

第6章 維持管理手法

6.1 ミニмумメンテナンス橋

わが国の社会資本整備はこれまでの着実な整備の結果、現在では膨大なストックを抱えるに至っている。これらの社会資本ストックがその機能を果たしていくためには、絶えず良好に維持管理、さらにはある水準以下に劣化したものは順次更新していく必要がある。今後進めしていく社会資本整備のあり方について、建設時のみならず、維持・管理・更新も含めた考え方・方法論について整理を行い、社会資本の合理的な整備方法の確立および維持更新費低減化が必要となっている。

現在、我が国では、橋長15m以上の橋だけでも13万橋以上のストックを抱えており、これまでのように50年程度の寿命を想定していたのでは、2010年以降になると更新の負担が急激に増加することが予想される。

そこで、従来重視されてきた建設費などの初期投資に代え、構造物の生涯にわたって費やされる費用、すなわちライフサイクルコスト(以下LCCと略す)を低減することが不可欠となっている。このため、多少投資額が増加しても、構造物の生涯にわたり費やされる費用、LCCを低減させることが必要となる。今後建設していく橋は、架替えを前提とせずできるだけ長持ちさせると同時に、将来にわたり維持管理作業を最小にしていけることが必要である。

そこで、将来における維持管理負担を削減するため、最小限の維持管理負担で最大限の寿命が得られる橋として各種要素技術を組み合わせたミニмумメンテナンス橋が提案されている。

6.1.1 橋が耐久性を損なう要因

図-6.1.1は平成8年建設省が実施した過去10年間の撤去または架替えの行われた一般国道、主要地方道および一般都道府県道の道路橋のうち、橋長15m以上の撤去・架替え理由を示したものである。

幅員の不足や改良計画に伴って架替えられたものが大半を占めているが、上部構造の損傷が直接の原因とされているものが全体の13%程度存在する。鋼橋に着目してみると、その主要因は鋼材の腐食とRC床版の破損が大半を占めていることがわかる。また、最近では鋼部材の疲労も鋼橋が耐久性を失う主要因の一つにあげることができる。

鋼橋については、図-6.1.2に示す腐食と床版・鋼部材の疲労に対して有効な防止対策を行うことができれば、工学的に、橋梁の寿命はほぼ永久と見なすことが可能と考えられる。

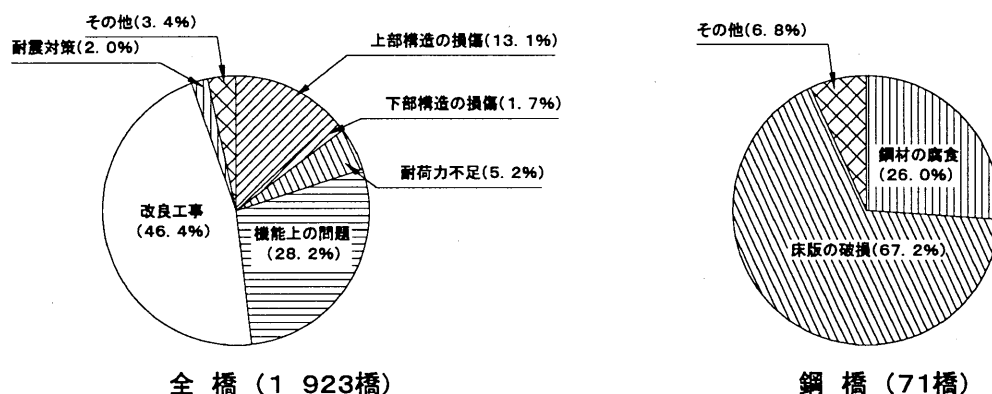


図-6.1.1 道路橋の架け替え理由の調査結果

(鋼橋における重要点検部位)

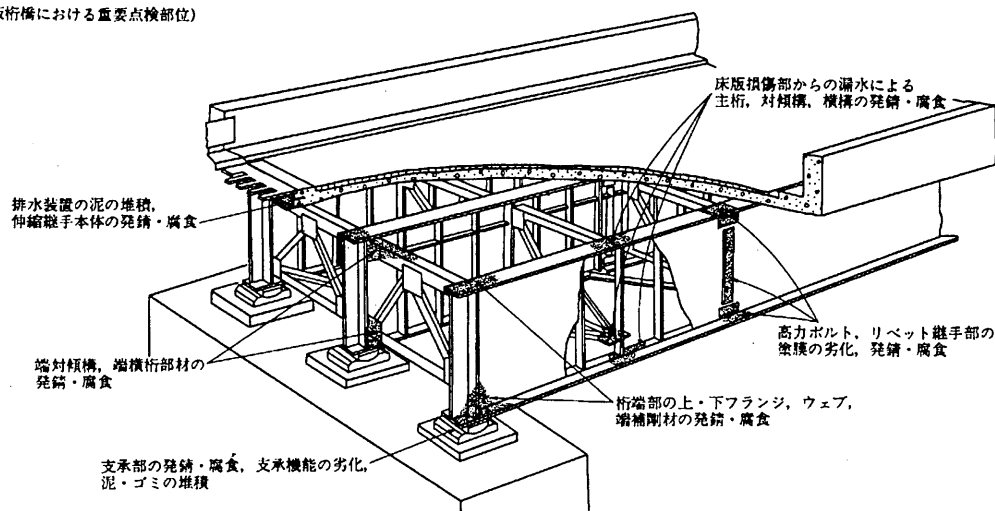


図-6.1.2 腐食マップ

6.1.2 ミニмумメンテナンス橋の概念

道路橋の維持管理負担の将来予測やLCCの試算例を通じて述べてきたように、今後建設していく橋は、架替えを前提とせずできるだけ長持ちさせると同時に、将来にわたり維持管理作業を最小にしていけることが必要である。

そこで、橋全体あるいは構成部材において、前項に示したように設計・施工および維持管理の面から寿命に影響を与える要因を整理し、それらに対し維持管理作業を低減あるいは解決できる技術を組み合わせた橋が必要となってくる。こうしてできた橋をここではミニмумメンテナンス橋と呼ぶことにする。以下に有効と考えられる要素技術を示す。

標準仕様は表-6.1.1に示すように、今後将来における新設橋梁を適用対象とするが、既設橋についても表-6.1.2に示すように、部材の更新の際には適宜、適用可能性を検討の上、採用することができる。

表-6.1.1 新規橋梁におけるミニмумメンテ橋の標準仕様

項 目	目 的
耐久性の高い舗装タイプの選定	床版舗装の延命化による舗装打ち替え工事の長周期化 渋滞の回避
床版の長寿命化	プレキャストPC床版の採用による疲労耐久性向上 橋面防水工による床版の疲労損傷促進の防止 床版上面の動水勾配の確保等排水性に優れた床版構造の採用
長寿命化・省力化桁の採用	主桁断面変化の1ブロック1断面、水平補剛材の省略、腹板添接板等の省略(断面増加による耐腐食性の向上、剛性増加による耐疲労性の向上) フランジ幅の統一(プレキャスト床版への対応)
桁の(多径間)連続化	伸縮装置の減少による交換工事の省力化 伸縮継手部からの漏水による桁、支承部の劣化防止 騒音、振動の低減
塗装の長寿命化あるいは無塗装化	塗装塗り替え工事の長周期化
取り替え容易で長寿命な伸縮装置	更新回数の軽減、作業の簡素化、渋滞の回避
排水装置及び排水回りの漏水防止	床版部の孔開けの廃止、床版防水層上面の排水処理、清掃作業の簡素化
取り替え容易な支承構造	ジャッキアップ部の想定と構造対応 フランジ下以外へのアンカー筋の移動 ゴム系支承(水平分散沓、免震沓等)の採用
下部工沓座面の動水勾配の確保	沓座上の滞水による下部工、アンカーボルト、支承の劣化防止
取り替え容易な防護柵構造の採用	アンカーの改良による取り替え作業の簡素化

表-6.1.2 既設橋梁におけるミニмумメンテ橋の標準仕様

項 目	仕 様 (案)
耐久性の高い舗装タイプの選定	長期耐久性の舗装材料の使用
床版の長寿命化	補強に伴う疲労耐久性向上 橋面防水処理
桁の(多径間)連続化	ノージョイント化工法
塗装の長寿命化あるいは無塗装化	長期耐久性の塗装仕様の使用
取り替え容易で長寿命な伸縮装置	長寿命の伸縮装置の採用 後打ちコンクリート部の構造改良
排水装置及び排水回りの漏水防止	伸縮装置の非排水化 床版防水層上面の排水処理
取り替え容易な支承構造	ゴム系支承(水平力分散沓、免震沓等)への変更
下部工沓座面の動水勾配の確保	橋座面の標高変更(動水勾配の確保) 表面被覆
取り替え容易な防護柵構造の採用	アンカーの改良による取り替え作業の簡素化

【参考文献】

西川和廣、ライフサイクルコストを最小にするミニмумメンテナンス橋の提案、橋梁と基礎、Vol. 31、1997. 8

6.2 床版の維持管理の最適化手法に関する検討

6.2.1 はじめに

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 6.2.1 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定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定性の幅を減少させることになる。また、性能低下の不確定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。

表 6.2.1 に高速道路の維持管理に関する用語の定義を行う。本論においては、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付随するリスクを算定し、両者のバランスを取ることで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。

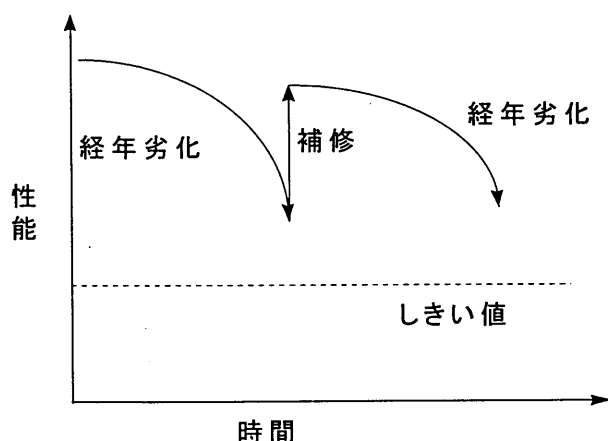


図 6.2.1 経年劣化と維持補修の概念図

表 6.2.1 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。

6.2.2 予算制約条件のない場合のトータルコスト定式化

(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 $\mathbf{S}(\tau)$ 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。

$$\mathbf{S}(\tau)^T = \{p_1(\tau), p_2(\tau), \dots, p_n(\tau)\} \quad (1)$$

$$\sum p_i(\tau) = 1.0 \quad (2)$$

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 T 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)の遷移マトリクス \mathbf{T} を用いて表現することとした。遷移マトリクス \mathbf{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 \mathbf{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。

$$\mathbf{S}(n) = \mathbf{T}^n \cdot \mathbf{S}(0) \quad (3)$$

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 \mathbf{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 \mathbf{T} として扱うことにした。

(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が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クス \mathbf{R} により表現するものとする。 $\mathbf{S}'(\tau)$ は、補修後の状態ベクトルを表す。

$$\mathbf{S}'(\tau) = \mathbf{R} \cdot \mathbf{S}(\tau) \quad (4)$$

補修マトリ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 若しくは 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クス \mathbf{R}_A で表現される。 $\mathbf{S}''(\tau)$ は補修後の状態ベクトルを表す。

$$\mathbf{S}''(\tau) = \mathbf{R}_A \cdot \mathbf{S}(\tau) \quad \text{or} \quad \mathbf{R}_A \cdot \mathbf{S}'(\tau) \quad (5)$$

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。

$$\mathbf{S}(\tau+1) = \mathbf{S}''(\tau) \quad (6)$$

(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 \mathbf{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。

$$\mathbf{CR}(\tau) = \mathbf{E}_R^T \mathbf{S}(\tau) \quad (7)$$

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) $\mathbf{S}(\tau)$ 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) \mathbf{L} あるいは緊急補修費用(緊急補修費用ベクトル) \mathbf{E}_A との積との和で表現する。

$$\mathbf{CA}(\tau) = \mathbf{L}^T \cdot \mathbf{S}(\tau) + \mathbf{E}_A \cdot \mathbf{S}(\tau) \quad (8)$$

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。

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

6.2.3 予算制約のない状態での床版の維持管理状態試算

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, B, C, OK”の5段階で行っている。現在補修基準として、“@”とは緊急に補修の必要な状態を示す。“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か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、“@”については損傷程度のさらに大きいものとを区別するために、“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-6.2.2 および図-6.2.3 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。

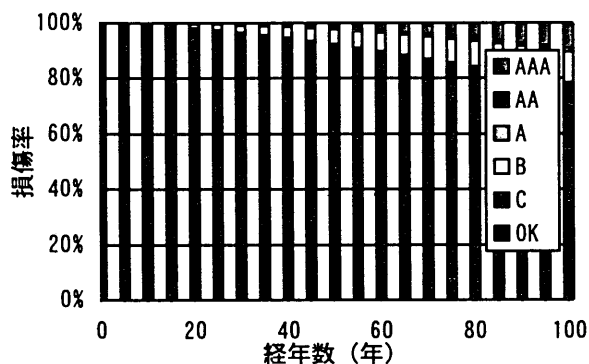


図-6.2.2 補修前床版の損傷遷移

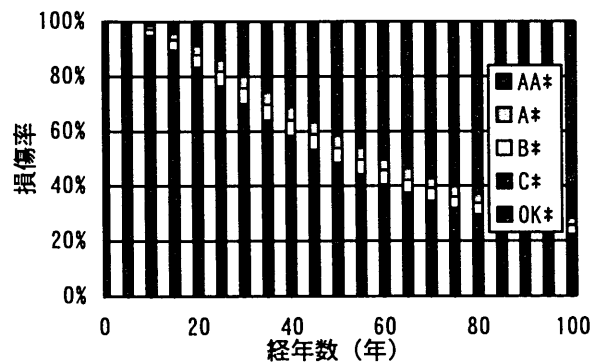


図-6.2.3 補修後床版の損傷遷移

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、床版が補修されないことによる損失を算定する必要がある。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、実額は示さないで、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-6.2.4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ことがわかる。早期補修計画を立案する必要がある事を示している。

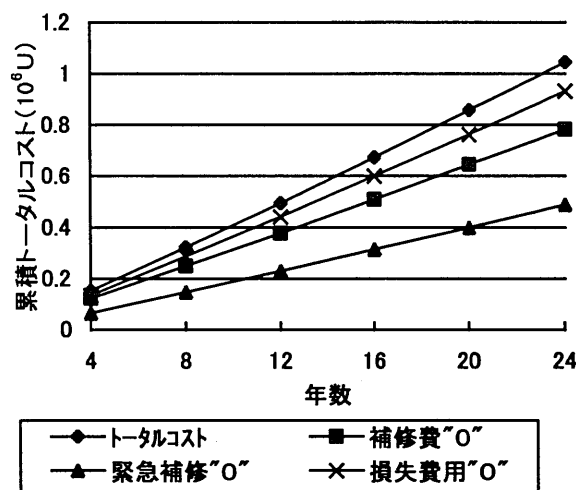


図-6.2.4 補修費用の感度分析結果
(点検間隔4年、A以上補修)

図-6.2.5 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年後は以降は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年程度であり、この区間で見限る限り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-6.2.6、図-6.2.7 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。

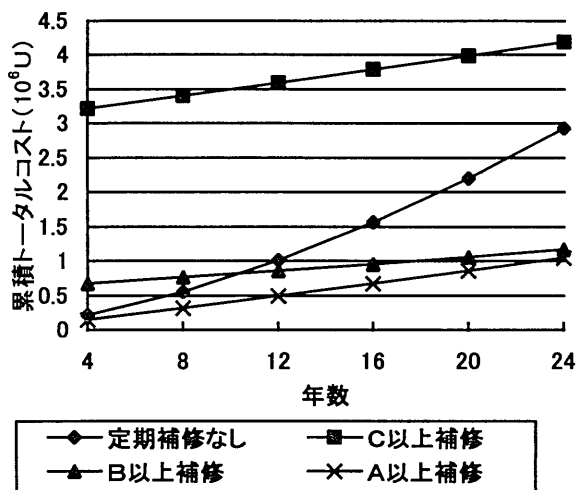


図-6.2.5 補修基準による維持管理総費用の変化
(点検間隔4年)

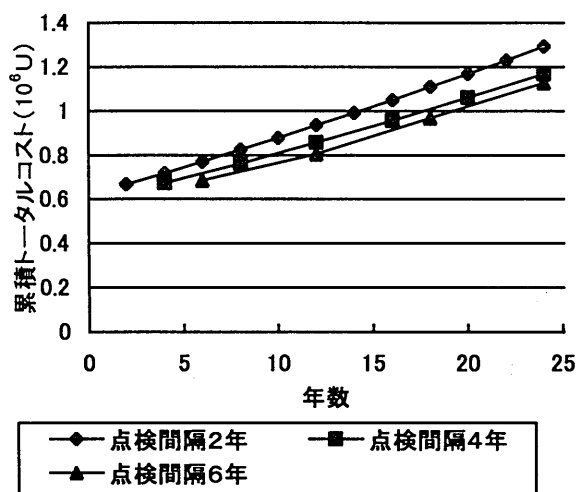


図-6.2.6 B以上補修の場合の定期点検間隔感度

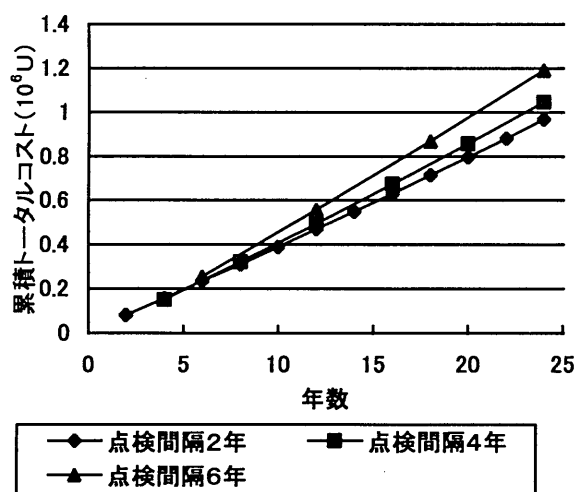


図-6.2.7 A以上補修の場合の定期点検間隔感度

6.2.4 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

(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。

(2) 予算制約条件下における状態遷移評価

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。繰り返す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クス $A(\tau)$ を導入する。補修未定係数マトリ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。

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

補修未定係数マトリ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。

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

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

$(R_A \cdot T)^t \cdot SF(\tau)$ 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。

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

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。

(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ことは、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。

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

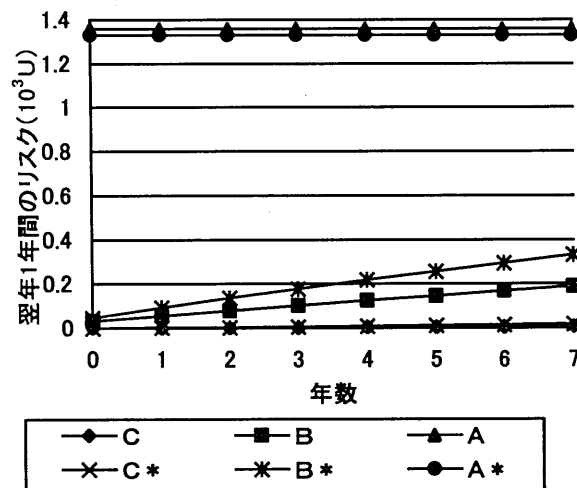


図-6.2.8 翌1年間のリスク算定結果

式(13)に基づいて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1年間のリスクを算定した結果を図-6.2.8に示す。

図-6.2.8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-6.2.8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。

6.2.5 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

(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-6.2.2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、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-6.2.2 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-6.2.3 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。

表-6.2.3 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	165,000
Case2	Case2の5倍	750,000
Case3	Case2の10倍	1,500,000
Case4	Case3の15倍	2,250,000
Case5	A、A*以上で補修	-

(2)パネルの状態変化

図-6.2.9～図-6.2.10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。

(4)コスト算定結果

図-6.2.11 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。

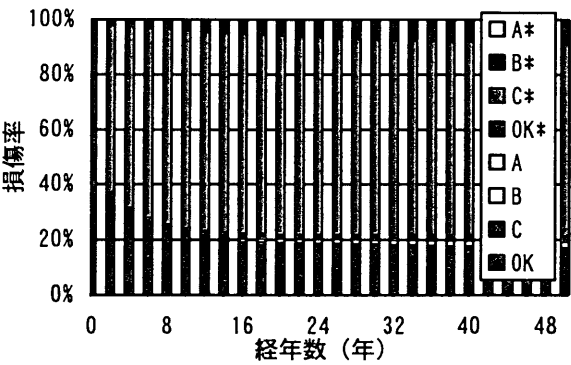


図-6.2.9 Case1における床版パネルの遷移状況

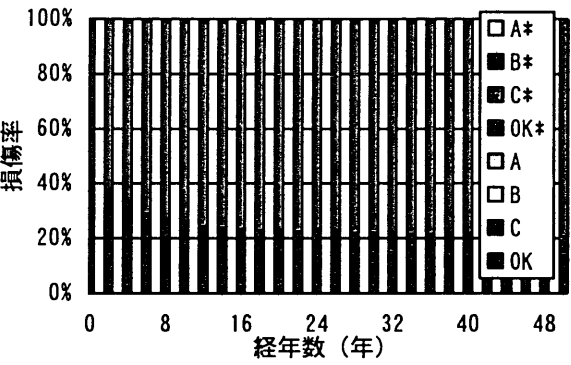


図-6.2.10 Case3における床版パネルの遷移状況

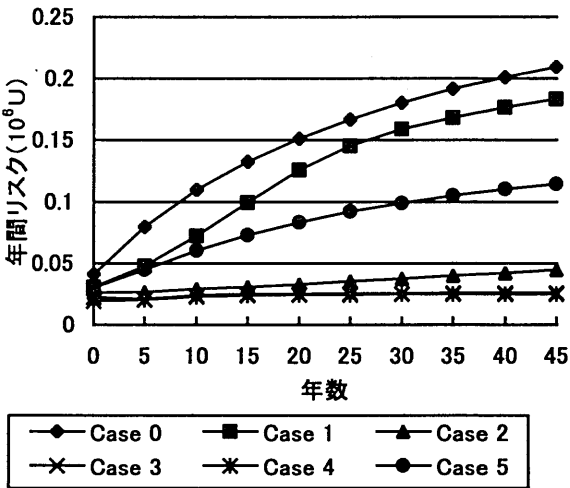


図-6.2.11 リスク算定結果

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-6.2.12 である。累積リスクを見ても明らかなように、Case3およびCase4は傾きの小さい直線となり、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、Case1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。

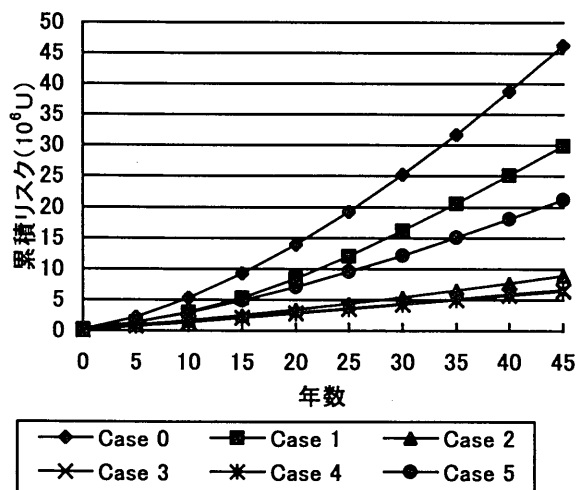


図-6.2.12 予算制約条件下における累積リスクの変化

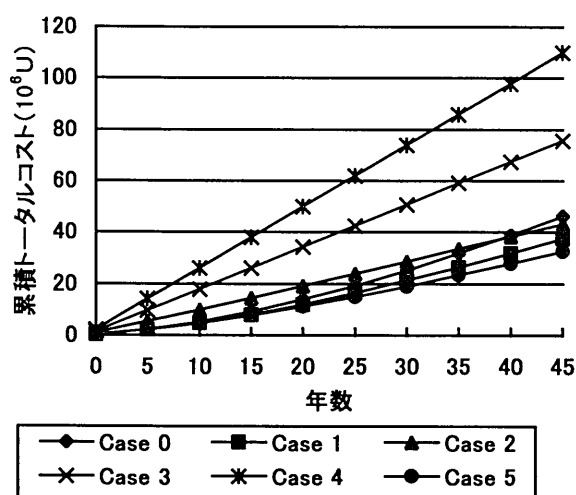


図-6.2.13 累積トータルコスト算定結果

図-6.2.13 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。Case2およびCase3では、トータルコストが定期補修を行わない場合(Case0)よりもかなり大きくなっており、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(Case1~4)の中で、トータルコストを最小化させるものはCase1となる。しかしながら、図-6.2.10や図-6.2.12に示されるように、Case1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Case2のトータルコストを越す可能性もある。一方、Case2は図-6.2.11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、Case2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。

(4) トータルコストの内訳

図-6.2.14,15にCase3とCase1について、トータルコストの内訳を示した。Case3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Case1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、Case3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、Case1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るだけ少なくする観点からは、Case2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。

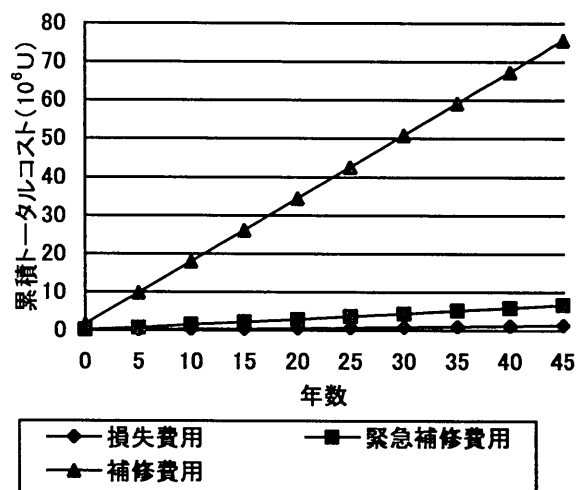


図-6.2.14 Case3におけるトータルコストの内訳

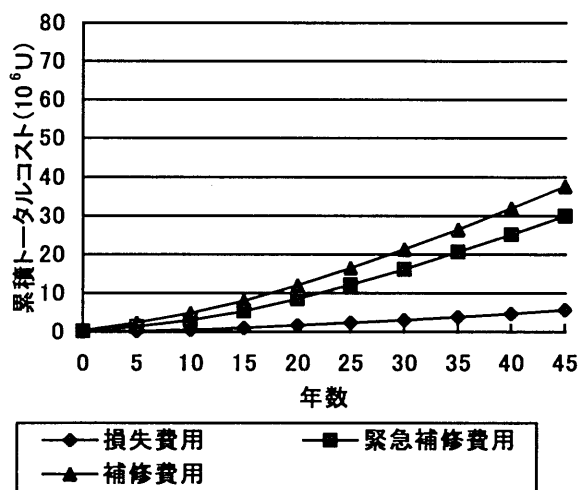


図-6.2.15 Case1におけるトータルコストの内訳

6.2.4 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。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、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。

【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、JCROSSAR、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回土木学会年講、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, ICROSSAR, 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回土木学会年講、1996.9

6.3 ライフサイクルコスト (LCC)

6.3.1 LCC解析概要

(1) LCCとは

建設構造物のライフサイクルコスト(LCC=Life Cycle Cost)とは、計画・設計→建設→維持管理→解体撤去の各過程に要する費用の総額を指す。土木学会建設マネジメント委員会が98年にまとめた「建設とマネジメントXVI」では、分科会の定義としてライフサイクルコストを「土木構造物の企画、設計、建設、運営、維持管理、解体撤去、廃棄に至る費用」としている。一方、トータルコストは「ライフサイクルコストに、土木構造物が建設されることにより、発生する外的費用(例えば補償費、環境破壊による復元費用などのソーシャルコスト)を加算した総費用」と区別している。しかしながら、我が国では新しい分野で馴染みが薄いこともあり、トータルコストの場合であっても単にライフサイクルコストと呼ばれている場合がある。ここでは両者を区別せずライフサイクルコストと記述する。

LCCを積極的に展開しているアメリカでは、10年前から舗装分野で活発に議論され、連邦道路局が積極的に採用し、推奨している。我が国でも舗装分野での試算例が多くなされている¹³⁾。

建築分野は、土木よりLCC評価に対する取り組みが積極的であるとされている。土木構造物に比べて建築構造物は、LCCに占めるランニングコストの割合が大きく、ランニングコスト率は8～9割になり、ランニングコストの安い建物が良い設計につながるからである。一方、土木構造物のランニングコストは2～3割であることが多いようであるが、ランニングコストの高い舗装で積極的に採用検討される理由になっているものと考えられる。最近は舗装分野以外の橋梁や港湾施設などにおいても、LCC分析は意志決定のツールの一つとして検討され始めている。

(2) ライフサイクル評価の必要性

ライフサイクルコストによる評価の機運が高まった背景には、次のような理由が挙げられる。

- 1) 公共投資規模が縮小する中で、高度経済成長期に建設された大量の建造物が、一斉に劣化する時代を迎え、より効率的な投資が求められる。
- 2) 建設投資を抑えるだけのコスト削減に、限界を感じ始めた。
- 3) 相次ぐコンクリート片の落下事故を受けて、良質な構造物を造ることの重要性に対する認識が強くなった。
- 4) ほかに社会が環境負荷の軽減を求めていることや、少子高齢化によって生産人口が減る前に長寿命化の体制を整えて置く、国際化、性能規定、アカンタビリティの要求など複数の背景が考えられる。

そして、なによりも維持更新費用の増大は、新規建設に比較して生産性が乏しく、経済効果に寄与しないためと考えられる。

(3) LCC解析手法

ここでは、アメリカ連邦道路局(FHWA)の舗装ライフサイクル解析: Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design (Publication No. FHWA SA-98-079 Pavement Division Interim Technical Bulletin September 1998)の内容を紹介する。

1) 解析の目的

ライフサイクルコスト解析は、投資選択の比較において、全体的長期経済効果を評価するための経済分析理論の上に成り立つ解析技術である。解析には道路舗装や橋梁の生涯に係わる当初および将来の道路管理者費用、道路利用者費用およびその他の関連する投資費用を含んでいる。また、投資費用に対する最大効果(要求される性能目標を満足する最小の長期費用)を明確にするものである。とされており「代替案の比較」が目的であって、コストそのものが重要な目的ではないとしている。

2) 評価指標

基本的に定額年間費用も容認できるとあるが、純(総)現在価値で評価する。代替案の比較が目的であるため、各案で差異が生じる部分のみについて分析し、共通な部分は除外する(ただし、除外する項目は明示しなければならない)。一般に「総現在価値=総便益-総コスト」であるが、各案で総便益の差が生じないものと考え、以下の総コストで評価する。

$$LCC = \text{初期コスト} + \text{維持管理費} + \text{更新費}$$

3) 解析期間

舗装の解析期間は、最低限35～40年という見解もあるが、将来の補修・更新計画の違いによる各案のコストの違いを評価するために、場合に応じて十分に長い解析期間を設定する必要があるとしている。少なくとも耐用年数より長く、最低1回の補修又は更新が含まれるように設定する。

本ガイダンスには橋梁については記述されていない。しかし、この考え方を橋梁についても適用した場合の解析期間は、耐用年数が60年である場合では最低でも1回の更新を含めて60年以上となり、補強や補修を見込んで寿命を100年まで延命させるモデルは100年以上となる。さらに代替案で長寿命の橋梁を対象に解析をおこなうケースでは、建設省土木研究所橋梁研究室の「ミニマムメンテナンス橋に関する検討」の200年の例や東京都土木技術研究所の250年という解析期間が設定されることになる。

4) 割引率

適用すべき割引率は、年度毎に異なり、行政監理予

算庁(OMB)の通達を基準とする。一般に3～5%である。

我が国の割引率に関する基準は、一般に公表されていないが、建設省道路局の委員会報告「道路投資の評価に関する指針(案)」、道路投資の評価に関する指針検討委員会編、(財)日本総合研究所発行1998.6)では4%としている。例えば、割引率4%の各年次の価格100に対する割り引いた現在価値は、30年では30.1%、40年では20.8%、50年では14.1%になる。したがって、橋梁のように解析期間が十分に長い100年や200年とした場合、割引率を考慮すると遠い将来の維持更新費は無視しうるコストになってしまうという問題もあり、橋梁における解析期間と割引率の取り扱いに関する議論が必要と思われる。

なお、本指針(案)は、道路の新設や改良事業の事前評価を目的としているが、社会的影響等に関する様々な基礎単価を設定しており、我が国におけるLCC分析の基礎単価としても利用されるものである。

5) 利用者コスト

最低限「遅延、車両走行、事故費用」を含むべきであるとされている。維持補修工事による渋滞発生を想定して車両タイプ別に時間遅れ費用を算出する。車両走行費用は、路面性状の悪化による走行コスト増を評価する内容であるが、あまり研究が行われていないことや差異による影響が大きくないため、今のところ重要視されていない。事故コストは、データ不足のため代替え案ごとの違いを計測することは難しいが、事故コストの原単位を提示することを推奨している。

6.3.2 LCC解析例

(1) ミニмумメンテナンス橋の提案⁴⁾

建設省土木研究所橋梁構造部橋梁研究室は、ライフサイクルコスト分析に基づく「ライフサイクルコストを最小にするミニмумメンテナンス橋の提案」⁵⁾をおこなっている。橋梁に関する我が国におけるLCC分析の代表例である。我が国の道路橋の現状と将来、LCCとミニмумメンテナンス橋のコンセプト、ミニмумメンテナンス橋のプロトタイプ、LCCの試算例をわかりやすくイラストに表現したパンフレットを作成して普及に努めている。

LCC分析における現在の橋とミニмумメンテナンス橋の試算条件を表-6.3.1に示す。解析モデルは、橋長30m程度の鋼単純桁橋で上部工を対象にしている。現在の橋における各部材の耐用年数は、実態調査結果を基に設定されている。ミニмумメンテナンス橋の耐用年数は、耐用年数の長い、言い換えれば性能の高い部材や工法を組み合わせた橋梁をモデルにしている。ここに示されている耐用年数は、確定的なものではなく、技術の進歩や新技術の導入などによって常に見直されるものであるとしている。

ミニмумメンテナンス橋の床版では、プレストレス

(PC)床版の性能を200年に設定している。輪荷重走行疲労試験の結果から、現行RC床版の数倍の疲労耐久性を考慮して設定されたものと推察される。他の形式の床版についても建設省土木研究所で共同研究されている疲労試験結果などを基に合理的に設定されることにより、LCCの試算バリエーションが増加して、より合理的な検討が可能になると期待される。

解析結果を図-6.3.1に示す。現在の初期コストを1.0として、200年の解析期間の累積コスト指数で評価している。ミニмумメンテナンス橋は初期コストが1.6と割高であるが、従来橋は200年で18倍のコストがかかるが、ミニмумメンテナンス橋は5.6倍であり、総コストが1/3で有利になることを示している。さらに新たな技術開発や施工事例の増加などにより、各種要素技術のコストパフォーマンスは確実に向上していること、構造のシンプル化など耐久性向上に寄与することを考え合わせると、初期コストの増加なしにLCCの大幅な軽減を図ることも可能であろうとの考えを示している。

表-6.3.1 LCCの試算条件

	現在の橋	ミニмумメンテナンス橋
架換えサイクル	60年	200年
塗装(塗膜)	塩化ゴム系塗料15年	亜鉛めっき130年
塗替え	塩化ゴム系塗料15年	亜鉛溶射70年
床版	RC床版40年	PC床版200年
床版補修	部分補修(建設後20年)20年	継目部補修50年
支承	鋼製支承30年	ゴム支承100年
伸縮装置	従来仕様10年	ミニмумメンテナンス仕様20年
舗装	普通アスファルト10年	改質アスファルト15年
防水層	シート防水(舗装のサイクル)10年	シート防水(舗装のサイクル)15年
防水層更新	塗膜防水(舗装のサイクル)10年	塗膜防水(舗装のサイクル)15年

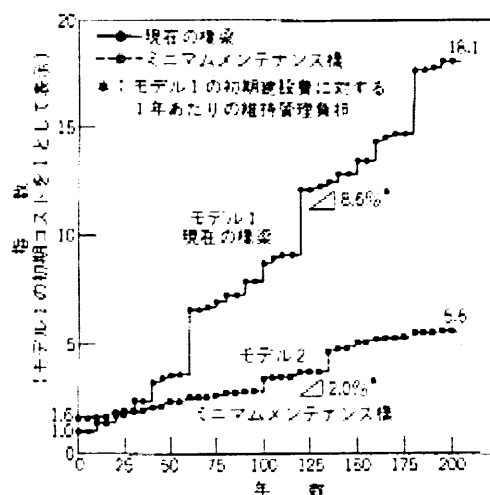


図-6.3.1 LCC推定例

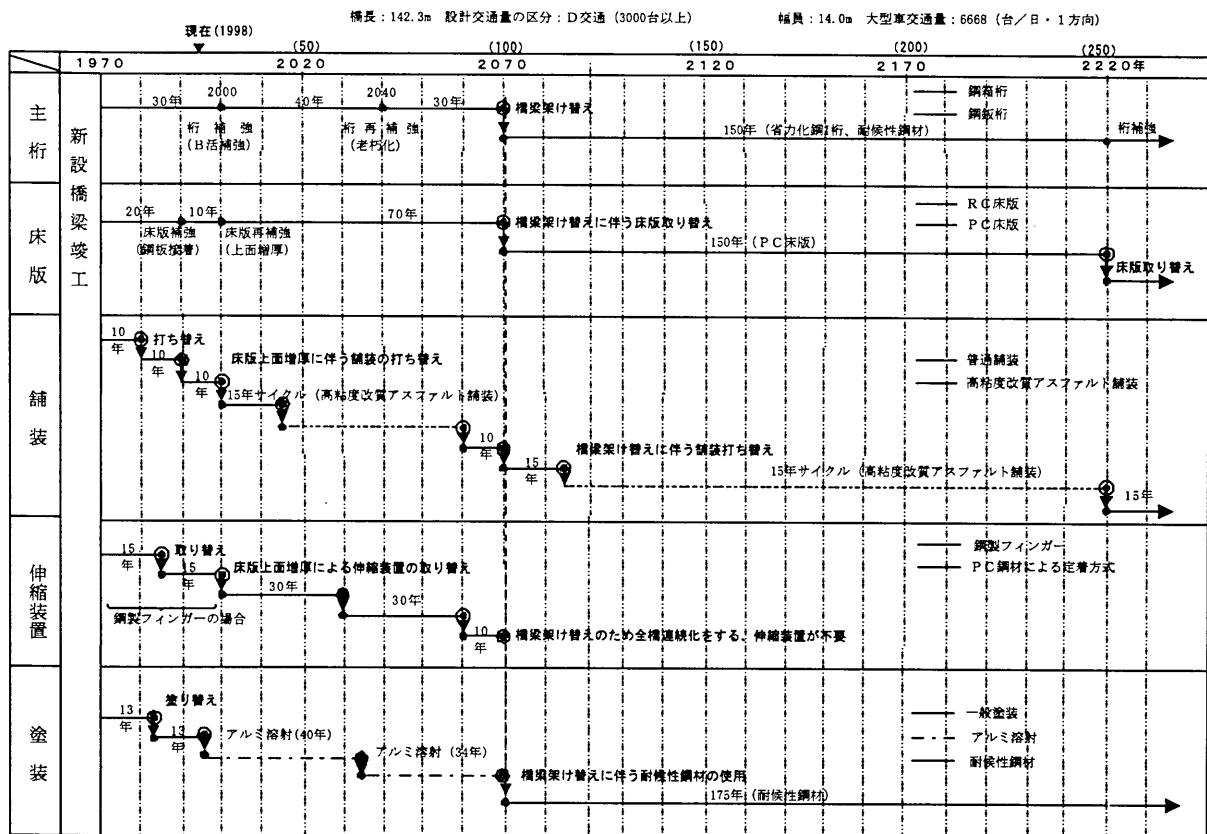


図-6.3.2 ライフサイクルモデルの設定例

(2) LCC解析に基づく床版補強・補修計画例⁶⁾

都市内道路橋床版の補強・補修では、工法によっては交通規制が不可欠であり、工事渋滞に伴う時間損失や燃料損失など社会的外部費用が無視し得ない。

ここでは、従来の工法選択である経済性(工事費)、施工性、工期等のほかに将来の維持更新費用や外部費用も含むLCC分析を加味した補強・補修計画を策定して、補修工事を行った東京都の実施例を紹介している。

1) 対象橋梁の概要

分析の対象橋梁は、都内で最も交通量の多い環状8号線の昭和45年供用開始した高井戸陸橋で橋長142m（単純合成桁20m+3径間連続2鋼箱桁100m+単純合成桁20m）、幅員14m、床版厚18cmである。本橋は供用開始直後から交通量調査、床版のひび割れ調査、載荷試験による力学特性のほか鋼板接着、縦桁増設工法の補強効果についても追跡調査を実施している。

床版の補修履歴は、昭和62年に中央径間と側径間2でひび割れ密度約10m/m²の状態で鋼板接着工法により補強されている。なお、追跡調査対象側径間1は、未補強で平成9年まで使用し、一部陥没の兆候が確認されたため追跡調査を行った。その結果、ひび割れ密度が約15m/m²以上で角欠けが顕著の

ほか舗装面に貫通ひび割れと一部舗装下の床版上面が砂利化しており、疲労損傷による供用限界に達していると判断している。平成10年度から補強工事を実施し12年5月に完了している。

2) ライフサイクルのモデル化

ライフサイクルのモデル化は、基本的に現行橋梁を補強して延命させ100年以降に更新を行うと仮定し、更新では現行標準規格の材料を使用した「現行モデル」と高耐久性材料を使用して、維持管理費を低減する性能保証型の「性能仕様モデル」を想定している。性能仕様モデルのライフサイクル設定例を図-6.3.2に示す。ここに示したようなモデルを解析条件として明示することが不可欠である。

分析の対象部材は、主桁（塗装、補強、架替え）、床版（補強、再補強、取替）、伸縮装置（取替）、舗装（打替）としている。その他のコストは維持管理費として定期点検費（5年毎）、架替え時の仮橋費、外部費用（工事期間内の交通渋滞待ち時間損失費、燃料消費損失費など）としている。

解析の対象部材には、沓の交換や排水装置、高覧、防音壁などの項目も考慮することが求められる。しかし、解析に影響を与える項目を網羅することが重要であり、影響の少ない項目は省略してもよい。

単価については、過去の工事費は実績とし、将来

の工事費は現在の概算工事費単価とし、ここでは割引率は考慮していない簡単な積み上げとしている。

解析期間は250年間とし外部費用を考慮したケースと考慮しないケース、および仮橋を考慮した場合と考慮しない場合の6ケースで試算している。

LCC分析の主要部材の単価と耐用年数は、過去の実績や実験結果、経験などから表-6.3.2に示す値を設定している。これらの単価や性能については、今後多くの実績や実験値から妥当な値を見いだして設定する必要がある。

表-6.3.2 主要部材の単価と耐用年数の例

モデル 項目	現行仕様モデル		性能保証仕様モデル	
	内容	単価(万円) 耐用年数	内容	単価(万円) 耐用年数
主桁	省力化鋼桁	85	省力化カラー耐候性鋼桁	110
		100		150
床版	RC床版	11.1	PC床版	18.3
		50		150
舗装	改質Ⅱ型	0.45	高粘度改質	0.6
		10		15
伸縮装置	鋼製フィンガー	10	連続化	—
		15		—
塗装	一般塗装	0.5	カラー耐候性鋼材	0.8
		13		175
床版補強	鋼板接着	9.1		
		50		
床版補強	上面増厚	11.1		
		50		

3) LCC分析結果

a) 未補強で供用限界に達した側径間1の床版は、上面増厚補強、取替工法（2方向PC床版、鋼合成

床版、I型格子床版、鋼床版）について試算した結果、耐久性が高く、工期が短く、維持管理費の少ない2方向PC床版取替がコスト的に有利である。

b) 既に鋼板接着で補強済み中央径間と側径間2のLCC試算結果を図-6.3.3に示す。

① 性能仕様モデルを導入する前の100年までは、主桁補強と床版上面増厚で延命化するため現行モデルと性能仕様モデルには優位差がない。100～150年では外部費用を考慮しない場合に性能仕様モデルの方がコストは高い。150年以降では性能仕様モデルの方がコストは安くなる。

② 外部費用は、総費用の75%（現行モデル）、69%（性能仕様モデル）を占めており無視できない。また初期建設費に対する総コストは、現行モデルで外部費用無視の場合15.1倍（外部費用考慮60.9倍）、性能仕様モデルで外部費用無視の場合9.8倍（外部費用考慮31.5倍）となる。

③ 高井戸陸橋は立地条件から架替え時の外部費用が高く、補強による延命化をはかることが適切である。また架替え時には現状の側道外側に仮橋を設けて外部費用を発生させない案を検討する必要がある。

c) LCC分析は、長期的な維持更新の戦略を策定するうえで有効な一指標である。現行の工法選択検討項目（工事費、工期、維持管理の容易性など）と組み合わせることで検討することにより、より適切な維持更新事業が計画実施される。

d) LCC分析では、各部材のコストと性能（耐用年数）の関係および外部費用算定手法と単価の設定を適切に行う必要があるが、信頼性が少し劣るとしても設計者が想定する将来の維持更新の考え方が明確になり、客観性が高まるメリットが大きいことを指摘している。

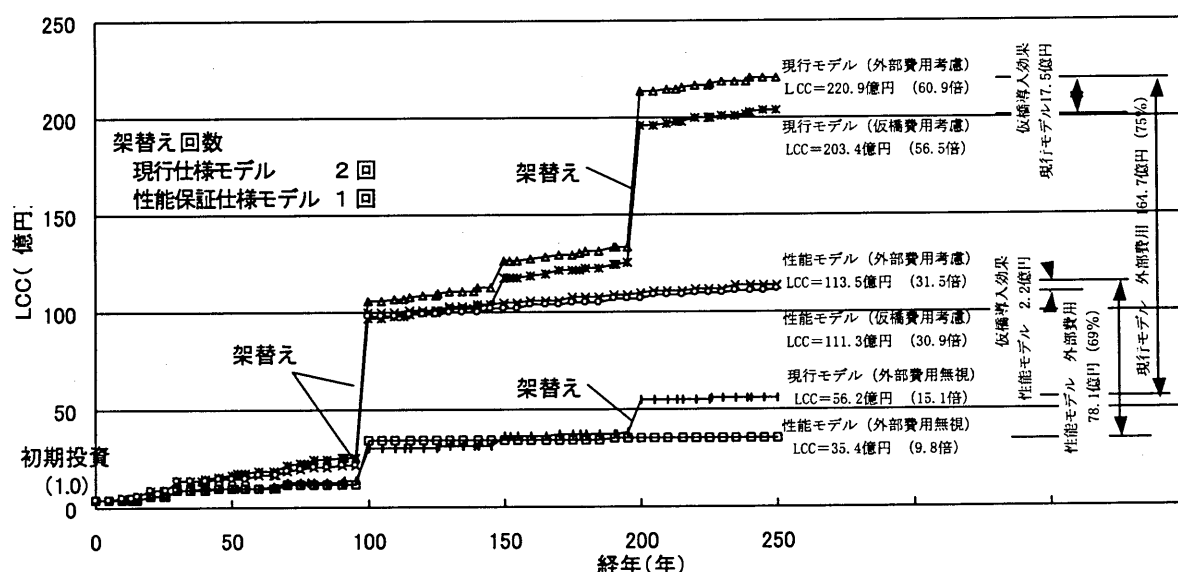


図-6.3.3 性能仕様モデルのLCC解析例

参考文献

- 1) 関口, 山下, 角田: 環状七号線における補修工事のライフサイクルコスト試算, 土木学会第50回年次学術講演会論文集V-294, pp. 588-589 (1995)
- 2) 関口幹夫: 環状七号線における経済性評価モデルの一例, 舗装, pp. 9-18 (1997.5)
- 3) 関口幹夫: 長寿命舗装, 土木学会誌, Vol. 83, pp. 23-24 (1998.3)
- 4) 西川和廣: ライフサイクルコストを最小にするミニマムメンテナンス橋の提案, 橋梁と基礎, (1997.8)
- 5) 建設省土木研究所橋梁構造部橋梁研究室: ミニマムメンテナンスに関する検討, 土木研究所資料第3506号 (1997.6)
- 6) 関口, 今里: LCC分析に基づくRC床版の補強・補修計画, 第23回日本道路会議論文集(B), pp. 254-255 (1999)