

# 福井県内の既存橋梁の劣化予測および最適補修戦略

谷 脇 一 弘 \*

## Deterioration forecasting and optimum maintenance strategy for bridges in Fukui prefecture

Kazuhiro Taniwaki

In this study, the applicability of bridge deterioration forecasting method, which is developed by the Markovian transition probability model in cooperate with the exponential hazard model, is discussed for bridges in Fukui prefecture. Furthermore, an optimal maintenance strategy which can determine the optimal scheme of repair considering life-cycle cost is proposed for bridges in Fukui prefecture. The strategy is developed by using the Markovian transition probability model and mathematical programming. The usefulness and effectiveness of the strategy are demonstrated in the numerical example.

### 1. はじめに

近年、社会資本整備のための資源が極めて限られた状況にあり、橋梁の建設においても、初期建設費をできる限り節約した橋梁構造物が要求されるとともに、橋梁をより長期にわたり有効に利用することが求められている。そのため、各地方公共団体は、耐用年数が50年の橋梁を適切な維持管理により100年まで長寿命化を行うための策定を行うことが義務付けられている。最適な維持管理計画を行うためには、橋梁の点検結果に基づく健全度の評価、劣化の予測、ライフサイクルコストの推定、最適戦略の決定の手順を踏まなければならない。橋梁の維持管理分野における研究としては、主に劣化の予測および最適補修戦略の決定法に重点が置かれている。劣化の予測方法としては、橋梁の部材に対して劣化のメカニズムが明らかにされつつあり、力学モデルを用いた劣化の予測方法も提案されている<sup>1)</sup>。近年では、マルコフ推移確率を用いて劣化を推定する方法が着目されており、貝戸らは<sup>2)</sup>ニューヨーク市の橋梁の検査データを用いてマルコフ推移確率行列を推定する方法を提案している。津田らは<sup>3)</sup>、ハザードモデルに基づいてマルコフ推移確率を推定する方法を提案している。この方法は、個々の橋梁の特性を考慮して劣化過程を表現することができることから、汎用性があり操作性に優れており本研究でも採用している。青木らは<sup>4)6)</sup>、劣化過程をさらに厳密に表現するためにワイブル型ハザードモデルを用いた被斉次モデルを提案し、トンネル照明灯具の維持管理の方法を提案している。

一方、最適補修戦略の決定法に関しては、多量の橋梁の点検データを取り扱うため最適化手法の利用無しでは困難であり、これまで主にGAを用いた方法の有効性が示されている。中村らは<sup>7)</sup>、1つの橋梁の最適維持管理問題を経済性最小化と品質指標最大化の多目的組合せ最適化問題として定式化し、GAおよびIAを用いて解き有効性を示している。近田らは<sup>8)</sup>、限られた予算内で最大の補修効果をもたらす橋梁補修パーツの選定をウイルス進化型GAを用いて決定している。古田らは<sup>9)</sup>、橋梁を管理する機関のLCC、橋梁の利用者のLCC、補修工法の損傷橋梁と周辺環境への適用度を目的関数とした多目的組合せ最適化問題として取り扱い、パレート保存戦略を取り入れたGAを用いて最適解を決定している。この研究において、床版の劣化の推定をマルコフ推移確率を用いて行い、マルコフ推移確率をファジーラーニングとクラシファイアを用いて更新する方法を提案している。貝戸らは<sup>10)</sup>、半永久的に橋梁を維持管理する仮定のもとで、マルコフ推移確率を用いて計算される期待累積費用最小化問題を平均費用最小化モデルとして定式化し、Howardの政策改良法を用いて補修戦略を決定している。

本研究では、多量の点検データを考慮して耐用年数を100年まで考慮した場合のライフサイクルコストを最

\* 建設工学科土木環境工学専攻

小化する最適補修回数, 補修時期を決定することができる最適補修戦略の決定法を確立することを目的とするものである。本研究の方法では, まず津田らの方法によりマルコフ推移確率を決定し, この推移確率を用いて期待累積ライフサイクルコストを求め, 1 橋梁に着目した場合の期待累積ライフサイクルコストを最小化する最適な補修回数および補修時期を数理計画法を用いて決定している。計算例において, ハザードモデルによるマルコフ推移確率を用いて劣化を推定する方法を福井県内の橋梁の床版の劣化予測に適用し基本的考察を述べるとともに, 最適な補修回数および補修時期決定法を福井県内の橋梁に適用し, 有効性を明らかにしている。

## 2. ハザードモデルによる橋梁の健全度の推移確率

対象とする橋梁の健全度を1~ $J$ に区分し,  $J$ が最も劣化が進行した状態と仮定する。橋梁の劣化の推移は, 時点 $t$ で健全度 $i$ であったときに, 次の時点 $t+1$ に健全度 $j$ に推移する確率が, 状態 $i$ に到達する前の履歴によらず, 定常的に推移していくマルコフ過程で表現できるものとする。橋梁の健全度の推移は, 式(1)の推移確率 $\Pi$ を用いて確率的に表現することができる。

$$\Pi = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \cdots & \pi_{1J} \\ 0 & \pi_{22} & \cdots & \pi_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \pi_{JJ} \end{bmatrix} \quad \text{ここに, } \sum_{j=1}^J \pi_{ij} = 1 \quad (1)$$

ただし,  $\pi_{ij}$ は健全度 $i$ から $j$ へ推移する確率を示している。

$\Pi$ は1年後の推移確率であるとして $t$ 年後の健全度の状態ベクトル $\mathbf{S}(t)$ は $\mathbf{S}(t) = \Pi^t \mathbf{S}(0)$ により得られる。

ハザードモデルを用いた推移確率の要素の計算は文献2)に詳述されているので, ここでは要点のみ記す。橋梁の部材の健全度が $i$ から $i+1$ へと変化する確率は, 健全度 $i$ の寿命を確率変数 $\zeta_i$ で表し, 確率密度関数 $f_i(\zeta_i)$ , 分布関数 $F_i(\zeta_i)$ に従うものと仮定する。健全度 $i$ の寿命が $t_i$ 年以上となる確率 $\tilde{F}_i(t_i)$ は式(2)で与えられる。

$$\tilde{F}_i(t_i) = 1 - F_i(t_i) = 1 - \int_0^{t_i} f_i(\zeta_i) d\zeta_i \quad (2)$$

ここで, 部材の健全度が $t_i$ 年まで状態 $i$ で推移し, 期間 $[t_i, t_i + \Delta t_i]$ の間に水準 $i+1$ へと変化する条件付確率は次式で与えられる。

$$\lambda_i(t_i) \Delta t_i = \frac{f_i(t_i) \Delta t_i}{\tilde{F}_i(t_i)} \quad (3)$$

ここに,  $\lambda_i(t_i)$ はハザード関数であり, 一定値 $\theta_i$  ( $\theta_i > 0$ ) と

する。すなわち,  $\lambda_i(t_i) = \theta_i$

ハザード関数を考慮して $f_i(\zeta_i)$ および $\tilde{F}_i(t_i)$ はそれぞれ次式により得られる。

$$f_i(\zeta_i) = \theta_i \exp(-\theta_i \zeta_i) \quad (4),$$

$$\tilde{F}_i(t_i) = \exp(-\theta_i t_i) \quad (5)$$

図-1 の点線で示すように初期検査時 $\tau_A$ で健全度が $i$ であったものとし, さらに $Z$ 年後の次の検査時 $\tau_B$ において健全度 $i$ が継続する条件付確率 $\tilde{F}_i(\tau_A + Z | \zeta_i \geq \tau_A)$ はマルコフ推移確率 $\pi_{ii}$ となる。すなわち,

$$\pi_{ii} = \tilde{F}_i(\tau_A + Z | \zeta_i \geq \tau_A) = \frac{\tilde{F}_i(\tau_A + Z)}{\tilde{F}_i(\tau_A)} = \exp(-\theta_i Z) \quad (i=1, \dots, J-1) \quad (6)$$

初期検査時 $\tau_A$ より $\bar{z}_i$  ( $0 \leq \bar{z}_i \leq Z$ ) 年後の $\tau_A + \bar{z}_i$ において健全度が $i$ から $i+1$ に推移し, さらに次の検査時点 $\tau_B$ において健全度が $i+1$ となる条件付確率密度は次式で与えられる。

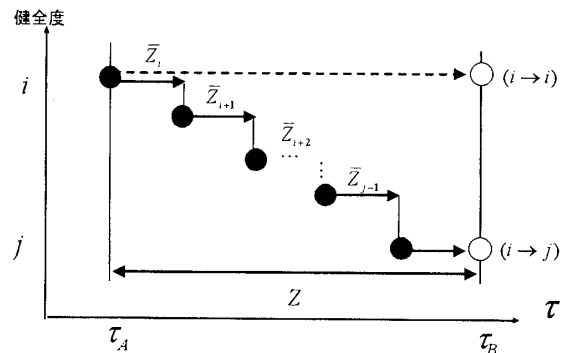


図-1 健全度の変化

$$q_{i+1}(\bar{z}_i | \zeta_i \geq \tau_A) = \frac{f_i(\tau_A + \bar{z}_i)}{\tilde{F}_i(\tau_A)} \cdot \tilde{F}_{i+1}(\tau_B - \bar{z}_i - \tau_A) = \theta_i \exp(-\theta_{i+1}Z) \exp\{-(\theta_i - \theta_{i+1})\bar{z}_i\} \quad (7)$$

$\bar{z}_i$  は  $0 \leq \bar{z}_i \leq Z$  の範囲で変化しえるので、この検査時点  $\tau_A, \tau_B$  間で健全度が  $i$  から  $i+1$  に推移するマルコフ推移確率  $\pi_{i+1}$  は次式で与えられる。

$$\pi_{i+1} = \int_0^Z q_{i+1}(z_i | \zeta_i \geq \tau_A) dz_i = \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{ -\exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1} Z) \} \quad (i=1, \dots, J-1) \quad (8)$$

図-1 の実線で示すように 2 つの検査時点間  $\tau_A \sim \tau_B$  において健全度が  $i$  から  $j \geq i+2$  以上 ( $j \geq i+2$ ) 変化する場合は、最初の期間  $\tau_A + \bar{z}_i$  で健全度が  $i+1$  となり、続いて  $\tau_A + \bar{z}_i + \bar{z}_{i+1}$  で  $i+2$  となり、最終的に  $\tau_A + \bar{z}_i + \bar{z}_{i+1} \dots + \bar{z}_{j-1}$  で健全度  $j$  へと変化する。式(7)と同様にして  $i$  から  $j$  へ変化する条件付確率密度  $q_j(\bar{z}_i, \bar{z}_{i+1}, \dots, \bar{z}_{j-1} | \zeta_i \geq \tau_A)$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} q_j(\bar{z}_i, \bar{z}_{i+1}, \dots, \bar{z}_{j-1} | \zeta_i \geq \tau_A) &= \frac{f_i(\tau_A + \bar{z}_i)}{\tilde{F}_i(\tau_A)} \prod_{m=i+1}^{j-1} f_m(\bar{z}_m) \tilde{F}_j\left(Z - \sum_{m=i}^{j-1} \bar{z}_m\right) \\ &= \prod_{m=i}^{j-1} \theta_m \cdot \exp\left\{-\sum_{m=i}^{j-1} \theta_m \bar{z}_m - \theta_j \left(Z - \sum_{m=i}^{j-1} \bar{z}_m\right)\right\} = \prod_{m=i}^{j-1} \theta_m \cdot \exp\left\{-\theta_j Z - \sum_{m=i}^{j-1} (\theta_m - \theta_j) \bar{z}_m\right\} \end{aligned} \quad (9)$$

検査時点  $y_A, y_B$  間で健全度が  $i$  から  $j (j \geq i+2)$  に推移するマルコフ推移確率  $\pi_{ij}$  は次式で得られる。

$$\begin{aligned} \pi_{ij} &= \int_0^Z \int_0^{Z-\bar{z}_i} \dots \int_0^{Z-\sum_{m=i}^{j-1} \bar{z}_m} q_j(z_i, \dots, z_{j-1} | \zeta_i \geq \tau_A) dz_i \dots dz_{j-1} \\ &= -\sum_{k=i}^{j-1} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_j} \pi_{ik} + \prod_{m=i}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_j} \exp(-\theta_j Z) \\ &\quad (j=i, \dots, J-1) \end{aligned} \quad (10)$$

$i = J$  の場合は、推移行列の各行要素の和が 1 となることより次式で与えられる。

$$\pi_{iJ} = 1 - \sum_{j=1}^{J-1} \pi_{ij} \quad (i=1, \dots, J-1) \quad (11)$$

本研究では表-1 に示すように健全度を 6 つのレーティングで評価するものとし、健全度 6 の場合を除く合計 5 つのレーティングに対して指数ハザードモデルを定義する。橋梁の劣化過程を特徴づけるハザード率  $\theta_i^k$  を特性ベクトル  $x^k$  と重み  $\beta$  を用いて以下のように表す。

$$\theta_i^k = \beta_{i,1} + \beta_{i,2} x_2^k + \beta_{i,3} x_3^k \quad (i=1, \dots, 5; k=1, \dots, K) \quad (12)$$

ここに、 $K$  は検査サンプル数、 $x_2, x_3$  は文献 2) に従い正規化された 1 支間あたりの平均床版面積及び交通量の特性値を考慮している。 $\beta_{i,1}$  はすべての橋梁に共通の  $i$  番目の健全度の重み、 $\beta_{i,2}$  および  $\beta_{i,3}$  はそれぞれ床版面積および交通量の特性値の  $i$  番目の健全度に対する重みを示す。

$K$  個の橋梁部材の劣化が互いに独立であると仮定し、推移確率  $\pi_{ij}$  を  $Z^k, x^k, \beta$  の関数として表し、ダミー変数  $\delta_{ij}^k$  (該当する場合 1, 該当しない場合 0) を用いて、全検査サンプル

表-1 床板の健全度の設定

健全度	内容
1	健全である。
2	局所的な損傷は見られるが補修を行う必要はない。
3	今現在補修の必要はないが継続的に点検が必要。
4	損傷があり状況に応じて補修を行う必要がある。
5	速やかに補修を行う必要がある。
6	緊急に補修を行う必要がある。

表-2 福井県内の橋梁データ

番号	完成年(竣工後)	橋種	径間数	橋長(m)	幅員(m)	幅員×橋長 ÷径間数 (平均面積)	交通量(台/12時間)	健全度
1	H11(6年)	PC・RC	7	202.0	8.6	248.2	3360	2
2	S54(27年)	PC	2	57.2	10.0	286.0	3360	2
3	H8(9年)	鋼	1	33.7	11.0	370.7	269	2

42	S8(73年)	RC	1	20.0	8.0	160.0	14383	6
----	---------	----	---	------	-----	-------	-------	---

91	S38(43年)	RC	1	8.6	5.3	45.6	435	2
92	S38(43年)	PC	1	12.2	5.6	67.7	435	3
93	S38(43年)	RC	1	13.6	5.5	74.1	515	3
94	S50(31年)	RC	1	16.6	9.5	157.7	808	4
95	S50(31年)	PC	1	15.5	8.4	130.2	808	4
96	S50(31年)	RC	1	6.6	6.0	39.6	5458	4
97	S61(20年)	鋼	1	7.1	4.5	31.7	5458	4
98	S58(23年)	RC	1	3.1	14.5	44.8	15468	4
99	S58(23年)	RC	1	4.4	8.9	39.2	3014	4
100	S38(43年)	RC	1	6.5	5.4	34.8	616	5

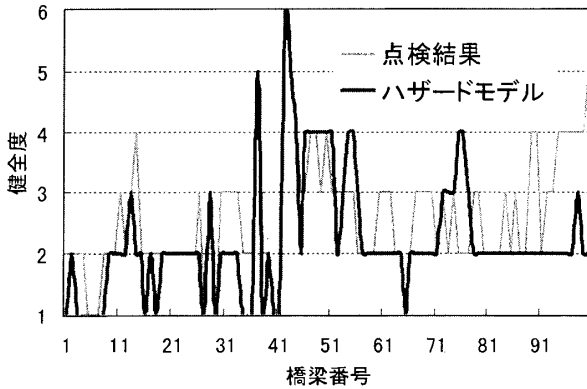


図-2 点検結果およびハザードモデルによる健全度の比較(100 橋)

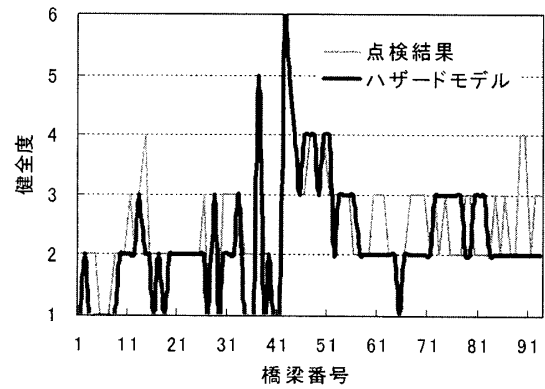


図-3 点検結果およびハザードモデルによる健全度の比較(93 橋)

 表-3  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \theta$  の値

健全度	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	4.4223	0.0653	5.8734
2	1.9990	0.01	8.4247
3	0.4358	0.01	8.3320
4	0.01	11.3580	4.6224
5	3.3192	0.01	0.0213

表-4 42 番橋梁の推移確率行列

健全度	1	2	3	4	5	6
1	0.9158	0.8077e-01	0.3357e-02	0.7468e-04	0.9626e-06	0.6142e-08
2	0.0	0.9207	0.7668e-01	0.2561e-02	0.4404e-04	0.3516e-06
3	0.0	0.0	0.9359	0.6250e-01	0.1613e-02	0.1718e-04
4	0.0	0.0	0.0	0.9501	0.4907e-01	0.7852e-03
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9689	0.3107e-01
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0

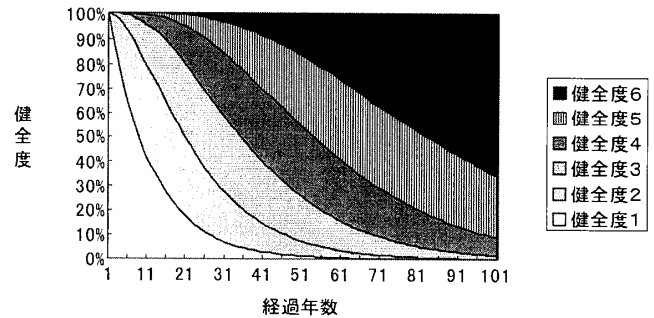


図-4 42 番橋梁の完成から 100 年間の劣化推移状況

の劣化推移パターンの同時生起確率密度を表す対数尤度関数を以下のように導入する。

$$\ln[L(\beta)] = \ln \left[ \prod_{i=1}^{J-1} \prod_{j=i+1}^J \prod_{k=1}^K \left\{ \pi_{ij} (Z^k, x^k; \beta) \right\}^{\delta_{ij}^k} \right] = \sum_{i=1}^{J-1} \sum_{j=i+1}^J \sum_{k=1}^K \delta_{ij}^k \ln [\pi_{ij} (Z^k, x^k; \beta)] \quad (13)$$

上記の尤度関数を最大化する  $\beta$  を求めることにより、 $\theta_i^k$  を決定し推移確率を決定することができる。本研究では、 $\beta$  の最小値を 0.01 と設定し、変数の改良幅を規定する move limit の制約条件(最大 20%)を考慮した勾配射影法を用いて式(13)を最大化する  $\beta$  を決定した。

### 3. ハザードモデルによる福井県内の橋梁の劣化予測

上で述べたハザードモデルを用いた推移確率の推定方法を用い、表-2 に示す福井県内の利用可能な 100 橋について床版の劣化予測を行った。利用できるデータは 1 回の点検結果のみであるので、図-1 の最初の点検時点  $\tau_1$  を供用開始時とし健全度を 1 と設定した。検査間隔  $Z$  は 1 年とし、1 年後の推移確率を求めることとした。表-2 の健全度は表-1 に示す 6 レーティングの評価基準に対して入手した点検結果をもとに床版の健全度を評価した結果を示している。表-2 に示すデータはわずか 100 橋分であること、および健全度の分布が 1~3 の領域に集中していることより、レーティング 1 から 6 に至る劣化過程を示す良好な推移確率行列を得ることができないことが考えられるため、本研究では全体のデータから検討を行い、交通量の多い橋梁群に対して供用開始後 55 年で健全度 5、70 年で健全度 6 の仮想のデータを追加して推移確率を求めることとした。また、42 番の橋梁は既に補修がされているが、補修を行わない場合の健全度として評価している。表-2 の 94 橋~100 橋は事前調査により施工不良によるかぶり不足が判明している橋梁であるが、まずこの 7 橋も含めた 100 橋につ

いてハザードモデルによる劣化の推定を行った。100 橋の点検結果およびハザードモデルで推定した場合の確率が最も大きくなる場合の健全度の比較を図-2 に示す。図-2 において、各橋梁の健全度は離散的に表現すべきであるが、点検結果とハザードモデルで推定した結果との比較を分かりやすくするために折れ線グラフで表現している。図より明らかなごとく、94 橋～100 橋の健全度は、点検結果とハザードモデルによる推定結果が大きく異なっている。このことより、ハザードモデルを用いることにより、施工不良や点検による健全度の判断ミスの橋梁を判別できることが明らかとなった。

次に、施工不良の 94 橋～100 橋を取り除き 93 橋について再度ハザードモデルで健全度を推定し、点検結果と比較した結果を図-3 に示す。ハザードモデルの健全度は点検結果とおおむね一致しており、図-2 に示した結果と比較してもより精度良く推定しているといえる。しかし、14,89,90 番の橋梁は点検結果とハザードモデルに 2 つの健全度の隔たりが見られるため検討した結果、これらの橋梁は海岸の近辺に位置しており塩害の影響を受けたものと推測される。このことより、橋梁の床版面積や交通量のみならず塩害の影響を受けやすいかどうかを示す指標をも式(12)に考慮する必要があることが明らかとなった。

最尤推定法により得られた各レーティングに対する  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \theta$  の値を表-3 に示す。健全度 2,3,5 の  $\beta_2$  は最小値の 0.01 となっていることより、 $\theta_2, \theta_3, \theta_5$  の決定に床版面積はほとんど影響していない。逆に、 $\theta_4$  の決定には床版面積が大きく影響しているという結果となっている。交通量は健全度 5 を除くすべての場合に重要な要因となっている。93 橋の中で最も古い 42 番目の橋梁に着目した推移確率行列を表-4 に、さらにこの推移確率行列を用いて供用開始時から 100 年間の劣化の推移状況を計算した結果を図-4 に示す。完成後 12 年で健全度 2 へ移行し、22 年で 3、36 年で 4、51 年で 5、67 年で 6 へと推移している。

#### 4. 最適補修回数および最適補修時期の決定

本研究では、上で得られた推移確率を用いて 1 橋梁に着目した場合の最適補修戦略および最適補修時期の決定法について検討を行った。

補修を考慮した推移確率  $\Pi^r$  は文献 10) を参考に、補修推移行列  $Q$  を用いて次式で表現することとした。

$$\Pi^r = \Pi Q \quad (14), \quad \text{補修する場合 } Q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1J} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{J1} & q_{J2} & \cdots & q_{JJ} \end{pmatrix} \quad q_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{補修または現状維持より健全度} \rightarrow j \text{ の時}(j \leq i) \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad \text{補修しない場合 } Q = \text{単位行列} \quad (i, j = 1, \dots, J)$$

$\Pi^r$  は  $J \times J$  次の行列であるが、健全度  $J$  が観測されれば、直ちにその部材は取り替えられるため、健全度  $J$  が存在することはない。文献 10) においては、劣化が進行した場合に補修を行うかどうかの検討を行うため、 $\Pi$  を劣化が進行する要素と現状を維持する対角要素の行列に分離しているが、本研究では、 $t$  年後の状態に対して対応した補修工法を用いて補修を行うかどうかを決定するため式(14)で表現することができる。

目的関数として補修 1 回あたりの間接諸経費を含む管理期間の期待累積ライフサイクルコストを考慮する。初期健全度を  $i$  とした場合 1 年目の期待ライフサイクルコストは  $u_i(1)$  は次式で与えられる。

$$u_i(1) = \sum_{j=1}^J \pi_{ij} c_j \quad (15)$$

ここに、 $c_j$  は健全度  $j$  に対する補修費用であり、次に示す補修費用ベクトルの要素である。

$$C = (c_1, \dots, c_J)^T$$

補修を行わない場合には、 $c_j$  以外は 0 がセットされる。2 年目の期待累積ライフサイクルコスト  $u_i(2)$  は次式で与えられる。

$$u_i(2) = \sum_{j=1}^J \pi_{ij} c_j + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^J \pi_{jk} \pi_{ij}^r c_k \quad (16)$$

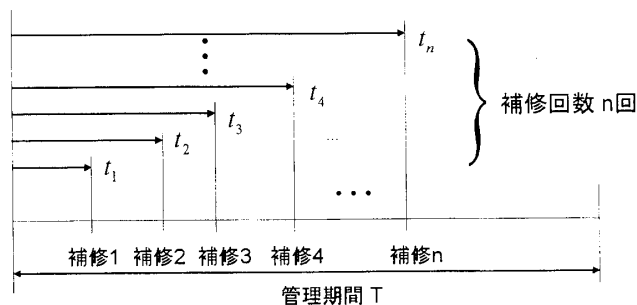


図-5 補修回数および補修時期

3年目の期待累積ライフサイクルコスト $u_i(3)$ は次式で与えられる.

$$u_i(3) = \sum_{j=i}^J \pi_{ij} c_j + \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J \pi_{jk} \pi_{ij}^r c_k + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^J \sum_{l=k}^J \pi_{kl} \pi_{jk}^r \pi_{ij}^r c_l = \sum_{j=i}^J \pi_{ij} c_j + \sum_{j=1}^J \sum_{k=j}^J \pi_{jk} \pi_{ij}^r c_k + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^J \sum_{l=k}^J \pi_{kl} \pi_{jk}^r \pi_{ij}^r c_l$$

$$= \sum_{j=i}^J \pi_{ij} c_j + \sum_{j=1}^J \pi_{ij}^r u_j(2) \quad (17)$$

以上より,  $t$ 年後の期待累積ライフサイクルコスト $u_i(t)$ は次式で与えられる.

$$u_i(t) = \sum_{j=i}^J \pi_{ij} c_j + \sum_{j=1}^J \pi_{ij}^r u_j(t-1) \quad (18)$$

本研究では, 図-5 に示すように1橋梁に着目した場合の最適な補修回数 $n$ および補修時期 $t_i (i=1, \dots, n)$ を決定することを目的とするため, 補修間隔の制約条件を考慮し目的関数 $LCC(t, n, \mathbf{T})$ を最小化する補修回数および補修時期を決定する問題を下記のように定式化した.

Find  $t_i (i=1, \dots, n)$  which minimize  $LCC(t, n, \mathbf{T}) = u(t, n, \mathbf{T}) + nC_r$

subject to  $t_{i+1} - t_i \geq \bar{t} \quad (i=1, \dots, n-1)$  (19)

ここに,  $u(t, n, \mathbf{T})$ は管理期間 $\mathbf{T}$ の期待累積ライフサイクルコスト,  $C_r$ は1回の補修に必要となる間接諸経費,  $\bar{t}$ は補修間隔の最短期間を示す.

表-5 補修戦略および補修工法

種類	健全度	補修工法の内容	補修単価	回復水準
補修1	2	表面被覆工法	10,000円/m <sup>2</sup>	1
補修2	3	ひびわれ注入工法	30,000円/m <sup>2</sup>	2
補修3	4	繊維シート接着工法	50,000円/m <sup>2</sup>	2
補修4	5	鋼板接着工法	120,000円/m <sup>2</sup>	2
補修5	6	床板打ち替え	380,000円/m <sup>2</sup>	1

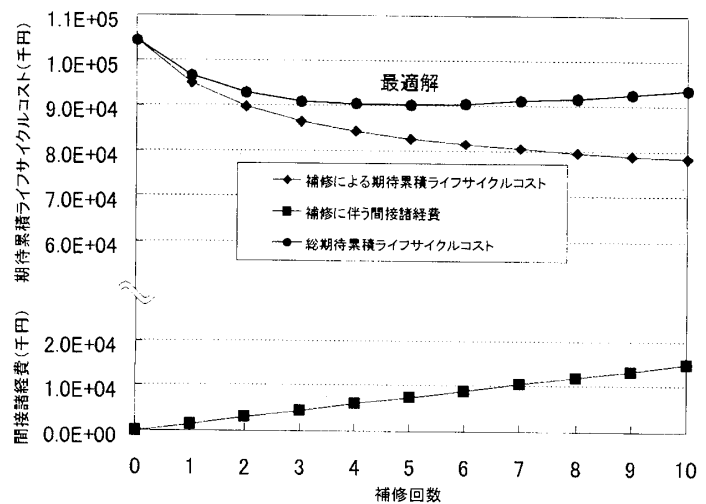


図-6 各補修回数に対する期待累積ライフサイクルコスト

表-6 各補修回数に対する最適補修時期および目的関数値

補修回数	補修時期(年)	補修による期待ライフサイクルコスト(千円)	間接諸費用(千円)	目的関数(千円)
0		104345.6	0	104345.6
1	51	94993.6	1500	96493.6
2	30, 55	89816.0	3000	92816.0
3	23, 41, 62	86496.0	4500	90996.0
4	19, 34, 46, 64	84387.2	6000	90387.2
5	16, 27, 38, 49, 64	82809.6	7500	90309.6
6	13, 22, 32, 43, 52, 65	81574.4	9000	90574.4
7	11, 19, 28, 36, 45, 54, 65	80582.4	10500	91082.4
8	9, 16, 23, 32, 40, 48, 56, 65	79768.0	12000	91768.0
9	7, 14, 21, 28, 35, 42, 50, 57, 66	79076.8	13500	92576.8
10	4, 11, 18, 25, 32, 39, 46, 53, 60, 67	78569.6	15000	93569.6

上記の問題を直接解くことは困難となるため、補修回数  $n$  を  $0, 1, 2, \dots$  と順次変化させた場合の補修時期  $t_i (i=1, \dots, n)$  を決定し、その解の中で  $LCC(t, n, T)$  が最小となる解を最適解とした。なお、最適化の手法として無制約最小化の場合には最急勾配法を用い、制約条件付最小化の場合には勾配射影法を用いた。

## 5. 福井県内の橋梁の最適補修戦略

上で述べた方法を用い 42 番の橋梁の床版の最適補修回数および最適補修時期を決定した例を示す。補修工法として表-5 に示す補修 1(健全度 2→1)、補修 2(健全度 3→2)、補修 3(健全度 4→2)、補修 4(健全度 5→2)、補修 5(健全度 6→1)の 5 種類の補修工法を採用し、それぞれの補修のためのコストを表-5 に示す通り  $c_2^d = 10$ (千円/ $m^2$ )、 $c_3^d = 30$ (千円/ $m^2$ )、 $c_4^d = 50$ (千円/ $m^2$ )、 $c_5^d = 120$ (千円/ $m^2$ )、 $c_6^d = 380$ (千円/ $m^2$ )とする。補修推移行例  $Q$  および補修費用ベクトルは次式で与えられる。

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \text{ 補修する場合 } C = (0, 10, 30, 50, 120, 380)^T, \text{ 補修しない場合 } C = (0, 0, 0, 0, 0, 380)^T$$

初期状態は健全度 1 とし、管理期間  $T$  を 100 年とした。1 回の補修に必要となる間接諸経費  $C_r$ 、最短の許容補修間隔  $\bar{t}$  をそれぞれ 150 万円および 7 年と設定した。

各補修回数に対する最適解の期待累積ライフサイクルコストの関係を図-6 に、各補修回数に対する最適補修時期および目的関数値を表-6 に示す。補修による期待累積ライフサイクルコストは補修回数が多くなるほど減少しているが、補修による間接諸経費が増加するため目的関数の値は補修回数が 5 回の場合に最も減少している。最適な補修時期は、16 年で補修 1 により健全度 2 から 1 へ回復させ、以後 11 年から 15 年の周期で健全な状態へ回復させ、残り 36 年間は補修しない戦略となっている。さらに補修回数を増加させた場合においても、最初の補修時期が早まり、以後補修間隔の最短期間の 7 年の間隔で補修を行い、残りの 35 年間は補修しない戦略となっている。

## 6. 結 論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) ハザードモデルによる劣化の推定方法を福井県内の橋梁の床版の劣化予測に適用することにより、精度良く推定できることが明らかとなった。
- 2) ハザードモデルによる劣化の推定方法を用いることにより、施工不良や点検による健全度の判断ミスの橋梁を判別できることが明らかとなった。
- 3) 橋梁の床版面積や交通量のみならず塩害の影響を受けやすいかどうかを示す指標をも健全度を決定するための特性値として考慮する必要があることが明らかとなった。
- 4) 推移確率を用いて期待累積ライフサイクルコストを求め、1 橋梁に着目した場合の期待累積ライフサイクルコストを最小化する最適な補修回数および補修時期を数理計画法を用いて容易に決定できることが明らかとなった。
- 5) 管理期間を 100 年とした場合の最適な補修時期は、16 年で健全度 2 から 1 へ回復させ、以後 11 年から 15 年の周期で健全な状態へ回復させ、残りの約 35 年間は補修しない戦略となっている。

今後の課題として、管理している橋梁すべてを同時に考慮し年間の補修予算の制約を考慮した最適補修時期の決定法を確立する必要がある。また、今後は床版のみならず主桁、支承、橋脚の劣化も考慮した最適補修戦略の開発を行っていく予定である。

## 謝 辞

本研究の一部は平成19年度福井工業大学学内特別研究費Bにより実施した。また、データの整理において平成18年度地球環境工学専攻4回生の島田晴菜さんおよび宮原克幸君の助力を得た。ここに謝意を表する。

## 参考文献

- 1)(社)土木学会, コンクリート標準示方書[維持管理編], 2001, 丸善(株)
- 2)貝戸清之, 阿部允, 藤野陽三: 実測データに基づく構造物の劣化予測, 土木学会論文集, No.744/IV-61, pp.29-38, 2003
- 3)津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.69-82, 2005.10
- 4)青木一也, 山本浩司, 津田尚胤, 小林潔司: 多段階ワイブル劣化ハザードモデル, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.125-136, 2005.9
- 5)青木一也, 山本浩司, 小林潔司: トンネル照明システムの最適点検・更新政策, 土木学会論文集, No.805/VI-69, pp.105-116, 2005.12
- 6)青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修モデル, 土木学会論文集, No.805/VI-69, pp.105-116, 2005.12
- 7)中村秀明, 河村圭, 鬼丸浩幸, 宮本文穂: 遺伝的アルゴリズムおよび免疫アルゴリズムによる橋梁維持管理計画最適化の検証, Vol.47A, pp.201-209, 2001.3
- 8)近田康夫, 清水宏孝, 廣瀬彰則: ウイルス進化型GAを援用した橋梁補修計画支援に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.211-219, 2001.3
- 9)古田均, 横田知則, 堂垣正博: ファジィラーニングとクラシファイアを適用した橋梁維持管理計画支援システムの構築, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.233-243, 2003.3
- 10)貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.10

(平成20年3月31日受理)