確率論的手法による弾塑性構造の床応答スペクトルに関する研究*

持 尾 隆 士^{*1}

Study on Stochastic Floor Response Spectra of Hysteretic Structures

Takashi MOCHIO^{*2}^{*2} Department of Intelligent Systems, Kinki University,
930 Nishimitani, Kinokawa-shi, Wakayama, 649-6493 Japan

The purpose of this paper is to propose one analytical method to make stochastic floor response spectra in order to easily estimate the dynamic characteristics of secondary system such as piping, equipment and so on, mounted on a class of nonlinear viscoelastic structures owing to a severe earthquake. The nonlinear properties of the structures are modeled in terms of an equation of motion which linearly involves the auxiliary variable as part of the restoring force and the auxiliary equation which describes a nonlinear relationship between the auxiliary variable and the structural response. Total equations including the auxiliary equation are linearized using a stochastic linearization technique. Then executing the statistical calculation to obtain the non-stationary variance relating to relative displacement of secondary system and utilizing a newly proposed idea to estimate the extreme value, finally the stochastic floor response spectra can be derived. The analytical results are compared with those by Monte Carlo simulation.

Key Words: Non-Stationary Random Process, Peak Factor, Nonlinear System, Floor Response Spectra

1. 緒 言

地震時における構造物や機器・配管系の簡易動的評価法として応答スペクトル法が知られている。特に発電プラントや化学プラント等では多くの機器・配管系が存在するため床応答スペクトルと呼ばれる形で整理され、多用されている。ところで床応答スペクトルの入力となる主構造の応答は大地震時には非線形挙動を示す可能性があるが、このような場合にも機器・配管系を動的に簡略評価したいケースがある。しかし従来は、主構造が非線形解析となるため機器・配管系も同時に解析モデルに組み込んで詳細評価されることが多く、機器・配管系の詳細仕様が固まっていない初期設計段階では詳細解析は実施しづらい。このため主構造の弾塑性特性を考慮した床応答スペクトルがあれば初期設計段階においても機器・配管系の動特性を概略把握することが可能となり、詳細設計や

リスクマネジメントへの有用な資料を提供できる可能性がある。

一方、入力そのものについては、近年特に地震波の不確定性による構造応答への影響が議論されている。主構造物の弾塑性特性を考慮した応答スペクトルの概念は古くからあるが⁽¹⁾、地震波の不確定性を考慮した床応答スペクトルの研究はほとんどなされていない。そこで当該分野研究の第一歩として、本報告では確率論的手法により主構造の弾塑性特性を考慮した床応答スペクトルの推定法について述べる。

2. 対象とする数学モデル

2.1 非線形システムの状態空間表現 本研究では図1で示されるような、ヒステリシス復元力特性を有する主構造物の上部に一質点振動系が設置されているケースを取り上げる。

ここでヒステリシス復元力特性としてWenモデル⁽²⁾を採用し、相対変位 $x = y - z_0$, $x_a = y_a - y$ について定式化を行うと式(1)のようになる。

* 原稿受付 2009年9月28日。

^{*1} 正員, 近畿大学生物理工学部知能システム工学科(〒649-6493 紀の川市西三谷930)。

E-mail: mochio@waka.kindai.ac.jp

Fig.1 Analytical Model

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + \alpha kx + (1-\alpha)k\varepsilon = -m\ddot{z}_0 + c_a\dot{x}_a + k_ax_a \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = A\dot{x} - \beta|\dot{x}||\varepsilon|^{n-1}\varepsilon - \gamma\dot{x}|\varepsilon|^n$$

$$m_a(\ddot{x}_a + \ddot{x}_a) = -m_a\ddot{z}_0 - c_a\dot{x}_a - k_ax_a$$

ここで、 $\alpha, k, A, \beta, \gamma, n$ はヒステリシス特性を示すパラメータである。式(1)を状態空間表示することにより次の非線形システム方程式が得られる。

$$\dot{X} = F(X) + D_c\ddot{z}_0 \quad (2)$$

ただし、

$$X^T = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \equiv (x, \dot{x}, \varepsilon, x_a, \dot{x}_a)$$

$$D_c^T = (0, -1, 0, 0, 0)$$

$$F_1(X) = x_2$$

$$F_2(X) = -\frac{\alpha k}{m}x_1 - \frac{c}{m}x_2 - \frac{(1-\alpha)k}{m}x_3 + \frac{c_a}{m}x_5 + \frac{k_a}{m}x_4$$

$$F_3(X) = Ax_2 - \beta|x_2||x_3|^{n-1}x_3 - \gamma x_2|x_3|^n$$

$$F_4(X) = x_5$$

$$F_5(X) = \frac{\alpha k}{m}x_1 + \frac{c}{m}x_2 + \frac{(1-\alpha)k}{m}x_3 - c_a\left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m_a}\right)x_5 - k_a\left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m_a}\right)x_4$$

2.2 基部外乱モデル 本研究においては基部入力加速度 $\ddot{z}_0$ を、式(3)のような定常確率過程 $\ddot{z}_g(t)$ と緩やかに変化する確定的時間関数(エンベロープ関数) $\varphi(t)$ との積で与えられるものと仮定する。ここで A_m, c_1, c_2 はエンベロープ関数を特徴づける確定的パラメータである。

$$\ddot{z}_0(t) = \varphi(t)\ddot{z}_g(t) ; \varphi(t) = A_m(e^{-c_1 t} - e^{-c_2 t}) \quad (3)$$

近年活断層の調査・研究が進むにつれ地域によってはその複雑さゆえに逆に地震動推定が難しくなっているケースもあり、このため地震動の不確定性考慮の必要性が各方面で取り上げられている⁽³⁾。そこで本研究においても広範囲の入力周波数特性に対する応答性状概略把握の観点から、多くの周波数成分を含む広帯域確率過程としてのガウシアンホワイトノイズを $\ddot{z}_g(t)$ に選定した。 $\ddot{z}_g(t)$ は以下のように平均値0、スペクトル強度 ζ を有する定常確率過程と仮定する。

$$E[\ddot{z}_g(t)] = 0, E[\ddot{z}_g(t)\ddot{z}_g(t+\tau)] = 2\pi\zeta\delta(\tau) \quad (4)$$

3. 確率論的評価

3.1 非線形方程式の区間等価線形化

この解析目標は、非定常入力を受ける非線形構造系の非定常統計的応答(分散値)を求めることであるが、ここで、ある微小時間間隔 $\Delta t(t_k \leq t \leq t_{k+1})$ においては近似的に等価線形化した線形モデルによって得られる過渡応答値は、実際の応答を示しているものと仮定する。まずこの k 番目の区間で等価線形化される非線形方程式を次のように記述する(ただし k 番目であることの添字 k は省略)。

$$\dot{X} = F(X) + D\ddot{z}_g \quad (5)$$

ここで係数ベクトル D は式(2)と異なり

$D^T = (0, -\varphi(t), 0, 0, 0)$ である。

微小時間間隔内では入力レベルはほぼ定常と見なし、当該区間限定の等価線形化方程式

$$\dot{X} = A_e X + D\ddot{z}_g \quad (6)$$

を導出する。すなわち $F(X) \equiv A_e X$ と近似化する。ここで、 A_e は等価線形化係数行列であり、行列の各要素 a_{ij} は等価線形化による二乗平均誤差を最小にするように決定される。

$$\frac{\partial}{\partial a_{ij}} E[(F - A_e X)^T (F - A_e X)] = 0 \quad (i, j = 1 \sim 5) \quad (7)$$

式(7)を実行することにより次の形が得られる。

$$\begin{bmatrix} K & & & & \\ & K & & 0 & \\ & & K & & \\ & 0 & & K & \\ & & & & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ \vdots \\ a_{54} \\ a_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ \vdots \\ h_{54} \\ h_{55} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで K は式(2)の状態変数に関する共分散行列であり, h_{ij} は共分散行列の要素及び状態変数の高次モーメント等から構成される関数であり次のようになっている。

$$\begin{Bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{14} \\ h_{15} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \kappa_{12} \\ \sigma_2^2 \\ \kappa_{23} \\ \kappa_{24} \\ \kappa_{25} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{24} \\ h_{25} \end{Bmatrix} = K \begin{Bmatrix} \frac{\alpha k}{m} \\ -\frac{c}{m} \\ (1-\alpha)k \\ \frac{m}{k_a} \\ \frac{c_a}{m} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \\ h_{34} \\ h_{35} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A\kappa_{12} - \beta E[x_1 x_3 | x_2 | x_3]^{n-1} - \gamma E[x_1 x_2 | x_3]^n \\ A\sigma_2^2 - \beta E[x_2 x_3 | x_2 | x_3]^{n-1} - \gamma E[x_2^2 | x_3]^n \\ A\kappa_{23} - \beta E[x_3^2 | x_2 | x_3]^{n-1} - \gamma E[x_2 x_3 | x_3]^n \\ A\kappa_{24} - \beta E[x_3 x_4 | x_2 | x_3]^{n-1} - \gamma E[x_2 x_4 | x_3]^n \\ A\kappa_{25} - \beta E[x_3 x_5 | x_2 | x_3]^{n-1} - \gamma E[x_2 x_5 | x_3]^n \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} h_{41} \\ h_{42} \\ h_{43} \\ h_{44} \\ h_{45} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \kappa_{15} \\ \kappa_{25} \\ \kappa_{35} \\ \kappa_{45} \\ \sigma_5^2 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} h_{51} \\ h_{52} \\ h_{53} \\ h_{54} \\ h_{55} \end{Bmatrix} = K \begin{Bmatrix} \frac{\alpha k}{m} \\ \frac{c}{m} \\ (1-\alpha)k \\ -k_a \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m_a} \right) \\ -c_a \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{m_a} \right) \end{Bmatrix}$$

応答統計量についても近似的にガウス性であると仮定できる場合には, キュムラント打ち切りによる高次モーメントの近似化手法を援用することにより, a_{ij} を低次モーメントのみで解析的に表現することが可能となる⁽⁴⁾。以上により式(6)の A_e が求まるので状態方程式の線形近似化が可能となる。式(6)は線形の状態方程式になっているので t_k 時刻の応答統計量を初期値として t_{k+1} 点の応答統計量を求めることができる。

3.2 t_{k+1} 点の応答統計量の推定 式(6)に対する一般解は良く知られている通り次式のように表現される。

$$X(t) = \Phi(t-t_0)X_{t_0} + \int_{t_0}^t \Phi(t-\tau)D(\tau)\ddot{z}_g(\tau)d\tau$$

ここで $\Phi(t)$ は状態推移行列, $X_{t_0} = X(t=t_0)$ である。上式を k 番目の区間において, t_k 時刻の応答が既知で t_{k+1} 時刻の応答を求めるための式に変更してみると,

$$X(t_{k+1}) = \Phi(t_{k+1}-t_k)X_{t_k} + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi(t_{k+1}-\tau)D(\tau)\ddot{z}_g(\tau)d\tau \quad (9)$$

となる。式(9)を用いて, t_k 時刻における状態量の統計量が既知であるときの, t_{k+1} 時刻における状態量の統計量について考えてみる。

まず状態量の期待値は式(9)より,

$$E[X(t_{k+1})] = \Phi(t_{k+1}-t_k)E[X_{t_k}] + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi(t_{k+1}-\tau)D(\tau)E[\ddot{z}_g(\tau)]d\tau \quad (10)$$

なので, $t=0$ では全ての状態量がゼロであることが確定的に保証されているものとし, また式(4)を考慮すれば t_{k+1} 時刻における状態量の期待値も厳密には非線形システムではあるが近似的にゼロとなることが期待できる。一方状態量の微分値に関する期待値も等価線形化方程式が有効である限りは式(6)より区間全域で,

$$E[\dot{X}(t)] = A_e E[X(t)] + D(t)E[\ddot{z}_g(t)] = 0 \quad (11)$$

が期待できる。

次に k 番目の区間全域で成立する, 状態量に関する共分散行列 $V(t)$ が満たすべき微分方程式について示す。式(10)を考慮すると $V(t)$ は式(12)の通りであるが, 更に式(12)において両辺を t について微分し若干の変形を行えば良く知られた共分散行列 $V(t)$ が満たすべき微分方程式が式(13)のように得られる。

式(13)を解くことにより, k 番目の区間内における任意時刻の非定常共分散値を求めることができるので最終目的の t_{k+1} 時刻における応答統計量も得られることになる。

$$V(t) = E[X(t)X^T(t)] \quad (12)$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_x^2(t) & K_{xx}(t) & K_{xe}(t) & K_{xa}(t) & K_{xx}(t) \\ K_{xx}(t) & \sigma_x^2(t) & K_{xe}(t) & K_{xa}(t) & K_{xx}(t) \\ K_{ex}(t) & K_{ex}(t) & \sigma_e^2(t) & K_{ea}(t) & K_{ex}(t) \\ K_{xa}(t) & K_{xa}(t) & K_{ea}(t) & \sigma_a^2(t) & K_{xa}(t) \\ K_{xa}(t) & K_{xa}(t) & K_{ea}(t) & K_{xa}(t) & \sigma_a^2(t) \end{bmatrix}$$

$$\dot{V}(t) = AV(t) + V(t)A^T + 2\pi\zeta D(t)D^T(t) \quad (13)$$

以上の計算を k 番目の区間内で反復的に実施することにより収束解を得る。

なお式(13)の微分方程式を解くためには共分散行列の初期値,

$$\{V(t)\}_{t=t_k} = V(t_k) = \{E[X(t)X^T(t)]\}_{t=t_k} = E[X(t_k)X^T(t_k)] \quad (14)$$

が必要であるが、この値は既に $(k-1)$ 番目の区間における最終応答統計量として計算されている。

4. 最大値の期待値の推定

本研究では床応答スペクトルとして機器・配管系の相対変位量 (x_a) を採用する。システムが線形であったり定常確率過程であれば、最大値の期待値推定に対して種々の解析手法が提案されているが、非定常非線形問題に対する厳密で汎用的手法は未だ確立されていない。そこでここでは Morikawa ら⁽⁵⁾ の簡略推定法を援用して、近似的な最大値の期待値推定を行う。

いま図2のように機器・配管系の相対変位に関する非定常標準偏差 $\sigma_{x_a}(t)$ が与えられているとする。このときこの非定常確率過程における最大値の期待値を次式で近似する。

$$\begin{aligned} E[x_a(t)]_{MAX} &= \sigma' \eta \\ &= \sigma' \left\{ \sqrt{2 \ln(v_0^+ T')} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(v_0^+ T')}} \right\} \\ v_0^+ &= \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\sigma_{x_a}}{\sigma_{x_a}} \right) \\ \eta; \text{ peak factor} \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)における σ', T' は図2より決められる。同図において T' が決まる (r は $0 < r < 1$ の任意であるが 0.9 を採用)。次に $\sigma_{x_a}(t)$ の T' 部分の面積と等価になるように σ' が求められる。非定常標準偏差 $\sigma_{x_a}(t), \sigma_{x_e}(t)$ のみで最大値の情報を得られる簡便な方法である。Morikawa らが図2で対象とした系は、非定常ガウス性ホワイトノイズを受ける線形1質点系応答であり厳密には本研究での対象モデルと異なっている。しかし両者とも応答は狭帯域確率過程であり、かつ本研究のように変位量での評価の場合は応答波形が比較的滑らかであるため十分利用価値のある近似解法と考える。

Fig.2 Illustration to Evaluate the Extreme Value

5. 試算例

5.1 基本諸定数 本報告で用いる基本諸定数は次の通りである。

$$\left(\frac{m_a}{m} \right) = 0.02, \quad \left(\frac{c}{m} \right) = \frac{\pi}{25}, \quad \left(\frac{k}{m} \right) = 4\pi^2$$

$$\alpha = 0.05, \quad A = 1.0, \quad \beta = 0.75, \quad \gamma = 0.47, \quad n = 1$$

$$c_1 = 0.3, \quad c_2 = 0.5, \quad A_m = 5.379, \quad \zeta = 100$$

5.2 高次モーメントの近似化 3.1節で具体的に等価線形化係数行列の各要素を求めるためには高次モーメントを近似化する必要があるが、本研究では以下のようにキュムラント打ち切りによる近似手法を用いた。

5.1節の基本諸定数を採用する場合に3.1節で必要となる期待値量の近似化は次の10個である。

$$i) E[x_1 x_3 | x_2]$$

ここでは $|x_k|$ に対して

$$|x_k| \equiv \left\{ \frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_k}} \right\} x_k^2 \quad (16)$$

なる近似化をおこなう⁽⁴⁾ (他の量も同様). このとき

$$E[x_1 x_3 | x_2] \equiv \left\{ \frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_2}} \right\} E[x_1 x_2^2 x_3]$$

なので, ここで4次キュムラント打ち切りによりモーメント近似をおこなうと最終的に低次モーメントのみで次のように近似することが可能となる.

$$E[x_1 x_3 | x_2] = \left(\frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_2}} \right) \times \{ 2E[x_1 x_2] E[x_2 x_3] + E[x_1 x_3] E[x_2^2] \} \quad (17)$$

以下, 同様に近似化をおこなう.

ii)

$$E[x_1 x_2 | x_3] = \left(\frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_3}} \right) \times \{ 2E[x_1 x_3] E[x_2 x_3] + E[x_1 x_2] E[x_3^2] \} \quad (18)$$

iii)

$$E[x_3 x_4 | x_2] = \left(\frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_2}} \right) \times \{ 2E[x_2 x_3] E[x_2 x_4] + E[x_3 x_4] E[x_2^2] \} \quad (19)$$

iv)

$$E[x_2 x_4 | x_3] = \left(\frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_3}} \right) \times \{ 2E[x_2 x_3] E[x_3 x_4] + E[x_2 x_4] E[x_3^2] \} \quad (20)$$

v)

$$E[x_3 x_5 | x_2] = \left(\frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_2}} \right) \times \{ 2E[x_2 x_3] E[x_2 x_5] + E[x_3 x_5] E[x_2^2] \} \quad (21)$$

vi)

$$E[x_2 x_5 | x_3] = \left(\frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_3}} \right) \times \{ 2E[x_2 x_3] E[x_3 x_5] + E[x_2 x_5] E[x_3^2] \} \quad (22)$$

vii)

$$E[x_2 x_3 | x_2] = \frac{4\sigma_{x_2}}{\sqrt{2\pi}} E[x_2 x_3] \quad (23)$$

viii)

$$E[x_2^2 | x_3] = \left(\frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_3}} \right) \times \{ E[x_2^2] E[x_3^2] + 2(E[x_2 x_3])^2 \} \quad (24)$$

ix)

$$E[x_3^2 | x_2] = \left(\frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_2}} \right) \times \{ E[x_2^2] E[x_3^2] + 2(E[x_2 x_3])^2 \} \quad (25)$$

x)

$$E[x_2 x_3 | x_3] = \frac{4\sigma_{x_3}}{\sqrt{2\pi}} E[x_2 x_3] \quad (26)$$

5.3 計算結果

まず全体的な挙動を把握するため任意の入力波形を用いたシミュレーションを実施した. 図3~図6は大地震を想定($\zeta=100$)したときの, 各々入力波形, 主構造物の絶対応答加速度, 主構造/機器・配管系間の相対変位, 主構造のヒステリシス特性であり, 他方図7~図10は中小地震を想定($\zeta=5$)したときの同様の結果である. なおヒステリシス特性においては応答相対変位及び非線形復元力ともに最大値で基準化している.

Fig.3 Input Acceleration ($\zeta=100$)

Fig. 4 Acceleration of Main Structure ($\zeta=100$)

Fig. 5 Relative Displacement of Equipment ($\zeta=100$) Fig. 6 Cycle of Force Displacement ($\zeta=100$) Fig. 7 Input Acceleration ($\zeta=5$) Fig. 8 Acceleration of Main Structure ($\zeta=5$) Fig. 9 Relative Displacement of Equipment ($\zeta=5$) Fig. 10 Cycle of Force Displacement ($\zeta=5$)

本研究で採用した諸定数の場合、特に大地震時には主構造は大きく非弾性領域（図6）に突入しており非線形解析の必要性を示している。

本研究での理論解析で使用している確率論的等価線形化手法では、応答は近似的にガウス性確率過程であることを前提としている。この仮定がどの程度実現されているのかを把握するため大地震時($\zeta=100$)における主構造物の絶対応答加速度に関してヒストグラムを作成した。時間軸方向統計と集合論的統計を採っている。時間軸方向統計量は応答レベルが大きい前半15秒間を対象とし、一方集合論的な任意時刻での統計量計算は応答レベルがもっとも大きくなる5秒近傍で実施した。時間軸方向統計結果は図11、集合論的統計結果は図12に示すが、いずれも図中には統計量から算出したパラメータを用いた理論曲線も示している。応答が残留変形を残す高い非線形性を示すため理論曲線通りにはならないが、後述の理論応答計算とシミュレーション結果が比較的良好一致を示していることから図11,12程度の誤差ならば、今回対象の解析に関する限り許容範囲と考えることが可能であるように思われる。

Fig. 11 Histogram of Acceleration of Main Structure (Statistics in Time History)

Fig. 12 Histogram of Acceleration of Main Structure (Statistics in Ensemble)

床応答スペクトル算出時の基本データとなる機器・配管系相対応答変位の非定常標準偏差 $\sigma_{x_a}(t)$ の妥当性を評価するために、大きな値が得られる機器・配管系固有周期が5秒のケースについて、大地震対応($\zeta=100$)でシミュレーションと解析を実施した。シミュレーションは確率論的解析と比較できるように入力波形を変えて500回行った。500個の応答波形を統計処理することにより非定常標準偏差を求めた。図13に相対変位 x_a に関する30秒間の非定常標準偏差を示す。一方、本研究における主要目的である確率論的解析による図13相当の結果を図14に示している。

Fig. 13 Statistical Results of Simulation ($\zeta=100$)

Fig. 14 Statistical Results by Stochastic Analysis ($\zeta=100$)

両者は良い一致を示しており、非定常標準偏差に関する解析手法妥当性への見通しが得られた。

上記で得られる非定常標準偏差と本研究で提案する式(15)を用いて最終的な最大値の期待値が求められるので、機器・配管系の固有周期毎に計算を行うことで確率論的床応答スペクトルが得られる。その一例を、機器・配管系の減衰定数0.02について示したものが図15である。同図には500回のモンテカルロシミュレーション結果も三角マークで記載している。

Fig. 15 Stochastic Floor Response Spectrum ($\zeta=100$)

上記大地震対応ケースと同様に中小地震($\zeta=5$)対応ケースについても計算を行った。結果は各々図16～図18に示すとおりである。

Fig. 16 Statistical Results of Simulation ($\zeta=5$)

Fig. 17 Statistical Results by Stochastic Analysis ($\zeta=5$)

Fig. 18 Stochastic Floor Response Spectrum ($\zeta=5$)

以上図 13～図 18 を通して明らかなように、解析とシミュレーションは比較的良好一致を示しており、式(15)の妥当性も含めて本研究で提案した手法の有用性への見通しが得られたものと考える。

6. まとめ

大地震により非弾性挙動を示す主構造物に対し、その内部に設置されている 2 次系としての機器・配管系の簡易動的評価を入力地震動の不確定性を考慮して実施可能とするために、確率論的床応答スペクトルを求めた。この床応答スペクトルを求めるために本研究では、確率論的等価線形化手法と非定常確率過程における簡易最大値推定法を利用した新たな解析手法を提案した。この解析

手法はモンテカルロシミュレーションと比較され、両者はかなり良好一致を示しており、解析手法妥当性への見通しが得られた。

文 献

- (1) Newmark, N.M., Blume, J.A. and Kapur, R.R., Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plants, *Journal of the Power Division*, ASCE, Vol.99 (1973), pp.287-303.
- (2) Wen, Y.K., Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.102, No.EM2 (1976), pp.249-263.
- (3) Nuclear Safety Commission of Japan (NSC), Regulatory Guide for Reviewing Seismic Design of Nuclear Power Reactor Facilities, NSC, (2006)
- (4) Mochio, T., Stochastic Analysis of Non-Linear System Subjected to Random Excitation, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.49, No.445 (1983), pp.1455-1463.
- (5) Morikawa, H. and Zerva, A., Approximate Representation of the Statistics for Extreme Response of Single Degree of Freedom System Excited by Non-stationary Processes, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 23(2008), pp.279-288.