

防錆剤を用いた港湾構造物の劣化調査

九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 高阪 雄一

1. はじめに

1. 1. 背景・目的

港湾構造物は海上に位置するため、飛沫等の影響により海水中から塩化物イオンが供給されるだけでなく、大気中より多量の酸素も供給される。特に栈橋上部コンクリートは、塩害による劣化が進行し所定の耐用年数を待たずに20～30年で施設としての機能を損なう例が多数報告されているⁱ。このような塩害への対策手段の一つに防錆剤をコンクリートに添加する方法がある。九州地方整備局ではライフサイクルコストの低減を目指し、実験的に防錆剤を添加してモニタリングを行っているが、港湾構造物に適用された事例は他になく、今後の活用へ向け、防錆剤の効果の確認が必要である。



写真 鉄筋が露出した栈橋上部工

そのため本研究は、コンクリート品質、外部環境の各要因から、塩害のメカニズム及び防錆剤の効果を確認することを目的とする。

1. 2. 研究の構成

本研究の構成は図-1のとおりである。4章では、3章の各実験結果を照らし合わせ、項目毎に整理した。

2. 鉄筋の腐食と防錆剤の効果

防錆剤とは、腐食環境中のコンクリートに添加することで、金属の腐食を抑制する化学物質である。コンクリート中に塩化物イオン（以下 Cl^- ）が存在すると、鉄筋の表面を覆っている不動態皮膜を壊し腐食の進行を助長するが、防錆剤が添加されている場合、防錆効果を持つ亜硝酸イオン（以下 NO_2^- ）が破壊された不動態皮膜を再生すると同時に Cl^- をはねのけ、鉄筋の腐食を抑える効果がある。（図-2）

防錆剤を用いた場合の鉄筋腐食開始時期は、鉄筋位置に存在する NO_2^- 量と Cl^- 量の比（以下 $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ ）に依存することが知られており、劣化予測のためにはこの比の値を明確にすることが重要である。

3. 調査内容

苅田港・下関港・博多港において、①現地構造物のモニタリング調査、②現地暴露試験体調査お

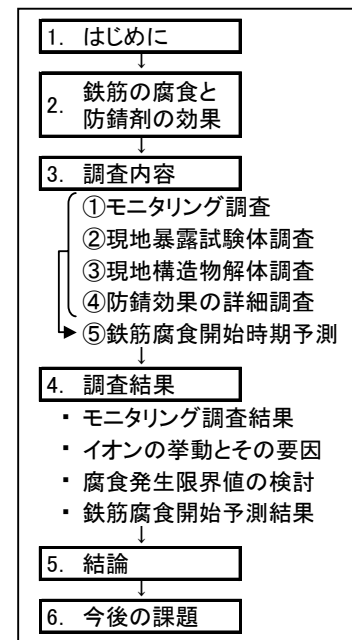


図-1 研究の構成

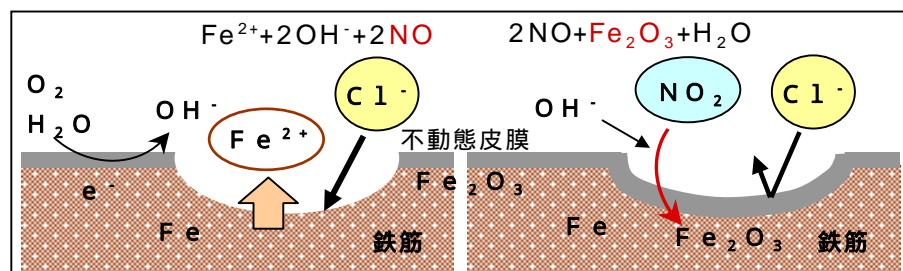


図-2 鉄筋腐食と防錆剤のメカニズム

よび③現地構造物解体調査を行った。また、港湾空港技術研究所内で別に試験体を作製し、④防錆剤効果の詳細調査を行った。これら調査より、コンクリート品質や外部環境が鉄筋の腐食に及ぼす影響を、 Cl^- と NO_2^- を指標として定量した。また、調査の結果を用いて、下関港・苅田港の実構造物について、⑤鉄筋の腐食開始予測を行った。

3. 1, 現地構造物モニタリング調査

実験的に防錆剤を添加している苅田港・下関港・博多港の栈橋上部コンクリートにおいて、電気化学的方法ⁱⁱにより鉄筋腐食状況のモニタリングを行った。コンクリート配合を表-1に、部材と海水面の位置関係を図-3に示す。

3. 2, 現地暴露試験体調査

博多港の防波堤、下関港・苅田港の栈橋下に3年間暴露されたコンクリート試験体について各種試験を行い、各イオン量と鉄筋の腐食状況を測定した。試験体諸元は表-2に、暴露位置は図-3に示すとおりである。

3. 3, 現地構造物解体調査

下関港・博多港から解体された部材の劣化状況の調査を行った。部材については、はり及びスラブで劣化度が異なるものを選定し、コンクリート中の Cl^- 量と距離・劣化度の関係を調査した。採取した部材一覧を表-3に示す。

3. 4, 防錆剤効果の詳細調査

3. 4. 1, 亜硝酸イオンの溶出に関する調査

NO_2^- 溶出に関する検討を行うため、防錆剤の添加量、セメント種類、水セメント比(W/C)を変えた試験体を海水循環水槽中の干満帯及び海中部、飛沫帯の3箇所半年間暴露し、 NO_2^- 量と Cl^- 量を測定した。

3. 4. 2, 腐食発生限界値 NO_2^-/Cl^- に関する調査

普通ポルドラントセメント(N)と高炉セメント(B)の2種について、防錆剤量、 Cl^- 量により NO_2^-/Cl^- を変化させた試験体を作成し、促進環境に暴露後、各イオン量の変化と鉄筋の腐食状況から腐食発生限界 NO_2^-/Cl^- を求めた。

3. 5, 鉄筋腐食開始時期の予測

前述4調査のイオンの浸透・拡散に関する結果を用い、下関港・苅田港の実構造物について、鉄筋腐食開始時期の予測を行った。時間とともに Cl^- 量は増加、 NO_2^- 量は減少させ、防錆剤無しの場合は鉄筋位置の全 Cl^- 量が $1.2kg/m^3$ に到達した時点、防錆剤 $10L/m^3$ 添加の場合は NO_2^-/Cl^- が1.0, 0.6まで下がった時点で

表-1 各港コンクリート諸元

設置場所	博多港	下関港	苅田港
セメント	高炉B	高炉B	高炉B
W/C(%)	53.5	54.0	51.4
防錆剤量(L/m ³)	10	20	10

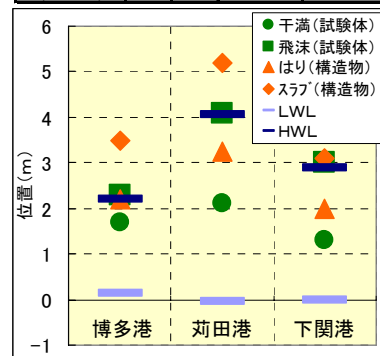


図-3 海水面との位置関係

表-2 暴露試験体コンクリート諸元

設置場所	博多港	下関港	苅田港
材料	セメント 高炉B	高炉B	高炉B
防錆剤	ラスナイン 太平洋マテリアル(株)	NR-1900 ホゾリス物産(株)	NR-1900 ホゾリス物産(株)
配合	W/C(%) 防錆剤(L/m ³)	53.5% 0.5, 10, 20	54.0% 10
かぶり(cm)	7	2.7	7

表-3 解体調査採取部材一覧

港名	建設年	部材	HWLからの距離(m)	浸漬率(%)	平均かぶり(mm)	劣化度
須崎(博多)	1964~1966	はり	0.29	0	105	V
					109	IV
	スラブ	0.89	0	60	II	
				(剥落)	60	III
下関	1968~1971	はり	-0.81	0.26	90	0
					80	0
					85	0
					75	0
	スラブ	0.19	0	80	0	
				40	IV	
				71	II	

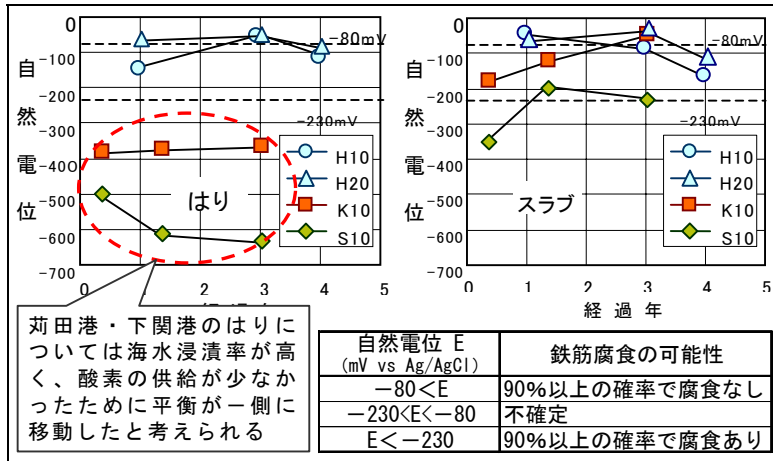


図-4 自然電位の測定結果

鉄筋腐食が始まると仮定した iii。

4. 調査結果

4. 1, 現地構造物モニタリング調査結果

苅田・下関・博多港棧橋において電気化学的手法により鉄筋腐食状況モニタリング調査を行った結果を図-4に示す。建設後約3年が経過した現在でも大きな変化はなく、鉄筋に腐食が生じている可能性は低いと判断された。

4. 2, イオンの挙動とその要因

4. 2. 1, Cl⁻について

②の調査より、全Cl⁻量と表面からの距離の関係から表面Cl⁻量(C₀)と拡散係数を求めると表-4のようになった。

更に③の調査より、解体時のCl⁻量と表面からの距離の関係は図-5、かぶりと劣化度の関係は図-6のようになった。これらより、防錆剤の使用はCl⁻浸透性状には影響はないが、かぶり厚さがCl⁻の浸透に大きく影響していると言える。また、H.W.L.からの距離とC₀の関係は図-7のようになり、H.W.L.から遠ざかるほどC₀は少なくなる傾向が見られた。

4. 2. 2, NO₂⁻について

調査④より、同量の防錆剤を添加した場合のコンクリート中の可溶性NO₂⁻量は、高炉セメント(B)の方が普通セメント(N)よりも多くなる傾向が見られる。(図-8) また可溶性NO₂⁻量と表面からの距離の関係は図-9のようになり、コンクリート中における可溶性NO₂⁻の拡散速度は、海水に常時浸漬している海中部でもっとも大きい結果となった。

4. 3, 腐食発生限界値 NO₂/Clの検討

普通ポルドランドセメントに防錆剤添加量 10L/m³の場合においては、NO₂/Cl=0.9程度で明確な腐食が観察された(図-10)。今回条件では高炉セメントの場合は腐食が不明確であった。

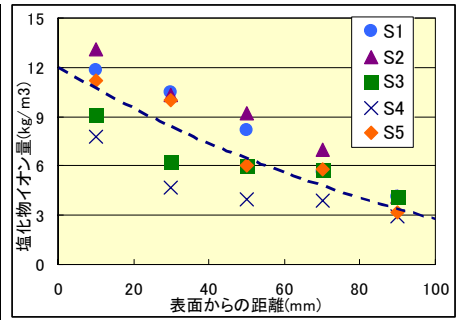


図-5 Cl⁻量と表面からの距離

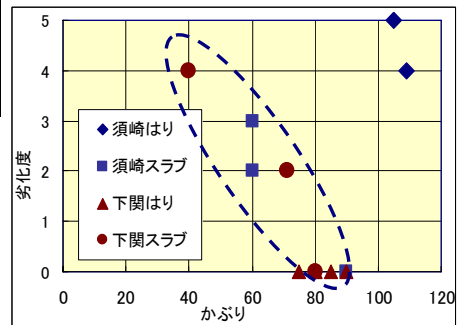


図-6 かぶりと劣化度の関係

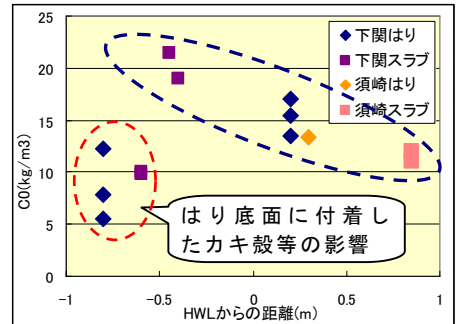


図-7 C₀とHWLからの距離

表-4 C₀と拡散係数

港名	防錆剤	位置	表面Cl ⁻ 量(C ₀) kg/m ³	拡散係数(D) 10 ⁻⁸ cm ² /s
サンプル	博多	0 H	24.0	1.09
		5 H	22.9	1.15
		10 H	18.0	0.89
		20 H	25.1	1.24
	苅田	0 M	16.8	1.52
		5 M	17.5	1.25
		10 M	19.3	1.04
		20 M	19.2	1.72
	下関	10 H	20.3	1.00
		10 M	18.5	0.86
下関	10 H	13.9	2.42	
	10 M	11.2	2.47	

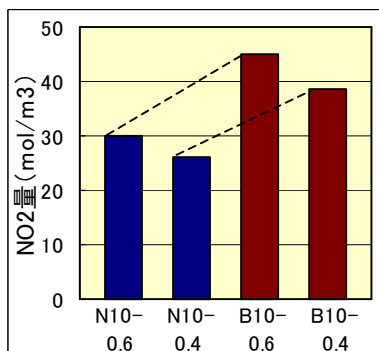


図-8 NO₂⁻量の初期値

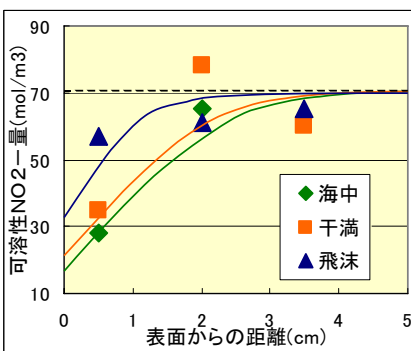


図-9 NO₂⁻量と表面距離

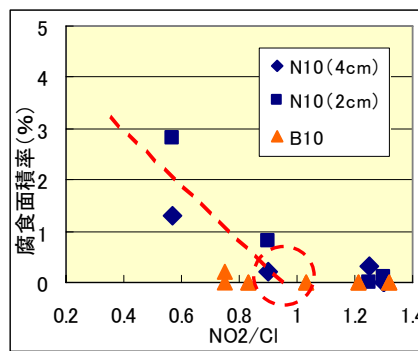


図-10 NO₂⁻/Cl⁻と腐食面積

4. 4. 鉄筋腐食開始時期の予測結果

鉄筋腐食開始時期の予測結果を図-11に示す。なお、これらの予測結果については、構造物の品質や置かれる環境により異なり、一様に今回の結果が適用できないため、傾向として示すものである。荻田港のようにコンクリート品質が良い場合（高炉セメント, W/C=51.4%）、防錆剤無しでも40年程度経過しても腐食は発生せず、また両港ともコンクリート品質が通常（普通セメント, W/C=55%）では、20年弱程度で腐食が開始すると予測された。このとき防錆剤が10L/m³程度添加されていれば、NO₂/Cl=1.0（安全側）で10年程度、NO₂/Cl=0.6（危険側）で20年程度腐食開始時期が遅くなる計算となった。

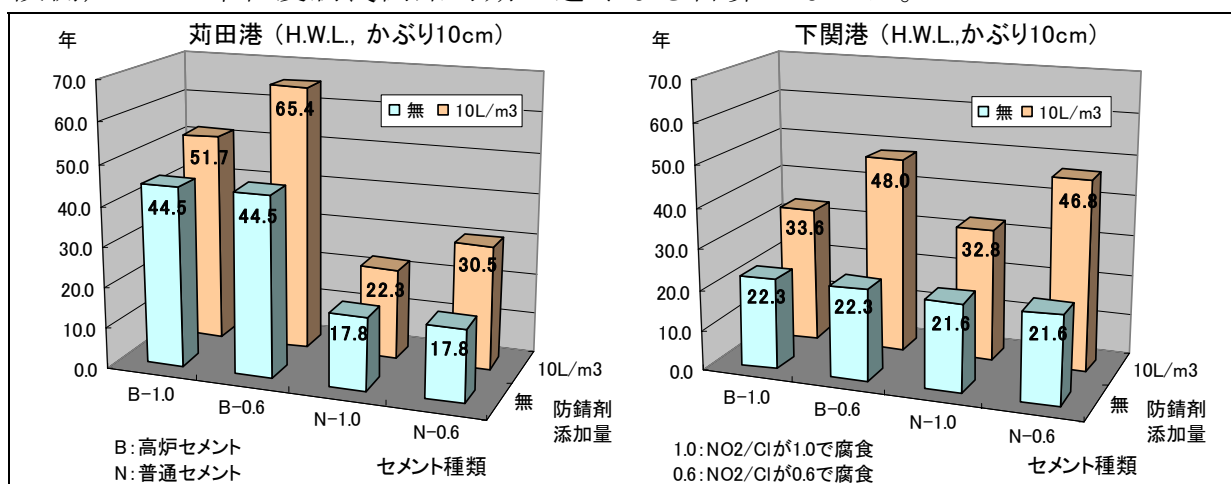


図-11 鉄筋腐食開始時期の予測結果（荻田港・下関港）

5. 結論

- 鉄筋腐食の要因として、塩化物イオン及び亜硝酸イオンと、外部環境及びコンクリート品質の関係を整理した。
- 各実験から得られた値を用いた鉄筋腐食開始予測の結果、防錆剤添加による一定の効果が認められた。

6. 今後の課題

防錆剤添加時の劣化予測には、腐食限界値（NO₂/Cl）を正確に把握する事が重要であるため、今後もモニタリング・暴露試験を長期間継続して行い、データを蓄積することで、鉄筋腐食開始時期の予測精度を向上させる必要がある。

i 大即信明、濱田秀則、原茂雅光(1988.9)「栈橋上部工の劣化実態詳細調査報告」による。

ii (社)日本コンクリート工学協会(2004.1)「コンクリート診断技術'04」に詳しい。

iii コンクリート混和剤による塩害防止研究委員会「コンクリート混和剤による塩害防止に関する研究報告書」他、既往研究による文献値は、NO₂/Cl=0.6~1.0と値に幅がある。