

不確定性を有する建築構造物の耐震信頼度解析

鈴木祥之・荒木時彦*

*京都大学大学院工学研究科博士後期課程

要 旨

本論文では、不確定性と履歴特性を有する構造物系に地震外乱が作用する場合の信頼度解析手法について述べる。本手法の特徴は、確定系において用いられる損傷の尺度に関する確率密度関数と同様な解析的表現を不確定系に対して適用し、これを応答局面法と組み合わせて各要素あるいは系全体の信頼度関数を求めている点にある。ここでは、特に、2階建木造構造物に大地震が作用した場合を想定して耐震信頼度解析を行う。

キーワード： 不確定性，耐震信頼度解析，実験計画法，応答局面法
木造住宅

1. はじめに

建築構造物の耐震設計においては、地震動や対象となる構造物系に多くの不確定性・不規則性が含まれる。従来の研究においては、このような非線形性と不確定性の両者を有す複雑な系の動的な応答解析あるいは信頼度解析といった問題に対する手段として、モンテカルロ・シミュレーション手法を用いねばならなかった。しかしながら、そのためには膨大なサンプル数と計算量が必要となる。本研究では近似数値解析手法である応答局面法と確定系に対する理論解析手法を組み合わせ、不確定・履歴構造物系の耐震信頼度解析手法について考察する。本論文では、まず信頼度解析の基本的な考え方について述べ、その後2階建て木造住宅をポリリニア・スリップ混合型履歴を有する2自由度モデルへとモデル化したものを対象とした数値解析を行う。ここでは、実際の構造物を想定したモデルを採用する。また、層間変形角 1/120 に対応する標準せん断力係数をパラメータとして信頼度解析を行い、標準せん断力係数と系全体の信頼度との関係を調べる。これらの数値解析により、不確定パラメータの損傷過程や系の信頼

度への影響を明らかにする。

2. 信頼度解析手法

構造物系の信頼度関数は、注目する構造物損傷の尺度に関する確率密度関数を積分したものととして次式の様に表される。

$$R(t; {}_M S(C)) = \int_{{}_M S(C)} p_{\eta}(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m; t) d\eta \quad (1)$$

但し、

$${}_M S(C) = [0, c_1) \times [0, c_2) \times \dots \times [0, c_m)$$

ここで、 ${}_M S(C)$ は安全域、 c_i は損傷の尺度の閾値、 $p_{\eta}(\)$ は損傷の尺度に関する確率密度関数である。式(1)の信頼度関数を解析的に表すためには、損傷の尺度に関する確率密度関数を解析的表現を得なければならない。しかし、一般に不確定パラメータを有する非線形系を確率論的に取り扱い、その応答の確率密度関数を解析的に得ることは困難である。そこで本研究では、確定系の損傷の尺度に関する確率密度関数を不

確定系に対しても適用することを検討する。

2.1 構造物系の状態方程式

前述の近似確率密度関数は構造物損傷の尺度に関するものであり、この損傷の尺度は微分形式で表される。構造物損傷の尺度として、初期通過型と累積型の2種類が考えられる。ここでは、最大変位応答と履歴消費エネルギーを考える。それぞれの微分表示を次に示す(Suzuki & Minai, 1988a)。

最大変位応答

$$\dot{\eta}_{mi} = |\dot{x}_i| U(x_i, \dot{x}_i) U(|\dot{x}_i| - \eta_{mi}) \equiv g_{mi} \quad (2)$$

履歴消費エネルギー

$$\dot{\eta}_{hi} = (1 - r_i) z_i(\dot{x}_i - g_{zi}) \equiv g_{hi} \quad (3)$$

但し、 $U(\cdot)$ は単位階段関数、 r_i は履歴における第*i*分岐勾配、 g_{zi} は履歴要素の微分表示である。以上のように微分形式で表された損傷の尺度を構造物の状態方程式と連立させると、変位、速度、履歴要素、損傷の尺度、を状態変数とする系の状態方程式は次のように表わされる。

$$\dot{Z}(t) = F(Z, t) + V(t)W(t) \quad (4)$$

但し、 F は非線形関数、 V は時間関数、 W は入力外乱である。

2.2 損傷の尺度に関する確率密度関数

確定な構造物系に対して正規白色雑音が作用することを想定すると、式(4)で表される状態方程式は伊藤型確率微分方程式の形に書き換えることができる。この場合、確率微分方程式は異種混合形直交多項式による級数展開で損傷の尺度の確率密度関数を近似することによって解くことができる。損傷の尺度に関する近似確率密度関数は、次式で表される(Suzuki & Minai, 1988b)。

$$p_{\eta}(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m; t) = \prod_{j=1}^m w_G(\eta_j) \sum_{q_j=0}^M C_{q_1 q_2 \dots q_m} \sum_{j=1}^m L_{q_j}^{(\beta_j-1)}(\bar{\eta}_j) \quad (5)$$

但し、

$$C_{q_1 q_2 \dots q_m} = E \left[\prod_{j=1}^m L_{q_j}^{(\beta_j-1)}(\bar{\eta}_j) \right] \prod_{j=1}^m \frac{q_j! \Gamma(\beta_j)}{\Gamma(\beta_j + q_j)}$$

$$\bar{\eta}_j = v_j \eta_j, \quad \beta_j = E^2[\eta_j] / \sigma_{\eta_j}^2, \quad v_j = E[\eta_j] / \sigma_{\eta_j}^2$$

ここで、 w_G はガンマ密度関数、 $L_{q_j}^{(\beta_j-1)}$ はラゲールの多項式、 m は損傷の尺度の数、 M は展開の次数である。本研究では、式(5)の確率密度関数を不確定系に対して適用する。

2.3 不確定系の構造物損傷に関する信頼度関数

不確定系における構造物損傷に関する確率密度関数が、確定系において用いられる解析的表現と同様、式(5)のように表されるとする。式(5)を式(1)に代入すると、不確定系の損傷の尺度に関する信頼度関数は次のように表される。

$$R(t; M, S(C)) = \sum_{q_1=0}^M \sum_{s_1=0}^{q_1} \dots \sum_{s_m=0}^{q_m} (-1)^{\sum_{j=1}^m s_j} \prod_{j=1}^m \frac{\Gamma(\beta_j + q_j)}{q_j} \binom{q_j}{s_j} \cdot \frac{v_j^{s_j}}{\Gamma(\beta_j + s_j)} M(s_1, \dots, s_m; t) \sum_{r_1=0}^{q_1} \dots \sum_{r_m=0}^{q_m} (-1)^{\sum_{k=1}^m r_k} \prod_{k=1}^m \binom{q_k}{r_k} \frac{\gamma(\beta_k + r_k, v_k c_k)}{\Gamma(\beta_k + r_k)} \quad (6)$$

但し、 $\gamma(\cdot; \cdot)$ は不完全ガンマ関数、 $M(\cdot; t)$ は損傷の尺度に関する確率モーメントである。

3. 応答局面法

損傷の尺度に関する確率密度関数の解析的表現を得るためには、損傷の尺度の基本統計量を求める必要がある。不確定系においてこれを解析的に得ることは困難であり、また数値解析手法としてしばしば用いられるモンテカルロ法も、系の自由度が高くなり不確定パラメータの数が増加すると膨大な計算量が必要となる。本研究では近似数値解析手法である応答局面法を用いることで計算量を軽減する。いま、不確定パラメータを $\xi_i (i=1, \dots, k)$ とし、注目する応答 y とのあいだに次のような関係が成り立つとする。

$$y = f(\xi) \quad (7)$$

一般に、この関数形 f は複雑で求まらないが、これを2次の多項式で近似することを考える。応答局面法では、不確定パラメータ ε_i は基準化されて、設計変数 x_i ($i=1, \dots, k$) として取り扱われる。応答変数 y は x_i の2次多項式として次のようにモデル化される。

$$y \approx \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{ji} x_j x_i \quad (8)$$

ここで、 β は回帰係数であり最小二乗法によって求められる(Myers, 1971)。本研究では、注目する損傷の尺度を応答変数として応答曲面を構成する。

4. 数値解析による近似確率密度関数の検証

ここでは、モンテカルロ・シミュレーション手法による数値解析によって(5)式で表される近似確率密度関数が不確定系に対して適用可能であることを確認する。パイリニア型の履歴特性を有する1自由度剪断質点系に、不規則外乱あるいは確定外乱が作用する場合についての数値解析例について述べる。損傷の尺度として、最大変位応答と履歴消費エネルギーを取り扱う。無次元円振動数と臨界減衰定数を不確定パラメータとし、平均値はそれぞれ1.0と0.05である。無次元弾性限変位は1.0、履歴における線形要素の重みは0.3とする。モンテカルロ・シミュレーションにおけるサンプルサイズは5000である。

図1から図3は、金井・多治見フィルタを通じた正規白色外乱が不確定系に作用した場合の数値解析結果である。金井・多治見フィルタの無次元固有円振動数と臨界減衰定数は、それぞれ、2.0と0.5である。

図1と図2は、それぞれ最大変位応答の平均値と分散である。系の変動係数は、 $COV=0.05, 0.10, 0.15$ である。平均値は変動係数の増加の影響をそれほど受けず、分散は変動係数が増加するにしたがって早く増加することがわかる。

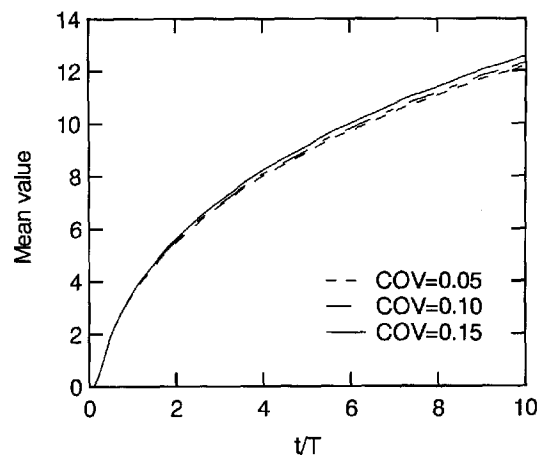


Fig. 1 Mean value of maximum absolute displacement.

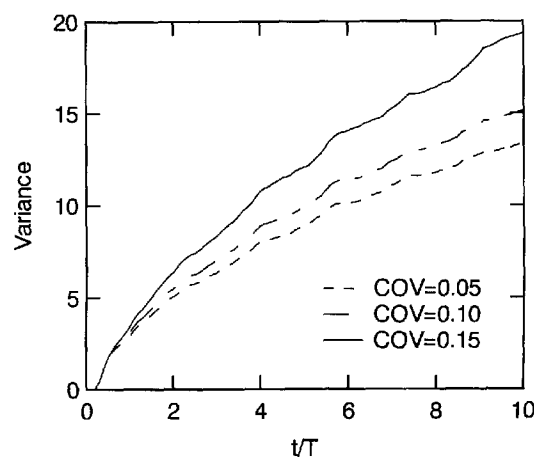


Fig. 2 Variance of maximum absolute displacement.

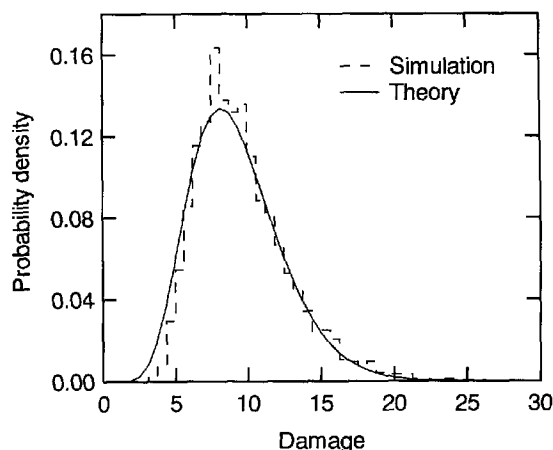


Fig. 3 Probability density function concerning maximum absolute displacement ($COV=0.10$, $t=7.5T$).

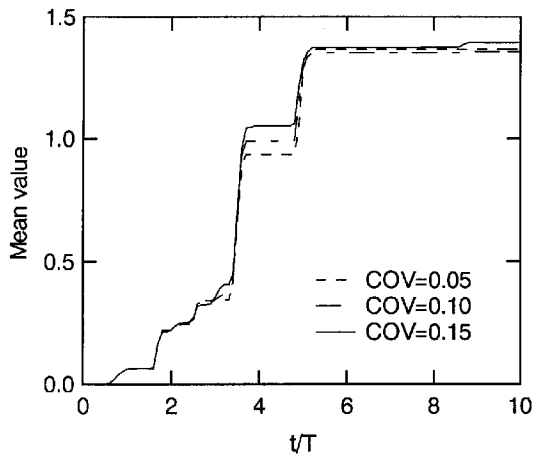


Fig. 4 Mean value of maximum absolute displacement.

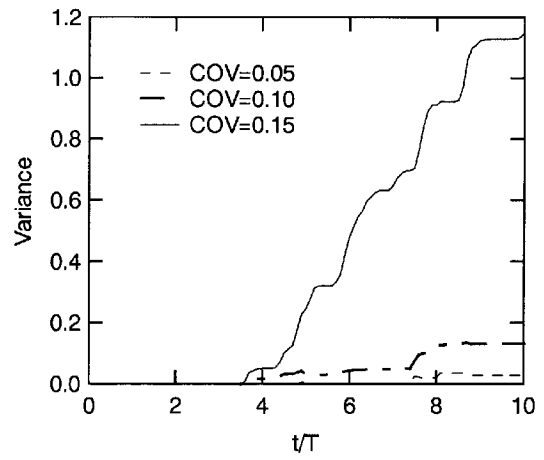


Fig. 7 Variance of cumulative hysteretic energy.

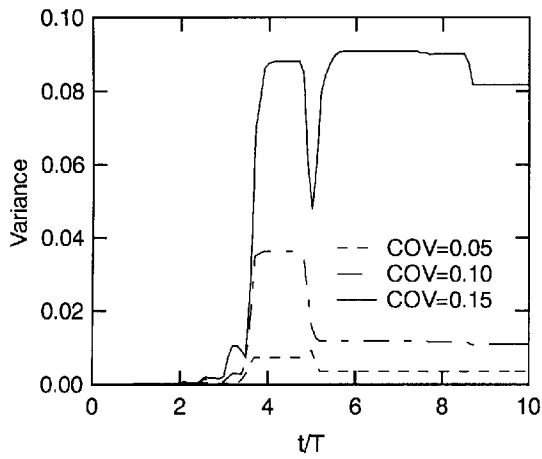


Fig. 5 Variance of maximum absolute displacement.

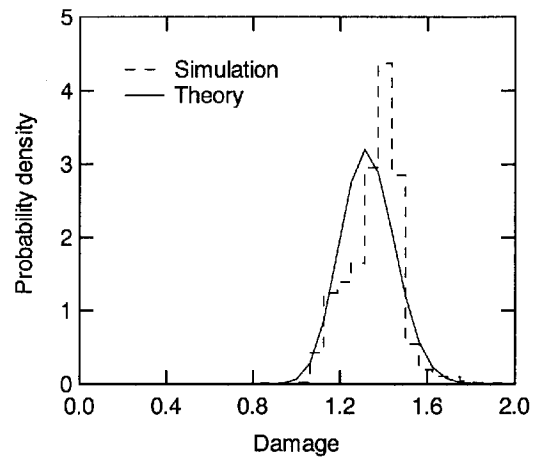


Fig. 8 Probability density function concerning maximum absolute displacement ($COV=0.10$, $t=5.0T$).

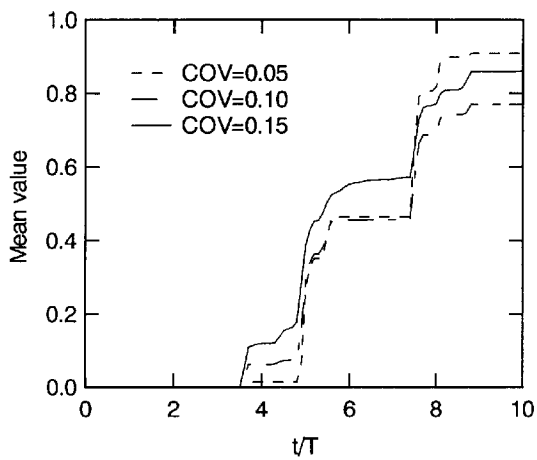


Fig. 6 Mean value of cumulative hysteretic energy.

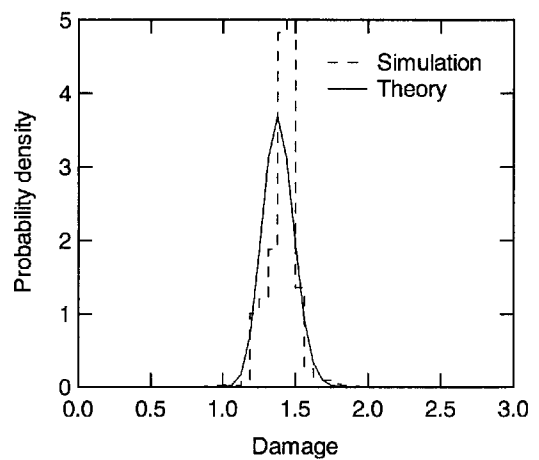


Fig. 9 Probability density function concerning maximum absolute displacement ($COV=0.10$, $t=7.5T$).

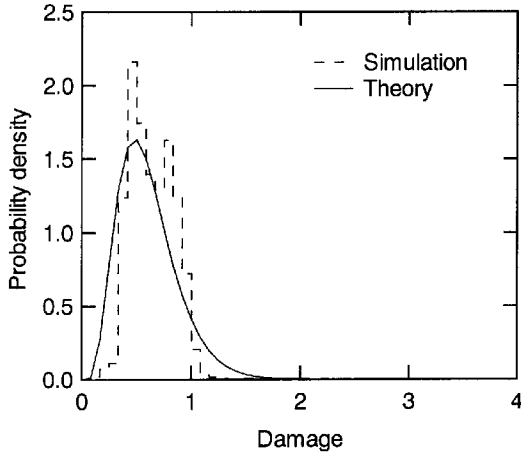


Fig. 10 Probability density function concerning cumulative hysteretic energy (COV=0.10, $t=7.5T$).

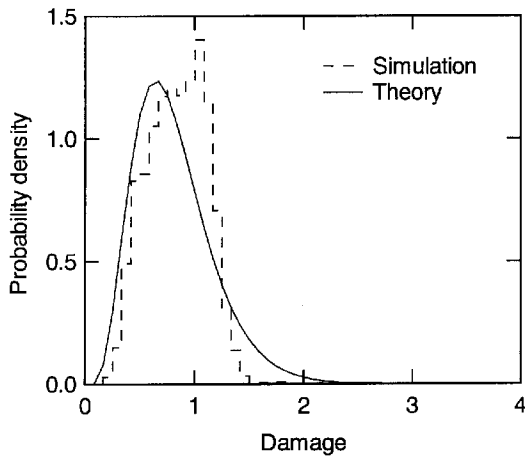


Fig. 11 Probability density function concerning cumulative hysteretic energy (COV=0.10, $t=10.0T$).

図 3 は $COV=0.10$ の系の $t=7.5T$ における最大変位応答の確率密度関数をシミュレーション結果と比較したものである。横軸は最大変位応答の値であり、縦軸は確率密度である。

最大変位応答の確率密度関数による近似が比較的精度よく行われている。

図 4 から図 11 には、確定外乱の作用する不確定系を対象とした数値解析結果を示されている。確定外乱は包絡曲線をかけた正規白色外乱の見本関数の 1 つである。

図 4 と図 5 は、それぞれ最大変位応答の平均値と分散であり、図 6 と図 7 は、それぞれ履歴消費エネルギーの平均値と分散である。

図 8 と図 9 は、それぞれ $t=5.0T, 7.5T$ における最大変位応答に関する確率密度関数をシミュ

レーション結果と比較したものである。図 10 と図 11 は、それぞれ $t=7.5T, 10.0T$ における履歴消費エネルギーに関する確率密度関数をシミュレーション結果と比較したものである。

以上の数値解析結果から、系の不確定度が損傷の尺度の基本統計量に大きな影響を及ぼすことが確認できた。その影響は、外乱が確定外乱である場合に特に顕著に見られる。また、損傷の尺度に関する確率密度関数の解析的表現が、シミュレーション結果をよく近似していることも確認できた。

5. 2階建て木造住宅を対象とした耐震信頼度解析

5.1 構造物のモデル化

ここでは、ポリリニア・スリップ混合型履歴特性を有する 2 自由度せん断質点系に地震外乱が作用する場合について数値解析を行う。このモデルは、木造住宅において一般的な 2 階建てを対象に行われた静的水平力載荷実験等から得られた復元力特性を勘案して構築された地震応答解析用モデルである(鈴木ら, 1997)。損傷の尺度として、最大絶対変位応答と履歴消費エネルギーを考える。また、損傷の尺度の閾値は確定値とし、(1)式で表わされる信頼度関数を用いる。ポリリニア型履歴モデルは次のように表される。いまポリリニア型履歴による復元力を Φ_{pi} 、スリップ型履歴による復元力を Φ_{si} とすると、混合型の復元力は、

$$\Phi_i = R_i \Phi_{pi} + (1 - R_i) \Phi_{si} \quad (9)$$

で表される。 R_i は復元力におけるポリリニア型の重みである。ポリリニア型とスリップ型の復元力はそれぞれ次のように表される。

$$\Phi_{pi} = r_{pi} x + (1 - r_{pi}) z_p \quad (10)$$

$$\Phi_{si} = r_{si} x + (1 - r_{si}) z_s \quad (11)$$

ここで、 r_{pi} は復元力における線形要素の重みである。ポリリニア型の履歴要素 z_{pi} は次のように表される。

$$z_{pi} = \sum_{j=1}^{np} (r_{ij} - r_{i,j+1}) z_{ij}$$

$$\dot{z}_{ij} = \dot{x}_i \left[1 - U(\dot{x}_i) U(z_{ij} - \delta_{ij}) - U(-\dot{x}_i) U(-z_{ij} - \delta_{ij}) \right] \equiv g_{z_{ij}}(\dot{x}_i, z_{ij}) \quad (12)$$

但し、 r_{ij} は第 j 分岐勾配、 δ_{ij} は第 j 分岐点変形量である。スリップ型の履歴要素 z_{si} は次のように表わされる。数値解析においては $np=3$ のモデルを使用する。

$$\begin{aligned} \dot{z}_{si} = & \dot{x}_i \{ U(x_i - u_i^+) U(\dot{x}_i) [1 - U(z_{si} - \delta_{si})] \\ & + U(x_i) U(-\dot{x}_i) [1 - U(-z_{si})] \\ & + U(-x_i - u_i^-) U(-\dot{x}_i) [1 - U(-z_{si} - \delta_{si})] \\ & + U(-x_i) U(\dot{x}_i) [1 - U(z_{si})] \} \\ \equiv & g_{z_{si}}(x_i, \dot{x}_i, z_{si}, u_i^+, u_i^-) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \dot{u}_i^+ &= \dot{x}_i U(\dot{x}_i) U(z_{si} - \delta_{si}) \\ \dot{u}_i^- &= -\dot{x}_i U(-\dot{x}_i) U(-z_{si} - \delta_{si}) \end{aligned}$$

但し、 δ_{si} は弾性変位限である。

5.2 数値解析例

前述のモデルに地震外乱が作用した場合について耐震信頼度解析を行う。まず、損傷の尺度の基本統計量と信頼度関数の時刻歴を求め、不確定パラメータの影響を調べる。次に、層間変形角 $1/120$ に対応する標準せん断力係数をパラメータとして数値解析を行い、地震外乱を受けた構造物の最終的な状態を損傷の尺度および信頼度によって評価する。系に含まれる不確定パラメータはすべて正規分布に従う互いに独立な確率変数として定義される。数値解析においてはパラメータの値を次のように設定する。

Table 1 Deterministic parameter

| 確定パラメータ | 1層 | 2層 |
|-----------------------|-------|-------|
| 床面積 (m ²) | 99.37 | 69.75 |
| 階高 (cm) | 275.0 | 250.0 |
| 標準せん断力係数 | 0.2 | |

Table 2 Mean value of uncertain parameter

| 不確定パラメータ | 1層 | 2層 |
|--------------|--------|--------|
| 重量 (tonf) | 21.540 | 13.740 |
| 第1折れ点変位 (cm) | 0.286 | 0.260 |
| 第2折れ点変位 (cm) | 2.290 | 2.080 |
| 第3折れ点変位 (cm) | 9.167 | 8.333 |
| α | 0.5 | 0.5 |
| β | 0.6 | 0.6 |
| γ | 1.5 | 1.5 |
| 1次臨界減衰比 | 0.05 | |

不確定パラメータの変動係数は、 $COV = 0.05, 0.10, 0.15$ の3種類を考える。ここで、第1折れ点変位、第2折れ点変位、第3折れ点変位はそれぞれ層間変形角 $1/960, 1/120, 1/30$ (rad) に対応する変位である。 α と γ はそれぞれポリリニア型履歴の第2折れ点の復元力を1とした時の第1折れ点と第3折れ点の復元力であり、 β は復元力におけるポリリニア型履歴による復元力の重みである。各層の層間変形角 $1/120$ における復元力 P_i は、現行の建築基準法施行令に基づいて次式によって決定する。

$$\begin{aligned} P_i &= C_i \cdot W_i \\ C_i &= Z \cdot R_i \cdot A_i \cdot C_0 \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 A_i は層せん断力分布係数、地域係数は $Z=1.0$ 、振動特性係数は $R_i=1.0$ 、 W_i は i 層以上の重量である。地震外乱として、El Centro NS 加速度波形と、JR Takatori NS 加速度波形 (1995 兵庫県南部地震) を用いる。また、応答局面法を用いる際の設計変数は 15 個、センターポイントの数は 100、全部で 32898 の設計点となる。

図 12 と図 13 は、それぞれ $COV=0.05, 0.10, 0.15$ の3種類の系に対して El Centro NS 波が作用したときの各層の最大変位応答の平均値と分散である。これらの図から、最大変位応答の分散が系の不確定度の影響を大きく受けており、変動係数の増加に伴い分散が早く増加していることがわかる。

図 14 は、 $COV=0.05, 0.10, 0.15$ の系に El Centro NS 波が作用したときの最大絶対変位応答に関する系の全体の信頼度関数である。横軸は時間であり、40 秒までを図示している。最大絶対変位応答の許容限界値は $CM_1=CM_2=5.0$ [cm] である。この図から、変動係数の値が大きいほど系全体の信頼度関数が早く低下することがわかる。

次に、層間変形角 $1/120$ に対応する標準せん断力係数をパラメータとして耐震信頼度解析を行なった例を示す。ここでは、不確定パラメータを、各層の重量、第2折れ点変位、第3折れ点変位、 β 、 γ の10個とする。それぞれの平均値および確定パラメータの値は、前述の表1、表2に同じである。不確定パラメータの変動係数は0.15である。また、応答局面法を用いる際の設計変数は10個、センターポイントの数は50、全部で1094の設計点となる。

図15と図16は、それぞれ $COV=0.15$ の系に対して JR Takatori NS 波が作用したときの最大絶対変位応答の平均値と分散である。横軸 C_0 は層間変形角 $1/120$ に対応する標準せん断力係数である。 C_0 の増加とともに、平均値も分散も減少することがわかる。

図17は、 $COV=0.15$ の系に対して JR Takatori NS 波が作用したときの最大変位応答に関する系全体の信頼度である。損傷の尺度の許容限界値は、層間変形角 $1/20$ 、 $1/15$ 、 $1/10$ に対応する変形量とする。これから、 C_0 が増加するとともに、系全体の信頼度が上がる傾向にあることがわかる。しかし、許容限界値が $1/20$ 、 $1/15$ の場合で C_0 が小さい場合には、信頼度の値がばらついている。

図18と図19は、それぞれ $COV=0.15$ の系に対して JR Takatori NS 波が作用したときの履歴消費エネルギーの平均値と分散である。 C_0 の増加とともに、履歴消費エネルギーの平均値も分散も減少する傾向にあることがわかる。但し、 $C_0 = 0.1$ において、その平均値が $C_0 = 0.2$ より低くなっているのは、応答が不安定的に増大し、計算を終了したためである。

図20は、 $COV = 0.15$ の系に対して El Centro NS 波が作用したときの履歴消費エネルギーに関する系全体の信頼度である。損傷の尺度の閾値はそれぞれ 800, 1000, 1200 [tonf・cm]である。これより、 C_0 の値が 0.2 以上の場合、 C_0 の値が増加するに伴って系全体の信頼度が増加することがわかる。

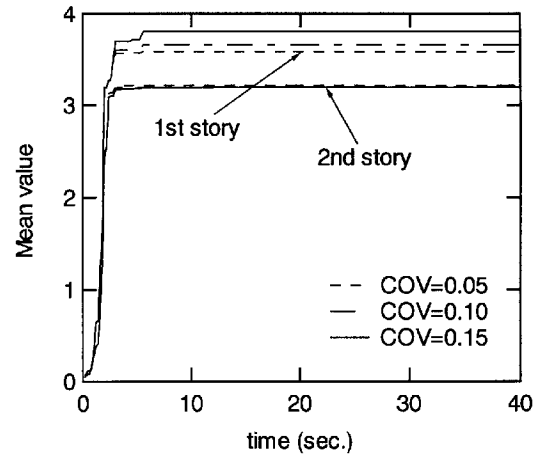


Fig. 12 Mean value of maximum absolute displacement(El Centro NS).

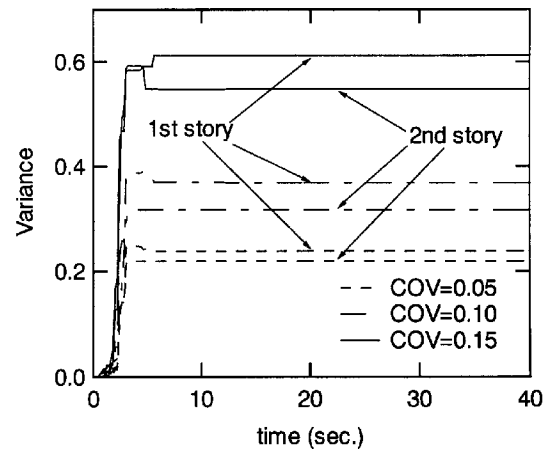


Fig. 13 Variance of maximum absolute displacement (El Centro NS).

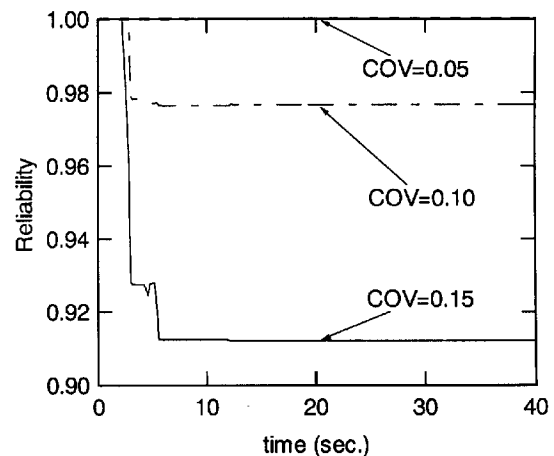


Fig. 14 System reliability function concerning maximum absolute displacement (El Centro NS, $CM_1=CM_2=5.0$).

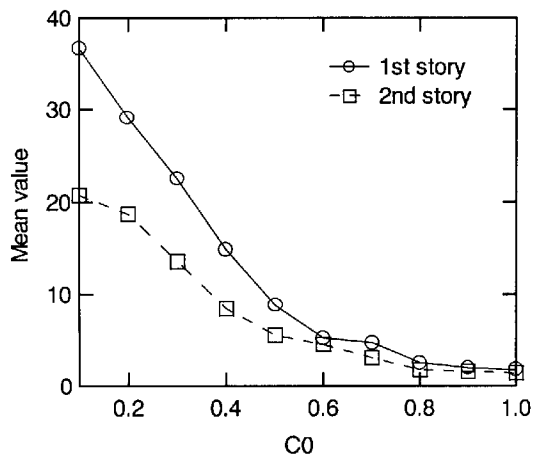


Fig. 15 Mean value of maximum absolute displacement (JR Takatori NS).

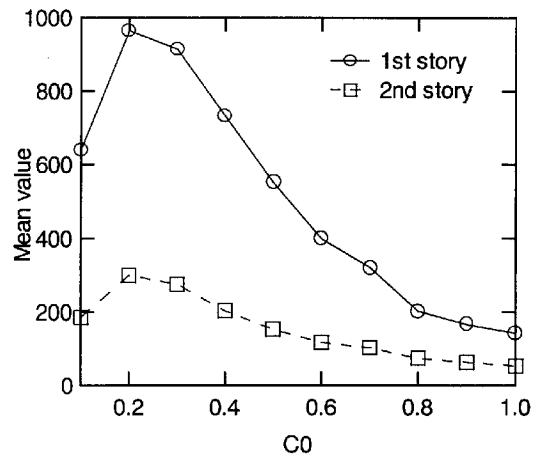


Fig. 18 Mean value of cumulative hysteretic energy (JR Takatori NS).

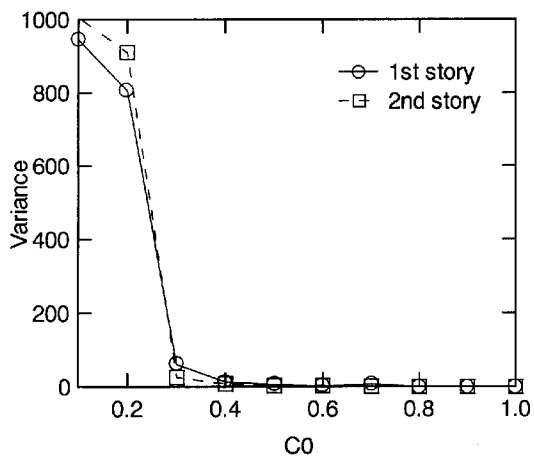


Fig. 16 Variance of maximum absolute displacement (JR Takatori NS).

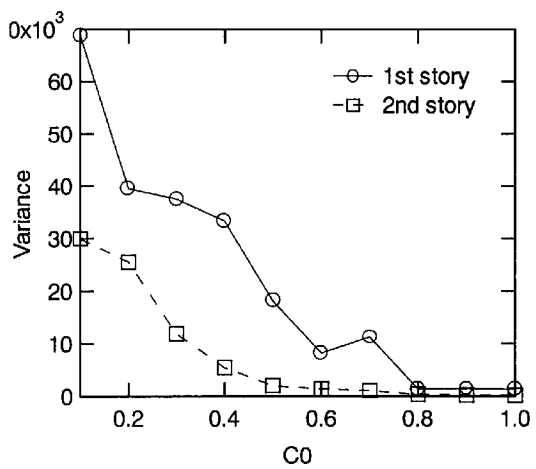


Fig. 19 Variance of cumulative hysteretic energy (JR Takatori NS).

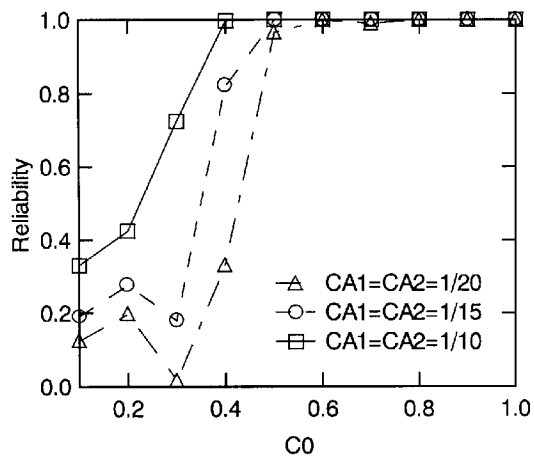


Fig. 17 System reliability concerning maximum absolute displacement (JR Takatori NS).

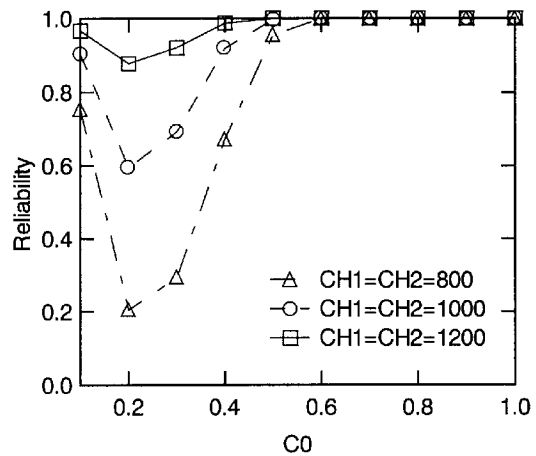


Fig. 20 System reliability concerning cumulative hysteretic energy (JR Takatori NS).

6. おわりに

本論文では、不確定な履歴構造物系が地震外乱を受ける場合において、構造物各部の損傷過程を求め、さらに構造物系全体の信頼度関数を求めるための、理論的・数値解析的手法を示した。

まず、確定系に対する理論解析手法について述べ、そこで導入された損傷の尺度に関する確率密度関数の解析的表現が、不確定系に対して適用し得ることを検討した。ここでは、パイリニア型履歴特性を有する1自由度質点系に対するシミュレーション解析を行い、損傷の尺度に関する確率密度関数の解析的表現をシミュレーション結果と比較した。系が不規則外乱を受ける場合には、確率密度関数の解析的表現がシミュレーション結果を良好に近似している。しかし、系が確定外乱を受ける場合には、不規則外乱の場合に比べて近似の精度が落ちる結果となった。不規則外乱を受ける場合と確定外乱を受ける場合とでは、近似の精度に差があるが、確率密度関数の解析的表現を不確定系に適用し、構造物系全体の信頼度を評価することは十分に可能である。

次に、実際の2階建て木造住宅を想定したモデルに対して動的信頼度解析を行った。ここでは、損傷の尺度に関する近似確率密度関数を構成するために、応答局面法によって損傷過程の基本統計量を求め、系全体の信頼度関数を得た。これによって、構造物系の不確定度が損傷過程や各層あるいは系全体の信頼度に大きく影響することが確認できた。また、層間変形角 1/120 に対応する標準せん断力係数をパラメータとして数値解析を行うことによって、系全体の信頼度との関係を調べることができた。履歴消費エネルギーに関しては、標準せん断力係数の値を基準値 0.2 より大きくすることで系全体の信頼度を上げることができる。

本解析手法を用いることで、想定する地震強度と必要とされる構造物系の信頼度あるいは許容される構造損傷との関連から、標準せん断力係数などの設計変数を決定することが可能である。

参考文献

鈴木祥之、中治弘行、岩井 哲、北原昭男
(1997)：木造軸組構法建物の実大引張載荷実験、日本建築学会構造系論文集、第 499 号：

pp. 69-76.

Faravelli, L. (1989): Response surface approach for reliability analysis, *J. of Engineering Mechanics*, 115 (12).

Iwan, W. D. & Ching-Tung Huang (1996): On the dynamic response of non-linear systems with parameter uncertainty, *J. of Non-Linear Mechanics*, 31(5), pp. 631-645.

Myers, R. H. (1971): *Response Surface Methodology*, Boston, Allyn and Bacon.

Suzuki, Y. & R. Minai (1988a): Application of stochastic differential equation to seismic reliability analysis of hysteretic structures, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 3(1), pp. 43-52.

Suzuki, Y. & R. Minai (1988b): Seismic damage and reliability analysis of hysteretic multi-degree-of-freedom structures, *Proc. of the Ninth World Conf. on Earthquake Engineering*, VIII, pp. 773-778.

Suzuki, Y. and R. Minai (1989): Seismic reliability analysis of hysteretic structural systems. In W.K. Liu & T. Belytschko (eds.), *Computational Mechanics of Probabilistic and Reliability Analysis*, Lausanne: Elmepress International, pp. 509-541.

Suzuki, Y. & Y. Yamagishi (1995): Seismic reliability analysis of hysteretic structural systems with uncertain parameters. In Spanos (eds.), *Computational Stochastic Mechanics*, Balkema, Rotterdam, pp. 259-266.

Suzuki, Y. & T. Araki (1998): Seismic damage and reliability analysis of uncertain structural systems, *Structural Safety and Reliability*, Shiraishi, Shinozuka & Wen(edu), Balkema, Rotterdam, 3, pp. 1637-1644.

Yao, T. H. & Y. K. Wen (1993): *Response surface method for time-variant reliability analysis*. Dept. of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Seismic Reliability Analysis of Structural Systems with Uncertain Properties

Yoshiyuki SUZUKI, Tokihiko ARAKI*

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

This paper presents theoretical/numerical methods for evaluating stochastic properties of damage processes and reliabilities of structural systems with uncertain parameters under seismic excitations. An analytical form of the probability density function with respect to structural damages for deterministic systems under random excitations is similarly applied to dynamic reliability analyses for uncertain structural systems under random excitations and deterministic seismic excitations. Reliability analyses for wooden structures by using variable values of a design variable shows that the proposed method can be utilized to determine appropriate values of the design variables in the anti-seismic design.

Keywords: uncertainty, seismic reliability analysis, experimental design, response surface method,
wooden structure