

松尾 稔
出村 龍典 共著
小堀 為雄

“使用実績を考慮した現行設計規準の安全率に 関する研究”への討議

(土木学会論文報告集, 第340号・1983年12月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

長 尚 (信州大学)

By Takashi CHOU

「実績の蓄積はきわめて重い」からこれを考慮に入れて適切な安全率について信頼性理論の立場から議論しようとする、本論文の意図には全く異論はない。しかしその方法論の前提に疑問を感じるので、指摘させていただきます。

著者らは「過去の時点で決定された現行安全率その時点では最適の決定結果であった」と考え、「信頼性設計法により決定した最適安全率が現行安全率に一致したときの工学的満足度を把握する」ことによって、破壊によって生ずる社会的な損失費 C_{sc} を決定している。このことをもっと具体的にいうと (p.45の右上から4行目～10行目の説明に基づいて)、現行の安全率は「既知の確率分布 (部材強度や部材応力について) と仮定された未知要因の確率分布を用いて、期待総損失費最小化の原則で最適決定されたもの」と、結果的になっている。さらに表現を変えると、確率分布と期待総損失費とが配慮されたうえで、最適化問題が過去において存在し(暗にはあるが)、その最適解が現行の安全率になっているということになる。

いくら「過去の時点においても技術者集団はあらゆる努力と英知を傾けて」安全率の決定がなされたとしても、現時点の手法(それも単純なモデル化によったものだが)で評価した最適解になっているとはとうていいえない。むしろそうっていないと考える方が常識的であろう。このことは土木構造物の鋼の安全率^{32), 33)}が、降伏点に対してほぼ2(最大強度に対してほぼ3)とされ、その後やや下げられて降伏点に対して現行の1.7程度になった経過をみてもいえる。安全率に2を採用した背景や、その後の技術の進歩を反映した安全率の改訂において、安全性と経済性は二律背反の性格ばかりではなく、安全性の水準を適切に設定しないと結果として不経済になるという性格をもつことを、抽象的意味では認識されていたとは考えられる。地震時には許容応力度を割増して、常

時より安全率を下げているのはこのような配慮によるものといえる。しかし適切な安全率について何らかの形で具体的に評価して、安全率の設定・改訂が行われたという側面はない。たとえ経験的にしても評価のしようが過去にはなかったのである。つまり「技術者集団はあらゆる努力と英知を傾け」たとしても、現時点の手法で評価した最適解になっていない可能性の方が高いといわざるを得ない。「数理的なトレードオフ分析はできていなくても、社会的、経済的、技術的観点から不特定多数のコンセンサスが得られ」た決定であれば、その時点での妥当な(他に適切な決め方がないという意味で)決定とはいえるが、結果的に期待総損失費最小化の最適決定になっているとはいえない。そういう保証はどこにもない。おそらく著者らの考え方は、期待総損失費最小化の原則からいって過去の決定が不当なものであったら、「社会的、経済的、技術的観点から不特定多数のコンセンサスが得られ」るはずはない、だから厳密には最適ではないにしても、かなり期待総損失費最小化の原則が入っているはずであり、便宜上最適な決定として扱うのも許されるということなのであろう。しかしこのことがいえるためには不当な決定かどうかをチェックする自己調整機能が備わっていて、過去にそのような機能の働いた形跡がなければならぬ。確かに一般論としては、安全性が低過ぎて事故等が頻発すれば安全性を高める動きが出るだろうし、逆に高過ぎて極端に高い出費を強いられると低める動きが出るであろう。だから一見自己調整機能が備わっているように思えるが、この機能が実際に働くのは、かなり異常な事態であると判定される場合に限られる。前にも触れたように、歴史的にみてもこの機能が働いて試行錯誤的に安全率が上下して現行の水準に至ったという経過はない(特に常時については)。あるのは技術の進歩を反映して、それまでと同程度の安全性の水準は保てるだろうからというものが主な理由で、時代とともに幾

分下げられているということだけである。だから特にこれ以上安全性を下げる（または上げる）と結果として不経済になるというような判断が可能な状況は過去になかったし、安全性を下げ過ぎて逆に上げたという経験もしていない。つまり自己調整機能が過去に具体的に働いたという形跡は認められない。概念的には自己調整機能があるはずといっても、実際にはその機能が働いていないのであるから、期待総損失費最小化の原則がかなり入った決定に、現行の安全率はなっているとはいい難い。したがって便宜上最適な決定であるとして扱うことが許されるということにはならない。

もし著者らのいうように、過去の決定が現時点のある程度進んだ手法で評価しても合理的だといえるのなら、過去の決定に基本的には不合理はなく、合理化の余地は、データの信頼度の向上分しかないことになる（著者らの「使用実績の安全率への貢献度」がこれに当たる）。過去の決定は基本的な部分での合理化の余地がないほど合理的なものであるという主張は、きわめて説得力に欠け、不合理であることは指摘するまでもなからう。

なお信頼性理論を適用して構造物の設計法の改善について議論をするとき、特に安全性の水準の設定の問題（たとえばコード・キャリブレーション）のような場合、とりあえず現行の水準を1つのよりどころとせざるを得ないことがしばしばある。しかしこの場合は、著者らの前提のように、最適だとしてよりどころとしているのではない。他に判断の基準がないから、最適ではないが過去の決定を合理化の議論の出発点として利用するまでのことである。確かに破壊によって生ずる社会的な損失費を評価するため、何らかの形で過去の決定を利用したいという気持ちは十分理解できる。しかし、過去の決定が最適として利用するのは妥当性を欠く。最適だとすること、単に合理化の出発点だとすることは全く意味合いが違う。最適であったという保証がない限り、最適を前提とした結論に妥当性はない。

次に別な4点について指摘と質問をさせていただきます。

(1) 「Z はすべての不確定要因の総合としての確率変数であるから、これを正規分布と仮定する。」とされている。これは中心極限定理を念頭に置いてのことだと推

測するが、中心極限定理が成立するのは線形の関数の場合であって、 $K \cdot R$ のように掛け算が含まれたり、 R 、 S が個々の確率変数の非線形関数であるような場合には成立しない。したがってこの理由は適切ではないと思う。

(2) 著者らのいう実績とは、現行の設計荷重で計算上降伏応力を超えるものがあるかどうかではなく、実際に作用した荷重で破壊したものがあるかどうかということを目指すはずである。したがって破壊、非破壊を区別する基準式 Z の S 項は実際に作用する荷重による応力でなければならない。実際に作用する荷重は、道路橋の示方書の活荷重の規定とはある程度無関係に時代とともに変化し、増大している。そこで具体的にはどのようなデータに基づいて実際の荷重による応力を推定して、(平均値)/(設計基準値)を決めたのか、お聞きしたい。

(3) 「 $S_{L_i}(t_j)$ 」が文字通り「 t_j 年目に載荷される年間の最大荷重による応力」であるならば、式 (19) の η_i による補正は不要のように思われる。逆に η_i による補正が必要であるとすれば、 $S_{L_i}(t_j)$ はその橋梁の建設時に規定されていた設計荷重による計算応力で、 t_j 年目に載荷される年間の最大荷重による応力ということにはならない。しかもこの場合には現行の設計荷重による計算応力が実際に作用する荷重による応力ということになる。討議者の誤解かもしれないが理解しにくい。

(4) 表—5 の最適安全率に対応する最適破壊確率はどの程度の値で、過去の実績からみた破壊確率とどの程度異なるのか、さらにそれは常識的にも妥当な値といえるかどうかについて、お聞きしたい。

注：「」内は著者らの表現の再掲である。

参考文献

- 32) 川北司郎・長 尚・小山 健：土木構造物の設計法における許容応力度の変遷について、昭和58年度土木学会中部支部研究発表会概要集、I-27、1984-3。
- 33) 川北司郎・長 尚・小山 健：材料安全率の変遷と若干の考察、土木学会第39回年次学術講演会概要集、I-226、1984-10。

(1984.6.13・受付)

▶回答者 (Closure)———松尾 稔 (名古屋大学)・出村 禧典 (石川工業高専)・小堀 為雄 (金沢大学)

By Minoru MATSUI, Yoshinori DEMURA and Tameo KOBORI

討議の p.592 左列下の5行目までは、代案が示されていないという意味において討議というよりもコメントと解釈するが、一応著者らの基本的な考え方を補足説明しておきたい。また、p.592の(1)~(4)は質問事項であるので後に順を追って回答する。

まず初めに、コメントの重要対象部分である「過去の

時点で決定された現行安全率とその時点では最適の決定であったと考え、信頼性設計法により決定した最適安全率が現行安全率に一致したときの工学的満足度を表わす、(破壊によって生ずる)社会的損失費 $C_{F,c}$ を逆算し、以後の決定に使用する」について補足説明する。

本論文では、過去に多くの橋梁が建設され使用されて

きているという実績を安全率決定の中に定量的に組み入れるための手法を開発している。さらに、その手法を用いて最適決定された安全率値と現行安全率値を比較し、考察を加えている。本論文の再録になるが、その方法の概略を示すと以下のものである。まず、現行安全率は過去の時点で期待総損失費が最小となるように最適決定されたものと仮定し、その時点での破壊に伴う損失費 $C_{F,c}$ を現時点における経済的価値の観点から逆算する。次に橋梁の使用実績を確率・統計的に処理し、そこから得られる情報を用いて構造物の破壊確率を修正する。そして、上記逆算 $C_{F,c}$ と修正破壊確率 P_F を用い計算された期待総損失費 C_T が最小になるように最適安全率を決定する。以上のようなプロセスで求めた最適安全率と現行安全率の差を使用実績の安全率への貢献度とみなすことができる。ここでは期待総損失費最小化の原則を安全率決定基準に採用しているが、本研究で注意すべき点は以下のことである。すなわち、もし他の決定基準を用いたとしても、それが過去と現時点で同一であるならば、その決定基準のもとでの使用実績の貢献度の算出に同様の手法を適用することができるという点である。著者らは、現在のところ期待総損失費最小化基準が最も現実性のある基準の一つであると考えているが、この点が討議者の考え方と異なる点であると思われる。いうまでもなく、著者らも現行安全率が期待総損失費最小化基準によって数的に決定されたなどとは考えていない。しかし、技術というものは社会のニーズと容認を無視しては成り立たず、試行錯誤的に社会との対応を図りながら進展することは歴史の教えるところである。本研究に関していうならば、現行安全率を決定した技術者集団が過度に安全で不経済な構造物を望んだとか、逆に、安価なものを求めるあまり社会に受け入れられないような過度のリスクを意図したとは考えにくい。以上から、破壊に対するリスクと経済性を同時に考慮する期待総損失費最小化原則の適用が基本的に不合理であるとは思われない。ただし繰り返し述べるが、著者らも $C_{F,c}$ 値の見積りがきわめて正確であるとは考えていない。討議者は安全性を力学的側面からのみみてそのレベルが過去と現在で同一になるようにキャリブレーションされてきたと主張しているようであるが、著者らは安全性の議論に経済性を除外することはできないという立場をとっている。すなわち、ここでは数値的には厳密性を欠くという認識をもちつつも、現行安全率が決定された時点での経済性も含めた工学的満足度、すなわち $C_{F,c}$ 値を本手法に適用したときの安全率を現時点における最適値とみなしているのである。なお、紙幅の関係で本論文では掲載しなかったが、初期の未知要因の確率分布に起因する $C_{F,c}$ の見積り誤差が、使用実績の貢献度にどのように影響するかを別途

表一1 $C_{F,c}$ の γ^* への影響

No.	v_K	$C_{F,c}$ $\times 10^9 \text{yen}$	γ^*	$\frac{\gamma^*}{1.7} \times 100$	C_T $\times 10^9 \text{yen}$
1	0.11	87.5	1.472	86.6	10123.0
2	0.12	62.5	1.463	86.1	10124.0
3	0.13	45.0	1.453	85.5	10122.0

にチェックしてある。表一1にその結果を示す。表中、 v_K 、 $C_{F,c}$ は、初期の未知要因 K の変動係数と逆算された損失費を示しており、 γ^* はこの逆算損失費を用いて最適決定された安全率値を示している。計算結果は破壊事例が皆無の場合の決定値である。 v_K 値が小さいとき $C_{F,c}$ 値は大きく、また逆に v_K 値が大きいときは $C_{F,c}$ 値が小さくなっている。これは、過去の時点で決定された安全率が同じ値ならば v_K 大、すなわち不確実性が大きい場合は $C_{F,c}$ の値を小さく設定して決定がなされたことを表わし、逆に v_K が小の場合は、大きい $C_{F,c}$ 値が設定されたことを示している。いずれの場合も、その後の使用実績を考慮して最適決定した安全率 γ^* 値の違いは小さい。このことは現行安全率 1.7 と表中の γ^* 値の差に工学的に問題とすべきほどの相違がないこと、換言すると、 $C_{F,c}$ の逆算値の誤差が使用実績の貢献度に与える影響は小さいことを示している。

また、討議者は「安全率決定に自己調節機能が働いていると著者らは考えているらしいが歴史的にそのような事実はない」という趣旨のことを述べている。討議者の推測のように、活字として公表してはいないが、あらゆる技術において自己調節機能が作用するというのはまさしく著者らが従来から主張している工学的な考え方である。討議者がいう橋梁構造物には自己調節機能が働かなかったという主張に対して若干の反論を加えたい。

道路や鉄道は、いうまでもなく1つのライフラインとして機能しており、全体としての調和が最も強く要求される典型的なシステムである。したがって、これを構成する個々のサブシステムとしての橋梁や盛土やトンネルに関し、経済性も考慮したうえで必要とされる力学的信頼度が甚だしく調和を欠いていると考えるのは不合理であり、過去の実績をみれば、それぞれの設計精度は現在に向けてバランスよく向上してきたとみるのが妥当である。ある特定のサブシステム、たとえば橋梁の部分だけが常に機能障害を起こしたり、あるいは常に過大設計されているという事実がもしあったとすれば、全体の調和がとれるよう設計法に修正圧力が加わらないはずがなかったと考えるのが工学の自然である。これまでに著者の1人は、高速道路の盛土構造物について期待総損失費最小化の原則によって決定された安全率と現行安全率が

よく一致している事実を確認している^{1),2)}。このように、比較的歴史の浅い高速道路用盛土構造物でさえ最適決定の努力がなされているのに対して、歴史が長い橋梁構造物の安全率がそうではなかった、とは考えられない。

具体的に2, 3の事例を述べると以下のようである。わが国の設計規準は、欧米諸国の設計規準の影響を強く受けているといわれている。欧米諸国にはかなりの破壊事例がある。文献3)では、「欧米においては、19世紀から今世紀の初めにかけて橋の破壊が頻発し、大きな社会問題になった。事故の多発に手を焼いた当局が安全対策にいくつかの委員会を招集し基準を定めた。これがそもそも設計規準の歴史的な背景になっている」と記している。これは鉄道橋の場合であるが、道路橋の設計規準にも影響を与えないわけではないと思われる。また、文献4)では、橋梁事故の中でも代表的なケベック橋の座屈による落橋事故について記述されている。これは架設中の事故であるが、大きな原因の1つは荷重の過小評価、許容応力度の過大見積りであるといわれている。そして最初の橋梁の2.5倍の鋼材量を用いて新たな橋梁が架設されたとのことであるが、このような例は安全率を過去のものより上昇させた事例であろう。文献4), 5), 6)では、箱桁橋の座屈による破壊事例がかなりあることを示している。その後、道路橋示方書の箱桁に関する規準が改訂されているが、改訂においてこのような破壊事例が全く無視されたとは考えられない⁷⁾。

また、土木構造物の鋼の降伏応力度に対する安全率が下げられたことがある。これは、いみじくも討議者が述べているように、「技術の進歩」、すなわち、材料の品質向上のみならず、これまでの橋の使用実態、経済性も考慮したグローバルな検討の結果と考えるのが妥当であろう。道路橋の設計荷重も過去に何度か改訂され、自動車荷重は大きく、等分布荷重は小さくなっている。自動車荷重を大きくしたのは交通荷重の重量増大によるものであろうが、等分布荷重を逆に減少させたのは、それまでの設計荷重では安全性に余裕があると判断し、経済性も勘案した結果であろう^{8),9)}。また、プレートガーダーのたわみ制限も改訂され、スパンの短い橋ではたわみの許容値が小さく、設計を厳しく規制するようになってきている。これらも自己調節機能が作用した事例であろう。

討議者は、①過去の決定が最適であったとするのは不合理であり説得力に欠ける、また、②もし最適であったならばその後の合理化の必要性はないではないか、という趣旨のことを述べている。まず、①に関しては、見解の相違であり、繰り返して述べるが、数理的な最適手法を用いてはいないものの、その時点ではベストが尽くされたとする立場に立脚しているのである。また、②に関しては、討議者の批判は見当違いである。過去の時点での

情報量のもとで最適であったものが、その後付加情報によりよりよいものに変更されるのは当然のことである。この点が技術と科学の異なる点であり、両者は峻別されなければならない。技術に関する最適解は、社会の価値観も含む周辺状況で当然変化することを銘記すべきである。

次に、別な4点の質問に対して以下のように回答する。

(1) Z の分布を、単純に中心極限定理を念頭において正規分布と仮定したわけではない。したがって、そのようなことを明記することはしていない。本来ならば、 Z の分布は、基礎変数による Z の関数形やその基礎変数の分布が既知であるとして導かれなければならない。しかし、ここでは、このような関数形や基礎変数の分布について明確な情報がないことを前提にしている。このことは K , R , S についても同様である。そこで、 $Z (=K \cdot R - S)$ の形式が Z の分布を求めるための何らかの情報を与えるものとは解釈せず、 Z の分布については独立に正規分布の仮定をおいたのである。ところで、観測値の誤差分布は、消極的な理由からではあるが他に適した分布がない限り正規分布とみなしても不合理ではない、と考えられる。そこで本論文では、 Z と観測値、各基礎変数のばらつきと誤差とを対応させ、 Z の分布を正規分布と仮定してもよいと考えたわけである^{10),11)}。以上の点については、本論文の表現はやや不明確であったと考えている。

なお、この仮定を用いた式(11)は、安全率決定システムにおいては、設計破壊率 p_F から安全率を計算するために使用されているが、その安全率を用いて求められた断面に対して改めて式(37)を用いて構造物の破壊確率を計算し直している。したがって、安全率の決定値には Z の分布の仮定の誤差は影響しないことを付記する。

(2) 破壊、非破壊の区別は、当然実際に作用した荷重によって生じる部材応力と部材強度を比較することによってなされなければならない。そのために、本論文では、文献12)と同様の手法とデータを用いて、年間の最大荷重の統計量を計算している。さらに、荷重から応力に変換するときも、計算上の応力と実際に構造物に生じる応力との違いを、文献8), 13)のデータから求めている。このようにして、実際に近い応力と強度によって破壊、非破壊の区別ができるように工夫している。なお、本論文の表一4の変動係数欄の最下段の数値0.16は表記ミスであって、正しくは0.32であるので修正しておきたい。

(3) 本手法では、過去に建設された橋梁に作用した年間最大荷重は、同一の母集団からランダムに抽出されたものであると考えている。 $S_{.i}(t_j)$ は、年間最大荷重の母集団から t_j 年目に抽出された荷重が橋梁 i に作用

したときに生じる応力を表わしている。ところが建設された橋梁の中には、設計荷重などの設計条件が現行の設計規準と異なっている橋梁がある。このような橋梁では、現行設計規準によって設計された橋梁とは、同じ大きさの荷重が作用しても生じる応力の値が異なってくる。 $S_{Li}(t_i)$ は、現行設計規準によって設計された橋梁に生じる応力であるから、設計条件による応力の違いを表現する変数が必要となる。 η_i がこれである。すなわち、 η_i は、橋梁 i にある大きさの荷重が作用したときに生じる応力と、その荷重が現行設計規準を用いて設計された橋梁に作用したときに生じる応力との比を表わしている。したがって、本論文のような表現方法が適切であると考ええる。

(4) 本論文の表—5 の No.1 ケースと同じ条件のときの最適破壊確率は、 4.82×10^{-5} となっている。なお、この値は未知母数 θ_k の事後分布によって平均化された値である。「過去の実績からみた破壊確率」については本論文ではふれていないので、討議者自身で比較されたい。

参 考 文 献

1) Matsuo, M. and Suzuki, H. : Use of charts for reliability-based design of embankment on saturated clay layer,

Soils and Foundations, Vol. 23, No. 3, pp.13~26, 1983.
 2) Matsuo, M. and Suzuki, H. : Study on reliability-based design of improvement of clay layer by sand compaction piles, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 3, pp.112~122, 1983.
 3) 土木学会：土木計画に於ける総合化，土木計画学シリーズV，技報堂出版，pp.129~130，1984。
 4) 友永和夫・前田幸雄：鋼橋架設の問題点について，JSSC, Vol.10, No.105, pp.9~32, 1974。
 5) 土木学会編：安全性・信頼性，pp.170~176, 1977。
 6) 奥村敏恵：鋼橋破壊の諸問題，カラム，No.21, pp.16~26, 昭和42年1月。
 7) 日本道路協会：道路橋設計示方書，昭和48年8月。
 8) 国広哲雄・太田 実：橋の耐荷力と寿命，土木学会誌，pp.45~50, 1970年11月。
 9) 多田安夫：鋼道路橋の許容応力度，カラム，No.37, pp.61~65, 昭和45年10月。
 10) 竹内 啓：数理統計学的方法的基礎，東洋経済新報社，pp.52~79, 昭和48年7月。
 11) 一瀬正巳：誤差論，培風館，pp.14~15, 昭和40年。
 12) 藤野陽三・伊藤 学・遠藤元一：シミュレーションに基づく道路橋設計荷重の評価，土木学会論文報告集，第286号，pp.1~13, 1979年6月。
 13) 建設省土木研究所：橋梁に生ずる応力の実態調査研究，第23回建設省技術研究発表会，昭和44年11月。

(1984. 9. 10・受付)