

計画案のフレキシビリティを考慮した 道路舗装の維持管理計画策定システムの開発

原田隆郎¹・吉田勘平²・横山功一³

¹正会員 博(工) 茨城大学助手 都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)

²非会員 セントラル・コンピュータ・サービス(株) (〒136-8503 東京都江東区亀戸 6-41-10)

³フェロー会員 博(工) 茨城大学教授 都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1)

道路舗装の維持管理においては、限られた予算の中で道路利用者や周辺住民に対するサービス水準を維持するための効果的な補修計画を立てる必要がある。一方、将来が不確実な状況下で計画案の持つフレキシビリティの価値を評価する手法としてリアルオプションの導入が注目されている。本研究では、計画案を導出するための最適化手法として遺伝的アルゴリズムを利用し、フレキシビリティを考慮した道路舗装の維持管理計画を策定する最適化システムの開発を行った。そして、このシステムを利用して実路線のデータによる数値シミュレーションを行った結果、計画案のフレキシビリティを考慮しない硬直的な評価手法よりも効果の高い計画案が得られることを確認でき、開発したシステムの有用性が確認できた。

Key Words: maintenance strategies, road pavement, flexibility, real option, GA, optimization

1. はじめに

我が国の抱えている多大な道路ストックは、交通量の増加、車両の大型化等の交通負荷による劣化損傷が激しく、維持補修の必要性が高まっている。しかしながら、現在、我が国の財政状況は厳しいものがあり、維持管理に対する財政的支援は益々制約され、道路利用者や周辺住民に対するサービス水準を維持しながら、限られた予算内でのメンテナンスを合理的にかつ計画的に進めていくことが重要となっている。そして、このような維持管理計画またはマネジメントプランを支援するために、ライフサイクルコスト分析の利用やアセットマネジメントに関する研究・開発が行われている¹⁾。

一方、道路舗装に限らず都市インフラの維持管理業務全般において、将来の管理状況は確定的ではなく、維持管理・運営コスト、インフラの劣化、予算、制度変更、技術革新などの様々な不確実要因により変化する。これに対して、効果的な維持管理を目指して策定された計画案の中には、将来の不確実性が減少または状況が確定した時点で対応を判断できるというフレキシビリティを持つケースがあるにも係

わらず、DCF法(Discount Cash Flow法)などのような硬直的な評価法では、このような状況の変化に対応する計画案の「柔軟性(フレキシビリティ)」を評価できていない。そこで、将来が不確実な状況下で計画案が持つフレキシビリティの価値を評価し、最適な投資行動やタイミングを検討することのできるリアルオプションを導入した評価法が注目を集めている^{2)~5)}。

これらの研究のうちで具体的な構造物を取り上げてリアルオプションを適用しているものとして、社会資本整備のリスク評価としてのリアルオプションの考え方とその適用例を示した研究⁴⁾やリアルオプションを道路舗装に適用して合理的な補修ルールを導出している研究⁵⁾などがあるが、道路舗装の維持管理計画に関して言えば、より実際のデータを用いて計画案のオプション価値を評価するとともに、計画策定のための最適化システムを構築し、実路面の維持管理計画案を導出することが、今後の研究に必要不可欠なものであると考えられる。

そこで本研究では、道路舗装の維持管理計画案の策定を対象とし、将来の補修時期や対策を選択する上で考えられるいくつかのオプション(将来の施策

を変更できる選択権)を適切に評価するために、リアルオプションを利用した計画案の評価手法を提案した。そして、維持管理に関する予算制約のもと、「いつ、どこを、どのように補修するか」といった最適な維持管理計画案の策定システムを遺伝的アルゴリズムを用いて開発し、実際の道路舗装のデータを用いた維持管理計画策定におけるリアルオプション導入の可能性について検討した。

2. 都市インフラの維持管理における不確実性と計画案のフレキシビリティの評価法

一般に、都市インフラの維持管理において、将来の状況は確定的ではなく様々な要因により変化し、これに伴って維持管理負担が増大する。このような不確実性要因としては、①維持管理・運営コスト(物価の上昇、想定を上回る劣化の進行に伴う維持管理費の増加、事故や災害等によるインフラの損傷に伴う補修補強費など)、②インフラの劣化(使用環境(交通量など)の変化による劣化進行の変化)、③予算(社会経済状況の変化に伴う事業予算の縮減)、④制度変更(法令や制度の変更に伴う当初の計画変更)、⑤技術革新(従来技術が陳腐化し、より高度で安価な技術が開発される)などが挙げられる。これに対して、計画案には、将来の不確実性が減少、または状況が確定した時点で、対応を判断できるというフレキシビリティがあり、対策実施時期の延期や対策工法の変更などがこれに相当する。

一方、従来の維持管理計画は、予測される劣化に対し対策を行う時期を決定し、計画内容は変更されないという前提の下に評価され策定されている(硬直的な評価法)。しかし、現実には対象の状態により対策工法の変更などが行われており、固定的な計画案を想定する従来の評価手法ではそのフレキシビリティを評価できていない。リアルオプションとは、事業を対象とした意思決定上のオプションであり、「将来に行動を変えることのできる選択権(=フレキシビリティ)」を指す。

具体的には、事業環境の変化に応じて、開始時期をずらしたり、事業規模を変更したり、一時中断したり、見切りをつけて撤退したりするという選択肢を持っている。リアルオプション法による計画の評価では、現時点での判断だけでなく、将来の状況が変化した場合に下されるであろう判断も含めて計画の評価を行う。従って、従来の評価手法のように固定的なシナリオの前提で算出した評価値よりも大きな値となる。

3. 劣化の不確実性を考慮した路面性状3特性のモデル化

道路舗装の維持管理業務では、路面性状3特性(ひび割れ率(%), 平均わだち掘れ量(cm), 縦断方向凹凸量(以下、平坦性)(mm))による管理が行われている。本研究では、これらの各特性値の不確実性(劣化の不確実性)を図-1に示すように経年劣化量による将来の期待値とその変動量 γ で表現し、劣化の進行も簡略的に線形に仮定した。なお、路面性状3特性それぞれの経年劣化量の期待値は実際に計測された値の平均値、変動量 $\pm\gamma$ はその平均値と予測値との乖離(路面供用状態の良い場合と悪い場合があり、その発生程度は必ずしも同等ではない)であり、過去の路面性状調査結果(実データ)より統計的に求めることができる。

また、道路舗装の維持管理計画立案の際には、路面性状データをもとに適切な対策工が選択される。道路維持修繕要綱⁶⁾では、路面性状3特性から算出される供用性指数(PSI)により、おおよその対策工が決めてられており、本モデルではこの供用性指数(PSI)を対策工の選択に用いることとした。具体的には、PSI=3.0~2.1のとき「表面処理」、PSI=2.0~1.1のとき「オーバーレイ」、PSI=1.0~0.0のとき「打換え」をおおよその対応工法として定めている。供用性指数(PSI)は以下の算出式⁶⁾で求められる。

$$PSI = 4.53 - 0.518 \log \sigma - 0.37 \sqrt{C} - 0.1741 D^2 \quad (1)$$

ここで、 σ : 平坦性(mm), C : ひび割れ率(%), D : 平均わだち掘れ量(cm)である。

なお、維持修繕を行った場合、路面性状3特性の値は0(劣化なし)へ戻り、その後一定の経年劣化量で劣化が進行することとした。ただし、劣化の状態(PSI)に対して適切な工法ではない工法を選択した場合は、より現実的な劣化進行をイメージし、将来の劣化進行は変化すると考えた(図-1)。

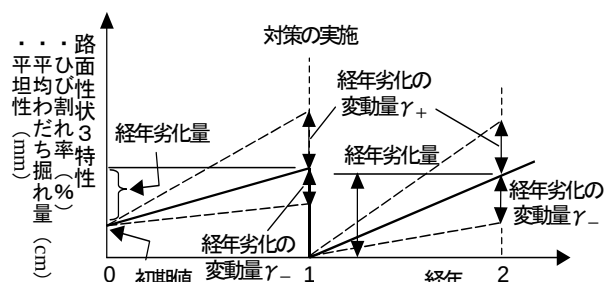


図-1 路面性状3特性の劣化に関するモデル化

4. 計画案のフレキシビリティを考慮した道路舗装の維持管理計画案の評価手法

(1) 評価の流れ

前述のモデル化を前提として、本研究で対象とする道路舗装の維持管理計画案の評価方法を以下のように提案した。評価の流れを図-2に示す。評価したい計画案が入力されたら、まず、計画のフレキシビリティを考慮しない硬直的な評価法（以下、硬直的な評価法という）により計画案の評価を行う。次に、対象とする計画案にオプションがあるかどうかを判定し、オプションがある場合はリアルオプション法による評価値の計算を行う。そして最後に、硬直的な評価法による評価値にオプション価値を合わせたものを最終的な計画案の評価値とする。

以下に、硬直的な評価法とリアルオプション法によるそれぞれの評価値の算出方法を示す。

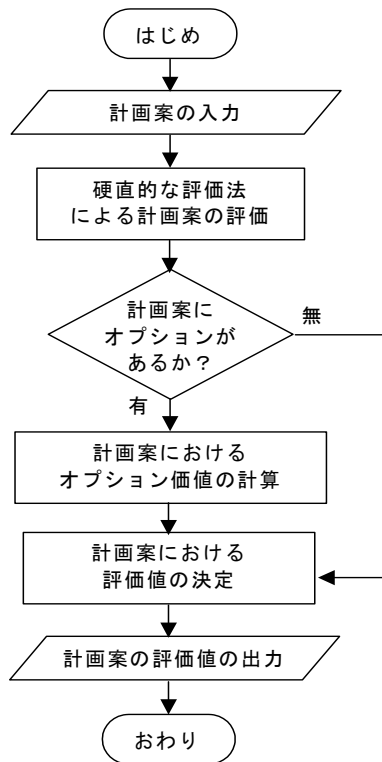


図-2 リアルオプションを導入した計画案評価の流れ

(2) 硬直的な評価法による計画案の評価

本研究では、計画案のフレキシビリティを考慮しない硬直的な評価法による計画案の評価値として、次式に示すように舗装区間 i における t 年目の現在価値 PV_{it} (Present Value) を定義した。これは、対策実施前後の供用性指数 (PSI) の差に当該道路区間の大型車交通量を乗じたものであり、維持管理対策による効果を定量化するものである。

$$PV_{it} = \frac{(PSI_{it}^a - PSI_{it}^b) \times T_{it}}{(1+i)^t} \quad (2)$$

ここで、 PSI_{it}^a : t 年目に対策を行った場合の舗装区間 i の供用性指数、 PSI_{it}^b : t 年目に対策を行わなかった場合の舗装区間 i の供用性指数、 T_{it} : 舗装区間 i における t 年目の大型車交通量 (台/日)、 i : 社会的割引率である。

供用性指数 (PSI) は、先に述べたように路面状態を総合評価した指標であり、道路管理においては維持管理対策工の選定に用いられている。道路自体の価値を定量化する方法は多岐に渡るが、本研究では維持管理の効果を定量化することを目標としているため、維持管理によって路面状態がどのように変化し、それが大型車両にどのように影響するかを計画案の評価値と定義した。

(3) リアルオプション法による計画案の評価

対象とする計画案にオプションがある場合はリアルオプション法による評価値の計算を行う。本研究では、将来の劣化状況の変動により対策時期の延期や工法の変更が行われる場合が考えられるとして、計画案の持つフレキシビリティとして①対策時期の延期 (タイミングオプション)、②工法変更 (柔軟性オプション) の2つのオプションを取り上げ評価した。舗装区間 i における t 年目のリアルオプション価値 ROV_{it} の計算式を次式に示す。

$$ROV_{it} = P \times V_+ + (1-P) \times V_- - PV_0 \quad (3)$$

ここで、 P はリスク中立確率であり、路面性状調査の統計データから求められた変動量 γ によって維持管理に伴う価値がどのように変化するか傾向を求め、プラス側の価値が発生する確率がどの程度かを計算したものである。以下に算出式を示す。

$$P = \frac{S_0 - S_-}{S_+ - S_-} \quad (4)$$

ここで、 S_0 : 変動量 γ が 0 の場合の現在価値、 S_+ : 変動量 γ が + の場合の現在価値、 S_- : 変動量 γ が - の場合の現在価値である。

また、式(3)の V_+ は変動量 γ が + の場合のオプション行使後の計画案の価値、 V_- は変動量 γ が - の場合のオプション行使後の計画案の価値であり、それぞれ次式で計算される。

$$V_+ = \max(S_+, PV_+) \quad (5)$$

$$V_- = \max(S_-, PV_-) \quad (6)$$

ここで、 PV_+ はオプションを行使しなかった場合の変動量 γ が+における現在価値、 PV_- はオプションを行使しなかった場合の変動量 γ が-における現在価値である。

なお、式(3)の PV_0 はオプションを行使しなかった場合の変動量 γ が0における現在価値であり、(2)で算出された現在価値 PV と等しい。

(4) 計画案の評価値の決定

以上により、リアルオプションを導入した場合の計画案の評価値 B_{it} (区間*i*における*t*年目の評価値)は、硬直的な評価法による PV_{it} とリアルオプション価値 ROV_{it} を併せたものとなり、次式で表される。ただし、 m はオプションの種類であり、複数のオプション価値 ROV_{ij} ($j=1\sim m$)が存在する場合は、すべてのオプション価値を総和する。

$$B_{it} = PV_{it} + \sum_{j=1}^m ROV_{ij} \quad (7)$$

5. 道路舗装の維持管理計画案を策定するための最適化システムの開発

(1) システムの概要

本システムは、複数の補修対象区間の路面性状3特性、経年劣化量や変動量などを入力することで、最も適切な対策時期および工法を策定するものである。計画案の評価方法としては、4.で述べた評価方法を利用し、計画案の最適化手法としては遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms ; 以下 GA) を用いることで、計画案のフレキシビリティを考慮した最適な維持管理計画案を導出する。

ここで、GA は自然淘汰と生物遺伝の仕組みを基礎とし、生物の持つ環境への適応性を工学的にモデル化したものであり、解候補の集団に生物進化の法則を適用して最適解を探索する手法である。組合せ最適化問題の最適解探索手法として評価が高く、土木構造物の補修・補強計画の最適案導出問題に関する求解アルゴリズムとしても約十数年前から利用されている^{7),8)}。

(2) 最適化問題の定式化

本システムの最適化問題としての目的関数を式(8)に、制約条件を式(9)に示す。

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^Y B_{it} \rightarrow \max \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N C_{it} \leq C_t^{\text{budget}} \quad (t=1\sim Y) \quad (9)$$

ここで、 B_{it} : 区間*i*における*t*年目の評価値、 C_{it} : 区間*i*の*t*年目の対策費用 (円/区間)、 C_t^{budget} : *t*年目の維持管理予算 (円)、 N : 補修区間数、 Y : 計画策定年数である。

目的関数における評価値は式(7)で求めたものであり、具体的には対策前後のPSIの差に大型車交通量を乗じたものを現在価値に換算したものと、対策によるオプション価値を総和したものである。すなわち劣化状態の改善がその道路舗装の供用性に与える効果を最大とすることを目的関数として設定した。また、制約条件としては各年の対策費用の総和が当該年の予算を超えないこととした。なお、評価値およびコストはすべて計画策定年の現在価値に換算されて求められる。

(3) システムの構築

本システムは、Microsoft Visual Basic を利用して構築した。図-3に開発したシステムの実行画面の一例を示す。システムでは、計画案の評価で利用される路面性状3特性やその経年劣化量および変動量 γ 、そして大型車交通量などを入力するとともに、対策費用の単価や予算制約などを設定することで、計画案 (各対象区間の対策時期と対策工法) とその評価値が導出される。

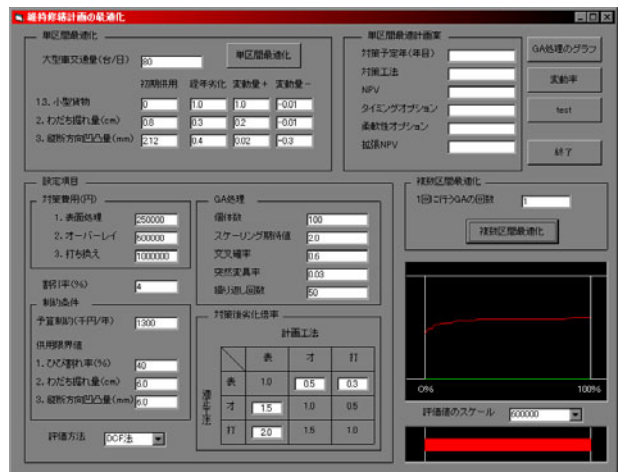


図-3 開発したシステムの実行画面の一例

また、本システムは最適解導出過程でGAを利用していることから、複数の計画案をGAの領域で扱えるように遺伝子型に変換する必要がある。これはコード化と呼ばれるが、導出される各対象区間の対

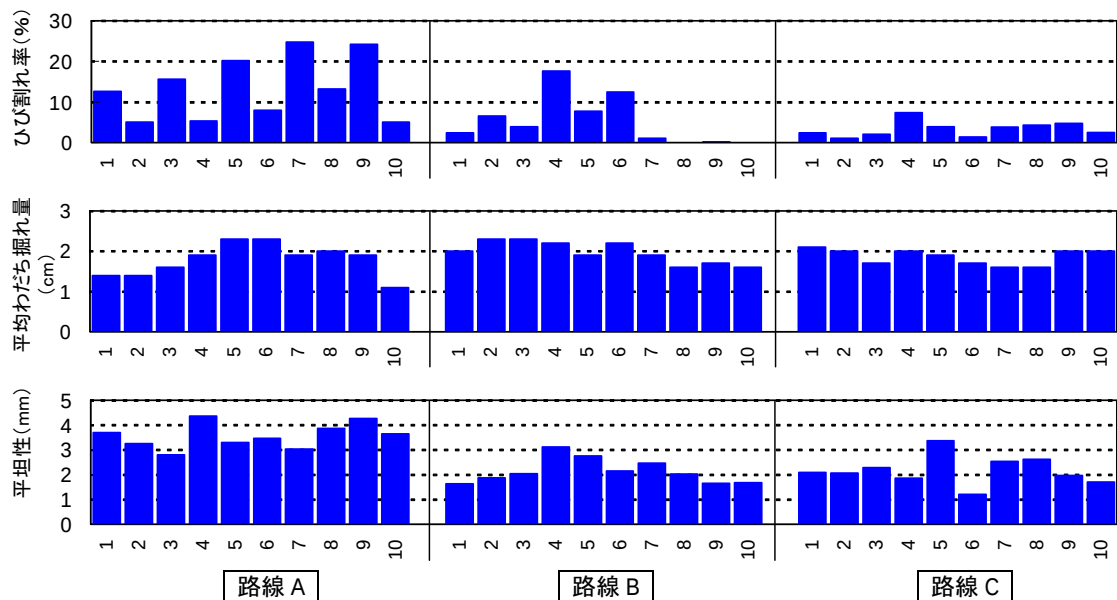


図-4 各路線の供用状態の初期値

策時期と対策工法の組合せから 2bit の遺伝子型 0000 ～1111 (組合せ数が計画年数 5×対策工法 3+対策無し=16 通りの場合) を設定した。なお、GA における各種遺伝子操作(遺伝的オペレータ)については、淘汰・増殖処理としてはエリート保存とルーレット戦略を、交叉処理としては 1 点交叉を採用し、システム開発を行った。

6. 数値シミュレーション及び考察

(1) 概要

本研究において開発した「道路舗装の維持管理計画策定のための最適化システム」を用いて、計画案のフレキシビリティを考慮しない場合(硬直的な評価法)と計画案のオプション価値を考慮した場合(リアルオプション法)とによる最適導出解の違いを検討した。具体的には、交通量区分(大型車交通量)、劣化進行(経年劣化量, 変動量 γ)の異なる実際の一般国道の 3 路線(30 補修対象区間)について、以下に示す 2 ケースの 5 年計画の維持管理計画を導出し、計画案の違いや評価値の違いを分析した。

<Case1> 路線 A の連続 10 区間 (A1～A10) を対象とし、大型車交通量, 経年劣化量, 変動量が同一区間における最適計画案を導出する。

<Case2> 路線 A～C より任意に 10 区間を抽出し、大型車交通量, 経年劣化量, 変動量が異なる場合の最適計画案を導出する。

(2) シミュレーション条件

シミュレーション対象とする実際の一般国道 3 路

線の経年劣化量とその変動量 γ 、大型車交通量を表-1 に示す。表中の経年劣化量と変動量 γ は、ひび割れ率, 平均わだち掘れ量, 平坦性が 1 年間に劣化進行する程度の平均値とその変動量であり、各路線の過去の路面性状データを統計的に分析して算出した。例えば、路線 A のひび割れ率の経年劣化量は 1.0% と求められ、変動量 γ については、 γ_+ (劣化が進行する可能性) は 0.6%, γ_- (劣化が進行しない可能性) は 1.0% と算出された。つまり、路線 A のひび割れ率は年間 1.0% で劣化進行するが、1 年後に 1.6% ($1.0\% + \gamma_+$) まで劣化する可能性があるとともに、1 年間ではひび割れ率は劣化しない ($0\% = 1.0\% - \gamma_-$) 可能性もあるという結果になった。このように結果を見ると、経年劣化量については大型車交通量の多い路線 A が最も大きい結果となり、路線 B, 路線 C の順であった。また、経年劣化の変動量 γ については、各路線の値は違うものの、いずれの路線も劣化が進行する可能性(変動) γ_+ よりも、劣化がそれほど進行しない可能性(変動) γ_- が高いという傾向があった。

表-1 シミュレーション対象路線の各種データ

			路線 A	路線 B	路線 C
経 年 劣化量	ひび割れ率 (%)		1.0	0.7	0.5
	平均わだち掘れ量 (cm)		0.3	0.25	0.15
	平坦性 (mm)		0.4	0.3	0.1
経年 劣化の 変動量 γ	ひび割れ率 (%)	$\gamma +$	0.600	0.210	0.050
		$\gamma -$	1.000	0.490	0.150
	平均わだち掘れ量 (cm)	$\gamma +$	0.030	0.025	0.015
		$\gamma -$	0.210	0.125	0.045
	平坦性 (mm)	$\gamma +$	0.040	0.060	0.030
		$\gamma -$	0.200	0.090	0.010
大型車交通量 (台／日)			4985	2013	438

さらに、補修対象区間の計画策定初年の供用状態（路面性状3特性）は図-4のようになっており、平均わだち掘れ量は各路線各区分ともにほぼ同程度であるが、ひび割れ率と平坦性については、路線BおよびCの各区分に比べて路線Aはやや高めの（悪い）供用状態であった。

本シミュレーションでは、道路舗装の維持管理対策工法として「表面処理」「オーバーレイ」「打換え」の3工法を取り上げるとともに、シミュレーションにおける1区間を延長100m×幅員3.5mの同一区間として定義し、各対策工法の区分当たり費用を表面処理250千円、オーバーレイ500千円、打換え1,000千円と設定した。また、社会的割引率*i*は4%として計算した。

表-2には、PSIにより決められているおおよその対策工法（以下、適切工法とする）とは異なる対策工法を実施した場合の経年劣化量の変化倍率を示している。この変化倍率は、「表面処理」「オーバーレイ」「打換え」の3工法ごとに、適切工法が行われなかった場合に経年劣化量がどの程度変化するかを表現したものであり、計画案が適切工法と同じ場合は倍率の変化はない（1.0倍）が、計画案が適切工法とより上位工法である場合は劣化進行が遅くなるとともに、計画案が適切工法より対策効果の小さい下位工法である場合は劣化が急速に進行すると設定した。ここで、上位工法とは「表面処理」においては「オーバーレイ」と「打換え」であり、下位工法とは「打換え」においては「オーバーレイ」と「表面処理」である。つまり、一般的な維持工法と修繕工法のように、維持管理対策の効果が高い工法を上位工法と定義することとした。このように劣化速度が変化するという考え方は、一般に対策工法の耐久性の評価と関連づけられるべきものであるが、本研究ではこれを簡略化し、経年劣化量の変化倍率という値で表現した。

表-2 PSIによる適切工法と計画案による対策工法が異なる場合の経年劣化量の変化倍率

		計画案による対策工法		
		表面処理	オーバーレイ	打換え
PSIによる適切工法	表面処理	1.0	0.5	0.3
	オーバーレイ	1.5	1.0	0.5
	打換え	2.0	1.5	1.0

さらに、*t*年目の維持管理予算を1,300（千円）に設定し、これを現在価値に換算したものを予算制約として用いてシミュレーションを行った。維持管理予算1,300（千円／年）という設定値は、表面処理ならば5区間、オーバーレイならば2区間、打換えな

らば1区間の対策を行えるというものである。

また、GAの運用条件としては、最適解を探索するための母集団の個体数を300、GAオペレータとして交叉確率を0.6、突然変異確率を0.05と設定し、最適解の探索における終了条件は世代数が200世代に到達した時とした。

(3) シミュレーション結果と考察

まず、シミュレーションCase1およびCase2のそれぞれについて、導出された最適計画案の評価値と総コストを表-3に示す。評価値については、どちらのシミュレーションケースにおいても、オプション価値を考慮した場合（PV+ROV）の方が硬直的な評価法による場合（PV）よりも高い値を示した。これは、オプション価値を考慮した分が正しくプラスに評価されているだけでなく、フレキシビリティの価値の存在する計画案を最適化システムで適切に導出できていることを表している。なぜならば、もし導出された計画案がフレキシビリティの価値を保有していなかったとすれば、両者の現在価値PVは同様の値になったと思われ、最適計画案も同様の出力がなされていたと考えられるからである。しかしながら、結果ではオプション価値を考慮した場合の現在価値（PV）は硬直的な評価法による現在価値（PV）よりも小さくなっており、オプション価値を考慮した場合はPVとROVの両者を合わせて最適化していることが確認できた。一方、総コストについてはオプション価値を考慮した場合の方が安くなっており、オプション価値を考慮した場合の方が評価値も高くコストも安いという結果となった。

表-3 最適計画案の評価値と総コストの比較

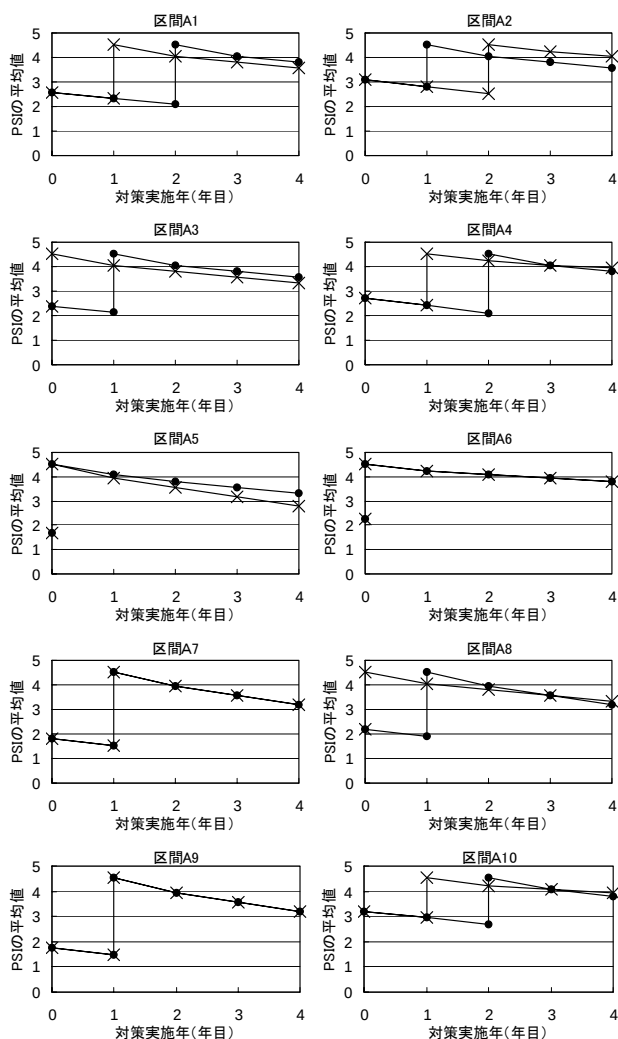
		Case1	Case2
硬直的な評価法による場合	PV 値	594,419	373,524
	総コスト (千円)	3,376	3,829
リアルオプション法による場合	PV 値	563,693	340,668
	ROV 値	139,787	84,241
	合計	703,480	424,909
総コスト (千円)		2,895	3,357

次に、システムから出力されたCase1の最適計画案を表-4に、Case2の最適計画案を表-5に示す。Case1は路線A（10区間）を対象としたシミュレーションであり、道路舗装の経年劣化量やその変動量 γ 、大型車交通量が一定である。表-4に示されるオプション価値を考慮しない場合の最適計画案は、路面の初期状態の悪い区間を、予算制約内で、できるだけ早期に良い工法で実施するという傾向が見られ

表-4 最適計画案の出力結果 (Case1)

		対策実施年 (年目)				
		0	1	2	3	4
補修対象区間	A1		○	●		
	A2		●	□		
	A3	○	●			
	A4		□	●		
	A5	○ ■				
	A6	□ ■				
	A7		○ ●			
	A8	○	●			
	A9		○ ●			
	A10		□	●		

[凡例]: 白抜き記号 (○□) はオプション価値を考慮しない場合の最適計画案, 塗りつぶし記号 (●■) はオプション価値を考慮した場合の最適計画案である. また, ○と●は表面処理, □と■はオーバーレイである.

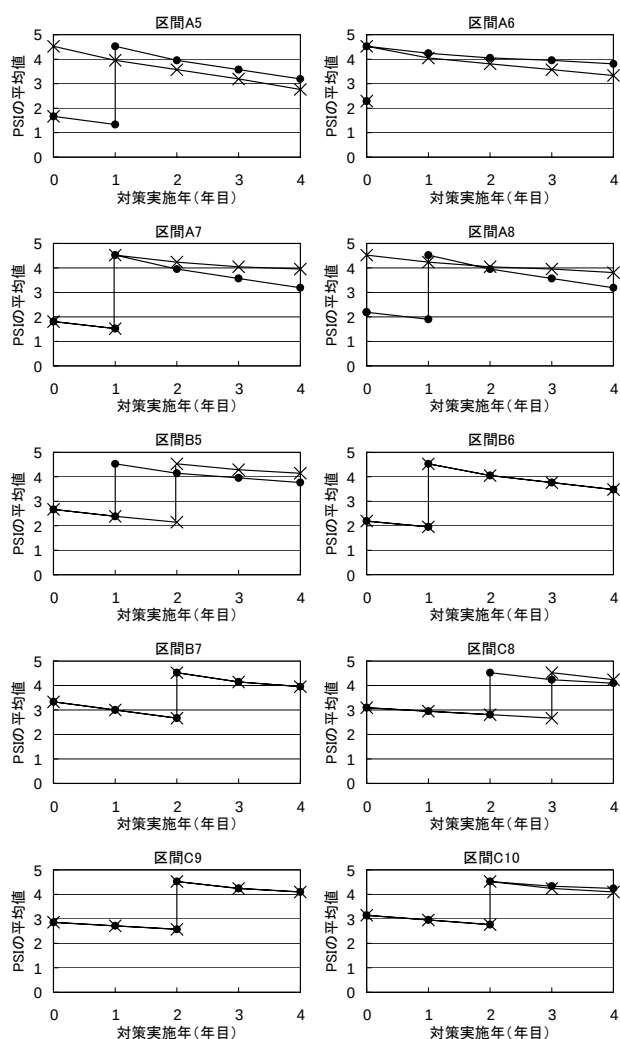
図-5 各区間の平均 PSI 値の経年変化 (Case1)
(×…硬直的な評価法, ●…リアルオプション法)

る. これに対して, オプション価値を考慮した場合の最適計画案は, 対策時期および対策工法ともにそれほど緊急性を感じさせない結果となった. これは, 路線 A では劣化が進行する可能性 (変動) γ_+ より

表-5 最適計画案の出力結果 (Case2)

		対策実施年 (年目)				
		0	1	2	3	4
補修対象区間	A5	○	●			
	A6	□ ▲				
	A7		△ ●			
	A8	□	●			
	B5		●	□		
	B6		○ ●			
	B7			○ ●		
	C8			●	○	
	C9			○ ●		
	C10			○ ■		

[凡例]: 白抜き記号 (○□△) はオプション価値を考慮しない場合の最適計画案, 塗りつぶし記号 (●■▲) はオプション価値を考慮した場合の最適計画案である. また, ○と●は表面処理, □と■はオーバーレイ, △と▲は打換えである.

図-6 各区間の平均 PSI 値の経年変化 (Case2)
(×…硬直的な評価法, ●…リアルオプション法)

も, 劣化がそれほど進行しない可能性 (変動) γ_- が高いという傾向があり, 経年劣化の変動量 γ の影響であると考えられる. また, Case2 の場合は経年劣化量や変動量, 大型車交通量が異なる路線を同時

に評価しているケースであるが、表-5 に示される最適計画案は Case1 の出力結果と同様の傾向を示している。ただし、路線別の特徴も大きく現れており、経年劣化量や変動量、大型車交通量の各値が大きな路線を優先的に対策するような出力であった。なお、大型車交通量の少ない区間は他の区間に比べ評価値のオーダーが小さくなっており、評価手法において大型車交通量の影響を考慮したことが反映されている。また、図-5 および図-6 に各区間の平均 PSI 値の経年変化を示す。これは、システムから出力された Case1 と Case2 の最適計画案（表-4 および表-5）の詳細を示したものであり、シミュレーションケースごとに各区間の PSI 値の経年変化が異なってくる事が分かる。

ここで、オプション価値を考慮した場合の最適計画案に対して、補修対象区間ごとの PV 値と ROV 値（工法変更と対策延期）の詳細をシミュレーションケースごとに算出した。Case1 の結果を図-7(a) に、Case2 の結果を図-7(b) に示す。どちらのシミュレーションケースにおいても、対策延期に関する ROV 値は工法変更に関する ROV 値に比べてとても小さく、維持管理計画においては対策延期の効果は大きく見積もれないことが分かる。また、工法変更に関する ROV 値は「表面処理」工法に最も多く見積もられている。一般に、工法変更による柔軟性の価値は「表面処理」のような応急的対策よりも「オーバーレイ」や「打換え」のような上位工法に多く存在すると考えられる。しかしながら、今回のシミュレーションで用いた各路線における経年劣化の変動量の特徴（劣化が進行する可能性よりも劣化が進行しない可能性の方が高いという点）と設定した年間予算制約の影響によって、このように「表面処理」工法に多くのオプション価値が見積もられた最適計画案が導出されたと考えられる。

さらに、最適化の効果を確認するために、硬直的な評価法によって導出された最適計画案に対して、工法変更や対策延期のオプション価値が付与されたと仮定し、オプション価値を再評価した場合の計画案の評価値について、はじめからオプション価値を考慮して最適計画案を導出した場合の評価値との比較を行った。結果を図-8 に示す。Case1 および Case2 のいずれの場合でも、硬直的な評価法によって導出された最適計画案に対してオプション価値を再評価したものは、はじめからオプション価値を考慮して最適計画案を導出したものには及ばないという結果となった。すなわち、オプション価値を考慮した最適化を行うことによって、フレキシビリティをより多く持つ計画案が最適解として引き出されることが

分かった。

以上のシミュレーション結果より、リアルオプション法を用いた計画案の評価法が提案できたとともに、これらを検討するための最適化システムの有効性が確認できた。

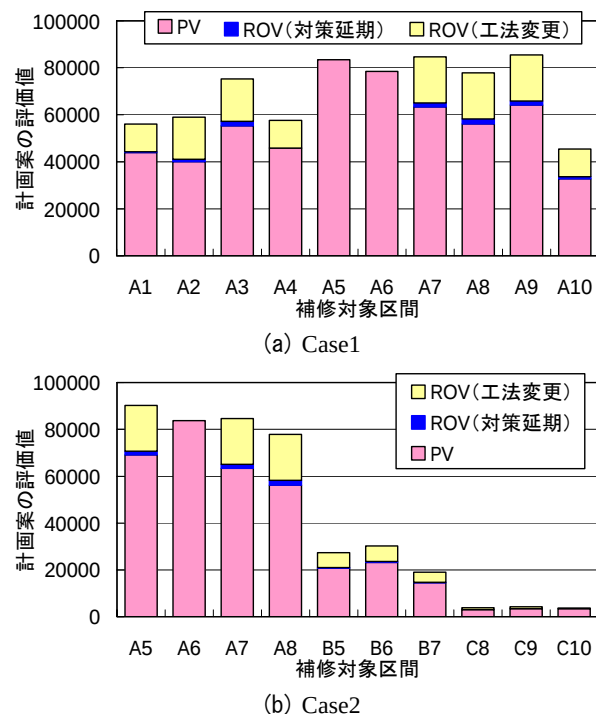


図-7 最適計画案における PV と ROV の詳細

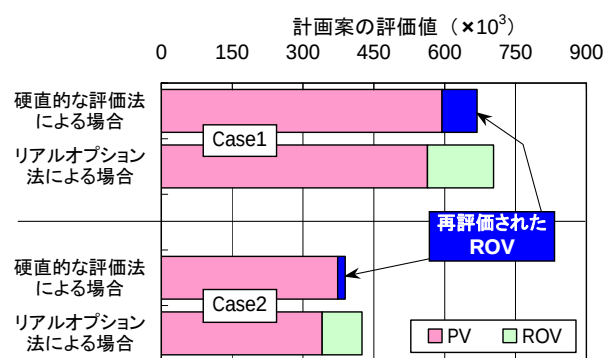


図-8 硬直的な評価法による最適計画案の再評価

7. おわりに

本研究では、道路舗装の維持管理計画案を策定するためにリアルオプションを導入した計画策定システムを開発し、異なる供用環境の実際の道路舗装に対する予算制約を踏まえた最適維持管理計画案を導出した。そして、フレキシビリティの価値を検討するとともに、最適化システムとしての有用性を確認した。その結果、道路舗装の維持管理計画においては、

計画案のフレキシビリティを考慮することで、これまでの考え方とは異なった新しい計画案が導出できることが分かり、道路舗装の維持管理計画案の評価方法に関するリアルオプション法の有用性を確認できたとともに、計画案の評価法に関する選択肢の広がり可能性を見出すことができた。

以下に、本研究で得られた成果の要約を示す。

- 1) 維持管理の実施による路面の PSI 値の変化量と当該路線の大型車交通量により維持管理の効果（現在価値 PV）を定量化し、この PV を用いて道路舗装の維持管理計画案の評価値を計算するためのリアルオプション法による評価モデルを提案できた。
- 2) 維持管理計画案を導出するための最適化手法として遺伝的アルゴリズムを利用し、計画案のフレキシビリティを考慮した道路舗装の維持管理計画を策定する最適化システムを開発できた。
- 3) 開発した最適化システムを用いて複数区間における 5 年間の維持管理計画を策定する数値シミュレーションを行った結果、オプション価値を考慮した最適化を行うことによって、フレキシビリティをより多く持つ計画案が最適解として引き出されることが分かり、最適化システムの有効性が確認できた。
- 4) また、道路舗装の維持管理計画案の持つフレキシビリティとして対策延期と工法変更を取り上げ、最適計画案を導出するための評価モデルに組み込んだ結果、対策延期に関するオプション価値は

非常に小さいこと、工法変更に関するオプションの価値は路面の劣化進行の変動と予算制約によって変化することが確認できた。

【参考文献】

- 1) 土木学会アセットマネジメント研究小委員会：アセットマネジメント導入への挑戦—新たな社会資本マネジメントシステムの構築に向けて—平成 14 年度報告書，2003.8
- 2) 吉田二郎：社会資本ライフサイクルマネジメントとリアルオプション，土木学会誌，Vol.86，pp.30-31，2001.12
- 3) 上田孝行：社会基盤施設のライフサイクル評価手法，東京工業大学土木工学科研究報告，No.63，pp.121-135，2001.3
- 4) 大谷 悟，安達 豊：社会資本整備におけるリスクに関する研究，国土交通政策研究 第 4 号，2001.6
- 5) 栗野盛光，田村謙介，小林潔司：不確実性下における道路舗装の補修投資ルールに関する研究，土木計画学研究・講演集，No.23(2)，pp.55-58，2000.11
- 6) 日本道路協会：道路維持修繕要綱，1978.7
- 7) 近田康夫，橋 謙二，城戸隆良，小堀為雄：GA による既存橋梁の補修計画支援の試み，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.151-159，1995.4
- 8) 呉 智深，原田隆郎，横山功一：遺伝的アルゴリズムによる大規模既存道路橋の耐震補強計画支援モデルの構築，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1037-1046，1998.3

OPTIMIZATION SYSTEM OF MAINTENANCE STRATEGIES FOR ROAD PAVEMENT BY CONSIDERING FLEXIBILITY OF ALTERNATIVES

Takao HARADA, Kanpei YOSHIDA and Koichi YOKOYAMA

Maintenance strategy might be changed in future due to uncertainty included in cost of maintenance and operation, degradation of infrastructure, budget, change of social system, technology innovation and so forth. The present value (PV) method commonly used for alternative evaluation cannot consider uncertainty that is expected to occur in future. On the other hand, real options (RO) method is new technique that can consider the value of flexibility of alternative. In this study, optimization system of maintenance strategies for road pavement by using real options has been developed. Through the numerical simulations on road pavement, it was confirmed that the alternatives which have flexibility more abundantly were drawn as optimum solution by considering of option values.