剛接骨組系の簡便なシステム信頼度の評価法に関する考察

A SIMPLE EVALUATION TECHNIQUE FOR SYSTEM RELIABILITY OF RIGID FRAMES

小沢典史*, 小浜芳朗**, 高田豊文***, 宮村篤典****
Norichika KOZAWA, Yoshiro KOHAMA, Toyofumi TAKADA
and Atsunori MIYAMURA

The present study deals with the system reliability evaluation of multi failure mode systems by application of the second-order bounds method which guarantees practical convergence of reliability, particularly, in case of prominent failure modes approximately in parallel with inefficiency of numerical simulation. Practical activity of the present method is positively discussed on numerical comparison between the ultimate limit state and the serviceability limit state of six story, two span rectangular frames.

Key Words : *system reliability, liner approximate, ultimate limit, serviceability limit*
システム信頼性, 線形近似, 終局限界, 使用限界

1. はじめに

多モード破壊を対象としたシステムの信頼度評価については古くから多くの研究が行われており, 主要な手法として確率限界値による近似的な方法が数多く提案され精度の向上も図られている¹⁾²⁾³⁾. これまで, 筆者らはシステムの破壊確率における上・下限値を, 2次までの結合確率を考慮した複モード限界値に対するDitlevsenの算定式²⁾を用いて, システム信頼度を評価してきた. しかし, この算定式は高次の結合確率が無視されているため, 系においてシステム信頼度に対して寄与度の高い有効な破壊モードの数が増大すると, 算定される限界幅が広がる傾向にある問題点が存在している.

システム信頼度を評価するには個別破壊モードに対する信頼度の評価が必要とされるが, 非正規変数によって構成されるその解析法には, モンテカルロ法, 2次モーメント法を始め, 小野らの高次積率を考慮した非正規変数の標準化手法⁴⁾や, 坂本らの高速フーリエ変換を応用した方法⁵⁾など良好な方法が提案されている.

システム信頼度評価には, 更に, 必要な破壊モード群を探索する必要があるが, この方法には, 破壊モード列挙法や破壊パス上における分枝限定法⁶⁾⁷⁾, 更に塑性崩壊を対象とする場合では, 動的許容条件に基づく組合せモード探索法, 静的許容条件に基づく確率極限解析法を発展させた確率計画法⁸⁾等がある. 特に大規模システムになると全ての破壊モードを列挙したり, 多量の応力解析を行うこと

が困難となるので, 実用的にはシステム信頼度に寄与の大きいモードのみを探索できる組合せモード探索法や確率計画法が有効である.

本稿では, 対数正規変数を持つシステム信頼度に関して単純かつ精度的にバランスのとれた評価手法として, これまで実績のある遺伝的アルゴリズム(GA)に基づく組合せモード探索法⁹⁾と個別モード信頼度評価にAFOSM法(拡張線形2次モーメント法)を用い, 更に, 破壊モードに関する2次までの統計量を用いた多モード破壊システムに対する簡便なシステムの信頼度評価法を提案する. AFOSM法を適用することによりその限界状態関数は非相関標準正規空間において線形式となるため, システムの破壊確率を評価する際に重要となるモード間の結合確率を簡便に評価できるという利点もある.

2. 近似システム信頼度評価法

結合対数正規確率変数下における多モード破壊事象を含む系のシステム信頼度の評価精度は, 個別破壊モードの信頼度計算とこれに基づくシステム信頼度計算の精度に依存する. 以下に, これらの評価法と精度について述べる.

2.1 結合対数正規変数下の線形限界状態関数の信頼度評価

対数正規変数の線形限界状態関数値は非対数正規変数になることから, その信頼度の厳密な評価は困難であるが, 次の2種類の近似

* 三重大学大学院工学研究科 大学院生・修士(工学)
** 三重大学工学部建築学科 教授・工博
*** 三重大学工学部建築学科 助手・修士(工学)
**** 名古屋市立大学芸術工学部 教授・工博

Graduate Student, Dept. of System Eng., Mie Univ., M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.
Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Mie Univ., M. Eng.
Prof., School of Design and Architecture, Nagoya City Univ., Dr. Eng.

図1 結合確率の評価精度 ($\beta_i=2$)

の方法が考えられる。1. 対数正規変数を等価正規近似して評価する方法。2. 対数正規変数を正規変数変換し非線形限界状態関数を線形化する方法。これら2種の方法を比較検討した結果、評価精度・計算量に関する差異が少ないことが判明した¹⁰⁾。本稿では、非線形限界状態関数にも適用可能で、適用範囲の広い後者の方法を用いる。

対数正規変数 X_i は対数をとることにより、正規変数 Y_i へ変換することができ、この変換による Y_i の統計量は次式のようになる。

$$\begin{aligned}\mu_{Y_i} &= \ln(\mu_{X_i} / \sqrt{1 + V_{X_i}^2}), \\ \sigma_{Y_i}^2 &= \ln(1 + V_{X_i}^2), \\ \rho_{Y_{ij}} &= \frac{\ln\{1 + \rho_{X_{ij}} V_{X_i} V_{X_j}\}}{\sqrt{\ln(1 + V_{X_i}^2) \ln(1 + V_{X_j}^2)}}\end{aligned}\quad (1)$$

ここに、 $\mu_{X_i}, V_{X_i}, \rho_{X_{ij}}$ は変数 X_i の平均値、変動係数、相関係数、 $\mu_{Y_i}, \sigma_{Y_i}, \rho_{Y_{ij}}$ は、変数 Y_i の平均値、標準偏差、相関係数を示す。

したがって、対数正規変数 $\{X\}$ に対する線形限界状態関数は、正規変数 $\{Y\}$ に関する非線形限界状態関数に変換される。

$$G(\{X\}) = a_0 + \{a\}^t \{X\} \quad (2)$$

$$g(\{Y\}) = a_0 + \{a\}^t \exp(\{Y\}) \quad (3)$$

(3) 式は非線形関数であるから、非相関標準正規空間における限界状態面上において原点からの最短距離点に対する線形化関数を用いる AFOSM 法により信頼度が近似評価される。

2.2 システム信頼度の逐次近似評価

AFOSM 法により線形化された限界状態関数を持つ多モード破壊システムの信頼度の厳密な評価は困難であるため、確率限界値で評価される場合が多い^{1) 2) 3)}。代表的な評価法としては Ditlevsen による限界値²⁾があげられるが、これは、破壊モードが多数となると3次以上の結合確率が無視されるため、上・下限界幅が広くなるといった欠点がある。以下に、この算定式を参考にした等価線形化法に基づく新しいシステム信頼度評価法を提案する。

n 個の個別モード破壊事象 ($E_i; i = 1, \dots, n$) の直列モデルで構成される系のシステムの破壊事象 E_{sys} は下式で表現できる。

$$E_{sys} = (\dots((E_1 \cup E_2) \cup E_3) \cup \dots) \cup E_n \quad (4)$$

(4) 式は、(・) 内で示される和事象を一つの事象とみなせば、2-事象和を多重に実行することにより評価できることを示している。

2-和事象に対する信頼度評価

2-和事象に対する確率は次式によって計算される。

$$\begin{aligned}P[E_i \cup E_j] &= P[E_i] + P[E_j] - P[E_i \cap E_j], \\ &= \Phi(-\beta_{ij}), \\ P[E_i] &= \Phi(-\beta_i)\end{aligned}\quad (5)$$

図2 2つの限界状態関数の等価線形近似

ここに、 $P[E_i \cup E_j], P[E_i \cap E_j]$ はそれぞれ i, j -破壊モードからなる和事象、積事象の破壊確率、 $P[E_i]$ 、 β_i は i -破壊モードの破壊確率、信頼性指標、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規確率分布関数を示す。

$P[E_i \cap E_j]$ は、限界状態関数が非相関標準正規空間において線形であり、確率変数が正規変数の場合には、Ditlevsen の算定式²⁾によってその上・下限値が評価できる。ここでは、この上・下限値を参考にし、更に、 $\rho_{g_i, g_j} = 0, 1.0$ の場合には理論解に一致させることを考えて、次式の単一値により簡便に近似評価する。

$$\begin{aligned}P[E_i \cap E_j] &\approx \text{Max}[P_{ij}, P_{ji}] + \rho_{g_i, g_j} \text{Min}[P_{ij}, P_{ji}], \\ P_{ij} &= \Phi(-\beta_i) \Phi\left(-(\beta_j - \rho_{g_i, g_j} \beta_i) / \sqrt{1 - \rho_{g_i, g_j}^2}\right)\end{aligned}\quad (6)$$

図1は(6)式による評価結果と数値積分結果との対比を示したもので、図中の範囲では(6)式の評価誤差は僅少であることが確認できる。

等価線形限界状態関数近似

(5) 式を多重に用いて(4)式に基づきシステム信頼度を評価するには結合確率 $P[E_i \cap E_j]$ が必要とされ、和事象の限界状態関数は一般に非線形となるため(6)式を適用できないが、本稿ではこの非線形限界状態関数を等価線形近似することにより、(6)式を適用可能とさせることを考える。以下では、説明を簡単にするため、3つの和事象でシステム破壊が表される場合を考える(図2-左)。

和事象 $E_{ij} = E_i \cup E_j$ とその限界状態関数は下式で表される。

$$\begin{aligned}E_{ij} : \{g_i < 0\} \cup \{g_j < 0\} &= \{\text{Min}[g_i, g_j] < 0\}, \\ g_{ij} &= \text{Min}[g_i, g_j] = g_i U(g_j - g_i) + g_j U(g_i - g_j)\end{aligned}\quad (7)$$

ここに、 g_i は非相関標準正規空間における i -破壊モードの限界状態関数、 $U(\cdot)$ は階段関数を示す。

限界状態関数 g_{ij} は非線形関数であるため、それを確率的重みを使って次式のように線形関数 $\tilde{g}_{ij}$ へ等価線形近似する(図2-右)。

$$\begin{aligned}\tilde{g}_{ij} &= g_i P_{i-j} + g_j P_{j-i} + C, \\ P_{i-j} &= E[U(g_i - g_j)] = P[g_i - g_j \leq 0] = \Phi(-\beta_{i-j}) \\ &= 1 - P_{j-i}, \\ \beta_{i-j} &= (\beta_i \sigma_{g_i} - \beta_j \sigma_{g_j}) / \sqrt{\sigma_{g_i}^2 - 2\rho_{g_i, g_j} \sigma_{g_i} \sigma_{g_j} + \sigma_{g_j}^2}\end{aligned}\quad (8)$$

ここに、 C は(7)式と(8)式による破壊確率が一致する条件により定められる定数である。 $E[\cdot]$ は期待値、 P_{i-j} は $g_i - g_j \leq 0$ となる確率、 σ_{g_i} は i -破壊モード限界状態関数値の標準偏差である。

(8) 式のような近似を行うと、これと破壊モード k との共分散 $\text{Cov}[\cdot]$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned}\text{Cov}[\tilde{g}_{ij}, g_k] &= \text{Cov}[g_i, g_k] P_{i-j} + \text{Cov}[g_j, g_k] P_{j-i}, \\ \sigma_{\tilde{g}_{ij}}^2 &= \sigma_i^2 P_{i-j}^2 + 2\rho_{g_i, g_j} \sigma_i \sigma_j P_{i-j} P_{j-i} + \sigma_j^2 P_{j-i}^2\end{aligned}\quad (9)$$

図3 荷重変動, $\rho = 0.0$, c.s.f.=1.2 図4 荷重変動, $\rho = 0.5$, c.s.f.=1.6 図5 抵抗変動, $\rho = 0.0$, c.s.f.=1.1

図6 卓越信頼度型 (30 モード)

図7 一様信頼度型 (30 モード)

図8 一様信頼度型 (10 モード)

$\bar{g}_{ij}$ と g_k の相関係数 $\rho_{\bar{g}_{ij}, g_k}$ は i, j, k -破壊モードの統計量を使って算定できる。

$$\rho_{\bar{g}_{ij}, g_k} = \frac{\rho_{g_i, g_k} \sigma_i P_{i-j} + \rho_{g_j, g_k} \sigma_j P_{j-i}}{\sqrt{\sigma_i^2 P_{i-j}^2 + 2\rho_{g_i, g_j} \sigma_i \sigma_j P_{i-j} P_{j-i} + \sigma_j^2 P_{j-i}^2}} \quad (10)$$

したがって、等価線形化限界状態関数を用いると (5) 式を準用して、システム破壊確率の近似値が評価できる (図2-右)。

以上の関係を用いて多重逐次近似を行うことにより、2次までの統計量だけを使った多モード破壊システムに対するシステム信頼度評価が可能となる。

なお、上述の線形近似に起因して (4) 式に基づく逐次評価順序がシステム信頼度の評価精度に影響を与えることが予想される。多くの試計算の結果、モード信頼性指標の昇順に評価するのが最も高精度であったので、以下ではこの評価順序に従っている。

2.3 数学モデルを使った評価例

本項では前述した近似評価法の精度について、理想化された数学モデルを使って検証する。なお、妥当値の算出については10000標本のモンテカルロシミュレーションを使って数値的に求めた。

個別破壊モードの信頼度評価例

限界状態関数には荷重作用項と抵抗項が存在するが、確率変数に対数正規変数を仮定した場合、その分布形は左右非対称であるため、各項に分割して検討の方が妥当であると判断される。また、評価精度には各種統計量や限界状態関数の係数などが影響を与えるが、主要な影響因子は確率変数の数であるので、本項では、これに対する基本的性状を調べる目的から、限界状態関数 ((2) 式) における定数 a_0 と係数 a_i は、場合分けによって以下のように設定した。

1. 荷重作用が確率変数で抵抗が確定値。 $a_0 > 0, a_i = -1$ (一律)
2. 荷重作用が確定値で抵抗が確率変数。 $a_0 < 0, a_i = 1$ (一律)

図3~5から荷重作用が確率変数の場合にはモンテカルロ法の結果に対し近似結果が β 値を大きめに評価し、抵抗が確率変数の場合には逆の結果が得られている性状が指摘される。

本例では、相関係数が大きい領域および変動係数の小さい領域においては誤差は僅少であった。しかし、相関係数が小さい領域では確率変数の数の増加と共に誤差が大きくなる傾向があり、変動係数が大きくなるとこの傾向は増長される。また、現実の構造物では荷重作用と抵抗が共に確率変数であるため、荷重作用と抵抗の誤差は互いに相殺するように働く。したがって、後述の例のような現実的なパラメータ値においては実用上十分な精度であると判断する。

システムの信頼度評価例

本システム信頼度計算ではAFOSM法により線形化された個別モードの限界状態関数が用いられるので、本例では正規変数下の線形限界状態関数に対するシステム信頼度の評価例を以下に示す。

システム信頼度に影響する要因は、モードの β_i とモード間の相関係数 ρ_{ij} である。特に、個別モードの β 値が同レベルの場合には、多数のモードがシステム破壊に寄与するが、或モードの β 値が卓越して小さい場合には、この破壊モードがシステム破壊に支配的となる傾向がある。したがって、モードの β が全て同じ値の場合 (一様信頼度型) と、1つの値だけが他の値より小さく他は全て同じ値である場合 (卓越信頼度型) との2種類について検討すれば概括的性状は把握できる。なお、 ρ_{ij} は全て同じ値 $\rho_{ij} = \rho$ とした。

図6,7はモード数が30の場合、図8は10モードの場合におけるシステム信頼度と相関係数の関係を示したものであるが、卓越信頼度型モデルの β は1モードだけ2.5、残り全部が3.0、一様信頼度型モデルの β は全部2.5である。なお、図中の上・下限値はDitlevsenの算定式による値である。図より何れの場合においても本評価法は、シミュレーション値に対して若干高めに信頼度を評価

しているが、高々0.2程度の誤差である事が確認できる。

以上本近似評価法について要約すると以下ようになる。

1. 限界状態関数の信頼度評価精度に関しては誤差の存在が否めないが、実用的には十分な範囲であると判断される。
2. 提案するシステム信頼度評価法は個別モード群の信頼度特性やその破壊モード数に依存せずに良好な精度を有している。

したがって、本評価法による信頼度評価は有効であると結論される。

3. 限界状態関数とモード生成

本稿では実際の限界状態として、限界状態設計法¹²⁾¹³⁾に準じて、剛接骨組の塑性崩壊に関する終局限界状態⁹⁾と、強度・変形に関する使用限界状態¹¹⁾の2つの限界状態を設定する。

3.1 終局限界状態関数

破壊事象を骨組の塑性崩壊と定義すると、 E_i は下式で表現される。

$$E_i : G_i(\{M_P\}, \{P\}) = \{\tau_{P_i}\}^t \{M_P\} - \{D_i\}^t \{P\} < 0 \quad (11)$$

ここに、 G_i は i -破壊モードの限界状態関数、 $\{\tau_{P_i}\}$ 、 $\{D_i\}$ はそれぞれ塑性ヒンジ回転ベクトル、節点変位ベクトル、 $\{M_P\}$ 、 $\{P\}$ はそれぞれ材の塑性モーメントベクトル、節点荷重ベクトルである。

多モード破壊システムの破壊確率計算には全ての破壊モードを考慮する事が基本であるが、塑性崩壊を破壊事象として定義した場合には可能な破壊モード数が莫大な数となり、モード生成が困難となるため、限られた数の破壊モード群を用いて実用的精度で評価を行うのが実際的方法である。したがって、少ないモード数で十分な精度を持つシステムの信頼度評価を行うためには、有効な破壊モード群を探索する必要がある。塑性崩壊に対する任意の破壊モードは互いに独立な基本モードの線形結合で表すことができるので、基本モード群が得られた下では、有効なモードの探索問題は基本モードに関する典型的な組合せ最適化問題として定式化できる。この解法には遺伝的アルゴリズム (GA) を使った解法⁹⁾を用いる。

3.2 使用限界状態関数

破壊事象を材の降伏及び、過度の変形と定義すると、各破壊事象 E 及び限界状態関数 $G(\cdot)$ は次式で表現される。

$$E_i : G(M_{Y_i}, \{P\}) = M_{Y_i} - |M_i(\{P\})| < 0 \quad (12)$$

$$E_j : G(\delta_{a_j}, \{P\}) = \delta_{a_j} - |\delta_j(\{P\})| < 0 \quad (13)$$

ここに、 $\{P\}$ は節点荷重ベクトル、 M_{Y_i} 、 M_i はそれぞれ i -危険断面の降伏モーメント、荷重作用モーメント、 δ_{a_j} 、 δ_j はそれぞれ j -材の許容変形量、荷重作用変形量である。

$M_i(\{P\})$ 、 $\delta_j(\{P\})$ については、使用限界状態に至るまでは弾性状態であることを前提として、たわみ角法により決定される行列の逆行列から求めている。したがって、限界状態関数は確率変数 $\{M_Y\}$ 、 $\{\delta_a\}$ 、 $\{P\}$ に関する線形式となる。

材の降伏モーメント M_Y 、剛度 EK は次式により算定している。

$$M_Y = 0.9 M_P \quad (14)$$

$$EK = M_P \cdot E / \sigma_Y \cdot I / Z_l \quad (15)$$

ここに、 E / σ_Y はヤング係数と降伏応力度の比、 I 、 Z_l は断面2次モーメント、断面係数、部材長を示し、標準的なH形鋼断面に基づき数値が設定される。

			mean		mean		c.o.v.	
			C_i (xPI)	B_i	C_i (xPI)	B_i		
H_6	P_6	B_6						
H_5	C_6	B_6						
H_4	C_5	B_5	0.48	0.46	0.66	0.45	0.1	1.0H
H_3	C_4	B_4	0.68	0.68	0.68	0.58	0.1	0.8H
H_2	C_3	B_3	0.75	0.75	0.82	1.18	0.1	0.7H
H_1	C_2	B_2	1.10	1.10	1.01	0.72	0.1	0.6H
	C_1	B_1	1.32	1.32	1.16	0.98	0.1	0.5H
			1.73	1.73	2.11	1.39	0.1	0.4H

model A model B

correlation			mean		c.o.v.
$\rho_{HH} = 0.6$	$\rho_{PP} = 0.4$	$\rho_{HP} = 0.0$			
$\rho_{CC} = 0.0$	$\rho_{BB} = 0.0$	$\rho_{CB} = 0.0$	P_i	1.0P	0.15

図9 解析骨組

本稿では、剛度は確定量として扱っているため、(12)、(13)式に基づく破壊モード群は有限個数である。したがって、全ての破壊モードを列挙することが可能であるから、使用限界状態に対するシステム信頼度はそれら全てを使って評価する。

4. 剛接骨組のシステム信頼度の評価例

本稿では図9に示す6層2スパン骨組を解析モデルとする。図中の数値は強度、荷重の平均値、変動係数を表し、 C_i 、 B_i は柱、梁材の塑性モーメント比を表す。本例では強度の異なる骨組モデルを設定するため、終局限界用荷重に対する中央安全率が所定値(1.4~1.8)になるような倍率を C_i 、 B_i に乘じた値を各塑性モーメント値に設定している。さらに、数学モデルで検証した場合と同じ理由により、終局限界状態に対するモード信頼度がほぼ同様な一様信頼度型のモデル(model A)と或モードの破壊確率が支配的となる卓越信頼度型モデル(model B)の2種の強度モデルが設定されている。図10,11は $c.o.v._H = 0.25$ の場合における各骨組モデルのモード信頼性指標と崩壊モードに含まれる基本崩壊モードの組合せ数 K との関係を図示したもので、●印は、各組合せ数 K における最小値を示し、システムにおける最小の β 値(卓越モード)を矢印で示した。◇印は、卓越モード(矢印)とのモード間相関係数 ρ を示す。また、図中には代表的なモードについてその崩壊機構を例示した。model Aでは $K=4 \sim 18$ の範囲で β 値がほぼ一様、model Bでは $K=9$ の β 値が卓越して小さい性状が分かる。

本解析骨組モデルの確率変数は全て対数正規分布を仮定し、その種類は荷重作用項が12種、抵抗項が12種で計24種である。水平荷重 H は風荷重や地震荷重を対象とし、終局限界状態に対しては50年最大値、使用限界状態に対しては年最大値を想定して、文献¹²⁾¹³⁾から水平荷重 H の平均値と変動係数を概括的に次のように決定した。

H	mean	c.o.v. _H
終局限界	P	0.25, 0.5
使用限界	$P/3$	0.6

なお、終局限界 $c.o.v._H = 0.5$ は、対象とする荷重の変動係数としてはやや過大と考えられるが、 $c.o.v._H$ の影響を検討する上で参考として設定した。評価精度の妥当性を検討するために行ったモンテカルロシミュレーションは10000標本であるが、すべての破壊モードが列挙できない終局限界状態に対しては、LPによる塑性解析を用いてモンテカルロシミュレーションを行った。

図 10 model A, $\beta - K$, $\rho - K$ 関係, c.s.f.=1.5 図 11 model B, $\beta - K$, $\rho - K$ 関係, c.s.f.=1.5

図 12 model A, 終局限界

図 13 model B, 終局限界

4.1 終局限界状態に対するシステム信頼度

図 12, 13 は, GA によって得られた破壊モード群 (25 モード) を使って評価した本評価法によるシステム信頼性指標値, モンテカルロシミュレーション結果と各骨組モデル (中央安全率) との関係を併せて図示したものであるが, GA のような確率的探索手法は 1 回の試行により判断することは妥当ではないので, その確率変動によるバラツキを示すために, 異なる 5 種類の乱数列を用いて行った結果を記す。これら 5 つは横軸に対して広がりがあるが中央安全率は全て同じである。なお, 5 種類の限界幅を図示した Ditlevsen の上・下限界値についても本評価法と同じモード群を使って算定された。

本評価法による評価値とモンテカルロシミュレーション結果及び Ditlevsen の上・下限界値との比較から以下のことが指摘される。

1. model A, B 共に本近似法による評価値はシミュレーション結果と比較して実用上十分な精度を有しているとみなされる。但し, model B の c.o.v._H=0.25 で中央安全率が 1.7, 1.8 のモデルの一部において高めに評価する傾向にあるが, これは GA による卓越モード探索に失敗した場合であり, 使用モード数を増加させることによりこの傾向は解消される。
2. 特に, 卓越信頼度型の model B において, 本手法が高精度であるのは, システム破壊に卓越モード破壊が支配的な影響を及ぼすので, システム信頼度は卓越モードのそれにほぼ等しいことによるものである。したがって, この種のモデルでは卓越モードを抽出することが特に重要であるといえる。
3. 一様信頼度型の model A では使用モード数が 25 より増加させると, シミュレーション結果との差異が若干増大する傾向が

見受けられたが, これは相関の高い類似した破壊モードが多数組み入れられることにより, 本手法における各モードの評価順序が精度に影響を与えているものと推察される。

4. 特に, 一様信頼度型の model A において Ditlevsen の上・下限界幅が大きくなる傾向にあるのは, 図 6~8 で認められた傾向と同様な理由である。本評価法による評価誤差はこの限界幅に比べて十分小さいので, 本評価法は確率限界値の手法より優れていると言えよう。

4.2 使用限界状態に対するシステム信頼度

使用限界状態に対しては層間変形に関する限界状態も考えており, 許容変形量 δ_a も確率変数 (6 種) となるため, 確率変数は全部で 36 種である。 δ_a は対数正規分布を仮定し, 平均値を 1/120, 変動係数を 0.2 と設定した。この限界変形の特値 (非超過確率 99% 値) は約 1/182 となり, 現行設計法の許容層間変形値に概ね対応している。また, (15) 式の変換において必要となる値は標準的な H 形鋼に基づき, $E/\sigma_Y = 750$, $(I/Z \cdot 1/l) = 20/350$ (柱), $30/350$ (梁) とした。一方, 骨組に存在する破壊モードは応力に関するモードが 168 種, 層間変形に関するモードが 6 種で計 174 種である。

図 14, 15 は終局限界状態に対する中央安全率 1.5 のモデルについて, 使用限界状態の破壊モード群に対する信頼性指標と卓越モードとのモード間相関係数の分布を示した図である。図中の ●印は降伏限界 (12) 式, ○印は変形限界 (13) 式に基づくモードを表している。model A では, 最小 β 値が 1.1 であり, 2 番目以降の β 値が 1.91 以上であるため卓越モード型とみなされ, model B では最小 β 値を含め 1.65~2.2 の β 値を有するモードが 4 個存在し, 同レベル信

図 14 model A, $\rho - \beta$ 関係 図 15 model B, $\rho - \beta$ 関係

図 16 model A, 使用限界

図 17 model B, 使用限界

信頼度のモードが複数存在するモード特性であると判断されるが、図 10,11 の崩壊モードとの対応関係はない。

図 16,17 は使用限界状態に対するシステム信頼度評価結果を図示したものであり、使用限界状態に対するシステム信頼度の評価性状として以下の点が指摘される。

1. model A,B 共に、本手法による評価値は極めて高精度である。これは図 14,15 に示されるように、卓越信頼度型に近いモード特性によるものである。
2. 本荷重条件のもとでは使用限界システム信頼性指標は終局限界の $c.o.v._H=0.25$ に比べて概ね 0.8~1.0 程度小さい傾向がある。
3. Ditlevsen の限界幅に比べて本評価誤差は非常に小さいので、本評価法は確率限界値の評価法より優れているといえる。

5. まとめ

本稿では対数正規確率変数によって表されるシステムに対する信頼度の近似評価法を提案し、モンテカルロシミュレーション値や、筆者らが従来から用いてきた Ditlevsen の算定式による上・下限値と比較することにより、その精度・適用性について考察したが、本稿の内容をまとめると以下になる。

1. 対数正規確率変数によって構成される線形限界状態関数の信頼度評価に対して、対数正規変数を正規変数に変換し、変換後の非線形限界状態関数に AFOSM 法を適用して評価した信頼度の精度について、簡単な数学モデルを使って検討し、現実的なパラメータにおいてはその誤差が許容範囲であることを示した。
2. 個別破壊モードに関する 2 次までの統計量を用いて限界状態関数の逐次等価線形化に基づくシステム信頼度の簡便な評価法を提案し、モンテカルロシミュレーション結果との比較から、本手法は実用上十分な精度を有していることを示した。
3. 剛接骨組系の塑性崩壊を終局限界状態とした場合と、強度・変形に関する使用性を使用限界状態とした場合について、システ

ム信頼度評価性状の異なる典型的な 2 種類の例題を示し、何れの場合においても本評価法は良好な結果が得られる適用性の高い評価手法であることを示した。

本解析法はシステム信頼性を目標にした最適設計にも応用でき、精度の高い設計を可能とする。これについては次の機会に報告する。

なお、本研究の一部には、平成 10,11 年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(c)、代表者: 小浜芳朗、課題番号: 10650561)の援助を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) Alefred H.-S. Ang, Wilson H. Tang: 伊藤 学, 亀田 弘行, 黒田 勝彦, 藤野 陽三 共訳: 確率・統計の応用, 丸善, 1988
- 2) O. Ditlevsen: Narrow reliability-bounds for structural systems, J. Struct. Mech., ASCE, Vol. 7, pp. 435-451, 1979
- 3) 日本建築学会設計荷重小委員会: 設計荷重の考え方, pp. 91-102, 1989
- 4) 小野 徹郎, 井戸田 秀樹: 高次確率標準化手法とそれに基づく信頼性指標の設定, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 359 号, pp. 43-49, 1986.1
- 5) 坂本 順, 森 保宏, 関岡 孝緒: 離散高速フーリエ変換による確率解析法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 472 号, pp. 39-45, 1995.6
- 6) Murotsu, Y., Okada, H., Yonezawa, M. and Taguchi, K.: Reliability Assessment of Redundant Structure, 3rd Int. Conf. of Structural Safety, 1, No. 1, pp. 315-328, 1981
- 7) Thoft-Christensen, P. and Murotsu, Y.: Application of Structural Systems Reliability Theory, Springer-Verlag, 1986
- 8) 西田 明美, 孫 宏, 大井 謙一, 高梨 晃一: 骨組構造物の崩壊モード探索に関する一考察, JCROSSAR '95 論文集 Vol. 3, pp. 239-242, 1995
- 9) 小沢 典史, 小浜 芳朗, 高田 豊文, 宮村 篤典: 剛接骨組系のシステム信頼性解析問題に対する GA の適用, 構造工学論文集 45B, pp. 275-281, 1999
- 10) 小沢 典史, 小浜 芳朗, 高田 豊文, 宮村 篤典: GA による剛接骨組のシステム信頼性評価における精度に関する考察, 日本建築学会東海支部研究報告集 第 37 号, pp. 221-224, 1999
- 11) 小沢 典史, 小浜 芳朗, 高田 豊文: GA による剛接骨組の使用限界システム信頼性の評価法, 計算工学講演会論文集 Vol. 4, pp. 501-504, 1999
- 12) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 1993
- 13) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 1998

(1999年7月9日原稿受理, 1999年11月1日採用決定)