

設計規準における安全性確保の考え方

A PROPOSAL FOR SECURING STRUCTURAL SAFETY IN DESIGN CODES

佐藤尚次¹⁾、藤田宗久²⁾、白木 渡³⁾、香月 智⁴⁾、中村孝明⁵⁾

Naotsugu SATO, Munehisa FUJITA, Wataru SHIRAKI, Satoshi KATSUKI and Takaaki NAKAMURA

- 1) 工博 関東学院大学助教授 工学部土木工学科 (〒236 横浜市金沢区六浦町4834)
- 2) 工博 清水建設(株) 土木本部設計第2部課長 (〒105-07 港区芝浦1-2-3)
- 3) 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)
- 4) 工博 防衛大学校助教授 工学部土木工学科 (〒239 横須賀市走水1-10-20)
- 5) 工博 (株)篠塚研究所 主任研究員 (〒160 新宿区新宿6-26-4 JMBビル)

It is very important to clarify how to secure the safety of structures, or how to determine the safety factor in structural design codes. The task committee of JSCE is going to propose a "code for code writers", in which a method of maintaining the safety level in the structural design codes is specified. The basic idea of the proposal is explained in this paper. The followings are peculiar to the proposal. (1) The roles of code writers and designers are clearly distinguished. (2) Simple format is adopted for the convenience of designers. (3) Freedom of designers is restricted in order to reduce the deviation of safety margin due to judgement of designers. (4) Safety margin is determined on the basis of the importance factor of the structure and the social allowable level against risk. (5) Safety factors for loading, material properties, physical equations, structural analysis are related by using the reliability theory.

Key Words: design code, limit state, safety factor, importance factor

1. はじめに

本論文の著者グループは、土木学会構造工学委員会・建設事業における確率統計的意思決定研究小委員会の、「設計規準ワーキンググループ」を構成しているメンバーである。

土木構造物の設計規準に関する、わが国における研究上の議論は、限界状態設計法への移行という世界的な趨勢を受ける形で、主に1980年代に盛んに行われた経緯がある¹⁾。信頼性設計の方法についてもこの時期高い関心を集めたが、その後実務レベルでは大きな動きはなく、今日に至っている。上記の研究小委員会も、そうした動向を踏まえ、研究の対象を幅広くとらえることに主眼を置いてきた。しかしながら、種々議論を重ねる中で、やはり設計における安全性確保の方法の整理という問題が、緊急性のある課題として再度浮上してきたのである。それには、次のような背景がある。

- 1) Eurocode (ヨーロッパ共同体における共通構造設計規準) の内容が明らかになりつつあり、そこにかなり信頼性の考え方が取り入れられていること²⁾。

EUはこのEurocodeを世界共通規準の雛形として戦略的

に利用する意図をみせている。SI単位系、ISO規格等と類似した性格付けと考えればわかりやすい。米国でもこれに対抗する形で「世界」共通規準の原案づくりが進行していると言われる。これらと比較してわが国の対応は鈍いと言わざるを得ず、これまでに他の分野でしばしばみられた国際交渉の場での混乱も懸念される。すなわち「国際化」がキーワードである。

- 2) 建設業界や行政のあり方が、緩やかではあるが、パラダイム・シフトを起こしつつあるとみられること。

上記の国際化に加え、規制緩和・情報開示を含む高度情報化等により、わが国の経済の活性化・高コスト体質からの脱却をはかることが切実な課題となりつつある。規制緩和とはいってみても、公共物である土木構造物には高い品質が求められており、設計規準の運用を弾力化してコストダウンする、といったことは容易には実現できないであろう。しかし、それをもって信頼性の考え方が無為であるとするのは早計に過ぎよう。財政赤字の膨張の中で、建設事業も拡大路線は終焉の時期を迎えている。個々の事業計画について、その意義や採算性等が(予算査定という行政の流れだけでなく、社会の眼という意味で)、厳しく問われる時代を迎えて、構造物の重要度

と、それに対してどういう設計をしているかを関連づけるロジックが現在は明確でなく、それは決して好ましいことではない。違う言い方をするならば、従来設計規準は構造物管理者と設計・施工者の間に成立した一種の約束事としての性格でのみとらえられてきたが、そこに、「市民に開示されるべき『情報』」としての性格が求められつつあるのである。2章の分析を受けて、7章において、「重要度と限界状態時コスト」という議論を試みているのは、こうした要因を設計規準の中で考えることが特に重要と考えたからである。キーワードとしては「社会性」になるだろう。

3) 阪神・淡路大震災の経験から、設計規準で表現される限界状態と現実の現象との間にギャップがあることがわかり、耐震設計の合理化を含めた新しい設計規準の枠組みを考える必要性を求める機運が高まってきたこと。

ある意味では震災が、著者らのグループの活動の最も重要な動機付けである。上記の社会性という問題も、震災後の状況下では説得力をもつと考える。

限界状態の詳細な検討については、土木学会でも、耐震・鋼構造・コンクリート各委員会をはじめとする専門委員会で行われており、本論文で立ち入るのは適切ではない。しかしながら、施工や材料のレベルに明らかに問題のあった事例を除いて、設計規準の問題点に原因を帰せられるものがどの程度あるのか、あったとして、その問題点としては、「設計荷重が過小であったのか」「材料強度の評価が過大であったのか」「耐力算定式にばらつきがあったのか」「構造解析法が不適切であったのか」「安全係数等が不十分だったのか」ということを定量的に比較計量する分析が、未だに十分行われてきたとは言えないのではなからうか。これらの要因は互いに独立ではないし、また現在の規準の枠組みや、研究分野の振り分けのあり方ではこうした検討への取り組みは容易ではない。そこに一つの問題点があるといえる。2章で行っている分析を進めることにより、安全性確保の方法が定量的に明確に出来るならば、安全性の余裕を変更するために規準を改定すべきかどうか、規準のどの部分の余裕を変化させるのかといった検討を合理的に行える道筋が出来ると思う。キーワードとしては「総合化」となるだろう。

本論文では、2章において、図-1に「設計規準における安全性確保の方法」と題する概念図を示し、そこに続く様々な議論の基本的枠組みを与えている。この図では荷重・材料強度・構造解析・限界状態解析・安全係数・安全性照査といった通常の設計規準にみられる構成要素に加えて、設計者の実務作業の範囲、設計規準を規定する際の考慮およびそこに影響を及ぼすと思われる様々な背景といった、層別化した概念構成が配慮されている。これは従来行われてきた設計規準の議論を踏まえつつも、上に述べた様々な新しい状況をも取り入れていこうとす

る試みである。

この図は議論の第1段階として、極力汎用性のあるものとするのと、現在の実務作業の枠組みから極端に逸脱しないことの両面に注意を払っている。しかしながら、この図をグループ内の共通基盤とした後の、内容について出た議論は極めて多様であり、設計規準概念の一般化の困難さをあらためて感じた部分もある。

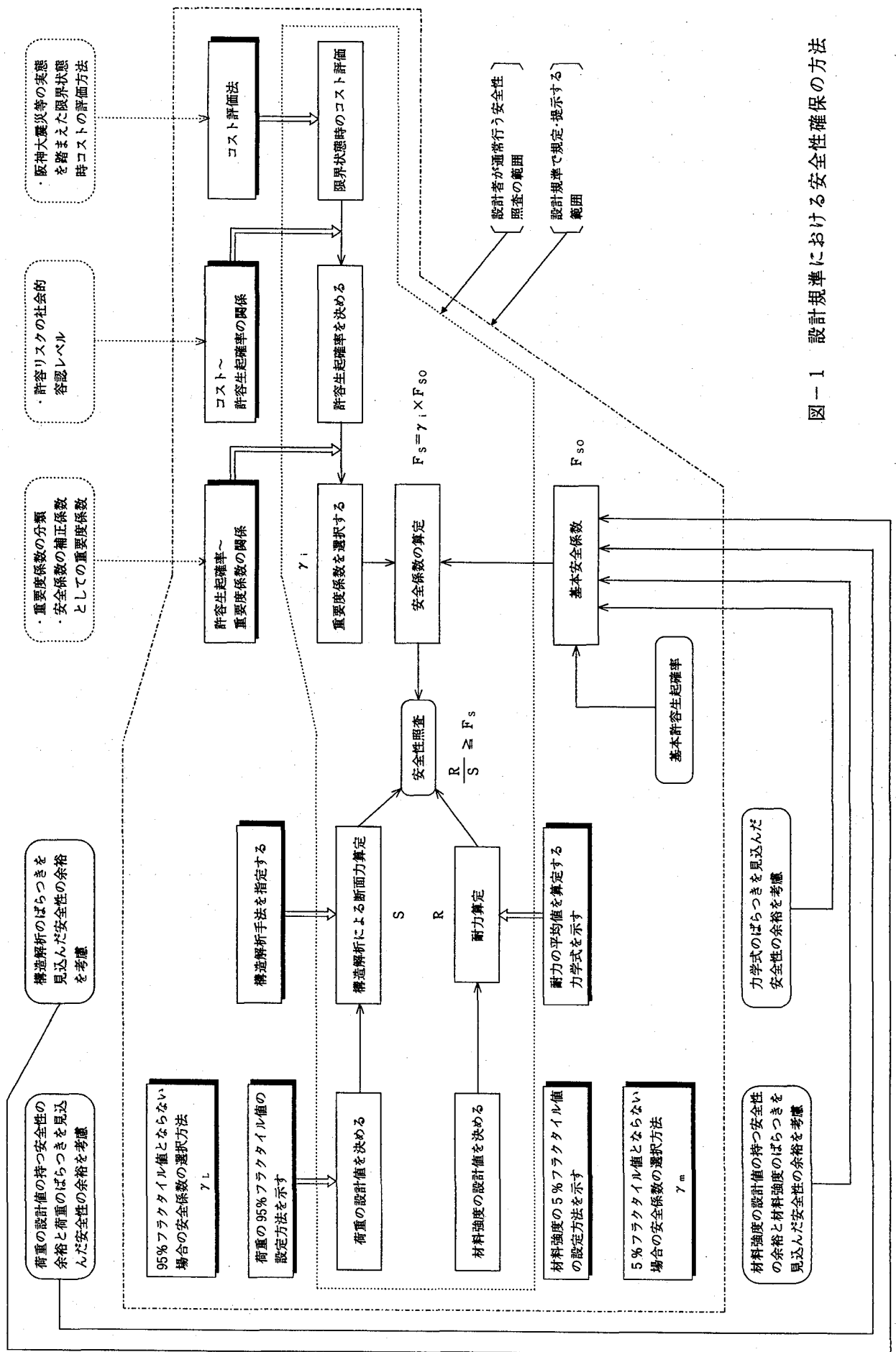
グループとしての作業目標はいわば“Code for code writers”の提示である。そこに向けての一段階として、本論文は枠組みの提示とともに問題点の整理に目的があり、併せて今後この種の議論が活発となる契機となるよう念願して書かれたものである。

2. 設計規準における安全性確保の方法

構造物のある断面の終局耐力検討をする場合は、材料強度に基づいて断面耐力を算定し、他方、荷重の設計値を使って構造解析を行い、断面力を算定し、断面耐力と断面力との比を安全係数と比べることによって照査をする。この照査方法の中では、①材料強度の設計値の算定、②断面耐力の算定、③荷重の設計値の算定、④構造解析による断面力の算定、⑤安全係数の算定という5項目各々において、安全性の余裕が見込まれており、これらの安全性の余裕が複合されて、その断面の終局限界状態に対する安全性が確保される。設計規準における安全性の確保を考える場合は、このように、種々の項目で考慮されている安全性の余裕を、全て総合して取り扱い、検討する必要がある。この方法は、広い意味で、信頼性設計法の考え方と言うことができる。ここで提案する安全性確保の方法も、この信頼性設計法の考え方に基づいている。

構造物の安全性は、設計規準が意図している安全性と共に、その規準に従って構造物を設計する設計者が与える安全性の余裕とによって確保される。もし、設計者に多くの自由度を与えるような設計規準の場合は、設計者によって、安全性確保の方法が異なるので、設計結果もばらつき、確保される安全性水準もまちまちになる危険性がある。設計実務者に安全性確保の考え方や信頼性設計法が十分に浸透していれば、多くの自由度を与えても構造物のもつ安全性水準は統一のとれたものとなるが、現時点ではそれを期待することには無理がある。そこで、本提案では、設計規準の適用に当たって、設計者に与えられる自由度を出来るだけ制限し、設計規準で想定した安全性を確保できる形式とした。将来、信頼性設計法が普及し、各種のデータベースも十分整備されれば、設計者に多くの自由度を与えることによって設計者の質を進歩させることが出来ると思われるが、現時点では、逆の方法を採用せざるを得ない。

半面、与えられた条件下でルーチンワークとしての設計業務を遂行するのみでは、設計実務者のレベルアップ



図一 1 設計規準における安全性確保の方法

は期待できないし、規準の個々の条項が定められた経緯等が明確な形で資料として残されていない場合、規準作成者の世代交代に際し、技術継承が満足のいく形で行われない危険性すらあり得ると思われる。そのため、設計規準の条項の背景にある安全性確保への配慮は、その根拠となるデータと共に可能な限り明らかにしていく努力をすべきである。

図-1に、本論文で提案する「設計規準における安全性確保の方法」を示す。その基本的な考え方は次の通りである。

- 1) 対象とする限界状態の基本許容生起確率を定める。
- 2) ①材料強度算定、②断面耐力算定、③荷重算定、④断面力算定で見込まれている安全性の余裕が基本許容生起確率に比べて不足する分を基本安全係数として設定する。
- 3) 限界状態時のコストと構造物の重要度とから、重要度係数を選択する。
- 4) 基本安全係数と重要度係数とから安全係数を算定する。
- 5) 断面耐力と断面力との比が安全係数以上であることを照査する。

このような手順を踏むことで、安全性照査の中の各段階で考慮されている安全性の余裕を関連付けて取り扱うことができ、所要の安全性を確保することができる。

図-1中で、破線で囲んだ内側の部分が、設計者の行う行為である。設計者は、与えられた方法で耐力および断面力を算定し、与えられた方法で限界状態時コストを勘案して重要度係数を選択し、安全係数を算定し、安全性照査を行うことになる。(上記の3)、4)、5))各設計値の設定方法、構造解析手法、耐力算定式、限界状態時コスト算定法、重要度係数選択法、限界状態の基本許容正規確率は、設計規準作成者が設定する。(上記の1)、2))従って、基本安全係数は、設計規準作成者が既に設計規準の中で設定しており、設計者に与えられている自由度は、構造物の重要度係数をどのように選択するかという点に集約される。

本提案では、設計の各段階における安全性の余裕の確保を設計規準作成段階で考慮しているので、部分安全係数形式は不必要となり、安全係数が一つだけの照査式にすることができる。このように、設計者にとって使い易い安全性照査式となっているのも特徴である。

部分安全係数形式は、性格の異なる不確定要因を、関連する箇所調整することを目標としており、後出の4.1で述べるLRFDもその一つの手法である。しかし現状の研究水準や設計者への便宜を考え、4.2に述べるように一つの安全係数にまとめているのである。

以降に、図-1に示す各項目の安全性確保の考え方について説明するが、その前に本提案の基本となる限界状態の考え方について述べる。

3. 限界状態

図-1で提案した設計規準における安全性確保の方法は、構造物およびそれを構成する構造部材のある一つの限界状態 (Limit State) に対して示したものである。一般に、構造物および構造部材は、供用期間内にその意図された性能を有し、意図された使用に適する状態を維持しなければならない。限界状態とは、このような構造物に対して意図される状態と意図されない状態とを区別する限界の状態をいう。従って、限界状態とは、構造物および構造部材に要求される性能と直接関わった重要なもので、どのような限界状態を設定するかによって、規定される設計荷重、部材耐力、構造解析法、安全性照査法、許容生起確率、重要度係数等が決定され、構造設計の善し悪しが左右される。ここでは、土木構造物および構造部材の限界状態の基本的な考え方を説明し、本論文で提案する安全性確保の方法 (図-1参照) における限界状態の考え方について述べる。

3.1 基本的な考え方

構造設計で考慮すべき限界状態 (性能) は多種多様で、それらを分類整理することは非常に大変な作業になる。一般には、ヨーロッパを中心とする国際標準 (ISO)³⁾やヨーロッパ統一規準 (Eurocode) 等で行われているように、限界状態を終局限界状態 (Ultimate Limit States) と使用限界状態 (Serviceability Limit States) の2つに大別するのが普通である。前者は、それを超えると構造物あるいは構造部材が崩壊あるいは破損に至る限界状態をいい、後者は、構造物の通常の使用が困難になる限界状態をいう。

土木構造物に関する終局限界状態の定義としては、次のようなものが考えられている²⁾⁻⁴⁾。

①断面終局：部材の断面または接合部に生じる応力が限界値をこえて構造物、構造部材または接合部が破壊する限界の状態をいう。

②座屈終局：軸荷重を受ける柱の座屈、横荷重を受ける梁の横倒れ座屈などにより構造物あるいは構造部材が不安定になる限界の状態をいう。

③疲労終局：繰返し荷重を受ける構造部材または接合部の劣化により、構造物、構造部材または接合部が疲労破壊する限界の状態をいう。

④変形終局：構造部材の塑性変形、クリープ、ひびわれ発生等により、部材の取り替えを必要とするような幾何学的変形が生じる限界の状態をいう。

⑤安定終局：構造物またはその一部の構造部材が転倒あるいは滑動等により安定を失う限界の状態、橋台や擁壁の安定計算は、この終局限界状態に対する検討をしていることになる。

⑥メカニズム終局：構造物にある個数以上の塑性ヒンジが生じると、それ以後は荷重を増加させなくとも構造

物の変形は著しく増大する。このような限界の状態をいう。

使用限界状態の定義としては、次のようなものが考えられる²⁾⁻⁴⁾。

①変形限界：常時作用する荷重のもとにおいて、構造物が正常に機能を発揮しうするために、その変形量が一定の限界をこえないようにする必要がある。この限界の状態をいう。

②ひびわれ限界：鋼材にはひびわれ発生は許されないが、コンクリート部材では小さなひびわれは許される。その許容されるひびわれの限界の状態をいう。

③変位限界：構造物が平衡・安定を失うまでには至らないが、正常な使用が不可能になるような過大な変位が生じる限界の状態をいう。

④振動限界：過大な振動により構造物の正常な使用が不可能になる限界の状態をいう。

⑤損傷限界：構造材料の腐食などに起因して構造物の正常な使用ができなくなる限界の状態をいう。

さらに、ISO や Eurocode では、上述した終局ならびに使用の限界状態に加えて、火災、爆発、衝突、人的過誤等により構造物が損傷しない強靱性に関する限界状態についても配慮すること要求している。

以上示した限界状態（目標性能）に対して構造設計がなされる。構造設計では、各限界状態を限界状態関数 $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ と呼ばれる関数を用いて、次式で表す。

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (1)$$

ここに、 X_i は、限界状態を表すのに必要な変数で、「基本変数」と呼ばれる。 $g(\cdot) > 0$ であれば限界状態に達しないで目標性能が満足される状態を表し、 $g(\cdot) < 0$ であれば限界状態に達して目標性能が満足されない状態を表している。

例えば、鋼製梁の断面破壊の終局限界状態に対して目標性能を満足する設計を考える場合には、次式のような限界状態関数が設定できる。

$$g = \sigma_y - M/Z \quad (2)$$

ここに、 σ_y は鋼材の降伏点応力度、 Z は部材の断面係数、 M は設計荷重 S とスパン長 L の関数で $M = f(S, L)$ で与えられる。

3.2 限界状態と安全性確保

上述した限界状態は、終局限界状態については荷重効果と部材の耐力の大小関係で表されるように「力」で表現され、使用限界状態については「変形」の大きさで表わされている。これは「力」や「変形」という物理量を用いれば、限界状態という概念を表現することが容易になるからである。しかしながら、阪神・淡路大震災以後その経験を生かして、同じ終局限界状態に陥にしても、人命を守れるような限界状態（人命確保限界状態）、早期復旧可能な損傷を抑える限界状態（早期復旧限界状態）等、構造物の重要性や果たすべき機能性に注目した

限界状態導入の必要性が叫ばれてきている。このような限界状態は、構造物自身の重要度や周辺の構造物や施設との関わりを考慮した上で、構造物をどのように壊すかということを検討する必要がある、現段階ではその定式化は非常に難しい。しかし、その定式化が可能になれば、従来の部材レベルの設計ではできなかった構造物の重要性や機能性に着目した安全性確保のための多様な設計が可能になる。

本論文で提案する安全性確保の考え方（図-1 参照）においては、これまで述べてきた多くの限界状態の内ある1つの限界状態に対して、その要求される目標性能を満足するための設計手順が示されている。したがって、図-1 に示す安全性確保のための設計手順、用いる荷重の設計値、断面力や耐力の算定法、基本安全係数や重要度係数等の諸係数は、各限界状態ごとに異なることになる。また、図-1 で示す安全性確保の考え方は、構造部材レベルの設計を意図したものになっている。従って、いくつかの部材の崩壊により構造物全体が崩壊に至るメカニズム終局限界状態のような構造システムの限界状態に対する安全性の確保については考えていない。このような考え方は、ヨーロッパ、アメリカ、カナダ等で現在導入されている限界状態設計規準においても基本的には同じである。

このように分類された各限界状態に対して、その性能を保証する、つまりどのように構造物の安全性が確保されるかについては、次章で説明する。

4. 安全係数

図-1 において、安全係数 F_s は、「構造物の安全性・信頼性をどの程度まで求めるか」という「希求水準」に基づき決定される係数である。図-1 の形式で決定される設計規準に用いる安全係数 F_s を信頼性設計の観点から解釈するために、まずレベル I の信頼性設計法¹⁾に沿って、安全性照査の基本式と安全性の希求水準の設定法の相互関連性について説明する。これは、図-1 の「外側領域」において作業・記述されるべき内容のベースとなるものである。

4.1 レベル I (LRFD) の信頼性設計

部材の強度 R と荷重効果 S が正規分布に従い、相関性がないものと仮定すると、信頼性指標 β は次式によって与えられる。

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{R}$ 、 $\bar{S}$ ：強度と荷重効果の平均値

σ_R 、 σ_S ：強度と荷重効果の標準偏差

ここで目標信頼性指標を β_a とすると、次式が得られる。

$$\bar{R} \geq \bar{S} + \beta_a \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (4)$$

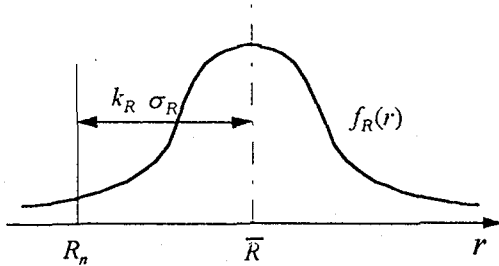
説明を簡単にするために、平方根の式を次のように線形近似する⁵⁾。

$$\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \cong \alpha(\sigma_R + \sigma_S) \quad (5)$$

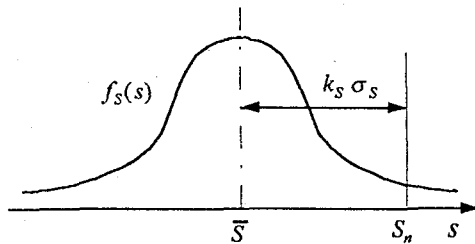
ここで、 α ：近似係数で、 $1/3 \leq \sigma_R/\sigma_S \leq 3$ の範囲で $\alpha=0.75$ によって誤差 5% の近似となる。

さらに、図-2 に示すように作用荷重と強度の特性値と変動係数を導入して、式(4)を整理すると所要の安全性を満足する条件式が次のように得られる。

$$\frac{(1-\alpha\beta_a V_R)}{(1-k_R V_R)} R_n \geq \frac{(1+\alpha\beta_a V_S)}{(1+k_S V_S)} S_n \quad (6)$$



(a) 強度Rの確率密度関数



(b) 荷重効果Sの確率密度関数

図-2 強度・荷重効果の特性値および特性係数

ここで、 V_R, V_S ：それぞれ強度と荷重効果の変動係数 ($=\sigma_R/\bar{R}, \sigma_S/\bar{S}$)， k_R, k_S ：それぞれ強度と荷重効果の特性値と平均値とを図-2 のように関係づける特性係数 (標準正規分布パラメータ)， R_n, S_n ：それぞれ強度と荷重効果の特性値。

そこで、式(6)の左辺と右辺の係数をそれぞれ ϕ, γ と定義すると、次式のように表される。

$$\phi R_n \geq \gamma S_n \quad (7)$$

ここで、

$$\phi = \frac{(1-\alpha\beta_a V_R)}{(1-k_R V_R)} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{(1+\alpha\beta_a V_S)}{(1+k_S V_S)} \quad (9)$$

このように、LRFDのフォーマットでは、安全性の希求水準は、荷重と強度に振り分けられた部分係数によって決定され、それぞれの部分係数の目標信頼性指標との関連性も明らかである。このため、設計者は、信頼性解析の知識とは無関係に、単に部分係数を組み合わせ

ることによって、設計作業を行うことができ、また、規準を維持管理する場合や規準を拡張して使用するような判断を要する場合には、問題の性質に応じて、部分係数を個々に変更修正することが可能である。例えば、

- 1) 全体的に安全性の希求水準を上げる場合には、式(8), (9)に含まれている目標信頼性指標 β_a を大きくする。
- 2) 大地震などの荷重側の推定を調整する必要がある場合には、荷重効果の変動係数や特性係数を調整する。
- 3) 強度の推定を調整する必要がある場合には、強度の変動係数や特性係数を調整する等である。

Galambos⁶⁾が、LRFDの導出に際して、「目標信頼性指標 β_a は、相対的指標であるので、過去の技術者が暗黙のうちに培ってきた信頼性・安全性への希求水準に合致するために、既存コードで得られる設計の安全性と整合 (キャリブレーション) される必要がある」としたように、目標信頼性指標や部分係数の設定には、従来の設計によって蓄積された経験的判断が重要な要因となっている。

4. 2 提案法の安全係数

LRFDは上記のような利点を有するが、部材構造、限界状態および荷重組み合わせが限定された場合の設計規準の策定においては、部分係数の種類を限定した方が、業務の効率化を図ることができ、かつ、簡明なフォーマットにすることによって、設計結果に対して多段階にチェックをすることが可能になり、結果としてより安全で経済的な設計が達成される可能性がある。

式(7)の照査式では、部材強度や荷重効果の確率分布の情報が直接に含まれているが、図-1で設計者に委ねているのは、材料強度や荷重のフラクタイル値から耐力算定や構造解析を行う操作である。式(8), (9)の ϕ, γ の中には、「材料強度の設計値の持つ安全性の余裕と材料強度のばらつきを見込んだ安全性の余裕」「荷重の設計値の持つ安全性の余裕と荷重のばらつきを見込んだ安全性の余裕」「力学式のばらつきを見込んだ安全性の余裕」「構造解析のばらつきを見込んだ安全性の余裕」といった要素が含まれなければならないし、場合によっては信頼性理論には乗りにくい一定のマージンのようなもの (factor of ignorance) も含めておかなければならないこともある。図-1では、これら全てに配慮したうえで安全係数 F_S を定めて、次式のような安全性照査式を提案している。

$$\frac{R_n}{S_n} \geq F_S \quad (10)$$

この F_S は、準拠すべき基本となる許容生起確率 (7章で述べる「最低限の安全性レベル」) に対して基本安全係数 F_{S0} をひとつ求めておき、これに限界状態時のコスト算定 (構造物の用いられ方ばかりでなく、考慮している限界状態の内容にも依存する) 等から導かれる重要度係

数 γ_i を乗じて得られる。 γ_i は目標信頼度の関数となるが、LRFDの考え方に従うなら、式(7)から

$$\frac{R_n}{S_n} \geq \frac{\gamma}{\phi} \quad (11)$$

となり、この右辺と式(10)の F_s を関係づけることができる。これにより、 F_s と β_a とを関係づけられるため、

$$\gamma_i = \frac{F_s(\beta_a)}{F_s(\beta_{a0})} \quad (12)$$

というように考えていくのも一つの方法である。

以上、提案手法の安全係数 F_s を部材レベルの目標信頼性指標 β_a と関係づけて誘導する手法の一例を示した。ここで示した各々の変数や係数は、「限界状態の定義」、「荷重および強度の不確定性の定義」、「重要度と許容破壊確率の対応性」および「部材強度と作用荷重の解析法の定義」等に依存するものであり、かつ、相互に関連性がある。規準に示した安全係数は、前提とした材料や荷重の不確定性の变化に伴って、また、他の構造物や同一構造物においても異なる限界状態に対する安全係数とのバランスを保つために、時代の流れに応じて合理的に変更されるべきものである。そのため、規準策定において使用した係数や不確定性および仮定を、策定の根拠として示しておくことが重要である。

5. 荷重・強度の設計値

荷重の中には、死荷重（または固定荷重）のように不確実性の要素をほとんど含まないものもあるが、地震荷重・風荷重あるいは自動車荷重のようにばらつきの大きいものが多く、設計における安全性への影響が大きい。材料強度もまた、直接・間接に計測データに触れ、ばらつきがあることを実感させられることが多い。従って、これらの設計値をどう取り扱うかが、設計における安全性確保の中でも極めて重要な要素であることは論を待たない。

現在実用に供されている大部分の設計規準では、荷重の設計値や材料強度の設計値を具体的な数値で与えている。鋼構造物等における許容応力度は材料強度そのものではなく、安全係数で割った値になっている。従って、図-1の解釈でいえば、許容応力度の割増しを行うのは重要度係数 γ_i を減じていることと等価の意味を持つ（この他組合せ荷重に対して荷重値の低減をはかる意味で用いられることもある）。

この荷重や材料強度の設計値を、規準において、必ずしも値そのものでなく、「設定方法」で提示するというのが、現在の研究の流れであり、図-1にはそれが反映されている。これは値そのものを示すばかりではなく、構造物に応じて、特有のデータがあるのならば、それを活用してもよいということを意味している。例えば地震荷重の場合、歴史的な地震資料からある地点の地震動の強さと再現期間の関係を推定するとか、震源データに当た

って、マグニチュード分布と距離減衰から加速度確率分布を推定する等の考え方がとられる。阪神・淡路大震災後、日本各地の活断層を耐震設計で考慮するかどうかの議論が進んでいる。従来であれば原子力発電所等、極めて重要な構造物のみで行われてきた地震危険度解析の手法が、このように一般化の兆しをみせていることは、図-1に説得力を持たせているとともに、データベースの公開とその利用という今日的課題と直結するといえるのではなかろうか。

風荷重も同様であって、日本全国の気象観測所のデータに加え、現地観測のデータを利用して、確率モデルを構築できよう。風速の統計的性質には、台風の通り道であるかといった大局的な地域性に加え、地表粗度や様々な地形因子が関係する。その点、断層や震源域の影響が広域的に現れる地震と異なり、局地的な条件に左右されやすい。塔状構造物のような、風により設計が決まる構造物においては、とりわけ建設サイトの情報を取り込むことの意義が大きいと言えるであろう。

コンクリートの材料強度では品質検査規定等で5パーセンタイルの確保を目標とした管理が実行されてきており⁷⁾、馴染み深い考え方であるといつてよいだろう。コンクリート標準示方書(設計編)では、この5パーセンタイル値を特性値と位置づけ、さらに材料係数で割り、また耐力評価の際に部材係数で割る操作を加えている⁸⁾。これらの操作は図-1では安全係数の算定の中に組み込まれていることになる。

鋼材の場合、従来、参照する強度は、JIS規格の降伏点強度（いわゆる公称強度）であり、一般構造物鋼材では、ここを下回る強度の材料が市場に出回ることとはほとんど稀な、5パーセンタイル下限値よりもさらに下回る管理値として理解されることが多かった（鉄筋の場合には若干の例外があるようである）。しかしながら、近年の研究では、材料引張試験で通常計測される上降伏点よりも、より安定な物理現象に対応する下降伏点の方が構造強度としてふさわしいとする指摘もあり⁹⁾、これを反映して設計規準強度を、確率モデルにより低減する案も作られている¹⁰⁾。また、従来より座屈強度については、実験データベースから5パーセンタイル下限値が与えられるように耐力力曲線が提案されている⁹⁾。

コンクリート、鋼材ともに5パーセンタイルのレベルで特性値、あるいは設計値が設定されるわけだが、文献として挙げた資料では、材料強度の確率分布として正規分布が仮定され、5%に対応する標準正規分布パラメータ1.64を（不偏）標準偏差に乘じたものを標本平均から差し引くという操作が説明されている。しかし、仮にある程度の量のデータが利用可能であるならば、分布の適合度検定等の手法を用いて、より良い確率分布モデルのあてはめによって、フラクタイルの設定を行う方法を考えてみるべきである。

正規分布は取り扱いやすい確率分布ではあるが、「裾

が伸びている」特性から、例えば本来非負の変量である材料強度が、負の値をとる可能性まで含むことになる。こうした影響で、耐力項に正規分布の仮定を行うことが、信頼性理論の計算上様々な矛盾をもたらすことが、古くから指摘されている¹¹⁾。信頼性理論でよく用いられるのは各種の極値分布、ベータ分布、地震危険度のゲーテンベルク・リヒター式等に現れる指数分布、海の波の波高分布に用いられるレーレー分布等である。材料強度のモデルには、最小値を持つ第Ⅲ種の極値分布（ワイブル分布）等が用いられる例が多い。

荷重のフラクタイトルの95%という数字は材料強度の5%と対の意味で与えたのであるが、時間軸上で変動する性格を持つ荷重については、どういう期間に対して超過確率が5%であるのかを定義しなければ、実質的な意味はない。言い方を変え、設計荷重の再現期間を考慮しなければならない。

建築学会の「建築物荷重指針」¹²⁾では、どの荷重についても100年再現期待値を基本値として与え、異なる再現期間の荷重が必要な場合には、再現期間換算係数を与えて処理している。再現期間の年数は、年超過確率の逆数となる。無論5%は年超過確率（再現期間20年）ではなく、準拠する年数としては、その構造物が供用される期間に近いものが妥当である。しかし、一般論としてそれを何年とは特定しにくい。橋梁などで50年という供用期間が想定されることもあるが、その期間がくれば自動的に更新するというものではなく、使用可能であれば半永久的に利用されるのが、土木構造物の宿命であるという面もある。建築物荷重指針では標準的な供用期間という意味で基準期間という用語を定義し、橋梁同様50年としている。昭和59年から63年にかけて行われた日本道路協会・橋梁委員会・限界状態設計法分科会・荷重検討班での検討¹³⁾では、50年超過確率10%のレベルの荷重値を「最大値に相当する特性値」と位置づけて、既存の荷重値との整合性を調査した。また、英国のBS5400¹⁴⁾では、設計寿命を120年とし、120年再現期待値を基準荷重として与えている。一般的に、N年間超過確率pの荷重の再現期間Tは、

$$T = 1 / [1 - (1 - p)^{1/N}] \quad (13)$$

で表される。50年10%ならTは475年であり、5%なら975年である。

先にも述べたように、荷重には変動性の小さいものと大きいものが混在している。一つの構造物の中に、死荷重に代表される変動性の小さい荷重で決まる部材と、風や地震のように変動性の大きい荷重で決まる部材が混在していて、それらに同等の目標信頼性指標（あるいは許容破壊確率）が要求される場合、式(12)の重要度係数を、共通に決定することが出来るのかという問題が残る。これは本論文をもとに議論を発展させるべき重要なテーマであると思われるが、ここでは、再現期間を変えて考えたときに、対応する荷重設計値はどの程度変化するかを、

変動性をパラメータとして示してみるにとどめる。

地震や風のように、個々の偶発事象の荷重値の分布がexponential型の裾を有している場合には極値Ⅰ型分布（グンベル分布）が高い適合度を有することが多いことが知られている。この累積確率分布関数は

$$F_X(x) = \exp[-\exp\{-\alpha(x-u)\}] \quad (14)$$

であり、スケールパラメータ α 、 u は、 X の分布の平均値 μ_X 、標準偏差 σ_X との間に

$$\mu_X = u + \gamma/\alpha, \quad \sigma_X = (\pi/\sqrt{6})/\alpha \quad (15)$$

の関係がある（ γ はオイラーの定数0.577215）。まずある荷重の年最大値を X で表すものとし、データから上記の α 、 u が求められたとする。このときレベル x に対する再現期間 $T(x)$ は、

$$T(x) = 1 / [1 - F_X(x)] \quad (16)$$

となる。これと式(13)を比較することにより、

$$1-p = [F_X(x)]^N \quad (17)$$

を得、ここから、

$$x = \mu_X + \sqrt{6}[-\ln\{-\ln(1-p)\} + \ln N - \gamma] / \pi \cdot \sigma_X \quad (18)$$

を得る。例えばこれに $N=50$ 、 $p=0.05$ を代入すると、 $x = \mu_X + 4.916 \sigma_X$ となり、 $p=0.1$ ならば、 $x = \mu_X + 4.355 \sigma_X$ となる。材料強度を正規分布と仮定した場合、標準偏差にかかる数値は、それぞれ1.64、1.28となるので、著しく違うように見えるが、これは時間変動の効果で式(18)の右辺に $\ln N$ の項が加わっていることが大きく、この場合その寄与分がそれぞれ3.05あることになる。 $p=0.05$ のときの x と0.1のときの x の比をとると、年最大値データの変動係数が0.1のとき約4%、1.0のとき約10%前者が大きいことになる。再現期間が2倍近く違うことと比べれば、この差は存外に大きくないことが知られる。

荷重の問題の中では、この他に荷重組合せの方法が重要である。信頼性理論の主要な研究テーマのひとつであるが、紙幅の関係でここでは省略させていただく。稿を改めて議論させていただくこととしたい。

6. 構造解析と耐力算定

図-1では構造解析手法・耐力算定手法を設計規準で規定し、設計者が決めた荷重や材料強度の数値をそこに代入して安全性照査を行うように記述されている。

一般的な原則論をいえば、これらの手法は平均的な荷重を代入すれば平均的な応答が求まる構造解析と、平均的な材料強度を代入すれば平均的な耐力が求まる耐力算定式であり、95あるいは5パーセンタイル値を代入することにより、これらに見合うぐらゐの応答・耐力の確率分布上の裾野値が推定できることが保証されるのであれば最も都合がよい。しかしながら、様々な非線形性の影響があつて、必ずしもそれができない場合も少なくなく、それらはあらかじめ基本安全係数の値の中に含めておく（構造解析係数や耐力係数として分離する考え方もあり

設計の場合分けとうまく対応させられるなら便利な方法になる可能性もあるが、ここでは取り上げない) こととする。

コンクリート構造や鋼構造では、構造解析に用いる様々な物性値 (ヤング係数等) のばらつきが設計上重大な影響をもたらすことはあまりないが、土質・基礎では物性値の推定は、5章で述べた荷重・強度の設計値の設定に劣らず極めて重要な問題である。もともと土質では図-1の概念分類自体が複雑で、各々が独立した要因になりにくいわけである。物性値のばらつきの影響が無視できない場合、確率有限要素法やシミュレーション等の手法により、感度解析を行うのも一つの考え方である。

コンクリートの耐力算定では、材料の応力-ひずみ関係の適切なモデル化も重要である。鋼構造でも材料降伏後の挙動は耐力算定に大きな影響があるが、これまでそれを設計者に陽な形で提示して、計算を求めるようなシステムは一般化されてはいなかった。今後、限界状態が性能要求型を加えるなど、多様化していく場合、標準的な応力-ひずみ関係 (ひずみ硬化、バウシinger効果等を含む) の提示が必要とされる場合が出てくる可能性もある。

耐力算定式が、限界状態の選択と密接な関係があるのは当然のことであるが、構造解析法の選択 (適切な構造モデル・境界条件等の解析モデルの選択を含む) もまた、考えている限界状態と深く関係する事項である。

現在、標準的に行われている構造解析は、いわゆる線形解析 (微小変位弾性解析) である。この利点は、何よりも簡便であること、再現性があり、誰が行っても同一の結果が得られること、重ね合わせの原理が成り立つために、荷重組み合わせの条件等が多少煩雑になっても、簡単に対処できること等が挙げられる。

現在ほど計算機の利用が高度化していなかった時代には、設計者に委ねる構造計算は静的な線形解析が大前提であった。そのため設計規準策定に際しても、線形解析で安全性確保に問題が生じないような、様々な工夫がなされていた。例えば、耐震設計における震度法・修正震度法で与えられている設計震度は、地面の揺れの加速度ではなく、動的な応答を静的な線形解析にフィードバックしたものである。鋼構造物の座屈等も、形式上は材料強度が低下しているように見えているが、実質的には変形が大きくなることで構造物に断面力が付加される、という荷重応答の問題をフィードバックしているのである。

こうした基本的な枠組みは今でも崩れてはいないが、半面で設計者が実行可能な構造解析のオプションは増えつつあるために、自主的判断で、非線形解析や動的解析を行う例もよくみられるようである。これは、結果の解釈が正しく行われることが肝要で、そのためにも設計規準の構造解析手法の指定のところで、親切なガイドラインが待望されるところである。

非線形解析・動的解析等を設計者の自主的運用から、

標準的な手法として規準の中で位置づける動きは、現在進行中の技術課題といえる。弾塑性有限変位解析は、プログラムの別、計算者の別により数十%程度のばらつきが生ずることがあるようである。動的解析もまた、力の関係だけでなく、変位の関係など多様な限界状態を表現する上で非常に有効な手法であるが、入力波の標準化をはじめとする、解決すべき課題がある。例えば、大崎スペクトルに合わせて模擬地震波を作成する方法などもあるが、乱数の初期値の違いだけで、結果にやはり数十%に及ぶばらつきが生ずる場合もある。

7. 重要度と限界状態時コスト

7.1 安全性と経済性

土木構造物の多くは公共施設である。その計画は社会的要求に伴う性能と投資費用とのバランスの上に行われる。設計では、与えられた性能に対し十分な安全性を持つことが要求され、更に経済的に優れていることも必要とされる。このように設計や計画は、常に経済性と背合わせにあることを念頭に置く必要がある。

一般に言われている経済設計とは、設計規準で定められたぎりぎりの安全性を持たせた上で、施工法や構造形式の違いによる投資額の差を経済性の優劣と捉えている。そこでは、設計規準以上の安全性の付与は、不経済であるとの認識が根底にある。しかし、現行の設計規準は、構造強度面での安全性の下限値を工学的判断に基づき定めたものであり、そこで規定される安全性のレベルは、必ずしも経済的とは言えない。

施設の安全性は、供用期間中に施設が地震等の外乱や劣化に対し、許容できる範囲で機能維持できることであり、経済性は許容できる範囲内で最も安いことを目指すことに他ならない。このような観点から、設計規準で規定される安全性のレベルは、供用期間中における施設の機能維持を経済的な観点から、社会的に容認できる最低限の安全性を目指したものと解釈できる。

7.2 重要度と限界状態時コスト

人や物流の使用頻度や規模或いは求められている性能等、施設に対する社会的要求は様々である。社会的要求は、施設の重要性を意味するもので、施設が機能しないことによる社会的影響を見ることで自明となる。また、社会的影響は経済損失として量的に表すことが可能であり、ここではこれを限界状態時コストと呼ぶこととする。設計が経済行為の一端であるとの認識に立つと、限界状態時コストの違い、即ち重要度の違いを安全性のレベル差として設計規準に反映させることは、合理性と共に本質的な経済設計を目指す上で必要である。高橋¹⁵⁾のアンケート調査によると、98%の専門家が安全性のレベルに差を持たせることに肯定的であると言っている。

安全性のレベル差を検討するには、限界状態時コスト

を定量的に評価することが第一に必要となる。限界状態を施設の倒壊とすると、限界状態時コストは以下の4つに分類することができる。

- 1) 再調達価格
- 2) 機能低下に伴う損害
- 3) 波及被害に伴う損害
- 4) 人命

再調達価格は施設が壊れた場合の復旧費用に相当し、計画時に与えられた性能或いは施工法や構造形式によって大きく異なる。更に環境や景観への配慮から付加価値を持たせる場合もある。これらは、設計や計画に携わる人々の目的や裁量に支配される部分が大半で、設計規準で規定される安全性のレベルは、部分的な関与に過ぎない。神田¹⁶⁾は、構造種別に関わらず、建築構造物の建設費と標準せん断力はほぼ線形にあり、標準せん断力2倍に対し、建設費の増分は10%程度であることを示している。安全性のレベルを検討する際の限界状態時コストは、社会的影響という視点から捉えるべきで、個人的な目的や裁量に依存する再調達価格は除外するのが妥当と考える。

機能低下に伴う損害は、対象施設が法人や個人のものであれば、営業損失や代替機能による付加費用等であり、公共施設或いはこれに準ずる施設では、社会的な経済損失として見る必要がある。波及被害に伴う損害は、他の健全な施設への二次的な物的被害を意味し、延焼や爆発によるもの、倒壊による交通遮断などが挙げられる。

人命は、施設が倒壊することによって生じる直接的なものと、機能低下や波及被害に伴う間接的な要因とに別けることができる。前者は人々の使用頻度、後者は周辺施設や当該施設の持つ機能にそれぞれ関係する。人命は、貨幣価値換算が必ずしも容易ではなく、一元化は現状では困難である。また、無理な定量化は社会的反感を招く恐れがあり好ましくない。しかし、人命の量的な差を損害の大小として認識することは、施設の重要性を見る上では不可避である。一方、機能低下に伴う損害は、人々の使用頻度に依存することは明らかで、人命の損失価値を暗に含めることも一案であろう。

以上より、安全性のレベルを検討する際の限界状態時コストには、機能低下や波及被害に伴う損害、上記2)、3)に注目することが重要である。

7.3 限界状態時コストの定量化

(1) 機能低下に伴う損害

施設の機能が低下或いは停止した場合に生じる損害は、施設の目的や機能に応じ4つに分類して考えることができる。

- 1) 生産を目的とした施設(工場、発電、オフィス等)
- 2) サービスを目的とした施設(病院、役所、消防)
- 3) 人や物の移動を目的とした施設(道路、鉄道、ライフライン等)

4) 居住を目的とした施設

上記の分類は、更に法人や個人等私設であるか、公共或いはこれに準ずる施設であるかによって扱いは異なる。

施設の機能低下を社会的な損害価値として評価するには、第一にその施設の目的や機能を明確にした上で、1)～4)のどの分類に属するかを見極める必要がある。そして、施設が壊れた場合を想定し、復旧までに要する期間を推定する。これに機能低下による日単位或いは月単位での損害額を乗じることで、損失金額として定量化することができる。ここで、日単位或いは月単位での損害額が期間により一様でないことに留意する必要がある。また、人や物の移動を目的とした施設では特に、機能を補完する代替機能を有する場合が多く、この場合の冗長性の問題についても十分検討を行うことが必要である。一方、地震のように同時且つ広域的に発生する被害では、通常時の機能低下による損害だけにとどまらず、様々な影響を鳥瞰的に捉えることが重要である。

(2) 波及被害に伴う損害

波及被害に伴う損害を評価するには、施設が壊れた場合に生ずる周辺への影響を物理的被害として想定することから始める。高架の道路や鉄道では、下部施設(道路や建築物)への影響や交通遮断、上水道では、水漏れによる浸水や交通遮断などが考えられる。出火爆発の可能性の高い施設では、周辺への延焼や爆風圧を考える必要がある。ダム等では、破壊による下流域への影響を見る必要がある。これらは、施設周辺の状況に左右されるもので、一般化は難しい。また、壊れ方や影響範囲、更には季節や時間など想定如何によっては、波及被害の様相も大きく変わってくる。特定の値に固執するより、むしろ幅を持って評価する方が現実的であろう。また、住居地域か商業域か、或いは工場地帯か、更に建物の密集度合い等により、波及被害のレベル分類を行い、損害を大雑把に捉えることも一案である。

(3) 損害価値の違い

損害価値は、個人或いは団体としての利害の及ばない、社会という視点から公平に評価することが重要である。これは、個人や立場による損害価値の違いが、安全性のレベルに影響することを避けるためである。例えば、原子力発電所の建設は、資源エネルギーの貧困な我が国の国策として進められて来たが、住民の根強い反対により、頓挫しているケースが多い。これは、施設が壊れた場合に被る損害価値の相違を如実に表したものである。住民は自己の生命財産に強い関心を持ち、国は公益を守ろうとする。双方の利害が一致することは少ない。損害価値は利害に関与しない第三の機関で評価することが望ましい。

7.4 損失期待値と安全性レベル

施設の脆弱性は、その施設の破壊確率 P_f を評価することで量的な記述が可能となる。これに前述した限界状

態時コスト C_f を掛け合わせることで、損害価値の期待値（期待損失 $\text{Expected Loss} = P_f \cdot C_f$ ）が求められる。これは、施設の重要度に脆弱性を加味した合理的な安全性照査基準と解釈することができる。現在、設計規準で規定されている脆弱性が一律であると考え、期待損失の違いは限界状態時コストの差を持って現われる。期待損失に対し、社会的な許容限界があるとする、ある施設はこれを大きく上回り、またある施設は下回り、一律とはならないことが容易に想像できる。これは施設の重要度を考慮していない現状設計規準の問題点を指摘している。大きく上回る施設については、 P_f を減らすことが必要となり、必然的に設計規準で規定すべき安全性のレベルが見えてくる。しかし、社会的な許容限界を如何に説得力のある論拠に基づき、設定すべきかという基本的且つ重要な問題が前提としてある。最終的には人間の判断に委ねられることになるが、論拠に乏しい現状設計規準の安全性レベルに比べ、期待損失を照査基準として導入することは、安全性レベルの本質的な議論を行う上で、大きな進歩と言えよう。

7.5 重要度係数

1950 年の建築基準法施行令、1980 年の耐震規定の改定では、施設の重要度による荷重割増しについて、検討はしたものの採用されなかった経緯がある。即ち、重要度係数の見送りである。大橋¹⁷⁾は、1980 年の建築基準法改定に際し、重要度係数（用途係数）が見送られた理由について考察し、基準法は安全性の最低基準を定めるものの、工事費の増加に対する懸念、の 2 つを理由として挙げている。前者は、最低基準以上の安全性は建築主の裁量に委ねられるとの判断による。後者について、安全性を向上させるには工事費の増加を伴うのは確かであるが、不経済であると速断するのは正しい解釈ではない。安全性向上と共に P_f が小さくなり、期待損失（社会的な経済損失）が低減することも、工事費の増加と共に考慮しなくてはならない。しかし、期待損失と工事費即ち初期投資とを一元的に比較評価することは多少問題はあるが、工事費の増加だけに固執することは誤った判断をもたらす原因となろう。何れにせよ、社会環境の変遷と共に最低基準に対する解釈や考え方も変化するのは必然であり、目的や用途に応じた最低基準の違いについても経済性という観点から、積極的に図るべきであろう。

設計規準で規定する安全性のレベルが最低基準であるとの認識に立てば、重要度係数は施設の重要度に応じそれぞれ 1.0 以上でなければならない。重要度係数の評価に関し、設計者が対象施設ごとに期待損失を計算し決定することは、煩雑であると同時に設計者の主観価値が混入するため好ましくない。施設の使用目的（用途）、機能、使用頻度、立地条件（周辺環境）等から、メニュー方式で重要度を選択、係数を決定することが妥当である。これは、構造物の審査や許認可の簡略化においても

必要なことである。設計規準作成者は、様々な施設の期待損失を評価し、それぞれの差異を十分検討した上で、重要度分類のメニュー化を進めることが必要である。ここでは、設計者の判断を促すような分類方法は好ましくなく、だれでも同じ結果となるような機械的な分類方法が望ましい。

8. おわりに

設計規準における安全性確保の考え方として、図-1 を軸に、多岐にわたる議論を駆け足で行った。ここで触れた内容には、1980 年代の復習の部分もなくはない。しかし、1 章に述べたように時代は変化しており、議論のもつ意味合いも変わってきていると考えている。限界状態確率の算定が議論の重要な核になってはいるものの、それを助けとして、限界状態発生時コストに応じた、重要度係数を策定するという、意思決定問題を行っていくというプロセスを想定しており、震災後の問題意識と整合するものと考えている。ここでは以下に若干補足を述べたい。

Eurocodes3²⁾では信頼性指標として、終局限界状態に対して $\beta = 3.3 \sim 4.3$ （破壊確率 $P_f = 5 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-6}$ ）が示されており（値の大小は破壊時損失のレベルにより決まる安全階級の高低に対応）、標準値はこの中間の $\beta = 3.8$ （ $P_f = 7 \times 10^{-5}$ ）とされている。こうした数値がどういう意味を持つのか、わが国にとってその意味は同様であるのか、震災の経験をきちんとフィードバックした上で議論が進められなければならない。また、社会性を考慮して、可能な限り議論の経緯が明らかにされねばならない。3.2 で触れたように、限界状態の表現を単なる「終局」から、社会との関連に配慮したものに移していくこともこの目的には有意義である。またデータが不十分で、確率モデルの精度が十分得られない現段階で、 β の値の利用にも一定の限界があるという認識も忘れてはならない。7 章では、施設の重要度の違いを安全性のレベル差として設計規準に反映させることの必要性について、経済性という観点から論じた。そこでは、施設の重要度を限界状態時における社会経済損失と同意に解釈し、期待損失をもって施設の安全性レベルと関連付けられることを示した。また、重要度係数を導入することにより、重要度の違いを設計規準に反映させることを示した。設計は経済行為であるという原点に立ち戻り、更に壊れた場合の社会的な損失の大きさを認識した上で、様々な分野の人々と建設的な議論をしていく必要がある。限界状態設計法による設計規準の改訂に、コード・キャリブレーションは不可欠であるが、そこに重きを置き過ぎると、現状追認傾向が強くなり、合理化は難しくなる¹⁾。

実務に直結する設計規準は、ほとんどの場合対象となる構造物の範囲が特定されており、策定作業の中では、個別の条項の改変に際しては、設計結果への具体的影響

が常にイメージされている。また、限界状態設計法では、建前として、起こりうる限界状態は全て照査することになっているが、実際の規準を作成する場合、簡便性に配慮して、寸法制約等の細目規定表現の中に照査の内容を取り込んでしまったり、ある照査によって自動的に満足される他のいくつかの限界状態の照査について、条件の省略だけでなく、解説からも省いてしまうこともある。これらは、あくまでも設計結果のイメージがあって可能なことである。

対象構造物を特定しない汎用的な規準では、このあたりを一般的な形で表現することが容易でないのである。いくつかの限界状態間の関係、例えば震災後問題になっている、RC構造の曲げ耐力とせん断耐力の関係のように、ある限界状態を他のものに先行させようとするなど、耐力評価式のみならず、断面決定を支配する荷重の問題とも関係しており、図-1のような広い観点からの検討が求められる。しかし、構造物の形状により関係性は様々であり、設計結果をイメージした議論抜きで、安全係数の調整を一律に行うことで、何にでも適用可能な解決ができるとは限らない。

設計規準は、設計者を規準作成者のイメージした設計結果に導くためのガイドである。それが照査式の羅列という形式をとっていることさえ、誘導のためのひとつの便法にすぎないといえる。そこには設計プロセスの簡便化や、設計結果のばらつきを小さくすること等も考慮に入れ、長年にわたって蓄積された知恵が詰まっている。図-1で一点鎖線と破線の間で表現した部分に、この知恵が含まれるわけである。これは必ずしも規準の条文・解説には直接表現されているとは限らない。2章で設計実務者のレベルアップや規準作成者の世代交代に言及し、6章では構造解析手法の指定に関するガイドラインに言及したが、広い言い方をすれば、この知恵の多くの部分に対して、より深い理解を与える解説書が著されることが望まれる。設計規準の背景を明らかにしておけば、改訂の必要が生じたときにも、合理的かつ速やかに作業が実施できる。

安全性余裕の確保と重要度への配慮という要件を、この「知恵」の部分で、規準作成者と設計者の間でどのように役割分担するかが、本論文における問題提起である。幅広い議論をお待ちしたい。

追記：本論文に対し査読者の方々から貴重なご指摘を多数いただいた。その大部分は修正に反映させているが、中には上記の「幅広い議論」として（要約の上で）紹介させていただく形をとる方がよいと著者側で判断したものもある。ここにそれを示す；「土木構造物は公共性が高く、将来的にも設計者の判断に任せられない部分が多いのではない。重要度係数の選択に自由度を与えたり、最後に述べている規準作成者と設計者の役割分担ということは疑問」「7章の安全性と経済性の議論に対し、現

状認識として、経済性から要求される安全性のレベルをかなり超えたものになっているように思われる。また“社会的容認”という表現に対し、そういう手順を踏んでいないし、容認を求めても受入れは容易でないと思う」さらに、例題を示す等で一般技術者にわかりやすい説明を心掛けよというご指摘もあった。まことにごもっともであると考えるが、紙幅の制約と、構造工学論文集という性格を考え併せ、今回は十分な対応を行えなかった。著者グループの活動へのご意見と、真剣に受け止めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物のライフタイムリスクの評価（構造工学シリーズ2）、土木学会、1988.
- 2) IABSE：Structural Eurocodes, IABSE COFERENCE DAVOS, IABSE REPORTS, Vol.65, 1992.
- 3) 大橋雄二：材料・規格の国際標準化、Structure、No.41、1992.1.
- 4) 尾坂芳夫、高岡宣善、星谷勝：土木構造設計、新体系土木工学12、技報堂出版、1981.
- 5) Lind, N. C.: Consistent Partial Safety Factors, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST6, pp. 1651-1669, June. 1978.
- 6) Ravindra, M. K., and Galambos, T. V.: Load Resistance Factor Design for Steel, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 104, No. ST9, pp. 1337-1353, Spt. 1978.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編)、1996.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書(設計編)、1996.
- 9) 土木学会：鋼構造物の終局強度と設計(鋼構造シリーズ6)、1994.
- 10) 土木学会：鋼構造物設計指針—PART A 一般構造物(鋼構造シリーズ)第2版(案)、1997出版予定.
- 11) 長尚：安全性指標に関する若干の考察、土木学会論文報告集、No.324, pp.41-50, 1982.
- 12) 日本建築学会：建築物荷重指針、1993.
- 13) 日本道路協会橋梁委員会限界状態設計法分科会荷重検討班：限界状態設計法分科会荷重検討班第1次報告書、1986、第2次報告書、1989.
- 14) BSI：BS5400 Steel, Concrete, and Composite Bridges, Part1,2, 1978, Part3, 1982.
- 15) 高橋徹、横内隆典：階層分析法を用いた構造安全性に関する意識調査、日本建築学会大会学術講演梗概集1996 B -1 pp.77 - 78.
- 16) 神田順：最適信頼性に及ぼす経済要因の影響評価、日本建築センター研究助成年報、1994, pp. 98 - 110.
- 17) 大橋雄二：なぜ建築基準法の耐震規定に用途係数が規定されなかったか、日本建築学会大会学術講演梗概集1996 B -1 pp.73 - 74.

(1996年9月6日受付)