

信頼性設計による性能明示型設計のリスク分担分析 (その2: 各種の確率分布に対する理論の適用)

中央大学 学生会員 遠藤 基織 中央大学 学生会員 原本 隆一
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. 研究の目的

性能設計には、いくつかのパターンがあるがこのうち図-1の耐震性能マトリクスを用いる方法がある。これは、発注者の要求性能に対して、設計に用いる地震作用の再現期間を組み合わせたものであるが、耐力側の保証レベルは明確ではない。片出、香月ら¹⁾は、 $Z=R-S$ モデルにおいてSが所定の設計値以下で $Z<0$ となる確率を瑕疵担保責任発生確率と呼び、これを信頼性のコントロールパラメータとすることを提言した。

これに対し、原本²⁾、佐藤³⁾は耐力側に非超過確率の形で保証レベルの定めがある状態が自然であるとして、これを推定パラメータとして推定する方法を示している。具体的には正規分布を仮定することで破壊確率、瑕疵担保責任発生確率を算出するものである。

本研究では、これを拡張し、非正規分布にも対応した理論を構築することでより幅広い現象に適合した破壊確率、瑕疵担保責任発生確率を算出することを目的とする。

2. 研究の手法

本研究では、作用効果(stress resultant)と耐力(resistance)で表わされるR-Sモデルを用いる。S側の設計値を S^* とし、 S^* を超える確率を超過確率 e_s とする。R側においては設計値を R^* とし、耐力が R^* を下回ってしまう確率を非超過確率 e_R とする。さらに図-2に示すように破壊確率 $P_f = \Pr(R<S) = P_{ff} + P_{sf}$ 及び瑕疵担保責任 $P_{sf} = \Pr(R<S, S<S^*)$ を定義する。

まず、S側とR側の分布を正規分布と仮定する。以下に示す式によって破壊確率、瑕疵担保責任発生確率は導かれる。

$$-\beta = \frac{\Phi^{-1}(e_R)\sigma_R + \Phi^{-1}(e_S)\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

ただし、 Φ は標準正規分布の累積分布関数

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

$$P_{sf} = e_R \times (1 - e_S) \times x_1 \times P_f^{x_2}$$

ただし、 x_1, x_2 は OR/OS によって多少のばらつきはあるが、 $x_1=0.5 \sim 1.0, x_2=0.2 \sim 3.0$ の範囲の定数である。

これを受けて、SとRの分布が正規分布ではない事象を何らかの方法で、「近似的な」正規分布に置き換え、上式によって P_f, P_{sf} の精度の良い値が出るかが本研究の関心事である。このために以下の3つの近似方法を提案する。

方法(1) (Rackwitz-Fiessler法) 元の分布形の S^*, R^* におけるPDFとCDFが一致するような正規分布の平均値と標準偏差を定める。

方法(2) 元の分布形の最頻値(mode)を、近似する正規分布の平均値とする。さらに S^*, R^* においてCDFが一致するように正規分布の標準偏差を定める。

方法(3) 元の分布形の平均値をそのまま近似する正規分布の平均値とする。さらに S^*, R^* においてCDFが一致するように正規分布の標準偏差を定める。

方法(1)は1次ガウス近似法の中で良く知られる近似であるが、方法(2)、方法(3)は新たに導入した近似法である。

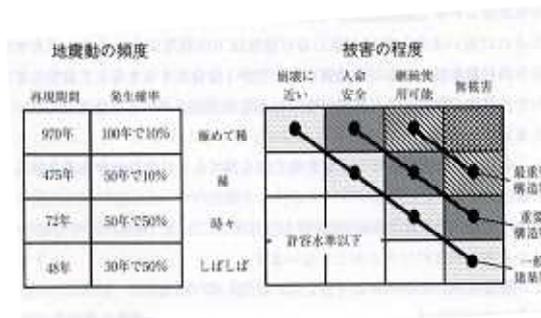


図-1 耐震性能マトリクス

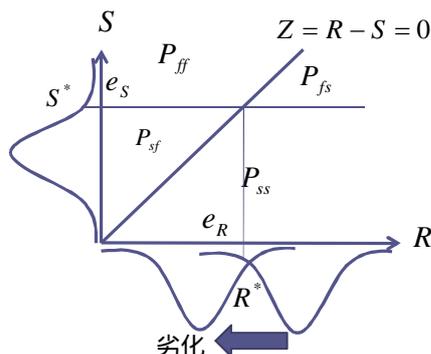


図-2 作用側と耐力側の限界状態

3. 数値解析

ケース 1 対数正規分布

R, S ともに対数正規分布とし, $\mu_S=100$ $\sigma_S=\sigma_R=50$ は一定とする. μ_R のみ, 1: $\mu_R=300$ 2: $\mu_R=280$ 3: $\mu_R=250$ 4: $\mu_R=230$ 5: $\mu_R=200$ と変化するものとして時系列的に並べる. これは, 図-2 において R の分布を次第に左にずらしたことに対応しており時系列的劣化イメージを持たせている. 結果を図-3-(a) ~ (c) に示す. 図のグラフではモンテカルロ法で求めた P_f, P_{sf} と正規分布近似によって求めたものを比較している.

ケース 2 防舷材モデル

村田⁴⁾は港湾の防舷材について,

$$R=Z_d \times Z \times E_{cat}$$

Z_d, Z : 正規分布に従う分布形

$Z_d=100+Z_r \times t$ によって R 分布が小さい方にずれていく. (Z_r : 劣化の程度を表す直線の傾き t : 経年)

$$S=0.5 \times M \times V_b^2 \times C_M \times C_e$$

M, V_b^2, C_M, C_e : 対数正規分布に従う分布形

とし P_f の変化を追っている. これに対し, 前述の方法 (1) ~ (3) を適用し, P_{sf} も合わせて求めているものを図-3-(d) ~ (f) に示す.

4. 結果に対する考察

3 通りの方法の比較により, いずれの正規分布近似法においてもよい精度であることがわかった. しかし, その中でも対数正規分布では方法 1, 防舷材モデルにおいては, 方法 3 が最も精度が高いことがわかった. また, 時間の経過とともに P_f と P_{sf} は漸近してくる. 劣化の影響まで瑕疵担保責任になるのは適切ではなくさらに管理者の責任を分離する議論が必要である.

5. 今後の研究の流れ

他の非正規分布での解析を行う. 現段階では極値分布を考えている. 同時に今までの解析理論の見直しを行い, 改善を加えることで分布系の違いによらない統一的な理論の構築を目指す.

< 参考文献 >

- 1) 片出 亮, 香月 智: リスク分担原則に基づく目標信頼性指標決定法の提案 土木学会論文集 2009
- 2) 原本 隆一: 超過確率法による性能明示型設計のリスク分担分析 卒業論文 2009
- 3) 佐藤 尚次: 超過確率に基づく信頼性設計の基礎理論と鋼構造物の限界状態設計への適用に関する研究 東京大学学位論文 1984
- 4) 村田 直也: 船舶接岸時の防舷材の最適設計と定量的な機能評価の提案 卒業論文 2009

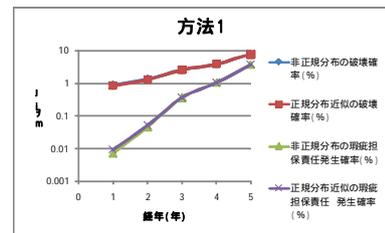


図-3-(a) 対数正規モデルにおける方法(1)の解析結果

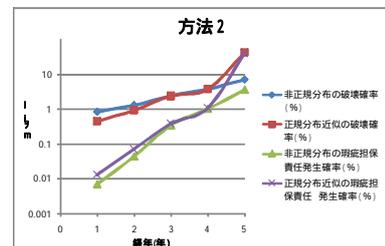


図-3-(b) 対数正規モデルにおける方法(2)の解析結果

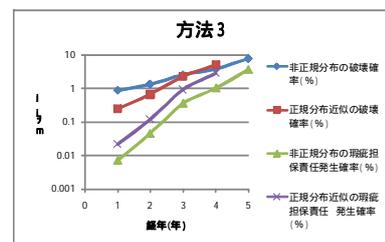


図-3-(c) 対数正規モデルにおける方法(3)の解析結果

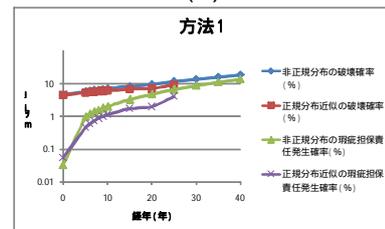


図-3-(d) 防舷材モデルにおける方法(1)の解析結果

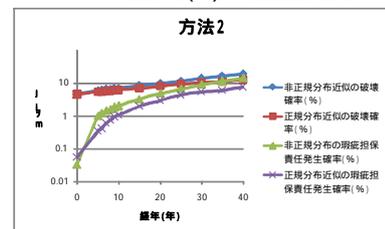


図-3-(e) 防舷材モデルにおける方法(2)の解析結果

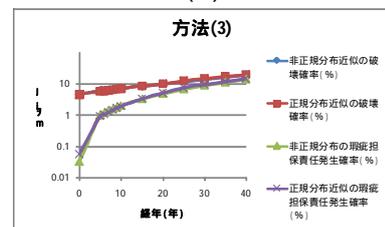


図-3-(f) 防舷材モデルにおける方法(3)の解析結果