

波浪による円柱構造物周辺の海底地盤の有効応力と流速のベッセル関数を用いた解析

豊橋技術科学大学大学院 学生会員 ○齋藤 裕也
豊橋技術科学大学 正会員 三浦 均也 松田達也

1. はじめに

台風や低気圧の接近に伴う荒天時において、沿岸や海洋の諸施設が被害を受けることがある。この際、海底面に作用する水圧の変動が海底地盤を不安定にし、被害を拡大することが多い。一般的に海岸工学分野では、海底面における流速とそれに関連する底質の移動に着目することにより、海底地盤の「洗掘現象」の枠組みで地盤や施設の不安定化が検討される。一方、地盤工学分野では、海底面に作用する水圧の変動に対する海底地盤の連続体としての応答に着目して、「鉛直有効応力の減少・液状化現象」について検討される。両者の発生のタイミングが一致すれば、その相乗効果により海底地盤の不安定化が加速されると考えられる。

本研究の目的は、海底地盤の不安定化に及ぼす「洗掘現象」と「鉛直有効応力の減少・液状化現象」の相乗効果を解析的に検討することであり、特に波浪を受ける円柱構造物周辺で議論することである。

本研究では、円柱構造物の周辺における底質の移動方向をパラメトリックに算定し、その定性的な特徴を検討した。

2. 海底地盤における鉛直有効応力の変動

海底地盤は間隙が水や空気を満たされているため、多孔性の材料として扱わなければならない。多孔性の材料は数学的な扱いが難しいため、固体相と流体相の二相系として扱うことにする。また、既往の研究¹⁾から u - p モデルの一次元擬似動的条件の支配方程式によって十分な精度で解析を行えることがわかっている。以下にその支配方程式を示す。

[u - p] formulation

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

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、 G はせん断定数、 λ は Lamé の定数、 k は Darcy の透水係数、 B_f は気体相と液体相を平均化した流体の体積圧縮係数である。不透水性岩盤上の一様な厚さ D を有する単一海底地盤層を境界条件として想定すると、層の上面（海底面）には波浪による周期的な水圧変動が作用し有効応力はゼロ、下面では変位が固定であり、鉛直方向の浸透流がゼロとなる。以下の境界条件を解くと、(2)式が得られる。

$$\begin{aligned} \text{地盤表面: } (z=0) \quad \Delta p &= p_0 e^{i\theta}, \Delta \sigma_z = 0 \\ \text{地盤基部: } (z=H) \quad \Delta u_z &= 0, \partial \Delta p / \partial z = 0 \end{aligned}$$

$$\Delta p = p_0 [B' + (1-B')e^{i\kappa z}] e^{i\theta} \quad (2)$$

ここに、 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 $\xi = (i\omega h_v)^{1/2}$ である。 h_v は飽和度を考慮した圧密係数 c_v の逆数 $h_v = 1 / (c_v B')$ であり、水理圧密係数と呼ぶ。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。

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_z' &= p_0 e^{i\theta} - \Delta p = p_0 [(1-B')(1-e^{-\xi z})] e^{i\theta} \\ \Delta \sigma_z' &= (\rho_t - \rho_w) g z + \Delta \sigma_z' \end{aligned} \quad (3)$$

3. 円柱構造物周辺における海底地盤の応答

x -軸方向に前進する線形進行波を受ける円柱構造物周辺の幾何学的な定義を図-1 に示す。本論文では円柱構造物の直径 D が波長の半分であるケースのみを対象とした。この領域における波浪は入力波と回折・散乱波の重ね合せによって得られる。円筒座標系における入力波の速度ポテンシャル ϕ_i は次のようになる。

$$\begin{aligned} \phi_i(r, \theta, z, t) &= i \frac{ga}{\omega} \frac{\cosh \lambda(h+z)}{\cosh \lambda h} \left[J_0(\lambda r) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} i^m J_m(\lambda r) \cos m\theta \right] e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

これに対し、回折・散乱波の速度ポテンシャル ϕ_s は以下の様になる。

$$\begin{aligned} \phi_s(r, \theta, z, t) &= -i \frac{ga}{\omega} \frac{\cosh \lambda(h+z)}{\cosh \lambda h} \left[\frac{J_0'(\lambda r_0)}{H_0^{(1)'}(\lambda r_0)} H_0^{(1)}(\lambda r) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} i^m \frac{J_m'(\lambda r_0)}{H_m^{(1)'}(\lambda r_0)} H_m^{(1)}(\lambda r) \cos m\theta \right] e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (5)$$

(4)式と(5)式の和をとることで、波浪場全体の速度ポテンシャル ϕ を求めることが出来る。速度ポテンシャル ϕ を利用して、 $-\partial \phi / \partial r$ 、 $-1/r \times \partial \phi / \partial \theta$ を計算することで半径方向流速と周方向流速をそれぞれ求めることが出来る。

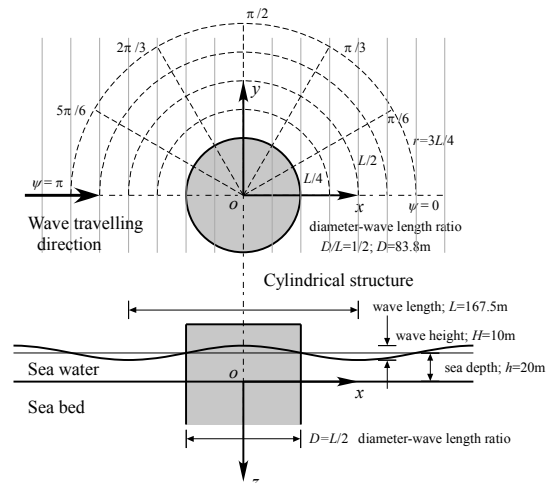


図1 円柱構造物の幾何学的条件

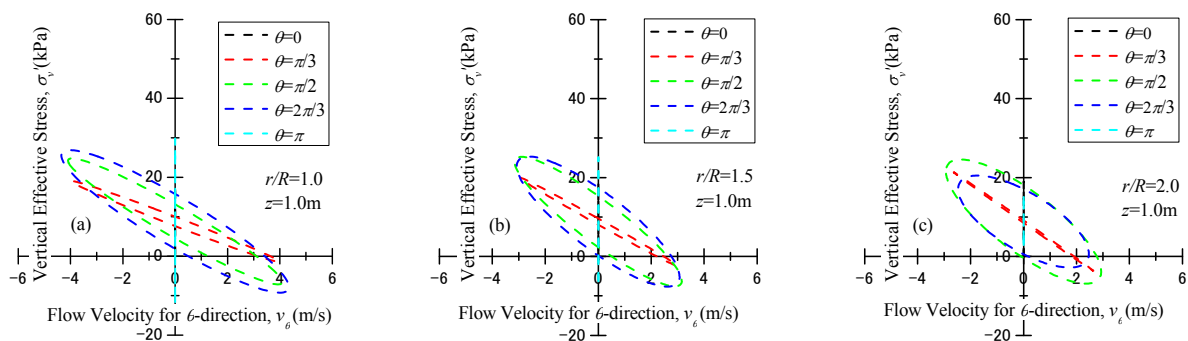


図2 有効応力と周方向流速の関係

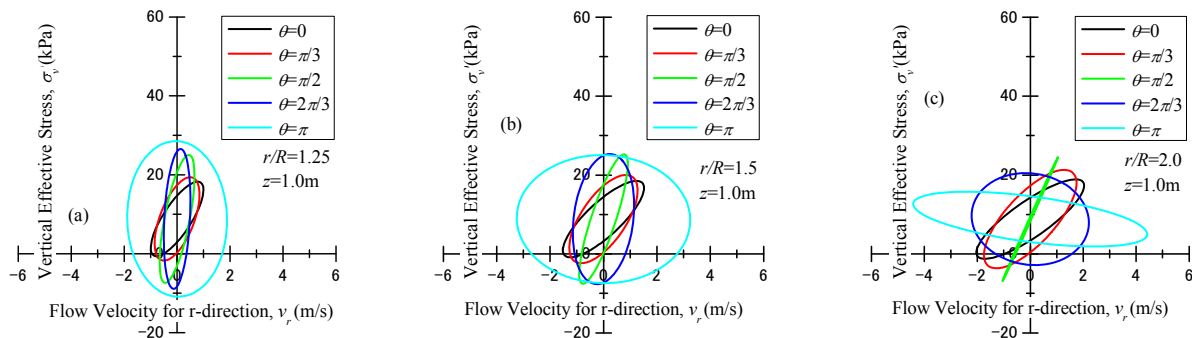


図3 有効応力と半径方向流速の関係

4. 解析結果

図2は構造物周辺の地盤内有効応力 σ_z' と周方向流速 v_θ の関係を示している。図では構造物と波浪の対称性から構造物の真正面($\theta=\pi$)と真後ろ($\theta=0$)では周方向流速はゼロになっている。 $r/R=1.0$ は構造物側壁の位置に、 $r/R=2.0$ は側壁から1/4波長離れた位置に対応している。

図が示すように、周方向流速の振幅は構造物側壁で最も大きく、離れるとともに減少している。また、構造物周辺では構造物の正面側で背面側よりも流速 v_θ の振幅が大きくなっている。これらの傾向は構造物の影響としては妥当な結果と言える。図示していないが、構造物の近くで、また、構造物の正面側で海底面に作用する水圧 p の変動も大きくなることを確かめている。以上のような波浪に対する地盤の応答によって海底地盤内には有効応力 σ_z' の変動が生じるが、有効応力 σ_z' の変動も構造物側壁付近で大きく、より不安定化の影響が大きいと考えられる。図示した条件においては、有効応力 σ_z' の変動と周方向流速 v_θ の相関は負であり、構造物周辺における底質の移動は θ の正方向（構造物の背面から前面に向かう方向）に卓越することを示唆している。また、その移動量は背面側よりも正面側でより大きいと言える。

図3は海底地盤内の有効応力 σ_z' と半径方向流速 v_r との関係を示している。半径方向流速 v_r の振幅は構造物真正面で最も大きく、背後に向かう（ θ が小さくなる）ほど小さくなる傾向が認められる。構造物

真正面（ $\theta=\pi$ ）においては、側壁付近でも有効応力 σ_z' が負になる不安定化が認められるが、半径方向速度 v_r に対する相関は無く（グラフがほぼ対称になる）底質の移動はそれほど大きくないと考えられる。しかし、 $r/R=2.0$ では半径方向流速 v_r との相関は負に転じて正になり、海底地盤が不安定化するとき流速 v_r は正であることから構造物から離れる方向に底質移動が生じると理解できる。構造物の背面側では海底地盤の有効応力 σ_z' の変動の半径方向流速 v_r に対する相関はおおむね正であり、有効応力 σ_z' が低下して不安定化するとき半径方向流速 v_r は負になる傾向が明らかで、この範囲では構造物に向かった底質移動が促進されると考えられる。

5. まとめ

円柱構造物周辺における海底地盤の底質移動のメカニズムを明らかにするために、波浪と海底地盤の相互作用について検討した。その結果、定性的ではあるが底質移動の移動特性を明らかにすることが出来た。今後は波長と構造物寸法の関係など条件を広げて構造物周辺の相互作用を定量的に明らかにするとともに、底質移動量や移動方向の詳細を検討する予定である。

参考文献

- 1) 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. 233-240.