

石川工業高等専門学校 正会員 ○ 出村 禧典
金沢大学工学部 正会員 小堀 尚雄

1. まえがき 設計規準における安全性水準は、その規準によって設計・製作される同種の構造物群全体の安全性・経済性のバランスや制約条件を考慮して決定されなければならない。またそれ以前の安全性水準によって建設され使用されてきた同様の構造物群全体の実績も考慮されなければならない。本研究は安全性の水準と、過去に建設され使用されてきた実績を統計的に定量的に評価しながら将来建設される構造物群全体の総期待損失費を最小化するように決定する手法について考察した。

安全性水準は対象とする構造物や荷重・破壊モードの種類によって異なるが、ここでは特に橋梁の主荷重による降伏や座圧などの終局限界状態に対する安全性水準の決定を例にとりその考え方を簡単に説明する。

2. 総期待損失費用の計算 橋梁の主荷重による降伏や座圧に対する安全性は、ある水準で設計・製作された橋梁の中でそのような破壊が1橋以上生じたときその水準が不適切であるとされ、それまでに建設されてきた全橋梁の補強が必要となるとして決定しなければならぬと考えられる。そこで本研究はこのような前提に従い、全国の橋梁をシリーズ結合システムにおき、総期待損失費 C_T を次式のように求めた。 $\Delta t = 1$ 年とする。

$$C_T(p_{f,a}) = C_I(p_{f,a}) + C_R(p_{f,a}) + C_F(p_{f,a}) \quad (1)$$

== に、 $C_I(p_{f,a})$ は、部材が $p_{f,a}$ なる許容破壊確率で設計された構造物群全体の建設費で、その設計規準が適用される限り建設が進められるとして次式のように求めた (Fig. 1 参照)。

$$C_I(p_{f,a}) = \sum_{j=0}^{j_F} n_j \cdot C_I(p_{f,a}) \cdot R(t_{j-1}) \quad (2)$$

== に、 $C_I(p_{f,a})$ は1橋あたりの建設費で、 n_j は t_j 時に建設される橋梁の数である。 $R(t_{j-1})$ は設計規準の信頼性函数である。

$$R(t_{j-1}) = \exp\left\{-\sum_{i=1}^{j-1} m_i p_{f,a} T_{i,j-1}\right\} \quad (3)$$

== に、 n_{j-1} は t_{j-1} 時までに建設された橋梁の総和で、 m_i は異なる橋梁の部材数で、 $T_{i,j-1}$ は異なる橋梁の i 時までの経過年数である。また、 $C_R(p_{f,a})$ は1橋以上破壊したときのそれ以前に建設された全橋梁の補強費で、 C_R も1橋あたりの補強費、 n_{j-1} は t_{j-1} 時までの建設総数とすれば次式のように表わされる。 $\bar{m}_i$ は平均部材数。

$$C_R(p_{f,a}) = \sum_{j=0}^{j_F} n_{j-1}^2 \cdot C_R \cdot \bar{m}_i p_{f,a} R(t_{j-1}) \quad (4)$$

また $C_F(p_{f,a})$ は、破壊が生じた場合の損失費で、 C_F は1橋あたりの損失費とすれば次式のようになる。

$$C_F(p_{f,a}) = \sum_{j=0}^{j_F} C_F \cdot n_{j-1}^2 \cdot \bar{m}_i p_{f,a} R(t_{j-1}) \quad (5)$$

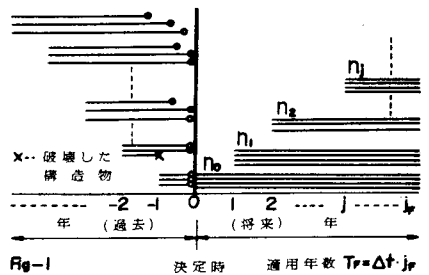
3. 実績の評価 近年荷重や強度のばらつきは次第に明らかになってきたが(文献1, 2参照)、製作・施工など変動の特性が不明な要因も多く、本研究はこれらの要因を実績により統計的に推定し、将来の構造物の設計の安全性水準の決定に定量的に反映させようとするものである。すなわち破壊限界関数を(6)式のように設定し、 N の母数(平均 μ_N) を未知とし、過去の建設数 n_p や破壊の生じた橋梁の数 $n_{p,f}$ から推定する。その手順を

$$Z = NR - S \quad (6)$$

簡単に説明する。もし橋梁の破壊確率 p_f の事前分布 $f_{p_f}^0(x)$ が与えられたとすればその事後分布はベイズの定理より、

$$f_{p_f}^1(x) = \frac{\int_{n_{p,f}}^{n_{p,t}} m_i x \exp[-x \sum_{i=1}^{n_p} m_i T_{i,j-1}] f_{p_f}^0(x) dx}{\int_{n_{p,f}}^{n_{p,t}} m_i x \exp[-x \sum_{i=1}^{n_p} m_i T_{i,j-1}] f_{p_f}^0(x) dx} \quad (7)$$

== に、 T_i は異なる橋梁の使用年数であり、 m_i は部材数である。 $f_{p_f}^0(x)$ は、 N の平均 μ_N の事前分布が平均 μ_N 、標準偏差の μ_N の正規分布であるとすれば、(8) 式の関係より(9) 式のような対数正規分布となる。



$$P_f(\mu_N) = \Phi_2(0.1\mu_N) \quad (8)$$

$$f_{P_f}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\mu_N}/A} \frac{1}{x} \exp\left[-\frac{1}{2(\sigma_{\mu_N}/A)^2} \{-\log x - (B - \mu_N)\}^2\right] \quad (9)$$

== には、 $\Phi_2(\cdot)$ は正規分布関数で、 A, B は定数である。そこで対数正規分布をガンマ分布に次式のように二次近似し、(7) 式に代入すると(11)式のような関

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 1 / \{ \exp(\sigma_{\mu_N}^2) - 1 \} \\ \beta &= \exp(\mu_N + \sigma_{\mu_N}^2/2) \cdot \{ \exp(\sigma_{\mu_N}^2) - 1 \} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

係が得られる。そこで、 $f'_{P_f}(x)$ は α, β を(12)式'のような α', β' としたガン

$$f'_{P_f}(x) \propto \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \beta'^{\alpha} x^{\alpha-1} \exp(-\frac{x}{\beta'}) \prod_{i=1}^{n_p} m_i \exp(-x \sum_{i=1}^{n_p} m_i T_i) \quad (11)$$

マ分布となり、(10)式', (9)式'の逆の関から μ_N の事後分布の平均 $\bar{\mu}_N, \sigma_{\mu_N}'$ は得られる。そして、容易に信頼係数 $1-\epsilon$ で μ_N の下限値を求めることができる。ま

$$\left. \begin{aligned} \alpha' &= \alpha + n_{p,f} \\ \beta' &= \beta / (1 + \beta Q), \quad Q = \sum_{i=1}^{n_p} m_i T_i \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

た最適な信頼係数もやはり最小費用の原則を適用して求めることができる。

4. 数値計算結果とその考察 計算はトラス橋について行なった。強度や荷重の平均・分散は文献(1, 2)より引用し、建設されている橋梁は建設省の橋梁台帳によった。建設費は次式のような荷重係数設計法の各係数を2次元モーメン

$$\phi R^* = f_g \Sigma n_i S^* \quad (13)$$

ト法より求め、断面計算を行ない計算した。 N は f_g と対応させた。

Fig.2は許容破壊確率 $P_{f,a}$ と総期待損失費 C_T の関係を示す。図中の1橋あたりの補強費 C_R 、破壊損失費 C_F の単位は億円である。 $P_{f,a}$ は 10^{-6} から1が最適となる。最適 $P_{f,a}$ の値は C_F, C_R の値によってそれ程大きな変化はない。 $P_{f,a}$ が 10^{-6} よりも小さくなると急激に減少するのは安全性水準が適用年数途中で不適切になる確率が大きくなるからである。(b) は将来建設される毎年の建設数 n_j を変化させた結果で、建設数が多くなると途中で不適切となる可能性が $P_{f,a}$ が小さい値から大きくなる。Fig.3の結果は、 N の相定値の信頼係数 ϵ を変化させたときの C_T や f_g (--- 線) の変化を示す。 ϵ によ、それ程大きく変化しないがある値を越えると不適切となる可能性が大きくなり。(したが、) 減少する11前の ϵ に対応する f_g が最適と考えられる。 n_p (過去に建設された橋梁数) が小さい場合や破壊した橋梁が増せば f_g も大きくなりなければならぬことを示(211)る。Fig.4は $P_{f,a}$ が異なった場合の最適 ϵ の変化を示した結果で、 $P_{f,a}$ を小さくするとき、 ϵ を小さくし f_g を大きくしなければならぬ。すなわち過去の実績を少な目に見積るをしなければならぬ。

5. おまひ 本研究は1つの構造物だけでなく、設計規準を適用する構造物全体を考慮した期待損失費の最小化による最適安全性水準の決定について考察した。(しかし、適用システムの改良、建設費や補強費や破壊による損失費のデータの吟味を今後さらに検討(2行きた1)。

参考文献 1) 東海鋼橋研究グループ; 鋼橋産部材の抵抗強度の評価と信頼性設計の適用, 橋梁と基礎, 30-32
2) 藤野・藤澤・シミュレーションに基づく道路橋設計荷重の評価, 土木学会論文集, 第286号 3) 松尾・上野; 構造物の耐用期限内に生じる外力の不確実性を考慮した信頼性設計法, 土木学会論文集, 第289号

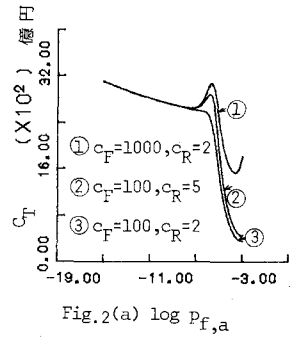


Fig.2(a) $\log P_{f,a}$

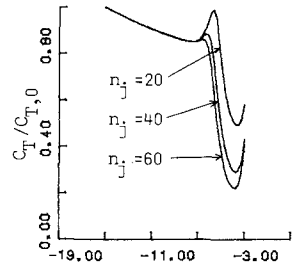


Fig.2(b) $\log P_{f,a}$

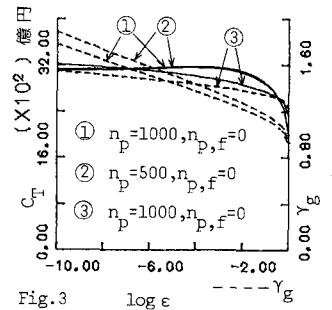


Fig.3 $\log \epsilon$ --- f_g

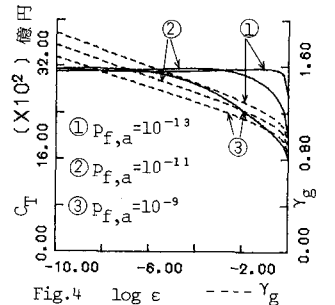


Fig.4 $\log \epsilon$ --- f_g