

交通流動を考慮した複数主要橋梁における長期補修でのライフサイクルコストに関する分析

谷田 英駿¹・奥嶋 政嗣²

¹ 学生会員 徳島大学 大学院先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程
E-mail: c501831033@tokushima-u.ac.jp

² 正会員 徳島大学教授 大学院社会産業理工学研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)
E-mail: okushima.masashi@tokushima-u.ac.jp

橋梁の長期補修計画では補修費用だけでなく、その残存価値に加え、補修工事によって生じる交通流動の変化を考慮する必要がある。本研究では、交通流動変化による道路利用者負担のみならず、橋梁劣化に対応した残存価値を考慮した複数主要橋梁における長期補修計画案の方法論の確立を目的とする。そのため、複数主要橋梁を対象として、橋梁劣化モデルと交通量配分モデルを組み合わせた橋梁補修シミュレーションによりライフサイクルコスト (LCC) を推計し、各種補修シナリオを比較評価した。その結果、橋梁の供用予定年数に関わらず予防的補修による費用削減効果を実証した。さらに、補修費用と道路利用者負担を合わせたLCCについて、残存価値を考慮することにより計画期間の長さに関わらず適切な長期補修計画案の立案が可能であることを実証した。

Key Words : *life cycle cost, traffic assignment, road user cost, asset management*

1. はじめに

近年、社会基盤施設の合理的な維持管理計画が全国各地で行われている。その中でも道路橋梁の維持管理計画は、市民生活に与える影響が大きいことから積極的に行われている。しかしながら、地方自治体では管理橋梁数が膨大なうえ、技術者が不足しているため具体的な計画策定が進んでいないのが現状である。さらに地方自治体のみならず、我が国全体として今後、人口減少に伴う税収のさらなる減少が想定されており、限られた予算内で戦略的かつ中長期的な補修計画の立案が必要とされている¹⁾。

そこで、従来の事後的補修方針から予防的補修方針に移行することにより、橋梁の長寿命化が期待されている。予防的補修では、定期点検によって橋梁の損傷が初期段階であると判定された場合、比較的安価な補修工事が実施される。これにより、橋梁の供用予定年数の増加を期待することができる。橋梁の長寿命化により、各種費用が削減され、かつ限られた予算内において効率的な維持管理を行うことが期待されている。また、橋梁の長寿命化は、発生する費用の削減のみならず、ストック効果や費用負担の平準化²⁾、安全性やサービス水準の向上を期待することができる。

こうした背景を踏まえ、橋梁をはじめとした社会基盤施設での維持管理において、補修計画策定時点から計画対象期間終了時まで発生する各種費用の総和を「ライフサイクルコスト (LCC : Life Cycle Cost)」として、予防的補修による最小化や合理化を目的とする長期的な補修計画 (アセットマネジメント) に関する研究が行われている。例えば、橋梁における長期補修計画について、古田ら³⁾は補修費用を評価指標として、不確実性を考慮した最適な補修計画の策定方法を提案した。一方、小林ら⁴⁾は劣化予測やLCCに基づく維持管理計画は技術者不足が深刻かつ管理橋梁数が膨大な地方自治体において有効的ではないとして、橋梁の劣化速度の異質性を考慮した補修戦略の考え方を提示している。Seyedshohadaieら⁵⁾は、アスファルト舗装における劣化の不確実性を考慮した補修計画策定モデルを構築している。

一方、橋梁をはじめとした道路施設における維持管理では社会的損失について考慮する必要がある。その中でも、補修工事に伴う車線規制によって生じる交通渋滞は利用者のみならず地域に大きな影響を与える。これについて、杉浦ら⁶⁾はアスファルト舗装におけるポットホール補修によって生じる補修費用だけでなく、旅行時間増大を考慮して、最適補修戦略の決定をモデル化している。石橋ら⁷⁾は道路ネットワーク上の橋梁群の補修によって

を設定する。

供用予定年数により更新時期が与えられる基本シナリオ群について設定する。「更新型シナリオ」では、健全度7において実施される更新工事のみを対象としている。そのため、更新工事が必要と判断されるまでは補修工事を一切行わない。つぎに、従来から行われている「事後保全型シナリオ」では、健全度5において事後的補修が実施される。「予防保全型シナリオ」では、橋梁の状態が比較的良好な健全度3において予防的補修が実施される。しかしながら、補修計画策定時における橋梁の初期健全度が3よりも大きい場合には、事後的補修を集中的に行い健全度を回復させたのち、予防的補修を行う。

「初期健全度型シナリオ」は、事後保全型シナリオと予防保全型シナリオを組み合わせたシナリオである。補修計画策定時の橋梁の初期健全度に合わせた補修が実施される。具体的には、初期健全度が予防保全段階を突破している場合は、供用予定年数によって設定した更新が実施されるまで事後的補修を行う。更新後には、対象期間終了時まで予防的補修が行われる。一方、初期健全度が予防保全段階である橋梁では、供用予定年数による更新工事の前後を通じて一貫して予防的補修が実施される。

(2) 長寿命化シナリオ群の設定

橋梁の補修計画では予防的補修による橋梁の長寿命化が期待されている。特に、交通量が多い国道や高速道路区間では予防的補修による更新工事の回避が期待されている。そこで、基本シナリオ群に対して、予防的補修が実施される予防保全型シナリオおよび初期健全度型シナリオにおいて供用予定年数による更新時期の設定を行わないシナリオを設定する。基本シナリオ群と区別するために、それぞれ「予防保全型（更新なし）シナリオ」および「初期健全度型（更新なし）シナリオ」とする。

具体的には、予防保全型シナリオ（更新なし）では橋梁の初期健全度によらず全橋梁において順次、予防的補修が実施されるため、全橋梁において対象期間中は更新工事が実施されない。一方、初期健全度型（更新なし）シナリオでは、橋梁の初期状態によって予防的補修が実施されない橋梁が存在する。そのため、初期健全度が予防保全段階を突破している場合は供用予定年数による更新工事が実施される。すなわち、初期健全度が予防保全段階の橋梁においてのみ、供用予定年数による更新工事が実施されないとする。

3. 橋梁補修シミュレーションの構築

(1) 橋梁劣化予測モデル

長補修計画では将来に発生する各種費用について、橋

梁の劣化予測に基づいて推計がされる。このため、劣化予測において用いる手法は適当なものを用いる必要がある。様々な劣化予測手法が構築提案されている中で、本研究では取り扱いが容易であることから、既往研究¹⁰⁾で構築されたマルコフ劣化ハザードモデルを適用する。本モデルでは、過去の定期点検結果によって推定したパラメータを用いて現在の橋梁の状態のみで劣化予測が行えること（マルコフ性）が最大の特徴である。本モデルでは橋梁の健全度を7段階に区分し、年次経過に伴う劣化進行をマルコフ推移確率行列で表現している。またモデル構築において、大型車交通量等の劣化要因を劣化確率に反映させることができる。

推移確率行列における推移確率 $\pi_{i,j}$ は健全度が*i*から*j*に劣化する確率を表している。ここで、補修を除き橋梁の健全度は回復することはないため、式(1)が満たされる。

$$\pi_{i,j} = 0 \quad (i > j) \quad (1)$$

推移確率は管理者が過去に実施した定期点検結果によって推定することができる。このとき定期点検結果の情報は、劣化進行の有無 $\delta_{i,j}$ 、定期点検間隔 *Z*、劣化要因を表す特性ベクトル *x* で構成される。特性ベクトルは、各橋梁における劣化要因が含まれる。例えば、大型車交通量や床版面積等が挙げられる。ここで、任意の時点において定期点検を実施し、次回の定期点検においても健全度が維持される確率 $\pi_{i,i}$ は式(2)によって求めることができる。

$$\pi_{i,i} = \exp(-\theta_i Z) = \exp(-x\beta_i Z) \quad (2)$$

このとき、 θ_i はハザード率と呼ばれ特性ベクトル *x* と未知パラメータ β_i を掛け合わせることで求める。未知パラメータ β_i は定期点検結果および特性ベクトルの観測値に基づいて、健全度別に最尤推定法によって推定することができる。

一方、定期点検間隔を適正に設定し点検結果の誤差が小さければ、定期点検間に健全度が2段階以上進行する確率は微小となる。このため本研究ではその確率を無視できると仮定する。このとき、健全度が1段階のみ劣化する確率は $\pi_{i,i+1}$ は式(3)のように記述することができる。

$$\pi_{i,i+1} = 1 - \pi_{i,i} \quad (3)$$

本研究では、既往研究¹⁰⁾において床版を対象とした統計的に推定された係数パラメータを参照し、ハザード率を設定する。ただし、簡便のため、対象橋梁は概ね同質の劣化特性を有していると仮定する。そのため、対象橋梁間における大型車交通量の差による劣化の差異を考慮することは今後の課題である。ここで、既往研究において求められた係数パラメータはNY市の管理橋梁での定期点検結果を対象としたものである。既往研究では定期点検間隔が2年に1度のデータを用いている。一方、我が国では5年に1度の定期点検が義務付けられている。

そこで、整合性を図るため、「定期点検は4年に1度」、
「1回の定期点検で健全度の推移は1段階のみに限定する」という条件により、推移確率を算定した結果を表-1に示す。既往研究では、NY市の損傷度判定と我が国における定期点検要領（案）との対応関係について整理されている。そのため、整理事項を参照し、各健全度における補修区分は更新を除き、定期点検要領における橋梁全体の判定区分に対応するようにした。本研究では、全ての対象橋梁において、定期点検における各健全度での劣化進行の有無は、この劣化確率に基づいて推計する。

表-1 マルコフ推移確率

健全度	状態維持確率	劣化確率	補修区分
1	0.2925	0.7075	-
2	0.3527	0.6473	-
3	0.5162	0.4838	予防的補修
4	0.6576	0.3424	巻き戻し補修
5	0.7073	0.2927	事後的補修
6	0.4374	0.5626	緊急補修
7	1.0000	0.0000	更新

(2) 交通量配分モデル

本研究では、橋梁の長期補修計画において実在する道路網における橋梁を対象とし、補修工事に伴う車線規制によって生じる旅行時間の増大を道路利用者負担とする。そのため、精度の高い交通量配分モデルを構築する必要がある。そこで、本研究では対象圏域を徳島広域都市圏として、図-2に示すようなリンク数3426、ノード数2789で構成される道路ネットワークを構築した。つぎに、交通需要として平成22年度道路交通センサス起終点調査に基づく車種別OD表を対象とする。ここで、区間交通量の推計精度の向上を図るために、対象圏域については徳島市内を小学校区単位として、BゾーンOD表を68ゾーンに分割することとした。



図-2 対象道路ネットワーク

以上の道路ネットワークおよび交通需要を対象として、平成27年度道路交通センサス調査結果（24時間交通量）と比較して、交通量配分結果について現況再現性を検証する。道路区間交通量の推計では車種別確率的利用者均衡配分法を用いる。このとき、リンクコスト関数 $t_a(x_a)$ としては、式(4)に示す修正BPR型関数を用いる。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right\} + F_a \quad (4)$$

ここで、 x_a はリンク a の車種別交通量（pcu/日）を、 t_{a0} はリンク a の自由走行時間を、 C_a はリンク a の交通容量（pcu/日）を、 F_a はリンク a の料金抵抗の時間換算値を、 α, β はパラメータをそれぞれ表す。

料金抵抗の時間換算値 F_a については、高速道路区間を対象として、ターミナルチャージを150円、走行区間1kmにつき24円を設定し、時間価値 μ で除して算出した。また、時間価値 μ については、平成20年度国土交通省価格¹⁾を参考に車種別に設定した。具体的には、乗用車では40.1（円/分）、小型貨物では47.91（円/分）、普通貨物では64.18（円/分）、バスでは374.27（円/分）と設定した。さらに、パラメータ α, β は修正BPR型関数（ $\alpha = 2.62, \beta = 5$ ）を採用した。また乗用車換算係数は、普通貨物およびバスにおいて2.0とした。

確率的利用者均衡配分法では、経路分散パラメータに応じて異なる配分結果が得られる。そこで、経路分散パ

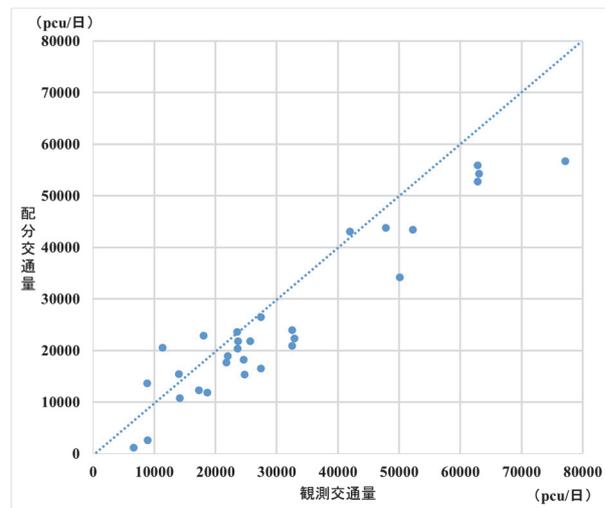


図-3 現況再現結果

ラメータを調整した。このとき、対象道路網のうち、主要区間の配分結果と、対応する平成27年度道路交通センサス調査結果を比較して、最も再現性が高い配分結果を図-3に示す。観測値である平成27年度道路交通センサス調査結果と配分交通量との相関係数は0.949となっている。経路分散パラメータを調節することで、多数の主要区間において、観測交通量との推計誤差が15%以内となっている。

(3) 補修シナリオの評価方法

本研究では、橋梁劣化モデルおよび交通量配分モデル

を組み合わせた橋梁補修シミュレーションを実行する。このシミュレーションにより、補修シナリオ別に補修費用および道路利用者負担が推計される。これらの2指標を合計した指標をLCCとして、残存価値を考慮した上で補修シナリオの比較評価を行う。

本研究での橋梁補修シミュレーションの概要を図4に示す。対象橋梁および計画対象期間を設定したのち、補修シミュレーションを実行する。各年次において橋梁kが定期点検の対象であるかを判定する。定期点検の対象橋梁は、表-1における劣化確率を用いて健全度の推移を判定する。定期点検の終了後、点検結果を踏まえ橋梁kが補修シナリオに対応した補修工事が必要であるかを判断する。このとき、供用予定年数に応じて更新工事が設定された基本シナリオ群では、更新工事实施が優先される。補修工事が必要となった全ての橋梁について、補修工事实施時期を決定する。補修工事实施時期において、表-2に示す健全度別に設定した補修工事が実施される。各健全度における補修工法および補修単価の設定は、既存研究⁹⁾を参考とした。補修費用は、各補修工法に応じて設定している補修単価に補修対象橋梁の橋長および幅員を掛け合わせることで推計する。また補修工事では、工事期間全日において補修工事が実施されるとする。このとき、車線規制を伴う補修工事では、各工事における車線規制数に応じて上下線とも同数の車線が終日規制される。その通行規制の条件に応じて、交通量配分により道路利用者負担が推計される。

道路利用者負担の推計では、通行規制なしの現況と各補修工事による通行規制時において、それぞれ交通量配分の結果として、総交通費用GTを式(5)に基づいて算定する。

$$GT = \sum_a \sum_m \mu_m x_{a,m} t_{a,m} \quad (5)$$

ここで μ_m は車種別時間価値を、 $x_{a,m}$ は車種別区間交通量を、 $t_{a,m}$ は車種別リンクコストの時間換算値を表す。各車線規制時の総交通費用と車線規制なしでの総交通費用の差を道路利用者負担として推計する。

以上の手順により、計画対象期間が終了するまで推計する。道路事業をはじめとした公共事業では、計画対象期間が長期的である場合、一般的には各種費用において社会的割引率が適用される。しかしながら、本研究のように、予防的補修を取り入れた橋梁の長期補修計画において、補修費用等橋梁管理者が実際に負担する費用のみを推計対象とし、それらの合計であるLCCに基づいて補修シナリオの比較評価を行う場合、貝戸ら¹²⁾や高橋¹³⁾が指摘しているように、社会的割引率を適用するのは適当でないと考えられる。一方、本研究では補修費用だけでなく補修工事による旅行時間増大に伴う交通費用を「費用」として扱いLCCの推計対象としている。ここ

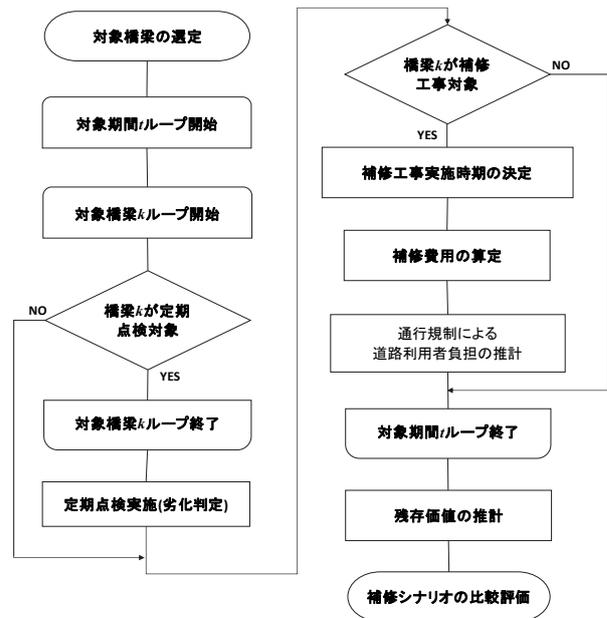


図4 橋梁補修シミュレーション過程

表-2 健全度別補修工事設定

健全度	補修工法	補修単価 (千円/m ²)	工事期間 (カ月)	規制車線数 (片側)	回復水準
3	ひび割れ 注入工法	18	1	0	2
4	断面修復 工法	20	1	1	3
5					4
6	鋼板接着 工法	140	3	2	5
7	床版取替 工法	450	12	通行止め	1

で、交通費用は道路事業評価では「負の便益」として扱われているため、社会的割引率適用の可能性が考えられる。しかしながら、[1]本研究では既存橋梁の維持管理計画を対象としており、橋梁の供用による「正の便益」を推計対象としていない、[2]社会的割引率を適用すると対象期間後期に発生する道路利用者負担が過小評価されるため、車線規制を伴う補修工事を先送りするような補修戦略が優位となる恐れがある。そのため、本研究では各評価指標において社会的割引率を適用しない。

計画対象期間が終了すると、推計した補修費用および道路利用者負担よりLCCが推計される。しかしながら、このLCCに基づいて補修シナリオの比較評価を行う点について、以下の3点の問題が存在する。

[1] 計画期間終了時では補修シナリオごとに対象橋梁の健全度が異なる。例えば、対象期間終了直前にある橋梁の更新を行った場合、多額の更新費用が必要とされるが、期間終了時点の橋梁の健全度は比較的良好となる。一方、期間終了時点の橋梁の劣化が進行している場合、その直後に多額の補修費用が必要となる。

そのため、LCCの総和のみで比較することは適切であるとはいえない。

[2] 対象期間の設定について、設定する期間によって優位となる補修シナリオが異なる可能性がある。補修シナリオによって管理水準となる健全度が異なるため、対象期間内における補修工事のタイミングが異なる。そのため、対象期間設定の任意性が LCC での比較評価に影響する。この問題点について、貝戸ら¹²⁾は橋梁を半永久的に維持すると仮定して、供用期間中に発生する維持管理費用を平均費用に分割して評価する平均費用法を提案している。

[3] 予防的補修による橋梁の長寿命化を対象とするとき、計画対象期間は比較的長期間に設定される。このとき、社会状況の変化が想定できない期間年数に設定した場合、策定した補修計画が将来世代において有効とされない可能性がある。例えば、人口変動による交通需要の変動や災害による橋梁の損傷等が挙げられる。したがって、社会状況の変化が想定可能な計画期間において橋梁の長寿命化を考慮した補修計画を策定する必要がある。

以上の諸問題を踏まえ、本研究ではこれらの問題点を考慮するために LCC の評価において、減価償却の考え方に基づく残存価値の評価を行う。具体的には、計画期間終了時において、各補修シナリオで橋梁別に式(6)を用いて残存価値 RV_k の評価を行い、LCC から差し引くこととする。

$$RV_k = RC_k - \left(\sum C_{k,i-1} + C_{k,i} \cdot \frac{y_{k,i}}{RMD_i} \right) \quad (6)$$

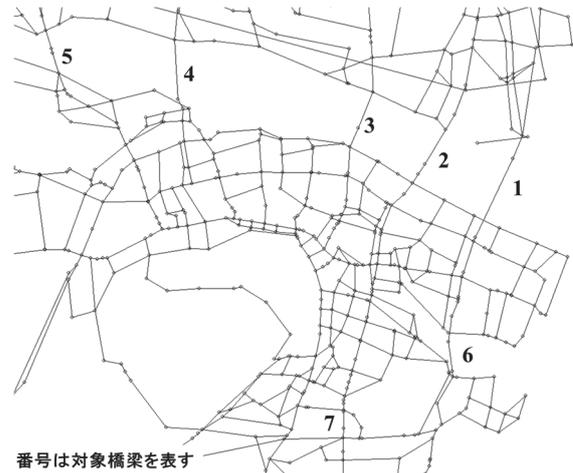
RC_k は橋梁 k における更新費用、 $C_{k,i}$ は健全度 i の状態から1段階劣化が進行することによる損失価値、 $y_{k,i}$ は橋梁 k における対象期間終了時の健全度 i における経過期間、 RMD_i は対象期間終了時の健全度 i の期待寿命をそれぞれ表す。つまり、本研究における残存価値は、更新費用を橋梁の初期価値として、各健全度ごとに設定した損失価値を対象期間終了時の健全度に応じて差し引いて求めるものである。右辺の第3項では、対象期間終了時の健全度 i における期待寿命に対する経過期間の割合を考慮して、最終段階での損失価値を表している。

それぞれの健全度における期待寿命と損失価値の設定について表-3に示す。各健全度における期待寿命は橋梁補修シミュレーションによって得られた期待値を与えている。また、損失価値の単価については、表-2に示した回復水準の健全度に応じた補修単価により設定している。つまり、各段階での補修費用を投資と捉え、期待寿命の期間において減価償却が行われると想定している。ただし、健全度1および健全度6では、劣化により次の段階へ移行した場合、健全度を1段階回復するための費用は明確でない。このため、健全度1~6における損失価値の総和が更新費用と同額となると仮定して、それぞれの損失価値を設定した。

以上のように、残存価値を考慮することにより、任意

表-3 健全度別残存価値の設定

健全度	損失価値単価 (千円/m ²)	期待寿命 (年)
1	5	3.25
2	18	12.89
3		
4	20	10.43
5	140	13.76
6	267	6.59



番号は対象橋梁を表す

図-5 対象橋梁周辺の道路ネットワーク

表-4 対象橋梁の設定

橋梁番号	架設年	橋長 (m)	幅員 (m)	車線数 (片側)	交通容量 (pcu/日) (片側)	初期健全度
1	2012	1291	26.3	2	24000	1
2	1986	1137	25.8	3	36000	4
3	1928	1070	7	1	9000	5
4	1998	911	14	1	12000	3
5	1963	800	8.8	1	12000	4
6	1975	470	18.5	2	24000	4
7	1978	96.2	28.2	3	36000	4

の対象期間において補修シナリオ間の比較評価を適切に行うことができると考えられる。

4. 橋梁補修シミュレーションによる評価

(1) 橋梁補修シミュレーションの実行条件

本研究では、複数橋梁の床版を対象として橋梁補修シミュレーションを実行する。このとき、[1]対象橋梁の設定、[2]対象期間の設定、[3]供用予定年数による更新時期の設定がそれぞれ必要となる。

対象橋梁として、図-5に示す徳島市内の主要な7橋梁を設定する。対象橋梁区間には番号を付している。各橋梁の詳細な設定を表-4に示す。各橋梁では定期点検結果に基づき補修工事が実施される。このとき、車線規制を

伴う工事の場合、車線規制数に応じて対象橋梁区間の交通容量が減少するとする。各補修工事における橋梁別の交通容量を表-5に示す。各補修工事では上下線とも同数の車線数が規制されることとし、そのため交通容量も上下線とも同一とする。

対象期間については、本研究では橋梁の長期補修計画を対象としているため、100年間と設定する。ただし、残存価値を考慮した妥当な計画期間の設定については後述する。

供用予定年数による更新時期の設定では、2017年を計画期間の開始時点とし、各橋梁において架設から100年が経過すると更新されるとする。

以上の設定にしたがって、各補修シナリオにおいて橋梁補修シミュレーションを実行する。橋梁補修シミュレーションでは橋梁の劣化を確率的に判断するため、劣化進行の判定に関わる異なる乱数系列を与えた10ケースでの推計値により各評価指標を算定する。

(2) 補修費用の推計結果

橋梁補修シミュレーションの推計結果より、補修シナリオ別に推計ケースによる全橋梁における補修費用合計の分布を図-6に示す。推計結果より、更新型シナリオの補修費用が明確に大きいことがわかる。一方、供用予定年数による更新時期を設定した基本シナリオ群においては、初期健全度型シナリオが平均値では優位となる。また、更新工事を想定しない長寿命化シナリオ群においては予防保全型（更新なし）シナリオが明確に優位である。

つぎに、橋梁別の平均補修費用について補修シナリオ別に表-6に示す。推計結果より、供用予定年数による更新工事の設定の有無に関わらず、予防的補修を取り入れることにより補修費用が削減される。特に、基本シナリオ群の場合、初期健全度型シナリオが優位となる。初期健全度が事後保全段階の橋梁において、予防保全型シナリオでは対象期間初期に集中的に補修工事を行い予防的補修が行えるまで健全度を回復させるのに対して、初期健全度型シナリオでは更新まで事後的補修を行う。そのため、対象期間初期に発生する費用を削減でき、合計においても優位となる。ただし、初期健全度型シナリオでは供用予定年数による更新工事の設定の有無によって補修費用が大きく変化するのは初期健全度が3以下である橋梁1および橋梁4のみであるため、残りの5橋梁においては補修費用に明確な差が存在しない。

以上のように供用年数による更新時期の設定に関わらず、予防的補修による費用削減効果を実証した。特に更新工事を想定するシナリオにおいては、初期健全度を考慮した補修シナリオが有効である。

表-5 補修工事別対象橋梁の交通容量変化

健全度	補修工法	交通容量(片側)						
		橋梁1	橋梁2	橋梁3	橋梁4	橋梁5	橋梁6	橋梁7
3	ひび割れ注入工法	24000	36000	9000	12000	12000	24000	36000
4	断面修復工法	12000	24000	通行止め	通行止め	通行止め	12000	24000
5		通行止め	通行止め	通行止め	通行止め	通行止め	通行止め	通行止め
6	鋼板接着工法	通行止め	12000	通行止め	通行止め	通行止め	通行止め	12000
7	床版取替工法	通行止め	通行止め	通行止め	通行止め	通行止め	通行止め	通行止め

単位:pcu/日

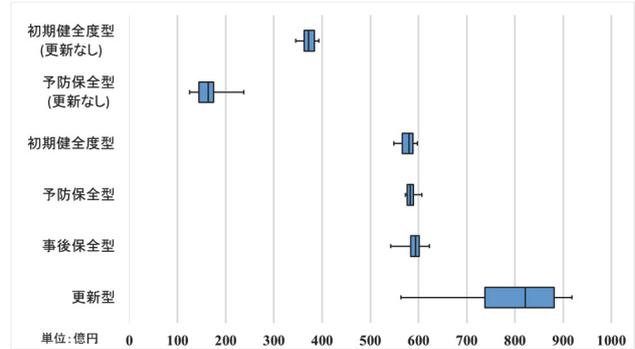


図-6 補修費用推計結果

表-6 橋梁別平均補修費用推計結果

橋梁番号	初期健全度	補修シナリオ					
		更新型	事後保全型	予防保全型	初期健全度型	予防保全型 (更新なし)	初期健全度型 (更新なし)
1	1	259.7	199.0	190.0	188.2	48.6	38.5
2	4	224.4	167.2	169.4	166.9	48.3	166.9
3	5	67.4	46.4	44.5	44.4	19.6	44.4
4	3	80.4	70.4	71.2	71.0	17.4	15.5
5	4	57.0	41.3	42.0	40.3	12.7	40.3
6	4	74.3	49.9	52.2	50.2	15.0	50.2
7	4	24.4	15.5	16.2	15.6	4.6	15.6
合計		787.7	589.7	585.4	576.6	166.2	371.3

単位:億円

...最大値
...最小値

表-7 補修シナリオ別道路利用者負担推計結果

ケース番号	補修シナリオ					
	更新型	事後保全型	予防保全型	初期健全度型	予防保全型 (更新なし)	初期健全度型 (更新なし)
1	562.7	313.9	291.8	298.5	21.6	272.0
2	562.5	304.5	286.5	290.6	7.6	264.1
3	537.6	305.5	289.1	291.3	9.6	264.9
4	432.6	304.4	292.6	294.5	14.3	268.1
5	562.5	304.1	290.7	290.7	25.6	264.2
6	323.9	304.6	291.5	289.6	11.9	263.1
7	661.0	310.5	292.7	294.4	14.8	267.9
8	440.1	310.9	292.0	294.2	24.7	267.8
9	518.6	301.9	291.6	288.4	15.1	261.9
10	553.5	310.2	290.1	295.1	36.9	270.3
平均	515.5	307.0	290.8	292.7	18.2	266.4

単位:億円

...最大値
...最小値

(3) 道路利用者負担の推計結果

道路利用者負担の推計結果についてケース別に表-7に示す。本研究では、表-2に示す補修工事の設定より、橋梁の劣化が進行するほど、それに対する補修工事の規模は増大することを仮定している。そのため、事後的補修

工事や更新工事が多く必要となるシナリオでは、多額の道路利用者負担が推計される。推計結果より、基本シナリオ群では、平均値において予防保全型シナリオが優位となる。補修費用とは異なり、初期健全度が事後保全段階の橋梁に対して期間初期において補修工事を集中的に行うことにより、初期以降に発生する道路利用者負担を削減することができるため、合計では優位となる。また、更新工事を想定しない長寿命化シナリオ群では予防保全型（更新なし）シナリオの結果が示すように、他のシナリオと比較して大幅に費用を削減することができる。つまり、予防的補修により橋梁を長寿命化することが可能となる場合、補修費用と同様に、道路利用者負担を大幅に抑制することができる。

(4) LCC 推計結果

ケース別に推計した補修費用および道路利用者負担の2指標を合計したLCCの推計結果について補修シナリオ別に分布を図-7に示す。推計結果より、基本シナリオ群では平均値において初期健全度型シナリオが優位となる。初期健全度を考慮することによって期間初期に発生する費用を抑制することができるため、LCCにおいても優位となる。また、更新工事を想定しない長寿命化シナリオ群では、予防保全型（更新なし）シナリオが優位となる。

つぎに、各補修シナリオにおけるLCCの時間的推移について、平均値の推移を10年ごとに区分して図-8に示す。基本シナリオ群では、50年経過時点までは事後保全型シナリオが優位となるが、60年経過以降は初期健全度型シナリオが優位となる。これより、対象期間の設定次第では優位となる補修シナリオが異なることがわかる。また、60年から70年経過時点にかけて更新型及び予防保全型（更新なし）シナリオを除く4シナリオにおいて多額の費用が発生している。これは当該期間において、補修工事に伴い発生する補修費用及び道路利用者負担が大きい橋梁2及び橋梁7に対して供用年数100年による更新工事が発生するためである。特に橋梁2では橋長が1kmを超える長大橋であるとともに、片側3車線の国道上に位置しているため通常時の区間交通量が多く、更新工事を行うことによって多額の費用が発生する。これにより、LCCにおいて60年から70年の期間において急激な増加が生じている。

(5) 残存価値の考慮によるLCC分析

計画期間100年経過後の社会状況の想定は容易ではない。想定可能な期間内において評価することが必要であるが、橋梁の更新を考慮して評価するためには、長期間を考慮する必要性もある。また、先述したように対象期間終了時の橋梁の状態が補修シナリオによって異なるため、残存価値を考慮せず比較評価をするのは適切ではな

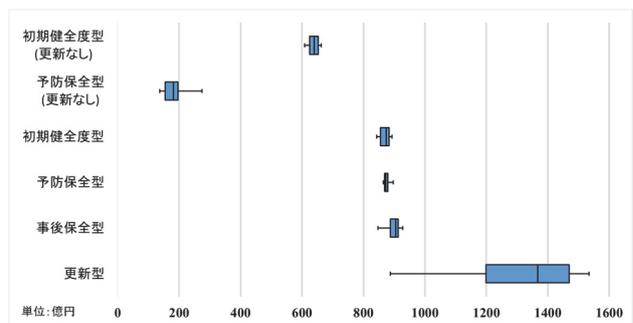


図-7 補修シナリオ別LCC推計結果

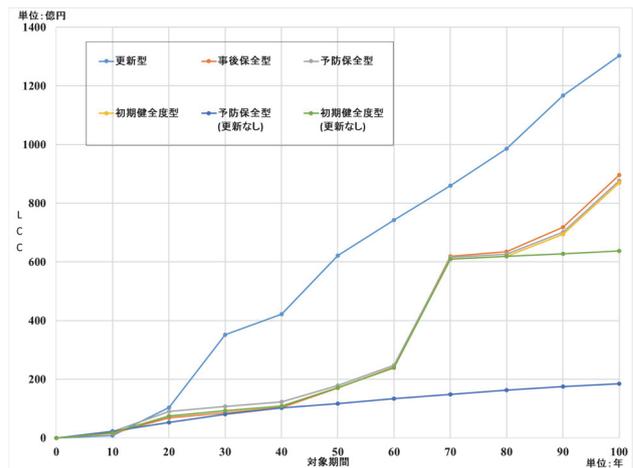


図-8 補修シナリオ別平均LCCの時間的推移

表-8 残存価値を考慮したLCC推計結果（70年経過時点）

ケース番号	補修シナリオ					
	更新型	事後保全型	予防保全型	初期健全度型	予防保全型(更新なし)	初期健全度型(更新なし)
1	520.6	207.5	182.5	188.4	-283.1	188.4
2	580.4	198.2	162.0	164.8	-326.4	164.8
3	565.7	205.2	177.5	167.0	-305.5	167.0
4	530.1	158.9	175.1	147.7	-317.2	147.7
5	441.7	169.8	159.2	151.3	-258.1	151.3
6	385.7	151.3	156.5	135.5	-332.9	135.5
7	494.8	174.0	153.2	153.4	-328.7	153.4
8	401.3	187.8	163.5	162.8	-291.2	162.8
9	447.6	179.1	164.4	148.8	-298.7	148.8
10	463.9	201.9	177.9	179.0	-218.7	179.0
平均	483.2	183.4	167.2	159.9	-296.0	159.9

…最大値
…最小値

単位: 億円

い。これらの問題点を対応するために残存価値の時間推移的を評価する。このため、表-3に示した設定値を用いて、補修シナリオ別に式(6)により残存価値を推計する。70年経過時点におけるLCCから残存価値を差し引いた推計結果を表-8に示す。残存価値は、各橋梁において更新費用を満額として減価償却の考え方に基いて評価される。このため、予防保全型（更新なし）シナリオのように補修費用が少額の場合、残存価値が補修費用より大きくなり、その差は負の推計値となる。また、更新型シナリオでは残存価値はLCCの半数程度の推計値であるが、残存価値を差し引いたとしても最も高い費用が必要となる。

残存価値を考慮した LCC の推計結果について、予め設定した対象期間である 100 年間から、道路供用の費用便益分析で適用されることもある計画期間 50 年間までについて、10 年ごとに区分した平均値の時間的推移を 図-9 に示す。推計結果より、基本シナリオ群において 100 年経過時での優位となるシナリオは、残存価値を考慮した場合でも初期健全度型シナリオである。一方、対象期間 50 年経過時では残存価値を考慮しない場合は事後保全型シナリオが優位であったが、残存価値を考慮した場合には初期健全度型シナリオが優位となる。さらに、50 年目以降は各年代においても残存価値を考慮した場合、初期健全度型シナリオが優位となる。

このように、残存価値を考慮することによって、補修計画を立案する際に、橋梁の管理水準が異なる補修シナリオを比較評価できる。

(6) 感度分析による補修シナリオの頑健性検証

本研究では、交通量配分モデル及び橋梁劣化予測モデルを組み合わせた橋梁補修シミュレーションにより LCC を推計し、補修シナリオの比較評価を行った。ここで、各モデルにおいて LCC の推計結果に直接影響を与える要因として、[1]交通需要、[2]劣化確率が挙げられる。本研究では、これらの要因について年代や橋梁特性に関係なく統一のパラメータを用いている。しかしながら、人口減少に伴う交通需要の変動や劣化確率の変動によって優位となる補修シナリオが異なる可能性がある。そのため、設定した補修シナリオにおいて感度分析を行い補修シナリオの頑健性を検証する必要がある。

感度分析は、LCC の推計結果に直接影響を及ぼす 2 要因において、それぞれ実行することが考えられる。しかしながら、本研究では LCC の推計において交通流動への影響を評価することに主眼を置いているため、感度分析では人口減少による交通需要の変動を想定した補修シナリオの頑健性の検証を行う。

交通需要の変動では、将来の各種社会指標に基づき交通需要の将来推計を行うのが望ましい。しかしながら、将来交通量の推計は容易ではないため、今回は簡易的な交通需要変動を対象とする。具体的には、交通量配分モデルで用いている車種別 OD 表において、全 OD ペア間の交通量を全車種一律で 5%減少させる。減少させた車種別 OD 表を交通需要として、各補修シナリオにおいて橋梁補修シミュレーションを実行する。このとき交通需要を除き、橋梁補修シミュレーションで用いる各種設定や実行条件、補修シナリオ等は 2. から 4. で示したものと同一とする。

人口減少に対応した交通需要に基づき推計した残存価値を考慮した LCC での平均値の時間的推移推を 図-10 に示す。図-9 と比較して、各補修シナリオにおいて対象期

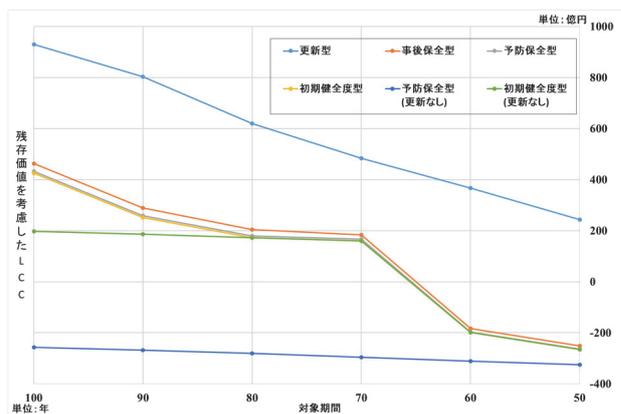


図-9 残存価値を考慮した LCC での平均値の時間的推移

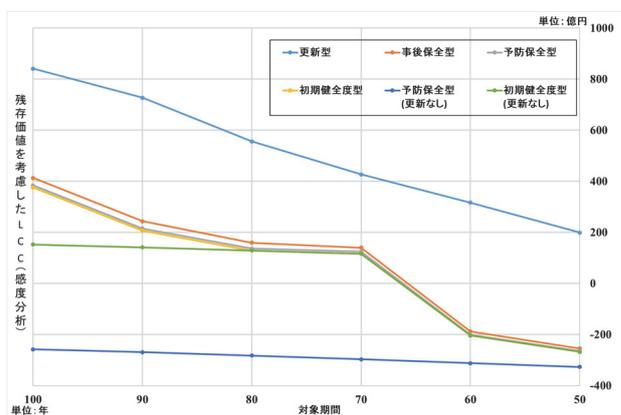


図-10 感度分析における残存価値を考慮した LCC での平均値の時間的推移

間全体にわたって残存価値を考慮した LCC が減少している。これは、交通需要が減少することにより対象橋梁における通常時の区間交通量が減少し、補修工事による通行規制が生じた際に推計される道路利用者負担が減少したためである。一方、補修シナリオ間の優位性については交通需要の減少前後において変化が生じていない。交通需要が全 OD ペア間で全車種一律に 5%減少した場合においても、基本シナリオ群では残存価値を考慮した LCC において対象期間の長さに関わらず初期健全度型シナリオが優位となり、補修シナリオの頑健性を検証することができた。

しかしながら、ここでは交通需要に焦点を当て、簡易的に感度分析を行っているため、[1]将来の各種社会指標に基づき推計した将来交通量を用いたより精度の高い推計、[2]劣化確率の変動による感度分析は課題となる。

5. おわりに

本研究では、複数主要橋梁における長期補修計画案の評価のために、補修費用に加えて、交通流動変化による

道路利用者負担のみならず、橋梁劣化に対応した残存価値を考慮した評価方法を提案した。本研究の成果は以下のように整理できる。

[1] 橋梁劣化に対応した損失価値を補修費用に基づいて設定することで、減価償却の考え方に基づいた残存価値の算定が可能となることを示した。残存価値を考慮することで、各補修シナリオにおける橋梁の LCC をより適切に比較評価でき、LCC 評価において残存価値を考慮することの重要性を示した。

[2] 長期間を対象とした評価が必要とされる橋梁の補修計画について、残存価値を考慮した LCC について時間的推移を評価することにより、評価期間の縮減ができる可能性を示した。また、橋梁部材の劣化の不確実性を考慮した供用予定年数に関わらず予防的補修による費用削減効果を実証した。

[3] 事後保全型シナリオと予防保全型シナリオを組み合わせた初期健全度型シナリオを考案した。橋梁の初期健全度に適した補修を選定可能とすることで、供用予定年数での更新を想定する基本シナリオ群では、初期健全度型シナリオが最も優位な評価となることがわかった。

[4] 予防的補修による橋梁の長寿命化が実現し、供用予定年数を超過して供用を継続可能となった場合には、予防保全型（更新なし）シナリオの優位性を示した。70 年経過後にその優位性はより明確になることもわかった。

今後の課題としては、[1]対象圏域における定期点検結果による各橋梁の劣化確率の推定、[2]橋梁の劣化確率に対する感度分析を通じた補修シナリオの頑健性の検証、[3]橋梁補修による波及的な社会損失等の考慮、[4]将来の交通需要に対する頑健性の検証の精緻化、[5]補修工事によって車線規制が発生した際に区間交通量が変動する橋梁における劣化確率の再推定が挙げられる。

参考文献

- 1) 大島俊之編：実践 建設系アセットマネジメント 補修計画事業の立て方と進め方、森北出版、2009。
- 2) 瀬木俊輔、小林潔司：インフラの動学的投資政策と長寿命化便益、土木学会論文集 D3（土木計画学）、

Vol.70, No.3, pp.179-197, 2014。

- 3) 古田均、野村泰稔、中津功一郎、香川圭明、石橋健、内田昌宏：橋梁群のアセットマネジメントにおける予定の変更を考慮した補修計画策定、土木学会論文集 A2（応用力学）、Vol.70, No.2（応用力学論文集 Vol.17）、pp. I_959-I_970, 2014。
- 4) 小林潔司、中谷昌一、大迫湧歩、安部倉完：橋梁の劣化速度の異質性を考慮した補修戦略プロファイリング、土木学会論文集 D3（土木計画学）、Vol.73, No.4, pp.201-218, 2017。
- 5) Seyedshohadaie, S., R., Damjanovic, I. and Butenko, S. : Risk-based maintenance and rehabilitation decisions for transportation infrastructure networks, *Transportation Research Part A*, Vol. 44, pp.236-248, 2010。
- 6) 杉浦聡志、高木朗義、倉内文孝：道路施設の破損リスクに基づく最適補修戦略決定モデルの構築、土木学会論文集 D3（土木計画学）、Vol.69, No.5（土木計画学研究・論文集第 30 巻）、pp. I_145-I_152, 2013。
- 7) 石橋健、中津功一郎、古田均、野村泰稔、高橋亨輔：GA を用いた大規模橋梁群の長期的な維持管理計画の最適化、土木学会論文集 A2（応用力学）、Vol.69, No.2（応用力学論文集 Vol.16）、pp. I_731-I_740, 2013。
- 8) 谷田英駿、奥嶋政嗣：道路利用者負担を考慮した複数主要橋梁における長期補修シナリオに関する分析、交通工学論文集、Vol. 5, No. 2, pp.A_311-A_318, 2019。
- 9) (財) 道路保全技術センター、道路構造物保全研究会編：道路アセットマネジメントハンドブック、鹿島出版会、2008。
- 10) 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定、土木学会論文集、No.801/I-73, pp.69-82, 2005。
- 11) 国土交通省道路局都市・地域整備局：費用便益分析マニュアル、2008。
- 12) 貝戸清之、保田敬一、小林潔司、大和田慶：平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略、土木学会論文集、No.801/I-73, pp.83-96, 2005。
- 13) 高橋宏直：維持補修計画での社会的割引率の設定と補修工事の最適実施時期に関する研究、建設マネジメント研究論文集、Vol.14, pp.23-33, 2007。

(Received February 22, 2019)

(Accepted August 26, 2019)

ANALYSIS OF LIFE CYCLE COST ON LONG-TERM MANAGEMENT FOR MULTIPLE BRIDGES CONSIDERING TRAFFIC FLOW

Hidetoshi TANIDA and Masashi OKUSHIMA

In the long-term management for bridges, it is necessary to consider not only repair costs but also changes in traffic flow caused by repair work under the plan period in which social conditions can be assumed. In this paper, it aims to establish a methodology of a long-term management for multiple bridges considering traffic flow. For the purpose, we evaluate the management scenarios for multiple bridges with life cycle cost, which is estimated with the bridges management simulation combined method of bridge deterioration model and traffic assignment model. In the management methodology consider in particular the method of estimating the residual value corresponding to bridge degradation. As a result, we demonstrated cost reduction effect by preventive repair irrespective of the planned service life of the bridge. Furthermore, by considering the residual value in the LCC which adds the repair cost and the road user cost, we demonstrated that it is possible to draft an appropriate long-term management plan regardless of the length of the planning period.