

港湾施設長寿命化検討業務

調査課

1. 概要

栈橋構造の岸壁上部工について、ライフサイクルコスト（以下、LCC）低減及び予防保全方策、長寿命化に資する点検方策等、港湾施設の長寿命化方策の検討を行った。

2. 調査内容

2.1 栈橋構造の岸壁上部工におけるLCC低減及び予防保全対策の検討

(1) LCC低減及び予防保全方策の利点

従来の補修・補強対策では、「初期コスト最小」が優先されてきた。そのため、高耐久性の材料を用いようとする初期コスト上昇は避けられず、良い材料であることがわかっても現場ではなかなか採用されないことが多かった。LCCを指標とすることで供用期間中において要求性能を満足する最適な工法・材料が選定されることが可能となると考えられる。一方、栈橋上部コンクリートに頻繁に見受けられる塩害による劣化は、一旦顕在化するとその後の劣化の進行は早く、効果的な対策も限られるばかりか解体・更新をせざるを得ない場合がある。そのため、予防保全とLCC縮減の二つの観点が必要になると考えられる。

表1 事後保全と予防保全の比較

	事後保全	予防保全
LCC	・一般的に高価になる。 ・残存供用年数が短い場合、事後保全の方が低価となる場合がある。	・一般的に低価になる。 ・予防保全の当初は、事後保全に比べ、コスト高になる傾向がある。
劣化リスク	・想定外の劣化・損傷による事故が発生する場合がある。	・計画的な点検により、想定外の劣化・損傷の早期発見が期待できる。
施設の長寿命化	・補修・補強の効果が不十分となり、再劣化の可能性も生じる場合もある。 ・補修・補強では対応できずに、解体・更新をせざるを得ない場合がある	・施設の要求性能を計画的に把握することで、長寿命化を図ることができる。
施設群の計画的な維持管理	・予算制約のもと、施設群の計画的な維持管理が困難となる場合がある。 ・港全体の機能低下が懸念。	・予算制約、施設の重要度から対策の優先順位の選定が可能となり、施設群の計画的な維持管理が期待できる。 ・港全体の機能維持が可能。

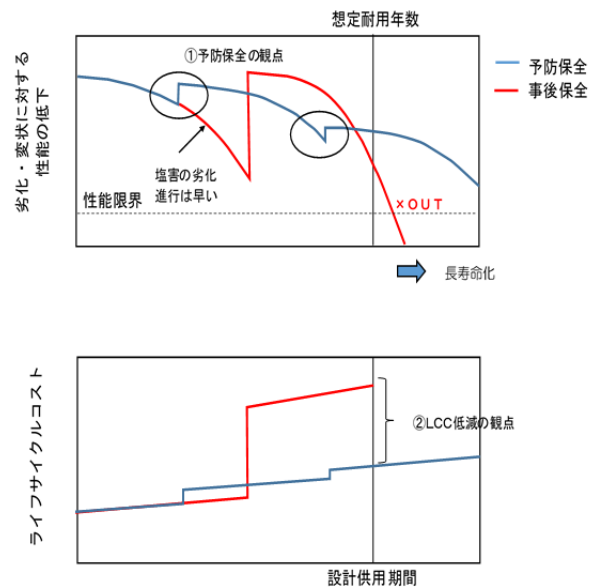


図1 予防保全によるLCC低減効果

(2) LCC低減及び予防保全方策の課題

今後、LCC最小化を指標として予防保全を推進していくためには、現在の劣化状態を正確に把握し、その劣化が今後どのように進行するのかを予測することが重要である。そして、この予測結果に応じて補修・補強工法を抽出するとともに、対策実施時期を検討する必要がある。しかし、現在のところ塩害の劣化予測が確立しているのは潜伏期の塩化物イオン拡散予測のみであり、今後は進展期以降の劣化予測方法の確立が課題となる。

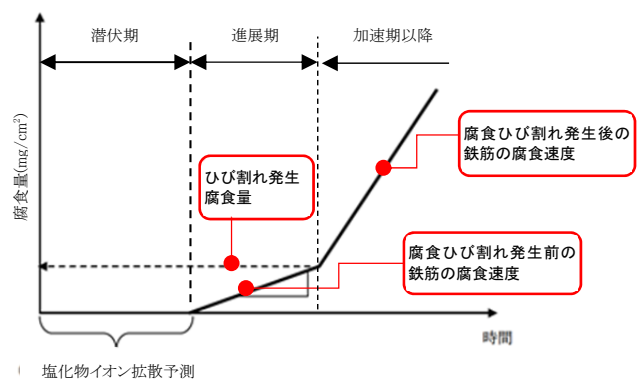


図2 進展期以降の劣化予測の概念図

2.2 棧橋構造の岸壁上部工における点検方策の検討

(1) 塩害の劣化特性に応じた点検方策の利点

棧橋上部工の塩害劣化の進行過程は潜伏期、進展期、加速期、劣化期に区分され、進展期終了時に腐食ひび割れが発生することから、潜伏期から進展期まではコンクリート内部で鋼材腐食が進行し、加速期を過ぎてからコンクリート表面に顕在化して鋼材腐食がさらに進行するという特性を有している。これまでの事例から、塩害による劣化は一旦顕在化するとその後の進行は早く、効果的な対策も限られることが多いことから、劣化が顕在化する前の早い段階で対処することが重要となる。また、劣化が顕在化する前と後で点検方法を区分することにより、目的に合致した効率的・効果的な維持管理が可能となる。

- ① 予防保全を念頭に置いた点検方策（潜伏期～進展期）：非／微破壊試験を活用
- ② 事後保全（従来の点検方法）（加速期以降）：目視点検を中心

(2) 塩害の劣化特性に応じた点検方策の課題

各劣化過程における点検方策の課題を表2に示す。点検によって把握すべき事項は各劣化過程によって異なり、潜伏期では鉄筋位置の塩化物イオン濃度（発錆限界量 2.0kg/m³）、進展期では鉄筋の腐食速度（腐食状況）、加速期以降は、ひび割れを有する場合の鉄筋の腐食速度（腐食状況）となる。

また、塩害は構造物を構成する部材の全てが同じように進行するわけではない。部材の位置する場所によって塩害環境が異なることや、コンクリートの品質の違いによって、劣化の進行もばらつきが生じることが一般的である。例えば、潜伏期の課題は、塩害環境に関する課題、進展期は、鋼材の腐食状況や腐食速度の把握、加速期以降は腐食速度等の把握である。なお、加速期以降は、目視調査による点検が主体となり、これまでの点検方策と大きな違いがないと考えられる。

表2 塩害の各劣化過程の点検診断の課題

劣化過程	課題	対応策
1) 潜伏期	<ul style="list-style-type: none"> ・ C₀の空間的分布の把握（塩害環境の把握） ・ 鉄筋かぶりの把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 微破壊試験（ドリル試料採取） ・ 電磁波レーダ、電磁誘導法
2) 進展期	<ul style="list-style-type: none"> ・ 浮き範囲の確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 叩き点検
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼材の腐食可能性の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自然電位測定（非破壊試験） ・ はつり調査（破壊試験：確認のため）
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼材の腐食速度（腐食量）の把握 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 分極抵抗測定（非破壊試験） ・ はつり調査（破壊試験：確認のため）
3) 加速期	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼材の腐食速度（腐食量）の把握 ・ 鋼材の腐食と耐荷力低下の関係（加速期後期～劣化期） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 分極抵抗測定（加速期前期まで） ・ 試験体による実験（検討対象外）
4) 劣化期		

※目視では潜伏期 or 進展期であるかの判断は困難である

いによって、劣化の進行もばらつきが生じることが一般的である。例えば、潜伏期の課題は、塩害環境に関する課題、進展期は、鋼材の腐食状況や腐食速度の把握、加速期以降は腐食速度等の把握である。なお、加速期以降は、目視調査による点検が主体となり、これまでの点検方策と大きな違いがないと考えられる。

2.3 棧橋構造の岸壁上部工における長寿命化方策の検討

ケーススタディとして具体的な長寿命化方策について検討を行った。ケーススタディは以下の3施設を対象とし、劣化予測及び対策工法のLCCを算定した。

- ・ ケーススタディ1：四日市港霞ヶ浦地区 南ふ頭 26号岸壁（以下、W26岸壁）
- ・ ケーススタディ2：四日市港霞ヶ浦地区 南ふ頭（以下、W22岸壁）
- ・ ケーススタディ3：新設棧橋（事前対策あり、なし）

加速期の電気防食工法は、断面修復を伴うものと考えられるため、小断面修復工法を、加速期の断面修復工法は、鉄筋の断面減少に伴うため、補強工法としてFRP接着工法を併用するものと仮定した。また、各補修工法の耐用年数は、表面被覆工法は15年、電気防食工法は、陽極は50年、配線・配管は20年で交換するものとした。なお、断面修復工法の耐用年数は、既往の資料（港空研報告 Vol. 48、No. 2）を参考に設定しないものとした。

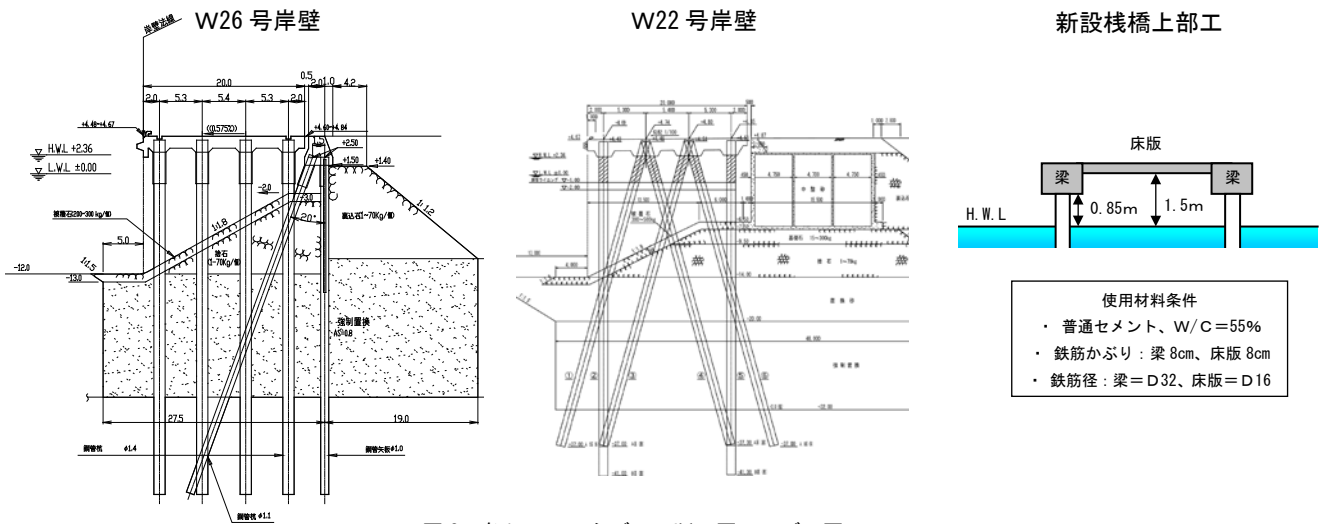


図3 各ケーススタディの断面図、モデル図

(1) ケーススタディ 1 (W26 号岸壁)

1) 劣化予測結果

梁では腐食開始 8 年、腐食ひび割れの発生 15 年、耐荷力の低下 20 年に対し、床版では腐食開始 15 年、腐食ひび割れの発生 33 年、耐力の低下 35 年となり、梁の方が劣化の進行が速くなる結果となった。このように、部材によって劣化の進行が異なる場合は個別に劣化予測を行い、その予測結果から個別に LCC 算定を行うことが重要である。

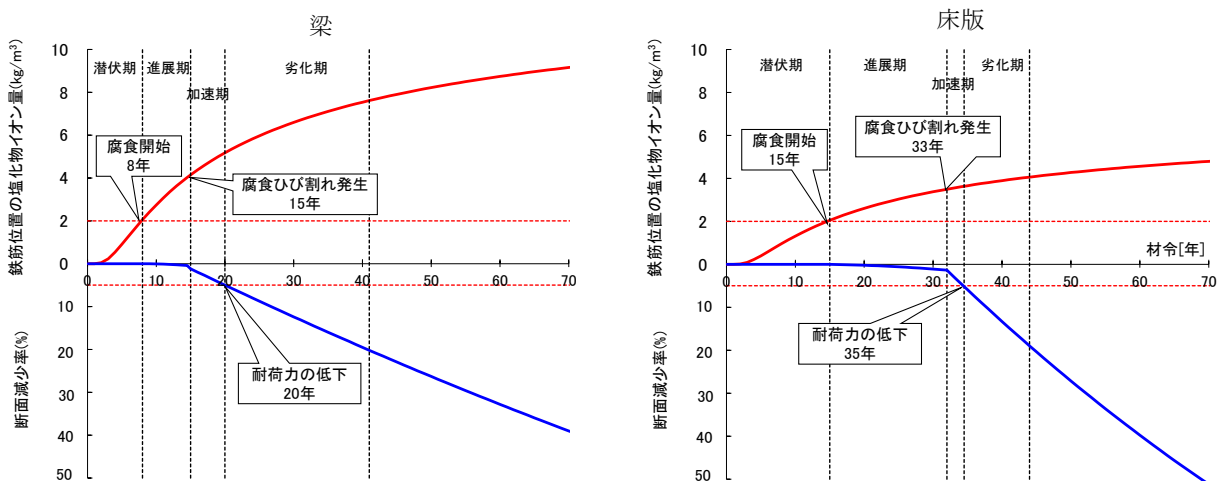


図4 W26 号岸壁の劣化予測結果

2) LCC 算定結果

梁・床版ともに潜伏期、進展期に対策を実施した方が LCC 低減となった。潜伏期では表面被覆工法、進展期では電気防食工法が最も経済的となった。

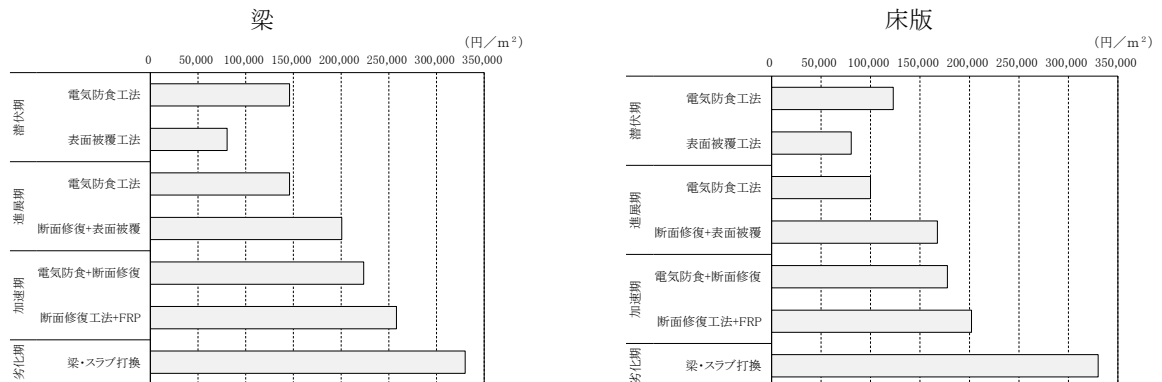


図5 W26 号岸壁の LCC 試算結果 (50 年間)

なお、梁に比べ床版の方がLCCを小さくできるのは、床版の方が劣化の進行が遅いためである。また、潜伏期、進展期の早い段階で対策を施せば、部材自体の劣化の進行を防ぐことができるため、LCC低減や長寿命化が可能であることがわかった。しかし、潜伏期や進展期で対策を実施する場合、これらの対策要否を判断するための点検や診断が重要となる。

(2) ケーススタディ 2 (W22 号岸壁)

1) 劣化予測結果

1ブロックでは、腐食開始14年、腐食ひび割れの発生25年、耐荷力の低下29年に対し、7ブロックでは、供用開始から100年経過しても鉄筋位置の塩化物イオン量は発錆限界量 2.0kg/m^3 を超えないという結果となった。このように、平面的な部材の位置によって、部材によって劣化の進行が大きく異なる場合は、塩害環境別にグループ化して劣化予測を行い、その予測結果から塩害環境に応じた対策工法やLCC算定を行うことが重要である。

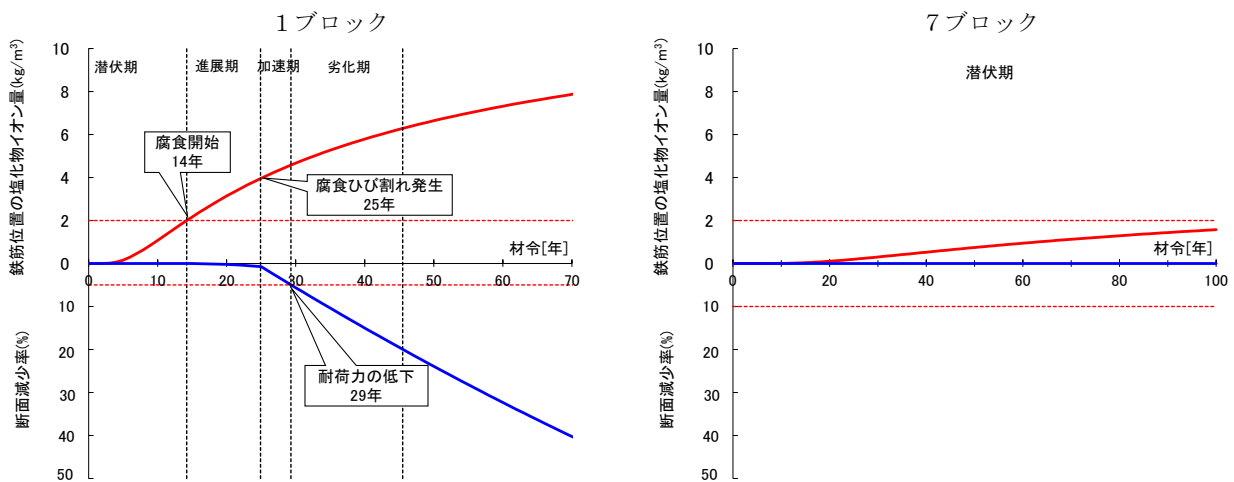


図6 W22号岸壁の劣化予測結果

2) LCC算定結果

W26号岸壁と同様に、潜伏期、進展期の早い段階で対策を施せばLCCは低減する結果となった。

また、W22号岸壁の場合、部材の位置によって劣化の進行が著しく異なる傾向があった。そのため、劣化が顕在化する前にこれらの傾向を把握することが重要である。なお、劣化の進行が著しく異なる原因として、図8に示すような劣化機構が想定される。

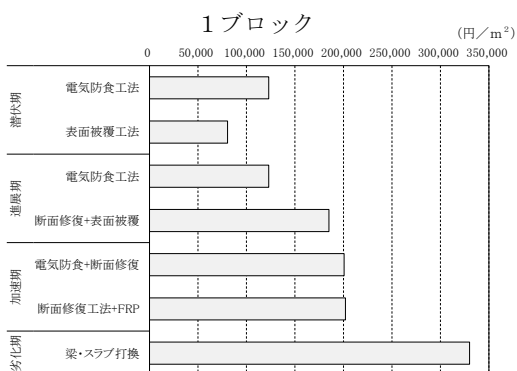


図7 W22号岸壁のLCC算定結果

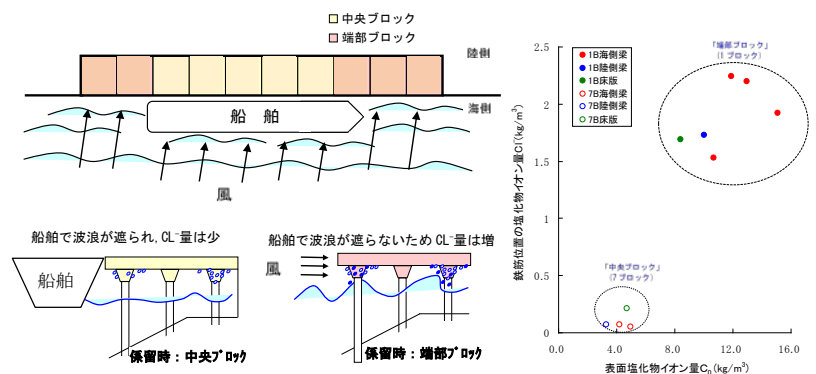


図8 端部と中央ブロックの劣化進行が異なる理由 (模式図)

(3) ケーススタディ3 (新設棧橋)

1) 事前対策工法

新設棧橋上部工の事前対策として、①エポキシ樹脂塗装鉄筋、②ステンレス鉄筋、③表面含浸材、電気防食の4工法を設定した。また、事前対策を行わない(加速期に断面修復及びFRP接着の事後保全を実施する)場合も比較対象としてLCCを算定した。

2) 劣化予測結果

ステンレス鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋は梁、床版ともに建設後100年間には発錆限界量以下であり、鋼材の腐食は生じない結果となった。一方、表面含浸材は梁では建設後33年、床版では建設後57年で鋼材の腐食が発生する結果となった。この劣化予測から、表面含浸工法のLCC算定は床版の50年間のみを対象とし、その他は参考値とする。

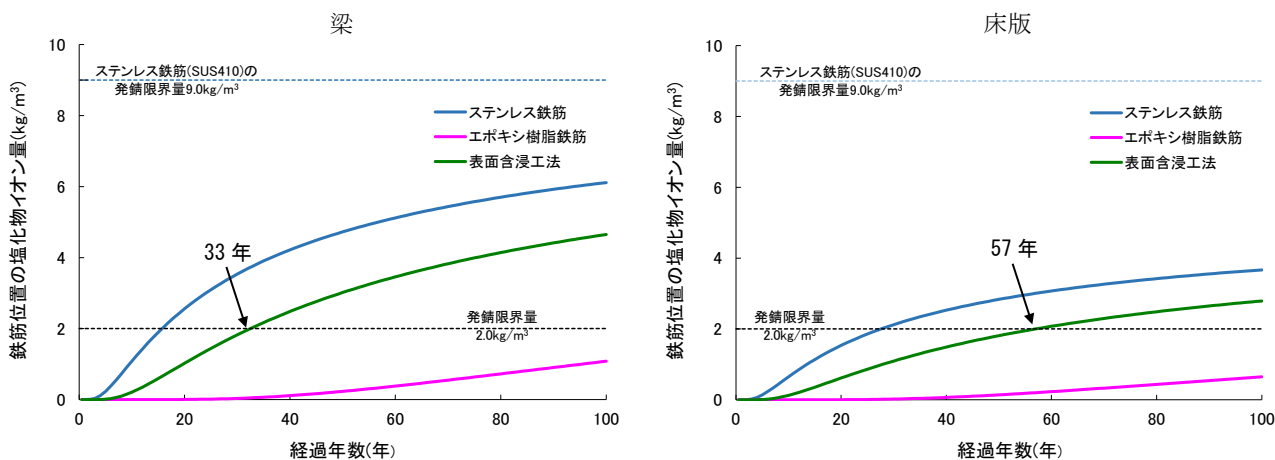


図9 新設棧橋の塩化物イオン拡散予測結果

3) LCC算定結果

梁・床版ともに事前対策のLCCは、「エポキシ樹脂塗装鉄筋<ステンレス鉄筋<表面含浸工法<電気防食工法」の順となったが、実際の検討ではLCCの他に、施設の重要度、施工性、予定供用年数等を考慮し対策方法を決める必要がある。なお、床版のLCCにおいては事後保全の方が有利となる結果となったが、これは劣化の進行が梁に比べ遅いことが原因であり、どのような条件でも事前対策が有利となるわけではなく、劣化の進行や供用年数等の条件によって異なることに留意する必要がある。

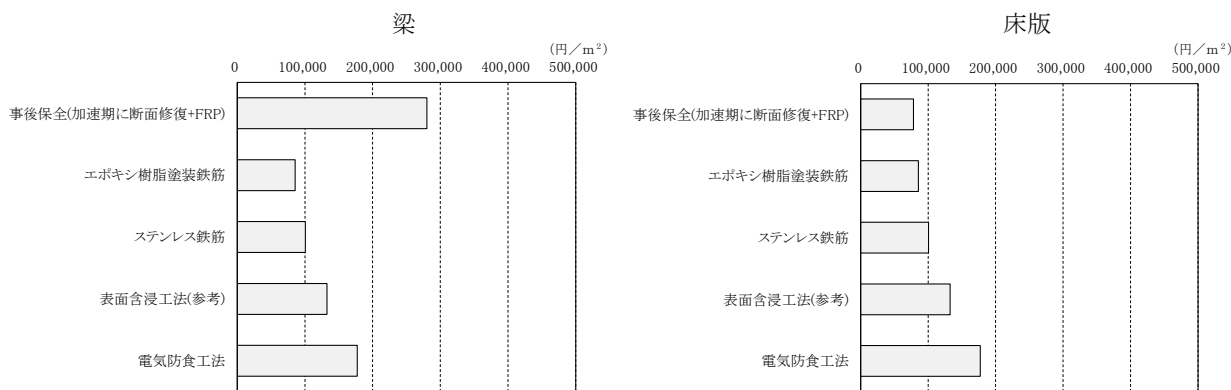


表10 新設棧橋のLCC算定結果 (50年間)

2.4 棧橋構造の岸壁上部工における長寿命化対策・点検メニューリスト（案）の検討

棧橋上部工のLCC低減、予防保全方策の検討および点検方策の検討結果を踏まえ、棧橋構造の上部工における代表的な構造毎の特性、技術開発の方向性を加味した長寿命化対策・点検メニューリスト（案）を作成した。作成に際しては、図11に示す方針に基づき検討を行った。表3に点検メニューリスト（案）、表4に長寿命化対策リスト（案）を示す。

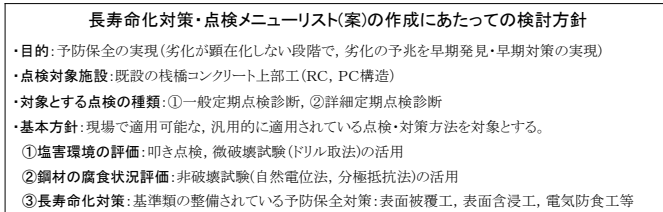


図11 検討方針

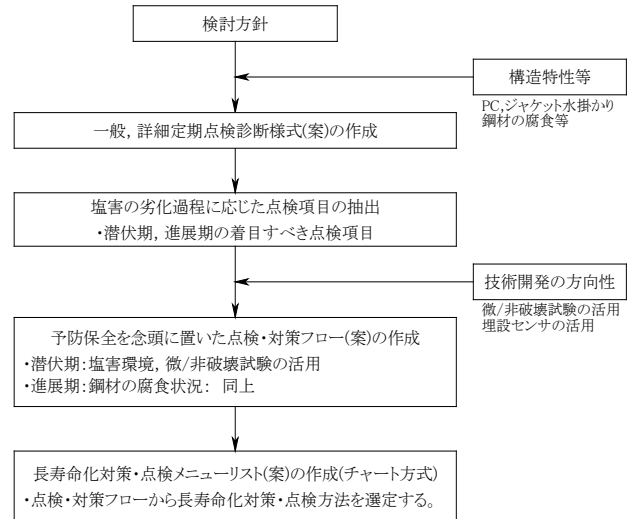


図12 検討フロー

2.5 港湾施設の長寿命化に関する課題等の検討

今後の課題、検討手法について、「社会インフラのモニタリング技術活用委員会」の考え方をもとに図13に示す手順で検討した。

(1) 維持管理のニーズの設定

港湾施設の維持管理のニーズとして、①維持管理の高度化による安全性・信頼性の向上、②維持管理の効率化によるコストの縮減・平準化を設定した。

(2) 維持管理のニーズに対応する今後の課題の設定

維持管理のニーズに対応する今後の課題を、点検診断（日常点検、定期点検診断、臨時点検診断）、長寿命化対策（事前対策、補修・補強対策）ごとに具体的に設定した。

(3) 今後の課題に対応する検討手法の抽出

今後の課題に対して検討手法を抽出した。その際、

課題への対応の難易度も考慮するものとした。表5に港湾施設の今後の課題に対応する検討手法等の一覧を示す。

(4) 現段階における実証試験等の適用性検討

今後の課題への対応の難易度等から、長寿命化対策等を抽出し、①港湾施設における新技術の用途、②競合する従来の方法に対する長所・短所、③港湾施設への適用の機会や課題の整理、④具体化するための施策等を挙げ、現段階における実証試験等の適用性について評価した。その結果、現段階においては以下の長寿命化技術の実証試験が有効と考えられる。

○長寿命化点検技術

- ・ 微/非破壊試験及び塩化物イオン濃度測定の新技術の活用（塩害環境の評価）
- ・ 微破壊試験（自然電位法、分極抵抗法等）の活用（鋼材腐食状況の評価）

○長寿命化対策技術

- ・ 連続繊維補強材
- ・ 表面含浸工法

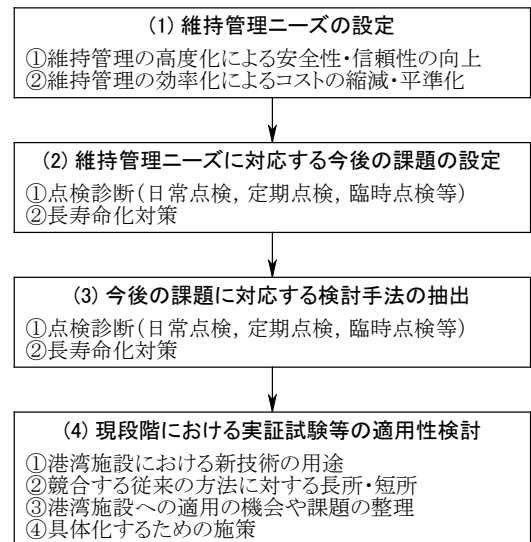


図13 今後の課題、検討手法の検討フロー

表3 点検メニューリスト(案)

	点検項目	点検方法等	概要	長所	短所	規準類、参考文献	留意点
新設	劣化状態の把握	点検足場・歩廊の設置	・事前に点検のための棧橋上部工下面に点検足場、歩廊を設置する。	・維持管理の省力化を図ることが期待できる。	・足場や歩廊の腐食対策を怠ると、足場・歩廊が早期に劣化する。	—	・足場設置位置の選定 ・足場、歩廊の腐食対策
		ボス供試体の設置	・コンクリート打設時にボス型枠を取り付けて、事前に採取試料を配置する。	・詳細点検時の圧縮強度、中性化試験、塩化物イオン濃度測定用の試料を配置することで、維持管理の省力化を図ることが期待できる。	・構造体から突出しているため、コンクリート硬化時に気温などの影響を受けやすい。	・NDIS3424:2011「ボス供試体の作製方法及び試験方法」	・ボス供試体の設置位置、数量
	塩化物イオンの浸透	埋設センサの設置	・埋設センサを設置して、かぶりコンクリートの塩化物イオンの浸透をモニタリングする。	・簡易に塩化物イオンの浸透をモニタリングできるため、予防保全を行う上で重要な情報となる。	・事前に塩害環境が厳しい箇所を把握する必要がある。	—	・現地計測にするか、遠隔地での確認にするかを選定する。
	鋼材の腐食	埋設センサの設置	・埋設センサを設置して、コンクリート中の鋼材の腐食をモニタリングする。	・簡易に鉄筋の腐食をモニタリングできるため、予防保全を行う上で重要な情報となる。	・同上 ・データのばらつきが課題。 ・センサ、ケーブル類の耐久性が課題。	・岩波ら「棧橋上部工における鉄筋腐食モニタリング実証実験」、土木学会年次学術講演会(H22.9)	・同上
潜伏期	劣化状態の把握	目視点検	・小型船舶から目視点検によって棧橋上部工の劣化度を評価、劣化状態を記録する。	・簡易、かつ広範囲に劣化状態を把握することができる。	・潜伏期は、コンクリート表面に劣化が生じない場合が多い。ただし、非構造鋼材(段取り筋)等の腐食状況によって、腐食環境をある程度把握できる場合がある。	・港湾の施設の維持管理技術マニュアル、(財)沿岸技術研究センター、H19.10	・潮間作業となるので、事前に潮位を確認する。 ・小型船舶の荷卸し場所の確認 ・関係機関との調整等
	鉄筋かぶりの把握	電磁波レーダ法(電磁誘導法)	・電磁波が鉄筋に反射して、その伝播時間から鉄筋かぶりを測定する。	・構造物を損傷させることなく、現地の鉄筋かぶりを広範囲に取得することができる。	・鉄筋かぶりの精度は、コンクリートの比誘電率に依存する。比誘電率はコンクリートの含水状態によって異なるため、比誘電率の設定が課題となる。はつり調査で比誘電率のキャリブレーションして精度確認することが望ましい。	・NDIS3429:2011「電磁波レーダ法によるコンクリート構造物の鉄筋探査方法」	・同一棧橋でも施工者により、鉄筋かぶりが異なる場合がある。そのため、鉄筋かぶりの傾向やばらつきに留意する。
	塩化物イオンの浸透	塩化物イオン濃度測定	・コンクリート構造物から、試料を採取して、コンクリート中の塩化物イオン浸透を把握する。	・塩害環境を把握することができる。 ・塩化物イオン拡散予測より、潜伏期の性能照査が可能となる。	・経過時間が短い場合、コンクリート中の塩化物イオン量が少ない場合、C0、Dの同定が困難な場合がある。 ・通常は、試料採取を2cm毎とするが、1cm毎にする等の工夫が必要(EPMAでも可)。	・JIS A 1154:「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」 ・JSCE-G573-2013「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法」	・試料採取位置の選定・できるだけ多地点の塩化物イオン濃度を測定するため、微破壊試験等を活用する。 ・移動足場、高所作業台の活用
進展期	劣化状態の把握	目視点検	・潜伏期と同じ。	・潜伏期と同じ。	・進展期は、鉄筋の腐食による「浮き」が生じているが、コンクリート表面に劣化が顕在化しない場合がある。その場合、劣化度を過小評価する可能性がある。	・潜伏期と同じ。	・潜伏期と同じ。
		叩き点検	・コンクリート表面をハンマで打撃し、その衝撃の程度や衝撃音の音色の変化等によりコンクリートの「浮き」の箇所や内部の変状の有無を推定する。	・コンクリート表面は健全で、鉄筋腐食による「浮き」が発生している場合、叩き点検によって「浮き」を把握することができる。	・点検者の直観や経験による判断に委ねられているとともに、点検結果を客観的に評価することが困難である。	—	・叩き点検結果の精度確認のため、一部の「浮き」の有・無の打音の違いを録音して確認する等の方法が有効である。 ・移動足場、高所作業台の活用
	塩化物イオンの浸透	塩化物イオン濃度測定	・潜伏期と同じ。	・塩害環境の把握 ・進展期の劣化の進行の推定	・既に鉄筋位置で発錆限界量を超えている場合、測定結果の利用方法に課題がある。	・潜伏期と同じ。	・鉄筋位置の塩化物イオン量は、鋼材の腐食進行とも関係するため、進展期の劣化の進行の推定に利用する。
	鋼材腐食の可能性	自然電位法	・コンクリート表面で鉄筋の電位を測定することによって、腐食の可能性を評価する。	・コンクリート表面に劣化が顕在化していない場合でも鋼材の腐食の可能性を非破壊で、かつ簡易に推定することができる。	・定性的な情報(腐食発生の可能性)しか得られない。 ・実際の鉄筋の腐食状態とASTM876の「鋼材の腐食判定基準」が一致しない場合がある。	・JSCE-E601-2007「コンクリート構造物における自然電位測定方法」	・ASTM876の判定基準は、環境条件によって一致しない場合があるため、等電位線図を用いて、等電位線が狭く、電位が卑な箇所を抽出することに留意する。
	鋼材の腐食速度	分極抵抗法	・コンクリートに当てた外部電極から内部鉄筋に微弱な電流(電位差)を付加したときに生じる電流(電位)変化量から分極抵抗を求め、鉄筋の腐食速度を推定する。	・コンクリート表面に劣化が顕在化する前に、鉄筋の腐食速度を把握することができる。 ・進展期(腐食ひび割れの発生時期)の劣化予測が期待できる。	・国内に測定方法、評価方法の規準がない。 ・鉄筋の腐食速度を評価する場合、鉄筋の配筋状態を正確に把握する必要がある。 ・鉄筋の腐食速度は、気温、降雨等の気象条件によって変化する。	・コンクリート構造物における分極抵抗法(試案)、土木学会、338委員会	・自然電位法と併用して、分極抵抗の精度向上を図る。 ・腐食速度は温度が高いほど速くなる。年1回の測定の場合には、安全側の配慮から夏に行うことが望ましい。
加速期	劣化状態の把握	目視点検	・潜伏期と同じ。	・潜伏期と同じ。	・目視点検のみでは劣化範囲がわからない場合が多い。	・潜伏期と同じ。	・潜伏期と同じ。
		叩き点検	・進展期と同じ。	・叩き点検によって、目視点検では不明な劣化範囲が明確になる。	・進展期と同じ。	—	・進展期と同じ。
	鉄筋の腐食状態	はつり調査	・かぶりコンクリートをはつり、内部鉄筋を露出させて、鉄筋の腐食状況の観察やノギス等による鉄筋径の測定を行う。	・目視点検では得られない鉄筋の腐食度、鉄筋径(断面減少率)等を直接把握することができる。	・構造物を損傷させる。 ・進展期～加速期前期は、鉄筋の腐食は少ないため、ノギスでの計測が難しい場合がある。	・JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」	・残存耐力などの推定を行う際のデータとなる。
劣化期	・加速期と同じ。	・加速期と同じ	・加速期と同じ。	・加速期と同じ。	・加速期と同じ。	・加速期と同じ。	・加速期と同じ。

表 4 長寿命化対策リスト (案)

	長寿命化対策	対策工法	概要	長所	短所	規準類	適用事例
新設	高耐久性コンクリートの使用	超高強度繊維補強コンクリート (UFGC)	・圧縮強度150N/mm ² 以上、ひび割れ発生強度4N/mm ² 以上、引張強度5N/mm ² 以上の繊維補強を行ったセメント系複合材である(いずれも特性値)。	・高強度のため、部材の軽量化を図ることができる。 ・通常のコンクリートに比べ拡散係数は2桁以上小さく、100年以上の耐用年数が期待できる。 ・高耐久性型枠に利用することで、経済的に塩化物イオン侵入を抑制することができる。	・初期コストは普通C ₀ の2倍程度 ¹⁾ (軽量化による下部工の変更を考慮しない場合) ・高耐久性型枠のみの適用の場合、初期コストは普通コンクリートの1.2倍程度 ¹⁾ ・繊維の分散と配向に配慮した施工計画が必要。	・超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)、土木学会、H16.9	・床版の適用事例 羽田空港D滑走路の床版 ・高耐久性型枠の適用事例 伏木富山港新港地区棧橋
		複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC)	・セメント系材料と補強用の短繊維を用いた複合材料であり、一軸引張応力下において疑似ひずみ硬化特性を示し、微細で高密度の複数ひび割れを形成する高靱性材料である。	・ひび割れ制御機能、ひび割れ分散性により鋼材の腐食が抑制される。 ・高靱性材料であるため、補強材や耐震補強材として期待される。 ・コンクリート表面をHPFRCCで被覆して、構造物を長寿命化させる工法もある(靱性モルタル工法)。	・普通コンクリートの費用を1.0とすると、HPFRCCは3.5倍UFGCは2倍程度 ²⁾ 。 ・実構造物の適用は少ない。	・複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)、土木学会、H19.3	・鋼床版の疲労耐久性向上を目的とした舗装上面増厚 ・鉄道高架橋の中性化抑止対策工: 曲げひび割れに有効な新しい表面保護工として適用
	高耐久性補強材料	エポキシ樹脂塗装鉄筋	・鉄筋にエポキシ樹脂塗装を施すことにより、塩害環境下の構造物の耐久性を向上させる工法。	・鉄筋に塗装したエポキシ樹脂によって腐食因子を遮断することで、鉄筋の腐食を抑制する。 ・実績が多い。	・普通鉄筋の1.6倍程度の費用 ・棧橋上部工全体では1.1倍程度 ¹⁾ 。 ・施工時に塗膜損傷の懸念がある。	・エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針[改訂版]、土木学会、H15.11	・衣浦港中央ふ頭西岸壁(-12m)改良 ・四日市港霞ヶ浦地区W22岸壁(試験施工1988年)
	ステンレス鉄筋	・耐食性に優れたクロム酸化物の不動態皮膜が形成され、塩害環境下の構造物の耐久性を向上させる。	・鉄筋位置の腐食発錆限界量が非常に大きい。(SUS304 : 15kg/m ³ 、SUS316 : 24kg/m ³ 、SUS410 : 9kg/m ³)。	・普通鉄筋(N)の4~10倍の費用(SUS304 : Nの4倍、SUS316 : Nの7倍、SUS410 : Nの10倍)。 ・現場溶接ができない。 ・すき間腐食、異種金属接触腐食に留意が必要。	・ステンレス鉄筋を用いる構造物の設計施工指針(案)、土木学会、H20.9	・古宇利大橋 ・東京根津神社 (日本での実績は少ないが、海外では比較的多い)	
	連続繊維補強材	・連続繊維に繊維結合材を含浸させ、硬化・成形してコンクリートを補強する工法。連続繊維には炭素繊維・アラミド繊維・ガラス繊維等がある。	・高引張強度、高耐久性、軽量、非磁性などの長所を有する。	・連続繊維は比較的高い強度と弾性係数を有するが、破断ひずみが0.5~4.5%と、鋼材の破断ひずみ20%に比べて小さい(鉄筋に比べ靱性に劣る)。	・連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)、土木学会、H8.9	・西宮ヨットハーバーマリーナポンツーン補修 ・東北電力火力発電所連絡橋 ・橋梁では歩道橋への適用がある。	
潜伏期	表面処理工法	表面被覆工法	・コンクリート表面に塗装を施して、外部からの水や塩化物イオンの浸入を抑制する工法。	・外部からの劣化因子の遮断性能に優れる。 ・実績が多く、性能確認試験や性能照査方法も確立されている。	・塗布後にコンクリート表面の目視ができない。 ・施工不良やコンクリート中の水分の影響によって塗装割れがわが生じやすい。 ・表面被覆工法よりも遮塩性能が劣る。	・表面保護工法 設計施工指針(案)、土木学会、H17.4	・実績多数
		表面含浸工法	・表面含浸材をコンクリート表面から含浸させて、表層部の組織を改質することでコンクリートの耐久性を向上させる工法	・無色透明であるため、塗布後もコンクリート表面の目視点検が可能。 ・表面被覆のような塗装の割れ、剥がれがない。 ・母材コンクリートの品質や含水状態によって、遮塩性能が異なる。	・性能確認試験、照査方法が確立されていない。 ・母材コンクリートの品質や含水状態によって、遮塩性能が異なる。	・シラン系: 同上 ・けい酸塩系: 「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)」、土木学会、H24.7	・名古屋港飛鳥島南地区TS1岸壁 (シラン系+けい酸塩系の複合材料)
進展期	電気防食工法	外部電源方式(面状、線状、点状)	・外部電源から強制的に防食電流を流して鋼材の腐食を抑制する工法	・防食電流の調整が可能であり、確実に腐食を防止できる。 ・陽極の耐用年数は40年以上である。	・外部電源が必要となる。 ・塩害環境、鉄筋量により、回路分けを行う必要がある。	・電気化学的防食工法設計施工指針(案)、土木学会、H13.11	・東京港大井埠頭棧橋 ・他実績多数
		流電陽極方式	・内部鋼材と陽極材(亜鉛等)の電池作用により防食電流を流して鋼材の腐食を抑制する工法	・防食電流の調整が不要であり、維持管理が容易な面がある。	・樹脂等で表面被覆されている場合、樹脂を剥がす必要がある。 ・陽極(亜鉛)の耐用年数は20年程度と短い。 ・維持管理を怠った場合、知らない間に陽極が喪失している場合がある。	・同上	・四日市港霞ヶ浦地区W22岸壁(試験施工1988年) ・清水港日の出岸壁(-12m)4・5号
加速期	電気防食工法	・同上	・同上	・同上	・同上	・同上	・同上
		断面修復工法	断面修復工法	・塩化物イオンの発錆限界量を超えた部分を物理的に全てはつき落とし、所要の性能を有する断面修復材で復旧する工法。	・実績が多い。	・塩化物イオンの発錆限界量を超えた部分を全てはつき落とし、マクロセル腐食による再劣化の懸念がある。 ・棧橋下面の狭い空間において、全断面はつき作業、鉄筋プラスト処理、型枠設置、修復材打設等の多工種となるため、施工性に劣る。 ・PC構造物の場合、断面修復箇所のプレストレスが喪失するため、事前に耐力検討が必要。	・表面保護工法 設計施工指針(案)、土木学会、H17.4
劣化期	断面修復工法	・同上	・同上	・同上	・同上	・同上	・同上
		FRP接着工法	FRP接着工法	・FRPをコンクリート表面に接着させることによって、耐荷性能の向上を図る工法。	・軽量であるため、既設構造物への付加重量は非常に小さい。 ・重機は不要で、施工スペースの制約を受けず、少人数でかつ短い工期で施工が可能である。 ・FRPにより塩化物イオンの遮断効果も期待できる。	・全面に接着するとコンクリート表面の目視ができない。 ・FRPシートが剥がれないように、コンクリート表面の含水状態に応じて、接着材料を選定する必要がある。	・連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針、H12.7

1) 土木学会コンクリート標準示方書に基づく設計計算例 [棧橋上部工編] p.114, 土木学会, 平成17年3月

2) 複合構造の最先端p.64, 土木学会, 平成19年7月

表5 港湾施設の今後の課題に対応する検討手法等の一覧

項目	維持管理のニーズ		①高度化による安全性・信頼性の向上		②効率化によるコストの縮減・平準化	
	現場ニーズ	今後の課題	今後の課題	検討手法等	今後の課題	検討手法等
点検診断	1. 日常点検	(1) 劣化損傷等の原因となる事象の監視	・重要箇所は巡回時に異常を見逃さないようにしたい。	● 棧橋上部工等の塩害：埋設センサのモニタリング等により、日常的に劣化状態を把握する。	・十分に巡回できない場合でも最小限の確認をしたい。	● 岸壁等：利用状態（過積載、衝撃荷重）の把握。 ▲ 港湾施設の劣化等：自航式ロボット（ROV）の活用
	2. 定期点検診断（一般、詳細）	(1) 詳細点検が必要な箇所の抽出	・目視による把握が困難な事象を定量化したい。 ・経年的な劣化等の状況を把握したい。	● 棧橋上部工等の塩害環境：簡易塩分測定方法（蛍光X線分析、電量滴定法）の活用 ● 棧橋上部工等の鋼材腐食：①自然電位、分極抵抗法の活用、②埋設センサのモニタリングによる劣化状態の定量化 ▲ 鋼構造（塗覆装）の詳細点検方法：目視点検以外の詳細点検方法の確立 ▲ 岸壁背後の空洞化：電磁波レーダ法の高度化 ▲ 土中部鋼材（パイロド）等の腐食：点検方法の確立	・点検を効率的に実施したい。 ・広い、長い、多い施設の点検作業時間を削減したい。 ・船舶等を利用することなく安価に把握したい。	● 棧橋上部工の塩害環境：①微破壊試験（ドリル試料採取）の活用、②移動足場の活用 ● 棧橋上部工の鋼材腐食：①叩き点検の活用、②移動足場の活用 ▲ 水中部の鋼材腐食：非接触肉厚計測装置の活用
		(2) 補修補強効果等の確認	・補修、補強後の効果及び手法の妥当性を把握したい。	● 効果及び点検方法：(①～③管内実績あり) ①エポキシ樹脂塗装鉄筋 ②流電陽極方式による電気防食 ③表面含浸工法	—	—
		(3) 発見・特定した劣化損傷等の進行状況の監視	・目視による把握が困難な事象の進行を把握したい。 ・損傷の進行等を遠隔地から確認したい。	▲ 劣化、損傷箇所の事象の進行：ひずみゲージ、変位計等のモニタリング、遠隔モニタリング方法 ▲ 閾値の設定：危険とみなす判断基準の設定	・損傷の進行等を効率的に確認したい。 ・規制等の措置を講ずる必要性を明確にしたい。	▲ 劣化、損傷箇所の事象の進行：自航式ロボット（ROV）の活用 ▲ 供用（規制）の可否判断：簡易に供用可否判断を行う方法の確立
	3. 臨時点検診断（一般、詳細）	(1) 地震時等の災害発生時における迅速な変状把握・評価	・目視による把握が困難な事象を定量的に把握したい。 ・点検結果から、合理的に補修・補強の要否を判断したい。	▲ 変状の定量的把握：地震時等の損傷を定量的に把握する点検方法の確立 ▲ 対策要否の判定：損傷した構造物の性能評価手法の確立	・船舶等を利用することなく安価に把握したい。 ・広い、長い、多い施設の点検作業時間を削減したい。 ・異常の可能性の高い箇所を効率的に抽出したい。	▲ 点検の効率化、省力化：①自航式ロボット（ROV）の活用、②簡易点検カメラの活用 ▲ 緊急時の供用可否判断：簡易な点検方法より、迅速に岸壁の供用可否判断を行う方法の確立
長寿命化対策	1. 事前対策等	(1) 高耐久性工法・材料の開発、活用	・高耐久性工法、材料を活用して、施設の長寿命化を図りたい。	● 長寿命化対策の推進 ①短繊維補強コンクリート（UFC、HPFRCC等） ②ステンレス鉄筋、連続繊維補強材等 ③表面含浸工法（シラン系、けい酸塩系）	・設計時に点検の容易性を考慮して、維持管理の手間を省きたい。	● 維持管理の省力化に配慮した構造形式・細目 ①棧橋下面に点検足場・歩廊の設置 ②防波堤に点検孔を設置 ③交換可能な部材の適用（リプレサブル構構） ④ボス供試体の設置（試料採取の軽減）
		(2) 事前対策の合理化	・事前に塩害が生じやすい箇所に配慮して対策したい。	▲ 塩害環境の把握：①データベース分析、②腐食環境センサ等の活用	—	▲ 塩害環境の把握：①既往点検データの確認、②隣接岸壁等のデータ整理
	2. 補修補強対策	(1) 高耐久性工法・材料の活用	・高耐久性工法、材料を活用して、再劣化しないように施設の長寿命化を図りたい。	● 長寿命化対策の推進 ①短繊維補強コンクリート（UFC、HPFRCC等） ②連続繊維補強材等 ③表面含浸工法（シラン系、けい酸塩系）	—	—

●：優先順位は高い。▲：課題が多く、中～長期的な検討が必要であり、現段階においては優先順位が低い。●：検討手法がほぼ確立されている。