

荷重変動と組合せを考慮した構造信頼性設計の基礎的研究

信州大学大学院
信州大学工学部
斎久工業

伊藤 孝政
正会員 小山 健
後藤 源

1. はじめに

最近 ISO2394 による、「確率に基づく設計」、あるいは「部分係数による設計」が設計の基本概念として採用されるようになってきており、これまで確定論的に取り扱われていたものを確率変数として処理することに加えて、繰り返し荷重とその組み合わせを考慮する必要性が出てきている¹⁾。

そこで本研究では、活荷重に対して時間的変動性を考慮することにより、従来行われてきた平均値と標準偏差のみによる荷重パラメータの評価方法から得られる安全性との比較を行うことを目的とした。

2. 活荷重の解析手法^{2),3)}

図 2.1 の活荷重の荷重過程 $\{X_i\}$ に対して、荷重は等間隔のいわゆる基本時間区間 τ_i ごとにその値を変化させるという仮定を設け、対象とされる期間 T は、 $\tau_i = T/n_i$ の n_i 個の区分に分ける。この n_i を荷重繰り返し回数と呼び、各基本時間区間内においては、荷重値は一定であると仮定する。また荷重は、任意の時点において同一の確率分布法則に従い、互いに独立な確率変数とする。荷重過程 X_i (平均値 μ_{x_i} : 標準偏差 σ_{x_i}) の任意時点における確率密度を f_{x_i} とし、その分布関数を F_{x_i} とすれば、期間 T における最大値の分布は以下の式となる。

$$F_{\max X_i}(x_i) = (F_{x_i}(x_i))^{n_i} \\ = \Phi^{n_i} \left(\frac{x_i - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \right) \dots (3.1)$$

しかし、式(3.1)は正規分布に従っていないので、以下のような、平均値 μ'_{x_i} 、標準偏差 σ'_{x_i} を有する正規分布に従うものと近似する。

$$\sigma'_{x_i} = \frac{\phi \left(\Phi^{-1} \left(\Phi^{n_i} \left(\frac{x_i^* - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \right) \right) \right)}{n_i \Phi^{-1} \left(\frac{x_i^* - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \right) \phi \left(\frac{x_i^* - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \right)} \times \sigma_{x_i} \dots (3.2)$$

$$\mu'_{x_i} = x_i^* - \Phi^{-1} \left(\Phi^{n_i} \left(\frac{x_i^* - \mu_{x_i}}{\sigma_{x_i}} \right) \right) \sigma'_{x_i} \dots (3.3)$$

ここで、 x_i^* は設計点の x_i 座標である。

3. 荷重の組み合わせ

通常構造物には、複数の活荷重過程 $\{X_1\}, \{X_2\}, \dots, \{X_r\}$ が組み合わせられて作用する。活荷重に時間的変動性を考慮した場合、この組み合わせられた複数の荷重が、期間 T において、同一時点で最大値に達することはない。従って、最大値を各

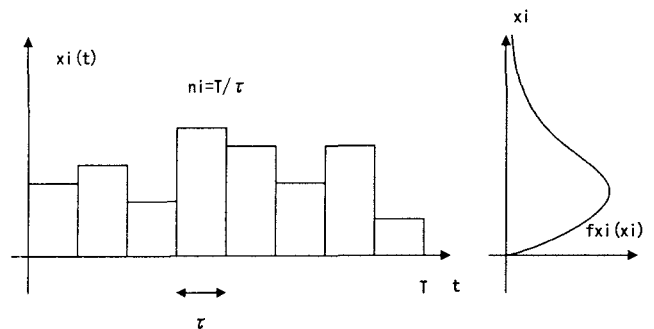


図2.1 時間的変動性を考慮した荷重過程と関連する確率密度関数⁴⁾

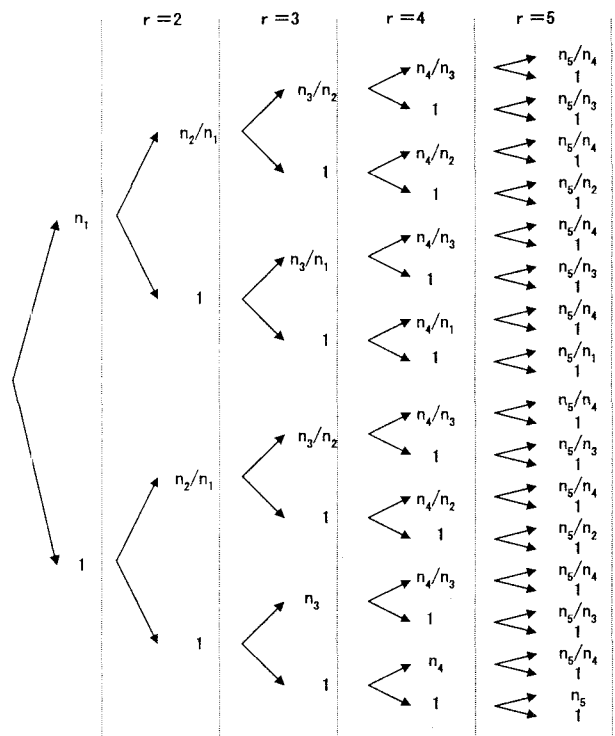


図3.1 荷重個数 $r=2 \sim 5$ までの組み合わせの種類

荷重過程 $\{X_i\}$ の最大値の総和とすると、あまりにも安全側すぎる。そこで、トルクストラの規則^{5),6)}に基づき、個々の荷重過程が、それぞれの最大値に達する各時点での荷重の総和を検討することにした。以上のことを前項の荷重モデルと関連すると、荷重過程 $\{X_1\}, \{X_2\}, \dots, \{X_r\}$ が期間 T において、それぞれの荷重繰り返し回数 $n_1, n_2, \dots, n_r$ を有する長方形荷重過程とすると、図 3.1 で表されるような 2^{r-1} 種類の異なる荷重の組み合わせを考えなくてはならない。

4. 計算結果及び考察

本研究では、RC 単鉄筋短形断面において、許容応力度設計法で一般的に用いられているつり合い断面付近での安全性の検討を行った⁷⁾。なお、各パラメータが従う分布関数は標準正規分布と仮定し、現行の設計方法を用いて表 4.1 のパラメータ時の破壊確率 P_f を計算すると、 $P_f = 2.62 \times 10^{-5}$ という値

を示している。

図4.1は、表4.1のパラメータをもとに、活荷重に時間的変動性を考慮して、荷重繰り返し回数を2～100回まで変化した時の破壊活率Pfを計算した結果である。荷重繰り返し回数を増やすほど、危険度が高くなっていくのが分かる。次に表4.1のパラメータの中から、死・活荷重率の値を、{0.91, 0.09} … ① {0.67, 0.33} … ② {0.5, 0.5} … ③ と変化させた時の現行設計での破壊確率と、活荷重に時間変動性を考慮した破壊確率との比を図4.2に載せる。荷重繰り返し回数が増加すると、破壊確率の比が比例的に増加しているのが分かる。例えば、繰り返し回数が100のとき、現行設計と比べ、①で約40倍、②、③で約90倍の危険性を秘めている結果となった。

荷重組み合わせ問題について、本研究では3種類の荷重が作用する場合の破壊確率の計算を行った。荷重のパラメータは以下の通りである。

死荷重：割合平均値・0.5 活荷重1：割合平均値・0.2
 変動係数・0.05 変動係数・0.35
 繰り返し回数・12
 活荷重2：割合平均値・0.3
 変動係数・0.5
 繰り返し回数・24

死荷重は、変動のない荷重と見なし繰り返し回数を1回とすると、図3.1より、この問題で検討すべき荷重組み合わせ種類は表4.2となり、計算結果は、表4.3, 4.4の通りである。

以上の結果から、活荷重に時間変動性を考慮することによって、従来の設計で確保していた安全性が過大評価であると共に、設計者が意図していた安全性を十分確保していないということを表している。しかしながら、本研究で用いた活荷重パラメータの決定に際しては、例えば地震荷重のような非常に複雑な荷重過程が存在しており、これらをどのように簡単な形で繰り返し荷重にモデル化するか、及び各パラメータの特性に適合した分布関数を、どのようにモデル化するかの問題点に対しては、難解な点もあり、更なる研究および発展が必要となる。

参考文献

- 1) 土木学会 構造設計国際標準研究小委員会：活動成果報告書 国際標準に基づく構造物の設計法 2000.8
- 2) P.トフークリステンセン/M.J.ベイガー、室津 義定 監訳：構造信頼性 理論と応用 シュプリンガー・フェアラーク東京 1986.5
- 3) Hasofer, A.M. and Lind, N.C. Exact and Invariant Second-Moment Code Format, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.100, No.EM1, pp.111-121 1974
- 4) R. Rackwitz : First Order Reliability Method pp.23-30, pp.45-50 1980.4
- 5) Ferry Borges, J. & Castanhela, M. : Structural Safety, 2nd edition. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisbon 1972
- 6) Turkstra, C.J. & Madsen, H.O. : Load Combinations in Codified Structural Design. J. Struct. Div., ASCE, Vol.106, No. St.12 1980.12
- 7) 長 尚・小山 健：鉄筋コンクリート構造物設計法のコード・キャブレレーション 土木学会論文報告集第287号 pp.115-125 1979.7

表4.1 各パラメータの値

鉄筋降伏点(N/mm ²)		死荷重率	
平均値	300	平均値	0.5
変動係数	0.05	変動係数	0.05
コンクリート強度(N/mm ²)		活荷重率	
平均値	24	平均値	0.5
変動係数	0.2	変動係数	0.35

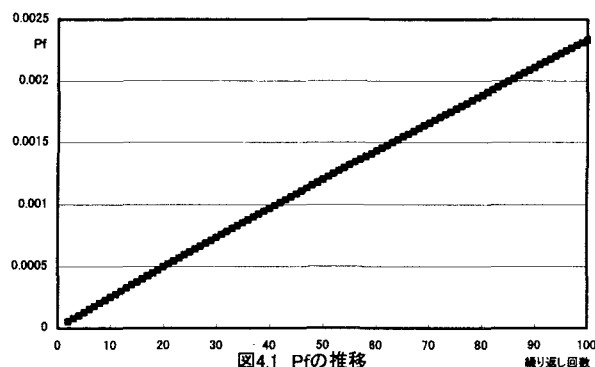


図4.1 Pfの推移

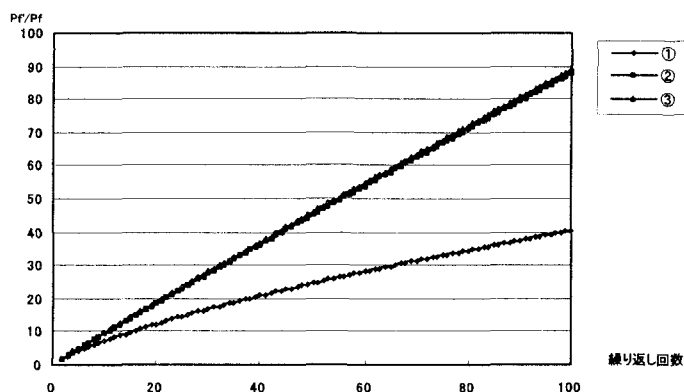


図4.2 現行設計と本研究での破壊確率の比

表4.2 組み合わせ種類

	死荷重繰り返し	活荷重1 繰り返し	活荷重2 繰り返し
組み合わせ 1	1	1	24
組み合わせ 2	1	12	2

表4.3 組み合わせ1の計算結果

	破壊確率 Pf
現行設計	1.2×10^{-5}
時間変動考慮	2.56×10^{-4}

表4.4 組み合わせ2の計算結果

	破壊確率 Pf
現行設計	1.2×10^{-5}
時間変動考慮	1.55×10^{-4}