

波力と地震力を受ける海洋構造物の動的応答解析

Dynamic Response Analyses of Offshore Structures due to
Ocean Wave and Earthquake Excitation

by

山田善一 (I) 家村浩和 (II) K.Venkataramana (III) 河野健二 (IV)

This paper discusses the dynamic response analysis of offshore structures subjected to random sea waves and strong motion earthquakes. The stationary random sea state is represented by a one-dimensional Bredt-Nieder type power spectrum. The wave kinematics are computed using small amplitude wave theory. The Morison equation defines the wave forcing function. Tajimi-Kanai's power spectrum is used for the stationary filtered white noise of input ground acceleration. The soil-structure interaction is idealized as a system of spring-dashpot elements connecting the structure and subsoil. The equation of motion is obtained by the substructure method. The analysis is carried out in the frequency domain using the mode superposition principle. It is shown that since the first few modes provide significant contributions to the response, the first few modes evaluation is very important for the application of the dynamic soil-structure interaction analysis. Since the dynamic response due to earthquake motion gives the comparable results to ocean waves, it is important to clarify the earthquake motion effects on the dynamic response evaluation of offshore structure systems.

1. まえがき

海洋開発の進展にとまぬ、より厳しい環境のもとでの海洋構造物の設計が求められている現在、これに対する基礎的な検討を加えておくことは重要であると考えられる。海洋構造物の設計法を信頼性のあるものにするためには、その動的応答解析法を確立しておくことが求められる。本研究では水深が約100mの海域における海洋構造物が波力や地震力を受ける場合の動的応答解析について検討を加えたものである。このような海洋構造物の動的応答評価に及ぼす基礎-地盤系の動的影響も合わせて検討するため、杭基礎系の動的特性をインピーダンス関数で表わし、動的サブストラクチャ法の適用により全体系構造物の定式化を行なっている。波力の評価においては修正モリソン式を適用し、海面上昇量のパワースペクトル密度関数はブレットシュナイダー型を用いて表わしている。また地震力は多治見のスペクトル密度関数によって表わし、スペクトル解析を利用した動的応答解析を行なっている。構造物の応答特性を明確にするためには、種々の要因が考えられるが、本解析では入射波の平均波高や周期の変化、地盤条件の変化、構造物の卓越周期の変化、地震入力強度の変化等が海洋構造物の応答評価に及ぼす影響について検討を加えた。

(I)	京都大学工学部	土木工学科	教授	工博
(II)	京都大学工学部	土木工学科	助教授	工博
(III)	京都大学工学部	大学院		
(IV)	鹿児島大学工学部	海洋土木開発工学科	助教授	工博

2. 定式化

2.1 全体系の運動方程式

海洋構造物に作用する主要な外力として、波力と地震力があげられる。これらの外力は一般に不規則な特性を有しており確率過程として表わされる。また本解析では、これらの外力はそれぞれ独立に構造物に作用するものとして扱っている。このような構造物の動的応答解析は不規則振動論を利用したスペクトル解析によって行なうことができる。^{2), 3)} 微小振幅波理論を用いて水粒子の速度や加速度が表わされると、モリソン式より定常なエルゴードガウス過程として波力を求めることができる。構造物が線形でこのような波力を受けるとき、その応答も同様の特性を有するため、不規則振動解析によって応答を求めることができる。海洋構造物は設置される地盤の動的特性により、基礎固定の場合とは異なった応答特性を示すことが考えられる。そこで本解析では海洋構造物の動的応答解析に及ぼす杭基礎-地盤系の影響を調べるため、動的サブストラクチャ法によって運動方程式を表わすことにする。一方、地震力を受ける場合も同様に、入力加速度のパワースペクトル密度関数が与えられると流体力の影響を考慮した運動方程式を求めることができる。上部構造物系の運動方程式は有限要素法の適用により容易に導くことができる。すなわち上部構造物系に対する運動方程式は

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_a \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} \\ C_{ba} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (1)$$

と表わされる。ここで添字 a は自由節点に、添字 b は下部構造との接合点に、それぞれ対応している。ところで、基礎-地盤系の動的特性が上部構造物の応答に及ぼす影響を考えると、上部構造物に対して自由節点の変位は上部構造物と下部構造物の接合点を完全固定とした時の動的変位 (u_a^c) と拘束を解除したことによる接合点上の変位 (u_b) に対する準静的な変位の和として表わされる。すなわち

$$\begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & L \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a^c \\ u_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ただし $[L] = -[K_{aa}]^{-1}[K_{ab}]$ $[I] =$ 単位マトリックス

一方、杭基礎天端に作用する上部構造物からの相互作用力を (R_s) として、杭基礎-地盤系の動的特性をインピーダンス関数を用いて表わすと杭基礎系の運動方程式は⁴⁾

$$[M_p]\{\ddot{x}_p\} + [C_p]\{\dot{x}_p\} + [K_p]\{x_p\} = \{R_s\} \quad (3)$$

と表わされる。ところで上部構造系と下部構造系の接合点においては、変形の適合条件と断面力の平衡条件を用いると、式(1)及び式(3)を用いて全体系の運動方程式が求められる。上部構造物系が複雑になるにつれて、一般に式(1)の自由度は増大し、全体系の運動方程式を直接解くことは多大の時間を要することとなる。しかしながら、このような構造物系の応答は比較的低次の振動モードに支配されることを考えて、式(1)に対して非減衰振動時の固有値解析を適用して自由度の低減を計ることができる。ところで波力と地震力を受ける場合、外力の形が異なるため全体系の運動方程式は以下のように求めることができる。

2.2 波力を受ける場合

構造物が波力を受ける場合を考えると、外力 (F_a) は水粒子速度 (\dot{v}_0) 及び加速度 (\ddot{v}_0) を用いて表わされる。すなわちモリソン式によって波力を表わすと、²⁾

$$\{F_a\} = [C_M]\{\dot{v}_0 - \dot{u}_a\} + [C_D]\{(\dot{v}_0 - \dot{u}_a)|\dot{v}_0 - \dot{u}_a|\} \quad (4)$$

と表わされる。ただし $[C_M]$ は水粒子加速度に対する質量係数を含むマトリックスであり、海中に

ある各部材の体積に比例する。また、 $[C_D]$ は水粒子の速度に対する抗力係数を含むマトリックスであり、各部材の流れ方向の断面積に比例する。波力は式(4)から分かるように水粒子と構造物の相対速度に対して非線形となるため、一般には等価線形化法等を用いて線形化して扱われる。すなわち、抗力は水粒子と構造物の相対速度の自乗に比例するため、運動方程式は非線形となる。しかしながら等価線形化手法による近似化を行なった場合、数回の繰り返し計算で応答を求めることができる。この手法はあくまでも近似的なものであるが、本解析で対象としているような構造物では、十分適用できるものと思われる^{1), 7), 8)}したがって式(1)の運動方程式は

$$\text{ただし } \begin{bmatrix} \dot{M}_{aa} & \dot{M}_{ab} \\ \dot{M}_{ba} & \dot{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_a \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{C}_{aa} & \dot{C}_{ab} \\ \dot{C}_{ba} & \dot{C}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_M & C_D \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_0 \\ \dot{v}_0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$[M] = [M + \dot{C}_M]$, $[C] = [C + \dot{C}_D]$, $[\dot{C}_D] = [C_D \sqrt{(8/\pi) \sigma_{\dot{r}_j} \dot{r}_j}]$, $\dot{r}_j = \dot{v}_{0j} - \dot{u}_j$

と表わされる。ここで、 $\sigma_{\dot{r}_j}$ は水粒子と構造物の相対速度に対する自乗平均応答である。したがって動的サブストラクチャ法を適用すると、式(3)と式(5)から全体系の運動方程式を求めることができる。前述したように上部構造物系では基礎を固定した場合の非減衰時の固有値解析を行ない自由度の大幅な低減化を計ることができる。これより全体系の運動方程式は波力を受ける場合、

$$\begin{bmatrix} I & \dot{M}_{ap} \\ \dot{M}_{pa} & \dot{M}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{x}_p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{C}_{aa} & \dot{C}_{ap} \\ \dot{C}_{pa} & \dot{C}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ \dot{x}_p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_j^2 & 0 \\ 0 & K_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ x_p \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} P_a \\ P_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_0 \\ \dot{v}_0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ただし $\begin{bmatrix} P_a \\ P_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi^T C_M & \phi^T \dot{C}_D \\ GL^T C_M & GL^T \end{bmatrix}$, $\{x_a^C\} = [\phi]\{q\}$, $\{x_p\} = [G]\{u_b\}$

と表わされる。したがって水粒子速度及び加速度が与えられると式(6)を用いて応答を求めることができる。この式を解くためには水粒子の加速度や速度を与える必要がある。一般に水粒子の速度や加速度は不規則な運動をするため、波の運動が定常ガウス過程に従う場合を与えると、振動数領域で解析するスペクトル理論の適用が容易になる。すなわち、微小振幅波理論に従うと、水平方向の水粒子速度及び加速度のパワースペクトル密度関数は

$$[S_{\dot{v}_i \dot{v}_j}(\omega)] = [F(z_i)F(z_j)S_{\eta\eta}(\omega)] \quad , \quad [S_{\ddot{v}_i \ddot{v}_j}(\omega)] = [\omega^2 S_{\dot{v}_i \dot{v}_j}(\omega)] \quad (7)$$

ただし $\omega^2 = gk \tanh(kd)$, $F(z_j) = \frac{gk \cosh(k(d+z_j))}{\sinh(kd)}$

と表わされる。ここでdは水深、 z_j は水面上からの水深、 $S_{\eta\eta}(\omega)$ は波の海面上昇量に対するパワースペクトル密度関数である。海面上昇量に関しては、観測値に基づいた解析から幾つかのパワースペクトル密度関数が提案されているが、本解析では波の平均周期と平均波高をパラメータとするプレットシュナイダー型のスペクトル密度関数を用いることにする。すなわち

$$S_{\eta\eta}(\omega) = a_1 (\bar{H}/g\bar{T})^2 g^2 \exp(-b_1(\bar{T}\omega)^4)/\omega^5 \quad (8)$$

ただし \bar{T} =平均周期(sec), \bar{H} =平均波高, $g=9.8m/s^2$, $a_1=4120$, $b_1=1052$

ところで式(6)で表わされた全体系の運動方程式が式(7)に示すようなパワースペクトルを有する水粒子による波力を受けるとき、その応答量はスペクトル理論を用いて求めることができる。このため式(6)に再び非減衰時の固有値解析を適用して応答解析を行なうことにする。この場合、式(6)は一般に非比例減衰系となるため、減衰マトリックスを近似的に対角化して解析を行なうことにする。すなわち、一般座標系における応答のパワースペクトルは

$$[S_{yy}(\omega)] = [H(\omega)][S_{ff}(\omega)][H^*(\omega)] \quad (9)$$

ただし

$$\begin{Bmatrix} q \\ x_p \end{Bmatrix} = [\Psi] \{y\}, \{S_{ff}(\omega)\} = [\Psi]^T \begin{bmatrix} P_a \\ P_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{VV} & S_{V\dot{V}} \\ S_{\dot{V}\dot{V}} & S_{\dot{V}V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_a \\ P_b \end{bmatrix} [\Psi], [H(\omega)] = \begin{bmatrix} -\omega_j^2 - \omega^2 & \\ & +i2\omega\beta_j\omega_j \end{bmatrix}$$

と表わされる。したがって応答のパワースペクトルが求まると、二乗平均応答はその逆フーリエ変換より求めることができる。このようにして求めた応答量は固有振動モードを用いた変換をさらに適用して構造物各点の二乗平均応答として表わされる。変位応答が求まると、各要素における断面力応答も同様にして表わすことができる。

2.3 地震力を受ける場合

地震動は本来不規則な振動をするため、その特性はパワースペクトル密度関数の形で表わされる。杭基礎-地盤系の動的特性がインピーダンス関数で表わされる場合、入力の評価法についても検討を加えることが必要であるが、本解析では杭頭の重心点でのインピーダンス関数を用いて基礎-地盤系の動的特性を表わし、有効入力の影響を無視して入力地震動を扱っている。この入力地震動の加速度のパワースペクトルは

$$S_{z_g \ddot{z}_g}(\omega) = \frac{1 + 4h_g^2(\omega/\omega_g)^2}{(1 - (\omega/\omega_g)^2)^2 + 4h_g^2(\omega/\omega_g)^2} \quad (10)$$

と表わされる。ここで ω_g 、 h_g はスペクトルの形状を与える減衰定数と振動数である。ところで地震動が作用する場合の運動方程式も動的サブストラクチャ法を適用すると式(6)と同様な形で求められる。¹⁰⁾ この場合の流体力は構造物の振動によって生じるものであるが、質量マトリックスや減衰マトリックスは波力を受ける場合と同様に表わされる。外力項は地震力のみであり、運動方程式は

$$\begin{bmatrix} I & \dot{M}_{ap} \\ \dot{M}_{pa} & \dot{M}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ \dot{x}_p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{C}_{aa} & \dot{C}_{ap} \\ \dot{C}_{pa} & \dot{C}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ \dot{x}_p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_j^2 & 0 \\ 0 & K_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ x_p \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \ddot{z}_g \quad (11)$$

ただし

$$\{F_1\} = \{\Phi\}^T ([M_{aa}][L] + [M_{ab}] + [C_M][L])[G] \{1\}$$

$$\{F_2\} = [G]^T ([L]^T [M_{aa}][L] + [L]^T [M_{ab}] + [M_{ba}][L] + [M_{bb}] + [L]^T [C_M][L])[G]$$

と表わされる。したがって入力加速度のパワースペクトル関数が式(10)のように与えられる場合、

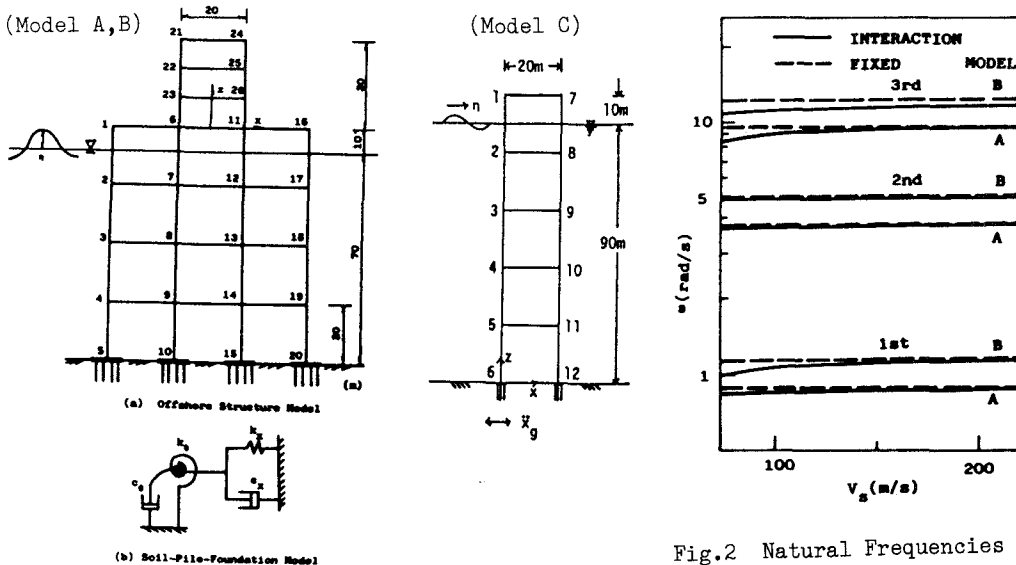


Fig.1 Soil-Offshore Structure Models

Fig.2 Natural Frequencies of Model A and Model B

非減衰時の固有値解析を適用し応答解析を行なうことができる。式(11)は一般に非比例形の減衰マトリックスとなるため、厳密には複素固有値解析を適用する必要があるが、本解析では簡単のため対角化を行ない近似的な扱いをしている。⁶⁾

3. 応答解析結果

波力や地震力を受ける海洋構造物の動的応答特性を明確にするため、Fig.1 に示すような構造物を対象とした解析を行ない検討を加える。⁹⁾ このような構造物の応答特性は波力や地震力の影響ばかりでなく、基礎-地盤系との動的相互作用の影響を受けることが考えられる。解析モデルの構造物は2つの型式からなり、それぞれ水深が70mと90mの場合であり、ラーメン構造となっている。主要部材の径は2.8mあり、波の進行方向に広がる平面上での動的応答解析を行なっている。

3.1 波力を受ける場合

波力のパワースペクトルは、先に述べたようにブレットシュナイダー型を用いて表わされるが、そのスペクトル特性は平均波高や周期によって変化する。動的応答解析の対象となる波力の卓越周期は約10秒程度であるため、このような構造物の応答は低次モードの振動が支配的となる。このため本解析では、上部構造物に関しては3次の振動までを考慮して基礎系を含む全体系の動的応答解析を行なっている。式(8)に示すように平均周期や平均波高をパラメータとした波力を受けるとき、地盤や上部構造物の剛性の変化が構造物の動的応答特性に及ぼす影響について検討を加えた。

Fig.2 はモデルAの構造物系に対して杭基礎を支持する地盤のせん断定数の変化による全体系の固有振動数の変化を示したものである。実線は杭基礎を含む動的相互作用を考慮した全体系に対する場合であり、破線は基礎を固定した場合である。モデルA及びモデルBは基本振動数がそれぞれ0.87rad/sと1.15rad/sに対応したものであり、上部構造物の剛性による変化を表わしている。いずれのモデルにおいても、地盤のせん断波速度が小さいとき、1次及び3次の振動数に相違が見られるが、せん断波速度の増加とともに基礎固定時の場合に接近することが分かる。また、本解析モデルでは地盤条件等による固有振動数間の接近は見られず、杭基礎系が全体系の固有振動数に及ぼす影響は比較的小さいことが分かる。一方、モデ

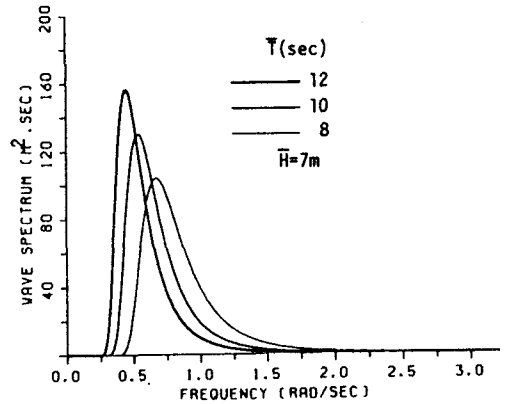
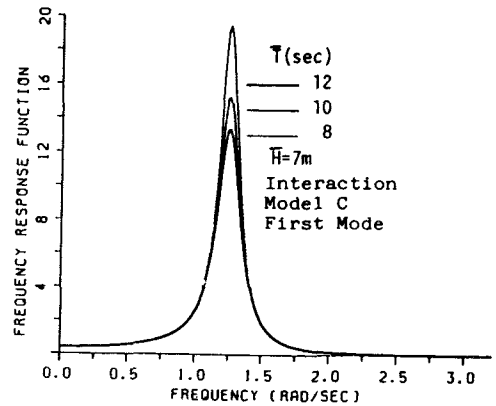
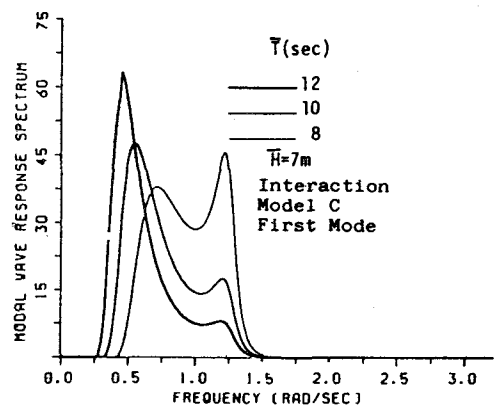


Fig.3 Bretschneider Wave Energy Spectrum



(a) Frequency Response Function



(b) Modal Wave Response Spectrum

Fig.4 Response Spectrum

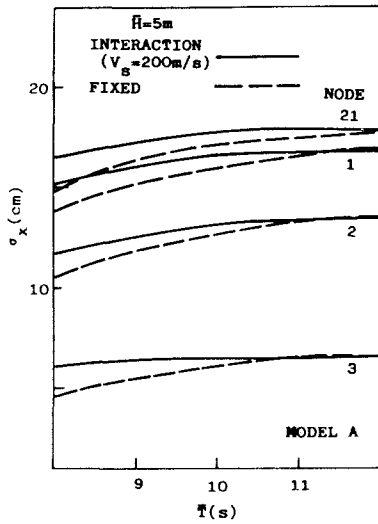


Fig.5 Displacement Responses due to Wave Forces

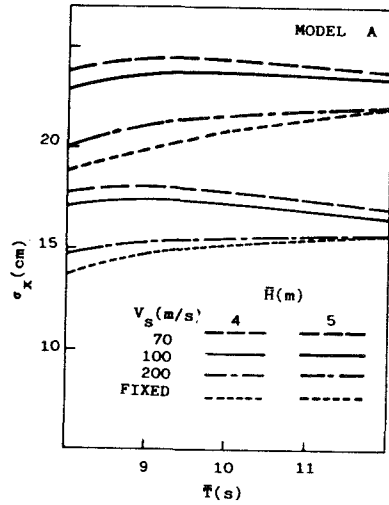


Fig.6 Displacement Responses due to Wave Forces

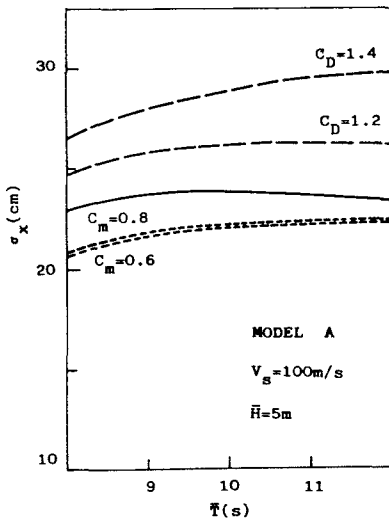


Fig.7 Effects on Wave Force Evaluations

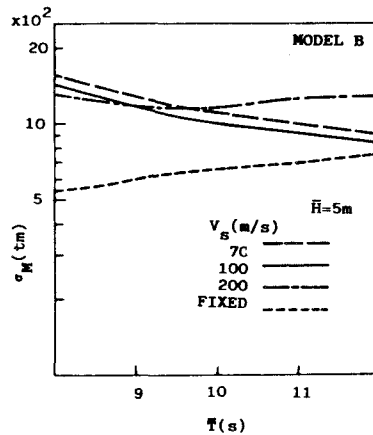


Fig.8 Bending Moment Responses due to Wave Forces

ルCの固有振動数は基礎固定時で3.72秒、動的相互作用を考えた場合で5.00秒であり、本モデルは基礎-地盤系が全体系の固有周期に及ぼす影響が大きな構造であることが分かる。

Fig.3は水深90mのとき、平均波高が7mに対する海面上昇量のパワースペクトル密度関数を示したものである。平均周期によって、その形状は変化しており、平均周期が長くなると、パワースペクトル密度関数のピークは鋭くなり低振動数側へ移動することが分かる。

Fig.4(a)はモデルCの構造物の周波数応答関数を示したものである。海洋構造物の応答は式(5)および式(6)からも分かるように、入射波の大きさによって減衰力が変化する。これは水粒子の速度の2乗に比例した抗力の影響を受けて減衰力が変化するためである。したがって平均波高が7mの場合、入射波の平均周期が長くなるに従って、周波数応答関数のピークは減少しており、減衰力が増加していることを示している。また、Fig.4(b)はCモデルの構造物に対する応答のパワースペクトルを示したものである。入射波の平均周期が長くなり、それが構造物系の1次振動

数から離れるに従って、応答は波力のパワースペクトルに支配されるものと思われる。一方、入射波の平均周期が7秒と短くなると、それが構造物系の1次周期と接近し、応答のパワースペクトルは構造物系の影響が増加していることが分かる。このように海洋構造物系の応答は波力の平均周期と構造物系の卓越周期に大きく影響されることが分かる。

Fig.5 はモデルAに対して平均波高5mに対する各節点の変位応答を示したものである。実線は地盤のせん断波速度が200m/sの場合であり、破線は基礎を固定した場合の応答を示している。各節点は入射波の平均周期の増加に従って若干の増加を示しており、全体において基礎固定時の応答に比べて杭基礎の場合は大きな応答を示している。しかしながら、その相違は入射波の平均周期が増加するとともに減少しており、約12秒では全体に一致する傾向がみられる。これは入射波の平均周期が長くなるに従って、そのパワースペクトルの卓越周期が増加し、構造物の卓越周期から十分に離れるためである。このため構造物基礎の支持条件にかかわらず、応答の相違は小さくなるものと考えられる。

Fig.6 はモデルAに対して基礎地盤のせん断波速度が変化する場合の節点1の水平方向の変位応答を、平均波高が4mと5mの場合について示したものである。地盤のせん断波速度が100m/s以下の場合、入射波の平均周期が約9秒のときピークを示し、その後平均周期の増加に従い少しずつ減少する傾向を示している。一方、地盤のせん断波速度が100m/sを越え、波の平均周期の増加にともない応答は増加する傾向を示している。杭基礎との連成を考慮した応答は全体に基礎固定時の応答に比べて大きな応答を示している。これは構造物の変形にともなって波力が変化するためであり、基礎系の振動によって一般に波力が増加することに基づくものと考えられる。そして地盤のせん断波速度が200m/sを越え、入射波の平均周期が約12秒になると、基礎固定時の応答に接近する傾向を示している。杭基礎との連成を考慮した場合、地盤のせん断波速度の減少にともなって固有周期が減少する。このため全体系の伝達関数のピークが入射波のパワースペクトル密度関数の卓越振動に接近することによって応答が増加するものと考えられる。また、入射波の平均周期が長くなるとそのパワースペクトル密度関数は一般にはピークが構造物の卓越周期に相当する伝達関数のピークから離れるため、基礎固定時の応答は杭基礎を有する場合の応答に接近する傾向を示すものと考えられる。

Fig.7 はモデルAに対して基礎地盤のせん断波速度が100m/sで入射波の平均波高が5mのとき、質量係数や抗力係数の変化が応答に及ぼす影響を示したものである。抗力係数はReynolds数、KC数、隣接する部材間隔等によって変化するためその変動が応答に及ぼす影響を調べておくことは必要だと思われる。また、質量係数も部材寸法や隣接する部材間隔等の影響によって変化する。したがって、Fig.7 は式(4)に示すように本解析ではモリソン式によって波力の評価を行なっているため、これらの値が変位応答に及ぼす影響について調べたものである。実線はこれらの係数がそれぞれ1.0の場合の応答であり、点線は質量係数のみが、また破線は抗力係数のみが変化した場合の応答を示している。質量係数が減少した場合、一般に慣性力の影響が減少し、それにと

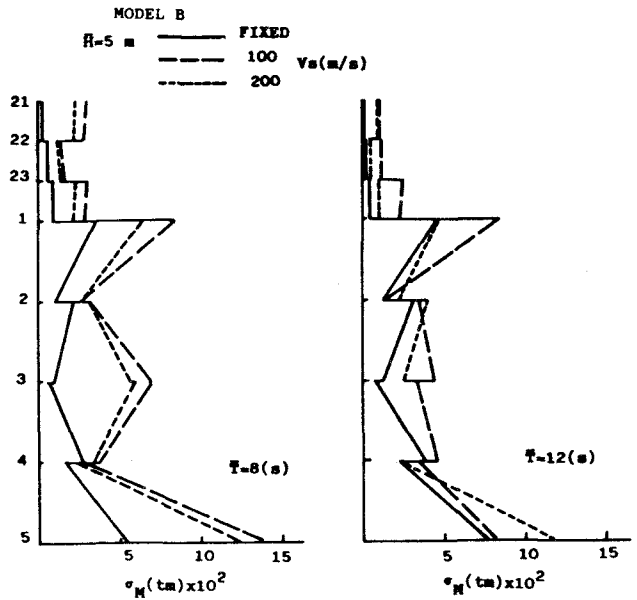


Fig.9 Bending Moment Responses due to Wave Forces

もなって応答も減少することが分かる。その影響は入射波の平均周期が長くなるにつれて減少しているが、平均周期が短くなると若干増加することが分かる。また質量係数が0.8以下になるとその影響は全般に小さい。一方、抗力係数が増加する場合の応答は比較的大きく、全体に入射波の平均周期が長くなるにつれて若干増加する傾向を示している。本解析モデルでは主要部材の直径が2.8mであり、抗力が応答に及ぼす影響が比較的大きいため抗力係数の評価は応答解析に大きな影響を与えることが分かる。

Fig.8 はモデルBに対して同様に入射波の平均波高が5mの場合の節点5における曲げモーメント応答を示したものである。入射波の平均周期が10秒以下では基礎系の振動を考慮した場合の応答は基礎固定時の場合より大きく、その相違は変位応答の場合より増加している。せん断波速度が200m/s及び基礎固定時の応答は入射波の平均周期が長くなるに従って増加する傾向が見られる。これは入射波のパワースペクトルが増加することと、曲げモーメント応答は1次振動以上の振動モードの影響が増加するためと考えられる。

Fig.9 はモデルBの主要部材である節点1から節点5における入射波の平均波高が5mのとき、平均周期が8秒と12秒に対する曲げモーメントの rms 応答を示したものである。実線は基礎固定時の応答であり、破線および点線は地盤のせん断速度が100m/sと200m/sに対する応答をそれぞれ示している。動的相互作用を考慮すると一般に応答は増加する傾向を示している。これは構造物系の卓越周期が入射波のパワースペクトルのピークに接近することによるものと思われる。平均

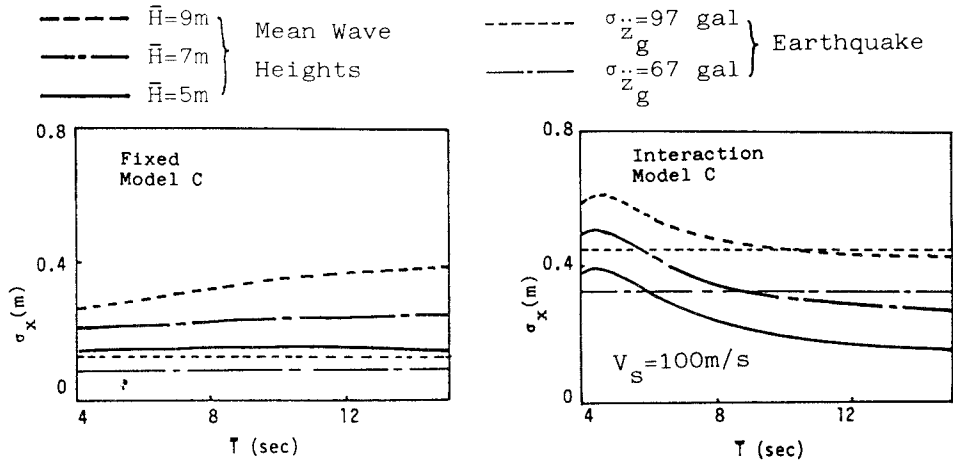


Fig.10 Displacement Responses due to Wave and Earthquake Forces

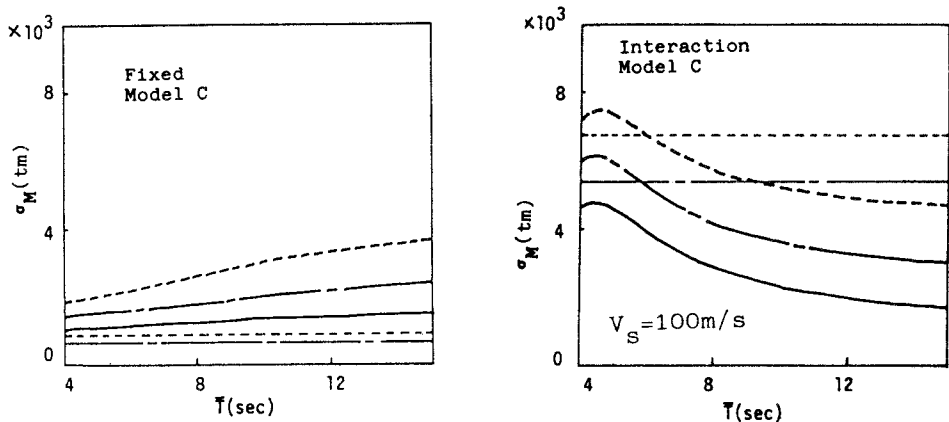


Fig.11 Bending Moment Responses due to Wave and Earthquake Forces

周期が12秒と構造物の卓越周期から離れるに従って動的相互作用の影響は減少することが分かる。しかしながら、曲げモーメント応答に及ぼす基礎系の振動による動的相互作用の影響は大きく、海洋構造物の動的応答解析においては基礎系の動的特性が構造物の応答に及ぼす影響を把握することが重要であると思われる。

3. 2 地震力と波力を受ける場合

海洋構造物に作用する外力の中では、地震力の影響も考えられる。¹⁰⁾ 地震力と波力は一般にその卓越周期が大きく異なっており、比較的長い固有値周期を有する海洋構造物では地震力の影響は小さいと考えられてきた。しかしながら3秒～5秒程度の固有周期を有する海洋構造物系では波力に比べて地震力の影響も無視できないものと考えられる。そこで本解析ではFig.1のモデルCを用いて地震力を受ける場合の影響について検討を加えることにする。応答解析においては設定波として考えられるような波高を有する波力と大きな最大加速度を有する地震力が同時に作用する確率は非常に小さいものと考え、それぞれ独立に応答を求めている。

Fig.10はモデルCの節点1のrms変位応答を示したものである。太線は波力に対するものであり、細線は地震力による応答を示している。式(10)に示された入力加速度のパワースペクトルにおいて、 ω_g は15.0rad/sであり、 h_g は0.5を用いている。この場合の地震力としては二乗平均加速度 $\sigma_{\ddot{z}}^g$ として97galと67galに対応したものをを用いている。これはピーク係数を約2.8とした場合、 $\sigma_{\ddot{z}}^g$ 最大加速度が270galおよび190galに相当するものである。基礎を固定した場合の応答は平均波高が5mの場合においても地震力に対する場合より大きな応答を示している。一方、基礎系の動的な影響がある場合、地震力による応答は波力による応答と同レベルの結果を与えており、地震力の影響は無視できないものであることが分かる。

Fig.11はモデルCの節点6の曲げモーメントに対するrms応答を示している。太線は波力に対するものであり、細線は地震力による応答を示している。基礎が固定の場合、地震力による応答は波力の場合より全般に小さいことが分かる。一方、基礎の動的な影響がある場合、地震力による応答は波力による場合よりも大きくなる場合のあることが分かる。波力に対する応答は波力のパワースペクトルの平均周期が構造物系の卓越周期に接近するとき、この場合は約5秒のとき最大応答を示す。しかし波力の平均周期が長くなり、構造物系の卓越周期から離れるに従って応答は減少する傾向を示している。平均波高が9mの非常に大きな波力を受ける場合でも平均周期が約10秒を越えると、二乗平均加速度が97galの地震力の場合より応答は小さく、地震力の影響が大きいたことが分かる。このように地震力と波力を受ける海洋構造物の応答は入力波の卓越周期と構造物系の卓越周期との関係によって大きな影響を受けることが分かる。このため3秒～5秒程度の固有周期を持つ海洋構造物では、基礎-地盤系との連成による動的相互作用の影響を明確にするとともに、波力ばかりでなく地震力の影響についても検討を加えることが重要であることが分かる。さらに、波力と地震力が同時に作用する場合の応答特性についても検討を加えておくことは、海洋構造物の動的応答特性を明確にする上で必要であると考えられる。

4. あとがき

基礎-地盤系の動的特性を考慮した海洋構造物系に対して波力と地震力を受ける場合の定式化を行ない、動的応答特性に関する検討を加えた。本解析で得られた結果を要約すると次のようになる。

1) 波力を受ける海洋構造物系の応答特性は入射波の平均周期と構造物系の卓越周期によって大きな影響を受ける。すなわち、変位応答は入射波の平均周期が構造物系の卓越周期に近づくとき、動的相互作用の影響が大きくなり、その平均周期が長くなると基礎固定時の応答に接近する傾向が見られる。一般には動的相互作用を考慮した場合の変位応答が基礎固定時よりも大きな結果を与えている。

2) 波力を受ける場合、動的相互作用を考慮した場合の曲げモーメント応答は、一般に基礎固定時の場合よりも大きな応答を与えている。変位応答では1次振動が卓越するのに対し、曲げモーメント応答は2次以上の振動の影響も強く受けるため、動的相互作用を考慮した応答評価を行なうことが必要である。

3) 地震力による海洋構造物系の応答は、構造物系の卓越周期の影響を強く受ける。基礎系との動的相互作用を考慮した場合、構造物系の卓越周期の影響を受けるものの、波力による応答に比べて地震力による応答は同レベルあるいは、それ以上の結果を与えている。このため海洋構造物の動的応答評価を行なう場合、波力ばかりでなく地震力の影響についても検討することが必要だと思われる。

謝辞 原稿作成に御協力頂いた鹿児島大学工学部 愛甲頼和技官に感謝致します。

参考文献

- 1) A.K. Malhotra and J. Penzien, "Nondeterministic Analysis of Offshore Structures", ASCE, EM6, pp.985-1003, 1970
- 2) R. Sigbjørnsson, K. Bell and I. Holand, "Dynamic Response of Framed and Gravity Structures to Waves" Numerical Method in Offshore Engineering, pp.245-280, 1977
- 3) C.A. Brebbia and Walker, "Dynamic Analysis of Offshore Structures", Newnes Butterworths, 1979
- 4) R.G. Bea, "Dynamic Response of Piles in Offshore Plates", Dynamic Response of Pile Foundations: Analytical Aspects, ASCE, pp.80-109, 1980
- 5) K. Kawano, Y. Yamada and K. Venkataramana, "Dynamic Response Analysis of Soil-Offshore Structure Systems", The Third Intern. Conf. on Civil and Structural Engineering Computing, London, Vol.1, pp.315-319, 1987
- 6) J. Penzien, M.K. Kaul and B. Berge, "Stochastic Response of Offshore Towers to Random Sea Waves and Strong Motion Earthquake", Computers and structures, Vol.2, pp.733-756, 1972
- 7) A.W. Lipsett, "Nonlinear Structural Response in Random Waves", ASCE, Journal of Struc. Engng, Vol.112, No.11, pp.2416-2419, 1986
- 8) R. Eatock Taylor and A. Rajagopalan, "Load Spectra for Slender Offshore Structures in Waves and Currents", Earthq. Engng. and Struct. Dyn., Vol.11, pp.831-842, 1983
- 9) W. Jesion, "Random Vibrations of the Baltic Drilling Platform Subjected to Wind Loads and Water Waves", Earthq. Engng. and Struct. Dyn., Vol.15, pp.595-617, 1987
- 10) H. Takemiya, K. Goda, T. Iida and T. Nakazato, "Soil-Structure Interaction Gravity-Type Steel Offshore Structure for Earthquakes", Offshore Mechanics and Arctic Engng., 5th International Symposium, Tokyo, pp.663-670, 1986

(1987年10月16日受付)