

6. 耐震性能照査法

世界貿易機関 WTO の TBT 協定では、WTO に加盟している各国における国内規格の基礎として国際規格、いわゆる ISO 規格を採用することが義務づけられている。我が国の建設事業に使用される仕様及び技術規準は国際規格と整合したものとすることが求められているのである[土木学会 ISO 対応特別委員会, 1999]。したがって、設計規準策定に際しては、ISO 規格との整合性を十分考慮する必要がある。構造物の設計に関わる ISO 規格としては、ISO2394 があり、1998 年に改訂された[ISO/TC98/SC2, 1998]。ISO2394 は、設計規準を作成する機関に基本として利用されることを意図した規格である。

本章では、ISO2394 の要求事項を踏まえて、鋼構造物の耐震設計における安全性照査方法の試案を提案すると共に、今後の課題および将来展望についても概説する。

6.1 安全性照査式のフォーマット

6.1.1 安全性照査式の比較

構造物の設計法の歴史を振り返るまでもなく、構造物の安全性の照査は、最大値と想定される荷重に対する荷重効果 S (断面力あるいは応力) と確率的に見て十分安全と思われる抵抗値 R (断面力あるいは応力) とを比較して、

$$S \leq R \quad (6.1.1)$$

が成り立つように行うことが自然であり、合理的である。すなわち、十分大きな荷重に対する荷重効果 S と十分小さな抵抗値 R とを比較して安全性を確保しようという考え方である。

しかしながら、確率統計の理論に基づいて荷重効果 S や抵抗値 R を十分安全側にとったとしても、設計から施工に至るまでのあらゆる段階における未知の要因を S や R の中に含ませることはできず、無知係数とも呼べるような安全率 ν ($\nu \geq 1$) を考えることの必然性が多くの事故例を教訓に提案された。そして、式(6.1.1)の安全性照査式をさらに安全側に持っていくため、 S と R との間に一定の比で表される安全率を確保するという表現

$$S \leq R / \nu \quad (6.1.2)$$

が Navier (1826 年) によって提案された。その後、長い間、式(6.1.2)が許容応力度設計法の安全性照査式として使われてきた。

土木学会鋼構造委員会に設置された鋼構造物設計指針小委員会が作成した鋼構造物設計指針 (第 1 版) [土木学会, 1987] では、安全性照査式のフォーマットが明確になるように、許容応力度設計法の抵抗値の側に含まれていた安全率 ν を抵

抗値から独立させ、式(6.1.2)を変形し、

$$\nu \frac{\Sigma S (F_d)}{R (f_d)} \leq 1 \quad (6.1.3)$$

の形の限界状態照査式が提案された。ここに、 F_d ：設計荷重、 f_d ：設計材料強度、 S ：荷重効果、 R ：抵抗値、 ν ：安全率である。この安全性照査式は当然のことながら許容応力度設計法による安全性照査式と等価である。

一方、土木学会コンクリート委員会が作成したコンクリート標準示方書（平成8年）[土木学会コンクリート委員会，1996]では、

$$\gamma_i \frac{\Sigma \gamma_a S (\gamma_f F_k)}{1 / \gamma_b \cdot R (f_k / \gamma_m)} \leq 1 \quad (6.1.4)$$

の形の安全性照査式が用いられている。ここに、 F_k ：荷重の特性値、 f_k ：材料強度の特性値、 S ：荷重効果（断面力）、 R ：抵抗値（断面耐力）、 γ_f ：荷重係数、 γ_a ：構造解析係数、 γ_m ：材料係数、 γ_b ：部材係数、 γ_i ：構造物係数である。この照査式はISO2394に配慮したものであり、式(6.1.3)に見られる安全率 ν を5つの係数に割り振り、技術の進歩に合わせて安全性を確保するための係数を変更し易くした点で大きな進歩と考えられる。

式(6.1.3)と式(6.1.4)を比較すると本質的な差異はなく、不確定要因について、どちらがきめ細かく対応できるフォーマットであるかという点が異なるだけである。つまり、歴史的背景を考慮すれば、式(6.1.3)、(6.1.4)ともに、荷重効果の設計値 S_d と抵抗の設計値 R_d を比べて（安全性の照査に用いる値を設計値と呼ぶ）、

$$S_d \leq R_d \quad (6.1.5a)$$

あるいは

$$\frac{S_d}{R_d} \leq 1 \quad (6.1.5b)$$

が成立すれば、安全性の確保ができていると考えていることに他ならない。設計値として S_d と R_d をどのように決めるかという点が異なるだけである。例えば、鋼構造物とコンクリート構造物の安全性照査式である式(6.1.3)と式(6.1.4)はそれぞれ、鋼構造物については、

$$S_d = \Sigma \nu S (F_d), R_d = R (f_d) \quad (6.1.6a)$$

とおき、コンクリート構造物については、

$$S_d = \sum \gamma_i \gamma_a S (\gamma_f F_k), R_d = 1 / \gamma_b \cdot R (f_k / \gamma_m) \quad (6.1.6b)$$

とおけば、見かけ上式(6.1.5)の形で表現できる。すなわち、荷重効果と抵抗の設計値をどのように定め、安全率をどのように評価するかが設計フォーマットの違いになって現れているのである。

鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則[土木学会鋼・コンクリート共通構造設計規準小委員会，1992]を積極的に利用することを前提に、平成9年に改訂された鋼構造物設計指針[土木学会鋼構造物設計指針小委員会，1997]では、抵抗値に関する最新の成果を取り入れ、抵抗の設計値 R_d を最新の研究成果に合わせて

$$R_d = \phi r R_u \quad (6.1.7)$$

というように表現している。ここに、 R_u ：設計材料強度（保証降伏点強度を用いる）、 r ：抵抗値（式(6.1.6b)に見られる R と同じように平均値曲線を指す）、 ϕ ：抵抗係数である。すなわち、コンクリート構造物で考えられている部材係数 γ_b と材料係数 γ_m をまとめて一つの係数 ϕ で表し、1より小さい係数 ϕ （抵抗係数と暫定的に呼ぶ）を導入して、抵抗の設計値の確率的扱いを容易にしている。ここに、抵抗係数を $\phi \leq 1$ としているが、コンクリート標準示方書の安全性照査式のように、 ϕ の代わりに $1 / \gamma_b$ ($\gamma_b \geq 1$) を利用しても本質的な差異はない。式(6.1.7)では、低めの（小さな）抵抗値を取っているという意味を明確に表現するため、抵抗係数として1より小さい ϕ を採用しているに過ぎない。

さらに、安全率を荷重効果の側に持ってゆき、荷重効果の設計値を

$$S_d = \sum \nu S (F_d) \quad (6.1.8)$$

と表している。線形構造解析を前提とするときには式(6.1.8)で問題なく処理でき、安全率の意味が設計フォーマット上もはっきりするのであるが、非線形構造解析を利用する場合には、荷重効果 S は ν 倍された設計荷重 F_d に対して計算された値が一番大きくなり、安全率の持つ役割が荷重効果と抵抗値との間に一定の比率の安全性を確保させることである点に注意すれば、

$$S_d = S (\sum \nu F_d) \quad (6.1.9)$$

とした方が妥当な荷重効果の設計値が得られる。もちろん、線形構造解析を利用する場合には式(6.1.8)と式(6.1.9)は同じになるので式(6.1.9)は式(6.1.8)を含むことになる。また、式(6.1.9)の安全率 ν の中にはコンクリート構造物の安全性照査式(6.1.4)の構造物係数 γ_i と構造解析係数 γ_a が含まれていると考えることもで

きる。

以上をまとめれば、荷重効果が一つの場合、安全性照査の基本式は、いずれの設計規準においても

$$S_d \leq R_d \quad (6.1.10a)$$

あるいは、

$$\frac{S_d}{R_d} \leq 1 \quad (6.1.10b)$$

と書ける。比較のため、具体的な安全性照査式のフォーマットを、ISO2394（平成10年版）、鋼構造物設計指針（平成9年版）、鋼・コンクリート共通構造設計規準（平成4年版）、コンクリート標準示方書（平成8年版）を例に取り、表6.1.1に示す。

一般的な荷重状態を考えると、荷重効果（断面力）が一つの軸力やモーメントで表されることは少なく、いくつかの断面力が構造部材に生じることが想定される。この場合には荷重効果とそれに対応する抵抗値の次元を合わせなければならず、式(6.1.10a)では、整合性がとれなくなることがあるので、式(6.1.10b)の形を採用することが適切である。すなわち、複数の荷重効果（断面力）が生じるときには、

$$\sum_{i=1}^n \frac{S_{d i}}{R_{d i}} \leq 1 \quad (6.1.11)$$

と拡張するのが正しい。この式は、それぞれの項が単独に存在するときにも安全性の確保が保証され（ $S_{d i}/R_{d i} \leq 1$ を指す）、式(6.1.10)を含んでいる点で一般性を有している。

さらに、一般的な場合を想定すれば、断面力同士が連成する場合や非線形強度相関式を用いる場合には

$$G(S_{d 1}/R_{d 1}, S_{d 2}/R_{d 2}, \dots, S_{d n}/R_{d n}) \leq 1 \quad (6.1.12)$$

と書くことができる。ここに、 G は一般的な安全性評価関数を意味する。この式はISO2394で提案されている一般式と等価である。

6.1.2 安全性照査式の解説

一般に、構造物の安全性の照査と設計の方法は、不確実性の扱い方とその近似の仕方に基づいて、三つのレベルに分類されている。しかし、これらの分類は、

確定的に区分されるものではなく、いずれのレベルの方法でも限界状態に対する適切な安全性・信頼性の水準を保証するには、材料強度や荷重作用の確率的変動およびその他全ての不確定性を考慮に入れることが必要である。ここでは、荷重や強度のように設計に用いられる物理量を設計変数と呼ぶことにする。この設計変数と安全性の照査法の差異によってレベルが分けられていると考えることもできる。

(1) レベルⅢの方法

確率論的に最も厳密な安全性の照査法である。設計空間の確率論的性質の検証のために、また、以後に述べるレベルⅡ、Ⅰの方法に採用される種々の単純化、理想化の有効性を検証するために用いられる。その特徴は以下の通りである。

- a) 破壊確率の計算に必要な不確定要因の確率・統計的な特性やパラメータは全て分かっているものとする。すなわち、設計変数の確率分布が既知であることが前提である。
- b) 限界状態に対する破壊確率を正しく求め、最適破壊確率（または最大期待効用）によって安全性を照査する。すなわち、次式を満足するように設計値を定める方法である。

$$P_f \leq P_{fa} \quad (6.1.13)$$

ここに、 P_f ：構造物の破壊確率、 P_{fa} ：破壊確率（最適破壊確率を考慮）の許容値である。

(2) レベルⅡの方法

限界状態の表現と確率論的な取扱いに一次近似を行う方法で、レベルⅠの信頼性検証方法を構成するための基礎としての意味を持つほか、特別な場合として構造物の安全性の照査を行うためにも用いられる。その特徴は下記の通りである。

- a) 設計変数の分布を正規分布に変換して取り扱う。設計変数の分布は平均値、標準偏差など2次までのモーメントによって表される。
- b) 構造の安全性・信頼性の水準は信頼性指標 β または対応する破壊確率で表される。すなわち、レベルⅡの信頼性解析法（2次モーメント法）で信頼性指標 β を計算し、その値が次式を満足するように設計値を定める方法である。

$$\beta \geq \beta_a \quad (6.1.14)$$

ここに、 β ：信頼性指標、 β_a ：信頼性指標の許容値である。

(3) レベルⅠの方法

実際の構造設計において最も一般的に利用されることが期待される安全性の照

査方法で、レベルIIの方法が与える安全性の連続関数を離散化した方法とみることが出来る。また、この方法では、構造設計における不確定性の影響を、半ば確率論的に、半ば係数処理的に取り扱っている。その特徴は以下の通りである。

- a) 構造物の安全性・信頼性の水準は、各設計変数について代表値を指定し、この代表値に関係づけて部分安全係数を定め、限界状態に対する安全性を確認する。
- b) 設計変数の代表値は、その確率分布についてあらかじめ指定された超過確率（非超過確率）を持つ値として定義される種々の特性値に対応する。
- c) 部分安全係数の大きさは、従来の方法による設計結果との整合性を考慮して、必要な信頼性水準と設計変数の変動性との関数として、レベルIIの方法で定められる。

ISO2394を参考に設計照査式の一例を示すと、次式のようなになる。

$$S_d \leq R_d \quad (6.1.15)$$

ここに、 S_d ：荷重効果の設計値、 R_d ：抵抗の設計値である。

式(6.1.15)の設計照査式を、部分安全係数を用いて具体的に書くと、次式のよう表せる。

$$\sum \nu_n \nu_{S_d} S(F_d, a_d) \leq 1 / \nu_{R_d} \cdot R(f_d, a_d, c) \quad (6.1.16)$$

ここに、 S ：荷重効果関数、 R ：抵抗関数、 F_d ：荷重の設計値、 f_d ：材料強度の設計値、 a_d ：幾何学的パラメータの設計値、 c ：使用上の制約、例えば、使用限界状態を制御するための、許容される変形量、加速度、ひび割れ幅などに関する一つまたは複数の制約、 ν_n ：破損の形式による重大性を含んだ破損の結果および構造の重要度が考慮された係数、 ν_{S_d} ：荷重効果部分のモデルの不確定性または他の ν で考慮されていないその他の状況に関する係数、 ν_{R_d} ：抵抗部分のモデルの不確定性または他の ν で考慮されていないその他の状況に関する係数である。さらに、設計変数に割り当てられた設計値は、具体的に次のように表される。

$$\text{荷重の設計値} \quad : F_d = \nu_f F_k \quad (6.1.17)$$

$$\text{材料強度の設計値} \quad : f_d = f_k / \nu_m \quad (6.1.18)$$

$$\text{幾何学的パラメータの設計値} : a_d = a_k \pm \Delta a \quad (6.1.19)$$

ここに、 F_k ：荷重の代表値、 f_k ：材料特性の特性値（例えば、強度）、 a_k ：幾何学的パラメータの特性値、 ν_f ：荷重係数で、荷重の不確定性を示す、 ν_m ：材料係数で、材料特性の不確定性を示す、 Δa ：加算部分の幾何学量で、幾何学的パラメータの不確定性を示す。

表-6.1.1の安全性照査式も、このレベルIの方法によるものであり、部分安全

係数を用いた設計法である。前節での議論もこのレベル I の安全性照査法が中心であった。

土木学会が作成したコンクリート標準示方書では、

$$\gamma_i \frac{\sum \gamma_a S (\gamma_f F_k)}{R (f_k / \gamma_m) / \gamma_b} \leq 1 \quad (6.1.20)$$

の形の安全性照査式が用いられている。ここに、R: 抵抗関数, S: 荷重効果関数, f_k : 材料強度の特性値, F_k : 荷重の特性値, γ_m : 材料係数, γ_f : 荷重係数, γ_b : 部材係数, γ_a : 構造解析係数, γ_i : 構造物係数 (全体係数) である。

さらに、それぞれの係数の持つ意味は、以下のように説明されている。

γ_m : 試験値と構造物中の値の差を考慮する

γ_b : 部材算定式の不確実性, 寸法のバラツキ, 重要度等を考慮する

γ_f : 荷重の最大値がその特性値を超える可能性等を考慮する

γ_a : 構造解析における不確実性を考慮する

γ_i : 構造物の重要度, 限界状態に至る確率, 社会・経済的影響を考慮する

国際規格 ISO2394 の安全照査式である式 (6.1.15) と我が国の安全照査式である式 (6.1.20) を比較しても、安全性照査式のフォーマットには本質的な差異はないことがわかる。

表 6.1.1 安全性照査式のフォーマット比較

| 項目 | ISO2394 (H10年) | 鋼構造物設計指針 (H9年) | 鋼・コンクリート共通構造設計規準 (H4年) | コンクリート標準示方書 (H8年) |
|----------------|---|---|--|--|
| 安全性照査式 | 部分安全係数法 $R_d \geq S_d$ (確率に基づく設計方法もある) | 部分安全係数法 $S_d / R_d \leq 1$ $R_d = \phi r R_u$ あるいは $R_d = R_u$ $S_d = S(\gamma F_d)$ | 部分安全係数法 $\gamma_i S_d / R_d \leq 1$ | 部分安全係数法 $\gamma_i S_d / R_d \leq 1$ |
| 不確定性の考慮方法 | 設計値はフラクタイル値に対応 ・ 不確定性は部分安全係数で考慮 | ・ 不確定性は部分安全係数で考慮 | ・ 設計荷重は耐用期間中に生ずると想定される最大値(最小値)の期待値 ・ 材料強度の特性値はフラクタイル値に対応 ・ 不確定性は部分安全係数で考慮 | ・ 設計荷重は耐用期間中に生ずると想定される最大値(最小値)の期待値 ・ 材料強度の特性値はフラクタイル値に対応 ・ 不確定性は部分安全係数で考慮 |
| 部分安全係数の種類 | γ_n : 重要度係数(仮称) γ_f : 荷重係数(仮称) γ_m : 材料係数(仮称) Δ_a : 付加的幾何学量 γ_D : モデル不確定性を表す部分安全係数 | ϕ : 部材強度係数 ($\phi \leq 1$) γ : 安全率 r : 無次元化部材強度の平均値 | γ_i : 構造物係数 γ_f : 荷重係数 γ_m : 材料係数 γ_a : 構造解析係数 γ_b : 部材係数 | γ_i : 構造物係数 γ_f : 荷重係数 γ_m : 材料係数 γ_a : 構造解析係数 γ_b : 部材係数 |
| 荷重に関する部分安全係数 | γ_f と γ_D を用いる。 ・ 荷重の不確定性を考慮 ・ 荷重モデルの不確定性を考慮 | γ を用いる。 ・ 荷重の不確定性を考慮 ・ 部材強度以外の不確定性を考慮 | γ_f と γ_a を用いる。 ・ 荷重の不確定性を考慮 ・ 荷重モデルの不確定性を考慮 | γ_f と γ_a を用いる。 ・ 荷重の不確定性を考慮 ・ 荷重モデルの不確定性を考慮 |
| 耐力に関する部分安全係数 | γ_m を用いる。 ・ 材料特性の不確定性を考慮 ・ 耐力モデルの不確定性を考慮 | ϕ を用いる。 ・ 部材強度の不確定性を考慮 | γ_m と γ_b を用いる。 ・ 材料特性の不確定性を考慮 ・ 耐力モデルの不確定性を考慮 | γ_m と γ_b を用いる。 ・ 材料特性の不確定性を考慮 ・ 耐力モデルの不確定性を考慮 |
| 構造寸法のばらつきを考慮方法 | Δ_a を用いる。 | γ に含まれる。 | γ_b で考慮 | γ_b で考慮 |
| 重要度係数 | γ_n を用いる。 ・ 構造物の重要度、限界状態に達したときの社会的・経済的影響を考慮して定める。 ・ 規定された信頼性レベルに応じ設定する。 | γ に含まれる。 | γ_i を用いる。 ・ 構造物の重要度、限界状態に達したときの社会的・経済的影響を考慮して定める。 | γ_i を用いる。 ・ 構造物の重要度、限界状態に達したときの社会的・経済的影響を考慮して定める。 |

6.2 安全性確保の方法

6.2.1 ISO2394 の要求事項への対応

ISO2394 の中で規定されている主要な要求事項を表 6.2.1 に示す。

表 6.2.1 ISO2394 の要求事項

| NO. | 項目 | 内容 |
|-----|-------------------|---|
| 1 | 基本的要求性能 | <ul style="list-style-type: none"> ・使用限界状態に関する要求 ・終局限界状態に関する要求 ・強靱な要求 |
| 2 | 信頼性レベル | <p>各限界状態に対して適度な信頼性レベルを定める。 信頼性レベルの設定に当たっては次の点を考慮する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・破壊性状 ・人命，社会・経済的影響 ・特別な社会・環境的条件 |
| 3 | 限界状態 | <p>限界状態設計法を採用する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・終局限界状態 ・使用限界状態 |
| 4 | 設計手順 | <p>適切な全ての限界状態を考慮する。</p> <p>限界状態に影響を与える基本変数を明確にする。</p> <p>限界状態を表現する計算モデルを確立する。</p> |
| 5 | 設計状態における信頼性レベルの照査 | <p>次の設計状態において信頼性レベルを照査する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・持続的な状態 ・過渡的な状態 ・偶発的な状態 |
| 6 | 基本変数 | 不確実性が重要と判断される基本変数は確率変数とする。 |
| 7 | 材料特性 | 材料特性は試験結果に基づいて設定する。 |
| 8 | 幾何学的数量 | 幾何学的数量の変動を考慮する。 |
| 9 | 計算モデル | <ul style="list-style-type: none"> ・計算モデルは限界状態までの挙動を表現できる。 ・計算モデルの仮定は実験的，定量的に検証されている。 |
| 10 | 荷重モデル | 荷重と構造物の相互作用がある場合は，考慮する。 |
| 11 | 耐力モデル | 耐力モデルは荷重モデルと整合している。 |
| 12 | 疲労モデル | 構造物が疲労の原因となる荷重を受ける場合は，疲労に対する信頼性を検証する。 |
| 13 | モデル不確実性 | 耐力モデルは実験結果の平均値を算定する。 |
| 14 | 試験結果に基づく設計 | 試験結果は統計的方法に基づいて評価する。 |
| 15 | 荷重作用の特性値 | <ul style="list-style-type: none"> ・参照期間中の超過確率が既定値となるように設定する。 ・複数の荷重により生じる荷重効果の特性値も単一荷重作用と同様の超過確率となるように設定する。 |
| 16 | 材料の特性値 | 材料の特性値は，統計分布のフラクタイル値として規定する。 |
| 17 | キャリブレーション | 部分安全係数は，直接比較や確率論的手法によってキャリブレーションする。 |

国内外の構造設計規準における安全性照査式のフォーマットは、6.1 節で紹介したように「部分安全係数を用いた限界状態設計法」が主流となってきた。ISO2394 でも、限界状態設計法を採用しているが、「部分係数法」と併せて「確率論に基づく方法」も規定しているのが大きな特徴である。

前節で述べたように、部分係数法を採用している国内規準は、安全性照査式のフォーマットに関しては、ISO2394 と本質的な差異はない。しかしながら、表 6.2.1 に挙げた要求項目の中で、次の 2 点は現在の国内規準で対応しているとは言えない。

- ① 各限界状態の信頼性レベル(目標安全性水準)を設定し、照査すること (項目 2 と 5)
- ② 確率論に基づき部分安全係数を設定すること (項目 17)

国際規格である ISO2394 との整合性を図るためには、これらの点に対応していく必要がある。しかしながら、これらの項目を反映させた構造設計規準を制定するための議論や研究が十分されているとは言い難い。ISO2394 を反映させた形で整備されつつある Eurocodes においても未だに種々の議論が噴出している状態である。したがって、本報告では、目標安全性水準方法ならびに部分安全係数の設定方法についての基本的な考え方を概説し、併せて今後の課題についてまとめることとする。

6.2.2 目標安全性水準の設定について

目標安全性水準の設定方法の例を表 6.2.2 に示す。

表 6.2.2 目標安全性水準の設定方法

[星谷, 石井, 1986]

| No. | 方法 | 概要 |
|-----|---------------------------|--|
| 1 | 事故統計に基づく方法 | 事故, 損傷に関する統計資料に基づき (年) 破壊確率を求め, これを参考として許容破壊確率 P_{fa} (許容安全性指標 β_a) を決定する方法 |
| 2 | 現行設計規準へのキャリブレーションに基づく方法 | 現行の設計規準により設計された種々の構造物, 部材の $P_f(\beta)$ を求めて, その資料に基づき $P_{fa}(\beta_a)$ を定める方法 |
| 3 | 他の災害危険性との比較による方法 | 構造物の破壊に伴って予測される (1名の) 死亡危険性を, 自然災害あるいは他の人為災害による危険性と比べて, ある水準以下に設定する方法 |
| 4 | 人的損失に対する危険回避に要する投資効果による方法 | 構造物の破壊に伴って予測される一人当たりの死亡率を低減させるのに要する費用の大きさを評価する方法 (1名の生命を救うのに社会が支払う金額には自ずからある規準があるとする.) |

表 6.2.2 の 2 番目の方法は、「現行規準へのキャリブレーション」と呼ばれる方法で、海外の設計規準改訂の際に用いられることが多い、最も一般的な方法である。この方法は、現行の設計規準に従って設計された構造物が持つ信頼性レベルが、歴史的な経緯からみて社会的にも十分に容認されており、経済性と安全性についてもある程度までバランスがとれているとすることが前提となっている。

ISO2394 の Annex E.4 には、目標安全性水準の設定方法として次の 3 種類の方法が紹介されている。

- ① 人命の安全性に対する要求値に基づいて設定する方法
- ② ライフタイムコストを最小化するように設定する方法
- ③ 現行設計規準へのキャリブレーションによって設定する方法

①の方法は、表 6.2.2 の 1 番目の方法と 3 番目の方法とに関連した方法と考えることができる。ISO2394 では、構造物の最大許容破壊確率は、構造物が破壊するという条件のもとで人が死亡するという条件付確率で表現できるとして、次式を紹介している。

$$P(f|\text{year})P(d|f) < 10^{-6}/\text{year} \quad (6.2.1)$$

ここで $P(d|f)$ は、破壊の際に構造物の中にいる人が死亡する確率である。1 年あたりの個人致死事故率が 10^{-4} であることを参考にすると、 10^{-6} という値は合理的であると解説している。

②の方法は、経済的観点から、目標安全性水準は、破壊時損失と安全対策費のバランスから設定されるという考え方に基づく方法である。ISO2394 では、次の期待総費用最小化の基本式が紹介されている。

$$C_{\text{tot}} = C_b + C_m + \sum P_f C_f \quad (6.2.2)$$

ここで、
 C_b : 建設費用
 C_m : 維持管理・取り壊し費用の期待値
 C_f : 破壊時損失
 P_f : ライフタイムの破壊確率

期待総費用 C_{tot} を最小化するような P_f を目標安全性水準として設定する方法であり、考え方が明快であるので以前から種々の研究が行われている。しかしながら、土木構造物は公共性の高い構造物であり、地震により破壊した構造物がもたらす損失 C_f をどのように見積もるかについては、まだ十分な研究が行われていないのが現状である。今後この分野の研究成果が蓄積され、 $\sum P_f C_f$ の項（リスク）の算定方法が実務でも容認できるレベルになれば、このリスクを (a) 予算内に収めるように目標安全性水準を設定する、(b) 保険でカバーする、といった現実的な対応方

法（リスクヘッジ）へと結びついていくと考えられる。

ISO2394においても，上記の①と②の方法は直接実務に適用するのが非常に難しいので，目標安全性水準の設定は③のキャリブレーションによって設定する方法が使われることが多いと解説している．ISO2394に掲載されている目標信頼性指標 β_t の例を表-6.2.3に示す。

表-6.2.3 目標信頼性指標（ライフタイム，例）

| 安全性の 相対コスト | 破壊の頻度 | | | |
|---------------|-------|------|-----|------|
| | 小 | 時々 | 中 | 大 |
| 高 | 0 | A1.5 | 2.3 | B3.1 |
| 中 | 1.3 | 2.3 | 3.1 | C3.8 |
| 低 | 2.3 | 3.1 | 3.8 | 4.3 |

(注) A: 使用限界状態では，可逆的なものは $\beta=0$ を，非可逆的なものは $\beta=1.5$ を使う。

B: 疲労限界状態では，検査の可能性に依存して $\beta=2.3$ から $\beta=3.1$ を使う。

C: 終局限界状態では，安全性クラスに応じて $\beta=3.1, 3.8, 4.3$ を使う。

これらの目標信頼性指標は，ある特定の構造と確率モデルの場合の値であるので，別の構造や確率モデルを使う場合には適用することができない。したがって，目標信頼性指標（目標安全性水準）について議論する場合は，前提となっている条件を明確にすることが重要である。今後の設計規準の中で，各限界状態の目標安全性水準を明示する場合は，その値の算定根拠を明確にし，設計資料ならびに将来の規準改訂時の資料として公開することが必要である。それらは，将来の規準改訂作業において，貴重な資料となるからである。

6.2.3 部分安全性係数の設定について

前述したように，ISO2394では「部分係数法」と併せて「確率論に基づく方法」も規定しているが，本報告書では安全性照査式のフォーマットとして部分安全係数形式を提案しているので，「確率論に基づく方法」については解説を省略し，「部分係数法」について記述する。部分係数法を用いた設計規準を制定するに当たっての最大の課題は，部分安全係数の設定である。しかしながら，6.2.1で述べたように，日本の現行の構造設計規準では，部分安全係数を合理的に設定している例がまだ見あたらない。そこで，本節では，ISO2394で紹介されている次の2つの設定方法について概説する。

- ・基本変数の感度に応じて設定する方法
- ・キャリブレーションによる方法

(1) 基本変数の感度に応じて設定する方法

ここでは、ISO2394で紹介されている方法を若干単純化して説明する。
 まず、限界状態関数が次式で記述されるとする。

$$g = R(f_k / \gamma_m) - S(\gamma_f \cdot F_k) \quad (6.2.3)$$

ここで、Rは抵抗関数、Sは荷重効果関数を表し、

- f_k : 材料特性の特性値
- γ_m : 材料係数
- F_k : 荷重の特性値
- γ_f : 荷重係数

信頼性解析で求められる設計点 (β point) に対応する材料特性の設計値を f_d 、
 荷重の設計値を F_d とすると、それぞれの部分安全係数は次式で算定できる。

$$\gamma_m = f_k / f_d, \quad \gamma_f = F_d / F_k \quad (6.2.4)$$

たとえば、材料特性を表す確率変数の確率密度関数が正規分布で、特性値 f_k が
 平均値である場合は、材料係数 γ_m は次式で算定できる。

$$\gamma_m = 1 / (1 - \alpha \cdot \beta \cdot V) \quad (6.2.5)$$

- ここで、 α : 材料特性の感度係数
- β : 信頼性指標
- V : 材料特性の変動係数

一例として、鋼材降伏強度の感度係数 $\alpha = 0.5$ 、変動係数 $V = 5\%$ というデータが
 ある場合は、目標信頼性指標が $\beta_t = 3.8$ と与えられれば、

$$\gamma_m = 1 / (1 - 0.5 \cdot 3.8 \cdot 0.05) = 1.10$$

と計算できる。

限界状態関数およびそれを構成する確率変数の統計量が同一であれば、構造寸
 法や荷重条件が異なる構造形式であっても、感度係数 α の値はあまり変動しない。
 したがって、設計規準作成時に、設計対象として想定される種々の構造形式に対
 して信頼性解析を実施しておけば、設計者が部分安全係数を設定する際に用いる
 α の値を定めておくことができる。感度係数 α は、確率変数の変動係数 V の影響
 を受けるが、 αV はあまり変動しないので、式(6.2.5)における αV の値を設計規
 準で規定しておく方法も考えられる。

構造物係数 γ_i は、目標信頼性指標 β_t に対応して設定する。これも設計規準作
 成時に、 γ_i をパラメータとして設計した種々の構造形式に対して信頼性解析を
 実施しておけば、 $\gamma_i \sim \beta_t$ の関係がわかるので、その関係を設計規準に規定するこ
 とで、設計者は、与えられる β_t から γ_i を設定することができる。

Eurocodes では基本的にこの方法によって、部分安全係数を設定している。ただし、 α は上記の感度係数 (sensitivity factor) ではなく、重要度係数 (importance factor) と呼ばれており、信頼性解析で算出される感度係数よりは、安全側の大きめの値が設定されている。部分安全係数の値については、種々の限界状態間での整合性をとるために、Eurocodes の制定母体である CEN の中でも議論中であり、最終結論がでていない状況である。この Eurocodes 策定に当たっての部分安全係数の議論は、今後の国内の設計規準を策定していく際に参考にしていく必要がある。

(2) キャリブレーションによる方法

キャリブレーションによって部分安全係数を設定する方法の基本的な考え方は、任意に決定した部分係数形式のフォーマットからスタートして、構造物の信頼性が目標値にできる限り近くなるように部分安全係数を選択するというものである。その一般的な手順は、次の通りである。

- ① 部分係数形式の限界状態関数を設定する。
- ② 適用範囲を網羅するように n 個の様々な設計対象を設定する。その際、荷重の種類、構造寸法の種類、材料特性の種類、限界状態の種類を考慮して設定する。
- ③ 与えられた一連の部分安全係数 γ の場合において、個々の設計対象を設計する。設計された個々の構造に対して信頼性指標 β_i を算出する。
- ④ 目標信頼性指標 β_i に対する β_i の偏差の総和 D は、次式で算定できる。

$$D = \sum_{i=1}^n [\beta_i(\gamma) - \beta_i]^2 \quad (6.2.6)$$

- ⑤ この D を最小にするような γ の組み合わせが、構造物の信頼性のばらつきが少ない、最適な部分安全係数と考えられる。

ISO2394 で紹介されている上記の 2 つの方法共に、部分安全係数を設定するためのベースになっているものは、基本変数の統計量である。設計規準策定に当たっては、できる限り普遍的な部分安全係数を設定することが望ましい。したがって、今後の課題としては、次の項目があり、積極的な対応が必要である。

- ① 基本変数の統計量のデータベースの整備
 - ② 基本変数の確率分布の統一
 - ③ 各種設計規準に共通する荷重指針の制定
- ① に関しては、「構造物のライフタイムリスクの評価」[土木学会構造工学委員会、1988]の中で鋼構造物の耐荷力と疲労試験のデータベースについて詳しくまとめられている。また、③に関しては、土木学会構造工学委員会「構造設計国際標準研究小委員会」において、将来土木分野と建築分野に共通した荷重指針制定を視野に入れて、荷重指針の枠組み作りを行っており、その成果は平成 12 年 8 月に公表される予定である。

6.3 安全性照査方法の展望と課題

6.3.1 限界状態設計法の導入に関わる問題点

限界状態設計法の利点は

- ①設計手法の透明性・公平性が高い
- ②設計の自由度が大きい
- ③合理的な設計を可能にする
- ④新しい技術の導入が容易になる
- ⑤設計法として統一化が図りやすい

と言われている。耐震設計法においても限界状態設計法が国際標準であることに変わりはない。我が国でも限界状態設計法を導入すれば、耐震設計法も容易に国際標準化できるかといえ、必ずしもそうではない。

鋼橋の設計を例に取れば、従来の限界状態設計法では、上部構造、支承、落橋防止構造、橋脚、アンカーボルト、および基礎構造に作用する外力が求めれば、これらの構造部材は、それぞれ別個に設計することが可能であった。しかしながら、弾塑性挙動が支配的となるレベル2の地震[日本道路協会，1996]による終局限界状態では、それぞれの部材に作用する地震外力が変化するため、これらの構造部材すべてを含む構造システムとしての限界状態は想定した状態と大きく異なると考えられる。つまり、現時点では、構造物全体の構造システムとしての限界状態を明確にできるだけの技術レベルに達していないということである。

一方、耐震性能を照査するための構造解析手法に注目すると、実際に近い終局限界状態を想定した設計を行うには、橋軸方向と橋軸直角方向との地震荷重を受ける2つの平面構造モデルを用いる従来の耐震設計法のみならず、実際的な地震外力が入力できる立体構造モデルを用いた動的弾塑性応答解析が必要になる。特に、薄肉鋼構造部材の終局強度は、最終的に、構成する補剛板パネルの局部座屈によって支配されることが多い[土木学会鋼構造新技術小委員会，1996]。したがって、終局限界状態付近の挙動を明らかにするためには、板要素の局部座屈と梁・柱の部材座屈、および橋梁の全体座屈との連成現象が精度よくシミュレートできる動的解析法の開発が不可欠となる。

さらに、基礎の側方移動、あるいは支承の崩壊などによって、地震力が作用している間に、構造系が設計時と大きく異なる場合も想定されるので、巨大な地震に対しては、機能を失っても、崩壊には至らない構造物を設計することも考慮に入れておく必要がある。その際には、従来に増して、支承部の耐震設計が重要となる。

以上の問題点をまとめると、

- ①鋼構造物（橋梁、タンク、パイプライン等）の構造全体システムを対象とした限界状態設計法の構築
- ②構造物、構造システム、部材要素、接合部の限界状態の明確化
- ③多層ラーメン等の不静定構造物の静的および動的弾塑性解析法の確立

④鋼材の低サイクル疲労破壊の照査方法の確立

⑤地盤や基礎構造の評価法とそのモデル化

付言するならば、耐震設計に関する分析的な研究については、諸機関で積極的に行われており、それらの成果は数多く発表されている。しかしながら、それらの要素技術を総合化する作業、つまり、耐震設計法へ昇華させる作業は緒についたばかりである。特に、今後耐震設計法と免震設計法・制震設計法との融合を考える場合、鋼構造物に対象を限定しない広い観点・視野からの限界状態設計法の構築が望まれる。具体的には、構造システムという観点から限界状態を考える必要がある。例えば、限界状態設計法を損傷許容(損傷制御)設計法と理解して、構造全体システムの耐震性能を確保するために必要な各要素の損傷量を合理的に決定し、構造システムとしての限界状態を考えることは今後の重要な検討課題の一つである。

6.3.2 部分係数法と確率論に基づく方法との比較

部分係数法においても、6.2.3 で述べたとおり、部分安全係数の設定では確率論がベースになっているので、確率論に基づく方法と言えるが、ここではISO2394で言う「部分係数法」と「確率論に基づく方法」とを安全性照査の観点から比較する。比較に当たっては、設計規準で規定する事項と設計者との役割分担を考慮して整理してみる。その結果を表-6.4.1に示す。

表-6.4.1を見て明らかのように、2つの設計法の作業内容の違いは、部分安全係数の設定と信頼性解析にある。安全性照査の精度の点で比較すると、信頼性解析の方が精度がよい。一方、設計実務の簡便さから言うと、部分係数法の方が設計者にとっては簡便と言えるだろう。ところで、部分係数法の簡便さは、信頼性解析との精度の差を補うほどのメリットがあるのだろうか。設計規準作成時には、6.2.3 で述べたように部分安全係数を設定するために信頼性解析を用いた多くの検討作業が必要になる。安全性照査の精度を高めようとする、構造種別を細分化して、それぞれの構造種別毎に部分安全係数のメニューを準備する必要がある。そうなると、設計者が行う部分安全係数の設定作業は煩雑化していくことになるだろう。実務的な部分安全係数の設定方法としては、日本建築学会の「限界状態設計法指針(案)」[日本建築学会, 1999]が参考になるが、土木構造物に適用する場合については検討が必要である。信頼性解析に関しては、例えば一般にFORM/SORMと呼ばれているプログラム[RCP, 1991]があり、ユーザーは限界状態関数を計算するサブルーチンとFORM/SORMをコールするメインプログラムを作成すれば、精度良く限界状態の生起確率を計算することができる。設計実務において、非線形解析等の複雑な解析が日常的に行われている現状を考えると、信頼性解析は決して複雑とは言えない解析に分類されると思われる。

以上のような状況を考えると、設計規準のフォーマットとして、「部分係数法」の方が「確率論に基づく方法」よりも相応しいとは必ずしも言えない。「部分係数法」の採用は、現在の国内外の設計規準との整合をとっているという意味合いが強く、将来「確率論に基づく方法」へ移行する過渡的な状況と捉えることもでき

る。

表 6.3.1 部分係数法と確率論に基づく方法における安全性照査作業の比較

| | 作業項目 | 部分係数法 | 確率論に基づく方法 |
|--------------|-------------|--|--|
| 設計 規 準 | 信頼性レベルの設定 | 目標安全性水準に応じた構造物係数 γ_i の設定方法を提示する。 | 目標安全性水準（許容生起確率または目標安全性指標）の設定方法を提示する。 |
| | 確率分布・統計量の設定 | 各基本変数の確率分布とその統計量を提示する。 | 各基本変数の確率分布とその統計量を提示する。 |
| | 部分安全係数の設定 | 各部分安全係数の設定方法を提示する。 | 不要 |
| | 安全性照査 | 部分安全係数形式の限界状態関数を提示する。 | 限界状態関数を提示する。 |
| 設計 者 | 信頼性レベルの設定 | 設計規準に示された方法に従って、構造物係数 γ_i を設定する。 | 設計規準に示された方法に従って、目標安全性水準を設定する。 |
| | 確率分布・統計量の設定 | 設計規準に示されたデータベースに基づいて、各基本変数の確率分布とその統計量を設定する。 | 設計規準に示されたデータベースに基づいて、各基本変数の確率分布とその統計量を設定する。 |
| | 部分安全係数の設定 | 設計規準に示された方法に従って、各部分安全係数を設定する。 | 不要 |
| | 安全性照査 | 部分安全係数形式の限界状態関数を計算するプログラムを作成する。限界状態関数の値と構造物係数 γ_i を用いて安全性照査をする。 | 限界状態の生起確率を計算するために、限界状態関数を計算するプログラムを作成する。生起確率 P_f あるいは信頼性指標 β を計算し、目標安全性水準との比較によって安全性照査をする。 |
| | 検討事項 | 設計実務で使いやすい簡便な部分安全係数設定方法を提示できるか？ また、その方法の精度はどれくらいか？ | 限界状態関数を計算するプログラムの作成および確率計算（信頼性解析）は、設計実務で対応できる程度の簡便な作業か？ |

次に表 6.3.1 に関連して考えなければならない点は、設計規準（作成者）と設計者との役割分担である。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ている。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、確保される安全性水準がばらつく危険性がある。前述したように、目標安全性水準ならびに部分安全係数も、その設定時に採用した前提条件に依存する値であるので、それらの条件を統一さ

せるような機能が設計規準には必要と考えられる。したがって、性能照査型設計においては、「発注者は要求性能を提示し、後は設計者の裁量に任される」ということにはならず、準拠する設計規準において必ず安全性確保の方法を明確にし、統一しておくことが重要であることを認識する必要がある。

6.3.3 将来展望と課題

限界状態設計法導入に関わる課題については、6.3.1 で概説したので、ここではその他の点について補足することとする。

(1) 安全性照査式

安全性照査式のフォーマットとしては、Eurocodes等の国内外の設計規準で採用されているように、部分安全係数形式が一般的である。「部分係数法」は、「確率論に基づく方法」に比べて実務上必ずしも優位な方法とは言えない(6.3.2)。それは、部分安全係数の設定も信頼性解析に基づいて行われるので(6.2.3)、作業の簡便さにそれほど差異がないし、安全性照査の精度は劣るからである。

ISO2394で併記されているように、将来は、安全性照査の方法は、「部分係数法」(信頼性設計法のレベルI)から「確率論に基づく方法」(信頼性設計法のレベルII, III)へ移行していくものと考えられる。この移行に当たっての課題としては、基本変数の統計量・確率分布の整備、荷重指針の制定が挙げられる(6.2.3)。

(2) 耐震設計法と情報開示

性能照査型の耐震設計法の考え方として、VISION 2000[SEAOC, 1995]の性能マトリックスがある。これは、再現期間(発生確率)に対応した地震動と構造物に要求される性能とをマトリックスで表現したものである。ISO2394の要求事項にある目標安全性水準の設定(6.2.2)とは、この性能マトリックスの各項(限界状態)に目標安全性水準(生起確率の許容値)を付与することに他ならない。したがって、耐震設計における安全性の水準は、①設計地震動の再現期間と②照査する限界状態の生起確率とによって表現されることになる。これら2項目は、構造物の耐震安全性を表示する項目として、一般市民にも情報開示していく必要があるだろう。構造物の耐震性能をどのように情報開示していくかは、経済の低成長時代における社会資本整備の観点からも、今後の大きな課題と言える。情報開示によって、公共性の高い土木構造物の安全性水準に対する社会的コンセンサスが醸成されていくだろうし、限界状態が発生した場合のリスクへの対応についても具体的な方策が整備されていくだろう。そこには、構造物の地震時リスクに対処するための債権化等の新規ビジネスも生まれつつある。このように、耐震設計法に関わる範囲は、今後益々拡大していくと考えられる。

参考文献

- [土木学会, 1999] 土木学会 ISO 対応特別委員会: 「ISO への対応」に関する第 2 回シンポジウム—ISO と CEN—講演資料集, 1999 年 11 月.
- [ISO, 1998] ISO/TC98/SC2: ISO2394. General Principles on Reliability for Structures, 1998 年 6 月.
- [土木学会, 1987] 土木学会鋼構造物設計指針小委員会: 鋼構造物設計指針(第 1 版), PART A 一般構造物, 土木学会, 1987 年 11 月.
- [土木学会, 1996] 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書(設計編), 1996 年 3 月.
- [土木学会, 1992] 土木学会鋼・コンクリート共通構造設計規準小委員会: 鋼構造とコンクリート構造の限界状態設計法に関する共通の原則, 土木学会論文集, No.450/I-20, pp.13-20, 1992 年 7 月.
- [土木学会, 1997] 土木学会鋼構造物設計指針小委員会: 鋼構造物設計指針(平成 9 年版), PART A 一般構造物, 1997 年 5 月.
- 「星谷ら, 1986」星谷勝, 石井清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986 年 5 月.
- [土木学会, 1988] 土木学会構造工学委員会・構造物安全性研究小委員会: 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, 1988 年 12 月.
- [日本道路協会, 1996] 日本道路協会: 道路橋示方書・V 耐震設計編, 丸善, 1996 年 12 月.
- [土木学会, 1996] 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計研究 WG: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996 年 7 月.
- 「日本建築学会, 1999」日本建築学会: 限界状態設計法指針(案), 1999 年 4 月.
- [RCP, 1991] RCP: STRUREL—A STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS PROGRAM, 1991 年.
- [SEAOC, 1995] Structural Engineers Association of California (SEAOC): VISION 2000 Performance Based Seismic Engineering of Buildings, 1995 年 4 月.