

等価線形化手法の非線形確率構造物の 応答評価への適用

APPLICATION OF EQUIVALENT LINEARIZATION TECHNIQUE TO
STOCHASTIC NON-LINEAR STRUCTURE RESPONSE

大島靖樹^{*}・平田和太^{*}・石田勝彦^{**}

By Yasuki OOTORI, Kazuta HIRATA and Katsuhiko ISHIDA

The purpose of this study is to develop a probabilistic evaluation method of maximum response of isolated structure during earthquake, where randomness of earthquake input motion and structural materials are taken into account. In this method random vibration theory and equivalent-linearization technique are combined. The applicability of the method is verified by MCS(Monte-Carlo simulation) for SDOF system with bi-linear restoring force. As a result, the expected value and the variance of maximum response estimated by the proposed method agree well with MCS.

1. はじめに

近年、原子力発電所等の重要構造物に対して、確率論的な手法を用いて信頼性を評価することの重要性が認められつつある。一般に、構造物の耐震信頼性を評価する際には、荷重効果及び耐力の不確定性として構造物に働く地震動のランダム性や構造物の材料特性に含まれる不確定性を確率論的に考慮して解析を行なうことが要求されている。

一方、原子力発電所等の重要施設や高規格な道路橋に対して免震システムを導入するための研究が各方面で行なわれている。このため、非線形挙動を示す免震システムを導入した構造物に対して地震動のランダム性と材料特性に含まれる不確定性を考慮して、応答を確率論的に評価する手法を整備することは重要な課題となっている。

従来から、線形構造物に対しては、不規則振動論に基づき構造物の最大応答の期待値や分散を効率的に求める研究が行なわれてきた^{1)~5)}。一方、免震構造物のように非線形な復元力特性を有し、かつ、塑性率の大きな構造物に対する確率論的な応答評価においては、時刻歴解析によるモンテカルロシミュレーション(MCS)に頼らざるを得ないのが現状である。しかしながら、MCSは、特に入力のランダム性と材料特性の不確定性を考慮する場合、計算コストが膨大となり、耐震信頼性評価において現実的な手法とは言い難い。

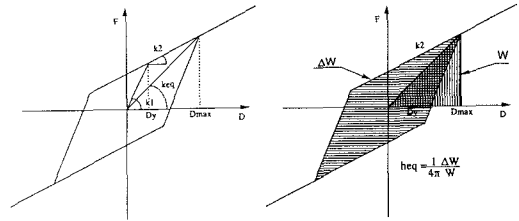
* 工修 (財)電力中央研究所 FBR部 免震研究室 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子 1646)

** 工博 (財)電力中央研究所 FBR部 免震研究室 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子 1646)

本論文では、免震構造物のように大きな塑性率を有する構造物の応答の期待値と分散を簡便に評価する方法について提案を行なうものである。提案する手法は、地震動のランダム性と構造物の材料特性に含まれる不確定性を考慮した確率論的応答評価を等価線形化手法を用いて周波数領域の解析によって行なうものである。ここでは、先ず、免震構造物を対象として地震動のランダム性を考慮した場合の最大応答変位の期待値の評価に対して周波数領域での等価線形化手法の適用を図り、次に、構造物の材料特性に不確定性を有する場合に対して1次近似2次モーメント法を適用し、最大応答値の確率論的評価を行なうものである。本手法による応答評価の結果は、MCSの結果と比較し、その適用性について検討を行なった。

2. 等価線形化手法における応答修正係数の導入

等価線形化手法は、図-1に示す等価剛性と等価粘性減衰定数によって非線形の復元力特性を簡略化する方法である。一般には、簡便さと汎用性から、最大応答振幅と有効振幅係数の積である有効振幅における割線係数で等価剛性と等価粘性減衰を表現する方法がよく用いられている。ここに有効振幅係数とは等価線形化解析において等価剛性と等価粘性減衰を定めるのに必要な有効振幅を求めるために用いる係数で、繰返し計算において前段階の最大応答変位に乘ずる係数である。



(a) 等価剛性 k_{eq} の定義 (b) 等価粘性減衰 h_{eq} の定義

図-1 等価線形化の概念

この等価線形化解析によって、非線形構造物の応答を求めようとする時、有効振幅係数が大きな影響を与える。この有効振幅係数については、地盤を対象とした解析では従来から65%が用いられる事が多かった。また、H.Watanabe et.al.⁶⁾はRamberg-Osgoodモデルに対して最大外力が降伏点の2倍となるようにして数種類の地震波に対して解析を行ない有効振幅係数として0.5を用いることを提案している。それに対して、免震構造物を対象とした時は、1.0を用いた例もある^{7), 8)}。しかしながら、対象構造物の復元力特性や塑性率及び地震動の波形特性の影響によって必ずしも最適な有効振幅係数が存在するとは限らず、有効振幅係数を一意的に決定することは難しい。一例として、免震構造物を想定した1質点系モデル(図-2)に対して、図-3に示される速度応答スペクトル⁹⁾をターゲットとして作成した地震波3波(図-4)に対して有効振幅係数を0.05~1.0まで変化させて最大応答変位を求めた時の結果を図-5に示す。この図より有効振幅係数によっていくらかでも評価結果が変わり得ること、また、免震構造物のように塑性率が大きくなる場合には、非線形解析結果から有効振幅係数を逆算した時、

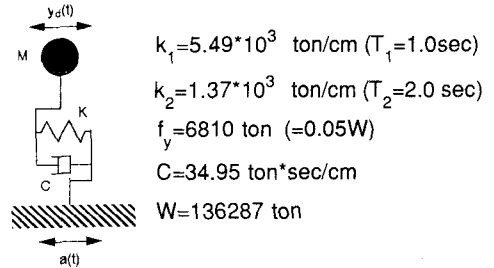


図-2 1質点系モデル

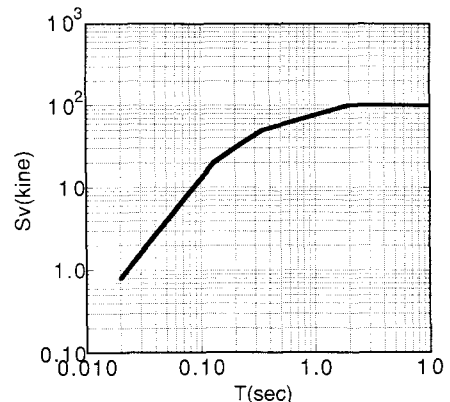


図-3 ターゲットの速度応答スペクトル

1つの応答変位に対して有効振幅係数が2つ存在する場合もあることから、免震構造物に対して最適な有効振幅係数を定めることは困難であり、ここでは等価線形化解析から非線形応答を簡易的に評価するために以下に述べる応答修正係数を導入する。非線形系の等価周期と線形化された復元力特性の固有周期が同じであるとするために有効振幅係数を1.0として、時間領域で等価線形化解析と非線形解析を行い、両者の比較から応答修正係数 β_d を求める。 β_d は定義より次式で与えられる。

$$\beta_d = \frac{(R_d)_{NL}}{(R_d)_{EQ}} \quad (1)$$

ここで、 $(R_d)_{NL}$ はバイリニア系に対する時間領域での非線形解析 (Newmark- β method) によって求めた最大応答変位、 $(R_d)_{EQ}$ は時間領域での等価線形化解析による最大応答変位である (図-6)。検討に用いた地震波はホワイトノイズとし、パワーの強度 S_0 と第1剛性と第2剛性の比 k_2/k_1 をパラメトリックに変化させて検討を行なった。

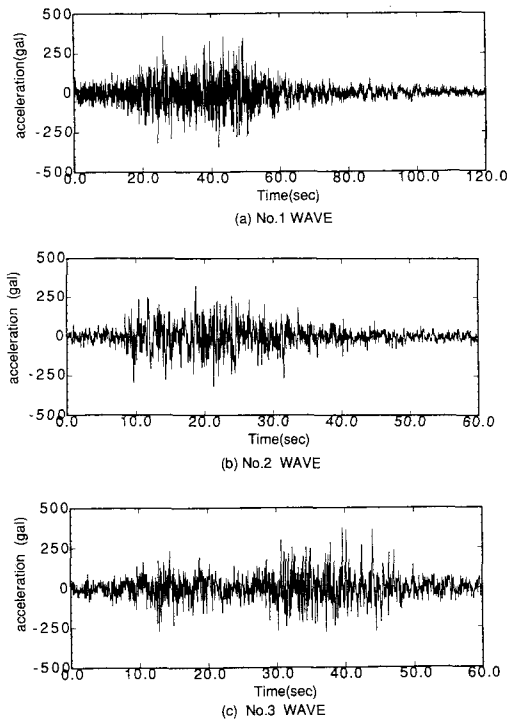


図-4 検討に用いた地震波

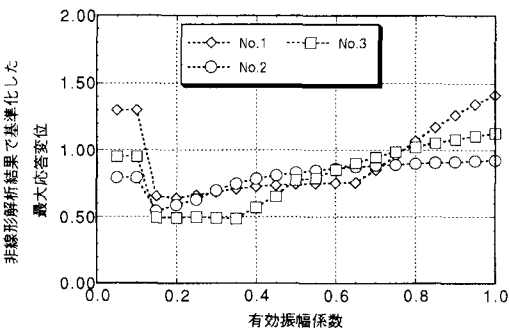


図-5 有効振幅係数と最大応答変位の関係

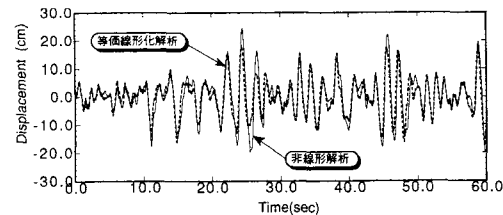


図-6 時刻歴応答解析の一例

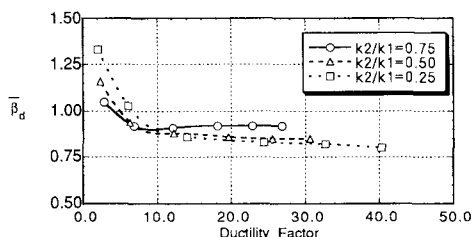


図-7 応答修正係数と塑性率の関係

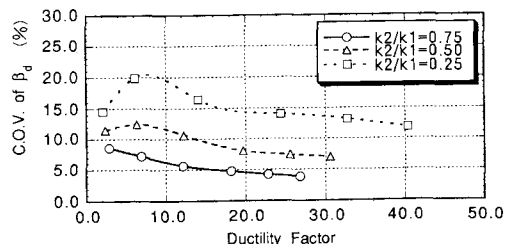


図-8 応答修正係数の変動係数と塑性率の関係

応答解析をホワイトノイズのパワーの強度 S_0 を 25, 100, 250, 500, 750, 1000 ($\text{gal}^2 \cdot \text{sec}$) (最大加速度で約 200-1800 gal) と変化させ、位相を $0 \sim 2\pi$ の乱数で与えた模擬地震波各 50 波に対して k_2/k_1 を 0.25, 0.50, 0.75 と変化させて解析を行なった。得られた結果を図-7, 8 に示す。図-7 に示す $\bar{\beta}_d$ は期待値で、免震構造物の応答で重要となる大変形域 (塑性率 $\mu = D_{\max}/D_y$ が 10~15 以上) ではほぼ一定となり、また、図-8 に示す β_d のばらつきに関しては応答の塑性率が大きくなる程、応答が実質上第 2 剛性に支配され第 1 剛性の影響が小さくなるため、減少する傾向にあると考えられる。従って、免震構造物のように大きな塑性率に達する構造物の応答の期待値を等価線形化手法を用いて求める際に応答修正係数を導入することによって補正を行なうことは妥当であると考えられる。

図-7 に示す結果から応答修正係数の期待値 $\bar{\beta}_d$ を求めた結果を表-1 に示す。免震構造物を対象とした場合には、小変形域は設計上あまり問題にならないため、以後の解析においては $\bar{\beta}_d$ を k_2/k_1 のみの関数とし、塑性率の値に依存しないものとした。ここで、表-1 に示した結果と $k_2/k_1 = 1.0$ の時、 $\bar{\beta}_d = 1.0$ であることを考慮して最小二乗法により下式を得る。

$$\bar{\beta}_d = 0.202 \cdot \left(\frac{k_2}{k_1}\right)^2 - 0.024 \cdot \left(\frac{k_2}{k_1}\right) + 0.823 \quad (2)$$

以後の解析では等価線形化解析の結果に (2) 式で与えられる応答修正係数を掛け合わせるにより任意のバイリニア型非線形復元力特性を有する構造物の応答の期待値を評価する。

また、バイリニア型以外の復元力特性を有する構造系に対して上記手法を適用することにより、応答を評価することも可能であると考えられる。

表-1 応答修正係数

剛比 (k_2/k_1)	$\bar{\beta}_d$	塑性率
0.25	0.83	15 <
0.50	0.86	10 <
0.75	0.92	7.5 <

3. 非線形確定構造物の応答評価

ここでは、非線形確定構造物に関して最大応答変位の期待値を前節で述べた等価線形化手法と極値分布理論を用いて評価する手法について述べる。本評価手法は、前節の応答修正係数による等価線形化手法に基づいており、最大応答変位の期待値 R_d を評価するに当り以下の評価式を用いる。

$$R_d = \bar{\beta}_d \cdot \gamma_d \cdot \sigma_d \quad (3)$$

上式において、 $\bar{\beta}_d$ は応答修正係数の期待値で (2) 式で与えられる。 γ_d はピークファクターと呼ばれ、極値分布理論により評価される係数で、応答の自乗平均値から応答の最大値の期待値を求めるときに用いる。

また、応答変位の自乗平均 σ_d^2 は次式により求められる。

$$\sigma_d^2 = \overline{y_d(t)^2} = \int_0^\infty S_d(\omega) d\omega = \int_0^\infty \frac{S_E(\omega)}{n^4 [(1-\omega^2/n^2)^2 + 4h^2(\omega/n)^2]} d\omega \quad (4)$$

但し、 $y_d(t)$ は応答変位の時刻歴、 n は系の固有円振動数、 h は減衰定数を示し、 $S_d(\omega)$ は一質点系の応答変位を定常過程とみなした場合の応答変位パワースペクトル密度関数、 $S_E(\omega)$ は定常入力地震動のパワースペクトル密度関数、 $H_d(i\omega)$ は次式で与えられる一質点系の相対応答変位の伝達関数である。

$$H_d(i\omega) = - \frac{1}{n^2 \{1-\omega^2/n^2 + 2ih(\omega/n)\}} \quad (5)$$

γ_d の評価式としては A.D. Kiureghian による下式²⁾を用いる。

$$\mu_{d1} = \gamma_d \cdot \sigma_d = \left(\sqrt{2 \ln \nu \cdot T} + \frac{0.5572}{\sqrt{2 \ln \nu \cdot T}} \right) \sigma_d \quad (6)$$

$$\sigma_{dT} = \left[\frac{1.2}{\sqrt{2 \ln \nu_e T}} + \frac{0.5772}{13 + (\sqrt{2 \ln \nu_e T})^{3.2}} \right] \sigma_d \quad \nu_e T > 2.1 \quad (7)$$

$$\sigma_{dT} = 0.69 \sigma_d \quad \nu_e T \leq 2.1 \quad (8)$$

ここで、 μ_{dT} は最大値の期待値、 σ_{dT} は最大値の標準偏差を示す。また、

$$\nu_e = \begin{cases} (1.63 q^{0.45} - 0.38) \nu & , \quad q < 0.69 ; \\ \nu & , \quad q \leq 0.69 \end{cases}$$

$$\nu = \sqrt{\lambda_2 / \lambda_0} / \pi \quad (\text{平均ゼロクロス比})$$

$$q = \sqrt{1 - \lambda_1 / \lambda_0 \lambda_2}$$

$$\lambda_m = \int_0^\infty \omega^m S_d(\omega) d\omega \quad ; \quad m=0,1,2$$

である。

以上の式を用いて以下の手順に従って繰り返し計算を行なうことにより最大（相対）応答変位を求めることができる。

- ①等価剛性、等価粘性減衰の初期値を設定する。
- ②(5)式で与えられる応答変位の周波数伝達関数と入力スペクトルから応答変位のパワースペクトルを求める。
- ③応答変位のパワースペクトルのモーメントを2次まで求め、(6)式を用いて、最大応答変位を求める。
- ④最大応答変位から等価剛性、等価粘性減衰を求め、②、③の操作を最大応答変位が収束するまで繰り返す。
- ⑤求められた最大応答変位に(2)式で計算される応答修正係数を掛け合わせて補正を行なう。

以上の評価手順を図-9にフローとして示す。

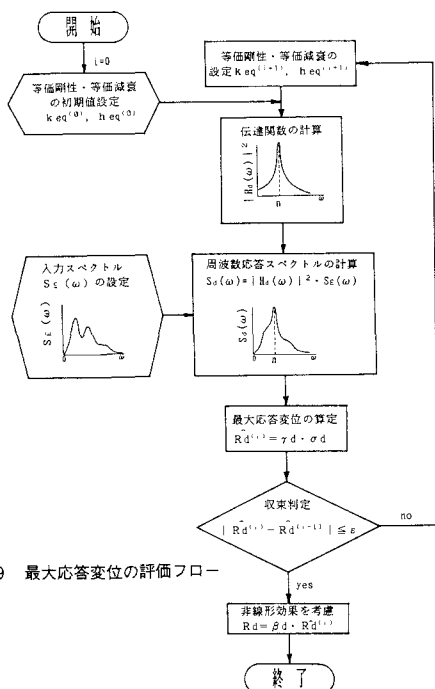


図-9 最大応答変位の評価フロー

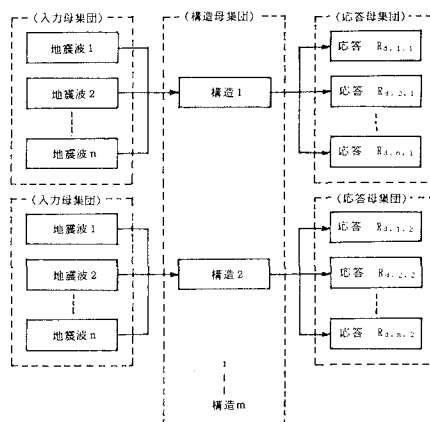


図-10 入力と材料特性に不確定性を有する場合の最大応答の概念図

4. 非線形確率構造物の応答評価手法

地震動のランダム性と構造材料特性の不確定性を考慮する場合の応答の概念図を図-10に示す。線形系に対しては1次近似2次モーメント法を用いて構造物の材料特性に不確定性を有する場合の応答の期待値および分散を評価する手法が提案されている^{3), 4)}。ここでは、非線形確率構造物の最大応答変位の期待値と分散を等価線形化手法を用いた解析によって近似的に評価するため、1次近似2次モーメント法を適用した定式化を行なう。以下では応答修正係数を導入した等価線形化手法に対して、1次近似2次モーメント法を適用し、確率構造物の応答変動を評価する。

前節(3)式で示した最大応答変位の期待値の評価式において、応答変位の2乗和平方根 σ_d のみが構造物の材料特性の不確定性の影響を受けるものとして定式化を行なう。 β_d と γ_d も構造物の材料特性の不確定性により多少は影響を受けるが、 σ_d が受ける影響に比べ小さいことからその影響は無視する。

材料特性の不確定性の影響が σ_d のみに及ぶものとした場合、(3)式で与えられる最大応答変位の期待値は、

$$R_d(X_1, \dots, X_n) = \bar{\beta}_d \cdot \gamma_d \cdot \sigma_d(X_1, \dots, X_n) \quad (9)$$

と表わされる。ここに、 $X_1, \dots, X_n$ は σ_d を規定する確率変数で、等価線形化解析によって応答を評価する場合には $X_1 = \text{heq}$, $X_2 = \text{keq}$ となる。上式を期待値 $X_1, \dots, X_n$ まわりでテイラー展開すると(10)式を得る。(10)式および以後の式において偏導関数の値は期待値まわりの値とする。

$$R_d = \bar{R}_d + \bar{\beta}_d \cdot \gamma_d \sum_i \left(\frac{\partial \sigma_d}{\partial X_i} \right) (X_i - \bar{X}_i) + \frac{1}{2} \sum_i \left(\frac{\partial^2 \sigma_d}{\partial X_i^2} \right) (X_i - \bar{X}_i)^2 + \dots \quad (10)$$

1次の項までを考慮して最大応答変位の期待値と分散を求めると、

$$\begin{aligned} E[R_d] &= \bar{\beta}_d \cdot \gamma_d \cdot E[\sigma_d] \\ \text{Var}[R_d] &= \bar{\beta}_d^2 \cdot \gamma_d^2 \cdot \sum_i \sum_j \frac{1}{4 \sigma_d^{1/2}} \left(\frac{1}{4 \pi^2} \right) \left[\int_0^\infty \frac{\partial}{\partial X_i} |H_d(i\omega)|^2 S_E(\omega) d\omega \right] \\ &\quad \times \left[\int_0^\infty \frac{\partial}{\partial X_j} |H_d(i\omega)|^2 S_E(\omega) d\omega \right] \text{Cov}[X_i, X_j] \end{aligned} \quad (11)$$

上式において $\text{Cov}[X_i, X_j]$ を X_i, X_j 間の相関係数 ρ_{ij} を用いて表わすと、

$$\text{Cov}[X_i, X_j] = \rho_{ij} \sqrt{\text{Var}[X_i] \text{Var}[X_j]} \quad (12)$$

となる。

(12)式における $\text{Var}[\text{heq}]$, $\text{Var}[\text{keq}]$ についても1次近似2次モーメント法を用いて評価する。いま、 $\text{keq} = g(R_d, Y_1, \dots, Y_n)$, $\text{heq} = h(R_d, Y_1, \dots, Y_n)$ とする。ここで、 $Y_1, \dots, Y_n$ は等価剛性及び等価粘性減衰を定める確率変数で、バイリニアモデルの場合には第1剛性 k_1 , 第2剛性 k_2 , 降伏変位 D_y , 初期減衰 h_0 である。

keq を期待値 $\bar{R}_d, \bar{Y}_1, \dots, \bar{Y}_n$ のまわりでテイラー展開すると、

$$\begin{aligned} \text{keq} &= \text{keq}(\bar{R}_d, \bar{Y}_1, \dots, \bar{Y}_n) + \left(\frac{\partial g}{\partial R_d} \right) (R_d - \bar{R}_d) + \sum_i \left(\frac{\partial g}{\partial Y_i} \right) (Y_i - \bar{Y}_i) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial R_d^2} \right) (R_d - \bar{R}_d)^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_i \left(\frac{\partial^2 g}{\partial R_d \partial Y_i} \right) (R_d - \bar{R}_d) (Y_i - \bar{Y}_i) + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \left(\frac{\partial^2 g}{\partial Y_i \partial Y_j} \right) (Y_i - \bar{Y}_i) (Y_j - \bar{Y}_j) + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

上式の右辺において1次の項まで考慮して、 $Y_1, \dots, Y_n$ はそれぞれ独立と仮定し、さらに、 Y_i と R_d の間の相関係数 ρ_{Y_i, R_d} を用いて表現すると、 keq の期待値と分散は、

$$E[\text{keq}] = g(\bar{R_d}, \bar{Y_1}, \dots, \bar{Y_n}) \quad (14)$$

$$\text{Var}[\text{keq}] = \left(\frac{\partial g}{\partial Y_i}\right)^2 \text{Var}[Y_i] + \left(\frac{\partial g}{\partial R_d}\right)^2 \text{Var}[R_d] + \sum_i^n \left(\frac{\partial g}{\partial Y_i}\right) \left(\frac{\partial g}{\partial R_d}\right) \rho_{Y_i, R_d} \sqrt{\text{Var}[Y_i] \text{Var}[R_d]} \quad (15)$$

となる。 ρ_{Y_i, R_d} については、必ずしも一定値とならないこと、また、その評価は一般には困難であることから安全側の評価として、 $|\rho_{Y_i, R_d}|$ の最大値が1であることを用いて分散の上限値 (sup) を以下のように与える。

$$\sup \text{Var}[\text{keq}] = \left(\frac{\partial g}{\partial Y_i}\right)^2 \text{Var}[Y_i] + \left(\frac{\partial g}{\partial R_d}\right)^2 \text{Var}[R_d] + \sum_i^n \left|\left(\frac{\partial g}{\partial Y_i}\right) \left(\frac{\partial g}{\partial R_d}\right)\right| \sqrt{\text{Var}[Y_i] \text{Var}[R_d]} \quad (16)$$

同様に等価粘性減衰 heq に関する分散の上限値も以下のように求めることができる。

$$\sup \text{Var}[\text{heq}] = \left(\frac{\partial h}{\partial Y_i}\right)^2 \text{Var}[Y_i] + \left(\frac{\partial h}{\partial R_d}\right)^2 \text{Var}[R_d] + \sum_i^n \left|\left(\frac{\partial h}{\partial Y_i}\right) \left(\frac{\partial h}{\partial R_d}\right)\right| \sqrt{\text{Var}[Y_i] \text{Var}[R_d]} \quad (17)$$

(11)式の $\text{Cov}[X_i, X_j]$ に(12)式を代入して、さらに(16), (17)式で与えられる $\text{Var}[\text{keq}]$, $\text{Var}[\text{heq}]$ を用いることによって応答の分散に関する上限値と下限値が評価できる。

$$\begin{aligned} \text{Var}[R_d] = & \bar{\beta}_d^2 \cdot \gamma_d^2 \cdot \frac{1}{4\sigma_d^{1/2}} \left(\frac{1}{4\pi^2}\right) \left\{ \left[\int_0^\infty \frac{\partial}{\partial \text{heq}} |H_d(i\omega)|^2 S_E(\omega) d\omega \right]^2 + \left[\int_0^\infty \frac{\partial}{\partial \text{keq}} |H_d(i\omega)|^2 S_E(\omega) d\omega \right]^2 \right. \\ & + \left[\int_0^\infty \frac{\partial}{\partial \text{heq}} |H_d(i\omega)|^2 S_E(\omega) d\omega \right] \times \left[\int_0^\infty \frac{\partial}{\partial \text{keq}} |H_d(i\omega)|^2 S_E(\omega) d\omega \right] \\ & \left. \times \rho_{\text{heq}, \text{keq}} \sqrt{\sup \text{Var}[\text{heq}] \times \sup \text{Var}[\text{keq}]} \right\} \quad (18) \end{aligned}$$

上式において $|\rho_{\text{heq}, \text{keq}}| = 1$ で、右辺第3項が正の時に応答の分散の上限値を、負の時に下限値を求めることが出来る。なお、式(18)は右辺の $\text{Var}[\text{heq}]$, $\text{Var}[\text{keq}]$ に $\text{Var}[R_d]$ が含まれるため陰関数となる。従って、評価するに当たっては収束計算を行なう必要がある。

5. 数値解析結果

(1) 確定構造物の解析結果

応答修正係数を導入した等価線形化手法を用いて、非線形構造物の最大応答変位の期待値を評価した結果とMCSの結果の比較を図-11に示す。検討では、継続時間 60sec のホワイトノイズとし、入力のパワーの強度 S_0 を 125, 281, 500 と変化させて作成した模擬地震波を用いた。復元力特性としては、線形域の固有周期 $T_1 = 1.0\text{sec}$ を有するバイリニア型の構造物を仮定し、 k_2/k_1 が 0.25, 0.50, 0.75 となるように第2剛性のみを変化させた。

図-11より応答の期待値が精度良く求められるこ

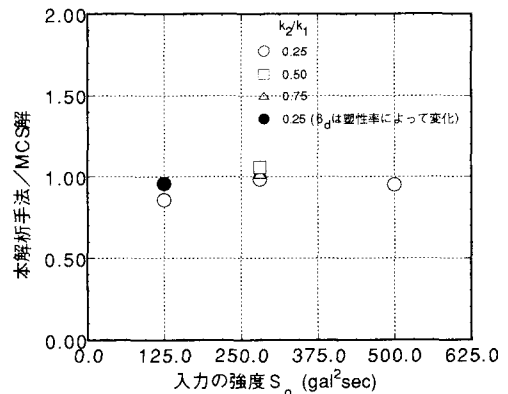


図-11 最大応答変位の期待値に関する解析結果

と、また、塑性率が小さいときには応答修正係数として(2)式ではなく、塑性率に依存する式を用いれば精度の向上が図れることがわかる。

次に、ホワイトノイズ以外のスペクトルで規定される地震動に対する応答についても検討する。ここでは、金井-田治見のスペクトルで規定される地震動に対する応答評価を行なった結果を表-2に示す。ただし、金井-田治見のスペクトル式は、

$$S_E(f) = \frac{1 + (2\eta \frac{f}{f_g})^2}{(1 - (\frac{f}{f_g})^2)^2 + (2\eta \frac{f}{f_g})^2} S_0 \quad (19)$$

で与えられ、上式においてパラメータ f_g 、 η は文献10)を参考に定めた。 $f_g=5\text{Hz}, 2.5\text{Hz}, 1.25\text{Hz}$ はそれぞれマグニチュード $M=5.5, 7.0, 8.5$ に対応する。また、 S_0 は入力加速度が約300, 400, 500 galになるよう極値分布理論を用いて簡略的に定めた。表-2の結果を見る限り金井-田治見のスペクトルのように任意のスペクトル形状を有する場合に対しても最大応答変位の期待値は比較的精度良く評価されていると言える。

(2) 確率構造物の解析結果

非線形構造物の応答の分散を評価するために、(18)式で与えられる1次近似2次モーメント法を適用した式を、時間領域でのMCS解析と比較を行なった。MCSの回数は各解析ケースに対して25波×25構造物性=625回とし、構造物の材料特性の期待値は図-2に示す値を用いた。解析ケースとしては、構造特性を規定するパラメータを単独にばらつかせた場合と複数のパラメータを同時にばらつかせた場合を想定した。入力としては、ホワイトノイズ($S_0=500\text{gal}^2\text{sec}$)で継続時間60secの模擬地震波を用いた。

(12)式で与えられるテーラー展開の結果と、MCSで行なった解析結果の比較を図-12に示す。この図より、免震構造物のように塑性率の大きな応答を示す系に対して、1次近似が適用可能であると言える。

次に、図-13には、第1剛性 k_1 が単独に変動した場合について変動係数を25%まで変化させて評価した結果を、また、図-14には表-3で示す組合せで複数のパラメータが同時に変動した場合の最大応答変位の分散を評価した結果を示す。図-13、14の比較結果を見る限り、どの解析ケースにおいても1次近似2次モーメント法を用いて評価した上限値を上回ることがない。従って、例えば最大応答変位の超過確率を求める場合には、応答変動の上限値を用いて推定することにより安全側の評価結果が得られる。

表-2 金井-田治見スペクトルに対する最大応答変位の精度比較 (cm)

f_g	S_0	非線形解析 (時刻歴解析)	本手法 (周波数解析)	誤差 (%)
5.0	98.85	7.75	7.84	1.2
	175.73	11.54	11.54	0.0
	274.58	16.11	16.09	0.1
2.5	197.70	13.42	13.39	0.2
	351.46	20.61	20.98	1.8
	549.16	28.34	30.04	6.0
1.25	395.40	26.93	28.24	4.9

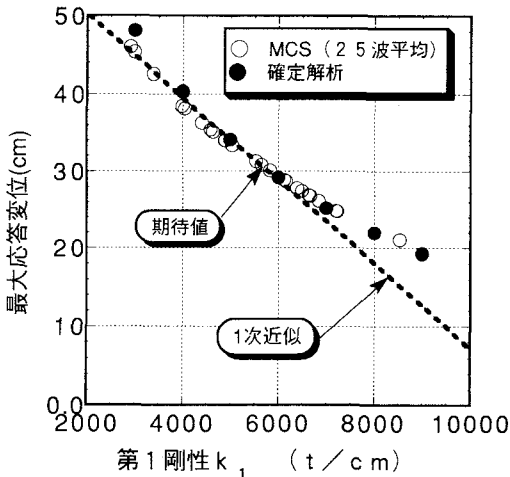


図-12 第1剛性 k_1 に関する1次近似法と確定解析の比較

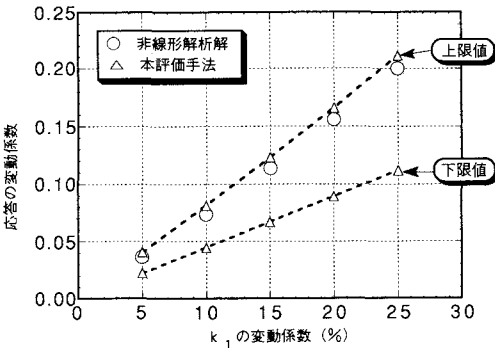


図-13 第1剛性 k_1 を変動させた時の解析結果

図-13で非線形解析の結果が上限値に近い値を示したのは、 k_1 を変動させたときの h_{eq} と k_{eq} の相関係数 $(\rho_{k_{eq}, h_{eq}})_{k_1}$ がほぼ1.0となるためである。また、 k_2 , D_y を変動させたときの相関係数は、それぞれ $(\rho_{k_{eq}, h_{eq}})_{k_2} \approx -0.75 \sim -0.90$, $(\rho_{k_{eq}, h_{eq}})_{D_y} \approx 1.0$ となる。これらの結果から、 k_1 , D_y の変動では上限値に近い値を示し、 k_2 の変動では下限値に近い値を示すことになる。従って、(18)式に出てくる相関係数が適切に算定できれば応答の変動をかなり精度良く求めることが可能である。しかし、現状においてはこれらの相関係数を特定することは難しく、応答の分散評価については上下限値の評価にとどまる。

表-3 複数のパラメータを変動させた場合の解析ケース

解 析 ケース	変動係数 (%)		
	k_1	k_2	D_y
1	10.0	10.0	—
2	10.0	—	10.0
3	—	10.0	10.0
4	10.0	10.0	10.0

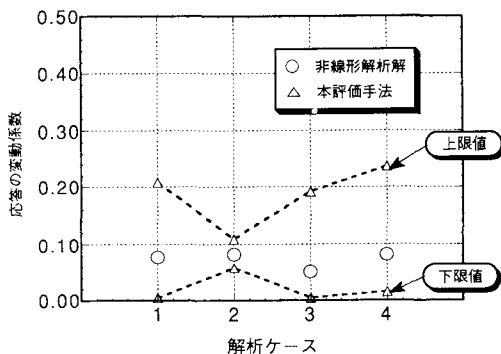


図-14 複数のパラメータを変動させた時の解析結果

6. まとめ

本研究は、免震構造物のような塑性率の大きな非線形確率構造物の応答評価への等価線形化手法の適用に関して検討を行なった。本研究を通じて得られた知見をまとめると以下のようになる。

- ① 免震構造物のように塑性率の大きな応答を示す構造物に対して、等価線形化手法を用いて最大応答変位を評価する場合には、有効振幅係数を1として、さらに応答修正係数を用いることを提案した。
- ② 応答修正係数を導入した等価線形化手法を用いることにより、定常過程入力に対する非線形構造物の応答評価に不規則振動理論の適用を図ることが可能となった。
- ③ 非線形確率構造物の応答評価に1次近似2次モーメント法を適用し、最大応答変位の期待値および分散の上下限値の評価手法を提案した。モンテカルロシミュレーションとの比較の結果、本手法の妥当性を検証した。

7. 参考文献

- 1) 亀田弘行, 不規則地震動に対する構造物の最大応答の推定法について, 土木学会論文報告集, 第201号・1972年5月, pp.1~12
- 2) A.D.Kiureghian, Structural Response to Stationary Excitation, JOURNAL OF THE ENGINEERING MECHANICS DIVISION, DECEMBER 1980 EM6, pp.1195~1213
- 3) 松島豊, 確率変数から成る振動系の地震応答量の変動, 日本建築学会論文報告集 第210号, 昭和48年8月, pp.5~10

- 4) 山崎裕, 構造物の地震応答問題における不確定変動量の取扱に関する研究 第1報 不確定変動量からなる構造物の地震応答理論, 日本建築学会論文報告集 第240号, 昭和51年2月, pp.133~139
- 5) 山崎裕, 構造物の地震応答問題における不確定変動量の取扱に関する研究 第4報 不確定変動量からなる構造物の地震応答に関する数値的検討, 日本建築学会論文報告集 第243号, 昭和51年5月, pp.33~40
- 6) H.Watanabe et.al., "A CONSIDERATION ON THE EQUIVALENT LINEARIZATION OF RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF STRUCTURES", PROC.OF JSCE Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.2, No.1 April 1985, pp.195~205
- 7) 川島一彦他, 等価線形化法による免震橋の地震応答解析, 土木学会第45回年次学術講演会, pp.1246~1247
- 8) 鈴木英世他, 弾塑性系ダンパーの等価線形化法に関する検討, 土木学会第45回年次学術講演会 pp.1252~1253
- 9) K.Ishida et al., "Tentative Design Response Spectrum for Seismically Isolated FBR", Transaction of 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology., Anaheim 14-18 August 1989., pp.685~690
- 10) 神田順他, 弾塑性建築構造物の実用的耐震信頼性指標, JCOSSAR'87 論文集, pp.183~188

(1992年9月21日受付)