

維持・補修を考慮に入れた橋梁の ライフサイクルコストの評価について

信州大学大学院 ○高澤 和典*

株式会社 大林組 多田 栄一**

信州大学 小山 健*

by Kazunori Takasawa, Eiichi Tada and Ken Koyama

我が国では、高度成長期に建設された土木構造物が、主として経済的または社会的な耐用年数の終わりに近くなっている現状であると考えられさまざまな維持管理および補修計画が必要になってきている。したがって、適切な維持管理および補修計画・対策がコスト・マネジメントの観点および資源とエネルギーの節約または社会資本の適正管理といった面から、今後とも重要な問題になるように思われる。

本研究は、これらの観点から、土木構造物のなかでも、特に橋梁構造物を対象として、一般に橋梁に必要とされている耐用年数間にかかる維持・補修に関するライフサイクル・コストの評価に関して、シミュレーションモデルを作成し、維持管理・補修計画に対する定性的な経済性比較を行った。

【キーワード】 補修計画，ライフサイクルコスト，経済性評価

1. まえがき

現在、多くの土木構造物において損傷の発生が報告され¹⁾、それに伴う維持、補修費も増加の一途をたどっている。一方、高度成長期に比べて新設構造物の整備速度が低くなった現状においては、既設構造物を維持、補修^{2)~8)}によって出来るだけ長期にわたって使用することが重要なことと考えられる。このためには、構造物の寿命、つまり構造物が現在どのような状態におかれていて、今後、どのような状態へ変化していくのかを正確に把握することが不可欠である。また、日本は降雨や降雪が多く、しかも世界的に有数の地震国であるため、取り替え、補修を行う必要のある土木構造物が絶えず発生してくる。³⁾このような問題点について本研究は、数ある土木

構造物の中から特に橋梁に対して、その取り替え(Replacement)と補修(Rehabilitation)のシミュレーションを設定してその経済性評価を行い、今後の補修(維持、管理)業務の政策を考えていくものである。

2. 土木構造物の経済性の評価方法

一般に、土木構造物の耐用期間における経済性を評価するためには異なる時点における収益や費用を同一の時点での価値に換算して比較することが必要で、⁹⁾開発期間や耐用期間が異なるいくつかの代替案の評価の比較に用いられる。(表-1、図-1 参照)

本研究ではその評価方法として以下のような代替案の比較によって行うことにした。¹⁰⁾

(1) いつかは取り替えを行う既設構造物の余儀なき理由による(Force Account)補修

(2) いつかは取り替えを行う既設構造物の契約

*工学部社会開発工学科 Tel:0262(26)4101

**株式会社 大林組 Tel:0762(78)7040

表-1 基本的価値換算係数

価値換算係数	式
現価係数	$(P/F, i, n) = (1+i)^{-n}$
資本回収係数	$(A/P, i, n) = i(1+i)^n / \{(1+i)^n - 1\}$

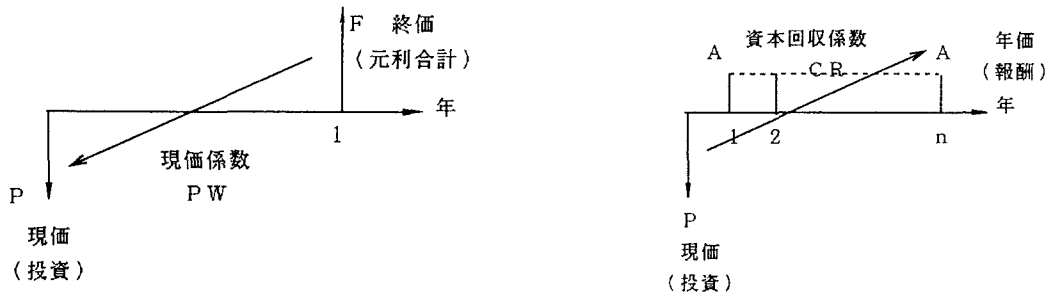


図-1 価値換算係数の関係図

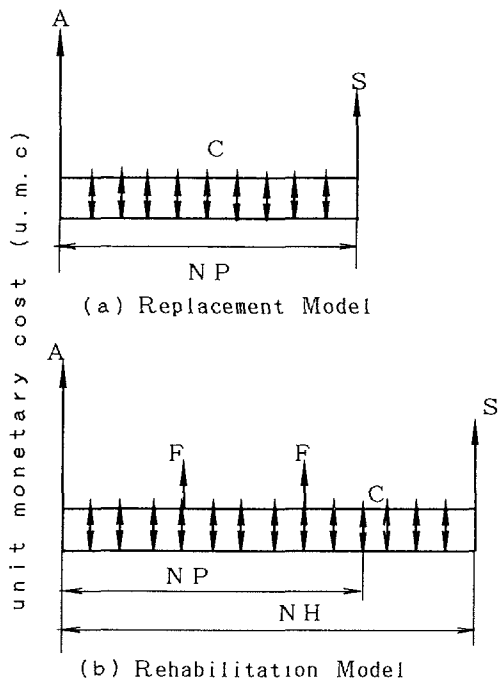


図-2 資金流れ図

に入力するパラメーターであるために最初に評価を行う。つまり(1)と(2)の補修の代替案を比較評価して費用の安い方を(3)の取り替えの代替案と比較する。ただし、本研究では、(1)と(2)の区別はしないものとし、取り替え、補修の代替案の比較と評価は、次のようなVM値(Value Management Term)¹⁰⁾によって行う。

$$(VM値) = (\text{取り替え費用}) - (\text{補修費用}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

本研究では、このVM値がその土木構造物を取り替えるべきか、補修するべきかを判断する比較指標となる。具体的には、 $(VM値) > 0$ のときは取り替え費用の方が高いので、その既設構造物の維持、補修をした方が有利だということになり、逆に、 $(VM値) < 0$ のときは、補修費用の方が高いので、その既設構造物に見切りをつけて新しく構造物を建設した方が有利だということになる。

次に土木構造物の耐用期間において補修業務にかかる費用を、毎年均等に返済すると仮定した場合の単年における費用(Life Cycle Cost)のことをEUAC(Equivalent Uniform Annual Cost)と定義する。¹⁰⁾

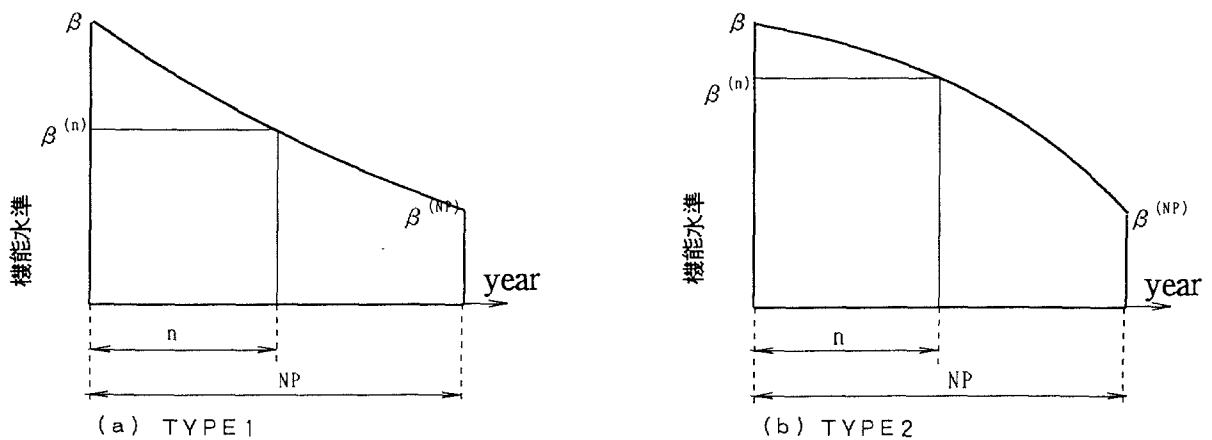
本研究で対象とする経済性評価モデルとして、取り替え(Replacement)と補修(Rehabilitation)の2通りの代替案と資金流れ図を図-2に示した。

この図で用いられている記号は以下のものである。

(Contract) による補修

(3) 直ちに行う構造物の取り替え

(1)と(2)は、補修の代替案で、最終的な取り替えを含んでいる。(3)は、取り替えの代替案で、(1)と(2)



図－3 構造物の劣化状況パターン

- A : 建設時の初期費用
 S : 撤去費用
 F : 不定期に生ずる補修費用
 C : 毎年必要な維持、管理費用
 (清掃、塗装など)
 NP : 構造物の耐用年数
 NH : 補修によって維持できる年数

3. シミュレーションモデルの設定

構造物は、建設時から時間の経過とともに劣化が始まる。また、劣化の状況も様々なパターンがある。⁸⁾ その劣化の状況を数値仮定することにより機能水準を考慮した評価を行うことにした。

本研究では、図－3のような2種類の劣化パターンを仮定して評価していく。2種類の劣化とは、建設後すぐに劣化が始まるタイプと建設後何年か後に急に劣化が始まるタイプである。前者をTYPE1として式(2)、後者をTYPE2として式(3)で表す。建設時点の土木構造物の機能水準を β 、建設時からn年後の機能水準を $\beta^{(n)}$ として次のような式を仮定する。

$$\beta^{(n)} = \beta \cdot \exp(-\alpha \cdot n / NP) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta^{(n)} = \beta \cdot (11 - \exp(\alpha' \cdot n / NP)) / 10 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、n : 経過年数、 α 、 α' : 定数、である。

本研究では、式(2)において $\alpha = 0.5^{11)}$ として計算を行った。このとき、 $\beta^{(NP)} = 0.607\beta$ である。この $\beta^{(NP)}$ がほぼ等しくなるように式(3)で α' を求める

と、 $\alpha' = 1.6$ となる。これらの機能水準に基づいて次の2つの方法で比較していくことにする。

- (1) 橋を建設して耐用年数がきたらそのまま撤去する。 (EUAC_{REP})
 (2) 橋の補修をして少しでも長持ちさせる。 (EUAC_{REH})

いま(VM値)をEUACを用いて表すと次式のようになる。

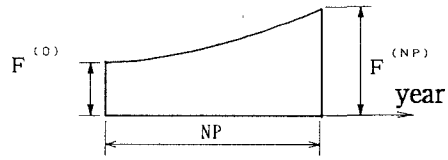
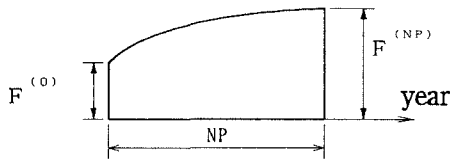
$$(VM値) = (EUAC)_{REP} - (EUAC)_{REH} \quad \dots\dots\dots (4)$$

4. シミュレーションモデルの条件

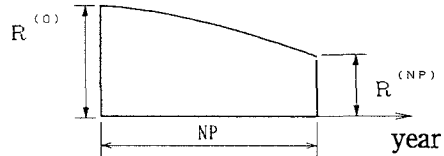
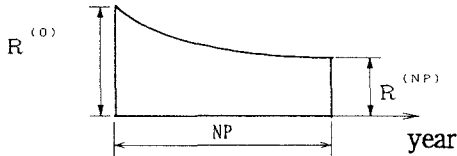
3. で設定したシミュレーションモデルには多くの変数が用いられ、その変数は予測、予期されにくい。また、補修を行う時期も予測しにくい。そこで橋梁の故障の分布がポアソン分布に従うとき、故障時間の分布は指数分布に従うことを用いて疑似乱数を発生させて疑似状況を仮定することによって計算することにした。そのためこの状況は、それぞれのシミュレーションのみ妥当であって現実の問題とは多少かけ離れてしまう可能性を多分に含んでいるが、本研究では、次に述べるような値を用いて計算を行いその違いにより結果にどのような影響を及ぼすのかを定性的に調べていくことにする。

- (1) 利率 i について

補修費増加曲線



回復率減少曲線



(a) TYPE 1

(b) TYPE 2

図-4 補修の費用、回復率の変化

あまり大幅な金利の上昇（インフレーション）が見込まれることは、考えないことにして、利率 $i=0.03\sim0.07$ の範囲で考えることにする。

(2) 費用について

土木構造物の規模などにより多種多様にある費用額の定量的な扱いは避けて、初期費用 A を基準とし、その他の費用は $A=1$ に対しての比で表すこととし、以下のように仮定した。これは、結果の理解を容易にするためである。

初期費用 : $A=1.0$

撤去費用 : $S=0.5$

毎年必要な維持管理費用 : $C=0.02$

(3) 耐用年数

土木構造物の特にコンクリート橋における耐用年数は、大蔵省令による法定的耐用年数によると、一般に40~50年と考えられるので、本研究では耐用年数 NP として大まかに40~80年程度と考えた。⁴⁾

(4) 不定期に生ずる補修を行う年数の発生

予想しにくい補修を行う年数は、疑似乱数を発生させ指数分布を用いて決定する。そのときの期待値(AVK)は $AVK=10, 20$ として計算を行う。 $AVK=10$ とは、10年に1度比較的大規模な補修を行うということ

を意味する。

(5) 不定期に生ずる補修費用と機能水準の回復率

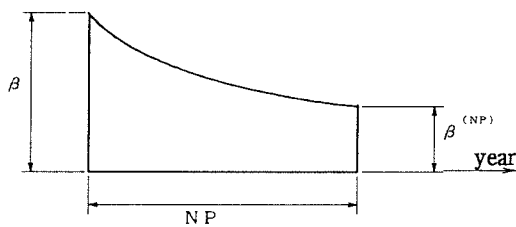
橋梁の補修について考えると橋の長い一生において、補修に関する費用、回復率は変化していくものだと考えられる。橋の劣化の進んでいない早い時期に補修すれば、補修費は少なくて済むであろうし、また劣化の進んだ遅くには多くを必要とするであろう。回復率についていえば、劣化の進んでいない早い時期には補修をすれば、高い回復率が期待できるであろうし、劣化の進んだ遅くでは低い回復率しか期待できないであろう。このように補修に関する費用、回復率は、補修を行う時期によって変わってくると考えられる。このことを踏まえてシュミレーションを行う。2種類の劣化のタイプのそれぞれの補修の費用、回復率の変化を図-4にのせた。

建設まもなく補修をしたときの補修費、回復率を、 $F^{(0)}, R^{(0)}$ 、 N 年たったときに補修をしたときの補修費、回復率を、 $F^{(N)}, R^{(N)}$ とするとTYPE1, TYPE2での補修費増加曲線、回復率減少曲線を表す式は以下のようになる。

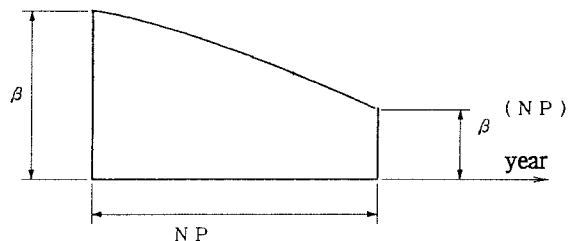
TYPE 1:

$$R^{(N)} = R^{(0)} \cdot \exp(-\ln(R^{(0)}/R^{(NP)}) \cdot n/NP) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$F^{(N)} = F^{(0)} \cdot (9 + \exp(\ln(10 \cdot F^{(NP)}/F^{(0)}) \cdot n/NP)/10 \quad \dots\dots\dots (6)$$



(a) TYPE1



(b) TYPE2

図-5 資金流れ図と橋梁の劣化状況図

TYPE 2:

$$R^{(n)} = R^{(0)} \cdot (1 - \exp(\ln(1 - 10 \cdot R^{(NP)} / R^{(0)}) \cdot n / NP)) / 10 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$F^{(n)} = F^{(0)} \cdot \exp(\ln(F^{(NP)} / F^{(0)}) \cdot n / NP) \quad \dots\dots\dots (8)$$

補修モデルの場合においてどの程度の補修費用 F をかけるかは、補修する時の補修費増加曲線に基づいて決定するが、ここでは $F^{(0)} = 0.1$, $F^{(NP)} = 0.1$, $0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ と仮定した。補修によって土木構造物の機能水準が、前回の補修時、または建設時に対してどの程度まで回復できるかは事実上は不明であるが、ここでは、 $R^{(0)} = 100\%$ とし $R^{(NP)} = 70\%$ と仮定した。

ここでいう回復率とは、補修によって土木構造物の機能水準が、前回の補修時、または建設時に対して劣化によって機能水準の値が減少した分の何%程度回復するかを示すものとする。

5. シミュレーションモデルの計算例

(1) 補修期間の発生方法¹¹⁾

橋梁の故障の分布がポアソン分布に従うと仮定する。その場合、故障時間の分布は指数分布に従う。ここで、指数分布の期待値を $1/k$ ($1/k$ 年に 1 度補修が必要になる) とおくと、 t 年間で橋梁の故障が x

回発生する確率 $P(x)$ は、

$$P(x) = \frac{(kt)^x}{x!} \cdot e^{-kt} \quad \dots\dots\dots (9)$$

であるので、補修の発生年間隔を t とすると、 t 年以内に橋梁の故障が 1 度も発生しない確率は、式(9)で $x=0$ とおいて、

$$P(0) = e^{-kt} \quad \dots\dots\dots (10)$$

である。従ってその余事象を考えると、 t 年以内に橋梁の故障が起こる(補修が必要になる)ということであり、その確率 $P'(t)$ は、

$$P'(t) = 1 - P(0) = 1 - e^{-kt} \quad \dots\dots\dots (11)$$

これから t を求めると次のように得られる。

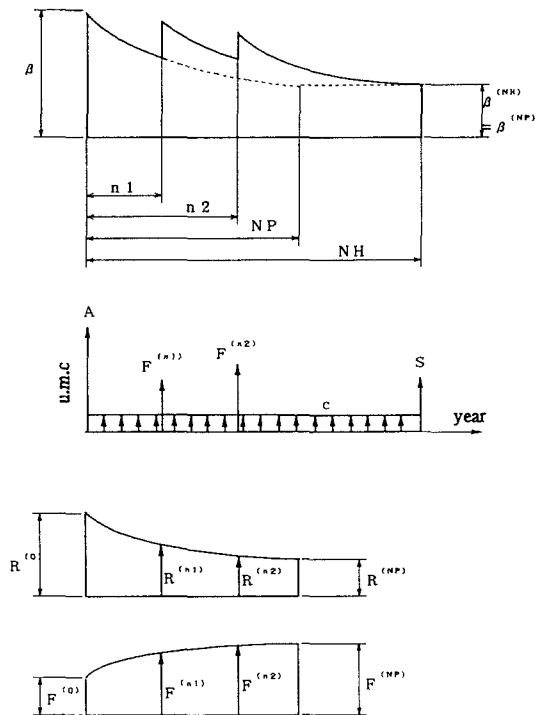
$$t = -\frac{1}{k} \cdot \ln(1 - P'(t)) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $P'(t)$ は一様乱数を発生させることにより得られる。ただし $AVK = 1/k$ で表される。

(2) 取り替えモデル (EUAC_{REP})

この取り替えモデルは、設計時に決めた耐用年数 NP がきたら、直ちに取り替え作業を行うモデルである。すなわち橋梁の機能水準が、 $\beta^{(NP)}$ になった時に取り替え作業を行うというモデルである。そして、費用の面では、初期費用と撤去費用それに清掃、塗装などの毎年行う補修以外は費用をかけないというモ

TYPE 1



TYPE 2

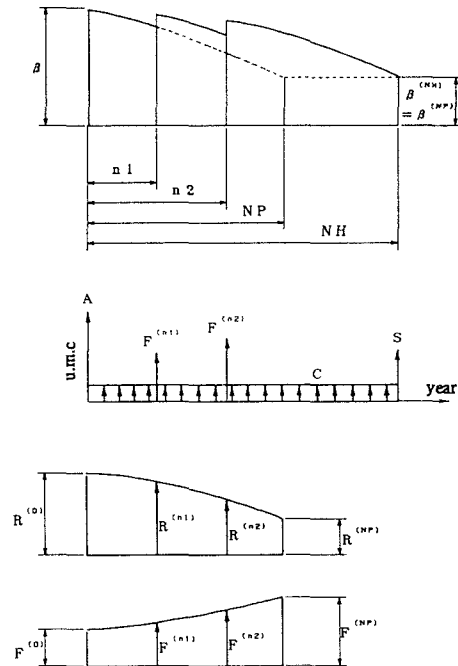


図-6 補修モデルの資金流れ図と橋梁の劣化状況図

デルである。

このモデルの資金流れ図と橋梁の劣化状況を、図-5で表す。

これより、取り替えモデルのEUACを示すと次式のようにになる。

$$EUAC_{REP} = (A/P, i, NP) \times (A + S \times (P/F, i, NP)) + C \quad \cdots (15)$$

(3) 補修モデル (EUAC_{REH})

この補修モデルは、建設時の耐用年数をNP年として、ni年後に補修を行うことにより機能水準を向上させてNP年より何年かでも長く維持させようとするモデルである。このモデルでは、ni年に補修作業を行いその時の補修費は、補修費増加曲線で、回復率は、回復率減少曲線によって決定する。補修作業では機能水準 $\beta^{(n1)}$ を、回復度Rまで向上させる。この作業を何回か行いniが耐用年数NPを越えるときそこで補修作業をやめ、橋梁の機能水準が $\beta^{(NP)}$ になったときに撤去作業を行うとする。このモデルの資

金流れ図と橋梁の劣化状況を、図-6で示す。

補修モデルのEUACを示すと次のようになる。

$$EUAC_{REH} = (A/P, i, NH) \times (A + S \times (P/F, i, NH) + \sum F(ni) \times (P/F, i, ni)) + C \quad \cdots (16)$$

6. EUACの計算例

ここでは、式(3)で表される劣化について、NP=60, $i=0.04$, $F^{(0)}=0.1$, $F^{(NP)}=0.5$, $R^{(0)}=100\%$, $R^{(NP)}=70\%$, AVK=20の場合の計算例を示す。橋梁の機能水準は建設時を1として、1に対しての比で表した。

(1) 取り替えモデル

取り替えモデルの劣化状況図と資金流れ図は図-7(a)(b)のようになる。このモデルにおけるEUAC_{REP}を求めると以下のよう。

$$EUAC_{REP} = (A/P, 0.04, 60) \times \{1 + 0.5 \times (P/F, 0.04, 60)\} + 0.02 = 0.0663/\text{year} \quad \cdots (17)$$

表 - 2 補修発生間隔および回復率

メンテナンス回数	メンテナンス発生間隔	メンテナンス発生年数	$R^{(n)}$	$F^{(n)}$	β_0	β_1
1	18	18	89.8%	0.162	0.861	0.986
2	24	42	77.9%	0.309	0.807	0.946
3	13	55	72.1%	0.437	0.849	0.919

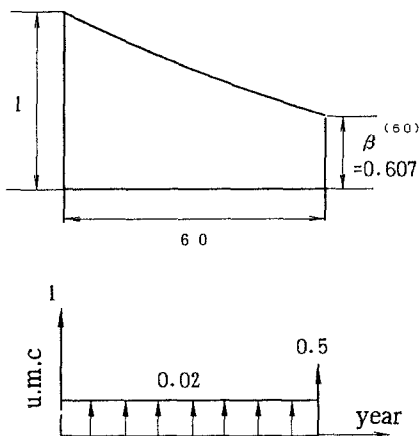


図 - 7 取り替えモデルの劣化状況図と資金流れ図

(2) 補修モデル

取り替えモデルと同様の条件のもとで橋梁の劣化状況図と資金流れ図と計算例を図-8、表-2で表示した。

このモデルの $EUAC_{REH}$ は前と同様にして以下のように求められる。

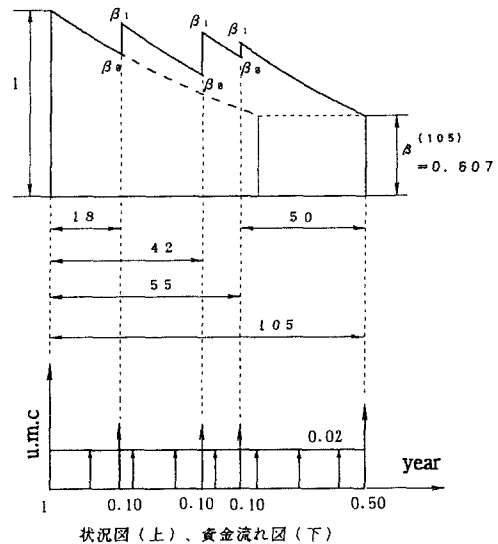
$$EUAC_{REH} = 0.0688/\text{year} \quad \dots\dots(18)$$

式(17)、(18)よりVM値を求めると、

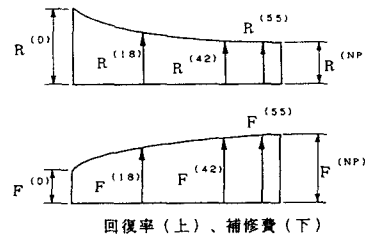
$$\begin{aligned} (VM_{\text{値}}) &= EUAC_{REP} - EUAC_{REH} \\ &= 0.0663 - 0.0688 = -0.0025 \quad \dots\dots(19) \end{aligned}$$

となり、この計算例では $(VM_{\text{値}}) < 0$ なので、取り替えのほうが安くなる。

以後、補修モデルの場合、乱数の発生シミュレーションを100回行い、得られた結果の平均値をその仮定条件でのEUACとした。



状況図(上)、資金流れ図(下)



回復率(上)、補修費(下)

図 - 8 補修モデルの劣化状況図と資金流れ図

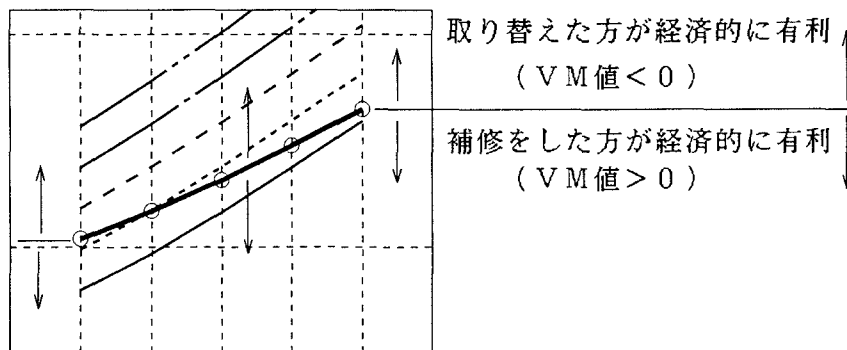
7. 計算結果

シミュレーションの計算で得られた結果を図-10および図-11にのせた。表-3には、各条件による補修モデルの寿命の平均値を示した。

図-10(a)~(f)ではTYPE1の劣化パターンのEUACを、図-11(a)~(f)ではTYPE2の劣化パターンのEUACを示した。

表－ 3 補修モデルの寿命の平均値

NP	AVK	NH	
		TYPE 1	TYPE 2
40	10	68	74
	20	64	69
60	10	105	113
	20	100	108
80	10	142	152
	20	136	149



図－ 9 図の見方の説明

図中では、横軸に利率、縦軸に年均等価格EUACをとり、 $EUAC_{REP}$ を極太線と点、 $EUAC_{REH}$ は太線で表し、補修費用の違いは線種で区別した。

極太線が太線より上にある場合は $EUAC_{REP} > EUAC_{REH}$ となり $VM > 0$ であるので補修をした方が経済的に有利である事を意味し、また、逆に極太線が太線の下にある場合は $EUAC_{REP} < EUAC_{REH}$ となり $VM < 0$ であるので取り替えをした方が経済的に有利である事を表している（図－ 9を参照）。例えば、図-10(a)で見ると $i = 0.03$ の場合には $F(NP) = 0.4$ 以上だと取り替えた方が有利で、それ以下だと補修した方が有利であることがわかる。

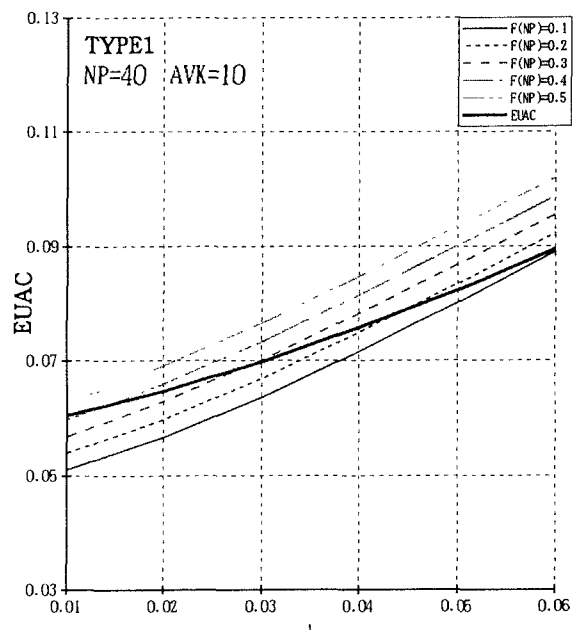


図-10(a)NP=40 AVK=10の場合

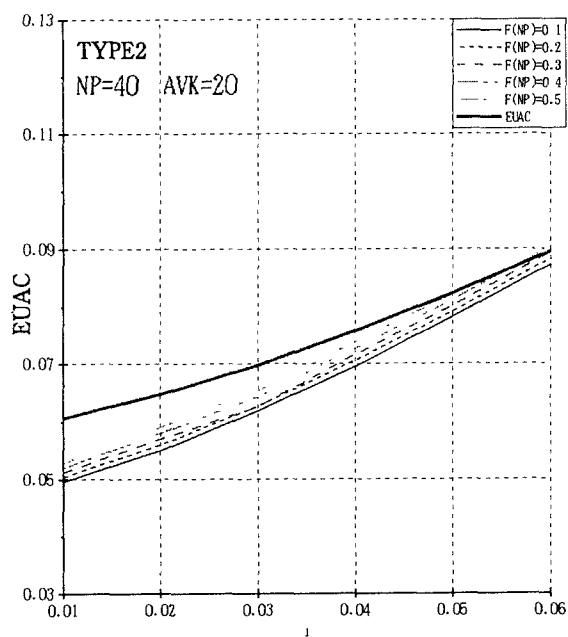


図-10(b) NP=40 AVK=20の場合

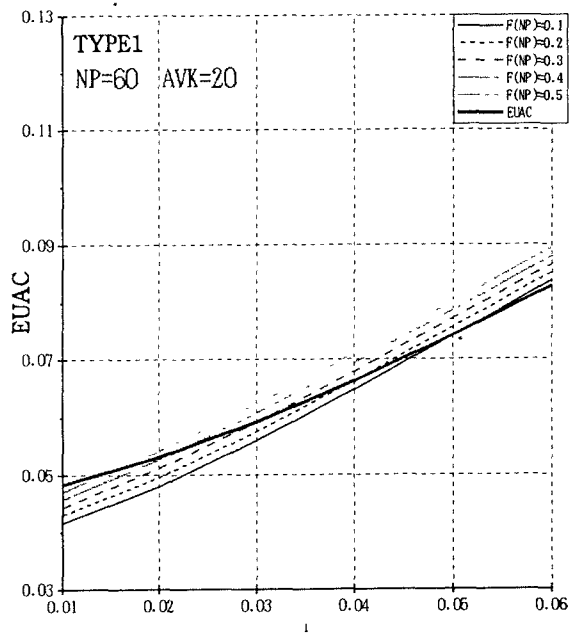


図-10(d) NP=60 AVK=20の場合

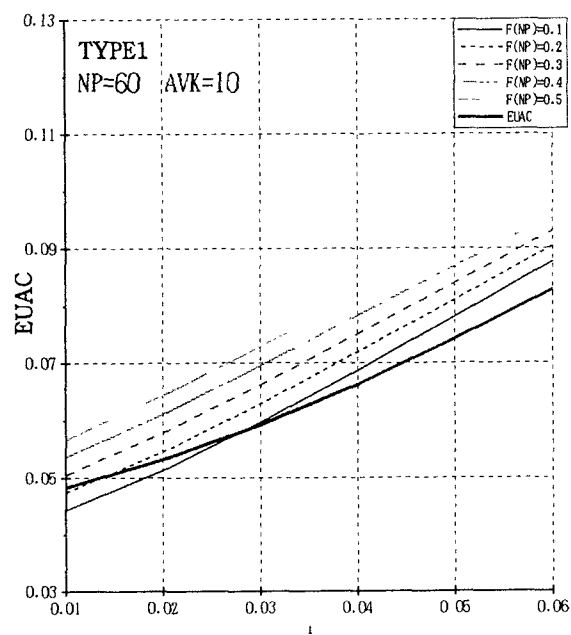


図-10(c) NP=60 AVK=10の場合

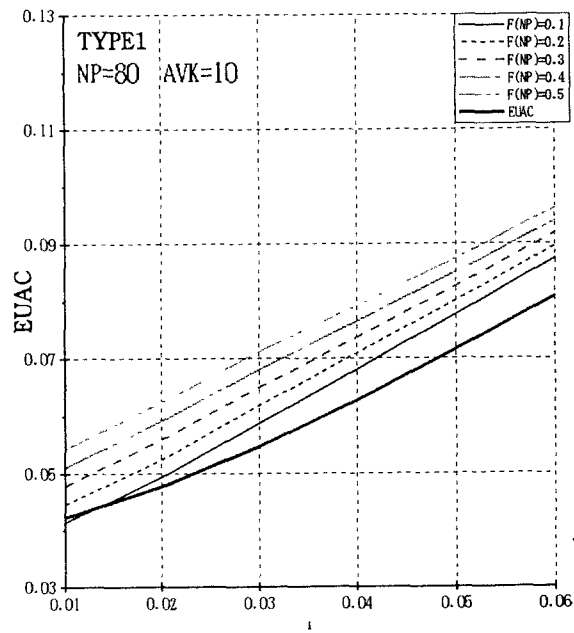


図-10(e) NP=80 AVK=10の場合

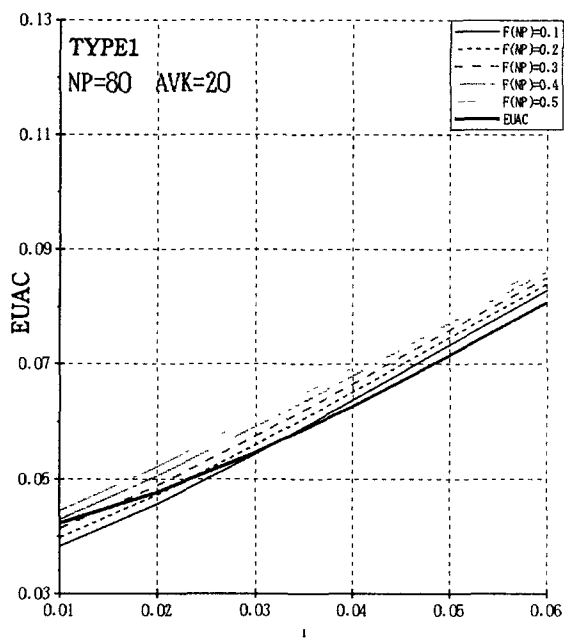


図-10(f) NP=80 AVK=20の場合

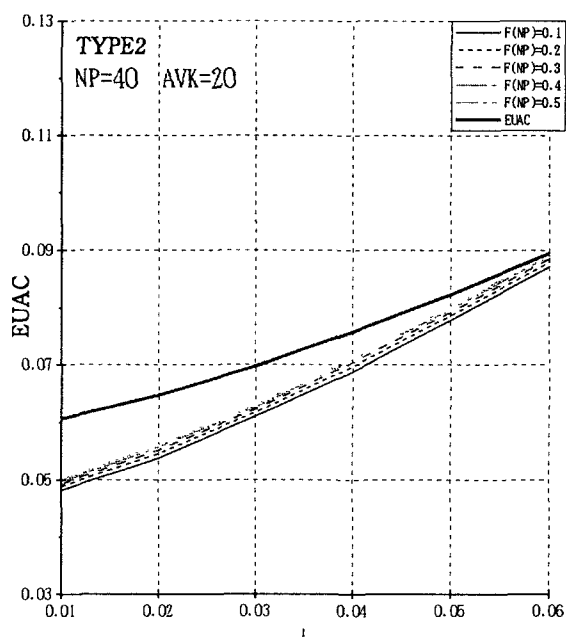


図-11(b) NP=40 AVK=20の場合

図-10 EUACと利率の関係：TYPE1の場合

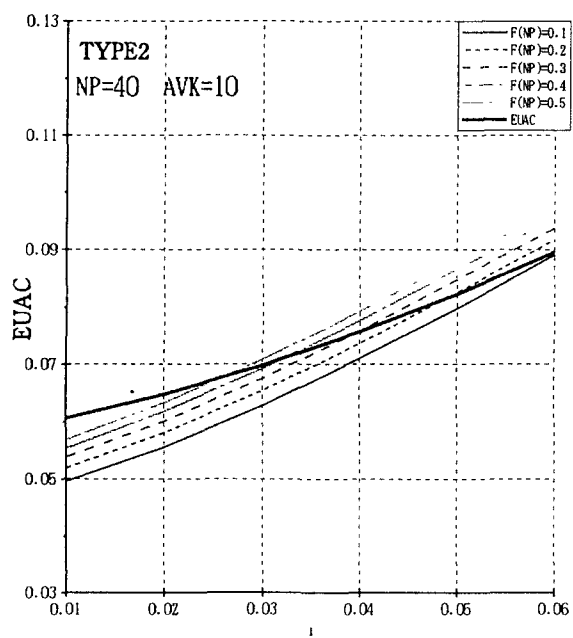


図-11(a) NP=40 AVK=10の場合

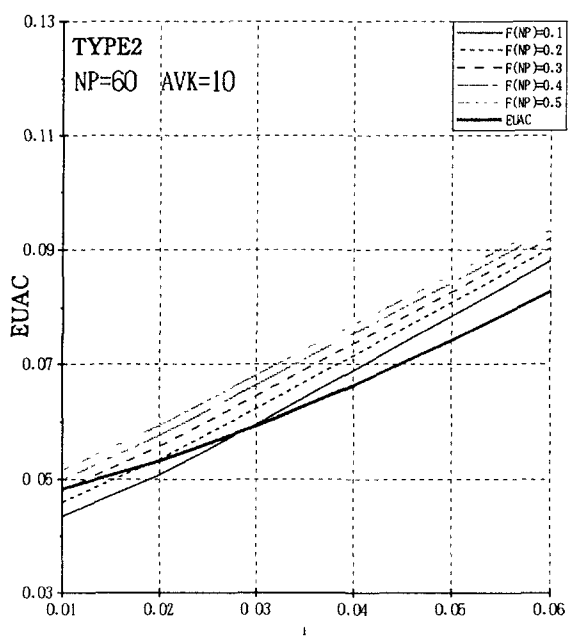


図-11(c) NP=60 AVK=10の場合

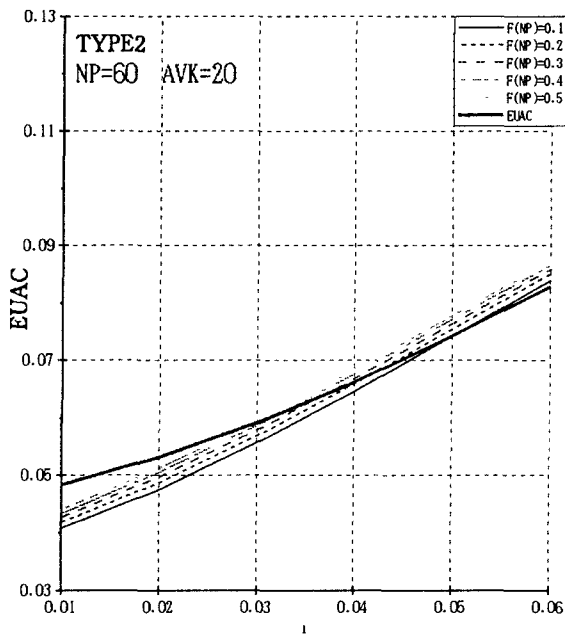


図-11(d) NP=60 AVK=20の場合

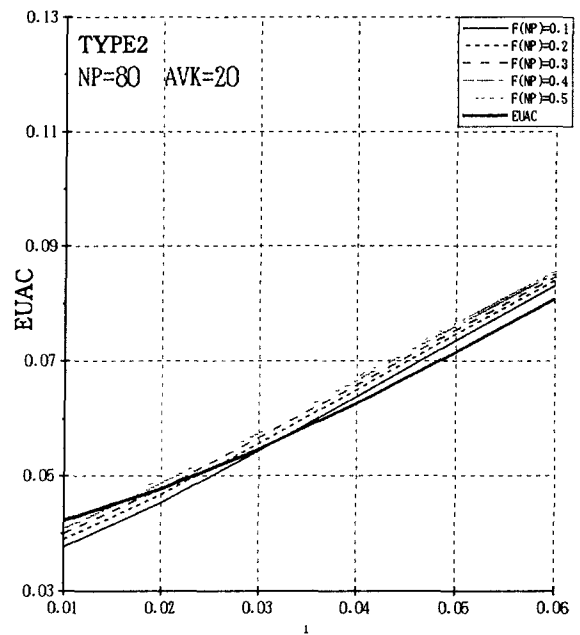


図-11(f) NP=80 AVK=20の場合

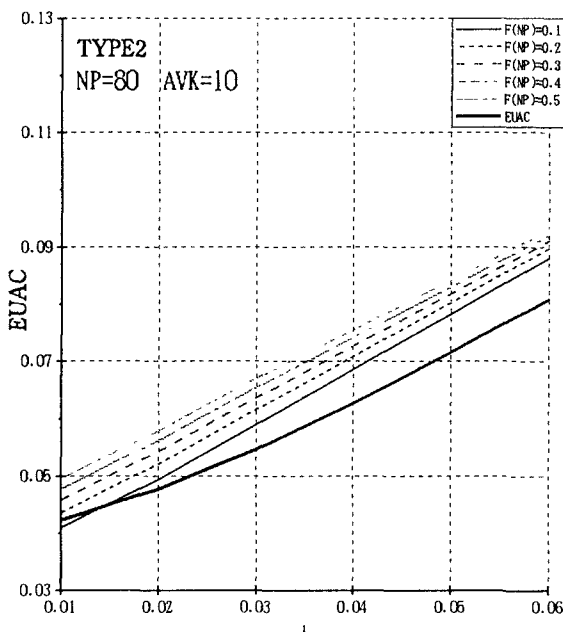


図-11(e) NP=80 AVK=10の場合

図-11 EUACと利率の関係：TYPE2の場合

以上の図の結果から次のようなことがいえる。

- ①利率：利率が低いときには補修を行うほうが、利率が高く見込まれるときには取り替える方が有利であると思われる。
- ②補修費用：補修費用が増えるにつれて、当然であるが $EUAC_{REH}$ も増加している。
- ③耐用年数：耐用年数が長くなると、 $EUAC_{REP}$ と $EUAC_{REH}$ の値はどちらも小さくなり、相対的に $EUAC_{REP}$ の方が有利といえる。
- ④補修の発生回数：補修の発生回数が20年に1回程度では耐用年数が長くなるにつれて、 $EUAC_{REP}$ と $EUAC_{REH}$ の差は小さく、補修費用が多少高い場合でも、利率が低いという条件で、 $EUAC_{REP}$ が $EUAC_{REH}$ を上回ることがある。
- ⑤劣化曲線：TYPE1とTYPE2の橋梁の補修モデルの平均寿命を比較した結果、TYPE2の劣化モデルの方がやや長くなり経済的にみて有利である。したがって、劣化モデルの選択が重要になると考えられる。

8. あとがき

本研究は、土木構造物の中でも特に橋梁構造物をモデルとしたライフサイクル・コストの経済性評価という事に関して、維持・補修計画の策定を目標として、シミュレーションを行い、利率、補修費用、耐用年数等の関連から、年平均均等価格(EUAC)に基づいた定性的な評価を実施した。それによると、劣化関数の評価、および利率の予測の違いがEUACに及ぼす影響が異なり、補修した方が経済的になるか、または耐用年数がきたらそのまま廃棄した方が経済的になるかの方法の選択に与える影響を指摘できた。

しかしながら、4. でも述べたように、シミュレーションモデルに用いられている仮定された多くの変数は定量的な評価が困難でありしたがって現実のモデルから幾分か離れている可能性もある。またモデル化に対しても補修頻度、補修費、劣化状況等のデータの裏付けも乏しいという点本研究の限界となっている。

【参考文献】

- ¹⁾ 例えば 小林一軸：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断診断，森北出版，1991. 7.
- ²⁾ 野沢太三：メンテナンスの経済的側面、土木学会誌，pp17-21, 1979. 10.
- ³⁾ 菅原操：メンテナンスー今後への展望，土木学会

誌，pp57-62, 1979. 10.

- ⁴⁾ 土木構造物の耐用年数、劣化現象としての考え方，土木学会誌，pp8-19, 1983. 10.
- ⁵⁾ 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，pp. 33-37, 1983. 10.
- ⁶⁾ 岩松幸雄，早川祐史，原田隆朗：道路構造物の維持管理システムに関する研究，土木学会論文集，No. 444/VI-16, pp. 69-76, 1992. 3.
- ⁷⁾ Ross Sandler, Samuel I. Shwarts: Spanning the 21st Century (上) (下)，(三木千尋他訳)，橋梁と基礎，89-10.
- ⁸⁾ 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理、土木学会論文集, No. 501/I-29, pp. 1-10, 1994. 10
- ⁹⁾ 例えば 室津義定，大場史憲，米沢政昭，藤井進：システム工学，森北出版，pp. 16-29, 1981. 2.
- ¹⁰⁾ Richardo E Weyers, Philip D Cady, and Richard M. McClure: Cost-Effective Decision Models for Maintenance, Rehabilitation, and Replacement of Bridges, Transportation Research Record 950, pp. 28-33, 1985.
- ¹¹⁾ Ken Koyama: Reliability Based Economic Evaluation of Structures Considering the Life Term, Proc. of JSCE No. 410/I-12, pp. 187-193, 1989. 10.
- ¹²⁾ 例えば 米倉亮三：社会システム工学入門，三海堂，1990. 2.

Economic Evaluation of Life Cycle costs on Bridge Rehabilitation or Maintenance

It seems really important to make adequate maintenance and rehabilitation management schemes for keeping the existent structures good condition.

In this paper, a simulation method for estimating life cycle cost of bridge is proposed using the Value Management Term whether the bridge should be rehabilitated or replaced without maintenance. This is evaluated by EUAC for annual interests, qualitatively. To be replaced or not depends on the type of bridge deterioration or annual interest rates, significantly.