

論文 選択的表面含浸工法適用による端島 RC 造建築物の鉄筋腐食抑制に関する研究

平田 真佑子*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨: 近年, 端島 (通称軍艦島) の鉄筋コンクリート造 (RC) 建築物について, 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, 端島 RC 造建築物を対象とした高水セメント比のコンクリートにおいて表面含浸材の効果および塩分浸透特性について検討するとともに, 端島にて曝露 7 年目における表面含浸材を塗布した供試体の鉄筋腐食抑制効果を検討した。その結果, 築年数の長い端島 RC 造建築物においてもシラン系表面含浸材はかぶり厚さが大きい部材, 亜硝酸リチウム系表面含浸材はかぶり厚さが小さい部材など, 表面含浸材を選択的に適用することによって鉄筋腐食を抑制できる可能性が示唆された。

キーワード: 表面含浸材, 塩害, 塩化物イオン量, 曝露試験, 鉄筋腐食, 端島

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ついて, 適切な維持保全に関する議論が交わされている。

そこで本研究では, その基礎的検討として, 端島の高水セメント比コンクリートを用いた構造物に対応する水セメント比 40% から 120% の供試体を作製し塩水浸漬試験を行い, 高水セメント比コンクリートの塩分浸透特性および表面含浸材の塩分浸透抑制効果について検討を行った。あわせて, 端島にて曝露を継続している供試体における表面含浸材の鉄筋腐食抑制効果を検討し, 鉄筋のかぶり厚さによって最適な表面含浸材の選択方法について提案を試みた。また, 実際に端島の実構造物に表面含浸材を適用した時の塩分浸透抑制効果についても検討を行った。

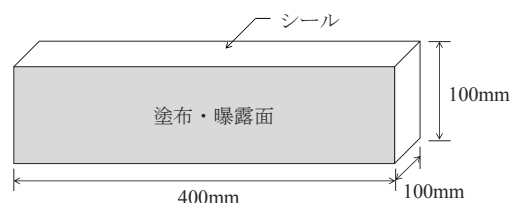


図-1 供試体の形状および寸法

2. 塩水浸漬試験

2.1 供試体概要

供試体の形状および寸法を図-1 に示す。100×100×400mm の角柱供試体を作製した。表-1 にコンクリートの調合を示す。水セメント比 40% から 120% の 5 調合とした。塩水浸漬試験において使用した供試体名および表面含浸材を表-2 に示す。有効成分濃度の異なる 2 種類のシラン・シロキサン系表面含浸材を水セメント比 60% および 80% の供試体に塗布した。また, 比較用として無塗布の供試体を用意した。養生を行った後, 濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液に 360 日浸漬する塩水浸漬試験を実施した。なお, 塩水浸漬試験は材齢 28 日より開始した。

2.2 測定項目および方法

(1) 含浸深さ

JSCE-K571-2005 に準拠して含浸深さの測定を行った。

表-1 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
40	43	156	390	763	1044
60	47	183	305	833	970
80	54	200	250	959	843
100	52	212	212	923	880
120	52	221	184	923	880

表-2 供試体名および表面含浸材

供試体名	塗布量	主成分
40-1, 60-1, 80-1, 100-1, 120-1		無塗布
60-2, 80-2	400g/m ²	シラン・シロキサン
60-3, 80-3	528g /m ²	シラン・シロキサン

*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)

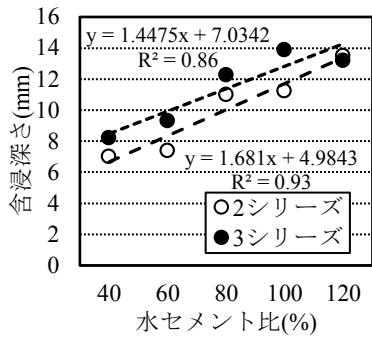


図-2 水セメント比と含浸深さ

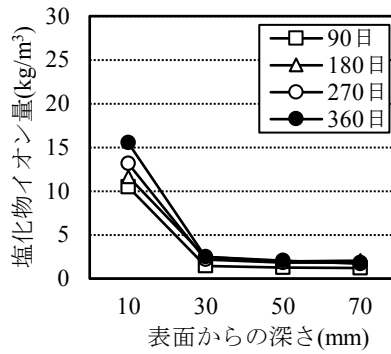


図-3 塩化物イオン量(W/C=40%)

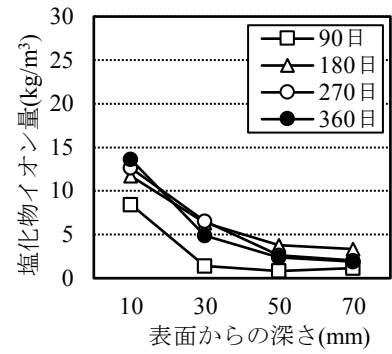


図-4 塩化物イオン量(W/C=60%)

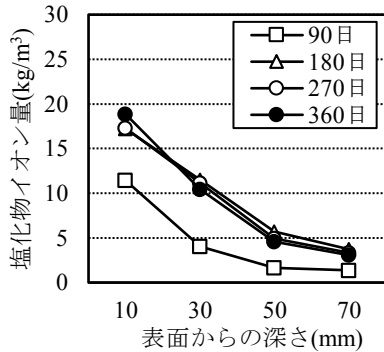


図-5 塩化物イオン量(W/C=80%)

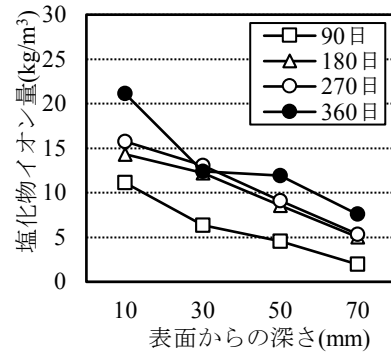


図-6 塩化物イオン量(W/C=100%)

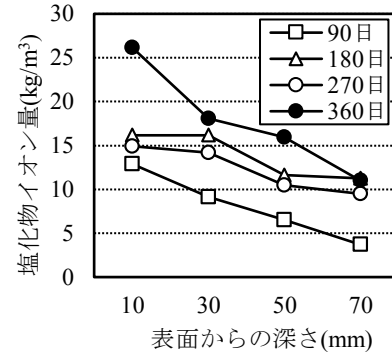


図-7 塩化物イオン量(W/C=120%)

(2) 塩化物イオン量

供試体を深さ方向 20mm ごとに切り出し、JIS A 1154 に準じた硝酸銀滴定法により全塩化物イオン量を算出した。また、式(1)のフィックの拡散方程式による回帰分析を行い、非含浸部の見かけの拡散係数を求めた。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right) + C(x, 0) \quad (1)$$

ここに、 x : 表面からの深さ(mm) , t : 浸漬期間(日),

D_{ap} : 見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{日}$),

C_0 : 表面塩化物イオン量 (kg/m^3)

2.2 実験結果

水セメント比と表面含浸材 2 種の含浸深さを確認するため 40%から 120%の 5 供試体に表面含浸材を塗布した。水セメント比と含浸深さの関係を図-2 に示す。水セメント比と含浸深さには相関がみられ、水セメント比が大きいほど含浸深さも大きくなること示された。これは、水セメント比が高くなるほどコンクリート表層の緻密性が低下し表面含浸材が浸透しやすくなったためと考えられる。

90 日ごとの水セメント比 40, 60, 80, 100, 120%の塩化物イオン量の推移を図-3~図-7 に示す。水セメント比が 80%までの供試体は浸漬 180 日以降塩化物イオンの浸透量に大きな差はみられない。しかし水セメント比 100% および 120%の供試体は浸漬 180 日を越えても塩化物イオンが浸透する結果となった。

無塗布の供試体の水セメント比と見かけの拡散係数の関係を図-8 に示す。水セメント比が 80%を超えても水

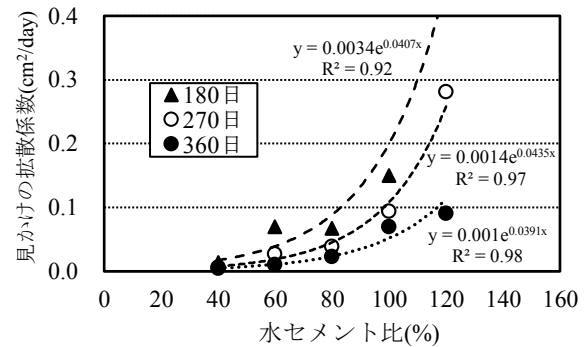


図-8 水セメント比と見かけの拡散係数

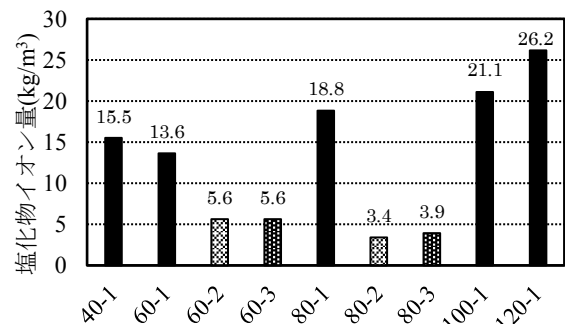


図-9 表面付近(0-20 mm)の塩化物イオン量

セメント比と見かけの拡散係数には相関が見られた。

塩水浸漬 360 日における表面から深さ 0-20 mm の塩化物イオン量を図-9 に示す。表面含浸材を塗布した供試体は表層部において無塗布の供試体より塩化物イオン量が小さい値を示し、表面含浸材の塩分浸透抑制効果が見られた。なお、水セメント比 80%の表面含浸材を塗布し

た供試体が水セメント比 60%の表面含浸材を塗布した供試体より塩化物イオン量が小さい結果となった理由として、図-2 に示すようにコンクリート表層の緻密性が低下し表面含浸材がより深部まで多く浸透し、塩分の浸透をより抑制したと考えられる。

3. 曝露実験

3.1 供試体概要

コンクリートの調合を表-3 に示す。調合は文献¹⁾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、同文献に示される同棟の内在塩化物イオン量を参考に、内在塩分量を 4 kg/m^3 とした。供試体名および使用した表面含浸材を表-4 に示す。表面含浸材は種類の異なるシラン系表面含浸材 2 種および亜硝酸リチウム系表面含浸材を使用している。供試体の形状と寸法を図-10 に示す。供試体はかぶり厚さが 10mm および 40mm の供試体を各 1 体測定した。2012 年 5 月に曝露を開始し、曝露 7 年が経過した。

3.2 曝露環境条件

曝露場所は端島 59 号棟の横とした。また、平均月飛来塩分量の $10 \text{ mg/dm}^2/\text{day}$ の環境下²⁾ に設置した。

3.3 測定項目および方法

測定項目および測定方法を以下に示す。

(1) ひび割れ幅

クラックスケールを用いて測定をした。

(2) 鉄筋質量減少率

鉄筋を供試体より取り出し、クエン酸水素二アンモニウム 10%水溶液に 2-ベンゾチアゾールチオール 1%アルコール溶液を添加した溶液中へ鉄筋を 4 日間浸漬して除錆した。浸漬中は 1 日おきに付着した錆をブラシで洗浄した。除錆後に鉄筋の質量を測定し、曝露前の質量より質量減少率を算出した。

(3) 自然電位

硫酸銅電極を照合電極として用い各 3 か所測定した。

(4) 塩化物イオン量

EPMA を用いて Cl 濃度を算出した。EPMA 分析は 1 つの断面に依存するため、骨材分布の影響を受けやすい。そこで既往の研究³⁾に示すように数値の補正を行い、骨材が均一に分布している場合の塩化物イオン量を算出した。また、表面からの深さ 40mm で内在塩化物イオン量が初期の内在塩分量の 2.4 kg/m^3 となるよう、補正を行った。

3.4 実験結果

(1) 最大腐食ひび割れ幅

曝露 7 年においでのかぶり厚さ 10mm および 40mm の供試体の曝露面の様子を写真-1、最大ひび割れ幅の測定結果を図-11 に示す。曝露 7 年において、S-1 の供試体

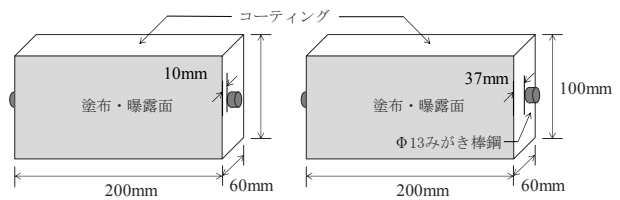


図-10 供試体の形状および寸法

表-3 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	NaCl
65	49	201	309	842	881	4

表-4 供試体名および使用した表面含浸材

供試体名	主成分	塗布量	塗布回数
N	無塗布		
S-1	シラン	528g/m ²	2 回
S-2	シラン	300g/m ²	2 回
LNS	亜硝酸リチウム	150g/m ²	約 12 時間

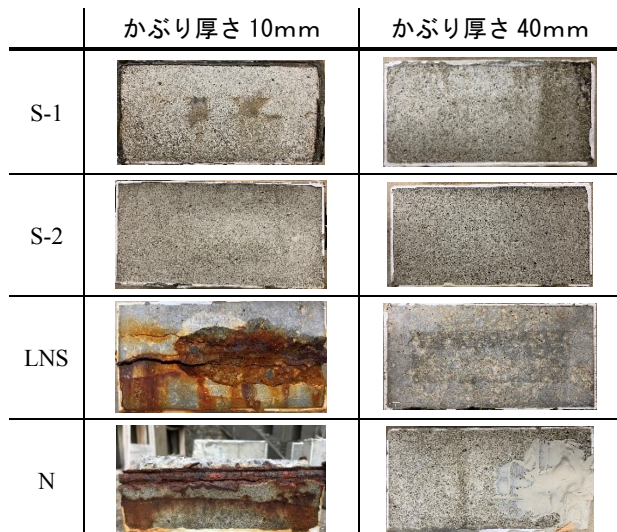


写真-1 曝露 7 年目の曝露面の様子

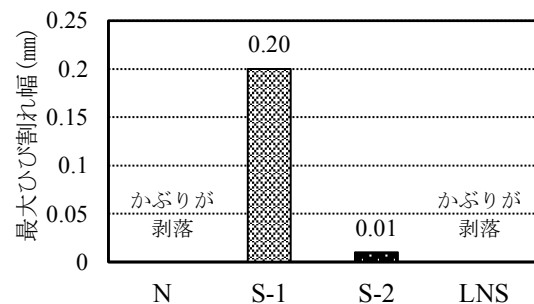


図-11 かぶり厚さ 10mm の最大ひび割れ幅

では最大約 0.2mm 程度のひび割れが発生していたのに対し、S-2 の供試体にはわずかなひび割れが見られたものの鉄筋に沿ったひび割れがみられなかった。なお、既往の研究³⁾にて述べたように亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布した供試体は固定化を図っていなかったため曝露 4~5 年の段階でその予防保全効果が消失したと考えられており、無塗布の供試体と亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布した供試体はかぶりが剥落している。

(2) 鉄筋質量減少率

かぶり厚さ 10mm の供試体での鉄筋質量減少率を図-12 に、かぶり厚さ 40mm の供試体での鉄筋質量減少率を図-13 に示す。かぶり厚さ 10mm および 40mm の供試体でシラン系表面含浸材を塗布した供試体は無塗布の供試体より鉄筋の質量減少率が小さく、鉄筋の腐食を抑制している。また S-2 に比べて S-1 の供試体の鉄筋の質量減少率がわずかに大きい。なお、LNS は亜硝酸リチウムが溶脱し曝露 7 年において鉄筋腐食抑制効果を確認することができないため測定をしていない。

(3) 自然電位

かぶり厚 40mm の供試体での自然電位の測定結果を図-14 に示す。シラン系表面含浸材を塗布した S-1 および S-2 は貴側の傾向を示した。一方、LNS は無塗布と同様に卑側を示していた。既往の研究⁴⁾にて鉄筋の腐食が軽微な場合、自然電位と含水率の相関が確認されており、自然電位が卑になるほど含水率が高い傾向が示されている。シラン系表面含浸材を塗布した供試体は無塗布や亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布した供試体に比べて含水率が低く、腐食しにくい環境であることが考えられる。

(4) 塩化物イオン量

全供試体の塩化物イオン量の分布を図-15 に示す。

回帰分析にて算出した見かけの拡散係数および表面塩化物イオン量を表-5 に示す。なお S-1 は塩化物イオン量に表面からの勾配が無い（拡散係数が無限小の）為、除外した。無塗布の供試体と比べて特に S-2 の見かけの拡散係数は無塗布の供試体の 1/4 程度となり、表面含浸材の塩分浸透抑制効果がみられた。

3.5 今後の塩化物イオン量の予測

表-5 の見かけの拡散係数より、表面からの深さ 10mm および 40mm での塩化物イオン量の浸透予測を行った試算結果を図-16 および図-17 に示す。シラン系表面含浸材を塗布した供試体は無塗布の供試体に比べ塩化物イオン量を抑制でき、表面含浸材塗布したかぶり厚さ 10mm の供試体は無塗布のかぶり厚さ 40mm の供試体に相当する結果となった。

鉄筋の腐食条件を、予測式より求めた無塗布の供試体でひび割れが始まった曝露 2 年目の鉄筋位置の塩化物イオン量 3.7kg/m^3 とし、それぞれの腐食条件に達するまで

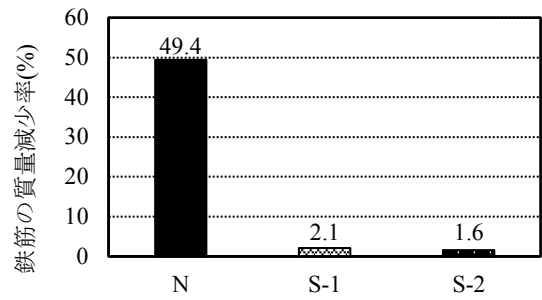


図-12 かぶり厚さ 10mm の鉄筋の質量減少率

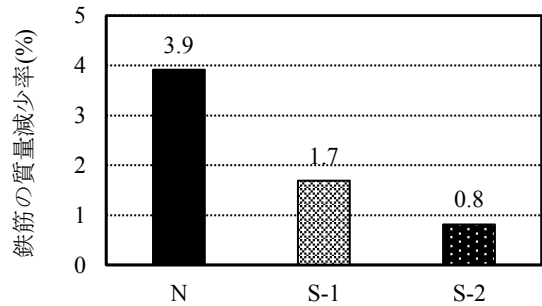


図-13 かぶり厚さ 40mm の鉄筋の質量減少率

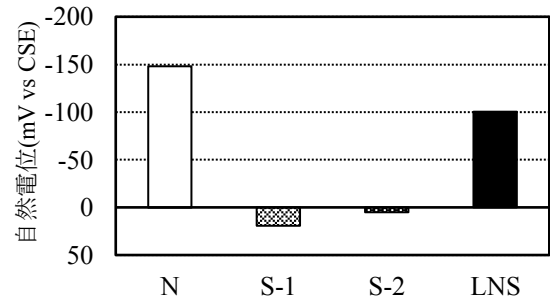


図-14 自然電位

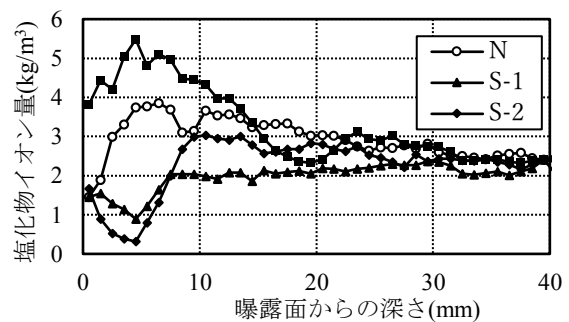


図-15 塩化物イオン量

表-5 見かけの拡散係数

供試体名	C_0 (kg/m ³)	D_{ap} (cm ² /年)
N	2.3	0.72
S-2	1.4	0.17
LNS	3.7	0.22

表-6 腐食条件に達するまでの年数

	かぶり厚さ 10mm	かぶり厚さ 40mm
N	2 年	32 年
S-2	到達しない	到達しない

の年数を表-6 に示す。シラン系表面含浸材を塗布した S-2 の供試体は計算上、かぶり厚さに関わらず 100 年以上経過しても腐食条件に達しない結果となった。このことから、シラン系表面含浸材を塗布することが塩化物イオン量を抑えるのに効果的であるという結果が得られた。

3.6 考察

既往の研究³⁾において亜硝酸リチウム単体を塗布した、すなわち固定化を図っていない亜硝酸リチウム系表面含浸材を塗布した供試体の本環境下（平均月飛来塩分量は $10\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ ）におけるその耐用年数は 4~5 年程度と推察しているが、写真-2 の鉄筋の様子および既往の研究⁵⁾にて示されるように曝露 4 年時には亜硝酸リチウム系表面含浸材がシラン系表面含浸材より鉄筋の腐食を抑制しており、亜硝酸リチウム系表面含浸材が鉄筋まで到達していれば、その鉄筋腐食抑制効果は高いと考えられる。

一方、シラン系表面含浸材は前述のように水分浸透抑制効果は高いが、既往の研究⁶⁾によるとシラン系表面含浸材を塗布した供試体では乾湿繰り返し試験にて含水率がわずかに上昇しており、かぶり厚さが小さい場合鉄筋への水分の侵入を完全に抑制することはできない。一般的な塗布量における亜硝酸リチウム系表面含浸材が浸透する深さは既往の研究⁷⁾によると最大で 20mm 程度であることから、表面塗布による浸透深さは多少異なるもののその値は小さいものと考えられる。以上のことから、図-18 に示すように、かぶり厚さが大きい部位においてはシラン系表面含浸材、かぶり厚さが小さい部位においては亜硝酸リチウム系表面含浸材の選択的適用が考えられるが、この点においては今後データをさらに集積して検討を行いたい。なお、亜硝酸リチウム系表面含浸材を使用する場合は他の補修工法と併用して亜硝酸リチウムの固定化を図るか 4~5 年おきに亜硝酸リチウムの再塗布を行うことが必要であると考えられる。

4. 端島の実構造物への適用

端島の実構造物へシラン系表面含浸材を塗布した場合の塩化物イオン浸透抑制効果の検討を行った。検討は以前の端島の調査⁸⁾で測定した塩化物イオン量をもとに Fick の第 2 法則により見かけの拡散係数を算出し今後の塩化物イオン量の予測を行った。本項 3.4 で得られた、S-2 の見かけの拡散係数は無塗布の供試体の見かけの拡散係数の 1/4 程度となったことを用い、曝露実験で使用した S-2 の表面含浸材を塗布した場合の今後の塩化物イオン量の予測を行った。なお、検討は劣化が比較的軽微で塩化物イオン量の侵入が現段階で少ない部材を対象で行った。端島の実構造物で検討に使用した部材の場所を図-19、検討した箇所の竣工年数等のデータを表-7 に示す。

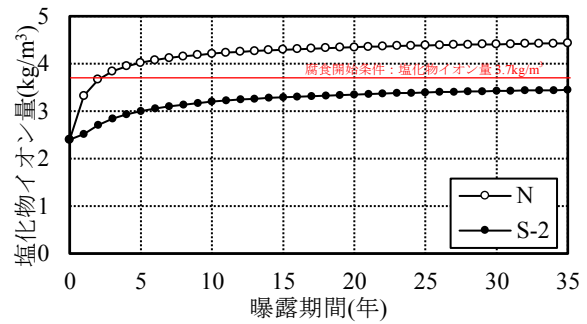


図-16 表面からの深さ 10mm での塩化物イオン量試算結果

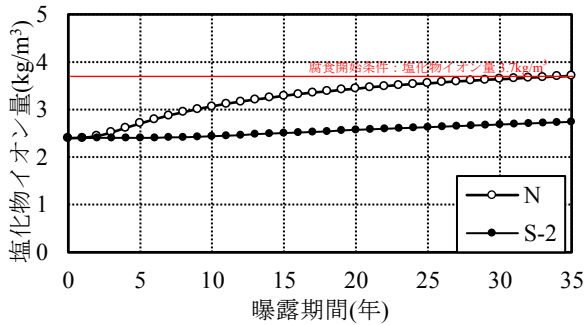


図-17 表面からの深さ 40mm での塩化物イオン量試算結果

	曝露 1 年目	曝露 4 年目	曝露 7 年目
S-1			
S-2			
LNS			亜硝酸リチウムが既に溶脱
N			

写真-2 鉄筋の様子(かぶり厚さ 10mm 供試体)

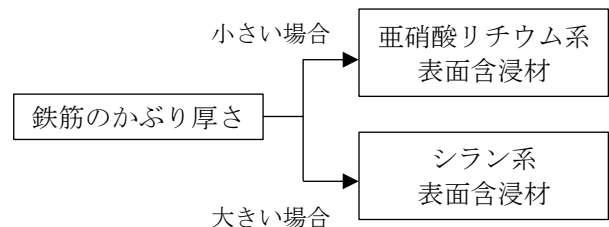


図-18 表面含浸材の選択手法

図-20 および図-21 に表面含浸材を塗布しなかった場合と S-2 の表面含浸材を塗布した場合の塩化物イオンの侵入の推移を示す。表面含浸材を塗布した場合、塩化物イオン量の侵入を大きく抑えることができる。このように端島のような築年数が長い構造物でも、選択的な表面含浸材の適用により、かぶり厚さの大小に応じた効果的な鉄筋腐食抑制が可能になるものと考えられる。今後はかぶり厚さの小さい部分への亜硝酸リチウムによる効果を検証してゆきたい。

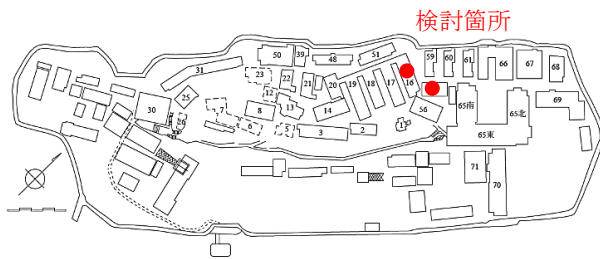


図-19 端島の実構造物で検討に使用した部材

表-7 検討した箇所のデータ

	57外1F_M1	16外1F_N1
場所	57号棟	16号棟
かぶり厚さ	50mm	110mm
竣工年数	1939年	1918年
築年数	80年	101年
中性化深さ	5.1mm	20.4mm

5. まとめ

本研究より、以下の知見が得られた。

- (1) 水セメント比が80%を超えても水セメント比と見かけの拡散係数には相関が見られた。
- (2) 表面含浸材を塗布した供試体の筋腐食抑制効果を塩害環境の極めて厳しい端島において検証した。その結果、本環境下においては、シラン系表面含浸材を塗布し、かぶり厚さを10mmとした供試体は、かぶり厚さを40mmとした無塗布の供試体に相当する塩化物イオン浸透量の抑制効果が得られることが考えられた。
- (3) 端島構造物群のように保存すべき廃墟建築物については、かぶり厚さが大きい部位においてはシラン系表面含浸材、かぶり厚さが小さい部位においては亜硝酸リチウム系表面含浸材の選択的適用が考えられる。
- (4) 端島のような築年数が長い構造物でも、表面含浸材を選択的に適用することによって鉄筋腐食を抑制できる可能性が示唆された。

謝辞

本研究にあたり、株式会社八洋コンサルタントの田中章夫様、EPMAを測定していただいた一般社団法人日本建築総合試験所の木野瀬透様に大変お世話になりました。ご協力感謝致します。また、本研究は長崎市の特別な許可を得ています。関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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

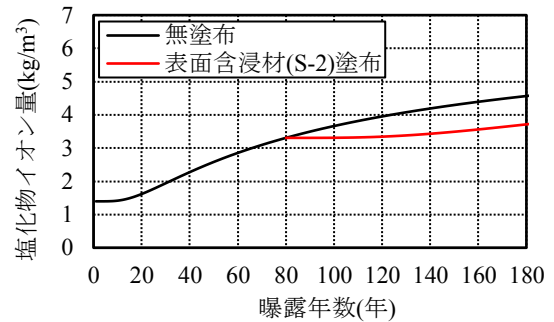


図-20 塩化物イオン量の推移 (57外1F_M1)

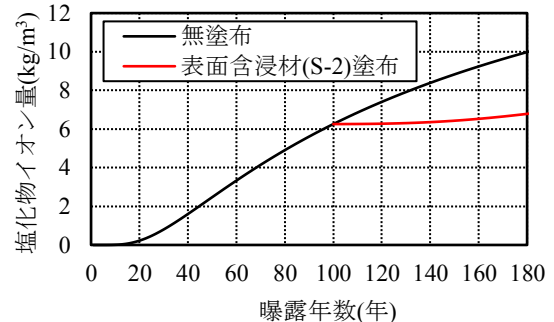


図-21 塩化物イオン量の推移 (16外1F_N1)

- 2) 清水峻，崎原康平，山田義智，濱崎仁：長崎県軍艦島における飛来塩分輸送状況の推定に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.763-768，2015
- 3) 平田真佑子，今本啓一，清原千鶴，渡辺恭子：表面含浸材を塗布したコンクリートの塩化物イオン浸透特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1661-1666，2019
- 4) 小澤 優太，今本啓一，清原千鶴：実構造物における自然電位と質量含水率の相関に関する検討，日本建築学会関東支部研究報告集，Vol.88，No.1，pp.17-20，2018.3
- 5) 篠原佳代子，今本啓一，清原千鶴：軍艦島に4年間暴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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1669-1674，2017
- 6) 御園麻衣子，今本啓一，永井香織，清原千鶴：表面含浸材と表面コーティング材によるコンクリート躯体保護性能に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1693-1698，2013
- 7) 前山誠志，久保善司，木虎久人，石井一騎：亜硝酸系含浸材のコンクリートへの適用方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.965-970，2019
- 8) 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