

# 栈橋上部工の劣化度予測手法について

石原慎太郎\*・根木貴史\*\*・宮島正悟\*\*\*

\* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

\*\* (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹

\*\*\* 前 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 所長

栈橋上部工の維持管理は、「事後保全」から「予防保全」に転換していくことで、計画的に実施していく必要がある。中部地方整備局管内で直轄により設置された栈橋上部工を計画的に維持管理できるよう、一般定期点検、詳細定期点検の方法を中心にまとめた「栈橋上部工点検マニュアル(案)」を作成した。本報告は、点検の実施手順、方法等、劣化度予測手法について検討した概要について述べるものである。

キーワード：栈橋上部工，維持管理，予防保全，定期点検，劣化度，塩害

## 1. はじめに

1960年代の高度経済成長期に建設された施設の多くは、建設されてから既に40年余が経過し、今後維持管理費用が急増していくことは確実である。このため、できる限り小さい負担で計画的かつ戦略的な維持管理を実施していくことが必要である。

維持管理計画を定める際には、設計段階における維持管理に対する考え方や重要度、点検補修の難易度等を踏まえて、図-1に示されている維持管理レベルを設定する必要がある。

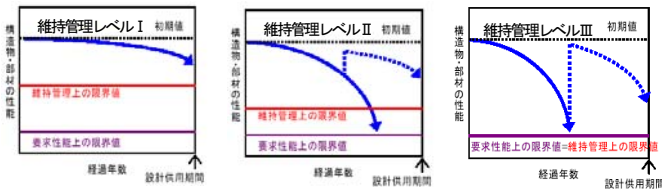


図-1 維持管理レベルの概念図

したがって、従来の「事後保全」から致命的な変状および劣化の発生を事前に防止する「予防保全」に転換し、計画的な点検を実施するため、技術基準対象施設の建設又は改良を行おうとする者が「維持管理計画等」を作成する方針とされており、当該施設の設置者が維持管理計画等を作成する必要がある。

本報告は、中部地方整備局管内において塩害等により劣化を生じやすい栈橋上部工コンクリートを対象に、点検の実施手順、方法等、劣化度予測手法について検討した概要について述べるものである。

## 2. 点検計画

予防保全の観点から、栈橋上部工コンクリートにおける変状および劣化を早期かつ合理的に発見するために、設計供用期間、材料特性、点検及び維持工事等の難易度などを考慮して、点検計画を策定する。

表-1に、一例として初回点検の結果より供用40年目に鉄筋腐食発生限界濃度に達すると推計された場合、中間年の20年目に詳細定期点検(塩化物イオン濃度の測定)を行う計画を事例として示す。なお、最初の詳細定期点検は20年目に行い、その間の5年目、10年目、15年目に一般定期点検(目視点検)を実施することとしている。

表-1 定期点検計画の一例

供用後	初回点検	一般定期点検	詳細定期点検
0年目	●		
1年目			
9年目			
10年目		○	
11年目			
19年目			
20年目		○	○

## 3. 初回点検

初回点検では、定期点検計画策定のため、新設構造物では設計資料等、既設構造物では塩化物イオン濃度の調査結果を基に、塩化物イオン濃度が鉄筋腐食発生限界濃度に達するまでの期間を推計する。

## 4. 一般定期点検

一般定期点検は、目視調査により各部材の劣化状況を把握し、詳細定期点検の見直しや維持工事等の必要性を判断するために実施するものである。点検の実施箇所は、栈橋上部工下面の全ブロックを対象とし、すべての部材(はり、ハンチ、床版)を実施する。

### 4.1 点検の実施項目および判定基準

栈橋上部工の点検の実施項目および判定基準は、鉄筋の腐食状況およびコンクリートの劣化状況（ひび割れ、剝離、剝落等）に着目して、表-2 に示す部材別劣化度判定基準により、床版、はり、ハンチの部材単位で行う。

表-2 部材別劣化度判定基準

判断基準	
a	<b>床版：</b> <input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50%以上ある。 <input type="checkbox"/> かぶりの剝離がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が広範囲に発生している。 <b>はり・ハンチ：</b> <input type="checkbox"/> 幅 3mm 以上の鉄筋軸方向のひび割れがある。 <input type="checkbox"/> かぶりの剝落がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が広範囲に発生している。
b	<b>床版：</b> <input type="checkbox"/> 網目状のひび割れが部材表面の 50%未満である。 <input type="checkbox"/> 錆汁が部分的に発生している。 <b>はり・ハンチ：</b> <input type="checkbox"/> 幅 3mm 未満の鉄筋軸方向のひび割れがある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が部分的に発生している。
c	<b>床版：</b> <input type="checkbox"/> 一方向のひび割れもしくは帯状又は線状のゲル析出物がある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が点状に発生している。 <b>はり・ハンチ：</b> <input type="checkbox"/> 軸と直角な方向のひび割れのみがある。 <input type="checkbox"/> 錆汁が点状に発生している。
d	<input type="checkbox"/> 変状なし。

### 4.2 点検結果の評価

点検の結果の評価は、栈橋上部工 1 ブロック毎の各部材の劣化度判定結果をもとに、マルコフ連鎖<sup>1)</sup>の考えを適用し、将来の劣化状況を推計し、劣化状況に応じ補修計画の検討、点検計画の見直し等を行う。

#### (1) 栈橋上部工の劣化進行モデル

栈橋上部工の劣化は塩害が主要因であるが、助序に劣化度が進行するものと考え、劣化現象の時間軸に沿った推移を把握することを目的とし、劣化進行モデルを導入する。

各部材の構造物全体の劣化予測には、徐々に劣化が進行する過程を表すモデルをして、マルコフ連鎖による確率論的モデルを適用し、一般定期点検診断結果をもとに、将来における劣化状況の推計を行う。

#### ① マルコフ連鎖による確率論的モデル

マルコフ連鎖による確率論的モデルとは、「状態」と「遷移（推移）」という 2 つの概念を用い、物事がある「状態」から、ある「遷移（推移）確率」で「次の状態」へと移行する様子を確率論的に捉える統計手法である。

この手法は、特に栈橋上部工に関する分析が実施され、実際の結果と予測結果（3年後）は比較的良く一致していることが確認されている。

ここで、対象構造物内での劣化度として、一般定期点検診断での判定結果（a, b, c, d）を用いて図-3 のように劣化度の遷移状況を表すことで、ばらつきを考慮した劣化度の予測が可能となる。すなわち、現時点からある一定期間が過ぎると、ある劣化度の部位はある遷移確率  $x$  で次の劣化度に移行し、移行しない残り  $(1-x)$  は同じ劣化度の状態に留まる。

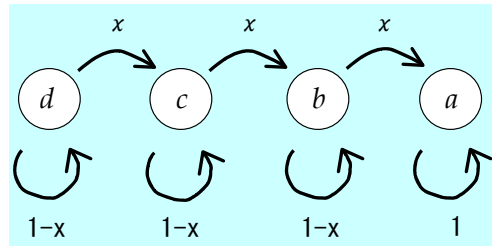


図-2 一般定期点検結果 abcd のマルコフ連鎖遷移図

単位時間を 1 年とし、 $t$  年間が経過した劣化度の分布は、図-2 で表したマルコフ連鎖の流れを  $t$  回分繰り返すこととなる。この劣化過程は式(1)で表される。

$$\begin{pmatrix} d \\ c \\ b \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \cdot \cdot \text{式(1)}$$

#### ② マルコフ連鎖による確率モデルの適用について

マルコフ連鎖による確率論的モデルは、図-3 に示すように遷移確率が小さく ( $X=0.01$ )、変状および劣化の進展がほとんどみられない d 判定が多い場合、経年の遷移変動が判別しにくい。よって、劣化度の遷移確率がある程度大きい場合でないと適用は難しい。図-4 に示しているように、遷移確率が  $X=0.02$  以上の場合であれば、経年の遷移変動が判別できることから、適用できる。

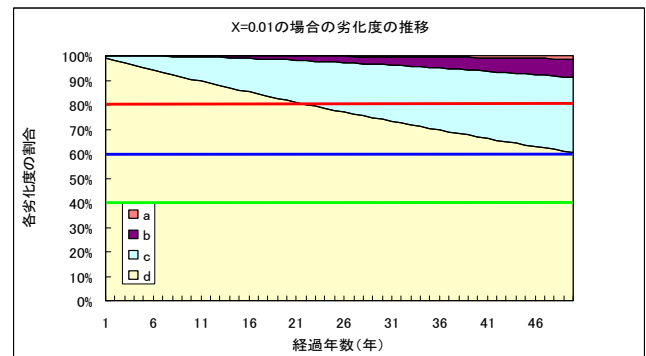


図-3 遷移率が小さい場合の劣化の進展

#### (2) 栈橋上部工を総合評価する際の留意点

厳しい海洋環境下に置かれた栈橋上部工は、塩化物イ

オンに起因する劣化による部材の性能の低下によって設計供用期間内に構造物の性能が要求レベルを下回る可能性がある。よって、構造物の性能が要求性能を下回ることがないように注意が必要である。

一般定期点検を総合評価する際、要求性能とされている施設の機能・安全性が、ブロック単位で損なわれているかどうかを評価する必要がある。よって、設計供用期間の性能低下をおこさせないように当初設計の時点で対処しておく維持管理レベルⅠを除き、予防保全を基にした維持管理レベルⅡ、事後保全を基にした維持管理レベルⅢに則した総合評価指標が必要となる。

(3) 劣化度推計結果の評価

各ブロック、各部材毎に劣化の進行状況は異なることから、各ブロックの各部材毎の劣化を評価単位として結果を整理する。表-3 に各ブロックに適用する劣化度の総合評価を示す。

総合評価については、名古屋港金城ふ頭の既往調査結果より算出した遷移確率は $X=0.02$ であったことから、図-4 に示すような遷移確率 $X=0.02$  および  $0.03$  が最も妥当な遷移確率だと仮定し、供用期間 50 年を目安として検討・設定した。

表-3 劣化度の総合評価

総合評価	ブロック毎の評価	各部位の結果		対応	
		はり	床版	維持管理レベルⅡ	維持管理レベルⅢ
A	施設の機能・安全性が損なわれており、緊急に対策の必要があると判断される場合	劣化度 a の部位が 20% 以上を占める	劣化度 a の部位が 20% 以上を占める	詳細調査を行い補修対策の実施	詳細調査を行い補修対策の実施
B	放置した場合、施設の機能・安全性が損なわれるおそれがあり、計画的な対策を実施する必要があると判断される場合	劣化度 a の部位数が 20% 未満かつ a + b の部位数が 30% 以上を占める	劣化度 a の部位数が 20% 未満かつ a + b の部位数が 50% 以上を占める		
C	施設の機能・安全性に係る異常は認められず、現状では対策の必要はないが、継続して観察する必要があると判断される場合	劣化度 a の部位数が 20% 未満かつ a + b の部位数が 30% 未満かつ a + b + c の部位数が 60% 以上を占める	劣化度 a の部位数が 20% 未満かつ a + b の部位数が 50% 未満かつ a + b + c の部位数が 60% 以上を占める	補修対策実施時期、対策工法の検討	当初の計画どおり点検を実施
D	異常が見られず、十分な機能・安全性を保有していると判断される場合	劣化度 d 以上の部位数が 40% 以上を占める	劣化度 d 以上の部位数が 40% 以上を占める	当初の計画どおり点検を実施	当所の計画どおり点検を実施

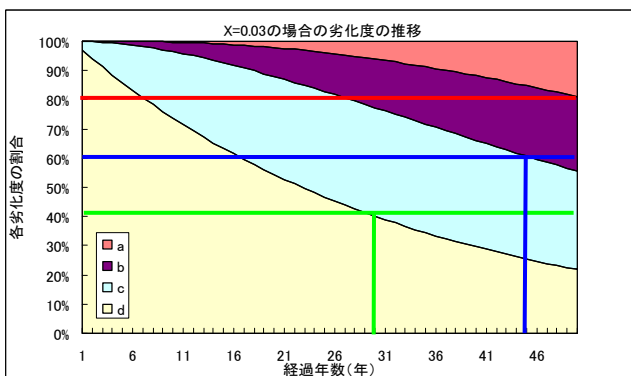
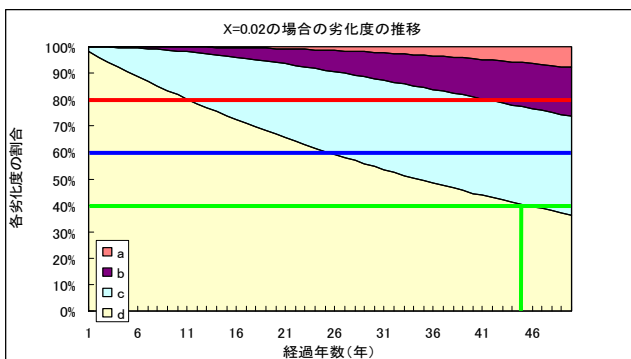


図-4 既往調査結果に近い遷移率での劣化度の推移

①総合評価Aについて

劣化度 a の部位が 20% に達するのは、遷移確率  $X = 0.02$  および  $0.03$  の場合も、50 年以降である。

設計供用期間を 50 年とすると、想定される遷移確率以内であれば、劣化度 a の部位が 20% を占めることはない。この劣化度 a の遷移をもとに、はり、床版ともに「劣化度 a の部位が 20% を占めた場合」を総合評価 A とする。

②総合評価Bについて

総合評価 B は、劣化度 a + b の部位に着目する。その際、劣化進行が異なる「はり」と「床版」で、評価基準を別々に設定する。

1) はりについて

「はり」は、構造上局部的なかぶり不足が発生しやすいため、劣化度 c までは進行しやすいものの、劣化度 b 以上は発生しにくいと考えられる。よって、劣化度 a + b の部位が 30% を占めた場合、総合評価 B とする。

2) 床版について

「床版」は、構造上面的なかぶり不足が発生しやすいため、劣化度 c から b への進行が進みやすいと考えられる。よって、劣化度 a + b の部位が 50% を占めた場合、総合評価 B とする。

③総合評価Cについて

総合評価Cについても、同様に考え、設定する。

④総合評価Dについて

総合評価Dは、劣化度dの部位に着目し、①～③以外の場合となる。

総合評価の設定は、明確の基準がなく、設計供用期間50年の期間で、現実的に管理できる数字に設定した。よって、今後、データが蓄積されて行くことにより、さらなる検討が必要になることも考えられる。

5. 詳細定期点検

詳細定期点検は、栈橋上部工のコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定し、鉄筋の腐食状況を調べるために行うので、一般定期点検のように全ての部位を対象として、詳細定期点検を実施することは合理的ではない。このため、前回までの点検結果や詳細定期点検の実施に先立ち、実施する全部位の一般定期点検結果をもとに、詳細定期点検の対象箇所を選定する。

なお、中部地方整備局管内においては、凍害、アルカリ骨材反応の事例が無く、また中性化も可能性が低いことから、塩害による劣化に絞っている。

5.1 詳細定期点検の実施箇所

詳細定期点検は、実施箇所に応じて費用が増大するため、前回までの一般定期点検結果および詳細定期点検前に実施する目視調査結果を踏まえて、詳細定期点検実施箇所を選定する。

(1) ブロックの選定

詳細定期点検の実施箇所は、箇所を絞ったミクロ的な調査になりデータのバラツキがあるため、比較的劣化が進行している栈橋上部工の中央部付近を中心として少なくとも1箇所以上、可能であれば3箇所以上実施する。

なお、周辺に既存の直杭式横栈橋が存在する場合には、その上部工の変状および劣化状況を参考に、最も陸側を含めた調査実施箇所を選定する。

詳細定期点検の実施箇所の設定イメージを図-5に示す。

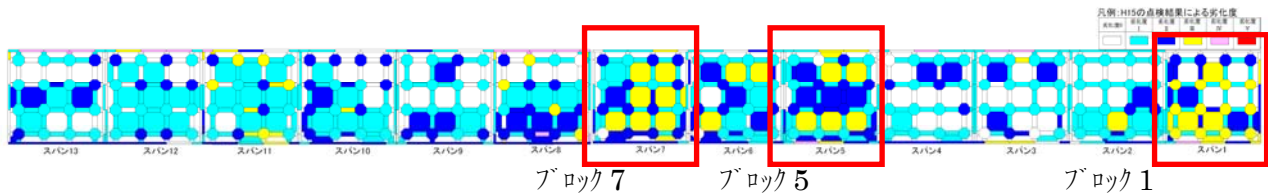


図-5 詳細定期点検の実施箇所(ブロック)の一例

(2) ブロック内断面方向での選定

詳細定期点検で実施する塩化物イオン濃度の測定箇所は、図-6に示すように塩化物イオン濃度の増加速度が速い「最も海側のはり(重要エリア)」を対象とすることを原則とする。これは、通常最も海側のはりが、気象・海象の影響により、飛来塩分を受けやすいからである。

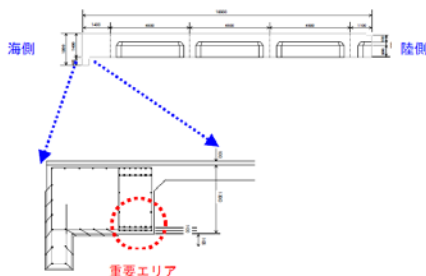


図-6 重要エリア(最も海側のはり)

以上の測定3箇所について、1箇所につき各3本、合計9本の試料を採取し、塩化物イオン濃度の測定を実施する。

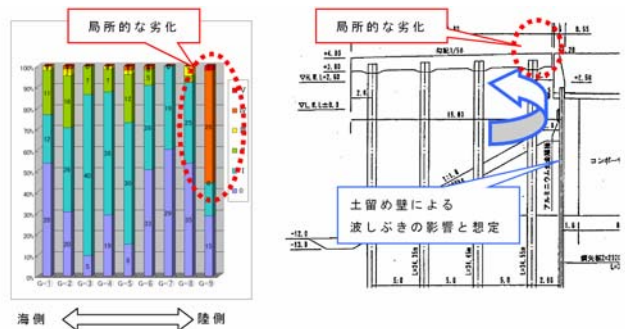


図-7 最も陸側のはりの劣化が著しい例

ただし、必要に応じて「最も海側の床版」、「最も陸側のはり」を対象とする。その理由として、図-7に示すように栈橋背後の護岸構造形状や捨石マウンドの形状により、最も陸側のはりに多くの塩分が飛来し、劣化著しい事例も見受けられたからである。

5.2 詳細定期点検の実施項目

詳細定期点検で実施する項目は、コンクリート中の塩化物イオン濃度、かぶり厚さについて調査することとする。なお、部位の特性や変状および劣化の状況を踏まえ「電気化学的な点検方法」を必要に応じて実施する。詳細定期点検で実施するコンクリート中の塩化物イオ



ン濃度, かぶり厚さから表面塩化物イオン濃度, 塩化物イオンのみかけの拡散係数, 鉄筋位置における腐食発生限界塩化物イオン濃度を推計し, 塩化物イオン濃度による劣化予測を実施する。

### 5.3 詳細定期点検の実施方法

詳細定期点検は, 栈橋上部工のコンクリートから採取した試料の塩化物イオン濃度から, コンクリート表面の塩化物イオン濃度及び塩化物イオンの拡散係数を算出し, 鉄筋の腐食発生時期を予測する。

塩化物イオンはコンクリート中の空隙を移動し, 拡散することから, 式 (2) に示すフィックの拡散方程式で表すことができる。

現地採取試料による塩化物イオン濃度の分析結果とフィックの拡散方程式より算出した予測値を比較することにより, 塩化物イオンの見掛けの拡散係数やコンクリート表面における塩化物イオン濃度から推計することが可能であり, 将来における塩化物イオン濃度の分布を推定することができる。これをもとに鉄筋位置における塩化物イオン濃度が  $2.0\text{kg/m}^3$  に達する時期を推計し, 鉄筋の腐食発生時期を予測する。

しかし, 栈橋上部工コンクリートの周辺環境は必ずしも一定ではなく, 推定の精度にはばらつきがあることに留意することとする。

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

ただし,

$C(x, t)$ : 表面からの深さ  $x$  (cm) の時刻  $t$  (年) における塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_0$ : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_i$ : コンクリート材料に当初から含まれていたと考えられる塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$D$ : コンクリート中で塩化物イオンの見かけの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )

$\operatorname{erf}()$ : 誤差関数

### 5.4 詳細定期点検結果の評価

詳細定期点検による塩化物イオン濃度の推計結果と当初に実施した予測結果とでは図-8 に示すように差異が生じる。よって, 双方の値を比較し, 以下に示す3ケースの劣化進行速度により今後の詳細定期点検計画の見直しを図るものとする。

- ①遅いケース: 当初計画のとおり。
- ②同程度のケース: 当初計画のとおり。
- ③早いケース: 次回実施する詳細定期点検を早める。

詳細定期点検は個別部材の劣化状況を把握することのための調査方法としては有効であるが, 施設全体の劣化状況を把握することは難しい。劣化が顕在化していない部材の内部劣化状況を把握する等目視点検結果と総合的に

判断し, 維持補修計画を検討する際の基礎資料として活用することが望まれる。

具体的には, 塩化物イオン濃度が  $2.0\text{kg/m}^3$  を超えているが, 劣化が顕在化していない部材が多い場合には, 一般定期点検計画の実施間隔を短くする, 予防保全対策を検討する等急激な劣化進行に対応できるよう配慮することが必要である。

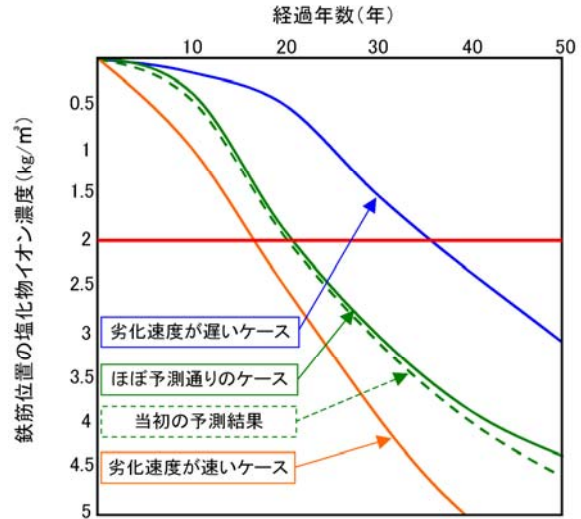


図-8 塩化物イオン濃度の予測と結果の比較

## 6. おわりに

栈橋上部工コンクリートの点検の実施手順, 方法等, 劣化度予測手法の検討にあたっては, マニュアルを作成することにより, できる限り小さい負担で計画的かつ戦略的な維持管理できるよう, 目視点検による一般定期点検により上部工の劣化を点検できるようにした。

今後, 港湾施設をはじめとする社会資本は, 新設する時代からメンテナンス時代へ変わっていく。このような情勢の中, 作成したマニュアルが栈橋上部工の効率よい維持管理に役立てば幸いである。

## 7. 謝辞

栈橋上部工コンクリートの点検の実施手順, 方法等, 劣化度予測手法の検討にあたっては, ご指導いただいた東洋大学 福手勤教授をはじめ, 栈橋上部工の点検マニュアル作成委員会の委員および関係者各位に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 小牟禮建一・濱田秀則・横田弘・山路徹著, R C 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, 港湾空港技術研究所報告, No. 41, Dec, 2002.