

波浪を受ける層状海底地盤の応答関数を用いた挙動計算

豊橋技術科学大学 学生会員 ○中山真哉
豊橋技術科学大学 正会員 三浦均也, 松田達也

1. 研究目的と意義

海洋・沿岸構造物において、波浪荷重が構造物に作用するときの構造物の安定性に加えて、構造物を支える海底基礎地盤の安定性が重要である。これを考慮するためには、波浪を受ける構造物の検討だけでなく、波浪を受ける海底地盤の変形挙動を解析する必要がある。

海底地盤と波浪の相互作用を考慮することは、固体と流体の相互作用を考慮することである。これまで、海底地盤と波浪の相互作用を検討した研究は多く存在している。しかし多くは、海底地盤を変形しないと仮定している。加えて、間隙流体を非圧縮と仮定しているものもある。これらの仮定の違いにより一貫した結論が得られていない。

間隙流体、体積変化、変形は海底においては同時に発生する。これらの効果すべてを考慮した支配方程式が既往の研究により定式化された。

本研究では、間隙流体や体積変化、変形を考慮し、既往の研究¹⁾によって求められた一次元の疑似動的条件下における[u-p]formulationを用いて解析する。目的として、地盤材料を考えて均質な地盤のみではなく、多層になった地盤においても変位等が求められるように定式化をする。

2. 海底地盤の多孔質弾性体のモデル化

本章では、波浪と海底地盤の応答解析をするために、海底地盤を多孔質弾性と考えてモデル化をし、連続体の構成則と保存則を考える。また、流体相の圧縮性を考慮した構成則を示す。既往の研究¹⁾より定式化された支配方程式を示す。

(1) 多孔質体の2相系材料へのモデル化

土のような多孔質物質中の間隙は、気体と液体で満たされているため、土骨格の固体相を加えた3相の相互作用を考慮しなければならない。しかし数学的に表現することや計算の困難さが増すために現実的ではない。そのためここでは、液体相

と気体相を混合して平均化した流体相と考え、2相の相互作用を考慮する。個体相については通常の線形弾性理論によって構成則を記述した。

(2) 連続体の保存則

運動量保存則を考えることで連続体の保存則は定義することができる。以下に一次元における微小要素を考慮した保存式を示す。

$$\begin{aligned} \rho A \ddot{u}_x &= \frac{\partial(-A\sigma_{xx})}{\partial x} + \rho A \psi_x = \frac{\partial\{-A(F+2G)\varepsilon_{xx}\}}{\partial x} + \rho A \psi_x = \frac{\partial\left\{A(F+2G)\frac{\partial u_x}{\partial x}\right\}}{\partial x} + \rho A \psi_x \\ &= A(F+2G)\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial A(F+2G)}{\partial x}\frac{\partial u_x}{\partial x} + \rho A \psi_x \end{aligned} \quad (2-4-2)$$

(3) 流体相の構成則

$$(1-n)\Delta\dot{\varepsilon}_{ii} + n\Delta\dot{\varepsilon}_{iii} = -(\Delta\dot{u}_{i,i} + \Delta\dot{w}_{i,i}) = \left(\frac{1-n}{K_s} + \frac{n}{K_f}\right)\Delta\dot{p} = \frac{1}{B_f}\Delta\dot{p}; \quad (2-5-1)$$

$$B_f = \frac{K_f}{n}, \quad \frac{1}{K_f} = \frac{1}{K_l} S_r + \frac{1}{K_g}(1-S_r), \quad K_s \gg K_f$$

上記の式における K_s , K_l , K_g はそれぞれ固体粒子、流体相、液体相、気体相の体積弾性率である。流体相の体積弾性率 K_f は、 S_r 飽和度の関数である。また、土壌鉱物で構成された固体相の体積弾性率 K_s は、一般的に流体相の体積弾性率 K_f よりもはるかに大きい。そしてベクトル変数 u_i は固体相の絶対変位であり、ベクトル変数 w_i は流体相の相対変位である。

(4) 支配方程式の定式化

支配方程式は、既往の研究¹⁾により定式化されている。4種類の支配方程式と3種類の解析条件が考えられている。その中でも、本研究において用いる[u-p]formulationを以下に示す。

([u-p] formulation : 動的解析) $\ddot{w}=0, \quad \dot{w} \neq 0$

$$\begin{aligned} \rho_l \Delta \ddot{u}_i - F \Delta u_{kk,i} - G(\Delta u_{i,jj} + \Delta u_{j,ij}) + \Delta p_{,i} &= \rho_l \psi_i \\ \rho_f B_f \frac{k_{ij}}{\rho_w g} \Delta \ddot{u}_{j,i} - B_f \Delta \dot{u}_{i,i} + B_f \frac{k_{ij}}{\rho_w g} \Delta p_{,ij} - \Delta \dot{p} &= \rho_f B_f \frac{k_{ij}}{\rho_w g} \Delta \psi_{j,i} \end{aligned} \quad (2-6-7)$$

([u-p] formulation : 疑似動的解析)

$$\begin{aligned} \ddot{w} &= 0, \quad \dot{w} \neq 0 \\ -F \Delta u_{kk,i} - G(\Delta u_{i,jj} + \Delta u_{j,ij}) + \Delta p_{,i} &= \rho_l \psi_i \\ -B_f \Delta \dot{u}_{i,i} + B_f \frac{k_{ij}}{\rho_w g} \Delta p_{,ij} - \Delta \dot{p} &= \rho_f B_f \frac{k_{ij}}{\rho_w g} \Delta \psi_{j,i} \end{aligned} \quad (2-6-8)$$

([u-p] formulation : 静的解析) $\dot{w}=0, \quad \dot{w} \neq 0$

$$-F\Delta u_{kk,i} - G(\Delta u_{i,jj} + \Delta u_{j,ij}) + \Delta p_{,i} = \rho_i \psi_i$$

$$B_f \frac{k_{ij}}{\rho_w g} \Delta p_{,ij} = \rho_f B_f \frac{k_{ij}}{\rho_w g} \Delta \psi_{j,i} \quad (2-6-9)$$

3. 地盤材料の特性

本章では、本研究で扱う地盤材料の種類と力学的性質について記述する。これは既往の研究成果²⁾から得られたものである。

7 種類の地盤材料の設定

本研究では、地盤材料の種類は以下の 7 種類とする。緩い砂、密な砂、シルト、正規圧密粘土(NC)、過圧密粘土(OC)、礫、軟岩である。これらの物理的、力学的性質は既往の研究²⁾で広く用いられているものを利用した。

4. 擬似動的 u-p モデルによる基本解の誘導

本章では、2 章で示した[u-p]formulation の一次元における擬似動的条件下で、海底地盤の挙動解析を行う。

(1) 係数変換マトリックスの誘導

2 章で示した式(2-6-8)から解の基本形を求め、支配方程式をマトリックス形に変形する。そのマトリックスの行列式から解が得られる。これにより、支配方程式の一般解が求められ、式(2-6-8)に必要な導関数が得られる。これを代入することで新たな z についての恒等式が得られる。ここで 8 つの未定係数があるが、それらの従属関係を係数変換マトリックス[Cv]と定義する。

(2) 剛性マトリックスの誘導

海底地盤層の挙動において連続条件および平衡条件において検討すべき変数は以下の 4 つである。

$$\begin{aligned} \Delta u_z(z) &= [a_{uz1} + a_{uz2}z + a_{uz3}e^{-\zeta z} + a_{uz4}e^{\zeta z}]e^{i\omega t} \\ \Delta \sigma_z(z) &= (F + 2G)\Delta \varepsilon_{zz} = -(F + 2G)\frac{\partial \Delta u_z}{\partial z} \\ &= -(F + 2G)[a_{uz2} - a_{uz3}\zeta e^{-\zeta z} + a_{uz4}\zeta e^{\zeta z}]e^{i\omega t} \\ \Delta p(z) &= [a_{p1} + a_{p2}z + a_{p3}e^{-\zeta z} + a_{p4}e^{\zeta z}]e^{i\omega t} \\ \Delta q &= \frac{\partial p}{\partial z}(z) = -\frac{k}{\rho_w g}[a_{p2} - a_{p3}\zeta e^{-\zeta z} + a_{p4}\zeta e^{\zeta z}]e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (4-2-1)$$

これらをマトリックスの形に整理したマトリックス[Fc(z)]と定義する。

ここで、マトリックスの積[Fc(z)][Cv]を計算すると剛性マトリックス[S(z)]を得る。

(3) 応答マトリックスの誘導

応答マトリックス[R(z)]の定義は以下のようである。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \Delta u_z(z) \\ \Delta \sigma_z(z) \\ \Delta p(z) \\ \Delta q(z) \end{Bmatrix} &= [R(z)] \begin{Bmatrix} \Delta u_z(0) \\ \Delta \sigma_z(0) \\ \Delta p(0) \\ \Delta q(0) \end{Bmatrix} \\ \Rightarrow \begin{Bmatrix} \Delta u_z(z) \\ \Delta \sigma_z(z) \\ \Delta p(z) \\ \Delta q(z) \end{Bmatrix} &= [S(z)] \begin{Bmatrix} a_{uz1} \\ a_{p1} \\ a_{uz3} \\ a_{uz4} \end{Bmatrix} = [S(z)][S(0)]^{-1} \begin{Bmatrix} \Delta u_z(0) \\ \Delta \sigma_z(0) \\ \Delta p(0) \\ \Delta q(0) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4-3-1)$$

上記の式(4-3-1)のように剛性マトリックス[S(z)]において、z=0 を代入したものの逆マトリックスを求めることによって応答マトリックス[R(z)]が得られた。

5. 結論

本研究において、海底地盤を多孔質弾性体としてモデル化し、弾性体の構成則と保存則をとりまとめた。加えて、流体相の圧縮性を考慮した構成則についても定義した。これらを考慮した支配方程式の 1 つを用いて、一次元における擬似動的条件下で解析をするために応答マトリックスを誘導することができた。これを用いて、海底地盤の地表面からの深さが分かることと地盤の力学的性質を当てはめることによって、変位や有効応力や圧力、水量を求めることができることが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 三浦均也・浅原信吾・大塚夏彦・上野勝利 (2004) : “波浪に対する海底地盤応答の連成解析のための地盤の定式化”, 第 49 回地盤工学シンポジウム, pp.223-240.
- 2) Kinya Miura, Nozomu Yoshida and Yoon-Sang Kim : ”FREQUENCY DEPENDENT PROPERTY OF WAVES IN SATURATED SOIL”, SOILS AND FOUNDATIONS vol.41, No.2, 1-19, Apr.2001