

1 はじめに

一般に建設(土木・建築)分野における構造物の設計・施工、維持管理には、種々の不確実性が考慮されている。これら不確実性に確率・統計を援用して対処する信頼性工学は、コンピュータの発展に伴って実用段階にきた。設計法体系では、限界状態を超過する確率で安全性余裕を規定しようとする信頼性設計^{1),2)}、施工管理³⁾では品質管理手法として数々の統計手法、維持・補修^{4),5)}などを考慮したライフ・サイクル・コストなど多くの分野に信頼性工学が適用されている。ここでは、構造物の信頼性設計、施行管理、維持管理に信頼性工学を応用した事例の概略を紹介する。

2 構造物の信頼性設計

2.1 設計法体系 建設分野における設計とは、正確に予知できない不確実な事象のもとで、構造物を建設するための意思決定問題と捉えることができる。従来からの安全率を用いた設計法は、伝統に裏打ちされ、膨大な実績をもつ極めて優れた方法であるが、安全率が絶対的な尺度ではないという問題点が指摘されている。このような背景から、「確率論に基づいた限界状態設計法」である信頼性設計法と呼ばれる方法が開発された。この設計法は⁶⁾、荷重や抵抗力に関する入力パラメータを、不確実性を記述できる確率変数として捉え、構造物の信頼性を定量的に求めようとするものである。

1980年代以降、欧米では安全率に基づいた許容応力度設計法から、部分係数を用いた限界状態設計法への移行をはじめてきた。初期の時点では、部分係数は安全率を考慮しながら経験的に決定されていたことが多かったが、近年になって、信頼性理論に基づいたキャリブレーションが進められてきた。1990年代に入り、社会的・経済的な制約を受ける土木・建築の構造物に対して、安全性や使用性といった性能を基本的な原則として、国際的に工学的共通概念として共有することが市場の国際化に伴ってより重要なこととなってきた⁸⁾。加えて、度重なる地震災害に対して、もはや従来の設計法では対処できなくなり、想定する地震の大きさに対応した性能表示をせざるを得なくなってきた。このような動向から、日本でも建築基準法が改定され、道路橋示方書をはじめとする土木構造物の設計にも「性能設計法」を意識した改定が進められている^{8),9)}。

2.2 矢板式係船岸の部分係数法 現在、港湾構造物の設計法を部分係数による限界状態設計法へ移行する作業が進められている。ここでは、矢板式係船岸の設計を対象とし、荷重側と抵抗側の両方に作用する地盤特有の課題をもつ部分係数の適用性の検討を紹介する²⁾。最初に不確実性が大きい地盤パラメータの不確実性を考慮して、既設の矢板係船岸を対象とした信頼性評価を実施し、現行設計基準が有する信頼性水準を把握するとともに、同時に地盤パラメータの感度係数も算

定する。これらの結果を考慮して、部分係数形式の検討および感度係数を用いた設計値に基づく方法により部分係数の設定を行う。最後に、設定された部分係数を用いて設計された断面を、従来の方法で設計された断面と比較することにより、新しく設定した部分係数法の適用性を検討した。実務的な設計照査式を作成するときには、部分係数をもう少しまるめる必要があるが、ここでは感度係数の設定におけるばらつきを部分係数に直接に反映させてその影響を検討するため、算定された値を用いて既設構造物の試設計を行った。試設計から決定された断面の信頼性指標 β_{new} の結果から、どの信頼性指標 β_{new} も、多少ばらつきはあるものの目標信頼性指標 β_t に近いことから、ほぼ一定の信頼性をもつ断面が設定されていることがわかった。

3 施工管理と品質管理への応用

設計段階で考慮されない不確実性は、施工段階で品質管理として考慮することになる³⁾。ここでは、ばらつきが大きく、しかも少ない標本数しか得られないときの品質管理として特性値設定の考え方を紹介する。標本数が無限にあり、これが母集団であれば、材料物性値 X の確率密度関数が確定していることになる。このとき、特性値 x_k は、母集団の統計パラメータを用いて、フラクタイル値として定義されることが一般的である。式で表すと $x_k = \mu - k\sigma$ のようになる。ここで、 μ は X の平均値、 σ は X の標準偏差、 k は選択された確率水準に応じた係数である。特性値 x_k を超過する確率を p とすると、 X が正規分布に従えば、 $k = Z_p = \Phi^{-1}(1-p)$ となる。標本数が無限大であれば、母集団の確率分布が確定できるが、少数であれば標本から母集団の確率分布を推定するときに統計的不確実性を考慮しなければならない。標本から母平均 μ を推定するとき、標本平均の分布は、母分散 σ^2 が既知であれば、 X が正規分布 $N(\mu, \sigma)$ に従うと、 $\bar{X}$ は $N(\mu, \sigma/\sqrt{n})$ となる。

本質的不確実性と統計的不確実性を同時に扱うためには、超過確率と信頼水準の2つの確率を設定する必要がある。次に、下限値を考慮した特性値を定義する。 X を正規分布として、片側 p の確率を考える。

母分散 σ^2 が既知のとき、母平均 μ の下側 α (信頼水準 $1-\alpha$)の信頼区間を考慮すると、平均値の下限値を μ_a は次式となる。

$$\mu_a = \bar{x} - \frac{Z_\alpha \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

ここで、 Z_α は標準正規分布の逆関数 $\Phi^{-1}(1-\alpha)$ を表したものである。ここで、下側 p の超過確率となるフラクタイル値を特性値 x_k とすると、 $x_k = \mu - Z_p\sigma$ で表現できる。ところが、統計的不確実性のために μ は未知であるから μ_a を用いる。

よって、特性値を $x_k = \bar{x} - k_\sigma\sigma$ とすれば、 k_σ を下側 p のフラクタイル値を信頼水準 $1-\alpha$ で設定するためには、次式で設定すればよい。

$$k_{\sigma} = Z_p + \frac{Z_{\alpha}}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

また、母分散 σ^2 が未知のときに、特性値を $x_k = x - k_s s$ とすると、同様に k_s を下側 p のフラクタイル値を信頼水準 $1-\alpha$ で設定するためには、次式で設定すればよい。

$$k_s = Z_p + \frac{t_{\alpha}(n-1)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

ここで、 s は標本標準偏差である。

このように、少ない標本数から品質管理するときは、統計的不確定性を考慮することができることを示した。

4 維持管理とLCCへの応用

揚炭棧橋の鋼管杭は、腐食による板厚減少などにより耐荷力が低下する。さらに波浪による繰り返し荷重によって疲労き裂が発生し部材抵抗の減少を生じ、大規模な損傷を生じる可能性がある。そこで、波浪荷重による発生応力を定量的に評価し、信頼性理論による期待総費用を用いて検査計画の最適化をはかることを試みた⁴⁾。

ここでは、疲労による劣化の進展をマルコフ連鎖モデルにより表わされている。推移確率行列 $\mathbf{P}$ はUnit Step B-modelを用い、 p_i を状態 i にいたものが単位時間経過後も状態 i に留まる確率、 q_i は状態 $i+1$ に推移する確率として、 $r_i = p_i/q_i$ が一定のモデルとした。また、疲労の進展過程を b_1 段階の発生過程と b_2 段階の伝播過程に離散化し、 (b_1+b_2-1) 行からなる1つの遷移確率行列に組み込む。

次に、き裂の発生寿命 N_c はS-N線図の直線から求められる。き裂の伝播寿命はパリズ則を用い、き裂幅が a_0 から a に進展するまでにかかる時間をき裂伝播寿命 N_p として定義する。ただし、これらは材料の性質から決まるパラメータの関数である。また、構造物に作用する応力範囲 $\Delta\sigma$ は、レイリー分布を仮定する。 N_c と N_p の平均と分散を、マルコフモデルの寿命の平均と分散 $E[T] = (b-1)(1-r)$ 、 $Var[T] = (b-1)(1+r)$ に代入し、き裂発生、伝播寿命についてそれぞれ連立方程式を解けば、遷移確率行列 $\mathbf{P}$ が決められる。

疲労過程の途中から、破壊事象が発生する可能性を考える。状態 i にいたものが単位時間経過後に破壊事象に推移する確率を S_i とおくと、破壊確率 S_i を1から引いた残りが r の割合で推移すると考えることができる。破壊確率のベクトルを遷移確率行列の (b_1+b_2) 列に組み込み、破壊事象への遷移を考慮したマルコフ連鎖モデルを作成する。曲げ荷重が鋼管に作用している状態を考え、継ぎ手に発生する破壊事象として塑性崩壊によるもの($l=1$)とき裂破壊によるもの($l=2$)を考え、各破壊を生じる曲げモーメント M_l を求める。鋼管に曲げモーメント M_0 が作用していれば、各破壊モード l の生起確率は $(P_l)_i = P(M_l - M_0 < 0)$ のように定義される。

波浪条件として、その発生確率と平均周期から1次ガウス近似法により破壊の生起確率を算定する。これらから、単位時間長さ t における各破壊モードの生起確率 S_l が算定でき、さらに2つの破壊事象を独立であると仮定すると、すべての破壊の生起確率 S は容易に算定できる。このように各状態 i について求められた破壊確率 S を遷移確率行列中の S_i とする。

モデルを簡単にするため、各部材は統計的に同じ強さをも

ち、同じ荷重状態に置かれているものとする。さらに、検査によってき裂が発見できたときは補修を行い、補修された部材は完全に初期状態に戻る(完全補修モデル)とする。すると、時点 n での検査後の状態確率ベクトル $A(n)$ の要素 $a'_i(n)$ ($i=1, b$)は次式のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} a'_i(n) &= a_i(n) \times \{1.0 - E_i\} \quad i = 2, 3, \dots, b-1 \\ a'_1(n) &= 1.0 - \sum_{i=2}^{b-1} a'_i(n), \quad a'_b(n) = 0.0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 E_i はき裂発見確率を表わし、き裂深さ x_i と検出可能な最小き裂深さ x_0 にしたがって $E_i = 1 - \exp[-d(x_i - x_0)]$ のように仮定した。ある時点 n において発見され補修を受けるき裂の割合は、補修率 $P_D = \sum a_i(n) \times E_i$ で表わされる。

ある検査時点 n において必要となる費用は、それまでに行われた各回の検査で累積された費用と、その時点における部材破壊による損失費の期待値の和と考えることができる。また、 k 回目の検査時において部材 j に対する費用 C_{kj} は、検査にかかる費用 C_I と発見された損傷を補修する費用 C_R の合計として $C_{kj} = (C_I + P_D \times C_R)_{k,j}$ のように表わされる。また、検査のためのシステムダウンによる損失費は考えていないと、部材破壊による損失費は $C_F(n) = \sum_j (P_j \times C_F)_j$ となる。ここで、 C_F は破壊時損失費、 P_j は各部材 j の破壊確率である。以上の結果から、ある期間 $(n, n+\Delta t)$ の期待総費用は、次式のように求めることができる。

$$C_T(n, n+\Delta t) = \sum_j \left[\sum_{k=1}^{n/\Delta t} (C_I + P_D \times C_R)_{k,j} + (P_j \times C_F)_j \right] \quad (5)$$

すなわち、このようにライフサイクルを考慮した費用を算定することにより、検査時期の最適化などへ適用できる。

5 おわりに

現在、建築構造物に関する設計基準、鉄道橋、道路橋、港湾構造物等の設計基準が信頼性理論に基づいた限界状態設計基準への移行が行なわれている。しかし、設計基準の書き換えは実施されても実務レベルで信頼性設計を行うようにするためには、荷重や強度の確率モデルの整備、簡易的で効率的な信頼性設計システムの開発が不可欠である。これらについては今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 白木渡, 井面仁志, 堂垣正博, 石川浩, 材料, 51, 80 (2002).
- 2) 井面仁志, 白木渡, 堂垣正博, 石川浩, 材料, 53, 76 (2004).
- 3) 鈴木誠, 辻岡信也, 菊池喜昭, 山本修司, 石井清, 土木学会論文集, 702/III-58, 401 (2002).
- 4) 鈴木誠, 日本材料学会学術講演会, 51, 369 (2002).
- 5) 氏家久芳, 佐々木明, 稲田裕, 鈴木誠, 海岸工学論文集, 39, 1071 (1992).
- 6) 井面仁志, 白木渡, 今井慈郎, 神余宏之, 材料, 52, 40 (2003).
- 7) 星谷勝, 石井清, "構造物の信頼性設計法", (1995) 鹿島出版.
- 8) ISO, "ISO 2394: General principles on reliability for structures" (1998).
- 9) 藤谷秀雄, 土木学会誌, 83, 36 (1998).
- 10) 日本鋼構協会編, "土木構造物の性能設計ガイドライン テクニカルレポート No. 49 (2001).