

I-32 確率変数変動型の効率化モンテカルロ法による構造物の経時的信頼性評価

Time Historical Structural Reliability Evaluation Using Varied Stochastic Variable Type Efficient Monte Carlo Method

山口和範¹・白木渡²・井面仁志³

Kazunori YAMAGUCHI, Wataru SHIRAKI, and Hitoshi INOMO

抄録: 我が国では、近年既設鋼橋などの構造物の老朽化が進んできており、合理的な維持管理が焦点の課題となっている。しかしながら、鋼構造物の強度への経年的影響として鋼材の腐食や活荷重の確率特性の変動などが挙げられるが、個々の構造物でその発生傾向は異なっており信頼性評価が難しい。そこで、本論文では、経時的な影響をパラメトリックに分析可能な確率変数変動型の効率化モンテカルロ法を提案し、簡単な解析事例により本手法の有用性を示すとともに、今後の方向性について考察する。

Abstract: Since the superannuation of existing steel bridges has been progressed in our country, rational maintenance management is an urgent problem. However, it enumerates changes in the probability character of live load and corrosion etc. that affect time historical variation to the strength of steel structures, reliability evaluation is very difficult because of a stochastic characteristic variation that occurred in the individual structure. Therefore, in this paper, we propose a varied stochastic variable type efficient Monte Carlo method which can parametrical analyze the time historical problem, and an easy analytical case is shown, and the direction of the future is discussed.

キーワード: 経時的問題、効率化モンテカルロ法、信頼性評価、不確定要因、維持管理

Keywords: Time Historical Problem, Efficient Monte Carlo Method, Reliability Evaluation, Uncertain Factor, Maintenance

1. まえがき

我が国の道路橋の多くは高度経済成長期に建設されており、これらの橋は2010年頃から供用後50年を超えるものが増え始め、2020年頃には全橋に占める割合が30%になり、2030年頃には50%になると予測されている¹⁾。このように、急激に道路橋の老齢化が進行しており、橋梁の維持管理が重要な課題となっている。また、近年、鋼橋の様々な損傷事故が報告されており、例えば、2007年8月に米国ミネソタ州ミネアポリスにおいて供用中の橋が落橋し、多数の死傷者を出す事故が発生している。また、我が国においても、2007年6月に三重県の本荘大橋で、また、同年8月に秋田県の本荘大橋でトラス部材破断事故が発生しており²⁾、既設鋼橋の安全性の再検討が求められている。このような状況において、既設橋梁の安全性を再検討する手法の1つとして、信頼性工学によるアプローチが考えられる。

鋼構造物の終局状態を確率・統計的に把握することは、性能設計法への移行や、鋼構造物の維持管理を念頭に置くと、今後ますます重要な分野になると考えられる。鋼構造物の終局強度は、残留応力や初期不整が影響しており、データが蓄積され統計的にある程度その傾向が把握されている。一方、鋼構造物の強度への経年的影響として鋼材の腐食や疲労亀裂が挙げられるが、個々の構造物でその発生傾向は異なっており統計的な整理が難しい。しかし、鋼橋の腐食は終局強度に及ぼす影響が大きい重要な要因であり、信頼性の観点から腐食の進行がどの程度まで許容され、また補修を行うことによりどの程度構造物の信頼度が向上したか把握するのは構造物を維持管理する上で有意義な情報である。また、活荷重の確率特性も経時的に変化する可能性があり、このような変動要因に対して柔軟に対応できる信頼性評価手法の開発が望まれている。

このような分析を解析的に行う手法として確率有限要素法があるが、終局状態のような非線形な問題には適

1 : 正会員 工修 本州四国連絡高速道路(株) 長大橋技術センター 診断・構造グループサブリーダー
(〒651-0088 神戸市中央区小野柄通4-1-22 アパース三宮ビル, Tel : 078-291-1075, E-mail : kazunori-yamaguchi@jb-honshi.co.jp)
2 : フェロー 工博 香川大学工学部 教授 信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町2217-20)
3 : 正会員 工博 香川大学工学部 教授 信頼性情報システム工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町2217-20)

用困難なため、本論文では確率的な事象をモンテカルロ法で生成し分析するアプローチを適用する。

信頼性解析におけるモンテカルロ法の研究の多くは、超過確率をいかに効率よく正確に計算するかを主要な目的とした効率化したモンテカルロ法に関するものである^{3)~7)}。本論文では、これまでの研究とは異なる観点からその工学的意義を整理し、本研究で対象とする腐食による終局強度低下のように元となる確率変数の特性が途中で変わった場合でも、その影響をパラメトリックに分析可能な確率変数変動型の効率化モンテカルロ法を提案する。構造物の信頼性を考えるとき、確率変数の特性（平均、標準偏差など）を明確に定められない場合や確率特性が経時的に変化する場合があります、一般的にはこのような問題に信頼性理論を適用するのは難しい。しかし、本論文で提案する手法は、基本となる1ケースについてモンテカルロシミュレーションを行えば、元の確率変数の特性が変化してもその影響をパラメトリックに分析できるものであり、信頼性理論の適用性の拡張に繋がるもので、鋼橋の維持管理に有益な情報を提供できる。

本論文では、活荷重、腐食量を確率変数とするが、通常、これらの確率変数の特性が変動した場合にはそれに対応した複数ケースのモンテカルロシミュレーションを行う必要がある。しかし、本論文で提案する手法では上述のように基本となる1ケースのシミュレーションで容易にパラメトリックに分析することができる。例えば、腐食量が予想より大きい場合、腐食が経時的に進行する場合や活荷重の確率特性が予想より大きい場合、基本となる1ケースについてモンテカルロシミュレーションを行っておけばその他のケースについては簡単に分析できる手法である。本論文では、提案した確率変数変動型の効率化モンテカルロ法をラーメン橋脚の事例に適用して、その有効性を検証する。

2. 確率変数変動型の効率化モンテカルロ法

効率化モンテカルロ法については多くの論文で紹介されており、本論文では詳細な解説を行わないが、確率変数変動型の効率化モンテカルロ法に拡張するとき、その基礎式を用いるため、効率化モンテカルロ法の代表的な手法である重点サンプリングの基礎式の概要を説明し、理論の展開を行う。

(1) 効率化モンテカルロ法の概要

効率化モンテカルロ法の代表的な手法である重点サンプリングの概要を以下に示す。

重点サンプリングでは、式(1)に示すm次元の確率変数ベクトル \mathbf{x} で表される確率密度関数 $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ おいて破壊基準関数 $g(\mathbf{x})$ を超過する確率 P_f は式(2)で近似される。

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{m-1}, x_m) \quad \dots (1)$$

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(g(\mathbf{x}_i) \leq 0) \frac{f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_i)}{h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}_i)} \quad \dots (2)$$

ここに、Nはサンプリング回数、確率変数ベクトル \mathbf{x} の添字 i は i 番目サンプリング、 $I(\cdot)$ は \mathbf{x}_i が破損領域にある場合 ($g(\mathbf{x}) \leq 0$) が1で \mathbf{x}_i が安全領域にある場合 ($g(\mathbf{x}) > 0$) が0なるインデックス関数である。また、 $h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})$ は重点サンプリング密度関数で任意の確率密度関数を選ぶことができ、この関数に基づきサンプリング（確率変数ベクトル \mathbf{x}_i の発生）を行う。図-1に確率変数が1つ(x)の場合、図-2に確率変数が2つ(x_1, x_2)の場合の重点サンプリングのイメージ図を示すが、破損領域を重点的にサンプリングしており、通常のモンテカルロ法（元の確率密度関数 $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ によるサンプリング）と比べ効率化されていることが分かる。

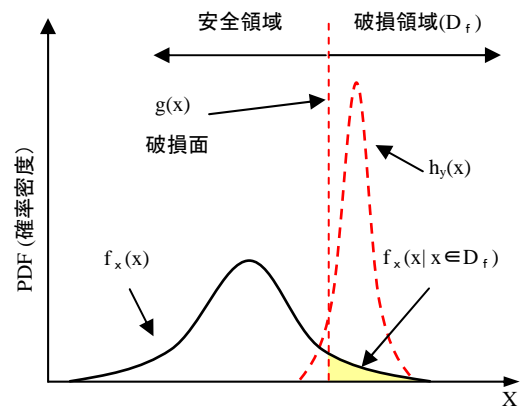


図-1 重点サンプリングの概要図(1変数)

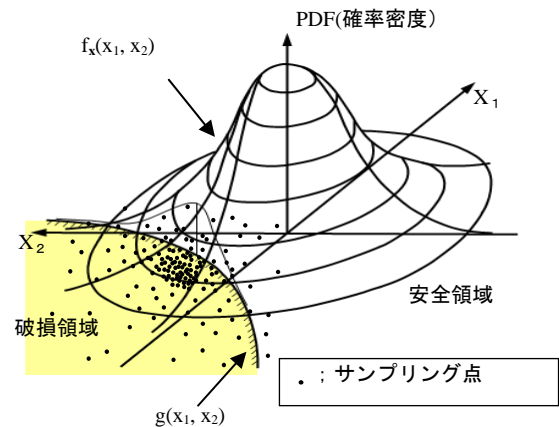


図-2 重点サンプリングの概要図(2変数)

(2) 誤差分析および精度向上の手法

重点サンプリングの統計的誤差 S_{IE} は式(3)で表される。

$$S_{IE} = \sqrt{\frac{S_1^2}{N}} \quad \dots\dots (3)$$

ここに

$$S_1^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[I(g(\mathbf{x}_i) \leq 0) \frac{f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_i)}{h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}_i)} \right]^2 - \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(g(\mathbf{x}_i) \leq 0) \frac{f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_i)}{h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}_i)} \right]^2 \quad \dots\dots (4)$$

このとき、重点サンプリング密度関数 $h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})$ として式(5)を採用することができれば、統計誤差を0にすることができる。

$$h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}) = f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x} | \mathbf{x} \in D_f) / P_f \quad \dots\dots (5)$$

ここに、 $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x} | \mathbf{x} \in D_f)$ は図-1に示すとおり、破損領域 (D_f) における $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ の分布を表し、式(5)は $h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})$ が確率密度関数の要件 ($\int h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = 1.0$) を満たすようそのときの超過確率 P_f で $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x} | \mathbf{x} \in D_f)$ を割り戻したものである。一般にこのような関数の選択は困難であるため、式(6)、式(7)により $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x} | \mathbf{x} \in D_f)$ の平均値、分散値を近似的に求め、この特性を反映した重点サンプリング関数 $h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})$ を設定すれば精度向上に繋がる。

$$E_h(\mathbf{x}) = E_f(\mathbf{x} | \mathbf{x} \in D_f) = \frac{1}{P_f \cdot N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i I(g(\mathbf{x}_i) \leq 0) \frac{f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_i)}{h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}_i)} \quad \dots\dots (6)$$

$$E_h(\mathbf{xx}^T) = E_f(\mathbf{xx}^T | \mathbf{x} \in D_f) = \frac{1}{P_f \cdot N} \sum_{i=1}^N \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^T I(g(\mathbf{x}_i) \leq 0) \frac{f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_i)}{h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}_i)} \quad \dots\dots (7)$$

式(5)に示すとおり、重点サンプリング密度関数 $h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})$ は破損領域 (D_f) における元の確率密度関数 $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ の近似の度合いが高いほど少ないサンプリング回数 (N) で精度の高い超過確率 P_f を求めることができる。すなわち、 $h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})$ は破損領域における $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ の疑似の確率密度関数とみなすことができ、適正な疑似化がされていれば精度の高い値を求めることができる。工学的に解釈すると、損傷が起こるパターンを確率特性に基づき如何に重点的なおかつ適正にサンプリングできるかが精度に関係しているといえる。

通常の重点サンプリングでは信頼性指標 β に対応する設計点 (Design point) の周りでサンプリングする⁸⁾等が普通であるが、本論文では式(5)、(6)を用いて破損領域の平均値、分散を求め、破損領域の平均値周

りにサンプリングを行った。尚かつ、破損領域の平均値および分散の正確さを期するため、複数回の重点サンプリングを行い、式(5)、(6)を適用して破損領域の平均値、分散の更新を行った。

重点サンプリング密度関数 $h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})$ が破損領域における $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ の疑似の確率密度関数を適正に形成することができれば、以下に示す確率変数変動型の効率化モンテカルロ法への拡張を行うことができる。

(3) 確率変数変動型の効率化モンテカルロ法への拡張

構造物の信頼性を考えるとき、確率変数の特性を明確に定められない場合や確率特性が経時的に変化する場合があります。一般的にはこのような問題に信頼性理論を適用するのは難しく、確率特性が変化したときの影響をパラメトリックに分析する必要がある。このような場合、本論文で提案する確率変数変動型の効率化モンテカルロ法が有効となる。

図-3に確率密度関数が $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ から $f_{s_{\mathbf{x}}}(\mathbf{x})$ へ変動した場合の重点サンプリングの概要図を示す。このときの損傷超過確率 P_f は式(2)の $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ を $f_{s_{\mathbf{x}}}(\mathbf{x})$ に置き換えた式(8)で近似できる。

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(g(\mathbf{x}_i) \leq 0) \frac{f_{s_{\mathbf{x}}}(\mathbf{x}_i)}{h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}_i)} \quad \dots\dots (8)$$

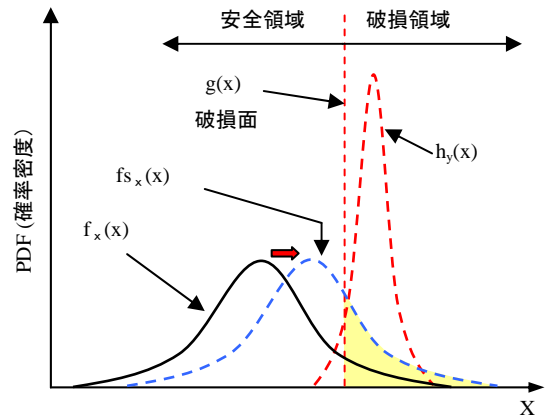


図-3 確率変数変動型の重点サンプリング

精度の観点からは、確率変数 $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ が変化した場合それに合わせ重点サンプリング密度関数 $h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})$ を再設定することが考えられる。しかしながら、超過確率を考える場合、確率密度関数の裾部の情報が重要であり、元の確率密度関数が $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ から $f_{s_{\mathbf{x}}}(\mathbf{x})$ へ変化 (図-3) しようとも破損面近傍を重点的にサンプリングするのが最も効率であることには変わりなく、どちらのケースに対しても共通の $h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})$ を適用しても精度が大きく低下することはないと考えられる。

共通の重点サンプリング密度関数 $h_{\mathbf{y}}(\mathbf{x})$ を用いると、

始めのケースでサンプリングした確率変数ベクトル： \mathbf{x}_i ($i=1\sim N$)とインデックス関数： $I(g(\mathbf{x})\leq 0)$ を記憶しておけば、確率密度関数 $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ が変化しようとも、新たなモンテカルロシミュレーションをすることなく、式(8)に記憶した \mathbf{x}_i と $I(\cdot)$ 代入すれば確率密度関数が変化した場合の損傷超過確率 P_f を容易に求めることができる。更なる省力化として \mathbf{x}_i が安全領域にある場合はインデックス関数： $I(\cdot)=0$ であるため式(8)の損傷超過確率 P_f に全く影響を及ぼさず、 \mathbf{x}_i が損傷領域 ($I(\cdot)=1$)にある確率変数ベクトルの組のみを記憶しておくことが考えられる。このような手順を踏めば、基本となる1ケースのシミュレーションの結果を用いて確率特性が変化した場合の影響を容易にパラメトリックに分析することができる。このことが本手法のメリットであり、既存の重点サンプリングを大きく改良した点である。

本論文では、この手法を用いて、複数の崩壊モードが想定されるラーメン橋脚の腐食量や荷重の確率特性が変化したときの終局状態超過確率に及ぼす影響をパラメトリックに分析する。また、その際、式(3)、式(6)、式(7)により確率特性が変化したときの損傷超過確率 P_f の統計的誤差、損傷領域における平均、分散の推移を計算し、本手法の有効性の検証を行う。

ただし、本手法の場合、例えば図-4に示すような複数の損傷モードが想定される場合には注意を要する。確率密度関数が図-4の状態の場合には、重点サンプリングを行う領域は重点サンプリング領域1で仮に確率密度関数が \mathbf{x}_1 方向にシフト(図中の実線矢印方向)したとしても最適なサンプリング領域は大きく変化しないと考えられる。一方、確率密度関数が \mathbf{x}_2 方向に大きくシフト(図中の波線矢印方向)した場合には、重点サンプリングを行うべき領域は重点サンプリング領域2にしなければならない。

このように、複数の損傷モードがある場合の対応は今後の検討課題である。

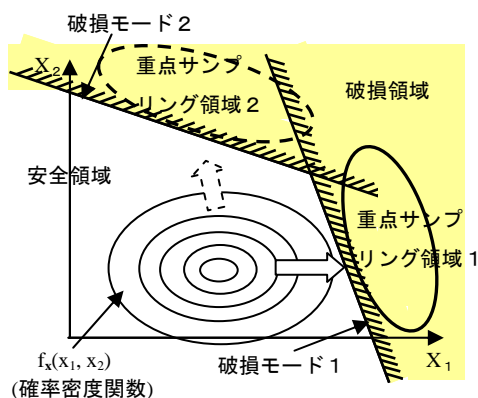


図-4 複数の損傷モードの例

3. ラーメン橋脚に対する試算例

本論文で提案した確率変数変動型の効率化モンテカルロ法をラーメン橋脚に適用し、その有効性を示し今後の方向性について考察する。なお、インスブルク大学で開発された ISPUD (Importance Sampling Procedure Using Design Point)^{8)~10)}で重点サンプリングなどの統計処理のプログラムが整理されており、本論文で提案した手法は ISPUD をベースに改良し、プログラムを開発した。

(1) 解析モデル

解析モデルを図-5に示す。荷重については死荷重、活荷重、地震荷重を想定した、それぞれ R_D 、 R_L 、 R_E の3荷重について考慮する。抵抗力については、柱の全塑性曲げモーメントを R_{C1} 、 R_{C2} 、とし、梁の全塑性曲げモーメントを R_B とする。即ち、確率変数については (R_D 、 R_L 、 R_E 、 R_{C1} 、 R_{C2} 、 R_B)の6変数について考慮する。また、崩壊モードについては、図-6に示す塑性ヒンジの発生による12モードを考慮した。

試算については、活荷重が卓越する場合を想定した (Case-1)と地震力が卓越する場合を想定した (Case-2)の2ケースに対して実施した。

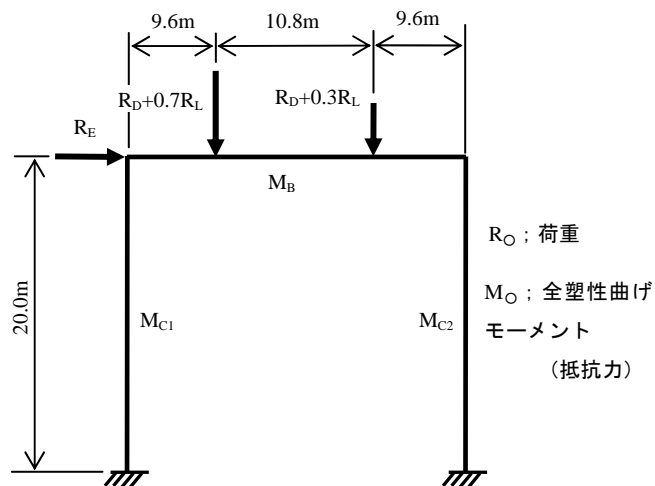


図-5 解析モデル (ラーメン橋脚)

(2) 解析結果

a) 活荷重が卓越するケース (Case-1)

活荷重が卓越する場合を想定した (Case-1)の確率変数の設定を表-1に示す。モンテカルロシミュレーションのサンプリングは1回当たり10万回実施し、重点サンプリング関数の特性値(平均、標準偏差)は式(6)、(7)に基づき3回更新しており(トータルサンプリング回数は3回×10万回=30万回)、その最終(3回目)の結果を表-2に示す。

表-2の中での元の確率密度関数からの偏差(d)は、式(9)で定義しており、重点サンプリング関数の平均値の元の確率密度関数の平均値(表-1)からの離れ具合を

表すものでこの数字の絶対値の大きい確率変数ほど崩壊への寄与が大きいと考えられる。この試算例では抵抗力 R_B 、荷重 R_L の影響が大きく、抵抗力 R_{C1} 、 R_{C2} 、荷重 R_E の影響が小さいことが分かる。

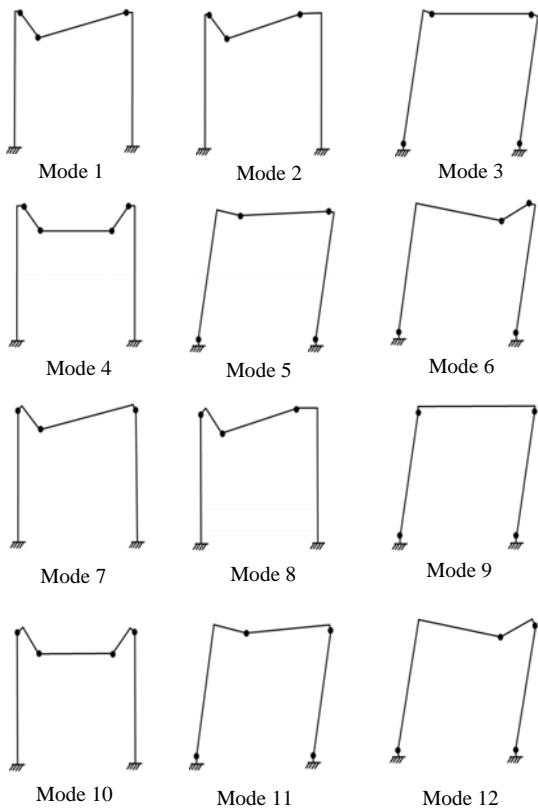


図-6 崩壊モード

∴ 塑性ヒンジ

表-1 確率変数の設定 (Case-1)

	変数	分布関数	平均 (μ)	標準偏差 (ν)
抵抗力	M_{C1}	Normal	3100 ton · m	300 ton · m
	M_{C2}	Normal	3100 ton · m	300 ton · m
	M_B	Normal	3400 ton · m	300 ton · m
荷重	R_D	Normal	450 ton	20 ton
	R_L	Welbull	100 ton	40 ton
	R_E	Welbull	50 ton	20 ton

表-2 重点サンプリング関数の特性値 (Case-1)

	変数	平均 (μ)	標準偏差 (ν)	元の確率密度関数からの偏差 (d) ※
抵抗力	M_{C1}	3050 ton · m	332 ton · m	-0.166
	M_{C2}	3032 ton · m	313 ton · m	-0.227
	M_B	2596 ton · m	184 ton · m	-2.679
荷重	R_D	471 ton	19 ton	1.059
	R_L	150 ton	40 ton	1.253
	R_E	50 ton	20 ton	0.087

※元の確率密度関数からの偏差量を式(9)で表したもの

$$d = \frac{\text{元関数}(f_x(x))\text{の平均値} - \text{重点サンプリング関数}(h_x(x))\text{の平均値}}{\text{元の関数}(f_x(x))\text{の標準偏差}} \dots\dots (9)$$

また、図-7に崩壊に対する各モードの寄与率を示す。寄与率は、各サンプリングで崩壊したモードを記憶させておき、集計して比率を求めたものである。この試算例は、傾向が比較的単純で崩壊するのはモード1に集中している。

表-1の条件に対して効率化モンテカルロ法で計算した破壊確率は 2.01×10^{-3} で、そのときの統計的誤差 6.80×10^{-3} となった。

次に、このデータを用いて、本論文で提案した確率変数変動型の効率化モンテカルロ法を適用する。具体的手順としては、効率化モンテカルロ法で計算したデータを記憶させておき、式(8)に基づき元の確率変数が変動したときの破壊確率を計算する。

図-8は、表-1の確率変数の特性値のうち、抵抗力 M_B の平均値のみが変化した場合の破壊確率の推移を示したものである。この状態は、ラーメン橋脚の梁の部分の腐食が進行して抵抗力が経時的に変化することを想定している。この図中の破線は統計的誤差で概ね数%程度で推移しており、比較的良好な結果が得られていると考えられる。また、図中の鉛直の実線で示した基本となるケースは、始めに表-1に基づき実施した効率化モンテカルロ法のデータによるものであり、そのときの破壊確率と統計誤差はそれぞれ前述した 2.01×10^{-3} および 6.80×10^{-3} に一致している。

図-9は、表-1の確率変数の特性値のうち、荷重 R_L の平均値のみが変化した場合の破壊確率の推移を示したものである。この状態は、交通流の変化等により、活荷重特性が変動することを想定している。この図中の破線は統計的誤差で概ね数%程度で推移しており、比較的良好な結果が得られていると考えられる。

また、図-8と図-9の破壊確率の推移の変化率を比べると図-9の方が小さい傾向にあるが、その傾向は、表-2の元の確率密度関数からの偏差(d)の傾向と一致する。

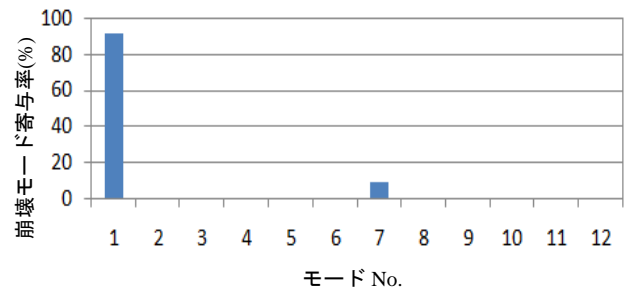


図-7 崩壊に対する各モードの寄与率 (Case-1)

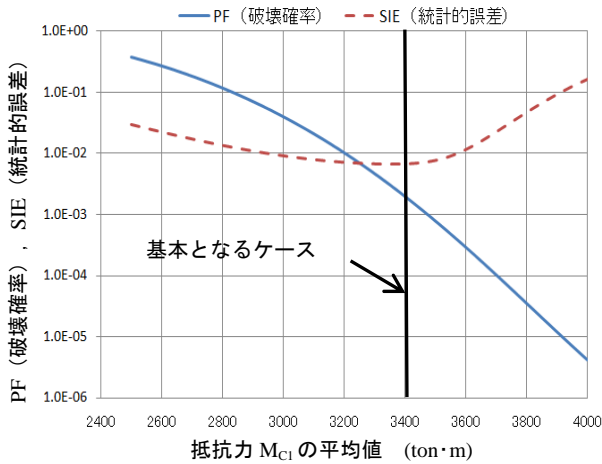


図-8 抵抗力 M_{C1} の変動による破壊確率の変化 (Case-1)

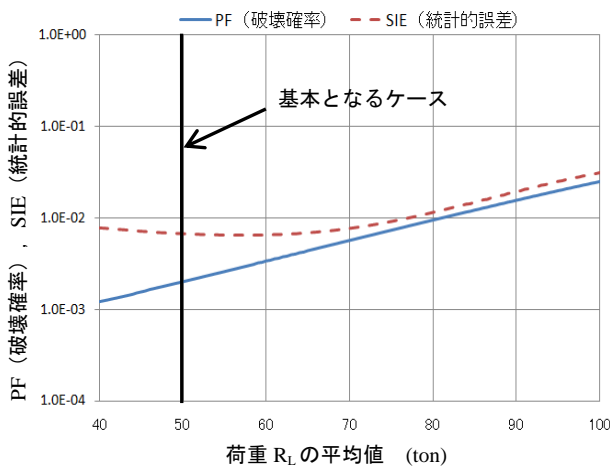


図-9 抵抗力 R_L の変動による破壊確率の変化 (Case-1)

腐食の進行や交通流特性の変化などの経時的な信頼性の問題を検討する場合、図-8や図-9のグラフが有用な判断材料となるが、通常の効率化モンテカルロ法の場合、それぞれのケースに対してサンプリングを行う必要があるが、本論文で提案した手法は基本となる1つのケースでサンプリングをしておけば、簡単にこれらのグラフを画くことができ、非常に有用な手法になり得ると考えられる。この手法を適用した場合の誤差が注意すべき要因であるが、この解析例では比較的良好な結果となっている。

b) 地震荷重が卓越するケース (Case-2)

活荷重が卓越する場合を想定した (Case-2) の確率変数の設定を表-3に示す。また、そのときの重点サンプリング関数の特性値を表-4に示すが、崩壊への寄与が大きい確率変数としては、抵抗力 R_B 、荷重 R_E が考えられる。

また、図-10に崩壊に対する各モードの寄与率を示すが、(Case-1)の場合と異なり、崩壊に寄与するモー

ドが複数あることが分かる。このように、崩壊に寄与するモードが複数ある場合にも、本論文で提案した確率変数変動型の効率化モンテカルロ法が有効であることを以下に示す。

表-3 確率変数の設定 (Case-2)

	変数	分布関数	平均 (μ)	標準偏差 (ν)
抵抗力	M_{C1}	Normal	3100 ton·m	300 ton·m
	M_{C2}	Normal	3100 ton·m	300 ton·m
	M_B	Normal	3400 ton·m	300 ton·m
荷重	R_D	Normal	450 ton	20 ton
	R_L	Weibull	40 ton	10 ton
	R_E	Weibull	100 ton	40 ton

表-4 重点サンプリング関数の特性値 (Case-2)

	変数	平均 (μ)	標準偏差 (ν)	元の確率密度関数からの偏差 (d)
抵抗力	M_{C1}	2929 ton·m	332 ton·m	-0.569
	M_{C2}	2880 ton·m	313 ton·m	-0.731
	M_B	2666 ton·m	184 ton·m	-2.446
荷重	R_D	471 ton	19 ton	1.044
	R_L	43 ton	10 ton	0.294
	R_E	167 ton	68 ton	1.677

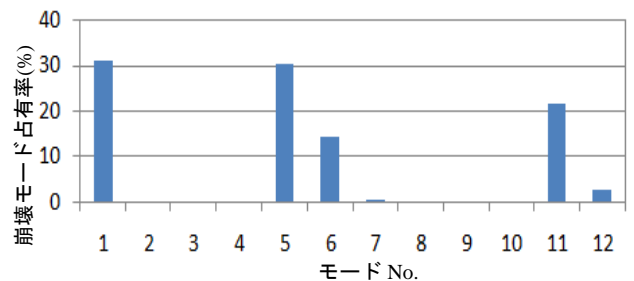


図-10 崩壊に対する各モードの寄与率 (Case-2)

表-3の条件に対して効率化モンテカルロ法で計算した破壊確率は 4.13×10^{-4} で、そのときの統計的誤差 1.02×10^{-2} はとなった。

図-11は、表-3の確率変数の特性値のうち、抵抗力 M_B の平均値のみが変化した場合の破壊確率の推移を示したものである。この状態は、ラーメン橋脚の梁の部分の腐食が進行して抵抗力が経時的に変化することを想定している。この図中の破線は統計的誤差であるが、複数の崩壊モードが介在しているにも拘わらず、概ね数%程度で推移しており、比較的良好な結果が得られていると考えられる。

図-12は、表-3の確率変数の特性値のうち、荷重 R_E の平均値のみが変化した場合の破壊確率の推移を示したものである。この状態は、地震力の確率特性が想定しているものに比べ差異がある場合に対応する。この図中の破線は統計的誤差であるが、複数の崩壊モードが介

在しているにも拘わらず、概ね数%程度で推移しており、比較的良好な結果が得られていると考えられる。

図-11 と図-12 の破壊確率の推移の変化率を比べると図-12の方が小さい傾向にあるが、その傾向は、表-4の元の確率密度関数からの偏差(d)の傾向と一致する。また、図-9と図-12と比べると図-12が大きい傾向にあるが、その傾向は、表-2および表-4の元の確率密度関数からの偏差(d)の傾向と一致する。

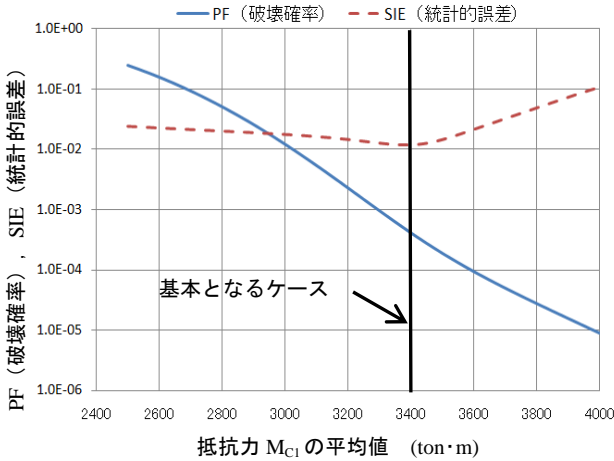


図-11 抵抗力 M_{C1} の変動による破壊確率の変化 (Case-2)

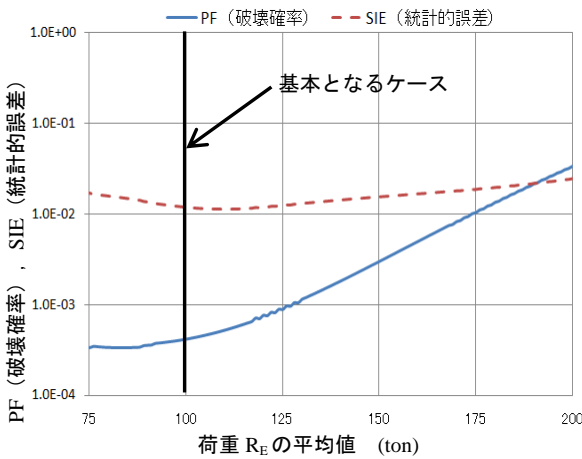


図-12 荷重 R_E の変動による破壊確率の変化(Case-2)

(3) 考察

崩壊に寄与するモードが少ない(Case-1)と崩壊に寄与するモードが多い、(Case-2)について、確率変数変動型の効率化モンテカルロ法を適用したが、どちらの場合においても統計的誤差は比較的小さく、本手法の適用性が確認できた。

ただし、2. (3)の最後で考察してあるとおり、崩壊に寄与するモードが複数ある場合には注意を要す

る。今回の(Case-2)の試算例では比較的良好な結果が得られた。その理由としては、今回の試算例では、式(9)で定義した元の確率密度関数からの偏差(d)の絶対値が大きく崩壊に対する寄与の大きい確率変数を選んで実施したことによると考えられる。即ち、確率密度関数からの偏差(d)は崩壊に寄与する確率変数を識別するための指標になり得ると考えられる。

実構造物への本手法適用する場合、最も知りたい情報は、どの確率変数が構造物の崩壊に最も寄与し、その経時的な変動がどの程度構造物の安全性に影響するかということである。このような意味において、今回の試算で得られた、崩壊に寄与が大きい確率変数を変動させて確率変数変動型の効率化モンテカルロ法を適用すると統計的誤差が比較的小さいという特性は、実構造物の信頼性の分析で有用な手段となる可能性を秘めていると考えられる。

ただし、確率変数の微妙な変動で崩壊モードが変わる事例も考えられるので、破壊確率の計算と同時に統計的誤差も計算し、誤差をチェックする必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた成果を、以下の2つの観点でまとめる。

(1) 確率変数変動型の効率化モンテカルロ法の適用性について

- ・ 構造物の信頼性を考えるとき、確率変数の特性を明確に定められない場合や確率特性が経時的に変化する場合がある。このような場合、確率特性の変化の影響をパラメトリックに分析する必要があるが、本論文で提案した確率変数変動型の効率化モンテカルロ法が有効となる。
- ・ 確率変数変動型の効率化モンテカルロ法は基本となる1ケースのみ解析しておけば、確率変数の変動に対する分析が容易に行え、信頼性評価の効率化に繋がる可能性がある。
- ・ 確率変数変動型の効率化モンテカルロ法において、崩壊への寄与が大きい確率変数を変動させると統計的誤差が比較的小さい。
- ・ 確率密度関数からの偏差(d)は崩壊に寄与する確率変数を識別するための指標になり得ると考えられる。
- ・ ただし、確率変数変動型の効率化モンテカルロ法の適用においては破壊確率の計算と同時に統計的誤差を計算し、誤差をチェックしておく必要がある。

(2) 構造物の信頼性評価への適用について

- ・ 構造物の信頼性評価で最も知りたい情報の1つは、どの確率変数が構造物の崩壊に最も寄与し、

その変動がどの程度構造物の安全性に影響するかである。

- また、構造物の安全性の観点から整理すると、微少な変動で大きく破壊確率が変動する確率変数が最も注意すべき要因と考えられる。
- このような観点から考えると、提案した確率変数変動型の効率化モンテカルロ法は、崩壊の主要因分析ができる効率的な手法となり得る可能性がある。

5. おわりに

信頼性解析におけるモンテカルロ法の研究の多くは、超過確率をいかに効率よく正確に計算するかが主要な課題であった。本研究もこの流れを汲むものであるが、着目点が少し異なり、モンテカルロ法における崩壊領域内のサンプリング点は構造物の破壊状態と密接に関係した重要な情報であり、これらの情報を工学的に有効に活用し、構造物の信頼性評価の効率化を図り構造物の維持管理への応用を目的としたものである。

本論文では比較的簡単な事例を示したが、今後はトラス橋の信頼性評価への検討を予定している。

参考文献

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No. 501/I -29, 1994年10月，pp. 1-10.
- 2) 鋼橋技術研究会：「トークイン・日本の鋼橋を考える」報告書，TECHNICAL REPORT, No. 66, 2008年3月.
- 3) 白木渡，Schüeller, G.：条件付き破壊確率を用いた繰り返し高速モンテカルロ法とその構造物の動的信頼度評価への応用，構造工学論文集，Vol. 35-2, 1989年，P. 467～P. 477.
- 4) 白木，松保，山口，高岡：効率化モンテカルロ法による構造システムの信頼性評価法，構造工学論文集，Vol. 37A, 1991年3月，P. 577-P. 584.
- 5) 田中泰明，仙田圭一：Girsanov変換を用いた重点サンプリング法による確率過程の初到達問題の効率的解法，第14回材料・構造信頼性シンポジウム講演論文集，日本材料学会，1996年，P13-P18.
- 6) 渋谷卓，須藤敦史，星野勝：設計評価のための効率化モンテカルロシミュレーションの基礎考察，JCOSAR2003論文集，2003年11月，P:933-P:936.
- 7) 山口和範，白木渡，井面仁志：モンテカルロ法を用いた「鋼橋管理シミュレーターシステム」の構築，土木情報利用技術論文集，vol. 17, 2008年11月，pp. 57-62.
- 8) U. Bourguad, C. G. Bucher：ISPUD (IMPORTANC SAMPLING PROCEDURE DESIGN POINT) USER'S MANUAL, November 1986.
- 9) C. G. Bucher：Adaptive Sampling - An Iterative Fast Monte-Carlo Procedure, Structural Safety, Vol. 5, p. 119-p. 126, 1988
- 10) Schüeller, G. and Stix, R., A critical appraisal of methods to determine failure probabilities, Structural Safety, 4(4), p. 293-p. 309, 1988

(2010.5.28 受付)