

論文

[1112] RC栈橋の最適検査期間の一考察

正会員○松島 学(東電設計技術開発本部)

正会員 関 博(早稲田大学理工学部)

正会員 金子雄一(東電設計第二土木本部)

正会員 松井邦人(東京電機大学理工学部)

1. はじめに

海洋構造物は塩害による劣化が問題 [1] となり、定期的な点検が必要である。構造物の耐用期間内に行われる検査回数は、その検査回数が多くなれば必要以上の検査費用が必要となり、逆に、その回数が少ないと構造物の重大な劣化レベルを見落とすことになり、多大の補修費用を要することになる。この問題は、検査費用と補修費用のトレードオフとなる。

本研究は、対象をコンクリート構造のくい式栈橋とし、その定期点検の最適検査期間の間隔を期待費用最小 [2] の方法により求めるものである。くい式栈橋は、各構成部材の中でスラブが一番劣化が問題となることが想定される。そのため、スラブの最適検査期間の間隔を求めることが、他の構成部材の最適検査の間隔をも満足することが考えられる。ここでは、このスラブに注目して、栈橋の最適検査期間の設定手法を提案するものである。

2. 栈橋の劣化モデル

(1) 対象構造物

対象とした構造物は図-1に示すRC構造の栈橋とする。図にみられるように、このスラブはH.W.L.より上に位置しており、環境状態としては飛沫帯と区分される。

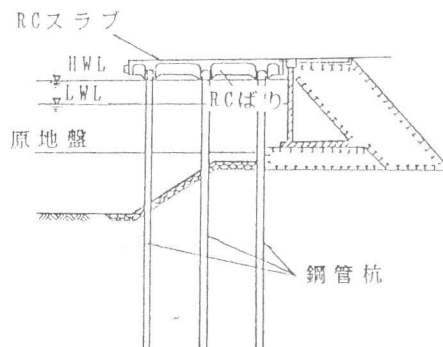


図-1 対象構造物

(2) 劣化モデル

栈橋の劣化モデルは図-2に示されるように、2つの折れ線の関数で示されるものとした。図中で0~Aは外部からの塩素イオンの侵入や空気中の炭酸ガスにより中性化等の影響により不動態皮膜が破壊され鉄筋の腐食が開始されるまでの時間 t_m である。この期間は外部に劣化の現象はほとんど見られない潜伏期間である。A点を越えると、腐食により鉄筋が膨張し、鉄筋に沿ったひびわれが発生する。その後、表面コンクリートの剝離・剝落と続き、劣化が徐々に進み破壊へと進展する。したがって、竣工 t 年後の栈橋の劣化レベルの評価は式(1)の1次式で表されるものと仮定した。ただし、 $a_0=0.5$ とする。

$$y_D(t) = \begin{cases} a(t-t_m) + a_0 & t_m < t \\ a_0 & t_m > t \end{cases} \quad (1)$$

関数 $y_D(t)$ の値と各劣化レベルの関係を表-1のように設定する。『劣化防止・補修マニュアル(案)』

[3]によると、目視による外観調査から劣化程度の評価項目は、レベル0~Vの区分で設定されている。評価項目は鉄筋の腐食、ひびわれおよび剝離で、目視調査により各項目の劣化レベルを判断し、総合評価はその内最大劣化レベルを採用するものである。式(1)で劣化程度がモデル化されるとすると、 τ 年後の劣化レベル L を対数正規分布 $f_R(L | \tau = \tau_0)$ の式(2)で表される。

$$f_R(L | \tau = \tau_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \xi \cdot L} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln L - \lambda(\tau_n)}{\xi} \right)^2 \right] \quad (2)$$

ここで、 $\lambda(\tau_n)$ および ξ は式(3)で表される。

$$\begin{aligned} \lambda(\tau_n) &= E[\ln L] = \ln(y_D(\tau_n)) \\ \xi &= \text{Var}[\ln L] = \ln(1.0 + \delta_D^2) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 δ_D (σ_L/L : L は平均値、 σ_L は標準偏差である)は、竣工 t 年後での劣化度の推定誤差の変動係数である。本研究は劣化度が進むにつれて、そのばらつきは大きくなると仮定して、変動係数一定のモデルを考えた。

τ_n は、劣化レベルを計算するための期間である。本研究は、補修により劣化レベルをレベル0まで下げることができると仮定する。しかし、そのように下げることができたとしても、図-2のA点までで、それ以下の状態(例えば、0点まで)には回復しないものとした。これは、いくら補修をしたとしても、コンクリート内部の塩分を除去することは、一般的な補修では不可能と考えたからである。

表-1 関数 $y_D(t)$ と各劣化レベルの関係

損傷レベル	$y_D(t)$ の範囲
0	0.0~1.0
I	1.0~2.0
II	2.0~3.0
III	3.0~4.0
IV	4.0~5.0
V	5.0~

(3)劣化開始時間 t_m の決定

本研究は、劣化を外部からの塩素イオンの浸透問題と考える。この問題を式(4)に示すFickの拡散方程式で表すことが出来るものと考え、A点は式(4)で計算された塩分量 C の値が鉄筋の不動態皮膜を破壊する限界の塩分量 C_{limit} を越え、鉄筋の腐食が開始される時間 t_m と定義した。

$$C = C_0 \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x_t}{2\sqrt{D \cdot t_m}} \right) \right] \quad (4)$$

ここで、

C :鉄筋近傍の塩素イオン量(kgf/m³)

x_t :鉄筋のかぶり(cm)

D :拡散係数(cm²/sec)

C_0 :表面の塩分量(kgf/m³)

erf(·)は誤差関数である。

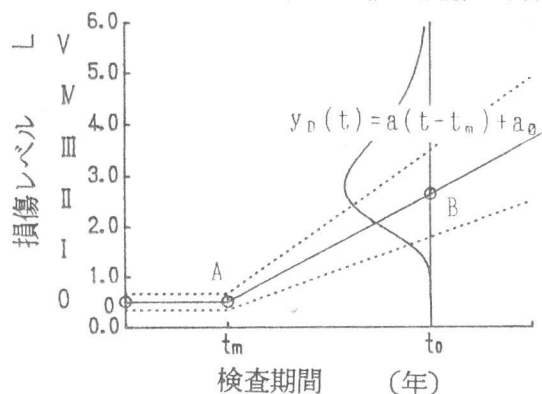


図-2 劣化モデルの概念

対象とする既設の栈橋の床板のかぶりは $x_t=6$ cmである。ここで問題となるのは、拡散係数と表面の塩分量である。コンクリートコアなどの塩分分析を行った場合、表面濃度と言えは表層部の平均イオン濃度を指すことが多いが、上記のような拡散方程式を利用する場合は文字通り表面濃度を意味する。本研究での対象栈橋のスラブは、H.W.L.より上に位置しており、飛沫帯に位置しており波飛沫を繰り返しかぶることが考えられる。そのため、表面の付着した海水は濃縮されることが想定される。大即ら[4]は、全国96箇所の栈橋施設を対象に、コンクリートの拡散係数と表面濃度を調査している。その値をまとめると、表-2のようになる。これによると、拡散係数は最大で $D=18.0 \times 10^{-8}$ cm²/sec、最小で $D=0.5 \times 10^{-8}$ cm²/secであり、表面塩分量は最大で $C_0=39.73$ kgf/m³、最小で $C_0=0.37$ kgf/m³である。本研究ではこれらの平均値を採用することで、

表-2 栈橋の拡散係数と表面濃度の調査結果

項目	拡散係数 (cm ² /sec)	表面塩分量 (kgf/m ³)
平均	4.58×10^{-8}	8.17
標準偏差	4.42×10^{-8}	7.76

$D=4.85 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$, $C_0=8.17 \text{ kgf/m}^3$ と設定した。また、限界の塩分量を $c_{\text{limit}}=1.0 \text{ kgf/m}^3$ と仮定した。その結果、 $t_m=5.25$ となり、以降の計算では $t_m=5$ 年と仮定した。

(4) 劣化速度の係数 a の決定

既住の栈橋での塩害調査での結果から、劣化速度の係数 a を決定するものとする。収集した既住の栈橋の調査データは全26個で、その劣化レベルの区分を表-3に示す。ただし、調査した栈橋の竣工から調査した時までの年数は、 $t_0=25$ 年である。この時の劣化レベルの分布は、式

表-3 既住の調査での栈橋の劣化レベル ()内は比率

損傷レベル L	データ数 n	$y_D(t)$ の範囲
0	0	0.0~1.0
I	8(0.31)	1.0~2.0
II	6(0.23)	2.0~3.0
III	12(0.46)	3.0~4.0
IV	0	4.0~5.0
V	0	5.0~

(2)を使い、表3のデータから平均値 $\bar{L}=2.65$, 標準偏差 $\sigma_L=0.86$ となり変動係数 $\delta_D=0.32$ となった。したがって、式(1)の係数 a の値は0.133となった。

3. 最適検査期間の求め方

耐用期間内におこなわれる検査回数は、その検査回数が多くなれば必要以上の検査費用が必要となり、逆に、その回数が少ないと構造物の重大な劣化レベルを見落とすことになり、多大の補修費用を要することになる。このような問題は、検査費用と補修費用のトレードオフとなり、本研究では期待費用最小の手法を用いて最適検査期間の間隔を求めることとする。

耐用期間 T_m 内に間隔 τ で検査するものとする、耐用期間内の検査回数は式(5)で表される。

$$n_s = T_m / \tau \quad (5)$$

耐用期間内に n_s 回の検査を行うときの総期待費用 C_T は、式(6)で表される。

$$C_T = C_I + C_R \quad (6)$$

ここで、 C_I は耐用期間内に n_s 回の検査をすることによる費用である。一回の検査費用を I_s とすると、検査費用は式(7)で表される。

$$C_I = I_s \cdot n_s \quad (7)$$

C_R は検査結果から判断された劣化レベルに基づいた期待補修費用である。この費用は検査ごとに期待補修費用を計算し、耐用期間までの合計したものである。図-3に検査と期待補修費用のフローを示す。この図で、 $P_{n,i}$ は、事前までのノードの発生確率を考慮しない当該ノードでの発生確率である。そして、 $P_{n,i}$ は、事前までのノードの発生確率を考慮した当該ノードでの発生確率で、検査 $n-1$ 回目の発生確率 $P_{n-1,i}$ と当該検査 n 回目の発生確率 $P_{n,i}$ で計算される。yesは補修をすることを、noは補修をしないことを意味する。各ノードでは図にみられるように補修をするかしないかの決定がなされる。例えば、ノード12で補修をする場合にはノード23に、補修をしない場合にはノード24の状態に移動する。このように、検査が進むに連れて、その場合分けが増えて行き、検査が n 回目の時にはノードの数は 2^n になる。ノード23での期待補修費用は、ノード12では補修をしなかったので、ノード23での劣化レベルの計算期間はノード00からノード23までの期間 $\tau_{23}=\tau_1+\tau_2$ で計算することになる。しかし、ノード35では、ノード23で補修をしているので $\tau_{35}=\tau_3$ となる。また、補修をしないノード22,24での期待補修費用はゼロとなる。 n 回目の検査での補修期待費用は、 n 回目の各ノードの 2^n 個の各期待補修費用を足し合わせることで求める。そして、

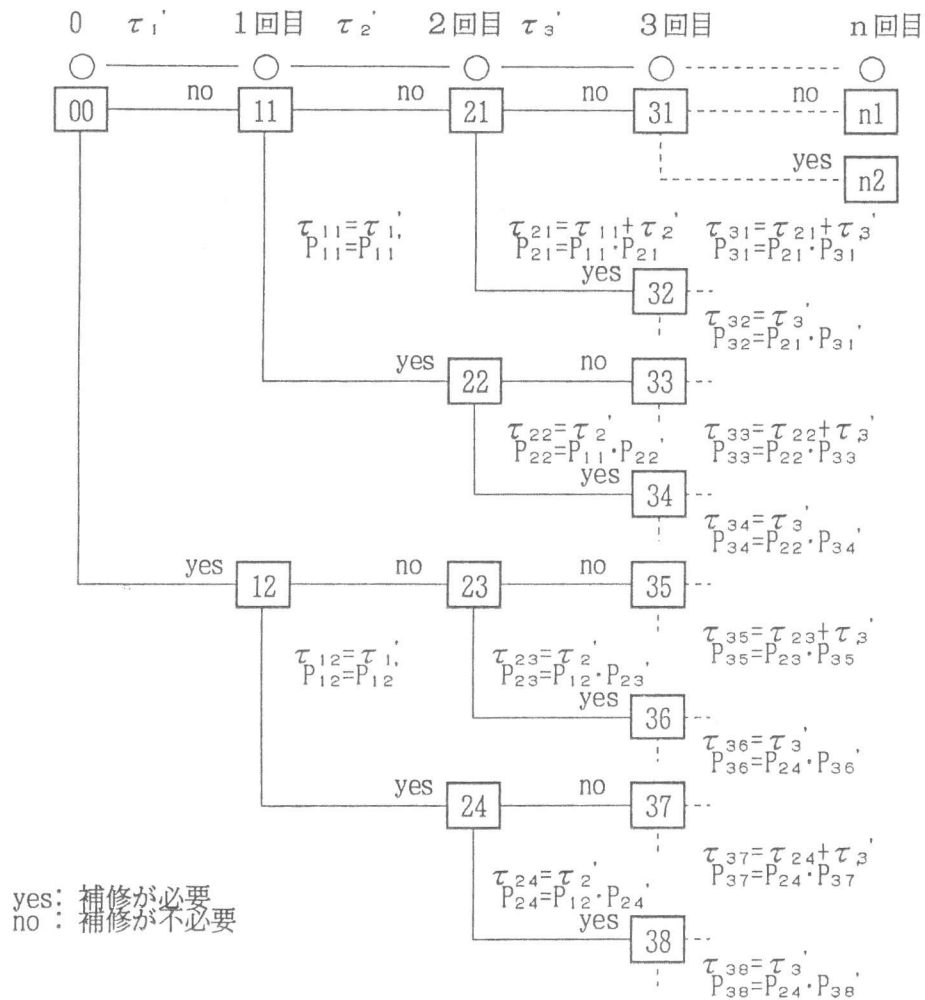


図-3 検査と補修の有無の関数のツリー

この値を検査終了までを足し合わせることで、期待補修費用 C_R が求められる。したがって、期待補修費用 C_R は、式(8)で表される。

$$C_R = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n \text{sign}(i) \cdot P_{n-1, K(i)} (L < M \mid \tau = \tau_{n-1, K(i)}) \cdot \sum_{L} C_{RL} \cdot P_{n, i} (L \mid \tau = \tau_{n, K(i)}) \quad (8)$$

ここで、 L は劣化レベルである。ただし、 $P_{n-1, K(i)} (\cdot)$ は、 $n=1$ のとき1.0とする。 $\text{sign}(i)$ は i が偶数の時=0.0、奇数の時=1.0の値を取る関数と定義する。この関数で i が偶数の時は検査 n 回目で補修をしない場合であり、 i が奇数の場合は補修をする場合を意味する。 $K(i)$ は i の関数であり、 $K(i) = \text{ifix}((i-1)/2) + 1$ で表される。 $\text{ifix}()$ 内の値を整数として取り出し、小数点以下の値は切り捨てる関数と定義する。 $K(i)$ が奇数の時は検査 $n-1$ 回目の時に補修をした場合で、偶数の場合は補修をしなかった場合を意味する。したがって、検査 n 回目での劣化レベルの計算の間隔 τ は、 $K(i)$ が奇数の場合では $\tau_{n, i} = \tau_{n-1, K(i)} + \tau_n'$ となり、偶数の場合では $\tau_{n, i} = \tau_n'$ となる。 $L < M$ は $\text{sign}(i)=0.0$ の時に $L < M$ 、 $\text{sign}(i)=1.0$ の時に $L \geq M$ とする。 M は補修をしなくてはならない最低劣化レベルである。これは、前者は補修をしない確率を意味し、後者は補修をする確率を意味する。 $P_{n-1, K(i)} (L < M \mid \tau = \tau_{n-1, K(i)})$ は、当該検査 n 回目より前の検査 $n-1$ 回目のノード $K(i)$ での発生確率で式(9)で表される。

sign(K(i))=1.0の場合

$$P_{n-1, k(i)} (L < M | \tau = \tau_{n-1, k(i)}) = P_{n-2, k(k(i))} (L < M | \tau = \tau_{n-2, k(k(i))}) \cdot \int_{L=3.0}^{\infty} f_B (L | \tau = \tau_{n-1, k(i)}) dL$$

sign(K(i))=0.0の場合

$$= P_{n-2, k(k(i))} (L < M | \tau = \tau_{n-2, k(k(i))}) \cdot \int_{L=0}^{L=3.0} f_B^0 (L | \tau = \tau_{n-1, k(i)}) dL \quad (9)$$

同様に、 $P_{n, i'} (L | \tau = \tau_{n, i})$ は各劣化レベルLの発生確率として式(10)のように表される。

$$P_{n, i'} (L | \tau = \tau_{n, i}) = \int_{L=0}^{L+1.0} f_R (L | \tau = \tau_{n, i}) dL \quad (10)$$

ただし、 $L=5.0$ の時、 $L+1.0$ は $+\infty$ を取る。 C_{RL} は劣化レベルLの補修費用であり、式(11)に示す線形式で表されるとした。

$$C_{RL} = \eta(L) \cdot C_0 \quad (11)$$

ここで、 $\eta(L)$ は、補修費用のモデルの係数で、劣化レベルLの関数である。式(6)に式(7), (9), (10), (11)を代入すると、総期待補修費用は式(12)で表される。

$$C_T = I_s \cdot n_s + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n \text{sign}(i) \cdot P_{n-1, k(i)} (L < M | \tau = \tau_{n-1, k(i)}) \cdot \sum_{L=3}^5 \eta(L) \cdot C_0 \cdot P_{n, i'} (L | \tau = \tau_{n, i}) \quad (12)$$

ここで、 I_s と C_0 の関係を $I_s = \alpha \cdot C_0$ と置くと、式(12)は式(13)のように無次元量 β_T で表される。

$$\beta_T = C_T / C_0 = \alpha \cdot n_s + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n \text{sign}(i) \cdot P_{n-1, k(i)} (L < M | \tau = \tau_{n-1, k(i)}) \cdot \sum_{L=3}^5 \eta(L) \cdot P_{n, i'} (L | \tau = \tau_{n, i}) \quad (13)$$

最適な検査期間の間隔 τ_{opt} は、 β_T を最小とする時の τ を選択することで求められる。

$$\text{find: } \tau_{opt} = \text{opt. } \{\tau\} \text{ such that min. } \{\beta_T\} \quad (14)$$

具体的な数値計算では、上記の方法で計算すると $\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n$ 回の計算回数が必要となる。このような膨大な計算回数は経済的な観点からみても不可能である。そのため各ノードで期待費用の計算回数を減ずる必要がある。本研究ではn回目の検査での各ノードの最大発生確率の値に対して、1%未満のノードをn+1回目以降の計算では無視し、その値を各ノードに均等に分担させ、各検査回数での確率和が1.0になるように調整した。このようにすることで、計算回数を減ずることができ、実用的な計算時間となる。

4. 最適検査の間隔

3., 4. で設定されたモデルを用いて、総期待費用最小の手法により最適検査の間隔を求めることとする。対象構造物の耐用期間は50年とした。検査費用 I_s と劣化レベルIV（補強または重大な補修）での補強費用 $1.0C_0$ との比 α を既往の実績から $\alpha=0.03$ とした。また、補修費用モデルの係数 $\eta(L)$ の値を表-4のように仮定した。『劣化防止・補修マニュアル（案）』[3]によると、劣化レベルが小さいI, IIでは補修はしないものと考えており、ここでは補修費用は0.0とした。そして、劣化レベルがIII, IV, Vとレベルが大きくなるにつれて指数的に増大すると考えた。劣化レベルVを越えると、建て替えるものとして、大きな費用が必要であると考えた。図-4に検査間隔2

年の経過年数に
対する検査費用
と期待補修費用
の累積値を示す。
図より竣工後20
年程度まではほ
んど期待補修
費用は必要では
なく、その後増
加しているのが

わかる。このように、ここで仮定し
た検査期間一定と考えるよりも、初
めの20年は検査回数を20年以降より
も少なくすることにより、総期待補
修費用の無次元量 β_T を少なくするこ
とができる。 β_T と検査期間の関係を
図-5に示す。さらに、同図には、検
査費用と期待補修費用の累積値も示
す。図にみられるように、全検査費
用は検査回数が少なくなるにつれて
小さくなり、逆に、全期待補修費用は大
きくなる。この値の総和が β_T であり、ピ
ーク値が見られ、図では2年が最適検査期
間の間隔となる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、奥村敏
恵 東京大学名誉教授から常に適切な助
言をいただきました。また、東京電機大
学卒論生の佐藤直俊氏には、計算に協力
をいただきました。ここに深く感謝致し
ます。

参考文献

- [1] 小林一輔：コンクリート構造物の耐久性，コンクリート工学，Vol. 23, No. 2, pp. 4~12, Feb., 1985.
- [2] Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang (伊藤学, 亀田弘行訳)：土木建築のための確率・統計の応用, pp. 53~82, 丸善, 昭和63年1月30日.
- [3] 港湾コンクリート構造物の劣化防止・補修に関する技術調査-劣化防止・補修マニュアル(案)-, 昭和62年9月, (財) 沿岸開発技術センター
- [4] 大即信明, 森良生, 関 博：海洋環境下におけるコンクリート中の塩素に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第332号, 1983年4月, pp107-118

表-4 補修費用と劣化レベルの関係

劣化レベル	適用範囲	補修費用	補修項目
O	0.0~1.0	0.0	補修をしない。
I	1.0~2.0	0.0	補修をしない。
II	2.0~3.0	0.0	補修をしない。
III	3.0~4.0	$0.3C_0$	補修をする。
IV	4.0~5.0	$1.0C_0$	補強または多大な補修をする。
V	5.0~6.0	$1.5C_0$	多大な補強をする。
V以上	6.0~	$20.0C_0$	建て替え, 使用できないことによる費用も考慮。

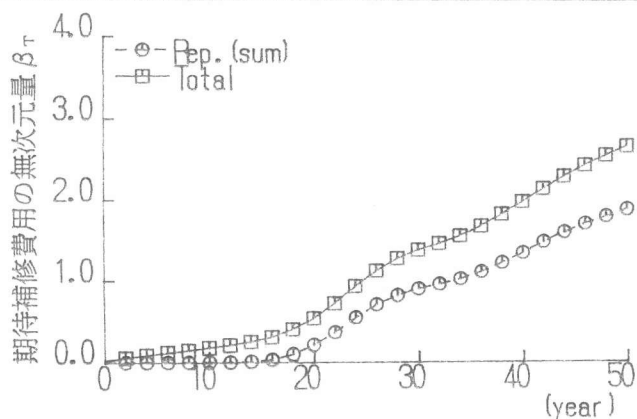


図-4 検査費用と期待補修費用の累積値の例

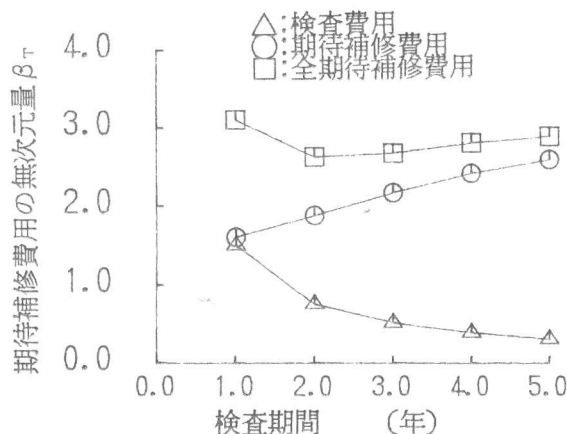


図-5 最適検査期間の決定