2 次系の非弾性を考慮した確率論的床応答スペクトル*

持尾 隆士^{*1}

Development of Stochastic Floor Response Spectra in Consideration of Elasto-Plastic Characteristics at Secondary System

Takashi MOCHIO^{*1}^{*1} Kinki Univ. Dept. of Computational Systems Biology
930 Nishimitani, Kinokawa, 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 structure owing to an earthquake. Because of the increase of uncertainty at earthquake level, the design level for earthquake is tending upward. This is implying that the aseismic design of secondary system based on elastic design becomes more difficult from the viewpoint of economic design. Thus, as a first step, this paper derives the stochastic floor response spectra in consideration of a simple nonlinear design and/or a seismic risk analysis in future. The nonlinear properties of the secondary system 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. 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 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 : Earthquake Resistant, Random Vibration, Seismic Motion, Floor Response Spectra, Peak Factor

1. 緒 言

近年, 地震入力レベルの不確実性が重要視されるにつれて耐震安全性確保の観点から入力レベルは大幅に引き上げられる傾向にある. これにともない, 一般に入力レベルが主系より更に増幅する機器・配管系等の 2 次系においては, 基本的に従来の弾性設計をベースにした耐震性確保では経済性の観点から設計限界に近づきつつある. これをクリアするための方法の一つとして 2 次系の塑性化によるエネルギー吸収が考えられる. しかし長年弾性設計をベースとして多くの知見を獲得してきた動的設計を必要とする一般の 2 次系耐震設計法に, 急激な弾塑性設計を導入することは耐震安全性・信頼性確保の観点から問題であり, 今後の多くの実験・研究さらには実規模での試計算・試作等データの蓄積が必要である.

本研究は前述の流れの中の一つであり, 2 次系における簡易動的解析として長年活用されてきた床応答スペクトル法による設計思想を, 将来の PSA (Probabilistic Safety Assessment) まで見据えながら弾塑性レベルまで利用できるか否かを検討するための第一ステップとして確率論的床応答スペクトルを作成するものである.

* 原稿受付 2011 年 10 月 20 日

^{*1} 正員, 近畿大学 (〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930)
E-mail: mochio@waka.kindai.ac.jp

2. 対象とする数学モデル

2・1 対象とする運動方程式

本研究では図 1 で示されるような，弾性主構造物の上部にヒステリシス復元力特性を有する一質点振動系が設置されているケースを取り上げる．

Fig.1 Analytical model

ここでヒステリシス復元力特性として Wen モデル⁽¹⁾を採用し， 相対変位 $x = y - z_0$ ， $x_e = y_e - y$ について定式化を行うと以下ようになる．

$$\left. \begin{aligned} m_e(\ddot{x}_e + \ddot{x}) + c_e \dot{x}_e + \alpha k_e x_e + (1 - \alpha)k_e \varepsilon &= -m_e \ddot{z}_0 \\ \dot{\varepsilon} &= A \dot{x}_e - \beta |\dot{x}_e| |\varepsilon|^{n-1} \varepsilon - \gamma \dot{x}_e |\varepsilon|^n \\ m \ddot{x} + c \dot{x} + kx &= -m \ddot{z}_0 + c_e \dot{x}_e + \alpha k_e x_e + (1 - \alpha)k_e \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)で， α ， k_e ， A ， β ， γ ， n はヒステリシス特性を示すパラメータである．

2・2 基部外乱モデル

地震外乱のモデル化を行う．本研究においては地震入力加速度 $\ddot{z}_0$ を，式(2)のような定常確率過程 $\dot{w}(t)$ と緩やかに変化する確定的時間関数（エンベロープ関数） $\phi(t)$ との積で与えられるものと仮定する．

$$\ddot{z}_0(t) = \phi(t) \ddot{w}(t) \quad ; \quad \phi(t) = A_m (e^{-c_1 t} - e^{-c_2 t}) \quad (2)$$

更に $\ddot{w}(t)$ は Kanai-Tajimi スペクトルを有する狭帯域確率過程でモデル化する．この過程はガウシアンホワイトノイズを基部に受ける線形 1 自由度系の絶対応答加速度として得られる．運動方程式は次式の通りである．

$$\ddot{v} + 2h\Omega\dot{v} + \Omega^2 v = -\ddot{z}_g \quad ; \quad (\ddot{v} = \ddot{w} - \ddot{z}_g) \quad (3)$$

ここで， h ， Ω は狭帯域確率過程を特徴づけるパラメータであり， $\ddot{z}_g$ は平均値 0， スペクトル強度 ζ を有するガウシアンホワイトノイズである．

2・3 状態空間表現

式 (1) ～ (3) を用いることにより，対象システムの状態方程式が得られる．

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}(\mathbf{X}) + \mathbf{D} \ddot{z}_g \quad (4)$$

ただし,

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X}^T = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) \equiv (x_e, \dot{x}_e, \varepsilon, x, \dot{x}, \nu, \dot{\nu}) \\ \mathbf{D}^T = (0, 0, 0, 0, 0, 0, -1) \\ F_1(\mathbf{X}) = x_2 \\ F_2(\mathbf{X}) = -\left(1 + \frac{m_e}{m}\right) \alpha \omega_e^2 x_1 - 2\left(1 + \frac{m_e}{m}\right) \xi_e \omega_e x_2 - \left(1 + \frac{m_e}{m}\right) (1 - \alpha) \omega_e^2 x_3 + \omega_0^2 x_4 + 2\xi \omega_0 x_5 \\ F_3(\mathbf{X}) = A x_2 - \beta |x_2| |x_3|^{n-1} x_3 - \gamma x_2 |x_3|^n \\ F_4(\mathbf{X}) = x_5 \\ F_5(\mathbf{X}) = \alpha \left(\frac{m_e}{m}\right) \omega_e^2 x_1 + 2\left(\frac{m_e}{m}\right) \xi_e \omega_e x_2 + \left(\frac{m_e}{m}\right) (1 - \alpha) \omega_e^2 x_3 - \omega_0^2 x_4 - 2\xi \omega_0 x_5 \\ \quad + \Omega^2 \varphi(t) x_6 + 2h\Omega \varphi(t) x_7 \\ F_6(\mathbf{X}) = x_7 \\ F_7(\mathbf{X}) = -\Omega^2 x_6 - 2h\Omega x_7 \\ \frac{c}{m} = 2\xi \omega_0, \frac{k}{m} = \omega_0^2; \frac{c_e}{m_e} = 2\xi_e \omega_e, \frac{k_e}{m_e} = \omega_e^2 \end{array} \right.$$

3. 確率論的評価

3・1 非線形方程式の区間等価線形化

ここでの解析目標は、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 Δt ($t_k \leq t \leq t_{k+1}$) 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式は、微小時間間隔内では入力レベルはほぼ定常とみなし、当該区間限定の等価線形化方程式として次式のように記述する。（ただし k 番目であることの添字 k は省略。）

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

すなわち $\mathbf{F}(\mathbf{X}) \cong \mathbf{A}_e \mathbf{X}$ と近似化する。ここで $\mathbf{A}_e$ 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。

$$\frac{\partial}{\partial a_{ij}} E[(\mathbf{F} - \mathbf{A}_e \mathbf{X})^T (\mathbf{F} - \mathbf{A}_e \mathbf{X})] = 0 \quad (i, j = 1 \sim 7) \quad (6)$$

式 (6) を具体的に実行して等価線形化係数 a_{ij} を求めるためには次の高次モーメントを低次モーメントで表現する必要がある。

$$E\left[x_3 x_l | x_2 \| x_3 \|^{n-1}\right], \quad E\left[x_2 x_l | x_3 \|^{n-1}\right] \quad (l=1 \sim 7)$$

このため本研究では応答統計量についても近似的にガウス性であることを仮定してキウムラント打ち切りによる高次モーメントの近似化手法⁽²⁾を援用することで、 a_{ij} を低次モーメントのみで解析的に表現した。以上により式 (5) の $\mathbf{A}_e$ が求まるので状態方程式の線形近似化が実現できることになる。

式 (5) 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 (5) 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。

$$\mathbf{X}(t) = \Phi(t-t_0)\mathbf{X}_{t_0} + \int_{t_0}^t \Phi(t-\tau)\mathbf{D}(\tau)\ddot{\mathbf{z}}_g(\tau)d\tau \quad (7)$$

ここで $\Phi(t)$ は状態推移行列、 $\mathbf{X}_{t_0} = \mathbf{X}(t=t_0)$ である。式 (7) 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、

$$\mathbf{X}(t_{k+1}) = \Phi(t_{k+1}-t_k)\mathbf{X}_{t_k} + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi(t_{k+1}-\tau)\mathbf{D}(\tau)\ddot{\mathbf{z}}_g(\tau)d\tau \quad (8)$$

となる。式 (8) 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 (8) より、

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

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 $\ddot{\mathbf{z}}_g$ は平均値が 0 であることを考慮すれば 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 (5) より区間全域で、

$$E[\dot{\mathbf{X}}(t)] = \mathbf{A}_e E[\mathbf{X}(t)] + \mathbf{D}(t)E[\ddot{\mathbf{z}}_g(t)] = \mathbf{0} \quad (10)$$

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 $\mathbf{V}(t)$ が満たすべき微分方程式は、外乱 $\ddot{\mathbf{z}}_g$ がガウシアンホワイトノイズであることから容易に次式の形が導出される。

$$\dot{\mathbf{V}}(t) = \mathbf{A}_e \mathbf{V}(t) + \mathbf{V}(t)\mathbf{A}_e^T + 2\pi\zeta \mathbf{D}(t)\mathbf{D}^T(t) \quad (11)$$

式 (11) 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出来るので最終目的の t_{k+1} 時刻における応答統計量も得られることになる。

以上の計算を k 番目の区間で反復的に実施することにより収束解を得る.

なお式 (11) の微分方程式を解くためには共分散行列の初期値,

$$\{V(t)\}_{t=t_k} = V(t_k) = \{E[X(t)X^T(t)]\}_{t=t_k} = E[X(t_k)X^T(t_k)] \quad (12)$$

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_e) 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. 更に今回は大地震対応を想定しているため入力レベルが大きく相対変位量も弾塑性ゆえに大変形となっているため, 従来の解析的手法を利用するに際しての適用可能範囲が現時点では明確ではない. そこで本研究では文献 (3) で提案された, Morikawa らの簡略推定法⁽⁴⁾を援用した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 $\sigma_{x_e}(t)$ が与えられているとする.

Fig.2 Illustration to evaluate the extreme value

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.

$$E\left[\left|x_e(t)\right|_{\max}\right] = \sigma' \eta = \sigma' \left\{ \sqrt{2 \ln(v_0^+ T')} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(v_0^+ T')}} \right\} \quad ; \quad v_0^+ = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\sigma_{\dot{x}_e}}{\sigma_{x_e}} \right) \quad (13)$$

式 (13) における σ', T' は図 2 より決められる. 同図においてまず T' が決まる (r は $0 < r < 1$ の任意であるが 0.9⁽⁴⁾ を採用). 次に $\sigma_{x_e}(t)$ の T' 部分の面積と等価になるように σ' が求められる. なお, 後述するような図 12 および図 14 のような場合には, 最初のもっとも大きなピーク部について図 2 の手法を適用している⁽⁵⁾.

5. 試計算例

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.

$$\left(\frac{m_e}{m}\right) = 0.02, \left(\frac{c}{m}\right) = \frac{\pi}{25} (1/\text{sec}), \left(\frac{k}{m}\right) = 4\pi^2 (1/\text{sec}^2), \alpha = 0.05, A = 1.0, \beta = 0.75, \gamma = 0.47, n = 1$$

$$c_1 = 0.3, c_2 = 0.5, A_m = 5.379, h = 0.6, \Omega = 5\pi (1/\text{sec})$$

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を次に示す.

一般表現 $E[x_i x_j | x_k]$ において、ここでは $|x_k|$ に対して

$$|x_k| \cong \left\{ \frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_k}} \right\} x_k^2 \quad (14)$$

なる近似化をおこなう⁽²⁾. このとき

$$E[x_i x_j | x_k] \cong \left\{ \frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_k}} \right\} E[x_i x_j x_k^2] \quad (15)$$

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.

$$E[x_i x_j | x_k] \cong \left\{ \frac{4}{3\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_{x_k}} \right\} \{ 2E[x_i x_k]E[x_j x_k] + E[x_i x_j]E[x_k^2] \} \quad (16)$$

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 ($\zeta = 500$) したときの、各々入力波形、主構造物の絶対応答加速度、主構造物/機器・配管系間の相対変位、機器・配管系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 ($\zeta = 10$) 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 [$\zeta = 500 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)$] Fig. 4 Acceleration of main structure [$\zeta = 500 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)$] Fig. 5 Relative displacement of equipment [$\zeta = 500 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)$] Fig. 6 Cycle of force displacement [$\zeta = 500 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)$] Fig. 7 Input acceleration [$\zeta = 10 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)$] Fig. 8 Acceleration of main structure [$\zeta = 10 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)$]

Fig. 9 Relative displacement of equipment [$\zeta = 10 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)$] Fig. 10 Cycle of force displacement [$\zeta = 10 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)$]

本研究で採用した諸定数の場合，特に大地震時には機器・配管系は大きく非弾性領域（図 5, 6）に突入しており非線形解析の必要性を示している．

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 $\sigma_{x_e}(t)$ の妥当性を評価するために，機器・配管系固有周期が 1 秒と 5 秒の 2 ケースについてシミュレーションと解析を実施した．なお本研究における機器・配管系の固有周期とは地震入力を受ける前における $2\pi\sqrt{m_e/k_e}$ の値で定義したものをさしている．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 11, 12 に相対変位 x_e 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 11, 12 相当の結果を図 13, 14 に示している．2 ケースともシミュレーションと解析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．

Fig. 11 Statistical results of simulation [$\zeta = 100 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)$] Fig. 12 Statistical results of simulation [$\zeta = 100 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)$]

Fig. 13 Statistical results by stochastic analysis
 $[\zeta = 100 (\text{cm}^2/\text{sec}^3)]$

Fig. 14 Statistical results by stochastic analysis
 $[\zeta = 100 (\text{cm}^2/\text{sec}^3)]$

Fig. 15 Stochastic floor response spectrum $[\zeta = 100 (\text{cm}^2/\text{sec}^3)]$

図 13,14 等で得られる非定常標準偏差と式 (13) 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が両者は比較的良好な一致を示しており、先に述べた非定常標準偏差に関する比較結果での妥当性から考えて本研究で提案する解析手法の有用性への見通しも得られた。

5・4 非弾性機器・配管系の床応答スペクトル解析利用への可能性検討

耐震解析独特の計算手法である床応答スペクトル法の最大の特徴は、上部構造としての機器・配管系の詳細動特性を知ることなく地震時の動的応答評価が簡便に行えるところにある。しかしこれが実現されるためには主構造物／機器・配管系間での非連成化による推定精度の低下が小さいことが前提となる。すなわち式 (1) において原則、

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= -m\ddot{z}_0 + c_e\dot{x}_e + \alpha k_e x_e + (1-\alpha)k_e \varepsilon \\
 \Downarrow \\
 m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= -m\ddot{z}_0
 \end{aligned} \tag{17}$$

のような近似化による誤差が少ないことが必要である．そこで非弾性機器・配管系に対しても床応答スペクトル法が採用できるか否かの評価は，線形系同様に近似化による誤差量の評価で可能であるとの仮定のもとでこの誤差量評価を行った．本研究では確率論的评价であるので誤差量を次式で定義している．

$$\text{誤差量} = \left| \frac{\left(\text{連成系 } \sigma_{x_e} \text{Max} - \text{非連成系 } \sigma_{x_e} \text{Max} \right)}{\text{連成系 } \sigma_{x_e} \text{Max}} \right| \times 100 \quad (\%) \tag{18}$$

式 (18) において本来ならば応答の非定常標準偏差最大値ではなく，応答最大値の期待値を使用することが好ましい．しかし本研究では次の理由， 1) 非定常弾塑性大変形における確率過程のピークファクタ推定法が確立しておらず 4 章で使用した近似推定の適用限界が不明， 2) 式 (18) の形を採用すれば（応答最大値の期待値＝非定常標準偏差最大値×ピークファクタ なので）ピークファクタの影響を除去できる可能性が高い，により誤差量を式 (18) で評価した．5.1 節の基本諸定数を用いて計算した結果を図 16 に示す．

Fig. 16 Relative error of decoupling calculation $[\zeta = 100 \text{ (cm}^2/\text{sec}^3)]$

同図で (b) とは (a) を xy 平面上に投影したものである．さらに，

$$\text{Mass Ratio} = \frac{m_e}{m}, \quad \text{Frequency Ratio} = \frac{\omega_e}{\omega_0} = \sqrt{\frac{k_e}{m_e}} / \sqrt{\frac{k}{m}}$$

である．図 16 は解析解であるがこれの妥当性を確認するため 500 波の入力を用いたモンテカルロシミュレーションにより連成系と非連成系の非定常標準偏差を計算し誤差量を求めた．図 17~19 の結果図において実線が連成系としての計算，破線が非連成系の結果である．評価ポイントは図 16 (b) に示しているが実用性がある

と思われる低質量比の範囲においてはかなり良い一致を示しており（A点の解析値＝1.4%，B点の解析値＝18%，C点の解析値＝80%）図16を求めるために使用した解析法が妥当である見通しが得られた。

Fig. 17 Comparison of coupled and decoupled analysis(A)

Fig. 18 Comparison of coupled and decoupled analysis(B)

Fig. 19 Comparison of coupled and decoupled analysis(C)

図16において垂直軸方向（誤差量）の値が小さいほど非連成系による誤差が少なく床応答スペクトル法が有効である領域ということになる。同図よりこの範囲は線形系と同様の、質量比(m_e/m)で0.03程度までと考えられる。なお0.03以下でも振動数比(ω_e/ω_0)が3近傍では誤差量の値が大きくなっているが、図18で示されているように、1) 相対変位量自体が小さく本研究での対象としている大変形量領域に比べ設計への影響は少ない、2) また非連成系による計算結果のほうが大きな値となっておりこれは床応答スペクトル法による計算を実施したほうが安全側の評価となることを意味している、等の理由もあり、振動数比に関係なく質量比のみを0.03程度以下に抑えれば非弾性機器・配管系も従来の床応答スペクトル法を利用して評価できるものとする。

ここで図19（C点評価）のケースは、上記1), 2)のいずれにも該当し、床応答スペクトル法の適用範囲と考えられるが、同図で採用されている質量比＝0.1の場合には仮に振動数比が2程度になると相対変位量自体が大きくなり誤差量も図16より40%程度となっている。すなわち質量比が大きくなると、設計への影響が大きい過剰な安全サイド評価となって経済性の観点から好ましくない領域が増えることになる。一方、質量比が0.03程度以下であれば当該全振動数比領域において過剰設計となることが回避できる。この点からも床応答スペクトル法適用範囲は質量比0.03程度以下とすることが好ましいと考える。

6. まとめ

地震波の不確定性による入力地震動レベルの増大が今後予想される中で、2 次系としての機器・配管系における入力レベルもより増加することが考えられる。2 次系の動的設計は床応答スペクトルを用いて行われることが多いが、入力レベルの増大により今後弾塑性設計を実施するケースが増加すれば、弾性設計をベースとした床応答スペクトル法も理論の再構築が必要となる可能性もある。特に今後は地震入力の不確定性の考慮も耐震安全性・信頼性確保の点から重要なファクタである。このような観点から入力の不確定性を考慮した弾塑性 2 次系の確率論的床応答スペクトルを作成した。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、両者はかなり良い一致を示しており、解析手法妥当性への見通しが得られた。更に主構造物と機器・配管系間の連成／非連成による影響を評価することにより、弾塑性 2 次系を従来の床応答スペクトル法の枠内でも利用できる可能性があることを確率論的観点から示した。

文 献

- (1) Wen, Y.K., "Method for Random Vibration of Hysteretic Systems", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 102, No.EM2 (1976), pp.249-263.
- (2) 持尾隆士, "不規則外乱を受ける非線形構造系の動的信頼性解析", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.49, No.445(1983), pp.1455-1463.
- (3) 持尾隆士, "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", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.765(2010), pp.1201-1208.
- (4) 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*, Vol.23, No.2-3(2008), pp.279-288.
- (5) 盛川仁, "局所的に分散が増大する非定常正規白色雑音の極値分布の近似法に関する一考察", Vol.5, JCROSSAR2003 論文集, (2003), pp.765-770.