I-316　構造物の信頼性解析モデルに関する研究

神奈川県　正会員　酒井利夫
山梨大学　正会員　杉山俊幸
東京大学　正会員　伊藤学

1. はじめに

新しい設計規準を考える場合、その安全性照査式はいわゆる部分安全係数設計法的な形式をとり、荷重や強度の特性値，安全率等の決定過程に確率論的な考え方を導入していこうというのが最近の傾向である[(1),(2)]。その際、安全性照査式の目標とする信頼性レベルを予め設定しておくことが必要となる。本報告では、特に変動性の異なる荷重作用に対する安全性照査式での目標とする信頼性レベルの設定及び安全率の考え方について (i) 総費用最小化の原則に基づいた信頼性レベルのバランス，(ii) 統計的なばらつき以外の要因に対する配慮 の二点からそれぞれ簡単な確率モデルを設定して考察を加えた。なお、本研究において用いる信頼性レベルβは、$\beta=\Phi^{-1}(P_f)$で定義する。ただし P_fは破壊確率とし、$\Phi(x)=\int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}t^2}dt$とする。

2. 総費用最小化の原則に基づいた信頼性レベルのバランス

信頼性レベルを設定する場合の一つの方法として、総費用最小化の原則に基づく方法は広く認められている。ここでは特に変動性の異なる二つの荷重作用を受ける部材を考え、これら二つの荷重作用に対する最適信頼性レベルのバランスを求めるモデルを考えた。変動性の小さい荷重作用をS_1，変動性の大きい荷重作用をS_2とし、これらの同時発生はないとする。総費用，初期費用，損失費用をC_T^*，C_I^*，C_f^*とすると、これは$C_T^*=C_I^*(\theta)+P_f\cdot C_f^*$を最小とする$\theta$を求める問題となる。ただし $\theta=\bar{R}/\bar{S}_1$，$r=\bar{S}_1/\bar{S}_2$ とすると $P_f\equiv P_{f1}(\theta)+P_{f2}(\theta,r)$，$P_{f1}(\theta)\equiv P[R<S_1]$，$P_{f2}(\theta,r)\equiv P[R<S_2]$と定義する。*は、ある$\theta$での$C_I$で無次元化した量である。$C_I^*$と$\theta$との関係は、合成桁橋を現行の設計規準に従って安全率を変えて設計した場合の総鋼重と安全率との関係から求めた。これによるとθを10%上昇させるとC_I^*は4～6%上昇することとなる。C_f^*については絶対的な評価ができないので一つのパラメータとした。　このモデルによると最適信頼性レベルは、S_1が支配的な場合とS_2が支配的な場合では差を設けるべきこと、さらに変動性の大きい荷重作用に対しては、それが小さい荷重作用に対するよりも低い信頼性レベルとすべきことを示すことができる。C_f^*の評価が絶対的でないため、これらのレベルを確定できないが、そのレベルのバランスは把握できる。

3. 統計的なばらつき以外の要因に対する配慮

構造物の安全性に影響を及ぼす要因は、荷重や強度の統計的なばらつきだけではなく、それ以外の要因 たとえば 設計時のミス，施工不良，未知の破壊メカニズム等の いわゆるある値のまわりに統計的にばらつくという性質を持たない要因(以後"未知要因"と呼ぶ)が考えられる。実際 過去の橋梁破壊事故調査報告[(3)]などを見るとこの"未知要因"に帰因したものがかなり多いことがわかる。設計規準の安全性照査式の中の安全率にこの"未知要因"に対する配慮を含めるか否かは意見の分れるところであろう。しかし、特に土木構造物を対象とするならば、その公共性や供用期間の長さ等を考慮して、この"未知要因"に対する配慮をある程度安全率の中に入れてもよいと考えられる。　そこでここでは、このような"未知要因"が構造物の安全性に及ぼす影響を簡単な確率モデルで表現することを試みる。"未知要因"はその発生によって構造部材強度を低下させるという直観のもとに次のような強度低下モデルが考えられる。即ち、通常の部材強度をR，未知要因効果をUとすると、その実質的な部材強度は $\tilde{R}=R\cdot U$と表わされ

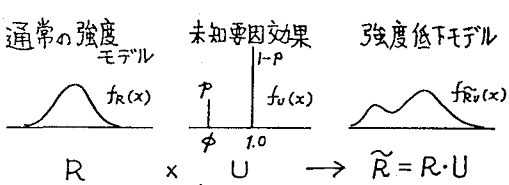

図1　強度低下モデル

るものと仮定する。(図１)　未知要因効果Uの確率密度関数を $f_U(x)=p\cdot\delta(x-\phi)+(1-p)\cdot\delta(x-1)$ と仮定している。このパラメータ p,ϕ は、それぞれ未知要因発生率，未知要因による強度低下率と見なせる。この場合破壊確率は $\tilde{P}_f=P[\tilde{R}<S]=\int_{-\infty}^{\infty}f_S(x)\int_{-\infty}^{x}f_{\tilde{R}}(y)dydx=p\cdot P_{fU}(\phi)+(1-p)\cdot P_{fn}$ と表わせる。P_{fn} は通常の強度モデルRを用いて計算できる見掛上の破壊確率であり、$\tilde{P}_f$ は未知要因効果を含めた実質的な破壊確率と見なせる。この p,ϕ は事故統計からその関係を決めることができる。今、$a\equiv n_u/n_r$ とし、n_uは"未知要因"により破壊した件数，n_rは統計的ばらつきに帰因した破壊件数とすれば、この a を与えると p,ϕ は図２のように決まる。特にこれまでの事故統計(3)や何人かの技術者の意見等(4)を総合すると、この a の範囲はほぼ $a=0.25\sim10.0$ と見ることができる。(図２斜線域内)　実質的な信頼性レベル $\tilde{\beta}(\equiv\Phi^{-1}(\tilde{P}_f))$ を一定に保とうとするならば、"未知要因"に対して配慮する場合に、見掛上の信頼性レベル $\beta_n(\equiv\Phi^{-1}(P_{fn}))$ をどの程度にとればよいかを示したのが図３である。特に $a=0.25\sim10.0$ に相当する p の範囲も示した。

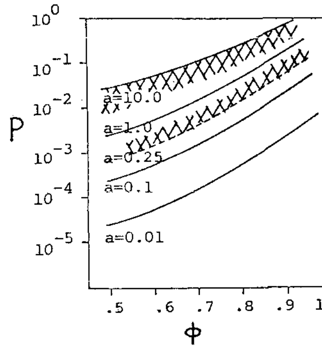

図２．(p,ϕ) と a の関係

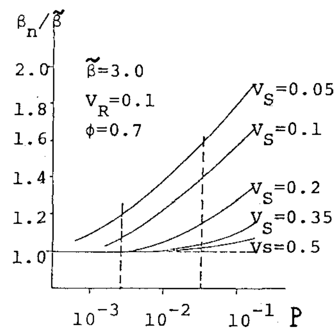

図３　$\beta_n/\tilde{\beta}$ と P_n 関係

4．例題

以上の２，３でのモデルに基づいた例題を示す。変動性の異なる二つの荷重作用に対する安全性照査式を考え、R,S_1,S_2の諸条件を表１上段のように設定する。(i)見掛上の信頼性レベルを一定($\beta_n=3$)とした場合，(ii)本報告でのモデルを用いた場合の二つの場合について、各荷重作用に対する安全率を計算した。(i)の考え方によれば、変動性に差がある程安全率にも差を設けることが必要となるが、(ii)によると、変動性に差があっても安全率にはさほど差を設ける必要のないことを示している。

5．まとめ

いかなる荷重作用に対しても見掛上の信頼性レベルを一定に保つことは経済的に見ても、未知要因に対する配慮という点から見ても好ましくないこと、また変動性の小さい荷重作用に対する信頼性レベルは、それが大きい荷重作用に対するレベルよりも高く設定すべきことが、ここで考えたモデルによって明らかにできた。また、安全率の面から見ると荷重の変動性に差があっても安全率の数値自体にはさほど差を設けなくともよいことが明らかにできた。実際の設計規準の安全性照査式で安全率を決める際、現在のところ工学的判断に頼らざるを得ない部分について、このモデルを用いて導いた答が、ある程度の情報を与えうるものと期待する。ただし、未知要因配慮モデルでは、$a=n_u/n_r$ の値がその結果に大きく影響するので、破壊事故調査をより広範に行い事故統計データを蓄積することが今後の課題となろう。

$\begin{cases}R^*>\gamma_1\cdot S_1^*\\R^*>\gamma_2\cdot S_2^*\end{cases}$　$V_R=0.1$, $V_{S1}=0.05$, $V_{S2}=0.35$
R,S_1,S_2 ; Lognormal Dist.
「*」; 90% fractile value

(i) 同一の信頼性レベルを設定する場合(未知要因に対する配慮なし)
($\beta_n=3$)
$\gamma_1=1.15$，$\gamma_2=1.77$

(ii) 本研究でのモデルを用いた場合
(S_1 に対して $\tilde{\beta}=3$)

$S_1 \rightarrow \tilde{\beta}_1=3$ ← 総費用最小化モデル → $\tilde{\beta}_2=2.5 \leftarrow S_2$

$\beta_{n1}=3.6\sim4.8$ ← 未知要因配慮モデル → $\beta_{n2}=2.5\sim2.6$　⇐($a=0.25\sim10.0$)

$\gamma_1=1.22\sim1.41$　　$\gamma_2=1.48\sim1.50$

表１．例題

参考文献　(1)構造工学委員会；土木学会誌，第65巻，9，1980　(2)安田・西野・長谷川；第34回年次講演概要集，I-310，1979
(3)たとえば D.W.Smith；Bridge failures，Proc.ICE，Aug.，1976　(4)たとえば A.S.Nowak；Effects of human errors on structural safety，ACI Journal，Sep.，1979