

論文 端島のRC造建築物に対する表面含浸工法の適用性に関する研究

篠原 佳代子*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3・平田 真佑子*4

要旨: 端島の鉄筋コンクリート造建築物に対し、現地調査を行った。その結果、劣化の進行しやすさにはコンクリートの含水状態が大きく影響していると推察した。つづいて、コンクリートへの吸水抑制効果の付与が期待できる表面含浸工法に着目し、現地での曝露実験を通してその適用性について検討した。その結果、表面含浸工法を施すことによりコンクリートの含水率が低下し、腐食の進行が緩やかになることが確認でき、端島の建築物の保存に向けた一つの可能性を示した。

キーワード: 端島, 含水率, 腐食, 表面含浸工法, 曝露実験, 非破壊試験

1. はじめに

近年、長崎県長崎市に位置する端島（通称軍艦島）の鉄筋コンクリート造建築物に対し、適切な維持保全に関する議論が交わされている。

本研究では、これらの建築物の劣化状況および劣化要因を把握するため、現地調査を行った。また、現時点でひび割れは発生していないが、今後発生することの予想される部材に対して表面含浸工法の適用性を検討するため、現地にて曝露実験を行った。

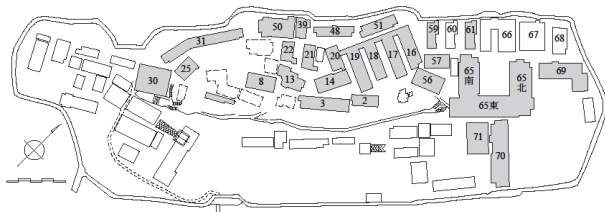


図-1 調査対象の棟



写真-1 分類の例



写真-2 削孔法

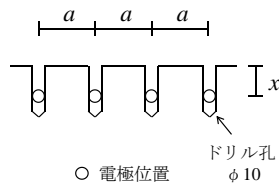


図-2 電極位置

2. 現地調査

2.1 調査計画

(1) 目視調査

2015年9月、図-1に網掛けで示す棟の各柱・梁・壁部材に対し、表-1に則り目視で劣化度の分類を行った。分類の例を写真-1に示す。

(2) 比抵抗調査

2017年4月、65号棟北棟（1945年竣工）1～6階の屋内の柱において、ドリル削孔を用いた比抵抗試験法²⁾（以下削孔法、写真-2）により部材内部の比抵抗を測定した。削孔法は四電極法を応用したもので、図-2に示すように4つのドリル孔に電極をさし込み測定を行う。本調査では電極間隔 a を4 cm、表面からの深さ x を2 cmとした。

表-1 劣化度分類の基準¹⁾

劣化度	劣化状況
0	表面上劣化のない状態
I	ひび割れ幅は1 mm程度以下、鉄筋が付着劣化しているとは考えられない
II	腐食により鉄筋とコンクリートが肌別れし、若干付着劣化
III	かぶりコンクリートが剥落し、鉄筋のかぶり側はほぼ肌別れしているが、鉄筋のコア側はまだ付着があり、鉄筋は全面に浮き錆び程度
IV	鉄筋とコンクリートが肌分かれし、付着力が殆どないが、鉄筋の断面積は70%程度以上と判断できる、あるいは酸化鉄が表面のみと判断できる
V	コア部のコンクリートも欠落するほど完全に鉄筋とコンクリートが肌分かれし、付着力がなく、鉄筋の断面積が70%未満と判断できる、あるいは鉄筋が層状に割裂

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科嘱託助教 博士(工学) (正会員)

*4 東京理科大学 工学部建築学科

2.2 調査結果

(1) 目視調査

調査で得られた各部材の劣化度を棟ごとまたは築年数ごとにまとめた。大規模な補修・補強履歴³⁾のある30号棟および16～20号棟は、劣化要因を考察する上で適さないと考え除外した。屋内の部材と屋外に面する部材それぞれを平均して比較したものを図-3に示す。この図より、26棟中21棟で、屋内の部材より屋外に面する部材の平均劣化度が高いことがわかる。さらに、海沿いの棟において、屋外に面する部材と中でも海側に面する1～3階の部材を比較したものを図-4に示す。この図より、屋外に面する部材の中でも、特に海にごく近い部材の平均劣化度が高い傾向にあることがわかる。

これらの理由として、屋外や特に海にごく近い部材は飛来塩分、降雨および波飛沫の影響を受けやすく、鉄筋の発錆限界塩化物イオン濃度に達する時期が早まったことに加え、コンクリート中の含水率が上昇して鉄筋が腐食しやすい環境が形成されたことが考えられる。逆の傾向を示した棟については、壁が存在しないケースや庇が大きいケース等があるが、原因の把握には、雨掛かりや仕上げ、かぶり厚さ等の詳細な調査が必要である。

(2) 比抵抗調査

削孔法による比抵抗と測定対象部材の劣化度の関係を図-5に示す。この図より、比抵抗が低いほど劣化度が高い傾向にあることがわかる。一般に、含水率が高いほど比抵抗は低い値を示すことが知られており、劣化度が高い部材ほど含水率が高い可能性がある。なお、本調査における劣化度と既往の調査結果⁴⁾によるかぶり厚さに関連性はみられなかった。

以上より、コンクリートの含水率が低い状態に保たれていれば劣化の進行は緩やかになると推察される。そこで以降は、コンクリートへの吸水抑制効果の付与が期待できる表面含浸工法に着目し、曝露実験を通してその適用性について検討した。本実験は、コンクリート標準示方書⁵⁾に示される塩害の進展期に相当するような、ひび割れのない部材(劣化度0)への施工を想定して行った。

3. 曝露実験

3.1 実験計画

(1) 供試体

コンクリートの調合を表-2に示す。調合は文献⁶⁾に示される16号棟の単位セメント量の推定値より決定した。また、同文献⁶⁾に示される同棟の内在塩化物イオン量を参考に、塩化物イオン5kg/m³を混入した。材齢4日で脱型したのち気中養生を行い、材齢71日で表面含浸材を塗布した。供試体名および使用した表面含浸材を表-3に示す。有効成分濃度の異なる3種類のシラン・シ

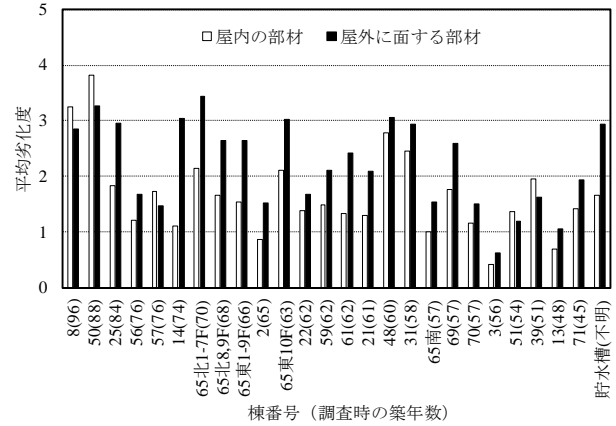


図-3 屋内の部材と屋外に面する部材

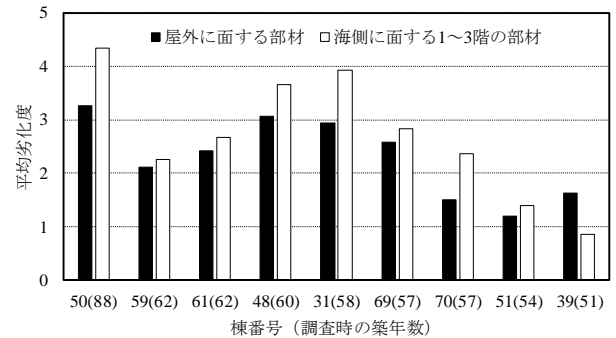


図-4 海にごく近い部材の劣化度

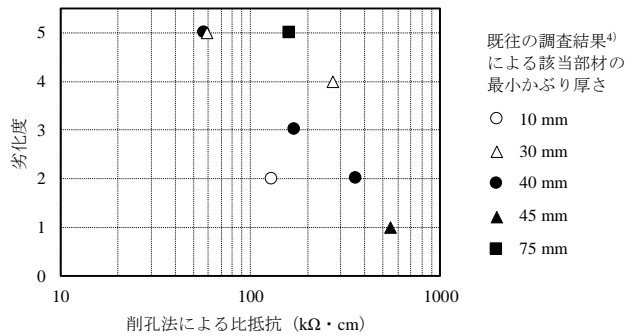


図-5 劣化度と削孔法による比抵抗

表-2 コンクリートの調合

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

C : 普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm³)

S : 大井川水系 陸砂 (表乾密度 2.59 g/cm³)

G : 東京都青梅産 硬質砂岩砕石 (表乾密度 2.66 g/cm³)

表-3 供試体名および使用した表面含浸材

供試体名	表面含浸材の主成分	有効成分濃度
N	無塗布	
SS-1	シラン・シロキサ	約 25 %
SS-2	シラン・シロキサ	約 80 %
SS-3	シラン・シロキサ	約 60 %

ロキサン系表面含浸材を塗布した。また、比較用として無塗布の供試体を用意した。供試体の形状を図-6に示す。鉄筋有に加え、塩化物イオン量等の測定のため鉄筋無も作製した。鉄筋有は各水準3体(Nのみ4体)ずつ、鉄筋無は1体ずつ用意した。鉄筋有は裏面に自然電位および分極抵抗の測定部を設け、曝露中は塩化ビニル板で覆うこととした。材齢83日より曝露を開始した。曝露開始時点において供試体にひび割れは発生していなかった。

(2) 曝露環境条件

曝露場所は端島69号棟(4階建)の屋上とした。端島の南5.5kmに位置する野母崎気象観測所の年間の降水量は1871mm、平均気温は16.9℃である。曝露の様子を写真-3に示す。

(3) 試験項目

試験項目を表-4に示す。ここでは、曝露開始後1年

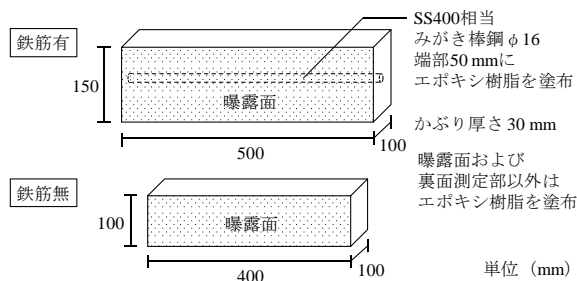


図-6 供試体の形状

表-4 試験項目

試験項目	方法	供試体
ひび割れ幅	クラックスケールを用いて測定	鉄筋有
色差	曝露面の色彩を色彩色差計で測定し、JIS K 5600-4-6 に準じて算出	鉄筋有
表面含水率	文献 ⁷⁾ 参考	鉄筋無
表面吸水速度	文献 ⁸⁾ 参考	鉄筋無
比抵抗	表面電気抵抗計(四電極法、電極間隔5cm)を用いて測定(以下表面法、写真-4)	鉄筋有
質量含水率	JIS A 1476	鉄筋無
中性化深さ	JIS A 1152	鉄筋有
可溶性塩化物イオン量	JIS A 1154 付属書 B に準じて温水抽出法で溶液を作製しイオンクロマトグラフ法で測定	鉄筋無
腐食量	供試体を割裂させて鉄筋を取り出した後、クエン酸水素二アンモニウム水溶液に浸漬して除錆し、腐食前からの質量変化から算出	鉄筋有
自然電位	飽和硫酸銅電極を用いて裏面測定部をよく湿潤させ測定	鉄筋有
分極抵抗	鉄筋腐食診断器を用いて裏面測定部から測定	鉄筋有

までの試験結果を報告する。曝露開始時に鉄筋有のNを1体、曝露1年経過時に各水準1体ずつを解体し、鉄筋の状況を確認した。

(4) 質量含水率と比抵抗に関する室内実験

質量含水率と表面法による比抵抗の検量線を求めるため、新たにコンクリート供試体を作製した。水セメント比は45%とし、塩化物イオンは混入していない。形状は測定面が100×400mm、奥行が100mmの直方体とした。材齢にともなう乾燥を利用し、様々な含水状態における質量含水率および比抵抗を測定した。

3.2 実験結果

(1) 供試体の外観

曝露1年で、無塗布の供試体に最大幅0.05mm程度の鉄筋に沿うひび割れが確認された。

曝露1年における供試体の外観を写真-5に、Nとの色差を図-7に示す。端島の建築物においては、外観を極力変化させずに補修することが望ましい。色の許容差の事例⁹⁾において、SS-1, 2は「離間比較ではほとんど



写真-3 曝露の様子



写真-4 表面法



N



SS-1



SS-2



SS-3

写真-5 曝露1年での供試体の外観

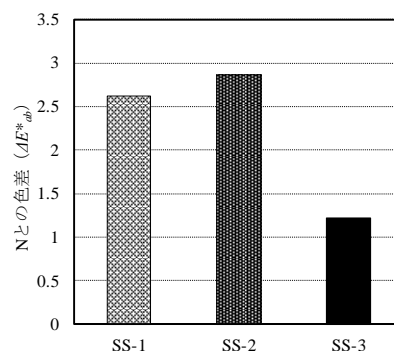


図-7 Nとの色差

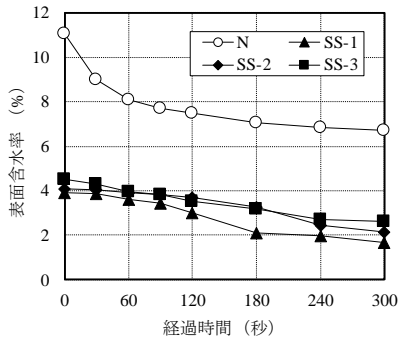


図-8 表面含水率

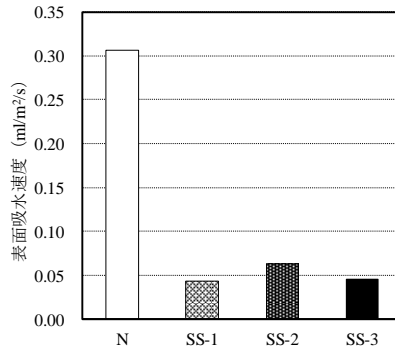


図-9 表面吸水速度

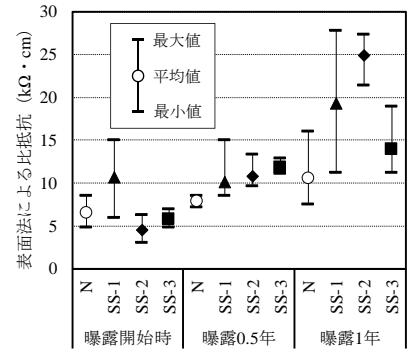


図-10 比抵抗

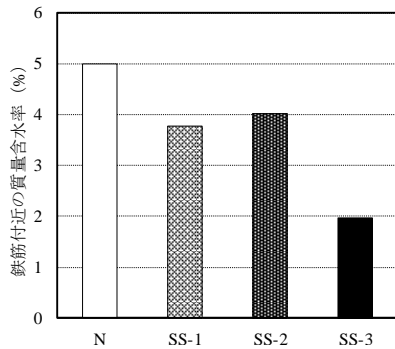


図-11 鉄筋付近の質量含水率

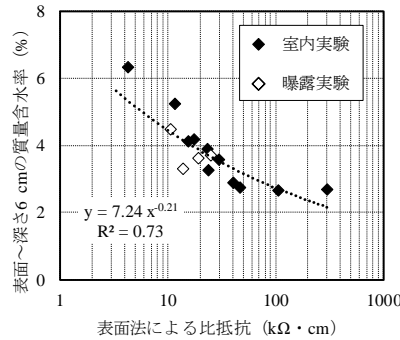


図-12 質量含水率と比抵抗

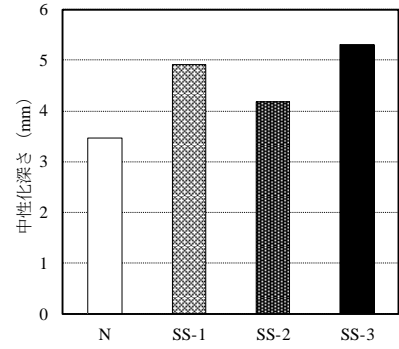


図-13 中性化深さ

気付かれない色差レベル」, SS-3 は「隣接比較でわずかに色差が感じられるレベル」とされ, 表面含浸材による外観の変化はごく小さいと言える。

(2) コンクリート表層の状態

曝露 1 年での表面含水率の試験結果を図-8 に示す。表面含浸材を塗布した供試体は, 無塗布より低い値を推移した。曝露 1 年での表面吸水速度を図-9 に示す。図より, 表面含浸材を塗布した供試体の表面吸水速度は無塗布と比較して 5 分の 1 以下に抑えられていることがわかる。以上より, 表面含浸材によりコンクリートに吸水抑制効果が付与されていることが確認できる。なお, 現時点では表面含浸材の種類の違いによる差は明確に現れなかった。

これらの測定値はコンクリートのごく表層の状態に依存する。既往の実験結果¹⁰⁾によれば, 曝露 4 年では紫外線により含浸層の一部が消失し, コンクリートのごく表層に対する試験では表面含浸材の吸水抑制効果を正しく評価できないとされている。曝露初期においては上記の試験により表面含浸材による変化を捉えることが可能であるが, 今後は困難になると考え, 比抵抗によりコンクリート内部の含水状態を評価できないか試みた。

(3) 質量含水率と比抵抗

表面法による比抵抗の測定結果を図-10 に示す。曝露 0.5 年, 1 年のいずれにおいても表面含浸材を塗布した供試体は無塗布よりも高い値となった。曝露 1 年における他の測定結果と同様に, 表面含浸材の吸水抑制効果を評

価することが可能であると考えられる。

曝露 1 年における鉄筋付近の質量含水率を図-11 に示す。実際に鉄筋に影響を及ぼす範囲において, 表面含浸材を塗布した供試体は無塗布よりも質量含水率が低くなっており, 鉄筋の腐食抑制に繋がると期待できる。

図-12 は室内実験で得られた表面から深さ 6 cm の範囲の質量含水率と表面法による比抵抗の関係に, 曝露実験で得られた結果をプロットしたものである。質量含水率と表面法による比抵抗には一定の相関がみられており, 曝露実験の結果も概ねこれと一致している。このことから, 今後の曝露実験において, 比抵抗を測定することでコンクリート内部の質量含水率を推測できる可能性がある。この方法であれば表面含浸材の紫外線劣化の影響を受けることがないと考えられ, 今後さらにデータを収集したい。また, 実際に端島の建築物へ補修を施した場合, その補修効果の確認には破壊を伴わないことが望ましい。表面法は非破壊試験であるため, この観点からも適用性が高い手法と言える。

(4) 中性化深さ

中性化深さを図-13 に示す。いずれの供試体においても中性化は鉄筋位置に達していなかった。表面含浸材を塗布した供試体は無塗布より中性化が進行していたが, これは含水率が低下したことによりコンクリート中の空隙に二酸化炭素が侵入しやすくなったためと考えられる。

(5) 塩化物イオン量

本実験においては, 打設時に混入した塩化物イオン量

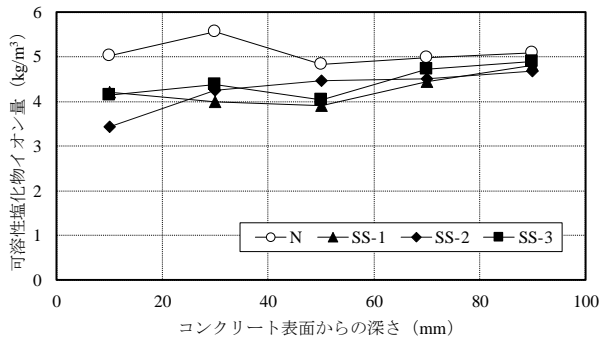


図-14 塩化物イオン量の分布

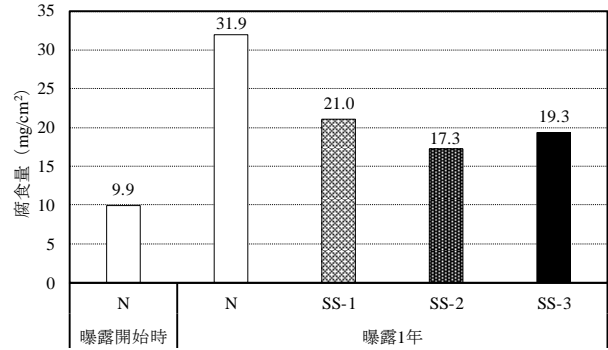


図-15 腐食量

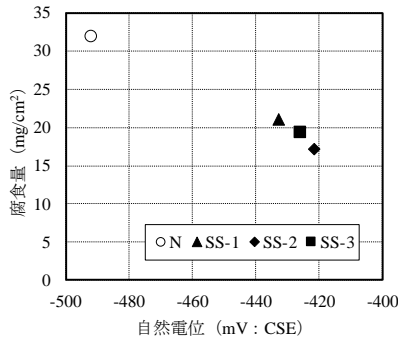


図-16 腐食量と自然電位

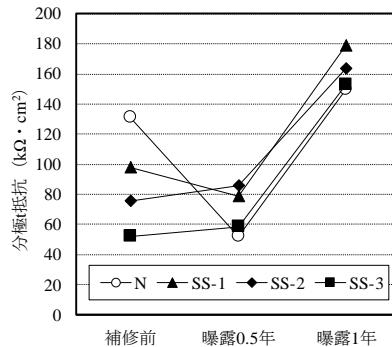


図-17 分極抵抗の推移

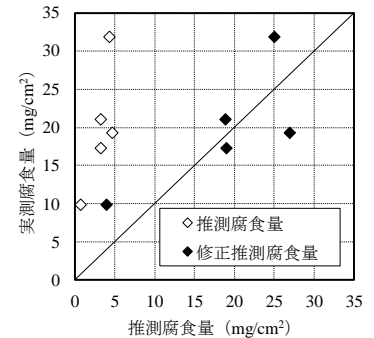


図-18 実測腐食量と推測腐食量

が 5 kg/m^3 であり、初期より腐食発生限界濃度に達しているものと考えられる。

曝露1年での可溶性塩化物イオン量の分布を図-14に示す。表面含浸材を塗布した供試体は、特に表層部において無塗布より小さな値となった。既往の研究¹¹⁾において、コンクリートの吸水量が大きくなるほど塩化物イオンの見かけの拡散係数も大きくなる傾向が認められている。本実験においても表面含浸材を塗布した供試体では飛来塩分の浸透が抑制されていると考えられ、これは吸水抑制効果によってもたらされたものと推察できる。また、コンクリート標準示方書⁹⁾に示される潜伏期に相当するような塩化物イオン量の少ない部材に対しても、本工法を適用することで腐食の発生を遅らせることができ、劣化の進行を抑制することが可能であると考えられる。

(6) 鉄筋の腐食状況

鉄筋の腐食量を図-15に示す。いずれの鉄筋においても腐食の発生が確認されたが、曝露開始時の無塗布の腐食量は 9.9 mg/cm^2 であり、これを差し引けば、表面含浸材を塗布した供試体では曝露開始以降の腐食量は無塗布の34%~50%程度に抑えられていることがわかる。

表面含浸材を塗布することでコンクリートに吸水抑制効果が付与され、含水率が低下し、その結果腐食の進行が緩やかになったと考えられる。ただし、曝露1年において各供試体の差はまだ小さなものである。曝露実験を継続し、表面含浸工法の適用性について今後も検討を続けていく必要がある。また、前述した通り無塗布におい

て曝露1年でひび割れの発生が確認されており、このときの腐食量は 31.9 mg/cm^2 であった。この値は、おおよそのひび割れ発生限界腐食量として今後曝露実験を続ける上で一つの目安になると思われる。

(7) 電気化学的手法による鉄筋の腐食状況の評価

曝露1年における腐食量と自然電位の関係を図-16に示す。いずれの供試体も -400 mV より卑の値となった。ASTM C 876 に示される腐食判定基準において -350 mV 以下は「90%以上の確率で腐食あり」とされ、本実験において鉄筋の腐食状況と判定は一致した。また、自然電位が卑であるほど腐食量が大きくなった。このことから、自然電位を測定することによって、鉄筋を供試体から取り出すことなく腐食程度を相対的に評価することが可能であると考えられる。

分極抵抗の推移を図-17に示す。本実験ではひび割れの影響を考慮して裏面に測定部を設けた。この測定部は本来雨掛かりを想定しない位置であるため、曝露中は湿潤しないこととした。既往の研究¹²⁾によれば、測定部に対し30分以上の湿潤を行ってから測定することで、湿潤なしの場合よりも低い一定の値に収束するとされており、同図における分極抵抗の値は本来よりも高い値になっていると考えられる。分極抵抗が低いほど腐食速度は大きい。補修前の測定では表面含浸材を塗布した供試体は無塗布よりも低い値をとったが、曝露後は無塗布が最も低くなった。

分極抵抗から腐食量の推測を試みた。式(1)¹³⁾により、

分極抵抗から腐食電流密度を算出した。

$$I_{corr} = K \cdot 1/R_p \quad (1)$$

I_{corr} は腐食電流密度 (A/cm^2), K は金属の種類や環境条件で決まる定数 (V), R_p は分極抵抗 ($\Omega \cdot cm^2$) である。 K は, コンクリートでよく用いられる $0.026 V$ とした。さらに, 式(2)¹³⁾により腐食電流密度を質量損失速度に換算した。

$$1 \mu A/cm^2 \rightarrow 9.1 mg/cm^2/year \quad (2)$$

ここで得られた質量損失速度を時間で積分することで, 腐食量を算出した。

実測腐食量と算出した推測腐食量の関係を図-18 に示す。実測腐食量より推測腐食量の方が小さくなった。これは, 湿潤をせずに測定した影響と考えられる。そのため, 実測腐食量と推測腐食量の近似曲線が $y=x$ となるように, 推測腐食量に対する補正係数を 6.0 と定めた。補正した推測腐食量による点を同図中に修正推測腐食量として示す。実測値腐食量と修正推測腐食量の関係には幅があり, 現時点で正確な推測は難しいと言える。しかし, 今後さらにデータを収集していくことで一定の傾向を見出し, 推測の精度を向上できる可能性がある。精度が向上すれば, 供試体から鉄筋を取り出さずとも腐食状況の定量的な把握が可能になると考えられる。

4. まとめ

本研究より, 以下の知見が得られた。

- (1) 現地調査の結果から, 劣化の進行しやすさにはコンクリートの含水状態が大きく影響していると推察される。
- (2) 曝露実験で用いた表面含浸材は, いずれもコンクリートに吸水抑制効果を付与した。
- (3) 表面法による比抵抗を測定することで, 非破壊でコンクリート内部の質量含水率を推測できる可能性があり, 表面含浸材の吸水抑制効果の評価に有用であることが示唆された。
- (4) 表面含浸材を塗布した供試体では, 鉄筋の腐食の進行が緩やかになった。このことから, 端島の建築物の保存に向けた一つの可能性を示した。
- (5) 自然電位から鉄筋の腐食程度の相対評価が可能であると考えられる。また, 分極抵抗による鉄筋の腐食量の推測については, 今後データを収集していくことで精度を向上できる可能性がある。

謝辞

目視調査は「軍艦島コンクリート系建築物の健全度調査小委員会」(野口貴文主査)の活動の一環として行ったものです。関係各位に謝意を表します。比抵抗調査および曝露実験にあたり, (一財)日本建築総合試験所の下澤

和幸様, (株)八洋コンサルタントの田中章夫様, 芝浦工業大学濱崎研究室, 旭化成ワッカーシリコーン(株)の神澤弘様にご助力を賜りました。深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 迫田丈志ほか: 端島の建物の劣化による構造性能低減に関する研究その2 部材の劣化度評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.517,518, 2016.8
- 2) 下澤和幸ほか: かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性評価のためのドリルPR法の適用性の検討, 日本建築学会構造系論文集, No.74, Vol.646, pp.2145-2153, 2009.12
- 3) 阿久井喜孝, 滋賀秀實: 軍艦島実測調査資料集, 東京電機大学出版局, p.638,p.647, 1984.3
- 4) 佐藤大輔ほか: 端島の建物の劣化による構造性能低減に関する研究その4 配筋調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.521,522, 2016.8
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理編], 2013
- 6) 軍艦島コンクリート構造物劣化調査WG: 軍艦島コンクリート構造物の劣化調査報告書, pp.41-44,113-117, 2013.3
- 7) 御園麻衣子ほか: 国立西洋美術館本館躯体の保全に向けた表面含浸材の特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1942-1947, 2014
- 8) 林和彦, 細田暁, Usman AKMAL, 藤原麻希子: コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1804-1829, 2012
- 9) 日本電色工業株式会社ウェブページ参照: https://www.nippondenshoku.co.jp/web/japanese/colorstory/08_allowance_by_color.htm (閲覧日: 2017.12.31)
- 10) 宮崎香苗ほか: 軍艦島に4年間曝露した表面含浸材塗布コンクリートの鉄筋腐食抑制効果その1 表面含浸材の劣化抑制効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.765,766, 2017.9
- 11) 古賀裕久, 河野広隆, 渡辺博志: 実構造物から採取したコアの吸水性状と耐久性能の関係, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.429-436, 2012
- 12) 松塚忠政, 渡辺博志, 古賀裕久, 中村英佑: 塩分を含むコンクリート中のPC鋼より線の腐食評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.919-924, 2005
- 13) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術'17 基礎編, 日本コンクリート工学会, pp.194,195, 2017.2