第Ⅳ部門

橋梁の劣化速度の異質性を考慮した統一的維持管理戦略

京都大学工学部　学生員　○大迫　湧歩
京都大学経営管理大学院　フェロー会員　小林　潔司

1．はじめに

今後，日本では高度経済成長期に建設された橋梁の団塊的な老朽化による維持管理費用の急激な増加が確実である．しかし，橋梁管理者は維持管理予算，技術者不足等の制約に直面しており，今後，管理する膨大な橋梁全てを対象として，個別に維持補修計画を策定していくことは困難である．そこで，橋梁の特性や損傷の種類に基づいてグルーピングし，グループ内において維持補修方針を統一化することで維持補修に関わる意思決定の合理化を図り，橋梁システム全体の最適化が実現されると考える．本研究では橋梁の劣化速度の異質性に着目し，ライフサイクルコストの視点からグルーピングとその補修戦略の決定を行う．

2．統一的維持管理戦略

橋梁システム全体を統計的視点からマネジメントすることを考える場合，健全度に関する経年的な目視点検結果のデータから健全度間の劣化速度を推計することができる．具体的に，ある特定の損傷に着目する時，混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いると，健全度i $(i=1,\dots,I)$ごとに定義される対象橋梁群全体の平均的な劣化速度を特徴づける標準ハザード率$\tilde{\lambda}_i$，橋梁k $(k=1,\dots,K)$において標準ハザード率からの乖離度を示す異質性パラメータε_k，その異質性パラメータの分布形状を支配する形状パラメータφを推計できる[1]．ここで，各橋梁の個別ハザード率は

$$\lambda_i=\tilde{\lambda}_i*\varepsilon_k \tag{1}$$

と表せる．また，異質性パラメータは連続型の確率変数であり，以下のようなガンマ分布に従う．

$$g(\varepsilon_k|\varphi)=\frac{\varphi^{\varphi}}{\Gamma(\varphi)}(\varepsilon_k)^{\varphi-1}\exp(-\varphi\varepsilon_k) \tag{2}$$

ここで，式(1)より個別ハザード率から各橋梁のマルコフ推移確率を求めることができ，それを用いると補修戦略d $(d\in D)$が与えられている時，平均費用法に基づいて対象橋梁の生涯にわたって発生する総維持管理費用であるライフサイクルコストの年平均値を算出することができる[2]．今後，異質性パラメータε_kを持つ橋梁のライフサイクルコストの年平均値を$lcc(d|\varepsilon_k)$と表す．ただし補修戦略dの内容は各健全度iに対して，補修後の回復健全度を示す補修アクション$\eta^d(i)$(補修が行われない場合$\eta^d(i)=i$となる)，補修費用c_i^dの組$(i,\eta^d(i),\ c_i^d)$と定義する．ただしDは補修戦略の集合である．ここで，異質性パラメータの値によらず，全橋梁に同一の補修戦略dを採用すると$lcc(d|\varepsilon_k)$の期待値$LCC(d)$は，式(2)を用いて，

$$LCC(d)=\int_0^{\infty}lcc(d|\varepsilon_k)\ g(\varepsilon_k|\varphi)\,d\varepsilon_k \tag{3}$$

と表すことができる．また，

$$LCC(d^*)=\min_{d\in D}LCC(d) \tag{4}$$

より，期待値を最小化する補修戦略を統一補修戦略d^*と定義する．また，

$$lcc(d^*_{\varepsilon_k}|\varepsilon_k)=\min_{d\in D}lcc(d|\varepsilon_k) \tag{5}$$

より，各橋梁についてライフサイクルコストの年平均値を最小化する補修戦略を個別最適補修戦略$d^*_{\varepsilon_k}$と定義する．ここで，式(5)の個別橋梁に対して厳密に補修戦略を求める方法と、グループ内で統一化された補修戦略を採用する方法のライフサイクルコストの間に大きな差異が存在しないのであれば、簡略化された方法を採用することに一定の合理性が存在する。つまり，

$$r_{\varepsilon_k}=\frac{lcc(d^*_{\varepsilon_k}|\varepsilon_k)}{lcc(d^*|\varepsilon_k)} \tag{6}$$

とすると，r_{ε_k}は$0<r_{\varepsilon_k}\le 1$の範囲で動き，ここに閾値$\mathrm{R}\,(0<\mathrm{R}\le 1)$を定め，$\mathrm{R}<r_{\varepsilon_k}\le 1$を満たす橋梁に対して統一補修戦略を適用するとする．このように統一補修戦略を一定の範囲に適用することで，補修戦略のコ

Yuho OSAKO and Kiyoshi KOBAYASHI
Oosako.yuuho.86n@st.kyoto-u.ac..jp

ンパクト化による政策決定の効率化や補修技術の向上による費用削減等により，維持管理予算や技術者人数の制約の下での橋梁システム全体の最適化が見込める．また，個別の維持管理方針を適用せざるを得ない橋梁群を明らかにし，個別的なマネジメント体制を構築する．本研究では，このような橋梁システム全体をマネジメント対象とした維持管理戦略を「統一的維持管理戦略」と定義する．

3．適用事例

実際の適用事例として国土交通省近畿地整が管理する橋梁 148 橋を対象とし，その中でも床版ひび割れに着目して分析する．床版ひび割れは５段階の健全度で評価される．推計にあたっては MCMC 法(マルコフ連鎖モンテカルロ法)を用いて階層ベイズ推定した [1]．図-1 はこの推定結果に基づいて各橋梁の期待寿命を算出した場合の劣化パスである．ただし，本分析において，健全度５に推移するサンプルが少なく，健全度 4-5 の間ではほとんど劣化しない結果が出たため，暫定的に健全度 3-4 間の劣化速度と 4-5 間の劣化速度は等しいと仮定し今後の分析を進め，図-1 においても健全度 4-5 の劣化過程は省略する．健全度４に達するまでの平均期待寿命は約 40 年であった．

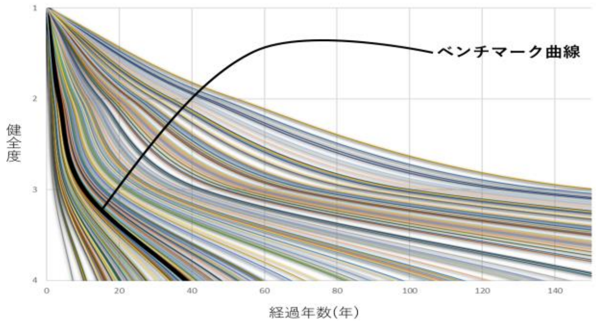

図-1　推計結果

次に，ライフサイクルコストを計算する上で用いる補修工法と補修費用を図-2 に示す．

補修タイミング	補修工法	補修費用	補修後の健全度
2	ひび割れ注入工法	約2.5千円/㎡	1
3	断面修復工法	約5千円/㎡	1
4	鋼板接着補強工法	約100千円/㎡	1
5	床版取替工法	約700千円/㎡	1

図-2　補修工法と補修費用

ここで，式(3)，式(4)より健全度が３と５に推移した場合にのみ補修行う戦略が統一補修戦略となる．さらに式(6)に基づいて統一補修戦略と個別最適補修戦略の比率r_{ε_k}を取ると図-3 のようになる．また，r_{ε_k}に対して統一補修戦略の適用基準 R を$0 < \mathrm{R} \leq 1$の範囲で変化させた時，統一的維持管理戦略を全体戦略として採用した場合と全て個別に補修戦略を設定した場合の橋梁システム全体の総費用差を比較すると，$0.6 \leq \mathrm{R} \leq 1$付近の範囲においては大きく総費用差は発生しないため，統一的維持管理戦略を採用することに対する有効性が窺える．(図-4)

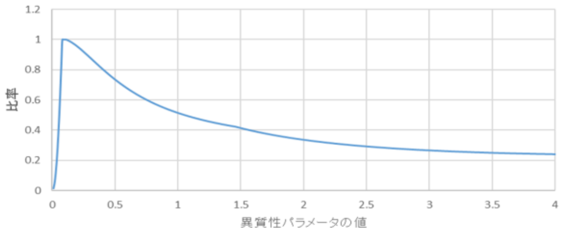

図-3　ライフサイクルコストの比率r_{ε_k}

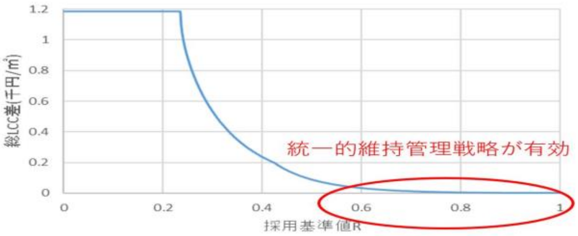

図-4　総ライフサイクルコスト差

ただし，本研究で得られた手法はそのまま橋梁マネジメントに実装することはできない．なぜなら，地方自治体などでは，点検結果が十分に蓄積されておらず，推計値によるグルーピングができないからである．よって，国のビッグデータを地方自治体の補修戦略決定の指標に反映させるステップが必要である．例えば，統一補修戦略の適用基準を定めた時，その境界値となる劣化曲線において各健全度への到達年数が分かる．ここで，供用開始後か補修後からの経過年数と点検時の健全度の情報さえ持っていれば，どの補修戦略グループに属するかを判断できる．このように，地方自治体がより簡便な形で補修の意思決定を行えるように指標化する必要がある．

4．おわりに

本研究では統一補修戦略を１つに設定した場合，適当な適用範囲における統一的維持管理戦略の有効性について検証した．今後の課題として，複数の統一補修戦略を設定した場合等，現モデルを拡張し，実データとの整合性についても検証する必要がある．

参考文献

[1]貝戸清之，小林潔司，青木一也，松岡弘大：混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計，土木学会論文集 D3，Vol.68，No.4， pp.255-271，2012.

[2]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.