

津波時の防波堤マウンドの安定性評価における浸透挙動に着目した洗掘発生条件
(Conditions of Scour Occurrence Focused on Infiltration Behavior in Stability
Assessment of Breakwater Mounds During the Occurrence of Tsunami)

安江絵翔¹, 前田健一², 鈴木悠真³

1 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻・E-mail address k.yasue.493@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター

3 名古屋工業大学大学院・社会工学専攻

概 要

津波のような高速流体が作用すると沿岸部の地盤が洗掘され、防波堤が被災する。著者らの研究により、地盤への浸透現象が洗掘現象を助長していることが明らかとなった。本稿では水平な開水路流れ下の飽和水平地盤に作用する浸透現象について考察を行った。また、その知見に基づいた開水路流れに起因して発生する防波堤基礎マウンド内部における浸透流の可視化を水理模型実験と浸透流解析により行い、浸透流の局所化が洗掘現象に与える影響について考察した。実験より、港外側からマウンド内に流入した浸透流は港内外の水位差やマウンドの形状に関わらず港内側のマウンド法肩付近に集中して排水することが分かった。また、解析により特にマウンドの法肩付近において浸透流速が局所的に大きくなっていることが分かった。この浸透流速による安全率評価を行ったところ、浸透流の局所化が土粒子の浮遊作用をもたらし、洗掘現象を発生、拡大していることが分かった。

キーワード：洗掘，浸透流，マウンド

1. はじめに

津波や洪水流などの高速流れにより発生した洗掘現象は、構造物の支持力低下や損傷をもたらす。2011年の東日本大震災の際、八戸港の防波堤では支持マウンドの洗掘が契機となりケーソンが転倒した。マウンド洗掘のメカニズムは未だ解明されておらず、模型実験による破壊過程の再現は確立できていない。これまで、洗掘現象については水理学の分野における掃流力¹⁾(表面流速が地表面に及ぼすせん断力)による評価(さらにケーソン直上の越流によるマウンド上部への衝撃力、津波の流れ方向に生じる水位差(空間的变化)に起因して発生する浸透流の影響²⁾など)が一般的であった。しかし、1993年の北海道南西沖地震で発生した大津波による奥尻港等の防波堤の被害状況では、これまで想定されてきた被災要因だけでは説明できないような大規模な洗掘が発生したと報告された³⁾。また近年の研究成果から地盤内部の応力変化が洗掘現象を助長させる可能性が示されており、地盤力学的な視点からも検討が必要であると考える。

著者らの研究⁴⁾⁹⁾から、地盤内部での浸透現象が応力変化を誘発させる要因の一つであることが分かっている。この浸透現象については、水位変動のない水平な開水路流れが飽和水平地盤に作用する場合であっても、地表面で波状

に流入及び排水する浸透流が発生することが明らかとなっている。そこで本稿では、まず飽和地盤内での浸透現象に着目した開水路模型実験を実施し、地盤内部での浸透挙動を可視化した。そして実験より得られた知見をもとに、実際の防波堤マウンドを模擬した水理模型実験及び浸透流解析を行うことで、浸透現象が防波堤マウンドの洗掘に及ぼす影響を考察した。実験では撮影した浸透流の動画をもとにPIV(Particle Image Velocimetry)解析を行うことで土粒子レベルの安定性を検証し、浸透流解析では、実験で簡易的な装置により得られたピエゾ水頭を境界条件とすることで、土要素レベルの浸透破壊に対する安定性を検討した。この浸透流解析については、従来の手法では複雑な計算を省くために静水状態を仮定し、地表面に作用する静水圧を境界条件として用いて行っている。

2. 飽和水平地盤への浸透現象

2.1 実験概要

実験は図1に示す開水路模型を用いた。装置内には海底を模した幅500mm、高さ100mm、奥行き300mmの土槽区間を設けた。水流は水中ポンプ(流量: $Q = 120\text{L}/\text{min}$)を用いて循環流を発生させた。土槽区間には、珪砂2号を水中落下法により相対密度 $D_r = 40\%$ で堆積させた。土槽区間

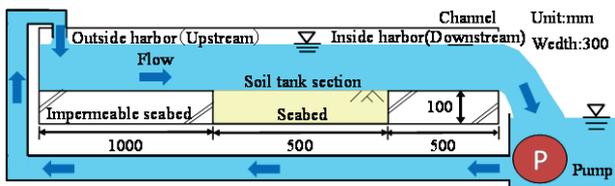


図 1 開水路の概要図

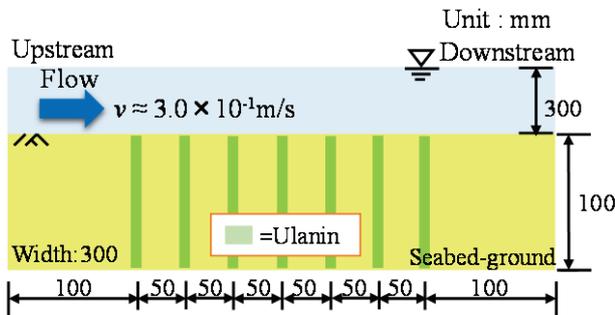


図 2 土槽区間でのウラン柱概略図

に用いた珪砂 2 号は透水係数 $k=1.83 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 、平均粒径 $D_{50}=3.270 \text{mm}$ である。地盤内部での浸透現象を可視化する為、ウラン溶液を予め地盤内に注射器を用いて注入し、ウラン柱とした(図 2)。ビデオカメラを設置し、土槽内での浸透挙動を観察した。

2.2 実験結果および考察

実験結果を図 3 に示す。開水路流れが地盤表面に作用した直後より、ウラン柱が初期の形状を変化させ、形を崩しながら流下方向に向けて浸透していく様子が観察された。このウラン柱の軌跡に着目すると、地盤上部から地盤下部に向けて押されるような挙動と土槽の上流部から下流部に向けて水平方向に進む挙動が同時に見られた。開水路流れが地盤内部に浸透し、もともと内在していたウラン溶液を含む間隙水が押し出される形で地盤内部を流下方向へ浸透したと考えられる。従って、開水路流れが作用することで、飽和水平地盤内において浸透流が発生することが確認された。この浸透現象の発生要因について考察する。開水路流れが地盤に浸透していく際、特に顕著にウ

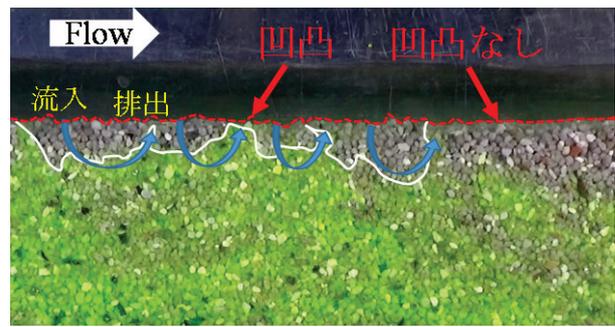


図 2 地盤表面の凹凸と浸透現象の関係(赤破線:地盤表面の凹凸, 白実線:浸透フロント)

ラン柱の崩壊が観察された箇所に着目すると、微小ながら地表面の凹凸が存在していることが分かった(図 4)。また、この凹凸の高低差が大きい程、ウラン柱が土槽下方へ大きく押し出されていることが分かった。つまり、地盤の凹凸により浸透現象が発生し、地表面の起伏が大きいほど浸透現象が顕著になることが考えられる。以上、地盤表面の起伏により浸透現象が発生することから、海底地盤上の起伏となる実際の防波堤マウンドではより顕著な浸透現象が発生していると考えられる。そこで、開水路流れ下における防波堤マウンドの浸透現象について検討した。

3. 定常流れ下における防波堤マウンドの浸透現象

3.1 実験概要

洗掘要因の一つである浸透流に着眼点を置いた実験を図 1 に示す模型水路を用いて実施した。ポンプ(流量: $Q=280 \text{L/min}$)により津波を模擬した定常の循環流を作用させ、マウンドの形態変化による浸透流挙動への影響を排除するため、洗掘現象が生じない地表面近傍流速に調節した。整流板を上流に設け、水面変動を抑制した。土槽中央の表面形態については、整形したマウンドを設置し、その天端にケーソン底面を模擬した非排水面を設置した場合(図 5)とその天端にケーソンを設置した場合(図 6)の検討を行った。浸透現象を明瞭に観察するため、土槽区間とマウンドに珪砂 2 号を用い、相対密度 $D_r=40\%$ で統一した。地盤

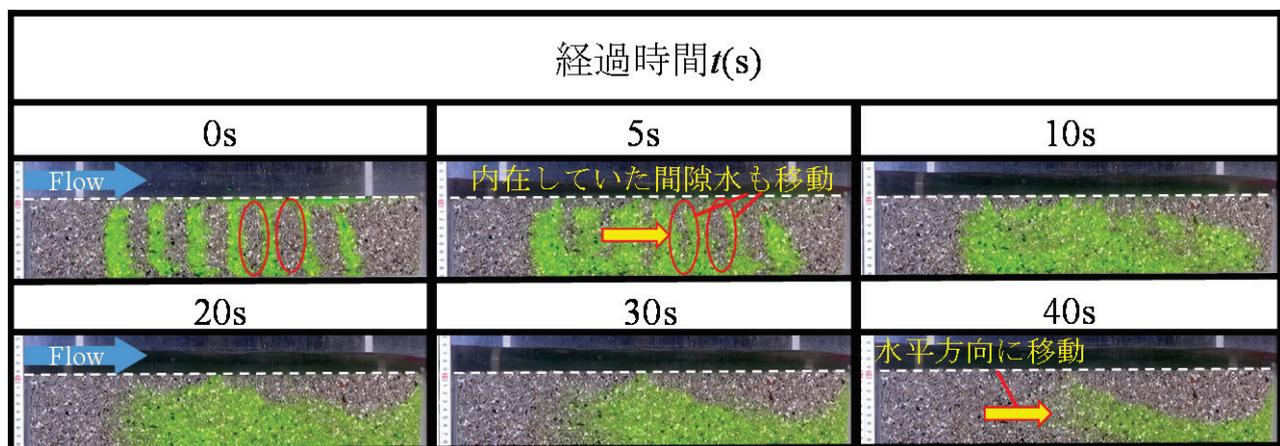


図 3 ウラン柱による地盤内浸透挙動の可視化(地盤材料:珪砂2号, 平均断面流速: 0.31m/s , 白破線:地盤表面の位置)

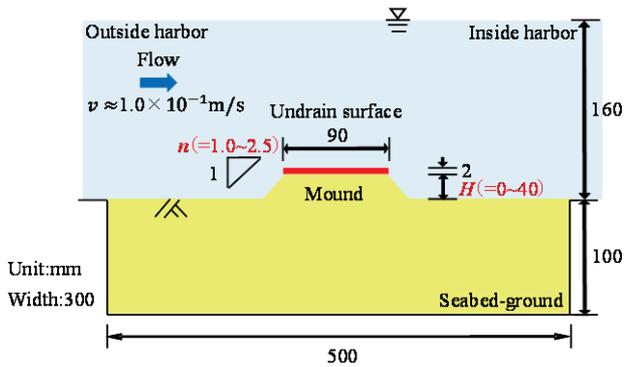


図 3 土槽区間の断面図（整形されたマウンドの天端にケーソン底面を模擬した非排水面を設置/定常状態）

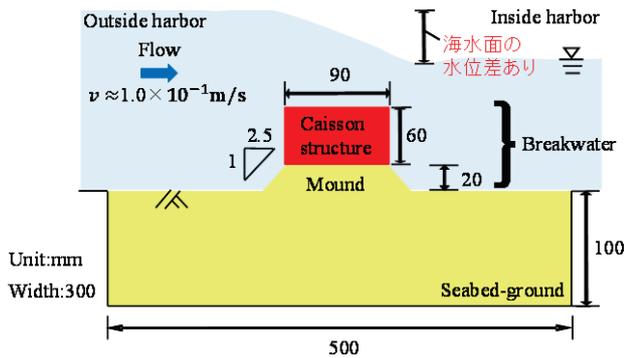


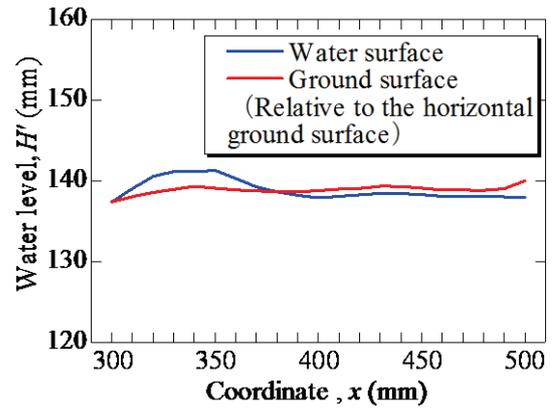
図 4 土槽区間の断面図（整形されたマウンドの天端に実ケーソンを設置/定常状態）

内を移動する浸透流を可視化するため、ウランで黄色く着色した液体を注射器を用いて適宜地表面から注入した。ケーソンを設置した検討では、実験で得たピエゾ水頭を用いて浸透流解析を行った。実験条件と同様の寸法、物性値でモデルを作成し、土槽区間の飽和浸透流を対象として定常解析を有限要素法で行った。マウンド内浸透流について、[1]従来想定されてきた発生要因（静水状態を仮定し、水面水位差のみに起因する浸透流）の場合と、[2]起伏の存在により生じる空間的な水圧変化を発生要因として加えて考慮した場合の浸透挙動を計算した。境界条件は、[1]の場合は津波の水面水位を測定し、[2]の場合は簡易装置であるストロー状の細管（直径 3mm）の先端を地表面に接触させ、細管内の水位を読み取ることで直接計測した（図 7）。

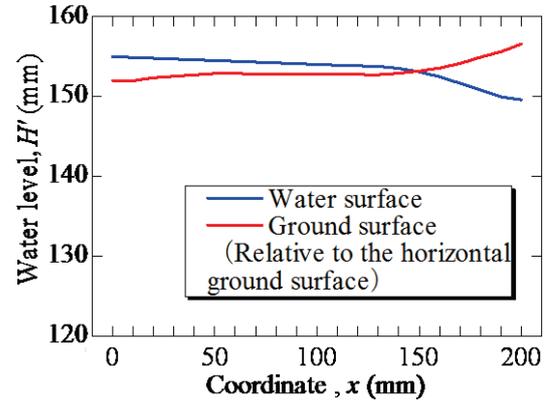
3.2 実験・解析結果および考察

(1) 非排水面のみ設置したマウンド内の浸透流

実防波堤の状態に近い、ケーソン構造物による非排水境界がある場合の浸透流挙動を観察するため、地盤表面にマウンドを設置し、その天端にケーソン底面を模擬した非排水面を設置した実験を行った（図 5）。起伏の存在により生じる空間的な水圧変化だけに着目できるように、非排水面の厚みは薄くし（約 2mm）、あえてケーソンの寸法には合わせないことで、水面水位の差が生じないように設定した。マウンド形態については、天端高を $H=0\sim 40\text{mm}$ で 10mm 刻み、法勾配を $n=1.0\sim 3.0$ 割で 0.5 割刻みで変化させ、計



(a) 港外側



(b) 港内側

図 5 2種類の測定方法による地表面のピエゾ水頭分布（整形されたマウンドの天端に実ケーソンを設置/定常状態）

21 ケース ($H=0\text{mm}$ は法面がないため 1 ケースのみ) で比較した。上流側（以後港外側と称す）法面の法肩、法面中央、法尻にウラン溶液を注入し、各注入箇所の場合においてマウンド内浸透流の移動を可視化した様子 ($H=20\text{mm}$, $n=2.5$ 割) を図 8 に示す。結果より、法肩と法面中央に注入した場合、ウラン溶液はいずれも下流側（以後港内側と称す）の法肩から排水され、特異的な浸透挙動となった。この現象は他のマウンド形態においても同様の結果となった。このことから、マウンドの港外側で流入した浸透流は港内側の法肩付近に集中し、局所的に排水するといえる。この要因としては、検討したマウンド形態において、いずれの港外側法面の箇所からも港内側法肩までの経路が最短であったためと考えられる。浸透流は地盤内のピエゾ水頭差によって移動するため、最少のエネルギー損失で圧力消散に向かう挙動となる。

水圧変化に起因する浸透流が洗掘に及ぼす影響を定量的に調べた。浸透流の流速を測るため、港外側の地表面から注入したトレーサーが地盤内を移動の様子を高速度カメラ（Ditect 製/1000fps）で撮影し、Flownizer2D（Ditect 製）による PIV 解析を行った。用いたトレーサーは粒子径が $10\mu\text{m}$ 、比重が約 1.0 であり、間隙水と一体となって移動するため、浸透流の移動追跡に適する。トレーサーの動きを鮮明に撮影するため、高速度カメラには 105mm の望遠レンズを取り付け、撮影時には LED 照明を用いた。以

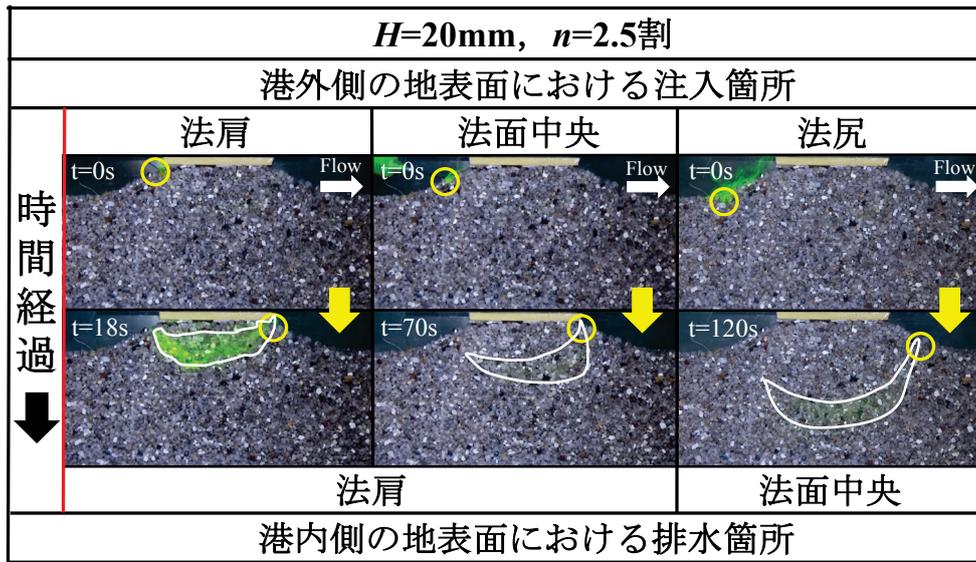


図 8 マウンド内浸透流の可視化（整形されたマウンドの天端にケーソン底面を模擬した非排水面を設置/定常状態）

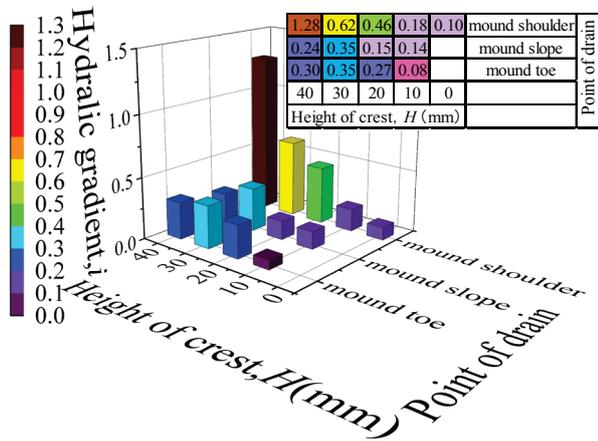


図 6 PIV 解析：港内側マウンドの法尻・法面中央・法肩における局所動水勾配（整形されたマウンドの天端にケーソン底面を模擬した非排水面を設置、 $n=2.5$ 割/定常状態）

下のダルシー則（式(1)）を仮定し、捉えた複数のトレーサーの平均移動速度を用いて港内側の法尻、法面中央、法肩における局所動水勾配を算出した（図9）。

$$i = \bar{v} / k \quad (1)$$

ここで、 i ：マウンド法面における局所動水勾配、 \bar{v} ：トレーサーの平均流速、 k ：透水係数を示す。結果より、法肩において局所動水勾配の値が顕著に大きな値を示しており、ウラン溶液が法肩に集積したと整合がとれた。次に、粒子一粒での鉛直方向の力の釣り合いに着目し、法肩付近での浸透力による浮遊の危険度 j_v/W_p を算出した。この指標は、浸透力 j の鉛直成分 j_v を粒子一粒の有効重量 $W_p=2.96 \times 10^{-4} \text{N}$ で除することで無次元化したパラメータである。なお、浸透力 j は以下の式(2)で算出した。

$$j = i \gamma_w V_p \quad (2)$$

ここで、 j ：マウンド法肩における浸透力、 γ_w ：水の単位体積重量、粒子一粒の平均体積 $V_p=18.3 \text{mm}^3$ を示す。また、 $j/W_p \geq 1$ を満たした時に、浸透流によって土粒子が浮遊す

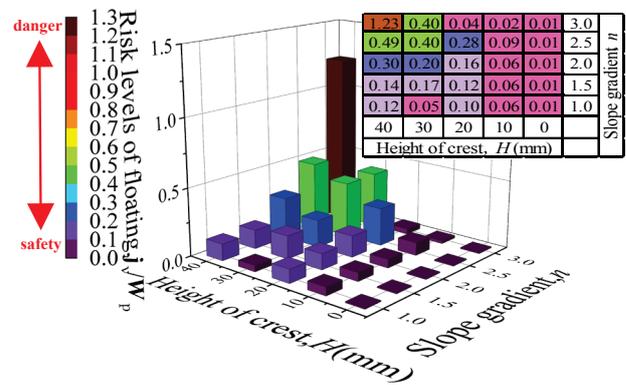


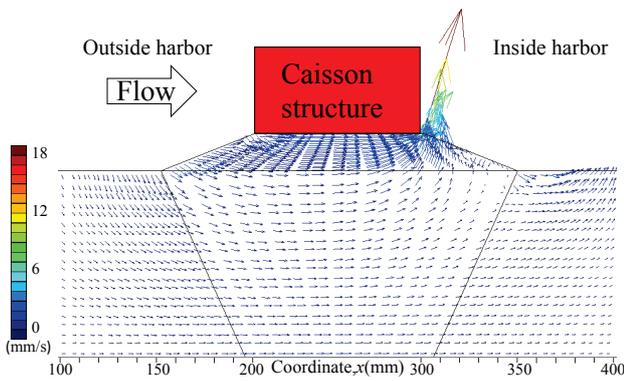
図 7 マウンド表面粒子の浸透力による浮遊の危険度（整形されたマウンドの天端にケーソン底面を模擬した非排水面を設置、港内側法肩/定常状態）

ることになる。

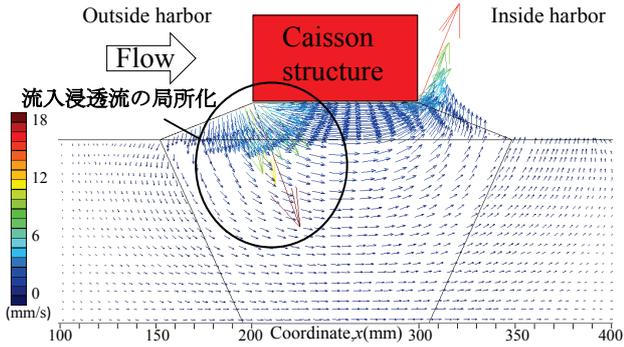
計算結果（図10）より、 $H=40 \text{mm}$ 、 $n=2.5$ 割の場合において $j_v/W_p=1.23$ となり、数値上は土粒子が浮遊する状態にある結果となった。実際には浮遊が生じていないが、周囲粒子との噛み合わせ効果が要因であると考えられる。しかし、越流等の他の洗掘要因が少しでも加われば、洗掘現象の発生も十分に考えられる結果である。水圧変化だけに起因する浸透流の影響により、防波堤マウンドが大きく不安定化することがわかった。

(2) 防波堤マウンド内における浸透流とその破壊形態

ケーソンを有す実防波堤を想定して水理模型実験（図6）及び浸透流解析を実施した。マウンド内浸透流について、[1]従来想定されてきた静水状態を仮定した、水面水位差に起因する浸透流の場合と、[2]空間的な水圧変化を発生要因として加えて考慮した場合の浸透挙動を浸透流解析により計算した。それらの解析結果と実験で実際に発生させたマウンドの破壊形態を照合し、水圧変化を考慮した浸透流挙動及び浸透破壊形態について、模型実験における再現性



(a) [1]水面水位を地表面のピエゾ水頭として入力



(b) [2]地表面のピエゾ水頭を直接計測して入力

図 9 流速ベクトル分布 (整形されたマウンドの天端にケーソンを設置/定常状態)

がどれだけ向上したかを検討した。なお水理模型実験は、地盤が形態変化しない定常状態のケースと、形態変化する非定常状態のケースの2つを行った。まず、境界条件の入手過程での都合上洗掘発生を抑制し、定常としたケースにおいて、[1],[2]に該当する境界条件を得て、浸透流解析を行った。次に、洗掘現象を発生させるために流速を上昇させた非定常のケースを行い、前者2つの場合の解析結果と照合した。

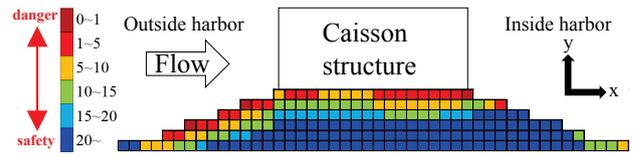
a) 2種類の境界条件による浸透流解析結果 (定常状態)

まず、流速ベクトル分布による浸透流挙動の比較を行った(図11)。いずれの結果も港内側の法肩における浸透流速が顕著に大きかった。一方、水圧変化を考慮した[2]の場合では、港外側においても法肩における浸透流速が顕著に大きかった。これは、ケーソン港外側において水圧が上昇し、マウンド上部の地盤内の圧力についても静水圧分布を仮定した[1]の場合よりも大きくなったためであると考えられる。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、法肩では従来よりもさらに厚い根固め工の措置が必要であると考えられる。

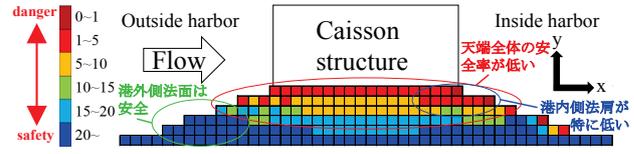
次に、浸透破壊に関する安全率による比較を行った。図11の結果より浸透流が水平方向に流れる傾向がみられたため、水平浸透力に着目して計算した。まず、以下のダルシー則(式(3))により局所動水勾配を算出した。

$$i' = v/k \quad (3)$$

ここで、 i' : マウンド内部の局所動水勾配、 v : 浸透流速を



(a) [1]水面水位を地表面のピエゾ水頭として入力



(b) [2]地表面のピエゾ水頭を直接計測して入力

図 10 水平方向の浸透力に着目した浸透破壊に関する安全率コンター (整形されたマウンドの天端にケーソンを設置/定常状態)

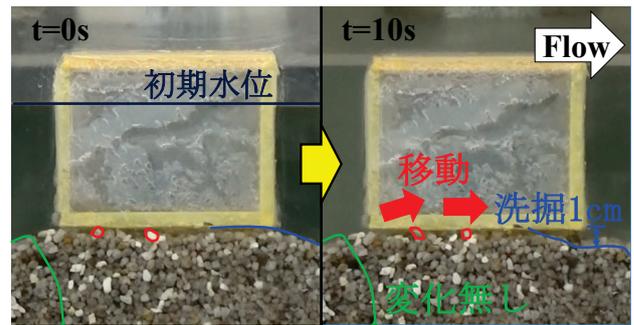


図 11 水理模型実験において実際に発生させた浸透破壊の様子 (整形されたマウンドの天端にケーソンを設置/非定常状態)

示す。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。

$$F_x = i_x \gamma_w V_m \quad (4)$$

$$F_y = i_y \gamma_w V_m \quad (5)$$

ここで、 F_x : 水平浸透力、 F_y : 鉛直浸透力、 i_x : 局所動水勾配 i' の水平成分、 i_y : 局所動水勾配 i' の鉛直成分、 γ_w : 水の単位体積重量、メッシュ一片の体積 $V_m=125\text{mm}^3$ を示す。粘着力を $c'=0$ と仮定し、鉛直有効荷重 W' を受けるメッシュ底面の水平せん断強度 T_f を次式で計算した。

$$T_f = (W' - F_y) \tan \phi' \quad (6)$$

内部摩擦角を $\phi'=30^\circ$ と仮定し、以上の計算結果を用いて、浸透破壊に関する安全率 F_{sx} を次式より計算した。

$$F_{sx} = T_f / F_x \quad (7)$$

安全率コンターを図12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。[1]の場合では、港外側法尻からマウンド天端までの安全率が周囲より相対的に小さかった。一方[2]の場合では、マウンド天端の広範囲で安全率が小さく、特に港内側法肩付近で著しく不安定化していた。後者の[2]について図11と併せて考察する。港外側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比較的低いと考えられる。しかし、天端においては水平方向の大きな流速の浸透流が広範囲に生じるため、浸透破壊の可能性は高いと考えられる。従って、天端はケーソンの支持力低下に直接関わるため、[2]の結果はより危険性の高い結果であることがわかり、空間的な水圧変化を加味する必要性が改

めて明確となった。

b) 水理模型実験による実際の浸透破壊（非定常状態）

実際の浸透破壊の様子を観察するため、より大きな流速で水理模型実験を行った（図13）。模擬津波の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生じ、港内側の法肩では実スケール換算で最大深さ約1m（縮尺1/100）の洗掘が観察できた。なお、港外側の法面では浸透破壊は観察できなかった。これらの現象は[2]の計算結果（図12(b)）と一致している。従って、従来想定されてきた浸透流の発生要因に簡易的に水圧変化を加えて考慮した浸透流解析を行うことで、浸透破壊が生じる箇所や規模を従来の手法よりも高い精度で特定することがわかった。浸透破壊に対する対策としては、マウンド天端に作用する水平浸透力を緩和する必要があるため、マウンド内に鉛直な矢板を設置する等で浸透破壊の危険性を低減できると考えられる。

4. まとめ

本研究では、水理模型実験や PIV（Particle Image Velocimetry）解析および浸透流解析を用いて浸透流が防波堤のマウンド基礎の洗掘にもたらす影響について考察した。特に、津波流れが河床波や防波堤等によって抵抗を受けて生じる空間的な水圧変化に着目した。地表面のピエゾ水頭分布を計測し、それを境界条件として用いた定常解析によって、浸透流挙動の特性を定量的に評価した。実験結果および解析結果から、以下の知見を得ることができた。

- 1) 飽和水平地盤に開水路流れが作用することで地盤内において浸透現象が生じる。この浸透流について、地表面の機微な凹凸が浸透挙動の進展に影響していたことから、地表面の起伏が浸透挙動の発生・発達を大きく助長すると考えられる。この起伏が大きくなることで、より浸透挙動が生じやすくなると考えられる。
- 2) 津波が発生すると、流れが河床波や防波堤等によって抵抗を受けて生じる空間的な水圧変化に伴って、地盤内部のピエゾ水頭分布についても変化することで、地盤内部で浸透流が発生することが明らかとなった。このことから、防波堤マウンド基礎の設計計算において、水圧変化に起因する浸透流の影響を反映することで、地盤内における浸透流挙動を正確に把握することに繋がり、支持マウンドにおける洗掘現象や浸透破壊に対する安定性評価の向上が期待できると考えられる。
- 3) 港外側のマウンド上部表面から流入した浸透流は港内側の法肩付近に集中し、局所的に排水される。これは、浸透流が地盤内のピエゾ水頭差によって移動するため、最少のエネルギー損失で圧力消散に向かおうとした結果であると考えられる。この浸透流の局所化に伴ってマウンド法肩部の地盤内で大きな局所動水勾配が発生し、浸透流の発生要因が空間的な水圧変化だけの条件下であっても、洗掘現象を発生させる程度の

土粒子の浮遊作用が生じる。

- 4) 防波堤マウンド基礎が津波力を受ける際、マウンド天端付近の広範囲の地盤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ことがわかった。特に、港内側法肩において著しく不安定化し、最大深さ 1m 程度の洗掘を観察することができた。
- 5) 定常状態における飽和浸透流解析において、簡易的な計測装置であるストロー状の細管を用いて直接計測した、地表面のピエゾ水頭を境界条件として設定することで、空間的な水圧変化が浸透流挙動にもたらす影響を反映することができる。その解析結果を用いて、防波堤のマウンド基礎において浸透破壊が発生する箇所や規模を簡易的に、従来の解析方法よりも高い精度で特定することができる。

今後の検討としては、洗掘現象及び浸透破壊が進行する過程に着目し、本論文で新たに検討・提案した境界条件下における非定常状態での飽和浸透流解析の適用を試みる。

参考文献

- 1) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究(I) 限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第 41 号，pp.1-21，1956.
- 2) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン，pp. 29，2015.
- 3) 木村克俊，山本泰司，笹島隆彦，鶴谷広一，中川康広：1993 年北海道南西沖地震津波による奥尻港防波堤の被災原因について，土木学会論文集，第 41 巻，pp.1191-1195，1994.
- 4) 鈴木 悠真，前田 健一，松田 達也，高木 健太郎：水平流れが作用する地盤への浸透現象に伴う過剰間隙水圧の発生要因分析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.74，No.2，pp. I_721-I_726，2018.
- 5) 山口敦志，前田健一，松田達也，高木健太郎：表層流れに起因する地盤の流動および間隙水圧変化に関する DEM-CFD 解析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.73，No. 2，pp. I_517-I_522，2017.
- 6) 松田達也，前田健一，山口敦志，高木健太郎，鶴ヶ崎和博，宮本順司，角田紘子：PIV による水平流れに起因した土粒子・土粒子群の微視的な流動挙動解析，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.73，No.2，pp. I_529-I_534，2017.
- 7) 松田達也，前田健一，泉典洋，伊藤嘉，山口敦志，鶴ヶ崎和博，宮本順司：自由表面流れに起因して発生する地盤内の過剰間隙水圧に関する一考察，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 72，No. 2，pp. I_565-I_570，2016.
- 8) 今瀬達也，前田健一，三宅達夫，澤田豊，鶴ヶ崎和博，角田紘子，張鋒：地震および越流による地盤損傷を考慮した津波力を受ける混成堤の支持力破壊検討，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.68，No.2，pp. I_866-I_870，2012.
- 9) 松田達也，前田健一，三宅達夫，宮本順司，角田紘子，鶴ヶ崎和博：土粒子－土要素レベルに着目したジェット流に伴う地盤洗掘の実験的考察，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.70，No.2，pp. I_1041-I_1045，2014.