I-178　積分方程式法による地盤―構造物―流体系の動的応答解析

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　　重力式海洋構造物など海底地盤に設置された構造物の地震動あるいは波浪による動的相互作用問題の解明は、工学上重要な課題の一つである。

著者らはこれまで、浮遊式海洋構造物、あるいは海底地盤を剛体と仮定した重力式海洋構造物と流体の動的応答解析に、積分方程式法を適用し、その有用性を示してきた[1]。本研究では、海底地盤をも構造物とは異質な弾性体として解析に取り入れ、地盤―構造物―流体系における動的応答解析に積分方程式法を適用したものである。

2．解析法　　解析対象とする領域をFig. 1のように定義する。領域Ⅲの海底地盤は、等方均質な半無限弾性体であり、領域Ⅱの構造物は、海底地盤とは異質な弾性体である。また、領域Ⅰ，Ⅰ$^+$，Ⅰ$^-$の流体は、非圧縮性完全流体であると仮定する。

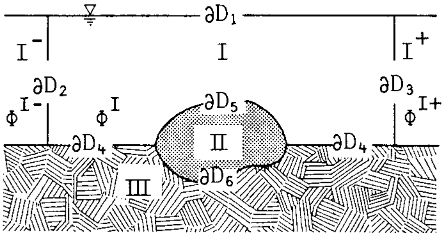

Fig. 1　Soil-structure-fluid coupling model

各領域に対する基礎式は、弾性体においては変位ベクトル$\mathbf{u}$を用いて、Navier-Cauchy の式、流体については速度ポテンシャルΦを用いて、Laplace 方程式で表される。

次に、各領域に対する積分表現を示す。本解析法では、Green 公式を用いて境界積分方程式への変換を行った。領域Ⅱ，Ⅲの境界上の変位に関する積分表現および、領域Ⅰの境界上の速度ポテンシャルに関する積分表現は、各々次のようになる。

$$\mathbf{C}_d^+\mathbf{u}_G(\mathbf{x})=\mathbf{u}^i(\mathbf{x})+\int_{\partial D}\mathbf{U}(\mathbf{x},\mathbf{y};\omega)\cdot\{\mathbf{T}^{n_y}\mathbf{u}_G(\mathbf{y})\}dS_y-\int_{\partial D}\{\mathbf{T}^{n_y}\mathbf{U}(\mathbf{x},\mathbf{y};\omega)\}\cdot\mathbf{u}_G(\mathbf{y})dS_y \qquad \mathbf{x}\in\partial D_4\cup\partial D_6 \quad (1)$$

$$\mathbf{C}_d^+\mathbf{u}_S(\mathbf{x})=\int_{\partial D}\mathbf{U}(\mathbf{x},\mathbf{y};\omega)\cdot\{\mathbf{T}^{n_y}\mathbf{u}_S(\mathbf{y})\}dS_y-\int_{\partial D}\{\mathbf{T}^{n_y}\mathbf{U}(\mathbf{x},\mathbf{y};\omega)\}\cdot\mathbf{u}_S(\mathbf{y})dS_y \qquad \mathbf{x}\in\partial D_5\cup\partial D_6 \quad (2)$$

$$C_d^+\Phi(\mathbf{x})=\int_{\partial D}\{G(\mathbf{x},\mathbf{y})(\partial\Phi(\mathbf{y})/\partial n)\}dS_y-\int_{\partial D}\{(\partial G(\mathbf{x},\mathbf{y})/\partial n)\Phi(\mathbf{y})\}dS_y \qquad \mathbf{x}\in\partial D_1\cup\partial D_2\cup\partial D_3\cup\partial D_4\cup\partial D_5 \quad (3)$$

ここに、$\mathbf{U}$，Gは基本解を表し、$\mathbf{u}^i(\mathbf{x})$は入射波、$\mathbf{C}_d^+$，C_d^+は二重層ポテンシャルのfree term の係数である。添字G,S はそれぞれ地盤、構造物に関係していることを示す。基本解$\mathbf{U}$，Gは次のようになる。

$$\mathbf{U}=\frac{i}{4\mu}\left[H_0^{(1)}(k_Tr)\mathbf{1}+\frac{1}{k_T^2}\nabla\nabla\left\{H_0^{(1)}(k_Tr)-H_0^{(1)}(k_Lr)\right\}\right] \quad (4) \qquad G=\frac{1}{2\pi}\log\frac{1}{r} \quad (5)$$

ここで、$r=|\mathbf{x}-\mathbf{y}|$、$k_T$は横波の波数、$k_L$は縦波の波数、$H_0^{(1)}(\cdot)$は第１種０次ハンケル関数である。地盤、構造物、流体の動的相互作用問題を解析するためには、各領域の接続を行わなければならない。本解析法では、次式で示されるような連続条件を用いることにより、領域の接続を行った。

$$\mathbf{t}_{G(S)}=\mathbf{n}i\rho\omega\Phi \quad (6.a,(7.a)), \qquad -i\omega\mathbf{u}_{G(S)}\cdot\mathbf{n}=-(\nabla\Phi)\cdot\mathbf{n} \quad (6.b,(7.b)) \qquad \text{on } \partial D_4(\partial D_5)$$

$$\mathbf{u}_G=\mathbf{u}_S \quad (8.a), \qquad \mathbf{t}_G=-\mathbf{t}_S \quad (8.b), \qquad \text{on } \partial D_6$$

（$\mathbf{t}$：表面力，$\mathbf{n}$：外向き単位法線ベクトル）

積分表現(1),(2),(3) 式および連続条件(6.a) ～(8.b) 式より得られる境界積分方程式系を所要の境界条件のもとで解くことにより、境界上の変位、表面力および速度ポテンシャルが求められる。

3．数値解析例　　Fig. 2は、構造物と海底地盤の剪断弾性係数の比を$\mu_S/\mu_G=4.0$として、$ak_T=1.0$（a:構造物の幅）のＰ波を入射角$\theta=0°$、すなわち真下より入射させた場合の構造物、海底地盤の変位および地盤のhoop stress(τ_{11})を示したものである。構造物の方が地盤に比べて剛いことから、構造物はほとんど剛体的な変形を示している。また、地盤のhoop stress を見てみると構造物の角点付近において応力集中域が生じていることがわかる。Fig. 3に$\mu_S/\mu_G=0.25$，$ak_T=1.0$，$\theta=0°$でＳ波を入射させた場合を示す。これより、構造物がねじれ変形を起こしているのがわかる。

参考文献1)Kawakami,T. & Kitahara,M.(1986)Analysis of Structure-Fluid Dynamic Interaction Problems by Boundary Integral Equation Methods,Boundary Elements Ⅷ,Vol. Ⅱ,PP.515-524,Springer-Verlag.

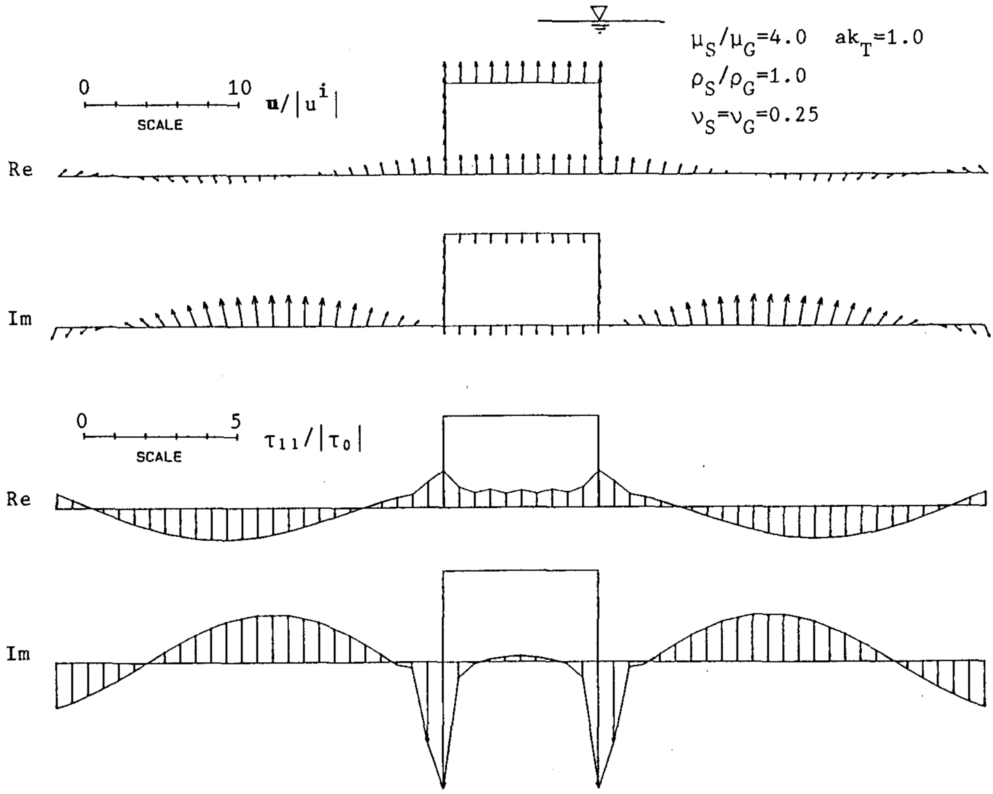

Fig. 2 Deformations and hoop stresses for P-wave incidence

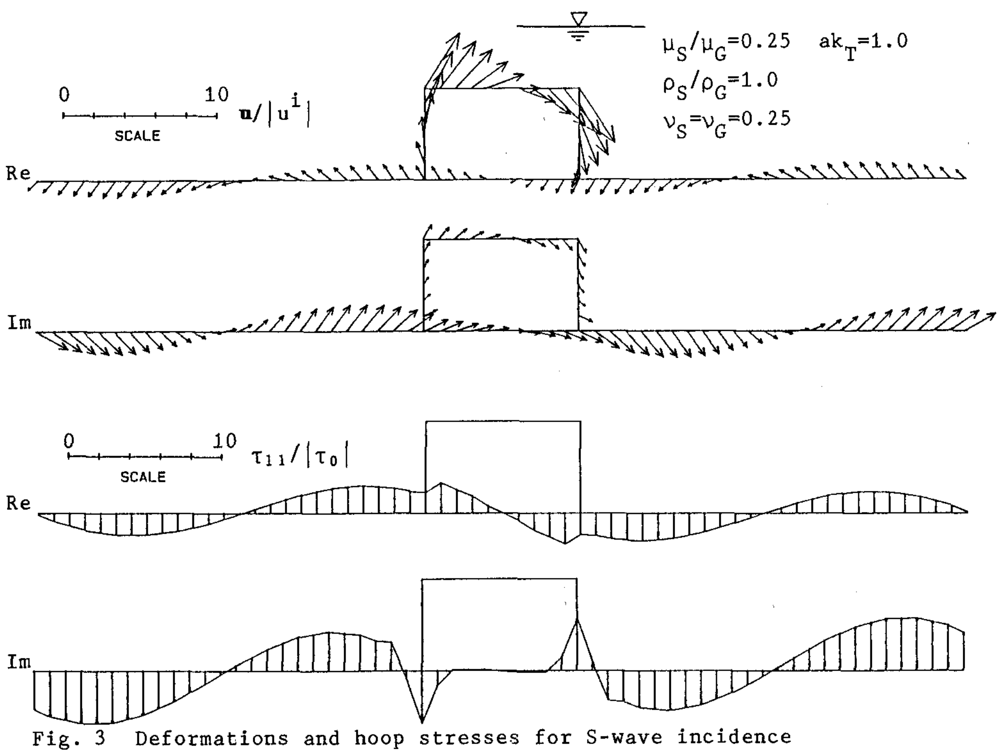

Fig. 3 Deformations and hoop stresses for S-wave incidence