



抛石丁坝块石走失监测分析*

袁俊^{1,2}, 王平义¹, 王梅力¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆建筑工程职业学院 交通与市政工程学院, 重庆 400072)

摘要: 抛石丁坝服役过程中的块石走失如维护不及时将导致丁坝丧失整治功能。针对水下块石走失过程难以实时观测的问题, 提出智能块石监测方法。利用水槽概化模型试验, 测量丁坝不同部位块石运动加速度和流速数据, 试验数据与人工观察结果吻合, 智能块石监测方法可靠。试验结果表明, 块石受湍流作用会产生非线性振动过程, 块石振动加速度的概率分布符合正态分布, 继承湍流波动的随机性。提出的监测方法为抛石丁坝维护时机的选择提供依据, 并为深入研究丁坝损毁机理和泥沙起动问题提供重要参考。

关键词: 抛石丁坝; 智能块石; 加速度传感器; 监测

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0094-06

Block walking monitoring for rock-throwing spur dike

YUAN Jun^{1,2}, WANG Pingyi¹, WANG Meili¹

(1. College of Hehai, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Transportation and Municipal Engineering, Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China)

Abstract: If rock-throwing spur dike in the service process of the block is lost and the maintenance is not timely, it will lead to the loss of remediation function of spur dike. For the problem that it is difficult to observe the process of underwater block loss in real time, this paper presents the smart block monitoring method. The acceleration and flow velocity data of the block movement in different parts of the spur dike are measured using the flume generalization model test, the test data match the results of manual observation, indicating the reliability of the smart block monitoring method. The experimental results show that the block is subjected to turbulent flow, which generates nonlinear vibration processes. The probability distribution of the block vibration acceleration conforms to the normal distribution and inherits the randomness of turbulent fluctuations. The monitoring method proposed in this paper provides a basis for the selection of maintenance timing for rock-throwing spur dikes, and provides an important reference for the in-depth study of spur dike damage mechanism and sediment initiation.

Keywords: rock-throwing spur dike; smart block; acceleration sensor; monitoring

丁坝是航道整治工程中最常用的整治建筑物, 其中抛石丁坝应用最为广泛。但抛石丁坝结构较为松散, 坝头、坝身及坝根的块石受复杂水流作用易流失, 从而发生坍塌水毁现象。针对块石走失现象, 学者对其运动形式^[1-2]、受力特点^[3]、起

动流速^[4-5]、走失机理^[6]等问题进行研究, 取得较大的进展。为保证丁坝的稳定性和可靠度, 韩林峰等^[7]提出以坝体水毁体积比判别丁坝安全性的方法; 任晶轩等^[8]采用基础统计理论, 得出流量过程和最大冲深相结合的可靠度及使用寿命预测

收稿日期: 2023-04-01

*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1600400); 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0667); 重庆市教委科技项目(KJQN202104304)

作者简介: 袁俊(1990—), 女, 博士研究生, 从事港口及航道工程等方面研究。

通讯作者: 王平义(1964—), 男, 博士, 教授, 从事港口及航道工程等方面研究。E-mail: py-wang@163.com

的概率模型计算方法。虽然相关研究获得了较多成果, 但影响抛石丁坝水毁的因素极为复杂, 其破坏机理一直是学术界公认的难题, 抛石丁坝水毁现象仍然严重。

工程中抛石丁坝块石走失如维护不及时导致丁坝坍塌水毁, 建筑物将失去航道整治功能, 因此抛石丁坝的损坏过程与损害程度是值得关注的工程问题。然而, 由于建筑物工作环境一般位于水下, 难以实时观测, 导致不能及时评判丁坝损坏程度, 错失维护的最佳时机。故需要设计一种抛石丁坝块石走失监测方法。

传统的丁坝损毁监测主要依靠人工检测, 但水上工作强度大、速度慢、效率低。近几十年, 水下结构物冲刷的监测受到广泛重视, 监测手段有雷达、声呐、超声波、电磁波时域反射(TDR)、光纤光栅等。声呐、雷达、超声波可确定泥沙淤积和冲刷的深度, 探测装置容易安装^[9-11], 但洪水期间监测信号受悬浊物影响会产生严重衰减, 通常应用在洪水后的冲刷检查, 但信号质量依然会受到水草或泥沙等物质的影响^[12]。电磁波时域反射(TDR)主要应用于桥梁冲刷监测, 通过感知监测部位的电缆变形甚至破坏确认冲刷情况, 但信号容易失真, 造成测量结果不精准^[13]。光纤光栅传感器技术本身比较脆弱, 多应用在刚性坝体中^[14], 在柔性坝体中缺乏应用, 其在恶劣服役环境下操作困难, 难以定量。

近几年, 加速度传感器备受关注^[15], 应用在惯性导航、航天航空、消费电子、机器人以及汽车工业等领域, 具有体积小、成本低、性能和灵敏度高、输出数据不易温漂、动态范围宽和数字输出准的特点, 并且不受特定场景限制进行不间断监测等优势。本文利用加速度传感器制作智能块石, 通过水槽概化模型试验, 采集块石的实时加速度数据, 分析块石运动状态和运动特性, 判别丁坝损毁程度。

1 基于加速度传感器的块石走失监测原理

加速度传感器采用数字输出的工业级 MEMS

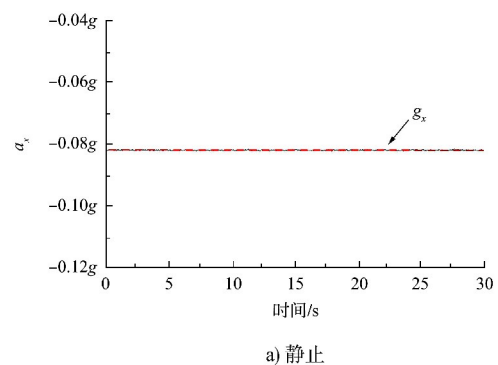
加速度传感器, 测量范围 3.6 g、分辨率 0.1 mg、采样频率 10~200 Hz。传感器采用先进的数字滤波技术, 能有效降低测量噪声, 提高测量精度。

本文监测方法是将三轴加速度传感器安装在块石内部, 通过与块石的刚性连接采集块石运动过程的实时加速度, 传感器在测量块石加速度时不受环境影响, 能准确采集真实数据。原始振动信号数据曲线上有毛刺, 故对数据进行平滑处理, 减少干扰信号对真实数据的影响。传感器输出的加速度为三轴加速度(a_x 、 a_y 、 a_z)。输出的加速度 a 包含重力加速度 g 和振动加速度 a_c :

$$\begin{cases} a_x = g_x + a_{c,x} \\ a_y = g_y + a_{c,y} \\ a_z = g_z + a_{c,z} \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_x 、 a_y 、 a_z 为传感器输出的三轴加速度值, g_x 、 g_y 、 g_z 为三轴重力加速度, $a_{c,x}$ 、 $a_{c,y}$ 、 $a_{c,z}$ 为块石三轴振动加速度值。

相关学者发现部分泥沙起动前受湍流作用有振动或来回摆动现象, 临近阈值时才突然起动^[16-19]。图 1 为块石 4 种运动状态下的 a_x , 图中 $a_{c,x}$ 为块石受湍流作用产生的振动加速度。图 1a) 中 a_x 为一条直线, $a_{c,x} = 0$, 即 $g_x = a_x$, 表明重力加速度为定值, 块石静止。图 1b) 中 a_x 围绕基线 g_x 上下波动, 表明块石产生振动, 但未起动。图 1c) 中基线 g_x 发生突变, 表明块石重力加速度改变, 块石起动。图 1d) 中基线逐渐降低, 表明重力加速度变化, 块石逐渐滑动, 但位置变化不大, 认定抛石丁坝块石并未走失。因此可根据传感器采集的三轴加速度判定抛石丁坝块石的走失情况。



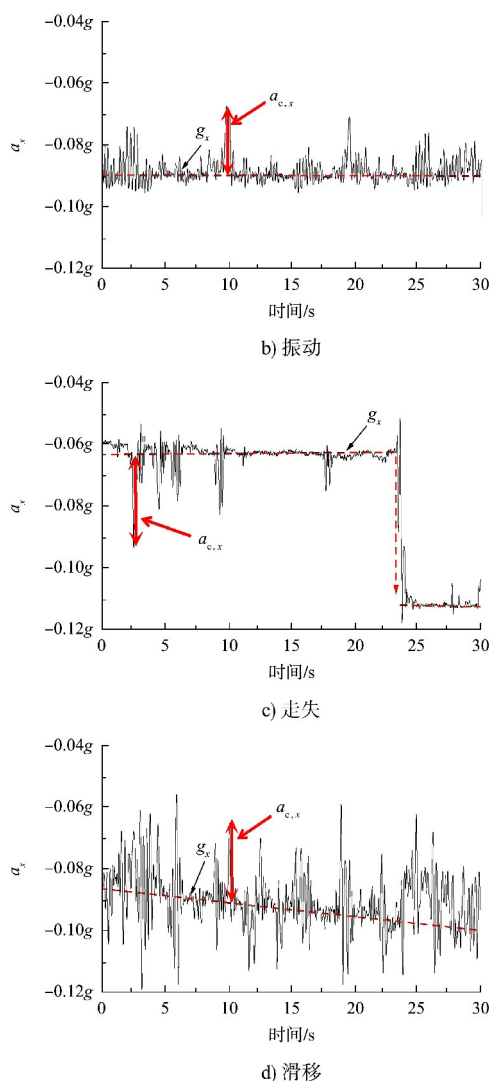


图 1 块石不同运动状态的加速度数据

2 水槽物理模型试验设计

模型试验主要模拟长江上游航道常见的抛石丁坝在非恒定流作用下的坝头块石走失情况。借助非恒定流模拟的前期研究成果，即采用自回归马尔可夫模型模拟寸滩水文站 1954—2008 年日均流量数据得出的模型流量过程，试验选择 20 a 一遇的流量过程。

模拟试验在矩形玻璃水槽中进行，水槽长 30 m、宽 2 m、高 1 m。抛石丁坝选择长江上游航道常见的丁坝结构形式进行正态概化设计，考虑到三轴加速度计尺寸限制，模型比尺设计为 1:25。模型丁坝尺寸如图 2 所示，坝高 16 cm，坝面 12 cm，迎水坡坡度 1:1.5，背水坡坡度 1:2，向河坡坡度 1:2.5。

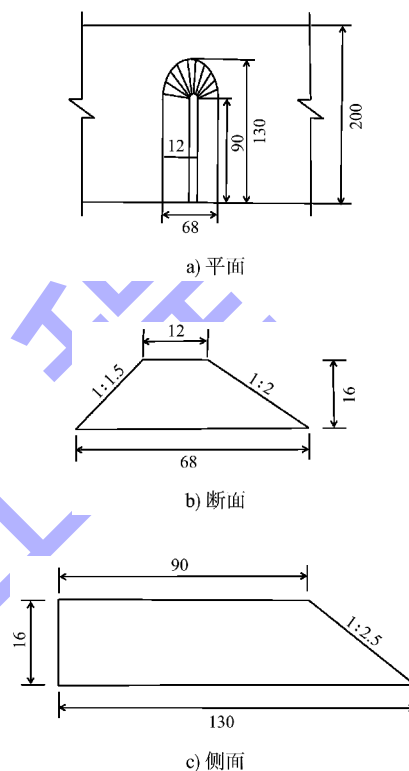


图 2 模型丁坝坝体布置 (单位: cm)

丁坝块石采用天然材料，为保证与原始丁坝块石起动相似，根据流速比尺，确定模型丁坝块石粒径起动流速后，依据《航道整治工程技术规范》10.10.3.1 公式计算出块石粒径为 2.5 ~ 4.0 cm。为模拟抛石丁坝块石走失情景，考虑水槽流量限制及块石尺寸的影响，模型丁坝坝顶长度采用 90 cm，模型布置见图 3。

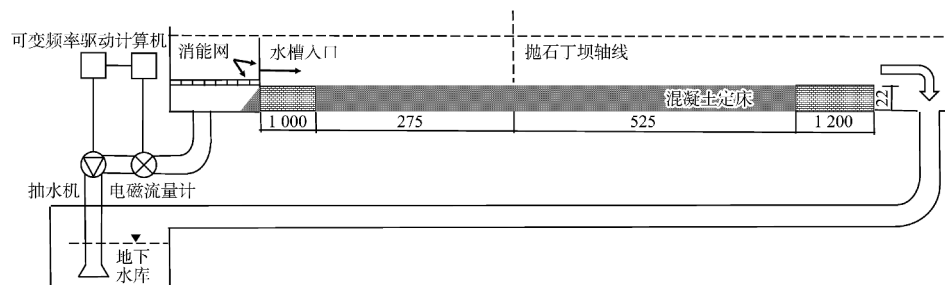


图 3 模型布置 (单位: cm)

块石走失监测采用自主研发的智能块石走失监测技术。智能块石中的传感器采用定制小体积加速度传感器, 采样频率 200 Hz, 尺寸为 15 mm×15 mm×2.3 mm。考虑到水下无线传输数据丢失问题及传感器尺寸的影响, 传感器舍弃电池和储存卡的硬件, 采用有线传输方式。智能块石选择模拟抛石丁坝块石中最常见形状, 如图 4a) 所示, 块石形状接近长方体, 最长边尺寸为 2.0 cm×1.6 cm×3.5 cm, 密度为 2.438 kg/m³。制作的智能块石与天然块石形状和密度一致, 见图 4b)。加速度传感器采样分辨率为 0.1 mg, 智能卵石采集加速度数据可达 0.098 066 cm/s² 的分辨率; 传感器精度为 1 mg。

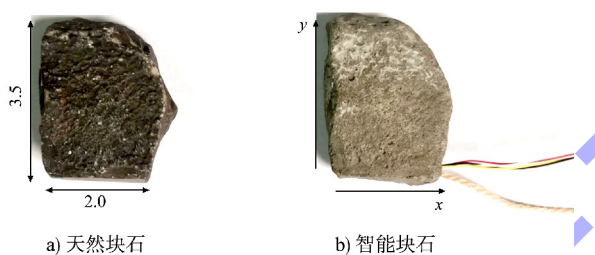
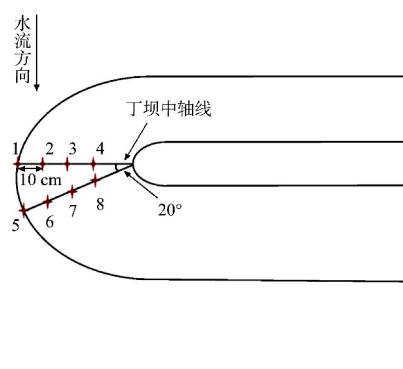


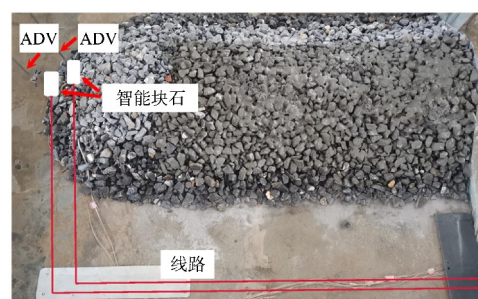
图 4 智能块石设计 (单位: cm)

抛石丁坝坝头中轴线区域的块石易走失, 故将智能块石安装在中轴线坝头及下游位置, 共设置 8 个测量点, 相邻测量点间距为 10 cm, 测量点布置见图 5a)。将智能块石放置于测量点上, 监测其运动过程和局部流速。为防止电线干扰块石运动, 将电线固定在智能块石下游。局部流速用声学多普勒流速仪 (ADV) 测量, 采样频率 100 Hz, 仪器安装布置见图 5b)。本试验目的为监测坝头块石走失情况, 故将丁坝坝身混凝土固化, 以消除坝身损毁对坝头监测的影响。

试验在 20 a 一遇的非恒定流条件下进行水槽试验, 观察智能块石的运动情况。由于近床湍流作用以及泥沙在床面位置几何条件的随机性, 使块石运动过程变得随机, 故每点测量 4 次。为避免过多 ADV 影响智能块石运动, 故每组非恒定流过程只测量 2 点的振动加速度和局部流速。试验完成 8 点测量需要重复 16 次水槽试验, 采集 32 组数据。



a) 测量点



b) 仪器安装

图 5 智能块石布置

3 块石走失监测分析

3.1 块石运动状态

试验数据显示大部分块石在走失前会产生振动响应, 故利用静力学模型分析块石走失问题并不合理, 基于此相关学者提出了泥沙动力学模型。考虑单向流振动情况, 描述单颗粒泥沙运动的方程为:

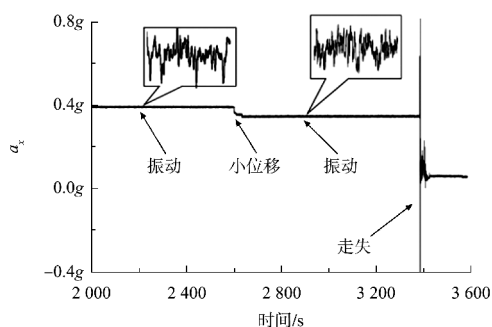
$$F_{D,i} - (W_i - F_{L,i}) \tan \varphi = m_i \frac{du_i}{dt} = m_i a_i \quad (2)$$

式中: $F_{D,i}$ 为拖曳力, $F_{L,i}$ 为上举力, W_i 为重力, m_i 为单颗粒泥沙质量, φ 为摩擦角, $\tan \varphi = u$ 为摩擦系数, u_i 为泥沙在水流作用下运动的速度, t 为时间, a_i 为泥沙振动加速度。

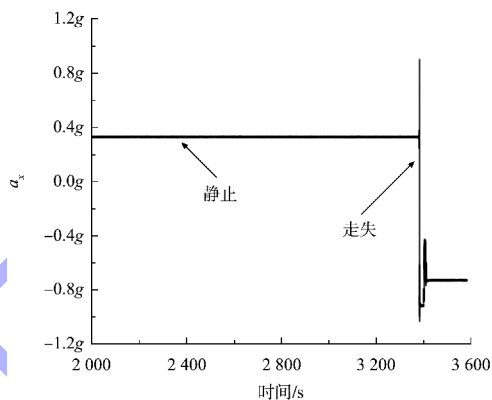
由颗粒的动力方程可知, 颗粒振动受拖曳力、上举力、重力的影响, 产生典型的非线性振动。受流速影响, 3 个力的大小和方向发生非线性变化, 而块石床面位置和粗糙度的不同导致块石运动出现随机现象。以往试验研究均假定块石走失前静止不动, 但实际情况复杂得多。本文首次提出加速度传感器监测块石运动过程的方法, 不仅能判断块石的走失情况, 还反映泥沙走失前的运动情况。

图6为4组智能块石 x 方向加速度的数据。由图可知,1号块石前期静止不动,随着流量增加,紊流增强, a_x 围绕基线(重力加速度)上下波动,块石振动;随流量继续增大,振动加速度增强;局部流速 $v=65.2\text{ cm/s}$ 时,基线突变,块石走失。4号块石前期静止不动,随流量增加,基线有微小变化,表明块石轻微滑动;当流量达到洪峰值、 $Q=155.5\text{ L/s}$ 、 $v=65.7\text{ cm/s}$ 时,基线突变,块石走失。6号块石产生振动加速度(a_c),块石原位振动,但并未走失;随流量增加,基线有轻微变幅,块石产生小位移;块石轻微滑移后继续原位振动,当最大洪峰通过, $v=52.9\text{ cm/s}$ 时,基线突变,块石走失。7号块石前期静止不动,当流量达到洪峰值、 $v=37.2\text{ cm/s}$ 时,基线突变,块石走失。

分析32组加速度数据,块石的运动状态包括静止、滑移、振动、走失4种。试验得出的块石运动结果与人工观察的情况一致,表明加速度传感器监测块石运动方法可行,数据真实有效。



c) 6号测量点

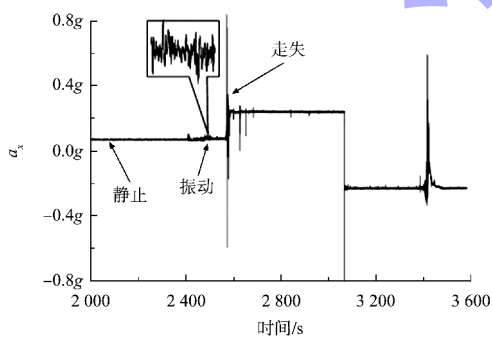


d) 7号测量点

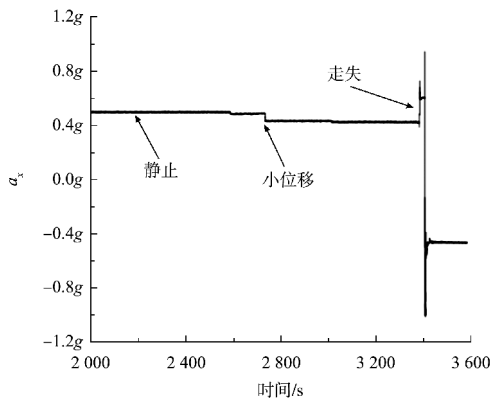
图6 智能块石的加速度数据

3.2 块石走失特性

统计分析每个测量点的4组加速度数据。1号测量点的4组工况中,受床面位置几何条件的影响,智能块石的起动时间和起动流速不同,说明块石起动具有一定的随机性。虽然1号点的块石起动时间不同,却早于其他测量点。因为底部水流遇到丁坝发生绕射,坝头阻力急剧减小,水流动能增大,导致1号块石最先走失。随着洪水持续进行,坝头靠近河床5号测量点的智能块石相继走失。5号测量点的4组工况中,3组工况的块石在同一时间段走失,剩余1组推迟了150 s,其起动流速相差不大。当最大洪峰过坝时,坝头中轴线4、3号测量点的块石受下潜水流和绕流作用最先走失,随即2、8、7、6号测量点的智能块石走失。除去坝头靠近河床的1号和5号最早走失外,剩余6个测量点、24组工况的智能块石均在最大洪峰时期走失。试验结果表明加速度传感器准确测量了丁坝坝头块石的走失情况。



a) 1号测量点



b) 4号测量点

3.3 块石振动特性

试验结果显示, 智能块石在走失前会产生振动响应。故分析块石振动特性有利于理解丁坝块石走失机理, 为泥沙起动问题提供参考。块石振动主要为受水流激励作用产生振动响应, 但由于水流的紊动性以及颗粒形状、位置等因素的影响, 导致块石振动为随机振动, 振动物理量不能用确定的时间函数表达, 因此本文将智能块石走失前的原位振动数据进行时域分析。

32 组加速度数据中有 22 组的智能块石产生振动, 其加速度值各异。采集 22 组块石走失前的加速度值, 每组样本数量 $N=6\ 000$, 采集时间 $t=30\text{ s}$ 。将 a_x 减去 g_x (基线) 得到智能块石 x 方向的振动加速度 $a_{e,x}$ 。时域分析发现块石振动加速度概率分布 PDF 图符合正态分布函数 (图 7)。相关研究结果表明, 近底水流瞬时流速近似服从正态分布, 故块石振动与水流作用具有强相关性, 块石振动的根本原因在于水流的脉动作用。

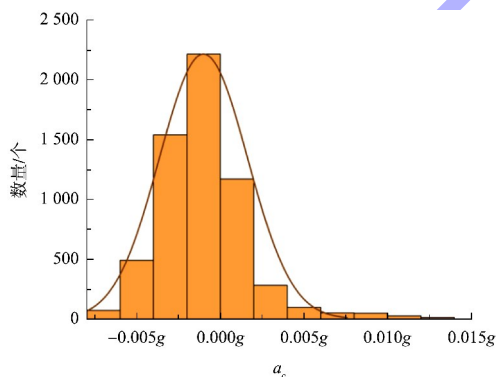


图 7 振动加速度概率分布

4 结论

1) 提出了抛石丁坝块石走失监测方法, 该方法能实时采集水下块石运动加速度, 判定块石运动情况, 从而分析坝体水毁程度, 及时采取补救措施, 维持抛石丁坝功能。

2) 加速度传感器采集的数据包含重力加速度 (g) 和振动加速度 (a_e)。振动加速度产生是因为块石受湍流作用, 产生振动或来回摆动; 而重力加速度值 (基线) 产生突变, 表明块石走失。

3) 块石振动加速度的概率分布符合正态分布, 继承湍流波动的随机性, 表明局部湍流在块石振动方面具有显著的动力学意义。智能块石监测方法为深入研究抛石丁坝损毁机理和泥沙起动问题提供了重要参考。

4) 水槽试验验证了智能块石监测方法的有效性, 但真实河道比实验室水槽情况更加复杂, 故该监测方法尚需进一步实地验证。

参考文献:

- [1] 喻涛, 王平义, 陈里, 等. 非恒定流作用下丁坝坝体块石运动特点分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(3): 40-44.
- [2] PAROLA A C. Stability of riprap at bridge piers [J]. Journal of hydraulic engineering, 1993, 119 (10): 1080-1093.
- [3] 缙元有. 河道整治工程根石走失的力学分析研究[J]. 人民黄河, 2000, 22(4): 4-5.
- [4] 张玮, 瞿凌峰, 徐金环. 山区河流散抛石坝水毁原因分析[J]. 水运工程, 2003(4): 10-12.
- [5] 陈小莉, 马吉明. 竖轴旋涡对丁坝坝头块石颗粒起动的影响[J]. 水力发电学报, 2007, 26(5): 97-101, 79.
- [6] 喻涛. 非恒定流条件下丁坝水力特性及冲刷机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [7] 韩林峰, 王平义, 刘怀汉, 等. 基于水毁体积比的抛石丁坝安全性判别分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(2): 201-206.
- [8] 任晶轩, 胡杰龙, 王平义, 等. 非恒定流作用下的抛石丁坝可靠度研究[J]. 水运工程, 2019(4): 102-109.
- [9] HAYDEN J T, PULEO J A. Near real-time scour monitoring system: application to Indian River inlet, Delaware [J]. Journal of hydraulic engineering, 2011, 137(9): 1037-1046.
- [10] FALCO F D, MELE R. The monitoring of bridges for scour by sonar and sediment [J]. NDT 8. E international: independent nondestructive testing and evaluation, 2002, 35(2): 117-123.
- [11] DENG L. Bridge scour: prediction, modeling, monitoring, and countermeasures-review [J]. Practice periodical on structural design and construction, 2010, 15(2): 125-134.

(下转第 177 页)