

津波による掃流力及び地盤内浸透力に起因する防波堤下の洗掘現象

掃流力 浸透力 洗掘

名古屋工業大学 学○後藤麻衣 国 前田健一
学 今瀬達也 学 伊藤嘉

1. はじめに

東日本大震災では、津波力による滑動、転倒被害に加えて捨石マウンドや支持地盤の洗掘が防波堤の破壊に起因している事例が報告されている。近年の研究では、津波のような高速流れの作用により支持地盤内部の過剰間隙水圧が上昇し、洗掘を助長させることが指摘されている¹⁾。そこで本稿では捨石マウンドおよび支持地盤の透水性の異なる境界面において発生する洗掘現象について、掃流力及び地盤内部の応力変化に着目した水理実験を行った。

2 実験概要

2.1 実験装置概要及び実験方法

図-1 に実験装置の概略図及び堆積地盤内における間隙水圧計の設置位置を示す。実験では、長さ 2.0m×幅 0.3m×高さ 0.3m のアクリル水槽を用いた。水路の上流より 1.0m を起点に長さ 0.5m×幅 0.3m×高さ 0.1m の土槽区間を設置し、地盤を堆積させた。それ以外の区間は不透水床とし、床表面に摩擦を考慮して平均粒径 $D_{50}=0.17\text{mm}$ の豊浦砂を付着させた。土槽上部には捨石マウンドとケーソンを設置した。ただし、捨石マウンドの透水性を考慮した洗掘メカニズムに焦点をあて、より簡易的に現象を観察するために、捨石マウンド及びケーソンは不動とした。流体力はフルード則を考慮して、水中ポンプ (0.1kL/min) を使用し、継続的に作用させた。地盤内に間隙水圧計 (SSK 製) を設置し、地盤内の応力変化を観察した。

2.2 実験に用いた試料及び実験ケース

本実験では、支持地盤に豊浦砂を用いて相対密度 $D_r=40\%$ になるように堆積させた。実験初期の水位およびマウンドの高さは 20mm に統一し、マウンドの透水性を礫材大、礫材小、

不透水、無限の場合に変化させて支持地盤の洗掘現象を観察した。試料の詳細を表-1 に、実験ケースを表-2 に示す。ケーソンの上流側と下流側の水位差を $\Delta\eta$ と定義した。

3. 実験結果

3.1 洗掘の様子

図-2 に case1 から case4 の実験時の様子を、図-3 に case1 から case3 における洗掘幅上流端 X_u 、下流端 X_d 、最大洗掘深 $D_{s_{max}}$ の位置の時刻歴を示す。case2, case3 では、水位差 $\Delta\eta$ の増加により発生したケーソン模型直下を回り込む流れによって、マウンドと支持地盤の境界面に洗掘が発生した。この洗掘は、上流側のケーソン模型隅角部を起点とし、水位差 $\Delta\eta$ の増加に伴って上流側および下流側へ拡大した。最大洗掘深

表-1 実験で用いた試料の詳細

| 試料 | 豊浦砂 | 礫 大 | 礫 小 |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $D_{10}(\text{mm})$ | 0.116 | 5.335 | 2.319 |
| $D_{50}(\text{mm})$ | 0.173 | 8.570 | 4.730 |
| 透水係数 $k(\text{m/s})$ | 2.21×10^{-2} | 7.46×10^{-4} | 6.04×10^{-4} |

表-2 実験ケース

| | 支持地盤 | | 捨石マウンド |
|-------|------|----------------|--------|
| | 材料 | 相対密度 $D_r(\%)$ | |
| case1 | 豊浦砂 | 40 | 無 |
| case2 | 豊浦砂 | 40 | 礫材 大 |
| case3 | 豊浦砂 | 40 | 礫材 小 |
| case4 | 豊浦砂 | 40 | 不透水 |

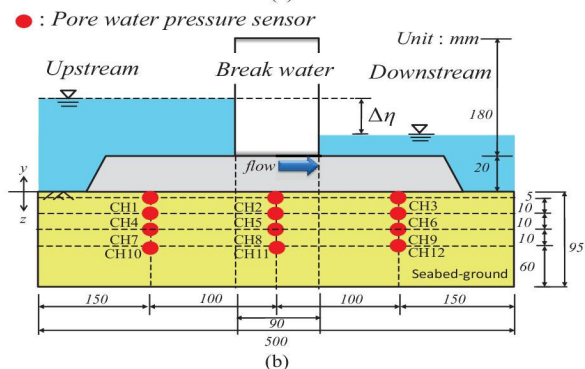
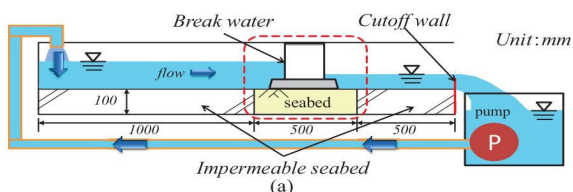


図-1 実験装置の様子：(a) 模型水路全体図，(b) 間隙水圧計設置位置

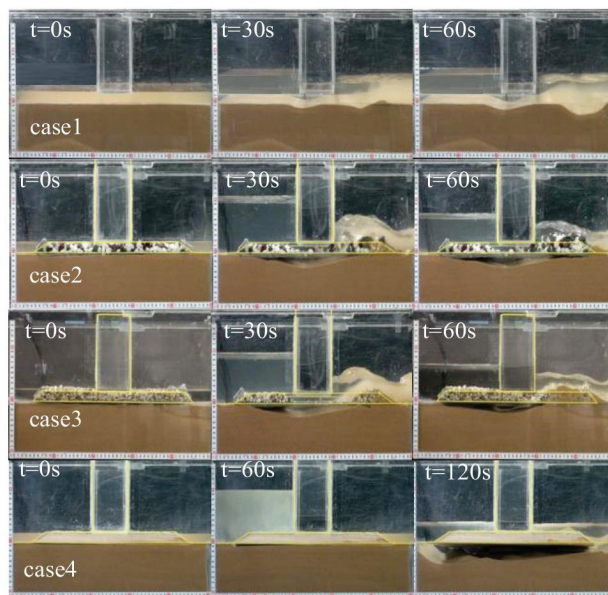


図-2 実験の様子：case1-case4

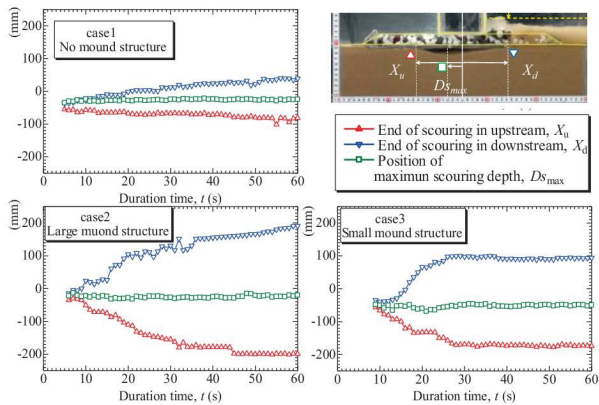


図-3 洗掘幅, 最大洗掘深位置の時刻歴 : case1-case3

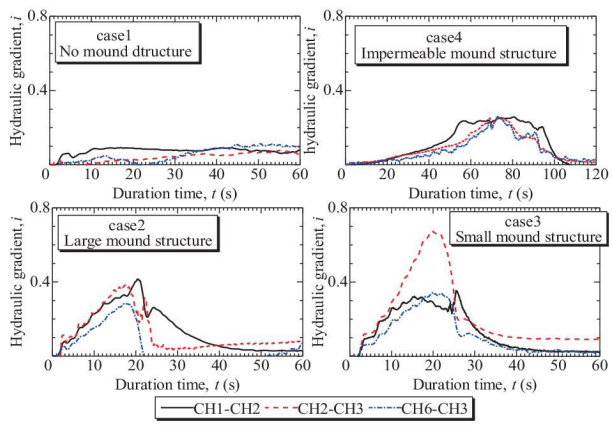


図-4 計測器間(CH1-CH2, CH2-CH3, CH6-CH3)における局所的動水勾配の時刻歴 : case1-case4

$D_{s_{max}}$ の位置は常にケーソン模型隅角部であった。case2, case3 の洗掘断面を比較すると、透水性の高い case2 の方が広域に洗掘されていることがわかる。比較的大きな透水性を有する多孔質体においては透流速が速くなり、流速に応じた掃流力の影響に起因していると推察する。次に、より簡易的な実験である case1, case4 について比較する。case1 では case2, case3 と同様の半楕円上の洗掘形状であるが、水位差 $\Delta\eta$ の増加により洗掘断面の規模が異なることがわかる。case4 においては、水位差 $\Delta\eta$ の増加に伴い、地盤内に浸透流の影響が発生し、特にマウンドと支持地盤の境界面で洗掘が進行的に生じ、やがて破壊に至った。

3.2 動水勾配に着目した洗掘要因の分析

次に、地盤内に設置した間隙水圧計の計測結果をもとに各設置位置における位置水頭及び圧力水頭より全水頭を求め、計測器間の全水頭差を計測距離で除して動水勾配を算出し、地盤内の応力変化について考察した。図-4 に case1 から case4 における計測器間 CH1-CH2, CH2-CH3, CH6-CH3 の動水勾配 i の時刻歴を示す。マウンドが比較的透水性を有する case2, case3 では、局所的動水勾配の上昇がみられた。これは、マウンド内で流量が捌ききれず水位差 $\Delta\eta$ が上昇したことに起因すると考える。一方、case1 では局所的動水勾配の上昇が小さく、掃流力による作用が支配的であるといえる。また、case1 と対照的な条件である case4 では局所的動水勾配が $i=0.3$ 程度の上昇を示した。ここで、case4 における動水勾配 i 、水位差

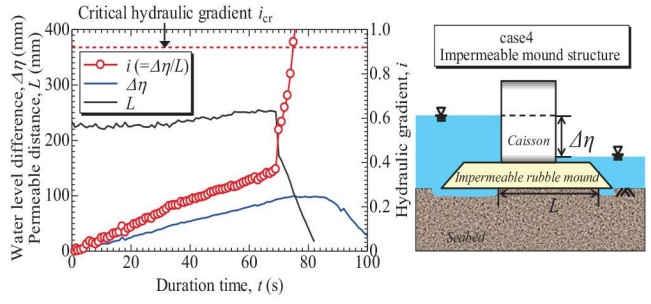


図-5 動水勾配 i , 水位差 $\Delta\eta$, 流路長 L の時刻歴 : case4

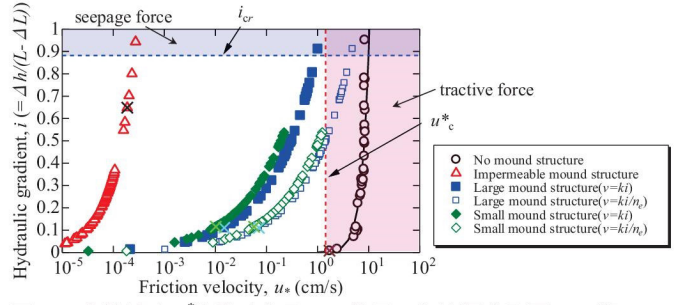


図-6 摩擦速度 u^* と動水勾配 i に着目した洗掘支配要因の解釈 : case1-case4

$\Delta\eta$, 流路長 L の時刻歴を 図-5 に示す。この動水勾配 i は、実験時の画像から読み取った水位差 $\Delta\eta$ を、マウンド幅より洗掘幅を差し引いた流路長 L で除して算出した。実験開始 70 秒後から流路長 L が減少し、実験開始 75 秒後に限界動水勾配 $i_{cr}=0.913$ に達して浸透破壊となったことがわかる。

以上より洗掘には掃流力と浸透力の両方の作用を受けていることが推察される。そこで、各ケースにおける掃流力と浸透力の影響の関係を、摩擦速度 u^* と動水勾配 i の関係に置き換えて考察した。図-6 に摩擦速度 u^* と動水勾配 i 関係図を示す。摩擦速度 u^* はマウンド内の浸透流速より算出した。図中の赤の破線は限界摩擦速度 u^*_c を、×印は実際に洗掘が始まった時点を示す。case1 では動水勾配 i は上昇せず、限界摩擦速度 u^*_c に達して洗掘されていることがわかる。対称的に case4 では限界動水勾配に達する前に洗掘されており、限界摩擦速度 u^*_c には達しなかった。case2, case3 では、マウンド無しの case1 と不透水の case4 の中間にプロットされ、掃流力及び浸透力の両方の影響を受けていることが示唆された。

4. 結言

比較的透水性を有するマウンドでは、掃流力及び浸透力の複合作用を考慮した洗掘を考える必要があることがわかった。今後は掃流力と浸透力の推移・相互評価を定量的・理論的に評価し、その影響を検討する必要があると示唆された。

謝辞 : 本研究では、日本学術振興会科学研究費補助金基礎研究(B)23360203 と基盤研究(B)21360222 の助成を受けたものであり、深謝の意を表す。

参考文献 : 1)今瀬達也他(2012) : 間隙圧の変化に着目した開水路流れ及び越流による洗掘メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 B2, vol.68, No.2, pp.836-840.