

人的過誤等の要因が安全率設定に及ぼす 影響に関する一考察

A STUDY ON THE EFFECTS OF GROSS ERRORS FOR DETERMINING THE FACTORS OF SAFETY

佐藤尚次* 長谷川彰夫** 西野文雄***

By Naotsugu SATO, Akio HASEGAWA and Fumio NISHINO

Existence of Gross Errors will increase the risk of design. In this study the effects of these kind of Errors are incorporated in a reliability model being assumed as continuous, non-dimensional random variables. And the factor of safety is related to the design value of this Gross Error variable. The relation between the probability of failure and determination of the factor of safety is analysed by the fractile-method. Even though the factor of safety covers some additional functions such as modification of the characteristic values of load effect and resistance, it is possible to separate these effects. From these points of view, some comparisons between the conventional design method utilizing fractiles with very small exceeding probabilities and recently-proposed partial safety factor design are investigated by parametric studies.

1. はじめに

多岐にわたる工学分野の中で、土木、建築の構造物を特徴づける要素の一つに、荷重、強度の設計値の取り方と安全率がある。とりわけ製作工程、供用環境に不確定要因が多だけに、安全率を用いて安全性を確保することが避けられない¹⁾。安全率の値の時代による変化が長らによって示されているが²⁾、技術的背景が反映されているようで興味深い。安全率の一つの意味は、理論と現実の間にあるギャップをカバーするために用いるものと考えられるが、このギャップの内容については特定することが難しく、これが安全率を別名無知率 (factor of ignorance) と呼ぶゆえんでもある。土木構造物と同様に単品生産の色合いの強い (大量生産される工業製品と比べてという意味で) 航空機と対比すると、土木の設計の特徴は一層明らかになる。一応民間航空機の安全率は1.5 ということになっているが、実感としては土木構造物との差はもっと大きいように思われる。航空機の場合、パイロードの考え方が徹底しているため³⁾、自重の軽減が設計における至上の要求であり、そのために技術を集積し、「無知率」の介在する余地を極力排除している。これ

* 工博、関東学院大学講師、工学部土木工学科 (神奈川県横浜市)。

** 工博、東京大学助教授、工学部土木工学科 (東京都文京区)。

*** Ph. D.、アジア工科大学副学長 (タイ国バンコック市)。(東京大学より海外派遣)

に対し、土木構造物は空間に固定されているため外的な作用の影響の制御が困難であり、製作、維持管理についても航空機並の厳密さを要求することは不可能である。もとより土木構造物の設計が特殊な技術をもった一部の団体にしかできないのでは社会的ニーズにも対応できない。また、航空機の性能評価の基準が耐用期間中にどれだけの重量を載せたかであるのに対し、土木構造物の場合は、考えられる最大の荷重に確実に耐える、すなわち需要のピークに応えられるかどうかであることや、その他の社会的背景⁴⁾もあって、従来の土木設計では自重の軽減にさほど熱心ではなかった。製作費の中で材料コストの割合を多くし、その分技術コストの代替としていっていると考えられる。しかしながら、近年土木構造物の種類も多様化してきており、設計への要求も複雑になってきている。こうした状況を考えれば、安全率まで含めて、従来の設計慣行を見直すことも必要になりつつあるであろう。

土木構造物の信頼性に関する研究では、強度と荷重に関連する量で、力学的に明確な意味をもつ量に関するばらつきが、主に扱いの対象となっていた。これらの量のデータは、直接これらの量が推定できるような形で与えられるのが普通である。一方、安全率でカバーする対象と考えられる不確定要因は、構造力学の教科書などにもいくつかの例が示されているが、データをとることが困難で、事故の発生によってぐらいしかその影響を推し測ることができず、統計量としての解析などは極めて難しいと考えられてきた。

しかし、現実にはこれらの要因が存在する以上、理論の中でこれらの影響を加味することは、応用上極めて重要であると考えられる。事実、Smith の橋梁事故報告によれば⁵⁾、設計、施工時の人的な過誤が主原因となって発生した事故は、全事故数の1割を超えている。また、一般に耐用期間中の構造物の破壊確率は $10^{-4} \sim 10^{-6}$ を目標として設計が行なわれていると思われるが⁶⁾、Brown⁷⁾は現実の破壊確率は 10^{-2} 程度ではないかと考え、Nowak⁸⁾は、理論的に計算した破壊確率よりも実際のものは10倍程度大きいのではないかと述べている。実際の事故を見ても、設計段階でのチェックの不備、施工不良、使用材料のミス等々が原因になっていることも少なくはないし、構造解析や構造物モデルに対する計算上の仮定と現実の相違が安全性に影響する場合もありうる。更に、設計に対する要求の複雑化、多様化にともなって、現時点では未知の現象によって事故の発生をみる可能性もないとはいえない。

通常これらの要因はGross Error、あるいはHuman Errorと呼ばれている。本研究では後者に対応させて「人的過誤等」と呼ぶことにする。ただしこれは設計ミスのような純然たる「過失」もさることながら、理論、理念と現実との格差を生む「人知の未熟さ」までも含む概念と考えている。これらに関連する研究は、上記のもの他、わが国では、杉山ら⁹⁾、白石ら¹⁰⁾、長ら¹¹⁾等によるものがあり、また外国でも、数は多くはないが、研究が続けられてきており^{12),13)}、1981年の「構造物の安全性・信頼性に関する国際会議(ICOS SAR'81)」で新しい課題として挙げられたのをはじめとして、近年関心が高まる方向にあるといえる。

この他、こうした要因を扱った例としては、Ang, Amin¹⁴⁾の拡張信頼性理論が有名である。1970年前後にCornell¹⁵⁾、Lind¹⁶⁾、Ang・Ellingwood¹⁷⁾らはこうした要因を主観的不明量と呼んで、種々の扱いを試みたが、その後の研究の発展は必ずしも顕著ではない。理論の概要は成書¹⁸⁾に譲るが、例えばAngらは、主観的不明量を表わす変数のある特定値を選び、これに対応して、客観的不明量のみから求める(破壊)確率と主観的不明量のみによる(破壊)確率の積で表現される量Pfnを導入した。そして、このようにとったPfnは 10^{-5} より小さいオーダーであっても、強度や荷重の分布形による違いが小さくなるため、主観的不明量の影響まで含めて安全性を評価するための指標として有効であるとした。

しかしながら、この論理の妥当性には疑問がある。真の破壊確率Pfrは元来強度や荷重の分布形の違いによって異なるものであり、安全性を支配しているのは、この真の破壊確率なのである。Pfrが分布形の違いによってばらつくときに、分布形の違いに対して鈍感な量Pfnを導入したとしても、それは単にPfrと

PfNの対応が悪いことを意味するだけのことであり、PfNの指標としての不適当さを証明しているにすぎない。ここに述べた問題点はCornellの初期の安全性指標 β （いわゆるFOSM）に対し、西野ら¹⁹⁾が加えた批判と同じ主旨である。

本研究ではこうした過去の経緯を考慮しつつ、Angらの扱いと同様に、人的過誤等の影響を一つの、無次元の連続量の確率変数 H で表現し、限界状態の表現として、

$$R \geq HS \quad (1)$$

を用いる。これは、 $H^* = 1$ とおいたものが、現行の設計式の表現¹⁾と整合するという理由による。すなわち

$$\frac{H^* S^*}{R^*} = \nu \frac{S^*}{R^*} \leq 1 \quad (2)$$

となるからである。荷重効果が大きくなる（あるいは強度が小さくなる）といった意味づけをしているわけではない。このモデル化の一つの意義は、実際の設計式の形に近いものを扱うことにより、設計基準の合理化に関連して論じられているいくつかの問題点の整理ができることである。後の議論にも出てくるが、現行の設計では、安全率は人的過誤等への対処ばかりではなく、考慮する限界状態、あるいは荷重の組合わせの種類によって、目標とする安全度（あるいは破壊確率）のレベルに差をつける場合、これを調整する機能をも果たしている（例えば、橋梁の設計では死荷重・活荷重の組合せに対して要求している安全度のレベルは地震に対するものよりも高くなっていると推定されるが、この差の調整を荷重値の選択のみでなく、安全率のとり方——許容応力度の割増し——によっても行なっている）。これら2つの機能を同時に（あるいは分離して）議論することができる。しかし、実際人的過誤等の影響をこうした確率モデルの中にどのように組込むかは非常に大きな問題であり、例えば確率変数として扱うこと自体妥当かどうか、扱えるとしてこのモデルのように連続量とできるのか、離散的な性質をもつのか、あるいは効き方として、次元をもった量として「和」の形で考えるのが適当であるのか、無次元量で積の形で考えるのがよいのか等、考えられる問題は多々あると思われる。前にも述べたように、実際の事故の原因調査等を通じて、人的過誤等がどのように構造物の安全性に影響していくかを推定していくことは、今後極めて重要な課題であるが、ここでは第一階としてこのような定式化を行なった。以下の議論は式（1）のモデルを前提に導かれたものであり、この前提に依存する部分も相当にあることをお断わりしておく。

また、 H の確率的なパラメータとしては、 H の存在が、 H を無視した場合に対して大きなバイアスとならないよう、 H の平均値 μ_H を1.0とすることを基本に考え、 H の変動係数 V_H の大小で H の効き方の大小を表現するように考えた。ただし、これらのパラメータの設定がこのモデル化においてどのように影響するかは後の章で改めて考察する。

2. 超過確率法の応用による3変数モデルでの破壊確率

「人的過誤等」の影響 H を導入し、限界状態関数 Z を、

$$Z = R - HS \quad (3)$$

と表わすことにする。Zが0を超えない確率、すなわち破壊確率P_fの近似値を得るため、超過確率法²⁰⁾を用いる。式(3)を、Z=0を満足するある点(R⁰、S⁰、H⁰)でTaylor 1次近似した線形近似関数を

$$Z^0 = (R-R^0) - \Pi^0(S-S^0) - S^0(\Pi-\Pi^0) = R^0\left(\frac{R-R^0}{R^0} - \frac{S-S^0}{S^0} - \frac{\Pi-\Pi^0}{\Pi^0}\right) \quad (4)$$

とする。R、S、Hが独立な正規分布に従うと仮定したときのZ⁰ ≤ 0となる確率P_{fD}を破壊確率の近似値とする。ここで、R、S、Hの設計値をR^{*}、S^{*}、H^{*}とし、

$$\begin{aligned} e_R &= \text{Pr. } [R \leq R^*], \quad e_S = \text{Pr. } [S \geq S^*], \\ e_H &= \text{Pr. } [H \geq H^*] \end{aligned} \quad (5)$$

とおくと、

$$P_{fD} = \Phi \left[\frac{\frac{\sigma_R}{R^0} \phi^{-1}(e_R) + \frac{\sigma_S}{S^0} \phi^{-1}(e_S) + \frac{\sigma_\Pi}{\Pi^0} \phi^{-1}(e_H)}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R^0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_S}{S^0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\Pi}{\Pi^0}\right)^2}} \right] \quad (6)$$

である。ただしσ_R、σ_S、σ_Hは各々R、S、Hの標準偏差であり、Φ(・)は標準正規確率分布関数であり、φ⁻¹(・)はその逆関数である。文献20)、21)で述べたように、線形化を行なう点(R⁰、S⁰、H⁰)の選択には自由度が含まれており、この点の選び方によって領域Z ≤ 0に対するZ⁰ ≤ 0の近似度が異なるため、真の破壊確率に対するP_{fD}の精度が影響を受ける。(R⁰、S⁰、H⁰)の位置を決める一つの考え方はHasofer-Lind流の方法であるが、このモデルのような双曲線型の関数の場合、標準化空間内で平均値から最も近い点を選んで線形化する方法では、必ずしもよい領域近似を与えないと思われる。文献22)に示した

$$Y = HS \quad (7)$$

とおいて、式(7)およびZ=R-Yの2段階で近似を行なう手法も考えられるが、これも一定の条件のもとに(R⁰、S⁰、H⁰)を選んだ場合と等価になる。ここでは一つの試みとして、R⁰=R^{*}、S⁰=S^{*}、H⁰=H^{*}という条件を付してみた。無論設計値と線形化点は別個の概念であるが、解析上の自由度を減ずる便法として試みた。このとき、正規分布の仮定により、

$$P_{fD} = \Phi \left[\frac{\frac{\phi^{-1}(e_R) V_R}{1 + \phi^{-1}(e_R) V_R} + \frac{\phi^{-1}(e_S) V_S}{1 - \phi^{-1}(e_S) V_S} + \frac{\phi^{-1}(e_H) V_H}{1 - \phi^{-1}(e_H) V_H}}{\sqrt{\left(\frac{V_R}{1 + \phi^{-1}(e_R) V_R}\right)^2 + \left(\frac{V_S}{1 - \phi^{-1}(e_S) V_S}\right)^2 + \left(\frac{V_H}{1 - \phi^{-1}(e_H) V_H}\right)^2}} \right] \quad (8)$$

となる。ただし、V_R、V_S、V_Hは各々R、S、Hの変動係数である。μ_H=1.0、V_R=V_S=V_H=0.1のときの、R、S、Hが種々の分布形をとるときについて、P_{fD}と真の破壊確率を対比したものを図-1(a)、(b)に示す。(a)はe_R=e_S=e_H、(b)はe_R=0.1 e_S=e_Hの条件下でこれらの超過確率とP_{fD}の関係を式(8)から求め、またこれらの超過確率から実際の分布形について式(5)によって設計値を選んで、

$$R^* - S^* H^* = 0$$

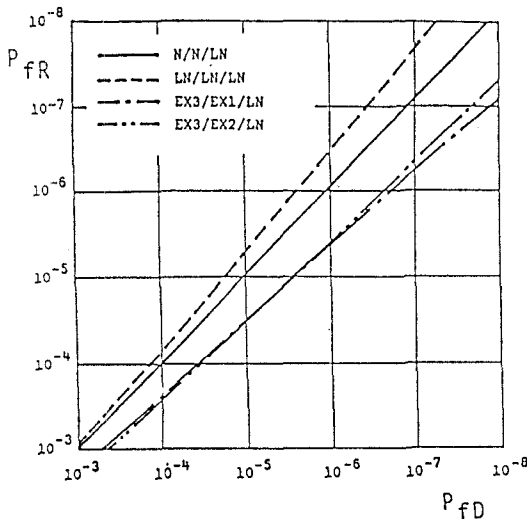
(9)

とした場合の真の破壊確率 P_{fR} を、3変数の確率密度関数のたたみ込み積分によって計算し、対比したものである。図中の分布の組合せは $R/S/H$ に対応し、 N は正規分布、 LN は対数正規分布、 $EX1$, $EX2$, $EX3$ は各々極値Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型分布を表わす。変数 H の分布形は、拡張信頼性理論で用いているのと同様に、対数正規分布を用いた。図-1における P_{fD} と P_{fR} の対応は比較的良好な精度を示している。これは一つには変動係数が0.1と小さいことにもよると考えられるが、領域の近似のしかただけでもある程度の誤差が予想されることを考え合わせると、式(5)の設計値選択に対する式(8)の近似の精度は評価しうるであろう。また、 e_R 、 e_S 、 e_H の設定について特に理論的な根拠はないが、実際の設計の間ではデータの個数等の兼ね合いによって決められることになるであろう。ただし図-1(a)、(b)の比較の範囲では、これらの超過確率の取り方によって特に著しい差はみられなかった。以下の節では計算に時間を要する図-1の P_{fR} に代え、この P_{fD} を計算することにより、破壊確率の近似値と考えていくことにする。

3. 破壊確率と安全率

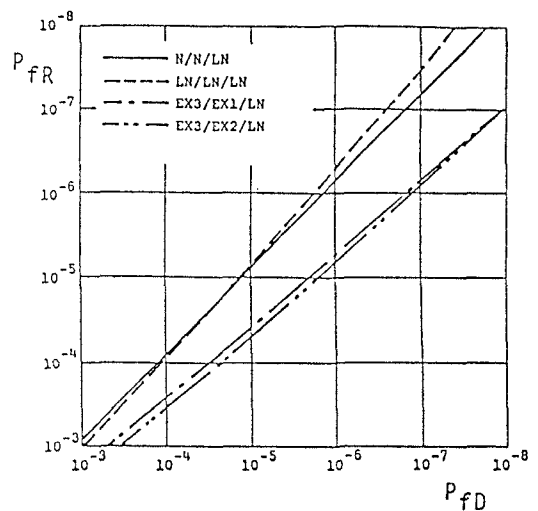
3.1 変数 H のパラメータの影響

初めに、この節で用いる概念を整理する。設計の時点において変数 H の影響が無視され（いわゆる安全率1の設計を行なうことになる）、 R と S のみに注目して計算された破壊確率を P_{fD} とおくことにする。すなわち



$$V_R = V_S = V_H = 0.1 \quad e_R = e_S = e_H$$

(a)



$$V_R = V_S = V_H = 0.1 \quad e_R = 0.1 \quad e_S = e_H$$

(b)

図-1 破壊確率の目標値と実現値の対応；3変数の場合

$$P_{f0} = \Pr.[R \leq S] \quad (10)$$

である。一方、Hが影響を及ぼすために実際に達成される破壊確率を P_{fH} とおく。すなわち

$$P_{fH} = \Pr.[R \leq SH] \quad (11)$$

である。設計段階でHを無視したために P_{f0} の破壊確率を期待して作られたものが、実際にはHの存在で P_{fH} の破壊確率となるわけである。ここで前節で導いた式(8)の P_{f0} を P_{fH} の近似値として考えることにする。また、 P_{f0} の計算には

$$P_{f0} = \Phi \left[\frac{\Phi^{-1}(e_R) \sigma_R + \Phi^{-1}(e_S) \sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \right] \quad (12)$$

が用いられる。

ただし、式(8)はもともとHの設計値を決めて、式(9)のように設計したときの破壊確率の近似に用いる式であって、この場合のように設計時点でHの存在が考慮に入れられていない(したがって H^* 、 e_H が決まらない)ときには別な解釈をつける必要がある。新しい解釈の概念構成を図-2に示す。設計の基本となる材料強度、荷重等にはばらつきがあるとき、信頼性の観点から見れば、設計行為(具体的には断面の決定等)とは、図-2に示すように、Rの分布とSの分布の間の相対的な位置関係を定めて、その結果目標の破壊確率を実現しようとする

ことにある。変数Hの存在を無視した場合には、 P_{f0} がこの目標破壊確率に該当する。このとき、例えばRとSの分布の位置関係が図-2(a)の R^{*0} と S^{*0} をもとに決められているとすると、このときの P_{f0} は対応する e_{R0} と e_{S0} から計算される。ところが、実際にはHが存在するため、この影響によって当初意図したRとSの位置関係に狂いが生じることがある。例えばHが1.0を超える値をとり、元来は一致するはずのなかった S^{*H} と R^{*H} (図-2(b))が一致してしまうことがあると考えられる。そこで基準となる図-2(a)の分布の位置関係にもとづいて、こ

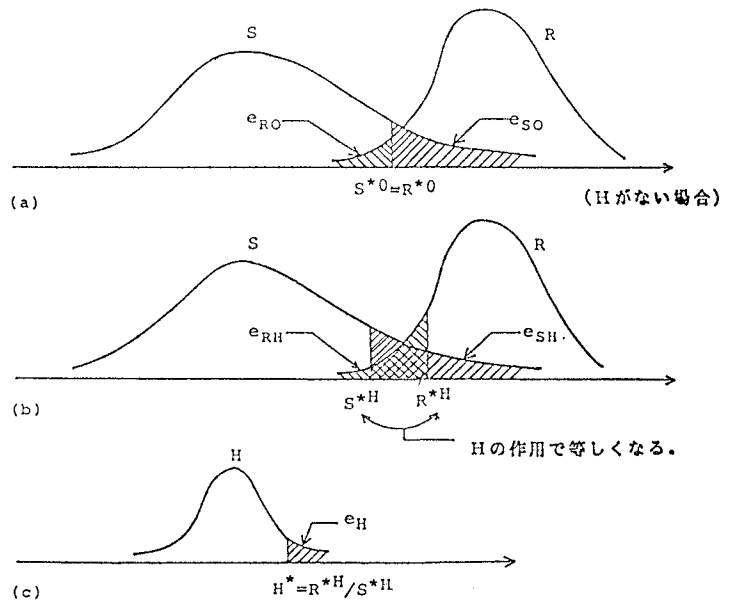


図-2 変数Hの影響と、Hの設計値 H^*

から任意に S^{*H} と R^{*H} を選び出し、対応する超過確率を e_{SH} 、 e_{RH} とする。 $H^* = R^{*H} / S^{*H}$ とおくと、 S^{*H} と R^{*H} が一致してしまうのは $H = H^*$ のときであり、このようなことが起こるのはどの程度の確率か、ということの指標として（図-2（c））、 H^* に対応する e_H が用いられる。こうした意味づけにおいて式（8）を用いる。

ここで、変数 H のパラメータについて考えてみる。現状では、変数 H が破壊確率を大きくする可能性が高いか、小さくする可能性が高いかについては全く資料がなく、 H の平均値 μ_H は、1.0 の近辺にあると仮定せざるを得ない。 μ_H の値の設定の及ぼす影響をみるため、図-2で示した手順で P_{fH} の計算を行なった。 $VR = VS = 0.1$ を仮定し、まず $P_{f0} = 10^{-6}$ ととして図-2（a）の R と S の位置関係を決める。次にこの関係から、 $e_{SH} = e_{RH} = 10^{-2}$ に対応する S^{*H} 、 R^{*H} を求め H^* を定める。この H^* が、 H の分布の中でどのように位置づけられるかによって、 P_{fH} が決まる。すなわち H^* に対応する e_H が小さいほど（ μ_H との関連で実質的に「大きな」安全率をとることに対応） P_{fH} は小さくなる。そこで、 μ_H をパラメータとして e_H と P_{fH} の関係を求めて、図-3に示す。図によれば、 P_{fH} は e_H の変化には敏感に反応しているが、 μ_H が 1.0 のまわりで多少違う値をとっても、さほど影響を受けていない。それゆえ、 μ_H としては仮定通りに 1.0 を採用し、今後の数値計算に用いることにする。

次に、 V_H の値について考察する。種々の VR 、 VS の値に対し $P_{f0} = 10^{-6}$ として上で行なったのと同じ計算をした結果を、今度は V_H を横軸にとりて図-4に示す。 $V_H = 0.0$ の場合は、 $H \equiv \mu_H = 1.0$ を意味するが、このときはいうまでもなく $P_{fH} = P_{f0} = 10^{-6}$ である。 V_H が大きくなるほど、 H^* に対応する超過確率も大きくなって、破壊確率も大きくなるが、その変動の度合いは VR 、 VS によって著しく異なる。1章で紹介したいくつかの研究例によれば、 P_{fH} は P_{f0} よりも、 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ のオーダーで大きくなるものと推定されるが、これと、図-4の結果を考え合わせ、 V_H は 0.05~0.3 の範囲の値を仮定することにする。

図-4の結果は、 P_{fH} の、 P_{f0} に比べての増加が特に VR 、 VS の小さいときに著しいことを

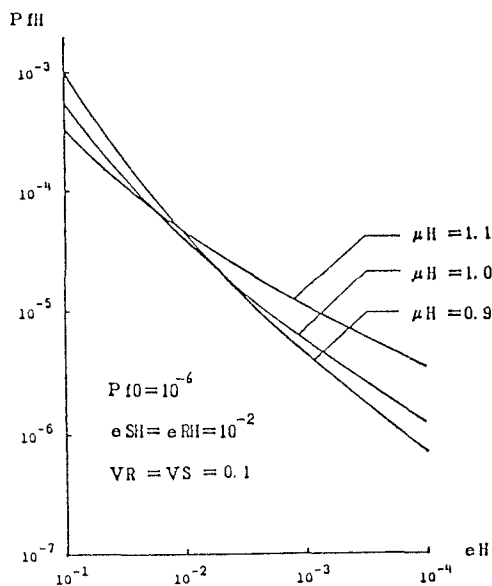


図-3 安全率の確率論的評価と破壊確率

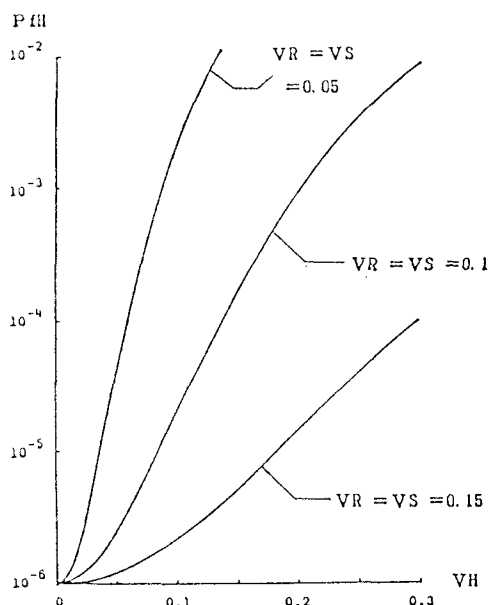


図-4 人的過誤等の影響による破壊確率の増加

示している。従来提唱されてきた、荷重係数法等による設計理論では、変動係数の大きい変数ほど、「安全率」を大きくとるべきとされているが、これは人的過誤等を考えていない場合の話であって、変動係数の大きい変数であれば、設計値もそれだけ平均値から隔たった値をとらなければならない、同一のPfdを実現するためには、中央安全率 μ_R / μ_S も大きくとる必要がある。この意味での安全率と、ここで考えている、変数Hの設計値としての安全率の違いに注意を要する。Hの影響を無視すれば、VR、VS が小さい場合には μ_R と μ_S の隔たりの小さい設計が可能であるが、そのぶんHの影響があった場合には、 μ_R と μ_S の間の距離が狭まることの効果が大きく、真の破壊確率が大きくなるのである。このことはある程度常識的に容認する事実であろう。これはまた式(7)において

$$V_Y^2 = V_S^2 + V_H^2 + V_S^2 V_H^2 \quad (13)$$

であることから、VS が小さいほどVH の影響が大きくなることによって説明できる。以上の理由で、例えば死荷重のウェイトが大きい設計の場合でも、極端に安全率を下げる方向に進むことには問題がある。

3. 2 安全率の設定について

安全率を破壊確率との対応でどのように定めたらよいかは、極めて重要なテーマである。限られた範囲の数値計算で、この問題に明確かつ一般的な解答を与えることは不可能であるが、特に問題になると思われる点を抜き出すことはできると思われるので、整理の意味も含めて考察を試みることにする。

ところで、先に図-2に関連して行なった説明から容易に理解できるように、図-2(b)における R^{*H} 、 S^{*H} (すなわち e_{RH} 、 e_{SH}) の選択には自由度がある。たとえば、 e_{RH} 、 e_{SH} を大きめにとってその分 H^* を大きくとることも可能である。文献1)において、設計式 $\nu \frac{S^*}{R^*} \leq 1$ において ν を

$$\nu = \nu_R \cdot \nu_S \cdot \nu_H \quad (14)$$

の3つの部分に分け、 $\nu_H \frac{(e_S S^*)}{(e_R R^*)} \leq 1$ とすることができるとしたとこれに関連する。このことは、式(8)のもとになる式(6)において e_R 、 e_S を任意に選んでも、 e_H を適当に選べばPfdをコントロールできるという意味である。

論理的には、VH が極めて小さく、Hがほとんど1.0 (一定)に近いような場合でも $VH = 0$ でない限り、これは同様である。すなわち、式(6)において、Pfd、 σ_R 、 σ_S 、 e_R 、 e_S を一定の値として与えればこれは σ_H と e_H の間の関係を与える式となり、さらに σ_H が小さく、分母の $(\sigma_H/H_0)^2$ の項が、 $(\sigma_R/R_0)^2$ 、 $(\sigma_S/S_0)^2$ に対して省略できるような場合、この関係は近似的に

$$\sigma_H \phi^{-1}(e_H) = \text{const.} \quad (15)$$

と表わせる。このことは、 $H^* (= \mu_H - \sigma_H \phi^{-1}(e_H))$ がほぼ一定の値であることを意味する。したがって、 $\sigma_H \rightarrow 0$ の極限を考え、 $H \equiv 1.0$ であるような場合を考えても、それとは別に任意に考えた e_R 、 e_S に対してある「安全率」 $\nu = H_0^*$ を用いて設計すれば、式(12) (最初から $VH = 0$ を代入した場合になる) から求まる破壊確率 (Pfdとする) よりも小さい破壊確率 (Pf2とする) が実現できる。式(12) から求まる $Pf1$ は $R^* \geq S^*$ として設計した場合の破壊確率であり、対して $Pf2$ は $R^* \geq H_0^* S^*$ として設計した場合の破壊確率であるから、Pf2の方が小さくなるのは当然のことである。

しかし、 $VH = 0$ と考えているのだからこの H_0^* が変数Hの設計値としての意味をもたないことは明ら

かである。目標破壊確率 P_{fd} を実現させるための、設計式の補正係数という意味になる。すなわち、この H_0^* の機能が、1 章の最後に述べた「破壊確率の調整」の機能に他ならない。また、

$$H_0^* = H_{01}^* H_{02}^* \quad (16)$$

のように分けて表わすことができれば、 P_{fd} を求める前提となるのは、

$$R^*/H_{01}^* \geq H_{02}^* S^* \quad (17)$$

という設計式になる。式 (17) のように書けば、 H_{01}^* 、 H_{02}^* は、任意に e_R 、 e_S を選んだあと、全体の破壊確率が P_{fd} になるように設定した、いわば R および S の設計値に対する補正係数としての意味をもっていると理解することもできる。すなわち、式 (17) はいわゆる強度係数、荷重係数を用いた設計式の表現になっていると見なすことができる。 $H \equiv 1.0$ の場合、 R^* 、 S^* に対するものである e_R 、 e_S には実質的な意味はなく、 R^*/H_{01}^* 、 $H_{02}^* S^*$ が各々 R および S の分布の中でどのような位置を占めているかが本質的に重要である。安全率を式 (14) あるいは (16) のように分けようとする議論において、この、目標破壊確率に応じた設計式の修正（荷重や強度の設計値の補正）という議論と、広い意味での人的過誤等に対する対処という議論とは極めて混同されやすいように思われる。

再び V_H がある程度大きい場合に議論を戻すとして、このときもやはり同様に、 H^* の中には R 、 S の分布に対する補正係数の意味が含まれることになる。この要因を分離して、 H^*/H_0^* を、純粋な意味で人的過誤等 H に対応するための、「安全率」と考えることにする。

試みに $P_{fd} = 10^{-6}$ を満足するために必要な「人的過誤等に対処する安全率」 H^*/H_0^* を、 V_H の値に対してプロットし、図-5 に示した。図-5 (a)、(b) とともに $V_R = 0.1$ とし、(a) は $e_R = e_S = 10^{-3}$ とした場合、(b) は $e_R = e_S = 10^{-1}$ とした場合を示す。(a) は R^* 、 S^* を分布の端の方に

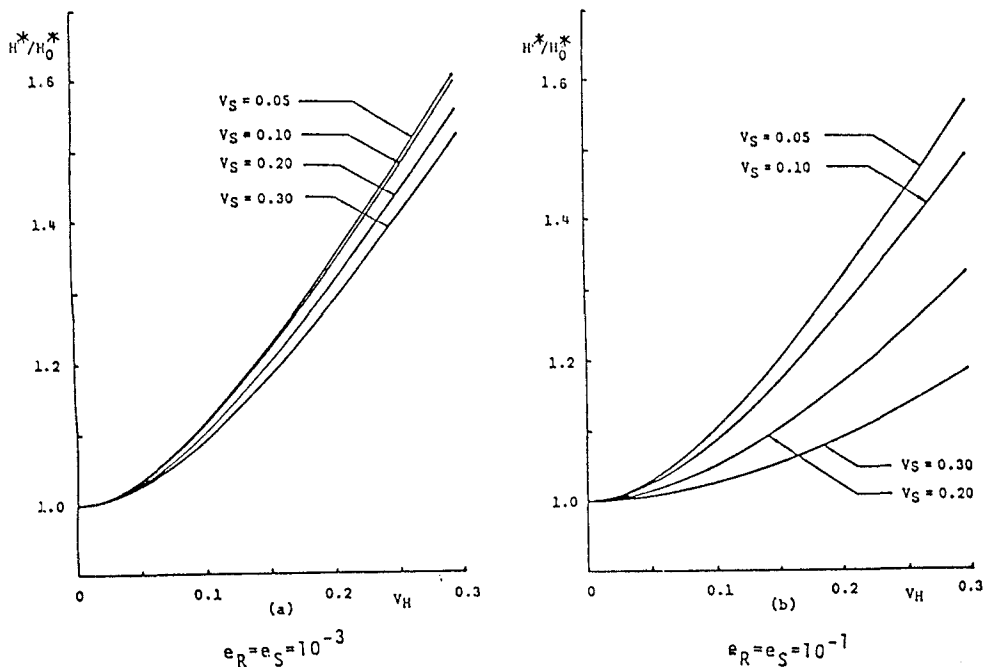


図-5 破壊確率 $P_{fd} = 10^{-6}$ を満足するための安全率 $P_{fd} = 10^{-6}$ 、 $V_R = 0.1$

とっており、超過確率法、もしくは現行の設計法に近いといえる。(b)は比較的中央に近い値をもとにして、後から H_0^* によって補正する、いわば部分安全係数法に近い手法であるといえる。図-5が示すように、Hの影響に対して与えるべき安全率の値が(a)ではVSの値によってほとんど変わらないのに対し、(b)ではVSの値に対する変動が大きい。安全率は荷重Sの統計的な性質と独立に決められることが望ましく、(a)の挙動が(b)に比べて好ましい。このことは、部分安全係数法フォーマット、というよりも(特性値)×(係数)という方法で設計値を決める手法のもつ一つの問題点として指摘することができるであろう。実際には、データ不足等の理由により、超過確率の小さいレベルでの特性値が精度よく求められない場合に、こうした、係数をかける方法を用いることもあるかもしれないが、その際でも、係数倍された荷重が、どのような超過確率を目標に定められているかを極力明確にしていくことが重要である。

4. まとめ

本研究では、荷重や強度のばらつきに含めた形で統計的に処理することが適当でない(あるいは困難な)、「人的過誤等」の影響を組入れた3変数モデルに超過確率法を適用、安全率と破壊確率の関係を中心に考察を行なった。

人的過誤等の影響を考慮せずに設計を行なった場合、この影響によって破壊確率は増加するが、特に変動係数の小さい変数に対して行なった設計に対してこの増加が著しい。たとえば、死活荷重の組合わせに対し、 $s^* = 1.3D + 2.0L$ などの組合せで設計荷重値を決める手法は、死荷重の影響の大きくなる長支間の橋で、実質的に安全率を下げる効果があるが、本研究の結果によれば、人的過誤等の要因が入ってくるのを防ぐための万全の措置をしなければ、このような安全率の低減は危険を伴う。本研究で取上げた意味での安全率を下げるためには、航空機の設計にみられるように、設計、施工、維持管理全般に渡る、注意深いチェックが必要とされよう。ただし、特殊な場合、たとえば本州四国連絡橋における長大橋の場合等については、このチェックが相当度に期待できるために、安全率が低減できる可能性はかなり大きいと考えてよいと思われる。支間の大小等の構造形式、使用材料の性質等によって安全率の設定が経済性に及ぼす影響は相当に異なるが、こうしたことも含めて、安全率のもつ意味と、設定のしかたの議論が進められることが期待される。

超過確率の大きいところに特性値をとり、それに係数をかけて設計値を決定する、いわゆる部分安全係数法の手法では、本研究において示したモデルの妥当性を認めるならば、荷重のばらつきによって、安全率の値を操作しなければならないという欠点が指摘できる。この意味では既往の設計法のように、はじめから超過確率の小さいレベルをねらって設計値を設定する方が手法として優れているといえる。仮に、部分安全係数法の書式によるとしても、「特性値」は可能な限り、超過確率が小さくなるようにすべきである。また、先の $s^* = 1.3D + 2.0L$ の例でみると、わが国では、Lの係数である2.0は現行のL荷重が実情に比して過小であるために、それを補正する係数と理解されることが多く、半面Dに対する3割増しをLの係数と同様の意味に理解する場合は殆どない。こうした意味付けの異なった係数の混在は問題であり、整理が必要であるが、本研究における、 H^* に含まれる2つの意味をこのような現状と対応させて考えることができる。

本研究の3変数モデルの基本的背景となるのは、設計における種々の概念は原則的に「荷重及び応答」ならびに「強度、限界状態」という2つのカテゴリーに分類でき、例外的にこれらに含まれないものの不確定性は安全率に含めて最後の安全性照査の段階で考慮し、さらに安全率は限界状態に応じた破壊確率のレベルの指標になっているという、現行設計の多段階的解釈²²⁾である。こうした解釈にもとづけば、安全率を1

箇所にまとめるのは簡潔で十分合理性のある方法である。安全率の内容をいくつかに分けて、何箇所かに分けて置くという方法がむしろ近年の世界の設計手法の主流になりつつあるが、強度及び荷重のばらつきと人的過誤のみを考えるならば、必ずしも論理的な説明のつけにくい係数を方々でかけるということが合理的であるともいえず、優れているとはいえないと思われる。しかし、実際には鋼、コンクリート、土の各分野の設計での安全率の使われ方に差があり^{23), 24), 25)}、上記の解釈を鋼構造以外にそのまま適用することが妥当であるかは問題であるし、鋼にしても現行の安全率が全て人的過誤に対応しているわけでもない。例えば、座屈関連規定において、後座屈強度が十分期待できる場合には座屈安全率を小さくしているが、これなどは限界状態の特性に応じた質的調整機能と考えられ、破壊確率の調節とはまた異なった機能である。さらに、非線形の問題を含む場合、安全率をどう位置づけていくかも明らかではない。現状ではこうした論議は甚だしく未整理であるように思われる。力学の問題と確率の問題の境界をなす課題を含んでいると考えられるだけに、広い角度からの検討が必要であろう。

本研究では人的過誤等について、拡張信頼性理論と同様の、しかも現行の設計式とも整合性の高い形でモデルを考え、限界状態に取入れることを試みた。そして超過確率法の手法によって近似的に破壊確率を求めて、安全率の性格等を考察したのであるが、人的過誤等を表わす量そのものの性質についての考察は極めて不十分であり、またそれをどのような形によってモデルに取入れるかについても十分な検討を行なったわけではない。こうしたことに関する研究は未だ緒についたばかりであり、データの収集、解析、モデル化等、今後課題となるべきことは多い。他分野と比較して、土木の設計を規定する種々の背景と関係することだけに、非常に興味深く、重要な問題と思われる。また破壊確率の計算等についても、必ずしも精密な解析を行なったわけではなく、概略の特性を示したのみであって、この点でも今後改善すべき余地は少なくない。とはいえ、研究の第一歩としては、問題の所在等の整理という効用は果たし得たと考えられる。

謝辞

本研究は文部省科学研究費による研究の一部として行なわれたものである。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 西野文雄、佐藤尚次、長谷川彰夫：許容応力度法の内容と問題点（上）、（下）、橋梁と基礎、第17巻第12号、第18巻第1号、1983-1984.
- 2) 川北司郎、長尚、小山健：材料安全率の変遷と若干の考察、第39回土木学会年次学術講演会概要集Ⅰ-226、1984.
- 3) 関川栄一郎：シンポジウム—構造物の安全性と経済性について—飛行機、日本鋼構造協会第16回研究集会報告、日本鋼構造協会誌第18巻第196号、1982.
- 4) 倉西茂：安全率は小さくできるか—特集日本の風土と土木技術、土木学会誌第67巻第11月号、pp.18-19、1982.
- 5) Smith, D.W. : Bridge Failures, Proc. ISCE, Vol.60, Part1, 1976.
- 6) 伊藤学、尾坂芳夫：設計論、土木工学大系第15巻、pp.231-243、彰国社、1980.
- 7) Brown, C.B. : A Fuzzy Safety Measures, Jour. of the Eng. Mech. Div. ASCE, Vol.105, EM5, 1979.
- 8) Nowak, A.S. : Effect of Human Error on Structural Safety, ACI Jour., 1979.

- 9) 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第327号、pp.21-28、1982.
- 10) 杉本雅一、白石成人、古田均： Gross Error の構造安全性への影響、第37回土木学会年次学術講演会概要集Ⅰ-41、1982.
- 11) 長尚、小山健： 土木構造物の安全性に影響を及ぼす要因に関する若干の考察、第37回土木学会年次学術講演会概要集Ⅰ-43、1982.
- 12) Nowak, A.S. and R.I.Carr: Errors in Structural Models, Proc. of 4th Int.Conf.on Structural Safety and Reliability, pp.Ⅱ-41-50, 1985.
- 13) Melchers, R.E. and M.G.Stewart: Data-Based Models for Human Error in Design Proc. of 4th Int. Conf.on Structural Safety and Reliability, pp.Ⅲ-51-60, 1985.
- 14) Ang, A.H.S. and M.Amin: Safety Factors and Probability in Structural Design, Jour. of Str. Div. ASCE, Vol.95, No.ST7, 1969.
- 15) Cornell, C.A. : A Probability Based Structural Code, ACI Jour., Vol.66, 1969.
- 16) Lind, N.C. : Consistent Partial Safety Factors, Jour. of Str. Div. ASCE, Vol.97, No.ST6, 1971.
- 17) Ang, A.H.S. and B.R.Ellingwood: Critical Analysis of Reliability Principles Relative to Design, Conf. on Applications of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering, Hong Kong, 1971.
- 18) 土木学会編： 構造物の安全性、信頼性、pp.17-19,45-47、1976.
- 19) Nishino, F., A.Hasegawa, C.Miki and Y.Fujino: A Fractile-Based Reliability Structural Design, Proc. of JSCE, No. 326, pp.141-153, 1982.
- 20) Nishino, F., N.Sato, A.Hasegawa and J.Inoue : A Probabilistic Basis for Fractile-Based Structural Design, Proc. of JSCE Structural Eng. /Earthquake Eng. Vol.1, No.2, pp.249s-259s, 1984.
- 21) 長尚： 文献20) への討議、及び、西野、佐藤、長谷川、井上：同解答、土木学会論文集第 362号、pp.485-488、1985.
- 22) 池田豊人、佐藤尚次、長谷川彰夫： 非線形限界状態関数の扱いに関する一つの試み、第40回土木学会年次学術講演会概要集Ⅰ-125、1985.
- 23) 日本道路協会： 道路橋示方書（Ⅱ鋼橋編）pp.92-107, 217-225, 280, 319-320、1980.
- 24) 日本道路協会： 道路橋示方書（Ⅲコンクリート橋編）pp.92, 144-153、1978.
- 25) 日本道路協会： 道路橋示方書（Ⅳ下部構造編）pp.106-114, 180-181, 183, 191, 206, 209, 211, 264, 270、1980.

(1985年10月18日受付)