

管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验

满晓磊^{1,2}, 束一鸣², 曹明杰², 蔚成亮², 郝雪航², 李少鹏², 毛文龙²

(1. 滁州学院地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239000; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对管袋坝坝芯吹填砂沿袋间接缝流失问题,采用自行研制的管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验研究装置,进行了单向流和波浪工况下管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失物理模型试验,分析了不同工况下的颗粒运移规律和冲刷稳定性。试验结果表明:单向流工况下,砂颗粒的流失方式为“槽沟式”;波浪工况下,冲刷过程以拱结构空间的出现、形成和坍塌为标志划分为冲击、成拱、稳定3个阶段;选择袋间接缝内砂堆长度作为判定管袋坝袋间接缝冲刷稳定性的判定指标,通过比较实际工程中管袋坝袋间接缝长度与接缝内砂堆长度可以判断波浪工况下的冲刷稳定性。

关键词:管袋坝;袋间接缝;坝芯;吹填砂;冲刷稳定;模型试验

中图分类号:TV641.2 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2018)01-0028-08

Experimental study on dam core sand scouring through seams between tubes of a geotube dam//MAN Xiaolei^{1,2}, SHU Yiming², CAO Mingjie², YU Chengliang², HAO Xuehang², LI Shaopeng², MAO Wenlong²(1. College of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the problem of sand erosion through seams between geotubes, erosion stability of the backfill sand inside the dam core was carried out by a self-developed experimental apparatus. The physical model test was performed in unidirectional flow conditions and wave conditions. The transport characteristics of sand particles and scouring stability were analyzed. Experimental results show that in the condition of unidirectional flow, the process and mechanism of sand particle erosion has a “groove type” characteristic. In the condition of wave flow, arch-like structures will appear, form and collapse and correspondingly the erosion process can be divided into three stages of lashing, arching and stability. The critical length of the sand pile inside the seams between tubes was chosen as a criterion parameter to determine the erosion stability of seams between geotubes. The scouring stability in wave flow conditions can be determined by comparing the length of the seam between geotubes and the length of the sand pile inside the seam in real engineering works.

Key words: geotube dam; seam between geotubes; dam core; backfill sand; scouring stability; experimental research

吹填管袋筑坝技术是以层状堆叠的吹填管袋为围堰,并在两侧管袋围堰之间吹填砂质土进而形成堤坝的技术,其典型断面如图1所示。与传统河、海围堤的筑堤技术相比,该技术具有施工工艺简单、可就地取材、工程造价低、施工速度快、对软土地基的适应能力较好、施工受潮位和降雨影响小等优点^[1-2]。

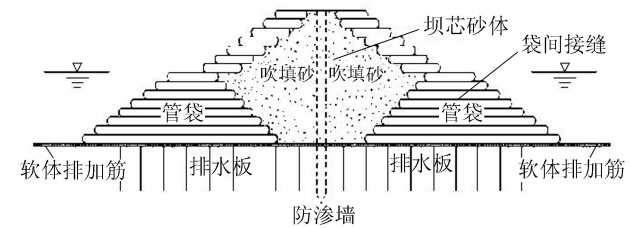


图1 管袋坝断面

近年来,充填管袋技术在河口蓄淡水库的建设中发挥着越来越重要的作用。由于沿海港口城市人口数量急剧膨胀,淡水资源越来越成为制约城市发展的瓶颈。沿海地区汇入大海的大江大河拥有丰富的淡水资源,但由于受到海潮的影响,河口地区容易遭受咸潮的侵袭,影响河口地区的沿江取水,长江口、珠江口等地区受咸潮影响尤为突出。为了解决淡水资源供需矛盾,沿海地区大城市纷纷开始建设蓄淡水库作为城市的水源地。上海市在长江口建设了青草沙、陈行两座蓄淡水库,并正在规划建设东风西沙水库^[3];长江口的太仓等城市也已建或在建多座蓄淡水库^[4];江苏沿海开发规划了蓄淡水库总库容为10.6亿m³,约需大小20座水库。由于沿海

平原地区往往缺乏大量的筑坝土石料,而潮汐河口地区河床上部多为天然沉积粉砂、砂质粉土等砂土料,所以采用充填管袋筑坝技术已成为潮汐河口地区建造蓄淡水库的首选技术。

但是,前期建成的管袋坝经过一段时间的运行,也慢慢出现各种问题,包括坝体的局部沉降问题。通过论证分析,认为局部的沉降可能是由于坝内砂颗粒沿袋间接缝流失引起的(图2),因此管袋坝袋间接缝冲刷问题应引起重视,但目前我国关于该问题的研究几乎空白。



图2 袋间接缝

国外土工管袋大多选用高强土工织物制作,管袋可以做得很长,管袋搭接较少,管袋坝袋间接缝渗透冲刷稳定问题并不突出,所以国外学者的研究更多地侧重于管袋坝坝体稳定性、管袋后期变形和管袋材料的渗透性等问题^[5-11]。

本文针对管袋坝坝芯吹填砂沿袋间接缝流失破坏开展模型试验研究,结合管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷模型试验研究^[12],可为工程实践提供参考。

1 试验装置及试验方法

1.1 单向流工况试验装置及试验方法

根据工程中管袋坝袋间接缝可能形成细小水砂通道的实际情况,设计了管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验研究装置如图3所示。该装置由砂槽、水槽、沉砂槽、控制上下游水位的进出水槽、测量

设备、加载设备、照相摄像设备等组成,其中砂槽模拟管袋坝袋间接缝与坝芯交界处附近的吹填砂体,水槽模拟袋间接缝。

为了便于观察,砂槽、水槽等均用有机玻璃制作。为了完成边界条件的模拟,利用自行设计的简易模型对国内外两种常用的管袋材料糙率进行了测试,并根据谢才公式计算了糙率。测试结果表明,20目的白色纱网与国产编织布粗糙系数相当,且该纱网相对编织布更利于对试验的观察,因此试验均用纱网配合有机玻璃用于编织布糙率的模拟。

试验过程包括试验准备、试验实施、试验后处理3个阶段。试验准备阶段主要完成装置组装、配制砂样、装填砂样及加载浸泡等准备工作;试验实施阶段主要进行试验操作(水压差的施加等)与信息采集(数据、图像等);试验结束后在特征部位取样,用于进行孔隙率检测及颗分试验,分析颗粒的流失及分布情况。

1.2 波浪工况试验装置及试验方法

为模拟波浪水流沿袋间接缝对坝芯吹填砂的冲刷过程,设计了一套试验装置如图4所示。该装置主要由试验砂槽、水槽以及波浪水流发生器3部分组成,其中砂槽用于模拟坝芯砂体,水槽用于模拟袋间接缝,波浪水流发生器用于提供进入接缝的破碎波浪水流。

波浪水流发生器在调速电机的驱动下,为接缝水槽及试验砂槽提供一定周期和压力的往复水流,周期及能量分别通过调节调速电机的转速和行程来改变。

试验过程同样包括试验准备、试验实施、试验后处理3个阶段,除在试验实施阶段中施加不同特性的波浪作用外,其他试验环节与单向流工况基本一致。

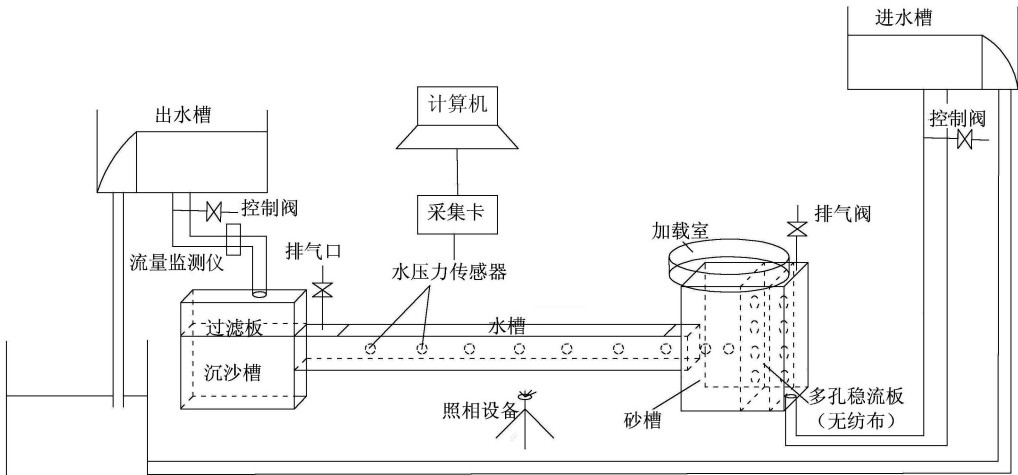


图3 单向流工况试验装置

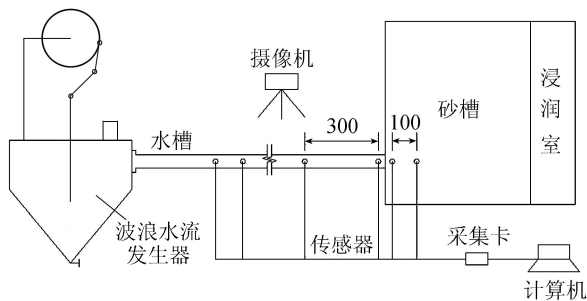


图4 波浪工况试验装置(单位:mm)

2 单向流工况试验结果与分析

2.1 吹填砂流失运移规律

2.1.1 砂槽内颗粒运移特点

为便于研究坝芯砂体的运移规律,将砂槽渗透影响区域划分为8个特征单元,在每个特征单元内布置不同颜色的彩砂。试验结束后,分别在特征单元内取样,分析颗粒的运移路径并进行颗粒分析。

由图5和图6可知,砂槽内颗粒运移的主要路径为紧靠砂槽前壁(即紧靠袋间接缝)倒锥形半椭圆圆柱以及水槽顶部(即袋间接缝顶部)的砂体表面细小槽沟,当发生颗粒渗透流失时,砂槽出口处颗粒首先被水流带走,带走的颗粒沿着堆积体表面细小槽沟运移至颗粒堆积体另一端的自然坡面,最后从坡角依次往上部堆积形成新的坡面堆积层,当砂槽出口上方结构由于颗粒流失而无法稳定时,上部砂体颗粒便塌落填补颗粒流失造成的孔洞。



(a) 试验前



(b) 试验后

图5 砂槽内(俯视)上层单元内颗粒流失前后对比

试验结束后对彩砂区域取样的特征点位置如图7所示,各取样点颗分结果如图8所示。

从图8可以看出,当水槽发生渗透破坏时,在颗粒渗透流失而造成的倒锥形塌落区域外侧,颗粒基本



(a) 试验前



(b) 试验后

图6 砂槽内(俯视)下层单元内颗粒流失前后对比

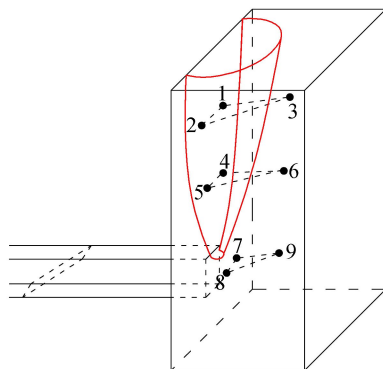


图7 试验结束后砂槽取样点分布

上未发生运移。塌落区域边缘处的级配曲线均在原砂的下方,说明在该区域内细颗粒存在流失现象,尤其是倒锥形塌落区边缘中部,其细颗粒流失较塌落区内部更为严重。这主要是由于边缘区域粗颗粒流失较少,细颗粒大量流失后得不到补充,导致该区域细颗粒占比减少,而中心区域在下部区域掏空后,粗细颗粒整体下陷,所以细颗粒百分比的减少反而不明显。

2.1.2 水槽内颗粒运移特点

图9为水槽侧面和顶面堆积体各粒径颗粒分布,可以看出,不同颜色代表的不同粒径颗粒在竖向和水平向均为有规律的分布。

水槽内砂体颗粒从下往上颗粒粒径依次减小,其原因是当颗粒沿着堆积体与水槽顶面接触冲刷产生的细小槽沟运移至砂堆坡面处时,粗颗粒沉落速度较快,细颗粒在粗颗粒之间移动,形成了下粗上细的分布。

试验过程中水槽内颗粒主要沿细小槽沟运移。粗颗粒在细小槽沟的形成过程中起到了细小槽沟两侧骨架的作用,使得细颗粒可以沿细小槽沟运移。

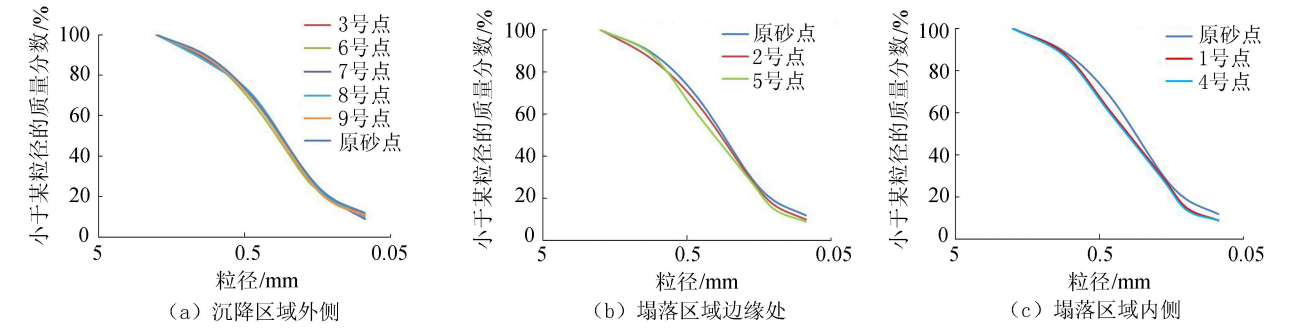


图 8 倒锥形塌落区域附近砂颗粒级分结果

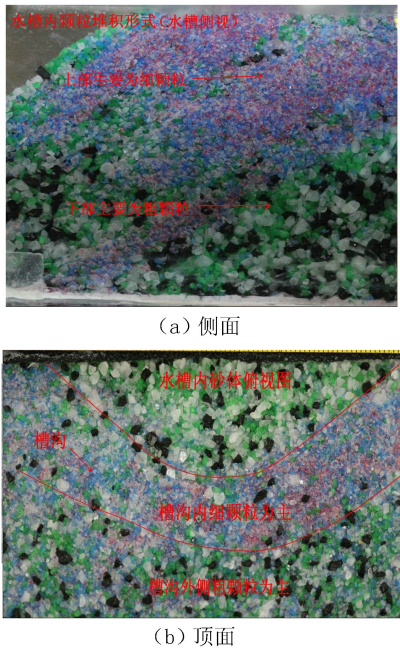


图 9 水槽内堆积颗粒分布

该水流路径出现的原因是当渗流沿着堆积体与水槽顶面两种不同介质接触面流动时,容易带走堆积体表面的细颗粒,且由于堆积体表面砂颗粒重力作用下的法向接触力最为薄弱,靠近水槽上壁面流线又比较集中,流速较大,颗粒被水流带走后形成细小槽沟。

2.1.3 吹填砂颗粒运移规律

结合砂槽及水槽内颗粒的运移特点,单向流工况管袋坝坝芯吹填砂沿袋间接缝流失运移规律可以概括为:

a. 起动过程。在该过程中,随着上下游水位差的增大,砂槽出口区域水力坡降不断升高;细颗粒首先开始流失,拱结构骨架个别粗颗粒逐渐失去稳定而流出。

b. 发展过程。随着拱结构骨架颗粒的不断流失,下游水位迅速升高,拱结构区域坡降减小;拱结构失去稳定,颗粒大规模流出,下游水位和拱结构区域坡降分别达到最大和最小峰值;峰值过后砂槽出口骨架颗粒重新调整形成新的结构,细颗粒充填至粗颗粒空隙,流失速度逐渐减慢,结构趋于稳定。

c. 稳定过程。由于砂槽出口区域各粒径颗粒的逐步堆积,使砂体渗透性减小;而流至水槽内的砂颗粒也使得水槽砂体堆积长度增加,渗透路径延长,沿程水头损失增大;当拱结构区域坡降减小至临界坡降以下,整个水槽达到渗透稳定。

2.2 吹填砂流失稳定分析

由单向流工况的流失运移规律可知,控制“槽沟式”水槽渗透破坏起动的关键为砂槽出口是否形成了稳定结构,该结构稳定性决定了砂槽出口的临界水力坡降以及临界流速;而该临界水力坡降又决定了水槽需要消耗的水头,临界流速则决定了水槽细小槽沟单位长度内沿程水头的损失并进一步决定了水槽最终达到渗透稳定所需要的砂体堆积长度。

本文采取的简化计算模型如图 10 所示,取断面 A—A 和断面 B—B 建立能量方程。断面 A—A 为砂槽(坝芯)出口处,该断面总水头近似于测压管水头;断面 B—B 为水槽(袋间接缝)全过水断面,该断面相对细小槽沟面积大几十倍,所以认为水槽全断面流速水头接近于零,该断面总水头也近似用测压管水头代替。

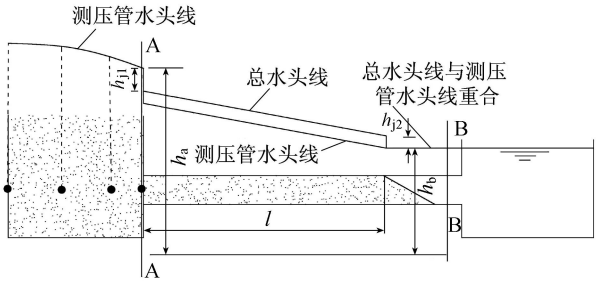


图 10 水槽渗透稳定计算模型

断面 A—A 和断面 B—B 槽沟的能量方程式为

$$h_a = h_{j1} + h_f + h_{j2} + h_b \quad (1)$$

式中: h_a 为砂槽出口测压管水头,对应实际工程中坝芯与袋间接缝交界处稳定时刻的孔隙水压力值; h_b 为水槽出口测压管水头,对应实际工程中袋间接缝外侧(临水面)水压力; h_{j1} 为砂槽出口处水头损失; h_f 为细小槽沟沿程水头损失; h_{j2} 为细小槽沟水流出口水头损失。则有

$$h_a - h_b = h_{j1} + h_f + h_{j2} =$$

$$\zeta_{c1} \frac{v_c^2}{2g} + \lambda \frac{L_{\text{堆}}}{4R} \frac{v_c^2}{2g} + \zeta_{c2} \frac{v_c^2}{2g} = \left(\zeta_{c1} + \lambda \frac{L_{\text{堆}}}{4R} + \zeta_{c2} \right) \frac{v_c^2}{2g}$$

(2)

整理得

$$L_{\text{堆}} = \frac{4R}{\lambda} \frac{2g}{v_c^2} \left(h_a - h_b - \zeta_{c1} \frac{v_c^2}{2g} - \zeta_{c2} \frac{v_c^2}{2g} \right)$$

(3)

式中: $L_{\text{堆}}$ 为渗透稳定时水槽内砂体的堆积长度,也即稳定渗透长度;; v_c 为槽沟稳定流速; R 为槽沟水力半径;; λ 为槽沟沿程水头损失系数; ζ_{c1} 、 ζ_{c2} 为系数。

根据水槽渗透稳定计算模型,当砂体的级配和孔隙率一定时,砂槽出口的临界坡降、细小槽沟内的稳定流速以及细小槽沟的水力半径一定。细小槽沟水流的雷诺数 Re 约为 200,可认为是层流,故槽沟沿程水头损失系数 λ 仅与雷诺数 Re 有关。因此,当给出上游水槽进口处(即砂槽出口处)水位 h_a 时,只要根据每组试验所测定的 v_c 、 ζ_{c1} 、 ζ_{c2} 、 R 以及 λ 即可求出稳定渗透长度 $L_{\text{堆}}$ 。

根据式(3)计算不同颗粒级配和孔隙率组成的砂样在水槽内的稳定渗透长度,表 1 列出了 6 种砂样的试验结果,实际工程中坝芯砂料若接近表 1 砂样,可参考表 1 选取参数,计算稳定渗透长度。

从表 1 可以发现,在相同的上下游水位差 Δh 下,细颗粒组的 $L_{\text{堆}}$ 计算值反而较其他组小,这是由于细颗粒组形成细小槽沟的沿程水头损失系数较其他组大,但这并不代表细颗粒组不易发生渗透破坏。当上游水位相同时,以砂槽出口进入水槽细小槽沟处为分界面,在该面上游由于细颗粒组渗透系数非常小,在砂槽内水流类似于淤堵状态,各点处水压力比较接近,而该分界面下游为细小槽沟,细小槽沟水压力值又与下游水位接近。因此,细颗粒组在该分界面两侧水力梯度比较大,“拱结构”处更易达到其临界坡降而发生破坏。相反,粗颗粒渗透系数较大,因而水力梯度分布相对更均匀,有利于稳定。

综上所述,单向流工况坝芯吹填砂经袋间接缝流失稳定性判断方法如下:先量测管袋坝间接缝砂槽出口测压管水头 h_a 和水槽出口测压管水头 h_b ,然后计算出袋间接缝内砂体堆积长度 $L_{\text{堆}}$ 与接缝长度 $L_{\text{缝}}$ 进行比较,临界渗透稳定的判定式为

表 1 6 种砂样的稳定渗透长度

组 次	试验压实孔隙率	不均匀系数	曲率系数	松散堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	最大压实密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$L_{\text{堆}}$
粗粒组 1	0.45	2.62	1.06	1451	1678	$L_{\text{堆}} = 15.4\Delta h - 0.7$
粗粒组 2	0.39	2.62	1.06	1451	1678	$L_{\text{堆}} = 12.1\Delta h - 0.9$
细粒组 1	0.42	3.40	1.08	1537	1827	$L_{\text{堆}} = 8.5\Delta h - 0.5$
细粒组 2	0.35	3.40	1.08	1537	1827	$L_{\text{堆}} = 8.3\Delta h - 0.6$
均布组 1	0.35	5.10	1.29	1783	1925	$L_{\text{堆}} = 12\Delta h - 0.8$
均布组 2	0.31	5.10	1.29	1783	1925	$L_{\text{堆}} = 11.5\Delta h - 1$

$$L_{\text{堆}} < L_{\text{缝}} \tag{4}$$

3 波浪工况试验结果及分析

3.1 吹填砂流失发展过程

波浪工况下,坝芯吹填砂流失过程可以分为冲击、成拱、稳定 3 个阶段,3 个阶段内砂槽状态如图 11 所示。

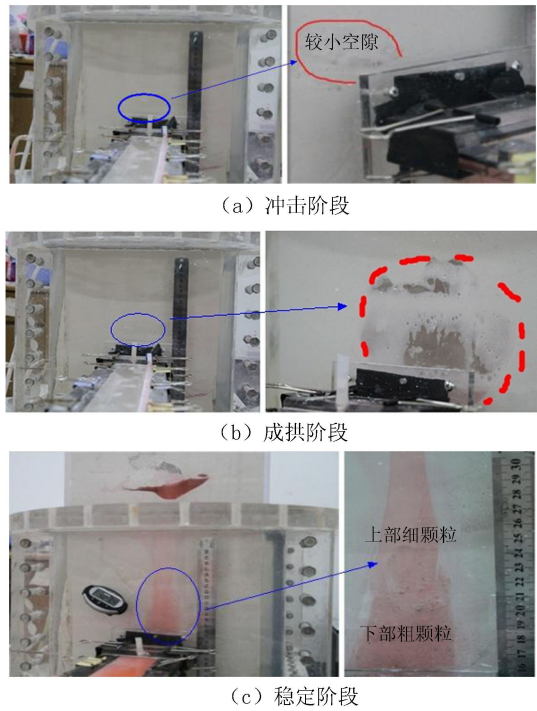


图 11 波浪工况不同阶段砂槽状态

- 冲击阶段。**主要表现为砂槽出口处形成微小空隙,成股的砂颗粒呈雾状流出,如图 11(a)所示,此阶段出砂量较少,主要起到破坏砂土结构的作用。
- 成拱阶段。**此阶段主要表现为砂槽出口部位出现较大空洞,但可以维持一定时间,此处称其为拱结构空间,如图 11(b)所示。此阶段,砂颗粒出现液化现象,随水流作往复运动,呈现出“砂舌”伸缩状态,在伸缩过程中产生不可逆位移,并在水槽中形成堆积砂体。此阶段出砂量最多。
- 稳定阶段。**此阶段表现为水槽内砂体停止前进,水槽水流变清澈;砂槽出口处拱结构空间消失或者上移,上部砂颗粒在重力及水流冲刷作用下塌陷,砂槽出口处拱结构空间消失,水流携砂量减小。

砂槽出口颗粒重新分布,出现上细下粗的布局,如图 11(c)所示。砂槽口处上细下粗的结构可以起到反滤作用,抑制颗粒外移,与此同时,水槽中已经堆积了较长一段砂体,一定程度上消耗了来水能量,回水过程中,当水流到达水槽砂堆首部位置时已经不足以带动颗粒产生不可逆位移,因此,颗粒处于稳定状态。

3.2 吹填砂流失运移规律

3.2.1 砂槽内颗粒运移特点

采用相同配比有色颗粒砂样来研究颗粒变化及分布特点,于拱结构空间最可能发生冲刷的位置(砂槽出口部位上侧)布置有色颗粒进行试验。不同粒径颗粒使用不同颜色:橙色颗粒粒径为 0.185 ~ 0.425 mm,红色颗粒粒径为 0.125 ~ 0.185 mm,紫色颗粒粒径为 0.075 ~ 0.125 mm,白色颗粒粒径小于 0.075 mm。

试验结果显示,拱结构空间形成后,砂颗粒随水流在拱结构空间内上下往复运动,最终呈现出粗颗粒(橙色颗粒)居下、细颗粒(白色颗粒)居上的颗粒分布特点,如图 12 所示。原因是在来水阶段,颗粒上扬,粗颗粒体积和自重较大,上升高度较小,位置处于下方;细颗粒体积和自重较小,上升高度较大,

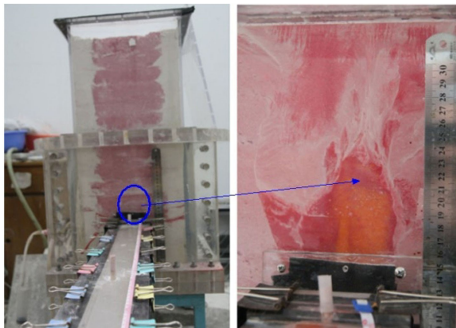


图 12 拱结构部位颗粒分布

位置偏上。在回水阶段,一方面拱结构空间底部接近水槽的细颗粒被带入水槽,剩余较多粗颗粒;另一方面,细颗粒与粗颗粒上下分布形式起到了反滤作用,导致上部细颗粒不易穿过粗颗粒进入水槽,因此,上部聚集较多细颗粒。

3.2.2 水槽内颗粒运移特点

通过试验观察发现,水槽中砂颗粒的运移形式有两种:全断面运移与沟槽式运移。

a. 全断面运移是指距水槽顶面 2 ~ 5 mm 深度范围内的砂颗粒随水流沿整个断面向前推进,这种运移方式多出现在成拱阶段。此时水槽顶部出现贯通的颗粒通道,水流的势能大量转化为动能,砂颗粒在较大流速作用下迅速液化,随水流剧烈运动,在水槽的上部空间全断面向前推进。

b. 沟槽式运移是指颗粒在距水槽顶面 2 ~ 5 mm 深度范围内的局部断面(沟槽)内向前运移。沟槽是砂颗粒在波浪水流作用下做往复运动所形成的结构,该种推移方式常出现在稳定阶段前期,此阶段水流能量消耗过多而剩余能量较低,不能够带动整个断面的砂颗粒向前推进。此时大部分砂颗粒停止移动而逐渐聚集,仅在最松散处留有较窄的通道供水砂通过;沿水槽纵轴方向各个断面上通道位置不同,形成了宏观所观察到的沟槽。小流速水流的携砂过程使得断面上的砂土结构不断调整,而水流总会沿着断面最薄弱处流动,因此沟槽的形状也随时间不断变化,如图 13 所示。

试验结束后,沿水槽长度方向以及拱结构部位深度方向利用环刀取样,分析颗粒级配及孔隙率情况。水槽堆积砂体孔隙率及细颗粒占比沿长度方向变化情况分别如图 14、图 15 所示。

由图 14 可以看出,水槽长度方向孔隙率变化是

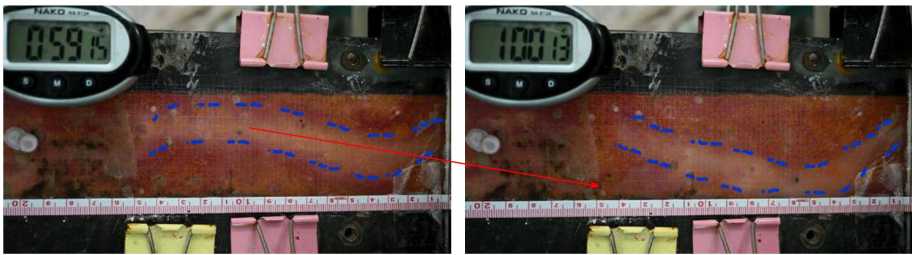


图 13 1 min 内沟槽状态变化

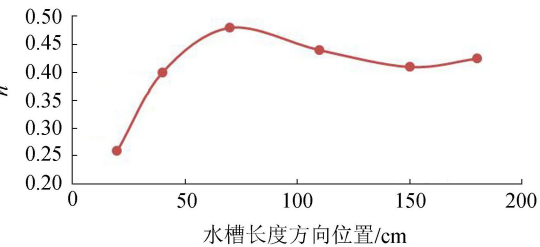


图 14 水槽长度方向砂体孔隙率变化

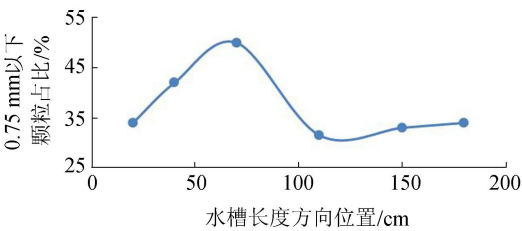


图 15 水槽长度方向细颗粒占比变化

先增加后减小然后略有增大。在冲击阶段及成拱阶段前期,拱结构空间尚未形成,砂颗粒外移较慢,砂颗粒有足够的时间重新排列成新的紧密结构,故堆积相对密实;水槽中部的砂颗粒多堆积于成拱阶段的中期,该阶段中处于液化状态的砂颗粒以全断面形式推进,出砂迅速,出砂量较多,堆积相对松散;随着时间的推移进入成拱阶段的后期,砂颗粒外移量减少且缓慢,最终不再外移,砂颗粒的堆积也逐渐变密实;在接近稳定阶段时,由于水流能量较低,水槽因砂堆中部颗粒通道的消失而封堵,砂堆中部达到最密实的状态,即曲线的谷点;封堵后波浪水流主要影响水槽砂堆首部被封堵在外的砂颗粒,周期性往复的波浪水流使该处的砂体结构较为松散,因此孔隙率略有回升。

从图 15 可以看出,沿水槽长度方向细颗粒占比先增大后减小,然后再次增大。原因是细颗粒起动流速较小,相对容易外移,所以在水槽与砂槽的交界处多堆积粒径相对较大的粗颗粒,因此此处细颗粒占比相对较小;水槽中部的砂颗粒主要堆积于全断面推进的成拱阶段,故此处细颗粒较多;在成拱阶段后期,流速减小,仅将砂堆中细颗粒带走,而逐渐剩余粒径较大的粗颗粒,故细颗粒占比减小;接近稳定阶段时,剩余的粗颗粒将颗粒通道封堵,砂堆中部细颗粒比例达到最小值,即曲线的谷点;封堵后波浪水流主要作用于封堵在外部的砂堆,将细颗粒冲刷至砂堆首部,因此该段砂体的细颗粒占比沿长度方向再次增大。

3.2.3 颗粒流失运移规律

结合砂槽及水槽内颗粒的运移特点,波浪工况下管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失运移规律可总结为:

- a. 冲击阶段。在该过程中,波浪水流冲击砂槽内砂体,砂颗粒由紧密逐渐变松散;在较低流速下细颗粒首先达到起动流速,并外移至接缝水槽。
- b. 成拱阶段。砂槽内砂颗粒的流失使砂槽与水槽交界部位形成微小空隙,为波浪水流提供充足的运动空间;波浪水流的势能更易转化为动能,较高的流速使粗颗粒和细颗粒同时发生液化;液化后的砂颗粒以全断面式外移至水槽,在水槽内形成较松散的砂堆,水流沿程水头损失增大,动能减小。
- c. 稳定阶段。当进入到砂槽内的水流能量不足以维持拱空间上部砂体时,上部砂体逐渐塌落,拱空间逐渐上移;颗粒再堆积时孔隙率增大,使得拱空间体积减小;同时拱空间下部砂颗粒重新分布形成上细下粗的布局,对上部颗粒起反滤作用,且进一步增大水流的沿程水头损失;最终砂槽内颗粒不再外

移,水槽与砂槽交界处的砂堆将水槽封堵,系统达到稳定状态。

3.3 吹填砂流失稳定性判定指标及方法

与单向流工况相同,同样取 $L_{堆}$ (颗粒由砂槽进入水槽后运移所形成的砂堆长度) 为吹填砂稳定性的判定指标。以 $L_{堆}$ 为目标参数,分析其影响因素,并建立其与影响因素之间的函数关系,作为用于计算波浪水流作用下坝芯吹填砂流失稳定性判定指标的公式。

波浪水流作用下影响坝芯吹填砂稳定性的因素较多,比较重要的有波浪周期 T 、峰值压力水头 h (表征波浪水流能量)、砂体孔隙率 n 以及颗粒粒径 d 等。不同条件下水槽砂堆长度 $L_{堆}$ 与波浪水流能量、波浪周期和孔隙率之间的关系曲线分别如图 16 ~ 18 所示。

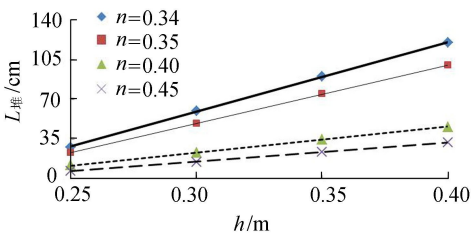


图 16 波浪水流能量对水槽砂堆长度的影响

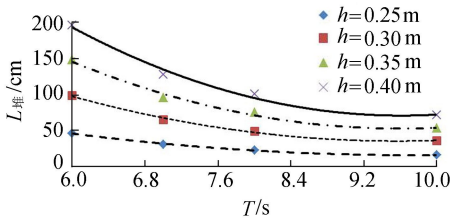


图 17 波浪周期对水槽砂堆长度的影响

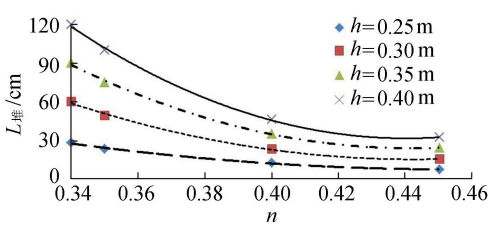


图 18 砂体孔隙率对水槽砂堆长度的影响

由图 16 可知,在其他条件相同的情况下,水槽砂堆长度 $L_{堆}$ 随着波浪水流能量的增大而增大,且呈线性关系,这与单向流工况完全一致。另外,图 16 各直线具有相同的截距,该截距可以定义为砂槽内拱效应消耗的水头 $h_{耗}$ ($h_{耗}=0.2\text{ m}$),则推动砂颗粒运动的水头 $h_{动}=h-h_{耗}$ 。

根据量纲和谐原理,将 $L_{堆}$ 与各因素间的关系表示为

$$L_{堆} = L_{堆}(T, n, h, g) \tag{5}$$

式中 g 为基于量纲平衡原理添加的常数。将式(5)

右侧具体表达为幂函数的乘积形式,并代入试验数据计算得:

$$L_{堆} = 23T^{-2}(h - 0.2)g^{-1}n^{4.78} \quad (6)$$

根据上述分析,波浪工况坝芯吹填砂流失稳定性判定方法为:先利用相关仪器及测试方法获得波浪周期 T 、峰值压力水头 h 、砂体孔隙率 n 等参数,然后计算出水槽内砂堆长度 $L_{堆}$ 并与接缝长度 $L_{缝}$ 比较。管袋坝发生波浪水流渗透破坏的判定式与式(4)相同。

4 结 论

- a. 管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验研究装置可以完成管袋坝实际工程工况的模拟。
- b. 单向流工况下砂颗粒运移主要发生在砂槽内倒锥形区域及水槽内,且在水槽内运移方主要以“沟槽式”运移为主;波浪工况下的冲刷过程可依据拱空间的发展过程分为冲击、成拱、稳定3个阶段。
- c. 单向流及波浪工况下冲刷稳定性都以稳定渗透长度 $L_{堆}$ 为判别指标,并推导出了两种工况下的 $L_{堆}$ 计算公式,若袋间接缝长度小于稳定渗透长度 $L_{堆}$,则发生冲刷破坏。

参考文献:

[1] 束一鸣,吴海民. 围垦堤防施工技术研究[J]. 水利经济,2012,30(3):31-34. (SHU Yiming, WU Haimin. Research on construction technique of dike[J]. Journal of Economics of Water Resources,2012,30(3):31-34. (in Chinese))

[2] 束一鸣. 我国管袋坝工程技术进展[J]. 水利水电科技进展,2018,38(1):1-11. (SHU Yiming. Advances in technology of geotube dam engineering in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018,38(1):1-11. (in Chinese))

[3] 陆忠民. 土工合成材料在潮汐河口地区水库建设中的应用[J]. 水利水电科技进展,2009,29(6):39-41. (LU Zhongmin. Application of geosynthetics to reservoir construction in tidal estuary area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2009,29(6):39-41. (in Chinese))

[4] 束一鸣,张乃国,史海珊,等. 长江口复杂软土地基上堤坝的设计:太仓市第二水厂蓄淡避咸水库围堤设计[J]. 水利水电科技进展,2003,23(6):33-36. (SHU Yiming,ZHANG Naiguo, SHI Haishan, et al. Design of reservoir dike on complex soft foundation at Yangtze River Estuary;dike design for Taicang fresh water reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003,23(6):33-36. (in Chinese))

[5] SHIN E C,OH Y I. Analysis of geotextile tube behaviour by large-scale field model tests [J]. Geosynthetics

International,2003,10(4):134-141.

[6] SHIN E C, OH Y I. Coastal erosion prevention by geotextile tube technology [J]. Geotextiles and Geomembranes,2007, 25(4/5):264-277.

[7] CHEN S,ZHONG Q, CAO W. Breach mechanism and numerical simulation for seepage failure of earth-rock dams[J]. Science China Technological Sciences,2012,55(6):1757-1764.

[8] VAN STEEG P,VASTENBURG E,BEZUIJEN A, et al. Large-scale physical model tests on sand-filled geotextile tubes and containers under wave attack [J]. Coastal Structures, 2011, 476 (1):1083-1094.

[9] RECIO J,OUMERACI H. Process based stability formulae for coastal structures made of geotextile sand containers [J]. Coastal Engineering,2009,56(5/6):632-658.

[10] RECIO J,OUMERACI H. Processes affecting the hydraulic stability of coastal revetments made of geotextile sand containers[J]. Coastal Engineering, 2009, 56 (3): 260-284.

[11] CHEW S H,TIAN H,TAN S A, et al. Erosion stability of punctured geotextile filters subjected to cyclic wave loadings: a laboratory study [J]. Geotextiles and Geomembranes,2003,21(4):221-239.

[12] 满晓磊,束一鸣,李少鹏,等. 管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷模型试验[J]. 水利水电科技进展,2018,38(1):36-43. (MAN Xiaolei, SHU Yiming, LI Shaopeng, et al. Experimental study on scouring along seams between tubes of a punctured geotube dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(1):36-43. (in Chinese))

(收稿日期:2017-09-15 编辑:熊水斌)

+++++

(上接第 27 页)

[19] 蓝蓉. 滇池环保疏浚工程中的新型土工管袋围埝:国内首次土工管袋围埝生产性试验工程设计[J]. 云南环境科学,2002,21(1):39-42. (LAN Rong. New pipe-type geotech-bag for box dam in dianchi lake dredging project [J]. Yunnan Environmental Science,2002,21(1):39-42. (in Chinese))

[20] STOKES G G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums[J]. Transactions of the Cambridge Philosophical Society,1985,9(2):89-106.

[21] 吴海民,束一鸣,常广品,等. 高含黏(粉)粒土料充填管袋高效脱水工艺现场模型试验[J]. 岩土工程学报,2016,38(增刊1):209-215. (WU Haimin, SHU Yiming, CHANG Guangpin, et al. Field model tests on effective dewatering technology of geotextile tube filled by soil with high clay (silt) particle content [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(Sup1):209-215. (in Chinese))

(收稿日期:2017-10-26 编辑:熊水斌)