

平成 16 年度（財）港湾空港建設技術サービスセンター
研究開発助成報告書

助成番号：平成 17 年 1 月 11 日付 04 - 4 号

助成開発項目：(8) 公共施設の維持・管理に関するもの

アセットマネジメントのための港湾構造物の劣化に対応した
維持・補修（補強）工法の選定手法の検討

平成 18 年 3 月

東洋大学工学部環境建設学科
福手 勤

目 次

1 . はじめに -----	1
2 . 「材料劣化」と「部材の力学劣化」 -----	2
3 . 実構造物の調査 -----	5
3.1 対象構造物 -----	5
3.2 調査方法 -----	6
3.3 調査結果 -----	10
3.4 まとめおよび考察 -----	17
4 . 材料劣化と補修（補強）工法の適用性 -----	20
4.1 各種補修(補強)工法の設計上の留意点 -----	20
4.2 各補修（補強）工法の適用時期 -----	21
4.3 各種補修(補強)工法の施工上の留意点 -----	22
4.4 各補修（補強）工法の適用環境 -----	23
5 . 今後の課題と展望 -----	25

1. はじめに

近い将来、かつての高度経済成長期に整備されてきた大量のストックがその更新期を迎え、更新投資も急激に増加していくものと見込まれる。また、ユーザーである国民の社会資本に対する要請の高まりや、不動産証券化の普及などにより、社会資本のリニューアル、補修・補強などの分野においても、アセットマネジメントによるリスクの定量化技術ならびにその具体的な方法の確立が求められている。

コンクリート構造物における材料劣化は、鉄筋腐食の有無とその程度、ひび割れの有無とその程度などにより、潜伏期、進展期、加速期、劣化期に区分される。このような材料劣化とそれに対応する部材の力学的劣化の関係を合理的に把握することが社会資本の維持管理において重要であるにもかかわらず、両者の材料力学的関係は明確にされるには至っていない。

一方、部材の力学性能は、その部材の供用性能（使用性能、安全性能）と密接に関係する。

これらのことから、補修・補強効果を客観的に評価し、部材の供用性能の時間的变化、回復程度を予測・把握するとともに、長期にわたって信頼性のある維持管理を進めるためには、「材料劣化」と「部材の力学劣化」を合理的に関連づけておくことが極めて重要である。

本研究では、15年度の研究によって得られた知見に基づき、厳しい環境にある港湾施設を対象に、施設の劣化に対応した有効な維持手法および補修(補強)工法の選定メニューを検討するものである。

なお、本研究で得られた成果は、今後のミクロおよびマクロマネジメントシステムの構築、アセットマネジメントのプロトタイプへの展開、現場の支援ツールの開発などにつながるものである。

2. 「材料劣化」と「部材の力学劣化」

2001 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】によると、塩害による劣化(ここでは、材料劣化)と部材の性能低下(ここでは、部材の力学劣化)との関係は、図-2.1 のように考えられている。

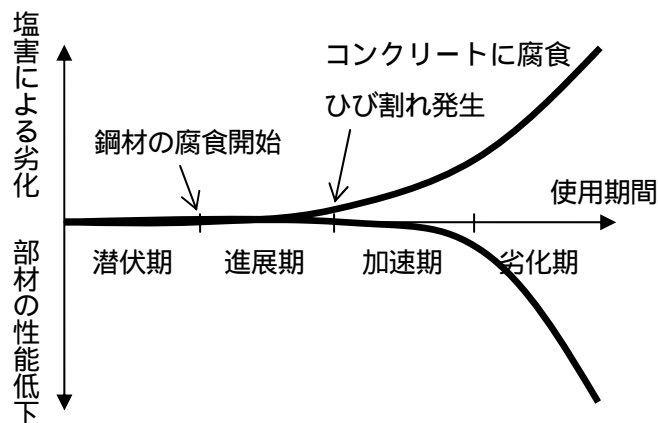


図-2.1 塩害による劣化進行過程¹⁾

「材料劣化」は、表-2.1 のように、鋼材の腐食が開始するまでの潜伏期、腐食開始から腐食ひび割れ発生までの進展期、腐食ひび割れの影響で腐食速度が大幅に増加する加速期、および鋼材の大幅な断面減少などにより耐荷力等の性能が大幅に低下する劣化期に区分され、塩化物イオンの拡散の予測および鋼材腐食の進行予測によって期間の長さを定量的に計算が可能である。

表-2.1 各材料劣化期間の定義¹⁾

劣化過程	定義
潜伏期	鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの期間
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間
加速期	腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間
劣化期	腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間

港湾技研資料 No.1001 (栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発) によると、各材料劣化期間を決定する主要因の限界値は表-2.2 のように考えられている。

表-2.2 各材料劣化期間を決定する主要因の限界値²⁾

劣化過程	潜伏期	進展期		加速期		劣化期
劣化度	0					
塩化物イオン濃度	1.2kg/m ³	2.0kg/m ³				
鉄筋質量減少率			1%	5%	20%	

ここで、劣化度は目視調査による評価値である。目視調査は、人が判定するため必ずしも客観的な結果を与えることにはならないが、比較的簡便で広い範囲を短時間に実施することが可能であり、構造物全体の状況を把握することができる。

一方、「部材の力学劣化」は、劣化調査などのデータから定量的に評価する必要があるが、現状においては定量的評価手法が明確となっていない。また、港湾施設においては設置環境の制約から詳細調査を行うことが非常に困難であることが多く、また仮設費用も高額となるため、検討に要するデータが不足する場合もある。

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によると、定性的な評価の範囲ではあるが、表-2.3のように「材料劣化」と「部材の力学劣化」を関連付けている。

表-2.3 「材料劣化」と「部材の力学劣化」の関係³⁾

劣化過程	潜伏期	進展期	加速期	劣化期
じん性	グレード 0		グレード	グレード
たわみ性	グレード 0		グレード	グレード
耐荷性	グレード 0		グレード	グレード

なお、劣化過程 = 材料劣化、性能低下グレード = 部材の力学劣化

じん性は、柱や梁において部材変形が大きくなった場合に、腐食ひび割れに起因したかぶりコンクリートのはく離や孔食が存在する箇所における鉄筋の破断によって低下する可能性がある。したがって、グレード 0 においてはじん性には変化がない。一方、グレード 1 では鉄筋に沿ったひび割れ発生後にじん性が低下し、さらにグレード 2 では大変形時にじん性低下が大きくなる。

たわみ性は、鉄筋の腐食による断面積の減少と腐食によって生じる見掛けの弾性係数の低下による部材の曲げ剛性の低下として評価される。したがって、グレード 0 では低下は小さく、また補強筋があれば低下はない。グレード 1 ではスターラップの断面減少が激しくない場合には主筋に腐食があってもたわみ性の低下は少ない。グレード 2 ではスターラップなどの腐食が激しいためにたわみ性は大幅に低下する可能性が高い。

耐荷性は、鉄筋の腐食減量が 5%程度まで進行すると、曲げ耐力は 2%程度低下すると想定され、腐食減量 5%では劣化過程として相当進んだ段階と考えられている。したがって、グレード 0 では低下なし、あるいは、ほとんどないと評価される。グレード Ⅰ では腐食の進行あるいは腐食ひび割れ幅が大きくなると耐荷力が低下する、ただし当初設計の値はまだ満足している。グレード Ⅱ では鉄筋の断面減少率が大きくなり、当初設計の値より低下する。

以上のように、「材料劣化」においては定量的評価手法が明確にされているのに対して、「部材の力学劣化」については定量的評価手法および「材料劣化」との関係がまだ明確にされるまでには至っていない。

コンクリート構造物は、劣化の程度にもよるが、かなり劣化が顕在化した段階でも力学的性能の低下は大きくない場合もある。したがって、構造物を維持管理・マネジメントするためには、部材あるいは構造物全体の要求性能を適確に把握し、供用性能（使用性能、安全性能）の低下時期を予測する必要があり、そのためには「材料劣化」と「部材の力学劣化」を合理的に関連付けておくことが極めて重要となる。

3．実構造物の調査⁴⁾⁵⁾

「材料劣化」と「部材の力学劣化」の関連付けを試みるため、実構造物の調査を実施し、考察を行った。また、比較的簡易に行える外観調査（打音調査を含む）から得られる情報をもとに大まかな機能や安全性の評価が可能であるか考察を行った。

3．1 対象構造物

対象とした構造物の概要と写真を図-3.1 および写真-3.1 に示す。この構造物は、係留施設内の渡橋を支える RC 上部工であり、建設後 35 年が経過していた。RC 上部工の大きさは $4\text{m} \times 4.4\text{m} \times 1.02\text{m}$ であり、海面 (H.W.L.) から 0.92m の高さにあった。かぶり厚さは 100mm 程度であった。側面においては隅角部に変状が見られたものの比較的健全であった。底面においては波浪が作用する側にはく落・鉄筋露出などの激しい劣化が見られた。なお、RC 構造物には渡橋などの上載荷重が作用するものの、部材厚が大きいいため、下側鉄筋に作用する応力は比較的小さい。

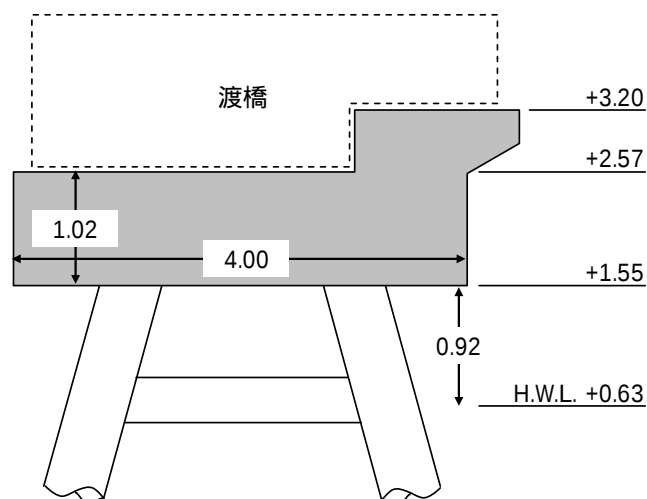


図-3.1 対象構造物の概要



写真-3.1 対象構造物の写真

3.2 調査方法

今回行った調査概要を表-3.1 に示す。

表-3.1 調査概要

調査項目	調査概要	箇所数
外観調査	打音調査を行ってマーキングし，外観変状をスケッチおよび写真を撮影	全面
塩化物イオン量	ドリル法により試料採取し，JISA 1154の吸光光度法に準じた	底面：4箇所 側面：4箇所
中性化深さ	試料採取後の孔を利用し，JIS A 1152に準じた	底面：1箇所 側面：4箇所
腐食グレード	鉄筋採取後，腐食状況を目視により観察	底面：7試料 側面：1試料
質量減少率	腐食生成物の除去後の腐食減量を計測	底面：7試料 側面：1試料
断面減少率	最大侵食深さ部分の2方向の残存径をノギスで測定	底面：7試料 側面：1試料
引張試験	腐食生成物を除去後，JIS Z 2241 に準じた	底面：7試料 側面：1試料

JIS G 3112 コンクリート用異形棒鋼 D16 の規格値を基準とした。

なお，腐食生成物の除去方法は JCI-SC1 に準じた

(1) 外観調査

まず、船上から目視および打診にて調査し、その劣化状況を区画毎の部材別に変状展開図に記入および写真撮影を行い、変状箇所を記録した。ひび割れ幅、ひび割れ長さの測定はクラックスケールおよびスケールを使用して調査を行った。図-3.2 に目視調査概念図を示す。

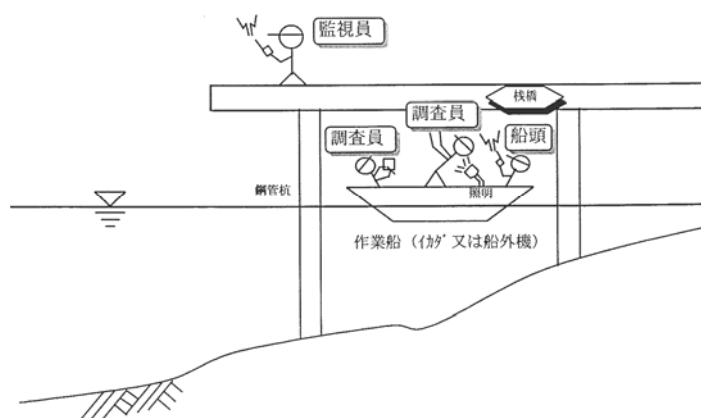


図-3.2 目視調査概念図

次に、足場を設置した後に、変状箇所をコンクリート表面にチョークで印し、デジタルカメラで全面を撮影した。その後、CAD 等へ変換して変状の長さと面積を算出した。調査項目を以下に示す。

< 調査項目 >

全体的な表面劣化状態の把握・・・遊離石灰、ジャンカ、補修箇所

亀裂（ひび割れ）の有無及びその状態の把握・・・ひび割れ（ひび割れ幅測定、ひび割れ長さ測定）

鉄筋露出の有無及びその状態の把握・・・鉄筋露出、腐食状況

浮き、剥離、表面の汚れ、その他の状態の把握・・・浮き、剥離

そして、船上からの調査と足場上からの調査で得られた変状数量の比較を行った。

（２）塩化物イオン量

鉄筋探査機（RC レーダー）により鉄筋の位置およびかぶり厚を推測した後、ハンマードリルにより鉄筋位置（コンクリート表面から 8～10cm：2cm ピッチ）での試料を採取し、JIS A 1154:2003「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」の吸光光度法に従って実施した。写真-3.2 に試料採取状況を、写真-3.3 に分析装置を示す。



写真-3.2 試料採取状況



写真-3.3 分析装置

(3) 中性化深さ

塩分含有量分析試料採取後の孔を利用して、JIS A 1152:2002「コンクリートの中性化深さの測定方法」に従って実施した。写真-3.4 に中性化試験（フェノールフタレイン法）状況例を示す。



写真-3.4 中性化試験（フェノールフタレイン法）状況例

(4) 鉄筋腐食調査

まず、はつり後に、コンクリート表面各面の健全な箇所、浮き・はく離箇所およびはく落箇所をそれぞれ選定し、鉄筋を切断して試料を採取し、目視観察により鉄筋の腐食グレード

を評価した。鉄筋の腐食グレードの評価は、表-3.2 に示すように、土木学会「コンクリート標準示方書 [維持管理編]」の腐食のグレードと鋼材の状態の關係に準じて行なった。

表-3.2 腐食のグレードと鋼材の状態

グレード	状態
	黒皮の状態。または、錆は生じているが全体的に薄い緻密な錆であり、コンクリート面に錆が付着していることはない。
	部分的に浮き錆があるが、小面積の斑点状である。
	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮き錆が生じている。
	断面欠損を生じている。

次に、JCI-SC1 に準じ、錆を落として腐食減量を測定し、質量減少率を求めた。また、最大侵食深さ部分の 2 方向の残存径をノギスで測定し、断面減少率を求めた。その際の基準となる健全な鉄筋の試料採取ができなかったため、JIS G 3112 コンクリート用異形棒鋼 D16 の規格値を基準にした。表-3.3 に規格値を示す。

表-3.3 コンクリート用異形棒鋼D16 のJIS規格値

項目	単位	数量
公称直径	mm	15.9
公称断面積	cm ²	1.986
ふし高さ	mm	0.7 ~ 1.4
単位質量	kg/m	1.56

その後、JIS Z 2241「金属材料引張試験方法」に準じて引張強度試験を実施した。写真-3.5 に引張試験状況を示す。なお、鉄筋の採取試料は断面欠損が激しく、ゲージが張れなかったため、試験機によるつかみの間隔での伸びを見掛けの伸びとして測定した。

そして、外観変状と鉄筋腐食調査結果との關係を考察した。



写真-3.5 鉄筋試料の引張試験状況

3.3 調査結果

(1) 外観調査

船上から行った調査で得たスケッチを図-3.3に、足場上から行った調査で得たスケッチを図-3.4に示す。

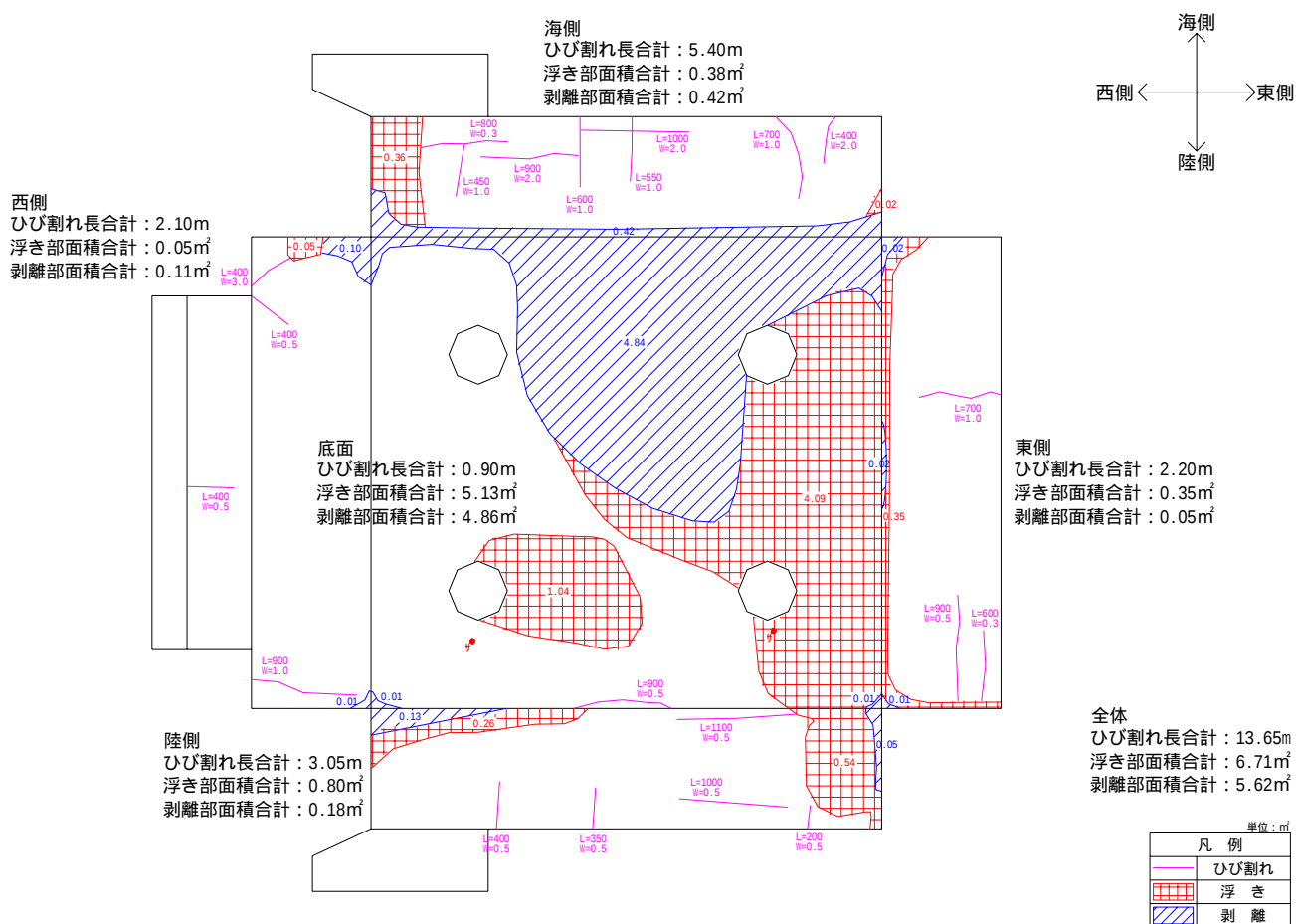


図-3.3 船上から行った調査で得たスケッチ

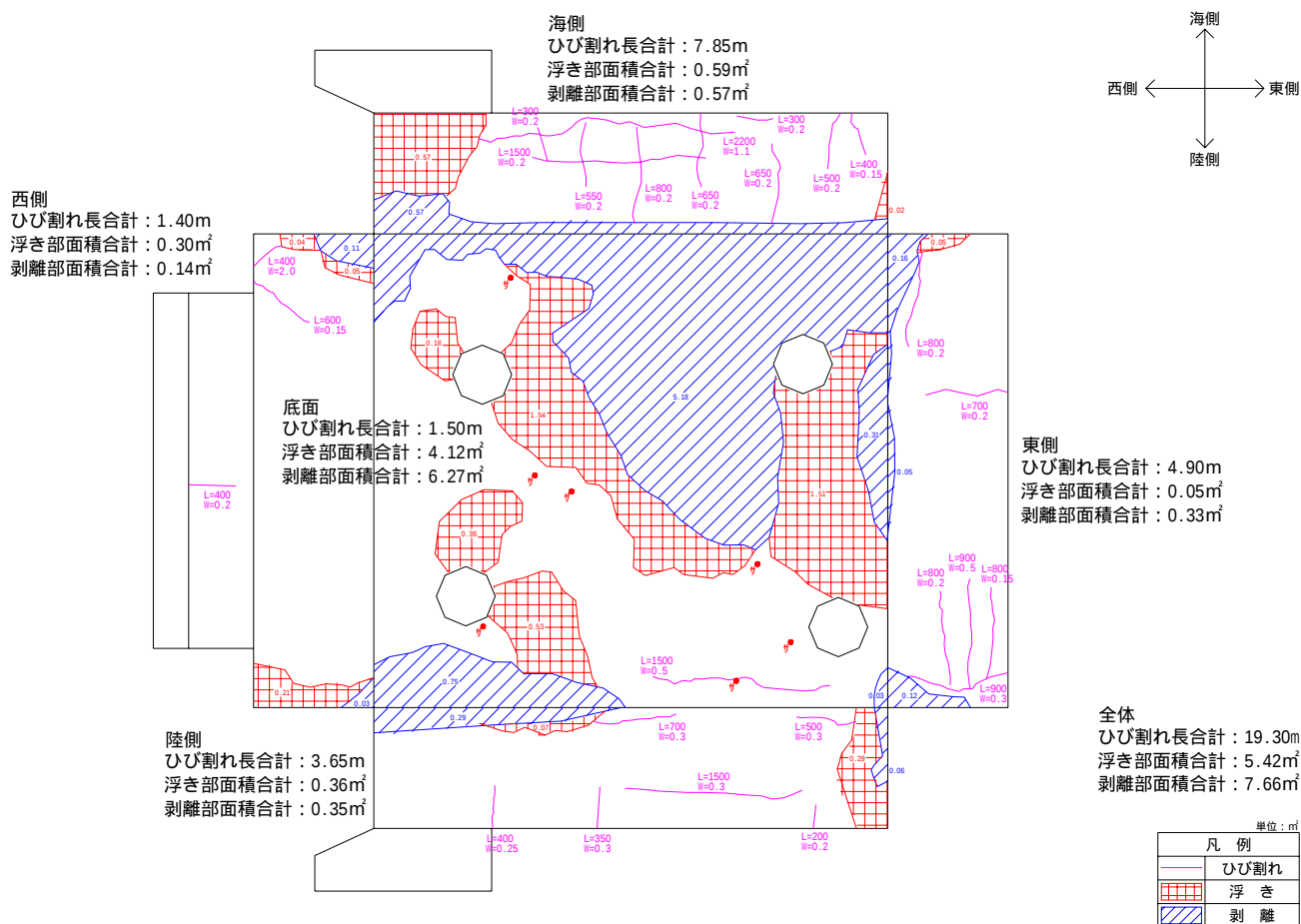


図-3.4 足場上から行った調査で得たスケッチ

船上からの調査と足場上からの調査で得られた変状数量の比較を表-3.4 に示す。

表-3.4 船上からの調査と足場上からの調査で得られた変状数量の比較

変状	単位	数量		差
		昨年（船上）	今年（足場上）	
浮き・はく離面積	m ²	6.71	5.42	-1.29
はく落面積	m ²	5.62	7.66	+2.04
合計面積	m ²	12.33	13.08	+0.75
ひび割れ長さ	m	13.65	19.30	+5.35
ひび割れ幅	mm	0.3～2.0	0.2～2.0	-0.1～0
錆計	箇所	2	7	+5

足場上から調査した場合と船上から調査した場合のスケッチは当然ながら、変状数量に差異を生じた。変状数量の比較では、浮きやはく離・はく落の面積は 6%程度、ひび割れや錆計の変状箇所は 1.5～3 倍程度の差となった。このことから、船上からの調査では、密着しな

くても確認しやすい比較的大きな変状あるいは劣化後期の変状を確認することを目的とする場合には、経済的で有効な調査ではあるが、比較的規模の小さな変状あるいは劣化初期の変状は見落としてしまう恐れがあると考えられる。そのため、劣化進行予測に高精度を要求する場合には足場上からの調査、そして、詳細調査が不可欠になる。

(2) 塩化物イオン量

塩化物イオン量の測定箇所を図-3.5 に、測定結果を図-3.6 および図-3.7 に示す。

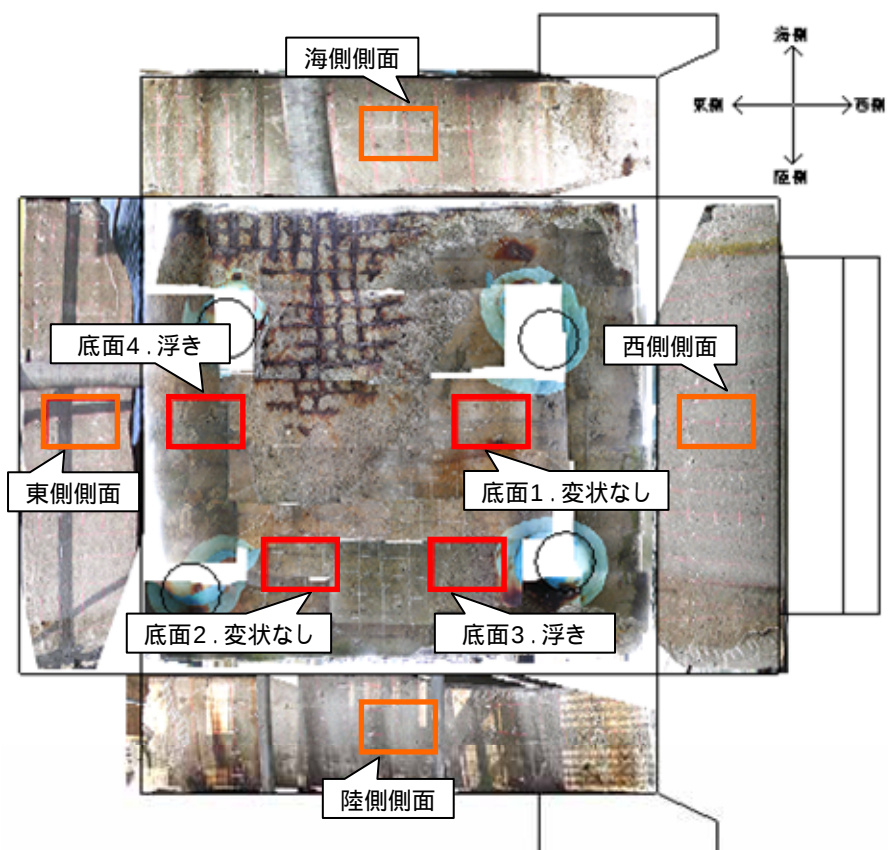


図-3.5 塩化物イオン量の測定箇所

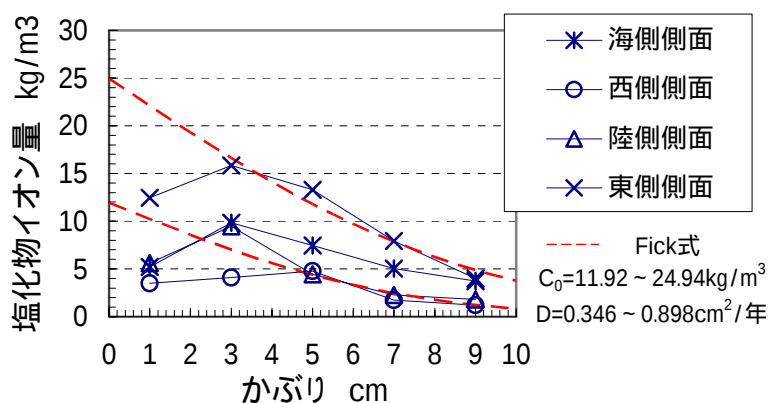


図-3.6 塩化物イオン量の分布 (側面)

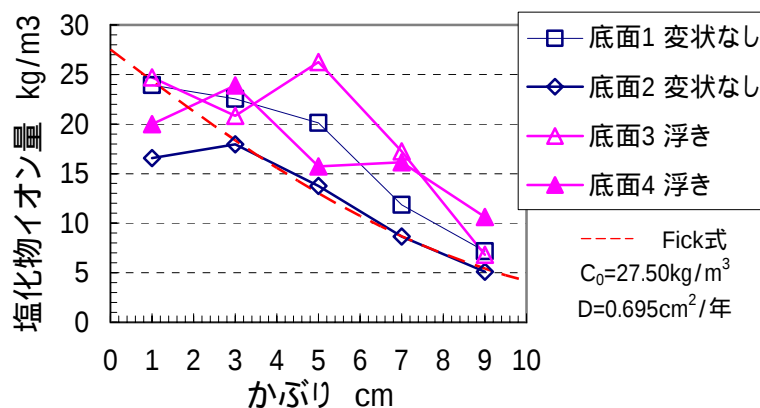


図-3.7 塩化物イオン量の分布（底面）

側面においては、波浪の影響を受けない西側に比べて波浪の影響を受ける東側は、鉄筋位置での塩化物イオン量が2～3倍程度となっており、表面の塩化物イオン量 C_0 と見かけの拡散係数 D は環境の違いによって大きくばらついていた。

底面においては、側面ほどばらつきは大きいものの、測定結果から側面東側より環境は厳しいものと推定できる。また、変状が顕著な箇所ほど塩化物イオン量は大きな値となっていた。

全測定箇所の鉄筋位置で腐食発生限界塩化物イオン量を超えていない箇所は1箇所のみであり、その1箇所も極めて腐食発生限界値に近い値であった。すなわち、構造物全面的に鉄筋は発錆状態にあると考えられる。

（3）中性化深さ

フェノールフタレイン法による中性化深さ測定状況を写真-3.6に示し、中性化深さの測定結果を表-3.5に示す。



写真-3.6 中性化深さ測定状況

表-3.5 中性化深さの測定結果

項目	対象	中性化深さ		
		最小	最大	平均
√t 則による予測値	全面	8～13		
測定 No. (フェノール法)	1 海側面	6	15	10
	2 西側面	0	12	6
	3 陸側面	0	11	6
	4 東側面	6	10	9
	5 底面	0	0	0

単位：mm

2001 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】に示される√t 則から算出される中性化深さは、乾燥しにくい環境 8mm、乾燥しやすい環境 13mm であった。側面については、中性化深さ測定結果の平均値が予測値（8～13mm）より小さいものの、標準的な中性化の進行であったと考えられる。底面については、常時湿った環境であったために中性化が進行しなかったものと考えられる。

（４）鉄筋腐食調査

鉄筋腐食調査箇所を図-3.8 に、調査で得られた結果（腐食グレード・質量減少率・断面減少率）とコンクリート表面の外観変状を表-3.6 に示す。

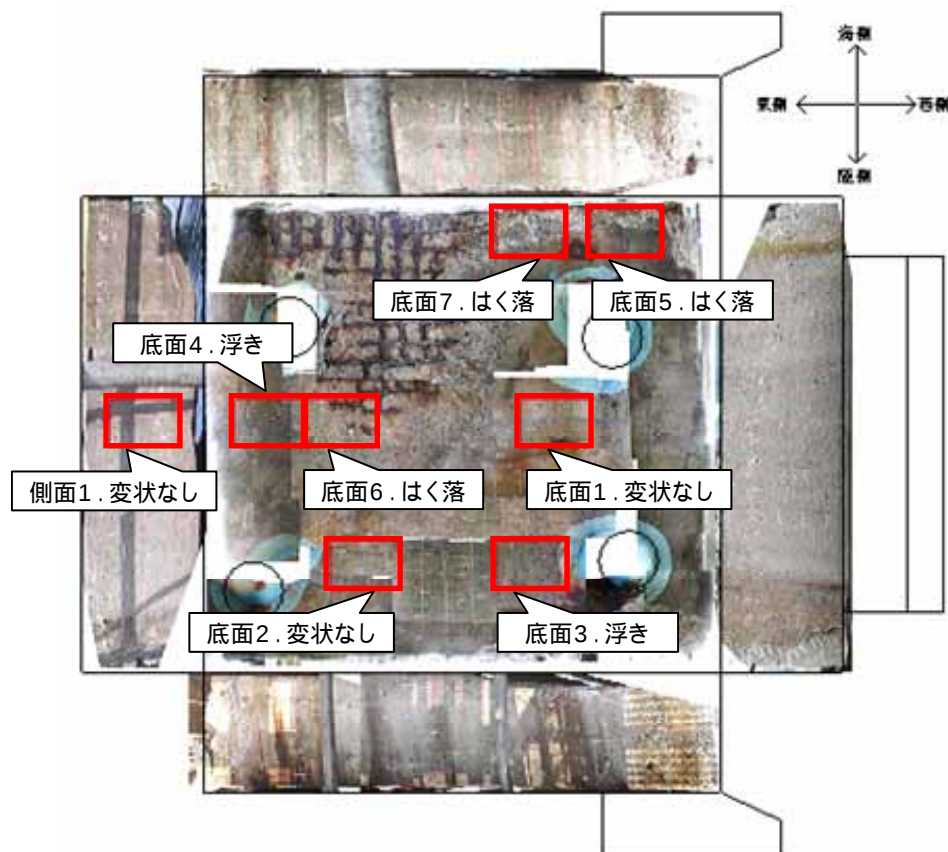


図-3.8 鉄筋腐食調査箇所

表-3.6 外観変状と鉄筋腐食調査結果

採取場所		外観変状	腐食グレード	質量減少率%	断面減少率%
面	No				
側面	1	変状なし		-3.0	1.9
	1			0.1	6.3
	2			3.3	9.3
底面	3	浮き		6.0	12.1
	4			8.2	23.6
	5	はく落		10.3	30.5
	6			29.0	50.5
	7			47.3	59.0

外観変状で浮きやはく落が見られた箇所の鉄筋の腐食グレードは大きく、変状が激しいほど腐食グレードも大きかった。

鉄筋の採取試料は局部腐食を生じていたものの、質量減少率と断面減少率の関係は図-3.9に示すとおり、ほぼ線形関係を示した。なお、底面7のデータは鉄筋採取試料が全面的に激しく断面減少しており、最大侵食深さ部分を特定できなかったものと考え、線形関係から除

外した。ここで、実際の調査では、質量減少率の調査は鉄筋試料の採取（鉄筋の切断）が必須であるのに対して、断面減少率の調査の方が現地で計測することが可能であり、現実的な評価手法であると考えられる。なお、これまでの屋外暴露試験や電食実験などでは質量減少率での評価が一般的に行われており、材料劣化の劣化期間予測に用いる限界値もこの評価値で示されている。

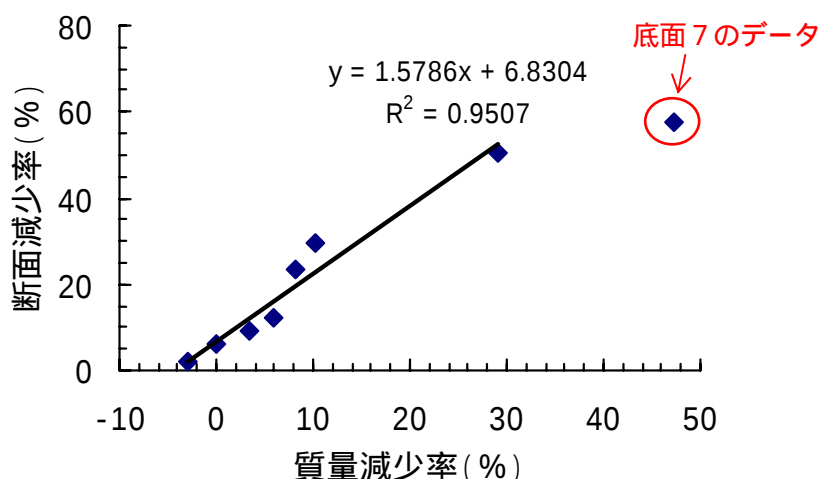


図-3.9 質量減少率と断面減少率の関係

引張試験の結果（荷重と見掛けの伸びの関係）を図-3.10 示す。外観変状なしの側面 1、底面 1、底面 2 で採取した鉄筋試料は降伏棚がはっきり確認できたのに対して、浮きやはく落が見られた底面 3～底面 7 で採取した鉄筋試料は降伏棚が確認できなかった。また、荷重と見掛けの伸びの初期の傾きに注目すると腐食により鉄筋の断面が減少した分、弾性剛性が低下している様子が分かる。すなわち、浮きやはく落が見られた箇所においては部材の構造性能が低下するものと考えられる。

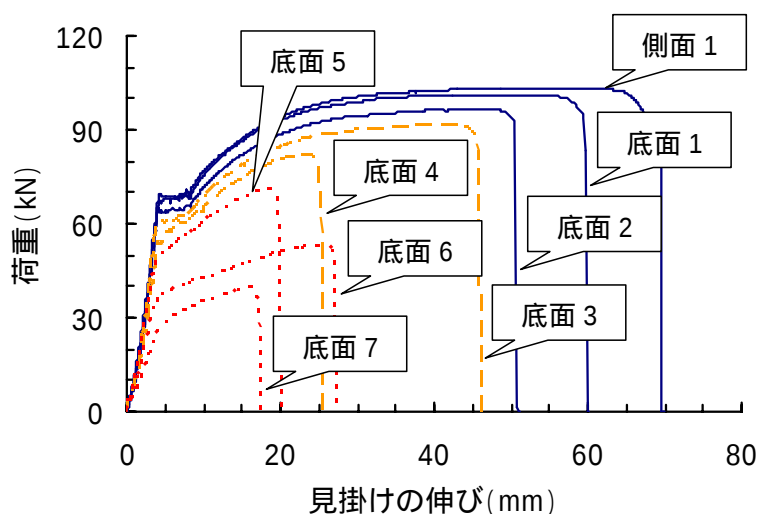


図-3.10 荷重と見掛けの伸びの関係

断面減少率と降伏点および伸びの関係を図-3.11 に、質量減少率と降伏点および伸びの関係を図-3.12に示す。降伏点は底面7のデータを除いて線形関係にあり、断面減少率が18.6%、質量減少率が7.4%に達すると JIS 規格値を下回った。伸びは底面6 および底面7のデータを除いてばらつきが大きいものの線形関係にあり、断面減少率が11.5%、質量減少率が3.1%に達すると JIS 規格値を下回った。以上のことから、外観変状が見られない箇所の鉄筋は比較的健全であり、浮きやはく落が見られた箇所の鉄筋は断面減少率が12.1%、質量減少率が6.0%を超え、鉄筋の機械的性質が JIS 規格値を下回ったことから、浮きやはく落が見られる箇所においては鉄筋の機械的性質が低下するものと考えられる。

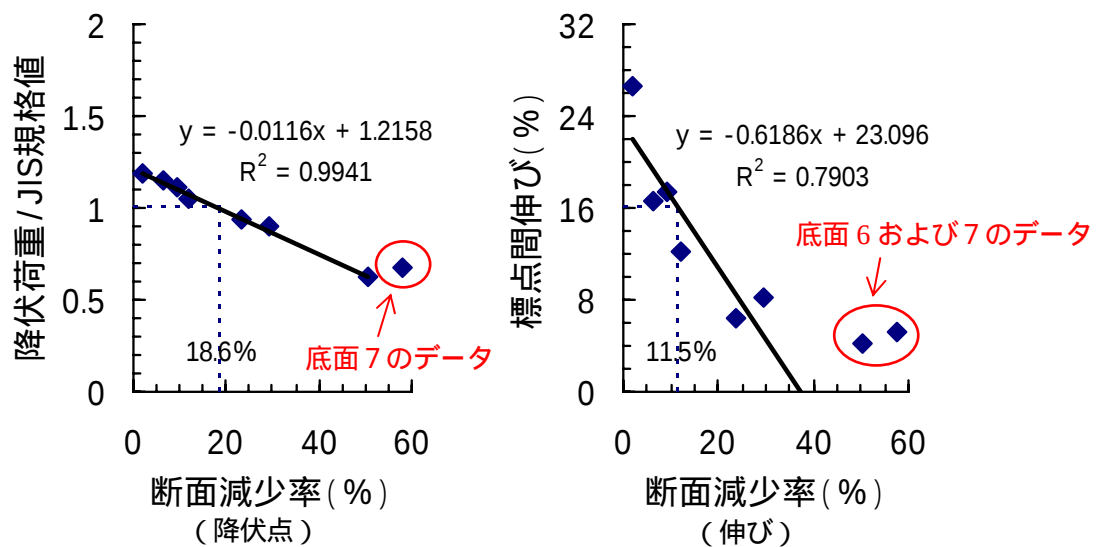


図-3.11 断面減少率と降伏点および伸びの関係

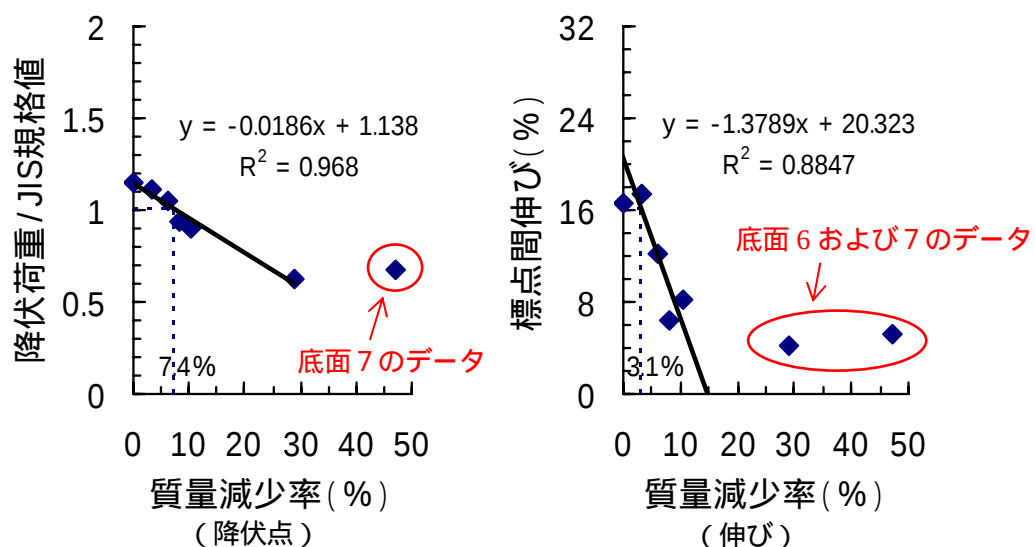


図-3.12 質量減少率と降伏点および伸びの関係

3.4 まとめおよび考察

以下に、実構造物の調査結果から得られた知見を述べる。

- ・ 船上から行う簡易な外観調査（打音調査を含む）の結果でも構造物全体の比較的大きな変状数量を把握でき、大まかな評価および劣化傾向の把握が可能であると思われる。ただし、比較的規模の小さな変状あるいは劣化初期の変状は見落としてしまう恐れがあるため、その場合には足場上から行う調査が不可欠になるものと思われる。
- ・ 波浪の影響など環境の違いによって塩化物イオン量は大きくばらつき、環境が厳しいほど塩化物イオン量も大きな値を示した。また、塩化物イオン量が大きな値を示す箇所ほど外観変状も激しかった。なお、建設後の経過年数が長く、すでに腐食発生限界塩化物イオン量を超えていると思われる構造物や劣化後期の変状が多く見られる構造物に対しては、構造物の性能低下を検討する際、このデータの活用場面は少ないものと思われる。
- ・ 海洋環境においても、中性化の進行速度はコンクリート標準示方書に示される平均的な値を示したが、海面に近く、常時湿った環境にある箇所は中性化の進行がなかった。なお、構造物の性能低下を検討する際、このデータの活用場面は少ないものと思われる。
- ・ 外観変状が激しいほど鉄筋の腐食グレードも大きかった。このことから、データを蓄積することによってデータベースを構築し、簡易調査判定の可能性を示せた。
- ・ 腐食鉄筋は局部腐食を生じていたものの、質量減少率と断面減少率の関係は、ほぼ線形関係を示した。なお、実構造物の調査において、鉄筋の切断・試料採取は困難な場合が多く（通常は行われない）質量減少率より断面減少率の方が活用しやすいと思われる。
- ・ 外観変状が見られた箇所の鉄筋は降伏棚がはっきり確認できなかった。腐食鉄筋の降伏荷重は、腐食により鉄筋の断面が減少した分、低下し、断面減少率が 18.6%、質量減少率が 7.4%に達すると JIS 規格値の降伏点を下回った。なお、表-2.2 によると材料劣化（劣化過程）の加速期後期中間付近に相当する。
- ・ 腐食鉄筋の弾性剛性は、腐食により鉄筋の断面が減少した分、低下した。
- ・ 腐食鉄筋の伸びは、ばらつきが大きいものの、腐食により鉄筋の断面が減少した分、減少し、断面減少率が 11.5%、質量減少率が 3.1%に達すると JIS 規格値の標点間伸びを下回った。なお、表-2.2 によると材料劣化（劣化過程）の加速期前期中間付近に相当する。

得られた知見を踏まえて「材料劣化」と「部材の力学劣化」の関係を表-3.7 にまとめる。

表-3.7 「材料劣化」と「部材の力学劣化」の関係

	劣化過程	潜伏期	進展期		加速期		劣化期
	劣化度	0					
材料劣化	塩化物イオン濃度	1.2kg/m ³	2.0kg/m ³				
	鉄筋質量減少率			1%	5%	20%	
じん性	鉄筋質量減少率				JIS 規格値を下回る		
たわみ性					3.1%		
耐荷性	鉄筋質量減少率						JIS 規格値を下回る
							7.4%

今回の調査で得られた外観変状と鉄筋腐食の関係の一例を表-3.8 に示す。

表-3.8 外観変状と鉄筋腐食の関係（建設後 35 年経過時点のデータ）

外観変状	変状なし	浮き	はく落	はく落
				
質量減少率	3.3%	6.0%	10.3%	47.3%
断面減少率	9.3%	12.1%	30.5%	59.0%
塩化物イオン量	5.1kg/m ³	6.8kg/m ³	-	-

このように、船上から行う簡易な外観調査（打音調査を含む）の結果からコンクリート内部の腐食鉄筋の状況を推定し、大まかな性能が評価できる手法の可能性を示せた。今後、同種のデータ収集に努め、データベースを構築し、ばらつきの検討を行った上で信頼性のある評価基準値を決定したい。

なお、今回は鉄筋の機械的性質に着目して検討しており、実部材の構造性能低下は鉄筋の機械的性質のみに起因するものではなく、コンクリートとの付着力低下にも影響するため、これも含めた評価方法についても検討していく必要がある。さらに、構造物の性能を評価するためには、各部材に作用する応力分布と劣化箇所との関係も把握して行うことが重要である。

4．材料劣化と補修（補強）工法の適用性

補修（補強）工法の選定では、再劣化のリスクをできるだけ小さく、コスト最小に努める必要があり、技術者の判断が非常に重要となる。

4．1 各種補修(補強)工法の設計上の留意点

以下に、陸上構造物よりも厳しい塩害環境に置かれることが多い港湾構造物に適用する際の各種補修(補強)工法の設計上の留意点を述べる。

（１）ひび割れ補修工法

ひび割れ補修工法は、温度応力ひび割れや乾燥収縮ひび割れなどの初期ひび割れに対して、防水性や耐久性を回復させる目的で適用される補修工法である。塩害などにより鋼材が腐食して発生したひび割れ、すなわち、劣化ひび割れに対しては、単にひび割れを補修しただけでは対策としては不十分であるため、断面修復などを行って、劣化因子を取り除くなどの処置を行う必要がある。港湾構造物においては、表面塗装あるいは電気防食時の補助工法として適用されるのが一般的である。

（２）表面塗装工法

表面塗装工法は、塩化物イオンや酸素など、鋼材の腐食因子の供給量を低減させて、鋼材の腐食進行を抑制する目的で適用される補修工法である。ただし、コンクリート内部にとじ込められた塩化物イオンが塗装後に拡散しても、鉄筋位置で腐食発生限界塩化物イオン量を超えないように補修設計する必要がある。すなわち、潜伏期の構造物に対しては表面塗装工法を単独使用することもありうるが、進展期以降の構造物に対しては断面修復工法との併用で適用される。

（３）脱塩工法

脱塩工法は、仮設陽極を設置して通電を行うことにより、コンクリート中に存在する塩化物イオンを電気化学的に除去もしくは低減する目的で適用される補修工法である。ただし、脱塩工法適用後、多少なりとも塩化物イオンが残存する場合、環境条件によっては塩化物イオンが再供給され続ける場合もありうるため、鋼材位置での塩化物イオン濃度の管理限界値を定めて維持管理することが重要である。

（４）電気防食工法

電気防食工法は、外部から防食電流を流すことで、電気化学的に腐食反応を抑止させる目的で適用される補修工法であり、最も信頼性の高い塩害対策である。電気防食工法の利点としては、多量の塩化物イオンを含有したコンクリートに対しても防食可能であり、劣化部分のみの修復で大きくはつり取る必要がなく、鉄筋の防錆処理が不要で、防食効果が定量的に確認できるなどが挙げられる。ただし、長期にわたり電流を流す必要があり、配線配管の維

持管理（20年程度で配線配管および電源装置などの取替え）が必要である。また、防食効果の確認のために継続的な電流管理（防食効果確認のための試験や停電等による短期間の通電停止を除き、通常1～30mA/m²程度の防食電流を継続して通電）が必要である。

（５）断面修復工法

断面修復工法は、欠損した部分のコンクリート断面形状を修復し、塩化物イオンなど、鋼材の腐食因子を除去する目的で適用される補修工法である。ただし、劣化が顕在化した部分だけを補修した場合には、補修部の境界付近の鋼材が急速に腐食する「マクロセル腐食」が生じ、既設コンクリート側の鋼材の腐食が加速的に進行する可能性が高くなる。すなわち、劣化が顕在化した部分だけを補修するのでは不十分であり、鋼材の裏側やその周辺の腐食発錆限界値を超えた塩化物イオン量が浸透しているコンクリートも同時にはつり取り、塩化物イオン量の少ない部分で打継ぎができるように計画する必要がある。

（６）FRP接着工法

FRP接着工法は、鉄筋腐食に伴うコンクリート部材の静的耐荷力や疲労寿命の低下、あるいは活荷重の増加による耐力不足などを補う目的で適用される補強工法である。なお、FRP接着表面には表面塗装工法が施されるため、表面塗装工法の留意点に従う必要がある。また、欠損した部分のコンクリート断面には断面修復を併用することとなり、その際には断面修復工法の留意点に従う必要がある。

（７）打換え工法

打換え工法は、損傷している部分だけを取り除いて新たにコンクリートを打設して損傷を受けていない他の部分と同程度の機能に回復させる部分打換え工法と、部材を全面的に撤去して新たに打換える全面打換え工法とがあり、いずれの工法も耐荷力やたわみ性を回復する目的で適用される工法である。ただし、構造物上面から部材を大掛かりに撤去することとなるため、構造物を供用しながらの施工は難しい。

4.2 各補修（補強）工法の適用時期

前述の各種補修(補強)工法の設計上の留意点を踏まえて、材料劣化に対応した適用時期をまとめると表-4.1のようになる。

表-4.1 各補修（補強）工法の適用時期

補修（補強）工法	劣化過程					留意点	
	新設時	潜伏期	進展期	加速期	劣化期		
ひび割れ補修	○	再劣化のリスク大				塩化物イオン再拡散	
表面塗装	○						○
脱塩＋表面塗装	-						○
電気防食	○	○	○	○	○	防食電流の管理	
断面修復	不経済		○	○	○	マクロセル腐食	
F R P 接着					○	施工環境	
打換え					○	供用制限	

このように、ひび割れ補修工法は潜伏期以降、表面塗装工法は進展期以降、脱塩工法は加速期以降に適用すると再劣化のリスクが大きくなるものと思われる。リスクの評価については塩化物イオンの再拡散予測を行って適用可否を決定することとなる。電気防食工法は再劣化のリスクが小さく、どの時期においても適用は可能であるが、初期費用および管理費用が比較的高いため L C C を算出して他工法と比較検討することが重要である。断面修復工法、F R P 接着工法、打換え工法は、対象とする構造物の要求性能を把握し、適切な時期（できるだけ限界時期）に適用しないと不経済な対策となってしまう可能性がある。また、断面修復工法や F R P 接着工法においては、再劣化のリスクを小さくするための留意点は多い。

4.3 各種補修(補強)工法の施工上の留意点

以下に、陸上構造物よりも作業性が悪条件になりがちである港湾構造物に適用する際の各種補修(補強)工法の施工上の留意点を述べる。

(1) ひび割れ補修工法

通常、有機系材料を使用する場合は注入箇所が乾燥していることを確認してから行い、無機系材料を使用する場合は湿っていることを確認してから行う。また、潮位や波浪の影響を受ける場合には施工後初期に注入材が洗い流されない対策を検討する必要がある。

(2) 表面塗装工法

塗装材が湿潤タイプでない場合には、水分計を使ってコンクリート表面の水分率を確認した上で、塗布しなければ塗装材と既設コンクリートとの付着性が劣ることとなり、防食効果を十分発揮できなくなる。また、潮位や波浪の影響を受ける場合には施工後初期に塗装材が洗い流されない対策を検討する必要がある。

(3) 脱塩工法

脱塩工法を港湾構造物に対して適用する場合には、電解質溶液の保持方法や回収方法など、コスト面および環境面に課題が多い。

(4) 電気防食工法

海上大気中部、飛沫帯部、干満帯部、海中部のいずれの環境においても電気防食工法を適用できるが、環境によりコンクリートの含水量が大きく異なり、コンクリートの電気抵抗の違いから防食電流の過不足が生じるため、環境毎に防食回路を分離する必要がある。

(5) 断面修復工法

断面修復工法は、海上大気中部、飛沫帯部、干満帯部、海中部のいずれの環境においても適用できる。吹き付け工法で行う場合には、海上環境においては非常に乾燥しやすく、ひび割れ防止対策を実施することが重要である。充填工法で行う場合には流動性の優れた材料を選定し、海中部への施工時は材料分離させない対策を検討する必要がある。

(6) FRP接着工法

FRP接着には含浸させる樹脂として一般的にエポキシ樹脂が使用される。エポキシ樹脂は有機系材料であり、コンクリート表面の水分が多い場合には接着力が劣ることとなる。

(7) 打換え工法

打換え工法は、部材を大掛かりに撤去するため、支保工や仮設の検討を十分に行うことが重要である。

4.4 各補修（補強）工法の適用環境

前述の各種補修(補強)工法の施工上の留意点を踏まえて、各種補修(補強)工法の適用環境をまとめると表-4.2 のようになる。

表-4.2 各補修（補強）工法の適用環境

補修（補強）工法	環境条件				検討項目
	海上大気中部	飛沫帯部	干満帯部	海中部	
ひび割れ補修	○	要注意・検討			コンクリート表面の
表面塗装	○				湿潤状態
脱塩					電解質溶液の保持
電気防食	○	○			防食回路の分離
断面修復	○	○	○	○	ひび割れ・充填性
FRP接着	○			-	湿潤状態
打換え	○	○	○	○	支保工・仮設

このように、ひび割れ補修工法、表面塗装工法、FRP接着工法を飛沫帯部や干満帯部に適用する場合にはコンクリート表面の湿潤状態に十分注意する必要がある、対策検討することが重要となる。断面修復工法や打換え工法は海上大気中部、飛沫帯部、干満帯部、海中部のいずれの環境においても適用できる。電気防食工法もいずれの環境においても適用できるが、防食回路の分離を検討する必要がある、分離することによって補修コストは高くなる。なお、脱塩工法については、現時点では港湾構造物に対して適用するには課題が多い。

5．今後の課題と展望

一般的なインフラと同様、港湾施設においても関係者へのアカウンタビリティーが強く要求されるようになってきた。そのために、これまでどちらかというと半経験的に工法選定、設計、材料選定が行われてきた維持管理(補修・補強)が、これまで以上に客観的かつ説明可能な行為として位置づけられる必要がある。

本研究では、「材料劣化」と「部材の力学劣化」の関係について、今回の実構造物の調査結果から鉄筋の機械的性質に着目して定量的に関連付けを行った一つの考え方を示した。しかし、構造物の性能を評価するためには、鉄筋以外の他の要因についても検討が必要である。

外観変状と鉄筋腐食の関係をデータベースにすることによって、今後、外観調査など簡易な調査を実施することで、コンクリート内部の腐食鉄筋の状況を推定し、大まかな性能が評価できる手法が開発可能であることが分かった。そのためにも、データの蓄積は重要である。

材料劣化と補修(補強)工法の適用性については、今回は定性的なまとめとなったが、今後、定量的な検討を行うことが重要と考える。

今回の研究においては、既存の港湾構造物に対する事例調査、文献調査を通じ、最適な補修工法、補修範囲、補修材料の選定メニューを提示した。これらを発展させることにより、実用性、信頼性の高いアセットマネジメントシステムに展開していくことが可能となる。また今後マニュアル化などを通じて使いやすくすることによって、上記アカウンタビリティーの向上に大いに役立つものと思われる。

参考文献

- 1) (社)土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕
- 2) 古玉,田邊,横田,濱田,岩波,日比：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,国土交通省港湾技術研究所,2001. 6
- 3) (社)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. 10
- 4) 中川将秀,末岡英二,佐野清史,福手勤：アセットマネジメントの考え方を取り入れた港湾施設の維持管理,日本材料学会,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集,第 5 巻,pp. 247-252,2005. 10
- 5) 中川将秀,末岡英二,佐野清史,福手勤：塩害劣化を受けた R C 構造物中铁筋の力学的性質の変化,土木学会年次学術講演会,2006