

地盤との相互作用における重力式鋼製海洋構造物の 三次元地震応答性状

3-DIMENSIONAL SEISMIC RESPONSES OF A GRAVITY-TYPE STEEL OFFSHORE PLATFORM WITH EMPHASIS ON SOIL- STRUCTURE INTERACTION

竹宮宏和*・合田和哉**・飯田 毅***・中里卓三****
By Hirokazu TAKEMIYA, Kazuya GODA, Takeshi IIDA
and Takuzo NAKAZATO

Three-dimensional seismic analysis of a gravity-type steel platform, which is proposed for oil production and storage at marginal offshore fields, is carried out. The present structure is characterized by a massive top deck, a six-leg flexible tubular framed jacket, and a wide spread out base tank. The interest for investigation is, therefore, placed on the dynamic interaction of the structure with soils at site. Different models are taken for structural parts in view of the accuracy for response analysis. The dynamic substructure method is applied to advantage for evaluating the soil-structure interaction effectively. Through the numerical computation, some useful informations are derived for the seismic design of the concerned offshore structure.

Keywords : seismic analysis, offshore platform, soil-structure interaction, three dimensional, substructure method

1. 結 言

現在、中程度の水深度に対する海洋油田開発のため、**Fig. 1** に示すような再使用可能な重力式鋼製海洋構造物 (Reusable Gravity Platform : RGP) の開発が第3, 4 著者らによって進められているが、本研究はその地震応答性状を究明することを目的としたものである¹⁾。同構造物は、ジャケット部がフレキシブルな構造形式から成り、ジャケットの基底には接地面の大きい一時貯油用のベースタンクを有している。そして同タンクの接地面でそれより上の構造物の重量の支持力をとれるように設計している。なお、ベース・タンクの下に短杭を小数本打設して、過大な地震力によるベースタンクの滑りを防止する安全策も講じている。これらの構造的特徴から、地震地域での当該海洋構造物の耐震設計では、ジャケット部を三次元空間構造物として把握すること、および設置地盤との動的相互作用の程度を明らかにすることが重

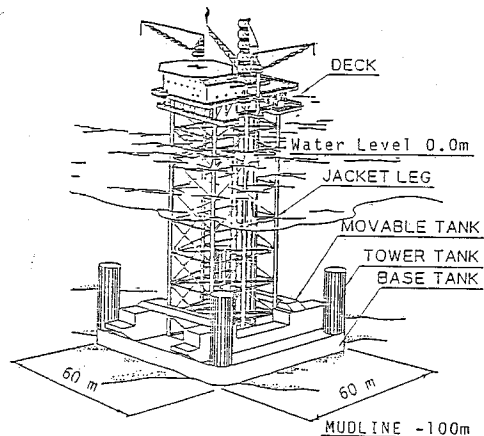


Fig. 1 General view of Offshore Structure (Reusable Offshore Platform).

要となる。本研究では、そのモデル化は三次元空間構造物として行い、ベース・タンク部には剛体仮定とともに、同部の曲げ剛性を考慮した板要素をも導入した。同時に簡易なモデル化も行い、それぞれの解析結果からモデル化の違いによる応答への影響を検討した。動的応答解析の手法としては、動的サブストラクチャ法 (インピーダンス法) を用い、解析プログラムには、三次元地盤

* 正会員 岡山大学教授 工学部
(〒700 岡山市津島中 3-1-1)

** 正会員 東洋建設(株)土木設計部 (元岡山大学大学院生)

*** 正会員 住友金属工業(株)中央技術研究所主任研究員
(〒314-02 茨城県鹿嶋郡波岡大字砂山 16)

**** 住友金属工業(株)エンジニアリング本部主任研究員
(〒100 千代田区大手町 1-1-3)

一構造物系の地震応答解析システム SUBSSIP-A3 D^{2),3)}を拡張して、基礎部の三次元性および、流体力が一般化されたモリソン式⁴⁾から評価できるようにして使用した。ベース・タンクへの動水圧効果は、同タンクが満油時として無視した。

2. 定式化

(1) 上部構造物系 (デッキ-ジャケット)

解析対象海洋構造物 (Fig. 1) は、トップヘビーでフレキシブルな構造形式を有している。同構造物は三次元空間構造物として把握する必要があることから、ジャケット部は三次元はり要素によるモデル化を行った。デッキ部は、複数の板による強固なセル構造になっているので剛体と仮定した。構造物周辺の流体は、当該海洋構造物の地震応答性状の評価に主眼を置いていることから、静水状態と仮定した。地震時における静水中の構造物には、周辺流体との相互作用で慣性力項が卓越するが、修正モリソン式より得られる付加質量として考慮した。また、同相互作用による抗力効果は、厳密には、対象系の支配方程式を非線形運動方程式に導くが、通常は等価減衰定数として評価され、その程度はそれほど大きくないことから、これによる等価減衰定数を構造物のそれに上乘せした形で使用していく。

対象構造物の支配運動方程式を導くに際して、まず、ジャケット部の1部材を忠実に1はり要素としてモデル化し (以後、三次元フレーム系とよぶ)、三次元はり要素によるマトリックス解析法の定式化に従えば、静水中に在る対象海洋構造物の運動方程式は、

$$[M]_{\text{sup}}\{\ddot{X}^t\}_{\text{sup}} + [C]_{\text{sup}}\{\dot{X}\}_{\text{sup}} + [K]_{\text{sup}}\{X\}_{\text{sup}} = \{P_w\} + \{P\}_{\text{sup}} \dots \dots \dots (1)$$

と表わされる。ここに、 $\{\ddot{X}^t\} = \{\ddot{X}_g\} + \{\ddot{X}\}$ で、 $\{\ddot{X}^t\}$ 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、 $\{P\}_{\text{sup}}$ は下部構造系との連成力を表わし、下添字 sup は上部構造物を意味する。なお、質量マトリックス $[M]_{\text{sup}}$ には、節点集中質量マトリックスを用い、並進自由度のみを評価した。減衰マトリックス $[C]_{\text{sup}}$ は、固定支持状態での各固有モード減衰を仮定して作成した。ジャケット部に作用する外力 $\{P_w\}$ は、修正モリソン式より得られる流体力を表し、次のように与えられる⁴⁾。

$$\{P_w\} = \sum_{i=1}^m \{-\rho(K_{M_i}-1)V_i\ddot{X}_i^t\} \dots \dots \dots (2)$$

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

ここに、 ρ は部材周辺の水の密度、 V は部材体積、 K_M は質量力係数、 m は部材数、 \bar{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 (下添字 b) とに分割して表わすと、

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

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

以上のように、解析モデル化として三次元フレーム系を採用する場合、部材振動をも把握でき、海洋構造物の厳密な応答性状を捉えることができる。しかし、自由度数が多くなり、計算機の使用に際して容量とコスト面の問題が生じてくる。一般に、地震力に対する全体構造物の動的解析においては、低次の固有振動モード⁵⁾が、通常、支配的となる。したがって、容易に全体的な挙動を把握するのが目的であれば、簡易スティック・モデル系としてのモデル化が有効となる。このモデル化では、各水平構面を剛体と仮定し、それぞれの構面の運動をその重心節点での自由度 (6 自由度) により表すことができる。つまり、各節点変位を、幾何学的変換マトリックス $[T]$ を介して、重心節点変位で規定すれば、

$$\{X_s\} = [T_s]\{X_s^c\}, \{X_b\} = [T_b]\{X_b^c\} \dots \dots \dots (5)$$

となる。ここに、肩添字 c は各構面の重心節点を指す。式 (4) に、式 (5) を代入し、マトリックスの対称性を保持するために、さらに前から $[T]^T$ を乗ずれば、簡易スティックモデル系の運動方程式が、次式で与えられる。

$$[\bar{M}^c]\{\ddot{X}^c\} + [C^c]\{\dot{X}^c\} + [K^c]\{X^c\} = -[T]^T[\bar{M}]\{\ddot{X}_{g,s}\} + [T]^T\{P\}_{\text{sup}} \dots \dots (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} [\bar{M}^c] &= \begin{bmatrix} T_s & \\ & T_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{M}_{ss} & \bar{M}_{sb} \\ \bar{M}_{bs} & \bar{M}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s \\ T_b \end{bmatrix} \\ [C^c] &= \begin{bmatrix} T_s & \\ & T_b \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s \\ T_b \end{bmatrix} \\ [K^c] &= \begin{bmatrix} T_s & \\ & T_s \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_s \\ T_b \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(2) 地盤-基礎系 (ベース・タンク-地盤)

剛体ベース・タンクとしての解析モデルと、弾性ベース・タンクとしての解析モデルについて、サブストラクチャ法からの定式化をそれぞれ以下に示す。前者は、基礎およびその周辺地盤を軸対称化し、ベース・タンクを剛体として扱った擬似三次元解析モデルである。一方、後者は、ベースタンク部の曲げ剛性を考慮するために、同部を板要素としてモデル化し⁵⁾、その近傍地盤および杭から成る三次元有限要素領域 (3D) と、それを取り囲む軸対称領域 (A3D) に区分してモデル化するもの

である⁹⁾。一般に、矩形断面を有する基礎や非成層地盤の場合、軸対称モデルの適用や厳密なモデル化は困難である。この意味で、地盤-基礎系を上記のようにサブストラクチャ化して、3D と A3D 領域の総合として解析する手法が有効となる。

【剛体ベース・タンク】

ベース・タンクおよびその周辺地盤を軸対称とし、側方仮想境界には粘性境界要素（アイソパラメトリック要素による定式化を採用）を配置し、下方境界には剛基礎仮定を適用する。さらに、ベース・タンク部を剛体と仮定し、その運動を重心節点における6自由度によって評価する（Fig. 4, 5 参照）。

本文の定式化では、まず変位を円筒座標系において周方向にフーリエ級数展開する。

$$\{X\}_{sub} = [G(\theta)] \sum_{n=0}^1 ([H_n^s(\theta)] \{X_n^s\} + [H_n^a(\theta)] \{X_n^a\}) \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $\{X_n^s\}$ 、 $\{X_n^a\}$ はフーリエ振幅であり、肩添字 s は x 軸 ($\theta=0^\circ$) に対して対称、 a は逆対称、 n はフーリエ級数次数を指し、ここでは0次と1次のみを採用している。また、 $[H_n^s(\theta)]$ 、 $[H_n^a(\theta)]$ は周方向への展開を示し、

$$[H_n^s(\theta)] = \text{diag.}(\cos n\theta, -\sin n\theta, \cos n\theta) \dots (8)$$

$$[H_n^a(\theta)] = \text{diag.}(\sin n\theta, \cos n\theta, \sin n\theta)$$

$[G(\theta)]$ は円筒座標から直交座標への変換マトリックスである。式(7)のフーリエ級数展開の下でソリッド要素（アイソパラメトリック要素）による有限要素法の基礎式を導くと、それに対応する剛性、減衰、質量マトリックス $[K]_{sub}$ 、 $[C]_{sub}$ 、および $[M]_{sub}$ を得る。これらより対象領域の運動方程式は、

$$[M]_{sub} \{\ddot{X}\}_{sub} + [C]_{sub} \{\dot{X}\}_{sub} + [K]_{sub} \{X\}_{sub} = \{P\}_{sub} - \{P_b\} \dots\dots\dots (9)$$

と表される。ここに、下添字 sub は下部構造系を指し、 $\{P\}_{sub}$ は上部構造系との連成力、 $\{P_b\}$ は基礎面で規定された地震入力に対応する側方境界上の作用力を表わす。次に、式(9)を振動数領域での支配方程式に変換し、縮合操作から応答自由度をフーチング重心のものに限れば、

$$[\hat{K}_G(\omega)] \{X_G^f\} = \{P_G\} - \{P_G^0(\omega)\} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $[\hat{K}_G(\omega)]$ は下部構造インピーダンスを、 $\{P_G^0(\omega)\}$ は有効入力とよばれ、 $\{P_G\}$ は基礎への作用力、下添字 G は基礎ベース・タンク重心を指す。よって、その運動方程式は次式となる。

$$(-\omega^2 [M_G] + [\hat{K}_G(\omega)]) \{X_G^f\} = \{P\}_{sub} - \{P_G^0(\omega)\} \dots\dots\dots (11)$$

【弾性ベース・タンク】

地盤-基礎系を、ベース・タンク、ベースタンク近傍の地盤-杭系（3D 領域）および周辺の地盤-杭系（A3D

領域）にサブストラクチャ化する（図-4,5 参照）。後者の軸対称領域（A3D）の運動方程式は、上述の定式化に従って得られる。これに縮合操作を行うと、三次元有限要素領域（3D）とのインターフェイス節点 i のみに関する運動方程式が、次のように表される。

$$[\hat{K}_i] \{X_i\} = \{P\}_{A3D} - \{P_i^0\} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $[\hat{K}_i]$ は A3D 領域での地盤-杭系のインピーダンス・マトリックス、 $\{P\}_{A3D}$ は 3D 領域からの断面力、 $\{P_i^0\}$ は A3D 領域からの有効入力を表している。

次に、3D 領域の地盤に対して、三次元アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法の定式化に従って基礎式を導く。この場合、有限要素節点は並進自由度のみを有する。一方、杭は三次元はり要素によりモデル化する。よって、地盤-杭系の動的剛性は、杭の動的剛性の回転自由度を縮合したうえで、地盤の動的剛性に加算される。直交座標系で表した 3D 領域の運動方程式は、したがって、

$$\begin{bmatrix} K_{ee} & K_{eg} & K_{ei} \\ & K_{gg} & K_{gi} \\ \text{Sym} & & K_{ii} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_e \\ X_g \\ X_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_e \\ P_g \\ P_{3D} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

ここに、下添字 i は 3D 領域と A3D 領域のインターフェイス節点、 e は地盤とベース・タンクとのインターフェイス節点、 g はその他の下部構造系節点を示し、 $[K]$ は 3D 領域の動的剛性、 $\{P\}_{3D}$ は A3D 領域からの断面力、 $\{P\}_e$ はベース・タンクからの断面力を表す。式(13)中、A3D 領域とのインターフェイス節点上の変位および力を円筒座標系で表し、それらが周方向にフーリエ級数展開できると仮定すれば、各インターフェイス円周上での力のつり合い式は、次式のフーリエ振幅によって与えられる⁹⁾。

$$\{P\}_{3D} = \sum_j \sum_{n=0}^1 [H_n^s(\theta_j) H_n^a(\theta_j)] \begin{Bmatrix} P_n^s \\ P_n^a \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

さらに、フーリエ振幅に対する変位の適合条件を適用すれば、式(12)と式(13)から、3D 領域と A3D の両領域にわたっての運動方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} K_{ee} & K_{eg} & K_{ei} \\ & K_{gg} & K_{gi} \\ \text{Sym} & & (K_{ii} + \hat{K}_i) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_e \\ X_g \\ X_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_e \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_i^0 \end{Bmatrix} \dots (15)$$

ベース・タンクは、8 節点板曲げ要素により有限要素化し、その動的剛性を求める。ただし、自由度をできるだけ縮小して解析を容易にするため、文献 7) の考え方に従って、面内 (xx 面) 運動は剛体運動のみに従うとして、ベース・タンク重心位置における3自由度（面内並進およびねじれ）によって評価する。これらのベース・タンクの変形状態の下では、板曲げ要素中立面上の任意の位置における変位 $\{d\}$ と、板曲げ要素の節点変位 $\{X^p X^c\}^T$ との関係式は次のように簡略化されて表せる。

$$\begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N \\ C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X^p \\ X^e \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(16)$$

ここに、 $[N]$ は板曲げ要素の内挿関数、 $[C]$ は幾何学的変換マトリックスをそれぞれ表わし、下添字 1 は面内自由度、2 は面外自由度、肩添字 c はベース・タンク重心節点、 p は板曲げ要素節点をそれぞれ示す。式 (15) 中の節点 e に関する変位を、幾何学的に板曲げ要素中立面に変換し、式 (16) の関係を用いれば、変位の適合条件および力のつり合い条件より、ベース・タンク-地盤系の運動方程式が導ける。さらに、上部構造物との連成をはかるため、同部分とのインターフェイス節点に対する運動方程式に変換すれば、

$$[\hat{K}]_{\text{sub}} \{X^i\}_{\text{sub}} = \{P\}_{\text{sub}} - \{P_b^0\} \dots\dots\dots(17)$$

ここに、 $[\hat{K}]_{\text{sub}}$ は上部とのインターフェイス節点において評価した地盤-基礎系のインピーダンス、 $\{P_b^0\}$ は同節点における有効入力を表す。

(3) 対象動力系の支配方程式

上部構造物の運動方程式 (4) あるいは式 (6) を固定支持状態で固有モードに分解して、応答をモード座標でそれぞれの支配方程式から表す。そして地盤-基礎系との連成振動方程式を、動的サブストラクチャ法の適用からそれら両系のインターフェイス節点での断面力のつり合いと変位の適合性を考慮して導く。その結果、運動方程式はいずれの場合も基盤変位に対する相対変位によって、次のように表わされる。

$$\begin{Bmatrix} [\hat{K}_{ss}] & [\hat{K}_{sb}] \\ [\hat{K}_{bs}] & ([\hat{K}_{bb}] + [\hat{K}]_{\text{sub}}) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{X_b\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_{w,s}\} \\ \{P_{w,b}\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \{P^0\} - [\hat{K}]_{\text{sub}} \{X_g\} \end{Bmatrix} \dots(18)$$

ここに、

$$\begin{aligned} [\hat{K}_{ss}] &= -\omega^2 [I] + i\omega [2\xi\omega_i] + [\omega_i^2] \\ [\hat{K}_{sb}] &= -\omega^2 [\Phi]^T [M_{ss}] [\beta] = [K_{bs}]^T \\ [\hat{K}_{bb}] &= -\omega^2 ([\beta]^T [M_{ss}] [\beta] + [M_{bb}]) + [K_{sb}]^T [\beta] \\ &\quad + [K_{bb}] \end{aligned}$$

で、 $[\Phi]$ は上記の固有モードマトリックス、 ω_i と ξ_i は各固有モードの振動数と減衰定数、 $\{q\}$ は固有振動モード応答ベクトル、 $[\beta]$ は上下部構造系のインターフェイスに単位変位を与えたときの上部構造物への変位影響マトリックス、 $[I]$ は単位マトリックス、 $\{P_{w,s}\}$ 、 $\{P_{w,b}\}$ は上部構造物に作用する周辺流体力をそれぞれ表す。

なお、本研究では比較のため、固定支持状態での解析も併せて行う。そのときの運動方程式は、ベース・タンクの重心節点 (入力点) の変位に対する相対変位で定式化することにより、

$$[\hat{K}_{ss}] \{q\} = \{P_{w,s}\} \dots\dots\dots(19)$$

と得られる。

3. 数値解析および考察

[解析モデル]

本研究で解析対象とした重力式鋼製海洋構造物の一般図を Fig. 1 に与えた。同構造物の動的解析にあたっての各構造部分のモデル化を、デッキ部とジャケット部から成る上部構造物に対して Fig. 2 に、ベース・タンク部およびその下の杭、さらにそれらの周辺地盤を含めた下部構造系に対しては Fig. 4 に示す。上部構造物のデッキ部は剛体とし、ジャケット部はパイプ構造の 236 部材から構成される。上部構造物の主軸方向を x 、 y 軸とし、 x 軸が弱主軸、 y 軸が強主軸となっている。下部構造系の地盤は軸対称と仮定し、その諸元と物性定数を Table 2 に示す。ベースタンクのモデル化で剛体仮定をした場合は等価断面の軸対称とし、また曲げ板として剛性を考慮した場合は、Fig. 5 に示すように原形状の中央部をくり抜いた矩形とした。前者の場合、質量と質量回転慣性を原型ベース・タンクと等価なものにし、後者の場合、等価なソリッド板として換算している。

[上部構造物の動特性]

上部構造物を、各部材を要素として三次元フレーム系のマトリックス構造解析の定式化に従い、剛性および質量マトリックス (集中質量) を作成して、これから固有振動解析をしたときの結果を Table 1(a) と Fig. 3(a) に示す。解析対象構造物は、Fig. 2 の挿入図に示すように主軸を採っている。Table 1 には、各固有振動モードの運動性状を明記しておいたが、三次元フレーム系としての 1 次振動モードには x 軸方向 (弱主軸) の基本

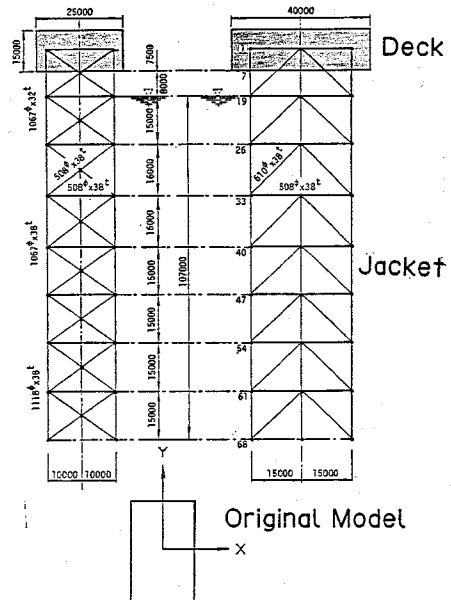


Fig. 2 Model for Analysis

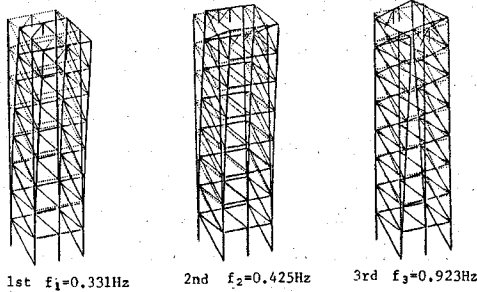
Table 1 Natural Periods and Predominant Modes.

(a) Original Model

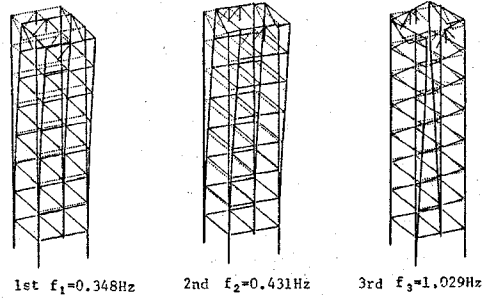
MODES	PERIOD(S)	PREDOMINANT MODE	PARTICIPATION FACTOR		PARTICIPATION RATIO (%)	
			X-INPUT	Y-INPUT	X-INPUT	Y-INPUT
1	3.0683	X-SWAY	2.435x10	2.660x10 ⁻⁴	72.28	0.66
2	2.3843	Y-SWAY	-2.672x10 ⁻²	2.439x10	0.07	56.62
3	1.1145	TORTION	4.832x10 ⁻²	1.595x10 ⁻²	0.14	0.03
4	0.4247	Y-SWAY	2.560x10 ⁻³	-8.645		20.07
5	0.4117	X-SWAY	9.250	3.064x10 ⁻³	27.46	
6	0.3843	LOCAL	-1.123x10 ⁻²	-1.028x10 ⁻²		0.02
7	0.3405	Z-SWAY	-3.608x10 ⁻³	-8.068x10 ⁻³		
8	0.3284	LOCAL	-1.136x10 ⁻⁴	2.302		5.34
9	0.3217	LOCAL	7.198x10 ⁻⁶	-4.511x10 ⁻⁵		
10	0.3145	LOCAL	-1.596x10 ⁻⁶	-1.886		4.38

(b) Simplified Model

MODES	PERIOD(S)	PREDOMINANT MODE	PARTICIPATION FACTOR		PARTICIPATION RATIO (%)	
			X-INPUT	Y-INPUT	X-INPUT	Y-INPUT
1	2.8700	X-SWAY	2.420x10	-2.007	44.51	3.42
2	2.3222	Y-SWAY	2.003	2.427x10	3.68	41.41
3	0.9716	TORTION	4.420x10 ⁻¹	-5.352x10 ⁻¹	0.81	0.91
4	0.3635	X-SWAY>Y-SWAY	7.068	5.083	13.00	8.67
5	0.3799	Y-SWAY>X-SWAY	-6.003	6.618	11.04	11.29
6	0.3652	Z-SWAY>Y-SWAY	9.706x10 ⁻¹	3.941	1.78	6.72
7	0.2203	TORTION	4.790x10 ⁻¹	5.044x10 ⁻¹	0.88	0.88
8	0.1938	Y-SWAY	5.379x10 ⁻¹	3.650	0.99	6.28
9	0.1799	X-SWAY	4.120	-5.182x10 ⁻¹	7.58	0.88
10	0.1435	Y-SWAY	1.636x10 ⁻¹	3.320	0.30	5.66



(a) Original Model



(b) Simplified Model

Fig. 3 Vibration Modes of Superstructure.

振動モードが、2次振動モードにはy軸方向(強主軸)の基本振動モードが現われ、3次振動モードには三次元フレーム系としてのねじれ振動モードがみられる。そして以下、4次振動モードにはx軸方向の2次振動モードが、5次振動モードにはy軸方向の2次振動モードが対応している。また、三次元フレーム系としての解析によって、対象構造物には局所的な部材の振動が高次振動モードにおいて発生することもわかる。なお、Table 1のモード寄与率は、それぞれx方向、y方向に独立して基

盤面入力を与えたときの最初の20次モードまでで計算したときの値である。Table 1(b)、Fig. 3(b)に簡易スティック・モデル(Simplified Model)の解析結果を示したが、三次元フレーム系(Original Model)との対応は低次固有モードにおいてはよい。

[下部構造系の動特性]

ベース・タンクとその周辺地盤の動的相互作用を、まずベース・タンクが軸対称な剛体として、その重心位置における地盤インピーダンス関数(Substructure Impedance Function)と有効入力(Substructure Effective Input)の伝達関数の形で評価した。Fig. 6, 7にこれらを図示する。同図からは、上記の関数が振動数に強く依存して変化する様相がわかる。これはベース・タンクと層状地盤の動的相互作用のためである。

[相互作用系の振動特性]

対象構造物の周辺地盤との相互作用の程度を把握する

Table 2 Soil Dimensions and Properties.

LAYERS NO.	DEPTH (m)	SHEAR VELOCITY (m/s)	UNIT WEIGHT (t/m ³)	POISSON RATIO	THICKNESS (m)	DAMPING (%)
1	3.000	170.0	1.80	0.450	3.00	0.20
2	6.500	170.0	1.80	0.450	3.50	0.20
3	10.000	170.0	1.90	0.450	3.50	0.20
4	15.000	250.0	1.90	0.400	5.00	0.10
5	25.000	250.0	1.90	0.40	10.00	0.10
6	35.000	250.0	1.90	0.40	10.00	0.10
7	45.000	250.0	1.90	0.40	10.00	0.10
8	55.000	250.0	1.90	0.40	10.00	0.10
9	65.000	250.0	1.90	0.40	10.00	0.10

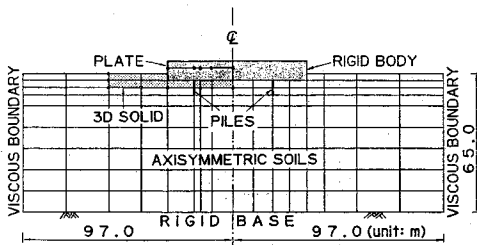


Fig. 4 Soil-Base Tank Model

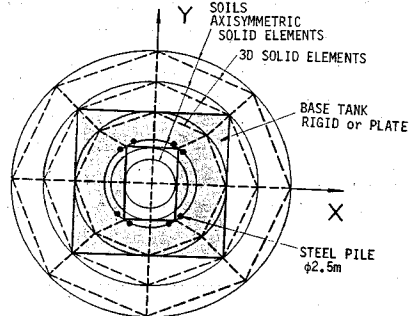


Fig. 5 3D-Plate Model on Axisymmetric Soil.

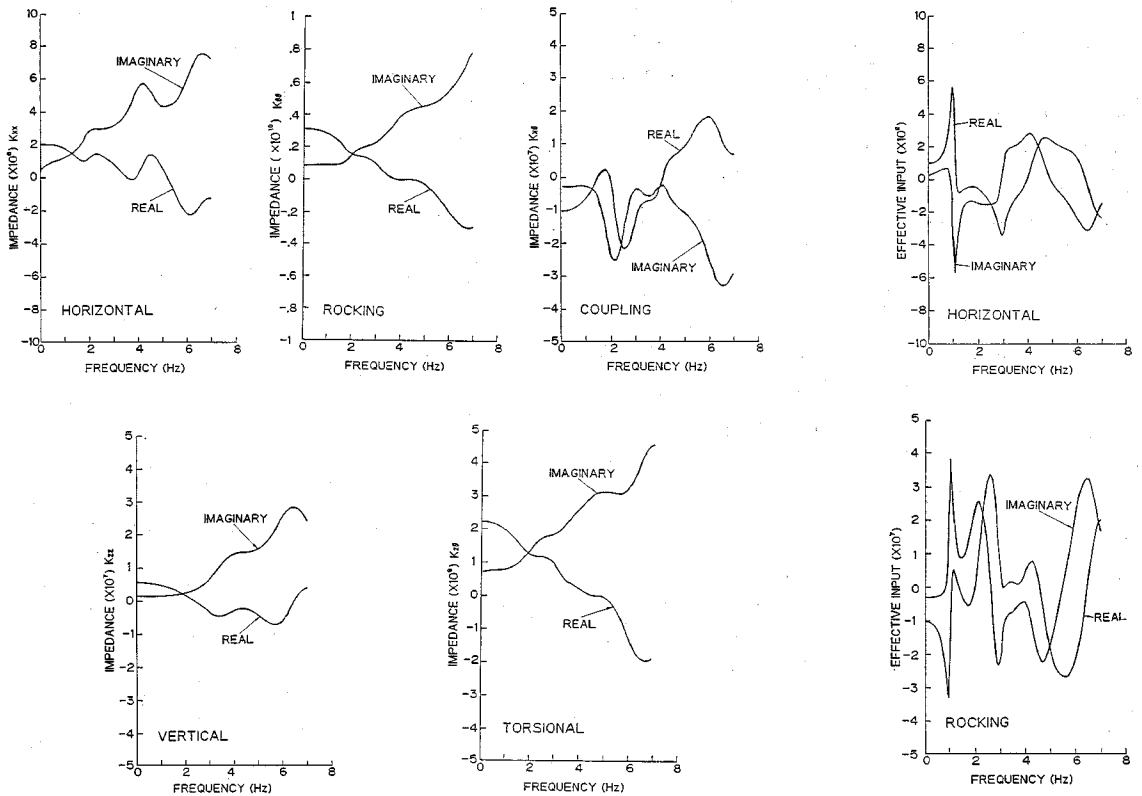


Fig. 6 Substructure Impedance Functions.

Fig. 7 Substructure Effective Input.

ため、基盤面に単位振幅の調和入力を与えたときの上部構造物の応答と、上部構造物が固定支持の状態におけるときの応答を比較する。ただし、後者への入力には、建設地地盤の一次元せん断波としての増幅効果を考慮している。Fig. 8は、デッキ部の振動数応答 (Transmitting Functions) についての比較である。相互作用系に対しては、ベース・タンク部のモデル化で剛体としたときと、

矩形板としたときの応答を描いてある。これらの振動数応答を計算するに際して、ジACKET部と周辺の流体との相互作用からくる抗力効果を等価減衰定数として、上部構造物の固有振動モード減衰定数に上乘せして、都合 $\xi=5\%$ の一定値を各固有振動モードに使用した。固定支持系と相互作用系を比較して、特に 1 Hz の振動数付近で相互作用の影響を受けて前者にはみられない応答が

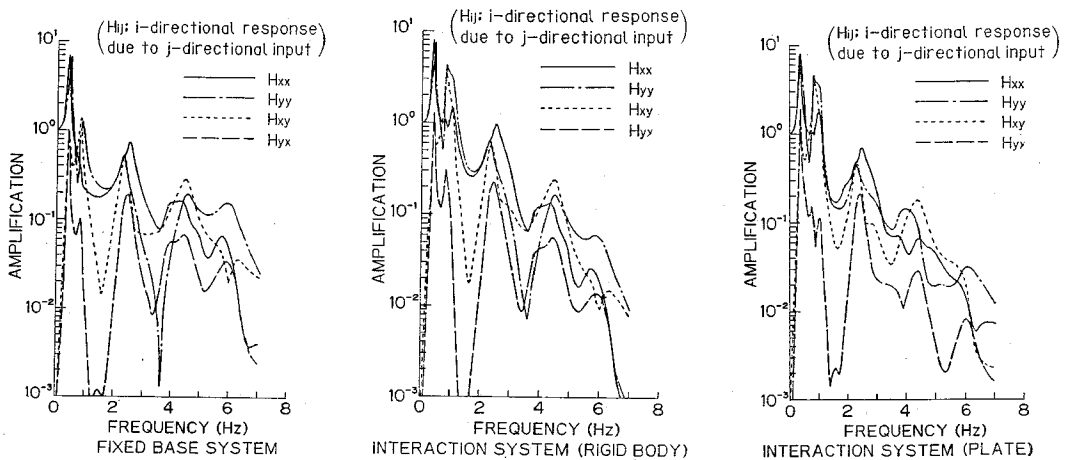


Fig. 8 Transmitting Functions at Deck.

ークが現われている。相互作用系のうちで、ベース・タンク部のモデル化（つまり剛体か弾性体）の差は、デッキ部の応答に関しては、耐震的に主要な振動数領域ではそれほど顕著にはみられないが、弾性ベースタンクの方が応答が若干小さい結果となっている。

〔地震応答〕

過去の強震記録の代表的な2つの波形（短周期型のインペリアル地震、1940年、EL CENTRO, NS成分と、長周期型の十勝沖地震、1968年、八戸、NS成分）を用いて、フーリエ変換法から対象構造物の地震応答シミュレーションを実施した。Fig. 9, 10は応答の最大加速度分布、Fig. 11, 12は最大変位分布を与えている。使用した入力波形は、いずれも最大加速度を100galに調整し、基線修正したものである。

まず、入力波を特定して、ジャケット部のモデル化の差を検討すると、三次元フレーム解析では構造物の断面特性が原因して、x, y方向の入力方向の差が現われている（特に、八戸、NS成分において）。簡易スティック・モデルでは、三次元フレーム解析結果より過大応答値となっているが、入力方向に関して応答の差は鋭敏には現われてこない。

地盤との動的相互作用効果は、相互作用系（SSI）で

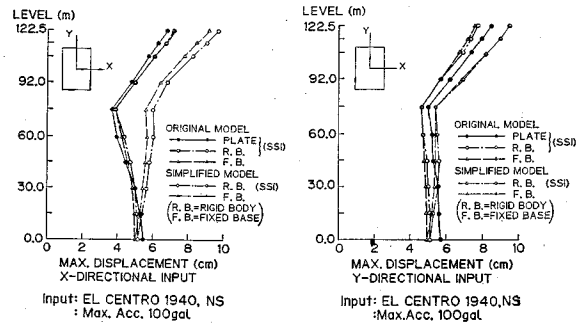


Fig. 11 Maximum Relative Displacement Responses.

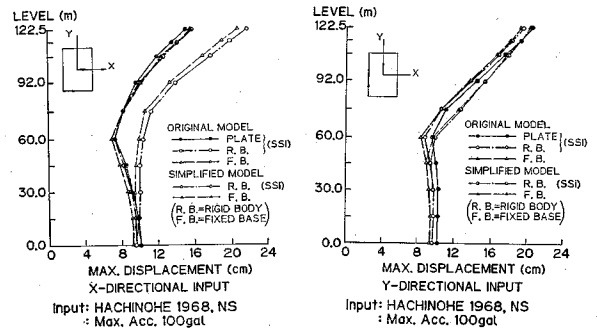


Fig. 12 Maximum Relative Displacement Responses.

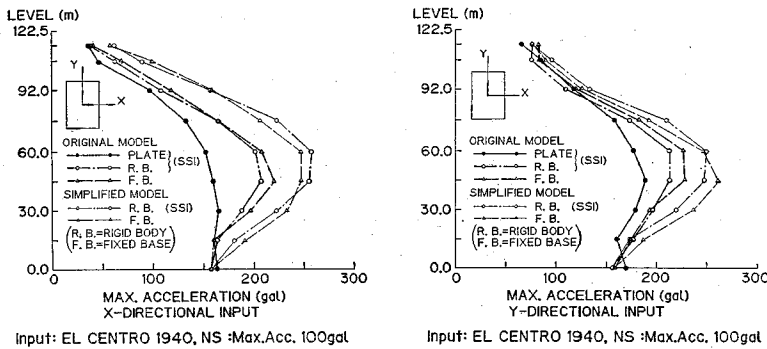


Fig. 9 Maximum Acceleration Responses.

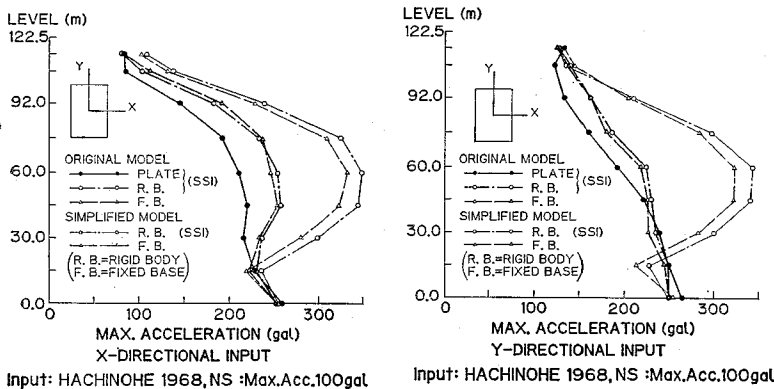


Fig. 10 Maximum Acceleration Responses.

示されるように、ジャケット部の応答を低下させる方向に作用している。弾性ベース・タンクとしてのモデル化で、この事実は明確に理解できる。ベース・タンク部のモデル化の差は、最大加速度分布において顕著に現われ、剛体ベース・タンクと比較して弾性ベース・タンクの場合、ベースタンク部の応答は同程度かあるいは僅か大きく出ているが、ジャケット部においてはかなり減少している。

入力波形の差に注目すると、対象構造物の卓越振動モードが長周期領域に存在し、また八戸、NS記録の方が長周期型の地震波形であるため、EL CENTRO, NSの短周期型の波形より全体的に大きな応答となっている。なお、地盤との相互作用による応答低減効果は、後者の EL CENTRO, NS成分の方に顕著に現われている。

最後に、地震入力方向の構造物の応答に与える影響を調べる。地震入力が構造物の断面に対して、

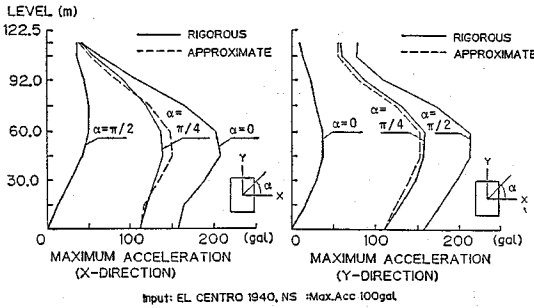


Fig. 13 Maximum Acceleration Responses.

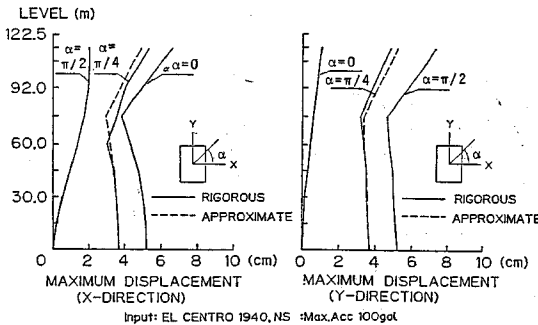


Fig. 14 Maximum Relative Displacement Responses.

主軸方向から任意の角度で入力した場合の最大値応答分布を Fig. 13, 14 に示す。当然のことながら、主軸方向の応答は、その方向に地震入力を行ったときに最大応答になるが、ここでの目的は、主軸方向の最大応答分布を利用して、ベクトルの任意方向の入力に対する主軸方向の最大応答を精度よく評価できる（近似解）かという点に興味がある。同問題は、対象系の三次元動特性と入力波形から最大応答の位相差として捉えることができる。α=π/4 のときの入力状態について検討したところ、厳密解（Rigorous）と近似解（Approximate）はかなりよい一致を与えていることがわかる。

4. 結 論

本研究は、新形式の油田開発用の重力式鋼製海洋構造物、RGP の合理的耐震設計のための基礎データを得るため、ケース・スタディーとしての地震応答解析を実施したものであり、解析の主眼点を

- ① 上部構造物（デッキ-ジャケット部）のモデル化の精度
- ② 地盤と当該構造物の動的相互作用効果
- ③ 上記の相互作用におけるベース・タンク部の剛性の影響
- ④ 入力地震波の差
- ⑤ 地震の任意方向入力の評価

に置き、これらの各項目による構造物の応答への影響を

定量的に検討した。その結果、以下の重要事項が判明できた。

(1) 当該構造物のグローバルな挙動は、各主軸方向の低次振動モードで支配されるとともに、三次元としてのねじれ振動も考慮する必要がある。全体的な挙動の概略を把握するのであれば、簡易モデル化（スティック・モデル）をジャケット部に採用できる。ただし、これは過大応答を与えるので注意を要する。また、高振動数領域では部材振動が現われてくる可能性がある。

(2) 地盤との相互作用は、上部構造物の加速度応答を固定支持時より低下させること、その際、ベース・タンク部のモデル化で同剛性を考慮する方が、剛体仮定するよりもさらに応答の低下をきたす。つまり、解析精度を上げることで当該構造物の安全設計ができることを示している。

(3) 入力地震波の波形特性は、応答に顕著に現われる。特に、長周期型の地震では当該構造物がフレキシブルであるため応答が増加する。

(4) 任意方向からの地震波の入力に対しては、構造物の断面の直交する 2 つの主軸方向の応答を計算しておけば、これから容易に最大応答を精度よく求めることができる。

参 考 文 献

- 1) Takemiya, H., Goda, K., Iida, T. and Nakazato, T.: Soil-Structure Interaction of Gravity-type Steel Offshore Structure for Earthquakes, Procs. of 5th Int. Symp. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 1, Tokyo, pp. 663~670, April 1986.
- 2) Takemiya, H.: Three-Dimensional Seismic Analysis for Soil-Foundation-Superstructure Based on Dynamic Substructure Method, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 2, No. 1, pp. 139s~149s, April 1985.
- 3) Takemiya, H.: Ring-Pile Analysis for a Group Pile Foundation Subjected to Base Motion, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 3, No. 1, pp. 195s~202s, April, 1986.
- 4) Penzien, J. and Tseng, S.: Three-dimensional Dynamic Analysis of Fixed Offshore Platforms, Ed. by O.C. Zienkiewicz et al., Numerical Methods in Offshore Engineering, John Wiley, Chapt. 7, 1978.
- 5) Rock, T. and Hilton, E.: Free Vibration and Transient Response of Thick and Thin Plates Using the Finite Element Method, Int. J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, pp. 51~63, 1974.
- 6) 竹宮・合田・平松: 根入れ基礎構造物の3次元動的解析, 土木学会第41回年次学術講演会, 1-437, 昭和61年11月.
- 7) Aboul-Ella, F. and Novak, M.: Dynamic Response of Pile-Supported Frame Foundation, J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 106, No. EM 6, pp. 1215~1232, Dec. 1980.