

海底地盤不安定化に及ぼす水圧変動の影響に関する地盤工学的検討

豊橋技術科学大学 学生会員 ○齋藤 裕也 正会員 三浦 均也

北日本港湾コンサルタント 正会員 大塚 夏彦

長崎大学 正会員 森政 信吾

1. 本研究の目的と意義

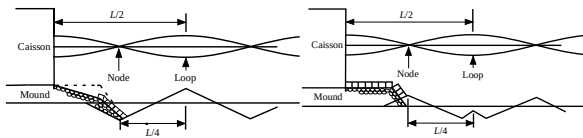
台風や低気圧の接近に伴う荒天時において、沿岸や海洋の諸施設が被害を受けることがある。この際、海底面に作用する水圧の変動が海底地盤を不安定にし、被害を拡大することが多い。従来、波浪を受ける構造物の港湾・沿岸施設の設計において行われる安定化工法では、本質的に地盤の安定性を改善するものではないので、定期的な維持管理が欠かせず、かつ長期的には不安定である。そのため、既往の研究¹⁾で透水性の良いコラムを海底地盤に配置することによる海底地盤安定化工法を提案し、現場観測により有効性を明らかにしている。しかし、海底地盤の不安定化に及ぼす水圧と流速の相乗効果に関してはいまだ十分に研究されておらず、海底地盤の有効応力の変動と海底面の流速変動の関係は十分に分かっていない。本研究では、海底地盤不安定化のメカニズムを水圧と流速の両方を考慮して検討した。

2. 海底地盤内の有効応力

不安定化のメカニズムについて説明する。まず、波浪によって海底面に水圧変動が作用する。そして、海底地盤内の間隙水が不飽和な状態による圧縮性と地盤材料の比較的低い透水性により、地盤内の水圧変動伝播に減衰・位相遅れが発生し、海底面と海底地盤内の間隙水圧変動差が生まれる。その結果、生じた水圧変動差により上向き浸透流が発生し、地盤内の鉛直有効応力が減少あるいは失われ、不安定化する。

3. 流速による洗掘

海底面の流速変動によって、海底地盤面の土粒子が移送される洗掘が発生する。直立護岸における洗掘は、海底面に沿う水粒子流速の最大値 u_b と底質の沈降速度 w との相対速度 u_b/w に応じて、2つのタイプに分けられる。図1に、2タイプの底質移動による、波浪と海底面の変状の関係を模式的に示す。このうち、実際の護岸前面では、発生条件からL-タイプ洗掘が大半を占める。



(a) L-タイプ洗掘 (b) N-タイプ洗掘

図1 洗掘のタイプ

4. 海底地盤の波浪に対する応答の解析

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（流体相の相対加速度を無視）の一次元擬似

動的条件（加速度の項を無視）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

$$-(F+G)\frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial z^2} - G\frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial \Delta p}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$-B_f \frac{\partial \Delta u_z}{\partial t \partial z} + B_f \frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial z^2} - \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = 0$$

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Lame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。

$$\text{地盤表面: } (z=0) \quad \Delta p = p_0 e^{i\theta}, \quad \Delta \sigma_z = 0$$

$$\text{地盤基部: } (z=H) \quad \Delta u_z = 0, \quad \partial \Delta p / \partial z = 0$$

$$\Delta p = p_0 e^{i\kappa x} \left[\frac{B_f}{E_{us} + B_f} + \frac{E_{us}}{E_{us} + B_f} \left(\frac{e^{-\zeta z} + e^{\zeta(z-2D)}}{1 + e^{-2D\zeta}} \right) \right] e^{i\theta} \quad (2)$$

ここに、

$$\zeta = \sqrt{i\omega h_v} = \sqrt{\frac{\omega h_v}{2}} + i\sqrt{\frac{\omega h_v}{2}}$$

$$h_v = \frac{\rho_w g}{k E_{us} B_f / (E_{us} + B_f)} = \frac{1}{C_v B'} \quad (3)$$

$$B' = \frac{B_f}{E_{us} + B_f}$$

B' はSkemptonの一次元変形における間隙水圧係数、 h_v は水理圧密係数である。水理圧密係数とは、圧密係数 C_v を間隙水の圧縮性を考慮して修正した値の逆数である。式(2)において、 $e^{-2D\zeta}$ は他の項に比べて無視できるほどに小さい。よって $e^{-2D\zeta}$ の項を無視し、以下の近似式が得られる。

$$\Delta p = p_0 [B' + (1-B')e^{i\kappa x}] e^{i\theta} \quad (4)$$

5. 線形波浪解析

微小振幅波理論を用い、図2に示す進行波と重複波に対する線形波浪応答解析を行った。

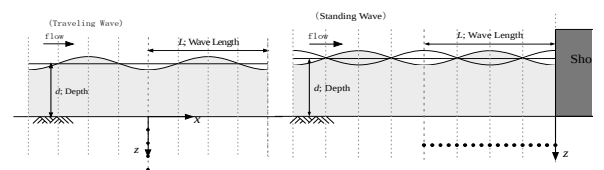


図2 進行波と重複波

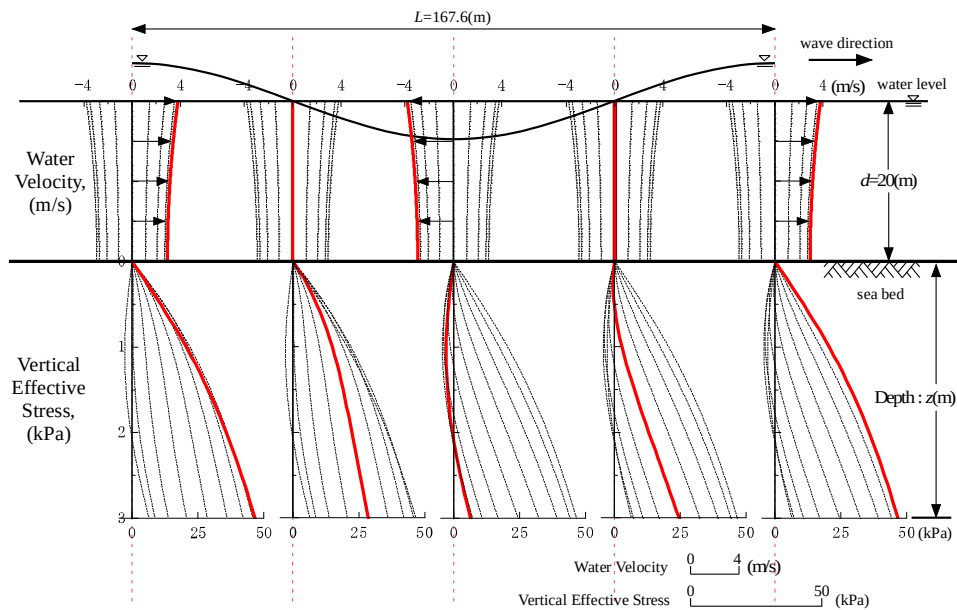


図3 進行波と流速分布と鉛直有効応力

進行波，重複波ともに波浪条件を波高 $H=10\text{m}$ ，周期 $T=13.0\text{s}$ とした。岸向きの流れを x 軸正方向，沖向き流れを負方向としている。

図3に示す線形波浪解析の結果から進行波浪下では，波浪方向と逆向き(一側)の流速がピークとなるときに海底地盤内の鉛直有効応力が最も低下している。一方，波浪の進行方向(+側)では流速がピークになるとき，有効応力は上昇した状態にある。このことから，波浪方向とは逆向きの流速がピークになるとき，海底地盤の不安定化と洗掘が同時に発生し，土粒子移送量が沖向きに最も多くなる。紙面の関係で図示していないが，重複波では護岸前面にできる重複波の腹から節に向け土粒子移送が多くなる。これにより，堤体基礎地盤で吸い出しと洗掘が同時に活発になる。よって，線形的な波浪下では海底地盤不安定化と海底面流速による洗掘の相乗効果は無視することができないといえる。

6. 非線形波浪解析

数値波動水路で計算された海底地盤面の水圧変動・流速変動の時刻歴データを用い，図4に示す護岸の海底地盤内の間隙水圧変動と鉛直有効応力を解析し，不安定化と洗掘の影響に関して検討した。

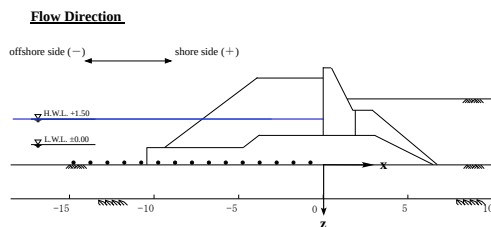


図4 護岸断面図

図5には防波堤から-8.5m地点における深さが $z=0.1\text{m}$ での，地盤内の有効応力と海底面流速の関係を示している。解析結果を総合すると，岸向きの流れは短時間でピークを迎え，沖向きへ流速方向が変化する，しかし，そのとき，有効応力も増大することから，不安定化と洗掘は同時に発生しにくいといえる。一方，沖向

き(一側)の流速のピークは岸向きと比較しても絶対値は大きいものではないが，岸向きとは異なり流速がピーク(一側)になるとき，有効応力が低下している。さらに，沖向きの流れは，ピーク値を迎えてからの岸向きへの流速方向変化が遅いので，不安定化と洗掘の相乗効果が有効な時間が長い。

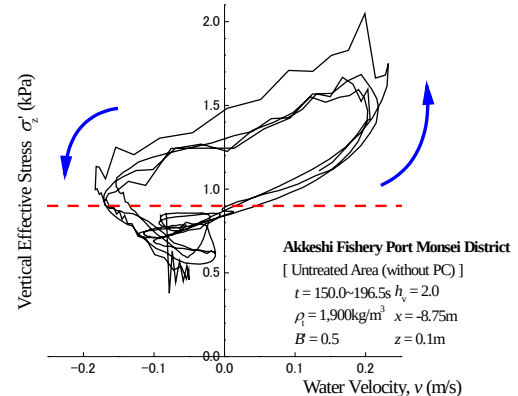


図5 $x=8.75\text{m}$ 地点の有効応力と流速の関係

7. まとめ

- 線形波浪応答解析により，進行波では不安定化と波浪方向と逆向きの洗掘が同時し，沖向きの土粒子移送が多くなる。一方，重複波では，護岸前面にできる重複波の腹から節に向け，不安定化と洗掘の発生が同時に確認できたことから，重複波の節へ向け土粒子移送が多くなるといえる。このことから，海底地盤不安定化と海底面流速による洗掘の相乗効果が認められる。
- 次に，非線形波浪応答による検討でも沖向きに流速がピークを迎える際に不安定化と洗掘が同時に発生することが確認でき，相乗効果があるといえる。

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