

【付録 1】

土木鋼構造物の安全性確保について

PART A の 3 章, 6 章, あるいは 7 章において触れられている, 具体的な数値の決め方, 安全率のとり方, 限界状態のとらえ方などにつき, 簡単な説明を補足する。また, これとは別な角度の問題として, 安全性照査における形式比較の議論を【付録 2】に述べる。

わが国の土木鋼構造物では, 橋梁を中心として, 伝統的に許容応力度を用いた設計法が行われてきたことは周知の事実である。本指針の PART A における限界状態設計法による安全性照査が, 基本的にはこれら従来の設計法の等価変換であり, こうした書き直しの作業を通じて, 従来の設計法の本質的な部分を提示することに本指針のひとつの意義があるといえる。

とはいうものの, 「限界状態設計法」という用語に対する受取り方, 定義の与え方は人により様々であり, なお統一がなされている状況にないことも事実である。通常, 「限界状態設計法」というときには「限界状態の定義を明確にして用いる設計法」というのが第一義的であり, さらに「終局と使用(あるいは, さらに疲労)限界状態の区別」という概念が付加されることもある。この他に, 「可能なかぎり確率論を用いて行う設計法」という意味も含めて理解されることも多い。初期に限界状態設計法の研究が進められてきたヨーロッパでも, おおむねこうした理解がなされていたと思われる。しかし, これらの理解のうち, 前二者と最後のものとは大分性格を異にする概念であり, また, 互いに結合しなければ概念が成立しないといったものではない。むしろこれらを分けて, 「限界状態設計法」「確率論的設計法」のように区別した方が理解を容易にすると思われる。

限界状態を終局と使用に区別することは, ひとつの概念の進歩であるといえよう。一方, 同じ終局限界状態であっても, 性格を異にするものはいくらかもある。本指針でもたとえば 7.2.1~4 に示す限界状態については 6 章の安全率をそのまま, 7.2.5~6 についてはそれを 1.1 で割ったものを用いている。また, 13 章(貯槽)で, 一部限界強度として降伏点のかわりに引張強さをを用いているところでも, 異なった安全率が採用されている。これらは限界状態の性格の相違をある程度反映したものである。終局と使用の区別に注意が行く余り, これらの区別への配慮がおろそかになるようでは, 考え方としてはむしろ後退である。同じようなことが, 荷重の扱いでもいえる。死荷重, 活荷重によって限界状態に達することと, 地震によって限界状態に達することでは意味合いも違ってくるというのが常識的判断であろう。

確率論を陽な形で導入することもまた, 疑いなくひとつの進歩であるが, 構造物のすべての基準のなかに確率の概念が入っているのは疑う余地のない事実である。確率論の導入を, 数理的, 論理的モデルの上に表現することはなかなか難しいし, これらの配慮から目をそらして問題を単純化してしまうならば, かえって考え方の後退につながりかねない。いわゆるコード・キャリブレーションは, 現状の「安全性バランスに対する細かな配慮」と「不合理なアンバランスさ」とを混然と定量化している面があり, 評価の難しいところといえる。

確率論的設計法とも関連するが, 本指針の PART A では, 設計荷重の値そのものを規定する形を採用しており, ある荷重値に係数を乗じて設計荷重を決める形は採用していない。PART B では PART A との整合性と, 現在一般に用いられている基準の尊重という中での均衡を勘案した結果, 16 章(海洋構造物)で荷重・抵抗係数法を採用することとした。

係数をかけた荷重を用いた設計の意味を議論するためには, その前に, 基準となる荷重値の確率的な意味を明確にしておく必要がある。3 章の解説でも触れたように, 設計荷重は, 保証限界荷重として, 社会的な意味づけがなされることがあると考えてよい。したがって(特に終局限界の照査に対してとる設計荷重は), 所定耐用期間中の最大値, もしくはそれに相当する十分大きな荷重値を採用するのが最も合理的である。少なくとも, 橋梁

などの伝統的な設計慣習の中ではこうした考え方が支配的といえたであろう。橋梁のような公共性の強いものでなければ、発注者と設計者の合議によって設計荷重のレベルを決めるようなことも認められようが、現時点でそれを一般的と理解するには無理がある。米国の Build-ing Code においても、フロアスラブの活荷重を、耐用期間中に起こりうる最大値とすることが定められている例がある¹⁾。以上のことから、本指針では、構造解析を行うための荷重は供用期間中の最大値、あるいはこの最大値と確率的に同等と考えられる荷重、すなわち耐用期間中に実際に作用する荷重が設計に用いる荷重を超過する確率が十分に小さな値となる荷重を念頭におくこととして、特にそこに係数をかける必要性を認めなかったのである。

荷重係数を用いた橋梁基準で見ると、英国の BS 5400 では、耐用期間（設計寿命）を 120 年と定義し、再現期間 120 年のレベルの荷重を基準荷重とし、これに係数をかけたものを設計荷重として用いている²⁾。この場合、基準荷重の耐用期間中の超過確率は約 63 % であり、十分大きい荷重値になっているとはいええない。荷重係数はこれを補正し、最大値のレベル（に近いもの）とするための係数としての役割が最も大きい。BS の条文の中に、外国で BS を用いる際には、超過確率 5 % のレベルのものを設計荷重にとるということが明記されている²⁾から、荷重係数も、このレベルを目標とした補正係数と理解される。BS におけるこの超過確率 5 % レベルと、本指針における設計荷重とが、概念上は対応していると考えてよいが、本指針における超過確率は一般には 5 % より小さい。公共構造物で 5 % という荷重超過確率を大きいとみるか小さいとみるかは、議論の余地がある。

実際には、3 章の解説に例示した設計荷重の中にも、最大値となっていないものも少なくない。例えば道路橋示方書の活荷重は規定の制定時点（昭和 31 年）の最大値ではあっても、現状では最大値とはなっていない。現在この規定の見直しが進行中であるが、他の法制等との兼合いから、改正案は現行規定に係数をかけたもので与えられる可能性がある。その場合は、係数倍されたものを本指針でいう「最大値（相当）」とみなして使用すれば、論理的矛盾は生じない。

同じ道路橋示方書でも、風・地震等の荷重も最大値とはなっていない。これは一つには構造物建設地点での生起頻度が小さいことを考慮しているのと、先に述べた荷重間のバランスや、経済性に対する配慮に関連してそうになっているものと思われる。構造物の主要部分の設計を支配する、いわゆる主荷重については最大値を考えるのが原則と思われるが、それ以外の荷重では、この原則は当てはまらないのが普通である。設計基準を作る立場からみて、構造全体のプロポーションとして、一定の「好ましい」あり方の像があり、設計者が基準の定めに従って最適（に近い）設計をすればその像に近いものができる、というのがほぼこれまでの実情であって、そのように導く手段として従荷重があったとも考えられる。この解釈に基づけば、例えば鉛直方向に長い鉄塔などでは風荷重が設計を支配する主荷重であり、橋梁での活荷重と同様に扱われるべきであることになる。ただし、風・地震等は確率分布の「裾の長い」荷重なので、最大値を考えるのは不経済になる。十分超過確率の小さいレベルを工学的判断により定めていくことになる。

ここまででは荷重について述べてきたが、5 章における強度、7 章における限界状態などについても、同様に、現状の規定値が「供用期間中における最低保証値」であるとの解釈のもとで、係数を用いずに書いている。鋼部材では、JIS に定められた規格保証値を下回る強度の材料を使用することはほとんどないと言ってよい。7 章の限界状態は、実験的に確認され、試験材の実強度で無次元化された強度データから、安全をみた下限値に近い値を選んだうえ、JIS に定められた保証値を乗じた値を採用している。2 つの独立変数である実験値と材料強度について、前者には非超過確率が比較的小きな値、後者には同じ確率が十分に小さな値を選んでいる。この結果、7 章に示す限界状態の値を実際の部材強度が下回る確率は十分に小さな値になっていると考えてよい³⁾。すなわち、本指針の PART A における安全性の確保の基本的考え方を要約すれば、「限界状態の、耐用期間を通じて最小と思われるもの」と「耐用期間中最大の荷重による応答」との間に、なお「一定のマージンとしての安全率」をもたせる、ということになる。

コンクリートの（材料、部材）強度の場合には鋼に比べて不確実性が大きく、数個の試験体の圧縮試験をもとにした保証値を一定の係数で割ることによって「非超過確率が十分に小さな値」に変換することが、ひとつの慣

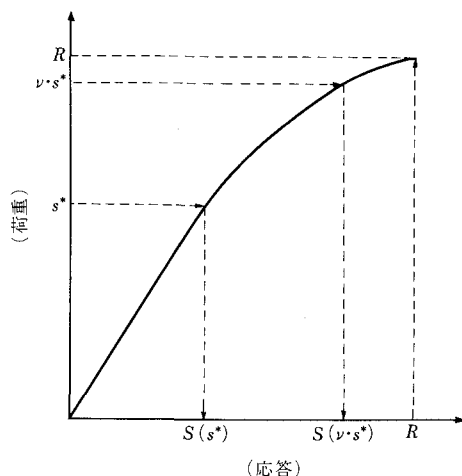
習として定着してきた経緯がある。こうした歴史的背景の相違が、設計荷重についても荷重係数的な扱いの受入れ方の相違に反映されている面がある。しかしつぶさに検討すれば、概念上の対応をつけられる点も少なくないと思われる。

荷重係数による設計の利点として、ばらつきの大きい荷重に対する安全率を大きく、ばらつきの小さい荷重に対する安全率を小さくとりうる点が挙げられることがある。こうした効果があることは事実であるが、この効果自体を利点としてどれだけ評価するかは、荷重が最大値であるかどうかにも関係する。つまり荷重が最大のものとなっているならば、そこに追加する余裕に、ばらつきによる差をつけることには余り意味がない。ばらつきの大きい荷重は、設計荷重そのものが大きくとられているわけであるから、改めて安全率を大きくとる必要はない。しかし設計荷重が、超過確率の大きいレベルにとられているなら、ばらつきの大きい荷重に対して「安全率」を大きくして対処する必要がある。

逆に、ばらつきの小さい荷重に対してこそ、積極的に安全率を確保すべきであるという見方もある。「最大の荷重」、「最小の強度」を設定して、なお安全率を必要とするのは、設計、施工には荷重や強度のばらつき以外の不確定要因があるからである。これは Gross Error と呼ばれる。Gross Error が包括する概念は幅広いが、人為的ミスなど、人間が関与することも多いので、Human Error と呼ばれることもある。特に、構造物の完成後の、構造的に安定した状況ではこの影響は比較的少ないが、施工中の不安定な状況では Gross Error が事故につながる可能性が高いと思われる。1969年11月から1971年11月にかけてヨーロッパ、オーストラリアで鋼箱桁橋が4本続けて施工中に破壊事故を起こした事例は著名であるが³⁾、これが西独の DIN の鋼構造の安全率を引上げるもととなっている。

現実には、これまで安全率の果たすべき役割が論じられる機会が多いとはいえなかったし、道路橋にみられるように、設計活荷重を上回る過積載車の通行を、安全率でカバーしてきたような面もある。部分安全係数といった概念の中には、こうした安全率の役割を分析したうえで、分割できるところは分割して示すということもあると思われる。確かに、安全率を一つにまとめるより、役割に応じた分割の形式をとる方が、研究の進展などを背景に、安全率の低減などの操作を行いうる可能性が高いといえる。ただ、それを実行していくのは決して容易なことではない。

係数倍した荷重による構造解析については、もう一つ別な目的で使用されることがあるので、区別する意味も含め、ここで解説を補足する。それは、(幾何学的、材料的)非線形性を構造解析、強度解析の中で考慮する際のことである。前述のように、設計は、「最小の強度」と「最大の荷重による応答」との間に一定の余裕(7章の記号に従い、 ν と書く)が保たれるように行われる。設計荷重による応答を計算するときには、限界状態との



付録図 非線形応答に対する係数倍荷重による設計

間にまだ余裕があるため、非線形性の影響を無視することが多いが、対応する強度の方を算出するには、幾何学的・材料的非線形性を考えねばならないことがある。たとえば上界定理（メカニズム法）により、塑性（材料非線形性的一种）強度を求めようとするときを考えてみる。この場合、何をもって強度とするかの定義自体明確でない面もあるが、便宜上は考慮している荷重（これはあくまでも最大値）を比例的（proportional）に増加させることを考え、各塑性ヒンジ部の全塑性モーメントとのつりあいにより、比例定数を求める。この比例定数が先に述べた「一定の余裕」になるようにするのが「設計行為」である。確率論の見地からすれば proportional loading というのは全く無意味なことであるが、設計の便法として、そうせざるを得ないわけである。当然このときの、「係数倍された荷重」には確率的な意味はない。

もうひとつ幾何学的非線形性に関連した例を挙げる。付録図 1 は、荷重—応答の非線形な関係を模式的に示したものであり、縦軸が荷重、横軸が荷重による応答（応力、変位等）である。まず 1 本の柱の座屈について考えてみる。仮に柱の座屈を部材縁の降伏によって判断するものとする（実際にはひずみ硬化の影響でもう少し耐荷力の上昇はある）。図の横軸を部材縁の応力とすれば、 R をつけて示したのが降伏点である。これに対応する縦軸の荷重が強度に相当するもので、これも R をつけて示した。本指針の 5 章に書かれている強度は概念上は、縦軸の R （を断面積で割って応力にしたもの）である。一般的な設計の場でも、（構造全体の安定問題などで）縦軸の量で定義される強度が要求されることがある。その際横軸の応答量で、設計荷重に対する線形応答と R との間に、所定のマージンを確保したとしても、縦軸の量において本来的に要求されているマージンを確保している保証はない。さりとて実務レベルで幾何学的・材料的非線形性をともに考慮して、縦軸の R を求めることを要求することには無理がある。そこでひとつの便法として、係数倍された荷重を用いて、比較的扱いの容易な幾何学的非線形のみを考慮した解析によって応答を求め、横軸の R と比較させることにより、設計の精度を確保しようというのである。西独における DAST-Ri 008 の規定など⁴⁾もこの主旨に沿ったものと思われる。以上の説明は 4 章において、5 章に定義された強度が 4 章の構造解析を前提とするとしていることと関連する議論でもある。いずれにせよ、先の塑性解析と同様、係数倍された荷重が確率的意味を有するという性格のものではない。

ところが、近年この係数倍された荷重を「終局荷重」、係数のかかる前の荷重を「使用荷重」と呼び、すでに BS について述べたような、超過確率の大小と関連づけて理解しようとする議論がみられる。形式上の類似性からくる混乱と思われるが、早急に整理を必要とする事項でもあろう。

以上、新しい設計基準のあり方とも対比させつつ、本指針前半における安全性確保の方法について述べてきた。海洋構造物の章についても、前半と同様の書式（たとえば、材料係数と強度特性値に分けずに、これらを合わせて強度の設計値とするなど）により書直すことも検討したが、荷重係数を変換するのはなかなか難しく、また最初に述べたような理由で、無理に統一をはかることにそれほどの意義もないと考えられたため、本指針の形に落着いた。しかし、ひとつの試みとして、たとえば本指針の PART B に収録されているような、一見異なった基準の間で、対応する概念をつぶさに比較し、実質的にどの程度の安全率がとられているかを比べてみることなどは、鋼構造設計に対する理解を深めるのに極めて有効であろうと思われる。

参 考 文 献

- 1) National Board of Fire : National Building Code, Sec. 902, p.106, 1955.
- 2) BSI : BS 5400, Steel, Concrete, and Composite Bridges, Part 1, 1978.
- 3) 土木学会 : 構造物の安全性, 信頼性, p.170, 昭和 51 年 10 月.
- 4) DAST : DAST-Ri 008 Richtlinien zur Anwendung des Traglastverfahrens im Stahlbau, 1973.
- 5) Fumio Nishino, Akio Hasegawa, Chitoshi Miki and Yozo Fujino : A Fractile-Based Reliability Structural Design, Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, No.326, October 1982.