

電気防食工法を用いた道路橋の維持管理 手法に関する共同研究報告書(その2)

－ 実橋を活用した調査および間欠通電方式の基礎的検討 －

Research on Maintenance Method of Road Bridges using Cathodic Protection
- Investigations of the Applicability Verification using an Actual Bridge
and Intermittent Current Supply of Cathodic Protection -.

国立研究開発法人 土木研究所

先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ

研究グループ長 西崎到、上席研究員 新田弘之、主任研究員 佐々木巖
交流研究員(元) 加藤智丈

構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ

上席研究員 石田雅博、主任研究員 山本 将、研究員(元) 山口岳思
主任研究員(元) 本間英貴、宇佐美惣
交流研究員(元) 關繭果、松尾健二、渡辺遼

東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

准教授 皆川浩、(元) 茂庭柁彦

日本エルガード協会

峰松敏和、山本誠、鹿島篤志、阿部健
新藤麻子、中澤貴幸、松居良美、三村典正

コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会

羽瀨貴士、小城守、小林浩之、加藤善史、宇山真介
鴨谷知繁、青山敏幸、佐々木亘、山本悟

要旨

橋梁を対象とした電気防食の簡便かつ効率的な維持管理手法の確立を目的として、供用中および撤去後の実橋について調査を行って電気防食工法の維持管理における課題や留意点を抽出した。これらをもとに、同工法の適用性や耐久性を確認するとともに、維持管理手法の信頼性の向上につながる知見を集約し、維持管理マニュアルの検証を行った。また、間欠的な通電方式について異なる腐食環境における防食性を評価した結果や、それを通じた通電停止時の状態評価について述べる。

キーワード：コンクリート橋、塩害、電気防食、維持管理、実態調査、間欠通電

電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する

共同研究報告書（その2） 第516号

令和2年3月

目次

1編	序論
2編	電気防食工法の現状
3編	電気防食工法の維持管理の実態調査
4編	供用中の橋梁の調査
5編	撤去橋梁の調査
6編	維持管理マニュアル（案）の策定
7編	新工法の開発（間欠通電方式の検証）
8編	結論

（1～8編は共同研究報告書第502号にて報告，第502号と第516号の総目次を本報告書巻末に収録）

9編	供用中/供用後の橋梁の調査	— 電気防食を適用した弁天大橋における防食効果の検証 —
1.	はじめに	9- 1
1.1	調査の経緯	9- 1
1.2	調査内容	9- 2
2.	概略調査	9- 3
2.1	弁天大橋（B橋）の概要	9- 3
2.2	電気防食に関する事項（調査票より）	9- 4
2.3	電気防食の維持管理に関する事項（調査票より）	9- 4
2.4	定期点検結果他に関する事項（調査票より）	9- 5
2.5	外観目視調査結果	9- 5
2.6	書類調査	9- 7
2.7	詳細調査項目	9- 7
3.	詳細調査	9- 8
3.1	弁天大橋電気防食概要	9- 8
3.2	詳細調査内容	9- 10
3.3	詳細調査結果	9- 11
3.4	詳細調査結果のまとめ	9- 20

4.	追加調査	9- 22
4.1	概要	9- 22
4.2	追加調査項目	9- 23
4.3	通電状態の確認	9- 25
4.4	陽極被覆モルタル浮き部での防食効果の確認	9- 31
4.5	耐用年数を経過した防食板の調査	9- 36
4.6	モニタリング測定不具合の調査	9- 44
5.	解体調査	9- 54
5.1	概要	9- 54
5.2	調査内容	9- 54
5.3	チタンメッシュ方式の調査結果	9- 59
5.4	チタングリッド方式の調査結果	9- 70
5.5	亜鉛シート方式の調査結果	9- 83
6.	電気防食を適用した弁天大橋（B橋）調査のまとめ	9- 97
6.1	陽極の変状と防食効果について	9- 97
6.2	電気防食の効果範囲	9- 97
6.3	陽極材の付着強度	9- 97
6.4	分配電流（外部電源方式）	9- 97
6.5	陽極耐久性試験	9- 97
6.6	配線配管材	9- 98
6.7	全体を通して	9- 98

10 編 撤去橋梁の調査

— 陽極の異なる腐食環境における配置がコンクリート内部の鋼材の分極量の分布に及ぼす影響の評価 —

1.	はじめに	10- 1
1.1	本編に示す調査の背景と目的	10- 1
1.2	撤去桁の概要	10- 2
2.	実験概要	10- 6
2.1	調査対象の部位	10- 6
2.2	通電方法	10- 7
2.3	その他の測定項目	10- 9
3.	実験結果	10- 10
3.1	電気抵抗率	10- 10
3.2	陽極－鋼材間の交流抵抗	10- 10
3.3	陽極への電流分配	10- 10
3.4	G5-3の下フランジ部の自然電位の分布と鋼材の腐食状況	10- 12
3.5	分極量比の分布	10- 12
4.	まとめ	10- 16

11 編 間欠通電方式の検証 — 異なる腐食環境における防食性の評価 —

1. はじめに	11- 1
2. 実験概要	11- 3
2.1 供試体概要	11- 3
2.2 通電方法および測定項目	11- 7
3. 実験結果	11- 11
3.1 各暴露環境における防食効果の検証	11- 11
3.2 試験室温 20°C, 相対湿度 60%の試験結果 (間欠通電)	11- 11
3.3 試験室温 20°C, 相対湿度 90%の試験結果 (間欠通電)	11- 19
3.4 試験室温度 40°C, 相対湿度 90%の試験結果 (間欠通電)	11- 41
3.5 試験室温度 40°C, 相対湿度 90%の試験結果 (常時通電)	11- 62
3.6 屋外暴露の試験結果 (間欠通電)	11- 78
3.7 屋外暴露の試験結果 (常時通電)	11- 91
4. 実験結果の考察	11- 98
4.1 各試験条件における鋼材の腐食状況	11- 98
4.2 防食期間中の通電停止期間における復極状況	11-100
4.3 間欠通電における防食効果	11-103
4.4 まとめ	11-106
5. 間欠通電 (断続通電) の適用にあたって	11-107

はじめに

1. 本研究の背景と目的

老朽化してくる橋梁が増加しているなか、コンクリート橋では塩害による劣化損傷により鋼材の腐食破断といった最悪の場合、落橋に繋がりがねない重篤な損傷事例が報告されてきている。

塩害を受けたコンクリート構造物の補修対策の一つである電気防食工法は、コンクリート表面または表層に設置した陽極材から内部の鋼材に微弱な防食電流を流し、電気化学的に鋼材の腐食反応を制御する工法である。この工法は、直流電源装置や、陽極システム、配線・配管などの付帯設備などから構成される電気防食システムが適切に構築され、適切な防食電流が流れている限り、鋼材腐食による劣化の進行を抑制することができる工法として、コンクリート構造物の長寿命化や予防保全といった観点からその有効性が期待され、その適用実績も増加している。

一方、電気防食工法を適用している構造物において、防食効果を適切に維持するための「稼働状態」や「防食状態」の維持管理ができず、結果として鋼材腐食などに起因すると考えられるコンクリートのひび割れ、はく離などの構造物自体の不具合が生じている事例も報告されており、電気防食工法の維持管理についての問題も生じている。

電気防食工法のコンクリート構造物への適用後の維持管理にあたっては、これまで土木研究所から提案している「新設コンクリート橋の電気防食マニュアル（案）2000年」、土木学会で制定している「電気化学的防食工法設計施工指針（案）2001年」において、維持管理手法が示されている。しかしながら、これらの維持管理手法の提案後、約20年が経過しているなかで、その手法などの活用状況や効果などは検証されていない。また、その後開発された新しい技術や新たに発生している不具合などへの対応が必要となっている。

そこで、本共同研究では、電気防食適用橋梁における道路管理者への実態アンケートや維持管理データの整理、実橋調査やその解析検討などから、現行の維持管理手法の効率化・高度化を目指すための改善点を明確にし、電気防食工法の新たな維持管理マニュアル（案）を提案した。電気防食工法を適用した橋梁の調査としては、供用中の複数の実橋、ならびに橋梁（弁天大橋および荒磯橋）撤去後の桁ブロックを活用した詳細な解体調査を行って、電気防食工法の適用性や耐久性を検証した。

また、電気防食工法の用途が予防保全や局所的な適用に広がりつつあることから、商用電源や蓄電池を使用しない低コストで信頼性が高い工法も期待されている。新たな通電方式の開発として、間欠通電方式の適用性や耐久性を検証し、その防食性や適用条件を評価した結果についても紹介する。

コンクリート構造物に適用する電気防食工法は、塩化物イオンが侵入し損傷が進行した橋梁に対しては数少ない対策工法となっていることから、適切な維持管理を効率的かつ確実に実施できる維持管理手法の提案や新たな工法の開発により現場での積極的な活用を図っていくことを期待したい。

2. 本研究の経緯と報告書の構成

2.1 既往の研究項目と報告書

本研究は、コンクリート構造物に適用する電気防食工法の維持管理における効率化・高度化を目指した維持管理手法の確立することを目的とするものであり、電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書－電気防食工法の維持管理の課題に関する研究成果－（(国研)土木研究所，東北大学，日本エルガード協会，コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会，共同研究報告書，No.502，2018.7）として研究成果を報告している。この報告書は、図-1の上部に示す第1編から第8編で構成されている。

第1編「序論」では、本研究の背景と目的を記述した。

第2編「電気防食工法の現状」では、現状の電気防食工法の技術について、工法概要およびその特徴として、構造部位や環境への適用性、耐用年数、施工実績、コストなどに着眼して整理した。

第3編「電気防食工法の維持管理の実態調査」では、道路管理者へのアンケート調査により、電気防食の維持管理実態を把握し、電気防食専門家へのアンケート調査により、専門家が理想とする管理水準を把握した。

電気防食適用後の不具合状況を把握するための調査として、第4編「供用中の橋梁の調査」および第5編「撤去橋梁の調査」に記述した。第4編「供用中の橋梁の調査」では、供用中の道路橋梁を対象に現地にて構造物や電気防食システムの不具合に関する調査結果を記述した。第5編「撤去橋梁の調査」では、撤去された電気防食適用橋梁に対して各種試験あるいは数値解析による評価に基づき、電気防食工法の信頼性の確保するための具体的な対策を示した。

第6編「維持管理マニュアル（案）の策定」では、第2編から第5編で明らかとなった電気防食工法の維持管理の効率化・高度化を目指した維持管理マニュアル（案）の策定方針を記述した。

第7編「新工法の開発」では、第3編で判明した維持管理リスクを軽減する新工法の開発として、間欠通電技術などに関する概要、実験結果について記述した。

第8編「結論」では、本研究を取り纏めたものであり、これを踏まえた電気防食工法の維持管理手法の確立へ向けた提言を記述した。

2.2 本報告の研究項目

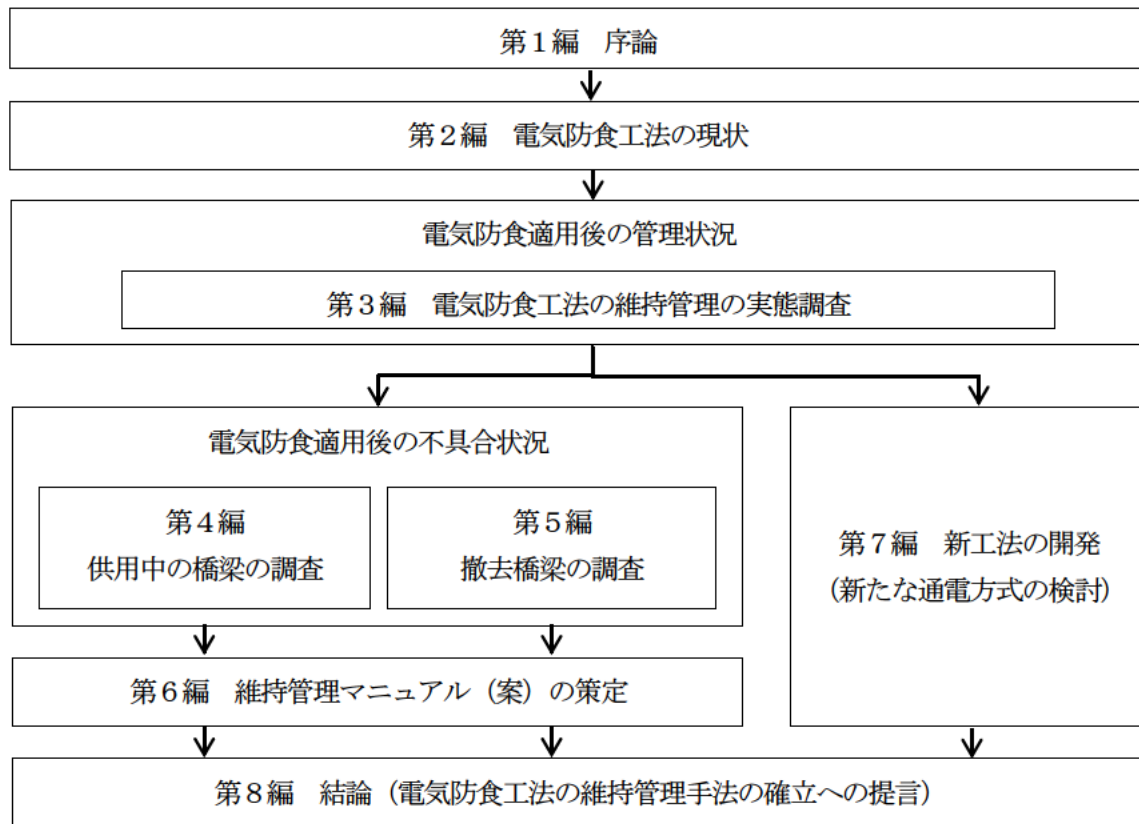
本研究では、上記の共同研究報告書 No.502 でとりまとめを行った一連の項目のうち、実橋を活用した試験調査、および室内における通電方式の試験については、継続して試験調査を行ってきた。本報告は、それらの成果をとりまとめた本共同研究の最終的な報告書である。

第9編「供用中/供用後の橋梁の調査」では、塩害劣化後に電気防食工法が適用され、その後架け替えによる撤去に到った弁天大橋について、構造物や電気防食の効果および電気防食システムの不具合に関する調査、解体調査による防食効果の検証についての一連の結果を記述した。

第10編「撤去橋梁の調査」では、撤去された電気防食適用橋梁に対して、既存の陽極システムに加えて異なる陽極システムも使い、陽極の再配置を行って通電試験を実施し、陽極配置が防食効果に及ぼす影響を実験的に評価した。

第11編「間欠通電方式の検証」では、間欠的な通電方式の防食性に関する実験の追跡調査結果について、上記報告書 No.502 の第7編を含めた総括報告として整理した。

共同研究報告書, No. 502, 2018. 7



共同研究報告書, No. 516, 2020. 3

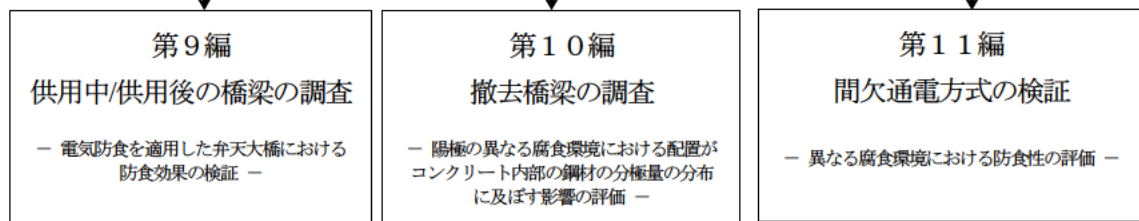


図-1 共同研究報告書の全体構成

9 編 供用中/供用後の橋梁の調査

－ 電気防食を適用した弁天大橋(B 橋)における防食効果の検証 －

目 次

1. はじめに	9- 1
1.1 調査の経緯	9- 1
1.2 調査内容	9- 2
2. 概略調査	9- 3
2.1 弁天大橋 (B 橋) の概要	9- 3
2.2 電気防食に関する事項 (調査票より)	9- 4
2.3 電気防食の維持管理に関する事項 (調査票より)	9- 4
2.4 定期点検結果他に関する事項 (調査票より)	9- 5
2.5 外観目視調査結果	9- 5
2.6 書類調査	9- 7
2.7 詳細調査項目	9- 7
3. 詳細調査	9- 8
3.1 弁天大橋電気防食概要	9- 8
3.2 詳細調査内容	9-10
3.3 詳細調査結果	9-11
3.4 詳細調査結果のまとめ	9-20
4. 追加調査	9-22
4.1 概要	9-22
4.2 追加調査項目	9-23
4.3 通電状態の確認	9-25
4.4 陽極被覆モルタル浮き部での防食効果の確認	9-31
4.5 耐用年数を経過した防食板の調査	9-36
4.6 モニタリング測定不具合の調査	9-44
5. 解体調査	9-54
5.1 概要	9-54
5.2 調査内容	9-54
5.3 チタンメッシュ方式の調査結果	9-59
5.4 チタングリッド方式の調査結果	9-70
5.5 亜鉛シート方式の調査結果	9-83
6. 電気防食を適用した弁天大橋 (B 橋) 調査のまとめ	9-97
6.1 陽極の変状と防食効果について	9-97
6.2 電気防食の効果範囲	9-97

6.3	陽極材の付着強度	9- 97
6.4	分配電流（外部電源方式）	9- 97
6.5	陽極耐久性試験	9- 97
6.6	配線配管材	9- 98
6.7	全体を通して	9- 98

9 編 供用中/供用後の橋梁の調査

— 電気防食を適用した弁天大橋(B 橋)における防食効果の検証 —

1. はじめに

1.1 調査の経緯

電気防食工法は、コンクリート構造物の塩害対策工法として広く適用されているが、近年、電気防食適用中の橋梁で、鋼材腐食に起因するひび割れや剥離などの変状が生じている事例が報告されている。

そこで、電気防食工法を適用している直轄橋梁 58 橋に対して実施した調査票の回答から、6 橋について現地で概略調査を行い、その結果から構造物の変状や電気防食システムの不具合、施工後の維持管理状況などを考慮して 3 橋を選定し詳細調査を実施した。調査対象橋梁一覧を表-1.1.1 に示す。

さらに、電気防食の適用から約 20 年が経過した弁天大橋 (B 橋) において、変状が確認された陽極被覆モルタル周囲での防食効果の確認、耐用年数を経過した流電陽極方式防食板の消耗量調査、計測不良が報告された照合電極の調査等を追加調査として行い、同様な事象が起きた場合に有用となる知見が得られた。

調査は、供用中には足場または高所作業車により近接し、その近傍での表面電位分布や分配電流などの測定により電気防食の効果を評価するとともに、直流電源装置や配管材など付帯設備の確認、また、通電方式や陽極設置方式に応じた調査を行った。さらに解体調査では、PC 桁を大ブロックに切断し試験ヤードに移設して、通電試験や、付着強度や陽極材採取、結線状況や内部鋼材腐食状況等の破壊調査を含めた様々な詳細調査を行い、電気防食工法の適用性や耐久性の検証と、今後の維持管理に向けて具体的な方策となるような知見を得た。

表-1.1.1 実橋調査を行った電気防食適用橋梁一覧

対象	電気防食方式	概略調査	詳細調査	追加調査	解体調査	電気防食適用
						括弧内は概略調査時の経過年数
A 橋 (東北)	チタンロッド [®]	○	○	—	—	適用 1999 年 (15 年)
X 橋 (東北)	チタングリッド [®]	○	—	—	—	適用 1996 年 (18 年)
Y 橋 (北陸)	チタンリボンメッシュ・チタングリッド [®]	○	—	—	—	適用 2000 年 (14 年)
	チタンロッド [®] ・チタン溶射					※新設時より適用
B 橋 (北陸)	チタンメッシュ・チタングリッド [®]	○	○	○	○	適用 1996 年 (18 年)
	流電陽極 (亜鉛)					
C 橋 (九州)	チタンリボンメッシュ縦置き	○	○	—	—	適用 2005 年 (9 年)
Z 橋 (沖縄)	チタン溶射・チタングリッド [®]	○	—	—	—	適用 2002 年 (12 年)
	チタンロッド [®] ・チタンリボンメッシュ・チタンメッシュ					※新設時より適用

○ : 調査実施

1.2 調査内容

本研究は、電気防食工法を適用したコンクリート構造物における施工後の変状や電気防食装置の維持管理について調査を行い、維持管理マニュアル作成のための資料を収集することを目的とするものである。

概略調査～維持管理マニュアルまでの基本的なフローを図-1.2.1に示す。





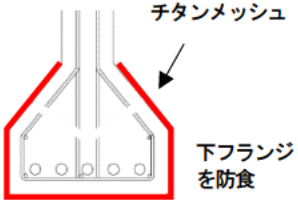
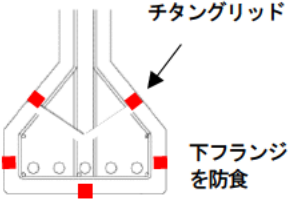
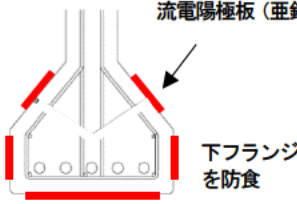
図-1.2.1 弁天大橋解体調査までの実橋調査の流れ

2. 概略調査

2.1 弁天大橋（B橋）の概要

橋梁の概要を表-2.1.1に示す。単純PCプレテンションT桁17連のうちの第8径間では、架橋後12年で塩害が生じ断面修復と表面保護工が実施されたものの、その後も再劣化が見られ塩害の進行抑制が困難と判断されたことから、電気防食を試行的に設置し、そのモニタリングも併せて実施されてきた。

表-2.1.1 弁天大橋の概要

名称	弁天大橋		
所在地	北陸地方	路線名	国道8号
橋梁管理者	北陸地方整備局高田河川国道事務所	竣工	1974年4月
構造形式	PC桁橋 17径間、橋長340.02m、全幅員11.35m		
海岸からの距離	約0m (架橋時一部海洋上で、H15海岸整備により下記写真の地形となった)	日交通量	11,160台 (大型車3,307台)
凍結防止材の散布	なし		
<p><調査写真></p>  <p>←上越側（第1径間）</p> <p>富山側（第17径間）→</p> <p>弁天大橋全景（第8径間に電気防食適用）</p>  <p>←山側(G11)</p> <p>海側(G1)→</p> <p><u>電気防食適用範囲（第8径間）</u> G1～G4：チタンメッシュ方式 G5～G7：チタングリッド方式 G8～G11：流電陽極方式</p>			
<p><電気防食概要図></p>  <p>チタンメッシュ</p> <p>下フランジを防食</p> <p>チタンメッシュ方式</p>  <p>チタングリッド</p> <p>下フランジを防食</p> <p>チタングリッド方式</p>  <p>流電陽極板（垂鉛）</p> <p>下フランジを防食</p> <p>流電陽極方式</p>			

2.2 電気防食に関する事項（調査票より）

電気防食に関する事項を表-2.2.1に示す。

表-2.2.1 電気防食に関する事項（弁天大橋）

電気防食適用前の補修	あり（S57年度～ 断修・塗装）※供用開始約8年後
電気防食適用前の劣化調査	あり（年度不明） 劣化要因：塩害 ひび割れ：あり 剥離・剥落：あり 塩化物イオン量：データなし
電気防食施工年度	1996年度 ※供用開始約18年後（調査時）
電気防食方式	G1～G4：チタンメッシュ方式 G5～G7：チタングリッド方式 G8～G11：流電陽極方式（亜鉛シート方式）
電気防食適用径間	1径間（P7-P8径間）
電気防食面積	66 m ² （3方式合計）
防食回路数（外部電源方式）	3回路（チタンメッシュ方式1回路，チタングリッド方式2回路）
全体工事費	試験施工のため不明
補修工種	塗膜除去＋電気防食
適用部位	主桁下フランジ部
電気防食設計・竣工図書	あり（別紙）

2.3 電気防食の維持管理に関する事項（調査票より）

電気防食の維持管理に関する事項を表-2.3.1に示す。

表-2.3.1 電気防食の維持管理に関する事項（弁天大橋）

点検の有無	あり	
点検手法	現地点検	
点検項目・頻度	1. パイロットランプ点灯確認	1回/年程度
	2. 電源装置目視	1回/年程度
	3. 配線・配管・プルボックスの目視	1回/年程度
	4. 陽極材の設置状況目視	1回/年程度
	5. 各回路の電流量	1回/年程度
	6. 各回路の電圧量	1回/年程度
	7. 鉄筋電位（On電位，Instant Off電位）	1回/年程度
	8. 復極量	1回/年程度
	9. 臨時点検	必要時に判断

2.4 定期点検結果他に関する事項（調査票より）

電気防食の定期点検結果他に関する事項を表-2.4.1 に示す。

表-2.4.1 定期点検結果他（弁天大橋）

定期点検結果（2013年12月）	対策区分：B 状況に応じて補修を行う必要がある	
電気防食適用後の不具合 （アンケート結果および 概略調査結果より）	1. 電気防食範囲内コンクリート	あり
	2. 陽極材および陽極分配材	あり
	3. 直流電源装置	あり
	4. 配線配管	なし
	5. その他	なし

2.5 外観目視調査結果

2.5.1 電気防食対象範囲内コンクリート

陽極システムの形状から、コンクリート表面を観察できたのはG5～G7に適用されているチタングリッド方式のみである。外観目視においてはひび割れ、剥離等の損傷劣化はみられなかった。

2.5.2 陽極材および陽極分配材の状況

チタンメッシュ方式 G1 桁底面に被覆モルタルの剥落が確認された。また、流電陽極方式範囲において、防食板端部パテ材剥落防止のため、養生ネットが設置されていた。



写真-2.5.1 チタンメッシュ方式陽極被覆モルタル剥落部（G1 桁底面）



写真-2.5.2 流電陽極方式部養生ネット設置状況（G8～G11 桁）

2.5.3 直流電源装置

高所作業車により近接して通電状況を確認した。チタンメッシュ回路 R3，チタングリッド回路 No.2 の R2 照合電極の測定値が安定しておらず測定不能であった。



写真-2.5.3 直流電源装置および流電モニタリングボックス

2.5.4 配線配管材

今回の概略調査においては、特に異常は確認されなかった。

2.5.5 電気防食対象範囲外の変状

電気防食対象範囲外において、他径間での主桁部の剥落、同径間での横桁部の剥落を確認した。



写真-2.5.4 主桁の変状（他径間）



写真-2.5.5 横桁の変状（同径間）

2.5.6 周囲環境条件

桁下面は地上から 5m 程度の高さにあり、直流電源装置も高い位置に設置されているため、詳細調査を行う場合は、高所作業車を使用しての調査となる。



写真-2.5.6 高所作業車による調査状況

2.6 書類調査

弁天大橋では電気防食の適用から約 17 年間、定期的な点検が行われている。各方式の主な変状として、チタンメッシュ方式での被覆モルタルひびわれ、浮き、チタングリッド方式での被覆モルタル劣化、ひびわれ、流電陽極方式においては防食板端部パテ材の剥離が確認されている。

防食効果の確認は、電気防食適用開始から定期的に復極量試験が行われており、概ね防食基準が得られていることを確認した。また、チタンメッシュ G3 桁において 2011 年 11 月時点で電位の測定不能が報告されている。今回、概略調査時の測定においても電位表示値が不安定のため測定ができなかった。照合電極の機能が損なわれている可能性が考えられるため、詳細調査により確認する必要がある。

2.7 詳細調査項目

概略調査結果をもとに設定した、弁天大橋での詳細調査に必要な項目を以下に示す。

表-2.7.1 弁天大橋詳細調査項目一覧

分類	項目	内容	数量	備考
電気防食範囲内 コンクリート	詳細目視	劣化調査資料をもとに確認		
陽極 陽極分配材	被覆モルタル、パテ 材劣化部	詳細目視 チタンメッシュの剥落部 チタングリッドのひびわれ部 流電陽極のパテ変状	劣化部	
直流電源装置	通電測定 (電圧・電流)	通電電圧 通電電流 (電流密度)	3 方式	
	鉄筋電位測定 (照合電極)	オン電位 インスタントオフ電位 オフ電位	モリソグ 12 箇所	
		チタングリッド G3 桁 照合電極	1 箇所	
配線配管	結線部の確認	プルボックス内の目視 結線部の状況確認	可能な範 囲で	
	分配電流の確認	クリップオン電流計による 分配電流確認		

3. 詳細調査

3.1. 弁天大橋電気防食概要

3.1.1 調査概要

対象施設：弁天大橋（PCT 桁橋・17 径間 11 主桁）

調査日：2015 年 11 月 16 日～2015 年 11 月 18 日

3.1.2 電気防食適用位置

試験施工として第 8 径間に適用されている。（G1 桁～G11 桁下フランジ）

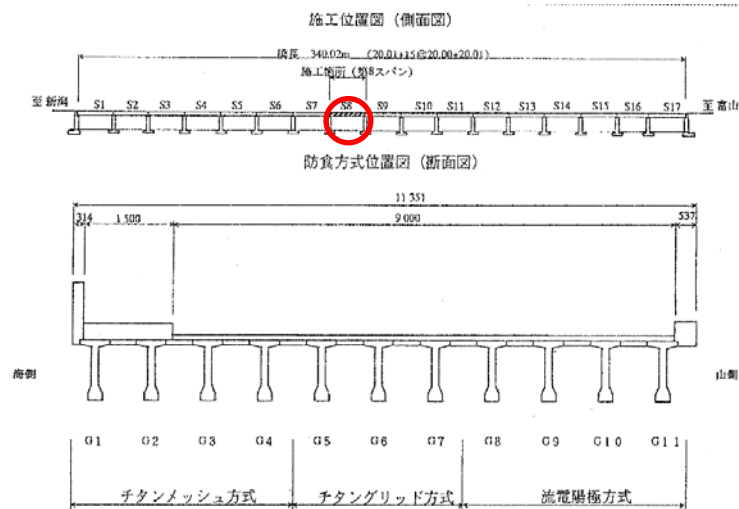


図-3.1.1 弁天大橋電気防食適用位置

3.1.3 電気防食方式

3.1.3.1 チタンメッシュ方式（外部電源方式，面状設置方式）

チタンメッシュ陽極をコンクリート表面に設置し，これをモルタル（オーバーレイ材）で被覆する。

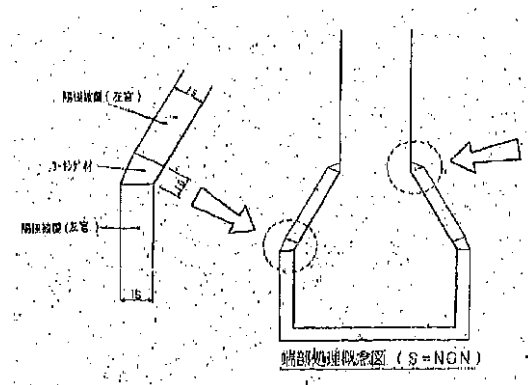


図-3.1.2 チタンメッシュ方式の概要

3.1.3.2 チタングリッド方式（外部電源方式，線状設置方式）

チタングリッド陽極を一定間隔で切削した溝に設置し，セメントモルタルにより充填する。

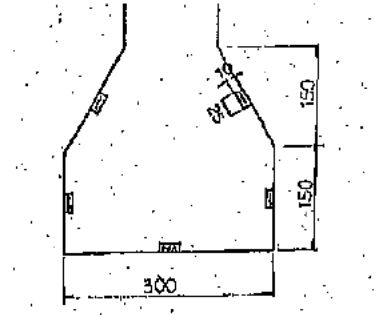


図-3.1.3 チタングリッド方式の概要

3.1.3.3 流電陽極方式（流電陽極方式，面状設置方式）

保護カバーで覆われた亜鉛シート，特殊バックフィルからなる亜鉛防食板をアンカーボルトでコンクリート表面に設置する。

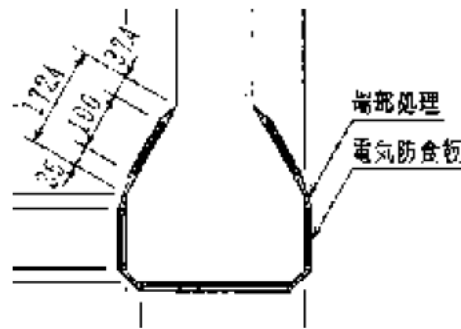


図-3.1.4 流電陽極方式の概要

3.1.4 回路構成とモニタリング位置

電気防食の効果を確認するためのモニタリング装置は，各方式において4箇所設置されている。

表-3.1.1 弁天大橋の電気防食回路構成

方式	回路数	モニタリング数
チタンメッシュ	1	4
チタングリッド	2	4
流電陽極	—	4

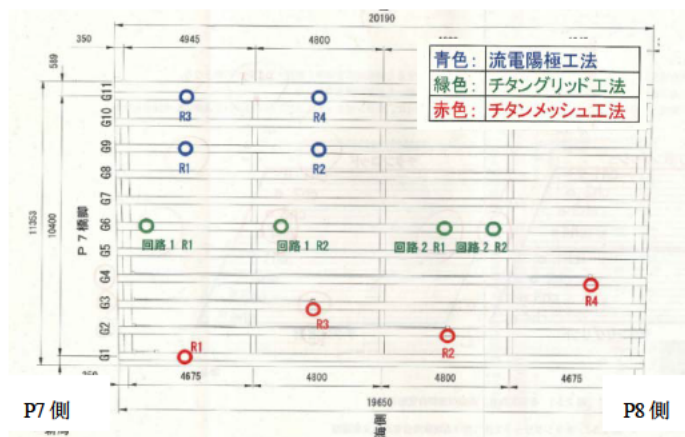


図-3.1.5 弁天大橋モニタリング位置図

3.2 詳細調査内容

3.2.1 調査内容

弁天大橋における詳細調査は、先に実施した概略調査結果に基づき、下記の項目について実施した。

表-3.2.1 弁天大橋詳細調査項目

調査区分	No	対象位置および項目	内容
目視調査	1	コンクリート面 陽極設置面	近接目視・たたき点検による変状の有無確認
	2	直流電源装置	外観、端子台等の状況を確認
	3	配線配管	設置状況、配管材固定状況等を確認
	4	プルボックス	設置状況、結線部の状況等を確認
測定調査	5	通電状態の測定	通電電圧・通電電流の測定
	6	防食効果の確認	オン電位、インスタントオフ電位、オフ電位の測定
	7	被覆モルタル剥落部	表面電位による防食効果確認 (チタンメッシュ方式：G1桁)
	8	内部照合電極不能部	表面電位による防食効果確認 (チタンメッシュ方式：G3桁)
	9	分配電流測定	チタンメッシュ回路での分配電流測定

3.3 詳細調査結果

3.3.1 陽極設置コンクリート面確認結果

チタンメッシュ方式において2箇所剥落を確認した。G1桁は概略調査時に確認していたが、G4桁については新たなものであり、剥落部周辺において浮きも確認された。また、チタングリッド方式においては、G5桁の一部に陽極被覆モルタルの浮きがみられた。流電陽極方式では間詰めモルタルの浮きや剥落が全体的にみられ、剥落による第三者被害防止のための養生ネットが設置されていた。また、防食板表面に波を打ったような変形が確認された。



写真-3.3.1 G1桁被覆モルタル剥落部



写真-3.3.2 G4桁被覆モルタル剥落部



写真-3.3.3 G5桁被覆モルタル浮き部



写真-3.3.4 G9桁パテ剥落部



写真-3.3.5 流電防食板波打ち状況



写真-3.3.6 たたき点検状況

3.3.2 直流電源装置・モニタリングボックス確認結果

本橋の下面は海水浴場の砂浜の一部であるため、直流電源装置、流電陽極方式のモニタリングボックスはP7橋脚の上部に設置されていた。箱体外観に劣化や損傷等は認められず、扉の開閉や鍵の開錠もスムーズに行えており、内部端子台の劣化等もなく状態は良好であった。



写真-3.3.7 直流電源装置・モニタリングボックス

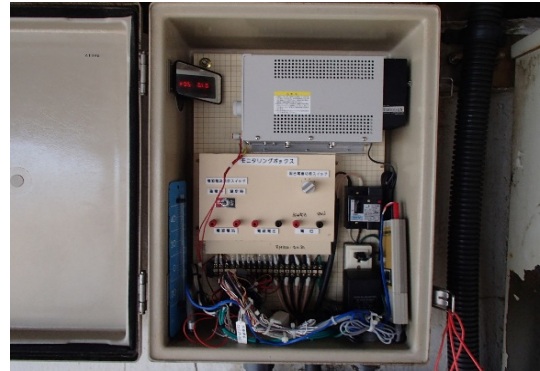


写真-3.3.8 チタンメッシュ方式
(直流電源装置)



写真-3.3.9 チタングリッド方式
(直流電源装置)

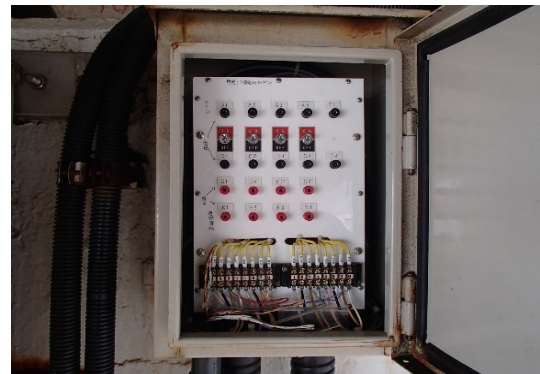


写真-3.3.10 流電陽極方式
(モニタリングボックス)

3.3.3 配線配管材確認結果

チタンメッシュ方式は1回路であり、4本の桁に配管材が分配されている。配管材は塩ビ製であり、配管は樹脂製サドルおよび樹脂製アンカーで固定されていた。樹脂製のため腐食もなく健全であった。

チタングリッド方式は、橋軸方向に回路が分割されており桁を横断するため、可とう性のある波付合成樹脂製配管材が設置されており、固定材としてチタンメッシュ方式と同様、樹脂製サドルおよび樹脂製アンカーで固定されていた。配管材の劣化や損傷等もなく健全であった。

流電陽極方式においてもチタングリッド方式と同様、波付合成樹脂製可とう管が使用されていたが、各桁に分配するための橋脚に設置された配管材の固定にSUS製サドルおよびSUS製アンカーが使用されており、その部分で錆汁の汚れが確認された（電防対象外の橋脚部表面）。

全体の評価として配管材の脱落等は確認されておらず、固定状況は良好であった。



写真-3.3.11 チタンメッシュ方式
(直線部配管状況)



写真-3.3.12 チタンメッシュ方式
(樹脂製配管材固定具)



写真-3.3.13 チタングリッド方式
(桁横断部配管状況)

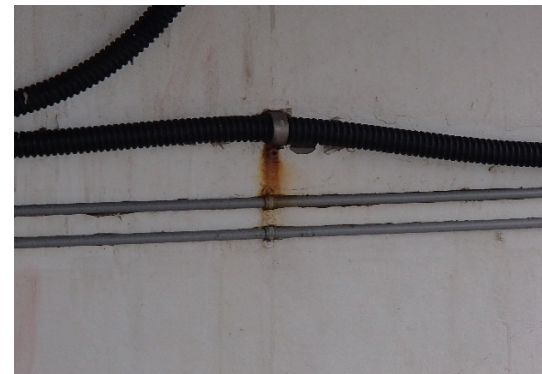


写真-3.3.14 流電陽極方式
(SUS製金具からの錆汁)

3.3.4 プルボックス確認結果

プルボックスは結線部の収納やケーブル分岐点となる場所である。チタンメッシュ方式においては、各ケーブル結線部が写真-3.3.15 に示すように、弾性シリコン材で絶縁処理が施されており腐食もなく健全であることが確認された。

チタングリッド方式では、写真-3.3.16 に示すように、プルボックス上部に切り込み孔があり、そこから樹脂材がプルボックス内部に充填されており、プルボックスを開放することができなかった。

流電陽極方式では、写真-3.3.17 に示すよう、プルボックスの上蓋を固定するためのビス頭が一般的なドライバーで回すことができない特殊構造であったこと、また、養生ネットで固定されていたため、結線部の確認ができなかった。

なお、チタンメッシュ方式 P7 橋脚部に設置してあるプルボックスは、外側および内側ともに損傷等もなく健全であった。



写真-3.3.15 チタンメッシュ方式結線部



写真-3.3.16 チタングリッド方式（樹脂充填）



写真-3.3.17 流電陽極方式（特殊ビス仕様）



写真-3.3.18 橋脚部プルボックス

3.3.5 通電電圧・電流測定結果

チタンメッシュ方式の通電方式は定電流方式であるため、電流値に過年度との差はなく概ね一定であることが確認された。電圧値は測定時期が冬季のこともあり回路抵抗が増加しており、夏季（過年度6月における測定では1.76V）と比較して大きい値であることが確認された。

チタングリッド方式の通電方式は、過年度報告書より定電位方式であることが確認されているが、過去の通電結果が入手できず、通電電圧および電流値の評価が難しいところではあるが、防食効果も確認されており適性な範囲での通電がされているものと思われる。

流電陽極方式においては、通電電流のみの測定となる。モニタリング4箇所における通電電流を測定した結果、R1=4.68mA, R2=4.44mA, R3=5.54mA, R4=6.16mA であり、ほぼ均等な発生電流であることが確認された。

また、オフ時の陽極電位は、それぞれR1=-941mV, R2=-915mV, R3=-887mV, R4=-917mVであった。亜鉛の固有電位は一般的に-1000mV程度であるため、耐用年数を過ぎているが電位の大幅な電位の貴化はなく、陽極として機能していることが確認された。

なお、外部電源方式の電源装置は市販のものが使用されていた。

表-3.3.1 通電測定結果

電気防食方式	回路No	通電電流 (A)	通電電圧 (V)	防食面積 (m ²)	電流密度 (mA/m ²)
チタンメッシュ方式	—	0.107	1.89	22.0	4.86
チタングリッド方式	1	0.073	2.68	11.0	6.64
	2	0.039	1.99	11.0	3.55
流電陽極方式	—	—	—	—	—



写真-3.3.19 外部電源方式測定状況

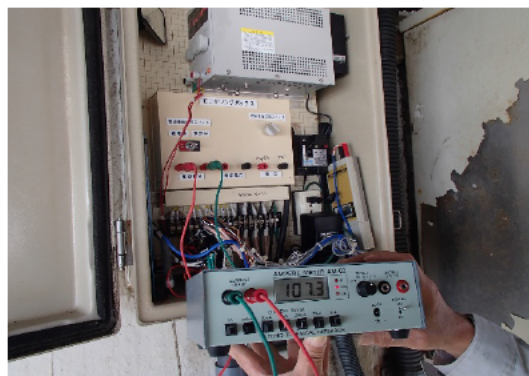


写真-3.3.20 流電陽極方式測定状況

3.3.6 防食効果測定結果

直流電源装置およびモニタリングボックスにて、埋設照合電極により防食効果の確認試験である復極量試験を行った。復極量試験の結果を表-3.3.2に示す。なお、各方式において照合電極が異なるため、飽和硫酸銅基準（CSE）に換算している。測定の結果、チタンメッシュ方式R3を除き、防食基準を満足しており、インスタントオフ電位についても過防食電位-1000mVより貴であるため、適正な範囲での通電状態であることが確認された。

チタンメッシュ方式R3（G3桁）においては、電位値が不安定であり測定ができなかった。過年度の報告書からも2011年11月時点より測定不能との記録があるため、照合電極の機能が損なわれていることや、配線経路の接点不良が考えられるため、詳細調査を行い早急に復旧することが望ましい。

表-3.3.2 復極量測定結果（防食基準100mV以上）

単位：mV

	チタンメッシュ方式 (飽和塩化銀)			チタングリッド方式 (鉛電極)			流電陽極方式 (二酸化マンガ)		
	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量
R1	-481	-245	236	-691	-314	377	-519	-170	349
R2	-489	-125	364	-664	-345	319	-477	-213	264
R3	----	----	----	-731	-522	209	-640	-186	454
R4	-595	-263	332	-676	-479	197	-506	-237	269

飽和硫酸銅（CSE）基準に換算

3.3.7 陽極被覆モルタル剥落部における表面電位の確認

チタンメッシュ方式, G1 桁被覆モルタル剥落部において, 外部照合電極により表面電位での復極量試験を行った。測定の結果, 剥落部においても周囲と同等の電位変化を示しており, 被覆モルタルの剥離による防食効果への影響は特に確認されなかった。



写真-3.3.21 チタンメッシュG1桁剥落部測定状況



写真-3.3.22 チタンメッシュ健全部測定状況

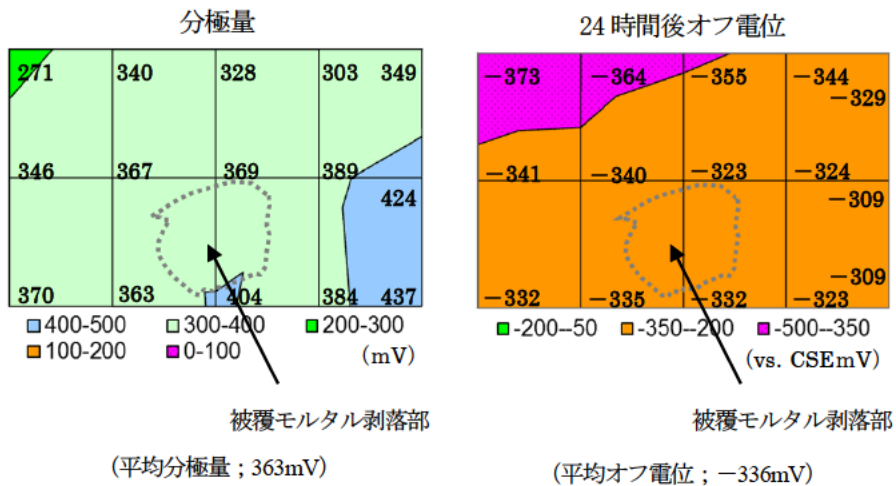


図-3.3.1 外部照合電極による表面電位分布結果 (チタンメッシュ方式G1桁)

3.3.8 照合電極測定不能桁における表面電位の確認

埋設照合電極による測定が不能であった、チタンメッシュ方式G3桁において、外部照合電極により表面電位での復極量試験を行った。測定の結果、平均436mVの分極量が得られており、24時間後のオフ電位も貴化していることから、測定不能である埋設照合電極の代替として、外部照合電極により防食効果があることを確認できた。

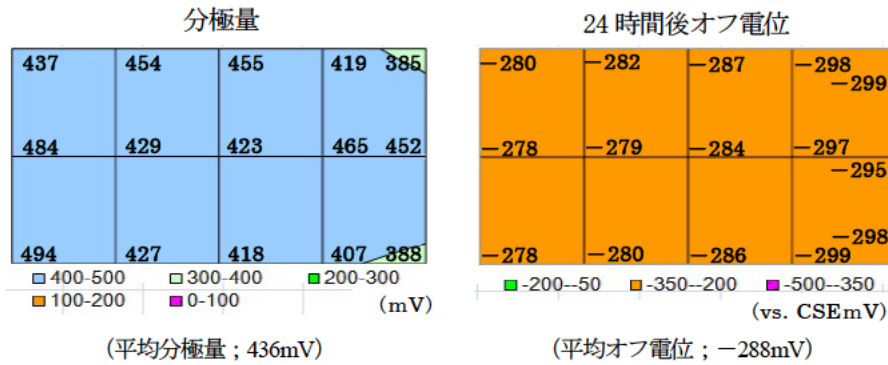


図-3.3.2 外部照合電極による表面電位分布結果 (チタンメッシュ方式G3桁)

3.3.9 分配電流測定

プルボックスの開放が可能なチタンメッシュ方式において、分配電流を測定した。図-3.3.3 に示すように、直流電源装置から4本の桁それぞれに配線が分配されている。この分配電流を各プルボックスにおいて、クリップオン電流計を用いて測定を行った。クリップオン電流計は、電流による磁界を測ることによって、電気回路を開くことなく測定できる電流計である。測定値はいずれも0.03A~0.04Aであり、均等に分配されていることが確認された。

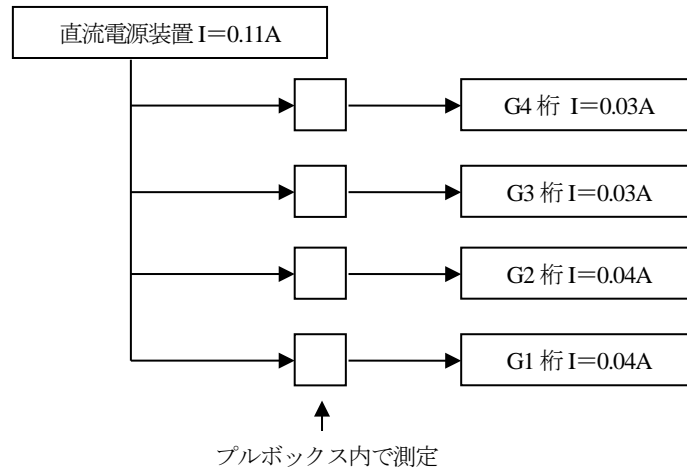


図-3.3.3 分配電流計結果（チタンメッシュ方式）



写真-3.3.23 チタンメッシュ方式
配線分配状況（P7橋脚側面）



写真-3.3.24 電流測定状況

3.4 詳細調査結果のまとめ

弁天大橋における詳細調査結果を以下に考察する。

3.4.1 外部電源方式

チタンメッシュ方式 G1 において、10×10cm 程度の陽極被覆材の剥落が確認された。これまでにチタンメッシュ方式において確認されている剥落例とは異なっており、本件に類似した剥落の確認例はない。今後、類似の剥落例の確認に注意を払うことが必要である。このような剥落が生じる可能性としては、小石や突起物等の物理的な衝突やモルタル被覆施工時に生じる空気層や練混ぜ不足のモルタル塊の存在に起因することが考えられるが、現時点でこの原因を特定することはできない。

一般的に外部電源方式での陽極被覆材の劣化は、陽極周辺への電流集中や過防食による、塩素ガス発生に伴う被覆モルタルの変状、変色等が考えられるが、過去の通電データからは過防食による劣化とは考えにくい。

今後、同様の劣化事例を調査するとともに、陽極材周辺の反応や劣化のメカニズムを解明し、電気防食システムとしての耐用年数のあり方、維持管理の手法についても検討していく必要がある。

3.4.2 流電陽極方式

防食板パネルの表面において波を打った状態の変形が確認された。内部の陽極材が消耗したことにより剛性が不足し、FRP 保護板が追従し変形に至ったものと考えられる。また、変形は道路に面した側で大きく、この面では太陽光などが樹脂カバーの変形を助長していることも考えられる。

亜鉛シート方式の間詰めパテは、亜鉛シート間の導通リード線の保護やバックフィル材の保護を目的として施工されているため、細長比の大きい形状であることや下地処理が不十分になり易いことなどもあり、同様の変状も確認されていることから、現在ではエポキシパテが用いられている。また、亜鉛シートの樹脂板の変形は、道路に面した側で大きく、この面では太陽光などが樹脂カバーの変形を助長していると考えられる。

本損傷との直接的な関係性はないが、本亜鉛シート（流電陽極）方式は施工後約 19 年が経過しており、本方式の耐用年数である 15 年を経過しても十分な防食効果が得られているが、今後、防食効果が低下する可能性が大きいため、寿命が近づいた場合は消耗量調査などにより確認することが重要と考えられる。

3.4.3 直流電源装置

直流電源装置、モニタリングボックスは腐食等もなく良好に維持されていた。塩害環境である海岸付近に設置する場合、前面扉や内部端子台が腐食することが多く、定期点検時に詳細部の確認を行い、必要に応じて部品交換等のメンテナンスを行うことが望ましい。

3.4.4 プルボックス

チタングリッド方式のプルボックスは、内部に樹脂材等が充填されており、結線部の確認ができなかった。また、流電陽極方式のプルボックスは、一般工具での上蓋の撤去が不可であった。

プルボックス内には電線の結線部が収納されていることから、維持管理上、容易に補修が行える構造にしておかなければならない。

3.4.5 配線配管

配管材は厳しい環境の中、経年劣化や破損も特にみられず概ね良好であった。一般的に使用されている合成樹脂材の配管材は耐候性が弱点であるため、本橋のように直射日光を避けた桁内への設置が望ましい。

また、流電陽極方式の配管材の一部に SUS 製固定材からの錆汁が確認された。防食対象外ではあるが、防錆対策および耐食性のある材料への検討が望まれる（現在はチタン製に変更）。

3.4.6 防食効果の確認

コンクリート内部に設置されたモニタリング装置での防食効果の確認は、定期点検が適切に行われており良好な防食状態が維持されていた。なお、チタンメッシュ方式 R3 照合電極による測定が不能であった。過去の点検報告からも測定不能と記載されており、防食システムとしての適切な維持管理を行う上でも、発見時での早急な対応が望まれる。

3.4.7 表面電位の測定

チタンメッシュ方式被覆モルタル剥落部において、表面電位による復極量試験の結果、健全部と同等の電位変化量が確認された。また、不良が疑われる照合電極埋設付近コンクリート表面での測定においても、防食基準を満たす電位変化があることが確認されている。

今回のように、変状部の周囲において表面電位の測定により鋼材電位の変化を確認することは、変状部への防食電流の流入および防食効果の確認が行え、有効な調査手法であることが確認できた。

3.4.8 分配電流の確認

防食電流の分配測定については、チタンメッシュ方式のみの測定であったが、桁4本にそれぞれ均等に分配されている結果が得られた。このようにプルボックスを開放して分配電流を確認することは、変状部への電流供給の確認において有効な調査手法であることが確認できた。

4. 追加調査

4.1 概要

4.1.1 追加調査の概要

調査概要：詳細調査で確認された事象のうち、さらに究明すべき課題を絞りこみ調査を実施した。

調査日：2017年2月13日～2017年3月15日（本調査）

2017年3月17日（モルタル硬化後の確認）

4.1.2 追加調査位置

今回調査位置を図4.1.1に示す。

- 電気防食調査 A …… 直流電源装置, モニタリング装置
- 電気防食調査 B・F …… チタングリッド部 (G5桁)
- 電気防食調査 C・E …… 亜鉛シート部 (G9桁) 調査Dは実施段階で省略
- 電気防食調査 G …… チタンメッシュ部 (G3桁)

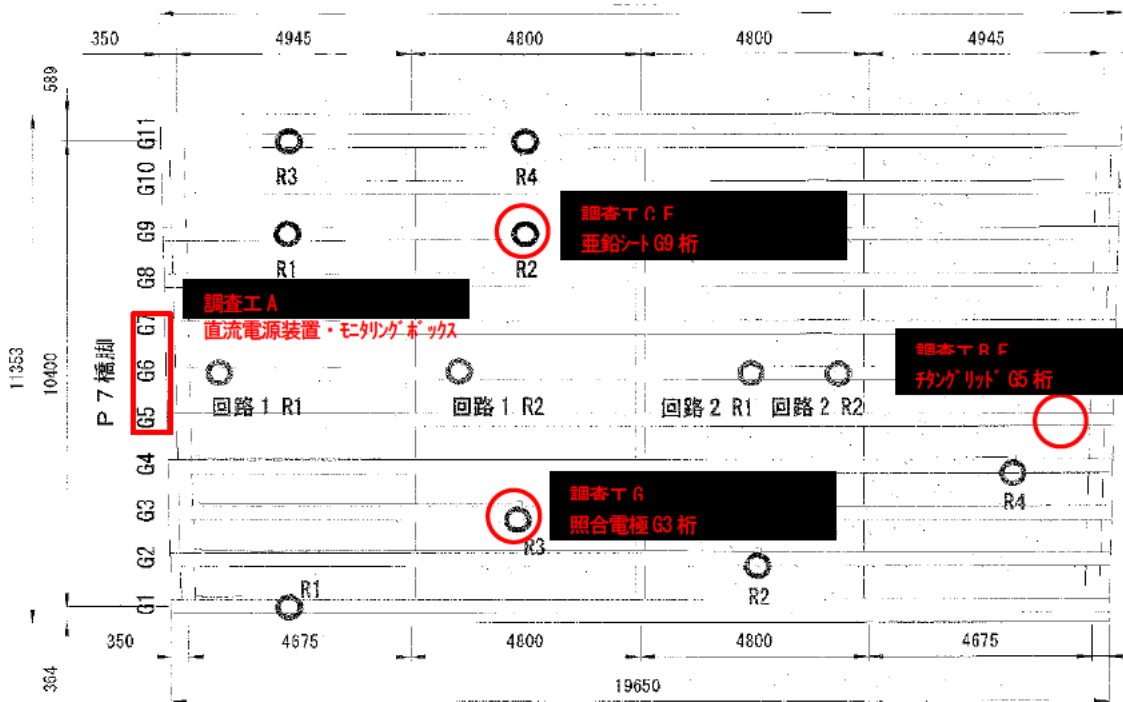


図4.1.1 調査実施位置図

4.2 追加調査項目

4.2.1 調査項目

追加調査項目を表-4.2.1に示す。調査は本調査（3日間）、モルタル硬化後の確認（1日）に分けて実施した。

表-4.2.1 調査項目

調査区分	調査目的・内容	実施日
1. 電気防食調査A (通電測定)	チタンメッシュ方式, チタングリッド方式および亜鉛シート方式の電流・電圧値ならびに照合電極の電位を測定。 ① 調査開始時 ② 調査終了時 ③ 調査中, 通電を再開した各段階	2/13 2/15 3/17
2. 電気防食調査B (チタングリッド表面電位測定)	チタングリッド方式の被覆モルタルの浮き部について, 外部照合電極（鉛照合電極）を用いて表面電位を測定。 ① 現状（モルタルが浮いた状態）での測定 ・オン電位 ・インスタントオフ電位 ・オフ電位（電源オフ後1時間*1経過後） ② 陽極設置後モルタル復旧前での測定 ・オン電位（電源オン後3時間*1経過後） ・インスタントオフ電位（電源オン後3時間*1経過後） ③ モルタル補修*2*3後（モルタル硬化後）の状態での測定 ・オン電位（電源オン後24時間*1経過後） *1)電位測定の経過時間は目安である。実際の測定は電位変化が落ち着いたことを確認して行うこととする。 *2)通電を停止して, 浮き部(□500mm×50mm程度で深さ30mm程度)のモルタル補修（電気防食用被覆モルタル）を行う。浮き部のモルタルを除去する際は, どの箇所から浮きが生じているかを確認できるよう注意深く除去する。また, モルタルは2層仕上げとし, 2層目は1層目が硬化した後に施工する。 *3)補修用モルタル材は, 別途打合せ協議時に指定するものを使用する。	2/14 2/14 2/14 2/14 2/14 2/15
3.電気防食調査C (亜鉛シート調査)	亜鉛シートの採取と既設と同程度の亜鉛シート設置を行う。 ① 撤去箇所の選定（底面1枚, 側面2枚） ② 撤去部周辺の防護網を一時撤去 ③ 撤去部のパテを除去 ・オン電位, オフ電位（電源オフ後1時間*1経過後） ④ 亜鉛シート撤去 ⑤ 撤去箇所のコンクリート外観観察 ⑥ 代替の亜鉛シート設置, 結線, パテ埋め	2/13 2/13 2/14 2/14 2/15 2/15

調査区分	調査目的・内容	実施日
3.電気防食調査C (亜鉛シート調査)	⑦亜鉛シート設置後パテ復旧前での測定 ・オフ電位 ・オン電位（電源オン後1時間*1経過後） ⑧ 防護網の復旧 ⑨ 撤去した亜鉛板は丁寧に梱包して発送し、電気防食調査Eを実施する ⑩ 調査Bで行うモルタル材齢28日以降の付着状況に併せて防食板パテ付着状況等健全性の近接確認 *1)電位測定の間経過時間は目安である。実際の測定は電位変化が落ち着いたことを確認して行うこととする。	2/15 2/15 2/15 2/15 3/17
4. 電気防食調査E (亜鉛シート消耗状況調査)	撤去した亜鉛シートの消耗状況を調査する。 ① 外観観察（腐食生成物除去の前後） ② 重量測定 ③ 腐食生成物除去（酢酸アンモニウム水溶液浸漬） ④ 乾燥後、重量測定 ⑤ 残寿命算出	3/2 (報告書)
5. 電気防食調査F (チタングリッド表面電位測定)	チタングリッド方式の被覆モルタルの浮き部について、電気防食調査Bの完了後モルタル材齢28日以降に外部照合電極(鉛照合電極)を用いて表面電位(オン電位, インスタントオフ電位)を測定する。 ①モルタル材齢28日以降の付着状況の近接目視確認 ②オン電位, インスタントオフ電位の測定	3/17
6. 電気防食調査G (照合電極調査)	不良となっているチタンメッシュ方式G3桁の埋設照合電極(電極番号:R3)の原因調査を行う。 ① チタンメッシュ方式回路の電源オフ ② 照合電極箇所のプルボックス解放, 配線切断 ③ 照合電極本体ケーブルでの測定（照合電極の健全性確認） ④ 本体不良であれば照合電極を取り出しての調査（別途）	3/17

4.3 通電状態の確認

4.3.1 調査概要

弁天大橋の電気防食方式は、外部電源方式（定電流、定電位）、流電陽極方式の3方式が適用されており。それぞれ方式において、測定時期（温暖時、寒冷時）の違いによる特性を確認した。

4.3.2 防食効果の確認

チタンメッシュ方式、チタングリッド方式および亜鉛シート方式の電流・電圧値ならびに照合電極の電位を測定した。復極量試験の電源停止後のオフ時間は一般的に24時間後とされているが、調査の中で陽極補修等の作業があり都合上48時間としている。

4.3.2.1 復極量試験の測定結果

測定結果を表-4.3.1に示す。各方式すべての照合電極において復極量は防食基準である100mV以上の電位変化量を得られていることが確認された。また、インスタントオフ電位は水素脆化の懸念される-1000mVより貴であり、適正な範囲での通電が行われていることを確認した。

表-4.3.1 復極量試験測定結果

チタンメッシュ方式				チタングリッド方式				亜鉛シート方式			
照合電極	Ins. OFF	OFF 電位	復極量	照合電極	Ins. OFF	OFF 電位	復極量	照合電極	Ins. OFF	OFF 電位	復極量
R1	-605	-264	341	R1-1	-677	-290	387	R1	-549	-215	334
R2	-619	-158	461	R1-2	-684	-326	358	R2	-478	-207	271
R3	-590	-145	445	R2-1	-725	-497	228	R3	-648	-256	392
R4	-708	-234	474	R2-2	-770	-451	319	R4	-505	-254	251

※飽和硫酸銅（CSE mV）基準に換算

※チタンメッシュ R3 は材齢 28 日以降調査時の E_{io} 電位を記載（照合電極健全性確認後の分極した値）

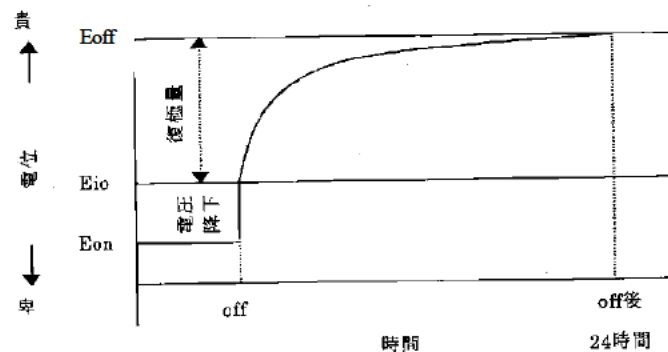


図-4.3.1 復極量試験概念図

4.3.3 チタンメッシュ方式（定電流方式）調査結果

4.3.3.1 過年度調査結果との比較

チタンメッシュ方式における測定結果の比較を表-4.3.2に示す。チタンメッシュ方式は定電流方式であり通電電流は一定値を示していた。前回（温暖時）と比較して電圧の増加，インスタントオフ電位の卑化および復極量の増加していることが確認された。

表-4.3.2 通電結果の比較（概略調査，詳細調査，追加調査）

	H27/06（概略調査）			H27/11（詳細調査）			H29/02（追加調査）		
気温	21℃			17℃			4℃		
電流	100mA			107mA			110mA		
電圧	1.76V			1.89V			2.61V		
測定時間	----			23 時間測定			48 時間測定		
照合電極	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量
R1	-458	-259	199	-481	-245	236	-605	-264	341
R2	-427	-130	297	-489	-125	364	-619	-158	461
R3	----	----	----	----	----	----	-590	-145	445
R4	-487	-262	225	-595	-263	332	-708	-234	474

※飽和硫酸銅（CSE mV）基準に換算

※インスタントオフ測定時の気温は気象庁データ新潟県能生より

※H27/06，H27/11 測定データは土研測定データより

※H29/02 における R3 は材齢 28 日以降調査時の IO 電位を記載

4.3.3.2 過年度調査結果との比較（寒冷時の傾向について）

H29/03（再追加調査時）における通電電流，電圧の結果を表-4.3.3 右側に追記して示す。電圧は気温が低い時期に増加していることが確認された。

表-4.3.3 通電電流，通電電圧の比較（概略調査，詳細調査，追加調査）

	H27/06（概略調査）	H27/11（詳細調査）	H29/02（追加調査）	H29/03（再追加調査）
気温	21℃	17℃	4℃	8℃
電流	100mA	107mA	110mA	117mA
電圧	1.76V	1.89V	2.61V	2.46V

※測定時の気温は気象庁データ新潟県能生より

※H27/06，H27/11 測定データは土研測定データより

各測定での通電電圧を通電電流で除した回路抵抗を比較した結果、寒冷時の H29/02（追加調査時）および H29/03（再追加調査時）において回路抵抗の増加が確認された。

回路抵抗

- 1) 概略調査時 H27/06 (6月測定 21°C) $1.76V \div 0.100A = 17.6\Omega$
- 2) 詳細調査時 H27/11 (11月測定 17°C) $1.89V \div 0.107A = 17.7\Omega$
- 3) 追加調査時 H29/02 (2月測定 4°C) $2.61V \div 0.110A = 23.7\Omega$
- 4) 再追加調査 H29/03 (3月測定 8°C) $2.46V \div 0.117A = 21.0\Omega$

4.3.3.3 定電流方式通電の考察

- 1) 定電流のため、寒冷時に回路抵抗が増加したことによる電圧の増加、また、鋼材の分極抵抗が増大したことにより分極量が大きくなり、インスタントオフ電位の卑化や復極量の増加していることが確認された。
- 2) 既往の資料を図-4.3.2 に示す。寒冷時にはコンクリート抵抗および全抵抗の増加 (①)、また、鉄筋の分極抵抗の増加 (②) があるとの報告がされている。気温の低下や乾燥によるコンクリート抵抗の増加、また、アノード反応に必要な水分の不足による陽極分極抵抗の増加等から、回路全体の抵抗が増加したものと考えられる。
- 3) 定電流通電の場合、温暖時は復極量が不足する傾向にあり、寒冷時は回路抵抗の増加により復極量が大きくなるため、特に通電初年度に各季節での測定を実施した上で、年間を通じて防食効果を満足できる適正な通電量を設定しなければならない

試 験 体	RC はり ③		PC はり ③		
	温 暖	寒 冷	温 暖	寒 冷	
気 温 範 囲					
気 温 (°C)	22.6	-0.6	19.1	-0.14	
電 流 (mA)	2.76	1.85	10.8	5.66	
起 電 力 (mV)	713	729	840	825	
全 抵 抗 (ohm)	270	411	110	201	←①
コンクリート抵抗 (ohm)	109	204	39.5	107	
復 極 量 (mV)	164	200	239	211	
アノード分極抵抗 (*)	26.6	25.7	24.6	27.1	
カソード分極抵抗 (*)	16.1	29.1	16.1	27.0	←②
デ ー タ 数	7	9	7	7	

(*) : ohm・m²

図-4.3.2 温暖時と寒冷時の電気化学的特性 *1)

*1) 塚孝司, 千葉丈夫; 寒冷環境における鉄筋およびプレストレストコンクリート構造物の流電陽極方式による電気防食特性: コンクリート工学論文集 第7巻第2号, pp.9-17, 1996年7月

4.3.4 チタングリッド方式（定電位方式）調査結果

4.3.4.1 過年度調査結果との比較

チタングリッド方式における測定結果の比較を表-4.3.4 に示す。チタングリッド方式は定電位方式であるた

め、鋼材電位は一定値を示していることが確認された。また、前回（温暖時）と比較して電圧は一定であるが、電流が大幅に低下していることが確認された。なお、H27/11 と H29/02 の復極量の比較は、測定時間に違いはあるが同様な値が得られており、測定時期（気温）の影響は少ないことが確認された。

表-4.3.4 通電結果の比較（概略調査，詳細調査，追加調査）

		H27/06（概略調査）			H27/11（詳細調査）			H29/02（追加調査）			H29/03（再追加調査）		
気温		21℃			17℃			4℃			8℃		
電流		----mA／----mA			73mA／39mA			33mA／15mA			33mA／15mA		
電圧		----V／----V			2.68V／1.99V			2.42V／1.65V			2.69V／1.82V		
測定時間		----			23 時間測定			48 時間測定			2 時間測定		
照合電極		Ins. OFF	OFF	復極量	Ins. OFF	OFF	復極量	Ins. OFF	OFF	復極量	陽極被覆モルタル浮き部調査のため測定していない		
No	R1	-726	-308	418	-691	-314	377	-677	-290	387			
1	R2	-668	-333	335	-664	-345	319	-684	-326	358			
No	R1	-754	-518	236	-731	-522	209	-725	-497	228			
2	R2	----	----	----	-676	-479	197	-770	-451	319			

※飽和硫酸銅（CSE mV）基準に換算

※インスタントオフ測定時の気温は気象庁データ新潟県能生より

※H27/06, H27/11 測定データは土研測定データより

4.3.4.2 定電位方式通電の考察

- 1) H29/02, H29/03（寒冷時）には通電電流の低下はあるものの、H27/11 と同程度の復極量が得られていることが確認された。
- 2) チタングリッド方式は定電位方式で通電されており、寒冷時は回路抵抗の増加により電流量が低下したものと考えられる。
- 3) 復極量については分極抵抗の増加により、寒冷時の低下した電流でも所定の電位変化量が得られたものと考えられる。

4.3.5 流電陽極方式（亜鉛シート方式）調査結果

4.3.5.1 過年度調査結果との比較

流電陽極方式における測定結果の比較を表-4.3.5に示す。前回（温暖時）と比較して電流の大幅な低下が確認された。なお、電流が低下したもののすべての照合電極において100mV以上の復極量が得られていることが確認された（図-4.3.2に寒冷時の電気化学的特性を示す）。

表-4.3.5 通電結果の比較（概略調査，詳細調査，追加調査）

	H27/06（概略調査）			H27/11（詳細調査）			H29/02（追加調査）			H29/03（再追加調査）		
気温	21℃			17℃			4℃			8℃		
電流	----mA			4.68/4.44/5.54/6.16mA			2.35/2.64/3.00/2.30mA			2.26/2.66/2.54/2.95mA		
測定時間	-----			23時間測定			48時間測定			2時間測定		
照合電極	Eio	Eoff	復極量	Eio	Eoff	復極量	Eio	Eoff	復極量	—	—	—
R1	-505	-162	343	-519	-170	349	-549	-215	334	—	—	—
R2	-450	-199	251	-477	-213	264	-478	-207	271	—	—	—
R3	-469	-209	260	-640	-186	454	-648	-256	392	—	—	—
R4	-469	-200	269	-506	-237	269	-505	-254	251	—	—	—

※飽和硫酸銅（CSE mV）基準に換算

※インスタントオフ測定時の気温は気象庁データ新潟県能生より

※H27/06，H27/11 測定データは土研測定データより

※電流値はR1/R2/R3/R4 順番で記載

4.3.5.2 流電陽極方式の考察

- 1) H29/02，H29/03（寒冷時）には通電電流の低下はあるものの，H27/06，H27/11と同程度の復極量が得られていることが確認された。
- 2) 亜鉛シート方式は陽極鋼材間の電位差を利用して電流を供給する方式である。表-4.3.6に陽極鋼材間の電位差測定結果を示す。僅かな差はあるが気温の違いによる影響は小さい。定電圧方式と同様に電圧を一定と考えると，回路抵抗の増加により所定の電位変化量を得るための電流が低下したものと考えられる。

表-4.3.6 陽極（アノード）と鋼材（カソード）電位差（起電力）

測定日/気温	H27/11/17℃			H29/02/4℃		
電位	陽極	鉄筋	電位差	陽極	鉄筋	電位差
平均(CSE)	-829	-209	620	-866	-233	633

※気温は気象庁データ新潟県能生より引用

(単位;mV)

3) アノード電位の平均値は -866mV (CSE) であり、亜鉛の初期電位 $-1,080\text{mV}$ (CSE) に対し 214mV の貴化が確認された。図-4.3.3 に栈橋での流電陽極方式の電位測定事例を示す。経年とともに陽極が消耗し電位が貴化している傾向が示されており、本施設においても同様の傾向が確認された。陽極電位の貴化により鉄筋との電位差となる起電力が小さくなる。起電力の低下は陽極発生電流の低下ともなるため、定期点検において陽極電位の測定や消耗量調査を行うことが重要であると考えられる。

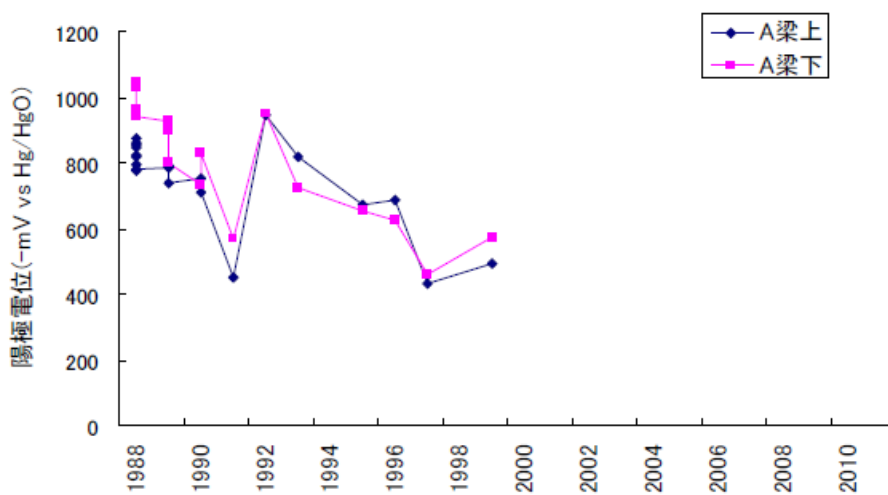


図-4.3.3 流電陽極電位の経年変化^{*1)}

*1) 栈橋の現地調査について：港湾空港技術研究所 相談事例

4.4 陽極被覆モルタル浮き部での防食効果の確認

4.4.1 調査概要

チタングリッド方式において確認された被覆モルタル浮き部周囲において、表面電位による防食効果への影響を確認するため、高所作業車により近接してたたき点検を行い浮き部の範囲を特定した。コンクリートカッターで浮き部の溝外周を5mm程度の深さで切断し、陽極の損傷のないように周囲のモルタルを撤去した。

モルタル撤去後を写真-4.4.2に示す。チタングリッド陽極は2枚重ねで設置されており、コンクリート側の陽極メッシュ内にモルタル充填不足と思われる範囲が確認された。

チタングリッド陽極の復旧は、陽極同士をスポット溶接によりつなぎ合わせ、樹脂ピンで陽極を固定後、実績のあるモルタル材を1層10mm程度で充填した。材齢28日後以降の調査においてモルタル材に浮き等はなく健全であることを確認した。

各調査段階での表面電位測定結果を「表-4.4.1 各状態における表面電位測定結果」に示す。



写真-4.4.1 被覆モルタル浮き部



写真-4.4.2 P1 陽極材確認 (二枚重ね)



写真-4.4.3 表面電位測定状況



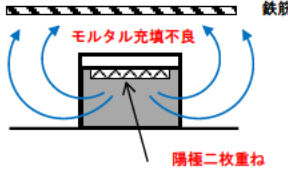
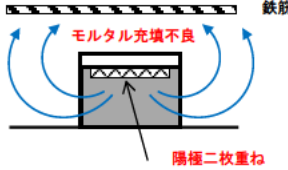
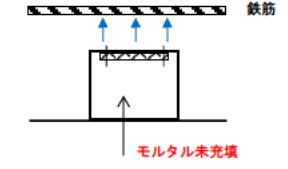
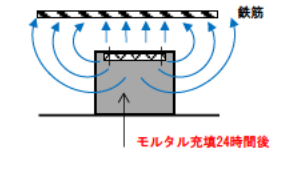
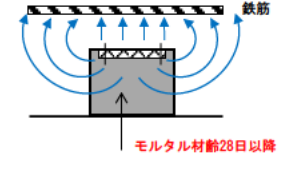
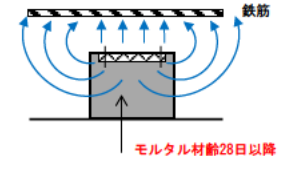
写真-4.4.4 モルタル被覆完了

4.4.2 調査結果

4.4.2.1 測定結果一覧

モルタルの浮き部を中心に 100×100mm メッシュにてマーキングを行い、外部照合電極（鉛照合電極）を用いて表面電位を測定した。測定の時系列と陽極の状態一覧表を表-4.4.1 に示す。

表-4.4.1 各状態における表面電位測定結果

測定番号	測定日時	陽極状態	測定項目 (状態)	電位変化量 (平均)	
①	2/14 9:10	モルタルが浮いている状態 (既設モルタル除去前)		当初のオン電位 インスタント オフ電位	—
②	2/14 10:15	モルタルが浮いている状態 (既設モルタル除去前)		測定①から オフ1時間後 のオフ電位	復極量 147mV
③	2/14 13:57	モルタルの剥落の状態 (新規陽極ピン固定) (モルタル充填前)		測定②から 通電1時間後 のインスタント オフ電位	分極量 225mV
④	2/15 14:57	モルタル充填初期の状態 (モルタル充填24時間後)		測定②から 通電24時間後 のインスタント オフ電位	分極量 419mV
⑤	3/17 14:20	モルタルが安定した状態 (モルタル材齢28日以降)		インスタント オフ電位	—
⑥	3/17 15:20	モルタルが安定した状態 (モルタル材齢28日以降)		測定⑤から 通電1時間後 のオン電位	復極量 175mV

4.4.2.2 各段階における測定結果詳細

(1) 調査① モルタル浮き状態での復極量確認（オフ1時間後）

電源オン状態で陽極周囲のオン／インスタントオフ電位を測定後，電源を遮断して1時間後のオフ電位を測定して復極量を求めた。いずれの測定点においても100mV以上（平均147mV）の電位変化量が確認されており，モルタルが浮いた状態でもある程度は防食電流が流れており分極していたものと考えられる。

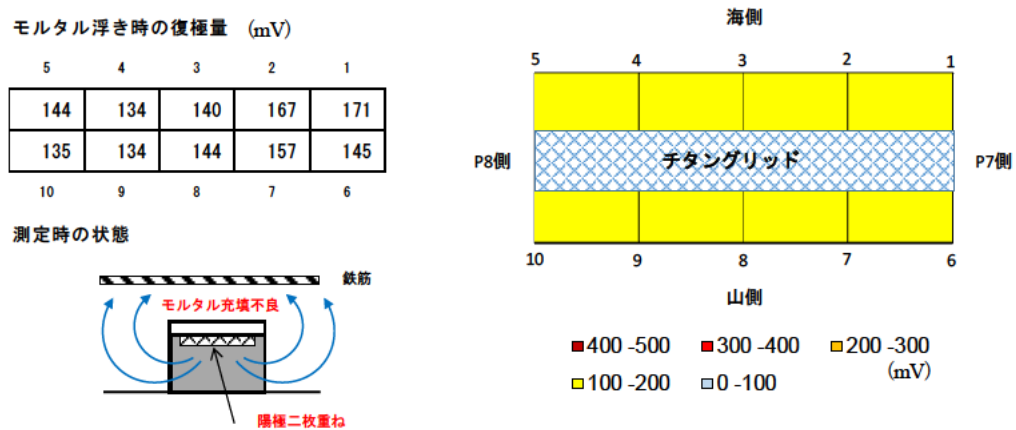


図-4.4.1 オフ1時間後の復極量（分布図）

(2) 調査② 陽極固定のみでの分極量確認（通電1時間後）

モルタルが剥落した状態を再現するため陽極を樹脂ピンで溝内に固定後，電源投入1時間後のオン／インスタントオフ電位を測定しオフ電位からの分極量を確認した。なお，陽極を樹脂ピンで固定しており実際の剥落より付着が高い状態であり予備的な条件である。

いずれの測定点においてもモルタル浮き状態より分極量の増加が確認された（平均78mVの増加）。ピン固定により陽極と溝内コンクリートの付着面積が増えたためと考えられる。

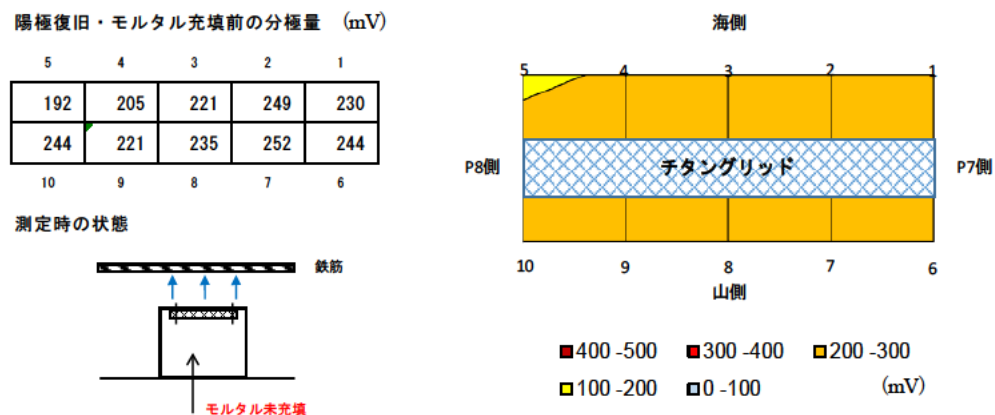


図-4.4.2 通電1時間後の分極量（分布図）

(3) 調査③ モルタル充填後の分極量確認 (通電1時間後)

陽極周囲を電気防食用モルタルで充填を行い、24時間後における電源投入1時間後のオン/インスタントオフ電位を測定し、オフ電位からの分極量を確認した。

モルタル充填後の分極量は、ピン固定のみの状態より分極が進んだ (平均 194mV の増加)。陽極周囲に水分を多く含んだモルタルが充填されたため、陽極からの防食電流が既設部より流れやすくなり分極が進んだものと考えられる。

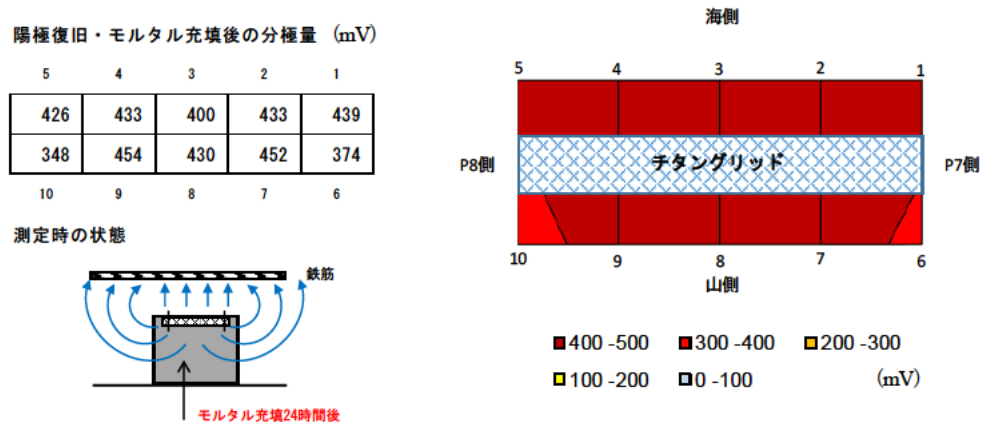


図-4.4.3 通電1時間後の分極量 (分布図)

(4) 調査④ インスタントオフ電位の差

モルタル浮き状態でのインスタントオフ電位、充填硬化後のインスタントオフ電位との差を求めた。浮き状態と比較して大幅な分極量の増加がみられた (平均 272mV の増加)。

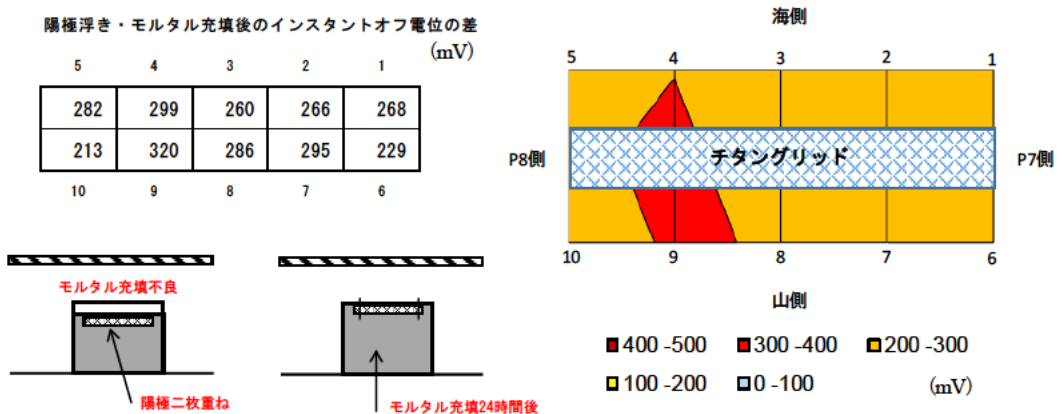


図-4.4.4 インスタントオフの電位差 (分布図)

(5) 調査⑥ モルタル材齢 28 日後以降の復極量確認（通電停止 1 時間後）

モルタル材齢 28 日後以降の安定した状態での通電停止 1 時間による復極量を確認した。浮きの状態 (①) に比べ 28mV の増加が確認されており、モルタルが充填され電流分布が向上したものと考えられる。

なお、モルタル充填後の材齢 1 日 (④) と比較して電位変化量が低下したことは、水和反応が終わりモルタルの抵抗が増加したためと思われる。

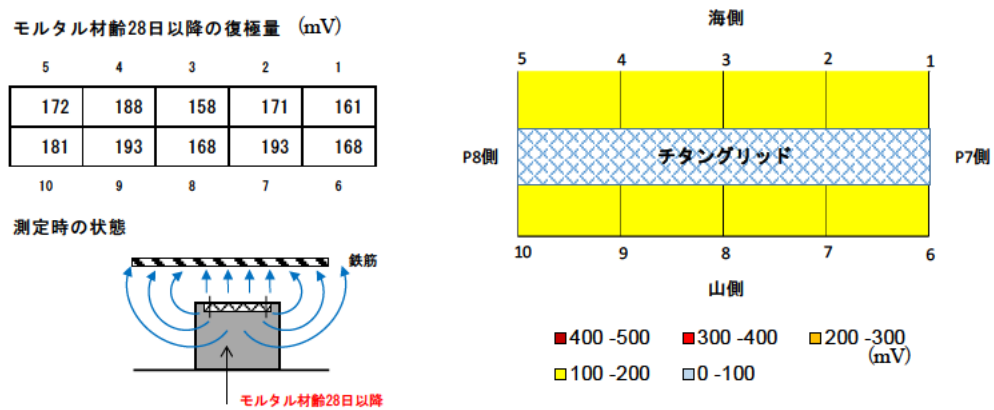


図-4.4.5 浮き部モルタル材齢 28 日後の通電停止 1 時間後の復極量（分布図）

4.4.3 調査結果の考察

線状方式において被覆モルタルの浮きが確認された周囲において、表面電位の測定により防食効果への影響を確認することができた。調査結果からの考察を以下に示す。

1)当初のモルタルが浮いた状態からモルタルを除去し、モルタル材の剥落を想定して陽極をピンのみで固定した場合で平均 78mV の増加が確認された。周囲のモルタルの付着面積が増したことで、チタングリッド陽極からの電流が増加したものと考えられる。

今回は浮きの範囲が 40cm 程度であり防食効果への影響は小さいものの、浮きにより電流の供給が損われていたものと考えられる。

2)モルタル充填 24 時間後の分極量は平均 419mV であり、材齢 28 日後の 175mV に比べ非常に大きな分極量となった。若材齢時にはモルタル水分量も多く抵抗が低くなるため電流が流れやすくなり、分極量が増大したものと考えられる。モルタルの充填直後および水濡れ時等には正しい評価が得られない場合もあるため、注意しなければならない。

3)モルタルの浮きはコンクリートと陽極界面に隙間が生じている可能性が高く、これを放置した場合、陽極反応によるガスが滞留して範囲が拡大することが懸念されるため、定期点検時に陽極被覆モルタルの目視確認と同時にたたき点検を行うことが望ましい。

4.5 耐用年数を経過した防食板の調査

4.5.1 調査概要

耐用年数が経過して使用されている流電陽極（防食板とする）について、表面電位による防食効果の確認を実施した。また、陽極の消耗量を確認するため、3枚の防食板（桁底面1枚、桁側面両側各1枚）を採取し、別途、試験機関にて消耗量調査を行った。

防食板の撤去は周囲のモルタルを除去後、アンカーボルトキャップおよび固定ナット等を取り外し、防食板内部の形状が崩れないよう慎重に撤去した。コンクリート面に付着したバックフィル（電解質）の清掃後、コンクリート面の確認を行った。固定アンカーボルト表面からと思われる錆の付着がみられたが、内部鉄筋の腐食によるひび割れや浮き等は確認されておらず、電気防食の効果が得られていたものと考えられる。

その後、用意した代替防食板を設置し、隣接する既設防食板とリード線を結線して陽極を一体化して通電を開始した。防食板の周囲はエポキシパテ材にて端部処理を行い、防護網を復旧した。

各調査段階において、表面電位による防食効果の確認を行った。



写真-4.5.1 既設防食板（亜鉛シート）



写真-4.5.2 亜鉛防食板撤去完了



写真-4.5.3 コンクリート表面確認



写真-4.5.4 代替防食板設置完了

4.5.2 調査結果

4.5.2.1 表面電位調査

調査対象となる防食板の周囲を 100mm 間隔でマーキングを行い、外部照合電極（鉛照合電極）を用いて表面電位を測定した。測定時系列を表-4.5.1 に、表面電位測定状況を写真-4.5.5、写真-4.5.6 に示す。

なお、測定値はオン電位であり、防食板間の狭い場所での測定でもあるため、測定値に防食評価を求めるものではなく、あくまで部位別における比較や電位変化の増減等を確認するものとする。

表-4.5.1 亜鉛シートの表面電位測定時系列

番号	測定日時	陽極状態	測定項目	備考
①	2/14 15:11	既設防食板	オン電位	
②	2/14 16:13	〃	オフ電位	①通電停止 1 時間後
③	2/15 11:12	代替板設置・パテ復旧前	オフ電位	①通電停止 20 時間後
④	2/15 13:45	代替板設置・パテ復旧前	オン電位	③通電 2 時間後



写真-4.5.5 既設防食板周囲オン電位測定



写真-4.5.6 代替防食板周囲オン電位測定

防食板周囲の表面電位は以下に示す位置で行った。

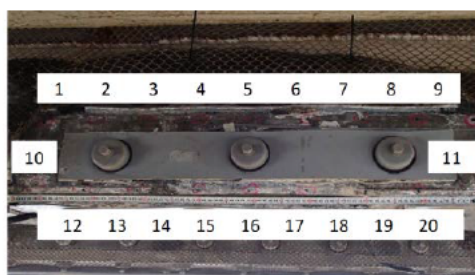


図-4.5.1 山側側面防食板測定位置 (20点)

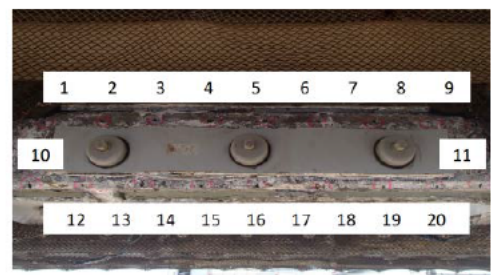


図-4.5.2 海側側面防食板測定位置 (20点)

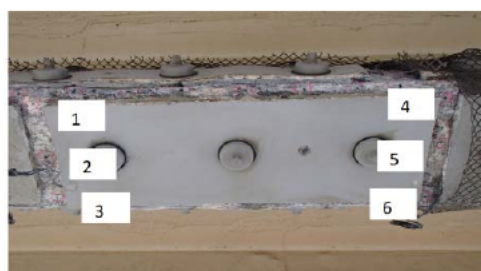


図-4.5.3 底面防食板測定位置 (6点)

4.5.2.2 表面電位測定結果

(1) 調査② 既設防食板設置状態での復極量確認 (通電停止1時間後)

電源オン状態で防食板周囲のオン電位を測定後、通電を停止して1時間後のオフ電位での復極量を求めた。オン電位との比較ではあるが、海側平均138mV、桁底面平均317mV、山側平均227mVの復極量となり、いずれの測定点においても100mV以上の電位変化量が得られていることが確認された。

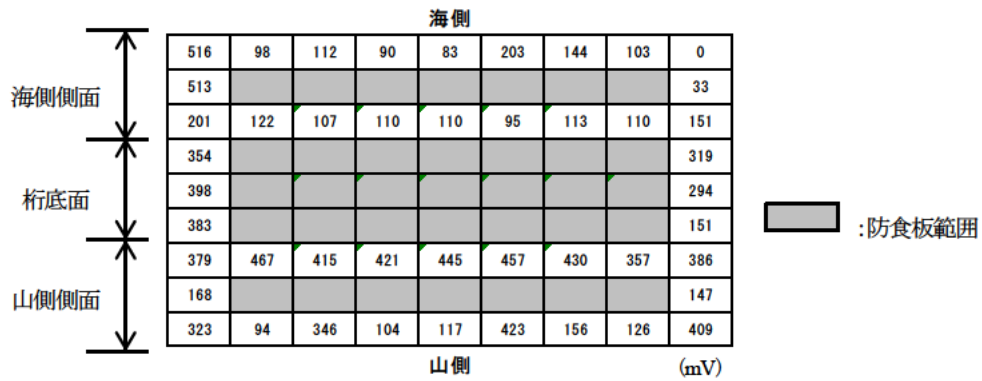


図-4.5.4 オフ1時間後復極量

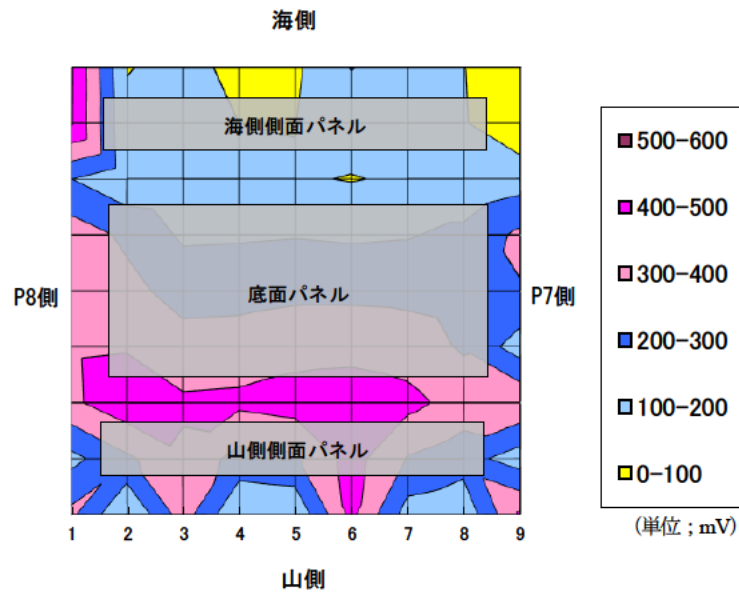


図-4.5.5 オフ1時間後復極量 (分布図)

(2) 調査③ 既設防食板設置状態での復極量確認 (通電停止20時間後)

測定時間を延長し、通電停止 20 時間後のオフ電位での復極量を求めた。測定結果を表-4.5.2 に示す。オフ時間を延長したことで 100mV 以上の復極量の増加が確認された。また、電位分布は 1 時間後の測定分布と同様に山側の復極量が大きい傾向を示した。

表-4.5.2 既設防食板での復極量オフ時間の比較

オフ経過時間	海側側面	桁底面	山側側面
停止 1 時間後	138 mV	317 mV	227 mV
停止 20 時間後	247 mV	464 mV	333 mV
差 (増分)	109 mV	147 mV	106 mV

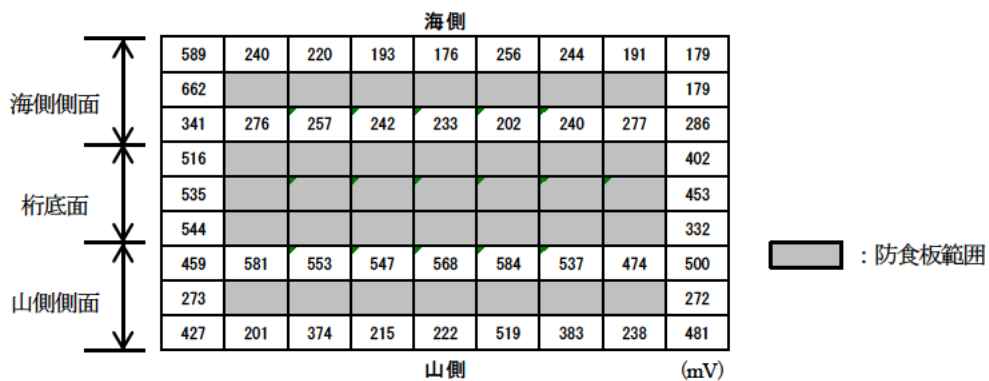


図-4.5.6 オフ 20 時間後復極量

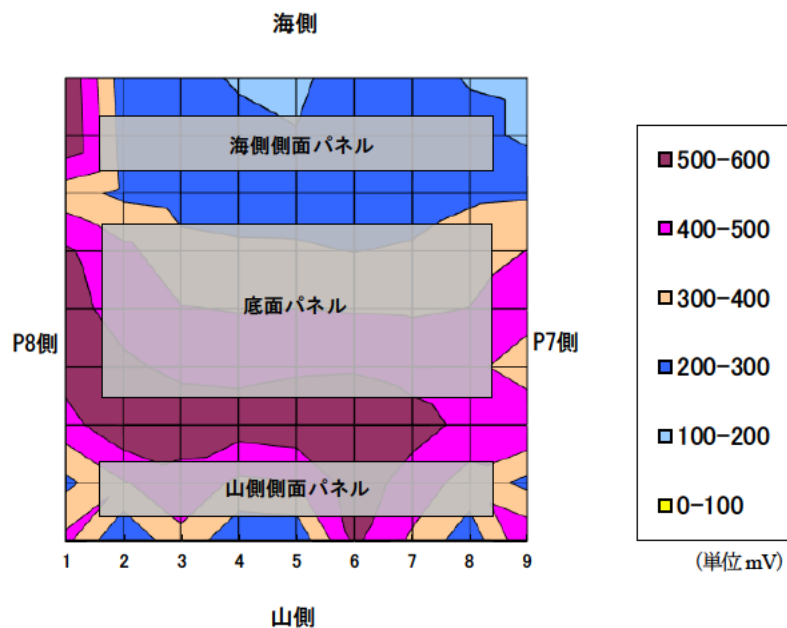


図-4.5.7 オフ20時間後復極量 (分布図)

(3) 調査④ 代替防食板設置状態での分極量確認 (通電2時間後)

既設防食板撤去前のオン電位と代替防食板設置時のオン電位の比較を表-4.5.3に示す。代替防食板の設置により、鋼材電位が卑化 (分極) していることが確認された。

この理由として、既設防食板の陽極消耗により防食電流が不足していたこと、バックフィル (陽極とコンクリート間に介在する電解質) の劣化等によりコンクリート面との密着性が低下しており亜鉛からの防食電流が十分に供給されていなかったこと、また、代替防食板のバックフィル材は水分が多く柔軟性がありコンクリートとの密着性が向上したため多くの電流が供給されたことなどが考えられる。

表-4.5.3 既設防食板と代替防食板でのオン電位の比較

	海側側面	桁底面	山側側面	平均
既設防食板	-573 mV	-835 mV	-698 mV	-702 mV
代替防食板	-941 mV	-881 mV	-769 mV	-864 mV
差 (増分)	368 mV	46 mV	71 mV	162mV

(mV vs CSE)

4.5.2.3 陽極消耗量調査

採取した防食板（桁底面部1枚＋側面部2枚＝計3枚）の陽極消耗量調査を行った。表-4.5.4に消耗量分析結果および消耗状況写真を示す。底面防食板の消耗率が大きいことが確認された。

表-4.5.4 消耗率分析結果のまとめ

試料 No.	寸法(mm)	初期質量 W_i (g)	残質量 W_f (g)	消耗質量 W_c (g)	消耗率 C (%)	推定残寿命 T_r (年)	推定総寿命 T (年)
①(山側)	100×700	482.0	239.2	242.7	50.4	20.7	41.7
②(海側)	100×700	482.0	188.2	293.8	61.0	13.5	34.5
③(底面)	250×700	1227.5	59.5	1167.9	95.2	1.1	22.1

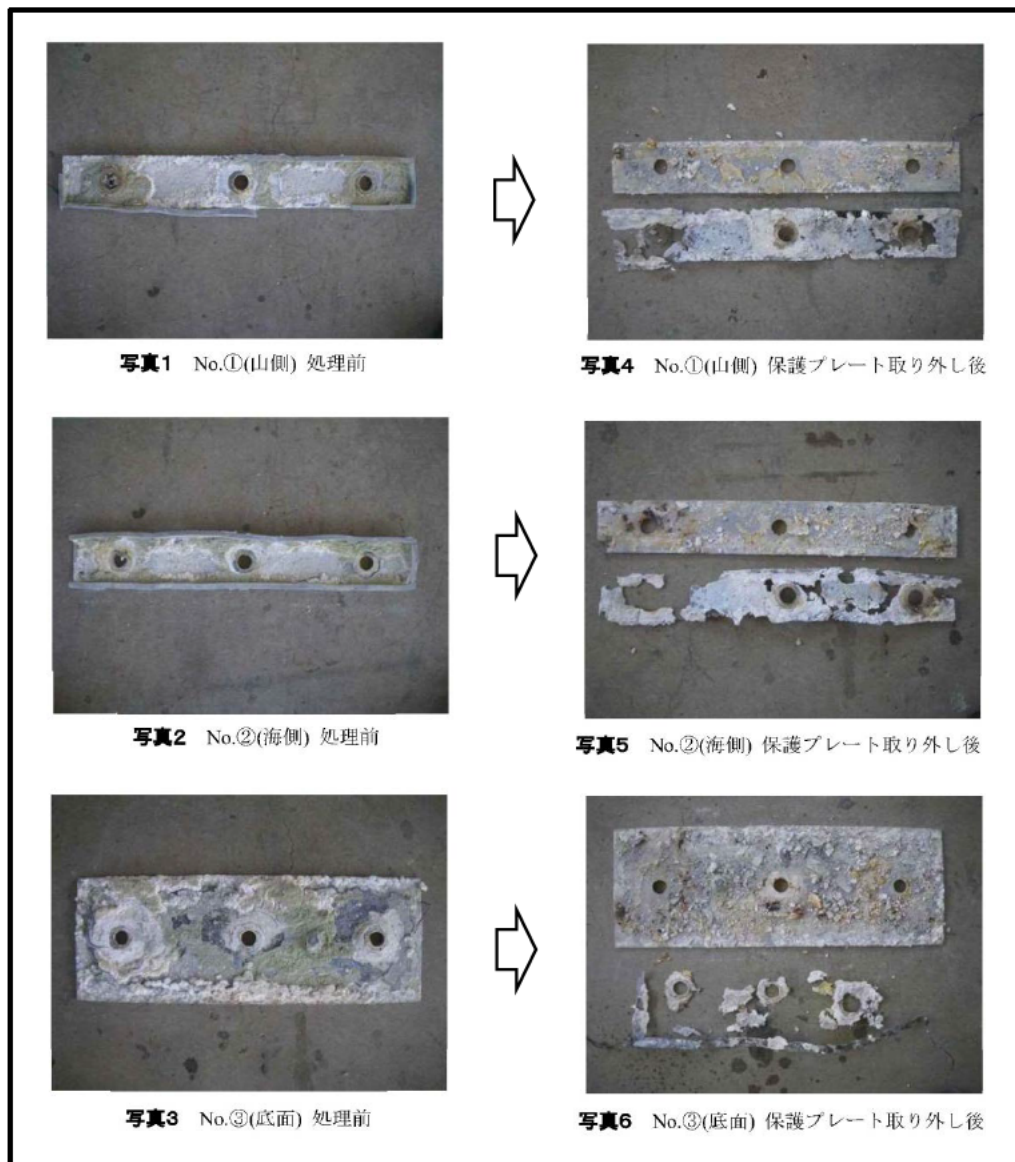
(注) 経過年数 t (年) : 21、厚み 2mm、密度 7.1g/cm³

[算出式]

$$\text{消耗率 } C (\%) = W_c / W_i$$

$$\text{推定残寿命 } T_r (\text{年}) = W_f / (W_c/t)$$

$$\text{推定総寿命 } T (\text{年}) = t + T_r$$



不純物を取り除いた後の各防食板の消耗形態を図-4.5.8に示す。底面部は95.2%の消耗率が確認されており、消耗形態においても亜鉛が分離していることから実質的には寿命を迎えていたものと考えられる。



図-4.5.8 酸処理後の陽極状況（亜鉛）

4.5.3 調査結果の考察

耐用年数を過ぎた防食板周囲での表面電位を測定することで、防食効果を定量的に確認することができた。また、消耗量調査により部位別の消耗程度を把握することができた。調査結果からの考察を以下に示す。

1)表面電位測定結果より

オン電位を比較した場合、桁底面は最も卑な電位であることが確認されたが、これは側面側陽極からの電流流入の影響が大きいものと考えられる。また、通電遮断オフ 20 時間後のオフ電位の比較では、各部位において-350mV 程度の同様な値であり復極量も満足されているため、各鋼材に均一な防食効果が得られていたものと考えられる。

流電陽極の場合、陽極を面状に設置するため隣接する陽極からも防食電流が流れ込み、各部位における明確な評価をすることはできない。目安ではあるが、オフ電位によりある程度の鋼材の状態は確認できるものとする。

表-4.5.5 既設防食板での表面電位測定結果

	海側側面	桁底面	山側側面	平均	備考
オン電位	--573 mV	-835 mV	-698 mV	-702 mV	—
オフ電位	--326 mV	-371 mV	-364 mV	-354 mV	オフ 20 時間後
復極量	247 mV	464mV	333 mV	348 mV	—

mV vs CSE

2)防食効果確認試験について

復極量試験の測定時間を 1 時間から 20 時間に延長した結果、山側側面 106mV、底面 147mV、海側側面 109mV とそれぞれ復極量の増加が確認された。なお、桁底面の防食板は消耗量調査において激しい消耗が確認されているものの、側面からの防食電流の供給により防食効果が得られたものと推察され、耐用年数が近づいた場合は、各部位における消耗量を把握して評価することが必要であると考えられる。

また、流電陽極方式での復極量試験の注意として、防食板によりコンクリート表面の大部分が覆われるため、復極反応に必要な酸素の拡散速度が小さくなる傾向にある。一般的に復極量の測定時間は 24 時間とされているが、陽極の配置形状や乾湿環境の違いなどにより復極の遅れがあることを考慮して測定時間を見極める必要がある。

3)耐用年数を経過した防食板について

新規に代替防食板を設置したことにより電位変化量が増加したことで、少なからず既設防食板の防食効果は失われていたものと考えられる。実際、既設防食板は変形やたわみが多数確認されており、撤去の際においてもバックフィルが乾燥しており、形状が保持されていないことが確認された。このため、陽極の消耗に加えてバックフィルの密着性が損なわれたことにより、防食効果が少なからず損なわれていたものと考えられ、特に耐用年数が近づいた防食板は定期的に消耗量調査等により確認する必要があると考えられる。

なお、陽極消耗量は鋼材量の多い桁底面での消耗率が大きいことが確認され、消耗量の調査対象は鋼材量の多い部位において評価することも重要である。

4.6 モニタリング測定不具合の調査

4.6.1 調査概要

過年度報告書より測定不能との報告があるチタンメッシュ方式 G3 桁の照合電極について、不具合の原因を確認するための調査を行った。なお、先に実施した概略調査および詳細調査でも測定不可であった。

表-4.6.1 概略調査時、詳細調査時測定結果 (R3測定不能)

照合電極	H27/06 (概略調査)			H27/11 (詳細調査)		
	Ins.OFF	OFF	復極量	Ins.OFF	OFF	復極量
R1	-458	-259	199	-481	-245	236
R2	-427	-130	297	-489	-125	364
R3	----	----	----	----	----	----
R4	-487	-262	225	-595	-263	332

(mV)

4.6.2 調査内容

4.6.2.1 各段階における詳細調査内容

調査は、高所作業車により直流電源装置端子台および G3 桁照合電極埋設部に近接して行った。

(1) 測定端子台での測定 (通常の測定方法)

直流電源装置測定端子台の測定において、電位差計の表示値が安定せず測定不可であった。

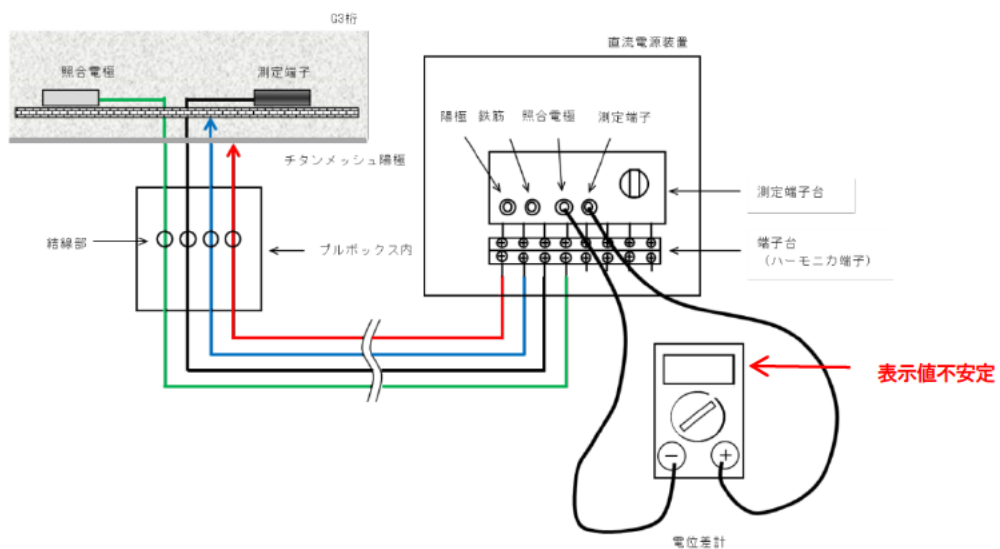


図-4.6.1 測定端子台での測定 (通常の測定方法)



写真-4.6.1 電位値不安定の状況 (17.1mV → 195.7mV)

(2) 照合電極本体ケーブルでの測定

プルボックス内照合電極リード線の結線部を解き、埋設照合電極本体リード線と測定端子（対極）を接続し測定したところ、電位差計の表示値が安定した。

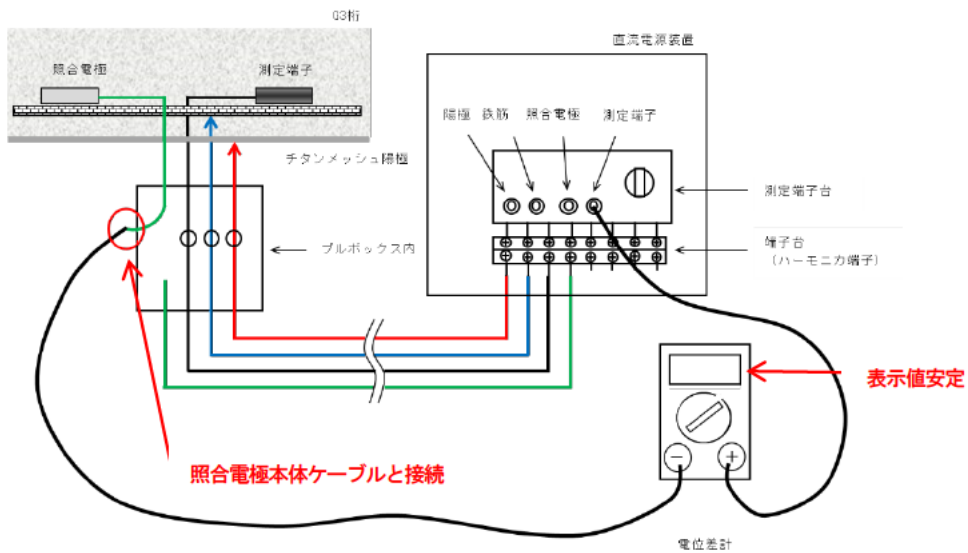


図-4.6.2 照合電極本体ケーブルでの測定



写真-4.6.2 電位値確認状況



写真-4.6.3 電位値安定確認 (145.5mV)

(3) 照合電極と結線されていたリード線の確認

プルボックスと直流電源装置間のリード線に問題があると判断し、リード線端部と測定端子間の導通調査を行った結果、電位値が不安定であった。ハーモニカ端子部を調査したところ、照合電極リード線を固定しているビスに緩みがあることが確認された。

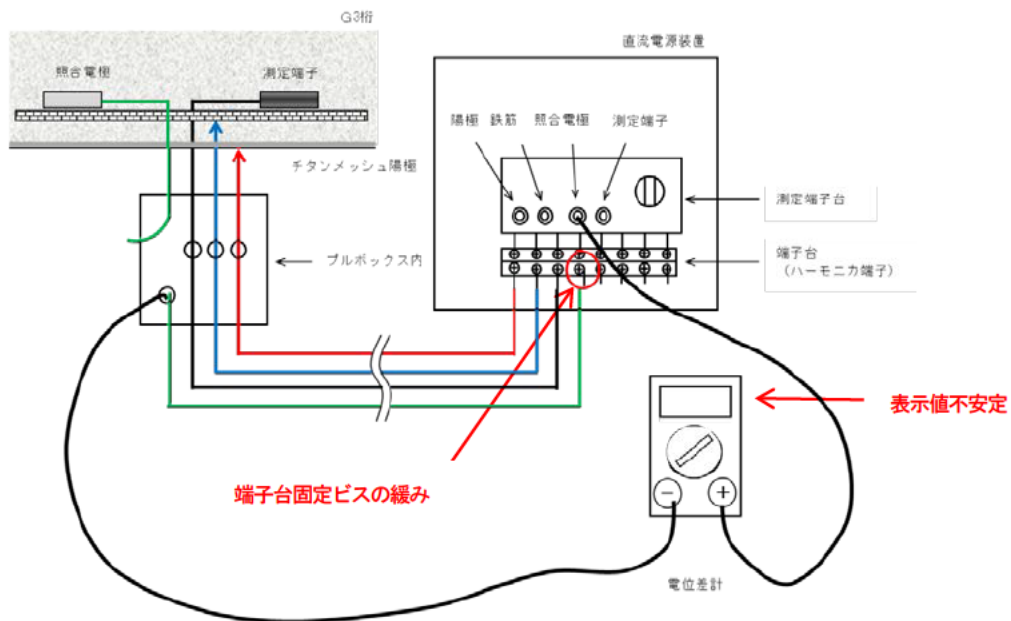


図-4.6.3 照合電極と結線されていたリード線の確認

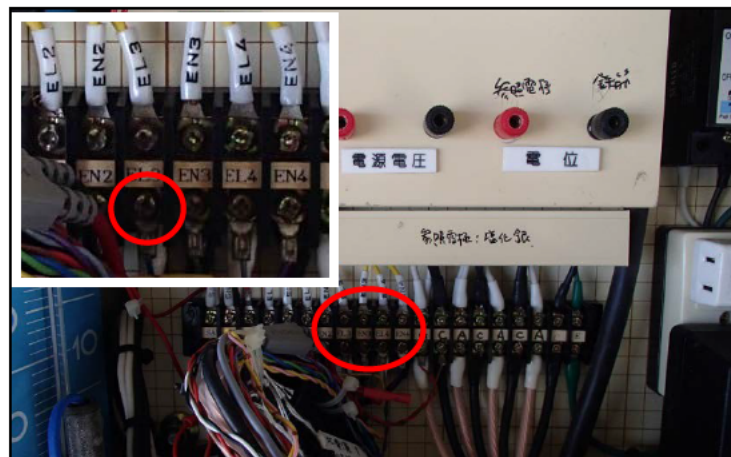


写真-4.6.4 ハーモニカ端子リード線固定部

(4) 復旧後の確認（通常の測定方法）

ハーモニカ端子の固定ビスを締め直し、プルボックス内結線部の復旧を行った結果、安定した電位表示値が得られたため、照合電極の本体は健全であることが確認された。

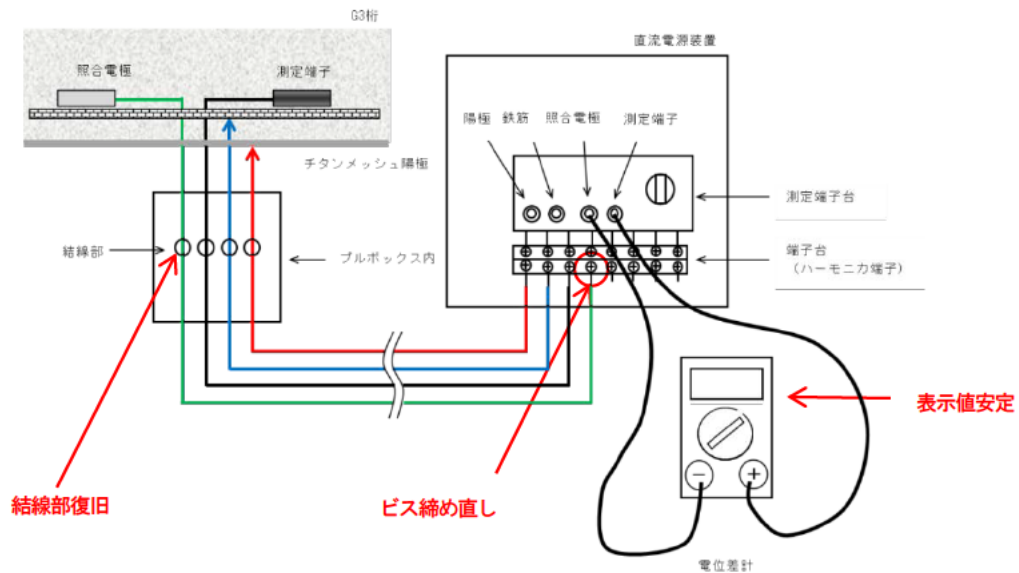


図-4.6.4 復旧後の確認（通常の測定方法）

4.6.3 調査結果の考察

今回のような照合電極の電位表示値が不安定であることが確認された場合、照合電極本体の不良と断定する前に、ケーブル類および結線部等の電流経路の確認により復旧する場合もある。

調査手順（参考）

- ①電位差計のケーブルが測定端子に確実に接続されていることを確認
→確実に接続されていない場合、電位値が不安定となる
- ②リード線の結線部、端子接続箇所等の固定状況、結線部被覆の状態を確認
→結線部や接続部に欠陥がある場合、電位値が不安定となる
- ③照合電極本体リード線との結線部を解体し、延長リード線の導通を確認
→リード線に損傷等や接点不良がある場合、ノイズ等により電位値が不安定となる
- ④照合電極本体のケーブルと排流端子ケーブルを直接接続して確認
→ここで電位値が不安定であれば照合電極の不良を視野に入れた調査を計画する

※今回の調査では、③④の調査により照合電極が健全であることを確認した上で、

②の調査により端子接続不良箇所を発見した。

測定データ

- ①電気防食調査 A（通電データ測定）
- ②電気防食調査 B, F（チタングリッド表面電位測定）
- ③電気防食調査 C（亜鉛シート周囲表面電位測定）

① 電気防食調査A 防食効果確認（復極量試験）

測定日：平成29年2月13日 (Eon/Eio電位)・15日 (Eoff電位)	測定者：三宅, 大島
---	------------

【チタンメッシュ方式】

適用析：	G1・G2・G3・G4				通電電流：	110mA				電流密度：	5.0mA/m ²	
照合電極：	飽和塩化銀				通電電圧：	2.61V				対象面積：	22.0m ²	
回路	照合電極	計測値 (mV)				照合電極	飽和硫酸銅 (換算、mV)				判定 (100mV ≤ ΔE)	
		Eon	Eio	Eoff	ΔE		Eon	Eio	Eoff	ΔE		
No. 1	R1	-492	-485	-144	341	R1	-612	-605	-264	341	合格	
	R2	-541	-499	-38	461	R2	-661	-619	-158	461	合格	
	R3	-596	-590	-145	445	R3	-716	-710	-265	445	合格	
	R4	-652	-588	-114	474	R4	-772	-708	-234	474	合格	

※ R3：電気防食調査Gの実施補修後の値としている

※ 換算電位：計測値-120mV

【チタングリッド方式 No.1回路】

適用析：	G5・G6・G7				通電電流：	32.9mA				電流密度：	3.0mA/m ²	
照合電極：	鉛電極				通電電圧：	2.42V				対象面積：	11.0m ²	
回路	照合電極	計測値 (mV)				照合電極	飽和硫酸銅 (換算、mV)				判定 (100mV ≤ ΔE)	
		Eon	Eio	Eoff	ΔE		Eon	Eio	Eoff	ΔE		
No. 1	R1	+96	+123	+510	387	R1	-704	-677	-290	387	合格	
	R2	+69	+116	+474	358	R2	-731	-684	-326	358	合格	

※ 換算電位：計測値-800mV

【チタングリッド方式 No.2回路】

適用析：	G5・G6・G7				通電電流：	14.5mA				電流密度：	1.3mA/m ²	
照合電極：	鉛電極				通電電圧：	1.65V				対象面積：	11.0m ²	
回路	照合電極	計測値 (mV)				照合電極	飽和硫酸銅 (換算、mV)				判定 (100mV ≤ ΔE)	
		Eon	Eio	Eoff	ΔE		Eon	Eio	Eoff	ΔE		
No. 2	R1	+65	+75	+303	228	R1	-735	-725	-497	228	合格	
	R2	+25	+30	+349	319	R2	-775	-770	-451	319	合格	

※ 換算電位：計測値-800mV

【流電陽極方式】

適用析：	G8・G9・G10・G11				通電電流：	下表に記載				電流密度：	-----	
照合電極：	二酸化マンガン				通電電圧：	-----				対象面積：	-----	
照合電極	通電電流	計測値 (mV)				照合電極	飽和硫酸銅 (換算、mV)				判定 (100mV ≤ ΔE)	
		Eon	Eio	Eoff	ΔE		Eon	Eio	Eoff	ΔE		
R1	2.35mA	-683	-635	-301	334	R1	-597	-549	-215	334	合格	
R2	2.64mA	-581	-564	-293	271	R2	-495	-478	-207	271	合格	
R3	3.00mA	-778	-734	-342	392	R3	-692	-648	-256	392	合格	
R4	2.30mA	-605	-591	-340	251	R4	-519	-505	-254	251	合格	

陽極電位 (参考)：R1=-967mV、R2=-963mV、R3=-960mV、R4=-912mV

※ 換算電位：計測値+86mV

② 電気防食調査B,F 表面電位計測結果 (チタングリッド)

【計測時系列】

番号	計測日時	陽極状態	計測項目	備考
①	2/14 9:10	モルタル除去前	Eon・Eio	—
②	2/14 10:15	〃	Eoff	①オ 1h後
③	2/14 13:57	新規陽極設置・モルタル充填前	Eon・Eio	②オ 1h後
④	2/15 14:57	新規陽極設置・モルタル硬化後	Eon・Eio	②オ 24h後
⑤	3/17 14:20	モルタル材齢28日以降	Eon・Eio	—
⑥	3/17 15:20	〃	Eoff	⑤オ 1h後

【計測写真】



マーキング完了



表面電位計測状況

表面電位計測結果 ※CSE変換

表面電位（浮き部）

単位：mV

番号	計測日時		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
①	2/14 9:10	Eon	-607	-584	-571	-579	-572	-583	-575	-573	-585	-575	-580
		Eio	-572	-565	-540	-536	-541	-543	-558	-548	-539	-535	-548
②	2/14 10:15	Eof	-401	-398	-400	-402	-397	-398	-401	-404	-405	-400	-401
	②-①	復極量	171	167	140	134	144	145	157	144	134	135	147
③	2/14 13:57	Eon	-714	-706	-656	-639	-624	-694	-702	-671	-657	-629	-669
		Eio	-631	-647	-621	-607	-589	-642	-653	-639	-626	-601	-626
	②-③	分極量	230	249	221	205	192	244	252	235	221	201	225
④	2/15 14:57	Eon	-961	-933	-854	-920	-920	-819	-953	-914	-943	-784	-900
		Eio	-840	-831	-800	-835	-823	-772	-853	-834	-859	-748	-820
	②-④	分極量	439	433	400	433	426	374	452	430	454	348	419
	①-④	分極差	268	266	260	299	282	229	295	286	320	213	272

※ 換算電位：計測値-800mV

表面電位（浮き部モルタル補修材齢28日以降）

番号	計測日時		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
⑤	2/14 9:10	Eon	-621	-729	-649	-765	-772	-601	-824	-734	-821	-738	-725
		Eio	-597	-663	-623	-693	-689	-585	-725	-676	-719	-666	-664
⑥	2/14 10:15	Eof	-436	-492	-465	-505	-517	-417	-532	-508	-526	-485	-488
	⑥-⑤	復極量	161	171	158	188	172	168	193	168	193	181	175

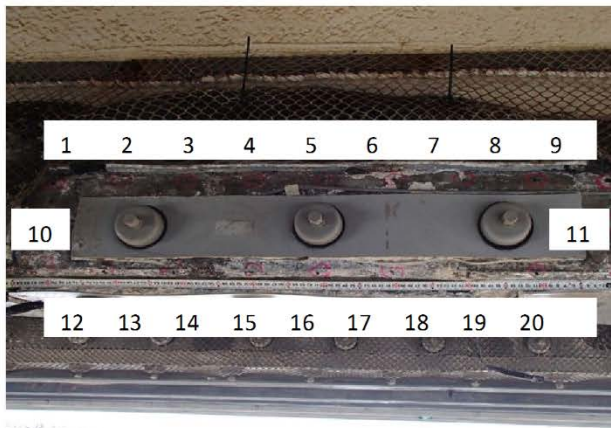
※ 換算電位：計測値-800mV

③ 電気防食調査C 表面電位計測結果 (亜鉛シート)

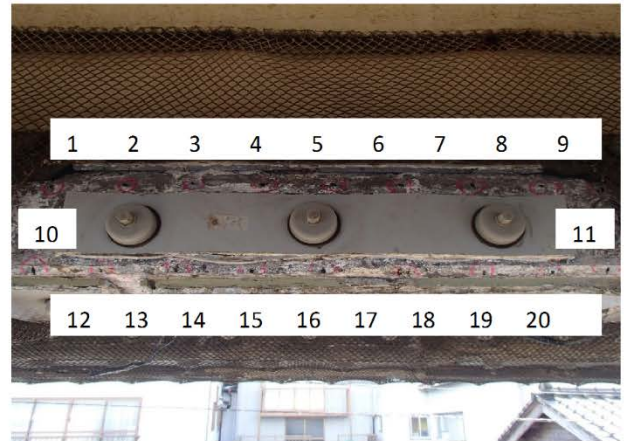
【計測時系列】

番号	計測日時	陽極状態	計測項目	備考
①	2/14 15:11	既設防食板設置	Eon	—
②	2/14 16:13	〃	Eoff	①オ 1h後
③	2/15 11:12	代替防食板設置・パテ復旧前	Eoff	①オ 20h後
④	2/15 13:45	代替防食板設置・パテ復旧前	Eon	③オ 2h後

【計測位置】



山側側面 (山から海を見る)



海側側面 (海から山を見る)



底面 (山から海を見る)

③ 表面電位計測結果 ※CSE換算

表面電位 (山側)

單位 : mV

番号	計測日時	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
①	2/14 15:26	Eon	-844	-524	-812	-526	-517	-884	-719	-964	-637	-605	-847	-912	-884	-882	-900	-917	-869	-814	-925	-698
②	2/14 16:13	Eoff	-521	-430	-466	-422	-400	-461	-563	-423	-469	-458	-468	-445	-469	-461	-455	-460	-439	-457	-539	-471
	②-①	復極量	323	94	346	104	117	423	156	409	168	147	379	467	415	421	445	457	430	357	386	227
③	2/15 11:12	Eoff	-417	-323	-438	-311	-295	-365	-336	-483	-364	-333	-388	-331	-331	-335	-332	-333	-340	-340	-425	-364
	③-①	復極量	427	201	374	215	222	519	383	481	273	272	459	581	553	547	568	584	537	474	500	333
④	2/15 13:45	Eon	-928	-767	-796	-720	-701	-780	-625	-1004	-610	-920	-1129	-1108	-1108	-1113	-1126	-1063	-1075	-1050	-872	-769
	③-④	分極量	511	444	358	409	406	415	289	693	277	246	587	741	777	778	794	730	743	710	447	405

表面電位 (底面)

單位 : mV

番号	計測日時	1	2	3	4	5	6	平均	
①	2/14 15:26	Eon	-905	-970	-992	-744	-748	-651	-835
②	2/14 16:13	Eoff	-551	-572	-609	-425	-454	-500	-519
	②-①	復極量	354	398	383	319	294	151	317
③	2/15 11:12	Eoff	-389	-435	-448	-342	-295	-319	-371
	③-①	復極量	516	535	544	402	453	332	464
④	2/15 13:45	Eon	-787	-912	-954	-1097	-654	-879	-881
	③-④	分極量	398	477	506	755	359	560	509

表面電位 (海側)

單位 : mV

番号	計測日時	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	平均
①	2/14 15:26	Eon	-511	-518	-569	-603	-506	-512	-547	-957	-460	-948	-691	-599	-561	-528	-562	-572	-574	-600	-665	-573
②	2/14 16:13	Eoff	-511	-415	-425	-400	-423	-422	-435	-441	-427	-435	-540	-489	-448	-433	-452	-462	-467	-478	-464	-435
	②-①	復極量	0	103	144	203	83	90	112	98	516	33	513	151	110	95	110	110	107	122	201	138
③	2/15 11:12	Eoff	-332	-327	-325	-347	-330	-319	-327	-308	-281	-286	-405	-322	-321	-326	-329	-330	-317	-324	-324	-326
	③-①	復極量	179	191	244	256	176	193	240	589	179	662	286	277	240	202	233	242	257	276	341	247
④	2/15 13:45	Eon	-913	-1081	-1093	-852	-777	-938	-973	-860	-992	-974	-956	-1124	-1128	-1102	-1119	-1117	-1119	-1126	-1115	-941
	③-④	分極量	581	754	768	505	447	619	665	492	711	688	551	802	807	776	790	787	802	802	791	614

5. 解体調査

5.1 概要

5.1.1 解体調査の概要

調査概要：弁天大橋の架け替えに伴い、電気防食工法が適用された第8径間の桁を大ブロックに切断して試験ヤードに移設し、通電試験や、付着強度や陽極材採取、結線状況や内部鋼材腐食状況等の破壊調査を含めた様々な詳細調査を実施した。これまでの調査で確認された事象とあわせて、電気防食工法の適用や耐久性の検証を行った。

調査日：2019年(平成31年) 2月6日 (プルボックス開放試験)

2019年(令和元年) 5月14日～5月16日 (撤去桁調査)

2019年(令和元年) 5月～9月 (採取材の室内試験)

5.1.2 調査体制

弁天大橋は他径間の塩害進行が著しく、近い将来において耐荷性能低下を抑制できないとされ、2007年(平成19年)に架替えが必要と判断されている。このため2017年(H29.3 工事着工)から函渠化や架替え事業が開始され、電気防食を設置した第8径間が撤去されることになった。

北陸地方整備局の橋梁塩害対策検討委員会では塩害対策の効果検証を総合的に実施してきており、弁天大橋の架替えにあたり撤去桁でしか実施できない諸調査を行って電気防食の効果検証を図ることとなった。この解体調査では、土木研究所の共同研究において継続的に評価検証を行ってきていることもあり、陽極をはじめとした電気防食システムの検証に関する調査を、委員会の構成員として分担して実施することとなった。

5.2 調査内容

5.2.1 電位防食の概要

電気防食方式や工法による効果と維持管理上の課題等の検証として、外部電源方式よりチタンメッシュ方式とチタングリッド方式、流電陽極方式より亜鉛シート方式が選定され、上部工を3分割して下フランジを防食対象(ウェブ、上フランジ、床版は電気防食対象外)として各方式が設置されている。

またチタングリッド方式では、電気防食の稼働状況を遠隔にて監視、制御できるように遠隔監視制御装置を併設しており、2018年(平成30年6月)まで通電とともに遠隔モニタリングも稼働していた。

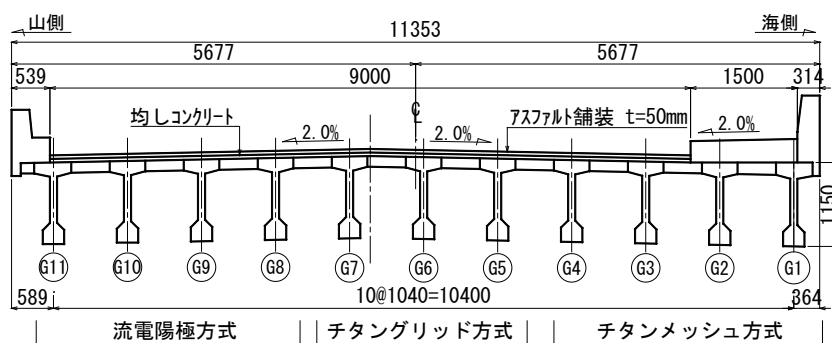


図-5.2.1 電気防食配置図

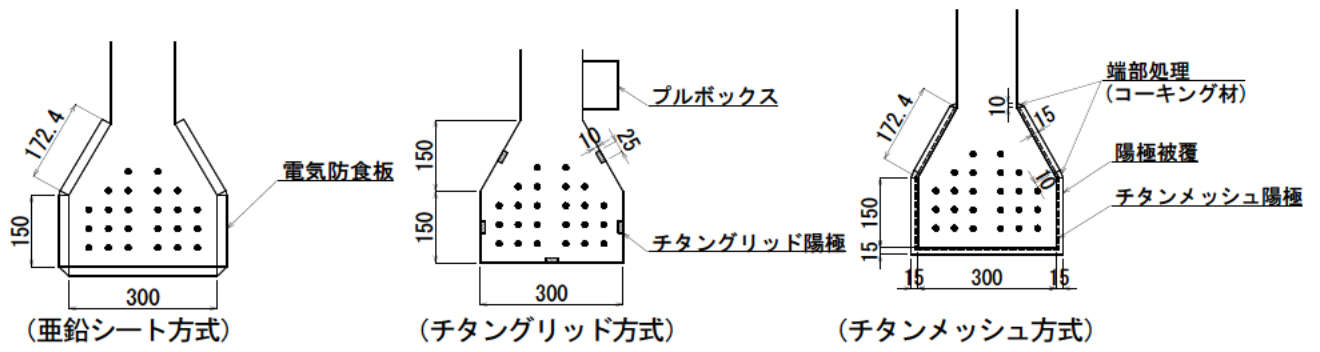


図-5.2.2 電気防食方式概要

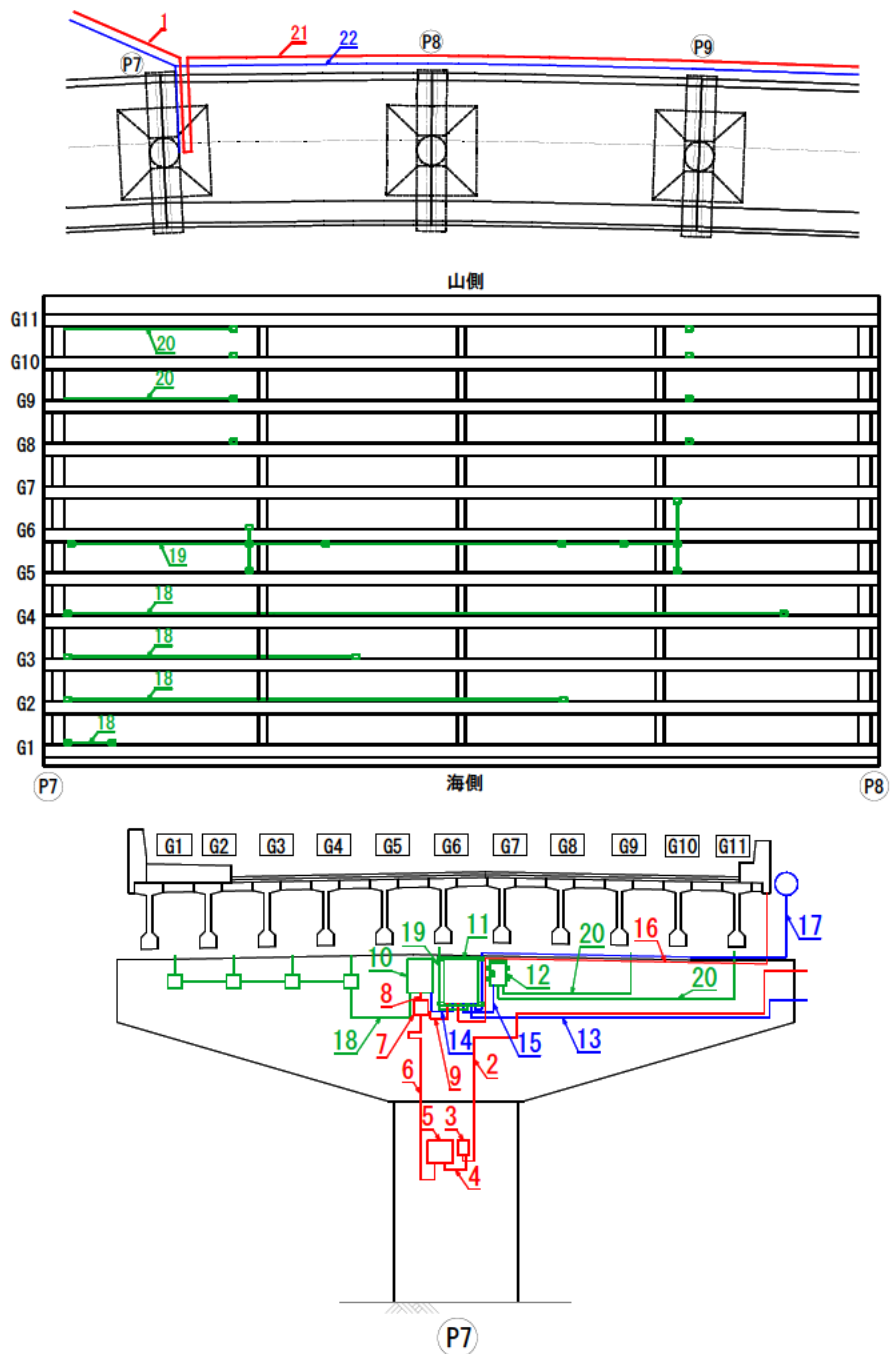


図-5.2.3 電気防食配線系統

表-5.2.1 電気防食配線内容

No.	系統	種別
1	電柱（第6径間山側）⇒P7（固定金具）	電力線（第8径間電気防食の電力供給）
2	P7（固定金具）⇒電気メーター	電力線（第8径間電気防食の電力供給）
3	電気メーター	電気メーター
4	電気メーター⇒分電盤	電力線（第8径間電気防食の電力供給）
5	分電盤	分電盤
6	分電盤⇒プルボックス	電力線（第8径間電気防食の電力供給）
7	プルボックス	プルボックス
8	プルボックス⇒チタンメッシュ方式電源装置	電力線（第8径間電気防食の電力供給）
9	プルボックス⇒チタングリッド方式電源装置	電力線（第8径間電気防食の電力供給）
10	チタンメッシュ方式電源装置	電気防食電源装置
11	チタングリッド方式電源装置 遠隔監視制御装置	電気防食電源装置 遠隔監視制御装置
12	亜鉛シート方式計測装置	電気防食電源装置
13	P7（固定金具）⇒遠隔監視制御装置	通信線
14	チタンメッシュ方式電源装置⇒遠隔監視制御装置	通信線
15	亜鉛シート方式計測装置⇒遠隔監視制御装置	通信線
16	遠隔監視制御装置⇒山側地覆下面	電力線（第12径間電気防食の電力供給）
17	遠隔監視制御装置⇒情報通信管	通信線（NTT専用回線）
18	チタンメッシュ方式電源装置⇒プルボックス（その後の配線含む）	電力線（電気防食の電力供給）及び照合電極線
19	チタングリッド方式電源装置⇒プルボックス（その後の配線含む）	電力線（電気防食の電力供給）及び照合電極線
20	亜鉛シート方式計測装置⇒プルボックス（その後の配線含む）	照合電極線
21	山側地覆下面（第8径間）⇒山側地覆下面（第10径間）	電力線（第12径間電気防食の電力供給）
22	情報通信管⇒P10計測装置	通信線
23	P10計測装置	計測装置
24	P10計測装置⇒G3	照合電極線
25	P10計測装置⇒G4	照合電極線
26	P10計測装置⇒地面	アース

5.2.2 撤去桁の調査場所

橋梁撤去工事に於いて主桁1本を3分割にしたブロックを、調査ヤードとなる糸魚川除雪ステーション内に搬入して実施した。今回調査位置を図-5.2.4に示す。

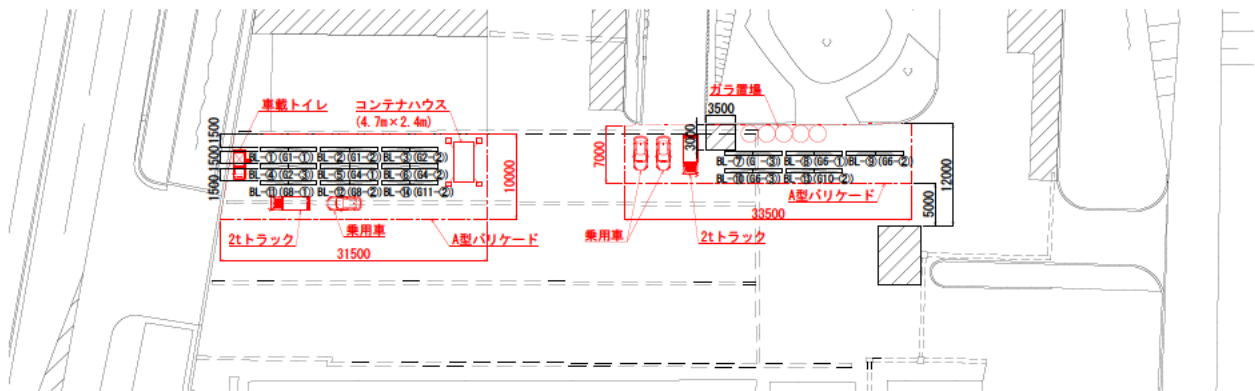


図-5.2.4 調査桁配置図



写真-5.2.1 調査桁配置状況



写真-5.2.2 調査桁配置状況

5.2.3 調査項目および調査位置

調査項目一覧を表-5.2.2に、変状展開図と対応させた調査位置を図-5.2.5に示す。

表-5.2.2 調査項目一覧

電気防食工法	調査項目	調査方法	調査数量
チタンメッシュ方式	浮き部の防食効果試験	仮通電復極試験	浮き部, 健全部; 各1か所
	付着強度試験	建研式	浮き部, 健全部; 各3試料
	陽極耐久性試験	試料採取+ラボ試験	桁中央と端部の底面・側面 計4箇所
チタングリッド方式	分配電流測定	各桁への分配電流測定と表面電位測定	1回路分
	陽極耐久性試験	試料採取+ラボ試験	4箇所
	プルボックス開放試験	ボックスの切断・目視	3個以上
亜鉛シート方式	表面電位測定	埋設照合電極部以外	2箇所
	陽極耐用年数確認	試料採取+ラボ試験	5枚×2箇所+1枚
	間詰パテ付着強度試験	建研式	3箇所
	プルボックス開放試験	ボックスの開放・目視	4個程度

※ プルボックス開放試験は、土木研究所内で実施。結線部の確認を行った。

弁天大橋第8径間 変状展開図

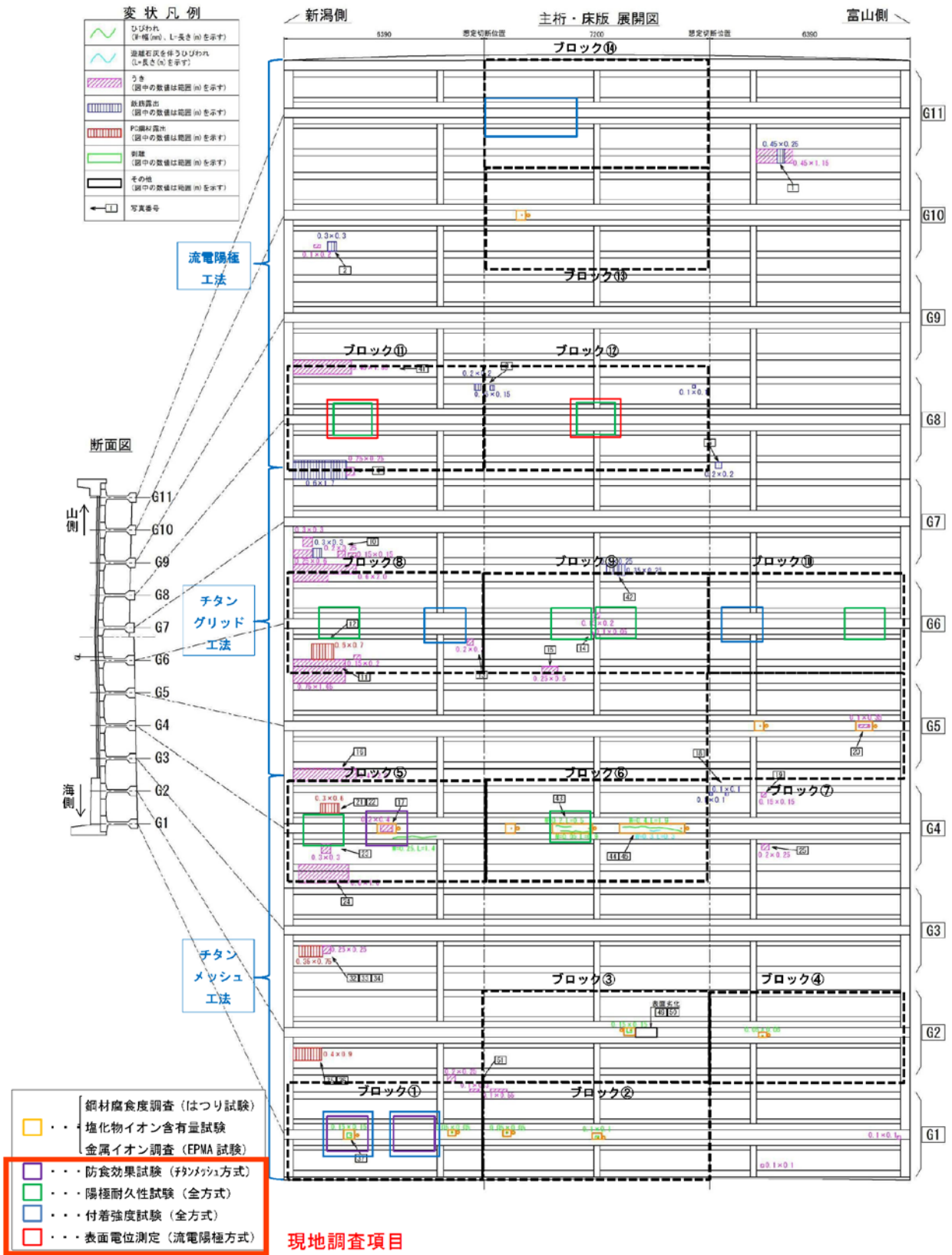


図-5.2.5 弁天大橋撤去桁のブロック割と解体調査項目一覧

5.3 チタンメッシュ方式の調査結果

5.3.1 調査前の外観

調査に先立ち、撤去桁に設置されているチタンメッシュ陽極の外観状況を以下に示す。



写真-5.3.1.1 調査前ブロック①(1)



写真-5.3.1.2 調査前ブロック①(2)



写真-5.3.1.3 調査前ブロック⑤(1)



写真-5.3.1.4 調査前ブロック⑤(2)



写真-5.3.1.5 調査前ブロック⑥(1)



写真-5.3.1.6 調査前ブロック⑥(2)

5.3.2 浮き部の防食効果確認試験

撤去運搬された弁天大橋の最も海側にある新潟側の撤去ブロック①には、 $\phi 10\text{cm}$ 以下の陽極被覆モルタルの剥がれが確認されている。また、海側から4番目の新潟側の撤去ブロック⑤には陽極モルタルの浮きが確認されている。この陽極モルタル剥がれ部および浮き部、ならびに同一ブロック内健全部の数か所に $\phi 30\text{mm}$ 、深さ 30mm 程度のコア削孔を行い、これらに外部測定用の照合電極を設置して、通電試験を行い、その分極性状を測定した。削孔位置を図-5.3.2.1および図-5.3.2.2に示す（削孔位置は、図中の●位置）。

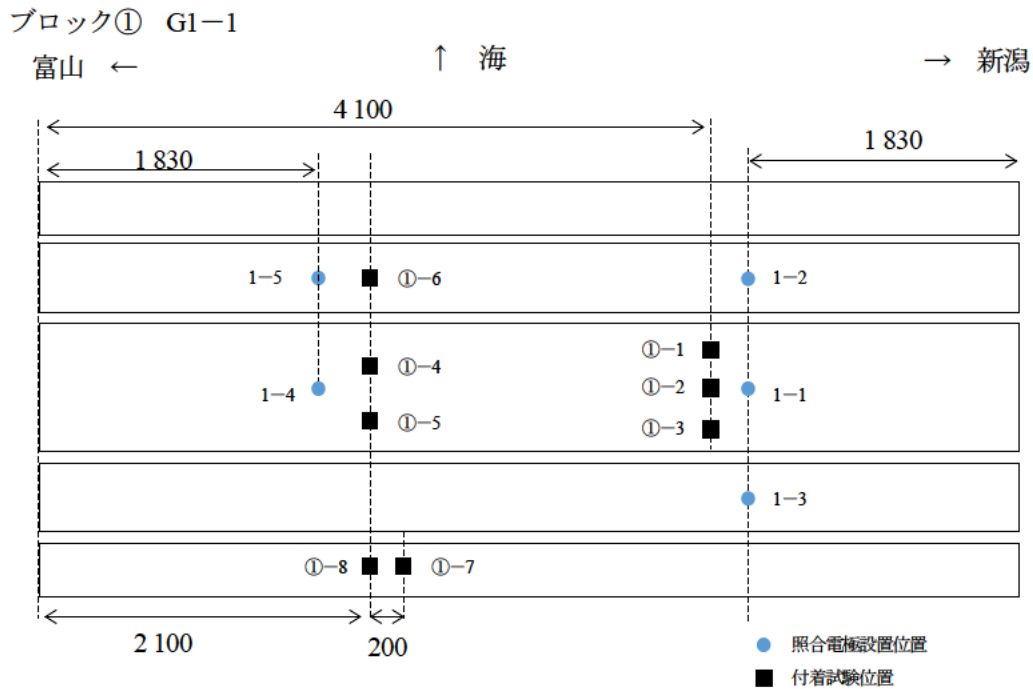


図-5.3.2.1 ブロック①の通電試験照合電極位置および付着強度試験位置

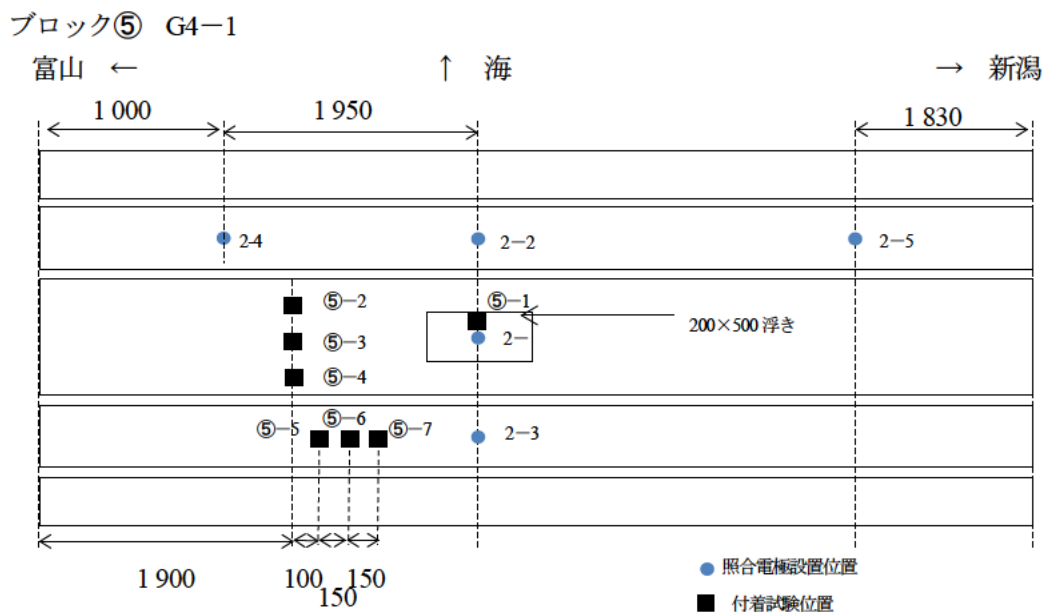


図-5.3.2.2 ブロック⑤の通電試験照合電極位置および付着強度試験位置

また、これらの測定を行う際、コンクリート中鋼材の電氣的導通が必要となる。撤去桁は分割撤去されているため、PC 鋼線も鉄筋も切断されていた。したがって、鋼材間の導通確認を実施し、電氣的導通が得られていない鋼材は、リード線で接続して電氣的に一体化した。さらに鋼材間の導通を確保するとともに、ブロック端部の陽極をはつり出し、これを通電点とした。加えて、各ブロックの陽極表面積を実測測定して、これを防食面積として、実橋で通電されていた $4.5\text{mA}/\text{m}^2$ を最大通電量とした通電試験を実施した。



写真-5.3.2.1 導通確保



写真-5.3.2.2 表面電位測定状況



写真-5.3.2.3 表面電位測定状況

電位の計測は、**図-5.3.2.1** および**図-5.3.2.2** に示す測定点（1-1～1-5 および 2-1～2-5）の位置で実施した。測定項目は、通電電圧、通電電流、電流密度（計算）、自然電位（ E_c ）、オン電位（ E_{on} ）、インスタントオフ電位（ E_{ins} ）を計測した。計測された結果から分極量を算出した。測定結果を**表-5.3.2.1** および**表-5.3.2.2** に示す。なお、本試験における通電時間は、各電流密度で 30 分の通電を維持した後の測定結果である。また、比較参考資料として、前述の概略調査、詳細調査、追加調査において電位測定を行った結果を**表-5.3.2.3** に示す。

表-5.3.2.1 ブロック①の通電試験結果 (vs CSE, 単位 mV, 防食対象面積 : 6.03 m²)

測定位置 No.			1-1			1-2			1-3		
測定位置			底面 (剥がれ部)			フランジ海側側面			フランジ山側側面		
電流密度	電流量	電圧	Eon	Eins	分極	Eon	Eins	分極	Eon	Eins	分極
mA/m ²	mA	V	mV		mV	mV		mV	mV		mV
0	0	0.307	-316		0	-234		0	-270		0
1.00	6.03	0.885	-468	-458	142	-441	-416	182	-473	-417	147
2.00	12.1	1.157	-569	-526	210	-556	-508	274	-613	-509	239
4.50	27.1	1.468	-705	-677	361	-707	-613	379	-836	-620	350
測定位置 No.			1-4			1-5					
測定位置			底面 (健全部)			フランジ海側側面					
電流密度	電流量	電圧	Eon	Eins	分極	Eon	Eins	分極			
mA/m ²	mA	V	mV		mV	mV		mV			
0	0	0.307	-246		0	-365		0			
1.00	6.03	0.885	-443	-413	142	-574	-568	203			
2.00	12.1	1.157	-533	-526	210	-693	-648	283			
4.50	27.1	1.468	-672	-677	361	-848	-744	379			

表-5.3.2.2 ブロック⑤の通電試験結果 (vs CSE, 単位 mV, 防食対象面積 : 5.96 m²)

測定位置 No.			5-1			5-2			5-3		
測定位置			底面 (浮き部)			フランジ海側側面			フランジ山側側面		
電流密度	電流量	電圧	Eon	Eins	分極	Eon	Eins	分極	Eon	Eins	分極
mA/m ²	mA	V	mV		mV	mV		mV	mV		mV
0	0	0.342	-322		0	-278		0	-255		0
1.00	5.96	0.978	-544	-523	201	-519	-485	207	-429	-400	145
2.00	11.9	1.231	-700	-662	340	-652	-592	314	-552	-502	247
4.50	26.8	1.606	-965	-742	420	-891	-768	490	-723	-655	400
測定位置 No.			5-4			5-5					
測定位置			フランジ海側側面			フランジ海側側面					
電流密度	電流量	電圧	Eon	Eins	分極	Eon	Eins	分極			
mA/m ²	mA	V	mV		mV	mV		mV			
0	0	0.342	-299		0	-290		0			
1.00	5.96	0.978	-476	-444	145	-475	-450	160			
2.00	11.9	1.231	-592	-576	277	-592	-550	260			
4.50	26.8	1.606	-758	-646	347	-766	-741	451			

表-5.3.2.3 既往調査における防食効果の確認試験結果（概略調査，詳細調査，追加調査）

	H27/06（概略調査）			H27/11（詳細調査）			H29/02（追加調査）		
気温	21℃			17℃			4℃		
電流	100mA			107mA			110mA		
電圧	1.76V			1.89V			2.61V		
測定時間	----			23 時間測定			48 時間測定		
照合電極	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量	Ins.OFF 電位	OFF 電位	復極量
R1	-458	-259	199	-481	-245	236	-605	-264	341
R2	-427	-130	297	-489	-125	364	-619	-158	461
R3	----	----	----	----	----	----	-590	-145	445
R4	-487	-262	225	-595	-263	332	-708	-234	474

※飽和硫酸銅（CSE）基準に換算 電位の単位は mV

※インスタントオフ測定時の気温は気象庁データ新潟県能生より

※H27/06, H27/11 測定データは土研測定データより

※H29/02 における R3 は材齢 28 日以降調査時の IO 電位を記載

5.3.3 付着強度試験

チタンメッシュ方式の陽極被覆モルタルの浮き部・剥落部近傍および健全部の付着強度試験を行った。試験は図-5.3.2.1 および図-5.3.2.2 に示す位置でブロック①で8か所，ブロック⑤で7か所実施した。



写真-5.3.3.1 付着試験用治具接着状況



写真-5.3.3.2 建研式試験状況



写真-5.3.3.3 ブロック① ①-1



写真-5.3.3.4 ブロック① ①-2



写真-5.3.3.5 ブロック① ①-3

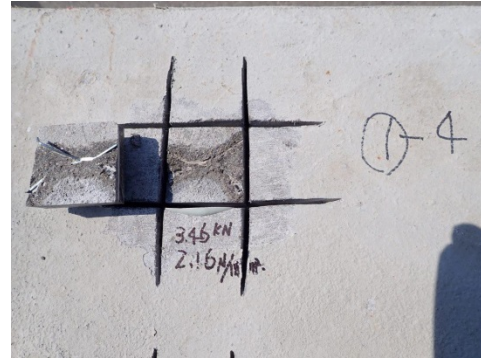


写真-5.3.3.6 ブロック① ①-4

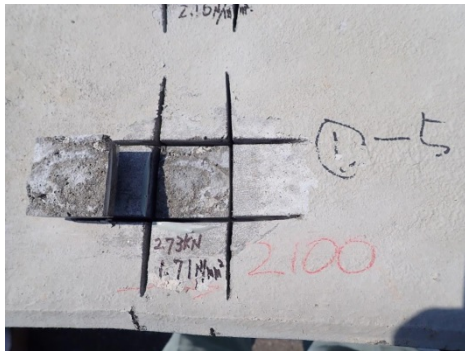


写真-5.3.3.7 ブロック① ①-5



写真-5.3.3.8 ブロック① ①-6



写真-5.3.3.9 ブロック① ①-7



写真-5.3.3.10 ブロック① ①-8



写真-5.3.3.11 ブロック⑤ ⑤-1



写真-5.3.3.12 ブロック⑤ ⑤-2



写真-5.3.3.13 ブロック⑤ ⑤-3



写真-5.3.3.14 ブロック⑤ ⑤-4



写真-5.3.3.15 ブロック⑤ ⑤-5

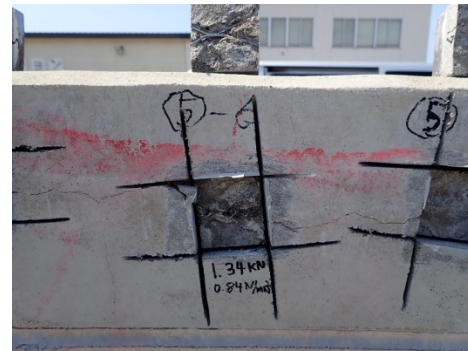


写真-5.3.3.16 ブロック⑤ ⑤-6



写真-5.3.3.17 ブロック⑤ ⑤-7

表-5.3.3.1 付着強度試験結果一覧 (単位 試験荷重 ; kN, 付着強度 ; N/mm²)

ブロック	試験 No.	1	2	3	4	5	6	7	8
試験位置		剥がれ部近傍底面			底面		海側面	山側ハンチ面	
①	試験荷重	1.92	試験不可 カッター 切断不良	1.70	3.46	2.73	1.66	6.07	3.40
	付着強度	1.20		1.06	2.16	1.71	1.04	3.79	2.13
	破断位置	表層		表層	基層	基層	表層	被覆層	被覆層
	陽極位置	躯体側		躯体側	躯体側	躯体側	躯体側	破断側	破断側
試験位置		浮き部	底面			山側側面 (ひび割れ部)			
⑤	試験荷重	0	0.28	0.51	2.73	0.59	1.34	0	
	付着強度	0.00	0.18	0.32	1.71	0.37	0.84	0.00	
	破断位置	表層	表層	表層	基層	基層	基層	表層	
	陽極位置	躯体側	躯体側	躯体側	躯体側	躯体側	躯体側	躯体側	

5.3.4 陽極耐久性試験

陽極の耐久性は、撤去桁から陽極材をはつり出し、これを採取して陽極耐久性試験を実施することで確認する。陽極材の採取は、図-5.3.4.1 および図-5.3.4.2 に示すブロック⑤（桁端部）およびブロック⑥（中央部）から防食対象の下フランジ全面を各々40cm幅で採取した。採取状況を写真-5.3.4.1に、採取した陽極を写真-5.3.4.2 および写真-5.3.4.3 に示す。

ブロック⑤ G4-1

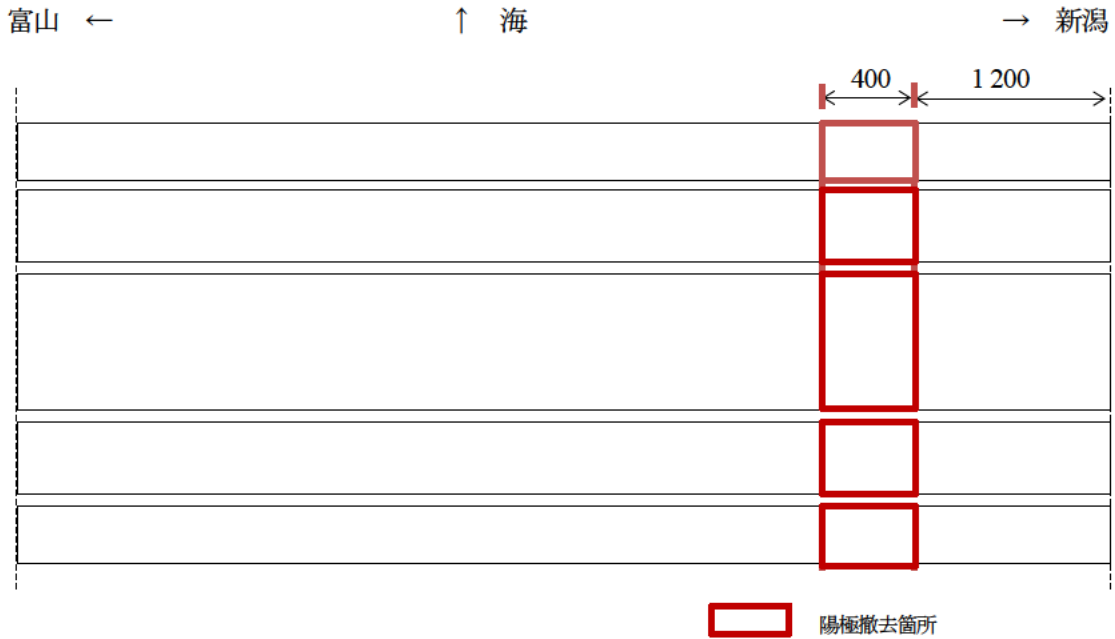


図-5.3.4.1 ブロック⑤陽極採取位置

ブロック⑥ G4-2

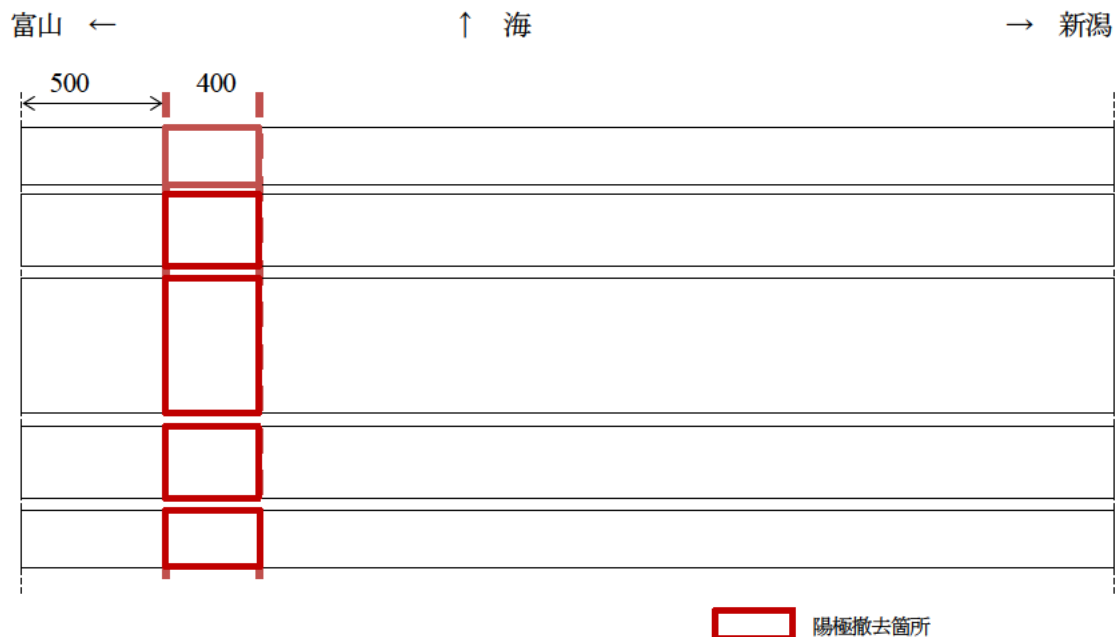


図-5.3.4.2 ブロック⑥陽極採取位置



写真-5.3.4.1 陽極採取状況

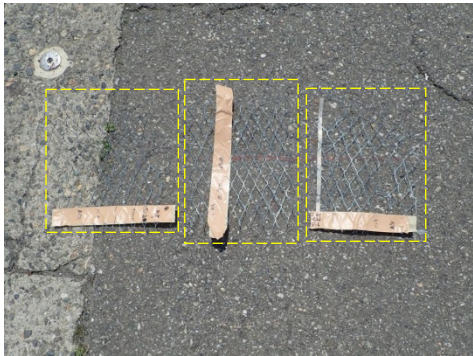


写真-5.3.4.2 採取陽極（ブロック⑤）

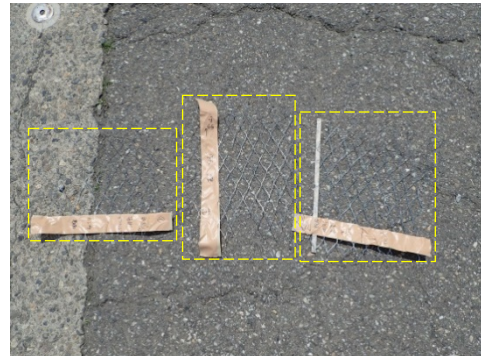


写真-5.3.4.3 採取陽極（ブロック⑥）

ブロック⑤およびブロック⑥から採取した陽極材を用いて促進法による陽極耐久性試験[※]を実施した。促進法による陽極耐久性試験条件および試験結果、浴電圧の経時変化および試験状況をそれぞれ表-5.3.4.1、図-5.3.4.3、写真-5.3.4.4に示す。試験結果から、測定開始後 26.5 時間後の浴電圧の急激な上昇が認められず、電気防食工法を適用し 20 年経過した本構造物から採取した陽極材は、いずれも今後 40 年以上の耐久性を有することが確認された。

※)：日本エルガード協会「陽極材料の促進耐久性試験方法」

陽極材料の 40 年間積算電流量を 26.5 時間で促進通電することで耐久性を評価する。

表-5.3.4.1 促進法による陽極耐久性試験結果一覧

試験 No.	1	2	3
採取位置	ブロック⑤ (海側下フランジ～ハンチ部)	ブロック⑤ (底面部)	ブロック⑥ (底面部)
採取試料形状	LWD 76mm×SWD 135mm (1LWD×4SWD)		
対極形状等	チタン板：幅 76mm×長さ 135mm		
溶液	希硫酸 (15%濃度)		
試験時間	26.5 時間		
印加電流/電流密度	3.3A/1453A/m ²		
測定開始時の浴電圧	3.2915V	3.4225V	3.246V
26.5 時間後の浴電圧	3.3185V	3.4885V	3.238V
浴電圧上昇量	0.027V	0.066V	-0.008V
合否基準	浴電圧の急激な上昇		
判定	合格	合格	合格

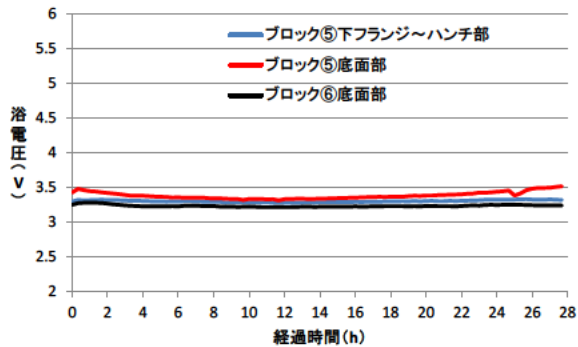


図-5.3.4.3 浴電圧の経時変化

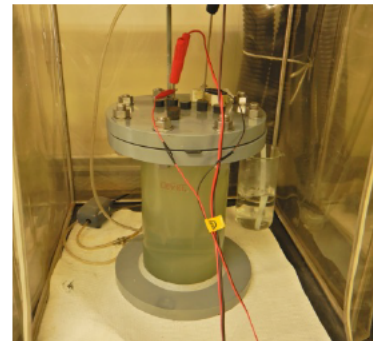


写真-5.3.4.4 試験状況

5.3.5 チタンメッシュ方式の調査結果のまとめ

5.3.5.1 浮き部の防食効果確認試験

- (1) 自然電位はブロック①で-234~-365mVとなり、不確定~90%以上の確率で腐食ありの領域であった。ブロック⑤では-255~-322mV (vs CSE) であり、不確定の領域であった。
- (2) 撤去前の通電電流密度である $4.5\text{mA}/\text{m}^2$ で通電した結果、分極量はブロック①で 350~379mV、ブロック⑤で 347~490mV が得られており、良好な防食状態であった。
- (3) ブロック①とブロック⑤の分極量を比較すると、ブロック⑤のほうが大きな分極量となった。これは、コンクリート中鋼材の腐食程度やコンクリート抵抗等によるものと考えられる。定電流制御で通電しているため、電流密度は同じであるが、通電電圧はブロック⑤のほうが大きい。通電電圧を決定する要素は、コンクリート抵抗と鋼材の分極抵抗である。自然電位はブロック⑤のほうが若干貴な範囲にあり分極抵抗が高かった可能性がある。表-5.2.2.3 に示す R1 はブロック①の桁に設置された埋設照合電極で計測した復極量であり、R4 はブロック⑤の桁に設置された埋設照合電極で計測した復極量である。過年度の結果においてもブロック①よりブロック⑤の位置のほうが復極量は大きい結果であった。
- (4) 陽極被覆材の浮きや剥がれが生じていた位置の分極量をみると、浮き部および剥がれ部の双方ともに各ブロックの平均的な分極量が得られていた。すなわち、本橋梁においては、陽極被覆材の浮きや剥がれは防食効果に影響していないと言える。これは、以下に示す付着強度試験結果において、すべての試験対象の陽極が躯体と一体化しているためと判断できる。

5.3.5.2 付着強度試験

- (1) 付着強度は $0\sim 3.79\text{N}/\text{mm}^2$ と大きな差があった。破断位置や陽極の位置も異なっていた。試験結果についてそれぞれの特徴を以下の(2), (3)に示すが、陽極は躯体側に密着しており、防食電流の供給に問題なかったことが把握できた。
- (2) 付着強度 $0\text{N}/\text{mm}^2$ の部位は、陽極被覆材の浮きが確認された箇所、被覆材の表層で破断しており、陽極は躯体側に埋設されていた。
- (3) 陽極被覆材の剥がれ部近傍においても破断位置は表層であり、陽極に直接的な影響はなかった。

5.3.5.3 陽極耐久性試験

- (1) 採取した陽極の加速試験を行った結果、すべての試料で試験時間 26.5 時間の通電を行っても急激な電圧上昇は生じなかった。
- (2) チタンメッシュ方式を適用し、20 年経過した本構造物から採取した陽極材は、いずれも今後 40 年以上の耐久性を有することが確認できた。
- (3) 数値上の算定ではあるが、本施工に用いている陽極は、陽極表面積 (=コンクリート表面積 ; 面状陽極) 当り $23\text{mA}/\text{m}^2$ の通電で 40 年の陽極耐用年数が確保できる陽極である。本施工における通電電流量は、 $4.5\text{mA}/\text{m}^2$ での通電が行われていたことを考慮すると、陽極自体は 200 年の通電が可能と算定できる。

5.4 チタングリッド方式の調査結果

5.4.1 調査前の外観

調査に先立ち、撤去桁に設置されているチタングリッド陽極の外観状況を以下に示す。



写真-5.4.1.1 調査前ブロック⑦



写真-5.4.1.2 調査前ブロック⑧



写真-5.4.1.3 調査前ブロック⑨



写真-5.4.1.4 調査前ブロック⑩

5.4.2 分配電流, 鋼材電位, 陽極電位測定

弁天大橋では、G6の桁からG5およびG7桁に電流が流れるように回路が形成されていたが、現地のプルボックス内は樹脂で覆われており、各桁に流れる電流の分配が測定できていない。

ここでは、現地での同一回路であったブロック7 (G5桁) とブロック10 (G6桁) を対象として、電流分配、鋼材電位、陽極電位の測定を行った。ブロック7とブロック10の回路形成を図-5.4.2.1に示す。

また、これらの測定を行う際、コンクリート中鋼材の電氣的導通が必要となる。撤去桁は分割撤去されているため、PC鋼線も鉄筋も切断されていた。したがって、鋼材間の導通を確認し、電氣的導通が得られていない鋼材は、リード線およびクリップを用いて電氣的に一体化した。さらに鋼材間の導通を確保するとともに、ブロック端部の陽極をはつり出し、ディストリビュータと陽極の導通を確認した後に、ディストリビュータを通電点とした。加えて、防食対象範囲の下フランジの周長を測定して、これを防食面積 (12.0m²) として、可搬式の照合電極を用いて100mV以上の分極量が得られるように、0.5, 1.0, 2.0mA/m²通電を行った。

総電流の計測はポテンショガルバナスタットで、ブロック7に流れる電流量は無抵抗電流計にて測定した。鋼材電位の計測は、図-5.4.2.1に示すように下フランジのハンチ、側面、底面の6ヶ所を5つの断面で、陽極電位の測定は、陽極が配置されている下フランジハンチ、側面の各2ヶ所と底面1ヶ所の5ヶ所を5つの断面で計測した。測定項目は、通電電圧、通電電流、電流密度 (計算)、自然電位 (E_c)、オン電位 (E_{on})、インスタントオフ電位 (E_{ins}) とした。計測された結果から分極量 (ΔE) を算出した。電流分配の測定結果を表-5.4.2.1

に、鋼材電位および分極量の測定結果を表-5.4.2.2, 図-5.4.2.2, 図-5.4.2.3, 図-5.4.2.4, 図-5.4.2.5に、陽極電位および分極量の測定結果を表-5.4.2.3, 図-5.4.2.6, 図-5.4.2.7にそれぞれ示す。

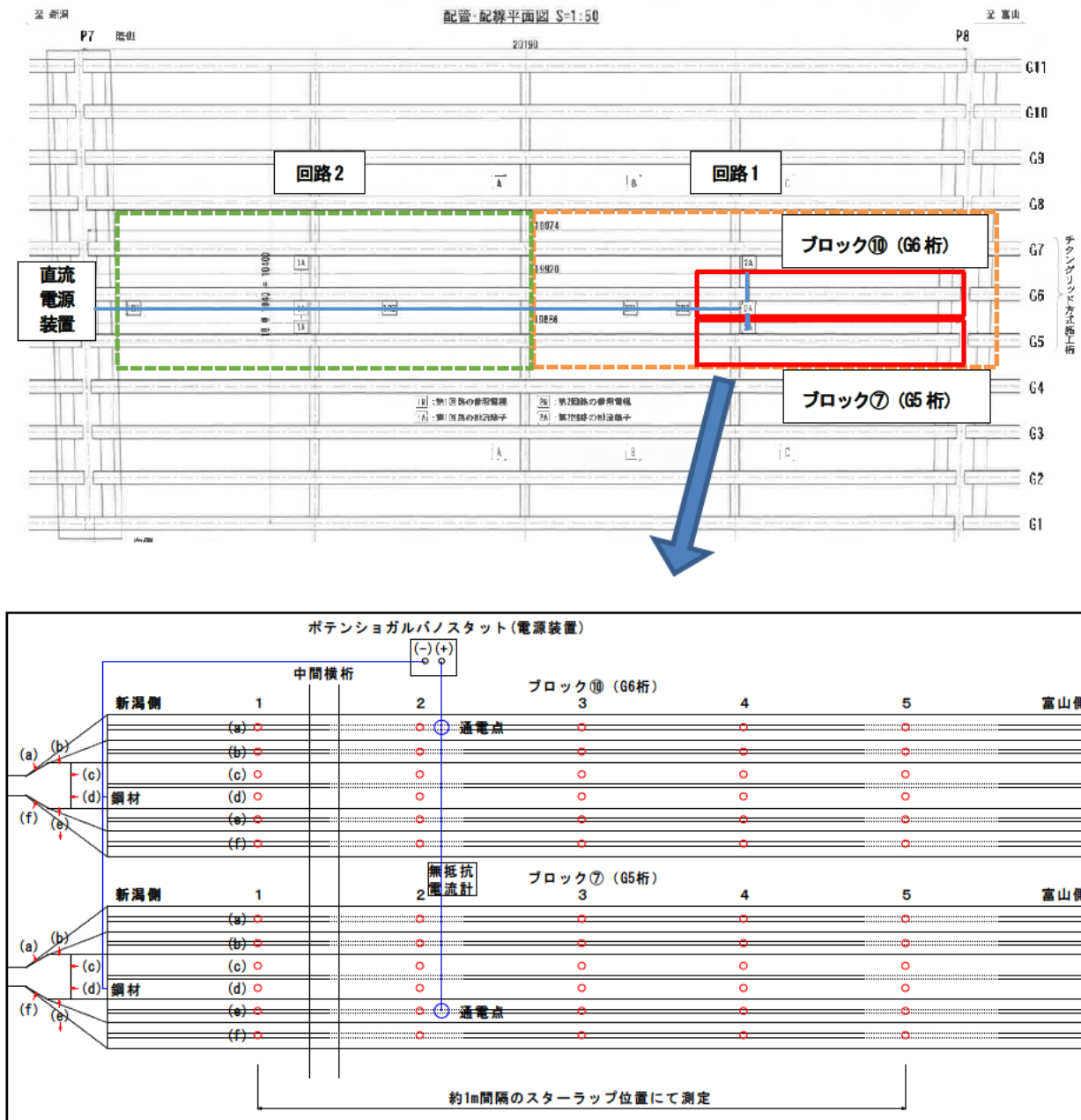


図-5.4.2.1 電流分配, 鋼材電位, 陽極電位の測定位置



写真-5.4.2.1 導通確認と確保

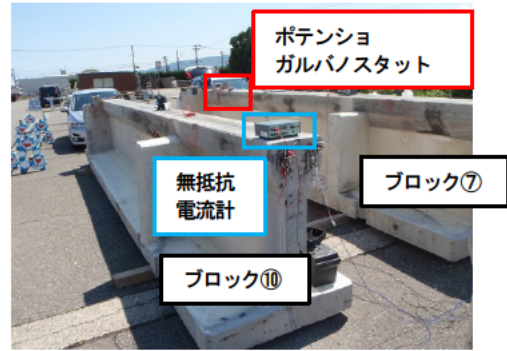


写真-5.4.2.2 電流分配測定状況



写真-5.4.2.3 表面電位測定状況



写真-5.4.2.4 表面電位測定状況

表-5.4.2.1 電流分配の測定結果

電流密度 (mA/m ²)	通電電圧 (V)	電流量(mA)			電流分配率(%)	
		総電流	ブロック⑩	ブロック⑦	ブロック⑩	ブロック⑦
0.5	0.742	6	3.18	2.82	53	47
1.0	1.004	12	6.46	5.54	53.8	46.2
2.0	1.219	24	13.45	10.55	56	44

表-5.4.2.2 鋼材電位の測定結果 (2mA/m²通電時)

単位:mV vs. 飽和硫酸銅電極(CSE)の換算値

測定点	ブロック⑩				ブロック⑦				
	Ec	Eon	Eins	ΔE	Ec	Eon	Eins	ΔE	
(a)ハンチ	測点1	-362	-625	-603	241	-424	-567	-539	115
	測点2	-392	-643	-595	203	-357	-562	-505	148
	測点3	-406	-626	-583	177	-312	-541	-481	169
	測点4	-348	-559	-513	165	-323	-526	-468	145
	測点5	-410	-570	-531	121	-362	-537	-500	138
(b)側面	測点1	-343	-557	-554	211	-407	-586	-544	137
	測点2	-371	-588	-541	170	-374	-540	-488	114
	測点3	-386	-589	-533	147	-319	-543	-479	160
	測点4	-338	-534	-478	140	-337	-547	-489	152
	測点5	-428	-561	-532	104	-364	-599	-531	167
(c)底面	測点1	-328	-546	-541	213	-393	-574	-544	151
	測点2	-364	-520	-516	152	-405	-576	-536	131
	測点3	-432	-628	-596	164	-335	-560	-524	189
	測点4	-309	-544	-497	188	-329	-578	-537	208
	測点5	-425	-603	-532	107	-303	-602	-501	198
(d)底面	測点1	-311	-532	-528	217	-412	-585	-580	168
	測点2	-362	-558	-549	187	-362	-544	-540	178
	測点3	-384	-572	-533	149	-335	-542	-501	166
	測点4	-294	-511	-464	170	-321	-543	-509	188
	測点5	-415	-575	-518	103	-308	-594	-510	202
(e)側面	測点1	-357	-571	-550	193	-434	-642	-598	164
	測点2	-388	-513	-507	119	-374	-616	-547	173
	測点3	-400	-563	-516	116	-395	-626	-543	148
	測点4	-323	-554	-502	179	-314	-584	-480	166
	測点5	-402	-612	-523	121	-412	-618	-574	162
(f)ハンチ	測点1	-336	-617	-605	269	-385	-656	-573	188
	測点2	-374	-596	-557	183	-396	-674	-594	198
	測点3	-393	-608	-573	180	-341	-621	-530	189
	測点4	-346	-561	-518	172	-320	-596	-517	197
	測点5	-483	-635	-599	116	-402	-593	-535	133

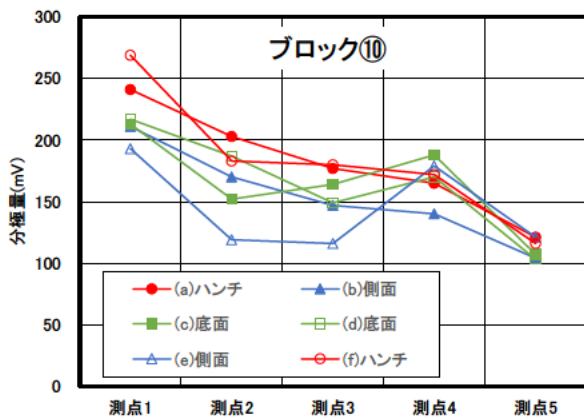


図-5.4.2.2 鋼材の分極量の測定結果 (ブロック 10)

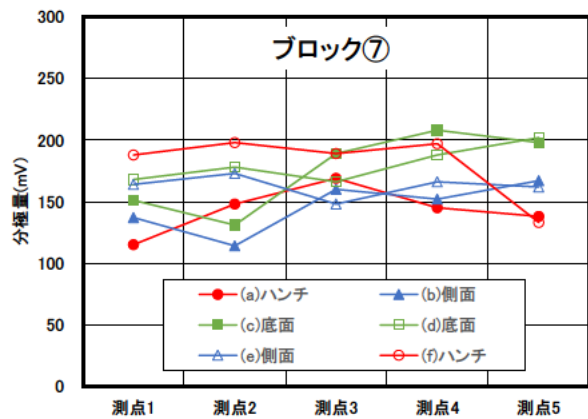


図-5.4.2.3 鋼材の分極量の測定結果 (ブロック 7)

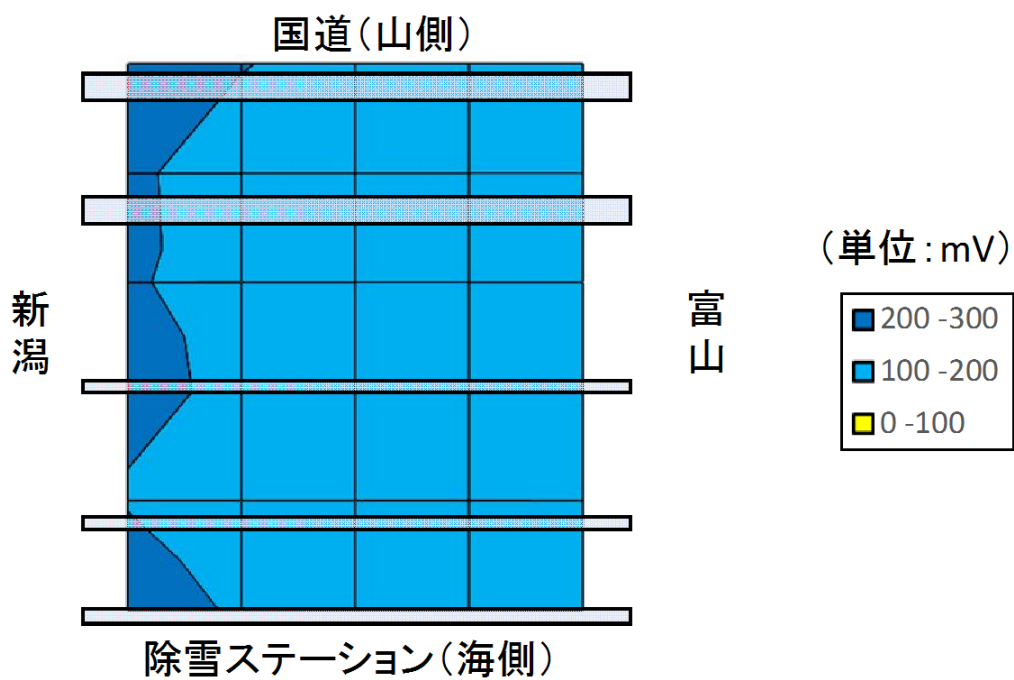


図-5.4.2.4 鋼材の分極量の測定結果 (ブロック10)

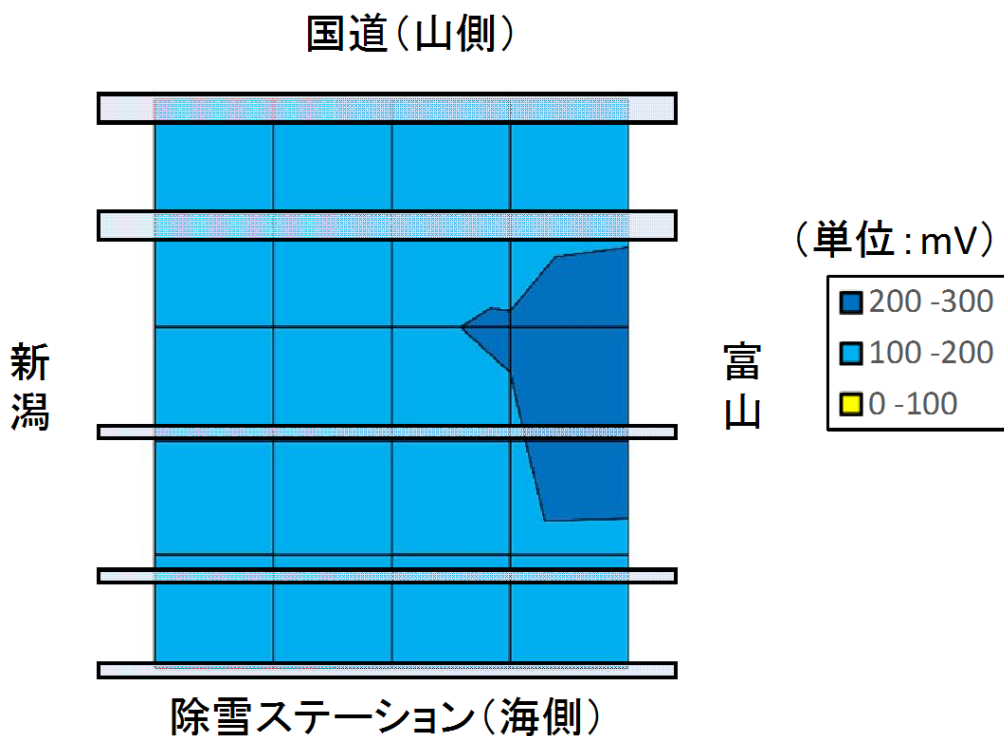


図-5.4.2.5 鋼材の分極量の測定結果 (ブロック7)

表-5.4.2.3 陽極電位の測定結果 (2mA/m²通電時)

単位:mV vs. 飽和硫酸銅電極(CSE)の換算値

測定点	ブロック⑩				ブロック⑦				
	Ec	Eon	Eins	ΔE	Ec	Eon	Eins	ΔE	
(a)ハンチ	測点1	139	556	475	336	67	560	521	454
	測点2	106	559	510	404	162	578	575	413
	測点3	107	562	557	450	153	608	603	450
	測点4	146	674	672	526	168	655	592	424
	測点5	73	596	550	477	115	612	608	493
(b)側面	測点1	141	574	497	356	82	553	515	433
	測点2	135	603	578	443	145	610	609	464
	測点3	79	641	637	558	167	604	603	436
	測点4	186	659	657	471	153	612	609	456
	測点5	47	596	594	547	113	565	563	450
(c)-(d)間底面	測点1	125	528	474	349	59	537	480	421
	測点2	95	533	495	400	98	526	524	426
	測点3	81	527	493	412	143	602	545	402
	測点4	173	588	578	405	138	519	515	377
	測点5	18	569	567	549	106	534	532	426
(e)側面	測点1	121	569	480	359	48	517	481	433
	測点2	94	593	500	406	115	528	525	410
	測点3	78	572	511	433	108	530	524	416
	測点4	183	602	591	408	150	593	586	436
	測点5	75	553	546	471	93	528	505	412
(f)ハンチ	測点1	144	545	463	319	117	538	536	419
	測点2	132	533	477	345	111	497	493	382
	測点3	126	584	575	449	158	555	552	394
	測点4	171	608	548	377	162	574	570	408
	測点5	61	565	555	494	91	579	578	487

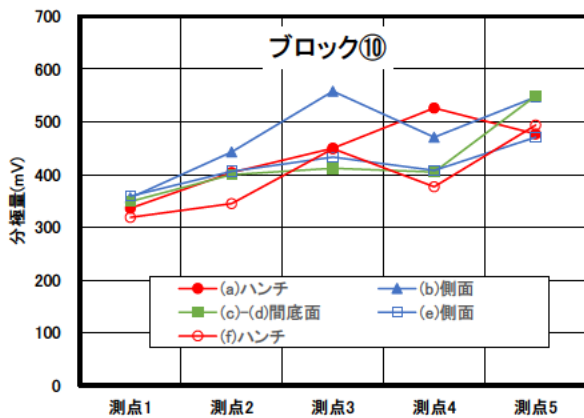


図-5.4.2.6 陽極の分極量の測定結果 (ブロック 10)

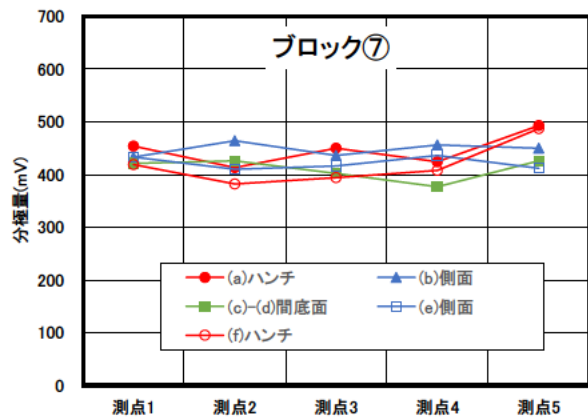


図-5.4.2.7 陽極の分極量の測定結果 (ブロック 7)

5.4.3 陽極付着強度試験

チタングリッド陽極の界面の付着性状と界面の状況およびコンクリートや陽極被覆材の母材の付着強度を確認することを目的として、付着強度試験を行った。試験は、図-5.4.3.1に示すように、ブロック9で17か所、ブロック10で3か所の合計19か所実施した。ここで、9-1、9-8、9-17は陽極の界面の付着強度を測定するため、40×溝幅の30mmで陽極の溝切削深さの切り込みを入れた方法とした。9-2～9-7および10-1～10-3は、建研式試験の治具の寸法の通り、40×40mmとし、陽極の溝切削深さの切り込みを入れた方法とした。以上に示す2つの方法は、陽極界面の付着強度の確認を目的としたが、実際には陽極がコンクリートの内部に埋め込まれており、コンクリートおよびモルタルそのものの付着を有しているため、9-9～9-12はコンクリートおよびモルタルそのものの付着強度を測定することを目的に、溝の切り込み深さを陽極の埋設深さより手前の15mmとして、付着強度を測定した。

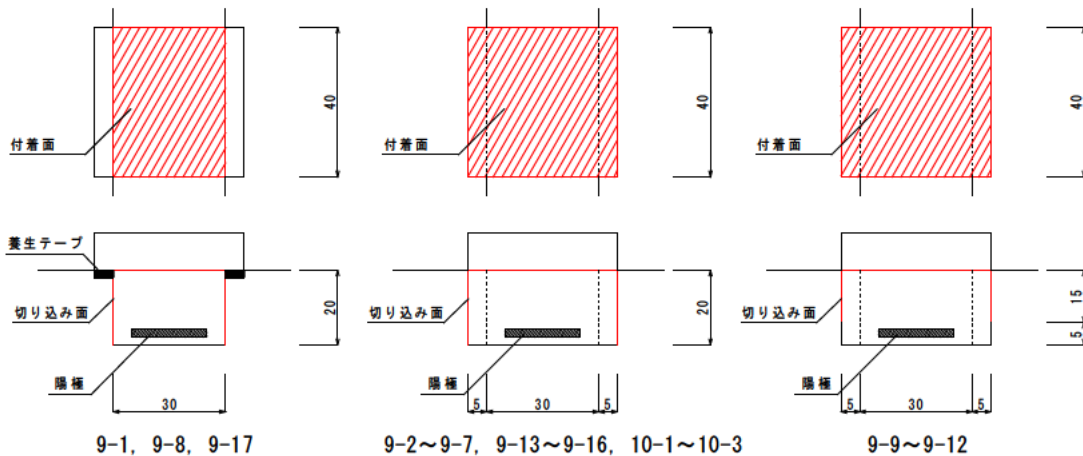
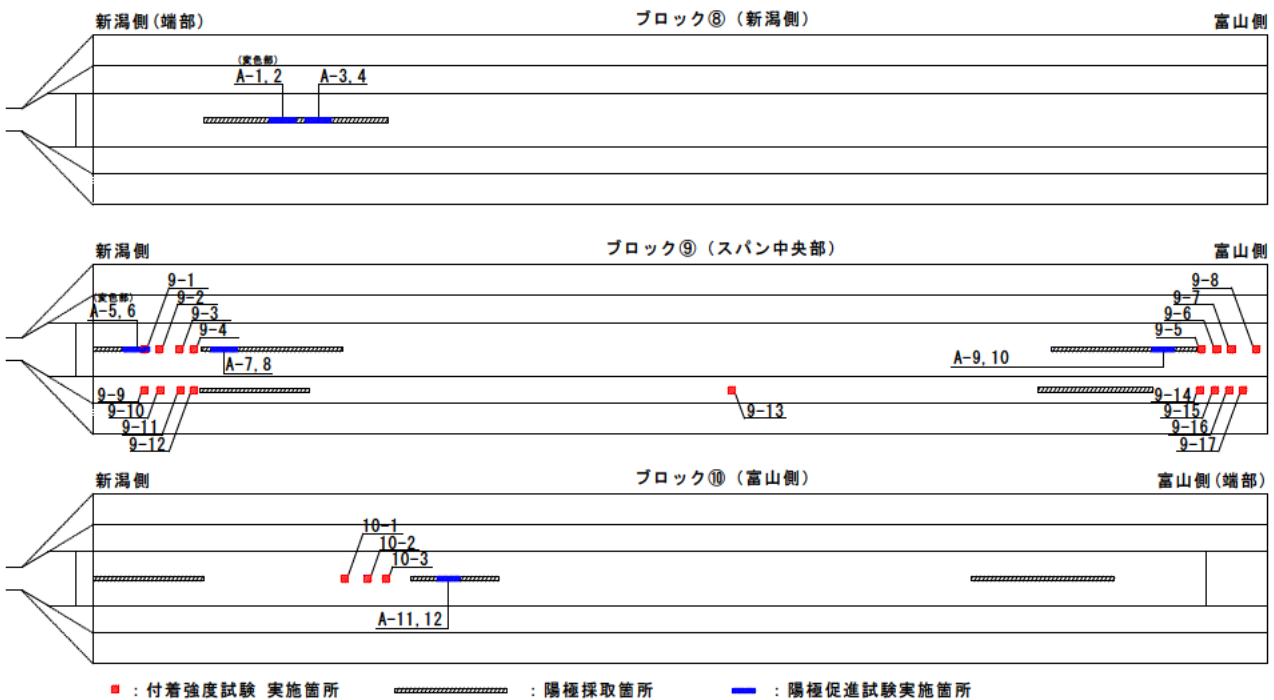


図-5.4.3.1 ブロック⑧、⑨、⑩の付着強度試験およびチタングリッド陽極の採取位置



写真-5.4.3.1 附着試験用治具接着状況



写真-5.4.3.2 建研式試験状況



写真-5.4.3.3 ブロック⑨底面 (9-1~9-4)



写真-5.4.3.4 ブロック⑨底面 (9-5~9-8)



写真-5.4.3.5 ブロック⑨側面 (9-9~9-12)



写真-5.4.3.6 ブロック⑨側面 (9-13)



写真-5.4.3.7 ブロック⑨側面 (9-14~9-17)



写真-5.4.3.8 ブロック⑩底面 (10-1~10-3)

表-5.4.3.1 付着強度試験結果一覧

ブロック	試験No.	9-1	9-2	9-3	9-4	9-5	9-6	9-7	9-8	
⑨(底面)	試験荷重(N)	500	2451	1152	1402	1169	1387	796	355	
	付着強度(N/mm ²)	0.42	1.53	0.72	0.88	0.73	0.87	0.50	0.30	
	破断位置 ^{※1}	界面	界面	界面	界面	界面	界面	界面	界面	
	備考	幅30mm							幅30mm	
ブロック	試験No.	9-9	9-10	9-11	9-12	9-13	9-14	9-15	9-16	9-17
⑨(側面)	試験荷重(kN)	3030	6409	3712	6320	1638	1615	950	1298	742
	付着強度(N/mm ²)	2.53	4.01	2.32	3.95	1.02	1.01	0.59	0.81	0.62
	破断位置 ^{※1}	母材	母材	母材	母材	界面	界面	界面	界面	界面
	備考	幅30mm								幅30mm
ブロック	試験No.	10-1	10-2	10-3	※1 破断位置について ・界面 → 陽極の界面部分での破断 ・母材 → 陽極被覆材, コンクリート部での破断					
⑩(底面)	試験荷重(kN)	1039	334	1029	・9-1, 9-8, 9-17の平均					
	付着強度(N/mm ²)	0.65	0.21	0.64	0.45 N/mm ²					
	破断位置 ^{※1}				・9-2~7, 9-13~16, 10-1~3の平均					
	備考				0.87 N/mm ² ・9-9~12の平均					
						3.2 N/mm ²				

5.4.4 陽極耐久性試験

陽極の耐久性は、撤去桁から陽極材をはつり出し、これを採取して陽極耐久性試験を実施することで確認する。陽極の採取は、図-5.4.3.1 に示すブロック⑧, ⑨, ⑩から採取した。採取した陽極を写真-5.4.4.1～写真-5.4.4.6 にそれぞれ示す。試験は、NACE(National Association of Corrosion Engineers)の規格である Standard TM0294-2016, Item No.21225:「Testing of Embeddable Anodes for Use in Cathodic Protection of Atmospherically Exposed Steel-Reinforced Concrete」に準拠して実施した。本試験は、積算電流密度(=通電電流密度×通電期間)を38500A・hr/m²と同一とし、短期間に過大な電流を流すことにより陽極材の耐久性を短期間で評価する試験方法であり、使用環境下での最大電流密度である陽極材面積あたり110mA/m²で40年間通電した値を8.9A/m²で180日間通電し、浴電圧および陽極電位が初期の値よりも4.0V以上高くならなければ良いとするものである。今回は、更なる試験の短縮化を図るため、53.4A/m²で30日間の通電にて評価する。また今回は、30g/LのNaCl溶液、40g/LのNaOH溶液にて試験を行い、試験期間中は浴電圧を測定し、急激な上昇が生じないことを確認する。

NACE試験に用いた試験片を写真-5.4.4.7に、試験の状況を写真-5.4.4.8にそれぞれ示す。

30g/LのNaCl溶液での試験の結果を図-5.4.4.1に、40g/LのNaOH溶液での試験の結果を図-5.4.4.2にそれぞれ示す。

積算電流密度が38500A・hr/m²までの段階において、NaCl溶液およびNaOH溶液ともに浴電圧の著しい上昇は認められていない。



写真-5.4.4.1 ブロック⑧



写真-5.4.4.2 ブロック⑨ (富山側)



写真-5.4.4.3 ブロック⑨ (新潟側)



写真-5.4.4.4 ブロック⑩ (陽極①)



写真-5.4.4.5 ブロック⑩ (陽極②)



写真-5.4.4.6 ブロック⑩ (陽極③)

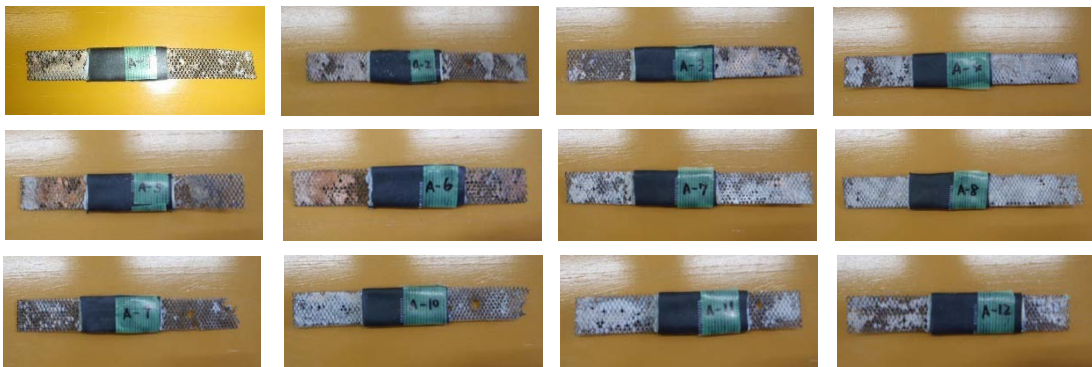


写真-5.4.4.7 採取した陽極からの試験片 (A-1~A-12)

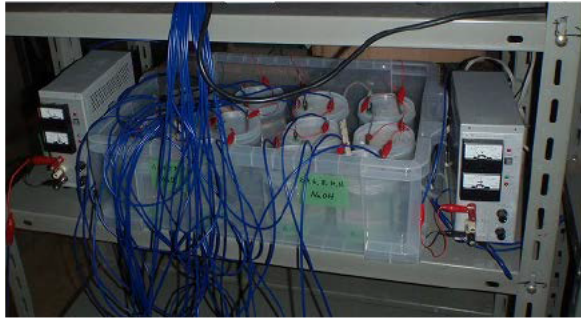


写真-5.4.4.8 NACE に準拠した試験の状況

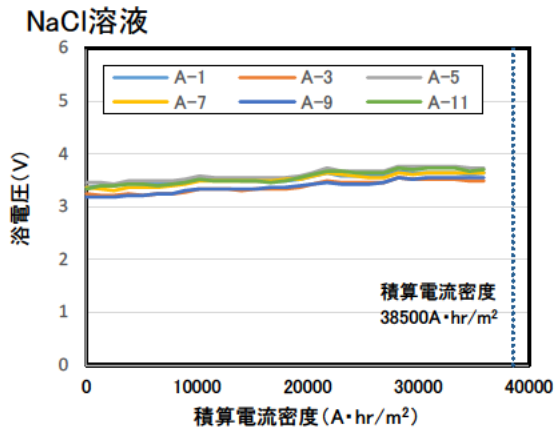


図-5.4.4.1 浴電圧の経時変化 (NaCl 溶液)

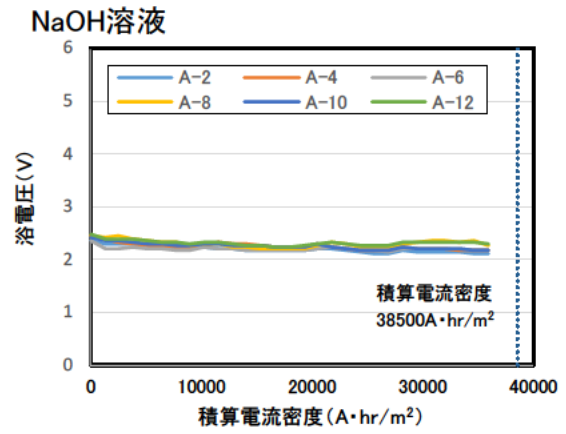


図-5.4.4.2 浴電圧の経時変化 (NaOH 溶液)

5.4.5 プルボックス開放試験

桁撤去に先立ち回収されたプルボックスを開放し、結線部の状態を調査した。本方式では、プルボックスの内部が樹脂で充填されていたため、ボックスを解体した後、結線部の外観を確認した。プルボックスおよびプルボックスを解体後の結線の状況を写真-5.4.5.1～写真-5.4.5.4にそれぞれ示す。



写真-5.4.5.1 解体前のプルボックスの状況



写真-5.4.5.2 プルボックスの解体状況



写真-5.4.5.3 ディストリビュータと電線の結線



写真-5.4.5.4 排流端子と電線の結線

5.4.6 チタングリッド方式の調査結果のまとめ

5.4.6.1 分配電流, 鋼材電位, 陽極電位測定

- (1) ブロック⑦ (G5 桁) とブロック⑩ (G6 桁) を接続し, 0.5, 1.0, 2.0mA/m²の通電時におけるブロック⑩の電流分配率は 53~56%であり, ほぼ均等に電流が流れていた。
- (2) 鋼材の自然電位は, ブロック⑦ (G5 桁) で-294~-483mV (平均値-363mV), ブロック⑩ (G6 桁) で-303~-434mV (平均値-372mV) となり, 不確定~90%以上の確率で腐食ありの領域であった。
- (3) ブロック⑦ (G5 桁) とブロック⑩ (G6 桁) を接続し 2.0mA/m²の通電を行った結果, 鋼材の分極量はブロック⑦で 114~208mV (平均値 169mV), ブロック⑩で 103~269mV (平均値 163mV) であり, 数値のばらつきは見られるものの, 良好な防食状態であった。
- (4) ブロック⑦ (G5 桁) とブロック⑩ (G6 桁) を接続し 2.0mA/m²の通電を行った結果, 陽極の分極量はブロック⑦で 377~493mV (平均値 429mV), ブロック⑩で 319~558mV (平均値 430mV) であり, 陽極の大きな電位上昇は認められなかった。

5.4.6.2 付着強度試験

- (1) 陽極界面の付着強度は, 40×溝幅の 30mm で実施した場合の平均値は 0.45N/mm², 40×40mm で実施した場合の平均値は 0.87N/mm²であった。一方, 切り込み深さを陽極の埋め込み深さより手前とした場合のコンクリートおよび陽極被覆材の付着強度の平均値は 3.2N/mm²であった。陽極埋設箇所は, 溝の両側面および底面の 3 面にて付着されていること, 母材の付着強度は陽極界面に対して高いため, 通電に伴う陽極被覆材の剥落等の心配はないものと考えられる。
- (2) 今回付着試験を実施した箇所の陽極被覆材は, 陽極の網目にも充填されていた。

5.4.6.3 陽極耐久性試験

- (1) チタングリッド方式を適用し, 20 年経過した本構造物から採取した陽極材は, いずれも NACE の促進試験を満足し, 今後 40 年以上の耐久性を有することが確認できた。

5.4.6.4 プルボックス開放試験

- (1) ディストリビュータおよび排流端子の結線部に腐食等は認められず, 健全であった。

5.5 垂鉛シート方式の調査結果

5.5.1 調査前の外観

調査に先立ち、撤去桁に設置されている垂鉛シートの外観状況を以下に示す。



写真-5.5.1.1 調査前ブロック⑪(1)



写真-5.5.1.2 調査前ブロック⑪(2)



写真-5.5.1.3 調査前ブロック⑫(1)



写真-5.5.1.4 調査前ブロック⑫(2)

5.5.2 表面電位測定

表面電位測定を行う際、コンクリート中鋼材の電氣的導通が必要となる。撤去桁は分割撤去されているため、PC鋼線も鉄筋も切断されていた。したがって、鋼材間の導通確認を実施し、電氣的導通が得られていない鋼材は、リード線で接続して電氣的に一体化した。



写真-5.5.2.1 導通確認状況



写真-5.5.2.2 導通確保

亜鉛シート方式では、陽極相互間は間詰パテにより覆われている。表面電位を計測する場合、躯体コンクリート面に照合電極を押し当てる必要があるため、表面電位を計測する範囲の間詰パテを撤去し、測定点とした。

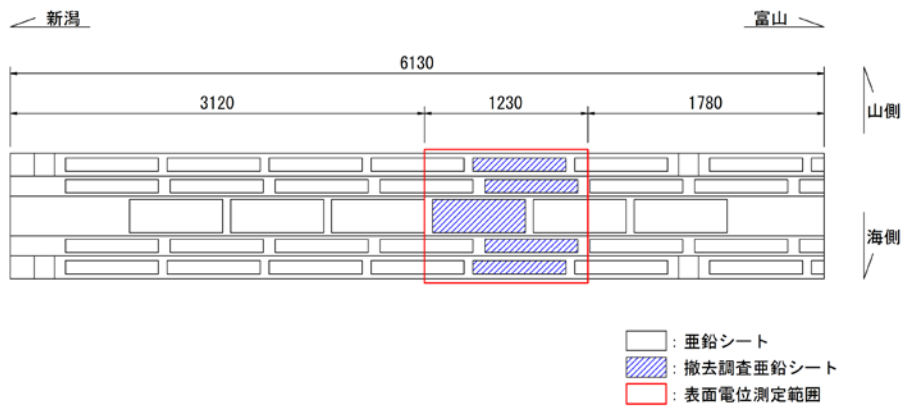


図-5.5.2.1 ブロック⑪の調査位置図

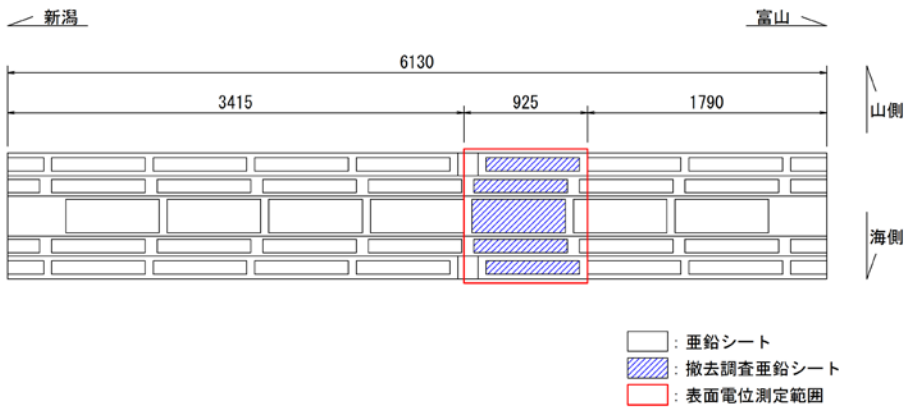


図-5.5.2.2 ブロック⑫の調査位置図



写真-5.5.2.3 間詰パテ撤去後ブロック⑪



写真-5.5.2.4 間詰パテ撤去後ブロック⑫

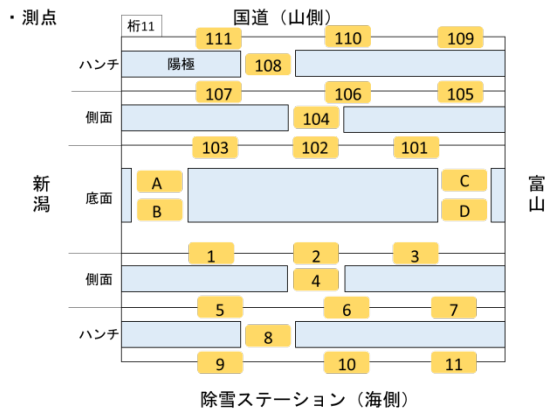


図-5.5.2.3 測定点図ブロック⑪

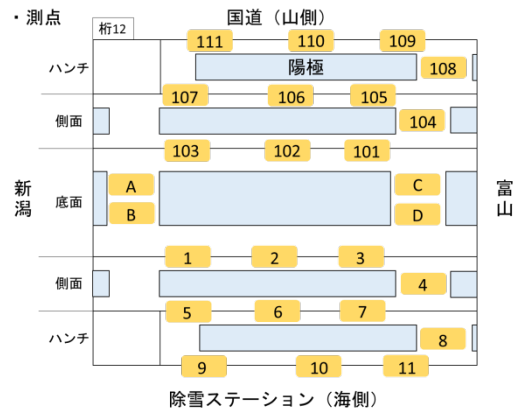


図-5.5.2.4 測定点図ブロック⑫

表面電位の計測は、図-5.5.2.3 および図-5.5.2.4 に示す測定点 (1~11, 101~111, A~D) の位置で実施した。測定項目は、陽極発生電流、自然電位 (E_c)、オン電位 (E_{on})、インスタントオフ電位 (E_{ins}) を計測した。計測された結果から分極量 (ΔE) を算出した。測定結果を表-5.5.2.1、図-5.5.2.5~図-5.5.2.12 に示す。なお、通電時間が約4時間で実施した。



写真-5.5.2.5 表面電位測定状況



写真-5.5.2.6 表面電位測定状況

表-5.5.2.1 表面電位測定結果

vs CSE

単位 : mV

測定点	ブロック⑪				ブロック⑫			
	陽極発生電流密度 5.31 mA/m ²				陽極発生電流密度 5.53 mA/m ²			
	Ec	Eon	Eins	ΔE	Ec	Eon	Eins	ΔE
1	-345	-808	-629	284	-341	-991	-739	398
2	-329	-834	-589	260	-340	-962	-737	397
3	-336	-978	-696	360	-430	-955	-726	296
4	-342	-851	-652	310	-394	-860	-729	335
5	-350	-1030	-759	409	-467	-1005	-747	280
6	-349	-824	-664	315	-416	-890	-713	297
7	-330	-980	-803	473	-465	-874	-706	241
8	-352	-977	-827	475	-461	-938	-729	268
9	-322	-828	-703	381	-435	-732	-600	165
10	-331	-1013	-745	414	-468	-653	-593	125
11	-316	-843	-679	363	-442	-668	-592	150
101	-306	-727	-468	162	-231	-967	-711	480
102	-284	-726	-457	173	-241	-925	-666	425
103	-291	-739	-573	282	-242	-927	-656	414
104	-211	-657	-523	312	-309	-646	-555	246
105	-306	-823	-640	334	-401	-712	-608	207
106	-304	-759	-617	313	-388	-871	-651	263
107	-284	-931	-675	391	-396	-905	-660	264
108	-316	-766	-717	401	-417	-895	-673	256
109	-310	-781	-636	326	-421	-696	-593	172
110	-309	-819	-662	353	-422	-788	-628	206
111	-300	-803	-631	331	-404	-702	-594	190
A	-314	-771	-514	200	-288	-889	-673	385
B	-310	-774	-498	188	-264	-921	-681	417
C	-322	-713	-456	134	-228	-855	-690	462
D	-323	-762	-494	171	-227	-951	-700	473

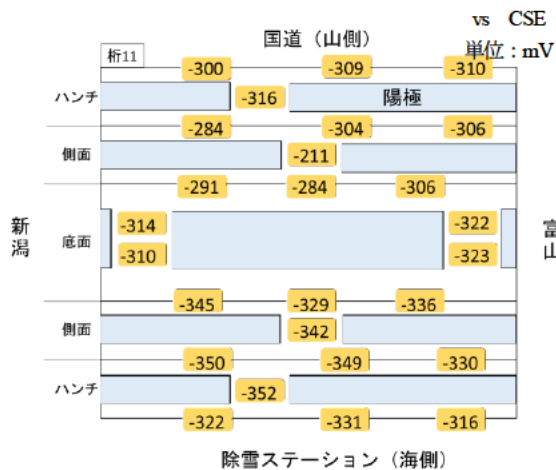


図-5.5.2.5 自然電位ブロック①

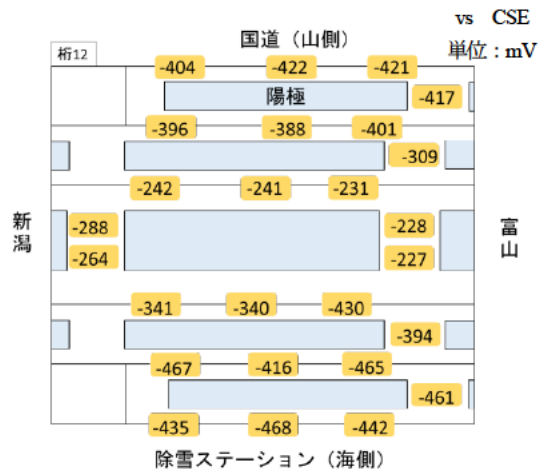


図-5.5.2.6 自然電位ブロック②

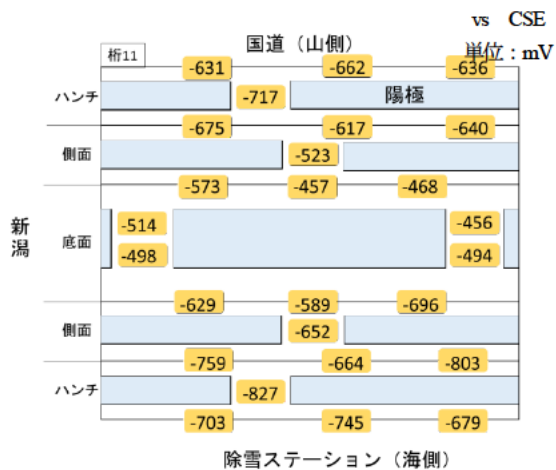


図-5.5.2.7 インスタントオフ電位ブロック①

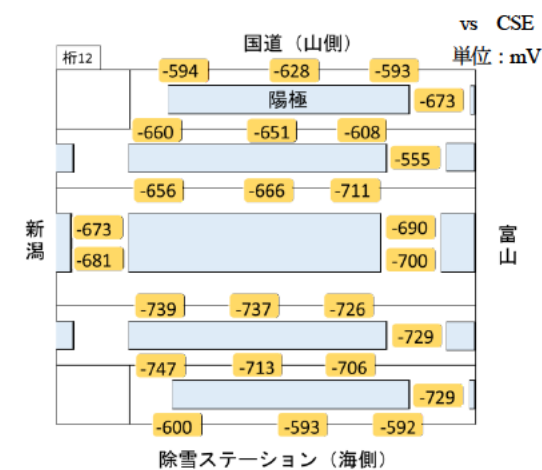


図-5.5.2.8 インスタントオフ電位ブロック②

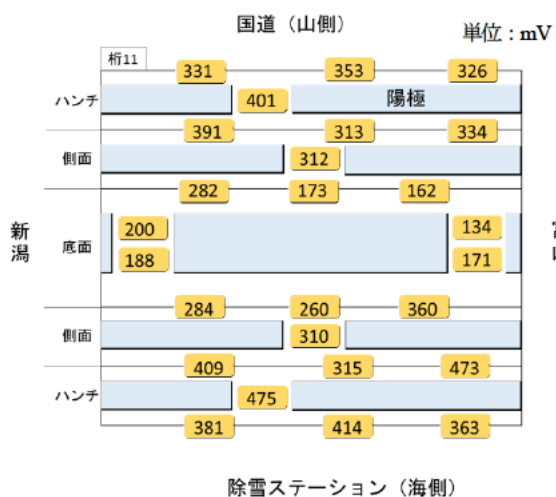


図-5.5.2.9 分極量ブロック①

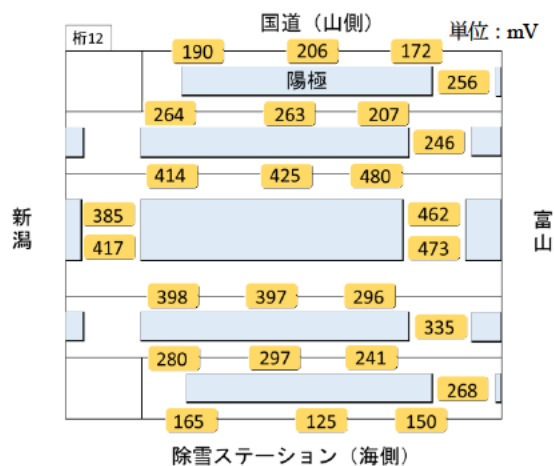


図-5.5.2.10 分極量ブロック②

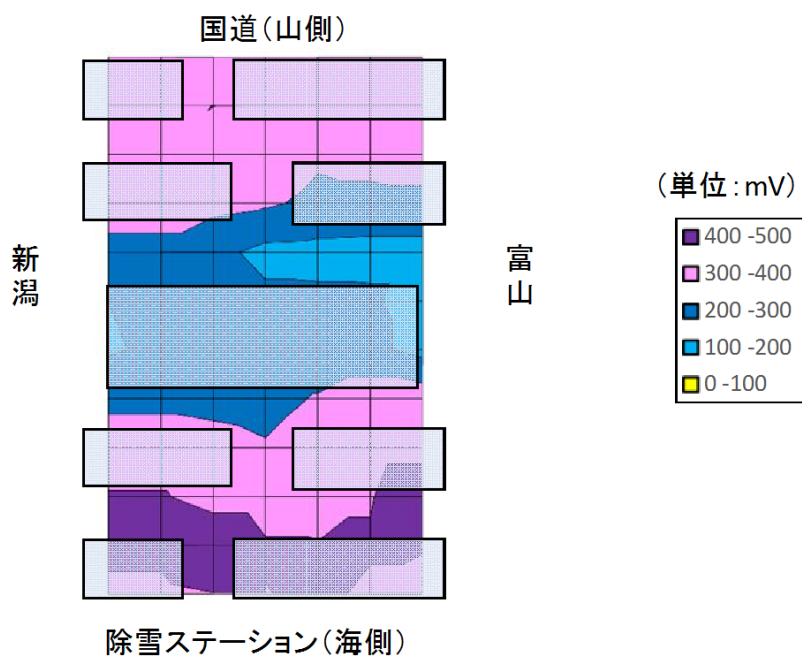


図-5.5.2.11 分極量ブロック①

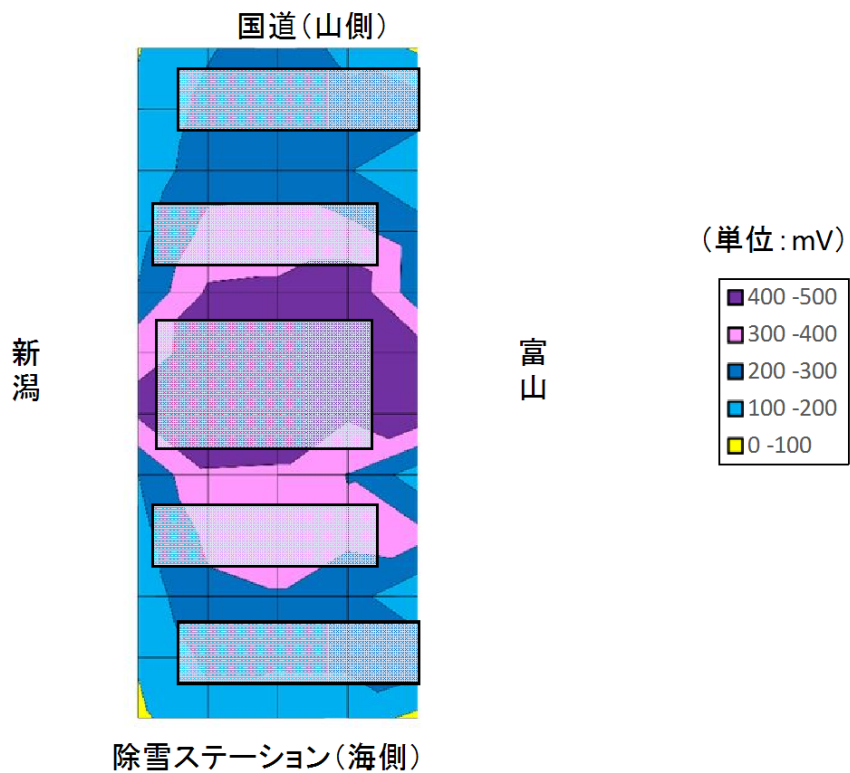


図-5.5.2.12 分極量ブロック②

5.5.3 陽極耐用年数確認

亜鉛シート方式の設計上の耐用年数は15年（当時）である。本電気防食装置は1996年2月に設置され、約23年が経過している。また、一部2010年11月に設置した陽極がある。2010年11月に設置した陽極は、当初設置した陽極の設計耐用年数が近くなった時点で、今回の調査同様に一部陽極を採取して期待耐用年数を確認した際、取り替えた陽極である。今回は、**図-5.5.3.1** および**図-5.5.3.2** に示す位置の陽極（5枚×2箇所）を採取、実験室にて秤量し陽極耐用年数を確認した。なお、参考として2010年11月に再設置された陽極についても底面1枚を採取し、耐用年数を確認した。

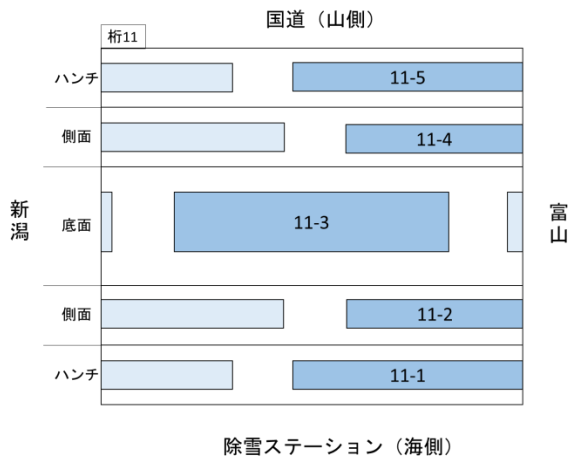


図-5.5.3.1 陽極採取位置ブロック⑪

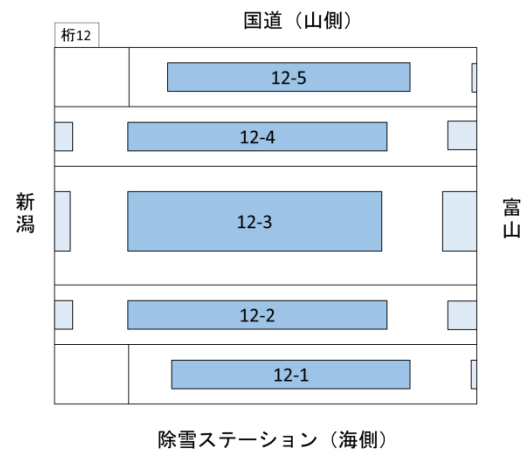


図-5.5.3.2 陽極採取位置ブロック⑫



写真-5.5.3.1 陽極撤去後ブロック⑪



写真-5.5.3.2 陽極撤去後ブロック⑫

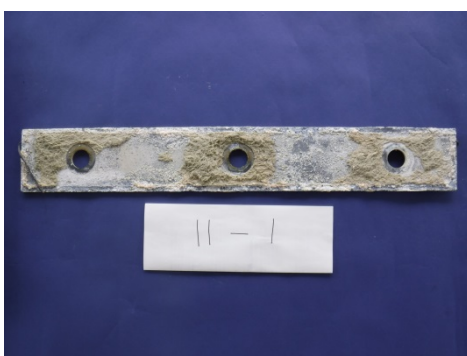


写真-5.5.3.3 陽極撤去後 11-1

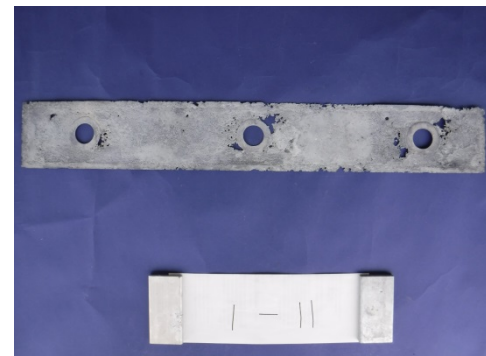


写真-5.5.3.4 陽極表面処理後 11-1



写真-5.5.3.5 陽極撤去後 11-2



写真-5.5.3.6 陽極表面処理後 11-2



写真-5.5.3.7 陽極撤去後 11-3

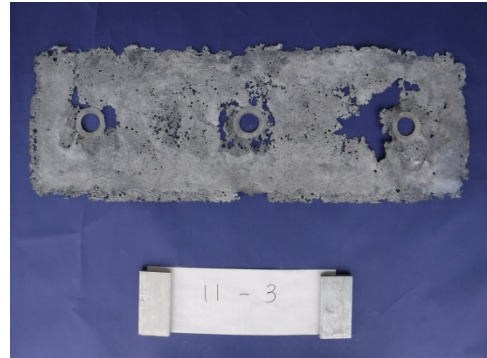


写真-5.5.3.8 陽極表面処理後 11-3



写真-5.5.3.9 陽極撤去後 11-4

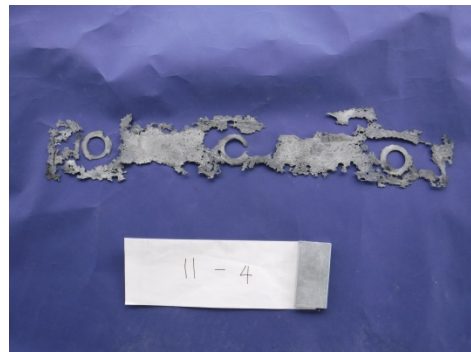


写真-5.5.3.10 陽極表面処理後 11-4



写真-5.5.3.11 陽極撤去後 11-5

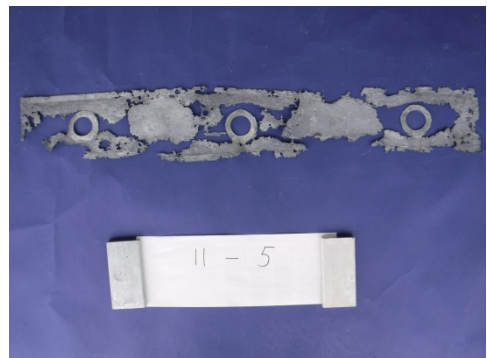


写真-5.5.3.12 陽極表面処理後 11-5

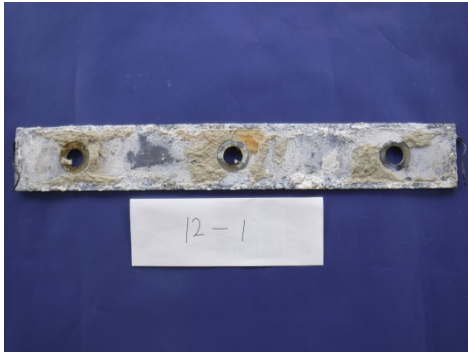


写真-5.5.3.13 陽極撤去後 12-1



写真-5.5.3.14 陽極表面処理後 12-1



写真-5.5.3.15 陽極撤去後 12-2



写真-5.5.3.16 陽極表面処理後 12-2



写真-5.5.3.17 陽極撤去後 12-3

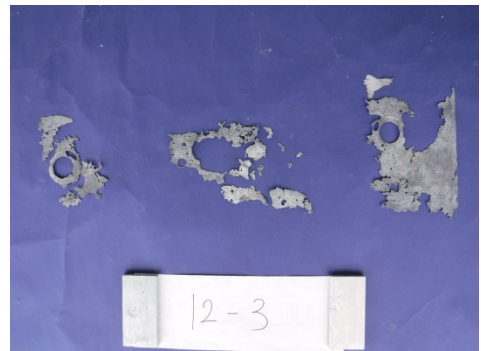


写真-5.5.3.18 陽極表面処理後 12-3



写真-5.5.3.19 陽極撤去後 12-4

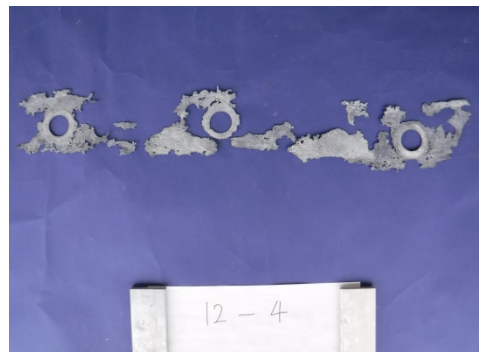


写真-5.5.3.20 陽極表面処理後 12-4



写真-5.5.3.21 陽極撤去後 12-5



写真-5.5.3.22 陽極表面処理後 12-5



写真-5.5.3.23 陽極撤去後 H22-11



写真-5.5.3.24 陽極表面処理後 H22-11

表-5.5.3.1 陽極耐用年数のまとめ

ブロック	試料番号	設置箇所	初期質量 Wf (g)	残質量 Wr (g)	消耗質量 Wc (g)	消耗率 C (%)	推定残寿命 Tr (年)	推定総寿命 T (年)
⑪	11-1	海側ハンチ	482.0	308.3	173.7	36.0	40.6	63.4
	11-2	海側側面	482.0	293.8	188.2	39.0	35.7	58.5
	11-3	底面	1,228.0	660.6	566.9	46.2	26.6	49.5
	11-4	山側側面	482.0	147.7	334.3	69.4	10.1	32.9
	11-5	山側ハンチ	482.0	200.6	281.4	58.4	16.3	39.1
⑫	12-1	海側ハンチ	482.0	293.4	188.6	39.1	35.5	58.4
	12-2	海側側面	482.0	216.1	265.9	55.2	18.6	41.4
	12-3	底面	1,227.5	104.0	1,123.5	91.5	2.1	25.0
	12-4	山側側面	482.0	106.2	375.8	78.0	6.5	29.3
	12-5	山側ハンチ	482.0	198.0	284.0	58.9	15.9	38.8
⑭	H22-11	底面	1,228.0	882.1	345.4	28.1	37.7	52.5

注) 経過年数 t (年) : 11-1~12-5 = 22.8年

H22-11 = 14.8年

消耗率 C (%) = Wc / Wf

推定残寿命 Tr (年) = $Wr / (Wc / t)$

推定総寿命 T (年) = $t + Tr$

5.5.4 間詰パテ付着強度試験

亜鉛シート方式では、近年陽極相互間の間詰部の埋戻しにエポキシ樹脂（パテ）を使用している。そこで、間詰に使用されているパテの躯体コンクリートへの付着強度を調べた。調査は、2010年に一部陽極を取り換えた範囲でパテ材が使用されているため、ブロック⑭の該当部位にて実施した。

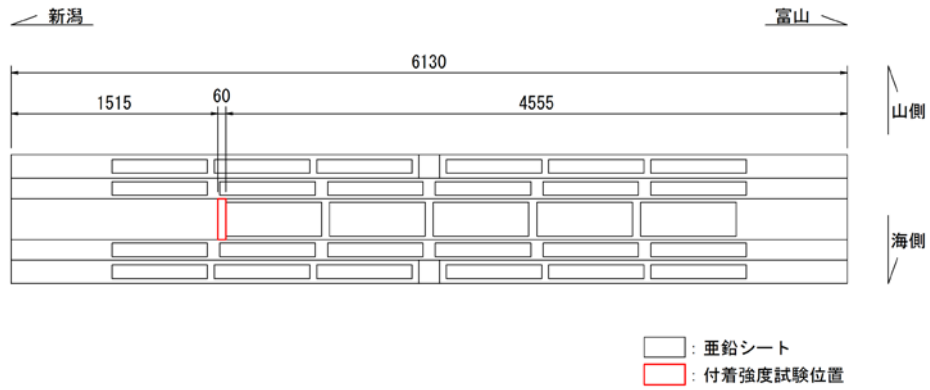


図-5.5.4.1 ブロック⑭の調査位置図

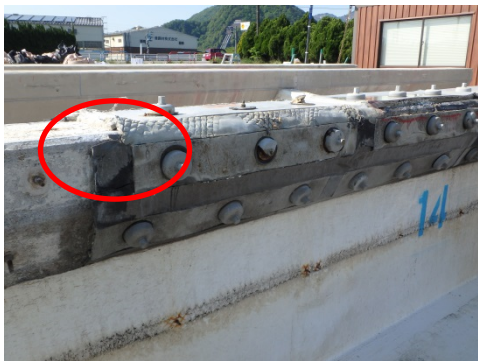


写真-5.5.4.1 建研式試験箇所ブロック⑭



写真-5.5.4.2 建研式試験箇所詳細

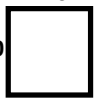
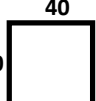
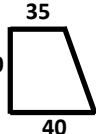


写真-5.5.4.3 建研式試験状況



写真-5.5.4.4 建研式試験後

表-5.5.4.1 付着強度試験結果一覧

ブロック	測点	所	破断状況	寸法(mm)	面積(mm ²)	引張荷重	
						(kN)	(N/mm ²)
⑭	1	海側 ↑	母材 パテ間	40 	1600	2.14	1.34
	2		母材中	40 	1600	1.91	1.19
	3	山側 ↓	母材 パテ間	40 35 40 	1500	2.16	1.44

使用機材：SANKO TECHNO製 テクノテスター(R-1000D)

5.5.5 プルボックス開放試験

桁撤去に先立ち回収されたプルボックスを開放し、結線部の状況を調査した。調査は、北陸技術事務所に保管されていたプルボックス内から結線部の電線を採取し、土木研究所内に持ち込み結線部の養生を撤去した後、外観を確認した。



写真-5.5.5.1 採取電線



写真-5.5.5.2 養生撤去後



写真-5.5.5.3 結線部 G10-3 回路



写真-5.5.5.4 結線部詳細 G10-3 回路

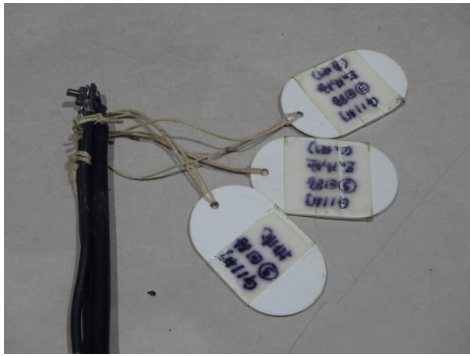


写真-5.5.5.5 結線部 G11-3 回路



写真-5.5.5.6 結線部詳細 G11-3 回路

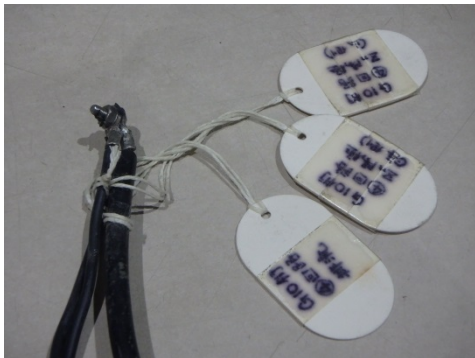


写真-5.5.5.7 結線部 G10-4 回路



写真-5.5.5.8 結線部詳細 G10-4 回路

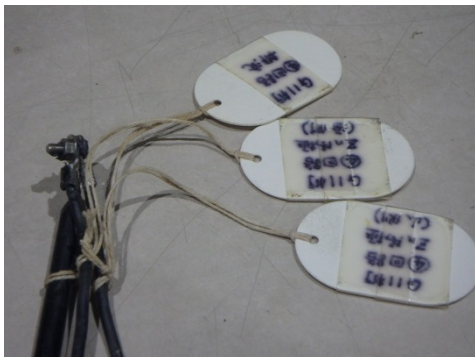


写真-5.5.5.9 結線部 G11-4 回路



写真-5.5.5.10 結線部詳細 G11-4 回路

5.5.6 亜鉛シート方式の調査結果のまとめ

5.5.6.1 表面電位測定

- (1) 通電前の鋼材の自然電位は、ブロック⑪および⑫において不確定～90%以上の確率で腐食ありの領域であった。若干ブロック⑪のほうがブロック⑫より貴電位を示していたが大きな差ではない。また、いずれのブロックともに海側側面・山側側面に比べて底面のほうが貴電位であった。
- (2) 通電後はいずれのブロックも大きく分極しており、陽極が機能していることを確認した。
- (3) 陽極発生電流密度はブロック⑪で $5.31\text{mA}/\text{m}^2$ 、ブロック⑫で $5.53\text{mA}/\text{m}^2$ であった。
- (4) すべての測定点で 100mV 以上の分極量が得られた。
- (5) 本電気防食装置は施工後約23年が経過しているが防食状態を維持していた。

5.5.6.2 陽極耐用年数確認

- (1) 推定陽極残寿命は、ブロック⑪で10.1～40.6年、ブロック⑫で2.1～35.5年であった。
- (2) 推定陽極残寿命は、桁底面と山側側面が短寿命となる傾向を示した。ブロック⑪で短寿命だったのは山側側面の10.1年、ブロック⑫では底面の2.1年であった。なお、本電気防食装置は設置後約23年が経過しており、当初設計における期待耐用年数15年は十分に上回っていた。

5.5.6.3 間詰パテ付着強度試験

- (1) 間詰パテの付着強度はいずれも $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の引張強度を示しており、良好であった。
- (2) 本電気防食装置の当初はモルタル被覆であったが、現在の仕様ではパテ材の仕様となっているため現在では剥落防止ネット等の設置は不要である。

5.5.6.4 プルボックス開放試験

- (1) 結線部に腐食等は認められず、健全であった。
- (2) ケーブルタグの破損や消失も認められず、プルボックス内は健全であった。

6. 電気防食を適用した弁天大橋（B橋）調査のまとめ

6.1 陽極の変状と防食効果について

6.1.1 外部電源方式

弁天大橋では外部電源方式の代表例としてチタンメッシュ方式とチタングリッド方式が適用されていた。いずれの電気防食方式も陽極は被覆モルタルで覆う電気防食方式である。弁天大橋では、この2方式の被覆モルタルの一部浮きや剥落が確認されている。現地調査ならびに解体調査時に通電試験を行った結果、小規模の劣化・損傷では防食効果に大きな影響がないことがわかった。ただし、被覆モルタルの劣化・損傷を修復した場合、防食電流は増大して供給できることが判明している。したがって、ある程度の被覆モルタルの劣化・損傷は許容できるが定期点検時に被覆モルタルの浮きや剥離・剥落が確認された場合は、速やかに補修することが望ましいと言える。

6.1.2 流電陽極方式

流電陽極方式では、一部紫外線劣化による防食板のたわみが確認されている。しかしながら、流電陽極方式の当初設計耐用年数は15年であり、調査時にはその耐用年数は経過していた。また、防食効果に問題はなかったことから、供用期間内で問題なく電気防食機能は発揮されていたと推測できる。

6.2 電気防食の効果範囲

本電気防食装置は、下フランジを防食対象として適用されていた。撤去前および撤去後に通電試験を行い、コンクリート表面電位を計測した結果、良好な防食状態が得られていることが判明した。また、解体調査時、ウェブ部のスターラップ筋の腐食状況を確認した結果、下フランジ部から10cm程度まで健全であった。一般的に電気防食の陽極相互間は最大30cm程度とされている。陽極端部から10cm程度まで防食効果があったことは、陽極間の相乗効果を考慮すると妥当な効果範囲であったと言える。

6.3 陽極材の付着強度

6.3.1 陽極被覆材の付着強度

2方式の外部電源方式では、いずれも陽極被覆材を使用する。陽極被覆材と躯体コンクリートとの付着強度を調べた結果、浮きが生じていない範囲においては十分な強度があり、剥落等の心配はない。したがって、前述のとおり、点検において陽極被覆モルタルの健全性を確認しておけば問題ないと言える。

6.3.2 陽極間の間詰材の付着強度

流電陽極方式では、陽極相互間の間詰材が使用されている。当初はモルタル仕様であり、浮きが確認されていたことから剥落防止ネットを併用していた。一部、過年度陽極耐用年数調査のため陽極を撤去・再設置した範囲については、現行仕様のパテ材に変更されていた。パテ材は浮きもなく、 $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の付着強度が確認された。本調査では、パテ材仕様となっている範囲では剥落防止ネットの併用は不要と考えられるが、施工環境に起因する品質の不均一性等も考えられるため、剥落防止ネットの設置については構造物の立地条件等を考慮して決定することが望ましい。

6.4 分配電流（外部電源方式）

チタンメッシュ方式とチタングリッド方式の各桁への分配電流を測定した結果、概ね均等な電流分布であることが判明した。施工当初のデータがないため、経年の比較はできないが、電気防食施工後20年程度が経過した時点で均一な電流分布であったことがわかった。今後、施工時にも初期値として分配電流を計測し、記録しておくことが望ましい。

6.5 陽極耐久性試験

6.5.1 外部電源方式

チタンメッシュ方式とチタングリッド方式において、既設陽極を用いて耐久性試験を行った結果、20年以上供用しても今後さらに40年以上の耐久性を有することがわかった。すなわち、陽極被覆モルタルの軽微な劣化をメンテナンスすることにより、陽極を長期間使用できることがわかった。

6.5.2 流電陽極方式

亜鉛シート方式において、既設陽極を一部撤去・秤量し、陽極残存寿命を計算した結果、2～40年のばらつきが確認された。これは、陽極設置面におけるコンクリート中鋼材の表面積と鋼材の分極抵抗によって左右される。本施設へは亜鉛シート方式適用後20年以上が経過しているにも関わらず、陽極残存寿命は2年以上残っていた。当初、亜鉛シート方式の設計陽極寿命は15年程度とされていたが、20年以上の耐久性を有することがわかった。

6.6 配線配管材

6.6.1 配管材料

本電気防食装置には複数の仕様の配管材が使用されていた。いずれの材料も大きな損傷はないが、他の橋梁において曲げ部の配管材の割れ等が確認されている。また、紫外線劣化の可能性も含めて配管材の仕様を決定することが望ましい。

また、配管固定材料については、電気防食装置は塩害地域に適用されることから耐食性を有する材料または非金属材料による固定が望ましい。

6.6.2 配線材料

今回の各種調査において、配線材料の劣化・損傷は認められなかった。配線材料はすべて配管材に収納されていたことから直接的な劣化・損傷がなかったものと思われる。配線材料は通電において、主要材料となるため、配管材に収納または埋設等により直接露出することがないように施工すればよいと考えられる。

6.6.3 配管固定材料

配管固定材料には樹脂製のサドルが使用されていた。サドルの固定は、プラスチック製の釘やSUS製ビスが使用されていた。SUS製のビスからは錆汁が発生していた。電気防食を適用する環境は塩害環境であり、露出金属も塩害の影響により腐食することが懸念される。電気防食の耐用年数は長く、配線配管材料も20年程度の耐用年数を求められることから、配管固定材料も耐食性材料を使用することが必要である。

6.6.4 プルボックス

今回の調査において、プルボックスの損傷・破損は認められなかった。プルボックス内では、配線の結線部があることから定期的に点検を実施する項目となっている。今回の調査において、プルボックス内に樹脂充填がされているものや特殊ねじによって容易にボックスの開放ができなかったものがある。後日、撤去桁からプルボックスを回収し、破壊調査により結線部を確認できたが、今後は定期点検時にプルボックスの開放・結線部の確認ができる構造にしておくことが必要である。

6.7 全体を通して

弁天大橋では、2種類の外部電源方式と1種類の流電陽極方式が適用され、20年以上が経過した。調査の結果から、一旦塩害を受けた構造物であっても、電気防食を適用することにより、その後の塩害によるコンクリート中鋼材腐食は防止できることがわかった。しかしながら、電気防食の維持管理も必要であり、直流電源装置や陽極、配線配管等の適切な維持管理を行うことにより、電気防食システムの健全性が保たれることになる。また、外部電源方式および流電陽極方式による防食効果の差はなく、適切に通電できれば電気防食の効果が得られるため、電気防食の維持管理は必須となる。

10 編 撤去橋梁の調査

— 陽極の異なる腐食環境における配置がコンクリート内部の鋼材の分極量の分布に及ぼす影響の評価 —

目 次

1. はじめに	10- 1
1.1 本編に示す調査の背景と目的	10- 1
1.2 撤去桁の概要	10- 2
2. 実験概要	10- 6
2.1 調査対象の部位	10- 6
2.2 通電方法	10- 7
2.3 その他の測定項目	10- 9
3. 実験結果	10- 10
3.1 電気抵抗率	10- 10
3.2 陽極—鋼材間の交流抵抗	10- 10
3.3 陽極への電流分配	10- 11
3.4 G5-3 の下フランジ部の自然電位の分布と鋼材の腐食状況	10- 12
3.5 分極量比の分布	10- 12
4. まとめ	10- 16

10 編 撤去桥梁の調査

— 陽極の異なる腐食環境における配置がコンクリート内部の鋼材の分極量の分布に及ぼす影響の評価 —

1. はじめに

1.1 本編に示す調査の背景と目的

電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書 — 電気防食工法の維持管理の課題に関する研究成果 — ((国研)土木研究所, 東北大学, 日本エルガード協会, コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会, 共同研究報告書, No. 502, 2018.7) の5編(撤去桥梁の調査)には, 電気防食工法を適用した桥梁(秋田県国道7号線に架設されていた荒磯橋)からその撤去時に採取したPC桁(以下, 撤去桁)について調査した結果が報告されている。荒磯橋は電気防食工法を適用していたにもかかわらず, 防食対象部位の一部においてコンクリート中の鋼材腐食に伴う変状が再び顕在化した桥梁である。

調査対象の撤去桁への通電試験および数値解析による分極量や防食電流の分布の分析の結果, 変状はコンクリート内部の鋼材腐食に起因するものと考えられた。そして, その変状発生メカニズムのひとつとして, 下フランジ底面近傍に位置する鋼材への防食電流供給量が少なくなる陽極配置であることが指摘された。調査対象の撤去桁の既設の陽極システムは外部電源を用いた点状陽極方式の一つであるチタンロッド陽極方式である。図-1.1.1の配置図、その断面拡大図である図-1.1.2および図-1.1.3に示すように, 陽極は下フランジのハンチ上部から棒状の陽極(チタンロッド陽極棒)を差し込むように配置されており, 陽極近傍の鉄筋やシースには防食電流が流入するものの, 下フランジ底面部近傍の鋼材には防食電流が届きにくいと考えられた。

そこで新たに線状陽極の一つであるチタンリボンメッシュ陽極を下フランジに仮設して通電試験を実施し, コンクリート内部の鋼材の分極量の分布を測定し, 陽極配置が防食効果に及ぼす影響を実験的に評価した。

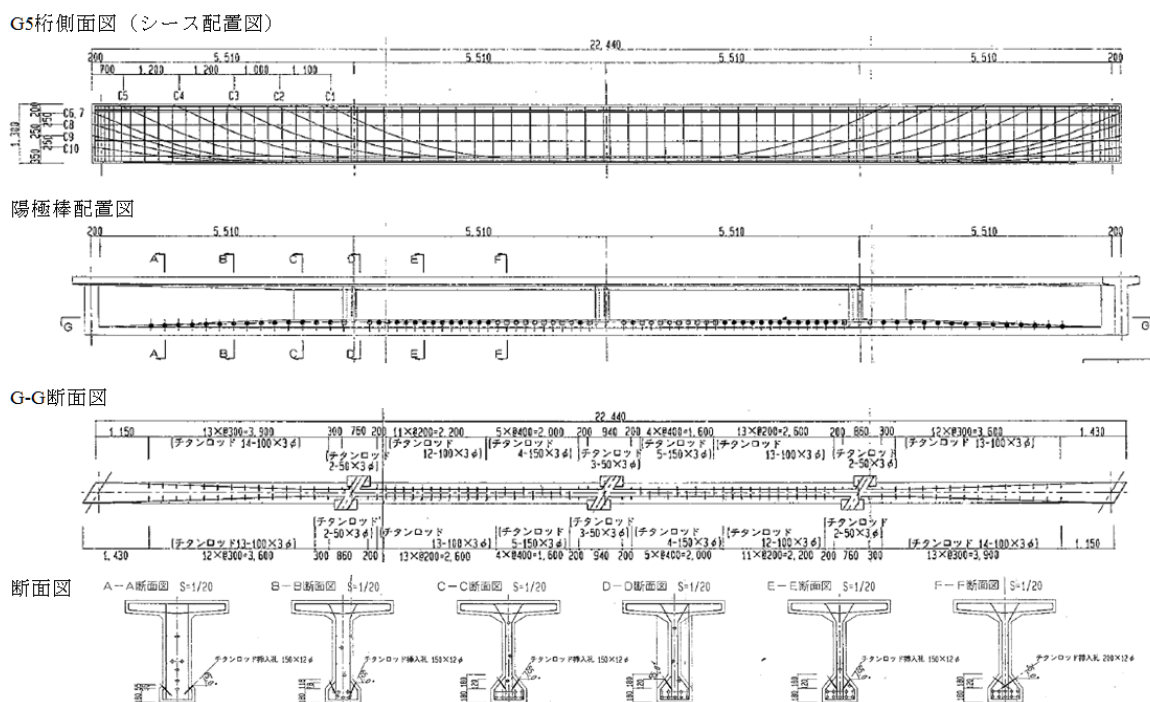


図-1.1.1 調査対象の撤去桁の陽極の配置図

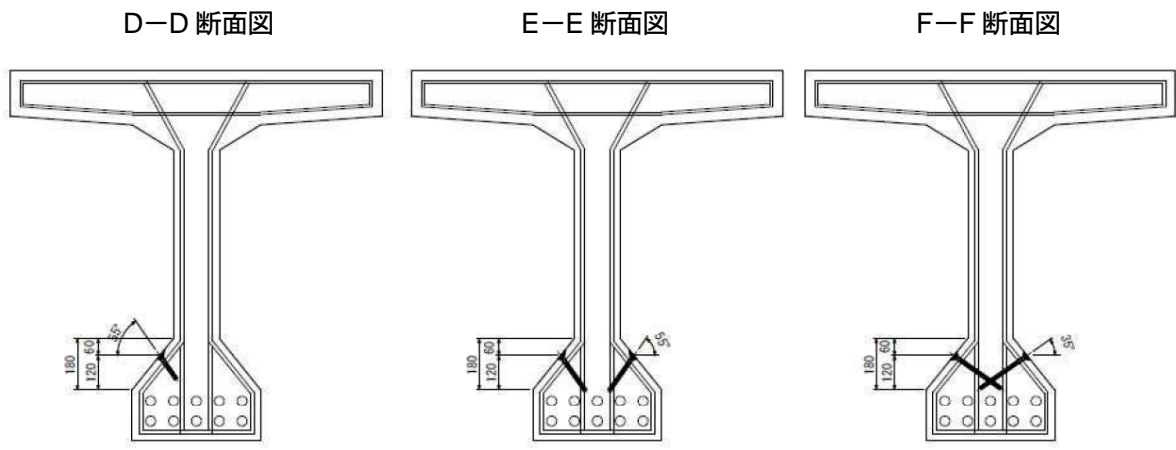


図-1.1.2 陽極の配置図（図-1.1.1 の断面図の拡大図）

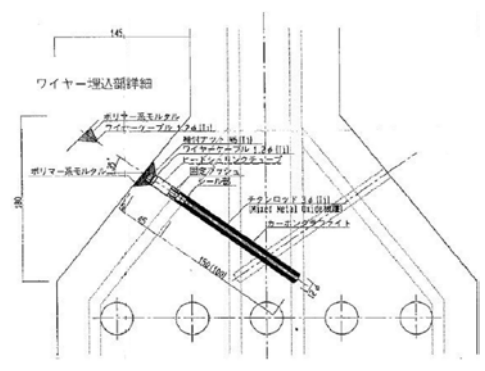


図-1.1.3 陽極の設置詳細図（F-F 断面）

1.2 撤去桁の概要

この節では調査対象とした撤去桁の諸元について、電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書「電気防食工法の維持管理の課題に関する研究成果」（国研）土木研究所，東北大学，日本エルガード協会，コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会，共同研究報告書，No. 502，2018.7）の5編（撤去橋梁の調査）2.1（書類調査）から抜粋して示す。

1.2.1 橋梁諸元

荒磯橋は、秋田県由利本荘市岩城内の一般国道7号線上に架橋されていた橋長45.8m・幅員13.8mの2径間単純PCポストテンションT桁橋である。荒川橋は汀線からの距離・約300mの位置に架橋されており、冬期間の季節風により輸送される海水飛沫（飛来塩分）に曝されていた。塩害による鋼材腐食が進行し、ひび割れや浮などの変状が生じ、劣化の進行が懸念されたため、平成11年（1999年）より上部工に電気防食工法が適用された。

図-1.2.1に荒磯橋の構造一般図を示す。荒磯橋の竣工年度は昭和40年度（1965年度）である。その後、各種の調査や補修・補強がなされ、平成26年（2014年）1月に供用を終了し、撤去された。撤去された桁の一部は土木研究所（茨城県つくば市）の敷地内に移設され、平成27年（2015年）2月より、本検討に関する調査が開始された。

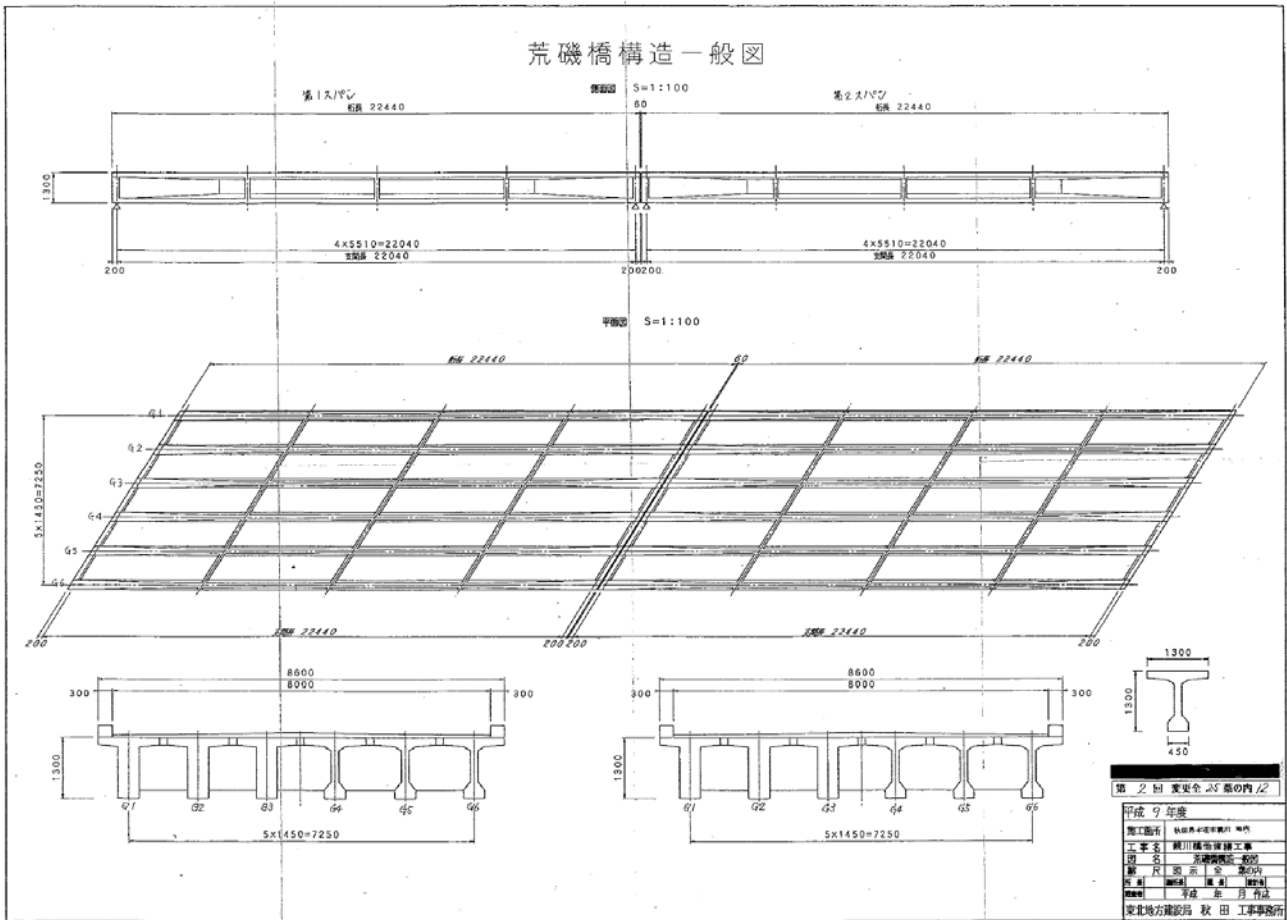


図-1.2.1 荒磯橋構造一般図

1.2.2 荒磯橋の塩害外力の評価

荒磯橋の桁のウェブ部分から採取されたコア試料の塩化物イオン濃度分布に「土木学会規準：実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法（案）（JSCE-G 573-2003）の附属書2（参考）コンクリート中の全塩化物イオン濃度分布に基づいた見掛けの拡散係数の算出方法」を適用して評価した表面塩化物イオン濃度と見かけの塩化物イオン拡散係数を表-1.2.1に示す。なお、参考として、荒磯橋と同様にチタンロード方式により電気防食による補修がなされた海士剥橋の調査結果も併せて示す。さらに、表-1.2.2には、土木研究所方式塩分捕集器で評価した飛来塩分量の評価結果を示す。

表-1.2.1より、コア試料の分析の結果をみると、荒磯橋の表面塩化物イオン濃度は10.0~15.4 kg/m³となっており、海士剥橋と比較しても塩害外力（飛来塩分量）が多いことが推察される。また、表-1.2.2の結果を見ても、荒磯橋は海士剥橋よりも飛来塩分量が多い傾向にあることがわかる。これらより、荒磯橋の立地環境は、秋田県沿岸部でも厳しい部類に入る橋梁であると推察される。

表-1.2.1 コア試料による塩害外力の評価結果

橋梁（諸元）	部位	表面塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	見かけの塩化物イオン 拡散係数 (cm ² /年)
荒磯橋 竣工：S40 年度 調査：H10 年度 調査時の供用期間：32 年	G3 桁-海側	12.5	0.35
	G4 桁-海側	10.0	0.22
	G3 桁-山側	15.4	0.30
	G4 桁-山側	13.1	0.34
海士剥橋 竣工：S51 年度 調査：H10 年度 調査時の供用期間：21 年	G2 桁-海側	5.5	1.05
	G3 桁-海側	8.3	0.22
	G2 桁-山側	4.6	1.68
	G3 桁-山側	3.0	0.66

表-1.2.2 土研式塩分捕集器による日平均飛来塩分量（mdd）測定結果

荒磯橋		海士剥橋	
設置・採取日	日平均飛来 塩分量（mdd）	設置・採取日	日平均飛来 塩分量（mdd）
平成 15 年 12 月 04 日	設置	平成 15 年 12 月 03 日	設置
平成 16 年 01 月 07 日	1.710	平成 16 年 01 月 06 日	1.363
平成 16 年 02 月 03 日	3.723（最大値）	平成 16 年 02 月 02 日	2.795（最大値）
平成 16 年 03 月 02 日	3.611	平成 16 年 03 月 01 日	2.727
平成 16 年 04 月 06 日	1.254	平成 16 年 04 月 05 日	1.304
平成 16 年 05 月 01 日	0.182	平成 16 年 04 月 30 日	0.118
平成 16 年 05 月 30 日	0.084	平成 16 年 05 月 30 日	0.033
平成 16 年 07 月 04 日	0.044（最小値）	平成 16 年 07 月 03 日	0.025（最小値）
平成 16 年 08 月 01 日	0.078	平成 16 年 07 月 31 日	0.031
平成 16 年 08 月 30 日	1.085	平成 16 年 08 月 29 日	0.795
平成 16 年 09 月 30 日	0.421	平成 16 年 09 月 30 日	0.343
平成 16 年 10 月 31 日	0.131	平成 16 年 10 月 30 日	0.078
平成 16 年 11 月 30 日	3.186	平成 16 年 11 月 30 日	1.988
平均値	1.292	平均値	0.967

1.2.3 荒磯橋の延命化計画と補修・補強履歴および追跡調査

本検討の調査の範囲では、入手できた維持管理記録は平成 10 年度（1998 年度）以降のものである。ここでは、入手できた範囲の維持管理記録にて荒磯橋の延命化計画と補修・補強履歴および電気防食施工後の追跡調査の結果を整理する。主要な補修・補強履歴と変状の目視確認の履歴は表-1.2.3 の通りである。

電気防食工法が適用される直前の荒磯橋の調査報告書では、塩害の兆候は明白であること、第 2 スパンでは塩害特有の幅の広い橋軸方向ひび割れが随所に見られること、特に G5 と G6 桁においては部分的にコンクリートのはく離・はく落も見られること、近接点検調査およびはつり調査により PC 鋼線の腐食・破断が確認されたことが報告されている。なお、G5 桁は今回の調査で対象の 1 つとなった桁である。写真-1.2.1 は、はく離・はく落の変状が確認された G5 桁および G6 桁のはつり調査部の PC 鋼線の状況である。

表-1.2.3 荒磯橋の補修・補強と変状の目視確認の履歴

年度	補修・補強履歴	変状の目視確認の履歴
1965年 (S40)	竣工	
1979年 (S54)	落橋防止装置	
1982年 (S57)	高欄・防護柵	
1985年 (S60)	伸縮装置取替え	
1988年 (S63)	橋梁拡幅	
1997年 (H9)	断面修復 (はつり調査の埋戻しであるが、比較的規模が大きい。)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 既設部のスパン2のG4, G5桁に橋軸方向のひび割れを確認。G5桁の一部にはく離を確認。 ✓ 近接点検調査およびはつり調査により、PC鋼線の腐食・破断が確認される。
1999年 (H11)	脱塩工 (下部工) 断面修復 電気防食工 (既設部上部工) 伸縮装置取替え・外ケーブル 舗装・排水施設・表面塗装 (拡幅部)	
2001年 (H13)		<ul style="list-style-type: none"> ✓ ごく一部で仕上げ材のはく離などの軽微な変状が確認されるが、防食状態は良好。
2002年 (H14)		<ul style="list-style-type: none"> ✓ ごく一部で仕上げ材のはく離などの軽微な変状が確認されるが、防食状態は良好。
2003年 (H15)	はつり調査部について断面修復。	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 鋼材腐食に起因するひび割れ・浮きが確認される。 ✓ 埋めこみ照合電極による復極量は100 mV以上であり、防食規準を満足していた。 ✓ 詳細調査の結果、浮部周囲の復極量は100 mVより小さかった。
2004年 (H16)	橋面防水工	
2010年 (H22)		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 防食対象の下フランジに設置された埋め込み型照合電極により測定した復極量は、下フランジ下面において100 mV未満になるものがあった。 ✓ 安定した電位を示さない照合電極が一部で確認された。 ✓ H21年度の橋梁定期点検結果と今年度の現地踏査結果を比較しており、損傷が著しく進行していること、特に、補修した断面修復材が浮いて、その後剥落して剥離・鉄筋露出に至っていることを指摘している。



(a) G5 桁



(b) G6 桁

写真-1.2.1 荒磯橋第2スパンはつり部のPC鋼線の状態

2. 実験概要

2.1 調査対象の部位

調査対象の部位は図-2.1.1 に示す G5-3 と G3-3 の部位である。調査に際しては、さらに橋軸方向に 90 cm の部位 (図-2.1.1 の「通電対象範囲」として示した部位) に対して通電試験を実施した。

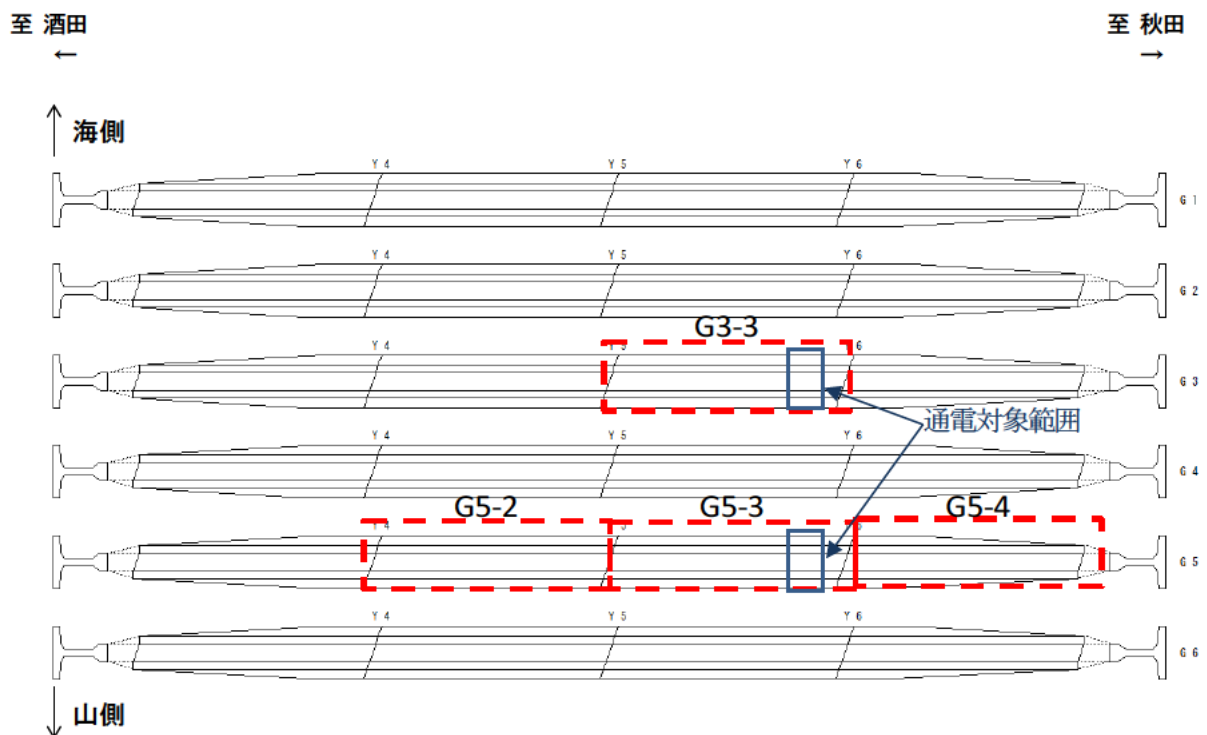


図-2.1.1 調査対象部位

2.2 通電方法

2.2.1 前処理

図-2.2.1に示すように、通電対象範囲以外のチタンロッド陽極棒に防食電流が流れないようにするために、チタンロッド陽極棒を電氣的に接続するチタン・ワイヤーを切断した。通電対象範囲の前処理は次のとおりである。

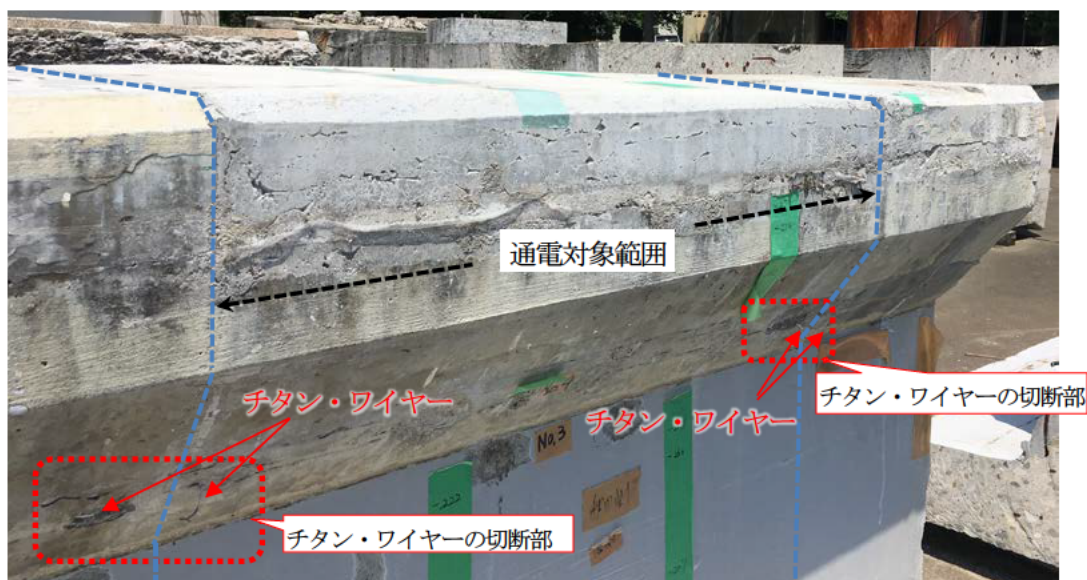


図-2.2.1 チタン・ワイヤーの切断処理 (G5-3)

(1) G5-3

通電対象範囲は、電気防食施工時に実施された断面修復工法の断面修復材が存在していた箇所である。この断面修復材の一部は鋼材腐食によって浮きや剥落が見られた。そのため、通電対象範囲の下フランジ部底面の断面修復材を全てはつりとり、あらたに断面修復を実施した。断面修復材に用いた材料はP&S モルタル SP (住友大阪セメント(株)社製) である。断面修復は2017年4月26日に実施した。

さらに、既設のチタンロッド陽極棒による通電試験(後述)の後、チタンロッド陽極棒をバックフィル材とともに撤去し、残った空孔を無機系超速硬セメント補修材(セメフォースアンカー、住友大阪セメント(株)社製)で埋め戻した。この作業は2017年5月24日に実施した。

カソードとなる鉄筋、シースおよびPC鋼材の電氣的導通は、撤去桁の切断面に露出した鋼材をワニロクリップ付きリード線で結線することで確保した。

(2) G3-3

G3-3の通電対象範囲は健全で浮きが存在しないため、はつりや断面修復は実施せずに、そのままの状態に通電試験に供した。カソードとなる鉄筋、シースおよびPC鋼材の電氣的導通は、撤去桁の切断面に露出した鋼材をワニロクリップ付きリード線で結線することで確保した。

2.2.2 陽極の配置および通電量と通電時期

図-2.2.2に陽極の配置を示す。なお、図-2.2.2の右側の図は線状陽極(チタンリボンメッシュ#110陽極)の配置図であり、既設のチタンロッド陽極棒については図示していない。チタンロッド陽極棒の配置は、図-1.1.1のD-D断面とE-E断面の中間部に相当する。図-2.2.2に示すように、①はチタンロッド陽極棒のみを使用して

通電を実施した。②と③についてはチタンロッド陽極棒とチタンリボンメッシュ陽極を併用した。さらに、④～⑦についてはチタンリボンメッシュ陽極のみを使用した。なお、チタンリボンメッシュ陽極のみの通電（④～⑦）の実施に際しては、G5-3のケースではチタンロッド陽極棒を撤去し、残された空孔は無機系材料で充填している。一方、G3-3のケースではチタンロッド陽極棒は撤去せずに通電を実施した。

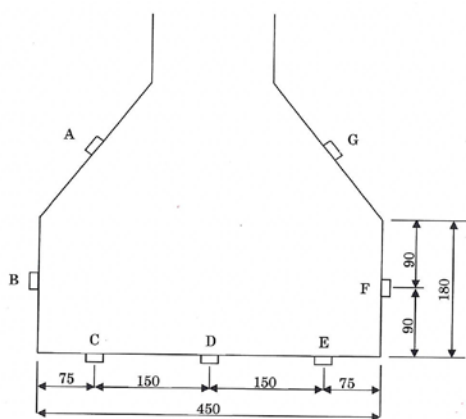
チタンリボンメッシュ陽極はコンクリート表面との間に導電性のハイドロゲルシートを介在させて設置し、さらにその上からハイドロゲルシートを接着した。図-2.2.3にチタンリボンメッシュ陽極の設置例を示す。通電の実施時期および通電量は次のとおりである。

2017年4月26日	G5-3	断面修復を実施。
2017年5月24日	G5-3	①：1.0, 1.7, 2.0 mA ②：4.7 mA ③：4.7, 6.0 mA
2017年5月25日	G5-3	④：2.0 mA ⑤：2.0 mA ⑥：2.0, 4.7 mA
2018年10月9日	G5-3	⑥：0.5, 2.0, 4.7, 7.05 mA ⑦：1.0 mA
2018年10月10日	G3-3	①：4.7 mA ⑥：2.0, 4.7, 7.05 mA

なお、通電対象範囲（下フランジ部）の面積は次式に示すとおりである。そのため、1.0 mAの通電量である場合、陽極から供給される防食電流密度（コンクリート表面積当り）は、0.88 mA/m²となる。

通電対象範囲（下フランジ部）の面積

$$\begin{aligned}
 &= (\text{ハンチの長さ} \times 2 + \text{側面の長さ} \times 2 + \text{底面の長さ}) \times \text{橋軸方向の長さ} \\
 &= (23 \text{ cm} \times 2 + 18 \text{ cm} \times 2 + 45 \text{ cm}) \times 90 \text{ cm} \\
 &= 11430 \text{ cm}^2 \\
 &= 1.143 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$



チタンリボンメッシュ陽極の位置と番号

No.	陽極						
	チタンロッド陽極棒	チタンリボンメッシュ陽極					
		海側ハンチ	海側側面	下フランジ			山側側面
	A	B	海側	中央	山側	F	G
①	○	—	—	—	—	—	—
②	○	—	—	○	—	—	—
③	○	—	○	○	○	—	—
④	—	○	○	—	○	○	○
⑤	—	○	○	○	—	○	○
⑥	—	○	○	○	○	○	○
⑦	—	—	○	○	○	○	—

図-2.2.2 陽極の配置

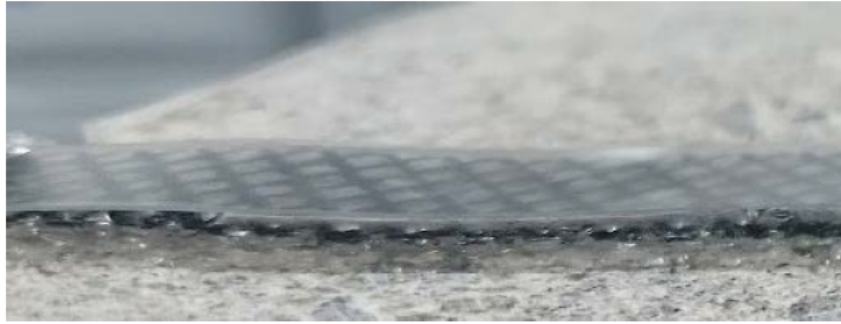
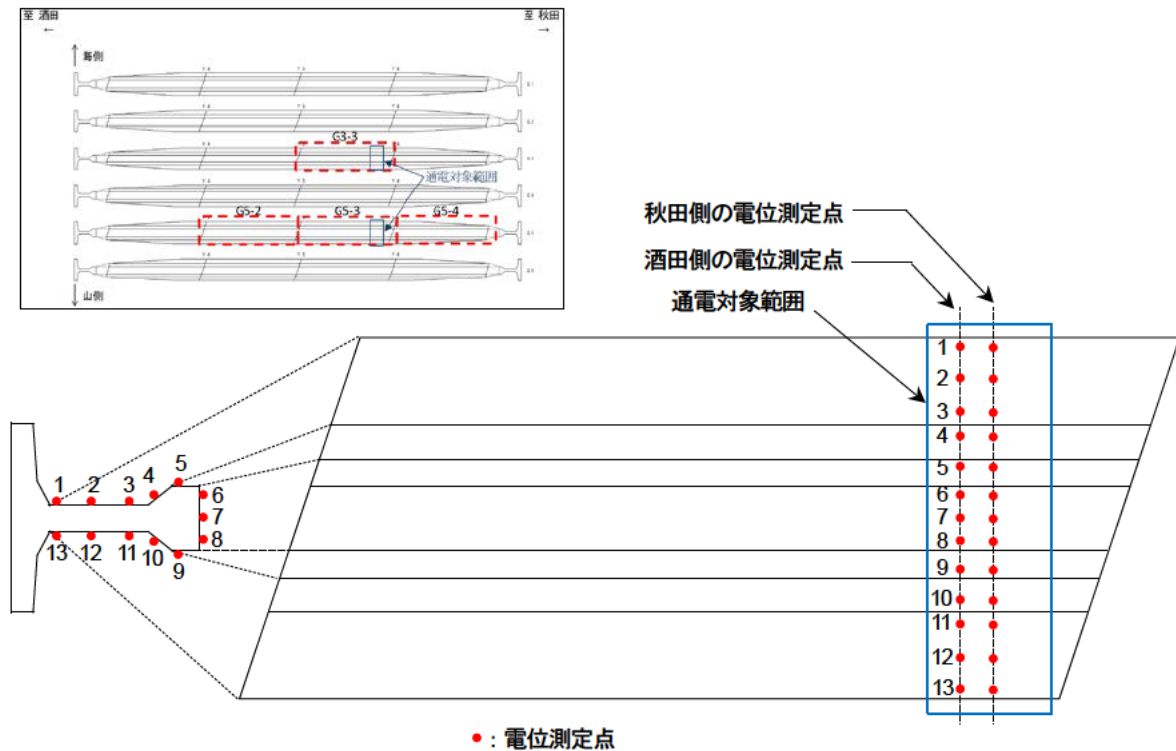


図-2.2.3 チタンリボンメッシュ陽極のハイドロゲルを用いた設置の例

2.2.2 照合電極の設置

図-2.2.4 に照合電極の設置位置を示す。照合電極には貼付け型照合電極（Ag/AgCl 電極）を用いた。なお、下フランジにおいては、従来設置していた位置にチタンリボンメッシュ陽極が設置されるため、チタンリボンメッシュ陽極のすぐ傍にずらして貼付け型照合電極（Ag/AgCl 電極）を貼付した。



●：電位測定点

※下図は左上図（図-2.1.1 の再掲）の G5-3 と G3-3 の部分。

図-2.2.4 貼付け型照合電極の設置位置（電位の測定位置）

2.3 その他の測定項目

2.3.1 電気抵抗率

Resipod（Proceq 社製）を用いて、電気抵抗率を測定した。撤去桁に対しての測定に際しては、電極間隔を $a = 3 \text{ cm}$ とし、セル定数を Wenner 法の $k = 1/(2\pi a)$ として電気抵抗率を算定した。ここで、セル定数、電気抵抗 R および電気抵抗率 ρ の関係は、 $\rho = R/k$ である。また、チタンロッド陽極棒を撤去した後の空孔の埋め戻し材として使用した無機系材料については、 $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ の角柱供試体を作製し、JSCE-G 581 に規定される四電極法

B 法によってその電気抵抗率を測定した。

2.3.2 陽極－鋼材間の交流抵抗

測定対象のチタンリボンメッシュ陽極を他陽極と絶縁状態にして，陽極と鋼材間の交流抵抗を測定した。

2.3.3 電流分配

測定対象のチタンリボンメッシュ陽極に対して直列に接続したシャント抵抗にかかる電圧を測定し，陽極に流入する防食電流の比率を算定した。

2.3.4 自然電位

G5-3 の通電対象範囲のうち，下フランジの底面部の自然電位の分布を鉛照合電極を用いて測定した。

3 実験結果

3.1 電気抵抗率

電気抵抗率の測定結果を以下にまとめて示す。特に断りがなければ，測定方法は **Wenner** 法である。

2017 年 5 月 24 日

G5-3 桁

下フランジ下面	14.9 kΩ cm	(測定箇所は本調査で再修復した断面修復部)
ウエブ 海側	42.4 kΩ cm	(測定箇所は母材コンクリート)
ウエブ 山側	48.7 kΩ cm	(測定箇所は母材コンクリート)
セメフォースアンカー (材齢 1 日)	2.4 kΩ cm	(JSCE-G 581 に規定される四電極法 B 法)

2018 年 10 月 9 日

G5-3 桁

下フランジ下面	72.0 kΩ cm	(測定箇所は本調査で再修復した断面修復部)
ウエブ	46.8 kΩ cm	(測定箇所は母材コンクリート)

2018 年 10 月 10 日

G3-3 桁

下フランジ下面	20.4 kΩ cm	(測定箇所は既設の断面修復部)
ウエブ 海側	28.9 kΩ cm	(測定箇所は母材コンクリート)

3.2 陽極－鋼材間の交流抵抗

表-3.2.1 に陽極と鋼材間の交流抵抗の測定結果を示す。G5-3 では下フランジのハンチ部に設置した陽極を除いて，全体的に陽極－鋼材間の交流抵抗が大きい。一方，G3-3 では，陽極ごとに違いは明確ではなく，ほぼ同等の陽極－鋼材間の交流抵抗であった。

表-3.2.1 陽極－鋼材間の交流抵抗 (単位 : Ω)

測定日	測定部位	海側← →山側						
		A	B	C	D	E	F	G
2018/10/9	G5-3 秋田側	580	4500	3200	2200	2900	2800	600
2018/10/10	G3-3 秋田側	500	380	390	470	580	710	560

3.3 陽極への電流分配

図-3.3.1 から図-3.3.4 に設置したチタンリボンメッシュ陽極に流入・流出する電流の分配比を示す。図中のチタンリボンメッシュ陽極の番号 (A~G) は図-2.2.2 と同じである。また、凡例中の丸数字は図-2.2.2 に示したチタンリボンメッシュ陽極の設置位置を、数字は通電量を示している。例えば、「③-1.0」は図-2.2.2 の③のチタンリボンメッシュ陽極の配置で1.0 mA の通電量で通電試験をした結果を示している。

図-3.3.1 から図-3.3.4 より、チタンリボンメッシュ陽極の配置によって、チタンリボンメッシュ陽極に流入・流出する電流の分配が異なることがわかる。図-3.3.1 より、1.0~2.0 mA の通電量 (0.88~1.76 mA/m²のコンクリート面積当たりの防食電流密度) において、G5-3 の下フランジ底面のチタンリボンメッシュ陽極に関しては、中央部に位置するチタンリボンメッシュ陽極に電流が分配される傾向であることがわかる。ただし、最も陽極量が多く、下フランジのハンチ部にもチタンリボンメッシュ陽極を配置した陽極配置⑥であると、下フランジのハンチ部に設置したチタンリボンメッシュ陽極に最も多くの電流が分配した。また、図-3.3.2 に G5-3 で陽極配置⑥で異なる通電量で防食電流を流した結果を示す。図-3.3.2 より、本調査で流した電流量の範囲においては、通電量が電流分配比に及ぼす影響はほぼなかった。また、設置した全てのチタンリボンメッシュ陽極を接続して通電した陽極配置⑥場合、下フランジのハンチ部に設置した陽極 (陽極番号 A および G) に多くの防食電流が分配した。これは表-3.2.1 に示した陽極-鋼材間の交流抵抗の大小関係と矛盾しない傾向であった。

図-3.3.3 に G3-3 に陽極配置⑥で通電した結果を示す。この図と図-3.3.2 の G5-3 の結果を比較すると、G3-3 では電流分配比はほぼ一様であることがわかる。これは表-3.2.1 に示した陽極-鋼材間の交流抵抗と矛盾しない結果であった。さらに、図-3.3.4 に G5-3 に陽極配置⑥で通電量 4.7 mA で通電したときの電流分配比が通電時期に受ける影響を示す。前述したように、G5-3 は断面修復をやり直したことで、断面修復材の電気抵抗率が測定日により異なる (2017年5月: 14.9 kΩ cm, 2018年10月: 72.0 kΩ cm)。しかし、チタンリボンメッシュ陽極の電流分配比には大きな差異は生じなかった。今回の調査では、断面修復材の電気抵抗率や鋼材の分極抵抗の変化よりも、陽極と鋼材の配置の方が陽極-鋼材間の交流抵抗の支配的要因であったと考えられる。

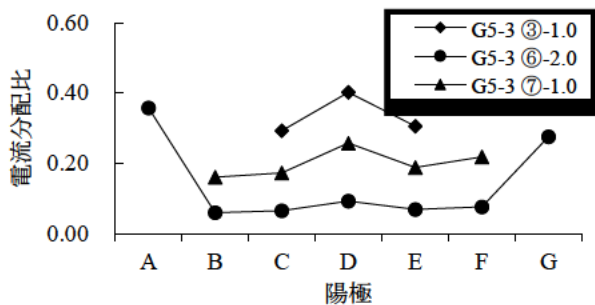


図-3.3.1 電流分配比 (2018年10月, G5-3)

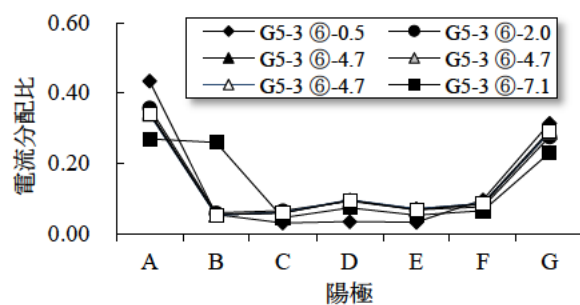


図-3.3.2 電流分配比 (2018年10月, G5-3)

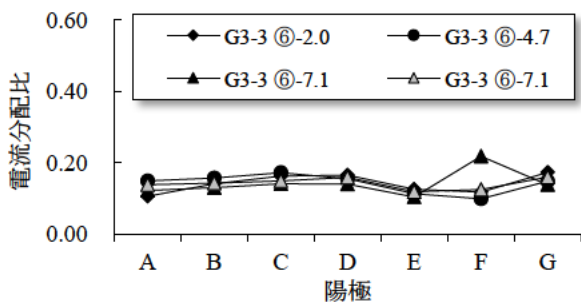


図-3.3.3 電流分配比 (2018年10月, G3-3)

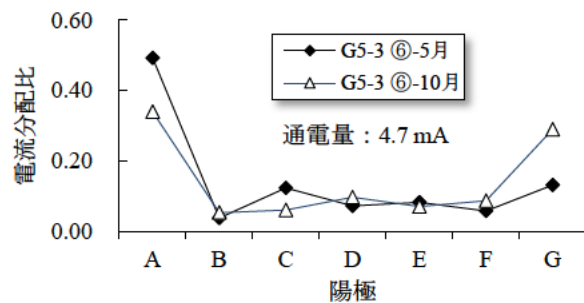
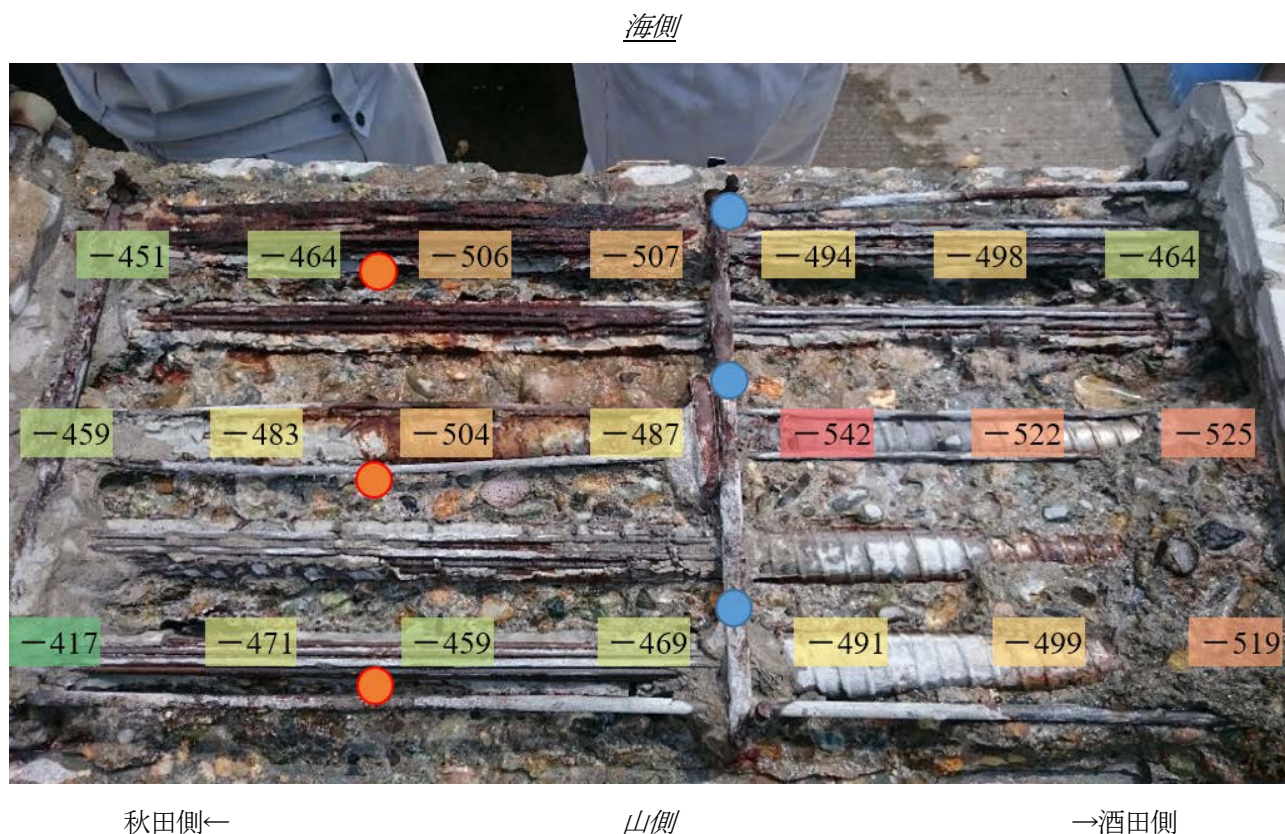


図-3.3.4 電流分配比 (G5-3, 測定日の違いの影響)

3.4 G5-3 の下フランジ部の自然電位の分布と鋼材の腐食状況

図-3.4.1 に、2018 年 10 月 9 日に測定した G5-3 の下フランジ下部の自然電位の分布を示す。なお、同図の写真は、2017 年 4 月 26 日に実施した再断面修復時のはつり状況である。図-3.4.1 の自然電位の分布およびはつり状況の写真より、断面修復部では海側の鋼材の腐食が山側と比較して進行している傾向が確認できる。特に、秋田側・海側においては、シーす内部の PC 鋼線も激しく腐食している状況であった。一方、山側の酒田側で自然電位が卑側の電位になっているのは、再断面修復時のはつりが不十分で、断面修復後にマクロセル腐食が生じていた可能性がある。



図中の●と●は通電試験での貼付型 Ag/AgCl 照合電極の設置位置であり、それぞれ図-2.2.4 に示した秋田側と酒田側の測点である。

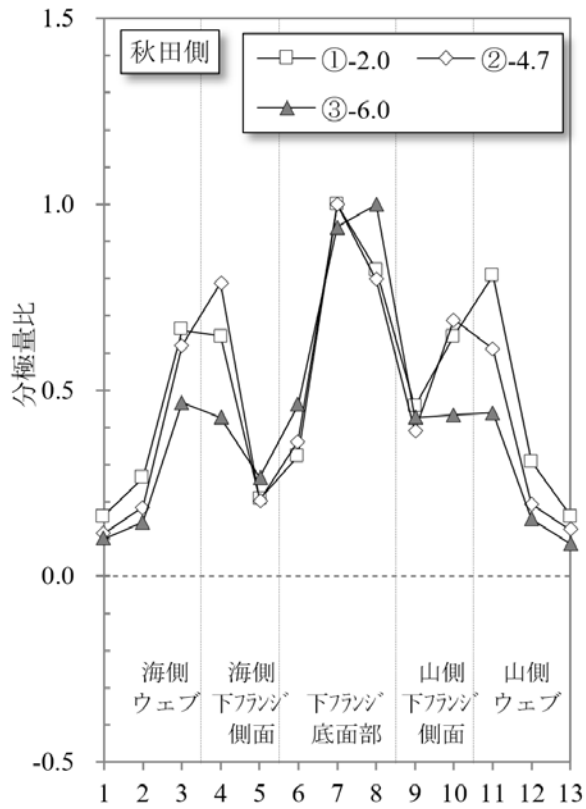
図-3.4.1 G5-3 の下フランジ部の自然電位 (mV vs CSE) の分布 (2018 年 10 月 9 日測定)

3.5 分極量比の分布

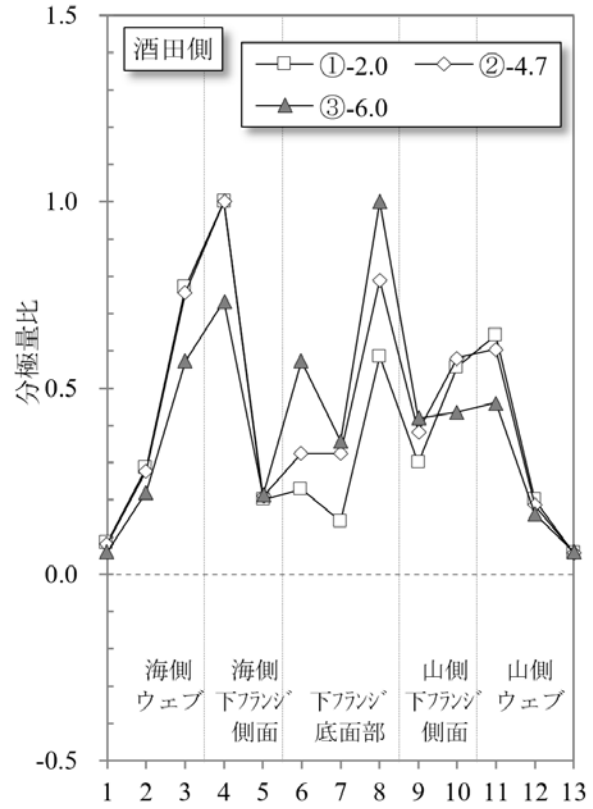
図-3.5.1～図-3.5.5 に種々の陽極配置で通電したときの分極量比の分布を示す。ここで、分極量比は 13 測点で測定されたうちの最大の分極量に対する各測点で測定された分極量の比である。分極量比で示したのは、異なる通電量でも防食電流の分配を比較できるようにするためである。また、電位の測定位置は秋田側と酒田側があり、その位置は図-3.4.1 と図-2.2.4 に示すとおりである。

図-3.5.1 に、G5-3 に陽極配置①②③で通電した結果を示す。図-3.5.1 より、下フランジ底面にチタンリボンメッシュ陽極の設置数量が増加するに伴い、分極量比はウェブや下フランジ側面では低くなり、下フランジ底面部では増加する傾向がみられた。

図-3.5.2 に、G5-3 に陽極配置①④⑤⑥で通電した結果を示す。図-3.5.2 より、チタンロッド陽極棒のみのケース（陽極配置①）と比較して、チタンリボンメッシュ陽極を用いて通電すると、下フランジ底面部の分極量比が大きくなり、その傾向は下フランジ底面のチタンリボンメッシュ陽極の設置数量が多いほど顕著であった。

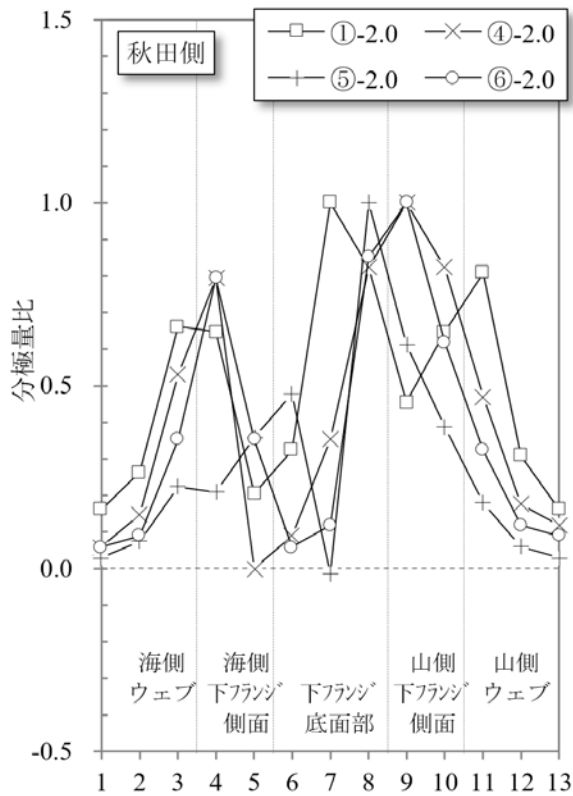


(a) 秋田側

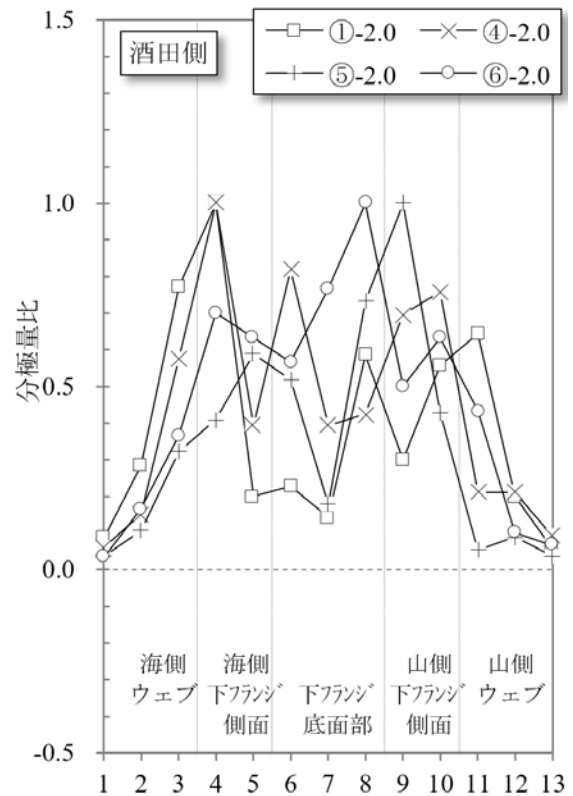


(b) 酒田側

図-3.5.1 分極量比の分布 (2017年5月24日, G5-3, 電極配置①②③)



(a) 秋田側



(b) 酒田側

図-3.5.2 分極量比の分布 (2017年5月24日, G5-3, 電極配置①④⑤⑥)

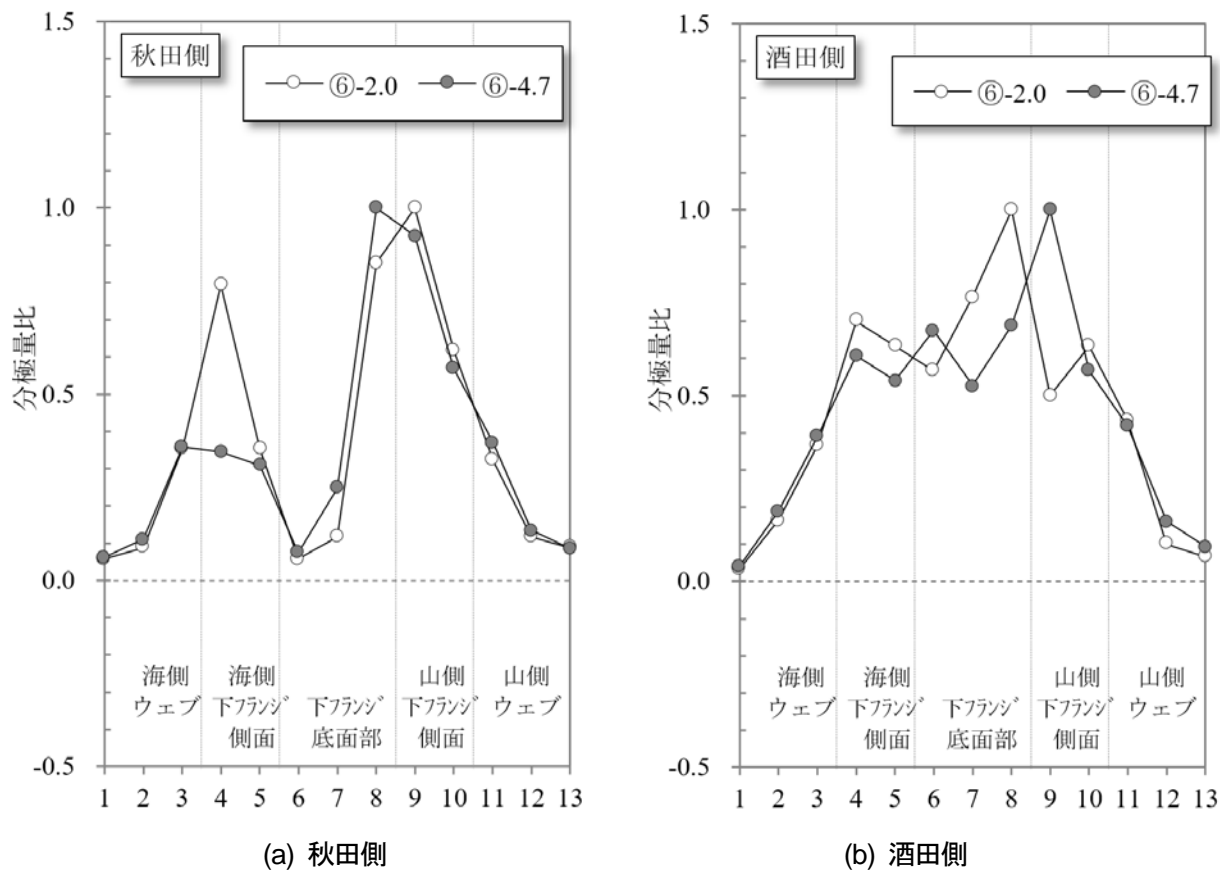
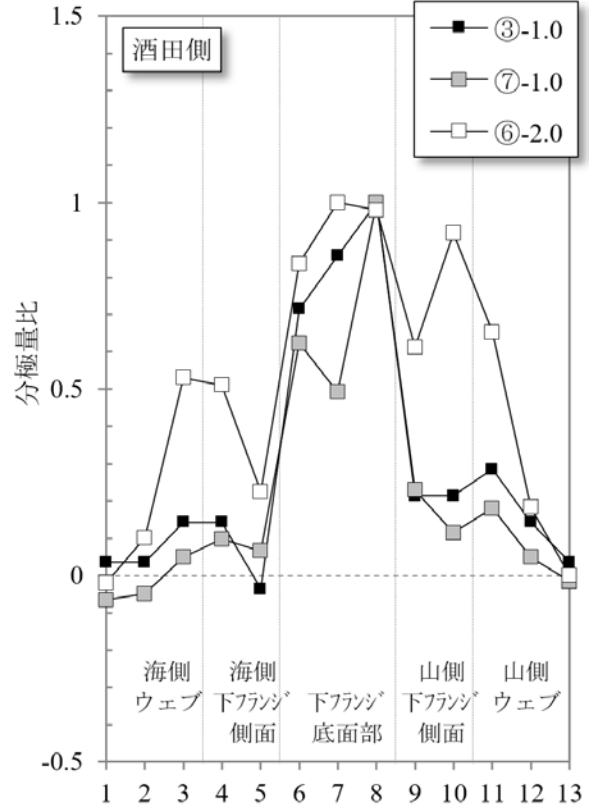
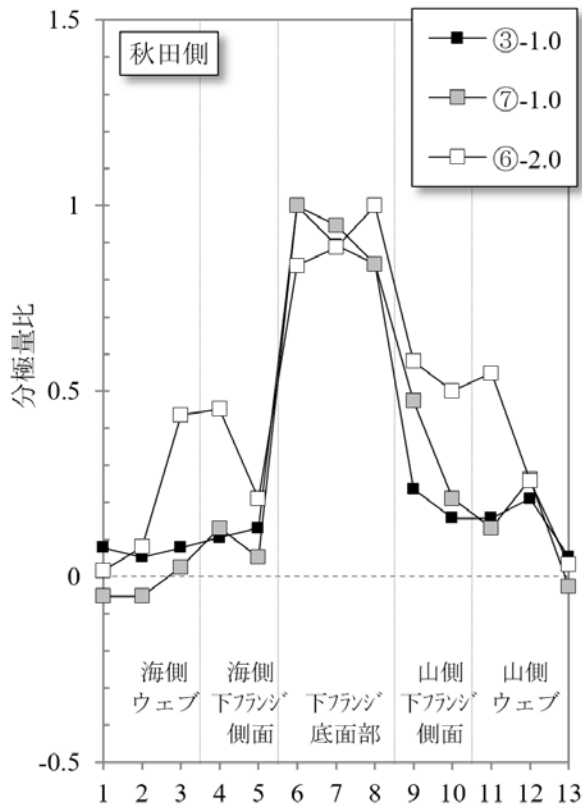


図-3.5.3 分極量比の分布 (2017年5月24日, G5-3, 電極配置⑥)

ただし、この傾向は秋田側では明確ではなかった。この理由としては鋼材の腐食状況の違いと電流密度が考えられる。図-3.4.1に示したように、下フランジ底面の鋼材腐食は秋田側の海側で顕著である。また、今回の通電試験では、コンクリート面積当たりの電流密度は最大でも 6.3 mA/m^2 であり、腐食状況が厳しい部材に対する防食電流密度としては低めの条件で通電している。このように、この位置の鋼材はカソード分極がしにくい条件が重なったものとなる。ここで、図-3.5.3と図-3.5.4にG5-3で2017年5月(断面修復実施から29日後)と2018年10月(断面修復実施から531日後)の分極量比の分布をそれぞれ示す。図-3.5.3と図-3.5.4を秋田側の陽極配置⑥で比較すると、下フランジ底面部の海側で分極量比が時間の経過とともに大きくなっていることがわかる。これは、断面修復によって塩化物イオンが除去されたことと、断面修復に使用した無機系材料によって鋼材周囲のpHが増加し、鋼材周囲の腐食環境が改善したためと考えられる。

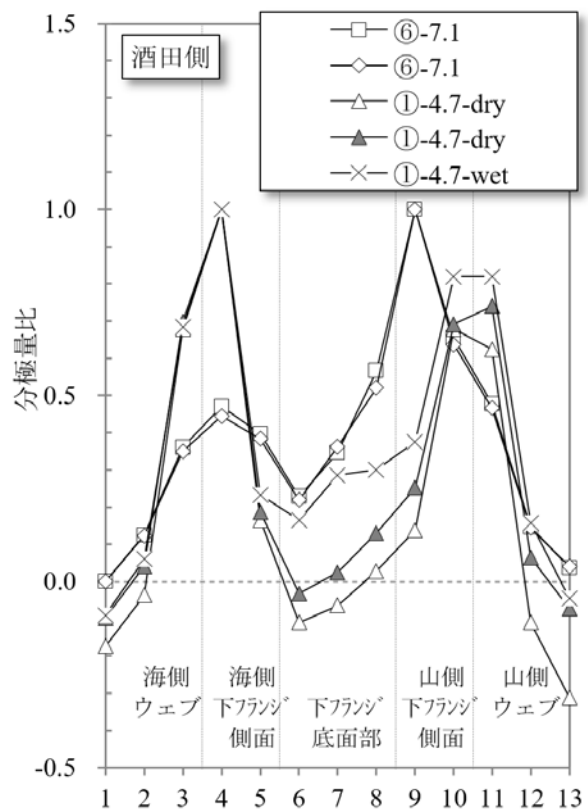
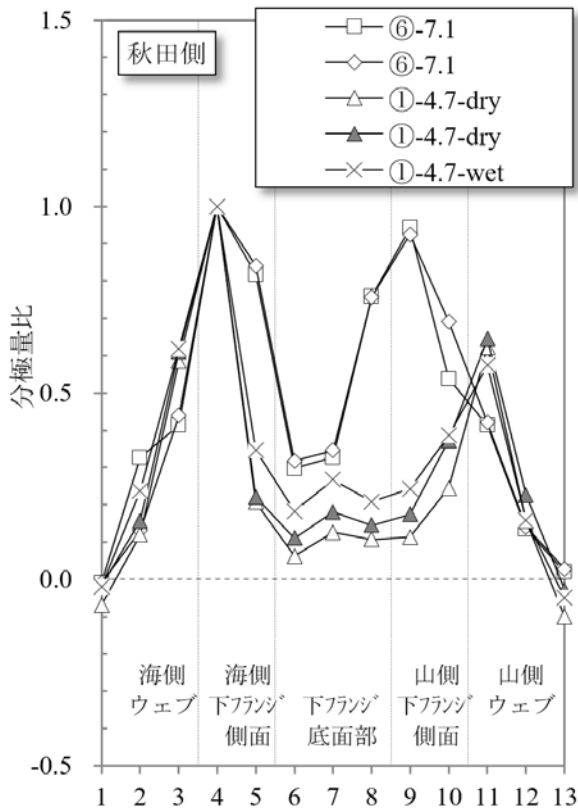
また、図-3.5.4より、電極配置ごとの分極量比の分布をみると、下フランジ側面の分極量比は電極配置⑥の方が電極配置③(このときの電極配置③はチタンロッド陽極棒を撤去した後の配置であり、チタンリボンメッシュ陽極のみが設置されている)および電極配置⑦よりも大きくなっていった。これは、電極配置⑥では下フランジのハンチ部にもチタンリボンメッシュ陽極を設置しているためである。

図-3.5.5に、G3-3の通電結果を示す。この時の陽極配置⑥では、チタンロッド陽極棒は撤去せずに通電している。図-3.5.5と図-3.5.4を電極配置⑥で比較してみると、G3-3では下フランジ底面よりも下フランジ側面の方が分極量比は大きくなっていることがわかる。これは、G3-3ではチタンロッド陽極棒を撤去せずに通電を実施したため、コンクリートよりも導電性が極めて高いチタンロッド陽極棒がディストリビュータのような役割を果たし、電流分布に影響を及ぼしたものと考えられる。



注：この図の陽極配置③は、チタンロッド陽極棒を設置していないときの結果である。

図-3.5.4 分極量比の分布 (2018年10月9日, G5-3, 電極配置③⑥⑦)



(a) 秋田側

(b) 酒田側

図-3.5.5 分極量比の分布 (2018年10月9日, G3-3, 電極配置①⑥)

また、図-3.5.5では、電極配置①で通電する直前にコンクリート表面に散水したときの結果も示している。凡例の①-4.7-dryは暴露されたままの状態での測定結果であり、①-4.7-wetが散水した後に通電したときの結果である。この結果より、チタンロッド陽極棒のみで通電を実施したケースでは、散水して湿潤状態にした方が下フランジ底面部の分極量比が大きくなる傾向が確認された。これは、コンクリートが高含水状態になるほど、コンクリートの電気抵抗率が低下し、防食電流分布が広がることによる。

4. まとめ

この編では、電気防食工法を適用したPC橋梁の撤去時に採取した撤去桁について調査した。この橋梁は電気防食工法を適用していたにもかかわらず、防食対象部位の一部においてコンクリート中の鋼材腐食に伴う変状が再び顕在化した橋梁である。前報での検討の結果、変状発生メカニズムのひとつとして、下フランジ底面近傍に位置する鋼材への防食電流供給量が少なくなる陽極配置であることが指摘された。そこで新たに線状陽極の一つであるチタンリボンメッシュ陽極を下フランジに仮設して通電試験を実施し、コンクリート内部の鋼材の分極量の分布を測定し、陽極配置が防食効果に及ぼす影響を実験的に評価した。

その結果、陽極の配置によって鋼材の分極量の分布が明らかに異なることが実験的に明らかになった。特に、下フランジ底面側の鋼材を防食するためには、陽極材を下フランジ底面に設置することが有効であることが示された。また、既設のチタンロッド陽極のみを使用して通電した場合に、コンクリート表面への散水の有無が分極量の分布に及ぼす影響を評価した。その結果、散水して湿潤状態にした方が下フランジ底面部の分極量比が大きくなる傾向が確認された。これは、コンクリートが高含水状態になるほど、コンクリートの電気抵抗率が低下し、防食電流分布が広がることによると考えられた。

以上より、防食電流を適切に防食対象鋼材へ分配するには、陽極の設置位置を適切に選定することと、コンクリートの含水状態を把握することが重要であることが示された。

11 編 間欠通電方式の検証

－ 異なる腐食環境における防食性の評価 －

目 次

1. はじめに	11- 1
2. 実験概要	11- 3
2.1 供試体概要	11- 3
2.2 通電方法および測定項目	11- 7
3. 実験結果	11- 11
3.1 各暴露環境における防食効果の検証	11- 11
3.2 試験室温 20℃, 相対湿度 60%の試験結果 (間欠通電)	11- 11
(1) 無通電供試体の自然電位	
(2) 防食電流密度	
(3) 復極量	
(4) 通電停止後のオフ電位の変化	
(5) 外観観察	
(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度	
(7) 分極曲線	
3.3 試験室温 20℃, 相対湿度 90%の試験結果 (間欠通電)	11- 19
(1) 無通電供試体の自然電位	
(2) 防食電流密度	
(3) 復極量	
(4) 通電停止後のオフ電位の変化	
(5) 外観観察	
(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度	
(7) 分極曲線	
3.4 試験室温度 40℃, 相対湿度 90%の試験結果 (間欠通電)	11- 41
(1) 無通電供試体の自然電位	
(2) 防食電流密度	
(3) 復極量	
(4) 通電停止後のオフ電位の変化	
(5) 外観観察	
(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度	
(7) 分極曲線	

3.5	試験室温度 40°C, 相対湿度 90%の試験結果 (常時通電)	11- 62
	(1) 無通電供試体の自然電位	
	(2) 防食電流密度	
	(3) 復極量	
	(4) 通電停止後のオフ電位の変化	
	(5) 外観観察	
	(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度	
	(7) 分極曲線	
3.6	屋外暴露の試験結果 (間欠通電)	11- 78
	(1) 無通電供試体の自然電位	
	(2) 防食電流密度	
	(3) 復極量	
	(4) 通電停止後のオフ電位の変化	
	(5) 外観観察	
	(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度	
	(7) 分極曲線	
3.7	屋外暴露の試験結果 (常時通電)	11- 91
	(1) 無通電供試体の自然電位	
	(2) 防食電流密度	
	(3) 復極量	
	(4) 通電停止後のオフ電位の変化	
	(5) 外観観察	
	(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度	
	(7) 分極曲線	
4.	実験結果の考察	11- 98
4.1	各試験条件における鋼材の腐食状況	11- 98
4.2	防食期間中の通電停止期間における復極状況	11-100
4.3	間欠通電における防食効果	11-103
4.4	まとめ	11-106
5.	間欠通電 (断続通電) の適用にあたって	11-107

11 編 間欠通電方式の検証

－ 異なる腐食環境における防食性の評価 －

1. はじめに

従来、鋼材コンクリート構造物における塩害劣化は、沿岸領域にある構造物での飛来塩や、海砂の除去不足による内在塩など、コンクリート中に塩化物イオンが存在する構造物で顕著である。周囲を海で囲まれている我が国では、海岸線に位置するコンクリート道路橋が多数存在し、塩害劣化に悩まされている。さらに、1991年に施行されたスパイクタイヤ禁止条例以降、山間部などの寒冷環境に位置する道路橋では、道路表面の凍結や積雪を防止し車両が安全に走行するために、凍結防止剤の散布が増加している。凍結防止剤には、 NaCl 、 CaCl_2 、 MgCl_2 などがあり、いずれも塩化物イオンを含む化合物である。つまり、これら凍結防止剤は、雪溶け水や雨水に流れ出てコンクリート中に浸透し、コンクリート中の鋼材が腐食する原因となる。したがって、コンクリート道路橋における塩害劣化は、沿岸環境のみで生じる劣化現象ばかりではなく、積雪寒冷地においては人為的に生じる劣化現象として認識されはじめている。

電気防食工法は、塩害劣化を受けたコンクリート道路橋の補修対策として期待され、適用実績も増加している。電気防食工法には、防食電流の供給方法の違いにより、外部電源方式および流電陽極方式がある。流電陽極方式とは、コンクリート内部鋼材と比較してイオン化傾向が高い金属をコンクリート表面に設置し、内部鋼材と接続し、防食電流を供給する方法である。一方、外部電源方式とは、直流電源装置の+側、-側にそれぞれ電気防食用陽極と内部鋼材を接続し、防食電流を供給する方法である。現在は、内部鋼材の腐食状態に適した防食電流を自由にコントロール可能な外部電源方式が主流である。

しかしながら、外部電源方式は、防食電流を供給する直流電源装置を稼働させるための1次側電力を周囲の商用電線路から引き込む必要がある。1次側電力の供給では、構造物周囲に電線路がない場合には適用することができない。また、近年注目されている太陽光など自然エネルギーを利用し1次側電力を補うことは可能であり、適用事例も報告されている。電気防食工法では、防食期間中、常時防食電流を供給する必要があるため、夜間の電力供給を目的としたバッテリーを備えなければならない。必要なバッテリー容量は防食対象面積が広がるにしたがって大きくなる。ところが、バッテリーは高価であるとともに、比較的短期間で更新が必要になることが多い。そのため、初期および維持管理ともに電気防食の適用コストが増加することにもなり得る。

また、本共同研究で実施した管理者へのアンケート結果から、電気防食工法の維持管理がより簡便になることが必要であることが確認された。その一つは、直流電源装置を管理する上で1次側電力の供給を第三者（電力会社）に頼らないことである。現位置での自然電力を活用すれば、電源の確保が容易になるばかりでなく、電気防食の稼働停止も抑制できる。例えば、電力線への落雷等により1次

側電力の供給停止（停電など）や電圧異常が生じると各種保護装置が働き、電源装置によっては復帰措置を行うまで一定期間にわたり防食電流が停止してしまうなどの管理リスクがある。

そこで、これら課題を解決するため、本検討では、1次側電力として自然エネルギーである太陽電池（ソーラーパネル）を使用し、従来必要であったバッテリーを用いない電気防食工法の開発に着目することとした。つまり、本検討の電気防食工法は、日中のみに太陽光発電で発生した電力で防食電流を供給し、夜間は防食電流を供給しない断続通電による電気防食工法である。防食電流は常時供給されないものの、システムの信頼性や経済性が大幅に向上し、防食効果が確保できる適用条件が見いだせれば有効な対策の選択肢の一つとなる。

本工法では、1日の中で防食電流を供給可能な期間が日照時間に左右されるため、雨天等が続くように日照時間が全くない期間も生じる可能性は高い。また、我が国は南北に長く、各地域の気温差も大きいこと、塩化物イオンの供給状況にも差が生じるため、コンクリート内部鋼材の腐食環境は、各地域で異なる。したがって、本工法が全ての腐食環境で適用可能であるとは限らない。そこで本検討では、日中に防食電流を供給する防食時間の長さ、内部鋼材の腐食環境として暴露環境温度、内部塩化物イオン量およびシフト量に着目して基礎検討を実施した。

なお、本報告では、断続通電でなく間欠通電と表現している。これは、基礎的な情報を得ることを目的に実験的には定期的に防食電流の ON, OFF を行って評価したためである。実構造物に適用する場合は、不定期に電源が ON, OFF され、防食電流の供給時間も不規則であることに注意することが必要である。

本研究の試験では、室内恒温恒湿室および茨城県つくば市の土木研究所屋外暴露試験場に供試体を暴露した。室内試験においては、通電開始から約9カ月後に約半数を解体調査し、残りを引き続き継続し約3年後に解体調査した。屋外暴露供試体に関しては、コンクリート中鋼材の腐食状態を各暴露環境で促進させるため、約1年後に試験を開始し約2年間の屋外暴露の後に解体調査を行った。

本報告は、電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する共同研究報告書－電気防食工法の維持管理の課題に関する研究成果－（(国研)土木研究所，東北大学，日本エルガード協会，コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会，共同研究報告書，No. 502，2018.7），7編 新工法の開発（間欠通電方式の検証）で述べた中間報告の内容を包括した，本研究の総括報告である。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験に用いた供試体は、図-2.1.1に示すモルタル供試体であり、供試体寸法は100×100×150 mmである。供試体中には、両端部を熱収縮チューブで被覆したφ6 mmの磨き丸鋼を1本埋設し、鋼材の直上にはチタンリボンメッシュ陽極を設置した。なお、丸鋼の設置では、実験期間中に暴露環境温度と湿度の影響を受け易くするため、鋼材かぶりの2ヶ所が20 mmとなるように配置している。また、チタンリボンメッシュ陽極は、磨き丸鋼と同様に一部をモルタル供試体から露出させ、外部電源と接続できるようにした。各供試体は、養生終了後、鋼材およびチタンリボンメッシュ陽極が露出している面（2面）に対して、陽極を除く全ての部分をエポキシ樹脂で被覆し、湿度等の影響を受けないようにした。

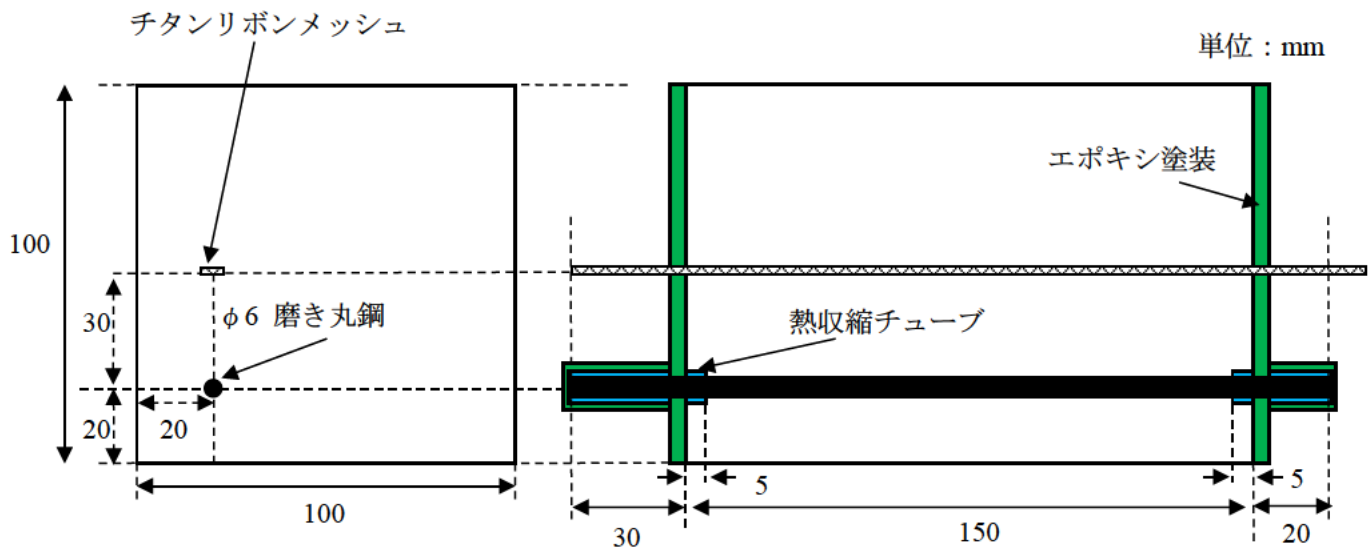


図-2.1.1 供試体概要図

モルタル配合は、W/C=40%のPC配合（表-2.1.1参照）をベースにモルタル配合を算出した。表-2.1.2には、モルタル配合を示す。なお、セメントは早強セメントを用いた。また、塩化物イオン量は、PC配合のコンクリートに対して2.4 kg/m³および12.0 kg/m³となるように算出し、NaClとして外割りでそれぞれ3.8 kg/m³および19.2 kg/m³となるようモルタル混合時に添加した。

表-2.1.1 モルタル配合のベース PC 配合（絶対容積）

W/C (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	空気量 (%)	絶対容積(kg/m ³)			
				W	C	S	G
40.0	165	43.0	4.5	165	132	283	375

※セメント：早強セメント（密度 3.13，単位量 413kg/m³）

表-2.1.2 モルタル配合

W/C (%)	W (kg/m ³)	空気量 (%)	絶対容積(kg/m ³)				
			W	C	S	塩化物イオン量（外添加） コンクリート m ³ 中に対する量	
						2.4 供試体の場合	12.0 供試体の場合
40.0	165	7.2	264	660	1178	3.8	19.2

※塩化物イオンは、コンクリートに対して 2.4 および 12.0 kg/m³となるように算出

表-2.1.3 には、要因と水準を示す。塩化物イオン量は、腐食発生限界に近い領域の塩化物イオン量として 3.8 kg/m³、塩害が進行した厳しい腐食環境を模擬して 19.2 kg/m³とした。供試体暴露環境は、乾燥環境 20℃-60%RH、湿潤環境 20℃-90%RH、高温多湿環境 40℃-90%RH の室内、および温湿度変化を繰り返し受ける一般屋外環境として茨城県つくば市にある土木研究所暴露場に屋外暴露した。

間欠通電における通電時間は、4、8 時間/日の 2 種類とし、いずれも午前 8 時に直流電源装置の電源が ON となるように市販のタイマーを用いて制御した。通電では、目標の電位シフト量が 50 mV および 100 mV となるように定電流制御により、防食電流密度を調整した。なお、通電調整は、概ね 3 ヶ月に 1 回の頻度で実施した。供試体の作製では、暴露スペースの関係で全ての要因と水準を組合せた供試体を作製することは困難であったため、表-2.1.4 に示す割り振りで供試体を作製し、同時期に暴露した。なお、屋外暴露供試体は、その暴露環境において約 1 年間静置し、コンクリート内部鋼材の腐食を促進させた。また、20℃-90%RH に暴露した供試体の内、通電開始から 632 日後に塩化物イオン量 19.6 kg/m³、3.8 kg/m³のものからそれぞれ 16 体ずつを 40℃-90%RH に暴露環境を変更し常時通電にて通電を開始した。表-2.1.5 に 40℃-90%RH にて常時通電した供試体の移設前後の通電条件を示す。なお、常時通電とは、一般的に外部電源方式電気防食における通電方法であり、防食期間中継続して防食対象鋼材に防食電流を供給する通電を示す。

表-2.1.3 要因と水準

要因	水準
塩化物イオン量	3.8 , 19.2 kg/m ³
暴露環境	20℃, 60%RH (乾燥) 20℃, 90%RH 以上 (湿潤), 40℃, 90%RH 以上 (高温多湿) 屋外暴露 (つくば[土研])
通電時間	4, 8, 24 時間/日 [※]
目標電位シフト量	100 mV, 50 mV

※24 時間/日は、常時通電

表-2.1.4 各暴露環境における供試体の割振り

室温 (°C)	湿度 (%RH)	塩化物 イオン量 (kg/m ³)	通電時間 (時間/)	目標 シフト量 (mV)	供試体 No.
20	60	19.2	8	100	65,67, 68,69,70,71
				50	57,61,73,74,75,76
			無通電		59,60,62,63,64,72,195
20	90	19.2	4	100	85,87,88,89
				50	78,91,92,95,96
			8	100	98,99,100,102
				50	103,104,105,106,107,200
			無通電		80,81,82,83,84
		3.8	4	100	9,10,11,14
				50	15,16,17,18,20
			8	100	21,22,24,26
				50	27,28,29,31,32
			無通電		4,6,7,8
40	90	19.2	4	100	109,111,116,118
				50	119,121,120,122
			8	100	123,124,125,126
				50	127,128,129,130
			無通電		112,113,114,115,198
		3.8	4	100	39,40,41,42
				50	43,44,45,46
			8	100	36,38,48,50
				50	51,52,53,54
			無通電		35,37,47,49,56
つくば	屋外暴露	19.2	8	100	155,156,157,153,154,162
			4		139,144,161,142,146,149
			24		145,151,152,133,141,148
			無通電		136,137,147,158,159,160,1
40	90	19.2	24	200	94,196
				100	90,108
				50	86,97
			無通電		101,197
		3.8	24	200	23,30
				100	13,19
				50	5,25
			無通電		12,55

表-2.1.5 40°C-90%R.H.供試体の移設前後の通電条件

供試体番号	塩化物 イオン量 (kg/m ³)	移設前の通電条件		移設後の通電条件	
94	19.2	20°C-90%R.H.	4h-50mV	40°C-90%R.H.	24h-200mV
196			無通電		
90			4h-100mV		24h-100mV
108			8h-50mV		
86			4h-100mV		24h-50mV
97			8h-100mV		
101			8h-100mV		無通電
197			無通電		
23	3.8	20°C-90%R.H.	8h-100mV	40°C-90%R.H.	24h-200mV
30			8h-50mV		
13			4h-100mV		24h-100mV
19			4h-50mV		
5			無通電		24h-50mV
25			8h-100mV		
12			4h-100mV		無通電
55			無通電		

2.2 通電方法および測定項目

各供試体の通電では、各暴露環境において通電電流量および通電時間が同一である供試体を直列に複数個接続した。図-2.2.1には、例として3体の供試体を接続した場合の接続状況を示した。また、湿潤環境では、同一回路あるいは、他回路の供試体から防食電流が侵入する可能性があるため、各供試体をプラスチック容器に入れて、防食電流の迷走が生じないように絶縁した。

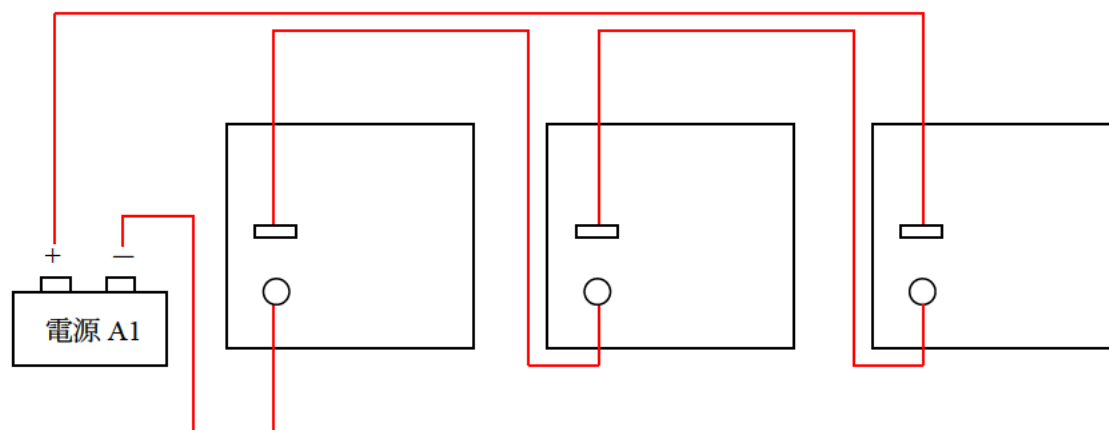


図-2.2.1 通電時の接続状況（3体の供試体を同一電流量で供給する場合の例）

本試験では、各暴露環境に供試体を静置し、屋外暴露環境の供試体以外は約4ヶ月後に、屋外暴露供試体は約1年後に通電を開始した。通電開始直前には、初期の分極性状を把握し、初期の防食電流密度を決定するために、すべての供試体でカソード分極による分極曲線を測定した。初期の防食電流密度は、得られたカソード分極曲線から目標シフト量となるように求めている。なお、本報告書における防食電流密度は、通電電流密度を鋼材表面積で除することで算出した。通電を開始した後は、約3ヶ月ごとに内部鋼材のオン電位(E_{on})、インスタントオフ電位(E_{ins})、通電停止4時間後および通電停止24時間後のオフ電位(E_{4off} , E_{24off})を測定し、24時間後復極量を参考にして、防食電流密度を調整した。図-2.2.2にそれぞれの概念図を示す。各測定時期に得られた復極量を平均したものを平均復極量 ΔE_{ave} (mV) とし、24時間後復極量と4時間後復極量の差を $\Delta E_{24off-4off}$ (mV) として(1), (2)式に従ってそれぞれ算出した。また、一部供試体では、シート型の SSE 電極を供試体側面に貼り付け、データロガーを用いて内部鋼材のオン電位および通電停止中のオフ電位を連続的に測定した。

$$\Delta E_{ave} = \frac{\Delta E_1 + \Delta E_2 + \dots + \Delta E_n}{n} \quad (1)式$$

ΔE_n : n 回目の測定時における復極量 (mV)

n : 測定回数 (回)

$$\Delta E_{24off-4off} = \Delta E_{24off} - \Delta E_{4off} \quad (2)式$$

ΔE_{24off} : 24 時間後復極量 (mV)

ΔE_{4off} : 4 時間後復極量 (mV)

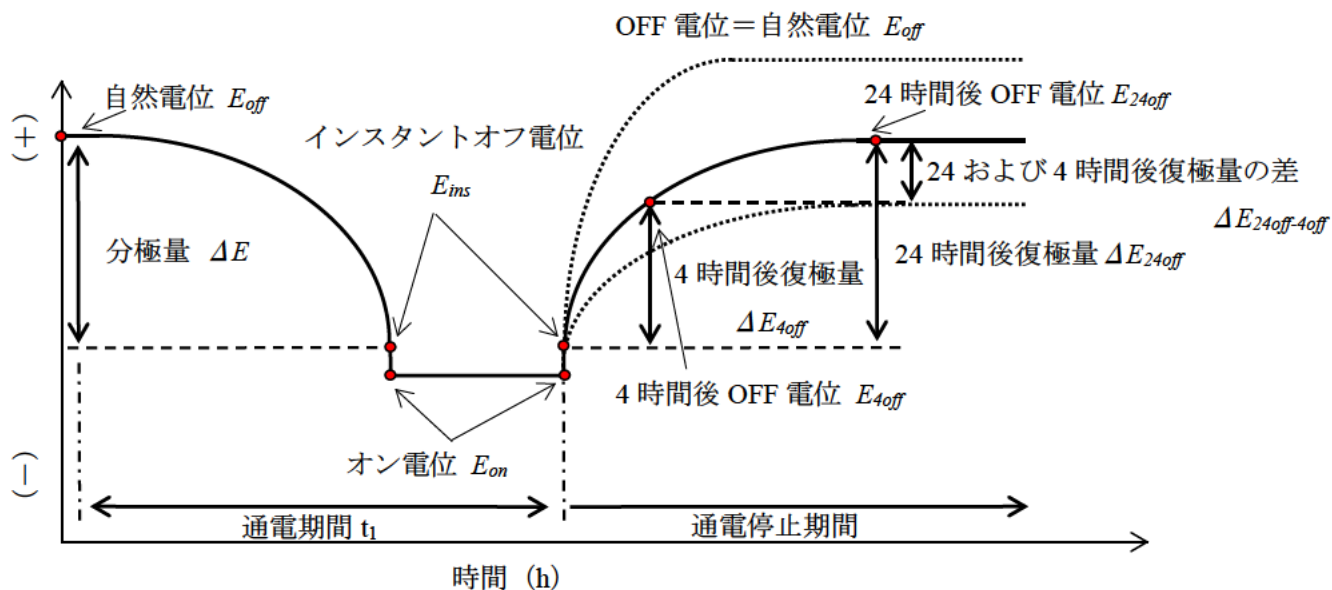







図-2.2.2 通電期間と通電停止期間中の鋼材電位の変動

さらに、通電開始直前および通電経過9ヶ月後に各通電条件から2体の供試体を解体し、内部鋼材の腐食状況の目視確認および腐食減量を測定している。鋼材は露出部の腐食の影響を排除する目的で、両端から35mmを切断・除去した。供試体解体時には、鋼材腐食に対する評価として目視評価を行い、供試体ごとに0~4点の評点を付与した。表-2.2.1に評価基準および評価した鉄筋の例を示す。2016年11月・2017年8月の解体では9名、2019年10月の解体では12名でそれぞれ評価を行った。評価は各人が判定したものの平均値とした。

供試体解体後、内部鋼材は、腐食減量を測定するために、クエン酸二アンモニウム10%水溶液に浸漬し、腐食生成物を除去後、重量を測定した。図-2.2.3に例として20°C-90%RH供試体の鋼材の質量変化の概念図を示す。本実験では、通電開始後の腐食減量について評価を行うため、初期腐食減量を差し引いた腐食減量率 w を(3)式より算出した。なお、暴露環境が40°C-90%RHかつ常時通電の供試体における初期の単位長さあたりの鋼材質量については、移設および暴露した時点での単位長さ当たりの鋼材の質量の平均値 W_a (g/mm)を(4)式より時間平均で予測し、腐食減量率 w' を(5)式より算出した。また、(6)式より、平均腐食電流密度 i ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)を求めた。

表-2.2.1 目視評価基準

評点	基準	写真(例)
0	腐食なし	
1	半分未満で発錆	
2	半分以上で発錆	
3	半分未満で減肉有	
4	半分以上で減肉有	

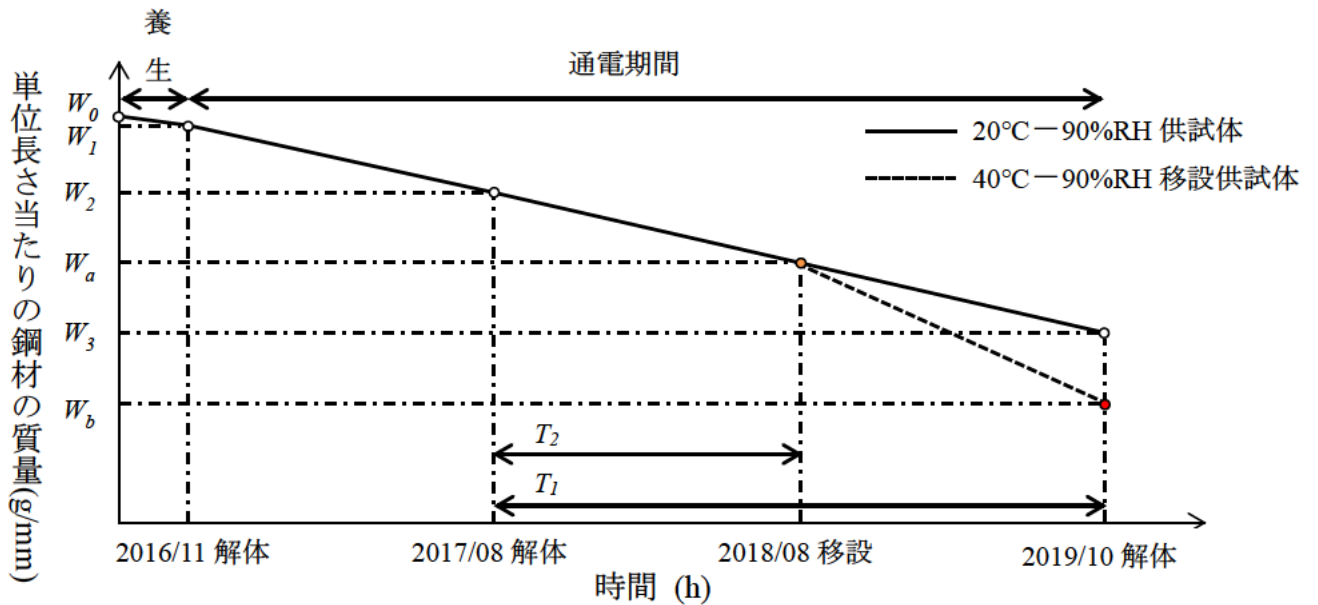


図-2.2.3 鋼材質量変化の概念図

$$w(\%) = \frac{W_n - W_1}{W_0} \times 100 \quad (3) \text{式}$$

W_0 : 打設前の単位長さあたりの鋼材の質量 (g / mm)

W_1 : 各環境における初期解体時 (2016/11) の単位長さあたりの鋼材の質量の平均値 (g / mm)

W_n (n=2,3) : 2017/08, 2019/10 解体時の単位長さあたりの鋼材の質量 (g / mm)

$$W_a = W_0 - (W_3' - W_2') \times \frac{T_2}{T_1} \quad (4)式$$

W_0 : 打設前の単位長さあたりの鋼材の質量 (g / mm)

W_2' : 20°C-90%RH における 2017/08 解体時の単位長さあたりの鋼材の質量の平均値 (g / mm)

W_3' : 20°C-90%RH における 2019/10 解体時の単位長さあたりの鋼材の質量の平均値 (g / mm)

T_1 : 2017/08 解体時から 2019/10 解体時までの時間 (h)

T_2 : 2017/08 解体時から 2018/08 移設までの時間 (h)

$$w'(\%) = \frac{W_b - W_a}{W_0} \times 100 \quad (5)式$$

W_0 : 打設前の単位長さあたりの鋼材の質量 (g / mm)

W_a : (3)式による移設・暴露時点での単位長さあたりの鋼材の質量の平均値 (g / mm)

W_b : 40°C-90%RH における 2019/10 解体時の単位長さあたりの鋼材の質量の平均値 (g / mm)

$$i = \frac{W}{K \times t} = \frac{w \times W_0 \times l}{A \times K \times t} \quad (6)式$$

W : 解体時の鋼材の腐食減量 (g)

K : 鉄の電気化学当量 1.042 (g / A · h)

t : 初期解体から各解体 (2017/08 解体, 2019/10 解体) までの時間 (h)

w : 各解体 (2017/08 解体, 2019/10 解体) における腐食減量率 (%)

W_0 : 打設前の単位長さあたりの鋼材の質量 (g / mm)

l : 鋼材長さ (mm)

A : 鋼材の表面積 (m²)

3. 実験結果

3.1 各暴露環境における防食効果の検証

本研究では、腐食環境に対する間欠通電の適用性を把握することを目的に、供試体の塩化物イオン量を調整するとともに、温湿度に関する試験環境の要因と水準を表-2.1.3のように設定した。本章では、乾燥環境 20℃-60%RH、湿潤環境 20℃-90%RH、高温多湿環境 40℃-90%RH の室内と、一般屋外の環境で日々の繰り返し変化を受ける屋外暴露について、(1)無通電供試体の自然電位、(2)防食電流密度、(3)復極量、(4)通電停止後のオフ電位の変化、(5)外観観察、(6)腐食減量率と平均腐食電流密度、(7)分極曲線の試験結果をそれぞれ整理した。

3.2 試験室温 20℃、相対湿度 60%の試験結果(間欠通電)

(1) 無通電供試体の自然電位

図-3.2.1 には、無通電供試体における自然電位の経時変化を示す。本環境での塩化物イオン量は、 $[Cl^-]=19.2\text{ kg/m}^3$ のみであり、鋼材周辺の塩化物イオンは、多量に存在する環境であった。試験開始当初は、 $-600 \sim -500\text{ mV vs.CSE}$ の範囲で供試体間における電位差のバラツキも小さく、ASTM の自然電位による腐食判定では「90%以上の確率で腐食あり」の範囲であった。しかし、暴露開始から 150 日程度までは、供試体間にバラツキが生じ、 $-550 \sim -350\text{ mV vs.CSE}$ の範囲で推移した。暴露開始から 230 日以降、自然電位は、貴側に移行し -350 mV vs.CSE より貴側で推移し、ASTM 基準による「不確定」の範囲となり、供試体間での電位差も小さくなる傾向を示した。暴露開始から 450 日が経過した時点から一部の供試体で -400 mV vs.CSE よりも卑な電位へ移行しており、900 日を超えるとすべての供試体で -350 mV vs.CSE よりも卑な電位へと移行し、ASTM 基準による「90%以上の確率で腐食あり」の範囲となった。これらの状況から、全体的には、腐食が進行している状況であると判断することができる。

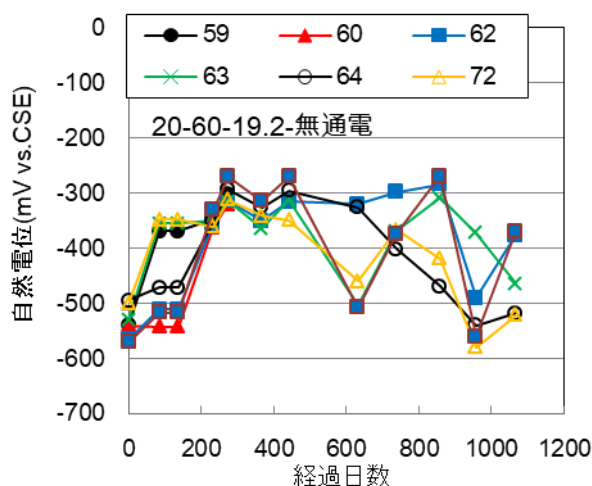


図-3.2.1 自然電位の経時変化 (20℃-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³)

(2) 防食電流密度

図-3.2.2 および 3.2.3 には、それぞれシフト量 100 mV および 50 mV における防食電流密度の経時変

化を示す。なお、本環境における通電時間は、8時間/日のみである。防食電流密度は、通電当初は、 20 mA/m^2 と大きな電流密度であり、目標シフト量 50 mV では、 100 mV の約半分程度の電流密度であった。いずれの供試体も通電の経過とともに防食電流密度が低下し、目標シフト量 50 mV では、通電開始後 60 日程度、 100 mV では通電開始後 120 日程度で 5 mA/m^2 以下まで低下した。それ以降も多少の上下はあるが、いずれのシフト量でも $0.1 \sim 1.0 \text{ mA/m}^2$ まで低下した。これは、通電期間の前半部分では、コンクリートの硬化反応に起因するコンクリートの緻密化による塩化物イオンの固定化、また電気防食を長期間適用することにより、鋼材表面で生成される水酸化物イオンの増加などの影響による鋼材表面での腐食環境の改善効果であると考えられる。

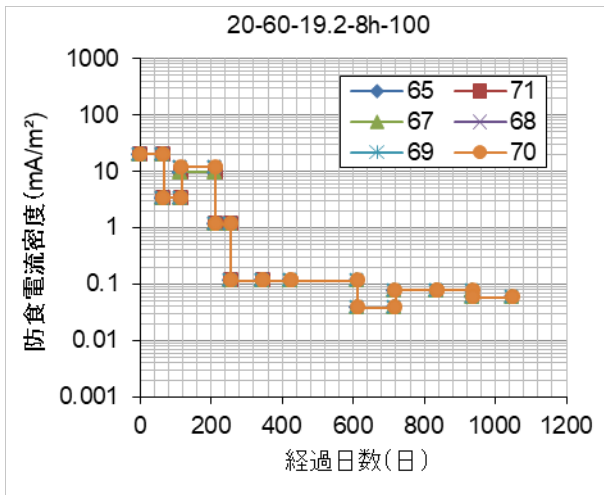


図-3.2.2 防食電流密度の経時変化
($20^\circ\text{C}-60\%RH$ $[\text{Cl}^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$
通電 8 時間 100 mV シフト)

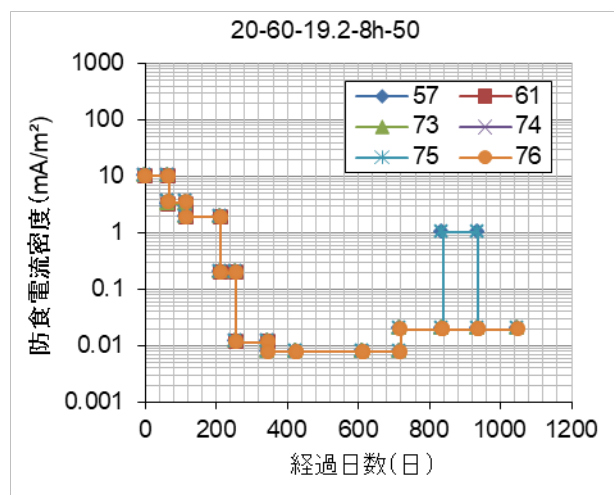


図-3.2.3 防食電流密度の経時変化
($20^\circ\text{C}-60\%RH$ $[\text{Cl}^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$
通電 8 時間 50 mV シフト)

(3) 復極量

4 時間後の復極量の経時変化と平均値を図-3.2.4～3.2.6、24 時間後の復極量の経時変化と平均値を図-3.2.7～3.2.9 に示す。

同一条件下の供試体では、シフト量に関わらず 4 時間後復極量に大きな差は確認されなかった。通電 200 日程度までは、目標シフト量を大きく上回る傾向にあったが、経時的には目標シフト量に近づく傾向が確認された。100 mV シフトでは、900 日後に目標シフト量以下を示したが、4 時間後復極量の平均値では、いずれの供試体も 100 mV を超えたシフト量が得られていた。50 mV シフトでは、200 日経過後から概ね目標のシフト量を維持されており、4 時間後復極量の平均値においても概ね目標のシフト量であった。一方で一部の供試体のシフト量が目標の 2 倍程度となったことも確認された。これは、900 日ごろに 150 mV 程度の復極量が得られ、数体の供試体を 1 台の直流電源装置で直列に通電したことに影響を受けたと考えられる。24 時間後復極量に関しても同一条件下では、4 時間後復極量と同様の傾向が確認された。初期復極量が目標復極量よりも極めて大きいのは、コンクリートの硬化反応によって緻密化することによる鋼材周辺の環境改善であると考えられる。また、防食電流密度は、先に示したように通電の経過とともに低減したものの、通電の長期化によって、鋼材周辺の腐食環境が改善されることが知られており、この効果によって少ない防食電流密度で大きな分極・復極をする状態になったと考えられる。

一方で、24 時間後復極量の平均値は、4 時間後復極量の平均値と比較すると小さくなる傾向が確認された。

め、図-3.2.10 および 3.2.11 には、4 時間後復極量と 24 時間後復極量の差の経時変化を示す。なお、この値がプラスを示す場合は、24 時間後復極量が 4 時間後復極量と比較して大きいことを示している。この結果、いずれの目標シフト量でも、目標シフト量の約 2 倍のシフト量が得られていた通電開始から 200 日程度までは、24 時間後復極量が大きく、通電停止から 24 時間までの期間の内部鋼材は、復極状態にある。一方で、目標シフト量に概ね調整された通電開始後 250 日以降、いずれのシフト量でも 700 日程度までは 24 時間後復極量が 4 時間後復極量と比較して小さくなる場合があり、それ以降は概ね 24 時間後復極量が大きくなった。

この状況は、間欠通電を実施している際、防食電流の供給が止まる間に内部鋼材が腐食状態に移行することを示唆している。間欠通電では、通電が停止されている期間に復極過程であれば防食効果が期待できるが、その期間内に腐食進行過程に移行する場合には、防食効果が期待できない。

本環境では、通電から 700 日前後までは、通電停止時の鋼材の電位が復極過程から腐食状態に移行する場が確認されるものの、長期的な通電により、通電停止期間に腐食過程に移行する鋼材がほぼなくなり、電気防食の効果が得られたものと考えられる。このような状況を踏まえると今後は、復極量あるいは分極量を設定する際、目標シフト量を大きくし復極時間を出来るだけ長くする手段などの設定方法を検討すると、より効果的な防食が実現するものと考ええる。

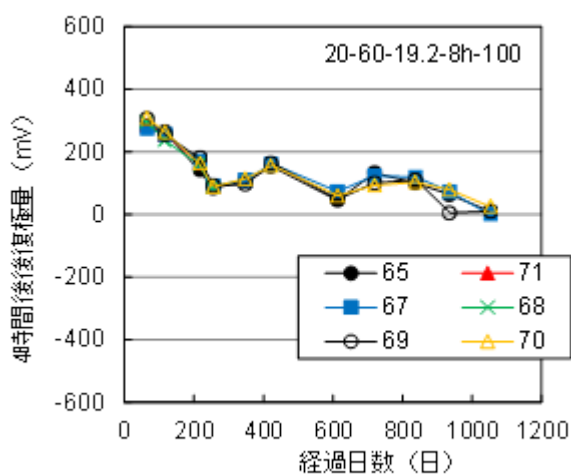


図-3.2.4 4 時間後復極量の経時変化
(20°C-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³
通電 8 時間 100 mV シフト)

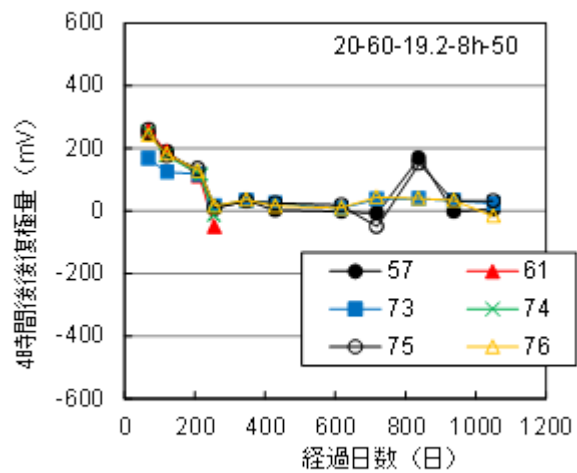


図-3.2.5 4 時間後復極量の経時変化
(20°C-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³
通電 8 時間 50 mV シフト)

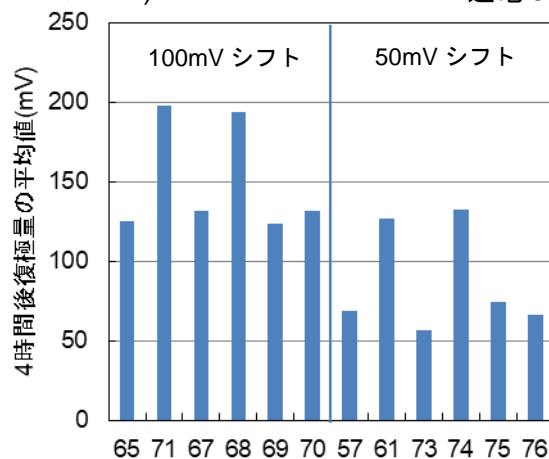


図-3.2.6 4 時間後復極量の平均値

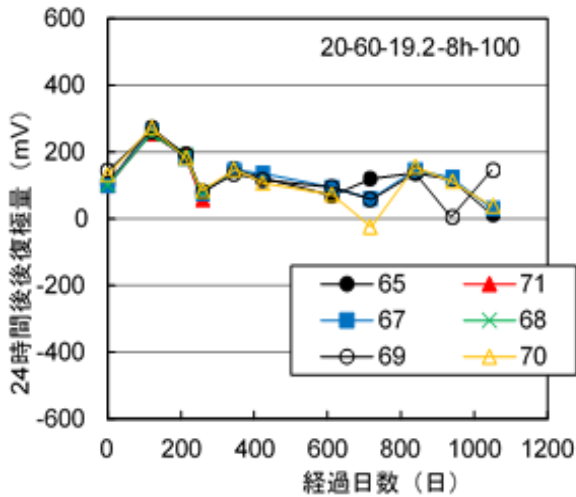


図-3.2.7 24 時間後復極量の経時変化
(20°C-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³
通電 8 時間 100 mV シフト)

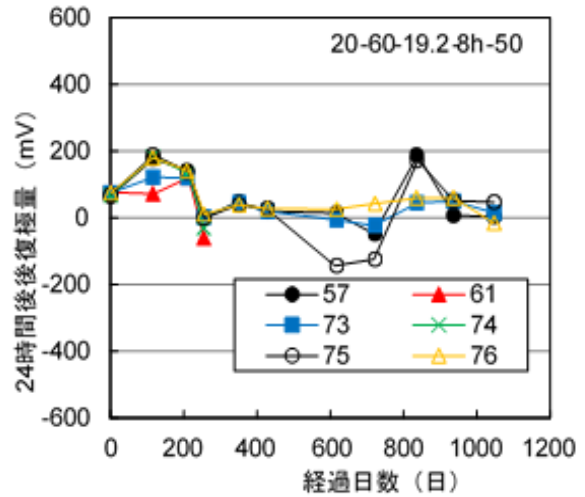


図-3.2.8 24 時間後復極量の経時変化
(20°C-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³
通電 8 時間 50 mV シフト)

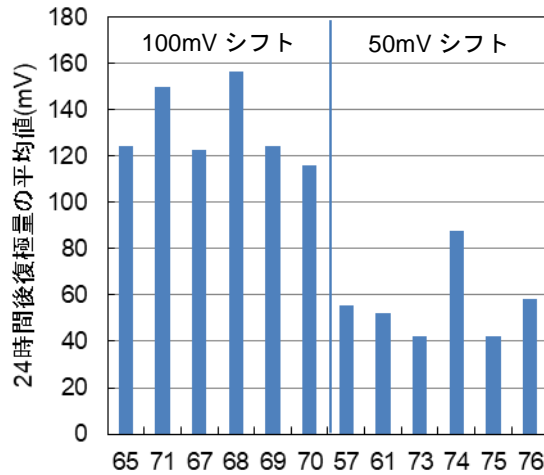


図-3.2.9 24 時間後復極量の平均値

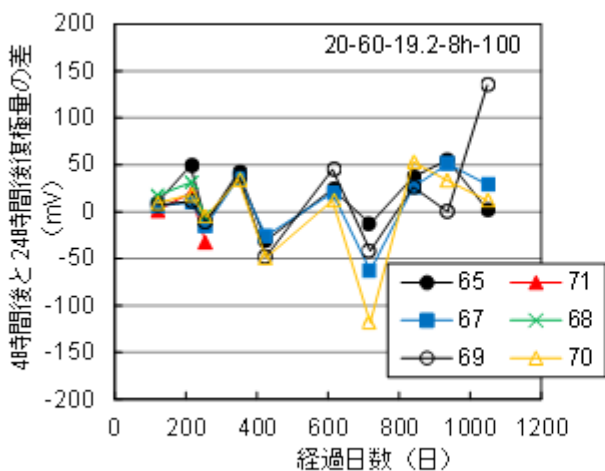


図-3.2.10 4 時間後と 24 時間後復極量の差
(20°C-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³
通電 8 時間 100 mV シフト)

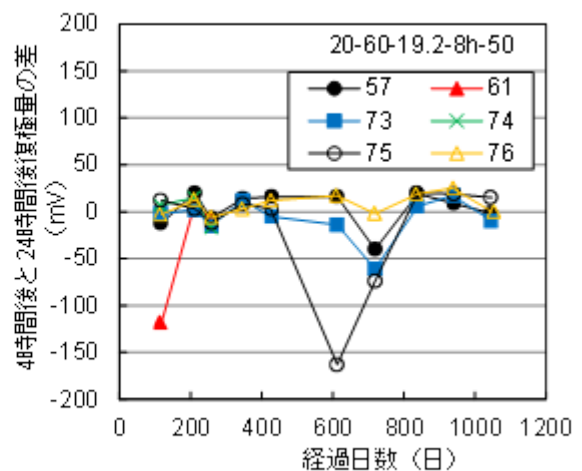


図-3.2.11 4 時間後と 24 時間後復極量の差
(20°C-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³
通電 8 時間 50 mV シフト)

(4) 通電停止後のオフ電位の変化

図-3.2.12~3.2.15には、通電停止4時間後および24時間後のオフ電位を示す。100 mV シフトでは、通電開始100日から800日程度まで $-400 \sim -350$ mV vs.CSEの範囲の電位で維持され、その後、 $-400 \sim -600$ mV vs.CSEの範囲に卑化する傾向が確認された。50 mV シフト供試体では、通電開始400日程度まで100 mV シフト供試体と同様に $-400 \sim -350$ mV vs.CSEの範囲の電位で維持されていたが、その後、一部の供試体で -400 mV vs.CSEよりも卑な電位を示した。これらの結果から、本試験におけるオフ電位の判定では、通電期間を通して -350 mV vs.CSEよりも卑な電位であり、ASTM 基準による判定で「90%以上の確率で腐食あり」と判定される。

また、通電開始250日を経過した時点から、24時間後オフ電位が4時間後オフ電位よりも卑な電位を示す場合があり、通電停止期間に内部鋼材が腐食状態に移行することを示唆する結果と考えられる。

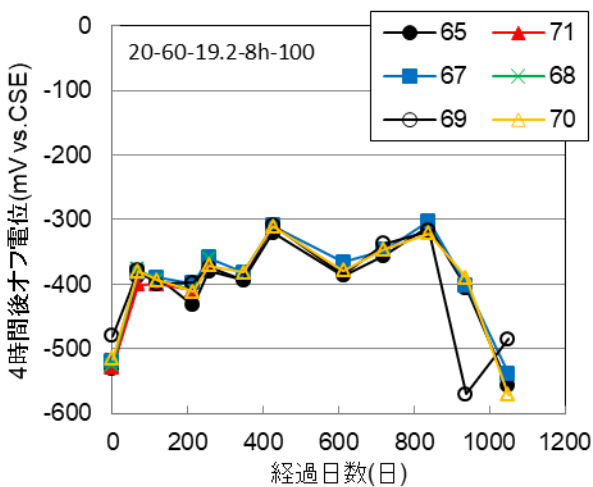


図-3.2.12 通電停止4時間後オフ電位の経時変化

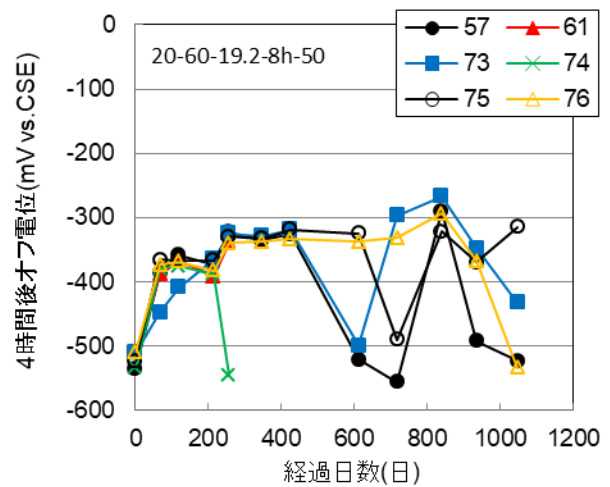


図-3.2.13 通電停止4時間後オフ電位の経時変化

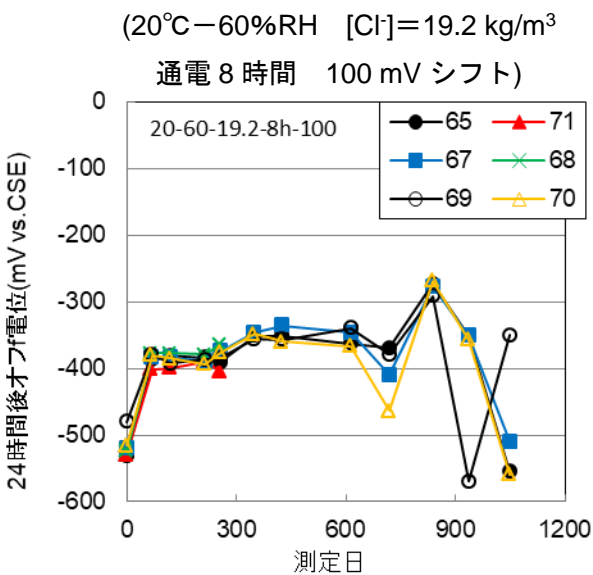


図-3.2.14 通電停止24時間後オフ電位の経時変化

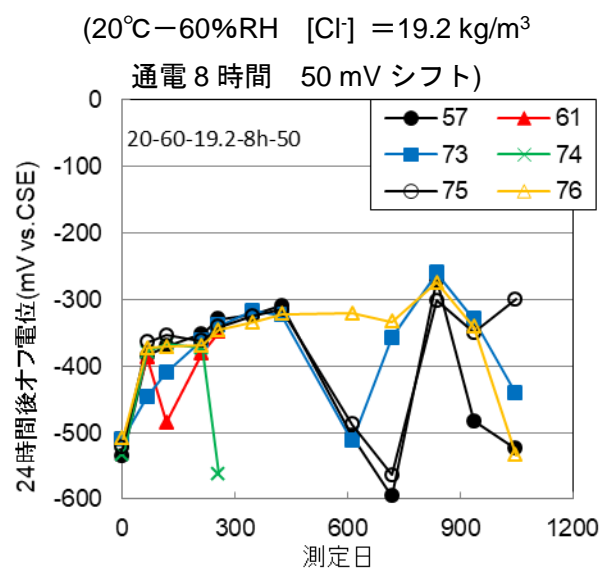


図-3.2.15 通電停止24時間後オフ電位の経時変化

(20°C-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³
通電8時間 100 mV シフト)

(20°C-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³
通電8時間 50 mV シフト)

(5) 外観観察

本環境における全ての供試体で、内部鋼材の腐食に起因すると考えられるひび割れ等の変状は確認されなかった。

(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度

図-3.2.16の a), b)には、通電開始から 256 日後および 1048 日後に解体した供試体の腐食減量率を示す。なお、腐食減量率は、通電開始直前に測定した腐食減量を差し引いているため、通電開始からの腐食減量として評価することができる。通電開始 256 日後までは、通電および無通電に関係なく腐食が確認されなかったが、通電から 1048 日後の解体では、腐食が確認された。そこで、図-3.2.17の a), b)には、腐食減量からファラデー式を用いて算出した平均腐食電流密度を示す。この結果、腐食の確認された通電開始 1048 日後における平均腐食電流密度は、100 mV シフトで $0.3 \sim 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、50 mV シフトで $0.4 \sim 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、無通電で $0.1 \sim 0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であった。したがって、本結果からは、間欠通電による優位性があるとは言えない。

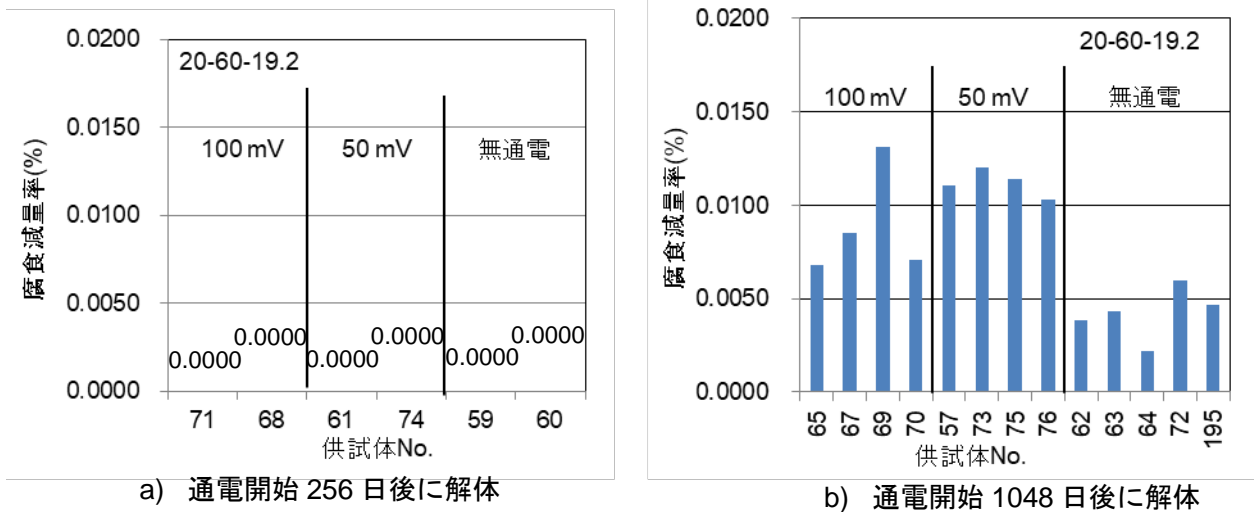


図-3.2.16 腐食減量率 (20°C-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 通電 8 時間)

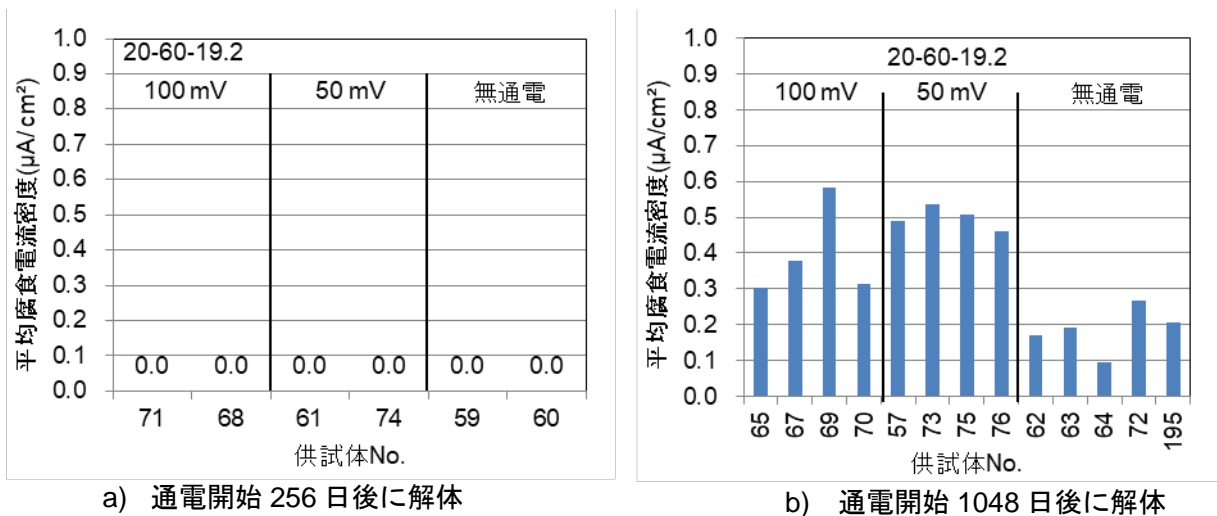


図-3.2.17 平均腐食電流密度 (20°C-60%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 通電 8 時間)

(7) 分極曲線

図-3.2.18～3.2.23には、それぞれ目標シフト量 100, 50mV および無通電供試体の通電開始直前と通電 256 日後と 1048 日後に測定したカソード分極曲線を示す。なお、図中凡例は、例えば、「68-解体時」の時、供試体 No.68 の解体時の意味を持つ。

通電後のカソード分極曲線は、通電 1048 日後の結果で一部の供試体において低電流密度領域で差が確認されるが、高電流密度領域ではほぼ同様のカソード曲線を描いていた。また、無通電供試体ともほぼ同様の曲線を描いており、本結果からは通電による優位性は確認できなかった。

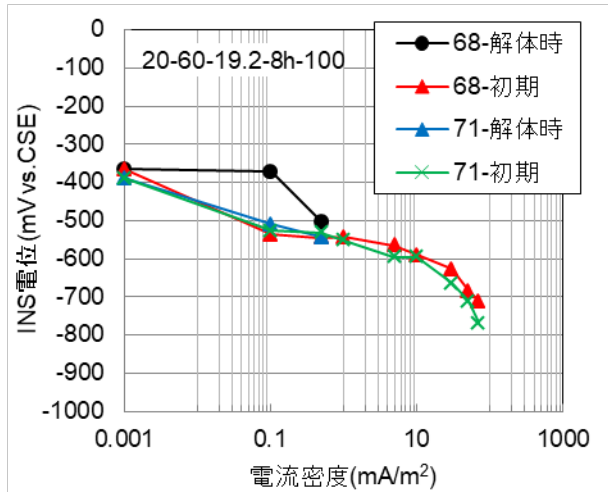


図-3.2.18 カソード分極曲線

(通電 256 日後 20°C-60%RH

[Cl]=19.2 kg/m³ 通電 8 時間 100 mV シフト)

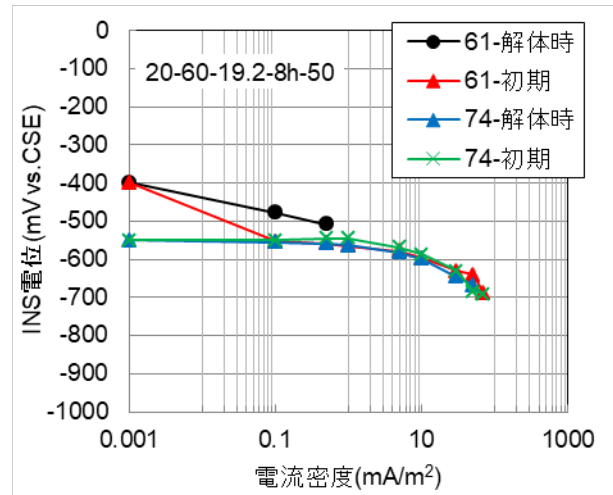


図-3.2.19 カソード分極曲線

(通電 256 日後 20°C-60%RH

[Cl]=19.2 kg/m³ 通電 8 時間 50 mV シフト)

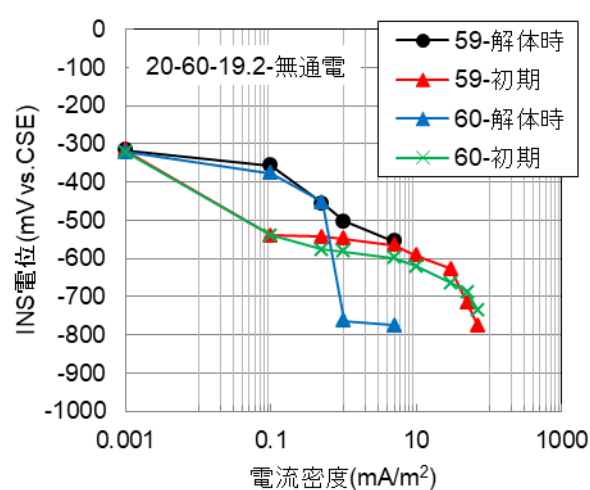


図-3.2.20 カソード分極曲線

(通電 256 日後 20°C-60%RH

[Cl]=19.2 kg/m³ 無通電)

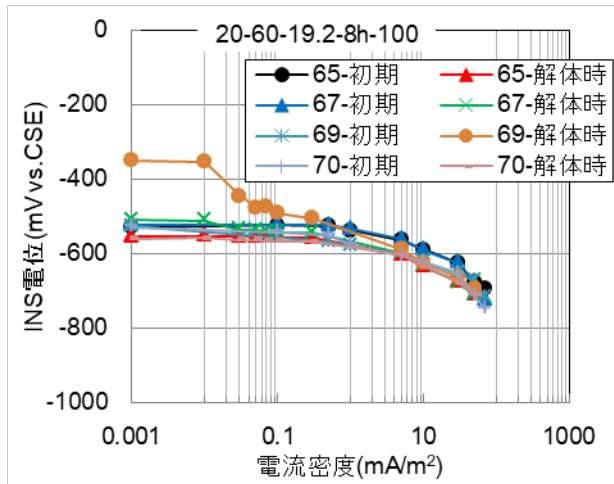


図-3.2.21 カソード分極曲線

(通電 1048 日後 20°C-60%RH

[Cl]=19.2 kg/m³ 通電 8 時間 100 mV シフト)

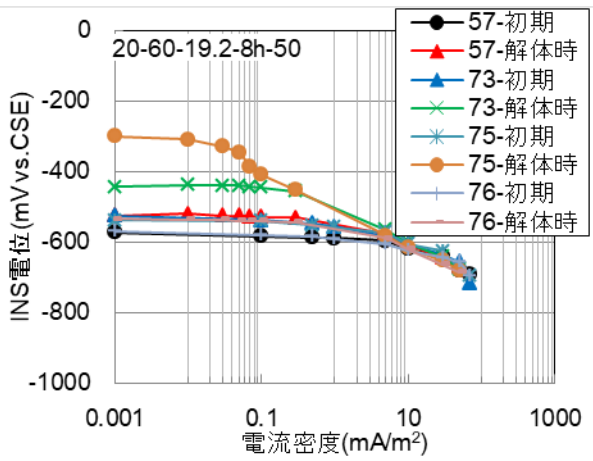


図-3.2.22 カソード分極曲線
 (通電 1048 日後 20°C-60%RH
 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 通電 8 時間 50 mV シフト)

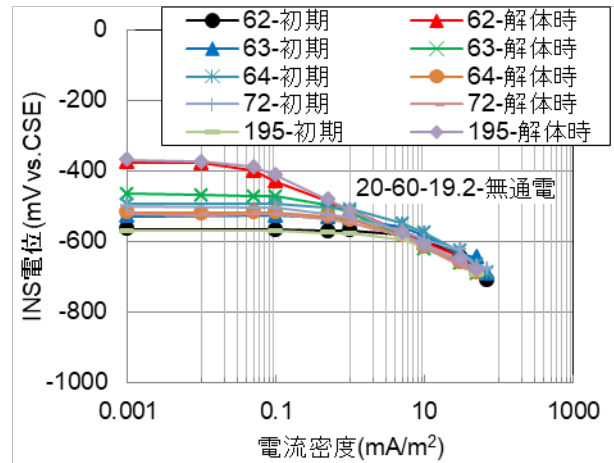


図-3.2.23 カソード分極曲線
 (通電 1048 日後 20°C-60%RH
 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 無通電)

3.3 試験室温 20℃, 相対湿度 90%の試験結果 (間欠通電)

(1) 無通電供試体の自然電位

[Cl⁻]=19.2kg/m³の無通電供試体について、自然電位の経時変化を図-3.3.1 に示す。暴露開始前の自然電位はいずれの供試体も-550mVvs.CSE 程度であったが、暴露日数の経過に伴い多少のばらつきがみられた。暴露終了時には-250mVvs.CSE から-400mVvs.CSE となり、いずれの供試体も暴露開始前に比べて貴化した。ASTM の判定基準によると、暴露開始前は「90%以上の確率で腐食あり」であり、暴露終了時は「不確定」、または「90%以上の確率で腐食あり」である。これらより、[Cl⁻]=19.2kg/m³の無通電供試体は腐食状態にあると考えられた。

次に、[Cl⁻]=3.8kg/m³の無通電供試体について、自然電位の経時変化を図-3.3.2 に示す。暴露開始前の自然電位はいずれの供試体も-300mVvs.CSE 程度であったが、暴露日数の経過に伴い No.6, No.7 と No.8 は異なる挙動を示した。暴露終了時の自然電位は、No.6 と No.7 は-200mVvs.CSE 程度、No.8 は-250mVvs.CSE 程度となり、いずれの供試体もわずかに貴化した。ASTM の判定基準によると、暴露開始前、暴露終了時のいずれも「不確定」であった。

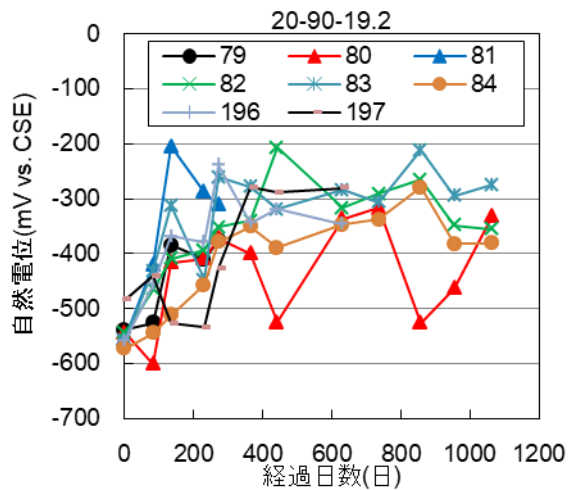


図-3.3.1 自然電位の経時変化
(20℃-90% [Cl⁻]=19.2kg/m³)

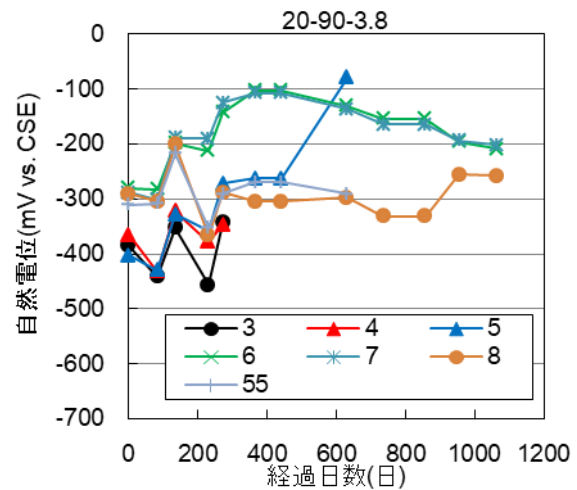


図-3.3.2 自然電位の経時変化
(20℃-90% [Cl⁻]=3.8kg/m³)

(2) 防食電流密度

防食電流密度の経時変化を図-3.3.3と図-3.3.4に示す。 $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ と $[Cl^-]=3.8\text{kg/m}^3$ とを比較すると、暴露開始時に必要であった防食電流密度は $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ のほうが大きかった。また、 $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ は暴露日数の経過とともに防食電流密度が小さくなった。一方、 $[Cl^-]=3.8\text{kg/m}^3$ は目標復極量100mVの供試体については、暴露日数の経過とともに防食電流密度は小さくなったが、目標復極量50mVの供試体については、防食電流密度の大小が供試体ごとにばらつきがみられた。

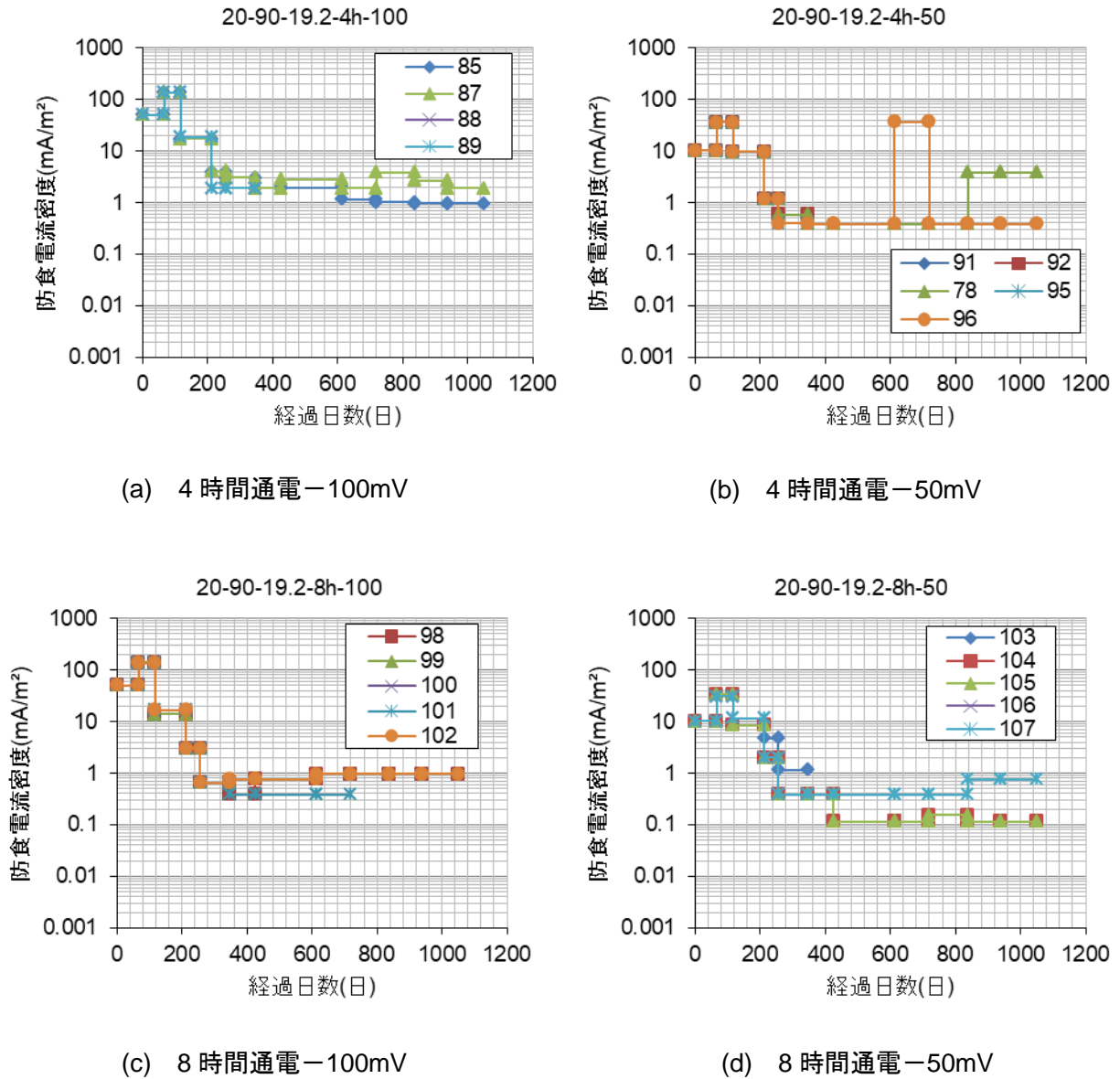
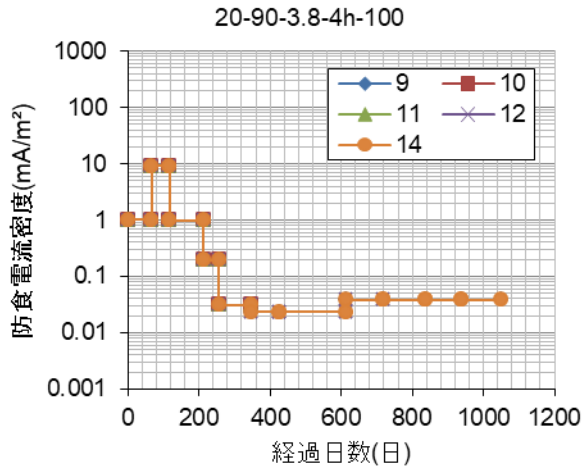
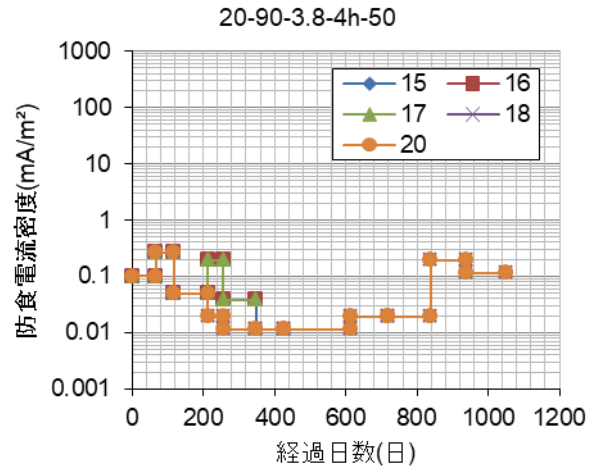


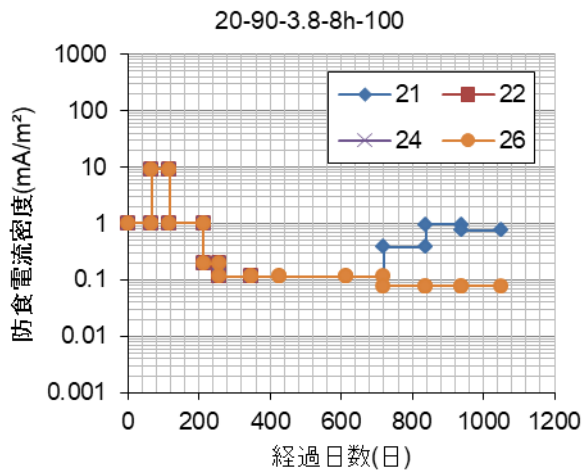
図-3.3.3 防食電流密度の経時変化
($20^{\circ}\text{C}-90\%$ $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$)



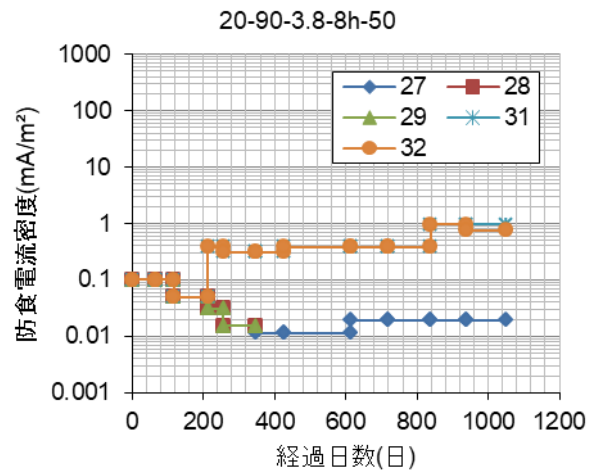
(a) 4時間通電-100mV



(b) 4時間通電-50mV



(c) 8時間通電-100mV



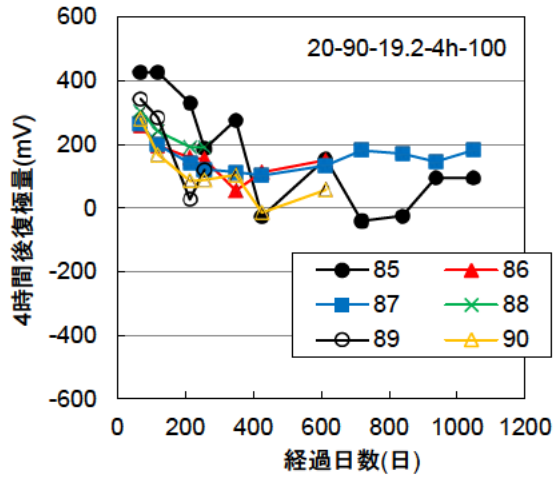
(d) 8時間通電-50mV

図-3.3.4 防食電流密度の経時変化
(20°C-90% [Cl]=3.8kg/m³)

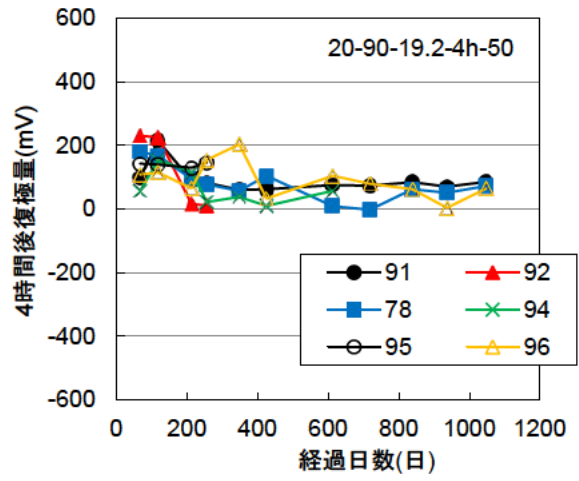
(3) 復極量

4 時間後の復極量の経時変化を図-3.3.5 と図-3.3.6 に、4 時間後復極量の平均値を図-3.3.7 に、24 時間後の復極量の経時変化を図-3.3.8 と図-3.3.9 に、24 時間後復極量の平均値を図-3.3.10 にそれぞれ示す。 $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ については目標復極量を概ね満足する結果であったが、 $[Cl^-]=3.8\text{kg/m}^3$ については、目標復極量を下回る供試体もみられた。この要因として、分極特性の異なる供試体を複数個、同一回路で通電していたことが考えられ、目標復極量に調整することが困難であった。

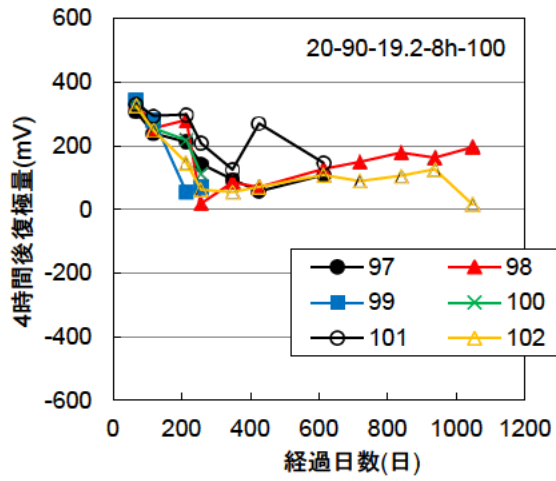
次に、4 時間後復極量と 24 時間後復極量との差の経時変化を図-3.3.11 と図-3.3.12 に示す。 $[Cl^-]=3.8\text{kg/m}^3$ については 4 時間後復極量と 24 時間後復極量との差がプラス方向の傾向を示したが、 $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ についてはマイナス方向の傾向を示した。つまり、 $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ は通電停止 4 時間後と比較して、24 時間後は鋼材電位が低いことを示しており、腐食状態に移行している可能性があることを示す結果であった。また、この現象は通電時間や目標復極量に関わらず確認された。



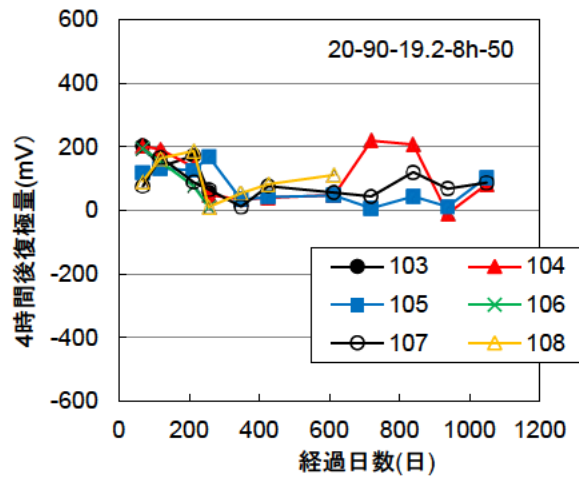
(a) 4 時間通電 - 100mV



(b) 4 時間通電 - 50mV

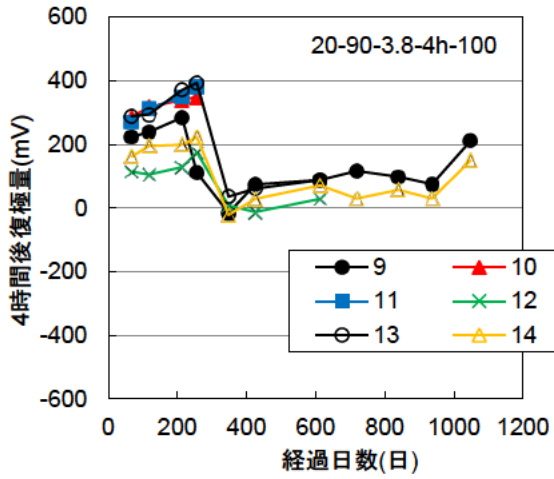


(c) 8 時間通電 - 100mV

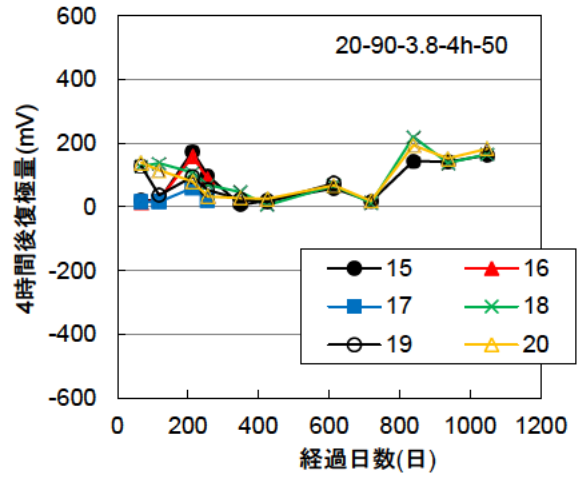


(d) 8 時間通電 - 50mV

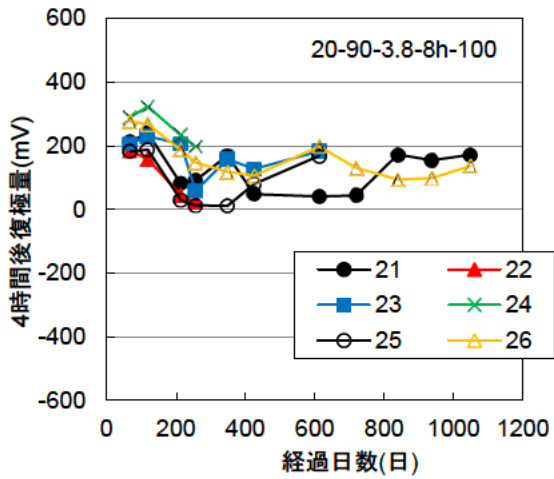
図-3.3.5 4 時間後復極量の経時変化
(20°C-90% [Cl]=19.2kg/m³)



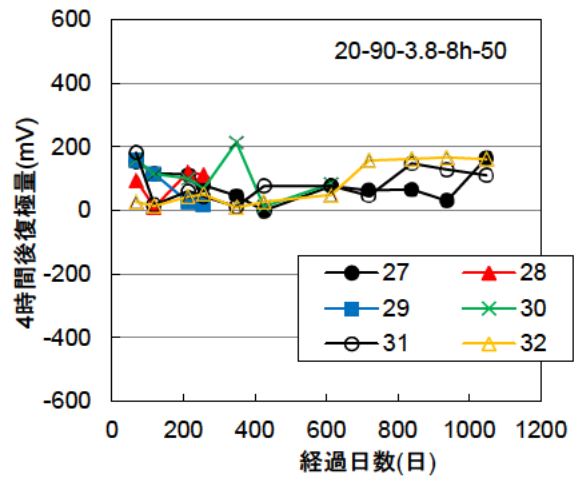
(a) 4 時間通電 - 100mV



(b) 4 時間通電 - 50mV

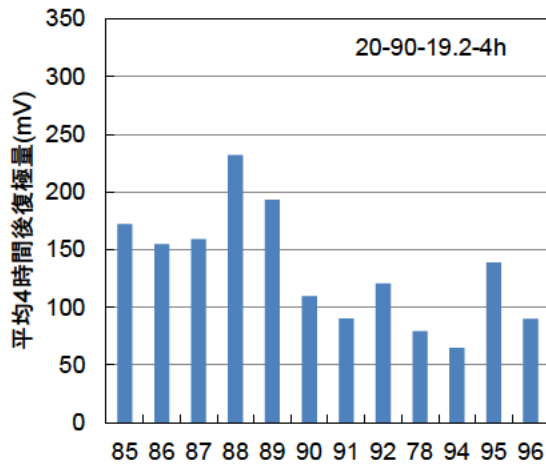


(c) 8 時間通電 - 100mV

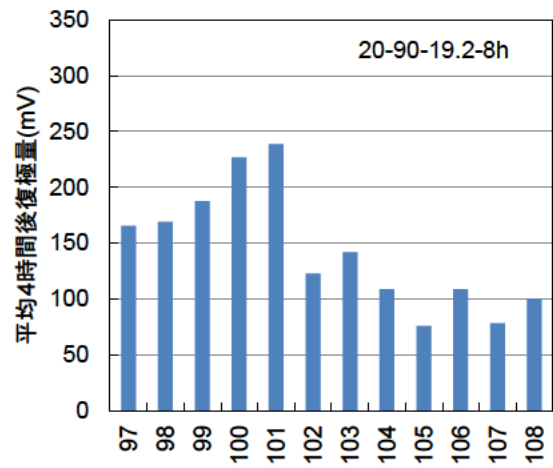


(d) 8 時間通電 - 50mV

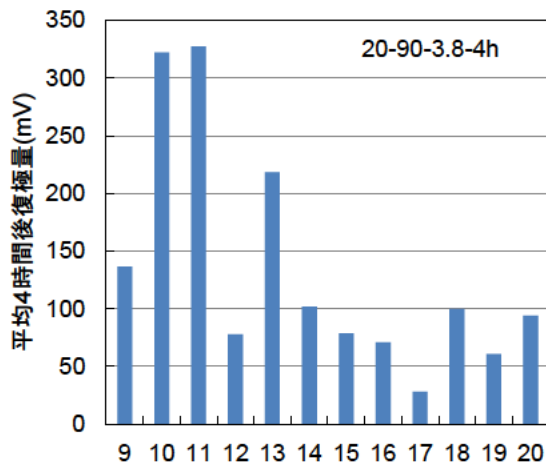
図-3.3.6 4 時間後復極量の経時変化
(20°C-90% [Cl]=3.8kg/m³)



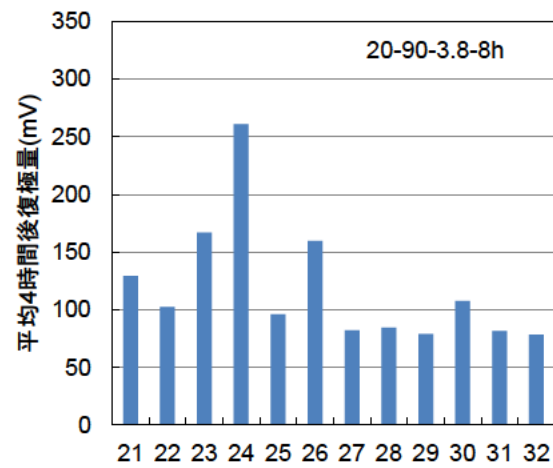
(a) [Cl⁻]=19.2kg/m³ 4 時間通電



(b) [Cl⁻]=19.2kg/m³ 8 時間通電

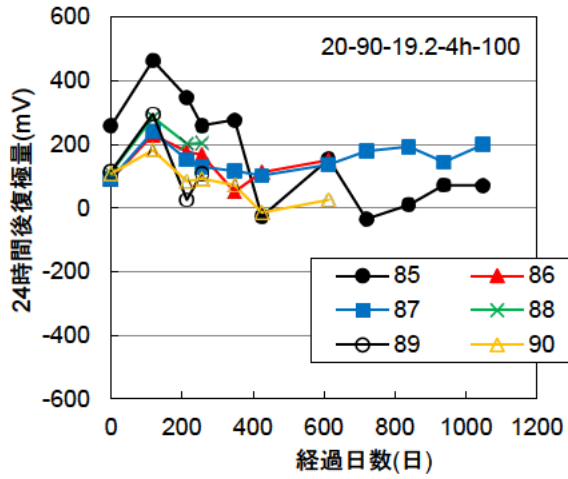


(c) [Cl⁻]=3.8kg/m³ 4 時間通電

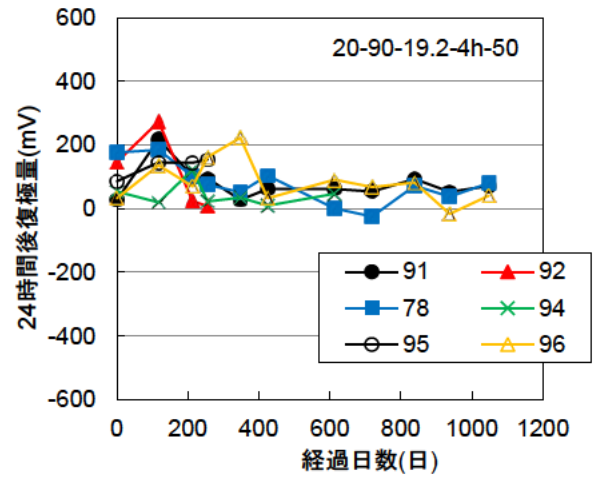


(d) [Cl⁻]=3.8kg/m³ 8 時間通電

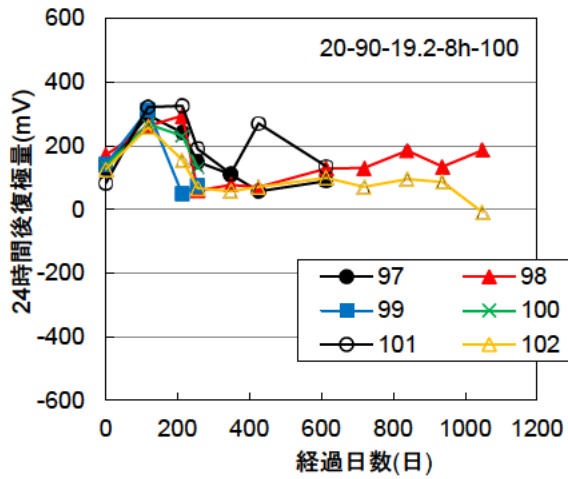
図-3.3.7 4 時間後復極量の平均値 (20℃-90%)



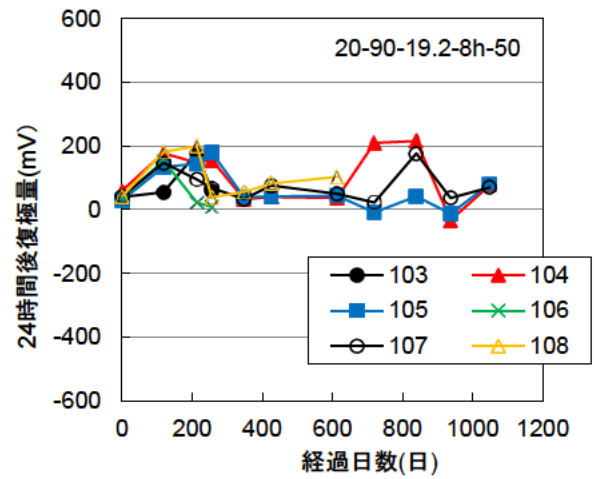
(a) 4 時間通電-100mV



(b) 4 時間通電-50mV

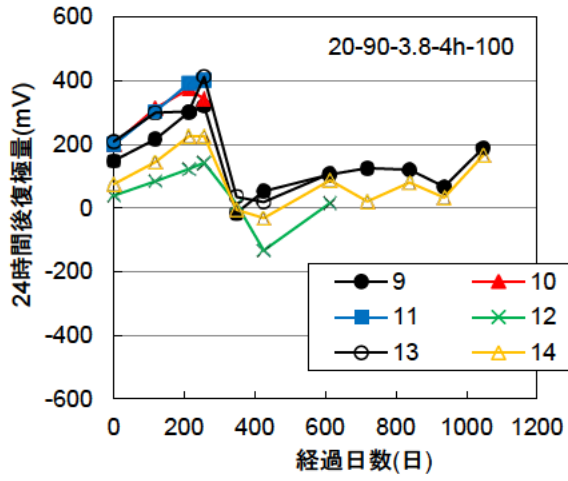


(c) 8 時間通電-100mV

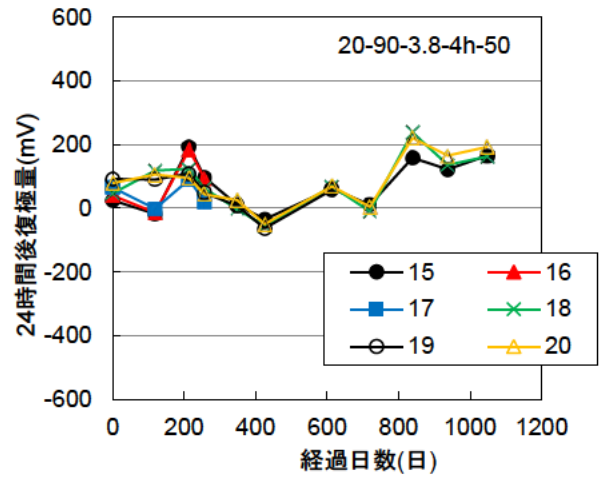


(d) 8 時間通電-50mV

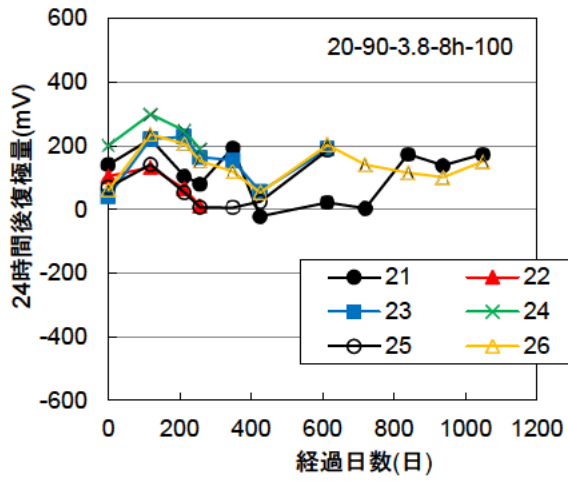
図-3.3.8 24 時間後復極量の経時変化
(20°C-90% [Cl]=19.2kg/m³)



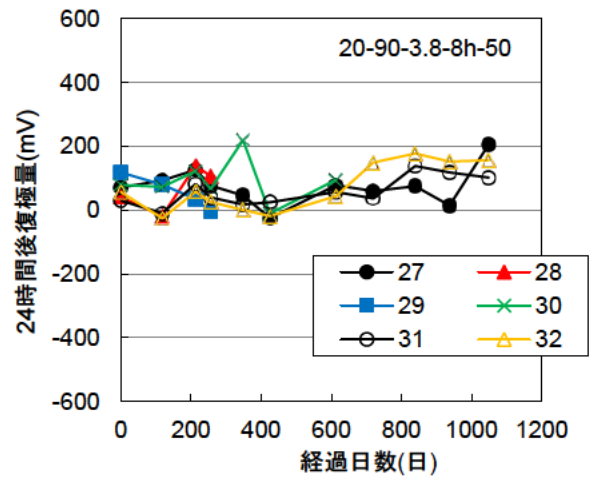
(a) 4時間通電-100mV



(b) 4時間通電-50mV

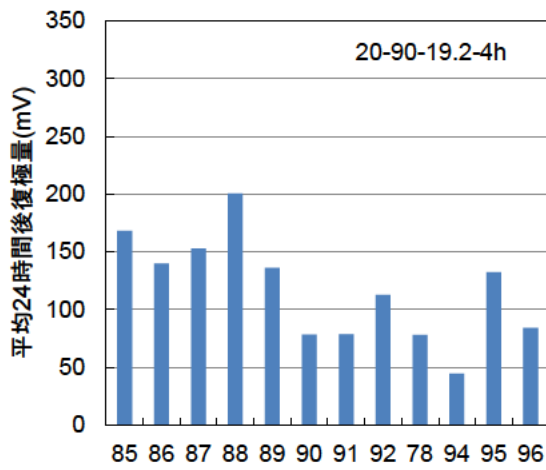


(c) 8時間通電-100mV

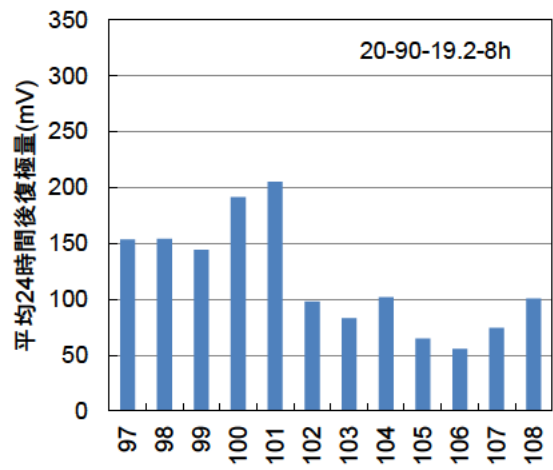


(d) 8時間通電-50mV

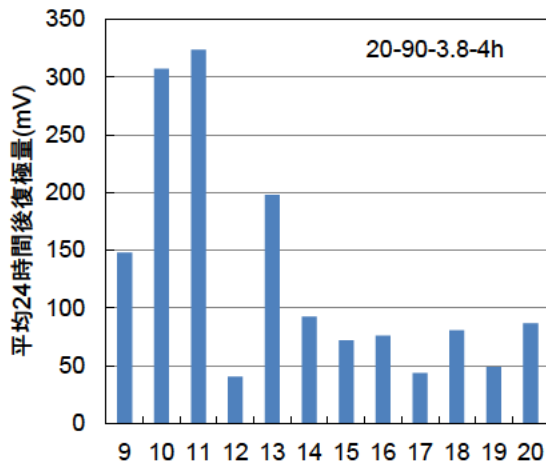
図-3.3.9 24時間後復極量の経時変化
(20°C-90% [Cl⁻]=3.8kg/m³)



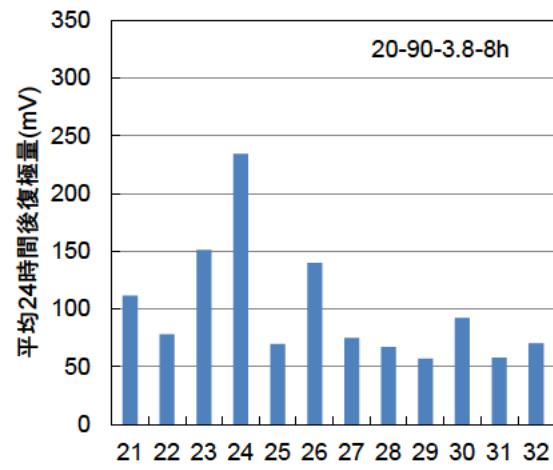
(a) [Cl⁻]=19.2kg/m³ 4 時間通電



(b) [Cl⁻]=19.2kg/m³ 8 時間通電

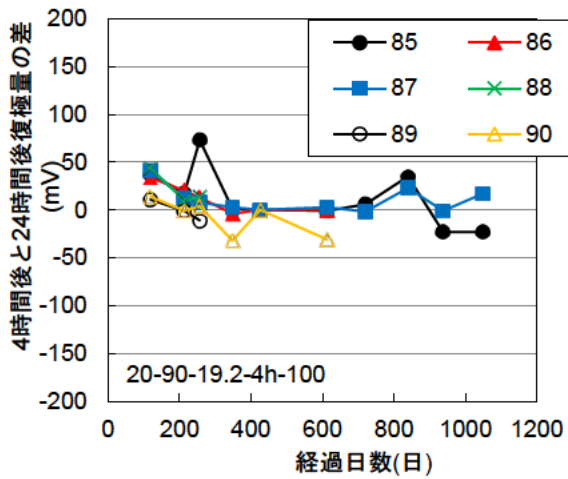


(c) [Cl⁻]=3.8kg/m³ 4 時間通電

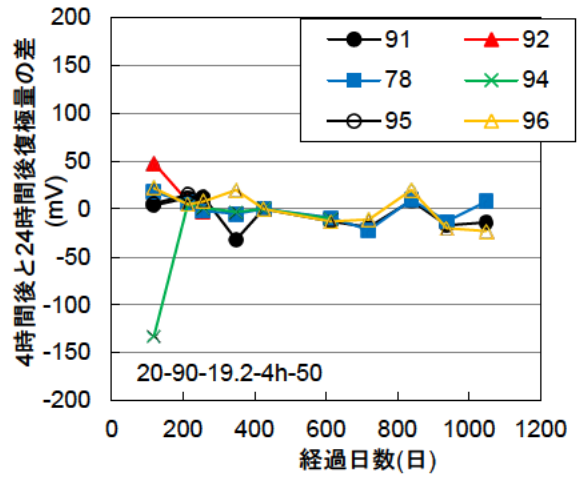


(d) [Cl⁻]=3.8kg/m³ 8 時間通電

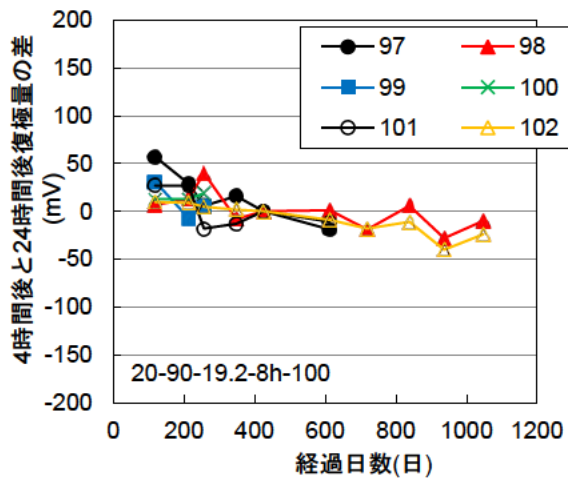
図-3.3.10 24 時間後復極量の平均値 (20°C—90%)



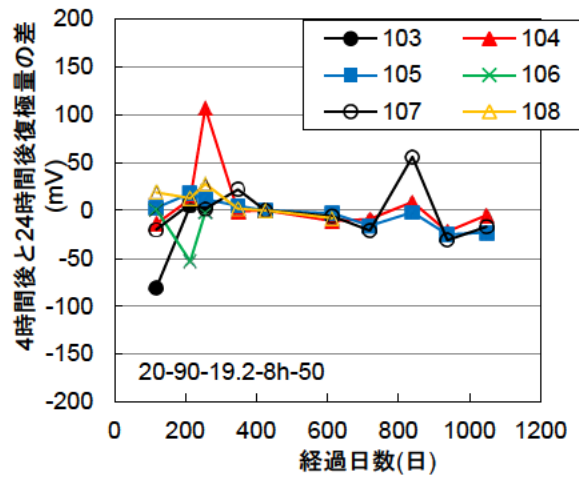
(a) 4時間充電-100mV



(b) 4時間充電-50mV

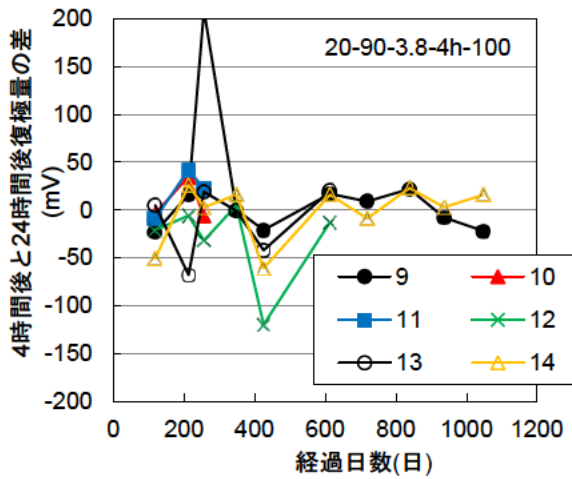


(c) 8時間充電-100mV

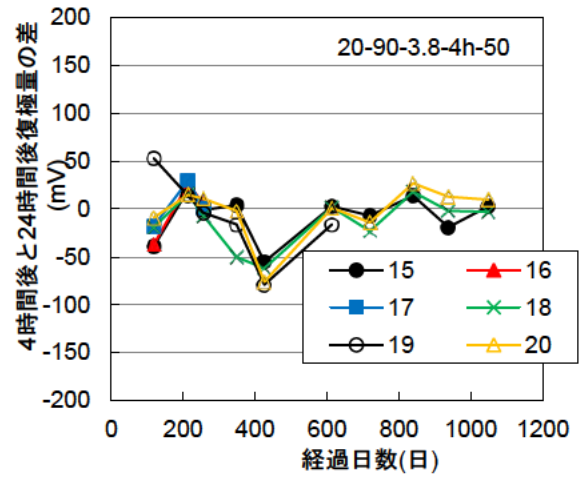


(d) 8時間充電-50mV

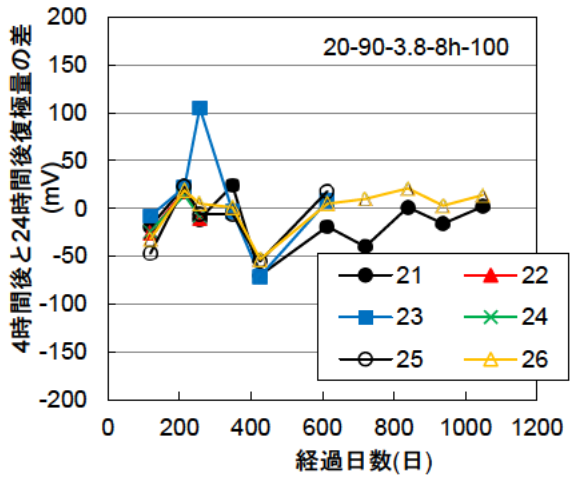
図-3.3.11 4時間後復極量と24時間後復極量との差の経時変化
(20°C-90% [Cl]=19.2kg/m³)



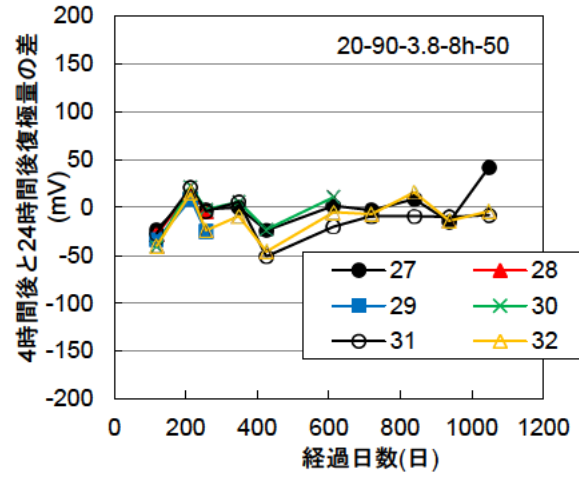
(a) 4時間通電-100mV



(b) 4時間通電-50mV



(c) 8時間通電-100mV



(d) 8時間通電-50mV

図-3.3.12 4時間後復極量と24時間後復極量との差の経時変化
(20°C-90% [Cl]=3.8kg/m³)

(4) 通電停止後のオフ電位の変化

通電停止後の4時間後のオフ電位の経時変化を図-3.3.13と図-3.3.14に、24時間後のオフ電位の経時変化を図-3.3.15と図-3.3.16にそれぞれ示す。[Cl]=19.2kg/m³について、暴露開始前と比較して暴露終了時の24時間後オフ電位は、同程度またはやや貴側の電位であったが、ASTMの判定基準では「90%以上の確率で腐食あり」に分類された。また、無通電供試体の暴露終了時の自然電位は-250mV vs.CSEから-400mV vs.CSEであり、通電時間や目標復極量によらず、いずれの通電供試体も24時間後のオフ電位は無通電供試体の自然電位と比較して同程度または卑側となり、通電による効果は小さかった。特に通電供試体のNo.78(通電時間4時間、目標復極量50mV)やNo.102(通電時間8時間、目標復極量100mV)は24時間後のオフ電位が-550mV vs.CSEであり、他の通電供試体と比較しても

卑な電位を示した。同じ通電条件であっても結果にばらつきがみられたことから、同一回路で複数個の供試体を通電したことの影響が伺えた。

次に、 $[Cl^-]=3.8\text{kg/m}^3$ について、暴露開始前と比較して暴露終了時の24時間後オフ電位は、同程度またはやや貴側の電位であり、ASTMの判定基準では「不確定」に分類された。また、無通電供試体の暴露終了時の自然電位は -200mV vs. CSE から -250mV vs. CSE であり、通電時間や目標復極量によらず、いずれの通電供試体も24時間後のオフ電位は無通電供試体の自然電位とほぼ同程度であった。

ここで、平均復極量とオフ電位の関係を図-3.3.17に示す。 $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ 、 $[Cl^-]=3.8\text{kg/m}^3$ ともに、通電時間の相違による効果に比べて、目標復極量の相違による効果のほうが大きいことが示唆された。つまり、目標復極量を 50mV とした通電供試体よりも 100mV とした供試体のほうが24時間後のオフ電位は貴の傾向であった。

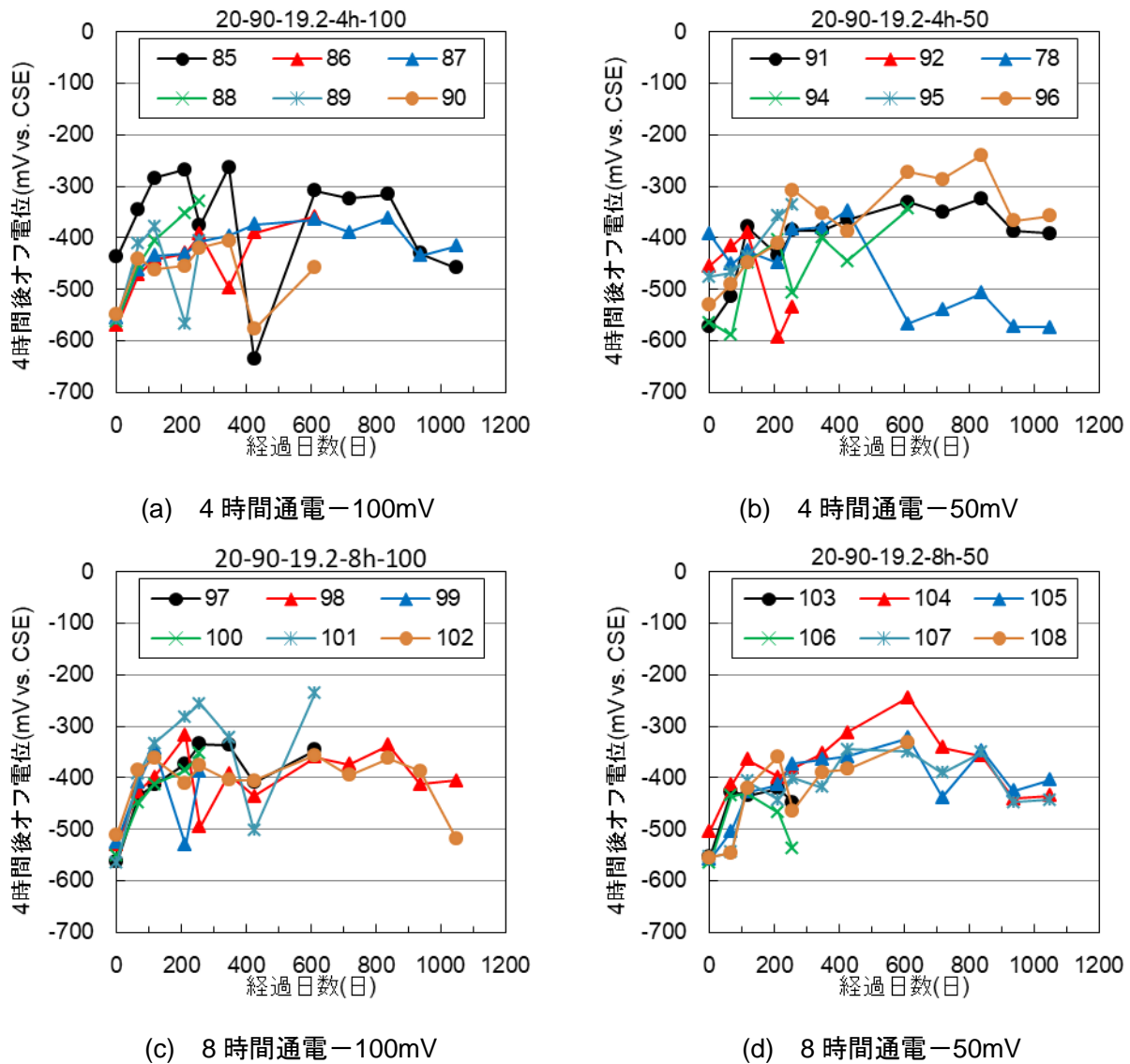
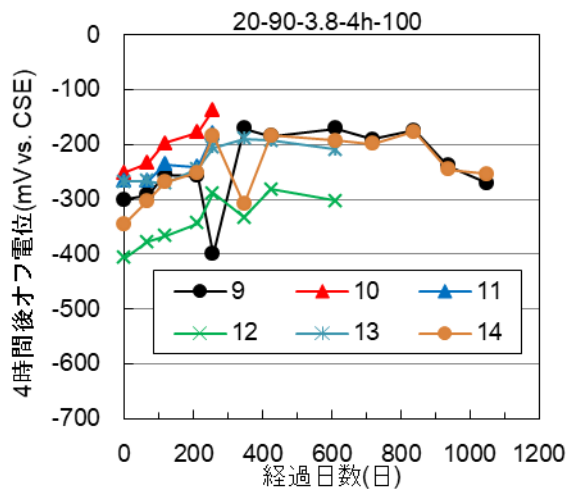
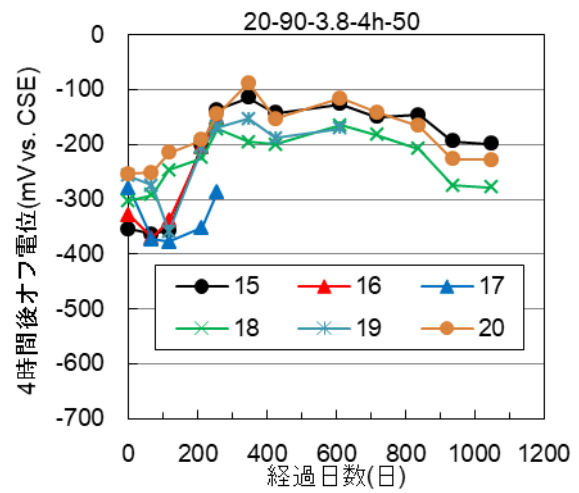


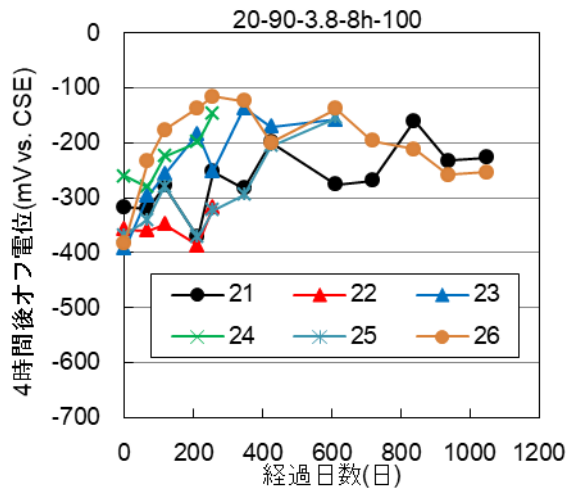
図-3.3.13 4時間後オフ電位の経時変化
($20^\circ\text{C}-90\%$ $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$)



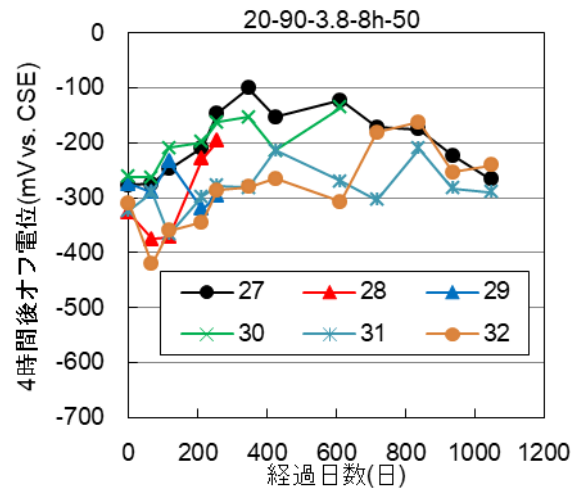
(a) 4 時間通電-100mV



(b) 4 時間通電-50mV



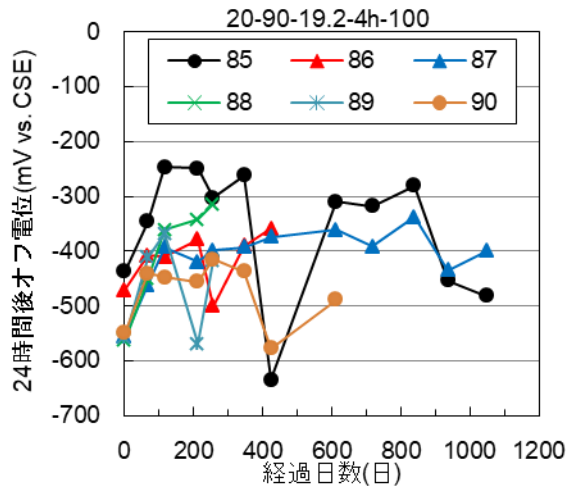
(c) 8 時間通電-100mV



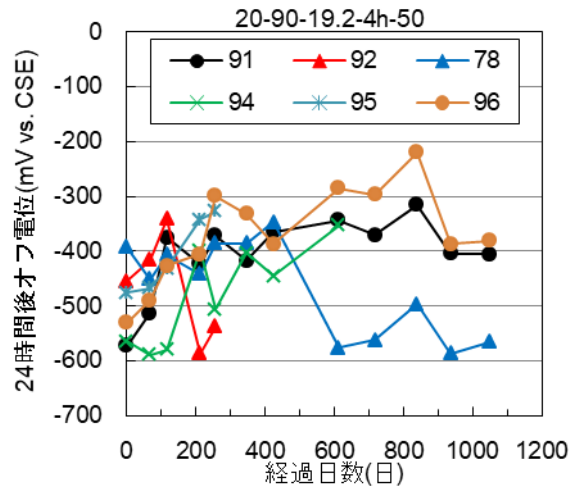
(d) 8 時間通電-50mV

図-3.3.14 4 時間後オフ電位の経時変化

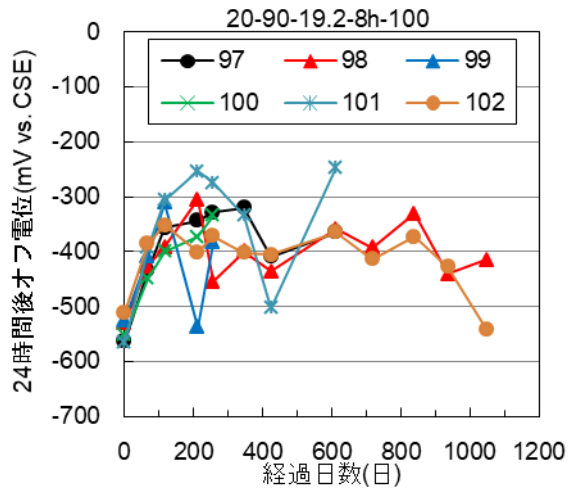
(20°C-90% [Cl]=3.8kg/m³)



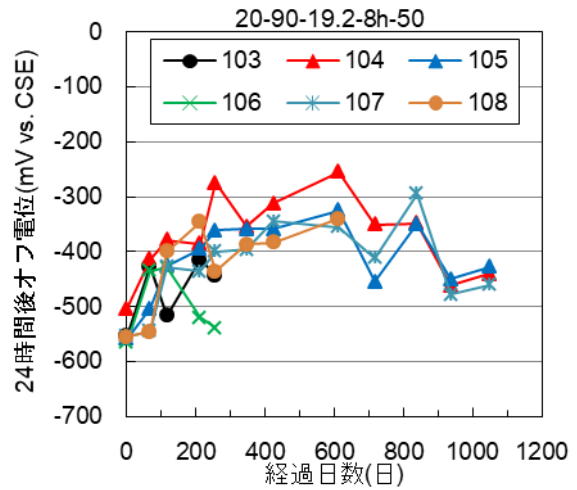
(a) 4 時間通電-100mV



(b) 4 時間通電-50mV

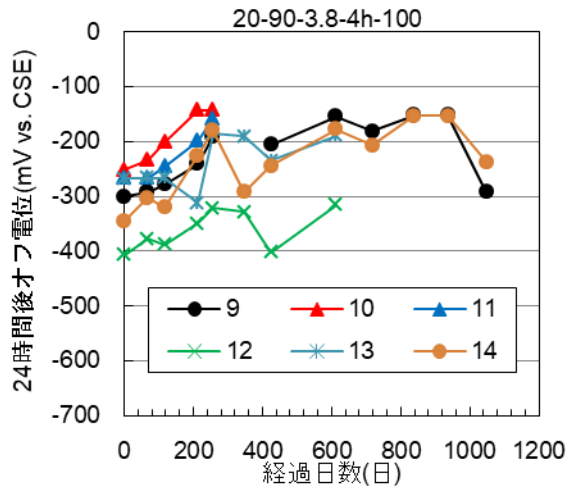


(c) 8 時間通電-100mV

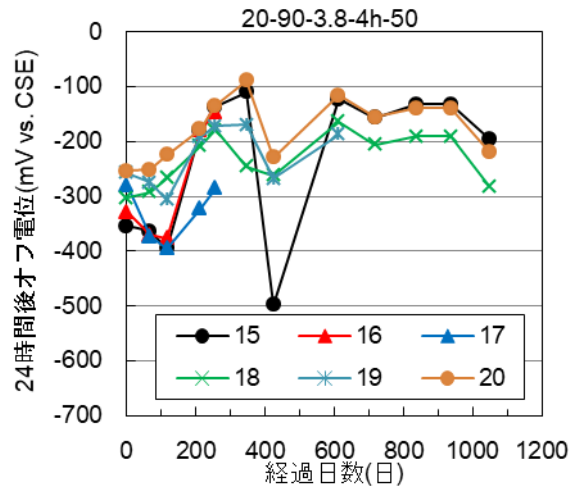


(d) 8 時間通電-50mV

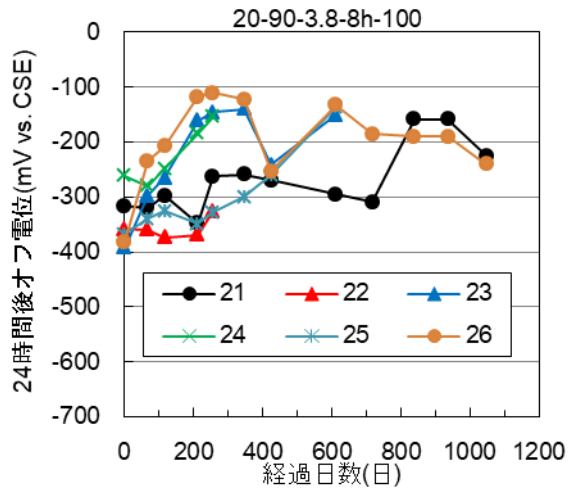
図-3.3.15 24 時間後オフ電位の経時変化
(20°C-90% [Cl⁻]=19.2kg/m³)



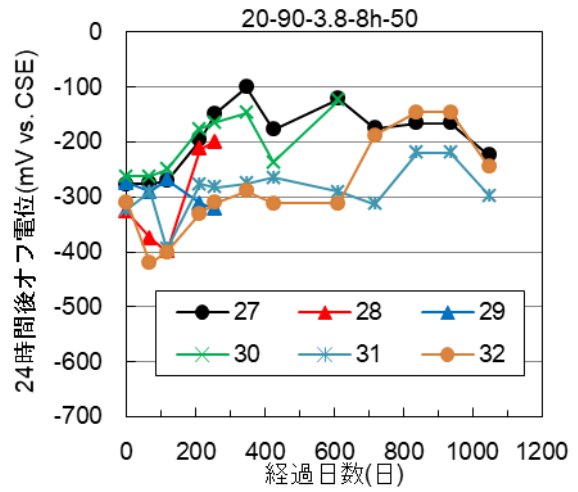
(a) 4 時間通電-100mV



(b) 4 時間通電-50mV

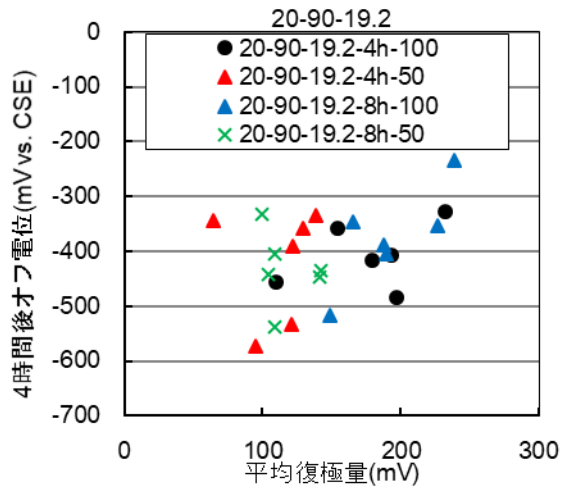


(c) 8 時間通電-100mV

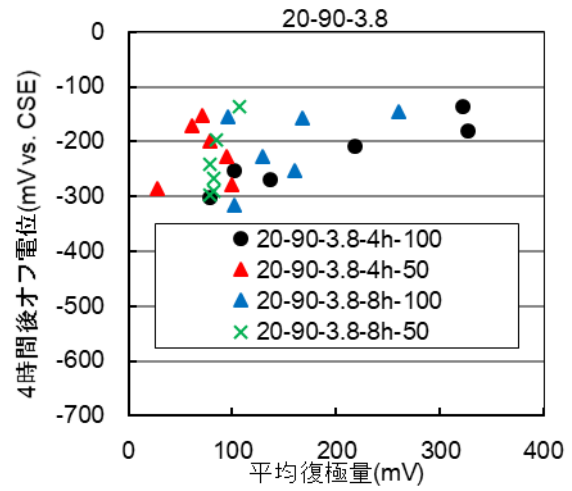


(d) 8 時間通電-50mV

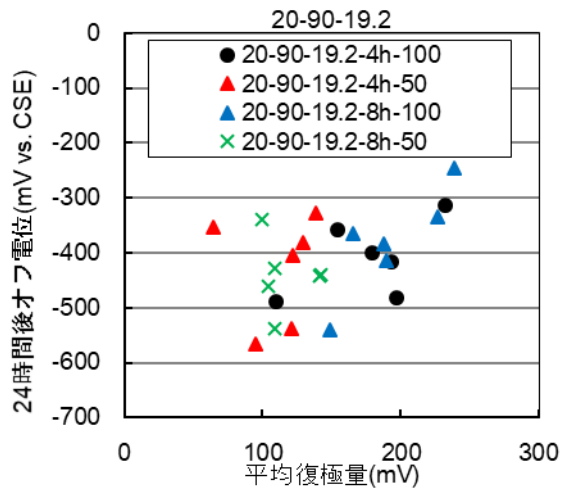
図-3.3.16 24 時間後オフ電位の経時変化
(20°C-90% [Cl⁻]=3.8kg/m³)



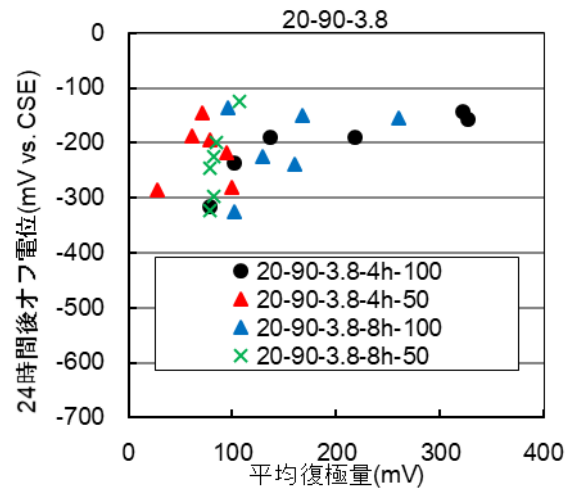
(a) 4 時間後オフ電位
[Cl]⁻=19.2kg/m³



(b) 4 時間後オフ電位
[Cl]⁻=3.8kg/m³



(c) 24 時間後オフ電位
[Cl]⁻=19.2kg/m³



(d) 24 時間後オフ電位
[Cl]⁻=3.8kg/m³

図-3.3.17 平均復極量とオフ電位 (20°C-90%)

(5) 外観観察

本環境では、無通電、通電供試体のいずれについても、鋼材の腐食に伴うひび割れは確認されなかった。

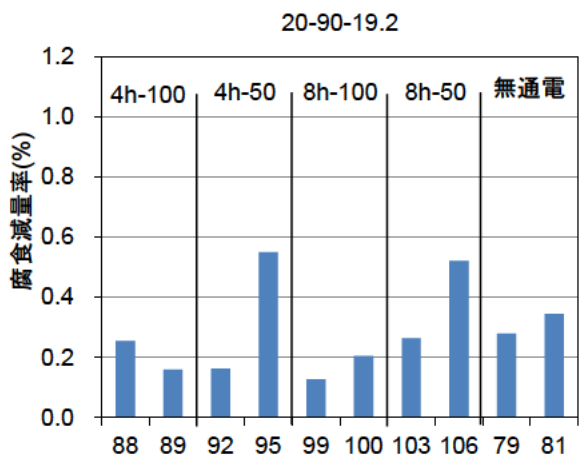
(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度

供試体の解体後に算出した鋼材の腐食減量率を図-3.3.18と図-3.3.19に示す。なお図中には通電開始から256日後における鋼材の腐食減量率と1048日後における鋼材の腐食減量率を合わせて示した。無通電供試体と通電供試体ともに通電開始から256日後に比べて、1048日後の鋼材の腐食減量率は増加した。[Cl⁻]=19.2kg/m³の通電供試体については、通電時間が長く、目標復極量が大きいほど腐食減量率は小さくなった。また、無通電供試体の平均腐食減量率が0.39%であったのに対して、通電時間8時間かつ目標復極量100mVのシリーズの平均腐食減量率は0.31%と小さく、通電時間8時間かつ目標復極量50mVのシリーズの平均腐食減量率は0.40%と同程度であった。一方、通電時間4時間の供試体は目標復極量によらず無通電供試体よりも腐食減量率は大きくなった。

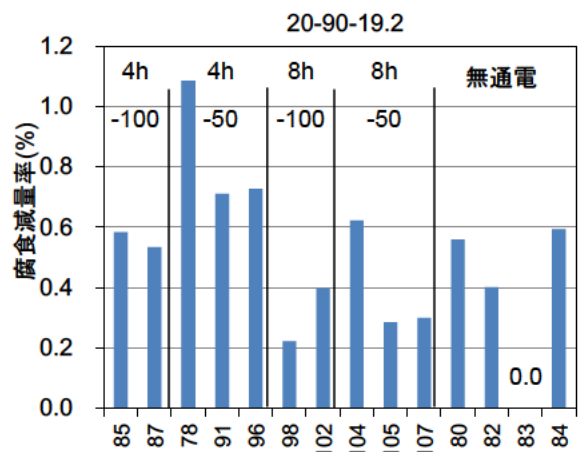
[Cl⁻]=3.8kg/m³の通電供試体については、通電時間や目標復極量の違いによる腐食減量率の差異はみられなかった。しかしながら、無通電供試体と比較すると、通電時間4時間かつ目標復極量50mVのシリーズが同程度の腐食減量率であり、その他の通電供試体は腐食減量率が小さくなった。

ここで、腐食減量からファラデー式を用いて算出した平均腐食電流密度を図-3.3.20と図-3.3.21に示す。無通電供試体の通電開始から256日後と1048日後の平均腐食電流密度を比較すると、[Cl⁻]=19.2kg/m³は0.80μA/cm²から0.10μA/cm²に、[Cl⁻]=3.8kg/m³は0.73μA/cm²から0.32μA/cm²にそれぞれ減少した。この要因として、暴露日数の増加に伴ってセメントの水和反応により鋼材周辺的环境が改善されたことによると考えられた。この傾向は通電供試体についても確認された。なお、CEB基準によると、通電開始から1048日後の無通電供試体については、[Cl⁻]=19.2kg/m³は腐食速度が不活性となり、[Cl⁻]=3.8kg/m³は低～中速の腐食速度となる。

次に、通電供試体と無通電供試体を比較すると、[Cl⁻]=19.2kg/m³は通電時間4時間かつ目標復極量50mVが0.22μA/cm²であり、CEB基準では低～中速の腐食速度となるため、無通電供試体よりも腐食速度が大きい結果となった。これに対して、他の通電条件のシリーズは0.20μA/cm²以下のためCEB基準では不活性の腐食速度であり、無通電供試体と同程度の腐食速度であった。[Cl⁻]=3.8kg/m³はいずれのシリーズも0.20μA/cm²から0.30μA/cm²の範囲であるため、CEB基準では低～中速の腐食速度となり、無通電供試体と同程度の腐食速度の範囲であった。しかしながら、平均腐食電流密度を比較すると、無通電供試体よりも通電供試体のほうが若干小さかった。

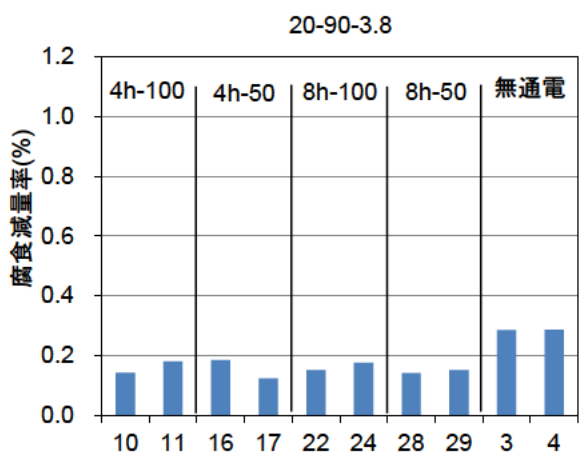


(a) 通電開始 256 日後に解体

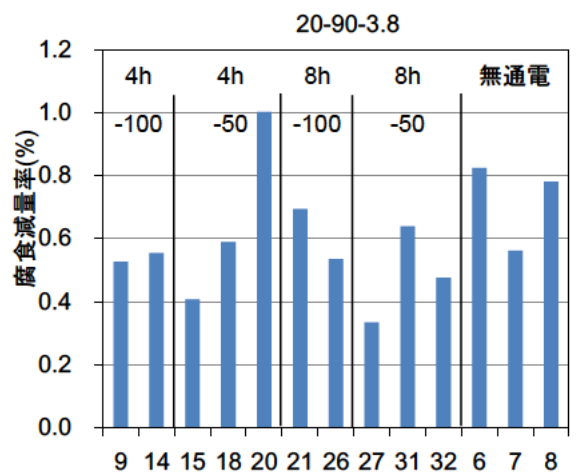


(b) 通電開始 1048 日後に解体

図-3.3.18 腐食減量率 (20°C-90% [Cl]=19.2kg/m³)

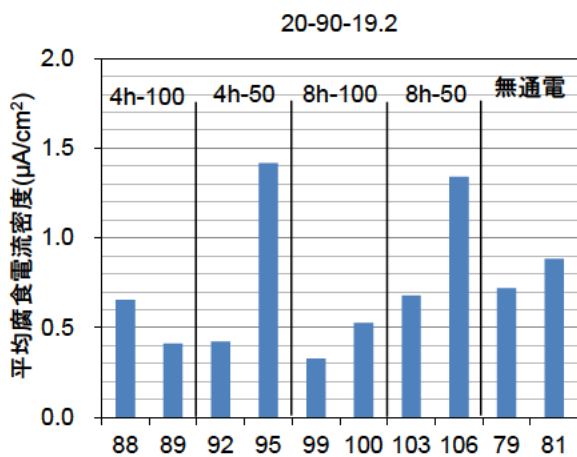


(a) 通電開始 256 日後に解体

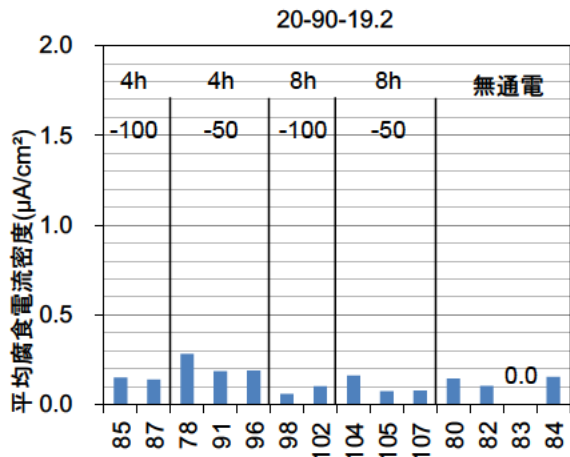


(b) 通電開始 1048 日後に解体

図-3.3.19 腐食減量率 (20°C-90% [Cl]=3.8kg/m³)

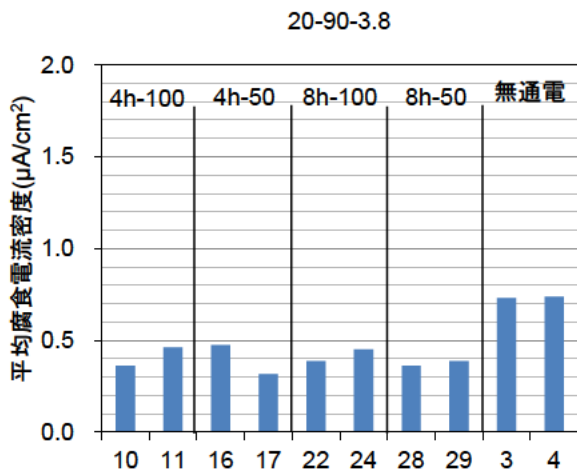


(a) 通電開始 256 日後に解体

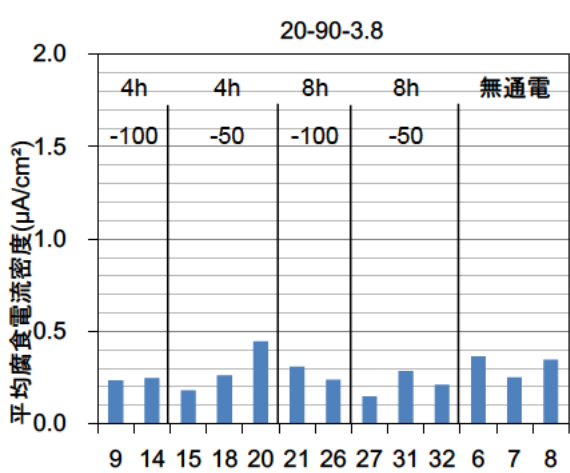


(b) 通電開始 1048 日後に解体

図-3.3.20 平均腐食電流密度 (20°C-90% [Cl]=19.2kg/m³)



(a) 通電開始 256 日後に解体

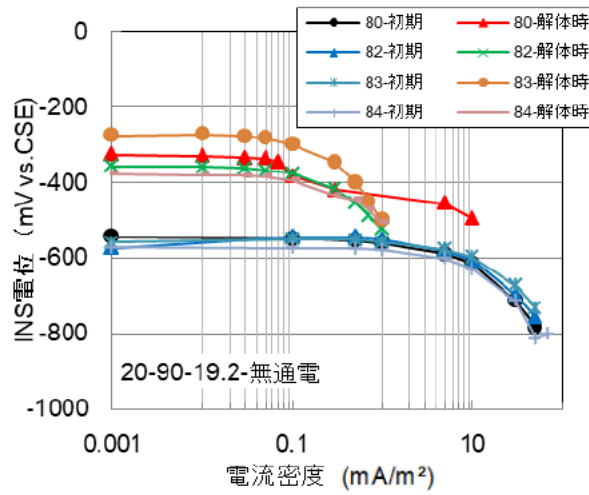


(b) 通電開始 1048 日後に解体

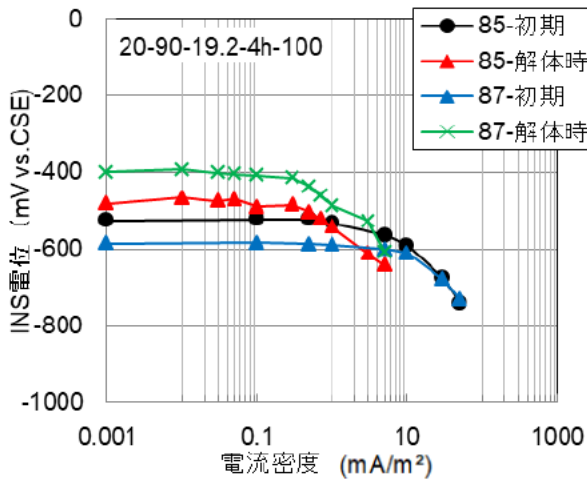
図-3.3.21 平均腐食電流密度 (20°C-90% [Cl]=3.8kg/m³)

(7) 分極曲線

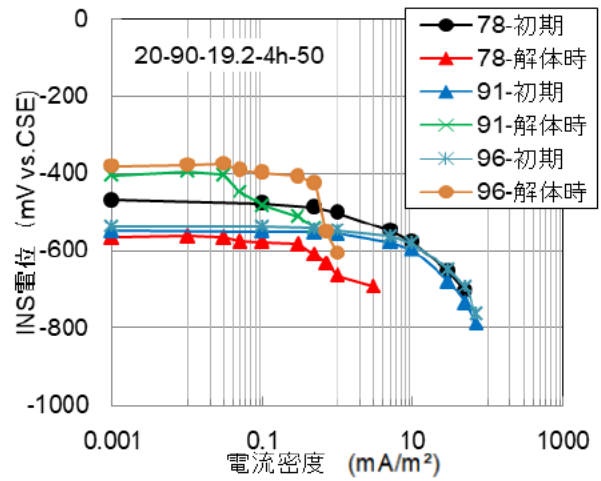
通電開始前と供試体解体時のカソード分極曲線を図-3.3.22 と図-3.3.23 に示す。通電の有無にかかわらず、ほとんどの供試体は通電開始前に比べて、供試体解体時の鋼材の電位が貴化している。また、通電開始前に比べて、供試体解体時のカソード分極曲線より小さな電流密度で大きく分極することが確認された。これはセメントの水和反応や通電により、鋼材周囲の環境や鋼材表面の状態が改善されたためと考えられた。



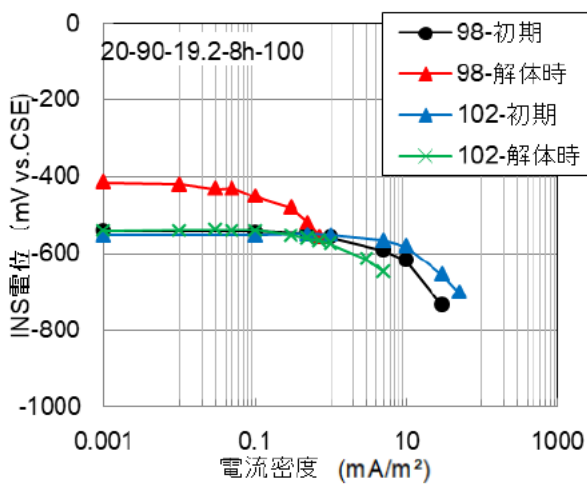
(a) 無通電供試体



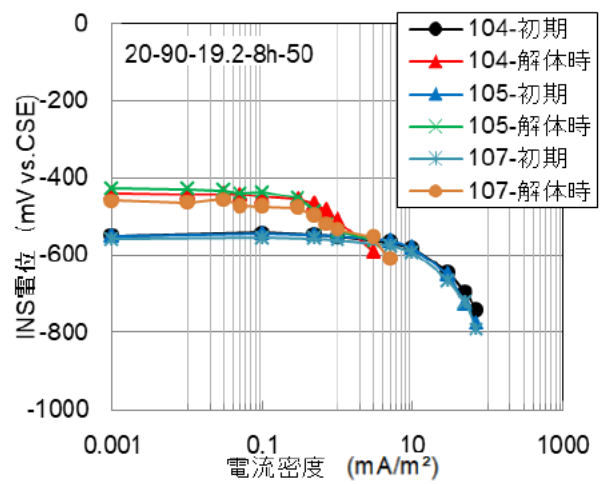
(b) 4時間通電-100mV



(c) 4時間通電-50mV

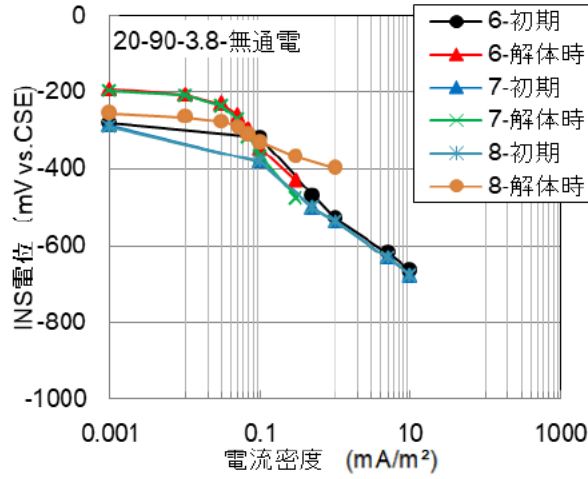


(d) 8時間通電-100mV

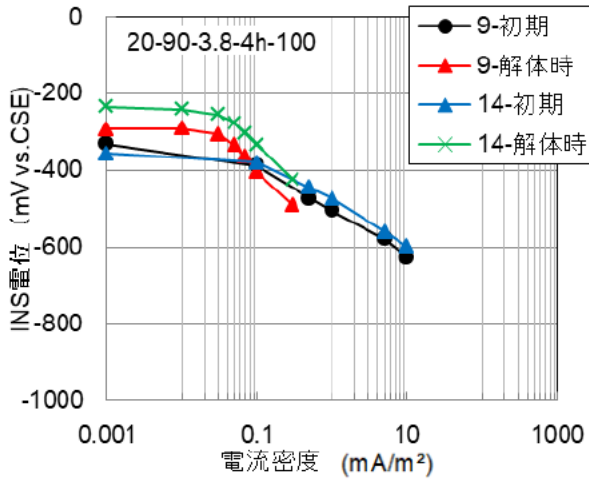


(e) 8時間通電-50mV

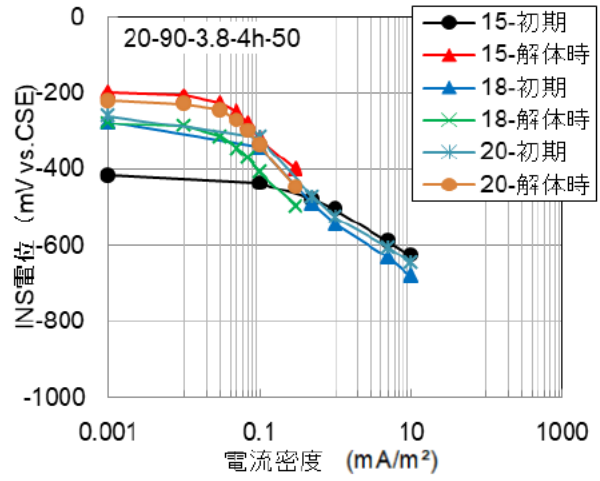
図-3.3.22 カソード分極曲線 (20°C-90% [Cl]=19.2kg/m³)



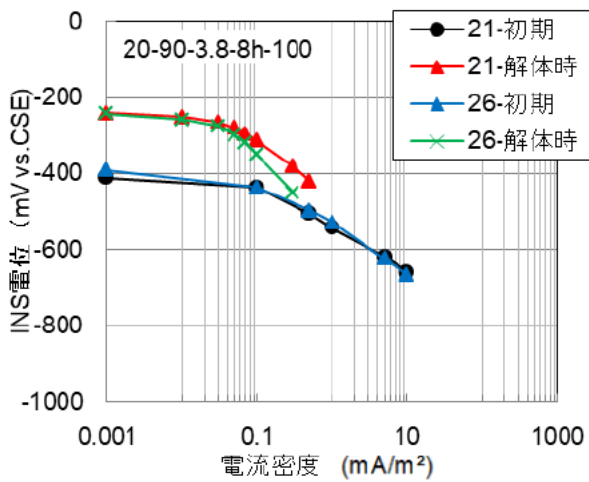
(a) 無通電供試体



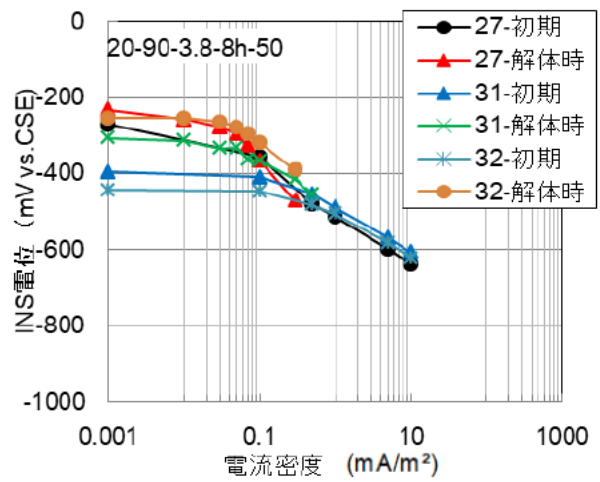
(b) 4時間通電-100mV



(c) 4時間通電-50mV



(d) 8時間通電-100mV



(e) 8時間通電-50mV

図-3.3.23 カソード分極曲線 (20°C-90% [Cl]=3.8kg/m³)

3.4 試験室温度 40°C, 相対湿度 90%の試験結果(間欠通電)

(1) 無通電供試体の自然電位

無通電供試体の内部鋼材の自然電位の経時変化を図-3.4.1 に示す。無通電供試体では、塩化物イオン量の違いにより電位の挙動が大きく異なった。 $[Cl^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$ では、試験初期は -450 mV vs.CSE 程度を示していたが、時間の経過とともに電位は貴側に变化し、130日以降は $-150 \sim -350 \text{ mV vs.CSE}$ の範囲で推移した。試験終了時の自然電位は -200 mV vs.CSE 前後を示しており、ASTMの自然電位による腐食判定(以下、自然電位判定と記す)によって評価すると、「不確定」あるいは「90%以上の確率で腐食していない」と判定され、内部鋼材の腐食傾向は小さいと判断される。 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ では、230日までは概ね $-450 \sim -600 \text{ mV vs.CSE}$ の範囲で推移していたが、それ以降は変動しながら電位は貴側に变化した。自然電位判定では、No.113が「不確定」、No.112とNo.115が「90%以上の確率で腐食なし」と判定された。内部鋼材の腐食は、経時的に軽減する傾向にあったと読み取られる。

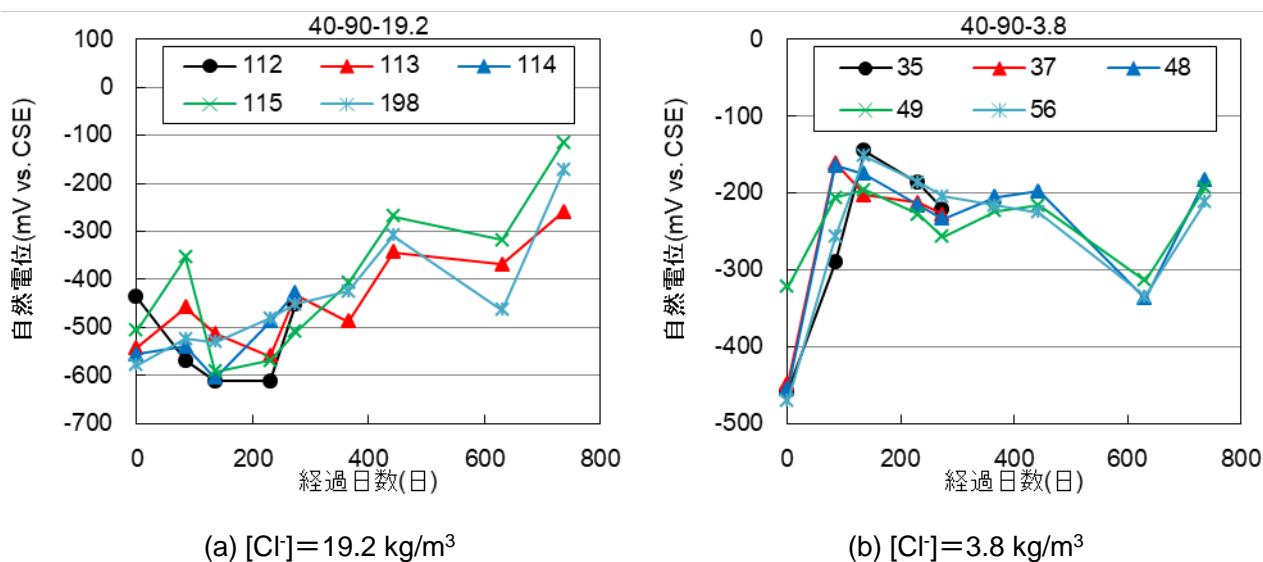
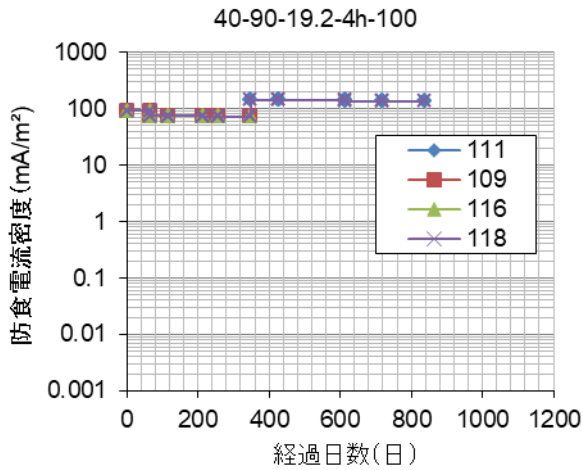


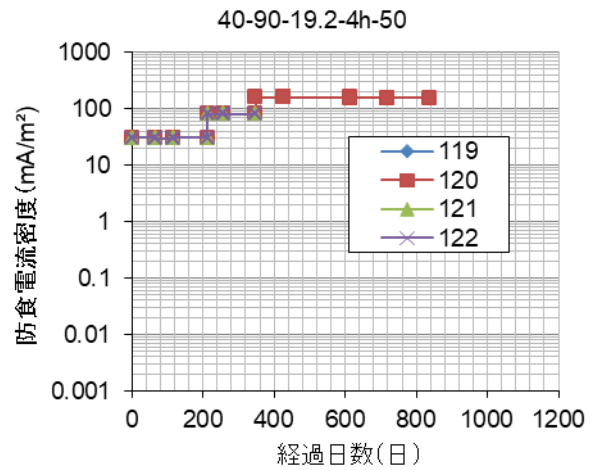
図-3.4.1 無通電供試体の自然電位の経時変化 (40°C-90%RH)

(2) 防食電流密度

防食電流密度の経時変化を図-3.4.2～図-3.4.5 に示す。防食電流密度の挙動は、塩化物イオン量による違いが顕著に認められた。 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ では、通電時間よりも目標シフト量による影響の方が強く表れており、経時的に増加する傾向を示した。通電初期の防食電流密度は目標シフト量 100 mV で $90 \sim 120 \text{ mA/m}^2$ 、目標シフト量 50 mV で $30 \sim 40 \text{ mA/m}^2$ であり、目標シフト量 100 mV は海水中の鋼材並みの防食電流密度であった。通電後期は、目標シフト量とは無関係に $100 \sim 200 \text{ mA/m}^2$ まで増加し、これはかぶり部分に生じた大きなひび割れが原因と考えられる。一方、 $[Cl^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$ では、通電初期は目標シフト量 100 mV で 20 mA/m^2 程度、目標シフト量 50 mV で $0.2 \sim 7 \text{ mA/m}^2$ であったが、経時的に低下する傾向を示し、鋼材表面の環境改善(⇒鋼材の自然電位の貴化)による防食電流密度の低減効果が認められた。

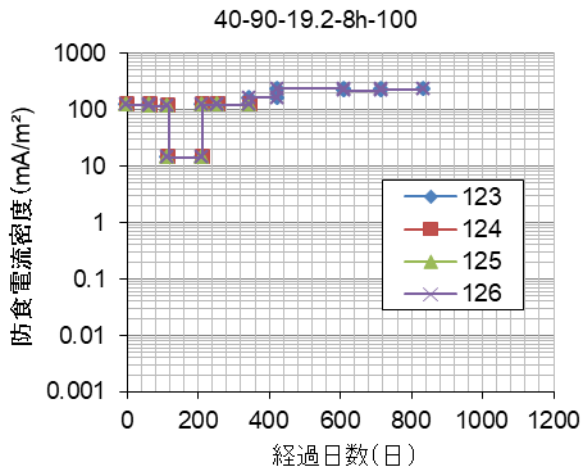


(a) 目標シフト量 100 mV

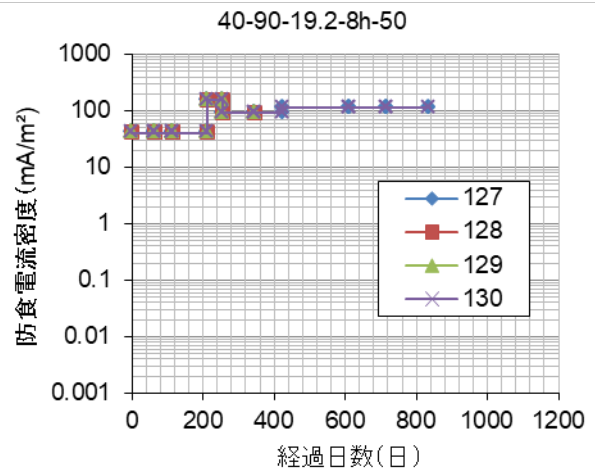


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.2 防食電流密度の経時変化 (40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, 4 時間通電)

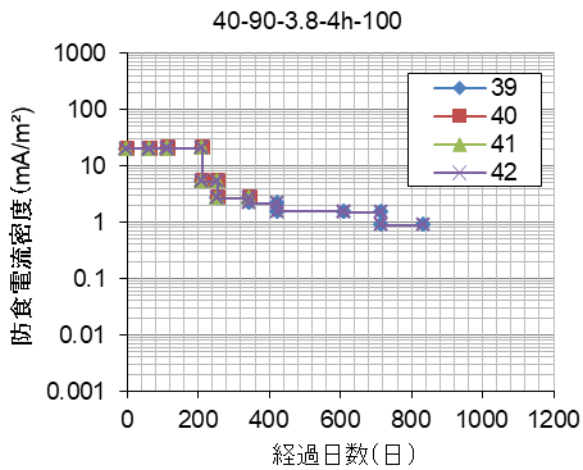


(a) 目標シフト量 100 mV

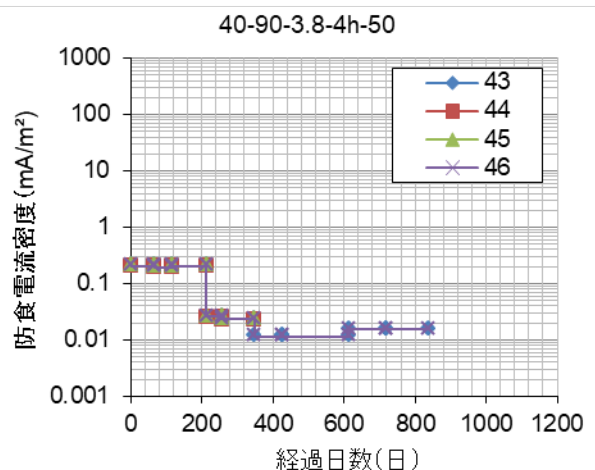


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.3 防食電流密度の経時変化 (40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, 8 時間通電)

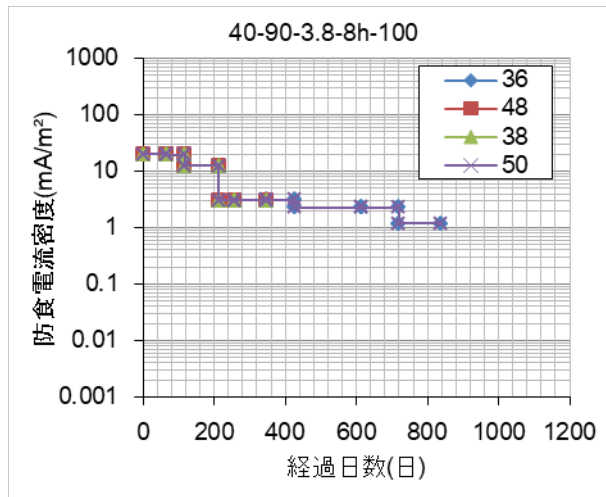


(a) 目標シフト量 100 mV

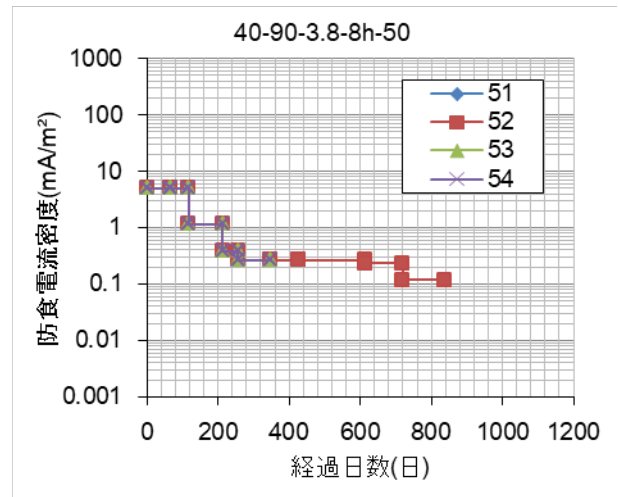


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.4 防食電流密度の経時変化 (40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, 4 時間通電)



(a) 目標シフト量 100 mV



(b) 目標シフト量 50 mV

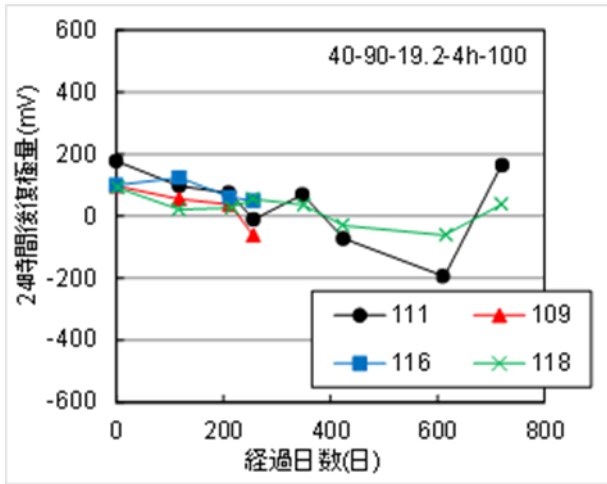
図-3.4.5 防食電流密度の経時変化 (40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, 8時間通電)

(3) 復極量

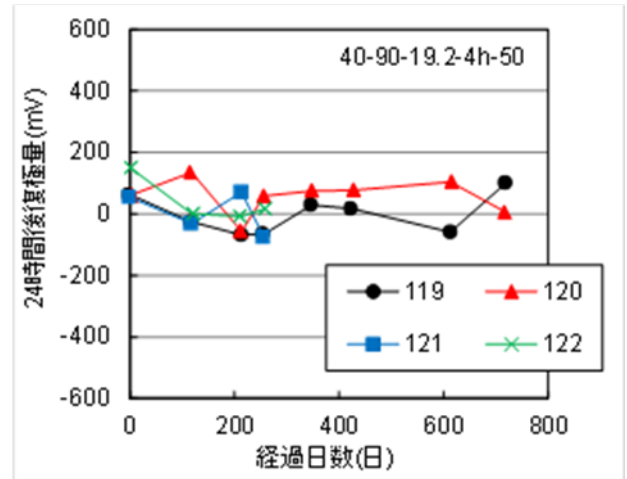
通電オフ 24 時間後の復極量(以下 24 時間後復極量と記す)の経時変化を図-3.4.6～図-3.4.9, 24 時間後復極量の平均値を図-3.4.10～図-3.4.11, 通電オフ 4 時間後の復極量(以下 4 時間後復極量と記す)を図-3.4.12～図-3.4.15, 4 時間後復極量の平均値を図-3.4.16～図-3.4.17 に示す。

個体差によって分極特性の異なる複数個の供試体を 1 回路で通電したため, 所定の目標シフト量に調整するのが大変困難であった。24 時間後復極量は大きく変動しながら推移しており, 一部の供試体では復極量がマイナスの値を示すものも認められ, その傾向は[Cl⁻]=19.2 kg/m³の供試体の方が強かった。4 時間後および 24 時間後復極量の平均値より, [Cl⁻]=19.2 kg/m³では目標シフト量よりも下回っているのに対し, [Cl⁻]=3.8 kg/m³では上回っており, 目標としていた復極量に電流調整ができていなかった。また, 24 時間後復極量と 4 時間後復極量との差を確認したところを, 図-3.4.18～図-3.4.21 に示すように, 特に[Cl⁻]=19.2 kg/m³の供試体においてマイナスの値を示していることから, 24 時間以内に復極過程(電気防食効果)が終了し, 腐食進行状態に移行していることが考えられる。このような環境下では, 復極量の最大値で復極量の判定を行わなければならない。

間欠通電においては, 通電を停止している期間の環境改善効果の程度が防食効果を大きく左右すると考えられる。通電停止期間が終始復極過程にあるときには防食効果が期待できるが, 短時間で復極過程が終了して腐食進行過程に移行した時には, 防食効果は期待できない。

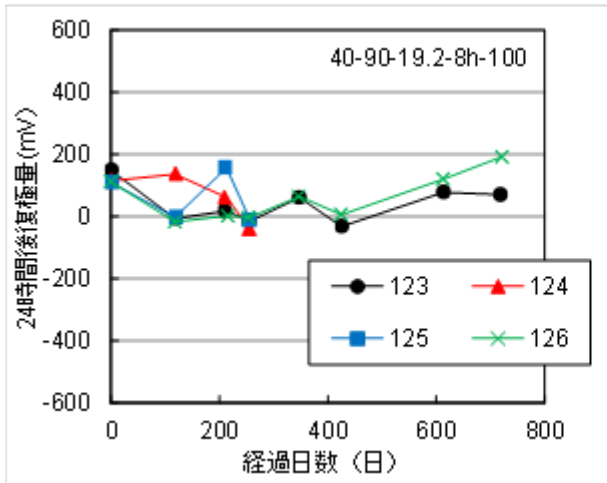


(a) 目標シフト量 100 mV

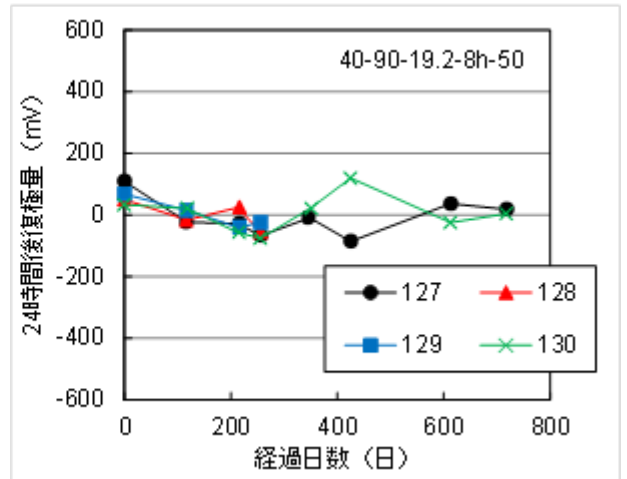


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.6 24 時間後復極量の経時変化 (40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 4 時間通電)

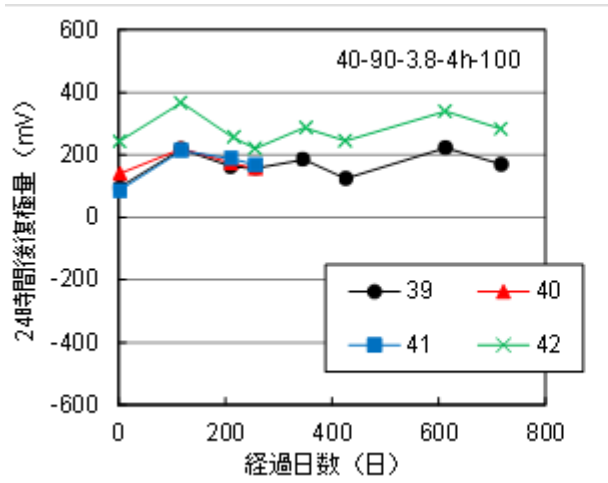


(a) 目標シフト量 100 mV

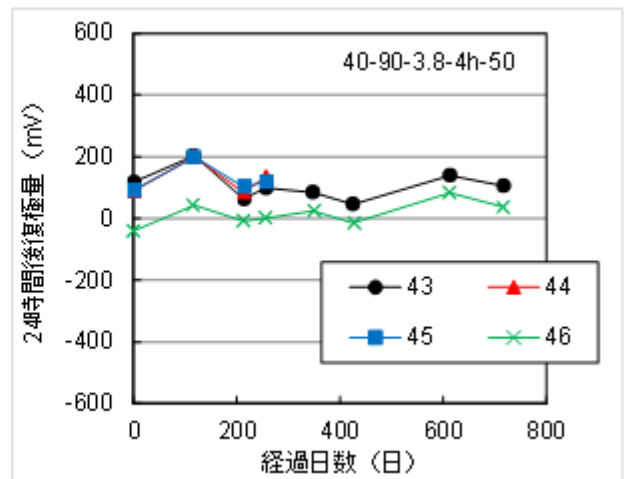


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.7 24 時間後復極量の経時変化 (40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 8 時間通電)

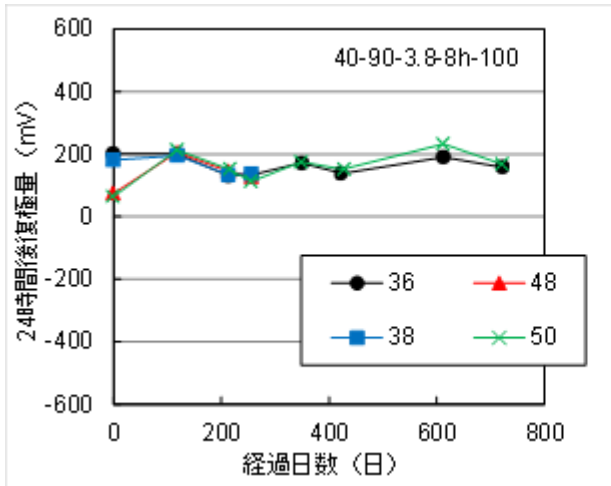


(a) 目標シフト量 100 mV

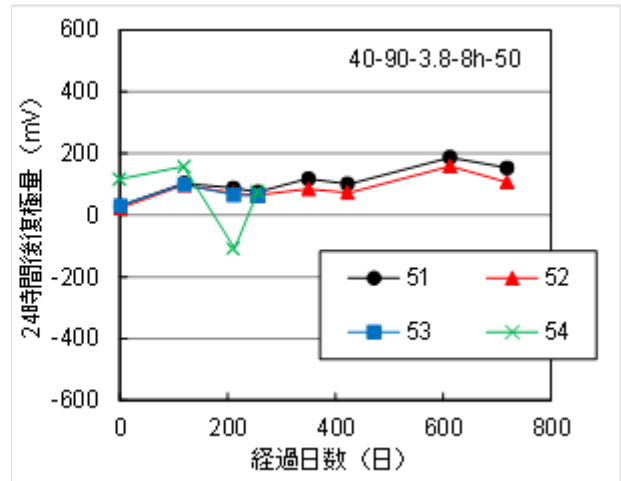


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.8 24 時間後復極量の経時変化 (40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, 4 時間通電)



(a) 目標シフト量 100 mV



(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.9 24 時間後復極量の経時変化 (40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, 8 時間通電)

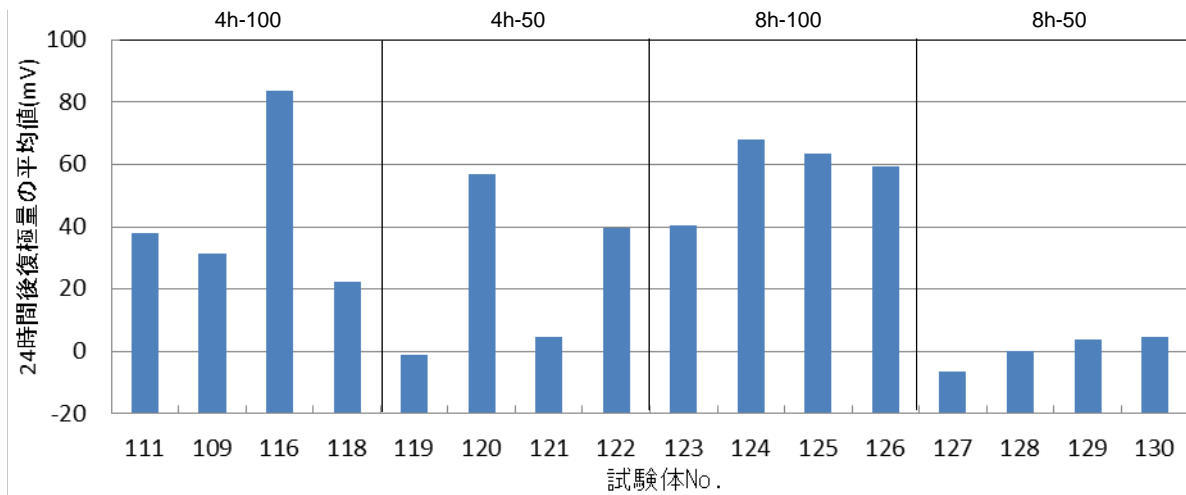


図-3.4.10 24 時間後復極量の平均値 (40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³)

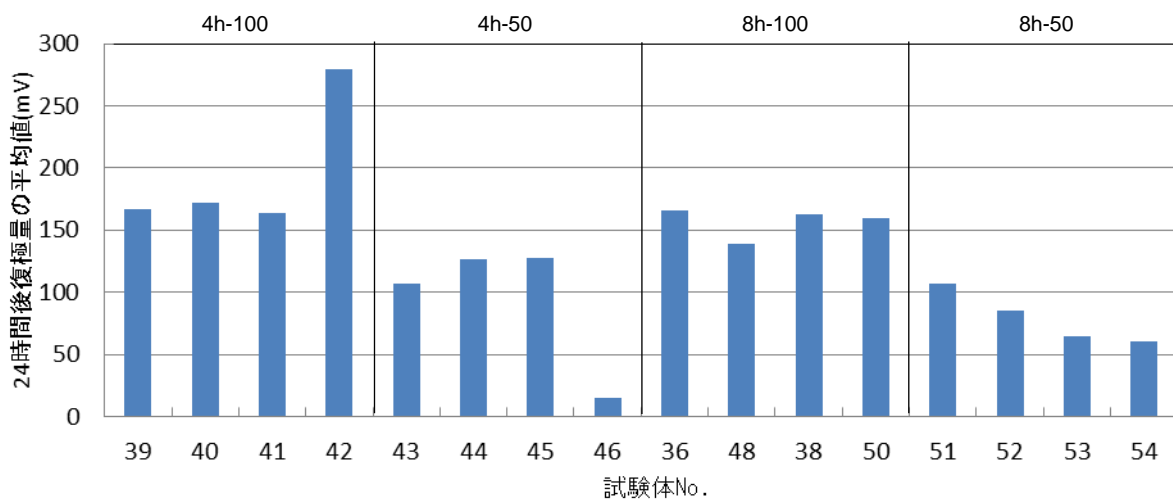
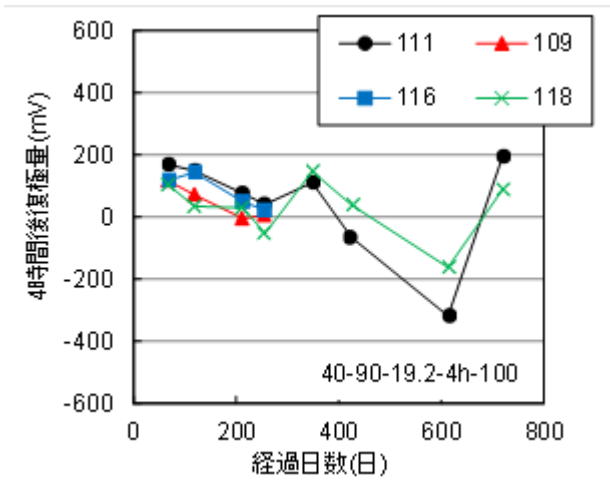
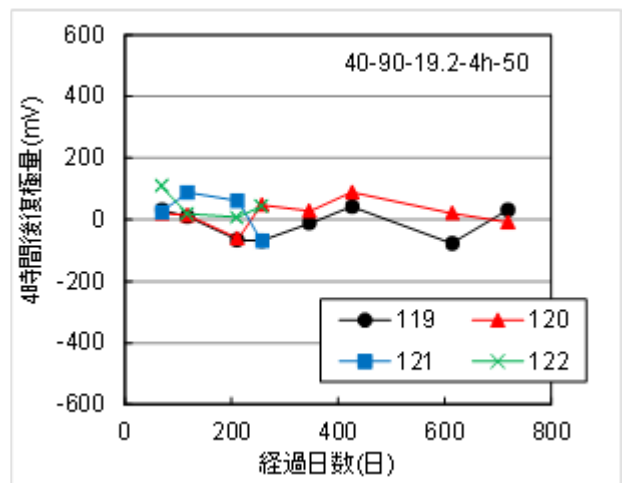


図-3.4.11 24 時間後復極量の平均値 (40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³)

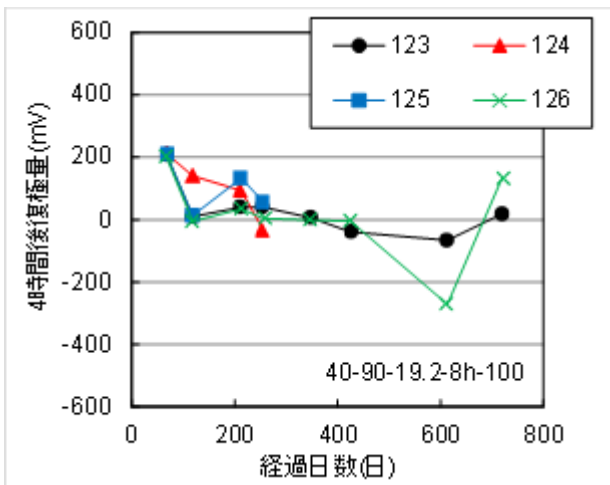


(a) 目標シフト量 100 mV

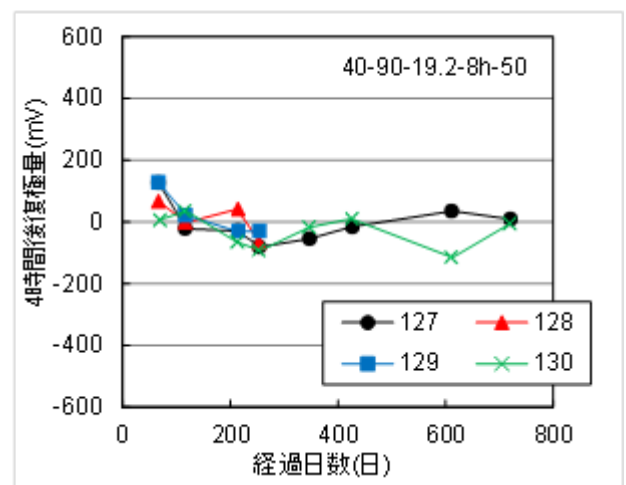


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.12 4時間後復極量の経時変化 (40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 4時間通電)

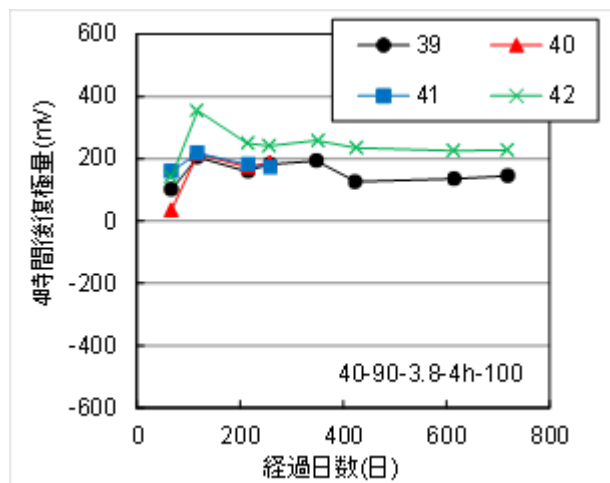


(a) 目標シフト量 100 mV

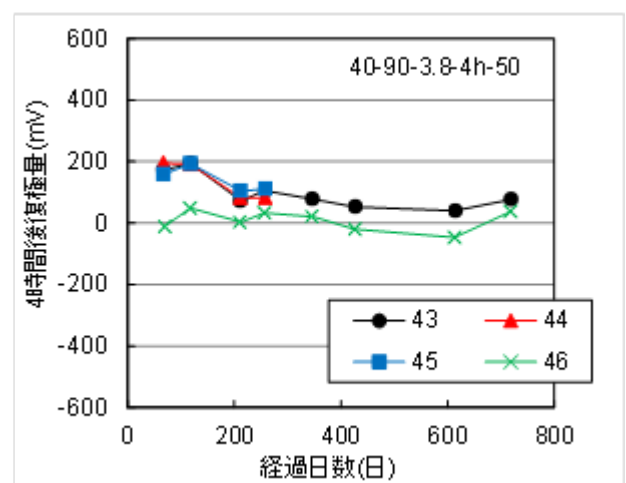


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.13 4時間後復極量の経時変化 (40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 8時間通電)

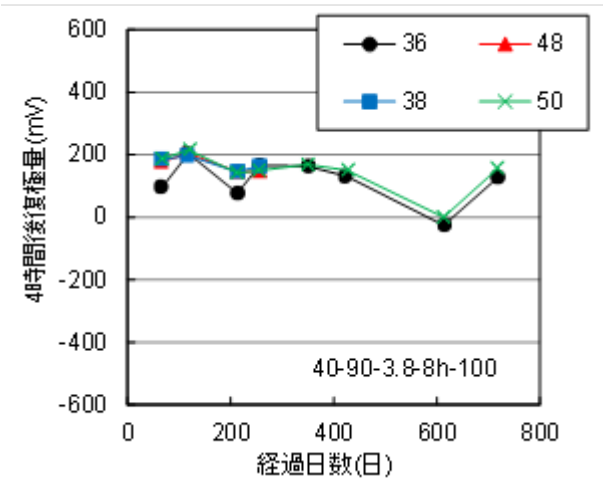


(a) 目標シフト量 100 mV

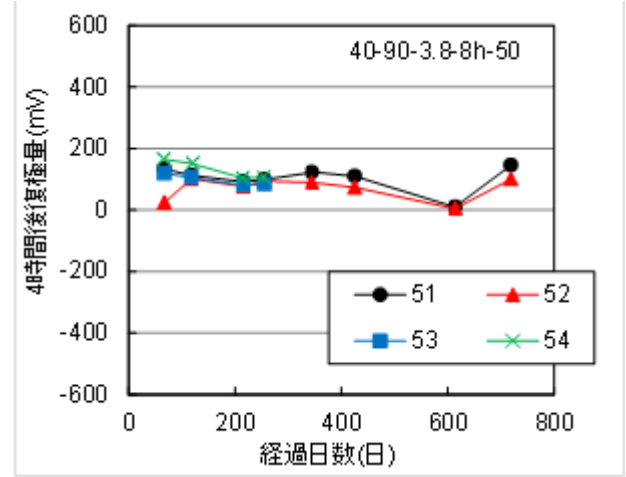


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.14 4時間後復極量の経時変化 (40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, 4時間通電)



(a) 目標シフト量 100 mV



(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.15 4時間後復極量の経時変化 (40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, 8時間通電)

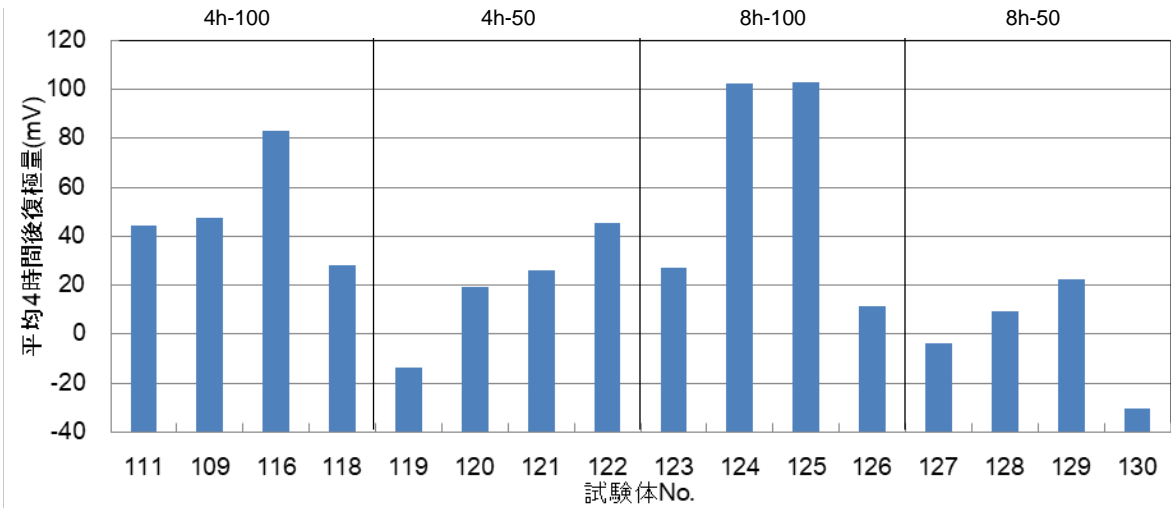


図-3.4.16 4時間後復極量の平均値 (40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³)

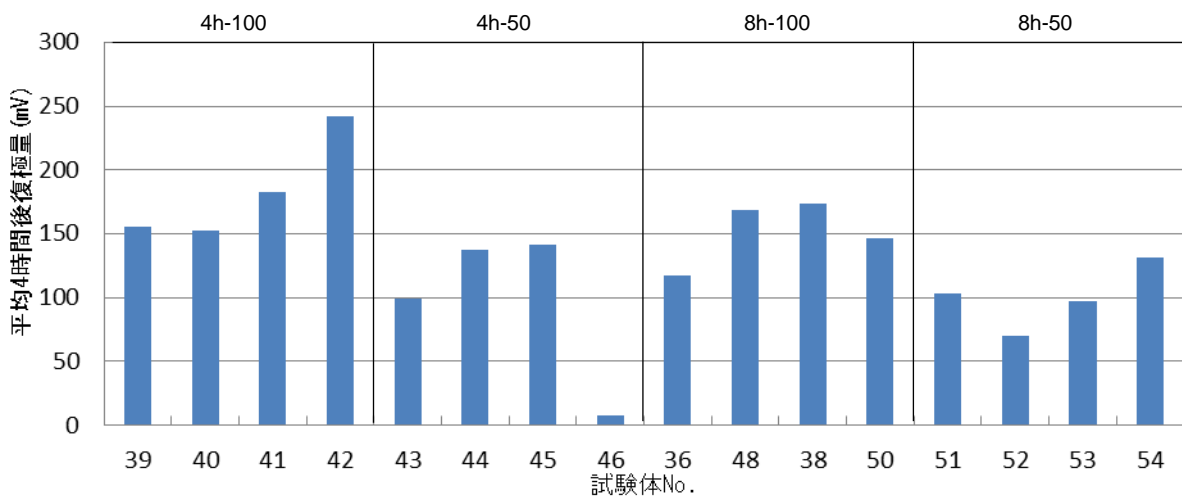
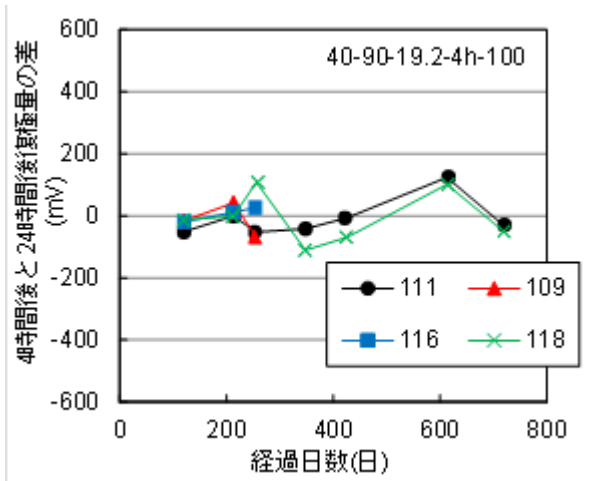
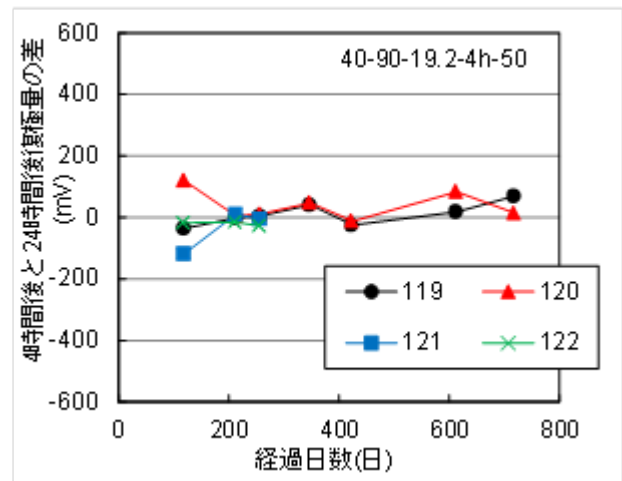


図-3.4.17 4時間後復極量の平均値 (40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³)

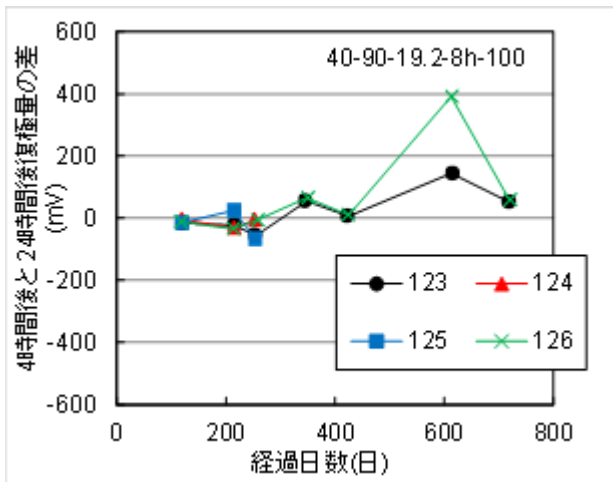


(a) 目標シフト量 100 mV

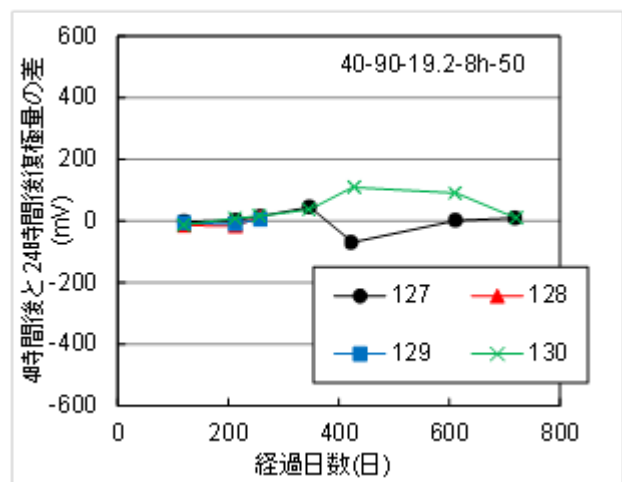


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.18 4時間後と24時間後復極量との差の経時変化
(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 4時間通電)

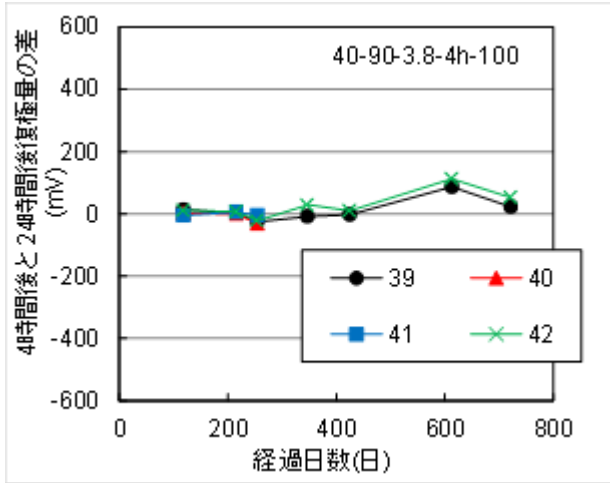


(a) 目標シフト量 100 mV

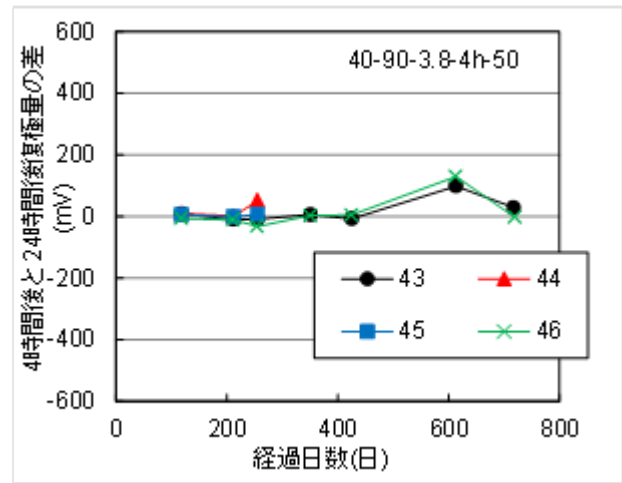


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.19 4時間後と24時間後復極量との差の経時変化
(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 8時間通電)

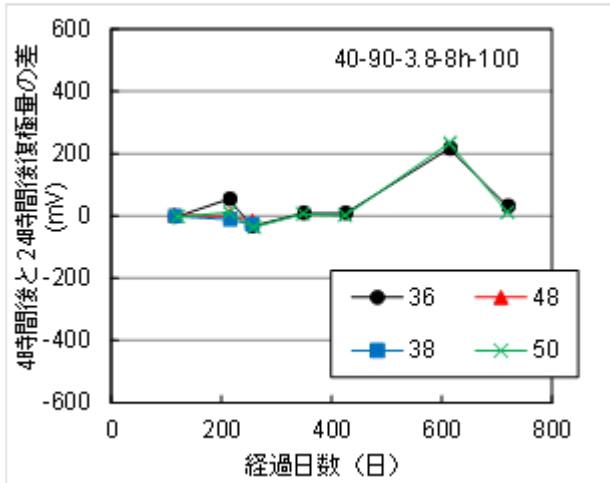


(a) 目標シフト量 100 mV

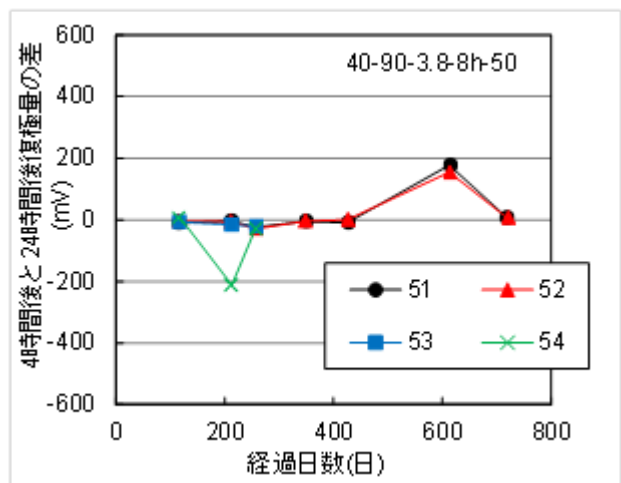


(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.20 4時間後と24時間後復極量との差の経時変化
(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, 4時間通電)



(a) 目標シフト量 100 mV



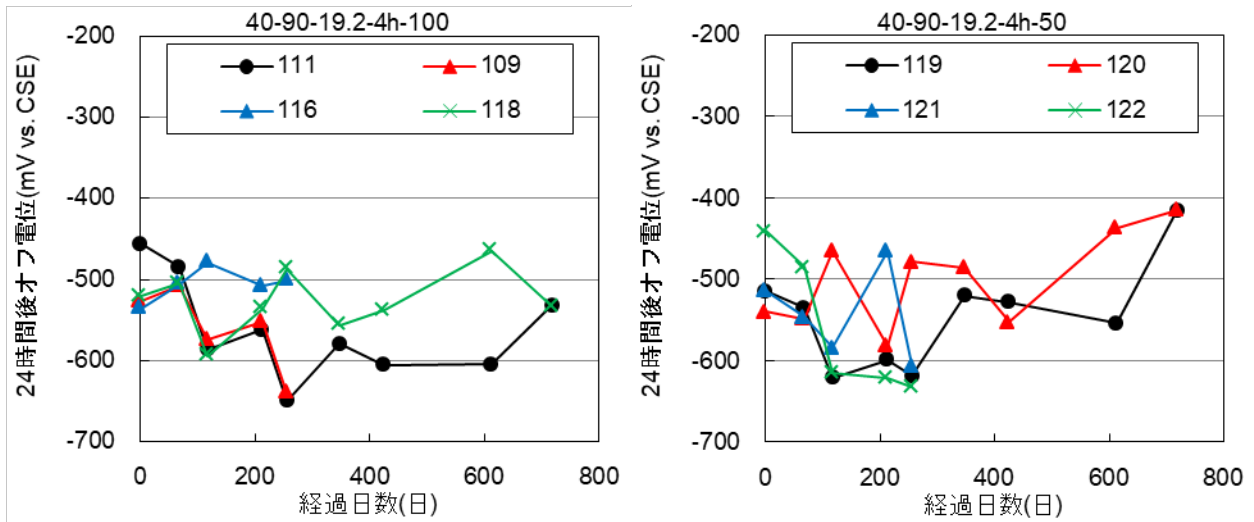
(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.21 4時間後と24時間後復極量との差の経時変化
(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, 8時間通電)

(4) 通電停止後のオフ電位の変化

通電停止から24時間後のオフ電位(24時間後オフ電位)の経時変化を図-3.4.22~図-3.4.25, 通電停止から4時間後のオフ電位(4時間後オフ電位)の経時変化を図-3.4.26~図-3.4.29に示す。4時間後および24時間後オフ電位は、いずれも通電時間による影響は認められなかったものの、塩化物イオン量による影響は顕著に認められた。[Cl]=19.2 kg/m³では、200日経過時までは卑化傾向を示し、その後は貴化傾向に転じた。これらの供試体は200日経過時から鋼材腐食によるひび割れ、剥離が生じており、試験後期の電位の貴化現象は剥離していない部分の鋼材の電気化学特性を表していると推察される。ほとんどの供試体が4時間後オフ電位よりも24時間後オフ電位のほうが卑な値を示しているため、通電停止から比較的短時間で腐食進行状態に移行したと言える。一方、[Cl]=3.8 kg/m³では、通電初期は貴化、中期は卑化、後期は卑化する傾向を示してい

るが、無通電供試体と同様の挙動を示していることから、モルタルの硬化反応に伴う組織の緻密化が影響していると推察する。ほとんどの供試体が4時間後オフ電位よりも24時間後オフ電位の方が卑な値を示していることから、通電停止から比較的短時間で腐食進行状態に移行したと考えられる。平均復極量と24時間後オフ電位を図-3.4.30、平均復極量と4時間後オフ電位を図-3.4.31に示す。平均復極量とオフ電位の関係は、塩化物イオン量による違いは見られなかったものの、24時間後オフ電位と4時間後オフ電位のいずれにおいても概ね平均復極量の増大とともに卑な電位を示す傾向であった。

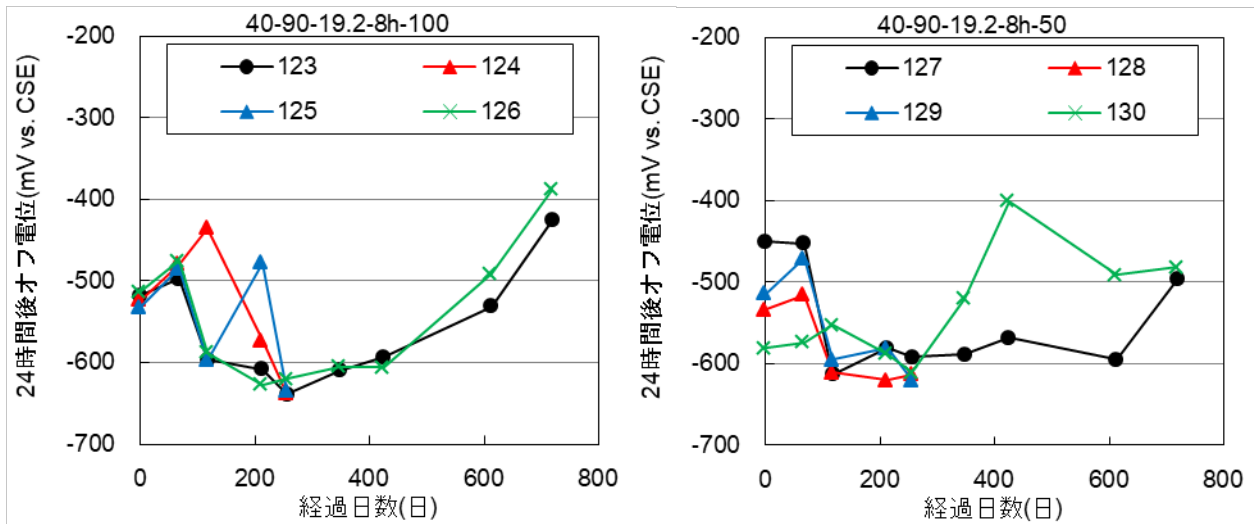


(a) 目標シフト量 100 mV

(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.22 24時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 4時間通電)

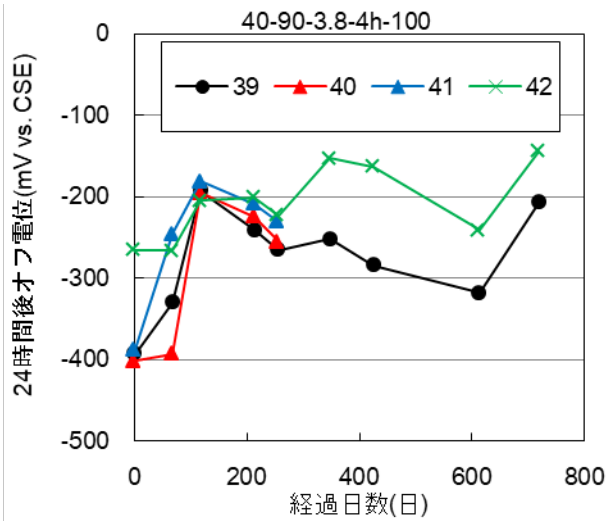


(a) 目標シフト量 100 mV

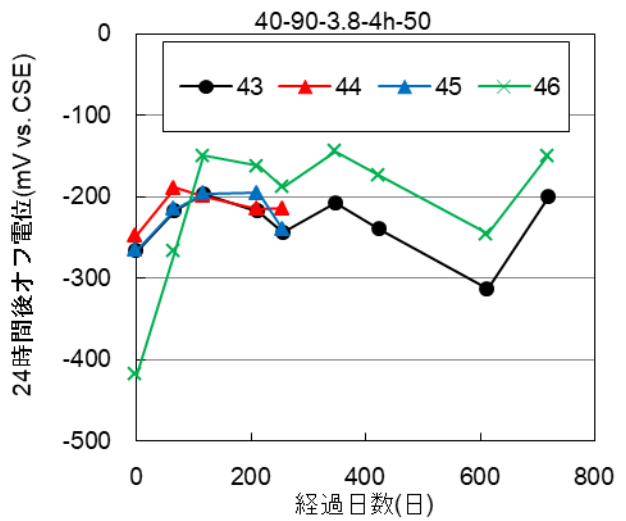
(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.23 24時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 8時間通電)



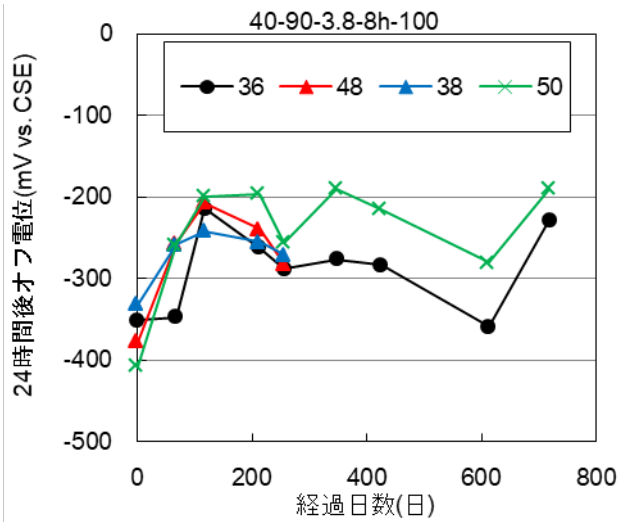
(a) 目標シフト量 100 mV



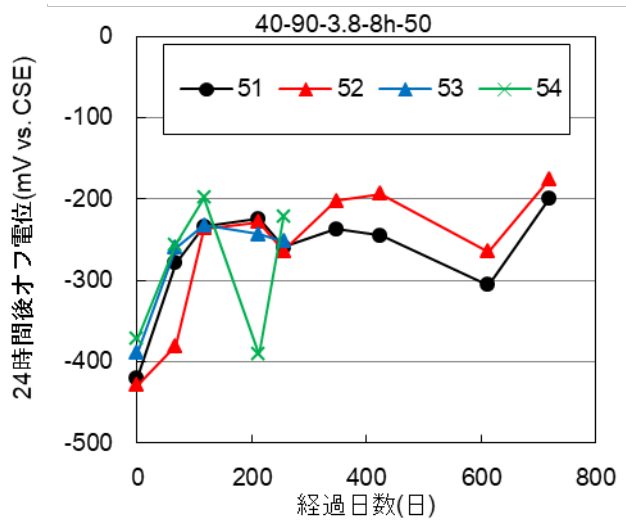
(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.24 24 時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, 4 時間通電)



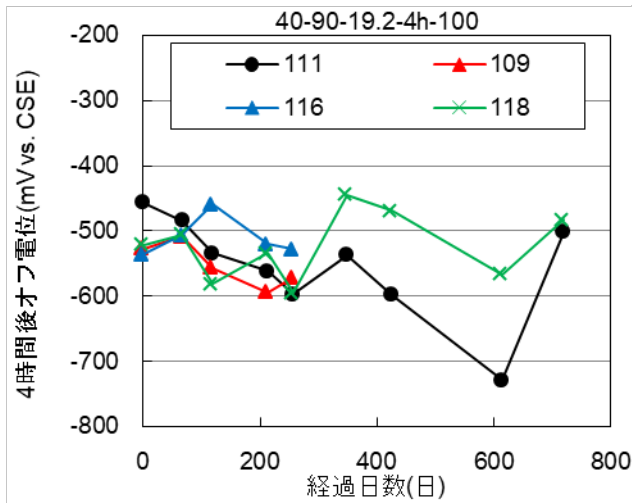
(a) 目標シフト量 100 mV



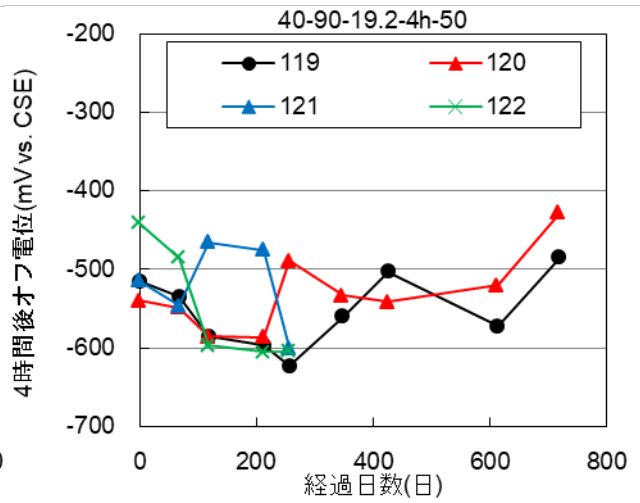
(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.25 24 時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, 8 時間通電)



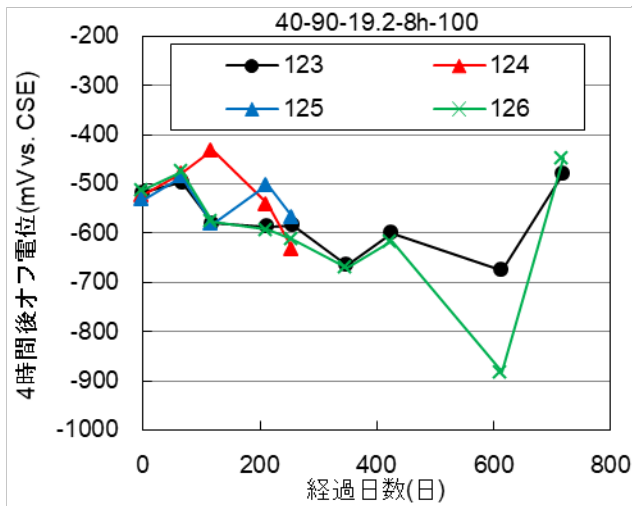
(a) 目標シフト量 100 mV



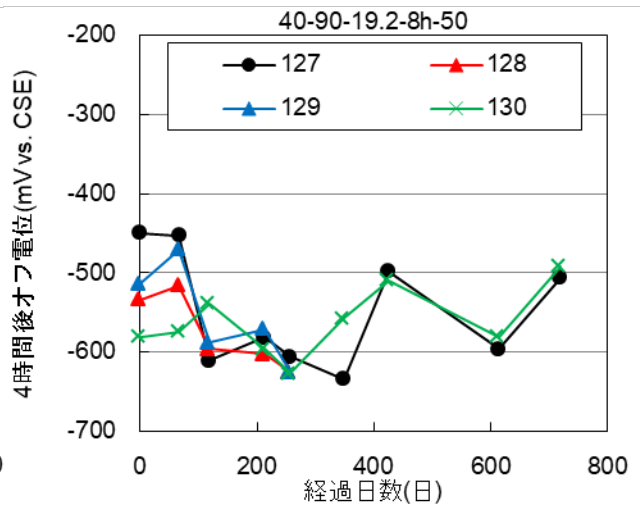
(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.26 4時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 4時間通電)



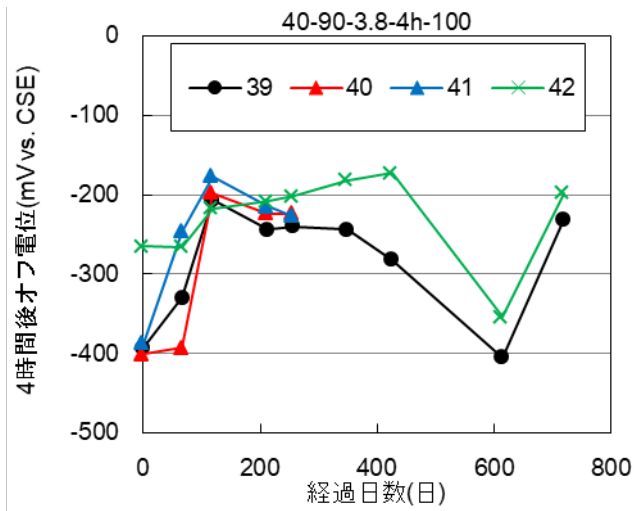
(a) 目標シフト量 100 mV



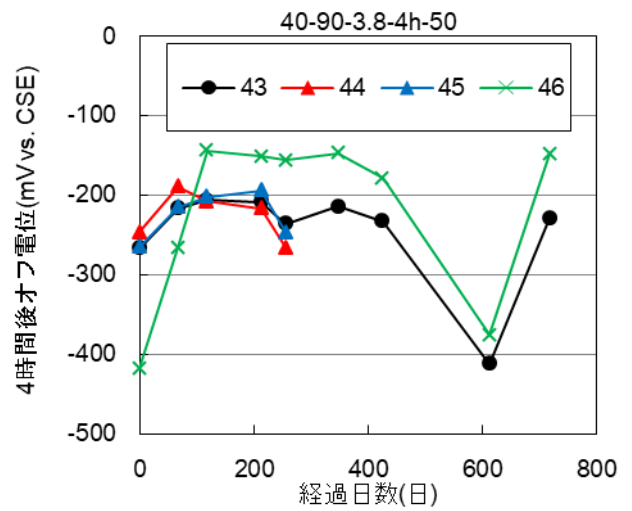
(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.27 4時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 8時間通電)



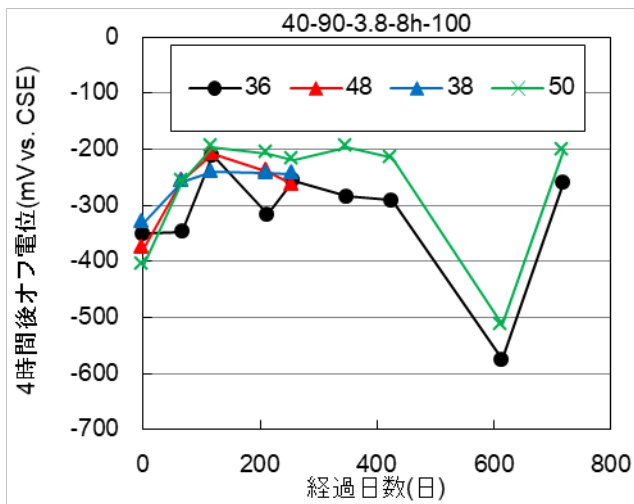
(a) 目標シフト量 100 mV



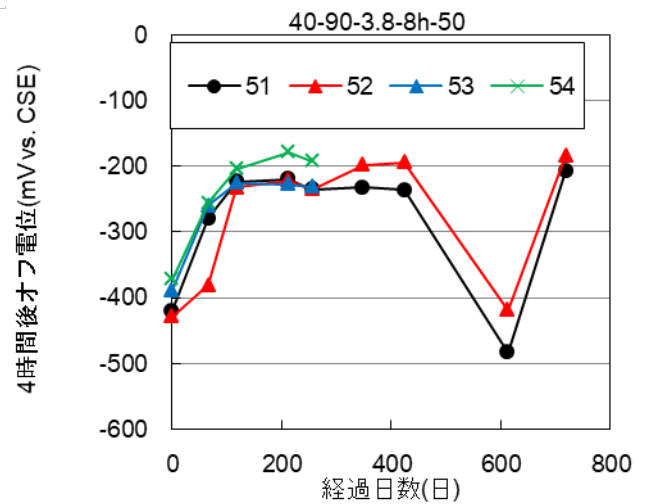
(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.28 4時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, 4時間通電)



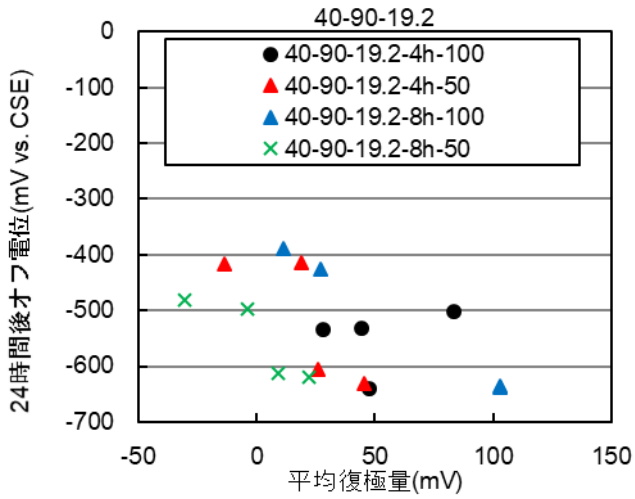
(a) 目標シフト量 100 mV



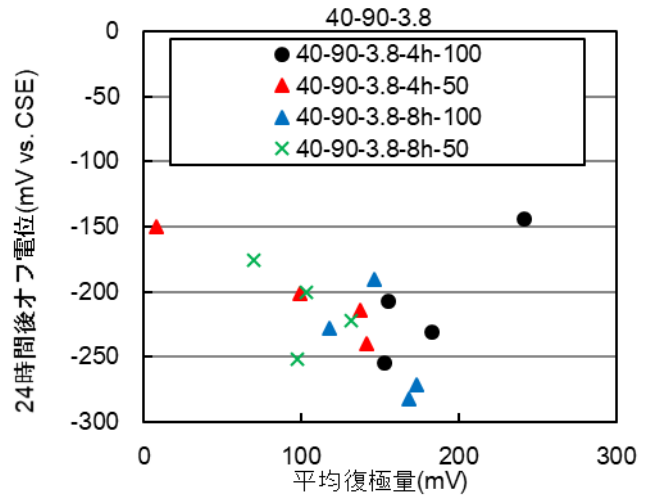
(b) 目標シフト量 50 mV

図-3.4.29 4時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, 8時間通電)

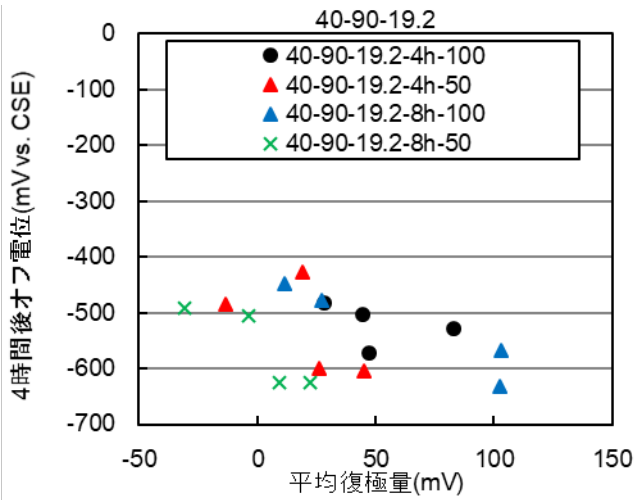


(a) $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$

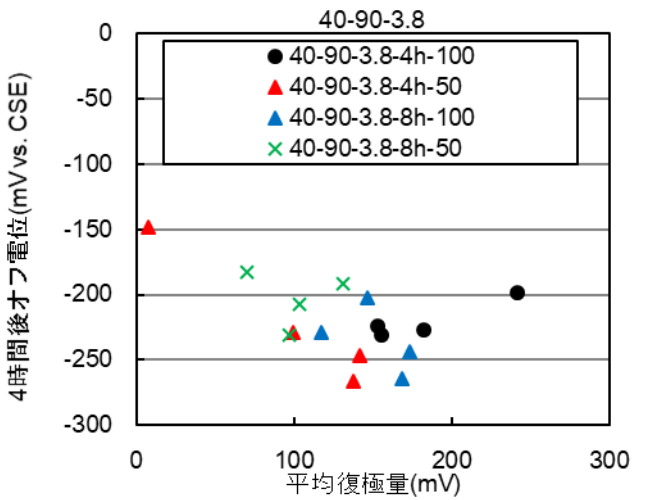


(b) $[Cl^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$

図-3.4.30 平均復極量と 24 時間後オフ電位 (40°C-90%RH)



(a) $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$



(b) $[Cl^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$

図-3.4.31 平均復極量と 4 時間後オフ電位 (40°C-90%RH)

(5) 外観観察

通電開始から 117 日が経過した時点で、 $[\text{Cl}^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ の 4 時間 -100 mV の条件を除く供試体において内部鋼材に沿ったひび割れが確認された。図-3.4.32 に示すように明らかな腐食ひび割れであり、ひび割れ幅は既に 0.2 mm を超えていた。ただし、ひび割れ幅の大小と通電の有無に相関は認められず、個体差の影響のほうが大きいと思われる。 $[\text{Cl}^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$ の供試体には、ひび割れは認められなかった。

通電開始から 256 日および 719 日経過後に外観観察と供試体を解体して鋼材の表面状態を観察した。256 日経過時は、無通電供試体は各条件 2 体ずつ、通電供試体は各条件 2 体ずつで総数は 20 体、719 日経過時は、無通電供試体は各条件 3 体ずつ、通電供試体は各条件 2 体ずつで総数は 22 体である。外観観察では、塩分量に関わらず 256 日および 719 日経過時の解体時の傾向が同じであった。 $[\text{Cl}^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$ の全ての供試体にひび割れは生じていなかった。一方、 $[\text{Cl}^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ の全ての供試体にひび割れ幅 5 mm を超えるひび割れが生じていた。ひび割れは全ての供試体で 2 方向に進行しており、鋼材とかぶり部分のモルタルとの付着はほとんどなく、剥落寸前の状態であった。解体後の鋼材表面の状態を図-3.4.33～図-3.4.34 に示す。40°C $-90\% \text{ RH}$ の供試体の中で、錆の生成が明らかに少なかったのは $[\text{Cl}^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$ 、4 時間 -50 mV の供試体であった。その他の条件では鋼材の表面全面に赤褐色の錆が生じており、 $[\text{Cl}^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ の方が錆の進行が激しかった。



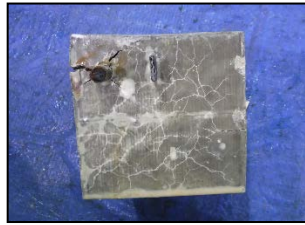

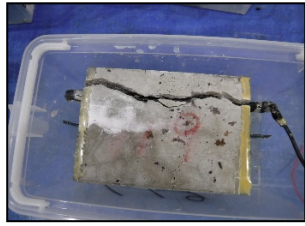
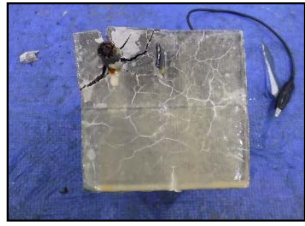



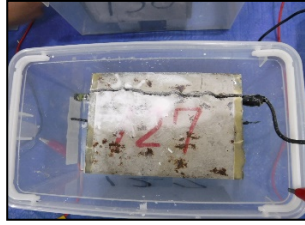

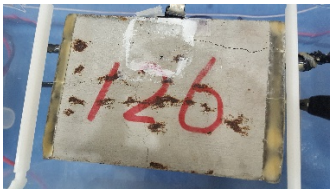
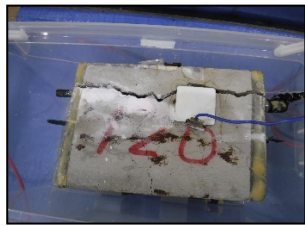
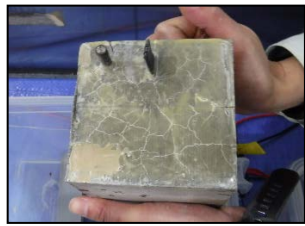
通電 時間	目標 シフト量	2017年3月17日 (117日経過)	2017年8月1日 (256日経過)	
無通電	無通電			
4時間	50mV			
	100mV	ひび割れなし		
8時間	50mV			
	100mV			

図-3.4.32 40℃-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³の供試体のひび割れ状況











通電 時間	目標 シフト量		[Cl]=3.8 kg/m ³		[Cl]=19.2 kg/m ³
なし	なし	No.35 No.37		No.112 No.114	
4 時間	50mV	No.44 No.45		No.121 No.122	
	100mV	No.40 No.41		No.109 No.116	
8 時間	50mV	No.53 No.54		No.128 No.129	
	100mV	No.38 No.48		No.124 No.125	

図-3.4.33 256 日経過時に解体した供試体の鋼材表面状況 (40°C-90%RH)



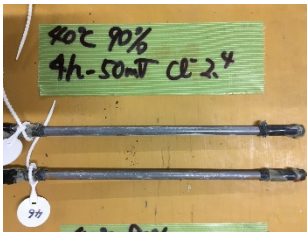
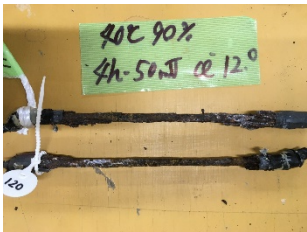

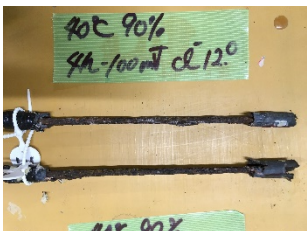


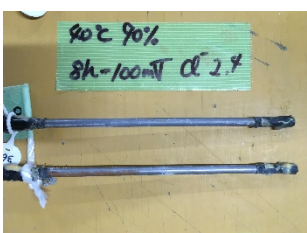

通電 時間	目標 シフト量	[Cl ⁻]=3.8 kg/m ³		[Cl ⁻]=19.2 kg/m ³	
なし	なし	No.47 No.49 No.56		No.113 No.115 No.198	
4 時間	50mV	No.43 No.46		No.119 No.120	
	100mV	No.39 No.42		No.111 No.118	
8 時間	50mV	No.51 No.52		No.127 No.130	
	100mV	No.36 No.50		No.123 No.126	

図-3.4.34 719 日経過時に解体した供試体の鋼材表面状況 (40°C-90%RH)

(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度

腐食減量率を図-3.4.35、質量減から求めた平均腐食電流密度を図-3.4.36 に示す。腐食減量率においては同一条件におけるばらつきが見られるものの $[Cl^-]=19.2\text{ kg/m}^3$ の供試体のほうが $[Cl^-]=3.8\text{ kg/m}^3$ よりも大きい値を示した。平均腐食電流密度も腐食減量率と同様の傾向を示した。CEB の腐食判定指標(以下、CEB 基準と記す)で評価するならば、腐食発生のしきい値である $0.1\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ を下回り防食効果が得られたのは4時間-50 mV のNo.46 と8時間-100 mV のNo.50 であり、いずれも $[Cl^-]=3.8\text{ kg/m}^3$ である。 $[Cl^-]=19.2\text{ kg/m}^3$ では、全ての供試体で防食効果は得られなかった。

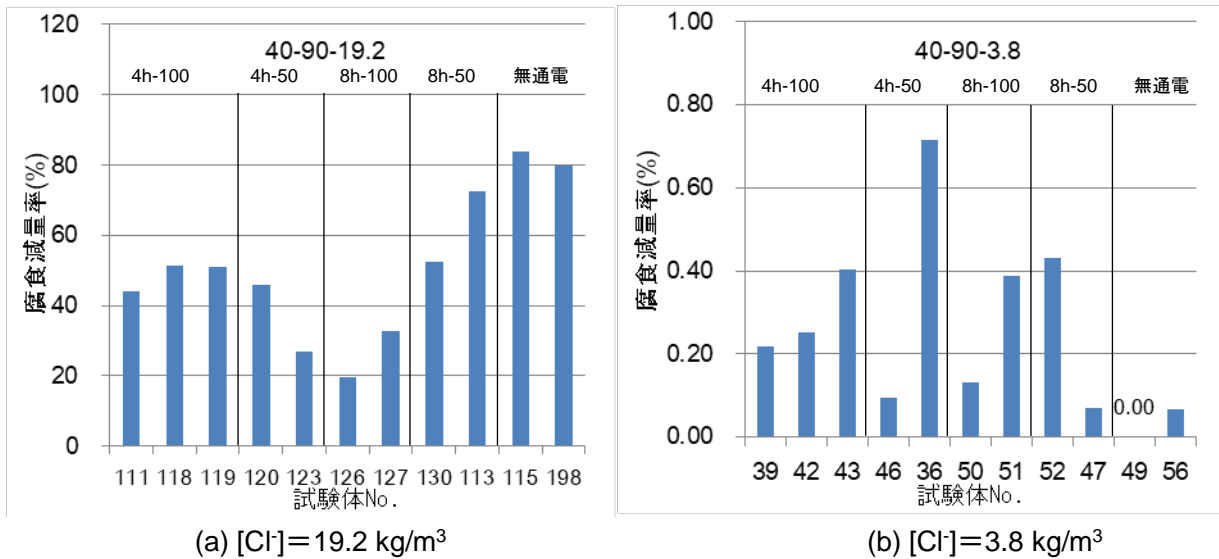


図-3.4.35 腐食減量率 (40°C-90%RH)

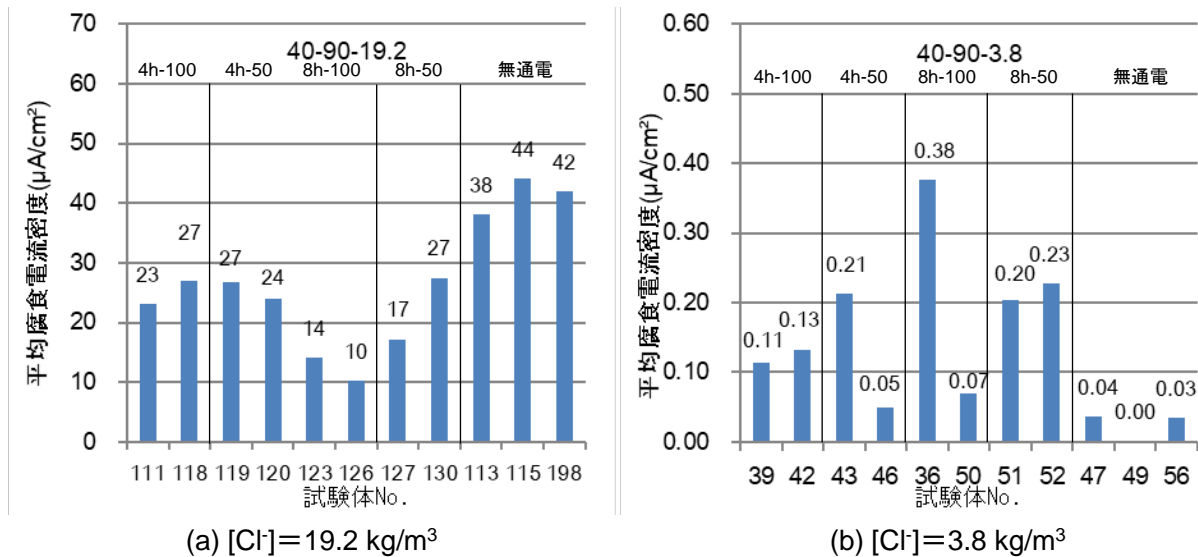
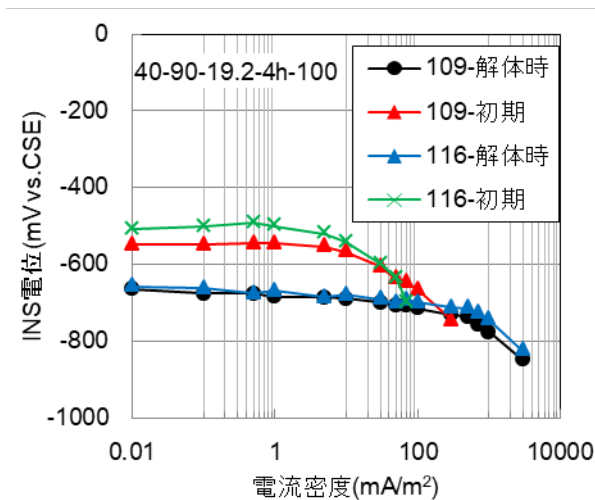


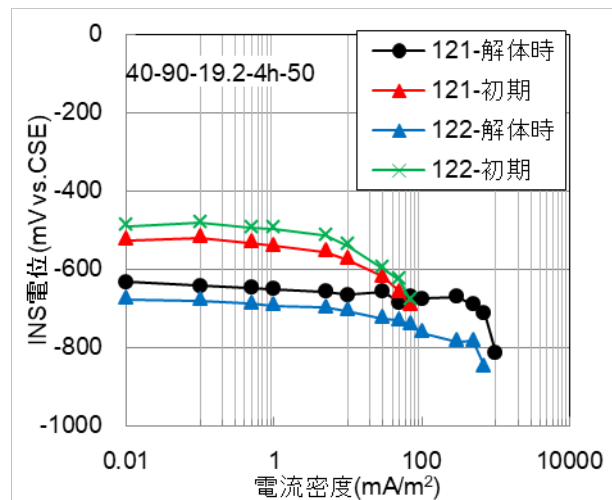
図-3.4.36 平均腐食電流密度 (40°C-90%RH)

(7) 分極曲線

試験開始時と供試体解体時に測定した鋼材のカソード分極曲線を図-3.4.37～図-3.4.41 に示す。無通電供試体において、活性電流のピークが $[\text{Cl}^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ の供試体の方が高電流密度側にあることから、錆の還元あるいは実質の電極反応面積が $[\text{Cl}^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$ の供試体よりも大きいことが影響したと推測される。経時的には塩化物イオン量に関わらず貴化傾向を示した。通電供試体では、カソード反応に変化は見られないが、自然電位は経時的に貴側に变化する傾向を示し、その傾向は $[\text{Cl}^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$ の供試体のほうが強かった。自然電位の貴化は、カソード反応による鋼材表面の pH 上昇に伴うアノード分極抵抗の増大によってもたらされたと考える。 $[\text{Cl}^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ の供試体のほうが活性電流のピークが高電流密度側にあるのは、無通電供試体と同じ理由と推測する。

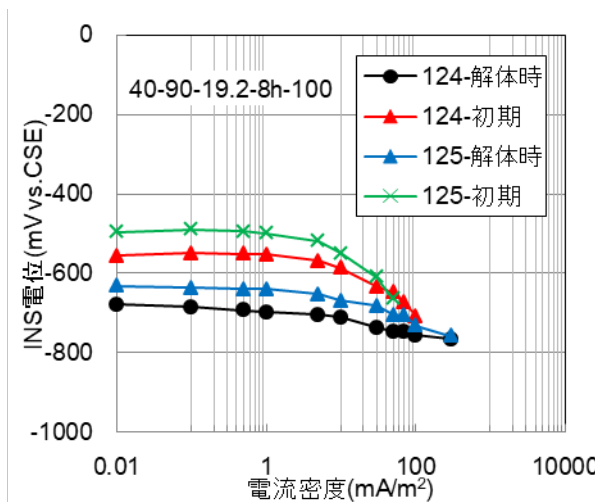


(a)目標シフト量 100mV

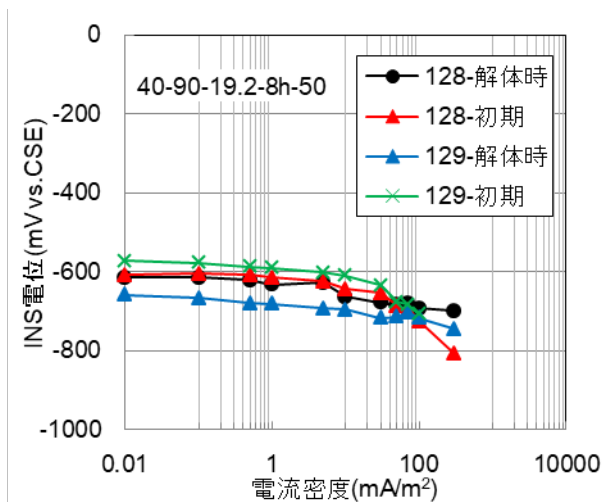


(b)目標シフト量 50mV

図-3.4.37 分極曲線① (40°C-90%RH $[\text{Cl}^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$, 4 時間通電)

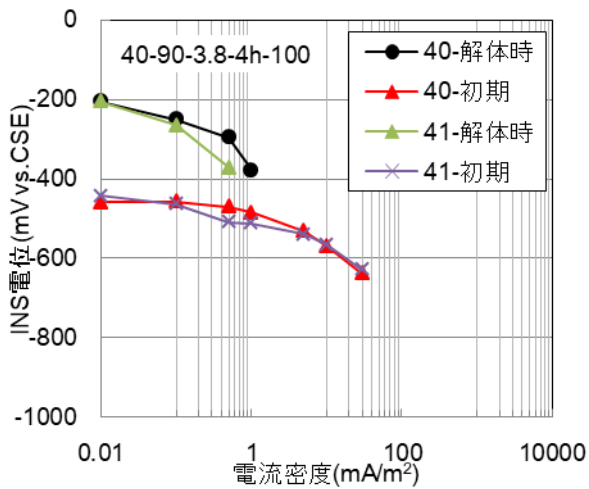


(a)目標シフト量 100mV

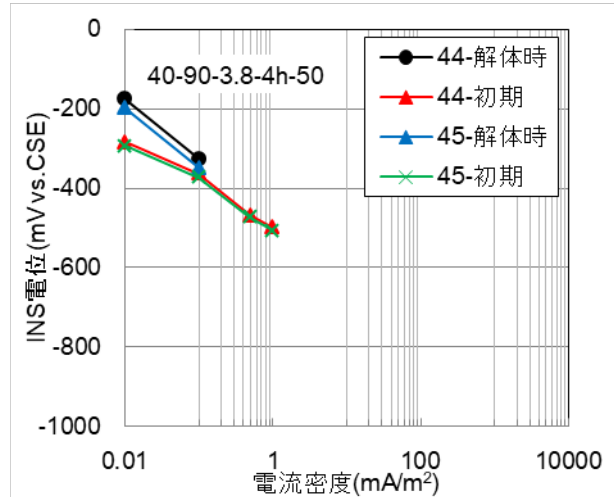


(b)目標シフト量 50mV

図-3.4.38 分極曲線② (40°C-90%RH $[\text{Cl}^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$, 8 時間通電)

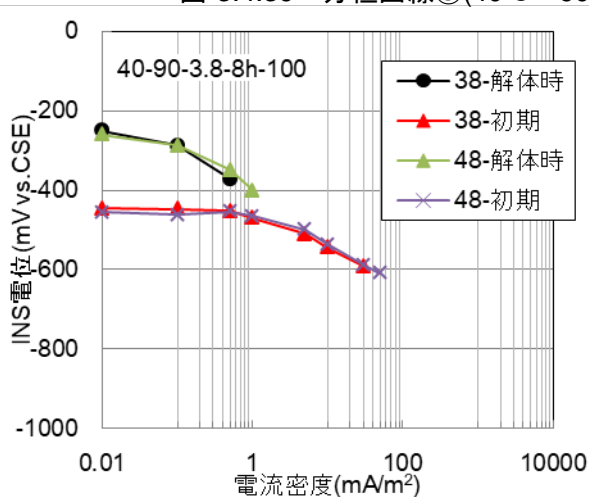


(a) 目標シフト量 100mV

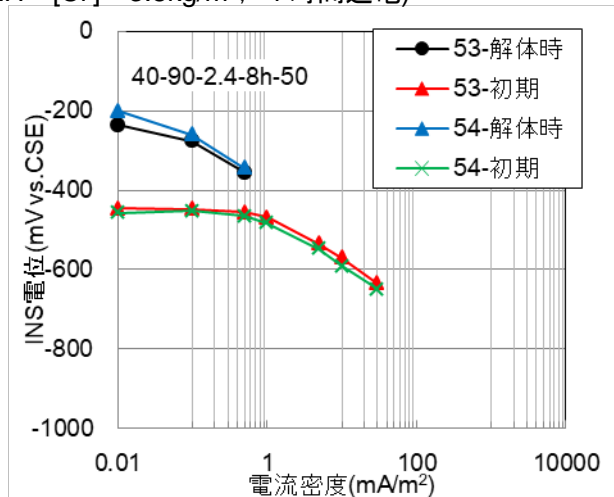


(b) 目標シフト量 50mV

図-3.4.39 分極曲線③(40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8kg/m³, 4時間通電)

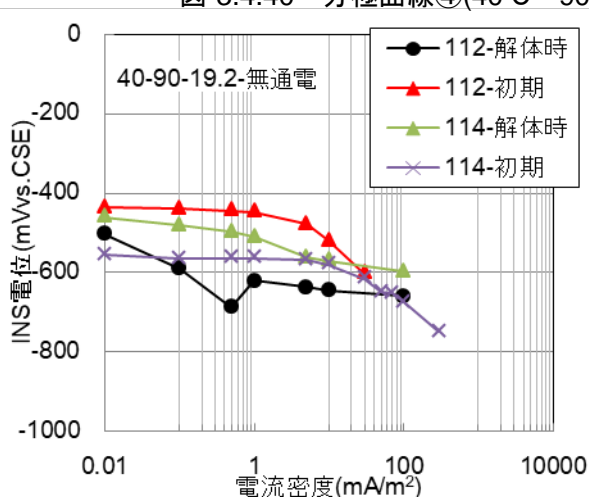


(a) 目標シフト量 100mV

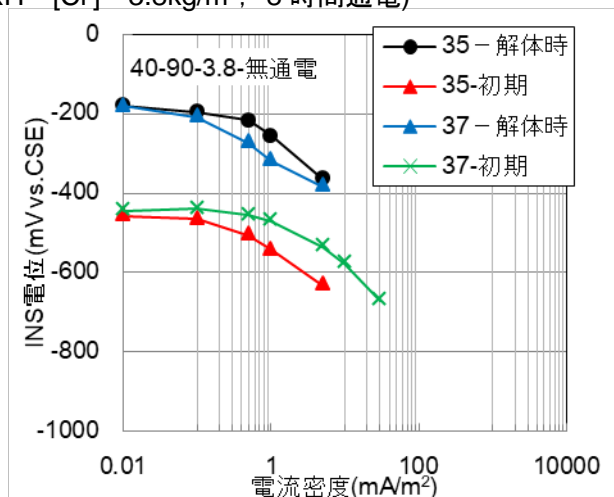


(b) 目標シフト量 50mV

図-3.4.40 分極曲線④(40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8kg/m³, 8時間通電)



(a) [Cl⁻]=19.2kg/m³



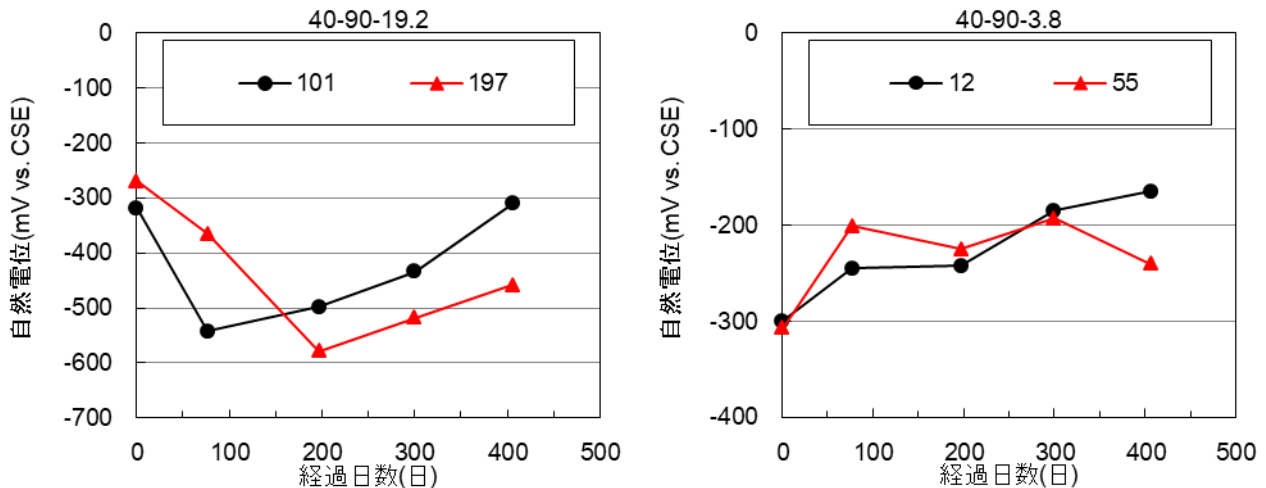
(b) [Cl⁻]=3.8kg/m³

図-3.4.41 分極曲線⑤(40°C-90%RH 無通電供試体)

3.5 試験室温度 40°C, 相対湿度 90%の試験結果(常時通電)

(1) 無通電供試体の自然電位

無通電供試体の鋼材の自然電位の経時変化を図-3.5.1に示す。[Cl⁻]=19.2 kg/m³では、-300~-600 mV vs.CSE で推移していた。自然電位判定では「90%以上の確率で腐食あり」と判定され、終始腐食状態であったと判断される。一方、[Cl⁻]=3.8 kg/m³は、-150~-300 mV vs.CSE を示しており、[Cl⁻]=19.2 kg/m³よりも高い電位で推移していた。自然電位判定では概ね「不確定」と判定され、[Cl⁻]=19.2 kg/m³よりも腐食の程度は小さい状態にあったと判断される。



(a) [Cl⁻]=19.2 kg/m³

(b) [Cl⁻]=3.8 kg/m³

図-3.5.1 無通電供試体の自然電位の経時変化 (40°C-90%RH)

(2) 防食電流密度

防食電流密度の経時変化を図-3.5.2~図-3.5.7に示す。目標シフト量を満足するのに必要な防食電流密度は、塩化物イオン量による影響を強く受けていた。同じ目標シフト量で比べた場合、塩化物イオン量の高いほうが防食電流密度は増加する傾向であった。また、[Cl⁻]=19.2 kg/m³では防食電流密度は経時的に増加する傾向を示し、目標シフト量 200 mV で4~200 mA/m²、目標シフト量 100 mV で1~20 mA/m²、目標シフト量 50 mV で2~20 mA/m²であった。一方、[Cl⁻]=3.8 kg/m³では防食電流密度は横ばい、あるいは緩やかに低下する傾向を示し、目標シフト量 200 mV で0.3~0.5 mA/m²、目標シフト量 100 mV で0.09~0.2 mA/m²、目標シフト量 50 mV で0.01~0.1 mA/m²であった。

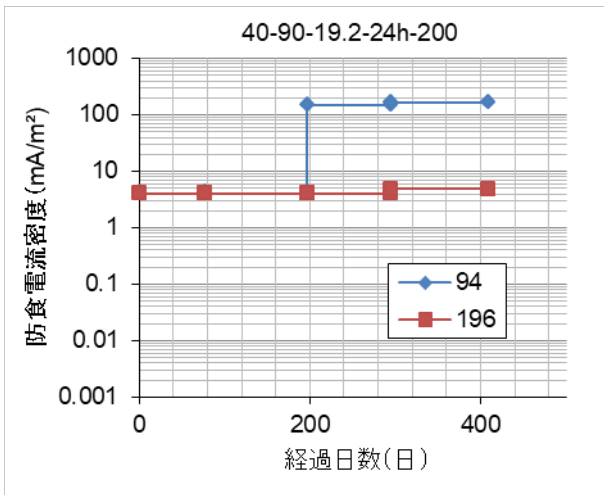


図-3.5.2 防食電流密度の経時変化①

(40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, シフト量 200 mV)

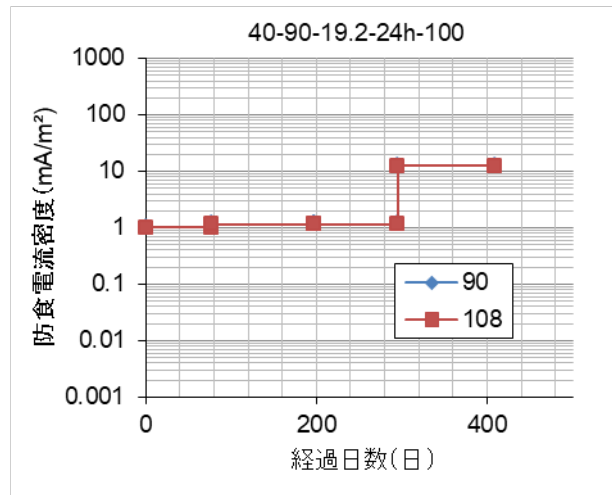


図-3.5.3 防食電流密度の経時変化②

(40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, シフト量 100 mV)

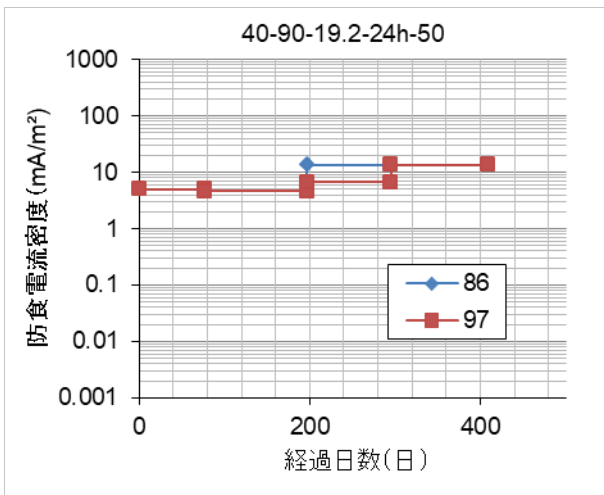


図-3.5.4 防食電流密度の経時変化③

(40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, シフト量 50 mV)

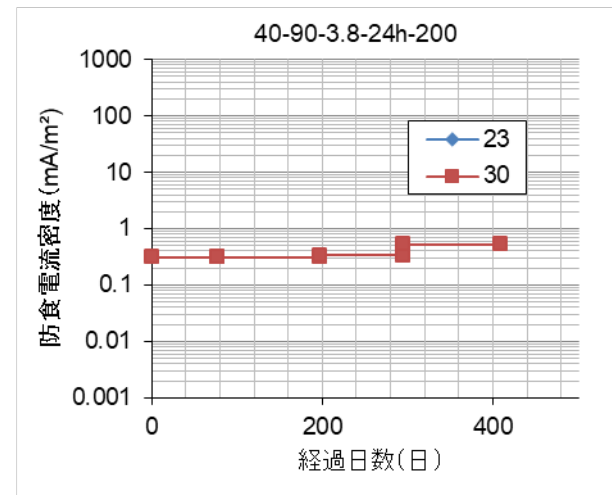


図-3.5.5 防食電流密度の経時変化④

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 200 mV)

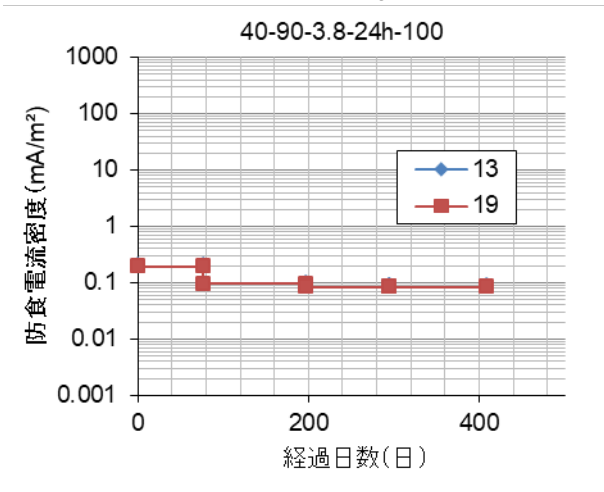


図-3.5.6 防食電流密度の経時変化⑤

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 100 mV)

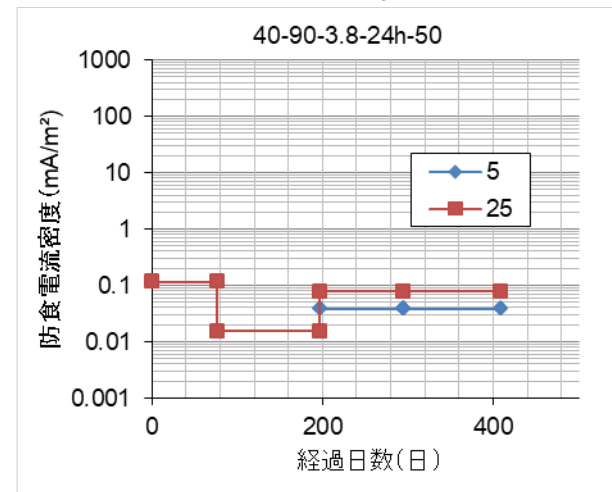


図-3.5.7 防食電流密度の経時変化⑥

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 50 mV)

(3) 復極量

24 時間後復極量の経時変化を図-3.5.8～図-3.5.13, 24 時間後復極量の平均値を図-3.5.14, 4 時間後復極量の経時変化を図-3.5.15～図-3.5.20, 4 時間後復極量の平均値を図-3.5.21 に示す。24 時間後復極量は, $[Cl^-]=3.8\text{kg/m}^3$ は概ね目標シフト量の付近で推移していたが, $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ は目標シフト量から大きく外れており, 4 時間後復極量においても同様の傾向であった。また, 24 時間後および 4 時間後復極量の平均値を見ても, $[Cl^-]=3.8\text{kg/m}^3$ は目標シフト量に近い値を示しているのに対し, $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ はいずれの供試体も目標シフト量から大きく外れていた。図-3.5.22～図-3.5.27 には, 4 時間後復極量と 24 時間後復極量との差を示す。 $[Cl^-]=3.8\text{kg/m}^3$ ではいずれの目標シフト量においてもプラスの値を示しているが, $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ ではマイナスの値を示すものが認められた。これは, 4 時間後復極量よりも 24 時間後復極量の値のほうが小さいことを示しており, 通電停止から 24 時間(測定終了時間)が経過する前に復極過程が終了し, 腐食状態に移行していることを意味している。

図-3.5.28 は通電オフ後の内部鋼材の電位を連続モニタリングしたものである。目標シフト量 200 mV では, 通電停止から 21 時間後まで復極状態が続いているのに対して, 目標シフト量 100 mV では, 1.2 時間で腐食状態に移行しているのが認められる。このような場合, 復極量は 53 mV となるが, 適正な評価とは言えない。この現象は高温環境のため, 電気防食による副次的効果(鋼材表面の pH 上昇や溶存酸素濃度の低下)が短時間で終了し, 24 時間が経過する前に腐食状態に移行したことにより生じたものと考えられる。このような環境下で復極量を適正に評価するためには, 通電停止後の内部鋼材の電位を連続モニタリングし, オフ電位の最も貴な値とインスタントオフ電位との差を復極量としなければならない。

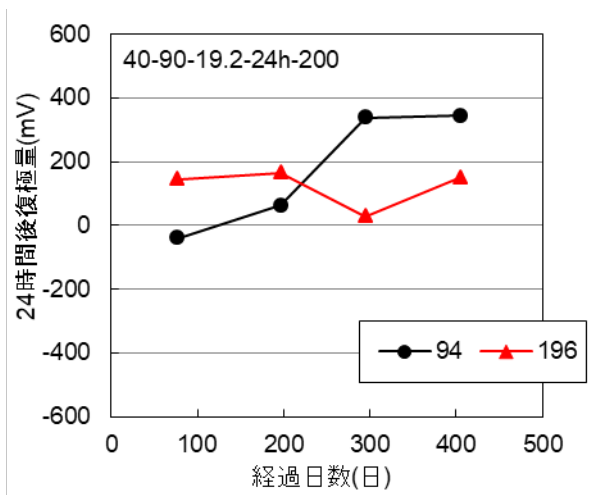


図-3.5.8 24 時間後復極量の経時変化①

(40°C-90%RH $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$, シフト量 200 mV)

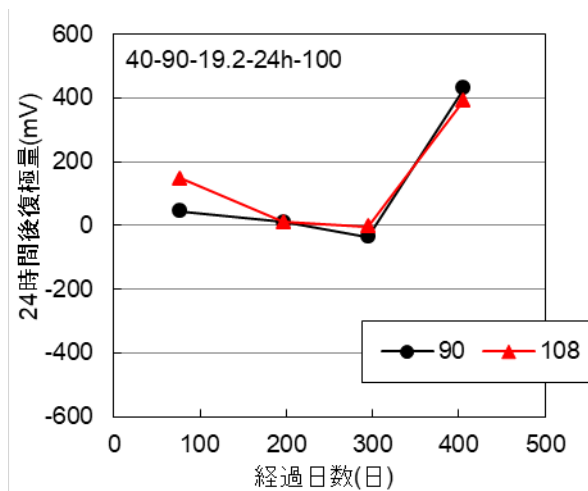


図-3.5.9 24 時間後復極量の経時変化②

(40°C-90%RH $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$, シフト量 100 mV)

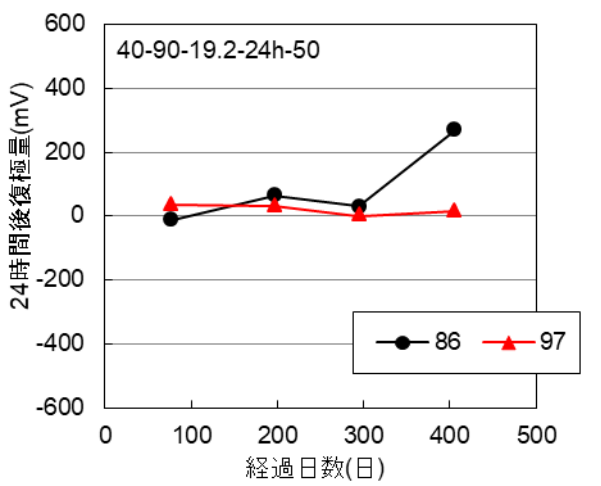


図-3.5.10 24時間後復極量の経時変化③

(40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, シフト量 100mV)

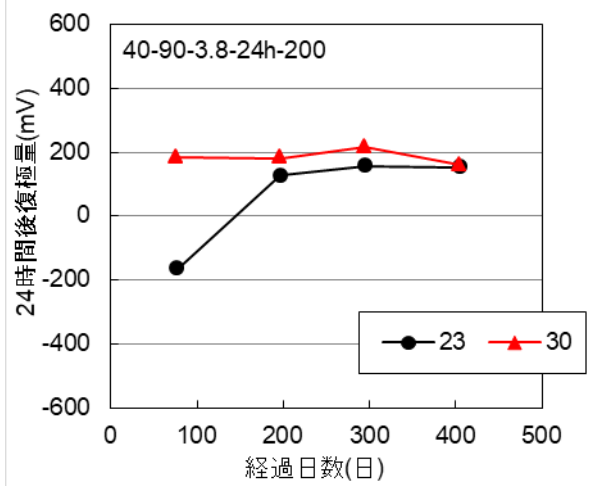


図-3.5.11 24時間後復極量の経時変化④

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 200mV)

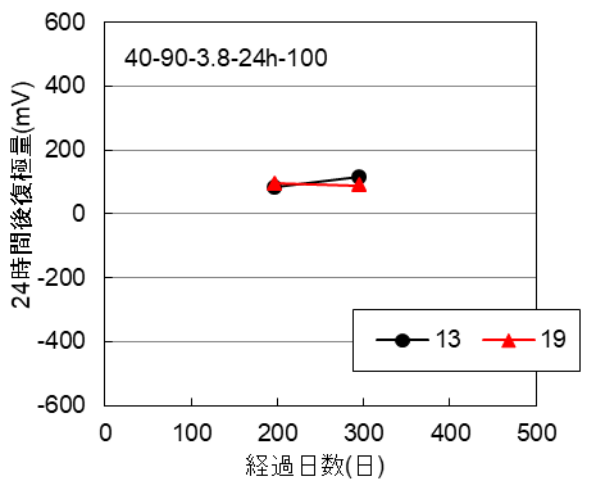


図-3.5.12 24時間後復極量の経時変化⑤

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 100 mV)

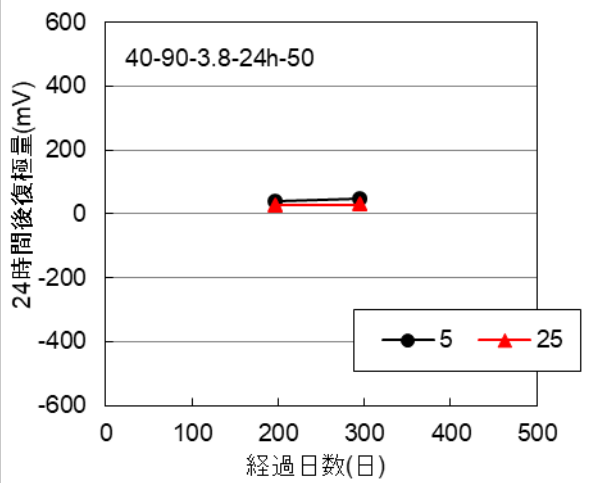


図-3.5.13 24時間後復極量の経時変化⑥

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 50 mV)

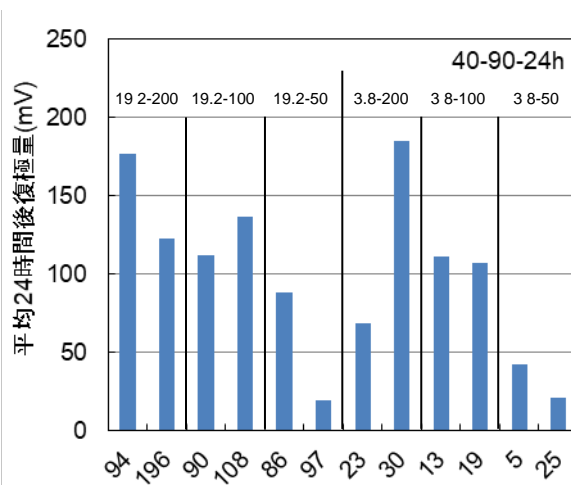


図-3.5.14 24時間後復極量の平均値 (40°C-90%RH)

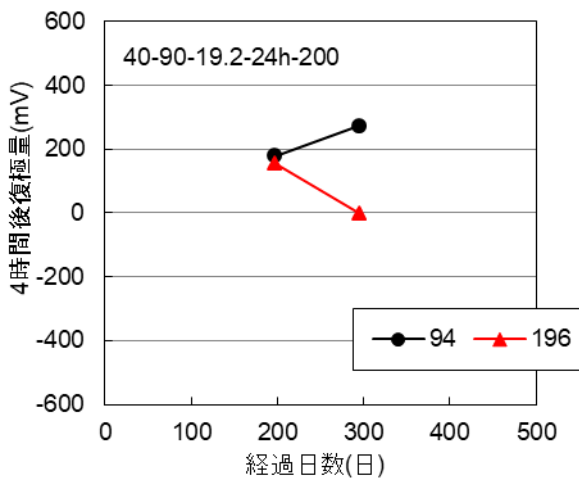


図-3.5.15 4時間後復極量の経時変化①

(40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, シフト量 200 mV)

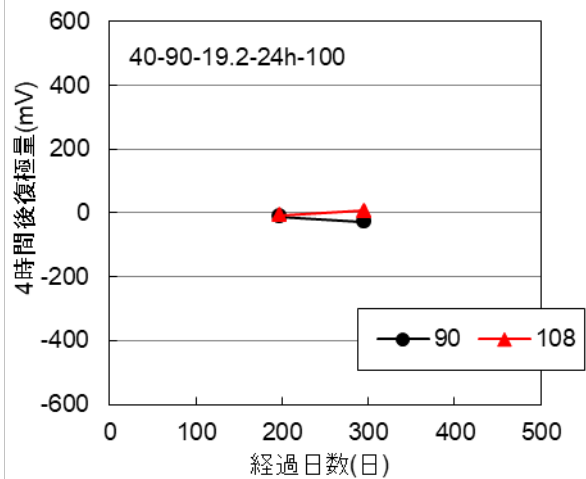


図-3.5.16 4時間後復極量の経時変化②

(40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, シフト量 100 mV)

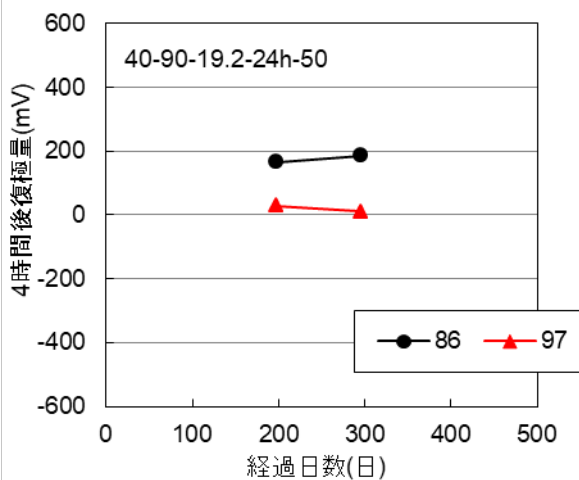


図-3.5.17 4時間後復極量の経時変化③

(40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, シフト量 50 mV)

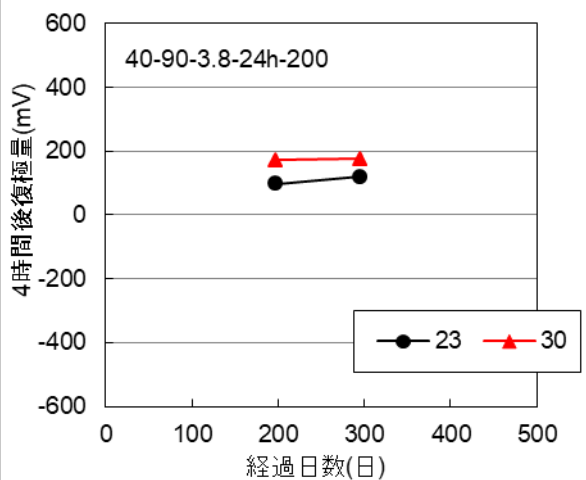


図-3.5.18 4時間後復極量の経時変化④

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 200 mV)

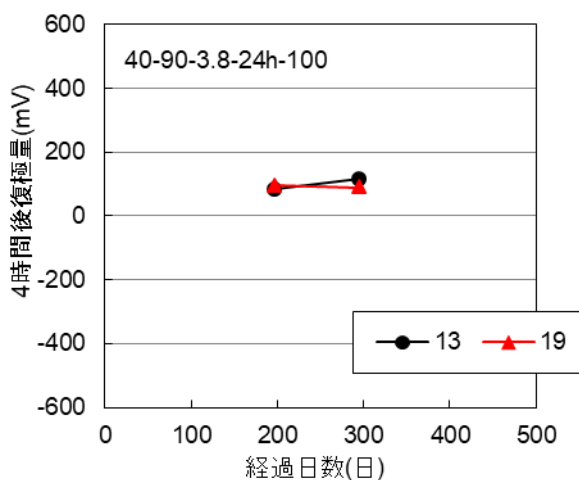


図-3.5.19 4時間後復極量の経時変化⑤

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 100 mV)

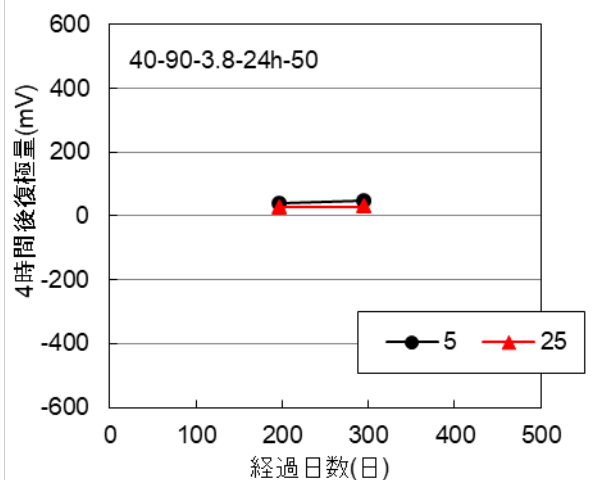


図-3.5.20 4時間後復極量の経時変化⑥

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 50 mV)

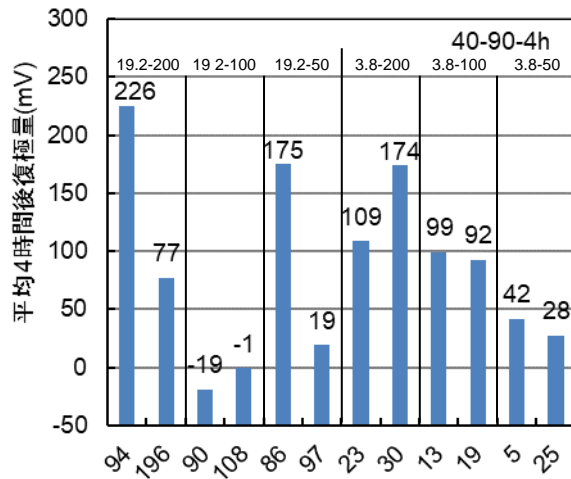


図-3.5.21 4時間後復極量の平均値 (40°C-90%RH)

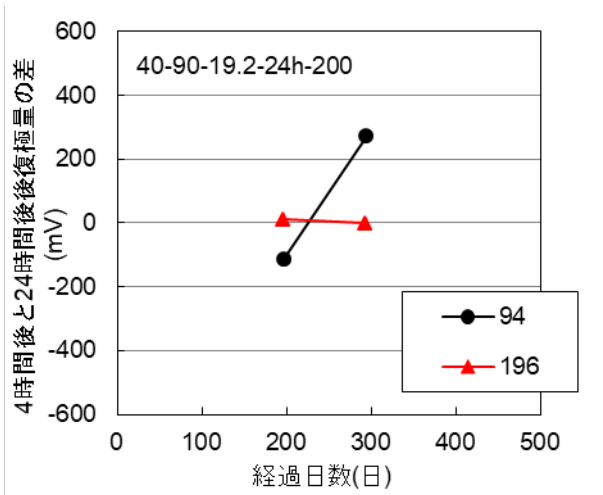


図-3.5.22 4時間後と24時間後復極量の差①

(40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, シフト量 200 mV)

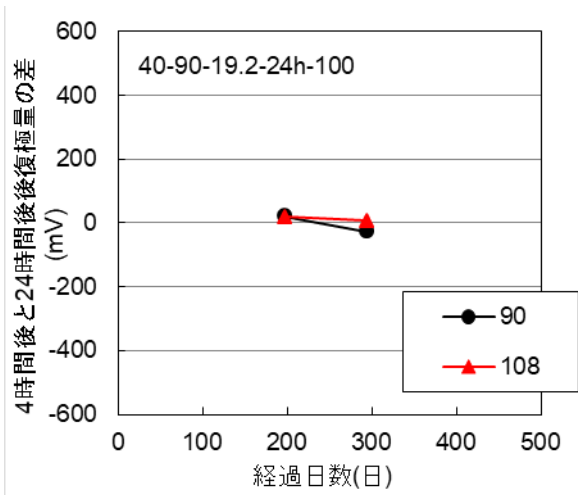


図-3.5.23 4時間後と24時間後復極量の差②

(40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, シフト量 100 mV)

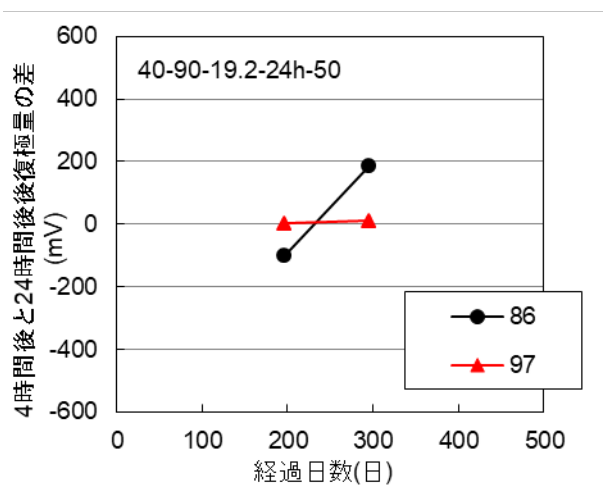


図-3.5.24 4時間後と24時間後復極量の差③

(40°C-90%RH [Cl]=19.2 kg/m³, シフト量 50 mV)

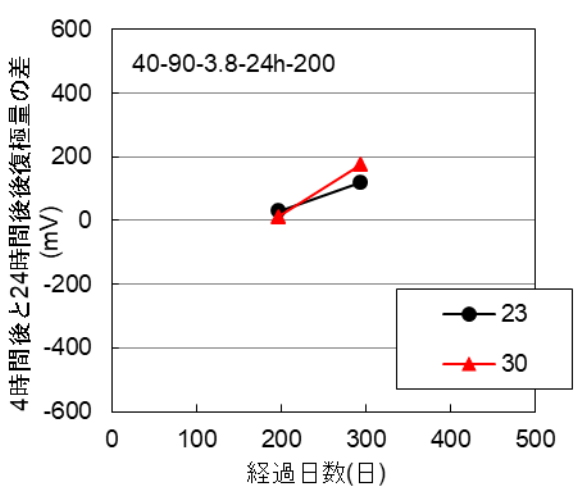


図-3.5.25 4時間後と24時間後復極量の差④

(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 200 mV)

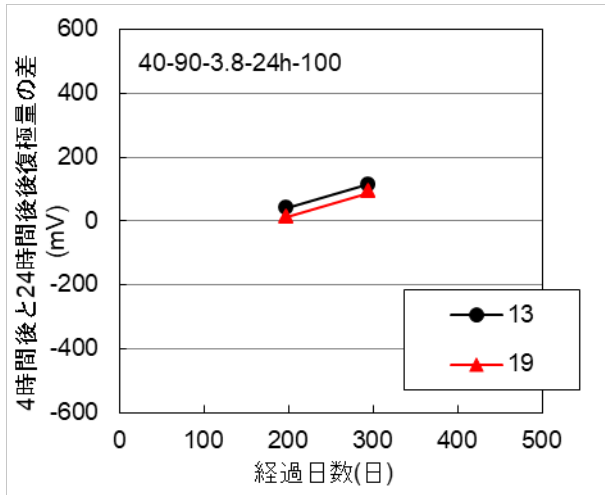


図-3.5.26 4時間後と24時間後復極量の差⑤
(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 100 mV)

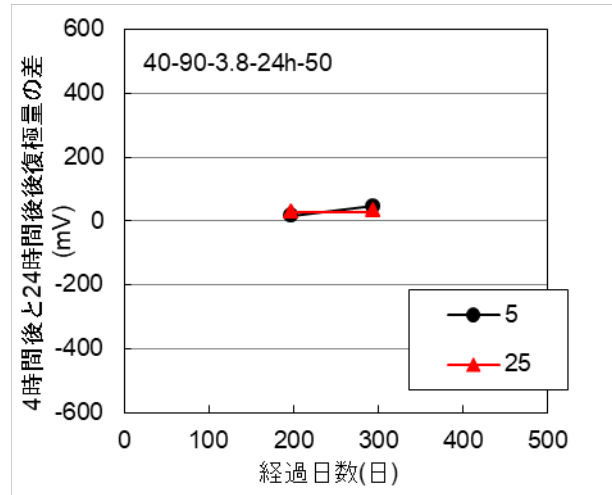


図-3.5.27 4時間後と24時間後復極量の差⑥
(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 50 mV)

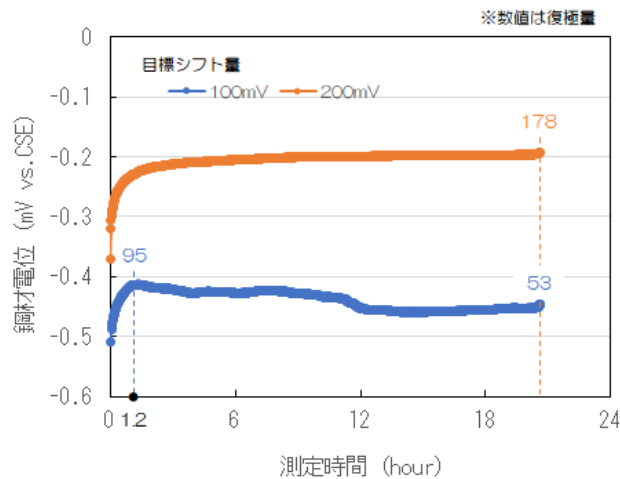


図-3.5.28 オフ電位の連続測定の一例 (40°C-90%RH)

(4) 通電停止後のオフ電位の変化

24時間後の鋼材の自然電位(24時間後オフ電位)の経時変化を図-3.5.29～図-3.5.34, 4時間後のオフ電位の経時変化(4時間後オフ電位)を図-3.5.35～図-3.5.40に示す。オフ電位はいずれも塩化物イオン量による違いが顕著に認められた。[Cl]=3.8 kg/m³では, 試験全体では時間の経過とともに電位は卑化する傾向を示し, 目標シフト量 50 mV と 100 mV においては0～100日にかけて貴化する傾向を示したが, それ以降は卑化する傾向を示した。目標シフト量 200 mV は概ね時間の経過とともに卑化する傾向を示した。いずれもオフ電位は-200～-300 mV vs.CSE の範囲で推移しており, プロットの多くは自然電位判定における「不確定」の領域に位置していた。[Cl]=19.2 kg/m³では, 目標シフト量 100mV と 200 mV が 200～300日まで低くなる傾向を示したのに対し, 目標シフト量 50 mV は安定して推移し, いずれも試験後期は高くなる傾向を示した。[Cl]=3.8 kg/m³に比べて卑な電位を示しており, -300～-700 mV vs.CSE の範囲で推移していた。プロットの多くは自然電位判定における「90%以上の確率で腐食あり」の領域に位置していた。

平均復極量とオフ電位を図-3.5.41 に示す。[Cl]⁻=19.2 kg/m³では平均復極量が大きくなるほど貴な電位を示す傾向にあり、その傾向は4時間後オフ電位のほうが顕著であった。[Cl]⁻=3.8 kg/m³では、24時間後オフ電位には違いは見られなかったものの、4時間後オフ電位には若干ではあるが平均復極量が大きくなるほど卑な電位を示す傾向が認められた。

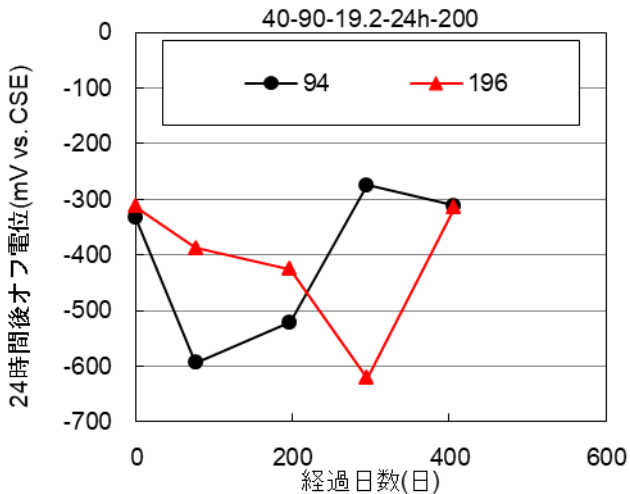


図-3.5.29 24時間後オフ電位の経時変化
(40°C-90%RH [Cl]⁻=19.2 kg/m³, シフト量 200 mV)

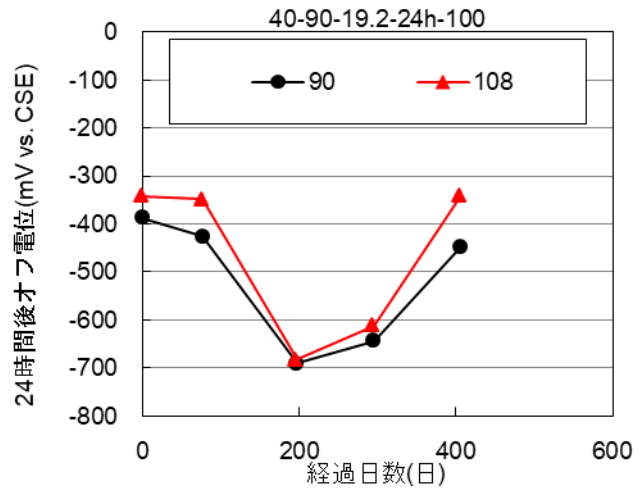


図-3.5.30 24時間後オフ電位の経時変化
(40°C-90%RH [Cl]⁻=19.2 kg/m³, シフト量 100 mV)

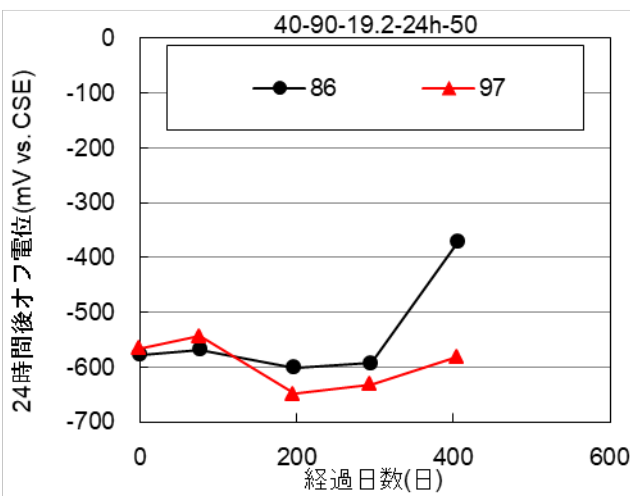


図-3.5.31 24時間後オフ電位の経時変化
(40°C-90%RH [Cl]⁻=19.2 kg/m³, シフト量 50 mV)

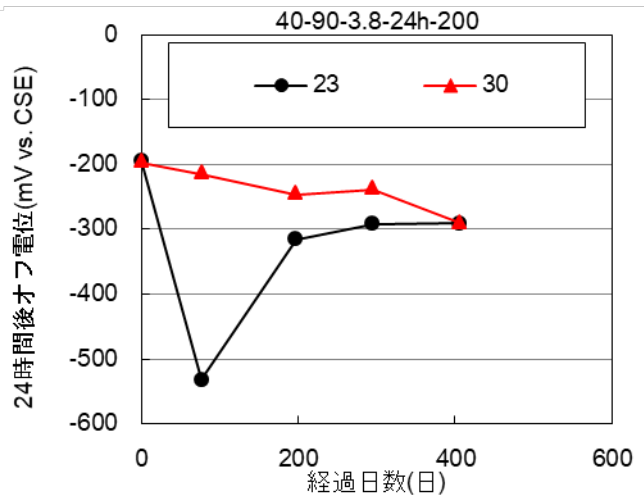


図-3.5.32 24時間後オフ電位の経時変化
(40°C-90%RH [Cl]⁻=3.8 kg/m³, シフト量 200 mV)

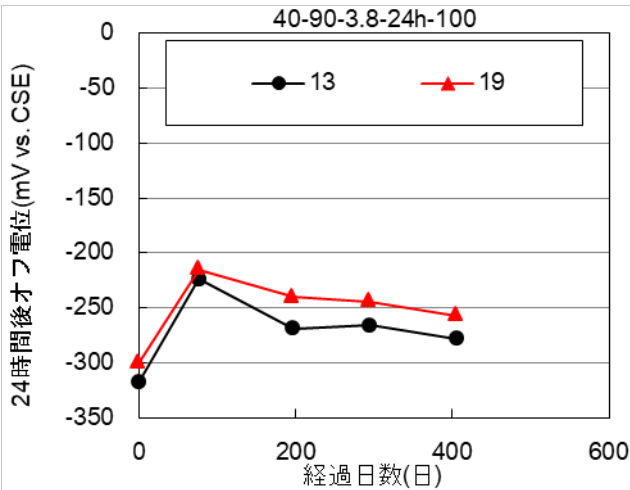


図-3.5.33 24 時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, シフト量 100 mV)

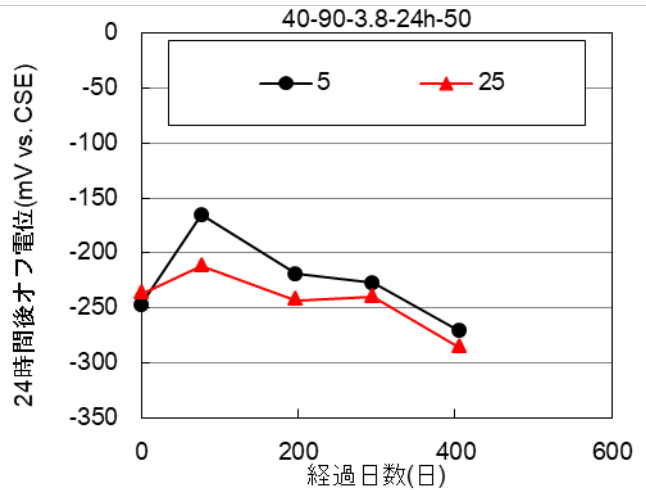


図-3.5.34 24 時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, シフト量 50 mV)

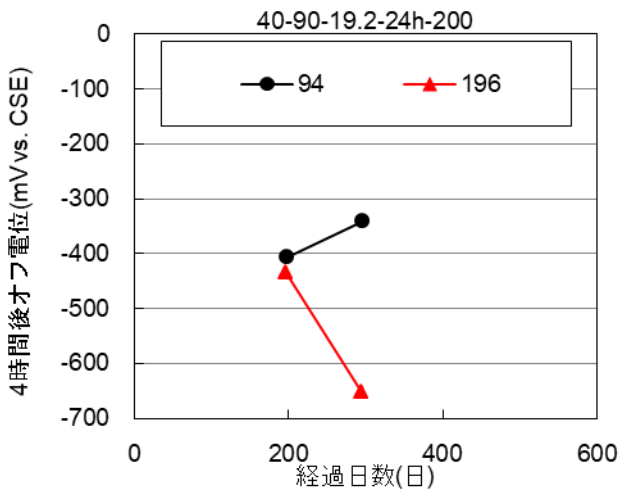


図-3.5.35 4 時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, シフト量 200 mV)

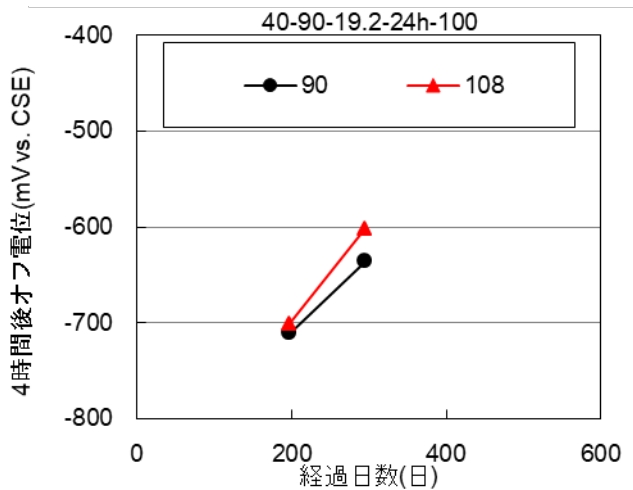


図-3.5.36 4 時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, シフト量 100 mV)

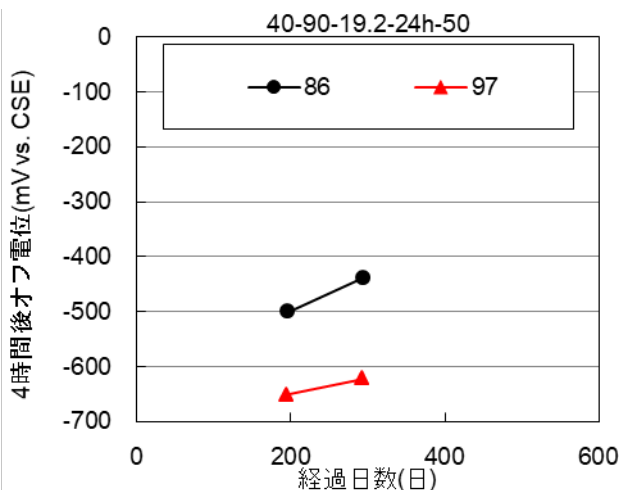


図-3.5.37 4 時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, シフト量 50 mV)

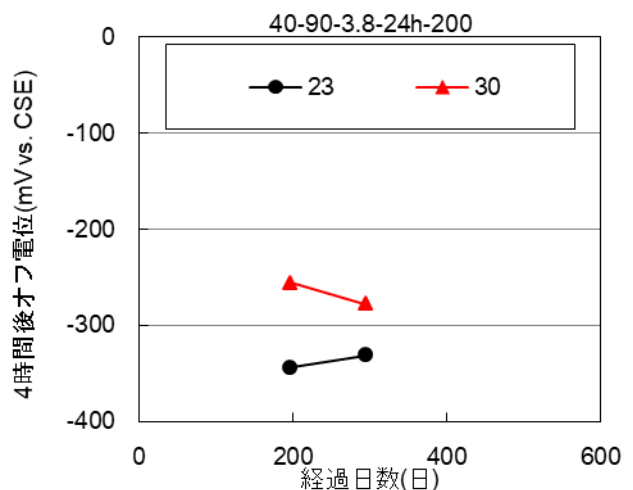


図-3.5.38 4 時間後オフ電位の経時変化

(40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, シフト量 200 mV)

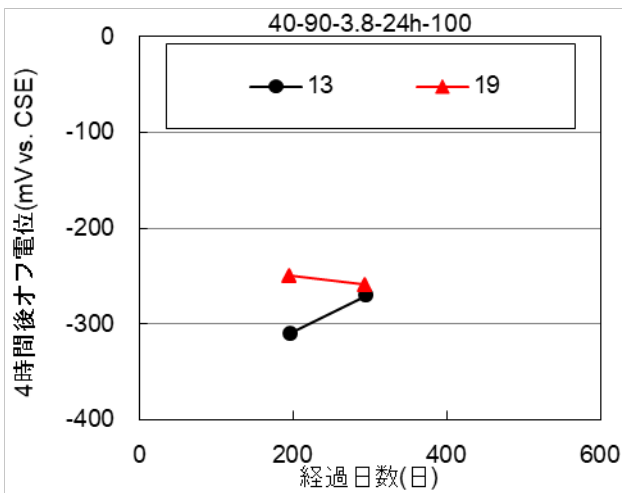


図-3.5.39 4時間後オフ電位の経時変化
(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 100 mV)

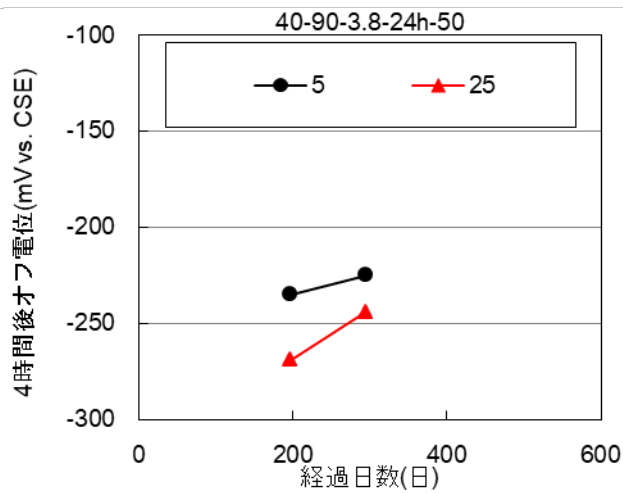
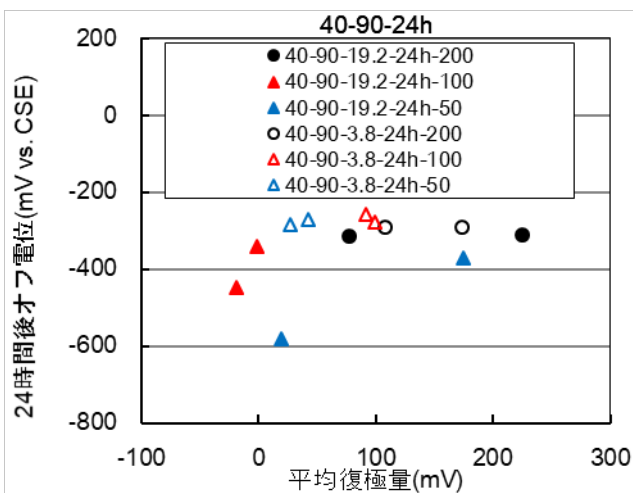
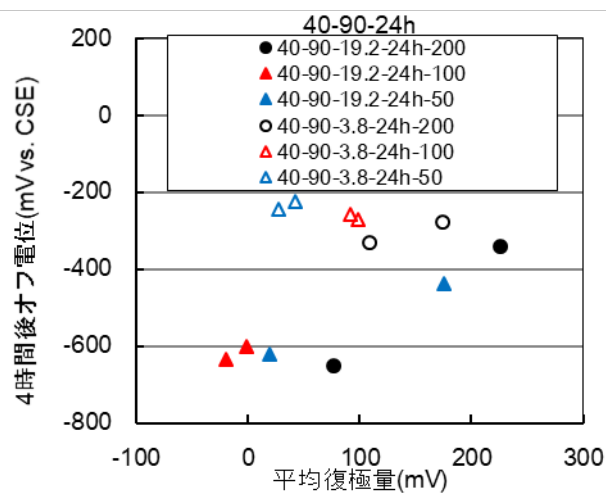


図-3.5.40 4時間後オフ電位の経時変化
(40°C-90%RH [Cl]=3.8 kg/m³, シフト量 50 mV)



(a) 24時間後オフ電位



(b) 4時間後オフ電位

図-3.5.41 平均復極量とオフ電位 (40°C-90%RH)

(5) 外観観察

試験終了後の供試体の外観と内部鋼材の表面状態を図-3.5.42～図-3.5.43に示す。なお、解体した供試体は、無通電供試体が各条件2体ずつ、通電供試体が各条件2体ずつで総数は16体である。[Cl⁻]=3.8 kg/m³において、無通電供試体には軽微な腐食が認められた。常時通電供試体では、目標シフト量50 mVに軽微な腐食が認められたが、目標シフト量100 mVと200 mVには腐食は認められなかった。一方、[Cl⁻]=19.2 kg/m³においては、無通電供試体の内部鋼材に激しい腐食が認められた。常時通電供試体では、いずれの目標シフト量においても内部鋼材の腐食が認められたが、目標シフト量が大きくなるほど腐食の程度は小さくなる傾向であった。





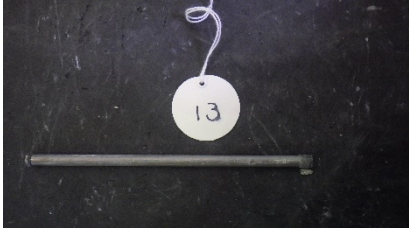
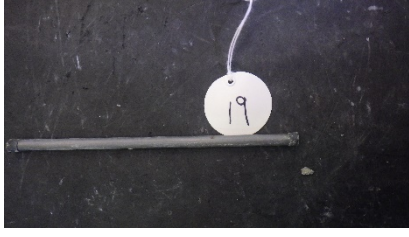


通電時間	目標シフト量	[Cl ⁻]=3.8 kg/m ³			
なし	なし	No.12		No.55	
24 時間	50mV	No.5		No.25	
	100mV	No.13		No.19	
	200mV	No.23		No.30	

図-3.5.42 解体した供試体の鉄筋表面状況 (40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³)







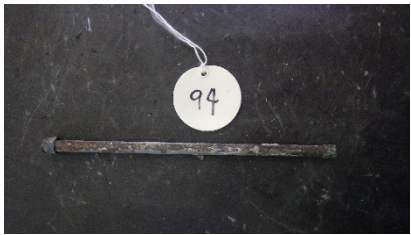

通電時間	目標シフト量	[Cl ⁻]=19.2 kg/m ³			
なし	なし	No.101		No.197	
24 時間	50mV	No.86		No.97	
	100mV	No.90		No.108	
	200mV	No.94		No.196	

図-3.5.43 解体した供試体の鉄筋表面状況 (40℃-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³)

(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度

内部鋼材の腐食減量率を図-3.5.44 に示す。無通電供試体の腐食減量率は、[Cl⁻]=3.8 kg/m³が 1.2～1.4%であるのに対して[Cl⁻]=19.2 kg/m³は 21～23%であり、[Cl⁻]=19.2 kg/m³の供試体のほうが 19 倍程度大きい値を示した。常時通電供試体は、[Cl⁻]=3.8 kg/m³では無通電供試体と比べて腐食減量率は 2 分の 1 程度、[Cl⁻]=19.2 kg/m³では 20 分の 1 程度(いずれも平均値比較)に抑えられていた。質量減から求めた平均腐食電流密度を図-3.5.45 に示す。無通電供試体では、[Cl⁻]=3.8 kg/m³が約 1.5 μA/cm²であるのに対して[Cl⁻]=19.2 kg/m³は約 25 μA/cm²であり、[Cl⁻]=19.2 kg/m³の供試体のほうが 17 倍ほど大きな平均腐食電流密度を示した。一方、常時通電供試体では、[Cl⁻]=3.8 kg/m³が 0.45～0.83 μA/cm²、[Cl⁻]=19.2 kg/m³が 0.5～3.9 μA/cm²であり、いずれも防食電流の供給によって内部鋼材の腐食は大きく軽減されているものの、CEB 基準の 0.1 μA/cm²よりも 5～40 倍大きい値を示していることから、40℃-90%RH の環境下では目標シフト量 200 mV で常時通電をしても、本試験における通電期間では再不働状態は得られないと結論付ける。

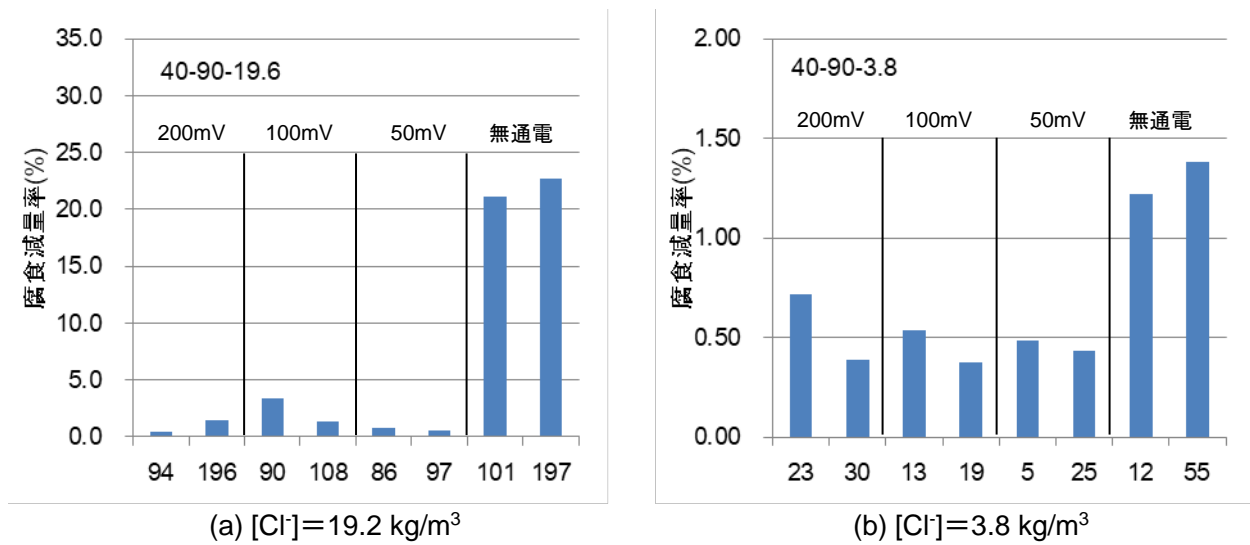


図-3.5.44 腐食減量率 (40°C-90%RH)

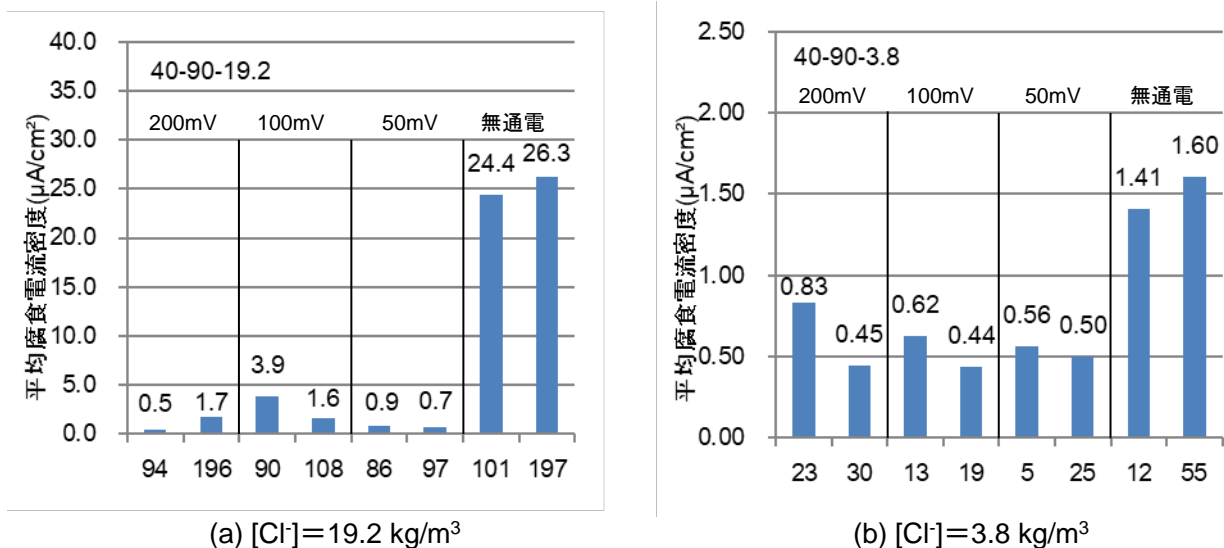


図-3.5.45 平均腐食電流密度 (40°C-90%RH)

(7) 分極曲線

通電停止から24時間経過後に測定した内部鋼材の分極曲線を図-3.5.46～図-3.5.53に示す。なお、凡例中のAはアノード分極曲線、Cはカソード分極曲線を示している。無通電供試体はいずれの塩化物イオン量においても分極曲線に大きな変化は認められなかったが、 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ では供試体に個体差が認められ、No.197はNo.101に比べてアノード・カソード分極曲線とも活性電流のピークが大きかった。これは、No.197のほうが内部鋼材の腐食が進行しており、錆の還元あるいは実質の反応面積の増加が影響していると推測される。常時通電供試体でも同様に $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ のほうが分極曲線の活性電流のピークが大きくなっていた。 $[Cl^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$ は、いずれの目標シフト量においても経時的な変化はほとんど認められなかった。 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ は、カソード分極曲線に概ね変化は認められないものの、アノード反応の抑制により自然電位が上昇していた。カソード反応による鋼材表面のpH上昇によりアノード反応が抑制されたことが原因と考えられる。

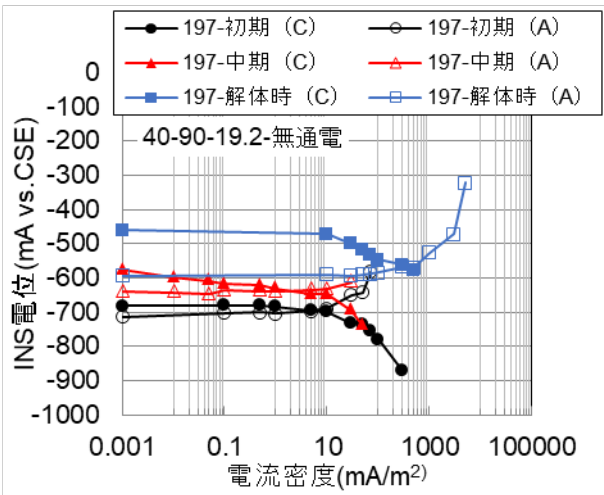
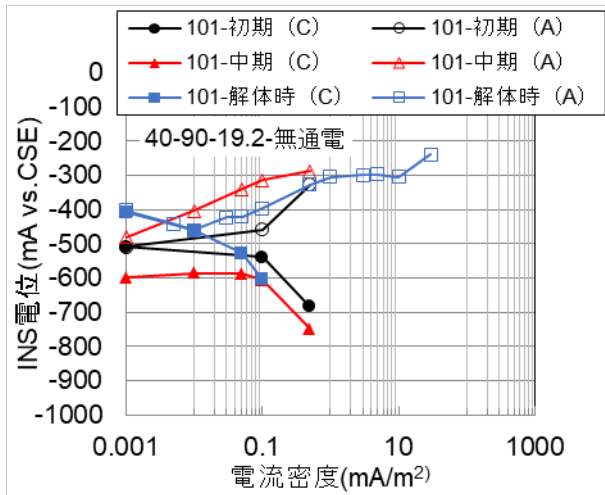


図-3.5.46 分極曲線①

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 無通電)

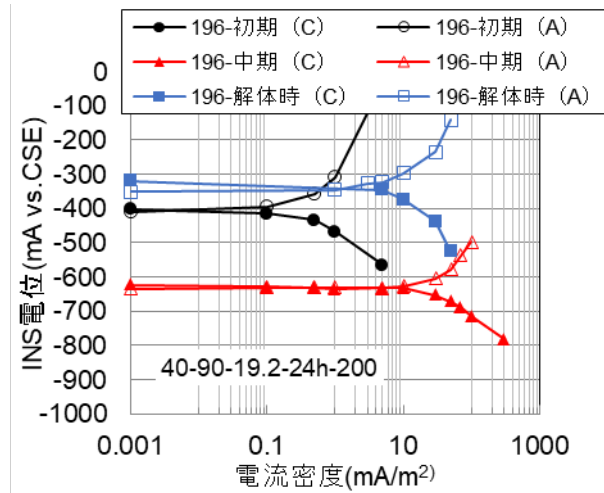
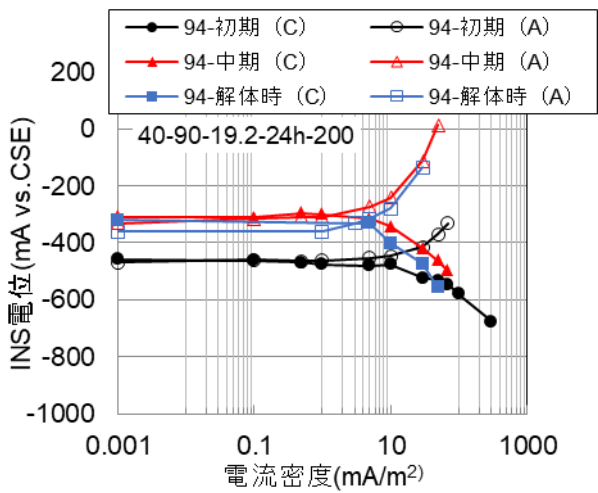


図-3.5.47 分極曲線②

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 目標シフト量 200 mV)

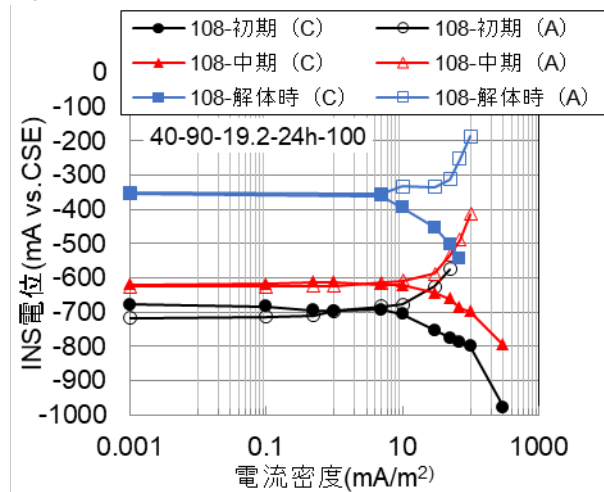
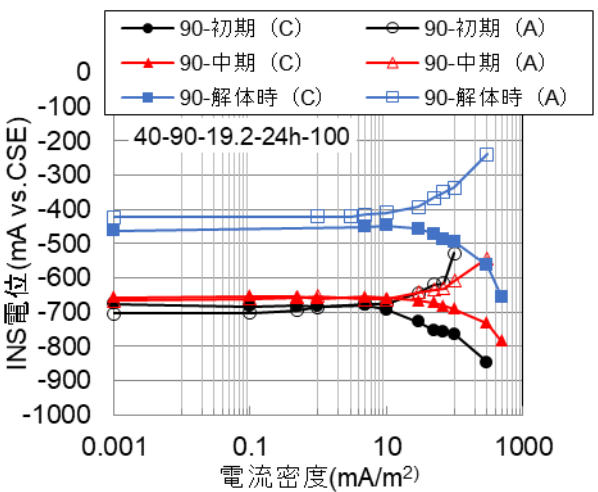


図-3.5.48 分極曲線③

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 目標シフト量 100 mV)

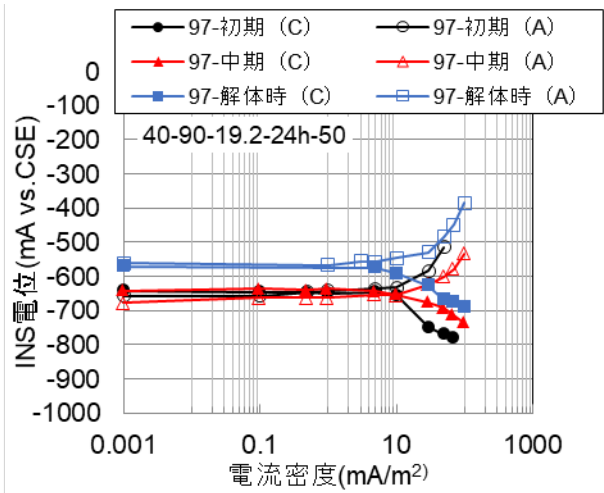
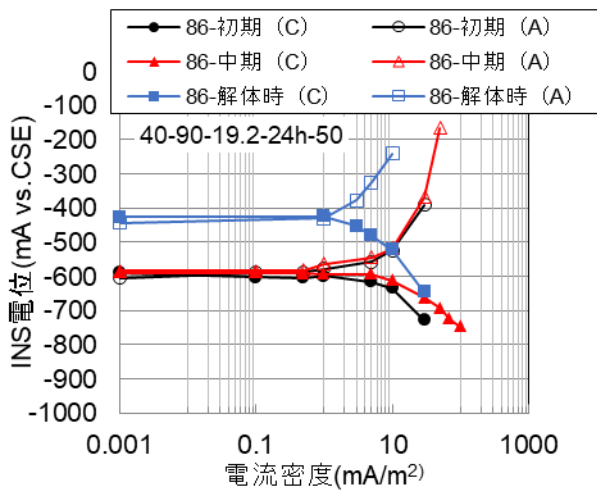


図-3.5.49 分極曲線④

(40°C-90%RH [Cl⁻]=19.2 kg/m³, 目標シフト量 50 mV)

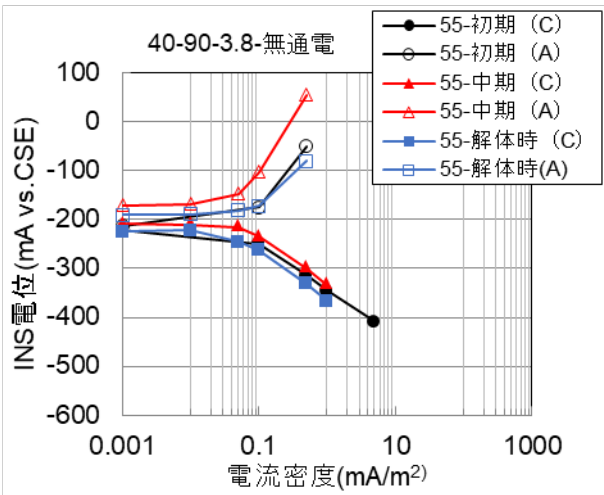
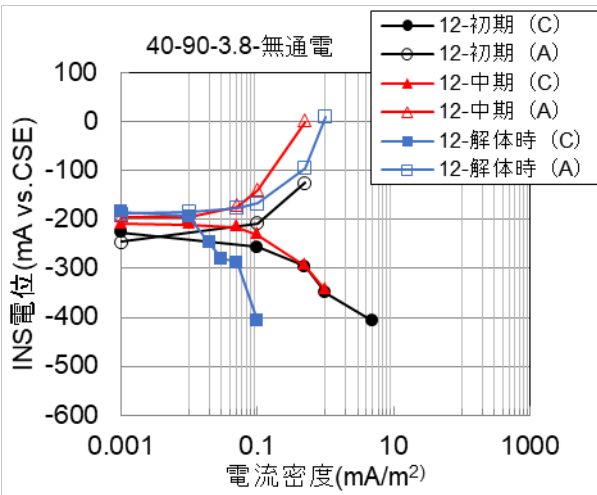


図-3.5.50 分極曲線⑤

(40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, 無通電)

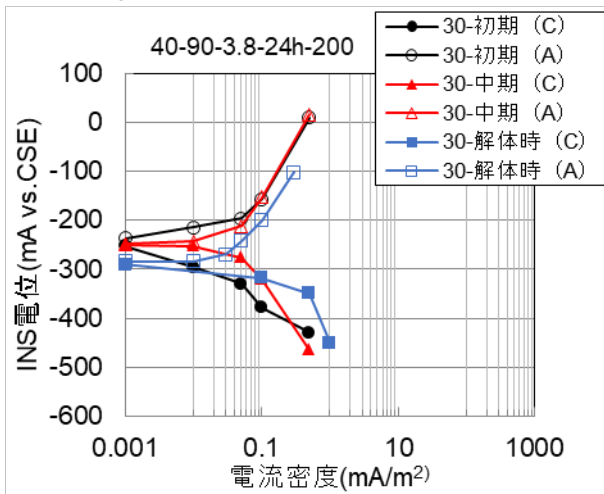
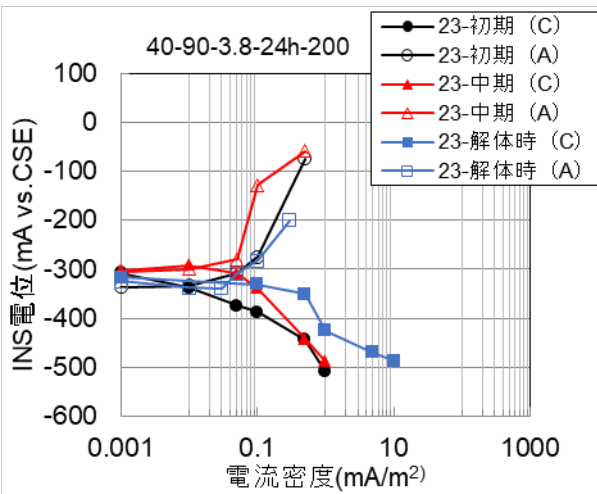


図-3.5.51 分極曲線⑥

(40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, 目標シフト量 200 mV)

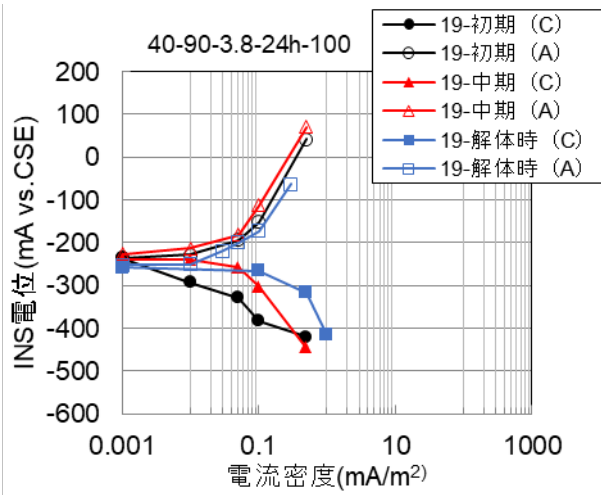
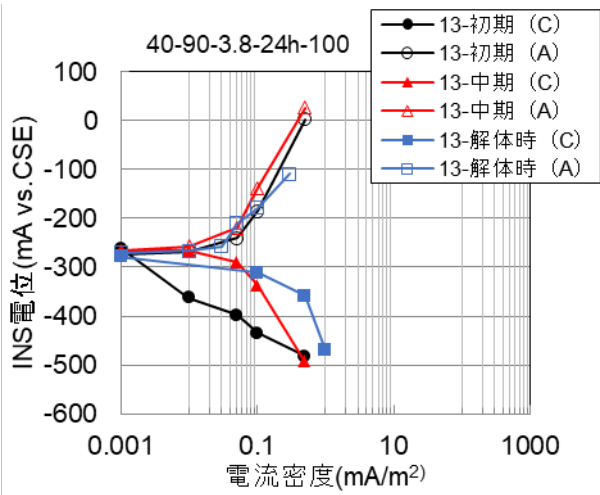


図-3.5.52 分極曲線⑦

(40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, 目標シフト量 100 mV)

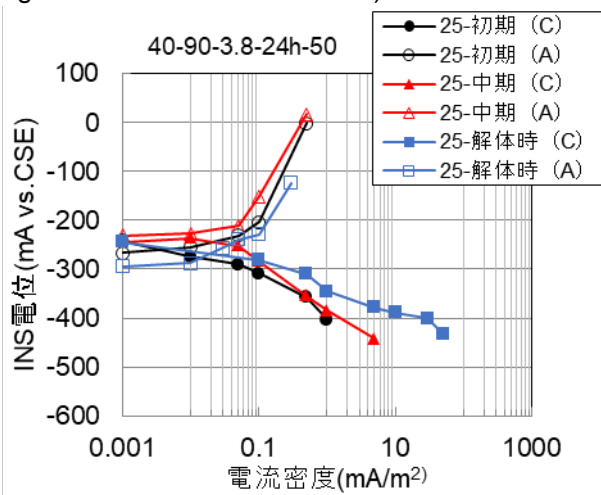
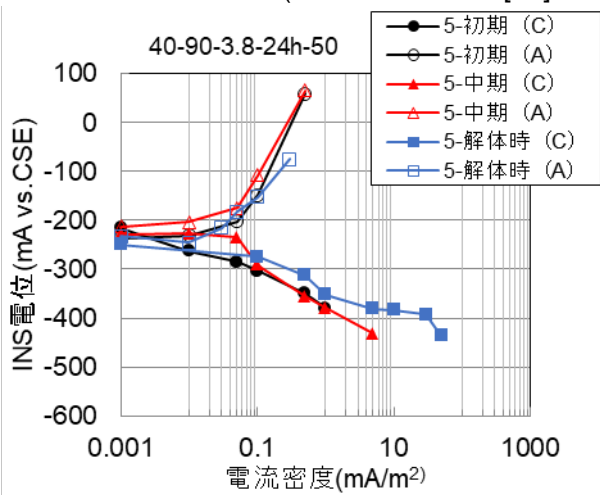


図-3.5.53 分極曲線⑧

(40°C-90%RH [Cl⁻]=3.8 kg/m³, 目標シフト量 50 mV)

3.6 屋外暴露の試験結果(間欠通電)

(1) 無通電供試体の自然電位

図-3.6.1 に無通電供試体の自然電位の経時変化を示す。なお、本環境に暴露した供試体は $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ のみであり、内部の鋼材は塩化物イオンが多量に存在する環境下に置かれていた。試験期間中はほとんどの供試体が ASTM 基準で「90%以上の確率で腐食あり」の判定となる -350 mV vs.CSE 以下の電位を示していた。自然電位は季節によって変化が生じており、夏季は比較的卑な電位を示し、冬季は比較的貴な電位を示す傾向にあった。暴露開始当初は自然電位に 200 mV 程度のバラツキが見られたが、試験後期にはバラツキが小さくなり 50 mV 以内で収まるようになった。

これらの状況から、屋外暴露の場合、 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ では鋼材は常に腐食状態にあり、腐食が進行することで個々の供試体の自然電位のバラツキは小さくなっていくものと考えられる。

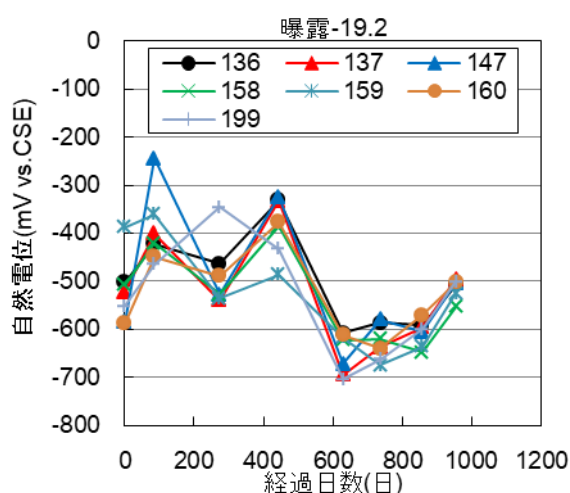


図-3.6.1 自然電位の経時変化 (屋外暴露 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$)

(2) 防食電流密度

図-3.6.2, 図-3.6.3 に防食電流密度の経時変化を示す。供試体の塩化物イオン量が 19.2 kg/m^3 と多いため、試験初期から通常の電気防食よりも防食電流密度が高かった。4時間通電の方が 100 mV の復極量を満たすために必要な防食電流密度が高く、試験後期には4時間, 8時間通電ともに防食電流密度が増加した。この理由としては通電時間が通常よりも短いためであると考えられる。最終的に防食電流密度は $20\sim 50 \text{ mA/m}^2$ 程度必要になった。この理由として、通電時間が短いため鋼材は不完全な防食状態にあり、初期は相対的に低い防食電流密度で目標シフト量を満足していたが、試験後期には活性な腐食を低い防食電流密度で抑えられなくなり、防食電流密度が高くなったと考えられる。また、4時間通電で一時的に防食電流密度が高くなったのは、調整時期の季節によるものと考えられる。

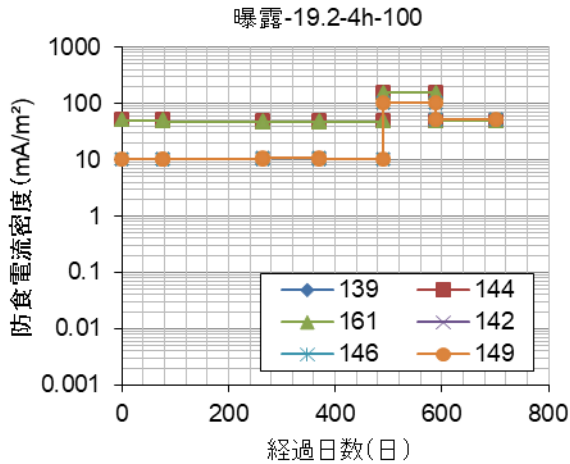


図-3.6.2 防食電流密度の経時変化
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 4 時間通電
目標シフト量 100 mV)

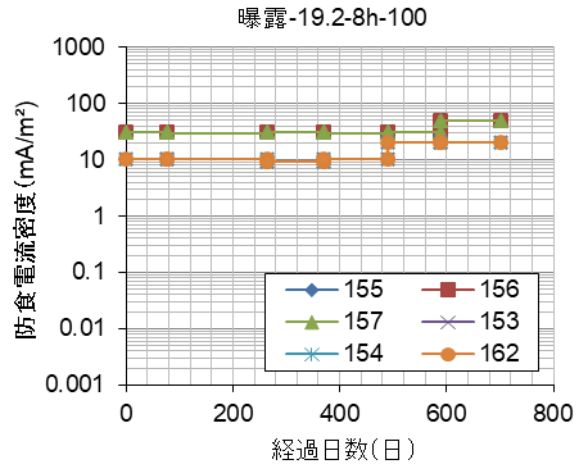


図-3.6.3 防食電流密度の経時変化
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 8 時間通電
目標シフト量 100 mV)

(3) 復極量

図-3.6.4, 図-3.6.5 に 4 時間後復極量の経時変化を示す。初期から高い防食電流密度に設定されていた 8 時間通電の供試体(No.155, 156, 157)は、4 時間後復極量が大きくなる傾向を示した。これは鋼材周辺の環境改善効果によるものであると考えられる。それ以外の供試体では復極量が小さくなる傾向にあった。これは調整した電流密度では腐食を完全に抑制することが困難になったためであると考えられる。

図-3.6.6, 図-3.6.7 に 24 時間後復極量の経時変化を示す。24 時間後復極量に関して、試験初期は概ね復極量 100 mV を満足していたが、試験後期にかけて復極量 100 mV を満足しないものが見られるようになった。4 時間後復極量が小さい時は 24 時間後復極量も小さく、逆に 4 時間後復極量が大きい時は 24 時間後復極量も大きくなった。また、4 時間および 8 時間通電の供試体で復極量が満足しなかった時期が同じ供試体が複数あった。このことから 4 時間および 8 時間通電では防食効果を満足できなくなる時期が似ていると考えられる。

図-3.6.8, 図-3.6.9 に 4 時間後復極量の平均値および 24 時間後復極量の平均値を示す。4 時間後復極量の平均値では、8 時間通電の供試体のほとんどが復極量 100 mV を上回っており、4 時間通電の供試体は半数が復極量 100 mV を上回っていた。24 時間後復極量の平均値では、全ての供試体が復極量 100 mV を上回っており、大幅に上回った供試体もあった。

図-3.6.10, 図-3.6.11 に 4 時間後復極量と 24 時間後復極量の差の経時変化を示す。本環境において、経過日数 400 日程度で総じて 4 時間後復極量と 24 時間後復極量の差が小さくなるもしくは負を示す傾向にあった。その後、供試体 No.153, 154, 162 の組以外は、4 時間後復極量と 24 時間後復極量の差が正を示す傾向にあった。これらの状況から、4 時間後復極量と 24 時間後復極量の差が正の場合、通電停止 4 時間後から 24 時間後までの間は復極過程にあり腐食反応は抑えられていると考えられ、差が負の場合は通電停止 4 時間後までに復極過程が終了し、通電停止後 4 時間後から 24 時間後までに腐食が再開していたと考えられる。

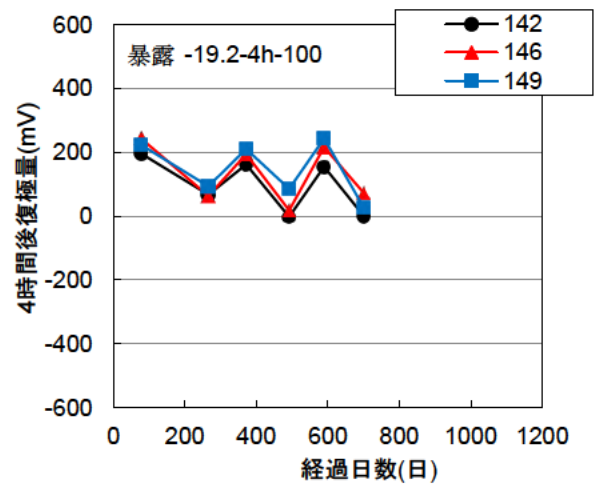
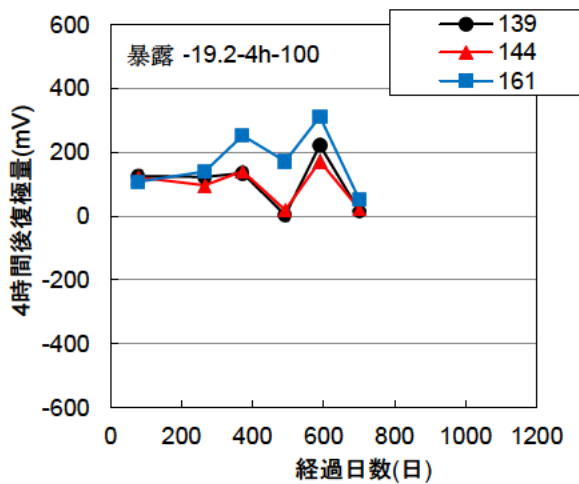


図-3.6.4 4時間後復極量の経時変化

(屋外暴露 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ 4時間通電 目標シフト量 100 mV)

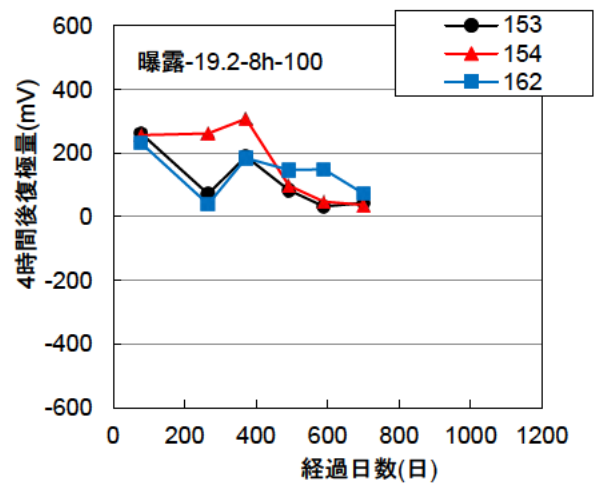
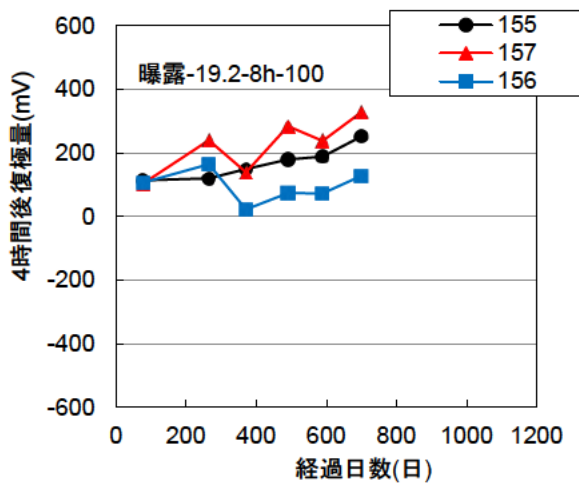


図-3.6.5 4時間後復極量の経時変化

(屋外暴露 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ 8時間通電 目標シフト量 100 mV)

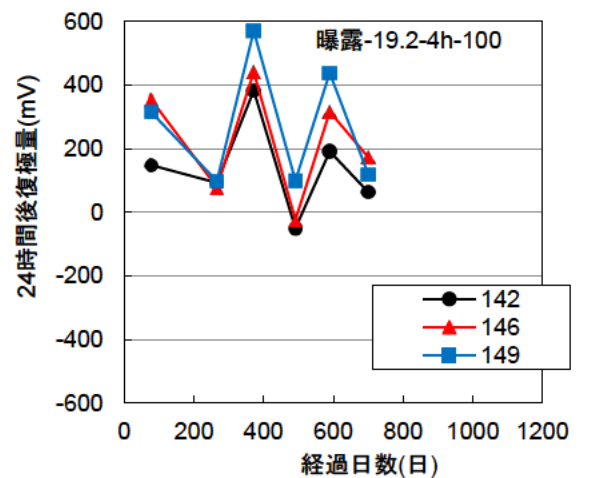
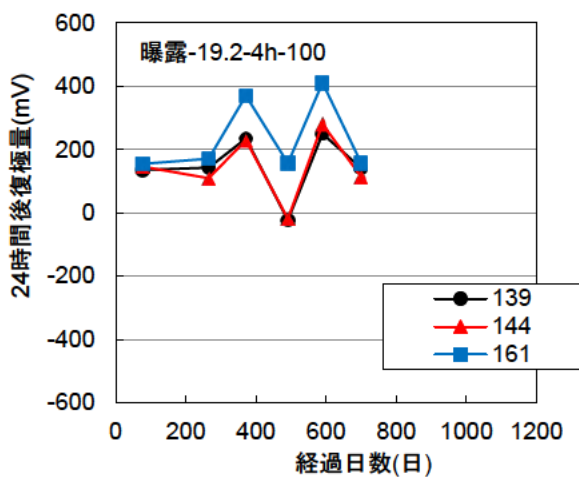


図-3.6.6 24時間後復極量の経時変化

(屋外暴露 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ 4時間通電 目標シフト量 100 mV)

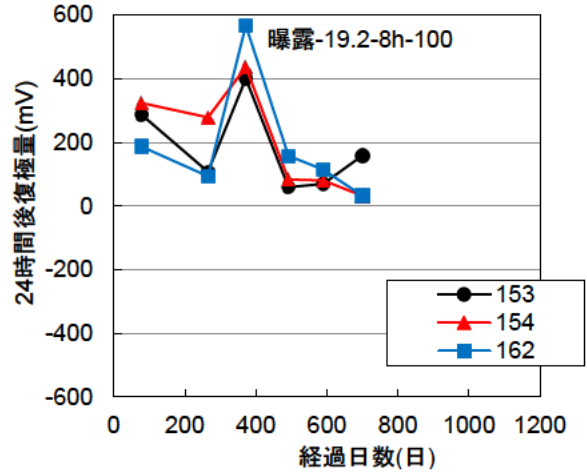
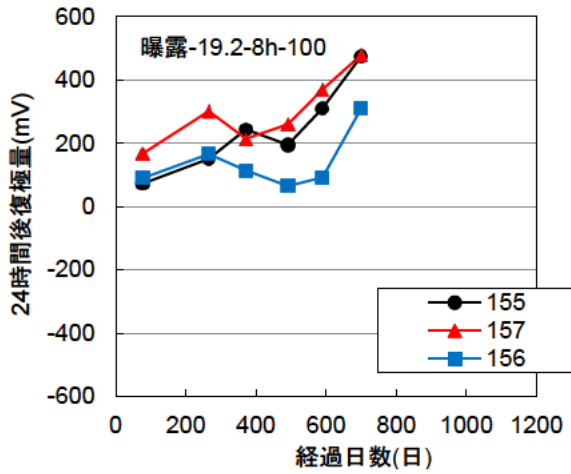


図-3.6.7 24 時間後復極量の経時変化

(屋外暴露 [Cl]=19.2 kg/m³ 8 時間通電 目標シフト量 100 mV)

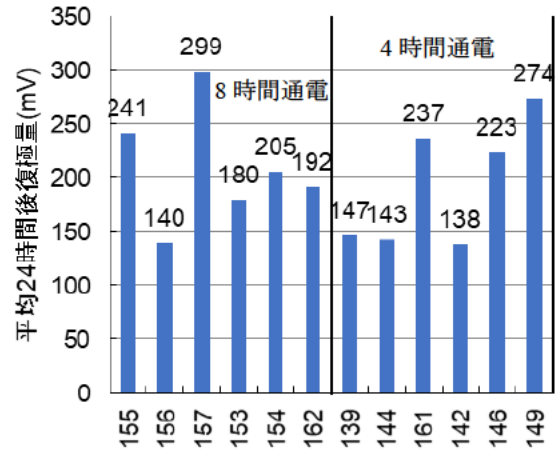
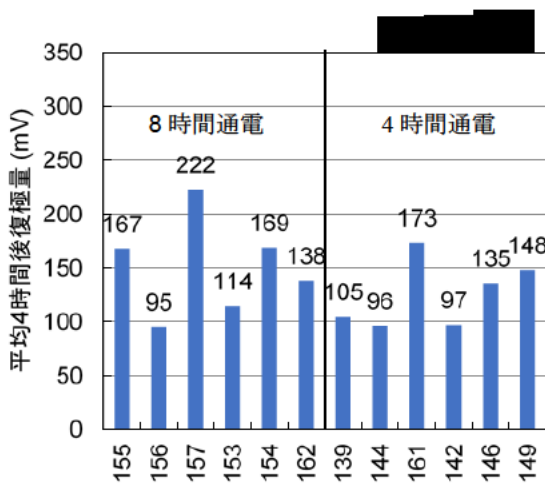


図-3.6.8 4 時間後復極量の平均値

図-3.6.9 24 時間後復極量の平均値

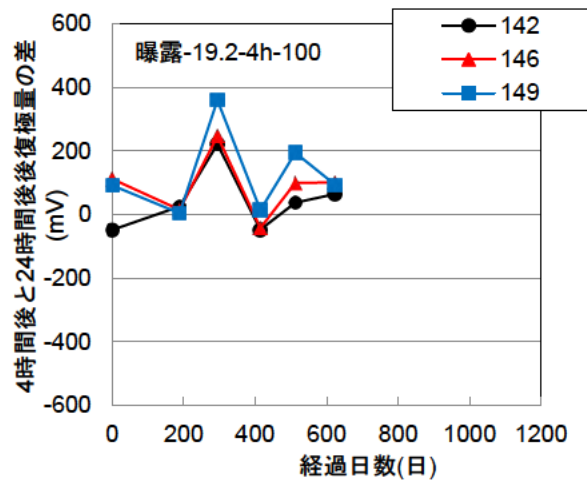
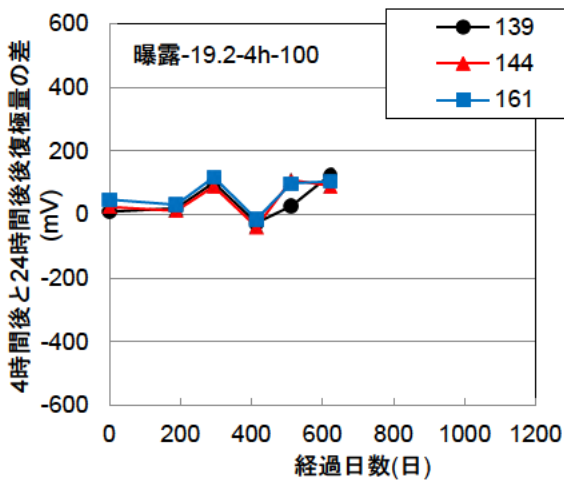


図-3.6.10 4 時間後復極量と 24 時間後復極量の差の経時変化

(屋外暴露 [Cl]=19.2kg/m³ 4 時間通電 目標シフト量 100 mV)

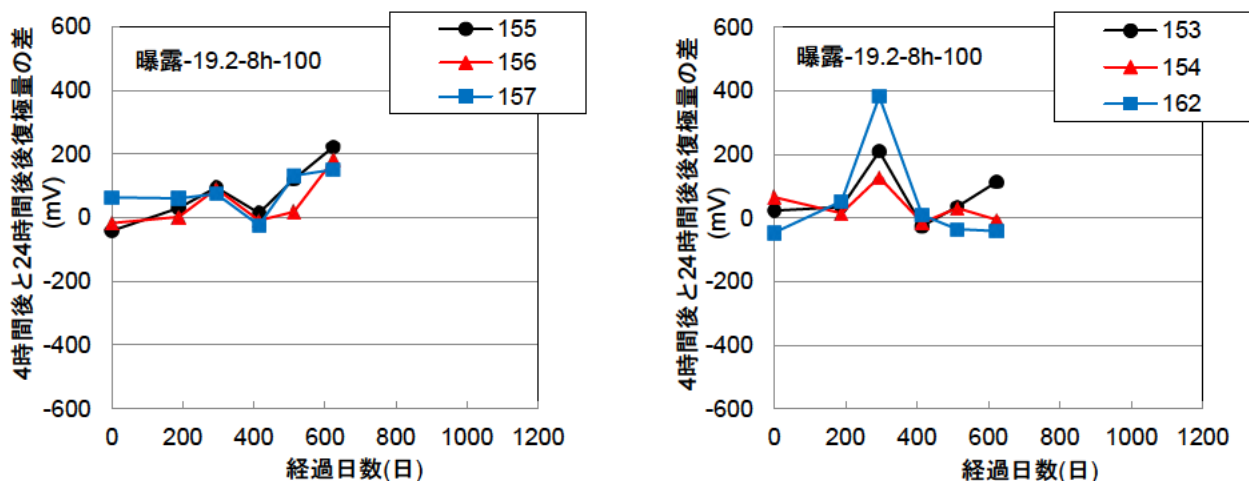


図-3.6.11 4時間後復極量と24時間後復極量の差の経時変化
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2kg/m³ 8時間通電 目標シフト量 100mV)

(4) 通電停止後のオフ電位の変化

図-3.6.12, 図-3.6.13 に4時間後オフ電位の経時変化を示す。図-3.6.14, 図-3.6.15 に24時間後オフ電位の経時変化を示す。図-3.6.16, 図-3.6.17 に4時間後オフ電位と平均復極量, 24時間後オフ電位と平均復極量を示す。

4時間後オフ電位および24時間後オフ電位の経時変化では, ASTM基準で「90%以上の確率で腐食あり」の判定となる -350mV vs.CSE 以下の電位を示す供試体がほとんどであった。しかし, 供試体 No.155, 156, 157 は24時間後オフ電位が貴化傾向にあった。これは電気防食による鋼材周辺の環境改善効果によるものと考えられる。

4時間後オフ電位と平均復極量は通電時間に関係なく, オフ電位が $-550\sim-600\text{mV vs.CSE}$ で復極量が $100\sim170\text{mV}$ の間に収まっている供試体が多かった。24時間後オフ電位と平均復極量では, バラツキが大きくなった。24時間後オフ電位が4時間後オフ電位よりも貴化したものに関しては鋼材周辺の環境改善効果によるものであり, 卑化に関しては腐食の進行によるものであると考えられる。

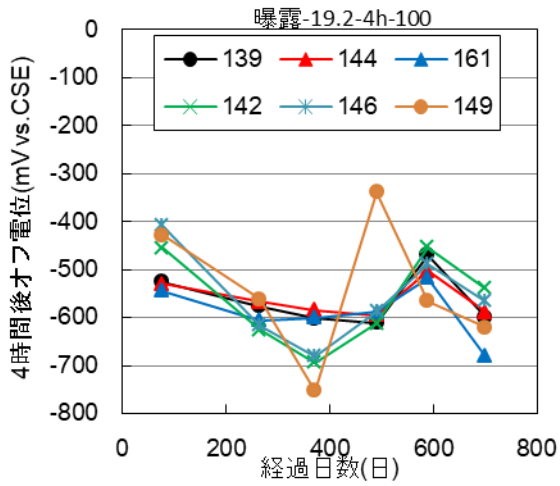


図-3.6.12 4時間後オフ電位の経時変化
(屋外暴露 [Cl]=19.2kg/m³ 4時間通電)

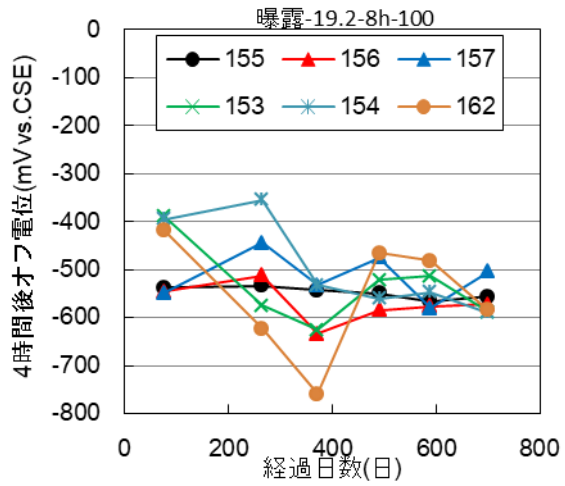


図-3.6.13 4時間後オフ電位の経時変化
(屋外暴露 [Cl]=19.2kg/m³ 8時間通電
目標シフト量 100mV)

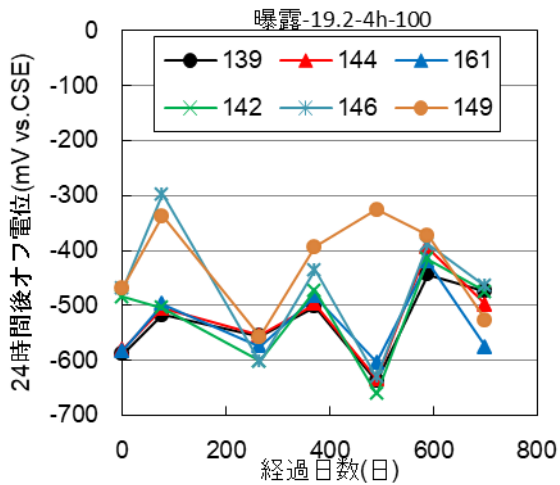


図-3.6.14 24時間後オフ電位の経時変化
(屋外暴露 [Cl]=19.2kg/m³ 4時間通電)

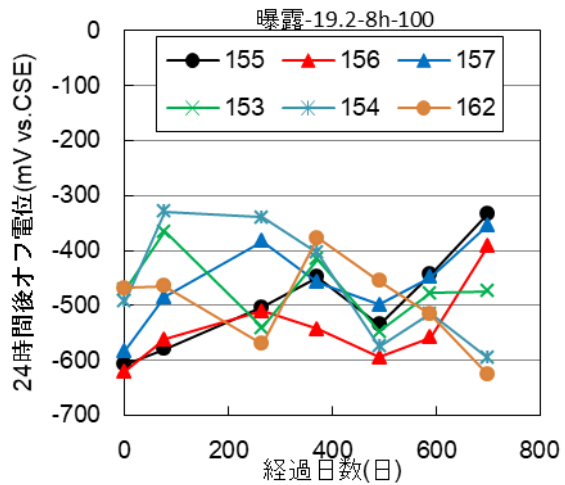


図-3.6.15 24時間後オフ電位の経時変化
(屋外暴露 [Cl]=19.2kg/m³ 8時間通電)

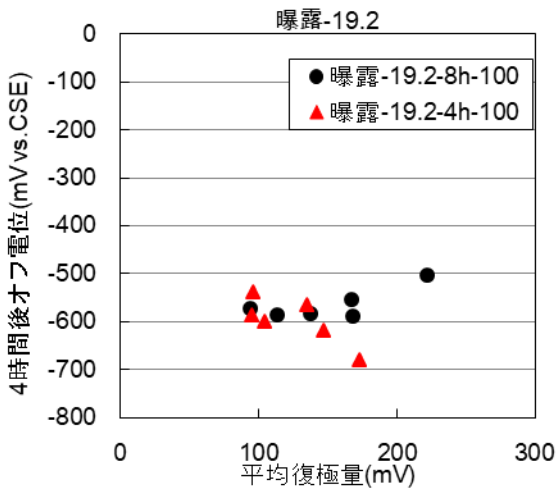


図-3.6.16 4時間後オフ電位と平均復極量
(屋外暴露 [Cl]=19.2kg/m³)

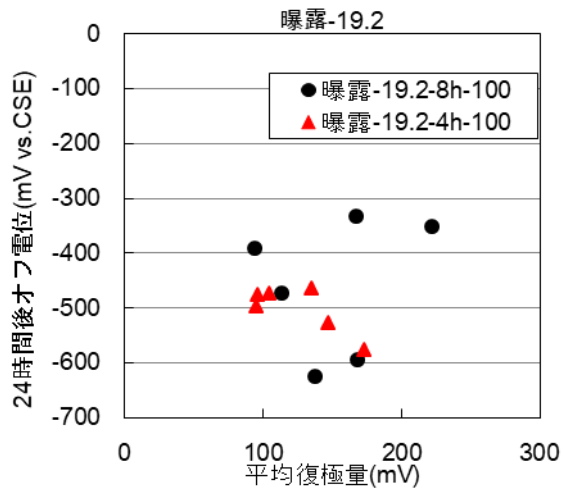


図-3.6.17 24時間後オフ電位と平均復極量
(屋外暴露 [Cl]=19.2kg/m³)

(5) 外観観察

図-3.6.18 に屋外暴露供試体の解体前後の外観状況を示す。図-3.6.19～図-3.6.21 に無通電，4時間通電，8時間通電供試体の鋼材表面状況を示す。

屋外暴露供試体では陽極位置からひび割れが生じているものがあったが，このひび割れは乾燥収縮割れによるものであると考えられる。また，通電供試体で腐食によるひび割れが生じているものはなく，このことから間欠通電により腐食の進行を遅らせる効果があったと考えられる。

供試体の鋼材表面状況は，無通電供試体では全体的に腐食しており，腐食部分の半分未満が減肉するほどの腐食が進行していた。4時間通電供試体では全体的に腐食しているものと，健全部分と腐食部分が混在しているものに分かれ，全体的に腐食していたものには減肉も生じていた。8時間通電供試体では腐食部分と健全部分が混在しているものが多く，部分的に減肉も見られた。鋼材の表面状態の観察から，腐食の程度は無通電供試体が最も大きく，次いで4時間通電供試体，8時間通電供試体の順であった。このことから，間欠通電によって腐食の進行を遅らせる効果が期待できると考えられる。







通電時間	目標シフト量	解体前	解体後
なし	なし	左列 : 136, 158, 159, 160, 右列 : 137, 147, 199	
			
4時間	100mV	左列 : 139, 144, 161, 右列 : 142, 146, 149	
			
8時間	100mV	左列 : 155, 156, 157, 右列 : 153, 154, 162	
			

図-3.6.18 屋外暴露供試体の解体前後の外観状況

無通電供試体(136, 137, 147, 158, 159, 160, 199)

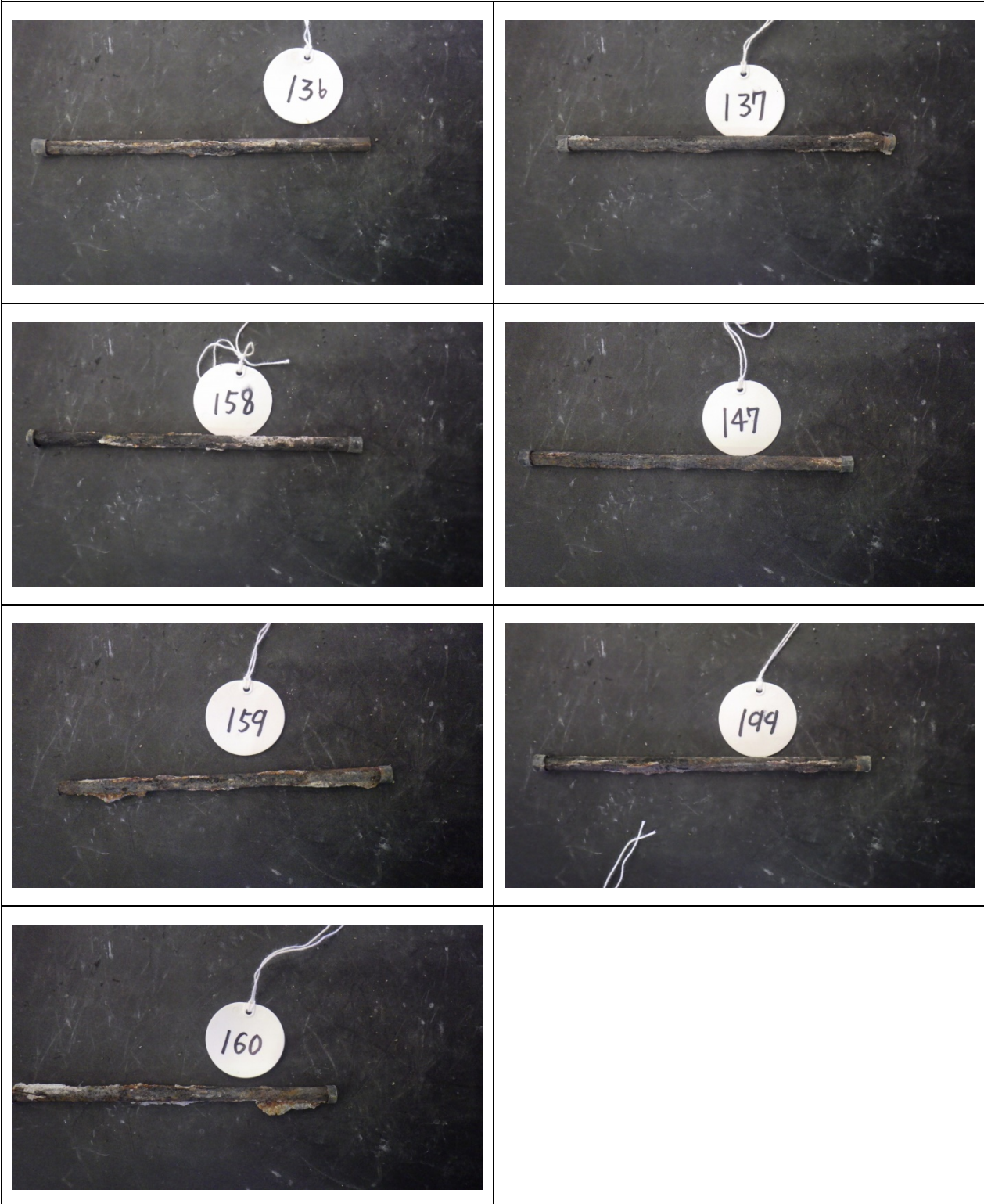


図-3.6.19 無通電供試体の試験後の鋼材表面状況
(屋外暴露 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$)

4 時間通電供試体(139, 144, 161, 142, 146, 149)

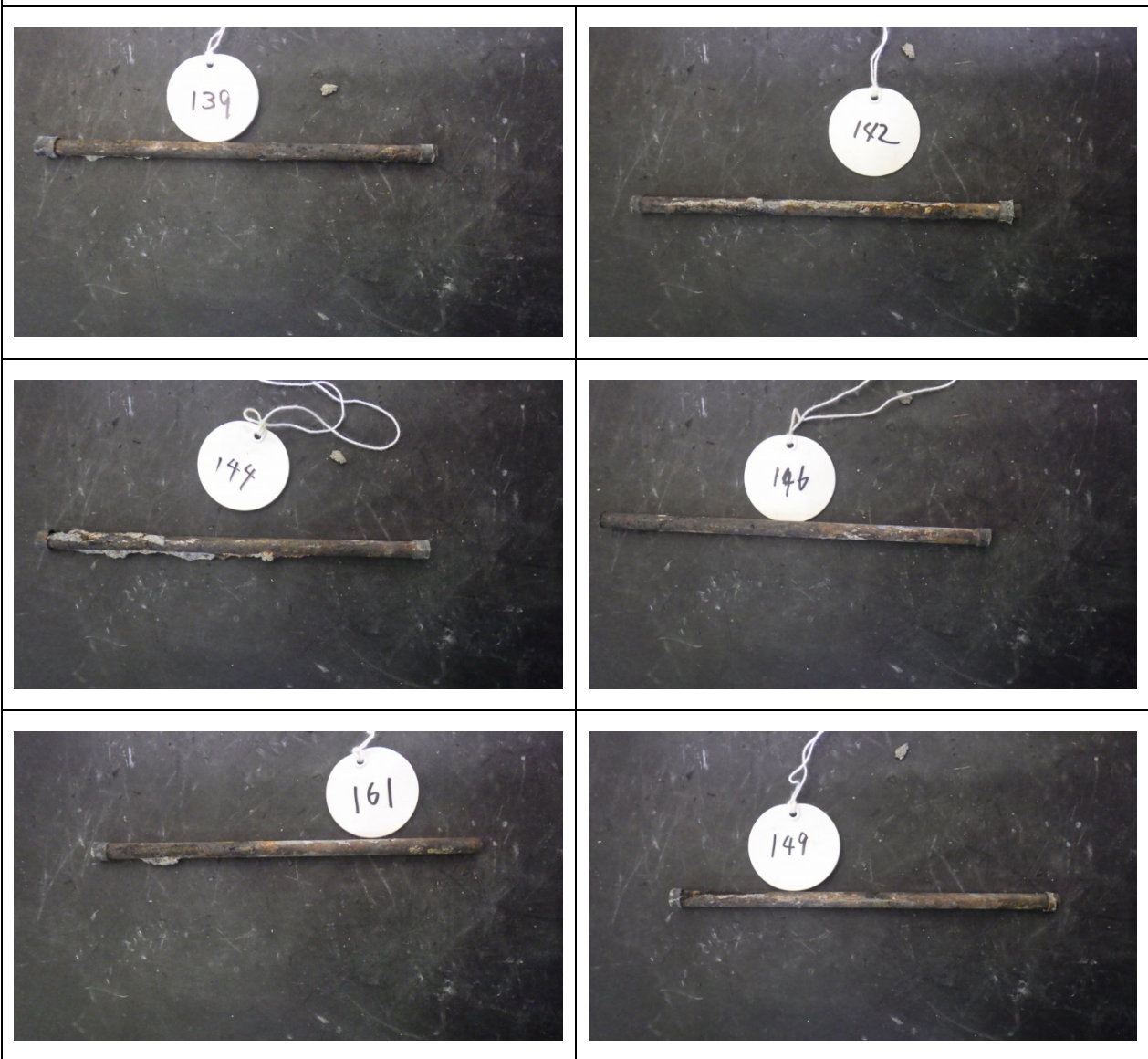


図-3.6.20 4 時間通電供試体の試験後の鋼材表面状況
(屋外暴露 $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ 4 時間通電 目標シフト 100mV)

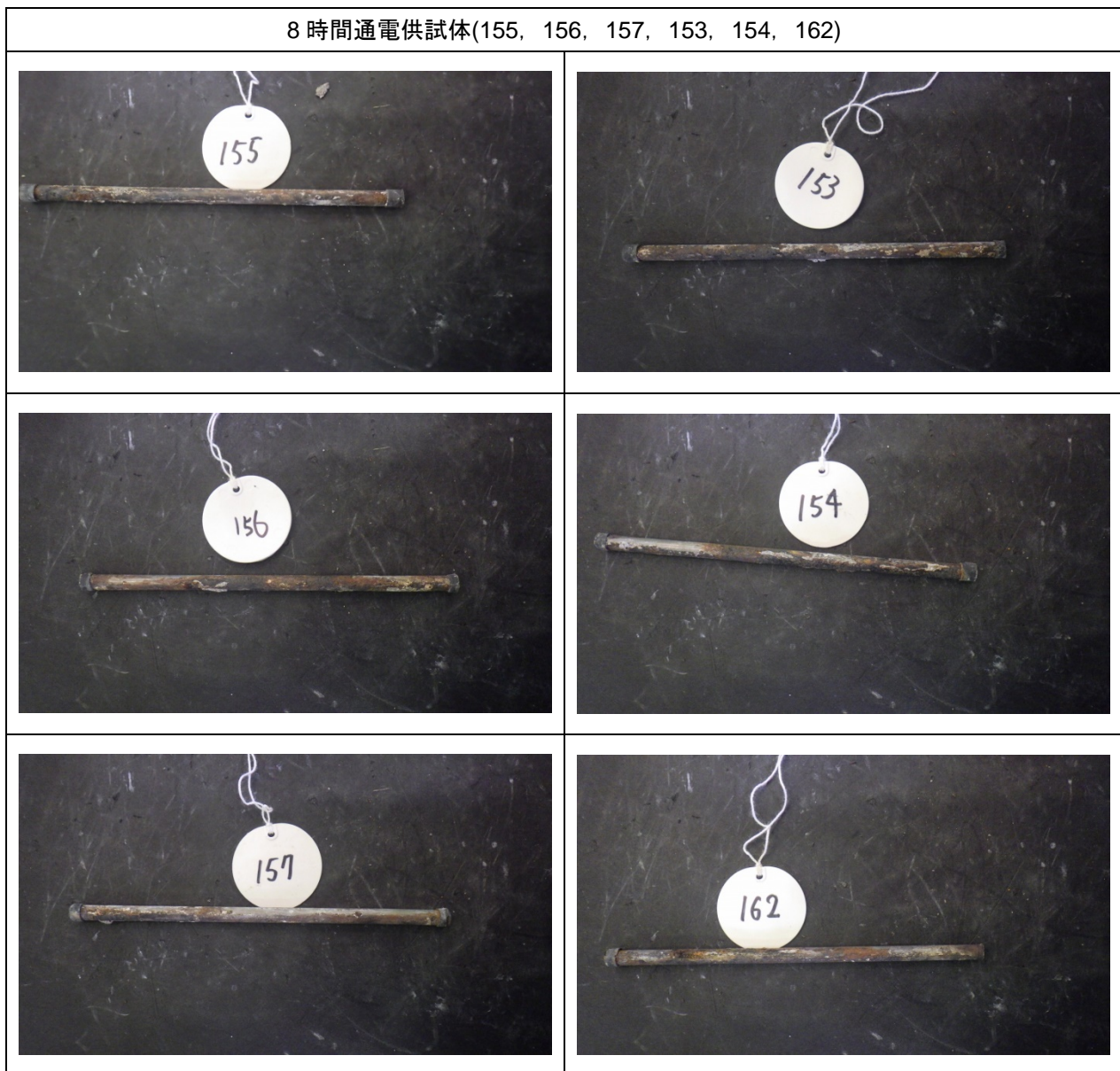


図-3.6.21 8 時間通電供試体の試験後の鋼材表面状況
(屋外暴露 $[Cl^-]=19.2\text{kg/m}^3$ 8 時間通電 目標シフト 100mV)

(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度

図-3.6.22 に無通電供試体，4 時間通電供試体，8 時間通電供試体の個々の腐食減量率を示す。図-3.6.23 に腐食減量率から求めた平均腐食電流密度を示す。腐食減量率は無通電供試体では 8～10%で，4 時間通電供試体は 2～5%，8 時間通電供試体は 0.6～2.4%であった。通電時間がより長時間の方が腐食減量率を抑えられた。また，腐食減量率のバラツキは初期の腐食によると思われる，無通電供試体，4 時間通電供試体，8 時間通電供試体の順でバラツキが小さくなっていった。

これらの状況から，通電時間が長い方が防食効果をより発揮できると考えられる。

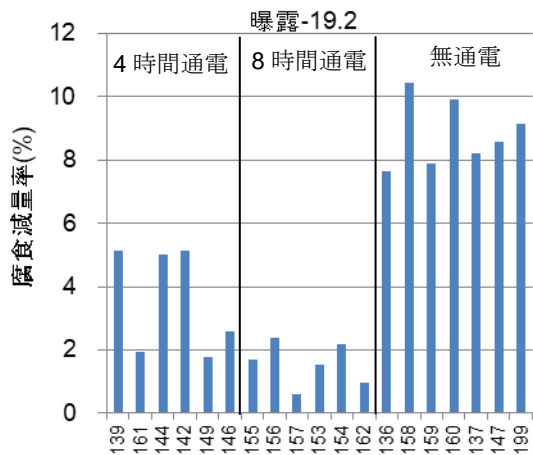


図-3.6.22 屋外暴露供試体の腐食減量率

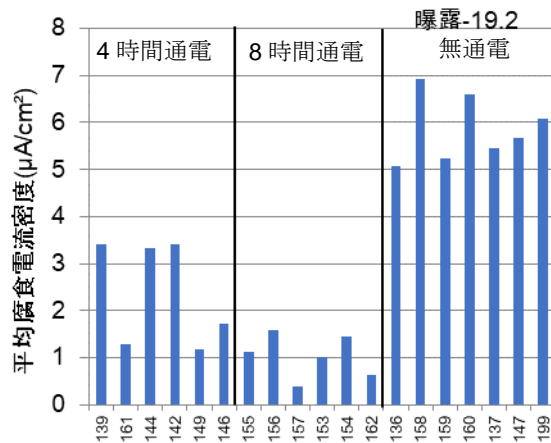


図-3.6.23 屋外暴露供試体の平均腐食電流密度

(7) 分極曲線

図-3.6.24～図-3.6.26 に試験初期と供試体解体時における鋼材のカソード分極曲線を示す。

無通電供試体の分極曲線は自然電位が全体的に卑化し、カソード分極挙動には変化が見られなかった。4時間通電供試体はカソード分極挙動に大きな変化はなかった。8時間通電供試体に関して、供試体 No.155, 156, 157 の組は初期よりも電位が貴化しており、間欠通電による防食効果があったといえる。また、供試体 No.153, 154, 162 の組は電位が卑化し、カソード分極挙動に変化が見られなかったが腐食減量率は小さかった。

以上より、試験期間の前後でカソード分極曲線に変化は見られなかった。

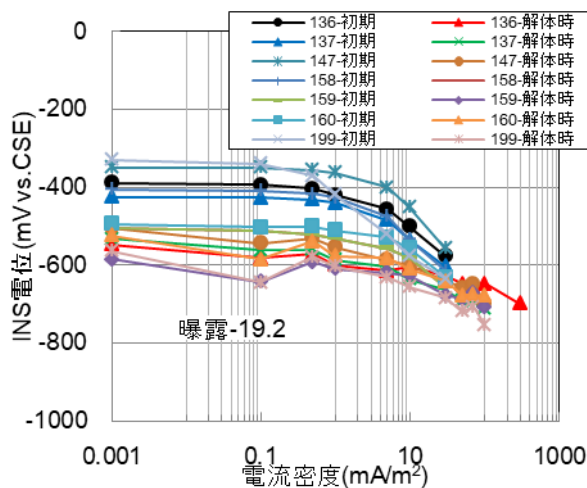


図-3.6.24 無通電供試体の初期および解体時での分極曲線 (屋外暴露 [Cl⁻]=19.2kg/m³)

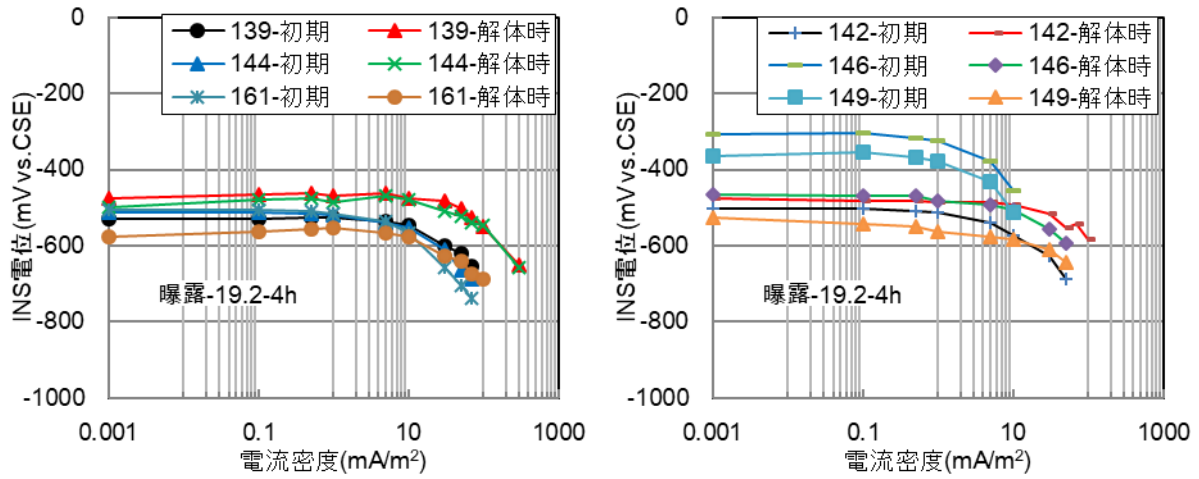


図-3.6.25 4時間通電供試体の初期および解体時での分極曲線
 (屋外暴露 [Cl⁻]=19.2kg/m³ 4時間通電 目標シフト量 100mV)

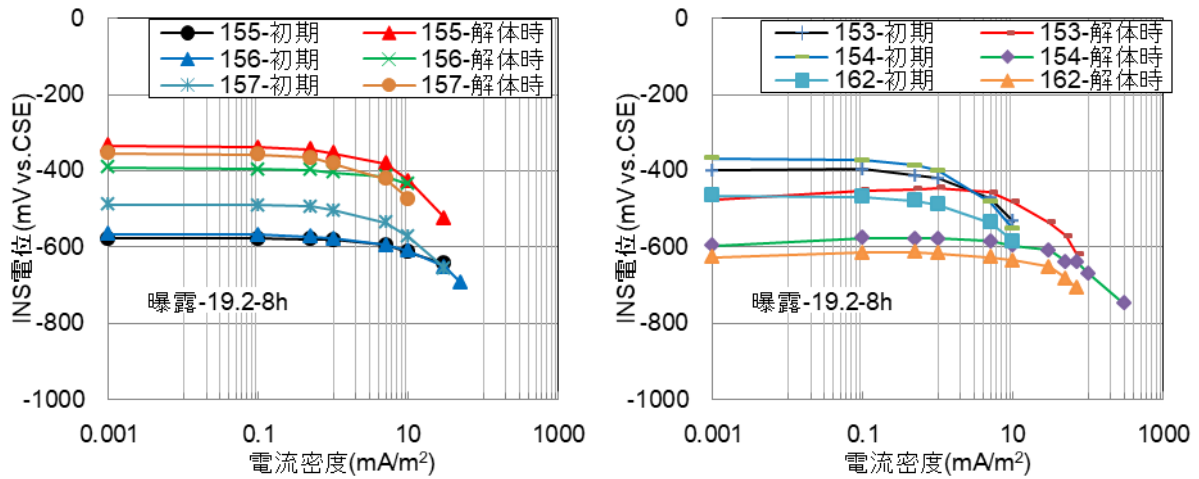


図-3.6.26 8時間通電供試体の初期および解体時での分極曲線
 (屋外暴露 [Cl⁻]=19.2kg/m³ 8時間通電 目標シフト量 100mV)

3.7 屋外暴露の試験結果(常時通電)

(1) 無通電供試体の自然電位

屋外暴露の無通電供試体は 3.6 項(1)の無通電供試体の自然電位で示したデータと同様であるため、本項では省略する。

(2) 防食電流密度

図-3.7.1 に防食電流密度の経時変化を示す。初期から高い防食電流密度を示した組は次第に減少し、初期に低い防食電流密度を示した組は次第に増加した。この理由としては、初期に高い電流密度で通電することによって鋼材周辺の環境改善効果が得られたためであると考えられる。また、初期に低い防食電流密度であった供試体 No.133, 141, 148 の組は最終的に屋外暴露の間欠通電供試体と同等の防食電流密度になった。

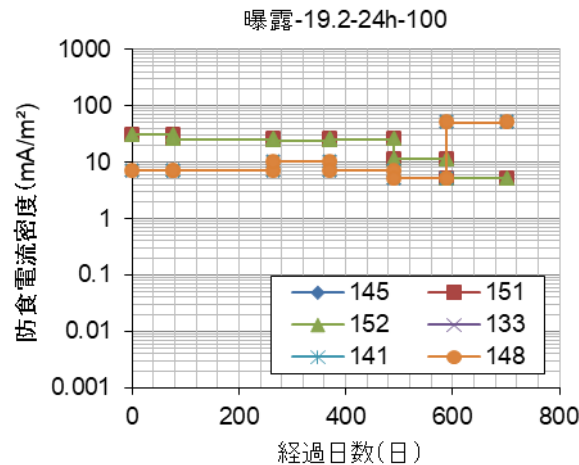


図-3.7.1 防食電流密度の経時変化
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 通電 24 時間 100 mV シフト)

(3) 復極量

図-3.7.2, 図-3.7.3 に 4 時間後復極量および 24 時間後復極量の経時変化, 図-3.7.4 に 4 時間後復極量の平均値および 24 時間後復極量の平均値, 図-3.7.5 に 4 時間後復極量と 24 時間後復極量の差を示す。概ね 4 時間後復極量は 100~300 mV の間で推移し, 24 時間後復極量は 100~400 mV の間で推移していた。しかし, 供試体 No.133, 141, 148 の組が 4 時間後復極量, 24 時間後復極量ともに所定のシフト量が得られない時期があり, その後の通電調整によって目標シフト量 100 mV を満足するようになった。このことから, 通電調整の時期によっては目標シフト量 100 mV だと, 不完全な防食状態になってしまう可能性があると考えられる。

4 時間後復極量と 24 時間後復極量の差に関して, 供試体 No.145, 151, 152 は概ね差が正の値で推移し, 供試体 No.133, 141, 148 では差が小さいもしくは負の値を示していた。差が正の値を示すものは通電停止 4 時間後も復極過程にあり, 差が負の値を示すものは通電停止 4 時間後以降に腐食が再開し

ているものと考えられる。このため、供試体 No.133, 141, 148 の組は一時的に不完全な防食状態になっていた可能性が考えられる。

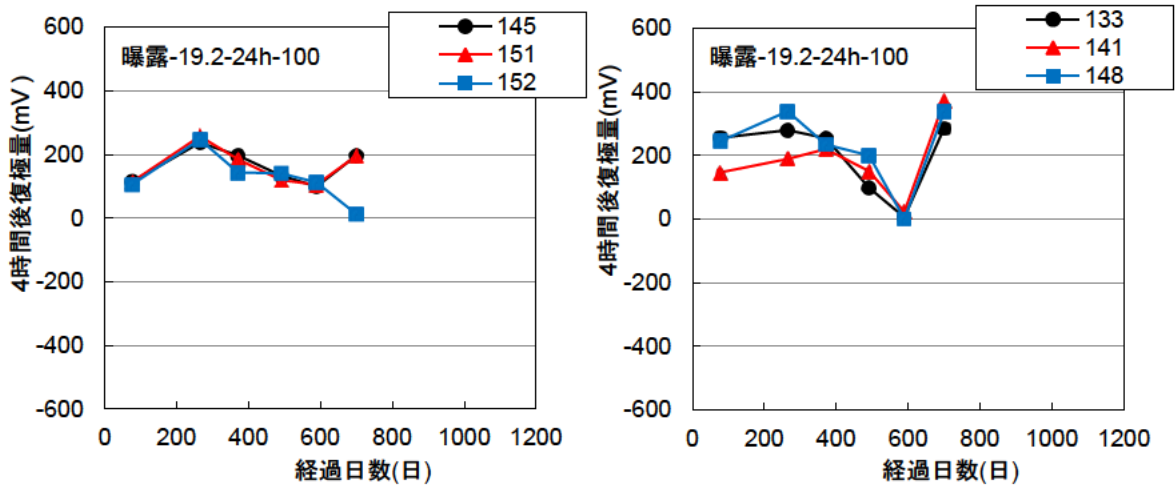


図-3.7.2 4時間後復極量の経時変化
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 常時通電 目標シフト量 100)

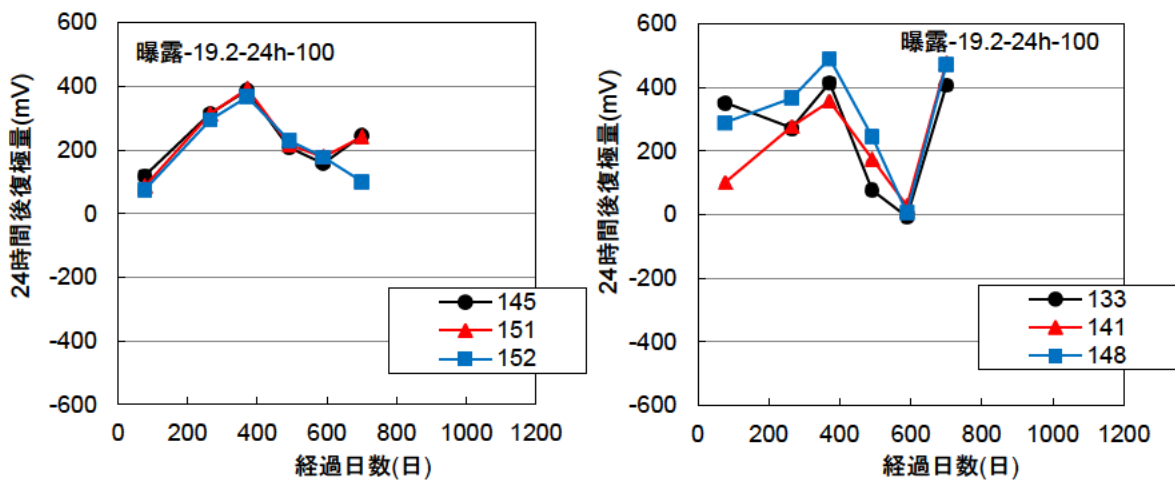


図-3.7.3 24時間後復極量の経時変化
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 常時通電 目標シフト量 100)

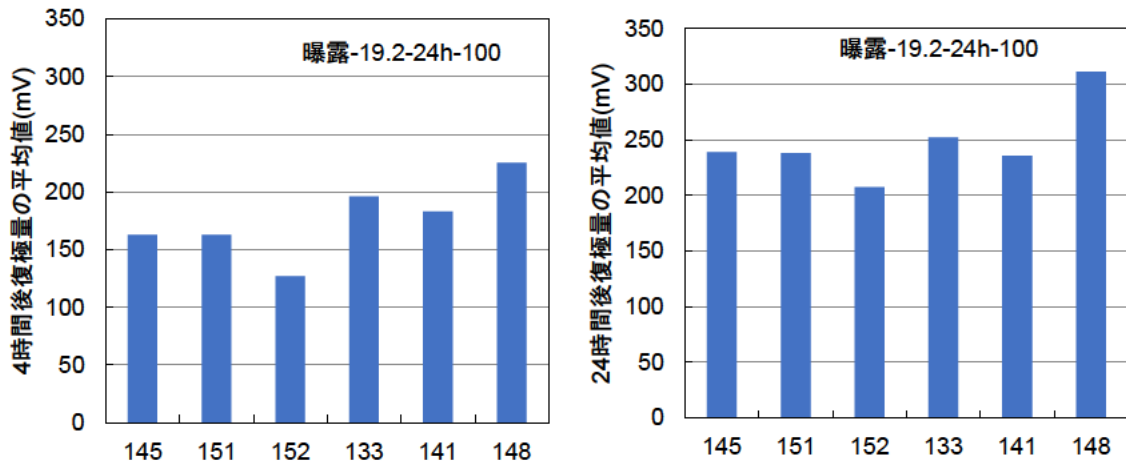


図-3.7.4 4時間後復極量の平均値(左)と24時間後復極量の平均値(右)
(屋外暴露 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ 常時通電 目標シフト量 100 mV)

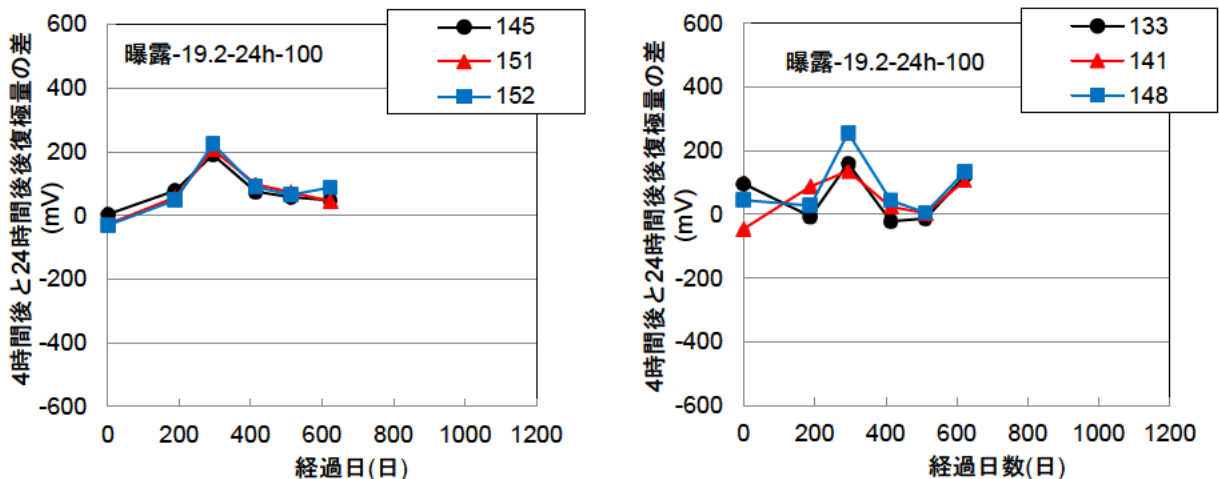


図-3.7.5 4時間後復極量と24時間後復極量の差
(屋外暴露 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ 常時通電 目標シフト量 100 mV)

(4) 通電停止後のオフ電位の変化

図-3.7.6, 図-3.7.7 に4時間後オフ電位および24時間後オフ電位の経時変化を示す。

4時間後オフ電位, 24時間後オフ電位ともに $-600 \sim -300 \text{ mV vs.CSE}$ の間を推移していた。このことから ASTM 基準で「90%以上の確率で腐食あり」と判断される。

図-3.7.8, 図-3.7.9 に4時間後オフ電位と平均復極量および24時間後オフ電位と平均復極量を示す。大半の供試体は平均復極量が $160 \sim 225 \text{ mV}$ 程度であり, 4時間後オフ電位は $-500 \sim -400 \text{ mV vs.CSE}$, 24時間後オフ電位は $-400 \sim -300 \text{ mV vs.CSE}$ を示した。総じて通電停止4時間後から24時間後までに 100 mV 程度復極していることから, 24時間通電による鋼材周辺の環境改善効果があったと判断される。

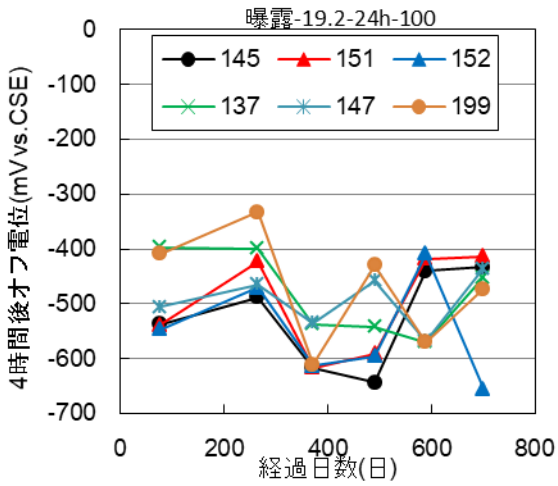


図-3.7.6 4時間後オフ電位の経時変化
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 常時通電
目標シフト量 100 mV)

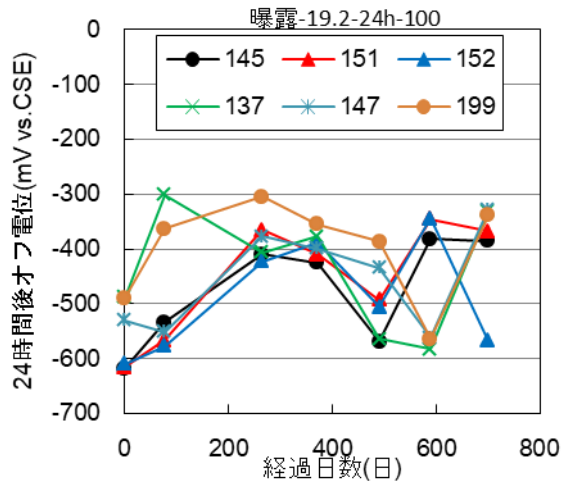


図-3.7.7 24時間後オフ電位の経時変化
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 常時通電
目標シフト量 100 mV)

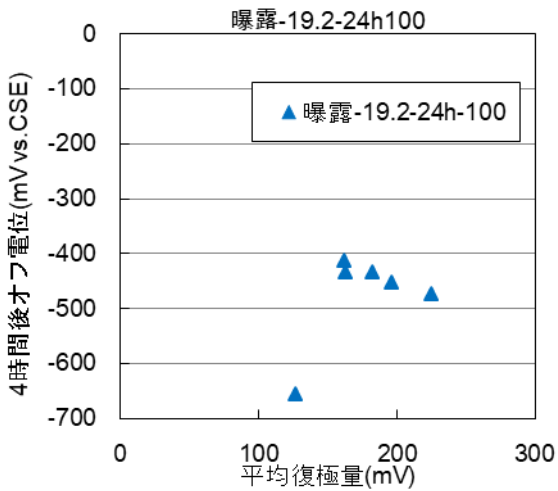


図-3.7.8 4時間後オフ電位と平均復極量
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 常時通電
目標シフト量 100 mV)

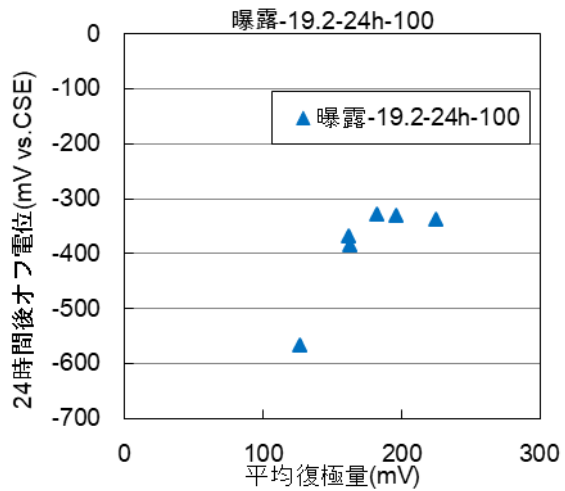


図-3.7.9 24時間後オフ電位と平均復極量
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 常時通電
目標シフト 100 mV)

(5) 外観観察

屋外暴露の常時通電供試体の解体前後の外観状況を図-3.7.10、鋼材表面状況を図-3.7.11 に示す。供試体の陽極位置からひび割れが生じているものがあった。これは乾燥収縮割れによるものであると考えられる。また、腐食によるひび割れが生じているものはなかった。

鋼材表面に関しては、部分的にさびが発生している箇所があり、これは通電開始前に発生した腐食によるさびであると考えられる。さびが発生していない健全な面の広さから、高塩化物イオン環境においても目標シフト量 100 mV で常時通電を行うことで、腐食鋼材の防食が可能であると判断できる。

通電時間	目標シフト量	解体前	解体後
24 時間	100 mV		

図-3.7.10 屋外暴露供試体の解体前後の外観状況
(屋外暴露 [Cl⁻]=19.2 kg/m³ 常時通電 目標シフト量 100 mV)

24 時間供試体(145, 151, 152, 133, 141, 148)

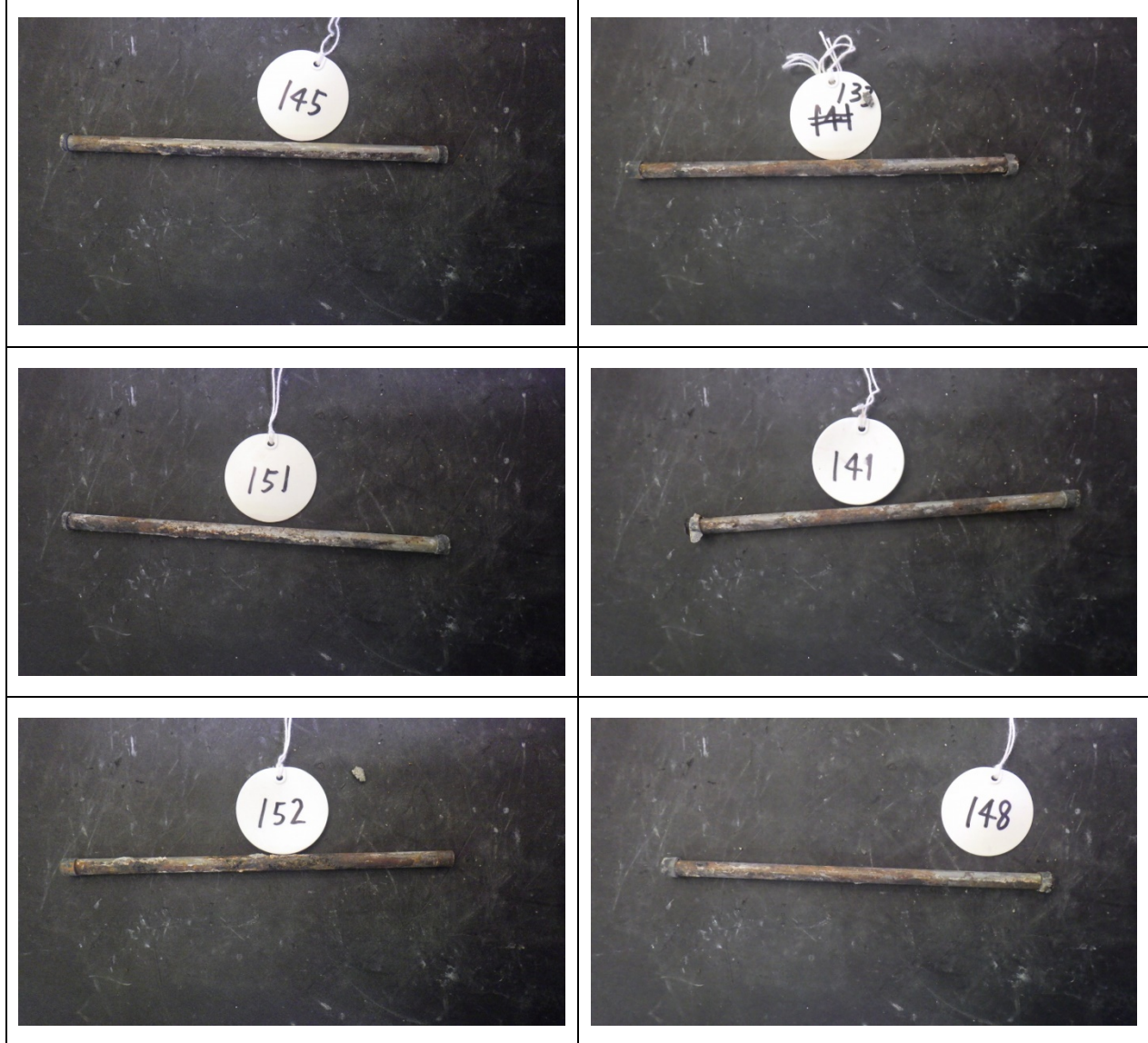


図-3.7.11 屋外暴露供試体の鋼材表面状況

(屋外暴露 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ 常時通電 目標シフト量 100 mV)

(6) 腐食減量率と平均腐食電流密度

図-3.7.12 に各供試体の平均腐食減量率を示す。図-3.7.13 に腐食減量率から求めた平均腐食電流密度を示す。腐食減量率は0.4～1.14%であり，屋外暴露環境の無通電供試体の腐食減量率8～10%に比べて，常時通電供試体は腐食減量率を1/10程度に抑えられた。このことから，常時通電による防食効果が確認された。

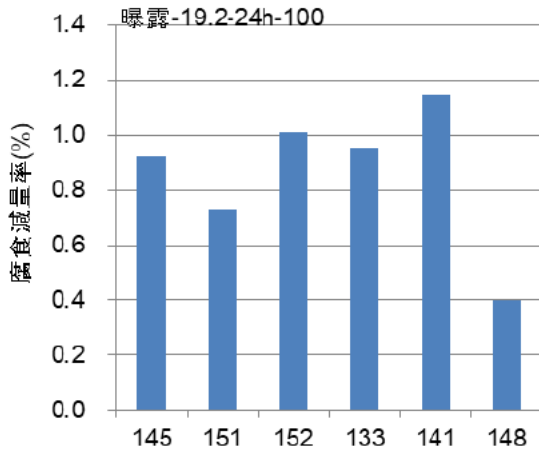


図-3.7.12 屋外暴露供試体の腐食減量率
(屋外暴露 [Cl]⁻=19.2 kg/m³ 常時通電
目標シフト量 100 mV)

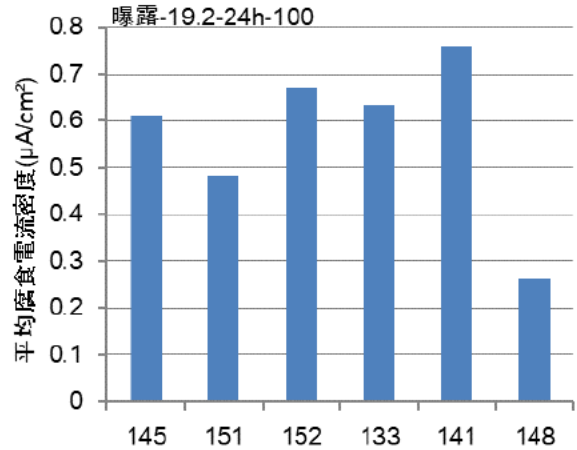


図-3.7.13 屋外暴露供試体の平均腐食電流密度
(屋外暴露 [Cl]⁻=19.2 kg/m³ 常時通電
目標シフト量 100 mV)

(7) 分極曲線

図-3.7.14 に試験初期および解体時における鋼材のカソード分極曲線を示す。

供試体 No.152 以外の供試体は，試験初期に比べて解体時の自然電位が貴化していたため，電気防食により鋼材周辺の環境改善がなされていたと考えられる。

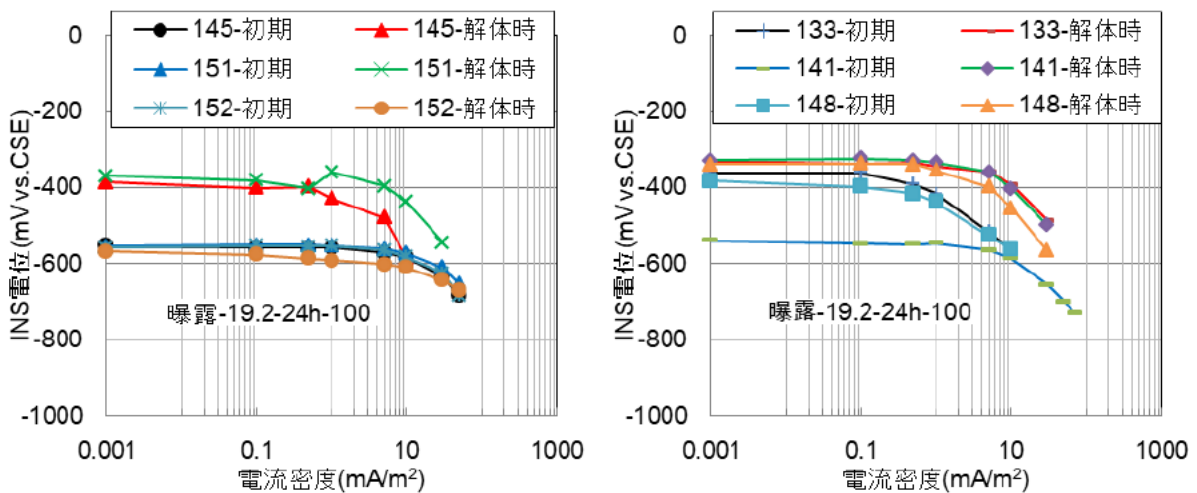


図-3.7.14 屋外暴露供試体の初期および解体時の分極曲線
(屋外暴露 [Cl]⁻=19.2 kg/m³ 常時通電 目標シフト量 100 mV)

4. 実験結果の考察

4.1 各試験条件における鋼材の腐食状況

図-4.1.1には、各試験環境における無通電供試体の自然電位の平均値の経時変化を示す。なお、40℃-90%RH 供試体に関しては、間欠通電を実施した通電開始から719日までを示しており、つくば暴露の供試体の塩化物イオン量は、 $[Cl^-]=19.2\text{ kg/m}^3$ である。

塩化物イオン量 $[Cl^-]=19.2\text{ kg/m}^3$ の自然電位は、いずれの暴露環境でも -350 mV vs.CSE よりも卑な電位であり、ASTM基準で「90%以上の確率で腐食あり」の範囲となった。一方で、 $[Cl^-]=3.8\text{ kg/m}^3$ では、いずれの暴露環境でも $-300\sim-200\text{ mV vs.CSE}$ で推移しており、ASTM基準で「不確定」の範囲であった。したがって、当然であるが鋼材の腐食環境は、塩化物イオン量が多いほど厳しいことが再確認された。環境温度では、40℃の方が20℃と比較して電位が卑であり、温度が高いほど腐食環境が厳しいことが確認できる。また、屋外のつくば暴露では、電位が他の環境と比較して卑な電位となっており、屋外における直射日光や天候による乾湿の繰り返しなどの影響を受けるため、20℃環境よりも腐食環境が厳しいものとする。40℃の自然電位は、通電開始200日ごろから電位が貴な方向に移行しているが、この頃から腐食ひび割れが生じ、ひび割れ幅も0.2 mm以上と大きくなった。本試験での鋼材電位の測定は、コンクリート表面に照合電極を設置して測定していることもあり、これらのひび割れが測定に影響しているものとする。これらの結果から、鋼材の自然電位で評価した温度条件による腐食環境の序列は、40℃>つくば暴露>20℃であったと判断することができる。

次に、20℃における湿度環境の比較では、概ね同様の傾向を示していることから、この環境における湿度の違いは明確ではなかった。

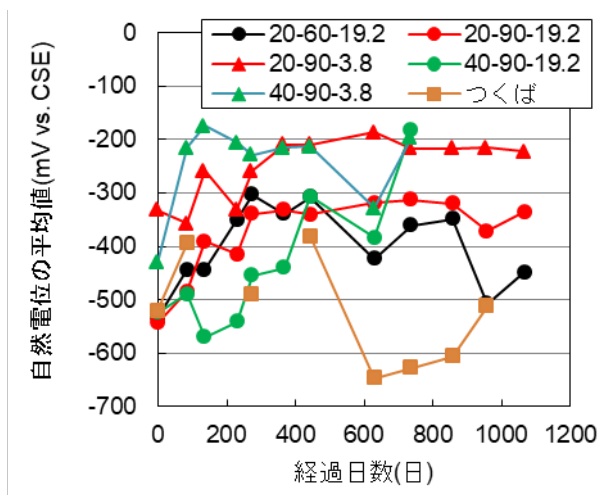


図-4.1.1 無通電供試体の自然電位の平均値の経時変化

図-4.1.2には、各暴露環境における無通電供試体の平均腐食電流密度の平均値の経時変化を示す。40℃-90%RH-19.2 供試体は、時間の経過とともに平均腐食電流密度が増加し、暴露開始から200日では、 $10\ \mu\text{ A/cm}^2$ 程度まで増加し、その後は $25\sim40\ \mu\text{ A/cm}^2$ と非常に大きな腐食電流密度であることが確認できた。屋外のつくば暴露では、通電開始から1000日以降で $5\ \mu\text{ A/cm}^2$ まで平均腐食電流密度が増

加し、屋外の乾湿繰返し等の影響で腐食環境が厳しくなったものと推測できた。図-4.1.3には、図-4.1.2のY軸の最大値を $2.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ として拡大して示した。初期の平均腐食電流密度は、 $40^\circ\text{C}-90\%\text{RH}-3.8$ 供試体では $0.8\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、その他の環境では $0.2\sim 0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の範囲であり、暴露環境として $40^\circ\text{C}-90\%\text{RH}$ が他の環境と比較して腐食環境が厳しいことが確認できる。つくば暴露では、通電開始から200日程度まで平均腐食電流密度は減少傾向を示し、その後は増加に転じた。なお、 $20^\circ\text{C}-90\%\text{RH}$ では、塩化物イオン量の違いによる平均腐食電流密度の顕著な差は確認できなかった。以上より、自然電位による評価の結果と同様に、平均腐食電流密度で評価した本試験の環境条件における腐食環境の序列は、 $40^\circ\text{C}-90\%\text{RH}-19.2 > \text{つくば暴露} > 40^\circ\text{C}-90\%\text{RH}-3.8 > 20^\circ\text{C}$ 環境であった。

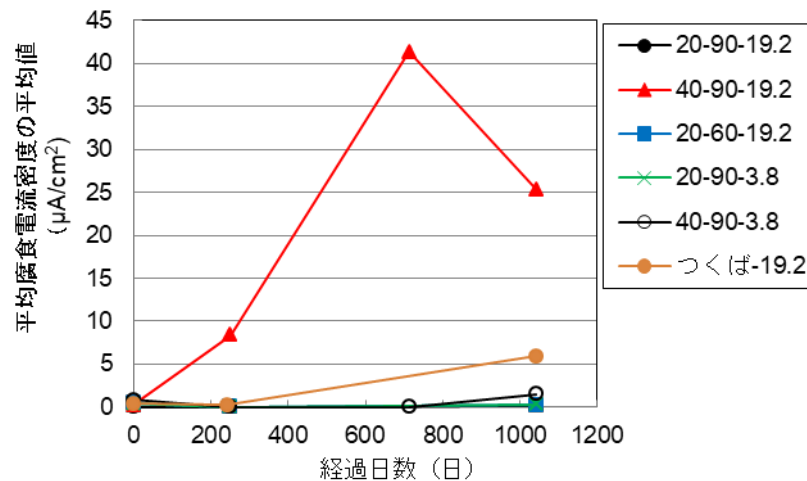


図-4.1.2 無通電供試体の平均腐食電流密度の平均値の経時変化

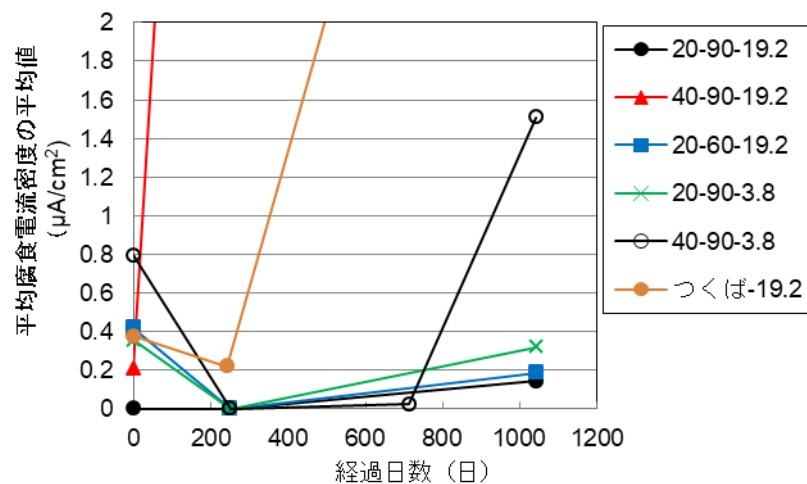


図-4.1.3 無通電供試体の平均腐食電流密度の平均値の経時変化
(図-4.1.2のY軸の最大値 $2.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ に変更)

4.2 防食期間中の通電停止期間にける復極状況

電気防食工法の原理は、コンクリート内部鋼材に防食電流を供給することで卑（－）方向に電位を分極させることである。したがって、防食電流の供給を停止すると鋼材周囲の水と酸素の増加にともなって、鋼材の自然電位は貴（＋）方向に復極し、時間の経過とともに一定の電位で安定する。電気防食の効果を確認する復極量試験では、通電停止から 24 時間経過後の自然電位（オフ電位）とインスタントオフ電位の差を復極量として評価する。その概念を図-4.2.1 に示す。なお、通電停止後の自然電位は、外気温等によって変動する。

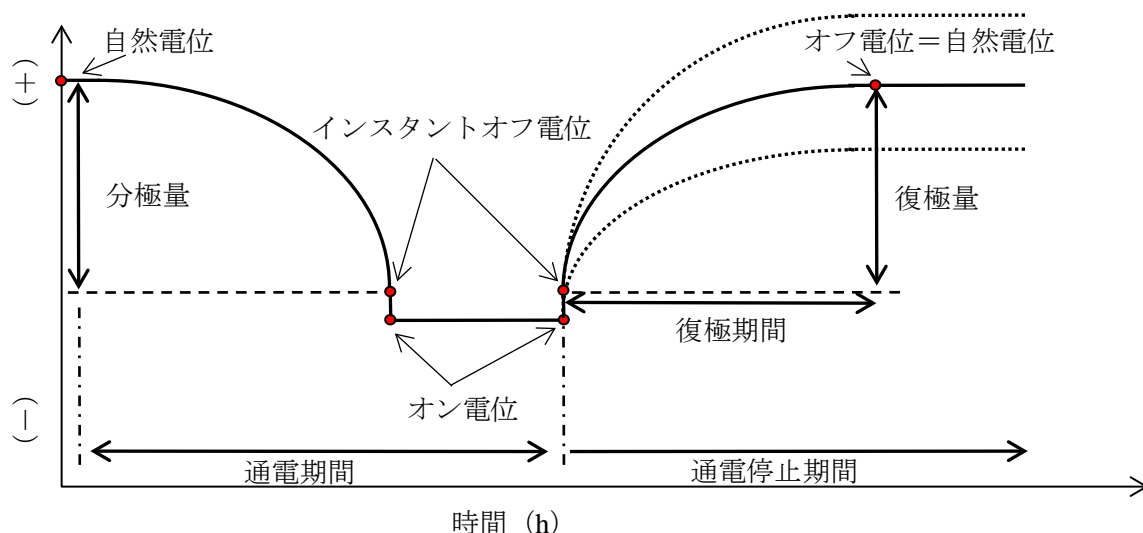


図-4.2.1 通電期間と通電停止期間中の鋼材電位の変動

また、通電停止後にオフ電位が安定するまでに必要とする時間は、鋼材周囲の環境等によって異なる。そこで、間欠通電における通電停止期間の復極状況がどのような状況であるかに着目した。40℃-90%RH, [Cl⁻]=19.2 kg/m³の供試体を用い、間欠通電で目標シフト量を 100 mV、常時通電で目標シフト量を 100, 200 mV とした時の通電停止後のオフ電位の変化をそれぞれ図-4.2.2 および 4.2.3 に示す。なお、測定は、貼付け型の照合電極（飽和銀塩化銀電極）をコンクリート表面に張り付け、データロガーを用いて連続的に内部鋼材の電位挙動を確認した。測定で使用した貼付け型の照合電極は、湿度の高い状態で長時間使用すると照合電極の平衡電位が不安定になるため、設置後 1 日分のみを示した。

図-4.2.2 に示される通電時の電位は、電圧（IR）降下を含むオン電位である。鋼材への防食電流の供給を停止した後（電源オフ後）のオフ電位の変動、つまり鋼材の復極状況に着目すると、通電停止から 1 時間程度で最も貴な電位を示し、その直後から電位が卑な方向に移行することが確認できる。図-4.2.3 に示した常時通電における目標シフト量 200mV では、測定終了の 21 時間後まで復極状態が続いているのに対して、目標シフト量 100mV では、1.2 時間で腐食状態に移行しているのが認められる。

間欠通電では、通電停止後 1 時間程度は、防食効果が得られていると考えられるが、通電停止 1 時間を経過した段階から次に通電が始まるまでの期間は、腐食が進行している状態になったと推測することができる。厳しい腐食環境では、間欠通電により防食電流を供給すると通電停止後、短時間で鋼

材の腐食が開始することが示唆されるため、電気防食による防食が十分でない可能性がある。つまり、間欠通電では、**図-4.2.1**に示すように復極状態とは、電気防食による副次的効果（低酸素濃度および高 pH 環境）が時間の経過とともに低下しオフ電位が貴化する過程であるため、少なくともオフ電位が貴化している状態では電気防食の効果が持続しているものと考えられる。しかし、復極過程が終了し、短時間でオフ電位が卑な方向に移行することは、防食電流によって分極する移行ではなく、鋼材の腐食進行に伴う自然電位の変化であると考えられる。

常時通電では、一般的に防食管理として用いられる鋼材の電位シフト量を 100 mV 以上で管理した場合においても、目標シフト量が 100 mV では通電が停止されると短時間で鋼材周辺は腐食環境に移行することが考えられる。つまり、鋼材周辺の腐食環境が厳しい場合、電気防食の適用後に鋼材周辺の pH 上昇などによる環境改善の効果が通電停止により短時間でなくなるものと推測することができる。

通常の電気防食では、防食期間中は常に防食電流が供給（分極状態）されているため、復極状態となることはないが、間欠防食あるいは断続防食では、定期的あるいは不規則に防食電流の供給が停止する。したがって、間欠・断続通電による電気防食を適用する場合は、通電停止期間の電位の復極状況を把握することが極めて重要である。

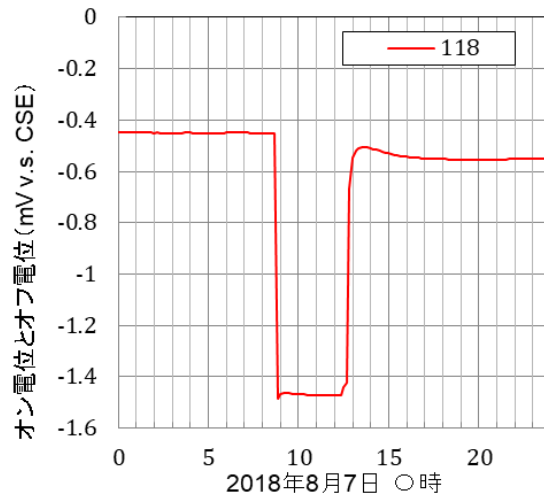


図-4.2.2 間欠防食中の電位変動の一例

(40°C, 90%, [Cl]=19.2 kg/m³ 2018 年 8 月 7 日)

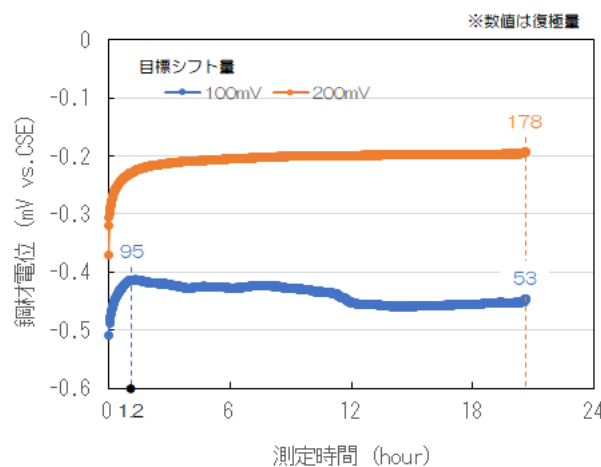


図-4.2.3 常時通電供試体における通電停止後の電位変動の一例

(40°C, 90%, [Cl]=19.2 kg/m³)

そこで、**図-4.2.4**には、通電停止後の鋼材電位の変化を模式的に示した。A線は通常の電気防食の状態（常時通電）を示しており、電位は通電停止後に貴（+）側に移行する復極状態を経由して定常状態になる。一方で、B線に示すように一定期間復極した後、電位が卑（-）側に移行する可能性がある。間欠通電では、1日の中で必ず通電が停止される期間があり、この間にB線の挙動を取ると電位が卑側に変化している間に腐食が進行すると推測することができる。

また、B線の挙動を示す場合、間欠通電におけるシフト量管理では、通電停止後どの段階で復極量を判断するかを検証する必要がある。また、本試験の常時通電では、目標シフト量の違いによって、復極挙動が異なる結果を得た。これは、間欠通電においても目標シフト量を大きくすることで復極挙動が変わることが示唆されるものであり、今後は復極量の管理値の検証も必要であると考えられる。

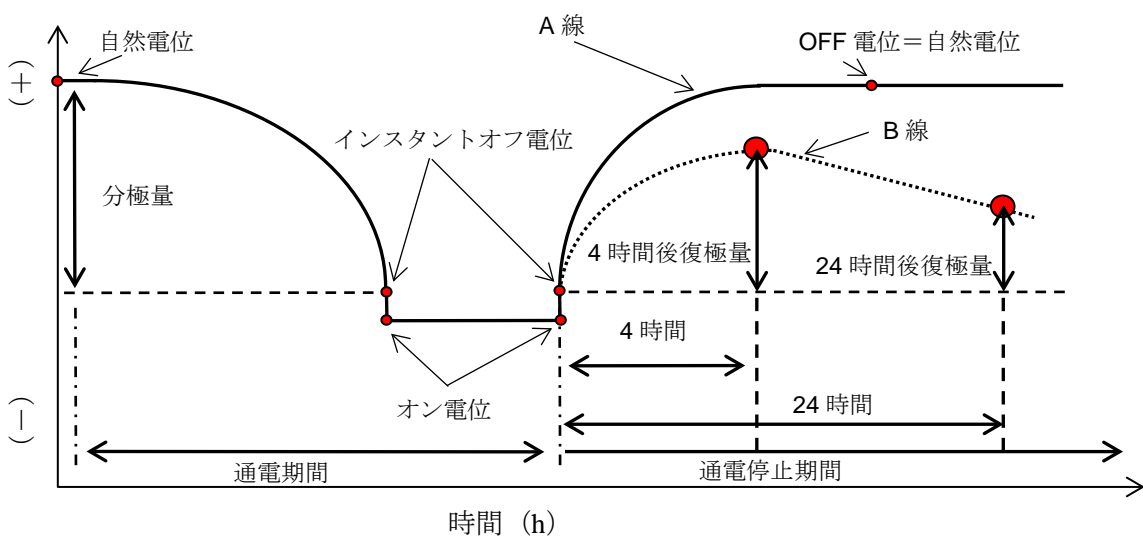


図-4.2.4 通電期間と通電停止期間中の鋼材電位挙動の模式図

4.3 間欠通電における防食効果

図-4.3.1～4.3.5には、供試体解体時に測定した4時間後オフ電位および24時間後オフ電位において貴（プラス）の電位を最大値とし、積算電流密度との関係を示す。ここで、貴（プラス）の電位を最大値としたのは、4.2に示したように腐食環境により、防食電流の供給を停止し、24時間以内に腐食状態へ移行することが確認されたため、防食状態と考えられる最大のオフ電位で評価した。

20°C環境において、 $[Cl^-]=19.2\text{ kg/m}^3$ の環境では明確ではないが、 $[Cl^-]=3.8\text{ kg/m}^3$ の環境では積算電流密度の大きい目標シフト量100 mVの供試体でオフ電位が貴側となる傾向が確認される。

40°C-90%RHにおける間欠通電では、塩化物イオン量が多いほど積算電流密度も大きくなる傾向が確認された。また、24時間通電を行う常時通電の $[Cl^-]=19.2\text{ kg/m}^3$ 環境では、間欠通電と比較して積算電流密度も大きく、オフ電位も貴（プラス）な電位であった。

つくば暴露の供試体では、間欠通電より常時通電における積算電流密度が大きく、オフ電位の最大値も常時通電の方が貴（プラス）な電位となる傾向がある。

したがって、電気防食の効果としては、積算電流密度を大きくすることが望ましいと推測する。

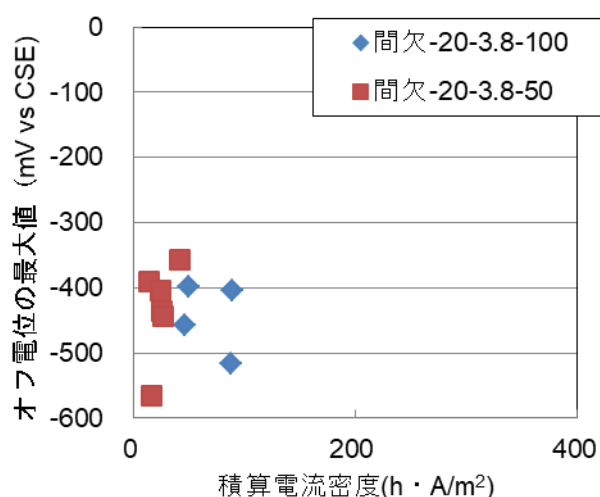


図-4.3.1 オフ電位の最大値と積算電流密度
(20°C, 60,90%RH 4,8時間, $[Cl^-]=3.8\text{ kg/m}^3$)

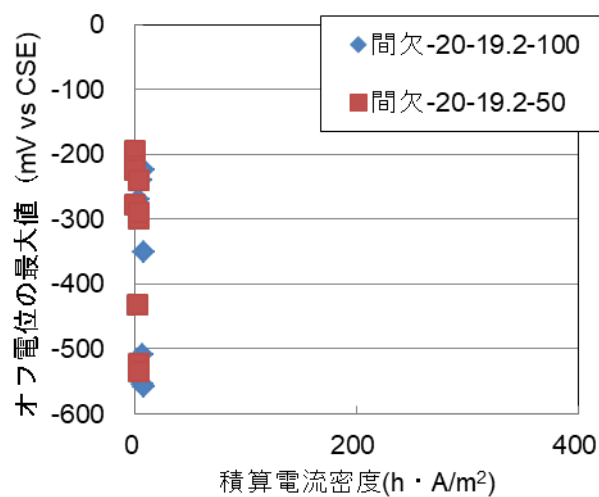


図-4.3.2 オフ電位の最大値と積算電流密度
(20°C, 60,90%RH 4,8時間, $[Cl^-]=19.2\text{ kg/m}^3$)

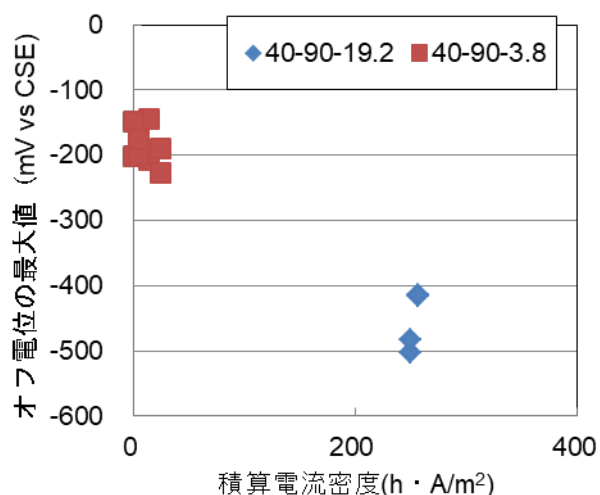


図-4.3.3 オフ電位の最大値と積算電流密度
(40°C, 90%RH, 間欠)

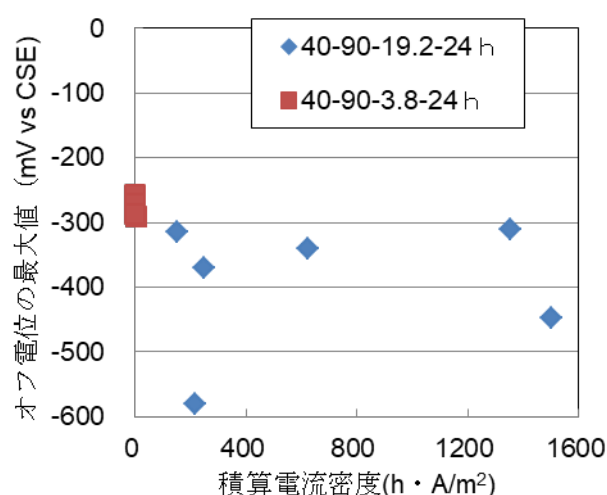


図-4.3.4 オフ電位の最大値と積算電流密度
(40°C, 90%RH, 常時)

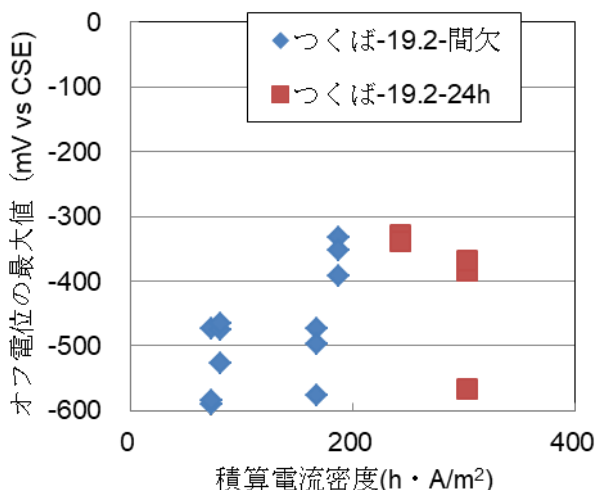


図-4.3.5 オフ電位の最大値と積算電流密度
(つくば, 24h<常時>, 間欠)

図-4.3.6～4.3.11には、供試体解体時に測定した4時間後復極量および24時間後復極量を比較して最大となる復極量と測定者（10名前後）で実施した目視判定結果との関係を示す。最大の復極量で評価した理由は、4.2で示したように激しい腐食環境のため、復極量測定の中で腐食状態へ移行することが確認されたためである。20℃環境では、塩化物イオン量、湿度に関わらず、鉄筋の表面の半分程度の錆の発生が認められる判定「2」程度までの結果であり、顕著な差が確認されなかった。

40℃-90%RHの間欠通電では、 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ で「4：半分以上で減肉有」と判定され、 $[Cl^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$ では「1：半分未満で発錆」程度と判定された。そこで、最大復極量に着目すると $[Cl^-]=3.8 \text{ kg/m}^3$ では、目標とするシフト量100 mV程度かそれ以上の復極量を得ていた。 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ では、目標とするシフト量100 mVを満足することができていない状態でもあったが、通電時間を8時間とした場合の方が若干ではあるが、目視判定が良好になる傾向があった。

40℃-90%RHの常時通電では、復極量0 mVである無通電供試体と比較して、100 mV程度の復極量を満足することで発錆および減肉が低減される傾向が確認されたが、「3：半分未満で減肉有」と判定されており、現実的には防食効果が小さいと考えられる。一方で、 $[Cl^-]=19.2 \text{ kg/m}^3$ を混合した供試体で180 mV程度と大きな復極量を得た供試体では、判定「1」程度となることが確認でき、復極量を大きくすることで防食効果が大きくなる。

つくば暴露の供試体では、無通電<間欠通電4時間<間欠通電8時間<常時通電の順で目視判定が良好となり、また、最大復極量が大きいほど目視判定として腐食程度が小さくなる傾向が確認された。

目視判定では、20℃と40℃環境で比較すると塩害環境の穏やかな20℃環境で防食効果が高いことが確認された。

以上より、間欠通電では、積算電流密度、通電停止期間中の最大復極量を大きくすることで電気防食の効果が大きくなることを確認することができた。また、その効果は、腐食環境が穏やかな環境ほど期待することができると考えられる。

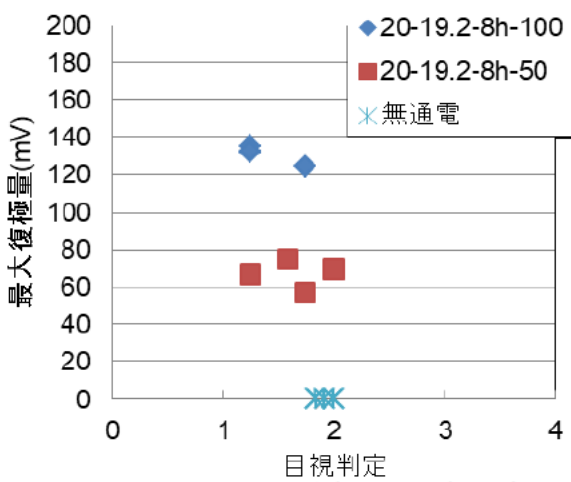


図-4.3.6 最大復極量と目視判定
(20°C, 60%RH)

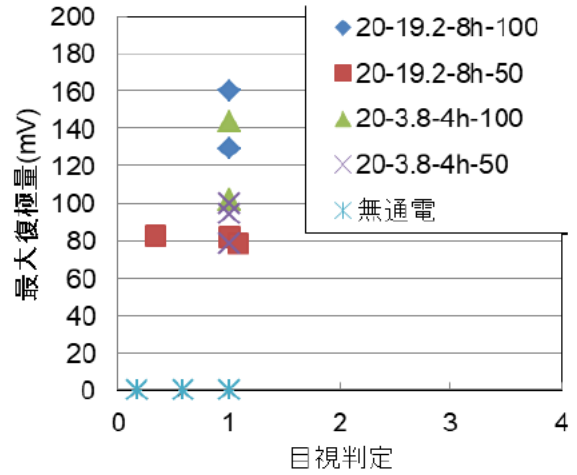


図-4.3.7 最大復極量と目視判定
(20°C, 90%RH)

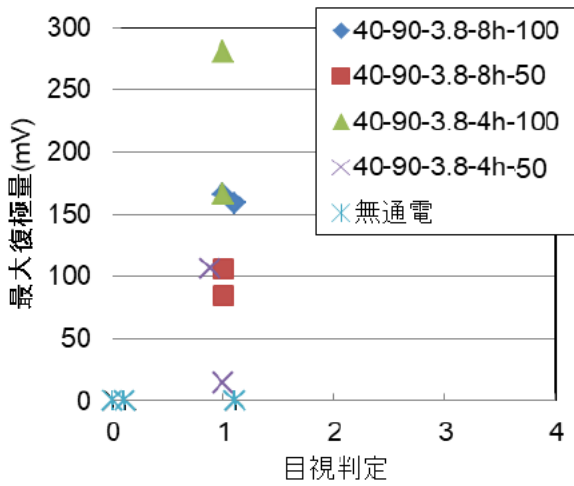


図-4.3.8 最大復極量と目視判定
(間欠, 40°C, 90%RH, [Cl⁻]=3.8 kg/m³)

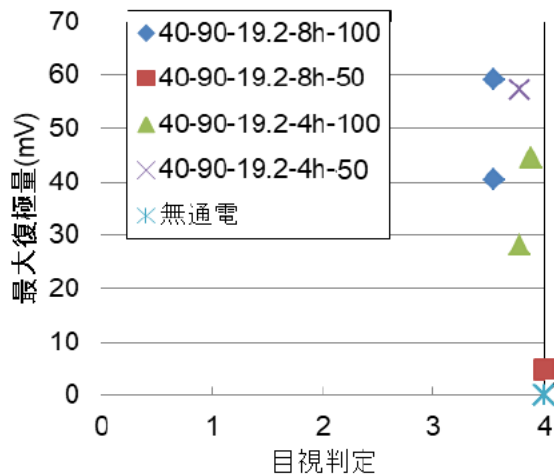


図-4.3.9 最大復極量と目視判定
(間欠, 40°C, 90%RH, [Cl⁻]=19.2 kg/m³)

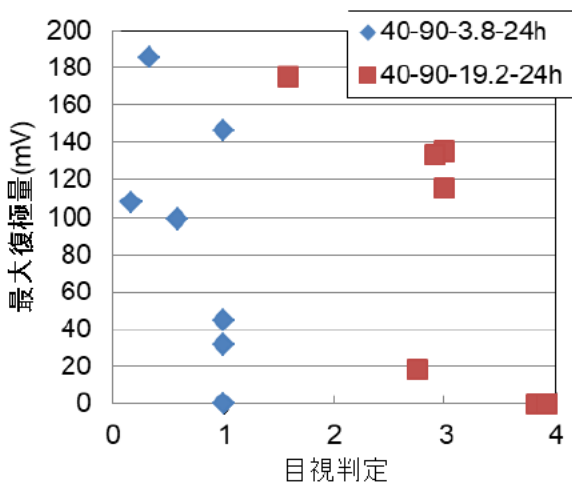


図-4.3.10 最大復極量と目視判定
(常時, 40°C, 90%RH)

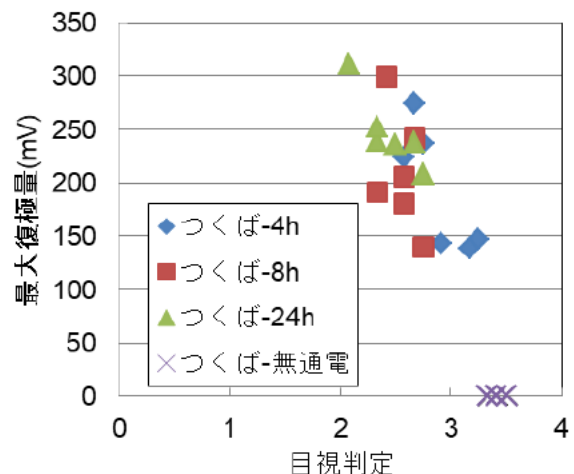


図-4.3.11 最大復極量と目視判定
(つくば, [Cl⁻]=19.2 kg/m³)

4.4 まとめ

電気防食工法では、一般的に防食電流を継続して供給する通電条件（常時通電）が適用されるが、本試験では、太陽光発電等の自然エネルギーを効率的に利用する断続通電を模擬した間欠通電での適用性を評価した。その結果、本試験では、以下のことを確認することができた。

- 1) 本試験では、 $40^{\circ}\text{C}-90\%\text{RH}$, $[\text{Cl}^{-}]=19.2\text{kg}/\text{m}^3$ > つくば暴露 > $40^{\circ}\text{C}-90\%\text{RH}$, $[\text{Cl}^{-}]=-3.8\text{kg}/\text{m}^3$ > 20°C 環境, の順で厳しい腐食環境であった。
- 2) 間欠通電では、通電を停止している期間に内部鋼材は復極状態となるが、腐食環境が厳しい場合には、次の通電が開始するまでの間に復極状態から腐食状態へ移行する可能性がある。
- 3) 間欠通電は、腐食環境が比較的穏やかな条件でその効果を期待することができる。
- 4) 間欠通電では、積算電流密度、復極量が大きいほど防食効果が高くなる傾向がある。
- 5) 常時通電においても、腐食環境が厳しい場合には、目標シフト量を 100 mV としても十分な防食効果が得られない可能性がある。

5. 間欠通電（断続通電）の適用にあたって

現在、外部電源方式の電気防食工法では、構造物の供用期間中、常時防食電流を供給することが基本である。したがって、防食電流を供給するための直流電源装置を稼働させるために、商用電源の引込み、あるいは太陽電池等の自然電力を用いた場合には蓄電池が必要不可欠となっている。ところが、蓄電池は高価であるとともに、比較的短期間での更新が必要になることが多いため、初期および維持管理ともに電気防食の適用コストが増加することにもなり得る。本検討では、太陽電池などの自然エネルギーを用いた場合に蓄電池を用いず、断続的に防食電流を供給する電気防食工法に関して基礎的な実験を実施した。

本試験の範囲内において、電気防食工法を適用するにあたって確認された事項や今後の課題に関して、以下に示す。

1) 期待できる適用範囲

比較的腐食環境が穏やかな場合にその効果を期待することができるため、予防保全的な適用でその効果が期待できると考えられる。また、復極速度が比較的遅いと考えられる含水状態の高いコンクリート中の鋼材の防食での適用が期待できる。一方で、本試験の範囲内では、具体的な含有塩化物イオン量や環境温度までは示すことができなかった。

2) 間欠通電を適用する場合の復極量を評価する通電停止時間を構造物ごとに設定

間欠通電では、1日の中で直流電源装置の動作が一次的に停止されるため、内部鋼材が直流電源装置の停止期間中に復極状態から腐食状態に移行する可能性があるため、適用する構造物において防食効果を判定する復極量試験における通電停止時間を適切に設定する必要がある。

3) 防食効果は積算電流密度と関連

間欠通電では、積算電流密度を大きくすることで防食効果への期待が増す。一方で、太陽光発電で蓄電池を用いない場合は、適用される日照条件によって通電時間が決定される。したがって、通電電流密度を大きくすることが1つの手段として考えられるが、陽極材等への過度な負担が増加することなどを今後考慮する必要がある。

4) 適切な復極量（シフト量）の設定値

電気防食基準として一般的に用いられる復極量 100 mV では、腐食環境により常時通電でも所定の防食効果が得られない可能性があるため、復極量を 100mV よりも大きく設定することが望ましい。また上記の 2) , 3)をそれぞれ考慮すると、通電電流密度を大きくし、復極量を大きく設定することは、積算電流密度を確保するだけでなく、通電停止期間中に鋼材の電位が自然電位まで復極する、つまり腐食状態に移行するまでの時間をより長くでき、通電による防食効果を確保できる可能性がある。したがって、今後は、どの程度の復極量を維持することが設定値として最適であるかを検討することが重要である。

電気防食工法における断続通電は、太陽光発電等の断続的な自然エネルギーを簡易な装置で有効利

用できる観点から期待される通電方法である。本試験では、間欠通電によってその評価を試みたものの、具体的な適用範囲の判断指標まで示すことができなかったが、今後、コンクリート道路橋における維持管理手法として本通電方法による電気防食工法が確立され、コンクリート道路橋の長寿命化へ貢献できることを期待する。本試験結果は、その一助となるものと考えている。

電気防食工法を用いた道路橋の維持管理手法に関する

共同研究報告書 第502号, 第516号

平成30年7月, 令和2年3月

総目次

1 編 序論	1- 1
1. 本研究の背景と目的	1- 1
2. 本報告書の構成	1- 2
2 編 電気防食工法の現状	2- 1
1. はじめに	2- 1
2. 電気防食工法の各技術に関する調査の方法	2- 2
2.1 調査対象会社および工法	2- 2
2.2 調査内容	2- 3
3. 電気防食工法の各技術に関する調査結果	2- 4
3.1 各工法の概要	2- 4
3.2 構造物の部位に関わる適用性	2- 11
3.3 立地環境に関わる適用性	2- 16
3.4 その他に関わる適用性	2- 19
3.5 耐用年数	2- 22
3.6 各工法の施工実績	2- 27
3.7 各工法のコスト	2- 30
参考文献	2- 33
3 編 電気防食工法の維持管理の実態調査	3- 1
1. はじめに	3- 1
2. 管理者へのアンケート調査	3- 1
2.1 調査概要	3- 1
2.2 アンケートの設問	3- 1
2.3 アンケート結果概要	3- 2
2.4 アンケート結果の分析	3- 7

3.	電気防食メーカーへのアンケート調査	3- 13
3.1	はじめに	3- 13
3.2	電気防食工法の維持管理に関する調査の方法	3- 14
3.3	電気防食工法の維持管理に関する調査結果	3- 16
4.	まとめ	3- 61
4.1	はじめに	3- 61
4.2	電気防食における維持管理の実施状況	3- 61
4.3	電気防食の維持管理内容に関する現状とその評価	3- 61
4.4	電気防食の維持管理方法における課題と方向性	3- 63
4.5	遠隔監視システムについて	3- 69
4.6	流電陽極方式の電気防食について	3- 71
4.7	記録について	3- 71
4.8	新工法の開発について	3- 71
付録-1	管理者へのアンケート調査票	3-付録- 1
付録-2	電気防食メーカーへのアンケート調査票	3-付録- 5

4 編	供用中の橋梁の調査	4- 1
1.	はじめに	4- 1
2.	調査内容	4- 2
3.	概略調査（6橋）	4- 3
3.1	概略調査対象橋梁	4- 3
3.2	確認された事象	4- 3
3.3	概略調査結果のまとめ	4- 5
4.	詳細調査および追加調査	4- 6
4.1	調査対象橋梁	4- 6
4.2	調査内容	4- 6
5.	橋梁調査結果のまとめ	4- 10
5.1	A橋調査より	4- 10
5.2	B橋調査より	4- 10
5.3	C橋調査より	4- 10
5.4	共通	4- 10
最後に		4- 10
6.	A橋調査結果抜粋	4- 11
6.1	電気防食方式の概要	4- 11
6.2	外観調査	4- 11
6.3	コンクリート表面電位分布測定	4- 11
6.4	内部照合電極での復極量試験結果	4- 12
6.5	調査よりわかったこと	4- 12

7. B橋	4- 13
7.1 通電方式の概要	4- 13
7.2 定電流方式の特性（チタンメッシュ方式）	4- 13
7.3 定電位方式の特性（チタングリッド方式）	4- 14
7.4 流電陽極方式の特性（亜鉛シート方式）	4- 14
7.5 調査よりわかったこと	4- 15
8. C橋	4- 16
8.1 橋脚陽極部の変状	4- 16
8.2 橋脚気中部回路での測定例	4- 17
8.3 調査よりわかったこと（C橋）	4- 17
付録-1 概略調査報告書	4-付録- 1
1. A橋	4-付録- 1
2. X橋	4-付録- 6
3. Y橋	4-付録- 7
4. B橋	4-付録- 13
5. C橋	4-付録- 18
6. Z橋	4-付録- 24
付録-2 詳細調査報告書（A橋）	4-付録- 31
1. A橋電気防食概要	4-付録- 31
2. 詳細調査内容	4-付録- 32
3. 詳細調査結果	4-付録- 33
4. 調査結果のまとめ	4-付録- 46
5. おわりに	4-付録- 49
付録-3 詳細調査報告書（B橋）	4-付録- 50
1. B橋電気防食概要	4-付録- 50
2. 詳細調査内容	4-付録- 52
3. 詳細調査結果	4-付録- 53
4. 調査結果のまとめ	4-付録- 62
5. おわりに	4-付録- 64
付録-4 詳細調査報告書（C橋）	4-付録- 65
1. C橋電気防食概要	4-付録- 65
2. 詳細調査内容	4-付録- 68
3. 詳細調査結果	4-付録- 69
4. 調査結果のまとめ	4-付録- 80
5. おわりに	4-付録- 82
付録-5 追加調査報告書（B橋）	4-付録- 83
1. 追加調査概要	4-付録- 83
2. 追加調査項目	4-付録- 84
3. 通電状態の確認	4-付録- 86
4. 陽極被覆モルタル浮き部での防食効果の確認	4-付録- 92
5. 耐用年数を経過した防食板の調査	4-付録- 97
6. モニタリング測定不具合の調査	4-付録-105
測定データ	4-付録-109

5 編	撤去橋梁の調査	5- 1
1.	はじめに	5- 1
1.1	背景と目的	5- 1
1.2	本編の構成	5- 1
2.	荒磯橋の概要	5- 3
2.1	書類調査	5- 3
2.2	定期点検に関する書類調査	5- 16
3.	撤去桁の調査結果	5- 45
3.1	撤去桁の現状把握のための調査	5- 45
3.2	詳細調査	5- 67
4.	FEMによる防食効果の評価	5- 94
4.1	FEMの概要と入力パラメータの決定	5- 94
4.2	解析結果と実測値との比較	5-100
5.	調査結果のまとめと本検討から得られた知見	5-103
5.1	調査結果のまとめ	5-103
5.2	本検討から得られた知見	5-104
6 編	維持管理マニュアル（案）の策定	6- 1
1.	はじめに	6- 1
2.	目次構成	6- 1
3.	維持管理のポイント	6- 2
4.	各種点検	6- 3
4.1	点検種別	6- 3
4.2	実施者	6- 3
4.3	点検頻度	6- 4
	参考文献	6- 4
7 編	新工法の開発（間欠通電方式の検証）	7- 1
1.	はじめに	7- 1
2.	実験概要	7- 3
2.1	供試体概要	7- 3
2.2	通電方法および測定項目	7- 6
3.	実験結果	7- 7
3.1	各曝露環境における防食効果の検証	7- 7
3.2	各条件の腐食電流密度	7- 47
3.3	通電停止期間の復極状況	7- 51
3.4	間欠通電（断続通電）の適用にあたって	7- 53

8 編	結論	8- 1
1.	研究調査結果の要点	8- 1
1.1	工法の現状と維持管理の実態	8- 1
1.2	電気防食適用後の不具合実態調査	8- 2
2.	維持管理マニュアルの策定	8- 2
2.1	点検種別と頻度の設定	8- 3
2.2	点検内容と記録	8- 3
3.	今後の課題と展望	8- 3
3.1	維持管理マニュアルの社会実装	8- 3
3.2	新技術の活用	8- 4

9 編 供用中/供用後の橋梁の調査 — 電気防食を適用した弁天大橋における防食効果の検証 —

1.	はじめに	9- 1
1.1	調査の経緯	9- 1
1.2	調査内容	9- 2
2.	概略調査	9- 3
2.1	弁天大橋（B 橋）の概要	9- 3
2.2	電気防食に関する事項（調査票より）	9- 4
2.3	電気防食の維持管理に関する事項（調査票より）	9- 4
2.4	定期点検結果他に関する事項（調査票より）	9- 5
2.5	外観目視調査結果	9- 5
2.6	書類調査	9- 7
2.7	詳細調査項目	9- 7
3.	詳細調査	9- 8
3.1	弁天大橋電気防食概要	9- 8
3.2	詳細調査内容	9- 10
3.3	詳細調査結果	9- 11
3.4	詳細調査結果のまとめ	9- 20
4.	追加調査	9- 22
4.1	概要	9- 22
4.2	追加調査項目	9- 23
4.3	通電状態の確認	9- 25
4.4	陽極被覆モルタル浮き部での防食効果の確認	9- 31
4.5	耐用年数を経過した防食板の調査	9- 36
4.6	モニタリング測定不具合の調査	9- 44
5.	解体調査	9- 54
5.1	概要	9- 54
5.2	調査内容	9- 54
5.3	チタンメッシュ方式の調査結果	9- 59
5.4	チタングリッド方式の調査結果	9- 70
5.5	亜鉛シート方式の調査結果	9- 83
6.	電気防食を適用した弁天大橋（B 橋）調査のまとめ	9- 97
6.1	陽極の変状と防食効果について	9- 97
6.2	電気防食の効果範囲	9- 97
6.3	陽極材の付着強度	9- 97
6.4	分配電流（外部電源方式）	9- 97
6.5	陽極耐久性試験	9- 97
6.6	配線配管材	9- 98
6.7	全体を通して	9- 98

10 編 撤去橋梁の調査

－ 陽極の異なる腐食環境における配置がコンクリート内部の鋼材の分極量の分布に及ぼす影響の評価 －

1. はじめに	10- 1
1.1 本編に示す調査の背景と目的	10- 1
1.2 撤去桁の概要	10- 2
2. 実験概要	10- 6
2.1 調査対象の部位	10- 6
2.2 通電方法	10- 7
2.3 その他の測定項目	10- 9
3. 実験結果	10- 10
3.1 電気抵抗率	10- 10
3.2 陽極－鋼材間の交流抵抗	10- 10
3.3 陽極への電流分配	10- 11
3.4 G5-3 の下フランジ部の自然電位の分布と鋼材の腐食状況	10- 12
3.5 分極量比の分布	10- 12
4. まとめ	10- 16

11 編 間欠通電方式の検証 － 異なる腐食環境における防食性の評価 －

1. はじめに	11- 1
2. 実験概要	11- 2
2.1 供試体概要	11- 3
2.2 通電方法および測定項目	11- 7
3. 実験結果	11- 11
3.1 各暴露環境における防食効果の検証	11- 11
3.2 試験室温 20℃, 相対湿度 60%の試験結果（間欠通電）	11- 11
3.3 試験室温 20℃, 相対湿度 90%の試験結果（間欠通電）	11- 19
3.4 試験室温度 40℃, 相対湿度 90%の試験結果（間欠通電）	11- 41
3.5 試験室温度 40℃, 相対湿度 90%の試験結果（常時通電）	11- 62
3.6 屋外暴露の試験結果（間欠通電）	11- 78
3.7 屋外暴露の試験結果（常時通電）	11- 91
4. 実験結果の考察	11- 98
4.1 各試験条件における鋼材の腐食状況	11- 98
4.2 防食期間中の通電停止期間における復極状況	11-100
4.3 間欠通電における防食効果	11-103
4.4 まとめ	11-106
5. 間欠通電（断続通電）の適用にあたって	11-107