

部材交換構造を前提とした橋梁群の LCAによる実現可能性評価

内海 正浩¹・内田 敬²

¹学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail:utsumi@plane.civil.eng.osaka-cu.ac.jp

²正会員 大阪市立大学大学院教授 工学研究科 都市系専攻

E-mail:uchida@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

従来の橋梁は、機能で構造的に分化されているものではなく、その橋梁固有のものとして最適化されてきた。そのため、性能が低下した場合の部材交換は、工事費も高価で、施工の難易度も高い。そこで、交換構造を前提とした橋梁の研究が行われている¹⁾。本研究では遺伝的アルゴリズムを用いて、最適な更新計画を探索し、従来橋梁と比較することによって、交換構造を前提とする橋梁の実現可能性を検討する。

Key Words : ECO-Bridge, replacement, genetic algorithm, Life Cycle Cost, maintenance planning

1. 研究背景

現在、高度経済成長期を中心に建設された社会資本は年々高齢化が進んでおり、それらに必要となる維持管理・更新費は着実に増加している。橋梁に関してもその範疇にある。

しかし、従来の橋梁は、機能で構造的に分化されているものではなく、個々橋梁ごとに一体のものとして最適化されてきた。そのため、性能が低下した場合の部材交換は、工事費も高価で、施工の難易度も高い。また、橋梁の部材として、汎用性のあるものを流用するといった概念はない。

それに対して、環境負荷の低減が求められる近年、交換部材と永久構造部に分化したECO-Bridgeという構造コンセプトが提案されている¹⁾。定められた期間で交換構造部を交換することで常時点検を廃止し、工場での詳細な点検を行うとともに、汎用化された形状とすることにより、再利用かつ大量生産が可能になれば、価格の低下も期待できる。ECO-Bridgeの詳細については8章に示す。

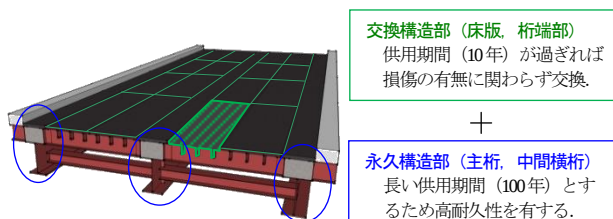


図-1 交換構造部を有する橋梁のイメージ

2. 既往文献での補修計画の扱い

従来の補修計画には使い捨て型、対症療法型、危機管理型の3つのシナリオと呼ばれる補修計画が各部材に対して運用されている。例えば²⁾、この3つのシナリオごとにLCAを行うと維持管理のミクロマネジメントにおける観点から、危機管理型において健全度の低下を抑制し、事業費の低減が図れることを明確にしている。ここに床版における危機管理型とは、耐荷力に影響を及ぼさない範囲で早めに繊維シートの接着や床版防水化といった長寿命化のための補修を行い、劣化の進行を緩やかにするというものである。しかし、危機管理型の条件として、実際では定期点検を行い、些細な損傷であっても、その後の詳細調査を行うことにより、現場の損傷の状況を細かに把握することが必要である。この危機管理型と対照的な考え方が交換構造といえる。

3. 研究目的

本研究では設計段階から交換構造部を設けているECO-Bridgeに対して、ライフサイクルコスト及びその耐久性を評価し、最適な更新シナリオ、交換間隔を求め、従来橋梁と比較することによって、ECO-Bridgeの実現可能性を検討する。

また、危機管理型の補修シナリオがLCCの観点からは優れていると考えられているが、技術者が高頻度で現地

に赴き、多数存在する橋梁全ての状況を把握することは困難である。そのため、ある一定期間を定め、定期的に交換することがLCC削減に有利に働くことが劣化状況や橋梁数、補修期間によっては期待できる。そのような有利に働く条件、状況を明確にする。

4. 最適化モデル

従来橋梁と比較し優位性を検討するにあたって、それぞれの最適な更新計画を選出しなければならない。そこで、本研究では最適解（最適更新計画）の探索に遺伝的アルゴリズムを用いる。その過程を図-2に示す。

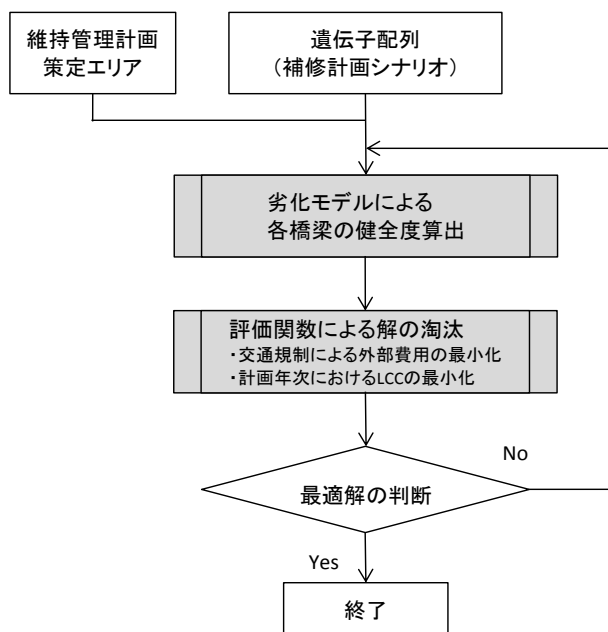


図-2 遺伝的アルゴリズムによる最適解の探索

5. 維持管理計画策定域の設定

比較検討を行うために実際の道路網および橋梁群を想定した維持管理計画域を設定する。

従来の床版打替え作業であれば大規模な作業スペースや大きな時間を要していた。しかし交換構造部は設計段階で、交換を前提としているため、従来なら本来2車線の両側通行止めが必要となる補修作業であっても、片側通行とし、交換作業を期待できる。これを利用者の立場から道路網として考えると、本来ならば迂回して向かわなければいけない箇所も従来通りの経路を通行することができる。これはLCC算定の計画年数を考えるうえで、迂回による時間損失削減が可能になる。このような時間損失の観点から、ECO-Bridgeの実現性を考慮すべく橋梁単体ではなく、橋梁群としての評価を行う。

また、維持管理計画策定域を設定することにより、最適化における評価関数を用いて、従来橋梁との比較や、不適切な解の淘汰を行うことができる。

6. 劣化モデルの構築

(1) 劣化係数の設定

本研究では橋梁の損傷による架替理由で多くの割合を占める床版を交換構造として検討を行う。文献²³⁾を参考に対象とする設計条件、床版サイズは8章表-3に示す。

実際の劣化モデルにおいては文献⁴⁾を参考に耐荷力、耐久性の2曲線を作成した。数式(1)には耐荷性を示す4次式、数式(2)には耐久性を示す3次式で設定した。両方とも上に凸な曲線とする。また表-1に劣化曲線の過程に用いる係数の整理したものを示す。

$$S_L = f(t) = b_L - a_L t^4 \quad (1)$$

$$S_D = g(t) = b_D - a_D t^3 \quad (2)$$

表-1 本文中で用いる用語及び係数

名称		定義
用語	耐荷性 S_L	橋梁部材の耐荷力に基づいて評価される橋梁の性能
	耐久性 S_D	橋梁部材の劣化速度からみた、現時点における橋梁部材の劣化に対する抵抗性
	橋梁数 N	LCC算定を行う維持管理策定域内の橋梁群
	健全度 y	各年数における橋梁の健全度を示す。
	計画年数 L	プログラムを組むにあたって設定するLCC算定上限年数(現段階では $L = 100$ とする)
劣化係数	劣化加速度 a	各期間の二次曲線係数
	補修実施健全度 C	各期間においてこの健全度を下回ると補修を遂行する健全度の下限値 $C_n = 1, 2, 3, 4$
	健全度回復度 r	補修の多様性、交換構造部と永久構造部の兼ね合いをモデルに反映できる $r_n = 1, 2, 3, 4$

(2) 更新シナリオの設定

劣化モデルにおける各橋梁において、「どの補修工法」を、「いつ」、「どの順番で行うか」を決定するのが更新シナリオである。この更新シナリオを遺伝子配列として扱うことにより、その橋梁に最適な補修シナリオを選出することができる。

文献⁴⁾を参考にして、耐久性に効果があるものを補修、耐荷性に効果があるものを補強とした。なお打替え、交換においてはその両方（耐久性、耐荷性）に対して効果がある作業とする。

ここで、ECO-Bridgeの運用イメージとしては定期点検をせず、交換のサイクルとしてある一定の期間を過ぎれば損傷の有無に関係なく、現地に向かい交換作業を行うというものである。そのため、更新シナリオもECO-Bridgeに適応するよう修正を行う。つまり交換作業は経時的にある一定の期間が過ぎれば損傷の有無に関わらず行われるということである。

7. 評価関数の設定

劣化モデルから得られた各橋梁の健全度、補修回数を反映する評価関数を作成し、遺伝子配列を淘汰する。国土交通省が挙げている橋梁定期点検要領（案）⁹⁾では建設から5年おきに定期点検を行うことを推奨している。その定期点検が不要であることからECO-Bridgeに関して点検費用が削減できることが期待できる。その一つの指標として、式(3)に示すとおり、計画年次における橋梁群の総費用の最小化を設定する。

$$LCC_{eco} = \sum_{n=1}^N \sum_{x=1}^L C_{eco} \quad (3)$$

$$C_{eco} = C_R + C_M \quad (4)$$

C_{eco} : 経過年数 x での総費用

C_M : 経過年数 x での維持管理費用

C_R : 交換費用

L : 計画年数

N : 橋梁数

また、交換構造部は従来の補修工法と比較して通行規制に要する時間を大幅に短縮しうる。その外部費用を最小にするようもう一つの評価関数を設定する⁹⁾。

$$C_E = \sum_{n=1}^N \sum_{x=1}^L \alpha \cdot l_n \cdot T_r \cdot Q \quad (5)$$

C_E : 通行規制に伴う外部費用（円）

T_r : 通行規制に要する時間（時間）

l_n : 補修回数

Q : 平均交通量（台/時間）

α : 時間価値原単位（円/時間・台）

9. 想定するECO-Bridgeの仕様

本研究では1章に述べたとおりECO-Bridgeの実現可能性LCC削減という目的に重点を置いて、検討していく。しかし、ECO-Bridge開発は多様な視点から進められている。文献¹⁰⁾を参考に本研究で主たる対象とする構想を紹介する。

(1) コンセプトデザイン

交換部材（モジュール）と永久構造部を有するECO-Bridgeという構造コンセプトが提案されている¹⁾。この考えのもととなっているのは、自衛隊が用いている災害復旧時の仮橋である。自衛隊が用いる仮橋は、持ち運びが可能で、急速に架設することができる組立式の橋梁という特長を持っている。ECO-Bridgeと組立式仮橋と異なる

特色はすべてを交換構造部とするのではなく、従来構造と交換構造を組み合わせたハイブリット構造部になっていることである。

表-2 交換構造を有する利点

特徴	利点
性能低下した交換構造部を短期間で交換する	全体として現場での詳細な点検を廃する
永久構造部はメンテナンスフリーの構造とする	点検品質の向上
取り外した交換構造部は向上での点検・補修を行う	汎用化による大量生産
点検後の交換構造部は他の橋梁の	部材のサイクルを生む
部材として再利用可能である	拡張や架け替えが容易になる
機能ごとに分化されている	急速施工性の向上
	災害時に恒久的な利用の応急橋

また一般的に橋梁に要求される性能以外にECO-Bridgeにはモジュールの易点検性、易交換性、易性能回復性が求められる。そのため、以下のような条件を加えて考慮しなければならない。主桁断面図を図-3に示す。

- ・2車線3主桁とすることによって床版モジュール交換時に干渉しないような主桁配置とする。
- ・床版モジュール取り換え時の施工性への配慮も目的とした検査路の設置
- ・横桁上面と床版下面のクリアランスを400mm確保（点検時の通行性確保）
- ・床版モジュールの基本サイズを2.5m×5.0mに決定
- ・鋼床版モジュールの横リブには、製作性、易維持管理性を考慮してバルブ形式を採用

表-3 ECO-Bridge 設計条件

設計荷重	B活荷重
橋梁形式	鋼床版鋼板桁
橋長	30m
幅員	9.7m
主要材料	SM400, SM490Y
床版モジュールサイズ	2.5m×5.0m
床版デッキ厚	10mm

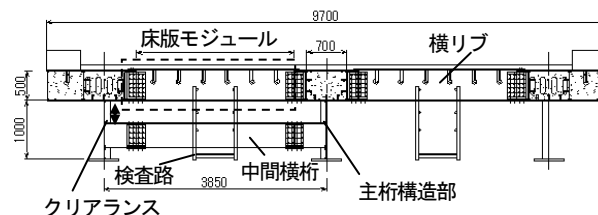


図-3 主桁断面図

(2) 継手構造の検討

頻繁に交換を行うモジュール間の継手構造部には交換性能の高い継手構造が必要となる¹⁾。現段階で採用が考えられるモジュール間継手構造を表-4に示す。

表-4 モジュール間継手構造の種類

検討する継手構造	内容
リベット継手構造	指圧接合に関する設計法の確立
ピン継手構造	疲労強度の検討と合理的な設計法の確立
引張継手構造	多列配置による性的強度の増加および疲労強度の検討
落とし込み継手構造	静的耐力および疲労強度の検討
複合継手構造	接合部としての性能評価法の確立

また、主桁-鋼床版モジュール継手構造の開発も同時に行われている⁴⁾。昨年度は主桁構造部をコンクリート充填構造とし耐久性向上のための解析的研究が行われており、コンクリート充填とした構造が鋼桁と比較して約3割程度の応力集中の緩和が期待できることがわかっている。

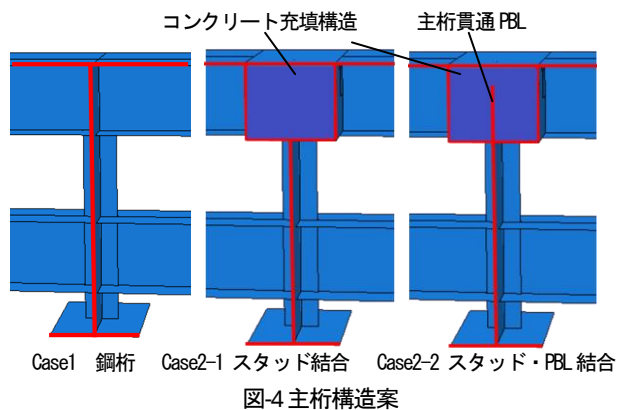


図-4 主桁構造案

(3) 床版モジュールの簡易的な劣化予測

床版モジュールは、交換性能を考慮して、大幅なデッキ厚の削減が考えられている。文献²³⁾を参考に対象とする設計条件、床版サイズは表-3に示している。

その影響が、劣化過程にも大きく影響すると考え、物理的寿命を推定した。

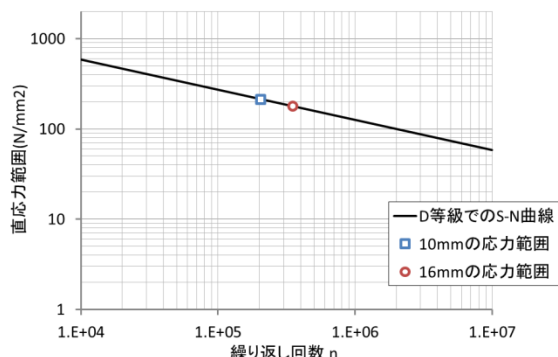


図-5 床版厚の差による疲労寿命への影響

推定手法は応力範囲を等価格子解析により算定しその応力範囲を比較することにより、簡易的に寿命を設定した。その結果によると、従来の16mmのデッキ厚の床版の劣化過程の1.71倍の進行速度で物理的寿命に至ると推測できる。この計算では一般的に床版の物理的寿命を60年とすると、交換構造部は35年となる。この物理的寿命を目安として劣化モデルを構築する。

8. 本研究のまとめと課題

交換構造という今までにはない概念をLCAを用いて、従来橋梁と比較するにあたって以下の項目を修正することが必要であるとわかった。

- ・交換構造部の経時的更新シナリオの策定
- ・評価関数へ交通規制に伴う負便益の導入

今後は、これらの修正点をモデルに反映し、シミュレーションを行うことで定量的な比較を行う。

参考文献

- 1) 山口隆司, 阿倍雅人, 奥井義昭, 館石和雄, 山口栄輝 : 急速架設・再利用を考慮したモジュラー型橋梁システム「ECO-Bridge」の提案と性能保証技術の開発, 報告書, 2010.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 住宅・社会資本の管理運営技術の開発, 研究報告書, 2006.1.
- 3) 内海正浩, 山口隆司, 松村政秀, 小林茂, 美濃智広, 光川直宏: 急速施工可能な ECO-Bridge の主桁構造部に関する 2,3 の検討, 土木学会関西支部年次学術講演会, 2012.
- 4) 玉越隆宮本文穂, 串田守可, 足立幸朗, 松本正人: BridgeManagementSystem の開発及び実用化に関する研究, 土木学会論文集, 1997.
- 5) 国土交通省: 橋梁定期点検要領 (案), マニュアル, 2008.3.
- 6) 道路投資の評価に関する指針検討委員会: 道路投資の評価に関する指針 (案), 1998.

(2013.8.2 受付)

LIFECYCLE ANALYSIS OF REPLACEABLE BRIDGES

Masahiro UTSUMI and Takashi UCHIDA

This paper describes an optimization technique of repair and replacement for deteriorated ECO-Bridges. The genetic algorithm (GA) that is search algorithm based on the mechanics of natural selection and natural genetics was adopted in order to search optimal maintenance planning with both of the minimum maintenance costs and minimum external cost. By applying this system to an existing bridge, it has been verified that employed system is effective for making optimal maintenance planning.