

直交異方性海底地盤の波浪応答特性 に対する理論解析

由比政年¹・石田 啓²

¹正会員 工修 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 (〒920 石川県金沢市小立野 2-40-20)

²正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 石川県金沢市小立野 2-40-20)

海底地盤を直交異方性の土粒子骨格と気泡を含む間隙水の混合体としてモデル化し、地盤の力学的異方性および透水異方性が海底地盤の波浪応答特性に及ぼす影響を理論的に検討した。まず、直交異方性海底地盤の波浪応答に対する解析解を陽な形で求め、応答を特徴づける無次元パラメータを飽和地盤と不飽和地盤のそれぞれの場合について抽出した。次に、地盤内の間隙水圧や有効応力の変動と地盤の力学的異方性および透水異方性との関連を検討し、異方パラメータの影響を明らかにした。また、直交異方性地盤と等方性地盤の波浪応答特性に関する比較を行い、異方パラメータが互いにその影響を強め合う場合には、地盤の異方性の影響は無視できないことを示した。

Key Words : wave seabed interaction, cross anisotropy, pore water pressure, effective stress, porous media

1. 序論

変動波圧を受ける海底地盤の動的応答においては、変動間隙水圧と残留間隙水圧という2つの異なるメカニズムを通して地盤内に過剰間隙水圧が発生し、海底地盤が不安定となることが知られている。高波浪の作用下において、過剰間隙水圧の値が地盤の抵抗力を超えて大きくなり、大規模な海底地滑りが発生すると、周辺の石油掘削プラットフォームやパイプライン、海底ケーブルといった海洋構造物は大きな被害を受ける。こうした災害を未然に防ぐために、海底地盤の波浪安定性や海底地滑りに関して近年精力的に研究が進められているが^{1), 2), 3), 4), 5), 6), 7), 8), 9)}、依然不明な点も多く残されている。

本報では変動過剰間隙水圧に起因する地盤の不安定化を扱うが、変動過剰間隙水圧は、海底地盤中の間隙水圧変動の伝達に、減衰と位相差が生じることから発生するものであり、その特性を知るためには、地盤内の間隙水圧の伝達特性を正確に把握することが必須となる。地盤内での間隙水圧伝達の減衰や位相差については、多くの要因が考えられるが、一般には地盤内の気泡の存在を考慮し、間隙水に見かけ上の圧縮性を持たせる方法により説明されることが多い。間隙水の圧縮性が間隙水圧伝達の減衰や位相差に対して大きな影響を持つことは、既に多くの研究で報告されている^{1), 2)}。

一方、地盤に関しては、従来の研究の多くが等方的な性質を仮定しており、異方性地盤について論じたものは少ない。しかし、互層構造を持つ堆積性地盤では、地盤は構造的異方性を持つと考える方が一般的であり、等方性の仮定は実体に即した理想化というよりも、むしろ力学的な解析を容易にするための便宜的な仮定にすぎない¹⁰⁾。堆積性海底地盤の波浪安定性に対する、より適切な評価を実現するためには、自重や堆積過程あるいは構造物重量による地盤の異方性が、海底地盤の波浪応答特性に及ぼす影響を把握することが重要である。

互層を成す堆積性地盤の特性をモデル化する方法は二つに大別される。一つは、地盤を不均質(多層系)と見る見方であり^{11), 12)}、もう一つは、地盤を異方性とする見方である^{13), 14), 15)}。この違いは、対象となる海洋構造物や波浪の代表長(L)と地盤の各層の厚さ(T)による(図-1)。構造物長や波長が、地層の各層の厚みに比べて十分小さい場合($T/L \gg 1$)には不均質地盤としての扱いが、逆に十分大きい場合($T/L \ll 1$)には異方性としての扱いが有効となる¹⁶⁾。本研究では、後者の場合を想定し、地盤を異方性として扱う。

地盤の異方性に着目した従来の研究には、透水係数の異方性に関するものと、地盤の力学的な異方性に関するものとの二つの流れがある。Madsen²⁾は、透水係数の異方性に関する検討を行い、粗い砂粒子

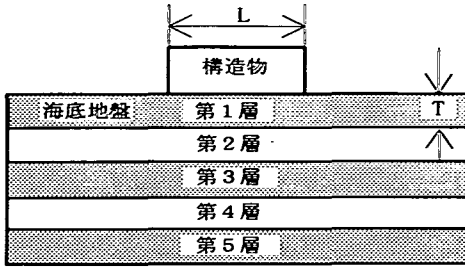


図-1 地盤の不均質性と異方性の尺度

からなる地盤の場合には、透水異方性の影響が無視できないことを示している。一方、地盤の力学的異方性については、Silvestriら¹⁴⁾が、直交異方性の海底地盤の波浪応答に関してヤング係数の異方性の影響を準解析的に検討している。しかし、解の誘導過程に疑問な点があり、また、解析解は陽な形には示されていない。また、Gatmiri¹⁵⁾は、同様のモデル地盤に対して有限要素法による数値解析を行い、ヤング係数、ポアソン比、せん断弾性係数および透水係数の異方性の影響に関する計算結果を報告している。しかし、数値解析的手法は個別の事例の解析には有効であるものの、異方性の影響を統一的に検討するには不向きである。さらに、Silvestriら¹⁴⁾やGatmiri¹⁵⁾の計算結果は、間隙水が気泡を含まない完全飽和地盤に限定されたものであり、間隙水圧伝達については海底地盤の波浪安定性に大きな影響を及ぼす間隙水の圧縮性の影響は考慮されていない。

これに対し、本研究では、地盤の力学的異方性および透水異方性が、地盤内の間隙水圧の伝達や有効応力の分布特性に及ぼす影響について、間隙水中の気泡すなわち間隙水の圧縮性を考慮した形で、理論的な検討を行う。以下では、まず、従来の等方性地盤に関する解析モデルを直交異方性の場合に拡張し、間隙水圧や地盤内の変位、有効応力に対する解析解を陽な形で提示する。次に、得られた解より、直交異方性海底地盤の波浪応答を特徴づける無次元量を抽出し、異方パラメータとの関連を検討する。また、地盤の異方パラメータが間隙水圧の伝達や有効応力の分布にどのような影響を及ぼすかに関して詳細な検討を行い、その特性を明らかにする。最後に、等方性地盤に対する解析結果との比較を行い、異方パラメータの影響は無視できないことを示す。

なお、海底地盤内の間隙水圧の伝達特性に対する地盤の力学的異方性の影響については、すでに研究成果の一部を発表している¹⁵⁾。これに対し、本論文では、従来の理論展開を大きく発展させるとともに、透水異方性の影響や地盤内の有効応力に対する地盤の異方性の影響に関する考察を付加することにより、

直交異方性海底地盤の波浪応答特性に関する、より詳細で包括的な議論を行う。

2. 解析の手法

(1) 基礎方程式

以下では、水平方向に x 軸、鉛直下向きに z 軸を取り、平面ひずみかつ微小ひずみ状態の準静的な変化を対象とする。Yamamotoら¹¹⁾の手法に従い、海底地盤を多孔質の弾性体である土粒子骨格と間隙水の混合体と考え、Biot¹⁷⁾の理論に基づいて定式化を行う。ここで、土粒子自身は非圧縮性とするが、土粒子骨格は圧縮性とみなす。さらに、間隙水は気泡の混入を考慮して圧縮性として扱う。なお、間隙水の流れにはダルシー則を仮定し、地盤の水平および鉛直方向の透水性は異なるものとする。

異方性地盤の構成関係に関しては、次のようなモデル化を行う。地盤の異方性は2つの要素、すなわち異方性の主方向および大きさによって特徴づけられる。海底地盤の異方性は重力に関連したものが大半であり、異方性の主方向は原則的には鉛直・水平方向となる。こうした特性を持つ土粒子骨格のモデルとして、水平面内では等方性となる直交異方性(横等方性とも呼ばれる)の様な線形弾性体を考えることとする。

微小ひずみを仮定した場合の直交異方性線形弾性体の構成関係式は、次のように表される¹⁸⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \alpha_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha_{xz} \frac{\partial w}{\partial z} \\ \sigma_{zz} &= \alpha_{zx} \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{zx} &= G_{zx} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 σ_{xx}, σ_{zz} は水平および鉛直方向の有効応力(引張りが正)、 τ_{zx} はせん断応力であり、 u, w は地盤の水平および鉛直方向変位を、 G_{zx} は鉛直面内のせん断弾性係数をそれぞれ表す。なお、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{xx} &= \frac{E_z N (1 - N \nu_{zx}^2)}{(1 + \nu_{xx})(1 - \nu_{xx} - 2N \nu_{zx}^2)} \\ \alpha_{zx} &= \frac{E_z N \nu_{zx}}{(1 - \nu_{xx} - 2N \nu_{zx}^2)} \\ \alpha_{zz} &= \frac{E_z (1 - \nu_{xx})}{(1 - \nu_{xx} - 2N \nu_{zx}^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$N = E_x / E_z \quad (3)$$

である。ここで、 E_x, E_z は水平および鉛直方向のヤング係数をそれぞれ表す。また、 ν_{xx}, ν_{zz} は、水平面内および鉛直面内のポアソン比であり、水平方向に作用する応力により生じるひずみの比および鉛直方向に作用する応力により生じるひずみの比としてそれぞれ定義される。直交異方性線形弾性体の独立な弾性パラメータは $E_x, E_z, \nu_{xx}, \nu_{zz}, G_{zx}$ の5つとなる。

静的平衡状態からの変動量に対する基礎方程式を求めるとし、微小量 (変動量) の2次以上の項は無視する。さらに、海底地盤の波浪応答の解析においては、重力項が他の項に比較して無視できる大きさとなることを考慮すると、直交異方性海底地盤の波浪応答に対する基礎方程式として、次の形の貯留式および釣り合い式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{k_z}{\gamma} \left(M \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) &= \frac{n}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \alpha_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + G_{zx} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (\alpha_{zx} + G_{zx}) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} &= \frac{\partial p}{\partial x} \\ G_{zx} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \alpha_{zz} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + (\alpha_{zx} + G_{zx}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} &= \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 M は次式で定義される。

$$M = k_x / k_z \quad (5)$$

なお、 p は間隙水圧であり、静的平衡状態からの変動量を表す。また、 β, γ は間隙水の体積弾性係数と単位体積重量を、 k_x, k_z, n は地盤の水平および鉛直方向の透水係数と間隙率をそれぞれ表している。以下では、地盤の変位および有効応力も、静的平衡状態からの変動量を表すものとする。

(2) 境界条件

一定水深で、地盤の厚さが半無限大の場合を考え、地盤の表面および無限下方で、次の境界条件を課す。

まず、地盤表面 ($z=0$) では、鉛直方向の有効応力はゼロとし、せん断応力も無視できるとする。また、 x 軸の正方向の進行波を考え、地盤表面での間隙水圧の変動振幅 p_0 は、微小振幅波理論を用いて求める。

$$\sigma_{zz} = 0, \tau_{zx} = 0, p = p_0 \exp[i(ax - \omega t)] \quad (6)$$

ここで、 i は虚数単位、 a は波数、 ω は角周波数をそれぞれ表す。

一方、無限下方 ($z=\infty$) では、地盤変位および間隙水圧の変動量をゼロとする。

$$u = w = p = 0 \quad (7)$$

なお、式(6)の第3式は、不透水性で剛な地盤を対象に導かれたものであり、本論文で扱うような浸透性地盤の場合には、海底地盤面上での圧力変動は、式(6)とは若干異なる形になる。しかし、これに関しては、Mei and Foda (1981)³⁾が、地盤表面での浸透流速と地盤上方での水粒子速度のオーダー比較を行うことにより、式(6)が近似的に有効であることを示している。本論文では、この議論に従い、地盤表面での境界条件として式(6)を用いることとする。

(3) 厳密解の誘導

次に、前節で定式化した境界値問題の理論解を Yamamoto ら¹⁾と同様の手法を用いて誘導する。

a) 特性方程式

境界条件が時間および空間 (x 方向) に関して周期的であるので、任意点での解も調和振動的な形を仮定し、この実数部を解とみなす。

$$\left. \begin{aligned} p &= P(z) \exp[i(ax - \omega t)] \\ u &= U(z) \exp[i(ax - \omega t)] \\ w &= W(z) \exp[i(ax - \omega t)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

これを式(4)に代入し、得られた式が非自明な解を持つという条件から、次の特性方程式が導かれる。なお、微分演算子 d/dz を D で表している。

$$\begin{aligned} D^6 &+ [iA(1+B) + F_1 - M]a^2 D^4 \\ &+ [iA(F_2 + F_1 B) - MF_1 + F_3]a^4 D^2 \\ &+ [iA(1+F_3 B) - MF_3]a^6 = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 A, B および $F_1 \sim F_3$ はすべて無次元量であり、以下のように表される。

$$A = \frac{\gamma \omega}{a^2 k_x \alpha_{xx}}, \quad B = \frac{n \alpha_{zz}}{\beta} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{-\alpha_{xx} \alpha_{zz} + \alpha_{zx}^2 + 2\alpha_{zx} G_{zx}}{\alpha_{zz} G_{zx}} \\ F_2 &= 2 + \frac{2\alpha_{zx} - \alpha_{xx} - \alpha_{zz}}{G_{zx}}, \quad F_3 = \frac{\alpha_{xx}}{\alpha_{zz}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

この内、 A は、Mei and Foda³⁾の境界領域近似の際の水面波の波長と境界層厚さの比 (の2乗) に対応し、 B は土粒子骨格と間隙水の剛性比に対応する。

なお、等方性地盤に対しては、波による海底地盤の応答を特徴づける2つの重要なパラメータが存在することが、いくつかの研究において指摘されている^{9), 19), 20)}。表現の仕方は異なるが、ここで示された A および B は、これらのパラメータを直交異方性の場合に拡張したものである。

式(9)は D^2 に関する3次方程式とみることができ、

カルダノの方法を用いて3組の複素解,

$$D = \pm \eta_1 a, \pm \eta_2 a, \pm \eta_3 a \quad (12)$$

を解析的に求めることができる。ただし、 η_1, η_2, η_3 は実数部が正のものを選ぶものとする。

直交異方性海底地盤の波浪応答に対しては、式(9)は一般に相異なる3組の複素解を持つので、無限下方での境界条件を考慮すると、この場合の $U(z)$, $W(z)$, $P(z)$ は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} P(z) &= P_1 \exp(-\eta_1 az) + P_2 \exp(-\eta_2 az) + P_3 \exp(-\eta_3 az) \\ U(z) &= U_1 \exp(-\eta_1 az) + U_2 \exp(-\eta_2 az) + U_3 \exp(-\eta_3 az) \\ W(z) &= W_1 \exp(-\eta_1 az) + W_2 \exp(-\eta_2 az) + W_3 \exp(-\eta_3 az) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここで、 P_j, U_j, W_j ($j=1,2,3$)は定数である。

なお、Silvestriら¹⁴⁾も同様な手法に基づいた解の誘導を試みているが、その際に、特性方程式は重根を持つとして解析を行っている。しかし、今回の解析にあたり、広範な範囲で異方パラメータを変化させて特性方程式の厳密解を求めてみたところ、特性方程式が重根を持つのは、 $N=1$ かつ $\nu_x = \nu_z$ すなわち力学的に等方性となる極限の場合に限定されることが明らかになった。したがって、Silvestriら¹⁴⁾の解は、力学的異方性の弱い場合には近似的に有効であるものの、力学的異方性が強い場合への適用に際しては、十分な注意が必要と考えられる。

b) 係数間の関係式

次に、 P_j, U_j, W_j ($j=1,2,3$)は独立ではなく、式(4)を満たすという条件から、次の関係式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= \Gamma_1 U_1, W_2 = \Gamma_2 U_2, W_3 = \Gamma_3 U_3 \\ P_1 &= ia\alpha_{zz} A_1 U_1, P_2 = ia\alpha_{zz} A_2 U_2, P_3 = ia\alpha_{zz} A_3 U_3 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここで、 Γ_j, A_j ($j=1,2,3$)は次式で定義される。

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_j &= \frac{-\omega + i(\alpha_{xx} - \eta_j^2 G_{xx})H_j}{\eta_j[i\omega + (G_{xx} + \alpha_{xx})H_j]} \\ A_j &= \frac{1}{\alpha_{zz}} [(\alpha_{xx} - \eta_j^2 G_{xx}) + i\eta_j(G_{xx} + \alpha_{xx})\Gamma_j] \\ H_j &= \frac{k_z}{\gamma} a^2 (\eta_j^2 - M) + i\omega \frac{n}{\beta} \quad (j=1,2,3) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ただし、本論文においては、添字に関する総和規約は用いないものとする。

次に、式(14)を地盤表面での境界条件式(6)に代入して整理すると次式が得られる。

$$\begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_0 / (ia\alpha_{zz}) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

ただし、 e_{mj} ($m=1,2,3; j=1,2,3$)は次式で定義される。

$$\left. \begin{aligned} e_{1j} &= A_j \quad (j=1,2,3) \\ e_{2j} &= 1 + i\eta_j \Gamma_j \alpha_{zz} / \alpha_{xx} \quad (j=1,2,3) \\ e_{3j} &= i\Gamma_j - \eta_j \quad (j=1,2,3) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

この連立方程式を解くと、式(13)中の各項の係数に対する解析解が、次のような形で得られる。

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \frac{p_0}{ia\alpha_{zz} J} \begin{pmatrix} e_{22}e_{33} - e_{23}e_{32} \\ e_{23}e_{31} - e_{21}e_{33} \\ e_{32}e_{21} - e_{22}e_{31} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix} = \frac{p_0}{ia\alpha_{zz} J} \begin{pmatrix} \Gamma_1(e_{22}e_{33} - e_{23}e_{32}) \\ \Gamma_2(e_{23}e_{31} - e_{21}e_{33}) \\ \Gamma_3(e_{32}e_{21} - e_{22}e_{31}) \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \frac{p_0}{J} \begin{pmatrix} A_1(e_{22}e_{33} - e_{23}e_{32}) \\ A_2(e_{23}e_{31} - e_{21}e_{33}) \\ A_3(e_{32}e_{21} - e_{22}e_{31}) \end{pmatrix} \quad (20)$$

ここで、 J は次式で定義される。

$$\begin{aligned} J &= e_{11}e_{22}e_{33} + e_{12}e_{23}e_{31} + e_{13}e_{32}e_{21} \\ &\quad - e_{11}e_{23}e_{32} - e_{13}e_{22}e_{31} - e_{12}e_{21}e_{33} \end{aligned} \quad (21)$$

こうして得られた解を、式(13)に代入することにより、直交異方性海底地盤の波浪応答における間隙水圧および地盤変位に対する厳密解を得ることができる。また、得られた変位を式(1)に代入することにより地盤内の有効応力の解が求められる。

(4) 近似解析解の誘導

a) 特性方程式の近似解

前節で得られた解は厳密であり、簡単な解析プログラムにより計算可能であるが、特性方程式として複素係数の3次方程式を解く必要があり、その解を陽な形で表すことはできない。このため、物理的な考察を統一的な形で行うには不向きである。そこで、ここでは、次の2つの仮定を用いて、特性方程式の近似解を求めることを考える。

$$\frac{1}{G_{xx}} = \frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_x} + \frac{2\nu_{xx}}{E_x} \quad (22)$$

$$\nu_{xx}^2, \nu_{zz}^2, \nu_{xx}\nu_{zz} \ll 1 \quad (23)$$

式(22)は、Barden²¹⁾により提案されたものであり、直交異方性で一相の線形弾性体に対する力学的解析を行う場合には、式(23)すなわちポアソン比の2次以上の項を無視するという仮定と組み合わせることで、解の表現が簡略化され、異方特性に対する見通しの良い解が得られることが知られている²²⁾。

式(22)、(23)の仮定のもとに、 F_1, F_2, F_3 は、

$$F_1 = -1 - N, F_2 = -N - (1/N), F_3 = N \quad (24)$$

のように簡略化され、特性方程式は次のように因数分解できる。

$$\frac{(\eta^2 - N)[\eta^4 + \{iA(1+B) - (1+M)\}\eta^2 - iA\{B + (1/N)\} + M]}{=} = 0 \quad (25)$$

解の公式を用いて下線部を解き、さらに、海底地盤の波浪応答を考える際の代表的な諸元を用いると、

$$A \gg 1 \quad (26)$$

となることを考慮して簡略化を行うと、特性方程式の近似解として次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \eta_1^2 &= N \\ \eta_2^2 &= \frac{1}{N} + \frac{N-1}{N} \frac{B}{1+B} \\ \eta_3^2 &= -iA(1+B) + M + \frac{N-1}{N} \frac{1}{1+B} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

特性方程式の解は、変位、間隙水圧の各項の鉛直方向の位相、減衰特性を支配するが、それらの値は、 N, M, A, B の4つの無次元パラメータを与えれば決定できることがわかる。なお、式(27)で、 $N \rightarrow 1$ の極限を取ると、 η_j ($j=1,2,3$) の値は、

$$\eta_1^2 = 1, \eta_2^2 = 1, \eta_3^2 = -iA(1+B) + M \quad (28)$$

となり、透水係数のみを異方性とした Madsen²⁾ の特性方程式の解と一致する。

b) 係数間の関係式の簡略化

式(26)を考慮すると、係数間の関係式は次のように簡略化できる。

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 &= \frac{i(1+B\zeta_1)}{\eta_1(1+B\zeta_1)}, \Gamma_2 = \frac{i(1+B\zeta_2)}{\eta_2(1+B\zeta_2)}, \Gamma_3 = \frac{i(1-\zeta_3)}{\eta_3(1-C_0)} \\ A_1 &= \frac{\zeta_1 - C_0}{1+B\zeta_1}, A_2 = \frac{\zeta_2 - C_0}{1+B\zeta_2}, A_3 = \frac{\zeta_3 - C_0}{1-C_0} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

ただし、 ζ_j ($j=1,2,3$) および C_0 は次式で定義される。

$$\zeta_j = \frac{(\alpha_{xx}/G_{xx}) - \eta_j^2}{(\alpha_{xx}/G_{xx})}, C_0 = \frac{1 + (\alpha_{xx}/G_{xx})}{(\alpha_{xx}/G_{xx})} \quad (30)$$

Γ_j および A_j は、 $A, B, M, N, \nu_{xx}, \nu_{xz}$ の関数となる。

c) 近似解析解の誘導

特性方程式の近似解として式(27)を、また、係数間の近似関係式として式(29)を用い、式(13)および式(18)等に代入することで、直交異方性海底地盤の波浪応答に対する近似解析解を得ることができる。この近似解析解では複素係数の3次方程式を解く必要はなく、解は陽な形で表現されるので、物理的に

表-1 地盤の特性

E_0	1.02×10^8 (N/m ²)
ν_0	0.30
n_0	0.454
k_0	1.0×10^{-4} (m/s)

表-2 波浪条件

周期	13.0 (s)
波高	10.0 (m)
水深	20.0 (m)

見通しの良い考察が可能になる。

以下の章で示す解析結果は、すべてこの近似解を用いて計算したものである。なお、この内のいくつかの結果に対して、厳密解を用いた結果との比較を行ったところ、定性的にも、定量的にも非常に良い一致が見られ、近似解の有効性が確認された。

3. 解析結果および考察

(1) 解析の条件

解析に際しては、緩い砂地盤と設計波規模の波浪を想定し、表-1, 2に示す地盤の特性および波浪条件を基準値(添字0をつけて表す)として用いた。これらの値は、海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会が設定⁵⁾したものである。

なお、微小振幅波理論に従えば、表-2の波浪条件下での波長は、約167.5 mとなる。また、これらの値を用いて、無次元パラメータ A の値を計算すると、 $A \approx 0(10^2)$ となり、式(26)の仮定の妥当性が確認できる。

先に述べたように、直交異方性線形弾性体の独立な弾性パラメータは $E_x, E_z, \nu_{xx}, \nu_{xz}, G_{xx}$ の5つである。弾性体のひずみエネルギーが正となるためには、これらの値は次の不等式を満足する必要がある²³⁾。

$$\left. \begin{aligned} E_x, E_z, G_{xx} &> 0 \\ -1 < \nu_{xx} < 1 \\ 1 - \nu_{xx} - 2(E_x/E_z)\nu_{xx}^2 &> 0 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

この必要条件を満たす範囲内で異方性の影響を検討するが、これらの条件は、かなりゆるやかな制約条件であり、実際の海底地盤で見られる異方性はこの範囲内の一部分に限定される。

砂地盤におけるヤング係数の異方性に関しては、Gatmiri¹³⁾, Silvestri ら¹⁴⁾は、Garnier²⁴⁾, Wiendick²⁵⁾の研究結果に基づき、次の範囲を採用している。

$$0.4 \leq N \leq 1.0 \quad (32)$$

本研究でもヤング係数の異方性の範囲として、式(32)を用いる。一方、ポアソン比に関しては、Gatmiri¹³⁾は、式(31)からその範囲を設定し、Silvestri ら¹⁴⁾は、Garnier²⁴⁾の結果をもとに、

0.1 ≤ v ≤ 0.4 の範囲が代表的としている。本研究では、式(23)の仮定の有効性も考慮し、ポアソン比の範囲として、次式を考え、式(31)と併用する。

$$0.1 \leq v_{xx}, v_{zz} \leq 0.5 \quad (33)$$

また、透水係数の異方性に関しては、Madsen²⁾とGatmiri¹³⁾にならない、次の範囲を想定する。

$$1.0 \leq M \leq 5.0 \quad (34)$$

以下では、まず、間隙水を非圧縮性と仮定できる飽和地盤の場合について解析を行い、次いで、より一般的な場合として、間隙水が気泡を含み圧縮性を持つ不飽和地盤の場合についての解析を行う。

(2) 飽和地盤に対する解析

a) 近似解析解の極限形

間隙水が気泡を含まない場合には、その体積弾性係数の値は、約 2×10^9 (N/m²) となり、先に示した解析条件下での無次元パラメータ B の値は、最大の場合で 0.1 程度となる。これは、飽和状態の砂地盤においても、間隙水の圧縮性の影響がわずかに存在する場合がある²⁰⁾ことを示唆している。しかしながら、本論文の解析対象となるケースの大部分においては、飽和地盤における B の値は、 10^{-2} 程度の小さい値を取る。また、等方性の場合には、飽和地盤において間隙水を非圧縮性として扱うことにより、物理的に見通しの良い解が得られることが知られており⁴⁾、直交異方性の場合にも同様の扱いをすることで、簡潔で物理的に見通しの良い解が得られることが期待できる。ここでは、以上の2点を考慮し、飽和地盤内の間隙水を非圧縮性として扱えると仮定して解析を行う。この時、

$$B \rightarrow 0 \quad (35)$$

となる。

式(35)の極限に対する近似解を求めると次式が得られる。なお、この時、式(13)中の第3項はすべてゼロになることがわかる。

$$\left. \begin{aligned} U(z) &= -i \frac{N}{(1-N^2)} \frac{p_0}{aG_{zz}} [\exp(-\sqrt{N}az) - \exp(-\frac{az}{\sqrt{N}})] \\ W(z) &= \frac{N}{(1-N^2)} \frac{p_0}{aG_{zz}} \times \\ &\quad \left[\frac{1}{\sqrt{N}} \exp(-\sqrt{N}az) - \sqrt{N} \exp(-\frac{az}{\sqrt{N}}) \right] \\ P(z) &= \frac{N}{(1-N^2)} p_0 \times \\ &\quad \left[(C_2 - N) \exp(-\sqrt{N}az) - (C_2 - \frac{1}{N}) \exp(-\frac{az}{\sqrt{N}}) \right] \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

ただし、 C_2 は次式で表され、 N, v_{xx}, v_{zz} の関数となる。

$$C_2 = \frac{\alpha_{zz}}{G_{zz}} - \frac{\alpha_{xx}}{G_{xx}} - 1 \quad (37)$$

また、有効応力の関数形は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\sigma}_{xx}(z) &= \frac{N}{(1-N^2)} \frac{(\alpha_{xx} - \alpha_{zz})}{G_{xx}} p_0 [\exp(-\sqrt{N}az) - \exp(-\frac{az}{\sqrt{N}})] \\ \tilde{\sigma}_{zz}(z) &= \frac{N}{(1-N^2)} \frac{(\alpha_{zz} - \alpha_{xx})}{G_{zz}} p_0 [\exp(-\sqrt{N}az) - \exp(-\frac{az}{\sqrt{N}})] \\ \tilde{\tau}_{xz}(z) &= i \frac{\sqrt{N}}{(N-1)} p_0 [\exp(-\sqrt{N}az) - \exp(-\frac{az}{\sqrt{N}})] \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \tilde{\sigma}_{xx}(z) \exp[i(ax - \omega t)] \\ \sigma_{zz} &= \tilde{\sigma}_{zz}(z) \exp[i(ax - \omega t)] \\ \tau_{xz} &= \tilde{\tau}_{xz}(z) \exp[i(ax - \omega t)] \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

である。

これが、飽和した直交異方性海底地盤の波浪応答に対する近似解析解である。

地盤が力学的に等方的な場合¹⁾と直交異方的な場合、両者の解に共通して見られる性質には次のようなものがある。まず、間隙水圧伝達の鉛直方向の位相遅れは存在せず、土粒子骨格の体積ひずみがゼロとなること。また、有効応力間の相対的な位相差に関して、鉛直方向と水平方向の有効応力が逆位相となり、せん断応力はそれより $\pi/2$ だけ位相が異なること。さらに、解は、地盤の透水性に依存しないことである。

式(36)で、さらに $N \rightarrow 1$ 、 $v_{xx} \rightarrow v_{zz}$ すなわち等方性の極限を取ってみる。この時、解は、0/0 の不定形になるので、ロピタルの定理を用いて計算を行うと、次の結果が得られる。

$$\left. \begin{aligned} U(z) &= -i p_0 \alpha_{zz} \exp(-az) / (2aG) \\ W(z) &= p_0 [\exp(-az) + az \exp(-az)] / (2aG) \\ P(z) &= p_0 \exp(-az) \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

これは、等方性の場合の Yamamoto¹⁾ の厳密解で、間隙水を非圧縮性とした極限の場合と一致する。

b) 近似解析解を支配する無次元パラメータ

次のような無次元の間隙水圧、有効応力を考える。

$$\bar{p} = \frac{p}{p_0}, \bar{\sigma}_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{p_0}, \bar{\sigma}_{zz} = \frac{\sigma_{zz}}{p_0}, \bar{\tau}_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{p_0} \quad (41)$$

式(2), (22), (36) および式(38)より、これらの値は、3つの無次元パラメータ N, v_{xx}, v_{zz} と無次元深度 az を与えることで完全に決定できる。すなわち、こ

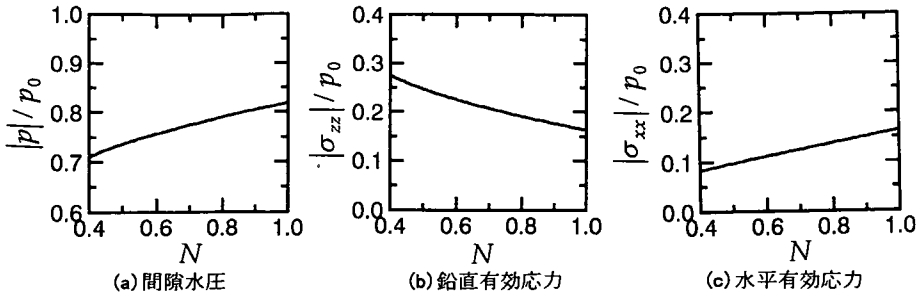


図-2 ヤング係数に関する異方パラメータの影響 (飽和地盤) ($az=0.2$ での振幅の変化)

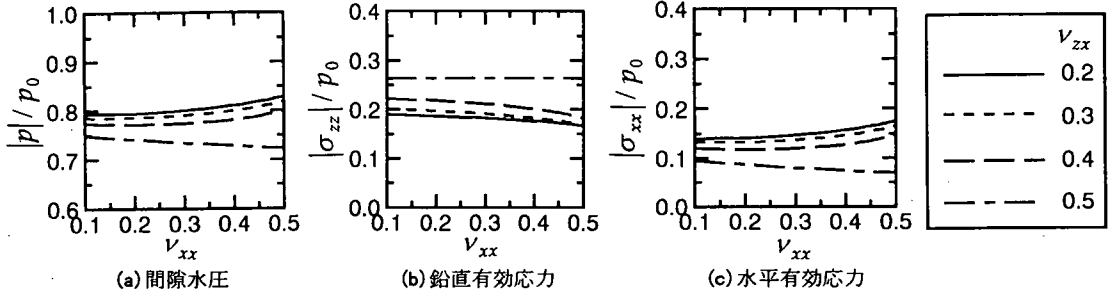


図-3 ポアソン比の影響 (飽和地盤) ($az=0.2$ での振幅の変化)

の3つの無次元パラメータが、直交異方性の飽和海底地盤の波浪応答を特徴づけるものとなる。

先に述べたように、飽和地盤では透水係数の異方性は解に影響を与えない。この点に関しては、Gatmiri¹³⁾の数値解析でも同様の結果が報告されている。一方、Madsen²⁾の透水異方性に関する解析結果においては、間隙水の体積弾性係数に飽和状態の値を仮定した場合にも透水異方性の影響が見られる。この違いは、次の2点によるものと考えられる。まず、本節では、間隙水を非圧縮性として扱ったが、実際には、間隙水の圧縮性の影響が若干存在すること。また、本論文では式(26)の仮定の下に解析を進めていることである。

c) ヤング係数に関する異方パラメータの影響

飽和地盤の場合には、ヤング係数は、 E_x や E_z の個々の大きさではなく、両者の比 N の形で解に影響を与える。したがって、飽和度の高い海底地盤の波浪応答を予測するには、両者の比 N の見積もりが重要となる。以下では、 $\nu_{xx} = \nu_{zz} = \nu_0$ とし、 N を変化させた時に、間隙水圧や有効応力の振幅(一周期中の最大値)がどう変化するかについての解析を行う。

図-2(a), (b), (c)は、無次元深度 $az=0.2$ の地点(表-1の波浪条件では地盤表面下約5mに相当)での間隙水圧および鉛直、水平有効応力の振幅が、 N に対してどう変化するかを示している。 N が小さい、すなわちヤング係数の異方性が強いほど、振幅

の値は小さく、間隙水圧の減衰が速いことがわかる。この間隙水圧の振幅の変化に対応して、鉛直有効応力の振幅は、逆に、 N が小さいほど大きい。一方、水平有効応力に関しては、 N が小さいほど振幅が小さい。また、 N に対する振幅の変化は、いずれもほぼ線形となっている。なお、せん断応力の振幅に対しては、 N の影響はほとんど見られなかった。等方性地盤においては、鉛直、水平有効応力、せん断応力の振幅の分布は、すべての地点で同一となるが、直交異方性の場合には、それは崩れることになる。

ν_{xx} や ν_{zz} あるいは az を他の値に変えて解析を行ってみたが、その場合にも同様の結果が得られた。

d) ポアソン比の影響

ここでは、 ν_{xx} および ν_{zz} の2つのパラメータの影響を検討する。図-3(a), (b), (c)は、無次元深度 $az=0.2$ の地点における間隙水圧および有効応力の振幅の値が、 ν_{xx} や ν_{zz} に対してどう変化するかを示す。なお、 $N=0.8$ として計算を行っている。

間隙水圧に関しては、一般に ν_{xx} が大きいほど振幅は大きい、 $\nu_{zz}=0.05$ の場合には、 ν_{xx} に対して緩やかに減少する傾向が見られる。次に、 ν_{zz} による変化を見ると、 ν_{xx} が大きいほど間隙水圧の振幅が小さい。両者による変化を比較すると、 ν_{xx} による変化の方が ν_{zz} による変化よりも大きい。一方、鉛直有効応力の振幅は、間隙水圧とは逆の傾向を示し、水平有効応

力の振幅は、間隙水圧と同様の傾向を示している。また、 N や α_z の値を変えても同様の結果が得られる。なお、式(38)より、せん断応力の振幅は、 v_{xx} や v_{zz} の影響を受けない。

e) 異方パラメータの影響の総括

以上の結果をまとめると次のことが言える。

飽和した直交異方性海底地盤の波浪応答は、式(36)および(38)の非常に簡潔な形で与えられる。この解の中には3つの異方パラメータ、 N 、 v_{xx} 、 v_{zz} が現れるが、その内では、 N と v_{xx} の2つが重要で、 N が小さく、 v_{xx} が大きい程、間隙水圧の振幅は小さく、鉛直有効応力の振幅は大きくなる。また、鉛直方向の位相遅れはなく、異方性が及ぼす影響は、すべての地盤深度において同じ傾向を示す。

異方パラメータの影響に関してここで得られた結果の多くは、Gatmiri¹³⁾の有限要素法による数値解析結果と定性的に良く一致する。大規模な数値解析を行わなくても、式(36)や(38)のような、簡潔な評価式で直交異方性海底地盤の波浪応答特性が検討できることは重要である。

(3) 不飽和地盤に対する解析

次に、より一般的な場合として、間隙水への気泡の混入を考慮した、不飽和地盤 ($B \neq 0$) に対する解析結果を示す。この時の間隙水の体積弾性係数の値には、 $\beta = 4.16 \times 10^7$ (N/m²) (飽和度 99.3%相当) を用いている⁵⁾。

なお、不飽和地盤中の間隙水の体積弾性係数は、絶対圧の変化量に依存し、静水圧状態からの間隙水圧の変動量が小さい場合のみ、その値を一定と仮定することができる。本解析では、波高が数メートル程度の場合を対象としており、間隙水の体積弾性係数の変動は、厳密には無視できない(この点に関して、名合²⁷⁾は、波による海底地盤の応答の基礎式が、不飽和地盤においては非線形になることを指摘している)。しかしながら、間隙水の体積弾性係数の時間および空間的な変動まで考慮して理論的検討を進めることはきわめて困難となるため、ここでは、簡単のために、間隙水の体積弾性係数は一定として解析を進めることとする。

a) 近似解析解を支配するパラメータ

不飽和地盤では、式(41)で定義される無次元の間隙水圧と有効応力の値は、飽和地盤の場合の無次元パラメータ N 、 v_{xx} 、 v_{zz} に加え、さらに3つの無次元パラメータ A 、 B 、 M の影響を受ける。すなわち、直交異方性の不飽和海底地盤の波浪応答を特徴づける無次元パラメータは6個となる。

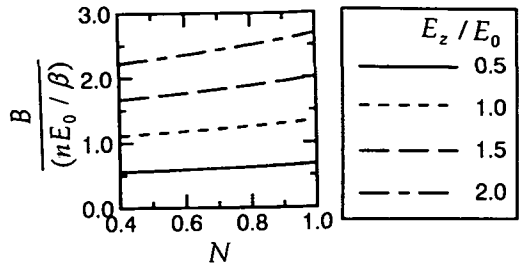


図-4 B と N 、 (E_z/E_0) の関係

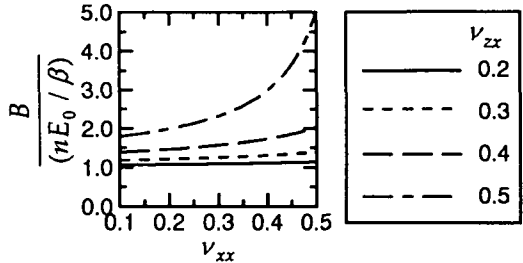


図-5 B と v_{xx} 、 v_{zz} の関係

A 、 B を N 、 v_{xx} 、 v_{zz} などを用いて表すと、

$$A = \frac{\gamma w}{a^2 k_z E_z} \frac{(1 - v_{xx} - 2N v_{zz}^2)}{(1 - v_{xx})} \quad (42)$$

$$B = \frac{n E_z}{\beta} \frac{(1 - v_{xx})}{(1 - v_{xx} - 2N v_{zz}^2)} \quad (43)$$

となり、 A は E_z および k_z に反比例し、 B は E_z に比例する。したがって、不飽和地盤の波浪応答は、異方パラメータの比 N 、 M に加え、 E_z および k_z の大きさの影響を受ける。

等方性の場合には、 B は、以下のようになる。

$$(B)_{isotropic} = \frac{n 2(1 - \nu)G}{\beta (1 - 2\nu)} \quad (44)$$

これは、等方性の場合の解の性質を特徴づける非常に重要なパラメータの1つであり、一般に、その値が大きいほど間隙水圧の減衰が速く、鉛直方向の位相差も大きい(表現のしかたは異なるが、 B に対応したパラメータの影響については、例えば、Okusa⁴⁾に詳しい)。直交異方性地盤においても B の影響は非常に大きいと考えられ、 B と異方パラメータの関連が重要な意味を持つ。

B と N 、 (E_z/E_0) 、 v_{xx} 、 v_{zz} の関係は、図-4、5のようになる。なお、図-4では、 $v_{xx} = v_{zz} = \nu_0$ として計算を行い、図-5では、 $N = 0.8$ 、 $E_z = E_0$ として計算を行っている。 N 、 (E_z/E_0) 、 v_{xx} 、 v_{zz} の値が大

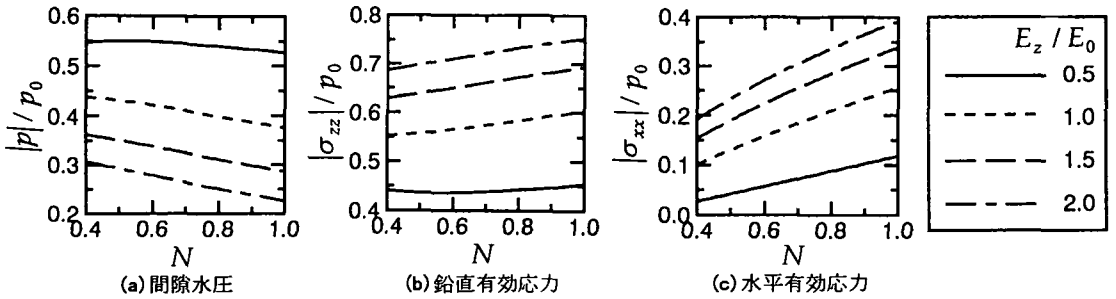


図-6 ヤング係数に関する異方パラメータの影響 (不飽和地盤) ($az=0.2$ での振幅の変化)

きいほど B の値が大きくなり、特に v_{xx} の影響が顕著である。これより、 N 、 (E_z/E_0) 、 v_{xx} 、 v_{zz} が大きいほど間隙水圧の減衰が速く、位相差も大きいこと、また、 v_{zz} が解に大きな影響を及ぼすことが予測できる。

先に示したように、直交異方性の不飽和海底地盤の波浪応答を特徴づける無次元パラメータは6個存在するが、この内の A および B は、他の3つの無次元パラメータ N 、 v_{xx} 、 v_{zz} と従属関係にある。このため、6つの無次元パラメータをそれぞれ独立に変化させてその影響を検討することは困難である。そこで、以下では、それぞれを独立に変化させることが可能な6つの異方パラメータ、 N 、 E_z 、 v_{xx} 、 v_{zz} 、 M 、 k_z を対象とし、個々のパラメータが、海底地盤の波浪応答特性にどのような影響を及ぼすかについて詳細な検討を行う。ただし、考察にあたっては、無次元パラメータ A あるいは B との関連を十分に考慮することとする。なお、不飽和地盤の場合には、無次元深度の値により、異方性の影響は異なる場合が多いが、ここでは、工学的に重要となる、地盤の表層付近を中心に検討を行う。

b) ヤング係数に関する異方パラメータの影響

図-6 (a), (b), (c) には、無次元深度 $az = 0.2$ における間隙水圧および有効応力の振幅が、 N に対してどう変化するかを示した。なお、このとき、 $M=1$ 、 $k_z=k_0$ 、 $v_{xx}=v_{zz}=v_0$ とし、 E_z の値を $E_z/E_0 = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ と4通りに変えて計算している。

間隙水圧振幅に対する影響に関しては、 N の値が大きいほど間隙水圧の振幅の値は小さいこと、また、 N を固定して、 E_z の値の大きさに対する変化を見た場合には、 E_z が大きいほど振幅が小さいことがわかる。これらの結果は先に B との関連から予想された通りである。

N に対する変化は、ここでは、飽和地盤の場合とは逆の傾向を示している。しかし、無次元深度を他の値に変えて解析を行った結果、地盤の深い部分

($az \geq 0.5$) では、表層部での N に対する変化の傾向とは逆に、 N の値が小さいほど間隙水圧の振幅の値が小さくなる傾向、すなわち飽和地盤の場合と同様の傾向がみられた。これは、式(13)中の間隙水圧の第3項は、地盤の深部では減衰が激しく、解は実質的に第1項と第2項の重ね合わせで表現されるため、飽和地盤の時の関数形に近づくためと考えられる。

有効応力に関しては、次のような影響が見られる。まず、鉛直有効応力の振幅は、 N が小さいほど小さくなり、間隙水圧とはほぼ逆の傾向を示している。また、水平有効応力については、 N が小さいほど振幅が小さく、 N に対してほぼ線形的な変化を見せているが、間隙水圧や鉛直有効応力の場合よりもその勾配は急激であり、 N の影響をより強く受けることがわかる。なお、せん断応力の振幅に対しては、ここでも N の影響はほとんど見られなかった。

無次元深度を他の値に変えて解析を行った結果、鉛直有効応力に関しては表層部と同様の結果が得られたが、水平有効応力に関しては、地盤の深い部分では、表層部での E_z に対する変化とは逆の傾向が見られた。

次に、鉛直方向の間隙水圧伝達の位相差についての検討を行った。振幅の場合と同じ範囲内で N および E_z を変化させて解析を行った結果、 N が小さくなるにつれて、位相遅れの鉛直方向の最大値が若干小さくなる傾向が見られた。一方、 E_z の値を変化させた場合には、位相差に与える影響は大きく、 $E_z/E_0 = 2.0$ の場合には、位相遅れの最大値が $E_z/E_0 = 1.0$ の場合の1.5倍程度にまで拡大された。また、位相差が極値をとる位置は、 E_z の値が大きくなるにつれて少しずつ下方へと移動した。なお、 N や E_z の位相差に対するこれらの影響も、 B との関連から予想された傾向と一致している。

c) ポアソン比の影響

図-7 (a), (b), (c) には、 $az = 0.2$ における、間

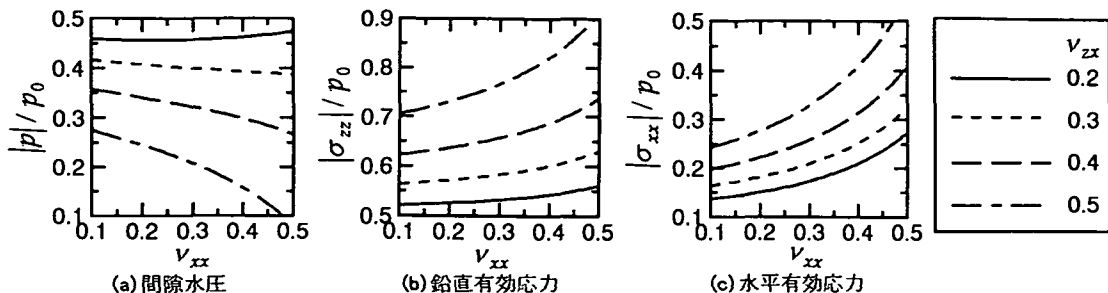


図-7 ポアソン比の影響 (不飽和地盤) ($az=0.2$ での振幅の変化)

隙水圧および有効応力の振幅が、 v_{zx} に対してどう変化するかを示した。なお、 $N=0.8$ 、 $M=1$ 、 $E_z=E_0$ 、 $k_z=k_0$ とし、 v_{zx} の値を 0.2 から 0.5 まで 4 通りに変えて計算してある。飽和地盤の場合と比較して、ポアソン比の影響が非常に大きいことが、これらの図より明らかである。

一般に、 v_{zx} および v_{xx} が大きいほど隙水圧の振幅は小さく、両者による変化を比較すると、 v_{zx} による変化の方が v_{xx} による変化よりも大きい。また、 v_{xx} が大きくなるほど、隙水圧振幅の v_{zx} に対する変化は急激になる。これらの性質も、 B と v_{zx} 、 v_{xx} の関連から予想される傾向と一致する。

有効応力に関しては次のような影響が見られる。まず、鉛直有効応力は、 v_{zx} や v_{xx} の値が大きいほど振幅が大きく、 v_{zx} および v_{xx} に対して隙水圧とは逆の変化傾向を示している。また、水平有効応力も v_{zx} や v_{xx} の値が大きいほど振幅が大きく、鉛直有効応力と類似の傾向を示しているが、 v_{zx} に対する変化は、鉛直有効応力の場合より顕著なものとなっている。この場合も、せん断応力はポアソン比の影響をほとんど受けない。なお、地盤深度を変えて解析を行って見たところ、隙水圧と鉛直有効応力に関しては、すべての深度において表層部と同様の影響が見られたが、水平有効応力に関しては、深い部分では v_{zx} に関して表層部とは逆の傾向、すなわち v_{zx} が小さいほど振幅が大きいという結果が得られた。

次に、鉛直方向の隙水圧伝達の位相差についての検討を行った。振幅の場合と同じ範囲内で v_{zx} および v_{xx} を変化させて解析を行ったところ、 v_{zx} の方が v_{xx} より位相差に与える影響が大きいという結果が得られた。これも、 B の値が v_{zx} より v_{xx} の値に敏感であるためと考えられる。鉛直方向の位相遅れは v_{zx} が大きいほど大きくなり、また、極値をとる位置が少しずつ下方へと移動する。 $v_{zx}=0.5$ の場合には、

位相遅れの最大値は、 $v_{zx}=v_{xx}=v_0$ の場合の 2.5 倍程度まで拡大された。

d) 透水係数に関する異方パラメータの影響

$N=0.8$ 、 $E_z=E_0$ 、 $v_{zx}=v_{xx}=v_0$ とし、 M の値を 1.0 から 5.0 まで、 k_z/k_0 の値を 0.2 から 5.0 まで変化させて、 M および k_z の影響に関する検討を行った。その結果、隙水圧、有効応力のいずれに対しても M の影響は非常に小さいが、 k_z の大きさに対しては、 k_z が大きいほど、隙水圧の振幅が大きく、鉛直有効応力の振幅が小さくなることがわかった。ただし、 k_z による違いも地盤表面近傍の浅い部分に限定され、 $az \geq 0.5$ の領域では、その影響は非常に小さいものとなった。これは次のように説明できる。

不飽和地盤の解に対して、 M が寄与するのは、 η_3 の部分のみである。しかし、今の場合、 $\alpha(M) \approx 1$ と $\alpha(A) \gg 1$ を考慮すると、

$$\eta_3^2 \approx -iA(1+B) \quad (45)$$

となり、 M の値は、 η_3 の値には大きな影響を与えない。したがって、 M が解に与える影響も小さくなる。一方、 k_z の大きさは、無次元パラメータ A の大きさと比例し、 A を通して解に影響を与える。しかし、これも式(13)中の第3項への寄与が主体である。第3項は、地盤表面付近で急激に減衰し、深い部分での解は第1項と第2項で支配されることから、 k_z の影響は地盤表面付近に限られることになる。なお、Madsen²⁾は、透水性の良い地盤では透水の異方性が海底地盤の波浪応答に大きな影響を与えるとしているが、厳密に言えば、透水の異方性の影響は、透水性と波浪特性の両方を組み込んだ形で判断する必要がある。ここでの考察より、 M の影響が顕著になるのは、 $\alpha(M) \approx \alpha(A)$ となる場合に限られるということが言える (Madsen²⁾の解析例で透水異方性の影響が顕著なケースでは、確かに、 $\alpha(M) \approx \alpha(A)$ となっている)。なお、このような場合には、式(26)の仮

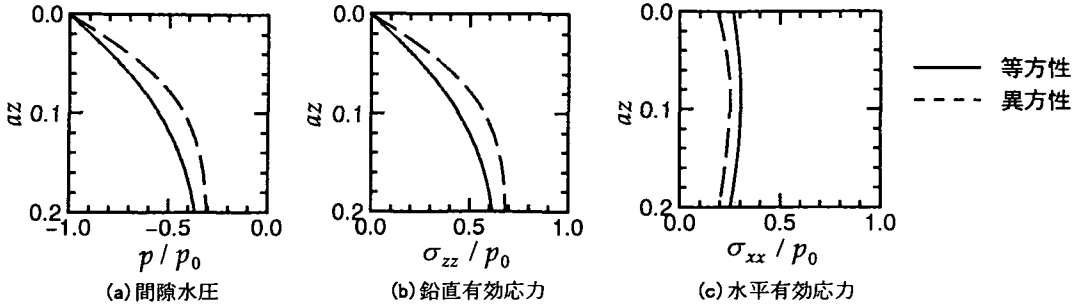


図-8 等方性地盤と異方性地盤の比較 (不飽和地盤) (波谷での鉛直分布)

定が崩れるので、近似解でなく厳密解を用いて検討を行う必要がある。

e) 異方パラメータの影響に関する総括

以上の結果をまとめると次のことが言える。不飽和な直交異方性海底地盤の波浪応答では、 A と B の 2 つの無次元パラメータが重要となる。ヤング係数やポアソン比に関する異方パラメータは、主に B との関連を通して、直交異方性海底地盤の波浪応答特性に影響を与える。このため、ヤング係数やポアソン比に関する異方パラメータの影響については、 B との関連からその傾向をおおよそ予測できる。一方、透水係数に関するパラメータは、 A との関連を通して波浪応答特性に影響を与える。しかし、通常の場合には透水異方性の影響は小さく、その影響は表層付近に限定される。

こうした考察は、特性方程式の近似解が陽な形で表されて初めて可能となる。前章で得られた近似解は、直交異方性海底地盤の波浪応答特性の計算を簡略化するのみでなく、その特性の統一的な解釈にも大きな役割を果たしているといえる。

f) 等方性地盤と異方性地盤の比較

前節までは、異方パラメータの個々の影響について詳細な議論を行ってきた。ここでは、直交異方性地盤と等方性地盤に対する海底地盤の波浪応答特性の簡単な比較を行い、異方特性を考慮することの重要性を示す。

図-8 (a), (b), (c) は、波谷の位相での間隙水圧と鉛直および水平方向の有効応力の鉛直分布を地盤の表層付近で比較したものである。なお、直交異方性地盤の物性値は次のように設定している。

$$\left. \begin{aligned} E_x = E_0 / \sqrt{2}, E_z = \sqrt{2} E_0 \quad (N=0.5) \\ \nu_{xx} = 0.25, \nu_{zz} = 0.4 \\ k_x = \sqrt{5} k_0, k_z = k_0 / \sqrt{5} \quad (M=5.0) \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

一方、等方性地盤に対しては、直交異方性地盤の水平、鉛直方向の物性値を平均化した次のような値を

用いている。

$$E_x = E_z = E_0, \nu_{xx} = \nu_{zz} = 0.3, k_x = k_z = k_0 \quad (47)$$

解析結果を見ると、この例では、直交異方性の場合の方が、過剰間隙水圧や鉛直有効応力の値が大きい。これは、直交異方性の場合の方が、全鉛直有効応力(静水状態の鉛直応力成分を足し合せたもの)の値が引張り側に近づき、地盤の不安定性が強まることを意味している。つまり、異方特性を平均化した等方性モデルは、この場合、危険側の評価を与えていることになる。この例では、過剰間隙水圧や有効応力の値に、等方性の場合と比較して 10~30%程度の差が出ており、海底地盤の波浪応答特性に対して異方パラメータが与える影響は非常に重要となっている。

一般に、力学的あるいは透水の異方パラメータの個々の影響は、場合により、互いに強め合うかあるいは打ち消し合うかして相乗効果を生み出す。相乗効果により異方性の影響が強まった場合には、間隙水圧や有効応力の分布さらには海底地盤の波浪安定性に与える効果はさらに大きくなり、異方性の影響は無視できない。

4. 結論

海底地盤を直交異方性線形弾性体の土粒子骨格と気泡を含む間隙水との混合体としてモデル化し、力学的異方性および透水異方性に関する異方パラメータが、海底地盤の波浪応答特性に及ぼす影響を理論的に検討した。その主要な成果は以下のようにまとめられる。

- 1) 直交異方性海底地盤の波浪応答に対する基礎方程式をBiotの理論に基づいて定式化し、微小振幅の進行波と半無限の一様地盤に対する解析解を陽な形で提示した。
- 2) 直交異方性海底地盤の波浪応答を特徴づける無次

元パラメータを飽和地盤と不飽和地盤のそれぞれの場合について抽出し、異方パラメータとの関連を示した。さらに、地盤内の間隙水圧の減衰や有効応力の分布に異方パラメータが与える影響に関する詳細な解析を行い、無次元パラメータとの関連に基づいて、その特性を明らかにした。

- 3) 等方性地盤の場合と直交異方性地盤の場合の解析結果の比較を行い、異方パラメータが互いにその影響を強め合う場合には、地盤の異方性の影響は無視できないことを示した。

謝辞：本研究を進めるにあたり、矢富盟祥教授(金沢大学)および廣部英一助教授(福井高専)には有益な御助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) Yamamoto, T., Koning, H. L., Sellmeijer, H. and Hijum, E. V. : On the response of a poro-elastic bed to water waves, *J. Fluid Mech.*, Vol. 87, No. 1, pp. 193-206, 1978.

2) Madsen, O. S. : Wave-induced pore pressures and effective stresses in a porous bed, *Geotech.*, Vol. 28, No. 4, pp. 377-393, 1978.

3) Mei, C. C. and Foda, M. A. : Wave induced responses in a fluid filled poro-elastic solid with a free surface a boundary layer theory, *Geophys. J. R. Astr.*, Vol. 66, pp. 597-631, 1981.

4) Okusa, S. : Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments, *Geotech.*, Vol. 35, No. 4, pp. 517-532, 1985.

5) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会：海岸波動，第V編 波浪と海底地盤の相互干渉，pp. 431-516，土木学会，1994

6) 土木学会海洋開発委員会波浪・海底地盤・構造物相互作用研究小委員会：海岸海洋構造物基礎地盤の波浪安定性，土木学会論文集，No. 539/II-35，pp. 1-14，1996.

7) 名合宏之：変動水圧による砂層の液状化に関する研究，第26回水理講演会論文集，pp. 589-594，1982.

8) 善 功企，山崎浩之，渡辺 篤：海底地盤の波浪による液状化および高密度化，運輸省港湾技術研究所報告第26巻，第4号，pp. 125-180，1987.

9) 酒井哲郎，畑中克也，間瀬 肇：波浪による海底地盤内間隙水圧変動解の適用性と地盤の液状化条件，土木学会論文集，No. 417/II-13，pp. 275-283，1990.

10) 小田匡寛，風間秀彦：土と岩盤の構造異方性，土と基礎，41-4，pp. 73-80，1993.

11) Yamamoto, T. : Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogeneous seabed foundation, *Ocean Engng.*, Vol. 8, pp. 1-16, 1981.

12) 三浦均也，大田 匠，吉田 望：重複反射法による層状海底地盤の挙動解析，第39回土質工学シンポジウム発表論文集，pp. 49-56，1994.

13) Gatmiri, B. : Response of cross-anisotropic seabed to ocean waves, *J. Geotech. Eng.*, Vol. 118, No. 9, pp. 1295-1314, 1992.

14) Silvestri, V., Soulie, M., Marche, C. and Louche, D. : Effect of soil anisotropy on the wave-induced pore pressures in the seabed, *J. Energy Resources Tech.*, Vol. 107, pp. 441-449, 1985.

15) 矢富盟祥，由比政年，石田 啓，廣部英一：海底地盤の波浪応答に対する地盤の異方性の影響，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1011-1015，1995.

16) 小田匡寛：地盤の異方性，土と基礎，42-3，pp. 83-84，1994.

17) Biot, M. A. : General theory of three dimensional consolidation, *J. Appl. Phys.*, Vol. 12, Feb., pp. 155-164, 1941.

18) Lekhnitskii, S. G. : *Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body*, Holden-Day, Inc., 404p, 1963.

19) 名合宏之，前野詩朗：変動水圧作用下における高飽和砂層の動的現象の相似律に関する研究，土木学会論文集，No. 509/II-30，pp. 45-53，1995.

20) Yamamoto, T. : Wave induced instability in seabeds, *Proc. of ASCE Spec. Conf., Coastal Sediments*, pp. 898-913, 1977.

21) Barden, L. : Stresses and displacements in a cross anisotropic soils, *Geotech.*, No. 13, Vol. 3, pp. 198-210, 1963.

22) 諸戸靖史：平面ひずみ直交異方性弾性地盤の応力と変位式，土と基礎，32-11，pp. 65-70，1984.

23) Pickering, D. J. : Anisotropic elastic parameters for soil, *Geotech.*, Vol. 20, No. 3, pp. 271-276, 1970.

24) Garnier, J. : Settlements and Stresses; Influence of the rigidity of the foundation and the anisotropy of the mass, Ph. D thesis, University of Grenoble, France, 1973.

25) Wiendick, K. : L'anisotropie des milieux pulverulents et son influence sur les tassements, *Publications Scientifiques du Ministere de l'Air*, Paris, No. 41, 1968.

26) Nago, H. and Maeno, S. : Pore pressure and effective stress in a highly saturated sand bed under water pressure variation on its surface, *Natural Disaster Science*, Vol. 9, No. 1, pp. 23-35, 1987.

27) 名合宏之：砂層内水圧変動と液状化，第18回水工学に関する夏期研修会講義集，A-9，pp. 1-15，1982.

(1996. 11. 11 受付)

THEORETICAL ANALYSIS OF THE RESPONSE OF A CROSS-ANISOTROPIC SEABED TO OCEAN SURFACE WAVES

Masatoshi YUHI and Hajime ISHIDA

Wave-induced pore water pressures and effective stresses are analyzed theoretically for a cross-anisotropic seabed with a vertical axis of symmetry. Analytical solutions based on the Biot's poro-elastic theory are derived in explicit form and the important parameters which governs the characteristics of the solutions are clarified. The effects of anisotropy of the Young modulus, the Poisson's ratio, and the permeability are investigated in detail for both a fully saturated and a slightly unsaturated seabed. The results show the significant influence of anisotropy on the pore water pressure and the effective stress distribution in the seabed.