Report レポート #02

(一財)北海道開発協会平成25年度研究助成サマリー

財政制約下における社会資本の戦略的な維持管理・更新

内田　賢悦（うちだ　けんえつ）
北海道大学大学院工学研究院准教授

2000年３月北海道大学大学院工学研究科助手、03年８月～04年５月文部科学省在外研究員（英国、リーズ大学交通研究所）、13年４月北海道大学大学院工学研究院准教授、現在に至る。

中尾　晴子（なかお　はるこ）
北海道大学大学院工学院修士課程１年

2014年３月北海道大学工学部社会工学科卒業。現在に至る。

1　はじめに

少子高齢化社会の厳しい財政状況の中、急速に増大する老朽化した社会資本の更新・修繕は、北海道のみならず日本において、社会・経済活動の継続だけではなく、国際的な競争力を維持する上でも喫緊の課題である。特に北海道は、日本の食料基地としての役割を担うために、長期的な視点から戦略的かつ効率的な社会資本の更新･修繕計画が立案されなければならない。

日本の道路構造物に目を向けると、その多くは1960～80年代の高度経済成長期に建設されている。そのため、多くの道路構造物は建設後50年以上が経過し、更新時期を迎えるものが存在する。しかしながら、すべての道路構造物を更新するために十分な財源が確保されているわけではなく、仮にこれまでと同じように道路整備を行っていけば、2037年には維持管理費用が予算を超え、約16%の道路構造物が更新できなくなると予想されている（国土交通省平成23年交通白書）。さらに近年まで、道路構造物の維持管理費用の重要性は認識されておらず、早急な対応をとらなれければならない状況になっている。

特にトンネルや橋梁などの道路構造物の場合には、経済効率性以上に、安全性の確保と更新予算との関係が重要になってくる。トンネルや橋梁などの構造物の劣化は直接人命に関わり、ちょっとした補修時期の見誤りが大きな事故につながりうる。最近では、2012年12月２日に山梨県大月市で起こった笹子トンネル天板崩落事故が記憶に新しい。このような痛ましい事故を未然に防ぐためにも、早めの更新が必要となるが、厳しい財政制約下では、どの道路構造物を優先的に更新するかを決めなければならない。しかしながら、優先度を社会的に合意するためには、極めて難しい問題を扱わなければならない。

こうした背景から、さまざまな社会経済状況を踏まえ、効率的な予算配分と安全性の確保を両立させる更新を実現するために、財政制約を踏まえた道路構造物の更新計画の立案手法が求められてきた。しかしながら、これまでこうした課題に適切に対応可能な計画立

案手法は開発されてはいないのが現状である。

道路構造物の更新計画を考える場合、さまざまな不確実性を考慮する必要がある。それらの代表的なものには、①劣化の進行、②更新時の影響、③交通量の不確実性に起因する移動時間の不確実性（内田,2013）が挙げられる。劣化の進行に関する不確実性は、更新時期の決定に影響するものと考えられる。また、更新時の影響および移動時間に関する不確実性は、ドライバーの経路選択行動を通じて道路利用者の費用に関係すると考えられる。本稿では以上３種の不確実性を考慮した財政制約下の最適更新計画モデルの開発を行う。

2　道路構造物の最適更新モデルの定式化

(1)　記号の定義

以下に本稿で使用する記号を示す。

A	ネットワーク上の道路区間（以下ではリンクとする）集合
V_a^y	y年目のある日のリンクaの確率的交通量
C_a	リンクaの確率的交通容量
$T_a^n(y)$	y年目の通常状態にある場合のリンクaの確率的移動時間
T_a^r	更新が必要な状態になった場合のリンクaの確率的移動時間
T_a^y	y年目のリンクaの確率的移動時間
$t_a(\cdot)$	リンクaの移動時間関数
cv_a	リンクaの確率的移動時間の変動係数
$\sigma_a^2(\cdot)$	リンクaの移動時間の分散
$\sigma_{ab}(\cdot)$	リンクaとbの移動時間の共分散
$p_a^n(y)$	y年目のある日にリンクaが通常の状態にある確率
c_a^y	y年目のリンクaの更新にかける費用
c	計画期間を通した更新費用予算
τ	時間価値
r	社会的割引率
g	計画期間
y_a	計画年時(y=0)におけるリンクa建設後の経過年数

(2)　最適更新計画の定式化

道路の維持管理において、リンクは通常と機能不全（通行不能）の２つの状態のみをとるものと考えられる。本稿では、機能不全になる前に更新する事を前提とするため、機能不全ではなく、更新が必要な状態と置き換えて扱っていく。y年目のある日にリンクaが通常状態である時、リンクaの確率的移動時間$T_a{}^n(y)=t_a(V_a^y;C_a)$は、確率的交通容量$C_a$を所与とした確率的交通量$V_a^y$の関数として表されると考える。また、リンク$a$の確率的移動時間は正規分布に従うものと仮定し式(1)で与える。

$$T_a^n(y) \sim N\left(E\left[T_a^n(y)\right], \mathrm{var}\left[T_a^n(y)\right]\right) \tag{1}$$

ここで、式(1)に示した正規分布の平均、分散はそれぞれ式(2)、(3)で与えられるものとする。

$$E\left[T_a^n(y)\right] = E\left[t_a\left(V_a^y;C_a\right)\right] \tag{2}$$

$$\mathrm{var}\left[T_a^n(y)\right] = \left(cv_a \cdot E\left[t_a\left(V_a^y;C_a\right)\right]\right)^2 \tag{3}$$

また、リンクの劣化が進み更新が必要な状態になると、道路管理者はそのリンクの更新を行うか行わないかを意思決定するものとする。リンクaが更新を必要とする状態になった時の移動時間T_a^rは、正規分布に従い式(4)で与えられるものとする。

$$T_a^r \sim N\left(E\left[T_a^r\right], \mathrm{var}\left[T_a^r\right]\right) \tag{4}$$

式(4)に示される移動時間は、通行規制を伴う更新中の移動時間だけではなく、更新を行わない場合の通行止めによる待ち時間も表現するものとする。

y年目のある日にリンクaが通常状態にある確率を$P_a^n(y)$と表現し、式(5)で与える。

$$p_a^n(y) = \frac{1}{1+\exp\left(\alpha+\beta\cdot\left(y+y_a\right)\right)} \tag{5}$$

ここで、$\alpha<0, \beta>0, y_a>0$はパラメータである。y_aは、リンクaに特有なパラメータであり、そのリンクの建設後の経過年数とする。さらにαに関しては以下の式(6)に示す関係を満たすものとする。

$$\frac{1}{1+\exp(\alpha)} \approx 1 \tag{6}$$

以上の設定で式(4)は、建設直後のリンクが通常状態である確率がほぼ１となる事を意味している。一方、y年目に更新を行った場合、$y+k(k=1,2\ldots)$年目の$p_a^n(y+k)$は、式(7)で与えられるものとする。

$$p_a^n(y+k) = \frac{1}{1+\exp(\alpha+\beta\cdot k)} \tag{7}$$

式(7)は、更新直後のリンクが通常状態である確率がほぼ１となり、更新後にはほぼ建設直後の状態まで状態が回復することを意味している。

y年目のある日のリンクaの確率的移動時間T_a^yは、式(1)および式(4)に示した２つの正規分布を混合分布となることを仮定し、それぞれの混合率をp_a^n, $1-p_a^n$として式(8)で与える。

$$T_a^y \sim GMD\left(T_a^n(y), T_a^r, p_a^n(y), 1-p_a^n(y)\right) \tag{8}$$

式(8)で示した確率的移動時間の期待値と分散は、それぞれ以下の式で与えられる（Paul & Hoel, 1962）。

$$E\left[T_a^y\right] = E\left[T_a^n(y)\right]\cdot p_a^n(y) + E\left[T_a^r\right]\cdot\left(1-p_a^n(y)\right) \tag{9}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{var}\left[T_a^y\right] &= p_a^n(y)\cdot\left(\mathrm{var}\left[T_a^n(y)\right] + \left(E\left[T_a^n(y)\right]\right)^2\right)\\ &+ \left(1-p_a^n(y)\right)\cdot\left(\mathrm{var}\left[T_a^r(y)\right] + \left(E\left[T_a^r(y)\right]\right)^2\right) - \left(E\left[T_a^y\right]\right)^2\end{aligned} \tag{10}$$

y年目のある日のリンクaの確率的移動時間T_a^yは式(8)で与えられ、本稿では、その確率的移動時間をy年目の代表的な移動時間と考えることにする。その解釈としては、ドライバーは１年間の356日のうち、p_a^nの割合で通常状態の移動時間を経験し、$1-p_a^n$の割合で更新時の確率的移動時間を経験すると仮定していることになる。

リンクaのy年目の確率的移動時間にリンク交通量を乗じた総移動時間の平均$E\left[V_a^y\cdot T_a^y\right]$をネットワーク全体で足し合わせたものを$y$年目の総移動時間と定義する。さらに、総移動時間に時間価値τを乗じることで総移動時間を費用に変換することができ、本稿ではこれを総移動コストと呼ぶことにする。リンクに対して更新を行った場合、劣化は回復する。そのため、そのリンクが通常状態である確率は、更新を行う前と比べて高くなり、総移動時間は短くなる。それに伴い総移動コストも減少することになる。こうした関係を踏まえると、n年間の総移動コストを足し合わせた総計も更新やその時期によって変化することになる。

一方、道路の更新コストは劣化の進行に伴い、経年的に増加すると考えられるため、更新時期が遅くなる程増えると考えることができる。本稿では、年間のコスト（更新コストと移動時間コストの和）を計画期間にわたり現在価値化した総コストを最小とするように、ネットワークの各リンクを更新する最適時期を求めることにする。この問題は、式(11)に示す目的関数z、すなわち総コストの現在価値を最小化する更新時期と更新コスト（$c_a^y \geq 0 \forall a, y$）を求めるものである。

$$\min z = \sum_{y=0}^{g} \frac{\sum_{a\in A}\left\{365\cdot\tau\cdot E\left[V_a^y\cdot T_a^y\right] + c_a^y\right\}}{(1+r)^y} \tag{11}$$

式(11)は、現在から将来にわたって発生するコストを社会的割引率（r）を用いて現在価値化している点に注意が必要である。また、上記の問題は、財政制約を考慮していないため、現実的ではない。そのため、式(12)に示す制約条件を考慮して解く必要がある。

$$\sum_y \sum_a c_a^y = c \tag{12}$$

3　数値計算例

(1)　設定条件

ここでは問題を簡単にするために、図１に示す１つのO－Dペア（交通の起点：Originと終点：Destinationのペア）間に１つのリンクのみがある場合を考える。すなわち、ドライバーの経路選択行動は考えず、さらに、予算制約も考えないことにする。

通常状態の確率的移動時間は平均移動時間を$E\left[T_a^n(y)\right]=10$分、分散を$\mathrm{var}\left[T_a^n(y)\right]=4$とした正規分布とし、更新中の移動時間に関しては、$E\left[T_a^r(y)\right]=180$、$\mathrm{var}\left[T_a^r(y)\right]=5$とした正規分布として数値計算を行った。通常、更新中の移動時間は、複数車線のリンクの場合は車線を１本通行止めにし、１車線道路の場合は片側通行とし、更新を行うことになると考えられる。しかしながら、モデルの定式化において示したように、更新が必要となった場合の移動時間は、更新を行わない場合の通行止めによる待ち時間も表現するため、通常状態の移動時間と比較すると、平均、分散が大きくなると考えられる。それだけではなくここでの設定値は、通常状態と更新が必要な状態、それぞれの状態で

の移動時間の違いを明確化するために、更新が必要な状態での移動時間の平均には大きな値を設定していることに注意されたい。

また、混合率はy年目のリンクaが通常状態である確率を$p_a^n(y)$とし、$y_a=0$として、式⒀で与えた。

$$p_a^n(y)=\frac{1}{1+\exp(-5+y)} \tag{13}$$

$p_a^n(y)$の挙動は図３に示すとおりである。図３より、リンクは建設後10年程度で通常状態をとる確率が０となるように設定していることがわかる。これは計算過程を理解しやするするために設定したパラメータによるものである。したがって、実際の道路構造物を扱う場合、実測の劣化データから推計されたパラメータ値を適用することによって、現実的な劣化曲線が再現されるものと考えられる。

⑵　結果

以上の設定から計算された、建設後１年目、５年目、10年目の確率的移動時間の混合分布をそれぞれ図３、４、５に示す。

図１　テストネットワーク

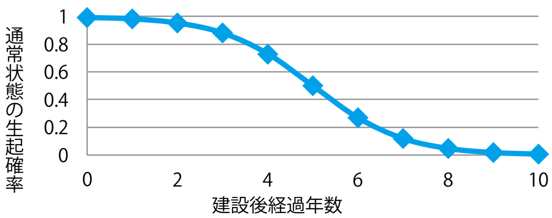

図２　通常状態の生起確率の経年変化

以上の図から時間経過とともに更新が必要な状態の割合が増えていくことがわかる。

次に、時間価値τを１台あたり40円/分、１日のリンク交通量を200台、社会的割引率は国交省の技術指針に示される４%と設定し（r=0.04）、混合分布で表される１リンクの確率的交通量の平均を用いて最適道路更新計画を考える。ここで更新は10年間で１度とし、更新によって道路は建設直後とほぼ同等の状態まで回復するとする。更新費用については$c_a^y=3.5y$［億円］と仮定した。この設定により、建設後期間が経過するにつれ、更新費用が増大する関係を表現している。

更新時期による移動時間コストと更新コストの変化の関係は図６に、更新時期による総コストの変化は図７に示す。図７より、総コストが最小となる建設後５年目が、最適更新時期であるという結果が得られた。

図３　建設後1年目の確率的移動時間

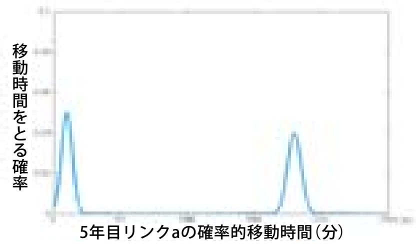

図４　建設後5年目の確率的移動時間

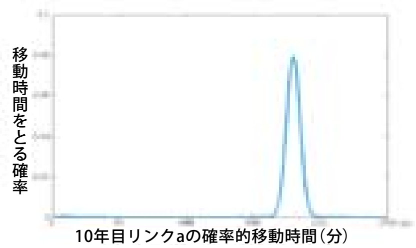

図５　建設後10年目の確率的移動時間

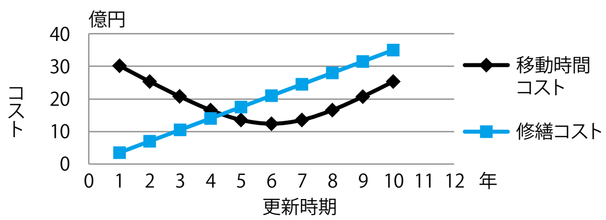

図６　更新時期による各コストの変化

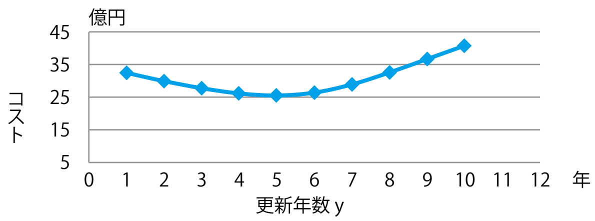

図７　更新年数による総コストの変化

⑶　実問題への適用に際して

ここで示した計算例では、開発したモデルの挙動を検証することを主目的としているため、混合分布を構成している２つの確率密度関数を極めて単純な正規分布で与えている。本来、通常状態での移動時間は、リンク交通容量と所与とした交通量の関数として与えられるが、計算例で示した結果では、このような関係は考慮されていないため、実問題への適用に際しては、こうした関係を表現する必要がある。このことは、更新が必要な場合の移動時間についても同様である。また、ネットワークレベルの問題を考えた場合、リンク交通量は、ドライバーの経路選択行動の結果として表現されるため、それを内生化した問題を解く必要がある。実問題を扱う場合には、こうしたモデル拡張を施す必要がある。

計算例で与えた更新コストは暫定的に与えたものであり、実問題に近づけるためには、リンク長や交通量に加え、その道路構造物の構造等を考慮した値を設定する必要があるであろう。

予算制約に関しては、ここでは１リンクしか扱わなかったために、考慮する必要がなかった。しかし、ネットワークレベルの問題に拡張した場合には、制約条件として扱い最適更新時期とそこでの更新費用を推計する必要がある。

道路構造物の劣化に関連するものとして、混合率としている通常状態の生起確率をどう与えるかも重要課題である。本稿では通常状態の生起確率をロジットモデルによって与えたが、生起確率の与え方によって、さまざまなな構造物への応用も可能となるであろう。土木学会関西支部（2011）や玉越ら（2011）の研究成果を参考に、今後、劣化予測式に関する検討を継続していく必要がある。

4　おわりに

本稿では、移動時間・更新時の影響・劣化の不確実性を混合分布によって表現した道路構造物の最適な更新計画立案モデルを提案した。これまでにも、さまざまな最適道路更新計画に関する研究が行われてきたが、既存の研究は確定的理論に基づくモデルが適用される場合が多かった。本稿では、将来の不確実性を考え、かつ移動時間の平均・分散を簡単に計算できるモデルを開発した。このモデルによって、将来の不確実性を考慮した計画の検討が可能になると考えられる。

本稿で開発したモデルの概念を適用すると、道路構造物だけではなく社会資本全般を対象とした検討も可能になると考えられる。すなわち、社会資本の更新・修繕費用が推計されるだけではなく、財政制約を考慮した上で、選択・集中の考え方を導入した更新・修繕計画を長期的な視点から戦略的に立案することが可能になると考えられる。さらには、一般均衡分析（たとえば、内田・杉木、2012）を適用することにより、社会資本の機能不全による経済影響の波及影響も推計可能なものと考えられる。

本稿で開発したモデルは、顕在化しつつある将来の人口減少を踏まえ、どの社会資本を更新・修繕するかに関わる意思決定を支援し得るツールとなり得ると考えられる。換言すれば、どの社会資本を捨象するかについての厳しい決定をすることにもなる。

今後も、不確実性を考慮した道路構造物だけではなく社会資本全般の最適更新計画に関する研究を続けていく所存である。

参考文献
〔１〕内田賢悦（2013）移動時間信頼性便益評価の課題と展望,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）, I_15-I_29
〔２〕杉木直,内田賢悦（2012）多地域応用一般均衡分析を用いた高速鉄道整備による経済効果の計測, 第32回交通工学研究発表会論文集, 537-544
〔３〕玉越隆史,大久保雅憲,北村岳伸,藤田知高（2011）道路構造物群の状態評価手法及び橋梁の将来状態予測手法に関する調査検討,国土交通省国土技術政策総合研究所研究成果資料　調査・試験・研究の成果の概要H23道路研究部〈http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0661pdf/ks066111.pdf〉
〔４〕土木学会関西支部（2011）構造物群のライフサイクルマネジメント共同研究グループ報告書　３.ライフサイクルマネジメントの検討・課題
〔５〕Paul G., Hoel, P.G.（1962）Introduction to mathematical statistics, Wiley, New York, 1962