

不確定性を考慮した非線形構造物の動的応答に関する基礎的研究

Dynamic response analysis of nonlinear structure with random parameters.

荒川勝広*, 河野健二**

Katsuhiko ARAKAWA, Kenji KAWANO

* 修 (工) 鹿児島大学大学院博士後期課程 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

** 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 (同上)

The dynamic forces such as seismic force, wave force and wind force have generally significant roles on the reliable design of the structure. Since these forces have generally the stochastic characteristics, the dynamic response evaluations have been effectively carried out using the random vibration approach. In order to perform the reliable evaluation of the dynamic response, it is required to examine the nonlinear dynamic response characteristics.

In this study, the uncertain parameter effects on the nonlinear dynamic response evaluation subject to seismic forces, in addition to the uncertain effects on the structure strength, are examined. The uncertain parameter effects in the maximum responses are evaluated with Monte Carlo Simulation (MCS) method, which has effective tools on evaluating the stochastic characteristics of the nonlinear dynamic structure. It is suggested that the uncertain parameters provide significant roles on the maximum response evaluations for the nonlinear dynamic responses.

Key Word: Uncertain Parameters, Nonlinear Dynamic Response, Monte Carlo Simulation

キーワード: 不確定量, 非線形動的応答, モンテカルロシミュレーション

1. はじめに

構造物の受ける動的外力(地震力, 波力, 風力等)は一般に不規則性を有している。このような外力は再現性がないため、その動的応答の評価に関しては不規則振動論を応用して多くの有益な結果が得られることが示されている¹⁾。このような不規則外力を受ける構造物の応答評価から得られる最大応答や分散等を用いて応答の初期通過確率が求められる。不規則外力が正規性を有する場合、構造物の最大応答や分散などの応答量については、これまで多くの評価法が開発されてきた。動的外力に対する構造物の安全性を評価するためには、一般には外力の不確定性だけでなく、構造物の強度に関する不確定性についてもその影響を把握することが必要になる。このような不確定性を考慮した解析法として信頼性解析が有力な手法として応用されている^{2),3)}。この中で最も有用な方法として1次近似2次モーメント法(FOSM)法がある。これは確率変数の統計量を平均と分散だけの関数として与えられる安全性指標 β を安全性の尺度として用いるものであり、比較的簡便な手法である。構造物の複雑化、大型化が見られる現在、構造物全体系の動的外力に対する安全性を評価する場合、作用する動的荷重や構造強度

の不確定性の影響を明らかにすることが必要となっている。このような中で確率有限要素法は有力な手法として応用されている⁴⁾。構造物が線形応答をする場合、1次近似2次モーメント法や摂動法の適用により有用な結果を得ることができる^{3),15)}。

一方、構造物の応答が非線形性をともなう場合、最大応答を推定する方法についてはこれまで多くの研究がなされてきた^{5),6),7)}。構造物の材料強度特性を正確に反映した確率有限要素法の手法は非線形特性を有する構造物の解析法として最も望ましいと考えられるが、膨大な計算によるシミュレーションが必要になる¹⁰⁾。このような手法としてモンテカルロシミュレーション(MCS法)が適用されるが、その計算の効率化をはかる試みもなされ、有力な方法になっている^{7),11),13)}。動的外力を受ける構造物が非線形応答を示す場合、材料強度や入力強度等の不確定性が応答評価に及ぼす影響を明らかにすることは、構造物の信頼性評価を行うために、重要なことと考えられる。

そこで本研究では、構造物の安全性を評価する上で重要である動的外力および構造物の材料強度の不確定性が構造物の最大応答に及ぼす影響を明確にすることを目的とし、不確定量が応答特性に及ぼす影響について検討を

加えた。動的外力としては地震入力を考え、構造物の復元力特性がバイリニア型となるような1自由度系の振動モデルを取り上げた。作用する動的外力の特性にもよるが、一般に構造物の応答は主要な振動モードに依存している⁶⁾。このため不確定量が応答量に及ぼす影響を調べる場合、1自由度系の振動モデルは基礎的な特性を表していると考えられる。構造物が非線形性を有する場合、等価線形化法を用いてFOSM法を利用した解析が行われているが⁵⁾、ここでは時刻歴応答解析によるMCS法を用いて、不確定量が最大応答、等価減衰定数、等価固有振動数、ピークファクターに及ぼす影響について検討した。

2. 不確定性を考慮した振動系の動的応答解析

入力地震動や構造物の動的特性を表す、固有振動数や減衰定数等の不確定性を考慮した解析法として1次近似2次モーメント法がある。構造物が線形応答を示す場合、それぞれ確率変数の平均値と分散を用いて応答量を推定する方法として有用である³⁾。また、不確定性を有する構造物の解析法としては摂動法があるが、変動量が大きくなると、一般に応答評価の精度が小さくなることが指摘されている⁸⁾。

構造物が線形応答を示す場合の応答は不確定量 $x_1, x_2, \dots$ の関数があり、これをそれぞれ平均値まわりにテイラー展開すると次のようになる。

$$F = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots) + \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) (x_i - \bar{x}_i) + \dots$$

$$\frac{1}{2} \sum_i \sum_j \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right) (x_i - \bar{x}_i) (x_j - \bar{x}_j) \dots \quad (1)$$

ここで $\bar{x}_i, \bar{x}_j$ はそれぞれの変数の平均値を表している。1次近似法では式(1)の右辺の第2項までの1次近似項までの平均値、分散をとると、応答量 F に及ぼす不確定量の影響を表すことができる。各応答量 x_i の平均値や分散および感度係数に相当する微分係数が与えられれば、これらの統計量を求めるのは容易ではある。動的外力を受ける場合の解析法としてはスペクトル解析法と時刻歴応答解析法が利用される。すなわち、平均値とその分散はそれぞれ次のように表される。

$$E[F] = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots)$$

$$Var[F] = \sum_i \sum_j \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) COV[x_i, x_j] \quad (2)$$

構造物の応答が線形領域に限られる場合は、振動数領域で解析するスペクトル解析が有用になると考えられる¹⁴⁾。一方、構造物の応答が非線形性を有する場合、動的応答解析としては等価線形化法と時刻歴応答解析を直接行う方法がある^{4), 5)}。一般に等価線形化法では等価な減

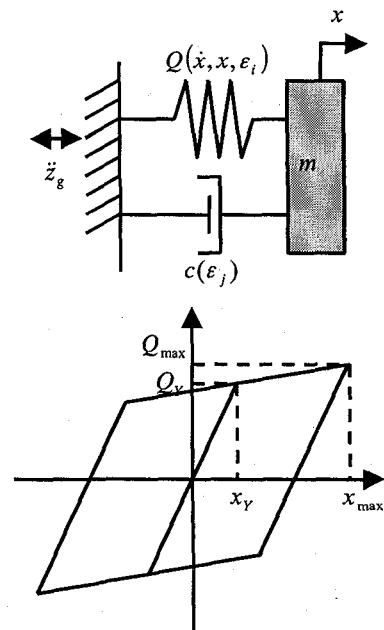


図-1 1自由度系の復元力と解析モデル

衰定数や固有振動数が最大応答等の関数となるため、スペクトル法を用いる場合でも収束計算が必要になる。一方、モンテカルロシミュレーション(MCS法)では多数回の時刻歴応答解析による計算を必要とするが複雑な非線形性を有する場合、有用な方法となる^{6), 7)}。不確定量を有する構造物が非線形性を有し、不規則な外力を受ける場合、最大応答の統計量に及ぼすこれらの不確定量の影響を検討するため図-1に示すような1自由度系が地震力を受ける場合を考える。この場合の運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{x} + 2\beta_0\omega_0\dot{x} + Q(\dot{x}, x) = -\ddot{z}_g \quad (3)$$

ただし、

$$Q(\dot{x}, x) = \begin{cases} \omega_0^2 x & (-x_y \leq x \leq x_y) \\ Q_y + n\omega_0^2(x - x_y) & (x > x_y) \\ -Q_y + n\omega_0^2(x - x_y) & (x < -x_y) \end{cases}$$

$$\frac{c}{m} = 2\beta_0\omega_0, \quad \frac{k_1}{m} = \omega_0^2, \quad n = \frac{k_1}{k_2}$$

と表される。 $Q(\dot{x}, x)$ は復元力の履歴特性を表す関数であり、本解析ではバイリニア型を用いている。ここで、 m は構造物の質量、 c は構造物の減衰係数、 k_1 は弾性域の剛性、 k_2 は塑性域の剛性、 n は第1剛性と第2剛性の比、 x_y は降伏変位、 Q_y は降伏強度、 β_0 は弾性域の減衰定数、 ω_0 は弾性域の固有振動数とそれぞれ示している。

本解析では構造物の応答に及ぼす不確定量として $\omega_0, \beta_0, n, x_y$ 、入力地震動の最大加速度 $\ddot{z}_g$ を考えることにする。これらの不確定量について正規性を有する確率変数として扱くと、次のように表される。

$$\begin{aligned}\beta_0 &= \bar{\beta}_0(1.0 + \varepsilon_1\delta_1) \\ \omega_0 &= \bar{\omega}_0(1.0 + \varepsilon_2\delta_2) \\ n &= \bar{n}(1.0 + \varepsilon_3\delta_3)\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}x_Y &= \bar{x}_Y(1.0 + \varepsilon_4\delta_4) \\ \ddot{z}_{g\max} &= \bar{\ddot{z}}_{g\max}(1.0 + \varepsilon_5\delta_5)\end{aligned}$$

ここで、 ε_i 、 δ_i はそれぞれの変動量の確率変数及び変動係数である。 ε_i は平均値が0、分散1の正規変数である。ここでは簡単のため、各確率変数がそれぞれ独立なものとして扱っており時刻歴応答解析によって、その応答を求めることができる。すなわち、変位、速度及び復元力の最大応答がそれぞれの確率変数及び変動係数の関数として、次式のように表される。

$$R_{j\max} = |R(\varepsilon_i, \delta_j)|_{\max} \quad (5)$$

ここで、 ε_i 、 δ_i は式(4)のそれぞれの変数に対応したものである。多数回の応答解析により、 $R_{j\max}$ を求め、それぞれの最大値の平均値やその分散を計算すると、それぞれの確率変数が最大応答に及ぼす統計量を求めることができる。

一方、等価線形化を行う場合、式(3)で示された運動方程式は次式で表される。

$$\ddot{x} + 2\beta_e\omega_e\dot{x} + \omega_e^2x = -\ddot{z}_g \quad (6)$$

等価線形化法については様々な方法が示されている。例えば、バイリニア系に定振幅の規則波が作用する場合の等価線形化法による等価減衰定数 β_e 、等価固有振動数 ω_e は塑性率 μ を用いて次式のように表されている。

$$\beta_e = \frac{2(1-n)(\mu-1)}{\pi\mu\{(1-n)+n\mu\}} \quad (7)$$

$$\omega_e^2 = \omega_0^2\left\{(1-n)\frac{1}{\mu} + n\right\}$$

一方、これらの運動方程式の統計量を利用する方法もある。式(3)及び式(6)にそれぞれ速度、変位の応答量を乗じ、それぞれの時間平均としての期待値をとることによって表される。すなわち、

$$\omega_e^2 = (S_4S_2 - S_5S_1)/(S_2^2 - S_3S_1) \quad (8)$$

$$\beta_e = (2\beta_0\omega_0S_1 + S_4 - \omega_e^2S_2)/(2\omega_eS_1)$$

ただし、

$$S_1 = E[\dot{x}^2] \quad S_2 = E[\dot{x}x]$$

$$S_3 = E[x^2] \quad S_4 = E[Q(\dot{x}, x)\dot{x}]$$

$$S_5 = E[Q(\dot{x}, x)x]$$

$E[\cdot]$ は各応答の期待値を表している。不規則外力を受ける場合、式(7)から得られる等価減衰定数及び固有振動数は式(8)と異なることが考えられるため、その影響について検討する。等価線形化法によって等価減衰定数および

等価固有振動数の値が決められると、最大応答の推定が可能となる。すなわち外力にパワースペクトル密度関数が与えられた場合、応答のパワースペクトル密度関数は次式で求められる。

$$S_x(\omega) = |H(\omega)|^2 S_{\ddot{z}_g}(\omega) = H(\omega) H^*(\omega) S_{\ddot{z}_g}(\omega) \quad (9)$$

ただし、

$$H(\omega) = (-\omega^2 + \omega_e^2 + i2\beta_e\omega_e\omega)^{-1}$$

$H^*(\omega)$ は $H(\omega)$ の共役複素数である。この応答のパワースペクトル密度関数に逆フーリエ変換を行うことにより、2乗平均応答を求めることができる。非線形応答をする振動系に等価線形化法を適用する場合、等価減衰定数や等価固有振動数は式(7)より塑性率の関数となり、最大応答を求めることが必要となる。このため応答に関するパワースペクトル密度関数を用いてピークファクターを計算し、最大応答を求めるための計算を繰り返す必要がある。ここで等価減衰定数や等価固有振動数はその振動系の応答特性の関数となるため、不確定量の影響とともに入力波の影響を受けることになる。そこで本解析では入力地震動の最大加速度の不確実性について検討を加えることにする。

不確定量の影響を用いて求められた2乗平均応答やピークファクターを用いると最大応答値が求められる。¹⁾

$$R_{j\max} = p(\varepsilon_i, \delta_j) \sigma(\varepsilon_i, \delta_j) \quad (10)$$

ただし、

$$p(\varepsilon_i, \delta_j) = f_1(\varepsilon_i, \delta_j) p_0(\nu, T_d)$$

$$\sigma(\varepsilon_i, \delta_j) = f_2(\varepsilon_i, \delta_j) \sigma_0(T_d)$$

$p_0(\nu, T_d)$ はゼロクロッシング数 ν 、継続時間 T_d に対するピークファクターであり $f_1(\varepsilon_i, \delta_j)$ はそれぞれの不確定量の影響を表している。また、 $\sigma_0(T_d)$ は2乗平均応答であり、 $f_2(\varepsilon_i, \delta_j)$ はそれぞれの不確定量の影響を表している。ここでは、関数 f_1 と f_2 を具体的には求めないが、MCS法を用いてそれぞれの不確定量の影響について検討を加えることにする。MCS法を適用する場合、それぞれの時刻歴応答解析においては時間刻みを0.001秒とし、Newmarkの β 法により解析を行った。

3. 解析結果

3.1 振動モデルと入力地震動

入力地震動については1995年兵庫県で観測された兵庫県南部地震—南北方向波(以下KOBE-NSと示す)および、1940年エルセントロで観測されたエルセントロ南北方向波(以下ELCENTRO-NSと示す)の2種類を取り上げた。図-2は時刻歴を、図-3はパワースペクトル密度関数をそれぞれ示している。非線形応答解析を行う場合、その降伏強度としては、それぞれの入力地震波の最大加速度を200galとした場合に線形時の時刻歴応答解析か

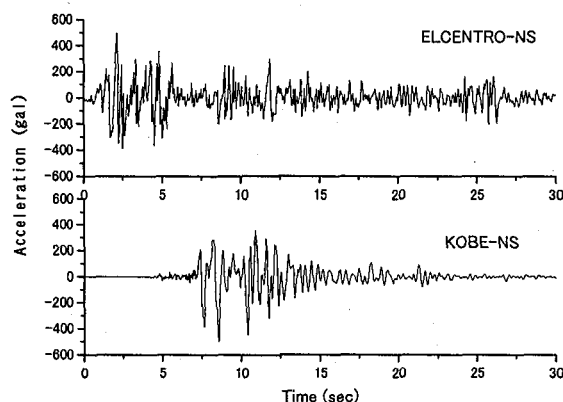


図-2 入力地震動の時刻歴

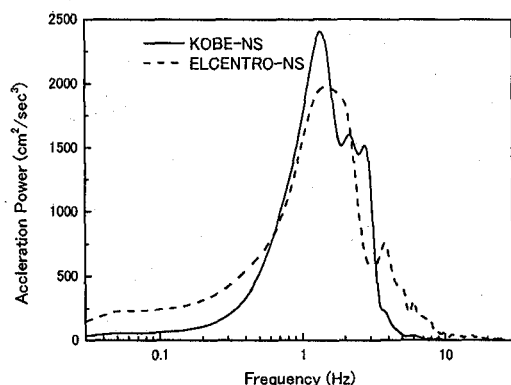


図-3 入力地震動のパワースペクトル密度関数

ら得られる最大変位を降伏変位、それに対応した復元力を降伏復元力としている。構造物の固有の減衰定数を2%、第1剛性と第2剛性の剛性比を0.1とした。動的応答量は構造特性、入力特性の影響を受けて大きく変化する。特に、固有振動数（固有周期）の影響は最も顕著であり、一般に応答スペクトルを用いて、その影響が表される。本解析においては、線形時の固有周期が0.1秒から3.0秒の間における応答量に注目して、それぞれの不確定量の影響について検討を行っている。非線形応答解析では最大加速度が500galの場合について、それぞれ解析を行っている。

3.2 シミュレーション回数

MCS法を用いて応答量を求める場合、そのサンプル数による精度の検討が必要になる。図-4と図-5は固有振動数に変動係数5%の変動を与えた場合の最大応答変位の平均値及びその変動係数の影響をシミュレーション回数毎に示したものである。ここで入力地震動はKOBE-NSとした。シミュレーション回数を500回、1000回、2000回とそれぞれ行ったがほとんど影響は認められなかった。不確定量が最大応答に及ぼす影響をその統計量であるその平均値や分散として求める場合、比較的小さい計算回数でその結果が得られることが分かる。そこで、これ以後の計算ではシミュレーション回数は主に

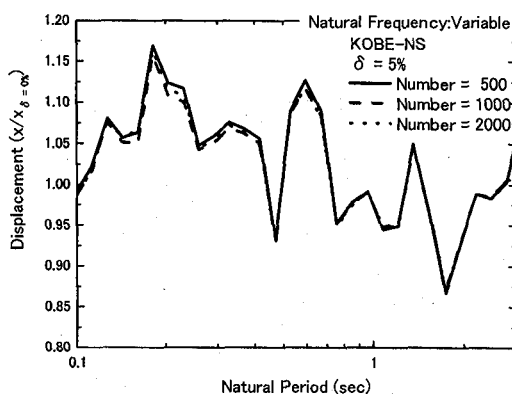


図-4 シミュレーション回数の比較（平均値）

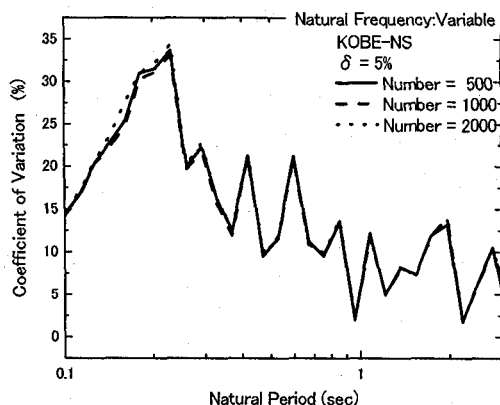


図-5 シミュレーション回数の比較（変動係数）

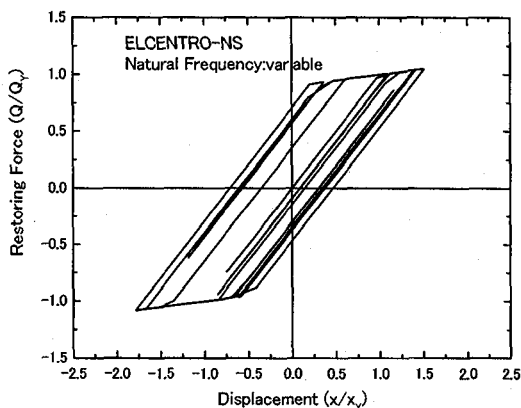


図-6 復元力特性

1000回の結果について示し、考察を行っている。

3.3 復元力特性

図-6は固有振動数について、変動係数5%の変動を考慮した場合の変位・復元力の関係を示したものである。なお、入力地震動についてはELCENTRO-NSとした。時刻歴応答の1つのサンプルなので、固有振動数の変動による影響は分からないが、塑性率は約1.8倍となっている。

3.4 等価減衰定数と等価固有振動数に及ぼす不確定量の影響

図-7と図-8は入力地震動を KOBE-NS、確率変数の変動係数を 5%としたときの等価減衰定数と等価固有振動数を示したものである。縦軸に関しては式(7)と式(8)の比較を行うため、式(8)で得られた等価減衰定数及び等価固有振動数を式(7)で得られた等価減衰定数及び等価固有振動数で除してある。これらの図では固有振動数、降伏変位および最大加速度のそれぞれに対する変動の影響を表している。図-7より等価減衰定数では固有周期が1秒より長くなるとこれらの変動量の影響が大きくなっている。また入力地震動の影響を考慮して求めた等価減衰定数は式(7)の結果と比べて固有周期が約1秒以下では小さく、これを超えると固有周期にもよるが約1.5倍程度の大きさになっていることが分かる。図-8より等価固有振動数に及ぼす各変動量の影響は小さくことが分かる。また入力地震波の影響を考慮して求めた等価固有振動数は式(7)に比べて少し小さくなっており、固有周期に依存したものとなっていることが分かる。等価減衰定数や等価固有振動数は入力地震動による影響に加えて、不確定量の影響を受けるため、非線形応答解析ではその影響を把握しておくことが必要であることがわかる。

3.5 最大応答の平均値に及ぼす不確定変数の影響

それぞれの確率変数が最大応答に及ぼす影響について調べてみる。図-9と図-10は各確率変数の変動係数を5%として、変位応答の最大値に関する平均値を示したものである。横軸には構造物の線形時の固有周期を縦軸は変動がない場合の応答に対する比を示している。これらより、変位応答に大きく影響を与えるのは固有振動数、降伏変位、最大加速度の変動であることが認められる。その他の剛性比や減衰定数の変動はあまり応答には影響を与えないことが分かる。入力地震波による影響もそれぞれの変動量に対して表われている。図-11は復元力の最大値に及ぼす各確率変数の影響を示している。確率変数の変動係数は20%とした。固有周期が約0.8秒より長くなると、その固有周期によっては大きな変動の影響があることが分かる。全体的に変位応答と比較すると復元力の応答の変動は変位応答に対応した変動の影響を示しているが、固有周期によってはその影響が大きくなることもあり、入力地震動の振動数成分の影響を強く反映したものとなっている。全体的な傾向として、非線形応答をする構造物の最大応答変位の平均値に対して、大きな影響を及ぼす不確定量としては、構造物の固有振動数、および降伏変位、入力地震動の最大加速が挙げられる。降伏変位と入力地震動の変動は類似した傾向を示している。いずれの場合も不確定量の変動が増加するに従い、応答量の変動も大きくなる。特に構造物の線形時の固有周期と入力地震動によって、各々の不確定量が最大応答値に及ぼす影響は大きくなる。このため不確定量が構造物の

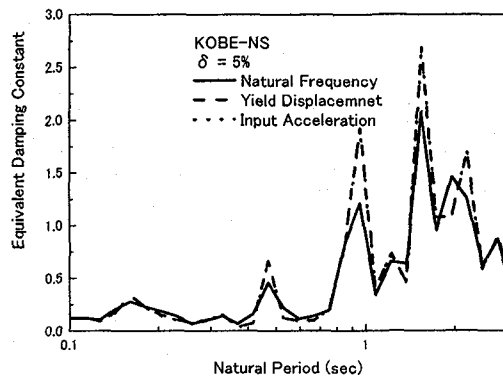


図-7 等価減衰定数

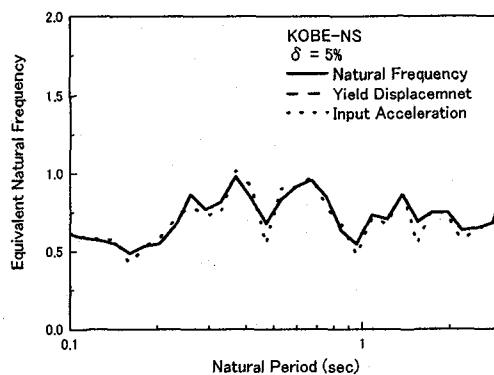


図-8 等価固有振動数

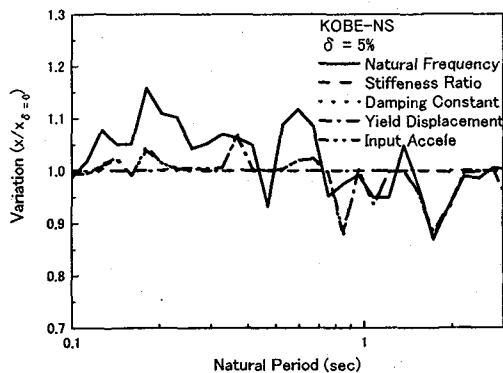


図-9 最大変位の平均値の変動

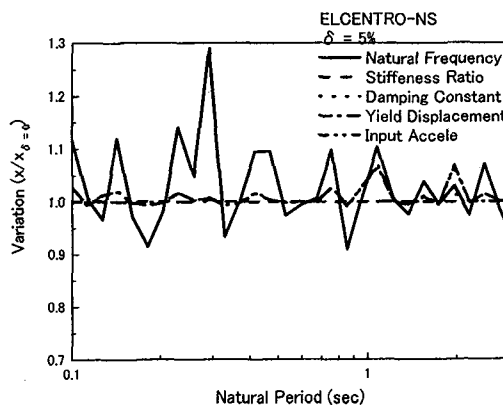


図-10 最大変位の平均値の変動

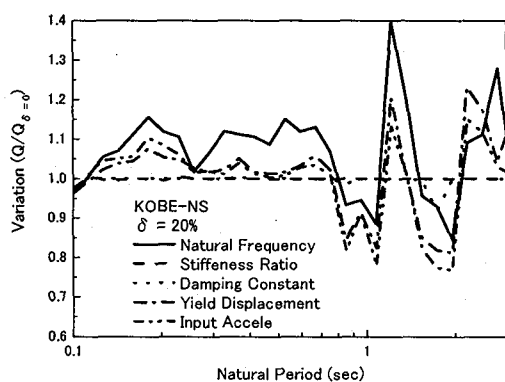


図-11 最大復元力の平均値の変動

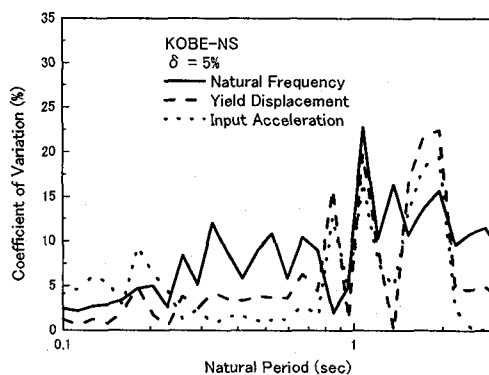


図-13 最大復元力の変動係数

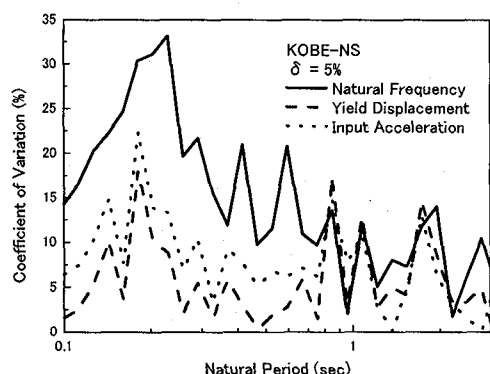


図-12 最大変位の変動係数

最大応答値に及ぼす影響を把握するためには、入力地震動と構造物の固有周期に対する影響を明らかにしておくことが必要となる。

3.6 最大応答の変動係数に及ぼす不確定量の影響

不確定量が最大値応答の分布に及ぼす影響を表わすものの1つとして分散値がある。この分散値の平方根をその平均値の比として得られる、最大応答値分布の変動係数を示したのが図-12と図-13である。これらの図は確率変数の変動係数を5%とした場合の最大応答の変動係数を示したものである。図-12より最大変位の変動係数について着目すると、固有振動数の変動の影響が顕著に認められる。短周期域では約30%の値を示し、固有周期が長くなるにつれて減少する傾向が見られる。降伏変位と入力地震動の最大加速度の変動は固有周期が0.2秒と1秒のときピークが見られるが、それ以外の周期では15%未満の変動係数を示している。図-13より最大復元力について着目すると、どの確率変数についても同じような傾向を示している。固有周期が短い場合、変動係数は小さい値を示しているが、固有周期が長くなるにつれ各変数の影響が増加する傾向が認められる。

3.7 ピークファクターに及ぼす不確定量の影響

式(10)に示したようにピークファクターは応答量の最大値を求める場合、重要な値となっている。各々の不確定

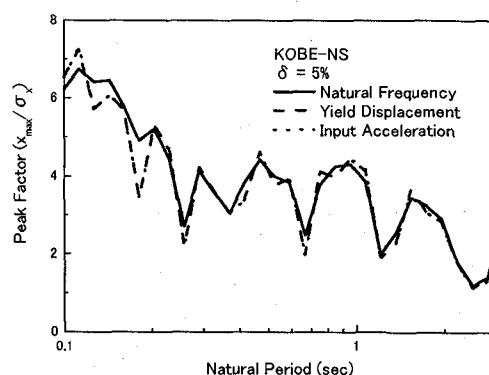


図-14 ピークファクター(変位)

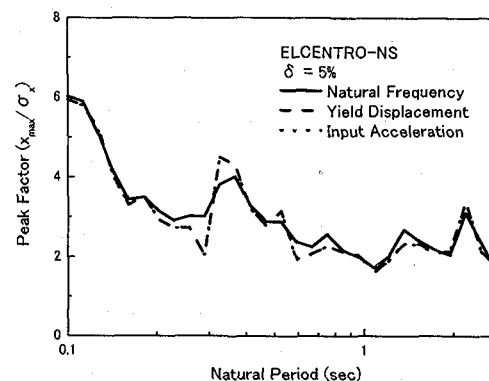


図-15 ピークファクター(変位)

量がピークファクターに及ぼす影響について解析結果を示すことにする。ピークファクターはそれぞれ時刻歴応答解析から得られた最大応答をそれぞれの応答量の標準偏差で除して求めた値として示している。ここでは、固有振動数、降伏変位、入力地震動の最大加速度の変動を考えた場合について示している。図-14および図-15より変動係数を5%とした場合の変位応答の影響について着目すると、固有周期が短いところでは6程度の値を示し、長周期になるにつれてピークファクターは減少する傾向を示している。各確率変数の変動について着目してみると、変動係数が5%の場合、短周期では降伏変位と固有振動数の変動に対して影響が見られるが、それ以外

の固有周期では小さいものとなっている。入力地震動が異なる場合、変位応答に関しては固有振動数と降伏変位の変動に対して、その影響が見られる。図-16 は復元力に関するピークファクターをそれぞれの確率変数の変動係数を 20%とした場合について示したものである。各確率変数のピークファクターに及ぼす影響は小さく、若干の相違が示されている。いずれの固有周期においても確率変数の変動の影響は小さいことがわかる。

以上より、各々の確率変数がピークファクターの評価に及ぼす影響は構造物の固有周期や入力地震動の影響を受けるものの、全体としてその影響は小さくなっていることが分かる。

3.8 累積確率分布

各々の確率変数が最大応答に及ぼす影響はその平均値だけでなく分散によって表される。最大応答値の確率分布は一般に極値分布理論によって表されるが、ここでは各確率変数の変動に対して得られた応答値を用いて、その分布関数に及ぼす不確定変数の影響について調べてみることにする。ここでは線形時の固有周期を 0.5 秒とした場合の最大応答量の累積確率分布を示している。横軸に関しては応答量を平均値で除して、標準化を行っている。図-17 は変動係数を 5% とし、入力地震動を KOBE-NS としたときの最大変位の累積確率分布を示している。これは図-9 に示した最大応答の平均値とも対応した結果となっている。図-18 は入力地震動を ELCENTRO-NS とした場合に示したものである。各確率変数の変動係数は 5% であるが、全体として KOBE-NS の場合と類似した傾向を示している。固有振動数の変動を考慮した確率分布は平均値のまわりに広く分布しており、最大加速度の変動を考慮した確率分布は平均値の周りに集中して分布している。図-19 は最大復元力に対する確率分布を示している。復元力についても各確率変数が最大値の確率分布に及ぼす影響は類似した傾向を示すことがわかる。固有振動数の変動を考慮した分布が幅広く分布しており、最大加速度に関しては平均値近辺に分布している。

以上より最大応答値の累積確率分布に関しては、入力地震動に限らず固有振動数の変動を考慮した分布が幅広い分布形状を示し、最大加速度や降伏変位に対する確率分布は平均値近辺のみで分布していることがわかる。

4. まとめ

構造物の安全性を評価する上で重要である動的外力および構造物の材料強度の不確定性が構造物の最大応答に及ぼす影響を明確にすることを目的とし、構造物が非線形性を有する場合、動的応答解析を行い構造物の材料特性及び外力における入力地震動の変動が応答量に及ぼす影響について検討を行った。その結果を要約すると次

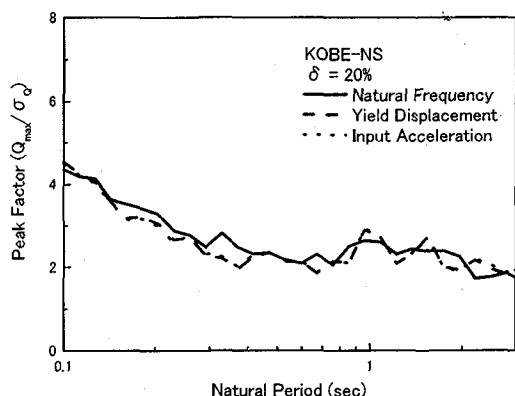


図-15 ピークファクター(復元力)

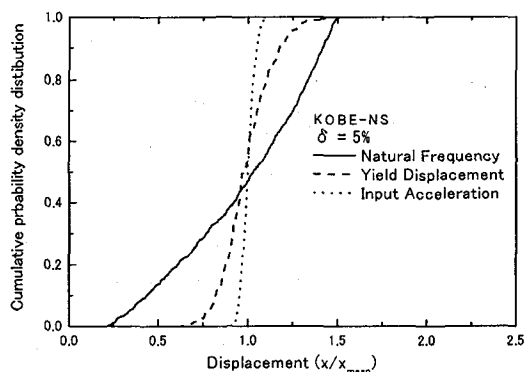


図-17 累積確率分布 (最大変位)

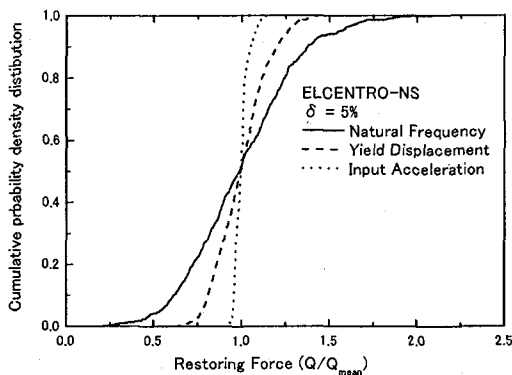


図-18 累積確率分布 (最大復元力)

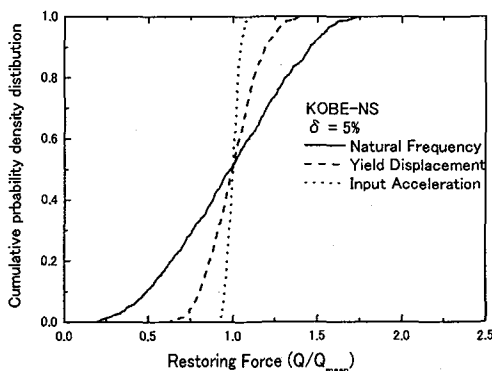


図-19 累積確率分布 (最大復元力)

のようになる。

- ① 各々の不確定量の影響を受けて構造物が非線形応答をする時、固有振動数、降伏変位の大きさ及び入力地震動の最大加速度の変動が最大応答に大きな影響を与えている。特に固有振動数の変動による影響は構造物の固有周期、入力地震動の特性によるものが、最も大きい。
- ② 不確定量の変動係数が増加するに従い、最大応答量の変動も大きくなるが、非線形応答をする場合、各々の不確定量の増加による影響は固有周期によって大きく異なるため、その影響を把握しておくことが重要になる。
- ③ ピークファクターは各不確定量の変動の大きさや入力地震動に関してあまり影響を受けず、固有周期にもよるが変位のピークファクターは2から6程度、復元力のピークファクターは2から4程度の値を示す。
- ④ 等価減衰定数の評価に及ぼす各々の不確定量の影響は固有周期によっては大きくなるが、全体としては少ない。また固有振動数に及ぼすこれらの不確定量の影響は微小である。
- ⑤ 不確定量が非線形応答をする構造物の最大応答に及ぼす影響は各種のパラメーターによって大きく異なるため、その評価には多くの計算が必要となる。複雑な非線形動的応答の評価に関して、MCS法は有用な方法であることがわかる。

<謝辞>

この研究を進めるにあたり、米盛誠心育成会より研究、助成を賜りました。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) R.W.Clough and J.Penzien:Dynamic of structures, McGRAW-HILL, pp.389-629, 1975.
- 2) 星谷勝：確率論手法による構造解析，鹿島出版会，pp.66-77, 1973.
- 3) 伊藤学，亀田弘行(訳)：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善，pp.79-214, 1977.
- 4) 中村秀明，石田邦洋，三浦房紀，浜田純夫：不確定構造系の時刻歴地震応答解析，構造工学論文集，Vol.39A,pp.545-554,1993.
- 5) 大島靖樹他：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，構造工学論文集，Vol.39A,pp.749-758,1993.
- 6) R.H.Cheng and Y.K.Wen:Reliability of uncertain nonlinear trusses under random excitation I,ASCE,EM,Vol.120,No.4,pp.733-747,1994.
- 7) P.Marek et al:Sensitivity analysis in simulation-based reliability assessment of structure, Structural Safety and Reliability, Vol.2, pp.715-721, 1998.
- 8) 中桐滋，久田俊明：確率有限要素法入門，培風館，pp. 211-264, 1985.
- 9) R.H.Cherng and Y.K.Wen:Reliability of uncertain nonlinear trusses under random excitation II,ASCE, EM, Vol.120, No.4, pp.748-757, 1994.
- 10) G.I.Schuëller:Structure reliability ? recent advances safety and reliability, Ed. Shiraishi et al, Vol.1, pp.3-35, 1998.
- 11) 須藤敦史，星谷勝：動的システムの初通過確率における効率化モンテカルロ法の基礎検討，構造工学論文集，Vol.45A,pp.373-378,1999.
- 12) 白木渡，松保重之，山口和範，高岡宣善：効率化モンテカルロ法による構造システムの信頼性評価法，構造工学論文集，Vol.37A,pp.577-584,1991.
- 13) 中山隆弘，相田清，今野光夫：防波堤の耐波信頼性評価への効率化シミュレーション法の適用性，構造工学論文集，Vol.37A,pp.585-592,1991.
- 14) K.Venkataramana,K.Kawano and T.Komasa:Uncertain parameter effects on reliability of offshore platform, J. of structural Eng. Vol.41A, pp.779-786, 1995.
- 15) 山田善一：耐震設計構造設計論，京都大学学術出版会，pp.51-95,1997.

(2000年9月14日受付)