

# 橋梁における劣化予測式の違いが 維持管理予算計画に及ぼす影響

(株)ニュージェック 保田敬一\*1  
By Keiichi YASUDA

橋梁の維持管理予算計画を策定する場合、部材の劣化予測式からLCCを算出し、LCCが最小となるシナリオを決定する。使用する劣化予測式は、グラフ形式と状態推移形式の2種類があるが、それぞれに使用する場合の前提条件や特徴があり、うまく使い分けがされていないことも多い。本研究では、グラフ形式と状態推移形式の劣化予測式の特徴を整理し、LCC算出方法の比較を行う。そして、使用に適した場面とその前提条件を明らかにする。次に、橋梁を対象にして、劣化予測式ごとにLCCを算出し、劣化予測式の違いが維持管理予算計画に与える影響を考察する。

【キーワード】劣化予測、グラフ式、状態推移式、維持管理予算計画

## 1. はじめに

アセットマネジメントに関する動きが盛り上がってきている。2002年8月から始まった(社)土木学会建設マネジメント委員会アセットマネジメント研究小委員会(委員長:小澤一雅東京大学教授)が設立されるとともに、東京都、青森県、横浜市、静岡県、大阪府など、自治体も取り組みを開始し、現在では半数以上の都道府県で何らかの維持管理計画策定に関する取り組みが行われている。しかし、自治体の維持管理に関する意識の差、点検に費用がかかり過ぎることなどから計画策定の進捗は早いとはいえない。国土交通省は対症療法的な修繕から、こまめな修繕による「悪くなる前に直す」予防的修繕への転換を促すために、橋の耐用年数を予防的修繕で100年まで延ばす長寿命化促進事業を2007年度から始める方針を明らかにした<sup>1)</sup>。その骨子は、地方自治体には修繕計画を作らせ、その費用の半分の補助することや、補助を受けるには、修繕計画の策定に土木工学の専門家が参加し、その計画の内容を一般に公表することを条件にすること、費用補助が受けられる期間は、都道府県と政令市が管理する国道や主要地方道は5年間、市町村道は7年間とするなどである<sup>1)</sup>。この国の施策により、一気に地方自治体の橋の

長寿命化計画と維持管理計画が進むものと予想される。さらに、2008年5月16日に公開された国の「道路橋の予防保全に向けた提言」<sup>2)</sup>では、早期発見・早期対策の予防保全システムとして、点検の制度化、点検及び診断の信頼性確保、技術開発の促進、技術拠点の整備、データベースの構築と活用という5つの具体的方策を提言している。

しかし、現実に維持管理計画を策定する際、劣化予測を行う必要があるが、使用する劣化予測式にも様々なタイプがあり、うまく使い分けがされていないことが多い。すなわち、使用する劣化予測式は、大きくグラフ形式と状態推移形式の2種類に分類できるが、それぞれに使用する場合の前提条件や特徴があり、LCC累計、予算の平準化などのアセットマネジメントサブシステムにおいてこの前提条件を混同して使われていることもある。例えば、グラフ式の劣化予測式では不確実性を考慮していないので各年度の状態の分布を表現することはできない。一方、状態推移型の劣化予測式で補修のタイミングを決定する際、点検のタイミングを含めたLCC最小化による補修のタイミングを決定することも可能であるが、限界保全ラインに達したかどうかという判断を状態の割合から判断することは難しい。

本研究では、グラフ形式と状態推移形式の劣化予測式の特徴を整理し、LCC算出方法の比較を行う。そして、使用に適した場面とその前提条件を明らか

\*1 道路グループ, tel.06-6374-4678  
E-mail: yasudakc@newjec.co.jp

する。次に、橋梁を対象にして、劣化予測式ごとにLCCを算出し、劣化予測式の違いが維持管理予算計画に与える影響を考察する。さらには、劣化予測式より部材の補修間隔をどうやって決めるのか、劣化予測式が持っている様々な仮定条件とは何かなどを考察する。

## 2. 維持管理予算計画における劣化予測

### (1) 劣化予測の目的

劣化予測はアセットマネジメントにおいて極めて重要な役割をしめる。この理由は、LCC 最小となるシナリオを選定する上で、補修時期を決定するのは劣化予測式によるためである。

表－1 劣化予測手法の特徴

| 手法                 | 概要                                                                                  | 特徴および課題                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 寿命設定 <sup>注)</sup> | 橋梁各部材毎に寿命を設定し、建設時点あるいは補修時点を「健全」、寿命時点を「要補修段階」として、予測直線または曲線を作成する。                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・個別橋梁の部材毎に補修時期が確定的に算定できる。</li> <li>・寿命設定の根拠づけが課題。</li> <li>・寿命に至るまでの劣化進行速度の設定が課題。</li> </ul>                                                                      |
| 劣化予測式(理論式)         | 劣化メカニズムに応じた理論的予測式を使用。<br>例) 塩化物イオン量の浸透速度の予測、中性化速度の予測、RC床版の疲労損傷速度の予測など               | <ul style="list-style-type: none"> <li>・個別橋梁の部材毎に補修時期が確定的に算定できる。</li> <li>・予測式の理論的根拠が明確である。</li> <li>・現時点では、理論的予測式を適用できる劣化要因が限定される。</li> <li>・劣化予測のための調査データが必要。</li> </ul>                               |
| 点検結果の統計分析          | 点検結果に対応する健全度と経過年の関係を統計分析することで、予測直線または曲線を作成。<br>部材毎、劣化要因毎に、環境条件、架設年次等でカテゴリ区分し、予測式を作成 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・個別橋梁の部材毎に補修時期が確定的に算定できる。</li> <li>・点検結果に基づく分析であり、設定根拠が明確である。</li> <li>・劣化要因や各橋梁の環境条件、交通条件等により、点検データを分類することで予測精度の向上が可能。</li> <li>・予測の精度は点検データの性質に依存する。</li> </ul> |
| 遷移確率               | 各健全度ランク間の遷移確率を用いて、各健全度ランクの比率の推移をマルコフ過程により計算。<br>遷移確率は、部材毎、劣化要因毎に複数年の点検結果を用いて算定      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・個別橋梁の部材毎には、補修時期、補修費用が算定できない。</li> <li>・個別橋梁の短期計画への反映が困難。</li> <li>・点検結果等により遷移確率を設定するため、根拠が明確である。</li> <li>・橋梁群を対象とした管理に有効。</li> </ul>                            |

注) ここでの寿命とは、建設後あるいは補修後から「要補修」に至るまでの期間をいう。

劣化予測を扱った文献では、縦軸を性能（健全度）、横軸を時間とした劣化曲線が示されていることが多い。健全性は時間とともに低下していき、補修により健全度は回復することは事実であり、この曲線はイメージがし易いといえる。劣化予測に影響を与える要因としては、構造・幾何条件、材料種別、環境条件、荷重変動などが考えられる。これらの要因が複雑に関連し合って、劣化予測を難しくしているのが現実であろう。このため、劣化要因ごとに供用期間中の劣化進行を予測し、性能の低下を推定する手法がよく用いられる。表－1に主な手法の比較を示す<sup>3)</sup>。この中で、点検結果の統計分析と遷移確率は点検結果を入力データとして用いる点では同じであるが、予測式が確定的か確率で表現されるかの違いである。例えば、ある環境化におかれたRC部材の中性化や塩化物イオンの浸透の進行などは定量的な予測式が提案されている<sup>4),5)</sup>。劣化予測式（理論式）の詳細は文献 6)などに詳しい。一方、遷移確率の代表的な劣化予測モデルがマルコフ連鎖モデルである<sup>7),8)</sup>。

### (2) 劣化予測の特徴

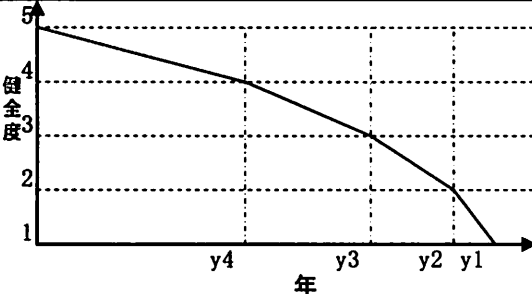
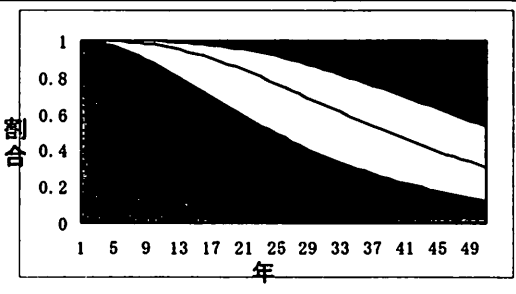
維持管理計画で用いられる劣化予測式には、前述のとおり、グラフ式と状態推移式とがある。両者の比較を表－2に示す。状態推移式では、国の場合、5年に1回の点検を実施し、その際に発見された損傷を補修するという考えで、点検と修繕とのリンクは分かりやすい。劣化進行の緩やかなケースでは5年に1回の点検を10年に1回、あるいは15年に1回と規定している管理機関も存在する。例えば、5年に1回の点検でも、劣化速度が緩やかな場合は、設定補修レベルに到達しない部材がほとんどであり、その場合は補修を実施しない。

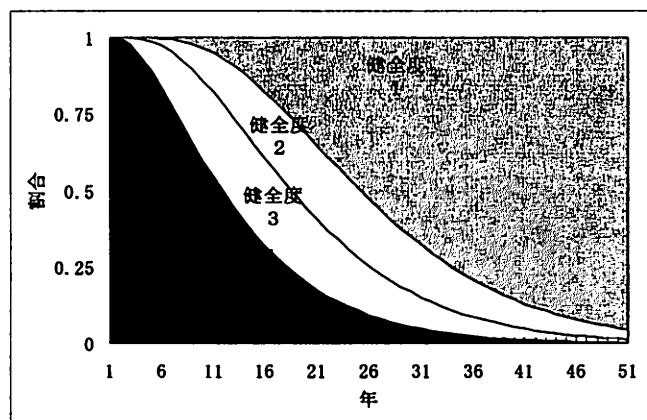
ここで、LCC 累計上重要になる補修時期の算定方法を考えてみる。

何年で補修すればよいのかをどうやって決めればよいのかという疑問に対しては、劣化予測式の形式ごとに考え方が異なる。グラフ式の場合、限界保全ラインに達する時期が補修時期に該当するとして、補修間隔を算出してもよいが、状態推移モデルの場合、健全度ランクの割合で決める方法と固定した年数による方法とが考えられる。

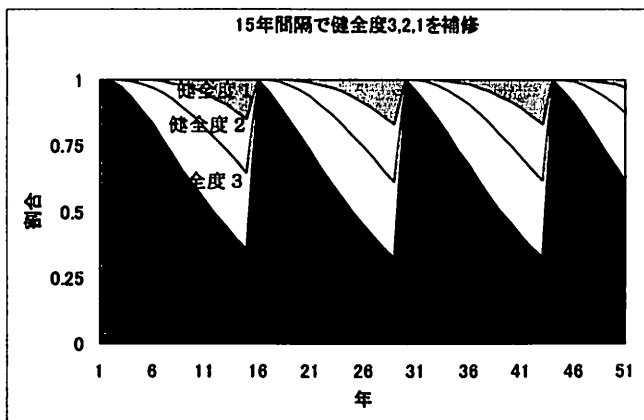
状態推移モデルの補修間隔の決定方法として、①

表－2 劣化予測式の違いによる長期的予算計画での LCC 推計比較

|                          | グラフ式劣化予測式                                                                                               | 状態推移モデルによる劣化予測式                                                                                    |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 補修<br>間隔                 | 健全度が平均値（平均健全度）で表されるため、更新限界以下になる割合が不明。よって、更新限界になった時点をもって全ての部材を補修するという考え方。補修間隔は補修時点から更新限界に至るまでの期間として設定する。 | 例えば、国の場合、点検要領（案）に記載されている 5 年に 1 回の定期点検で発見された損傷を翌年以降 5 年間（点検間隔の範囲）で補修するという考え方。補修間隔は 5 年に 1 回を原則とする。 |
| 劣化<br>予測モ<br>デル          |                        |                  |
| 点検<br>の目的                | 劣化損傷推移の確認が主                                                                                             | 損傷の発見が主                                                                                            |
| 損傷<br>発見の<br>リスク         | 劣化曲線によっては補修間隔が数十年空いてしまうこともあり、新規損傷の発見あるいは急な劣化進行による損傷発見のリスクは比較的大きい。                                       | 5 年に 1 回の点検が必ず行われるので、新規損傷の発見あるいは急な劣化進行による損傷発見のリスクは小さい。                                             |
| 短期的<br>修繕計<br>画との<br>リンク | 更新時期に至る時期の不確実性が大きいため、短期的修繕計画（補修が必要と判断）とのリンクがとりにくい。ただし、劣化の進行が緩やかな場合は、5 年に 1 回の点検を省略することでコスト削減が図れる可能性もある。 | 補修の必要の要否判断は 5 年に 1 回の点検によって実施されるので、短期的修繕計画とのリンクはとりやすい。                                             |



図－1 何も補修しない場合



図－2 15年間で健全度 3, 2, 1 を補修する

健全度ランクの割合（例えば、限界保全ラインとしてランク 3 以上）が 10%以上（予防保全），20%以上，30%以上（事後保全）を想定する方法と，②年数（補修間隔）は予防保全型（2 年，5 年など），現状型（10 年），事後保全型（15 年，20 年など）を想定するという 2 つの方法が考えられる。結果として平均健全度が変わるだけで，補修間隔の長い方が平均健全度は低いということになる，②の補修例を図－1～図－2 に示す。図－1 は何も補修しない場合を，図－2 は限界保全ラインを健全度 3 として 15 年間で限界保全ライン以下となる健全度 3, 2, 1 を補修して

いる。

ここで，①の特徴は，補修間隔が一定とはならないことと，割合の設定根拠が明確ではないということである，②の特徴は，補修間隔を一定に設定することである。健全度ランクの割合（ランク 3 以上）が何%以上になれば修繕するというシナリオは経験的に何%の根拠付けが難しい。

一方，部材を補修した後は補修前とは別の劣化曲線になると考えられるが，現在の知見では補修後の劣化曲線を想定することは，補修後部位の点検データ（損傷の推移）がないという理由から難しく，元

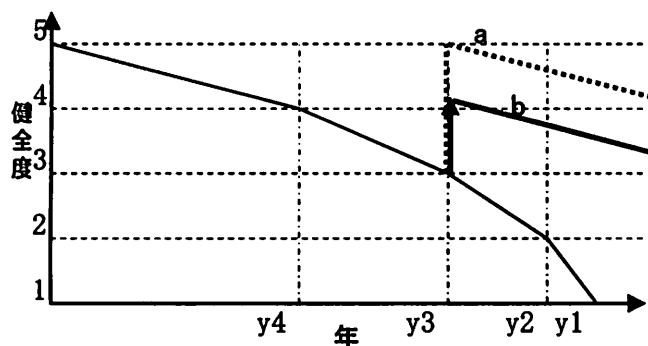
の劣化曲線を使わざるをえない

また、現在行われている点検業務や補修設計業務・工事を考えた場合、数年に1回の点検で不具合が発見されて初めて補修の要否判断をして詳細調査・補修設計・工事に至るという流れになる。仮に点検で損傷が発見されても補修の必要なしと判断された場合は次回点検まで放置される。結局、点検サイクル=補修サイクルという図式になっている。補修に要する費用は次回点検時までには予算を都合して修理することになる。

劣化予測式の算出方法の違いはどうであろうか。

グラフ式の場合も状態推移型の場合も、過去の点検結果を用いて統計的に予測を行うことになる。国土交通省ではグラフ式として2次式の劣化曲線を部材・材料ごとに与えている<sup>8)</sup>。当然、劣化推計の精度は用いるデータの質と量に依存する。

次に、劣化予測式に含まれる前提条件について考えてみる。グラフ式の劣化予測式は何を表しているのだろうか。



図－3 グラフ式劣化予測式

図－3は平均健全度を表しているとして、限界保全ラインを健全度3とすると、平均健全度が3になった時点で3以下(3, 2, 1)を全て補修するという意味なら、ランク3, 2, 1を5に補修してもランク4が存在するので、全て5には戻らない。これを平均健全度が3になった時点で4, 3, 2, 1ランクを全て5に補修することなら図－3のaのようになるが、実際は補修の必要のないランク4は措置をしない。よって、ランク4も混在する結果となり、平均健全度からすると図－3のbのようになる。したがって、この図－3はあくまで劣化の概念図であって、全体の劣化状態を表現しているわけではな

い。鋼橋の塗装塗り替えのように、一括して全体を塗り替えるような場合は図－3のaに該当する。

具体例として、橋梁1径間のRC床版パネル(5×4=20)を想定する。y3年後に全てのパネルがランク3になるということは均等には劣化しないという理由であり得ない。よって、y3年後にパネルの平均健全度が3になるという理解が正しい。この場合、y3年後の状態はランク1,2,4,5も存在するが、その割合は不明である。aの状態というのは、全てのパネル(4,3,2,1)を状態5になるように補修することを意味している。ただし、ランク4は補修の必要性がないし、ランク2,1は補修工費が高くなる。

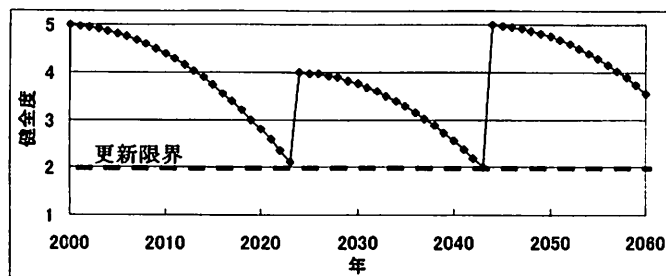
結果的に、グラフ式劣化予測式では平均健全度がいくつになったら補修するのかというタイミングを決める場合には適切であるが、不確実性(ばらつき)は考慮することができない。

以上、劣化予測式の違いを、「グラフ式」と「状態推移式」とに分けて説明したが、両者の違いは劣化速度の不確実性を考慮しているか否かによるものである。グラフ式は不確実性を考慮しないという仮定によっている。劣化速度の不確実性を考慮しない場合、環境ごと、部材ごと、損傷ごとなど、劣化速度の違いに応じた個々の劣化予測式を推計すればよいが、現実には条件ごとの特性を厳密にカテゴリ分けすることは至難である<sup>3)</sup>。構造物の劣化速度が一定ではなく、ばらつきがあることを前提とするならば、その時点において、構造物群全体を「グラフ式」のような確定的な劣化予測式を用いることはできない。劣化速度の不確実性を無視できない環境下で、劣化速度の不確実性を考慮しない劣化予測式を用いるのであれば、劣化速度の違う構造物個々に対する劣化予測式を用いるべきである。ただし、LCC分析の実務において以上のような認識の誤解によって結果の信頼性に与える影響を指摘することは有用性があると考える。

### 3. LCC算出方法

#### (1) グラフ形式の劣化予測式によるLCC算出方法

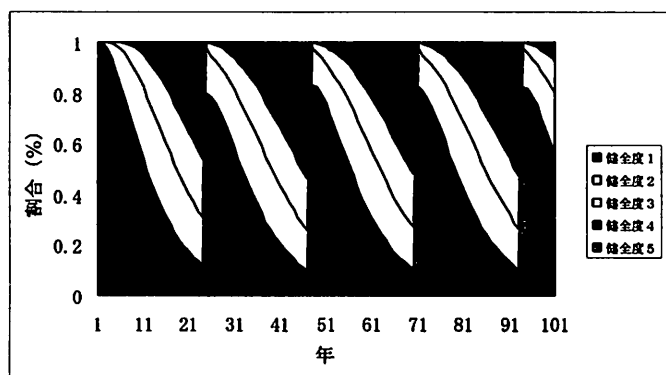
図－4を例にとると、劣化による部材の健全度が更新限界(健全度=2)になった時点で補修を繰り返すというシナリオで、発生した補修費用を所定の年数の間積上げていく方法である。



図－4 LCC 累計グラフ

## (2) マルコフ状態推移形式の劣化予測式による LCC 算出方法

グラフ式の劣化予測式のように、ある特定の健全度に至る年数、すなわち補修間隔を状態推移グラフから判断することは出来ない。状態推移形式の劣化予測式を用いる場合、補修対象となる健全度ランクと補修間隔を任意に与える方法で LCC を集計する。例えば、補修間隔を 24 年とし、24 年ごとに点検を実施し、発見された損傷を補修するというシナリオで、健全度 2 以下 (2,1) を 24 年ごとに補修するというシナリオならば状態推移は図－5 のようになる。



図－5 LCC の推移 (24 年間隔で健全度 2,1 を補修)

## 4. LCC 算出における課題

維持管理計画を作成する際、通常は LCC 最小化モデルによるシナリオを採用するが、LCC 推計時に用いる劣化予測式のタイプにより、異なった課題がある。グラフ式の劣化予測モデルでは、平均健全度がプロットされるが、ある年次での健全度分布が不明であることがあげられる。このため、状態が予想より良い場合と悪い場合の割合が不明なため、状態が悪くなる場合のリスクが計上できないことである。

一方、状態推移形式の劣化予測では、各年度の状

態割合は把握できるが、限界保全状態に達するタイミング (年度) は把握できない。そのため、予防保全型として点検・補修間隔を細かく設定する方法と、事後保全型として点検・補修間隔を大きくとる方法とがある。

もう一つ、維持管理計画を策定する際、シナリオごとに仮定した劣化曲線にしたがって補修のタイミングを設定する。しかし、本来、部材の健全度はばらつきが存在し、予想よりも状態のよい部材と悪い部材とが混在するのが通常である。これを平均健全度という評価指標で表現しているに過ぎない。例えば、平均健全度が 2 になっているのに健全度 1 が過半数近くを占め、健全度 2,3,4,5 が少しだけという状態も存在する。こうなると、補修のタイミングを誤って判断していることになる。1 施設に複数の部材が存在する場合、その部材の劣化はマルコフ状態推移で代表されるように、各部材がある確率で良い状態から悪い状態へと推移していくと考えるのが最も適していると思われる。よって、状態推移と平均健全度のグラフとはリンクしているべきと考えられる。すなわち、補修のタイミング算定に平均健全度のグラフを用いるのであれば、平均健全度とリンクしている状態推移もあわせて考えないと、LCC を危険側に判断してしまうという可能性がある。つまり、平均健全度が 2 になるタイミングを考え、(a)そのタイミングで部材を全て補修するという LCC と、(b)平均健全度が 2 になる状態での健全度分布を考え、2 以下の状態 (2,1) も補修するというシナリオの LCC の方が高くなる可能性がある。(b)の方が状態推移とリンクしており、より現実に近いと考えられる。

以下、平均健全度のグラフと状態推移のリンクに内在する問題点を示し、(a)平均健全度により補修するシナリオでの LCC と(b)状態推移を考慮した場合の LCC との比較を行う。

## 5. 適用例

### (1) 算出条件

構造物の劣化進行は状態推移により表現することが現実的であるとの仮定のもと、劣化速度を変えた複数の状態推移分布から平均健全度を算出する。これで、状態推移と平均健全度のリンクが確保される。そして、求めた平均健全度グラフを補修のタイミン

グ決定に用いる場合の留意点および平均健全度グラフに内在する問題点、劣化曲線の違いによる LCC の差などを検討する。

検討に用いる状態推移は劣化速度を  $p=0.96$  で一定（劣化速度遅い）、 $p=0.93$  で一定（劣化速度標準）、 $p=0.90$  で一定（劣化速度やや速い）、 $p=0.85$  で一定（劣化速度非常に早い）の 4 種類である。1 ランク下に推移する確率を各状態（5→4, 4→3, 3→2, 2→1）で一定としている。

この根拠は、文献 9)でも同じような劣化速度の違いによる検討が行われていることによる。なお、PONTIS で採用されている RC 床版における状態推移確率も 1 ランク下の状態への推移確率がどの状態でも 0.01～0.04 と非常に小さく、本論での劣化速度遅いの 0.96 と近い値となっている。

ここで、先行研究<sup>10)</sup>において、遷移確率の変化、すなわち、状態推移を劣化ランクごとの損傷係数を用いて健全度指数の経年推移という形で関連づけており、本研究でもこの方法を採用する。ここでは、ばらつきを考慮した劣化式と確定的な劣化式をリンクさせることが目的であり、両者の考え方を整合させる必要がある。その場合、確定式は、推移確率からある健全度に至るまでの時間の期待値として表現するという方法も考えられるが、マルコフ状態推移の性質上、時間の経過とともに最下位の状態に収束していくため、確定式として表現するとどうしても時間が経過した場合には下に凸の状態になる。このことは、竹田らの研究<sup>10)</sup>においても同じこと、すなわち、時間の経過とともに健全度指数の曲線が下に凸になっていくことが示されている。したがって、各状態の推移を先行研究と同じ健全度指数で表現することにした。

健全度指数の定義を以下に示す。

$$BHI = \sum_{i=1}^5 Ri \cdot di \quad (1)$$

ここに、 $BHI$ (Bridge Health Index)：健全度指数

$Ri$ ：各劣化ランクの割合

$di$ ：損傷係数（健全度が 5 の場合：1.00、健全度が 4 の場合：0.75、健全度が 3 の場合：0.50、健全度が 2 の場合：0.25、健全度が 1 の場合：0.00）

また、平均健全度 ( $Hm$ ) は式(2)で表す。

$$Hm = 5 \cdot BHI \quad (2)$$

なお、平均健全度と健全度指数とは文献 10)より表一 3 のように設定した。

表一 3 健全度指数と平均健全度

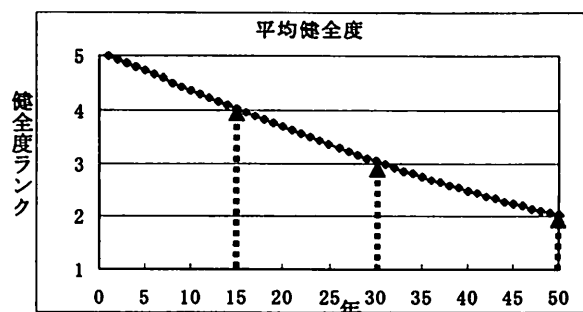
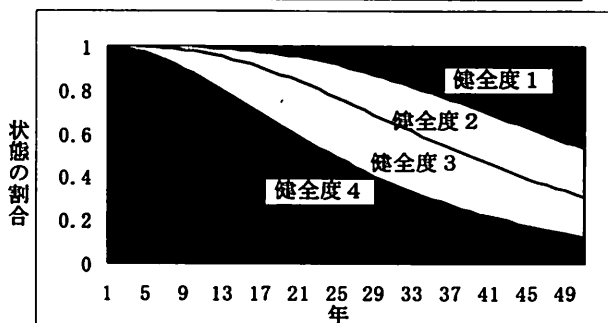
| 健全度指数 | 平均健全度 |
|-------|-------|
| 1     | 5     |
| 0.75  | 4     |
| 0.5   | 3     |
| 0.25  | 2     |
| 0     | 1     |

表一 4 LCC分析における補修単価

| 健全度 | ケース1 | ケース2 | ケース3 | ケース4 | ケース5 |
|-----|------|------|------|------|------|
| 5   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 4   | 13   | 10.4 | 13   | 13   | 13   |
| 3   | 35   | 28   | 28   | 35   | 35   |
| 2   | 80   | 64   | 64   | 64   | 80   |
| 1   | 350  | 280  | 280  | 280  | 280  |

分析に使用した単価を表一 4 に示す。これは、推移のばらつきの程度と補修単価の設定によって結果が異なることを把握するためである。ケース 2 では健全度 4～1 の補修単価を一律 20%減に、ケース 3 では健全度 3～1 の補修単価を一律 20%減で健全度 4 の補修単価はケース 1 と同じに、ケース 5 では健全度 1 の補修単価を 20%減で健全度 4～2 の補修単価はケース 1 と同じにしている。

| 状態推移<br>確率  |   | 今期   |      |      |      |      |
|-------------|---|------|------|------|------|------|
|             |   | 5    | 4    | 3    | 2    | 1    |
| 1<br>期<br>前 | 5 | 0.93 | 0.07 | 0    | 0    | 0    |
|             | 4 |      | 0.93 | 0.07 | 0    | 0    |
|             | 3 |      |      | 0.93 | 0.07 | 0    |
|             | 2 |      |      |      | 0.93 | 0.07 |
|             | 1 |      |      |      |      | 1    |



図一 6  $p=0.93$  で一定の場合の状態推移確率、状態推移グラフ、平均健全度グラフ

図-6に  $p=0.93$  で一定の場合の状態推移確率、状態推移グラフ、平均健全度グラフを示す。

## (2) 平均健全度グラフにおける状態の分布

前節で算出した平均健全度グラフは状態推移とリンクしている。表-5に平均健全度 4,3,2 に達する年数における健全度状態の分布を示す。例えば、図-6では、平均健全度 4 に達するのは 15 年、平均健全度 3 に達するのは 30 年、平均健全度 2 に達するのは 50 年になる。

表-5 平均健全度 4, 3, 2 に達する年数とその時の状態分布

|          | 平均健全度 4<br>(健全度指数 0.75) | 平均健全度 3<br>(健全度指数 0.50) | 平均健全度 2<br>(健全度指数 0.25) |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $p=0.96$ |                         |                         |                         |
| $p=0.93$ |                         |                         |                         |
| $p=0.90$ |                         |                         |                         |
| $p=0.85$ |                         |                         |                         |

この結果から、平均健全度のグラフは、平均健全度が 2 の場合、健全度 2 の頻度が最も多く、健全度 1 や 3,4 の頻度が 2 より少なくなるという分布にはなっていないことがわかる。表-5 より、平均健全度が 2 であっても、健全度が 1 から 5 まで幅広いレンジに分布しているといえる。平均健全度が 2 に達するタイミングをみると、ランク 1 の割合が最も多く、次いで 2,3,4,5 という順になっている。ランク 2 の割合

が最も多くなっているというわけではないことに注意する必要がある。すなわち、平均健全度が 2 に達したからといっても、状態分布を見ると過半数近くがより状態の悪いランク 1 になっていることになる。これでは補修のタイミングを逃していることになる。ただし、状態が 2 から 1 に推移する確率が非常に小さい場合は、時間が経過するにつれ 2 の状態が多くなっていくので、ランク 2 の割合が多くなっていく。しかし、西川によると、構造物の劣化進行は、右肩下がり（上に凸）の曲線で表現され、性能が低下してくると損傷が加速するイメージであることを考えると<sup>11)</sup>、状態 2 から状態 1 へほとんど移行しないとは考えにくく、状態 2 になれば加速的に状態が悪くなり、表-5 に示す分布になると考えるほうが妥当といえる。ただし、平均健全度グラフと状態推移とをリンクさせた場合、マルコフ状態推移の性質上、時間の経過とともに最下位の状態に収束していくため、下に凸の状態になっていく。したがって、式(1)の重み (5,4,3,2,1) を調整する、あるいは線形式である式(1)を多次元式にするなどしないと、状態推移とリンクした上に凸の平均健全度曲線は表現しにくい。今後の課題といえる。

## (3) LCC 比較

まず、点検・補修の間隔は、平均健全度が想定した限界保全ラインに推移するまでの時間という設定となっている。これは初期状態がすべて健全度 5 という条件下でのものであり、2 回目以降は同じ状態に移行するまでの補修間隔は初回よりも短くなっている。

さらに、シナリオ決定に用いる LCC の計算では、劣化速度が非常に緩やかな場合は限界保全ラインに至るまでに数十年間放置するという予算計画もあり得る。予算計画と実際の維持修繕とを切り分けて考えるべきであり、実際の維持管理では、5 年間隔で点検が実施され、部材が極端に劣化することを放置するリスクが少なくなる。本論で対象としているのは、実際の維持管理ではなく、シナリオ決定に用いる LCC の計算であり、あくまで維持管理計画策定での検討である。

平均健全度のグラフより、健全度が 4,3,2 に達する年数で補修を実施するとした際、次の 2 つのシナリ

オで LCC の差を検討した。すなわち、期間を 100 年間とした維持管理計画を策定する際、(a)グラフ式を用いて補修間隔を決定し、LCC を積上げる方法と、(b)状態推移分布を用いて所定の健全度よりも悪くなるケースも合わせて補修するというケースを比較した。(a)のケースでは、状態の分布が不明なため、全ての部材が目標とする健全度になっている（ばらつきがない）とし、全ての部材を補修すると仮定する。一方、(b)のケースでは、平均健全度が 3 に到達した時点で補修する場合、その時点での状態分布から、3 の状態を補修するのは当然であるが、3 より状態が悪い 2 と 1 の状態も補修しなければならない、しかし、3 より状態の良い 4 と 5 は補修対象からは除外される。(a)の方法に比べて、状態の良い部材は補修しないが、状態の悪い部材はより単価の高い工法で補修しなければならない。このように、健全度の分布を考慮しているのか、その結果が LCC にどのように影響しているかを把握できることになる。結果を図-7～図-10に示す。

例えば、劣化速度  $p=0.85$  で状態分布を考慮し、平均健全度 2 で補修する場合の状態分布の推移と平均健全度の推移を図-11に示す。この場合、健全度 2 と 1 は補修するが、健全度 3,4,5 は補修しないため、補修時期を経過しても健全度 3,4,5 の状態は以前と変わらず推移する。一方、健全度 2 と 1 は補修して健全度 5 になっていることが確認できる。ここで、補修時期に健全度 2 の状態が若干存在するのは、毎年の状態推移確率に従って、健全度 3 から 2 に数%推移するためである。

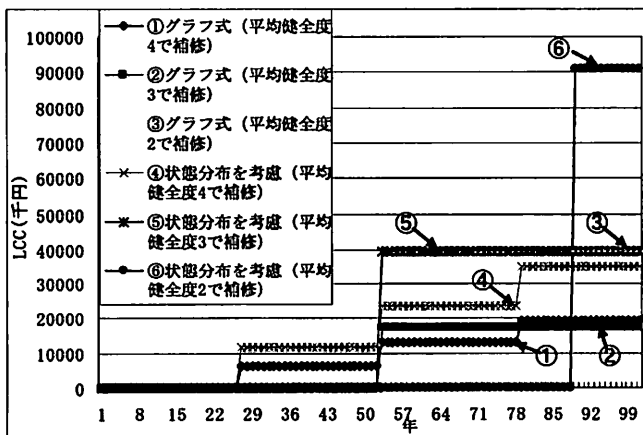


図-7 劣化速度  $p=0.96$  での LCC 比較

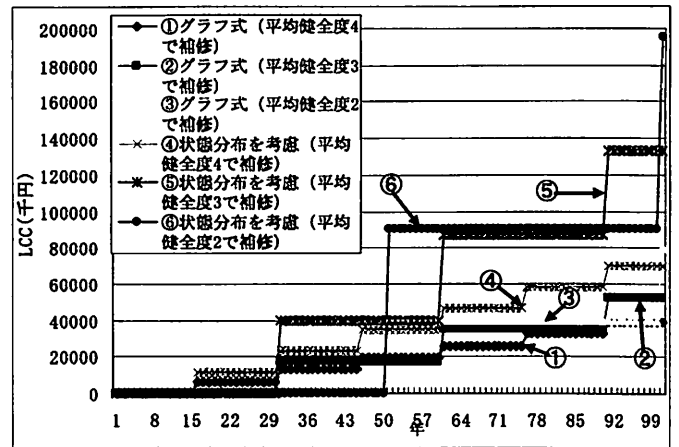


図-8 劣化速度  $p=0.93$  での LCC 比較

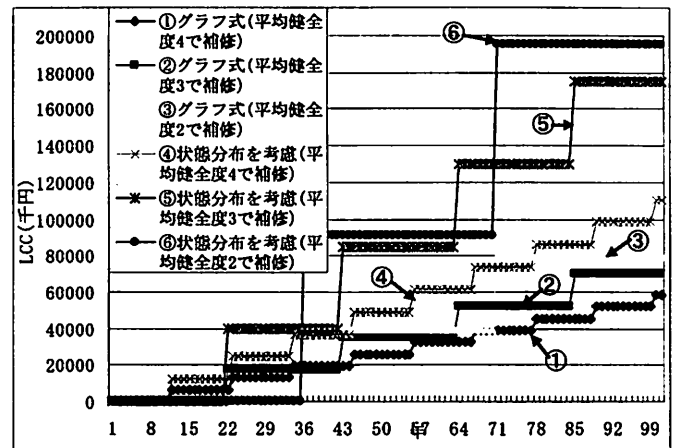


図-9 劣化速度  $p=0.90$  での LCC 比較

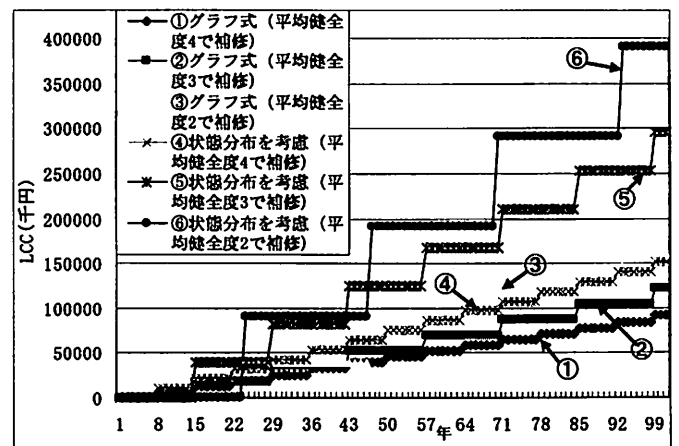


図-10 劣化速度  $p=0.85$  での LCC 比較

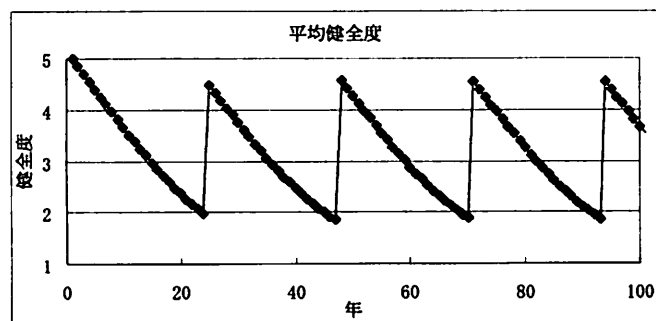
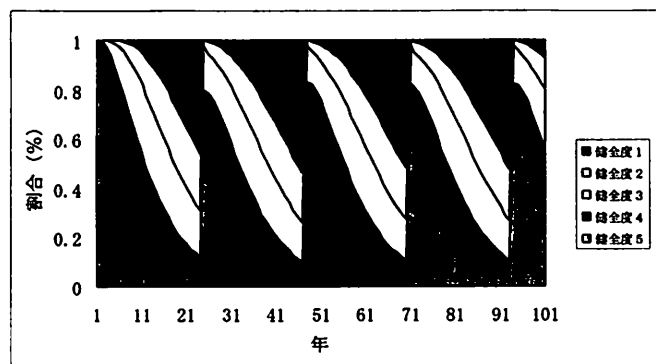


図-1 1 状態分布の推移と平均健全度の推移（劣化速度  $p=0.85$ 、状態分布を考慮、平均健全度 2 で補修する場合）

表-6 LCC累計

| 補修単価：ケース 1        |             | グラフ式による | 状態分布を考慮 | 比率    |
|-------------------|-------------|---------|---------|-------|
| 劣化速度：<br>$p=0.96$ | 平均健全度 4 で補修 | 19,500  | 35,299  | 1.810 |
|                   | 平均健全度 3 で補修 | 17,500  | 39,429  | 2.253 |
|                   | 平均健全度 2 で補修 | 40,000  | 90,985  | 2.275 |
| 劣化速度：<br>$p=0.93$ | 平均健全度 4 で補修 | 39,000  | 69,945  | 1.793 |
|                   | 平均健全度 3 で補修 | 52,500  | 132,700 | 2.528 |
| 劣化速度：<br>$p=0.90$ | 平均健全度 2 で補修 | 80,000  | 195,404 | 2.443 |
|                   | 平均健全度 4 で補修 | 58,500  | 110,760 | 1.893 |
| 劣化速度：<br>$p=0.85$ | 平均健全度 3 で補修 | 70,000  | 174,724 | 2.496 |
|                   | 平均健全度 2 で補修 | 80,000  | 195,342 | 2.442 |
| 劣化速度：<br>$p=0.85$ | 平均健全度 4 で補修 | 91,000  | 151,585 | 1.666 |
|                   | 平均健全度 3 で補修 | 122,500 | 295,894 | 2.415 |
|                   | 平均健全度 2 で補修 | 160,000 | 391,107 | 2.444 |

LCC 累計の総括を表-6 に示す。①グラフ式を用いて算出した LCC と②状態分布を考慮した場合の LCC の差は、劣化確率と補修単価の違いによるものである。例えば、グラフ式で 20 年後に補修する場合、すべての施設（100%）を補修することになるが、一方、状態推移型を用いる場合では、平均値とした場合、約 50%を補修するとすれば、補修量は半分である。しかし、より劣化した部材があり、その場合の補修単価が増加することにより LCC が増加する。つまり、推移のばらつきの程度と補修単価の設定によって結果が異なる。この傾向は予防保全型（平均健全度 4 で補修する）では①と②の比率は 1.7～1.9 程

度であるが、事後保全型（平均健全度 3 あるいは 2 で補修する）では①と②の比率は 2.3～2.5 となる。しかも、平均健全度 3 で補修する場合と平均健全度 2 で補修する場合の LCC はそれほど変わらない。①よりも②の方が LCC が高くなるという理由は、平均健全度より状態が悪くなるケース、すなわち、より工費の高くなる補修を考慮するためである。また、①と②の比率を比較した際、予防保全型より事後保全型の方が高くなる理由は、放置することにより工費が高くなる割合が増加するためである。また、どのケースでも予防保全型より事後保全型の方が LCC が高くなっている。

表-7 補修単価ケース 1 との LCC 比率

| 補修<br>単価  |                |           | グラフ<br>式によ<br>る | 状態分<br>布を考<br>慮 | 比率    |
|-----------|----------------|-----------|-----------------|-----------------|-------|
| ケー<br>ス 2 | 劣化速度<br>p=0.96 | 平均健全度4で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           | 劣化速度<br>p=0.93 | 平均健全度4で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           | 劣化速度<br>p=0.90 | 平均健全度4で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           | 劣化速度<br>p=0.85 | 平均健全度4で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
| ケー<br>ス 3 | 劣化速度<br>p=0.96 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.841           | 0.841 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           | 劣化速度<br>p=0.93 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.842           | 0.842 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           | 劣化速度<br>p=0.90 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.841           | 0.841 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           | 劣化速度<br>p=0.85 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.848           | 0.848 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
| ケー<br>ス 4 | 劣化速度<br>p=0.96 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.899           | 0.899 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 1.000           | 0.824           | 0.824 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           | 劣化速度<br>p=0.93 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.903           | 0.903 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 1.000           | 0.822           | 0.822 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           | 劣化速度<br>p=0.90 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.901           | 0.901 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 1.000           | 0.823           | 0.823 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
|           | 劣化速度<br>p=0.85 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.915           | 0.915 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 1.000           | 0.824           | 0.824 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 0.800           | 0.800           | 1.000 |
| ケー<br>ス 5 | 劣化速度<br>p=0.96 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.944           | 0.944 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 1.000           | 0.863           | 0.863 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 1.000           | 0.819           | 0.819 |
|           | 劣化速度<br>p=0.93 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.947           | 0.947 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 1.000           | 0.859           | 0.859 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 1.000           | 0.817           | 0.817 |
|           | 劣化速度<br>p=0.90 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.947           | 0.947 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 1.000           | 0.861           | 0.861 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 1.000           | 0.817           | 0.817 |
|           | 劣化速度<br>p=0.85 | 平均健全度4で補修 | 1.000           | 0.961           | 0.961 |
|           |                | 平均健全度3で補修 | 1.000           | 0.865           | 0.865 |
|           |                | 平均健全度2で補修 | 1.000           | 0.818           | 0.818 |

さらに、補修単価と推移のばらつき度合いによる影響を把握するために、補修単価を変えた場合の結果を表-7に示す。各健全度ランクでの補修単価を変え、表-6の結果とのLCCの比率を算出した。健全度1~4の補修単価を表-6より一律20%減とした場合(表-4のケース2)は、グラフ式、状態分布を考慮する場合ともに全てLCCが20%減になっている。健全度1~3までの補修単価を表-6より一律20%減とした場合(表-4のケース3)は、平均健全度2.3で補修する場合がグラフ式および状態分布を考慮する場合ともに20%減となるが、平均健全度4で補修する場合がグラフ式で表-6と同じとなる。これは健全度4での補修単価が表-6と同じためである。一方、状態分布を考慮する場合は平均健全度4で補修すると表-6の1/1.1885となる。この値が1.0にならないのは、平均健全度4より小さい3あるいは2に至る部材が若干でも存在するためである。このように、補修対象となる健全度における補修単価を下げていくと当然LCCは減少する。グラフ式の場合は、補修対象となる健全度より小さい健全度の補修単価を変えてもLCCには影響がない。例えば、平均健全度3で補修する場合、健全度2や1の補修単価が変化してもLCCは変わらない。しかし、状態分布を考慮する場合、平均健全度3で補修するとしても健全度3より小さい2や1となる割合が少なからず存在するため、健全度2や1の補修単価によってLCCは変化することになる。

健全度1~2までの補修単価を表-6より一律20%減とした場合(表-4のケース4)は、平均健全度2で補修する場合がグラフ式および状態分布を考慮する場合ともに20%減となるが、平均健全度4.3で補修する場合がグラフ式で表-6と同じとなる。これは健全度4での補修単価が表-6と同じためである。さらに、健全度1の補修単価だけを表-6より一律20%減とした場合(表-4のケース5)では、平均健全度1で補修するというシナリオがないため、グラフ式による場合のLCC比較では表-6と表-7とは同じになる。状態分布を考慮する場合でも同じ劣化速度で比較すると、平均健全度2で補修する方が平均健全度4で補修するよりもLCCは高くなるという傾向は変わらない。平均健全度4で補修する場合、ケース5とケース1のLCC比率は、0.94~0.96とな

っており、若干ではあるが健全度1での補修単価の差が表れている。

このように、平均健全度3で補修する場合、健全度4は補修せずに健全度3、2、1を補修するので、健全度3、2、1の単価差が20%少ないケース3でのLCC比率は0.8となるが、健全度2と1の単価差が20%少ないケース4でのLCC比率は0.8よりも大きくなる。これは健全度3での補修単価がケース1とケース3とで同じためであり、よりLCC比率は1.0に近づいていく。ケース5ではケース4よりもさらにLCC比率が1.0に近づいていく。要は、補修対象となる健全度ランク以上の補修単価に差があってもLCCには影響はなく、補修対象となる健全度ランク以下の補修単価に差があれば単価差の分だけLCCに影響する。

維持管理計画でLCCを算出する際、決定された補修のタイミングでの状態の分布を考慮するかしないかで、LCCが1.7から2.5倍増加する。問題は、1.7から2.5倍という値をどう考えるかである。地方自治体で現在作成されている維持管理計画では何時、どの部材を補修するかというための資料に用いる際は問題がないが、このLCCをもって補修費用の予算として計上する場合は本論で指摘した問題点、すなわち、劣化予測の不確実性を考慮し、状態の分布を見込んだLCCとして計上した方がより現実の劣化の推移に近いと考える。

## 6. おわりに

本研究では、構造物の劣化進行は状態推移により表現することが現実的であるとの仮定のもと、状態推移とリンクした平均健全度のグラフを維持管理計画に用いてLCCを計算する際の問題点を指摘した。

本研究で得られた成果は以下のとおりである。

### ①部材の補修間隔の決め方

維持管理計画に用いる劣化予測式により部材の補修間隔は異なる。グラフ式では限界保全ラインに達する年数を把握することが容易にできるのに対し、状態推移式では限界保全ラインに達したかどうかという判断を状態の割合から判断することは難しい。

### ②劣化予測式が持っている様々な仮定条件の整理

グラフ式は確定値であり、劣化速度の不確実性を考慮しないという前提条件がある。構造物の劣化速

度が一定でなく、ばらつきがあることを前提とするならば確定的な劣化予測式を用いることはできない。劣化速度の不確実性を無視できない環境下で、劣化速度の不確実性を考慮しない劣化予測式を用いるのであれば、劣化速度の違う構造物個々に対する劣化予測式を用いるべきである。

そして、(a)平均健全度により補修するシナリオでの LCC と(b)状態分布を考慮した場合の LCC との比較を行い、両者の LCC にどの程度の差があるのかを検討した。平均健全度での補修のタイミングで状態分布を考慮する場合、考慮しない場合に比べて LCC が 1.7 倍から 2.5 倍増加する。維持管理計画に用いる LCC を算出する場合は、平均健全度グラフにより求めた補修のタイミングで補修することを考えるが、その際、状態分布を考慮した方がより現実の劣化進行に近くなることから、今後は LCC 計算に際して、平均健全度とリンクした状態の分布を考慮することを提案するとともに、LCC に直接の補修費用だけでなく劣化予測の不確実性を考慮していくような議論がなされることが望まれる。

#### 【参考文献】

- 1) 産経新聞, 2007.2.5.
- 2) 国土交通省 道路橋の予防保全に向けた有識者会議：道路橋の予防保全に向けた提言, 2008.5.16.
- 3) 玉越隆史, 大久保雅憲, 渡辺陽太：道路橋の計画的な管理に関する調査研究 ―橋梁マネジメントシステム (BMS) ―, 国土交通省 国土技術政策総合研究所資料, 第 523 号, pp.3-7, 2009.3
- 4) 鳥取誠一, 宮川豊章：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.35-46, 2004.
- 5) 鳥取誠一, 宮川豊章：初期塩化物イオンの影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測, 土木学会論文集, No.781/V-66, pp.157-170, 2005.
- 6) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会：社会基盤メンテナンス工学, 東京大学出版会, 2003.3.
- 7) 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計, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.69-82, 2005.
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告 第 4 号 住宅・社会資本の管理運営技術の開発, 2006.1.
- 9) 保田敬一, 小林潔司：BMS における点検結果と状態推移確率が LCC に及ぼす影響, 土木学会, 建設マネジメント研究論文集, Vol.11, pp.111-122, 2004.12.
- 10) 竹田俊明, 大島俊之, 佐藤 誠, 三上修一：橋梁点検実測データに基づく橋梁資産劣化予測評価の検討, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1157-1167, 2005.3.
- 11) 西川和廣：社会資本ストックの戦略的維持管理とは何か, 平成 20 年度国土技術政策総合研究所講演会, 2008.12.2.

# THE INFLUENCE THAT THE TYPE OF THE DETERIORATION PREDICTION IN BRIDGE GIVES TO A MAINTENANCE BUDGET PLAN

By Keiichi YASUDA

We usually decide maintenance scenario by minimized life cycle cost from deterioration prediction when we make the bridge maintenance budget plan. There are two types of deterioration prediction, which is graph type and condition transition type. Each type of prediction has a precondition and a characteristic, However, it is often that each prediction is not had a good command of well. In this study, we arrange characteristic of two deterioration predictions, and compare the way of calculation of LCC, and we make the phase of suitable scene and precondition clear. Next, we calculate the LCC of each deterioration predictions for the bridge, and we consider the influence that the difference of the deterioration prediction type gives to the maintenance management budget plan.