

限界状態設計法

Limit-states Design Method

齊藤 正忠*
Masatada Saito

要 約

本報文は、近い将来我国においても構造物設計法の主体になろうとしている限界状態設計法の基本理念について述べたものである。

内容的には、まず構造物の安全性を検証することの意味を述べ、次に安全性検証のための確率論的な強度、荷重の評価について述べている。最後に、安全性照査の方法としての限界状態設計法について、従来の許容応力度法との対比のもとに、その基本理念を述べている。

目 次

- § 1. まえがき
- § 2. 安全性の検証
- § 3. 確率論的手法による安全性の評価
 - 3-1 確率論的手法とその限界
 - 3-2 強度の評価
 - 3-3 荷重の評価
- § 4. 安全性・使用性照査の方法
 - 4-1 照査方法の分類と限界状態
 - 4-2 許容応力度設計法
 - 4-3 部分安全係数法
- § 5. あとがき

成果を踏えて制定されたものであるため、かなりの相違が生じている。我国においても、近く、この限界状態設計法への移行が予定されている。

Table—1 諸外国の限界状態設計法の導入状態
Application of limit-states design method in foreign countries

イギリス	1972年	コンクリート標準規程 (CP110) に採用
	1978年	橋梁示方書に採用
フランス	1973年	プレストレスコンクリート設計規準に採用
西ドイツ	1972年	コンクリート・鉄筋コンクリート構造物設計施工規準に採用
アメリカ	1971年	鉄筋コンクリート構造設計規準 (ACI 318-71) に採用
	1973年	道路橋標準示方書に採用
ソ 連	1962年	鉄筋コンクリート構造物設計規準に採用

§ 1 まえがき

許容応力度設計法は、構造物の設計法として長年使用され、工学的判断を加味した伝統的手法であった。しかし、この手法に内在する欠点を除去するため、半確率論的アプローチを加味した限界状態設計法が提案され、1950年ころからヨーロッパを中心に研究が進められてきた。この方法は、ソ連においては1955年にすでに実用に供せられ、また、西ヨーロッパにおいては1964年に CEB/FIP の勧告となり、これを契機として本格的な研究が開始され、1973年にはISOで採択された。

これまでの欧米諸国の限界状態設計法 (Limit State Design Method) の導入状態はTable-1 のようである。

上記各国の基本理念、設計法は、それぞれ独自の研究

§ 2 安全性の検証

あらゆる構造物において、機能性、経済性とならんで安全性が重要となる。土木構造物は、一般に公共的かつ大規模であり、その破壊は社会的影響が大きい。したがって、機能性、経済性をふまえた安全性は、とりわけ注意を払うことが要求される。

一般に、構造物またはその構成要素は、建設中および使用中に予想されるすべての外的作用に対して、所要の安全性を保持しなければならない。また正常に使用される間は、十分な機能を発揮するとともに、その耐用期間中を通じて十分な耐久性をもつように設計されなければ

*土木設計部設計課課長

ならない。具体的には、見積られた強度と荷重応答との間に、ある“距離”をおいて設計を行っている。この算定強度と荷重応答との比を通常“安全率”と呼んでいる。

しかし、土木構造物は、自然環境に建設され、他の構造物に比べて使用期間が少なくとも20年以上（一般的には50年程度）という長い年月を期待するものであるから、その間にはさまざまな種類の荷重を受け、その変動も激しい。また構造物自体の強度に関しても、土をはじめ力学的特性・強度のよくわからない材料を用いるので、多くの変動を考えざるを得ず、十分な安全性を確保するためには、構造設計の全般に対して、いろいろな形で関与してくる不確定要因をできるだけ明確にする必要がある。更には人為的に生み出されたり、技術の未熟によって生じる誤差もある。これらの不確定要因の主なものには次のように分類できる。

- (1) 強度に関するもの
 - 1) 使用構造材料の強度の統計的変動
 - 2) 品質管理、施工の良否に起因する強度の人為的変動
- (2) 荷重に関するもの
 - 1) 荷重の統計的変動
 - 2) 時代の変化に伴う変動
- (3) 設計に関するもの
 - 1) 設計荷重の理想化、単純化に伴う誤差
 - 2) 解析手法による誤差
 - 3) 設計作業中に介在する人為的誤差

したがって、単純に荷重作用 S 、部材強度 R とおいた場合、設計は $R > S$ を確保することであるが、上記の不確定要因が介在するために、確定的に安全性を照査することは困難である。問題を解決するための一つの方法は、統計確率的な手法で不確定要因の定量評価を行うことであり、現在行われている多くの研究は、確率的な考え方に基づく合理的な設計法の確立をめざしている。

§ 3 確率論的手法による安全性の評価

3-1 確率論的手法とその限界

安全率は、過去の経験に基づいて決められている場合がほとんどで、構造物の事故、災害が生ずると原因究明が行われ、必要があれば安全率の値は変えられてきた。このような状況をへて現在に至っている安全率の値が平外れになっているとは考えにくい。また、経験的に決められてきた安全率が通用するのが工学の世界であると割り切ることも可能であるが、その数値の根拠一例えば、なぜ1.5であって1.3ではいけないか等一を解明しようとするのもまた工学技術者としてごく自然なことであ

る。そこで、安全性を客観的尺度で表わそうとして導入されたのが、確率、統計的手法である。すなわち、安全性に關与するすべての不確定性要因は、確率法則に従うという前提のもとで安全性を評価する、いわゆる信頼性理論と呼ばれるものである。話をわかりやすくするためには、部材強度 R と荷重作用 S の2つの確率変数を考え、その差を確率変数 $Z = R - S$ とおき

$$Z > 0 \dots\dots\dots \text{安全}$$

$$Z \leq 0 \dots\dots\dots \text{破壊}$$

と定義したとき、

$$Z > 0 \text{ なる確率} \dots\dots\dots \text{信頼度 } P_R$$

$$Z \leq 0 \text{ なる確率} \dots\dots\dots \text{破壊確率 } P_F (1 - P_R)$$

と呼び、この P_R あるいは P_F を安全性の尺度とするのが信頼性理論の基本的な考え方である。

この方法は、理論的にはきわめて明快であるが、大きな問題点が二つある。一つは荷重や強度の分布形の選び方により算出される破壊確率が大きくなることがある。即ち通常の土木構造物の推定破壊確率は $P_F = 10^{-3} \sim 10^{-6}$ と非常に小さく、このような P_F は不確定要素の確率分布形の選び方により大きく異なってくる。しかも、通常入手できるデータ数は、強度、荷重ともに限られており、その分布形を信頼をもって必ずしも決定できない。いま一つには、変数の数が増えると、破壊確率は一般に数値積分によらなければならない、複雑な計算が要求されることになる。そのため、今のところ実際への適用は一般に行われていない。最も簡潔であり、実際への適用という面からの柔軟性を有する手法は、確率変数の最も代表的な統計値である平均値と、ばらつきの大さを示す分散値のみを用いる二次モーメント法 (β 法) であるといわれている。この方法は、破壊確率の代わりに安全性指標 (β) を用いて間接的に安全性を評価しようとするものである。構造物の安全性が確保されるのは $M = R - S > 0$ なる安全性の余裕が与えられるときであるとして、

$$\mu_M = \beta \cdot \sigma_M$$

を基本としている。

ただし、 μ_M : M の平均値

σ_M : M の標準偏差

また、安全性の余裕を $M = R / S > 1$ とすれば

$$\mu_{\ln M} = \beta \cdot \sigma_{\ln M}$$

を基本とすることもできる。

ただし、 $\mu_{\ln M}$: $\ln M$ の平均値

$\sigma_{\ln M}$: $\ln M$ の標準偏差

ここに β が大きな値ほど構造物の安全性の余裕が得られ

ることになる。また、部材強度 R と荷重作用 S が正規確率分布に従うときには、破壊確率 P_F と安全性指標 β は理論的にその対応が定まる。このように安全性に関する理論が発展してきたのは、安全性と対立関係にある経済性が一段と重視されるようになってきたことと、もう一つは構造解析技術の急速な発展の中に安全性だけが取り残されているように思われることによると思われる。そもそも信頼性理論と云うのは、構造物の強度・荷重が統計的にばらつくというところに基盤を置いているものである。しかし、それが全てと考えるのは誤りである。即ち、構造物というのは、設計・施工というきわめて人間的な行為を経て建設されるので、予期しない構造物の破壊は、むしろ、技術の未熟さによる要因や制御し難い人為的ミスによって生ずる場合が多く、単なる強度・荷重の変動の結果、生ずることは少ないと考えるべきである。それでは、構造物の真の安全性を求めるのに、上にあげた二つの要因を含めた形で信頼性解析を行えばよいわけであるが、実際には、これらの統計的ばらつきを調べるのは、きわめて困難であったり、事実上不可能な場合もある。従って、われわれが通常入手しうる比較的正常的な状況で得られる強度および荷重データに基づいて算出される破壊確率 P_F あるいは安全性指標 β は、安全性の一つの側面を映し出しているにすぎなく、構造物の真の安全性レベルを示すものではないという認識をもつ必要がある。

3-2 強度の評価

一定の安全性を確保したうえで構造物を設計するためには、構造物の強度を統計的な特性を含めて正確に評価することが、荷重と並んで重要なことはいまでもない。

構造物の強度は、本来の意味から言えば構造物自身の強度であり、構成物を構成する各種部材の強度ではない。ここでいう強度とは、構造物あるいは部材の耐荷力のほか、変位、変形（コンクリート構造物の場合は更にひびわれか加わる）などに対する抵抗を含むものであり、一般に次の要素により支配される。

- ① 構造物を構成する部材および接合部の強度
- ② 構造物の不静定度

構造物あるいは部材の強度は、一般に材料の力学的性質および構造物、部材の形状寸法によって規定される。したがって、強度の評価にあたっては、次のような不確定要素が存在する。

- ① 材料の力学的性質のばらつき
- ② 製作あるいは施工精度のばらつき
- ③ 強度解析上の仮定、近似

このうち、設計規準に規定される材料の力学的性質な

どの値は、その平均値をとるか、最低保証値としての規格値をとるか、これ以上下回ることが考えられない最低値をとるか、のいずれかが考えられる。また、同じく現在の設計基準の概念のもとでは、設計強度と設計荷重の具体的な形としては、構造物の強度が対象となる場合は少なく、構造物を構成する部材の断面力または応力等が選ばれるのが普通である。

3-3 荷重の評価

構造物に変形、応力を生じさせる原因となる作用を荷重と総称する。単一の構造物をとっても、これに作用する荷重の種類は多い。しかも、これらの荷重は、方向性や時間的・空間的変動特性が一般に異なっている。時間的変動特性に着目しても、Table-2 のようにさまざまなものがある。

Table-2 荷重の時間的変動による分類
Classification of actions according to their variation

1	死荷重のように常時作用して、しかも、その変動がきわめて小さい永久荷重
2	頻繁に作用するが、その大きさの変動が著しい活荷重
3	地震や衝突荷重のように、ほとんど瞬間的であるが、構造物の安全性をおびやかすような値をこくまれにとる偶発荷重
4	架設時荷重のように、ある特定の比較的短期間のみ作用する一時荷重

したがって、構造物の安全性・使用性の照査にあたって、これらの荷重が同時に作用する可能性、すなわち、荷重の組合わせをいかに規定するかが重要な問題である。一般に、設計において使用される組合わせのパターンは、Table-3 に示す3種類が基本になる。

Table-3 荷重組合せの基本パターン
Fundamental combination of loads

1	(支配的な変動荷重) + (永久的な荷重)
2	(支配的な変動荷重) + (永久的な荷重) + (組合わせが必要と考えられる他の荷重)
3	(支配的な偶発荷重) + (永久的な荷重) + (組合わせが必要と考えられる他の荷重)

構造物の耐用期間中に生ずる荷重の最大値が、通常構造物の安全性に重要な意味を持つ。したがって、設計荷重も耐用期間中に予想される荷重の最大値を念頭において決めるのが合理的である。ただし、この荷重は、安全性・使用性の水準と関連するので、社会・経済的影響にも配慮されなければならないのは当然のことである。

想定耐用期間は、特に重要な構造物や仮設構造物など特殊な場合を除き50年程度である場合が多い。50年とい

う長い期間中に生ずる荷重の最大値を推定することは、きわめて難しい。構造物の強度を調べる場合には、その気になれば、数多くの実験を行い、かなり短期間のうちにその特性を調べることができる。

ところが荷重の場合は、50年間の最大値を予測するためには、少くとも数十年という歳月をかけて測定するという地道な努力が必要である。地震・強風等の環境荷重をはじめとして種々の荷重は発生頻度、発生時点、継続時間、大きさなどの面で不確実性が高い。しかし、それでも、これまでの調査結果によれば、確率的に取り扱うことの妥当性は確められているし、また荷重を確率論的手法で処理することに対する合意もあると考えられている。

強度の場合は疲労などを除いて、時間的な変化を考えなくてすむからわかり易いが、刻々と変動するものもある荷重を確率論的に扱うのは一般に理解しにくい面がある。また、現在、まだ荷重を規程する根拠となる統計的資料が必ずしも十分でなく、今後の研究がまたれるというのが現状である。

§ 4 安全性・使用性照査の方法

4-1 照査方法の分類と限界状態

(1) 照査方法の分類

構造物の安全性・使用性の照査方法を規準様式の上から分類すると、Table-4 のように大別される。

Table-4 安全性・使用性照査方法の規準様式による分類
Classification of design criterial for safety and servability

I	確率論的取扱いが当面困難な不確定要素の影響を考慮するために、材料強度および荷重の規定値のそれぞれ、あるいは、いずれかに適用する安全係数を各限界状態*に対して指定することにより、安全性・使用性の望ましい水準を確保する方法
II	各限界状態*に対して、安全性指標 β がそれぞれ規定された所要の値 β_r 以上となるように設計を行う方法
III	各限界状態*に達する確率 ϕ がそれぞれ規定された許容値 p_a 以下になるように設計を行う方法

これらの規準様式は、いずれも先に述べた安全性の検証という目的を達成することをめざしている点では、共通しているが、照査の表現方法が異なる。〔II〕、〔III〕の規準様式は、一般の構造物に対してはまだ実用の段階に至っていない。したがって、特殊な場合を除き、設計規準として採用されるのは当面〔I〕の規準様式であるが、これは従来の規範をも包含する幅広いもので

ある。また、後述のように、〔II〕、〔III〕も規準様式〔I〕の安全係数を評価する過程において利用される概念である。

ここで在来の設計規準を含め、上述の〔I〕の規準様式を分類すればTable-5 のようになる。

Table-5 水準〔I〕の規準様式の分類
Classification of criterials according to Level〔I〕

安全係数の取り方による分類	①許容応力度法	材料強度にかかる安全係数を規定
	②荷重係数法	安全係数を荷重に乗ずる
	③部分安全係数法	強度・荷重それぞれに安全係数を課する
構造物のどの状態を対象とするかによる分類	①作用荷重設計法(応力)	弾性解析に基づいた許容応力度設計法はこれに対応する。
	②終局荷重設計法(強度)	安全係数の規定は、荷重係数法あるいは部分安全係数法の形式をとるのが普通である。
	③限界状態設計法	構造物の各種限界状態*に着眼して設計を行うもので、限界状態*の定義いかによって上記①、②をも包含する。

したがって、当面は部分安全係数方式による限界状態*設計法が、最も普遍的かつ一般的な規準体系となりうるものである。従来構造設計規準の主流を占めてきた許容応力度方式は部分安全係数方式の特殊な一形式ということができる。

(2) 限界状態*

構造物は、その強度が十分でなければ使用中に破壊する恐れがあり危険である。また、剛性が十分でなければ、通常の使用状態において、荷重作用によるたわみ、その他の変形が過大となり、使用上不便や不都合が生ずる。このように、構造物は、使用目的を安全にかつ経済的に達することができるため、その強度、剛性、耐久性などについて、それぞれの所要の条件を満足するものであることが必要である。

構造物または部材が、破壊その他によって荷重作用に耐えるという本来の機能をまったく失おうとする状態、荷重作用による変形(コンクリート構造物の場合は更にひびわれが加わる)が過大となり、通常の使用に対して不都合を生じようとする状態などを構造設計における限界状態という。限界状態は一般に終局限界状態と使用限界状態とに大別され、両状態はTable-6に示すように多くの限界状態に分類される。

通常、構造物の安全性・使用性の照査の対象とする限界状態は複数個存在する。しかし、実際には、主要な少数の限界状態に対して設計を行えば、他の限界状態については確かめずともおのづから達しないことが明らかである場合が多い。

*限界状態：4-1(2)参照

Table—6 限界状態
Limit-states

安定終局状態	構造物の全体または一部分が、滑動、転倒などにより安定を失おうとする限界の状態
終局 限界 状態	断面破壊の終局状態 部材断面の破壊が生じようとする限界の状態
崩壊機構の終局状態	不特定構造物が崩壊機構へ移行しようとする限界の状態
座屈の終局状態	座屈によって破壊が生じようとする限界の状態
疲労終局状態	繰り返し荷重により、疲労破壊が生じようとする限界の状態
変形終局状態	部材断面は破壊していないが、塑性変形が大きくなり限界状態を越えようとする状態
その他の終局状態	火災、爆発などによって構造物の破壊が生じようとする限界の状態その他
変形限界状態	変形が構造物の通常の使用に対して過大になろうとする限界の状態
使用 限界 状態	ひびわれ発生限界状態 ひびわれが発生しようとする限界の状態
ひびわれ幅限界状態	コンクリートのひびわれ幅が構造物の美観を害するか耐久性を損ねるおそれがある大きさになろうとする限界の状態
振動限界状態	荷重による構造物や部材の振動が、通常の使用に対して過大であるか、不安の念を抱かせるおそれがある大きさになろうとする限界の状態
損傷の限界状態	構造物に各種の原因による割れ、欠けなどの損傷が生じ、コンクリートの欠陥その他のため水密性を失うなどのためそのまま使用するのが不適当となる限界の状態

4—2 許容応力度設計法

本節では、理解を容易にするため鉄筋コンクリートを対象とした説明とする。

(1) 概説

鉄筋コンクリートの許容応力度設計法は、部材断面の平面保持の法則を仮定し、コンクリートの引張強度を無視（この仮定はせん断力の照査については適用されない）し、コンクリートおよび鉄筋のヤング係数が一定であるとして、鉄筋およびコンクリートの応力度を計算で求め、それらの値が、あらかじめ定められたそれぞれの限界値、すなわち許容応力度を越えないようにそれぞれの断面形状寸法、鉄筋の配置などを定める設計方法である。この設計計算の方法は、鉄筋およびコンクリートのヤング係数が、それぞれ一定であるとする仮定を用いて計算を行うことから、一般に弾性設計法とも呼ばれている。この設計計算では、前述のように、部材断面における鉄筋とコンクリートの応力度が、それぞれの許容応力度を越えないことを確認することによってその安全性を確認するのであるが、このような設計計算を行う目的は、荷重による部材断面の応力度を求めることにあるのではなく、部材断面が破壊に対して十分に安全であることを確認することにあるのである。

この設計方法では部材断面の破壊に対する安全は材料の破壊強度と許容応力度との比に相当する安全率その他によって、これを保証しようとしている。また許容応力度の大きさを適当に定めることによって、コンクリートのひびわれ幅や部材の変形が過大とならないように配慮して、構造物が耐久性を損ねたり、使用上の不都合を生じたりすることに対する安全を確保すると同時に、構造物の経済性を保証しようとしている。

(2) 特徴

コンクリートは本質的に非弾性で、引張りに対して強度が小さく、ひびわれが出やすい材料である。更に鉄筋コンクリートは鋼材とコンクリートを組み合わせて得られる複合材料で、その力学的な機構が複雑であるため、コンクリート構造物における応力や変形の状態を理論計算によって解くことは事実上困難である。そのため、設計計算の理論は、コンクリート構造物や部材の強度・耐久性に関する実験・研究を基礎として、設計計算の誤差、簡便さ、構造物の経済性と安全性などに関する実際的な判断のもとに、その体系が構成されている。したがって、設計にあたっては、理論計算に基づく計算結果のほかにも、実験、研究および施工、その他の実際上の配慮により定められた構造上の条件に関する基準に従うことが必要である。

この設計法では、各種の限界状態に対する安全性を直接明らかにすることはできないが、設計計算に用いるコンクリート、鉄筋の許容応力度を適当に定め、かつ構造上の細目に対して必要な措置を講ずれば比較的簡単な設計計算で、一般に各種の限界状態に対して十分安全な構造物を設計することができる。

(3) 問題点

部材の設計を行うには、本来、その断面の破壊に至るまでの各段階で示す力学的な性状を実験・研究によって十分明らかにし、終局強度を算定し、これが予想される荷重に対して十分余裕を有するかどうか検証することが必要である。

従来の許容応力度法においては、部材に生ずる応力度は、死荷重、活荷重等の組合わせ荷重による合成応力として求められ、 σ_y を部材の降伏強度とすれば、許容応力度設計法は次式で表わすことができる。

$$\sigma_u = \frac{\sigma_y}{\nu} Z (\sigma_D + \sigma_L)$$

上式から推察できるように、死荷重、活荷重のように異なる荷重による部材応力度 σ_D 、 σ_L は、左辺の部材強度に対し同一の安全係数 ν を用いており、個々の荷重に対しどの程度の安全率が付与されているか不明である。しかし、事実上死荷重の変動は活荷重より小さいため、それによる応力度の安全係数も当然異なってよいはずである。たとえば、道路橋の鉄筋コンクリート床版の設計の場合、断面力としては活荷重である T 荷重の影響が死荷重の影響に比べて圧倒的に大きいので、許容値と降伏点との比がそのまま T 荷重に対する安全率となる。そのため死荷重の影響の大きい一般の鉄筋

コンクリート部材に比べて活荷重に対する安全度が過小になる。これが一つの原因となって全国的な道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷に結び付き、その結果として鉄筋コンクリート床版の鉄筋の許容応力度を大幅に低減したことは記憶に新しい。

このように許容応力度設計法は、部材断面がどの程度まで安全の余裕をもっているか明らかでなく、所要の安全度を直接的に保証することができない。

4-3 部分安全係数法

構造物に作用する荷重作用と各部材の断面強度とは、前述のように、各種の原因によって変動しており、ある確率分布をなしていると考えられる。これらの変動のうち、調査、試験によって推定できるものについては、構造物の安全に及ぼすその危険側の影響を十分確実に排除するため、荷重と材料強度についてそれぞれ特性値が定義されている。しかし荷重作用の変動と断面強度の変動には、調査、試験によって推定することが困難な変動があり、またまれには異常な変動も起こりうると考えられる。そこで、これらの特性値を設計計算に用いることにしても、構造物の安全性を確保するには不十分である。したがって、部分安全係数法では、材料強度の特性値をさらに低減係数 γ_m によって除して小さい値とし、荷重作用の特性値に割増係数 γ_f を乗じて大きい値とするなどの方法によって設計計算に用いる材料強度および荷重作用の値を定義している。

(1) 材料強度の特性値 R_{mk}

材料強度は、その値が小さくなる方が構造物に危険側となるのが普通であるから、試料から推定できる材料強度の変動の中からなるべく小さい値を選び、これを設計計算において材料強度として用いるのが安全である。材料強度の分布は、一般に、その平均値 R_m と変動の大きさを表わす標準偏差 σ によってこれを表わすことができるので、材料強度の平均値 R_m より小さい任意の強度 R_k は、一般に次のように表わされる。

$$R_k = R_m - k \cdot \sigma$$

ここに R_m : 材料強度の母平均

R_k : R_m より小さい任意の材料強度

k : 材料強度 R が R_m より小さくなる確率に関する係数

σ : 材料強度の標準偏差

Fig-1 のように R_k の値を小さく選ぶほど、材料強度 R が R_k より小さくなる確率 p_0 は小さくなるので、 R_k を設計計算に用いる材料強度とすると、材料強度の変動が構造物の安全に及ぼす危険側の影響は、 R_k を小さい値に選ぶほど確実にこれを排除することができる。

コンクリート構造物の部分安全係数法においては、設計計算に用いるコンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏点として、つぎの式で表わされる特性強度 R_{mk} を定めている。

$$\begin{aligned} R_{mk} &= R_m (1 - k \cdot V) \\ &= R_m (1 - k \frac{\sigma}{R_m}) = R_m - k \cdot \sigma \\ &= R_m - 1.65 \sigma \end{aligned}$$

ここに R_m : コンクリートの圧縮強度または鉄筋の降伏点の平均値

$V = \frac{\sigma}{R_m}$: コンクリートの圧縮強度または鉄筋の降伏点の変動係数

k : $k = 1.65$ ($p_0 = \frac{1}{20}$ に対応する確率偏差)

σ : 標準偏差

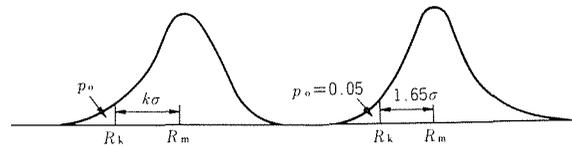


Fig-1(a) 材料強度の分布
Distribution of material strength

Fig-1(b) 材料強度の特性値
Characteristic value of material strength

(註) 平均値 m 、標準偏差値 σ の分布をしている品質において、平均値より標準偏差の k 倍だけ小さい品質を $x_0 = m - k\sigma$ とする。 x_0 未満の品質が生ずる確率 p_0 は品質の分布が正規分布をしている場合には、累積正規分布となり p_0 と k は次表の関係になる。

k	0.674	1	1.645	3
p_0	1/4	1/6	1/20	1/741

参考迄に鉄筋と板材について統計値の例を Table-7 に示す。

Table-7 鉄筋及び板材の統計値の例
Example of statistics for steel reinforcing bar and plate

	鉄筋(SD30)			板材(SS41)
	D16	D25	D32	$t = 9 \sim 16\text{mm}$
n ※	55	40	44	410
R_m kgf/mm ²	40.3	39.2	36.8	33.3
σ	2.44	0.98	1.37	3.5
$R_{mk} = R_m - 1.65 \sigma$	36.3	37.6	34.5	27.5

※ n : 母集団からの標本数 (抽出数)

鉄筋の降伏点は一般にJIS規格値を上まわっており、

JIS 規格値を特性値とすれば十分安全である。

(2) 荷重作用の特性値 Q_k

活荷重は一般にその値が大きい方が構造物に危険側の影響を与える(時として逆の場合もある)。したがって、変動する積載荷重については、一般に構造物に最も危険側の影響を与える荷重の大きさとして、なるべく大きい値を考える必要がある。

ある構造物に作用する変動積載荷重の特性値は、その構造物の耐用命数の期間に作用する最大荷重の分布から、なるべく大きい値を選び、その値によってこれを定義する。この最大値は、一つの構造物について、特定の変動積載荷重ごとに、一つずつ対応するものであるから、かりに、同じ目的で使用される同じ形式の数多くの構造物について、その最大値の全体からなる集合を考えると、この集合はある分布をなす。

この分布について、その平均値 Q_m を考えると、 Q_m は、その形式の構造物の耐用命数の期間中に、その変動積載荷重が1度だけこれを越える確率が1/2であるような大きさの値である。この場合、同じ使用目的をもつ同じ形式の構造物の集合ごとに定義され、ある変動積載荷重の特性値 Q_k は、最大荷重の分布によって、次のように表わされる。

$$Q_k = Q_m (1 + kV) = Q_m \left(1 + k \frac{\sigma}{Q_m}\right) = Q_m + k\sigma$$

ここに、 Q_m : 構造物の耐用命数の期間に作用する変動積載荷重の最大値が $\frac{1}{2}$ の確率で、これを越えて大きくなる値

V : 構造物の耐用命数の期間に作用する変動積載荷重の最大値の分布における変動係数 ($= \frac{\sigma}{Q_m}$)

σ : 標準偏差

k : $k = 1.65$ ($p_0 = 1/20$ に対応する確率偏差)

従来から構造物の設計において用いられてきた、いわゆる設計荷重は構造物の設計計算に用いる荷重で、道路橋・鉄道橋などの構造物にたいしては、それぞれの設計示方書や法規類で定められている。それらは、必ずしも上で述べた統計的な方法で定義されたものではないが、実際上の判断から、構造物が十分に安全に設計されるような相当に大きい値が定められている。それで、十分な統計資料によって荷重の特性値が定義されるまでは、法規や基準類で定められた設計荷重を荷重の特性値として取り扱えば、普通の場合、十分に

安全である。

(3) 材料強度を低減する部分安全係数 (材料強度の低減係数)

材料強度の設計計算値 f_d はつぎの式によって表わされる。

$$f_d = \frac{f_k^*}{\gamma_m}$$

ここに f_k : 材料強度の特性値

γ_m : 材料強度を低減する部分安全係数

係数 γ_m には、コンクリートの強度の安全係数 γ_c 、鋼材の降伏点の安全係数 γ_s などがある。この場合、部材断面強度の設計計算値は f_d の函数で表わされる。係数 γ_m は次項を考慮するものである。

- ① 材料強度または部材の強度が定義された特性値より危険側の値となる可能性
- ② 構造物の中にある材料または部材の強度と供試体によって求めた強度との間に差がある可能性
- ③ 構造物の中の材料または部材の強度が、施工方法や建造方法などにより局部的に低下する可能性
- ④ 施工の不確実さなどのため材料強度から部材の強度を求める場合に不明確さがある可能性

参考として、Table-8 にCEB/FIP に定めている鋼材とコンクリートの部分安全係数を示す。

Table—8 CEB/FIPの鋼材、コンクリートに対する部分安全係数
Partial safety factor of steel and concrete by CEB/FIP

	鋼材	コンクリート
終局限界状態	1.15	1.5
使用限界状態	1.0	1.0

(4) 荷重作用を割り増す部分安全係数 (荷重作用の割り増し係数)

荷重作用の設計計算値 F_d は、荷重作用の特性値 F_k と、荷重作用の安全係数 γ_f とによってつぎのように表わされる。

$$F_d = \Sigma \gamma_f \cdot F_k \text{ または } S(\gamma_f, F_k)$$

ここに、 γ_f : 荷重作用を割り増す部分安全係数

F_k : 荷重作用の特性値

この場合、 γ_f は三つの係数 $\gamma_{f1}, \gamma_{f2}, \gamma_{f3}$ (Table-9参照) の関数と考えられる。

※これまでの説明で使用した R_{mk} をここでは f_k に置き替えている。

Table—9 荷重作用を割り増す部分安全係数
Increasing partial safety factor under loading

γ_{f1}	荷重作用がその特性値より危険側の影響を構造物に与える可能性があることを考慮する係数
γ_{f2}	荷重の特性値の組合わせが実際にはあまり起らないことを考慮する係数
γ_{f3}	荷重作用の影響を求める解析の不正確さ、施工誤差、施工誤差が荷重作用の影響に及ぼす影響などを考慮する係数

Table—10 終局限界状態に対する荷重の割り増し係数
Increasing loading factor under ultimate states condition

①	$1.3 \times (\text{死荷重}) + 2.5 \times (\text{活荷重} + \text{衝撃})$
②	$1.0 \times (\text{死荷重}) + 2.5 \times (\text{活荷重} + \text{衝撃})$
③	$1.7 \times (\text{死荷重} + \text{活荷重} + \text{衝撃})$
④	$1.3 \times (\text{死荷重} + \text{地震の影響})$
⑤	$1.0 \times (\text{死荷重}) + 1.3 \times (\text{地震の影響})$

道路橋示方書・同解説「コンクリート橋編」（日本道路協会）によれば、終局限界状態における荷重の組合せおよび荷重の割り増し係数を Table-10 のように定めている。

§ 5 あとがき

以上、限界状態設計法の基本理念について、浅学をかえりみず紹介したが、これは参考文献の関係部分を若干わかり易く単にまとめ直したものである。

現場技術者が、この限界状態設計法について詳しい知識をもつ必要はないと思われるが、近い将来、現在の許容応力度法にとって変ることが予想される限界状態設計法について、その理念程度は知っておくのも必要なことと思われる。

本文が、このことに少しでも助けになれば幸いである。

参考文献

- 1) 不確実性の定式化と分析 ①構造設計 星谷勝, 林国安 土木学会誌 1980-9
- 2) 不確実性における評価の問題 ②安全率の考え方 藤野陽三 長谷川彰夫 土木学会誌 1980-9
- 3) 安全性照査のための構造設計基準 構造工学委員会 構造物安全性小委員会 土木学会誌 1980-9
- 4) コンクリート工学(II)設計 後藤幸正, 尾坂芳夫, 三浦尚 彰国社