

水平流れによる浸透流が防波堤マウンド基礎の洗掘にもたらす影響

名古屋工業大学 学 〇安江 絵翔 正 前田 健一
学 鈴木 悠真

1. はじめに

津波が発生すると、その水位変動や浸透流等が相互に影響し防波堤に被害をもたらす。例えば東日本大震災の際、八戸港中央防波堤では洗掘によりケーソンの転倒が発生したが、その支配的要因は未解明である。このメカニズムを解明するためにはまず各個の影響因子を分け、それぞれを定量化する必要があると考える。

既往の研究¹⁾から、水平流れが地盤に作用する際に地盤内部で浸透流が発生することが定性的に明らかになっている。そこで本研究では、水平流れによって基礎マウンドを流れる浸透流に着目した開水路模型実験を行った。またトレーサーを用いた PIV 解析を行い、マウンドにもたらす浸透流の影響の定量化を試みた。

2. 実験概要

実験は図-1 に示す開水路模型を用いた。装置内の土層区間には珪砂 2 号 (平均粒径: $D_{50}=3.271\text{mm}$, 透水係数: $k=1.83\times 10^{-2}\text{m/s}$) を水中落下法により $D_r=40\%$ で設置した。土層上には天端高 ($H=0\sim 40\text{mm}$) と法勾配 ($n=1\sim 3$ 割) をそれぞれ組み合わせた珪砂 2 号のマウンドを作成した (表-1)。水平流れによる浸透流のみに着目するため、天端にはケーソン底面を想定した非排水面を設置した (図-2)。水中ポンプを用いて循環流を発生させ、固定床状態にするため地表面流速を $v=8.52\times 10^{-2}\sim 13.51\times 10^{-2}\text{m/s}$ に設定した。

3. 実験結果と考察

3.1. 着色された液体による軌道追跡

浸透を可視化するため、着色した液体を注射器によって地盤表面に随時注入した。Case7 において、法肩と法面中央に注入した際の染色領域の移動を図-3 (a) に示す。結果から、どちらに注入した場合も最終的に下流側の法肩から排水していることが分かる。この挙動は他のケースでも多く見られた。よって、法肩付近は浸透流が集中し、動水勾配が他の排水箇所と比べて大きい可能性がある。

法肩に注入した場合で比較したとき、Case7 では下流側の法肩から鉛直上向き方向に排水している (図-3 (a))。一方、Case10 では同じ箇所において斜め方向に排水していることが分かる (図-3 (b))。つまり、法肩付近にかかる浸透力の向きは、マウンド形状により異なる可能性がある。また、法尻等の他の箇所に注入した際には、裏法肩以外の箇所で排水する場合もみられた (図-3 (b))。

表-1 実験ケース一覧

Slope gradient n	Height of crest, H (mm)				
	40	30	20	10	0
3.0	Case1	Case6	Case11	Case16	Case21
2.5	Case2	Case7	Case12	Case17	Case21
2.0	Case3	Case8	Case13	Case18	Case21
1.5	Case4	Case9	Case14	Case19	Case21
1.0	Case5	Case10	Case15	Case20	Case21

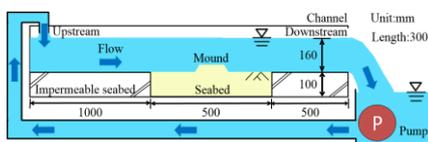


図-1 実験装置概略図

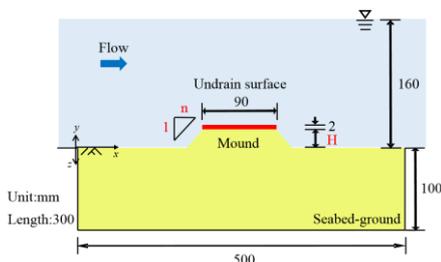


図-2 土層区間

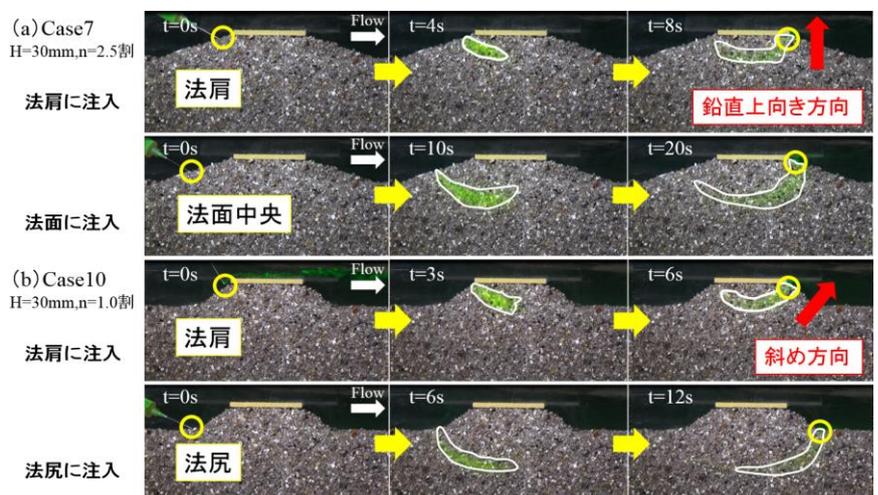


図-3 着色した液体によるマウンド内浸透流の可視化 (白線: 染色領域のフロント)

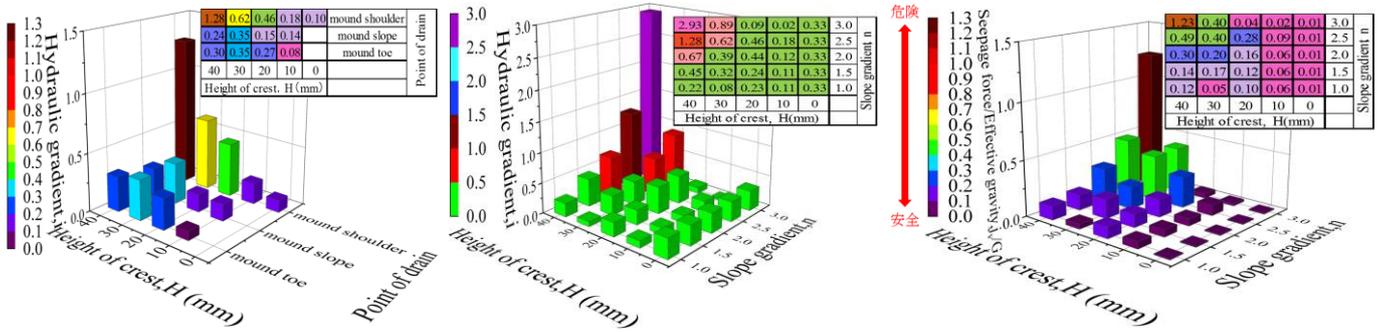


図4 天端高-排水箇所での動水勾配 (n=2.5 割) 図5 天端高-法勾配での動水勾配 (法肩) 図6 洗掘発生の危険度 (法肩)

3. 2. PIV 解析による動水勾配計算

浸透力場に対してダルシー則が成ると仮定し、下流側の法尻、法面中央、法肩の3箇所の動水勾配を計算した。予め循環流に投入したトレーサーがマウンド内を移動している様子を高速カメラ(1000fps)で撮影し、複数のトレーサーの平均速度ベクトル \bar{v} をPIV解析によって算出した。そして以下のダルシー則(式(1))を用いて透水係数 k から動水勾配 i を計算した。

$$i = \frac{\bar{v}}{k} \tag{1}$$

n=2.5 割での結果を図4に示す。結果より、法肩における動水勾配の卓越がみられた。H=40mmの場合と比較すると、法尻の $i=0.30$ に対して法肩は $i=1.28$ と約4.3倍になっている。このことは、着色された液体による軌道追跡(図-3)で法肩付近に染色軌道が集積したことで整合がとれている。よって、マウンドに作用する外力の中で水平流れによる浸透力が支配的になる場合には、法肩から洗掘が始まる可能性が高いといえる。

次に法肩だけに着目し、全ケースにおける法肩の動水勾配を計算した(図-5)。結果より、天端高が高く、法勾配が緩いほど動水勾配が大きい傾向がみられた。n=2.5 割の場合と比較すると、H=0mmの $i=0.33$ に対してH=40mmでは $i=1.28$ と約3.9倍となっている。さらにH=30mmの場合では、n=1.0 割の $i=0.08$ に対してn=2.5 割は $i=0.62$ と約7.8倍となっている。この要因としては、法肩以外の他の排水箇所へ流れていた浸透流の経路が延長し、流れが土粒子から受ける抵抗が増大したことで、より短い法肩に向かう経路の抵抗が相対的に減少した等が考えられる。一般的に高い天端高や緩い法勾配の場合には、ケーソンの荷重分散や波の反射による防災効果が期待される。しかし、今回の結果と併せて考えると、マウンドの天端高や法勾配は複合的な視点から決定する必要があるといえる。

3. 3. 浸透力の鉛直成分に着目した危険度判定

粒子一粒での鉛直方向の力のつりあいに着目し、法肩の危険度 j_v/G を計算した。 j_v/G は浸透力 j の鉛直成分 j_v を粒子一粒の有効重量 $G=2.96 \times 10^{-4} \text{N}$ で除し、無次元化したパラメータである。また同式は洗掘発生の危険度を意味し、 $j_v/G=1$ を閾値として洗掘の有無を判定する値である。なお浸透力 j は以下の式(2)で算出した。

$$j = i\gamma_w V \tag{2}$$

(i :法肩の動水勾配, γ_w :水の単位体積重量, 粒子一粒の体積 $V=18.30 \text{mm}^3$) 結果を図-6に示す。危険度は天端高が高く、法勾配が緩いほど高い傾向がみられた。H=30mmの場合と比較すると、n=1.0 割の $j_v/G=0.05$ に対しn=2.5 割は $j_v/G=0.40$ と8倍となっている。図-5と図-6のグラフ形状が異なることは、着色された液体による軌道追跡(図-3)でマウンド形状により浸透流の排水方向が異なったことで整合がとれている。また、Case1では $j_v/G=1.23$ となり、数値上は洗掘が発生しているという結果となった。実際に洗掘がなかった要因として、周囲の別の粒子による抗力の影響等が考えられる。しかし、港内外の水位差による外力も便乗した際には、洗掘の発生も十分に考えられる値である。

4. 結論

水平流れによってマウンドを流れる浸透流に着目した模型実験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 下流側の法肩には、法尻等の他の排水箇所に比べて大きな動水勾配(法肩の1.3~5.3倍)がかかる。
- 2) 下流側の法肩の動水勾配及び洗掘発生の危険度は、天端高が高く、法勾配が緩いほど大きい。

今後は、天端幅とケーソン底面の幅が異なる場合を想定した実験を行う予定である。

・参考文献

- 1) 鈴木悠真ら, 土木工学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_721-I_726, 2018.