

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1133

June 2006

海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物に対する補修効果の  
定量評価手法の構築に関する検討

加	藤	絵	万
堤		知	明
岩	波	光	保
山	内		浩
山	路		徹
横	田		弘

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 補修したRC建造物の補修効果の実態把握 .....	4
2.1 表面被覆を施した取水口護岸の補修効果調査 .....	4
2.2 表面被覆および断面修復を施したRC壁の補修効果調査 .....	5
2.3 表面被覆を施した栈橋上部工の補修効果調査 .....	5
3. ライフスパンを考慮した最適補修工法の選択に関する検討 .....	7
4. 補修を施したRC建造物の長期耐久性に関する検討 .....	8
4.1 表面被覆工法の補修効果の経年変化予測モデルの提案 .....	8
4.2 補修したRCはりの構造性能評価に関する検討 .....	9
5. あとがき .....	11
謝辞 .....	12
参考文献 .....	12

# **Evaluation of Performance Improvement by Repair on RC Structures in Marine Environment**

**Ema KATO\***  
**Mitsuyasu IWANAMI\***  
**Hiroshi YAMAUCHI\*\***  
**Toru YAMAJI\***  
**Hiroshi YOKOTA\*\*\***  
**Tomoaki TSUTSUMI\*\*\*\***

## **Synopsis**

The effect of repair work on durability enhancement of RC structures under marine environment was discussed in this study. The long-term performance of surface coating was evaluated by analyzing the chloride ion profile in concrete. The long-term performance of section repair was found to be decreased by the diffusion of chloride ion, which was already contained in the existing concrete. Moreover, it was verified that removal of chloride ion from concrete or electrochemical repair before surface coating is necessary to keep the long-term performance of surface coating. Furthermore, the total repair costs were calculated under several repair conditions with the use of different repairing materials and methods. Based on the calculated costs, the life-span simulation of the repaired RC structures considering re-deterioration of the repairing materials was conducted.

To evaluate accurately the long-term performance of repaired RC members, methods for evaluating the performance of surface coating and the structural re-deterioration of the repaired RC beams were discussed.

**Key Words:** Reinforced concrete structure, repair, chloride induced deterioration, surface coating, section repair, corrosion

---

\* Project Researcher of LCM Research Center for Coastal Infrastructures

\*\* Trainee of LCM Research Center for Coastal Infrastructures

\*\*\* Director General of LCM Research Center for Coastal Infrastructures

\*\*\*\* Tokyo Electric Power Company

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:katoh-e@pari.go.jp

# 海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物に対する 補修効果の定量評価手法の構築に関する検討

加藤 絵万\*  
堤 知明\*\*  
岩波 光保\*  
山内 浩\*\*\*  
山路 徹\*  
横田 弘\*\*\*\*

## 要 旨

海洋環境下における RC 構造物のライフサイクルマネジメント技術の確立を目標として、補修を施した既存 RC 構造物の補修効果の実態について調査を行った。その結果、表面被覆工法による補修効果はコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を把握することにより一応の評価が可能であること、また、断面修復工法による補修効果は補修前に既設コンクリートに浸入していた塩化物イオンの拡散により低下することが分かった。さらに、塩害が生じた RC 構造物に表面被覆を施す場合、内部に存在する塩化物イオンを除去する対策、あるいは電気化学的な補修対策を講じなければ、補修効果の持続は期待できない可能性があることが分かった。また、調査対象とした既存 RC 構造物の設計供用期間内の補修コストを算定し、構造物のライフスパンを考慮した最適補修工法の選択の重要性を確認した。最後に、ライフサイクルマネジメントシステムにおける個別技術の高度化を目指し、の表面被覆工法の補修効果の経年変化予測モデル、および表面被覆を施した RC はりの構造性能評価手法の構築について検討を行った。

キーワード：鉄筋コンクリート構造物、補修効果、塩害、表面被覆工法、断面修復工法、鉄筋腐食

---

\* LCM研究センター 特任研究官

\*\* 東京電力（株）

\*\*\* LCM研究センター 依頼研修員

\*\*\*\* LCM研究センター長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail:katohe-e@pari.go.jp

## 1. まえがき

海洋環境下に設置される鉄筋コンクリート（RC）構造物では、陸上のRC構造物と比較して劣化の進行がきわめて速い。特に、栈橋上部工では波浪、干満等の作用により鉄筋コンクリート中に塩化物イオンが浸透しやすいだけでなく、水や酸素の供給量も多いことから、鉄筋の腐食速度が非常に大きいことが知られている。建設の時代から保守の時代を迎えつつある現在、港湾・海岸RC構造物を合理的に維持管理していくためには、構造物のライフスパンを考慮し、ライフサイクルコストを可能な限り低減できるよう適切な対策を行っていくことが重要である。通常、劣化が生じたRC部材に対しては、その劣化程度に応じて表面被覆、断面修復、電気防食等の補修が施される。しかし、各種補修工法の補修効果について実験レベルでの検討はなされているものの、補修を施したRC構造物の長期耐久性に関する実データの蓄積は十分ではなく、補修効果の定量的評価は実現されていないのが現状である。

本研究では、補修を施した既存RC構造物の補修効果の実態について調査した結果を報告する。また、調査対象としたRC構造物について設計供用期間内の補修コストを算定し、構造物のライフスパンを考慮した最適補修工法選択の重要性を確認した。さらに、補修を施したRC構造物の長期耐久性を考慮したより精緻なライフサイクルマネジメント（LCM）技術の確立を目標として行った、補修効果の経年変化予測モデルの開発、および補修したRC部材の構造性能評価に関する実験的検討についてもあわせて報告する。

図-1に著者らが開発を進めている港湾構造物のLCMシステムの流れ<sup>1)</sup>と、LCMシステムにおける本研究の位置付けを示す。本研究の成果は、実構造物における耐久性データの蓄積、ライフスパンを考慮した対策工法の選定の重要性、また、RC部材の長期耐久性および構造性能評価の観点から、図で示した各段階に関する個別技術の高度化に貢献するものである。

## 2. 補修したRC構造物の補修効果の実態把握

### 2.1 表面被覆を施した取水口護岸の補修効果調査

調査対象は、供用43年が経過した東京湾内の取水口護岸である。同護岸は、供用後23年経過した時点でゴム系材料による表面被覆が行われた。このとき、断面修復や電気防食等の他の補修対策は併用されていない。補修後14年経過した時点でコンクリートコアを採取し、内部の

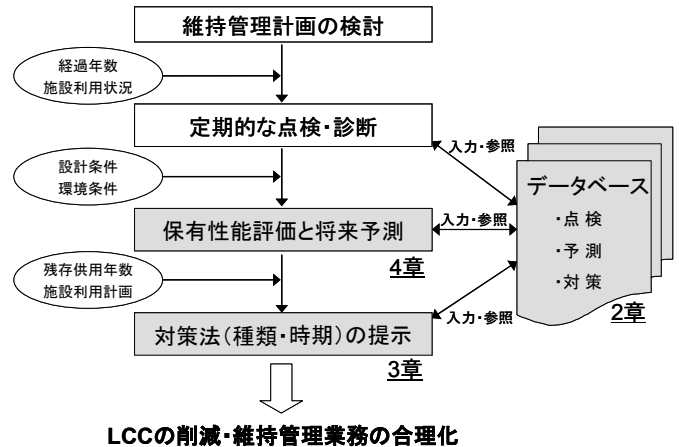


図-1 LCMシステムにおける本研究の位置付け

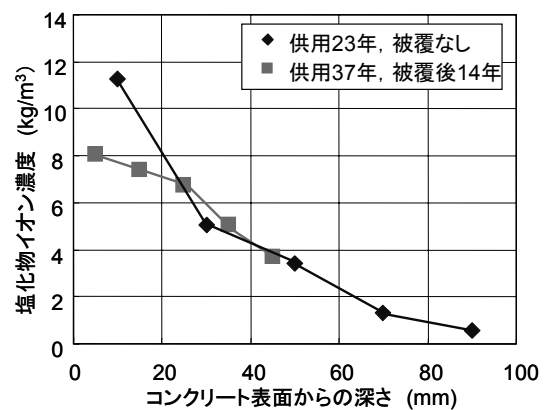


図-2 取水口護岸の塩化物イオン濃度分布

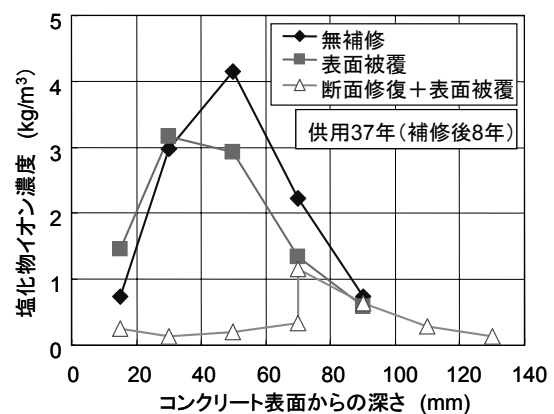


図-3 RC壁の塩化物イオン濃度分布

塩化物イオン濃度を測定した。

図-2に供用後23年時点の塩化物イオン濃度と、その後表面被覆を施して14年経過後、すなわち供用後37年経過した時点の塩化物イオン濃度を示す。表面から深さ20mm

までは、表面被覆前よりも被覆後14年経過時の塩化物イオン濃度が小さくなった。これは、コンクリートに表面被覆を施したことで外部からの塩化物イオンの供給が遮断され、コンクリート表面付近の塩化物イオンがコンクリート内部に拡散することによって生じたものと考えられる。

## 2.2 表面被覆および断面修復を施したRC壁の補修効果調査

調査対象は、供用37年が経過した取水施設のRC壁である。同施設は、供用29年後、塩害による劣化が顕著になってきたため、表面被覆あるいは表面被覆と断面修復の併用により部分的に補修された。表面被覆箇所においては、被覆材としてポリウレタン系材料が用いられた。また、断面修復においては、表面から約70mmの鉄筋埋設位置まで既設コンクリートをはつり取った後、ポリマーセメント系により埋め戻している。調査対象としたこれらの補修箇所は隣接しており、補修効果を確認するために同様に調査を行った補修を施していない箇所も補修箇所に隣接している。

図-3に補修時点（供用29年目）から8年経過した供用37年時のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を示す。ここで、別途実施した中性化深さ測定結果によれば、中性化深さは補修を施していない箇所でコンクリート表面から18～29mm、表面被覆箇所では表面から14～18mmであった。これより、コンクリート表面付近における塩化物イオン濃度の減少は、中性化により塩化物イオンの固定化が阻害されたことによる影響と推測される。コンクリート表面からの深さ30mm以深に着目すると、表面被覆を施した箇所の塩化物イオン濃度は無補修の箇所に比べ小さくなっていった。これは、表面被覆の補修効果により外部からの塩化物イオンの浸透が抑制されたためと考えられる。

断面修復と表面被覆を併用した箇所では、表面からの深さ0～70mmまでの塩化物イオン濃度は、他箇所と比較して小さくなった。しかし、僅かではあるが、同位置に塩化物イオンの存在が認められた。これは、補修前に既設コンクリートの70mm以深に浸入した塩化物イオンが、濃度勾配により断面修復部に拡散したものと考えられる。これより、補修前に既設コンクリートに浸入した塩化物イオンが、鉄筋位置において鉄筋の不動態被膜を破壊するに足り得る濃度に達し、鉄筋腐食が開始する恐れがあるため、調査対象施設の長期的な補修効果は、結果として低下することが予測される。

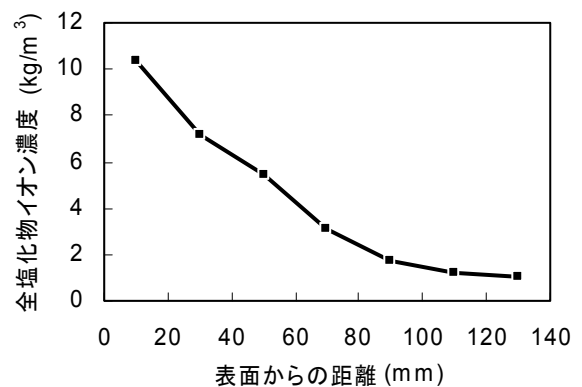


図-4 補修前の塩化物イオン濃度分布



写真-1 表面被覆後に確認された腐食ひび割れ



写真-2 被覆材の剥離

## 2.3 表面被覆を施した栈橋上部工の補修効果調査

調査対象とした施設は、東京湾内の栈橋上部工である<sup>2)</sup>。1969年に建設された後、塩害による劣化が認められたことから、1987年に表面被覆による補修工事が行われた。この時のコンクリート中の塩化物イオン分布を図-4に示す。なお、コアの採取位置等の詳細は不明である。補修には、被覆材として主にポリブタジエン樹脂が用いられ、断面修復や電気防食等の他の補修工法は併用されていない。1999年頃から、被覆材表面に鉄筋腐食に起因するひび割れ（写真-1）や被覆材の剥離（写真-2）等が

確認されたため、2001年に鉄筋の防錆処理、断面修復、表面被覆による再補修工事が行われた。本研究では、2001年に行われた劣化度調査結果、およびコンクリートコアの塩化物イオン濃度測定結果より、表面被覆を施したRC構造物の長期耐久性について検討した。

図-5に、調査対象とした部材とコア採取位置を示す。部材位置と潮位(L.W.L.およびH.W.L.)の関係は同図に示したとおりである。劣化度判定は表-1に基づいて目視により部材毎に行った<sup>3)</sup>。なお、ひび割れ位置以外では、被覆材自体の劣化は見られなかった。コアは、はりA~Eおよび床版では下面から、はりaおよびbでは側面から採取した。それぞれのコアについて、被覆材表面から20mm毎の全塩化物イオン濃度分布を測定した。

図-6に床版1~3のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を示す。主筋のかぶりは50~70mmであったが、床版1および3において、この位置の塩化物イオン濃度は、設計上の腐食発生限界濃度である $1.2 \text{ kg/m}^3$ <sup>4)</sup>を上回る値となった。また、全ての床版において、表面付近よりも表面から20~40mmの塩化物イオン濃度が高くなる傾向が見られた。

はりA~Eの塩化物イオン濃度分布を図-7に示す。鉄筋のかぶりは、スターラップで20~50mm、主筋で100mm程度であり、はりA~Eの塩化物イオン濃度は、スターラップ位置において腐食発生限界濃度を大幅に上回る値であった。また、はりBおよびCでは、表面付近よりも内部の塩化物イオン濃度が高くなった。はり側面における塩化物イオン濃度分布を、図-7にあわせて示す。はりaは、他と比較して最も塩化物イオン濃度が小さかった。

図-6から、床版におけるコア採取位置は、H.W.L.より上方、かつ、はりのコア採取位置より上方に位置するため、床版の塩化物イオン濃度は、はりと比較して全体的に小さくなったことが考えられる。しかし、鉄筋位置において腐食発生限界濃度を超える塩化物イオンを有するにもかかわらず、被覆材表面に損傷は認められず、鉄筋腐食は生じていないと推定される。これに加えて、全ての床版において表面付近よりも内部の塩化物イオン濃度が高い値を示したことから、床版では被覆材の補修効果が持続していたことが推測される。つまり、外部からの水および酸素の供給が絶たれたことにより、鉄筋腐食が進行せず、腐食ひび割れの発生等被覆材の損傷を招くような現象は生じなかった。そのため、補修前に浸入した塩化物イオンがコンクリート内部で拡散し、図-6のような濃度分布を示したと考えられる。

床版と同様に考察すると、はり下面では、はりBおよびC、はり側面でははりaにおいて、被覆材の補修効果が持

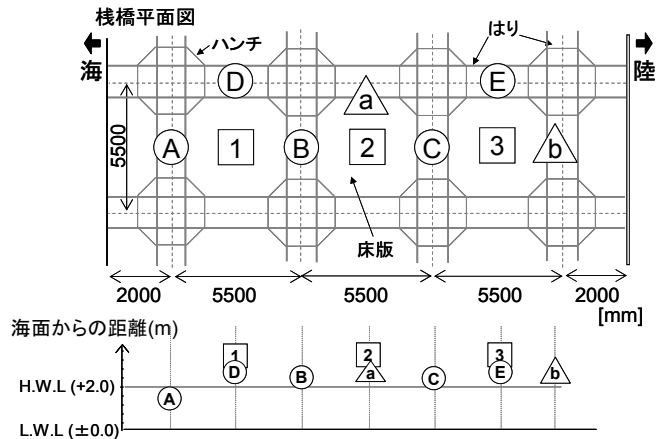


図-5 上部工の概要とコアの採取位置

表-1 劣化度判定基準<sup>3)</sup>

	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に錆がみられる	一部に錆汁がみられる	錆汁多し	浮きさび多し	浮きさび著しい
ひび割れ	なし	一部にひび割れが見られる	ひび割れやや多し	ひび割れ多し	幅数mm以上のひび割れ多数	(かぶりの状況で判断)
かぶりの剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きが見られる	一部に剥離・剥落がみられる	剥離・剥落多し	剥離・剥落が著しい

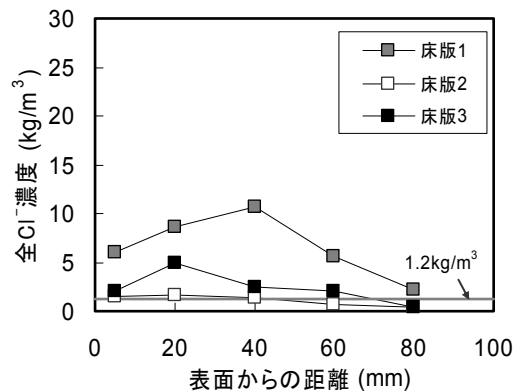


図-6 塩化物イオン濃度分布 (床版)

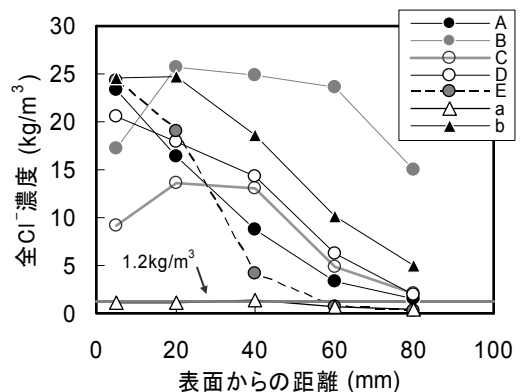


図-7 塩化物イオン濃度分布 (はり)

表-2 部材の劣化度

部材	No.	劣化度	部材	No.	劣化度
はり	A	Ⅲ	はり	a	Ⅲ
はり	B	Ⅱ	はり	b	Ⅲ
はり	C	Ⅲ	床版	1	Ⅱ
はり	D	Ⅳ	床版	2	Ⅱ
はり	E	Ⅲ	床版	3	Ⅱ

続していたことが推測できる。その他については、補修後の鉄筋腐食に起因するひび割れや剥離等により、内部に新たに塩化物イオンが浸入したために、表面の塩化物イオン濃度が最も高くなり、図-4に示した表面被覆前の濃度分布と同様の傾向となったことが考えられる。この現象は、コア採取位置の海面からの距離によらず、海側のはり、および土留め護岸からの反射波の影響を受ける陸側のはりにおいて見られた。このことから、補修効果を考慮する際には、海面からの距離だけではなく、特に波浪の影響についても検討する必要があるといえる。

表-2に各部材の劣化度を示す。劣化度の分布は、図-6および図-7に示したコンクリート中の塩化物イオン濃度分布より推測される補修効果と概ね同様の傾向を示した。しかし、これらは被覆を施していない部材を対象とした判定方法を基準として評価したものである。被覆を施した部材では、鉄筋腐食によりコンクリートにある程度以上の幅を持つひび割れが生じた後、被覆材にひび割れや剥離等が生じることが予測される。つまり、被覆を施していない部材と比較して、劣化が表面に現れるまで長い時間を要することが考えられる。したがって、外観から両者の劣化度が同じと判定された場合、被覆材内部のコンクリートおよび鉄筋の劣化の方が、実際は進行している場合があることが推測される。このことから、今後、構造物の適切な維持管理を行うためには、補修を施した部材を対象とした点検・調査方法および劣化度判定方法の確立が必要である。

既往の研究<sup>5)</sup>によれば、塩化物イオンが浸入していない初期段階において、RC部材に適切な表面被覆を行うことは、塩害対策として有効な手段であり、長期において鉄筋腐食抑制に対する効果が持続することが確認されている。しかし、既に塩害を生じたRC部材の補修を目的として表面被覆を施す場合、断面修復や脱塩等、内部に存在する塩化物イオンを除去する対策、あるいは電気化学的な補修対策を講じなければ、鉄筋腐食に起因するひび割れや被覆材の剥離等の再劣化が生じ、補修効果の持続は期待できない可能性があることが本調査により確認された。

### 3. ライフスパンを考慮した最適補修工法の選択に関する検討

2.3で対象とした栈橋上部工について、劣化進展予測に基づいた補修コスト算定手法<sup>9)</sup>を用いて、ライフスパンを考慮した最適補修工法の選択の重要性について検討した。

ここでは、栈橋1ブロック分のRC上部工を総補修コスト算定の対象とし、実際にRC上部工に補修が適用された1987年時に、どのような補修対策を講じれば供用中の総補修コストを抑えることが可能であったかということに着目した。補修工法は、補修時に適用した表面被覆工法、再補修時に適用した断面修復工法、電気防食工法の3ケースである。なお、補修コストは直接工事費のみを計上し、社会的割引率については考慮していない。

2004年に行った補修コスト調査に基づく各補修工法の費用比を表-3に示す。これは、補修時に表面被覆工法を適用した場合の費用を1.0とした場合における、各工法の補修費および再補修費の費用比を示すものである。表面被覆工法の補修費では、補修作業費の他、仮設費を計上しており、再補修費ではこれらに加えて被覆材の撤去等の補修前作業費を計上した。表面被覆工法と断面修復工法を併用する場合においては、上記の表面被覆工法に係る費用に断面修復工法に係る費用を計上した。電気防食工法における補修費は、断面修復、ひび割れ注入、電気防食工法の3工法の合計として算定しており、再補修費には配線・配管の更新費のみを計上している。さらに、電気防食工法においては毎年維持管理費を計上するとともに、20年、10年、5年毎に電源装置関連の更新費を計上した(表-4)。それぞれの補修材料(工法)の耐用年数は、既往の研究<sup>9)</sup>で設定されたとおりとした。表面被覆工法と断面修復工法を併用する場合、また、電気防食工法を適用する場合においては、劣化度毎に補修費用が異なるが、これは断面修復工法を適用する場合、部材の劣化度に応じて補修範囲が大きくなることに起因する<sup>9)</sup>。

算定対象施設において、補修時の床版の劣化度はⅠ、はりの劣化度はⅡであったものと仮定し、再補修時における劣化度は表-2にしたがって、それぞれⅡおよびⅢと設定した。

図-8に設計耐用年数を50年とした場合の総補修コスト比の経年変化を示す。ここでは、実際に行った補修(1987年に表面被覆工法を適用)および再補修工法(2001年に断面修復工法と表面被覆工法を適用)を適用した、供用50年時の総補修コストを1.0としている。補修ケース1およびケース2の場合、補修時のコスト比は実際の適用工法と比較して約5.0倍となる。しかし、ライフスパンを考



表-3 各補修工法の費用比

	劣化度毎の補修費 (／m <sup>2</sup> )			再補修費 (／m <sup>2</sup> )
	I	II	III	
表面被覆	1.0	1.0	1.0	1.3
表面被覆 + 断面修復	4.0	4.4	4.6	1.3
電気防食	3.6	3.9	4.5	0.4

表-4 電気防食工法の維持管理費 (比)

	維持管理費
1年毎	2.3×10 <sup>-2</sup> (／m <sup>2</sup> )
5年毎	0.9 (／1ブロック)
10年毎	27.3 (／1ブロック)
20年毎	39.6 (／1ブロック)

※ 但し、補修時に表面被覆工法費用を1.0とした場合の比率

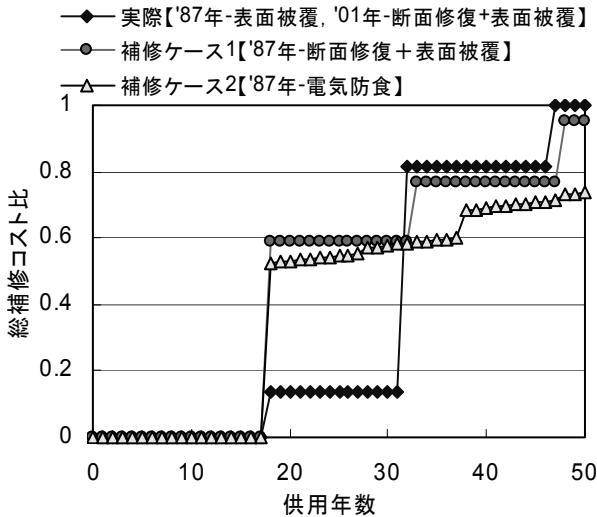


図-7 総補修コスト比の経年変化

慮した場合、供用約30年、つまり対象としたRC上部工において再補修が行われた段階で、総補修コスト比は逆転している。供用50年における総補修コストを見れば、補修時に断面修復や電気防食等の劣化の進行を抑制する抜本的な補修対策を講じることにより、総補修費用を抑えられることが分かる。

これより、これまで既往の研究<sup>7)</sup>においてシミュレートされてきたように、ライフスパンを考慮した補修対策を計画・実施することによって、実際にRC構造物の補修コスト、ひいてはライフサイクルコストを抑制し、効率的な維持管理を実施することが可能となることが確認された。しかし、供用初期からの継続的な点検・診断により、さらに効率的な維持管理が可能となることは言うまでもない。

#### 4. 補修を施したRC構造物の長期耐久性に関する検討

3. ではコンクリート構造物の部材毎の劣化度の推移を基にライフスパンを考慮した補修コストを算定した。しかし、RC構造物の今後の維持管理の重要性を考慮すれば、補修効果を定量的に評価しながら、構造物の性能低下を予測し、これに基づいてライフサイクルコストを適切に評価する手法を開発することが急務である。ここでは、補修を施したRC構造物の長期耐久性を考慮したより精緻なライフサイクルマネジメント技術の確立を目標として、既存構造物における補修効果調査を基に構築した補修効果の経年変化予測モデルを提案する。また、補修したRC部材の構造性能評価手法を提案することを目的とした実験的検討<sup>2)</sup>について報告する。

##### 4.1 表面被覆工法の補修効果の経年変化予測モデルの提案

図-9に表面被覆による補修後の経過年数と、被覆材の塩化物イオン量の関係を示す。塩化物イオン透過量は、2.1および2.2で報告した施設だけでなく、表-5に示す3施設より採取した表面被覆後のコンクリートコア（厚さ約10mm）を用い、日本道路協会「道路橋の塩害対策指針（案）・同解説」に規定される遮塩性試験<sup>8)</sup>により評価したものである。あわせて、補修後12年間曝露試験を行ったコンクリート試験体の結果も示した。それぞれの施設および試験体は全て海面直上の飛沫帯に位置し、被覆材の材質は表-5に示すとおりである。また同図に、塩化物イオン透過量の初期値として、別途実施した室内試験結果を示した。塩化物イオン透過量の初期値は、補修材の材質によらず約 $1.0 \times 10^{-5}$  mg/cm<sup>2</sup>/日であった。また図中に、同様の試験から得られた水セメント比0.40~0.60のコンクリートにおける塩化物イオン透過量、および表面被覆材の塩化物イオン濃度の品質基準値 $1.0 \times 10^{-3}$  mg/cm<sup>2</sup>/日<sup>8)</sup>を参考として示した。

データ数が限られていることから、各材質の塩化物イオン量と経過年数の関係を定量的に評価するのは困難である。しかし、全体としては、表面被覆後の経過年数の増大に伴い、塩化物イオン透過量は増加する傾向がみられ、補修材種類によらず概ね直線的に近似できた。これによれば、塩化物イオン透過量は約10年経過後に品質基準値を上回り、20年経過前後でコンクリートの塩化物イオン透過量とほぼ同等となる。塩化物イオン透過量がコンクリートと同等になるということは、被覆材の遮塩性能が無くなることを意味する。つまり、本研究の範囲で

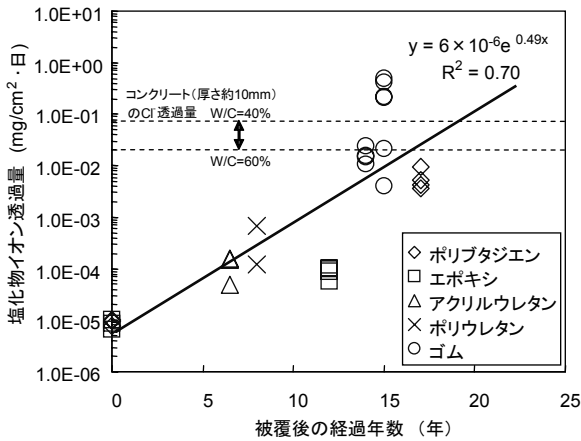


図-9 被覆後の経過年数と塩化物イオン透過量の関係

表-5 対象構造物の補修履歴

設備名	供用年数	補修後の経過年数	被覆材の材質
取水口護岸(2.1)	37	14	ゴム
RC壁(2.2)	37	8	ポリウレタン
護岸	43.5	6.5	アクリルウレタン
カーテンウォール橋	32	15	ゴム
RC壁	29	17	ポリブタジエン
暴露試験体	12	12	エポキシ

は、表面被覆工法の補修効果の寿命は概ね20年であることが推測される。

被覆材の塩化物イオン透過量の初期値を  $1.0 \times 10^{-5}$   $\text{mg/cm}^2/\text{日}$ 、コンクリートの塩化物イオン透過量を  $5 \times 10^{-2}$   $\text{mg/cm}^2/\text{日}$  として、これらがそれぞれ1および0となるように図-9の近似直線を正規化すると、被覆材の遮塩性能の経時変化は式(1)のように示すことができる。

$$S \cong 1 - \frac{1 \times 10^{-5} \times e^{0.426t'}}{0.05} \quad (1)$$

ここに、 $S$ : 遮塩性能、 $t'$ : 被覆後の経過年数(年)

ここで示す遮塩性能評価モデルは、現状の限られたデータに基づいて構築されたものである。この妥当性については、今後、被覆材種類や曝露環境等の実データをさらに蓄積し検証していく必要がある。

#### 4.2 補修したRCはりの構造性能評価に関する検討

##### (1) 実験概要

実験フローを図-10に、試験体一覧を表-6に示す。

##### a) 試験体概要

図-11にはり試験体の概要を示す。また、コンクリー

トの示方配合を表-7に、鉄筋の物性値を表-8に示す。はり試験体には、主鉄筋としてSD295A-D16を3本、せん断補強筋としてSD295A-D10を配置した。

製作から十分期間を経た後、はり試験体を海水中に浸せきし、鉄筋表面積あたり  $8.5 \text{ A/m}^2$  の直流電流を印加することで、コンクリート内部の鉄筋を腐食させた。その際、はり試験体の軸方向に腐食によるひび割れが発生するまでの時間を  $Q$  と定義し、これを基準電食期間として、 $1Q$ 、 $3Q$ 、 $5Q$  および  $8Q$  の電食期間を設定した。本実験における基準電食期間  $Q$  は51時間であった。あわせて、電食を施さないはり試験体を2体用意した。

所定の電食期間終了後、はり試験体にエポキシ系樹脂を用いたひび割れ充填、および表-9に示す材料を用いて表面被覆を施した。

##### b) 促進劣化試験

電食により劣化したはり試験体、および補修を施したはり試験体に対して、さらに劣化を進行させるため、温海水への乾湿繰返し、または海水噴霧を行った。温海水への乾湿繰返しは、はり試験体を大型タンク内に設置し、 $60^\circ\text{C}$  の温海水を用いて行った。1サイクルは、湿潤状態で3.5日、乾燥状態で3.5日の合計7日とし、122サイクル(およそ2年半)実施した。また、海水噴霧は、はり試験体を、実海域より採取した海水が1日2回、3時間にわたって噴霧される、港湾空港技術研究所構内の海水噴霧施設に暴露した。暴露期間は3年半とした。

##### c) 曲げ荷重試験

曲げ荷重試験は、支点間隔1200mmの2点単純支持、荷重点間隔400mmの対称2点荷重で行った。荷重は一方向単調荷重とし、荷重点および支点の片側には、2枚のテフロンシート(厚さ2mm)を挿入した。なお、本研究では、はり試験体に電食を施すことを考慮し、鉄筋にひずみゲージを貼り付けていない。したがって、スパン中央の鉛直変位が急激に増加した時点をはりの降伏時とした。荷重中は、支点、荷重点およびスパン中央の鉛直変位、および荷重荷重を計測した。

##### d) 鉄筋腐食量および塩化物イオン濃度の測定

荷重試験終了後、等モーメント区間の主鉄筋3本をはり取り出し、腐食量を測定した。1次処理としてサンドブラスト処理を、2次処理として10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液への浸せきを行い、腐食生成物を完全に取除いた。その後、それぞれの鉄筋100mm毎の質量減少量を測定し、等モーメント区間における鉄筋断面積の平均減少率を算定した。

また、はり試験体解体時に主鉄筋近傍のモルタルを採取し、全塩化物イオン濃度を測定した。得られた値は、

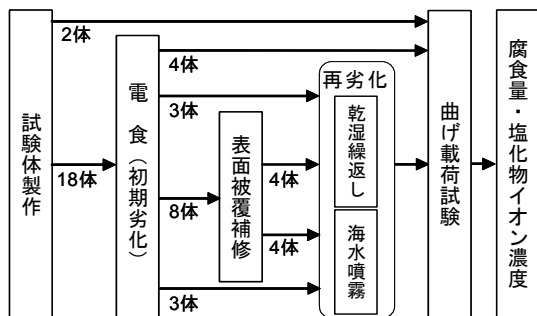


図-10 実験フロー

表-6 試験体一覧

No.	電食	補修	促進劣化	No.	電食	補修	促進劣化
1	—	×	—	11	3 Q	○	乾湿
2	—	×	—	10	3 Q	○	噴霧
3	1 Q	×	—	11	5 Q	×	乾湿
4	1 Q	×	—	12	5 Q	×	噴霧
5	1 Q	×	乾湿	15	5 Q	○	乾湿
6	1 Q	×	噴霧	16	5 Q	○	噴霧
7	1 Q	○	乾湿	17	8 Q	×	—
8	1 Q	○	噴霧	18	8 Q	×	—
9	3 Q	×	乾湿	19	8 Q	○	乾湿
10	3 Q	×	噴霧	20	8 Q	○	噴霧

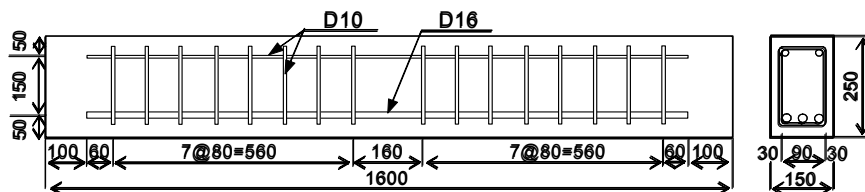


図-11 試験体概要

表-7 コンクリートの配合

G <sub>max</sub> (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	Ad
20	8	65	4	48	160	246	994	997	0.98

C: 早強ホルトランドセメント, S: 細骨材(鬼怒川産川砂), G: 粗骨材(鬼怒川産砕石)  
Ad: AE剤

表-8 鉄筋の物性

種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )
D10	365	512
D16	361	503

表-9 被覆材の材質

工程	使用材料
プライマー	エポキシ系(湿潤)
パテ	エポキシ系(湿潤)
中塗り	厚膜型エポキシ系
仕上げ	フッ素系

コンクリートの配合上の単位量および密度を用いて、コンクリート中の全塩化物イオン濃度に換算した。

(2) 補修効果に関する検討

荷重試験前には試験体を観察した結果、促進劣化による被覆材の変状は認められなかった。

表面被覆後の鉄筋腐食の進行を確認するため、それぞれの断面減少率から電食による断面減少分を差し引いた値、すなわち促進劣化のみによる鉄筋断面減少率の増分を図-12に示す。電食による断面減少として、1Qおよび8Qの場合、試験体No.1, 2およびNo.17, 18の実測断面減少率の平均値を用いた。3Qおよび5Qについては、1Qおよび8Qの平均断面減少率から、ファラデー則に基づいて内挿した値を用いた。図-12より、被覆を施していない試験体の鉄筋断面減少率の増加は、それぞれの促進劣化方法についてほぼ一定であった。これは、各劣化方法で腐食速度が一定であったことを示しており、乾湿繰返しは、海水噴霧と比較して、3~4倍の劣化速度であったといえる。被覆を施した試験体では、電食期間が長いほど、鉄筋断面減少率の増加は小さかった。

ここで、図-13に塩化物イオン濃度と鉄筋の平均断面減少率の増分との関係を示す。被覆を施した試験体は、被覆を施していない試験体と比較して、塩化物イオン濃度が小さいことは明らかである。また、腐食発生限界濃

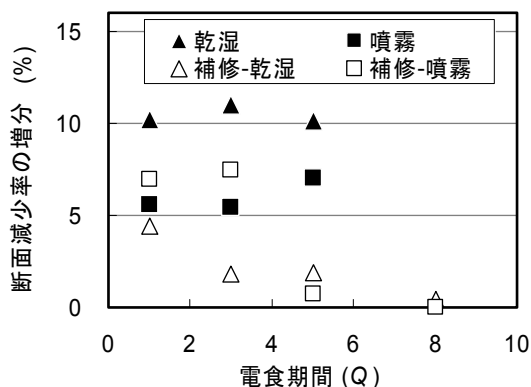


図-12 促進劣化による鉄筋の平均断面減少率

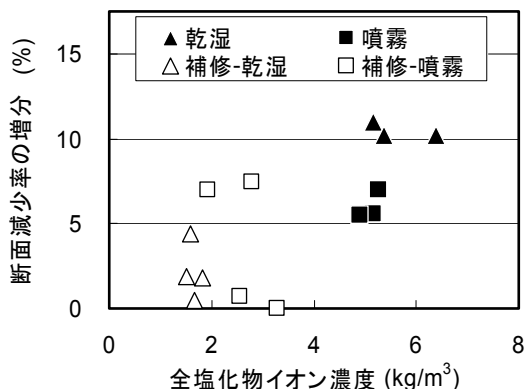


図-13 断面減少率の増加と全Cl-濃度の関係

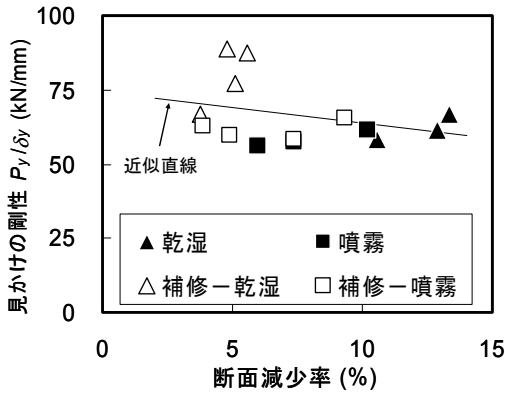


図-14 平均断面減少率と見かけの剛性の関係

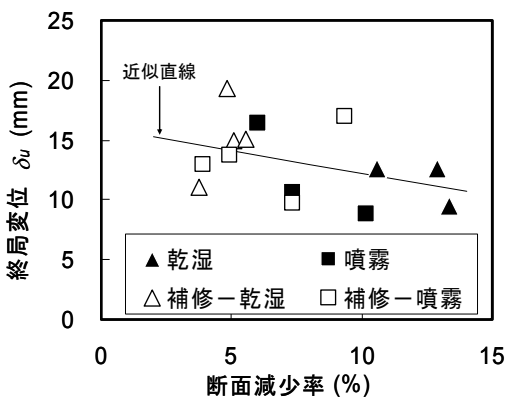


図-15 平均断面減少率と終局変位の関係

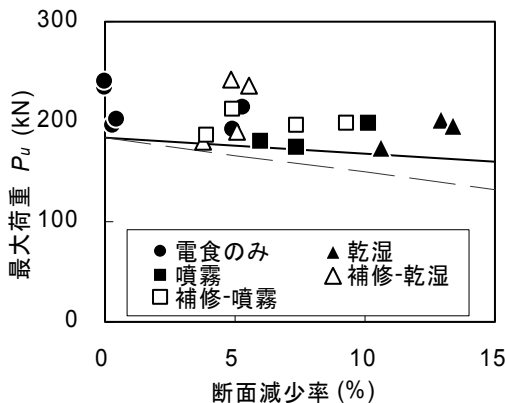


図-16 平均断面減少率と最大荷重の関係

度を超える塩化物イオンを有するにもかかわらず、促進劣化による鉄筋断面減少率の増分は少なかった。したがって、補修後、外部からの水および酸素の供給がなかったことが推測できるため、はり試験体における補修効果は、促進劣化中も持続していたことが考えられる。また、電食期間が長いほど鉄筋断面減少率の増分が小さくなっ

たが、これは、腐食反応や電気分解等により試験体内部の酸素消費量が増加したために、電食後の酸素残存量が少なくなったことが原因として考えられる。

### (3) 補修したRC部材の構造性能に関する検討

図-14に鉄筋の平均断面減少率とはり試験体の見かけの剛性の関係を、図-15に鉄筋の平均断面減少率とはり試験体の終局変位の関係を示す。見かけの剛性は、はりの降伏荷重 $P_y$ を降伏変位 $\delta_y$ で除した値とした。また、終局変位 $\delta_u$ は、降伏荷重 $P_y$ を下回らない荷重での最大の変位とした。なお、促進劣化を行っていないはり試験体については、載荷試験中、はりの鉛直変位が計測できなかったため記載していない。

図-14および図-15に示した全データの回帰線から分かるように、はり試験体の見かけの剛性および終局変位は、鉄筋の平均断面減少率が大きいほど低下する傾向となった。これより、RCはりの変形性は、補修の有無や促進劣化方法を問わず、腐食による鉄筋の平均断面減少率を用いて評価が可能であると考えられる。

図-16に鉄筋の平均断面減少率とはり試験体の最大荷重の関係を示す。はりの最大荷重は、変形性と同様、鉄筋の平均断面減少率が大きいほど低下する傾向を示した。ここで、図-16の実線は、鉄筋の断面減少を考慮し曲げ理論により求めた計算値、破線は断面減少に加えて、孔食等による鉄筋の力学的性質の低下を考慮した計算値を示す<sup>9)</sup>。このとき、コンクリートの物性値として、はり試験体製作時に同一バッチから採取したコンクリート（ $\phi 150 \times 300\text{mm}$ ）の標準養生28日後における圧縮強度 $29.2\text{N/mm}^2$ 、およびヤング率 $26.8\text{kN/mm}^2$ を用いた。これより、RCはりの耐荷性は、補修の有無や促進劣化方法を問わず、腐食による鉄筋の平均断面減少率を考慮することで評価が可能であるといえる。既往の報告<sup>9)</sup>によれば、孔食による応力集中などの影響により、腐食による断面減少分以上に鉄筋の力学的性質が低下するとされているが、本研究では、主筋がD16と比較的太径であったために、局部的な腐食の影響が顕著に現れなかったことが考えられる<sup>10)</sup>。

## 5. あとがき

本研究では、海洋環境下におけるRC構造物のライフサイクルマネジメント技術の確立を目標として、既存RC構造物の補修効果に関する調査、最適補修工法選択の重要性の確認、およびRC部材の長期耐久性性能評価に関する実験的検討を行った。本研究により得られた成果を以下に示す。

1) 表面被覆工法による補修効果は、コンクリート中の塩

化物イオン濃度分布を把握することで、一応の評価が可能である。

- 2) 断面修復工法による補修効果は、補修前に既設コンクリートに浸入していた塩化物イオンが断面修復材方向に拡散することにより低下することが考えられる。
- 3) 塩害が生じたRC構造物に表面被覆を施す場合、内部に存在する塩化物イオンを除去する対策、あるいは電気化学的な補修対策を講じなければ、鉄筋腐食に起因するひび割れや被覆材の剥離等の再劣化が生じ、補修効果の持続は期待できない可能性がある。
- 4) ライフスパンを考慮した最適な補修対策の選定により、RC構造物の補修コストを抑制することができる。
- 5) 実構造物の補修効果に対する調査データを基に、表面被覆工法の補修効果の経年変化予測モデルを提案した。
- 6) 表面被覆を施したRCはりの耐荷性および変形性は、腐食による鉄筋の平均断面減少率を考慮することで評価が可能である。

(2006年2月10日受付)

## 謝辞

本資料は、(独)港湾空港技術研究所と東京電力(株)の共同研究「海洋環境下のコンクリート構造物に対する補修効果の定量評価手法に関する共同研究」の成果としてとりまとめたものである。ここに記し、関係者各位に感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 横田弘：港湾施設の維持管理技術マニュアルの改訂動向，コンクリート工学，Vol.43, No.6, 2005年，pp.3-9.
- 2) 加藤絵万，岩波光保，横田弘，堤知明：表面被覆を施したRC部材の長期耐久性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.2, 2004年，pp.1759-1764.
- 3) 運輸省港湾技術研究所編著：港湾構造物の維持・補修マニュアル，沿岸開発技術ライブラリー，No.6，沿岸開発技術研究センター，1999年.
- 4) 土木学会：2002年制定・コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002年.
- 5) 山路徹，小牟禮健一，濱田秀則：海洋環境に15年暴露されたコンクリートにおける表面被覆の塩害防止効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, 2003年，pp.833-838.
- 6) 古玉悟，田邊俊郎，横田弘，濱田秀則，岩波光保，日比智也：栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発，港湾技研資料，No.1001，2001年，p.41.
- 7) 竹田宣典：表面保護工を適用したコンクリート構造物

の劣化予測とLCC評価の試算例，コンクリート工学，Vol.41, No.9, 2003年，pp.80-85.

- 8) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説，1984年.
- 9) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会 報告書，1998年.
- 10) 岩波光保，横田弘，佐藤文則：鉄筋腐食がRCはりの耐荷性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.2, 2002年，pp.1501-1506.

港湾空港技術研究所資料 No.1133

2006.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL.046(844)5040 URL.http: www.pari.go.jp

印刷所 ニッセイエプロ株式会社

Copyright© (2006) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。