード分極曲線の形状）の方が実際の分極挙動に類似するようである。図-13では、A1を良好な不動態がある、A2を不完全ながらも不動態がある、A3を活性（不動態はない）に相当するとしている。

断面修復材中の鉄筋についても同様の傾向を示すことが考えられる。断面修復材の酸素透過速度が変化しない場合、つまりカソード分極曲線が一定の場合、暴露期間が長期に及ぶにしたがって断面修復材中の塩化物イオン濃度が高くなるため、断面修復材中の鉄筋の腐食電流密度は大きくなる可能性があるといえる。本研究では、自然暴露26ヶ月後に分極曲線を測定したため、断面修復材試験体中にも多少の塩化物イオンが侵入している可能性がある。このため鉄筋が活性化し、図-11における断面修復材中の鉄筋の分極曲線の形状が、図-12および図-13中のアノード分極曲線A3に相当する形状となったことが考えられる。また、断面修復材中の鉄筋の不動態グレードからは良好な不動態状態であると推測されたが、実際は、断面修復材中への塩化物イオンの侵入や、断面修復材充填時に鉄筋下面に形成された微細な空隙の存在等による影響により、鉄筋表面に十分な不動態が形成されて

いなかった可能性があるといえる。

ここで、コンクリート中の鉄筋のアノード分極曲線と、断面修復材中の鉄筋のカソード分極曲線の交点をみると、コンクリート中における両者の交点よりも電流密度は大きい。この交点は、コンクリート-断面修復材界面近傍の鉄筋の腐食電流密度を表していると考えられる。したがって、塩化物イオンを含むコンクリートと断面修復材を打ち継いだ場合、鉄筋の腐食電流密度は、断面修復材中で形成される腐食電池、コンクリート中で形成される腐食電池、母材コンクリート-断面修復材間で形成される腐食電池の順に大きくなると考えられる。ただし、腐食電流はコンクリートおよび断面修復材を流れて流れるため、アノード・カソード間で電位ロスが生じる<sup>19)</sup>。このため、コンクリート-断面修復材界面近傍に形成される腐食電池は、コンクリート中の鉄筋のアノード分極曲線と断面修復材中の鉄筋のカソード分極曲線の交点より小さい電流で成立することが考えられる。

図-14は、宮里ら<sup>19)</sup>により示された断面修復部における腐食電池形成の概念図である。電位ロスの概念は、コンクリート中および断面修復材中に形成される腐食電池にも当てはまる。各材料間の抵抗は材料中の塩化物イオン濃度や含水状態等により異なるが、比較する腐食電池のアノード・カソード間の距離が同じ場合、概念的に、コンクリート中では電位ロスは小さく、断面修復材中では電位ロスが大きいことが考えられる。したがって、図-14におけるコンクリート-断面修復材間とコンクリート中の腐食電流密度の差異を考慮すれば、コンクリート中の鉄筋の腐食電流密度が、コンクリート-断面修復材間の腐食電流密度よりも大きくなる可能性がある。

### (3) 部分断面修復を施した床版試験体における鉄筋腐食の進行に関する考察

分極曲線の測定に供したコンクリートおよび断面修復材試験体は、本論文で対象とする部分断面修復を施した床版試験体とは、暴露環境・期間が異なるものである。また、断面修復を施した試験体を分割して、コンクリート単体中および断面修復材単体中の鉄筋について分極曲線を測定したため、コンクリート単体および断面修復材単体中における鉄筋の電気化学的特性を正確に把握できていない可能性もある。しかしながら、本節での検討により、床版試験体における断面修復材中の鉄筋要素間で腐食電池が形成される可能性があること、また、その腐食電流は、母材コンクリート中、母材コンクリート-断面修復材間よりも小さいことが分かった。これは、図-7から図-9に示した各試験体のマクロセル電流密度分布でも確認されたことである。さらに、母材コンクリート

表-3 電流密度の最大値を示した鉄筋要素とその回数

試験体	A/C	累計 1 <sup>st</sup> の位置(回数)	累計 2 <sup>nd</sup> の位置(回数)
1/4 補修	A	鉄筋 2・4 交差部 (7)	鉄筋 4 中央付近 (6)
	C	鉄筋 1・4 交差部 (34)	鉄筋 2・4 交差部 (5)
1/2 補修	A	鉄筋 2・3 交差部 (12)	鉄筋 2 端部付近 (11)
	C	鉄筋 2・3 交差部 (27)	鉄筋 2・4 交差部 (18)
無補修	A	鉄筋 1 中央付近 (10)	鉄筋 2 端部付近 (10)
	C	鉄筋 2・3 交差部 (21)	鉄筋 1・4 交差部 (8)

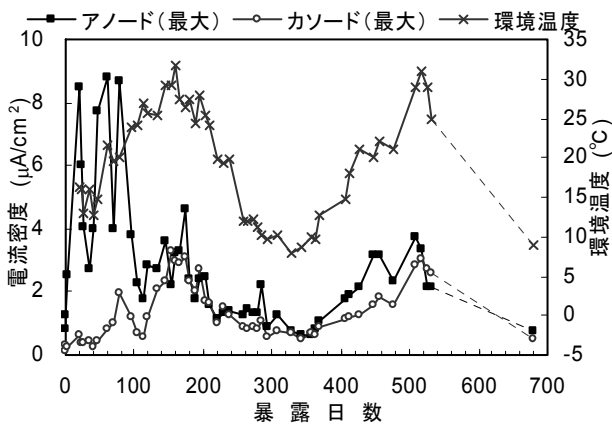
A : アノード, C : カソード

一断面修復材間の腐食電流密度が最も大きい、腐食電池のアノード・カソード間の電位ロスにより、母材コンクリート-断面修復材間よりも、母材コンクリート中の鉄筋要素の腐食電流密度の方が大きくなる可能性があることが考えられた。

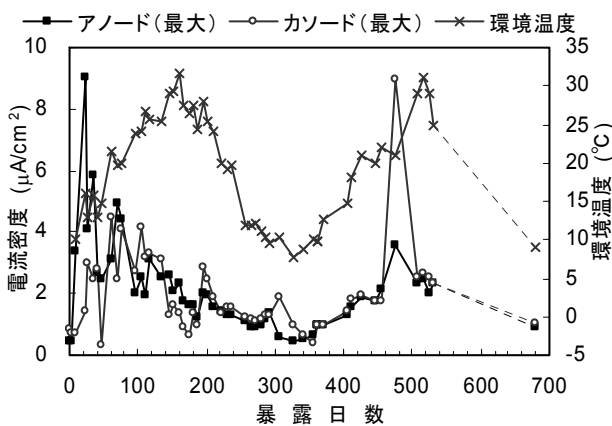
## 5.2 最大腐食電流密度の変化

各床版試験体の鉄筋要素の腐食性状を把握するため、全測定時におけるアノード・カソード電流密度の最大値とその鉄筋要素の位置を確認した。表-3 に全 53 回の測定で、アノード・カソード電流密度の最大値を示した鉄筋要素の上位 2 カ所とその回数を示す。なお、本研究で用いた床版試験体は計 76 要素の鉄筋要素で構成されているが、表-3 は各測定時においてアノード・カソード電流密度の最大値を示した箇所の累計度数を示したものであり、電流密度の大小および最大値を示した時期についてはここでは考慮していない。また、暴露期間中、ほぼ全ての鉄筋要素について、マクロセル腐食電池のアノードおよびカソードのどちらにも変化する様子が確認された。暴露期間中の全鉄筋要素のアノード・カソードの推移を付録 B に示す。

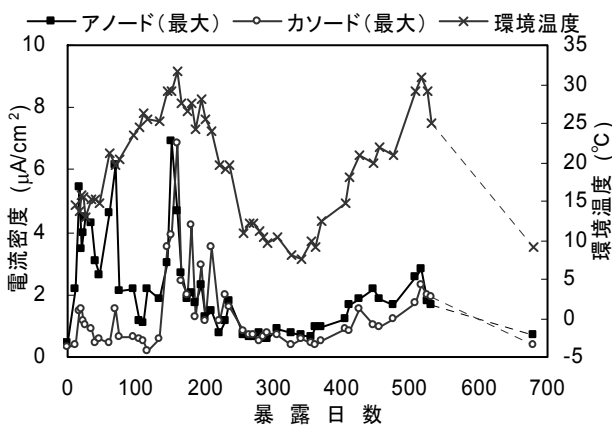
表-3によれば、アノード・カソード電流密度の最大値を示す箇所は、鉄筋の交差部であることが多かった。また、それらは全て母材コンクリート中に位置しており、全試験体を通して、カソード電流密度の最大値を示す位置は、アノード電流密度の最大値を示す位置と比較すると、ある程度固定されるようであった。さらに、部分断面修復を施した試験体では、アノード・カソード電流密度の最大値を示した鉄筋要素の上位2カ所が、全く同じ要素である場合があった。これは、それらの鉄筋要素が、床版試験体中の電気化学的バランスに最も影響される箇所であったためと考えられる。丸鋼を用いた鉄筋要素では、腐食電流は隣り合う2要素から一次的に流し入るが、交差部においては腐食電流が二次的に出入りすることとなる。このため、交差部はアノード・カソード両電流密度の最大値を示す箇所となり易かったことが考えられる。また、母材コンクリートには塩化物イオンが多



a) 1/4 補修試験体



b) 1/2 補修試験体



c) 無補修試験体

図-15 腐食電流密度の最大値と環境温度の変化

量に含まれ、補修材と比較すると、一般的に酸素透過性が高い。このため、母材コンクリート中の鉄筋要素は、断面修復材中の鉄筋要素と比較して、アノードおよびカソードどちらにも変化する可能性は潜在的に高いといえる。

図-15に各床版試験体におけるアノード・カソード電流密度の最大値の経時変化を示す。いずれの試験体におい

ても、暴露初期にアノード電流密度の最大値にピークが見られ、その後、暴露期間が長期になるにつれ、アノード電流密度の最大値は小さくなった。一方、カソード電流密度の最大値のピークは暴露初期には見られず、暴露期間の影響は明確ではなかった。

ここで、環境温度と各電流密度の最大値の関係をみると、アノード電流密度の最大値は、1/4補修試験体と無補修試験体では暴露初期のピークを除いた期間（暴露100日以降）が、1/2補修試験体では暴露約180日以降が環境温度の変動に対応し、カソード電流密度の最大値ではそのほとんどが環境温度の変動に対応している。一般に、環境温度の上昇は化学反応速度を増加させるものであり、既往の研究<sup>7)</sup>においても環境温度の上昇に伴ってRC試験体中のアノード電流密度が増加する様子が示されている。

以上のことから、塩化物イオンを含有するコンクリートおよび部分断面修復を施した部材のカソード電流密度の最大値は、環境温度の変動に対応して増加・減少することが考えられる。一方、アノード電流密度の最大値は、暴露初期を除いて環境温度の変動に対応することが考えられ、部分断面修復範囲が大きいほど、アノード電流密度の最大値が環境温度に対応するまでの期間は長くなることが考えられる。

### 5.3 コンクリート-断面修復材境界部における腐食電流密度の変化

図-16に1/4および1/2補修試験体におけるコンクリート-断面修復材境界部の腐食電流密度の経時変化を示す。境界は各補修試験体で2カ所ずつあり、図中には境界に隣接する母材コンクリート中および断面修復材中の鉄筋要素の腐食電流密度を示した。また、縦軸を電流密度の対数で表すため、便宜的に、電流密度 $0.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ は $1.0 \text{ nA}/\text{cm}^2$ として取り扱った。

図-16 a) に示す1/4補修試験体の境界部では、電流密度の大小の差はあるものの、暴露約450日まではほとんどの鉄筋要素がカソードとして作用している。その後、鉄筋3の母材コンクリート部のみが急激にアノードに変化した。ここで、図-17 a) に1/4補修試験体における鉄筋の自然電位の経時変化を示す。なお、参照電極は、図-1に示すとおりそれぞれの鉄筋の中央に設置した。自然電位は全ての位置で暴露開始から徐々に卑に移行しており、その値にも特筆すべき差異はない。しかし、暴露約450日以降から変化が見られ、暴露480日以降では鉄筋1よりも鉄筋3の境界部の方が卑な値を示した。

図-16 b) に示す1/2補修試験体の境界部においても、暴露約350日まではほとんどの鉄筋要素がカソードを示し

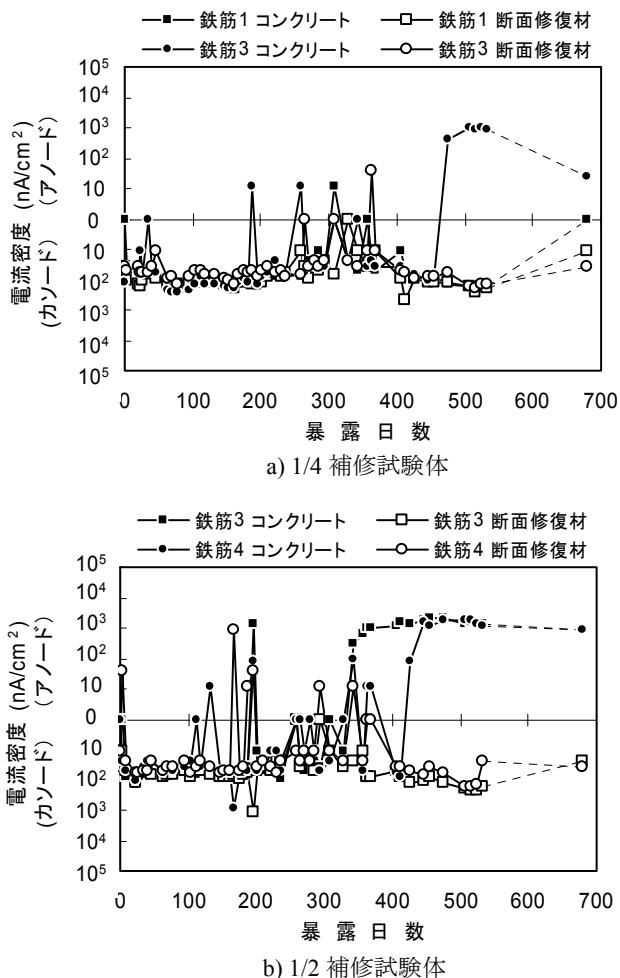


図-16 境界部における腐食電流密度の変化

ており、以降、鉄筋3の母材コンクリート部、鉄筋4の母材コンクリート部がアノードに変化した。図-17 b) に示す1/2補修試験体の自然電位は、暴露開始から約100日経過時までは貴化する傾向であったが、その後、徐々に卑に移行している。参照電極を境界部に設置した鉄筋3および鉄筋4については、自然電位は断面修復材中よりも常に卑であるが、明確な差異は認められなかった。

1/4および1/2補修試験体における腐食電流密度を比較すると、母材コンクリート中の鉄筋がアノード化する時期は、断面修復範囲によって異なり、1/2補修試験体の方が開始時期は早い。しかし、アノード化後の腐食電流密度は両者でほぼ同程度であった。

本研究では、部分断面修復を施した床版試験体の境界部の鉄筋要素が、ある時期にカソードからアノードに移行する要因について実験的に捉えることはできなかった。しかしながら、本研究の範囲では、コンクリート-断面修復材境界部からの距離が約20mmの範囲においては、母材コンクリート中および断面修復材中の鉄筋は、打継

目

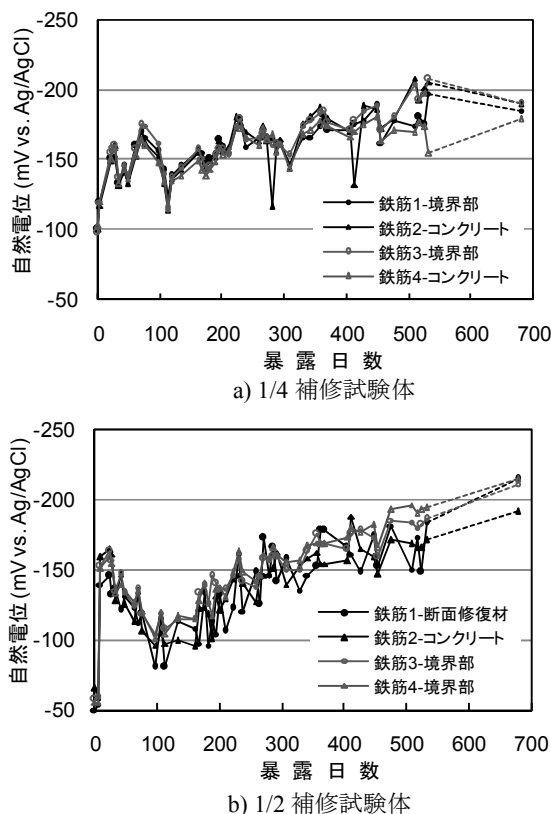


図-17 自然電位の経時変化

からの酸素の侵入の影響を受けて、カソードとして作用することが考えられる。その間、境界部以外に位置する鉄筋がアノードとなるが、時間の経過に伴って部材中の塩化物イオン濃度分布が変化したり、鉄筋表面に生成される錆層や周辺の酸素濃度の低下により、それまでアノードであった位置の腐食反応が妨げられるようになると、部材中の鉄筋の電気化学的バランスが変化して、境界部の母材コンクリート中の鉄筋がアノード化することが推測される。また、境界部の断面修復材では、母材コンクリートと比較して塩化物イオン濃度が小さいため自然電位が高くなり、引き続きカソードとなる可能性が高いと考えられる。

#### 5.4 鉄筋の交差部における腐食電流密度の変化

図-18 a) に1/4補修試験体の交差部における腐食電流密度の経時変化を示す。1/4補修試験体では、鉄筋1と鉄筋3の交差部は断面修復材中に、その他は母材コンクリート中に位置している。これによれば、断面修復材中の鉄筋要素から最も距離が離れた位置にある鉄筋2と鉄筋4の交差部では、試験開始から約40日までアノードとして作用し、その後はほとんどがカソード化していた。この交

差部は、表-3に示したとおり、計測時にアノード電流密

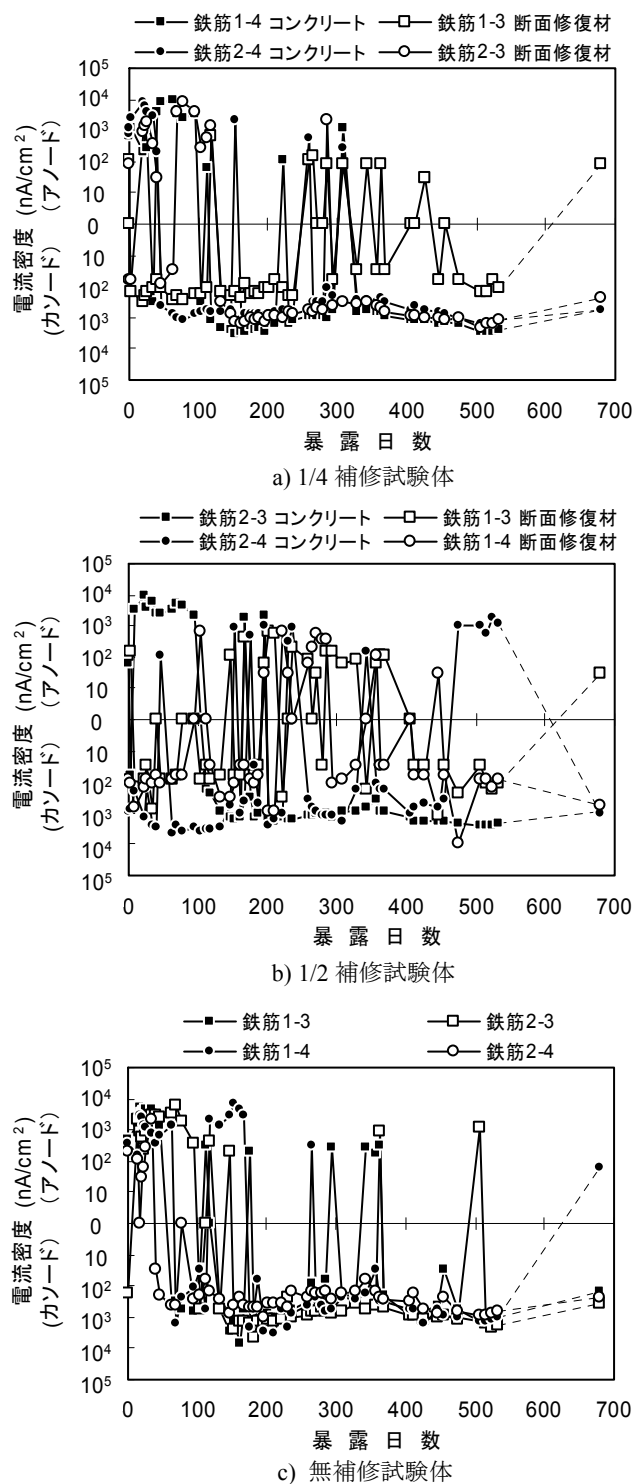


図-18 交差部における腐食電流密度の変化

度の最大値となる場合が最も多く、これより、暴露期間のごく初期に著しく腐食が進行したことが考えられる。鉄筋1と鉄筋4、鉄筋2と鉄筋3の交差部は、試験開始から暴露約100日までの期間の大部分でアノードとして作用し、その後は、鉄筋2と鉄筋4の交差部と同様に、カソー

ド化する傾向が見られた。断面修復材中にある鉄筋1と鉄筋3の交差部では、暴露約250日まではカソードとして作用しているが、以降、約400日前後まではアノードとカソードを不安定に繰り返した。なお、アノード・カソードの変化は床版試験体の暴露環境（乾燥・湿潤の別）に対応するものではなかった。

図-18 b) に1/2補修試験体の交差部における腐食電流密度の経時変化を示す。1/2補修試験体では、鉄筋1上の交差部は断面修復材中に、鉄筋2上の交差部は母材コンクリート中に位置している。1/4補修試験体では、断面修復部分との距離が等しい母材コンクリート中の交差部（鉄筋1と鉄筋4、鉄筋2と鉄筋3の交差部）は、ほぼ同時期にアノード化していたが、1/2補修試験体の母材コンクリート中の交差部ではその時期は異なっていた。鉄筋2と鉄筋3の交差部では、暴露初期から約100日まで、鉄筋2と鉄筋4の交差部では暴露約450日以降にアノード化していた。特に、鉄筋2と鉄筋3の交差部は、表-3に示したとおり、アノード電流密度の最大値を示す場合が最も多かったため、暴露初期に著しく腐食が進行したことが考えられる。一方、断面修復材中の2箇所交差部は、暴露約220日から380日までの間、つまり暴露期間中で環境温度が15℃以下の時期に、挙動は不安定であるがアノード化することが多く、それ以外の時期はカソード化することが多かった。

ここで、図-18 c) に無補修試験体の交差部における腐食電流密度の変化を示す。無補修試験体の交差部は、その位置によってばらつきはあるものの、ほとんどが暴露100日前後までアノード化し、それ以降は、カソードとして作用する傾向が見られた。このばらつきは、交差部付近のコンクリートの空隙構造、周辺の塩化物イオンおよび酸素濃度等のコンクリート中の微少な条件の違いにより生じたものであると考えられる。

5.2で述べたとおり、交差部においては腐食電流が二次元的に入り出すことになる。このため、塩化物イオンを混入したコンクリート中の交差部は、周囲の鉄筋要素と比較して活発に電子を放出でき、特に、暴露初期に著しくアノード反応が進行することが考えられる。しかし、その後、鉄筋表面に生成される錆層や周囲の酸素濃度の低下により腐食反応が妨げられるようになると、交差部はカソード化することが考えられる。部分断面修復を施した部材については、母材コンクリート中の交差部は、断面修復部からの距離が離れるほど、コンクリート単体中の交差部と類似した挙動を示すことが考えられる。しかし、交差部付近の酸素や塩化物イオン濃度の大小等の条件により、交差部がアノード化する時期が変化するこ

とが考えられる。さらに、断面修復材中の交差部は概ねカソードとなるが、断面修復材中に塩化物イオンが侵入し不動態が不完全になった場合、かつ母材コンクリート中の交差部を含む鉄筋のアノード電流密度が小さい場合、不安定ではあるがアノード化する可能性があるといえる。

## 6. まとめ

本研究では、部分断面修復を施した床版試験体中の鉄筋のマクロセル腐食の形成について実験的な検討を行った。本研究で得られた結果および考察を以下に示す。

- (1) 部分断面修復を施した床版試験体の母材コンクリート中の鉄筋の腐食性状は、部分断面修復の範囲が大きいほど、コンクリート単体の場合と異なる傾向を示した。
- (2) 母材コンクリート中、母材コンクリート-断面修復材中よりも腐食電流密度は小さいが、断面修復材中の鉄筋間にも腐食電池の形成が見られた。また、母材コンクリート中の腐食電流密度は、母材コンクリート-断面修復材間の腐食電流密度よりも大きくなる可能性がある。
- (3) 部分断面修復を施した床版試験体のカソード電流密度の最大値は、環境温度の変動に対応して増加・減少した。アノード電流密度の最大値は、暴露初期を除いて環境温度の変動に対応した。部分断面修復範囲が大きいほど、アノード電流密度の最大値が環境温度に対応するまでの期間は長くなった。
- (4) コンクリート-断面修復材境界部の鉄筋は、暴露初期は、打継目からの酸素の侵入の影響によりカソード化した。しかし、それまでアノードであった位置の腐食の進行が妨げられるようになると、部材中の鉄筋の電気化学的バランスが変化して、境界部の母材コンクリート中の鉄筋がアノード化する場合がある。
- (5) 鉄筋の交差部では腐食電流が二次元的に出入りするため、鉄筋の直線部と比較して、腐食電流密度が大きくなりやすい。
- (6) 母材コンクリート中の交差部では、暴露初期に著しくアノード反応が進行した。しかし、時間の経過に伴って腐食の進行が妨げられるようになると、交差部はカソード化した。
- (7) 断面修復材中の交差部は、暴露期間中、概ねカソードとなるが、断面修復材中に塩化物イオンが侵入し不動態が不完全になった場合、かつ母材コンクリート中の鉄筋のアノード電流密度が小さい場合、アノ

ード化する可能性がある。

## 7. おわりに

本研究では、部分断面修復を施した床版試験体のマクロセル腐食電流密度の変化を把握し、部分断面修復を施した床版におけるマクロセルの形成メカニズムについて考察した。本研究で得られた成果は、既往の研究と比較して長期的な試験結果に基づくものであるため、断面修復を施した部材の長期耐久性の解明に寄与するものであると考える。しかし、実構造物における補修後の予定供用期間を考慮すれば、今後、断面修復を施した部材の腐食性状について、更に長期的な検討を行う必要があると考えられる。実際、本研究で用いた床版試験体は、試験終了後もその腐食性状が変化する兆候が見受けられた。

したがって、本研究の範囲では、塩害により劣化したコンクリート部材の補修対策として断面修復を適用する場合、部分的な断面修復と電気化学的な補修対策を併用する、或いは全断面修復により鉄筋周囲の母材コンクリート中の塩化物イオンを除去する対策を講じなければ、補修効果の長期にわたる持続は期待できないといえる。

なお、近年では、栈橋上部工に断面修復を施す場合、同時に鉄筋の防錆処理を施したり、表面被覆、あるいは電気防食を併用することが多い。いずれの工法を選定するにせよ、部材の維持管理レベルと構造物の予定供用期間を考慮した上で、補修工法およびその実施時期を適切に選定し、補修を確実に実施することが重要である。

(2009年8月14日受付)

## 参考文献

- 1) 港湾空港技術研究所編著：港湾の施設の維持管理技術マニュアル，沿岸技術研究センター，2007年。
- 2) Yokota, H., Iwanami, Kato, E. and Yamaji, T.: Life-cycle management of concrete structures in coastal area, Proceedings of the 2nd International Workshop on Life Cycle Management of Coastal Concrete Structures, Hang Zhou, China, November 2008, pp.53-58.
- 3) 鬼束俊一，瀬下雄一，中川貴之，堤知明，岩波光保：塩害劣化した鉄筋コンクリートに対する補修効果の定量評価に関する研究，土木学会論文集E，Vol. 62，No. 4，2006年，pp.832-843.
- 4) 出村克宣，大濱嘉彦，井部博：補修後5年経過した鉄筋コンクリート造建物の鉄筋腐食，コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集，1994年，pp.29-32.

- 5) 中村和彦, 佐伯竜彦: 補修した構造物の塩害再劣化メカニズムに関する一実験, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集 第5部, 1993年, pp.272-273.
- 6) 浜田秀則, 福手勤, 阿部正美: 塩害により劣化した鉄筋コンクリート部材の補修効果に関する実験的考察, コンクリート工学論文集, Vol. 3, No. 2, 1992年, pp.85-95.
- 7) 長滝重義, 大即信明, 守分敦郎, 宮里心一: 鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.544 / V-32, 1996年, pp.109-119.
- 8) 長滝重義, 大即信明, 守分敦郎, 鎌田敏郎, 宮里心一: 断面修復部における打継目の物質透過性が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.578 / V-37, 1997年, pp.31-42.
- 9) 守分敦郎, 長滝重義, 大即信明, 宮里心一: 断面修復が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, 1994年, pp.7-14.
- 10) 大即信明: コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第24巻 第3号, 1985年, pp.183-283.
- 11) 運輸省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1999年.
- 12) 加藤絵万, 岩波光保, 山路徹, 横田弘: 建設後30年以上が経過した栈橋上部工から切り出したRC部材の劣化性状と構造性能, 港湾空港技術研究所資料, No.1140, 2006年, 87p.
- 13) 古玉悟, 田邊俊郎, 横田弘, 濱田秀則, 岩波光保, 日比智也: 栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発, 港湾技研資料, No.1001, 2001年, 41p.
- 14) 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘: 栈橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, 第48巻 第2号, 2009年, pp.3-35.
- 15) 分割鉄筋作製マニュアル: [http://www2.kanazawa-it.ac.jp/miyalab/bunkatsu\\_manual.pdf](http://www2.kanazawa-it.ac.jp/miyalab/bunkatsu_manual.pdf)
- 16) 大即信明, 宮里心一, 鈴木裕隆, 木村勇人: 曲げひび割れ近傍に生じる主鉄筋とスターラップの塩化物腐食形成機構, 土木学会論文集, No.627 / V-44, 1999年, pp.161-177.
- 17) O. Nanayakkara and Y. Kato: Macro-cell corrosion in reinforcement of concrete under non-homogeneous chloride environment, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 7, No. 1, February 2009, pp.31-40.
- 18) Ping Gu, J.J. Beaudoin, P.J. Tumidajski and N.P. Mailvaganm: Electrochemical incompatibility of patches in reinforced concrete, Concrete International, August 1997, pp. 68-72.
- 19) 宮里心一, 大即信明, 佐伯竜彦: 分極曲線を用いた断面修復部のマクロセル腐食速度予測, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, 1998年, pp.865-870.

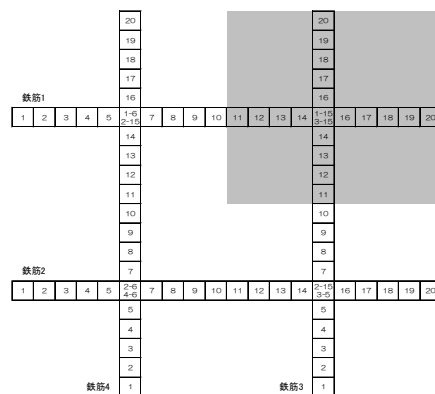
## 付 録

付録 A. 床版試験体の腐食電流密度分布

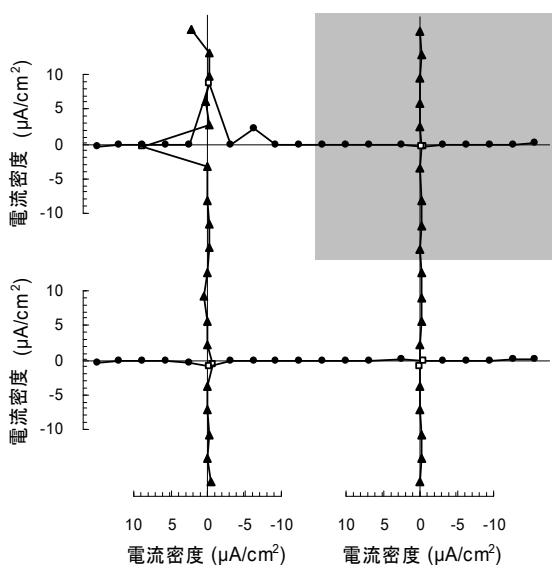
付録 B. 鉄筋要素のアノード・カソード推移



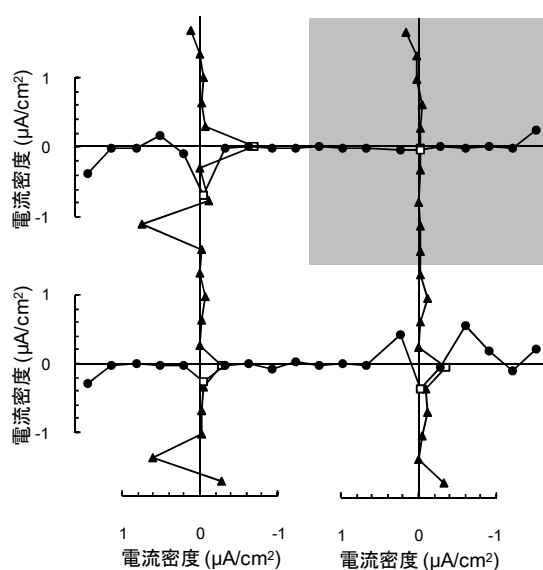
付録A. 床版試験体の腐食電流密度分布



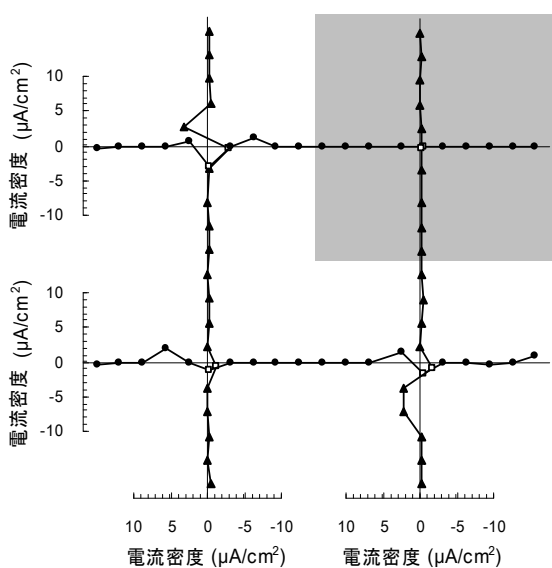
付図-A1 1/4 補修試験体の鉄筋要素の配置図



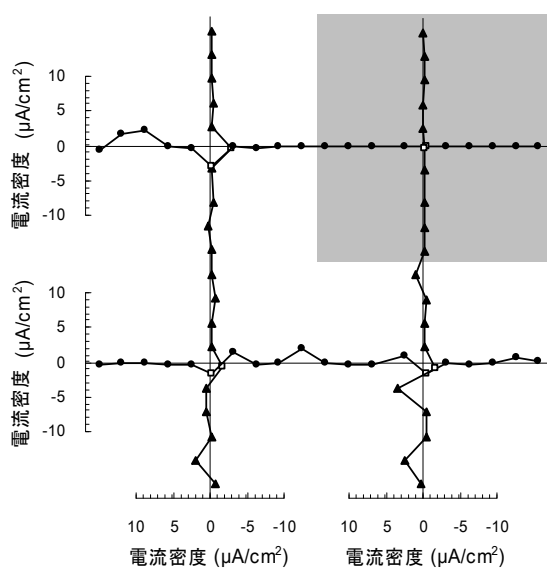
付図-A1 a) 暴露 67 日



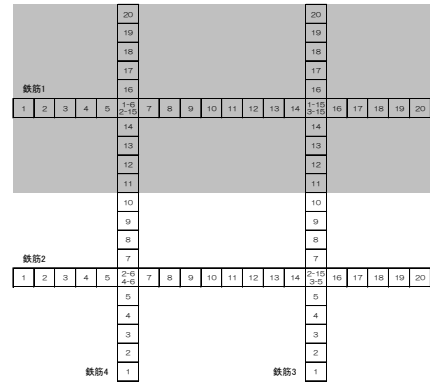
付図-A1 c) 暴露 328 日



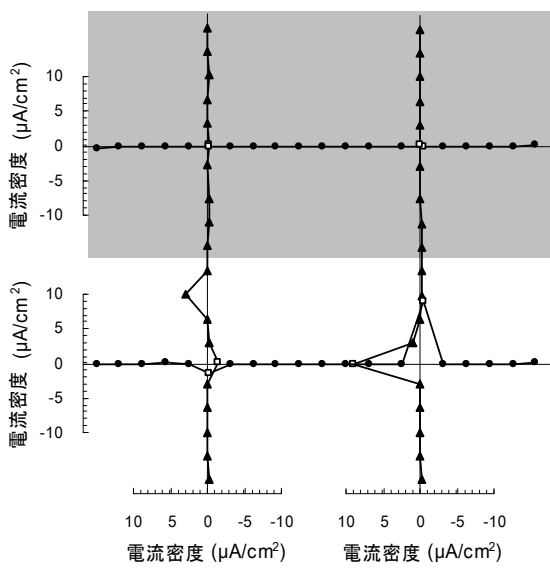
付図-A1 b) 暴露 160 日



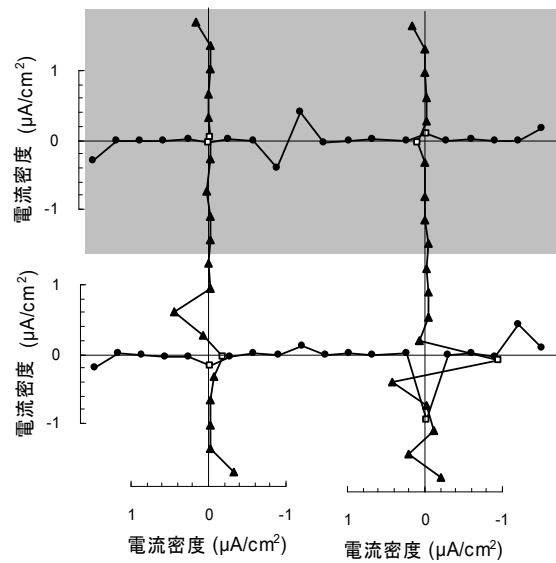
付図-A1 d) 暴露 517 日



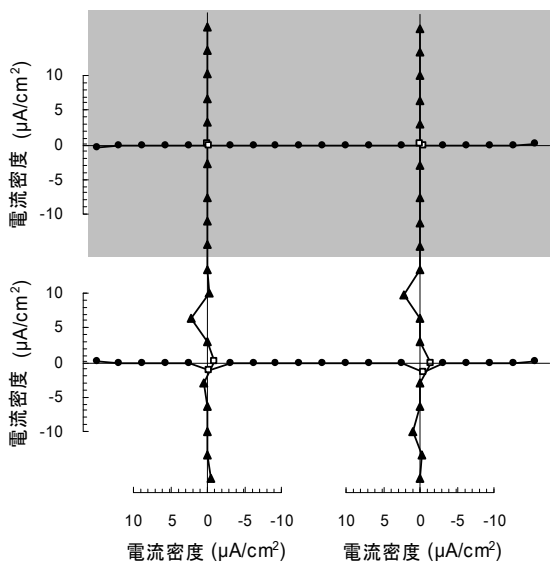
付図-A2 1/2 補修試験体の鉄筋要素の配置図



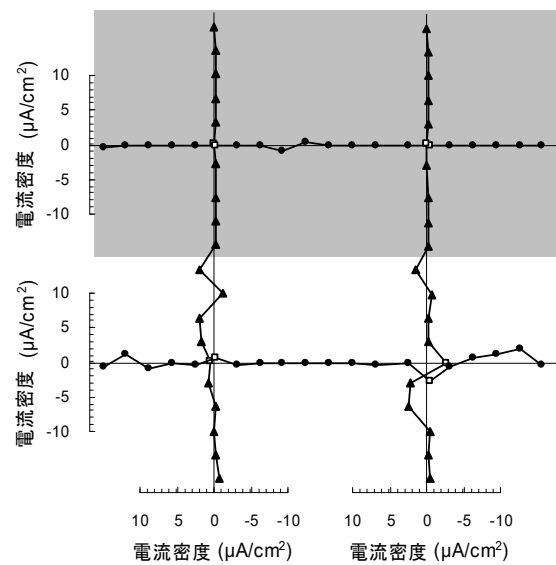
付図-A2 a) 暴露 24 日



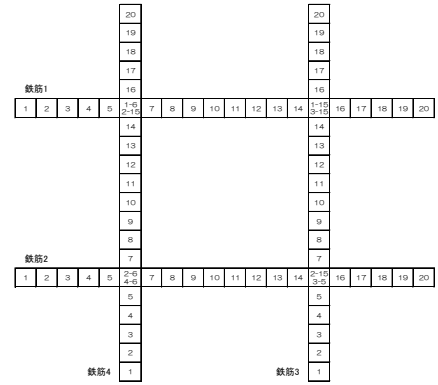
付図-A2 c) 暴露 328 日



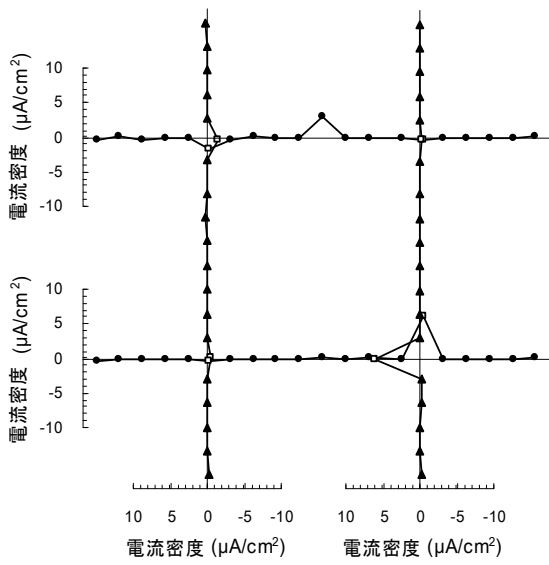
付図-A2 b) 暴露 160 日



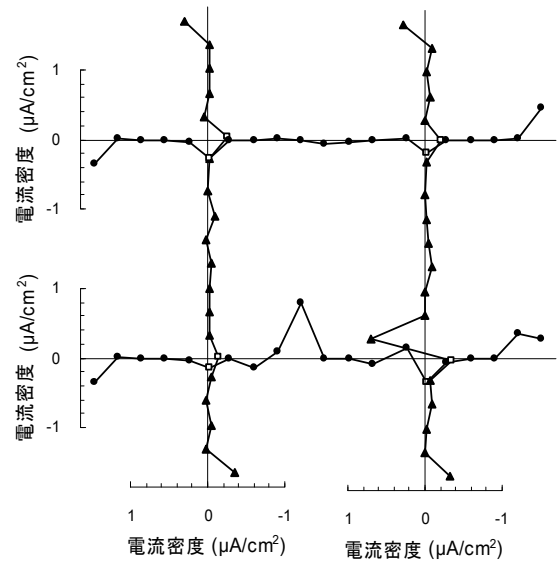
付図-A2 d) 暴露 517 日



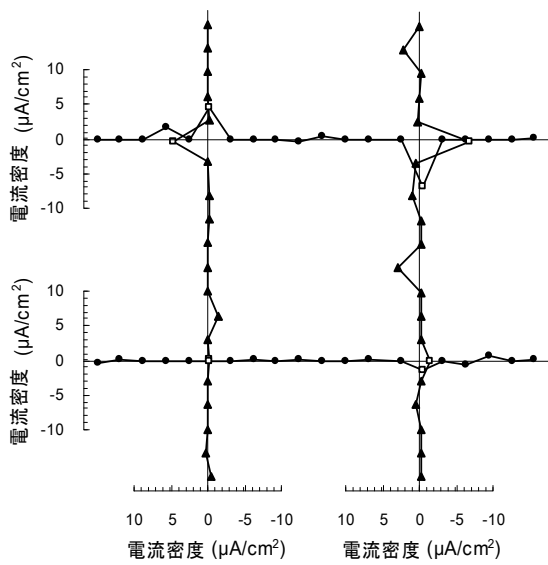
付図-A3 無補修試験体の鉄筋要素の配置図



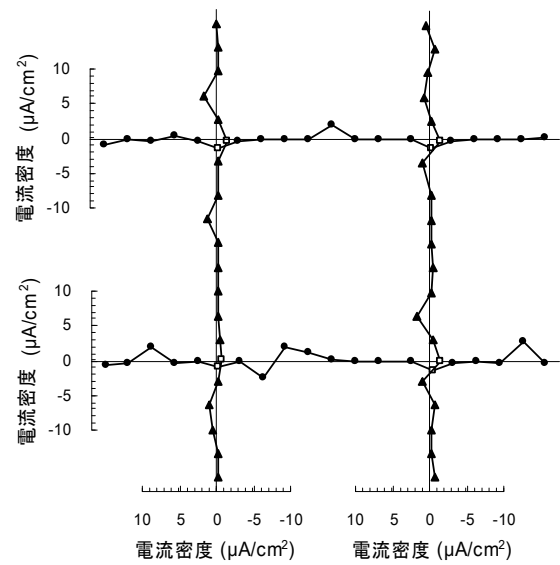
付図-A3 a) 暴露 69 日



付図-A3 c) 暴露 328 日



付図-A3 b) 暴露 160 日



付図-A3 d) 暴露 517 日

付録B. 鉄筋要素のアノード・カソード推移

付表-B.1 a) 1/4補修試験体のアノード・カソード推移

鉄筋	Position No.	交差	暴露日数																						
			4	21	24	27	34	41	47	62	69	77	96	105	112	118	133	146	153	160	167	175	181	188	195
1	1		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	2		C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	A
1	3		C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	4		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	5		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C
1	6	+	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	7		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	8		C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
1	9		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	10		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	11		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	12		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	13		C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	14		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	15	+	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	16		A	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	17		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	18		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	19		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	20		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
2	1		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	2		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	3		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	4		A	A	A	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	C	C	C	C	C
2	5		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	6	+	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C
2	7		C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A
2	8		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	9		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	10		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	11		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	12		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	13		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C
2	14		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A
2	15	+	C	A	A	A	A	A	C	C	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	16		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	C	C	C	C
2	17		C	C	C	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	18		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	19		A	C	C	C	A	C	A	A	A	A	A	C	A	A	C	C	C	C	C	A	A	A	A
2	20		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	1		A	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	2		C	C	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	3		C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	4		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	5		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	6	+	C	A	A	A	A	A	C	C	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C
3	7		C	A	A	C	C	A	C	C	A	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	8		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C
3	9		C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	10		C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C
3	11		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	12		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	13		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	14		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	15	+	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	16		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	17		C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	18		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	19		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	20		C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
4	1		A	A	C	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	2		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	3		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	4		C	C	C	C	C	A	A	A	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	5		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C
4	6	+	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C
4	7		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	8		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	9		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
4	10		A	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	11		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	12		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	A	C
4	13		C	A	A	A	A	C	C	C	C	C	A	A	A	A	C	C	C	C	C	A	A	A	A
4	14		C	C	C	C	A	C	C	C	C	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	15	+	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	16		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A
4	17		C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	18		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	19		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	20		C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

※網掛けは断面修復材部を示す。



付表-B.2 a) 1/2補修試験体のアノード・カソード推移

鉄筋	Position No.	交差	暴露日数																						
			4	10	24	27	34	41	47	62	69	77	96	105	112	118	133	146	153	160	167	175	181	188	195
1	1		C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	2		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	3		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	4		C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	A
1	5		A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	6	+	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	7		C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	8		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	9		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	10		A	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	A	A	A	A	C	C	A	C	C	C	C	C
1	11		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	12		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	13		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	14		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	15	+	A	C	C	C	C	A	C	C	C	A	A	C	C	C	A	C	C	A	C	C	A	C	A
1	16		C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	17		C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	18		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
1	19		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
1	20		C	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A
2	1		A	A	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	C	A	A	C	C
2	2		C	C	C	C	C	C	A	C	A	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	A	C	A
2	3		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	4		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	A
2	5		A	A	C	C	C	C	C	A	C	A	A	A	C	A	A	C	C	C	C	C	C	C	A
2	6	+	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	A	C	C	A	C	A
2	7		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	A	C	A	A
2	8		A	A	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	9		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	10		A	A	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	11		A	A	C	C	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	12		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	13		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	14		A	A	C	C	C	A	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	15	+	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	A
2	16		A	C	C	C	A	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	17		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2	18		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	19		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
2	20		C	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A
3	1		A	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	2		A	A	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	A	A	A	A	C	A
3	3		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	4		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	5		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	6	+	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	A
3	7		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	8		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	9		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	10		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	11		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	12		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	13		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	14		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	A	C	A	C	A	C	C	A
3	15	+	A	C	C	C	C	A	C	C	C	A	C	C	C	A	C	C	A	C	C	A	C	C	A
3	16		C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	17		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	18		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	19		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
3	20		C	C	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A
4	1		A	C	C	C	C	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	2		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	3		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	4		A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	5		A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	A	A	A	A	A	A	A
4	6	+	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	A	C	C	C	A
4	7		A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	8		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	C
4	9		A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	A	C
4	10		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	A	C	C	C	C	C	C	C	A
4	11		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	A	A
4	12		C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	13		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	14		A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	15	+	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	16		A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	17		C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	18		C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	19		A	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A
4	20		C	C	A	A	A	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A

※網掛けは断面修復材部を示す。



港湾空港技術研究所報告 第48巻第4号

2009.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



## CONTENTS

Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile .....	Yoshiaki KIKUCHI .....	3
Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching .....	Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA .....	23
Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens .....	Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI.....	53
Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers .....	Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA .....	71
Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure .....	Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA .....	89
Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery .....	Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI .....	109