

進行波および定常波を受ける海底地盤における有効応力応答と底質移動の解析

豊橋技術科学大学 学生会員 ○吉野貴仁, 後藤志侑子, 正会員 三浦均也, 松田達也

1. はじめに

海底地盤の底質（地盤材料）移動による海底地盤の浸食と堆積を伴う、いわゆる洗掘現象は海洋沿岸構造物の安定性においても重要な課題である。底質の移動に関しては、海底での流速を関数として検討されてきたが、本件研究では海底地盤の有効応力の応答と流速の複合的な効果を考慮する解析手法を提案し、解析結果について検討する。

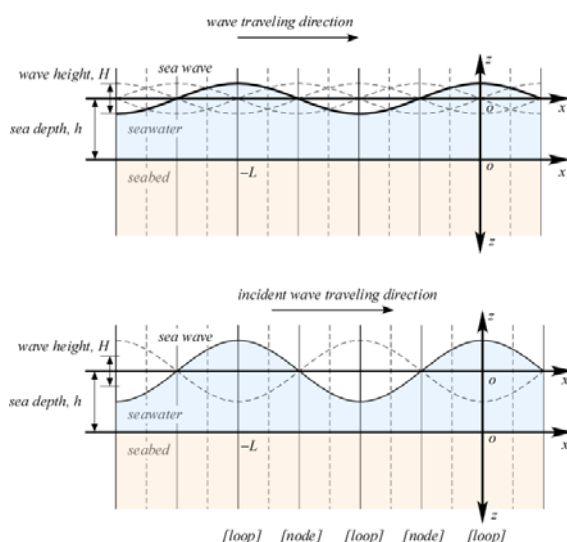


図-1 進行波と定常波

2. 波浪条件

2種類の波浪条件を設定した。図-1に示すように、進行波は入射波（平面波で進行方向はx軸正方向）そのものであり、荒天時の波浪波（ $H=10\text{m}$, $T=13.0\text{s}$, $L=167.5$ ）を想定した¹⁾。海水は一様深さ $h=20\text{m}$ を仮定した。定常波は $x=0$ 地点に防波堤や護岸のような直線構造物を無限長で配置し、波浪が全反射することを想定した。海水の波浪解析は線形解析とし、微小振幅波理論に基づいて解析した。

3. 地盤条件と海底地盤の応答解析

有効応力応答解析では海底地盤を、圧縮性を有する間隙流体で満たされた多孔質線形弾性体としてモデル化した。有効応力の応答は、間隙流体の粘性流動（支配方程式における速度項）を考慮するが、間隙流体と個体の加速度成分をともに無視する u-p モデルを疑似動的条件下で展開し、一次元条件で数式解を誘導した。波浪と海底地盤の境界である海底地盤

は2次元であるが、波長の10%以下であれば、地盤の応答解析は一次元条件で十分であることを確認している。地盤層厚を無限と仮定し、物性としては海底地盤の有効応力応答が顕著になる緩い砂を想定した¹⁾。最終的に得られた海底地盤における有効応力、水圧、変位等の数式解は以下のようなものである。

$$\begin{pmatrix} \Delta u_z(z,t) \\ \Delta \sigma_z(z,t) \\ \Delta \dot{w}_z(z,t) \\ \Delta p_z(z,t) \\ \Delta \varepsilon_{zz}(z,t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_0 \frac{1}{B_f + E_u} \left(d + \frac{e^{-\zeta z}}{\zeta} - z - \frac{1}{\zeta} \right) e^{-\zeta z} e^{-i\omega t} \\ p_0 \frac{E_u}{B_f + E_u} (1 - e^{-\zeta z}) e^{-i\omega t} \\ p_0 \frac{\zeta}{r} \frac{E_u}{B_f + E_u} e^{-\zeta z} e^{-i\omega t} \\ p_0 \frac{1}{B_f + E_u} (B_f + E_u e^{-\zeta z}) e^{-i\omega t} \\ p_0 \frac{1}{B_f + E_u} (1 - e^{-\zeta z}) e^{-i\omega t} \\ p_0 \frac{\lambda}{B_f + E_u} (1 - e^{-\zeta z}) e^{-i\omega t} \end{pmatrix} \quad (1)$$

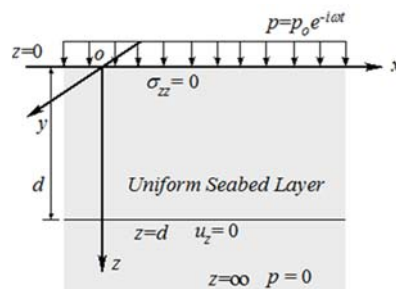


図-2 海底地盤の1次元解析

3. 海底地盤の移動の定量的評価

海底地盤において海底面での流速により流動する単位幅あたりの流量ベクトル q は海底面での流速ベクトルの関数として以下のように設定した。

$$\tau_b = C_b \rho_w v_0^2 \text{ (N/m}^2\text{)}; C_b = 1/20, q = C_q \frac{1}{2} v_0 z_f \text{ (m}^2\text{/s)}; C_q = 1/5 \quad (2)$$

ここで τ_b は流速 v_0 の2乗に比例する海底地盤に作用するせん断力、 z_f は地盤の有効応力から算定したせん断力に抵抗できない範囲を示す流動深さである。海底面に微小要素を考え、流量の収支から算定した貯留量 Q は q の導関数として計算した。

$$Q = \frac{(-q_{x(x+\Delta x/2,y)} \Delta y + q_{x(x-\Delta x/2,y)} \Delta y) + (-q_{y(x,y+\Delta y/2)} \Delta x + q_{y(x,y-\Delta y/2)} \Delta x)}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (3)$$

貯留量が正であることは海底地盤に底質が堆積し、海底面が上昇することを、負であることは底質が浸食され海底面が降下することを意味している。波浪1周期あたりの積分値を蓄積流量ベクトル q_c とその蓄積貯留量 Q_c を計算して検討している。

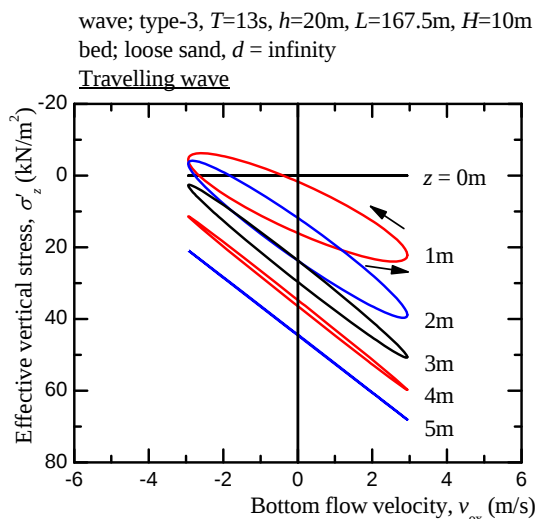


図-3 進行波による海底地盤有効応力の変動

4. 解析結果の考察

4.1. 進行波による地盤の応答と底質移動

図-3は進行波における海底地盤中の有効応力を海底面流速に対して深さ 1m ごとに示している。深さが $z=1m$, $2m$ の場合には波浪が作用する 1 周期の間に有効応力が負になり、海底地盤が不安定化して一体性を失うことが分かる。この時の流速 v_o は負の方向であることから、底質は負の方向に大きく流動すると考えられる。

図-4 は同じく進行波が 1 周期作用する間の特定の地点における底質移動を示している。上段には海水面高さ η と流速 v_o の挙動を示し、下段では液化化深さ d_l 、流動深さ d_f 、流動量 q_x 、貯留量 Q の挙動を示している。時間とともに海水面が低下し、流速が負のタイミングで液化化深さと流動深さは大きくなる。これに伴い負の底質流量が卓越している。これによって 1 周期当たりの蓄積流量 q_{cx} は $-2.086m^2/c$ となる。このような挙動は、進行波の場合にはすべての地点で等しくみられるので、 q_{cx} の導関数に相当する蓄積貯留量 Q_c はゼロとなる。すなわち、進行波では波の進行と逆方向に底質は移動するが、海底地盤の浸食も堆積も生じないことが確認できた。

4.2. 定常波による地盤の応答と底質移動

定常波における海底地盤の有効応力応答を、1 周期を 8 分割して、有効応力と流速の関係を図-5 に示す。進行波ではこの関係は全ての地点で等しいが、定常波では定常波の腹と節、その中間地点で異なっていることが分かる。図を見ると、腹 $x/L=0/8, 4/8$ では有効応力は変動するが流速ゼロ、節 $x/L=2/8, 6/8$ で流速は変動するが応力変化はないことが分かる。その中間地点では有効応力が減少するときの流速方向から、底質は腹から節に向かって蓄積的に移動することが分かる。その結果として、底質は図-6 に示し

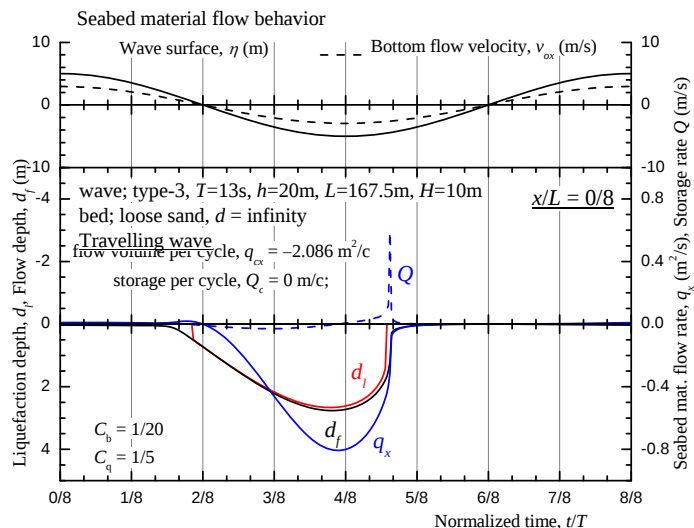


図-4 進行波による質流動挙動

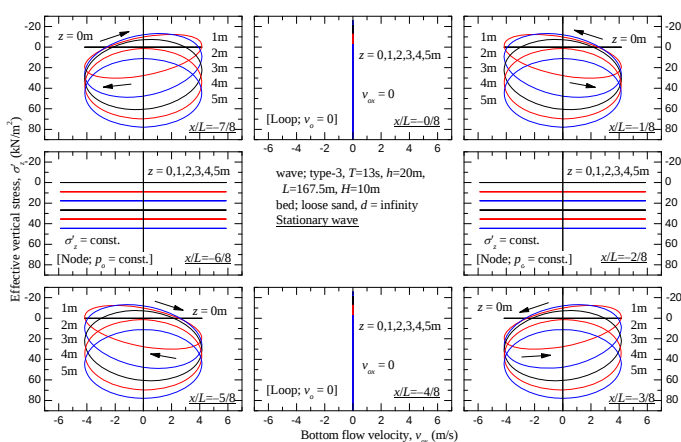


図-5 定常波による海底地盤有効応力の変動

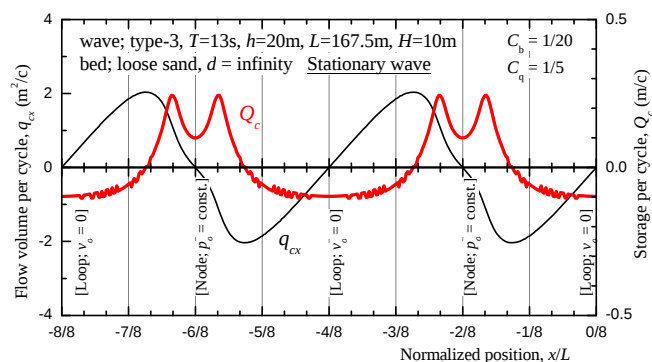


図-6 定常波に底質の貯留量分布

たように構造物側面を含む腹部で浸食され、その分の底質は節部に堆積することが分かった。

5. おわりに

海底地盤の底質移動を定量的に評価し、海底地盤の浸食と堆積の挙動を進行波と定常波を対比することによってメカニズムを明らかにした。地盤の有効応力応答を考慮することにより、線形解析によっても底質移動を定量的に評価できる可能性を示した。参考文献 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.223-240.