底泥による波浪の伝播変形

名古屋工業大学　学生員　猪垣　智靖
名古屋工業大学　学生員　山下雄一郎
名古屋工業大学　正会員　喜岡　渉

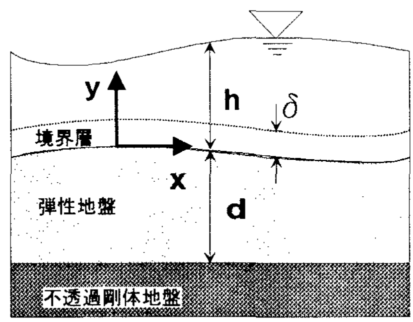
1．はじめに

波浪による海底地盤の応答や液状化についてはすでに多くの研究があり，地盤内の間隙水圧や有効応力などの応答特性が次第に明らかにされつつある．しかしながら，従来の研究のほとんどは波は地盤の応答に対して無関係としてとり扱ったものであり，波浪と海底地盤の相互干渉を取り扱ったものは少ない．底泥のような柔らかな海底地盤については相互干渉の影響は無視できないほど大きく，底泥内で液状化（mud fluidization）がおよぶ深さも入射波高に強く依存する（Foda，1993）ことから，微小振幅波を仮定しても底泥との相互干渉は非線形的なものになる．本研究は，Foda（1993）と同様に底泥を粘弾性体とみなし，２層混合体理論を用いて波浪と底泥の干渉現象を調べようとするものである．

2．基礎方程式

図－１に示すように座標系をとり，流体場については渦なし流れを仮定し，薄い境界層δを介して厚さdの弾性地盤を考え，その下は剛な不透過層とする．入射波を$\eta = a\exp\{i(kx-\omega t)\}$とすると，$z>0$における速度ポテンシャルは$\Phi^+ = \phi^+\exp\{i(kx-\omega t)\}$，$z<0$においては$\Phi^- = \phi^-\exp\{i(kx-\omega t)\}$と表せる．地盤内$z<0$の土粒子速度は次のせん断弾性波方程式（Kelvin方程式）を満たす関数$\Psi = \psi\exp\{i(kx-\omega t)\}$をもちいて記述する．

$$C_S{}^2\nabla^2\Psi = \partial^2\Psi/\partial t^2 \qquad (1)$$



図－１　座標系と記号の定義

ただし，C_Sはせん断波の伝播速度で，せん断弾性係数G，地盤の密度ρを用いて$C_S = \sqrt{G/\rho}$で与えられる．このとき，弾性地盤内の水平および鉛直方向の速度はそれぞれ，$u = \partial\Phi^-/\partial x + \partial\Psi/\partial z$，$w = \partial\Phi^-/\partial z - \partial\Psi/\partial x$と表される．粘性の影響は，地盤境界のごく近傍$\delta$に限られるので$\delta$内で境界層近似を行い，その流速成分$U_{layer} = U\exp\{i(kx-\omega t)\}$とその中の$U$は次式で与えられる．

$$U = U_0\exp\{(-1+i)\sqrt{\omega/2\upsilon}\,z\} \qquad (2)$$

弾性地盤境界$z=0$における境界条件は，鉛直および水平方向流速式，（線形化された）圧力式，およびせん断応力式からそれぞれつぎのように表される．

$$\partial\Phi^+/\partial z = \partial\Phi^-/\partial z - \partial\Psi/\partial x \qquad (3)$$

$$\partial\Phi^+/\partial x + U_{layer} = \partial\Phi^-/\partial x + \partial\Psi/\partial z \qquad (4)$$

$$\rho\partial^2\Phi^+/\partial t^2 = 2G\partial w/\partial z + \rho\partial^2\Phi^-/\partial t^2 \qquad (5)$$

$$(\partial/\partial t)(\rho\upsilon\partial U_{layer}/\partial z) = G(\partial w/\partial x + \partial u/\partial z) \qquad (6)$$

上式(3)から(6)は無限厚の粘弾性体を扱ったFoda（1993)の境界条件式と同一のものであるが，ここでは深さdの有限地盤を考えているので，波の境界条件式が課せられる．

$$u = 0,\quad w = 0 \qquad (z = -d) \qquad (7)$$

3．解析解

3．解析解

速度ポテンシャルΦ^+，Φ^-およびshear function Ψの解は水面波の波数をk，$S=\sqrt{\rho\omega^2/G}$とし，$m=\sqrt{k^2-S^2}$とするとそれぞれ次のようにおける．

$$\phi^+ = A\exp(kz)+B\exp(-kz) \tag{8}$$

$$\phi^- = C\exp(kz)+D\exp(-kz) \tag{9}$$

$$\psi = E\exp(mz)+F\exp(-mz) \tag{10}$$

$z=0$における地盤の鉛直速度wをw_0とすると，式(3)より$w_0=k(A-B)$と表されるので，水面波の自由表面境界条件よりA，Bは次式のように与えられる．

$$A=(w_0/k)(gk+\omega^2)\exp(-kh)/\{(gk+\omega^2)\exp(-kh)-(gk-\omega^2)\exp(kh)\} \tag{11}$$

$$B=(w_0/k)(gk-\omega^2)\exp(kh)/\{(gk+\omega^2)\exp(-kh)-(gk-\omega^2)\exp(kh)\} \tag{12}$$

他の未知係数C，D，E，FおよびU_0を順次境界条件式(5)～(7)から決めていき，最後に水面波の運動学的境界条件式から分散関係式を求めると次式を得る．

$$\omega^2 = gk\tanh(kh)-w_0\omega/\{ia\cosh(kh)\} \tag{13}$$

上式の右辺第2項が地盤との干渉項でw_0はk，Sの関数として与えられる．鉛直速度が非常に小さく，$w_0\approx 0$の時には式(13)は通常の不透過剛体地盤上の分散関係式となる．一方，波高減衰は底泥境界層を通してのエネルギー逸散から評価され，エネルギー減衰率εは次式で表される．

$$\varepsilon = \rho_0\upsilon\int_0^\infty \left(\overline{\partial U_{layer}/\partial z}\right)^2 dz \tag{14}$$

上式は底泥境界に働くせん断応力を$\tau_0\exp\{i(kx-\omega t)\}$とすると$\varepsilon=|\tau_0|^2/(2\rho_0\sqrt{\omega\upsilon})$と表されるので結局次式で与えられる．

$$\varepsilon = |(i-1)U_0|^2\rho_0\sqrt{\omega\upsilon}/4 \tag{15}$$

波数kに対応する波の減衰率k_iはεの値を用いて次式から決定される．

$$k_i=\varepsilon\Big/\left(\rho_0 g C_g|a|^2\right) \tag{16}$$

すなわち減衰率k_iはkと底泥境界のせん断波の伝播速度$C_S=\sqrt{G_0/\rho_0}$の関数で表され，水深hとともに弾性地盤厚さdにも依存する．

4．おわりに

底泥の波浪におよぼす影響を粘弾性体モデルを用いて調べた．ここでは波圧変動により液状化が生じる範囲δを一定として取り扱っているが，δは入射波高の関数となるのでこれについても水面波と連成させて解くことが必要と思われる．

参考文献

Foda, M. A., Hunt, J. R. and H.-T., Chou(1993), J. Geophy. Res., Vol. 98, No. C4, pp.7039-7047.