

第15回 部分係数の設定

原 隆史*

1. 性能設計と部分係数設計法

1.1 性能設計と信頼性設計

1998年に閣議決定された「規制緩和推進3ヵ年計画」にはじまる国家施策において、設計基準の性能設計化が促進されるとともに、折しも1995年の兵庫県南部地震により構造物が大打撃を受けたことから、新たな設計体系の構築が必要不可欠な時期であったこともあり、性能設計の考え方が一躍普及した。このため、現在ではほぼすべての設計基準で性能が定義され、設計状況とそれ際の構造物の特性から必要に応じて損傷を許容しつつ、設計対象構造物の重要性や利用目的に応じて損傷を制御するといった「性能設計」が一般に行われている。この経緯のもと、読者の方々は現在においても性能設計を実践していると考えているに違いない。これに対し、本連載講座「基礎構造物の性能設計」において、信頼性設計に関する解説が多く登場し、今回の講座でも部分係数設計法とここで用いられる部分係数の設定が解説され、「現在安全率を用いて実施している設計は性能設計ではないのか」と疑問を持たれている方がいるのではないかと考える。また、性能設計に関する話の中で、性能設計という用語とともに「限界状態設計」や「信頼性設計」という用語が同じように用いられており、このことに戸惑っている方も少なくないと思う。

そこで、今回の講座で信頼性設計の1つである部分係数設計法とここで用いられる部分係数の設定を解説するに当たり、今一度この点を整理する。

「規制緩和推進3ヵ年計画」に始まる設計基準の性能設計化では、設計に関わる世界標準の1つであるISO 2394¹⁾に準拠することが念頭におかれている。ここでは、構造物は設計状況に応じて目標とする信頼性で限界状態を満足することが規定されており、わが国の性能設計基準も最終的にはこれを目指している。これまででは、迫り来る大規模地震に対し新たな設計体系の構築が急がれたこと、信頼性に基づく検討の準備が不十分だったことなどから、わが国の基準は現在の進捗経緯をとってきた。しかしながら、例えばAASHTO-LRFD²⁾（北米）やEC³⁾（欧州）などの海外基準ではすでにこの形態に移行しており、我が国の基準も現在はこのための改定に取り組んでいる。港湾基準⁴⁾ではいち早く信頼性を取り入れて2007年に改定発刊され、我が国で最も用いられている道路橋示方書も、信頼性に基づいた基準とすべく改定に取り組んでいる例⁵⁾。このように我が国の基準は、現在信頼性に基づく基準化への改定の只中にあるため、信頼性に基づく限界状態設計や信頼性設計が性能設計と

同義で用いられるゆえんであり、本誌連載講座においても信頼性について詳しく解説する理由でもある。

1.2 信頼性設計と部分係数設計法

ISO2394で示される信頼性設計には以下の3つの手法がある。

- ①信頼性設計レベルⅢ：直接破壊確率を求める方法
- ②信頼性設計レベルⅡ：信頼性指標から破壊確率を求める方法
- ③信頼性設計レベルⅠ：部分係数設計法

ここで、①の手法は最も汎用性の高い設計法であり、例えば図-1に示す荷重と抵抗のばらつきを考えた場合、モンテカルロ・シミュレーション（以下、MCSと称）により、各ばらつき（確率変数）に応じて破壊確率を直接求める手法である。②の手法は、これまで最も多く用いられてきた信頼性設計法であり、図-1において荷重と抵抗のそれぞれのばらつきが正規分布とした場合に、それぞれのばらつきの平均値が平均的な標準偏差の何倍離れているかで定義される信頼性指標（ β ）を求め、正規確率関数から破壊確率を求める手法である。

一方、③の手法、すなわち今回の講座で対象とする部分係数設計法とは、設計対象構造物がよく設計される構造物であり、標準的な対象構造物を設計する場合の荷重や抵抗のばらつきが比較的既知である場合、事前に①や②の信頼性設計を行い、目標とする信頼性を確保できる、荷重を増加したり抵抗を減じたりする係数を設定し、設計実務ではこれらの係数を用いて設計することで、目標とする信頼性を確保した構造物を設計する方法である。設計のたびに複雑な信頼性解析を行う必要がないので、標準的な構造物の設計を対象とした設計基準に最も多く適用される手法である。本講座では、この部分係数設計法で用いられる部分係数の設定方法を解説する。

なお、設計基準の中には、信頼性解析によらず、これまでの実績や経験などにより部分係数を設定しているものもあるが、ここではそのような部分係数は対象としない。

1.3 ここで対象とする部分係数設計法

部分係数設計法には、材料係数法と抵抗係数法という

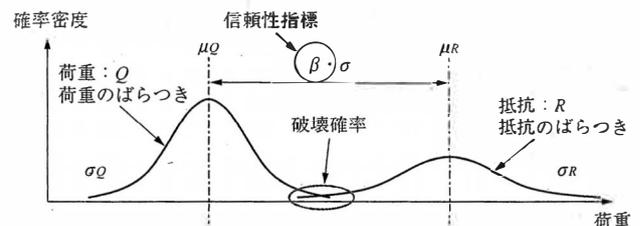


図-1 荷重・抵抗・破壊確率と信頼性指標

2つのアプローチがある。

材料係数法とは、式(1)に照査式を示すが、材料係数を地盤パラメータの特性値に直接乗じ、ここから得られる値を設計値として計算モデルに代入して構造物の抵抗を求め、これを荷重と比較して照査を行うものである。ただし、必要に応じて材料係数のほかにモデル化誤差などの別の部分係数を付加することもある。

$$\gamma_{RR}(\gamma_{xk}x_k) \geq \sum_j \gamma_{Sj}S_j(\gamma_{sk}x_k) \dots\dots\dots(1)$$

- ここに、
- x_k : 基本変数の特性値
- R, S_j : 抵抗と荷重の計算式
- γ_{xk} : 材料係数
- γ_{Sj} : 荷重係数
- γ_R : モデル化誤差などの係数

一方、抵抗係数法とは式(2)の照査式に示すとおり、地盤パラメータの特性値をそのまま設計計算式に代入し、得られた抵抗を抵抗係数で低減して安全余裕を確保するものである。この方法は、一般に荷重抵抗係数法(LRFD)として知られている。

$$\phi R(x_k) \geq \sum_j \gamma_{Sj}S_j(x_k) \dots\dots\dots(2)$$

- ここに、
- ϕ : 抵抗係数

これらのうち材料係数法は、低減した特性値で抵抗を計算するため、特に抵抗が非線形性を有する場合に、あり得ない挙動で照査することにもなりかねず、設計者が混乱することも懸念される。基礎の設計においては、非線形な地盤を取り扱うため、このようなケースが多いと考えられ、抵抗係数アプローチの採用が望ましいと考えられている。

そこで本講座では、抵抗係数アプローチによる荷重抵抗係数法を対象として、部分係数の設定について解説する。

2. 部分係数の設定

2.1 設定手順

先に解説したとおり、部分係数設計法における部分係数は信頼性設計レベルⅢやⅡから設定する。このため、部分係数設定の第一段階は目標信頼性を設定することであり、目標信頼性を満足するよう荷重係数や抵抗係数を設定することとなる。次に荷重と抵抗のそれぞれの係数については、両方を同時に考慮して設定するといった意見もあるが、設定が煩雑となり実用性の観点で難がある。そこで本講座では、AASHTO-LRFDにおける部分係数設定⁶⁾でも行われている、最初に荷重係数を設定し、その後目標信頼性を満足するように抵抗係数を設定する実用的な設定方法を解説する。

2.2 目標信頼性の設定

信頼性に基づいた設計基準の改定に当たっては、最初にそれまでの基準で設計された構造物が適切なものかどうかを評価する必要がある。これが適切であると判断された場合には、現行基準で設計される構造物の信頼性を

求め、その結果に基づいて目標信頼性を設定するケースが多い。わが国の多くの基準も、この方法により設定すると考える。ここで、目標信頼性は構造物として統一された値とすることが望ましいが、現行基準で設計された構造物が適切なものだった場合には、構造物に応じて異なった信頼性が推定されると考えられるため現実的ではない。このため、現時点での設計基準の改定における目標信頼性は、構造物の種類や設計条件などに応じて異なるものとなることはやむを得ないと考えられる。

なお、目標信頼性は信頼性設計レベルⅡで用いられる信頼性指標で表現されるケースが多い。

2.3 荷重係数の設定

前号において、荷重の組み合わせについて荷重シミュレーションを用いる方法について述べたが、ここではその続きとしての荷重の組み合わせと各荷重の部分係数(荷重係数)の設定について解説する。

ここではその設定例として、荷重シミュレーションで得られた、基礎の照査項目と照査の着目点ごとの設計供用期間における応答の最大値分布から代表値を抽出し、現行基準の荷重で算出される応答値との比較から荷重係数を仮決めした後、最終的に収斂して設定する方法を示す。この際、応答最大値分布の代表値として、ばらつきの比較的小さな荷重の組み合わせでは、ISO2394のベースライン法によれば、非超過確率95%近傍の応答を抽出するのがよいとされている。ただし、地震のようにばらつきの大きな荷重との組み合わせの場合には、再現期間との関連から平均値近傍から抽出することが多い。

荷重係数の仮決めでは、応答の代表値と現行基準による応答の差が小さい場合(例えば10%以内)には、式(3)から荷重の組み合わせを構成する各荷重の荷重係数を設定する。

$$\gamma_{Sj} = S_{js}/S_{j0} \dots\dots\dots(3)$$

- ここに、
- S_{js} : 荷重シミュレーションで得られた最大応答値分布代表値(組み合わせ)におけるある荷重の強度
- S_{j0} : 対象荷重の基本値

なお、応答の代表値と現行基準による応答の差が大きい場合には、抽出された荷重の組み合わせの傾向や妥当性などの検討を行い、その採用について検討しなければならない。

次に荷重の組み合わせと荷重係数の収斂とは、最大値分布から目標とする非超過確率近傍の応答標本を抽出すると、荷重組み合わせケースは非常に多くなるため、この中から照査を行うべき荷重の組み合わせと荷重係数を最終的に設定する作業をいう。

一般に荷重の組み合わせや荷重係数の収斂では、Turkstraの方法⁷⁾が用いられるケースが多い。Turkstraの方法とは、各荷重の最大値を組み合わせるのは過渡に安全側であることから提案されたものであり、その概念は式(4)のとおりである。すなわち、荷重の組み合わせを代表する荷重は

最大値を用い、それ以外の荷重は実際の状況を勘案して低減した荷重と組み合わせるといものである。

この手法による荷重の組み合わせは、各作用 S_i が実際に組み合わせられた状況に直接的に基づいたものではない。しかしながら、従来の基準のように主荷重と従荷重を区分し、それを組み合わせるとい考え方に親和的であるとともに、信頼性に基づく設計法に関する多くの研究に用いられている。

$$S_{\#} \cong \max S_i + \sum S_j^* \dots \dots \dots (4)$$

$j = \dots, i-1, i+1, \dots, n$

ここに、

S_d : 設計荷重組み合わせ

S_j^* : 任意の時刻の作用

$\max S_i$: 設計供用期間中の S の最大値

荷重シミュレーションを用いた手法でも基本的にはこの考え方による。しかしながら、荷重シミュレーションでは代表的な荷重の組み合わせを抽出し、各荷重の荷重係数を仮決めしているの、Turkstraの方法のコンセプトを活かしつつ、 $\max S_i$ や S_j^* の決定と収斂方法を例えば次のように行い、先に抽出した荷重の組み合わせと荷重係数を収斂する。

- ① 荷重係数を小数点以下1桁に丸める。
- ② 代表的な荷重やその組み合わせに対し、対象荷重以外の荷重係数が0.1未満となっている応答値を抽出する。
- ③ 全応答値の代表値の中で、代表的な荷重の最大の荷重係数が現れたときの応答値を抽出する。
- ④ 各荷重組み合わせにおけるそれぞれの作用の荷重係数の取りうる範囲について、代表的な荷重組み合わせを特定するという観点から、最大値と最小値を除外する。
- ⑤ 数値の丸め方として、基本的には平均あるいは中央値とするが、状況を説明するうえで荷重係数に幅をもたせた方がよい荷重については、最大値と最小値の幅を持って丸める。

このような収斂を行うことで、実際に起こりうる荷重の組み合わせと従来の考え方と大きく異なる荷重係数を設定することができる。

2.4 抵抗係数の設定

荷重係数が先に設定されれば、目標信頼性に対し信頼性解析から抵抗係数を設定することができる。

信頼性解析として、10月号で解説した簡易な概算法を用いる場合で、性能関数が式(5)や(6)で表されるとき、荷重と抵抗の両方が標準正規分布の場合は式(7)、対数正規分布の場合は式(8)で信頼性指標を求め、目標信頼性指標を満足する抵抗係数を設定できる。

$$g = R - S = \phi R_n - \gamma S_n > 0 \dots \dots \dots (5)$$

$$g = R/S = \phi R_n / \gamma S_n > 1 \dots \dots \dots (6)$$

$$\beta = \frac{(\gamma/\phi)\lambda_R - \lambda_S}{\sqrt{[COV_R(\gamma/\phi)\lambda_R]^2 + (COV_S\lambda_S)^2}} \dots \dots \dots (7)$$

$$\beta = \frac{LN \left[\frac{\gamma \cdot \lambda_R}{\phi \cdot \lambda_S} \sqrt{(1 + COV_S^2)/(1 + COV_R^2)} \right]}{\sqrt{LN [(1 + COV_S^2)/(1 + COV_R^2)]}} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、

R, S : 抵抗と荷重

R_n, S_n : 抵抗と荷重の特性値

ϕ : 抵抗係数

γ : 荷重係数

λ_R, λ_S : 抵抗と荷重のバイアス係数 (バイアスが
ない場合は1),

COV_R, COV_S : 抵抗と荷重の変動係数

また、MCSにより厳密な計算が必要なときは、10月号で解説したMCSの計算方法により信頼性指標を求め、目標信頼性指標を満足する抵抗係数を設定すればよい。

3. おわりに

ここでは、信頼性設計レベルIの部分係数設計法で用いる部分係数の設定について、抵抗係数アプローチによる荷重抵抗係数法を例に解説した。

部分係数設計法によれば、標準的な構造物に対し、複雑な信頼性の計算をすることなく、設計者はこれまでと同様な設計計算により、目標信頼性を満足する構造物の設計が可能となる。しかしながら、ここで解説した抵抗係数の設定は、あらかじめ抵抗のバイアスやばらつきが既知である場合を対象としている。すなわち、現在までによく用いられている構造物とその施工法などが対象となっており、新技術や最新の研究成果を用いる場合、あるいは地盤などの調査を入念に行うなどといった状況では、ここで設定した係数は適用外となることに留意しなければならない。

新技術や最新の研究成果などの活用から合理的な設計を目指す場合には、対象となるデータを用いて別途信頼性設計レベルIIIやIIの方法により、対象構造物が目標信頼性を満足することを照査する必要があることを最後に付け加えておく。

参考文献

- 1) International Organization for Standardization : General principle on reliability for structures (ISO2394, 現在改訂中), 1998.
- 2) American Association of State Highway and Transportation Officials : AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, SI Units 4th Edition, 2007.
- 3) European Committee for Standardization : Eurocode-Basis of Structural design (EN1990), 2002.
- 4) 日本港湾協会 : 港湾構造物の技術上の基準・同解説, 2007.
- 5) 玉越隆史 : 道路橋示方書の性能規定化と今後の展望, 土木学会誌, Vol. 98, No. 3, pp. 28~29, 2013.
- 6) Tony M. Allen, Andrzej S. Nowak & Richard J. Bathurst : Calibration to Determine Load and Resistance Factors for Geotechnical and Structural Design, 2005.
- 7) C.J Turkstra : Theory of structural design decisions (SM study/University of Waterloo. Solid Mechanics Division), 1970.