

簡易的に流水状態を考慮した浸透流解析による防波堤マウンドの安定性評価

名古屋工業大学 学 ○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、その波力やマウンド内で生じる浸透流により防波堤が被災する。マウンドにおける一般的な浸透流解析では、浸透流の発生が港内外の水位差のみに起因するとし、複雑な計算を省くために静水状態を仮定して行っている¹⁾。しかし、実現象の正確な再現は未だ困難である。そこで、津波が定常的に作用する際に防波堤マウンド内で生じる浸透流挙動及び浸透破壊に着目し、簡易的に流水状態を考慮した境界条件設定方法を用いる浸透流解析を行った。一般的な設定方法を用いた場合と比較しつつ、実際に浸透破壊を発生させた実験を行うことで、解析の再現性について検討した。なお、浸透流解析は、飽和状態の定常解析を有限要素法で行った。

2. 境界条件を得るための実験

境界条件であるピエゾ水頭は水理模型実験から得た。図-1に示す縮尺 1/100 の開水路に海底地盤及び防波堤を設置した(図-2)。定常の浸透流挙動に着目するため、マウンド形状が変化しないように洗掘現象や浸透破壊が生じない流速(想定津波流速の 1/3 倍)で循環流を作用させた。各地表面箇所での水面水位を計測した後、地表面のピエゾ水頭を直接計測した。後者の計測方法については、ストロー状の細管(直径 3mm)の先端を地表面に接触させ、管内の水位から読み取った。

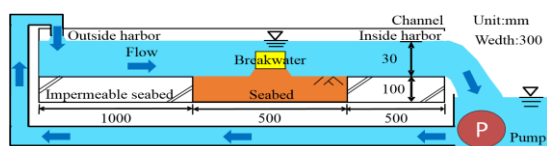


図-1 実験装置の概略図

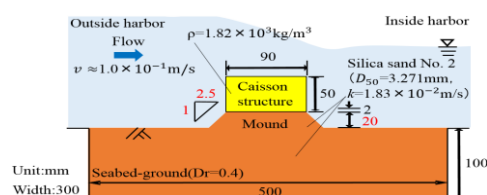


図-2 地盤区間の断面図

3. 流速ベクトル分布による比較

浸透流挙動について、津波の水面水位を入力した Case1 (一般的な方法) と、地表面のピエゾ水頭を直接計測した値を入力した Case2 で比較した(図-3)。流速ベクトル分布を図-4に示す。いずれの結果も港内側の法肩における浸透流速が局所的に大きかった。しかし、Case2 では港外側においても法肩での浸透流速が局所的に大きかった。津波の作用によりケーソンの港外側付近における水圧が上昇することで、法肩付近における地盤内の圧力水頭は、静水状態を仮定した Case1 の場合よりも大きくなると考えられる。また、局所的に流入した浸透流が再び局所的に排水することから、パイピングに似た浸透破壊が生じる可能性があり、法肩付近における厚い根固め工等の措置が必要であると考えられる。

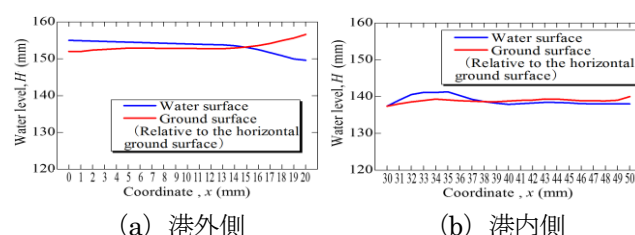
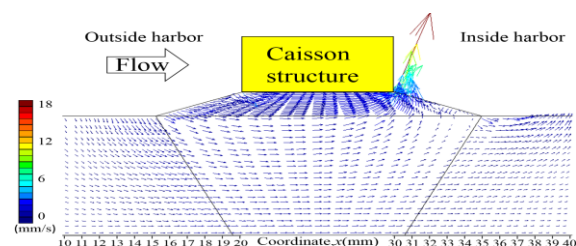
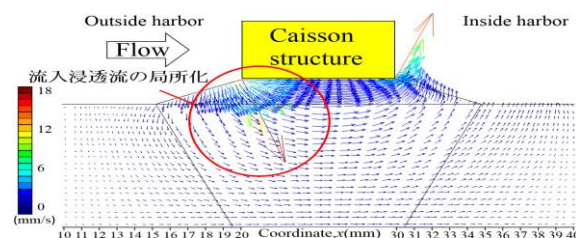


図-3 2種類の測定方法による地表面のピエゾ水頭分布



(a) Case1 (津波の水面水位を入力)



(b) Case2 (地表面のピエゾ水頭を直接計測して入力)

図-4 流速ベクトル分布

キーワード 津波, 防波堤, マウンド, 浸透流

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 16 号館 227 号室 TEL052-735-5497

4. 浸透破壊に関する安全率による比較

4.1. 解析結果

図-4より、浸透流が水平方向に流れる傾向があった。そこで、浸透破壊に対する水平方向の安全率を計算した。まず、ダルシー則により局所動水勾配を計算した。

$$i = v/k \quad (1)$$

(i : 局所動水勾配, v : 浸透流速, k : 透水係数) また、マウンドを立方体のメッシュで分割し、一片に作用する水平及び鉛直方向の浸透力を次式で計算した。

$$F_x = i_x \gamma_w V_m \quad (2)$$

$$F_y = i_y \gamma_w V_m \quad (3)$$

(F_x : 水平浸透力, F_y : 鉛直浸透力, i_x : 局所動水勾配の水平成分, i_y : 局所動水勾配の鉛直成分, γ_w : 水の単位体積重量, メッシュ一片の体積 $V_m=125\text{mm}^3$) 粘着力を $c'=0$ とし、鉛直有効荷重 W' を受けるメッシュ底面における水平方向のせん断強度を次式で計算した。

$$T_f = (W' - F_y) \tan \phi' \quad (4)$$

(内部摩擦角 $\phi'=30^\circ$ (仮定)) 以上の計算結果を用いて、浸透破壊に関する安全率を次式で計算した。

$$F_{sx} = T_f / F_x \quad (5)$$

浸透破壊に関する安全率コンターを図-5に示す。いずれの場合も概ね安全率が1を上回り、浸透破壊が生じない条件であることを確認した。Case1では、港外側の法尻からマウンド天端にかけて安全率が相対的に小さい。一方Case2では、マウンド天端の広い範囲で安全率が小さく、中でも港内側の法肩で著しく不安定化した。後者のCase2について図-4と照合して考察する。港外側の法面では浸透流が鉛直下向きに流れる傾向があり、浸透破壊の可能性は低いと考えられる。しかし、天端においては水平方向の大きな浸透流速が広い範囲に生じるため、浸透破壊の可能性が高いと考えられる。したがって、天端付近はケーソンの支持力低下に直接関することから、Case2の結果はより危険性の高い結果であるといえる。

4.2. 解析精度確認のための実験

実際の浸透破壊の様子を観察するため、より大きな循環流流速で2.と同様の実験を行った(図-6)。津波発生に伴い港外側から水位が上昇し始めると、マウンド天端において浸透破壊が観察され、港内側の法肩では実スケール換算で最大深さ約1mの洗掘が発生した。なお、港外側の法面では浸透破壊はみられなかった。これらの現象はCase2の計算結果(図-5(b))と一致している。従って、マウンド内に鉛直な矢板を設置する等の対策を

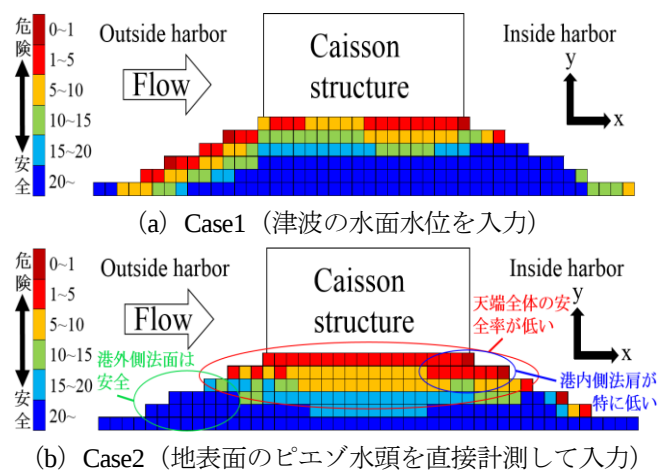


図-5 浸透破壊に対する水平方向の安全率コンター

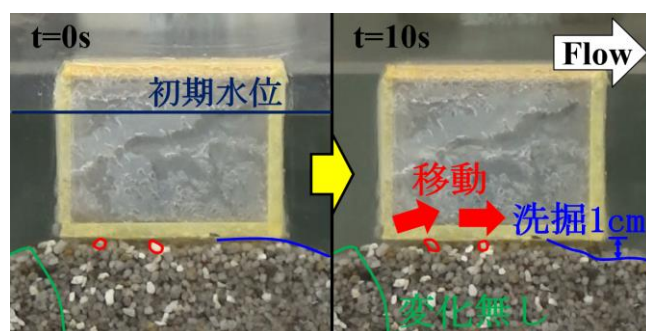


図-6 マウンド天端における浸透破壊 (水理模型実験)

講じ、マウンド天端で生じる浸透流の水平成分を緩和することで、浸透破壊の危険性を低減できると考える。

5. まとめ

浸透流解析及び水理模型実験から以下の知見を得た。

- 1) 浸透流解析において、簡易装置であるストロー状の細管で直接計測した地表面のピエゾ水頭を境界条件として設定することで、浸透破壊が発生する箇所や規模を簡易的に、より高い精度で再現できる。
- 2) 津波の作用により、ケーソンの港外側付近における水圧が上昇することで、マウンド内を流れる浸透流速が港内外の法肩付近において局所的に大きくなる。(他のマウンド内箇所における浸透流速の2~10倍)
- 3) 天端付近のマウンドにおいて大きな水平方向の浸透力が作用することで、浸透破壊が発生する。

今後は、浸透破壊の過程に着目し、本稿で提案した境界条件下での浸透流解析を適用することを試みる。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，平成27年12月，p.29，2015。