海洋構造物－地盤系の動的応答解析

鹿児島大学工学部　学生員　○樺山　信人
鹿児島大学工学部　正員　河野　健二
鹿児島大学工学部　安部　義美

1．まえがき

海洋の開発にともない海中に基礎を有する多くの構造物が設置される傾向にある。このような海洋構造物には各種の外力が作用するが、特に波力を受ける場合においても、その動的応答特性を明確にしておくことが必要になる。一般に海洋構造物の動的応答特性は設置される海底の地盤状態によって、その応答特性は変化するものと考えられる。このような地盤の動的応答特性を扱う場合、構造物系と地盤の動的相互作用を導入した応答解析が必要になると思われる。

本解析では杭基礎を有する海洋構造物の動的応答解析を行ない、動的相互作用特性が構造物の応答特性に及ぼす影響について検討を加えたものである。外力としては波力のみを考え、Morison式により評価し、そのスペクトル特性は Bretshneider の形で表わしている。

2．動的応答解析法

解析モデルは図－1．に示すような構造物であり、高さが$100m$、水深$90m$の場合である。基礎は杭で支持されているので、上部構造物から杭頭へ作用する反力に対するインピーダンス関数を用いて、その動的特性を表す。杭頭における変形を水平変位と回転で表わすと、これらの変形に対する上部構造物の変形が求まる。上部構造物の基礎における反力が杭頭へ作用するものとして釣合式を作り、変形の適合性を考慮すると、動的相互作用を導入した全体系の運動方程式が得られる。ところで構造物に作用する波力を Morison 式で表わすと、抗力項は水と構造物の相対速度に関して非線形となるが、その速度の rms 応答を用いると近似的に線形化される。このようにして外力が求まると、全体系の運動方程式は、

$$\begin{bmatrix}[\tilde{M}_{aa}] & [\tilde{M}_{ap}] \\ [\tilde{M}_{ap}] & [\tilde{M}_{pp}]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{u}_a \\ \ddot{x}_p\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}[C_{aa}] & 0 \\ 0 & [C_p]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{u}_a \\ \dot{x}_p\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}[K_{aa}] & 0 \\ 0 & [K_p]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}u_a \\ x_p\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}[C_I]\{\dot{v}\}+[\hat{C}_D]\{v\} \\ [G]^T[L]^T([C_I]\{\dot{v}\}+[\hat{C}_D]\{v\})\end{Bmatrix} \qquad (1)$$

となる。ただし$\{u_a\}$, $\{x_p\}$はそれぞれ上部構造物および杭頭に関する変位ベクトルを表わしている。また$[\tilde{M}_{aa}]$は水の付加質量の影響を含んでおり$[C_{aa}]$は構造物の減衰の他に抗力による減衰の影響$[\hat{C}_D]$を含んでいる。また$[C_I]$は圧力勾配による項であり、$\{v\}$は水粒子の速度を表わしている。$[G]$は上部構造物基礎と杭頭との間の変形の関係を示したものであり、$[L]$は基礎の変形に対する上部構造物に及ぼす影響を表わしている。基礎を固定し上部構造物のみを取り出し、非減衰時の固有値解析を行ない、応答に大きな影響を及ぼす振動モードのみを用いると大幅な自由度の低減を計ることができる。式(1)に関して、このような自由度の低減を行なった後、さらに固有値解析を行ない、減衰マトリックスの対角化を行なうと、各振動モードに対する周波数応答関数$[H(\omega)]$を求めることができる。波力に関するパワースペクトル密度関数から外力に対するパワースペクトル$[S_{pp}(\omega)]$を求めると、これらの振動モードからなる変換マトリックス$[\Phi]$を用いて各次モードの応答から全体系の応答は、

$$[S_{uu}(\omega)]=[\Phi][H(\omega)][S_{pp}(\omega)][H(\omega)^*][\Phi]^T \qquad (2)$$

と求められる。ここで$[H(\omega)^*]$は共役な周波数応答関数を表わしている。フーリエ変換を行なうと変位応答の自己相関関数$[R_{uu}(\tau)]$が求まり、$\tau=0$とすると、変位の rms 応答が得られる。また変位に関する rms 応答が求まると、断面力に関する自己相関関数は剛性マトリックスとの積から得ることができる。ところで、波力のパワ

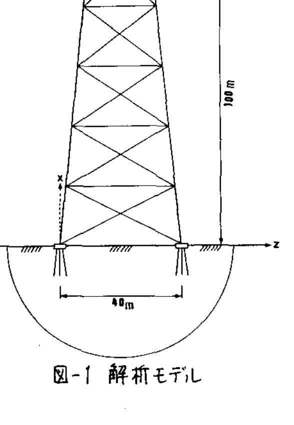

図-1 解析モデル

ースペクトル密度関数としては種々の形が提案されているが、本解析ではBretshneiderによるパワースペクトルを用いている。この形のパワースペクトルは、平均波高$\bar{H}$、平均周期$\bar{T}$をパラメータとして表され、一般に海面の上昇ηに対して、

$$S_{\eta\eta}(\omega)=\alpha\frac{\bar{H}^2}{\bar{T}^4\omega^5}\cdot\exp\left(-\beta\left(\frac{1}{\bar{T}\omega}\right)^4\right) \qquad (3)$$

と表わされる。

3. 応答解析結果

図-2と図-3は構造物上部のP点の水平方向の変位に関するrms応答を示したものである。波力は式(1)に示したように慣性力及び抗力から成るので、各々に対して変位応答を求めることができる。平均波高は5mであり、それぞれ横軸は波の平均周期を、縦軸はそれに対する変位のrms応答値を示している。図-2は構造物基礎を海底に固定した場合であり、図-3は杭基礎による動的相互作用を考慮した場合の応答を示している。このような構造物の応答は主に1次振動が支配的なものとなるが、固有周期は基礎固定の場合3.3秒であり、杭基礎の場合3.6秒である。基礎が固定の場合、固有周期付近の平均周期の波力に対して抗力による影響が大きい。また固有周期を越えると慣性力項の影響が増加し、抗力項が応答に及ぼす割合は減少する傾向が見られる。さらに波力の平均周期が8秒を越えると抗力の影響が大きくなっている。一方、図-3は杭基礎を有する場合の応答を示したものである。平均周期が固有周期を越えると抗力に比べて慣性力の影響が大きくなる傾向がみられ、最大応答は系の固有周期付近で生じていることがわかる。また最大応答は基礎固定時に生じているが、波力の平均周期によって変化しており、平均周期が5～8秒になると、杭基礎を有する場合の応答が大きくなっている。このように動的相互作用の影響を考慮した場合、基礎固定時に比べて変位応答は変化するが、波力の平均周期によって異なることがわかる。図-4は、最下部の部材の軸力に対する応答を示したものである。杭基礎、固定基礎のいずれにおいてもその系の固有周期付近で最大応答を示している。図-5は、修正されたPierson-Moskowitzの波力のパワースペクトルに対する構造物上部のP点の水平方向の変位応答を杭基礎に対して求めたものである。構造物系の固有周期より大きい約6秒の平均周期で最大応答を示している。慣性力及び抗力に対する応答が共に減少しており、全体変位も最大変位に関して約40%の減少を示している。

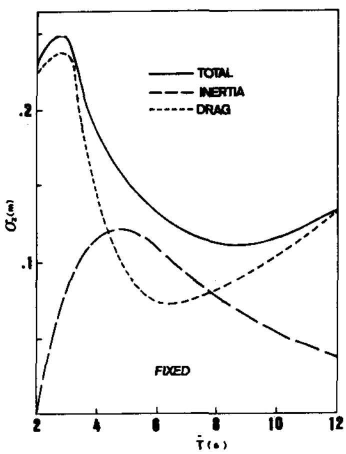

図-2 変位のrms応答
(Bretshneider)

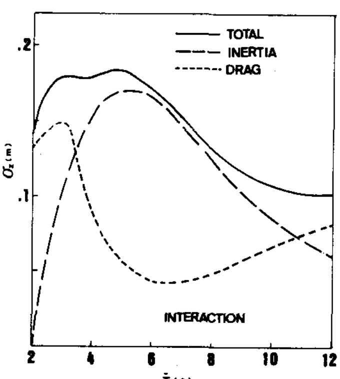

図-3 変位のrms応答
(Bretshneider)

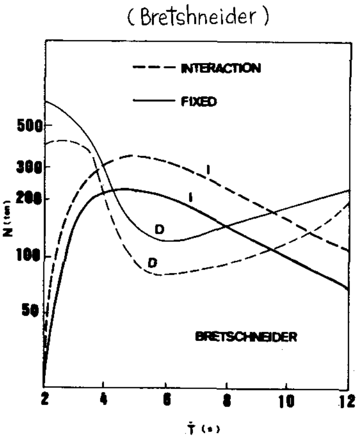

図-4 断面力のrms応答

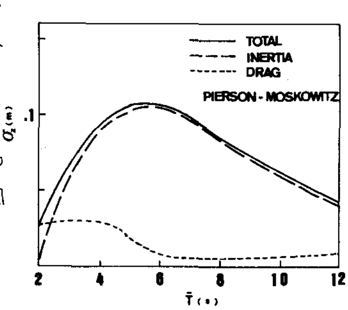

図-5 変位のrms応答
(動的相互作用)

4. あとがき

波力を受ける海洋構造物の応答は動的相互作用を考慮した場合、基礎を固定した場合との間に相違が見られ、その特性を明確にしておくことは、その動的応答量の評価を行なう上で重要であると考えられる。