

I - A 222

海震時における弾性浮体構造物の解析

東海大学大学院 学生員 ○内海 秀幸
東海大学海洋学部 正 員 川上 哲太郎

1. はじめに

現在, 超大型浮体構造物の建設が実施段階にあり¹⁾, 潮流, 波浪だけでなく海震時における浮体運動を把握するための解析手法が求められている. 超大型浮体構造物の構造系は隔壁により仕切られた空洞部を有する箱型ブロックを多数接合することにより構成されるため, その解析には中空構造に促した浮体構造物モデルの設定が必要であると思われる.

著者らは, これまで海底地盤-流体-浮体構造物からなる波動伝播経路ならびに各領域の相互作用を直接的にモデル化した上での解析手法²⁾を提案しており, 本報告ではその手法をもとに, 浮体構造物に空洞を有する弾性浮体構造物モデル(二隔壁ロング構造)を設定し, 海震時における浮体構造物の変位, 応力, 圧力の数値計算例を示す.

2. 解析モデルの設定

解析対象とする弾性浮体構造物-流体-弾性海底地盤系モデルをFig. 1に示す. ここで, 領域I, I⁺, I⁻は流体領域であり, 非圧縮性の完全流体とする. 領域IIは浮体構造物による波の散乱が顕著な領域, I⁺とI⁻は無遠慮方を含む一定水深領域である. 領域IIIの浮体構造物は均質・等方・線形な弾性構造物である. また, 領域IIIの海底地盤も弾性体とする. 外力として地震を想定した海底地盤内を無限遠方より伝播する弾性波動を考える. Fig. 1中に示したS₁ ~ S₆は各々の領域の境界を表し, 以下のように定義する.

- S₁; 流体領域における自由表面境界.
- S₂; 領域Iと領域I⁻における仮想境界.
- S₃; 領域Iと領域I⁺における仮想境界.
- S₄; 流体と半無限海底地盤とが接する共通の境界.
- S₅; 浮体構造物の自由表面境界.
- S₅[']; 浮体構造物の内部空洞境界(自由表面境界).
- S₆; 浮体構造物と流体とが接する共通の境界.

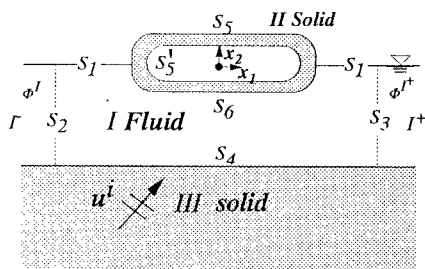


Fig. 1 Floating structure-fluid-seabed coupling model

3. 基礎式と連続条件

浮体式の構造物が海に浮かんでいる状況を想定する. 本解析では海底地盤と浮体式構造物を弾性体, 流体部分を非圧縮非粘性の完全流体と仮定した. 流体領域および海底地盤・弾性浮体領域の基礎式は定常状態においてそれぞれ以下のようである.

$$\Delta\Phi = 0 \quad (1)$$

$$\mu\Delta\mathbf{u} + (\lambda + \mu)\nabla\nabla\cdot\mathbf{u} + \rho\omega^2\mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

上式において Φ は速度ポテンシャル, $\mathbf{u}$ は変位, ρ は密度, λ と μ はラメ定数である. また ω は角振動数である.

次に弾性体と流体が接し合う境界における連続条件を考える. まず流体圧 p は速度ポテンシャル Φ を用いて次式で表される.

$$p = i\rho\omega\Phi \quad (3)$$

いま, 流体と弾性体に対する力学的連続条件は上記流体圧 p と表面力 $\mathbf{t}$ を用いて次のように書ける.

$$\mathbf{t} = -n\mathbf{p} \quad (4)$$

ここで, $\mathbf{n}$ は弾性体境界上における単位外向き法線ベクトルである. さらに, 運動学的連続条件として弾性体の境界における変位速度と, その点における水粒子速度の連続性より次式が成立する.

$$-i\omega\mathbf{u}\cdot\mathbf{n} = \mathbf{v}\cdot\mathbf{n} \quad (5)$$

ここで, $\mathbf{v}$ は流体の速度ベクトルである. また数値計算上, 流体領域は有限な長さになり打ち切る必要があるため弾性浮体領域から十分離れたところで仮想境界(S_2, S_3)を設定した(Fig. 1参照). 仮想境界上において流体領域内の速度ポテンシャル Φ^I と仮想境界以遠の領域における Φ^{I*} には次のような連続条件が成立する.

$$\Phi^{I*} = \Phi^I, \quad \frac{\partial\Phi^{I*}}{\partial n} = \frac{\partial\Phi^I}{\partial n} \quad (6)$$

ここで, 仮想境界以遠の水深が一定であれば Φ^{I*} は解析的に決定できる. また, 流体領域の自由表面における境界条件は次のようになる.

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x_2} = \frac{\omega^2}{g}\Phi \quad (7)$$

なお, 境界 S_5 , S_5 の浮体構造物における境界条件は以下のようである.

$$\mathbf{t} = 0 \quad (8)$$

4. 弾性浮体の内部応力

弾性浮体領域における内部応力は弾性浮体境界上において得られた変位と表面力(海底地盤-流体-浮体構造物の連成系モデルに対する境界値問題を境界要素法により数値的に解いて求められる)を用いて次式のように積分表

BEM, Interaction problems, Seaquake, Flexible floating structure

静岡県清水市折戸3-20-1東海大学海洋学部海洋土木工学科 TEL(0543)34-0411 FAX(0543)34-9768

現³⁾される。

$$\tau_{ij}(x) = \int_S P_{ij}^k(x, y) t_k(y) dS_y - \int_S Q_{ij}^k(x, y) u_k(y) dS_y \quad (9)$$

ここで、積分核である P, Q は動弾性波動場の基本解

$$U_i^k = \frac{i}{4\mu} [H_0^{(1)}(kTr) \delta_{ki} + \frac{1}{k_T^2} \frac{\partial^2}{\partial x_k \partial x_i} \{H_0^{(1)}(kTr) - H_0^{(1)}(k_L r)\}] \quad (10)$$

を用いて

$$P_{ij}^k = \lambda U_{m,m}^k \delta_{ij} + \mu U_{i,j}^k + \mu U_{j,i}^k \quad (11)$$

$$Q_{ij}^k = (\lambda P_{m,m}^{kl} \delta_{ij} + \mu P_{i,j}^{kl} + \mu P_{j,i}^{kl}) n^l \quad (12)$$

の様に表される²⁾。

5. 数値計算法と計算例

海底地盤—流体—浮体構造物連成系に対する境界積分方程式を数値的に評価するため、まず、各領域それぞれの基礎式を境界積分方程式に変換し、2次元アイソパラメトリク要素を用いて離散化を行った。さらに、連続条件式(4)~(6)と境界条件(7)を導入することにより最終的に次式で示す浮体構造物—流体—海底地盤系に対する境界積分方程式系が得られる。

$$\begin{pmatrix} H_1 & G_1^* & H_2^* & G_2^* & H_3^* & G_3^* & H_4 & G_4^* & 0 & -G_6^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -U_6^* & 0 & T_5 & T_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -S_4^* & 0 & D_4 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_6 \\ u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

上式において、添字1~6は、Fig. 1に示す境界 $S_1 \sim S_6$ に対応していることを表す。また、添字*aは流体領域における自由表面の境界条件、添字*cは式(6)の連続条件、添字*iは式(4)(5)の連続条件が各々導入されていることを表す。本解析では数値計算例としてFig. 2に示すような二隔壁ロング構造の弾性浮体モデルに対して、地震外力として海底地盤の鉛直下方より伝わってくる弾性波（P波）を考えた。各領域の物性値は海底地盤を砂質地盤と想定して $\nu = 0.3$, $\rho = 2.0(t/m^3)$, $\mu = 1.96 \times 10^5(kN/m^2)$ とした。浮遊式構造物は $\nu = 0.3$, $\rho = 0.5(t/m^3)$, $\mu = 2.45 \times 10^5(kN/m^2)$ とし、この浮体の剛性に関しては実機の浅喫水超大型浮遊式構造物の $EI = 5.1 \times 10^9(kNm^2)$ との相似性を考慮して決定している。数値計算例としてFig. 3に無次元化入射

波波数 $dk_T = 0.29$ における浮体構造物の変位(a)、浮体構造物底面での動水圧(b)ならびに浮体構造物内部での主応力(C)の分布状態をそれぞれ示す。図より変位分布は構造部底面の隔壁間において局所的に大きな変位が発生している。動水圧の分布は一般的に鉛直方向への変位量が多い構造底面側方部分において増加(正圧:compression)するものと予測されるが、本解析では鉛直方向への変位量が多いその部分において負圧(tension)を示している。これは浮体構造物の運動においては、その慣性が卓越していることを示唆しているものと考えられる。また、主応力分布は隔壁においてその集中が表れている。

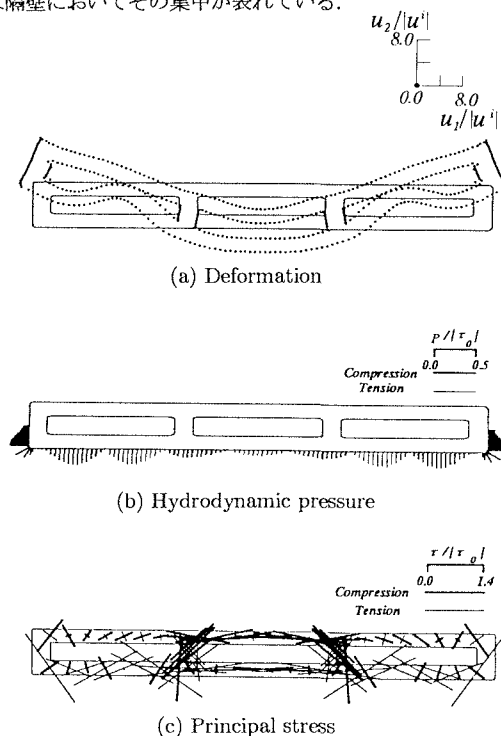


Fig. 3 Response for floating structure (P-wave incidence, $dk_T=0.395$)

参考文献

- 1) (社)日本造船学会, 海洋工学委員会性能部会編: 超大型浮体構造物, 成山堂書店
- 2) 内海秀幸 他: 弾性浮体構造物-流体-海底地盤系の動的相互作用問題の解析, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp.375-382, 1998.
- 3) 内海秀幸 他: 多孔質弾性地盤内の動的応力に及ぼす間隙率の影響, 境界要素法論文集, 13巻, pp.137-142, 1996.

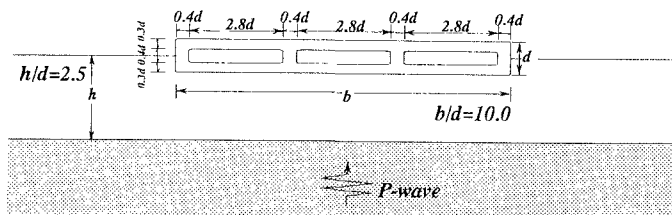


Fig. 2 Numerical model for Floating structure-fluid-seabed system