

I-169

構造信頼性評価に対するHarbitz法の応用

広島工業大学大学院 学生員 ○相田 清
 広島工業大学工学部 正 員 中山 隆弘
 東洋建設（株） 今野 光夫

1. まえがき

構造信頼性評価法の一手法であるシミュレーション法は、これまで種々の効率化が計られきた^{1)～3)}が、Harbitz法⁴⁾もそれらの手法のひとつである。ただし、文献4)では、2. で述べるような条件が満たされない問題への適用法までは明らかにされていないので、設計変数が非正規変数であり、かつ破壊基準関数が陽形式で表現できない、例えば波力に対する防波堤の構造信頼性問題等に応用するためには、3. で述べる方法を取り入れる必要があった⁵⁾。

さて、前回の報告⁵⁾では、Harbitz法を拡張した本シミュレーション法の有効性を、破壊確率の収束性とCPU時間を指標として示したが、3. の方法の妥当性にまでは触れなかった。そこで本報告では、本法を厳密解が得られる簡単な解析モデルに適用して妥当性を検討した結果を報告する。なお、併せて波力に対する防波堤の信頼性問題への適用結果も示しておく。

2. Harbitz法

Harbitz法 は、(a) 各設計変数によって記述された破壊基準関数が明かであり、(b) 各設計変数が互いに独立で、 $N(0, 1)$ に従う正規確率変数に変換でき、さらに(c) 安全性指標 β が明かである場合に限りその適用が可能である。図-1は設計変数が2個の場合のサンプリング領域を示したもので、半径 β の領域を除外した領域でのみサンプリングを行って、シミュレーションの効率化が達成される。その場合の破壊確率は、次式で与えられる。

$$P_f = P_r \{Z \leq 0 \mid R^2 > \beta^2\} \times P_r \{R^2 > \beta^2\} = P_r \{Z \leq 0 \mid R^2 > \beta^2\} \times \{1 - \Gamma_k(\beta^2)\}$$

ここに、 $\Gamma_k(*)$ は自由度 k の χ^2 分布関数である。また、自由度 k は設計変数の個数に等しい。さらに、 R は次式で表される様に原点からある1組の設計変数までの距離である。

$$R^2 = X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_k^2$$

3. 本シミュレーション法における破壊点の算定法

(a) β の初期値として、例えば $\beta_0 = 1.0$ を設定する。(b) 確率変数の平均値を破壊点の初期値とする。(c) 破壊点で正規確率変数を正規化近似⁶⁾する。(d) 図-2(a)に示すような $[R_1, R_2]$ 内部でサンプリングを行い、サンプリング点が破壊領域に入っていればその点を破壊点とみなし、新たな β_1 を設定する。ただし、 $R_1 = A \times \beta_0$, $R_2 = \beta_0$ とする。ここに、 $0 < A < 1$ である。(e) β_0 と β_1 を比較し、両者の差異が大きければ図-2(b)の状態が得られるまで(c)～(d)を繰り返す。以上の手順を踏むことによって近似的な破壊点が決定期できる。

4. 数値計算例

3. で提案した破壊点の算定法の妥当性を検証するため、以下のような簡単なモデルについて、本手法によって求めた破壊点と1次ガウス近似法⁷⁾によって求めた破壊点の比較を行う。

4. 1 計算モデルおよび破壊モード

計算モデルは図-3に示すように引張荷重を受ける断面積が A の一様断面棒である。破壊モードとして断面の引張破断を考えれば、破壊基準関数は次式で与えられる。

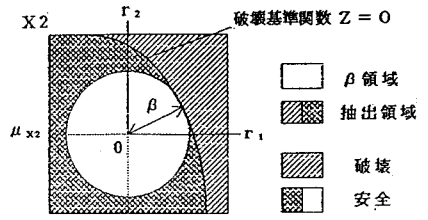


図-1 サンプリング領域

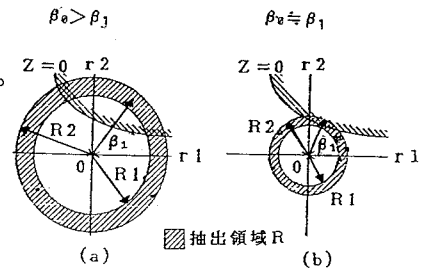


図-2 破壊点の算定法

$$Z = X1 - X2 / A$$

ここに、 $X1$ は極限引張応力度 σ_u に、 $X2$ は引張荷重 F に対応し、各々独立な確率変数とする。確率変数の母数は表-1に示す通りである。表中 $N(\mu, \sigma)$ は変数が正規分布、 $LN(\mu, \sigma)$ は対数正規分布に従うことを意味し、 μ は平均値、 σ は標準偏差を示す。

5. 計算条件

$A = 2.83 \text{ cm}^2$ とし、表-1に示す2ケースについて1次ガウス近似法および本手法により破壊点を求めた。ただし、本手法については、10回の独立なシミュレーションを行って求めた平均値および標準偏差によって評価した。

表-1 確率変数

	$X1 \text{ (kg f/cm}^2\text{)}$	$X2 \text{ (kg f)}$
CASE1	$N(2900.0, 300.0)$	$N(4000.0, 300.0)$
CASE2	$LN(2900.0, 300.0)$	$N(4000.0, 300.0)$

6. 計算結果

6.1 破壊点の算定結果

表-2および表-3にそれぞれ破壊点および破壊確率の算定結果を示す。2つの表より変数の分布形に関わらず、本手法の妥当性を確認することができる。

6.2 防波堤の信頼性問題への適用例

現行の基準⁸⁾によって設計された防波堤の構造諸元および使用した諸データの詳細については紙面の都合上講演時に示すことにするが、波力を受ける防波堤の破壊基準関数は非正規変数を含みかつ陽形式では表せない。

図-4は滑動破壊に対する単純モンテカルロ法と効率化シミュレーション法による結果を併記したものであるが、図より本シミュレーション法の有効性が理解できる。

表-2 破壊点

	CASE 1		CASE 2	
X^* : 破壊点	$X1^*$	$X2^*$	$X1^*$	$X2^*$
1次ガウス近似法	1578.440	4466.980	1726.890	4887.100
本手法 (平均値)	1578.669	4467.823	1725.538	4883.426
(標準偏差)	1.841	5.070	3.723	10.675

表-3 破壊確率

	CASE 1	CASE 2
1次ガウス近似法	$1.49 \times 10^{-9} (\beta = 4.672)$	$3.65 \times 10^{-9} (\beta = 5.784)$
本手法	1.49×10^{-9}	3.66×10^{-9}

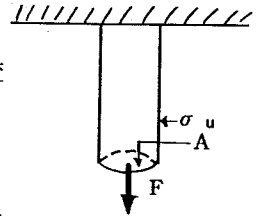
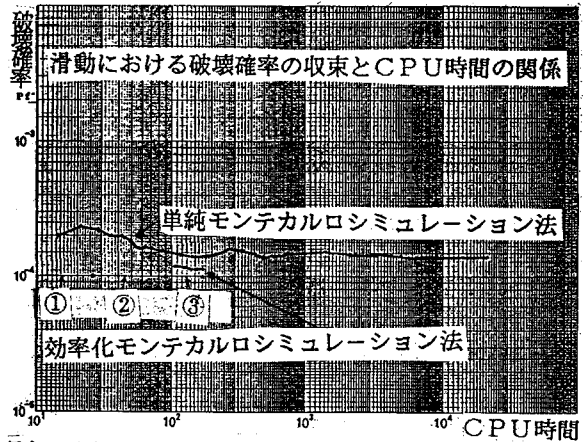


図-3 計算モデル



ここに、図-4 防波堤のシミュレーション結果 (秒)

①破壊点の算定② β の概略値の算定③破壊確率の算定

7. あとがき

破壊基準関数が非正規変数を含みかつ陽形式で表現できない信頼性問題に正規化近似法と繰返し法を用いて破壊点の算定をし、Harbitz法を適用すれば、かなり効率のいいシミュレーションを実行できることを示した。

<<参考文献>> 1)白木・Schuëller:条件付き破壊確率を用いた繰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, 構造工學論文集, Vol. 35A, pp. 467-477, 1989-3. 2)Csenki

:An Improved Monte Carlo Method in Structural Reliability, Reliability Engineering and System Safety 24, pp. 275-292, 1989. 3)白木・酒井ら:効率化モンテカルロ法とその構造信頼性解析への応用, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, pp. 378-379, 1989-10. 4)Harbitz:An Efficient Sampling Method for Probability of Failure Calculation, Structural Safety, pp. 109-115, 1986-3. 5)相田・中山・今野:効率化モンテカルロシミュレーション法による防波堤の信頼性評価に関する基礎的研究, 平成2年度土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, 1990-5. 6)星谷・石井:構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, pp. 73-76, 1986-5. 7)文献6)のpp. 64-80. 8)岩垣・彦坂:海岸工學(大學講座 土木工學 25), 共立出版, 1979-4.