浮遊式構造物の動的応答に関する一解析手法の開発

東海大学大学院　学生員　○白川　英輝
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　哲太朗
東海大学海洋学部　正　員　北原　道弘

1. はじめに

近年，海洋空間において空港などの超大型浮体式構造物の建設が望まれており，現在，実機を意識したモデルでの実験が進められている．これまで一般的に浮体式構造物は地震時の影響は少ないと考えられていたが，実際に地震に遭遇した船舶の中には損害を受けた例もあり[1]，必ずしも免震的であるとはいえないことが指摘されている[2]．そこで，本研究では海底地盤－流体－浮体式構造物の連成系モデルにおいて，特に浮体式構造物の地震時における弾性応答に着目した解析手法と一解析例を示す．

2. 基礎式と連続条件

Fig. 1に示すように，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．

$$\Delta\Phi = 0 \tag{1}$$

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

上式においてΦは速度ポテンシャル，$\mathbf{u}$は変位，ρ, μは密度とせん断剛性である．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．

$$p = i\rho_w\omega\Phi \tag{3}$$

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．

$$\mathbf{t} = -\mathbf{n}p \tag{4}$$

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．

$$-i\omega\mathbf{u}\cdot\mathbf{n} = \mathbf{v}\cdot\mathbf{n} \tag{5}$$

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打ち切る必要があるため弾性浮体領域から充分離れたところで仮想境界を設定した（Fig. 1参照）．

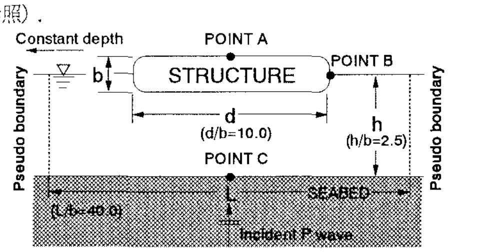

Fig. 1 Numerical model

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．

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

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．なお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．

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x_2} = \frac{\omega^2}{g}\Phi \tag{7}$$

3. 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，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海底地盤－流体－浮体構造物連成系に対する連立一次方程式を構築した．本解析における一連の数値計算手法はこれまで流体－構造物基礎－海底地盤系の動的相互作用問題に対する研究[(3)(4)]を応用したものである．

本解析ではFig. 1に示すような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．

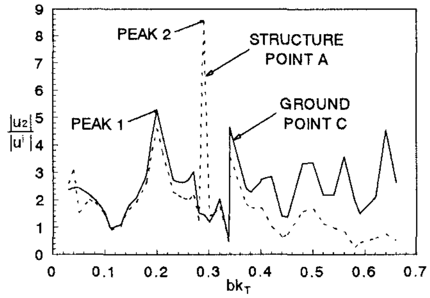

Fig. 2 Response curves at point A and C

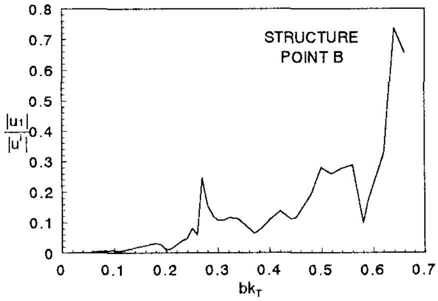

Fig. 3 Response curve at point B

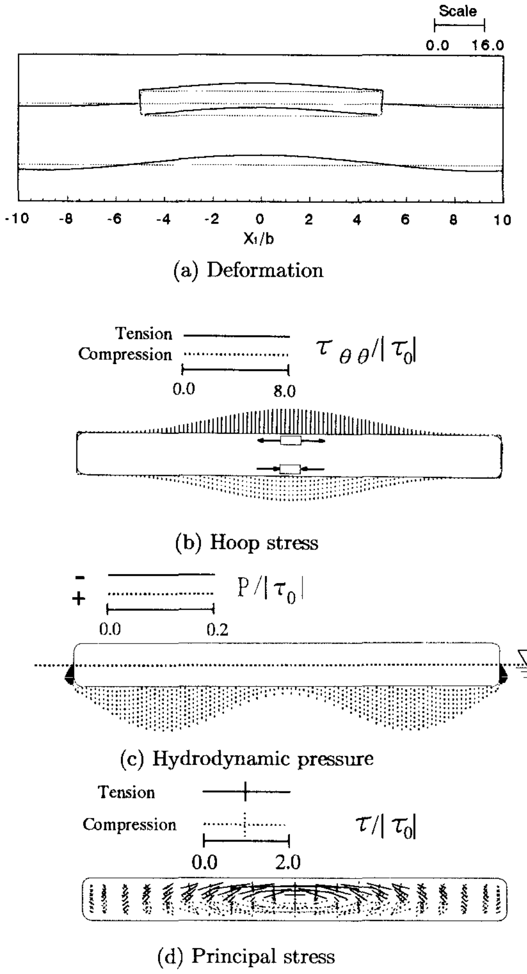

Fig. 4 P-wave incidenc at peak 1(Fig.1), Real part ($bk_T = 0.2, bk_L = 0.107$)

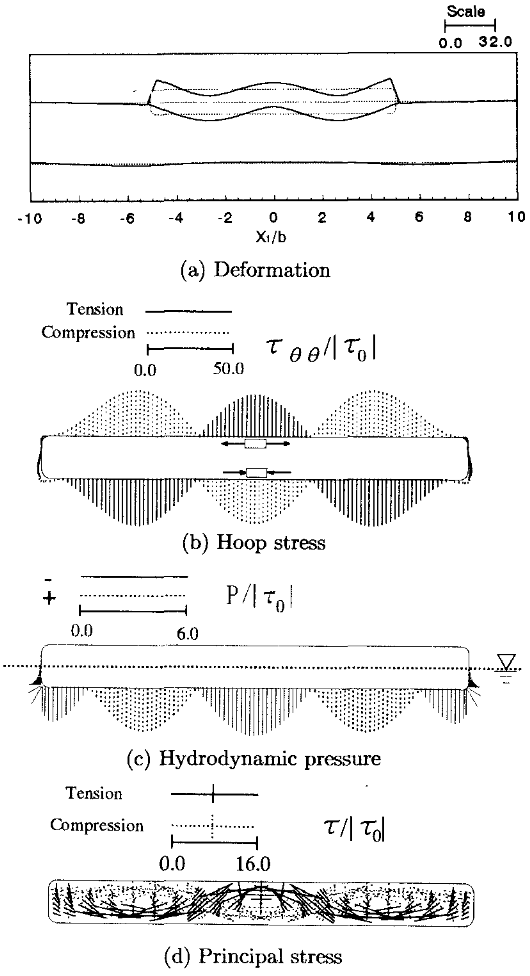

Fig. 5 P-wave incidenc at peak 2(Fig.2), Real part ($bk_T = 0.29, bk_L = 0.155$)

また，各領域の物性値は海底地盤を砂質地盤と想定して$\nu = 0.3, \rho = 2.0(t/m^3), \mu = 1.96\times10^5(kN/m^2)$とおいた．浮遊式構造物は$\nu = 0.2, \rho = 0.5(t/m^3), \mu = 2.45\times10^5(kN/m^2)$とし，浮体の剛性は２次元の解析を行うため，実機の浅喫水超大型浮遊式構造物の$EI = 5.1\times10^9(kNm^2)$との相似性を考慮して決定した．

Fig.2に無次元化入射波波数bk_Tに対するPOINT AおよびPOINT C，Fig.3では構造物側面中央POINT Bにおける応答倍率をそれぞれ示す（Fig. 1参照）．ここで，応答倍率はFig.2では鉛直方向変位$\mathbf{u_2}$と入射波振幅$\mathbf{u^i}$との絶対値の比$|\mathbf{u_2}|/|\mathbf{u^i}|$，Fig.3では水平方向変位を考え$|\mathbf{u_1}|/|\mathbf{u^i}|$と定義している．Fig.4とFig.5に応答曲線(Fig.2)がピーク値を示す無次元化入射波数$bk_T = 0.2$(peak 1)と$bk_T = 0.29$(peak 2)での変位(a)，Hoop stress(b)，動水圧(c)，弾性浮体内部での主応力の分布状態(d)をに示す．

図中，Hoop stressと主応力分布状態において実線は引張り，点線は圧縮，動水圧において実線は負圧，点線は正圧を表している．peak 1では浮体式構造物と海底地盤が追随した変形を示しいるのに対し，peak 2ではそのような変形状態は見られない．また応力および圧力状態は浮体式構造物の変形を示唆する状態となっている．

参考文献

1) 松岡一祥：浮遊式構造物の免震性，日本造船学会誌，第706, pp.12-18, 1988.
2) (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
3) 川上哲太朗　他：地盤－構造物－流体系における動的相互作用問題への積分方程式法の応用，境界要素法論文集，3巻，pp.191-196, 1985.
4) 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.