

システム同定を用いた等価線形化法による海洋構造物の動的解析

DYNAMIC ANALYSIS OF OFFSHORE STRUCTURES BY EQUIVALENT
LINEARIZATION METHOD BASED ON SYSTEM IDENTIFICATION

渡邊英一* 古田 均** 杉浦邦征*** 宇都宮智昭**** 富永知徳*****

By Eiichi WATANABE, Hitoshi FURUTA, Kunitomo SUGIURA

Tomoaki UTSUNOMIYA and Tomonori TOMINAGA

In the field of offshore engineering, the equivalent linearization method using statistical and frequency domain approach has been studied for simply calculating the nonlinear drag effect included in the Morison's equation. Investigated in this study is the alternative approach for linearizing the nonlinear fluid-structure interaction effect by using the system identification technique. The procedure is as follows: firstly, the nonlinear equation of motion is solved in the time domain by the step-by-step integration for random wave loads and/or earthquake excitations; secondly, the modal damping coefficient for linearized model is calculated using system identification technique so that the variance of modal response for linearized model agree with that of nonlinear model. Demonstrated herein are some numerical examples for a simple tower model. The results have shown that the responses by linearized equations of motion with equivalent modal damping coefficients agree well with those by nonlinear equations of motion.

1. 序論

海洋構造物の動的解析において、直径数m程度までの管状部材に作用する波力の算定には、通常、修正モリソン式が用いられる。本波力式中には、構造物の応答速度を含む非線形抗力項（流体-構造物系での相互作用）が存在するために、周波数領域での解析が困難なばかりでなく、ニューマーク β 法などの時間領域でのシミュレーション解法によった場合でも、各タイムステップにおいて収束計算を必要とするため、本式を直接反映する形で解析することは、計算上不利となる。また、このままでは、Nastran等の汎用解析プログラムの利用が難しい点も、欠点の一つと考えられる。

そこで、従来より様々な等価線形化法が提案されてきている。その大半は、不規則波浪や地震に対する応答を周波数領域で解くことを目的としたものであり、例えば、Penzien et al.[1,2]、Taylor et al.[3,4]によるものがある。周波数領域における解析法は時間領域におけるものに比べて、計算時間の点で有利であると従来は言われてきた。しかし、時間領域の解析法においても、不規則波浪の発生にFFT法を用い[5,6]、またモード解析法により解析の自由度を減らすことにより、計算時間を大幅に短縮することが可能であり、コンピュータの進歩と共に、計算時間の点で不利とは言えなくなりつつある。

*	工博, Ph.D.	京都大学教授	工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
**	工博	京都大学助教授	工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
***	Ph.D.	京都大学助手	工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
****	工博	京都大学助手	工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
*****	工修	新日本製鉄(株)	鋼構造研究開発センター	(〒299-12 富津市新富20-1)

そこで本論文では、モード解析法を前提とした等価線形化法を提案する。従来の等価線形化法においては、流体 - 構造系の相互作用による非線形抗力項による効果を、流体による減衰項として評価しているが、そこで作成される減衰マトリクスは、モーダルマトリクスによって一般には対角化されない。これに対し本論文で提案する方法は、モード間の非連成を仮定し、モード減衰定数をシステム同定法により数値的に同定するもので、同定後の線形化方程式は、時間領域の解析においても高速に解き得るものとなる。

ここでの計算例では、まず非線形方程式をシミュレーション解法により解き、そのモード応答変位の分散が線形化方程式から求まる応答の分散と等しくなる様にモード減衰定数を数値計算により同定した。現段階では、いったん非線形方程式を数値的に解くことが必要であり、ある意味では二度手間な方法であるが、任意の構造系におけるモード減衰定数の一般的な性質が把握されれば非線形方程式を解くステップは不必要となる。そこで、その性質の把握も本論文中で試みる。

2. 不規則波力および地震力をうける海洋構造物の動的応答解析

本論文では、構造物としては平面モデルのみを考え、座標系として、水平方向にx軸を、平均海底面から上方にz軸をとることにする。また、波はx軸方向に入射するものとする。ここで、Fig. 1に示す様な鉛直軸(z軸)と ϕ の角度をなす棒状有限要素を考える。この部材には、部材軸直角方向のみに分布力としての波力 f_n が作用し、修正モリソン式により、以下のように表される。

$$f_n = \frac{\pi}{4} C_M \rho d^2 \dot{w}_n - \frac{\pi}{4} (C_M - 1) \rho d^2 (\ddot{u}_n + \ddot{u}_{gn})$$

$$+ \frac{1}{2} C_D \rho d |w_n - \dot{u}_n - \dot{u}_{gn}| (w_n - \dot{u}_n - \dot{u}_{gn}) \quad (1)$$

ただし、 C_M : 慣性力係数、 C_D : 抗力係数
 ρ : 流体単位体積質量、 d : 管径

$w_n, \dot{w}_n$: 水粒子速度・加速度の部材軸直角方向成分

$\dot{u}_n, \ddot{u}_n$: 構造物の地盤相対速度・加速度の部材軸直角方向成分

$\dot{u}_{gn}, \ddot{u}_{gn}$: 地盤速度・加速度の部材軸直角方向成分

この内、第1項を慣性力項、第2項を付加質量力項、第3項を抗力項と呼ぶ。ここで、

$$w_n = w_x \cos \phi - w_z \sin \phi$$

$$\dot{u}_n + \dot{u}_{gn} = (\dot{u}_x + \dot{u}_{gx}) \cos \phi - (\dot{u}_z + \dot{u}_{gz}) \sin \phi \quad (2)$$

より、分布力としての波力ベクトル $f = (f_x, f_z)^T$ は次式のように表される。

$$\begin{aligned} f &= \begin{bmatrix} f_x \\ f_z \end{bmatrix} = f_n \begin{bmatrix} \cos \phi \\ -\sin \phi \end{bmatrix} \\ &= \frac{\pi}{4} C_M \rho d^2 C \dot{w} - \frac{\pi}{4} (C_M - 1) \rho d^2 C (\ddot{u} + \ddot{u}_g) + \frac{1}{2} C_D \rho d |w_n - \dot{u}_n - \dot{u}_{gn}| C (w - \dot{u} - \dot{u}_g) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{ただし} \quad C = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi & -\cos \phi \sin \phi \\ -\cos \phi \sin \phi & \sin^2 \phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$w = [w_x \quad w_z]^T, \quad u = [u_x \quad u_z]^T, \quad u_g = [u_{gx} \quad u_{gz}]^T \quad (5)$$

この分布力 f から、Fig. 1に示す棒状有限要素のノードI, Jにおける節点力を求める。ここでは簡単のため、Lumped Loadとして算出する。この時、

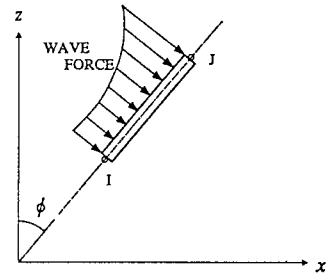


Fig. 1 Wave force acting on a beam element

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_I \\ \mathbf{F}_J \end{bmatrix} = \frac{\pi}{4} C_M \rho d^2 \mathbf{D} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{w}}_I \\ \dot{\mathbf{w}}_J \end{bmatrix} - \frac{\pi}{4} (C_M - 1) \rho d^2 \mathbf{D} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_I + \ddot{\mathbf{u}}_g \\ \ddot{\mathbf{u}}_J + \ddot{\mathbf{u}}_g \end{bmatrix} + \frac{1}{2} C_D \rho d \mathbf{D} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_M - \dot{\mathbf{u}}_M - \dot{\mathbf{u}}_{gn} (\mathbf{w}_I - \dot{\mathbf{u}}_I - \dot{\mathbf{u}}_g) \\ \mathbf{w}_N - \dot{\mathbf{u}}_N - \dot{\mathbf{u}}_{gn} (\mathbf{w}_J - \dot{\mathbf{u}}_J - \dot{\mathbf{u}}_g) \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし、

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{L}{2} \mathbf{C} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \frac{L}{2} \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad \text{L: 要素長} \quad (7)$$

となる。

以上、式(6)により、要素に働く節点力が求められた。この内、第2項の付加質量力項は運動方程式の左辺に移項し、構造物の質量マトリクスに重ね合わせることができ、次の運動方程式を得る。

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_a) \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = -(\mathbf{M} + \mathbf{M}_a) \ddot{\mathbf{u}}_g + \mathbf{F}_m + \mathbf{F}_d \quad (8)$$

ここで、
 $\mathbf{M}$: 構造物の全体質量マトリクス、
 $\mathbf{C}$: 構造物の全体減衰マトリクス、
 $\mathbf{F}_m$: 流体力中の慣性力項、
 $\mathbf{M}_a$: 付加質量マトリクス、
 $\mathbf{K}$: 構造物の全体剛性マトリクス、
 $\mathbf{F}_d$: 流体力中の抗力項

ただし、本運動方程式において、構造物の変位ベクトル $\mathbf{u}$ は、各ノードにおいて x, y, θ 方向の3自由度を有するものとする。

式(8)における左辺は一般の線形系の運動方程式と同じ形をしているが、右辺の抗力項中に構造物の応答速度 $\dot{\mathbf{u}}$ が含まれているために、非線形方程式となっている。ここでは、Shinozuka et al. [5]と同様なシミュレーション解法による応答解析法を用い、非線形方程式に対する応答時刻暦を得た。すなわち、不規則波力の計算に必要な水粒子速度・加速度の時刻暦をFFTを利用して高速に発生させると共に、モード座標系に運動方程式を座標変換し、その低次モードのみを採用することで、計算の高速化を計った。モード座標系に関する運動方程式は以下のとおりである。

$$\ddot{y}_i + 2h_i \omega_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = -\mathbf{x}_i^T (\mathbf{M} + \mathbf{M}_a) \ddot{\mathbf{u}}_g + \mathbf{x}_i^T \mathbf{F}_m + \mathbf{x}_i^T \mathbf{F}_d \quad (9)$$

ただし、
 h_i : i 次モードに関するモード減衰定数、
 ω_i : i 次固有周波数
 $\mathbf{x}_i$: 非減衰系に関する i 次モードベクトル

3. システム同定法を用いた等価モード減衰定数の同定

従来の非線形抗力項の線形化法には、Penzien et al.[1,2]の様に水粒子速度に関する二乗の項までも線形化するもの、および、Taylor et al.[3,4]の様に水粒子速度に関する二乗の項は保持した上で、流体-構造物系における相互作用を等価減衰定数として評価するものの、大きく2つのレベルがある。Taylor et al.[3]が既に示しているように、Penzien等による線形化法では波周波数の奇数倍において生ずる可能性のある共振現象を見落としてしまうため、ここではTaylor等による線形化方程式を採用する。ここで、減衰の効果は特に共振状態において顕著であることを考えると、モード減衰定数を同定することが合理的であると思われる。また、同定パラメーター数を最小にできること、同定後の線形化方程式の計算が容易であることも大きな特長である。そこで、次の様な線形システムを仮定し、そのモード減衰定数 h_{sys} を同定することにする。

$$\ddot{y}_i + 2h_{\text{sys}} \omega_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = -\mathbf{x}_i^T (\mathbf{M} + \mathbf{M}_a) \ddot{\mathbf{u}}_g + \mathbf{x}_i^T \mathbf{F}_m + \mathbf{x}_i^T \mathbf{F}'_d \quad (10)$$

ただし、抗力 $\mathbf{F}'_d$ は、要素レベルの節点力において、次式で表される様な構造物応答速度を含まないものとする。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}'_{dI} \\ \mathbf{F}'_{dJ} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} C_D \rho d \mathbf{D} \begin{bmatrix} \mathbf{w}_M - \dot{\mathbf{u}}_{gn} (\mathbf{w}_I - \dot{\mathbf{u}}_I) \\ \mathbf{w}_N - \dot{\mathbf{u}}_{gn} (\mathbf{w}_J - \dot{\mathbf{u}}_J) \end{bmatrix} \quad (11)$$

次に、具体的な計算手順を示すことにする。Fig.2は、ここで採用した解析手順をフローチャートで示し

たものである。まず、式(9)で表される非線形方程式をシミュレーション解法により解き、モード応答変位の時刻暦を求めておく。次に、iモードに関するこの応答時刻暦の平均二乗応答(分散) V_{NLi} を求める。この V_{NLi} にできるだけ近い線形系(10)のモード応答分散 V_{LNLi} が得られる様に、式(10)のモード減衰定数 h_{ysy} を収束計算により計算する。ここで、 V_{LNLi} は周波数領域においてモード応答変位のパワースペクトルを求め、これを積分することで得られる。

$$V_{LNLi}(h_i) = 2 \int_0^{\omega_m} |H_i(\omega, h_i)|^2 S_{F_i}(\omega) d\omega$$

$$|H_i(\omega, h_i)|^2 = \frac{1}{(\omega_i^2 - \omega^2)^2 + (2h_i\omega_i\omega)^2} \quad (12)$$

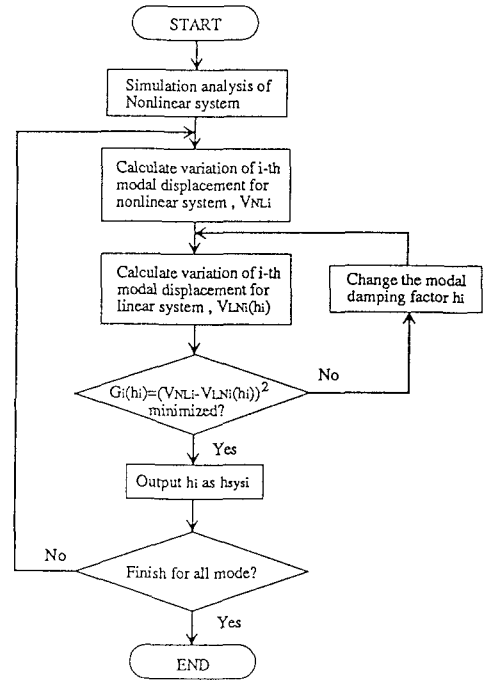
$$|H_i(\omega, h_i)|^2 = \frac{1}{(\omega_i^2 - \omega^2)^2 + (2h_i\omega_i\omega)^2} \quad (13)$$

ただし、 S_{F_i} : iモード外力のパワースペクトル
以上において、 h_{ysy} を同定する問題は、次のモード減衰定数を未知数とする1変数関数 $G_i(h_i)$ の極小化問題に帰着される。

$$G_i(h_i) = (V_{LNLi}(h_i) - V_{NLi})^2 \Rightarrow \text{minimize} \quad (14)$$

本研究ではこの極小化問題の解法プログラム

として、数値計算ライブラリSSL II[7]のLMINF Fig. 2 Flowchart of identifying modal damping factor, h_{ysy} サブルーチン(1変数関数の極小化サブルーチン)を利用して、安定した解を得ることができた。以上の手順を任意のモード次数について独立に繰り返せばよい。



4. 解析例

4.1 解析モデル

Fig. 3に示すような単純な平面骨組みモデルについて、本手法の有効性を検討する。レグ部材は直径2.0m、厚さ40mmの鋼管とし、柱脚は完全固定、節点はいずれも剛結とし、デッキは質量2000tonの剛体とした。各定数については、ヤング率 $E=206\text{GPa}$ 、海水の単位体積質量 $\rho=1.03\text{ton/m}^3$ 、慣性力係数 $C_M=2.0$ 、抗力係数 $C_D=1.4$ とした。また、構造物の減衰定数は、各モードとも $h_i=0.02$ とした。その固有周波数はTable 1に示すとおりである。

不規則波浪は、Pierson-Moskowitzの波高スペクトルにおいて、風速15m/secから30m/secまで5m/sec毎の4ケースについて、間隔0.02秒で8192ステップのデジタルデータをFFT法により発生させた[5,6]。各風速時における有義波高およびパワースペクトルのピークを与える周波数をTable 2に示す。

また、地震力には、十勝沖地震の加速度・速度データの水平方向成分のみを使った。これらは、0.02秒間隔でサンプリングされた5926個のデジタルデータであるが、本解析では、波浪による応答が十分励起された状態にある1000ステップ目からこの地震波を入力した。

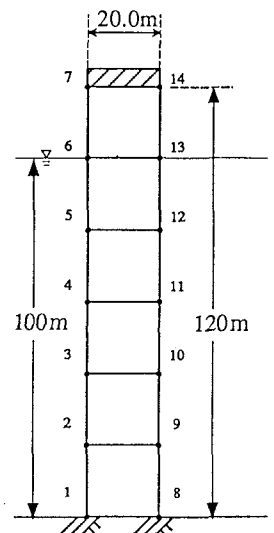


Fig. 3 Offshore structure model

4.2 解析結果および考察

Table 3に、本モデルについて得られた等価モード減衰定数をまとめて示す。表中のRandom 1~3はそれ

Table 1 Natural frequency of model structure

Mode	1	2	3
Natural frequency (rad/sec)	1.22	5.12	10.89

Table 2 Wave characteristics (Pierson-Moskowitz spectrum)

Wind velocity (m/sec)	15.0	20.0	25.0	30.0
Significant wave height (m)	4.80	8.53	13.33	19.19
Frequency at peak of power spectrum (rad/sec)	0.573	0.430	0.344	0.286

ぞれ異なるランダム位相成分をもった波浪入力を示している。なお、等価モード減衰定数の同定においては、その同定範囲を0.02～1.00に限定した。

まず、同定された数値の信頼性について考察する。波浪と地震を同時に受ける場合においては、いずれも安定した値が得られており、後に示す様に応答の再現性も良いため、信頼性は高い。これに対し、波浪のみを受ける場合は、1次モードに関してはややばらつきはあるものの安定した値が得られているのに対して、高次モードは安定した値が得られていない。これは、波浪中に含まれる高周波成分のエネルギーが相対的に小さいために、高次モードの共振周波数域($\omega_2=5.12\text{rad/sec}$ 、 $\omega_3=10.89\text{rad/sec}$)にほとんどエネルギーを与えず、静的応答が支配的であるためである。つまり、減衰定数の違いが応答にほとんど影響を及ぼさないために、モード減衰定数も同定できなかったと考えられる。従って、線形化方程式においてこれらのモード減衰定数を与える必要があるときには任意の値を与えたのでよく、例えば0.02あるいは1次モードの減衰定数と同じ値とすれば十分であろう。

Table 3に示されたモード減衰定数の平均値を、風速に対してプロットしたものをFig. 5に示す。いずれも風速とともに等価モード減衰定数が増加する傾向を示しているが、これは流体による減衰効果が基本的には流速の平均二乗平方に比例する性質をもつことに由来する[1-4]。また、1次モード減衰定数に関して、地震波を共に入力した場合は、波浪のみを受ける場合に比べてゆるやかに値が増加しているが、これは、地震波入力により生ずる構造物と水粒子の相対速度が風速に関わらず一定値として存在するためと考えられる。またここでは、波浪と地震を同時に受ける場合について、モード次数が上がるほど減衰定数が小さくなっているが、モデルを変えたときには逆の場合も生じており、今後の検討を要する。

Fig. 6は、波浪のみを入力した場合に関して、風速15m/sec及び30m/sec時のデッキ水平応答変位の時刻歴

Table 3 Modal damping factors identified for random wave and/or earthquake

Wind velocity (m/sec)	Mode	Modal damping factor identified for random wave				Modal damping factor identified for random wave and earthquake			
		Random 1	Random 2	Random 3	Average	Random 1	Random 2	Random 3	Average
15.0	1	0.0321	0.02	0.0289	0.0270	0.0276	0.0294	0.0296	0.0289
	2	0.0429	0.02	0.02	0.0276	0.0251	0.0262	0.0245	0.0253
	3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0234	0.0244	0.0235	0.0238
20.0	1	0.0272	0.0204	0.0252	0.0243	0.0340	0.0348	0.0360	0.0349
	2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0309	0.0292	0.0270	0.0290
	3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0263	0.0259	0.0243	0.0255
25.0	1	0.0410	0.0288	0.0330	0.0343	0.0390	0.0385	0.0419	0.0398
	2	0.2162	0.02	0.02	0.0854	0.0367	0.0324	0.0301	0.0331
	3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.0279	0.0279	0.0258	0.0272
30.0	1	0.0474	0.0593	0.0371	0.0479	0.0482	0.0564	0.0292	0.0446
	2	0.4361	0.5139	0.02	0.3233	0.0497	0.0375	0.0398	0.0423
	3	0.4495	0.5576	0.02	0.3424	0.0343	0.0284	0.0306	0.0311

およびそのパワースペクトルである。また、Fig. 7は波浪と地震を同時に受ける場合に関する同様な図である。以降、NLは非線形方程式(9)による解、WAVE-SYSは線形化式(10)による運動方程式において、波浪のみの入力に対して同定された等価モード減衰定数を用いた場合の解、LNはPenzien等[1,2]による線形化モリソン式に基づく解を表すものとする。

まず、全体を通じて、線形化式(10)に基づく解(WAVE-SYS)が、時刻歴応答、パワースペクトルいずれにおいても非線形方程式(NL)と極めて良く一致していることが分る。この意味で、モード減衰定数をうまく定めれば、非線形方程式(9)の代りに線形化方程式(10)を用いて応答を求めることができる。

これに対し、線形化モリソン式による解(LN)は、風速15m/sec時には非線形方程式による解(NL)と良く一致しているのに対し、風速30m/sec時には誤差が大きくなる。この原因は、風速15m/sec時には波高が小さく波力中における慣性力項が卓越するために、非線形抗力項による非線形性が弱い（従って非線形方程式との一致が良い）のに対し、風速30m/sec時には波高が大きく抗力項が卓越するために、非線形性が強くなるためである。この様に、線形化モリソン式は非線形抗力項が卓越する様な波高の大きな領域においては適用に注意を要する。

なお、Fig. 6のパワースペクトルをみると、固有周波数のところでエネルギーが通常と逆に、減少して

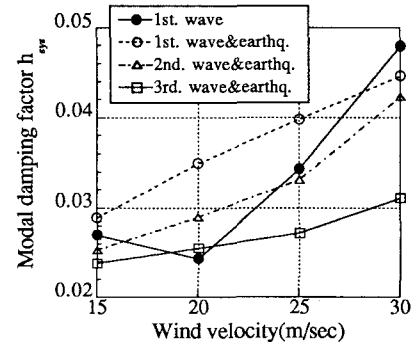
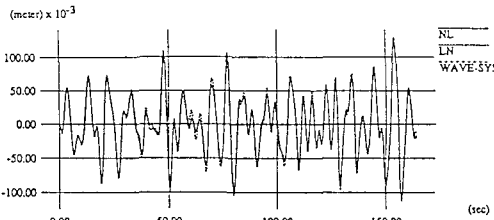
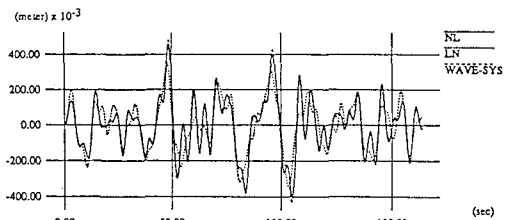


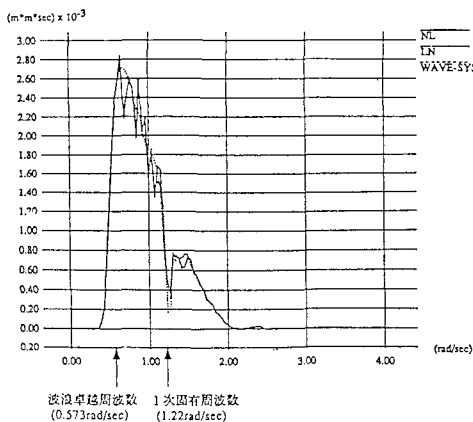
Fig. 5 Modal damping factor as a function of wind velocity



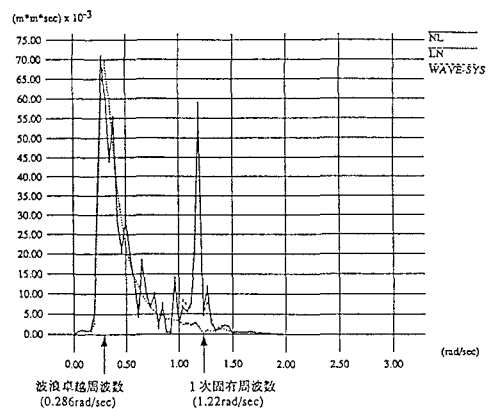
(a) time series for U=15m/sec



(b) time series for U=30m/sec

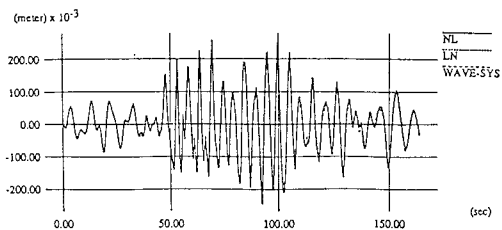


(c) power spectrum for U=15m/sec

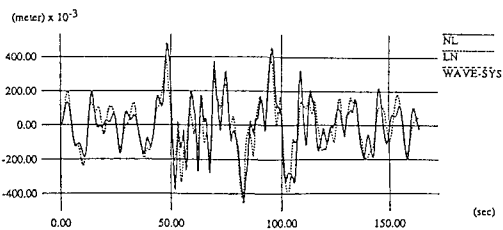


(d) power spectrum for U=30m/sec

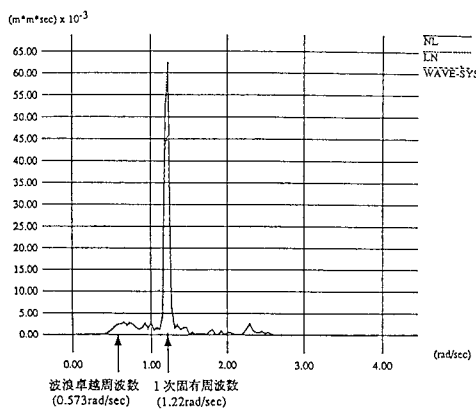
Fig. 6 Deck displacement response for random wave (U: wind velocity)



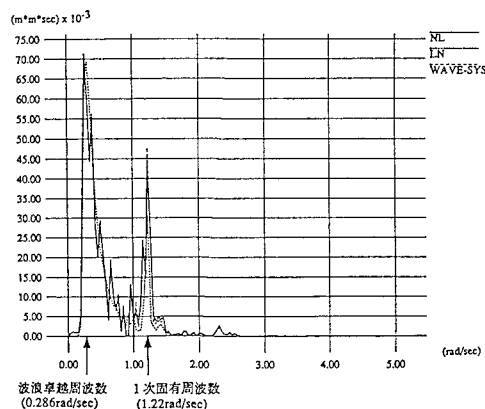
(a) time series for U=15m/sec



(b) time series for U=30m/sec



(c) power spectrum for U=15m/sec



(d) power spectrum for U=30m/sec

Fig. 7 Deck displacement response for random wave and earthquake (U: wind velocity)

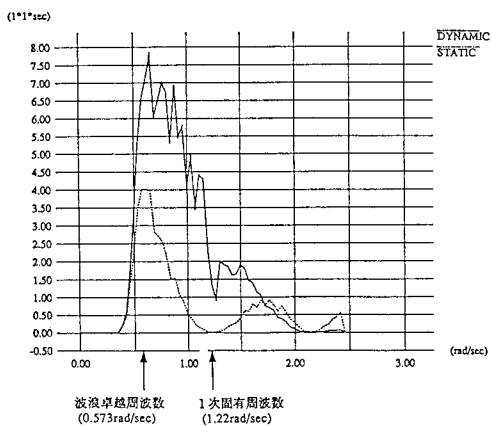


Fig. 8 1st modal displacement spectrum for random wave (U=15m/sec)

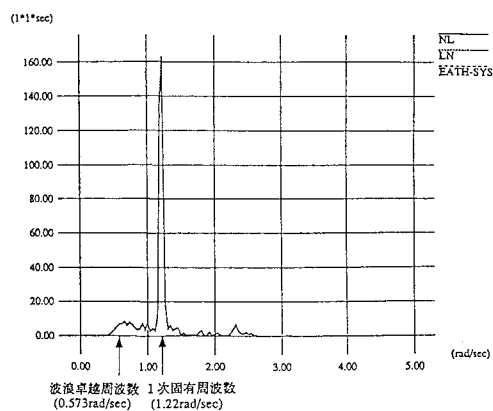


Fig. 9 1st modal displacement spectrum for random wave and earthquake (U=15m/sec)

いる様に観察される。これは次のように考察される。波長40mの波は、この構造物のレグ（レグ間隔20m）に互いに逆位相の波力を与えるため、1次モードに対する一般力はほとんど0になる。ところで波長40mの波に対する周波数は1.24rad/secとなり、ほとんど1次固有周波数に一致している。これが、1次固有周波数における共振現象が抑制されている原因と推定される。以上のことは、Fig. 8に示す静的応答曲線（外力／バネ定数）において、静的応答の値が $\omega=1.24\text{rad/sec}$ 近くでほとんど0になっていることから確認できる。このことは、構造物の固有周波数と波力の打ち消しあい効果の働く周波数とを一致させることで波力に対する動的応答を低減できる可能性を示唆している。

非線形方程式による解(NL)と線形化式(10)に基づく解（WAVE-SYS）は全般的に良好に一致しているが、Fig. 7(c)においては両者には若干の差が生じている。これは、波浪のみに対するモード減衰定数の同定値と、波浪と地震を同時に入力した場合に対する同定値にやや大きな差があるためで、モード減衰定数として後者の値を使用すれば、Fig. 9に示すように両者は極めて良く一致する。このように、本手法は地震力を受ける場合にも等価モード減衰定数の同定を良好に行える。

5. 結論および今後の課題

以上、修正モリソン式に含まれる流体-構造物系の相互作用における非線形効果を線形化する一方法として、システム同定に基づく等価線形化法を示した。得られた結論は以下のようまとめられる。

1. システム同定法を用いることで、修正モリソン式を波力式とした場合の非線形運動方程式を容易に線形化できる。
2. 波力式をモリソン式とし、流体-構造物系の相互作用における非線形効果を等価モード減衰定数として代表させる線形化運動方程式により、構造物の全体的な応答を良好に再現できる。
3. ここで示した海洋構造物モデルに関しては、等価モード減衰定数は、波力の増大とともに上昇する傾向を示し、また、1次～3次モードに関するモード減衰定数は2%～5%の範囲であった。

今後の課題として、様々な条件下における等価モード減衰定数の一般的性質を把握するために、様々な構造物や外力に対しての解析をおこなうと共に、従来の周波数領域における等価線形化法から導出される減衰定数との比較も必要である。

参考文献

- 1) Malhotra, A.K., and Penzien, J.: Nondeterministic analysis of offshore structures, J. of Engineering Mechanics Div., ASCE, Vol. 96, 985-1003 (1970).
- 2) Penzien, J., Kaul, M.K., and Berge, B.: Stochastic response of offshore towers to random sea waves and strong motion earthquakes, Computers and Structures, Vol. 2, 733-756 (1972).
- 3) Taylor, R.E., and Rajagopalan, A.: Dynamics of offshore structures, part I: perturbation analysis, J. of Sound and Vibration, Vol. 83, 401-416 (1982).
- 4) Taylor, R.E., and Rajagopalan, A.: Load spectra for slender offshore structures in waves and currents, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 11, 831-842 (1983).
- 5) Shinozuka, M., Yun, C., and Vaicaitis, R.: Dynamic analysis of fixed offshore structures subjected to wind generated waves, J. of Structural Mechanics, Vol. 5, 135-146 (1977).
- 6) Shinozuka, M., and Deodatis, G.: Simulation of stochastic processes by spectral representation, Applied Mechanics Reviews, Vol. 44, 191-203 (1991).
- 7) 富士通: SSL II使用手引書（科学用サブルーチンライブラリ）(1987).

(1992年9月21日受付)