

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

杉浦 聡志¹・高木 朗義²・倉内 文孝³

¹学生会員 大日コンサルタント 保全部（〒500-8384 岐阜県岐阜市藪田南3-1-21）

E-mail:sugiura-s@dainichi-consul.co.jp

²正会員 岐阜大学工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）

E-mail:a_takagi@gifu-u.ac.jp

³正会員 岐阜大学工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）

E-mail:kurauchi@gifu-u.ac.jp

LCC最小化アセットマネジメントでは、劣化予測に基づいた健全度とLCC最小となる管理水準を設定して補修意思決定する。しかしながら、劣化の進行に伴って増加する利用者費用は大きく無視できない。そこで、施設の劣化進行に伴って生じる道路利用者、道路管理者の費用をリスクとして定義した補修意思決定方法を用いる。この方法により、複数種類の道路施設における補修必要性が一元的に評価できる。ただし、このリスクは利用者によって被る量がことなるため、利用者間に格差が生じる。

本研究では、以上の問題意識から、利用者間におけるリスク量格差を公平性尺度として捉えて、公平性指標を定義し、格差を減少させ、投資金額に対して低減できるリスク量を最大化する最適補修戦略決定モデルを開発する。

Key Words : risk management, asset management, equality, integer linear programming.

1. はじめに

社会資本におけるLCC最小化アセットマネジメントは社会資本の高齢化と逼迫する財政事情を背景に全国の自治体で普及している。ここでいうLCC最小化アセットマネジメントとは、劣化予測式によって算出される健全度等の劣化状態指標が設定した管理水準を超過したら補修する意思決定ルールの下、中長期における補修費用を最小とする方法を指す。各自治体では橋梁や舗装をはじめ、上下水道施設など様々な社会資本の中長期の補修計画が策定され、それに基づく補修が実施されている。しかしながら、LCC最小化アセットマネジメントでは劣化の進行に伴って生じる道路利用者の費用は補修意思決定に反映されない。劣化の進行、あるいは道路施設の破損によって道路網が正常に機能しないことによる道路利用者への影響は交通渋滞や道路事故、救急医療搬送の遅延など多岐にわたり、費用も大きく、無視できないと考えられる。そのため、管理者費用と利用者費用の両者を評価して補修を意思決定する必要がある。一方で、種類の異なる道路施設を各々の管理計画に基づいて対策を実施する

ことは経済性の面で効率的ではない。施設が破損した場合の利用者、管理者への影響を考慮して優先順位を決定する必要がある。以上の問題意識に基づいて筆者らは橋梁、舗装、危険斜面を対象として健全度、MCI、斜面諸元に基づいて求められる破損確率と、破損した場合に利用者、管理者両者の費用を乗じた期待費用をリスクとして定義し、複数種類の社会資本の補修必要性を一元的に評価する指標として用いる手法を提案した。これに基づけば道路管理者は統一された予算内で同一種類の社会資本における施設間のもとより、異なる種類の社会資本間においても補修優先度を定めて補修計画を策定できる。

一方で施設をリスク評価することで、道路利用者が移動する間に被るリスク量が明示されることとなり、利用者間で被るリスク量に格差が生じることが新たな課題となる。LCC最小化アセットマネジメントでは、管理対象の施設群が設定した管理水準となるように補修が実施される。この結果、利用者にとっては一定の供用水準以上が保たれており、この視点においては公平性が保たれているといえる。リスク評価に基づく補修施設においても公平性に配慮する必要がある。そこで本研究ではリスク

に基づいて施設の補修必要性が算出された上で、所与の予算制約の下道路利用者が被るリスク量の格差縮小と投資金額に対して低減させられるリスク量の最大化を図る最適補修戦略決定モデルの構築を目的とする。

2. 既往研究と本研究の位置付け

(1) 補修施設決定手法に関する既往研究

社会資本のアセットマネジメントは検査の結果に基づき、統計的な劣化予測モデルを構築したうえで、設定したプロジェクトライフにおける補修費用の最小化を図るアセットマネジメント（以降LCC型AMと呼ぶ）に関する多くの研究が進められている。特に、検査精度、劣化の不確実性を考慮できるマルコフ推移確率モデルに基づく劣化予測は、橋梁、舗装を初めとして多くの社会資本を対象とした知見が蓄積されている。たとえば、津田ら¹⁾、青木ら²⁾、小林ら³⁾がある。これらの研究は、施設群の劣化予測精度を向上させることで投資量、投資タイミングをマクロ的視点で精緻化し、管理者の予算管理に資するものである。マルコフ推移確率モデルを用いた劣化予測の発展形として個々の施設の異質性に着目し、劣化過程をそれぞれの施設で推計した研究として小濱ら⁴⁾がある。これに基づけば個々の施設における投資タイミングが推計され、ミクロの補修計画立案が可能となる。

以上の研究では、LCC最小化を図るための劣化予測精度向上に主眼が置かれている。個々の施設における補修はそれぞれに定義された健全度とLCC最小となるように設定された管理水準によって意思決定される。

LCC型AMは全国の自治体に普及し、多くの社会資本において補修計画が策定され、これに基づく補修が実施されている。LCC型AMでは劣化の進行に伴って生じる道路利用者の費用は補修意思決定に反映されない。劣化の進行、あるいは道路施設の破損によって道路網が正常に機能しないことによる道路利用者への影響は交通渋滞や道路事故、救急医療搬送の遅延など多岐にわたり、費用も大きく、無視できないと考えられる。そのため、管理者費用と利用者費用の両者を評価して補修を意思決定する必要がある。一方で、種類の異なる道路施設を各々の管理計画に基づいて対策を実施することは経済性の面で効率的ではない。異なる道路施設に対して一元的に対策の経済効率性を比較して対策実施の意思決定をすることで、予算制約下における維持管理の投資効率を向上させることができる。筆者らはこの問題意識に基づき施設の破損によって発生する利用者、管理者の費用をリスクとして評価することで複数種類の社会資本における補修優先度を一元的に取り扱う手法を提案した⁵⁾。ここでは道路ネットワークを交差点間を基本として区分し、リスクが相対的に高い区間に存在する施設へ投資されるルールとした。これによりリスクが大きい区間は確実に補修

される。

(2) 投資における公平性について

道路管理者は公共投資の意思決定において公平性に配慮する必要がある。道路建設や公共交通計画では公平性を議論された研究がある。しかしながら維持管理において公平性を議論したものは見当たらない。これは、LCC型AMが管理対象のいずれの施設も管理水準を保つことでどの利用者にも同じ水準以上の施設が供用されており、供用水準という視点で結果の公平が保たれているといえるためであると考えられる。

一方で、筆者らが提案した投資ルール⁵⁾では、リスクが大きい箇所へ投資することになるため、リスク、健全度のどちらを尺度としても公平性に配慮した投資とならない。そこで、本研究では、利用者が被るリスクを公平性尺度の要素とした指標を定義し、補修施設を決定するモデルを構築する。

3. 施設のリスク評価

道路施設におけるリスクとは、供用中の道路施設が機能不全を起こすことにより発生する費用（以下影響度と呼ぶ）の大きさに、機能不全となった状態において費用が発生する確率（以下発生確率と呼ぶ）を乗じたものと定義できる。このとき、利用者が被る影響度の期待値を利用者リスクと呼び、管理者が被る影響度の期待値を管理者リスクと呼ぶ。利用者リスクにおける影響度は例えば舗装が破損し、ポットホールなどにより走行性が損なわれる結果、走行速度が低下するときの時間費用を捉えたものがある。管理者リスクにおける影響度は例えば上記の例でポットホール等の発生により、事後的補修が必要となったときの補修費用を捉えたものである。発生確率は施設の健全度に基づいて算出されるものである。例えばポットホールの発生確率であれば、測定された健全度と同地点のポットホールの発生件数を統計的分析により健全度に基づく発生確率算出式が推定できる。

4. 公平性・効率性に基づく最適補修戦略決定モデル

(1) 本稿で取り扱う公平性の定義

道路ネットワーク上に存在する施設が保有する利用者リスクは、その施設が所在する道路区間を通過する全ての利用者が被る。道路利用者1人に着目すると、移動の起終点間の経路に存在する全ての施設が保有する利用者リスクの総和を被る。この道路利用者1人の利用者リスクの総和は、起終点およびその間の経路によって異なるため利用者間に格差が生じる。利用者リスクを負の効用として捉えると公平性における尺度の要素とすることができる。利用者間格差の縮小を前提として公平性の評価

アプローチ⁷⁾を整理し、本稿のとり立場を示す。

a) 公平の捉え方

公平の捉え方は大分すると①結果、②機会の2つの軸があるとされている⁸⁾。②機会の公平は利用者が補修の投資意思決定に関わることがないため定義困難である。そのため、本稿では①結果の公平を図るものとなる。

b) 公平の対象

公平の対象は①個人、②領域の2つの軸があるとされている⁸⁾。本稿では利用者間のリスク量格差について問題提起しており、個人単位での計測が可能である。道路利用者そのため、①個人間の公平を図る。ただし、ここで定義している個人とは、道路利用者のうち「交通量1台あたり」を想定している。そのため全市民における個人間の公平は対象としていない。

c) 公平の尺度

公平の尺度は①効用、②資源の2つが考えられる。本稿では公平性における尺度の要素である利用者リスクを負の効用として捉える。②の資源は配分される投資量が想定できる。②資源の公平を図るためには、1施設あたりの補修費用に差があるにもかかわらず利用者1人あたりに一定の投資量となる。これにより劣化状態が進行して補修費用が高額となった施設が補修されない状況が想定される。そのため、①効用を尺度とした公平を図る。

d) 評価の単位期間

単位期間とは、公平性の尺度を計測する時期を指す。施設の補修においては、年度の補修計画との整合を考慮すると年度末までに実施した補修事業によって変化したリスクを計測することとなる。評価の単位期間は①毎年、②プロジェクトライフ、③任意の複数年の3つが考えられる。②または③では、それぞれの最終年に公平性を計測する。この場合では、最終年までの経過においてはリスク格差が看過されることとなる。そのため、本稿では①の毎年年を単位期間として公平を図る。

e) 評価の時点

評価の時点は①現在と施策後の差をとる、②施策後の状態をとる2つが考えられる。①では、現在の状態において利用者間のリスク格差が大きい場合においても施策による変分だけが計測されることとなる。施策後に残存するリスクが許容できないリスク量であっても看過されることが想定される。そのため、本稿では②施策後の状態における公平を図る。

f) 評価尺度の単位

評価の単位は①利用者が移動中に被る利用者リスク量、②利用者が移動中に被る単位距離あたりの利用者リスク量の2つが考えられる。②は利用者の移動距離はODペア、あるいは経路によって旅行延長が異なることを考慮したものである。旅行延長が長くなれば経路中に存在する施設数は多くなりやすいため利用者リスク量が高くなるこ

表-1 本稿で取り扱う公平性の定義

	①	②	③
公平の捉え方	垂直的(結果)	水平的(機会)	-
公平の対象	個人(利用者1人)	領域(地域)	-
公平の尺度	効用	資源(投資量)	-
評価の単位期間	単年	プロジェクトライフ	任意の複数年
評価の時点	現在と施策後の差	施策後の状態	-
評価尺度の単位	利用者が移動中に被る利用者リスク量	利用者が移動中に被る単位距離あたりの利用者リスク量	-

とが想定される。この場合、旅行延長が長ければ大きなリスクを被ることを前提とする立場をとるため、長距離を旅行する利用者が許容できないリスク量を被る場合にも看過することが想定される。そこで本稿では旅行延長の長短に関わらずリスク量が公平になるように投資するため、①利用者が被る利用者リスク量の公平を図る。

以上より本稿で取り扱う公平性の評価アプローチは表-1に網掛けで示した立場に立脚すると整理できる。

(2) 利用者の経路、経路交通量算出方法

道路利用者の移動起終点とその交通量は交通需要予測で用いるOD交通量で計測できる。OD間の経路と経路交通量は交通量配分によって経路交通量を求めることで計測できる。経路交通量はリンク交通量の更新時に経路とその交通量を記憶していく積み重ね法によって求める⁹⁾。ただし、この方法では、得られる経路交通量は不定であることに注意が必要である。

(3) 最適補修戦略決定モデル

a) 公平性指標

公平性指標は利用者がそれぞれの起終点間を移動中に被るリスクを尺度の要素として定義する。

施設 i がもつ利用者リスクを u_i とする。経路 j に施設 i が存在するか否かを示す状態変数ベクトル $\mathbf{y}$ を定義する。総数 N 個の施設があるとき、ある経路 j に施設 i が存在すれば 1、そうでなければゼロをとる経路-施設インシデンス行列 $\mathbf{y}^j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Nj})^t$ で表現できる。

補修意思決定前での経路 j の利用者が被る利用者リスクは以上より式(1)で表現できる。

$$U_{j0} = \sum_{i=1}^N y_{ij} u_i \quad (1)$$

施設の補修実施有無を示す状態ベクトル $\mathbf{x}$ を定義し、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^t$ で施設 i の補修するか否かを表現する。施設は補修されると健全度が上昇することで利用者リスクが 0 になると仮定する。補修によってリスクが解消した後の経路 j の利用者リスク U_{jd} は補修意思決定前での経路 j のリスクと補修した際に解消できるリスクの差をとり、式(2)で表現できる。

$$U_{jd} = U_{j0} - \sum_{i=1}^N y_{ij} x_i u_i = \sum_{i=1}^N (1 - x_i) y_{ij} u_i \quad (2)$$

算出された経路別リスクのネットワーク全体の平均、分散を算出し、その値が最小となる補修シナリオが最適解となる。経路の総数が M 、経路 j の交通量が h_j として、公平性に関する目的関数 z_1 を利用者リスクの分散で定義すると式(3)で記述できる。

$$z_1 = V(U_{jd}) = (E(U_{jd}^2) - (E(U_{jd}))^2) \quad (3)$$

$$E(U_{jd}) = \frac{1}{\sum_j h_j} \sum_j h_j \sum_i (1-x_i) y_{ij} u_i \quad (4)$$

$$V(U_{jd}) = \frac{\sum_j h_j \sum_i (h_j \{ \sum_i (1-x_i) y_{ij} u_i \}^2) - (\sum_j h_j \sum_i (1-x_i) y_{ij} u_i)^2}{\sum_j h_j} \quad (5)$$

b) 効率性指標

公平性に関する目的関数は、利用者リスクを尺度の要素として定義した。一方で効率性を測るときには、利用者リスクだけではなく、管理者リスクを考慮する必要がある。ネットワーク上における利用者リスクと管理者リスクの総和を効率性指標と定義する。

施設 i がもつ管理者リスクを g_i とする。利用者リスクと同様に、経路 j における管理者リスク G_{jd} は式(6)で表現できる。

$$G_{jd} = G_{j0} - \sum_{i=1}^N x_i g_i = \sum_{i=1}^N (1-x_i) g_i \quad (6)$$

ここで、 G_{j0} ：補修意思決定前の管理者リスクの総和。

式(2)に示す利用者リスクと管理者リスクの総和を効率性に関する目的関数 z_2 として定義し、式(7)で記述できる。

$$z_2 = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N h_j (1-x_i) y_{ij} u_i + \sum_{i=1}^N (1-x_i) g_i \quad (7)$$

c) 最適化問題の定式化

本研究では、所与の年予算制約の下で公平性指標と効率性指標の重み付き和を最小化する問題を解くこととする。式(3)、式(7)より、公平性指標、効率性指標は対策ベクトル $\mathbf{x}$ の線形結合となっていることから、この問題は二値整数線形計画問題として次のように定式化できる。

$$\min z = \alpha z_1 + z_2 \quad (8)$$

Subject to

$$\sum_{i=1}^N c_i x_i \leq \text{budget} \quad (9)$$

ここで、 α ：公平性と効率性の重みを表すパラメータ、 c_i ：施設 i の補修費用、 budget ：年補修予算。

(3) 計算方法

本研究では定式化した問題を繰り返し解くことで、年度ごとの最適対策箇所を決定していく。年度が経過するたびに劣化予測により施設の健全度を更新し、補修意思決定前に利用者リスク、管理者リスクを算定する。この計

算を設定したプロジェクトライフに至るまで繰り返す。また、求解にはMatlabを使い、最適化問題においては整数計画問題を解く高速アルゴリズムであるGurobiをMatlabから呼び出すことにした。なお、計算結果については講演時に示す。

5. おわりに

本稿では道路施設の破損リスクに基づく補修戦略決定モデルを構築した。本稿の概要を以下に示す。

- ① 道路利用者 1 人が移動の間に被る利用者リスクは利用者間で起終点、経路が異なるため、利用者間で格差が生じる
- ② 利用者間の格差を公平性指標における尺度の要素として捉え、モデル内における公平性の評価アプローチを整理した。
- ③ 利用者が移動によって被る利用者リスクの分散を公平性指標、ネットワーク上における各施設の管理者リスク総和を効率性指標として定義した。
- ④ 最適補修戦略を予算制約下における公平性指標と効率性指標の重みつき和を最小化する問題と捉えて、二値整数線形計画問題として定式化した。また、その計算方法を示した。

今後の課題としては、構築したモデルの挙動を確認し、必要である。具体的には重みパラメータの設定値によってどのように補修戦略が変動するかを確認する。

謝辞：本稿は岐阜県社会資本メンテナンスプラン検討委員会の議論された内容を発展させたものである。関係各位に感謝の意を表す。また、本研究は科学研究費補助金（基盤研究(B)、課題番号：21360243、研究課題名：社会費用を考慮した社会資本アセットマネジメントに基づく地域リスクガバナンス、研究代表者：高木朗義）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 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計, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.69-82, 2005.
- 2) 青木一也, 山本浩司, 津田尚胤, 小林潔司：多段界ワイブル劣化ハザードモデル, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.111-124, 2005.
- 3) 小林潔司, 熊田一彦, 佐藤正和, 岩崎洋一郎, 青木一也：サンプル欠損を考慮した舗装劣化予測モデル, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.1, pp.1-15.
- 4) 小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸清之, 小林潔司：劣化ハザード率評価とベンチマーキング, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.
- 5) 杉浦聡志, 金森吉信, 高木朗義, 倉内文孝, 森本博昭：リスク評価に基づいた道路施設の総合維持管理手法の開発, 土木学会論文集 F4(建設マネジメント) 特集号, Vol.67, No.4 特集号, pp.I_103-I_112, 2011.

- 6) M.G.H. Bell and Y. Iida : Transportation network analysis, wiley,1997.
- 7) 岡本裕豪，増田圭：平等をめぐる議論と社会資本整備に関する一考察，国土交通政策研究第6号，2001.
- 8) 小林潔司：地域間公平性を巡る論点と課題，季刊運輸政策研究，Vol.3，No.3，pp.015-026，2000.

？