

(110) 重力式鋼製海洋構造物の3次元地震応答特性

岡山大学工学部

竹宮 宏和

岡山大学大学院

○合田 和哉

住友金属工業(株)

飯田 毅, 中里 卓三

1. まえがき

近海海底油田掘さく用海洋構造物として、重力式鋼製プラットフォーム(図1)が考案されているが、本研究は、同海洋構造物の地震に対する検討を行ったものである。重力式鋼製海洋構造物は、従来の重力式海洋リグと比べて、ジャケットの基底に接面平面の大きいベース・タンクを有している構造物である。従って、その地震時の挙動には、設置地盤との動的相互作用効果が無視できなくなる。本研究では、地震時の上記海洋構造物の応答評価をより厳密に捉えるため、3次元空間構造物としてのモデル化を行ない、設置地盤との相互作用を考慮するための手法として、動的サブストラクチャ法¹⁾(インピーダンス法)を用いた。また、解析プログラムとしては地震応答解析プログラムSUBSSIP-A3Dを用いた。

2. 定式化

上部構造物系: 本研究では、海洋構造物の地震応答性状に主眼を置いていることから、周辺の流体を静水と仮定した。構造物の、周辺の流体との相互作用としては、修正モリソン式²⁾より得られる付加質量を考慮した。また、同相互作用による減衰効果はそれほど大きくないことから、減衰定数を構造物のそれに乗せすることによって考慮した。まず、静水中にある重力式鋼製プラットフォーム構造物の運動方程式は、3次元はり要素によるマトリクス解析法の定式化に従って

$$[M]_{sup} \{\ddot{X}\}_{sup} + [C]_{sup} \{\dot{X}\}_{sup} + [K]_{sup} \{X\}_{sup} = \{P_w\} + \{P_{sup}\} \quad (1)$$

と表わされる。ここに、 $\{\ddot{X}\}$ は絶対加速度、 $\{\ddot{X}\}$ は基盤における加速度 $\{\ddot{X}_g\}$ に対する相対加速度、 $\{P_{sup}\}$ は下部構造物からの連成力、添字supは上部構造物を表わす。なお、質量マトリクス $[M]$ は、節点集中質量マトリクスを用いた。減衰 $[C]$ については、固定支持状態での固有モード減衰を仮定した。式(1)における $\{P_w\}$ は、修正モリソン式より得られる流体力を表わし、次のように表わされる。

$$\{P_w\} = \sum_{i=1}^m \{-\rho(K_{Mi}-1)V_i \dot{X}_i^t\} \quad (2)$$

$$V = v \cdot \bar{N} \quad ; \quad \bar{N} = \begin{bmatrix} N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (N = I - s \cdot s^t) \quad (3)$$

ここに、 ρ は部材周辺の水の密度、 V は部材体積、 K_{Mi} は質量力係数、 m は部材数、 s は部材軸方向の単位ベクトルを表わす。式(2)を式(1)に代入し、自由節点(添字s)と基礎とのインターフェイス節点(添字b)とに分割表示して表わすと、

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_{ss} & \bar{M}_{sb} \\ \bar{M}_{bs} & \bar{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_s \\ X_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_s \\ X_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ X_b \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{M}_{ss} & \bar{M}_{sb} \\ \bar{M}_{bs} & \bar{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_{g,s} \\ X_{g,s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ P_{sup} \end{bmatrix} \quad (4)$$

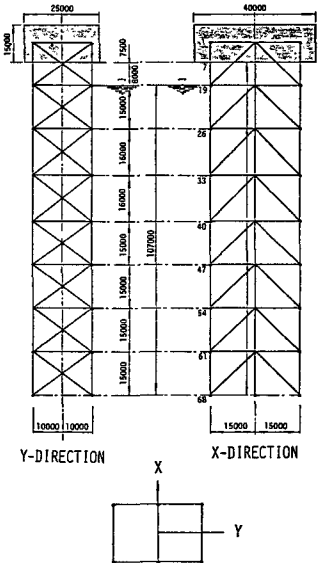


図1 解析対象モデル

となる。ここに、 $[\bar{M}] = [M] + [M_a]$ であり、 $[M_a]$ は付加質量と呼ばれるものである。

地盤-基礎系：モデル化において、地盤の3次元の広がり方を考慮するために、基礎およびその周辺地盤を軸対称とし、その応答を周方向に関してのフーリエ級数展開 ($N = 0, 1$) で表わした。側方境界としては粘性境界を採用し、下方境界としては剛基礎仮定を設けた。さらに、ベースタンク部を剛体と仮定した。以上の仮定に基づいて、有限要素化された対象領域の運動方程式は、

$$[M]_{sub} \ddot{\{X\}}_{sub} + [C]_{sub} \dot{\{X\}}_{sub} + [K]_{sub} \{X\}_{sub} = \{P\}_{sub} - \{P\}_b \quad (5)$$

と表わされる。ここに、添字 sub は下部構造系を示し、 $\{P\}_{sub}$ は上部構造系からの連成力、 $\{P\}_b$ は側方境界上の作用力を表わす。なお、実際の定式化では変位をフーリエ級数展開して、次式で表わす。

$$\{X\}_{sub} = \sum_{n=0}^1 ([H_n^s] \{X_n^s\} + [H_n^a] \{X_n^a\}) \quad (6)$$

ただし、 $\{X_n^s\}$ 、 $\{X_n^a\}$ はフーリエ振幅であり、肩字 s は X 軸 ($\theta=0^\circ$) に対して対称、a は逆対称、n はフーリエモード次数を表わす。また $[H_n^s]$ 、 $[H_n^a]$ は周方向への展開を示し、

$$[H_n^s] = \text{diag}(\cos n\theta, -\sin n\theta, \cos n\theta) \quad [H_n^a] = \text{diag}(\sin n\theta, \cos n\theta, \sin n\theta) \quad (7)$$

のようである。式(5)のフーリエ級数展開のもとで有限要素法の基礎式を導びくと、それに対応する剛性、減衰、質量マトリックスを得る。つぎに、式(4)を振動数領域に直し、縮合操作を施しフーチング重心へ変換すれば、次式となる。

$$[\hat{R}_G] \{X_G^t\} = \{P\}_{sub} - \{P_G^o\} \quad (8)$$

ここに、 $[\hat{R}_G]$ は下部構造系インピーダンス、 $\{P_G^o\}$ は有効入力、 $\{P\}_{sub}$ は上部構造物からの断面力、添字 G は基礎フーチング重心を表わす。

全体系：上部構造物系の運動方程式(4)を固有モード分解し、モード座標で表わした式に、地盤-基礎系の運動方程式(8)を加えて、両系のインターフェイス節点での断面力のつりあいと変位の適合性を考慮すれば、全体系の運動方程式は

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_{ss} & \hat{R}_{sb} \\ \hat{R}_{bs} & (\hat{R}_{bb} + \hat{R}_G) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ X_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{w,s} \\ P_{w,b} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \{P_G^o\} - [\hat{R}_G] \{X_g\} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

となる。ここに、 $\{q\}$ は固有振動モード応答ベクトル、 $P_{w,s}$ 、 $P_{w,b}$ は上部に作用する外力を表わす。したがって、上部-下部連成系の運動方程式(9)を基礎面で単位振幅の入力に対応する有効入力のもとでまず振動数領域での解析を行ない、時刻歴応答は、振動数応答と入力地震波の積を逆フーリエ変換して求める。

3. 数値解析例

図1は解析対象モデルであり、モデル化においてデッキ部を剛体と仮定した。図2は地盤-基礎系の有限要素モデルである。まず、3次元空間での上部構造物の振動特性を把握するために、1部材-1要素として部材振動をも把握できるモデル (O M E - m o d e l) と、水平構面を剛体と仮定して、その平面内に1節点 (6自由度) を採ることにより全体的な挙動を把握できる簡易モデル (S B E - m o d

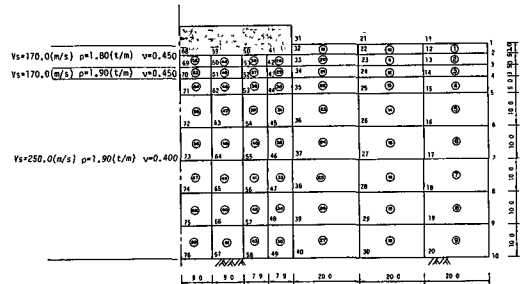


図2 地盤-基礎系の有限要素モデル

e 1) を採用した。それらのモード形状を図3に示す。この結果より、3次元系の3次元固有振動モードは、ねじれ振動を表わしている点と、OME-modelでは斜材の局所的な振動が表われている点が注目される。下部構造系の動特性を表わすものとして、フーチング重心で評価したインピーダンスと有効入力をそれぞれ図4、図5に示す。また、地盤との相互作用を明らかにするために、基盤面に単位調和入力を与えたときの固定支持状態と連成系の場合のデッキ部における振動数応答を図6において比較した。伝達関数としては、X方向入力によるX (H_{xx})、Y (H_{yx}) 方向応答、Y方向入力によるX (H_{xy})、Y (H_{yy}) 方向応答について示した。これより、地盤との相互作用を考慮することにより、上部構造物の応答は必ずしも基本固有振動モードに大きく支配されるというよりも、高次の固有振動モードの貢献度が大きくなることが判る。さらに、地震応答結果として図7、図8にそれぞれ最大加速度、最大変位の分布を1レグについて示した。この場合、設置地盤との相互作用効果を明らかにするために、地盤インピーダンスの評価においては、有限要素モデルを採用した動的サブストラクチャ法の解(FEM)³⁾と、連続体解析を使用した場合の解(CMM)、および入力には設置地盤の地震波の増幅は考慮するが地盤との相互作用を考慮しない応答値(FIX)を比較した。有効入力の評価においては、FEMでは基礎の根入れおよび広がり方を考慮してフーチング重心での有効入力を求めたのに対し、CMMでは地表面での自然地盤応答とインピーダンスの積より近似的に有効入力を求めた。これらからは、最大加速度、最大変位のいずれにおいても地盤との相互作用効果ははっきりと表われており、一般に地震動において卓越する振動数帯域での応答が減少していることは、対象構造物が、地震に対して制振効果を発揮していることがわかる。また、FEMとCMMの結果にさほどの差が見られないことより、応答解析においては有効入力の効果は小さく、地盤インピーダンスの効果が大きいことが予想できる。但し、入力地震波としては、EL CENTRO 1940、NS成分の最大値を100galとして処理した入力波を用いた。

《参考文献》

- 1) 竹宮、正木、魚谷：動的サブストラクチャ法による地盤-基礎-上部構造物系の擬似3次元地震応答解析、第38回年次学術講演会(1)、1983年9月
- 2) O.C.Zienkiewicz・R.W.Lewis・K.G.Stagg: Numerical Methods in Offshore Engineering, 1978
- 3) A.S.Veletsos: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.2, 87-102, 1973

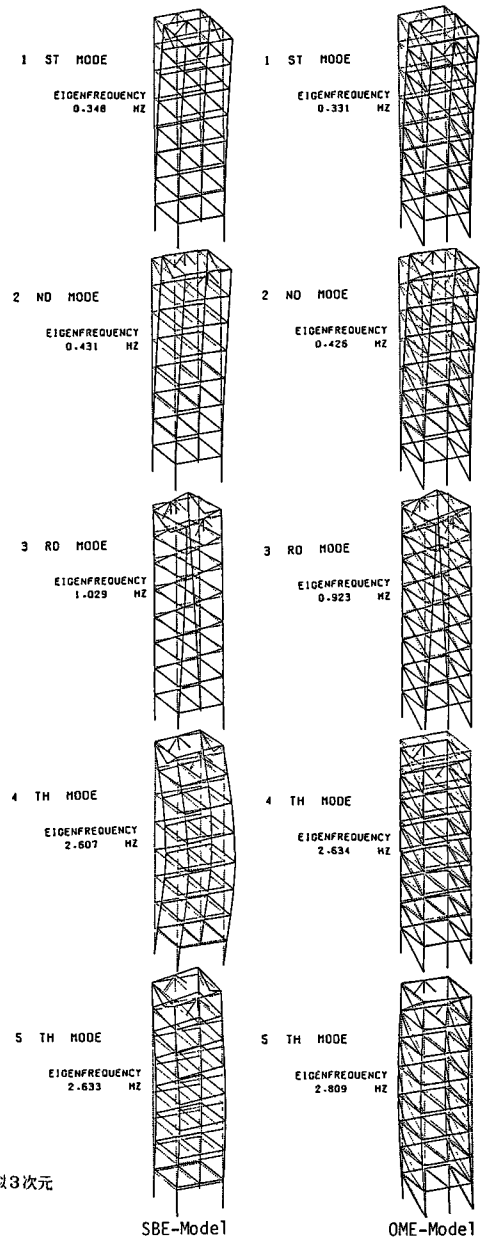


図3 上部構造物のモード形状

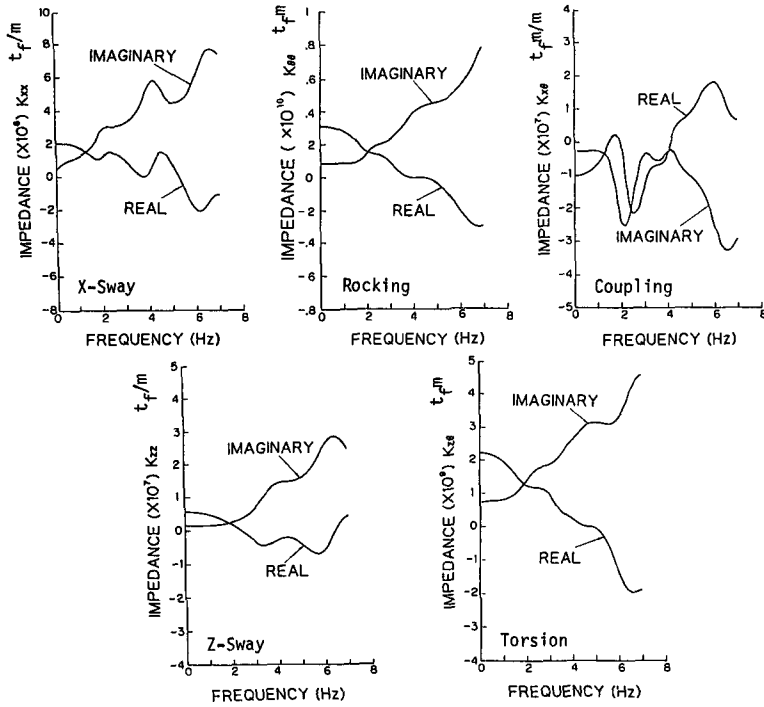


図4 フーチング重心でのインピーダンス

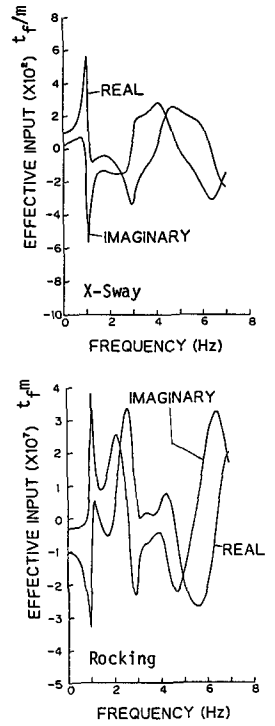


図5 フーチング重心での有効入力

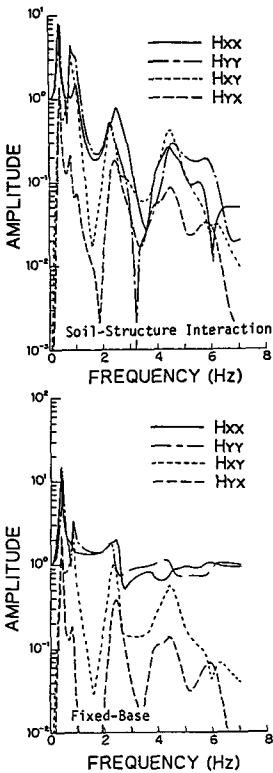


図6 デッキ部の振動数応答

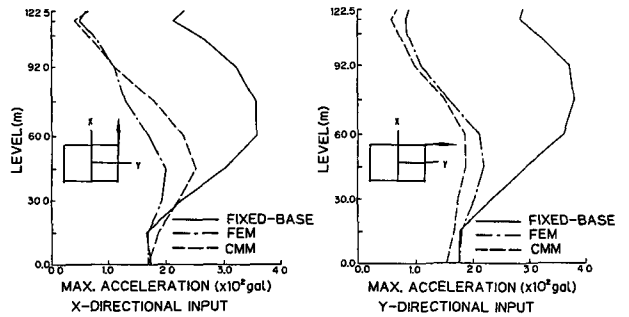


図7 最大加速度応答

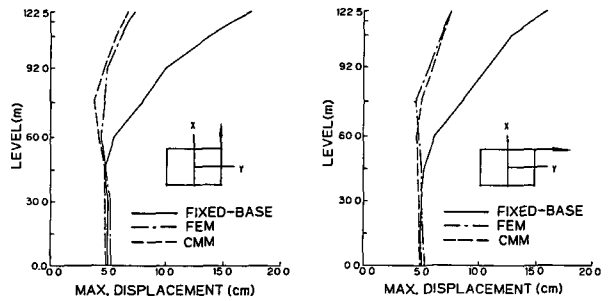


図8 最大変位応答