社会的損失費用の曖昧さを考慮した構造物のＬＣＣ評価

東日本旅客鉄道株式会社 小山 幸寛[1]
信州大学工学部 小山 健[2]
太平工業(株)　林 周平[3]
by　Hiroyuki Koyama, Ken Koyama and Shuhei Hyashi

土木構造物のライフサイクルと，その間にかかる総費用に対する考え方には多くの要因が関係している．しかし，日本は降雨や降雪が多く，また世界的に有数の地震国であるということも含め，その要因の中には費用を確定することが困難である不確定要因と言えるものも存在するため，現時点においてはそれらの定量的な評価を行うことは非常に困難であるとされている．
本研究は，総期待費用最小化原則に基づき最適な初期安全性レベルとその時の構造物のライフサイクルコスト（LCC）を求めようとするものである．総期待費用最小化原則の計算にあたって，不確定要因の一つと考えられる社会的損失費用に曖昧さを付与しファジィ数としてLCCを求めている．その結果従来の研究と比較して安全性指標および期待損失費用の評価に幅を考えることが可能となった．

Key Words : 総期待費用最小化原則，ライフサイクルコスト，社会的損失費用

１．はじめに

土木構造物の評価を行う場合，構造物の寿命と，その寿命を全うするまでにかかる総費用（ライフサイクルコスト，単にLCCと表す）を決定する要因は数多く存在する．しかし，その中には自然災害や人間の行動のように不安定で予想外に発生するような，現時点ではその発生を予測・決定することが困難である不確定要因と呼べるものも存在する．

既存の研究[1)][2)]において，ライフサイクルコストは構造モデルの劣化タイプあるいは設計耐用年数等で評価されてきている．しかし，各種費用の決定に際しては上記した不確定要因を含めあいまいな点があり，その結果得られたライフサイクルコストの最適値に対する信頼性に対してその点が考慮されていない．そこで本研究では，総期待費用最小化原則に基づいてのライフサイクルの計算にあたって，基本的には既存の研究[1),2)]を基本として社会的損失費用に曖昧さを付与し，安全性・経済性の評価を試みた．これによって，最適安全性レベル及び最適なLCCを費用の算定に関わるあいまいさも考慮して求めることが可能になっている．

２．安全性指標について

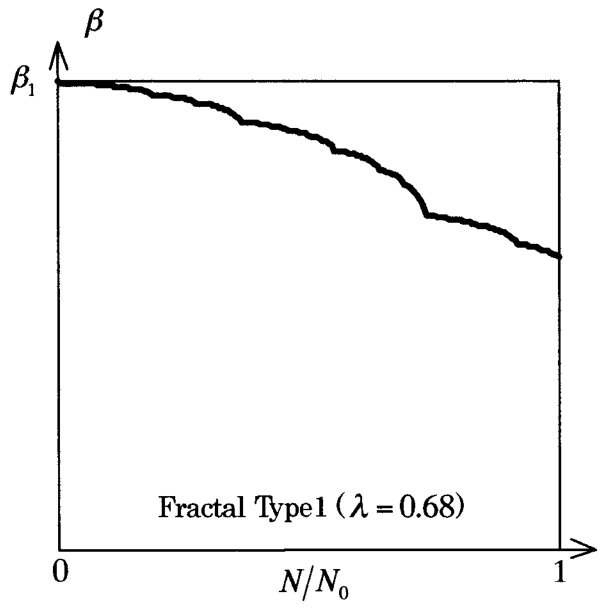
信頼性理論に基づく安全性レベルは一般に，２次モーメント安全性指標によって表される．安全性指標は，限界状態を表現する確率変数がどのような確率分布に従うかによって，また限界状態関数が確率変数によってどのように書き表されるかによって，異なった結果が生ずることが指摘されている[3),4),5)]．

本研究では安全性レベルを表すために，限界状態関数Zが$Z=\ln R-\ln S$で表わされる以下に示す安全性指標を採用する．[3),6)]

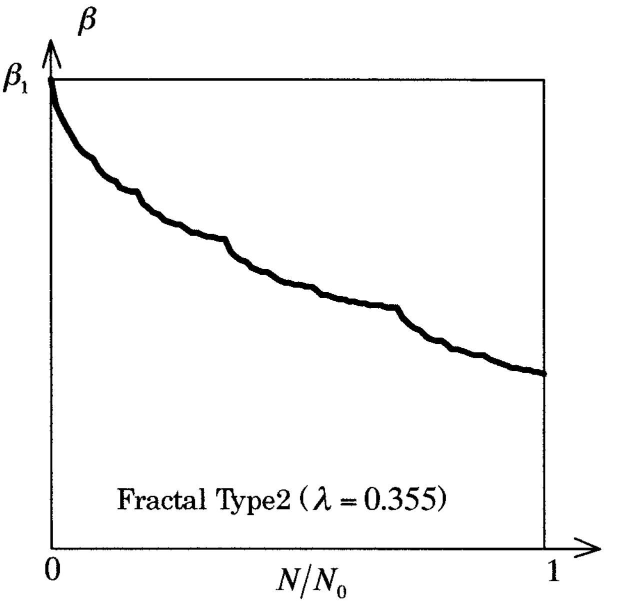
$$\beta=\frac{\ln\bar{\theta}}{\sqrt{{V_R}^2+{V_S}^2}} \qquad (1)$$

ここで，$\bar{\theta}$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

[1] 上信越工事（作）027（324）9364
[2] 社会開発工学科　027（269）5281
[3] 名古屋支店



図－１　安全性指標の経年劣化
比較的劣化の進まない場合



図－２　安全性指標の経年劣化化
比較的劣化の進む場合

それぞれの変動係数を表すものとする．

３．シミュレーションモデルの設定

ここでは，土木構造物の経済性評価のためのシミュレーションモデルを設定した．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．その劣化の状況を，数式を用いて仮定することにより安全性レベルを考慮した評価を行う．

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[7),8)]．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・ウィースのフラクタルの[8),9)]積分値を用いて次のような２つの関数を仮定する．

$$F_1(x) = 1.0 - d(x) \qquad \text{(2a)}$$

$$F_2(x) = d(1.0 - x) \qquad \text{(2b)}$$

ただしド･ウィースのフラクタルを$c(x)$とした場合積分値は，以下となる．

$$d(x) = \int_0^x c(s)ds \qquad \text{(3)}$$

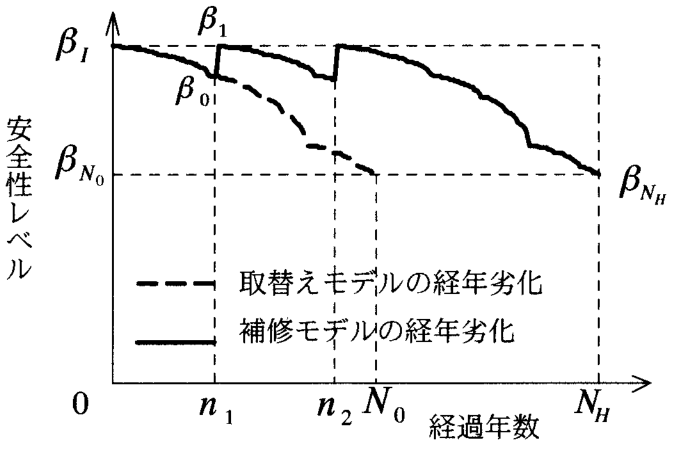
式（2a)，(2b）から得られる関数値は，直接劣化パターンを表現する物理的な意味は見出せないが，この関数は連続で，ほとんどで微分可能でありその値は０となるが任意の区間でみると単調減少している．横軸を時間とした時，日単位での安全性レベルの減少はない（微分＝０）が長い日数をみたとき構造物は劣化しているということより経年劣化（０からx年）の説明として例えばバスタブタイプ曲線[7)]あるいは標準劣化曲線[10)]といったものよりも感覚的に合うという理由で採用した．

式（2a)，(2b）を用いた２通りの劣化パターン関数としてそれぞれ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．本研究では，安全性レベルの劣化状況を表すものとして上の式を用い，式(４)で表される劣化をType1，式（５）で表される劣化をType2として用いた．

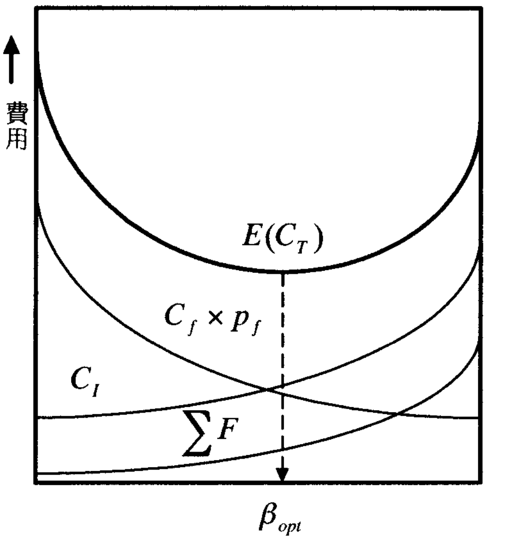
$$\beta = \beta_1 \times F_1(\lambda \frac{N}{N_0}) \qquad (4)$$

$$\beta = \beta_1 \times F_2(\lambda \frac{N}{N_0}) \qquad (5)$$

ここで，β_1は初期建設時の安全性レベルを，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



図－３　劣化状況図



図－４　総期待費用最小化原則の概略観念図

きの安全性レベルが Type1 と，Type2 でそれぞれ等しくなるように次のように設定した[1),2)]．

劣化の比較的少ない場合:

Type1 においてλ＝0.68

劣化が比較的進む場合:

Type2 おいてλ＝0.355

式（４），式（５）から得られた劣化パターンを図－1，図－2 に示した．

さらに，LCC の比較として次の２つのモデルを対象とした．

（取り替えモデル）＝土木構造物を建設して対用年数がきたら撤去する

（補修モデル）　＝土木構造物の建設後，補修を行うことにより少しでも構造物を長持ちさせる

図－３は，取替えモデルと補修モデルの劣化状況を図示したものである．建設時の安全性レベルをβ_Iとする．取替えモデルは，N_0年経過した時点で取替え作業を行う．補修モデルは，n_i年に補修作業を行い土木構造物の安全性レベルβ_N i をβ_1まで回復させる．この作業を何回か行い，耐用年数N_0年を越えるときそこで補修作業をやめ，橋梁の安全性レベルがβ_{N_0}になったときに撤去作業を行い，建設からの経過年数N_Hを補修モデルの寿命とする．ただしn_iは本文 6.にあるように乱数を利用して発生するものとする．またそのときのβ_N i はパターンの違いによって式(4)または式(5)から求められる．

４．総期待費用最小化原則について[3),11),12)]

一般に，総期待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．

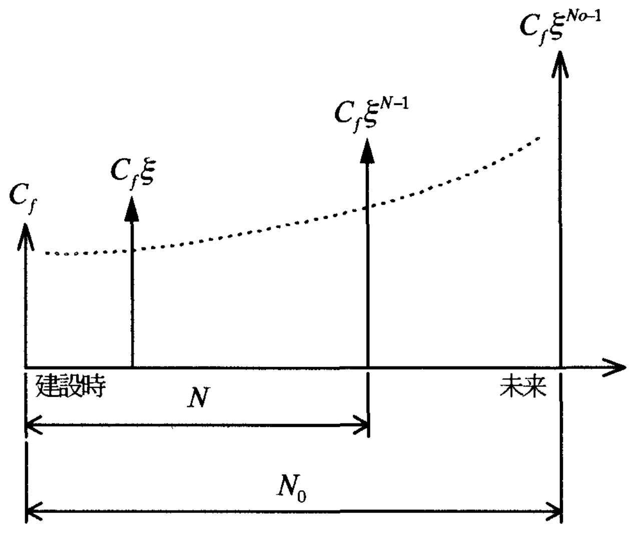
$$E(C_T) = C_I + C_f \times p_f + \sum F \qquad (6)$$

ここで，$E(C_T)$は総損失費用の期待値（本研究ではこれを LCC とする）を表し，C_Iは構造物の初初期費用を，p_fは構造物が機能を果たせなくなる何ら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，$\sum F$は総補修費用をそれぞれ表すものとする．そのため，取替えモデルでは，$\sum F = 0$となる．

ただし，ここでは問題を単純化するために，点検等にかかわる費用については考慮から外してある．

式（６）における，初期費用と社会的損失費用及び総補修費用の関係の概略を図－４に示す．この図から，構造物の安全性レベルを上げると，構造物にかかる初期費用及び総補修費用は増加するが，その分構造物が何らかの悪い限界状態に陥りにくくなり，その結果として社会的損失費用は減少することを表している．また，費用$\sum F$をかけ補修を行うことによってさらに社会的損失費用が減少することが期待できる．

以上から，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性レベルにおいて最小となるこ



図－5　社会的損失費用の資金流れ図

とが期待される．そこで，期待総損失費用の最小値をLCC の最適値とし，このときの安全性レベルを最適な安全性レベル β_{opt} とする．

ここでは，初期費用 C_I は前述の中央安全率 $\bar{\theta}$ と次のような関係があると仮定した[13]．

$$C_I = a(1.0 + b\bar{\theta}) \qquad (7)$$

ここで，a，b は定数を表す．

社会的損失費用については，建設時での価値を C_f と仮定したとき，建設後の経過年数のある時点で限界が来たときの社会的損失の価値 $C_f(N)$ は，利率 i とした場合の現在価値として次のようになる．

$$C_f(N) = C_f \times \xi^{N-1} \qquad (8)$$

ここで，$\xi = 1.0 + i$，N は建設時からの経過年数を表す．社会的損失価値の経過年数との関係をキャッシュフローとして図－5に示した．図中の N_0 は構造物の設計耐用年数を表す．

以上より，社会的損失費用は，建設時からの経過年数 N 年の期間の期待値を用いることにすると，以下のように表される．

$$\begin{aligned}\bar{C}_f &= C_f(1 + \xi + \xi^2 + \cdot\cdot\cdot + \xi^{N-2} + \xi^{N-1})/N \\ &= C_f(\xi^N - 1)/N(\xi - 1) \qquad (9)\end{aligned}$$

また，限界状態の発生確率 p_f についても同様に，建設時からの経過年数 N 年の期間の期待値を用いることにすると，以下のように表される[1),2),3)]．

$$\bar{p}_f = \Phi(-\bar{\beta}) \qquad (10)$$

$$\bar{\beta} = \frac{1}{\lambda \cdot N}\int_0^{\lambda \cdot N} \beta_1 \times F(\frac{t}{N_0})dt \qquad (11)$$

ここで，$\Phi(\cdot)$ は標準正規分布を，$\xi = 1.0 + i$ を，i は利率を表す．

以上より，式（6）は次のように表わされる．

$$\begin{aligned}E(C_T) &= a(1.0 + b\bar{\theta}) \\ &+ C_f \times \Phi(-\beta) \times (\xi^N - 1)/N(\xi - 1) + \sum F\end{aligned} \qquad (12)$$

5．社会的損失費用の曖昧さについて

(1) 総期待費用最小化原則の変化について

LCC で考慮されるべき曖昧さとしては，構造物の耐用年数の決定と，それに関係する荷重再現期待値の想定また，初期費用に絡む材料の選択，さらに架設工事の状況及び人件費の算定等があるが，本研究では数学的モデルの容易さから，社会的損失費用 C_f に曖昧さを持たせ $\tilde{C}_f$ とすることにしたが，その理由を以下に示す．

(a)総補修費用 $\sum F$ は補修モデルの場合しか幅ができない．

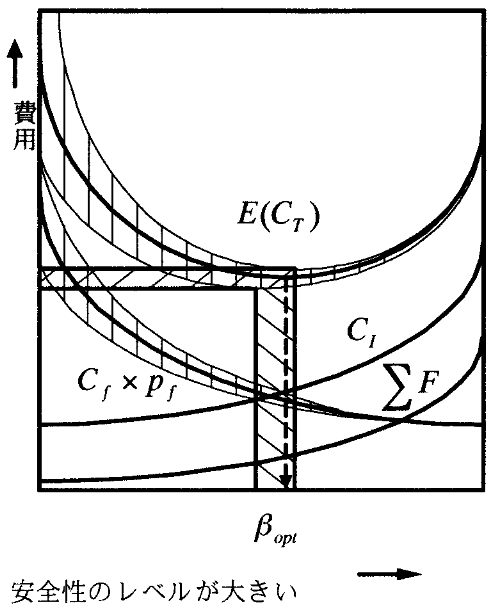
(b)限界状態の発生確率 p_f については，確率に幅を与えることになるのでファジィ確率なども考慮に入れなければならないため．

(c)構造物の初期費用 C_I については，幅を持たせることも可能だと考えられるが，C_f と比較した場合より後者のほうが幅を持たせるのに適していると考える．

以上から式(12)は以下のように書き換えられる．

$$\begin{aligned}\tilde{E}(C_T) &= a(1.0 + b\bar{\theta}) \\ &+ \tilde{C}_f \times \Phi(-\beta) \times (\xi^N - 1)/N(\xi - 1) + \sum F\end{aligned} \qquad (13)$$

式（13）の概略観念図を図示したものが図－6であり，社会的損失費用に曖昧さを付与した結果，期待総損失費用及び最適安全性レベルに幅ができることが分かる．これにより，やや現実的ではない厳格な最適安全性レベルと，それにより評価される LCC に比較して，ある程度の許容される範囲を設計に生かすことが可能になる.したがって,設計に対して代替案が提示しやすくなる利点が出てくるものと考えられる．



図－6　ファジィ導入後の概略観念図

(2) ファジィ線形計画問題について[14)]

以下に示す計算はファジィ線形計画問題を用いて行うが，その手法の詳細に関しては，文献[14)]等を参照されたい．

式(13)の変数はすべてβで表すことができるため，$\tilde{E}(C_T)$をβの関数として$\tilde{f}(\beta)$とおく．今，$\tilde{f}(\beta)$は非線形の関数であるから，テーラー展開をして線形化すると，式 (13) は次のように表すことができる．

$$\tilde{f}(\beta) = s + \tilde{t} + \tilde{u} \times \beta \tag{14}$$

ここで，sはファジィ数でないものを，$\tilde{t}$はファジィ数を，$\tilde{u}$は変数βにかかるファジィ係数をそれぞれ表している．

次に，期待総損失費用が最良の場合と最悪の場合の２つを制約条件としてとして表すと以下のようになる．

$$\tilde{E}_{\min} \le \tilde{E}(C_T) = \tilde{f}(\beta) \le \tilde{E}_{\max} \tag{15}$$

ここでは，計算を単純とするため最良値$\tilde{E}_{\min}$及び最悪値$\tilde{E}_{\max}$の幅は考えないこととする．式 (15) を，ノン・ファジィ線形計画問題[13)]として定式化を行うと下の２式が得られる．

$$\tilde{Y}_1 = \tilde{E}_{\max} - s - \tilde{t} - \tilde{u} \times \beta \ge 0 \tag{16}$$

$$\tilde{Y}_2 = -\tilde{E}_{\min} + s + \tilde{t} + \tilde{u} \times \beta \ge 0 \tag{17}$$

以上より，ノン・ファジィ決定問題として式 (16)，(17) を書き改めると以下となる．

$$\tilde{Y}_1 = (E_{\max} - s - t - c_t \times h) + (-u - c_u \times h)\beta \ge 0 \tag{18}$$

$$\tilde{Y}_2 = (-E_{\min} + s + t - c_t \times h) + (u - c_u \times h)\beta \ge 0 \tag{19}$$

ここでt,uは$\tilde{t},\tilde{u}$の中央値を，c_t, c_uはそれぞれの幅を表す．

式(18)，(19) という制約条件のもと，

$$h \to \max \tag{20}$$

を目的関数として，βの最適値β_{opt}を求める．

以上より，取り替えモデルと補修モデルの各種条件を同じにして計算することにより２つのモデルを比較・評価し，最適安全性レベルβ_{opt}から最適期待総損失費用$E(C_T)_{opt}$を求め，期待総損失費用$E(C_T)$及び安全性レベルβにどのような幅が表れるかを調べる．

６．計算例及び考察

補修期間が必要となる経過年数の設定は，補修期間そのものがいつになるかが確定的に判定できにくいものであるので，ここでは確率変数として乱数を発生させることで求めることにした[1,2)]．

いま，構造物の補修が必要となる年の分布がポアソン分布に従うと仮定すると，その期間の分布は指数分布になることから，指数分布の期待値をkとすると，t年以内に補修が必要となる確率は以下のように求められる．

$$t_i = -\frac{1}{k}\ln(1 - prob) \tag{21}$$

ここで$prob$は0～1の一様乱数でt_iはi番目の時期を表わす．また本研究では補修の必要となる期間の期待値を10年に１度と仮定した．

期待総損失費用$E(C_T)$の計算におけるパラメーターの組み合わせは表－1に載せる．

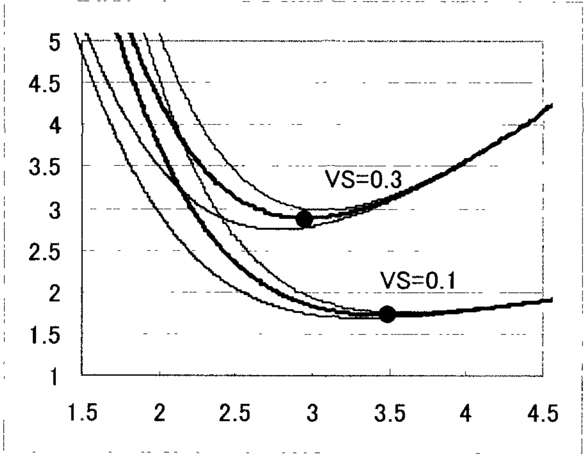
社会的損失費用$\tilde{C}_f$については，中央値を 9.0，幅を3.0と設定したが，これは既往の研究より得られた結果を予想値として用いたものである．

図において，横軸は初期安全性レベルβ，縦軸は無次元値$E^*(C_T) = (E(C_T - a)/ab$を表している[1)]．

また，$VS = 0.3, 0.1$の３本の曲線のうちまん中の曲線は計算より得られた$E^*(C_T)$の中央値を表し，上の曲線，下の曲線はそれぞれの中央値から計算より得られた幅を考慮した$E^*(C_T)$の最悪値，最良値を表す．

表－1　初期パラメーターと変数

	取替え Type1	取替え Type2	補修 Type1	補修 Type2
劣化係数（λ）	0.68	0.355	0.68	0.355
利率（i）	0.05	0.05	0.05	0.05
耐用年数（N_0）	40,60 80	40,60 80	40,60 80	40,60 80
荷重の変動係数（V_S）	0.1 0.3	0.1 0.3	0.1 0.3	0.1 0.3
強度の変動係数（V_R）	0.1	0.1	0.1	0.1
補修費用係数（ε）			1.0	1.0
平均補修発生係数（AVK）			10	10



図－7　安全性レベルと期待総損失費用

取替えモデル Type 1，$N_0 = 40$

図中の点は，$E^*(C_T)$の中央値における最適値β_{opt}をプロットしたものである．

(1) 取替えモデルについて

a) 劣化モデル Type 1 について

図－7 は，設計耐用年数が 40 年のときの想定荷重に対する変動係数が 0.1 及び 0.3 の場合を，図－8 は 60 年の場合を，図－9 は 80 年の場合をそれぞれ図示したものである．

設計耐用年数が長いほど最適な初期安全性レベル

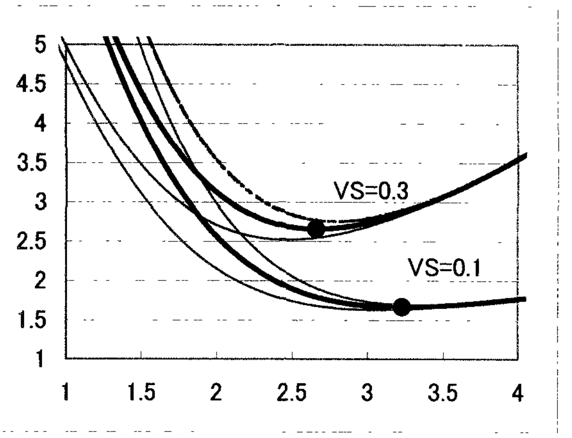
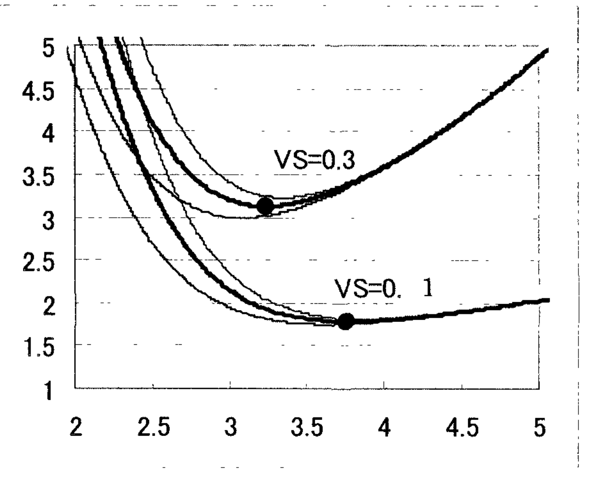


図-8 安全性性レベルと期待総損失費用

取替えモデル Type 1，$N_0 = 60$



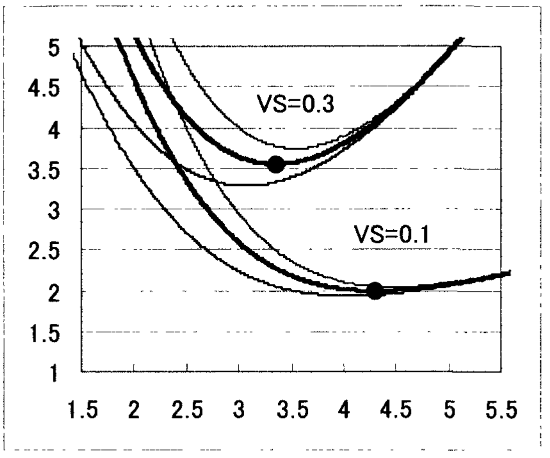
図－9　安全性レベルと期待総損失費用

取替えモデル Type 1，$N_0 = 80$

を高く設定する必要があるといえる．しかし，図より安全性レベル及び期待総損失費用の幅に対しては，設計耐用年数はほとんど影響していないことが分かる．

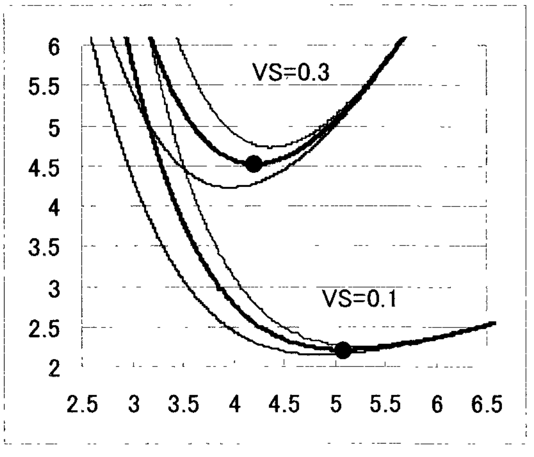
また，安全性レベルを向上させた場合の期待総損失費用の増加は，それほど大きいものではない．これより，設計耐用年数を長く設定する場合は，相対的に初期安全性レベルを高めておくことが経済的に有利であり，社会的損失費用の曖昧さを考慮する必要は少ないと言える．

想定荷重に対する変動係数が大きくなると，最適安全性レベルは小さく設定することになるが，逆に最適期待総損失費用は大きくなる．それに伴い相対的に期待総損失費用の幅も大きくなるが，安全性レベルの幅はほとんど変わらない．



図－10　安全性レベルと期待総損失費用

取替えモデル Type 2， $N_0 = 40$



図－11　安全性レベルと期待総損失費用

取替えモデル Type 2， $N_0 = 60$

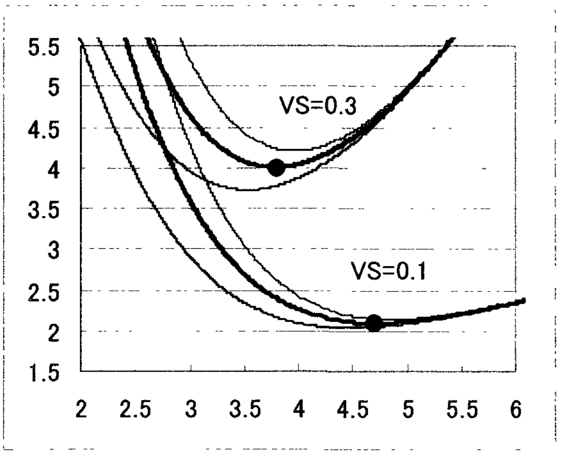
また変動係数が大きくなると，安全性レベルの変化による期待総損失費用への影響が大きくなるため，荷重にばらつきがあると予想される場合は安全性を下げておく方が経済的にみて有利であると考えられる．

その場合，期待総損失費用の幅が大きく，中央値に対するあいまいさが大きくなるので，構造物の耐用年数に応じて安全性レベルを高めて建設することが望ましいと考えられる．

b）劣化モデル Type 2 について

図－10，図－11，図－12 はそれぞれ設計耐用年数が 40 年，60 年，80 年の取り替えモデルについての場合を示したものである．

設計耐用年数の増加，想定荷重に対する変動係数の増加による安全性レベル及び期待総損失費用の変化は，Type 1 の場合と同じである．しかし，それぞれの増加に伴う変化の仕方は大きくなっている．



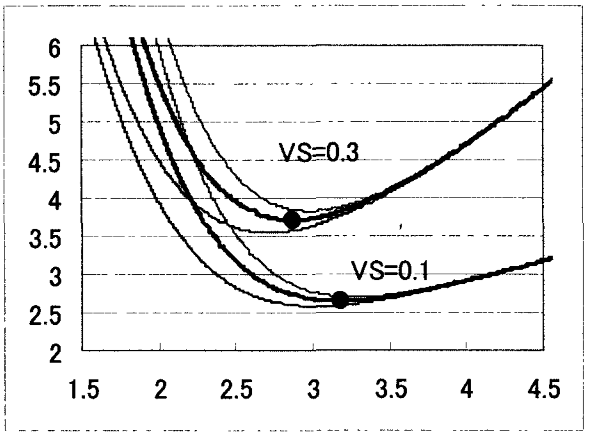
図－12　安全性レベルと期待総損失費用取替えモデル

Type 2， $N_0 = 80$

Type 1 と比較すると，想定荷重に対する変動係数が小さい場合，最適安全性レベルの増加に比べ最適期待総損失費用の増加は少ない．つまり，劣化速度が速く変動係数が小さい場合は，安全性レベルを上げておいたほうが経済的にも有利であると言える．

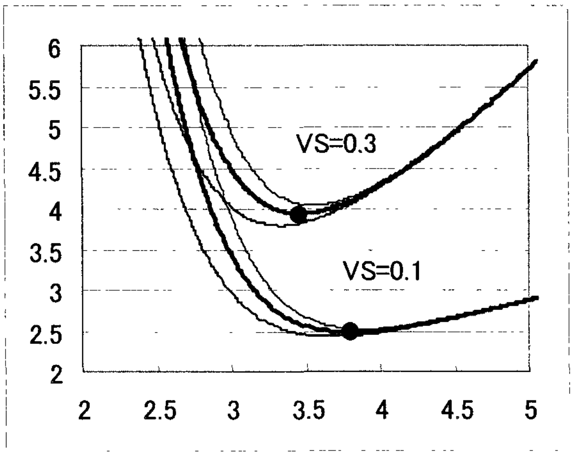
設計耐用年数が長く，想定荷重に対する変動係数が大きくなると，Type 1 に比べ最適安全性レベル及び最適期待総損失費用の幅は大きくなる．つまり，劣化速度が速い場合は，安全性レベル及び期待総損失費用に対して，社会的損失費用の曖昧さが大きく影響することが分かる．これより，構造物の重要度，建設場所の環境条件などに応じて安全性を上下させて設計する必要があると言える．

想定荷重に対する変動係数が小さい場合は，最適安全性レベル付近の期待総損失費用の幅は小さく考慮に入れる必要はないが，変動係数が大きい場合は期待総損失費用の幅が大きくなり，その中央値への信頼性は低くなり，安全性レベルの増減により経済性が大きく変化する．また劣化 Type1 に比べ Type 2 では，想定荷重に対する変動係数が 0.1 のときと 0.3 のときとの最適安全性レベルの差が大きい．これより，荷重にばらつきがあると予想される場合には，劣化速度が遅いタイプよりも速いタイプのほうの安全性レベルを下げておかなければ，経済的に不利になってしまう恐れがあると言える．



図－13　安全性レベルと期待総損失費用

補修モデル Type 1， $N_0 = 40$



図－14　安全性レベルと期待総損失費用

補修モデル Type 1， $N_0 = 60$

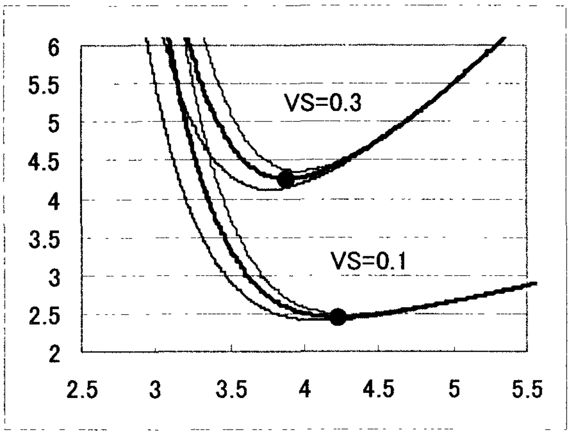
(2) 補修モデルについて

補修を行うことにより，最初に設定した設計耐用年数の 40 年，60 年，80 年はそれぞれ平均的に 74 年，115 年，148 年に延命することがわかった．

a) 劣化モデル Type 1 について

図－13，図－14，図－15 はそれぞれ，設計耐用年数が 40 年,60 年,80 年の場合を図示したものである．

想定荷重に対する変動係数が小さい場合には，設計耐用年数が長くなると，最適安全性レベルは大きくなるが，取替えモデルと違って最適期待総損失費用は減少する．それは，設計耐用年数の増加に伴う初期費用と総補修費用の増加に比べ，社会的損失費用と限界状態の発生確率との積の減少が大きいためである．これより，劣化速度が遅く荷重のばらつきが小さい場合は，耐用年数を長く設定するほうが経済性につながる．



図－15　安全性レベルと期待総損失費用

補修モデル Type 1， $N_0 = 80$

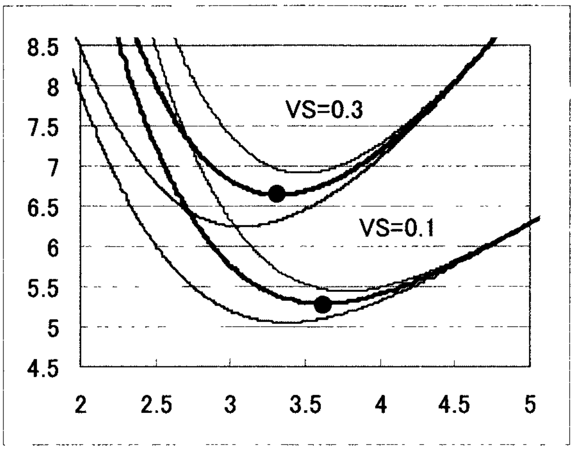
逆に想定荷重に対する変動係数が大きい場合に設計耐用年数が長くなると，取替えモデルと同様に最適安全性レベルと共に最適期待総損失費用も増加する．これは，設計耐用年数の増加に伴う社会的損失費用と限界状態の発生確率との積の減少を初期費用と総補修費用の増加が上回ったためである．これより，劣化速度が遅く荷重のばらつきが大きい場合は，耐用年数を短く設定することが経済性につながるといえる．

想定荷重に対する変動係数の増加に伴う安全性レベル及び期待総損失費用への影響は，取替えモデルと同じであるが，変動係数が 0.1 のときと 0.3 では最適安全性レベルの差は取替えモデルに比べ比較的少ない。よって，荷重のばらつきが大きいと予想される場合でも，安全性レベルを下げる必要性は低いといえる．

b) 劣化モデル Type 2 について

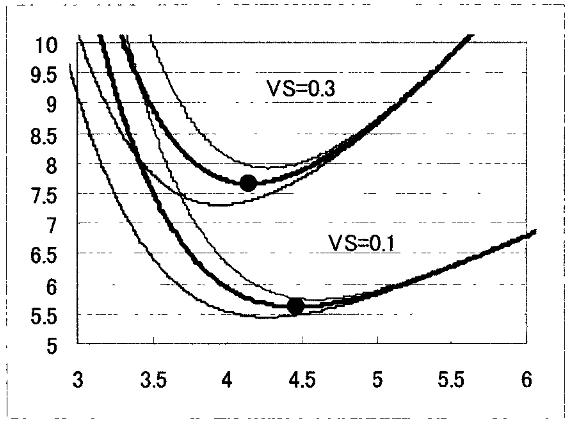
図－16，図－17，図－18 はそれぞれ，設計耐用年数が 40 年，60 年，80 年の場合を図示したものである．この補修モデル Type2 は，4 つのモデルの中で最適期待総損失費用が最も高く，期待総損失費用の幅も最も大きい．そのため，安全性レベルの増減によって経済性が大きく変化する．

設計耐用年数の増加と，想定荷重に対する変動係数の増加に伴う安全性レベルの，期待総損失費用への影響は，取替えモデルの場合とほとんど同じである．このモデルでは，上述の 3 つのモデルと異なり，想定荷重に対する変動係数が小さい場合でも最適安全性レベル付近の期待総損失費用の幅が大きく，期待総損失費用の中央値へあいまいさが増加する．



図－16　安全性レベルと期待総損失費用

補修モデル Type 2，$N_0 = 40$



図－17　安全性レベルと期待総損失費用

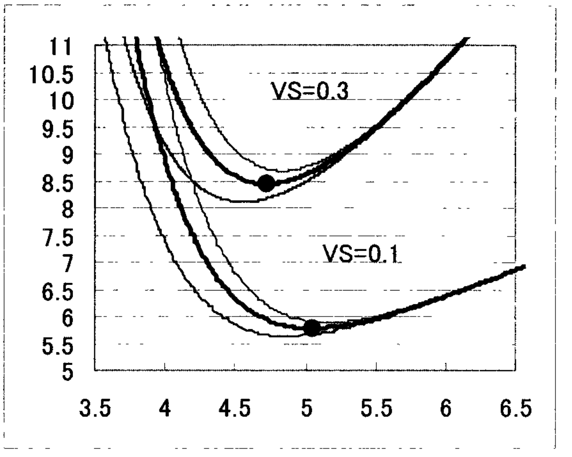
補修モデル Type 2，$N_0 = 60$

想定荷重に対する変動係数については，変動係数が0.1のときと0.3のときとの最適安全性レベルの差は，補修モデル Type 1とあまり変わらないが，最適期待総損失費用の差は他の3つのモデルと比べかなり大きい．これより荷重のばらつきが大きいと予想される場合は，安全性を下げる必要性は低いが，経済的に不利になる覚悟が必要と考えられる．

c）結論

設計耐用年数だけで比較した場合，設計耐用年数が長くなれば，最適安全性指標は大きく設定する必要がある．それに応じて，最適期待総損失費用も大きくなるが，その増加量はわずかである．つまり，安全性レベルを高めておいた方が構造物は長い間その機能を果たすことができ，経済的にも有利であるといえる．

想定荷重に対する変動係数だけで比較した場合，変同



図－18　安全性レベルと期待総損失費用

補修モデル Type 2，$N_0 = 80$

係数が大きいほうが最適安全性指標は低く設定することになり，逆に最適期待総損失費用は大きくなる．つまり，荷重にばらつきがあると予想される場合は，安全性レベルは高めておく必要性はないが高いコストを覚悟しなければならない．

劣化速度の違いで比較した場合，劣化速度が速くなると最適安全性指標，及び最適期待総損失費用は共に大きくなる．つまり，劣化速度が速くなると考えられる環境に構造物を建設する際には，安全性レベルを高めておく必要がある．

取替えモデルと補修モデルで比較した場合，補修することにより設計耐用年数の2倍近い寿命が得られるが，補修モデルの最適期待総損失費用は取替えモデルの最適期待総損失費用の2倍よりもかなり少なく，取替えモデルよりも補修モデルの方が本研究の LCC からみて経済的であると言える．しかし，劣化速度が速く (Type1)，荷重のばらつきが少ないと期待される場合には，取替えモデルと補修モデルの関係は逆転しているため，取替えモデルの方が経済的であると言える．

7．まとめ

本研究では，土木構造物に対して，取替え，補修の各モデルについて数値シミュレーションを行ったときに，社会的損失費用に曖昧さを付与した場合の安全性レベルと LCC が，どのように変化するかを調べた．

従来の研究と比較して，社会的損失費用に曖昧さを持たせることにより，安全性指標及び期待総損失費用に対しても幅ができ，設計に際しての安全性，経済性

に許容範囲ができた．これにより，構造物の重要性などに応じてその許容範囲内での設計ができるようになった．

現段階では，土木構造物の劣化や耐用年数などを予測することは難しく，その予測には莫大な資料・データを必要とするため，資料・データを収集・整理することが重要である．そこからある程度の要因を予測し，計算することによって，土木構造物の性質・状態に合った維持・管理を行うことが必要である．本研究はその予測・評価の一つの手段を示していると言える．

参考文献

1) 高沢和典，小山健：ライフサイクルコストを考慮した構造物の経済的側面，土木学会建設マネジメント論文集 vol.4, pp91-98, 1996.

2) 高沢和典，松田賢，小山健：繰り返し荷重に対する構造物の初期安全性レベルと LCC，土木学会建設マネジメント論文集 vol.6,pp289-298,1998.

3) Ken Koyama, Reliability based economic evaluation of structures considering the life term, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.6, No.2, JSCE, pp.187-193, Oct., 1989.

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

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

6) 藤野陽三：確率論に基づく安全性照査法と構造設計，土木学会誌，pp33-36, 1978,2.

7) 室津義定，大場史憲，米沢政明，藤井進：システム工学，森北出版，1987, 12.

8) 高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，1987, 12.

9) ベンワー・マンデルブロ：フラクタル幾何学，日経サイエンス，1989,2.

10)佐藤弘史：橋梁マネジメントシステム,特集「社会基盤の維持管理と再生を考える」,土木学会誌 Vol.85,2000.2.

11) 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，pp21-28,No.327,1982.

12) 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，pp221-228, JOCOSSAR '91,A-28, 1991.

13) Lind,N.C.:Approximate Analysis and Economic Structures, ASCE,Vol.102,No.ST6,pp1177-1195,1976.

14) 田中英夫，市橋秀友，浅井喜代治：ファジィ関数によるファジィ線形計画問題の定式化，日本自動制御学会論文集 vol,25, No.6, pp351-357, 1981.

The LCC evaluation of structures considering the fuzziness of the social loss cost

by Yukihiro Koyama, Ken Koyama and Shuhei Hayashi

The LCC evaluation of structures is important to the construction management. The LCC is minimized based on principle of excepted total cost minimum in this paper. The social loss cost due to the failure of structures used in this principle is very difficult to estimate exactly. In the former studies of this problem, the social loss cost is considered to be crisp variables. However, the variables should be considered to be uncertain variables. The variables are, therefore, treated as the fuzzy variables. The fuzzy linear programming is used to obtain the optimum values of safety indices and the minimum total LCC costs that are function of safety index. Both the optimum safety indices and the LCC have mean value and its width, according to the nature of fuzzy number. From the obtained result, the alternative solutions that are not unique solutions but vague solutions may be proposed in the prospect design to the construction of structures. The optimum safety indices and LCC are compared with the different deterioration type of structures and the coefficient of variations that express the carrying load variations of structures.