

## 土木構造物の補修・更新投資モデル

Maintenance and Replacement Planning of Infrastructures

黒田 勝彦<sup>\*</sup> 内田 敬<sup>\*\*</sup>

by KURODA, Katsuhiko and UCHIDA, Takashi

The maintenance and replacement planning of existing, mature facilities is discussed. Introducing such new concepts as Deterioration Index, Deterioration Function, Deterioration Penalty, and Allowable Deterioration Level, the problem is formulated as maximizing total net benefits over time subject to dynamic constraints (e.g., equations describing change in physical state of facility due to deterioration and maintenance). Solution of the problem gives the optimal time-series investment policies for maintenance level and replacement. Numerical example of the use of the formulation to optimize the maintenance level and its frequency and the replacement timing of urban highway structure and physical serviceable life span of newly replaced structure are given and discussed.

### 1. 緒言

わが国の社会資本の蓄積は、その伸びが経済成長の伸びに速く及ばない時代が永らく続き、充足率としては依然低い水準にとどまっている。しかし総量としてはかなりの域に達しており、特に高度成長期に大量に形成されたストックが更新期を迎えることから、その維持・補修に要する費用が看過できない水準になりつつある。例えば、社会資本全体の除却率（社会資本ストックの内、耐用年数を過ぎてその年に償却されるストックの割合。社会資本が老朽化した程度を表す）は現在こそ数%程度であるが、政府固定資本形成の伸びが3%の場合で2010年には除却率は30%に達し、伸びが0%とすると70%（これ

は1945年の値に等しい）にも達するという推計<sup>1)</sup>もある。

このような情勢下ではストックの維持を効率よく行わない限りストックの純増は望めない。そのためメンテナンス投資計画に関する研究が精力的に行われており、特に橋梁床版や舗装を対象としたものは多い。

Cady<sup>2)</sup>は床版の劣化の影響を維持費の増大で評価した。Balta et al.<sup>3)</sup>は交通需要量を舗装の状態の関数とし、劣化の影響を利用費用の増大と需要量の減少という点からも評価した。Tsunokawa et al.<sup>4)</sup>は舗装の状態がメンテナンスの実施によって不連続変化を起こすという計算上の不都合を回避するため、roughness trend curve なる連続な近似曲線を用いることを提案している。

ところで今日特に問題なのは、通常はメンテナンスを必要としないはずの躯体が損傷を受け、あるいは寿命を終えようとしている点である。躯体自体

<sup>\*</sup> 正会員 工博 京都大学助教授 工学部交通土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)  
<sup>\*\*</sup> 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

を対象とした経済分析モデルと舗装を対象としたものとは、劣化の評価方法において異なる。なぜなら舗装の場合は劣化により走行費用の増大等の直接的な影響を受けるのに対し、躯体の場合は劣化の極限状態として使用不能状態にならない限り、何ら直接的な影響は生じないからである。しかし躯体を対象とした研究は少ない。黒田<sup>5)</sup>が補修及び更新費用を構造物の年齢に対する増加関数とすることにより、補修及び劣化を考慮した場合の、構造物の更新時期決定モデルを定式化し、またKhan et al.<sup>6)</sup>が補修費用を年齢の増加関数とすると共に、構造物の状態と日常的な維持活動に要する費用を結び付け、決定理論によって構造物の状態が不確実な場合の、補修行動選択モデルを定式化した例があるくらいである。

本モデルも経済分析の手法により躯体を対象とした補修・更新投資行動を評価しようとするものである。本モデルでは劣化指数や劣化費用等の概念を新たに導入し、構造物の劣化の評価を従来とは異なった方法で行う。

## 2. メンテナンスと耐用年数

まず、本モデルが対象としている「メンテナンス」および、メンテナンスと密接な関連がある「耐用年数」について、その一般的な内容をまとめておく。

構造物が、時の経過と共に変化(劣化)していくことに対してとられる行動を、総括的に「メンテナンス」あるいは「維持・管理」と呼ぶ。管原<sup>7)</sup>は「メンテナンス」には、狭義、広義2つのそれがあるとし、

狭義：物理的耐用年数が機能的または経済的耐用年数より短くならないように維持する。

広義：機能的または経済的耐用年数を延ばすことも含む。

と定義している。また野沢<sup>8)</sup>は、メンテナンスを「構造物の当初設定された機能を維持するために行われる業務」とした上で、「メンテナンス」の内容として次の6つを挙げている。

- ①検査：定期的点検、臨時調査等。
- ②維持：計画時から手当を必要とされる業務。
- ③補修(修繕)：計画時に想定しなかった事象によって発生した損傷を回復させる業務。

- ④取替え：当初計画と同等程度の構造への更新。
- ⑤改良：当初計画の機能を上回る機能に強化した構造に改良する業務。
- ⑥廃棄：構造物を撤去し、原状に戻す業務。

一方耐用年数の概括的な意味は次の通りである。

土木構造物も物理的な存在であり、かつ使用目的を持っている以上、存在し得る限界がある。限界に達したときに、結果としてわかる、その施設の存在していた期間の長さを指して寿命と呼ぶ。寿命は結果としてわかるものだが、この一つの目安として設計時に予定されるのが耐用年数である。

通常用いられている耐用年数を含む語及びその一般的な定義は次のようなものである。

### ①物理的耐用年数

通常の維持修繕を加えても使用に耐えなくなるような年数<sup>8)・9)</sup>。また補修を行う場合と新規に造り直す場合との経済的な得失を比較することによって算出されることがあり、これを特に「経済的な観点からみた物理的耐用年数」と呼ぶ<sup>10)</sup>。

### ②経済的耐用年数

経済的により強力な競争相手が出現し、コストの引き合わなくなるまでの期間<sup>8)</sup>。

### ③機能(社会)的耐用年数

情勢の変化によりそのものが持つ機能が不要になってしまい廃棄されるまでの年数<sup>8)・9)・10)</sup>。

### ④計画耐用年数

費用と収益の関係から決定され、最低限この間は構造物を維持しなければならないとされる期間<sup>10)</sup>。

### ⑤設計耐用年数

設計時に外力等を規定するための条件として用いられる耐用年数。物理的耐用年数が用いられる<sup>10)</sup>。

### ⑥法定耐用年数

税法や会計法に設定されている耐用年数。

メンテナンスと耐用年数は相互に決定し合う関係にあり、それぞれを単独に決定し得るものではない。しかし従来は簡単のために純物理的耐用年数のみを考え、これを与件として効率的なメンテナンス計画を検討していた。したがって考慮されるメンテナンス行動もさきに挙げた①～③に限られている。

本モデルではメンテナンスの実施により耐用年数自体の最適化を図ろうとする立場から、広義のメンテナンスを考える。また、純粋に物理的に決定される寿命を物理的寿命とし、その予測値としての物理的耐用年数＝設計耐用年数のみを条件として扱う。そして上記のような分類には従わずに、構造物の耐用年数は経済的な検討により統合されたものが与えられるものとする。

### 3. 劣化の評価

#### (1) 構造物の劣化現象

劣化現象のもたらす影響は次のような要素に分けて考えられる（「既存橋梁の耐荷力と耐久性」<sup>11)</sup>を参考にアレンジした）。

- 1) 耐用性：構造物の安全性と使用性とを総合した利用可能性。
- 2) 構造物の安全性：構造物の耐荷力と耐久性の満足度とを総合した構造物の健全度。
- 3) 耐荷力：構造形式、断面諸元、材料強度等に基づく、ある時点での耐荷能力。
- 4) 耐久性：耐荷力的要素を含まない構造材料本来の性能の持続能力。
- 5) 使用性：構造物の使用目的からみたときの利用の容易さ。

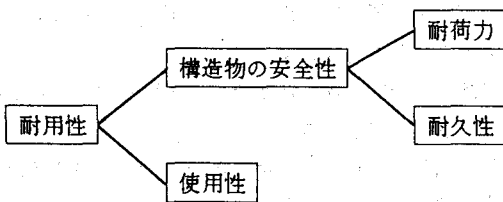


図1 劣化の評価項目の階層構造

構造物の劣化現象は、鋼構造の場合は疲労現象が支配的である。土木構造物の場合疲労寿命の大部分はマクロ的な亀裂の進展に費やされている<sup>12)</sup>。したがって、点検による疲労程度の予測が可能である。一方コンクリート構造の場合の主要な劣化現象はコンクリートのひび割れと鉄筋の発錆であり、ひび割れが劣化度判定の有効な指標となる。RC床版の場合はそのほかに、たわみも劣化度判定に有効であることを前田ら<sup>13)</sup>が示している。

#### (2) 劣化指数

構造物の劣化の程度を推測するのは困難で、疲労亀裂やひび割れは一つの指標に過ぎない。しかしこれらの指標から同種の構造物において共通な、正規化された指標を設定すれば、他の構造物との比較が可能となろう。そのことによって劣化度推測の負担が軽減され、データの蓄積も図られる。本研究では、そのような指標として劣化指数という概念を提案する。劣化指数は劣化の影響を考慮した耐用性の指標である。そして構造物の耐用性・耐荷力・耐久性・使用性は相互に一意的に対応づけられ、劣化指数がその指標となるものと仮定する。

劣化指数 $\alpha$ は、変域が $[0, 1]$ で、その値が大きいほど劣化の程度が甚だしいことを示す確率変数と定義する。すなわちその値が0.0のときはまったく健全で、値が1.0のときは完全に劣化して崩壊状態にあることを示すものとする。年齢と劣化指数の期待値を対応づける非減少関数を劣化関数と呼ぶ。劣化関数は施設の年齢が0のとき0.0、 $+\infty$ のとき1.0の値をとるものとする。劣化関数の形状は構造物の経時的な劣化パターンを表わす。

#### (3) 劣化関数と設計耐用年数

本モデルでは、純粋に物理的な耐用年数を条件として用いることとした。設計耐用年数は、その構造物の物理的寿命の予測値であるから、設計耐用年数の本モデルでの取扱を劣化関数と関連させて明らかにしておく。構造物がある時点で物理的な状態としてそれ以上の利用が不可能と判断されるのは、劣化の程度が使用性や安全性の上から規定される許容し得る値を上回ったからと考えられる。つまりその瞬間、その構造物の劣化指数の値は、許容し得る劣化指数の値の上限 $\alpha_{max}$ （許容劣化度）に達している。したがって、予測としての劣化関数は、年齢が設計耐用年数に一致するときに $\alpha_{max}$ の値をとる。このようにして設計耐用年数は、劣化関数を同定する際の一つの条件として扱う。

#### (4) 劣化費用

構造物本体はたとえ劣化したとしても通常はその利用になんら不都合を与えない。そのため土木構造物の場合は、メンテナンスフリーとして扱い、災害等によって実際に破壊したならば復旧するという方法を取る例が多い。しかしこの方法は、過大な安

全率を確保しがちであり、また災害復旧のために不意の巨額な投資を必要としかつ施設の継続的な利用が不可能となることから経済的に決して得策ではない。そこで劣化に伴う経済的ペナルティを設定して、更新も含めたメンテナンスの経済的な検討を行う必要がある。更新を含めて検討するならば、それは同時に構造物の耐用年数を決定することとなる。

劣化に伴う経済的ペナルティをここでは劣化費用と呼ぶ。劣化に対する評価は、社会的要請（多くは需要）によって異なるので、劣化のペナルティは需要に依存して定まるものがよい。また構造物にメンテナンスを行うのは、何も行わないでいると構造物が破損する危険性が高まるからと考えられるので、構造物の破損確率に比例しなければならない。そこで劣化費用として“利用阻害による逸失便益”を考える。ここに言う利用阻害は、構造物の劣化に起因する構造物の損傷による利用阻害状態を指す。

逸失便益LBは次式のように定義する。なお利用阻害率は、第t期において発生する需要のうち、構造物の劣化によって発生した不都合により、その施設の利用を諦めて代替施設へ回る需要の割合である。

$$LB(t) = RO(\alpha(t)) \times B(t) \quad (1)$$

ここに LB(t): 第t期の逸失便益

RO(α(t)): 第t期の利用阻害率

B(t): α(t)=0と仮定したときの第t期の便益

#### 4. メンテナンス行動の効果

本モデルでは、広義のメンテナンス行為のうち、構造物の劣化指数に影響するもののみを取り上げる。それらをここでは補修及び更新と呼ぶ。

補修とは、現存する構造物に手を加えることにより、劣化指数を低下させるような行動を指す。延命期間（物理的）が $l_e$ の補修を時刻 $t_m$ に受けた構造物は、 $t_m$ 以降劣化指数が低下し、劣化指数の値が $\alpha_{max}$ に到達する時期が $l_e$ だけ遅くなる（図2(a)）。

更新とは、現存する構造物を廃棄して、その代わりに同じ機能を有する構造物を建設することをいう。更新により既存の構造物の劣化指数は強制的に1.0にされ、新たに建設される設計耐用年数 $l_d$ の構造物の劣化関数に置き換えられる。時刻tに行われる更新行動により劣化関数は図2(b)の様になる。

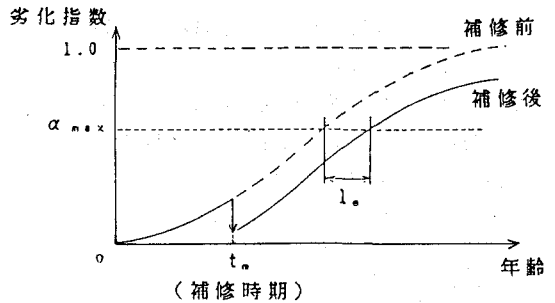


図2(a) 平均劣化曲線に対する補修の効果

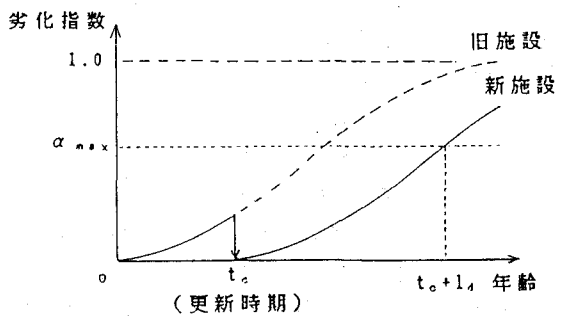


図2(b) 平均劣化曲線に対する更新の効果

#### 5. 問題の定式化

補修・更新投資決定モデルを定式化するに当たり、以下のことを前提とする。

- ① 評価に用いられる時間の単位を期と呼ぶ。計画期間の長さはLPとする。
- ② 評価基準として、社会的総純便益の現在価値最大化基準を用いる。
- ③ 代替案は各期に行われる行動 $a_t$ のベクトル $A_i$ として表現される。 $a_t$ は、行動の種類と、その程度の組合せで表現される。考慮する行動は‘何もしない’‘補修’‘更新’の3種類である。補修の程度は延命期数 $l_e$ 、更新の程度は設計耐用年数 $l_d$ で表される。 $l_e$ 期に取り得る行動は1つとする。
- ④ 初期条件として、第1期首から $t_{oini}$ 期前に建設された設計耐用年数 $l_{dini}$ の施設が1単位存在する。
- ⑤ 需要は利用費用に対して非弾力的とする。
- ⑥ 不確実性は需要予測と劣化指数について考慮する。
- ⑦ 各期の便益は有無比較により算出する。

⑧各期の費用は図3の手順により算出する。

本研究で考慮する費用および便益は、1)消費者余剰、2)償却費、3)劣化費用の3者である。なお施設によっては使用料が必要なものがあるが、国民経済的立場に立てば、これは自分が自分に支払うに過ぎないので、直接、費用及び便益として考慮する必要はない。

(1)便益 (消費者余剰)

本モデルでは、有無比較による消費者余剰の増分を便益とする。そこで計画の対象とする施設(施設1)には、それを補完する施設(施設2)があり、それぞれの施設に対する需要 $D_{t1}$ 、 $D_{t2}$ の和 $D_t$ と、施設1がない場合の施設2に対する需要は等しく、また両施設に対する支払い許容対価は等しいものと仮定する( $W_1=W_2=WTP$ )。このとき施設 $i$ の平均利用費用関数を $f_{s_i}(D)$ とすると、第 $t$ 期の需要 $D_{t1}$ 、 $D_{t2}$ の下での便益 $B(t)$ は以下のように与えられる。

$$B(t) = (W_1 - f_{s1}(D_{t1}))XD_{t1} + (W_2 - f_{s2}(D_{t2}))XD_{t2} - (W_2 - f_{s2}(D_t))XD_t + f_{s2}(D_t)XD_t - \{f_{s1}(D_{t1})XD_{t1} + f_{s2}(D_{t2})XD_{t2}\} \quad \dots (2)$$

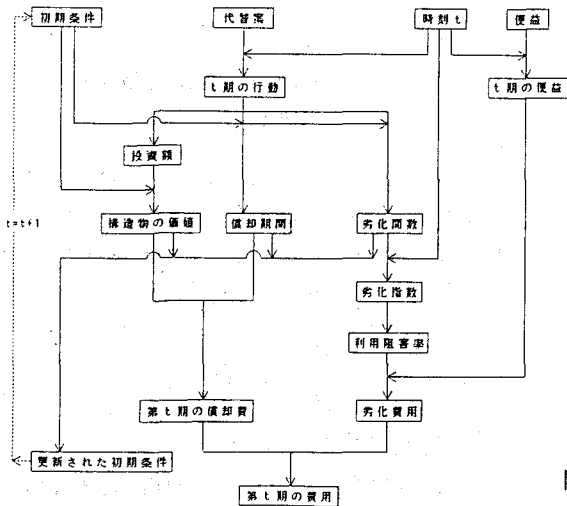


図3 費用算出のフロー

(2)償却費

償却費は每期等価費用として求める。第 $t$ 期の償却費 $RC(t)$ 及び残余価値 $V(t)$ の一般式は次のように表せる。なお各期の償却費は期首に発生するものとする。

$$RC(t) = R(t) / (1+i)^{(t-1)} + V(t-1) \cdot \delta_1 \quad \dots (3)$$

$$V(t) = C(t) - RC(t) \quad \dots (4)$$

ただし  $R(t) = \frac{i(1+i)^{(n(t)+t-1)}}{(1+i)^{n(t)} - 1} C(t) \quad (5)$

$$C(t) = \frac{l_0(l_d)}{(1+i)^{(t-1)}} \delta_1 + \frac{l_H(l_0)}{(1+i)^{(t-1)}} \delta_2 + V(t-1) \delta_3 \quad \dots (6)$$

$$n(t) = l_d \delta_1 + l_0 \delta_2 + (n(t-1)-1) \delta_3 \quad (7)$$

ここに  $RC(t)$ : 第 $t$ 期の償却費

$R(t)$ : 第 $t$ 期の(名目)毎年等価費用

$V(t)$ : 第 $t$ 期の価値

$C(t)$ : 第 $t$ 期の償却前価値

$i$ : 社会的割引率

$n(t)$ : 残余償却期間

$\delta_j$ : 0-1変数 ( $j=1, 2, 3$ )

$\delta_j$ は、第 $t$ 期の行動に従い次のように定義する。

	行動せず	補修	更新
$\delta_1$	0	0	1
$\delta_2$	0	1	0
$\delta_3$	1	1	0

(3)劣化関数

劣化関数の形は次式の成長曲線と与える。

$$\bar{\alpha}(t) = \frac{1 - e^{-At'(t)}}{1 + M^2 e^{-At'(t)}} \quad (8)$$

$$t'(t) = (t'(t-1)+1)\delta_3 - l_0\delta_2 \quad (9)$$

ここに  $\bar{\alpha}(t)$ : 第 $t$ 期の劣化指数の期待値

$t'$ : 建造物の見かけの年齢

$A, M$ : パラメータ

パラメータ $A$ は、その値を変えることにより劣化関数を $t$ 軸方向に伸縮させる効果を持つ。設計耐用年数が $l_d$ であるような建造物は、年齢が $l_d$ のとき劣化指数の予測値が許容劣化度 $\alpha_{max}$ に一致すると考えて、 $A$ を次式のように与える。

$$A = -\frac{1}{l_d} \ln \left( \frac{1 - \alpha_{max}}{\alpha_{max} M^2 + 1} \right) \quad (10)$$

パラメータMは構造物の劣化パターンを規定する。構造物の劣化パターンには①摩耗型②破壊型がある。M<sup>2</sup>の値が小さいときには摩耗型の劣化パターンを示す。M<sup>2</sup>の値が大きくなると次第に破壊型のパターンに近付き、M<sup>2</sup> = ∞ で完全な破壊型となる(図4)。破壊型の劣化関数は、従来の研究<sup>5)</sup>のように構造物の状態として健全か利用不能かの2つの状態のみを仮定する場合に相当する。また破壊型の劣化関数の場合には設計耐用年数内は劣化費用の影響を受けないので、この点からも、本モデルは従来のモデルの拡張となっている。しかし劣化関数は劣化指数の期待値を与えるものであるから、通常は摩耗型になるものと思われる。

なお式(9)から解るように、延命年数leなる補修を行うと、劣化曲線がleだけ右へシフトし $\bar{\alpha} = \alpha_{max}$ の直線と交差するのがleだけ遅くなる(物理的寿命がleだけ伸びる)。つまり補修はあくまで補修であって劣化のパターンを変えることはできないと考える。

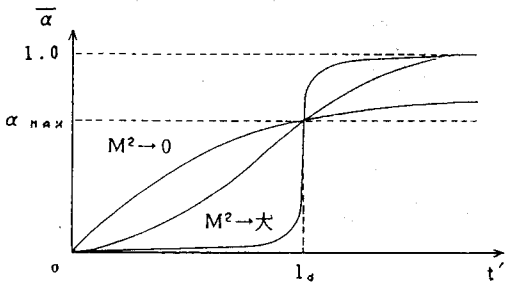


図4 劣化関数の例

(4) 劣化費用

式(1)により、ある一つの $\alpha(t)$ の下での逸失便益LB(t)は定まるが、 $\alpha(t)$ は確率変数であるから、第t期の劣化費用LC(t)は、LB(t)の $\alpha(t)$ についての期待値とする。

$$LC(t) = \int LB(t) \cdot \phi(\alpha(t)) d\alpha(t) \quad (11)$$

ここに  $\phi(\alpha(t))$  :  $\alpha(t)$  の確率密度関数

(5) 目的関数

目的関数は計画期間LP内の総純便益を設定する。

$$TNB(A_i) = \sum_{t=1}^{LP} \left\{ \frac{B(t)}{(1+i)^t} - RC(t, A_i) - \frac{LC(t, A_i)}{(1+i)^t} \right\} \quad (12)$$

今、考慮する行動に改良は含まれないので、上式右辺第1項はA<sub>i</sub>と独立である。従ってTNB(A<sub>i</sub>)の最大化は、総費用TC(A<sub>i</sub>)の最小化と等価であるから、最適解A\*は次のようなものとして定義できる。

$$TC(A^*) = \min_{A_i} TC(A_i) = \min_{A_i} \sum_{t=1}^{LP} \left\{ RC(t, A_i) + \frac{LC(t, A_i)}{(1+i)^t} \right\} \quad (13)$$

6. 適用例

都市間高速道路の高架部を対象と想定して、単純化した上で、本モデルを適用してみる。

(1) 関数形の仮定

a) 需要

需要は施設1と施設2それぞれに対する需要を与えるのではなく、両者に対する需要の合計を与えて、それぞれの施設への配分は、それぞれの施設における利用費用が互いに一致するように分けた。

総需要は時刻tのみによって定まるものとする。需要が正規マルコフ過程に従うとするならば、第t期の需要D<sub>t</sub>は(t-1)期の需要D<sub>t-1</sub>により次式のように与えられる。

$$D_t = \beta D_{t-1} + u_t \quad (14)$$

ここに  $u_t$  : N(0,  $\sigma_t^2$ ) に従う攪乱項

$\beta$  : (成長率+1)

この場合に、D<sub>t0</sub> (t<sub>0</sub> < t) のみが既知であって $\beta$ がtによらず一定とするならば、 $u_t$ は互いに独立な正規変数であることより、D<sub>t</sub>の平均値 $\bar{D}_t$ 及び分散 $\sigma_{D_t}^2$ は次式で与えられる。

$$\bar{D}_t = \beta^{(t-t_0)} D_{t_0} \quad (15)$$

$$\sigma_{D_t}^2 = \sum_{t'=t_0+1}^t \beta^{2(t-t')} \sigma_{t'}^2 \quad (16)$$

b) 平均利用費用

平均利用費用 f<sub>s</sub>(D<sub>t</sub>) は走行費用、時間費用と通行料の和とする。

$$f_s(D_t) = \frac{L}{V_t(D_t)} X60XTVX P + C_R X L + CH \quad (17)$$

- ここに L：走行距離(km)
- $V_t$ ：平均速度(km/h)
- TV：時間価値(円/分・人)
- P：1台当りの平均乗車人数(人)
- $C_R$ ：平均走行費用(円/km・台)
- CH：通行料(円)

需要と平均速度の関係は交通工学ハンドブックの図14)を参考にして次式のように与える。

$$V_t(D_t) = (2 - \exp[-(a/365 \cdot N \cdot ADT)D_t])V_D \quad (18)$$

- ここに N：車線数
- ADT：設計基準交通量(台/日/車線)
- $V_D$ ：設計速度(km/h)
- a：パラメータ

c)利用阻害率

利用阻害率は、構造物の判定区分が5段階程度である<sup>15)</sup>ことを考慮して、ファジィデータを恣意的に与え、線形回帰により劣化指数と利用阻害率の関係を与えた。

d)建設費関数・補修費関数

建設(更新)費を規定する変数は、設計耐用年数  $l_d$  だけと考える。設計耐用年数には、構造として成り立つ以上はゼロでない下限値  $l_{d0}$  が存在するであろう。またあまりに長い設計耐用年数は建設費が過大となる。そこで建設費関数  $l_c(l_d)$  を次式のように定める。

$$l_c(l_d) = \begin{cases} l_{c0} & (l_d < l_{d0}) \\ l_{c0} \times \exp[BX(l_d - l_{d0})] & (l_d \geq l_{d0}) \end{cases} \quad (19)$$

ここに  $l_{c0} = l_d = l_{d0}$  の場合の建設費

B：パラメータ

補修費  $l_m$  は建設行動と補修行動の類似性に着目し、式(19)を利用する。ただし補修費の決定変数は延命期数  $1e)0$  で、補修費は建設費よりも割高とする。

$$l_m(l_d) = RRX l_{c0} \times \exp[BX(1e - l_{d0})] \quad (20)$$

ここに RR：割増し係数

(2) 計算結果の検討

劣化費用導入の効果を検討するため、行動の集合を表1の様に設定したうえで、劣化関数のパラメータMの値を変えて最適解を求める。パラメータMは

劣化のパターンを規定すると同時に、その値を無限大にすることにより、劣化費用を考慮しないモデルと等価にする働きを持つ。他の定数やパラメータの値は適宜与える。なお建設費関数は、償却費だけを考えてときには行動②が最適解になるように与え、初期条件として残存寿命3期の構造物が現存するものとする。計算結果を表2に示す。

a)ケース1

行動集合の内、補修を考慮の対象から外して最適解を求めた。この場合、既存構造物の残存寿命が3期あるので、劣化費用を考慮しなければ第3期までは何も行動を行わないはずである。また仮に更新するならば償却費の点で有利な行動②を選択するであろう。計算結果を見ると、 $M=1 \times 10^{30}$ (劣化費用の効果がほぼ無視できる)のときには、そのような結果となっている。Mの値が小さくなる(年齢に対して劣化の程度が甚だしくなる)と、1)頻繁に投資してでも破損確率(劣化費用)を低下させた方が経済的であり、2)償却費を最小にする行動(②)が必ずしも最適な行動ではない、という結果となっている。

b)ケース2

補修も含めて表1に挙げた全ての行動を考慮した場合がケース2である。この場合も  $M=1 \times 10^{30}$  の時は行動②が償却費の点で有利であるのでケース1と同じ解になっている。それに対してMの値が小さいときは頻繁にメンテナンスを行うという点ではケース1と同様であるが、劣化の程度があまり甚だしくない場合は、補修によって劣化指数の低下を図ろうとする傾向がある。

表1 行動集合

行動番号	0	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
行動の種類	—	更新			補修			
行動の程度	—	3	5	8	10	1	2	3

表2 最適解

		ケース1	ケース2
M	0.0	①①①①②	④⑤⑤⑤⑤
	10.0	②0①④0	⑦⑦0⑥⑤
	$1 \times 10^{30}$	000②0	000②0
期		1 2 3 4 5	1 2 3 4 5

## 7. 結語

本研究で提案したモデルは、劣化指数及び劣化費用の概念を用いることによって次のような特徴を有することができた。

- ①従来のモデルでは、構造物は機能するか否かの2つの状態しかないと仮定していたが、本モデルでは機能は徐々に低下するものとして扱う。
- ②劣化の影響を維持投資額の増大として評価するだけでなく、構造物が劣化することのみによっても費用(劣化費用)が発生すると考えて評価する。
- ③構造物の寿命をモデルに内生化し、かつ、構造物の補修・更新の繰返し回数を制限することなく考慮することができる。
- ④計画期間内の償却費を明確にすることにより、若干の手直しにより既存施設のみならず、新規に建設する時点からを対象とすることが可能であるため、施設を構造物の系列と捉えた場合の、施設の全ての局面に対し適用が可能である。

本モデルはあくまでも概念モデルであり、直ちに

利用が可能というわけではない。しかしそれゆえに、さまざまな対象への適用を図るだけの自由度を有している。また維持・管理の分野における研究が余り進んでいない現在、まず概念的な方向づけを行うことは、実証的な研究と全く同様に重要であると思われる。

最後に本研究では扱いきれずに、今後に残された課題を挙げておく。

- ①本モデルでは、更新により建設される新構造物の施設規模は旧構造物の場合と同様とした。しかし需要の変化を考慮するとき、規模の変更も行動の一つとして扱えるようにしなければならない。この際に、規模の拡大は段階建設の考え方<sup>16)</sup>を援用することにより比較的簡単に対処できようが、需要が減退することが予想される場合に必要規模の縮小については、その扱いに苦慮しそうである。
- ②現実の施設を対象とするには単一施設を対象としたものから、直列システムやさらに冗長システムを対象とするものへの拡張をはからねばならない。

## 参考文献

- 1)坂井順行：国富および社会資本ストックの推移と維持管理問題，土木学会誌，1983-10
- 2)Cady, P. D.: Bridge deck rehabilitation decision making, Transportation Research Record 1035.
- 3)Markow, M. J. and Balta, W. S.: Optimal rehabilitation frequencies for highway pavements, Transportation Research Record 1035.
- 4)Tsunokawa, K. and Schofer, J. L.: Dynamic model for optimizing the timing and intensity of highway pavement maintenance, Proceedings of 10th WCTR, 1986.
- 5)黒田勝彦：都市高速道路の設計荷重と耐用年数評価における信頼性概念の導入に関する研究 2. 道路橋設計耐用年数と維持・更新に関する経済的評価，阪神高速道路公団・(財)システム総合研究所，1987.
- 6)Khan, A. M. and LaFontaine, P.: The management of highway infrastructure rehabilitation: a forward look, Proceedings of 10th WCTR, 1986.

- 7)菅原 操：メインテナンス—今後への展望，土木学会誌，1979-10.
- 8)野沢太三：メインテナンスの経済的側面，土木学会誌，1979-10.
- 9)村上 温：維持管理と施設寿命，土木計画学シンポジウムNo. 17, 1983.
- 10)小堀為雄：耐用年数の定義，土木学会誌，1983-10.
- 11)土木学会関西支部：既存橋梁の耐荷力と耐久性，1985.
- 12)三木千寿：鋼構造の耐用年数，土木学会誌，1983-10.
- 13)前田幸雄・松井繁之：道路橋RC床版のたわみによる劣化度判定法に関する研究，土木学会関西支部，1983-2.
- 14)交通工学研究会：交通工学ハンドブック，1973.
- 15)小村 敏・太田 実：新大系土木工学36コンクリートの維持・補修・取壊し，技報堂出版，1983.
- 16)長尾義三・森杉寿芳・吉田哲生：非弾力性需要のもとにおける段階建設について，土木学会論文報告集，No. 250, 1976.