

ROOFING / SIDING / INSULATION / RENEWAL

# 防水ジャーナル

2021

7

No.596



特集1 『建築保全標準』の概要と解説

特集2 いま使ってみたい施工機械と道具

THE BOUSUI JOURNAL

# 軍艦島のRC建造物の保存と 表面含浸材の効果

濱崎 仁

芝浦工業大学 建築学部 建築学科 教授

## 1 はじめに

軍艦島（正式名：端島）は、長崎市南西の海上に浮かぶ無人島で、世界文化遺産「明治日本の産業革命遺産」の構成要素の一つとなっている。

軍艦島は、写真1に示すように切り立った護岸が外洋の荒波から島を護っているが、このことによって護岸で碎波されミス状になった海水が建物に降り注ぐことになる。そのため、島内の建造物は厳しい塩害環境に晒され、コンクリート中の鉄筋が著しく腐食した箇所も多い。写真2は、日本国内で最古のRC造集合住宅といわれる30号棟の南面外壁の状況である。2020年、南面および西面の一部が崩壊している。鉄筋は腐食により消失し、かろうじて残った鉄筋に梁の残骸がぶら下がっている。

軍艦島の建造物群の一部は、鉄筋腐食の進行によって構造性能の低下を生じるような危機的な状況にある。一方で、現時点で劣化は顕在化

してはいるが、今後、鉄筋腐食の進行が懸念される状況にある建物も多く、これらの建造物群をできるだけ長く保存していくためには、状況に応じた適切な補修・補強技術が求められる。

また、歴史的建造物の補修・補強には、性能の回復や劣化進行の抑制だけでなく、歴史的建造物であるが故の厳しい制約も存在する。本稿では、歴史的建造物の補修・補強の難しさとともに、その解決方法の一つとして、筆者らが行っている亜硝酸リチウムを用いた補修方法に関する実験などの結果と、そこで得られた補修の考え方について紹介したい。

## 2 歴史的建造物の補修・補強の難しさ

歴史的建造物は、長期にわたって風雪に耐えてきた建造物であり、その折々に補修・補強・交換などが行われ、今なお存在し得ている。従って、建造物の歴史においては、さまざまな

手が尽くされているが、歴史的建造物の保存・修復のための諸行為に対しては、「Authenticity（オーセンティシティ）」の確保が重要であるとされている。オーセンティシティとは「真正性」、つまり「本物」であるのかどうかを意味し、1964年



写真1 軍艦島の状況(南西側上空より撮影)



写真2 30号棟南面外壁の状況

に「ヴェニス憲章」において提唱された概念である。その中では、歴史的構造物におけるオーセンティシティの確保について表1のような提言がなされている。また、ヴェニス憲章は、ヨーロッパを中心とした組積造文化における概念であったことから、1994年の世界文化遺産奈良会議において「奈良ドキュメント」が採択された。この中では、木造の建造物の保存が視野に入れられ、①形態と意匠②材料と材質③用途と機能④伝統と技術⑤立地と周辺環境⑥精神と感性⑦その他、内外的要因の七つの側面から真正であることを要求している。

しかしながら、RC造の構造物については、組積造や木造に比べるとその歴史も浅く、これまでは対象となる構造物も少なかったことから、積極的な議論がされておらず、世界的な合意を得られたような考え方はない。ヴェニス憲章や奈良ドキュメントにおける考え方をRC造に当てはめて解釈をしているのが現状である。

RC構造物におけるオーセンティシティ確保の考え方としては文化庁「重要文化財(建造物)耐震診断・耐震補強の手引」<sup>1)</sup>が参考になり、次のような原則が挙げられている。

- 意匠を損なわないこと
- 部材を傷めないこと
- 可逆的であること
- 区別可能であること
- 最小限の補強であること

この中でも、特に意匠を損なわないことについては、表面被覆や断面修復による補修を難しくし、外観変化の比較的少ない含浸材の適用が有効となる。また、可逆的であることという条件は特に難しく、より適切な補修材料・工法が存在する場合にはそれらを適用できることが求められているため、エポキシ樹脂注入工法などのように、取り外すことの出来ない補修方法は、歴史的構造物に対しては望ましくないとされている。また、補修後の期間も長期にわたるため、再補修のしやすさと置き換えて考えることもできる。

表1 ヴェニス憲章における提言の概要

観点	求められるオーセンティシティ
意匠 (第5条)	記念建造物の保全は、建造物を社会的に有用な目的のために利用すれば、常に容易であり、望ましいことであるが、建物の設計と装飾を変更してはならない
材料 (第9条)	修復の目的は美的価値、歴史的価値を保存し、オリジナルな材料を尊重することにもとづくこと
技術 (第10条)	伝統的な技術が不適切であることが明らか場合は、近代的な保全、構築技術を用いて、補強することも許される
周辺環境 (第14条)	記念建造物の敷地については、その全体を保護した上、適切な方法で整備し公開することが確実にできるように、特に注意を払うべき対象である

また、歴史的構造物では、補修・補強の原点は新築時にあるのではなく、歴史的・文化的価値が認められた時点を指すため、一般的には文化財指定などがなされた時点の状態を保つことが目標となる。従って、歴史的構造物の補修とは、劣化を回復させることではなく、劣化を止める、あるいは進行を遅らせることが目的となる。

以上のように、RC造の歴史的構造物の補修・補強については、一般の構造物に対する補修・補強に加えて考慮すべき点が多く、いまだ確たる方向性が定まっていない状況にある。そこで筆者らは、外観を極力変化させず、塩害環境下において鋼材腐食の進行を抑制させる技術として、亜硝酸リチウムを用いた補修方法に着目し、現地での屋外暴露試験などを行い、その有効性を確認した。以降、屋外暴露試験の結果<sup>2)3)</sup>について、概要を紹介したい。

### 3 軍艦島における実験的検討

#### 3.1 実験概要

屋外暴露試験体は、厳しい塩害環境にさらされた鉄筋コンクリート構造物に補修を行うことを想定し、初期内在塩化物イオン量を1.2kg/m<sup>3</sup>、10kg/m<sup>3</sup>の2水準とし、腐食評価のための鉄粉を混入させたW/C=70%のモルタル供試体を母材とした。モルタル供試体は、図1に示す100mm×100mm×100mmの立方体とし、暴露する2面以

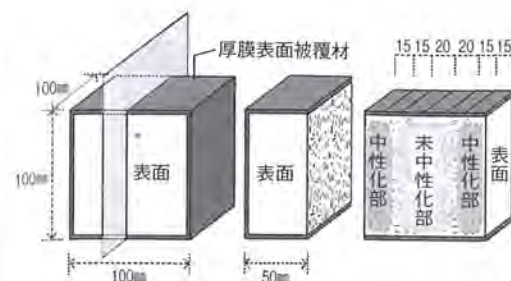


図1 モルタル供試体

表2 モルタル供試体の補修工法の一覧

分類	記号	仕様
補修なし	N	補修なし
表面被覆	CE	可とう形ポリマーセメント系複層仕上塗材CE
	WPE	防水形複層塗材E
	MC	アクリルゴム系塗膜防水材
浸透性吸水防止材	BP	シラン系浸透性吸水防止材塗布(600g/m <sup>2</sup> )
LiNO <sub>2</sub> 表面含浸	LNP1	LiNO <sub>2</sub> 表面塗布(400g/m <sup>2</sup> )
	LNP2	LiNO <sub>2</sub> 表面塗布(CI <sup>-</sup> 1.2kg/m <sup>3</sup> : 22.4g/m <sup>2</sup> , CI <sup>-</sup> 10kg/m <sup>3</sup> : 112.0g/m <sup>2</sup> )
	LNP1+BP	LiNO <sub>2</sub> 表面塗布(400g/m <sup>2</sup> )後、浸透性吸水防止材塗布(600g/m <sup>2</sup> )
LiNO <sub>2</sub> 内部圧入	LNIJ	LiNO <sub>2</sub> 高圧注入(CI <sup>-</sup> 1.2kg/m <sup>3</sup> 用5cc/体、CI <sup>-</sup> 10kg/m <sup>3</sup> 用30cc/体)
	LNIJ+BP	LiNO <sub>2</sub> 高圧注入後、浸透性吸水防止材塗布(600g/m <sup>2</sup> )
LiNO <sub>2</sub> +ポリマーセメントペースト被覆	LNP+PCP	LiNO <sub>2</sub> 表面塗布(約280g/m <sup>2</sup> )後、LiNO <sub>2</sub> 混入(70kg/m <sup>3</sup> )ポリマーセメントペースト2mm塗付け

外はエポキシ樹脂系の厚膜表面被覆材によって保護した。また、補修前に促進中性化試験(JIS A1153)を行い、表面から約20mm程度中性化させた後、各補修を行った。

#### 3.2 亜硝酸リチウムを用いた補修工法

表2に補修仕様の一覧を示す。亜硝酸リチウムを用いた補修工法は、表面含浸工法、内部圧入工法、亜硝酸リチウム入りポリマーセメントペーストによる表面被覆工法とした。亜硝酸リチウムの量は、亜硝酸イオンと塩化物イオンのモル比[NO<sub>2</sub><sup>-</sup>]/[Cl<sup>-</sup>]が0.6以上で塩害に対する

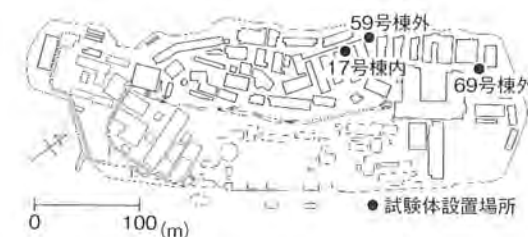


図2 暴露試験体の設置場所

防錆効果が発揮され、特に屋外環境のようなより高い防錆効果が必要とされる場合は、モル比が1.0以上であることが望ましいとされている。

また、外観変化を極力抑えることを目的としてシラン系の表面含浸材を用い、単独および亜硝酸リチウムと組み合わせて用いた。各補修工法の詳細は、(一社)コンクリートメンテナンス協会『コンクリート構造物を対象とした亜硝酸リチウムによる補修の設計・施工指針(案)』<sup>4)</sup>などを参照されたい。このほか、比較用の表面被覆工法として一般的に用いられるJIS A6909(建築用仕上塗材)に規定される防水形複層塗材E(WPE)、可とう形ポリマーセメント系複層仕上塗材CE(CE)、およびJIS A6021(建築用塗膜防水材)に規定されるアクリルゴム系塗膜防水材(MC)を用いた。

#### 3.3 暴露場所

暴露試験体の設置場所を図2に示す。暴露場所は軍艦島島内とし、屋外環境で直接海水飛沫を浴びやすい環境である59号棟外と、直接海水飛沫を浴びにくい69号棟外、屋内ではあるが建具がないため若干の飛来塩分のある17号棟内とした。いずれの暴露場所においてもモルタル供試体の暴露面2面のうち一方の面を海側へ、もう一方の面を山側へ向けて設置した。

#### 3.4 評価方法

図1に示したモルタル供試体の表面および割断面の中性化域と未中性化域に分けて、断面の鉄粉の腐食状況を5段階の腐食グレードで評価した。また、イオンクロマトグラフ法により、塩化物イオンおよび亜硝酸イオンの定量分析を行い、各イオンの深さ方向の分布を確認した。

表3 暴露1年目における腐食グレード

Cl <sup>-</sup> (kg/m <sup>2</sup> )	暴露場所	補修仕様	腐食グレード					
			海側			山側		
			表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
1.2	59号棟外	N	3.50	2.50	1.50	1.50	3.00	4.00
		CE	0.00	1.50	0.50	0.50	2.00	0.00
		WPE	0.00	2.50	0.50	0.50	2.50	0.00
		MC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
		BP	2.00	0.50	0.50	0.50	0.50	3.50
		LNP1	3.00	3.50	1.50	1.50	3.50	3.50
		LNP2	2.50	3.00	1.50	1.50	3.50	3.00
		LNP1+BP	3.00	1.00	0.00	0.00	1.00	2.00
		LNIJ	0.50	0.50	0.00	0.00	0.50	1.00
	LNIJ+BP	1.00	1.00	0.00	0.00	0.50	1.00	
	LNP+PCP	0.00	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00	
	17号棟内	N	1.50	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00
		CE	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		WPE	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		MC	0.00	1.50	0.00	0.00	1.50	0.00
		BP	1.50	1.00	0.00	0.00	1.00	1.50
		LNP1	1.50	0.50	0.00	0.00	0.50	1.00
		LNP2	1.50	0.50	0.00	0.00	0.50	0.50
LNP1+BP		1.50	0.50	0.00	0.00	0.50	0.50	
LNIJ		0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00	
LNP+PCP	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00		
10	59号棟外	N	4.00	4.00	2.50	2.50	4.00	3.50
		CE	0.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00
		WPE	0.00	2.00	1.50	1.50	2.00	0.00
		MC	0.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00
		BP	2.50	2.00	1.50	1.50	2.00	2.50
		LNP1	2.00	3.00	2.00	2.00	3.00	3.00
		LNP2	1.50	2.00	2.00	2.00	2.00	3.00
		LNP1+BP	3.50	1.50	2.00	2.00	1.50	3.00
		LNIJ	1.50	1.00	0.50	0.50	1.00	0.50
	LNIJ+BP	1.00	1.00	0.50	0.50	1.00	1.50	
	LNP+PCP	0.00	1.00	1.50	1.50	1.00	0.00	
	17号棟内	N	2.00	3.00	2.00	2.00	3.00	2.50
		CE	0.00	2.50	0.50	0.50	2.50	0.00
		WPE	0.00	2.50	0.50	0.50	2.50	0.00
		MC	0.00	1.50	0.50	0.50	1.50	0.00
		BP	2.00	2.50	1.50	1.50	2.50	2.50
		LNP1	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.50
		LNP2	2.50	2.00	2.00	2.00	2.00	1.50
LNP1+BP		2.50	2.00	1.50	1.50	2.00	2.00	
LNIJ		1.50	1.50	0.50	0.50	1.50	1.00	
LNP+PCP	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00		

表4 暴露3年目における腐食グレード

Cl <sup>-</sup> (kg/m <sup>2</sup> )	暴露場所	補修仕様	腐食グレード					
			海側			山側		
			表面	中性化	未中性化	未中性化	中性化	表面
1.2	59号棟外	N	4.00	3.25	1.25	1.75	4.00	3.75
		WPE	0.00	2.50	0.50	0.50	2.75	3.00
		MC	0.00	1.25	0.00	0.00	1.75	0.00
		BP	2.00	1.50	0.25	0.00	1.50	4.00
		LNP1	3.25	3.75	1.75	1.50	3.75	4.00
		LNP2	3.50	3.75	2.25	1.75	4.00	3.50
		LNP1+BP	3.00	1.75	0.25	0.25	1.75	3.00
		LNIJ	3.00	1.75	0.25	0.25	0.50	1.00
		LNIJ+BP	3.00	1.50	0.50	0.00	2.00	2.00
	LNP+PCP	0.00	0.50	0.25	0.25	0.25	0.00	
	17号棟内	N	1.25	1.50	0.50	0.50	1.50	1.25
		WPE	0.00	1.75	0.25	0.25	1.75	0.00
		MC	0.00	0.50	0.50	0.50	0.75	0.00
		BP	2.00	1.50	0.25	0.25	1.50	1.00
		LNP1	1.00	0.75	0.25	0.25	0.75	1.25
		LNP1+BP	1.00	0.75	0.25	0.25	1.00	1.00
		LNIJ	0.00	0.75	0.00	0.25	0.50	0.00
		LNP+PCP	0.00	0.25	0.25	0.00	0.25	0.00
10		59号棟外	N	3.75	3.25	2.00	1.75	3.75
	WPE		0.25	2.75	1.50	1.75	2.75	0.50
	MC		0.00	2.75	2.00	1.75	2.75	0.00
	BP		3.75	2.25	1.00	1.75	2.50	3.75
	LNP1		4.00	3.00	0.75	1.00	4.00	4.00
	LNP2		4.00	3.25	1.00	1.00	3.50	3.75
	LNP1+BP		2.75	2.25	0.50	0.50	3.00	3.00
	LNIJ		3.75	2.50	0.25	0.75	2.75	3.75
	LNIJ+BP		3.75	2.00	0.75	1.00	1.75	2.25
	LNP+PCP	0.00	1.75	0.75	1.00	2.00	0.00	
	17号棟内	N	2.25	2.50	2.50	2.25	2.75	2.25
		WPE	0.00	2.75	1.25	1.00	2.50	0.00
		MC	0.00	1.25	1.00	1.00	1.75	0.00
		BP	2.50	2.75	1.00	0.50	2.75	1.75
		LNP1	2.00	2.50	1.75	2.00	2.25	2.00
		LNP1+BP	2.25	2.50	0.50	0.50	2.25	2.00
		LNIJ	0.75	1.50	0.50	0.50	2.00	1.00
		LNP+PCP	0.00	1.75	0.75	1.00	1.75	0.00

LNP1+BPの表面の腐食は同様に進行していたが、断面の中性化域では比較的腐食の進行を抑えられている。内部圧入工法のLNIJ、LNIJ+BPも表面の腐食は進行しているが、断面の中性化域における腐食は表面含浸工法に比べて若干抑えられている傾向が見られた。LNP+PCPは、中性化域で若干腐食が進行しているものの、暴露3年目においても腐食グレード2以下で抑えられていた。表面被覆材は、表面では腐食の視認が困難であるが、CE、WPEは内部で腐食が進行している。表面被覆工法では水分の浸透防止を意図しているが、雨水や海水飛沫が試験体の内部へ少なからず浸透していると考えられる。

一方、屋内環境である17号棟内では、屋外に比べて腐食は進行していなかった。軍艦島のコンクリート構造物の多くに建具はないが、暴露3年目時点においても腐食の影響をあまり受けていないことが確認された。

軍艦島のコンクリート構造物のように、すでに多量の塩化物イオンがコンクリート中に存在する場合、内部鉄筋の不動態被膜は破壊されている。そのため雨がかりや海水飛沫を浴びる屋外環境では、腐食の主な要因の一つである水分の浸透を防ぐ浸透性吸水防止材を用いること、また鉄筋の不動態被膜を再生させ腐食進行を抑制させる亜硝酸リチウムを用いることが有効である。

評価は、暴露試験1年と3年後に行い、補修効果の比較を行った。

#### 4 暴露試験結果

##### 4.1 腐食グレードの経年変化

モルタル供試体の表面および割裂断面における中性化域、未中性化域の腐食グレードについて暴露1年目、3年目の結果をそれぞれ表3、表4に示す。

屋外環境である59号棟外では、全体的に初期内在塩化物イオン量によらず腐食グレードが大きく、表面および中性化域において腐食が顕著に進行していることが確認された。

LNP1やLNP2の亜硝酸リチウムの含浸工法は、表面の腐食は暴露3年で著しく進行しており、腐食グレード4に達しているものも見られた。また、断面の中性化域においても腐食が進行していた。シラン系の含浸材と組み合わせた

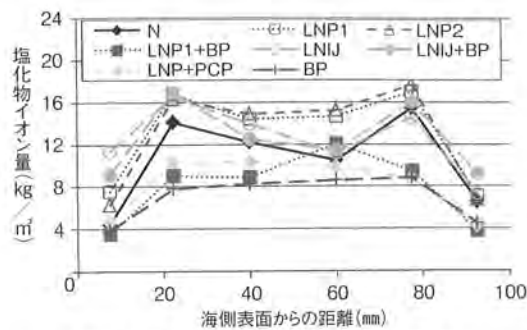


図3 塩化物イオン [Cl<sup>-</sup>] 分布 (59号棟)

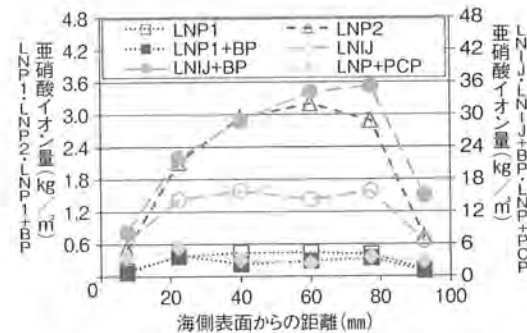


図4 亜硝酸イオン [NO<sub>2</sub><sup>-</sup>] 分布 (59号棟年)

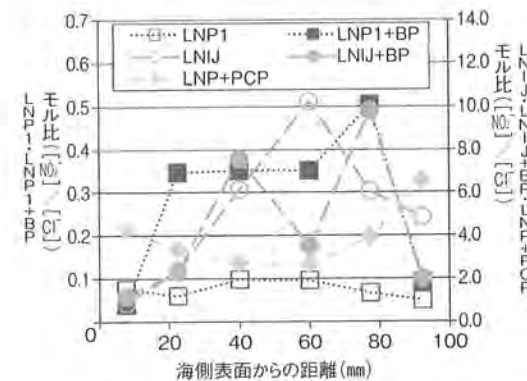


図5 モル比 [NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>] 分布 (59号棟)

#### 4.2 亜硝酸イオンと塩化物イオンの分布

59号棟横に3年間暴露した内在塩分量Cl<sup>-</sup>:10kg/m<sup>3</sup>試験体の塩化物イオンの分布[Cl<sup>-</sup>], 亜硝酸イオン[NO<sub>2</sub><sup>-</sup>], およびこれらのモル比[NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>]を図3~5に示す。

塩化物イオン量の分布をみると、全体的な傾向として中性化域と未中性化域の境界付近(20mm, 80mm付近)に塩化物イオンのピークが見られる。これは、乾湿繰返しに伴って塩化物イ

オンが中性化域と未中性化域の境界付近に濃縮されたためであると考えられる。BP単体およびBPを併用している補修と、LNP+PCPのように表面をポリマーセメントペーストで覆っている補修については無補修Nに比べて塩化物イオン量の浸透を抑えられている。亜硝酸イオンの分布をみると、LNP1の方がLNP1+BPに比べて亜硝酸イオンがより内部へ浸透しており、試験体内部のモル比も大きい。亜硝酸リチウムによる補修を行った試験体はリチウムイオンの潮解性により吸水率が高く、水分移動に伴い亜硝酸イオンも移動する。BPを用いていないLNP1の試験体表面付近の亜硝酸イオンが、雨水などにより試験体内部へと移動する水分とともに浸透したためであると考えられる。

LNIJとLNIJ+BPの圧入工法については、試験体内部へ充分な量の亜硝酸イオンを注入できていることが確認される。全体的な傾向としてLNIJ+BPの方が亜硝酸イオン量は大きいことから、BPを併用することで試験体内部からの亜硝酸イオンの流出を防げると考えられる。浸透性吸水防止材は水分、塩化物イオンの浸透抑制の効果だけではなく、試験体中に含浸、注入した亜硝酸イオンが外へと流出するのを防止しているため、モル比が大きくなると考えられる。また、LNP+PCPは表面付近のモル比が最も大きく、ペースト層から試験体内部へと亜硝酸イオンが供給され続けていると推測される。

#### 4.3 モル比と腐食グレードの関係

図6に中性化域、図7に未中性化域のモル比と腐食グレードの関係を示す。モル比が1.0を上回っている試験体はいずれも腐食グレード2.0以下となり、モル比が大きくなるほど腐食グレードは小さくなる傾向が見られる。

表面含浸工法のうちLNP1, LNP2はいずれもモル比は小さく腐食グレードも高い。しかし、浸透性吸水防止材を併用したLNP1+BPについてはモル比1.0を下回るものの、亜硝酸リチウムのみを塗布したものに比べ腐食を抑えられている。これは雨水や海水飛沫による水分の浸透が

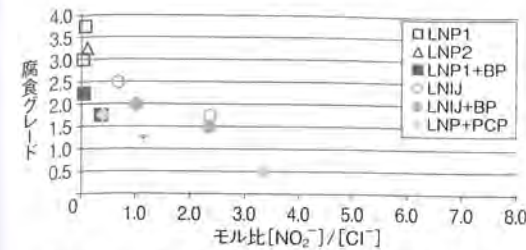


図6 モル比と腐食グレードの関係 (中性化域)

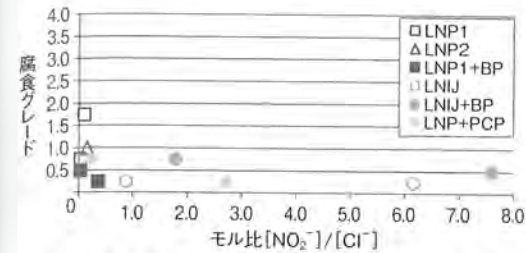


図7 モル比と腐食グレードの関係 (未中性化域)

抑えられ、試験体内部の乾湿繰返しが軽減されたためである。

内部圧入工法のLNIJ, LNIJ+BPでは、表面含浸工法に比べてモル比が大きく、いずれもモル比0.6~1.0を上回っている。また、亜硝酸リチウム入りポリマーセメントペースト被覆工法のLNP+PCPでは、モル比が1.0を下回っている場合でも腐食グレード2.0以下で抑えられている。被覆による塩分の遮蔽効果が高く、ペースト層から亜硝酸イオンが供給され続けているため腐食の進行を抑えられていると考えられる。

未中性化域では、モル比によらず腐食グレードは小さくおおむね2.0以下であった。また、屋内(17号棟)の結果からは、雨や海水といった水分の影響を受けて乾湿を繰り返さないような環境下では、浸透性吸水防止材の有無は腐食抑制にあまり影響がないことが明らかとなった。

### 5 補修工法の提案

前述の通り、軍艦島のような歴史的建造物では、外観の変化を極力抑えつつ、劣化の進行を停止、あるいは抑制するための補修を施す必要がある。また、外観変化については、すべての部材ではなく、特に見えがかりになる部材や外観が

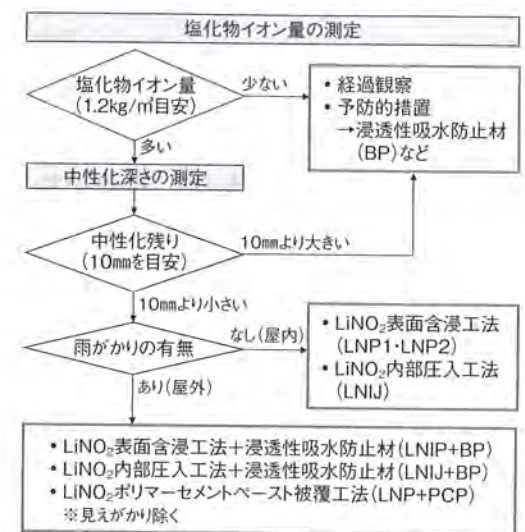


図8 補修工法選定フロー(案)

歴史的価値を有する部材が考慮の対象となる。このようなことを考慮して、軍艦島における補修工法の選定フローを図8のように提案した。

このフローは、塩化物イオン量と中性化深さ、雨がかりの有無、見えがかりか否かによって補修工法を選定する流れとなっている。ここでは、亜硝酸リチウムを適用した補修工法を例としてまとめているが、電気防食やその他の表面含浸材なども適用可能である。

軍艦島における建造物の現状は、非常に厳しい状況にあるが、鉄筋コンクリート造の歴史的建造物にとっても近い将来に起こりえる状況である。ここでの検討を土台にして、RC系建造物の歴史的建造物の補修・補強方法のノウハウを積み上げていくことが重要であると考えられる。

#### 1 参考文献

- 文化庁文化財部参事官：重要文化財(建造物)耐震診断・耐震補強の手引, 2013.9
- 濱崎仁ほか：亜硝酸リチウム含浸による経年建造物の補修工法に関する屋外暴露試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1519-1524, 2015.7
- 濵井雄斗ほか：塩害環境下における亜硝酸リチウムを用いた補修工法の腐食抑制効果の評価, 日本建築学会技術報告集, No.57, pp.529-534, 2018.6
- コンクリートメンテナンス協会：コンクリート建造物を対象とした亜硝酸リチウムによる補修の設計・施工指針(案), 2020.4