

管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷模型试验

满晓磊^{1,2}, 束一鸣², 李少鹏², 郝雪航², 蔚成亮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:针对管袋内充填砂从管袋侧壁缺损处外漏流失问题,采用自行研制的管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性试验研究装置,进行了单向流和波浪作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷试验,总结了冲刷过程及接缝管路内砂颗粒的运移规律,并分析了单向流工况下破损口大小对冲刷稳定性的影响。结果表明:单向流工况管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性与最粗砂颗粒的起动流速、接缝内水流流速及破损口大小有关,破损口越大、水流流速越大、最粗砂颗粒起动流速越小,越容易发生冲刷破坏;波浪工况下,选择临界峰值水压力作为管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性的判定指标,通过比较实际工程中管袋坝接缝所受峰值水压力与临界峰值水压力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; 侧壁损漏; 冲刷稳定; 试验研究

中图分类号:TV641.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)01-0036-08

Experimental study on scouring along seams between tubes of a punctured geotube dam//MAN Xiaolei^{1,2}, SHU Yiming², LI Shaopeng², HAO Xuehang², YU Chengliang², 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: For the problem of sand erosion from the side walls of punctured geotubes, a set of experimental apparatus was developed to study the erosion stability along seams between tubes of a punctured geotube dam. Based on the experiments in both unidirectional flow and wave flow conditions, characteristics of erosion process and sand transport in the seams between geotubes were summarized. The impact of breakage on the scouring stability in unidirectional flow conditions was also analyzed. The results show that scouring stability in the seams between geotubes in unidirectional flow conditions is related to the threshold velocity of the sand particles with the maximum diameter, velocity magnitudes inside the seam and the extent of the breakage. Scouring instability can easily occur in the case of larger breakage, higher flow velocity and lower threshold velocity of sand particles. In wave flow conditions, the critical peak water pressure is selected as a criterion parameter to determine the stability of seams between punctured geotubes. The scouring stability in wave flow conditions for real engineering works can be determined by comparing the peak water pressure in the seams with the critical value.

Key words: geotube dam; seam between geotubes; punctured wall; scouring stability; experimental research

充填管袋技术起源于国外,始于20世纪50年代后期^[1],其方法是用泥浆泵将细粉砂与水的混合物充填至袋内,待水分滤出后形成土工织物包裹的密实砂料。由于该技术对砂料要求不高,极大地解决了缺少砂石料地区筑坝的难题。20世纪80年代管袋筑坝技术引入我国,由于其独有的优点,在国内得到了迅速的发展,截至目前已被广泛应用于从内河到浅滩再到深海的各种工程,管袋筑坝技术也一步步成熟,许多工艺已经达到国际先进水平^[2-3]。

然而,我国制作管袋所用的土工织物强度却远

不及国外。国外管袋接缝问题并不突出,因此国外对管袋坝的研究更侧重于管袋材料和施工技术方面;Shin等^[4-5]根据黏土充填和砂土充填情况下坝体不同的沉降量总结出了沉降量计算公式,利用该经验公式对实际工程的沉降量进行计算发现,该公式的计算误差很小,证明了公式的准确性;Muthukumaran等^[6]试验研究了充填土的含水率、颗粒级配以及土工布本身的尺寸对土工管袋脱水性能的影响;van Steeg等^[7]对波浪作用下管袋坝的稳定性进行了试验研究,总结出了管袋充填的饱和性与坝体整体稳

定性之间的定量关系。我国管袋材料的强度相对较低,导致管袋尺寸较小,在用于管袋坝工程时会出现搭接次数多的问题,搭接次数的增加直接造成管袋间接缝数量的增加,在施工期末防护和施工完成后防护不到位的情况下,在管袋坝内外水位涨落引起的水压差、潮汐现象产生的往复水流及波浪形成的波动水流长期作用下,坝芯内的砂体很容易沿接缝发生流失,引起坝体破坏^[8-12]。此外,在施工过程中,由于机械损伤等原因,也很容易造成接缝管路侧壁出现破损(图1),接缝管路侧壁破损处充填泥沙同样存在被水流冲刷流失的风险,特别是在波浪水流的作用下,管袋坝前的破碎波以很大的压力和较高的流速周期性地冲击接缝管路,导致管路中的砂土不断流失,给坝体结构带来了很大的安全隐患。庄艳峰等^[13]试验研究表明,波浪作用下水流对砂体的冲刷机理与单向流对其冲刷完全不同,因此,有必要对单向流和波浪水流对管袋坝袋间接缝侧壁破损处充填砂的不同影响进行研究,并和管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失研究^[14]一起为工程实践提供参考。

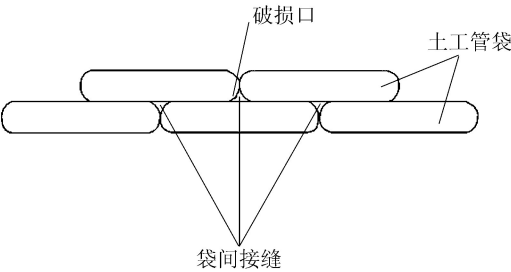


图1 损伤处截面示意图

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

根据实际工程中管袋坝袋间接缝破损形式,概化出一套管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性试验研究装置,如图2所示。试验装置由进水槽、出水槽、管袋砂箱、接缝管路、吸水泵、集砂槽以及信息采集

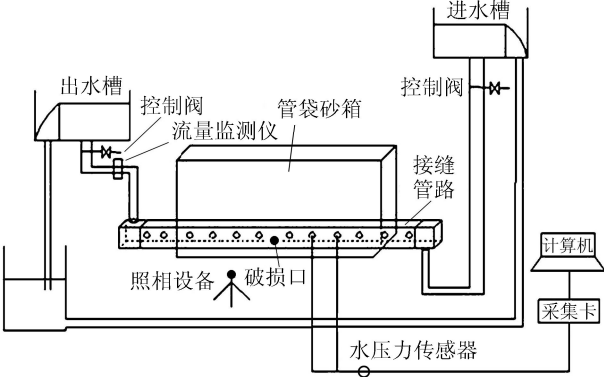


图2 单向流工况试验装置

集设备等组成,其中进、出水槽用于提供单向水流,管袋砂箱用于模拟土工管袋,接缝管路用于模拟袋间接缝,管袋砂箱与接缝管路间由含破损口的土工织物连接,用于模拟损伤的管袋侧壁。

试验过程主要包括试验准备、试验实施、试验后处理3个阶段。试验准备阶段主要进行装置调试、砂样制备、砂样装填、加水固结等准备工作,重点是含破损口的土工织物的安装;试验实施阶段主要施加单向水流作用并采集相关数据、图像信息,其中流速数据采用超声波流量计直接采集;试验后处理阶段主要对试验中采集的数据信息、试验现象信息以及试验取样等进行分析。

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侧壁破损处的冲刷过程,自行设计了一套试验装置,如图3所示。该装置主要由模拟管袋的砂箱、接缝管路、波浪水流发生器及信息采集设备等组成。波浪水流发生器在其调速电机和调压器的配合下,可以连续调节波浪水流的周期和能量,如图4所示。该工况的试验过程与单向流工况基本相同,除了在试验实施阶段中通过对波浪水流发生器的调节施加不同特性的波浪作用外,其他试验阶段与单向流工况基本一致。

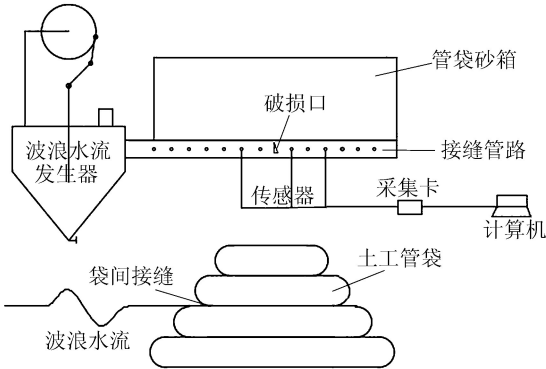


图3 波浪工况试验装置

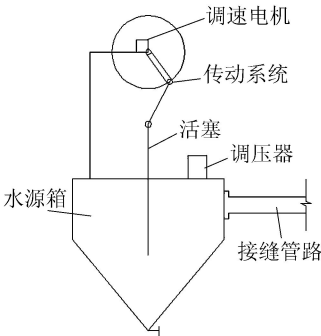


图4 波浪水流发生器

2 单向流工况试验结果与分析

在实际工程中,由于管袋所受破损具有随机性,

因此破损口形状也各不相同。由于破损口形状对试验结果也存在一定的影响,因此根据工程中最典型的 L 形刺穿破坏设计了几种 L 形破损口(直角三角形破损口)进行试验,并选择与面积相同的圆形破损口进行对比。各破损口形状如图 5 所示。

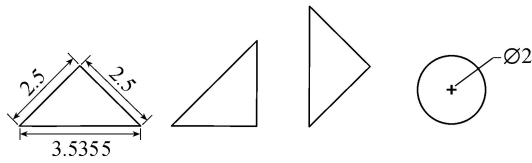


图5 破损口形状示意图(单位:cm)

试验结果表明:①面积相同、形心同高的三角形破损口中,顶部位置越高的三角形越容易发生破坏,且面积相同的圆形破损口最为危险。因此,在后续试验中均选取圆形破损口作为试验工况。②当破损口尺寸在一定范围内时,管袋内破损口附近砂颗粒在流失过程中可以不断调整,形成稳定的颗粒结构,并阻挡管袋内颗粒继续外移。③当破损口尺寸小于一定值时,管袋接缝侧壁破损处充填砂在无外部颗粒支撑的情况下可以始终保持稳定状态。通过设置破损口直径分别为 0.8 cm、0.9 cm、1.0 cm、1.1 cm 和 1.2 cm 的平行试验,发现破损口的临界直径为 1.0 cm,即当破损口直径小于 1.0 cm 时,可以忽视该处破损。

2.1 单向流工况冲刷发展过程

a. 扇面冲刷阶段。当管袋砂箱装填完毕后,破损口处会形成一个自然堆积的砂堆,砂堆表面比较平滑,颗粒分布均匀,此为试验的初始状态。当施加水头差后,管路内细砂在单向水流的作用下开始起砂,形成砂纹,并逐步发展。

b. 出砂阶段。砂纹不断由接缝管路内水流的上游(破损口右侧)向下游(破损口左侧)方向移动,使得砂堆背水扇面坡度变陡,而迎水扇面坡度变缓,当砂纹移至破损口左侧时,破损口外露,管袋砂箱内颗粒失去下部接缝管路中颗粒的支撑,失去平衡而外流。同时,管袋砂箱内砂颗粒在掉落至接缝管路的过程中会发生颗粒重排,达到起动流速的细颗粒被冲走,而粗颗粒则堆积在破损口处。

c. 稳定阶段。随着细颗粒被冲走,粗颗粒在破损口处逐渐堆积。最后接缝管路内粗颗粒的砂堆再次掩盖住部分破损口,并给予管袋砂箱内砂颗粒向上的支撑力,使之达到受力平衡状态而稳定。此时,管袋砂箱无砂颗粒外移,接缝管路内砂体停止前进。

2.2 单向流工况冲刷运移规律

2.2.1 管袋砂箱内颗粒运移特点

为了便于对管袋砂箱内砂体的运移规律进行研究,将渗透影响区域划分为 8 个特征单元,如图 6 所示。试验结束后,分别在特征单元内取样并进行颗

粒分析。

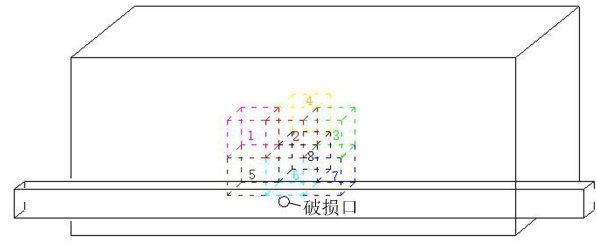


图6 管袋砂箱内特征单元分布

图 7 为砂箱破损口上方后侧特征单元的颗粒级配图。可以发现,4 单元、8 单元的颗粒级配曲线及典型粒径与实验前原砂基本重合,说明在冲刷过程中,在管袋砂箱后侧的颗粒基本上未发生运移。

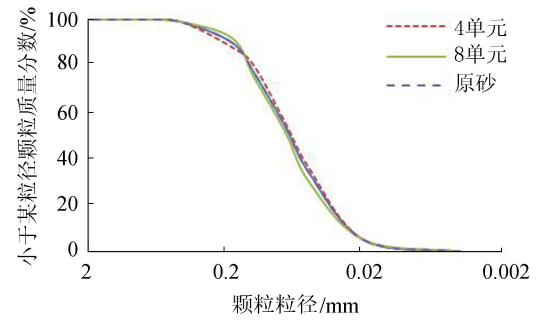


图7 砂箱后侧粒径对比

破损口附近的 1、2、6 单元内砂体及原砂的级配曲线如图 8 所示,破损口上方影响区域内 2 单元级配较其左侧 1 单元偏粗,这是因为水流方向是由右向左的,破损口上侧砂颗粒在下落过程中受到自右向左的渗流力作用,相对较细的砂颗粒容易在渗流作用下移向左侧。而正对破损口中间区域的 6 单元内的颗粒比其上侧 2 单元偏粗,说明在颗粒塌落过程中,细颗粒更易流失而剩余粗颗粒不断堆积。

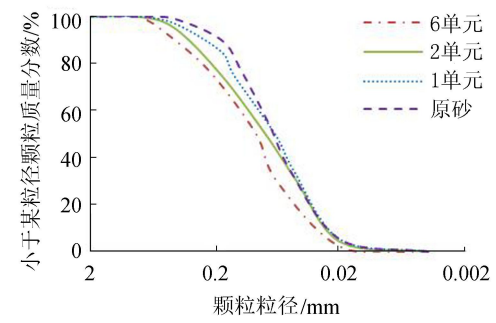


图8 砂箱前侧粒径对比

2.2.2 接缝管路内颗粒运移特点

在一定水力条件下,由于受到砂堆的影响,管路截面变小,流量一定,流速增大。当水流流经砂堆表面时,达到起动流速的细颗粒随水流发生运动,相对较粗的颗粒仍堆积在砂堆上。若管袋砂箱内无砂颗粒外流,随着接缝管路内细颗粒的不断运移,砂堆高度变小,过水截面变大,流速变小,直到无法达到颗

粒起动流速,则砂堆将不再发生变化。若管袋砂箱内有砂颗粒不断外流,则细颗粒流失而粗颗粒堆积,当无法起动的粗颗粒堆积至破损口处时,将阻止管袋砂箱内砂颗粒外流而稳定。然而,当水流流速超过最粗颗粒的起动流速时,所有砂颗粒均随水流移动而无法堆积,发生冲刷破坏。

2.2.3 颗粒运移规律

综合分析,单向流作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性取决于接缝管路内砂颗粒的运移情况,而该处砂颗粒的运移又取决于其表面水流的流速。

当破损口处经砂堆束窄后的水流流速大于最粗砂颗粒的起动流速时,接缝管路破损口处不能堆积粗颗粒,管袋砂箱内砂颗粒将持续外移至接缝管路,并沿接缝流出坝外,最终导致坝体的沉降甚至破坏。当破损口处经砂堆束窄后的水流流速小于最粗砂颗粒的起动流速时,接缝管路中会因堆积粗颗粒而使破损口砂体恢复稳定。

2.3 单向流工况冲刷稳定分析

根据单向流工况的冲刷运移规律,可以选择临界破坏流速作为表征单向流作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性的目标参数。影响临界破坏流速的因素主要是接缝管路内单向水流流速和砂堆高度,而砂堆高度又与破损口直径直接相关,其影响关系如图9所示。

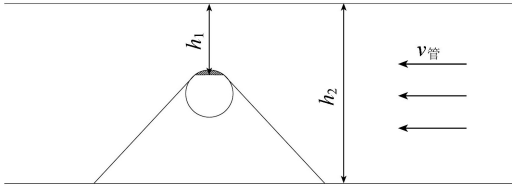


图9 束窄流速换算

破损口越大,接缝管路内砂体的堆积高度越高,水流经砂堆束窄后的流速越大。由图9可以计算出束窄后的流速与接缝管路内水流流速的换算关系:

$$v_{管} = \frac{h_1}{h_2} v_{束} \tag{1}$$

式中: $v_{管}$ 为接缝管路内流速; h_1 为破损口处砂堆底部与接缝管路顶部距离; h_2 为接缝管路高度; $v_{束}$ 为接缝管路内破损口处砂堆上方水流流速。设破损口直径为 d ,则式(1)可写为

$$v_{管} = \frac{\frac{h_2}{2} - \frac{d}{2}}{h_2} v_{束} = \frac{h_2 - d}{2h_2} v_{束} \tag{2}$$

在发生冲刷破坏时,经砂堆束窄后流速必须达到最粗砂颗粒的起动流速 $v_{起}$,即

$$v_{束} = v_{起} \tag{3}$$

此时接缝管路内流速达到临界破坏流速 $v_{临}$,即

$$v_{管} = v_{临} \tag{4}$$

将式(3)(4)代入式(2)可得单向流作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷的临界破坏流速与破损口直径的关系:

$$v_{临} = \frac{h_2 - d}{2h_2} v_{起} \tag{5}$$

由式(5)可知,临界破坏流速与破损口直径呈负相关关系,即破损口直径越大,临界破坏流速越小,越容易发生冲刷破坏;破损口直径越小,临界破坏流速越大,砂体越稳定而不易发生破坏。

选取直径分别为1.0 cm、1.2 cm、1.4 cm、2.0 cm、3.0 cm、4.0 cm的破损口进行冲刷试验,来验证分析破损口大小对临界破坏流速的影响,试验结果如图10所示。

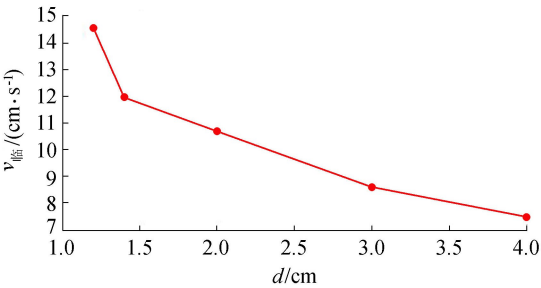


图10 破损口直径对临界破坏流速的影响

由图10可以看出,临界破坏流速随破损口的增大而减小,但不完全符合理论分析得到的线性关系。当破损口直径比较大时,二者保持线性关系,当破损口直径比较小时,曲线发生弯曲,这是因为前文所述的破损口存在临界孔径,当破损口直径越接近临界孔径时,影响越大,曲线越弯曲。

一般地,在坝内外水位差引起的单向水流作用下,袋间接缝内水流流速通常小于1 cm/s,远远小于试验中的最小值7 cm/s,由坝内外水位差引起的单向水流对管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷破坏作用较小。因此,推测管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷破坏很可能是由坝外的波浪作用引起的,所以有必要对波浪作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏的冲刷问题进行深入研究。

3 波浪工况试验结果与分析

3.1 波浪工况冲刷发展过程

a. 冲击阶段。主要表现为管袋砂箱内破损口处形成微小空隙。波浪水流包括来水和去水两个阶段,来水阶段破损口无明显变化,去水阶段破损口有成股的砂颗粒呈雾状流出,但出砂量较少,波浪水流主要是对管袋砂箱内破损口附近的砂体产生扰动作用。

b. 成拱阶段。随着冲刷过程的发展,管袋砂箱

内砂颗粒经破损口进入接缝管路,在接缝管路中形成一定长度的砂堆,同时,管袋砂箱内也因砂颗粒的流失且得不到上部颗粒的补充而形成一个拱形的空腔,可称之为拱结构空间,如图 11 所示。

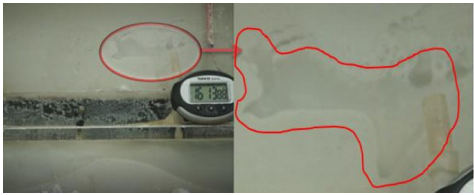


图 11 拱结构空间

c. 稳定阶段。该阶段开始于拱结构空间的坍塌,将破损口封堵,在水的往复渗流作用下,管袋砂箱破损口上方的拱结构空间上移并缩小甚至消失,如图 12 所示。



图 12 拱结构空间坍塌上移

3.2 波浪工况冲刷运移规律

3.2.1 颗粒运移特点

根据多次预试验的结果,在管袋砂箱内拱结构空间可能出现的位置(破损口上方)装填彩砂,用于观测各粒径砂颗粒的不同运移规律。砂颗粒由粗到细分别为绿、黄、红、白 4 色,装填并浸泡后的彩色砂样如图 13 所示。



图 13 彩砂布置

试验结束后在破损口上方拱结构部位取样分析,图 14 为拱结构部位纵剖面图,可以明显看出破损口的影响区域(红色梯形区域),而且在该区域中下方砂体以黄色和绿色的粗颗粒为主,而上部砂体主要由红色及白色的细颗粒组成。

对上下两部分颗粒分别取样,测其颗粒级配,结果如图 15 所示。

图 14 和图 15 均表明,当水流能量在一定范围内时,在来水阶段,波浪水流冲击并扰动破损口附近



图 14 拱结构部位纵剖面

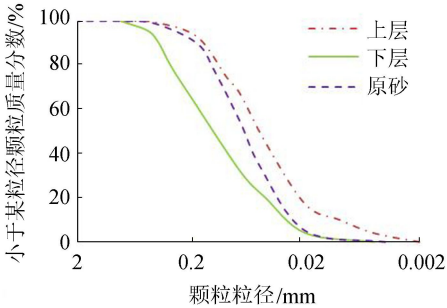


图 15 拱结构部位颗粒级配

砂体使之松散;在去水阶段,仅能携带部分细颗粒流至接缝管路,剩余的粗颗粒聚集在管袋砂箱底部的破损口附近。粗砂的堆积减小了水流能量,水流能量的减小和粗颗粒的堆积使上部颗粒不能继续外移,而是在来水和去水的循环过程中发生颗粒重排,形成了粗颗粒在下、细颗粒在上的上细下粗的反滤结构,该结构抑制了上部颗粒的外移。

同时,试验还发现,能量较大的波浪水流可以使破损口上方的砂颗粒全部液化(图 16),破损口上方砂体的各粒径砂颗粒均随去水水流移至接缝管路内,并全部沿接缝管路流出坝外,会导致管袋内砂体的不断流失,威胁坝体安全。



图 16 冲刷破坏时颗粒运移

3.2.2 颗粒运移规律

在来水阶段,水流对砂体的作用主要是扰动使

其松散,在去水阶段,松散的砂颗粒随水流下落,并流入接缝管路中。波浪作用下的冲刷稳定性与波浪水流能量有关。

当波浪水流能量在一定范围内时,水流仅能带走部分细颗粒,剩余的粗颗粒聚集在破损口附近,减小水流能量。随着粗颗粒的聚集和水流能量的减小,上部的砂颗粒在下落过程中受水力筛分作用而发生颗粒重排,粗颗粒在下细颗粒在上,经过一段时间的作用后形成了上细下粗的反滤结构,该结构会抑制上部砂颗粒的继续外移。进入到接缝管路的砂颗粒,细颗粒沿接缝管路移至坝外,粗颗粒不能继续移动而堆积在破损口附近,极大地增加了流经破损口处水流的沿程损失。因此破损口外侧堆积的粗颗粒和破损口内侧上细下粗的反滤结构共同修复了管袋接缝的侧壁破损,使之较未破损之前更加稳定。

当水流能量超过一定范围时,会使其上方砂颗粒全部液化,随去水水流移至接缝管路内,并沿接缝管路流出坝外,导致管袋内砂体的不断流失,威胁坝体安全。

3.3 波浪工况冲刷稳定影响因素

波浪作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定影响因素较多,包括破损接缝特性、充填砂特性以及波浪特性等3个方面的因素。其中破损接缝特性包括破损口大小、形状等;充填砂特性包括砂料密度、粒径、充填的密实度等;而简化后的波浪特性主要包括波浪周期和能量等。

结合前文试验结果,最终考虑波浪作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定的影响因素为波浪周期 T 、峰值水压力 P 、砂体孔隙率 n 、上覆压力 p 以及破损口直径 d 等。同时,根据波浪工况的冲刷运移规律可知,波浪作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定的决定性因素是波浪能量,因此选取管袋接缝口处的峰值水压力 P_c 为特征值来表征该能量的大小,则临界峰值水压力 P_c (能使管袋坝袋间接缝侧壁损漏发生冲刷破坏的峰值水压力中的最小值)即为判断管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性的判定指标。使管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷发生临界破坏时所需的临界峰值水压力 P_c 值越小,表明管袋坝越容易发生冲刷破坏;反之,管袋坝越稳定。为分析波浪作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性,对不同影响因素组合工况下冲刷稳定性进行试验研究,并利用控制变量法,分析各影响因素对目标参数 P_c 的影响。试验工况及结果如表1所示。

试验结果表明,当破损口直径 $d=1.0\text{ cm}$ 时,即使将峰值水压力 P 调整为 5 kPa ,管袋砂箱内破损口附近砂体仍可以保持稳定。这一现象说明,在波浪

表 1 试验工况及结果				
破损口直径 d/cm	砂体 孔隙率 n	上覆压力 p/kPa	波浪周期 T/s	临界峰值水压力 P_c/kPa
2.0	0.38	1	6	1.6
2.0	0.38	1	8	1.9
2.0	0.38	1	10	2.2
2.0	0.38	1	12	2.6
2.0	0.39	1	8	1.7
2.0	0.35	1	8	2.7
2.0	0.34	1	8	3.0
2.0	0.38	2	8	2.1
2.0	0.38	3	8	2.3
2.0	0.38	0	8	1.7
2.5	0.38	1	8	1.9
3.0	0.38	1	8	1.9
3.5	0.38	1	8	1.9

的冲刷作用下,管袋侧壁破损口同样存在临界孔径,且同样为 1.0 cm 。而当破损口直径超过临界孔径时,根据表1的试验结果可知,在其他条件保持不变的情况下,临界峰值水压力与破损口大小无关。这是因为砂体与充填砂体后的管袋具有相同的渗透系数^[15],破损口的大小并不会影响到水流动能和势能之比以及流经破损口的水流流量与通过未发生破损的管袋侧壁的渗流流量之比,故单位面积上的峰值水压力与破损口大小无关。可见,在波浪冲刷作用下,当 $d<1.0\text{ cm}$ 时,也可以忽视该处破损,而当 $d>1.0\text{ cm}$ 时,临界峰值水压力与破损口大小无关。

由表1可知,当 $d=2.0\text{ cm}$ 、 $p=1\text{ kPa}$ 、 $n=0.35$ 时, P_c 与 T 呈正相关关系,即周期越小,冲刷越剧烈,达到破坏时所需临界峰值水压力越小。其原因是:波浪水流方向改变较快时,波浪水流的能量不能完全传递到土体内部,而是主要消耗在比较接近波浪水流的破损口处的充填砂内,这种现象加剧了破损口附近砂体的冲刷,并且波浪水流的周期越小,这种水力梯度集中现象越明显,对破损口处砂体的冲刷也越剧烈。

当 $n=0.38$ 、 $T=8\text{ s}$ 时, P_c 也随 p 的增大而增大,且二者呈线性关系。这是因为上覆压力和波浪水流的峰值压力共同决定管袋砂箱内的水力梯度。由于砂颗粒液化时水力梯度一定,即在其他条件相同时,临界峰值水压力与上覆压力的差值一定,故上覆压力越大,破坏时所需临界峰值水压力越大,即上覆压力的存在有利于砂体的稳定。

当 $T=8\text{ s}$ 、 $d=2.0\text{ cm}$ 、 $p=1\text{ kPa}$ 时,由孔隙率 n 分别为 0.34 、 0.35 、 0.38 、 0.39 时临界峰值压力 P_c 的变化可知, P_c 与 n 呈负相关关系,即随着砂体孔隙率的增大,临界峰值水压力逐渐减小。原因是孔隙率越大,单位体积砂颗粒越少,在相同的波浪水流压力作用下,单个砂颗粒所需承担的压力越大而越容

易移动,因此宏观上表现为越容易发生冲刷破坏。

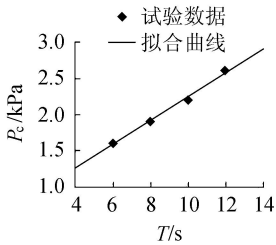
3.4 波浪工况冲刷稳定性判定指标及方法

3.4.1 冲刷稳定判定指标

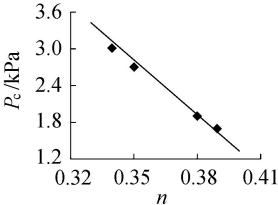
进行稳定性影响的单因素分析之后,还需要建立多因素与临界峰值水压力 P_c 的函数关系式,作为冲刷稳定性判定指标的计算公式。采用多元回归分析方法,利用 SPSS 软件直接对试验数据进行多元回归分析,得到以下函数关系式:

$$P_c = -30n + 0.335p + 0.164T + 11.68 \quad (6)$$

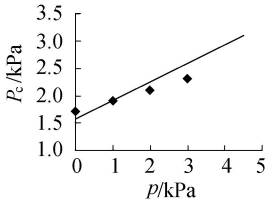
利用式(6)对标准试验工况进行计算,得到的拟合曲线与试验结果的对比如图 17 所示。



(a) 波浪周期的影响 ($n=0.38, p=1 \text{ kPa}$)



(b) 砂体孔隙率的影响 ($T=8 \text{ s}, p=1 \text{ kPa}$)



(c) 上覆压力的影响 ($T=8 \text{ s}, n=0.38$)

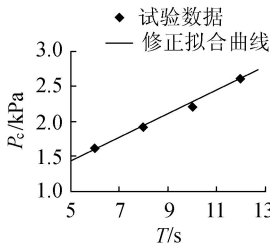
图 17 多元回归分析拟合曲线与试验结果对比

由图 17 可以看出,式(6)计算得到的拟合曲线与试验结果的偏差较大,尤其是图 17(b)中孔隙率的影响和图 17(c)中上覆压力的影响,拟合曲线严重偏离试验结果,说明对试验数据直接进行多元线性回归分析得到的计算值与试验结果之间误差偏大,远远超过误差允许范围。因此,采用非线性多元回归分析,对试验数据进行预处理,将波浪周期 T 和砂体孔隙率 n 组合为一个新的变量,通过变量代换,将三元回归分析化为二元回归分析。采用加权最小二乘法进行回归分析,得到新的公式:

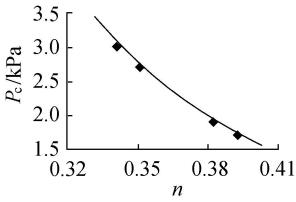
$$P_c = 20T(1 - n)^{10} + 0.2p + 0.39 \quad (7)$$

根据公式的物理意义,可以将式(7)分解为 3 部分:由 T 和 n 共同组成的首项为砂体孔隙率和波浪周期的联合影响;第二项为上覆压力施加引起的临界峰值压力附加增量;第三项常数项为波浪周期为零时冲刷破坏所需压力值。其他因素的影响包含在系数中,式中各个系数值仅对应本次试验条件,对于其他条件,系数需进行调整。

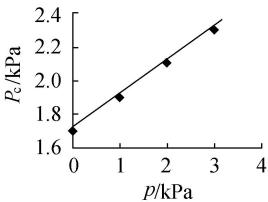
利用式(7)对标准试验工况进行计算,得到的修正拟合曲线与试验结果的对比如图 18 所示。



(a) 波浪周期的影响 ($n=0.38, p=1 \text{ kPa}$)



(b) 砂体孔隙率的影响 ($T=8 \text{ s}, p=1 \text{ kPa}$)



(c) 上覆压力的影响 ($T=8 \text{ s}, n=0.38$)

图 18 修正拟合曲线与试验结果对比

由图 18 可以看出,预处理后的最小二乘法回归分析修正拟合曲线与试验结果比较吻合。通过式(7)可以计算得到波浪作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定判定指标值,但对于其他因素发生变化时的工况,需要对系数进行重新率定和调整。

3.4.2 冲刷稳定判定方法

波浪作用下管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定判定方法是:将实际工程中管袋坝袋间接缝所受峰值水压力 P 与临界峰值水压力 P_c 作比较,当 $P > P_c$ 时,管袋坝在该条件下会发生冲刷破坏,当 $P < P_c$ 时,管袋坝将在来水去水冲刷过程中形成反滤结构而使破损口“愈合”进而使坝体恢复稳定。 P_c 值依据实际工程条件中波浪周期 T 、砂体孔隙率 n 、破损口直径 d 、上覆压力 p 等参数采用式(7)计算得到,而 P 可以通过监测采集或根据实际工程所处海域地形及波浪条件依据莫里森方程或其他理论公式计算得到。

4 结 论

a. 自行研制的管袋坝袋间接缝侧壁损漏冲刷稳定性试验研究装置可以完成管袋坝实际工程工况的模拟。

b. 单向流工况的冲刷过程可以概括为扇面冲刷、出砂和稳定 3 个阶段,该工况下的冲刷稳定与否取决于最粗砂颗粒的起动流速、接缝管路内破损口引起的束窄水流流速及破损口大小,破损口越大、水流流速越大、最粗砂颗粒起动流速越小,越容易发生冲刷破坏。

c. 波浪工况的冲刷过程分为冲击、成拱、稳定 3 个阶段,该工况下冲刷稳定性以临界峰值水压力 P_c 为判别指标,通过比较 P 与 P_c 值可以判断该工

况下的冲刷稳定性。

参考文献:

- [1] ALVAREZ I E, RUBIO R, RICALDE H. Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25(4/5):233-241.
- [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] 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))
- [4] 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.
- [5] SHIN E C, OH Y I. Coastal erosion prevention by geotextile tube technology [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, 25(4/5):264-277.
- [6] MUTHUKUMARAN A E, ILAMPARUTHI K. Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2006, 24(4):210-219.
- [7] 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.
- [8] 郝雪航, 束一鸣, 蔚成亮, 等. 波浪作用下管袋坝袋间接缝冲刷试验装置及方法[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(2):15-19. (HAO Xuehang, SHU Yiming, YU Chengliang, et al. Experimental apparatus and methods for scouring of seams between tube of geotube dam under wave action[J]. *Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)*, 2015, 37(2):15-19. (in Chinese))
- [9] 满晓磊, 束一鸣, 李少鹏, 等. 管袋坝接缝侧壁损伤冲刷试验方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(增刊1):238-243. (MAN Xiaolei, SHU Yiming, LI Shaopeng, et al. Experimental apparatus and methods for scour of seams between tubes of punctured geotube dam [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(Sup1):238-243. (in Chinese))
- [10] 宋倩, 束一鸣, 曹明杰, 等. 管袋坝接缝管路处渗透成拱的颗粒流模拟[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(2):25-28. (SONG Qian, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Particle flow simulation of soil arching effect of channel of joint among sand-filled tubes under seepage of forces [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2013, 35(2):25-28. (in Chinese))
- [11] 蔚成亮, 束一鸣, 曹明杰, 等. 管袋坝芯砂体沿袋间接缝渗透试验研究装置及方法[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(1):5-9. (YU Chengliang, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Experimental study device and test method for seepage of core sand through seams between tubes of geotube dam [J]. *Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)*, 2014, 36(1):5-9. (in Chinese))
- [12] 蔚成亮, 束一鸣, 曹明杰, 等. 管袋坝芯砂体沿袋间接缝流失的试验研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(1):5-9. (YU Chengliang, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Experimental research on migration law of core sand through seam between tubes of geotube dam [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(1):5-9. (in Chinese))
- [13] 庄艳峰, 陈轮, 许齐, 等. 循环往复水流对反滤系统的作用机理研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(7):1773-1777. (ZHUANG Yanfeng, CHEN Lun, XU Qi, et al. Research on effect mechanism of cyclic flow on filtration system [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(7):1773-1777. (in Chinese))
- [14] 满晓磊, 束一鸣, 曹明杰, 等. 管袋坝袋间接缝坝芯吹填砂流失模型试验[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(1):28-35. (MAN Xiaolei, SHU Yiming, CAO Mingjie, et al. Experimental study on dam core sand scouring through seams between tubes of a geotube dam [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(1):28-35. (in Chinese))
- [15] 许来香, 黄叶峰, 李燕杰. 青草沙水库大堤东堤段堤基渗流特性研究[J]. *勘察科学技术*, 2012(3):37-40. (XU Laixiang, HUANG Yefeng, LI Yanjie. Study on seepage characteristics of east dike foundation in Qingcaosha Reservoir [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2012(3):37-40. (in Chinese))

(收稿日期:2017-09-15 编辑:熊水斌)

