

海底地盤の波浪応答における間隙水圧の伝達特性に地盤の層厚を与える影響

金沢大学工学部 ○(正) 由比政年 (正) 矢富盟祥 (正) 石田 啓
福井高専 (正) 広部英一

1. はじめに 海底地盤の波浪応答を知るには地盤内の間隙水圧の伝達特性の把握が必要であり、間隙水の圧縮性がそれに対して大きな影響を持つことが多くの研究¹⁾で報告されている。一方、地盤の特性も間隙水圧の伝達に関与し、地盤の異方性や層厚の変化により、間隙水圧の振幅減衰や位相遅れの特性が変化する。異方性の影響については別の機会に譲り²⁾、本報では層厚が間隙水圧の伝達特性に及ぼす影響について報告する。

2. 基礎方程式および境界条件 海底地盤を、等方な多孔性の線形弾性体と間隙水の混合体と考え、Biotの理論に基づいて解析を行う。水平方向にX軸、鉛直上向きにZ軸を取ると基礎方程式は次のように表される。

$$\frac{k}{\gamma} \nabla^2 p = \frac{n}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, G \nabla^2 u + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x}, G \nabla^2 w + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} \dots (1)$$

ここで、 u, w は地盤の水平および鉛直方向変位、 p は間隙水圧であり、静水圧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、 E, ν は地盤のヤング係数とポアソン比、 k, n, G, ε は地盤の透水係数、間隙率、せん断弾性係数および体積ひずみをそれぞれ表す。本解析では、地盤表面での間隙水圧の変動は微小振幅波理論を仮定し、地盤の厚さが有限の場合を考え、地盤の表面及び底面で次の境界条件を課した。

$$z=0; \sigma_{zz}=0, \sigma_{xz}=0, p=p_0 \exp[i(\lambda x + \omega t)], z=-h; u=0, w=0, \partial p / \partial z = 0.$$

3. 解析解の導出 Yamamotoの手法に従い次のようにして解を求める。まず、境界条件が時間及び空間(x 方向)に関して周期的であることから、任意点での解も調和振動的な形を仮定する。

$$u=U(z) \exp[i(\lambda x + \omega t)], w=W(z) \exp[i(\lambda x + \omega t)], p=P(z) \exp[i(\lambda x + \omega t)]$$

これを先に示した基礎方程式に代入して得られた特性方程式を解き、さらに U, W, P の各項の係数は独立ではなく式(1)を満たすという条件と境界条件から次のような形の解が決定される。

$$P(z) = c_1 \exp(\lambda z) + c_2 \exp(-\lambda z) + c_3 z \exp(\lambda z) + c_4 z \exp(-\lambda z) + c_5 \exp(\lambda' z) + c_6 \exp(-\lambda' z)$$

ただし、 $\lambda'^2 = \lambda^2 + i(\gamma \omega / k)(n/\beta + (1-2\nu)/(2(1-\nu)G))$ であり、 U, W についても同様に表せる。(なお、 c_3, c_4 はゼロとなる。¹⁾紙面の都合上省略するが、この理論解を求めそれを用いて以下の解析を行った。

4. 解析結果および考察 まず、 λ は実数、 λ' は複素数であり、また、 $\text{Re}(\lambda') \gg \lambda > 0, \text{Im}(\lambda') > 0$ であることをふまえ、 P の各項の特性についてまとめておく。まず、 P の第1項は深さ方向にゆるやかに減衰し、位相変化はない。逆に第2項は深さ方向にゆるやかに増加するが、位相変化はない。一方、 P の第5項は深さ方向に関して急激に減衰し、位相遅れを持つ。逆に P の第6項は深さ方向に急激に増大し、位相進みを持つ。 P はこの4項の重ね合わせで表されることから、これらの項の係数の大きさのバランスにより振幅減衰の緩急、位相遅れの大小がある程度予測できる。なお、地盤の層厚は λ, λ' には影響しない。

まず、地盤の層厚 h を変化させたときの、 $|c_1|, |c_2|, |c_5|, |c_6|$ の変化を調べてみた。その結果を図1に示す。ただし、ここでは、設計波規模の波浪と緩い砂地盤を想定し、表1~3に示す値を用いている。 $|c_2|$ は単調に減少して0に近づき、 $|c_1|$ は逆に単調に増加して $h > 80\text{m}$ でほぼ一定となる。一方、 $|c_5|$ はすみやかに単調減少して0に近づくが、 $|c_6|$ に関しては変化は単調とはならず、2つのピーク($h=2\text{m}, 25\text{m}$ 付近)を持ち、 $h > 80\text{m}$ でほぼ一定値をとる。上に述べた各項の性格を考え合わせると、 $h=2\text{m}, 25\text{m}$ 付近で間隙水圧の振幅減衰および位相遅れが大きくなることが予想される。そこで、 $h=2\text{m}, 25\text{m}$ 前後で h を3通りに変化させ、それぞれの場合での間隙水圧の伝達特性を比較してみた。その結果を図2, 3に示す。振幅減衰では大きな差は見られないが、位相遅れは $h=2\text{m}, 25\text{m}$ 付近で大きくなっている。その結果、過剰間隙水圧の値もほかの場合より大きくなり、海底地盤はより不安定となっている。

5. 結論 設計波規模の波浪と緩い砂地盤を想定し、海底地盤の層厚が間隙水圧の伝達に及ぼす影響を調べた。地盤の層厚により間隙水圧の伝達特性は異なり、振幅減衰と位相遅れは、地盤がある厚さを有するときに最大

（極大）となり、その場合海底地盤の不安定性が強まることがわかった。また、今回用いた波浪および地盤の条件の下では、間隙水圧の位相遅れが極大となる層厚の値は2箇所（約2m, 25m）ほどみられた。

表1 地盤の物性値

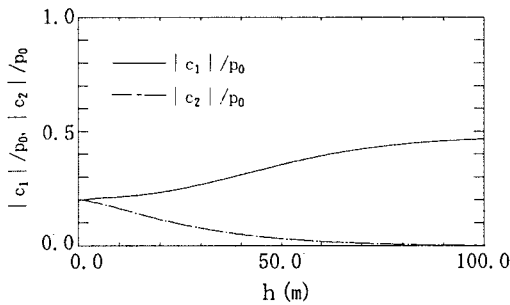
E	1.0192E+8 (N/m ²)	n	0.454
ν	0.30	k	1.0E-4 (m/s)

表2 波浪の諸元

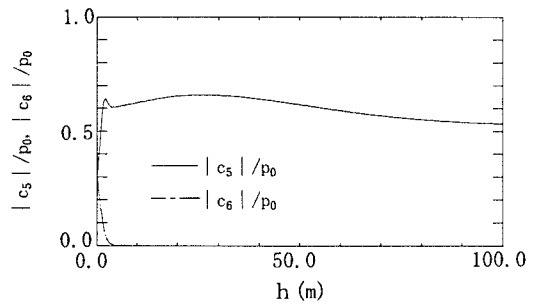
水深	20.0 (m)
波高	10.0 (m)
周期	13.0 (sec)

表3 間隙水の物性値

γ	9.73604E+3 (N/m ³)
β	4.2373E+6 (N/m ²)
S (飽和度)	99.28(%)

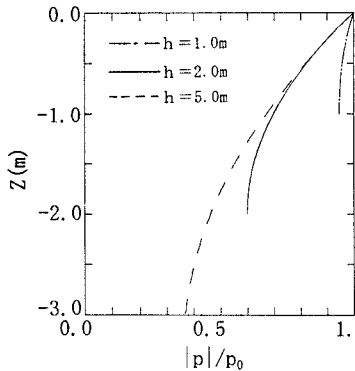


(a) $|c_1|$ および $|c_2|$

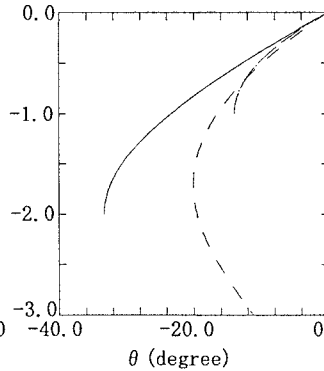


(b) $|c_5|$ および $|c_6|$

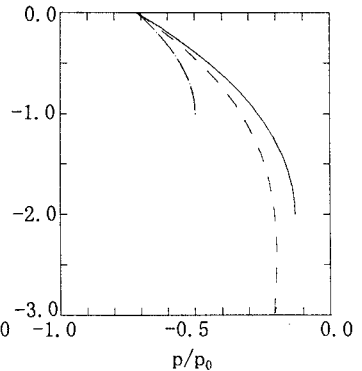
図1 間隙水圧各項の係数の大きさの地盤厚さによる変化



(a) 振幅

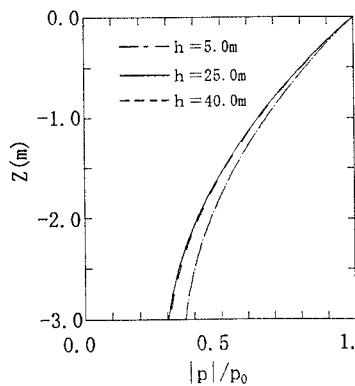


(b) 位相遅れ (—: 遅れ)

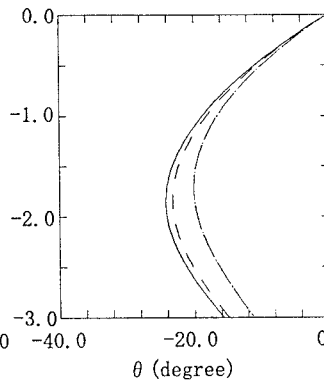


(c) 波の峰の通過後の間隙水圧

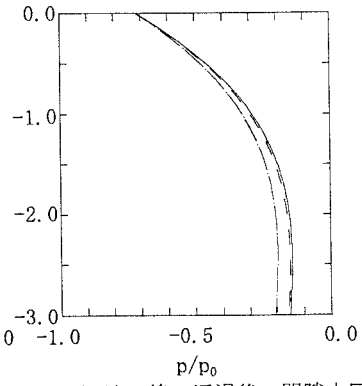
図2 地盤の厚さによる間隙水圧の伝達特性の変化



(a) 振幅



(b) 位相遅れ (—: 遅れ)



(c) 波の峰の通過後の間隙水圧

図3 地盤の厚さによる間隙水圧の伝達特性の変化

（参考文献）1) 例えば, Yamamoto et. al. (1978), J. F. M., Vol. 87, No. 1, pp. 193-206.

2) 矢富, 由比, 石田, 広部. (1995) 海岸工学論文集 (投稿中) .