

再構築を考慮した高速道路システムの維持管理費用と財源不足による機能低下の推計
An Estimation of Maintenance Cost and Function Decreasing Caused by Shortage of Budget
in Highway Infrastructure with Re-Building Situation

林 良嗣*・中川 義也**・加藤 博和***・森杉 雅史****
Yoshitsugu HAYASHI, Yoshiya NAKAGAWA, Hirokazu KATO, and Masafumi MORISUGI

1 研究の背景と問題意識

先進諸国では既存社会基盤システムをいかに維持するかという政策課題を共通に抱えている。米国では1970年代に社会基盤の劣化が深刻となった。ドイツでは旧東独の老朽構造物の維持に苦慮している。いずれも、社会基盤システムの老朽化の前例がなかったために、維持管理需要、特に再構築需要の予測が困難であった。その結果、再構築が間に合わない構造物が使用不能となり、社会的損失が発生した。日本は、先進諸国に比べて、短い期間に社会基盤の建設を行っているため、今後、維持管理・再構築需要が集中する可能性が大きく、この分野の研究の重要性が高まっていくといえる。

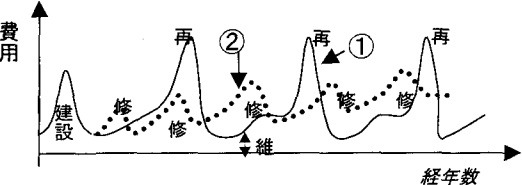


図1 単一構造物の維持管理・補修・再構築の発生とそれらに対する費用発生概念図

社会基盤システムの維持管理政策を考えるためのアプローチとして、まず、それを構成する単一構造物の維持管理と老朽化との関係を明らかにし、それを積み上げる方法を取る。図1に、単一構造物の維持管理・再構築による、費用発生経年変化を概念的にまとめたものを示す。供用開始された構造物には a.維持費用(維)、b.補修費用(修)、c.再構築費用(再)が時期に応じて必要となる。各費用は表1に定義されるものである。単位量あたり費用は順に高額になる。図1の①(実線)は再構築を繰り返す政策で、費用発生の波が

相対的に大きい。一方、②(破線)は補修を繰り返す政策で、費用発生の波は小さいものの根本的な老朽化が積み重なるために、通常の維持費は構造物の経過年数に対して通増する構造になると予想できる。

表1 維持管理費用の定義

費用	定義	高速道路での作業例
a.維持	構造物に恒常的に発生する費用	照明、点検、清掃、情報提供、塗装など
b.補修	構造物に追加的に投下される費用	補強、改良、案内板設置、環境保全
c.再構築	機能は維持しながら既存構造物を除去し、新規構築する費用	代替物の建設、既存構造物の破壊・除去、新規構築

このような関係を踏まえて、単一構造物の維持管理に関しては、その物理的耐用性と維持管理費用との関係を把握し、維持管理費用の最小化を図る手法¹⁾が、実際に幾つか提案されている。しかし、再構築需要に関して言及し、かつ、システムの範囲で維持管理需要を分析したものについて先行研究が無いといえる。

そこで本研究は、再構築費用を含めた社会基盤システムの長期的な維持管理費用の算定手法を提案し、日本の高速道路を例に試算を行うことを目的とする。さらに、システムの稼働率の概念を導入し、社会基盤システムの不稼働状態を記述する手法を提案する。この時、単一構造物の使用不能確率という指標を導入し、寿命に達した構造物は再構築されるという現象をモデルに取り入れている。

2 単一構造物からなる社会基盤システムの維持管理費用推計モデルの構成

まず、社会基盤システムの維持管理費用をマクロ的に推計する一般的なモデルを構築する。概略構成を図2に示す。表1に示した a+b を「純維持管理費用」N-MTC、a+b+c を「総維持管理費用」G-MTC と定義する。また、年次を t、構造物の経年数を a で表す。

(a) 構造物存在量サブモデル: 構造物存在量の時間変化を、人口動態を記述するときに用いられるコーホートモデルで表現する。このモデルに、構造物の建設量 $I(t)$ と、構造物の使用不能確率 $\delta(a)$ を決定する母数 μ 、 σ

Keywords: 土木施設維持管理, 道路計画
*フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 地圏環境工学専攻
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Tel. 052-789-2773, FAX: 052-789-3837
**正会員 修(工) 株式会社 パデコ
***正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手 地圏環境工学専攻
****学生員 修(経済) 名古屋大学大学院博士後期課程
地圏環境工学専攻

を入力すると、 t 年における経年数 a 別構造物の存在量 $Q(t,a)$ と使用不能量 $D(t)$ が出力される。使用不能確率 $\delta(a)$ とは、経年数 a の構造物が t 年において使用不能になる瞬間事象生起確率

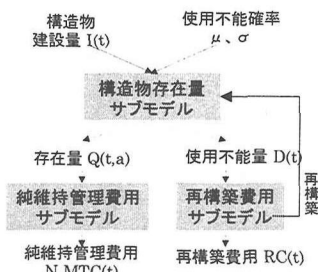


図2 モデルのフロー

であり、使用限界平均 μ (年)、標準偏差 σ (年)の正規分布に従うものとする。ここに、

$$Q(t,0) = I(t) \dots\dots\dots (1)$$

$$Q(t+1,a+1) = Q(t,a) \times \{1 - \delta(a)\} \dots\dots\dots (2)$$

$$D(t) = \sum_a \{Q(t,a) \times \delta(a)\} \dots\dots\dots (3)$$

更に、 $D(t)$ は $t+1$ 年の新規建設量 $I(t+1)$ に含まれる。

(b) 純維持管理費用サブモデル: 構造物単位量あたりの純維持管理費用 $C(a)$ をあらかじめ特定化し、それに(a)で求められた $Q(t,a)$ を乗じることにより、 t 年の純維持管理費用 $N-MTC(t)$ が推計される。ここに、

$$N-MTC(t) = Q(t,a) \times C(a) \dots\dots\dots (4)$$

(c) 再構築費用サブモデル: (a)で求められた使用不能量 $D(t)$ に再構築費用単価 $R(t)$ を乗じて全体の再構築費用 $RC(t)$ を推計する。

$$RC(t) = D(t) \times R(t) \dots\dots\dots (5)$$

最後に、 $G-TMC(t)$ は以下のように求められる。

$$G-TMC(t) = N-MTC(t) + RC(t) \dots\dots\dots (6)$$

3 ケーススタディー-高速自動車国道を例として-

日本道路公団 (以下、JH) の管理する高速道路システムを対象として、維持管理費用推計モデルを特定化する。高速道路を対象にしたのは、a)名神高速道路に再構築を実施した事例があり、b)維持管理費用のデータが揃っている、ためである。

(1) 社会基盤システムへのモデルの拡張

高速道路システムは複数の構造要素から構成されている。そこで、維持管理費用推計モデルを構築するために、構造要素を維持管理作業・費用発生の特徴に応じてカテゴリー



図3 高速道路システムのカテゴリー

一を単一構造物としてモデル化を行うこととする。

具体的には、図3のようにシステムを舗装部と構造部に分離し、構造部を更に土工・橋梁・トンネルの3つに区分する。カテゴリーごとの維持管理作業の違いを表2に示す。

表2 維持管理作業の有無に関する仮定 (有り=○)

作業\カテゴリー	土工	橋梁	トンネル	舗装
a.維持	○	○	○	×
b.補修	○	○	○	×
c.再構築	×	○	×	○

維持作業は構造部カテゴリーに共通である。舗装は「維持・補修作業は行われず再構築される」という性質を持つ構造物と見做す。橋梁は「補修、再構築ともに行われる」構造物と定義する。

(2) 高速道路システムへの適用

(a) 構造物存在量サブモデル

整備履歴データ、各構造物の使用不能確率 $\delta(a)$ を用いて $Q(t,a)$ 、 $D(t)$ を推計する。

$\delta(a)$ の母数は表3のように設定する。道路橋梁については国内の調査事例が無いため、イリノイ州の道路橋調査による実績値²⁾を用いる。舗装の μ はJHの維持管理作業計画³⁾を参考にしているが、 σ については資料が無いことや、JH 予算が急激な工事量の変化を生じない年度制であることを考慮し、現況再現性が高くなるように値を決定している。

表3 カテゴリー別の使用不能確率の μ 、 σ

	橋梁	舗装
使用限界平均 μ (年)	53	12
標準偏差 σ (年)	5	2

(b) 純維持管理費用サブモデル

図4に東名・名神高速道路の純維持管理費用実績値を、単位長(km)あたり、1990 年価格に換算して示す。図のように、JH における純維持管理費用は、a.維持管理費 (清掃・照明・点検など) と b.改良工事費

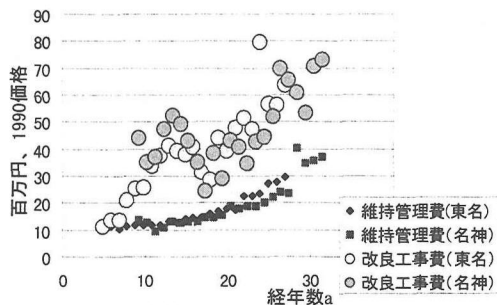


図4 純維持管理費の実績値の推移

(機能付加・補修)に分けて集計されている。それぞれは本論での、a.維持、及び、b.補修に対応する。

a.維持:純維持管理費用関数 $C(a)$ のうち、維持の部分 $C_1(a)$ は、

$$C_1(a)=f(p,fr) \cdots \cdots (7)$$

p: 自然発生的な営力、fr: 人為的な使用頻度で説明されると仮定する。実際のデータに基づく解析の結果、pに供用開始からの平均経過年数、frに累積走行台[※]を用いて1次関数形モデルfを推定し、表4に示すように統計的に有意な結果を得ている。

表4 維持費用モデルの推定結果

説明変数	パラメータ	t 値
累積走行台 [※]	1.85×10^{-2}	2.0
平均経年数(年)	0.588	3.2
定数項	3.28	2.0
サンプル数 46 自由度調整済みR ² 値 0.88		

なお、平均経年数は各道路区間の経年数の道路区間長による重み付け平均を、累積走行台[※]は各年度の自動車総走行台[※]のデータ⁴⁾を用いて求めている。この結果を元に、各カテゴリーの費用曲線を求める。元データが構造物別には集計されていないため、JHの維持管理作業計画³⁾にある平均的な維持作業単価から、重み付けのための補正係数を求める(表5)。

表5 カテゴリー別補正係数

土工	橋梁	トンネル
0.37	1.50	1.13

b.補修:JHの改良工事費には舗装の再構築(打替)費用も計上されているので、舗装実績値資料を用いて、舗装に支出された費用を除いた補修費用を算出する。次に前項「a.維持」で行ったのと同様に、この補修費用について1次関数形モデルを推定し、表6のように有意な結果を得ている。

表6 補修費用モデルの推定結果

説明変数	パラメータ	t 値
累積走行台 [※]	3.58×10^{-2}	1.9
平均経年数(年)	1.45	3.7
定数項	4.63	2.0
サンプル数 33 自由度調整済みR ² 値 0.83		

(c) 再構築費用推定サブモデル

道路橋の再構築は「代替構造物の建設」、「既存構造物の破壊」、「新規建設」という3段階で構成されており、一般的に総工事費用は新規構築費用の3倍といわれている。そこで、橋梁の再構築単価は新規構築費用の実績値⁴⁾の3倍を仮定する。また、舗装の単価は実

績値⁴⁾から求めたものを用いる。それぞれの単価を表7に示す。

表7 カテゴリー別の再構築費用単価

	橋梁	舗装
再構築費用単価 (億円/km、1990年価格)	144	22

構築されたモデルの現況再現性を確認するために、全国的高速道路のデータを用いてG-MTCを求め、実績値と比較したものを図5に示す。数値は比較のため1990年価格にそろえている。計算結果はG-MTC実績値の増加傾向をよく捉えているといえるので、このモデルを用いてシミュレーションを行う。

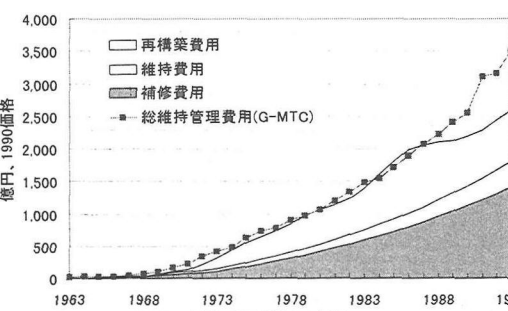


図5 現況再現性の確認

4 シミュレーションによる政策分析

(1) 総維持管理費用 G-MTC の算出

前章を通して構築されたモデルは表8に示す政策変数を含んでいる。これらを含んだ政策シナリオを与え、2070年までのG-MTCを1990年価格で算出する。但し、フレームの政策変数は原単位法でマクロ計量モデル化する。GDPの将来成長率は年率2%で計算している。

表8 政策変数一覧

分類	政策変数
システムに関わるもの	将来の新規建設量
	構造部カテゴリーの構成比率
カテゴリーによって異なるもの	使用不能確率のσ、μ
	純維持管理費用補正係数
	新規建設・再構築単価
フレーム	将来のGDP、人口
	将来の走行台 [※]

A)基本シナリオ(図6):1994年以降毎年同じ延長分だけ整備が行われ、2015年までにJHの基本計画延長が整備されるというシナリオである。構造部カテゴリーの構成比率は第2東名の設計に準拠する。2015年付近でG-MTCが現在の建設費用の水準を超過する。

B)建設集中シナリオ(図7):JH基本計画延長が2005年

までに集中して建設されるというシナリオである。この時、2050 年前後に集中した再構築費用が突出する。

C)橋梁老朽化シナリオ(図8):設計時の想定を越える荷重や交通量のために橋梁の使用限界平均 μ が 40 年になるというシナリオである。この場合、再構築費用の増加が早い時期にシフトする。

(2) 財源不足による機能低下の推計

「維持管理予算の不足により補修・再構築の間に合わない構造物の何割かが稼働しなくなる」状況の評価するために、ある年 t におけるカテゴリー i の稼働率 $A_i(t)$ を定義する。ここに、

$$A_i(t) = \sum_a Q_i(t, a) / \sum_{\tau} I_i(\tau) \cdots \cdots (8)$$

実際に図 3 に示したモデルに適用すると、高速道路システムの稼働率 A_S は、

$$A_S = \{(A_d \times R_d) + (A_v \times R_v) + (A_t \times R_t)\} \times A_p \cdots (9)$$

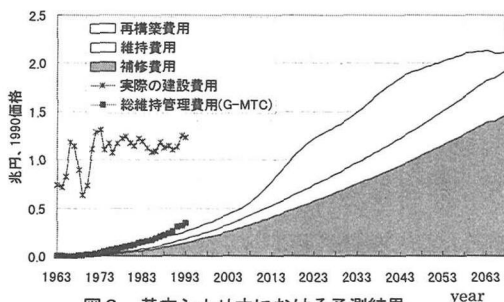


図6 基本シナリオにおける予測結果

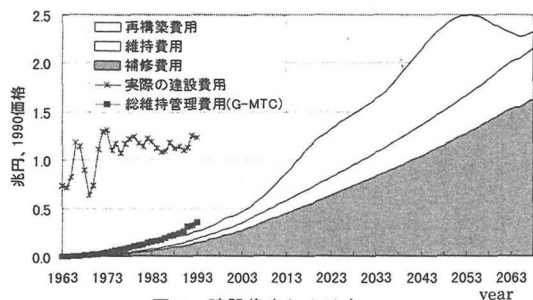


図7 建設集中シナリオ

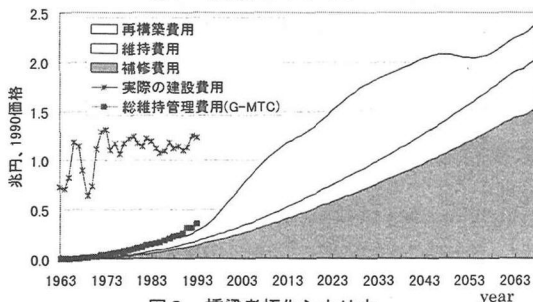


図8 橋梁老朽化シナリオ

ここに、 R_i : 構造部カテゴリー i の構成比率

添え字は、d:土工、v:橋梁、t:トンネル、p:舗装、である。

D)財源不足シナリオ(図9):2015 年以降、再構築費用の支払いが毎年 5%不足すると仮定する。この時、橋梁と舗装の再構築が不可能となり、不稼働状態の構造物が発生する。

不稼働状態の構造物が年々累積することで、システムの稼働率は 2040 年で 9 割を切ることになる。

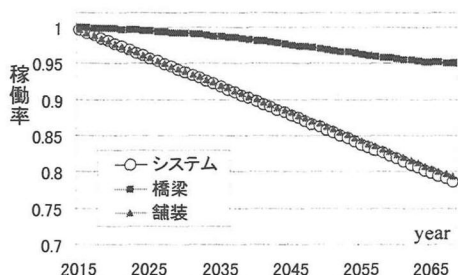


図9 財源不足シナリオによる稼働率の予測結果

5 成果と今後の課題

本研究では、再構築を含めた社会基盤システムの維持管理費用、及び予算不足によるシステムの稼働率低下を長期間にわたってマクロ的に推計する手法を開発した。適用事例として日本の高速道路を選び、新規建設が集中的に実施された場合や、予想より老朽化が速く進行した場合、維持管理予算が不足した場合、についての将来推計を行った。その結果、a)建設と再構築費用の集中に関する同調性、b)再構築需要に対する早い時期からの準備の必要性、c)予算不足に伴う機能低下の傾向が明らかになった。

今後の研究方向としては、a)純維持管理費用不足による使用限界平均 μ の低下の組み込みによる、維持管理費用と再構築需要とのトレードオフの表現、b)稼働率低下に伴う損失額の算出による、維持管理活動の機会費用の計測、を目標としている。

参考文献

- 1) 例えば、山岡、宮本: Bridge management system (BMS) における最適維持管理計画の策定、土木学会第 52 回年次学術講演会 CS-114, pp. 228-229, 1997
- 2) Mitsuru Saito, et. Al: Timing for bridge replacement, rehabilitation, and maintenance, Transportation Research Record No. 1268, pp. 75-83, 1990
- 3) 日本道路公団: 一般有料道路計画調査要綱、1983
- 4) 高速道路調査会: 統計とグラフでみる高速道路、1995