

ライフサイクルコストを考慮した構造物の経済性評価について

On the Economic Estimation of Life Cycle Cost of Structures

信州大学大学院 ○高沢和典*

信州大学工学部 小山 健**

by Kazunori Takasawa and Ken Koyama

土木構造物の耐用年数に対する考え方は、今後の我が国における社会資本の投資の方法と総量に関係し、かなり重要なものになると考えられる。現在ある構造物については、維持・補修計画に基づき、構造物の寿命を幾分なりとも伸ばすような、いわば構造物の延命政策が、経済性から見て有利になるかどうかについては、その構造物の劣化程度、補修に要する費用、あるいは補修の発生回数および、耐用年数間にわたり予想される金利の関係から、大まかに推定することは可能であろう。しかしながら、これから建設する場合の構造物についてはその耐用年数をどのように決定すべきかまた、その場合のライフサイクル費用としてどの程度に設定すべきかについては、構造物の安全性とも関係する。本研究は、総費用最小化原則に基づいた、構造物のライフサイクル費用の設定の最適化を目指している。なお、構造物の劣化に関しては、フラクタル理論を援用し、劣化のパターンを想定することにした。

【キーワード】ライフサイクルコスト、総費用最小化原則、フラクタル

1. まえがき

現在における構造物の耐用年数についての一般的な考え方としては、1)経済的耐用年数、2)機能的耐用年数、3)物理的耐用年数、の3通りがあると考えられている。^{1) - 3)} 現在我が国では、補修が必要となる構造物について国および多くの自治体で点検作業が進められている状況である。

耐用年数は設定されても、多くの構造物がその全期間供用を全うできるとは限らない。

主に社会的な変遷により、構造物の初期に設定された機能が十分果たせなくなり、廃棄され更新される構造物の方が多いとされている。その場合には、ある一定期間は構造物の利用ができなくなる事態も考慮に入れる必要がある。もちろん予期しない荷重の発生、例えば再現期待期間⁴⁾を越えた超過確率を

有する地震荷重のようなものが生じた場合には、構造物は破壊し、この場合にもその構造物は廃棄され更新される。

本研究は、このような事態を考慮にいたし、構造物の総費用最小化原則に基づいて、ライフサイクルにおける経済性の評価を試みるものである。一方、一般に構造物は、経年劣化を生じ、適切な維持・補修の策定計画は不可欠である。

したがって、劣化がどのように進行するのかをある程度評価する必要があるが、現実にはそれを予測・評価することは困難となる。ここでは劣化のパターンを数式モデルを用いて表現し、経済性評価に組み込んでいくこととした。

2. 総費用最小化原則について

一般に、総費用最小化原則に基づく期待総損失費用は以下のように表される。^{4) - 6)}

$$E(C_T) = C_i + C_r \cdot p_r \quad (1)$$

*信州大学大学院・博前 Tel 026(226)4101

**社会開発工学科 Tel 026(226)4101 ext. 2911

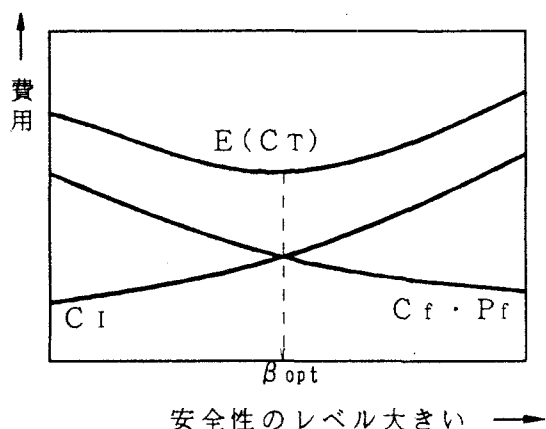


図-1 C_I および C_f と $E(C_T)$ の概略観念図

ここで、 $E(C_T)$ は総損失費用の期待値を、 C_I は構造物の初期費用を、 p_f は構造物が目的とする機能が果たせなくなる何等かの限界状態が発生する確率を、 C_f はその様な事態が発生することによる社会的損失費用を、それぞれ表すものとする。ただし、ここでは問題を単純化するために、維持・補修あるいは点検等にかかわる費用については考慮から外してある。

初期費用と社会的損失費用の関係は概略を図-1に示す。この図から、構造物の安全のレベルを上げると、構造物にかかる初期費用は増加するが、その分構造物が何等かの悪い限界状態に陥りにくくなり、その結果としての社会的損失費用は減少することを表している。したがって、この図から、構造物のライフサイクルにおける期待総損失費用はある安全レベルにおいて最小となることが期待される。本研究ではこの安全レベルでの設計をめざして、耐用年数をパラメーターにし、経済性の評価を試みるものとする。

社会的損失費用については次のように仮定した。

建設時に限界が来たとしたときの社会的損失の価値を C_f と仮定したとき、経過年数 N 年の時に限界が来たときの社会的損失の価値 $C_f(N)$ は利率 i を考へ次のようになる。

$$C_f(N) = C_f \cdot \xi^{N-1} \quad (2)$$

ここで、 $\xi = 1.0 + i$ 、 N は建設時からの経過年数、 N_0 は構造物の設計耐用年数である。社会的損失の価値が経過年数と共に移りゆく様を図-2に示した。

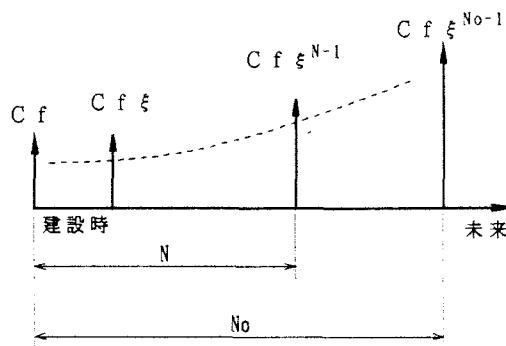


図-2 資金流れ図

3. 最適安全性レベルと経年劣化について

(1) 最適安全性指標

信頼性理論に基づく安全性レベルは一般に、2次モーメント安全性指標によって表される。^{4), 7), 8)} 安全性指標は、限界状態を表現する確率変数がどのような確率分布に従うかによって、また限界状態関数が確率変数によってどのように書き表されるかによって、異なった結果が生ずることが指摘されている。^{9), 10)}

本研究では簡単なために以下に示す安全性指標を採用する。

$$\beta = \frac{\ln \bar{\theta}}{\sqrt{V_R^2 + V_S^2}} \quad (3)$$

ここで、 θ は一般に中央安全率と呼ばれるもので、構造物全体の強度 R (=抵抗値)の平均値 $\bar{R}$ に対する、想定荷重 S によって構造物に生ずる断面力(荷重影響)の平均値 $\bar{S}$ との比として表され、 V_R, V_S はそれぞれの変動係数を表すものとする。このとき式(1)の p_f は一般に以下のように表される。^{4) - 6)}

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (4)$$

ここで、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布関数である。

また、構造物の初期建設費用と中央安全率には次のような関係が仮定できるものとする。¹¹⁾

$$C_I = a(1 + b\bar{\theta}) \quad (5)$$

ここで、 a, b は定数である。式(4)より β が大きくなるほど、構造物がなんらかの限界状態に達し、本来有する機能が果たせなくなる確率が低くなる、すなわち安全性レベルが高くなることを表している。

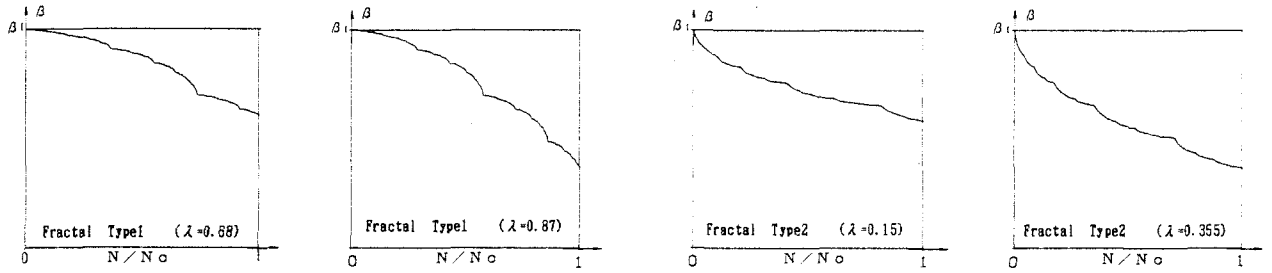


図-3 安全指標の経年変化($\alpha=0.3$)

しかしながら全体の経済性からみると図-1の破線に相当する安全性レベルが望ましいレベルといえる。このレベルは原理的には、以下のような式を満足する β を求めることになる。

$$\frac{\sum E(C_T)}{\sum \beta} = \frac{\sum C_i}{\sum \beta} + C_r \frac{\sum p_r}{\sum \beta} = 0 \quad (6)$$

式(6)から求められた β を最適安全性指標 β_{opt} と表すことにする。

(2) 経年劣化について

構造物は供用期間に渡って様々な要因から劣化する。この場合の劣化パターンとしては、例えば指数関数を利用したものなどが考えられている。¹³⁾⁻¹⁴⁾しかしながら、確立されているものはないように考えられる。本研究は、この劣化パターンをド・ウィース(De Wijs)のフラクタルを^{14)、15)}用いることによって近似し、そのような劣化パターンを構造物が有する場合の、最適安全性指標を決定し、その場合の経済性の評価を試みることにする。

いま、ド・ウィースのフラクタルを $c(s)$ とした場合のその積分値は以下のように表され、これを劣化パターンとする。

$$d(x) = \int_0^x c(s) ds \quad (7)$$

このモデルは、岩石中に含まれる鉱物の分布状況が、鉱物の総量 M が2分されると、 $(1-\alpha)M$, αM の鉱物をそれぞれが含有し、この操作を無限に繰り返す極限として定義されるものである。

ド・ウィースのフラクタルの積分値を用いて次のような2つの関数を仮定する

$$F_1(X) = 1.0 - d(X) \quad (8)$$

$$F_2(X) = d(1.0 - X) \quad (9)$$

式(8), (9)から得られる関数値は、鉱物の含有比率の意味を含めて、直接劣化パターンを表現する物理的な意味は見出せないが、文献14)にもあるように、この関数は連続でほとんどで微分可能でその値は0となるが任意の区間でみると単調減少している。横軸を時間とした時、日単位での安全レベルの減少はない(微分=0)が長い日数をみたとき構造物は劣化しているということより経年劣化(0から x 年)の説明として感覚的に合うという理由で採用した。式(8), (9)を用いた2通りの劣化パターンは比較的劣化の進む時期と、比較的劣化の進まない時期が交互に繰り返されるようになっている。ここでは以下のような式(10)で表される劣化をType1とし、式(11)で表される劣化をType2として用いた。

$$\beta = \beta_1 \cdot F_1\left(\lambda \cdot \frac{N}{N_0}\right) \quad (10)$$

$$\beta = \beta_1 \cdot F_2\left(\lambda \cdot \frac{N}{N_0}\right) \quad (11)$$

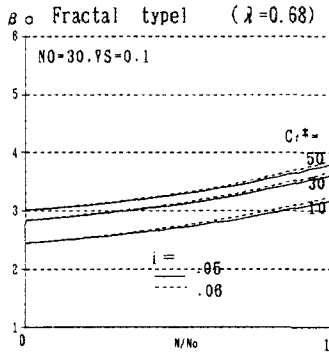
ここで、 β_1 は建設時の安全レベルを、 λ は劣化の度合いを表すパラメーターを、 N_0 は設計耐用年数を、 N は経過年数を、それぞれ表す。なお式中の係数 λ については建設時より設計耐用年数 N_0 年が経過したときの安全レベルがそれぞれ等しくなるようにType1とType2で次のように設定した。

a) 劣化の比較的少ない場合として

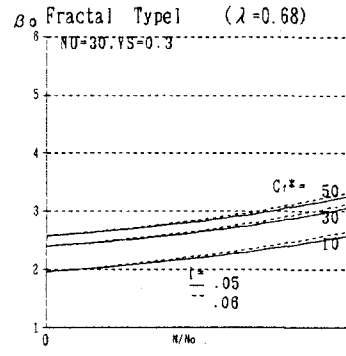
Type1では $\lambda=0.68$, Type2では $\lambda=0.15$

b) 劣化が比較的進む場合として

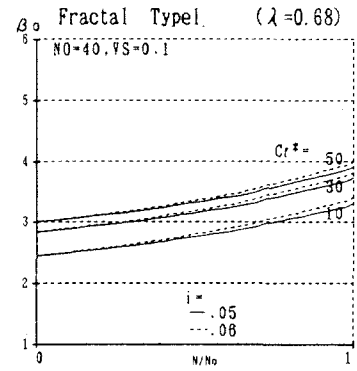
Type1では $\lambda=0.87$, Type2では $\lambda=0.355$ とした。



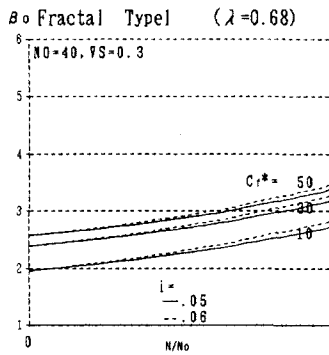
(a)



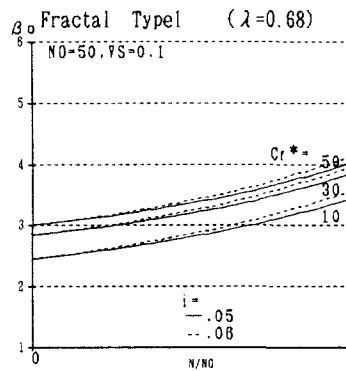
(b)



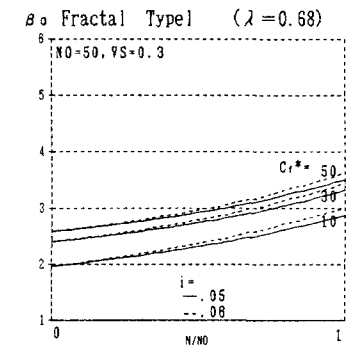
(c)



(d)



(e)



(f)

図-4 最適安全指標と経年変化

いま例として $\alpha=0.3$ の場合の式(6)から得られたフラクタルを図-3に載せる。図は横軸に N/No ，縦軸は、安全レベルの劣化を表す安全性指標をとっている。何らかの限界状態が生じるまでの経過年数 N は確率変数であるから特定できないので、式(1)に用いる p_r, C_r については N 年の期間の期待値を用いることにし、以下のように表される。

$$\bar{P}_r = \Phi(-\bar{\beta}) \quad (11)$$

$$\bar{\beta} = \frac{1}{\lambda \cdot N} \int_0^{\lambda \cdot N} \beta_t F\left(\frac{t}{No}\right) dt \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_r &= C_r (1 + \xi + \xi^2 + \dots + \xi^{N-2} + \xi^{N-1}) / N \\ &= C_r (\xi^N - 1) / N (\xi - 1) \end{aligned} \quad (13)$$

以上から式(1)は次の様になる。

$$E(C_T) = a(1 + b\bar{\theta}) + \bar{P}_r \bar{C}_r (\xi^N - 1) / N (\xi - 1) \quad (14)$$

4. 計算の条件

本研究では、式(6)から求められる β_1 に対する最的安全性レベルである β_{opt} について次に述べるそれぞれの項目をパラメータとして計算を行い、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。

a) 利率について

現在のような低金利は標準的とは考えられないが、利率 $i=0.05, 0.06$ の2通りを仮定し、大幅な金利の上昇は将来にないものとして考えた。

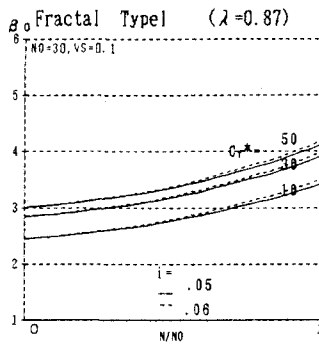
b) 耐用年数について

大蔵省令による法定的耐用年数は、一般に40~50年と考えられているので本研究ではそれを参考にして30, 40, 50年の3通りで考えた。

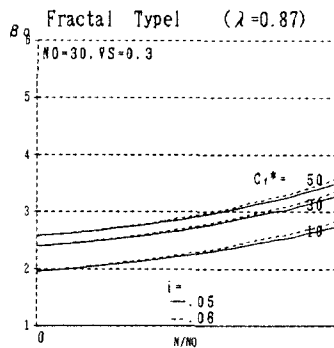
c) 構造物全体の強度に対する変動係数について

標準的なものとして $V_R=0.1$ と仮定した。

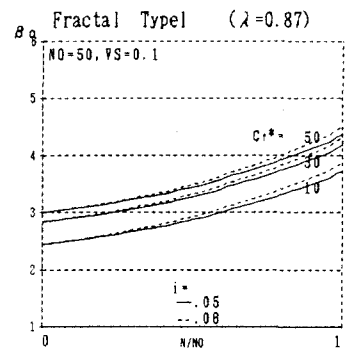
d) 想定荷重に対する変動係数について



(a)

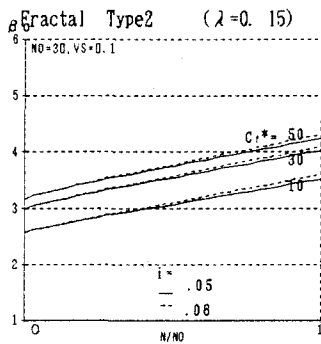


(b)

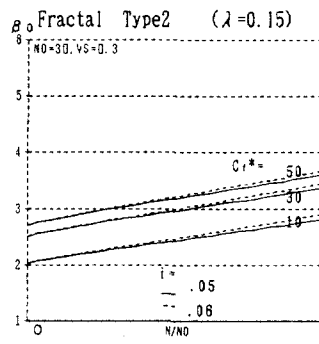


(c)

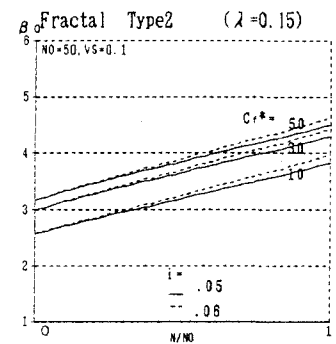
図-5 最適安全指標と経年変化



(a)

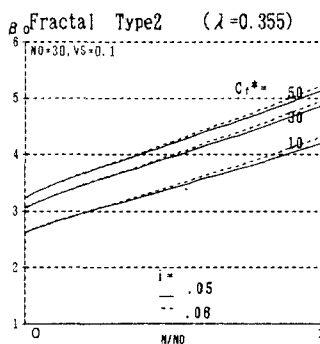


(b)

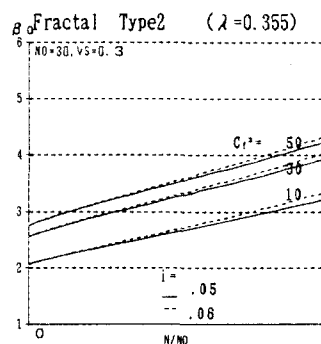


(c)

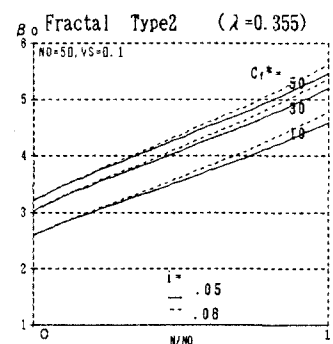
図-6 最適安全指標と経年変化



(a)



(b)



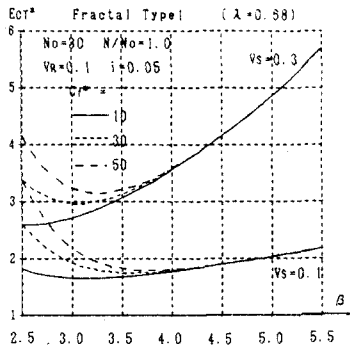
(c)

図-7 最適安全指標と経年変化

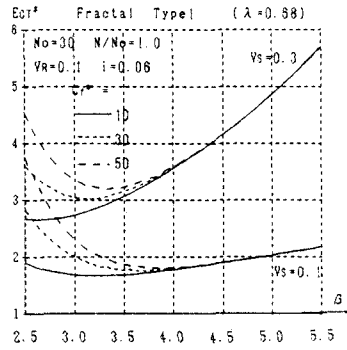
荷重についてにのばつきを想定するのは困難であるが、比較的小さいものと、大きな地震荷重のようなものの生起も含めた比較的大きなものを考え、 $V_s=0.1, 0.3$ と仮定した。

e) 社会的損失の費用について

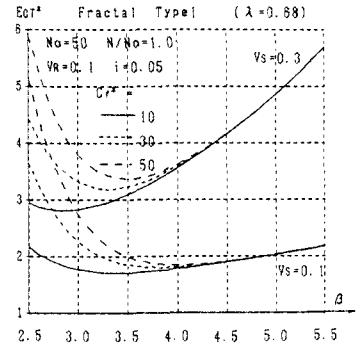
これについても正確に予測するのは困難なので $C_r^* = C_r / (a \cdot b)$ と無次元化して、 $C_r^*=10, 30, 50$ と仮定した。⁶⁾



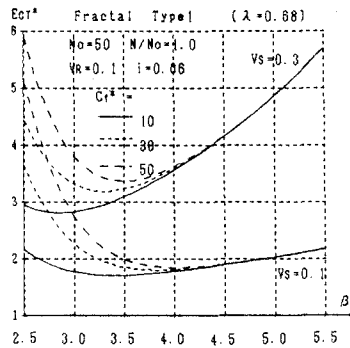
(a)



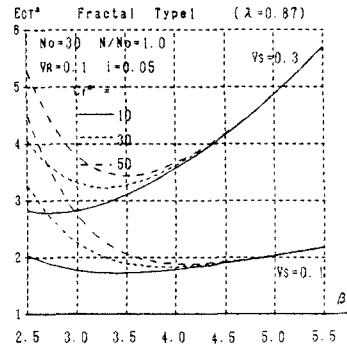
(b)



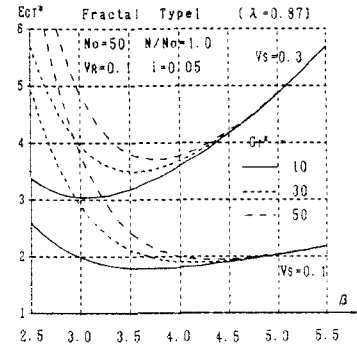
(c)



(d)



(a)



(b)

図-8 安全レベルと期待総損失費用の関係

図-9 安全レベルと期待総損失費用の関係

5. 計算結果および結論

(1) 最適安全指標の経年変化

式(6)より前節の諸条件の下で β に対する最適安全性レベル β_{opt} を求めた。Type1で $\lambda=0.68$ の場合を図-4(a)~(f)に、 $\lambda=0.87$ の場合を図-5(a)~(c)に、Type2で $\lambda=0.15$ の場合を図-6(a)~(c)に、 $\lambda=0.355$ の場合を図-7(a)~(c)に示した。図中では横軸に、 N/No を、縦軸に最適安全性指標 β_{opt} をとり、実線と点線で利率 $i=0.05$ 、 $i=0.06$ の場合とを区別している。これらの図から、

①図-4(a)~(f)より Vs が同じ場合には設計耐用年数 No に対して限界状態のくる年数 N が長くなるほど、また、 No そのものが長くなるほど β_{opt} は大きく設定することが経済性につながることを示している。一方、 Vs が大きい場合には、相対的に安全性のレベルを下げておいた方が経済性につながり、これらの傾向は、Type1, Type2全体についていえる。なお、 β_{opt} はわ

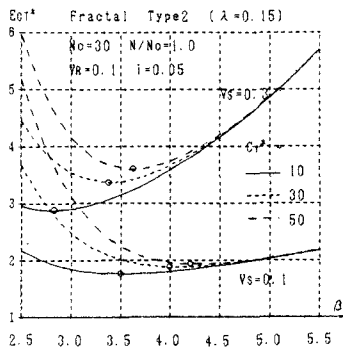
ずかに波打った状態となり、フラクタル劣化の影響がみられる。

②社会的損失費用に関する C^* が大きくなるほど β_{opt} を大きく設定することが経済性につながる。

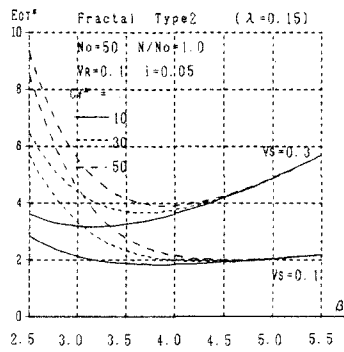
③予想される利率が大きくなるほど β_{opt} を大きく設定することが経済性につながる。ここでは2通りの利率($i=0.05, 0.06$)について示したが、利率がこれより上昇すると β_{opt} はさらに大きくなることが得られる。

④図-4と図-5、図-6と図-7の比較より、劣化の比較的少ないタイプに比べ劣化の比較的多いタイプでの β_{opt} は大きくなっており、比較的大きな劣化の見込まれる時には、安全レベルを大きく設定した方が経済性につながる。

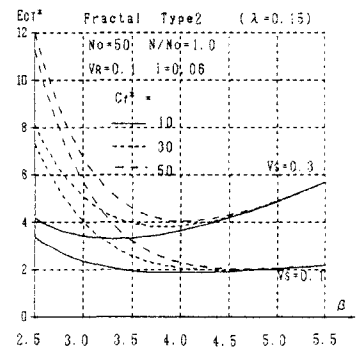
⑤建設後すぐに劣化の始まるType2のような相対的に大きな劣化の見込まれるような場合では、安全レベルを相対的にType1のパターンのものより大きく設定した方が経済性につながる。



(a)

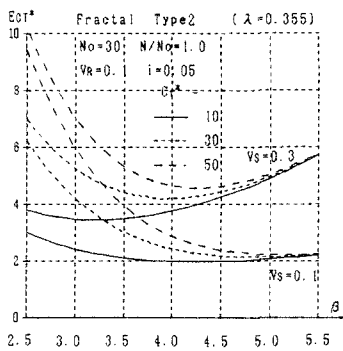


(b)

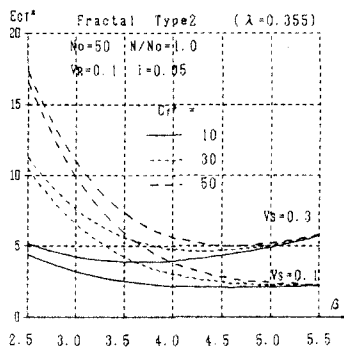


(c)

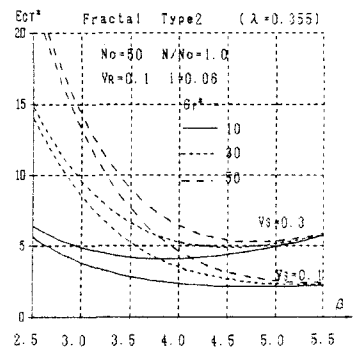
図-10 安全レベルと期待総損失費用の関係



(a)



(b)



(c)

図-11 安全レベルと期待総損失費用の関係

(2) 安全レベルと期待総損失費用の関係

得られた β_{opt} を用いて式(14)より求められた期待総損失費用 ($E(C_T)$) の最小値と、その周辺から求められる値の代表的な結果を、Type1で $\lambda=0.68$ の場合を図-8(a)~(d)に、 $\lambda=0.87$ の場合を図-9(a)~(b)に、Type2での $\lambda=0.15$ の場合を図-10(a)~(c)に、 $\lambda=0.355$ の場合を図-11(a)~(c)にそれぞれ載せた。横軸に建設時の安全レベル β をとり縦軸に $E(C_T)^*$ とした。ここで、 $E(C_T)^* = (E(C_T) - a) / (a \cdot b)$ で無次元化してある。実線、点線、破線によって、 $C_T^*=10, 30, 50$ の3通りを区別した。

また、荷重の変動係数については $V_s=0.1, 0.3$ の2通りで計算して1つの図中に示した。

①図-8(a)~(d)より、想定荷重に対する変動係数を大きく設定するほど期待総費用の最小値 $E(C_T)^*$ は大きくなり、 $V_s=0.3$ の場合は $V_s=0.1$ の場合に比べ1.5倍程度に上る。これらの傾向は他のパラメーターの組

み合わせでも同様であった。 $E(C_T)^*$ 最小となる最適安全性のレベルは3.0から3.5程度と考えるとよい。

②図-8、図-9より、条件が同じであれば、フラクタル劣化Type1における早期劣化タイプとそうでないタイプの違いは、費用最小にあまり影響がないと思われる。

③図-10、11より、フラクタル劣化Type2では、安全性をType1より相対的に上げておく(3.5~4.0)必要がある。

④図-8と図-10、図-9と図-11の比較より、全体的にType1に比べType2の方が期待総費用は大きくなっている。建設後すぐに劣化の始まるType2に比べ、建設後しばらく後に劣化の始まるType1のような劣化パターンの方が経済性に優れている。したがって、できることなら劣化パターンが、Type1となるような維持・補修方策を講じることが望ましい。

6. あとがき

本研究は構造物のライフサイクル費用の期待総費用最小化原則に基づいた建設時の最適安全レベルの設定を目指した。設計耐用年数、利率、劣化パターンおよび想定荷重影響の変動係数の予測の違いが建設時の最適安全レベルの設定に大きく影響を与えていることを示した。

しかし、利率、変動係数の予測は難しく、また本研究で採用されたフラクタルによる構造物の劣化タイプも物理的意味は乏しいことで利用性には問題点も残るが、一方で、日単位での構造物の劣化はないが長い単位で見ると確実に劣化が進んでいるといった感覚的に合う劣化状況を表していると思われることから、今後のこの方面でのフラクタル劣化パターンのさらなる研究が待たれる。

【参考文献】

- 1)野沢太三：メンテナンスの経済的側面，土木学会誌，pp.17-21, 10月号, 1979
- 2)菅原 操：メンテナンスー今後への展望，土木学会誌，pp.57-62, 10月号, 1979.
- 3)小堀為雄：土木構造物の耐用年数ー劣化現象としての考え方ー土木学会誌，pp.8-12, 10月号, 1983.
- 4)藤野陽三：確率論に基づく安全性照査法と構造設計，pp.33-39, 2月号, 1978.
- 5)杉山俊幸，酒井利夫，藤野陽三，伊藤 学：構造設計における信頼性レベル・安全率の設定に関する考察，土木学会論文報告集，pp.21-28, No.327, 1982.

6)小山 健，土屋宏信，矢野 勲：耐用年数を考慮したコンクリート床版の信頼性に基づいた最適かぶり厚さ，pp.221-228, JCROSSAR '91, A-28, 1991.

7)Cornell, C. A:Structural Safety Specifications Based on Second Moment Reliability Analysis, IABSE Symp. on Concepts of Safety and Methods of Design, Final Report, 1969.

8)Hasofer, A. M. and Lind, N. C:Exact and Invariant Second Moment Code Format, ASCE, Vol. 100, EMI, 1974.

9)Veneziano, D:Contributions to Second Moment Reliability Theory, MIT Research Report R74-33, 1974.

10)Rackwitz, R:First Order Reliability Methods, Technical Univ. of Munich, Sonderforschungs-bereich 96, M·chen, 1980.

11)Lind, N. C.:Approximate Analysis and Economic Structures, ASCE, Vol.102, No. ST6, pp.1177-1195, 1976.

12)高沢和典，多田栄一，小山 健：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，土木学会，建設マネジメント研究論文集，Vol. 3, pp.195-206, 1995.

13)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，1981.2.

14)高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，1987.12.

15)ベンワ・マンデルブロ：フラクタル幾何学，日経サイエンス，1989.2.

On the Economic Estimation of Life Cycle Cost of Structures

Life cycle cost of structure is optimized based on the principles of expected total cost minimum. The optimum second moment safety index is derived from that principle and the expected minimum cost of prospective structure is estimated by proposed method. Structures are going to deteriorate during the service term. The type of deterioration seems generally neither established clearly nor evaluated exactly. In this study, therefore, fractal type deterioration function is applied to obtain the optimum safety index.