

地盤条件が非一様な海底地盤の波浪応答

京都大学工学部 正会員 酒井 哲 郎
同上 正会員 間瀬 肇
関西電力(株) 正会員 松本 明 男

1. まえがき

沿岸域の開発にともなう、いわゆる海洋構造物を建設することは今後益々増加すると考えられる。その場合それほど水深が大きくなければ、程度の差はあっても海底地盤にその支持を期待することが多い。海底地盤の支持力を評価するのに、従来は地盤を一相として全応力法を用いることが多い。しかしながら地盤の支持力が有効応力によって評価されることを考えると、間隙水の存在を考慮した二相モデルが好ましい。特に波浪条件が厳しい外海に面した沿岸においては、波浪による海底地盤の応答を評価するのに海底地盤内の間隙水の挙動を考慮した方が合理的である(例えば前野・長谷川(1987))。

海底地盤を地盤骨格と間隙水からなる二相の媒質と考えて波浪による応答を扱った研究は既に10年前からあり、山本(1977)、Madsen(1978)、名合・前野(1984)さらに大草(1985)が挙げられる。これらの研究では、いずれも圧密の基礎式である Biot(1941)の式を用いている。一方 Mei and Foda(1981)は、Biotの式を解いた山本らの解が複雑なことから、mixture theoryを用い、彼らの言う boundary layer approximationを用いてより簡単な解を導いた。

以上全ての研究においては、Biot(1941)の圧密の基礎式と同様に、地盤骨格と間隙水の加速度および重力の効果は無視されている。著者らは、波浪による海底地盤の応答の二相モデルにおける地盤骨格と間隙水の加速度の効果について、上述の Mei and Foda の boundary layer approximation と同様の扱いによって加速度の効果を含めた解を得、その効果を検討した結果を既に別の機会に発表している(酒井・間瀬・松本(1988a))。また重力の効果についても Biot の圧密の式に重力項を加えた式を導き、有限要素法を用いてその効果を検討し、これも別の機会に発表している(酒井・間瀬・松本(1988b))。Biot の圧密の式の有限要素法の定式化は、すでに名合らが行っている。ただし境界積分の項などその詳細に関しては不明な点があったので、改めて定式化を行った。さらにこの有限要素法のプログラムを用いた応用例として、傾斜した海浜地盤の波浪による応答の計算結果を示した。

現実の海底地盤を考えると地盤定数が一様であることはなく、上下方向に異なった土質の層が重なっていることが多い。山本(1981)は、このような場合に対応するために一様な地盤定数の場合の自らの理論解(1977)を各層に適用し、層間は連続条件を満たすようにして上下方向に層をなす海底地盤の波浪応答を考えた。しかしその結果、解が接続面で急激に変化し、現実と一致しない事が分かった。有限要素法は、上下方向のみならず水平方向にも変化する非一様な地盤に対して適用可能である。本研究では、上述の Biot の圧密式の有限要素法による定式化を用いて、非一様な海底地盤の波浪による応答が計算出来ることを示す。

2. Biot(1941)の圧密式の有限要素法による定式化

Biot(1941)の圧密の基礎式は、鉛直二次元の場合次式で与えられる。

$$G \cdot \nabla^2 V_x + G/(1-2\nu) \cdot \delta e / \delta x - \delta p' / \delta x = 0, \quad (1)$$

$$G \cdot \nabla^2 V_z + G/(1-2\nu) \cdot \delta e / \delta z - \delta p' / \delta z = 0, \quad (2)$$

$$n/\beta \cdot \delta p' / \delta t + \delta e / \delta t - K \cdot \nabla^2 p' = 0. \quad (3)$$

ここで x は水平方向座標、 z は鉛直下向き座標、 V_x および V_z は x および z 方向の地盤骨格の変位、 p' は静水圧からの変動間隙水圧、 $e = \delta V_x / \delta x + \delta V_z / \delta z$ 、 G は地盤骨格のせん断弾性率、 ν はポアッソン比、 n

は間隙率, β は間隙水の有効体積弾性率, K は $k/\rho g$ (k : 透水係数, ρ : 間隙水の密度, g : 重力加速度) で定義される量である. 式 (1) および (2) は, 地盤骨格の歪との間に線形弾性体の Hooke の法則が成り立つと仮定した地盤骨格に働く有効応力の静的釣合を表し, 式 (3) は間隙水の運動に Darcy の法則が成り立つと仮定した場合の, 間隙水の連続条件を表す.

式 (1)~(3) の有限要素法による定式化はすでに名合らが行っているが, その詳細が不明のため改めて定式化を行った (酒井ら (1988b)). 海底地盤内に三角形要素を考え, その要素内における地盤の変位の 2 方向成分 V_x および V_z および変動間隙水圧 p' が, 要素 3 節点における x および z の一次関数で与えられる内挿関数と上記 3 変量の値の積の和で与えられるとする.

次に式 (1)~(3) を, Galerkin 法により試行関数として上述の内挿関数を用いて残差をとる. さらにグリーンの定理を用いて弱形式化する. 最後に時間微分の項を前進差分で与え, その他の節点値は次ステップでの値と現ステップでの値の平均値で与える.

境界条件のうち地盤表面 (海底面) 以外は, 名合らと同様である. すなわち海底地盤底面では地盤骨格の変位は 0, また変動間隙水圧の底面法線方向微分が 0 とする. 左右側方境界では, 地盤定数が一様の場合は山本 (1977) の理論解を境界条件とすることが出来るが, ここでは地盤条件が一様でないので, 地盤底面と同様の条件とする.

基礎式の弱形式化の際得られる境界積分は, 一般に境界条件が与えられれば領域内の未知数の値に関係なく求めることが出来, 境界積分項を外力項として剛体マトリックスの外に置くのが一般的である. しかしながらここで扱っている場合の地盤表面においては, 間隙水圧に対しては波浪による海底面での波圧は与えられるが, 地盤変位に対してはあらかじめ与えることが出来ない. しかし地盤表面においては地盤有効応力を 0 と置けるので, ここでは Hooke の法則から得られる関係を剛体マトリックスに組み入れた.

3. 計算例

計算例として, ここでは山本 (1983) が一相モデルで海底地盤の波浪応答を扱った研究で用いた, Mississippi 川の河口デルタの粘土海底地盤の場合を取り上げる. 山本 (1983) の論文には, Mississippi 川河口デルタでの vane shear strength (バーンせん断強度), maximum dynamic shear modulus (最大動せん断弾性率) の鉛直分布が示されている. ここでは, maximum dynamic shear modulus を式 (1) および (2) の G として用いた. 図-1 に, せん断弾性率 G の鉛直分布を示す. その他の地盤定数として, 間隙水の有効体積弾性率 β を $1.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, 透水係数 K を $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s/kg}$, 間隙率を 0.30, ボアッソン比を 0.45 とした. 水深及び波浪の条件は山本の論文に示されているが, ここではそれとは無関係に水深を 13.5m, 波の周期 T を 14sec, 波高を 4.52m とした. この場合, 微小振幅波の波長は 154m となる. 地盤表面での波圧変動は, 微小振幅波理論で与えた.

2. で述べたように, 地盤定数が一様でないため左右側方境界で理論解を境界条件として用いることが出来ない. そこで, 側方境界は不透過境界と仮定した. 予備的な検討の結果, 有限要素法による計算の領域の波の進行方向の長さは, 波浪の一波長程度に取っておけば, 波の進行方向の中間部分では側方境界の影響がないことが分かっている. ここでは計算領域は波の進行方向 (x 方向) には 150m とした. 鉛直方向には, 図-1 (z : 上向きを正, $x = 80\text{m}$: 地盤表面) に示した maximum dynamic shear modulus の値が与えられている 80m をその範囲とし, その下は不透過固定地盤とした.

上述の計算領域を三角形要素に分割した. その場合, x 方向には波長の 1/10 の 15m で分割し, 鉛直方向には地盤表面付近で分割が密になるようにして 20 分割した. 計算時間ステップは, 予備的な検討から $T/20$ とした.

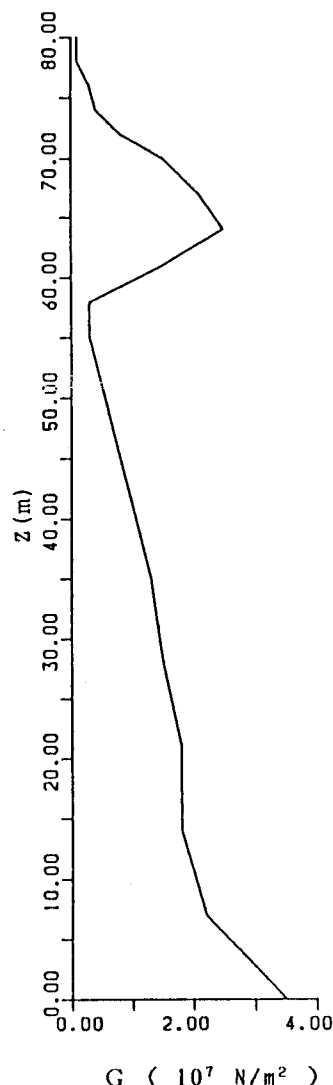


図-1 せん断弾性率の鉛直分布 (山本 (1983))

4. 計算結果と考察

図-2は、波浪の2つに位相における海底地盤骨格の変位ベクトルを示している。計算機のプロッタの都合上鉛直方向に一部分しか示されていない。また左右側方境界付近は、固定境界を仮定したため変位ベクトルの方向が鉛直方向になっている。ここでは x 方向の中央部分のみに注目することにする。

予想されるように、波の峯の下地の地盤では変位は下向きに、また谷の下地の地盤では上向きになっている。さらによく見ると、地盤表面 ($x = 80\text{m}$) から下方に減少した変位が 60m 付近で再び増加していることがわかる。これは、図-1のせん断弾性率 G の鉛直分布の傾向に対応しており、 $x = 60\text{m}$ 付近の G の減少が変位の増加に対応している。変位の値自体は、数 10cm にもなっている。これは、粘土地盤であり G がかなり小さいことによるものである。

図-3は、2つの波の位相での変動間隙水圧 p' の鉛直分布を示している。この図から、変動間隙水圧の鉛直分布も G の鉛直分布と対応しており、 G の増加領域と p' の絶対値の減少領域が対応している。

なおここでは地盤骨格は、Hooke の法則で表される線形弾性体の応力-歪関係を有するものと仮定している。しかしながら図-1で示したような大きなせん断弾性率

の変化を有するような地盤がこのような仮定を満足するものかどうかは、疑問の余地がある。ここではあくまで地盤の非一様性を強調するために、図-1の様な例を採用したものである。

5. あとがき

以上の様に、Biot(1941)の圧密の基礎式の有限要素法による定式化によって、一様でない地盤定数を有する現実の海底地盤の波浪による応答、すなわち地盤骨格の変位および変動間隙水圧の変化が計算出来る。この手法は、海洋構造物が存在する場合の海底地盤の応答の問題に応用できる。構造物の存在は、波浪による構造物の変位を海底地盤の境界条件に加えることによって表現できる。特に外海に面した沿岸に建設される海洋構造物の安全性を検討する際には、ここで示した解析方法を用いることが必要である。

最後に、本研究を行うに当たり助言を頂いた京都大学工学部嘉門雅史助教授に謝意を表する。

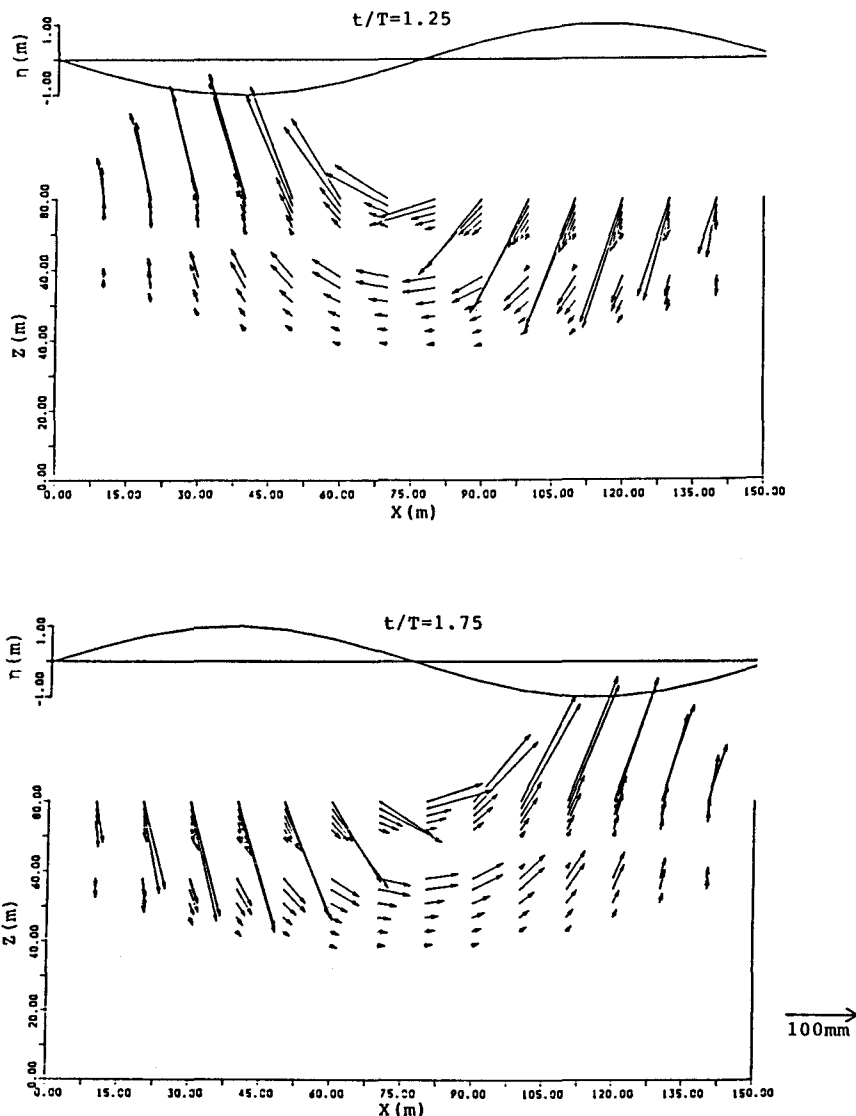


図-2 海底地盤骨格の変位ベクトルの計算例

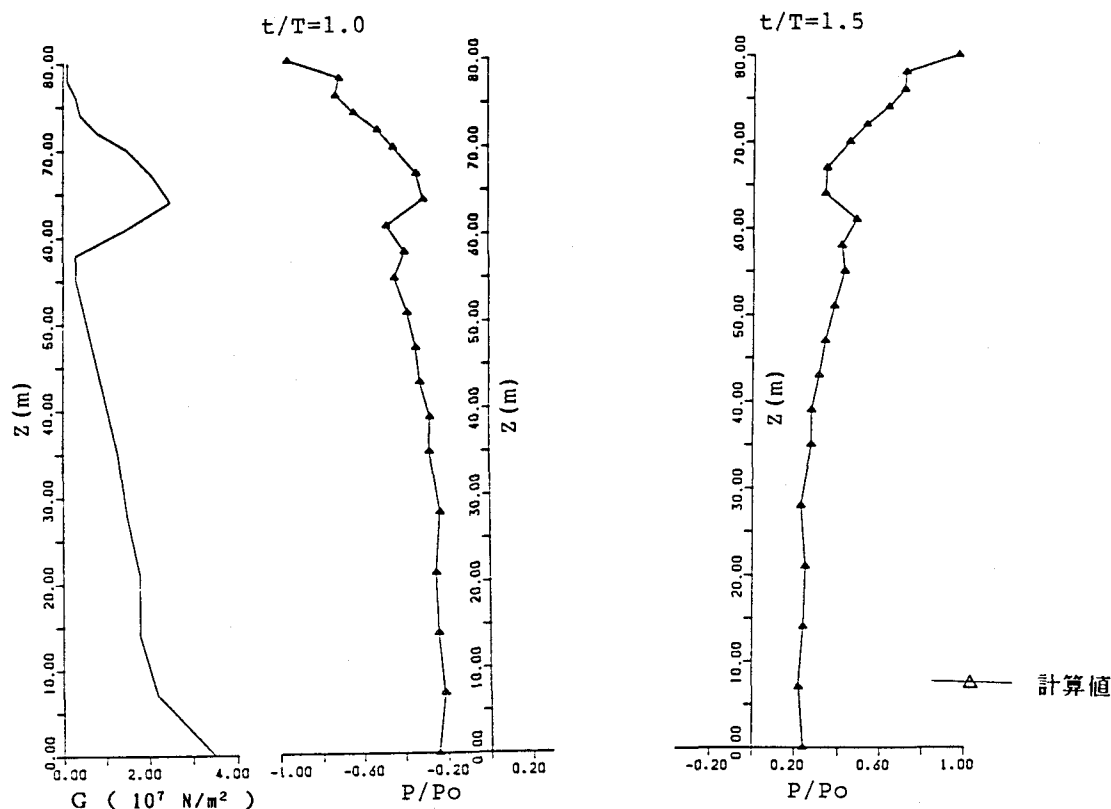


図-3 変動間隙水压の鉛直分布の計算例

6. 参考文献

- Biot, M.A.(1941) : General theory of three-dimensional consolidation, J. of Appl. Phys., Vol.12, pp.155-164.
- Madsen, O.S.(1978) : Wave-induced pressures and effective stresses in a porous bed, Geotechnique, Vol.28, pp.377-393.
- 前野賢彦・長谷川高志(1987) : 間隙圧の発達特性への砂層と水の境界付近のエネルギー損失の影響, 海洋開発論文集, 土木学会, Vol.3, pp.101-106.
- Mei, C.C. and Foda, M.A.(1981) : Wave-induced responses in a fluid-filled pore-elastic solid with a free surface - a boundary layer theory, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol.66, pp.597-631.
- Nago, H. and Maeno, S.(1984) : Pore water pressure in sand bed under oscillating water pressure, Memoirs of the School of Engineering, Okayama Univ., Japan, Vol.19-1, pp.13-32.
- Okusa, S.(1985) : Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, Geotechnique, Vol.35, pp.517-532.
- 酒井哲郎・間瀬肇・松本明男(1988a) : 波浪による海底地盤内の間隙水压変化に及ぼす慣性項の効果, 第 32 回水理講演会論文集, 土木学会, pp.589-594.
- 酒井哲郎・間瀬肇・松本明男(1988b) : 波浪による傾斜海底地盤の応答, 第 35 回海岸工学講演会論文集, 土木学会 (印刷中) .
- Yamamoto, T.(1977) : Wave induced instability in seabeds, Proc. of ASCE Special Conf. on Coastal Sediments'77, pp.898-913.
- Yamamoto, T.(1981) : Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogeneous seabed foundations, Ocean Engineering, Vol.8, pp.1-6.
- Yamamoto, T.(1983) : Numerical integration method for seabed response to water waves, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.2, pp.92-100.