



软体排塌陷弯曲变形的应变响应特征分析^{*}

魏祥龙^{1,2,3}, 尹书冉⁴, 夏志康⁵, 杨涵苑², 左利钦², 林青炜¹

- (1. 河海大学, 水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏南京 210024;
2. 南京水利科学研究院, 水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210029;
3. 河海大学, 水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210024;
4. 长江航道整治中心, 湖北武汉 430010; 5. 中交第二航务工程局有限公司设计研究院, 湖北武汉 430056)

摘要: 软体排是长江中下游航道主要的洲滩防护结构, 其变形的应变响应特征对评估分析软体排服役状态具有重要意义, 目前对此研究较少。针对目前软体排塌陷变形应变响应特征研究存在的难点, 开展模型试验, 研究软体排塌陷弯曲变形下的应变响应特征, 并提出排体塌陷变形的识别方法。结果表明: 排体塌陷变形时断面应变呈“双峰”型的分布特征; 该分布特征是由于内部排体弯曲变形并向内卷缩, 通过定点处的固定作用带动光纤受压, 导致该部分感测光纤呈现负应变而形成。

关键词: 软体排; 塌陷变形; 光纤传感; 应变响应

中图分类号: U614

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0090-06

Strain response characteristics to subsidence deformation of flexible mattress

WEI Xianglong^{1,2,3}, YIN Shuran⁴, XIA Zhikang⁵, YANG Hanyuan², ZUO Liqin², LIN Qingwei¹

- (1. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China;
2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China;
4. Yangtze River Waterway Regulation Center, Wuhan 430010, China;
5. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd. Design & Research Institution, Wuhan 430056, China)

Abstract: The flexible mattress is the main beach protection structure in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the strain response characteristics of its deformation are important for evaluating and analyzing the service state of the flexible mattress, there are few studies on this. To address the current difficulties in the study of the strain response characteristics to the subsidence deformation of flexible mattress, we carry out the model experiments, and study the strain response characteristics under the subsidence deformation of flexible mattress to propose the identification method of subsidence deformation. The results show that the section strain response to the subsidence deformation of the flexible mattress can be characterized as “bimodal” distribution. This distribution feature is formed by the internal mattress bending and coiling inward, driving the fiber under pressure through the fixation at the fixed point, resulting in a negative strain in that part of the sensing fiber.

Keywords: flexible mattress; subsidence deformation; optical fiber sensing; strain response

护滩、护底软体排广泛应用于长江中下游的洲滩守护^[1-2]。软体排主要利用其隔离和反滤功能进行河床的护底和固滩, 防止水流直接冲刷河床

(滩体), 同时也防止因水流渗透作用而造成河床(滩体)的局部形态破坏, 在稳定滩槽格局、提升通航能力等方面发挥了重要作用。在实际运行中,

收稿日期: 2022-11-14

*基金项目: 国家自然科学基金项目(U2040205、U2040219); 国家重点研发计划项目(2022YFC3202600); 长江航道科技项目(Hs219003); 江苏省水利科技项目(Qs222004)

作者简介: 魏祥龙 (1990—), 男, 博士, 助理研究员, 从事航道工程方面的研究。

通讯作者: 左利钦 (1980—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事航道工程泥沙研究。E-mail: lqz@nhri.cn

面对长期的清水冲刷^[3-4], 护滩护底软体排容易产生鼓包、塌陷、悬挂等变形破坏^[5-7]。其中, 排体的悬挂变形是护滩软体排变形破坏的形式之一。长江中游太平口水道三八滩的洲滩守护工程以及张家洲南水道官洲尾边滩守护工程中, 由于水流冲刷引起护滩软体排内部以及边缘大范围的塌陷变形, 如图 1 所示^[8]。排体的塌陷变形会导致排体局部受力变大, 并进一步引起排体的损坏。因此, 及时准确获取排体的变形形态, 对开展软体排服役状态评估与结构修复具有重要意义。



a) 太平口水道三八滩



b) 张家洲南水道官洲尾边滩

图 1 实际工程软体排塌陷变形

目前针对塌陷变形的研究较少, 马爱兴等^[9]通过现场踏勘, 发现了实际工程中塌陷变形产生的位置及形态; 曹民雄等^[10]通过水槽试验模拟出软体排的塌陷变形现象。排体塌陷变形多发生在岸边以及洪水期淹没枯水期出露的低滩地带。对于塌陷的产生机理, 刘怀汉等^[11]认为塌陷是由于接缝处理不牢造成接缝处的泥沙冲失, 排体在自身重力的作用下形成沉降、下凹; 汪求顺^[12]认为渗流等因素也会引起排体的塌陷变形现象。目前长江航道运维主要采用声学测量法对排体变形进行大范围的测量^[13], 无法实时获取排体变形所引

起的应变响应。魏祥龙^[14]、徐雪鸿等^[15]利用分布式光纤传感技术, 获取了软体排冲刷悬挂以及鼓包变形下的应变响应特征。但目前对塌陷变形所引起的应变响应研究较少。本文通过开展模型试验, 基于分布式光纤传感技术研究塌陷变形下的应变响应特征。基于排体塌陷变形的应变响应特征, 提出排体变形的识别方法。本文研究成果旨在为软体排服役状态的评估、分析提供技术支持。

1 试验方法

1.1 软体排模拟

开展软体排塌陷弯曲变形及应变响应的模拟, 主要考虑软体排模拟相似性、地形与排体变化相似等。通过室内模型试验, 模拟出排体的塌陷变形, 并利用分布式光纤传感技术测量其应变响应。

结合试验条件及目的, 排布及压载块体的模拟比尺设定为 1:30。根据 JTS/T 231-8—2018《内河航道整治建筑物模拟技术规程》^[16]软体排基布选用 250 g/m^2 的棉布, 压载块体选用密度为 2.7 t/m^3 、底部直径为 11 mm 、高度为 3 mm 的铝合金圆柱体片进行模拟, 压载块体质量模拟偏差为 -2.8% , 符合允许偏差 $\pm 5\%$ 的要求。压载块体以电熔胶粘贴在棉布上, 粘贴间距按原型间距同比尺缩小。原型软体排及模型软体排如图 2 所示。



a) 原型



b) 模型

图 2 软体排原型与模型

1.2 排体塌陷变形模拟

试验在尺寸为 $4\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m}$ (长×宽×高)的长方体水槽中进行, 软体排布设在水槽内的平整床面上。文献[14]认为采用分布式光纤测量排体变形时, 其应变响应特征只与排体变形形态有关, 水动力所引起的应变响应较小, 因此本文采用在静水中开展相关模拟试验。同时, 在水槽内将软体排塌陷变形模拟做到形态上的相似, 即能达到应变响应特征的相似。文献[6]和[9]通过现场踏勘发现, 护滩软体排塌陷范围的长度可达十几米, 但受到水流最大冲深以及排体自身的变形伸缩性所制约, 塌陷变形的深度一般为数米。卢毅等^[17]研究地面塌陷变形的分布式光纤监测方法时, 将充气气囊布设在监测区域土体内部, 通过放气的方法模拟地形塌陷, 较为准确地反映出地面的塌陷变形规律。除此之外, 也有学者^[18-19]采用将土体内埋置气囊充水与放水的方式模拟地面的塌陷变形。因此, 本文考虑在排体下方埋置直径 0.3 cm 的圆柱形气囊, 通过气囊充放气的方法模拟地形的塌陷变形。充满的气囊在放气后最大可模拟出 0.3 m 的塌陷变形, 按模型比尺对应原型 9 m 的高差。水槽内用模型沙埋置直径 0.3 m 的圆柱形气囊后平铺密实, 气囊外接打气和抽气装置。每次对气囊抽气、放气后, 可模拟出地形塌陷深度为 $0.5\sim1\text{ m}$ 。试验模拟的排体塌陷变形形态见图3, 与图1中长江中游太平口水道三八滩现场观测到的塌陷变形形态相似。

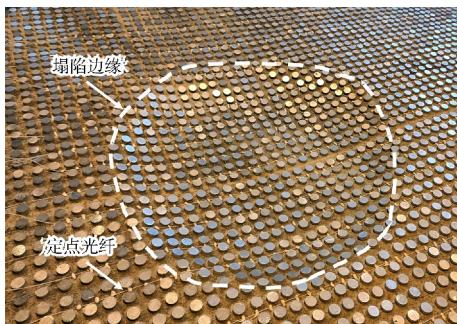


图3 模拟的排体塌陷变形

1.3 试验组次及测量

试验选用的应变测量光纤为直径为 0.9 mm

的紧套光纤, 定点固定间距为 20 mm 。在排布上粘贴光纤时, 首先将光纤拉直后按预定定点间距点涂胶水使其固定在排布表面上。排布上布设有 15 个断面(CS1~15), 断面间距在 $0.05\sim0.10\text{ m}$, 断面测量长度 1.2 m 。排布下方埋置气囊通过放气模拟地形变化, 形成排体的塌陷。试验布置如图4所示。试验模拟塌陷变形 3 个组次(即 TX1~3), 单次模拟高度变化在 -0.5 m 左右, 变形影响范围在 $10\sim20\text{ m}$ 。

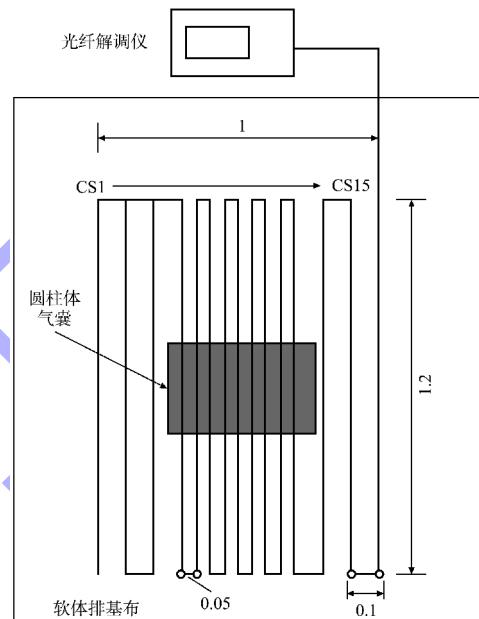


图4 排体传感光纤及气囊布置 (单位: m)

排体光纤变形监测采用高精度光纤解调仪 (OFDR), 仪器测量精度 $\pm 1 \times 10^{-6}$, 空间采样分辨率 1 mm 。采用超声地形测量仪进行地形测量, 断面测量间距为 20 mm 。总共进行 3 个组次的地形工况模拟。具体试验步骤为: 1) 预定位置放置气囊平整试验沙并铺排; 2) 缓慢放水至淹没地形仪超声探头; 3) 测量初始地形及初始应变; 4) 缓慢放气进行 1 个组次的变形模拟; 5) 产生塌陷后, 静置 15 min 对各断面地形及光纤应变进行测量; 6) 测量完成后重复步骤 4) 和 5) 进行下一个组次的试验。地形模拟以及测量所需时间较短, 试验前后温度变化较小, 温度变化所引起的应变也相对较小, 因而在后续应变分析过程中, 忽略温度所引起的应变变化。

2 试验结果分析

2.1 应变响应特征

塌陷工况下的地形变化、光纤应变响应见图5、6, 其中地形高程及应变均沿x轴方向进行测量。由图5的地形塌陷情况可见, 排体在塌陷坑中部区域下凹深度最大, 从中部往塌陷坑边缘, 排体塌陷深度逐渐减小, 与原型排体塌陷变形情况相类似。由图6的排体光纤应变响应情况可见, 塌陷工况下应变在测量断面(x轴方向)上呈“半圆形”分布。应变最大的区域位于塌陷坑边缘处, 最大可达 500×10^{-6} 。塌陷坑体表面弯曲变形的排体应变相对较小, 且存在应变为负值的情况, 最小可达 -400×10^{-6} 左右。塌陷区域排体应变总体呈“双峰”的分布形式。

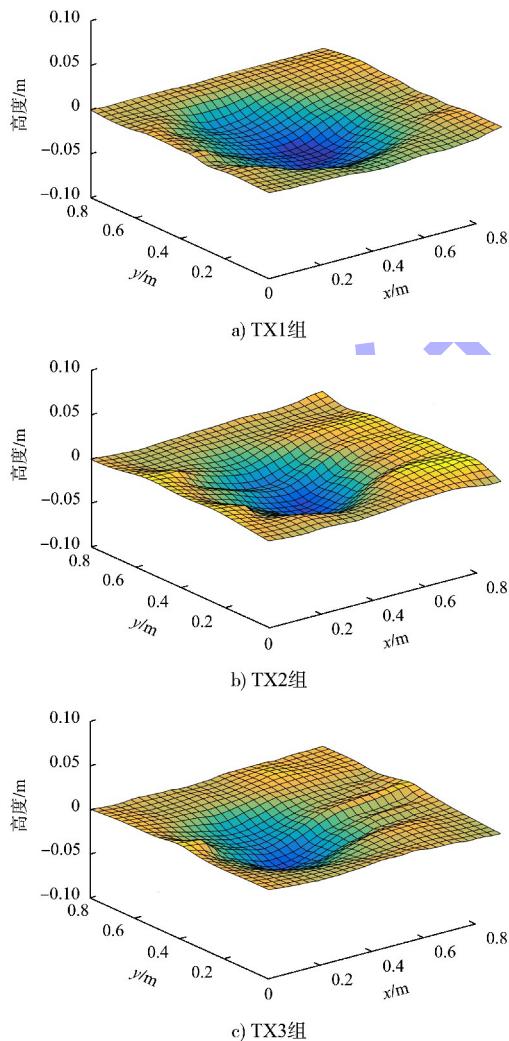


图5 不同组次下的地形变化

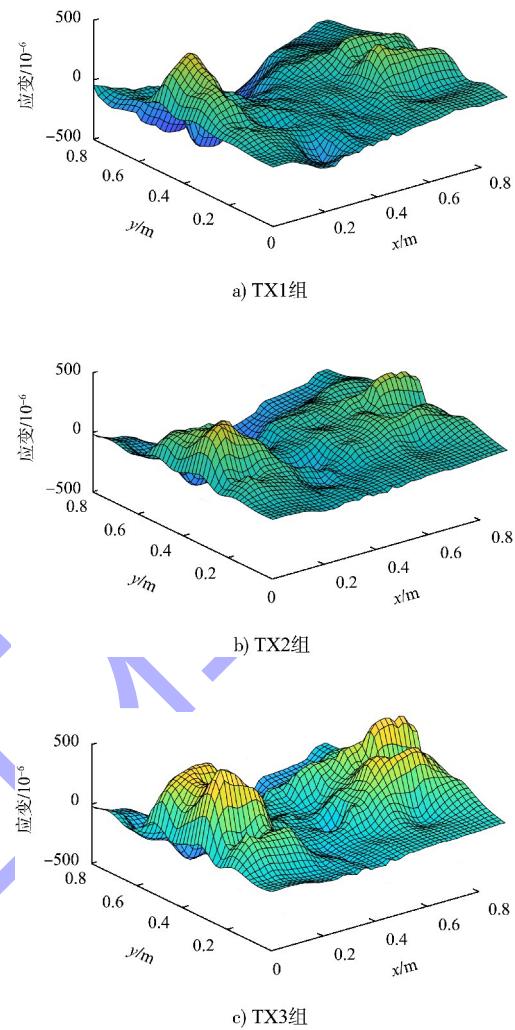


图6 不同组次下的应变响应

为进一步验证定点光纤测量弯曲变形的软体排时, 光纤应变值呈负值的情况, 在长江干线武安段6 m水深航道整治工程V标段玉带洲沉排施工过程中开展一次实船现场试验。原型试验中选用的光缆为直径14.5 mm的高强度铠装光缆, 按5 m定点间距沿沉排方向固定在排布中间。随系结压载混凝土块时, 同步进行光缆安装。沉排滑板长5 m, 打开卡排梁、转动卷排筒后, 软体排在重力作用下入水, 单次入水排长5 m(1个定点距离)。沉排后静置1 min, 测量单次入水5 m长排体的应变。如图7所示, 总计进行4次沉排应变测量试验。

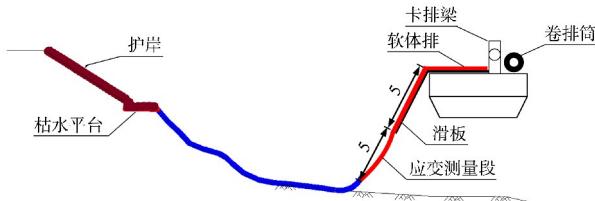


图 7 实船验证试验 (单位: m)

光纤采用定点布设, 光纤两端的定点负责传递排体拉伸所引起力的作用, 因此对于定点间光纤的应力、应变大致相同。本文选取定点光纤范围内中间点的应变进行分析, 不同组次的应变变化如图 8 所示。可以看出, 每一段弯曲变形上的感测光缆均呈现出负应变, 应变范围在 $-500 \times 10^{-6} \sim -260 \times 10^{-6}$, 不同组次间应变值略有差别。排体塌陷弯曲伸长, 弯曲变形部分排体向内卷缩, 并通过定点的固定作用带动光纤受压, 使得室内试验以及现场实船试验排体弯曲变形部分的感测光纤呈现出负应变。对于塌陷坑边缘的光缆, 与排体弯曲变形方向相同, 两者变形趋势一致, 因而光缆的应变响应为正。

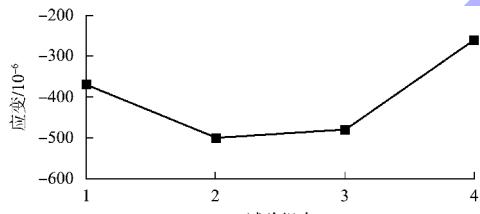


图 8 沉排实船试验光纤应变变化

2.2 塌陷弯曲变形分布

空间分辨率是指光纤解调仪所能分辨的两个相邻时间点检的最短距离, 试验采用的光纤解调仪空间分辨率 d_s 设置为 1 mm, 将实测的应变值 ε 代入式(1)可求得断面每个测点的变形量:

$$\Delta x = d_s \varepsilon m c \quad (1)$$

式中: Δx 为测点的变形量, 正值时代表此处产生拉伸变形, 负值代表此处产生收缩变形; m 为模型比尺; c 为应变传递效率系数。

不同组次下排体塌陷变形规律相同, 以 TX3 组次为例, 对排体塌陷变形的分布特征进行分析。文献[14]通过试验测得该测量条件下的光纤-排体应变传递效率系数为 23.31, 因而根据式(1)可计

算得到原型尺度下排体塌陷变形分布如图 9 所示。结合图 9 及式(1)可知, 排体塌陷变形量与应变值呈正比。塌陷坑边缘普遍产生拉伸变形, 最大可达 0.5 mm(30 mm 范围内), 部分区域有少量的收缩变形。塌陷坑边缘排体的拉伸变形主要由于受到塌陷区内部排体自身重力作用所引起的。

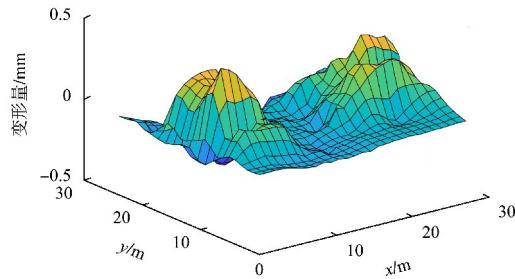


图 9 TX3 组塌陷弯曲变形分布模式

对塌陷坑边缘处的变形量进行积分, 可以得到排体在塌陷坑边缘总拉伸量。TX3 组光纤测量方向(y 轴)7~17 m 范围的塌陷坑左右两侧的边缘变形量见图 10, 其中左侧边缘的积分范围为 0~8 m (x 轴), 右侧边缘的积分范围为 17~27 m (x 轴)。可见, 各断面塌陷坑边缘的拉伸变形量在 1~3 mm, 不同断面的拉伸量略有区别。需要说明的是, 目前应用分布式光纤传感技术测量排体变形仍处于起步阶段, 光纤与排体的变形耦合程度会影响其测量精度, 因此更为精确的测量结果有待于监测方法与监测技术进一步的优化完善。

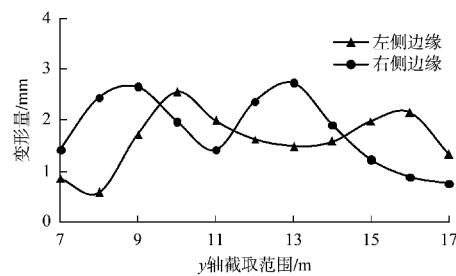


图 10 塌陷弯曲变形应变分布模式

2.3 塌陷弯曲变形识别方法

由塌陷弯曲变形下测量断面的应变分布可知, 排体应变呈“双峰”分布模式, 如图 11 所示。其中, 断面边缘处的应变较大, 而位于塌陷坑内部的排体应变较小。冲刷坑塌陷长度与边缘应变最大值的关系见图 12。可见, 应变最大值与塌陷长

度呈正相关, 塌陷范围越长, 边缘处应变越大, 边缘排体也更容易发生拉伸变形破坏。

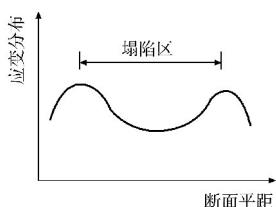


图 11 塌陷弯曲变形应变分布模式

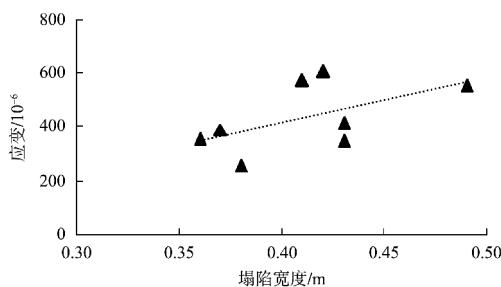


图 12 塌陷长度与应变最大值的关系

结合实测地形以及应变分布特征, 可归纳排体塌陷变形识别方法为: 塌陷变形引起“双峰”应变分布模式, 两端峰值间即为塌陷变形区域; 通过识别断面的双峰极值 m_1 及 m_2 , 确定其对应的位置标记为 l_1 及 l_2 , 那么塌陷排体的范围可确定为 $[l_1, l_2]$, 塌陷变形长度 $L = l_1 - l_2$ 。塌陷坑边缘处的排体拉伸量可由式(1)在边缘区域沿测量断面方向积分得到。需要说明的是, 由于塌陷坑内部光缆与排体变形不协调, 现有测量方法无法准确识别其塌陷深度。

3 结论

1) 导致排体塌陷变形下的断面应变呈“双峰”的分布特征。应变双峰分布出现的原因是排体塌陷弯曲伸长, 排体弯曲向内卷缩, 并通过定点的固定作用带动光纤受压, 使得室内试验以及现场实船试验中排体弯曲变形部分的感测光纤呈现出负应变, 而边缘区光缆与排体弯曲变形方向相同, 产生正应变。

2) 基于塌陷变形的应变响应特征, 提出的变形预警方法为: 根据塌陷变形区域呈双峰的分布特征, 通过寻找应变在双峰处的极值 m_1 、 m_2 以及

对应的位置就可以识别出塌陷变形的范围。

3) 本文阐明了软体排塌陷变形的应变响应特征, 有助于应用光纤传感监测软体排变形时对塌陷变形模式识别, 并进一步依据提出的塌陷变形识别方法量化实际的塌陷变形量。研究成果在水下软体排变形监测方面具有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] HUANG W, CREED M, CHEN F, et al. Scour around submerged spur dikes with flexible mattress protection [J]. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, 2018, 144(5): 1-14.
- [2] MA A X, CAO M X, DENG Y, et al. Laboratory and field investigation of an ecological cavity mattress in river bed protection [J]. Ecological engineering, 2021, 172 (2): 106-393.
- [3] ZUO L Q, LU Y J, LIU H X, et al. Responses of river bed evolution to flow-sediment process changes after Three Gorges Project in middle Yangtze River: a case study of Yaojian reach [J]. Water science and engineering, 2020, 13(2): 124-135.
- [4] LU Y J, ZUO L Q, JI R Y, et al. Deposition and erosion in the fluctuating backwater reach of the Three Gorges Project after upstream reservoir adjustment [J]. International journal of sediment research, 2010, 25 (1): 64-80.
- [5] COX A L, THORNTON C I, ABT S R. Articulated concrete block stability assessment for channelized flow [J]. Journal of hydraulic engineering, 2019, 145(4): 1-8.
- [6] 韩林峰, 王平义, 苏伟. X型系混凝土块软体排水毁量化分析及整治效果评估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(4): 487-493, 499.
- [7] 陈立, 朱一松, 张为, 等. 护滩带边缘局部冲刷深度计算公式初步研究[J]. 泥沙研究, 2017, 42(2): 61-66.
- [8] 李国斌, 徐慧, 徐峰. 长江九江航道处 2021 年度航道整治建筑物技术状况分析评价[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2021.
- [9] 马爱兴, 曹民雄, 王秀红, 等. 长江中下游航道整治护滩带损毁机理分析及应对措施[J]. 水利水运工程学报, 2011(2): 32-38.

(下转第 138 页)