

部材交換構造を前提とした橋梁群のLCCによる実現可能性評価

A Feasibility Study on ECO-Bridges considering Life Cycle Cost

都市基盤計画分野 内海 正浩

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、部材構造を汎用化した交換構造を前提とした橋梁の研究が行われている。本研究では ECO-Bridge の実現可能性を検討することを目的として、簡易的な劣化モデルを作成し、補修費用及び通行規制による損失時間価値を算出し、従来橋梁群の比較より ECO-Bridge の実現可能性を明確にした。

There is nothing that is structurally differentiated features. And all bridges are made to order. So there is nothing that is generalized. Therefore, the replacement cost is expensive, if a degraded. And maintenance is high degree of difficulty. Now, studies of module bridge “ECO-Bridge” has been carried out.

In this study, we examined a feasibility study on ECO-Bridges considering Life Cycle Cost. We are selected as the replacement cost and loss time value evaluation value.

1. はじめに

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経年化が進んでおり、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。従来橋梁は主構造の交換を考慮しておらず、性能が低下した場合に、交換には困難が伴う上、その部材は多くの場合、橋梁固有の形状として製作せねばならない。

一方、環境負荷の低減が求められる近年、中小支間長の橋梁を対象として交換構造部材と永久構造部に分化した ECO-Bridge という橋梁システムが提案されている¹⁾。設定した短い供用期間で強制的に交換構造部を交換し、使用後の交換構造部は工場での点検・補修を行うことで、現地では難易度の高い詳細な点検が容易となり、点検品質の向上も期待できる。交換構造部は汎用性を持たせて設計することで大量生産可能となり、点検後は他の ECO-Bridge の部材として再利用可能である。図-1 に示す永久構造部と交換構造部を同時に有する橋梁を ECO-Bridge と称する¹⁾²⁾。

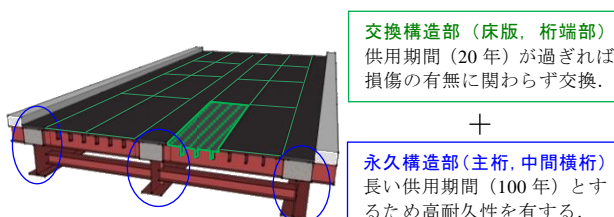


図-1 ECO-Bridge イメージ図

表-1 既往文献³⁾における補修シナリオの分類

分類	詳細
使い捨て型	使用限界において床版打替えで対応。
対症療法型	耐荷力に影響が及ぼす損傷ランクまで対処せず、更新限界においてせん断補強(鋼板接着+上面増厚)を行い、その後、打替えを行う。
危機管理型	損傷度に応じて長寿命化のための補修を行う。ここでは耐荷力に影響を及ぼさない範囲で早めに繊維シート接着で対処するものとした。

維持管理工法について研究³⁾では工法を補修シナリオとして、従来の維持管理工法を各部材に対して3パターンに分類してライフサイクルコスト (以下LCC) の算出及び比較を行っている。床版を対象とした事例を以下に記す。ここでは、この3パターンの中では危機管理型が優れている維持管理工法であるとしている。

しかし、詳細調査で橋梁の状態を詳細に把握する危機管理型の補修シナリオは、上述のECO-Bridgeと正反対のものだと考えられる。しかし、様々な橋梁の特性や経済条件、道路状況を考えると詳細点検を行わず、期間を定め強制的に交換を行うほうがLCCを削減できる場合もあると予想できる。

そこで本研究では、交換構造部を有するECO-Bridgeに対して、各条件を制御変数としてLCCの感度分析を行い、従来の補修工法と比較することでどういった状況であればECO-Bridgeが実現可能であるか検討する。

2. LCC 比較モデル

2.1 比較の流れ

ECO-BridgeのLCCを従来橋梁のものと比較し、実現可能性を検討するために、それぞれの最適な補修シナリオで運用されている橋梁群のLCCを比較する。本研究では橋梁の耐久性を模擬した健全度を用いることにより、補修・補強の回数やタイミングが確定的に定まる劣化モデルを作成した。補修費用と補修に伴う迂回損失時間を金額換算した和をLCCとすることで比較した。その全体の流れを図-2に示す。これら一連の流れを数値解析ソフトウェアMATLABにより行った。

2.2 劣化の評価

橋梁がある定められた年数（計画年次）に費やす補修費用は補修のタイミングを再現するため、経時的に劣化していく健全度のシミュレーションが必要である。そこで文献⁴⁾では図-3に示すように縦軸に健全度、横軸に計画年次をとった劣化曲線で示されているものが多い。本研究でもこの考え方を基に劣化モデルを作成した。本来であれば各部材ごとに劣化曲線を持つと考えるのが妥当であるが、今回は構造の簡略のため図-3に示す一つの曲線で一橋梁の健全度を表すとした。

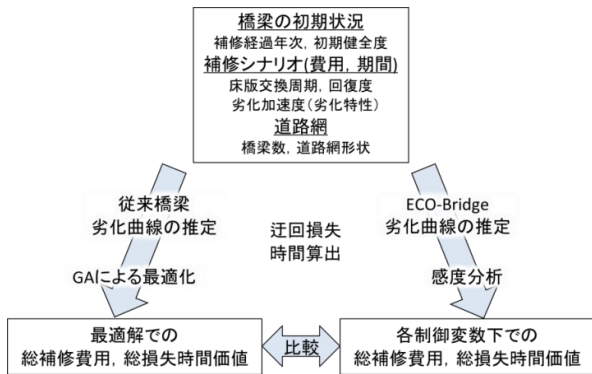


図-2 全体の評価フロー

式(1)に示す通り、健全度は計画年次 y での健全度 b_D から劣化加速度 a と経過年次 t の3次関数により定めるとしモデル化を行った。

$$S_D = b_D - a_n t^3 \quad (1)$$

また劣化加速度は初期健全度 b_D と物理的寿命 l を用いて式(2)とし、今回は健全度の上限 b_D は5とした。

$$a = \frac{b_D}{l^3} \quad (2)$$

2.3 補修計画のモデル化

劣化モデルは下がるだけでなく適切な維持管理より健全度は回復するとされている。そこで補修・補強の劣化モデル内での効果を述べる。

文献⁴⁾を参考に実際の補修・補強を2.2で述べた劣化モデルに取り込む。本モデルにおいて補修とは健全度のある一定の水準に向上させ、劣化加速度も緩やかになるものとなるもの、補強は劣化加速度のみ緩やかになるものとした。その劣化曲線との対応を図-4に示す。このことを念頭に置きながらいくつかの工法をモデル化する。

各補修補強工法は劣化曲線に関しては健全度回復度 c 、耐用年数 l_m という二つの変数を有しているとした。補修補強後の劣化加速度は耐用年数により定められ、健全度回復度分だけ健全度が b_D を上限に回復するものである。加えて劣化曲線における経過年次 t が1からとなり、必然的に劣化加速度が緩やかになる。

$$a_m = \frac{b_D}{l_m^3} \quad (3)$$

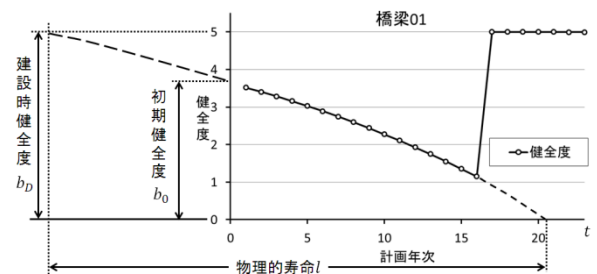
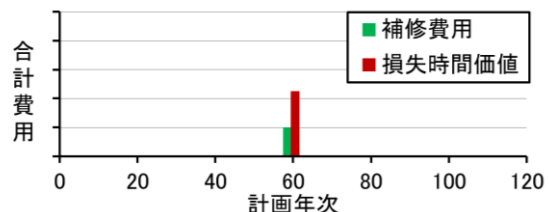
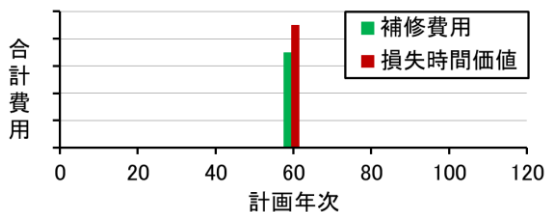
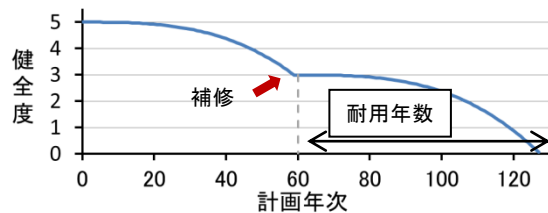
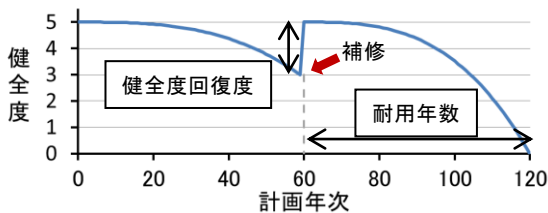


図-3 劣化曲線



(a) 補修効果

(b) 補強効果

図-4 劣化曲線における補修・補強が持つ効果及び費用のイメージ

つまり、総補修費用は式(4)に示すように、各橋梁の単位補修費用 C_m を定められた計画年次 T だけ合計し、それを橋梁数 N 分足し合わせることで求まる。

$$C_M = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T C_m \quad (4)$$

2.4 道路網による損失時間価値の算出

橋梁の補修・補強には大規模な交通規制がつきものである。また、本研究で対象としているECO-Bridgeの床版交換時にはホイストクレーンで交換することにより、全面通行止めを伴わないことが想定できる。また、交通規制による通行者の損失時間価値は大きなネットワーク・交通量になればなるほど無視できないものである。そこで、この効果を従来の損失時間価値と比較するため迂回による損失時間を算出する図-5に示すような高速道路と一般道を想定した道路網を設定した。

ここで、橋梁を模擬した橋梁リンクはそれぞれ一つの劣化曲線を持っており、健全度が低下し、補修・補強が行われた際には、そのリンクにおける交通量-速度式（以下Q-V式）は文献⁵⁾に基づき図-6のように、補修時のQ-V式に変換し対応させた。また、高速道路選択者には通行料として任意の時間価値を付加することで通行量が高速道路に偏らないように調整した。

つまり迂回損失時間は式(5)に示す通り算出した。 T_{normal} を全橋梁が健全である時での旅行時間とし、損傷時の旅行時間 T_{damage} との差をとることで総損失時間を算出する。それらを全リンクにおいて、補修にかかる時間、交通量、時間価値原単位を乗じることで総損失時間を求めた。それらを全リンクにおいて補修にかかる時間 T_m 、交通量 Q 、時間価値原単位 α を乗じることで総損失時間価値 C_L を求めた。また設定した交通量はH.22交通センサスの断面交通量の平均値が全橋梁健全時に流れるように地方道級、都道府県道級、都市高速道級として3つのパターンを設定した。

$$T_{loss} = T_{damage} - T_{normal} \quad (5)$$

$$C_L = \alpha \cdot T_m \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L Q \cdot T_{loss} \quad (6)$$

2.5 評価値設定

LCCは建設費用、維持管理費用、廃棄費用等様々な費用が考えられるが、本研究ではECO-Bridgeの実現可能性を目的としているため、従来の橋梁と大きく異なる補修費用と補修によって生じる損失時間価値をLCCとして式(7)に示すよう設定した。つまり今回ではこの値が小さいほど最適な補修であるといえる。

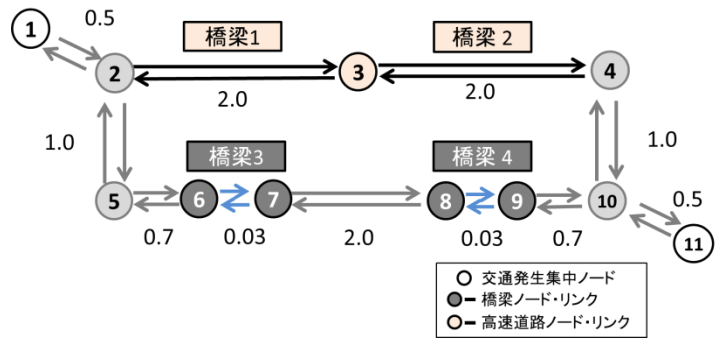


図-5 迂回損失時間算出に使用した道路網

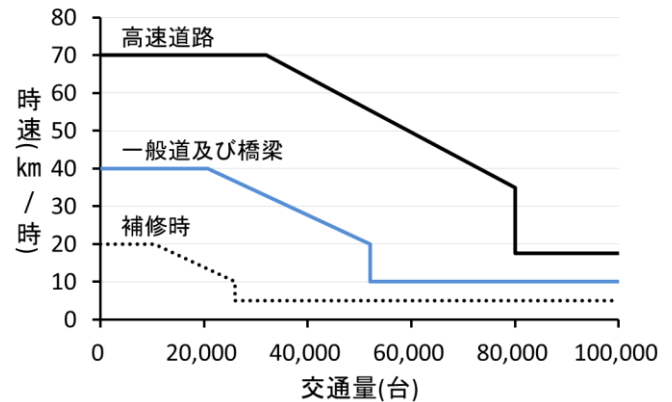


図-6 今回用いた Q-V 式

ここで C_M は総補修費用を示し、単位補修費用を計画年次で費やした全てを各橋梁足し合わせたものである。また、 C_L は補修費によって生じる損失時間を費用換算し合計したものである。

$$LCC = C_M + C_L \rightarrow \min \quad (7)$$

3. GA による橋梁群補修シナリオの最適化

補修シナリオは対象とする橋梁の健全度に応じて多数の維持管理工法とタイミングの組み合わせによる組み合わせ最適問題に帰着される。問題の構造が複雑かつ解空間の規模が非常に大きくなるため、最適化解を得ることが困難であるため、ヒューリスティックな解法である遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた最適化を試みた。

3.1 最適化のながれ

LCC 比較モデルを従来橋梁に適用し、評価値である総補修費用と総損失時間価値を算出する。その LCC を最小になるように、どの維持管理工法をどの年次に行うかを GA により、図-7 に示すフローで繰り返し計算を行うことで補修シナリオの最適化を図る

表-2 補修コードと各補修補強工法の変数対応関係

補修コード	補修・補強工法	分類	健全度回復度	耐用年数(年)	補修費用(万円/回)	通行規制(時間)
0000	-	-	-	-	-	-
0001	-	-	-	-	-	-
0010	断面補修工法A	補修	2	35	2,100	30
0011	床板打替え	補修	5	50	4,500	60
0100	接着工法	補強	0	40	1,500	30
0101	-	-	-	-	-	-
0110	増圧工法, 床板防水工法A	補強	0	60	1,800	30
0111	表面被覆工法	補強	0	20	1,800	30
1000	ひび割れ補修工法	補修	1	30	1,200	12
1001	-	-	-	-	-	-
1010	-	-	-	-	-	-
1011	-	-	-	-	-	-
1100	断面補修候補B	補修	1	45	900	30
1101	増圧工法, 床板防水工法B	補強	0	60	1,200	12
1110	-	-	-	-	-	-
1111	-	-	-	-	-	-

表-3 GA パラメータ

項目	パラメータの値, 手法
個体数	30
世代数	1000
突然変異率	0.001
選択手法	ランキング方式
交叉手法	二点交叉
交叉率	100%

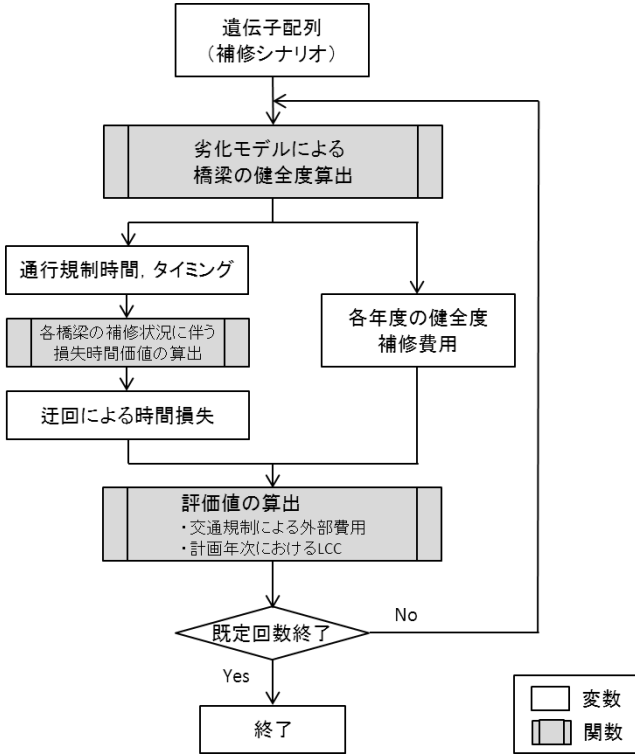


図-7 最適化フロー

3.2 遺伝子配列のコーディング

GA における解の探索は、遺伝子配列という記号列を用いて行うため、対象の問題を個体の形に置き換える(コーディングする)必要がある。本研究では既往文献を参考に既存橋梁に対する各補修補強工法を整理し、それらの組み合わせで補修シナリオとする。2章にも述べたとおり、劣化曲線を用いて、橋梁の劣化を模擬しており、各維持管理対策はそれぞれ物理的性質の変数「健全度回復度」「耐用年数」加えて費用及び外部費用である「補修費用」「通行規制時間」という変数を有しているとした。文献³⁴⁾を参考にそれら変数を表-2に示すように設定した。

これら8つの補修工法を個体として2進数の遺伝子配列でコーディングするために4bitの補修コード(遺伝子)を設けた。その補修コードにそれぞれ補修補強

工法を表-2に示すように対応付けた。つまり、一つの橋梁の計画年次における補修シナリオ(どの年次にどの工法を用いるのか)は図-8のように示すことができる。この補修シナリオを橋梁数分、水平に連結したものを遺伝子線列として選択や交叉を行っていく。今回用いたGAパラメータを表-3に示す。

今回は4橋梁において100年間4bitの補修シナリオをコーディングしているため、最適な補修シナリオという解の探索における解空間は2の1600乗という莫大な数になっている。つまり今回用いた最適な補修シナリオという解の探索における解空間は莫大な数になり、補修のタイミングも複雑である。そのため今回の問題はGAによる最適化問題として扱う。また、選択の際に、莫大な解空間を網羅すべく親を持たない単純な乱数により生成される個体を2個体組み込んだ。

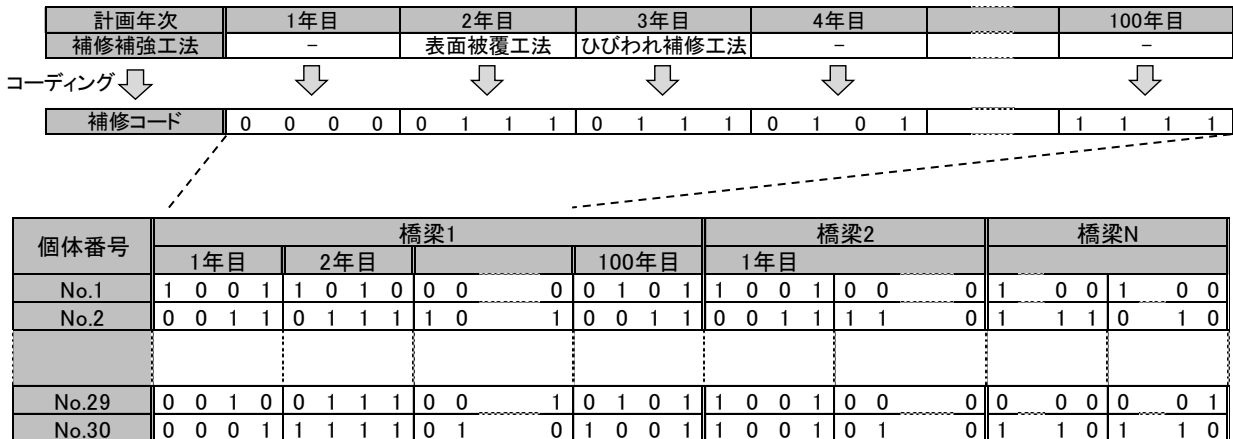


図-8 補修シナリオのコーディング例

4. ECO-Bridge 感度分析の流れ

ECO-Bridge の LCC を考えるにあたって多くの不確定な変数が存在する。今回は比較モデルに大きな影響を与えるであろう「交換に要する通行規制時間」、「交通量」、「交換単位費用」を制御変数としてこれら変数が変化した場合に評価値がどの程度どの方向に変動するのか調べた。それぞれ変数の基準となる値は表-2 に示す従来橋梁の補修工法の中から交換作業と最も近い床版打替えの値を基準値とし、その値を 10 分割し感度分析を行った。従来橋梁と比較すると表-4 に示すとおりである。

5. 考察

5.1 従来橋梁補修シナリオ最適化結果

従来橋梁の補修シナリオ最適化結果例を図-9に、収束状況を図-10に示す。これよりどの交通量においても約400世代である程度の収束を迎えていることが見て取れる。

図-10の最適解の収束状況において評価値の低下推移を見てみると都市高速道路級は1000世代近傍でも僅かながら低下しているが、これ以上世代数を増やしたとしても、大幅な評価値の低下が期待できないことがわかる。なので、1000世代目の最適解がこの最適化モデルの最適解とした。

また最適解で選択されている補修工法（4bit）を100世代別に集計したものを表-5に示す。これを見ると最終世代近辺の最適解では費用の高い床版打替が含まれていないことがわかる。このことから早期の段階で、何らかの維持管理工法を行う「危機管理型」の補修シナリオを再現出来ているといえる。

5.2 感度分析結果及び従来橋梁との比較

各制御変数が10通りあるため、感度分析結果として出力される評価値は100パターン存在する。都市高速道路級で分析を行った結果をもとに回帰平面を求め、従

来橋梁の評価値における切断線を引くと図-11のようになる。つまり、ECO-Bridgeの評価値が従来橋梁の評価値を下回る領域であればECO-Bridgeが実現可能であると考えられる。

表-4 変数の設定比較

変数の所属	変数	各モデルでの取り扱い	
		従来橋梁	ECO-Bridge
補修シナリオ	補修費用	GAIにより選択	床板交換の値を段階的に実行(制御変数)
	通行規制時間		
	健全度回復度		
	物理的寿命		
道路網	QV式	任意に設定(文献 ⁹⁾ を基に3種類)	
	設定OD	任意に設定(交通センサスを基に3種類)	
橋梁	劣化加速度	任意に設定	
	橋梁数		
評価値	補修回数		
	損失時間価値		

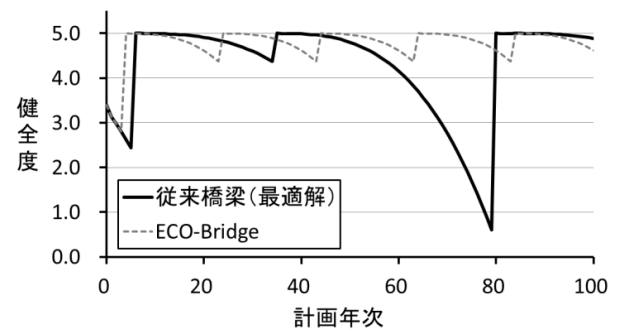


図-9 GA による最適解例

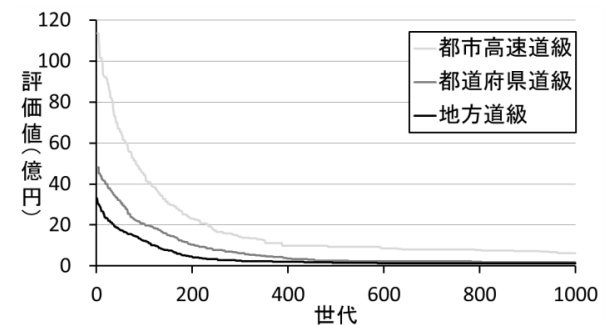


図-10 最適解の収束状況

表-5 GA による世代最適解の補修選択回数（地方道級）

世代	補修工法								
	補修無し	断面補修工法A	床板打替え	接着工法	増圧工法A	表面被覆工法	ひび割れ補修工法	断面補修工法B	増厚工法B
1~100世代	6243	369	149	524	836	331	349	675	524
101~200世代	7634	53	0	320	575	65	286	751	316
201~300世代	8635	32	0	68	213	193	173	499	187
301~400世代	9117	8	0	6	91	75	112	462	129
401~500世代	9149	4	0	108	86	35	100	434	84
501~600世代	9192	4	0	142	32	21	165	439	5
601~700世代	9282	0	0	91	0	104	185	330	8
701~800世代	9410	1	0	7	0	62	106	402	12
801~900世代	9561	2	0	0	0	0	19	412	6
901~1000世代	9548	2	0	39	0	0	22	380	9

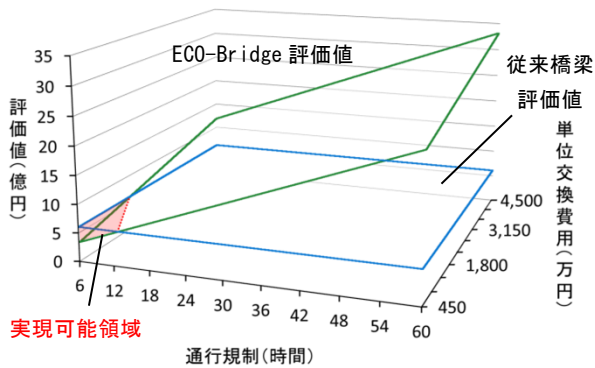
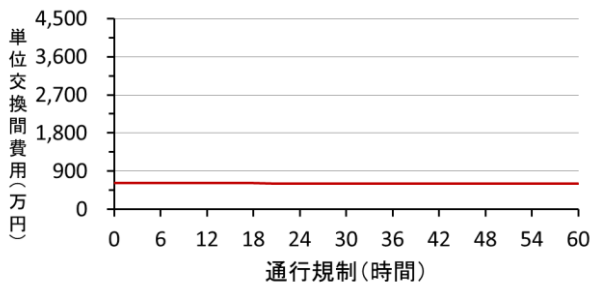
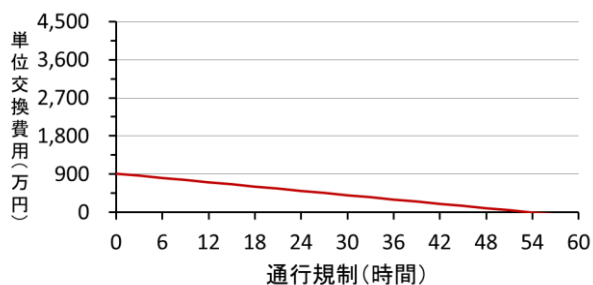


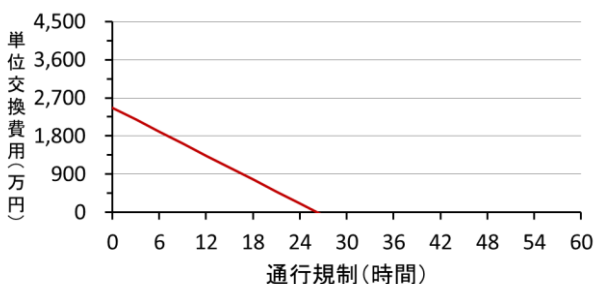
図-11 実現可能領域イメージ



(i) 地方道級



(ii) 都道府県道級



(iii) 都市高速道級

図-12 感度分析

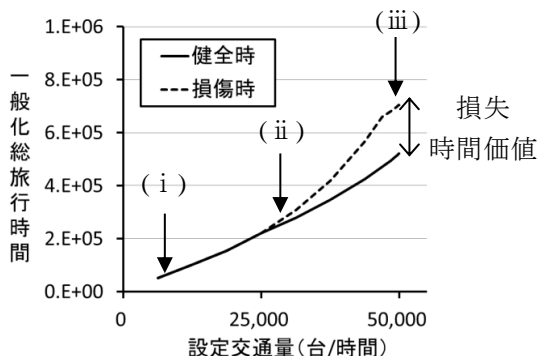


図-13 設定交通量別の損失時間価値推移

この切断線を各交通量別で見たものが図-12である。これを見ると、地方道級では通行規制時間は評価値に無関係となっていることがわかる。しかし、交通量が増加していくにしたがって切断線の傾きが急になっている。これは都市高速道路級において切片である単位交換費用が立ち上がってきている。この原因として今回用いた道路網のQ-V式では設定交通量が25,000台/時間を超えると道路が満たされ速度低下するものを用いているため、図-13の設定交通量別の損失時間推移をみて分かるように25,000台/時間を超えると損失時間価値が急激に増加していることが考えられる。

6. 本研究のまとめと課題

従来橋梁の補修工法において遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて最適化し、ECO-Bridgeの各不確定な変数を制御変数として感度分析を行い比較することで以下のことが明確になった。

- 1) GAを用いて、各補修工法と健全度回復度、耐用年数、通行規制時間を結び付けることで、総補修費用と総損失時間価値の和を評価値として最適化を行うことで、危機管理型の維持管理を再現することができた。
- 2) 交通量大きい都市高速道に関して従来の維持管理工法では通行規制時間がライフサイクルコストに与える影響が大きいため、短時間で通行規制であるECO-Bridgeが有利となり実現可能性が高いといえる。

本研究では交通量を変化させて、損失時間価値、総補修費用の比較を行ったが、解析で用いた道路網は簡易かつ橋梁数も少ないものである。しかし実際は交通量の大小と、橋梁数は関係しているため、本研究で扱った評価モデルに対して、実際の道路網や橋梁数や人口といった地域特性を考慮することが必要である。また、実際にECO-Bridgeのような交換構造を運用し、短期間での交換作業を可能にするためには、各橋梁の近辺に交換構造部のストックを保有しておくストックヤードの運搬費や施設費用が重要である。

参考文献

- 1) 山口隆司, 奥井義昭, 山口栄輝, 阿部雅人: 急速架設再利用性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) 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
- 3) 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, 国総研プロジェクト研究報告第4号, 2006
- 4) 中村秀明, 宮本文穂, 河村圭: 遺伝的アルゴリズムによる既存橋梁の最適維持管理計画の策定, 最適化に関するシンポジウム公演論文集, 1997
- 5) 土木学会: 交通需要予測ハンドブック, 1981

討議

討議 [徳尾野徹 准教授]

ECO-Bridge という名前であるなら、環境に配慮しているはずなので、CO₂ 排出量を従来のものと比較しなくていいのか。

回答

ECO-Bridge は交換部材の再利用を行うことで構造のサイクルを生むことを目標としている。そのため廃棄による CO₂ 排出等の環境への影響も小さいと考えられる。しかし、CO₂ 排出量等の環境影響評価であるライフサイクルアセスメント手法は既に研究が行われており、ECO-Bridge に関しても既往のもので十分に対応することができると思う。また橋梁システムの実現可能性を考えるにあたって判断の多くの割合を占めるのが採算性である。そのため、本研究ではライフサイクルアセスメントは本研究の対象とはせず、迂回による損失時間価値と補修費用を LCC とした評価値で比較を行っている。

討議 [山口隆司 教授]

- ①性能回復後のモジュール再利用に対してモデル内で再現出来るのか。
- ②研究で対象としている橋梁一橋につき劣化曲線ひとつとしているがそれは適切であるのか。

回答

- ①本研究では補修費用と迂回損失時間が LCC 現段階ではモジュールのストックを費用と関連付けてはいないが、より詳細な ECO-Bridge の再現を検討する際には、本研究で一括して交換単位費用としているものも、モジュール本体費用や運搬費用として細かく見ることが必要となる。そういったモデルの作り方をすればモジュールのストックや運搬費用を組み込むことで再現することが可能であると考えられる。
- ②本来であれば橋梁の部材ごとの詳細な健全度、及びそれに対応する補修を行うことが必要であると考えられるが、このような手法は既に新谷ら*によって行われている。また、本研究では道路網内に橋梁を複数設置しているため、さらに部材ごとの劣化曲線を設けることを考えると大規模な計算量になる。そのため劣化曲線を一本に絞り簡略化しシミュレーションを行った。

*新谷光平, 阿曾克司: GA を援用した橋梁群の経時的補修費用均等化に関する研究, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 2010

討議 [日野泰雄 教授]

ECO-Bridge の方が優位となるように、変数を設定しているのではないか。

回答

今回用いた変数は劣化曲線では「性能回復度」「物理的寿命」「補修費用」「通行規制時間」、橋梁では「劣化加速度」「橋梁数」、道路網では「QV 式」「設定交通量」「道路構造」である。しかし、これらの「補修費用」「通行規制時間」以外の変数は各モデル共通のものであり、既往文献をもとに設定した。また ECO-Bridge の「交換単位費用」「通行規制時間」の不明確な変数も上限を従来橋梁の床版打替えの値に設定し、段階的に実行しているものである。そのためどちらか片方のモデルのみ有利に働くようなモデルにはなっていない。また研究背景に ECO-Bridge の床版交換には全面通行止めを伴わないと記載しているが、今回は設定を等しくし評価することが必要なため、従来橋梁の補修工法と等しい QV 式や通行規制時間といった変数を用いている。