



#### 4. 不確実性を考慮した劣化モデルの作成

劣化進行の不確実性を考慮する劣化モデルとして5本の曲線からなる劣化曲線群を点検結果から作成する。ここで劣化曲線群を構成する劣化曲線の数を5本としたのは、これより多いと総組み合わせ数の爆発が生じ解析を行うのに膨大な時間が必要となり、逆に少なれば劣化曲線がまばらとなってしまう劣化進行のばらつきを再現できなくなってしまうためである。5本の劣化曲線はそれぞれが生起確率を有し、その総和は1となる。以下に劣化曲線群の作成手順について示す。

##### 1) 生起確率の決定

各劣化曲線の生起確率  $P_k$  ( $k=1\sim 5$ ) は、 $P_1=0.1$ ,  $P_2=0.20$ ,  $P_3=0.4$ ,  $P_4=0.2$ ,  $P_5=0.1$  とした。

##### 2) 劣化曲線の領域の決定

図-1 に示すように曲線によって仕切られた各領域内に存在する点検データ数  $n_k$  の全点検データ数  $N$  に対する割合  $R_k$  を式(2)から算定し、 $R_k$  が 1) で決定した劣化曲線  $k$  の生起確率  $P_k$  に等しくなるよう領域  $k$  を決定する。なお、仕切りに用いる曲線は式(1)の形で表され、式中の耐用年数  $T$  を変えることにより  $R_k$  を調整する。

$$R_k = \frac{n_k}{N} \quad (2)$$

3) 領域  $k$  内の点検データから耐用年数  $T_k$  を変数とした最小二乗法によって、領域  $k$  内の点検データを代表する劣化曲線  $k$  を作成する ( $k=1\sim 5$ )。また、劣化曲線  $k$  の生起確率には  $P_k$  ではなく、領域  $k$  内における点検データの全点検データに対する割合である  $R_k$  を用いる。

#### 5. 最適設計問題

本論文では、橋梁の維持管理計画に対して LCC 最小化の概念の下に年度予算等を制約条件とした最適な補修計画の策定を試みる。このとき、4. で示した劣化曲線群を用いて全ての劣化曲線の組み合わせのもとで解析を行うことによって得られる期待値を LCC に用いる。

最適設計問題は以下のように定義される。

目的関数は、劣化曲線の全組み合わせ数  $I$  回の解析を行うことにより算定されるライフサイクル期間  $T$  年以内に生じる対象橋梁数  $K$  の総費用の期待値とする。総費用はライフサイクル期間内に発生する補修費と点検費用の和とする。以下に目的関数式を示す。

$$OBJ = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (C_{ikt}^R + C_{ikt}^E) \cdot P_i \rightarrow \min \quad (3)$$

ここで、 $OBJ$  は目的関数、 $C_{ikt}^R$  は劣化曲線の組み合わせ  $i$  における橋梁  $k$  の  $t$  年度の補修費用、 $C_{ikt}^E$  は劣化曲線の組み合わせ  $i$  における橋梁  $k$  の  $t$  年度の点検費用、 $P_i$  は劣化曲線の組み合わせ  $i$  が生じる生起確率とし、次式より求める。

$$P_i = \prod_{j=1}^J P_{jm_j} \quad (4)$$

$m_j$  は部材  $j$  の劣化曲線群の中から劣化曲線の組み合わせ  $i$  において用いる劣化曲線の曲線番号、 $P_{jm_j}$  は部材  $j$  の劣化曲線群における曲線番号  $m_j$  の生起確率、 $J$  は総部材数を表す。

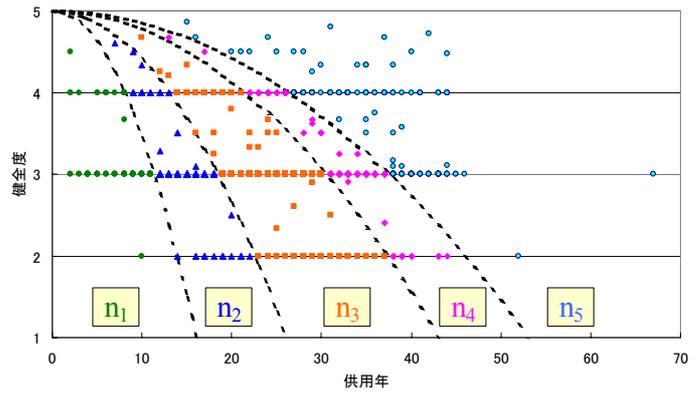


図-1 劣化曲線の領域決定

制約条件は様々な考慮が必要であるが、ここでは各年度の費用の期待値が年度予算を超過しないこととした。以下に制約条件式を示す。

$$g = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^I (C_{it}^R + C_{it}^E) \cdot P_i - B_t \right\} \leq 0 \quad (5)$$

ここで、 $g$  は制約条件、 $B_t$  ( $t=1\sim T$ ) は  $t$  年度における年度予算を表す。

この最適設計問題に対して、当初は設計変数を補修を行う年度とし、対象橋梁を複数の橋梁としたモンテカルロシミュレーションによって各橋梁、各部材の劣化曲線をランダムに与え補修費や健全度の期待値を算出し、GA を用いて LCC 期待値最小化に基づく最適補修計画策定を試みた。実際に対象橋梁 10 橋、ライフサイクル期間内の補修回数を 10 回、1 線列当たりの試行回数を 1000 回、ライフサイクル期間を 50 年として最適化を行ったが、最適解を得るまでに 19 時間を要した。対象橋梁は 10 橋と少なく、試行回数も総組み合わせ数と比較して非常に少ないにも関わらず結果を得るまでに長時間を要する本手法は実用的ではないと言わざるを得ない。

そこで本論文では、設計変数を各橋梁に対する補修計画のシナリオとし、あらかじめ 1 橋梁ごとに全ての劣化曲線の組み合わせの下で全シナリオに対して解析を行い、期待値等のデータベースを作成したのち最適化に用いるという方法をとった。設計変数となるシナリオは橋梁  $k$  の点検を行う間隔を表す点検間隔  $s_k$  ( $k=1\sim K$ ) と橋梁  $k$  の点検を行った際に各部材の健全度がその値以下であれば補修を実行するといったように補修実行の判断の際の基準値となる補修レベル  $h_k$  ( $k=1\sim K$ ) の 2 種類のパラメータから構成されるものとする。ここで、 $K$  は対象橋梁数を表す。補修レベルについて、健全度 5 は健全であるため補修の必要がなく、健全度 1 は最悪の劣化状態で起こすべきではないことから  $h_k$  の取りうる値は 2, 3, 4 の 3 通りとした。補修間隔  $s_k$  の候補値は任意の整数値とし、ライフサイクル期間内の途中での変更も可能とした。先に述べた最適化では 1 橋梁当りの設計空間が  ${}_{50}C_{10} = 1.03 \times 10^{10}$  と膨大な数となるためあらかじめデータベースを作成することができず、最適化の過程で全ての線列に対してシミュレーション計算を行う必要があったために最適化における解析回数が膨大となり結果を得るまでに長時間を要した。しかし、設計変数をシナリオとすること

により設計空間が大幅に縮まるため（後述する計算例では1橋梁当り16通り）、あらかじめ全ての設計に対し解析を行いデータベースを作成することが可能となることから、最適解を得るまでの時間の大幅な短縮が期待できる。データベースの作成について6.で述べる。

### 6. データベースの作成

最適化に用いるため、全シナリオに対して4.で作成した劣化曲線群を用いて解析を行い、データベースを作成する。以下に、橋梁kの1シナリオ( $h_k, s_k$ )に対して行う劣化曲線の全組み合わせでの解析について説明する。

#### 1) 補修シナリオの設定

補修は  $s_k$  年間の点検の結果を参照して、健全度が補修レベル  $h_k$  以下になっていたときに補修が行われるものとする。

#### 2) 劣化曲線の組み合わせの設定

先に作成した劣化曲線群の中から部材ごとにどの劣化曲線を用いるかを設定し、式(4)より劣化曲線の組み合わせの生起確率  $P_i$  を算定する。

#### 3) 健全度の算定

設定した劣化曲線の組み合わせ  $i$  における  $t$  年度の部材  $j$  の健全度  $R_{ijt}$  を算出する。

#### 4) 点検年の判定

$t$  年度が点検を行う年度  $Y$  であれば補修を実行する。 $Y$  の初期値、つまりは1回目の点検年度は実際の点検履歴に基づき橋梁ごとに設定する。後述する計算例では点検履歴に残っている最後の点検年度から5年間で点検が行われるものとして  $Y$  の初期値を決定している。また特殊な場合として、 $t$  年度が点検を行う予定の年ではなかった場合でも、いずれかの部材の健全度が  $t+1$  年度に2未満となる場合に緊急の点検を行った後、補修を行うものとしている。これは現在北海道が行っている定期点検の結果を受けた補修以外に、急な劣化症状が見られた場合に緊急の補修を行っていることに対応する。

#### 5) 点検費用の算定

点検を行う際に発生する点検費用を算定する。点検費用  $C^e$  [円]は橋長  $L$  [m]によって以下の式より算定される。

$$\left. \begin{aligned} C_k^e &= 212000 && (L < 25\text{m}) \\ C_k^e &= 212000 + (L - 25) \times 316 && (25\text{m} \leq L \leq 300\text{m}) \\ C_k^e &= 1081000 + (L - 300) \times 304 && (300\text{m} < L) \end{aligned} \right\} (6)$$

#### 6) 補修の実行

組み合わせ  $i$  における  $t$  年度の部材  $j$  の健全度  $R_{ijt}$  が補修レベル  $h_k$  以下の場合、補修を行う。このとき、補修は点検年の翌年である  $t+1$  年に行われ、要する補修費  $c_j(R_{ijt})$  も  $t+1$  年に発生するものとしている。これは実際の補修が点検の1~3年後に行われているという実態に合わせるために行った処理である。

また、次回の点検年を  $Y + s_k$  とする。

#### 7) 総費用期待値の算定

2) ~ 6) をライフサイクル期間内の全ての年度および全ての劣化曲線の組み合わせのもとで行い、橋梁  $k$  の1シナリオにおける総費用や部材健全度の期待値、標準偏差を算定し、データベースに出力する。劣化予測に4.

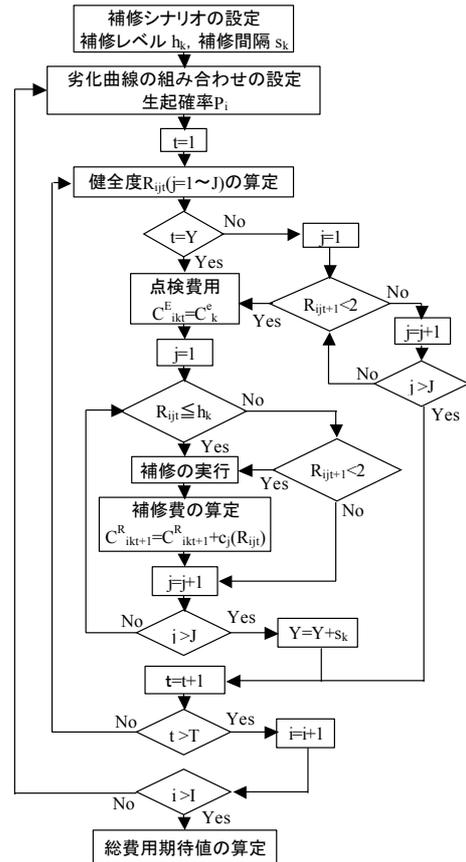


図-2 総費用期待値算定までのフロー

で示した劣化曲線群を用いる場合、総組み合わせ数  $I$  は  $5^6$  となるため、計 15625 通りの解析を行うこととなる。実際に行った計算では1橋梁に対する1シナリオ当りの解析時間はデータ出力の時間を含めて3秒程度であった。以上の一連の流れのフロー図を図-2に示す。

### 7. 数値計算例

ここでは、上記の最適設計問題に対して行った数値計算例を示す。対象橋梁は北海道が管轄する橋梁をモデル化したものの中から鋼橋、コンクリート橋をそれぞれ5橋ずつ任意に選択した10橋とした。また、設計変数は補修レベル2に対して補修間隔3~6年の4通り、補修レベル3に対して補修間隔4~9年の6通り、補修レベル4に対して補修間隔5~10年の6通りの計16シナリオとした。年度予算  $B_t$  は1橋当り150万円でライフサイクル期間内一定とした。またライフサイクル期間を50年とし、最適化にはGAを用いる。GAのパラメータは人口サイズ500、交叉法は1点交叉とし、交叉確率80%、突然変異確率5%、大変異回数20回とし、最大繰り返し回数1000回に達するか、最良解が占める人口の割合が10%を超えたときに計算を終了している。

得られた最適解のライフサイクル期間内に発生する期待総費用は2億6336.8万円となった。表-2に得られた最適シナリオにおける各橋梁の補修レベルおよび点検間隔を、図-3に最適解における総費用および各部材の健全度の橋梁群における平均値の年度推移をそれぞれ示す。図-3は棒グラフおよび左の縦軸が総費用期待値の推移

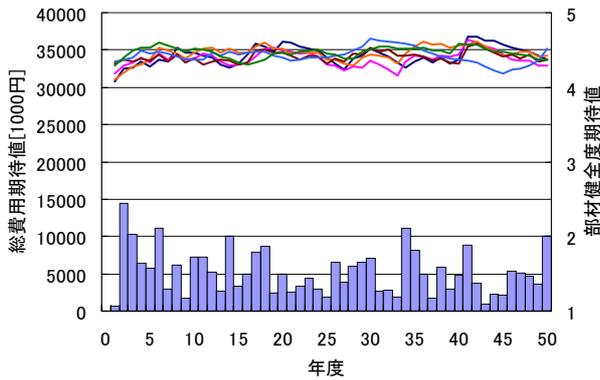


図-3 最適シナリオにおける期待値の年度推移

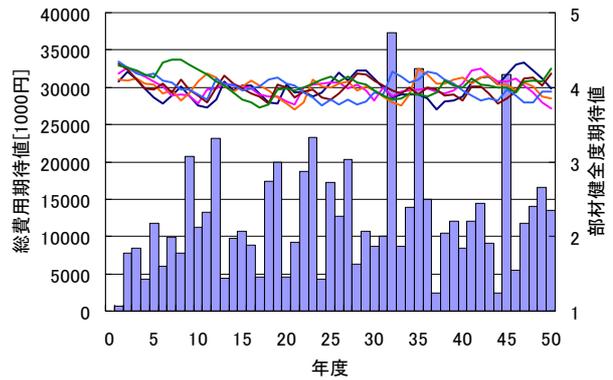


図-4 事後保全シナリオにおける期待値の年度推移

を、折れ線グラフおよび右の縦軸が各部材の健全度期待値の推移を表している。得られた最適シナリオでは、10橋中8橋の補修レベルが4となっており劣化の初期段階での補修によってトータルの補修費を少なくする予防保全型の補修計画の傾向が見られた。また補修間隔については、橋梁番号4以外はいずれも現行の補修間隔5年より長い補修間隔となっており、点検費用を抑制している。また費用期待値の年度推移に着目すると、2年目の費用つまり1年目の点検を受けて行われた補修に伴って発生する費用期待値が最大となっている。これは、ライフサイクル期間開始時の部材健全度が最適シナリオの補修レベルより低い状態にあったために補修が行われる確率が高くなったことによるものと考えられる。またその他にも、1年目には定期点検を行う予定の無い橋梁でも、用いる劣化曲線の組み合わせによっては1年目の部材健全度が2未満となり緊急の点検および補修が行われることも2年目の費用期待値が高くなった原因であると考えられる。

最適シナリオとは対照的に全橋梁に対して補修レベル2、補修間隔5年とした事後保全的なシナリオ（以下、事後保全シナリオ）で解析を行った場合の総費用および各部材の健全度の橋梁群における平均値の年度推移を図-4に示す。事後保全シナリオの場合は最適シナリオと異なり、全体で比較して計画初期の費用は低い値を示している。しかし、各年の費用期待値が最適シナリオと比較して全体的に大きい水準を示しており、ライフサイクル期間内の総和も6億1848.0万円と最適シナリオよりも2倍以上大きくなる結果となった。

また、データベース作成に要した時間は3秒×10橋×16シナリオの計480秒、最適化に要した時間は15秒と短時間で最適解を得ることが出来、本手法を適用することによって計算時間を大幅に短縮することが出来た。

## 8. まとめ

橋梁部材の劣化には多くの不確実性が含まれているため、橋梁の維持管理計画策定の際にはこれらの不確実性を考慮する必要性が考えられる。本論文ではそういった観点のもと、北海道の過去の橋梁点検結果より生起確率を持った複数の劣化曲線によって構成される劣化曲線群を作成し、この劣化曲線群を用いて不確実性を考慮した橋梁の最適補修計画の策定を試みた。

得られた最適シナリオは劣化の初期段階で補修を行うことによって1回あたりの補修費を少なくしてトータルの補修費を低く抑える予防保全型の補修計画となった。また、ライフサイクル期間内において2年目の総費用期待値が最大となることが確認できた。これは、計画開始時の健全度が最適シナリオの補修レベル以下か、計画開始時に緊急の点検を行う必要があったことによるものと考えられる。

また、点検健全度が2以下になった場合に補修を行う事後保全シナリオに対して劣化曲線群を用いて解析を行った。その結果、最適シナリオと比較してライフサイクル期間内の総費用期待値が2倍以上となる結果が得られた。これは、健全度と補修費の関係が比例関係ではなく、劣化が進むにつれ補修費の上がり幅が大きくなることに起因する。

本論文では、1種類のみの劣化曲線群を用いた場合の最適化を行った結果を示した。しかし、生起確率の与え方や用いる劣化曲線式の形状はほかにも様々なものが考えられるため、今後は様々な劣化曲線群を作成し得られる結果の比較を試みたいと考えている。また、数値計算例では10橋を対象とした計算結果を示したが、今後はより多くの橋梁を対象にした計算を試みたいと考える。

表-2 最適シナリオ

橋梁番号	補修レベル	補修間隔[年]
1	4	6
2	4	6
3	4	6
4	3	4
5	4	6
6	2	6
7	4	7
8	4	6
9	4	6
10	4	6

## 参考文献

- 1) 杉本, 赤泊, 中野, 渡邊: 北海道の橋梁の補修費計算モデルの構築と最適維持管理計画について, 応用力学論文集 Vol.6, pp.1121-1130, 2003.
- 2) 杉本, 阿部, 赤泊, 渡邊: 公共投資の経年的シナリオに対する橋梁の健全度推移に関する研究, 土木学会論文集, No.780/I-70, pp.199-209, 2005.
- 3) 鹿汴麗: 遺伝的アルゴリズムの工業設計への応用に関する研究, 平成8年度室蘭工業大学大学院博士論文, 1997.
- 4) Yanev, Bojidar: Bridge Management, John Wiley & Sons, 2007.
- 5) 北海道建設部: 公共土木施設長寿命化検討委員会報告書, 2006.