

港湾施設における鉄筋コンクリート構造物の劣化と対策の現状

一野武史¹・加藤隆士¹・川島仁¹

¹正会員 東亜建設工業株式会社 シビルリニューアル事業室（〒102-8451 東京都千代田区四番町5）

港湾構造物に見られる劣化は、全体を見渡した場合に傾向があるものの、劣化の進行が早い箇所と遅い箇所がある。筆者らは、劣化進行速度の違いを劣化調査結果より評価することによって、将来的な劣化数量を定量的に推測することができることを確認した。具体的には、調査によって得られる「劣化環境、かぶり、コンクリートの品質」についてばらつきを評価し、これらのばらつきを考慮に入れて劣化予測を行った。また、予測結果をもとに維持管理コストを算定した例を紹介する。

キーワード：劣化予測、ばらつき、表面塩化物イオン濃度、拡散係数、かぶり、塩害

1. はじめに

メンテナンスフリーと考えられてきた鉄筋コンクリート構造物も、厳しい環境条件では適切な維持管理が必要不可欠であることが広く認識されるようになってきた。

鉄筋コンクリートが劣化する機構は、中性化、塩害、凍害、化学的浸食、アルカリ骨材反応、疲労等があり、それぞれ劣化予測に関するデータが蓄積されつつある。その中でも中性化及び塩害については、計算式によって精度良く劣化予測する方法が検討されてきている。港湾施設における鉄筋コンクリート構造物は主として塩害であるので、本論文は塩害に限って検討した例を述べる。

コンクリート標準示方書によれば、塩害による劣

化予測は、本来、構造物の諸性能の変化（低下）が予測の対象となるべきであるが、現時点の技術レベルでは構造物を構成するコンクリートの耐久性及び鋼材の腐食を予測し、その結果を組合わせて評価する方が現実的であると記述されている。図-1 に塩害による劣化進行過程を示す。各劣化過程は構造物の状態に対応しており、各劣化過程の期間の長さを予測するためには塩化物イオン濃度及び鋼材腐食量を指標に用いる。

2. 港湾施設における鉄筋コンクリートの劣化現象と評価

(1)鉄筋コンクリートの劣化現象

港湾施設における鉄筋コンクリートの劣化現象は、塩害に加えて他の劣化要因が複合的に作用することがあるが、最も劣化速度が早く、供用への影響が大きい劣化要因は塩害である。また、海水中の塩分は鉄筋腐食の「きっかけ」であり、酸素と水が不可欠である。したがって、海中のコンクリート構造物は大量の塩化物イオンが浸透しても酸素が少ないため、窒息状態となり、鉄筋腐食はわずかである。以上のことから、外観では劣化状況がわかりにくい水没範囲は、鉄筋コンクリート構造物に限ってはかぶりにもよるが比較的健全であることが多く、劣化予測の必要性は低い。

栈橋の劣化状況調査の例を図-2に示す。はじめに

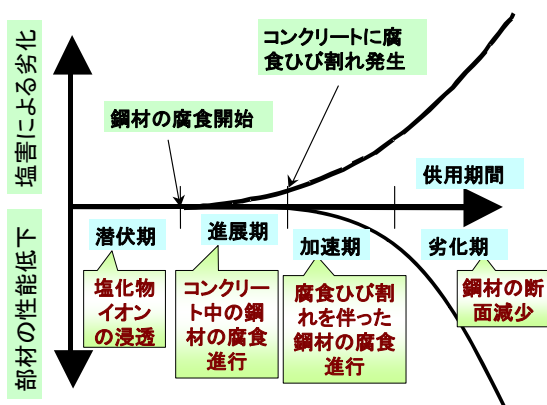


図-1 塩害による劣化進行過程

調査の手順(その1)・・・費用がかからない

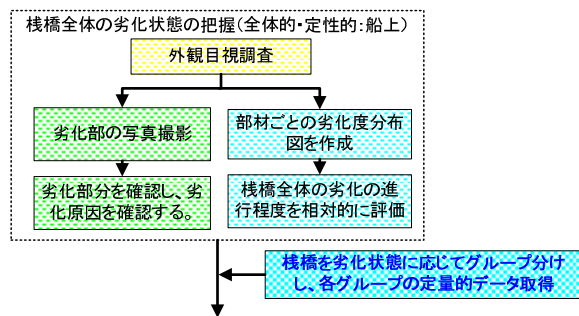


図-2 調査の手順(その1)

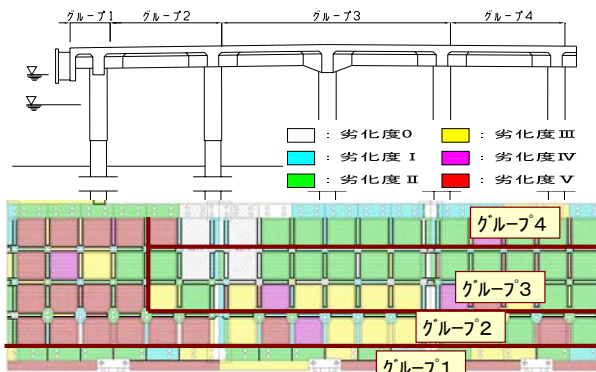


図-3 外観調査による劣化度分布図

実施する調査は外観目視調査である。全体的、定性的な把握を目的として外観目視調査を行い、構造物は劣化状態に応じてグループ分けされる。

費用がかさむ調査項目の調査位置は、劣化の進行程度を構造物全体で見渡し、グループ分けしたあとで決定する。一概に構造物の劣化といっても、すべての部材が同じ速度で劣化するわけではなく、環境条件の厳しさや、構造物施工時の品質のばらつきなどによって、劣化速度は大きく異なる場合が多い。栈橋のような大きな構造物の場合、構造物の劣化進行速度の違いを考慮に入れた対応が求められるようになってきている。

梁と床版で構成された栈橋プラットフォームのグループ分けの例を図-3に示す。図ではグループ1が着船側、グループ4が陸上側となっている。

この栈橋は平面的に大きく、塩分の飛来量が海側と陸側で差が出るため、グループ1の梁は劣化度Vが多く、グループ3～4の梁は劣化度0またはIが多い。断面的には海面から躯体面までの距離が異なるため、グループ1の梁は劣化度Vが多く、床版は劣化度Ⅲ～Ⅳとなっている。ばらつく原因は塩分の飛来量だけではないため、グループ2に見られるように、梁と床版で海面からの高さが大きく異なり、塩分供給量の違いが顕著であっても、かぶりの違いから床版の劣化進行が速いこともある。

調査の手順(その2)・・・費用がかかる

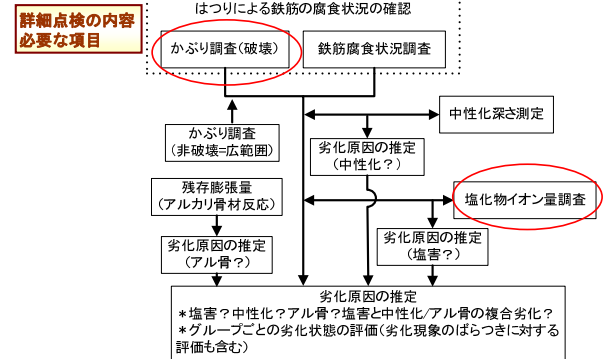


図-4 調査の手順(その2)

また、補修方法によってはマクロセル腐食により再劣化現象が起きるといったことや、既に浸透した塩分が多く、表面塗装が効果的でない場合があるため、注意が必要である。この再劣化については塩化物イオンの拡散計算によって評価することが可能である。

(2) 劣化現象の評価

劣化状況の評価するための調査計画を立案する時、詳細調査箇所をどこに選定するか、という問題がしばしば発生する。補修の方向性を決めるために実施するのであるから、費用は発生してもしっかりとした調査が不可欠である。参考となるマニュアル類は、「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」(平成11年6月)、「(財)東京港埠頭公社 栈橋劣化調査補修マニュアル」(平成16年6月)がある。

詳細調査の項目は、図-4に示すように、鉄筋腐食状況調査、塩化物イオン量調査、中性化深さ、自然電位測定、等がある。場合によりアルカリ骨材反応性調査を加える。それぞれの試験データは、採取した位置のグループ全体を評価することになる。

コンクリート中の鉄筋が腐食するきっかけとなる塩化物イオンは、鉄筋位置においてある量に達すると錆を発生させる。この腐食発生限界塩化物イオン量は $1.2\text{kg/m}^3 \sim 2.5\text{kg/m}^3$ ^{1), 2), 3)} といわれている。また、鉄筋腐食が進んで外観上クラックが発生したあと、かぶりコンクリートが剥離して耐荷力が低下するまでの現象に対して、それぞれの状態によって劣化度⁴⁾(または構造物の外観上のグレード⁵⁾)を割り当てることになる。(図-1 参照)

後述する劣化予測手法は、潜伏期、進展期、加速期の各過程において塩化物イオン濃度、鉄筋腐食量等のパラメータに判定基準値を設け、経過時間ごと

表-1 式(1)中の各パラメータのばらつき

表面塩化物イオン濃度	$C_0 = C_{0ave} + \sigma_{C_0} \times dz(C_0)$
見かけの拡散係数	$\log_e D = \log_e [D_{ave} + \sigma_D \times dz(D)]$
初期塩化物イオン濃度	$C_i = C_{iave} + \sigma_{C_i} \times dz(C_i)$
かぶり	$d = d_{ave} + \sigma_d \times dz(d)$

ここに、

C_{0ave} : 表面塩化物イオン濃度の平均値 (kg/m³)
 σ_{C_0} : 表面塩化物イオン濃度の標準偏差 (kg/m³)
 D_{ave} : 見かけの拡散係数の平均値 (cm²/年)
 σ_D : 見かけの拡散係数の標準偏差 (cm²/年)
 C_i : 初期塩化物イオン濃度の平均値 (kg/m³)
 σ_{C_i} : 初期塩化物イオン濃度の標準偏差 (kg/m³)
 d : かぶりの平均値 (mm)
 σ_d : かぶりの標準偏差 (mm)
 $dz(C_0)$, $dz(D)$, $dz(C_i)$, $dz(d)$
: 各パラメータの正規乱数

に各過程の割合を算定できるものである。

予測結果は、構造物の各グループ危険度の推移を平面的に理解することに役立つ。また、劣化度によって補修費用（表面塗装～撤去更新まで）が異なる事実を考慮すれば、補修時期を変えて維持管理計画パターンをいくつもシミュレートできるため、補修に要する単年度費用を抑え、平準化をアピールするツールにもなりうる。

3. 塩害環境下の鉄筋コンクリートに対するばらつきを考慮に入れた劣化予測

(1) 潜伏期の予測

潜伏期で行う鋼材（鉄筋）腐食の発生時期の予測は、鋼材の位置での塩化物イオン量が腐食発生限界塩化物イオン量に達した時点をもって判定する。それ以降は進展期へ移行する。

潜伏期の予測は、式(1)を用いた。

$$C(d, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{d}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) + C_i \quad (1)$$

ここに、 $C(d, t)$: かぶり d (cm) , 時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m³) , C_0 : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³) , D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm²/年) , C_i : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m³) を表す。

劣化進行のばらつき（不確定性）を考慮に入れるため、ここで行う予測では、各パラメータに対して、調査結果から得られた平均値と標準偏差を用いた。

ばらつきの考慮方法は、表-1に示すとおりとした。なお、腐食発生限界塩化物イオン量は、必ずしも合

意の得られた数値となっていない。したがって、腐食発生限界塩化物イオン量についてもばらつきを想定する必要があると考えられるが、参考文献の限界値は、維持管理の中である程度安全側の数値として採用されていると考えられ、本論文で行う不確定性を考慮した劣化予測においては、腐食発生限界塩化物イオン量は2.5kg/m³とした。ただし、限界値の違いが予測結果に与える影響については、今後検討していく予定である。

(2) 進展期の予測

進展期の予測は、かぶり2.5cmの鉄筋の腐食進行速度の計測結果をもとに⁶⁾、鋼材表面の腐食量がひび割れ発生限界値を超えるまでの期間を予測した。進展期における鋼材の腐食速度は式(2)および(3)によって表現した。

$$i = 0.025 \times C(d, t)^{1.5} \quad (2)$$

$$W_{spe} = i / (2F) \times [Fe(OH)_3] \times t_{corr} \quad (3)$$

ここに、 i : 腐食電流密度 (μA/cm²) , $C(d, t)$: かぶり d (cm) , 時刻 t (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m³) , W_{spe} : 腐食量 (g/cm²) , F : ファラデー定数 (=96500C/mol) , $[Fe(OH)_3]$: 水酸化鉄(Ⅲ)の分子量 (=106.9g/mol) , t_{corr} : 腐食発生限界塩化物イオン量を上回った時点からの経過年数を表す。

また、上記の式(3)にかぶりの影響を考慮して式(4)に示す係数を乗じた。

$$W = k \times W_{(spe)} \quad (4)$$

$$k = 1.0 \quad 3 \times D \geq d \quad (5)$$

$$k = 3 \times D/d \quad 3 \times D < d \quad (6)$$

ここに、 W : 実際の構造物の腐食速度, k : かぶりが腐食速度に及ぼす係数, D : 鉄筋径 (cm) , d : かぶり (cm) を表す。

進展期における腐食速度のばらつきは、環境条件やコンクリートの品質に影響されると考えられる。しかし現状において十分な情報がなく、今後もデータが蓄積される可能性が少ない。結果的にばらつきに対して物理的意味を持つ数値を設定することは難しいものの、劣化現象を表現でき、かつ実際と一致するよう見直すことも可能なように、ばらつきは上記式(4)によって得られた値を平均値とし、変動係数が1.0の正規分布と想定した。計算にあたっては、平均値、平均値±2σ、平均値±3σの5種類の値とその発生確率を用いて腐食量を計算した。

腐食ひび割れ発生時の腐食量は、かぶりと鉄筋径の影響を考慮に入れて式(7)により求めた⁷⁾。

$$W_{cr} = \frac{0.02d}{3D} \quad (7)$$

ここに、 W_{cr} ：腐食ひび割れを発生させる鉄筋の腐食量(g/cm^2)、 d ：かぶり(cm)、 D ：鉄筋径(cm)を表す。

(3) 加速期の予測

腐食ひび割れ発生後の鉄筋の断面減少率は式(8)にて計算した⁸⁾。

$$V_{reduction} = \frac{4ac}{\phi\gamma_{Fe}} e^{\frac{\alpha}{a}t} \quad (8)$$

ここに、 $V_{reduction}$ ：断面減少率(%)、 γ_{Fe} ：鉄筋の単位体積重量($=7.85\text{mg}/\text{mm}^3$)、 a ：腐食量とひび割れ幅を関連づける係数($=1.5\text{mg}/\text{mm}^2$ と仮定)、 c ：腐食による初期のひび割れ幅($=0.05\text{mm}$ と仮定)、 ϕ ：鉄筋径($=16\text{mm}$)、 α ：腐食速度とひび割れ幅を関連付ける係数($=0.22\text{mg}/\text{mm}^3/\text{年}$ と仮定)、 t ：腐食ひび割れ発生後からの年数を表す。

劣化が進行するとばらつきは拡大してくるため、予測精度も低下する。そこで、ここでは、上記式(8)によって得られた断面減少率を平均値とし、変動係数を1.0とした正規分布を仮定した。計算に当たっては、平均値、平均値 $\pm 2.5\sigma$ の3種類の値とその発生確率を用いて腐食量を計算した。

4. 劣化予測計算結果の例

(1) 計算に用いた調査データと設定値

計算例は17年が経過した栈橋で、劣化調査の結果では一部に劣化が確認されるものの、それほど激しい劣化状態には至っていない。上記までの計算手順により、各劣化過程における劣化進行のばらつきを考慮に入れて構造物の劣化がどのように進行するか評価した結果を以下に示す。また、計算に使用したパラメータの値を表-2に示す。

(2) 床版の予測結果

図-5に計算結果を示す。グラフでは劣化状況の分類を、「劣化しない(潜伏期)：鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界値を超えない」、「腐食進行中(進展期)：コンクリート中で鉄筋腐食が進行しているが、まだ劣化は現れていない」、「腐食ひび割れ進行中：部材に鉄筋に沿った腐食ひび割れが発生し、内部の鉄筋が急速に腐食している状態」、

表-2 計算例に用いた各パラメータの設定値

		床版	梁
表面塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m^3)	データ数	4	8
	平均値	15.31	18.62
	標準偏差	7.31	4.20
見かけの拡散係数 D ($\text{cm}^2/\text{年}$)	平均値	0.28145	
	標準偏差	1.6160	
かぶり d (mm)	データ数	12	14
	平均 d_{ave}	70.0	70.0
	標準偏差 σ_d	10.5	14.9
ひび割れ発生限界腐食量 W_{cr} (mg/m^2)		24.6	19.4
かぶりが腐食速度に及ぼす係数 k		0.8	1.0

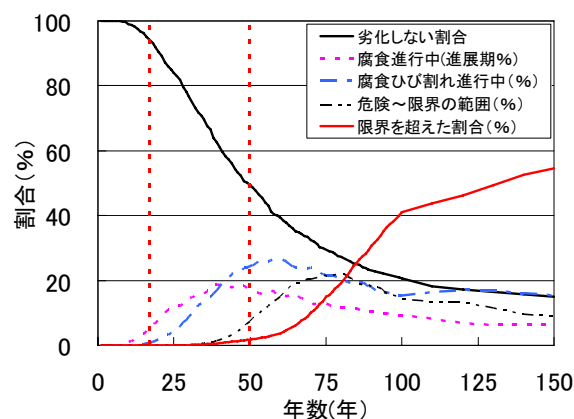


図-5 床版の劣化予測結果

「危険～限界の範囲：鉄筋の断面減少率が5%以上10%未満の状態、外観上危険な状態」、「限界を超える：鉄筋の断面減少率が10%以上になり、構造的に危険な状況」の5段階とした。

実際と同じ17年経過時の計算結果は、まだ大部分は劣化が顕在化していないが、5%程度の範囲で内部で鉄筋腐食が進行していると推測された。

建設50年後では、25%の部材に腐食ひび割れが見られ、10%の部材には「鉄筋の断面減少率が5%を超える」危険な状態になることが予測される。その時点で限界を超える割合は5%程度であり、床版の劣化により供用を停止する面積はそれほど大きくないと推測される。しかし、60年を超えたあたりから力学的に限界となる面積が急速に増加し、75年になると15%程度は力学的に限界となる可能性がある。

この予測では、面積的なばらつきを想定することができないが、一箇所でも力学的に限界を迎えた部材

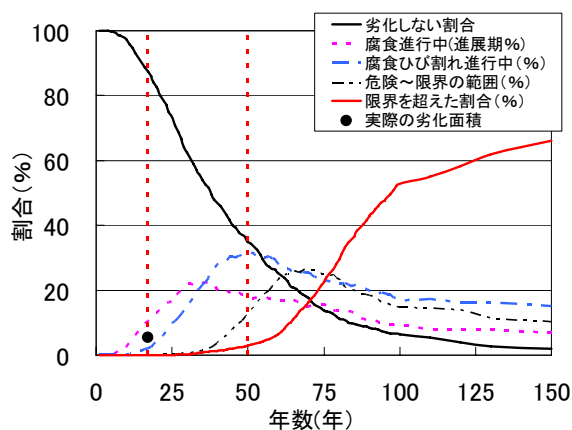


図-6 梁の劣化予測結果

があると、その周辺も含めて供用を制限する必要がある。明確に設定はできないが、例えば幅 0.8m の梁 1 本が力学的限界を迎えるとその梁と連続した床版の荷重分担幅 4m 程度が設計荷重に抵抗できない範囲と考えられる。したがって供用制限の観点から見ると、「鉄筋腐食により限界となった部材の面積」の 3 倍～5 倍程度の範囲が「供用が制限される面積」と考えられる。その場合には、50 年後では「 $5\% \times (3 \sim 5 \text{ 倍}) = 15 \sim 25\%$ 」が供用制限を受け、75 年後は「 $15\% \times (3 \sim 5 \text{ 倍}) = 45 \sim 75\%$ 」と構造物の大部分が床版の劣化により供用制限されると推測される。

(3) 梁の予測結果

梁の予測結果を図-6に示す。梁は、表-2に示すように床版よりも表面塩化物イオン濃度が高く劣化環境が厳しいために、腐食の進行は床版よりも速い。グラフでは「劣化しない割合」の曲線が床版に比較して立っており、計算結果でも床版に比較して腐食が速いことが分かる。

梁の場合も、建設後17年では90%以上で「劣化が顕在化していない」と計算される。さらに、全体の部材数の5%弱に腐食ひび割れが発生していると計算される。腐食ひび割れが発生していると補修する場合には断面修復の対象となる。実際の劣化面積が約5.4%であったことから、予測結果は実測値と整合する結果となった。

建設50年後では、「腐食進行中」が20%と、床版と比較して差は見られない。これは、塩化物イオン拡散係数とかぶりが床版と差がないことによると考えられる。また、30%の部材に腐食ひび割れが見られ、15%弱の部材には「鉄筋の断面減少率が5%を超える」危険な状態になることが予測される。その時点で限界を超える割合は5%程度である。全体では劣化しない割合が床版では50%あったのに対し、梁は

表-3 劣化状態と補修工法の組合せ

補修工法	劣化状態
塗装	潜伏期
電気防食	腐食進行中
断面修復	腐食ひび割れ進行中
補強	危険～限界の範囲
消耗材	電気防食設備等の更新

40%を下回る計算結果となった。建設75年後では先ほどの「供用が制限される面積」が「 $20\% \times (3 \sim 5 \text{ 倍}) = 60 \sim 100\%$ 」と構造物全体が床版の劣化により供用制限されると推測される。また、建設75年後以降において、床版、梁ともに劣化の進行速度が若干右下がりの低下傾向を保つという計算結果となった。

5. 劣化予測に基づく補修費用予測

(1) 計算方法

先の劣化予測では計算個数を1000個（実際の構造物のどの位置を指すか指定するものではない）としている。[予測される劣化数量＝実際の対象構造物面積×各劣化状態の割合]により補修面積が算定できるため、劣化数量の予測を行うことができる。さらに、上記の劣化予測数量に費用を乗じて劣化対策費が計算できる。

ここでは概算を検討するものであり、詳細には調査結果などのデータを用いて補修設計を行い費用を算出する必要がある。したがって、補修工法のデフレータと社会的割引率は”0”と仮定して算出した。

その他の計算条件は、床版は700m²、梁は2,300m²を対象面積と仮定し、劣化状態と補修工法の組合せは表-3のとおりとして検討を行った。

(2) 計算結果

最初の補修実施時期を変化させ、初期の補修費用とその後の建設100年間の維持管理費を合計した結果を図-7に示す。建設から10年程度は、対象構造物の多くを表面塗装補修で済ますことができ、建設20年後あたりから電気防食工法の適用が拡大すると推定される。現在17年経過しており、現時点で補修を実施した場合の内容としては「電気防食と塗装および一部の断面修復」により補修を行うことが可能であると推測された。またその場合のトータルコストは8億円程度である。

これに対し、建設50年後に初めて補修を行う場合は、断面修復や補強が増え、その場合のトータルコストは16億円程度となり、補修時期が遅れると余分

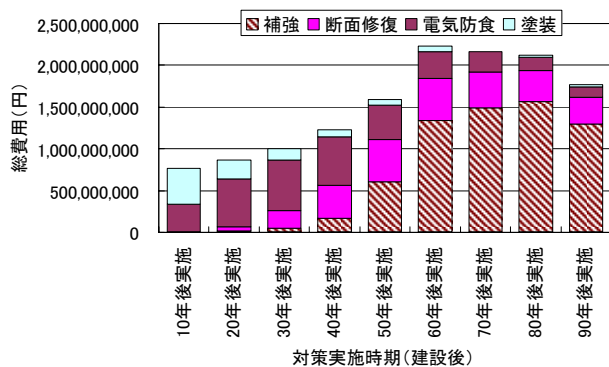


図-7 補修実施時期とトータルコスト

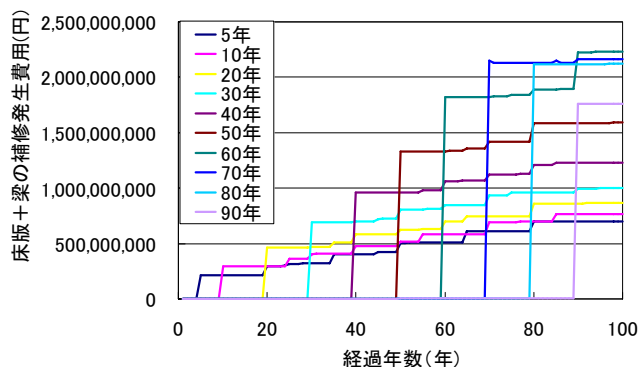


図-8 補修実施時期とそれ以降の発生費用の変化

なコストが発生する結果となった。経過年数にかかわらず最初の補修時期が後になるほどコストがかさむ傾向があることは明らかである。最初の補修時期が建設70年後以降は、合計金額が60年後実施に比較して下がっている。これは維持管理期間を100年として整理しているために、補修後の供用期間が30年を下回り、加算される費用が少ないためである。また、4章にて記述した対象構造物の半分以上が供用制限される可能性があるという観点を考慮する必要がある。つまり、この栈橋が生み出す便益が減少しているはずであり、栈橋の収益予測を併せて検討すべきであることがわかる。

建設後100年間を維持管理すると仮定した場合の、補修および維持管理に必要な費用の経年変化は、図-8のようになる。

建設後5年で補修を実施した場合、単年度で2億円の費用がかかり、その後維持管理費が積み重なって建設後100年でトータル7億の費用と推測された。初期の単年度費用はかかるものの、その後の単年度費用が低く抑えられ、平準化されていることがわかる。

建設後50年で補修を実施した場合、単年度で13億円の費用がかかり、その後維持管理費が積み重なって建設後100年でトータル16億の費用と推測された。

経過年数にかかわらず最初の補修時期が後になるほど補修する年の単年度費用が大きく、維持管理費用の平準化の点から好ましくない結果であることがわかる。

6. おわりに

劣化予測では構造物全体を評価することが必要であり、予測精度の向上には、調査データの質が重要な役割を担う。調査方法の注意点としては、劣化が進行している部分も健全部も全体を網羅した調査の確実な実施が必要である。

また、本予測手法の問題点としては、予測結果と実際の劣化状況の誤差が、調査データに起因するものか、それとも解析上の誤差なのかが不明であることである。この問題点を克服するためにも、更なるデータの蓄積が必要である。

現在は、劣化機構ごとの劣化予測に加え、ライフサイクルコストと構造物から得られる便益の変化をシミュレートできるプログラムを開発中である。

なお、これらは(独)港湾空港技術研究所との共同研究の成果の一部である。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.24-25，2002.3
- 2) (財)東京港埠頭公社：土木施設維持管理マニュアル，pp.77-79，2004.6
- 3) (財)土木研究センター：コンクリートの耐久性向上技術の開発，p.67，1989.5
- 4) (財)沿岸開発技術研究センター：港湾構造物の維持・補修マニュアル，pp.96～97，1999.6
- 5) 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，p.108，2001.1
- 6) 守分敦郎：鉄筋コンクリート栈橋上部工の塩害に対する耐久性評価と維持管理に関する研究，東京工業大学学位論文，1996.3
- 7) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書，p.106，1992.10
- 8) (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，p.11，1998.10