

海底地盤の層厚を考慮した波浪作用下の地盤内応力と底質移動に関する一考察

豊橋技術科学大学 学生会員 ○佐藤隼可 加藤悠貴
豊橋技術科学大学 正会員 松田達也 三浦均也

1. はじめに

既往の研究¹⁾では、海底地盤の不安定化現象について、地盤内の水圧変動に関する検討を行ってきた。しかし、海底地盤の移動現象を考えると、地盤内の応力変化に加え掃流力となる流速についても考慮する必要がある。そこで、本研究では水圧と流速の影響を考慮した海底地盤の不安定化による底質移動について、解析的に検討することを目的とした。また、本検討においては、これまで海底地盤の層厚を無限と仮定した検討を実施してきたが、より実地盤を対象とした地盤不安定化のメカニズムを考察するため、層厚を有限としたケーススタディを行い、その影響について考察した。

2. 波浪に対する応答解析の手法

海底地盤と波浪の相互作用は、力学的には多孔質体と流体の相互作用であり、多孔質体としてのモデル化および定式化が必要である。既往の研究により [u-p]formulation による一次元擬似動的条件による解析で十分な精度の応答が得られることがわかっている²⁾。以下にその支配方程式を示す。

$$\begin{aligned} -(F+G)\frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial z^2} - G\frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial \Delta p}{\partial z} &= 0 \\ -B_f \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial t \partial z} + B_f \frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial z^2} - \frac{\partial \Delta p}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 Δu_z は固体相の変位増分ベクトル、 Δp は間隙水圧増分、 F と G は剛性、 k はDarcyの透水係数、 B_f は流体相と液体相を平均化した流体の体積圧縮係数である。不透水層の上に厚さ D の均質な材料が堆積しており海底面には角振動数 ω 、海底面における水圧変動の振幅 p_0 が作用している場合の境界条件は 地盤表層($z=0$): $\Delta p=p_0 e^{i\omega t}$ $\Delta \sigma'_z=0$, 地盤基部($z=h$): $\partial \Delta p / \partial z=0$ $\Delta u_z=0$ とした境界条件より(1)式を解くと次式が得られる。

$$\Delta p = p_0 [B' + (1-B')e^{-\zeta z}] e^{i\omega t} \quad (2)$$

ここで、 B' はSkemptonの一次元変形における間隙水

圧係数であり、 $B'=B_f/(\lambda+2G+B_f)$ で定義される。また $\zeta = \sqrt{i\omega h_v}$ であり、 h_v は水理圧密係数と呼ばれ、飽和度を考慮した圧密係数 C_v の逆数となる。海底地盤内の鉛直有効応力変動 $\Delta \sigma'_z$ および鉛直有効応力 σ'_z は以下の式より得られる。

$$\begin{aligned} \Delta \sigma'_z &= p_0 e^{i\omega t} - \Delta p = p_0 [(1-B')(1-e^{-\zeta z})] e^{i\omega t} \\ \sigma'_z &= (\rho_t - \rho_w)gz + \Delta \sigma'_z \end{aligned} \quad (3)$$

3. 解析条件

本研究で使用する基本的な波浪および地盤のパラメータは表-1、表-2に示す。密な砂については緩い砂との比較のため用いる。波長 L および海底面における水圧振幅 p_0 は微小振幅波理論より得られる。

表-1 波浪条件

周期T	波高H	水深d	波長L	水の密度 ρ_w	海底面の水圧振幅 p_0
13s	10m	20m	167.6m	1000kg/m ³	37900kg/m ²

表-2 地盤条件

	地盤密度 ρ_t	土粒子密度 ρ_s	透水係数k	間隙水圧係数 B'	水理圧密定数 h_v
緩い砂	1900kg/m ³	2650 kg/m ³	1.0×10^{-4} m/s	0.4	1.75
密な砂	1900kg/m ³	2650 kg/m ³	1.0×10^{-5} m/s	0.7	3.34

4. 解析結果

図-1は波浪による鉛直有効応力 σ'_z の変化について間隙水圧増分 Δp の関係を表している。地盤層厚 $h=3.0$ mとしたときの海底地盤の深さ $z=1.0$ m~ 3.0 mで変化させた場合の応答である。実線は緩い砂、点線は密な砂の解析結果である。

緩い砂では $z=1.0$ mと 2.0 m地点で液状化に至った。 $z=3.0$ mでは液状化に至っていないが、有効応力の減少が見られる。 $z=3.0$ mでは鉛直有効応力は海底地盤内部へ深くなる程増大するため、それに伴い間隙水圧変動差が小さくなったため液状化には至らなかったと考えられる。また、観測地点が深くなるにつれ、間隙水圧の変動幅が狭くなる挙動は海底地盤の層厚を無限と仮定した場合にも見られた挙動であり、海底面に作用する水圧変動は深さとともに減衰するのが多孔質材料としての性質と推測される。

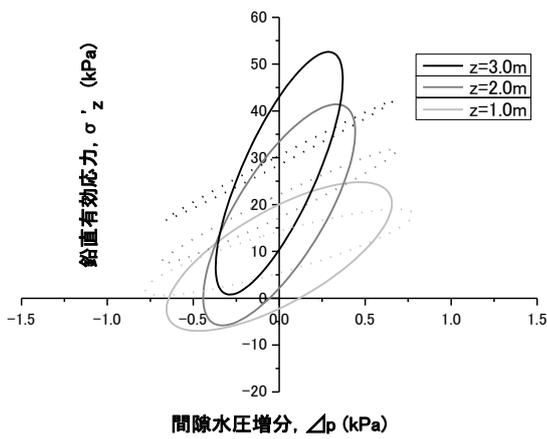


図-1 h=3.0m に対する各地点での応答

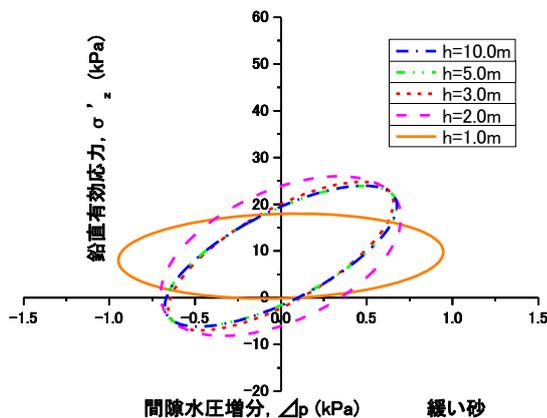


図-2 z=1.0m に対する各層厚での応答

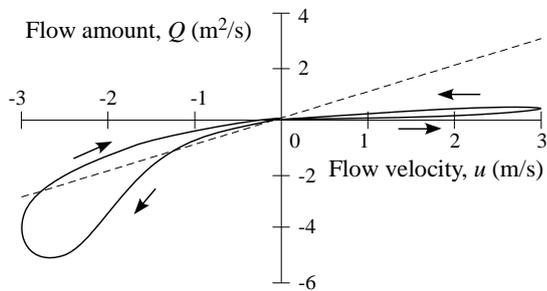


図-3 底面流速と底質移動量の関係

密な砂では緩い砂の時に見られた $z=1.0\text{m}$, 2.0m 地点では液状化しないことがわかった。透水係数が低くなると、流速が低下し、海底地盤内部への浸透量が低くなると考えられる。よって、海底地盤表層と内部での間隙水圧の変動差が小さくなり、液状化しなかったのだと考えられる。また、間隙水圧に大きな変動がないために、緩い砂と比べて鉛直有効応力が増大しなかった。

図-2 は海底地盤の深さ $z=1.0\text{m}$ の時に地盤の層厚を $h=1.0\text{m}$, 2.0m , 3.0m , 5.0m , 10.0m の 5 パターンに変化させて応答をまとめたものである。文面の都

合上、緩い砂の解析結果のみ記載する。緩い砂における $h=1.0\text{m}$ のグラフは、液状化せず左右対称に広がっている。これは、地盤の層厚が短いために海底地盤表層と内部で間隙水圧の位相差が生じなかったからだと推測した。 $h=2.0\text{m}$ の時から位相差が生じ、不安定化の影響が現れた。 $h=3.0\text{m}$ 以降では鉛直有効応力と間隙水圧の関係に大きな変化はなくグラフがほぼ重なった。密な砂では $h=1.0\text{m}$ の時から位相差が生じているが、 $h=2.0\text{m}$ 以降でも液状化していない。また $h=2.0\text{m}$ 以降でグラフの変化がほぼ見られなくなった。不安定化の影響についてはやはり、透水係数の低下により地盤表層付近の流速が下がり海底地盤内部へ与える影響が少なくなったと考えられる。

次に、底質移動に関して海底面における流速に地盤内応力の変動を考慮したシーلز数を算出し、それにより底質移動量 $Q(=z_c \cdot u_b)$ (m^2/s) を算定した。図-3 には底面流速と底質移動量の関係を示す。既往の研究により底面流速が負となる進行方向と逆向きのときに有効応力が低下することから、底質移動量が急激に増大することがわかる。

5. 結論

- 不安定化の影響は海底地盤内部へ深くなる程過剰間隙水圧の減少に伴い少なくなる。また、海底地盤の層厚が短い場合も位相差が生じにくいことにより不安定化の影響が少なくなる。
- 有効応力が最も減少するのは流速が波浪方向と逆向きのピーク時であり、このとき海底地盤の不安定化と洗掘が同時に生じることで土粒子移送量が冲向きに最大となる。

参考文献

- 三浦均也, 森政信吾, 大塚夏彦, 山崎浩之, 小浪岳治(2010): “海底地盤の不安定化に及ぼす流速と水圧変動の相乗効果”, 土木学会論文集 B2 vol.66 No1,2010, 851-855
- 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.223-24