

透水性が異なる二層地盤における洗掘メカニズムの外力要因分析

掃流力 浸透力 洗掘

名古屋工業大学 学○久泉友二 国 前田健一
学 今瀬達也 学 伊藤嘉

1. 研究背景

我が国では、支持地盤と捨石マウンドでケーソンを保持する混成堤が多く建設されている。近年、津波作用時に、捨石マウンド内に速い浸透流が作用することで、支持地盤が洗掘し、防波堤の支持力を低下させる可能性が指摘されている¹⁾。しかし、透水性が異なる二層地盤構造に津波浸透が作用した際の洗掘メカニズムについては未だ十分な議論がない。

そこで本研究は、上層地盤の透水性を変えた際の下層地盤の洗掘現象に与える影響を水理模型実験により検討した。

2. 実験概要

実験では、長さ2.0m、幅0.3m、高さ0.3mの移動床水路(図-1(a))を用いた。図-1(b)に実験装置の概要図および堆積地盤内に設置した間隙水圧計の位置を示す。水路上流から1.0mを起点に、長さ0.5m、幅0.3m、高さ0.1mの土槽区間を設け、地盤を堆積させた。支持地盤には豊浦砂($D_{50}^S=0.173\text{mm}$)を用い、水中落下法により相対密度 $D_r=40\%$ になるように作成した。土槽上部には混成堤模型を設置した。ただし、港内外の水位差 Δh に起因した捨石マウンドと支持地盤への浸透流による支持地盤の洗掘現象にのみ着目するために混成堤模型は水路に固定した。捨石マウンドには、透水性の異なる6つの材料を用いた。実験に用いた試料の粒径加積曲線を図-2に、実験ケースを表-1に示す。水中ポンプを用いて外力を継続的に作用させた。実験時には、間隙水圧計(SSK製)を用いて地盤内の間隙水圧を計測した。また、ビデオカメラと高速度カメラを用いて現象の撮影を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 洗掘の様子

図-3に代表的な例としてcase1,2,6,7における洗掘断面の時刻歴を示す。case1では、ケーソン上流側隅下より洗掘が生じたが、 Δh が小さいために小規模であった。case2では、ケーソン上流側隅下より洗掘が発生し、 Δh の上昇に伴って円弧状に洗掘が拡大した。case3,4でも同様な傾向がみられた。case6では、支持地盤ではなく、ケーソン模型と捨石マウンドの境界から洗掘が生じた。また、case5も同様な傾向を示した。これは、支持地盤と捨石材の粒径比が小さいことで、豊浦砂の移動が拘束されたためであると考えられる。case7では、 Δh の上昇に伴う捨石マウンドと支持地盤の境界で生じた水みちの進行と、港内側の法先からの噴砂を切欠に支持地盤全体が洗掘され、浸透破壊した。以上のように、捨石マウンドの透水性の違いによって破壊モードが変化した。

3.2 支持地盤に働く透水力に着目した洗掘要因の分析

まず、 Δh の上昇に伴って支持地盤に働く透水力が洗掘に及ぼす影響について検討する。case1,4,7における支持地

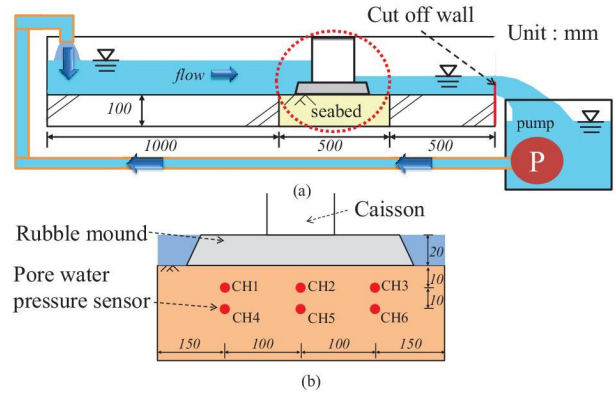


図-1 実験装置の概略図(a)、間隙水圧計の設置位置(b)

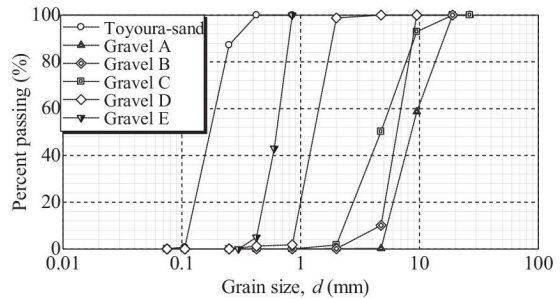


図-2 実験に用いた試料(捨石・支持地盤)の粒径加積曲線

表-1 実験ケース

case	ポンプ (m^3/min)	捨石マウンド				
		材料	透水係数 (m/s)	間隙率 n_e	D_{50}^M (mm)	粒径比 D^S/D^M
1	0.12	無	-	-	-	-
2	0.12	Gravel A	1.436×10^{-1}	0.458	8.570	0.020
3	0.12	Gravel B	1.359×10^{-1}	0.471	5.300	0.033
4	0.10	Gravel C	4.667×10^{-2}	0.422	4.730	0.037
5	0.12	Gravel D	1.200×10^{-2}	0.440	1.300	0.133
6	0.12	Gravel E	2.457×10^{-3}	0.374	0.630	0.275
7	0.10	不透水	-	-	-	-

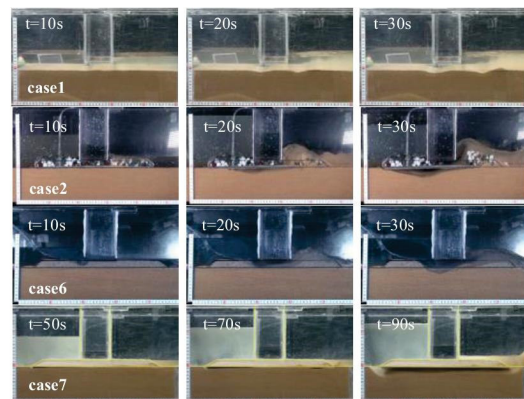


図-3 case1,2,6,7における洗掘断面の時刻歴

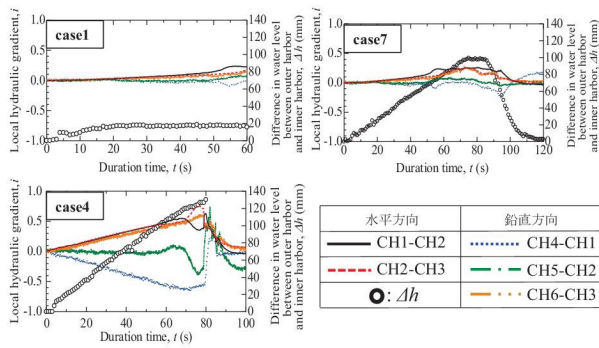


図-4 case1,4,7における局所的動水勾配の時刻歴

盤内の局所的動水勾配 i の時間歴を図-4に示す。局所的動水勾配 i は、間隙水圧計設置点ごとにピエゾ水頭を算出し、計測間のピエゾ水頭差を計測間距離で除して求めた。水平方向は上流側から下流側への流れを、垂直方向は上向き流れを正とした。case1では、 Δh が微小なために水平・鉛直方向ともに0.1程度であり、透水力の影響は小さい。case4では、 Δh の上昇に伴って、水平方向で最大0.8程度(CH2-CH3)、鉛直方向には最大0.5程度(CH6-CH3)上昇した。よって、透水力の影響を大きく受ける。また、case2,3でも動水勾配の最大値に違いはあるが同様の傾向を確認した。case7では、CH1-CH2(水平)においては、 Δh が大きくなるにも関わらず、0.2程度(水平方向)で保持しているが、港内側のCH6-CH3(鉛直)で75秒経過後に0.27程度まで上昇している。これにより、噴砂が生じたと考えられる。しかしながら、マウンドが不透水格子であるcase7に比べ、case4の方が透水力をより受けていることがわかった。

以上より、捨石マウンドの透水性の違いによって、地盤に作用する透水力(内力)が変化することがわかった。

3.3 捨石マウンド内の浸透流速の評価

捨石マウンド内の浸透流速の評価と支持地盤の洗掘について考察した。浸透流速は、高速度カメラにより捨石マウンド内を通過するトレーサー粒子を撮影して、画像解析により算出した。また、捨石マウンド内が層流であり、Darcy則に従うものとして算出した流速($u=ki$)、捨石の間隙率 n_e を考慮した実流速の3つの流速を比較した(図-5)。縦軸は、水位差 Δh を初期マウンド幅 $L(=410\text{mm})$ から洗掘された距離を差し引いた変動透水距離 L' で除した巨視的な動水勾配 i 、横軸は、Prandtl-Karmanの対数分布則を用いて算出した摩擦速度 u^* を表した。図-5より、捨石マウンド内の流速は間隙率を考慮した実流速に近いことがわかる。case3,4においても同様の傾向が得られた。よって、マウンド内の浸透流速は、間隙率を考慮した実流速で評価することが適当であるといえる。

3.4 掃流力と透水力の複合外力による洗掘メカニズム

一般に、 u^* が限界摩擦速度 u_c^* を超えると土粒子が移動開始し、 i が限界動水勾配 i_c を超えると浸透破壊することが知られている。ここで、図-6にcase1-case7における摩擦速度 u^* と動水勾配 i の関係を示す。×印は、目視により土粒子の移動を確認した地点をプロットした。case1については、 u_c^* に達してから支持地盤の洗掘が開始しているが、case2-case7に

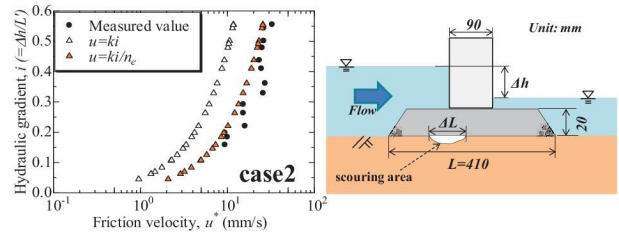


図-5 case2におけるマウンド内の浸透流速の評価

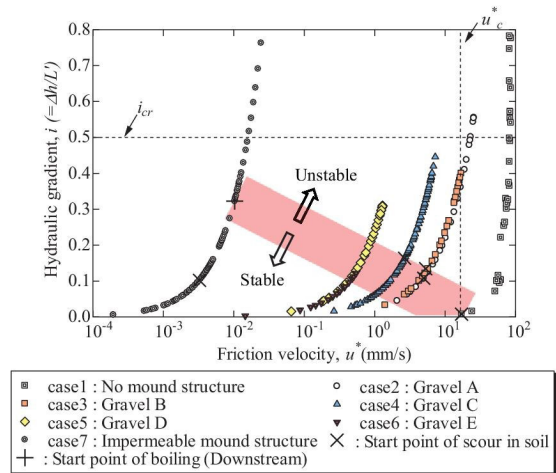


図-6 巨視的動水勾配 i と摩擦速度 u^* の関係

ついては、 u_c^* および i_c に達していないにも関わらず、洗掘が開始していることがわかる。この要因として、捨石マウンドの透水性が低くなるに従って、支持地盤には透水力が作用し、洗掘が開始する際には掃流力に加えて透水力が作用することで u_c^* および i_c 以下でも洗掘が発生したと考えられる。

以上より、捨石マウンドの透水性の違いによって洗掘に与える外力要因が、掃流力から透水力へと変化し、その洗掘開始条件に規則性があるのではないかと考える(図-6 帯線)。

4. 結言

捨石マウンドの透水性の違いにより、掃流力による洗掘から浸透破壊へと破壊モードが変化することが示唆された。捨石内の浸透速度を評価したところ、間隙率を用いた実流速を用いることが妥当であることがわかった。それを踏まえて透水性が異なる地盤境界の洗掘現象について掃流力と透水力の観点から考察すると、捨石径に対する支持地盤の粒径の比率が小さい場合、限界掃流力と限界動水勾配の基準以下で洗掘が発生することから、地盤洗掘については掃流力と透水力の複合的な作用を考慮する必要があると考えられる。

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 と特別研究員奨励金(24・9200) 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.