

既存橋梁の最適補修時期決定法に関する研究

谷脇 一弘

Determination of optimum repair schedule for existing bridges

Kazuhiro Taniwaki

In this study, an optimum maintenance strategy, which can determine the optimum repair schedule considering expected life-cycle cost and constraints with respect to the repair interval of the adjacent repair actions and the yearly allocated repair cost, is proposed for existing bridge maintenance. The strategy is developed by using the Markovian transition probability model and two stage optimization technique. The usefulness and effectiveness of the strategy are demonstrated in a numerical example.

1. はじめに

近年、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おり、種々の維持管理システムを用いて橋梁の健全度の評価および最適な補修維持管理計画の策定の試みを行っている。そこで、数多くの橋梁を対象とし、種々の制約条件を考慮して最適な補修回数および補修時期を合理的に決定できるシステムの開発が急がれている。

これまでの橋梁の維持管理分野における研究において、劣化の予測方法としては、力学モデルを用いた劣化曲線を用いる方法¹⁾およびマルコフ推移確率を用いて劣化を推定する方法²⁾⁻⁶⁾が主流となっている。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⁷⁾⁻⁹⁾。貝戸らは¹⁰⁾、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。また、著者は津田らの方法³⁾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、個別の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する方法を提案している¹¹⁾。

本研究では、著者の方法¹¹⁾をさらに発展させ、多量の橋梁に対して、補修間隔の制約および年間の補修費用の制約を考慮して耐用年数を100年まで延長した場合のライフサイクルコストを最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、まず第一段階の最適化として、補修間隔の制約のもとで個別の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。次に、第二段階の最適化では、第一段階ですべての橋梁の総期待累積ライフサイクルコストを最小化する補修時期を決定している。第二段階の最適化では、数理計画法を用いることなく簡単な感度解析により最適化が行えることを示している。計算例において、本手法を福井県内の橋梁の床版の最適維持管理計画に適用し、有効性および信頼性を明らかにしている。

2. マルコフ推移確率を用いた橋梁の健全度の劣化予測

対象とする橋梁の健全度は、表-1 に示すように補修が必要でない橋梁を3段階、補修が必要な橋梁を3段階の計6段階に区分することとし、6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、ある時点で健全度*i*であったときに、次の時点で健全度*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、推移確率 Π を用いて確率的に表現することができる。 Π は1年後の推移確率であるとする、*t*年後の健全度の状態ベクトル $S(t)$ は初年度の状態ベクトル $S(0)$ を用いて $S(t) = \Pi^t S(0)$ により計算できる。本研究では、橋梁の健全度の劣化予測の方法として、津田ら³⁾により提案されているハザードモデルに基づいてマルコフ推移確率の要素を決定する方法を用いている。詳細は文献3) および11)に記されているのでここでは計算例のみを記す。

マルコフ推移確率の要素を決定するために本研究では、橋梁の正規化された1支間あたりの平均床版面積、交通量の特性値および塩害の影響度を考慮し、最尤推定法により決定している。計算例として福井県内の橋梁の床版の劣化予測を行った結果について述べる。各橋梁の供用開始時からの経過年数および健全度の分布を図-1 に示す。利用できるデータは1回の点検結果のみであるので、最初の点検結果を供用開始時の健全度1と設定し、検査間隔1年後の推移確率を求めることとした。94橋～100橋の7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ので、この7橋を除いた93橋についてハザードモデルによる劣化の予測を行った。塩害の影響を示す特性値は、影響が明らかであった14,89,90番の橋梁のみ考慮している。点検結果による健全度およびハザードモデルにより得られた最も確率が大きくなる場合の健全度の比較を図-2 に示

表-1 床版の健全度の設定

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。

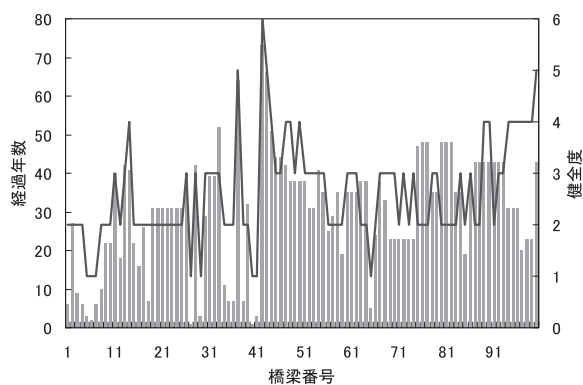


図-1 福井県内の橋梁データ

す．すべての橋梁について，点検結果とハザードモデルによる予測結果は補修を必要としない健全度 3 までの範囲で健全度が最大 1 段階異なるのみであり，精度よく予測しているといえる．

最尤推定法により得られた各健全度に対する β および最も古い 42 番橋梁の θ の値を表-2 に示す．健全度 2,3,5 の β_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， θ_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． β_4 の値は，健全度 1 から 3 までは大きな値を示しているが，健全度 4, 5 に対しては小さい値となっている．93 橋の中で 42 番目の橋梁に着目した推移確率行列を表-3 に示す．

表-2 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \theta_{42}$ の値

健全度	β_1	β_2	β_3	β_4	42番橋梁の θ
1	3.3659	0.2476	7.1947	12.4108	0.08747
2	1.3168	0.01	9.4521	14.5716	0.08341
3	0.01	0.01	10.6119	13.6354	0.07896
4	0.018	6.8600	4.5709	0.01	0.04422
5	2.1507	0.01	0.8905	0.05	0.02814

3. マルコフ推移確率を用いた最適補修回数および補修時期の決定

本研究では，上で得られたマルコフ推移確率を用いて橋梁の最適補修回数および補修時期を決定する方法について提案を行い，2.の計算例で述べた 93 橋の床版の最適補修回数および補修時期を決定した結果について述べる．

(1) 最適補修回数および補修時期の決定法

t 年後の補修を考慮した推移確率行列 $\Pi^r(t)$ は補修による回復健全度を示す補修推移行列 $\mathbf{R}(t)$ を用いて次式で表現することができる．

$$\Pi^r(t) = \Pi \cdot \Pi^r(t-1) \mathbf{R}(t) \quad (1)$$

ここに，補修を行う場合の $\mathbf{R}(t)$ の要素は，健全度 i に対する補修工法で回復する健全度 j に関する要素 r_{ij} のみ 1.0，その他の要素は 0.0 となる．補修を行わない場合 $\mathbf{R}(t)$ の要素は単位行列を示す．

本研究では，図-3 に示すように管理期間 T において最適となる補修回数および補修時期を決定することを目的としてい

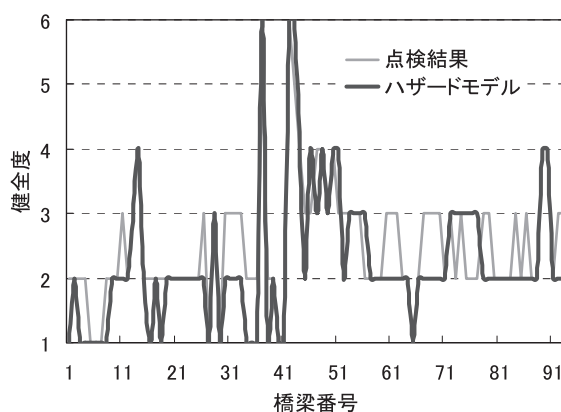


図-2 点検結果および塩害の影響を考慮したハザードモデルによる健全度の比較(93 橋)

表-3 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

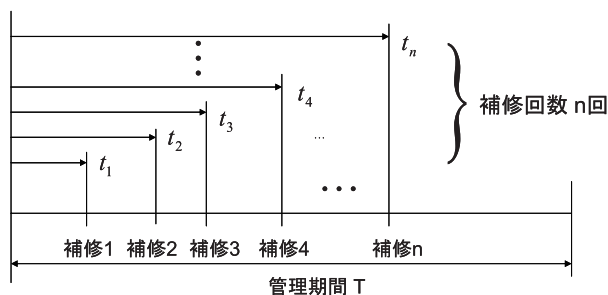


図-3 補修回数および補修時期

るため、各橋梁の補修回数 $n_k (k=1, \dots, K)$ および各橋梁の補修時期 $t_{ik} (i=1, \dots, n_k)$ を変数として考慮する。目的関数として式(2)で示す補修1回あたりの間接諸経費 C_k を含む管理期間における期待累積ライフサイクルコスト $L_{CC}(\mathbf{t}, \mathbf{n}, \mathbf{T})$ を考慮する。

$$L_{CC}(\mathbf{t}, \mathbf{n}, \mathbf{T}) = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^T \bar{u}_{ki}(\mathbf{t}_k, n_k) + n_k C_r \right) \quad (2) \quad \bar{u}_{kT}^i = \sum_{j1=1}^6 \sum_{j2=1}^6 \sum_{j3=1}^6 \cdots \sum_{jT=jT-1}^6 \pi_{jT-1}^{(k)} \cdots \pi_{j2j3}^{r(k)} \pi_{j1j2}^{r(k)} \pi_{ij1}^{r(k)} c_{jT} \quad (3)$$

ここに、 $\bar{u}_{ki}(\mathbf{t}_k, n_k)$ は k 番目の橋梁の i 年目の期待ライフサイクルコストを示す。T 年後の期待ライフサイクルコスト \bar{u}_{kT}^i は式(3)で与えられる。式(3)において、 $\pi_{ij1}^{r(k)}$ は式(1)で示される k 番目の橋梁の補修を考慮した推移確率行列の健全度 i から $j1$ に推移する確率を示す。 c_{j1} は健全度 $j1$ に対する補修費用であり、補修費用ベクトル $\mathbf{C} = (c_1, \dots, c_6)^T$ の要素である。補修を行わない場合には、 c_6 以外は 0 がセットされる。

制約条件として補修間隔の制約 g_{ki} および1年当たりの補修予算の制約 g_{ci} を考慮して $L_{CC}(\mathbf{t}, \mathbf{n}, \mathbf{T})$ を最小化する補修回数および補修時期を決定する最適化問題を下記のように定式化した。

$$\text{Find } n_k, t_{ki} (i=1, \dots, n_k; k=1, \dots, K) \quad \text{which minimize } L_{CC}(\mathbf{t}, \mathbf{n}, \mathbf{T}) = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^T \bar{u}_{ki}(\mathbf{t}_k, n_k) + n_k C_r \right) \quad (4)$$

$$\text{subject to } g_{ki} = t_{ki+1} - t_{ki} - \bar{t} \geq 0 \quad (i=1, \dots, n_k - 1; k=1, \dots, K) \quad (5)$$

$$g_{ci} = \sum_{k=1}^K \bar{u}_{ki}(\mathbf{t}_k, n_k) - \bar{u} \leq 0 \quad (i=1, \dots, T) \quad (6)$$

ここに、 \bar{t} は最短補修間隔、 \bar{u} は一年当たりの許容補修予算を示す。

式(4)~(6)の最適化問題を直接解くことは困難となるので、本研究では以下に示す二段階の最適化手法により解くこととした。まず、第一段階の最適化として k 番目の橋梁のみに着目し、1年当たりの補修予算の制約を考慮しない場合の次の最適化問題を考える。

$$\text{Find } n_k, t_{ki} (i=1, \dots, n_k) \quad \text{which minimize } L_{CC}^k(\mathbf{t}_k, n_k, \mathbf{T}) = \sum_{i=1}^T \bar{u}_{ki}(\mathbf{t}_k, n_k) + n_k C_r \quad (7)$$

$$\text{subject to } g_{ki} = t_{ki+1} - t_{ki} - \bar{t} \geq 0 \quad (i=1, \dots, n_k - 1) \quad (8)$$

式(7),(8)の最適化問題を直接解くことは困難となるので、補修回数 n_k を 0,1,2, ... と順次変化させた場合の補修時期 $t_{ki} (i=1, \dots, n_k)$ を決定し、その解の中で $L_{CC}^k(\mathbf{t}_k, n_k, \mathbf{T})$ 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、制約条件付最小化問題の場合には勾配射影法を用いた。 $t_{ki} (i=1, \dots, n_k)$ の離散解を求めるため、 $t_m < t_{ki} < t_{m+1}$ となる解 t_{ki} を t_m および t_{m+1} とした場合の $L_{CC}^k(\mathbf{t}_k, n_k, \mathbf{T})$ の比較を行い、より小さくなる場合の解を最適な離散解とした。すべての橋梁について式(7),(8)の最適化問題を解き1年当たりの補修予算の制約を考慮しない場合の最適解を求める。

最初の補修時期が変化した場合においても、以後の補修時期は式(7),(8)を解くことにより得られた最適補修時期の間隔を保つことがライフサイクルコストを最小化することとなるため、第二段階最適化においては、最初の補修時期 $t_{k1} (k=1, \dots, K)$ のみを変数として考慮し次の最適化問題

を考える.

Find t_{k1} ($k=1, \dots, K$) which minimize

$$L_{CC}(\mathbf{t}_1, \mathbf{n}, \mathbf{T}) = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^T \bar{u}_{ki}(t_{k1}, n_k) + n_k C_r \right) \quad (9)$$

subject to

$$g_{cj} = \sum_{k=1}^K \bar{u}_{kj}(\mathbf{t}_k, n_k) - \bar{u} \leq 0 \quad (j=1, \dots, T). \quad (10)$$

式(10)の制約条件を考慮しない場合の最適解は第一段階最適化により既に得られていることより, 式(10)の制約条件を満足させるための以下に述べる単純な感度解析により式(9),(10)の最適化問題を解くことができる. すなわち, 式(10)の制約条件の中で最も違反している制約条件 j に着目し, 現在の改良解より $\Delta t_{k1} = \pm 1$ ($k=1, \dots, K$) だけ変化した場合の制約条件の変化量 $\Delta g_{cj}(\Delta t_{k1})$ および目的関数の変化量 $\Delta L_{CC}(\Delta t_{k1})$ に着目し, 単位ライフサイクルコストの増加に対して最も制約条件を満足させることができる変数 k を式(11)により決定し, その変数を $\Delta t_{k1} = \pm 1$ の改良を行うことを繰り返すことにより, 式(9),(10)の最適化問題を解くことができる.

$$r_{ck} = \min_k \left\{ \frac{\Delta g_{cj}(\Delta t_{k1})}{\Delta L_{CC}(\Delta t_{k1})} \middle| \Delta g_{cj}(\Delta t_{k1}) < 0; k=1, \dots, K \right\} \quad (11)$$

上記の改良過程において, Δt_{k1} だけ変化した場合の $\Delta L_{CC}(\Delta t_{k1})$ の値は必ず $\Delta L_{CC}(\Delta t_{k1}) > 0$ となる. t_{k1} を Δt_{k1} だけ変化した場合の 2 回目以降の補修時期 t_{ki} ($i=2, \dots, n_k$) は第一段階で得られた最適な補修時期の間隔を保つため Δt_{k1} だけ変化するものとする.

上で述べた二段階の最適化では, 1 つの橋梁に着目した最適化および単純な感度解析のアルゴリズムにより最適解を決定する

表-4 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/㎡	1
補修2	3	ひびわれ注工法	30,000円/㎡	2
補修3	4	繊維シート接着工法	50,000円/㎡	2
補修4	5	鋼板接着工法	120,000円/㎡	2
補修5	6	床板打ち替え	380,000円/㎡	1

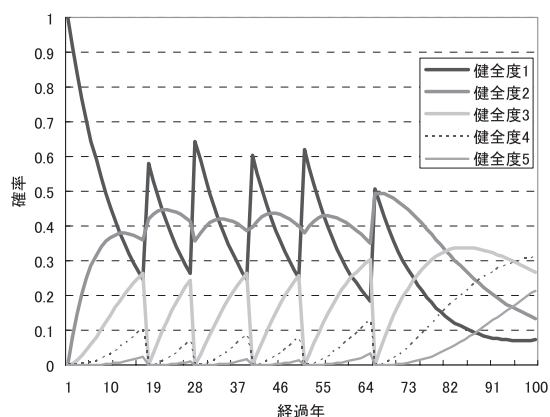


図-4 42 番橋梁の補修を考慮した健全度の推移

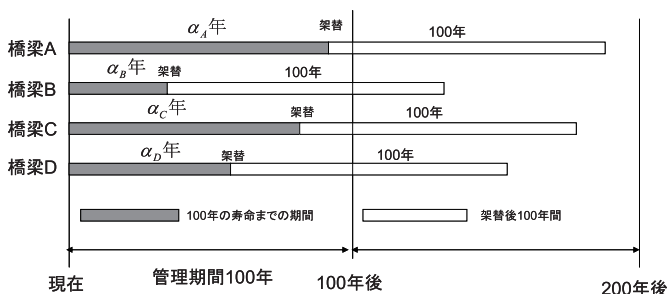


図-5 管理期間

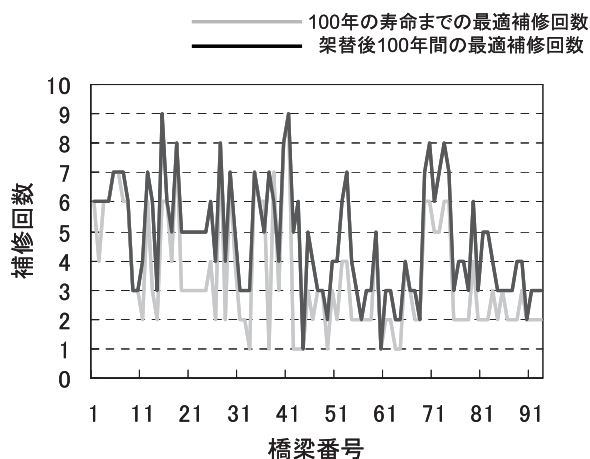


図-6 最適補修回数

ことができるため、考慮すべき橋梁の数に関係なく効率的に各橋梁の補修回数および各橋梁の補修時期の最適解を決定できる点に優位性を有している。

(2) 予算の制約を考慮しない場合の最適補修回数および補修時期の決定例

上で述べた第一段階の最適化により予算の制約を考慮しない場合の 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-4 に示す 5 種類の補修工法を採用し、補修費用ベクトルは次の通りとなる。

$$\text{補修する場合 } \mathbf{C} = (0, 10, 30, 50, 120, 380)^T \quad \text{補修しない場合 } \mathbf{C} = (0, 0, 0, 0, 0, 380)^T$$

初期状態は健全度 1 とし、管理期間 \mathbf{T} を 100 年とし、推移確率行列として表-3 に示す値を用いた。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 75 千円/m および 7 年と設定した。100 年間の健全度の推移を図-4 に示す。図-4 より明らかなごとく、健全度 2 の確率が最も大きく、健全度 1 の確率が健全度 3 の確率とほぼ等しくなる時期に補修が行われている。すなわち、まず 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。100 年目の状態は健全度 4 の確率が最も大きな状態となっている。

ところで、現在より 100 年間の管理期間における最適な補修回数および補修時期を決定するためには、図-5 に示すごとく供用開始から 100 年の寿命までの α 年間の補修戦略および架替え後の 100 年間の新たな橋梁としての補修戦略の 2 つの期間に対する補修戦略を決定し、すべての橋梁の $(\alpha + 100)$ 年間の補修時期が得られたうえで、現在より 100 年間の管理期間における補修予算の制約を考慮して最適な補修時期を決定しなければならない。そこで本研究では、2. で述べた 93 橋について、初期健全度を図-1 に示す点検結果に設定し、供用開始から 100 年の寿命までの α 年間の管理期間とした場合、および健全度を 1 とし管理期間を 100 年間とした場合の 2 つの期間に対して最適な補修回数および補修時期を決定した。得られた最適な補修回数を図-6 に示す。なお、最適化過程で使用した推移確率は、2. にて各橋梁毎に求められた推移確率を用いることも可能であるが、93 橋のデータのみで良好な分布が得られていない可能性もあるため、本研究では、表-3 に示す 42 番橋梁の推移確率をすべての橋梁に適用している。

架替え後の 100 年間の最適な補修回数に着目すると、1 回から 9 回までの補修回数となっている。橋長が短く、幅員の狭い橋梁は、健全度 6 の架替え工事に対する期待費用が安くなるため、できるだけ補修回数を少なくする戦略となっているが、橋長が長く幅員の広い橋梁では、健全度 6 の架替え工事に対する期待費用が高くなるため、劣化の初期段階においてできるだけ補修を行う戦略となっている。

(3) 予算の制約を考慮した場合の最適補修回数および補修時期の決定例

上で得られた予算の制約を考慮しない場合の最適解に対して、1 年間に費やすことができる補修予算 \bar{u} を 5 千万円と仮定し第二段階最適化における感度解析により補修時期の改良を行った。

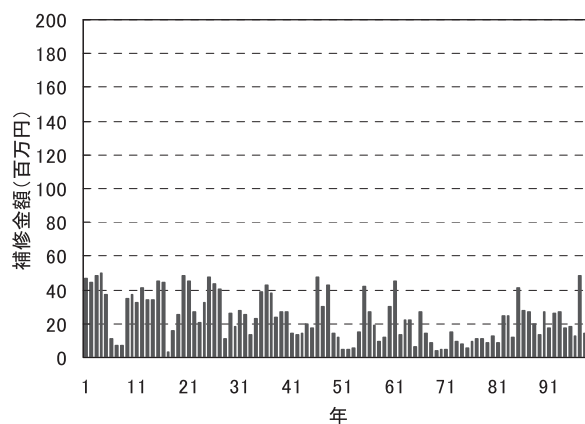
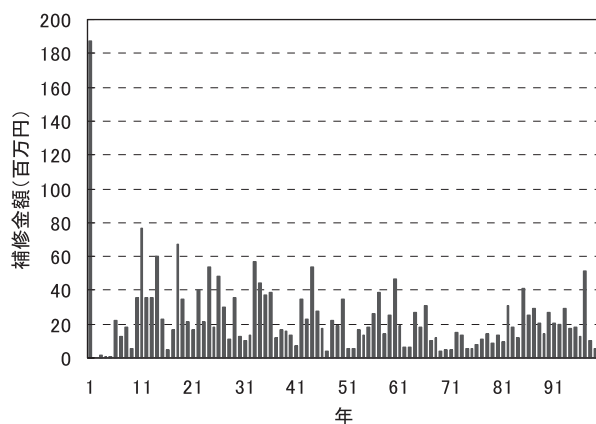


図-7 予算の制約を考慮しない場合の現在より 100 年間の管理期間における各年の補修金額の推移
図-8 予算の制約を考慮した場合の現在より 100 年間の管理期間における各年の補修金額の推移

予算の制約を考慮しない場合および考慮した場合の 100 年間の管理期間における各年の補修金額の推移をそれぞれ図-7 および 8 に示す。なお、これらの結果の補修費に架替えのための費用は含んでいない。

図-7 に示すように、1 年当たりの補修金額は 1 年目において 1 億 8 千 7 百万円と許容補修予算の 5 千万円を大きく違反し、以後 11 年目、14 年目、18 年目、24 年目、33 年目、44 年目、97 年目に違反が見られるが、第二段階最適化の方法を 153 回繰り返すことにより図-8 に示したごとくすべての制約条件を満足することができた。補修予算の制約を考慮しない場合の目的関数値は、 3.8282×10^6 (千円)であったのに対し、補修予算の制約を考慮した場合には 3.8430×10^6 (千円)とわずか 0.39% の増加であった。

以上の検討結果より、補修予算の制約を満足させるための補修時期の微調整による補修費用の増加はわずかであり、補修計画において最も重要な変数は補修回数であるということがいえる。

4. 結 論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 補修予算の制約を考慮して、補修回数および補修時期を決定する場合には、1 つの橋梁に着目した最適化および単純な感度解析の二段階の最適化アルゴリズムにより考慮すべき橋梁の数に関係なく効率的に最適解を決定できることが明らかとなった。
- 2) 計算例において、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。
- 3) 計算例において、管理期間を 100 年とした場合の最適な補修回数は 1 回～9 回となっており、小規模な橋梁は補修回数が少なく、大規模な橋梁は補修回数が増える傾向となっている。
- 4) 補修予算の制約を考慮しない場合には、1 年目に補修が集中し多大な補修費用が必要となるが、本研究で提案したアルゴリズムを用いることにより最小限の補修費用の増加により、補修費用

の制約を満足させることができることが明らかとなった。

- 5) 第二段階の最適化において改良すべき変数群から補修を優先すべき橋梁群を取り除き改良を行うことにより、容易に補修の優先順位を考慮できることが明らかとなった。
- 6) 補修予算の制約を満足させるための補修時期の微調整による補修費用の増加はわずかであり、補修計画において補修回数を決定するが最も重要であることが明らかとなった。

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
- 11) 谷脇一弘: 福井県内の既存橋梁の劣化予測および最適補修戦略, 福井工業大学研究紀要 第38号, pp.213-220, 2008.3

(平成21年3月31日受理)