I-214　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応答解析

新日本製鐵（株）　正員○冨永　知徳　京都大学工学部　正員　渡邊　英一
京都大学工学部　正員　古田　均　京都大学工学部　正員　杉浦　邦征
京都大学工学部　正員　宇都宮智昭　京都大学工学部　正員　杉戸　真太

1. はじめに

有脚式海洋構造物のレグ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。しかし，この式を波力式として用いた運動方程式は非線形方程式となるため，周波数領域での解析が困難なばかりでなく，時刻歴応答解析によった場合でも，応答の重ね合わせが出来ないという欠点を有する。そこで従来より様々な等価線形化法が提案されてきたが[1)2)]，いずれも周波数領域での解析手法に基づいており，時間領域での解析手法に基づくものはなかった。

そこで本研究では，等価線形化のための手法としてシステム同定法を新たに採用した。これは，任意の時刻歴応答（例えば，時刻歴解析により求めたモード変位）の分散を目標値とし，これと線形化方程式から求まる応答の分散が一致するように線形化方程式内のパラメーターを数値計算により同定するもので，手法としての一般性を有する。ここでは，構造物の全体的な応答を再現することを目的として，モード解析におけるモード減衰定数の決定法とその有効性について述べる。

2. システム同定による等価モード減衰定数の決定法

修正モリソン式を式(1)に示す。ただし，ρは流体密度，Dは管径，uは水粒子変位，xは構造物の絶対変位，C_Mが慣性力係数，C_Dが抗力係数である。

$$F=\frac{1}{2}C_D\rho D\cdot|\dot{u}-\dot{x}|\cdot(\dot{u}-\dot{x})+\frac{\pi}{4}(C_M-1)\rho D^2\cdot(\ddot{u}-\ddot{x})+\frac{\pi}{4}\rho D^2\cdot\ddot{u} \tag{1}$$

これを用いて求めたモード運動方程式を式(2)に示す。但し、式(1)の第2項における付加質量項は運動方程式の左辺に移項した上でこれを求めた。また、モード変位yは、モードマトリクス［Φ］を用いて、{y}=［Φ］{x}，により求められる。ω_0は固有角振動数，cはモード減衰定数である。

$$\ddot{y}_i+2c_i\omega_i\dot{y}_i+\omega_i^2y_i\equiv[\Phi_i]^T\left\{C_D\frac{1}{2}\rho D\cdot|\dot{u}-\dot{x}|\cdot(\dot{u}-\dot{x})+C_M\frac{\pi}{4}\rho D^2\cdot\ddot{u}\right\} \tag{2}$$

これは運動方程式右辺の外力項中に構造物の応答速度xに関する項を含んでおり、非線形方程式となっている。この式(2)を次式のように線形化することを試みる。

$$\ddot{y}_i+2h_{sys}\omega_i\dot{y}_i+\omega_i^2y_i=[\Phi_i]^T\left\{C_D\frac{1}{2}\rho D\cdot|\dot{u}|\cdot\dot{u}+C_M\frac{\pi}{4}\rho D^2\cdot\ddot{u}\right\} \tag{3}$$

すなわち，波力式としてはモリソン式を使用し，流体－構造物系の相互作用の結果生ずる非線形効果を等価モード減衰定数h_{sys}で代表する。このh_{sys}を，式(2)と式(3)の動的応答解析の結果得られるモード変位の分散が等しくなるように，システム同定法を用いて決定する。このプロセスのフローチャートを Fig.1に示す。ここで，式(2)の非線形方程式はWilson's θ法において各タイムステップごとに数回の収束計算過程を導入して求めた。また，式(3)のモード変位の分散σ^2(h)はスペクトル解析により次式のように求められる。

$$S_{xx}(\omega,h)=|H(\omega,h)|^2\cdot S_{FF}(\omega) \tag{4}$$

$$\sigma^2(h)=2\int_0^\infty S_{xx}(\omega,h)d\omega \tag{5}$$

ただし，$S_{xx}(\omega,h)$は応答スペクトル，$S_{FF}(\omega)$は外力スペクトル，

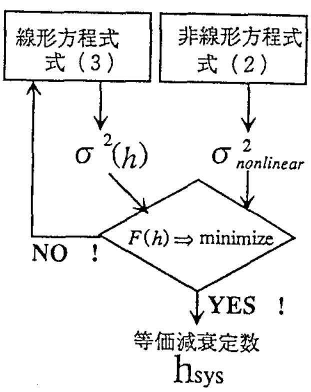

Fig.1　システム同定法のフローチャート

H(ω,h)は周波数応答関数である。結局，等価モード減衰定数のシステム同定は式(6)に示す１変数関数の最小化問題に帰着される。

$$F(h)=(\sigma^2(h)-\sigma^2_{nonlinear})^2 \Rightarrow \text{minimize} \qquad (6)$$

この手続きを任意のモード次数について独立に行えばよい。ここでは１次〜３次モードについて求めた。

3.解析例

解析モデルを Fig.2 に示す。レグの管径は2.0m,肉厚は4.0cmとする。これを骨組みの有限要素法によって定式化した。解析は，不規則波力のみを受ける場合及び不規則波力と地震力を同時に受ける場合について行った。不規則波力は Pierson-Moskowitz の波高スペクトルを用いてＦＦＴ法により発生し[3]，地震力としては十勝沖地震の水平動のみを使用した。

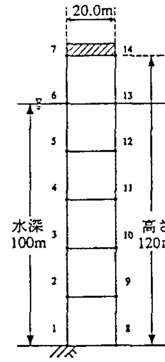

Fig.2　解析モデル

Fig.3 に波力のみの場合，および波力と地震力を同時に受ける場合について各風速時3ケースに対して得られた等価モード減衰定数の平均値を示す。入力する不規則波力のサンプルの違いによって，若干のばらつき（タイムステップ数8192の時の標準偏差0.007）は見られたが，その平均値は風速が早いほど大きくなる。また，Fig.4は波力と地震力が同時に作用する場合，式(2)（ここでは厳密解と見なす）と式(3)（等価線形化式による解）の比較を示す。両者は極めて良く一致している。また、Fig.5は波力のみが作用する場合に関しての式(2)によるデッキ応答水平変位の厳密解，式(3)に基づく同変位の近似解，及び線形化モリソン式を用いた場合の近似解[1]それぞれのパワースペクトルを示す。明らかに，線形化モリソン式を用いた解は構造物の固有振動数の奇数分の１の振動数を有する波力によって起こる共振現象[2]を捉えていないのに対し，本手法によるものはこれを十分捉えており，厳密解との一致は良い。以上より，式(3)に基づく等価線形化手法は修正モリソン式で表される波力による応答特性を良好に再現できることが分かる。

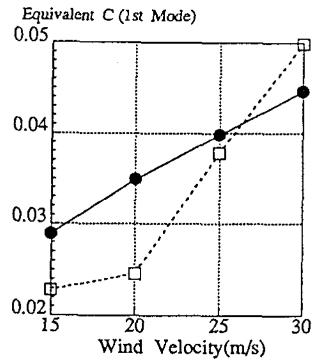

Fig.3　各風速時の等価１次モード減衰定数（●波力+地震力；□波力のみ）

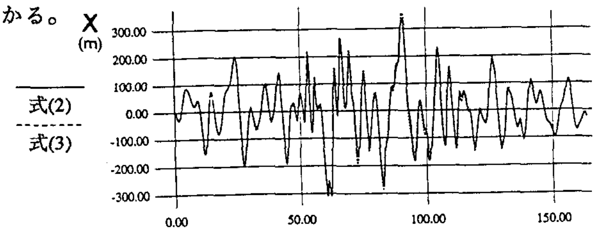

Fig.4　波力（風速25m/s）と地震力が同時に作用する場合のデッキ応答水平変位の時刻歴

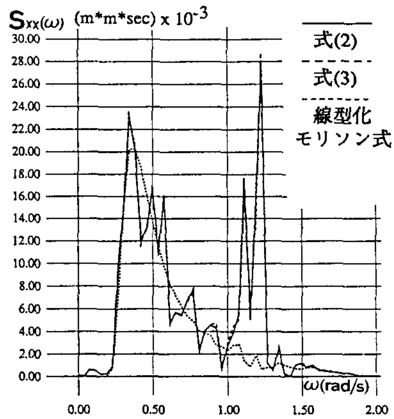

Fig.5　波力（風速25m/s）のみが作用する場合のデッキ応答水平変位のパワースペクトル

4.結論

(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，非線形効果を等価モード減衰定数として代表させる等価線形化法により，構造物の全体的な応答を良好に再現できる。

参考文献

1) Malhotra,A. K. and Penzien,J.:J. of the Eng. Mechanics Div.,ASCE,96(6),pp.985-1029,1970

2) Taylor,R. E. and Rajagopalan,A.:J. of Sound and Vibration,83(3),pp.401-416,1982

3) Shinozuka,M. and Deodatis,G.:Applied Mechanics Review,44(4),pp.191-204,1991