

京都大学防災研究所 正 員 佐藤忠信

京都大学防災研究所 正 員 北 勝利

京都大学工学部 学生員 ○尾崎哲也

1. はじめに

近年においては沿岸部の開発が頻繁に行われているが、この際に重大な問題となるのが外力としての波浪の影響である。高波や潮位の異常変動が起こると海底地盤が不安定化することは広く知られており、このメカニズムについては未だ未解決な点が多いが、要因としては変動間隙水圧に基づく考え方や残留間隙水圧に基づく考え方などがある。本研究では波浪による海底地盤の不安定化機構を解明するために、多孔質弾性体理論に基づいた有限要素法プログラムを開発し、その妥当性・適用性を検討した。

2. 有限要素法による定式化

本研究では有限要素法による定式化を2通りの方法で行った。1つは固相の変位 (u) と液相の固相に対する相対変位 (w) を未知数とする定式化 (以下u-w法)、もう1つは固相の変位 (u) と間隙流体圧 (p) を未知数とする定式化 (以下u-P法) である。u-w法の運動方程式は全体系が(1)式、液相については(2)式で表される。ここに ρ : 全体の密度、 ρ' : 間隙流体の密度、 u_i : 固相の変位、 w_i : 液相の変位、 τ_{ij} : 全応力、 b_i : 体積力、 n : 間隙率、 P : 間隙流体圧、 g : 重力加速度、 k : 透水係数であり、応力、間隙流体圧については圧縮を正とする。(1)、(2)式を仮想仕事の原理を用いて離散化を行うと、(3)式で表されるマトリックス方程式が導かれる。

$$\rho \ddot{u}_i + \rho' \ddot{w}_i = -\tau_{ij,j} + \rho b_i \quad (1)$$

$$\rho' \ddot{u}_i + \frac{\rho' w_i}{n} = -P_{,i} + \rho' b_i - \frac{\rho' g w_i}{k} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & [M_{uw}] \\ [M_{wu}] & [M_{ww}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{w} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & [H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{uw}] \\ [K_{wu}] & [K_{ww}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overline{f_{su}} + \overline{f_{su}} \\ \overline{f_{sw}} + \overline{f_{sw}} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

u-P法の運動方程式は全体系が(4)式、液相については(5)式で表される。ここで τ'_{ij} : 有効応力、 K_f : 間隙流体の体積弾性係数である。(4)、(5)式を同様に離散化すると(6)式で表されるマトリックス方程式が導かれる。(6)式は非対称であるので、u-P法では計算が複雑になることがここで分かる。

$$\rho \ddot{u}_i = -\tau'_{ij,j} - P_{,i} + \rho b_i \quad (4)$$

$$\rho' \ddot{u}_{i,i} = -P_{,ii} + \frac{\rho' g}{k} \left(\dot{u}_{i,i} + \frac{n}{K_f} \dot{P} \right) \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & 0 \\ [M_{pu}] & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ [C_{pu}] & [C_{pp}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{up}] \\ 0 & [K_{pp}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overline{f_{su}} + \overline{f_{su}} \\ \overline{f_p} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

なお海底地盤中には、土粒子と間隙流体のほかに空気も含まれているが、空気は間隙流体の体積弾性係数の中を含むものとする。

3. 海底地盤の波浪応答解析

u-w法とu-P法の適用性を考察するために、Yamamoto(1981)¹⁾ によって示された地盤を有限層厚とした理論解 (以下Yamamoto解) との比較を行う。解析モデルを図1に示す。ここで海底地盤は支持層の上に弾性体とみなせる一様かつ等方性の多孔質地盤がのっているものとし、海底表面には時間および空間的に正弦波で近似される変動水圧が作用しているとする。また解析領域の幅をu-w法では3波長分、u-P法では非対称マトリックスの取り扱いや水圧の境界条件の指定の都合により2波長分とした。解析

結果を図2、3に示す。図2は間隙水圧、図3はせん断応力の深度方向分布であり、間隙流体の体積弾性係数の値を変化させている。解析データは領域の中央付近の1波長分を取った。縦軸は図3が間隙水圧の深さ毎の最大値と流体圧の振幅の比、図4はせん断応力の深さ毎の最大値と流体圧の振幅の比を表し、横軸は地盤表面からの深さと波長の比である。図2、3を見るとu-P法は K_f の値にかかわらずYamamoto解とはほぼ一致しており、それに対してu-w法は K_f の値が大きいときYamamoto解をうまく表現できていない。またu-P法では地盤深部において理論値よりも大きな値を示す傾向がある。ここでは図を示していないが他の定数(透水係数、ポアソン比、周期)を変化させた場合はパラメータの値にかかわらず理論値とはほぼ一致した。

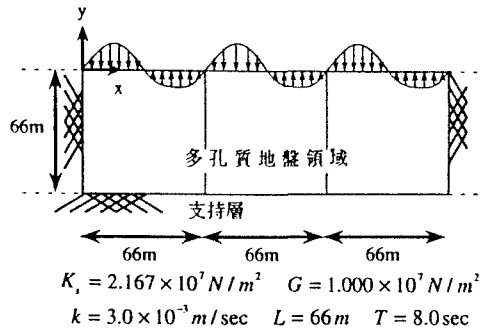


図1 有限要素解析モデル

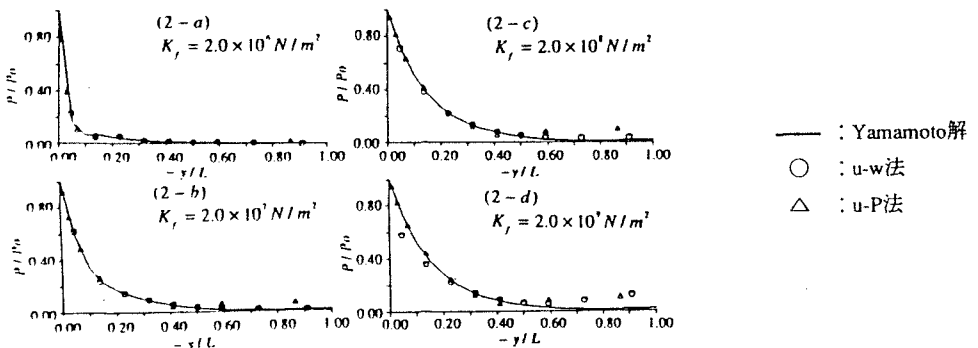


図2 間隙水圧の深度方向分布

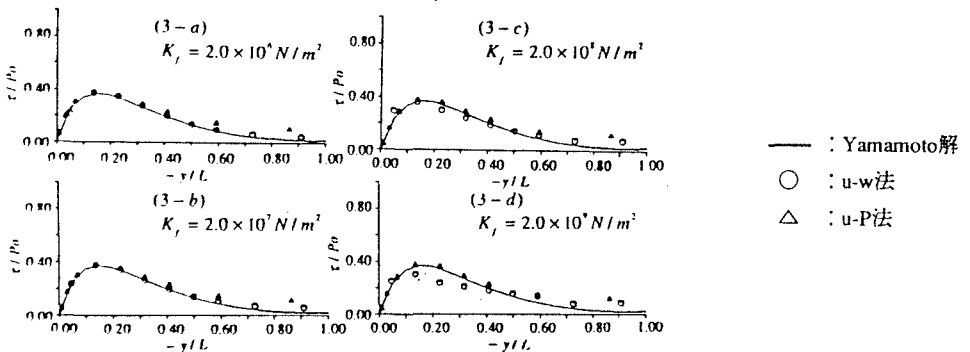


図3 せん断応力の深度方向分布

4. まとめ

本研究では波浪による地盤応答解析についてu-w法・u-P法の2通りの定式化方法で解析プログラムを開発し、その適用性の考察を行った。その結果、u-P法では地盤深部において異常値をとる傾向があり、u-w法では間隙流体の圧縮性が小さいとき応力算定の精度が悪くなる結果を得た。

参考文献

- 1) Yamamoto, T. : "Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogeneous seabed foundations". Ocean Engineering, Vol.8, pp.1-16, 1981.