

港湾鋼構造物およびコンクリート構造物に適用した 電気防食工法の防食効果の評価に関する研究

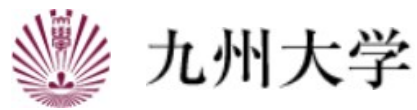
田土, 弘人

<https://doi.org/10.15017/2534438>

出版情報 : Kyushu University, 2019, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

港湾鋼構造物およびコンクリート構造物に
適用した電気防食工法の防食効果の
評価に関する研究

令和 元年 7月



九州大学大学院工学府建設システム工学専攻

田土 弘人

港湾鋼構造物およびコンクリート構造物に適用した電気防食工法の防食効果の評価に関する研究

目 次

第 1 章 序章

1.1 研究の背景と目的.....	1
1.2 論文の構成	4
参考文献	6
用語解説	7

第 2 章 既往の研究

2.1 序	8
2.2 金属の腐食現象のメカニズム	8
2.3 港湾鋼構造物の腐食と電気防食の概念	11
2.3.1 港湾鋼構造物の腐食	11
2.3.2 港湾鋼構造物への電気防食適用の概念	13
2.3.3 港湾鋼構造物に適用した電気防食工法の概要	15
2.4 港湾鋼構造物の電気防食効果の基準	19
2.4.1 電気防食の効果を表す防食電位	20
2.4.2 電気防食の効果を表す防食率と防食効果	22
2.5 港湾鋼構造物に適用された電気防食効果の既往の研究	23
2.5.1 電位と防食率の関係	23
2.5.2 防食電位と腐食速度の関係	26
2.6 電気防食を適用された港湾鋼構造物の防食効果の評価に関する検討課題	28
2.7 コンクリート構造物の塩害劣化と電気防食の概要	29
2.7.1 コンクリート構造物の劣化機構	29
2.7.2 塩化物イオンによるコンクリート中鋼材の腐食反応	30
2.7.3 塩害によるコンクリート構造物の劣化過程	32

2.7.4	塩化物イオンによる鉄筋の腐食発生限界濃度	33
2.7.5	コンクリート構造物の劣化状況による電気防食の適用例	33
2.7.6	塩化物イオンを含むコンクリート構造物への電気防食適用の概念	35
2.7.7	港湾コンクリート構造物に適用した電気防食工法の概要	37
2.8	コンクリート構造物における電気防食基準	41
2.9	湿潤環境下におけるコンクリート構造物に適用された電気防食の防食効果 に対する既往の研究	44
2.10	湿潤環境下にあるコンクリート中鋼材の防食効果の評価に関する検討課題	49
2.11	2章のまとめ	50
	参考文献	51

第3章 港湾鋼構造物に適用した電気防食工法の防食効果の評価に関する検討

3.1	はじめに	54
3.2	実海域に設置したテストピースによる電気防食効果の評価	56
3.2.1	電気防食の効果を表す評価指標とその課題	56
3.2.2	テストピースを用いた電気防食効果の経年変化に関する検討	58
3.2.3	テストピースを用いた電気防食効果における全国調査	62
3.2.4	電気防食適用時における最適な評価指標の検討	70
3.2.5	まとめ	71
3.3	電気防食効果に関する検討課題	72
3.4	鋼材の維持電位における腐食速度の検証	73
3.4.1	室内実験の試験方法	73
3.4.2	室内実験の試験結果	75
3.4.3	室内実験の試験結果に対する考察	85
3.5	電気防食が適用された実港湾構造物における電気防食効果の検討	86
3.5.1	肉厚測定の概要	86
3.5.2	肉厚測定時の素地面調整における削りしろの検証実験	93
3.5.3	実港湾構造物による鋼材の肉厚からの電気防食効果の検証	95
3.5.4	まとめ	103

3.6	3章のまとめ	104
3.7	電気防食が適用された港湾構造物の防食の効果を考慮した合理的な設計法の提案	106
	参考文献	108

第4章 港湾RC構造物に適用した電気防食工法の防食効果の評価に関する検討

4.1	はじめに	109
4.2	本検討における電気防食効果の評価する電気化学的手法	112
4.2.1	直線分極抵抗法による電気防食適用時の環境改善効果	112
4.2.2	分極曲線法による電気防食適用時の腐食速度の推定	116
4.2.3	再不動態化電位による防食電位の検討	121
4.3	下部工に電気防食が適用された場合の飛沫・干満帯環境下におけるRC構造物の電気防食効果	124
4.3.1	はじめに	124
4.3.2	試験体概要	125
4.3.3	試験体の暴露環境	127
4.3.4	試験方法	128
4.3.5	測定項目	129
4.3.6	試験結果	130
4.3.7	まとめ	138
4.3.8	電気防食効果の評価方法および電気防食の管理方法に対する課題	139
4.4	電気防食を適用した湿潤環境下における電気防食効果の評価方法の検証	141
4.4.1	はじめに	141
4.4.2	試験体および試験概要	141
4.4.3	試験結果及び考察	144
4.4.4	まとめ	152
4.5	干満帯における港湾RC構造物の電気防食管理方法の検討	153
4.5.1	はじめに	153
4.5.2	測定項目	154
4.5.3	各管理方法による試験結果	155

4.5.4	まとめ	167
4.6	4章のまとめ	168
4.7	下部工に電気防食が適用された港湾 RC 構造物へ電気防食を適用する場合 の今後の課題	171
	参考文献	172
第 5 章	結論	173

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

資源が乏しく対外依存度の高い日本にとって、輸出入物資の大半を扱う港湾は、国際貿易の玄関として、国民生活や経済活動を支えるために必要不可欠な社会資本である。港湾は、岸壁、防波堤、臨港道路といった多様な施設が一体的に機能しており、こうした施設は1970年代の高度経済成長期をピークに整備され、現在までに40年以上が経過している。図-1.1に示すように港湾の基幹的役割を果たす岸壁では、建設後50年以上経過する施設の割合が2014年には10%となっているが、20年後には60%に急増するなど急速に老朽化が進行することが予想され、物流ネットワークを支える港湾機能の低下とそれに対応するための改良・更新コストの増大が懸念される。

港湾施設は海洋に面するため、鋼部材や鉄筋コンクリート部材は腐食に対して極めて厳しい環境下であり、特に岸壁においては、鋼矢板の腐食貫通孔により中詰め材の流出によるエプロンの陥没、鋼管杭腐食により鋼管杭が座屈することによる崩壊、上部コンクリートの内部鉄筋が破断することによる崩壊といった極めて重大な事例が数多く報告されている。この原因の多くは、飛沫・干満帯や海中部の鋼材腐食、上部コンクリート中鉄筋の腐食を起因とするコンクリート劣化による強度低下、破損であると考えられ、腐食劣化により機能低下する港湾施設が増加すると考えられている。

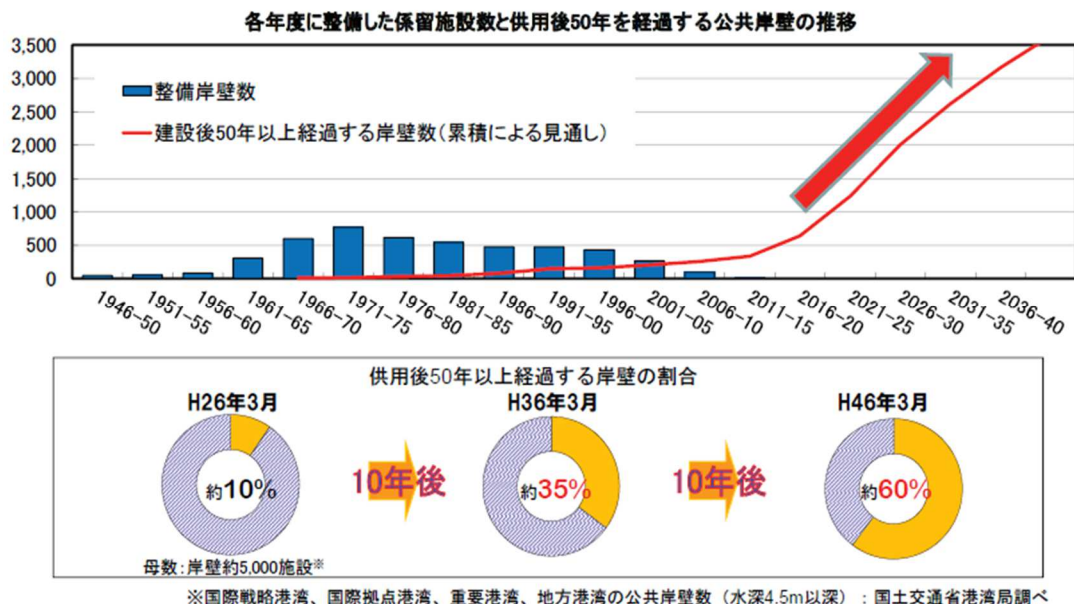
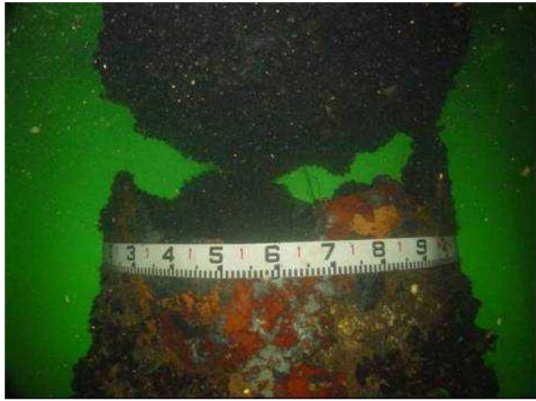


図-1.1 各年度に整備した係留施設数と供用後50年を経過する公共岸壁の推移^{1.1)}



港湾鋼構造物の劣化



港湾コンクリート構造物の劣化

岸壁鋼管杭が腐食して破断している状況、上部工が崩壊する危険がある。

栈橋上部工下面の床版のかぶりコンクリートが剥落している。塩害による鉄筋腐食が原因である。

写真-1.1 港湾施設の劣化事例

このような港湾施設の腐食劣化に対し、今日、鋼構造およびコンクリート構造物（RC 構造物および PC 構造物含む）に適用される電気防食（カソード防食）は極めて有効な防食方法である。日本国内の港湾施設に対し、初めて電気防食が適用されたのは、1953 年の尼崎港防潮堤の水門扉である。当時は外部電源方式と流電陽極方式（マグネシウム合金陽極）との併用であったが^{1,2)}、1976 年には運輸省（現国土交通省）において流電陽極方式はアルミニウム合金陽極を適用することが明記され、図-1.2 のように現在では鋼矢板や鋼管杭などの海中における防食法の主流となっている。また、塩害が社会問題となった 1980 年代半ば以降から、図-1.3 のように港湾 RC 構造物に対しても電気防食の適用への試験が実施され、実港湾 RC 構造物に国内で初めて電気防食が適用されたのは、1988 年清水港富士見岸壁に適用した亜鉛防食板（流電陽極方式）が最初である。今日においても、塩害による防食対策の主流となっている。

しかしながら、厳しい財政状況の中、限られた予算で、今までに蓄積された膨大な港湾ストックを活用していくことが重要であり、今後の港湾施設の老朽化に対する、維持・修繕・更新費の増大に備え、ライフサイクルコストの低減や更新需要の平準化を図るとともに、港湾施設の安全性の確保しつつ、構造物の劣化・損傷による性能の低下を予防し、戦略的に維持管理を行うことが求められている。このような背景から、港湾施設の計画的かつ適切な維持管理を推進するため、平成 19 年に「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」が改正され、これまでの設計手法が仕様規定型から性能規定型に移行されることになった。

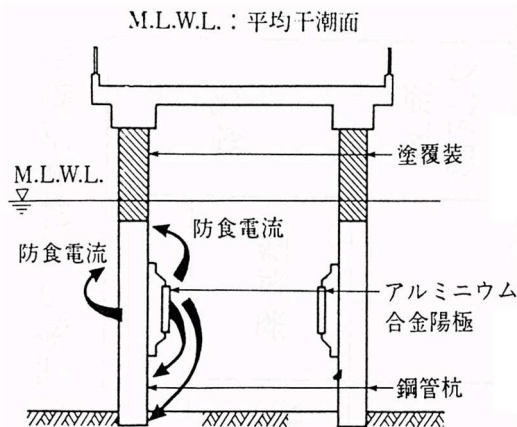


図-1.2 港湾鋼構造物への電気防食例
(流電陽極方式)

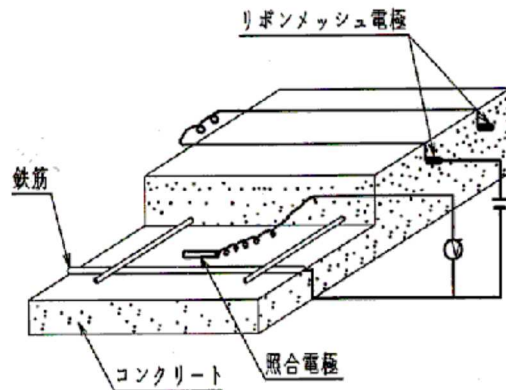


図-1.3 コンクリート構造物への電気防食例
(外部電源方式)

この改正により、要求性能を満足すれば多様な設計法や工法を適用することが可能となったが、一方で、要求性能を照査する際にそれぞれの性能に対し適切に評価することが求められた。

港湾鋼構造物における電気防食では、防食効果を設計時に評価する方法として1970年「港湾構造物設計基準」^{1.3)}に防食率90%以上として電気防食の効果が評価されている。

ここで、防食率を90%とした場合の港湾施設の構造設計に用いる鋼材の板厚は、防食時の腐食速度を無防食時の腐食速度の10% (=100-90) とし、設計供用期間終了時における鋼材の減肉量(腐食しろ)を、実際に使用する鋼材の板厚から減じた板厚が用いられる。つまり、無防食時の腐食速度を0.2mm/y、設計供用期間を50年とした場合、1mm (=0.2*0.1*50)が腐食することになる。既設構造物で無防食期間が長かった場合において、電気防食を適用したとしても、供用中に鋼部材の耐力を満足しなくなる場合もある^{1.4)}。しかしながら、近年では適切な時期に電気防食の更新が行われる場合が多く、鋼材の腐食速度はゼロに近いと考えられる。また、防食率は、無防食期間が不明な場合や、長かった場合に電気防食を適用した頃に採用されており、電気防食の有無が不明な場合を含んだ指標となっている。適切な維持管理されるような場合、電気防食の効果を表す評価指標について検討する必要があると考える。

一方、港湾RC構造物においては、様々な環境に電気防食が適用されているが、近年、湿潤環境下である干満帯において、従来の復極量(電位シフト)基準によって防食判定ができない場合が報告されている^{1.5)-1.6)}。また、大気環境下においては、電気防食の副次的効果により、従来よりも少ない防食電流で防食効果が得られることを示す報告も出されている^{1.7)}。現行の防食基準は、RC構造物への電気防食の適用実績が少なかった頃に採用されたことから、環境条件を考慮した電気防食の効果を表す評価方法について検討する必要があると考える。

以上の状況から本研究では、港湾施設に対する電気防食の効果を表す評価指標や評価方法について鋼構造物と RC 構造物に分けて課題を抽出し、その課題解決のために実構造物および暴露試験での測定結果を検証し、電気防食の効果に対する最適な評価指標や評価方法について検討した。

1.2 論文の構成

港湾施設に設置されている電気防食を長期にわたり経済的、効率的かつ適正に防食の効果を維持して行くために、海洋環境下における電気防食の特性を把握する必要がある。鋼構造物に対しては、電気防食の効果を表す評価指標について検討し、RC 構造物に対しては、電気防食の効果を表す評価手法の検討および干満帯における電気防食の管理方法について検討することを本論文の目的とした。この目的を達成すべく、以下の検討を行った。本論文の構成を図-1.4 に示す。

第1章【序論】では、日本国内の港湾施設の劣化状況と電気防食の必要性について述べ、本研究の背景および目的を示した。

第2章【既往の研究】では、はじめに海水環境下における鉄の腐食メカニズムとコンクリート構造物の塩害劣化メカニズムを示し、電気防食法の理論について説明を行った。さらに、港湾鋼構造物における電気防食の効果の評価指標、港湾RC構造物においては海中部に設置した流電陽極のコンクリート中鋼材への影響や湿潤環境下での電気防食の効果の評価手法について既往の研究と課題を示し、本研究の目的を明確にした。以上のことから、本論

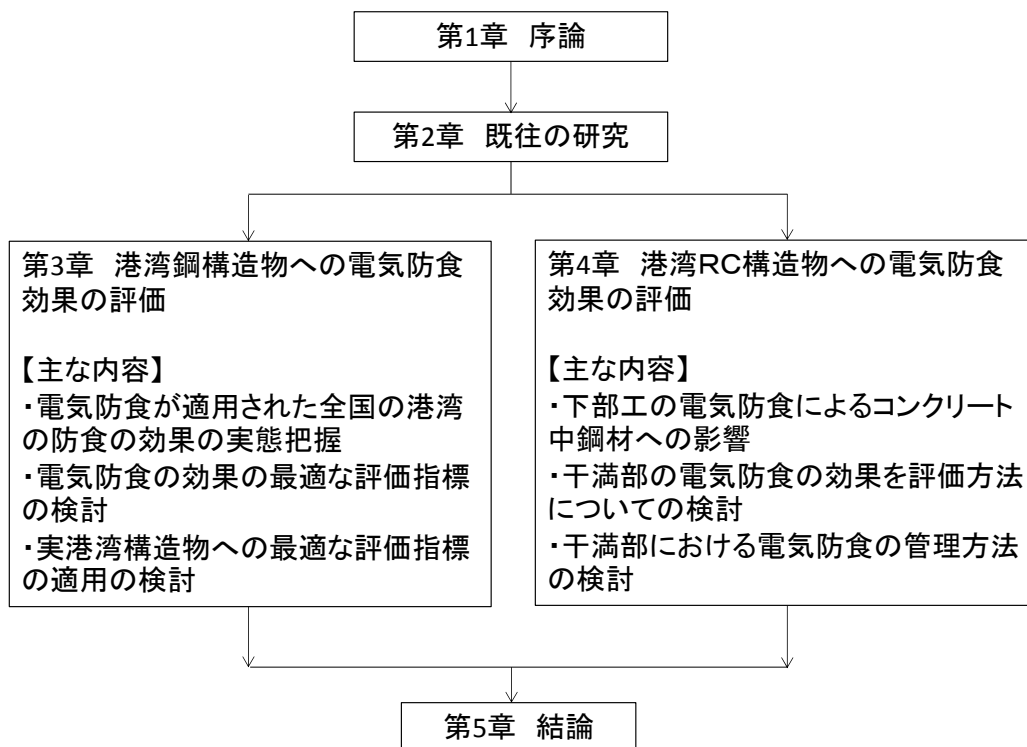


図-1.4 論文の構成

文では港湾施設を鋼構造物と RC 構造物に区分けし、各々に対して電気防食における防食効果の評価について課題を明らかにした。

第 3 章【港湾鋼構造物に適用した電気防食工法の防食効果の評価に関する検討】では、電気防食が適用された港湾鋼構造物における防食の効果の評価指標について検討した。港湾鋼構造物への電気防食の効果の指標として「防食率 90%」という指標が一般的に用いられている。まず初めに防食率という評価指標について、テストピースを用いたデータをもとに検討した。次に、防食時のテストピースだけで評価する防食効果^{1.8)}と防食率を比較検討し、電気防食の効果を表す最適な評価指標として、防食時の腐食速度について着目した。また、室内試験において、鋼材の電位を維持した場合の腐食速度を求め、鋼材の電位と腐食速度の関係を検証した。続いて、実港湾構造物の維持管理点検では、鋼材の電位および肉厚測定が実施されており、肉厚の減少量から鋼材の腐食速度に換算していることから、テストピースで得られた防食時の最適な評価指標とした腐食速度が実港湾構造物における電気防食効果の評価指標としての適用性について検討した。また、肉厚測定より腐食速度算出する際の留意点についても整理した。

第 4 章【港湾 RC 構造物に適用した電気防食工法の防食効果の評価に関する検討】では、電気防食が適用された港湾 RC 構造物の防食の効果について検討した。干満帯を含む RC 構造物への電気防食の効果は基準値として「復極量 100mV シフト」という電位シフトにより良否を判定しているが、干満帯のような湿潤環境下では復極量を満たさない場合がある。

しかしながら、干満帯のような湿潤環境下では、コンクリート中への溶存酸素の拡散が極めて遅く、鋼材の腐食速度は小さいと考えられる。また、栈橋のような港湾 RC 構造物には、海中部に流電陽極方式による電気防食が適用される場合が多く、コンクリートが海中に没水すると流電陽極の防食電流がコンクリート中鋼材に流入する。このような条件下において、干満帯における電気防食の効果を表す評価方法（通電時の腐食速度または再不動態化電位）について検討した。なお、通電時の腐食速度は通電停止直後の電位（インスタントオフ電位）と通電時のアノード分極曲線から外挿したターフェル勾配の直線との交点を通電時の推定腐食速度とした。また、電気防食の効果を通電時の腐食速度により評価する検証試験も併せて実施し、電気防食効果の評価方法について検討した。さらに、干満帯における電気防食の管理方法として、復極量を基準とした管理に代わる方法を検討した。

第 5 章【結論】では、**第 3 章**、**第 4 章**で得られた電気防食の効果に対する知見をまとめ、今後の課題や実構造物への測定の留意点についてまとめた。

【参考文献】

- (1.1) 平成 26 年度 国土交通省 港湾施設の維持管理に関する技術研修会資料
- (1.2) 柏木達夫, 電気防食の歴史変遷について, 防錆管理, Vol54. No.1. 2010
- (1.3) 旧運輸省港湾局監修 港湾構造物設計基準 1970, pp3-2-8
- (1.4) 田土弘人, 山路徹, 小林厚史, 川瀬義行, 吉田倫夫, 濱田秀則, テストピース調査結果に基づく港湾鋼構造物における電気防食効果の評価指標に関する研究, 材料と環境 Vol68, No.8, pp220-226, 2019
- (1.5) 篠田吉央, 望月紀保, 高久豊広, 小林浩之, 湿潤環境下コンクリート電気防食の防食評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol33. No.1. 2011
- (1.6) 小林浩之, 山路徹, 審良善和, 大谷俊介, 望月紀保, 濱田秀則, 湿潤環境下における港湾RC構造物の電気防食特性, 第 59 回材料と環境討論会, pp. 265-268, 2012
- (1.7) 大谷俊介, Muhammad Akbar Caronge, 山本大介, 濱田秀則, 電気防食下におけるコンクリート中鉄筋の復極量と防食効果に関する基礎的検討, コンクリート工学論文集, 第 28 巻, pp25-33, 2017
- (1.8) 山路徹, 審良善和, 佐藤俊二, 白石弘, 吉田倫夫, 船山嘉美, 阿部正美, 電気防食を適用した港湾鋼構造物の適切な維持管理下における防食効果 (全国 4 港湾における試験結果) 防錆管理, Vol52, No.2, pp41-44, 2008

【用語解説】

1. 防食率 (prevention rate)

経時的な電気防食の効果を表す指標であり、港湾鋼構造物の電気防食効果を表す指標として一般的に用いられている。下記式で示すように、無防食時の腐食速度(C[mm/y])と防食時の腐食速度(P[mm/y])の差を無防食時の腐食速度で除して算出されるものである。電気防食適用時においても無防食時の腐食速度が必要である。その値が90%以上であれば、電気防食を適用する際の防食設計が妥当であると評価される。

$$\text{防食率(\%)} = \frac{C - P}{C} \times 100 = \left(1 - \frac{P}{C}\right) \times 100$$

2. 防食効果 (prevention effect)

下記式で示すように電気防食が適用された試験後の質量 W_1 (g) を試験前の質量 W_0 (g) で除して算出されるものである。無防食時の腐食速度が不要な指標がある。しかしながら、試験期間が同じなら有効な指標であるが、試験期間が異なる場合は考慮が必要となる。

$$\text{防食効果(\%)} = \frac{W_1}{W_0} \times 100$$

3. 照合電極 (reference electrode)

金属の電位が測定する環境により変化しないように、環境によらず比較的固定した電位を持つ電極が対極として用いられる。この目的に用いられる電極を照合電極と呼ぶ。照合電極は安定な可逆電極を利用したもので、主に、飽和カロメル電極 (SCE)、飽和銀塩化銀電極 (SSE)、飽和硫酸銅電極 (CSE) が用いられる。また、港湾鋼構造物に対しては、現場作業に適した海水塩化銀電極 (SSE[SW]) が用いられることが多い。

それぞれの照合電極は、測定時において極端な温度差があるような場合は温度補正を行う必要がある。また、参照電極は比較的固定な電位であるため、相互に換算が可能である。下記に換算表を示す。

表 - 1.1 飽和銀塩化銀電極基準への換算式*

照合電極の名称	略称	飽和銀塩化銀電極への換算
飽和銀塩化銀電極	SSE	$E_{SSE} = 0 - 1.10 (t - 25)$
飽和カロメル電極	SCE	$E_{SSE} = E_{SCE} + 46 - 0.76 (t - 25)$
海水塩化銀電極	SSE[SW]	$E_{SSE} = E_{SSE[SW]} + 54 - 0.62 (t - 25)$
飽和硫酸銅電極	CSE	$E_{SSE} = E_{CSE} + 120 + 0.90 (t - 25)$

* : 金属防蝕技術便覧 (1956年)

第2章 既往の研究

2.1 序

港湾施設は海に面しており、非常に厳しい腐食環境に曝されている。構造部材には主に鉄が使用されていることから、鉄の腐食による耐久性の低下を最小限に防ぐことが必須である。しかしながら、環境条件や構造形式の影響により、各部位における腐食の度合いは大きく異なる。港湾施設に対して適切な防食対策を施すためには、鉄の腐食メカニズムと暴露環境による影響を理解することが必須である。そこで第2章では、鉄を例として金属の腐食現象を電気化学的観点から整理した。また、防食対策の基本的な考え方について整理するとともに、本研究のテーマとなる電気防食効果について、港湾施設を鋼構造物とRC構造物に区分し、それぞれに対して現状の問題点と既往の研究について整理した。

2.2 金属の腐食現象のメカニズム

金属の多くは、自然界では酸化物や硫化物の形で存在しており、これらの鉱石から様々な製錬過程を経て得られるものである。鉄の場合、地殻中では鉄鉱石（酸化鉄）として存在しており、コークスを還元剤として溶鉱炉、転炉などを用いて製造される。金属の製造過程は、化学的にみると、鉱石中の酸素と金属を分離する還元反応であり、反応を進行させるためには莫大なエネルギーを必要とする。製造する際に使用したエネルギーの一部は、金属自体の中に蓄えられるため、金属はエネルギーの高い状態にある。しかしながら、自然界の変化は、エネルギーの高い状態から低い状態へと移って行く。例えば、構造物などに使用されている鋼材は、その内蔵するエネルギーを放出しつつさび（酸化鉄）へと変化する傾向を持つ。これが金属の腐食である。図-2.1は、鉄鉱石、鉄、さびのエネルギー関係を模式的に示している。金属が腐食するという事は、金属が酸素と結合（酸化）して、もとの状態（鉱石）へと戻ることである。

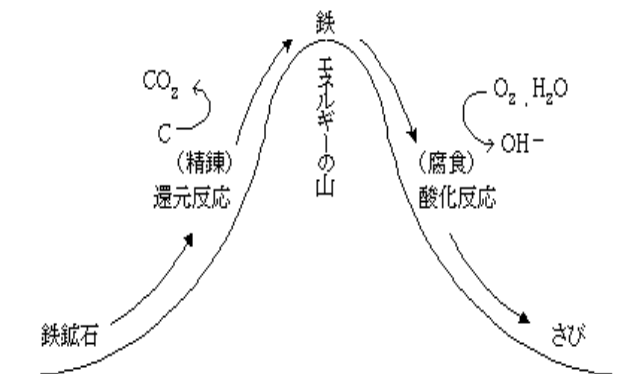


図-2.1 鉄鉱石、鉄、さびのエネルギーの関係^{2.1)}

腐食は、金属が環境の作用によって電気化学的に侵食される現象である。また、腐食は水分の有無によって湿食と乾食に区分される。港湾鋼構造物で生じる腐食は、湿食に分類される。

乾食は高温空気による酸化典型的であるが、溶融塩による腐食は無水の環境下であっても電気化学反応である。しかしながら、湿食は電解質溶液を媒体として金属が陽極溶解する現象であり、主に水溶液環境での金属の腐食を取り上げる。図-2.2 に金属の腐食が電池作用によって生じることを示した2つの電池 Galvani cell (ガルバニ電池) と Daniell cell (ダニエル電池) の概要を示す。Galvani cell (ガルバニ電池) のように薄い硫酸水溶液中に導線で接続された亜鉛板と銅板を浸すと亜鉛が溶解し、銅板から水素が発生して導線に電流が流れる。これは亜鉛が陽極溶解(電子を放出)して Zn^{2+} に酸化され銅板表面では H^+ が H_2 に陰極還元(電子受容)され、亜鉛の腐食は電気化学反応であることを示した。一方、Daniell cell (ダニエル電池) は、亜鉛板と銅板の間を隔膜で仕切って銅板が浸っている希硫酸中に硫酸銅を溶解しておけば水素の発生が止まって銅が析出し、回路電流の大きさは変わるが、亜鉛の溶解はそのまま継続する。すなわち、個々の金属とその周辺の電解質溶液によって一つの電気化学反応が構成され、系全体としては陽極側と陰極側で等量かつ向きの異なる電流が流れることを除けば、各電極がどのように反応するかは関係がないことを示した。

図-2.3は、金属は一見均一に見られるが組成の若干の違い等により、海水中に浸した場合、微視的範囲では、Aマイクロアノード(卑電位)、Cマイクロカソード(貴電位)の局部電池が形成され、マイクロアノードが腐食すると考えられている。

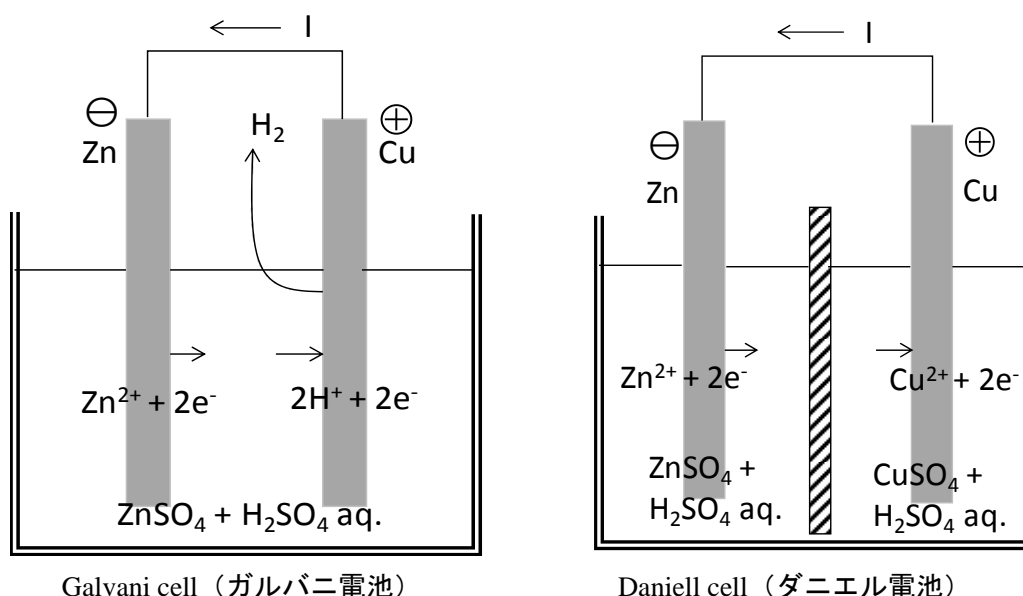


図-2.2 金属の腐食電池作用^{2.2)}

しかしながら、このような場合、A部のみが腐食するのか、極めて理想的な高純度の金属は腐食しないのかという疑念が生じる。

それに対して、WagnerとTraudは、単一金属上にアノードとカソードが生起し、その電池作用によって腐食が進行すること、混成電位の理論をもとに説明した。ここでは、中性環境で生じている鉄の腐食を例として、腐食のメカニズムを記述する。鉄の表面で生じている電気化学反応の模式図を図-2.4に示す。図-2.4の鉄の表面で生じている電気化学反応式は以下になる。

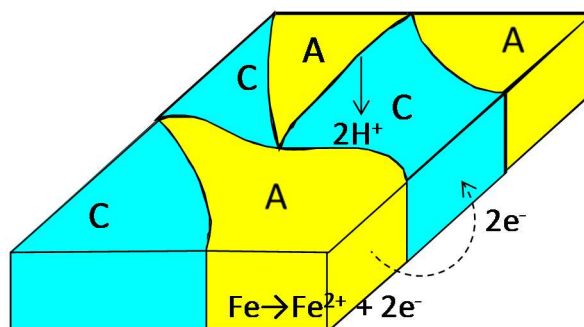


図-2.3 金属表面のマイクロ電池作用^{2,2)}

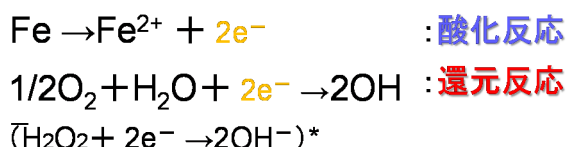
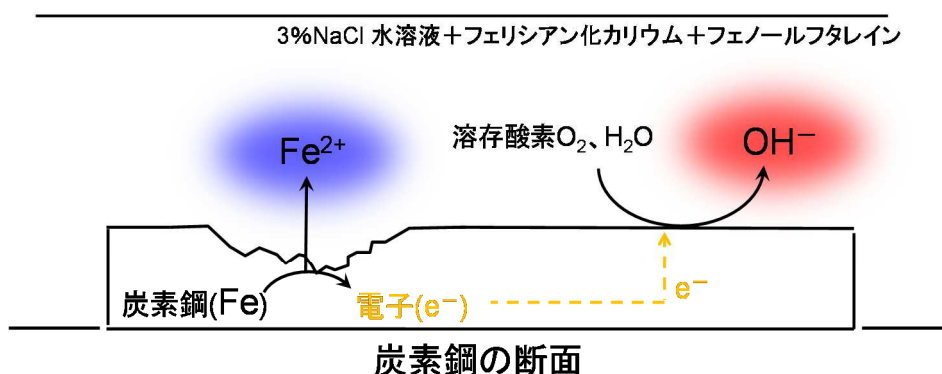
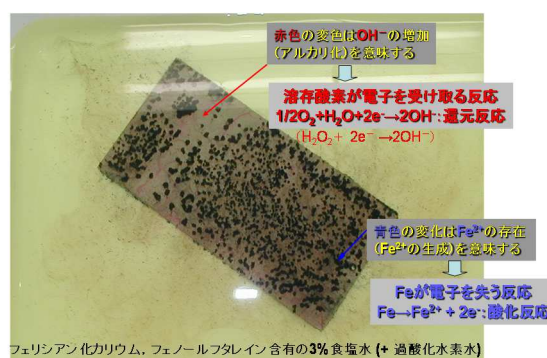


図-2.4 腐食発生の原理

アノード反応（酸化反応）： $\text{Fe} \Rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

カソード反応（還元反応）： $1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \Rightarrow 2\text{OH}^-$

総反応式： $\text{Fe} + 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 \cdots \cdots (2.1)$

水に浸漬された鉄の表面では、無数の電池（腐食電池または局部電池）が形成され、アノードとカソードが生じている。腐食反応の始まりは、鉄原子が結晶格子を離れ、水中に鉄イオン（ Fe^{2+} ）として移行する過程であり、これをアノード反応（酸化反応）と呼ぶ。しかしながら、この反応は単独では起こらず、対の反応が必要である。すなわち、海水中のような中性環境条件では溶存酸素は鉄表面上で電子を受け取り、自身は還元されて水酸化物イオン（ OH^- ）を生成する。これをカソード反応（還元反応）と呼ぶ。アノードとカソードが、時間の経過とともに位置を交換していく場合には均一腐食となり、固定される場合には孔食などの局部腐食となる。鉄が水中で腐食する過程の総反応式は（2.1）式で表される。アノード反応とカソード反応が、同一金属上で対になって進行していることを裏付ける実験例を以下に示す。

3%食塩水を含有する寒天ゲル中に折り曲げた鋼板を浸漬する。食塩水中にフェノールフタレインとフェリシアン化カリウムを添加しておくこと、 図-2.4 のように黒っぽく変色した部分と赤みがあって変色した部分が出現する。黒っぽい部分は Fe^{2+} の存在、赤みがかかった部分はアルカリ性であることを証明するものであるが、これは、腐食反応が上記の反応式で進行していることを示している。

2.3 港湾鋼構造物の腐食と電気防食の概念

2.3.1 港湾鋼構造物の腐食

港湾構造物である岸壁あるいは栈橋等は、コンクリートおよび炭素鋼が用いられている。我が国の港湾施設は高度経済成長期に建設されたものも多いが、短期間で港湾整備を行うために施工工期の短い鋼構造物が多用されている。

港湾鋼構造物の腐食環境は、 図-2.5 に示すように、海上大気中、飛沫帯、干満帯、海中部、海底土中部の環境に分類され、環境によって腐食の程度が異なる。最も腐食速度が大きいのは飛沫帯であり、 表 2.1 に示すように 0.3mm/y にも達する^{2.3)}。飛沫帯は海水の飛沫を絶えず受けることから、鋼材表面には常に薄い水膜が存在し、酸素の供給量が非常に多い。また、平均干潮面直下では、 図-2.6 に見られるように海洋鋼構造物に特有の腐食が生じる。これは集中腐食と呼ばれ、環境差によるマクロセル腐食である^{2.4)-2.5)}。平均水面から平均干潮面がカソードとして働き、平均干潮面直下がアノードとなって激しい腐食を生じる。

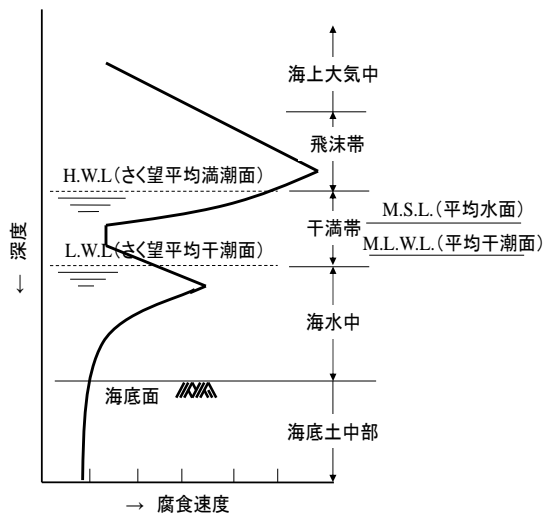


図-2.5 鋼管杭の板厚減少プロフィール

表-2.1 港湾における鋼材の腐食速度の標準値

腐食環境	腐食速度(mm/y)
1) H.W.L.以上	0.3
2) H.W.L.~L.W.L.-1.0m	0.1~0.3
3) 海水中	0.1~0.2
4) 海底土中部	0.03
5) 背面土中部	
a. 残留水位より上	0.03
b. 残留水位より下	0.02

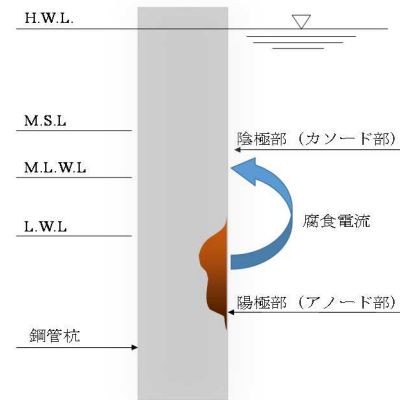
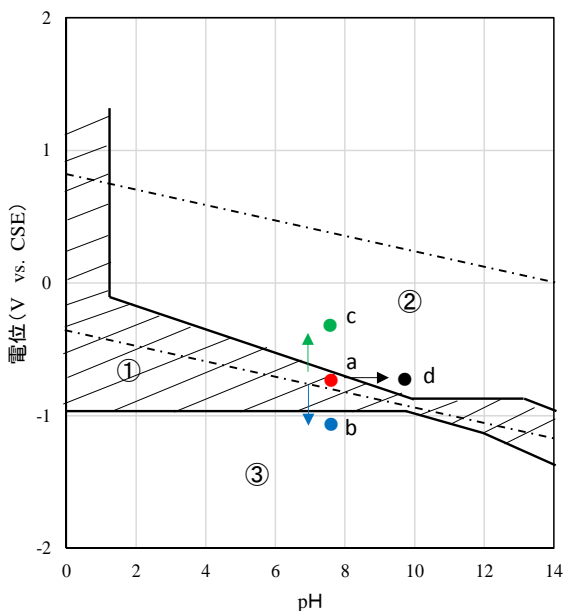


図-2.6 港湾鋼構造物のマクロセル腐食の例

2.3.2 港湾鋼構造物への電気防食適用の概念

海水中のような中性環境下での鋼材の腐食反応は、**図-2.4** に示した鉄がイオン化するアノード反応とアノード部で生じた電子を水と酸素で消費するカソード反応が同時に進むことによって腐食が進行する。このことから、鋼構造物の防食方法としては、カソード反応で必要な水や酸素の供給を遮断する間接的な対策により達成する被覆防食という方法の他に、鉄の腐食反応自体に直接的に作用する電気防食工法が挙げられる。次に電気防食の適用を熱力学的平衡論より説明すると以下のようになる。

海水による中性環境下での鉄の電位-pH 図を**図-2.7** に示す。図における a 点は中性環境下の pH (約 8.0) 鉄の電位を示す。鉄の電位を制御して防食する方法 (電気防食法) は、b 点、c 点が該当する。b 点は、鉄の電位を卑な方向に移動させて、不活性域まで卑化させ防食を達成しようとする方法である。また、c 点は、鉄の電位を貴な方向に移動させ、鉄を不動態化させることも目的としている。前者をカソード防食法、後者をアノード防食法と呼ばれている。アノード防食は、適用が特定の環境条件に限られるばかりでなく、不動態化が不完全な場合は、腐食を促進させてしまうという危険性を含んでいるため実用例が少なく、通常電気防食といった場合はカソード防食法を指すことが多い。また、d 点は、環境中の pH を上昇させ、鉄を不動態域にする方法であるが、海水環境の pH を上昇させることは現実的には難しい。



①全面腐食, ②不動態, ③不活性 (=電気防食)

図-2.7 海水中の鉄の電位-pH 図^{2.6)}

図-2.7のbの例を分極曲線で説明すると次のようになる。図-2.8は酸素の拡散で腐食が律速される系での炭素鋼の内部（破線）、外部（実線）のアノード、カソードの分極曲線の模式図を表す。外部カソード分極曲線からも分かる通り、鉄電位を低電位方向に移動させるためには、鉄に電流を流さなければならない。仮に、 i_{p1} の電流密度カソード電流を通電した場合、鉄の電位は E_{p1} になり、その時の腐食速度 i_{corr} は i_{corr1} に低減する。さらに、電流密度を増加して i_p にまですると鉄の電位は E_p となり、腐食速度がゼロになる。 E_p 以下の電極電位では、鉄の腐食は完全に停止し、 E_p はその上限の鉄の電位ということになる。カソード防食法の原理から、 E_p を防食電位、 E_p を維持するために必要な電流密度 i_p を防食電流密度という。

しかしながら、実用上の防食電位、防食電流密度は、防食電位 E_{ap} 、防食電流密度 i_{ap} に相当する値が用いられる。したがって、与えられた環境条件下での防食対象物のアノード、カソード分極特性を把握できれば、電気防食条件を推定することも可能となる。

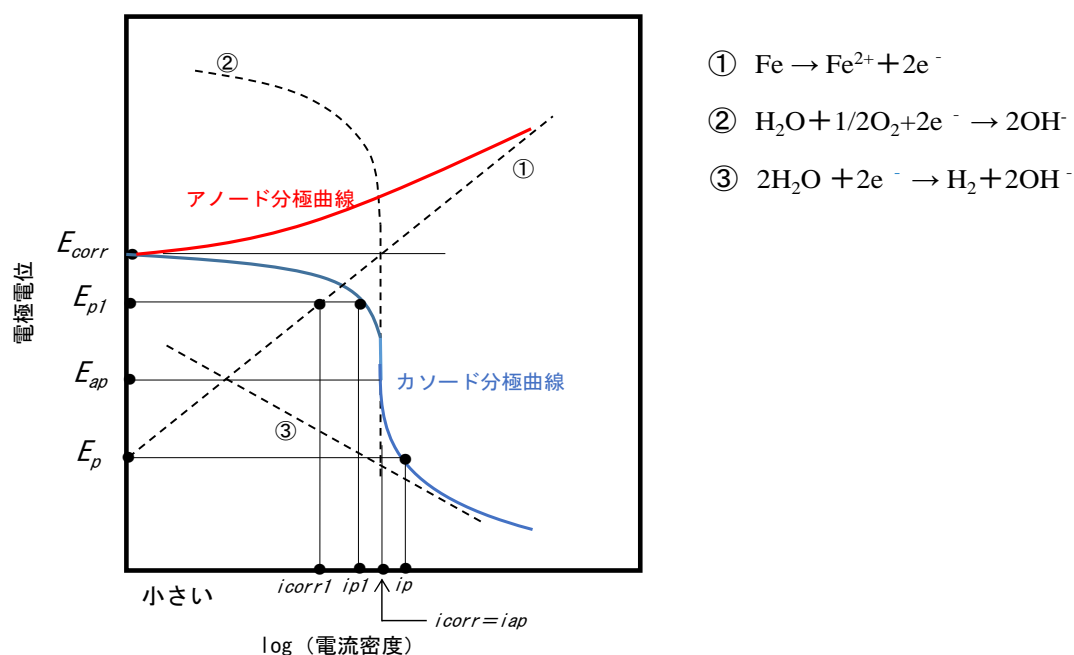


図-2.8 分極曲線を用いた電気防食の原理図^{2.7)}

2.3.3 港湾鋼構造物に適用される電気防食工法の概要

2.3.3.1 電気防食の工法概要

日本の港湾施設に電気防食が適用されたのは、1953年の尼崎港での試験施工が最初であるが、それから60年以上が経過し、今や港湾施設にとって必要不可欠な防食技術となった。また、電気防食工法は、鋼材の腐食進行を直接的に抑制でき、防食の効果が実証されていることから、港湾鋼構造物に維持管理を検討する上で、重要な位置付けになっている。

電気防食工法は、図-2.9の概要図に示すように流電陽極方式と外部電源方式に大別される。流電極方式は、鋼材である鉄よりもイオン化傾向の高い金属を陽極材として使用し、鉄と陽極材との間で発生する電位差を起電力として防食電流を供給する方式である。一方、外部電源方式は、直流電源装置を設置し、不溶性の電極を+側に接続し、-側を鋼管杭等の鋼材に接続することで、防食電流を電極から鉄筋に供給する方法である。港湾鋼構造物に適用される電気防食工法の特徴について表-2.2に示す。表-2.2より、電気防食工法における流電陽極方式、外部電源方式の一般的な特徴について整理した。

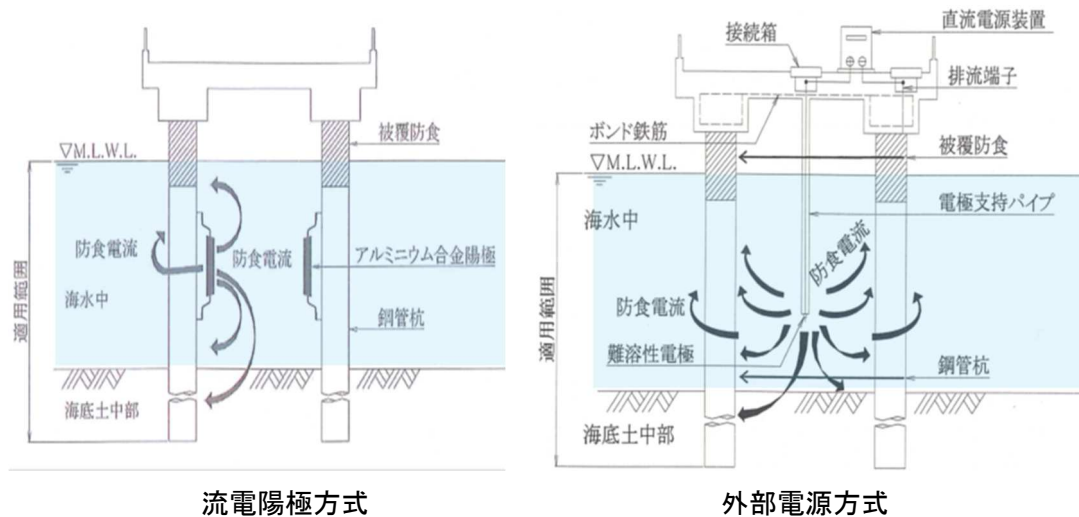


図-2.9 電気防食工法の概要図^{2.8)}

表-2.2 電気防食工法における一般的な特徴^{2.8)}

方式	長所	短所
流電陽極方式	<ul style="list-style-type: none"> ・メンテナンスが容易である ・施工が容易である ・陽極寿命を任意に設定できる ・小規模や独立した施設にも適用しやすい ・電源の無い場所でも適用できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・河川等の高抵抗環境下には適さない ・防食電流の調整ができない ・陽極が寿命に達し、完全消耗した時は取替える必要がある
外部電源方式	<ul style="list-style-type: none"> ・定格内なら出力電圧を任意に設定できる ・高流速化、河川水混入下など環境変化の激しい箇所にも適用できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・電源の確保できない箇所へは適用できない ・通電するために維持電力費が必要である ・過防食や隣接構造物への影響に留意する必要がある

2.3.3.2 電気防食の設計概要

港湾鋼構造物に適用する電気防食工法には、外部電源方式、流電陽極方式があるが、電気防食系の等価回路で考える場合、印加電圧の有無で分けられる。ここで、等価回路を外部電源方式として以下に示す。

$$\left(\varphi_a^M - \varphi_c^M\right) + V_{ex} = \left(\varphi_a^M - \varphi_a^S\right) + \left(\varphi_a^S - \varphi_c^S\right) + \left(\varphi_c^S - \varphi_c^M\right) \quad \dots (2.2)$$

ここで、 φ_a^M : アノードの金属内部電位 φ_c^M : カソードの金属内部電位

φ_a^S : アノード近傍の溶液内部電位 φ_c^S : カソード近傍の溶液内部電位

V_{ex} : 印加電圧

同一照合電極で測定しているものとし、陽極電位を E_a 、陰極電位を E_c 、通電電流を I 、極間抵抗を R_s として、

$$\varphi_a^M - \varphi_c^S = E_a$$

$$\varphi_c^M - \varphi_c^S = E_c$$

$$\varphi_a^S - \varphi_c^S = IR_s$$

と置き換えることができ(1)式は次式のようにまとめることができる.

$$E_c - (E_a - V_{ex}) = IR_s \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2.3)$$

ここで, 流電陽極方式の場合は印加電圧が加わらないため, 上式は次のようになる.

$$E_c - E_a = IR_s \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2.4)$$

また, アノード, カソードの分極特性を直線分極として表すと次のようになる.

$$\left(E_c^* - h_c \cdot \frac{I}{S_c}\right) - \left(E_a^* - h_a \cdot \frac{I}{S_a} + V_{ex}\right) = IR_s \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2.5)$$

$$I = \frac{E_c^* - (E_a^* - V_{ex})}{\frac{h_a}{S_a} + R_s + \frac{h_c}{S_c}} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2.6)$$

E_a^* : アノードの自然電位 E_c^* : カソードの自然電位

h_a : アノードの分極抵抗 h_c : カソードの分極抵抗

S_a : アノードの表面積 S_c : カソードの表面積

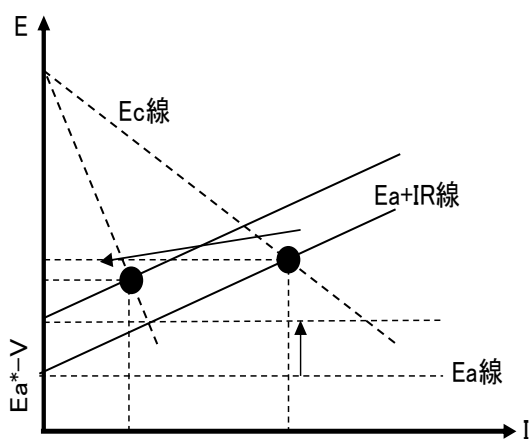
V_{ex} : 印加電圧

ここで, 流電陽極方式の場合は印加電圧が加わらないため, 上式は次のように表すことができる.

$$I = \frac{E_c^* - E_a^*}{\frac{h_a}{S_a} + R_s + \frac{h_c}{S_c}} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2.7)$$

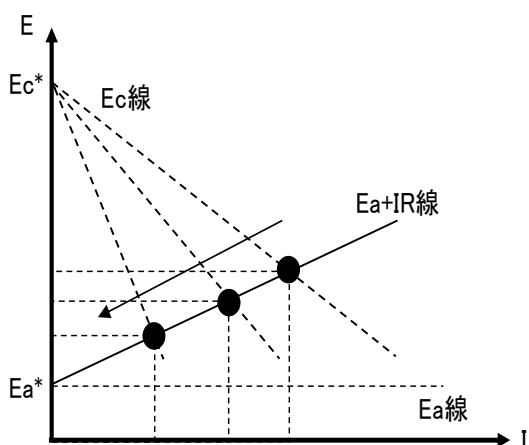
式 2.6, 2.7 で表される外部電源方式と流電陽極方式を適用した電気防食系を直線分極曲線を用いて概念図に表すと図-2.10, 2.11 のようになる.

ここで、**図-2.10** は外部電源方式の概念図を表し、**図-2.11** は流電陽極方式の概念図を表す。電気防食を運用する上で最適な条件は、少ない電圧（通電電圧）で大きな電流が得られること、かつ陰極への通電電流をできるだけ少なくすることで達成される。港湾鋼構造物の鋼材は表面に、電気防食の適用によりカソードにエレクトロコーティングといわれる薄い酸化皮膜が生成することにより酸素拡散が抑制されるため、カソード分極抵抗が上昇する。また、アノード分極はあまり変化しないため、電位が卑化することにより腐食が抑制される。したがって、港湾構造物の鋼材への電気防食では、カソード分極抵抗を上昇させ、 E_c 線の傾きを上昇させることによって、カソード電位を卑化させることに着眼されている。



外部電源方式の場合、外部電源により電圧 V を加えた場合、アノード電位が E_a^*-V になる。 E_a-IR 線は同じ傾きで、その切片は E_a^*-V に上昇する。そのため、アノードとカソードの電位差を小さくなることによって、 E_c が卑化し、腐食が抑制される。

図-2.10 外部電源方式の直線分極曲線概念図^{2.9)}



流電陽極方式の場合、カソード分極抵抗が増大し、発生電流 I が低下することによって E_c が卑化する傾向になることによって、腐食が抑制される。

図-2.11 流電陽極方式の直線分極曲線概念図^{2.9)}

2.4 港湾鋼構造物の電気防食効果の評価基準

電気防食法について1959年「港湾工事設計要覧」で初めて明記されてから、表-2.3に示すとおり幾度と改正されてきた。電気防食の効果を確認する方法として、鋼材の電位を測定することでスポット的に電気防食の効果を評価する方法が1967年「港湾構造物設計基準」に明記された。また、設置時の鋼材の質量から測定時の鋼材の質量減量より算出される腐食速度を基にした防食率という経過的な電気防食の効果を表す指標が1970年「港湾鋼構造物設計基準（改定）」^{2.10)}で示された。しかしながら、それ以降、電気防食の設計基準に幾度の改正があるが、防食電位、防食率について改定されていない。以下、電気防食の効果を表す防食電位、防食率および防食効果について整理した。

表-2.3 基準類の防食設計基準及び防食施工管理基準の遷移

年代	年月	防食設計基準の制定	防食施工管理基準の制定
昭和30年代	1959年	港湾工事設計要覧 塗覆法と電気防食法について記述	港湾工事共通仕様書、解説書発行 ①電気防食有効範囲を平均水面と明記 (M.W.L.→現在の記号M.S.L.) ②防食電流密度について海水中、海土中、陸土中について明記
	1960年3月		
昭和40年代	1967年4月	港湾鋼構造物設計基準 ①各水位での鋼材の腐食速度の明記 ②電気防食有効範囲を平均水面と明記 (M.W.L.→現在の記号M.S.L.) ③腐食代(しろ)を採用できることが明記 ④ 管理防食電位の明記 -770mV以下(飽和甘こう照合電極(vs.SCE)) -780mV以下(海水塩化銀照合電極(vs.SSE[SW])) -850mV以下(飽和硫酸銅照合電極(vs.CSE))	港湾工事共通仕様書、改定 ①電気防食は流電陽極方式のみと明記 ②防食電流密度は特記仕様書に記載することが明記
	1970年4月	港湾鋼構造物設計基準、改定 ① 電気防食の効果として防食率90%が明記 ②防食電流密度については記載はない	港湾工事共通仕様書、改定 ①電気防食用陽極はアルミニウム合金陽極と明記 ②電気防食適用時の陽極効率80%以上と明記
	1971年3月		
	1976年4月		
昭和50年代	1979年3月	港湾施設の技術上の基準：同解説 ①海水中、石積中、海土中、陸土中の防食電流密度が規定	
	1986年3月	港湾鋼構造物防食マニュアル発行 (港湾施設の技術上の基準・同解説の防食補修分野でより詳細に記載されたもの) ①電気防食の適用範囲を平均水面M.S.L.から平均干潮面(M.L.W.L.)に変更 ②電気防食用陽極の効率を80%から90%に変更 ③腐食代(しろ)採用に制限	
平成元年代	1989年2月	港湾施設の技術上の基準：同解説 ①腐食代(しろ)採用の制限	港湾工事共通仕様書、改定 ①電気防食用陽極の効率を80%から90%に変更
	1991年3月		
	1997年4月	港湾鋼構造物防食・補修マニュアル発行 防食マニュアルと補修マニュアルが統合 ①塗覆装下端レベルはL.W.L.-1mを標準として推奨	
平成10年代	1999年4月	港湾施設の技術上の基準：同解説 ①塗覆装下端レベルはL.W.L.-1m、それ以深は電気防食の適用が標準 ②腐食代(しろ)は仮設のみに適用可 ③汚染海域における電流密度の解説追加	

2.4.1 電気防食の効果を表す防食電位

防食電位に対する考え方には大別して2通りある。一つは海水中の鋼材、銅合金などに代表される非不動態化材料に対するもので、金属の酸化還元反応における平衡電位を防食電位とする考え方、もう一つはステンレス鋼、アルミニウム合金など不動態化材料に対するもので、局部腐食が発生しない不動態域の上限電位を防食電位とする考え方である。いずれも実用上適用されている防食電位は、防食状態と評価できる電位を実験室試験や現場試験、さらには運用上の課題なども考慮し、速度論的観点から決定していることが多いため、理論上の考え方に基づいて決定される値と必ずしも一致しない。電気防食において、防食域の上限値を示す電位（図-2.8の E_{ap} に相当する値）を防食電位と称している。

港湾鋼構造物を構成する主要鋼材として、非不動態化材料の代表的材料である炭素鋼の常温、海水（好気性）環境下における防食電位について説明する。

酸素の拡散で腐食速度が律速されている中性環境の鋼材の電位は、図-2.12の実験結果からも明らかのように、 -770mV (vs.SCE) (-725mV (vs.SSE)) である。この値は一方において、実用上の防食電位は、図-2.13に示すように、脱気環境下における鋼材の自然電位とほぼ等しく、脱気状態を実用上の防食状態としていることが分かる。すなわち、鋼材表面に供給される溶存酸素を通電電流によりすべて還元し、腐食反応として使われる溶存酸素がない状態を防食状態と考えてよいということで、古くは Schwerdtfeger^{2.11)} や Sudrabin^{2.12)}らによっても指摘されている。

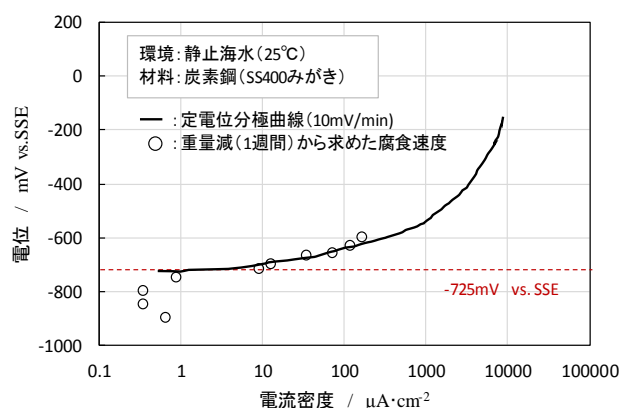


図-2.12 炭素鋼の電位と腐食速度の関係

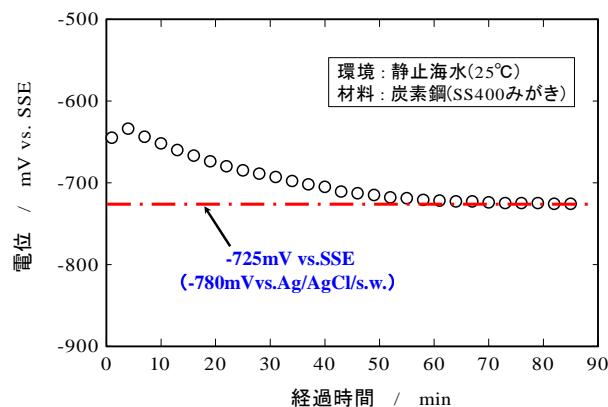


図-2.13 窒素ガス通気後（脱気環境）炭素鋼自然電位の経時変化^{2.13)}

表-2.4 に ISO に記載されている海水中の各種材料の防食電位を示す。表中、好気性環境下の鋼材、銅合金などは上記の考え方で防食電位が決定される材料であるが、いずれもより安全側にシフトした値が採用されている。嫌気性（硫酸還元菌（SRB）存在）環境下での値は、鋼材の場合 Fe/FeS 系の平衡電位に近似した値である。銅合金は、好気性環境では脱気環境下の自然電位が銅の酸化(腐食)反応の平衡電位と一致するため、防食電位は平衡論的評価と一致すると考えてよい。

表-2.4 海水中における各種金属の防食電位 (vs.SSE 基準)^{2, 14)}

材料	上限電位 (V)	下限電位 (V)
鉄および鋼		
・好気性環境	-0.80	-1.10
・嫌気性環境	-0.90	-1.10
高張力鋼	-0.80 (注1)	-0.95 (注1)
アルミニウム合金陽極 (Al-Mg) & (Al-Mg-Si)	-0.80 (-0.1Vカソード分極)	-1.10
ステンレス鋼		
・オーステナイト系		
・PREN \geq 40	-0.30	制限なし
・PREN<40	-0.60 (注2)	制限なし
・二相系	-0.60 (注2)	(注3)
銅合金		
・アルミニウムなし	-0.45~-0.60	制限なし
・アルミニウム含有	-0.45~-0.60	-1.10
ニッケル基合金	-0.20	(注4)

注1) 水素に起因する割れ感受性のある高張力に対しては、下限電位は-0.83V(Ag/AgCl/s.w)より貴電位にしなければならない。

注2) より貴電位も考えられるが、多くの場合、これらの電位ですき間腐食の防止は可能である。

注3) これらの合金は金属組織に依存して割れ感受性が生じるため、大幅な卑電位は

注4) 高強度ニッケル・銅およびニッケル・クロム・鉄合金は水素に起因する割れが生じるので、水素発生が生じるような電位は避けるべきである。

2.4.2 電気防食の効果を表す防食率と防食効果

電気防食の効果を表す指標として、防食率という指標が今日利用されている。防食率は式 2.8 で表されるとおり、無防食時の腐食速度(C[mm/y])と防食時の腐食速度(P[mm/y])の差を無防食時の腐食速度で除して算出されるものである。なお、電気防食適用における防食理論上は、防食時の腐食速度はゼロになることにより、防食率は100%となる。

$$\text{防食率}(\%) = \frac{C - P}{C} \times 100 = \left(1 - \frac{P}{C}\right) \times 100 \cdots (2.8)$$

一方、現在『港湾施設の技術上の基準・同解説』^{2.15)}に記載されている電気防食の効果を表す指標としては、一般的に防食率90%が用いられる。これは、1970年『港湾鋼構造物設計基準』に規定されたのが最初であり、電気防食を適用する前の無防食期間を含めた鋼材の腐食速度をもとに算出されたものであった。しかしながら、防食率は電気防食が適用されている場合、無防食時の腐食速度が不明であるため正確に評価できない場合がある。

また、実構造物において、電気防食が継続的に適用された場合の電気防食効果を確認する方法として、式 2.9 で示すように電気防食が適用された試験前後の質量を基に電気防食の効果を表す「防食効果」^{2.16)} という、無防食時の腐食速度が不要な指標がある。しかしながら、試験期間が同じなら有効な指標であるが、試験期間が異なる場合は考慮が必要となる。

$$\text{防食効果}(\%) = \frac{W_1}{W_0} \times 100 \cdots \cdots (2.9)$$

ここで、テストピースの試験後の質量：W₁ (g) ，試験前の質量 W₀ (g) である。

2.5 港湾鋼構造物に適用された電気防食効果の既往の研究

港湾鋼構造物への電気防食は、適用されてから60年以上が経過しており、今や必要不可欠な技術となっている。近年では、電気防食は、維持管理の容易な流電陽極方式が適用される場合が多くなった。しかしながら、適用開始時は電気防食の効果を裏付けるデータが少なかつたことから、条件設定のできる室内や実構造物における電気防食効果と電気防食特性を確認する多くの試験が実施された。次項より、電位、防食率、防食効果、腐食速度についての既往の研究を整理した。

2.5.1 電位と防食率の関係

図-2.8 から鉄の電位を理論上の防食電位 E_p 以下にすることで、鉄の腐食は完全に停止することになる。したがって、防食電位以下に鉄が維持されている場合、式 2.8 の $P[\text{mm/y}]$ はゼロであるため、防食率 100%となる。

ここで、電位、防食率、防食効果、腐食速度について既往の研究結果について整理した。

a) 「実験室での鋼材の電位と防食率の関係に関する研究」^{2.17)}

標準環境（清浄海水、25℃、微速、溶存酸素飽和）に設定された海水中に、サンドブラスト処理された鋼材、発錆処理された鋼材を用いて、ポテンシオスタットにより電位を設定した鋼材の防食率を算出した結果を図-2.14 に示す。

図-2.14 より、サンドブラスト鋼は防食電位 -770mV (vs.SCE) では防食率は 90%以上となっており、 -800mV (vs.SCE) 以下では防食率はほぼ 100%を示した。一方、発錆処理鋼は、 -800mV (vs.SCE) 以下

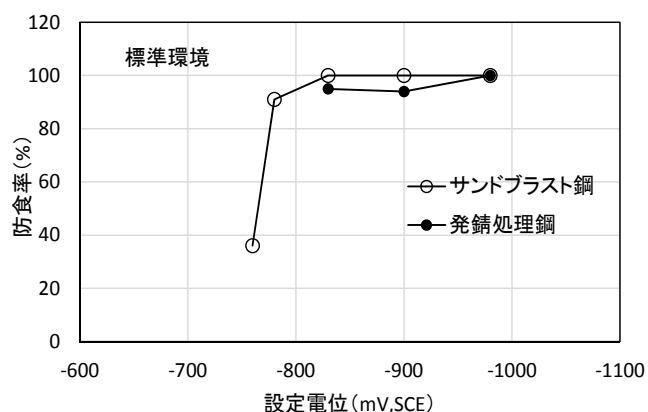


図-2.14 設定電位と防食率の関係

において防食率 90%以上にはなるが、サンドブラスト鋼のように高い防食率にはならなかった。これは、防食電流が錆の還元電流に消費されたためだと考えられる。 -1000mV (vs.SCE) ではサンドブラスト鋼と発錆処理鋼の防食率は同等となった。また、水温が低い場合 (5℃) および海水が希釈された場合 (例えば、河川水等の流入により抵抗率が標準海水の場合の約 10 倍 ($300\Omega\cdot\text{cm}$)) になった場合も試験結果は同様であったと報告されている。

b) 「実海域での鋼材の電位と防食率との関係に関する研究」^{2.18)}

福谷らは、清水港、小名浜港の実港湾海域の海水中、海土中に暴露され、電気防食が適用されたテストピースの電位と防食率の関係を調べた。その結果を図-2.15 に示す。図-2.15

より、海水中、海土中に関わらず、電位を卑にするほど、防食率が向上するところが示され、およそ-810mV (vs.SCE) で防食率 90%、さらに強く陰分極させれば-1150 mV (vs.SCE) に至って防食率 100%が達成された。-810mV (vs.SCE) 以下の直線が緩やかになっている。これは陰分極により水素(H₂)が発生することに鋼材露出面が減少することにより反応は低下したためだと考えられる。したがって、着目する点は防食率 90%の折れ点の電位-810mV (vs.SCE) を実用上の防食電位として示唆された。

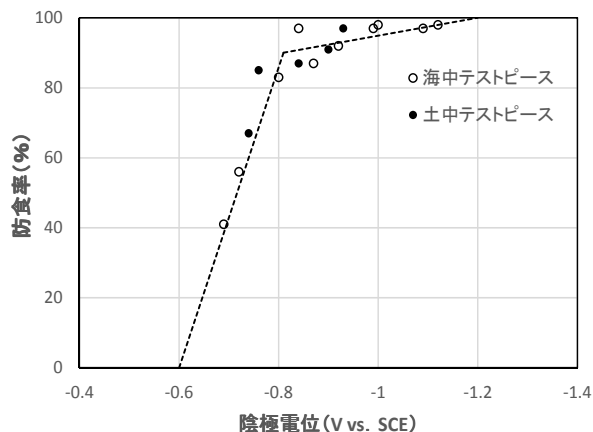


図-2.15 陰極電位と防食率の関係

c) 「電気防食効果と最適な陰極電位との関係」^{2.19)}

水流らは、カソード防食を行うにあたって、アノード溶解を抑制するためにカソード電位をできるだけ卑にする必要があるが、カソード電位を低くしすぎると水素発生に伴い電流効率が低下するとしている。そこで、室内試験によって、中性溶液中での鉄の分極曲線に近いと思われる図-2.16 を用いて、最適な電気防食効果を得るために、陰極防食において、1) アノード反応を抑制するために E_p をできるだけ低い電位にする、2) E_p を低くしすぎると水素発生反応が増大し、塗装の劣化・水素脆化などの過防食にならない電位とする、3)防食所要電流に対し防食率が最も高い、この3つの条件を満たす場合を検討した。

$$\text{防食率 } p(\%) = \frac{C - P}{C} \times 100 \dots \dots \dots (2.10)$$

$$\text{防食電流利用率 } q(\%) = \frac{C - P}{I} \times 100 \dots \dots (2.11)$$

$$\text{防食実効率 } r(\%) = p \times q \times 100 \dots \dots \dots (2.12)$$

ここで、C：無防食時の腐食速度 (mm/yr) ， P：防食時の腐食速度 (mm/yr)
I：防食電流 (A)

上記 1)～3)の条件を満たすため、図-2.16 より、防食電位 E_p は E'cor またはこれよりやや低い電位を選べばよいことが分かる。すなわち、中性環境下での腐食に対して、酸素還元

によるカソード電流を陰極防食電流により補償してやれば、その腐食速度は酸素が全くない（脱気環境）状態における水素発生型腐食まで抑制でき、多量の水素発生障害なく防食できることとしている。防食実効率 r が最大の電位が最も効率の高い電位であるといえる。また、防食率 p がある値以上でかつ防食実効率 r が最も大きい電位を選べばよいといえる。図-2.17 は図-2.16 に対応する p 、 q 及び r を表したものであり、 E'_{cor} （脱気時の炭素鋼の自然電位＝実用上の防食電位）で 99%を超える防食率が示された。このことから、海水のような中性環境下では、鉄は E'_{cor} 以下に維持すれば、理論上からも極めて高い防食率が得られることを示唆している。実構造物への電気防食適用において、 E'_{cor} 電位以下付近に電位を維持することは難しい。しかしながら、実構造物においては、本実験よりも厳しい環境下になることから、適切な電位を維持しておれば高い防食率が得られると考えられる。

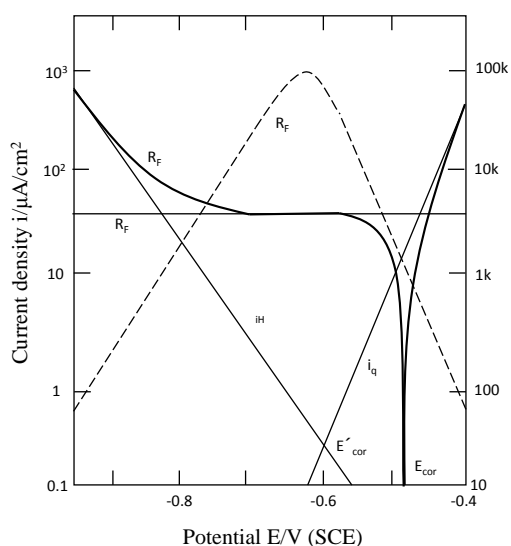


図-2.16 酸素の拡散電流密度を $30 \mu A/cm^2$

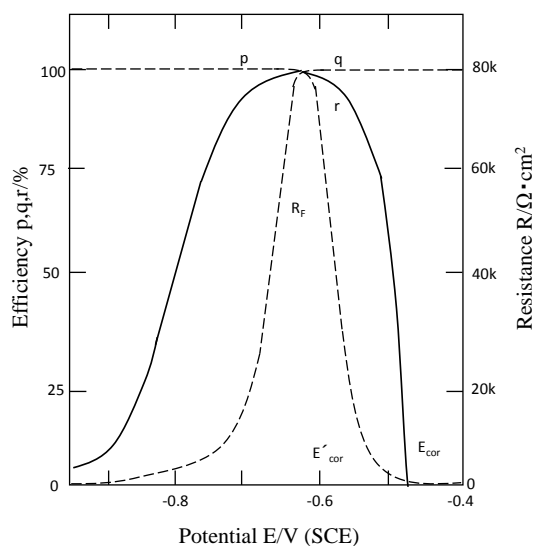


図-2.17 図-2.16 の場合の p 、 q 及び r の関係の場合の分極曲線

次に、適切な電位を維持した場合の、電気防食効果について整理された既往の研究を示す。

d) 「実海域で適切に維持管理された鋼材の電位と防食効果の関係に関する研究」^{2.16)}

山路らは、電気防食が適用され、無防食期間が無いように適切に維持管理された既設構造物の4港湾を選定し、テストピースを設置し、試験前後の質量を測定することにより、その防食効果について評価した。また、テストピースを取付けた実構造物の電位を合わせて測定を行った結果を図-2.18 に防食効果の経年変化、図-2.19 に電位の経年変化を示す。図-2.19 より隣接の実構造物の電位は何れの箇所も $-900mV$ (vs.SSE【SW】) 以下を示し、防食基準

電位 -780mV (vs.SSE【SW】) 以下よりも卑な電位が維持されていた。図-2.18によれば防食効果はいずれの港湾においても99%以上が確認された。したがって、適切に電気防食が維持されている場合、電気防食の効果はほぼ100%に近いと結論づけられている。

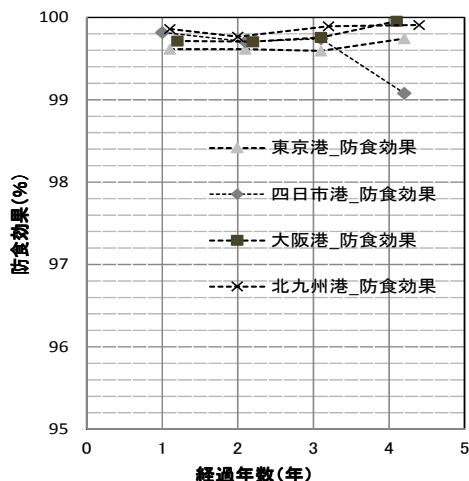


図-2.18 防食効果の経年変化

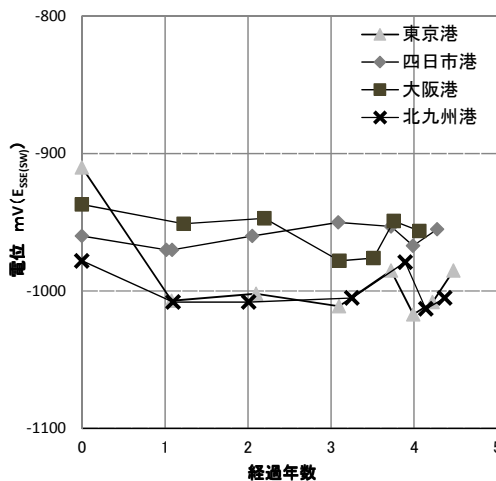


図-2.19 電位の経年変化

2.5.2 防食電位と腐食速度の関係

鋼材が実用上の防食電位以下に維持されている場合、高い電気防食の効果が得られていることから、次に防食電位と鋼材の腐食速度の既往の研究結果について整理した。

a) 「実験室内での鋼材の電位と腐食速度の関係に関する研究」^{2.17)}

標準環境（清浄海水、 25°C 、微速、溶存酸素飽和）に設定された海水中に、サンドブラスト処理された鋼材、発錆処理された鋼材を用いて、設定電位による鋼材の腐食速度を測定した。その結果を図-2.20に示す。実用上の防食電位 -770mV (vs.SCE) において、サンドブラスト処理された鋼材では、 0.01mm/y を下回ったが、発錆処理された鋼材では、 0.02mm/y 程度となった。このように、発錆処理された鋼材がサンドブラスト処理された鋼材に比べ腐食速度が大きかったのは、錆の還元に電流を要したためだと考え

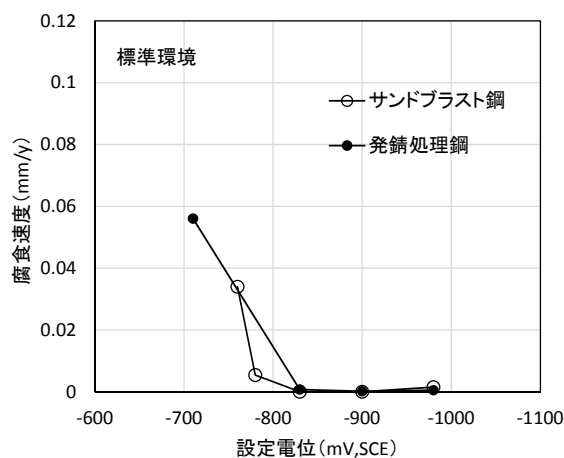


図-2.20 電位と腐食速度の関係

られる。しかし一方、設定電位 -800mV (vs.SCE) になると、サンドブラスト処理された鋼材と発錆処理された鋼材とも腐食速度はほぼゼロとなることが報告されている。

b) 「実験室内での鋼材の腐食速度と pH の関係に関する研究」^{2, 20)}

Kobayashi は、3%塩化ナトリウム水溶液中の炭素鋼の様々な pH 環境下での防食電位について実験を行った。静止させた水溶液中で pH3.5, 6.0 の環境下で電位と腐食速度の関係について実施し、その結果を図-2.21 に示す。図-2.21 より、pH6.0 において、 -770mV (vs.SCE) 付近で急激に腐食速度が低下し、 -950mV (vs.SCE) で腐食速度はゼロとなっている。一方、攪拌させた水溶液中で pH3.5, 6.0 の環境下で電位と腐食速度の関係について実施し、その結果を図-2.22 に示す。図-2.22 より、pH6.0 において、 -650mV (vs.SCE) 以下で腐食が十分に抑制されていることが示されている。

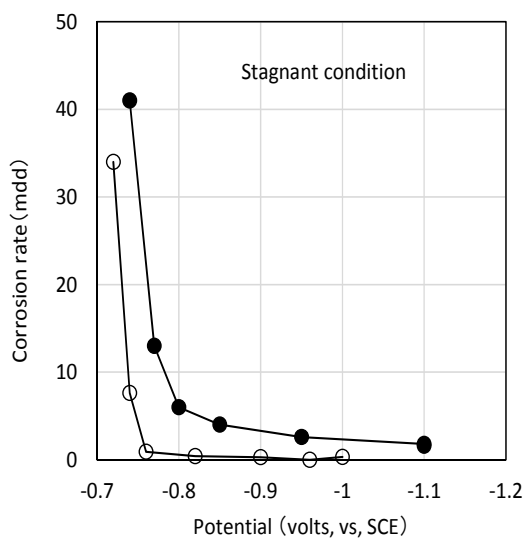


図-2.21 静止環境での腐食速度と pH の関係

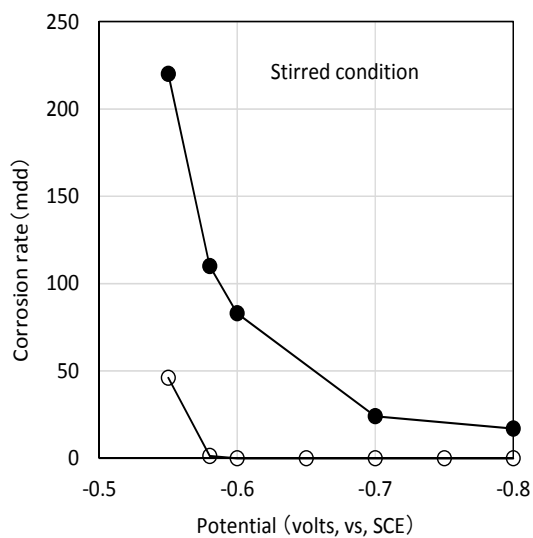


図-2.22 攪拌環境での腐食速度と pH の関係

2.6 電気防食が適用された港湾鋼構造物の防食効果の評価に関する検討課題

港湾鋼構造物へ電気防食が適用されてから 60 年以上が経過しており、今や港湾構造物の防食技術として不可欠な技術となっている。近年では、維持管理の容易さから流電陽極方式が主流となっている。港湾鋼構造物への電気防食の効果の評価指標として、一般的に「防食率 90%以上」が用いられているが、電気防食の適用状況に関わらず一様に設定された指標である。また、防食率は算出時に無防食時の腐食速度を必要とするため、電気防食が適用されている場合、無防食の腐食速度を正確に評価することができない場合がある。そのため、電気防食の効果として防食率では評価することが難しい場合があると考えられる^{2,21)}。

そこで、電気防食を適用した場合の防食率と防食電位および腐食速度の既往の研究を整理した結果、次のような検討課題が挙げられる。

1) 無防食期間がなく、適切に維持管理された場合は、無防食時の腐食速度を正確に評価することが難しいため、電気防食の効果の評価指標として、防食率に代わる評価指標を検討する必要がある。

2) 港湾鋼構造物の維持管理では、電位測定により電気防食の効果を確認していることから、防食電位と電気防食の効果を表す指標との関係を検討する必要がある。

3) 港湾鋼構造物の維持管理では、直接対象物の肉厚を測定し、その肉厚減少量を経過年数で除すことで電気防食適用時の腐食速度を直接的に求めている。しかしながら、将来の耐久性に対する構造設計において、防食率 90%として電気防食適用時の鋼材の腐食速度を 0.02mm/y (例: $0.2 \times (100-90)/100$) として推定値を計算に用いられているのが現状である。したがって、電気防食が適用された実港湾構造物の電気防食の効果として、電気防食適用時の鋼材から直接求められた腐食速度を検証する必要がある。

2.7 コンクリート構造物の塩害劣化と電気防食の概要

この節では、コンクリート構造物に対して、塩害による鋼材腐食のメカニズムを示し、劣化過程に対する防食対策について整理した。また、塩害による防食対策として電気防食を取上げ、その概要について説明する。次に、電気防食の効果を表す基準について整理し、湿潤環境下での電気防食の効果を表す既往の評価方法について整理した。

2.7.1 コンクリート構造物の劣化機構

海水に接するコンクリートおよび波浪や海水飛沫、潮風の作用を受けるコンクリートを、「海水の作用を受けるコンクリート」^{2.22)}と呼ばれている。海水の作用を受けるコンクリートは、潮位により海水の化学的浸食作用、砂れきを含む波浪による摩耗作用、飛沫による乾湿繰り返し作用、寒冷地での凍結融解作用による表面剥離、塩化物イオン浸透による鋼材腐食等が挙げられる。ここで、表-2.5に海洋環境下における劣化作用についてまとめた。

表-2.5 海洋環境下における劣化作用^{2.23)}

劣化要因	劣化内容
海水成分の化学作用による劣化	硫酸マグネシウム(MgSO ₄)が最も有害で、セメント水和生成物である水酸化カルシウム(Ca(OH) ₂)と反応して石こうの結晶と水酸化マグネシウム(Mg(OH) ₂)を生成し体積膨張を起こし、ひび割れを発生させる。
	塩化マグネシウムは、セメント中の水酸化カルシウム(Ca(OH) ₂)と反応して、水溶性の塩化カルシウムを形成し、コンクリートの組織を多孔質にする。
不動態皮膜破壊による劣化	塩化物イオンの浸透による鋼材の不動態皮膜が破壊され腐食が発生する。
気象作用による劣化	表層コンクリートは、潮の干満によってその温度や湿度が変化し、それに伴う体積変化が部位によって異なるため、局所的な引張応力が発生し、ひび割れを発生させる。
	気温が著しく低くなると、濃縮した海水の化学作用と凍結融解作用が複合してコンクリートを劣化させる。海水中のコンクリートの耐凍害性は淡水中の1/10程度まで低下するといわれる。
物理作用による劣化	波浪による繰り返し荷重、漂流物の衝撃などによって、ひび割れが発生する。
	漂砂、波浪などによって持続的作用によって、コンクリート表面が摩耗する。

近年、塩化物イオン浸透による鋼材不動態皮膜の破壊とその後の体積膨張によって発生したひび割れから、さらに劣化が加速度的に鋼材腐食を進行させる塩害が特に問題となっている。鋼材が錆を発生させた時の体積膨張は2~4倍^{2.24)}とされているが、海上大気中に暴露したコンクリート中鋼材の腐食生成物の分析結果から3.0~3.2倍程度^{2.25)}という報告もある。鋼材表面が深さ0.1mm程度腐食しても錆の膨張圧でひび割れが発生すると報告されている^{2.26)}。

以上から、コンクリートそのものの劣化よりコンクリート中鋼材の腐食から進行する劣化の方が性急であるため、コンクリート中鋼材の耐久性向上の施策が重要となってくる。

2.7.2 塩化物イオンによるコンクリート中鋼材の腐食反応

コンクリート中の細孔溶液は、水酸化カルシウム溶液（セメントの水和により生成）で満たされており、その pH は約 12~13 の強アルカリ性を示すといわれている。コンクリート中の鉄筋などの鋼材は、アルカリ環境下においては、その表面に 20~60 Å 程度の薄い酸化被膜 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) が形成されることで不動態化しているため、**図-2.24** に示す鋼の腐食速度と pH の関係から、腐食作用から保護されることがわかる。しかしながら、コンクリート中への塩化物イオンの侵入は、鉄筋表面の不動態皮膜を破壊し、鉄筋を腐食させる。

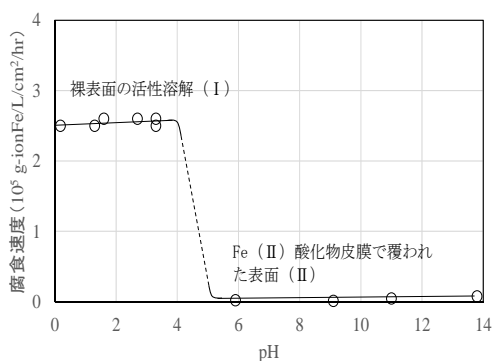


図-2.24 pH による鉄の腐食速度 ^{2.27)}

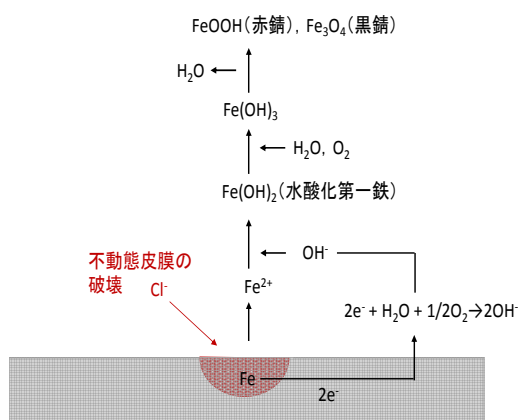
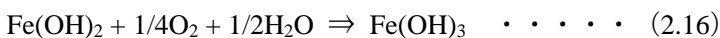
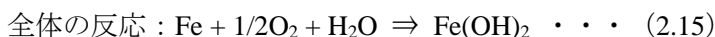
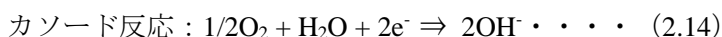
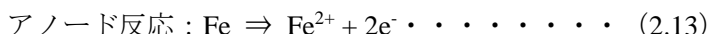
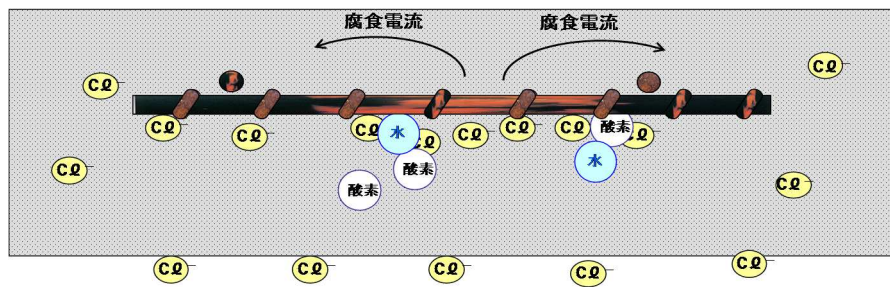


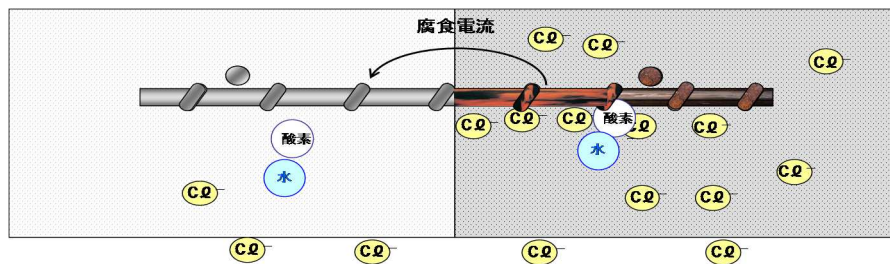
図-2.25 塩害環境下での鉄の劣化機構 ^{2.28)}



コンクリート中鋼材の劣化メカニズムを**図-2.25**に示す。腐食反応の始まりは、金属結合により結合した鉄原子が水中に鉄イオン (Fe^{2+}) として溶出する過程にある。この反応をアノード反応（酸化反応）といい、**式 2.13**に反応式を示す。また、アノード反応は単独では進まず対となる反応が必要であり、溶存酸素が鉄筋表面上で電子を受け取ることで水酸化物イオン (OH^-) を生成する。これをカソード反応（還元反応）といい、**式 2.14**の反応式で表す。鉄筋腐食の全体の反応は**式 2.15**に示すが、アノード反応とカソード反応が組み合わさった状態を表す。生成した水酸化第一鉄 ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) は、溶存酸素の供給により、**式 2.16**の反応により水酸化第二鉄 ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) となる。さらに進行すると、水酸化第二鉄 ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) は水を失って水和酸化物 (FeOOH) または酸化物 (Fe_2O_3)（赤錆）となり、また一部は酸



ミクロセル腐食（均一腐食）



マクロセル腐食（不均一腐食）

図-2.26 ミクロセルとマクロセル腐食の概要図

化不十分のまま酸化物（ Fe_3O_4 ）（黒錆）となって、鉄筋表面に錆層を形成する。この錆層は、多孔質で腐食を抑制する効果は小さく、下地の鉄筋表面では絶えず腐食が進行する。また、鉄筋に生じた錆は、体積変化が大きく、元の鉄筋の約2～4倍の体積となるため、この膨張圧によってコンクリートのひび割れや剥離が生じ、さらに腐食が進行することになる。

コンクリート中の鉄筋腐食は、腐食の形成によりミクロセル腐食およびマクロセル腐食の2種類に区別され、図-2.26に腐食進行の概要図を示す。アノード反応とカソード反応が、同じ位置もしくは極めて近い位置で生じ、時間とともにアノード、カソードを入れ替えながら腐食が全体的に均一に進行していく場合の腐食をミクロセル腐食という。一方、塩害による腐食は、外部から浸透した塩化物イオン量が部材位置やひび割れなどによって不均一になるため、一部に局部的に腐食が進行する可能性が高く、一か所のアノード反応が固定される場合には孔食などの局部腐食となるマクロセル腐食を発生させる。マクロセル腐食は、ミクロセル腐食よりも一般的に腐食速度が速い。そのため、局部的な腐食の進行に伴うコンクリート構造物の耐荷性能や変形性能の低下への影響が懸念される。また、いずれの腐食も、鉄が陽イオンに移行して電子を放出する反応であるため、アノード部の電位は卑な方向へ変化する。

このように、塩化物イオン自体は鉄の腐食反応に直接的に関与するものではないが、コンクリート中の鋼材の不動態皮膜を簡単に破壊し鋼材を活性化させることや、不動態域の範囲を小さくさせること、並びにコンクリートの電気抵抗を低下させ、腐食反応を促進させるなど、塩化物イオンが腐食に与える影響は非常に大きいといえる。

2.7.3 塩害によるコンクリート構造物の劣化過程

コンクリート構造物の塩害による劣化過程と部材の性能低下の関係^{2.29)}は、図-2.27 示す通り、鋼材の腐食が開始するまでの潜伏期、腐食開始から腐食ひび割れの発生までの進展期、腐食ひび割れの影響で腐食速度が大幅に増加する加速期、および鋼材の大幅な断面減少などが起きる劣化期に区分される。また、コンクリート標準示方書【維持管理編】においても、表-2.6 に示す通り、塩害の劣化過程を4段階で定義^{2.30)}している。

(1)第一段階 潜伏期

コンクリート中にはセメントの水和反応に関わらない水（以下、細孔溶液と記す）が存在しており、pHは約12~13の高アルカリ性を示す。潜伏期は鋼材表面において塩化物イオン濃度が腐食の発生に必要な腐食発生限界濃度に達するまでの期間であり、高アルカリ環境下で鋼材は不動態化している状態である。鋼材の不動態化のメカニズムは諸説あるが、鋼材表面に酸素が化学吸着し、さらに緻密な酸化皮膜が生じるとして厚さ3nm程度の皮膜が形成されることを表していることが一般的である^{2.31)}。

(2)第二段階 進展期

コンクリート表面より浸透した塩化物イオン濃度が鋼材表面で腐食発生限界濃度に達すると鋼材表面の不動態皮膜が塩化物イオンにより破壊されることで腐食が開始する。コンクリート中の鋼材が腐食すると腐食生成物の体積膨張によって、コンクリートにひび割れが発生する。進展期はコンクリートに腐食ひび割れが発生するまでの期間である。しかしながら、鋼材の腐食速度は、鋼材に対して酸素や水分供給によって大きく異なり、含水状態によって大きく変動するコンクリート抵抗の影響も受けるため、実験等によって、鋼材の腐食速度に関する研究が盛んに行われている。

(3)第三段階 加速期

コンクリートにひび割れや剥離が生じると、塩化物イオン、酸素および水分が鋼材へ供給が促進されることによって、腐食速度は増大する。加速期は腐食が加速的に進行する期間である。

表-2.6 塩害の劣化過程の定義^{2.30)}

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	鋼材表面における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの期間	・塩化物イオンの拡散 ・初期含有塩化物イオン濃度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れが発生するまでの期間	鋼材の腐食速度
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間	

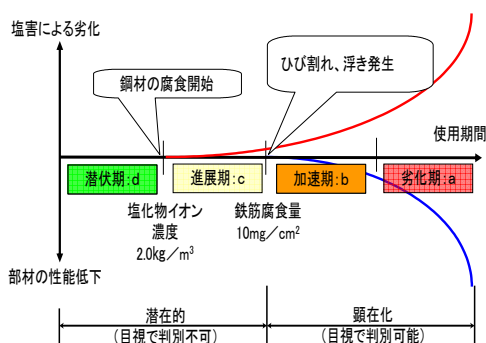


図-2.27 劣化過程と部材の性能低下の関係

(4)第四段階 劣化期

劣化期は、鉄筋が大幅な断面減少により、耐荷力などのコンクリート構造物の性能が低下する期間である。

2.7.4 塩化物イオンによる鉄筋の腐食発生限界濃度

コンクリート標準示方書【設計編】において、塩化物イオンによる鋼材の腐食発生限界濃度が使用するセメントの種類、水セメント比ごとに算出する式が示されている^{2.32)}。以下に普通モルトランドセメントを使用した場合の算出式 2.17 を示す。

$$\text{普通ポルトランドセメントを使用した場合 } C_{\text{lim}} = -3.0(W/C) + 3.4 \cdots \cdots (2.17)$$

ここで、 C_{lim} ：鋼材腐食発生限界濃度 (kg/m^3)， W/C ：水セメント比 (0.3~0.55)
ここで示す塩化物イオン濃度は、コンクリート中の液相における実際の塩化物イオン濃度ではなく、コンクリート単位体積当たりの全塩化物イオン濃度に相当する。また、本研究の実験でを使用したコンクリートの水セメント比は 50%である。その水セメント比から算出された鋼材腐食発生限界濃度は以下の結果となる。

$$W/C=0.50 \text{ の場合 } C_{\text{lim}}=1.9 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

一般的には港湾コンクリート構造物の鋼材腐食発生限界濃度は 2.0 (kg/m^3)^{2.33)}である。

本研究では、鉄筋を塩害による促進的な腐食環境とするためコンクリートへの塩化物イオンを上記の結果を踏まえ、塩化物イオン濃度が 10kg/m^3 となるように塩化ナトリウムを加えた。

2.7.5 コンクリート構造物の劣化状況による電気防食の適用例

塩害により劣化したコンクリート構造物に関して、コンクリート標準示方書【維持管理編】においては、表-2.7 に示すように外観上の劣化グレードと腐食発生限界塩化物イオン濃度の関係^{2.30)}が定義されている。また、同示方書において、構造物の外観上のグレードと腐食発生限界塩化物イオン濃度に対して標準的な対策工法^{2.30)}が参考として表-2.8 に示されており、電気防食は鋼材の腐食進行を抑制する効果が期待できる工法とされている。また、中性化による劣化に対する対策工法としても、加速期前期は塩化物イオンの濃縮現象を踏まえ、鋼材の腐食速度が速い場合や腐食量が大きい場合において電気防食が選定されている。

一方、電気化学的防食工法・設計施工指針(案)における電気防食適用例^{2.34)}を表-2.9 に示す。塩害対策および中性化対策の適用例として、劣化期に対しては他の補修工法と併用を検討する必要があるとされているが、劣化度に関わらず適用できることが示されている。また、予防保全的な観点から、新設構造物においても適用できることが示されている。

表-2.7 構造物の外観上のグレードと劣化状況^{2.30)}

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ-1(潜伏期)	外観上の変状が見られない, 腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
状態Ⅰ-2(進展期)	外観上の変状が見られない, 腐食発生限界塩化物イオン濃度以上, 腐食が開始
状態Ⅱ-1(加速期前期)	腐食ひび割れが発生, 錆汁が見られる.
状態Ⅱ-2(加速期後期)	腐食ひび割れが多数発生, 錆汁が見られる, 部分的なはく離・はく落が見られる, 腐食量の増大
状態Ⅲ(劣化期)	腐食ひび割れが多数発生, ひび割れ幅が大きい, 錆汁が見られる, はく離・はく落が見られる, 変位・たわみ大きい

表-2.8 構造物の外観上のグレードと標準的な工法^{2.30)}

構造物の外観上のグレード	標準的な工法
状態Ⅰ-1(潜伏期)	表面処理*
状態Ⅰ-2(進展期)	表面処理, 断面修復, 電気防食, 電気化学的脱塩
状態Ⅱ-1(加速期前期)	表面処理, 断面修復, 電気防食, 電気化学的脱塩
状態Ⅱ-2(加速期後期)	断面修復
状態Ⅲ(劣化期)	FRP接着, 断面修復, 外ケーブル, 巻立て, 増厚

*: 予防的に実施される工法

表-2.9 劣化グレードによる電気防食の適用例^{2.34)}

対象範囲		劣化機構		
		塩害	中性化	
既設構造物	劣化過程	潜伏期	○	○
		進展期	○	○
		加速期	○	○
		劣化期	△	△
新設構造物(予防保全)		○	○	

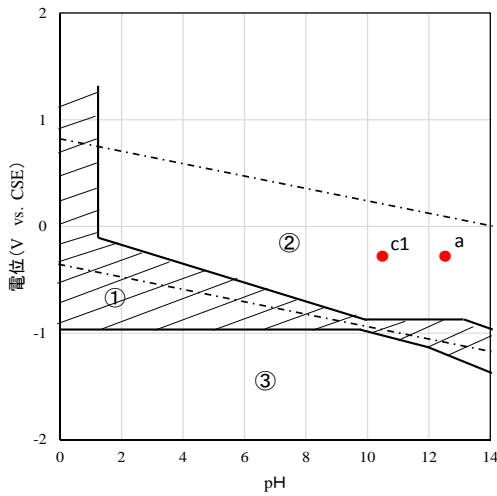
注)表中の○は適用対象, △は適用する場合検討が必要, -は適用対象外を示す.

2.7.6 塩化物イオンを含むコンクリート構造物への電気防食適用の概念

塩化物イオンを含むコンクリート中鋼材の腐食反応は、鋼材の腐食反応メカニズムで示したように、塩化物イオンによって鋼材の不動態皮膜が破壊され、腐食電池が形成されることによって始まる。この場合、**図-2.4**に示した鉄がイオン化するアノード反応とアノード部で生じた電位を水と酸素で消費するカソード反応が同時に進むことによって腐食が進行する。したがって、これまではコンクリート構造物の防食方法としては、塩化物イオンの浸入やカソード反応に必要な水や酸素の供給を遮断する間接的な対策により達成しようとするのが主であったといえる。しかしながら、電気防食工法は、鉄の腐食反応自体に直接的に作用するものである。

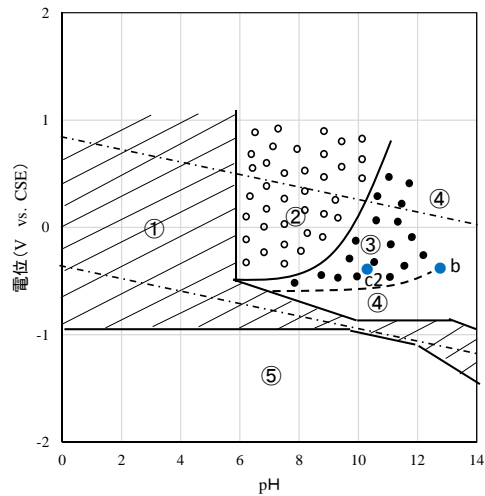
電気防食の適用を熱力学的平衡論より説明すると以下のようになる。

塩化物イオンを含まない電位-pH 図を**図-2.28**に、0.01M (335ppm) の塩化物イオンを含む電位-pH 図を**図-2.29**^{2.35)}に示す。これらの図における a 点、b 点は、コンクリート中の pH (約 12.5) にほぼ等しい環境での各溶液中における鉄の電位を示す。また、c1 点、c2 点は、コンクリートの中性化が進行した環境での各溶液中での鉄の電位を示す。電位-pH 図を**図-2.28**の塩化物イオンを含まない溶液においては完全に不動態化している領域②でも、**図-2.29**の塩化物イオンを含む溶液では鉄が腐食する領域になる場合があることが分かる。**図-2.29**の①～③の領域がそれに該当することが分かる。また、完全に不動態となる領域は④に該当するが、非常に狭く、塩化物イオン濃度が増加するとさらにこの領域は狭くなるといわれている。すなわち、コンクリート中の塩化物イオン濃度が限界値以下であれば、コンクリート中の鉄の電位 (b 点) は**図-2.29**の完全不動態領域にあるが、塩化物イオン濃度が限界値以上になると孔食領域が右下に広がり b 点においても鉄は腐食領域に入ることになる。このように、塩化物イオンが含まれる場合の腐食を防止するためには、環境をさらにアルカリ性領域へ変化させるか、鉄の電位を④の不動態領域や⑤の不活性領域の卑な方向に変化させる方法が考えられ、後者が電気防食工法である。ただし、高アルカリ環境下で鉄の電位を-1000mV (vs.CSE) 以下にすると、水素が発生するため、鋼材の水素脆化も考慮しなければならない。



①全面腐食, ②不動態③不活性(=電気防食)
塩化物イオン含有無し

図-2.28 塩化物イオンを含有し
ない鉄の電位-pH 図



①全面腐食, ②孔食, ③不完全不動態
④完全不動態, ⑤不活性(=電気防食)
塩化物イオン355ppm含有

図-2.29 塩化物イオン 355ppm を含
有する鉄の電位-pH 図^{2.35)}

港湾鋼構造物の鋼管杭のような海中の鋼材や土中のパイプラインのような鋼材への防食は、⑤の不活性領域まで電位を卑化させることに防食を達成している。しかしながら、コンクリート中鋼材に対する電気防食の考え方は、海水中や土中とは異なり、コンクリート中鋼材表面に形成された腐食電池を消滅、つまり鋼材の電位差を生じさせないようにすることで、腐食を抑制しようとするものである。このように考える理由には、電気媒体であるコンクリートが海水や土壌とその性質に相違があることに起因している。これは、海水や土壌は比較的均一であるのに対し、コンクリートの場合、マクロ的にコンクリートの品質が不均一であるためコンクリート中の鋼材の電位をマクロ的に均一に保つことができないことと、高抵抗なコンクリート中の鋼材の通電時の真の電位を把握することが難しいためである。

図-2.30 にコンクリート鋼材の腐食反応と電気防食を施した場合の腐食反応を比較して示す。コンクリート中の鋼材で進む腐食反応は、鋼材がイオン化するアノード部とその発生した電位を消費するカソード部が腐食電池を形成して進行する。電気防食は外部に取り付けた陽極(アノード)から強制的にコンクリート中鋼材に防食電流を流し、鋼材全体を陰極として卑な電位に維持することで、コンクリート中鋼材に形成された腐食電池を消滅させる。

図-2.30 に電気防食を適用することで電位の変化も併せて模式的に示した。無防食時のコンクリート中の鋼材の電位は、コンクリートの不均一性に起因した鋼材表面に電位差が生じている。その結果、電位が卑となる部分がアノード、相対的に電位が貴となる部分がカソードとなって、電位差を起電力とする腐食電池が形成される。この腐食電池が形成されている箇所には防食電流が流入した場合、この電流は電位差の大きい貴なカソード部に多くの電流

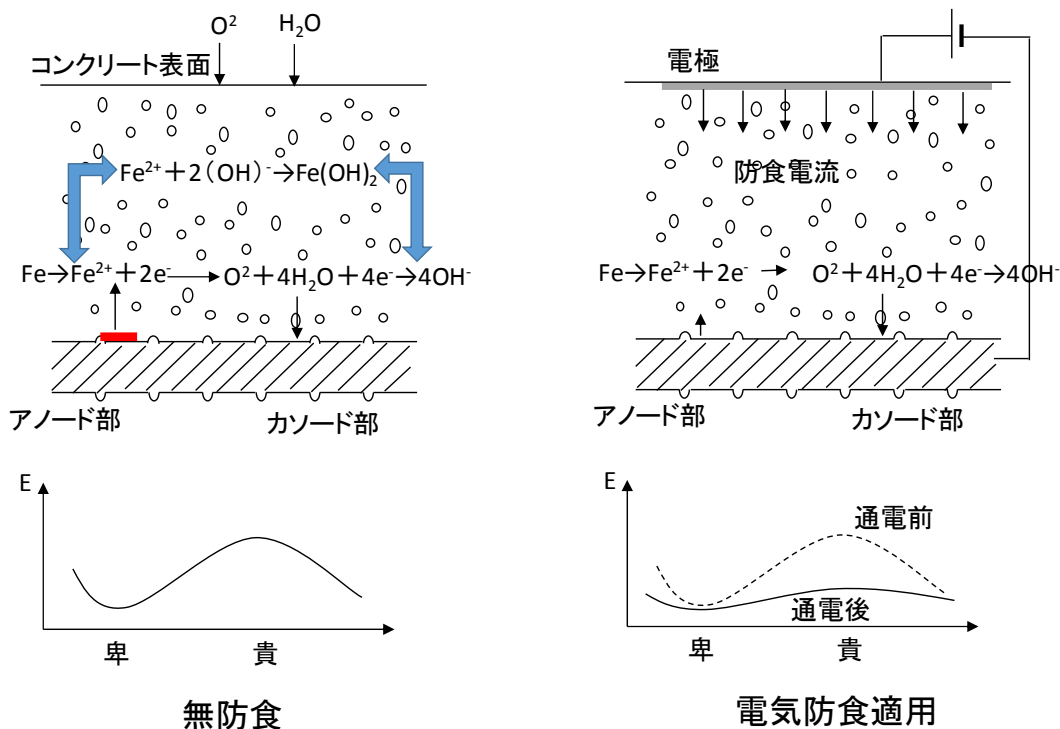


図-2.30 無防食と電位防食適用時の腐食反応の比較^{2,36)}

が流れ、カソード部の電位を卑方向へ変化させる。さらに継続的に電流を増加せるとカソード部の電位とアノード部の電位がほとんど等しくなり、電位差がなくなり、腐食電池が消滅することによって、腐食反応が停止するとしている。

2.7.7 港湾コンクリート構造物に適用した電気防食工法の概要

2.7.7.1 電気防食の工法概要

コンクリート構造物に対しては、上述してきたように、主に塩害劣化に対する対策工法として電気防食が適用されている。また、電気防食工法の適用は、一般的には厳しい塩害環境下に対して採用されるが、融雪材が散布されるような内陸部に位置する高架橋や内在塩分が多く含まれる構造物にも採用されている。現在では、鋼材の腐食進行を直接的に抑制できる電気防食工法は、防食効果を実証されており、塩害の再劣化のみならず、今後のコンクリート構造物に維持管理を検討する上で、重要な位置付けになっている。

電気防食工法は、外部電源方式と流電陽極方式に大別される。外部電源方式は、直流電源装置を設置し、不溶性の電極を+側に接続し、-側を鉄筋に接続することで、防食電流を電極から鉄筋に供給する方法である。一方、流電陽極方式は、鉄筋である鉄よりもイオン化傾向の高い金属を陽極材として使用し、鉄と陽極材との間で発生する電位差を起電力として防食電流を供給する方式である。電気防食工法における外部電源方式、流電陽極方式の一般

的な特徴（長所および短所）について表-2.10に整理した。また、コンクリート構造物に適用される電気防食工法の種類と特徴について表-2.11に示す。

表-2.10 外部電源方式と流電陽極方式の特徴

方式	長所	短所
流電陽極方式	<ul style="list-style-type: none"> ・メンテナンスが容易である ・施工が容易である ・小規模や独立した施設にも適用しやすい ・電源の無い場所でも適用できる ・陽極材の電位よりも鋼材電位が卑化しないため、過防食が避けられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・高抵抗環境下には適さない ・防食電流の調整ができなが、環境に応じた自己制御性がある ・陽極が寿命に達し、完全消耗した時は取替える必要がある ・陽極の寿命が比較的短く、取り替えが必要である
外部電源方式	<ul style="list-style-type: none"> ・定格内なら出力電圧を任意に設定できる ・高抵抗や腐食性の激しい環境でも適用できる。 ・陽極材の寿命が長く、長期間において取替の必要がない 	<ul style="list-style-type: none"> ・高抵抗環境下には適さない ・防食電流の調整ができなが、環境に応じた自己制御性がある ・陽極が寿命に達し、完全消耗した時は取替える必要がある

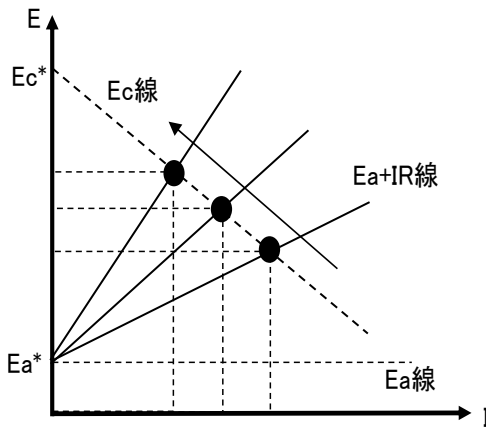
表-2.11 電気防食工法の種類と特徴^{2,37)}

		概要図	方式の概要	特徴
外部電源方式	面状陽極	<p>概要図: 主筋、コンクリート、モニタリング用陽極電極、DC電源装置、チタン溶射皮膜</p>	<p>高純度チタンをコンクリート表面にアーク溶射して耐久性のある電極皮膜を形成し、直流電源装置を用いて電極から鉄筋に対し防食電流を供給する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 死荷重の増加がない - 複雑な構造物にも容易に適用可能 - 干満部や飛沫部への適用は注意を要する - 構造物全体への適用が容易 - かぶりの薄い構造物にも適用可能 - 躯体コンクリート面は皮膜上から確認可能 - 美観上は溶射皮膜色となる - AC電源が必要である - 橋梁構造物では施工実績多数
	チタンメッシュ方式	<p>概要図: セメントモルタルまたはコンクリートオーバーレイ、チタンメッシュ電極、コンクリート、モニタリング用陽極電極、DC電源装置</p>	<p>金属酸化物をコーティングしたメッシュ状のチタン電極をコンクリート表面全面に設置し、直流電源装置を用いて電極から鉄筋に対し防食電流を供給する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 死荷重の増加がある(約35kg/m²) - 複雑な構造物には手間がかかる - 干満部や飛沫部への適用はオーバーレイ材の硬化時間に注意が必要 - 構造物全体への適用が容易 - かぶりの薄い構造物にも適用可 - 躯体コンクリート面を目視できない - 美観上最も優れる - AC電源が必要である - 近年、施工実績が少ない
	線状陽極	<p>概要図: セメントモルタル、コンクリート、チタン製の線状陽極、鉄筋、チタン製の線状陽極、モニタリング用陽極電極、DC電源装置</p>	<p>コンクリート表面に一定間隔の溝を切削し、チタン製の線状陽極を設置した後、溝をモルタルで充填する。直流電源装置の+側に線状陽極を-側に鉄筋を接続して、所定の防食電流を通电する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 死荷重の増加が少ない - 複雑な構造物にも適用可能 - 陽極材はコンクリート中埋設のため干満部に近い部位でも適用可能 - 構造物全体の適用が容易 - かぶりの薄い構造物には適用難 - 躯体コンクリートを目視可能 - 美観上溝跡が残る - AC電源が必要である - 施工実績は最も多い
	点状陽極	<p>概要図: チタンワイヤー、チタンロッド電極、バラスト材、セメントモルタル、モニタリング用陽極電極、DC電源装置</p>	<p>コンクリートを削孔し、チタン陽極棒(一次陽極)を専用バックフィル材(二次陽極)と共に挿入する。チタンワイヤーで結線し、モルタル充填した後、直流電源装置を用いて電極から鉄筋に対し防食電流を供給する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 死荷重の増加が少ない - 複雑な構造物にも適用可能 - 陽極材はコンクリート中埋設のため干満部に近い部位でも適用可能 - 過密配筋箇所では陽極の設置が困難な場合がある - かぶりの薄い構造物には適用困難 - 躯体コンクリートを目視可能 - 美観上削孔跡が残る。 - AC電源が必要である - 施工実績は近年増加
流電陽極方式	面状陽極	<p>概要図: 亜鉛キャップ、保護カバー、亜鉛シート板、特殊バグワール、アクリル、コンクリート、モニタリング用陽極電極、DC電源装置</p>	<p>亜鉛防食板をコンクリート表面に固定し、鉄筋からの配線と接続する。亜鉛防食板は鉄筋との電位差により鉄筋に防食電流を供給する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 死荷重の増加がある(約30kg/m²) - 複雑な構造物には適用困難 - 干満部に近い部位への適用が困難 - 構造物全体への適用は可能 - かぶりの薄い構造物にも適用可能 - 躯体コンクリートを目視できない - 美観上亜鉛防食板が露出する - AC電源は不要である - 施工実績は少ないが、歴史が古い

2.7.7.2 電気防食の設計概要

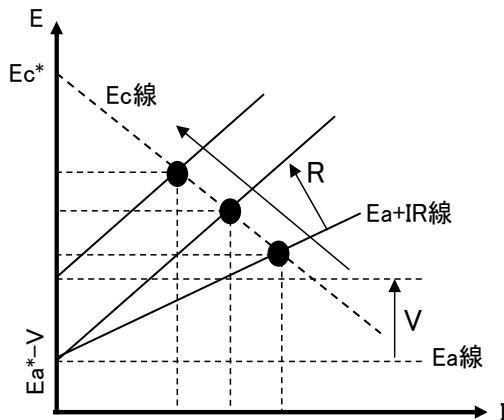
コンクリート構造物に適用する電気防食工法には、外部電源方式、流電陽極方式があるが、電気防食系の等価回路で考える場合、印加電圧の有無で分けられる。ここで、等価回路を2.3.3.2項と同様な回路が考えられる。

式2.6, 2.7で表される外部電源方式と流電陽極方式を適用した電気防食系を直線分極曲線を用いて模式図に表すと次図のようになる。ここで、図-2.31は流電陽極方式の模式図を表し、図-2.32は外部電源方式の模式図を表す。電気防食を運用する上で最適な条件は、少ない電圧（通電電圧）で大きな電流が得られること、かつ陰極への通電電流をできるだけ少なくすることで達成される。コンクリート中鋼材は、海水中の鋼材と異なり、コンクリート中の溶存酸素濃度がほとんど変化しないためカソード分極曲線がほとんど変化しないと言われる^{2.38)}。したがって、コンクリート中鋼材への電気防食では、アノード分極抵抗を上昇させ、 E_a-IR 線の傾きを上昇させることによって、カソード電位を貴化させることに着眼されている。



流電陽極方式の場合、環境抵抗 R が増大し、発生電流 I が低下することによって E_c が貴化する傾向になることによって、腐食が抑制される。

図-2.31 流電陽極方式の直線分極曲線を用いた模式図



一方、外部電源方式の場合、外部電源により電圧 V を加えた場合、アノード電位が E_a^*-V になる。 E_a-IR 線は同じ傾きで、その切片は E_a^*-V に上昇する。そのため、アノードとカソードの電位差を小さくなることによって、 E_c が貴化し、腐食が抑制される。

図-2.32 外部電源方式の直線分極曲線を用いた模式図

2.8 コンクリート構造物における電気防食基準

コンクリート構造物へ適用された電気防食の効果を表す基準は、海水中の鋼構造物のように自然電位がほぼ同じではなく、コンクリートの配合、塩化物イオン量、含水率等により大きく自然電位が変化するため、一般的には電位の絶対値からの評価ではなく、電位のシフト値（分極量または復極量 100mV 以上シフト）を防食基準としている。海洋コンクリートのように海水中にある場合は、コンクリート中鋼材の電気防食の効果を表す基準を海水中の鋼材と同様な電位（-850mV (vs.CSE)）以下としている。また、特に PC 構造物に対しては、PC 鋼材の水素脆化や鋼材とコンクリートの付着力低下を避けるため、-1000mV (vs.CSE) よりも貴な電位とすることとされている。

国内外で用いられている電気防食基準をまとめると表-2.12 の通りである。

表-2.12 電気防食基準一覧表

制定機関	規格名称	制定年度	適用範囲	防食方法	防食基準
土木学会	電気化学的防食工法設計施工指針案)	2001	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート構造物の塩害・中性化による腐食防食対策 ・干満帯部を含む大気中にあるコンクリート構造物 	外部電源方式 流電陽極方式	<ul style="list-style-type: none"> ・防食電流を流す前の電位に対し、100mV以上単方向に電位変化させる。 ・PC鋼材は下限電位を-1000mV (CSE)とする。
日本コンクリート工学会	JCI-R1 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)	1990	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート構造物の塩害・中性化による腐食防食対策 ・海中部を含む大気中にあるコンクリート構造物 	外部電源方式 流電陽極方式	<ul style="list-style-type: none"> ・防食電流を流す前の電位に対し、復極量100mV以上の電位変化をさせる。 ・海水中にあるような海洋コンクリートの場合、-850mV(CSE)以下とする。 ・PC鋼材は下限電位を-1000mV (CSE)とする。
NACE	NACE Standard RP0290-2000	2000	<ul style="list-style-type: none"> ・大気中に暴露された既設・新設のコンクリート構造物(PC構造物を除く) 	外部電源方式	<ul style="list-style-type: none"> ・通電前の電位が最も卑な部分で、0.1V以上の分極または復極。 ・復極後の電位が-200mV(CSE)より貴電位の場合、鉄筋は不動態化しているため0.1V分極(復極)基準は要求されない。 ・E-logI試験(分極曲線測定)が、初期防食電流の決定に使われる。
ISO	ISO/DIS12696 (EN12696 : 2000)	2005	<ul style="list-style-type: none"> ・大気中に暴露された既設・新設のコンクリート構造物(PC構造物を含む) ・鉄筋は有機系の被覆材の有無に関係なく適用可能 	外部電源方式 流電陽極方式	<ul style="list-style-type: none"> ・24時間以内の復極量が100mV以上 ・24時間を越える長期間(一般的には7日以上)の復極量が150mV以上 ・-720mV(vs. Ag/AgCl/0.5MKCl)より卑電位 ・普通鉄筋は-1100mV、PC鋼材は-900mVを下限電位とする。(vs. Ag/AgCl/0.5MKCl)

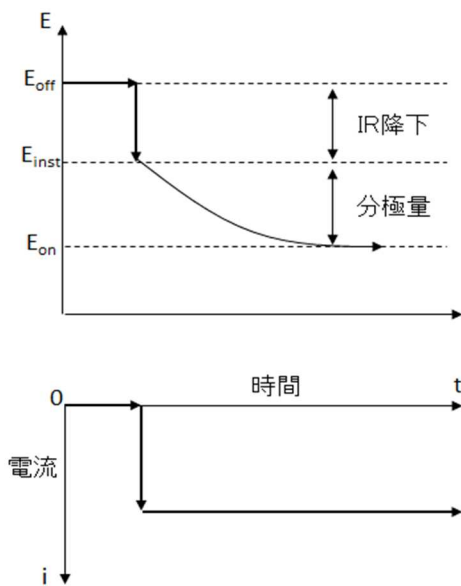


図-2.33 電位変化量（カソード分極量）

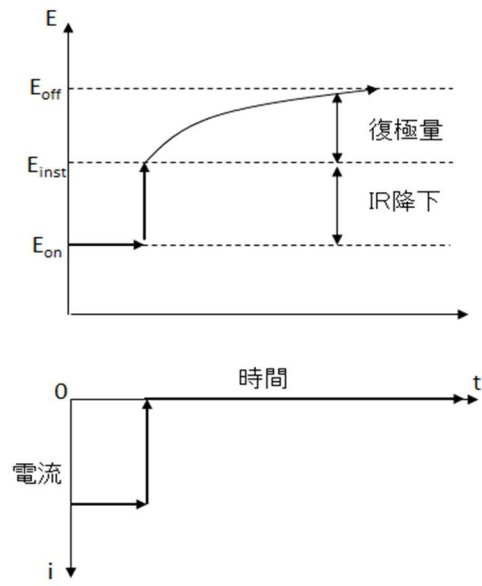


図-2.34 電位変化量（カソード復極量）

また、電位変化量（カソード分極量または復極量）と電流の経時変化の概念図を図-2.33にカソード分極量、図-2.34にカソード復極量を示す。カソード分極量とは、通電時の電圧降下分を除去したカソード電位（インスタントオフ電位）と通電時 24 時間後のカソード電位（オン電位）との差を表す。一方、カソード復極量とは、通電オフ時の電圧降下分を除去したカソード電位（インスタントオフ電位）と通電オフ 24 時間後のカソード電位（オフ電位）との差である。

篠田ら^{2.39)}は、100mV 電位シフトの電気化学的解釈を説明しており、図-2.35にその概念図を示す。コンクリート中鋼材の一般的な腐食条件として腐食速度 20mA/m^2 、腐食している鉄筋のアノードターフェル勾配を 100mV/decade （電流密度を常用対数軸で表した場合の1桁あたりの電位変化量）と仮定する。この条件下で電気防食の適用によって100mV以上の復極量が得られる場合、腐食速度が 20mA/m^2 から 2mA/m^2 以下になる。すなわち1/10に低減されることを意味しており、防食率でいうと90%以上の防食効果になると説明している。

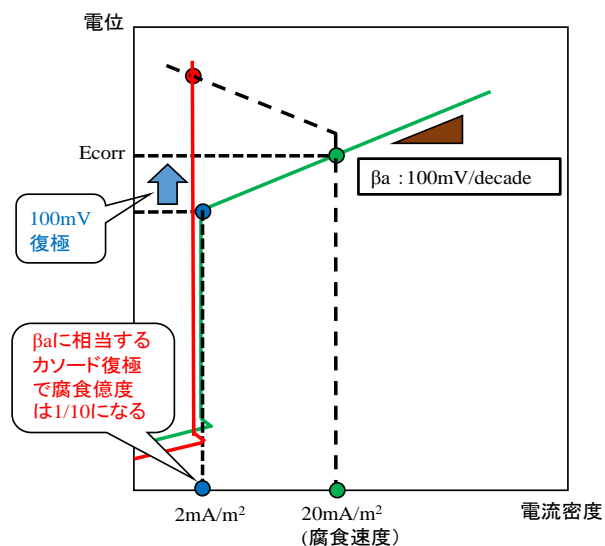


図-2.35 100mV 電位シフトの電気化学的解釈

雨宮ら^{2.40)}は、100mV以上の電位変化量について電気化学的に考察した。コンクリート模擬水溶液中の塩化物イオン濃度とpHを変化させて、鋼材のアノード分極曲線を測定した結果、いずれの条件下においてもアノード反応のターフェル勾配は60mV/decade程度であった。これは腐食速度を1/10以下に低減できることを示している。また、この模擬水溶液に腐食している鋼材を100mV陰分極で180時間通電したところ、いずれの環境下においても腐食速度が1/10以下に低減したことを示している。

千葉ら^{2.41)}は、無防食及び自然電位から50, 100, 150mVの3水準で定電位通電を行った試験体を用い、乾湿繰り返しの条件下で534日間の暴露試験を行った。試験後、試験体を解体して内部鉄筋の腐食面積及び質量減少量を測定した。その結果、カソード分極量50, 100及び150mV試験体に大差なく、防食率は91~92%であったと報告している。50mV分極で防食を達成することができたことから、実構造物の分極量のばらつきを考慮すれば、100mVの分極量は妥当であると示唆している。復極量100mV以上という防食基準は、実構造物で防食が確保されていることは多くの実績から確認されているが、電位シフト量と防食効果の関係は、コンクリート中の塩化物イオン濃度や環境条件にも影響されることが確認されている。

Bennettら^{2.42)}は、コンクリート中の塩化物イオン濃度を変化させた試験体に電気防食を適用し、鋼材の腐食速度と復極量を確認した。塩化物イオン濃度6.0kg/m³の場合、腐食速度0.2μA/cm²程度まで低下させるのに必要な復極量は100mVであるが、塩化物イオン濃度4.8kg/m³の場合、腐食速度0.2μA/cm²程度まで低下させるのに必要な復極量は100mV未満であった。このように、コンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度によって、鋼材の腐食速度を不働態域の状態にする復極量は異なることが示された。

また、さらに最近では、コンクリート構造物に適用した電気防食の副次的効果についても検討されている。副次的効果とは、電気防食を継続的に適用することによって、コンクリート中鋼材表面のアルカリ化(pHの上昇)、脱塩(塩化物イオンの鉄筋表面からコンクリート表面への移動)によって、鋼材表面の環境が腐食環境から改善されるところを意味する。

大谷ら^{2.43)}は、塩化物イオン濃度2, 5及び10kg/m³を添加した試験体を製作し、鋼材に1.33A/m²の電流密度でアノード溶解させた後、目標復極量を約25, 50及び100mVの3水準となるように定電流により通電を行った。その結果、気中部において、目標復極量を得るための通電電流密度は経時的に減少し、復極量100mV未満の25, 50mVの通電においても鋼材の腐食速度は60~71%低減できたとしており、継続的な通電が鋼材周辺の環境が改善したことを示唆している。

2.9 湿潤環境下におけるコンクリート構造物に適用された電気防食の防食効果に対する既往の研究

RC 構造物への塩害対策工法として、電気防食は、道路橋において実績が多く、一般的な技術となっている。近年では、道路橋に加え、港湾施設（岸壁、棧橋）といった下部鋼材に電気防食を適用した上部工コンクリートへ適用されるようになった。しかしながら、様々な環境に適用される一方で、環境によって異なる電気防食特性を示すことが報告されている。これまでの電気防食に関する研究は、材料選定による工法の検討や防食効果の確認が主であり、電気防食適用時の鋼材表面の環境変化に起因する防食特性の検討がほとんど行われてこなかったといえる。最近では、湿潤環境下等の環境変化に対する鋼材の防食特性について電気化学的観点から考察する試みが増加しており、既往の研究の成果を以下に整理した。

「模擬干満環境下でのコンクリート中鋼材への流電陽極の影響に関する研究」^{2, 4)}

浮島らは、海洋環境を模擬した試験水槽において、海水中に露出する鋼材とコンクリート中鋼材とが電氣的に導通するコンクリート試験体を設置した。海水中に露出する鋼材に対して電気防食を適用し、その電位を防食電位以下に維持した場合の干満部のコンクリート中鋼材の電気化学特性について確認した。その結果、海中部の鋼材は干満により電位及び電流密度の変動はほとんどないが、干満部の鋼材は、満潮時にはコンクリート中鋼材に防食電流が流入し、電位が相対的に卑化し、干潮時には、電位が相対的に貴化する傾向が示された。干満部は干潮、満潮で電位変動を示し、海水中に適用した電気防食の影響を受けていることが確認された。

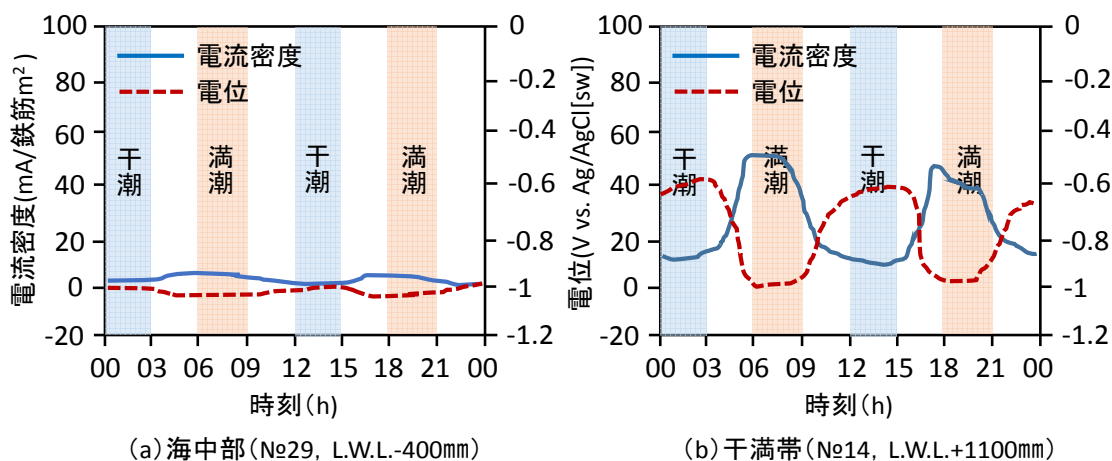


図-2.36 海水中鋼材の電位、電流密度経時変化 図-2.37 干満部鋼材の電位、電流密度経時変化

「流電陽極のコンクリート中鋼材への防食効果に関する研究」^{2.45)}

Bertolini らは、海水に一部が浸漬する RC に対して、3.5%の CaCl_2 中に浸漬したアルミニウム合金陽極とコンクリート中の分割した鉄筋を接続することで、流電陽極の防食電流がコンクリート中鉄筋に対してどの高さまで防食効果に影響を与えるか確認した。なお、コンクリート試験体は、塩化物イオン濃度をセメント質量に対して 3% 含ませている。

その結果、電気防食の効果を復極量 100mV とした場合の時間と復極量 100mV を満たした水面からの高さの関係を図-2.39 に示す。これより、活性鋼材の場合、水面から 30~40cm まで復極量 100mV が得られるとしている。また、不活性な鋼材の場合、水面から 60~70 cm まで復極量 100mV が得られることが確認された。

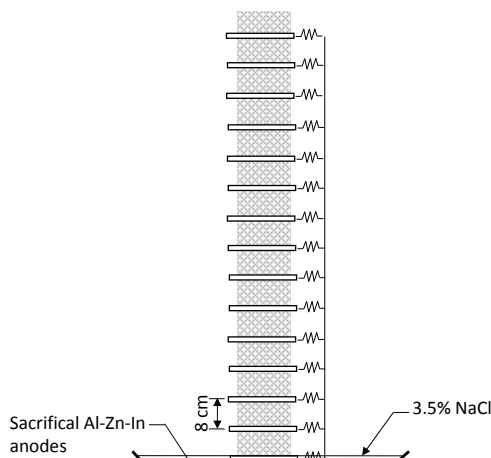


図-2.38 試験体概要図

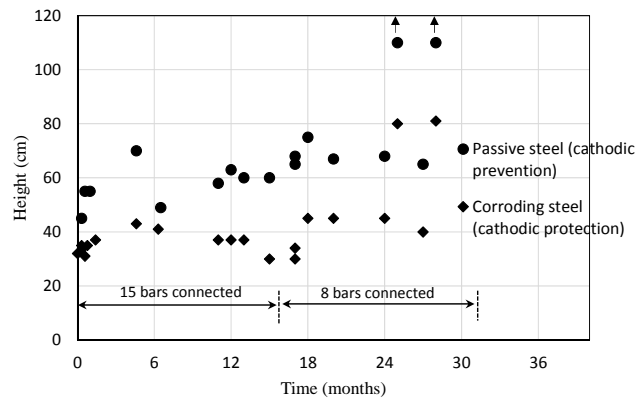


図-2.39 復極量 100mV と水面から距離との関係

「湿潤環境下でのコンクリート中鋼材の防食条件に関する研究」^{2.46)}

小林らは、湿潤環境下にあるコンクリート中鋼材の防食条件を検討するために、塩化物イオンを含むアルカリ環境下を模擬して、コンクリート中鋼材の再不動態化電位(E_R)の測定を実施した。また、コンクリート試験体を製作し、湿潤環境下でコンクリート中の鋼材の電位を一定(定電位)にして、その電気防食効果を検討した。

・塩化物イオンを含むアルカリ環境下における鋼材の E_R 測定結果

試料には SS400 (供試面 4cm^2) をアセトン脱脂して用いられた。 E_R 測定装置は、試料、対極、照合電極、電解セル、自動分極装置(北斗電工製 HZ3000)によって構成された。試験溶液は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の飽和溶液を用い、塩化物イオン濃度($[\text{Cl}^-]$)が 300, 500, 1000, 2000, 5000ppm となるように NaCl を添加して調整された。 E_R 測定は、図-2.40 のように N_2 ガスによる脱気環境中で $30\text{mV}/\text{min}$ でアノード方向に鋼材の電位を掃引し、鋼材に孔食を発生させた後 $50\mu\text{A}/\text{cm}^2$ で 2 時間保持することにより孔食を成長させ、その後 $10\text{mV}/\text{min}$ でカソー

ド方向に鋼材の電位を掃引し、電解電流がゼロに到達時の電位を E_R とした。当試験方法は日本工業規格 JIS G 0592 (2002) に準拠している。

塩化物イオン濃度が 300ppm 未満では、測定後の鋼材の目視観察から鋼材表面に腐食は認められなかったが、塩化物イオン濃度 ($[Cl^-]$) が 500ppm 以上では鋼材表面に腐食が認められるようになった。塩化物イオン濃度と E_R の関係を図-2.41 に示す。アルカリ環境下の鋼材の E_R はばらつきがあるものの概ね $-500 \sim -650\text{mV}$ (vs.SSE) の範囲にあることが確認された。

つまり電気防食により鋼材の電位をこの下限値 (-650mV) よりも低電位に維持した場合、腐食を抑制できることになる。この下限値 (-650mV) を腐食抑制の新しい防食基準値とした場合、この値は ISO における防食評価基準 ($-720\text{mV Ag/AgCl}/0.5\text{MKCl}=55\text{mV}$)^{2,47)} とほぼ対応しているといえる。

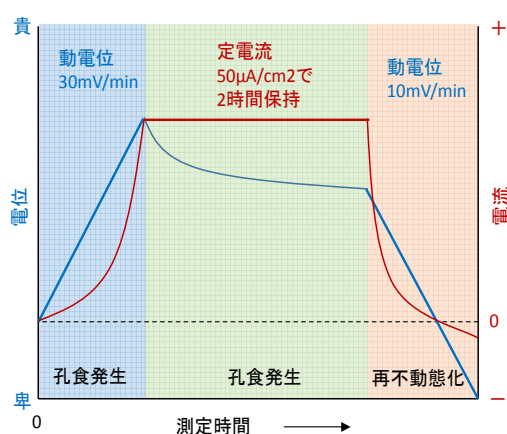


図-2.40 再不動態化電位 E_R 測定要領図

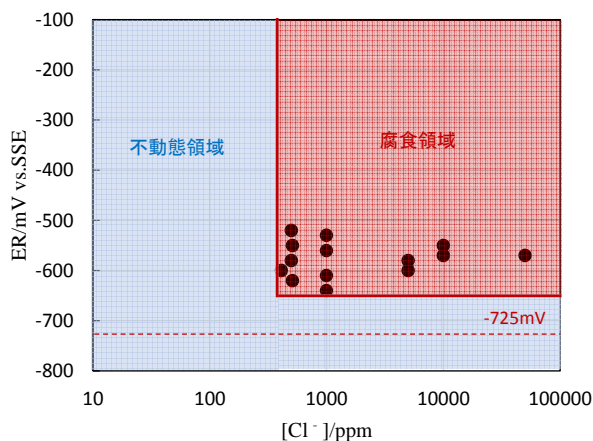


図-2.41 塩化物イオン濃度と E_R の関係

・ 湿潤環境下におけるコンクリート中鉄筋の電気防食特性^{2,48)}

湿潤環境下での電気防食の特性を調べるために、定電位通電試験が実施された。先の再不動態化電位 (E_R) を考慮して、 -400 , -500 , -550 , -600 , -650 , -725mV (vs.SSE) の 6 条件として干満帯を模擬した水槽に暴露された。また、コンクリート構造の試験体は、1 日 2 回干満 (潮位差 1.5m) が繰り返される環境にあり、干潮位の $+1.0\text{m}$ の位置に試験体が設置された。海水浸漬時間が約 5 時間と屋外乾燥時間が約 7 時間の繰り返しの環境となる。また、コンクリート中鋼材はあらかじめ腐食させた状態を想定しているため、 $92\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 9 日アノード電解をすることで鋼材を腐食させた。

それぞれの維持電位によるカソードの復極量の経時変化を図-2.42 に示す。その結果、設定電位 -600 , -725mV の場合、通電初期は 100mV 以上を満たしていたものの、時間の経過とともに復極量が低下し、130 日経過後にはいずれも復極量 100mV を下回っていた。また、通電 OFF 24 時間後の自然電位の経時変化を図-2.43 に示す。設定電位 $-500 \sim -600\text{mV}$ では、

時間の経過とともに自然電位は貴側に変化する傾向を示した。設定電位が卑側になるに従い、自然電位は貴側に変化する量が大きくなり、設定電位 -600mV では、初期自然電位から約 100mV 変化した。しかしながら、設定電位 -650 、 -725mV の自然電位は卑側に変化している。これらの結果について次のような考察がされた。電気防食の適用により、鉄筋表面の pH は上昇する。 pH の上昇に対して、復極後の自然電位が貴化するの、鉄筋の不動態化に起因し^{2.49)}、卑化するの鉄筋表面の溶存酸素の消費速度が供給速度を上回る状態すなわち脱気状態に起因^{2.50)}すると考えられた。したがって、湿潤環境下におけるRC構造物の電気防食では、自然電位が貴化するような場合では溶存酸素による不動態化が可能であるため、復極量 100mV による評価が可能である。

一方、溶存酸素の供給速度が遅く、鋼材表面が脱気環境になるような場合、鉄筋の不動態化による防食が困難であることから脱気状態の自然電位以下の電位に維持する必要があるとしている。また、その電位は前述の E_R に相当し、当該試験においては、 -650mV 以下に保持することが必要であるとしている。

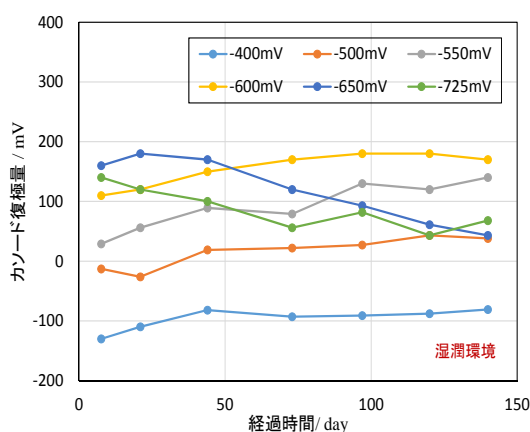


図-2.42 カソード復極量の経時変化

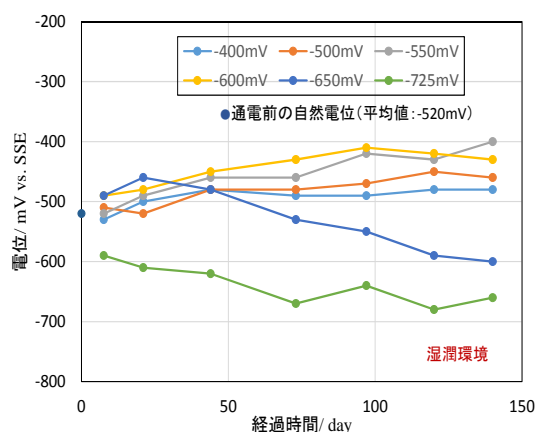


図-2.43 通電OFF24時間後の経時変化

「防食効果が得られる必要復極量と溶存酸素拡散限界電流密度の関係に関する研究」^{2.39)}

湿潤環境下のコンクリート構造物へ電気防食を適用すると、カソード反応に必要な溶存酸素の拡散速度が極めて遅くなり、酸欠状態になる場合がある。この場合、コンクリート中鋼材の電位を卑化し、防食効果の判定基準としている通電停止より24時間後の復極量を 100mV 以上確保できない場合がある。復極量 100mV を得られるように通電電流を増加することは、さらなるコンクリート中の溶存酸素の消費につながり、復極速度を遅延させる悪循環になる場合もあるとしている。

篠田らは、適正な防食管理を行うためには、鉄筋表面付近の溶存酸素供給速度を把握することが重要であるとし、水素電極法（電位減衰曲線）を提案し、溶存酸素拡散限界電流密度と電気防食効果として評価される復極量との関係を示している。

海水に浸漬したモルタル試験体中の Pt 板カソード分極曲線と、それに対応する水素電極法による電位減衰曲線を対とすると、カソード分極曲線から測定された溶存酸素の拡散限界電流密度 (i_L)、電位減衰曲線で測定された水素電極が消失するまでの時間 (t_H) はそれぞれの曲線の変曲点に相当する。また、電位減衰曲線は電位差滴定法における滴定曲線に類似していることから、 t_H は一定電気量のもとで生成された水素が拡散してくる溶存酸素によって消費される時間と考えられるとしている。したがって、 t_H は溶存酸素の供給速度に依存するパラメータと考え、カソード分極曲線より測定された溶存酸素の拡散限界電流密度との関係を調べた結果、拡散限界電流密度 (i_L) と水素電極が消失するまでの時間 (t_H) は直線関係にあることから、水素電極法を適用することにより鉄筋表面に供給される溶存酸素の拡散速度を評価することが可能であるとしている。

また、鉄筋の腐食速度 (溶存酸素の拡散限界電流密度 i_L) と必要分極量または復極量 (腐食速度を想定 $1/10$ に低減させるために必要なカソード分極量あるいは復極量) の関係を 図-2.44 に示す。これより、溶存酸素の供給速度により必要な分極量または復極量は変化することが示された。つまり、湿潤環境下のコンクリート構造物への電気防食の効果の評価として、必ずしも復極量 100mV を満足させる必要がないことが示された。

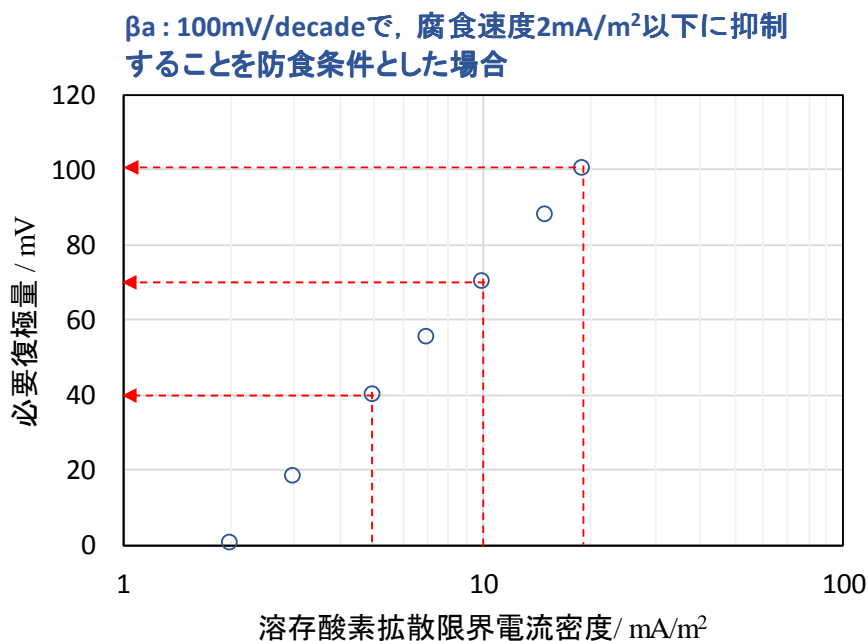


図-2.44 必要復極量と溶存酸素拡散限界電流密度との関係

2.10 湿潤環境下にあるコンクリート中鋼材の防食効果の評価に関する検討課題

港湾鋼構造物へ電気防食が適用されるようになって久しく、現在では海中部の鋼材に対して電気防食を適用することが一般的となっている。一方、近年、塩害劣化対策として、港湾RC構造物へも電気防食が適用されることが多くなり、その構造上から干満帯付近のコンクリート中鋼材にも電気防食を施工する場合がみられるようになった。

このような場合、干満帯付近では従来の復極量基準（電位シフト）では電気防食の防食効果の判定ができない場合が生じてきている。その主な理由として、コンクリート中は溶存酸素の拡散が非常に遅い環境にあり、さらに海中部の防食電流の流入や電気防食によりカソード反応により溶存酸素不足、脱気環境になることが挙げられる。

そこで、湿潤環境下にある港湾コンクリート構造物への電気防食適用に関する既往の研究などを整理した結果、次のような検討課題が挙げられる。

- 1) 従来の復極量基準（電位シフト）により電気防食効果の評価することが出来ないため、新たに効果の評価する方法を検討する必要がある。
- 2) 電気防食効果の評価するためには、コンクリート中の鋼材の腐食速度を定量的に把握することが望ましい。
- 3) 復極量基準により管理できない場合は、海中部の鋼材の防食管理方法と同様に、コンクリート中鋼材に対しても管理電位（例えば再不動態化電位等）を検討する必要がある。
- 4) コンクリート中の鋼材を電位により管理する場合、海中の防食電位 $-850\text{mV}(\text{vs.CSE})$ 以下にすることが、表 2-12 において示されているが、塩化物イオン含有時の鋼材の再不動態化電位を含め、管理電位についても検討する必要がある。

2.11 2章のまとめ

2章において海中及びコンクリート中鋼材の腐食発生のメカニズム，電気防食の原理について説明した。また，それぞれの環境での電気防食の適用工法や設計の概要について説明した。次に海中及びコンクリート中鋼材の電気防食効果についての既往の研究を整理し，今後の課題について以下にまとめる。

【港湾鋼構造物に適用した電気防食効果の評価に関する課題】

電気防食が適用された港湾鋼構造物の防食の効果は，防食率という指標により評価されている。電気防食適用時の構造物の条件（新設，既設，過去の防食の有無等）に関係なく全て防食率 90%としている。

しかしながら，実構造物において防食率を評価する際には無防食時の腐食速度が必要であるが，電気防食が適用された構造物において，無防食時の腐食速度を精度よく設定することは困難であることから，電気防食効果を適切に表す指標に関して検討することが課題である。またさらに，実港湾構造物の維持管理点検では鋼材の電位測定，肉厚測定が実施されている。そのため，鋼材の腐食速度を把握できることから，点検項目に合った電気防食効果の評価指標を検討することも課題である。

【港湾 RC 構造物に適用した電気防食効果の評価に関する課題】

RC 構造物へ適用された電気防食の効果基準は，電位のシフト値（分極量または復極量 100 mV 以上シフト）を防食基準にしている。しかしながら，港湾 RC 構造物のように湿潤環境下では防食基準を満たせない場合がある。そのような場合，電気防食効果の評価方法を検討することが課題である。また，復極量を防食基準として管理できない場合，電気防食が適用された場合の維持管理方法について検討することも課題である。

【参考文献】

- (2.1) 松島巖, 錆と防食の話 (第2版), 日刊工業新聞社, p12, 1998
- (2.2) 日根文男, 金属腐食の化学と電気化学, さんえい出版, pp.4-7, 2006
- (2.3) (財)沿岸技術研究センター, 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル (2009年版), p123, 2009
- (2.4) H.A.Humble, The Cathodic Protection of Steel Piling In Sea Water, National Association of Corrosion Engineers, Vol.5, pp.292-302, 1949
- (2.5) 松岡和巳, 山本正弘, 五戸清美, 海水中に暴露された鋼材のマクロセル腐食現象の解析, 材料と環境, Vol.56, pp.99-105, 2007
- (2.6) 藤井哲雄, 基礎からわかる金属腐食, 日刊工業新聞社, pp.25-26, 2011
- (2.7) (社)鋼材倶楽部, 海洋鋼構造物の防食 Q&A, 技報堂出版, p141, 2001
- (2.8) (株)ナカボーテック 社員研修資料
- (2.9) 例えば, 梅野秀夫, 金属腐食の電気化学入門 (その2), 日本海水学会誌, 第57巻, 第5号, pp.373-374, 2003
- (2.10) 旧運輸省港湾局, 港湾構造物設計基準, 1970, pp3-2-8
- (2.11) W.J.Schwerdtfeger and O.N.Mcdorman, Corrsion,8,p391,1952
- (2.12) L.P.Sudrabin, Corrosion,12,60t,1956
- (2.13) 横浜国立大学共同研究推進センター, 高度技術研修「電気防食の理論と実際」資料, 電気防食原理と適用法, 2003
- (2.14) ISO12473,2006
- (2.15) 国土交通省港湾局, 港湾施設の技術上の基準・同解説 (2007年版), pp.439-441, 2011
- (2.16) 山路徹, 審良善和, 佐藤俊二, 白石弘, 吉田倫夫, 船山嘉実, 阿部正美, 電気防食を適用した港湾鋼構造物の適切な維持管理下における防食効果, 防錆管理, Vol.52, pp.41-44, 2008
- (2.17) 片脇清, 田中柳之助, 森芳徳, 戸村寿一, 清水一夫, 海野武人, 田辺弘往, 海域における土木鋼構造物の電気防食に関する共同研究報告書, 旧建設省土木研究所, p7, 1991
- (2.18) 福谷英二, 総合講演(2)鉄鋼の防食基準電位の測定法, 防蝕技術, Vol.9, No.4, p158
- (2.19) 水流徹, 田大, 春山志郎, 陰極防食された金属の交流インピーダンス特性と防食電位, 防蝕技術, Vol.34, pp.36-41, 1985
- (2.20) T.Kobayashi, Effect of Environmental Factors on The Protective Potential of Steel, The Electrochemical Society,Inc, pp.627-630

- (2.21) 田土弘人, 山路徹, 小林厚史, 川瀬義行, 吉田倫夫, 濱田秀則, テストピース調査結果に基づく港湾鋼構造物における電気防食効果の評価指標に関する研究, 材料と環境, Vol.68, No.8, pp.220-226, 2019
- (2.22) 日本建築学会, 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2015
- (2.23) 戸田靖彦, コンクリートの知識, セメントジャーナル社, pp.332-333, 2005
- (2.24) 日本コンクリート工学協会, コンクリート診断技術' 07, p44, 2007
- (2.25) 横関康祐, M.Sudhir, 本橋賢一, 鉄筋の腐食膨張によるひび割れ発生に関する解析モデル, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム, pp.23-28, 1994
- (2.26) (社)鋼材倶楽部, 防錆特別委員会, 社会資本の腐食診断と補修技術, 防錆技術講習会III, p22, 1987
- (2.27) 日根文男, 金属腐食の化学と電気化学, さんえい出版, p57, 2006
- (2.28) 土木学会, 107 コンクリートライブラリー, 電気化学的防食工法設計施工指針(案), p53, 2001
- (2.29) 宮川豊章, 小林和夫, 藤井学, 塩害雰囲気中におけるコンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計, コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム, pp.47-54, 1988
- (2.30) 土木学会, コンクリート標準示方書 維持管理編(2007年版), pp.101-120, 2007
- (2.31) 大即信明, 檜野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章, コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(I), 技報堂出版, 1986
- (2.32) 土木学会, コンクリート標準示方書 設計編(2012年版), 2012
- (2.33) 沿岸技術研究センター, 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, pp.117-121, 2007
- (2.34) 土木学会, 107 コンクリートライブラリー, 電気化学的防食工法設計施工指針(案), pp.16-17, 2001
- (2.35) 小林豊治, コンクリート中の鋼材の腐食機構, コンクリート工学, Vol.19, No.3, p26, 1981
- (2.36) 関博, コンクリート構造物に対する電気化学的応用, コンクリート工学, Vol.36, No.2, p16, 1998
- (2.37) コンクリート構造物の電気化学的防食工法研究会 工法比較資料
- (2.38) 望月紀保, コンクリート中鉄筋のカソード防食について, 材料と環境, Vol.59, pp.121-128, 2011
- (2.39) 篠田吉央, 望月紀保, 高久豊広, 小林浩之, 湿潤環境下コンクリート電気防食の防食評価方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1157-1162, 2011
- (2.40) 雨宮佑太, 福手勤, 望月紀保, コンクリート中鉄筋の電気防食評価基準に対する考察, 材料と環境講演集, pp.297-300, 2008

- (2.41) 千葉丈夫, 関博, 阿部正美, 石井浩司, コンクリート中鉄筋の防食基準の検証, コンクリート構造物の補修方法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, pp.33-38, 1994
- (2.42) J.E.Bennett, J.Barthlolomew, T.RTurk, Cathodic protection Criteria Related Studies under SHRP Contract, Corrosion, No.323, pp.1-15, 1993
- (2.43) 大谷俊介, Muhammad Akbar Caronge, 山本大介, 濱田秀則, 電気防食下におけるコンクリート中鉄筋の復極量と防食効果に関する基礎的検討, コンクリート工学論文集, 第28巻, pp25-33, 2017
- (2.44) 浮島文香, 審良善和, 佐々木信博, 佐藤弘隆, 山路徹, 小林浩之, 下部鋼構造物の流電陽極方式電気防食が上部鉄筋コンクリート構造物に及ぼす影響, 材料と環境講演集, pp.39-42, 2011
- (2.45) L.Bertolini, M Gastaldi, M Pedefferi, E.Redaeli, Prevention of Corrosion in Concrete exposed to seawater with Submerged sacrificial Anodes, Corrosion Science, Vol.44, pp.1497-1513, 2001
- (2.46) 小林浩之, 電気防食を適用した港湾施設の維持管理手法に関する研究, 九州大学大学院博士論文, pp.117-141, 2013
- (2.47) ISO, Cathodic Protection of Steel in Concrete, ISO 12696, 2012
- (2.48) 小林浩之, 山路徹, 審良善和, 大谷俊介, 望月紀保, 濱田秀則, 湿潤環境下における港湾 RC 構造物の電気防食特性, 材料と環境討論会講演集, pp.265-268, 2012
- (2.49) 小林浩之, 審良善和, 山路徹, 濱田秀則, 若林徹, 望月紀保, 材料と環境討論会講演集, pp.217-220, 2011
- (2.50) 大谷俊介, 小林浩之, 若林徹, 望月紀保, 鋼材表面の環境改善を考慮した電気防食試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1030-1035, 2012

第3章 港湾鋼構造物に適用した電気防食工法の防食効果の評価に関する検討

3.1 はじめに

港湾施設は、1960 年後半から 1970 年代にかけて高度経済成長期に建設されたものが多く、現在では約 50 年程度が経過している。建設から長期間経過したことから現在、港湾施設の老朽化が顕在化しており、維持・補修・更新費が増大すると考えられている。そのため、今後の港湾施設の整備にあたっては、維持補修、更新費を最小にするために、効率的かつ効果的に実施していくことが望まれている。

港湾施設を有する管理者において「港湾の施設の点検診断ガイドライン」^{3.1)}により、港湾施設を適切に点検診断し、その結果を記録しまとめておくことが記されている。また、適切に維持管理を行って行くことが記されている。このように港湾施設は今後益々適切な維持管理がされようとしている。

港湾施設へ適用された電気防食効果の評価方法として、「港湾施設の技術上の基準・同解説（2007 年版）」^{3.2)}において、防食率という評価指標が用いられ、その値は 90%以上と記載されている。

しかしながら、防食率 90%という値は、2.4.2 項で述べたように、無防食期間を含んだ鋼材の腐食速度を基に算出されたものであった。さらには、実構造物において防食率を評価する際には無防食時の腐食速度が必要であるが、電気防食適用と同時にテストピース（防食試験片、無防食試験片を同時に測定できる構造）を設置する必要があり、簡便な方法とはいえ、最近では実施されていないのが現状である。

また、近年、実港湾鋼構造物の維持管理点検方法として、一般定期診断では防食の効果の確認方法として、電位測定が実施され、詳細点検項目として、鋼材の肉厚測定が実施されている。肉厚測定は、電気防食適用時も点検項目として実施されていることから、電気防食適用時（無防食期間がないような場合）の腐食速度も把握できる。したがって、電気防食の効果を確認する評価指標として防食率に代わる指標を検討することも可能であると考えられる。

本項の検討フローを図-3.1 に示す。本検討では、日本の各地域の実海域で 1966～2007 年間に実施されたテストピースによる電気防食効果の評価する指標として防食率、防食効果および防食時の腐食速度の比較検証を実施し、最適な指標について検討した。また、鋼材の電位と腐食速度の関係を調べるために、鋼材の電位を $-700 \sim -950\text{mV}$ (vs.SSE) の範囲に維持し、一定期間経過後の鋼板の質量減から得られる腐食速度と電位および防食率との関係を検証した。続いて、継続的に電気防食が適用された実港湾鋼構造物の鋼材の肉厚調査結果を基に、肉厚減少量から算出した腐食速度（防食時の腐食速度）を電気防食の効果として評価し、実海域における鋼材の電位と腐食速度（防食時の腐食速度）の関係を検討した。

最後に、テストピースおよび実港湾構造物の電気防食効果の検討結果を踏まえ、鋼構造物における電気防食工法の防食効果の評価についてまとめた。

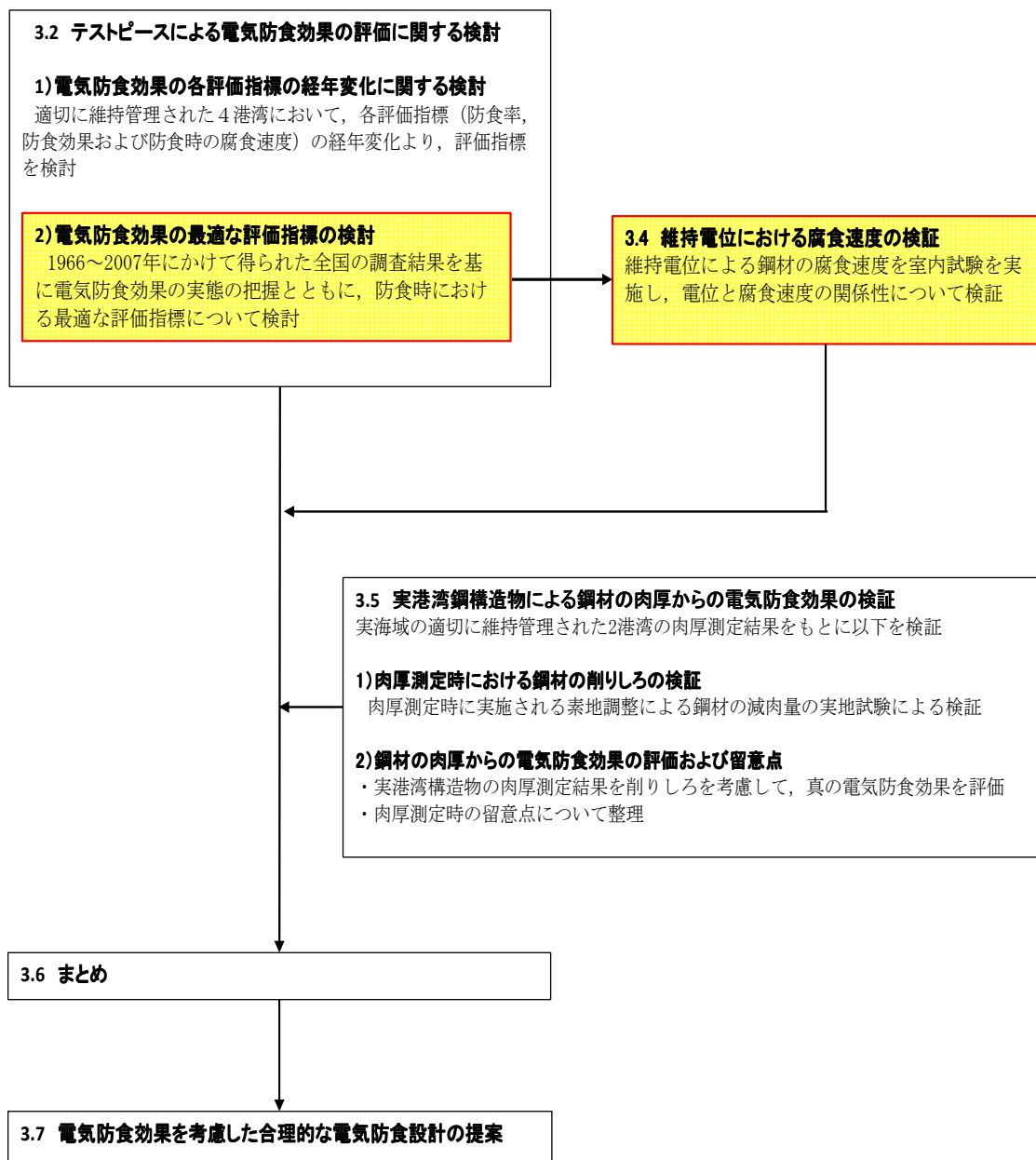


図-3.1 本章の検討フロー図

3.2 実海域に設置したテストピースによる電気防食効果の評価

3.2.1 電気防食の効果を表す評価指標とその課題

港湾鋼構造物へ適用する電気防食における防食理論^{3.3)}を図-3.2に示し、以下に説明する。水中で腐食している鋼材はその表面において電位の卑なアノード部と電位の貴なカソード部からなる腐食電池を形成しており、アノード部から金属(鉄)イオンが溶出して腐食する。電気防食法はこのような腐食している鋼材の表面全体をカソードとして外部より防食電流を供給し、カソード部の電位を次第に低下させ、アノード平衡電位にまで低下させることで鋼材表面の電位差をなくし、鋼材の腐食速度をゼロにするものである。

現在、電気防食の効果の評価指標として、『港湾施設の技術上の基準・同解説』^{3.2)}に記載されている防食率という指標が一般的に用いられている。防食率は式 3.1 で表されるとおり、無防食時の腐食速度(C[mm/y])と防食時の腐食速度(P[mm/y])の差を無防食時の腐食速度で除して算出されるものである。

$$\text{防食率 PR(\%)} = \frac{C - P}{C} \times 100 = \left(1 - \frac{P}{C}\right) \times 100 \cdots (3.1)$$

日本の港湾鋼構造物における電気防食の設計時において、適用範囲は平均干潮面 M.L.W.L. 以下とし、その際の防食率は90%を用いることが標準となっている。これは、1970年『港湾鋼構造物設計基準』^{3.4)}に規定されたのが最初であり、電気防食を適用する前の無防食期間の腐食しるなどを踏まえ、安全側の値として設定されたものであった。

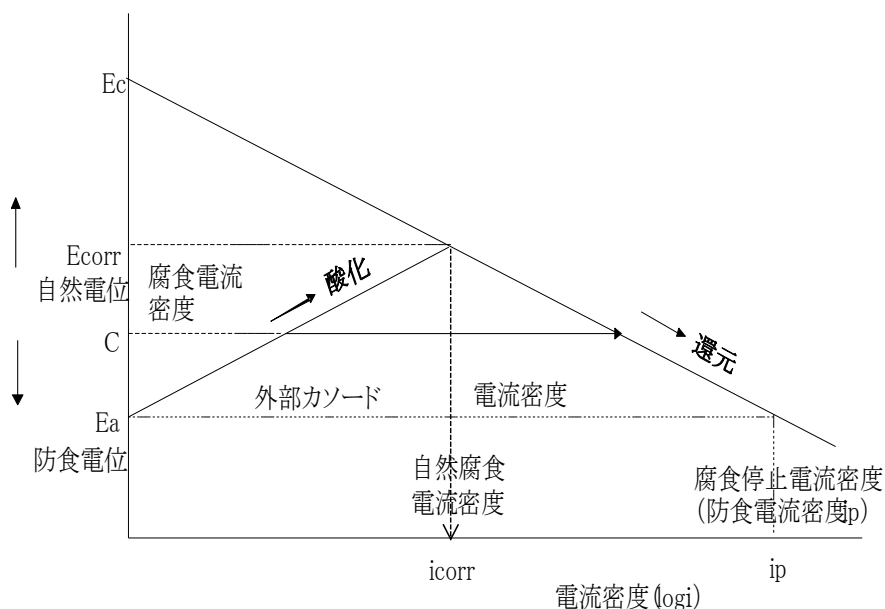


図-3.2 電気防食の防食理論

しかしながら、式 3.1 で表される防食率は、無防食時の腐食速度と防食時の腐食速度を基に算出されるものであり、環境条件が厳しく無防食時の腐食速度が大きくなれば防食率は上昇することになる。このことは、電気防食の評価指標とした防食率が、環境条件によりばらつくことを表している。また、実構造物において電気防食の効果として防食率を評価する際にも無防食時の腐食速度が必要であるが、電気防食が適用された構造物において、無防食時の腐食速度は分からないため、防食率を評価することは出来ない。よって、無防食時の腐食速度が不要な評価指標の確立が望まれる。

一方、電気防食が適用された構造物の将来の肉厚（耐力）を算出する際に防食率は以下のように用いられる。防食率を 90%とした場合、防食時においても、無防食時の腐食速度の 10%の腐食速度で腐食が進行することになる。例えば、無防食時の腐食速度を 0.2 mm/y、設計供用期間を 50 年とした場合、1 mm が腐食することになる。この程度の腐食量は、新設構造物の場合であれば、腐食しろを付与することで対応できる。しかしながら、既設構造物の場合、過去の無防食期間が長く、かつ今後の供用年数が長い場合等においては、電気防食を適用した場合においても、上述のように鋼材腐食は進行すると考えるため、設計供用期間内において部材に要求される肉厚（耐力）を満足しなくなる場合もある。

また、実港湾鋼構造物への電気防食適用例を図-3.3 に示す。新設構造物の場合、1) 鋼管杭または鋼矢板を設置し、上部工建設後に電気防食を適用するまでの無防食期間がある場合（ケース 1）、2) ジャケット式構造のようにあらかじめ工場にて陽極を設置するため無防

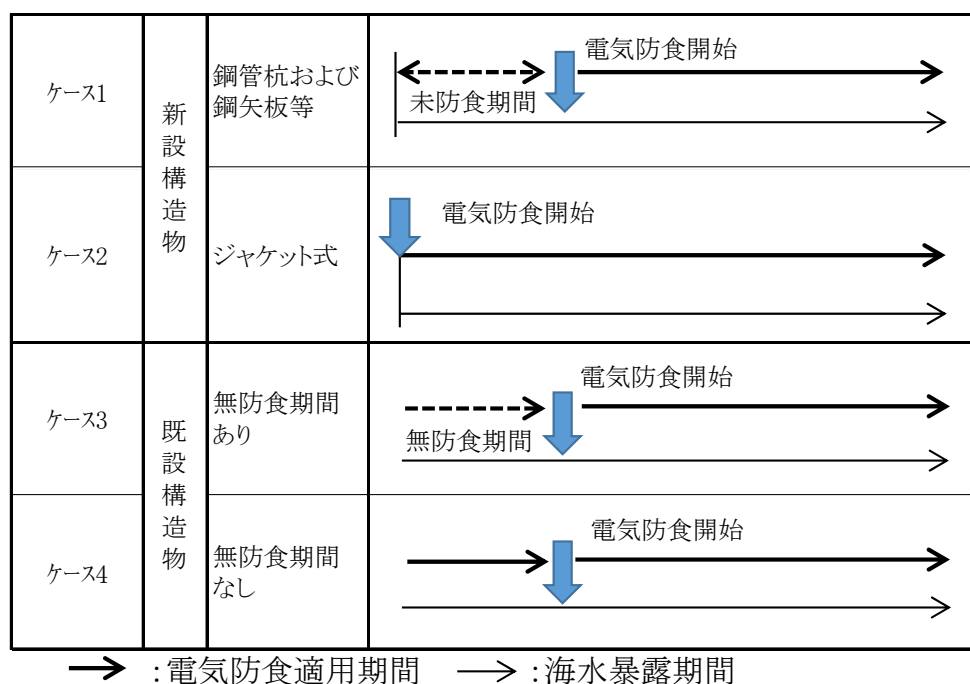


図-3.3 実港湾構造物への電気防食適用例

食期間のない場合（ケース 2）が考えられる。一方、既設構造物の場合、3）長期の無防食期間がある施設（建設当初は電気防食が適用されていたが現在は無防食の場合も含む）に電気防食を適用する場合（ケース 3）、4）電気防食が継続的に適用（継続的に陽極の更新）されている場合（ケース 4）、が考えられる。電気防食の適用時において、様々なケースがあるにもかかわらず、防食率は一様に 90% が用いられているのが一般的である。

上述の課題に対して、電気防食の効果に関する最新の知見を踏まえ、電気防食の効果の実態および電気防食の効果を表す評価指標に関して検証が必要であると考え。そこで本節では、まず、日本の 4 港湾において、テストピースを用い 4 年間にわたる電気防食の効果の経時変化を調査した結果を基に、電気防食の効果を表す指標の経時変化を整理した。次に、上記の調査結果を踏まえ、全国の港湾施設に設置された多数のテストピース（計 650 組）を用い、電気防食の効果の実態の把握および電気防食の効果を表す指標に関し比較検証を行った。最後に、既往の知見も踏まえ、最適な電気防食の効果の評価指標について考察を行った。

3.2.2 テストピースを用いた電気防食効果の経年変化に関する検討

本項では、テストピースを適切に維持管理（定期的に防食状態を点検し、鋼材の電位が防食管理電位 -800mV （vs.SSE[SW]）以下を常に維持している。）された実構造物に設置し、経年的に防食の効果を検査している事例^{3,5)}を基に、電気防食の効果を表す評価指標（防食率、防食効果）の経年変化より、防食時における評価指標の検討を行った。

3.2.2.1 試験方法

図-3.4 に各港湾に設置したテストピースの設置図を示す。各港湾の海水抵抗率は $20\sim 30\Omega\cdot\text{cm}$ 程度であり、一般的な海水の抵抗率と同様であった。また、各施設における設計防食電流密度（海水中）は、東京港及び大阪港が $130\text{mA}/\text{m}^2$ 、四日市港及び北九州港が $100\text{mA}/\text{m}^2$ であった。テストピースは直径 20mm 、長さ 50mm の円筒形で、材質は SS400 である。これにハンドルとナットを取付け、試験片表面を残して全面被覆した。このテストピースを図-3.4 に示すように取付け、栈橋の鋼管杭の M.L.W.L.以下の所定の水深に固定した。既設の陽極と電氣的導通を確保することで、海中に設置すると同時に陽極からテストピースへ防食電流が流れるようにし、無防食期間が発生しないようにした。テストピースは回収後、表面の付着物（腐食生成物、電解生成物）を薬品処理にて除去した後、質量測定を行った。また、試験前後の秤量結果を基に、式 3.2 と式 3.3 を用いて質量減量 $W[\text{g}]$ と腐食速度を算出した。ここで、テストピースの比重： $7.86(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、試験期間（ y ）： T 、テストピースの表面積（ cm^2 ）： S 、無防食時の腐食速度（ mm/y ）： C 、防食時の腐食速度（ mm/y ）： P である。

$$W = W_0 - W_1 \cdots (3.2)$$

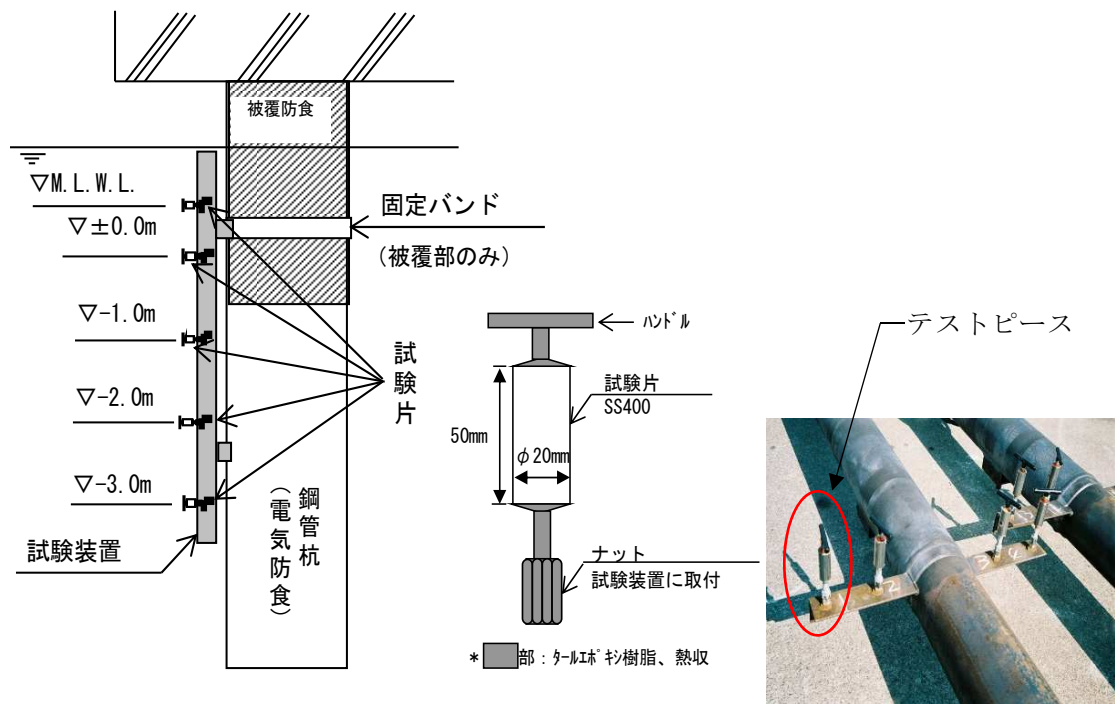


図-3.4 テストピース設置位置

$$C, P = \frac{W \times 10}{7.86 \times T \times S} \cdots (3.3)$$

また、実構造物において、電気防食が継続的に適用された場合の電気防食効果を確認する方法として、式 3.4 で示すように電気防食が適用されたテストピースの試験前後の質量を基に電気防食の効果を表す「防食効果^{3.5)}」という、無防食時の腐食速度が不要な指標を用いても評価を行った。

$$\text{防食効果 PE(\%)} = \frac{W_1}{W_0} \times 100 \cdots (3.4)$$

ここで、テストピースの試験後の質量： W_1 (g)、試験前の質量 W_0 (g) である。

3.2.2.2 試験結果

1) 電位の経年変化

各テストピースが設置された4港湾の陰極電位の経年変化を図-3.5に示す。各港湾の測定結果は、各港湾とも、防食管理電位 -800mV (vs.SSE[SW])を大きく下回っており、試験期間中を通して、良好な防食状態が維持されていた。

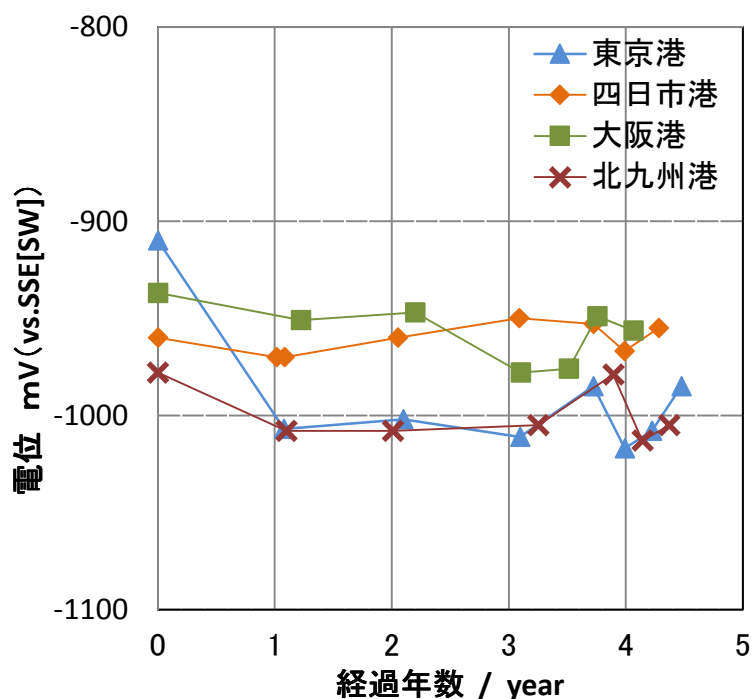


図-3.5 各港湾の電位経時変化

2) 電気防食効果の経年変化

各港湾の防食率と防食効果の関係を図-3.6に示す。次に、各港湾の防食率と防食効果の関係を図-3.7に示す。なお、各水深において、防食率と防食効果の算出結果に大きな差は見られなかったため、水深別測定結果の平均値として表した。その結果、東京湾では、防食率 $96.5\sim 98.5\%$ 、防食効果 $99.6\sim 99.7\%$ 、四日市港では、防食率 $96.1\sim 99.6\%$ 、防食効果 $99.1\sim 99.8\%$ 、大阪湾では、防食率 $94.4\sim 99.2\%$ 、防食効果は $99.7\sim 100\%$ 、北九州湾では、防食率 $94.6\sim 97.6\%$ 、防食効果 $99.8\sim 99.9\%$ であった。防食率は時間とともに増加し、港によってはばらつきが見られた。一方、防食効果は、4年間の範囲では変化は見られなかった。各港湾の防食時の腐食速度の経年変化を図-3.7に示し、各港湾とも、時間の経過とともに、腐食速度(=減量/時間)が小さくなる傾向が見られた。しかしながら、図-3.6の防食効果(=現在の質量/初期の質量)は時間と共に減少していない。これは電気防食適用時において、初期減量から経時的にほとんど減量が見られないことを、防食効果よりも腐食速度の方が防食時の質量減の経時変化を表していると考えられる。

また、電気防食適用時においては、適用初期に減肉しやすく、陰極電位が定常状態に達した後は減肉しにくいことを示唆していると考えられる。

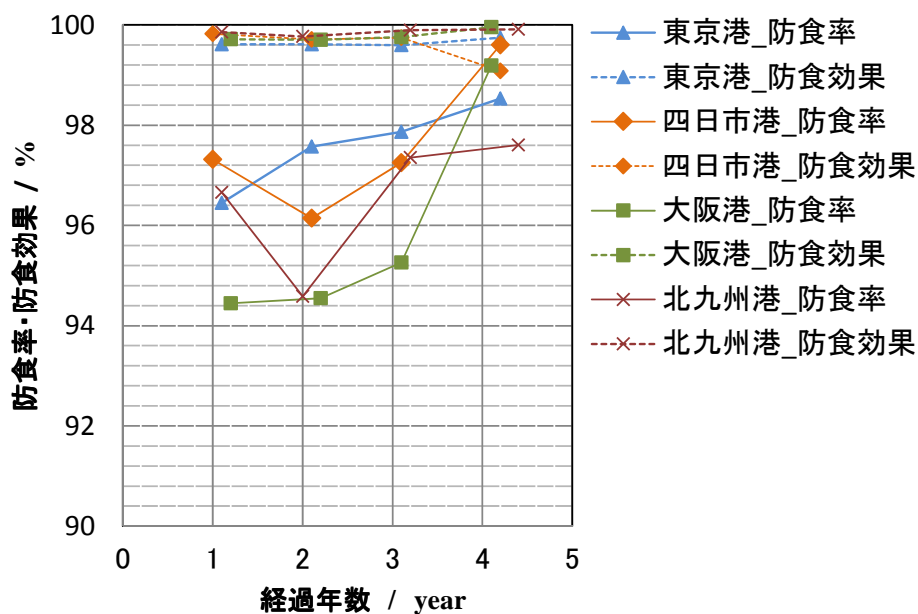


図-3.6 電気防食の効果の経年変化

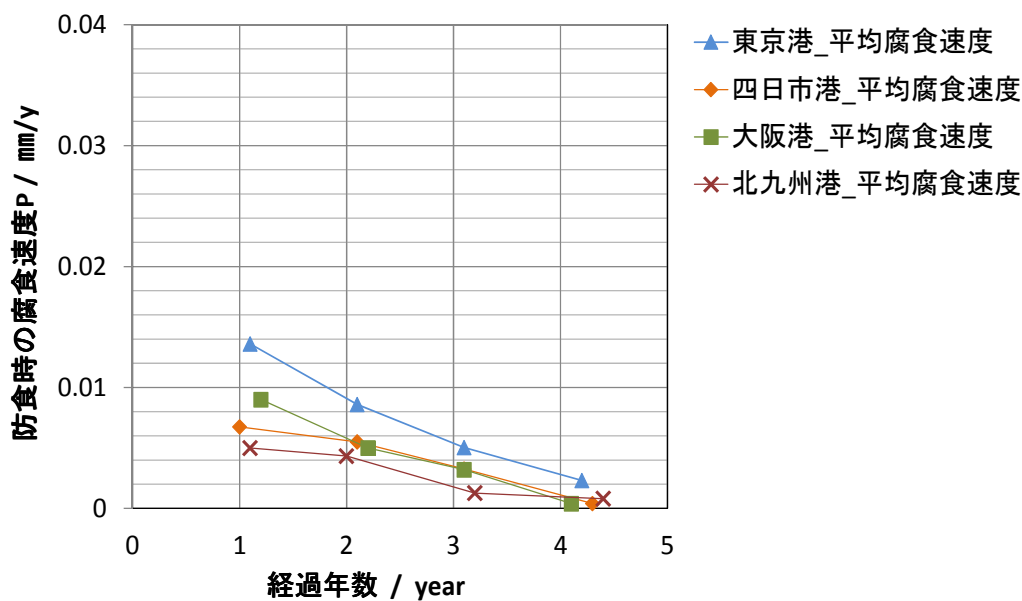


図-3.7 防食時の腐食速度と経過年数との関係

3.2.3 テストピースを用いた電気防食効果における全国調査^{3.6), 3.7)}

3.2.1 項において、適切に維持管理された港湾に設置されたテストピースの試験結果より、以下のことが分かった。防食率は、時間とともに増加し、港によってばらつきが見られた。また、防食効果は4年間程度では変化が見られなかった。しかしながら、防食時の腐食速度は、防食効果よりも防食時の質量減の経時変化をよく表していることが分かった。本項では、日本の各地域におけるテストピースの調査結果を基に、電気防食の効果の実態を把握した。その際、電気防食の効果を表す評価指標として、一般的に用いられている防食率に加え、防食効果、防食時の腐食速度について比較し、防食時における最適な評価指標について検討した。

3.2.3.1 調査方法

1) 設置されたテストピースの概要

実港湾構造物への電気防食の効果を検証するために、電気防食適用と同時にテストピースを同構造物に設置する場合がある。テストピースによる試験は、無防食用に絶縁処理を施されたテストピースと防食用テストピースを一对として、電気防食が適用された港湾鋼構造物に電氣的に導通させて行われる。国内で使用される主なテストピースの概要を表-3.1に示す。

表-3.1 テストピースの概要

形状	H型	Y型	平鋼型
概略図	<p>リード線先端を防食対象鋼材に接続 リード葎 テストピース (通電片) テストピース (不通電片)</p>	<p>テストピース (通電片) 防食対象鋼材 テストピース (不通電片) 絶縁材 水中溶接</p>	<p>防食対象鋼材 テストピース (通電片) テストピース (不通電片) 絶縁板 水中溶接</p>
写真			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・陸上から回収が可能 ・ケーブルが断線し試験中断 	<ul style="list-style-type: none"> ・潜水士により回収 ・脱落等の心配はない 	<ul style="list-style-type: none"> ・潜水士により回収 ・脱落等の心配はない

それぞれのテストピースについて説明する。H型は鋼管状のテストピースをケーブルにより取り付けただけのもので、一方はそのケーブルの導線と接触させ、もう一方は絶縁処理を行う。ケーブルは上部工に設置されたボックス内で構造物と電氣的に接続するものである。特徴として、陸上より回収可能であるが、ケーブルの断線により試験が中断する場合がある。Y型は鋼管状の通電用、不通電用テストピースを架台に固定し、その架台を直接構造物に溶接等により電氣的導通を図るものである。特徴として、脱落の心配はないが、テストピースの回収には潜水士による回収が必要となる。最後に、平鋼型はY型と同様に平鋼の通電用、不通電用テストピースを架台に固定し、その架台を直接構造物に溶接等により取り付け電氣的導通を図るものである。特徴として、脱落の心配はないが、テストピースの回収は潜水士による回収が必要となる。

調査に用いた代表的なテストピースの概略と設置した港を図-3.8に示す。試験は、無防食用に絶縁処理を施されたテストピースと防食用テストピースを一体として、電気防食が適用されている対象物に電氣的に導通させて行われた。調査対象となったテストピースは、図-3.8に示すとおり1966年から2007年の間に設置、回収されたL.W.L.以深を対象とした。平均的な試験期間は約6年である。また、テストピース設置時の陰極電位は不明であった。

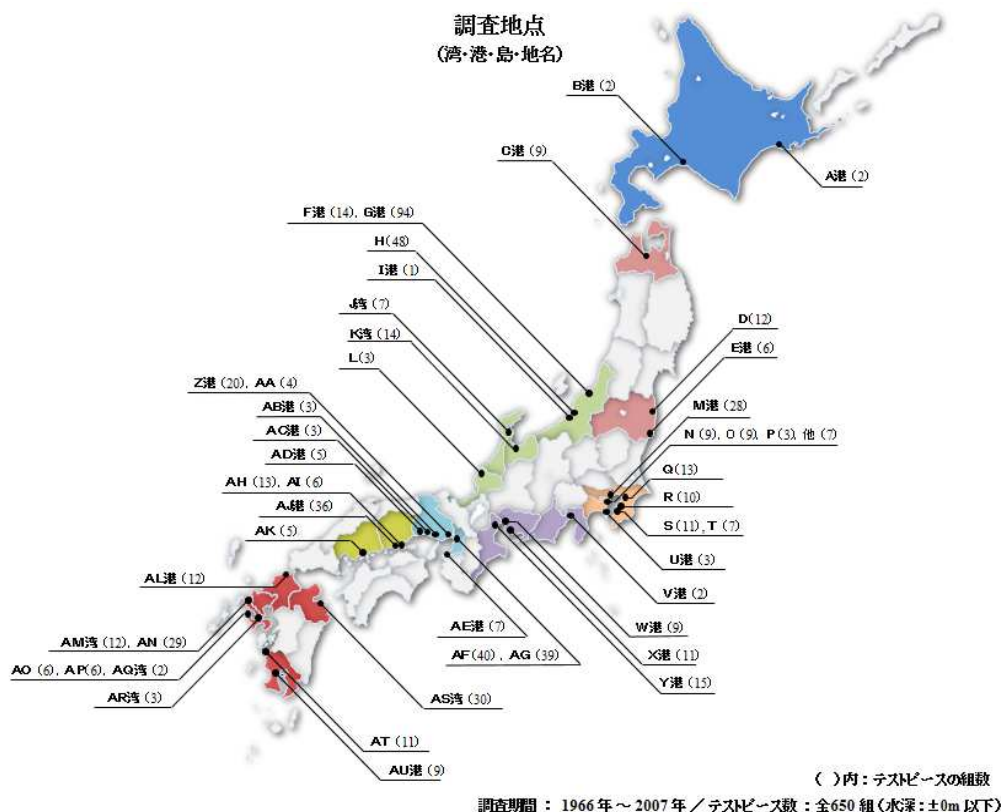


図-3.8 テストピースの調査位置図

3.2.3.2 調査結果

1) 無防食および防食時の腐食速度

各地域における無防食時および防食時の腐食速度の平均値を表-3.2 に示す。また、各地域における無防食時の腐食速度の最大値，平均値，最小値を図-3.9 に示す。その腐食速度の平均値は0.148mm/yであった。これは一般的に言われている海水中の鋼材の腐食速度0.1～0.3mm/y^{3,8)}の範囲内を示していた。腐食速度を各地方および湾について確認していくと、腐食速度は北海道で平均0.06 mm/y，東京湾周辺では平均0.18 mm/y（最大0.47mm/y），瀬戸内海沿岸では平均0.23 mm/y（最大0.36mm/y）という腐食速度であった。東京湾，瀬戸内海沿岸は平均腐食速度としては，一般的な海水中の無防食の鋼材の腐食速度を示しているが，最大値が一般的な海水中の鋼材の腐食速度を超える大きな腐食速度が確認された。それは，海水等の環境変化が大きいことを示すものである。なお，北海道の腐食速度が低い値を示したのは，他の地域に比べて平均気温が低いことが原因と考える。

一方，各地域における防食時の腐食速度の最大値，平均値，最小値を図-3.10 に示す。その腐食速度の平均値が0.0024mm/yであった。全国的に腐食速度の地域差がなく，どの地域においても電気防食が有効に効果を発揮していることが確認された。

表-3.2 無防食時および防食時の腐食速度平均値

地方区分	供試体	平均腐食速度 (mm/y)		平均防食率	平均防食効果
	Pcs	C	P	(%)	(%)
北海道	4	0.0644	0.0009	98.3	98.8
東北地方	27	0.1148	0.0026	97.5	99.8
北陸地方	181	0.1489	0.0015	98.9	99.7
東京湾	100	0.1818	0.0033	98.2	99.6
伊勢湾	37	0.1423	0.0022	98.6	99.8
大阪湾	121	0.1578	0.0019	98.7	99.8
瀬戸内	60	0.2279	0.0049	98.0	99.7
九州地方	120	0.1118	0.0021	97.9	99.8
全地方	650	0.1481	0.0024	98.2	99.7

C: 無防食試験体 P: 防食試験体

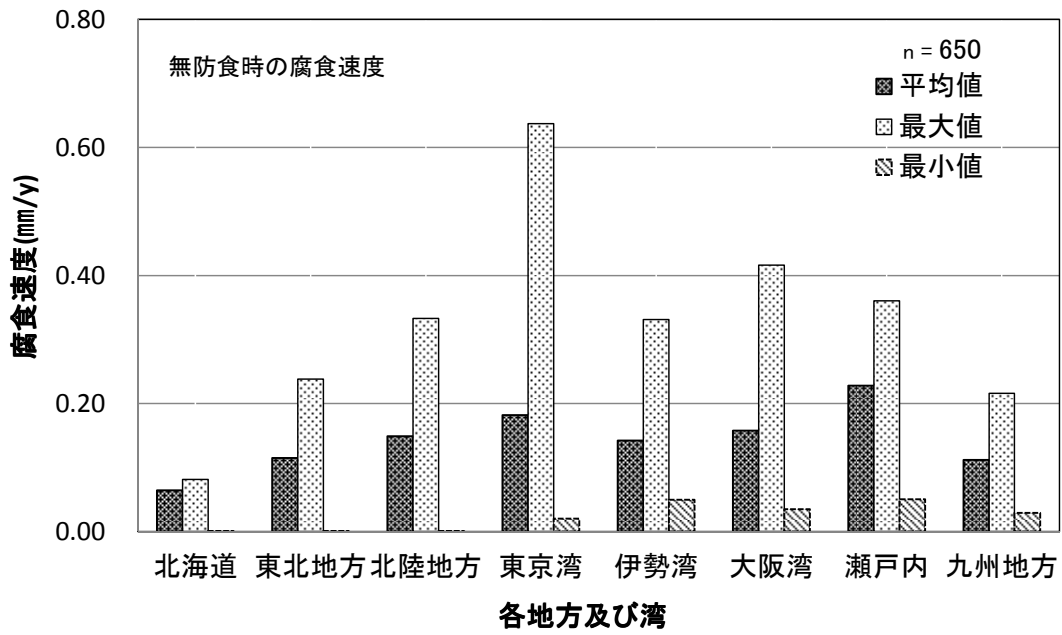


図-3.9 各地域における無防食時の腐食速度

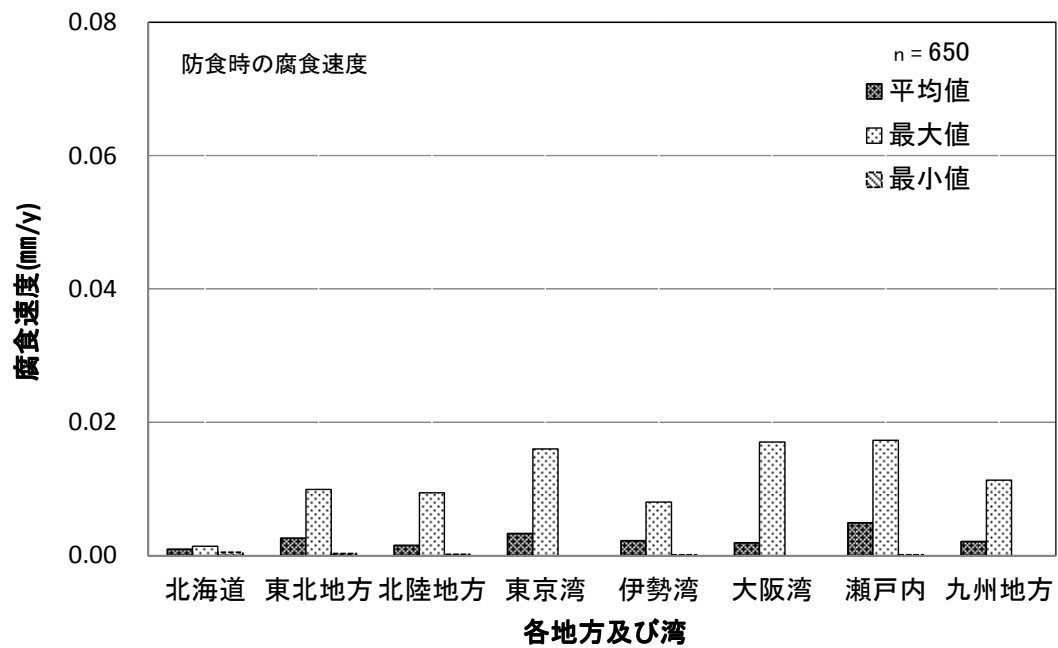


図-3.10 各地域における防食時の腐食速度

腐食速度の累積確率分布図として、無防食時の結果を図-3.11に、防食時の結果を図-3.12に示す。なお、累積確率は、データが出現する順番をデータの総数で除したものである。無防食時の腐食速度の平均値は0.148 mm/yであり、データの約80%程度が一般的な海水中の鋼材の無防食の腐食速度0.1~0.3mm/yの範囲内の値を示した。一方、防食時の腐食速度の平均値は0.0024 mm/yであり、データの97%程度が0.01 mm/y以下の小さな値を示した。

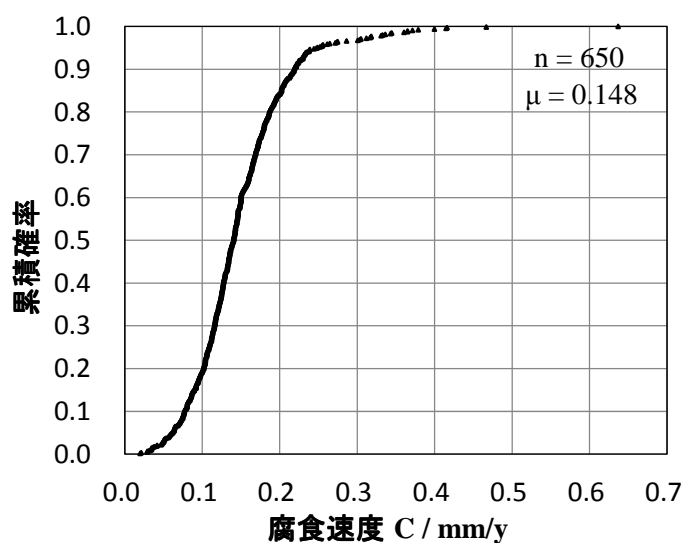


図-3.11 無防食テストピースの腐食速度(C)の累積確率分布図

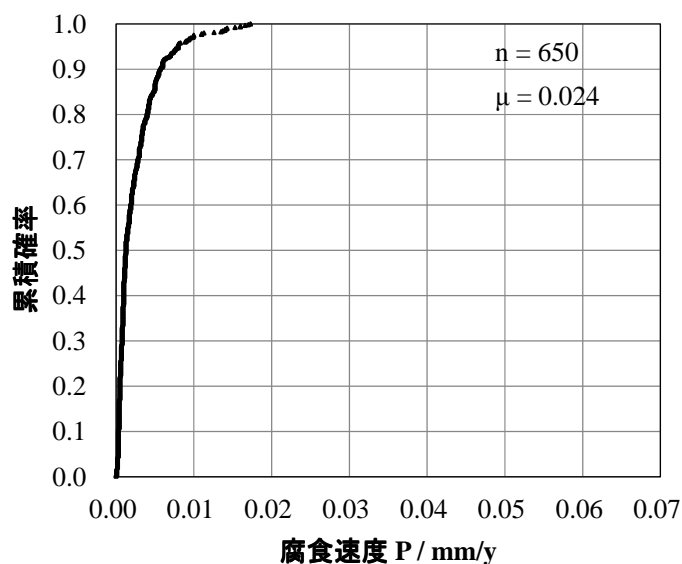


図-3.12 防食テストピースの腐食速度(P)の累積確率分布図

無防食時および防食時の腐食速度を比較したものを図-3.13に示す。また、図中の点線は防食率(式3.1)が90%とした場合の両者の関係を示したものである。式3.1において、防食時の腐食速度と無防食時の腐食速度は相関があることが前提となっているが、図-3.13より、両者の相関を表す直線の傾きは、防食率90%とした直線よりも小さい。つまり、防食時の腐食速度は地域的にもあまり変化がないが、無防食時の腐食速度のばらつきが大きいことが、防食率のばらつきを大きくしている要因となっている。また、式3.1からも防食時の腐食速度があまり変化しない場合、無防食時の腐食速度が大きくなるほど、防食率は高くなることになる。このことは、防食率は電気防食の効果を表す指標として、必ずしも適切であると言えないことを示唆するものである。

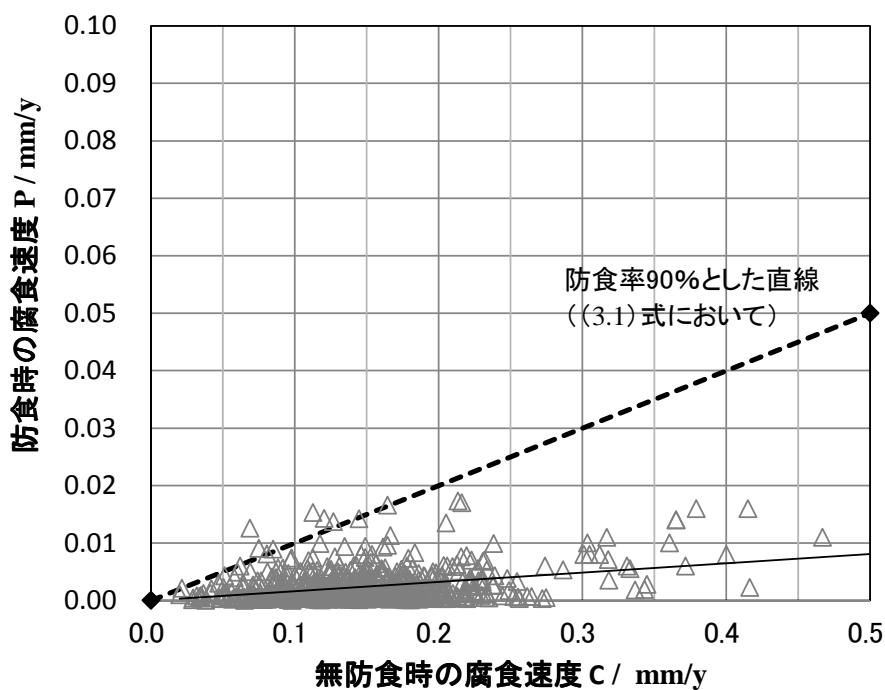


図-3.13 無防食および防食テストピースの腐食速度比較図

2) 電気防食効果とその経年変化

各地域における防食率と防食効果を表-3.2 に、図-3.14 に防食率および防食効果の累積確率分布図を示す。防食率の平均値は98.2%，防食効果の平均値は99.7%であった。いずれの指標で算出した場合においても、平均値は100%に近い値であった。

また、防食率と防食効果の経年変化を図-3.15 に示す。防食率は、試験開始直後はばらつきが見られたが、経年的にばらつきが小さくなっている。試験開始直後にばらつきが見られたのは、試験開始後の無防食時の腐食速度と防食時の腐食速度の相関が小さいことが影響しているためである。また、経年的に上昇した後、ばらつくのは、防食時の腐食速度は変化していないが、無防食時の腐食速度が経年的に変化することにより、ばらつくためである。

また、防食効果は防食時の状態のみで算出するものであり、無防食時の腐食速度の影響を受けないため、ばらつきが少なくなっている。しかしながら、防食効果（=現在の質量/初期の質量）は、図-3.15 により、経年的にばらつきが大きくなっている。つまり、これは、経過年数が長くなればなるほど初期質量からの減量が大きくなり、長期経過後の防食効果は計算上、低下することになるためである。このことは、時間的な要因を含まないことによると考えられ、防食効果は電気防食の効果を表す指標として、必ずしも適切であると言えないことを示唆するものである。

一方、防食時の腐食速度の経年変化を図-3.16 に示す。図-3.16 より、経過年4年程度までは腐食速度は減少が見られ、5年経過以降は腐食速度がほぼ平均的になっている。

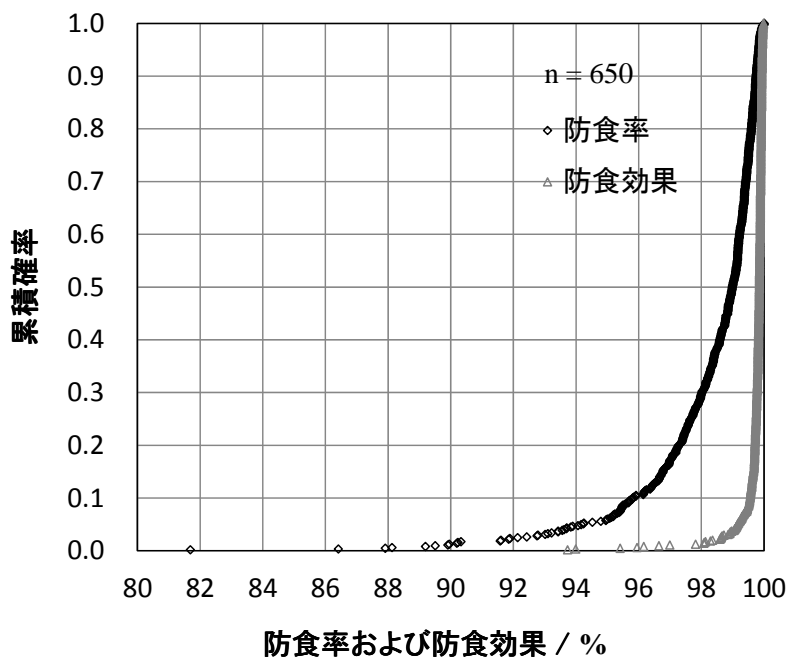


図-3.14 防食率および防食効果の累積確率分布図

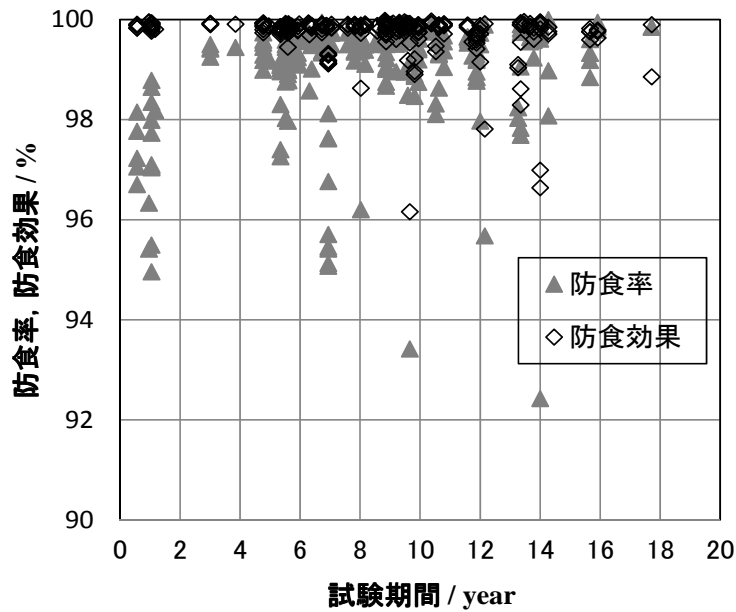


図-3.15 防食率と防食効果の経年変化

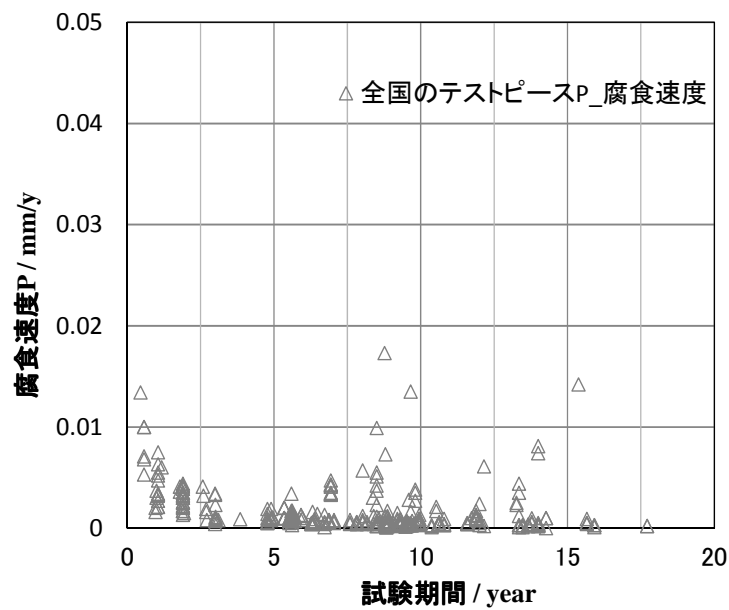


図-3.16 防食時の腐食速度の経時変化

これは 3.2.2 項で示したように防食適用初期に減肉しやすく、定常状態に達した後は減肉しにくいことを示唆している。

そこで、一般的な港湾施設に対する電気防食適用期間（5年以上）を考慮し、経過年数5年以上であるテストピースにおける、防食時の腐食速度の累積確率分布を図-3.17 に示す。経過年数が5年以上の場合、防食時の腐食速度は0.01 mm/y以下の値が99%程度であった。

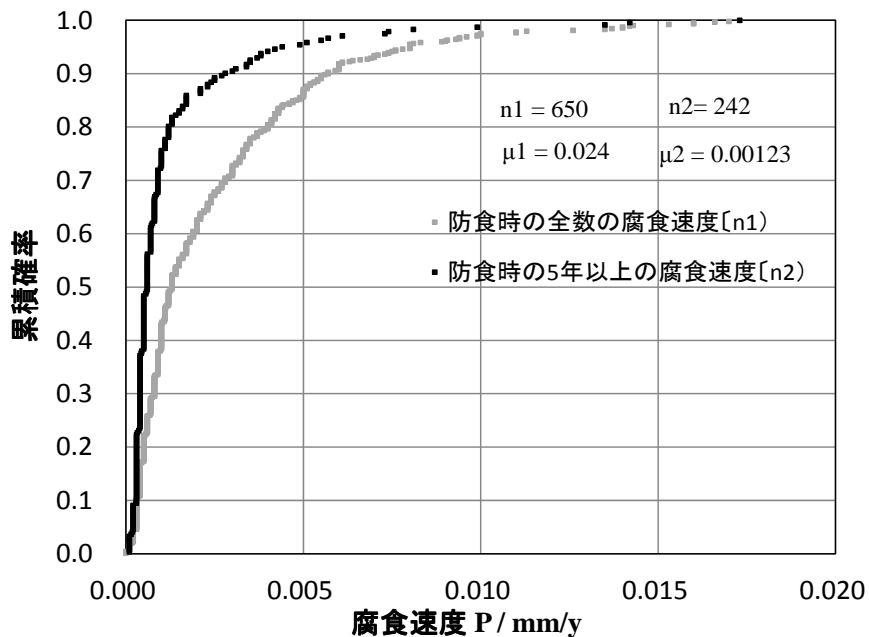


図-3.17 防食時の腐食速度累積確率分布

3.2.4 電気防食適用時における最適な評価指標の検討

3.2.2 項にて試験期間の経時変化が明確なテストピース、3.2.3 項で全国のテストピースの電気防食効果の指標について検証した。その結果、電気防食効果を表す指標の条件として、防食時の状態のみを用いて、かつ時間的な要因を含む、つまり防食時の腐食速度で評価することが望ましいと考えられた。また、防食時の腐食速度で評価するためには、施設の防食状態が適切に維持されていることが前提となるため、防食管理電位 -800mV (vs.SSE[SW]) 以下^{3.8)}と防食時の腐食速度との関係を既往の室内試験および実海域での試験結果をもとに検証した。

室内試験においては、水槽中に試験片を浸漬し、陰極電位の設定値を変化させた際の、陰極電位と腐食速度との関係が試験された。次に、実海域における試験では、試験開始から5年程度経過後の陰極電位と腐食速度の関係が測定された。室内試験と実海域での測定結果を図-3.18 に示す^{3.9)3.10)}。電位が防食管理電位 -800mV (vs.SSE[SW]) 以下に維持されている場合、室内試験および実海域での測定結果のいずれの場合においても、鋼材の腐食速度はほぼ 0.01mm/y 以下であった。さらに電位を下げると腐食速度は減少した。以上より、電気防食効果の指標として、下記の港湾構造物における一般的な3つの前提条件を満足する場合には、鋼材の腐食速度を 0.01mm/y 程度であると考えられる。

- ①無防食期間が無く防食管理電位 -800mV (vs.SSE[SW]) 以下が維持されている場合
- ②一般の海洋環境下（高波浪海域は除く）における M.L.W.L.以下の範囲である場合
- ③適切な防食設計、施工および維持管理がなされている場合

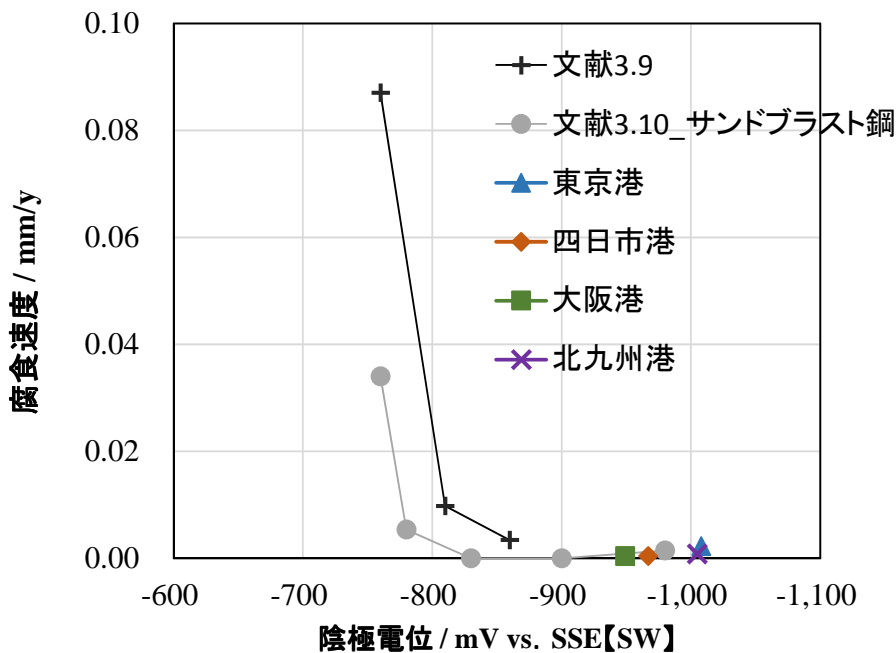


図-3.18 電位と腐食速度の関係

3.2.5 まとめ

試験期間の経時変化が明確な4港湾の調査結果および様々な試験期間の全国調査結果より、電気防食の効果を表す評価指標について検証した結果を以下にまとめた。

- 1) 防食率という評価指標は、無防食時および防食時の腐食速度から算出される。今回、防食時の腐食速度には全国的な変化は少なかったが、無防食時の腐食速度は大きくばらつきが見られた。結果として、防食率の値にはばらつきが見られた。
- 2) 防食効果という評価指標は、防食時の状態のみで算出するものであり、無防食時の腐食速度の影響を受けないため、ばらつきが少なくなっている。しかしながら、防食効果(=現在の質量/初期の質量)は、経年的に現在質量が減少することによって、経年的にその値は減少する傾向を示した。
- 3) 防食率、防食効果という評価指標に対する検証の結果を踏まえ、電気防食の効果を表す指標の条件として、防食時の状態のみを用いて、かつ時間を含む指標で評価することが望ましいと考えられた。電気防食の効果の評価指標(設計値)として、防食時の腐食速度がよいと考えられた。なお、電気防食の効果の評価指標として、基準にある一般的な防食設計条件を満足する場合には、鋼材の腐食速度を0.01mm/y程度であると考えられる。

3.3 電気防食効果に関する検討課題

3.2 節において、電気防食が適切に維持管理されている場合、テストピースによる電気防食の効果を表す評価指標として、防食時の腐食速度を評価指標とすることが最適であるとした。しかしながら、これは実海域に設置されたテストピースによる結果に基づいている。今後は実構造物の電気防食の効果を実構造物の維持管理点検で実施される点検項目（電位測定、鋼材の肉厚測定等）により評価できることが望ましい。

そのため、まず、3.4 節において、電気防食適用時の最適な評価指標とした防食時の腐食速度と維持管理点検で測定される電位との関係性について、環境条件、試験期間を設定し、室内試験において検証した。併せて、電位と防食率についても検証した。

次に、3.5 節において、適切に維持管理された港湾施設（無防食期間がない）を選定し、実構造物の維持管理時の詳細点検で実施される肉厚測定から算出される腐食速度から電気防食の効果を評価した。また、電気防食適用時は、電気防食の効果により鋼材の減肉は小さいと考えられ、肉厚測定時の素地調整による削りしろが、電気防食適用時の鋼材の真の減肉量に及ぼす影響が大きいと考えられる。そのため、肉厚測定時の削りしろを検証するために、電気防食を適用した試験片および無防食の試験片に対し、実海域と同様に素地調整し、肉厚測定を実施した。その検証結果を踏まえ、実構造物で得られた測定結果に素地調整による削りしろを考慮して腐食速度を算出し、真の電気防食の効果について検討した。また、テストピースより得られた結果と比較し、実構造物での電気防食の効果を検証する上での実務上の留意点についても整理した。

3.4 鋼材の維持電位における腐食速度の検証

実構造物の電気防食の効果を実構造物の維持管理点検で実施される点検項目（電位測定）により評価できることが望ましい。そのため、電気防食適用時の最適な評価指標とした防食時の腐食速度と電位との関係性について、海水中の鋼材の電位を一定に維持し、試験終了後の鋼材の腐食減量より腐食速度を算出することによって、電位と鋼材の腐食速度の関係を検証した。なお、鋼材の電位と腐食速度の関係の検証は、異なる環境条件（流水と静止水）や環境条件を同じにして期間の異なる条件（試験期間が1ヶ月と3ヶ月）により実施した。

3.4.1 室内実験の試験方法

海水中にある鋼材の電位を一定にし、その鋼材に流入する電流密度を計測する維持電位法についての試験を実施した。維持電位法に用いる使用材料及び機器は、ポテンショスタット、アノード（白金メッシュ電極）、カソード（SS400）飽和銀塩化銀照合電極（SSE）から図-3.19に示すような構成となる。

アノード表面積 12cm^2 、カソード表面 100cm^2 ($75\times 150\times 1\text{t mm}$) になるように端部をゴムシールにて処理を行った。ポテンショスタットを介してアノードとカソードを接続し、試験水槽内に設置した。ポテンショスタットにて鋼材の電位を所定の電位に設定維持した際の通電電流をデータロガーにて2分インターバルにて測定した。

試験水槽での測定状況は写真-3.1に示すとおりである。試験水槽は縦×横×高さが $650\times 450\times 350\text{mm}$ の塩化ビニル製であり、流水試験の場合は、神奈川県久里浜湾の自然海水を 1.5l/min （一過式）で供給した。また、各試験の設定条件について表-3.3に示す。

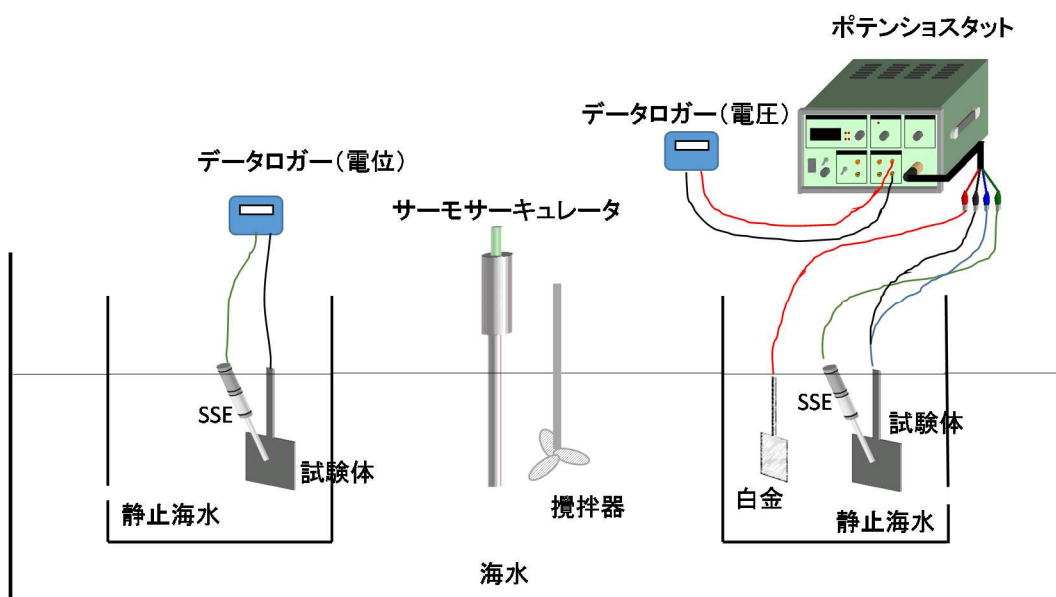


図-3.19 試験概要図



試験水槽

維持電位設定及び測定状況

写真-3.1 試験状況

表-3.3 試験の設定条件

試験記号	設定電位 mV(E_{SSE})	環境条件	試験期間
F(TC)	-700	流水海水(1.5ℓ/min)中で自然海水温	30日
S(TC)	-750	静止海水中で自然海水温	30日
	-800		
S(TF30)	-850	静止海水中で海水温25℃一定	30日
	-900		
S(TF90)	-950	静止海水中で海水温25℃一定	90日*

*: -700, -750, -800, -850mVに設定

例 F(TC): Flow (Temperature Change) S(TF30): Stationary (Temperature Fixed 30)

試験の設定条件は、以下のことを検討するために設定した。

① F(TC)と S(TC)による検証

流水による電気防食の効果を検証するために、自然海水温条件下で、静止海水中で同様の試験を実施し、比較検証した。

② S(TF30)と S(TF90)による検証

防食管理電位-750mV (vs.SSE) 付近の期間による電気防食の効果、腐食速度の経時変化を検証するために、同一環境で期間の異なる試験を実施し比較検証した。

3.4.2 室内実験の試験結果

各環境条件下での鋼材の維持電位と腐食速度および電気防食の効果について整理し、比較検証した。

1) 海水温変化における流水及び静止水環境下での鋼材の電位と腐食速度との関係

① 鋼材の自然電位の経時変化

試験 F(TC)での海水温と鋼材の自然電位との関係を図-3.20 に示し、試験 S(TC)での海水温と鋼材の自然電位との関係を図-3.21 に示す。試験 F(TC)の鋼材の自然電位は、試験水槽に浸漬直後は-450mV (vs.SSE) 以下の電位を示したが、降下を続け浸漬3日目には-700mVまで降下した。その後、電位は上昇を続け30日後には-650mV付近まで電位は緩やかに上昇を続けた。流水による影響であると考えられる。

一方、試験 S(TC)の鋼材の自然電位は、試験水槽に浸漬直後は-400mV の電位を示したが、降下を続け浸漬2日目には-700mVまで降下し定常状態となった。しかしながら、試験 S(TC)は水温が変化した場合でも鋼材の自然電位はほとんど変化が見られなかった。

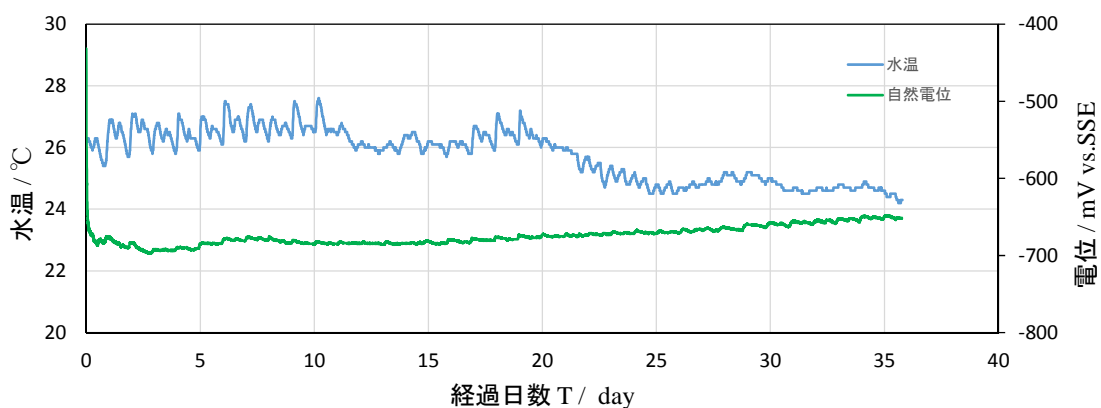


図-3.20 F(TC)での海水温と鋼材の自然電位との関係

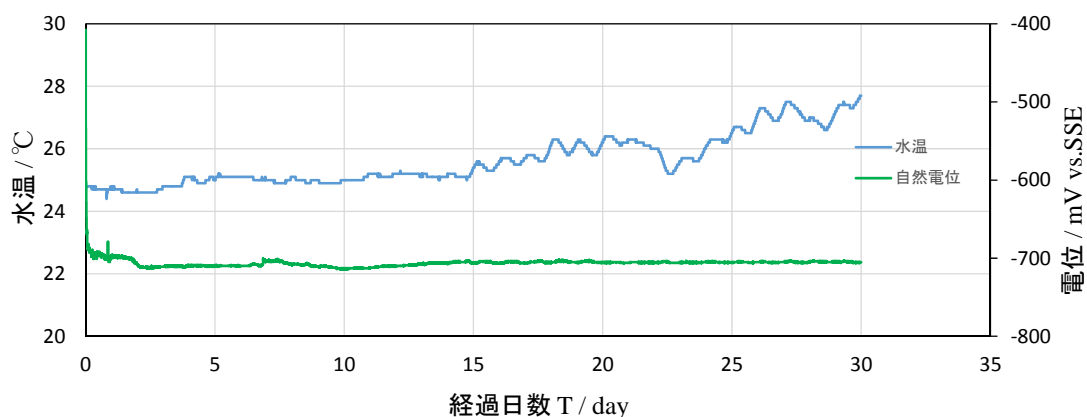


図-3.21 S(TC)での海水温と鋼材の自然電位との関係

②鋼材の維持電位に対する電流密度の経時変化

鋼材の維持電位（-700～ -950mV）に対する試験 F(TS)における維持電流密度の経時変化を図-3.22 に示し、試験 S(TC)における維持電流密度の経時変化を図-3.23 に示す。なお、維持電流密度のプラス表記はテストピースへ電流が供給されることを表し、マイナス表記はテストピースから電流が流出することを表す。

試験 F(TS)において、設定電位-700～ -800mV は、試験開始から 6 日程度まで維持電流密度が 200～400 mA/m² と変動し、その後、維持電流密度は 100 mA/m² 程度で定常化した。設定電位-700～ -800mV においては、30 日後の維持電流密度の差はほとんどみられなかった。一方、-850～ -950mV においては、初期に維持電流密度の変動は見られるが、その変動の大きな期間は設定電位-850mV が一番短く、設定電位を卑にするほど長くなった。30 日後には全て維持電流密度は定常化した。また、維持電流密度の定常化は-850mV が最も早く、5 日目であり、その後-900mV が 7 日目、-950mV が 16 日目と最も遅かった。定常化した維持電流密度は-850mV が 120 mA/m² であり、-900mV が 180 mA/m²、-950mV が 200 mA/m² であった。設定電位-950mV が最も維持電流密度の定常化が遅かったのは、初期の通電量が大きく疎なエレクトロコーティングが生成したことにより維持電流密度が低減するのに時間を要したと考えられる。

一方、試験 S(TC)において、鋼材の維持電位（-700～ -950mV）に対する維持電流密度の経時変化を図-3.23 に示す。設定電位を-700mV にしたテストピースは、試験開始後に降下して-30 mA/m² まで電流が流出したが、7 日以降から徐々に減少し 30 日目には-10 mA/m² の流出する電流密度で定常化した。設定電位-750mV は、試験開始から 5 日付近まで維持電流密度の変動が大きく、5 日以降 80 mA/m² で安定したが、20 日以降から更に維持電流密度は定常化し、30 日後には 50 mA/m² まで低減した。設定電位-800～ -900mV は、試験開始当初は設定電位による維持電流密度の違いはあったが、30 日後には維持電流密度は設定電位に

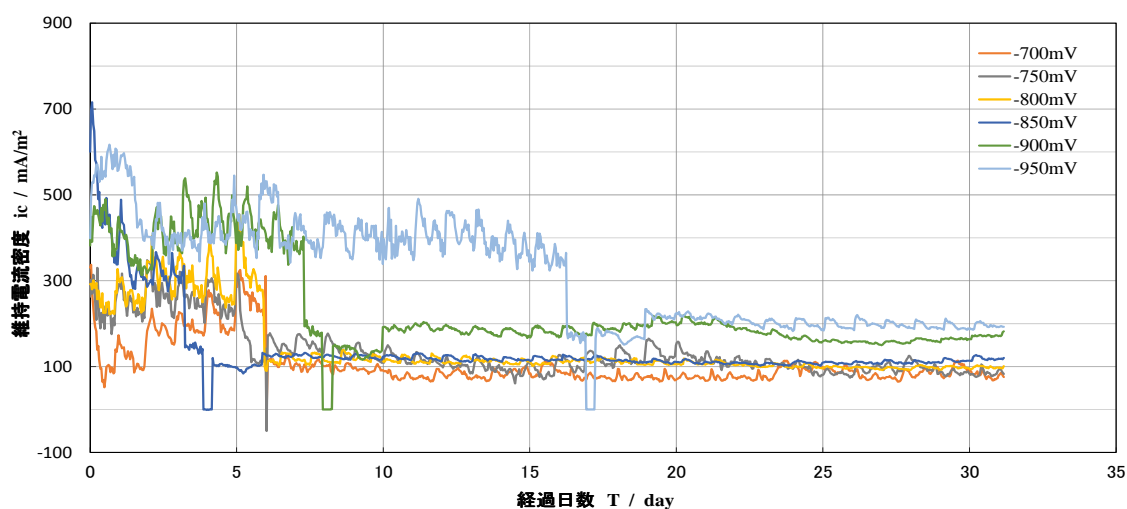


図-3.22 試験 F(TC)における維持電位による維持電流密度の経時変化

よらずほぼ 80 mA/m^2 で定常化した。一方、設定電位 -950mV は、試験開始直後に 380 mA/m^2 まで維持電流密度が上昇したが、経時的に徐々に低下し、30 日後には 150 mA/m^2 で定常化した。

試験 F(TC)と試験 S(TC)の各設定電位における維持電流密度を比較した場合、水温変化の環境下において、流水環境下の各設定電位の維持電流密度は、静止水環境下での各同じ設定電位においておよそ 1.2~1.3 倍の維持電流密度を要することが分かった。

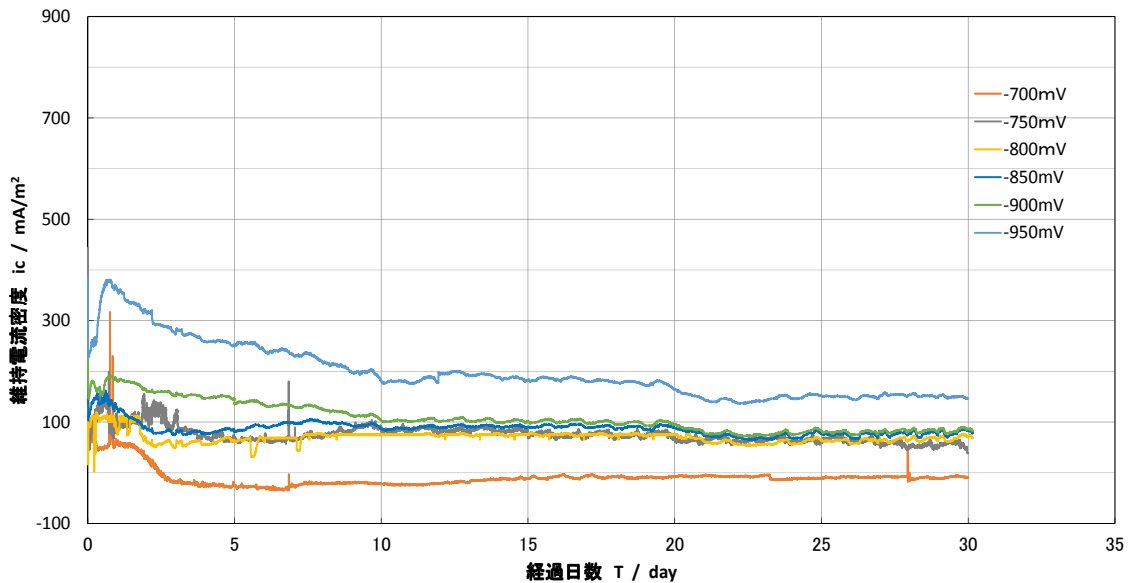


図-3.23 試験 S(TC)における自然海水温での維持電位による維持電流密度の経時変化

③鋼材の維持電位と電気防食効果（腐食速度、防食率）の比較

鋼材の電位 ($-700 \sim -950\text{mV}$) に対する電気防食の効果を防食率および鋼材の腐食速度で整理した結果を表-3.4 に示し、維持電位と腐食速度および防食率との関係を図-3.24 に示し、維持電位と腐食量との関係を図-3.25 に示す。その結果、試験 F(TC)の場合、設定電位 -750mV (約防食管理電位 -800mV (vs.SSE[SW])) において、約 98%以上の防食率であり、鋼材の腐食速度は 0.01 mm/y より小さく 0.005mm/y 程度であった。一方、試験 S(TC)の場合、設定電位 -750mV での防食率は約 93%であり、腐食速度は 0.009mm/y 程度となり、試験 F(TC)の 2 倍の腐食速度となった。これは、初期の通電量によるエレクトロコーティングの付着程度が影響しているものと考えられる。しかしながら、設定電位 -750mV において、環境条件に関係なく、鋼材の腐食速度は 0.01 mm/y 以下であった。

また、図-3.25 より、鋼材の腐食量は、設定電位 -700mV において最も大きく腐食していたが、設定電位 -750mV 以降は、流水および静止水に関係なく、腐食は大きく軽減されることが確認された。

ここで、防食率という指標について、設定電位-950mVにおいて、試験 F(TC)の腐食速度は試験 S(TC)の腐食速度が2倍程度になるにもかかわらず、試験 F(TC)の防食率が試験 S(TC)より高くなった。これは3.2節で示した防食率が電気防食の効果を適切に表しているとはいえないことを示唆している。

表-3.4 流水および水温変化における維持電位と腐食速度、防食率との関係

試験条件	SSE(mV)	腐食質量(mg)	腐食速度(mm/y)	防食率(%)
静止水 S(TC)	無防食	0.8715	0.1234	—
	-700	0.9633	0.1364	-10.5336
	-750	0.0603	0.0085	93.0809
	-800	0.0424	0.0065	95.1348
	-850	0.0375	0.0058	95.6971
	-900	0.0272	0.0042	96.8789
	-950	0.0146	0.0022	98.3247
試験条件	SSE(mV)	腐食質量(mg)	腐食速度(mm/y)	防食率(%)
流水 F(TC)	無防食	1.5521	0.2015	—
	-700	0.3622	0.0470	76.6639
	-750	0.0315	0.0041	97.9705
	-800	0.0186	0.0024	98.8016
	-850	0.0216	0.0032	99.2406
	-900	0.0226	0.0034	99.2055
	-950	0.0264	0.0039	99.0719

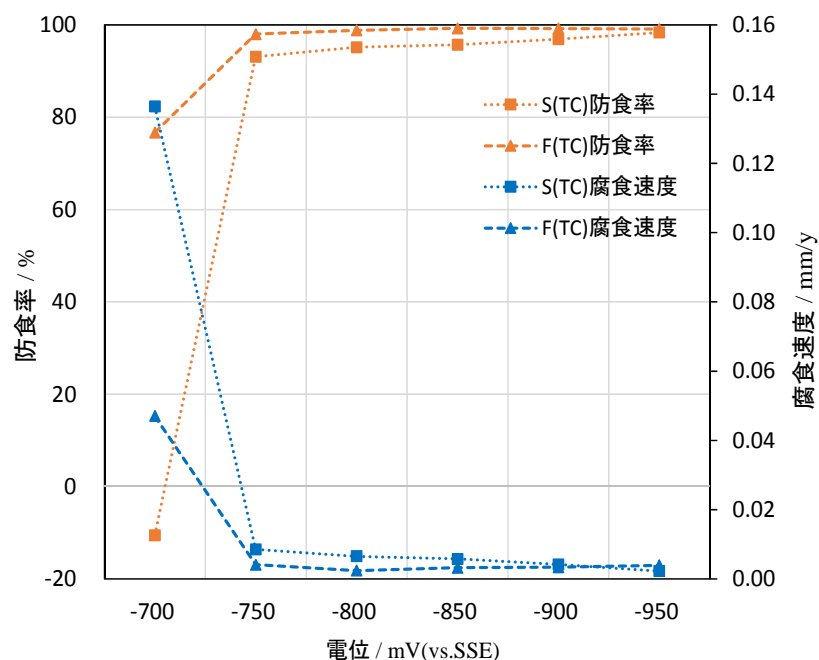


図-3.24 流水および水温変化下における維持電位と防食率、腐食速度との関係

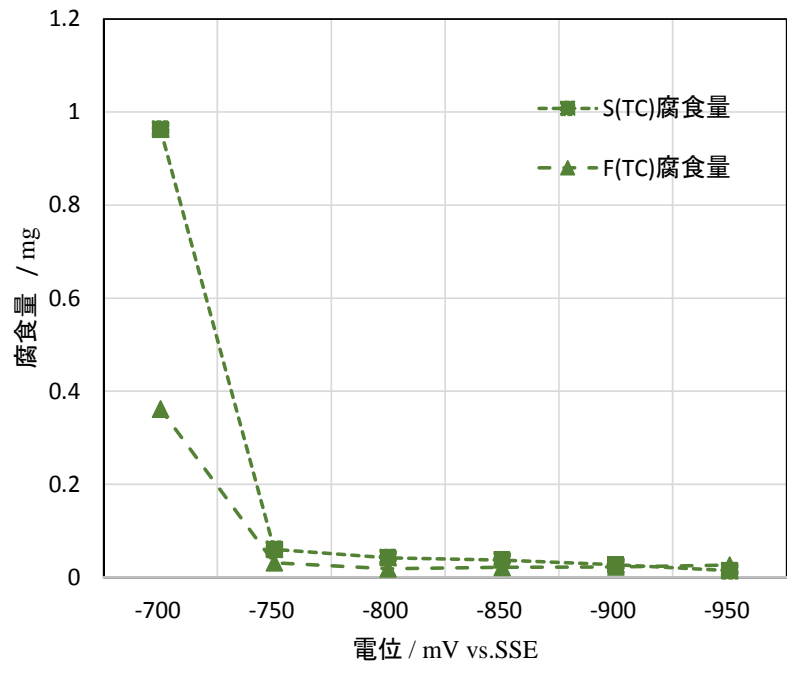


図-3.25 流水および水温変化下における維持電位と腐食量との関係

2) 試験期間の異なる同一環境下における鋼材の電位と腐食速度との関係

①鋼材の自然電位の変化

海水温 25℃一定にした場合, 試験 S(TF30)における自然電位の経時変化を図-3. 26 に示し, 試験 S(TF90)においては図-3. 27 に示す. 試験水槽に浸漬直後から-700mV の電位を示した. その後, 電位はほぼ変化せず 90 日後においても-700mV 付近であった. いずれの試験期間においても試験期間中での電位の大きな変化は見られなかった. 試験 1) からも, 静止水であることが電位を一定にさせたと考えられる.

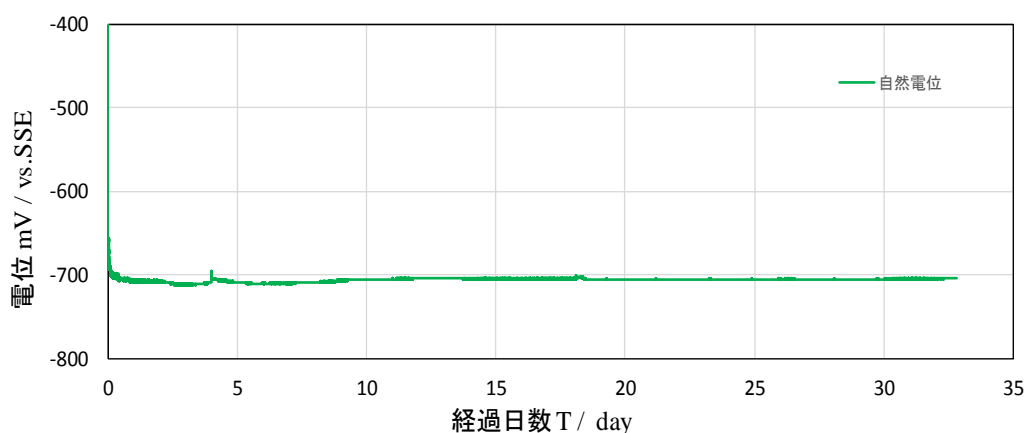


図-3. 26 試験 S(TF30)での鋼材の自然電位の経時変化

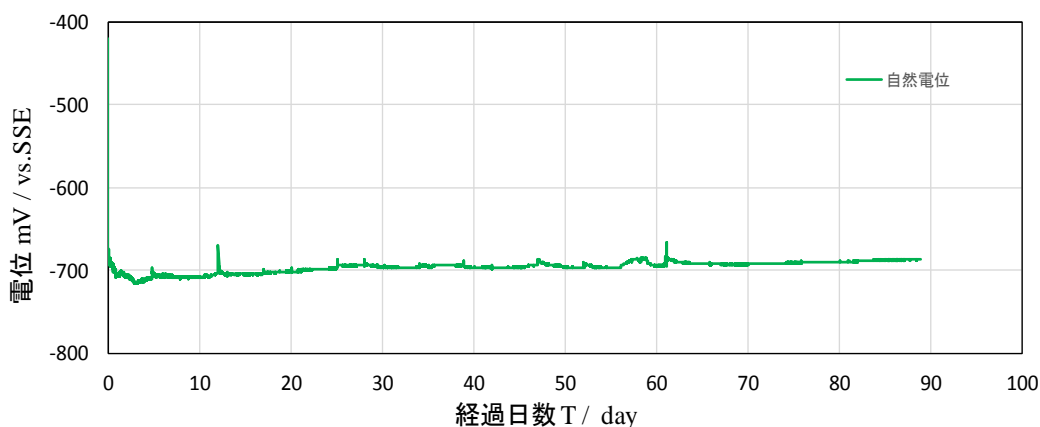


図-3. 27 試験 S(TF90)での鋼材の自然電位の経時変化

②鋼材の維持電位に対する電流密度の経時変化

試験 S(TF30)における鋼材の維持電位 (-700～ -950mV) に対する電流密度の経時変化を約1ヶ月間測定した結果を図-3.28に示す。設定電位を-700 mVにしたテストピースは、試験開始後に降下して 20 mA/m²まで電流が流出し、15日目以降から 30 mA/m²の流出する電流密度で定常化した。設定電位-750～ -800mVにおいては、3日目以降にはほぼ定常化し、その後徐々に降下し、30日目にはその電流密度は-750 mVで 50 mA/m²、-800mVで 80 mA/m²となった。設定電位-850～ -950mVにおいては、試験開始直後は電流密度の変動が大きく

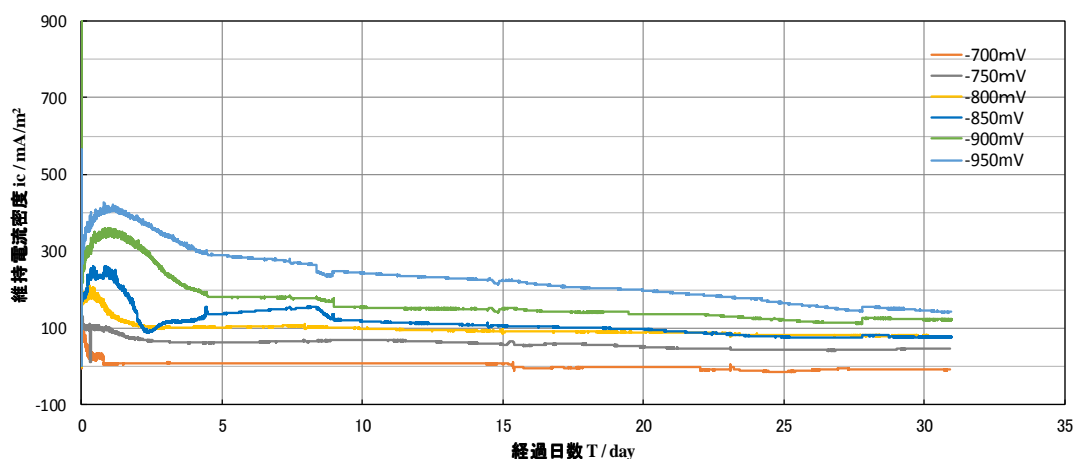


図-3.28 試験 S(TF30)での電位維持による電流密度の経時変化

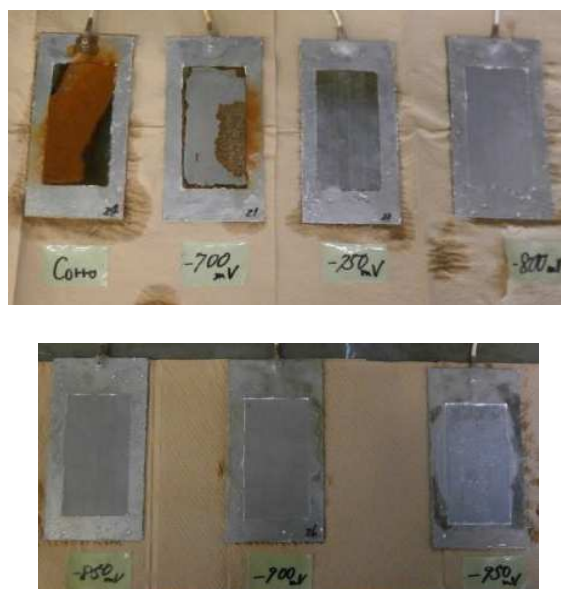


写真-3.2 試験終了直後のテストピース外観状況

5日目付近以降、維持電流密度は徐々に低減していき30日目にはほぼ定常化した。その定常化した維持電流密度は、 -850 mV で 75 mA/m^2 、 -900 mV で 120 mA/m^2 、 -950 mV で 150 mA/m^2 であった。設定電位 -800 mV および -850 mV はほぼ同じ電流密度であった。

一方、試験 S(TF90)において、設定電位 -750 mV 付近に鋼材の電位 ($-700\sim -850\text{ mV}$) を維持し、電位に対する電流密度の経時変化を約3ヶ月間測定した結果を図-3.29に示す。設定電位を -700 mV にしたテストピースは、試験開始後に降下して 20 mA/m^2 まで電流が流出し、15日目以降から 30 mA/m^2 の流出する電流密度で定常化した。設定電位 $-750\sim -800\text{ mV}$ においては、5日目以降にほぼ定常化し、その後徐々に降下し、90日目にはその電流密度は -750 mV で 60 mA/m^2 、 -800 mV で 80 mA/m^2 、 -850 mV で 85 mA/m^2 となった。90日後においても、設定電位 -800 mV および -850 mV はほぼ同じ電流密度であった。

したがって、同環境で期間の異なる電位を維持する電流密度の経時変化を測定した結果、初期に定常化する電流密度の数倍の電流密度が必要であることが分かった。設定電位 -750 mV を維持する電流密度は定常化した電流密度の5倍程度の電流密度を要した。そのことは、初期に供給する電流が不足すれば、腐食を引き起こしやすくなることを示唆している。

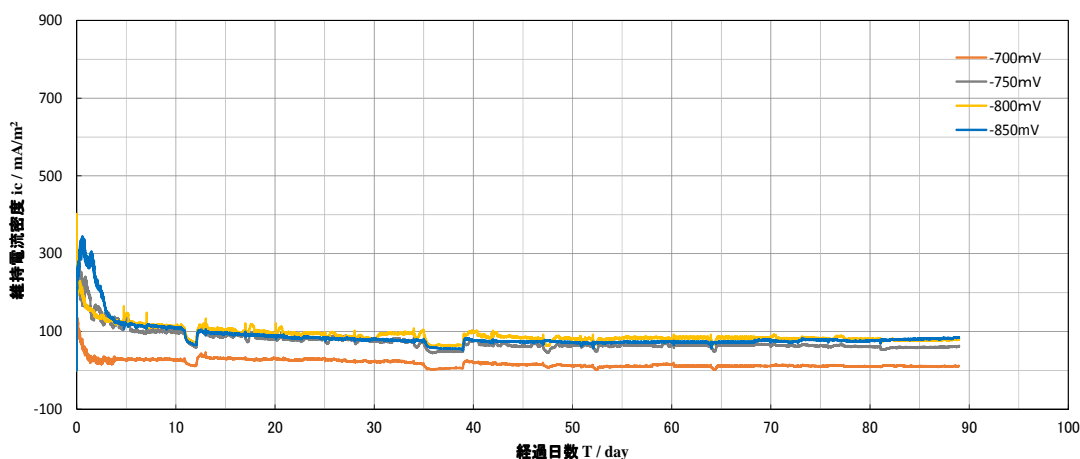


図-3.29 試験 S(TF90)での電位維持による電流密度の経時変化

③試験期間による鋼材の維持電位と電気防食の効果（腐食速度、防食率）の関係

試験 S(TF30), S(TF90)における鋼材の電位と腐食減量、防食率および鋼材の腐食速度で整理した結果を表-3.5に示し、維持電位と腐食速度および防食率との関係を図-3.30に示し、維持電位と腐食量との関係を図-3.31に示す。その結果、電位 -750 mV 以下において、約98%以上の防食率であり、試験期間が長くなれば防食率は上昇し、99%以上となった。電位 -750 mV 以下において、鋼材の腐食速度は 0.01 mm/y 以下であった。また、図-3.31より、鋼材の腐食量は、設定電位 -700 mV において最も大きく腐食していたが、設定電位 -750 mV 以降は、試験期間に関係なく、腐食は大きく軽減されていることが確認された。

試験 S(TF30), S(TF90)における鋼材の腐食量で比較した結果, 電位-700mV に設定した場合は, 鋼材の腐食量は試験期間とともに増加したが, 電位-750mV 以下に設定した場合は, 鋼材の腐食減量は試験期間に関わらず, ほぼ同じであった. これは, 電位を防食管理電位(およそ-750mV vs.SSE または-800mV (vs.SSE[SW])) 以下に維持した場合, 腐食は初期に発生したものであり, 定常状態後は腐食がほとんど進行しないことを示唆するものである.

表-3.5 試験 S(TF30), S(TF90)における維持電位と腐食速度, 防食率との関係

試験条件	SSE(mV)	腐食質量(mg)	腐食速度(mm/y)	防食率(%)
静止水+期間約30日 S(TF30)	無防食	0.7394	0.1047	—
	-700	0.4279	0.0606	42.13
	-750	0.0094	0.0013	98.73
	-800	0.0065	0.0009	99.12
	-850	0.0081	0.0011	98.90
	-900	0.0123	0.0017	98.34
	-950	0.0166	0.0024	97.75
試験条件	SSE(mV)	腐食質量(mg)	腐食速度(mm/y)	防食率(%)
静止水+期間約90日 S(TF90)	無防食	1.5187	0.0793	—
	-700	1.0622	0.0554	30.06
	-750	0.0113	0.0007	99.12
	-800	0.0084	0.0004	99.45
	-850	0.0093	0.0005	99.39

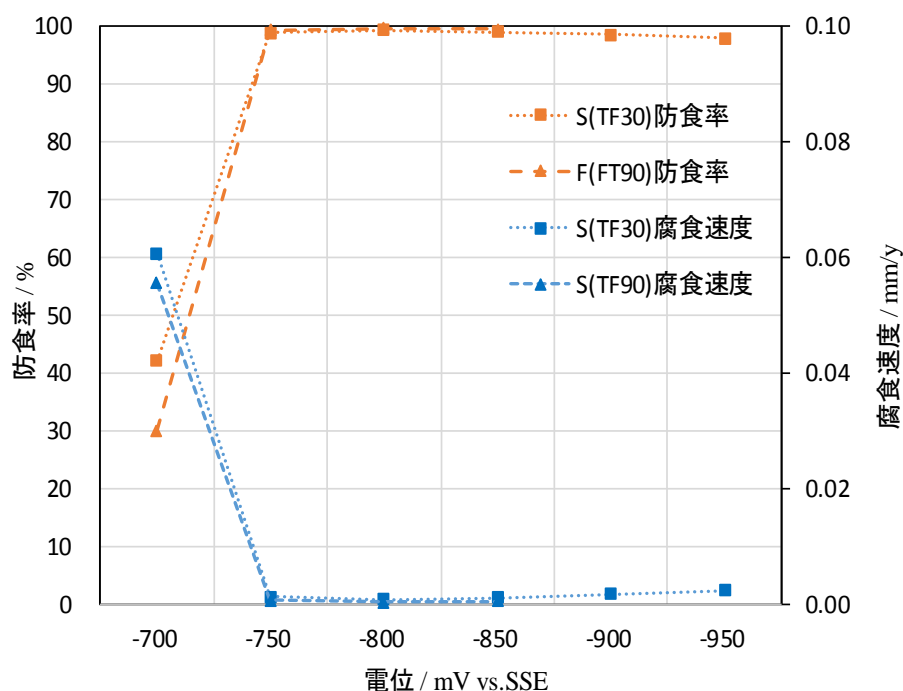


図-3.30 試験 S(TF30), S(TF90)における維持電位と腐食速度, 防食率との関係

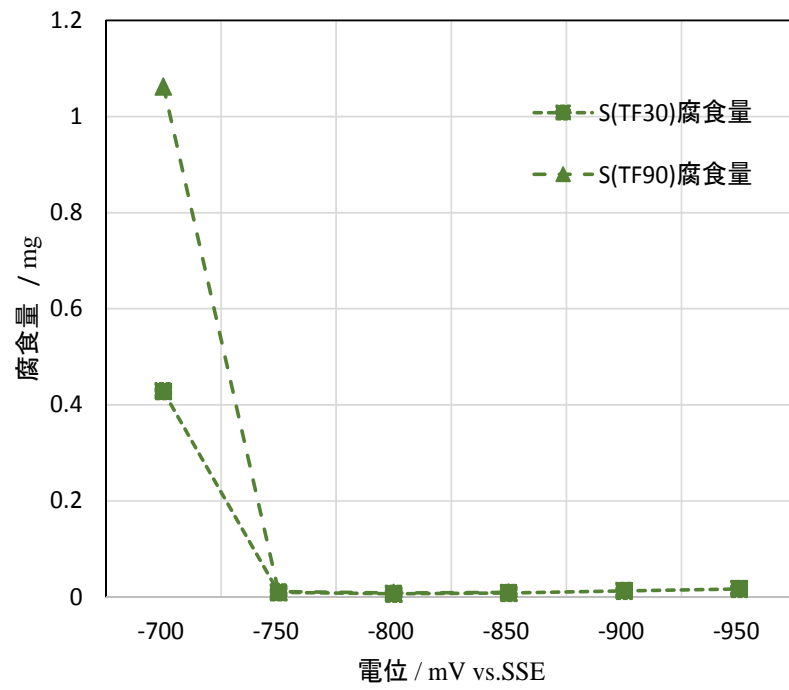


図-3.31 試験 S(TF30), S(TF90)における維持電位と腐食量との関係

3.4.3 室内実験の試験結果に対する考察

4つの設定条件、流水中かつ水温変化 (F(TC))、静止水中で水温変化 (S(TC))、静止水中水温 25°C一定 (S(TF30),S(TF90)) における鋼材の維持電位と電気防食の効果 (腐食速度, 防食率) との関係について検討し, 以下のような知見が得られた。

1) 今回の検証試験において, 水温変化による鋼材の自然電位の変化はほとんど見られなかったが, 流水による電位の貴化傾向が見られた。

2) 鋼材の電位を-750mV以下に設定した場合, 鋼材表面が $\text{Fe}(\text{OH})_2$ で覆われていたことから, 図-3.32の電位-pH図より, 鋼材表面の pHは9.5~12.5であったと考えられる。

3) 静止水中水温 25°C一定条件下において, 試験期間の異なる試験 S(TF30), S(TF90)における鋼材の腐食量で比較した結果, 電位-750mV (防食管理電位 - 800mV (vs.SSE[SW])) に設定した場合は, 鋼材の腐食量は試験期間に関わらず, ほぼ同じであった。これは, 電位を防食管理電位以下に維持した場合, 腐食は初期に発生したものであり, 定常状態後は腐食がほとんど進行しないことを示唆するものである。

4) 各設定条件下において, 鋼材の電位を-750mV (防食管理電位 - 800mV (vs.SSE[SW])) に設定した場合は, 腐食速度は0.01mm/yより小さな値であった。

以上より, 今回の検証試験において, 理論的には図-3.32の電位-pH図より pH9.5~12.5において鋼材を防食域にするためには鋼材の電位を-800mV (vs.SSE) 以下であるが, 実用上の鋼材の防食電位 (約-780mV (vs.SSE[SW])) を踏まえ, -750mV (vs.SSE, およそ防食管理電位-800mV (vs.SSE[SW])) 以下に鋼材の電位を維持すれば, その鋼材の腐食速度は0.01mm/y以下であることが分かった。

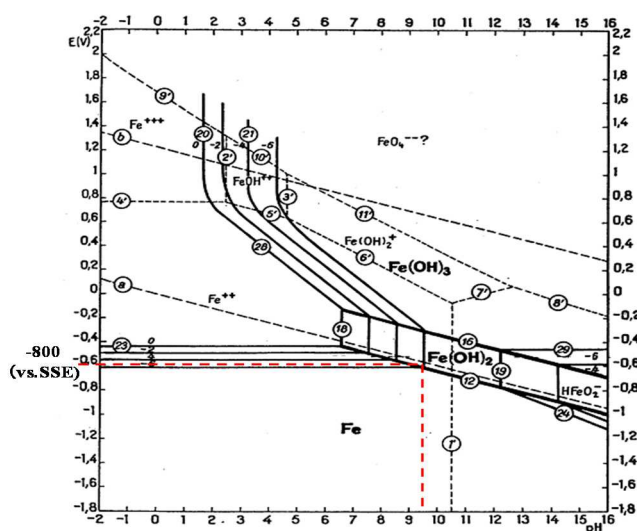


図-3.32 鉄の電位-pH線図

3.5 電気防食が適用された実港湾構造物における電気防食効果の検討

実構造物の電気防食の効果を実構造物の維持管理点検で実施される点検項目（鋼材の肉厚測定）により評価できることが望ましい。そのため、本節においては、鋼材の肉厚測定に用いる超音波法の原理を説明し、調査期間および陽極設置前の鋼材肉厚が明確な 2 施設の実港湾鋼構造物の肉厚測定結果から鋼材の腐食速度より電気防食の効果を検証した。

3.5.1 肉厚測定の概要

実港湾鋼構造物における構造物の健全度の把握、鋼材の腐食状況の把握および今後の防食対策の要否検討のために鋼材の厚み測定が実施される。その際、鋼材の肉厚測定には、ノギス等により厚みを測定することはできないため、一般的に一方向の鋼材表面から厚みを測定する超音波法により測定することが標準とされている。港湾鋼構造物の維持管理点検の詳細点検では鋼材の肉厚測定を実施し記録することになっており、定期的な鋼材の健全度を把握する点検項目になっている。表-3.6 に栈橋の鋼管杭等の詳細点検項目^{3,8)}の一例を示す。

表-3.6 詳細点検の項目の例

対象施設	点検項目		点検方法	判定基準案	
栈橋	鋼管杭等	鋼材の腐食、亀裂、損傷(防食工を施している場合)	潜水調査	a	<input type="checkbox"/> 腐食による開孔や変形、その他著しい損傷がある。 <input type="checkbox"/> 裏埋材が流出している兆候がある。
				b	<input type="checkbox"/> LWL付近に孔食がある。 <input type="checkbox"/> 全体的に発錆がある。
	c	<input type="checkbox"/> 部分的に発錆がある。			
	d	<input type="checkbox"/> 変状なし。			
			詳細調査	孔食等を変状図として整理	
		肉厚測定	超音波厚み計	測定値を記録する。	
	被覆防食工	塗装	潜水調査 ・錆、塗膜のふくれ、割れ、はがれ ・欠陥面積率	a <input type="checkbox"/> 欠陥面積率10%以上 b <input type="checkbox"/> 欠陥面積率0.3%以上10%未満 c <input type="checkbox"/> 欠陥面積率0.03%以上0.3%未満 d <input type="checkbox"/> 欠陥面積率0.03%未満	
		詳細調査 ・錆、塗膜のふくれ、割れ、はがれ	錆、塗膜のふくれ、割れ、はがれ等を変状図として整理する。		

3.5.1.1 測定方法

1) 超音波法の測定原理及び種類

超音波による鋼材の肉厚測定とは、超音波を利用して鋼材の肉厚を片面から測定する非破壊的な測定方法であり、現在では「パルス反射法」が主流となっている。

このパルス反射式超音波厚さ測定の原理は「測定物中を超音波パルスが往復する時間を測定し表示する」ことである。図-3.33 を用いてこの原理を説明する。

厚さ D の測定物中に探触子から超音波パルスが送信される。この超音波は、測定面で反射し表面エコー (S) を発生し残りの超音波パルスは測定物中を進み、裏面で反射して底面エコー (B) を発生する。このエコーが同じ経路を進んで、探触子で受信される。表面エコーと底面エコー間の時間を測定すれば、伝搬時間 (t) を得ることができる。これら t (μs),

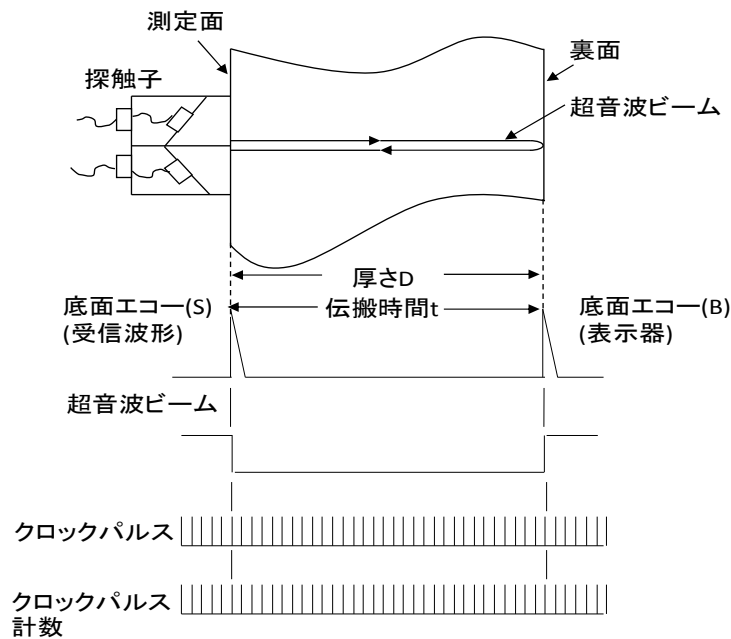


図-3.33 超音波厚さ測定の原理

表-3.7 各種材料の伝搬速度の一覧表

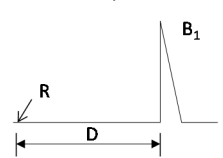
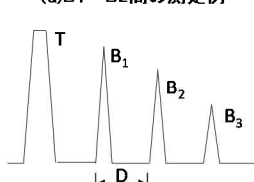
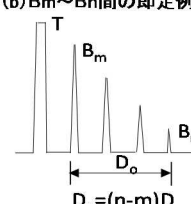
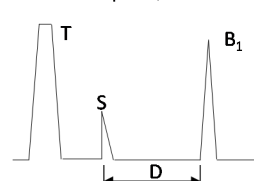
材質	比重	縦波速度 m/s	横波速度 m/s
鋼	7.7	5900	3230
鋳鉄	7.2	3500~5600	2200~3200
ステンレス鋼(304)	7.91	5790	3100
ステンレス鋼(410)	7.67	7390	2990
アルミニウム	2.7	6300	3130
黄銅	8.6	4700	2100

D (mm), および測定物の固有の音速 C (km/s) との間には次式が成り立つ. 測定物の固有の伝搬速度を表-3.7 に示す.

$$t = \frac{2 \times D}{C} \dots\dots(3.5)$$

この式から超音波パルスで鋼材の肉厚を測定するときの誤差は, 測定対象の伝搬速度に依存することが分かる. したがって, 校正した試験片と測定対象との材質が異なる場合や, 温度が著しく異なる場合は補正を行わなければならない. なお, この t を得る方式には主に 3 種類あり JIS Z 2355「非破壊試験—超音波厚さ測定」から引用して表-3.8 にまとめ, 組み合わせる探触子について図-3.34 に示す. 港湾鋼構造物の肉厚測定方式として, 表面エコー・第 1 回底面エコー方式, 使用する探触子は送・受信振動子別々になっていることから, 薄い測定物の測定が可能であるため, 使用される場合が多い.

表-3.8 厚さ測定方式と種類

厚さ測定方式の種類	厚さ測定に用いるエコーの種類	JIS Z 2344の基本表示の図形
零点・第1回エコー方式 (R~B ₁)方式	既知の厚さによって校正した零点を設定し、それと第1回底面エコーとの間隔から測定物の厚さを求める	R~B ₁ の測定例 
多重エコー方式 (B _m ~B _n)方式	多重エコーのうち、B ₁ とB ₂ との間隔から厚さを求めるか、B _m とB _n との間隔から(n-m)で除して厚さを求める。 $D = \frac{D_0}{n - m}$ ここで D:測定物の厚さ D ₀ :m回からn回までの厚さ m及びn:底面エコーの回数	(a)B ₁ ~B ₂ 間の測定例  (b)B _m ~B _n 間の即定例 
表面エコー・第1回底面エコー方式 (S~B ₁)方式	既知の厚さによって校正した零点を設定し、それと第1回底面エコーとの間隔から測定物の厚さを求める	R~B ₁ の測定例 

備考 表中の記号

R: 補正した零点 B₁, B₂, ..., B_m, B_n: 底面エコー

T: 送信パルス S: 表面エコー

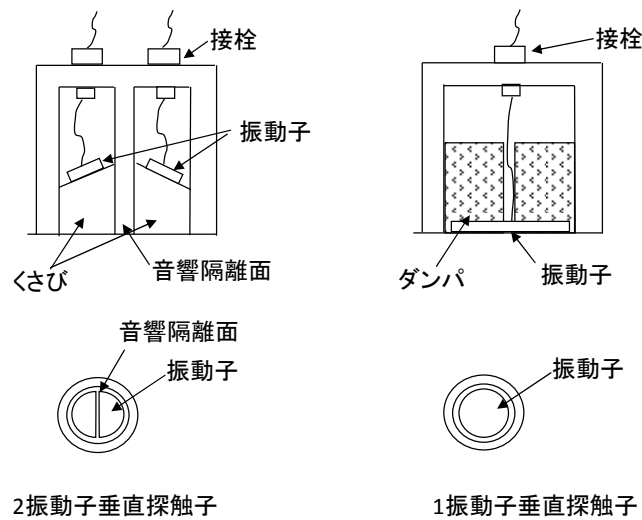


図-3.34 探触子の形状

2) 測定方法及び測定誤差

鋼材の肉厚測定は図-3.35 に示す手順で測定を行うことが一般的である。

肉厚測定器は、測定する対象物の伝搬速度（例えば鋼の場合：5920m/s 等）に合っていることを確認し、合っていない場合は操作キーにより設定する。次に校正用試験片を用いて、その試験片に少量の接触媒質を塗布し、探触子を接触させて、表示値が校正用試験片の厚みを表示するか確認する。表示値が校正試験片の厚みを表示しない場合は、校正キーにより表示値が校正試験片の厚みを表示するまで繰り返し操作する。

また、測定点やその付近の表面の素地調整として、はく離の錆や、塗装は取り除き、グラインダ等によりなるべく平滑にする。測定面の粗さに対しては表-3.9 を従い測定を行う。測定の終了時または1時間ごとに校正値を確認し、初めの校正値から0.3mmを超えていないかを確認する。

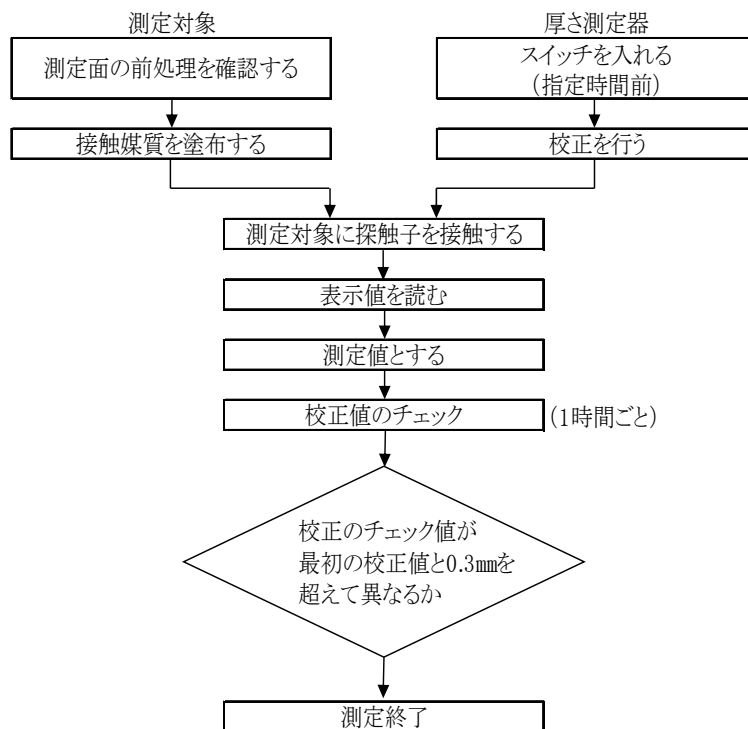


図-3.35 厚み測定の手順

表-3.9 測定面の粗さによる測定法

測定面の粗さ		
6.3a(25S)未満	6.3～25a(25～100S)	25a(100S)を超えるもの
規定しない	濃度75%以上のグリセリン水溶液 又はこれと同等以上の音響結合 が得られるもの。	測定面を25a(100S)以下に仕上 げて、左欄と同様のものを使用す る。

3) 港湾鋼構造物における測定方法

① 肉厚測定箇所の選定

港湾鋼構造物の腐食は、ほとんどが平滑な腐食ではなく、腐食生成物や海洋付着生物の付着状況や環境条件により局部腐食や孔食が生じる。そのため測定箇所は、防食の劣化、損傷状況を十分に考慮し、目視観察の結果を踏まえ、鋼材の腐食状況を確認した上で最適な位置を選定するのが望ましい。

しかしながら、実際には一般的な腐食状況を考慮し表-3.10に示す理由により標準的な肉厚測定箇所(図-3.36)で測定が実施される場合が多い。ただし、L.W.L.またはL.W.L.-1m付近まで被覆防食が適用されている場合は、その直下付近を測定箇所とするなど構造物の形状や防食対策に合わせた測定箇所の選定が行われている。

ここで、標準的な肉厚測定箇所について代表的な鋼材である鋼管杭および鋼矢板について説明する。

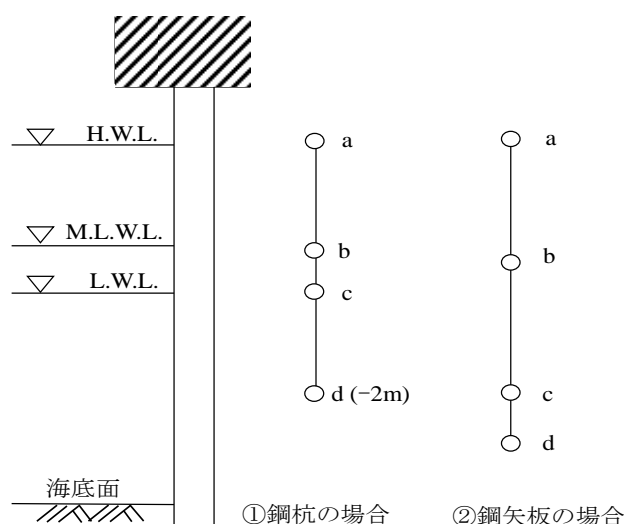


図-3.36 肉厚測定箇所の標準

表-3.10 肉厚測定位置選定理由

記号	選定理由	
鋼管杭	a	応力が大きく、H.W.L.付近で腐食量も大きい
	b,c	応力が大きく集中腐食が生じやすい箇所であり、断面剛性が構造物の応力解析結果に大きく影響するため、最大腐食量をできるだけ正確に把握する必要がある。M.L.W.L.～L.W.L.付近の最も腐食しやすい箇所を選定する必要がある。
	d	-2m以深では腐食速度はあまり変化せず、応力解析結果に及ぼす影響が小さい
鋼矢板	a	海水の飛沫を浴び酸素供給量も十分で腐食量大きい
	b	集中腐食が生じる
	c,d	最大応力は海水中で発生することから、最大腐食量を把握するために海水中は2点選定する。構造上、最大曲げモーメント発生箇所、セル構造の場合は引張応力が最大となる海底付近を測定箇所とする。

② 肉厚測定点の選定

肉厚測定点は、鋼材の同一断面内で肉厚を測定する点のことで、肉厚測定点の測定値は測定箇所断面形状を与える。肉厚測定点は、鋼材の形状に合わせて図-3.37の位置を標準としている。

また、各測定点において、公称厚さが一様な10×10 cmの範囲内で5点あるいは3点に超音波厚さ計の探触子を当てて肉厚を測定し、それらの平均値をその肉厚測定点の厚みとしている。腐食量は局所的にはばらつきがあるが、それを詳細に表現するよりは平均値で扱った方が実際的事から、ある範囲での測定値は平均値を求めるため数点に肉厚計の探触子を当てて測定することとしている。

孔があった場合は、その点を肉厚測定点の1点に選定し厚みを0とする。溶接により補修されているような場合は、その箇所は測定点から避けるものとされている。

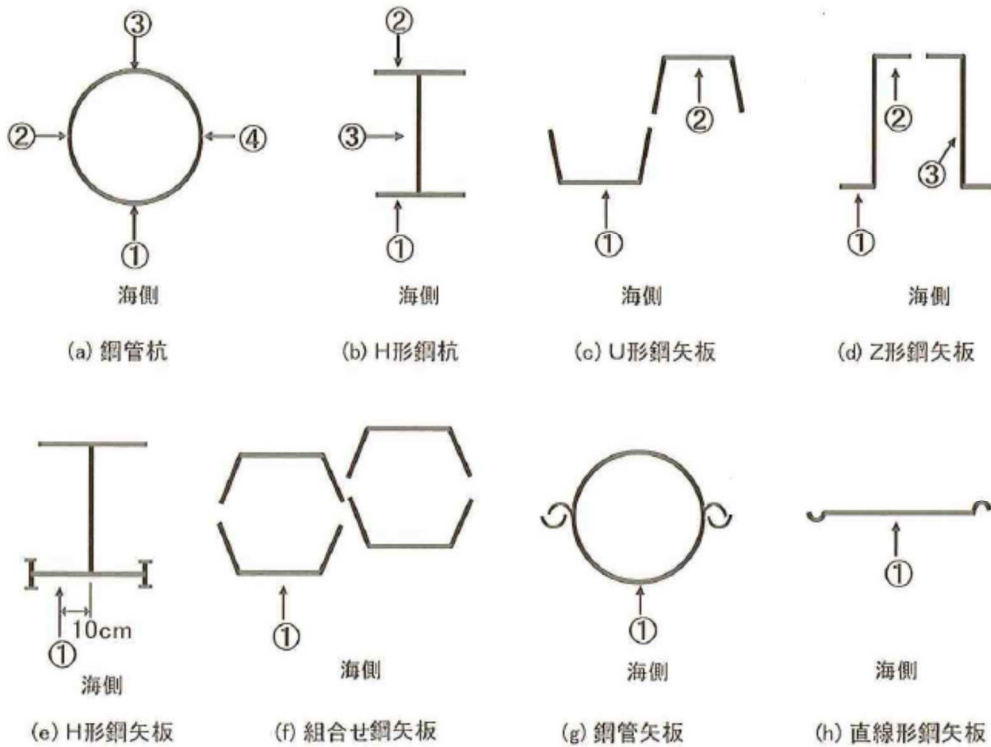


図-3.37 鋼材の肉厚測定点の標準

4) 鋼管杭及び鋼矢板製品の許容差

鋼管杭及び鋼矢板製品の厚みの許容差について、JIS に規定されている。表-3.11 に鋼管杭の厚さ許容差 (JIS A5525) を示し、表-3.12 に鋼矢板の厚さ許容差 (JIS A5528) に示す。鋼管杭において、厚みの許容差は鋼管杭の外径および指定厚さによりその許容差が規定されている。規定値としてプラス側 (厚みを増す側) には規定されておらず、マイナス側 (厚みを減ずる側) は最大で-1.0mm まで認められている。近年の製造技術向上がめざましく、マイナス側の許容差を目標に製造されているといわれている。

一方、鋼矢板においても、断面形状および指定厚さにより厚さの許容差が規定されている。鋼管杭の許容差と違いプラス側 (厚みを増す側) も許容されており、指定厚さが増すごとに許容差が大きくなり規定されている。

しかしながら、実際の厚み測定においては、実際に使用された鋼管または鋼矢板の初期の厚みを用いられる場合はほとんど無く、構造設計による設計厚さ (公称厚さ) を元厚として用いている。

表-3.11 鋼管杭の厚さ許容差

区分		許容差	摘要
厚さ	厚さ16mm未満	外径500mm未満	+規定せず -0.6mm
		外径500mm以上 800mm未満	+規定せず -0.7mm
		外径800mm以上 2000mm以下	+規定せず -0.8mm
	厚さ16mm以上	外径800mm未満	+規定せず -0.8mm
		外径800mm以上 2000mm以下	+規定せず -1.0mm

表-3.12 鋼矢板の厚さ許容差

項目	断面形状					
	直線形	U形	ハット形	Z形	H形	
厚さ	10mm未満	+1.5mm	+1.0mm	±1.0mm		
		-0.7mm	-0.3mm			
	10mm以上 16mm未満	+1.5mm	+1.2mm	±1.2mm		
		-0.7mm	-0.3mm			
16mm以上	—	+1.5mm -0.3mm	±1.5mm			

3.5.2 肉厚測定時の素地面調整における削りしろの検証実験

鋼材の肉厚測定を実施する前に鋼材面の前処理として、素地面調整が実施される。素地面調整は、一般的には1回の測定につき30~100 μm であるとされている^{3.11)}。しかしながら、施設の維持管理が長くなればなるほど、維持管理点検として肉厚測定を実施する回数が増える。そのため、継続的に電気防食が適用される施設の肉厚測定により鋼材の減肉量を基に電気防食の効果を把握するためには、素地面調整による削りしろを把握する必要があると考える。

ここで、測定箇所の鋼材の肉厚を予め測定し、肉厚がわかっている試験片を用いて、水中で実際の構造物を素地面調整している要領にて、水中で素地面調整を実施した。その鋼材を水中で超音波測定を実施することで、素地面調整による削りしろを把握した。なお、実構造物の状況を考慮し、試験片は、約2.7年間干満水槽に暴露した無防食の試験片と電気防食を設置と同時に適用した試験片を用いて実施した。

測定結果を表-3.13にまとめた。電気防食を適用した鋼材の素地面調整による削りしろは40~100 μm の範囲にあり、平均55 μm であった。また、無防食の鋼材の素地面調整による削りしろは80~290 μm の範囲にあり、平均200 μm であった。これは、図-3.38に示すように防食された鋼材は比較的平滑であるため素地面調整による削りしろは小さいが、無防食の鋼材は凹凸が大きく肉厚測定するための素地面調整による削りしろが大きくなることと一致している。

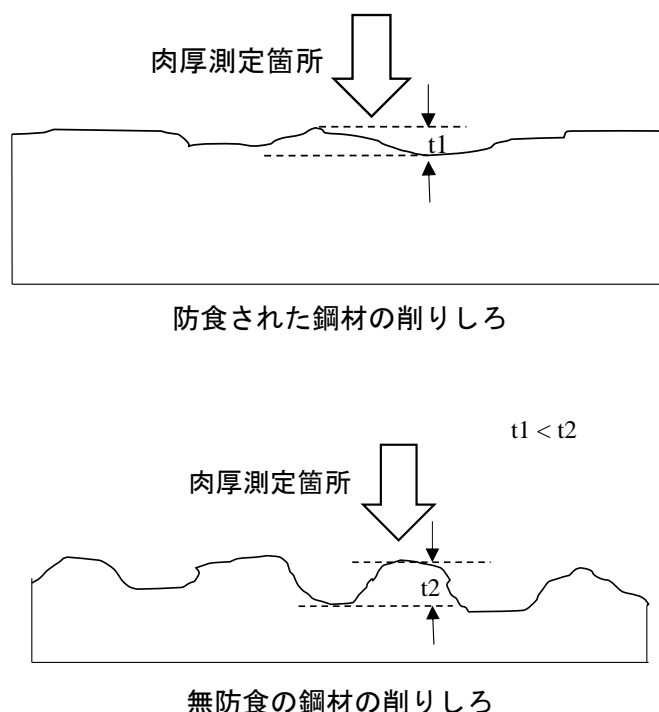


図-3.38 防食された鋼材、無防食の鋼材の肉厚測定時の素地面調整の概要

表-3.13 肉厚測定時の素地面調整による削りしろ

試験片	調査箇所	元厚(mm)	調整前肉厚 (mm)	調整後肉厚 (mm)	削りしろ (mm)	削りしろ (μm)	削りしろ 平均値 (μm)
電気防食	1	2.85	2.79	2.75	0.04	40	55.0
	2	2.85	2.79	2.75	0.04	40	
	3	2.85	2.80	2.75	0.05	50	
	4	2.85	2.79	2.73	0.06	60	
	5	2.85	2.81	2.77	0.04	40	
	6	2.85	2.82	2.78	0.04	40	
	7	2.85	2.82	2.72	0.10	100	
	8	2.85	2.79	2.72	0.07	70	
無防食	1	2.89	2.76	2.68	0.08	80	200.0
	2	2.89	2.73	2.44	0.29	290	
	3	2.89	2.70	2.44	0.26	260	
	4	2.89	2.64	2.41	0.23	230	
	5	2.89	2.67	2.53	0.14	140	
	6	2.89	2.72	2.47	0.25	250	
	7	2.89	2.65	2.40	0.25	250	
	8	2.89	2.56	2.46	0.10	100	



写真-3.3 電気防食した鋼材と無防食の鋼材の素地面調整した鋼材表面状況

3.5.3 実港湾構造物による鋼材の肉厚からの電気防食効果の検証

鋼管杭及び鋼矢板は製品に許容差があることから、実港湾鋼構造物における電気防食の効果を確認するために、製品による許容差を除く必要がある。そのため、調査実施前の鋼材肉厚が明確（以前に実測されている）な施設（三河港，横浜港）の調査時の肉厚測定結果から鋼材の腐食速度，防食効果および電位の関係を検証した。

3.5.3.1 三河港岸壁に設置された鋼管矢板の電気防食効果

1) 調査施設の概要

調査対象は，1981年に建造され，下部工に鋼管矢板（ $\phi 914.4\text{ mm}$ $t 14.0\text{ mm}$ ）が打設された計画水深 -12.0 m の延長 260 m の岸壁である。上部工下端からL.W.L. -1.0 m までタールエポキシ樹脂により被覆防食が施され，それ以深から電気防食が建設当時から適用され，計画的に陽極の更新が実施されている。施設の断面および調査位置の概要を図-3.39に示す。なお，電気防食の設計において，初期防食電流密度は海水中部 100 mA/m^2 と海底土中部 20 mA/m^2 が設定されている。

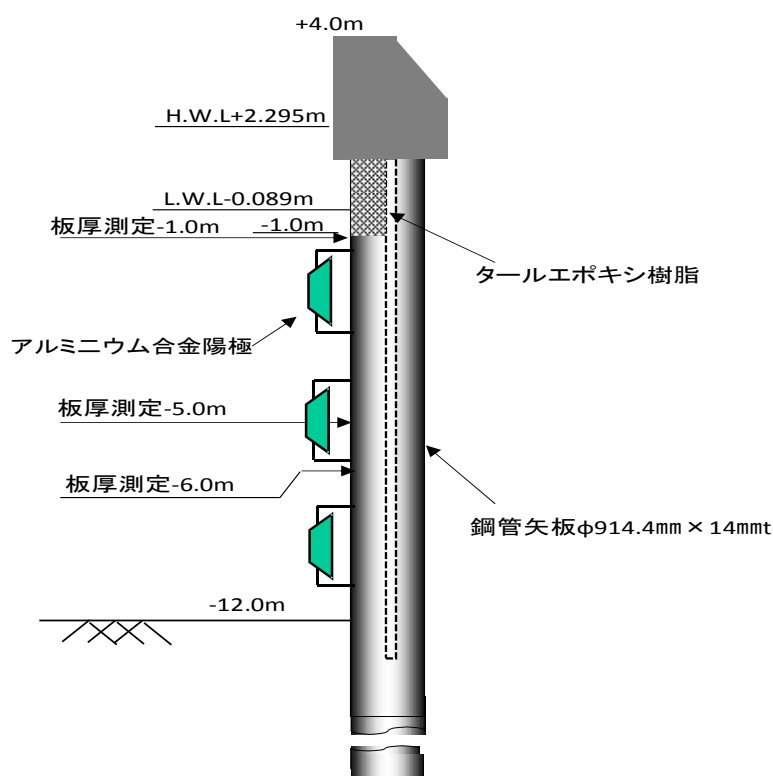


図-3.39 断面図および板厚測定位置図

2) 電位測定結果

電気防食の陽極更新（取替え）前後に実施した電位測定の結果を表-3.14 に示す。また、各測定地点の水深別平均値を図-3.40 に示す。これより、電気防食の陽極更新前の電位は、-996～ -1006mV (vs.SSE[SW]) の範囲にあり、施設全体で防食管理電位 (-800mV vs.SSE[SW]) を大幅に下回っており、良好な防食状態であった。また、陽極更新1週間後の電位は、-1049～ -1058mV (vs.SSE[SW]) となっており、陽極閉路電位 (-1050mV vs.SSE[SW]) に近い値となった。陽極の更新前より防食管理電位を下回っており、前回10年前に陽極が更新されてから良好な防食状態が維持されてきたと考えられる。

表-3.14 陽極更新前後の水深別電位測定結果

測定深度	陽極更新前						陽極更新後					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
+ 1.0 m	-999	-997	-1000	-998	-996	-1001	-1049	-1046	-1049	-1051	-1049	-1051
± 0.0 m	-1000	-998	-1001	-1002	-1000	-1003	-1051	-1048	-1050	-1052	-1051	-1052
- 1.0 m	-1001	-999	-1001	-1003	-1001	-1004	-1054	-1052	-1053	-1056	-1056	-1055
- 2.0 m	-1002	-1003	-1003	-1003	-1006	-1005	-1058	-1053	-1056	-1056	-1055	-1062
- 3.0 m	-1005	-1004	-1003	-1004	-1006	-1004	-1057	-1056	-1057	-1057	-1050	-1061
- 4.0 m	-1004	-1004	-1004	-1005	-1005	-1006	-1055	-1052	-1054	-1056	-1049	-1056
- 5.0 m	-1004	-1005	-1004	-1006	-1004	-1005	-1057	-1052	-1054	-1060	-1053	-1057
- 6.0 m	-1004	-1005	-1005	-1005	-1004	-1003	-1061	-1053	-1057	-1062	-1055	-1058
- 7.0 m	-1003	-1004	-1004	-1004	-1003	-1003	-1066	-1054	-1058	-1061	-1054	-1057
- 8.0 m	-1002	-1003	-1004	-1004	-1002	-1003	-1068	-1056	-1057	-1058	-1053	-1057
- 9.0 m	-1001	-1003	-1002	-1004	-1002	-1002	-1065	-1055	-1049	-1053	-1048	-1052
-10.0 m	-1001	-1002	-1000	-1003	-1001	-1002	-1060	-1052	-1049	-1053	-1046	-1047
-11.0 m	-1000	-1002					-1054	-1047				
-12.0 m												

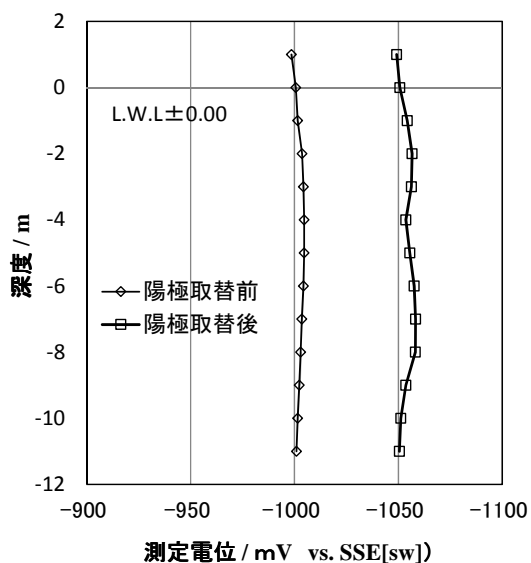


図-3.40 電気防食取替え前後の水深別平均電位

3) 肉厚測定結果および防食時の腐食速度

鋼管矢板の肉厚測定は、超音波式肉厚測定器を用いて実施した。なお、肉厚測定箇所は10年前（2002年実施）に肉厚測定を実施した同じ箇所で、追跡調査を実施した。

2002年と2012年に実施した肉厚測定結果の比較を表-3.15に示す。また、各測定地点の水深別平均肉厚測定結果を図-3.41に示す。

また、素地調整を考慮した場合の各測定水深別の平均腐食速度を図-3.42に示す。項3.5.2の結果を基に素地調整による鋼材の削りしろを $55\mu\text{m}$ とした場合、平均腐食速度は $0.017\sim 0.029\text{mm/y}$ の範囲にあり、削りしろが $200\mu\text{m}$ とした場合、平均腐食速度は $0.003\sim 0.016\text{mm/y}$ の範囲にあった。電気防食を適用した場合の鋼材の腐食速度は、減肉量が小さいため、肉厚測定時の鋼材表面の素地調整による削りしろが大きな影響を与えていることが分かった。

表-3.15 水深別肉厚測定結果および腐食速度

調査水深 (m)	公称元厚 (mm)	平均肉厚(mm)		電気防食時の腐食量(mm)	素地面調整を考慮した腐食速度(mm/y)	
		2002年	2012年		$55\mu\text{m}$	$200\mu\text{m}$
-1.0	14.0	13.82	13.56	0.26	0.017	0.003
-5.0		13.74	13.45	0.29	0.011	0.005
-6.0		13.81	13.41	0.4	0.026	0.016

素地面調整の削りしろを $55\mu\text{m}$ ($=0.055\text{mm}$)の場合と $200\mu\text{m}$ ($=0.2\text{mm}$)の場合として腐食速度を算出した。

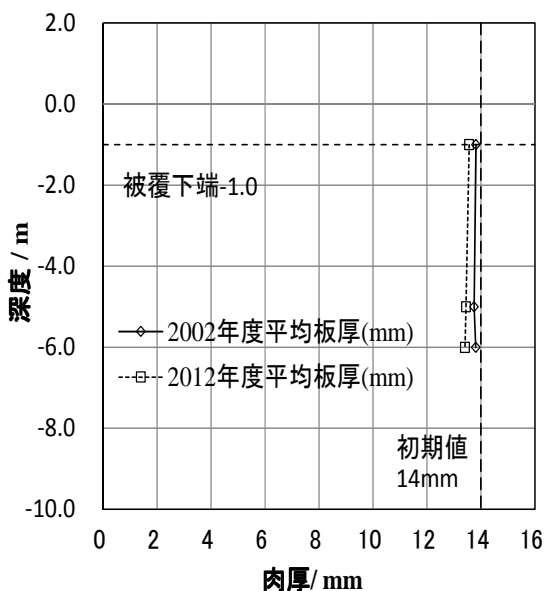


図-3.41 鋼材の平均現有肉厚

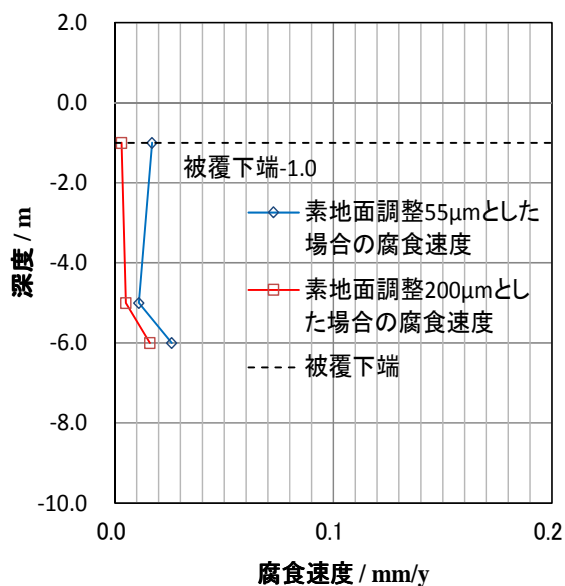


図-3.42 鋼材の平均腐食速度

4) 電気防食適用時の防食効果

テストピースによる電気防食の効果を算出するために用いた式 3.4 を用いて、電気防食が適用された試験前後の質量の代わりに 10 年経過前後の肉厚より電気防食の効果を表す式 3.6 (肉厚からの防食効果) を用いて評価を行った。

$$\text{防食効果 PE(\%)} = \frac{T_1}{T_0} \times 100 \cdots (3.6)$$

ここで、2012 年測定肉厚 : T_1 (mm), 2002 年測定肉厚 : T_0 (mm) である。

その結果を図-3.43 に示す。素地調整を考慮しない場合、防食効果は、97.1~98.3%となった。また、素地面調整による鋼材の削りしろを考慮した場合、削りしろ 55 μm とすると、防食効果は、97.5~98.7%に上昇し、削りしろ 200 μm とすれば、防食効果は、98.5~99.7%になり、高い防食効果を示した。肉厚測定時の鋼材表面の素地調整による削りしろが大きな影響を与えていることが分かった。防食効果についても、肉厚測定時の鋼材表面の素地調整削りしろが大きな影響を与えていることが分かった。

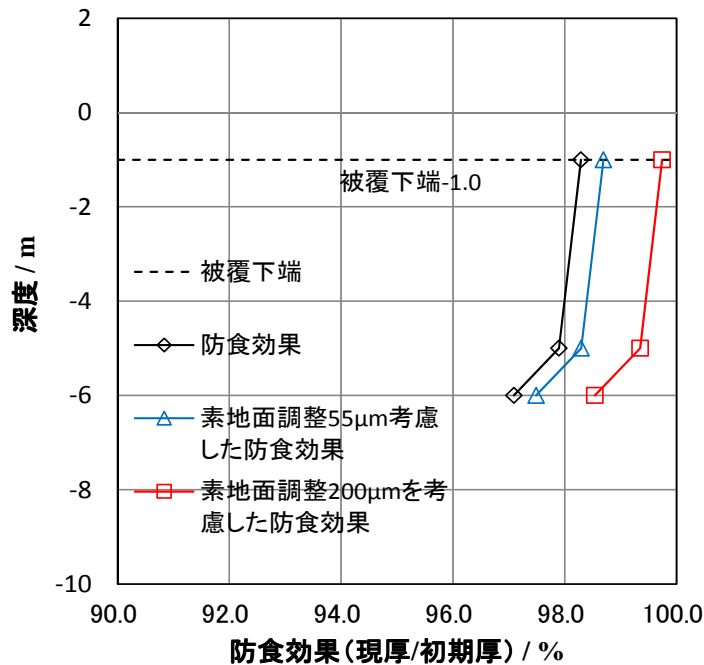


図-3.43 電気防食適用時の防食効果

3.5.3.2 横浜港岸壁に設置された鋼管杭の電気防食効果

1) 調査施設の概要

調査対象は、1975年1月に建造され、下部工に鋼管杭（φ1050～1200mm t12.0mm）が打設された計画水深-12.0mの延長300mの岸壁である。上部工下端からL.W.L.±0.0mまでモルタルにより被覆防食が施され、それ以深から電気防食が建設当時（1976年2月）から適用され、計画的に陽極の更新が実施されている。施設の断面および調査位置の概要を図-3.44、図-3.45に示す。なお、電気防食の設計において、初期防食電流密度は海水中部130 mA/m²と海底土中部26 mA/m²が設定されている。

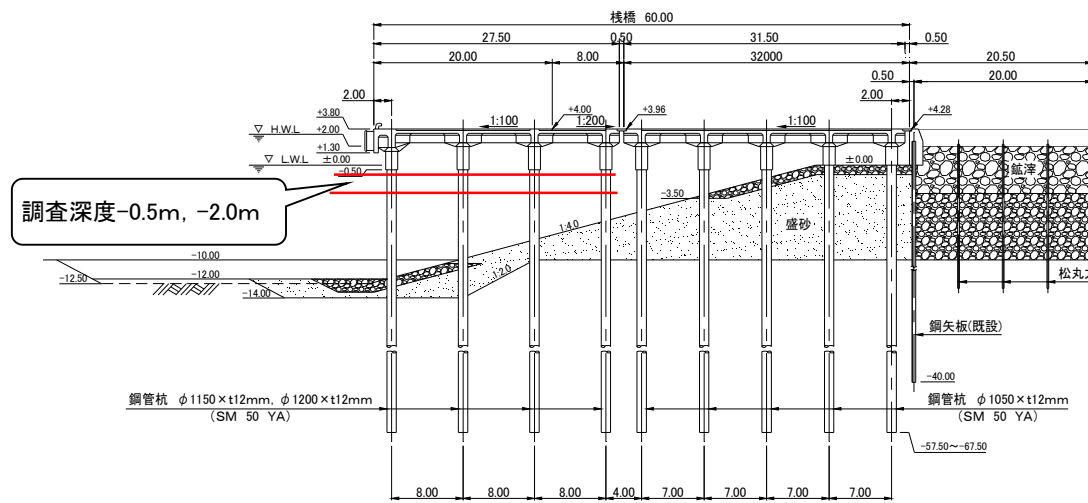


図-3.44 調査施設の断面及び調査水深

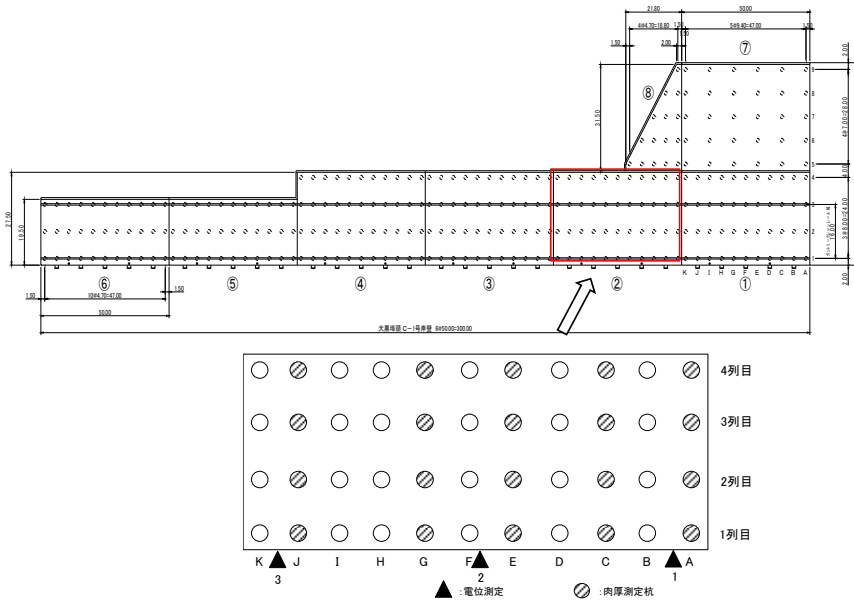


図-3.45 棧橋平面図と電位測定および肉厚測定箇所位置図

2) 電位測定結果

陽極は平成12年(2000年)3月に4回目の更新が実施されている。電位測定的位置を図-3.45に示し、結果を図-3.46に示す。なお、電位測定結果が表している期間は、施設点検調査で肉厚測定が実施された期間を表した。H14年以降電位は、 -1000mV (vs.SSE[SW])以下であった。また、直近(2017年)の電位測定結果を表-3.16に示す。これより、電位は、 $-1004\sim -1060\text{mV}$ (vs.SSE[SW])の範囲にあり、調査ブロック全体で防食管理電位 -800mV (vs.SSE[SW])を大幅に下回っており、良好な防食状態であった。

表-3.16 2017年度の水深別電位測定結果

水深 (m)	測定位置		
	1	2	3
±0.0	-1037	-1060	-1019
-1.0	-1041	-1060	-1010
-2.0	-1040	-1060	-1010
-3.0	-1042	-1054	-1011
-4.0	-1042	-1051	-1013
-5.0	-1044	-1050	-1014
-6.0	-1043	-1050	-1015
-7.0	-1040	-1052	-1011
-8.0	-1040	-1054	-1012
-9.0	-1036	-1060	-1008
-10.0	-1034	-1058	-1004
-11.0	-1033		

単位:mV

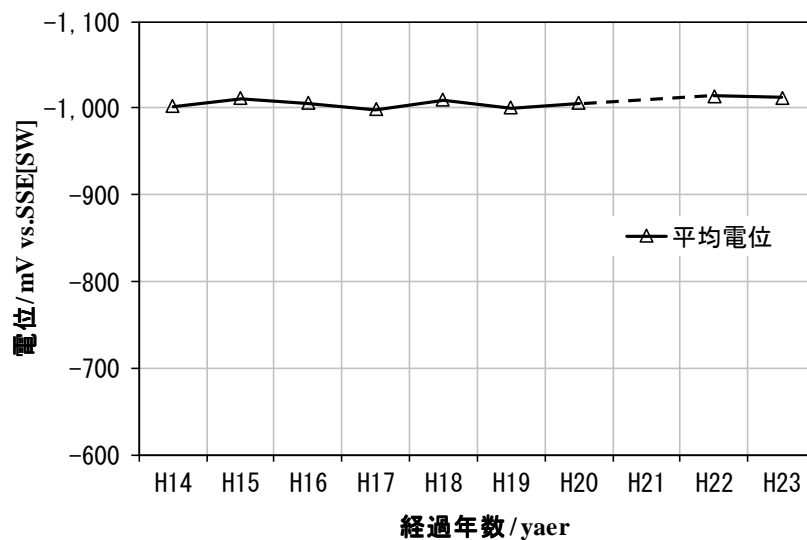


図-3.46 平均電位の経時変化

3) 肉厚測定結果および防食時の腐食速度

鋼管杭の肉厚測定は、超音波式肉厚測定器を用いて実施した。なお、H22年度に実施した肉厚測定箇所はH13年度に肉厚測定を実施した同一箇所、追跡調査を実施した。

H13年度とH22年度に実施した肉厚測定結果および腐食速度一覧表を表-3.17に示す。また、素地調整による削りしろ55 μm の場合の平均腐食速度を図-3.47に示し、削りしろ200 μm の場合の平均腐食速度を図-3.48に示す。削りしろ55 μm の場合、平均腐食速度は、-0.027~0.008mm/y、削りしろ200 μm の場合、平均腐食速度は、-0.043~-0.009mm/yとなった。腐食速度がマイナスになる場合、H13年度測定時の鋼材の肉厚が厚かったことや素地調整による削りしろが小さかったことが考えられる。しかしながら、いずれの場合においてもH13年度とH22年度で鋼材の肉厚がほとんど減肉しなかったこと表している。また、削

表-3.17 平均肉厚および腐食速度

	測定水深	年度	平均肉厚 (mm)	素地調整を考慮した 平均肉厚(mm)		素地調整を考慮した 腐食量(mm)		素地面調整を考慮した 腐食速度(mm/y)	
				55 μm	200 μm	55 μm	200 μm	55 μm	200 μm
第1列目	-0.5	H13	11.26	11.33	11.47	-0.07	-0.21	-0.008	-0.024
		H22	11.27						
	-2	H13	11.41	11.54	11.69	-0.13	-0.27	-0.014	-0.030
		H22	11.49						
第2列目	-0.5	H13	11.14	11.08	11.22	0.07	-0.08	0.008	-0.009
		H22	11.02						
	-2	H13	11.53	11.49	11.63	0.04	-0.10	0.005	-0.012
		H22	11.43						
第3列目	-0.5	H13	11.26	11.22	11.36	0.04	-0.11	0.004	-0.012
		H22	11.16						
	-2	H13	11.42	11.48	11.63	-0.06	-0.21	-0.007	-0.023
		H22	11.43						
第4列目	-0.5	H13	11.12	11.26	11.40	-0.14	-0.28	-0.015	-0.032
		H22	11.20						
	-2	H13	11.44	11.68	11.83	-0.24	-0.39	-0.027	-0.043
		H22	11.63						

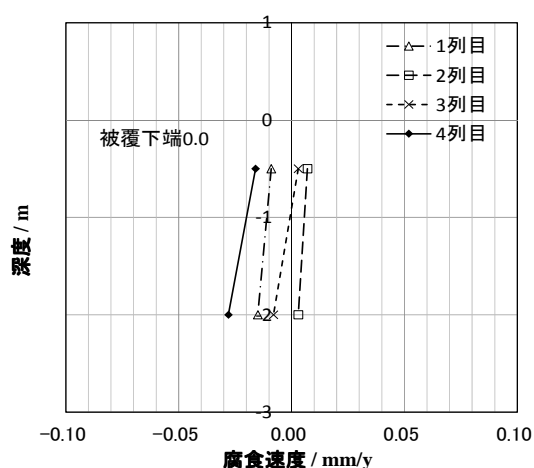


図-3.47 削りしろ55 μm とした場合の腐食速度

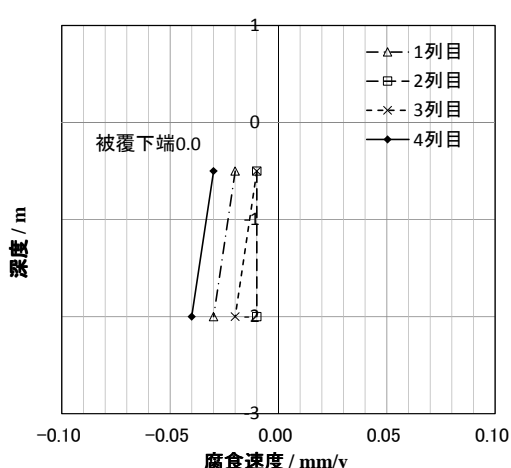


図-3.48 削りしろ200 μm とした場合の腐食速度

りしろ $200\mu\text{m}$ とした場合、図-3.48 より平均腐食速度は全てマイナスになることから、明らかに素地調整による削りしろはこの値よりは小さいと考えられる。

上記のように、肉厚測定の結果において、H13 年度の結果に比べ H22 年度の肉厚が厚く測定されたのは、作業者の技量、測定器の計器誤差、作業時の環境（波浪等）条件等の違いによると考えられる。電気防食適用時の鋼材の肉厚の変化により腐食速度を用いて、電気防食の効果を評価するための肉厚測定の留意点として、作業面において出来るだけ同一箇所でも測定できるように記録（例えば、調査水深、方向のズレが無いような位置出し方法）し、作業面から生じる誤差を無くす必要がある。また、測定器の調整において音速を記載し同一の音速で測定する必要がある。音速の違いによる測定値の誤差を無くす必要があると考えられる。

4) 電気防食適用時の防食効果

H13 年度と H22 年度の防食効果の測定結果を図-3.49 に示す。防食効果は、98.9~101.7% となり高い値を示した。100%を超えるのは H22 年度の肉厚測定結果よりも H13 年度の測定結果のほうが小さかったためである。また、素地面調整による鋼材の削りしろを $55\mu\text{m}$ とした場合、防食効果は、99.5~102.2% に上昇した。しかしながら、初期肉厚から防食効果を算出すると H22 年度で 91.8~96.9% となった。H13 から H22 年度での防食効果と比較するとその値は減少した。これは、防食効果が時間を含まない評価指標であるため、長期になればなるほどその値は減少することを示唆している。

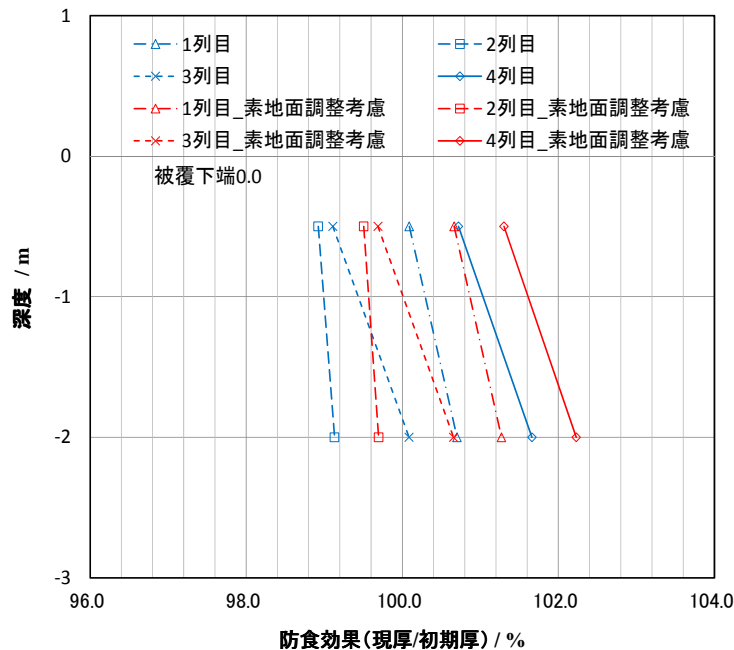


図-3.49 電気防食時の防食効果

3.5.4 まとめ

適切に維持管理され、検証期間において防食管理電位以下を経時的に維持した 2 つの実港湾構造物の肉厚調査結果より得られた電気防食の効果（腐食速度および防食効果）と電位の関係について整理を行った。電気防食の効果を表す評価指標について検証した結果を以下にまとめた。

1) 肉厚測定前に実施される素地面調整による削りしろの検証をした結果、腐食した鋼材を用いた場合は、平均で $200\mu\text{m}$ (0.2mm) となり、防食された鋼材を用いた場合、平均で $55\mu\text{m}$ (0.055mm) であった。肉厚測定が可能になる素地面調整に鋼材の腐食の程度が影響することが分かった。

2) 電気防食適用時のような鋼材の減肉量が小さい場合、肉厚測定において作業者の技量、測定器の計器誤差、作業時の環境（波浪等）条件等の違いにより測定される肉厚が腐食速度に与える影響が大きいことが分かった。

3) 防食管理電位 -800mV (vs.SSE[SW]) 以下に維持している鋼材の肉厚測定結果から求められた腐食速度は、検証により得られた素地面調整による削りしろを考慮すれば、テストピースで得られた電気防食適用時の腐食速度 0.01mm/y 以下程度とできる場合があることが分かった。

4) 防食効果（現有肉厚/調査前の肉厚）という評価指標は、防食時の鋼材の肉厚のみで算出するものであるが、肉厚測定時の鋼材の素調整による削りしろを考慮した場合、防食効果は、何れの港湾においても約 98%以上となり極めて高い値となった。

しかしながら、防食効果は、防食効果の算出に時間を含まない指標であるため、長期になればなるほど防食効果は減少ことが実構造物の肉厚測定結果からもいえることが分かった。

5) 電気防食の効果を評価するための肉厚測定の留意点として、作業面において出来るだけ同一箇所測定できるように記録（例えば、調査水深、方向のズレが無いような位置出し方法）し、作業面から生じる誤差を軽減する必要がある。また、測定器の調整において伝搬速度を記載し同一の伝搬速度で測定する必要がある。伝搬速度の違いによる測定値の誤差を軽減する必要がある。

作業面、測定器の調整により誤差を軽減することによって、肉厚測定から算出する腐食速度で、電気防食の効果を十分に表すことができると考えられる。

3.6 3章のまとめ

本章では、電気防食が適用された施設にテストピースを設置して電気防食の効果を表す評価指標について検討した。次に、実港湾構造物への維持管理点検として、電位測定と肉厚測定からの腐食速度を基に行っているため、防食時の電位と腐食速度の関係を検証し、実港湾構造物における電気防食の効果を表す評価指標について検討した。

得られた知見について以下に示す。

1) 実海域に設置したテストピースによる電気防食の効果

①防食率という評価指標は、無防食時および防食時の腐食速度から算出される。防食時の腐食速度には全国的な変化は少なかったが、無防食時の腐食速度は大きくばらつきが見られた。結果として、防食率の値にはばらつきが見られた。

②防食効果という評価指標は、防食時の状態のみで算出するものであり、無防食時の腐食速度の影響を受けないため、ばらつきが少なくなっている。しかしながら、防食効果(=現在の質量/初期の質量)は、経年的に現在質量が減少することによって、経年的にその値は計算上減少する傾向を示した。

③防食率、防食効果という評価指標に対する検証の結果を踏まえ、電気防食の効果を表す指標の条件として、防食時の状態のみを用いて、かつ時間を含む指標で評価することが望ましいと考えられた。電気防食の効果の評価指標(設計値)として、防食時の腐食速度がよいと考えられた。なお、電気防食の効果の評価指標(設計値)として、基準にある一般的な防食設計条件を満足する場合においては、鋼材の腐食速度を0.01mm/y程度であると考えられる。

2) 維持電位による鋼材の腐食速度の検証

各環境下において、設定電位 -750mV (vs.SSE, およそ防食管理電位 -800mV (vs.SSE[SW]))の維持電流密度は一番小さな値となった。その値は、流水中かつ水温変化条件で 100mA/m^2 、静止水中で水温変化、静止水中で水温 25°C 一定条件において 50mA/m^2 であった。

理論的には図-3.32の電位-pH図よりpH9.5~12.5において鋼材を防食域にするためには鋼材の電位を -800mV (vs.SSE)以下であるが、実用上の鋼材の防食電位(約 -780mV (vs.SSE[SW]))を踏まえ、 -750mV (vs.SSE, およそ防食管理電位 -800mV (vs.SSE[SW]))以下に鋼材の電位を維持すれば、その鋼材の腐食速度は 0.01mm/y 以下であることが分かった。

3) 実港湾構造物の鋼材の肉厚測定からの電気防食の効果

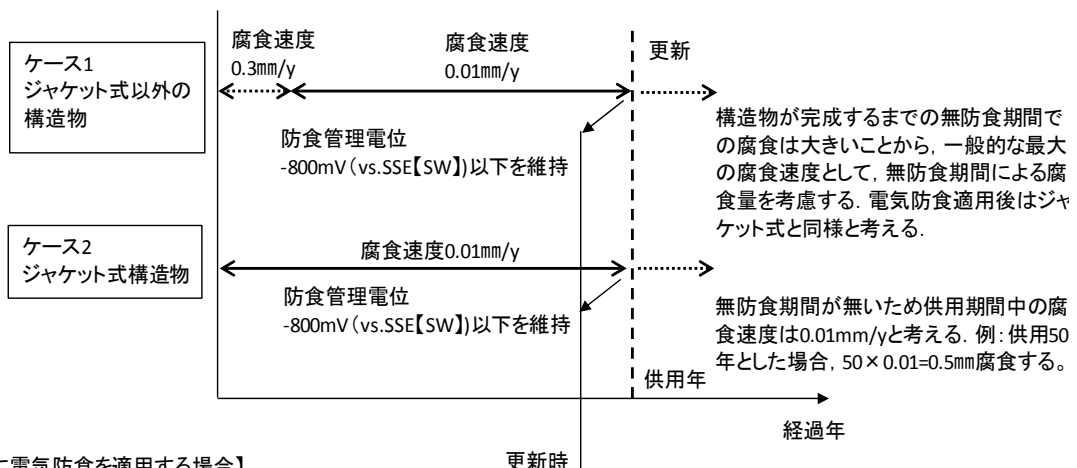
- ①肉厚測定前に実施される素地面調整による削りしろの検証をした結果，腐食した鋼材を用いた場合は，平均で $200\mu\text{m}$ (0.2mm) となり，防食された鋼材を用いた場合，平均で $55\mu\text{m}$ (0.055mm) であった．肉厚測定が可能になる素地面調整に鋼材の腐食の程度が影響することが分かった．
- ②電気防食適用時のような鋼材の腐食量が小さい場合，肉厚測定において作業者の技量に加え，測定器の計器誤差，作業時の環境（波浪等）条件等の違いにより測定される肉厚が腐食速度に与える影響が大きいことが分かった．
- ③防食管理電位 -800mV (vs.SSE[SW]) 以下に維持している鋼材の肉厚測定結果からの腐食速度は，検証により得られた素地面調整による削りしろを考慮すれば，テストピースで得られた電気防食適用時の腐食速度 0.01mm/y 以下とできる場合があることが分かった．
- ④電気防食の効果を評価するための肉厚測定の留意点として，作業面において出来るだけ同一箇所で測定できるように記録（例えば，調査水深，方向のズレが無いような位置出し方法）し，作業面から生じる誤差を軽減する必要がある．また，測定器の調整において伝搬速度を記載し同一の伝搬速度で測定する必要がある．伝搬速度の違いによる測定値の誤差を軽減する必要がある．
作業面，測定器の調整により誤差を軽減することによって，肉厚測定から算出する腐食速度で，真の電気防食の効果を表すことが可能になると考えられる．

3.7 電気防食が適用された港湾構造物の防食の効果を考慮した合理的な設計法の提案

本章では、港湾鋼構造物における電気防食効果の評価指標について検討した。電気防食の効果を表す指標の条件として、防食時の状態のみを用いて、かつ時間を含む指標で評価することが望ましいと考えられた。電気防食効果の評価指標として、防食時の腐食速度がよいと考えられた。したがって、電気防食効果の評価指標として、基準にある一般的な防食設計条件を満足する場合においては、防食時の腐食速度は概ね 0.01mm/y と考えることができるとした。この結果を踏まえ、新設または既設構造物において電気防食を適用する場合において、電気防食適用時の構造設計に用いる合理的な腐食速度について検討し、図-3.50 に電気防食の効果を考慮した合理的な設計法を提案する。

新設時の設計方法として、ケース1の場合、ジャケット式以外の栈橋のような構造物の基礎として鋼管杭等を打設後上部工が完成するまで鋼管杭等は無防食となる場合が多い。

【新設時に電気防食を適用する場合】



【既設に電気防食を適用する場合】

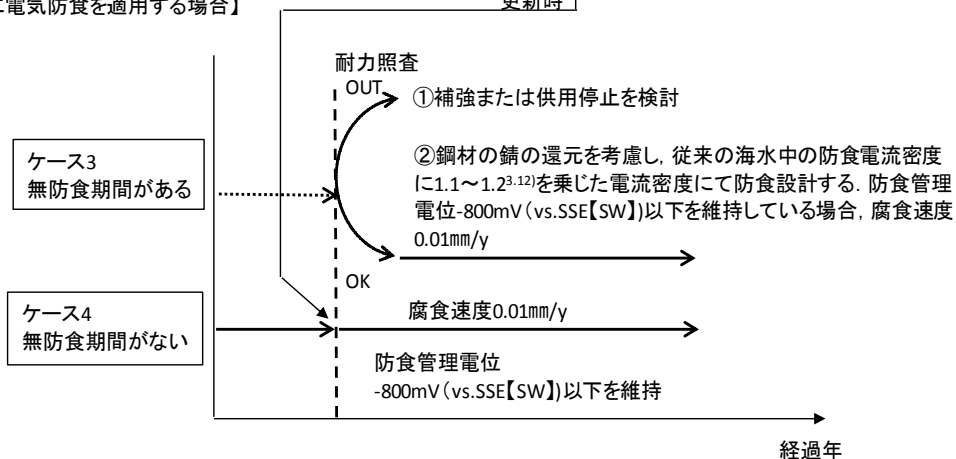


図-3.50 電気防食の効果を考慮した合理的な設計法の提案

また、打設当初は鋼材表面に錆層の保護皮膜が無いことから腐食は大きいと考え、電気防食が適用される前のこの期間の腐食速度を一般的な海水中の腐食速度（0.1～0.3mm/y）の最大値 0.3mm/y とした。電気防食適用後は、定期的な維持管理点検が実施され、防食管理基準 -800mV（vs.SSE[SW]）以下を維持していることを前提に、電気防食適用時の腐食速度を 0.01mm/y とした。

ケース 2 の場合、ジャケット式構造物は上部工が海水に浸漬すると同時に電気防食が適用されるため、ケース 1 のように構造物が完成するまでの無防食期間が無い。したがって、設置当初より電気防食が適用され、定期的な維持管理点検が実施され、防食管理基準 -800mV（vs.SSE[SW]）以下を維持していることを前提に、供用までの全期間の鋼材の腐食速度を 0.01mm/y とした。

一方、既設構造物に対して、ケース 3 のように無防食期間が長い場合、電気防食を適用する前に、肉厚測定等を実施、残存耐力の照査を実施する必要がある。残存耐力が無い場合は、補強または供用停止の措置を行う必要がある。残存耐力がある場合に電気防食を適用する場合は、無防食期間が長いため、錆層の還元電流を考慮し、従来の設計防食電流密度に 1.1～1.2^{3,12)} を乗じた電流密度で電気防食設計を行う。また、定期的な維持管理点検が実施され、防食管理基準 -800mV（vs.SSE[SW]）以下を維持していることを前提に鋼材の腐食速度を 0.01mm/y とした。

また、ケース 4 は、ケース 1, 2 の更新時と同様であり、定期的な維持管理点検が実施され、防食管理基準 -800mV（vs.SSE[SW]）以下を維持していることを前提に、供用までの全期間の鋼材の腐食速度を 0.01mm/y とした。

上記のように、電気防食適用時のケースに合わせた構造設計に用いる腐食速度を設定することで、より合理的な電気防食適用時の構造設計が出来るものと考えられる。

【参考文献】

- (3.1) 国土交通省港湾局, 港湾の施設の点検診断ガイドライン, 2014
- (3.2) 国土交通省港湾局, 港湾施設の技術上の基準・同解説 (2007年版), pp. 439-441, 2011
- (3.3) H. H. Uhlig、R. W. Revie Corrosion and Corrosion Control, pp59-61, 1989
- (3.4) 運輸省港湾局, 港湾鋼構造物設計基準, p. 2-3-8, 1970
- (3.5) 山路 徹, 審良 善和, 佐藤 俊二, 白石 弘, 吉田 倫夫, 船山 嘉実, 阿部 正美, 防錆管理, 52, pp. 41-44 (2008)
- (3.6) 田土 弘人, 山路 徹, 小林 浩之, 川瀬 義行, 前菌 優一, 吉田 倫夫, テストピースによる港湾施設における電気防食効果の統計的評価, 第 36 回 防錆防食技術発表大会, 講演予稿集, pp. 45-48 (2016)
- (3.7) 田土 弘人, 山路 徹, 小林厚史, 川瀬義行, 吉田倫夫, 濱田秀則, テストピース調査結果に基づく港湾鋼構造物における電気防食効果の評価指標に関する検討, 材料と環境, Vol.68, No.8, pp.220-226, 2019
- (3.8) 沿岸技術研究センター, 港湾の施設の維持管理技術マニュアル, p. 99, pp. 105-110 (2007)
- (3.9) 望月紀保, 人工海水中における軟鋼の防食電位について, ナカボーテック社内報 (1974)
- (3.10) 建設省土木研究所, 海域における土木構造物の電気防食に関する共同研究報告書, pp. 6-7 (1991)
- (3.11) 社) 日本非破壊検査協会, 非破壊検査技術シリーズ「超音波厚さ測定 I」, p16, 1989
- (3.12) 沿岸技術研究センター, 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル, p. 79, 2009

第4章 港湾RC構造物に適用した電気防食工法の防食効果の評価に関する検討

4.1 はじめに

港湾施設などの社会資本は、1960年後半から1970年代にかけて高度経済成長期に建設されたものが多く、現在では約50年程度が経過している。建設から長期間経過したことから、これらの栈橋上部工において塩害による劣化が顕著に確認されている。塩害とは、コンクリート中に浸透した塩化物イオンにより鉄筋の不動態皮膜が破壊され、鉄筋が腐食することによって、コンクリートにひび割れを発生させ、進行するとかぶりコンクリートの剥離・剥落を起こし、構造物の耐力低下を引き起こす現象である。この塩害に対して、電気防食はコンクリート中鋼材の防食対策として優れた防食工法の一つと考えられている。コンクリート構造物には、構造上の違いからRC構造およびPC構造があるが、本研究では、RC構造物に適用した電気防食の防食効果の評価に関する検討を行った。

RC構造物への電気防食は、国内外とも主に道路橋へ適用した実績が多く、港湾施設への適用はほとんどなかったといえる。しかしながら、塩害に対する優れた防食工法の一つという認識が高まり、現在では、港湾施設においても塩害対策としての補修対策工として採用されるようになった。

栈橋のような港湾施設は、構造上海中部の鋼管杭等の鋼材と上部工コンクリート中鉄筋とは電氣的に導通している。また、海中部の鋼材は古くからその防食対策として、電気防食が採用されているが、栈橋下部のような海水の飛沫を受け、または潮位の干満により一部没水するような上部工コンクリートには、海中部からの防食電流が流入することが確認されており、コンクリート中鋼材に影響を与えていることが報告されている。

また、RC構造物に対する防食基準について、主に復極量(100mV電位シフト)基準が採用されている。復極量(100mV電位シフト)とは、通電停止後の鉄筋自然電位と通電停止直後の鉄筋電位(インスタントオフ電位)との差(復極量)が100mVであると規定している。道路橋のような大気中環境下では特に問題とならなかった基準ではあるが、栈橋下部のような海水の飛沫、潮の干満、湿度が高く結露しやすいような湿潤環境下では、設計通電電流を流しても100mVシフト基準を満たせない場合があることが報告されている。また、100mVシフト基準を満たすために過度の通電をしている場合もあることが報告されている^{4.1)}。このような場合、海水中の鋼材に対する防食電位のように絶対値の管理基準が適用されるが、その値は、国内では、-850mV(vs.CSE)が採用されている。しかしながら、この電位までカソード電位を分極させるためには大きな防食電流が必要となり、アノード電極の早期耐久性低下やアノード電極周辺の水分枯渇による通電電圧の上昇により電源装置に負荷をかけることは、電気防食を運用する上で支障をきたす場合がある。

そこで、本検討では、下部工に電気防食が適用され、栈橋下のような湿潤環境下にある上部工コンクリートへ適用した電気防食特性や防食効果を評価するために、干満を模擬した水槽に栈橋の一部を模擬したRC試験体を設置した。この模擬試験体は上部工を模擬したコ

ンクリートと、下部工を模擬した鋼材が電氣的に導通されたものである。そして、下部工には流電陽極による電気防食を適用し、さらに上部工中に埋設した電極よりコンクリート中鋼材へ通電させることが可能である。この試験体を用いて、まず初めに、下部工の流電陽極からの防食電流がコンクリート中鋼材に及ぼす影響について検討を行った。

次に、飛沫・干満帯のような湿潤環境下におけるコンクリート中鋼材の防食効果を評価する場合、復極量による防食効果を評価することが難しいため、復極量に変わる電気防食の効果を評価する方法について検討を行った。

最後に、下部工に電気防食が適用され、かつ飛沫・干満帯のような湿潤環境下における電気防食の管理方法として復極量による管理が難しいため、復極量に代わる電気防食の管理方法について、コンクリート中鋼材の電気防食効果を検証するとともに、電気防食設計や管理方法について検討した。

本章の構成について図-4.1に示す。下部工に電気防食が適用され、かつ飛沫・干満帯のような湿潤環境下における港湾 RC 構造物に電気防食を適用する場合において、電気防食効果の評価方法、電気防食設計及び管理方法について以下に検討した。

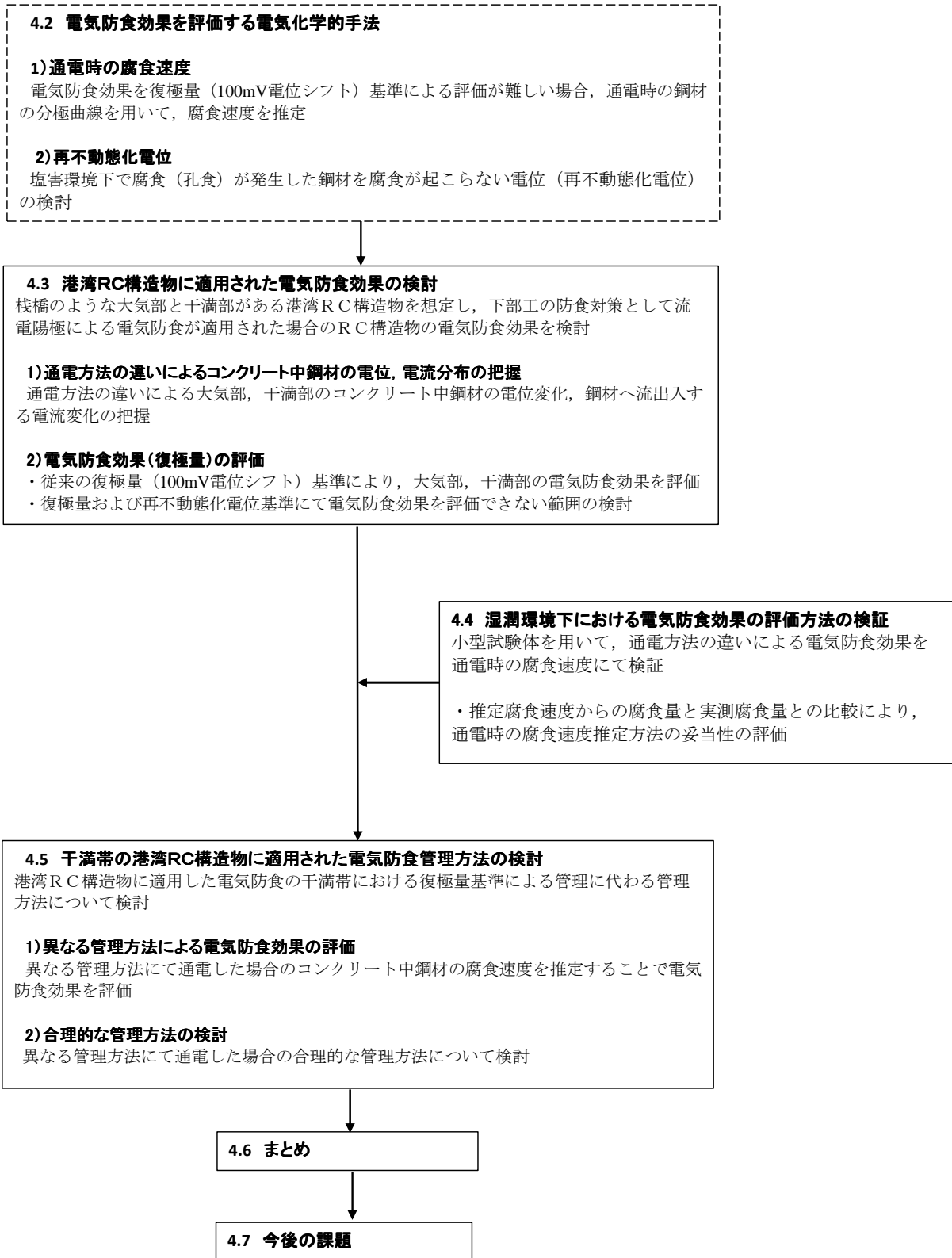


図-4.1 本章の構成

4.2 本検討における電気防食効果を評価する電気化学的手法

コンクリート中鋼材に対して、電気化学的測定手法を用いて鋼材の電気化学的特性を評価することは、コンクリート分野において比較的新しい技術であり、コンクリート工学の知識のみならず、電気化学的な知識が必要である。

本章では、コンクリート中鋼材の腐食を評価する電気化学的測定手法として、直線分極抵抗法および分極曲線法を用いた。また、防食電位として、塩害により不動態皮膜が破壊され孔食等の腐食が発生した場合、その腐食を抑制する電位である再不動態化電位を用いた。それぞれの測定手法、基本原理および適用に際しての留意点について整理した。電気化学的手法としての直線分極抵抗法、分極曲線法に関して、測定方法が規定化されていないことが現状であり、使用した機器についても詳細に記載する。分極曲線法については、防食効果の定量的な推定を検討するための実験的な手法として用いるため、測定方法やその測定結果の解釈についても述べる。また、防食電位として、再不動態化電位は JIS (G 0592) 化され、その測定結果の解釈について述べる。

なお、本検討で用いた試験体は、電気防食を適用し、その防食効果を検討する試験体であり、コンクリート中鋼材には外部電源方式にてコンクリート中に埋設した電極より通電している状況である。そのため、コンクリート中鋼材の電気防食による防食効果を把握するためには、通電（防食）時の状況に近い状況にて測定を実施する必要がある。測定は、通電（防食）時の状況から分極曲線を測定する測定器に切替え、その測定器より通電（防食）時の電流と同等になった後、測定を開始した。つまり、通電（防食）時の状況と同じにし、通電（防食）時の分極曲線を測定することで、通電（防食）時のコンクリート中鋼材が腐食速度を推定した。また、直線分極抵抗法では、24 時間後の復極量測定時に実施することで、電気防食を適用することによる電気防食の副次的効果としての環境改善効果についても把握した。

4.2.1 直線分極抵抗法による電気防食適用時の環境改善効果

交流インピーダンス法は直流分極成分に微小交流成分を重畳させて電極に印加し、電極反応を解析する試みで、19 世紀末から今世紀にかけて Kohlrausch, Warburg, Krüger, らにより始められ、現在では電極反応解析や電気分析等に広く利用されている。特に、電極反応や腐食反応に多く利用されている^{4,2)}。

その中でも、直線分極抵抗法は、 $\pm 10\text{mV}$ 程度の微小な過電圧では、過電圧 (ΔE) とその時に流れる電流をコンクリート中鋼材の表面積で除した電流密度 (Δi) は直線関係にあることを利用し、その傾き $\Delta E/\Delta i$ が分極抵抗 R_p と呼ばれている。単位は $\Omega \cdot \text{cm}^2$ が用いられる。

分極抵抗と腐食電流密度（鋼材の腐食速度）との関係は、Stern and Geary により、腐食電流密度 i_0 は、分極抵抗 R_p に反比例することを導いている。（式 4.1）

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 (\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{1}{R_p} \quad \dots (4.1)$$

ここに、 i_{corr} : 腐食電流密度 (A/cm^2), R_p : 分極抵抗 ($\Omega \cdot cm^2$)

β_a : アノードターフェル勾配, β_c : カソードターフェル勾配

$$K = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 (\beta_a + \beta_c)} \quad \dots \dots (4.2)$$

分極抵抗から腐食電流密度 (鋼材の腐食速度) を求める時の K 値は, 式 4.2 に示す通り, アノード反応とカソード反応のターフェル勾配によって求まる定数である. K 値は 0.02~0.05 となることが実験等により検証されているが, コンクリート中鋼材の腐食速度算出に対しては $K=0.026$ が用いられるのが一般的^{4,3)} となっている.

1) コンクリート中鋼材の等価回路モデル

RC 構造物の電気化学的等価回路について説明する.

一般的に溶液中での金属は, 図-4.2 に示すような抵抗 R_{ct} と表される腐食反応抵抗または電荷移動抵抗と呼ばれ分極抵抗 R_p に相当する抵抗と溶液と鋼材の界面を表す電気二重層容量 C_{dl} とが並列回路で表される. また, 液抵抗 R_s が, 溶液そのものと抵抗として直列で接続される回路で表される. その等価回路をコンクリート中鋼材に対しても適用している.

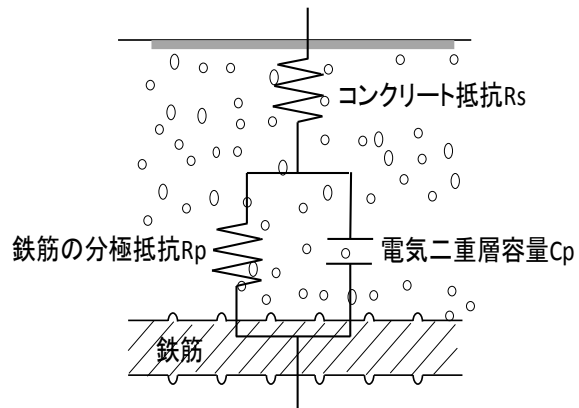


図-4.2 コンクリート中鋼材の等価回路モデル

2) 測定方法

分極抵抗の測定方法は, 直流法, 交流法によらず照合電極, 対極及び電位を制御する装置が必要である. 電位を制御する装置として, ポテンショスタット, 関数発生器, 周波数応答解析装置 (交流法) が必要である. 本検討で使用した機器は, 各装置が一体となった Corrosion Monitor7622 (交流法) を使用した. 図-4.3 に測定機器の接続図を示す.

この接続回路に微小な交流電圧 ΔE を印加した場合, θ だけ位相が進んだ同一周波数の応答電流 Δi が測定され, ΔE と Δi の比よりインピーダンス Z が得られる. 周波数を変化させていくと, インピーダンス Z と θ を用いて複素平面上に図-4.4 のように R_{ct} を直径とする半円となり, 半円が実数軸と交わる位置から R_s , $R_s + R_{ct}$ が, 半円の頂点での周波数から電気二重層容量 C_{dl} がそれぞれ求まる. 高低 2 周波のインピーダンス値から分極抵抗 R_{ct} を,

高周波数のインピーダンス値からコンクリート抵抗 R_s をそれぞれ求める方法を高低2周波交流法と呼んでいる。

交流インピーダンス特性は、腐食の有無によらず、高周波、低周波それぞれに半円が描かれるような特性が示されるとされ、高周波側における半円はかぶりコンクリート部の交流インピーダンス特性を、低周波側の半円ではコンクリート中鋼材の交流インピーダンス特性が示されるとされている^{4.3)}。

また、腐食状態にある鋼材は10mHz程度の低周波でインピーダンス測定が可能であるが、不動態化している鋼材は1mHzでも半円は認められず、不動態化している鋼材の分極抵抗を正確に測定しようとするれば、1mHz以下の低周波での測定が必要であると指摘されている。

しかしながら、低周波での測定は長時間を要するため、実用上を考慮して低周波側の周波数としては10~20mHzが採用されている。その測定で得られたインピーダンス値の周波数依存性を考慮して分極抵抗を推定する方法がとられている^{4.4) 4.5)}。

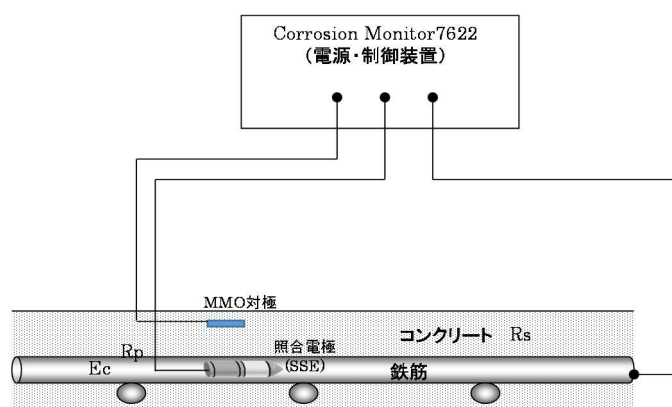


図-4.3 測定器の接続図

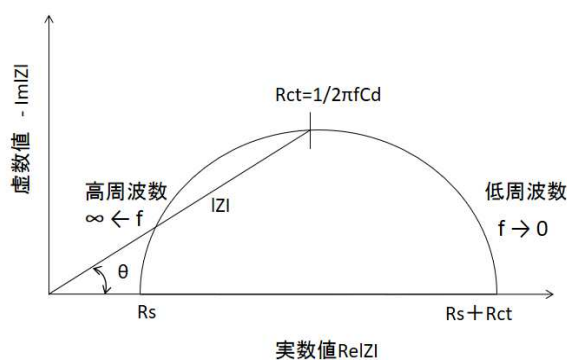


図-4.4 半円の複素平面図

3) 測定結果の腐食度判定および留意点

実構造物より測定された自然電位および分極抵抗より鋼材の腐食状況を評価した判定は国内において海外の判定基準を利用している場合が多い。そのため、アメリカ試験材料研究会から出されている自然電位による腐食判定 (ASTM-C876) を表-4.1 に 1998 年にヨーロッパコンクリート委員会 (CEB) によって示された分極抵抗より算出された腐食速度の判定表を表-4.2 に示す。なお、CEB より示されたのは腐食電流密度 I_{corr} と腐食程度の判定のみであるため、分極抵抗の判定例として、CEB の腐食速度の判定例を参照し、 $K=0.026$ とした場合のそれぞれの腐食速度に対しての分極抵抗に換算して評価した。

表-4.1 自然電位法による腐食判定 (ASTM-C876) ^{4.6)}

自然電位 E(mVvs. CSE)	腐食の可能性
$-200 \leq E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350 < E < -200$	不確定
$-350 \leq E$	90%以上の確率で腐食あり

表-4.2 腐食速度及び分極抵抗の判定表 (CEB) ^{4.7)}

CEB(ヨーロッパコンクリート委員会)の基準(案)

腐食速度 $I_{corr}(\mu A/cm^2)$	腐食速度の判定	分極抵抗 $R_p(K\Omega \cdot cm^2)$
0.1~0.2未満	不動態状態(腐食なし)	130~260より大
0.2以上0.5以下	低から中程度の腐食速度	52以上130以下
0.5以上1以下	中から高程度の腐食速度	26以上52以下
1より大	激しい、高い腐食速度	26未満

直線分極抵抗法によりコンクリート中鋼材の腐食速度を評価する場合は、測定方法や測定結果の解釈に関して次のような留意点がある。

- ① コンクリート中の通電電極(対極)よりコンクリート中鋼材に電流を印加した場合電流の分散範囲が鋼材の被表面積であるかは、鋼材径、鋼材の腐食状況、かぶり厚さ、コンクリート抵抗などに影響を受ける。
- ② K 値は鋼材の腐食状況により 0.02~0.05 の範囲で変動するとしているが、今回は $K=0.026$ を定数として用いている。
- ③ 分極抵抗は一般的に気温が高くなれば小さく、気温が小さくなれば大きくなる季節により変化するものであり、測定時の気温にも注意する必要がある。

本章での分極抵抗の測定は、コンクリート中鋼材への通電を遮断して 24 時間以上経過後に測定している。したがって、通電時ではなく、通電停止後の電気防食適用後の鋼材の副次的効果による鋼材の腐食環境の改善の評価ができると考えている。また、上記の留意点を考慮して、気温などの環境条件も考慮した。

4.2.2 分極曲線法による電気防食適用時の腐食速度の推定

1) 分極曲線から求められる腐食速度の原理

分極曲線とは、金属がある環境中にあり平衡状態に達しているときに、外部電源によって金属に電圧を印加し、強制的に電位あるいは電流を変化させることによって得られる電位 - 電流曲線のことである。逆の考えをすれば、金属がある電位において電気化学的な平衡状態にするにはどれくらい外部電源により通電すればよいかということになる。

腐食しつつある金属の電位 - 電流の関係を、電位と電流の対数または電流密度の対数の関係として示したグラフが Evans ダイアグラムと呼ばれ、**図-4.5**に示す。もともと U.R.Evans が腐食挙動を予測するのに役立つものとして考案したものである。分極図を作成するためには、対象とする金属の電極（作動電極 Working Electrode）のほかに、照合電極と白金のような不活性な対極（Counter Electrode；補助電極 Auxiliary Electrode）を用いる。**図-4.5**の2本の直線が、アノード分極曲線、カソード分極曲線であり、両線の交点が腐食電位と腐食電流または腐食電流密度となる。

しかしながら、溶液中に浸漬した金属を実際に測定する場合、腐食電位 (E_{corr}) の近傍では、アノードおよびカソード反応が相互に影響を受け、反応理論から電位 - 電流の関係が変化する。実際に測定される分極曲線と Evans が示した分極図との関係を**図-4.6**に示す。破線が Evans が示した理論的な内部分極曲線を示し、実線が実際に測定される外部分極曲線を示す。分極曲線の測定結果より腐食電流または腐食電流密度を求める場合、実際に分極曲線と理論分極曲線を考慮した方法として、Tafel（ターフェル）直線外挿法がある。実際に分極曲線の測定では腐食電位が既知のため、アノードおよびカソードの外挿線と腐食電位から腐食電流または腐食電流密度が求められる。コンクリート中鋼材に対しても同様な考え方が適用されるとしている。

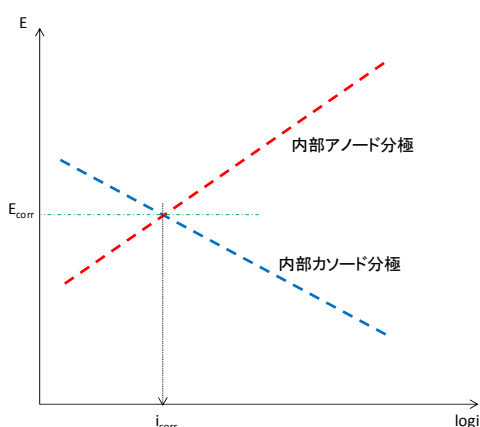


図-4.5 Evans 図

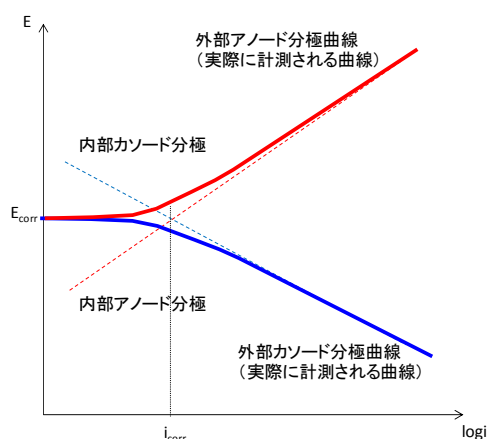


図-4.6 実際に測定される分極曲線と Evans 図との関係

腐食速度を推定する方法として、測定した分極曲線から作図法によるターフェル直線外挿法がある。Tafel (ターフェル) 式は、電流密度と過電圧との間に次のような関係があり、式 4.3 に表す。

$$\eta = \alpha + \beta \log i \quad \dots \dots (4.3)$$

ここで、 η : 過電圧、 i : 電流密度、 α および β は反応速度パラメータである。 β はターフェル勾配である。式 4.3 よりアノード反応電流密度 (i_a) 及びカソード反応電流密度 (i_c) を表すと、式 4.4 と式 4.5 になる。

$$i_a = i_0 \exp\left(\frac{\alpha_a z F \eta}{RT}\right) \quad \dots \dots (4.4)$$

$$i_c = -i_0 \exp\left(-\frac{\alpha_c z F \eta}{RT}\right) \quad \dots \dots (4.5)$$

ここで、 i_0 : 交換電流密度、 α_a および α_c : 移動係数 ($\alpha_a + \alpha_c = 1$)、 z : 反応電子数、 F : ファラデー定数、 R : 気体定数、 T : 絶対温度である。
よって、実際の測定で測定される電流密度 (i) は式 4.6 に示され、バトラー・ボルマーの式 (Butler-Volmer's equation) と呼ばれる。右辺の第一項はアノード電流に、第二項はカソード電流に対応する。

$$i = i_a + i_c = i_0 \left\{ \exp\left(\frac{\alpha_a z F \eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_c z F \eta}{RT}\right) \right\} \quad \dots \dots (4.6)$$

過電圧 η がアノード側に十分大きい場合、式 4.6 の第二項は実質的に無視できる。逆に、過電圧 η がカソード側に十分大きい場合、式 4.6 の第一項は実質的に無視できることになる。つまり、過電圧領域におけるアノードおよびカソード反応における電流と電位の関係はそれぞれ式 4.7、式 4.8 に表すことができる。

$$i = i_0 \exp\left(\frac{\alpha_a z F \eta}{RT}\right) \quad \dots \dots (4.7)$$

$$i = -i_0 \exp\left(-\frac{\alpha_c z F \eta}{RT}\right) \quad \dots \dots (4.8)$$

これらの式を、電位を縦軸に普通尺、電流密度の絶対値を横軸に常用対数としてプロットすると、アノードおよびカソードのターフェル勾配を β_a および β_c とする直線となる。また、過電圧 $\eta=0$ では $i=i_0$ となり、アノードおよびカソードのターフェル勾配の直線は腐食電位 E_{corr} において交差し、その交点での電流密度は腐食電流密度つまり交換電流密度となる。

以上の考え方より、アノードおよびカソード分極曲線の測定から、電位を縦軸に普通尺、電流の絶対値を横軸に対数としてグラフにプロットした結果において、ターフェル勾配の直線を作図することによって、腐食電位 E_{corr} との交点から腐食速度（腐食電流密度）を推定することができる。この方法を、ターフェル直線外挿法と呼ばれる。

しかしながら、コンクリート中鋼材に対して適用するときは、直線部分（ターフェル領域の区間）が明確になっていないことや、分極曲線の測定方法における影響が明確になっていないなどの課題がある。

2) 分極曲線を用いたコンクリート中鋼材における腐食評価法

コンクリート中鋼材に対して、分極曲線法による腐食状況の評価方法は現在のところ規定されていない。本検討におけるコンクリート中鋼材の腐食速度をアノードターフェル直線外挿法により評価を行った。なお、分極曲線測定はコンクリート中鋼材と電極からの通電をした状態からアノード電位まで分極させることによって行った。つまり、通電時の鋼材の分極曲線を測定し、アノードターフェル直線外挿法により、通電時のコンクリート中鋼材の腐食速度を把握するものである。

分極曲線におけるターフェル領域は、理論的には過電圧 $\pm 100\text{mV}$ 以上の分極量の範囲で現れるとされているが、コンクリート中鋼材に対しては、直線を外挿する範囲（ターフェル領域）は明確にされていない。ターフェル領域については理論的背景を踏まえ、過電圧の下限値は $50 \pm 10\text{mV}$ 以上の電位を参照している。過電圧の上限値については様々な値が用いられている。本検討においては、推定した腐食速度からコンクリート中鋼材の腐食量の実測値と腐食速度から算出した腐食量がほぼ同程度であった既往の文献^{4,8)}を参照し、外挿するアノードターフェル勾配を下限値 50mV 、上限値 80mV とした。

本検討においては、推定した腐食速度で鋼材腐食を評価するのに加え、腐食速度の推定で評価できない場合はアノードターフェル勾配より鋼材腐食を評価した。

アノードターフェル勾配により鋼材腐食を評価する方法として、**図-4.7** に示す方法にて行った。はじめに、通電時の ON 電位 (E_{on})、インスタント OFF 電位 (E_{io})、通電電流 (I) を測定し、開始電位を通電時の ON 電位、掃引速度 $20\text{mV}/\text{min}$ でアノード方向に電位を掃引することで電気防食適用時の鋼材の分極曲線を測定した。終了時の電位はカソード電流からアノード電流に切り替わる電位（自然電位： E'_{corr} ）から $+120\text{mV}$ 程度分極させた電位とした。**式 4.9** に基づき環境抵抗 R_s （主にコンクリート抵抗）を求め、環境抵抗と分極測定時の印加電流より電圧降下 IR を算出し、分極測定時の電位の補正を行った。なお、掃引速

度はアノード分極を短時間で行うことが必要であるが、湿潤環境下にあるコンクリート中鋼材に対し電気二重層容量が大きくなることから、できるだけ掃引速度遅くするため、20mV/minの掃引速度とした。

$$R_s = \frac{|E_{on} - E_{io}|}{I} \quad \dots (4.9)$$

アノードターフェル勾配は、自然電位 E'_{corr} から 50~80mV アノード分極させた電位 - 電流対数にて作図された分極曲線を直線近似した直線をアノードターフェル直線とし、その直線とインスタント OFF 電位 (E_{io}) との交点の腐食速度を通電時の鋼材の推定腐食速度とした。その推定腐食速度を表-4.2 の判定表を基に鋼材腐食を評価した。また、既往の文献^{4.9), 4.10)}を参照し、外挿したアノードターフェル直線の勾配が 200mV/decade を超える場合、図-4.9 に示すように鋼材は不動態化していると考えた。本検討での湿潤環境下における鋼材腐食の判定として、以下図-4.7 に示すように、アノードターフェル勾配が 200mV/decade を超える場合、鋼材が不動態化していると判定する。アノードターフェル勾配が 200mV/decade を超えない場合、アノードターフェル直線とインスタント OFF 電位 (E_{io}) との交点の腐食速度を通電時の鋼材の推定腐食速度とし、表-4.2 の判定表を基に鋼材腐食を評価した。

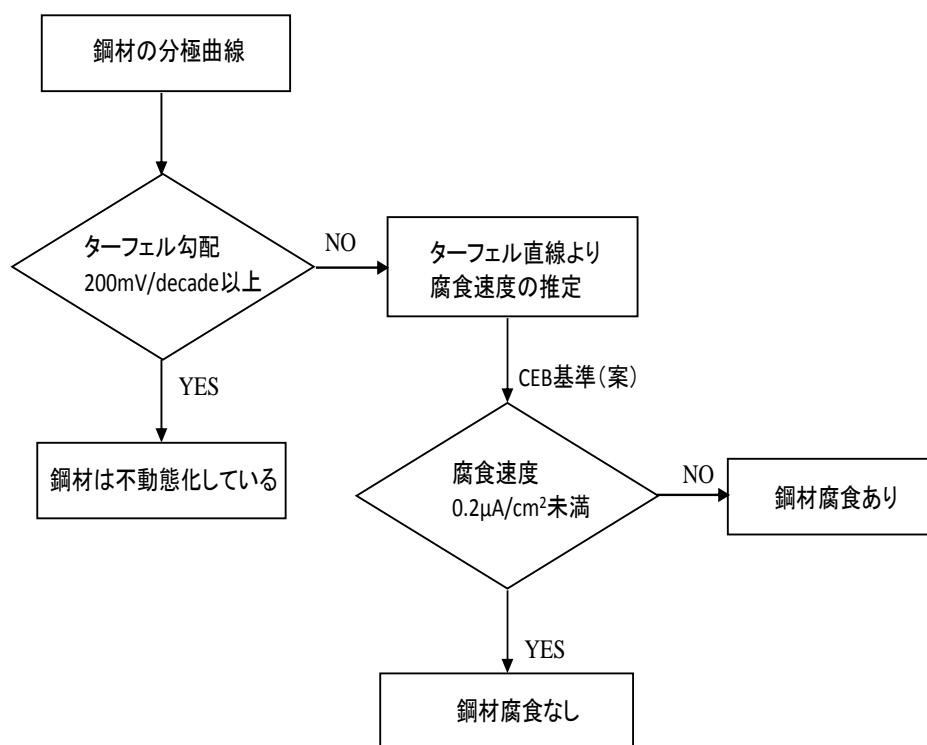


図-4.7 湿潤環境下における鋼材腐食状況推定フロー

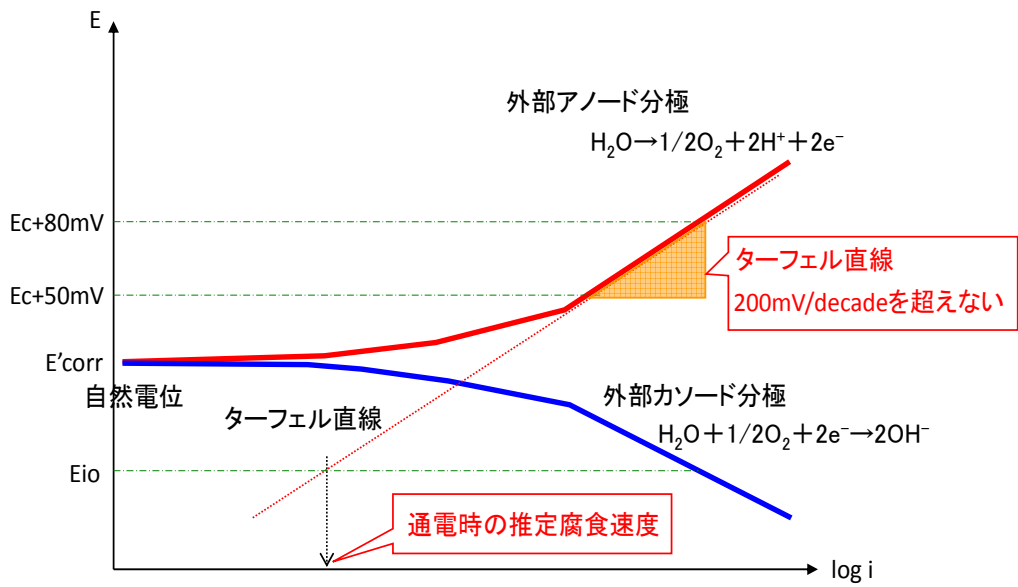


図-4.8 通電時の腐食速度の推定方法

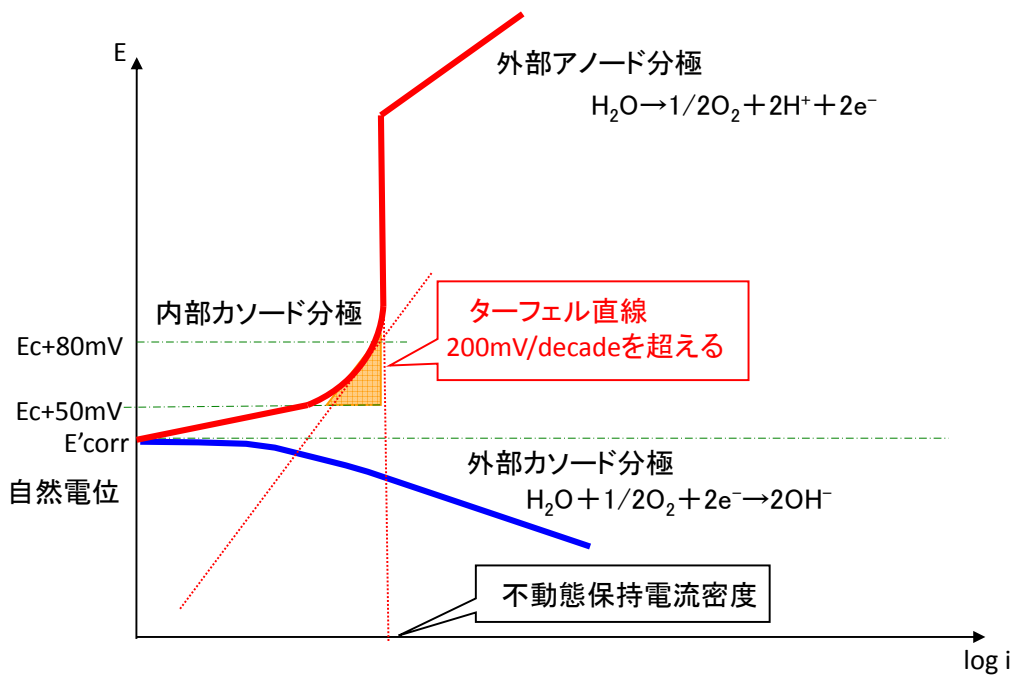


図-4.9 ターフェル勾配による腐食状況の推定

4.2.3 再不動態化電位による防食電位の検討

電気防食の基本的な防食原理は、腐食環境下で金属が保持する電位を外部から防食電流を供給することで強制的に変化させ、腐食の生じない電位まで移動させることである。コンクリート中鋼材に対しても、活性化している状態から不活性な状態まで電位を卑（-方向）に電位を移行させて防食を達成するカソード防食法が用いられる。その概念図を図-4.10に示す。一般的な溶液中での腐食では、アノード反応およびカソード反応は腐食電位（ E_{corr} ）で釣り合っ腐食回路を形成しているが、これに外部より強制的に防食電流を供給すると両反応の釣り合いが崩れてしまう。通電電流を増やし鋼材の電位を E_a に達せられれば、電気化学的な釣り合いを保持したまま、アノード反応が生じない状態とすることができる。つまり、鉄の溶解は生じず、防食されていると考えることができる。

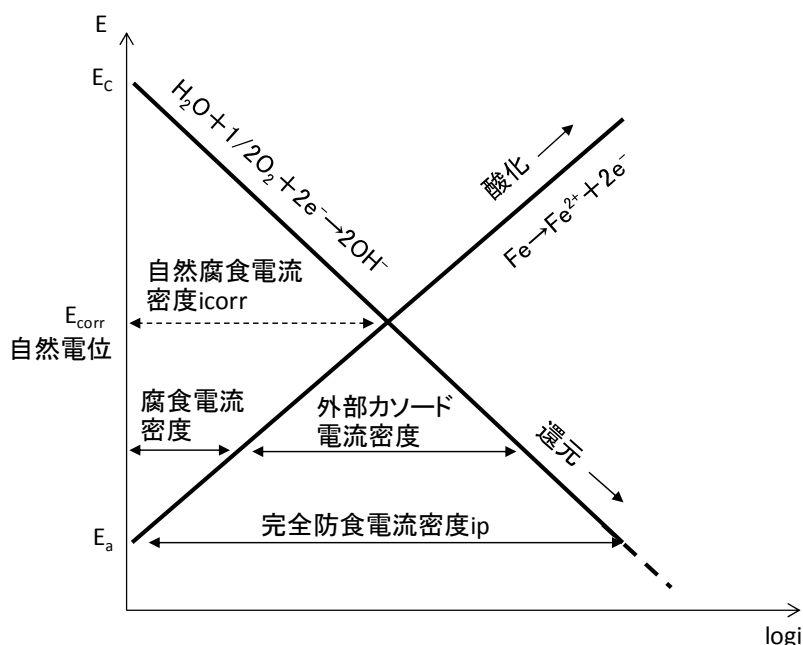


図-4.10 電気防食の一般的な概念図

1) 塩害環境下になるコンクリート中鋼材の電気防食の概念

塩害環境下にあるコンクリート中鋼材に対する電気防食の概念として、コンクリート中鋼材表面に形成された腐食電池の消滅、つまり鋼材の電位差を生じさせないようにすることで、腐食を抑制しようとするものである。図-4.11にコンクリート中鋼材のアノード反応と電位の関係を示すアノード分極曲線の一例を示す。一般的な溶液中の電気防食の概念を適用するとこの図中の A 点よりも電位を卑化させることによって防食を達成させることになる。

しかしながら、コンクリート中鋼材のように高アルカリ性環境下によって鋼材が不動態化している場合は、塩化物イオンによって不動態皮膜が破壊され孔食（金属表面には不動態表面からなる大きなカソードに取り囲まれた活性化した小面積のアノードが作られるようにして作られる“Passive-Active Cell”）が発生する。この孔食を抑制することに重きが置かれ、溶液中での防食の考え方と異なる。

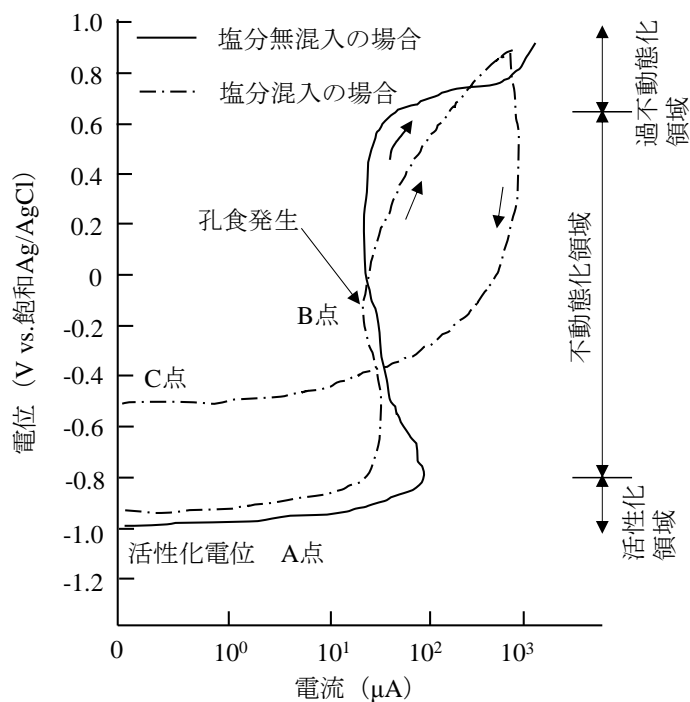


図-4.11 コンクリート中鋼材のアノード分極曲線の例^{4.11)}

この場合の腐食は、不動態領域から急激に腐食電流が増大し、孔食の発生（B点）に達する。したがって、孔食が起こらない電位まで鋼材の電位を卑化させれば、A点まで電位を卑化させなくても防食できることになる。ただし、いったん孔食を引き起こした鋼材では、その後にB点まで電位を卑化させても鋼材の不動態化はすぐには起こらず、さらに卑化させたC点の電位になって初めて孔食の進行は停止する（C点を再不動態化電位と呼ばれている）。また、この再不動態化電位は、その環境下にある鋼材の孔食の進行程度に関係なく、常に一定の値を示すと考えられている。

2) 湿潤環境下における再不動態化電位の基準値の選定^{4.11), 4.12)}

電気防食基準に基づいた通電量の設定が、防食効果を決定づけることになる。その場合、論理的には再不動態化電位がコンクリート中鋼材の防食基準として適当であるが、実際には以下のような理由により適当ではないとされてきた。

- ① 再不動態化電位は、その鋼材の環境条件や測定条件によって変化する。
- ② コンクリート中鋼材の電位を長期安定して測定する方法が確立していないこと。埋設照合電極の長期安定性が確保されていない。
- ③ 通電量は電極材料の耐久性も考慮して決定されなくてはならないこと。

湿潤環境下でのコンクリート中鋼材は、鋼材表面への溶存酸素の拡散が極めて遅いため腐食速度が小さい。また、電気防食を適用することでカソード反応によって鋼材近傍の酸素がさらに消費される状況となるため、腐食速度はさらに小さくなる。そのため、より大きな復極量を得るためには、溶存酸素の拡散速度が速くしなければならず、防食効果の評価として復極量（電位シフト）管理は適していないと考えられる。このような環境下に対して、ISOでは電位管理基準を設けられ、 -720mV (vs.Ag/AgCl/0.5M KCl=55mV)^{4.13)}つまり硫酸銅電極基準に換算すると -790mV (vs.CSE) となり、これは塩水中の鋼材の再不動態化電位と説明された。

しかしながら、湿潤環境下においては、再不動態化電位を防食基準として適当ではないとされてきた大きな要因であった埋設照合電極の長期安定性であるが、測定時に外部照合電極との電位差を確認することで、湿潤環境下にある干満帯については再不動態電位を適用できることとした。

湿潤環境下での防食基準として、コンクリート中鋼材が栈橋のような港湾鋼構造物の鋼管杭等の鋼材と電氣的に接続していること、コンクリートにひび割れがある場合にはコンクリート内部の鋼材は海水と直接接することを考慮して、海水中の鋼材の防食電位と同じ -850mV (vs.CSE) 以下、または -650mV (vs.CSE) 以下および -670mV 以下 (vs.CSE) に維持するという文献が示されている。しかしながら、海水中の鋼材と同様な防食電位 -850mV (vs.CSE) 以下は、この電位まで分極させるためには陽極の適用限界以上の電流を通電しなければならず、陽極周囲のオーバーレイ材に悪影響を及ぼす可能性が指摘されている。また、 -650mV (vs.CSE) 以下および -670mV 以下 (vs.CSE) においては、研究報告として挙げられているものである。

したがって、本検討では、再不動態化電位について検証した実験^{4.12)}を基に、 -770mV (vs.CSE) 以下を再不動態化電位として湿潤環境下における防食基準電位として整理を行った。

4.3 下部工に電気防食が適用された場合の飛沫・干満帯環境下における RC 構造物の電気防食効果

4.3.1 はじめに

栈橋のような港湾構造物は厳しい塩害環境下にあることから、上部の鉄筋コンクリート（以下、上部工）に塩害対策として外部電源方式による電気防食が適用される場合がある。また、海水中が鋼構造（以下、下部工）である場合、海水中の鋼材に対して、流電陽極方式による電気防食が適用されるのが一般的である。上部工と下部工は鉄筋により通常は電氣的に導通しており、上部工が海水中に没水すると鉄筋に防食電流が流入する（図-4.12）。しかしながら、上部工と下部工に電気防食が適用された場合（図-4.13）、干満による湿潤環境が鉄筋の電位、防食電流の分布状況にどのような影響を与えているか把握した事例は少ない。また、上部工への電気防食の効果は基準値として「復極量 100mV 以上」^{4.14)} という電位シフトにより良否を判定している。しかしながら、干満帯のような湿潤環境下において、溶存酸素の拡散速度が極めて遅くなることから、復極量を満たさない場合がある。

本節では、栈橋の一部を模擬したコンクリート長尺試験体を干満を模擬した水槽に設置し、下部工には流電陽極による電気防食が適用されていることを想定し、上部工の電極からコンクリート中鋼材へ通電した場合において、湿潤環境下でのコンクリート中鋼材の電位及び防食電流の分布により、上部工の電極からの通電電流および下部工の流電陽極からの防食電流の流入に対するコンクリート中鋼材の影響について把握した。

また、下部工に適用される電気防食は、海中に露出する鋼材に対して適用するものである。しかしながら、干満により上部工が没水する場合、下部工の防食電流が上部工に流入する。これは、防食面積が一時的増加することを示している。上記の条件下で、流電陽極の電気防食特性も合わせて検討した。

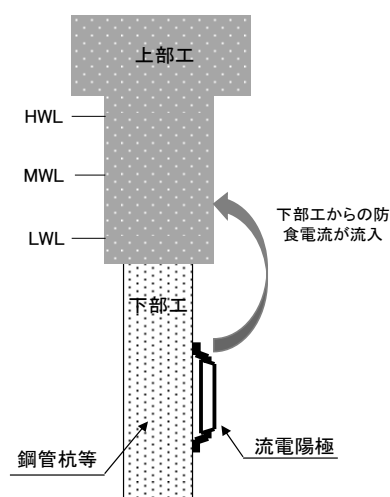


図-4.12 下部工からの防食電流流入のイメージ図

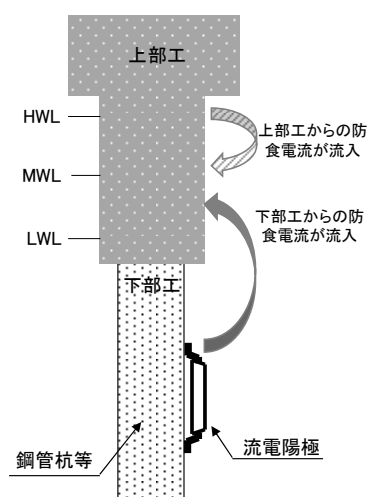


図-4.13 下部工および上部工からの防食電流流入のイメージ図

4.3.2 試験体概要

本試験における試験体は、100×150×2600mmの角柱であり、図-4.14に示すとおり港湾空港技術研究所の模擬干満暴露水槽に設置した。各試験体の鋼材の腐食状況や設置条件について表-4.3にまとめた。なお、干潮時にコンクリートの試験体の一部が没水する試験体において、腐食させた鋼材を用いたものをCS、腐食していない鋼材を用いたものをNSとし、干潮時に気中に完全露出する試験体をCAと表記した。試験体の詳細は以下のようになる。コンクリート中にリード線を取付けた丸鋼(R19)を6本、コンクリート中と海水中の境に1本、海水中に1本設置した。また、線状チタン製ラス材電極(以下MMO電極とする)を7箇所コンクリート中に埋設した。丸鋼は、コンクリートに埋設する前に、1ヶ月間海水噴霧をすることで腐食を発生させた状態で使用した場合(試験体CS、CA)、サンドブラスト処理により黒皮を取り除いた後そのまま使用した場合(試験体NS)がある。照合電極は、飽和銀塩化銀電極(SSE)を鋼材の近傍に埋設した。また、海水と接する面はコンクリート打ち込み面と底面の2面とし、3側面、上面の計4面についてはエポキシ樹脂にて塗装を行った。コンクリートの配合を表-4.4に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント、細骨材は天然砂、粗骨材は砕石(最大骨材寸法20mm)を用いた。目標スランプは10±2.5cm、空気量は4.5±1.5%とした。コンクリートには練り混ぜ時に塩化ナトリウムを用いて10kg/m³の塩化物イオンを混入させた。

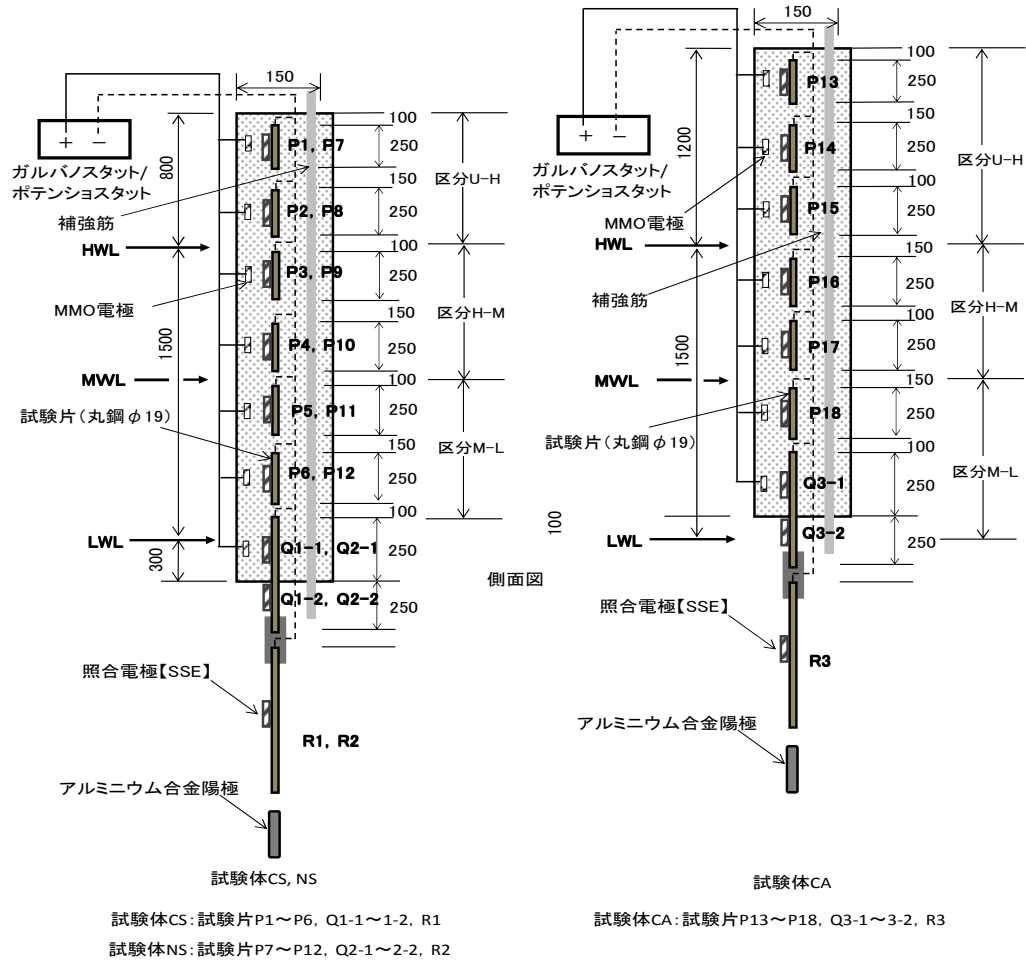
表-4.3 各試験体の概要

試験体	コンクリート下端の設置位置	コンクリートの配合		鋼材腐食の有無	海中部にアルミニウム合金陽極の有無
		水セメント比	塩化物イオン濃度		
CS	LWL以下	50%	10kg/m ³	有	有
NS	LWL以下			無	有
CA	LWL以上			有	有

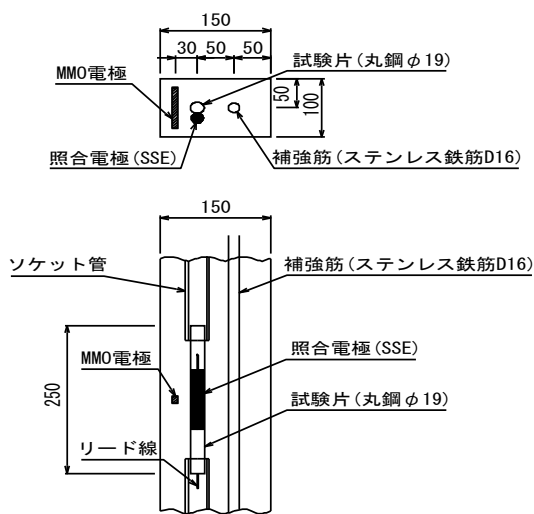
C:Corrosion(鉄筋腐食有) N:Non-Corrosion(鉄筋腐食無) S:Submersion(没水) A:Air(気中)

表-4.4 コンクリートの配合表

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	AE減水剤
50.0	46.0	168	336	808	975	1.19



平面図



断面図

図 - 4.14 試験体の概要図

4.3.3 試験体の暴露環境

試験体は、港湾空港技術研究所にある暴露水槽に設置した。干満サイクルは図-4.15 に示すとおり、1日2回（潮位差 1.5m）が繰り返される環境にある。また、試験体は2017年4月より試験が実施されている。2017～2018年の平均気温および湿度を図-4.16に示す。

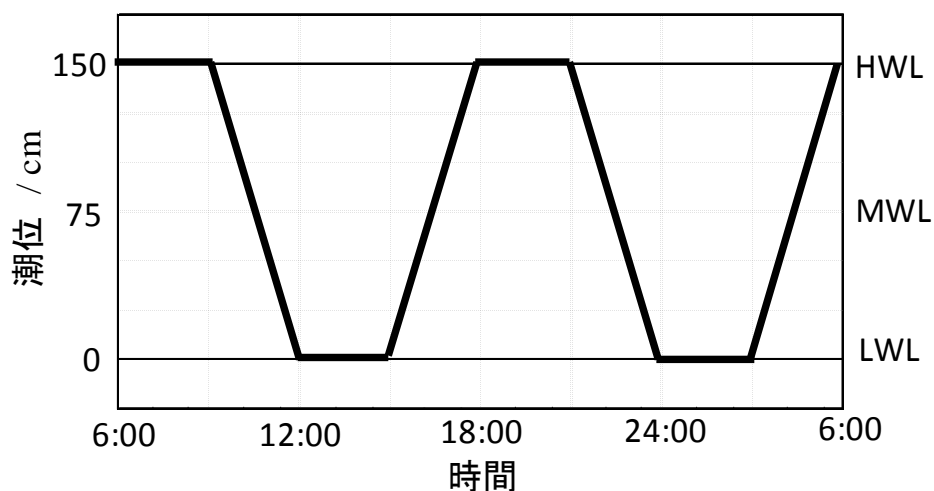


図-4.15 暴露水槽の干満サイクル

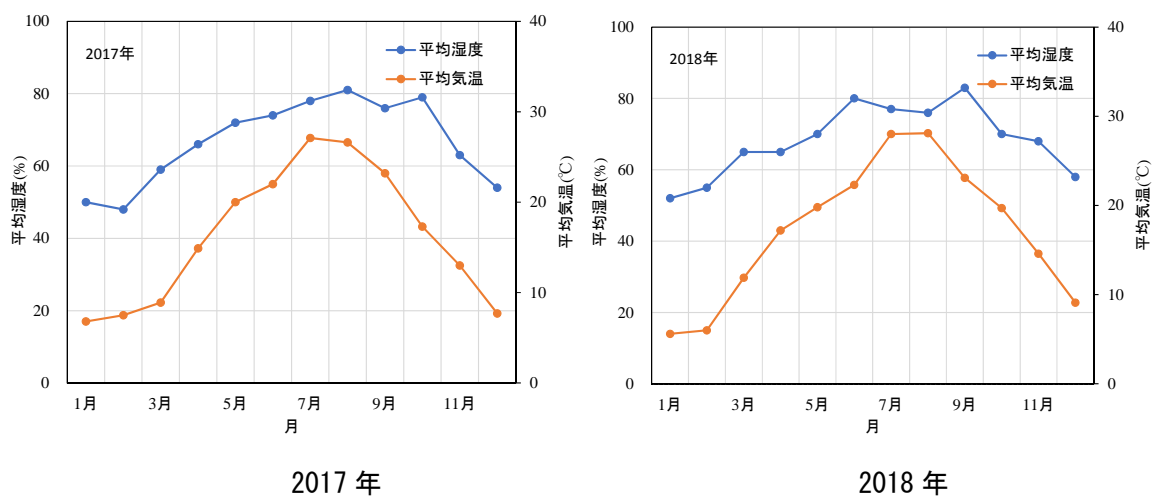


図-4.16 2017～2018年 月別平均気温・湿度^{4.15)}

4.3.4 試験方法

試験体への電気防食の通電ケースを表-4.5に示し、要領図を図-4.17に示す。無防食は上部工および下部工ともに通電しない場合、ケースPは下部工の流電陽極のみで通電した場合、ケースA-Pは下部工の流電陽極により通電しながら、上部工に設置された全電極より通電した場合、ケースH-Pは下部工の流電陽極により通電しながら、上部工のHWL（満潮位）以上に設置された電極より通電した場合を表す。上部工への通電方法は定電流方式で行い、直流電源装置として、ガルバノスタットを用いた。なお、上部工への通電は、HWL以上の鋼材に対して復極量100mVを満たすように通電した電流密度を示す。

また、下部工は海水中に露出している鋼材に対して、初期防食電流密度として、一般的な清浄海域の防食電流密度 100 mA/m^2 ^{4.16)} として電気防食を適用した。なお、各ケースの測定は、下部工の鋼材の電位が定常状態になった後に開始した。その際、下部工の流電陽極からの通電電流は約50~70%程度まで低減していた。各ケースの通電期間は3週間程度とした。なお、各ケース終了後は、1週間程度の無通電期間を設け、鋼材の電位が復極した後に、別ケースでの通電を開始した。

表-4.5 各試験体への通電ケースとその通電電流密度

ケース	コンクリート中通電電極		海水中	電流密度 (mA/㎡)			
	全電極	HWL以上の電極		上部工			下部工
				CS	NS	CA	全て
無防食	—	—	—	0	0	0	0
P	—	—	●	0	0	0	100
A-P	●	—	●	20	2	90	100
H-P	—	●	●	20	5	120	100

●:適用

海中部の電流密度:初期電流密度を表す。

各ケースの表記された数字は各試験体への通電電流密度(鉄筋表面積に対する)を表す。

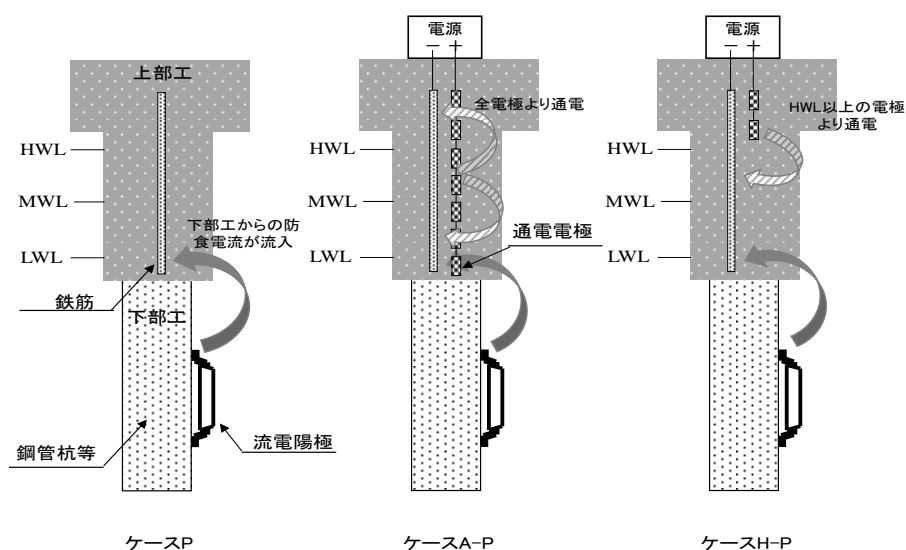


図-4.17 各試験体への通電ケースの要領図

4.3.5 測定項目

試験体の配線系統図を図-4.18に示す。各試験体の測定項目を以下に示す。

1) 鋼材電位

鋼材電位は、SSEで10分間隔にてロガーにて記録した。なお、測定値から環境抵抗 R と通電電流 I から電圧降下 IR を補正し、飽和硫酸銅電極基準(CSE)に換算して示した。

2) 鋼材への流出入電流

鋼材への流出入電流は、鋼材に 1Ω の抵抗器を挿入し、10分間隔にて記録された電圧を電流に換算して示した。

3) 鋼材の復極量

通電時のインスタントオフ電位と通電停止してから24時間経過後の電位との差を復極量とした。なお、復極量測定結果は、各ケースにおいて、電位変化が定常になった後に行った。測定は干潮時に行った。

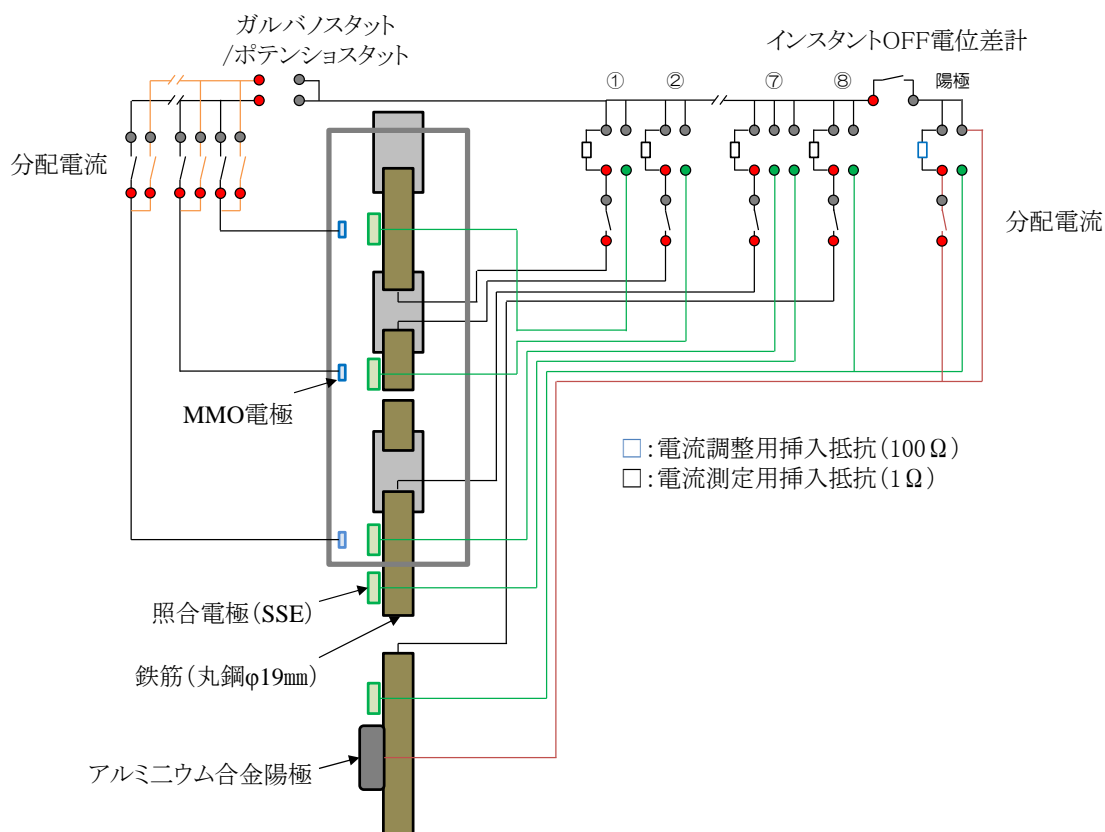


図-4.18 各試験体の配線系統図

4.3.6 試験結果

1) 干満によるコンクリート中鋼材の電位変化

各通電ケースにおける各試験体の干潮時および満潮時の電位測定の結果を図-4.19～図-4.21に示す。HWL～MWL（以下、区分H-M）の鋼材の電位は、すべての試験体についても干潮時に比べ満潮時に卑化していることが分かった。これは、満潮になるにしたがって、下部工の流電陽極からの防食電流が流入したことによると考えられる。

ここで、不動態化している鋼材に塩化物イオンにより腐食が生じる場合には、その腐食は孔食あるいはすきま腐食に起因している。これを防食するためには、一度破壊された不動態皮膜が再び形成される再不動態化電位まで、カソード分極させればよいことになる。^{4.13)} よって、コンクリート中鋼材が塩害環境下にある場合において、測定された電位が再不動態化電位以下にあるとき、鋼材腐食は抑制されていると考えることができる。図-4.19より、試験体No.CSは、干潮時において、ケースA-Pでは+1.2m、ケースP、H-Pでは+0.5m以下、満潮時には、ケースA-Pでは+1.3m、ケースPで+1.0m、ケースH-Pでは+0.6m以下で再不動態化電位以下であった。図-4.20より、試験体NSは、干潮時において、A-Pでは+1.0m、ケースP、H-Pでは+0.6m以下、満潮時には、ケースA-P、H-Pでは+1.5m、ケースPでは+1.3m以下で再不動態化電位以下であった。図-4.21より、試験体No.CAは、干潮時には、A-Pでは+1.0m、ケースPでは+0.7m、H-Pでは+0.5m以下、満潮時には、A-Pでは+1.2m、ケースPで+1.0m、ケースH-Pでは+1.1m以下で再不動態化電位以下であった。したがって、各試験体における電位の結果より、下部工の流電陽極のみから通電した場合（ケースP）において、干潮時では、MWL（+0.75m）付近まで、満潮時には、+1.0mまで試験体の設置位置に関わらず再不動態化電位以下であることが分かった。

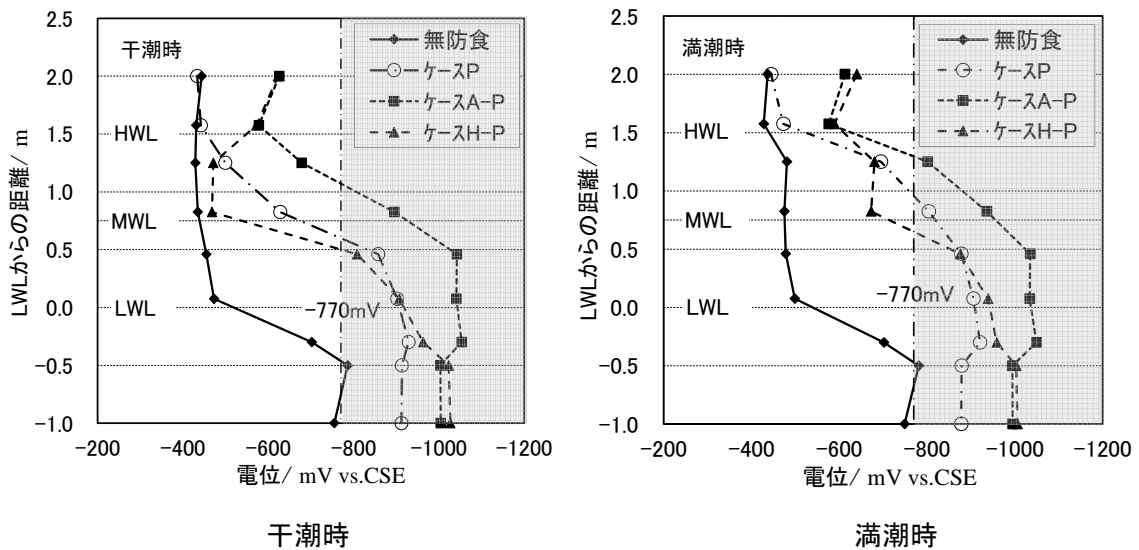


図-4.19 試験体 CS 干潮時および満潮時の電位測定結果

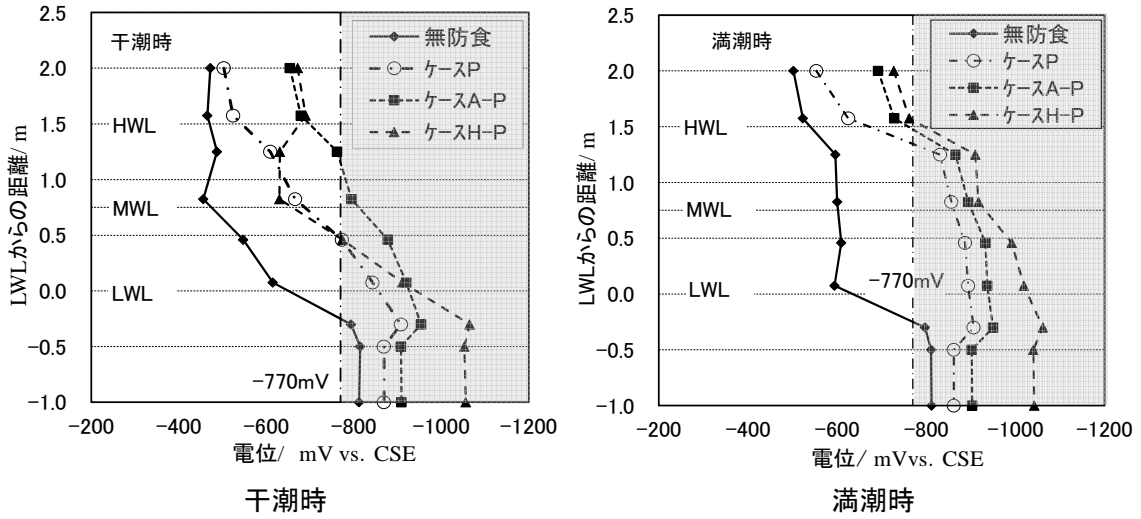


図-4.20 試験体 NS 干潮時および満潮時の電位測定結果

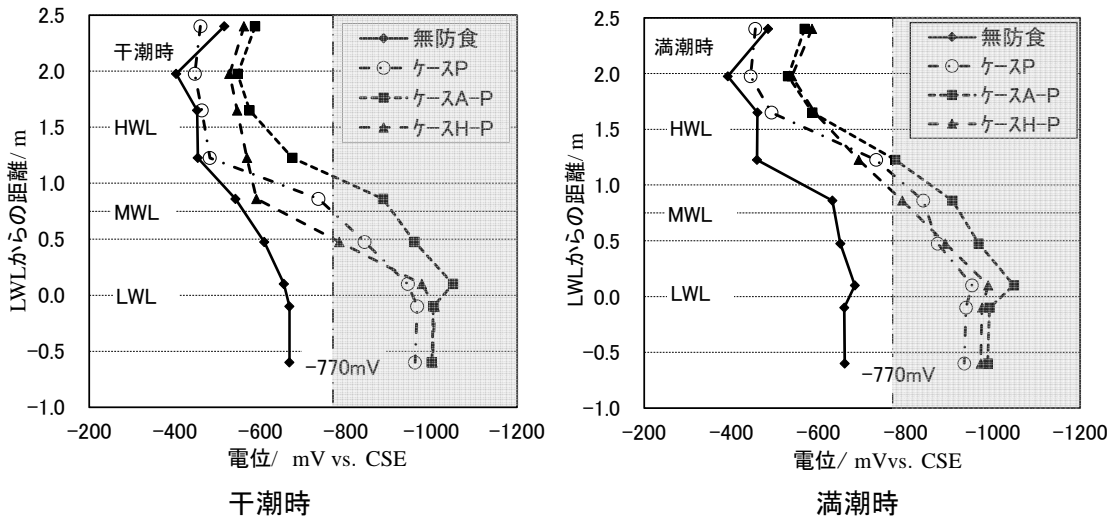


図-4.21 試験体 CA 干潮時および満潮時の電位測定結果

2) 干満によるコンクリート中鋼材に流出入する電流変化

各通電ケースにおける各試験体の干潮時および満潮時のコンクリート鋼材への流出入する電流の測定結果を図-4.22～図-4.24に示す。なお、鋼材に流入する電流はプラス表示、鋼材から流出する電流はマイナス表示としている。

各試験体において、干潮時および満潮時に関わらず、無防食時において、海中部の鋼材から電流が流出し、コンクリート中鋼材へ電流が流入するマクロセル電流が確認された。また、干潮時にケース A-P, H-P においてコンクリート中鋼材に流入する電流は、設定した電流密度であったことから、コンクリート中鋼材に様に分配されて通電されていることが確認された。コンクリート中鋼材への流入電流は、満潮位の直下付近に最大流入電流量が流入することが確認された。

干潮時には、ケース A-P, H-P ではそれぞれ所定の電流が通電されていることが確認されたが、ケース A-P, H-P の満潮時には、各試験体においていずれも区分 H-M の範囲で流入量が増大していた。また、満潮時の区分 H-M において、いずれの試験体においてもケース P とケース A-P, H-P の最大流入電流値が各通電ケースでほぼ同じとなった。これは、満潮時に流入した電流はほとんどが下部工の流電陽極からの防食電流が流入していたことを示唆している。

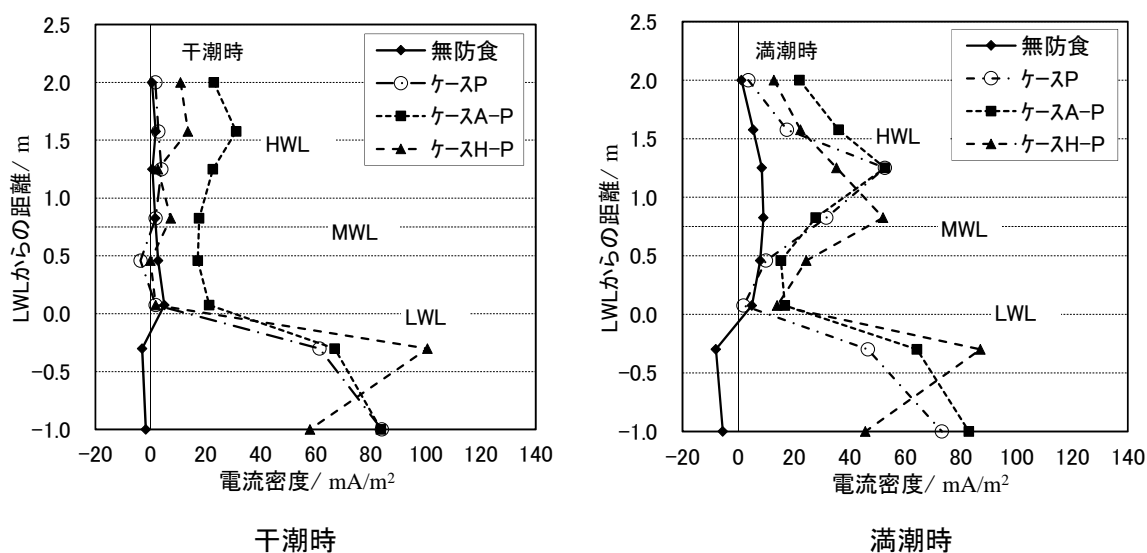


図-4.22 試験体 CS 干潮時および満潮時の電位測定結果

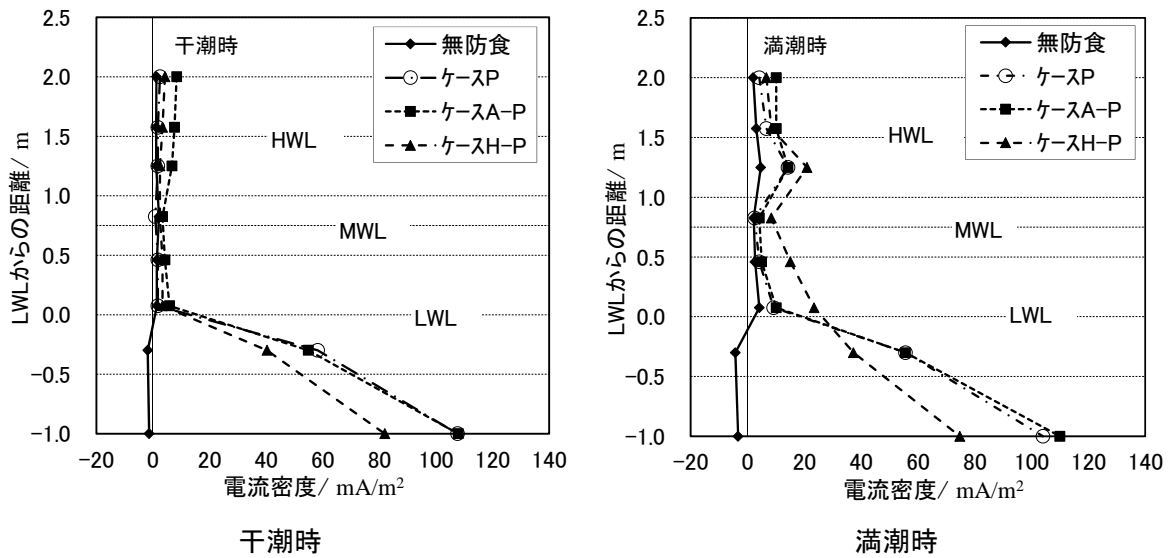


図-4.23 試験体 NS 干潮時および満潮時の電位測定結果

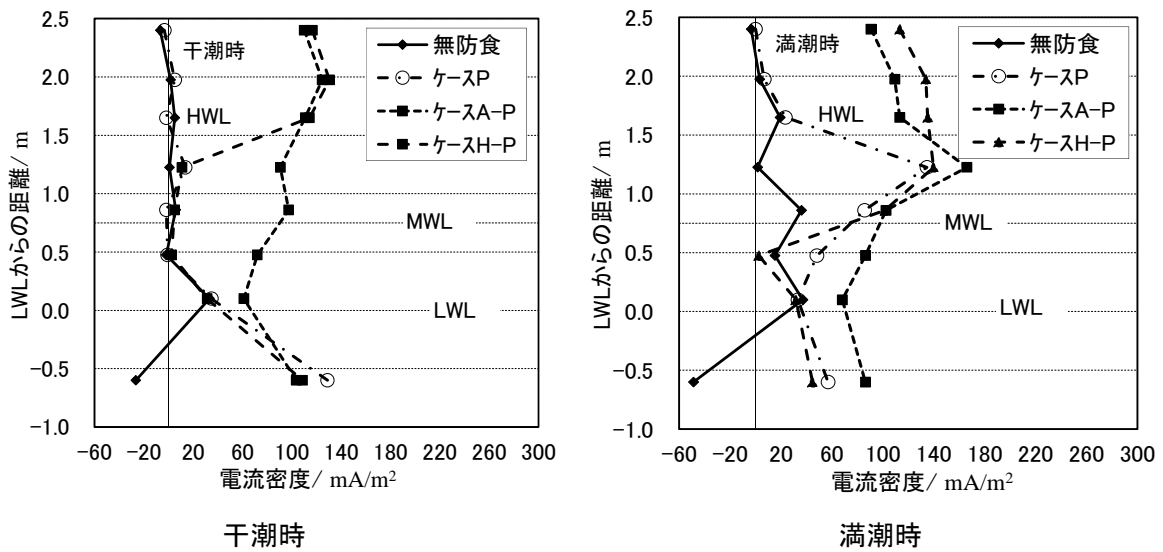


図-4.24 試験体 CA 干潮時および満潮時の電位測定結果

3) 干潮時におけるコンクリート中鋼材の復極量

ケース P, A-P, H-P における各試験体の干潮時の復極量測定結果を図-4.25～図-4.27に示す。HWL 以上（以下、区分 U-H）の復極量は 100mV 以上をほぼ満たしていた。区分 H-M は、満潮時において、各試験体に流入する電流は区分 U-H の通電電流の 1.5～2 倍程度あり、干潮時には外部電源方式からの通電電流が流入しているが、いずれのケースにおいても、復極量 100mV を満たさなかった。区分 M-L も復極量 100mV を満たさなかった。しかしながら、下部工の流電陽極の通電を停止した場合、区分 M-L において、20～50mV 程度の復極量が確認された。これは、陽極からの流入電流による得られたことを示唆している。

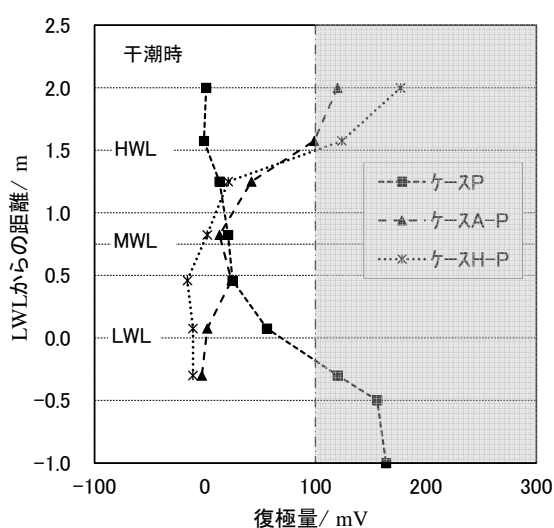


図-4.25 試験体 CS 復極量測定結果

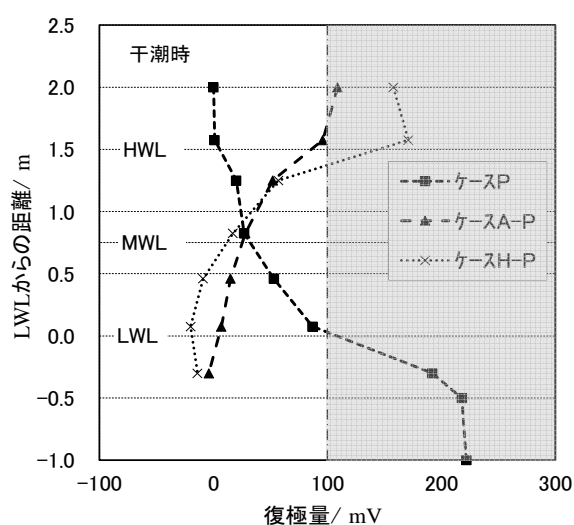


図-4.26 試験体 NS 復極量測定結果

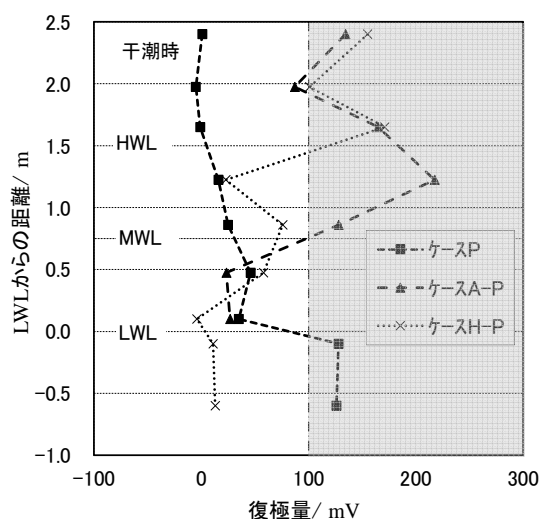


図-4.27 試験体 CA 復極量測定結果

また、ケース P において通電を停止した場合、区分 U-H の復極量にほとんど変化は見られなかったが、HWL～LWL では 100mV を満たさないまでも復極があることが確認された。これは、下部工に流電陽極からの防食電流がコンクリート中鋼材に流入することで、HWL 付近まで復極量に影響を与えたものと考えられる。

この原因について図-4.28 を用いて説明する。例えば、干潮時にコンクリート中に埋め込まれた電極の通電を停止すると復極状態となって鋼材の電位（自然電位）は貴方向に変化するが、潮位の上昇によって下部工の流電陽極の電流が流入すると分極状態となって鋼材の電位（通電電位）は卑方向に変化する。再び潮位の下降によって流入電流が低下すると、復極状態となって電位は貴方向に変化するが、干満部では大気中部に比べて鋼材表面への溶存酸素の供給速度が鈍く電位変化が緩やかなため、下部工の流電陽極の影響を受けない場合に比べて復極量は小さく測定されることになったと考えられる^{4.17)}。

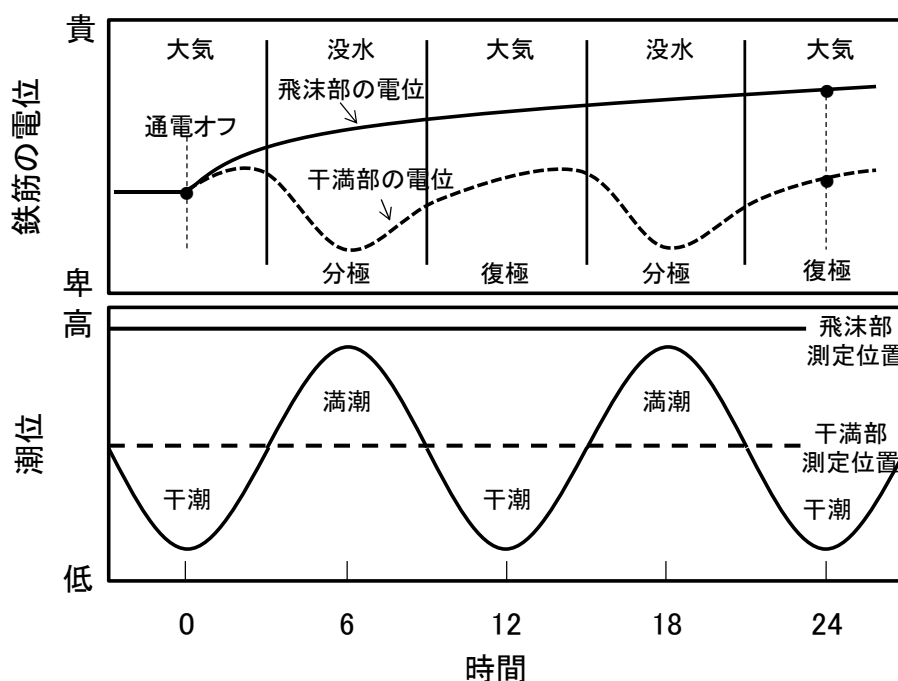


図-4.28 下部工に流電陽極がある場合の湿润環境下にあるコンクリート中鋼材の電位変化

4) 下部工の電気防食に用いた流電陽極の電気防食特性の変化

下部工に設置した陽極は、海水中に露出する鋼材に対して防食電流密度 100mA/m² になるように可変抵抗を挿入し、通電調整を行った。しかしながら、コンクリート中鋼材と電氣的導通していることから、干満によりコンクリートが海水に浸漬するとコンクリート中鋼材の防食電流が流入する。

電気防食特性を把握する手法として、Ec-Ic（陰極電位-陰極流入電流密度）プロットに用いられる。これは陰極電位-陰極流出入電流密度を同一平面上にプロットしたものであるが、その形状を基に電気防食の特性を把握するのである。

ここで、流電陽極方式による電気防食系では式 4.10 が成り立つ。

$$I_a = \frac{E_c - E_a}{R_{sa}} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.10)$$

I_a：陽極 1 本当りの発生電流，E_a：陽極電位，E_c：陰極電位，R_{sa}：陽極 1 本当りの接水抵抗は、（電気防食回路における回路抵抗 R_s は、陽極接抵抗 R_{sa}，環境抵抗 R_c，陰極接水抵抗 R_{sc} の和）であるが、海水中では R_{sa} とみなしている。式 4.10 より陽極 1 本当りの発生電流が防食面積 S_c で除すと設計防食電流密度 I_c が得られる。

$$I_c = \frac{E_c - E_a}{S_c R_{sa}} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.11)$$

式 4.11 を変形すると $E_c = I_c * S_c * R_{sa} + E_a \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (4.12)$

式 4.12 の傾きは S_c*R_{sa}，切片 E_a の一次直線であり，Ec-Ic 平面上にプロットした図を試験体 CS の結果を図-4.29，試験体 NS の結果を図-4.30 に示す。試験体 CS は，ケース P が最も傾きが大きかったが，電気防食設計線と比較すると傾きは小さく，設計電流密度（-810mVvs.SSE[SW]と電気防食特性線との交点の電流密度）初期設計電流密度より大きいことが確認された。また，通電ケースで，ケース H-P が最も初期電流密度を必要とすることが分かった。これは，コンクリート中鋼材に防食電流が流入することに加え，上部工への通電電流が影響しているものと考えられる。

一方，試験体 NS においては，ケース P，A-P は同じ線上にあることが確認された。これは，干満環境下で上部工の全電極から通電した場合と下部工の陽極のみから通電した場合において，電気防食の特性が同じであることを示している。しかしながら，ケース H-P においては，試験体 CS と同様に最も初期電流密度が必要であることが分かった。

したがって、電気防食特性線より、栈橋のような上部工が没水するような環境においては、上部工に下部工の流電陽極から防食電流が流入する場合、設計電流密度は設計値よりも大きくなる。また、上部工の通電ケースにより設計電流密度を考慮する必要があることが分かった。しかしながら、海中の防食面積に対する上部工への流入面積が小さければ、影響は小さいものと考えられる。

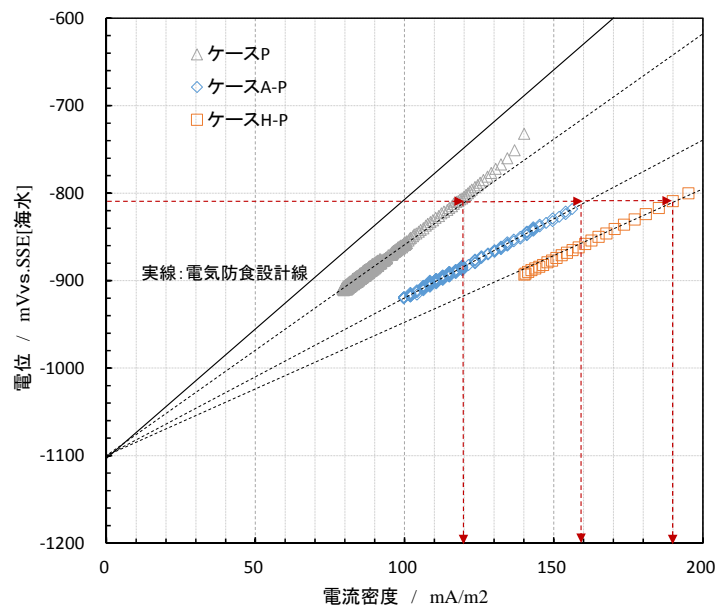


図-4.29 試験体 CS 各ケースによる陽極の電気防食特性線

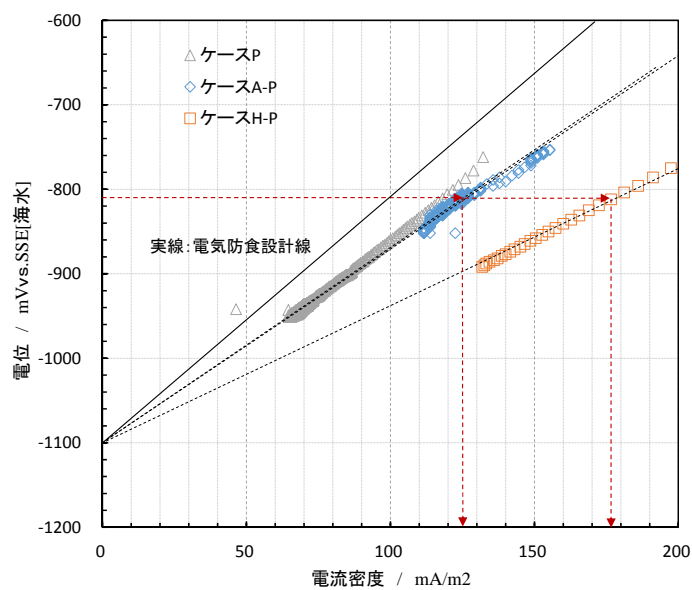


図-4.30 試験体 NS 各ケースによる陽極の電気防食特性線

4.3.7 まとめ

栈橋の一部を模擬したコンクリート試験体を干満帯環境に設置し、通電ケースを変え、鋼材の電位、防食電流の分布、復極量測定を行った。その結果による考察を区分ごとに行った。また、下部工の流電陽極の電気防食特性について考察を行った。

1) 区分 U-H (HWL 以上)

下部工の流電陽極からの防食電流の流入が満潮時に一時的に見られるが、電位変化はほとんど見られないことから、下部工の流電陽極の影響が及んでいないと考えられる。ケース A-P、H-P により、通電調整により復極量 100mV を維持できることから、電気防食の効果を復極量で管理できることが分かった。コンクリートの下端位置が、LWL より高い位置にある場合(試験体 CA)においても同様の結果となった。

2) 区分 H-M (HWL~MWL)

満潮時には区分 U-H の流入電流の 2 倍程度の電流が流入していたが、復極量 100mV を満たさなかった。これは、コンクリート中の鋼材周辺が脱気環境となったことが要因であると考えられる。下部工の流電陽極のみから通電した場合(ケース P)において、干潮時では、MWL (+0.75m) 付近まで、満潮時には、+1.0m まで試験体の設置位置に関わらず再不動態化電位以下であり、鋼材は再不動態化状態となり、鋼材の腐食は抑制されていると考えられる。

3) 区分 M-L (MWL~LWL)

下部工の流電陽極からの防食電流により、ほぼ鋼材は再不動態化電位以下であった。鋼材は再不動態化状態となり、鋼材の腐食は抑制されていると考えられる。

4) 下部工の流電陽極の電気防食特性

栈橋のような上部工が没水するような環境においては、上部工に下部工の流電陽極から防食電流が流入する。そのため、電流密度は設計値よりも大きくなる場合がある。また、上部工の通電ケースにより設計電流密度を考慮する必要があることが分かった。しかしながら、海中の防食面積に対する上部工への流入面積が小さければ、影響は無いものと考えられる。

4.3.8 電気防食効果の評価方法および電気防食の管理方法に対する課題

湿潤環境下にある RC 構造物に外部電源方式により電気防食を適用した場合、干満部において、従来の復極量により電気防食の防食効果の評価が難しいことが分かった。また、下部工が流電陽極方式による電気防食が適用されている場合、干満部に防食電流が流入し、MWL 付近まで再不動態化電位以下が潮位変動に影響されず維持されていることが分かった。

したがって上記のように湿潤環境下にある RC 構造物に電気防食を適用する場合、以下の 2 点を検討する必要がある。

1) 電気防食の防食効果の評価する方法

防食基準である復極量により管理すること難しいため、復極量に代わる電気防食の防食効果の評価する方法を検討する必要がある。

2) 電気防食の管理方法

復極量を防食基準として管理することが難しい範囲は、別回路により通電する必要がある。電気防食の管理方法を分けることによって管理を容易にする必要があり、以下のような電流値管理方法、電位値管理方法が考えられる。

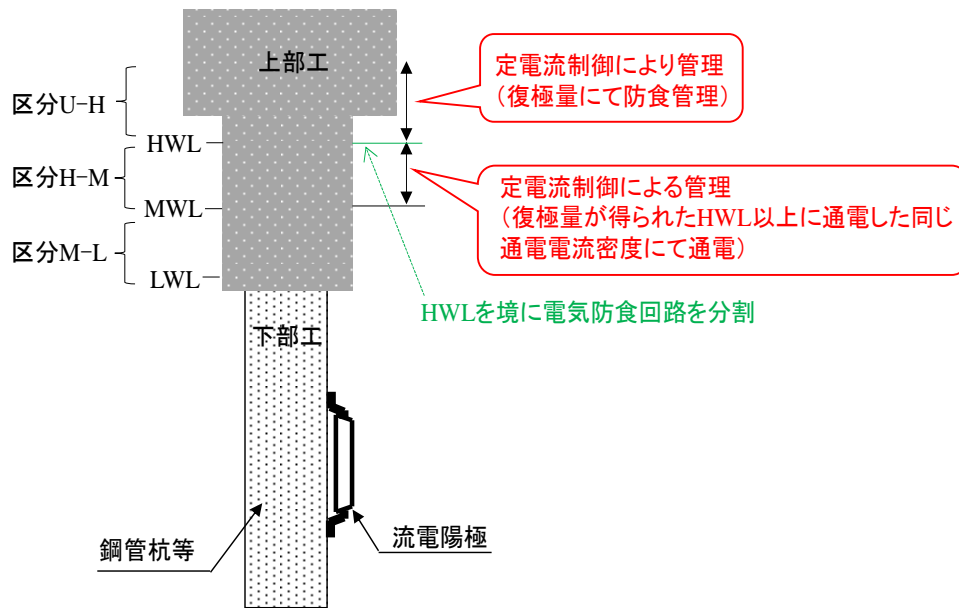
①電気防食回路の分割と電流値制御による管理

HWL を境に電気防食回路を分割し、それぞれ独立した直流電源装置で通電を行う。HWL 以上の回路（大気中回路）は従来の復極量で管理を行うが、HWL～MWL の回路は大気中回路と同じ電流密度（HWL 以上に通電して、復極量が得られた電流密度）となるように通電し、点検時に直流電源装置の電流値を管理していく方法であり、その概要を図-4.31 ①に示す。干満帯の鋼材は大気中より酸素の拡散速度が遅く、大気中の電流密度より低い電流密度で腐食が抑制できると考えられるため、電流値で管理していく実務的な管理方法である。

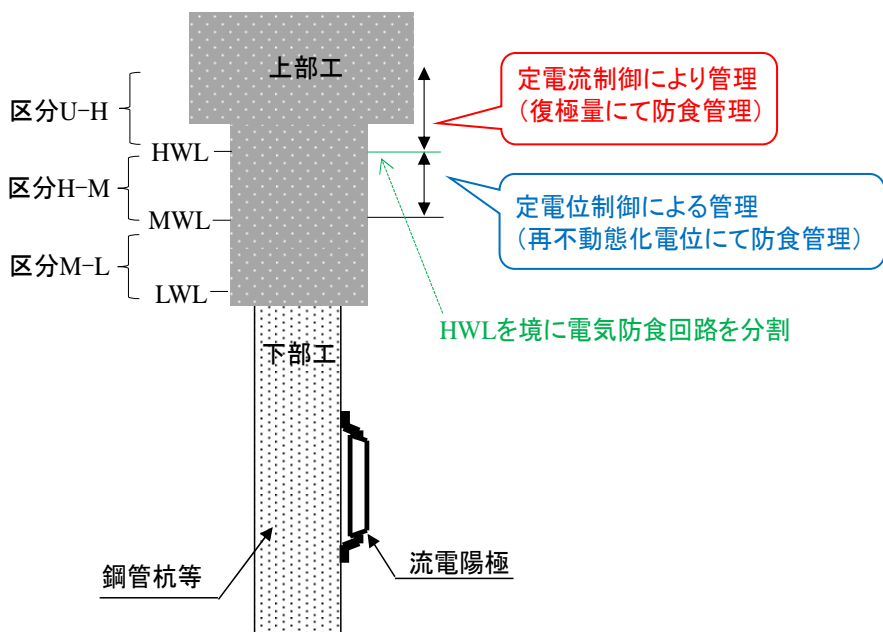
②電気防食回路の分割と再不動態化電位による電位値制御による管理

HWL を境に電気防食回路を分割し、それぞれ独立した直流電源装置で通電を行う。HWL 以上の回路（大気中回路）は従来の復極量で管理を行うが、HWL～MWL の回路は、鋼材の電位を再不動態電位 -770mV vs.CSE 以下にするものであり、その概要を図-4.31 ②に示す。鋼材電位が再不動態電位以下であれば、鋼材の腐食は抑制されていると考えられる。電気防食の維持管理方法として、HWL 以深において、鋼材電位が再不動態化電位以下を維持するよう直流電源装置で制御すれば、電気防食の管理は可能である。

1) において項 4.4 で検討し, 2) においては項 4.5 で検討する.



①電気防食回路の分割と電流値制御による管理

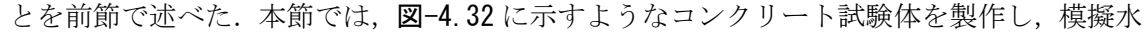


②電気防食回路の分割と再不動態化電位による電位値制御による管理

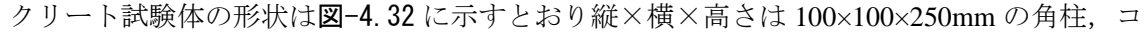
図-4.31 区分 H-M の電気防食管理方法

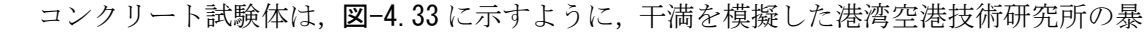
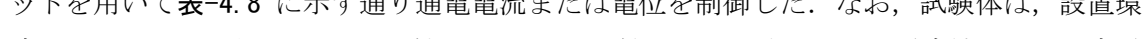
4.4 電気防食を適用した湿潤環境下における電気防食効果の評価方法の検証

4.4.1 はじめに

電気防食効果を評価する方法として、復極量にて評価することが一般的であるが、湿潤環境下では、溶存酸素の拡散速度が遅く復極量で電気防食の効果を評価することが難しいことを前節で述べた。本節では、-4.32 に示すようなコンクリート試験体を製作し、模擬水槽の各水位区分（区分 U-H，区分 H-M，区分 M-L の 3 区分）に配置し、定電流値制御や定電位（再不動態化電位）値制御にて電気防食を適用し、その電気防食効果を通電時の腐食速度を推定することによって検証した。また、推定した腐食速度から算出した腐食減量と試験体の解体により実測した鋼材の腐食減量を比較することで、通電時の腐食速度推定方法の妥当性について検証した。さらに、長尺模擬試験体のように隣接するコンクリート中鋼材の影響のある場合との比較を目的として、単体での自然電位、コンクリート抵抗、分極抵抗を測定することで、電気防食適用時の副時的効果も検証した。

4.4.2 試験体および試験概要

コンクリート試験体の配合を表-4.7 に示す。コンクリート試験体のセメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には川砂、粗骨材には川砂利を用いた。水セメント比 50%，目標スランプ $10\pm 2.5\text{cm}$ ，空気量 $4\pm 1\%$ とした。また、腐食環境下を模擬するためコンクリート中の塩化物イオン量が 10kg/m^3 となるように NaCl を練り混ぜ水に添加した。コンクリート試験体の形状は-4.32 に示すとおり縦×横×高さは $100\times 100\times 250\text{mm}$ の角柱、コンクリート上面からかぶり 4cm の位置に $\phi 19\text{mm}$ の鉄筋を配置し、その横に飽和銀塩化銀照合電極（SSE）を設置、かぶり厚さ 1cm の位置に MMO（酸化白金チタン）電極を埋め込んだ。上面以外 5 面はエポキシ樹脂にて塗装を施した。コンクリート打ち込み後、約 30 日間の湿潤養生を行い、表面が乾燥後にエポキシ樹脂を塗布し、エポキシ樹脂が完全に硬化後に模擬環境に設置した。また、鉄筋は電気防食適用による腐食量を算出するために、ブラスト処理されて質量が既知の鋼材を用いた。

コンクリート試験体は、-4.33 に示すように、干満を模擬した港湾空港技術研究所の暴露試験場に暴露した。暴露環境として、干満帯を模擬しており、-4.34 に示すとおり、1 日に 2 回の干満を繰り返す環境である。通電方法としてポテンシオスタット・ガルバノスタットを用いて表-4.8 に示す通り通電電流または電位を制御した。なお、試験体は、設置環境により HWL 以上を H，MWL 付近を M，LWL 付近を L と表記し、通電方法として、定電流通電の場合は C，定電位通電の場合は P と表記した。また、電位制御を行う場合、鋼材と照合電極間の IR 値の補正は、インスタントオフ電位差計を用いて、インスタントオフ電位が設定電位になるようにポテンシオスタットの設定電位を定期的に操作しながら行った。定期的に分極測定、交流インピーダンス測定、復極量測定（24 時間後）を実施した。また、通電時の防食状態を把握するために 4.4.2 項に示す方法により通電時の腐食速度を推定した。

また、通電オフ後の 24 時間後に復極量測定、交流インピーダンス測定（3 電極法にて、

振幅±10mV, 測定周波数高周波 1.28kHz 低周波 10mHz の2周波数)を測定し, 1日放置後に同設定とし測定を繰り返した. また, 通電期間中は, データロガーを用いて維持電流(定電位設定で通電される電流)及び電位変化を2分インターバルにて記録した.

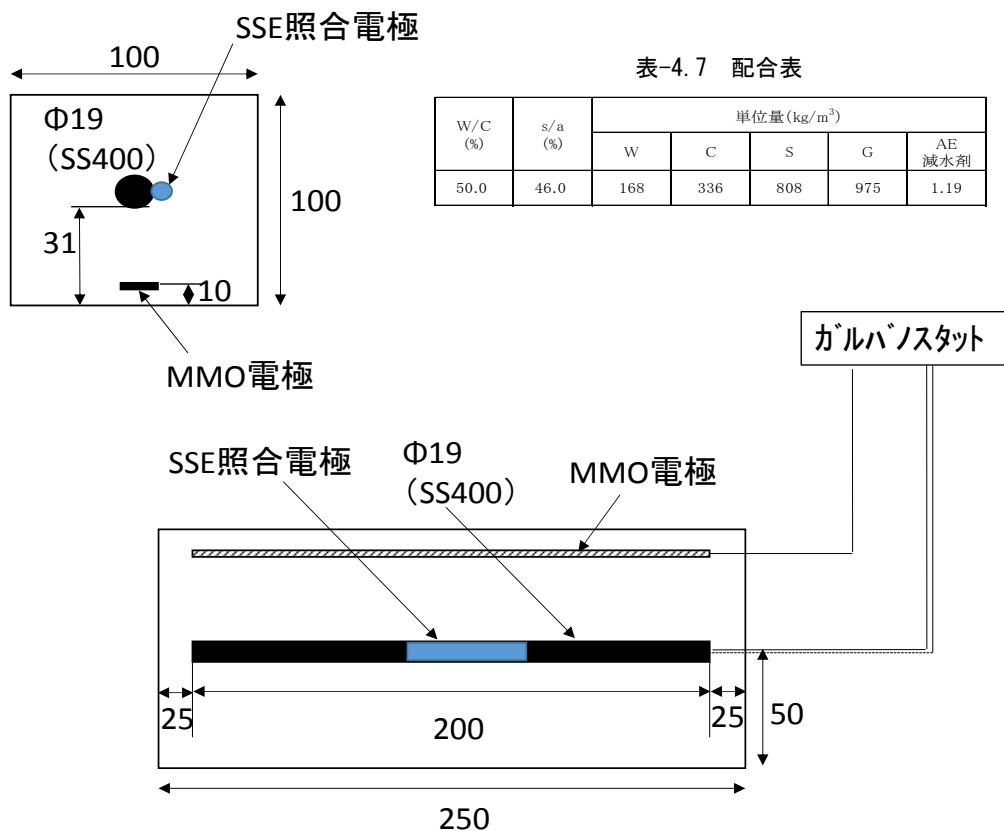


図-4.32 検証試験体概要図

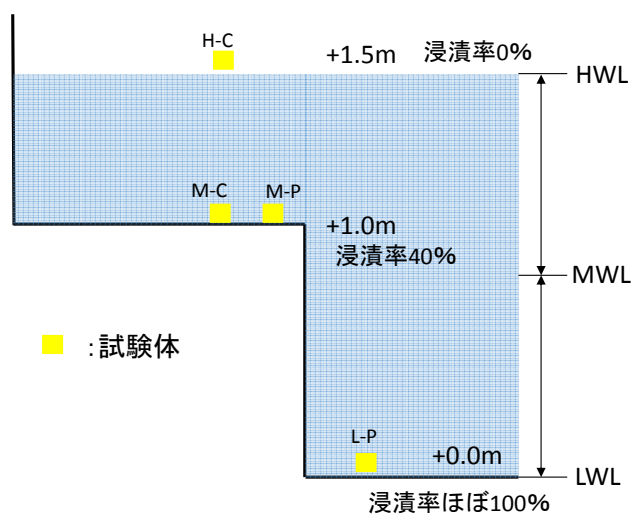


図-4.33 試験体の模擬水槽への暴露位置

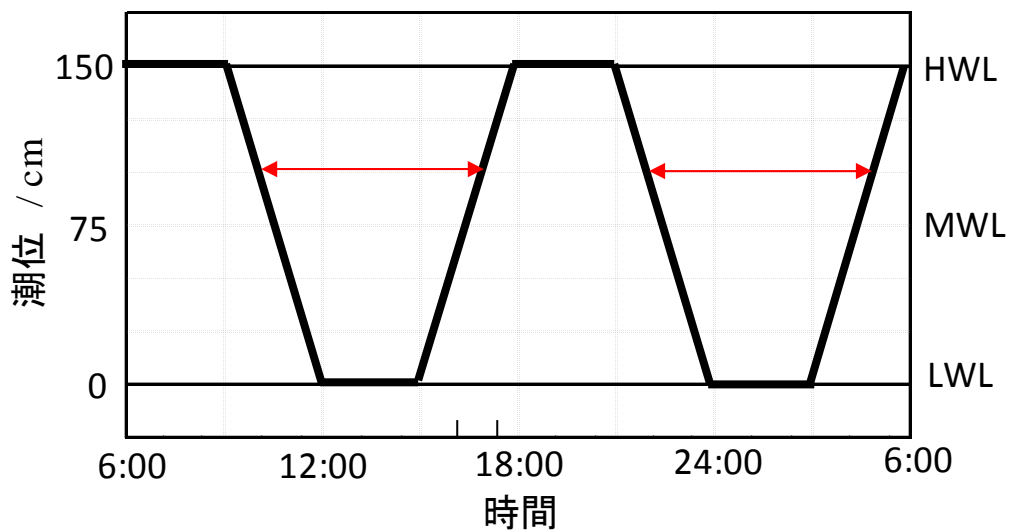


写真-4.1 設置試験体

表-4.8 各試験体の試験方法表

試験体№	試験内容
M-C	MWL付近(MWL+0.25m)に設置 浸漬率約40% 復極量100mV以上を確保できる電流にて通電する定電流通電を実施した。 復極量100mV以上を確保しつつ電流値を低減させた。
H-C	HWL以上に設置 復極量100mV以上を確保できる電流にて通電する定電流通電を実施した。 復極量100mV以上を確保しつつ電流値を低減させた。
M-P	MWL付近(MWL+0.25m) 浸漬率約40% 常に再不動態化電位(-770mV(vs.CSE))を維持する定電位通電を実施した。 維持電流密度の変化を確認した。
L-P	LWLに設置に設置 浸漬率ほぼ100% 常に再不動態化電位(-770mV(vs.CSE))を維持する定電位通電を実施した。 維持電流密度の変化を確認した。

C: Constant Current P: Constant Potential



←→ 試験体M-C, M-Pの設置位置 浸漬率約40%

図-4.34 干満サイクル

4.4.3 試験結果及び考察

1) MWL 付近と LWL 付近との維持電流密度の経時変化

MWL 付近に設置した試験体 M-P および LWL 付近に設置した試験体 L-P をそれぞれ -770mV (vs.CSE インスタントオフ電位) に設定した場合の維持電流密度の経時変化を試験体 M-P を図-4.35 に示し、試験体 L-P を図-4.36 に示す。MWL に設置した試験体 M-P は設置 1 か月後には満潮時に $130\text{mA}/\text{m}^2$ 、干潮時に $100\text{mA}/\text{m}^2$ の電流密度が計測された。また、干満サイクルは 2 回/日であるが、維持電流密度の変動は昼間にピークをむかえる 1 回のみである。これは夜間において潮位の変動は維持電流密度に影響していないことを表している。つまり、維持電流密度の変動は、環境条件である、気温、湿度の影響を大きく受けることを示唆している。しかしながら、維持電流密度は継時的に減少し、6 か月後には干潮、満潮の差は小さくなり $40\text{mA}/\text{m}^2$ 程度で定常化した。

一方、LWL に設置した試験体 L-P は、設置 1 か月後、4 か月後と維持電流密度の挙動に違いは見られなかった。浸漬時は $50\text{mA}/\text{m}^2$ であったが、干潮時は一時的に試験体表面が露出することから $30\text{mA}/\text{m}^2$ 程度の電流密度となった。試験体 M-P と同様に干満サイクルは 2 回/日あるが、維持電流密度の変動がみられるのは昼間の干潮時のみである。しかしながら、維持電流密度は 6 か月後には干潮、満潮の差は小さくなり、 $20\text{mA}/\text{m}^2$ 程度で定常化した。

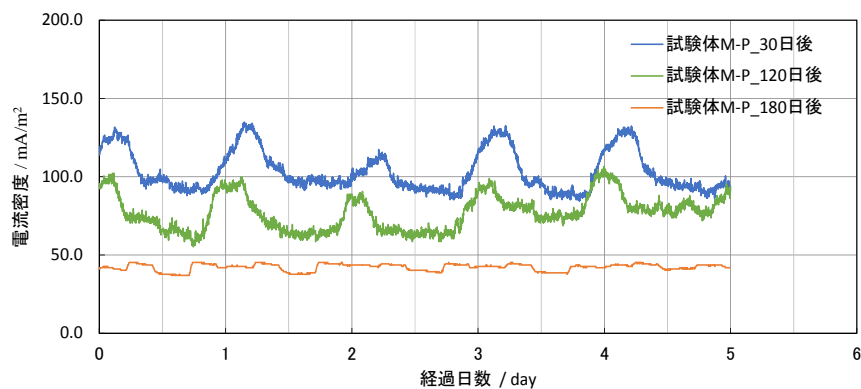


図-4.35 試験体 M-P の維持電流密度経時変化

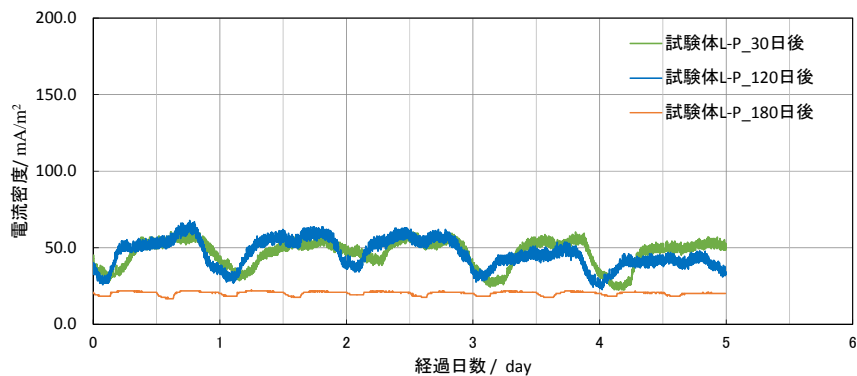


図-4.36 試験体 L-P の維持電流密度経時変化

2) 自然電位, コンクリート抵抗率および分極抵抗率の経時変化

各試験体を Corrosion Monitor7622 (交流法) を用いて, 自然電位, コンクリート抵抗率, 分極抵抗を同時に測定した. なお, 測定は, 24 時間後の干潮時, その干潮時後の満潮時にて実施した.

自然電位の干潮時および満潮時の経時変化を図-4.37 に示す. 各試験体とも電気防食を適用することで, 電位が貴化する傾向がみられた. 試験体 H-C は, 最も貴化傾向が大きくなった. しかしながら, CEB の判定基準^{4,6)}によれば「90%以上の確率で腐食あり」が「不確定」になったことを表す程度である. これは, コンクリートの性状 (塩化物イオン濃度が当初より 10kg/m^3 混入させているなど) に影響しているものと考えられる. その他の試験体は, 自然電位が貴化する傾向はみられるものの, 通電 6 か月後の干潮時においても「90%以上の確率で腐食あり」という判定結果は変わらなかったが, 区分 H-M, M-L においては, 定電流値制御, 定電位値制御によらず電位の貴化がみられた.

コンクリート抵抗率の干潮時および満潮時の経時変化を図-4.38 に示す. 試験体 H-C においては, コンクリート抵抗率は経時的に上昇した. 一方, MWL 付近に設置した試験体 M-C および M-P のコンクリート抵抗率は, 干潮時には継時的に上昇する傾向はみられたが, 満潮時には経時変化は小さく $100\Omega\cdot\text{cm}$ 程度で定常化していた. また, 試験体 L-P のコンクリート抵抗率は, 満潮時には試験体 M-C および M-P と同様に $100\Omega\cdot\text{cm}$ 程度で定常化していたが, 設置 6 か月後には $20\Omega\cdot\text{cm}$ 程度まで降下した. これは, 維持電流密度の経時変化から干潮時に満潮時よりも通電電流が大きくなっていることからコンクリート抵抗率が小さくなることによって通電電流が大きくなったことと一致している.

鋼材の分極抵抗の干潮時および満潮時の経時変化を図-4.39 に示す. 分極抵抗を CEB の判定基準を基に判定すると, 干潮時において, 試験体 H-C が最も腐食が軽微と判定されるに至る期間は短かったが, 試験体 M-C, M-P, L-P においても経時的に分極抵抗は上昇し試験開始 6 か月後にはすべて不動態化状態 (腐食なし) と判定された. 一方, 満潮時は, 試験体 H-C 以外は「中～高の腐食速度」と判定された. これは, 満潮時には試験体が海水に浸漬するために分極抵抗が下がったと考えられる.

したがって, コンクリート中鋼材に電気防食を適用し, 鋼材の経時的な環境改善効果を把握する場合, 海水の浸漬による影響を受けない干潮時に測定することが望ましいと考えられる.

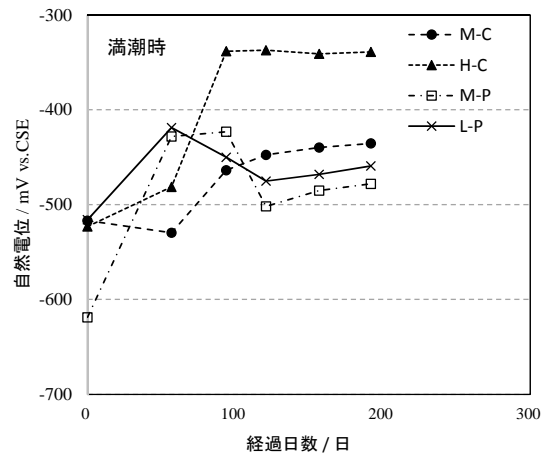
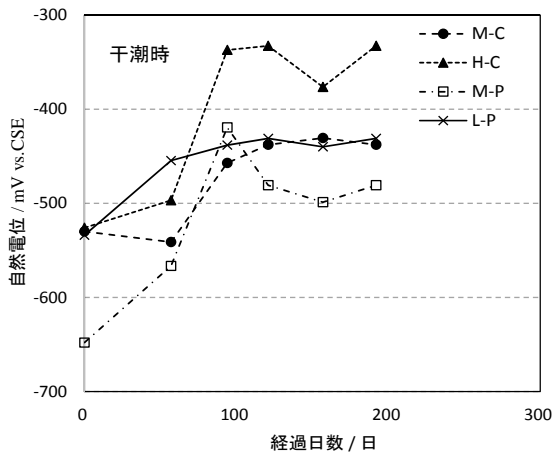


図-4.37 自然電位の干潮時，満潮時の経時変化

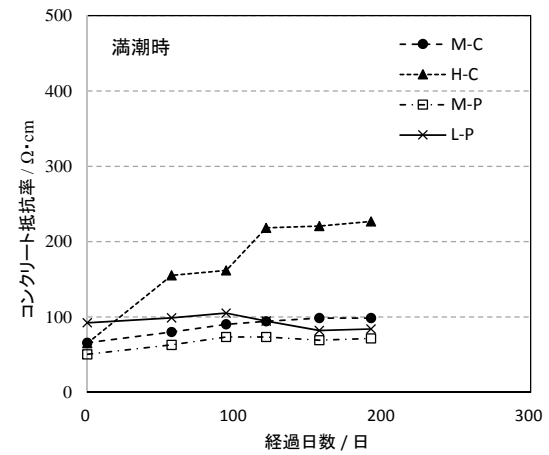
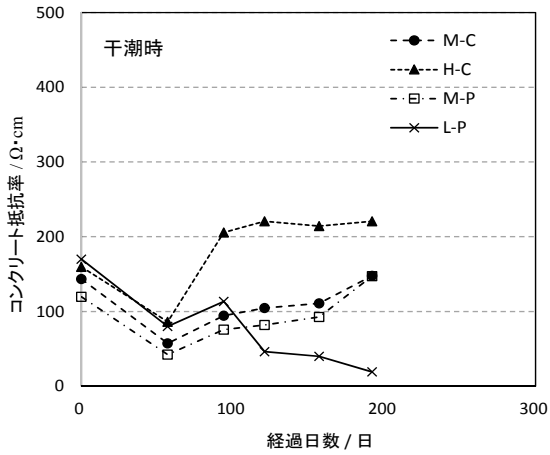


図-4.38 コンクリート抵抗率の干潮時，満潮時の経時変化

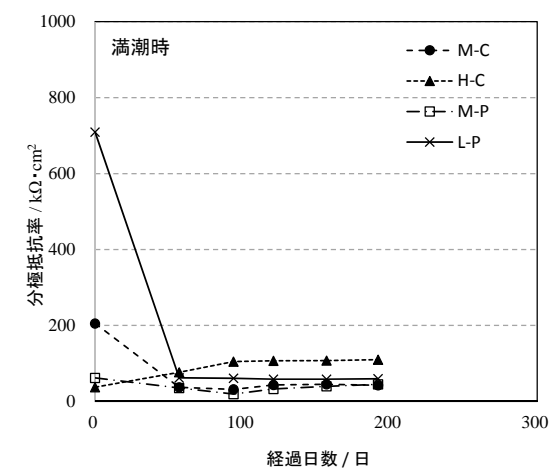
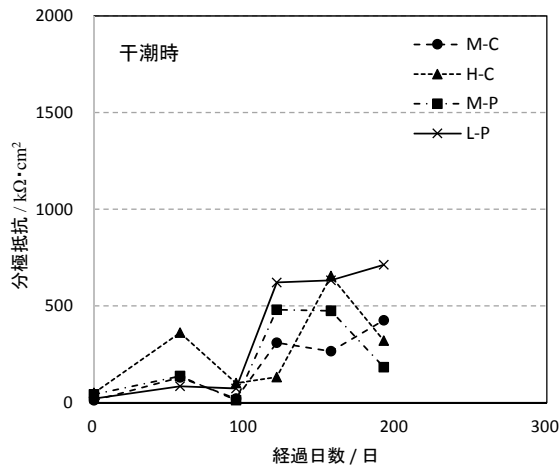


図-4.39 分極抵抗率の干潮時，満潮時の経時変化

3) 通電条件と復極量の経時変化

各試験体への通電条件と通電停止から 24 時間後の復極量の経時変化を表-4.9 にまとめ、図-4.40 に示す。試験体 M-C, H-C には、通電 50 日までは通電電流密度 $4\text{mA}/\text{m}^2$ (鉄筋表面積に対して) で通電を行ったが、いずれの試験体においても復極量 100mV は得られず 20mV 程度であった。そのため、通電 50 日以降は通電電流密度を $30\text{mA}/\text{m}^2$ から測定時に復極量 100mV が確保できるように段階的に通電電流を低下させた。通電 190 日後には試験体 M-C で通電電流密度 $10\text{mA}/\text{m}^2$ で復極量 100mV 以上となり、試験体 H-C では通電電流密度 $4\text{mA}/\text{m}^2$ で復極量 100mV 以上となった。

一方、定電位 -770mV (vs.CSE) に設定した試験体 M-P, L-P は試験期間を通して、復極量 100mV 以上であった。これは、経時的に定電流通電よりも、維持電流密度が大きな通電量であったからだと考えられる。なお、干潮時の測定において復極量が得られているのは、各試験体が干潮時に完全に海水より露出し、長尺試験体のように海中部の流電陽極の影響を受けないことが考えられる。

表-4.9 通電条件と復極量の経時変化

試験体No.	経過日数, 電流密度及び設定電位				
	50	90	120	160	190
M-C	$4\text{mA}/\text{m}^2$	$30\text{mA}/\text{m}^2$	$30\text{mA}/\text{m}^2$	$20\text{mA}/\text{m}^2$	$10\text{mA}/\text{m}^2$
H-C	$4\text{mA}/\text{m}^2$	$30\text{mA}/\text{m}^2$	$15\text{mA}/\text{m}^2$	$10\text{mA}/\text{m}^2$	$4\text{mA}/\text{m}^2$
M-P	-770mV	-770mV	-770mV	-770mV	-770mV
L-P	-770mV	-770mV	-770mV	-770mV	-770mV
	復極量 (mV)				
M-C	15	133	160	139	130
H-C	17	236	209	191	202
M-P	332	355	299	307	258
L-P	320	328	338	238	309

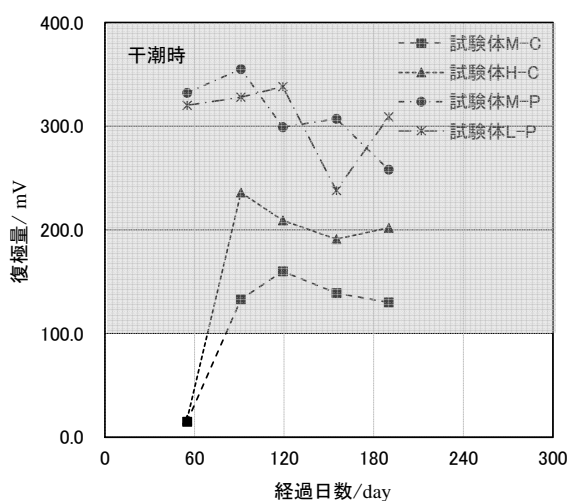


図-4.40 各試験体の復極量の経時変化

4) 通電条件と通電時の腐食速度の推定値の経時変化

各試験体における通電条件と推定腐食速度の関係を表-4.10 にまとめ、図-4.41～図-4.44 に各試験体の通電条件による通電時の分極曲線の経時変化を示す。試験体 M-C, H-C は通電 50 日後が復極量 20mV 程度であったことより腐食速度の推定値は大きくなった。通電 50 日以降は復極量 100mV を満たしていたが、通電電流を上昇させた 120 日後の推定腐食速度は、 $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (CEB の判定基準により) 未満となり、鋼材は不動態化状態 (腐食なし) と判定されが、通電電流を低減させた 190 日後には、試験体 M-C で $0.315\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、試験体 H-C で $0.377\mu\text{A}/\text{cm}^2$ となり、コンクリート中鋼材は軽微な腐食状態にあるという判定となった。

一方、再不動態化電位とした -770mV (vs.CSE) に電位を維持した場合は、通電 50 日後は腐食域と判定される腐食速度 $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ より大きな値であったが、それ以降から通電 190 日後までは推定腐食速度は、試験体 M-P で $0.039\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、試験体 L-P で $0.123\mu\text{A}/\text{cm}^2$ となり、コンクリート中鋼材は不動態化状態 (腐食なし) という判定となった。

表-4.10 通電条件と推定腐食速度

試験体No.	通電条件	経過日数 (日)	ターフェル勾配 (mV/decade)	推定腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
M-C	$4\text{mA}/\text{m}^2$	50	163.3	1.287
	$30\text{mA}/\text{m}^2$	120	170.2	0.197
	$10\text{mA}/\text{m}^2$	190	149.5	0.315
H-C	$4\text{mA}/\text{m}^2$	50	197.8	1.217
	$15\text{mA}/\text{m}^2$	120	144.9	0.156
	$4\text{mA}/\text{m}^2$	190	170.2	0.377
M-P	-770mV (vs. CSE)	50	154.1	1.073
		120	149.5	0.201
		190	138	0.039
L-P	-770mV (vs. CSE)	50	154.1	0.74
		120	154.1	0.137
		190	142.6	0.123

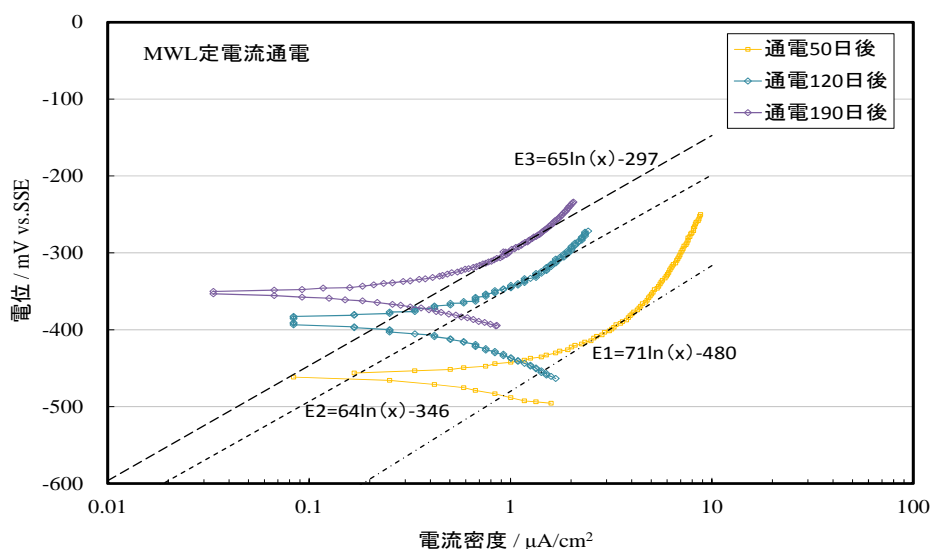


図-4.41 試験体 M-C 分極曲線の経時変化とターフェル直線

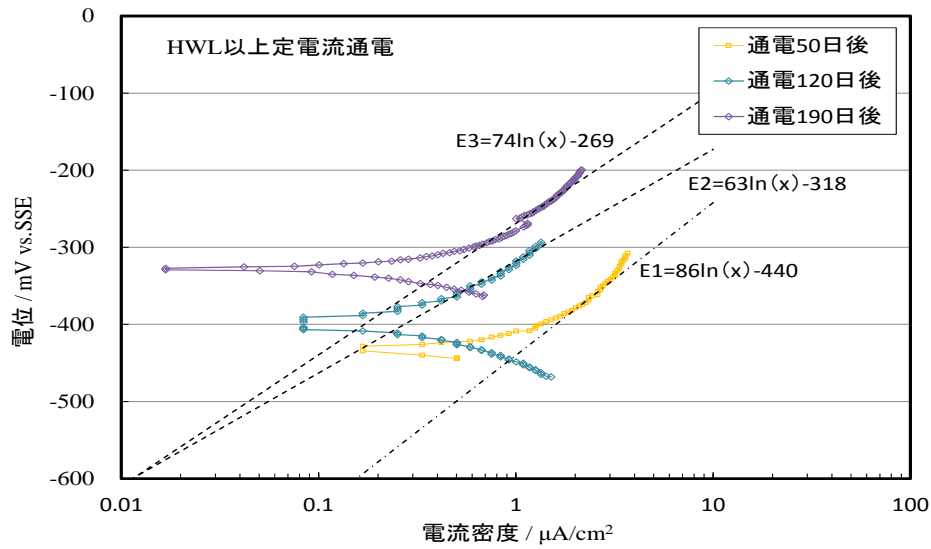


図-4.42 試験体 H-C 分極曲線の経時変化とターフェル直線

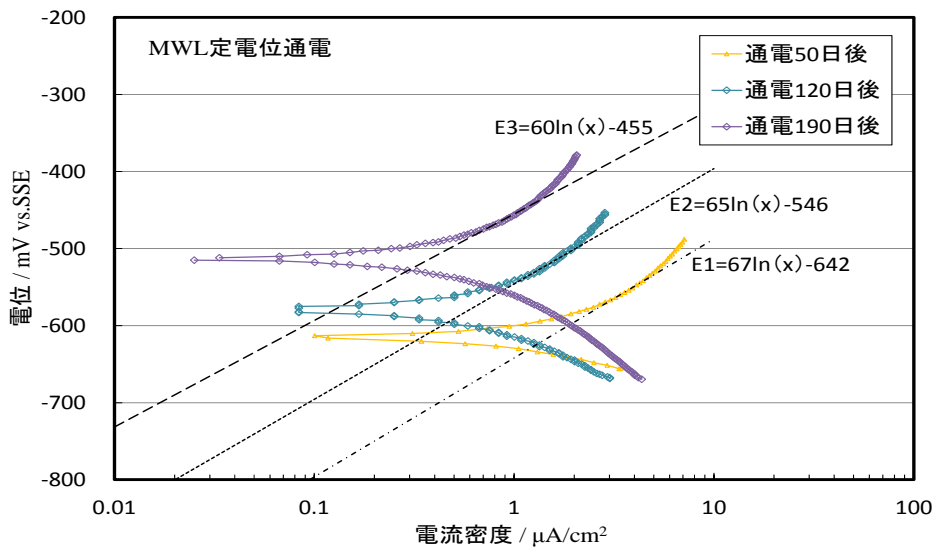


図-4.43 試験体 M-P 分極曲線の経時変化とターフェル直線

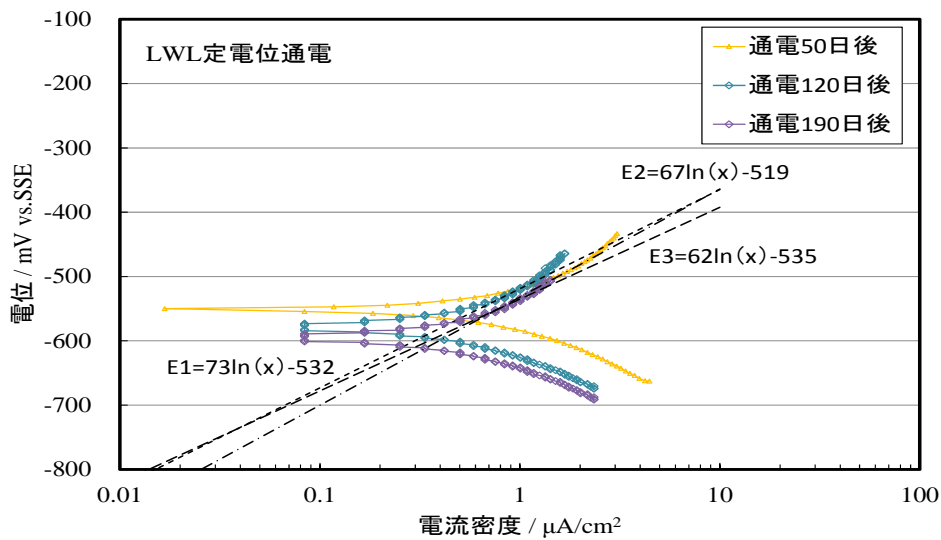


図-4.44 試験体 L-P 分極曲線の経時変化とターフェル直線

5) 腐食速度推定方法の妥当性の評価

通電時の腐食速度の推定方法の妥当性を評価するために、推定腐食速度より算出した鋼材の推定腐食量と試験終了後のコンクリートを解体することによって実測した鋼材の実腐食量とを比較した。なお、推定腐食量は式 4.13 の台形則により算出した。

$$\Delta W = Q_{eq} \times (i_1 + i_2) \times 0.5 \times h \quad \dots \dots \dots (4.13)$$

ここに、 ΔW ：腐食量 (mg/cm^2)、 Q_{eq} ：鋼材の電気化学当量 $1042 (\text{mg}/\mu\text{A}\cdot\text{h})$ 、 i_1 ：前回推定腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)、 i_2 ：今回推定腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)、 h ：時間 (h)

その結果を、表-4.11 に示す。また、推定腐食量と実腐食量との相関関係を図-4.45 に示す。図-4.45 により、相対比 r (推定腐食量/実腐食量) が $0.84\sim 1.05$ の範囲にあり、 $r=1$ の直線上付近に近似していることから概ね等価な関係にあると考えられる。試験体 M-C、H-C において、初期に復極量を満たさない期間があったことを考慮すれば、通電時の腐食速度として推定された腐食速度は、電気防食適用時の鋼材の腐食速度を概ね表していると判断できる。

表-4.11 推定腐食量と実腐食量との相対比

試験体No.	推定腐食速度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	期間		推定腐食量 (mg/cm^2)		実腐食量 (mg/cm^2)	相対比
		日 (day)	時間(h)	各期間	合計		
M-C	1.287	50日	1200	1.609	3.556	4.239	0.84
	0.197	70日	1680	1.299			
	0.315	70日	1680	0.448			
	0.351	24日	576	0.2			
H-C	1.217	50日	1200	1.522	3.441	3.803	0.90
	0.156	70日	1680	1.202			
	0.377	70日	1680	0.466			
	0.458	24日	576	0.251			
M-P	1.073	50日	1200	1.342	2.699	2.572	1.05
	0.201	70日	1680	1.115			
	0.039	70日	1680	0.21			
	0.069	24日	576	0.032			
L-P	0.74	50日	1200	0.925	2.399	2.681	0.89
	0.137	70日	1680	0.768			
	0.123	70日	1680	0.228			
	1.471	24日	576	0.478			

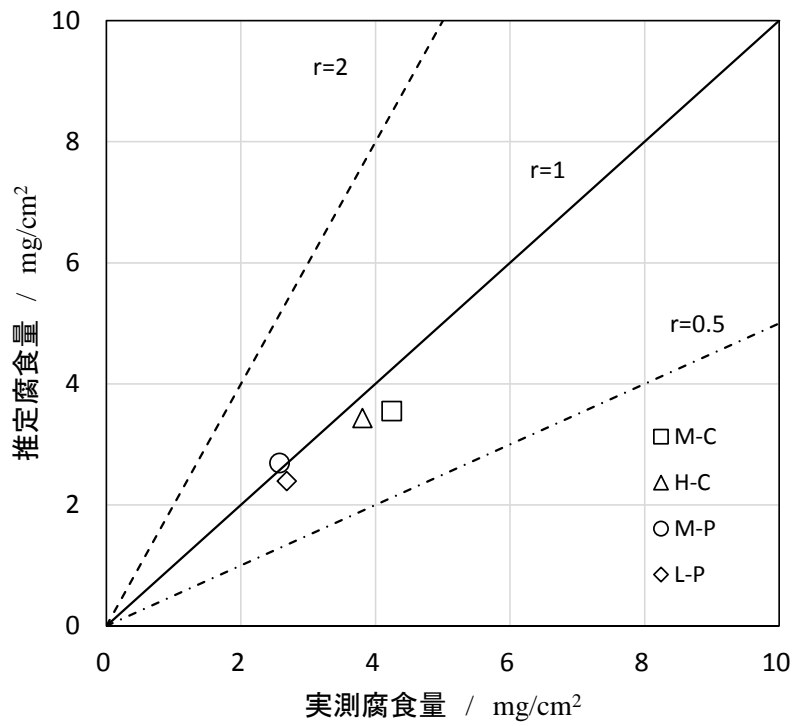


図-4.45 通電方法による推定腐食量と実腐食量との相関図



写真-4.2 コンクリート
打ち込み面（表面）



写真-4.3 通電電極の裏面

4.4.4 まとめ

本節では、小型コンクリート試験体を製作し、模擬水槽の各水位区分（区分 U-H，区分 H-M，区分 M-L の 3 区分）に配置し、定電流値制御や定電位値（再不動態化電位 -770mV vs. CSE）制御にて電気防食を適用し、その電気防食効果を通電時の腐食速度を推定する方法にて検証した。また、定電流値制御、定電位値制御して電気防食を適用した場合の通電電流密度の比較検証を実施した。その結果を以下にまとめた。

1) 復極量 100mV 以上が得られるように通電した場合、試験体 H-C, M-C を比較すると、M-C は復極量を得るためには H-C の通電量の 2 倍程度の電流量が必要であることが分かった。

2) 定電位値制御して通電した試験体 M-P, L-P の維持電流密度は経時的に低減することが分かった。低減率はいずれの場合も 50%程度であった。また、定電位値制御して通電した場合、定電流値制御にて通電した場合に比べて、4 倍程度の電流密度を要したが、推定された腐食速度は初期を除けば、 $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 未満（腐食なし）であり、鋼材腐食は抑えられたと考えられる。

3) 推定腐食速度より台形則にて求めた推定腐食量と実腐食量とは相対比は $r=0.84\sim 1.05$ の範囲にあり、 $r=1$ （推定腐食量／実腐食量）の直線上に近似でき概ね等価な関係になることから推定腐食速度は実腐食速度を概ね表していると判断できる。

4.5 干満帯における港湾RC構造物の電気防食管理方法の検討

4.5.1 はじめに

節4.3で得られた結果を踏まえ、下部工に電気防食が適用され、湿潤環境下にある干満部のコンクリート中鋼材の電気防食効果を復極量により管理することが難しいことが分かった。そのため、本節では、下部工に電気防食が適用された場合の干満帯におけるコンクリート中鋼材に対して定電流値通電または定電位値通電することによって、コンクリート中鋼材の電気防食効果を評価し、電気防食の管理方法について検討した。各試験体への電気防食の管理方法および通電ケースを表-4.12に示す。各試験体への管理方法として、電流-電流値管理（以下C-C管理）と電流-電位値管理（以下C-P管理）の2ケースにより試験を行った。C-C管理とは、区分U-H（HWL（満潮位）以上）中のコンクリート中鋼材が復極量100mVを満たすように通電した電流密度と同じ電流密度を区分H-M（HWL～MWL）に回路を分けて通電させる管理方法である（図-4.46）。一方、C-P管理とは、区分U-Hにおいて同じく復極量100mVを満たす電流密度で通電し、区分H-Mにおいて、この区分の最も貴な電位を示す鋼材の電位を常に再動態化電位を維持するように電流値を制御して回路を分けて通電する管理方法である（図-4.47）。直流電源装置として、2台のポテンショスタ

表-4.12 試験体への電気防食の通電ケース

管理方法	区分	電流密度及び電位	上部工			下部工
			試験体CS	試験体NS	試験体CA	全て
電流-電流値管理 (C-C管理)	区分U-H	mA/m ²	10	4	/	100
	区分H-M	mA/m ²	10	4		
電流-電位値管理 (C-P管理)	区分U-H	mA/m ²	15	4	70	100
	区分H-M	mV (vs. CSE)	-770	-770	-770	

下部工の電流密度: 初期電流密度を表す。

各試験体への通電電流密度は鉄筋表面積に対するものを表す。

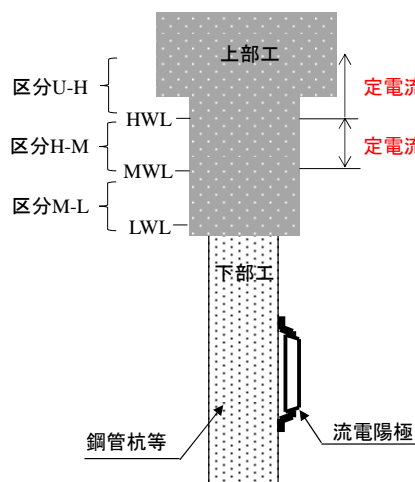


図-4.46 電流-電流値管理方法

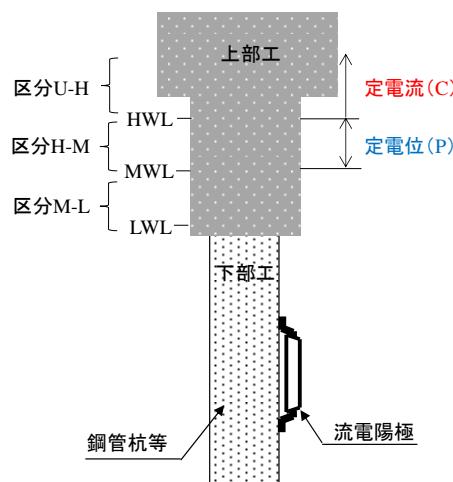


図-4.47 電流-電位値管理方法

ット/ガルバナスタットを用いた。

また、下部工は海水中に露出している鋼材に対して、初期防食電流密度として、一般的な清浄海域の防食電流密度 100 mA/m^2 として電気防食を適用した。なお各試験体の試験期間として、試験体 CS では約 8 ヶ月（C-C 管理約 3 ヶ月，C-P 管理約 5 ヶ月），試験体 NS では約 9 ヶ月（C-C 管理約 4 ヶ月，C-P 管理約 5 ヶ月）で行った。また、試験体 CA においては、定電位管理を約 1 ヶ月間実施し、定電位における維持電流密度を試験体 CS，NS における維持電流密度と比較するために用いた。なお、通電方法を変更する場合は、通電停止してから定常状態に戻った後に次の試験を開始した。

4.5.2 測定項目

試験体の配線系統図は図-4.18 と同様である。各試験体の測定項目を以下に示す。

1) 鋼材電位

鋼材電位は、SSE で 10 分間隔にてロガーにて記録した。なお、測定値から環境抵抗 R_s と通電電流 I から電圧降下 IR を補正し、飽和硫酸銅電極基準 (CSE) に換算して示した。

2) 鋼材への流出入電流

鋼材への流出入電流は、鋼材に 1Ω の抵抗器を挿入し、10 分間隔にて記録された電圧を電流に換算して示した。

3) 鋼材の自然電位，コンクリート抵抗率，鋼材の分極抵抗

通電停止してから 24 時間経過後の復極量測定終了後、腐食モニター (orrosion Monitor7622) を用いて、鋼材の自然電位，コンクリート抵抗率，鋼材の分極抵抗の測定を行った。なお測定は干潮時に行った。

4) 鋼材の通電時の腐食速度の推定

通電時の腐食速度の推定方法は、4.4.2 項で示した方法により行った。測定開始前に、通電時のオン電位 (E_{on})，インスタントオフ電位 (E_{io})，通電電流 (I) を測定する。その後、直流電源装置から分極測定に用いるポテンショスタットで通電時のオン電位に設定し、通電電流が通電時の電流値に近くなった後、掃引速度 $20\text{mV}/\text{min}$ でアノード方向に電位を掃引することで電気防食適用下の分極曲線を測定した。終了電位はカソード電流からアノード電流に切り替わる電位 E'_{corr} (通電時の自然電位) から $+120\text{mV}$ アノード分極させた電位とした。また、 IR 補正を行い、真の分極曲線とした。

通電時の腐食速度は、 E'_{corr} から $50\sim 80\text{mV}$ アノード分極させた電位 - 電流密度対数測定値の直線近似線をターフェル直線と評価し、通電時のインスタントオフ電位とこの直線との交点の電流密度を通電時の推定腐食速度とした。

4.5.3 各管理方法による試験結果

1) 干満によるコンクリート中鋼材の電位変化

各管理方法における各試験体の干潮時および満潮時の測定電位の結果を図-4.48 に試験体 CS を図-4.49 に試験体 NS を示す。試験体 CS において、C-C 管理の場合、干潮時における MWL 以深の電位は再不動態化電位以下にあったが、HWL~MWL (区分 H-M) においては再不動態電位を維持していなかった。しかし、C-P 管理の場合、干潮時においても、HWL 以深の鋼材の電位は再不動態化電位以下を維持していた。一方、試験体 NS において、C-C 管理及び C-P 管理のいずれの場合のいでも、HWL 以深において、鋼材の電位は最不動態化電位以下を維持していた。

C-P 管理の場合、HWL 以深において再不動態化電位以下に電位制御できることが分かった。

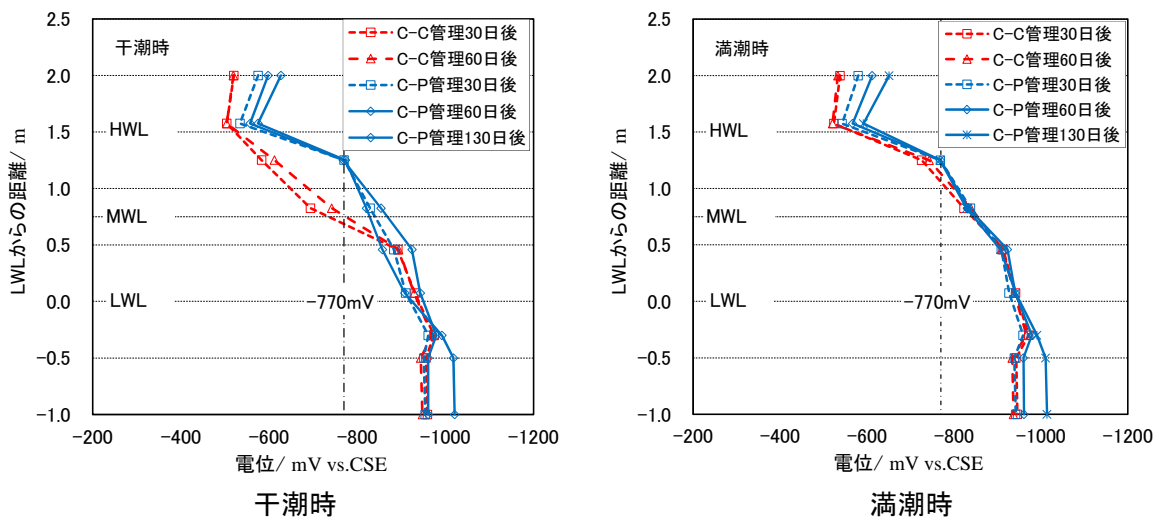


図 - 4.48 試験体 CS 定電流値管理および定電位値管理による電位測定結果

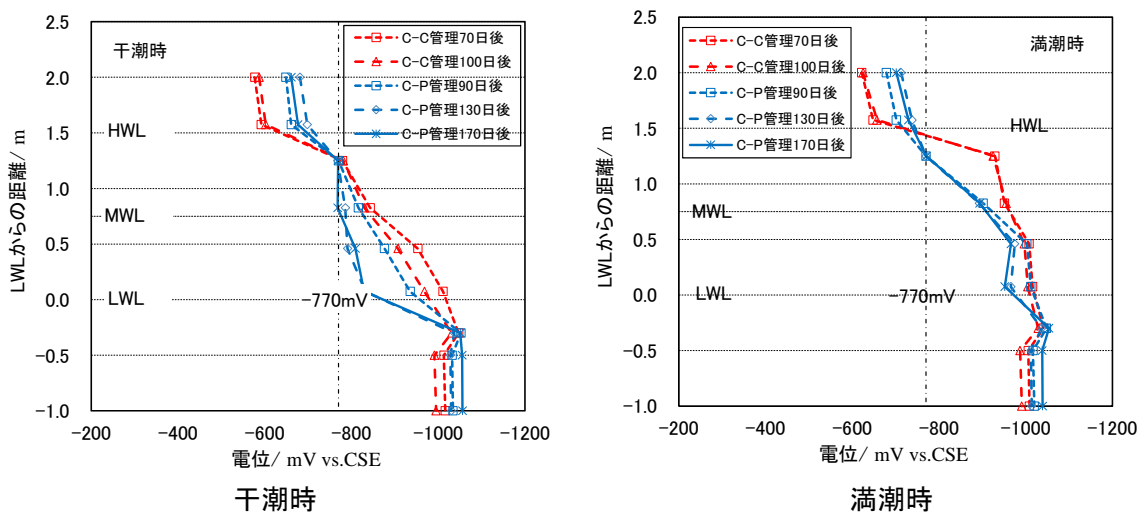


図-4.49 試験体 NS 定電流値管理および定電位値管理による電位測定結果

2) 干満によるコンクリート中鋼材に流出入する電流変化

各管理方法における各試験体の干潮時および満潮時の鋼材への流出入電流の測定結果を図-4.50 に試験体 CS を図-4.51 に試験体 NS を示す。試験体 CS において、C-C 管理の場合、干潮時に HWL~MWL (区分 H-M) において最大の流入電流が確認された。また、C-P 管理の場合、経時的に電位を維持する電流密度が、干潮時および満潮時ともに経時的に増加する傾向が見られた。また、試験体 NS においては、干潮時においては、C-C 管理および C-P 管理ともほぼ同じ電流密度であった。満潮時では、区分 H-M において、C-C 管理では流入電流値が増加したが、C-P 管理では、電流値の増加は見られなかった。

しかしながら、下部工の流電陽極の防食電流の流出入の影響を受ける場合においても、C-P 管理は干満において電流値の変化が見られなかった。これは、特定の照合電極にて電位値管理をした場合においても、電流値も制御できていることを示唆している。

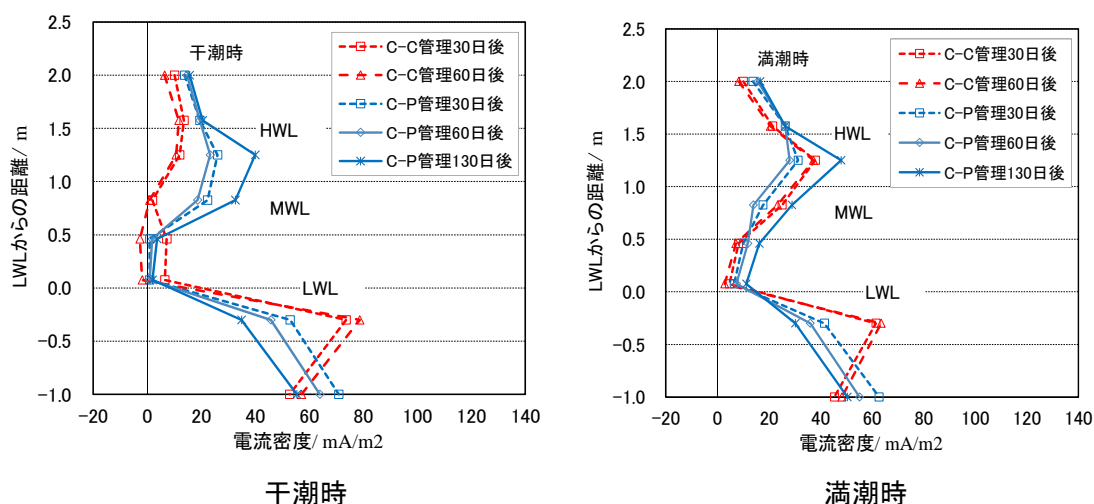


図 - 4.50 試験体 CS 定電流管理および定電位管理による鋼材の流出入電流測定結果

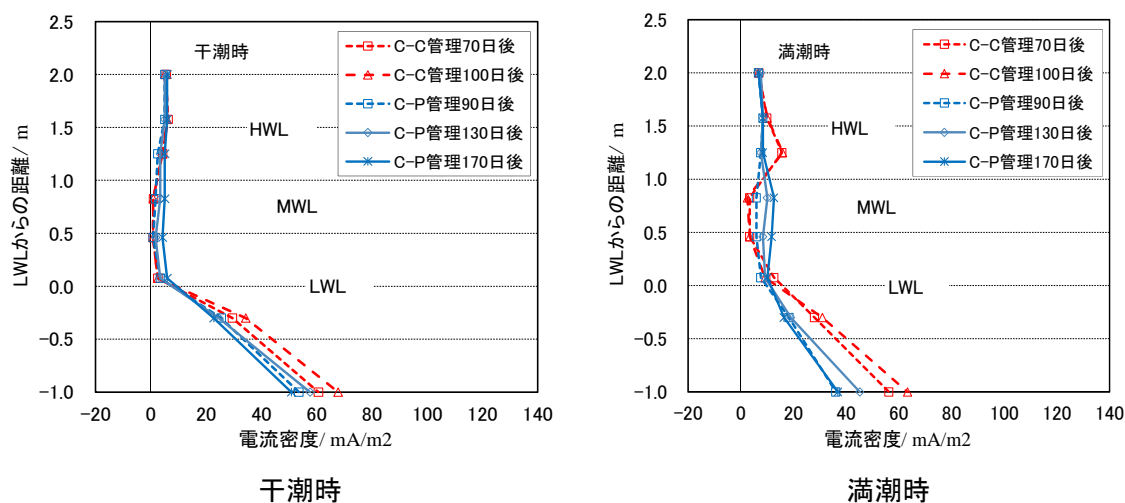
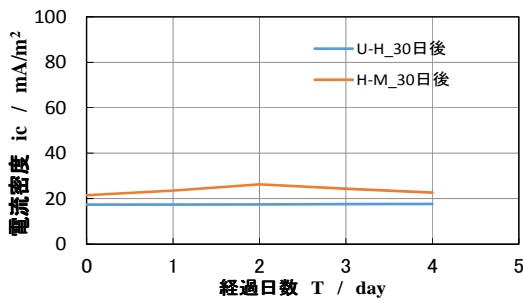


図 - 4.51 試験体 NS 定電流管理および定電位管理による鋼材の流出入電流測定結果

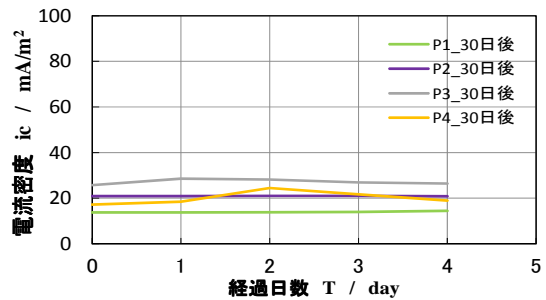
3) 干満による維持電流密度の経時変化

電源装置としてポテンショスタットを用いて再不動態化電位 -770mV (vs.CSE) に設定 (試験体 CS では P3, 試験体 NS では P9, 試験体 CA では P16 を定電位制御) した場合にはける区分 U-H, H-M の平均維持電流密度の経時変化および各試験片の維持電流密度の経時変化を図-4.52 に試験体 CS, 図-4.53 に試験体 NS, 図-4.54 に試験体 CA を示す。

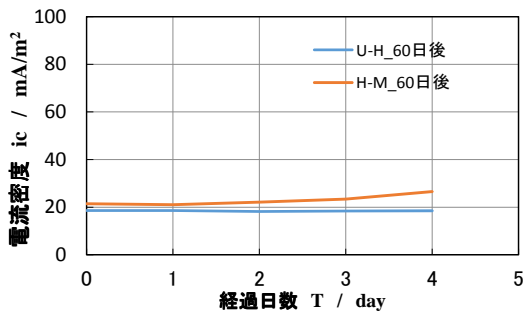
試験体 CS においては, 60 日後までは区分 H-M の維持電流密度は区分 U-H と同程度であったが, 130 日後は区分 H-M の維持電流密度は区分 U-M の電流密度の 2 倍程度の電流密度を要した。これは 130 日後の各試験片の通電電流密度より, 再不動態化電位を設定した



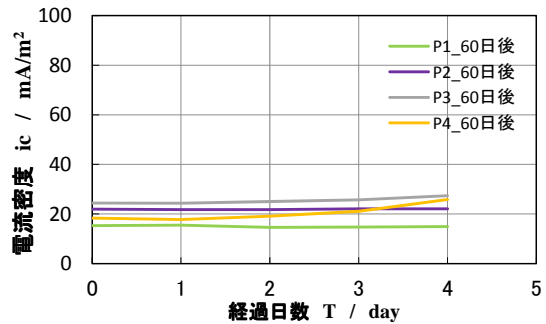
30 日後平均電流密度



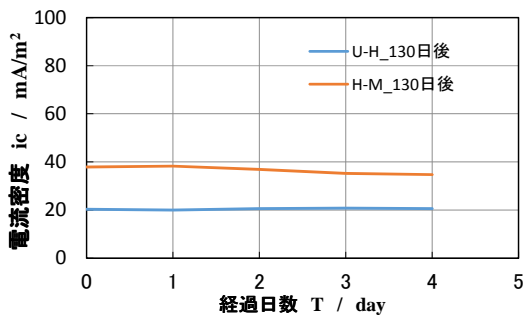
30 日後個別電流密度



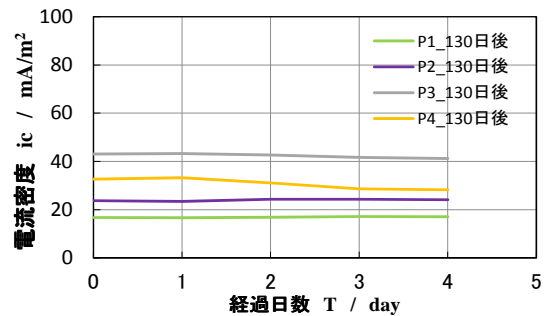
60 日後平均電流密度



60 日後個別電流密度



130 日後平均電流密度



130 日後個別電流密度

図-4.52 試験体 CS 維持電流密度の経時変化

P3 の電流密度が増加したためであり、通電電流を増加させて電位を維持したためであると考えられる。

また、試験体 NS において、90 日後には区分 U-H の方が区分 H-M に比べ通電電流が大きかったが、130 日後にはほぼ同じ電流密度になり、170 日後には区分 H-M の方が区分 U-H より大きな通電電流密度となった。各試験片の通電電流密度より 170 日後に P10 の電流密度が増加している。これは、図-4.49 より P10 の電位は通電電流を増加させて電位を維持したためであると考えられる。試験体 CS, NS において、復極量を満たすように通電した区分 U-H に対する電流密度は、試験期間中同じであった。しかし、区分 H-M に対する電位を維持する電流密度は増加傾向が見られた。

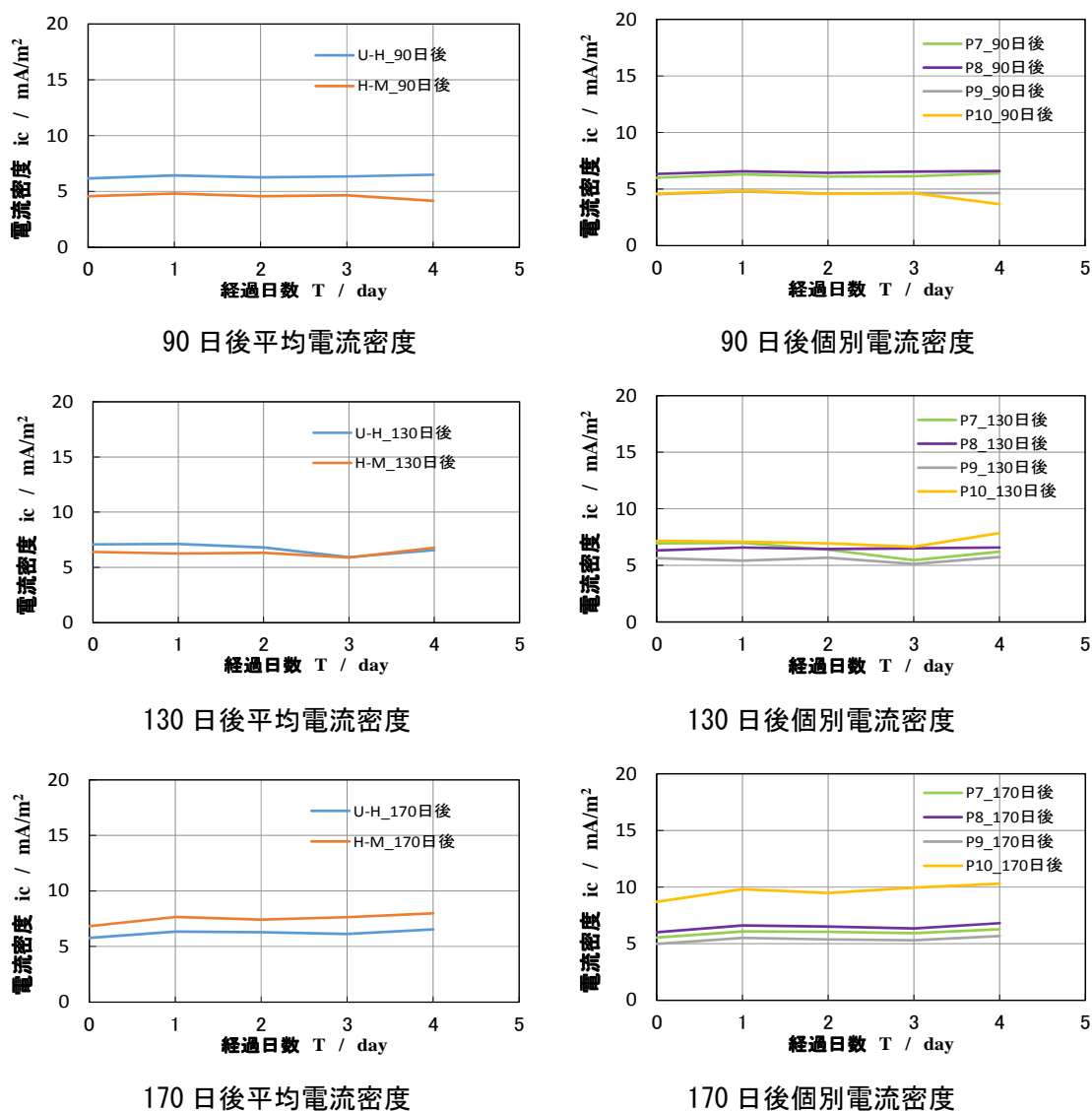


図-4.53 試験体 NS 維持電流密度の経時変化

一方、試験体 CA は、区分 H-M において、通電初期の電流密度は 140mA/m^2 であったが、経時的に減少し、通電 30 日以降から区分 U-H の通電密度より小さな電流密度で再不動態化電位が維持されるようになった。個別の試験片についても、P16、P17 は経時的に減少傾向が見られた。

以上のことから干満帯の電気防食の管理方法として以下のようなことが考えられる。C-C 管理は、干満部の溶存酸素の拡散速度が遅く、大気中の復極量を得るために必要な電流密度より少ない防食電流で防食が可能であるという想定の下での実務的な管理方法であるため、防食電流の過不足を補う管理方法とは言えない。

一方、C-P 管理は、干満部の電位変動に対して常に再不動態化電位を維持する方法であるため、電流の過不足に対応する実用的な管理方法であると考えられる。しかしながら、干満部へ適用する電気防食管理方法は、環境条件等の影響を受けることを考慮して、電気防食の管理方法を一つに絞るのではなく、C-C 管理、C-P 管理を組み合わせることで管理していくことが合理的な管理方法になると考える。

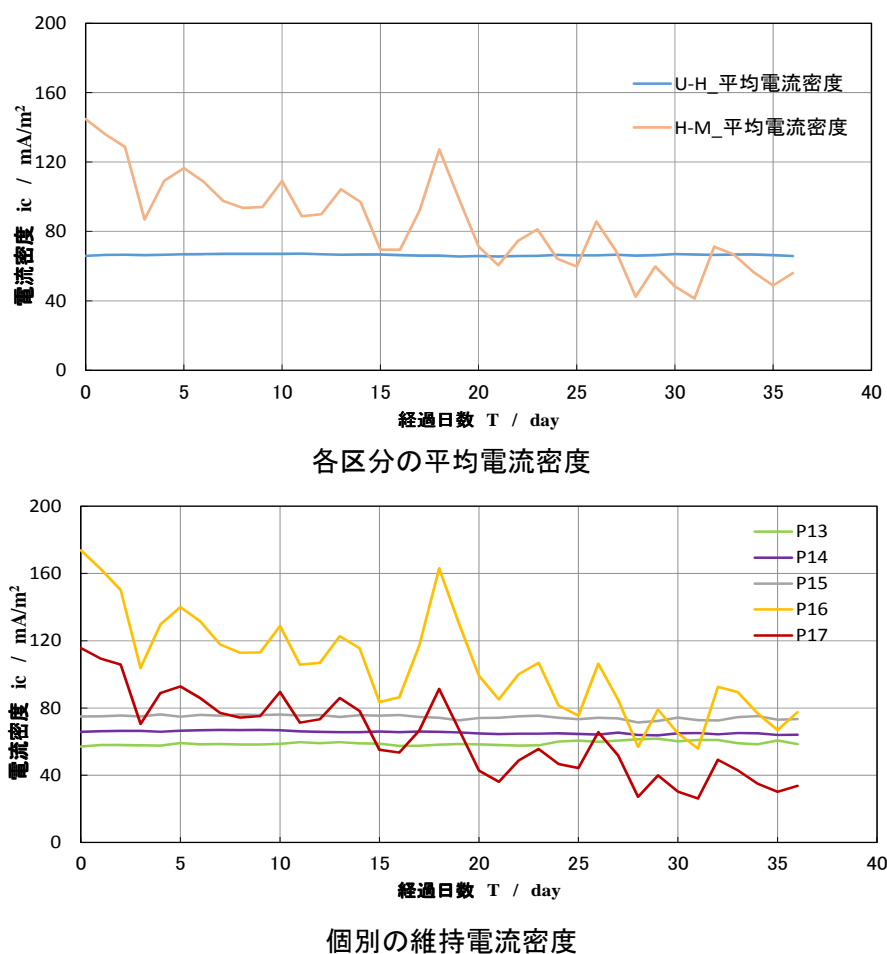


図-4.54 試験体 CA 維持電流密度の経時変化

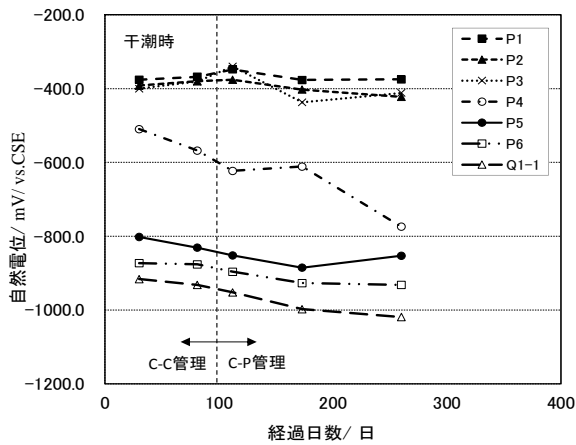
4) 自然電位, コンクリート抵抗率および分極抵抗の経時変化

各試験体を Corrosion Monitor7622 (交流法) を用いて, 自然電位, コンクリート抵抗率, 分極抵抗を同時に測定した. なお, 測定は, 24 時間後の干潮時にて実施した.

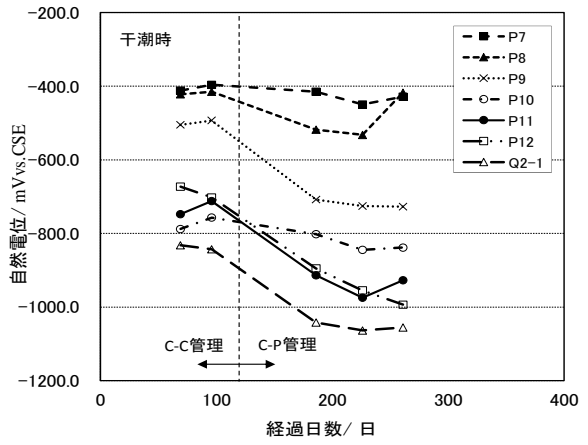
自然電位の経時変化を図-4.55 に示す. 試験体 CS において, 試験片 P1~P3 の自然電位は経時的に変化が見られなかった. P4~Q1-1 においては卑化する傾向が見られたが, P4 は経時的に卑化する傾向が最も大きかった. 干満による下部工の流電陽極の防食電流の影響を受けているものと考えられる. また, 試験体 NS においては, P7, P8 の自然電位は試験開始時の自然電位と変わらなかったが, P9~Q2-1 は自然電位が卑化する傾向みられた. P9 は経時的に卑化する傾向が最も大きかった. 電位が卑化していたのは, 干満による下部工の流電陽極の防食電流の影響に加え, 電気防食適用時の通電方法によると考えられる.

コンクリート抵抗率の経時変化を図-4.56 に示す. 試験体 CS において, コンクリート抵抗率は Q1-1 付近を除いて, その他の試験片付近で上昇していることが確認された. HWL 以上に設置している P1 付近のコンクリート抵抗率が最も上昇した. また, 試験体 NS においては, Q2-1 付近を除いて, その他の試験片付近で上昇していることが確認された. HWL ~MWL に設置している P10 付近のコンクリート抵抗率の上昇が最も大きかった. いずれの試験体においても, 水上部になるコンクリート抵抗率は経時的に上昇することが確認された.

鋼材の分極抵抗の経時変化を図-4.57 に示す. 試験体 CS において, P1~P6 で経時的に分極抵抗が上昇し, CEB の判定基準を基に判定すると, 「不動態化している (腐食なし)」と判定された. Q1-1 については「低~中の腐食速度」と判定された. 一方, 試験体 NS は, CEB の判定基準を基に判定すると, 全ての試験片で「不動態化している (腐食なし)」と判定された. 電気防食を継続的に実施していることから, 24 時間後において鋼材の腐食傾向が改善していると考えられる. また, 管理方法として, C-C 管理よりも C-P 管理方法の方が, 分極抵抗が上昇していることが分かった.

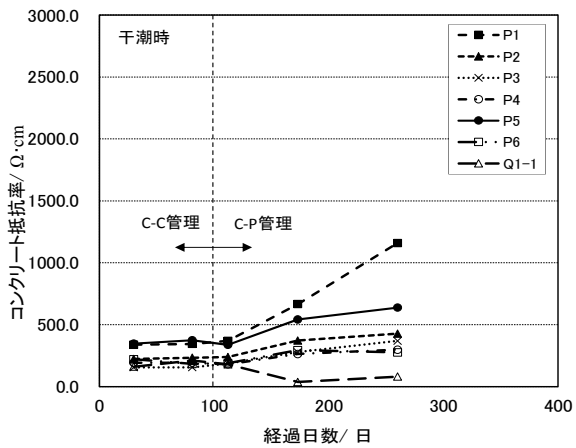


試験体 CS

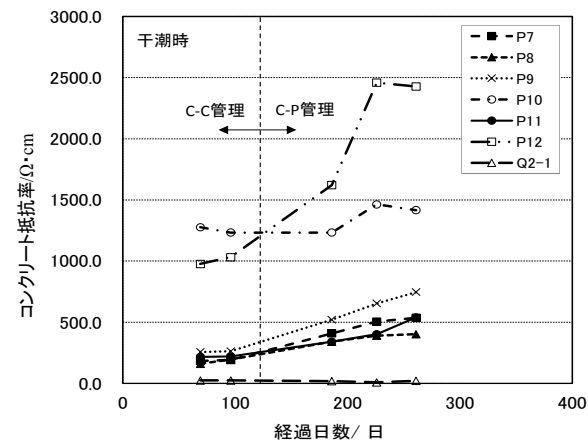


試験体 NS

図-4.55 自然電位の経時変化

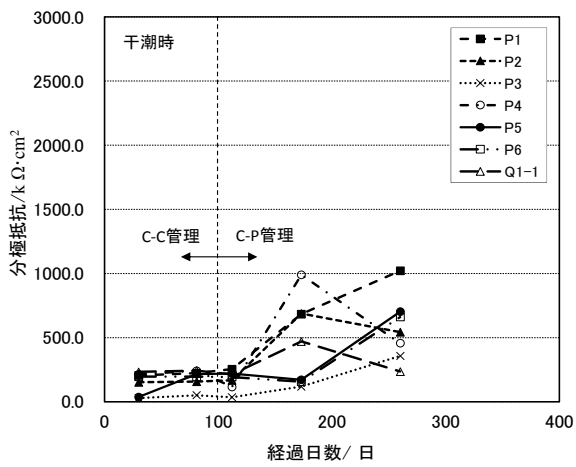


試験体 CS

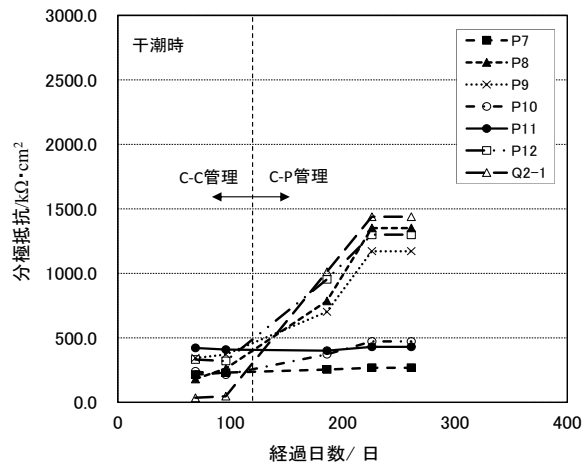


試験体 NS

図-4.56 コンクリート抵抗率の経時変化



試験体 CS



試験体 NS

図-4.57 分極抵抗の経時変化

5) 鋼材の推定腐食速度およびターフェル勾配の管理方法での比較

各管理方法における各試験体の干潮時の鋼材の分極曲線からの腐食速度を推定した結果を表-4.13 にまとめた。試験体 CS の試験片 P1～P6 の分極曲線からの推定腐食速度（図-4.61）とターフェル勾配との関係を図-4.58 に示し、試験体試験体 NS の試験片 P7～P12 の分極曲線からの推定腐食速度（図-4.62）とターフェル勾配との関係を図-4.59 に示し、試験体 CA の試験片 P13～P18 の分極曲線からの推定腐食速度（図-4.63）とターフェル勾配との関係を図-4.60 に示す。

試験体 CS において、試験片 P1 は C-C 管理，C-P 管理のいずれの場合においても、推定された腐食速度により鋼材が不動態化（腐食なし）と判定された。試験片 P2～P4 においては、いずれの管理方法において、ターフェル勾配が 200mV/decade をほぼすべて超える結果となり鋼材は不動態化（腐食なし）と判定された。試験片 P5, P6 においては、推定腐食速度としては大きな値となったが、これは、浸漬率が高くなると、カソード反応の影響が極端に大きくなると考えられる。そのため、浸漬率が大きい場合は、カソード分極曲線より腐食速度を推定することも今後検討する必要があると考えられる。しかしながら、P5, P6 は下部工の流電陽極の影響を受け、常に再不動態化電位を維持していることから防食効果は高いと考えられる。試験体 NS は、いずれの管理方法においても、推定腐食速度は鋼材が不動態化（腐食なし）と評価された。

一方、干潮時に気中に完全に露出する試験体 CA は、C-P 管理の場合のみであるが、P13～P16, P18 においてターフェル勾配が 200mV/decade を超える結果となり、鋼材が不動態化（腐食なし）と判定された。また、P17 においては、ターフェル勾配が 200mV/decade より小さいため、推定腐食速度での判定となり、腐食なしと判定された。

表-4.13 分極曲線から推定したターフェル勾配と腐食速度

測定項目	試験片	試験体CS		試験片	試験体NS		試験片	試験体CA
		C-C管理 60日後	C-P管理 130日後		C-C管理 100日後	C-P管理 130日後		C-P管理 30日後
ターフェル勾配(mV/decade)	P1	112.7	161	P7	195.5	184	P13	204.7
推定腐食速度(μ A/cm ²)		0.129	0.019		0.025	0.014		0.173
ターフェル勾配(mV/decade)	P2	285.2	184	P8	195.5	195.5	P14	230
推定腐食速度(μ A/cm ²)		1.19	0.363		0.047	0.015		0.18
ターフェル勾配(mV/decade)	P3	239.2	311	P9	200.1	207	P15	218.5
推定腐食速度(μ A/cm ²)		1.133	0.235		0.034	0.054		0.143
ターフェル勾配(mV/decade)	P4	322	230	P10	207	207	P16	202.4
推定腐食速度(μ A/cm ²)		6.4	9.68		0.048	0.006		0.494
ターフェル勾配(mV/decade)	P5	184	156	P11	214	184	P17	161
推定腐食速度(μ A/cm ²)		1.89	0.85		0.157	0.141		0.188
ターフェル勾配(mV/decade)	P6	161	151.8	P12	149.5	149.5	P18	218.5
推定腐食速度(μ A/cm ²)		2.92	2.7		0.011	0.004		0.949

ターフェル勾配200mV以上の場合

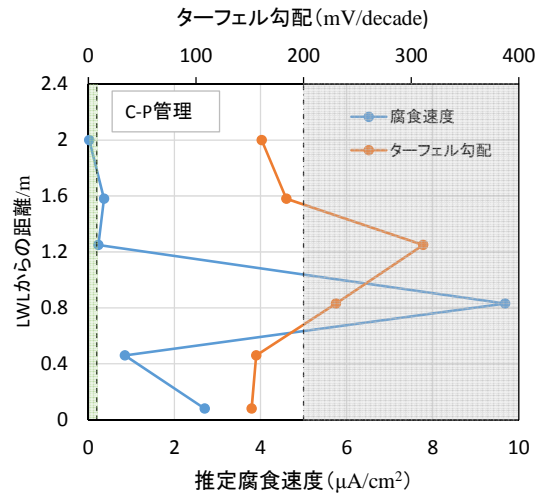
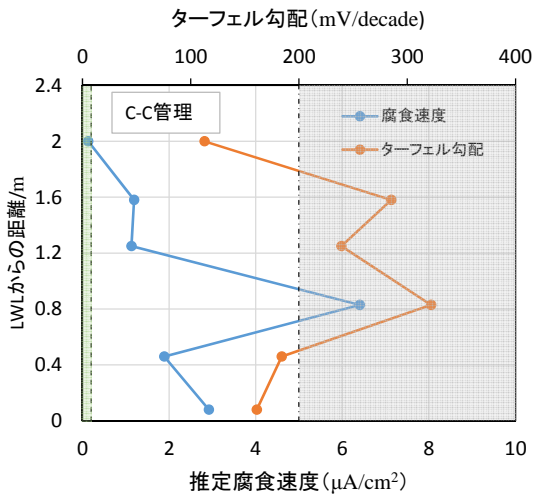


図-4.58 試験体 CS 各管理方法による推定腐食速度とターフェル勾配の関係

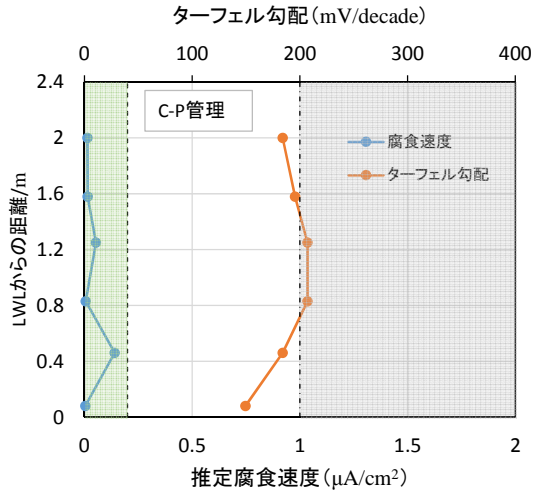
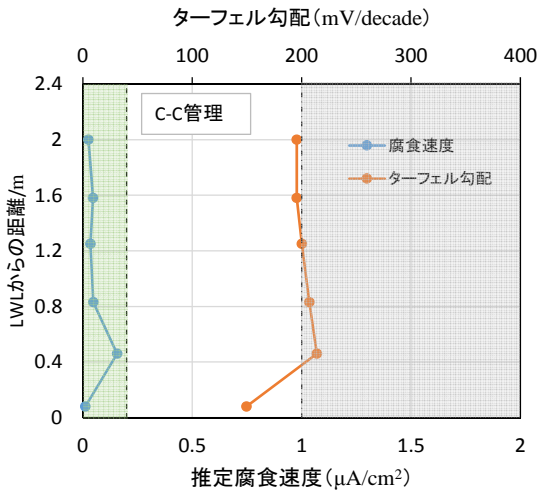
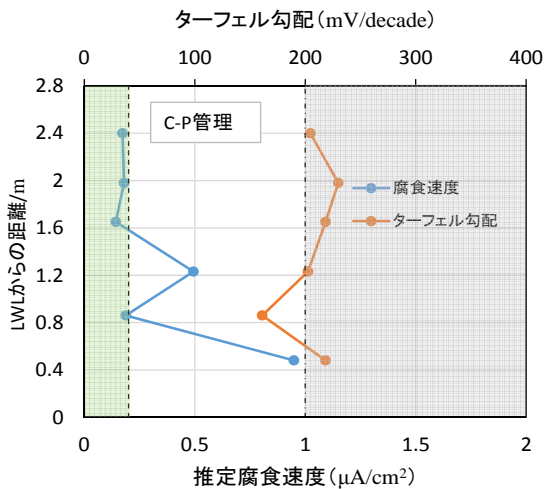
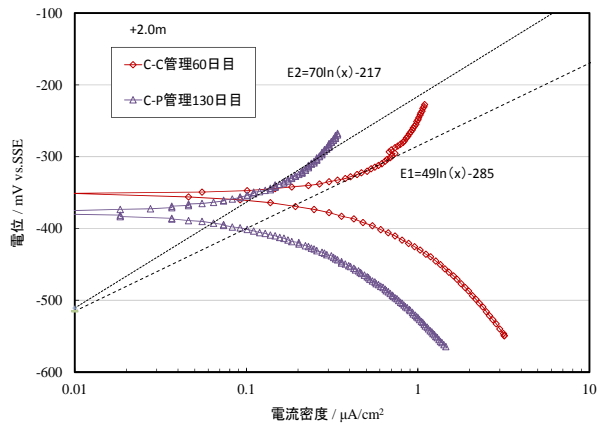


図-4.59 試験体 NS 各管理方法による推定腐食速度とターフェル勾配の関係

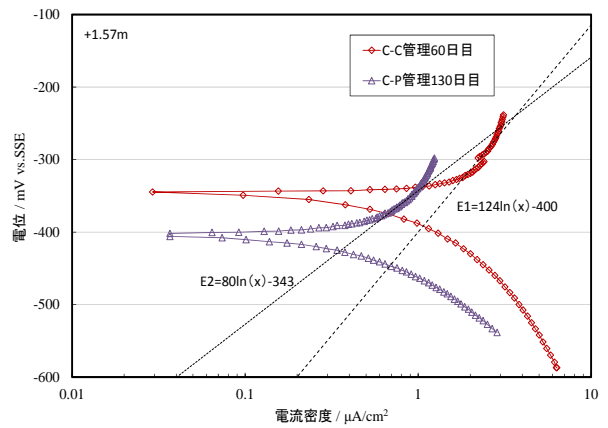


: 腐食速度による鋼材の不動態化判定範囲
 : ターフェル勾配による鋼材の不動態化判定範囲

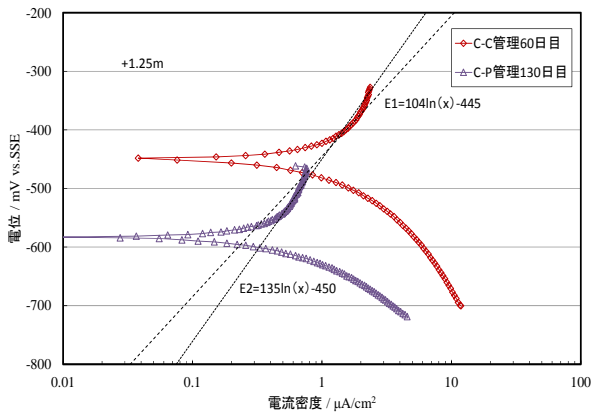
図-4.60 試験体 CA C-P 管理方法による腐食速度とターフェル勾配の関係



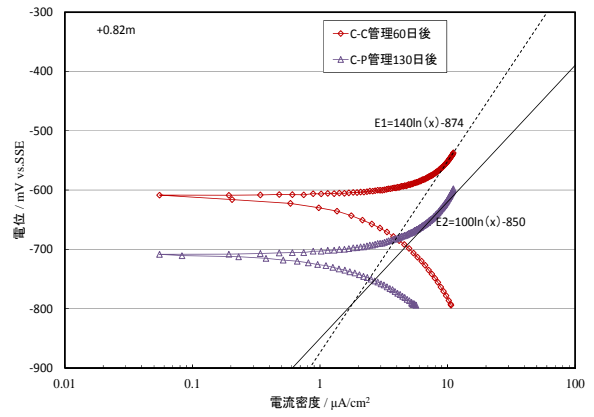
P1 推定腐食速度



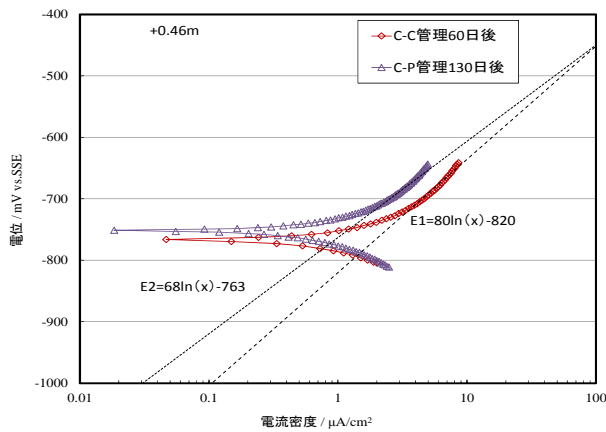
P2 推定腐食速度



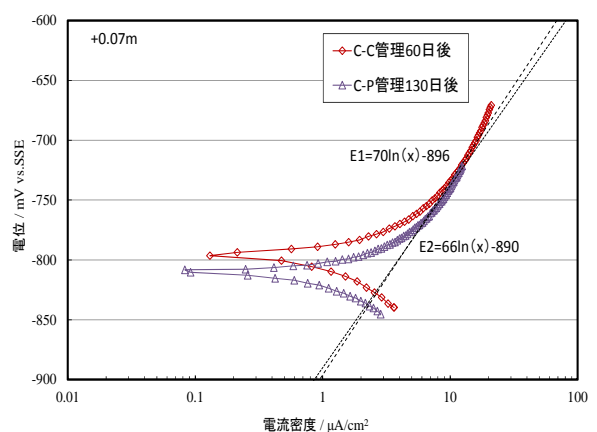
P3 推定腐食速度



P4 推定腐食速度

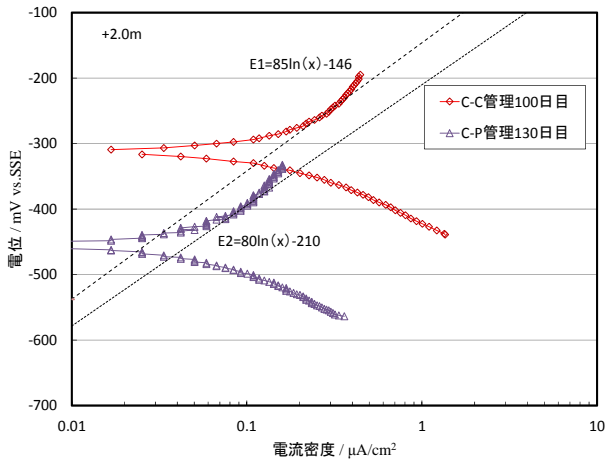


P5 推定腐食速度

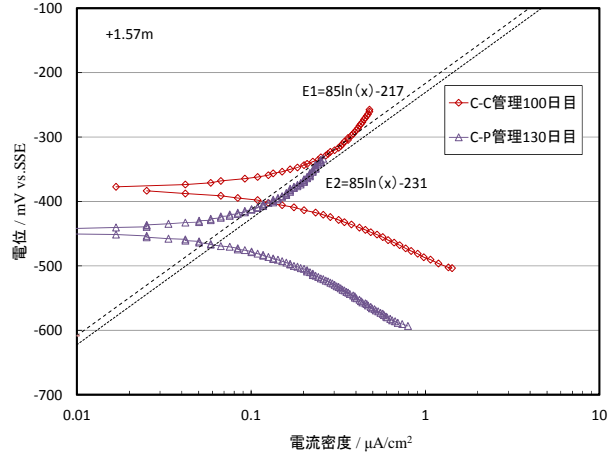


P6 推定腐食速度

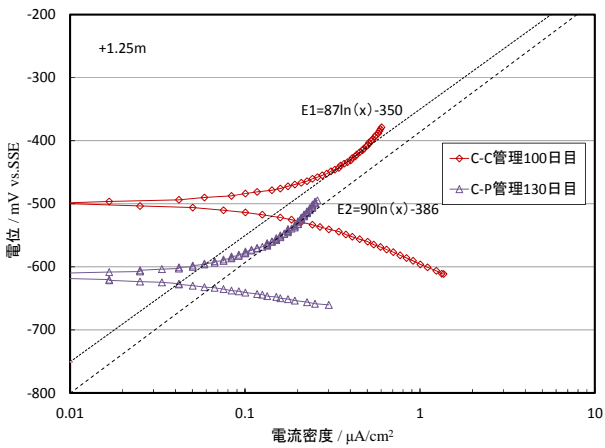
図-4.61 試験体 CS 試験片 P1~P6 の分極曲線とターフェル直線



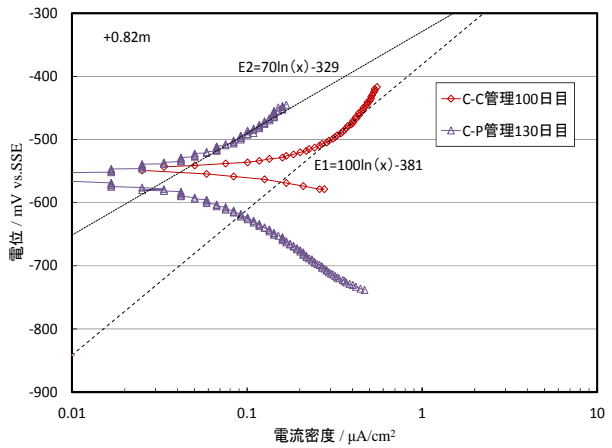
P7 推定腐食速度



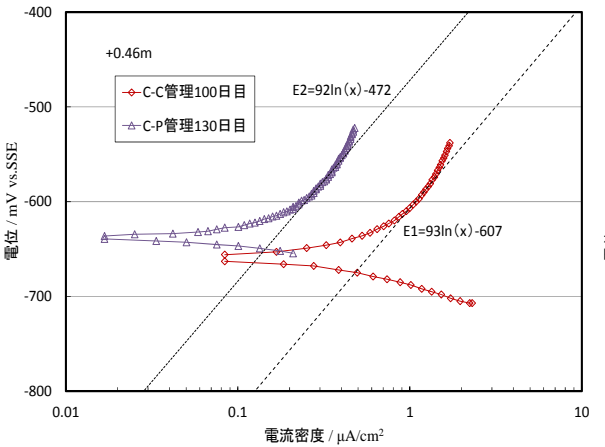
P8 推定腐食速度



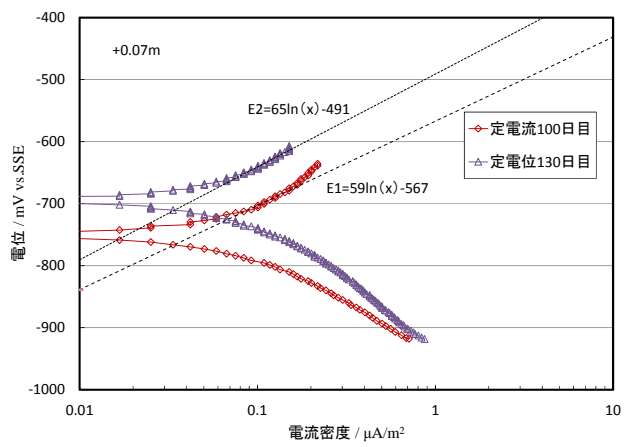
P9 推定腐食速度



P10 推定腐食速度

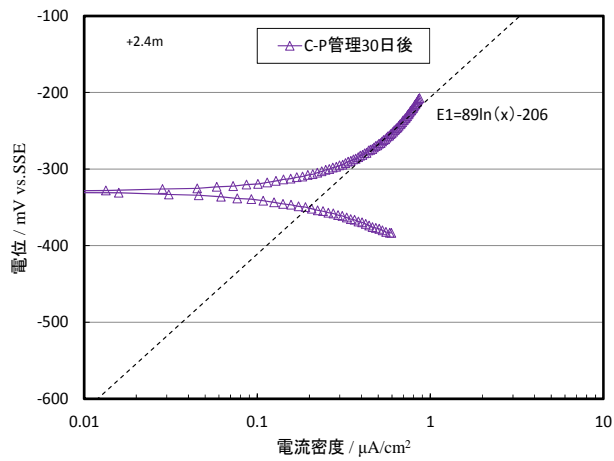


P11 推定腐食速度

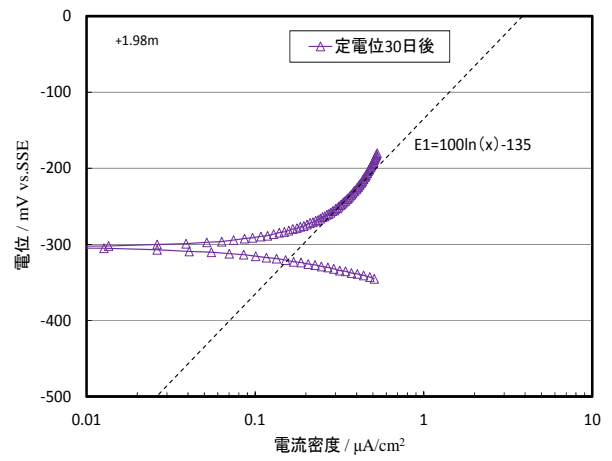


P12 推定腐食速度

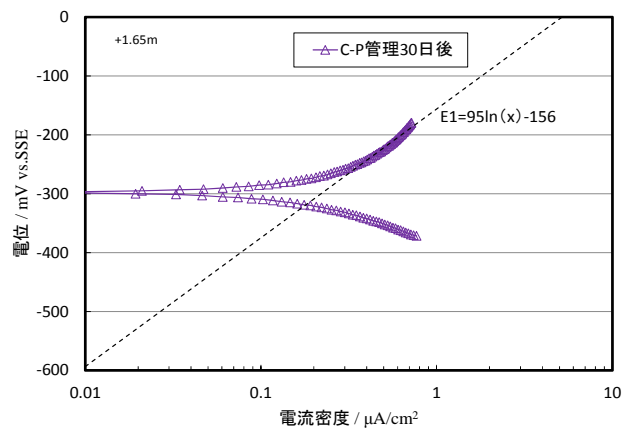
図-4.62 試験体 NS 試験片 P7~P12 の分極曲線とターフェル直線



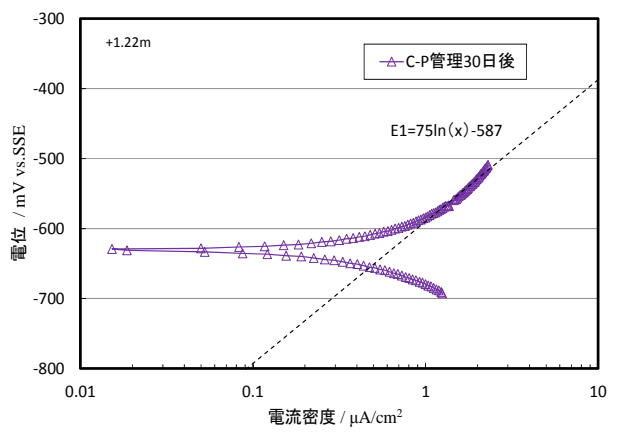
P13 推定腐食速度



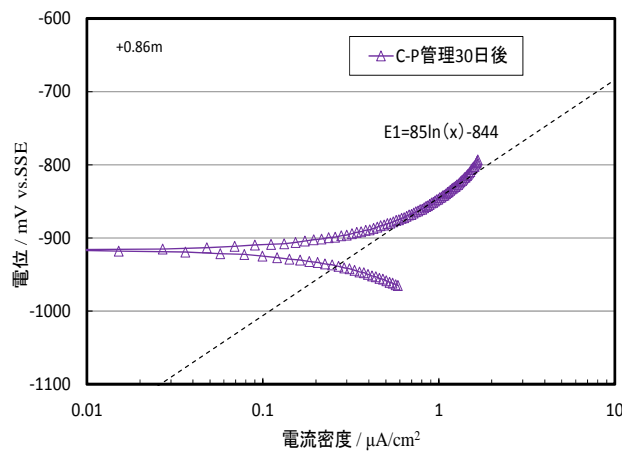
P14 推定腐食速度



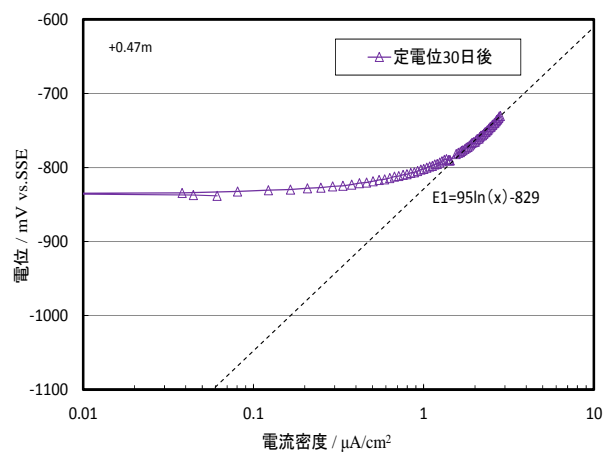
P15 推定腐食速度



P16 推定腐食速度



P17 推定腐食速度



P18 推定腐食速度

図-4.63 試験体 CA 試験片 P13~P18 の分極曲線とターフェル直線

4.5.4 まとめ

本節では、干満帯に位置する栈橋上部工における電気防食の管理方法の合理化を目的として、栈橋の一部を模擬した RC 試験体を干満環境に暴露し、干満帯において定電流制御および定電位制御による異なる通電方法により管理した場合のコンクリート中鋼材の腐食速度を推定することにより、電気防食の防食効果について評価を行った。また、電流－電流値管理（C-C 管理）および電流－電位値管理（C-P 管理）した場合における電気防食の実用的な管理方法について検討した。さらに、各管理方法における自然電位、コンクリート抵抗率、分極抵抗の経時変化により、干満帯での電気防食管理方法に対する電気防食適用時の副時的効果も把握した。その結果を以下にまとめた。

1) 各管理方法による鋼材の腐食状況をアノード分極曲線のターフェル勾配または推定した腐食速度にて評価した。その結果、試験体 CS は試験片 P1～P4 においては、いずれの管理方法においても鋼材は不動態化（腐食なし）と判定され、腐食が抑制されていることが分かった。また、試験片 P5, P6 は、本評価方法では不動態化しているという判定にならなかったが、下部工の流電陽極の影響を受け、常に再不動態化電位を維持していることから防食効果は高いと考えられる。また、試験体 NS は、いずれの管理方法においても、コンクリート中鋼材は不動態化（腐食なし）と判定され、腐食は抑制されていることが分かった。

一方、試験体 CA は、C-P 管理のみであるが、コンクリート中鋼材は不動態化（腐食なし）と判定され、腐食は抑制されていることが分かった。

2) 各管理方法の通電において、試験体 CS, NS の場合、C-C 管理が C-P 管理より低電流で防食効果が得られたが、試験体 CA の場合、C-P 管理が C-C 管理より低電流で防食効果が得られた。

C-C 管理は、干満帯が溶存酸素の拡散速度が遅く、大気中の復極量を得るために必要な電流密度よりの少ない防食電流で防食が可能であるという想定の下での実務的な管理方法であるが、防食電流の過不足を補う管理方法ではない。一方、C-P 管理は、干満部の電位変動に対して常に再不動態化電位を維持する方法であるため、区分 U-H は復極量により管理、区分 H-M は再不動態化電位以下で管理でき、互いに管理基準を基に防食効果の評価するため、実用的な管理方法であると考えられる。

3) 各管理方法による通電停止 24 時間後の自然電位、コンクリート抵抗率、分極抵抗の経時変化を確認した結果、自然電位において、HWL 以上については電位の変動は見られないが、MWL 以下について（試験 CS 試験片 P3 を除いて）通電により自然電位が卑化していた。

コンクリート抵抗率は、いずれの試験体においても、水上部は経時的に上昇することが確認された。

鋼材の分極抵抗は、試験体 CS において、LWL 付近の一部の鋼材が軽微な腐食ありと判定された以外は「不動態化している（腐食なし）」と判定された。

また、試験体 NS においては全ての試験片で「不動態化している（腐食なし）」と判定された。一方、干潮時に気中に完全に露出する試験体 CA は、C-P 管理の場合のみであるが、全ての試験片で「不動態化している（腐食なし）」と判定された。継続的な電気防食の適用が、鋼材腐食の抑制になったと考えられる。また、管理方法として、C-C 管理よりも C-P 管理方法の方が、分極抵抗が上昇していることが分かった。

4.6 4章まとめ

本章では、まず、栈橋の一部を模擬したコンクリート試験体を飛沫・干満帯環境に設置し、上部工への通電ケースを変え区分 U-H (HWL 以上)、区分 H-M (HWL～MWL)、区分 M-L (MWL～LWL) における鋼材の電位、防食電流の分布、復極量測定の結果を踏まえ、下部工に電気防食が適用された場合の飛沫・湿潤環境下におけるコンクリート中鋼材の電気防食効果について検討した。

次に、電気防食の防食効果を判定する基準として復極量 100mV シフトという指標が用いられるが、干満帯のような湿潤環境下では設計防食電流を通電しても復極量が得られない場合がある。そのため、復極量に代わる電気防食効果の評価方法として、通電時のアノード分極曲線を用いて通電時の鋼材の腐食速度を推定する方法を検討し、その推定方法の妥当性について検証した。

さらに、栈橋の一部を模擬したコンクリート試験体を飛沫・干満帯環境に設置し、干満帯に異なる通電方法（電流－電流値管理および電流－電位値管理）にて電気防食を適用し、干満帯における鋼材の電位、防食電流の分布および鋼材の腐食状況の判定結果より干満帯の防食効果について検討した。その結果、得られた知見について以下に示す。

1) 下部工に電気防食が適用された場合の飛沫・干満帯環境下におけるコンクリート中鋼材の電気防食効果

①区分 U-H (HWL 以上)

下部工の流電陽極からの防食電流の流入が満潮時に一時的に見られるが、下部工の流電陽極による影響が及んでいないと考えられる。電気防食の効果を復極量で管理できることが分かった。コンクリートの下端位置が、LWL より高い位置にある場合（試験体 CA）においても同様の結果となった。

②区分 H-M (HWL～MWL)

満潮時には区分 U-H への流入電流の 2 倍程度の電流が流入していたが、復極量 100mV を満たさなかった。これは、コンクリート中の鋼材周辺が脱気環境となったことが要因であると考えられ、この区分において、復極量での電気防食の効果を評価することが難しいことが分かった。

③区分 M-L (MWL~LWL)

下部工の流電陽極からの防食電流により、満潮および干潮時にほぼ鋼材は再不動態化電位以下であった。鋼材は不動態化状態となり、鋼材の腐食は抑制されていると考えられる。

④下部工の流電陽極の電気防食特性

栈橋のような上部工が一部没水するような環境においては、上部工に下部工の流電陽極から防食電流が流入する。そのため、設計電流密度は設計値よりも大きくなる場合がある。また、上部工の通電ケースにより設計電流密度を考慮する必要があることが分かった。しかしながら、海中の防食面積に対する上部工への流入面積が小さければ、影響は小さいものと考えられる。

2) 電気防食を適用した湿潤環境下における電気防食効果の評価方法の検証

①検証試験体による定電流値制御と定電位値制御における通電量と防食効果の比較

定電位値制御して通電した試験体 M-P, L-P の維持電流密度は経時的に低減することが分かった。低減量はいずれの場合の 50%程度であった。しかしながら、防食基準である復極量 100mV 以上を得られるように通電した場合に比べ、試験体 M-P は M-C の 4 倍程度の電流量を必要とした。定電流値制御の場合のほうが通電量を抑えて防食効果が得られていることが分かった。

②推定腐食量と実腐食量との比較

推定腐食速度より台形則にて求めた推定腐食量と実腐食量とは相対比は $r=0.84\sim 1.05$ の範囲にあり、 $r=1$ (推定腐食量/実腐食量) の直線上に近似でき、概ね等価な関係になることから推定腐食速度は実腐食速度を概ね表していると判断できた。

3) 干満帯における港湾 RC 構造物の電気防食管理方法の検討

①各管理方法による電気防食効果の評価

電流-電流値管理 (C-C 管理) または電流-電位値管理 (C-P 管理) をした場合、鋼材の腐食速度の推定またはアノード分極曲線のターフェル勾配にて評価した結果、試験体 CS は試験片 P1~P4 においては、いずれの管理方法においても鋼材は不動態化 (腐食なし) していると考えられた。

また、試験片 P5, P6 は下部工の流電陽極の影響を受け、常に再不動態化電位を維持していることから防食効果は高いと考えられる。また、試験体 NS は、いずれの管理方法においても、コンクリート中鋼材が不動態化 (腐食なし) している評価となった。

一方、試験体 CA は、C-P 管理のみであるが、コンクリート中鋼材は不動態化 (腐食なし) と判定され、腐食は抑制されていることが分かった。

②定電流値管理および定電位値管理の管理方法の実用性

各管理方法での通電において、試験体 CS, NS の場合、電流－電流値管理方法（C-C 管理）（図-4.64）が電流－電位値管理方法（C-P 管理）（図-4.65）より通電電流量を低減でき防食効果が得られる管理方法であることが分かった。一方、試験体 CA の場合、C-P 管理が C-C 管理より通電電流量を低減でき防食効果が得られる管理方法であることが分かった。

しかしながら、C-C 管理は、干満部は溶存酸素の拡散速度が遅く、大気中の復極量を得るために必要な電流密度より少ない防食電流で防食が可能であるという想定の下での実務的な管理方法であるが、防食電流の過不足を補う管理方法ではない。一方、C-P 管理は、干満部の電位変動に対して常に再不動態化電位を維持する方法であるため、電流の過不足に対応する実用的な管理方法であると考えられる。しかしながら、干満部へ適用する電気防食管理方法は、環境条件等の影響を受けることを考慮して、電気防食の管理方法を一つに絞るのではなく、C-C 管理、C-P 管理を組み合わせることで管理していくことが合理的な管理方法になると考える。

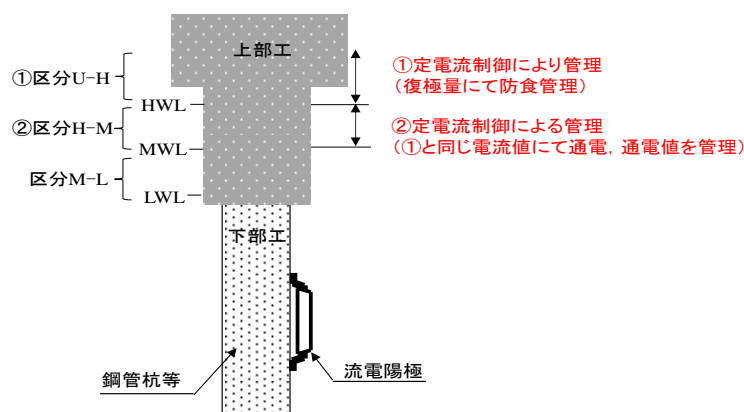


図-4.64 電流－電流値管理方法（C-C 管理）による通電方法

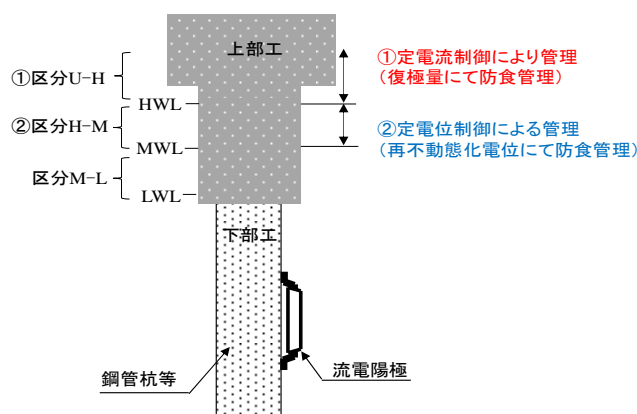


図-4.65 電流－電位値管理方法（C-P 管理）による通電方法

4.7 下部工に電気防食が適用された港湾 RC 構造物へ電気防食を適用する場合の今後の課題

下部工に流電陽極により電気防食を適用した栈橋を模した試験体を模擬干満水槽に設置して、下部工の流電陽極によるコンクリート中鋼材への影響、湿潤環境下での電気防食効果の評価方法、また防食効果判定基準として一般的に用いられる復極量 100mV シフトを満たせない場合があるため、干満帯への電気防食管理方法の検討を行ったが、検討をする上で新たな課題が考えられた。

【課題 1】電気防食を適用した湿潤環境下における電気防食効果の評価方法

本章においては、通電時のアノード分極曲線よりターフェル直線を用いて、通電時の電位（インスタントオフ電位）との交点の腐食速度を通電時の腐食速度として評価した。また、ターフェル勾配が 200mV/decade を超える場合はターフェル勾配にて鋼材の腐食状況の評価した。

しかしながら、区分 M-L において、鋼材は再不動態化電位以下にあるにも関わらず、本方法において、腐食速度が $1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を超える大きな腐食速度となった。区分 M-L はカソード反応の進行で脱気環境になっているものと考えられるため、カソード反応の影響が極端に大きな環境では、カソード分極曲線から腐食速度を推定する等、今後検証していくことが必要であり、環境条件にあった評価方法を確立していくことが課題である。

【課題 2】電気防食を適用した管理方法の検討

本章において、干満部の電気防食管理方法について検討し、C-P 管理で電気防食を適用するほうが実用的であると述べたが、C-C 管理に比べ通電量が増加するため、実構造物に適用する際には、電源容量、電極の耐久性を考慮しなければならない。

したがって、今後の検討課題として、例えば電気防食適用初期に C-P 管理にして通電し、定常化した後には C-C 管理に切替えるなど管理方法の組合せにより最適な通電方法を検討する必要があると考える。

【参考文献】

- (4.1) 篠田吉央, 望月紀保, 高久豊広, 小林浩之, 湿潤環境下コンクリート電気防食の防食評価方法に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No.1, pp. 1157-1162, 2011
- (4.2) 逢坂哲彌, 小山昇, 大坂武男: 電気化学法 - 基礎測定マニュアル, 講談社サイエンティフィック, p157, 1989
- (4.3) 横田優, 寺田和明, 幸英昭: 交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価, 土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集, Vol31. pp.241-246. 1991
- (4.4) 横田優, 河野清: 交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食診断について, 土木学会, 第 49 回年次学術講演会講演概要集, 第 V 部, V-88, pp.176-177. 1994
- (4.5) 横田優: 鉄筋腐食診断器の開発, 電力土木, №257, pp.64-71. 1995
- (4.6) ASTM C 876-91, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete Manual Book of ASTM Standards, Vol.03.02,p457, 1999
- (4.7) CEB Working Party V/4.1, Strategies for Testing and Assessment Concrete Structures Affected by Reinforcement corrosion(draft4), 1997
- (4.8) 板屋隼人, 大谷俊介, 若林 徹, 望月 紀保, 鉄筋の腐食状態を把握したコンクリート構造物の電気防食管理方法, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol140, №1, pp.915-920, 2018
- (4.9) Glass G.K., Hassanein A.M., Buenfeld N.R.: CP Criteria for Reinforced Concrete in Marine Exposure Zones, journal of Materials in Civil Engineering, pp.164-171,2000.5
- (4.10) 竹子賢士郎, 山本 悟, 高谷 哲, コンクリート中鉄筋の腐食速度とターフェル勾配の関係に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, pp.129-130, 2015
- (4.11) 武若耕司, コンクリート構造物における電気防食法の現状
- (4.12) 小林浩之, 電気防食を適用した港湾施設の維持管理手法に関する研究, 九州大学大学院博士論文, pp.117-141, 2013
- (4.13) ISO, Cathodic Protection of Steel in Concrete, ISO12696, 2012
- (4.14) 土木学会, 107 コンクリートライブラリー, 電気化学的防食工法設計施工指針(案), pp.67-480, 2001
- (4.15) 気象庁ホームページ過去の横浜の気温及び湿度
- (4.16) 国土交通省港湾局, 港湾施設の技術上の基準・同解説(2007年版), pp.439-441, 2011
- (4.17) 田土弘人, 山路 徹, 小林浩之, 濱田秀則: 栈橋を模した長尺試験体によるコンクリート中鉄筋の電気防食効果に関する検討, コンクリート構造物の補修・補強アップグレードシンポジウム, 第 18 巻, pp. 547-552. 2018.10

第5章 結論

本研究は、港湾鋼構造物およびコンクリート構造物に適用した電気防食工法の防食効果の評価に関して検討するために行った。

3章では、電気防食が適用された鋼構造物に設置されたテストピースによる電気防食効果の評価指標について検討した。次に、実港湾構造物への維持管理点検として、電位測定や肉厚測定から求めた腐食速度を基に行っているため、電気防食適用時の電位と腐食速度の関係を検証し、実港湾構造物における電気防食効果を表す評価指標について検討した。

4章では、栈橋の一部を模擬したコンクリート構造物を用いて、上部工への通電ケースを変え、下部工に電気防食が適用された場合の飛沫・干満帯環境下におけるコンクリート中鋼材の電気防食効果について検討した。次に、電気防食の防食効果を判定する基準として復極量100mV シフトという指標が用いられるが、干満帯のような湿潤環境下では設計防食電流を通電しても復極量が得られない場合がある。そのため、復極量に代わる電気防食効果の評価方法として検討を行った。さらに、干満帯に異なる通電方法（電流－電流値管理および電流－電位値管理）にて電気防食を適用し、干満帯における防食効果を検討するとともに維持管理方法についても検討した。

【港湾鋼構造物に適用した電気防食工法による電気防食効果の評価に関する検討】

電気防食が適用された施設にテストピースを設置して電気防食の効果を表す評価指標（防食率、防食効果、腐食速度）について検討した。次に、4つの設定条件、流水中かつ水温変化（F(TC)）、静止水中で水温変化（S(TC)）、静止水中水温25℃一定（S(TF30),S(TF90)）における鋼材の維持電位と電気防食の効果（腐食速度、防食率）との関係について検討した。また、実港湾構造物への電気防食の点検は、電位測定と肉厚測定からの腐食速度を基に行っているため、電位と腐食速度の関係を検証し、肉厚測定結果から求められる腐食速度を電気防食の効果を表す評価指標として検討した。

その結果、得られた知見について以下に示す。

1) 実海域に設置したテストピースによる電気防食効果の評価

- ①防食率という評価指標は、無防食時および防食時の腐食速度から算出される。今回、防食時の腐食速度には全国的な変化は少なかったが、無防食時の腐食速度は大きくばらつきが見られた。結果として、防食率の値にはばらつきが見られた。
- ②防食効果という評価指標は、防食時の状態のみで算出するものであり、無防食時の腐食速度の影響を受けないため、ばらつきが少なくなっている。しかしながら、防食効果（＝現在の質量/初期の質量）は、経年的に現在質量が減少することによって、経年的にその値は計算上減少する傾向を示した。

③防食率, 防食効果という評価指標に対する検証の結果を踏まえ, 電気防食の効果を表す指標の条件として, 防食時の状態のみを用いて, かつ時間を含む指標で評価することが望ましいと考えられた. 電気防食の効果の評価指標(設計値)として, 防食時の腐食速度がよいと考えられた. なお, 電気防食の効果の評価指標として, 基準にある一般的な防食設計条件を満足する場合においては, 鋼材の腐食速度を 0.01mm/y 程度であると考えられる.

2) 維持電位による鋼材の腐食速度の検証

①静止水中水温 25°C一定条件下において, 試験期間の異なる試験 S(TF30), S(TF90)における鋼材の腐食量で比較した結果, 電位-750mV(防食管理電位-800mV(vs.SSE[SW]))に設定した場合は, 鋼材の腐食量は試験期間に関わらず, ほぼ同じであった. これは, 電位を防食管理電位以下に維持した場合, 腐食は初期に発生したものであり, 定常状態後は腐食がほとんど進行しないことを示唆するものである.

②鋼材の電位を-750mV(防食管理電位-800mV(vs.SSE[SW]))に設定した場合は, 腐食速度は 0.01mm/y より小さな値であった. 実用上の鋼材の防食電位(約-780mV(vs.SSE[SW]))を踏まえ, -750mV(vs.SSE, およそ防食管理電位-800mV(vs.SSE[SW]))以下に鋼材の電位を維持すれば, その鋼材の腐食速度は 0.01mm/y 以下であることが分かった.

3) 実港湾構造物の鋼材の肉厚測定からの電気防食効果の評価

①肉厚測定前に実施される素地面調整による削りしろの検証をした結果, 腐食した鋼材を用いた場合は, 平均で 200 μ m(0.2mm)となり, 防食された鋼材を用いた場合, 平均で 55 μ m(0.055mm)であった. 肉厚測定が可能になる素地面調整に鋼材の腐食の程度が影響することが分かった.

②電気防食適用時のような鋼材の減肉量が小さい場合, 肉厚測定において作業者の技量, 測定器の計器誤差, 作業時の環境(波浪等)条件等の違いにより測定される肉厚が腐食速度に与える影響が大きいことが分かった.

③防食管理電位-800mV(vs.SSE[SW])以下に維持している鋼材の肉厚測定結果から求められた腐食速度は, 検証により得られた素地面調整による削りしろを考慮すれば, テストピースで得られた電気防食適用時の腐食速度 0.01mm/y 以下程度とできる場合があることが分かった.

④電気防食の効果を評価するための肉厚測定の留意点として、作業面において出来るだけ同一箇所測定できるように記録（例えば、調査水深、方向のズレが無いような位置出し方法）し、作業面から生じる誤差を軽減する必要がある。また、測定器の調整において伝搬速度を記載し同一の伝搬速度で測定する必要がある。伝搬速度の違いによる測定値の誤差を軽減する必要がある。

作業面、測定器の調整により誤差を軽減することによって、肉厚測定から算出する腐食速度で、電気防食の効果を十分に表すことができると考えられる。

【港湾 RC 構造物に適用した電気防食工法による電気防食効果の評価に関する検討】

栈橋の一部を模擬したコンクリート試験体を飛沫・干満帯環境に設置し、上部工への通電ケースを変え区分 U-H (HWL 以上)、区分 H-M (HWL～MWL)、区分 M-L (MWL～LWL) における鋼材の電位、防食電流の分布、復極量測定の結果を踏まえ、下部工に電気防食が適用された場合の飛沫・湿潤環境下におけるコンクリート中鋼材の電気防食効果について検討した。

次に、電気防食の防食効果を判定する基準として復極量 100mV シフトという指標が用いられるが、干満帯のような湿潤環境下では設計防食電流を通電しても復極量が得られない場合がある。そのため、復極量に代わる電気防食効果の評価方法として、通電時のアノード分極曲線を用いて通電時の鋼材の腐食状況を推定する方法を検討し、その推定方法の妥当性について検証した。

さらに、栈橋の一部を模擬したコンクリート試験体を飛沫・干満帯環境に設置し、干満帯に異なる通電方法（電流－電流値管理および電流－電位値管理）にて電気防食を適用し、干満帯における鋼材の電位、防食電流の分布および鋼材の腐食状況の判定結果より干満帯の防食効果について検討するとともに維持管理方法についても検討した。

その結果、得られた知見について以下に示す。

1) 下部工に電気防食が適用された場合の飛沫・湿潤環境下におけるコンクリート中鉄筋の電気防食効果

①区分 U-H (HWL 以上)

下部工の流電陽極からの防食電流の流入が満潮時に一時的に見られるが、下部工の流電陽極による影響が及んでいないと考えられる。電気防食の効果を復極量で管理できることが分かった。コンクリートの下端位置が、LWL より高い位置にある場合（試験体 CA）においても同様の結果となった。

②区分 H-M (HWL～MWL)

満潮時には区分 U-H への流入電流の 2 倍程度の電流が流入していたが、復極量 100mV を満たさなかった。これは、コンクリート中の鋼材周辺が脱気環境となったことが要

因であると考えられ、この区分において、復極量での電気防食の効果を評価することが難しいことが分かった。

③区分 M-L (MWL~LWL)

下部工の流電陽極からの防食電流により、満潮および干潮時にほぼ鋼材は再不動態化電位以下であった。鋼材は不動態化状態となり、鋼材の腐食は抑制されていると考えられる。

④下部工の流電陽極の電気防食特性

栈橋のような上部工が一部没水するような環境においては、上部工に下部工の流電陽極から防食電流が流入する。そのため、設計電流密度は設計値よりも大きくなる場合がある。また、上部工の通電ケースにより設計電流密度を考慮する必要があることが分かった。しかしながら、海中の防食面積に対する上部工への流入面積が小さければ、影響は小さいものと考えられる。

2) 電気防食を適用した湿潤環境下における電気防食効果の評価方法の検証

①検証試験体による定電流値制御と定電位値制御における通電量と防食効果の比較

定電位値制御して通電した試験体 M-P, L-P の維持電流密度は経時的に低減することが分かった。低減量はいずれの場合の 50%程度であった。しかしながら、防食基準である復極量 100mV 以上を得られるように通電した場合に比べ、試験体 M-P は M-C の 4 倍程度の電流量を必要とした。定電流値制御の場合のほうが通電量を抑えて防食効果が得られていることが分かった。

②推定腐食量と実腐食量との比較

推定腐食速度より台形則にて求めた推定腐食量と実腐食量とは相対比は $r=0.84\sim 1.05$ の範囲にあり、 $r=1$ (推定腐食量/実腐食量) の直線上に近似でき、概ね等価な関係になることから推定腐食速度は実腐食速度を概ね表していると判断できた。

3) 干満帯における港湾 RC 構造物の電気防食管理方法の検討

①各管理方法による電気防食効果の評価

電流-電流値管理 (C-C 管理) または電流-電位値管理 (C-P 管理) をした場合、鋼材の腐食速度の推定またはアノード分極曲線のターフェル勾配にて評価した結果、試験体 CS は試験片 P1~P4 においては、いずれの管理方法においても鋼材は不動態化 (腐食なし) していると考えられた。

また、試験片 P5, P6 は下部工の流電陽極の影響を受け、常に再不動態化電位を維持していることから防食効果は高いと考えられる。また、試験体 NS は、いずれの管理方法においても、コンクリート中鋼材が不動態化 (腐食なし) している評価となった。

一方、試験体 CA は、C-P 管理のみであるが、コンクリート中鋼材は不動態化（腐食なし）と判定され、腐食は抑制されていることが分かった。

②定電流管理および定電位管理の管理方法の実用性

各管理方法での通電において、試験体 CS, NS の場合、電流－電流値管理方法（C-C 管理）が電流－電位値管理方法（C-P 管理）より通電電流量を低減でき防食効果が得られる管理方法であることが分かった。一方、試験体 CA の場合、C-P 管理が C-C 管理より通電電流量を低減でき防食効果が得られる管理方法であることが分かった。

しかしながら、C-C 管理は、干満部は溶存酸素の拡散速度が遅く、大気中の復極量を得るために必要な電流密度より少ない防食電流で防食が可能であるという想定の下での実務的な管理方法であるが、防食電流の過不足を補う管理方法ではない。

一方、C-P 管理は、干満部の電位変動に対して常に再不動態化電位を維持する方法であるため、電流の過不足に対応する実用的な管理方法であると考えられる。しかしながら、干満部へ適用する電気防食管理方法は、環境条件等の影響を受けることを考慮して、電気防食の管理方法を一つに絞るのではなく、C-C 管理、C-P 管理を組み合わせで管理していくことが合理的な管理方法になると考える

【今後の課題および展望】

港湾構造物に対する電気防食の適用は、構造物の老朽化および延命化対策として今後益々増加するものと考えられる。しかしながら、老朽化および延命化対策を必要とする構造物は今後急激に増加することから、限られた予算の中、構造物一箇所に割り当てられる対策費は減少することが予想される。

このような状況下において、今後構造物への電気防食工法の適用に際しては如何に省力化し、最大限の効果を発揮できる設計法および維持管理方法を確立し、運用していくことが必要であると考えられる。

そこで、本論より得られた知見を踏まえ、今後、港湾鋼構造物およびコンクリート構造物(RC構造物)に対する電気防食の適用に際する課題および展望を以下に示す。

1) 電気防食工法を適用した鋼構造物における課題

①鋼材の肉厚を基にした将来の耐力設計に用いる防食時の腐食速度の見直し

防食率に代わる指標として防食時の腐食速度 0.01mm/y を基準・マニュアルに記載するために更に検討する必要がある。その結果、従来の設計法では将来の耐力(肉厚)が不足し、構造物の更新が必要であったものが、電気防食の適用することで構造物の更新を要しない構造物が増加し、対策費用の省力化につながる可能性がある。

②維持管理を考慮した適切な更新時期の選定

電気防食適用初期に防食電流が多く必要であることが分かっている。そのため、維持管理を適切に行い、電気防食の効果を維持したまま、電気防食の更新設計を確立させることによって、電気防食対策費の省力化につながる。

2) 電気防食工法を適用したコンクリート構造物(下部工電気防食適用)における課題

①防食効果の評価方法の確立

湿潤環境下におけるコンクリート構造物において、復極量による電気防食の効果を評価することは難しい。そのため、鋼材の腐食速度に着目して評価を行ったが、浸漬率が大きくなると評価が出来ない場合がみられた。しかしながら、浸漬率が大きくなればなるほど、コンクリート中の溶存酸素が少なくなり腐食は抑制されていると考えられる。よって、今後は浸漬率が大きくなるような場合は、鋼材のカソード分極により評価する等、新たな評価方法を検討することが必要であると考えられる。

②湿潤環境下における電気防食の設計法および維持管理法の確立

干満部のような湿潤環境下では、電位(再不動態化電位)により管理することが良いと考えられるが、大気中部における防食電流密度より大きくなる場合もなる。しかしながら、干満部は溶存酸素が大気中に比べ少なくなることから、腐食は環境により抑制されていると考えられるため、通電電流の省略化しつつ電気防食の効果を最大限に発揮できる環境条件に合わせた設定電位の検討が必要であると考えられる。