

BMS における点検結果と状態推移確率が LCC に及ぼす影響

(株)ニュージェック 保田敬一 *1

京都大学大学院 小林潔司 *2

By Keiichi YASUDA and Kiyoshi KOBAYASHI

維持管理シナリオの決定は BMS の中でも重要な位置を占めるが、路線の重要度、LCC、迂回路の有無、交通量、環境条件など様々な要因を考慮しなければならず、管理者にとって必ずしも分かり易い維持管理シナリオの決定方法が示されていないのが現状である。本研究では、個別の橋で LCC が最小となる維持管理シナリオは、点検結果から推定する状態推移確率から求める劣化予測モデルと各劣化状態で採用する補修・補強工法の種類およびその工費との関係から LCC を算出することで決定できることを示す。ケーススタディの対象は、直轄国道の鋼上部工における RC 床版とし、点検結果から状態推移確率を求める方法を示し、維持管理シナリオを変化させた場合の LCC 比較を行うとともに、各推移確率の感度分析を行う。そして、そして、劣化速度が速い場合はこまめに補修した方が、劣化速度が遅い場合は放置した方が経済的になるとの結論を得た。

【キーワード】 BMS, LCC, マルコフ劣化モデル, 維持管理シナリオ,

1. はじめに

我が国では高度成長期を中心にして整備された支間長 2m 以上の橋梁が既に 60 万橋を超えており、それらの多くは昭和 30 年代から 40 年代にかけて架設されたという特徴がある。したがって、特定の時期に集中的に整備された橋梁はまもなく橋齢 50 年以上に達すると言われている。橋梁の老朽化が社会的問題になるにたがって、適切な維持管理の重要性が認識され始めている。

社会経済が低成長期に入り、公共投資予算も大幅な削減の方向にあることから、新設の時代から維持管理および更新の時代に移行しつつある中で、既存橋梁に対して合理的な維持管理対策を行っていくことの重要性が指摘されている。橋梁の健全度判定と劣化予測、診断結果から補修・補強工法を選定し、限られた予算内で最大の効果を得るための橋梁維持管理支援システム (Bridge Management System : BMS) が国内および国内の各方面で構築され始めている¹⁾。

BMS の構築を難しくしている要因として、橋梁自身が複雑な構造をしていることに加えて、劣化損傷のメカニズムも複雑であること、あまりにも多機能を求めすぎることがあげられる。BMS の機能の中で重要な位置を占めるのが劣化予測である。劣化予測は劣化曲線をもとにして行うが、橋梁自体が複雑な構造をしていること、使用条件や環境条件によって劣化の程度に差があること、劣化損傷の要因が複雑に関連しあっていることなどから劣化曲線を定めることは容易ではない。

劣化予測を行う方法はこれまでに様々なものが提案されているが、点検結果を直接劣化予測式に反映させることができる状態推移確率を用いる方法がよく採用されている^{2)~5)}。

一方、BMS を道路管理者が使う局面を考えてみる。BMS を意思決定ツールとして位置付けると、管理者が求める機能は、予算制約のもとで、橋梁の重要度を判断し、何時最適な補修・補強を行うのかの指標となる最小化 LCC (Life Cycle Cost) を算出し、維持管理のシナリオを作ることが求められる。維持管理のシナリオとは、何時どういった劣化状況の時にどのような補修・補強対策を施すかを決定することである。例えば、供

*1 東京本社 道路 G 橋梁チーム Tel.03-5625-1844

*2 工学研究科都市社会工学専攻 教授 Tel.075-753-5071

用期間内に1回も補修を行わない場合、こまめに補修して健全度レベルを常にIV以上に保つなどの維持管理方針のことである。

維持管理のシナリオを決定する方法は、各橋梁の設定した供用期間の中で最もLCCが小さくなる補修・補強対策を選択することであるが、路線の重要度や防災上のネットワークなども関係するため、個別の橋でLCC最小となる維持管理シナリオが必ずしも橋梁群として考えた場合の最適解にはならない場合も発生する。しかし、個別の橋でLCC最小となる維持管理シナリオをまず算出しないと橋梁群としての維持管理シナリオには結びつかない。維持管理シナリオはBMSの機能に含まれるものであるが、路線の重要度、LCC、迂回路の有無、交通量、環境条件など様々な要因を考慮しなければならず、管理者にとって必ずしも分かり易い維持管理シナリオの決定方法が示されていないのが現状である。

本研究では、個別の橋でLCCが最小となる維持管理シナリオは、点検結果から推定する状態推移確率から求める劣化予測モデルと各劣化状態で採用する補修・補強工法の種類およびその工費との関係からLCCを算出することで決定できることを示す。ケーススタディの対象は、直轄国道の鋼上部工におけるRC床版とし、点検結果から状態推移確率を求める方法を示し、維持管理シナリオを変化させた場合のLCC比較を行うとともに、各推移確率の感度分析を行う。そして、劣化速度と維持管理シナリオの関係についても考察を加える。

2. BMSにおける劣化予測と維持管理シナリオ

(1) 劣化予測

BMSにおいて劣化予測は重要である。橋梁の維持管理業務の中で、点検、判定、劣化診断、健全度評価、将来予測、詳細調査、リニューアル判定、補修の優先度判定、リニューアル計画といった業務項目全てにBMSは関連している。

中でも劣化予測は点検結果あるいは理論的劣化モデルから推定される劣化曲線をもとにして、健全度評価および将来予測を行うもので、BMSの重要な位置を占める。また、補修・補強の優先度を決定する際の指標となるLCCを求める場合にも、この劣化曲線をもとにして計算を行うなど、劣化曲線をどのように設定する

かはBMSの精度に大いに関係する。

(2) 維持管理シナリオの決定

維持管理シナリオとは、何時どういった劣化状況の時にどういう補修・補強対策を施すかを決定することである。この維持管理シナリオを決定することは道路管理者にとって容易ではない。何故なら、維持管理シナリオを決定する際に考慮すべき項目として、LCC、路線の重要度、交通量、耐震対策、防災上のネットワークなど様々な項目を考慮して決定しなければならないためである。

維持管理シナリオの例として、

①補修・補強を1回も行わない、②常に健全度レベルIV以上になるように補修する、③健全度レベルがIになるまで放置し、Iになれば補修する、④更新を前提にするなどが考えられる。

設定した維持管理シナリオ毎にLCCを算出し、LCCが最も小さくなるシナリオが最適解となる。ただし、劣化曲線と補修工費、回復度合いおよび補修後劣化曲線などによってLCCは変化する。また、劣化曲線は部材毎、劣化要因、使用条件、環境条件などで変化する。

3. 劣化予測モデル

劣化予測モデルとしては、表-1に示す2つの方法が考えられる⁹⁾。

表-1 劣化予測モデル

	①劣化メカニズムを特定し、力学的特性の低下を予測する方法	②点検における判定区分の低下を統計的に予測する方法
健全度	押し抜きせん断力、鋼材の疲労強度などの力学的特性	点検要領に示されるI、II、III、IV、OKの判定区分を数値化したもの
長所	・健全度と要求性能が明確に定義できる(疲労による耐力の低下と許容応力度との関係)。	・点検結果から直接現時点の健全度が評価可能。 ・実際は複雑な劣化過程を単純なモデルで表現できる。 ・常に点検結果による補正が必要 ・多くの橋梁群を包括して評価することが可能
短所	・点検結果と保有性能(耐力)との関係づけが非常に困難である。 ・伸縮装置や支承など、損傷と要因との関係が複雑で劣化メカニズムを特定することが困難である。	・鋼材の疲労などは前兆が点検結果に現れにくく、点検結果からの予測は非常に困難である。

方法①の代表的なものに、疲労劣化曲線があり、方法②の代表的なものにマルコフ劣化モデルがある。図-1にマルコフ劣化モデルの例を示す。

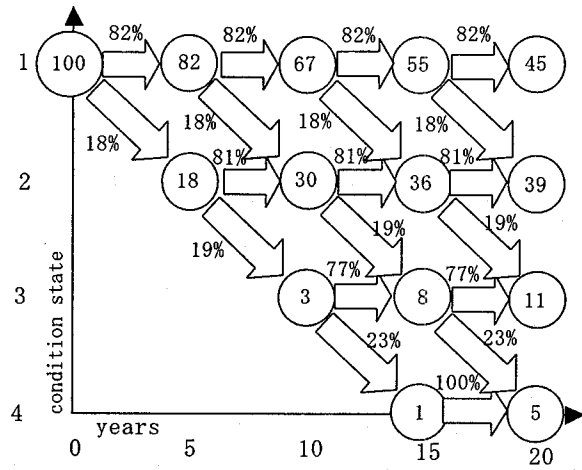


図-1 マルコフ劣化モデル (例)

実際の損傷劣化の進行は時間の経過とともに一様に進行するのではなく、ばらつきが存在する。本研究では図-2に示すように、このような劣化進行の不確定性に対して損傷劣化のレベルを離散化し、確率的な取扱いをする。すなわち、ある損傷レベルにある構造物は、1年後に確定的に次の劣化損傷レベルに遷移するのではなく、ある確率に従って、現状を維持したり、より早く劣化したりといくつかの損傷劣化の状態推移を仮定する²⁾。

健全度レベル	経過年数				
	1	2	...	t-1	t
高い	OK	n5		n5	
↑	IV	n4		n4	現状維持 (p=p41)
	III	n3		n3	1rank劣化 (p=p42)
	II	n2		n2	2rank劣化 (p=p43)
↓	I	n1		n1	
低い					

図-2 劣化進行の不確定性に関する概念図

供用開始t年後にある劣化損傷レベルの状態S(t)は一樣マルコフ連鎖の概念から、(1)式で表せる。S(t)は状態ベクトルであり、構造物の状態を離散的で順序関係のある劣化状態分類で定義したものである。(1)式の状態遷移マトリクスに用いた分類に従うと、状態ベクトルはOK, IV, III, II, Iの分類に対応した5つの要素から成る列ベクトルとなる。Mは(t-1)年の劣化損傷レベルから、t年後の劣化損傷レベルに移行する状態推移確率行列を表す。

$$S(t) = M \cdot S(t-1) \quad (1)$$

ここで、

$$S(t) = \begin{pmatrix} S(OK, t) \\ S(IV, t) \\ S(III, t) \\ S(II, t) \\ S(I, t) \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} p55 & & & & \\ p54 & p44 & & & \\ p53 & p43 & p33 & & \\ p52 & p42 & p32 & p22 & \\ p51 & p41 & p31 & p21 & p11 \end{pmatrix}$$

である。

4. 点検データからの状態推移確率の算出

(1) 対象構造物の諸元

過去の点検データから、劣化状態推移確率を算出するにあたり、ケーススタディをして、直轄国道におけるA橋のRC床版点検データから算出する。以下にA橋の諸元を示す。

- ・橋長：358.58m
- ・支間長：8@30.700m+3@26.900m+30.900m
- ・交通量：17,171台 (12h), 大型車 27.8%
- ・有効幅員：8.750m (総幅員：9.750m)
- ・適用示方書：昭和47年道示 (TL-20)
- ・架設年次：昭和50年
- ・上部工形式：鋼単純鉄桁
- ・下部工形式：控え壁式橋台 (鋼管杭), T型橋脚 (鋼管杭)

また、図-3に橋梁一般図を載せる。図中の平面図で204, 304などは点検における床版のパネル番号を表している。

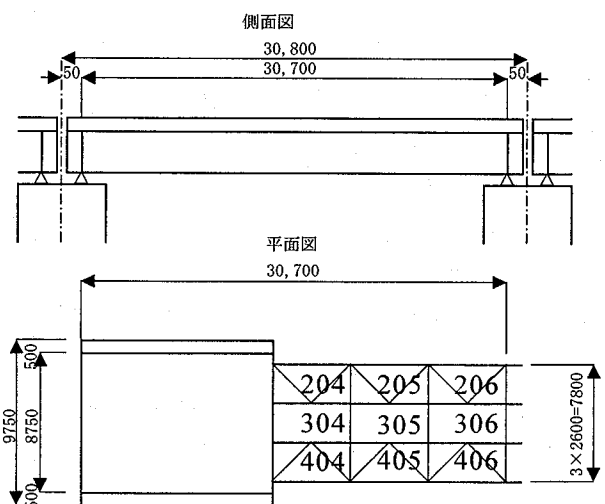


図-3 橋梁一般図

(2) 損傷度推移状況

RC床版は、交通荷重に伴う繰り返しによる疲労損傷が主で、ひびわれの進展メカニズムがある程度解明さ

れており、点検で捕らえやすいため、予測も可能と考えられる。損傷度の判定は橋梁点検要領(案)⁷⁾により、点検の方法は橋梁点検・補修の手引き【近畿地方整備局版】⁸⁾によっている。

図-4にRC床版の損傷度推移状況を示す。また、その損傷度の推移を%で表したものが表-2である。

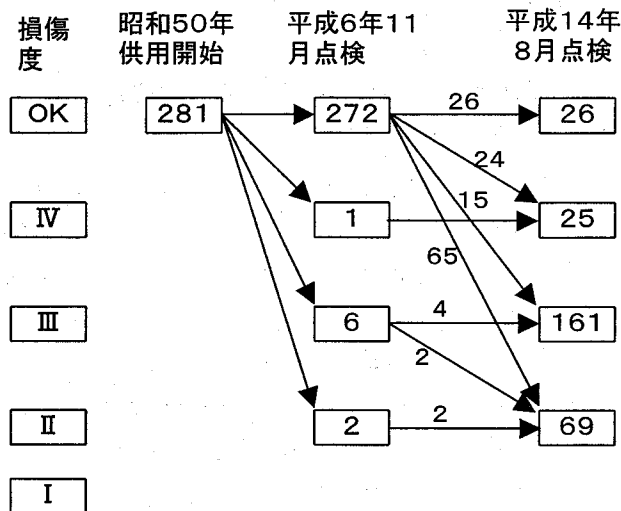


図-4 RC床版の損傷度推移状況

表-2 RC床版の損傷度推移状況 (百分率)

	H6. 11. 18点検結果		H14. 8. 29点検結果	
	部材数	(%)	部材数	(%)
OK	272	96.80%	26	9.25%
IV	1	0.36%	25	8.90%
III	6	2.14%	161	57.30%
II	2	0.71%	69	24.56%
I	0	0.00%	0	0.00%
合計	281	100.00%	281	100.00%

(3) 状態推移確率の算出

状態推移確率の算出方法は、表-2に示す過去2回の点検結果における各健全度の損傷度百分率を用いた。ここで、昭和50年の供用開始時点から平成6年11月までの間の点検結果は残っていない。厳密には、床版パネルごとに状態がどのように推移したか、あるいは、同じパネルでもIVからIIに変化した際に同じ位置であったかなど、課題はあるが、過去の点検報告書などが残っていないことや、損傷位置の変化を厳密に特定することは難しいことなどから、本研究では損傷度百分率の推移から算出する方法をとった。

コンクリート床版の場合、「潜伏期」,[進展期],[加速期],[劣化期]という劣化の状態区分があり、昭和50年供用開始時期からは「潜伏期」に該当すると考えられるが、昭和50年当時からの交通量、特に大型車交

通量は格段に増加している。点検データからみると、昭和50年から平成6年までが「潜伏期」あるいは「進展期」に該当するであろうと考えられるが、「潜伏期」,[進展期]などの状態と点検による損傷度区分I, II, III, IVなどとの関係は明確には定義されていないことから、「潜伏期」を何時から何時までと決定することは難しい。

昭和50年から平成6年までの19年間と、平成6年から平成14年までの8年間とではRC床版の使用条件、特に大型車交通量が大きく異なっていること、今後、国道の交通量がほぼ横ばいに推移するであろうことを考えると、今後床版を打ち変えた後の劣化曲線は昭和50年からの状態よりも、むしろ平成6年当時の交通量が増加している状態からスタートするのが妥当と判断した。

年数tにおいて健全度kの状態が翌年にも同じ状態である確率pは(2)式により算出した。

$$p(k) = m(t-1, k+1) \cdot \{1 - p(k+1)\} + m(t-1, k) \cdot p(k) \quad (2)$$

ここで、

p(k): 健全度kの状態が翌年にも同じ状態である確率

p(k+1): 健全度k+1の状態が翌年にも同じ状態である確率

m(t-1, k+1): 年数t-1における状態k+1の損傷度百分率

m(t-1, k): 年数t-1における状態kの損傷度百分率である。

(2)式は循環式となっているので、初期値を平成6年の点検結果、最終値を平成14年の点検結果として表-3のように与えることで、表-4の太枠の確率が求まる。表-4の太枠の値は1年後に同じ状態である確率である。

表-3 劣化状況 (H6~H14)

	H.6	H.7	H.8	H.9	H.10	H.11	H.12	H.13	H.14
OK	96.80	72.18	53.82	40.13	29.92	22.31	16.64	12.40	9.25
IV	0.36	24.69	30.42	28.59	24.23	19.49	15.24	11.71	8.90
III	2.14	2.21	14.59	28.68	40.48	48.94	54.18	56.76	57.30
II	0.71	0.93	1.17	2.59	5.34	9.21	13.90	19.10	24.56
I	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.05	0.04	0.00

表-4 状態推移確率

	OK	IV	III	II	I
OK	0.7456	0.2533	0	0	0
IV	0	0.4919	0.507	0	0
III	0	0	0.9047	0.0943	0
II	0	0	0	1.0052	-0.005
I	0	0	0	0	1.0525

算出の際の条件として、1年後に飛び級で、OK→III (0.1%), OK→II (0.01%), OK→I (0.001%) に

ランプするケースも考えられるが、本研究では考慮していない。1年後には最大で1ランクまでしか劣化しないと仮定する。したがって、1年後に1段階劣化する確率は1から同じ状態にとどまる確率を引いたものとする。ここで、表-4ではIIからIIにとどまる確率、IからIにとどまる確率が1.0を超える結果となっている。したがって、IIからIIにとどまる確率を0.99、IからIにとどまる確率を1.00と補正した。この理由として、点検結果から、IIからIに移行する確率がゼロ、すなわち、点検結果にIという状態は存在しなかったことによる。Iという状態は要補修状態であり、もし点検で発見された場合は即座に補修がなされるため、点検結果報告書にはその補修履歴が示されていないことも理由の一つと思われる。

補正した最終の状態推移確率を表-5に示す。

表-5 状態推移確率 (最終)

	OK	IV	III	II	I
OK	0.74564	0.25325	0.00000	0.00000	0.00000
IV	0.00000	0.49186	0.50704	0.00000	0.00000
III	0.00000	0.00000	0.90470	0.09430	0.00000
II	0.00000	0.00000	0.00000	0.99000	0.01000
I	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000

$$\begin{pmatrix} \text{OK} \\ \text{IV} \\ \text{III} \\ \text{II} \\ \text{I} \end{pmatrix} (t) = \begin{pmatrix} 0.74564 & 0.25325 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.49186 & 0.50704 & 0.00000 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.90470 & 0.09430 & 0.00000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.99000 & 0.01000 \\ 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 0.00000 & 1.00000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{OK} \\ \text{IV} \\ \text{III} \\ \text{II} \\ \text{I} \end{pmatrix} (t-1) \quad (3)$$

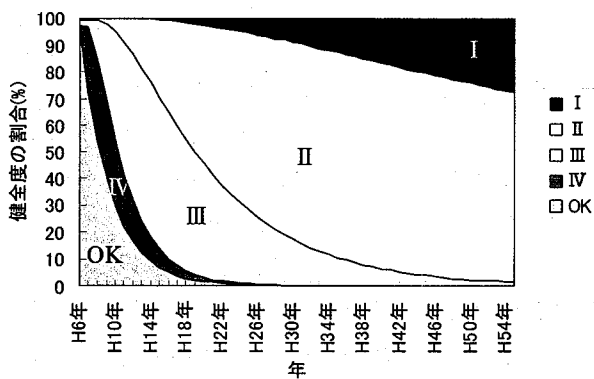


図-5 劣化予測結果

また、状態ベクトルは(3)式となる。

このようにして算出した状態推移確率による劣化予測結果を図-5に示す。

5. A橋における状態推移確率の感度分析

(1) 検討ケース

前節で検討したA橋のRC床版の状態推移確率の維

持管理シナリオを検討するために、維持管理タイプに応じた対策を実施した場合のLCCを算出し、維持管理シナリオの比較を行った。

仮定として、対策を行った際にどの状態に戻るかに関しては、データがないので全てOKに戻るとしている。

検討ケースを表-6に、状態推移確率と各対策における補修工費を図-6に示す。例えば、この図-6においてはアクションの選択として、状態Iで床版打替工を選択しているが、状態OKからIIまでは何もしないというアクションを選択している。

表-6 維持管理シナリオの検討ケース

維持管理型		対策			
		IVでの対策	IIIでの対策	IIでの対策	Iでの対策
予防保全型	case-1	表面被覆工	ひび割れ注入工	鋼板接着工	床版打替工
予防保全型	case-2	なし	ひび割れ注入工	鋼板接着工	床版打替工
事後保全型	case-3	なし	なし	鋼板接着工	床版打替工
事後保全型	case-4	なし	なし	なし	床版打替工

推移確率	I対策	t					工費 (千円)	アクションの選択
		I	II	III	IV	OK		
I	何もしない	1					0	Iでの対策 床版打替工
	床版打替工						350	
II	何もしない	0.01	0.99				0	IIでの対策 何もしない
	鋼板接着工						80	IIIでの対策 何もしない
III	何もしない		0.1	0.9			0	IVでの対策 何もしない
	ひび割れ注入工						35	
IV	何もしない			0.51	0.49		0	OKでの対策 何もしない
	表面被覆工						13	
OK	何もしない				0.26	0.74	0	

No	健全度	パネル数(初期値)
1	I	0
2	II	0
3	III	0
4	IV	0
5	OK	276

図-6 状態推移確率と選択するアクション

(2) LCCの算出

年数tにおけるコストは(4)式で算出する。

$$C(t) = \sum_{k=1}^5 [n(t,k) \cdot act(k) \cdot u] \quad (4)$$

ここで、

C(t): 年数tの時の状態kのコスト (円)

n(t,k): 年数tの時の状態kのパネル数

act(k): 状態kで選択した補修単価 (円/m²)

u: 1パネルあたりの面積 (m²)

k: 状態 (1, 2, 3, 4, 5)

また、LCC算出で考慮していない項目は以下のとお

りである。

- ①補修による交通止めで発生する利用者損失（社会的便益）
- ②割引率
- ③調査点検コスト，仮設物コスト，解体・廃棄物処分コストなど

(3) 健全度とLCCの推移

A 橋の維持管理シナリオとしてランク I まで放置する，すなわち，ランク I になれば床版打ち替えを行うとした場合の劣化状況を図-7 に示す。

次に，各健全度の割合に応じて点数をつけたものを総合健全度として算出した。総合健全度の推移を図-8 に示す。ランク I で補修の場合，図-7 からほとんどが状態 II であり，点数が 40 点に近いのに対し，ランク IV で補修する場合，ほとんどが OK という状態で，総合健全度は 97 点と非常に高い。

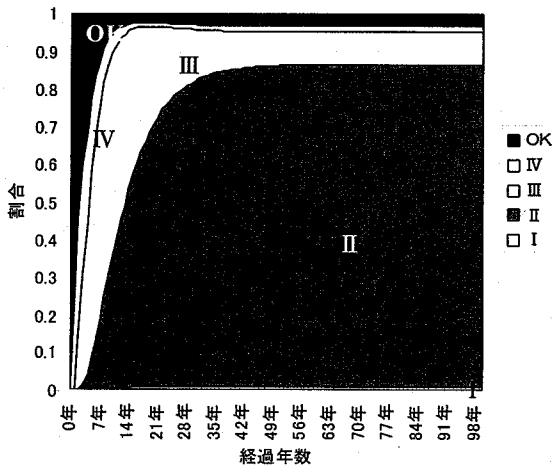


図-7 劣化状況

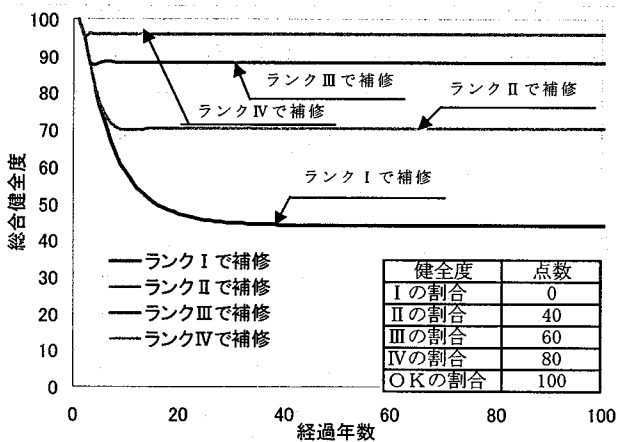


図-8 総合健全度の推移

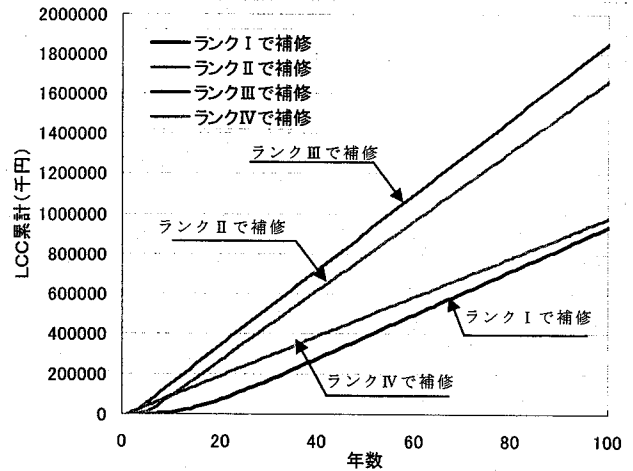


図-9 維持管理シナリオによるLCCの比較

維持管理シナリオによるLCCの比較を図-9に示す。この場合，ランク I になるまで放置するシナリオがLCC最小になるが，図-7からもわかるようにほとんどの床版のランクがIIと要補修状態であり，幹線国道にはこの状態は適さないと考えられる。したがって，こまめに補修するシナリオ（ランクIVで補修）が最適と考えられる。

(4) 補修時期を設定した場合

この状態推移確率による劣化モデルの特徴は2点ある。1点目は，吸収マルコフ過程になっている点であり，状態がOKからIV，III，II，Iというように推移し，I以降は変化しないことである。もう1点は，ある状態kで補修を行い，状態kがなくなっても，翌年kよりも1ランク上位のランクからある推移確率で状態kへと推移してくるため，毎年何らかの補修が必要になる点である。したがって，図-9に示すように，LCCの累計が毎年増加しているのはこのためである。毎年補修費用が発生することはマルコフモデルを用いているためにやむを得ないが，毎年の補修というのは現実的ではない。これを避けるために，補修期間を設定することを考える。例えば，5年に1回補修を行い，その5年間は何もしないというように維持管理シナリオを決定することは可能である。しかし，例えば5年間放置するとその5年間の間に更に下位の状態に推移してしまい，維持管理シナリオによっては補修費用がより高くつくことも予想される。

以下，補修時期を1年毎，5年毎，9年毎，13年毎という設定で，維持管理シナリオをランクIで補修，

ランクIIで補修，ランクIIIで補修，ランクIVで補修と条件を変えてLCCの比較を行った。

図-10 から図-13 にそれぞれ，ランクI，ランクII，ランクIII，ランクIVで補修するシナリオでの補修時期の比較を示す。

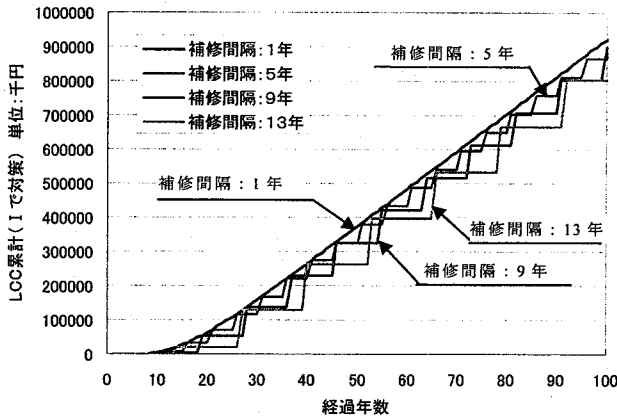


図-10 ランクIで補修するシナリオでの補修時期の比較

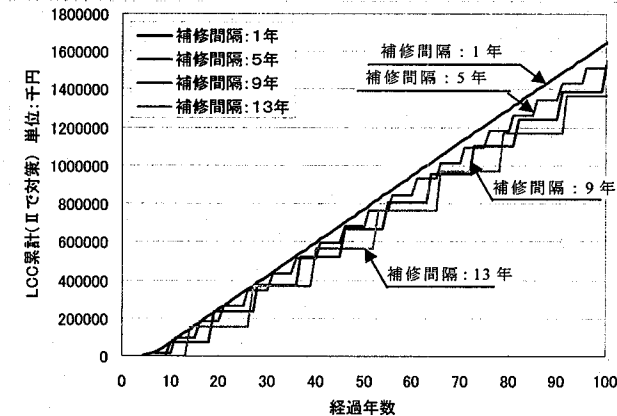


図-11 ランクIIで補修するシナリオでの補修時期の比較

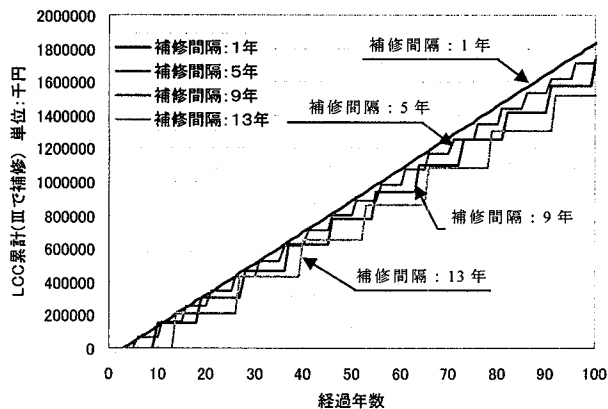


図-12 ランクIIIで補修するシナリオでの補修時期の比較

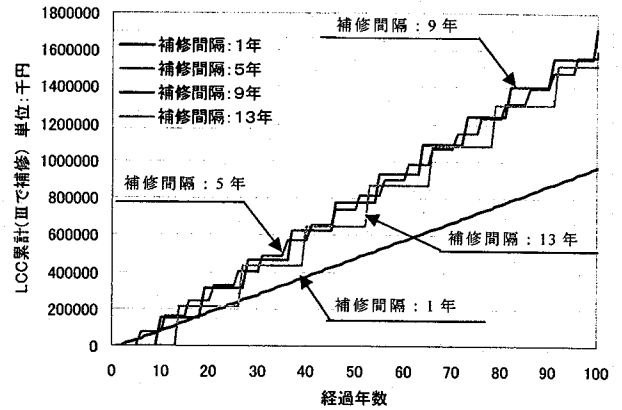


図-13 ランクIVで補修するシナリオでの補修時期の比較

A 橋の場合，ランクI，II，IIIで補修するシナリオでは補修間隔を大きくした方が密に補修するよりもLCCが安くなるという結果になった。一方，ランクIVで補修するシナリオの場合，経過年数15年以降という条件付きではあるが，密に補修した方が補修間隔をあげるよりもLCCが安くなる。

LCCはどの状態で補修を行うかという維持管理シナリオと状態推移確率，対策工の工費とから決定されるが，補修間隔もLCCに影響を与える。

ランクIで補修するシナリオでは，補修間隔1年のLCCが最も高くなる。この理由として，ランクIよりも下の状態にはならないという吸収マルコフ過程が原因で，補修間隔を長くしても短くしてもその間にランクIになる確率はランクIIの数によって決まるため，単年度ごとにみると同じになるためである。したがって，ランクIで補修するシナリオの場合，補修間隔を長くしても，補修間隔が1年の線よりもLCCが下になることになる。

次に，図-11より，ランクIIで補修するシナリオでもランクIと同じ傾向となっているが，これは別の理由による。補修間隔を長くすると，ランクIIからランクIへ推移するパネル数が増えるため，ランクIでの対策工費がランクIIよりも高いことから，補修間隔が長くなるとLCCは増加すると思われるが，図-11ではそうになっていない。この原因として，ランクIIからランクIへ推移する確率が1%と非常に小さいために，補修間隔を長くしてもLCCにはほとんど影響しないためと考えられる。

一方，図-13より，ランクIVで補修するシナリオの場合，補修間隔を短くした方が補修間隔を長くするより

もLCCは小さくなる。この理由として、補修間隔を長くするとその間にランクIVより補修工費の高い下のランクに推移してしまい、補修により多くの工費がかかるためと思われる。

(5) 状態推移確率の感度と考察

A橋の状態推移確率は、交通量が多く、重交通の割合も高い直轄国道の一つの状態推移を表していると考えられる。状態推移の感度を算出することでA橋の特徴がよりはっきりとでると想定されるため、各状態で1ランク下に移行する確率を変化させて比較を行った。なお、感度算出する状態以外は固定の値としている。比較した内容は表-7のとおりである。

表-7 A橋の状態推移確率の感度解析

① 状態Ⅱ→Ⅰの推移確率	変化させる値					結果
	0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	
② 状態Ⅲ→Ⅱの推移確率	0.01	0.05	0.10	0.15	0.20	図-15
③ 状態Ⅳ→Ⅲの推移確率	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	図-16
④ 状態OK→Ⅳの推移確率	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	図-17

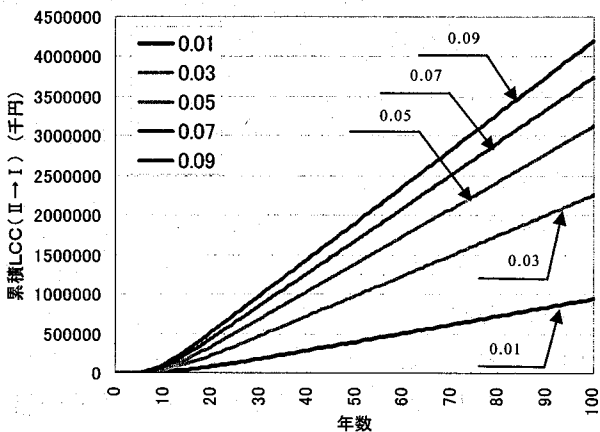


図-14 状態推移確率の感度 (Ⅱ→Ⅰ)

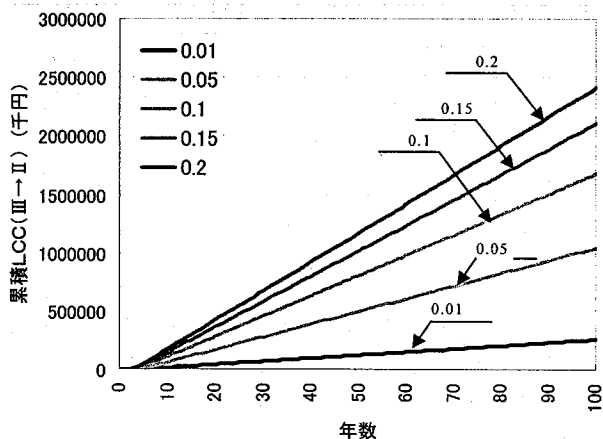


図-15 状態推移確率の感度 (Ⅲ→Ⅱ)

図-14～図-17に各状態での推移確率を変化させた場合のLCC累計を示す。

状態ⅡからⅠへの場合、ランクⅠでの床版打替工の工費が高いため、Ⅱ→Ⅰへの推移確率は小さいほどLCCは安くなる。また、Ⅲ→Ⅱ、Ⅳ→Ⅲ、OK→Ⅳへも同様で、1段下のランクに落ちる推移確率が小さい程LCCは小さくなるという結果になった。この理由として、1ランク下の状態での補修工費と推移確率の関係で、LCCの変化の程度は変わってくるためと考えられる。Ⅳ→Ⅲの場合が、他のケースに比べて感度は高くないが、もともと、Ⅳ→Ⅲでは約半分が1ランク下に移行するような推移確率であったことと、その1ランク下のⅢ→Ⅱで約1割しか1ランク下に移行しないことから、Ⅳ→Ⅲの確率を変えてもその下のⅢのランクでほとんどどまってしまうことが原因と思われる。

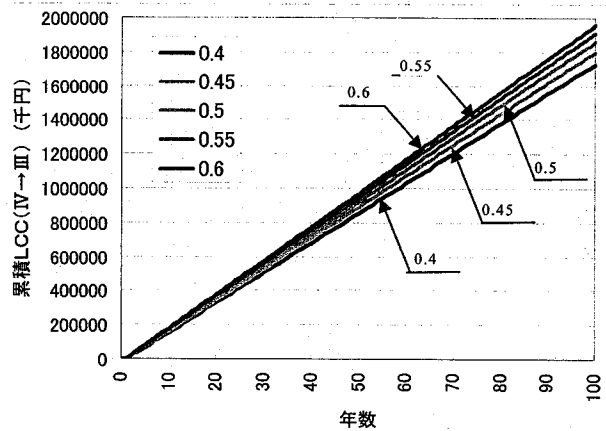


図-16 状態推移確率の感度 (Ⅳ→Ⅲ)

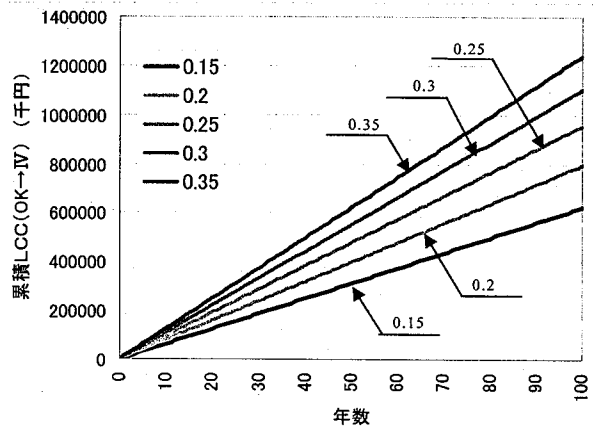


図-17 状態推移確率の感度 (OK→Ⅳ)

6. 劣化速度の違いと状態推移確率の関係

(1) 検討条件

維持管理シナリオをたてる上で、劣化速度の違いは重要な項目である。例えば、劣化速度が早い場合にはどういった補修のシナリオを作ればよいのか、また、ほとんど劣化が進行しない場合には補修シナリオはどう設定すればいいのかといったことを決定するために劣化速度の違いと LCC との関係性を把握することは必要である。

仮定として、1 ランク下の状態に推移する確率 p を全ての判定ランク (OK, IV, III, II, I) 毎に同じとした。

検討は、劣化速度が速く進む場合 (1 ランク下に推移する確率が高い) と劣化速度がゆっくりと進む場合 (1 ランク下に推移する確率が低い) を比較し、各劣化速度で維持管理シナリオを替えた場合の LCC を比較した。

各状態での対策工は表-6 と同じである。

状態推移確率が 0.7 とは、同一ランクにとどまる状態推移確率が 0.7 であることを示し、劣化速度が非常に早い場合で、状態推移確率が 0.8 とは、劣化速度が早い場合を想定している。一方、状態推移確率が 0.9 とは、劣化速度がゆっくりとした場合で、状態推移確率が 0.98 とは、劣化速度が非常にゆっくりとした場合を想定している。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 0.01~0.03 と非常に小さく、状態推移確率が 0.98 のケースとよく似ている。

(2) 結果と考察

図-18 から図-21 に状態推移確率がそれぞれ 0.7, 0.8, 0.9, 0.98 の場合の LCC 累計図を示す。

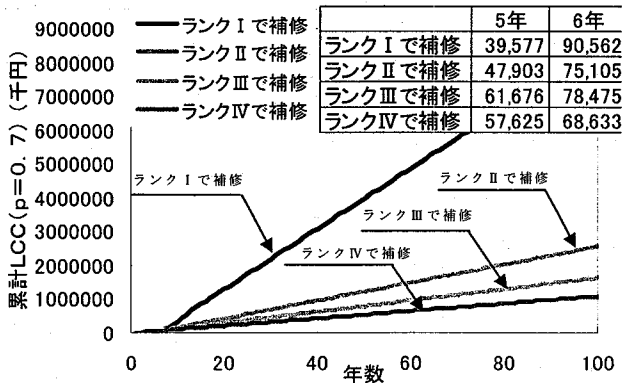


図-18 状態推移確率 $p=0.7$ の場合の LCC 累計

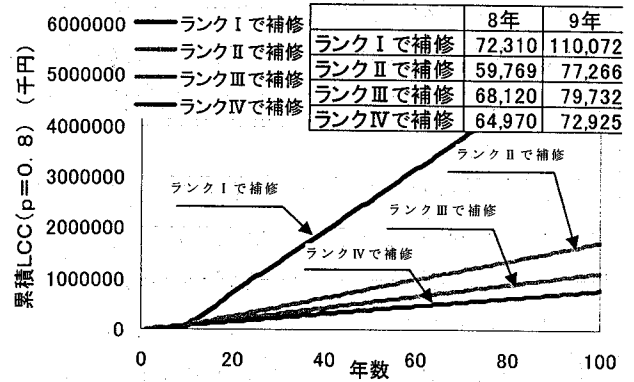


図-19 状態推移確率 $p=0.8$ の場合の LCC 累計

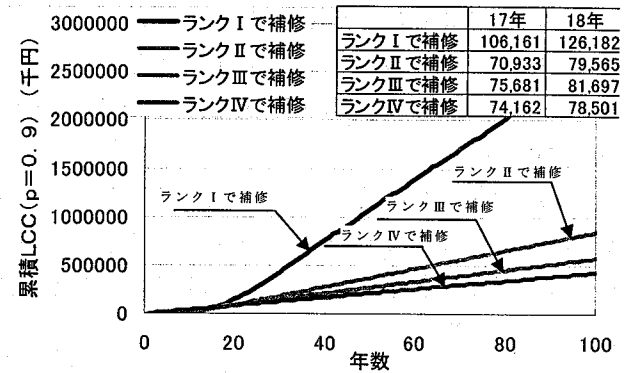


図-20 状態推移確率 $p=0.9$ の場合の LCC 累計

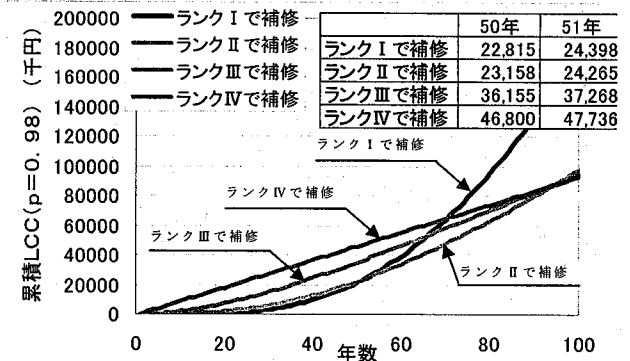


図-21 状態推移確率 $p=0.98$ の場合の LCC 累計

また、状態推移確率が 0.7 の場合に、補修間隔を 1 年, 3 年, 5 年, 7 年と変化させ、維持管理シナリオをランク I, II, III, IV にてそれぞれ補修するとして検討した結果を図-22~図-24 に示す。同様に、状態推移確率が 0.98 の場合を図-25~図-27 に示す。

図-18~図-21 では、ランクIVで補修するという維持管理シナリオが最も LCC が小さくなる年数を併記している。状態推移確率が 0.7 の場合は 6 年目と非常に早く、状態推移確率が 0.98 の場合は 50 年以降と長い年月がたたないとランク I で補修というシナリオが LCC 最小というパターンから脱却できない。

状態推移確率が 0.7 と劣化が非常に早く進む場合は、

図-18よりランクIVで補修の方がLCCは小さくなる。これは、劣化速度が非常に早い場合には状態が悪くならないうちに早めの対策を施す方が経済的であることを示している。

図-22から図-24の補修間隔を変えた場合の比較でも、ランクIで補修する場合は前述のA橋の場合と同じで、吸収マルコフ過程のために補修間隔を最短にする場合のLCCが最も高くなってしまふ。しかし、ランクIIおよびIVで補修するシナリオでは、対策工費の高い1ランク下の状態に移行する確率が非常に高いために、毎年補修する方法が最もLCCが小さくなる。

これは、劣化速度が非常に早い場合は早めの対策を施す方が経済的になるという予防保全的な維持管理方針が適切であるということを示している。

一方、状態推移確率が0.98と劣化が非常にゆっくりと進む場合は、図-21より約50年ほどはランクIあるいはランクIIで補修するという維持管理シナリオが最もLCCが小さくなる。100年間で見てもランクIVで補修する維持管理シナリオが最もLCCが小さくなるが、ランクIIあるいはランクIIIで補修するシナリオと大差ない。

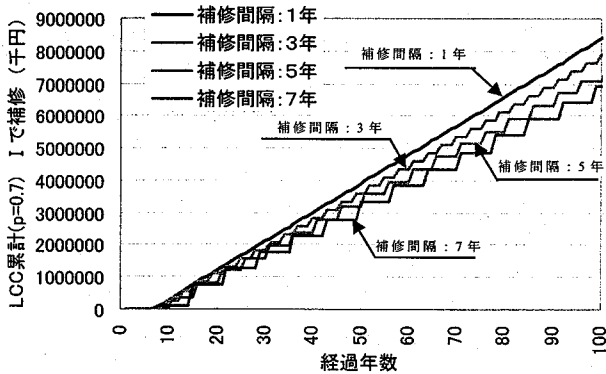


図-22 ランクIで補修するシナリオでの補修時期比較 (状態推移確率 $p=0.7$)

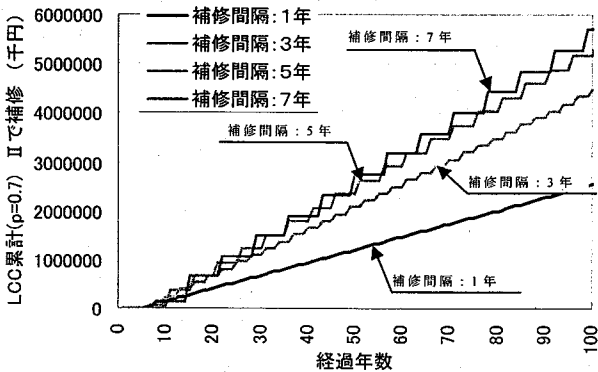


図-23 ランクIIで補修するシナリオでの補修時期比較 (状態推移確率 $p=0.7$)

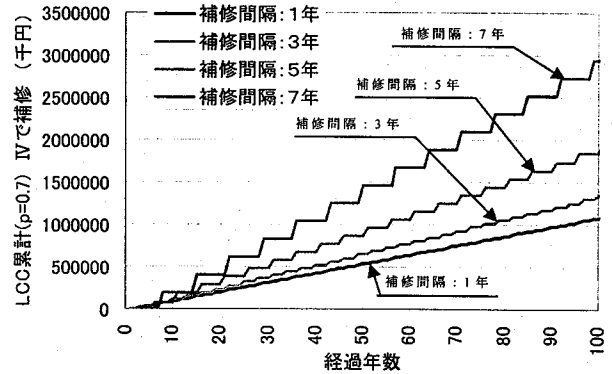


図-24 ランクIVで補修するシナリオでの補修時期比較 (状態推移確率 $p=0.7$)

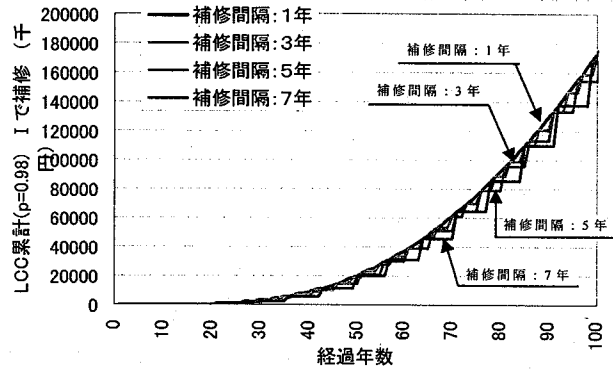


図-25 ランクIで補修するシナリオでの補修時期比較 (状態推移確率 $p=0.98$)

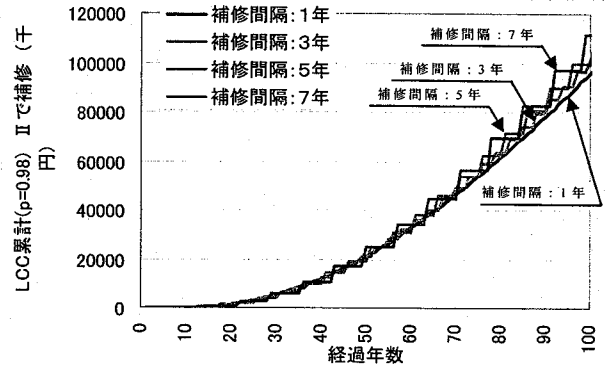


図-26 ランクIIで補修するシナリオでの補修時期比較 (状態推移確率 $p=0.98$)

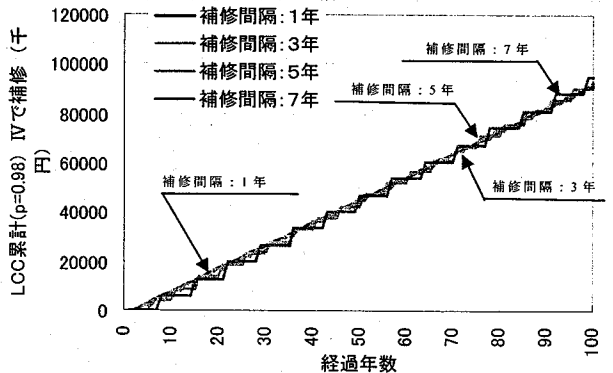


図-27 ランクIVで補修するシナリオでの補修時期比較 (状態推移確率 $p=0.98$)

このように、劣化が非常にゆっくりと進行する場合は、状態が悪くならない段階からこまめに補修するよりも状態が悪くなってから補修するという事後保全型、あるいは放置型の方が経済的となる。

また、図-25～図-27より、補修間隔を長くした場合、ランクⅠで補修するシナリオでは、状態推移確率が0.7の場合と同じく、補修間隔1年の場合のLCCが最も大きくなる。しかし、ランクⅣで補修するとした場合、図-24のように明確な差は出ない。補修間隔を長くしてもLCCに大差はなく、50年程度の比較ならば、逆に補修間隔を長くした方がLCCは小さくなる。

8. 結論

本研究では、個別の橋でLCCが最小となる維持管理シナリオは、点検結果から推定する状態推移確率から求める劣化予測モデルと各劣化状態で採用する補修・補強工法の種類およびその工費との関係からLCCを算出することで決定できることを示した。ケーススタディとして、直轄国道A橋の鋼上部工RC床版の損傷度点検結果（過去2回分）から状態推移確率を算出する方法を示し、維持管理シナリオを変化させた場合のLCC比較を行うとともに、各推移確率の感度分析を行った。そして、劣化速度と維持管理シナリオの関係についても考察を加えた。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 算出したA橋の鋼上部工RC床版の状態推移確率から、維持管理シナリオを変えた場合のLCCを算出し、こまめに補修するシナリオ（ランクⅣで補修）が適切であるとの結論を得た。
- (2) A橋の状態推移確率の感度を算出した結果、1ランク下に推移する確率が小さいほどLCCは小さくなる。
- (3) 補修間隔に関しては、ランクⅠで補修する場合、吸収マルコフ過程が原因で、補修間隔1年のLCCが最も大きくなる。しかし、ランクⅡ、Ⅲ、Ⅳでは状態推移確率と対策工費の関係でどの補修シナリオがLCC最小になるかは変化する。特にランクⅣの劣化が進んでいない状態で補修するシナリオでは、放置すると対策工費の高い下のランクに推移してしまうため、補修間隔を短くするのが経済的となる。
- (4) 劣化速度に着目し、劣化速度が速く進む場合（1ランク下に推移する確率が高い）と劣化速度がゆっくり

と進む場合（1ランク下に推移する確率が低い）場合を比較し、各劣化速度で維持管理シナリオを替えた場合のLCCを比較した。劣化速度が速い場合はこまめに補修した方がLCCは小さくなるが、劣化速度が遅い場合は放置した方が経済的になるとの結論を得た。

今後の課題は以下のとおりである。

- (1) 健全度ランクがⅡ→Ⅰとなる状態推移確率をどうやって求めるかは大きな課題である。なぜなら、Ⅰの状態は直ぐに補修してしまうため、点検記録として残らないことから、今後はⅠの状態の記録も必要であろうと考えられる。また、Ⅰの補修工費が非常に高く、ⅡからⅠにどの程度推移するかによってLCCが大きく変動するためである。
- (2) 補修した場合の状態回復の程度（状態推移確率）をどうやって決定するか？PONTISでは事例として示されてはいるものの、効果を確認することは難しいと思われる。
- (3) 床版単独ではなく、橋梁を構成する様々な部材や損傷要因ごとに状態推移確率を求め、それらを組み合わせた維持管理シナリオを求めることが必要である。

なお、本研究は、新都市社会技術融合創造研究会（委員長：大西有三京都大学大学院工学研究科教授）のインフラ資産評価・管理の最適化に関する研究プロジェクトの成果⁹⁾から一部引用している。

このBridge Management System 報告書では、アセットマネジメントシステムの枠組を示した上で、必要なサブシステムとして、最適修繕戦略モデルを提案している。本研究では、対象とした橋梁は同じであるが、最適修繕戦略モデルの基礎となる状態推移確率の算出方法を具体的に示したこと、維持管理シナリオによる具体的なLCC算出方法、劣化速度と維持管理シナリオとの関係を述べたもので、Bridge Management System 報告書では述べられていない。

【参考文献】

- 1) 国土交通省道路局：「道路構造物の今後の管理・更新のあり方」に関する提言，2003-4.
- 2) 水谷 守，足立幸郎，小塚幹夫：経年劣化構造物の維持補修計画最適化に関する研究，JCOSSAR'95 論文集，pp.341-348,1995.
- 3) 赤石沢総光，吉田郁政，安田 登，宮本幸始：性能設計を活用したRC構造物の保守頻度・時期の最適

- 化に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.277-284, 2001.3.
- 4) 小牟禮健一, 濱田秀則, 横田 弘, 山路 徹: RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, 港湾空港技術研究所報告, 第 41 卷, 第 4 号, pp.3-37, 2002-12.
- 5) 岡田昌澄, 井野勝彦, 船越博行, 黒川直哉: RC床版の劣化予測手法の検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, V-266, pp.531-532, 2002-9.
- 6) 古賀聡明, 中村幸一郎: 橋梁定期点検データによる劣化予測に基づく計画的維持管理について, 2002.
- 7) 建設省土木研究所: 橋梁点検要領 (案), 1988-7.
- 8) (財)道路保全技術センター: 橋梁点検・補修の手引き【近畿地方整備局版】, 2001-7.
- 9) 新都市社会技術融合創造研究会: インフラ資産評価・管理の最適化に関する研究プロジェクト Bridge Management System 報告書, 2004-3.

The influence of inspection data and transition probability of bridge condition to the LCC in BMS

Keiichi YASUDA and Kiyoshi KOBAYASHI

The determination of a maintenance scenario must take into consideration various factors, such as existence of the importance of a route, LCC, and a detour. However, the present condition is that the determination method of an intelligible maintenance scenario is not necessarily shown for an administrator. This research shows that the maintenance scenario from which LCC serves as the minimum can be determined by computing LCC from the kind of the degradation forecasting model for which the state transition probability presumed from a check result is asked, and each repair / reinforcement method of construction adopted in the state of degradation, and a relation with the cost of construction. The RC deck of a direct control national highway is set as the target of a case study. How to ask a check result for state transition probability is shown, and LCC comparison at the time of changing a maintenance scenario is performed. And sensitivity analysis of each transition probability is performed. Furthermore, the relation between degradation speed and a maintenance scenario is also considered.