パラメータの不確定性を考慮した動的構造信頼性評価

DYNAMIC STRUCTURAL RELIABILITY EVALUATION
CONSIDERING PARAMETER UNCERTAINTIES

趙 衍 剛*, 小野 徹郎**, 鈴木 誠***

Yangang ZHAO, Tetsuro ONO and Makoto SUZUKI

In evaluating dynamic reliability of structures with consideration of uncertainties included in structural properties and excitation characteristics, the gradients of the conditional failure probability with respect to the uncertain parameters are needed. In this paper, in order to avoid the difficulties in obtaining the gradients, a procedure of extensive FORM combined with Response Surface Approach is proposed, in which the performance function is approximated by a second order response surface and solved by FORM. The influences of parameter uncertainties are discussed and it has been proved through some examples that the proposed method has advantages in both computational efficiency and precision.

Keywords: dynamic structural reliability, parameter uncertainty, FORM, performance function, response surface approach
動的構造信頼性, パラメータの不確定性, 一次信頼性評価法, 限界状態関数, 応答曲面法

1. はじめに

静的構造信頼性を評価するとき、構造物の力学モデルのパラメータ、例えば強度、剛性などは基本確率変数に含まれ、その不確定性は当然考慮すべきものとしている。動的構造信頼性評価では、不規則振動解析及び最大応答分布の同定が複雑であるため、それらの力学モデルのパラメータはもとより、動的解析に関わる減衰定数、荷重プロセスの周波数スペクトル、継続時間などのパラメータも一般に既知あるいは確定値と仮定されている。しかし、これらのパラメータに含まれている不確定性は動的構造信頼性の評価結果に大きな影響を与える。確率過程と不規則振動論に関する研究が著しく発展を遂げており、動的構造信頼性評価は実用的段階に至っている今日、これらの不確定性を考慮して、適切に動的構造信頼性を評価することは大きな課題である^{[1]~[5]}。

本論文では、限界状態関数をResponse Surfaceで近似することにより現在用いられる拡張FORMにおける感度解析の問題を避け、既存の動的信頼性解析プログラムを用いて、パラメータの不確定性を考慮できる動的信頼性の簡便な評価法を提案した。いくつかの数値解析例を通して、提案した手法の特徴を考察し、その有効性を示した。

2. 拡張FORMとその問題点

パラメータ $\mathbf{X}_1$ を有する構造物にパラメータ $\mathbf{X}_2$ を有する動的荷重プロセス $S(t, \mathbf{X}_2)$ が作用する場合を考える。このとき、 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2)$ を時間的に変化しない確率変数と仮定すると、構造物の破壊確率は次式で表される。

$$P_F = \int_{G(\mathbf{X}, \mathbf{R}) < 0} f(\mathbf{X}, \mathbf{R}) d\mathbf{X} d\mathbf{R} \quad (1)$$

ただし、 $f(\mathbf{X}, \mathbf{R})$ は $\mathbf{X}$ と $\mathbf{R}$ の結合確率密度関数であり、 $G(\mathbf{X}, \mathbf{R})$ は構造システムの限界状態関数である。 $\mathbf{R}$ は不規則振動の応答変数であり、 $\mathbf{X}$ の関数である。

式(1)を解くためには、 $f(\mathbf{X}, \mathbf{R})$ と $G(\mathbf{X}, \mathbf{R})$ を陽な式で記述する必要がある。しかし、一般的にこれらを陽な式で表現できることは稀であるため、式(1)を解くことが困難となっている。そこで、 $\mathbf{X}$ が確定値である場合の条件付き破壊確率 $P_F(\mathbf{X})$ を求め、次式のように $\mathbf{X}$ の全定義領域で積分することにより全破壊確率を求める。

$$P_F = \int_{\mathbf{X}} P_F(\mathbf{X}) f(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \quad (2)$$

式(2)の解析手法としては数値積分法とMonte-Carlo法が挙げられるが、数多くの条件付き破壊確率 $P_F(\mathbf{X})$ を繰り返して計算しなければなら

* 名古屋工業大学 助手・工博
** 名古屋工業大学 教授・工博
*** 清水建設協和泉研究室 主任研究員・工博

Research Assoc., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
Senior Research Eng., Izumi Research Institute, Shimizu Corp., Dr. Eng.

らない。また、2次モーメント法により解析することもできるが、 $P_f(\mathbf{X})$ の2階導関数が必要となり、精度もよくない。

Madson^[1], Balendra^[2]などは補助確率変数を導入し、動的信頼性を等価な静的信頼性に変換して解析することを試みたが、補助確率変数の分布を求めることが困難であった。この問題点を解決するため、Wen^[11]は直接標準空間で次の限界状態関数を提案している。

$$G_U(\mathbf{U}, u_{n+1}) = u_{n+1} - \Phi^{-1} \left[P_f \left\{ T^{-1}(\mathbf{U}) \right\} \right] \quad (3)$$

ただし、 $\mathbf{U}$ は $\mathbf{X}$ から変換した標準正規確率変数ベクトルであり、 u_{n+1} は標準正規確率変数である。 T はRosenblatt変換である。

さらに、趙、小野ら^{[4][5]}は式(4)、(5)に示す一般的な限界状態関数を得ており、式(3)が式(5)の特殊な形式であることも明らかにしている。

$$F_{x_{n+1}}(0|\mathbf{X}) = P_f(\mathbf{X}) \quad (4)$$

$$G(\mathbf{X}, x_{n+1}) = x_{n+1} \quad (5)$$

x_{n+1} の導関数は次式で表される。

$$\left\{ \frac{\partial x_{n+1}}{\partial u_i} \right\}_{i \leq n} = - \left[J_n^{-1} \right]^T \left\{ \frac{\partial P_f(\mathbf{X})}{\partial x_i} \right\}_{i \leq n} \quad (6)$$

ただし、 ϕ は標準正規確率密度関数であり、 J_n はJacobianマトリックスである。

式(3)～式(6)には補助確率変数 x_{n+1} の確率分布が含まれておらず、結果的にFORMで式(2)を解くことができる。この手法は、FORMの適用範囲をパラメータの不確定性を考慮した動的構造信頼性問題に拡張しており、ここでは拡張FORMと呼ぶ。

拡張FORMでは式(6)のように限界状態関数または条件付き破壊確率の導関数を計算することが必要となる。しかし、動的構造信頼性解析には固有解析、応答解析、不規則振動解析などの複雑な計算過程が含まれており、その導関数を求めることは容易ではない^[6]。

一方、複雑な陰関数の取り扱い方としてはResponse Surface Approachが開発されている^{[7][8]}。Response Surface Approachは、複雑な陰関数を未定係数を含む簡単な陽関数で近似し、その導関数を取り扱う上の困難さを回避する手法である。

3. 解析手法

3.1 Response Surface Approachの概念

複雑な構造物の信頼性評価するとき、構造システムの限界状態関数 Z は、数多くの入力変数 $\mathbf{X}$ の関数 $Z=G(\mathbf{X})$ で表される、しかし、この関数は一般にかなり複雑で、陽な式で記述できないこともあり、構造信頼性解析に大きな支障となる。そこで、 $G(\mathbf{X})$ がある陽な形式、 $G'(\mathbf{X})$ で近似し、構造信頼性解析を行うことがResponse Surface Approachの基本概念である^{[7]-[11]}。

一般には、 $G(\mathbf{X})$ を未定係数を含む n 次多項式 $G'(\mathbf{X})$ で近似し、 $G'(\mathbf{X})$ に含まれている未定係数を求めるためには、選択された複数の点 $\mathbf{X}_i$ で $G(\mathbf{X}_i)$ を計算する(数値実験)必要がある。 $G'(\mathbf{X})$ の次数が高ければ高いほど $G(\mathbf{X})$ を近似する精度は高くなるが、計算時間は多項式の次数の増加に従って指数的に増加する。そのため、計算精度と計算時間のバランスを考えて、ほとんどの研究では2次多項式を用いている。

$$G'(\mathbf{X}) = a + \mathbf{X}^T \mathbf{B} + \mathbf{X}^T \mathbf{C} \mathbf{X} \quad (7)$$

ただし、 a , $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ は未定係数であり、その数は n^2+n+1 である。

信頼性解析に対しては、設計点あるいは結合確率密度の高い点のまわりに $G(\mathbf{X})$ を精度良く近似する必要がある。しかし、限界状態関数の陽な式についての情報が事前に分からないため、数値実験は一般に確率変数の平均値を中心点にして実行する。

得られた $G'(\mathbf{X})$ の設計点をそのまま $G(\mathbf{X})$ の設計点として近似的に取り扱うのは基本的な方法である。最近では精度をあげるために、次式で新中心点を推定し、続いてResponse Surface Approachを行うことも提案されている^{[9][10]}。

$$\mathbf{X}_M = \mu + (\mathbf{X}_D - \mu) \frac{G(\mu)}{G(\mu) - G(\mathbf{X}_D)} \quad (8)$$

ただし、 μ は平均値ベクトルであり、 $\mathbf{X}_D$, $\mathbf{X}_M$ はそれぞれ得られた設計点と移したい新中心点である。

3.2 パラメータの不確定性を考慮した動的信頼性評価法

本論文はResponse Surface Approachの概念をパラメータの不確定性を考慮した動的信頼性評価に応用する。

式(3)の限界状態関数は次式で表される。

$$G = u_{n+1} - \Phi^{-1} [P_f(\mathbf{X})] \quad (9)$$

式(9)を次式で近似する。

$$G' = u_{n+1} + a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (10)$$

ただし、 x_i , $i=1, \dots, n$ は基本確率変数であり、 a , b_i , c_i は未定係数である。

式(10)の中の未定係数を決めるためには、 $(2n+1)$ 個の数値実験を行う必要がある。Fig.1に示すように確率変数の平均値を中心点とし、中心点から δ_i の距離を有する各座標軸にある点 $\mathbf{x}_i = \mu_i \pm \delta_i$ を実験点とする。ただし、 δ_i は中心距離で、 μ_i は確率変数 x_i の平均値である。数値実験から $(2n+1)$ 個の連立線形方程式が得られる。この連立線形方程式を解くことにより式(10)は既知となり、FORMで簡単に解析できる。

ここでは要求された収束精度に従い、上述の計算過程をさらに信

Fig.1 Location of Experimental Points for Two Variable Problem

信頼性指標の収束まで繰り返す。得られた信頼性指標はFORM信頼性指標であり、限界状態関数が強い非線形を有する場合には精度を向上する必要がある。そのときには、限界状態関数を2次関数で近似しているため、SORMや重点サンプリングを用いて信頼性の精度を向上することは容易となる。

上述のプロセスはFig.2に示されている。その中に、(1)条件付き破壊確率の計算、(2)Response Surface 係数の算定、(3)FORM信頼性解析、および(4)SORM精度向上の、4つのステップを含んでいる。

(1)条件付き破壊確率の計算では与えられた $2n+1$ 個の実験点について確定的に行われ、既存信頼性解析プログラムを利用する。(2)Response Surface 係数の計算では数値実験から得られたデータより連立線形方程式を求め、式(10)の未定係数を決める。(3)FORMの部分では導関数の計算はあるが、既に得られた2次関数で表す限界状態関数を対象としているため（その導関数は式(10)の未定係数から直接計算する）、式(6)に示すような $P_f(\mathbf{X})$ の導関数の計算は回避されている。(4)SORM精度向上では式(10)の未定係数から2階導関数を直接算出し、文献[12]に示す簡単な式より計算する。このプロセスの収束は論理的に証明されていないが、筆者らの計算経験ではほとんどの場合では3～7回の繰り返して精度良く収束している。

4. 数値解析結果

4.1 1 自由度線形システム

まず、動的荷重が作用する1自由度線形システムの簡単な動的信頼性問題^[11]を通して本手法の有効性について考察する。入力ホワイトノイズで、荷重の強度、継続時間、固有振動数、減衰定数は相互独立の確率変数とし、その分布をTable 1に示すように仮定する。

Table 1 Parameter Uncertainties in the 1st Example

パラメータ	分布	平均値	変動係数
s	極値2型	0.25	0.60
D	対数正規	10秒	0.3
f	正規	2Hz	0.1
ζ	対数正規	0.02	0.4

破壊確率をある限界値に対する初期通過確率とし、不規則振動解析により、各パラメータが確定値の場合の破壊確率は近似的に次式で計算される。

$$P_f = 1 - \exp \left\{ -fD \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{d}{\sigma_r} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\pi s}{4(2\pi f)^3 \zeta}}$$

ただし、 s は入力のパワースペクトル密度、 D は継続時間、 f は固有振動数、 ζ は減衰定数である。

ここでは、 s, D, f, ζ に含まれている不確定性を考慮して信頼性解析を行う。 $d=0.34$ の時、得られた3回の繰り返しのResponse Surfaceとして、限界状態関数は次のようになる。

Fig.2 Flow-Chart of Response Surface Approach Used in the Dynamic Reliability Evaluation With Consideration of Parameter Uncertainties

$$G'_{1st} = u_{n+1} - 6.252 + 6.039 f + 292.65 \zeta - 28.41 s - 0.053 D - 0.345 f^2 - 3304.5 \zeta^2 + 30.85 s^2 + 0.00127 D^2$$

$$G'_{2nd} = u_{n+1} - 13.87 + 10.89 f + 535.96 \zeta - 17.67 s - 0.119 D - 1.605 f^2 - 10696 \zeta^2 + 11.68 s^2 + 0.00262 D^2$$

$$G'_{3rd} = u_{n+1} - 14.01 + 10.76 f + 549.79 \zeta - 16.67 s - 0.126 D - 1.558 f^2 - 11155 \zeta^2 + 10.30 s^2 + 0.00279 D^2$$

対応する各繰り返しで得られた主な計算結果をTable 2に示す。Table 2によると、初期中心点はその限界状態関数値 $G(\mathbf{X}_0)$ が3.4となっており、真の限界状態曲面上からはかなり離れている。しかし、Response Surface の設計点は対応する限界状態関数値 $G(\mathbf{X}_0)$ が-0.067となっており、真の限界状態曲面上にかなり近づいている。3回の繰り返しのあと、Response Surfaceの設計点はほぼ限界状態曲面にあり($G(\mathbf{X}_0) = 1.7 \times 10^{-4}$)、理想的な精度($(1.61401 - 1.61445) / 1.61401 = 2 \times 10^{-4}$)で収束している。最終結果としての設計点は $f=1.878$, $s=0.344$, $D=9.946$, $\zeta=0.014$ であり、式(9)で得られた $G(\mathbf{X})$ と式(10)で

Table 2 Main Results of Each Iteration

Iter. No.	Central Point X_0	$G(X_0)$	Design Point X^*	$G'(X^*)$	$G(X^*)$	β P_f
1st	2.0 0.02 0.25 10 0	3.400	1.859 0.014 0.332 9.747 -0.741	8.9×10^{-4}	-0.067	1.650 0.0495
2nd	1.862 0.014 0.331 9.769 -0.727	4×10^{-4}	1.880 0.014 0.346 9.926 -0.619	1.9×10^{-4}	1.1×10^{-3}	1.614 0.0533
3rd	1.887 0.014 0.352 9.960 -0.575	0.028	1.878 0.014 0.344 9.946 -0.621	1.5×10^{-4}	1.7×10^{-4}	1.614 0.0532

Table 3 Comparison of Response Surface

$X = [f, \xi, s, D, u_{n+1}]$	$ X - X^* $	$G(X)$	$G'(X^*)$
1.878, 0.014, 0.344, 9.936, -0.621	0	1.7×10^{-4}	1.5×10^{-4}
1.900, 0.018, 0.365, 9.543, -0.728	0.175	0.728	0.695
1.930, 0.018, 0.344, 9.946, -0.621	0.003	0.139	1.113
1.878, 0.014, 0.344, 9.330, -0.621	0.380	0.345	0.351
1.799, 0.012, 0.344, 10.41, -0.634	0.220	-0.890	-0.871
1.600, 0.013, 0.344, 11.30, -0.621	1.910	-1.733	-1.809
1.630, 0.016, 0.423, 12.80, -0.840	8.260	-2.000	-1.880

Fig.3 Reliability Index in 1st Example

得られた $G'(X)$ をTable 3に示す。Table 3により $G'(X)$ は設計点のまわりで $G(X)$ と精度良く一致していることがわかる。

また、2次モーメント法、拡張FORMおよび本手法であるResponse Surface Approachを用いた結果及びパラメータの不確定性を無視した結果をFig.3に示す。Fig.3では横軸は閾値であり、縦軸は信

頼性指標である。Fig.3 から本手法は良い精度で拡張FORMの結果を追従していることがわかる。

4.2高層鉄骨骨組の地震信頼性評価

第2種地盤にある15階建、高さは52.5mである高層鉄骨骨組を対象とする。構造モデルを多自由度せん断型モデルとし、復元力モデルをバイリニアモデルとした。各階の階高、重量、初期剛性および降伏強度をTable 4に示し、各階の減衰定数及び剛性比を0.02, 0.05にした。構造物の非線形不規則振動解析は、平均値応答スペクトルを利用した等価線形化解析手法^{[13][14][15]}を用いた。この手法では、最大変位応答までのあらゆる割線剛性の平均値を等価線形剛性と定義し、モード法より不規則振動の応答を求める。各モードのスペクトルモーメントは直接平均値応答スペクトルから得られ、繰り返しにより最大応答の平均値及び標準偏差を計算する。文献[13][14]の検討により十分な計算精度を有している。

信頼性解析に用いる破壊確率は最大応答がある限界値に対する初期通過確率と定義し、限界塑性率は文献[16]の鋼構造骨組の変形能力を参考にして7と仮定した。最大応答分布は次式で近似的に表される。

$$F_R(u) = \exp \left\{ -v D \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{u}{\sigma_R} \right)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

ただし、 v は0を交差する交差率(Cross Ratio)であり、 σ_R は不規則振動解析から得られた応答の標準偏差である。

計算を簡素化するため、地震動は定常Gaussian確率過程と仮定し、地震入力には日本建築学会建築物荷重指針の加速度スペクトル^[17]を採用し、そのパラメータを同指針の推奨値である $f_A=2.5$, $f_V=2.5$, $d=0.5$, $G_A=1.2$, $G_V=2.0$, $T_c=0.55$ と定めた。

1995年1月17日兵庫県南部地震で得られた最大記録の818galを地震動最大加速度として入力し、Table 4に示している構造物のパラメータをすべて確定値とした。非線形不規則振動解析の結果としての最大層間変位 R_{max} の平均値、標準偏差および最大層間変位に対応する塑性率と標準偏差もTable 4に示す。これらの結果により、818galの入力ですべての階が降伏したことが分かる。最大塑性率は5階で生じており、限界塑性率に対応する初期通過確率は 1.7×10^{-2} である。

初期剛性と降伏強度に含んでいる不確定性を考慮するために、初期剛性と降伏強度の値に平均値が1の確率変数を乗じる。

$$\begin{aligned} K'_0 &= x_1 K_0 \\ Q'_0 &= x_2 Q_0 \end{aligned} \quad (13)$$

ただし、 x_1 , x_2 は平均値が1の対数正規分布に従う確率変数である。 K_0 , Q_0 は確定的初期剛性と降伏強度であり、 K'_0 , Q'_0 は不確定性を含んでいる初期剛性と降伏強度である。鋼構造部材のヤング率(変動係数COV=0.05)、降伏応力度(COV=0.12)、初期たわみ(COV=0.6)、残留応力度(COV=0.5)、寸法(COV=0.12)などの統計結果^[18]を参考にし、初期剛性と降伏強度の変動係数はそれぞれ0.1, 0.2と仮定する。

本手法を用いて初期剛性と降伏強度に含んでいる不確定性を考慮した構造信頼性を評価する。各確率変数の平均値を中心点の座標とし、中心距離 δ を全て 0.4σ とした。第1~6階及び第10階に対しては、3, 4回の繰り返しで収束しているが、他の階に対しては実験点での条件付

き破壊確率 $P_f(X)$ が0となるので解析ができない。これは、拡張FORMが条件付き破壊確率 $P_f(X)$ の計算とFORMのアルゴリズムに基づいており、 $P_f(X)$ が0または0に近い値になる時 (Table 4では、7, 8, 9階に対して中心点での $P_f(X)$ は 10^{-7} ぐらいである)、標準正規分布の逆関数の計算が不可能となるためである。

各階の初通過に対応する破壊確率をTable 4に示す。表中 P_f は破壊確率であり、 β は P_f に対応する信頼性指標である。×は解析不可能を表す。パラメータの不確定性を考慮した破壊確率は、確定的なパラメータの場合と比べて10倍以上大きくなることは分かる。本例では条件付き破壊確率の計算は非線形不規則振動解析を含んでおり、その導関数は求められず、拡張FORMを適用することは難しい。そこ

でサンプリング数を5000と設定し、Monte-Carloシミュレーションを行った。Monte-Carlo法の解析結果をTable 4に示しており、本手法で得られた結果がMonte-Carlo法の結果に一致しており、精度が良いことがわかる。なお、設計点については、 x_1 は初期値からほとんど変化していないが、 x_2 はかなり変化しており、初期剛性より降伏強度に含まれている不確定性が信頼性解析結果に大きく影響を与えることがわかる^[9]。

次に限界状態曲面を考察する。 x_1 , x_2 をそれぞれ0.7から1.3まで変化させ、得られた5階の層間変位最大応答の平均値をFig.4に示す。また、対応する式(9)の限界状態曲面はFig.5に示す。Fig.4と Fig.5により、最大応答の平均値にはかなりの変化するが、対応する限界状

Table 4 Structural Parameters and Computational Results

Structural Parameters					Results with Deterministic Parameters					Results with Uncertain Parameters					
階	階高	重量	初期剛性	強度	μ of	Duct.	σ of	P_f	Graphics of	Design Point		Proposed Method		Monte-Carlo	
	cm	t	t/cm	t	R_{max}	Ratio	R_{max}		R_{max}	x_1	x_2	β	P_F	β	P_F
15	400	397	404	490	2.30	1.90	0.17	0.0		×	×	×	×	×	0
14	400	1278	615	1909	6.16	1.98	0.46	0.0		×	×	×	×	×	0
13	335	1909	1084	3044	7.62	2.71	0.60	0.0		×	×	×	×	3.66	1.3×10^{-4}
12	310	1400	1429	3739	7.47	2.85	0.61	0.0		×	×	×	×	3.28	5.3×10^{-4}
11	310	1386	1687	4216	7.52	3.01	0.63	1.2×10^{-7}		×	×	×	×	2.93	1.7×10^{-3}
10	310	1465	1979	4464	7.68	3.40	0.66	1.0×10^{-5}		1.01	0.68	2.40	8.2×10^{-3}	2.40	8.3×10^{-3}
9	310	1624	2200	5271	7.25	3.03	0.64	2.9×10^{-7}		×	×	×	×	2.83	2.4×10^{-3}
8	310	1595	2488	5665	7.09	3.11	0.63	9.5×10^{-7}		×	×	×	×	2.71	3.4×10^{-3}
7	310	1615	2889	6141	6.52	3.07	0.59	6.5×10^{-7}		×	×	×	×	2.77	2.8×10^{-3}
6	310	1961	3347	5669	7.16	4.23	0.65	2.0×10^{-3}		1.04	0.77	1.54	6.1×10^{-2}	1.63	5.2×10^{-2}
5	450	3546	2999	5953	9.60	4.84	0.88	1.7×10^{-2}		1.02	0.82	1.14	0.1268	1.16	0.1236
4	450	4613	2909	7224	10.26	4.13	0.94	1.5×10^{-3}		1.01	0.76	1.63	5.1×10^{-2}	1.62	5.2×10^{-2}
3	500	5802	2803	8735	11.22	3.60	1.03	8.0×10^{-5}		1.02	0.70	2.08	1.9×10^{-2}	2.07	1.9×10^{-2}
2	400	7593	3625	9922	10.16	3.71	0.91	1.3×10^{-4}		1.04	0.72	1.98	2.4×10^{-2}	2.00	2.3×10^{-2}
1	475	6007	4507	10330	8.97	3.91	0.77	3.2×10^{-4}		1.01	0.72	1.84	3.3×10^{-2}	1.82	3.4×10^{-2}

Note: Mean Value of Maximum Response

Mean Value of Maximum Ductility Ratio

Fig.4 Response Surface of the Mean Maximum Deformation

Fig.5 Limit State Surface Expressed by Eq.12

Fig.6 Response Surface with $\delta=0.4\sigma$ Fig.7 Response Surface with $\delta=0.8\sigma$ Fig.8 Response Surface with $\delta=1.2\sigma$

態曲面にはそれほど変化が見られない。拡張FORMは大きく変化する応答変数を含む限界状態を緩やかにすることがわかる。

解析過程でのResponse Surfaceを考察するために3回の繰り返しで得られたResponse SurfaceをFig.6に示す。図中黒点はこの問題の設計点である。この図により、各回の繰り返しで得られたResponse Surfaceはそれぞれ異なっているが、全てのResponse Surfaceは設計点または設計点の近くを通ることがわかる。Response Surfaceは真の限界状態曲面とはかなり差があるが、設計点のまわりで二つの曲面が交差し、ほぼ同じ信頼性指標を持っている。さらに、実験点の違いが解析結果に与える影響を調べるために中心距離 δ をそれぞれ 0.4σ , 0.8σ , 1.2σ として解析し、得られたResponse SurfaceをそれぞれFig.6, Fig.7, Fig.8に示す。対応する信頼性指標は $\beta=1.1422$, 1.1418 , 1.1359 である。これらの結果によると、 δ の違いにより、得られたResponse Surfaceがかなり異なっているが、対応する信頼性指標はほぼ同じである。

5. おわりに

本論文では、Response Surface Approachで拡張FORMにおける限界状態関数を近似し、パラメータの不確定性を考慮できる動的信頼性評価法の開発を試みており、以下の結果が得られた。

- (1) 解析手法では、条件付き破壊確率が不確定性を有するパラメータに対する感度解析が必要はなく、パラメータの不確定性を考慮する複雑な構造の動的信頼性評価に用いることができる。
- (2) 既存の動的信頼性解析プログラムの利用し、確定的パラメータを用いた条件付き破壊確率のわずかな繰り返し計算だけで、十分な精度を得ることができる。
- (3) 条件付き確率変数 $P_f(X)$ が0または0に近い値になる時、解析が不可能になることが解析手法の一つの欠点である。しかし、このような限界は実用上には問題がないと考えられる。

参考文献

- [1] Wen, Y.K. & H-C., Chen, "On Fast Integration for Time Variant Structural Reliability", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.2, No.3, 1987.
- [2] Der Kiureghian, "Measures of Structural Safety Under Imperfect States of Knowledge", *ASCE*, ST 5/7, Vol 115, 1989.
- [3] Balendra, T. & Y.P., Teo, Time Variant Reliability of Linear Oscillator Consid-

ering Uncertainties of Structures and input model Parameters, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.6, No.1, 1991.

- [4] Zhao, Y.G. & J.R., Jiang, An Advanced First Order Second Moment Method, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol 12, No. 4, 1992(in Chinese).
- [5] 小野徹郎, 趙 衍剛, 石井 清, 井戸田秀樹, パラメータの不確定性を考慮した構造信頼性解析, 構造工学論文集, Vol 41B, pp159-164, 1995.3
- [6] Zhao, Y.G. & J.J., Sun, On dynamic Sensitivity Analysis of Structures, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol 11, No. 4, 1991(in Chinese).
- [7] Wong, F.S., Slope Reliability and Response Surface Method, *J. Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.111, No.1, pp32-53, 1985.
- [8] Bucher, C.G., Y.M., Chen, G.I., Schueller, Time Variant Reliability Analysis Utilizing Response Surfaces Approach, P. Thoft-Christensen, ed., *Reliability and Optimization of Structural System '88*, Springer, Berlin, 1989, pp1-14.
- [9] Bucher, C.G. & U., Bourgund, A Fast and Efficient Response Surface Approach for Structural Reliability Problems, *Structural Safety*, Vol. 7, pp57-66, 1990.
- [10] Rajashekhar, M.R. & B.R., Ellingwood, A New look at the Response Surface Approach for Reliability Analysis, *Structural Safety*, Vol.12, pp205-220, 1993.
- [11] Liu, Y.W. & F., Moses, A Sequential Response Surface Method and Its Application in the Reliability Analysis of Aircraft Structural Systems, *Structural Safety*, Vol.16, pp39-46, 1994.
- [12] 小野徹郎, 趙 衍剛, 二次関数の限界状態に対するFORM信頼性指標の検討, 構造物の安全性及び信頼性, Vol.3, A-93, JCROSSAR'95.
- [13] Wen, Y.K., Equivalent Linearization for Hysteretic Systems Under Random Excitation, *J. Appl. Mech.*, Vol 47, No. 1, 1980.
- [14] Jiang J.J. and Q.N., Lu, Stochastic Seismic Response Analysis of Hysteretic MDF Structures Using Mean Response Spectra, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol 4, No. 4, 1984(in Chinese).
- [15] Sun, J.J. and J.J., Jiang, Stochastic Seismic Response and Reliability Analysis of Hysteretic Frame-Shear Wall Structures, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol 12, No. 2, 1992(in Chinese).
- [16] 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 日本建築学会, 1990.10.
- [17] 建築物荷重指針・解説, 日本建築学会, 1993.6.
- [18] 小野徹郎, 井戸田秀樹, 河原弘明, 高次積率を用いた鋼圧縮材および曲げ材の抵抗強度に関する統計論的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第370号, 1986.12.

(1996年11月10日原稿受理, 1997年3月6日採用決定)