

論文 厳しい塩害環境下における RC 部材の補修効果検証のための屋外暴露試験

澁井 雄斗^{*1}・今本 啓一^{*2}・濱崎 仁^{*3}・下澤 和幸^{*4}

要旨：重塩害環境下にある RC 部材を想定した試験体に対する補修仕様の効果検証のための共通試験を実施している。塩化物量の多いコンクリート中の鋼材の腐食量によって、三段階の劣化グレードに分けた試験体を用意し、それぞれ様々な補修をおこない暴露試験を開始した。腐食量が小さい場合、表面含浸材による腐食抑制効果が確認されたが、腐食量が大きい場合、防錆材や電気防食の使用が有効である傾向が確認された。また、自然電位やコンクリート比抵抗といったコンクリート表面からの非破壊試験の測定値による評価は、腐食量が小さい場合では有効であるが、腐食量が大きい場合については、明確な傾向を確認できなかった。

キーワード：塩害、鋼材腐食、外観変化、共通試験

1. はじめに

鋼材腐食の進行は、特に塩害環境において顕著であり、部材および建物全体の構造性能の低下につながる。塩害に対する RC 構造物の補修は、コンクリートの表面保護やひび割れ注入による劣化因子の遮断、断面修復や脱塩による劣化因子の除去、電気防食や防錆材による鋼材腐食の抑制が挙げられ、目的に応じて使い分ける必要がある。また、同様の補修を施した場合においても、周囲の環境条件などにより、その時々で効果は異なり、各補修工法・材料を適材適所に使用することが求められる。

著者らは、厳しい塩害環境下である長崎県端島（軍艦島）において、様々な補修を施した試験体を用意し、2016年10月から共通試験（屋外暴露試験）を実施している。主な補修仕様は、けい酸塩系、シラン系、シラン・シロキサン系、亜硝酸塩系による表面含浸工法や、有機系、無機系のひび割れ注入工法、電気防食工法などが挙げられ、個々の補修工法ごとにおける効果検証の研究は過去にも多く行われているものの、同一条件の試験体、暴露環境においてこれほど多くの補修工法を検証した事例は少ない。共通試験では、定期的に試験体中の鋼材の腐食状況をモニタリングし、厳しい塩害環境下における各工法・材料の効果や傾向についてデータの収集を行うことで、補修する対象の劣化状況や厳しい環境条件に応じた有効な補修方法を検討できると考えられる。また、端島の RC 構造物のような歴史的価値の高い構造物に対する補修は、補修による外観変化をなるべく抑えるように求められており、コンクリート表面の色差や光沢度についても測定を続けている。

本稿では、試験体中の鋼材の腐食量について、暴露 2

年目までの結果を用いて、共通試験による各測定項目と鋼材の腐食量の関係、および各工法・材料による腐食抑制効果について考察を行った。なお、本稿の共通試験の内容は、コンクリート工学4月号(2020年4月刊行予定)の「端島（軍艦島）における補修工法共通試験」に、さらに詳細な考察を加えたものである。

2. 屋外暴露試験の概要

2.1 補修前の試験体の製作

補修前の試験体は、端島の RC 構造物群の部材を想定し、鋼材の腐食状況およびかぶりコンクリートの損傷程度によって、表-1 に示すような三段階の劣化グレードとした。試験体中にはかぶり深さが 30mm となるように鋼材（SS400 相当の磨き鋼棒φ16mm）を埋設し、劣化グレードⅠ、Ⅱは図-1、劣化グレードⅢは図-2 に示すような試験体とした。鋼材は、両端をあらかじめタップ切りしたものとし、腐食モニタリングの際に必要なリード線（架橋ポリエチレン銅線（CV ケーブル）2.0sq）をネジを用いて固定した。

コンクリートの使用材料、計画調合を表-2、表-3 に示す。水セメント比 W/C や塩化物イオン Cl⁻ の添加量は、端島の実構造物より採取したコアにより実施した調査結果¹⁾を参考に決定した。コンクリート打設後は、材齢 4 日で脱型し 20℃で気中養生を行った。養生期間中に、暴露面および腐食モニタリング用の円形の開口部（φ50mm×2 箇所、φ130mm×1 箇所）以外を保護材（合成樹脂エナメル塗料）で覆い、劣化因子の侵入を防ぐこととした。

その後、鋼材が表-1 に示す状態となるように、グレ

*1 (一財)日本建築総合試験所 材料部材料試験室 修士(工学) (正会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 芝浦工業大学 建築学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*4 (一財)日本建築総合試験所 構造部耐震耐久性調査室 室長代理 博士(工学) (正会員)

表-1 補修前の試験体の劣化グレード

劣化グレード	補修前の試験体の劣化状況	
グレードⅠ (電食なし)		鋼材の腐食は開始していないもしくは軽微な腐食が発生している状態であり、コンクリートはひび割れ無しもしくは鋼材腐食によらない軽微なひび割れが発生している状態 鋼材の質量減少率：0.26%
グレードⅡ		鋼材は明らかに腐食している状態であり、鋼材腐食によるひび割れが発生し、さび汁等が見られる状態 鋼材の質量減少率：6.55%
グレードⅢ		鋼材の断面欠損が大きい状態であり、鋼材の腐食にともなうかぶりコンクリートの剥落や鋼材の露出が生じている状態 鋼材の質量減少率：7.27%

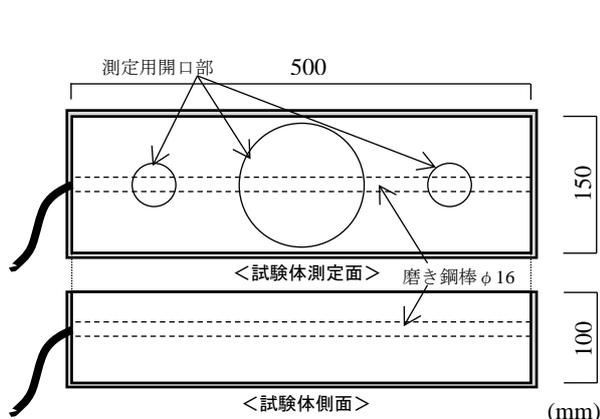


図-1 グレードⅠ、Ⅱの試験体

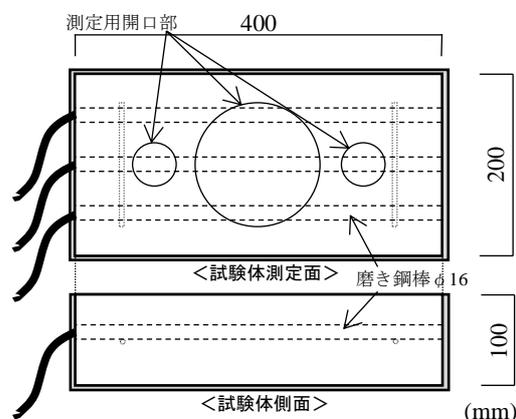


図-2 グレードⅢの試験体

ードⅡ、グレードⅢの試験体は3%食塩水に7日間浸漬させた後、過飽和塩化カリウム溶液による塩橋と鋼板を用いて、定電流電源による電食により鋼材の腐食を促進させた。

グレードⅡでは、500×150×厚さ15mmの塩橋を暴露面に乗せ、積算電流値60Ahrを目安に通電した。電流値は0.5~0.8Aの範囲で調整し、かぶりコンクリートの表面にひび割れ幅が1mm程度生じるように、通電させた。電食終了後、暴露面は#200の研磨材を用いて研磨し、実環境下において経年劣化したコンクリート表面を模擬した。

グレードⅢでは、400×70×厚さ15mmの短冊状の塩橋と400×200×厚さ15mmの試験体と同じサイズの塩橋の2種類を用いて通電した。まずは、短冊状の塩橋を中央の鉄筋直上に設置し、ひび割れを発生させた後、両端の鉄筋直上に塩橋を設置し2本の鉄筋に対してひび割れを発生させた。その後、試験体と同じサイズの塩橋に替えて、かぶりコンクリートの表面のひび割れ幅が2~5mm程度生じるように通電した。電食終了後、振動ドリルや研り機を用いてかぶりコンクリートを除去した。

なお、グレードⅠ、Ⅱ、Ⅲの補修前の鋼材の質量減少

表-2 使用材料

項目	使用材料
水 W	上水道水
セメント C	普通ポルトランドセメント ：密度 3.16g/cm ³
細骨材 S	大井川水系 陸砂 ：表乾密度 2.58g/cm ³
粗骨材 G	青梅産 硬質砂岩砕石 ：表乾密度 2.65g/cm ³
塩化物イオン Cl ⁻	塩化ナトリウム (NaCl) 換算

表-3 計画調査

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Cl ⁻ (外割) (kg/m ³)
		W	C	S	G	
79.1	54.0	200	253	1004	877	5.0

率は、それぞれ0.26%、6.55%、7.27%であった。

2.2 補修仕様

補修仕様を表-4に示す。これらの補修は、(公社)日本コンクリート工学会「危急存亡状態のコンクリート構

造物対応委員会」で実施されている，端島における補修材の効果検証に関する共通試験に賛同した企業・団体により提案されたものである。各補修仕様の試験体数は原則3体1セットとし，表-1に示す試験体ができてから約1か月以内に補修を行った。

グレードⅠは，表面含浸工法が多く，撥水層を形成し水分・塩分の浸入防止を意図したシラン系，シラン・シロキサン系の表面含浸材や，コンクリート表面組織を緻密化させるけい酸塩系の表面含浸材が，主に使用された。その他，防錆材である亜硝酸塩系の含浸材とシラン系，けい酸塩系の含浸材を組み合わせた工法，シートや有機系のウレタン樹脂による表面被覆工法，電気防食工法が使用された。

グレードⅡは，ひび割れ注入工法が多く，有機系ではエポキシ系，無機系ではセメント系の注入材が主に使用された。また，ひび割れ注入工法と表面含浸工法，表面被覆工法を組み合わせた補修の他に，電着工法，電気防食工法，断面修復工法が使用された。

グレードⅢは，主に電気防食工法と断面修復工法や塗料による鋼材の被覆を組み合わせた補修であった。

2.3 暴露場所・暴露期間

暴露試験は2016年10月に開始しており，2018年10月までは端島北部に位置する69号棟屋上に暴露していたが，測定作業の安全を考慮し，現在では70号棟グラウンドに試験体を移設し，現在も試験を継続している。試験体の設置場所と設置状況を図-3，写真-1に示す。なお，比較用に，各劣化グレードの無補修の試験体の一部を，69号棟の屋内に設置した。

3. 共通試験における鋼材の腐食量に関する測定項目

3.1 鋼材の質量減少率の測定

暴露開始から2年経過時点で，各補修仕様の試験体を

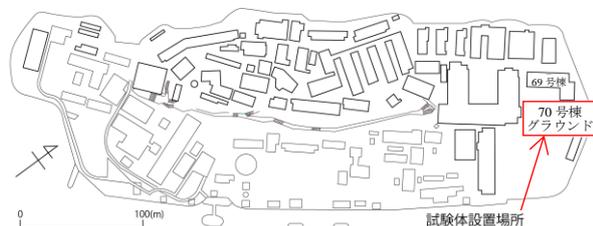


図-3 試験体設置場所



写真-1 試験体の設置状況

表-4 補修仕様

記号	種別	工法	使用材料
I-1	被覆	表面被覆	DLCシート
I-2	塗布	表面含浸	けい酸塩系
I-3	塗布	表面含浸	シラン系
I-4	塗布	表面含浸	けい酸塩系+シラン系
I-5	塗布	表面含浸	けい酸塩系
I-6	塗布	表面含浸	亜硝酸塩系+けい酸塩系
I-7	塗布	表面含浸	シラン系
I-8	塗布	表面含浸	シラン系
I-9	電気防食	電気防食	チタンリボンメッシュ陽極材
I-10	塗布	表面含浸	シラン系
I-11	電気防食	電気防食	貼付型・塗布型陽極材
I-12	塗布	表面含浸	けい酸塩系+シラン系
I-13	塗布	表面含浸	亜硝酸塩系+シラン系
I-14	塗布	表面含浸	けい酸塩系
I-15	塗布	表面含浸	シラン・シロキサン系
I-16	塗布	表面含浸	シラン・シロキサン系
I-17	塗布	表面含浸	シラン・シロキサン系
I-18	塗布	表面含浸	シラン・シロキサン系
I-19	塗布	表面被覆	ウレタン樹脂
I-20	屋外無補修	—	—
I-21	屋内無補修	—	—
II-1	注入	注入	エポキシ樹脂
II-2	注入	注入	エポキシ樹脂
II-3	電着	電着	電解質溶液
II-4	注入+塗布	圧入・注入+表面含浸	亜硝酸塩系(圧入・注入) けい酸塩系(表面含浸)
II-5	電気防食	注入+電気防食	チタンリボンメッシュ陽極材
II-6	塗布	表面含浸	シラン系
II-7	電気防食	電気防食	貼付型・塗布型陽極材
II-8	注入+塗布	注入+表面含浸	シラン系(注入, 表面含浸) けい酸塩系(表面含浸)
II-9	注入+塗布	注入+表面含浸	亜硝酸塩系, ポリマーセメントスラリー(注入) シラン系(表面含浸)
II-10	塗布	表面含浸	けい酸塩系, 水酸化カルシウム
II-11	断面修復	断面修復	亜鉛陽極材
II-12	屋外無補修	—	—
II-13	屋内無補修	—	—
III-1	注入+塗布+鋼材被覆	圧入+表面含浸+鋼材被覆	亜硝酸塩系(圧入, 鋼材被覆) けい酸塩系(表面含浸)
III-2	鋼材被覆もしくは断面修復+電気防食	鋼材被覆もしくは断面修復+電気防食	有機系塗料, 防錆セメントペースト(鋼材被覆) チタンリボンメッシュ陽極材
III-3	電気防食	断面修復+電気防食	貼付型・塗布型陽極材
III-4	断面修復	断面修復	亜鉛陽極材
III-5	鋼材被覆	鋼材被覆	素地調整特殊塗料
III-6	屋外無補修	—	—
III-7	屋内無補修	—	—

1体ずつ回収し（一部除く）、試験体から取り出した鋼材の腐食生成物をクエン酸水素二アンモニウム10%水溶液に浸漬し除錆した後、質量を測定し、以下の式(1)を用いて鋼材の質量減少率を測定した。これを腐食量の評価に用いることとした。

$$\text{鋼材の質量減少率(\%)} = (\text{腐食前の質量} - \text{除錆後の質量}) / \text{腐食前の質量} \cdot 100 \quad (1)$$

3.2 ひび割れ幅

暴露面に生じたひび割れのうち、内部埋設した鋼材に沿ったひび割れについてクラックスケールを用いて、ひび割れ幅を測定した。

3.3 自然電位

照合電極の種類は、銅硫酸銅電極（飽和）を用いて測定した。照合電極の先端部分に、十分に湿らせたスポンジを付けて、コンクリート面との導通を確保した。補修仕様による測定への影響を考慮し、補修をした暴露面とは反対側の面に用意した腐食モニタリング用の開口部3箇所を測定し、それらの平均値を求めた。

3.4 分極抵抗

交流インピーダンス法による腐食計を用いて測定した。センター対極とガード対極から構成される二重対極センサーを、試験体の腐食モニタリング用の開口部のうち、中央の1箇所を当てて測定した。

3.5 コンクリート比抵抗

4電極法（Wenner法）の比抵抗計により測定した。水を張った容器に全ての電極を浸漬させ、電極部に水分を含んだ状態でコンクリート面に密着させることで、導通を確保した。測定箇所は、暴露面のうち鋼材の直上を避けた2箇所を測定し、それらの平均値を求めた。

4. 結果・考察

4.1 劣化グレードIの鋼材腐食の傾向

劣化グレードIの暴露2年時点における鋼材の質量減少率を図-4に示す。なお、I-11, 18, 19については

試験体を回収していないため、質量減少率は測定していない。

無補修の試験体について、屋外のI-20と屋内のI-21を比較すると、暴露2年目で鋼材の質量減少率は、屋外で1.13%、屋内で0.27%であった。屋内は暴露開始時の0.26%とほぼ同程度であることから、腐食は進行していないことが確認された。屋外では雨掛りや波飛沫による水分供給の影響で腐食が進行したと考えられる。

シラン系、シラン・シロキサン系表面含浸材を用いたI-3, 7, 8, 10やI-15, 16, 17は、鋼材の質量減少率が小さいのに対して、けい酸塩系表面含浸材を用いたI-2, 5, 14は大きかった。けい酸塩系の改質機構は、コンクリート中に存在するCa²⁺と水が反応し、細孔空隙中にC-S-H結晶を生成し組織を緻密化させるものである。しかし、本研究における試験体のコンクリートは、水セメント比79.1%、単位水量200kg/m³、セメント量253kg/m³と、水量に対するセメント量が小さく、細孔空隙が多いわりにはCa²⁺の不足によりC-S-H結晶の生成量が少なくなったため、十分緻密化することが困難であった可能性が考えられる。菊地原らの研究²⁾では、水セメント比が大きいほど、けい酸塩系の改質深さが小さくなるという報告もある。今回のように、内在塩分量が大きく、雨や波飛沫による水分浸透が起こる環境の場合、けい酸塩系による補修は、十分な腐食抑制効果を得られないと考えられる。屋外無補修のI-20に比べて鋼材の質量減少率が大きい理由は明確ではないが、I-6やI-4, I-12のように防錆材の亜硝酸塩系やシラン系の含浸材と組み合わせることで、小さく抑えられていた。その他、シートによる表面被覆工法のI-1や電気防食のI-9も無補修のI-20に比べて腐食を抑えられていた。

以上より、本試験体のように内在塩分が大きい場合であっても、必ずしも防錆材や電気防食による補修は必要なく、水分の浸透を抑えられれば腐食は進行しないことが確認された。

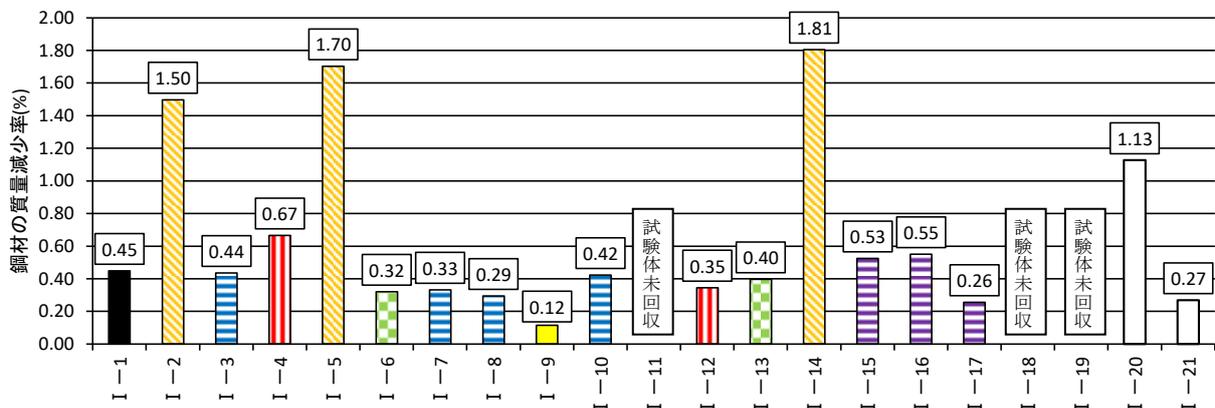


図-4 劣化グレードIの鋼材の質量減少率（暴露2年時点）

暴露2年時点で回収した試験体のうち、劣化グレードⅠのひび割れ幅、自然電位、コンクリート比抵抗の経時変化を図-5、図-6、図-7に示す。ここでは、主な補修工法・材料ごとに分類し、凡例をそろえて示した。

図-5より、けい酸塩系とシラン系の一部の補修仕様において、暴露1.5年目より鋼材に沿ったひび割れが確認されるようになったが、暴露2年目であっても、写真-2のように、劣化グレードⅠではひび割れ部分からのさび汁は確認されなかった。なお、図中に示していない補修仕様については、暴露2年目までに鋼材に沿ったひび割れは確認されなかった。

図-6より、けい酸塩系と屋外無補修の試験体は、自然電位の傾向が非常に類似しており、他の補修仕様と比較すると、相対的に卑な電位となった。これに対して、亜硝酸塩系や電気防食による補修は、時間の経過とともに貴な電位となる傾向が見られ、コンクリート中の内在塩化物イオン量が多い場合においても、鋼材周囲の腐食環境を改善できる傾向が確認された。

図-7より、シラン系、シラン・シロキサン系やけい酸塩系+シラン系により補修された試験体は、他の補修仕様に比べてコンクリート比抵抗が大きかった。補修により形成された撥水層の効果で、試験体のごく表層面においても雨水等による水分の浸入を小さく抑えられていると推測され、図-4より鋼材の質量減少率も比較的小さく抑えられていた。坂元らの研究³⁾によれば、シラン系はコンクリートの材齢によらず、補修を行うことで効果を発揮するが、けい酸塩系は材齢7日、28日でそれぞれ塗布した場合、材齢28日のほうがコンクリートへの水分浸透抑制効果が大きく、材齢7日では無補修のものと同程度であるという報告がされている。試験日程の関係で、補修前の試験体ができてから補修施工までの期間が短かったため、けい酸塩系のみで補修を行った場合には十分に効果を発揮できなかったと推察される。

なお、分極抵抗の経時変化については、補修仕様による明瞭な傾向を現時点では確認することができず、今後も継続して測定を行うこととする。

4.2 劣化グレードⅡの鋼材腐食の傾向

劣化グレードⅡの暴露2年目における鋼材の質量減少率を図-8に示す。なお、Ⅱ-7については試験体を回収していないため、質量減少率は測定していない。

屋外無補修のⅡ-12と比べて、エポキシ樹脂によるひび割れ注入工法のⅡ-1、Ⅱ-2や、電気防食工法のⅡ-5、けい酸塩系の表面含浸工法とシラン系のひび割れ注入工法を組み合わせたⅡ-8、断面修復工法のⅡ-11は、鋼材の質量減少率を小さく抑えられていた。一方で、電着によるⅡ-3は、質量減少率が20.54%と極めて大きかった。

劣化グレードⅡでは暴露2年目に回収したすべての試験体について、鋼材の質量減少率が10%を超えており、写真-3のようにひび割れ部分からのさび汁が多く、試験体で確認された。劣化グレードⅡの試験体の全体的な傾向として、ひび割れ幅は経時変化にともない徐々に大きくなるものの、いずれの試験体においても、鋼材の質量減少率が大きく、自然電位、分極抵抗、コンクリート比抵抗による明瞭な傾向を確認できなかった。

4.3 劣化グレードⅢの鋼材腐食の傾向

劣化グレードⅢでは、暴露2年目において回収した試験体は、亜硝酸塩系とけい酸塩系の補修材を組み合わせたⅢ-1と屋外無補修のⅢ-2、屋内無補修のⅢ-3のみ

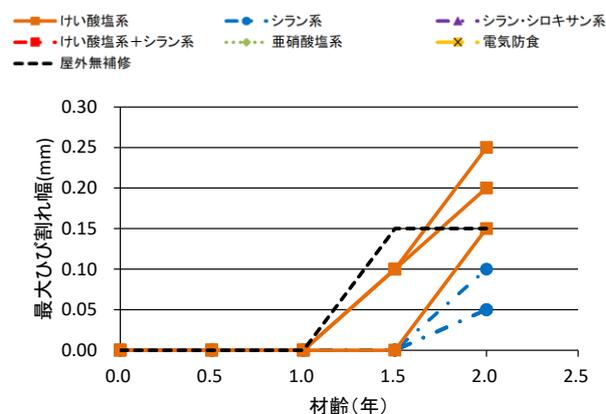


図-5 グレードⅠのひび割れ幅の経時変化

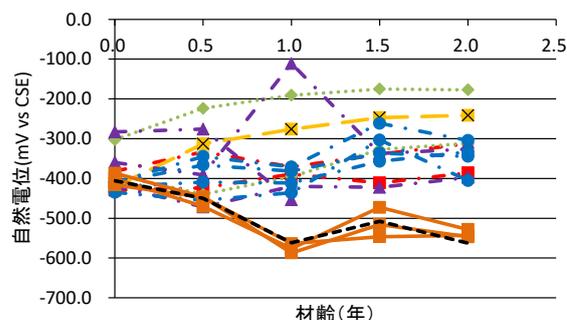


図-6 グレードⅠの自然電位の経時変化

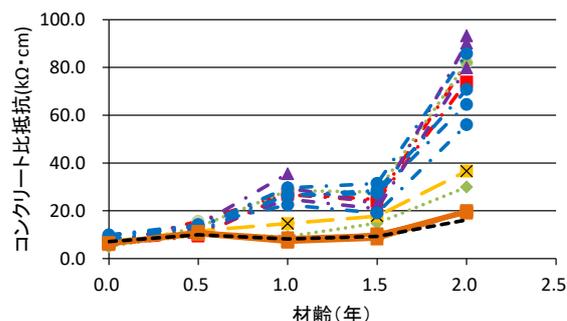


図-7 グレードⅠのコンクリート比抵抗の経時変化



写真-2 劣化グレード I の暴露 2 年目の外観 (I-14)



写真-3 劣化グレード II の暴露 2 年目の外観 (II-12)

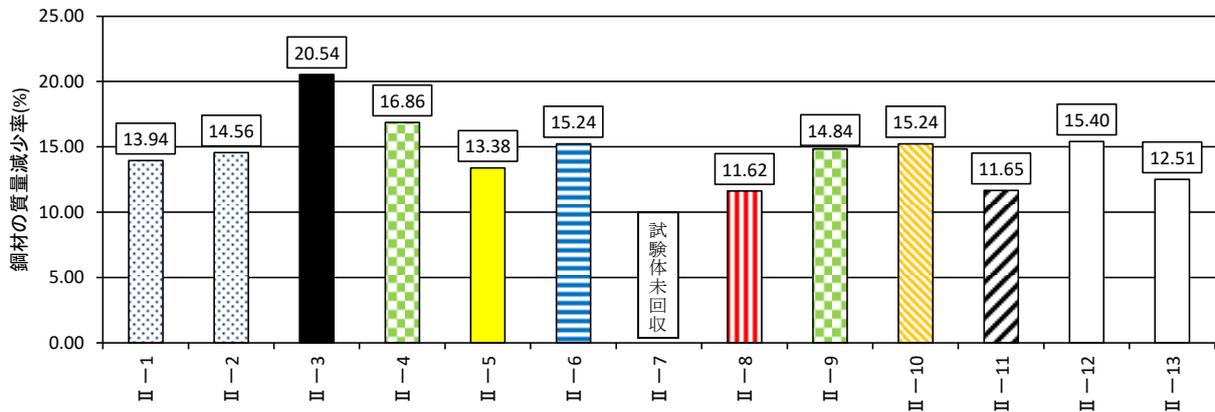


図-8 劣化グレード II の鋼材の質量減少率 (暴露 2 年時点)

であり、鋼材の質量減少率はそれぞれ 9.91%、12.67%、8.99%であった。劣化グレードⅢはかぶりコンクリートはなく鋼材が露出しているが、劣化グレードⅡよりも腐食が進行していなかった。劣化グレードⅡのような試験体の場合、かぶりコンクリートのひび割れ部分に雨水や波飛沫等による水分が吸収されやすく、鋼材への水分供給が劣化グレードⅢの試験体に比べて多いと考えられる。

5. まとめ

本研究により得られた知見を、以下に示す。

- ・塩化物量の多いコンクリート中であっても、劣化グレードⅠのように鋼材の腐食量が軽微な場合、防錆材や電気防食を行わなくても、水分浸透の抑制を意図したシラン系やシラン・シロキサン系の表面含浸材による補修で十分腐食抑制効果が得られた。
- ・劣化グレードⅠのように、かぶりコンクリート部分の損傷がない、あるいは小さい場合、自然電位やコンクリート比抵抗を測定する非破壊試験によって、無補修の試験体との相対的な鋼材の腐食状況にある程度把握できる。
- ・劣化グレードⅡ、Ⅲのように、鋼材の腐食の進行が著しい場合、表面含浸材だけではなく、防錆材や電気防食による補修を行うことで、腐食の進行を低減できる。

謝辞：本研究は、(公社)日本コンクリート工学会「危急存亡状態のコンクリート構造物対応委員会」(現委員長：東京大学大学院 野口貴文教授, 前委員長：東京工業大学 岩波光保教授)の活動の一環である共通試験WGにおいて実施した測定結果を使用した。試験体制作および現地での暴露試験の実施・測定にあたり、株式会社八洋コンサルタントの田中章夫氏、白石聖氏をはじめ、長崎市のご担当職員、参加大学の学生の皆様の多大なるご協力を得た。記してここに謝意を表す。

参考文献

- 1)楠麻希, 今本啓一, 野口貴文, 下澤和幸: 軍艦島構造物群の劣化調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.787-792, 2013
- 2)菊地原潤一, 染谷望, 加藤佳孝, 江口康平: けい酸ナトリウム系表面含浸材の浸透機構に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1615-1620, 2015
- 3)坂元貴之, 武若耕司, 山口明伸, 檀原弘貴: 各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1625-1630, 2011