

道路構造物の維持管理の最適化手法に関する検討

阪神高速道路管理技術センター 企画部	関 惟 忠
保全施設部 保全技術課	前 川 順 道
保全施設部 保全技術課	田 坂 広
保全施設部 保全企画課	足 立 幸 郎

.....

要 旨

高速道路の維持管理においては、道路構造物の経年劣化傾向を把握し構造物の健全度の状態を把握するために定期的に適切な点検を行い、損傷度において適切な補修を行っていくことが重要である。しかしながら、この点検手法・点検間隔・補修の優先度などについては、工学的判断に基づいて定められているのが実状である。また、一般に点検や補修予算は限られており、予算制約条件下における効率的な点検間隔および補修対策が重要な問題となる。ここでは、道路構造物の部材として床版を取り上げ、その損傷データから経年劣化傾向を分析するとともに、マルコフ連鎖モデルを用いた構造物劣化モデルを構築し、さらにコストおよびリスクに立脚した点検-補修モデルを構築し、予算制約条件下における維持管理の最適化手法を示した。さらに、供用路線における今後の維持管理手法について、本モデルを用いて予測を行った。

キーワード：維持補修，マルコフ連鎖モデル，点検，補修，損傷劣化，床版

まえがき

アメリカにおいては、1991年にISTEA法が施行され、点検から補修にいたる総合的な橋梁管理システム（BMS）の構築が推進されてきた。現在PONTISと呼ばれる橋梁データ、点検データ、補修データを管理し、予算制約条件化における橋梁管理の効率化を推進する管理システムが完成している。しかしながら、このシステムは橋梁の架替えにシステムの着眼点がおかれており、損傷のクラス分けも、従来日本で行われているものよりは、重度の損傷に対して主な評価が集中するようにシステムが構築されている¹⁾。

このような状況のもと、橋梁の保守に着目した維持管理システムの構築を検討するため、阪神高速道路の構造物として経年劣化損傷が著しい床版に的を絞り、維持管理の効率化手法を検討した。モデル化に当たっては、損傷の経年変化を定常マルコフ連鎖

モデルで近似し、点検、補修などに関する費用と、損傷を放置しておくことによるリスクに立脚したモデルを構築し、トータルコストの最小化を最適化と位置づけ、その手法の構築を行った。さらに予算制約条件下における同様な最適化手法について検討を行い、点検手法の基本戦略の検証と、供用路線における今後の維持管理に関する予測を行った。

1. 維持管理手法

構造物の経年劣化とは、時間に依存してその性能が低下していく現象と定義付けし、さらにその性能の劣化を指標化して示した場合、経年劣化現象は図-1に示すように表現することができる。性能に関するしきい値が存在するならば、維持補修とは適切に補修を行うことによって性能がしきい値を下回らないように行う行為を指すことになる。

一般に構造物の経年劣化の予測には大きな不確定

性を伴う。したがって、維持補修計画の設定では性能低下の予測に関する不確実性を考慮することが重要である。さらに点検を行うことによって現状を確認し、その後の予測に関する不確実性の幅を減少させることになる。また、性能低下の不確実性はしきい値を越えるリスクの存在を示唆し、余裕を持った補修を行うことも重要である。頻繁に点検を行い、早めに補修を行うことによってリスクを低減することは可能であるが、そのために必要となる費用が膨大となる場合もあり、維持補修計画立案における最大の問題点がここに存在する。

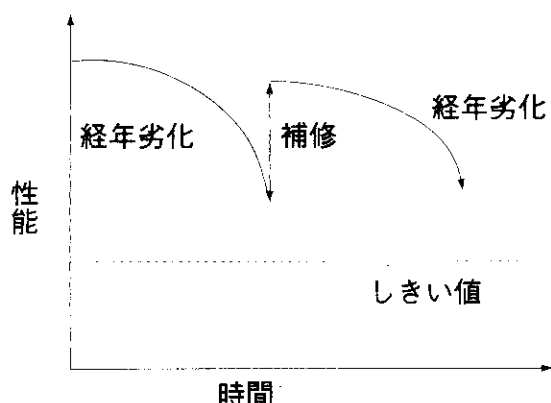


図-1 経年劣化と維持補修の概念図

表-1 維持管理用語の定義

項目	定義
点検 (定期点検)	損傷状態を把握するために行う行為で、これによって損傷状態が確定する。定期的に行うもので数年間隔で行われる。
補修	損傷状態を回復させる行為をいい、定期補修と緊急補修から構成される。
定期補修	定期点検の結果を受け、その損傷状態情報に基づいて行われる補修。予算制約条件下では、点検と補修とが時間的にずれる場合がある。
緊急補修	日常点検(点検費用の中には含めない)によって発見される補修を必要とされる損傷を補修する行為。
補修基準	補修を行うべきと判断される損傷程度。この補修基準に応じて補修の実施が判断される。定期補修と緊急補修の補修基準は、おのずと異なる。
費用	維持管理を行うために直接的に必要とされるものをいい、点検費用および補修費用とから構成される。
リスク	損傷状態をそのまま放置しておくことによって発生する貨幣価値換算した損失。損傷状態との積によって損失額が算出される。
コスト	点検や補修に代表される費用と、損傷を放置することによる損失されるリスクとの和。トータルコストとも呼ぶ。

表-1 に高速道路の維持管理に関する用語の定義を行う。本稿においては、この定義によって行われる維持管理体制における最適化を議論する。

性能低下の不確実性を表現するためには、平均値理論的な議論では、それによるリスクの評価において限界が生じる。したがって、ここでは信頼性解析を利用した維持補修計画の最適化手法を考えた。つまり、点検や補修に伴う費用と、性能がしきい値を下回ることに付随するリスクを算定し、両者のバランスを取ることによって上記問題の解決を図ろうとしたものである。

一般に維持管理の最適化の方法としては大きく三種類が考えられる。

- 1) 費用を拘束条件としてリスクを最小化するもの
- 2) リスクを拘束条件として費用を最小化するもの
- 3) 両者の和(トータルコスト)を最小化するもの

本研究においては、トータルコスト最小化を最適化と定義付け検討を行うものとした。また、対象としては、経年劣化損傷が著しい床版を対象とした。

2. 予算制約条件のない場合のトータルコスト定式化²⁾

2-1 床版損傷の状態と遷移の定式化

床版損傷状態は、数年間隔で実施される定期点検によってその損傷状態が把握される。この損傷情報は、一般に損傷ランク別に評価されている。これらの情報は床版パネル単位で評価されるため、このまま離散系の損傷状態を表す列ベクトルとして扱うこととした。

この損傷状態を示す列ベクトルを状態ベクトルと呼び、任意時間 τ における状態ベクトルを $S(\tau)$ と表現することとした。またここでは、全体パネル数からの比率で状態ベクトルを定義した。

$$S(\tau)^T = \{ P_1(\tau), P_2(\tau), \dots, P_n(\tau) \} \dots\dots\dots (1)$$

$$\sum P_i(\tau) = 1.0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで $P_i(\tau)$ は時点 τ において損傷ランク状態 i である確率。上付き τ は転置を表す。

経年劣化によるパネルの損傷状態の遷移は、定常マルコフ過程で仮定することを考え、単位時間当たり(ここでは1年)の遷移マトリックス T を用いて

表現することとした。遷移マトリックス T は過去の定期点検データに基づき、単位遷移時間を1年間として評価する。つまり T は損傷ランクの数の行と列を持つ行列であり、一年後にどのランクまで損傷が進展するのかを表現する確率行列である。なお、定常マルコフ過程では遷移特性が時刻に依存せず、後の遷移状態が現在の状態のみに依存し、過去の状況は何ら関係を持たないとするものである。このように仮定を行えば、 n 年の遷移後の状態ベクトルは次の式で示される。

$$S(n) = T^n \cdot S(0) \dots\dots\dots (3)$$

なお、損傷状態の遷移をマルコフ過程とする明確な根拠はないが、確率過程に対する一次近似としてこの仮定を採用した。したがって、ここでは損傷遷移速度の時間依存性は考慮していないことになる。また本来なら T は、1つの床版パネルの経時変化に基づいて評価されるべきである。しかし、実際にこのようなデータを得ることは困難であるため、全床版パネルの損傷状態の変化を T として扱うことにした。

2-2 損傷補修による損傷状態の変化

補修は特定の損傷状態にあるパネルの損傷状態を改善する行為として実施される。補修には2つの種類があり、一つは定期点検結果に基づいて行われる定期補修であり、他の一つは定期点検時以外において発見された重大な損傷に対して損傷状態を回復させるために行われる緊急補修である。

予算制約条件のない場合は、定期点検後に補修が必要であるパネルに対して、全てのパネルに対して補修を行う場合として定式化を行うとする。つまり、定期点検間には定期補修を行わないとする。この場合、以下の手法にて床版パネルの損傷遷移ができる。

ここでは、これら補修行為はパネルの状態変化として捉えることとし、その状態変化を補修マトリックス R により表現するものとする。 $S'(\tau)$ は、補修後の状態ベクトルを表す。

$$S'(\tau) = R \cdot S(\tau) \dots\dots\dots (4)$$

補修マトリックスは補修計画により確定し、その要素 r_{ij} は補修による状態 j から状態 i への変化を表すもので値は1.0もしくは0.0である。緊急補修のモデル化も同様で、その様子は緊急補修マトリックス R_A で表現される。 $S''(\tau)$ は補修後の状態ベクトルを表す。

$$S''(\tau) = R_A \cdot S(\tau) \text{ or } R_A \cdot S'(\tau) \dots\dots\dots (5)$$

以上のように、対象年の補修行為が終了した後、状態ベクトルの更新がなされる。

$$S(\tau+1) = S''(\tau) \dots\dots\dots (6)$$

2-3 コストの評価

一般に維持管理に関わるコストの算定においては、金利などを考慮した割引率を設定する場合があるが、ここでは簡略化のため考慮しないこととしている。経年劣化を示すパネルの維持補修を対象とした場合、考慮すべきコスト項目には大別して以下の三つがある。

- 1) 点検に関わる費用 (CI)
- 2) 補修に関わる費用 (CR)
- 3) パネルの性能低下に伴うリスク (CA)

点検費用 CI は点検の方法(精度)と点検間隔によって異なる。

補修は点検結果に基づく計画的補修を対象とするが、その費用 CR は補修方法すなわちどのような状態の時どのように補修するかによって異なる。定式化においては補修費用ベクトル E_R を用いて以下のように表現する。その要素 er_i は状態 i で補修を行う場合それに要する費用、行わないならば0である。

$$CR(\tau) = E_R^T S(\tau) \dots\dots\dots (7)$$

一方、リスク CA は損失期待値として定義される。即ち、経年劣化により特定の状態となる確率(状態ベクトル) $S(\tau)$ とその状態となった場合に生じる損失費用(損失ベクトル) L あるいは緊急補修費用(緊急補修費用ベクトル) E_A との積との和で表現する。

$$CA(\tau) = L^T \cdot S(\tau) + E_A \cdot S(\tau) \quad \dots\dots\dots (8)$$

損失費用ベクトルおよび緊急補修費用ベクトルは構造物が特定の状態にあることによる不具合や、緊急補修を行うための費用を表現するもので、その要素 ca_i は構造物が状態 i であることに関わる予想損失額を示すものである。

以上の検討により算定される各コスト評価により、例えば点検間隔 t での累積トータルコストは次式のように算定される。

$$ST(t) = CI + CR + \sum_{\tau=1}^t CA(\tau) \quad \dots\dots\dots (9)$$

3. 予算制約のない状態での床版の維持管理状態試算³⁾

阪神高速道路公団においては、これまで5年に一度全床版を定期点検しており、評価は損傷度の大きいものから“(a), A, B, C, OK”の5段階で行っている⁴⁾。現在補修基準として、“(a)”とは緊急に補修が必要な状態を示す。“A”とは定期補修の基準となっている。本モデルを用いて床版の維持管理のトータルコストを算定するに当たっては、損傷の時間的遷移を適切に評価する必要があること、補修に当たっては鋼板接着補強を行っているが、その補修前後の損傷遷移を適切に評価すること、重度損傷への遷移について確実に評価を行って損傷遷移を評価する必要がある。ここでは、過年度の点検結果を解析することによって損傷遷移を評価することとした。また、“(a)”については損傷程度のさらに大きいものを区別するために、“AAA”と“AA”とに区別を行った。“AAA”は補修法として緊急に床版うち換えが必要なものであり、“AA”は通常の鋼板補強で対応できる損傷を想定している。最終的に、補修前の損傷遷移は、“AAA, AA, A, B, C, OK”補修後の損傷遷移は“AA*, A*, B*, C*, OK*”で表現した。

図-2および図-3には、本モデルの重要な中核をなす損傷遷移マトリックスおよびその特性を示している。補修前の床版については、昭和46年以降に

設計された床版の点検結果より、その損傷遷移をまとめた。補修後の床版については、昭和46年以前に設計された床版で既に補修が完了しているものを統計処理の対象としている。ここで、補修後床版の損傷遷移が早く進むようにみえるが、これは損傷ランクの区分が補修前と補修後では異なるため、単純な両者の比較はできない。点検データの分析より、補修前床版においても損傷劣化はそれほど進まないことがわかる。これは、補修前床版の損傷遷移状況を昭和46年以降に設計された床版の損傷遷移データを基にして作成しているためである。

トータルコストを算定するためには、定期点検・定期補修・緊急補修に係る費用と、床版が補修され

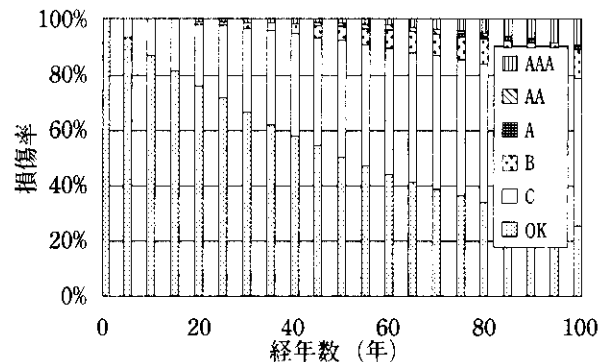


図-2 補修前床版の損傷遷移

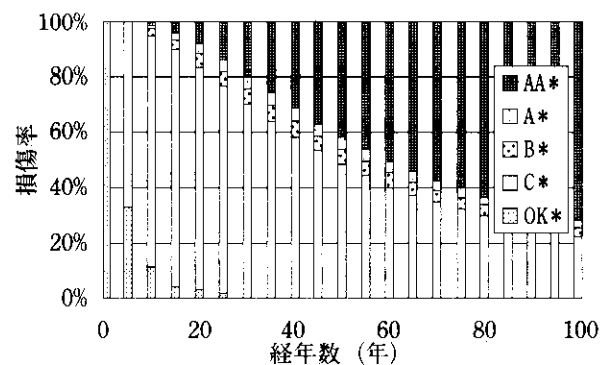


図-3 補修後床版の損傷遷移

ないことによる損失の算定が必要である。点検補修費用は実費用を用い、損失に関しては補修において通行止めが必要な場合は通行量の減少やそれに要する広報費などに起因する損失、コンクリート片落下などによる被害などを定量的に評価した。

本モデルを用いて維持管理総費用（トータルコス

ト)の伸びを想定してみた。ちなみに費用については実際の費用の算定を行っているが、実額は示さず、ここでは単位をUとして特別な貨幣単位として表記する。図-4では維持管理の重要性を示すため補修費用の感度分析を行った結果について示す。この場合A以上の損傷になった場合、緊急補修が行われるがこの費用が大きく総費用に関わってくるのがわかる。早期補修計画を立案する必要がある事を示している。

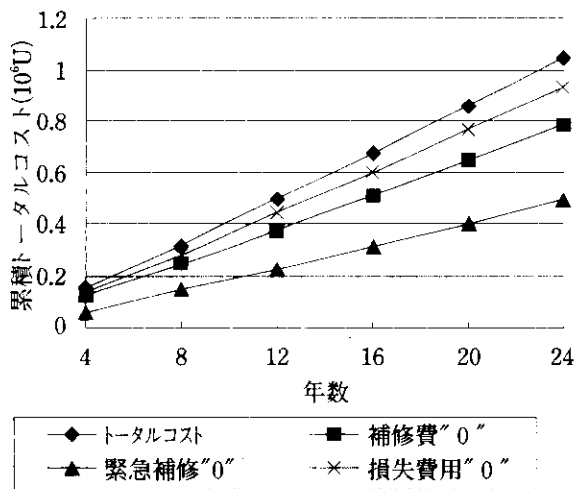


図-4 補修費用の感度分析結果
(点検間隔4年、A以上補修)

図-5に補修基準の影響について示している。現在、阪神高速道路公団においては、Aランク以上の損傷に対して補修を行っているが、現在の点検間隔を保持した場合、24年後以降はBランクで補修を行った方が、総費用が少なく維持管理ができることになる。本モデルは、定常マルコフ過程を用いたモデル構築を行っているため、本モデルの信頼性は10年もしくは20年程度と考えられ、この区間で見るとAランクでの補修基準は妥当であると判断できる。しかしながら、早期補修としてBランク程度での補修の実行も妥当な判断であるとも解釈できる。

図-6、図-7においては、B以上およびA以上で補修する場合における、定期点検間隔(補修実施間隔)の感度分析結果を示す。定期点検間隔による累積トータルコストの影響度が、補修基準の変化に伴って若干変化していることがわかる。定期点検周期と定期点検間隔は相関があることがわかる。

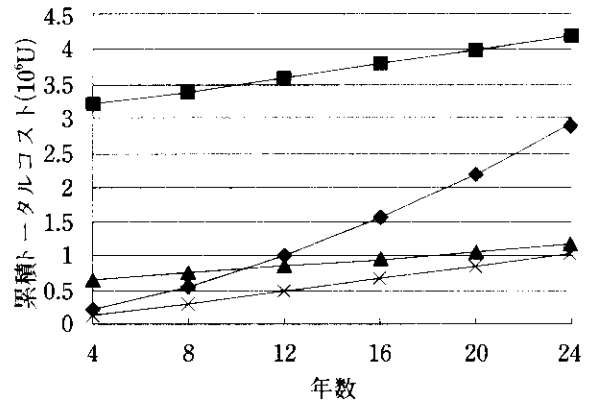


図-5 補修基準による維持管理総費用の変化
(点検間隔4年)

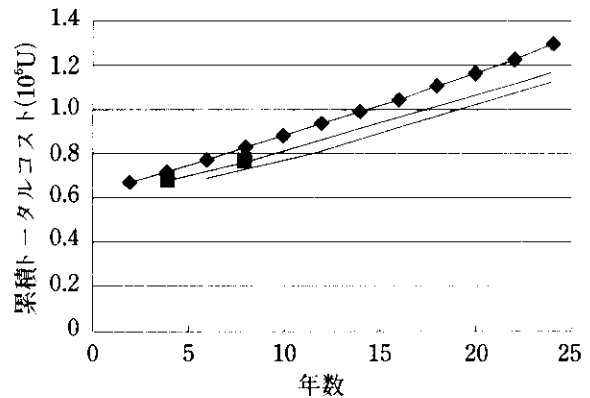


図-6 B以上補修の場合の定期点検間隔感度

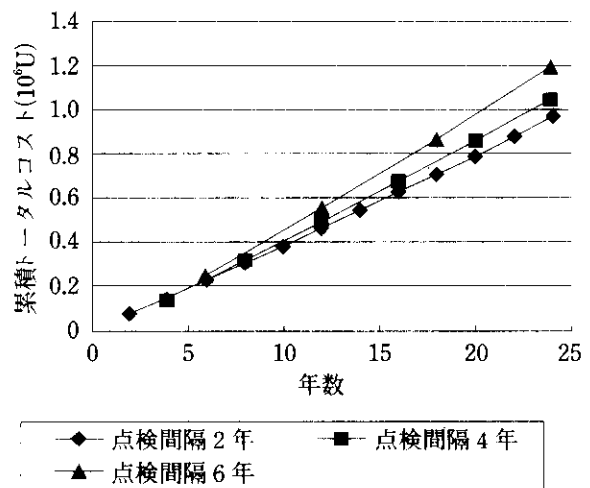


図-7 A以上補修の場合の定期点検間隔感度

4. 予算制約条件下・複数路線下におけるトータルコストの定式化⁵⁾

4-1 予算制約条件と複数路線条件

前章までにおいては、定期点検と定期補修との関係における、補修基準とトータルコストの関係を示した。これまでのモデルは、予算制約の条件を入れていないため、補修基準を早期補修に設定した場合、初年度の補修に多大の費用を要する。

一方、現実の点検補修においては、補修予算に制限があるため特定状態（以下ランク）にあるパネルを同時期に一括補修することは出来ず、予算状態に応じて時期をずらした補修が行われている。予算制約条件のある場合は、定期点検後に全ての補修が必要な床版パネルを補修できないことになる。さらに、複数路線を対象とした場合、点検結果が毎年発生することになり補修の優先順位を設定し、順次補修を行っていくことになる。この場合、補修が行われる時点は、点検時よりもパネルの状態遷移が進んでいることになる。したがって、点検情報とその後の補修経緯によって定まる状態と、遷移予測などから得られる状態が異なるため、両者の状態を考慮した定式化が必要である。

4-2 予算制約条件下における状態遷移評価⁶⁾

予算制約条件を考慮すると、年間に補修できるパネル数は制限される。このため、補修は時期をずらして行われることになり、補修が行われる時点では、点検時よりもパネルの状態遷移が進んでいることになる。つまり、補修計画は点検時の情報を基に立てられるため、数年前の点検情報にて補修計画が毎年策定される。しかし、リスクや損失の推定においては損傷遷移を考慮して算定するため、補修計画立案のための状態ベクトルと、リスクなどの算定のための状態ベクトルとは自ずと違ったものとなる。ここで、点検情報とその後の補修経緯により定まる状態を情報状態と呼び、また、遷移予測などから得られる状態を予測状態と呼び、それぞれ情報状態ベクトル $SI(\tau)$ 、予測状態ベクトル $SP(\tau)$ で表し、この2つの状態ベクトルを基にした、トータルコスト算定を行って行く必要がある。

予算制約条件を付加したことによって、コスト評価式においては補修の取り扱いが異なってくる。ここでは時期をずらした補修の表現方法とその補修に伴う情報状態の変化について説明する。繰り返しが予算制約を受ける場合、補修候補の床版パネルを全て定期点検後に補修できない場合が発生する。この補修パネル数が制限されることを表現するため補修未定係数マトリックス $A(\tau)$ を導入する。補修未定係数マトリックスは現状の情報状態 $SI(\tau)$ の内どのパネルを補修するかを規定するものであり、以後に述べる補修優先順位に示される順位に応じて補修パネルが決定される。この補修未定係数マトリックスによって、補修パネルが補修パネルベクトル $SF(\tau)$ に示される。

$$SF(\tau) = A(\tau) \cdot SI(\tau) \dots\dots\dots (10)$$

補修未定係数マトリックスの要素は対角項のみでランク i のパネルの補修率を表すものである。実際には、補修未定係数マトリックス（直接的には補修パネルベクトル）は、予算と各路線のパネルの情報状態とを勘案することにより決定される。つまり、補修による状態ベクトルの変化は、式（4）から以下のとおりに表現がかわる。

補修後の情報状態ベクトル $SI'(\tau)$ は次に策定された補修計画にしたがって補修行為を行う。始めに現状の情報状態 $SI(\tau)$ から補修パネル $SF(\tau)$ を減じ、次にそれを補修後の状態に移動させる $R \cdot SF(\tau)$ 操作を行い補修後の情報状態を算定する。

$$SI'(\tau) = SI(\tau) - SF(\tau) + R \cdot SF(\tau) \dots\dots\dots (11)$$

一方、予測状態 $SP(\tau)$ の表現は若干異なり、現状の予測状態から時間 τ までの補修パネルの t 年間の遷移予測分 $(R_A \cdot T)^t \cdot SF(\tau)$ を減じた後、補修計画にしたがって補修行為 $R \cdot SF(\tau)$ を行うといった操作を行うこととなる。補修後の予測状態 $SP'(\tau)$ は次式のように求められる。

$$SP'(\tau) = SP(\tau) - (R_A \cdot T)^t \cdot SF(\tau) + R \cdot SF(\tau) \dots (12)$$

前述したように、各年の補修パネルは、予算と各路線のその時点での情報状態とを勘案することにより決定される。補修パネルが決定されれば、上式により補修後の情報状態および予測状態が求まることになる。

4-3 複数路線条件下における状態遷移評価

予算制約条件の基で、複数路線を対象とした最適な補修計画を策定するという事は、多路線にわたって最適な補修パネルベクトルを決定することと等価になる。つまり、複数路線を対象とした場合は、点検時期の異なるパネルが混在することになり、例えば、3年前にランクBと判定されたパネルと1年前にランクAと判定されたパネルのどちらを先に補修するかといった判断が問題となる。したがって、補修優先度の設定が重要となる。

補修順位の決定⁶⁾に際しては、補修検討時点から翌年1年間のリスクを比較し、その大きなものから順位付けを行うことが妥当であると考えた。つまり、各ランクの単位パネルについて点検時から補修検討時までの遷移を推定し、それに各損失を乗じて翌年1年間のリスクを算定し、そのリスクの大きなものから順位付けを行うものである。翌1年間のリスクは次式のように求めることができる。

$$CA(\tau) = L^T \cdot S(\tau) + E_A^T \cdot T \cdot S(\tau) \dots\dots\dots (13)$$

式(13)に基づいて、3章で求めた遷移マトリックスおよび損失費用、緊急補修費用から算出する翌

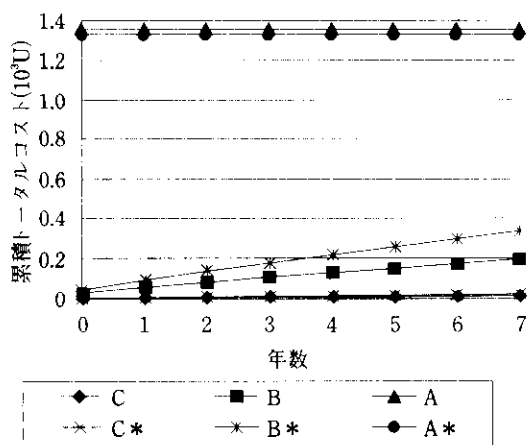


図-8 翌1年間のリスク算定結果

1年間のリスクを算定した結果を図-8に示す。

図-8からは、実床版の現在の評価基準においては、経年変化による損傷遷移によるリスクよりも、現在の状態に起因する損失が大きいことを示している。逆にいえば、損傷遷移マトリックスは、ほぼ対角行列に近く、損傷の遷移が非常に小さいことを示している。つまり、経年劣化が進むことによる補修費用、損失費用の確率的予測値は、非常に小さい。したがって、補修の優先順位は、図-8に示す経年期間内であれば、経年劣化による補修順位の逆転はない。この翌1年間のリスク評価はもちろん損傷状態におけるリスク評価により大きく変化することに留意する必要がある。

また、補修床版のリスクは同程度の損傷ランクの未補修床版のリスクより大きい。これは補修床版の補修費用は、未補修床版のそれより大きく、経年劣化によるリスクが大きく評価されるためである。

このように、補修順位が設定されれば、予算制約下で可能な補修パネル数と補修順位とを勘案することでその年の補修パネル数および補修パネルのランクが決定でき、補修パネルベクトルが確定する。

5. 予算制約条件および複数路線を対象とする状態での床版の維持管理状態試算

5-1 試算条件

以上の手法を用い、今後の床版維持管理のための予算制約条件と、維持管理状況（トータルコストとリスク）の評価を行った。ここでは補修予算制約とリスクとのバランスを見ることによる最適化を考察した。試算に当たっては、阪神高速道路における大阪域の供用路線において昭和46年以前に設計された床版が全て補強を完了した状態において、予算制約および複数路線を対象とした場合の、トータルコストおよびリスクの評価を行った。

表-2に適用試算において対象とした路線を示す。阪神高速道路公団においては、昭和46年以前の設計基準を用いて建設された床版においては補修を損傷の有無に関わらず実施することを推進しており、その補修が完了した状態を想定している。なお、

表-2 適用試算路線とその補修状態

路線名	パネル数	設計年次
環状線	5,569パネル	昭和46年以前
池田線	7,642パネル	昭和46年以前
守口線	10,196パネル	昭和46年以前
東大阪線	10,500パネル	昭和46年以前
松原線	4,529パネル	昭和46年以前
堺線	8,694パネル	昭和46年以前
大阪港線	2,922パネル	昭和46年以降
西大阪線	2,808パネル	昭和46年以降
神戸線	5,843パネル	昭和46年以降

表-3 試算ケース

試算ケース	ケース内容	年間予算(U)
Case0	定期補修なし	0
Case1	50~70パネルの補修可能な予算	165000
Case2	Case2の5倍	750000
Case3	Case2の10倍	1,500,000
Case4	Case3の1.5倍	2,250,000
Case5	A、A*以上で補修	

試算においては現時点における床版の損傷状態を用いて試算を行った。したがって、補修を想定している床版で補修がまだ完了していないものについては、OK*と評価された床版として取り扱った。

表-3においては、試算に用いた予算制約条件を示す。Case0およびCase5については、予算は浮動的に取り扱われることになり、固定的な予算は取り扱わないことを示す。また、Case1からCase4においては固定的に扱われることを示す。

5-2 パネルの状態変化

図-9~図-10にCase1とCase3におけるパネルの遷移状況を示す。補修後のパネルの遷移傾向が支配的であり、OK*からC*へ急速に遷移している。両者とも概ね15年後以降は、緩やかな推移を示している。補修の影響としては、補修予算が多いCase3においてはB*やA*のパネルがほとんど見られなくなり、OK*へ移行している。これは、後に示すリスクと大きな関係がある。

5-3 コスト算定結果

図-11にリスク算定結果を示す。Case3およびCase4での年間リスクは、低いレベルを維持したまま50年間ほとんど変化がない。これは、鋼板接着による補修が大阪地区の全路線の80%を完了した段階においても、年間1,500,000U以上の予算をかけた

補修が過剰補修であることを示唆している。一方、Case1での年間リスクは年々増加している。表-4からも分かるようにCase1での年間補修パネルは50~70パネル程度であり、AあるいはA*の床版の全てを補修することが出来ない。このため、ネットワーク全体としては状態劣化が進んでいる。

さらに、リスクの表現方法を累積リスクとして図化したものが図-12である。累積リスクを見ても明らかのように、Case3およびCase4は傾きの小さ

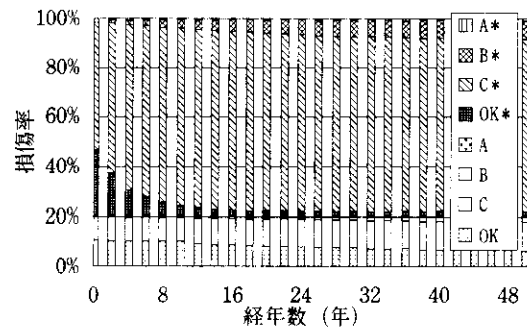


図-9 Case1における床版パネルの遷移状況

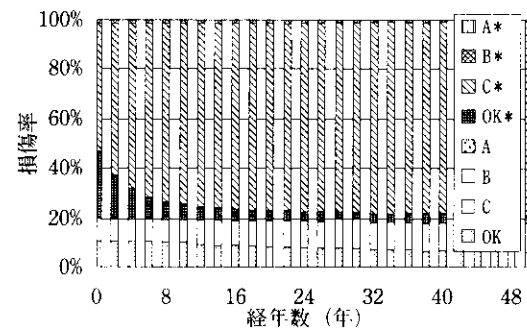


図-10 Case3における床版パネルの遷移状況

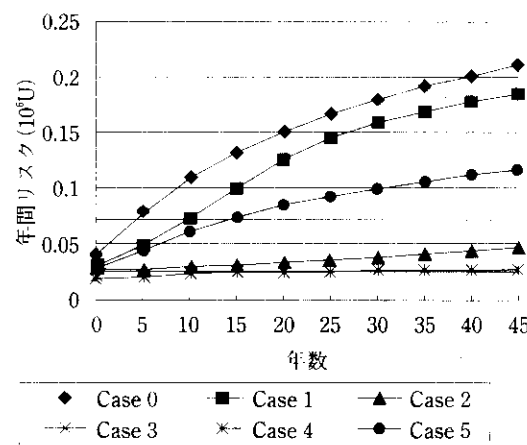


図-11 リスク算定結果

い直線となり、状態が定常化し年間リスクが一定化していることが分かる。一方、Case 1は年々状態劣化が進みリスクが増加する傾向を示している。

図-13に各ケースにおける累積トータルコスト（年間リスク+年間補修費用の累積）を示す。Case 2およびCase 3では、トータルコストが定期補修を行わない場合（Case 0）よりもかなり大きくなって

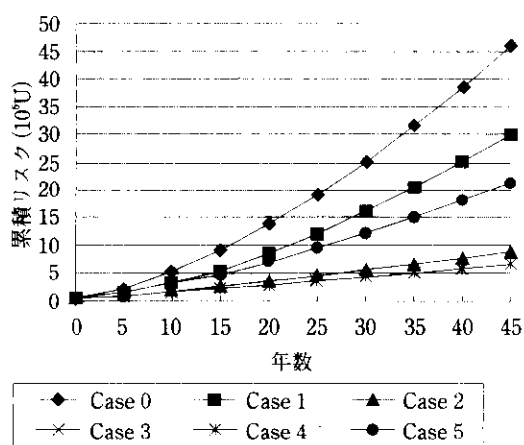


図-12 予算制約条件下における累積リスクの変化

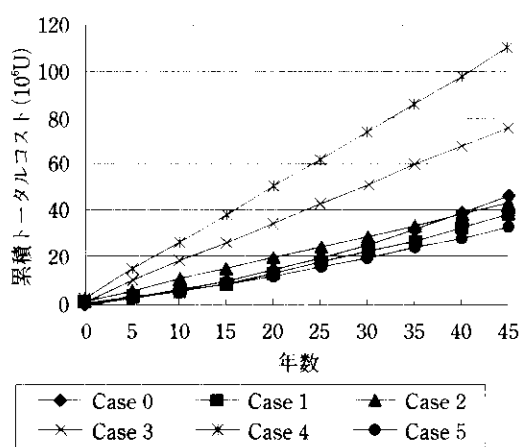


図-13 累積トータルコスト算定結果

おり、過剰な補修が行われていることがわかる。50年間で見た場合、予算制約条件を考慮したケース（Case 1～4）の中で、トータルコストを最小化させるものはCase 1となる。しかしながら、図-10や図-12に示されるように、Case 1では状態劣化が年々進みリスク増加が見られる。このため、累積トータルコストも増加傾向を示しており、50年以降にはCase 2のトータルコストを越す可能性もある。一方、Case 2は図-11より年間リスクの増加がほとん

ど見られず、累積トータルコストの内訳もほとんどが補修費用であると考えられる。したがって、リスクを低く抑えるという観点に立てば、Case 2の予算の確保が必要であることがわかる。

ちなみに、全ケースの内トータルコストが最も小さいものはA、A*以上で補修するとしたケースであり、定期点検時にAおよびA*以上のパネルのみ補修するといったような柔軟な方策の方が合理的であるとも言える。これは、現状の補修基準と合致している。現時点では、昭和46年以前の床版の補修が完了していないため、計画的に補修対策が行われているため、補修数はA、A*の数より多いことを注記しておく。しかしながら、この場合には年間補修費用は一定せず、現状の予算制度での実施は難しい。

5-4 トータルコストの内訳

図-14, 15にCase 3とCase 1について、トータルコストの内訳を示した。Case 3では、トータルコストの中で補修費用がほとんどの割合を占めており、リスク（損失費用および緊急補修費用）は小さな値となっている。リスクがほとんど無くなってしまふほどの過大な補修を行っているという解釈が出来る。一方Case 1においては、全てのコストが均等して発生しており、トータルコストを最小化する意味においては、一つの基本となるものであろう。

ここでの結果としては、Case 3またはそれ以上の補修予算を持つ場合は過剰補修であること、Case 1のケースが、トータルコストを最小化することが、また、リスクを低く抑えつつトータルコストを出来るだけ少なくする観点からは、Case 2のケースも有意であることが窺えた。さらに、毎年の補修費用を一定とせず、パネルの状態に応じて異なる補修予算を設定することの有用性も洞察された。

なお、ここでの試算は現在得られているデータを利用した推定値であり、現時点で概略的な今後の予測を行っているものであり、その精度は必ずしも高くはない。結果の精度を上げるためには、今後さらなるデータの集積が必要である。データの集積に伴ない、漸次遷移マトリックスや各種費用項目を改更し、同様の方法で推定を続けることが必要である。

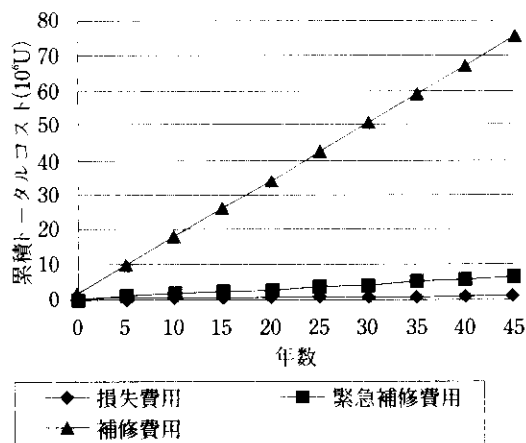


図-14 Case 3におけるトータルコストの内訳

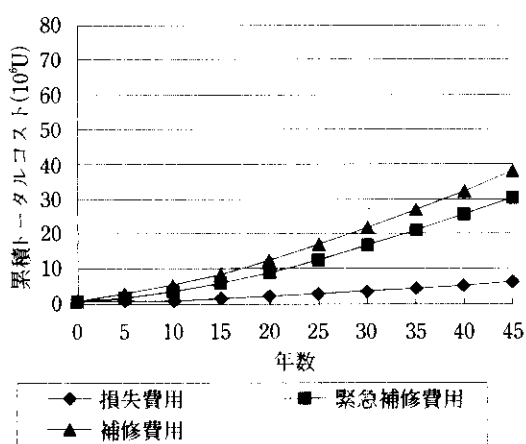


図-15 Case 1におけるトータルコストの内訳

まとめ

本論では、道路橋における確率的な損傷の経年劣化特性を表現するために損傷遷移マトリックスを利用し、さらに、定常マルコフ過程による損傷遷移を過程した場合における維持管理トータルコストの定式化を行った。さらに、予算制約条件および複数路線を対象とした維持管理におけるトータルコストの定式化を行った。さらに、ここで示した手法を用いて道路橋床版に適用した場合における床版の維持管理にかかる維持管理費用を試算した。

主な知見は以下のとおりである。

- (1) 床版損傷データを分析し、未補修床版と補修済床版の損傷傾向を明らかにした。
- (2) 予算制約下でない場合は、損傷ランク A 以上を対象とした補修基準がトータルコストを最小化

出来る。

(3) 予算制約下でない場合は、補修基準によっては定期点検間隔（定期補修間隔）はトータルコストの変化に大きく寄与する場合がある。

(4) 補修の優先順位考察方法を提案し、その手法によれば点検間隔が数年の範囲内であれば、点検時の損傷ランクによって補修順位を決定してよいことが示された。

予算制約下において、十分な予算が補修に充当できるならば、リスクを最小限に抑えた維持管理が可能であるが、予算のほとんどが定期補修に費やされるため、補修に追われた維持管理を行うことになる。このような定量化された手法に従い、今後の維持管理戦略を決定していく必要がある。

なお、本研究を遂行するにあたって、コンクリートの耐久性委員会耐久性向上手法検討部会（阪神高速道路管理技術センター）（藤井 学京都大学大学院教授主査）の各委員には多大なご意見を頂いた。さらに山口大学宮本文徳教授にはBMS構築に関して多くのご示唆を頂いた。ここに感謝致します。

参考文献

- 1) US Department of Transportation Federal Highway Administration, PONTIS Technical manual, 1994.
- 2) 足立, 水谷, 小塚: 経年劣化構造物の維持補修計画最適化に関する研究, JCOSSAR, 1995.
- 3) 足立, 大矢, 小塚他: 高速道路保守管理の最適化に関する研究, 第50回土木学会年次学術講演会, 1995.9.
- 4) 阪神高速道路公団: 道路構造物の点検標準, 1996.
- 5) Mizutani, Ohya, Adachi, Kotsuka, On Optimization of Maintenance Strategy for Highway Bridge Slab Panels, ICOSSAR, Kyoto, 1997.
- 6) 足立, 大矢, 小塚他: 点検時期の異なる構造物における補修優先順位の決定手法, 第51回土木学会年次学術講演会, 1996.9.