

繰り返し荷重に対する構造物の初期安全性レベルとLCC

東京電力(株) 高沢和典*

東京エンジニアリング(株) 松田 賢**

信州大学工学部 小山 健***

by Kazunori Takasawa, Ken Matsuda and Ken Koyama

わが国の今後の公共投資に関しては困難な問題が山積しており、いかに適切に投資がなされまたその後の維持補修が適切に実行されるかが大きな課題となってきた。公共投資の縮減政策あるいは抑制策についてはさまざまな議論があるのは当然としても方向としては困難な状況にあるのは否めない。したがって、今後建設される構造物は、経済的で安全なまた維持補修の容易な構造物の建設が望まれる。

本研究は、今後建設される構造物に対する初期安全性レベルの設定に必要となる、その構造物の維持補修に関した劣化状況をモデル化し、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場合の構造物のライフサイクルコストを求めようとするものである。この場合、最適安全性レベルの設定に関して構造物が繰り返し荷重を受けるモデルを想定している。このように処理することで、地震荷重のような荷重を想定した場合においても構造物の最適初期安全性レベルの設定が可能となると考えた。

【キーワード】ライフサイクルコスト、維持補修、初期安全性レベル、繰り返し荷重

1. まえがき

わが国の公共事業費に関しては、閣議決定された『公共工事コスト縮減対策に関する行動指針』¹⁾をはじめとして、これまでにさまざまな議論がなされてきており²⁾⁻⁴⁾、今後の公共投資のあり方にこれまで以上の経済性の制約と困難が顕在化してきている。経済性の制約があるといえども一方で、国民の財産としての公共構造物は、安全性がより強く求められるものでもあることは当然であろう。したがって、今後建設されるべき社会基盤としての土木構造物は、安全でかつこれまで以上に経済性に優れたものが求められる。

この場合、経済性としては、構造物の初期投資としての経済性のみならず、構造物の生涯に関わる費

用全体の、すなわちライフサイクルコスト(LCC)を考慮する必要がある⁵⁾⁻⁸⁾。

本研究は既往の研究⁹⁾に対して、具体的な荷重を想定した、維持補修を考慮にいたした構造物のLCCと初期安全性のレベルの設定を目指している。

2. 構造物の耐用年数について

土木構造物の耐用年数は一般に、1)経済的耐用年数、2)機能的耐用年数、3)物理的耐用年数があるが¹⁰⁾⁻¹³⁾、構造物としてここで考慮する耐用年数は物理的条件に何年間耐えられるかを条件とした物理的耐用年数を対象とする。この耐用年数の決定は主として設計荷重の再現期間を対象にするものと、構造物の強度に基づいたものとがある。本研究で取り扱う繰り返し荷重を想定した場合には、荷重の再現期間が、構造物の設計に対する耐用年数の決定の一つの指標となるものである。大蔵省令による法定

*甲府工務所土木課 0552(43)6247

**江東区東陽 ANビル 03(5632)4100

***社会開発工学科 026(226)4101

的耐用年数を参考にすると、一般には、例えばコンクリート構造物では約 40～50 年であるので、ここでは 40～80 年程度とした。

3. 構造物の経済性評価方法

3.1 経済性評価モデル

土木構造物の経済性評価方法として、本研究では、それが建設された後劣化が進み設計耐用年数が来た時点で速やかに取替えるモデル（取替えモデル）と、建設後劣化状態に応じて補修を実行し、設計耐用年数より幾分でも長く使用し、その後あるレベルに達した後廃棄するモデル（補修モデル）の 2 つのモデルで評価することにした。この場合の費用の評価として、期待総費用最小化に基づく以下のような式を用いた。

$$E(C_T) = C_I + p_f \cdot C_f + \sum_k F_k \quad (1)$$

ここで、 $E(C_T)$ は L C C の期待損失コストを、 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らかの限界状態が生起する確率を、 C_f はその様な現象が生ずることによる社会的損失費用を、 $\sum_k F_k$ は劣化レベルが、ある設定されたレベルを下回る限界が生じた場合の、補修回数 k にかかる総費用を、それぞれ表わすものとする。

ただし、取り替えモデルにおいては $\sum_k F_k = 0$ とし、定期的維持補修費用と点検等にかかる費用は考慮から外した。さらに、初期費用は以下のように表わされるものとした¹⁴⁾。

$$C_I = a(1 + b\bar{\theta}) \quad (2)$$

ここで、 a, b は定数で、 $\bar{\theta}$ は一般に中央安全率と呼ばれ、式 (1) p_f と次の関係がある。

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

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

ここで、 V_R, V_S はそれぞれ、構造物を構成する強度に関する変動係数と構造物に作用する荷重の変動係数である。また $\Phi()$ は標準正規分布関数である。

式 (3) は一般に安全性指標と呼ばれ、構造物の

安全性のレベルを、確率的に評価する場合の有効な指標となっている¹⁴⁾。

3.2 荷重モデルと破壊関数

ここでは構造物に作用する荷重のイメージとしてポアソン分布に従う繰り返し荷重を想定した^{15), 16)}。この場合、時間間隔 $(t, t + \Delta t)$ において荷重作用が必ず一度生起する確率は $h \cdot \Delta t$ である。ただし h は定数である。

いま荷重の期待再現期間を T_R とすると、 $h = 1/T_R$ であるので、 $h \cdot t = t/T_R$ は、時間間隔 $(0, t)$ における荷重の平均生起回数を表わす。

時間間隔 $(0, t)$ において荷重の発生回数は確率変数であり、発生回数が k 回となる場合の確率を $p_k(t)$ とすると、

$$p_k(t) = (ht)^k e^{-ht} / k! \quad (4)$$

となる。

ここで信頼性関数を $L_T(t)$ とおくと、

$$L_T(t) = P_r(T > t) \quad (5)$$

であるから、破壊関数 $F_T(t)$ は、

$$F_T(t) = 1 - L_T(t) \quad (6)$$

となる。したがって、 k 番目までの荷重作用に対して構造物が生き残る確率は、

$$\begin{aligned} L_T(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} \Pr(\text{非破壊} / k \text{ 番目の発生荷重}) \cdot p_k(t) \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} (ht)^k e^{-ht} \frac{(1 - p_f)^k}{k!} = e^{-ht p_f} \end{aligned} \quad (7)$$

で与えられるので、式 (6) より、破壊関数は

$$F_T(t) = 1 - e^{-ht p_f} \quad (8)$$

となる。式 (8) は $ht = 1$ の場合に単一の荷重作用の場合の破壊関数 $F_T(t) = p_f$ に一致する。したがってこの破壊関数を式 (1) の p_f に代入することで、繰り返し荷重に対して適用可能な式となる。

3.3 安全性レベルの劣化状況について

構造物は供用開始以降確実に劣化する。劣化の原因および種類は、構造物の使用材料にも依存し、さまざまなものが考えられるが、ここでは安全レベルに注目した劣化パターンをモデル化した。劣化パターンとその維持・補修政策にもさまざまなものが考えられている^{17)–19)}。しかしながら確定したモデル

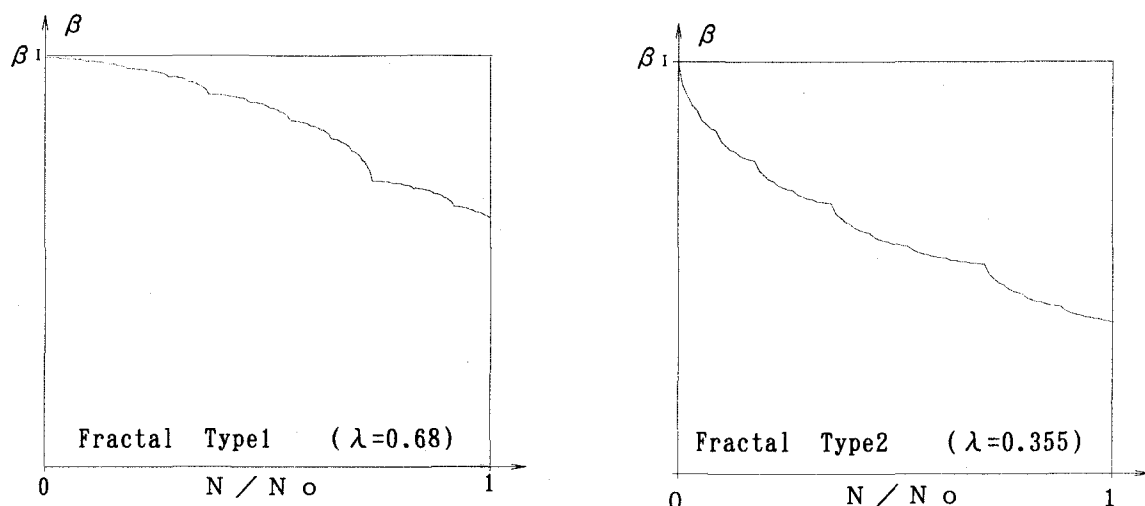


図-1 安全性レベルの劣化状況

はなく、ここでは図-1で示されるようなフラクタル劣化パターンを仮定した⁹⁾。この図で横軸の N_o は設計耐用年数を、 N は供用開始からの経過年数をそれぞれ表わす。また縦軸の β_I は供用開始時点での構造物の初期安全性レベル (Initial Safety Level) を表わすものとする。また λ は劣化のパターンが比較的ゆっくりのもの ($\lambda = 0.68$) と比較的急なもの ($\lambda = 0.355$) を表現するパラメータとして用い、 β_I と以下のような関数であらわされる。

$$\beta = \beta_I \cdot R(\lambda \cdot N / N_o) \quad (9)$$

なお、用いた劣化パターン関数 $R(\cdot)$ は以下のような De Wijs のフラクタル $c(s)$ に基づいている²⁰⁾。フラクタルタイプを用いた理由については、文献9)を参照されたい。

$$d(x) = \int_0^x c(s) ds \quad (10)$$

ここで、

$$R(x) = \begin{cases} 1 - d(x), & \text{type1} \\ d(1-x), & \text{type2} \end{cases} \quad (11)$$

である。

3.4 最適初期安全性レベル

構造物の LCC としての期待総費用は式(1)で表わされるが、ここで設定すべきは安全性の初期レベルであることから、期待設計耐用年数を通した費用については、初期費用発生時点での現在価値に換算して求め、それに基づいた経済的に見て最適な初期安全性レベルを求めることが必要となる。したがって、

式(1)の補修費用については補修がされた時点での費用に現在価値係数²¹⁾をかけることで評価した。

なお、ある決められた限界状態が発生するまでの経過年数 N は確率変数であるから特定できないので、社会的損失費用 C_f の評価については、以下の

ような N 期間中の平均費用 $\bar{C}_f$ と平均安全性レベル

$\bar{\beta}$ で考慮した。^{6),9)}

$$\bar{\beta} = \frac{1}{\lambda \cdot N} \int_0^{\lambda N} \beta_I \cdot R\left(\frac{t}{N_o}\right) dt \quad (12)$$

$$\bar{C}_f = C_f (\xi^N - 1) / (N \cdot (\xi - 1)) \quad (13)$$

ここで、 $\xi = 1 + i$ で i は年平均金利である。また、

$p_f \approx \Phi(-\bar{\beta})$ とする。

以上から式(1)は以下のように書き改められる。

$$E(C_T) = a(1 + b\bar{\theta}) + (1 - \exp(-ht \cdot p_f)) \cdot \bar{C}_f + \sum_k F_k \cdot pwf \quad (14)$$

ここで、 pwf は現在価値係数である。

したがって、最適な初期安全性レベル β_I^{opt} は原理的には以下の式を満足する β を求めることで得られる。

$$\frac{\partial E(C_T)}{\partial \beta} = 0 \quad (15)$$

3.5 シミュレーションモデルについて

いま LCC としての期待総費用の評価について以下のような2つのモデルを考慮することにする。

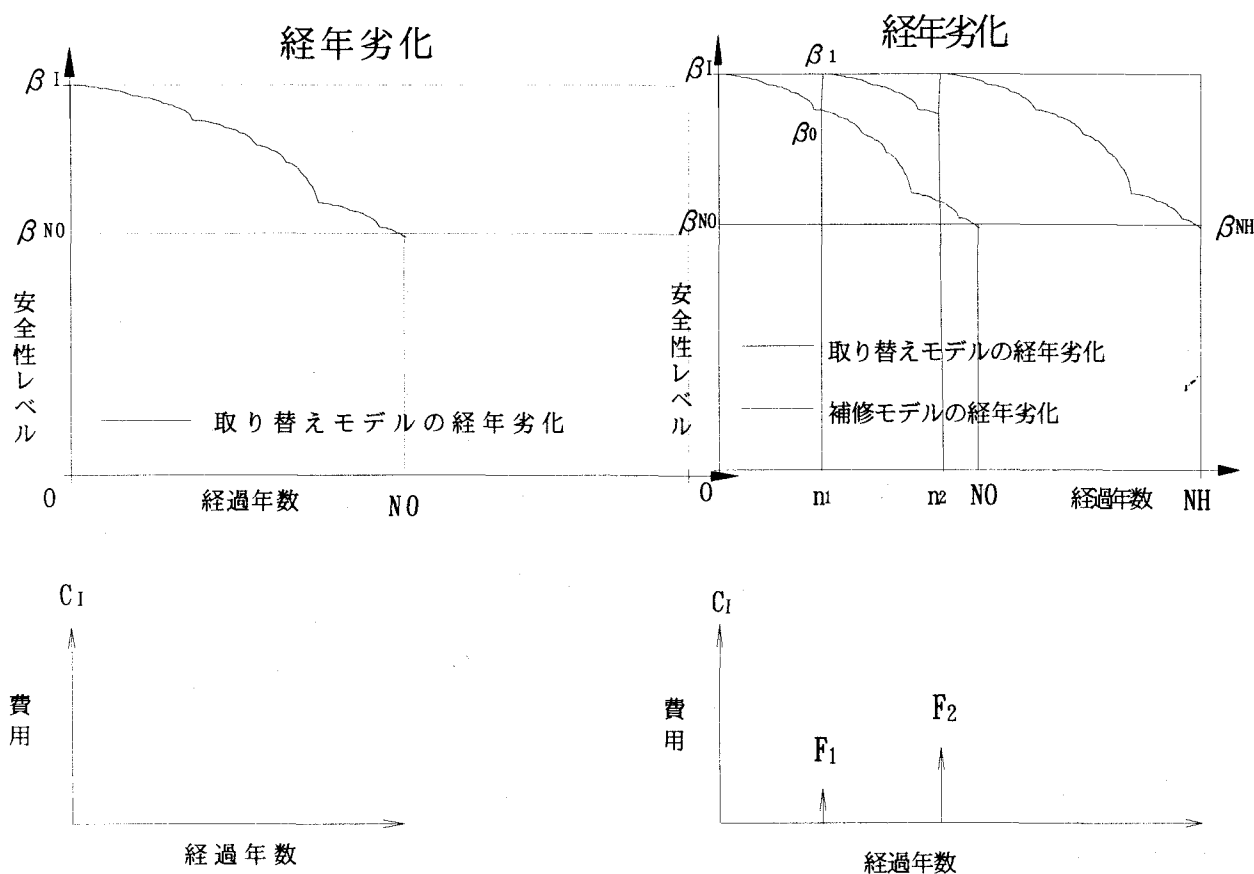


図-2 劣化パターンと補修資金流れ

(1) 取り替えモデル

このモデルは、構造物が決められた供用期間が過ぎ所定の安全性レベルまで劣化した場合に、速やかに別な構造物と取り替えるモデルである。補修は行わないので式(14)で $\sum_k F_k = 0$ となる。

(2) 補修モデル

このモデルは構造物を建設後、安全性レベルの劣化に応じて供用開始後 n_1 年後に費用 F_1 をかけて補修を行い、その時点での構造物の安全性レベル β_{n1} を初期安全性レベル β_1 の $r\%$ 以上まで回復向上させこの過程を繰り返し、構造物の設計耐用年数 N_0 が過ぎた場合にはそこで補修を止め、取り替えモデルの場合と同じ安全性レベル β_{N0} に達した段階で、すなわち供用後 N_H 年後に構造物を廃棄し別な構造物と取り替えるモデルである。ただし、設計耐用年数が過ぎてから、安全性レベルがどの程度劣化したら廃棄するかについての論理的根拠はない。

両モデルについての劣化状況と資金流れ図を、劣化タイプ1を例として、図-2にのせる。

3.6 補修費用と安全性レベルの回復率

補修費用の経年変化は、一般に構造物の劣化状況に依存すると考えられる。劣化の進んでない早期における補修費総額は劣化がかなり進んだ時期のものに比較すれば、ある安全性レベルまで回復するのに比べて相対的に少なくなることが予想される。

ここでは、ある状態の安全性レベルの回復率を、初期安全性レベルに対してどの程度まで確保すればよいのか、例えば 80%にするのかあるいは 70%にするのかを一義的に設定するのは一般的に困難であることから、便宜的に図-2のような 100%を回復するものと仮定した。

いま、補修を実行する建設時よりの経過年数 k における劣化状況に比例した補修費がかかると仮定して、この時の補修費用 F_k を以下のように劣化パターンの関数として表わした。

$$F_k = \varepsilon \cdot \beta_1 (1 - R(\lambda \cdot k / N_0)) \quad (16)$$

ここで、 ε は定数である。式(16)は図-2の例えば経過時点 n_1 においては縦距 $(\beta_1 - \beta_{n1})$ の ε 倍を表わしている。

表－3 計算パラメタ

パラメタ		取り替えモデル Type 1	取り替えモデル Type 2	補修モデル Type 1	補修モデル Type 2
劣化パラメタ	λ	0.68	0.355	0.68	0.355
平均荷重生起回数	ht	0.1～1.0	0.1～1.0	0.1～1.0	0.1～1.0
利 率	i	0.05	0.05	0.05	0.05
設計耐用年数	No	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
平均補修発生期間	$1/\nu$	—	—	10	10

3. 7補修期間の発生

補修が必要となる経過年数は予想不可能であることから確率変数とした．構造物の故障の分布はポアソン分布とすると故障時間の分布は指数分布に従う．この場合指数分布の期待値を $1/\nu$ とすると， t 年以内に故障が発生する(補修が必要となる)時期は一樣乱数 u を用いて以下のように求められる．

$$t = -\frac{1}{\nu} \ln(1-u) \quad (17)$$

4. 計算例および考察

各モデルについてシミュレーションを実行するに際して，パラメタの組み合わせは非常に多くなるため，ここでは表 3-1 にのせた代表的な組み合わせについて考察を加えることにした．

1) 取り替えモデルについて

取り替えモデルの劣化タイプ 1 および 2 についての安全性レベルに対する費用の関係を図－3 および図－4 にのせた．図中 CR は期待再現荷重により何ら限界状態が生起した場合の費用，式(14)の $\bar{C}_f$ に対する初期費用の比を表わしている．したがって CR=10 は限界状態が生起した場合回復に初期費用の 10 倍の費用が見込まれるということを意味している．また図の費用は，荷重の再現性を考慮しない場合のつまり， $ht=0$ のときの $No=40$, $CR=10$, $V_R=0.1$, $V_s=0.1$ の場合の費用を用いて基準化してある．

図－3 (a)から，取り替え劣化タイプ 1 の場合，設計耐用年数が比較的短期である構造物では，期待

再現期間の短い荷重を想定した $ht=0.1$ に比べてそれが比較的長い荷重に対する安全性レベルを高く設定したほうが LCC は有利になる．一方その間の LCC の増加は $CR=10$ の場合で約 10%程度また $CR=50$ の場合でも約 20%程度である．したがって希に起きると考えられる荷重作用に対しては，初期費用を増加することで相対的に初期安全性レベルを高めておいたほうが経済的に見て有利になると思われる．これらの傾向は取り替えタイプおよび補修タイプの両タイプについてみられる．

図－3 (b)には上と同じ条件で $No=80$ の場合についてのせた．構造物の設計耐用年数が長いものについては，短いものに比べて安全性レベルを相対的に高めておいたほうが LCC から見て有利であると考えられる．

図－3(c)に $No=40$ の場合の期待再現荷重の変動係数 V_s のばらつきが大きい場合の LCC と初期安全性レベルの関係をのせた．これらの図から V_s が大きくなると LCC のかなりの増加が見込まれる．ただし安全性レベルは相対的に低く抑えることが経済的に見て有利であることを示している．このことは，不確実性の大きな荷重に対して，不確実性の少ない荷重に対するものと同じレベルの安全性を要求すれば，費用の増加がはなはだしくなるので，費用の最適化を望むとすれば安全性のレベルをある程度下げざるを得ないと考えられるからである．

図－4 には劣化タイプ 2 について，タイプ 1 との比較のために $No=40$ の場合をのせた．これらの図から，劣化が比較的早く進むと考えられる場合の構造物の初期安全性レベルについては，そうでない場合より，相対的に上げておいたほうが LCC からみ

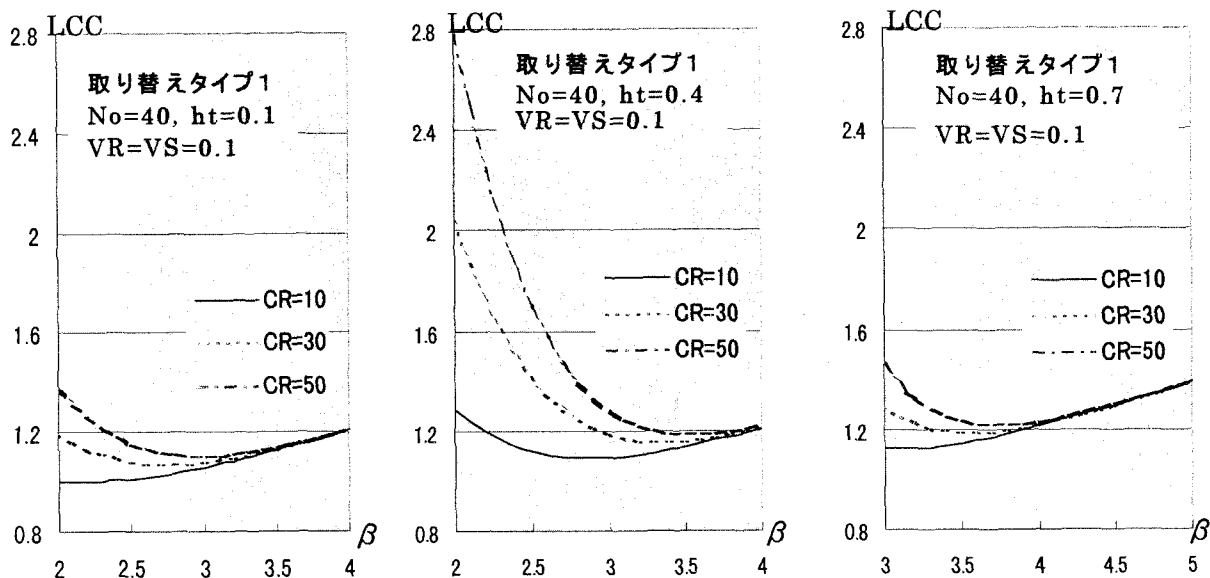


図-3 (a) 安全性レベルと LCC (No=40,VS=0.1)

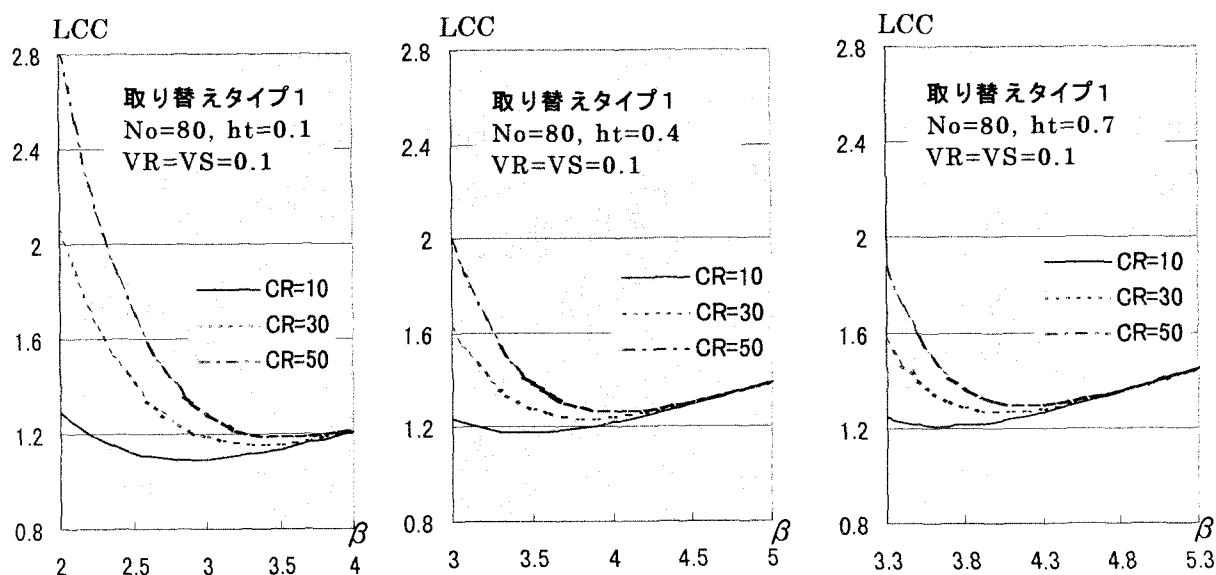


図-3 (b) 安全性レベルと LCC (No=80,VS=0.1)

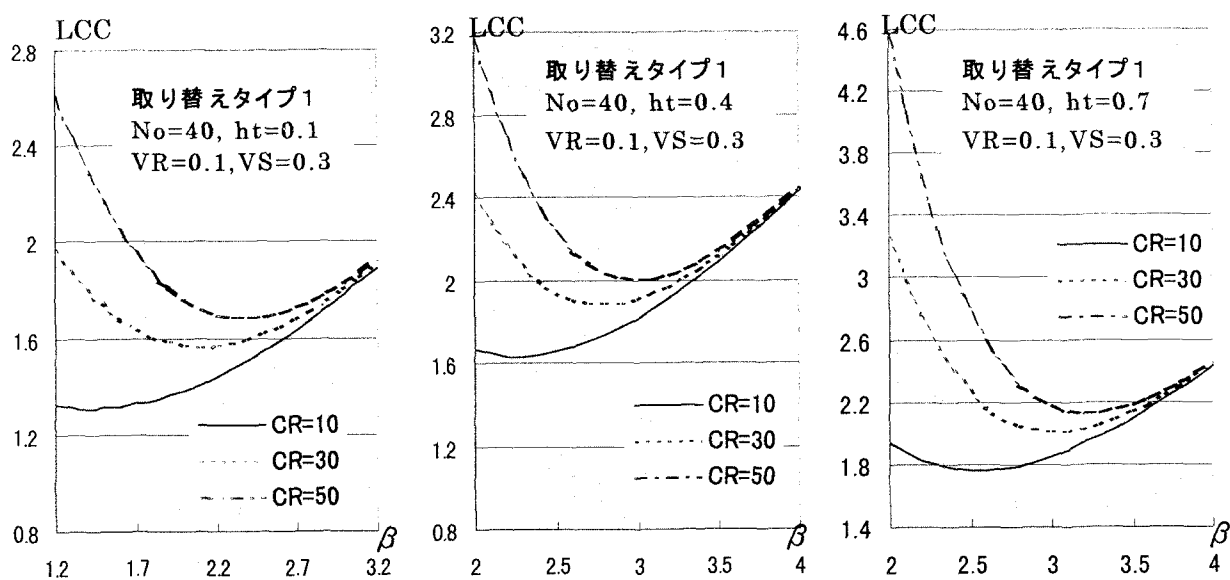


図-3 (c) 安全性レベルと LCC (No=40,VS=0.3)

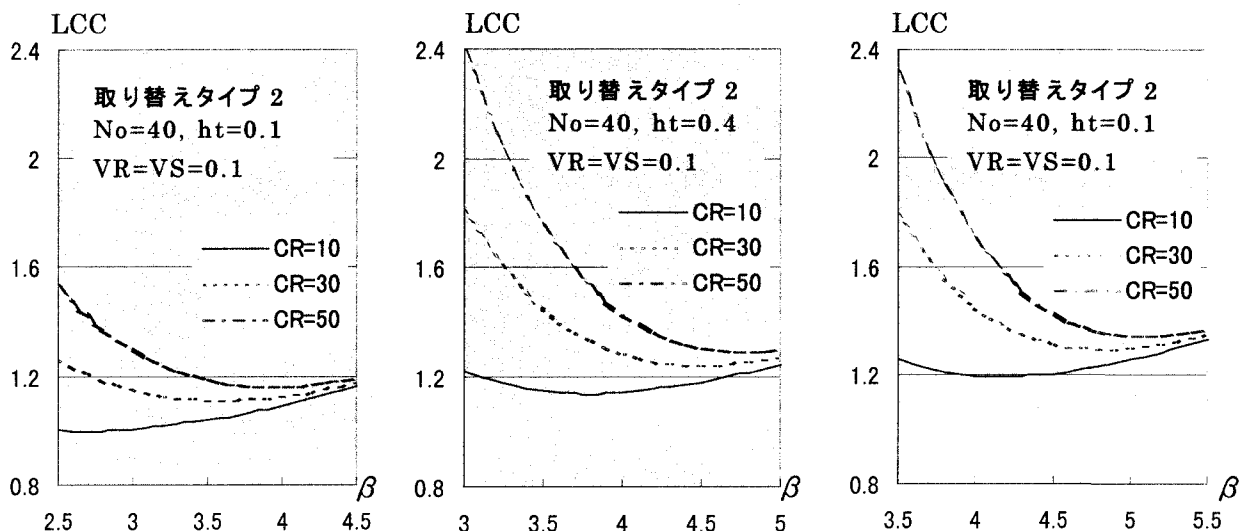


図-4 安全性レベルと LCC($No=40, V_s=0.1$)

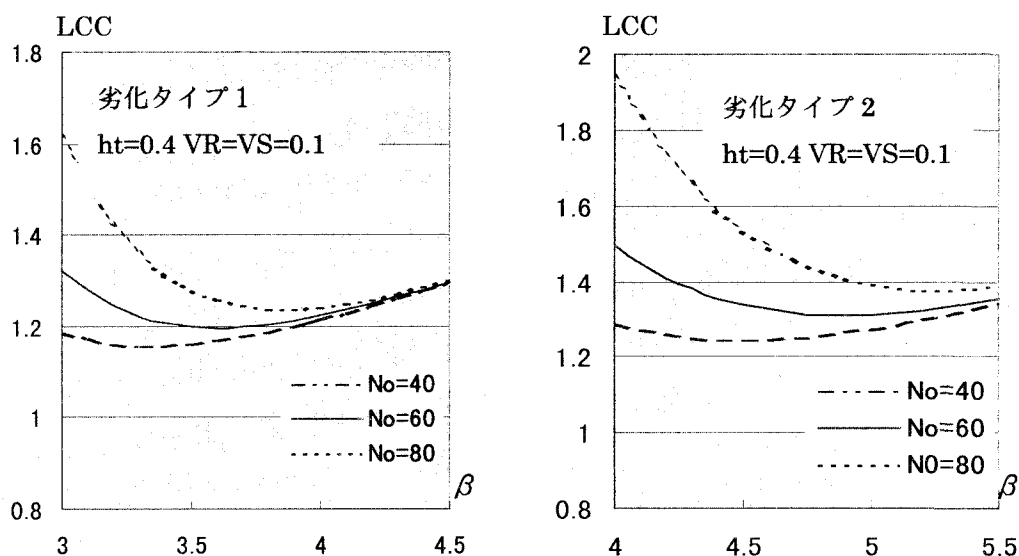


図-5 設計耐用年数に関する安全性レベルと LCC

て有利である．その他については劣化タイプ 1 で得られた傾向と同様の結果となった．設計耐用年数の相違に対する劣化タイプ 1 および 2 について図-5 にのせた．同じ設計耐用年数に対してタイプ 2 のほうが最適初期安全性レベルは相対的に高めておく必要があり，その時の LCC の増加が見込まれることがわかる．

2) 補修モデルについて

補修モデルのうち劣化タイプ 1 と劣化タイプ 2 について， $No=40$ ， $V_R=V_S=0.1$ についてそれぞれ図-6，図-7 にのせた．補修タイプについては両タイプとも，補修が必要となる時点を確率変数としてあるため，図-2 で示されるような n_1 あるいは n_2 と

いった時点が確定して求められない．したがって，式(17)から求められる期間は，故障期間の期待値 $1/\nu$ をここでは 10 年と仮定してあるが， $No=40$ の間に平均 4 回補修が必要となるということだけであり，乱数の発生状況によるとあるパターンでは 2 回であったり 3 回であったりする．そこでここでは，乱数の発生回数を 100 回についての平均を取ることで，あるパラメタの組み合わせの場合の初期最適安全性レベルと LCC とした．

これらの図から全体的に見て劣化タイプ 2 の場合の補修モデルの初期安全性レベルを劣化タイプ 1 のものより相対的に高めておいたほうが LCC からみて有利になることがわかる．また，劣化タイプが

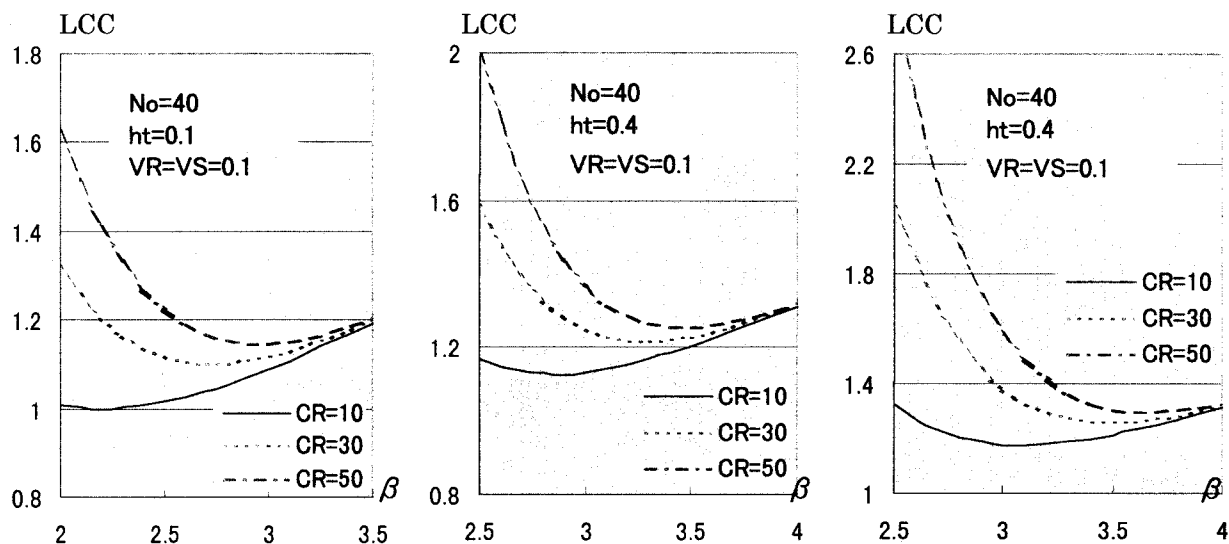


図-6 安全性レベルとLCC(補修モデルタイプ1)

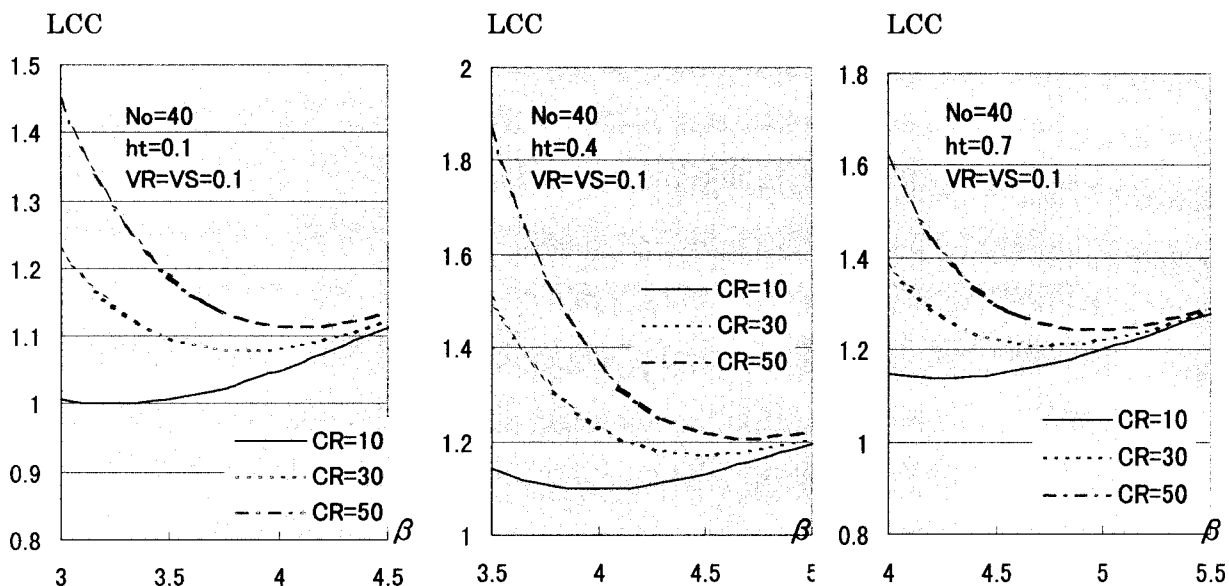


図-7 安全性レベルとLCC(補修モデルタイプ2)

同じとすると、取り替えモデルと同様に、期待再現期間の長い荷重に対しては相対的に安全性のレベルを高めることがLCCとしては有利になる。

図-8 に補修モデルの劣化タイプ2について期待再現荷重の変動係数 $V_S=0.3$ についての安全性レベルとLCCの関係をのせた。 V_S がLCCに及ぼす影響は劣化タイプ1のものより大きいので、建設初期より劣化の程度が大きくなるような管理体制を取ることが必要となる。そのためには、当然のことではあるが、施工の精度向上と定期的な監視および補修対策の確立を策定することが望まれる。

図-9 には劣化タイプごとに設計耐用年数 No とLCCの関係をのせた。これらの図から取り替えモデルと同様に No が長い設計のものの安全性レベルの方を短いものより相対的に高めておいた方がLCCには有利となる。

なお、補修モデルについては、補修によっていわゆる寿命が延び $No=40,60,80$ に対してそれぞれ平均的に約70,110,140となった(図-2中NHに相当)。この影響より、劣化タイプ1の場合には、現在価値係数との関係で、設計耐用年数が長い構造物の方が短い場合のものより、最適安全性レベルに対

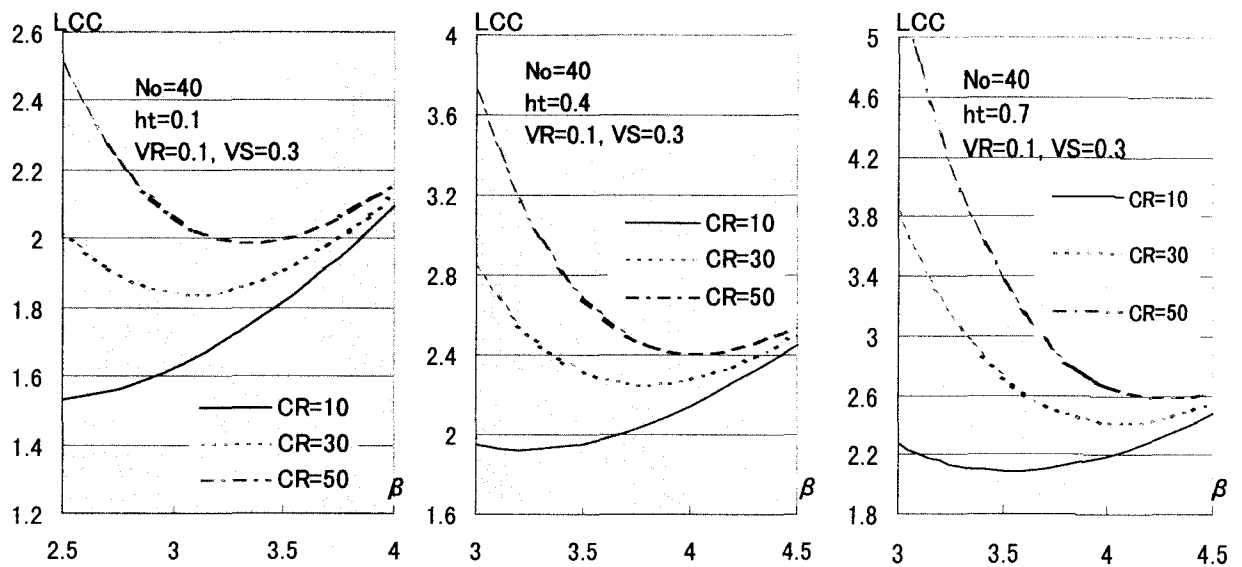


図-8 安全性レベルとLCC(補修モデルタイプ2)

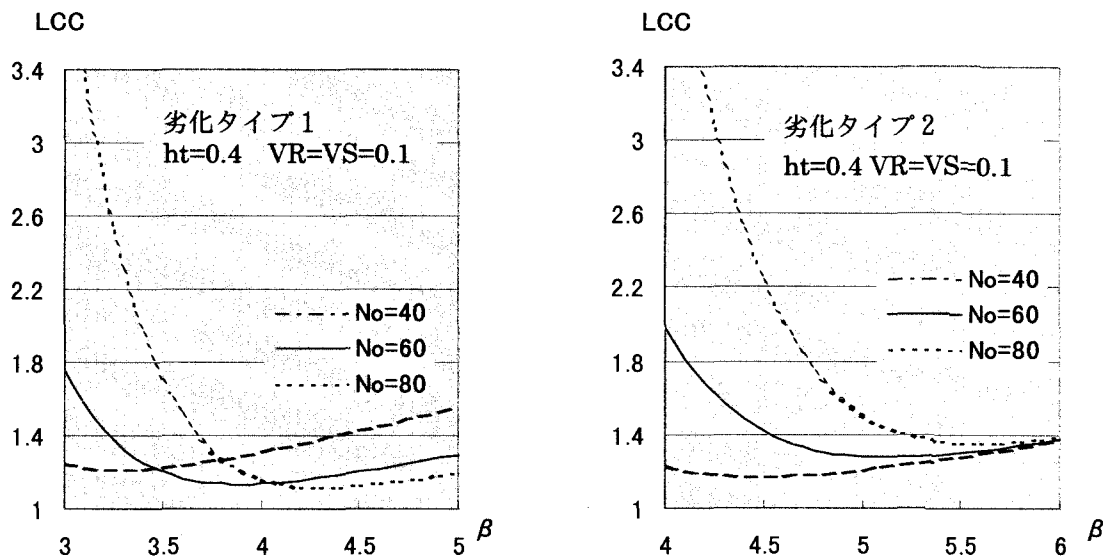


図-9 設計耐用年数に関する安全性レベルとLCC

して LCC が少なくなっている。ただし、劣化タイプ2については、劣化度合いが進むことからその分補修費がかさみ、LCC は改善されることはない。

5. まとめ

本研究は、公共投資としての今後建設される構造物に関して、主としてくり返し荷重に対する安全性レベルと LCC に関して、期待再現荷重にモデル化した取り替えモデルと補修モデルについて数値シミュレーションを実行し定性的な傾向を調べた。

建設初期費用に対する社会的損失費用の比 CR を取り LCC の相違を調べたが構造物の設計耐用年数

が長いもの、期待再現期間の長い荷重に対するもの、また劣化が比較的早く進むと考えられる構造物ほど安全性レベルを相対的に高めておいた方が LCC から見て有利といえる。ただし、CR がかなり大きいと仮定した場合でも最適安全性レベルに対する LCC の差は最大でも 30% 程度である。このことは、期待再現荷重、例えば地震荷重のようなものにより、何らかの限界状態が生じ、社会的損失費用が大と予想される構造物については、初期費用を現在の費用の 30% 程度上乗せした方が LCC から見て有利と思われる。ただしここでいう初期費用とは、構造物のみにかかる費用のことであって、用地買収あるいは架設費用・人件費等の費用は含まない。

参考文献

- 1) 公共工事コスト縮減対策に関する行動指針, 日本国政府, 1997.4.
- 2) 例えば 論壇シリーズ「公共工事を支えるシステム考」, 土木学会誌, 1997.2 から 1997.12.
- 3) 阿部賢一: 公共事業費の削減について, 建設マネジメント研究論文集, Vol.5, pp.49-58, 1997.12.
- 4) 平島 寛, 山本一敏: 公共事業の合意形成における情報公開の役割, 建設マネジメント研究論文集, Vol.5, pp.83-92, 1997.12.
- 5) John W. Bull ed.: Life Cycle Costing for Construction, Blackie Academic & Professional, 1993.
- 6) Ken Koyama: Reliability Based Economic Evaluation of Structures Considering the Life Term, Proc. of JSCE, No.410/I-12, pp.187-188, 1989.10.
- 7) 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.
- 8) 西川和廣: 社会資本の維持管理—道路橋からみた社会資本維持管理の現状と課題, 土木学会誌, Vol.83, pp.35-37, 1998.2.
- 9) 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性評価, 建設マネジメント研究論文集, Vol.4, pp.91-98, 1996.12.
- 10) 野沢太三: メインテナンスの経済的側面, 土木学会誌, pp.17-21, 1979.10.
- 11) 菅原 操: メインテナンス—今後への展望, 土木学会誌, pp.57-62, 1979.10.
- 12) 小堀為雄: 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, pp.8-12, 1983.10.
- 13) 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.
- 14) Lind, N.C: Approximate Analysis and Economic Structures, ASCE, Vol.102, No.ST6, pp.1177-1195, 1976.
- 15) Freudentahl, A.M., Garrelts, J.M. and Shinozuka, M.: The Analysis of Structural Safety, ASCE, Vol.92, No.ST1, pp.267-325, 1966.
- 16) Grigoriu, M.: Structural Safety Indices for Repeated Loads, ASCE, Vol.104, No.EM4, pp.829-844, 1978.
- 17) 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.
- 18) 金子雄一, 宮本文穂, 副手勤, 古谷時春, 関博: コンクリート構造物の維持管理における評価・判定の考え方, 土木学会第48回年次学術講演会, V, pp.214-215, 1993.9.
- 19) 関 博: 維持管理に関する研究展望, 土木学会論文集, No.557/V-34, pp.1-14, 1997.2.
- 20) 高安秀樹: フラクタル, 朝倉書店, 1987.12.
- 21) 例えば, J.A.White, M.H.Agee and K.E.Case: Principles of Engineering Economic Analysis, third edition, John Wiley & Sons, 1989.

INITIAL OPTIMAL SAFETY LEVEL OF STRUCTURES AND LIFE CYCLE COSTING FOR REPEATED LOADS

The initial optimal safety indices and the related LCC for repeated loads of to be constructing structures are obtained through the simulation models. The models have two types of repairs. One is the replacement model and other is rehabilitation one with repairs. To estimate the deterioration of structures, the Fractal pattern is used. The preference LCC are obtained by setting the safety level relatively high if structures have long design life and bearing the long expecting return period loads. Though the differences of LCC between models are not so significant., therefore, incremental expense of initial constructing cost is preferable to make LCC small if social loss cost is estimated very serious.