

DOI: 10.11779/CJGE2016S1044

# 管袋坝接缝侧壁损伤冲刷试验方法研究

满晓磊, 束一鸣, 李少鹏, 郝雪航, 杨帆, 蔚成亮

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为模拟波浪水流沿袋间接缝对侧壁损伤管袋坝的冲刷过程, 自行设计了一套试验装置; 该装置主要包括模拟管袋的砂箱、接缝管路、波浪水流发生器及信息采集设备; 针对该装置提出了相关试验方法, 包括试验材料和试验环节; 最后, 对该试验装置及试验方法的有效性进行了验证, 证明该装置及方法可以完成不同条件的波浪水流沿袋间接缝对侧壁损伤管袋坝冲刷过程的模拟。

**关键词:** 管袋坝; 侧壁损伤; 袋间接缝; 波浪作用; 冲刷; 试验装置

**中图分类号:** TV641

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)S1-0238-06

**作者简介:** 满晓磊(1988-), 女, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事河口海岸软基筑坝技术及工艺研究。E-mail: manxl@hhu.edu.cn。

## Experimental apparatus and methods for scour of seams between tubes of punctured geotube dam

MAN Xiao-lei, SHU Yi-ming, LI Shao-peng, HAO Xue-hang, YANG Fan, YU Cheng-liang

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To simulate the scour of punctured geotube dam along the seams between tubes under wave action, a set of experimental study apparatus is designed. The apparatus mainly includes wave generator, pipeline, sand box and information collecting device. The related methods are put forward, including experimental materials and processes. Finally, the effectiveness of the apparatus and methods is validated, and it is verified that the scouring process of punctured geotube dam in different waves can be simulated by the apparatus.

**Key words:** geotube dam; punctured wall; seam between tubes; wave action; scour; experimental apparatus

## 0 引言

随着对近海、河口地区的保护性开发, 充填管袋坝筑堤技术在沿海围垦造陆、河口蓄淡避咸水库等河口海岸工程中得到越来越广泛的应用。管袋坝典型断面如图1所示, 首先在水下充填两侧的大型土工管袋形成围堰, 待围堰高程达到水面以上后, 在两侧围堰中间吹填砂质土形成挡水堤坝。较之传统河、海围堤的筑堤技术, 充填管袋坝技术具有就地取材、坝体对软基的适应能力较强、造价低、无需大量大型施工设备、施工工艺简单、施工速度快、施工基本不受一般气象影响等优点<sup>[1]</sup>。

管袋坝一般都比较长, 最长可达几十公里, 在坝轴线方向上需要由众多管袋搭接而成, 搭接处会形成如图2所示的袋间接缝。尤其在我国, 管袋多用强度较低的裂膜丝编织土工织物制成, 受材料强度限制, 管袋长度一般较短, 高度小, 层数较多, 所以堆成的坝体会沿着坝轴线方向形成很多袋间接缝。另外, 在施工过程中, 由于机械损伤等原因, 很容易造成接缝

管路侧壁出现破损(见图3)。因此, 在施工期未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, 接缝管路侧壁破损处充填泥沙存在被水流冲刷流失的风险, 尤其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。

由于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集中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。J Recio等<sup>[2-3]</sup>通过室内试验和数值模拟研究了管袋坝在波浪作用下的变形和失稳过程; Steeg P. Van等<sup>[4]</sup>通过大尺度模型试验研究了充填

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179065); PAPD项目

收稿日期: 2015-11-30

饱和度对管袋坝稳定性的影响; E. C. Shin 等<sup>[5-6]</sup>通过室内试验对不同填充材料对管袋沉降变形的影响进行了研究; H. K. Moo-Young 和 G. R. Koerner 等<sup>[7-8]</sup>论证了对填充有高含水率沉积物的土工管袋进行脱水具有可行性。A.E. Muthukumara 等<sup>[9]</sup>通过试验发现充填土的含水率、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; Soon Hoe Chew 等<sup>[10]</sup>研究了波浪水流对破损土工布侵蚀稳定性的影响, 试验结果表明, 只要土工布破损口的尺寸在一定范围内, 土与土工布系统就可以保持稳定。国内, 由于部分管袋坝因接缝冲刷出现失稳, 管袋坝接缝冲刷问题作为一个新焦点引起了广泛关注。目前, 束一鸣教授及其团队在借鉴其他冲刷问题研究<sup>[11-15]</sup>的基础上, 对管袋坝接缝冲刷问题进行了深入研究, 并且已经完成了单向流作用下管袋坝坝芯砂体沿袋间接缝流失破坏的研究<sup>[16]</sup>。然而, 庄艳峰等<sup>[17]</sup>通过试验表明, 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, 且相对单向流作用, 波浪水流对砂体稳定性的影响更大。因此, 本试验旨在探索相对危险的波浪水流沿袋间接缝对侧壁损伤管袋坝冲刷问题, 以期工程实践提供启示。

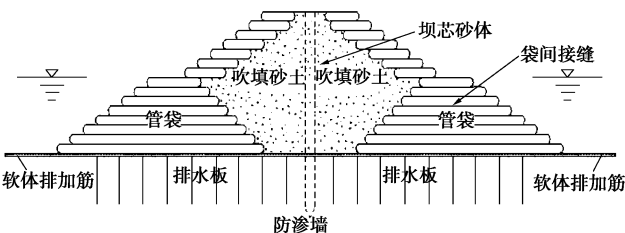


图 1 管袋堤坝典型断面  
Fig. 1 Sectional drawing of geotube dam



图 2 袋间接缝  
Fig. 2 Seam between geotubes of geotube dam

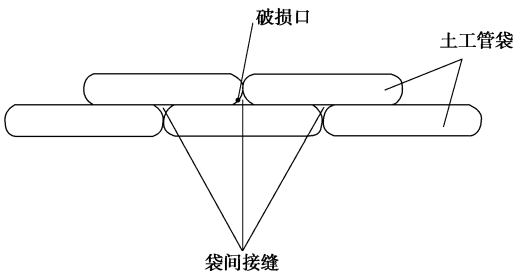


图 3 损伤处截面示意图  
Fig. 3 Sectional drawing of punctured geotube

# 1 试验装置

## 1.1 试验装置原理

由于管袋坝袋间接缝的存在, 管袋内部侧壁损伤处的砂体受波浪水流的掏刷作用, 容易沿袋间接缝流至坝外。因此, 在借鉴其他冲刷破坏试验装置及方法的基础上<sup>[9]</sup>, 根据坝体施工过程中接缝处单侧管袋壁损伤的情况将问题简化为图 4 所示的试验装置, 波浪水流发生器用于模拟波浪水流作用; 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连接有含破损口的土工织物, 用于模拟损伤的管袋侧壁。由于管袋与袋内固结土组成的系统渗透性能相对管袋损伤处无土工织物的水砂系统要小得多, 本文采用单侧透水的接缝管路模拟接缝, 比较接近实际工程且相对偏安全。

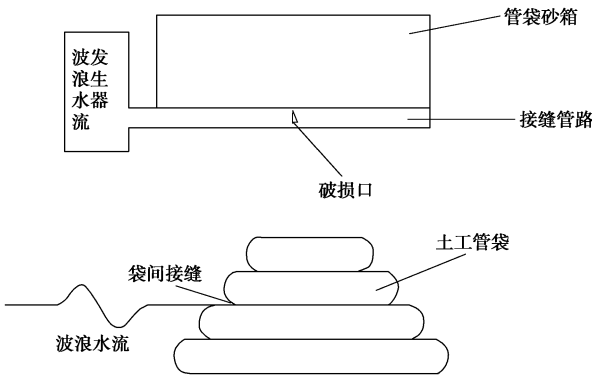


图 4 装置原理简化示意图  
Fig. 4 Principle diagram of apparatus

## 1.2 试验装置组成

模型装置组成部分包括: 波浪水流发生器、管袋砂箱、接缝管路以及信息采集设备等。装置主体材料使用有机玻璃, 可以便于观测砂颗粒的运移。装置实物图如图 5 所示。

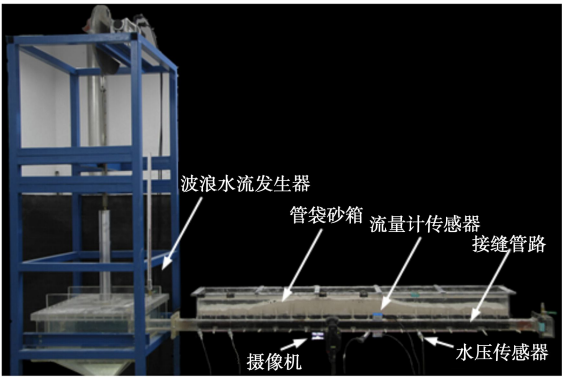


图 5 试验装置实物图  
Fig. 5 Physical map of test apparatus  
(1) 波浪水流发生器

波浪水流发生器用于模拟波浪水流的作用，为接缝管路提供一定周期和能量的波浪水流。一般物理模型对波浪的模拟，主要在大型试验水槽中进行，对试验场地的要求及费用均较高。本文的重点在于接缝管路内波浪水流对侧壁损伤处充填泥沙的影响，对于管路外波浪要素并不做过多要求，只需要为接缝管路提供一定周期和能量的波浪水流即可。鉴于各方面考虑，提出了新型波浪水流发生装置，该装置适用模拟具有一定周期和能量的波浪水流作用，如图 6 所示。

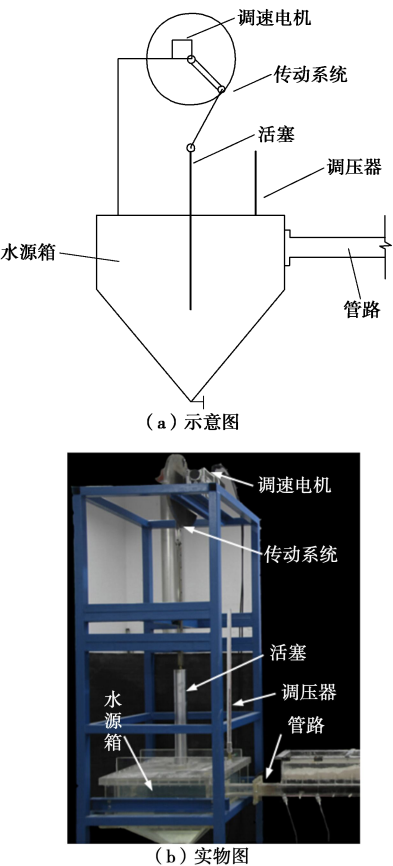


图 6 波浪水流发生器

Fig. 6 Cyclic flow generator

该装置主要组成部分包括水源箱、活塞、调压器、传动系统、调速电机等。调速电机经传动系统驱动活塞在水源箱内上下运动，使水流在水源箱与接缝管路及管袋砂箱内周期性往复运动，以模拟波浪水流对管袋坝接缝的冲刷作用。水源箱下部为漏斗状五面体，在为波浪水流提供水源的同时，便于收集波浪水流掏刷出的砂颗粒。通过对调速电机转速的调节，可以实现对波浪水流周期的调节；通过对传动系统和调压器的调节，可以实现对波浪水流能量的调节。

(2) 管袋砂箱

管袋砂箱用于模拟土工管袋。管袋砂箱的主体材料为有机玻璃，在与接缝管路的结合部位通过螺杆及预埋螺丝固定有含破损口的土工织物，二者共同组成

整体的管袋砂箱。土工织物上可以在不同位置布设不同尺寸及形状的破损口，通过替换在不同位置布设破损口的土工织物可以模拟在不同位置有损伤的管袋侧壁。管袋砂箱的尺寸为 200 cm×40 cm×40 cm（长×宽×高）。

(3) 接缝管路

接缝管路用于模拟袋间接缝。在实际的工程当中管袋坝袋间形成的接缝直径大约为 5 cm，形状各异。为便于连接和测量，将接缝简化为截面为边长为 5 cm 的正方形管路。接缝管路由三个有机玻璃面组成，另一个侧面与砂箱共用一片土工织物连接。为了更真实地模拟袋间接缝，对接缝管路进行了糙率率定试验。经试验测得纱网糙率略大于国产编制布的糙率，且一面有机玻璃与一面纱网及两面土工织物的组合恰好与四面土工织物的糙率相当，因此采用该组合可以完成对实际边界模拟，同时还便于接缝管路内砂颗粒运动的观察。接缝管路的有机玻璃侧壁留有压力传感器的接入点，以便于采集压力数据。

(4) 数据、图像采集设备

试验中信息采集设备主要包括采集水流压力和流速的数据采集设备和包括摄像机、照相机的图像采集设备。水压力实时动态数据的采集主要是利用接缝管路侧壁安装的水压变送器和布设于管袋砂箱内的微型渗压计。传感器采集到的电压信号经采集卡转换为压力数据，实时传输并保存到计算机上。本文水流流速的测量主要使用两种不同功能的超声波流量计，其中时差式超声波流量计可用于清水的测量；当水流浑浊时可用多普勒超声波流量计进行数据采集。图像采集是通过使用摄像机、照相机、秒表等记录整个颗粒运动及冲刷渗透发生过程，可为后期数据分析提供影像资料。

2 试验材料

管袋坝充填砂土及坝芯吹填砂土一般采用粉细砂，颗粒粒径一般在 0.08~0.27 mm 之间，抗渗透变形能力较弱。本文试验砂样为天然石英砂体，密度为 2764 kg/m<sup>3</sup>，砂样级配采用管袋坝充填砂的典型级配，级配曲线如图 7 所示。

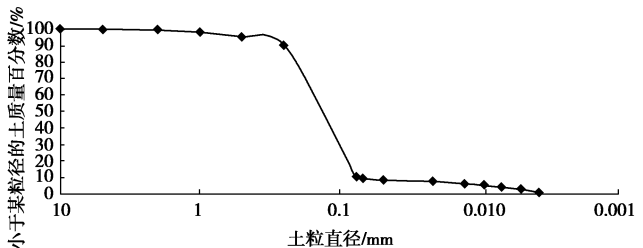


图 7 充填砂颗粒级配曲线

Fig. 7 Distribution of particle size of sand



为便于对试验过程中不同粒径砂颗粒运动情况进行观察和追踪, 管袋侧壁损伤处附近砂体采用彩砂填充, 如图 8 所示。

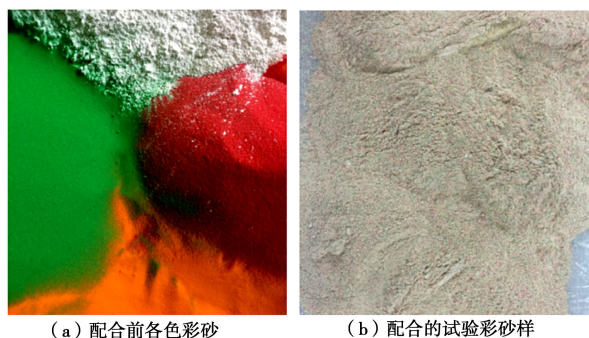


图 8 彩色试验砂样

Fig. 8 Color samples in tests

### 3 试验环节

试验环节主要包括试验准备、试验实施、试验后处理三个部分。

#### 3.1 试验准备

(1) 装置调试。首先分别在接缝管路顶部和底部粘贴纱网和土工织物, 然后把试验工况所需的土工织物用螺栓连接到管路砂箱与接缝管路之间, 最后将水压变送器连接至接缝管路接入点, 微型渗压计布设到管路砂箱内。装置组装完毕后通过波浪水流发生器向接缝管路和管袋砂箱内注水, 测试是否存在漏水现象, 并对水压变送器等设备进行校正。

(2) 砂样制备。根据每组不同试验工况, 确定砂样级配, 依据级配参数将各粒径颜色砂料混合均匀, 配制出所需砂样。

(3) 砂样装填。采取分层填装、逐层压实的方式来确保砂样装填的均匀性, 并达到预设的孔隙率。

(4) 加水固结。通过波浪水流发生器的水源箱底部的注水口向装置系统内加水, 为减少砂颗粒的扰动, 加水速度尽可能缓慢。水加满后关闭水源箱的注水口, 使砂样在静水头下浸泡, 浸泡时间维持 12 h 以上, 以确保砂样饱和。

#### 3.2 试验实施

(1) 施加波浪水流作用。调节传动系统和调速电机的转速, 制造预设周期和压力的波浪水流作用, 观察管袋砂箱侧壁损伤处砂颗粒的运动情况。

(2) 数据采集。采用水压变送器和微型渗压计监测接缝管路和管袋砂箱各部位实时压力, 通过超声波流量计自动采集并存储实时流速。

(3) 图像采集。试验开始时同时打开摄像机, 对管袋砂箱侧壁损伤处附近砂颗粒的运移情况进行实时

采集, 并用照相机配合刻度尺对试验过程中出现的特征部位实时拍摄图像以备后期处理。

(4) 待管路砂箱内砂体达到稳定状态, 即侧壁损伤处不再有砂颗粒外移, 停止波浪水流作用。

#### 3.3 试验后处理

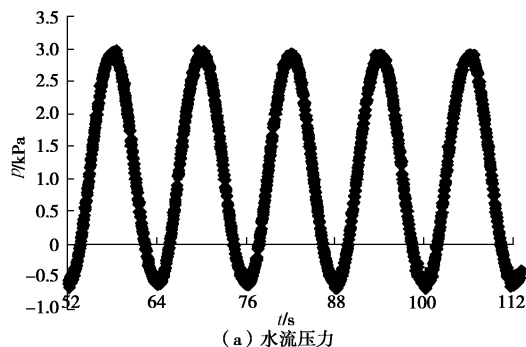
(1) 试验结束后, 在管袋砂箱内特征部位砂体取样, 进行颗粒分析与孔隙率的测定, 用以比较管袋砂箱内侧壁损伤部位与其他部位砂颗粒分布的情况, 进而结合试验过程中影像资料, 综合分析侧壁损伤处砂颗粒的运移规律。

(2) 整理试验过程中采集的数据, 包括接缝管路各处流速、水压力及管袋砂箱内渗透压力等数据, 以便为整个系统建立流场模型, 结合砂颗粒的运移规律, 分析得到波浪水流沿接缝管路对管袋侧壁损伤处砂体的冲刷机理。

(3) 收集水源箱及接缝管路内砂颗粒, 统计出砂量, 以此作为波浪水流沿袋间接缝对侧壁损伤管袋坝冲刷破坏的指标, 分析影响出砂量的因素, 并分析出砂量与各影响因素之间的关系, 进而得到波浪水流沿袋间接缝对侧壁损伤管袋坝冲刷破坏的宏观判别标准。

### 4 试验方法有效性分析

该试验装置及试验方法是基于实际工程简化而来的, 其目的是通过该试验装置及方法来探究实际工程中存在的持续侵蚀导致破坏的问题。为了说明该试验装置及试验方法的有效性, 本文依托于该试验装置, 采用该试验方法进行了一系列验证试验。试验过程中对试验现象进行了观察, 并采集到相关数据, 经分析与实际工程情况基本一致。下面以其中一个验证试验为例来说明。试验波浪水流周期为 12 s, 峰值压力为 3 kPa, 侧壁破损口直径为 1 cm, 破损位置距离波浪水流发生器 1 m; 在接缝管路内监测到的压力和流速数据如图 9 所示, 二者均呈周期性正弦变化, 与实际波浪水流基本一致, 证明该波浪水流发生器可以完成波浪水流的模拟。



(a) 水流压力

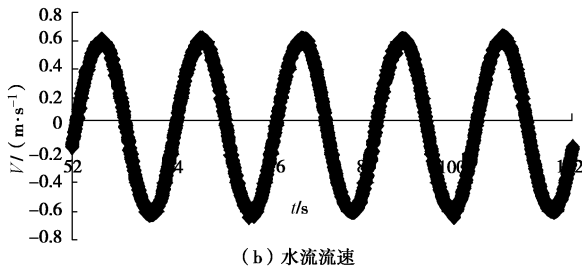


图9 接缝管路内水流参数

Fig. 9 Flow parameters in seams

接缝管路内初始状态如图 10 (a) 所示。图 10 (c) 和图 10 (d) 分别为同一个波浪周期内来水阶段及退水阶段：在来水阶段，侧壁破损口附近的水流由接缝管路经破损口进入管袋砂箱，冲击破损口附近砂颗粒变松散；水流反向后进入回水阶段，该阶段中侧壁破损处水流携带已松散的砂颗粒从砂管袋箱快速流至接缝管路内，使接缝管路水流变浑浊。经过 10 min 的冲刷，接缝管路内的状态如图 10 (b) 所示。比较图 10 (a) 和图 10 (b)，接缝管路中砂堆体积比初始状态明显增大(砂堆底部的位置由 95 cm 扩展至 97 cm 处)。以上试验现象表明在一定的周期、压力的波浪水流作用下，管袋侧壁损伤处砂颗粒在波浪水流作用下沿袋间接缝被带出坝外，与实际工程情况基本相符。因此，该装置及方法对研究波浪水流沿袋间接缝对侧壁损伤管袋坝冲刷作用具有有效性。

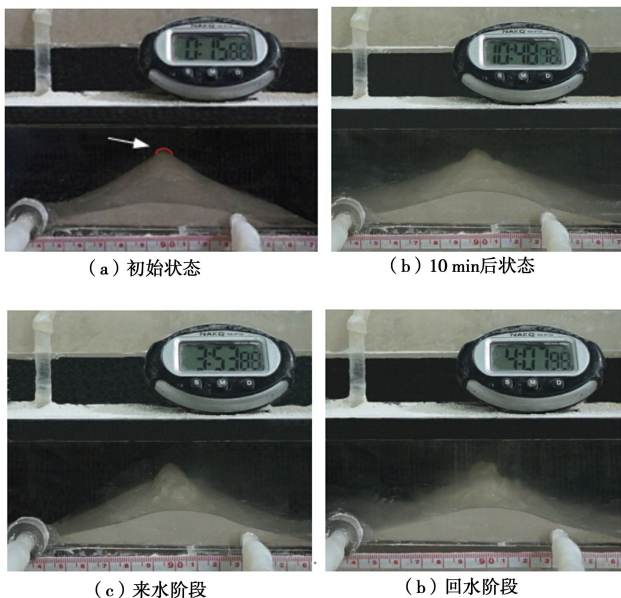


图10 侧壁破损口冲刷现象

Fig. 10 Phenomena of scour near punctured location

## 5 结 语

根据实际工程中管袋坝接缝侧壁损伤冲刷过程研究的需要，概化出一套试验装置，并提出了对应的试

验方法。该装置及方法可以模拟在不同周期、能量的波浪作用下，侧壁损伤处砂体流入管袋坝袋间接缝，并沿袋间接缝流失，直至管袋坝坝体发生结构破坏的过程。该装置及方法为探究波浪水流对管袋坝接缝侧壁损伤的冲刷机理以及对其冲刷稳定性的影响提供了有益参考。

## 参考文献:

- [1] 中国水利学会围涂开发专业委员会. 中国围海工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (Chinese Hydraulic Engineering Society Reclamation Development Professional Committee. Chinese reclamation engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000. (in Chinese))
- [2] RECIO J, OUMERACI H. Effect of deformations on the hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers[J]. Geotextile and Geomembranes, 2007, **25**(4/5): 278 - 292.
- [3] RECIO J, OUMERACI H. Processes affecting the hydraulic stability of coastal revetments made of geotextile sand containers[J]. Coastal Engineering, 2009, **56**: 260 - 284.
- [4] VAN Steeg P, BEZUIJEN A. Large scale physical model tests on sand filled geotextile tubes and containers[C]// Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010.
- [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] MOO Young H K, DOUGLAS A G. Testing procedures to assess the viability of dewatering with geotextile tubes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, **20**(5): 289 - 303.
- [8] KOERNER G R, KOERNER R M. Geotextile tube assessment using a hanging bag test[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, **24**(2): 129 - 137.
- [9] MUTHUKUMARAN A E, ILAMPARUTHI K. Laboratory studies on geotextile filters as used in geotextile tube dewatering[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, **24**(2): 210 - 219.
- [10] CHEW S H. Erosion stability of punctured geotextile filters subjected to cyclic wave loadings—a laboratory study[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2003, **21**(4): 221 - 239.
- [11] CHEN Jian-sheng, LIU Jian-gang, JIAO Yue-hong. Simulation study on the contact scouring development

- between underground layers[J]. Engineering Science, 2003, **5**(7): 33 - 39.
- [12] MORTEZA Z, ABBAS Y B. Lagrangian coupling two-phase flow model to simulate current-induced scour beneath marine pipelines[J]. Applied Ocean Research, 2012, **38**: 64 - 73.
- [13] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 堤基渗流无害管涌试验研究[J]. 水利学报, 2004(11): 46 - 54. (MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, CAI Jin-bang, et al. Experimental study on harmless seepage piping in levee foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(11): 46 - 54. (in Chinese))
- [14] 毛昶熙, 段祥宝, 吴良骥. 砂砾土各级颗粒的管涌临界坡降研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12): 3705 - 3709. (MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, WU Liang-ji. Study of critical gradient of piping for various grain sizes in sandy gravels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12): 3705 - 3709. (in Chinese))
- [15] 刘 杰, 崔亦昊, 谢定松. 江河大堤均匀砂基渗透破坏机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(5): 642 - 645. (LIU Jie, CUI Yi-hao, XIE Ding-song. Failure mechanism of seepage in uniform sand foundation of river levee[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(5): 642 - 645. (in Chinese))
- [16] 蔚成亮, 束一鸣, 曹明杰, 等. 管袋坝芯砂体沿袋间接缝运移规律试验研究[J]. 水利学报, 2014, **36**(1): 5 - 9. (YU Cheng-liang, SHU Yi-ming, CAO Ming-jie, et al. Experimental research on migration law of core sand through seam between tubes of geotube dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **36**(1): 5 - 9. (in Chinese))
- [17] 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 Yan-feng, 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))

(本文责编 明经平)