

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.03.006

堰塞湖土料冲蚀特性测量系统研究

王琳, 李炎隆, 武钰森

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 我国堰塞湖呈现大规模、高频率的趋势,一旦溃决,极易形成灾害链,威胁下游人民群众生命财产安全。冲蚀是堰塞湖溃决失稳的主要因素之一,定量分析冲蚀过程是揭示堰塞湖土料冲蚀特性的重要挑战。为定量测量堰塞湖土料的冲蚀特性,包括冲蚀剪应力和冲蚀率,本文研发了一种新的土料冲蚀特性测量系统。该测量系统包括圆筒型冲蚀试验设备(CETA)和冲蚀剪应力计算方法。CETA 主要由结构系统、传动系统、冲蚀试验系统、清淤循环系统、控制和数据采集系统组成,用于测量冲蚀流速与冲蚀率之间的关系。针对易贡堰塞湖的单粒径土料开展了冲蚀试验,结果表明,该装置的冲蚀率试验可靠,与 Briaud 的实验结果一致,可用于分析冲蚀剪应力。提出了冲蚀剪应力的精确计算方法,建立了堰塞湖土料冲蚀率与冲蚀剪应力的双曲线冲蚀模型,为堰塞湖溃决洪水分析提供了技术参考。

关键词: 冲蚀; 临界冲蚀剪应力; 圆筒型冲蚀试验装置

中图分类号: P642.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2020)03-0307-09

Research on measurement system of soil erosion characteristics for barrier lake study on the measurement system of the erosion characteristics of the earth material in the barrier lake

WANG Lin, LI Yanlong, WU Yumiao

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an university of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In recent years, the barrier lakes in China have shown a trend of large-scale, high frequency, mass occurrence, and increasing risk. The barrier lake, if out of control, will pose a great threat to the downstream. Erosion is one of the main factors of landslide and instability of the barrier lake. A quantitative analysis of erosion process is an important challenge to revealing the erosion characteristics of dammed lake soil. To quantitatively measure the soil erosion characteristics of the barrier lake including the critical shear stress and the erosion rate, a new measurement system is proposed. The measurement system contains a cylindrical erosion test apparatus (CETA) and a method for calculating shearing stress. The CETA is designed to measure the relationship between the velocity and erosion rate, which is mainly composed of a structure system, a transmission system, an erosion test system, a desilting circulatory system, and a control and data acquisition system. By the proposed new method, single-size soil samples from the Yigong landslide-barrier dam-lake have been collected for erosion tests. It is noted that the erosion rate from the apparatus is reliable, which is at the same order as that of the experimental results by Briaud. This apparatus can be utilized to analyze the shear stress. The hyperbolic relationship between erosion rate and shear stress is found by proposing the accurate calculation method of shear stress, providing a technical reference for the analysis of dam break flood.

Key words: erosion; critical erosion shear stress; cylindrical erosion test apparatus

收稿日期: 2020-08-27; 网络出版日期: 2020-09-29

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200928.1706.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51909214); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-577)

第一作者: 王琳,女,博士,讲师,研究方向为堰塞坝溃决机理基础理论研究。E-mail: ruoshuiya@163.com

通信作者: 李炎隆,男,博士,教授,研究方向为水利工程安全评价与预警。E-mail: liyanlong@xaut.edu.cn

堰塞湖是一种典型的地质灾害,具有坝体结构松散、几何形态各异、溃决风险高、溃决致灾后果严重等特点。近年来,我国堰塞湖呈现大规模、高频率、群发性、风险持续增加的趋势,是目前堰塞湖溃决数量最多的国家^[1]。堰塞湖一旦溃决,极易形成灾害链,威胁下游人民群众的生命财产安全^[2]。

据统计^[3],9%的堰塞湖在1小时内溃决,34%在1天内溃决,67%在1个月内溃决。2000年4月,易贡堰塞湖^[4]形成,溃决时峰值流量达到94 810 m³/s。2008年汶川特大地震造成257处堰塞湖,其中最具有代表性的是唐家山堰塞湖^[5]和小岗剑堰塞湖^[6],溃决洪峰分别达到6 500 m³/s和3 950 m³/s,使得近百万人的生命财产安全受到威胁。2018年白格堰塞湖更是两次堵塞金沙江上游干流^[7],溃决洪峰流量分别达到10 000 m³/s和31 000 m³/s^[8-9],导致下游在建的苏洼龙水电站围堰拆除,叶巴滩、拉哇、巴塘等在建水电站工程延期。

冲蚀是堰塞湖溃决的主要因素之一,定量分析冲蚀过程是揭示堰塞湖坝体土料冲蚀特性的重要挑战^[2]。土料的冲蚀特性以冲蚀流速(冲蚀临界剪应力)和冲蚀率表征。水流对土体表面颗粒施加剪应力,当该剪应力超过临界值时,土料发生冲蚀,对应的水流平均速度为冲蚀流速。冲蚀流速决定了土体冲蚀开始和终止的时间,是影响冲蚀率的重要参数。由于冲蚀率与剪应力的关系均呈现不同形式,进而导致溃决洪水分析计算结果极为不稳定,有时甚至不收敛。以唐家山堰塞湖为例,作者分别选用 Einstein-Brown、Englund-Hensen、Du Boys 和 Meyer Peter & Muller 四种不同的冲蚀模型开展溃决洪水分析,通过与实测数据对比^[10],发现不同冲蚀模型计算出的溃决流量结果差距可达2~3倍。

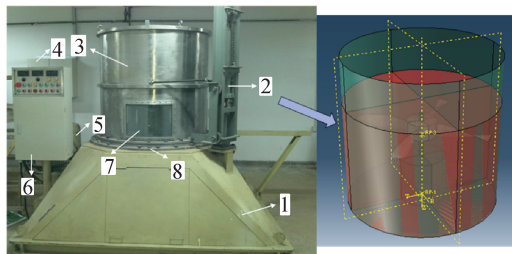
因此,许多不同的冲蚀特性测量系统被开发用以研究冲蚀特性。广泛应用的有原位流槽法^[11]、室内水槽法^[12]、旋转圆柱测试(Rotation Cylinder Test)^[13]、冲蚀装置(Erosion Function Apparatus, EFA)^[14]、孔洞冲蚀测试(Hole Erosion Test)^[15]、喷射冲蚀测试(Jet Erosion Test)^[16]等。Wahl^[17]在对 HET 和 JET 设备开展冲蚀试验对比时发现,JET 设备的冲蚀率比 HET 高一个数量级,临界剪应力却低两个或多个数量级。可见采用不同测量系统可得到不同的冲蚀模型,由于采用的系统不同,会产生较大差异。这些冲蚀测量系统没有标准,无法模拟实际溃决洪水流速,较难测量含有大体积岩石碎块的堰塞湖土料冲蚀特性。

为模拟堰塞湖溃决过程,本文拟提出一种新的土料冲蚀特性测量方法,并通过自行研制的圆筒型冲蚀试验设备(CETA)测量土料冲蚀特性。与上述测量系统相比,自行开发的 CETA 具有以下优点。首先,能提供7 m/s的最高流速,可满足溃决的快速变化过程。其次,可对粗料(砂、砾石)进行试验。第三,可针对最大粒径10 cm的土料开展冲蚀试验。本文将通过介绍圆筒型冲蚀试验设备,并选用易贡堰塞湖土料开展不同粒径的启动流速和冲蚀率的试验研究,建立土体冲蚀流速与冲蚀率之间的关系式,检测土料冲蚀特性测量方法的可靠性;并通过确定剪应力计算公式,建立堰塞湖土料冲蚀率与冲蚀剪应力间的冲蚀模型。

1 圆筒型冲蚀试验设备(CETA)结构与原理

1.1 结构

CETA 由结构系统、传动系统、冲蚀试验系统、清淤循环系统和控制及数据采集系统组成,见图1。传动系统包括电机和叶轮(见图2、3)。在实验中,电机旋转并驱动叶轮,叶轮又驱动圆筒中的水流来冲刷土料样品。调速电机额定电压为220 V,最高转速为1 400 r/min,由沉砂池、水泵和散水器组成的清淤循环系统可实现水循环。土颗粒被冲走后,随水流入沉砂池,沉砂池中的水通过水泵和散水器回到筒中,而土颗粒留在沉砂池中。在圆筒的四周专门设置了3个由有机玻璃制成的观察窗,可用于观察和拍摄土体冲蚀过程,每个观察窗的尺寸约为40 cm×28 cm。另外,考虑到圆筒涡流可能会影响冲蚀过程,所以在筒底部加装了一个圆柱体的灯环,使筒底接近一个环形水槽,降低涡流的影响,提高试验的观测和拍摄效果。试样可采用原状土或重塑土,也可以是细粒土或粗粒土。此圆筒的内径为104 cm,围绕中轴的照明灯环直径为35.4 cm,灯环的高度为30 cm。



注: 1—支撑架; 2—升降架; 3—不锈钢圆筒; 4—电力主控箱; 5—电机; 6—电器控制箱; 7—观察窗; 8—水准泡

图1 圆筒型冲蚀试验设备

Fig. 1 Cylindrical rotating erosion apparatus



图2 电机
Fig.2 Motor



图3 叶轮
Fig.3 Impeller

1.2 原理

设备通过电机带动叶轮转动,叶轮转动促使水流发生流动,水流启动后即冲刷已放置在圆筒底部的试样,一旦试样出现运动,此时的速度即为冲蚀启动流速。采集系统可记录流速和试样冲刷过程。设备的叶轮最大设计转速为 11 m/s,试验水深范围为 0.4~0.7 m。细粒料样品,如粘土、粉土和细砂,可放入土壤样品箱(见图 4(a)),类似于 EFA。在试验过程中,用提升系统将试样推进 5 mm,记录在一定水流速度下 5 mm 试样的冲蚀时间,可用于模拟真实堰塞湖坝体中的粗砾料土样(见图 4(b))。确定流速下的冲蚀率可通过计算固定时间内的土体冲蚀量计算。



(a) 细粒料 (b) 粗砾料

图4 土样的两种不同布置方式

Fig.4 Two different layout patterns of the soil sample

具体试验程序可简化为如下。

- 1) 土样制备。根据要求的密度和含水量制备土样,将制备好的土样放置在可升降的样品箱或圆筒底部。
- 2) 组装圆筒和摄像头。随后,将水注入圆筒,高度为 55 cm。

3) 打开相机并调整其位置。

4) 打开主电源,启动设备进行预热。

5) 在冲蚀开始之前,旋转速度一直增加,并记录转速。

6) 通过采集系统测量并记录冲蚀流速和冲蚀速率。冲蚀率可由冲刷高度(5 mm)或测定时间间隔内的残余土料换算而成。

7) 根据试验要求,提高转速并重复步骤 6。

8) 测试结束后,关闭电源并清洁仪器。

2 冲蚀剪应力计算方法

2.1 叶轮转速与水流速度关系的标定

圆筒型冲蚀试验设备工作时,是电机带动叶轮转动,再通过水的介质作用,将速度传递到底部的试样上。通过水的传递作用,叶轮中心位置处的流速值与底部试样位置上的流速值存在差异,需要率定。考虑到圆筒设备是新装置以及它的特殊性,选用流速仪对试验设备进行率定。采用 FP111 型直读式流速仪(见图 5),通过测量冲蚀设备过水断面的不同位置在不同叶轮转速下的流速来对设备内部的流场进行率定,建立不同叶轮转速下设备内部流速场的分布特征,确定实测流速与叶轮转速的相关关系,图 6 为流速测定的测点位置示意图。



图5 FP111 直读式流速仪
Fig.5 FP111 reading type current meter

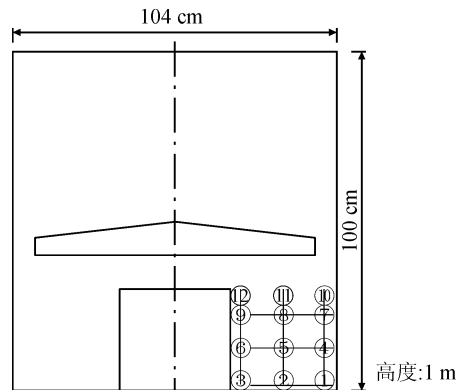


图6 测点分布图

Fig.6 Measuring point

表3 3、6、9、12四个点的率定结果
Tab.3 Calibration results of four points 3, 6, 9, 12

| 转速/ ($r \cdot s^{-1}$) | 不同测点号下的率定结果 | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | 3 | | 6 | | 9 | | 12 | |
| | 平均流速/ ($m \cdot s^{-1}$) | 最大流速/ ($m \cdot s^{-1}$) | 平均流速/ ($m \cdot s^{-1}$) | 最大流速/ ($m \cdot s^{-1}$) | 平均流速/ ($m \cdot s^{-1}$) | 最大流速/ ($m \cdot s^{-1}$) | 平均流速/ ($m \cdot s^{-1}$) | 最大流速/ ($m \cdot s^{-1}$) |
| 0.30 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 0.39 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| 0.49 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| 0.58 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |
| 0.68 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| 0.82 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 0.91 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 1.01 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.5 |
| 1.20 | 0.5 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.7 |
| 1.48 | 0.7 | 0.8 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.8 |
| 2.00 | 0.7 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 1.1 | 1.1 |
| 2.50 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 0.9 | 1.0 | 1.3 | 1.3 |

在率定过程中,发现无论水量多少,测点2(见图6)处的试样均为首先启动,验证了圆筒内部流速场的不均匀性。水流沿筒内叶轮的方向转动,流速分布主要由相对于叶轮的位置来决定,又因为2点的试样最先启动,故取各转速对应的2,5,8,11四个测点(见图6)最大流速值的平均值,得到转速与流速之间的换算关系。其换算关系式为:

$$y = 0.679x - 0.0103 \quad (1)$$

式中: y 为底部中心流速值($m \cdot s^{-1}$); x 为叶轮中心转速值($m \cdot s^{-1}$)。

2.2 冲蚀剪应力计算方法

文献[18]认为在无法直接测量冲蚀率和剪应力的情况下,最有效的替代方法是使用Moody图(见图7)估计其剪应力。

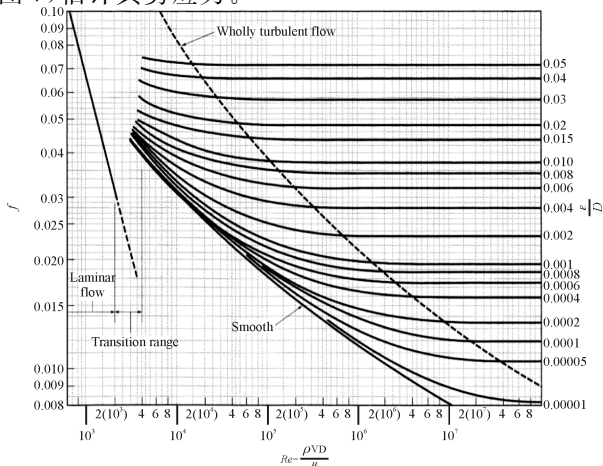


图7 Moody图

Fig.7 Moody chart

本研究对圆筒型冲蚀试验设备采用Briaud^[14]的剪应力计算公式:

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho_w V^2 \quad (2)$$

式中: τ 为剪应力($N \cdot m^{-2}$); ρ_w 为水的密度($1\ 000\ kg \cdot m^{-3}$); V 为平均速度; f 为摩擦系数。

可根据Moody图的3个参数: f 、 Re_c 、 $\frac{\epsilon}{D}$ (相对粗糙度,指粗糙部分突出的平均高度/管道直径)确定 f 。

Reynolds数 Re_c 计算公式为:

$$Re_c = \frac{VD}{\nu} \quad (3)$$

式中: D 为管道的水力直径; ν 为水在 $25^\circ C$ 时的运动粘度($10^{-6}\ m^2 \cdot s^{-1}$)。水力直径 D 为水力半径 R 的4倍,水力半径由流动面积除以润湿周长来定义,此公式表示为:

$$D = 2ab / (a + b) \quad (4)$$

则水力直径为:

$$D = \frac{2ab}{(a + b)} = \frac{2329}{214} = 0.1088 \quad (5)$$

当 $Re_c > 100\ 000$ 时,直接在Moody图中寻找对应的摩擦系数 f 。

当 $Re_c < 100\ 000$ 时,用:

$$f = \frac{0.316}{Re_c^{1/4}} \quad (6)$$

此方程为Blasius方程,式(6)可计算摩擦系数,不必使用Moody图查询。

3 试验结果讨论

见图8,选用易贡的两种典型土料开展冲蚀试验, $D_{50}=8\text{ mm}$, $D_{50}=10\text{ mm}$ 。样品的面积控制为 $1\ 075\text{ cm}^2$ 和 $1\ 085\text{ cm}^2$,结果见图9。试验中土体天然密度分别为 1.845 g/cm^3 和 1.585 g/cm^3 ,水深为 55 cm 。冲蚀率定义为单位时间内土料样品被冲走的高度,土料质量控制在 4.00 kg 和 3.72 kg 。

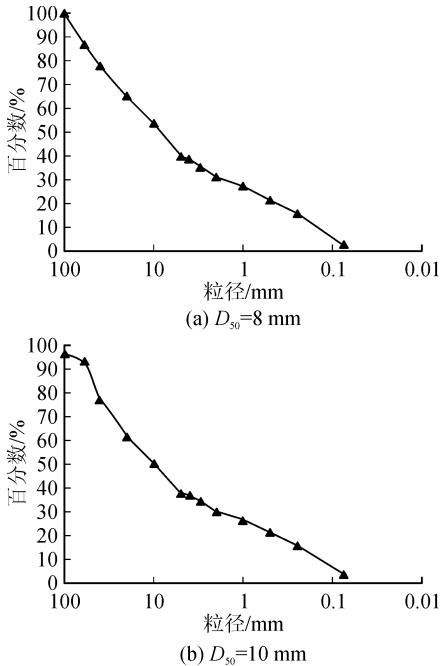


图8 易贡土料典型级配曲线

Fig. 8 Gain size distributions of two Yigong landslide dam materials

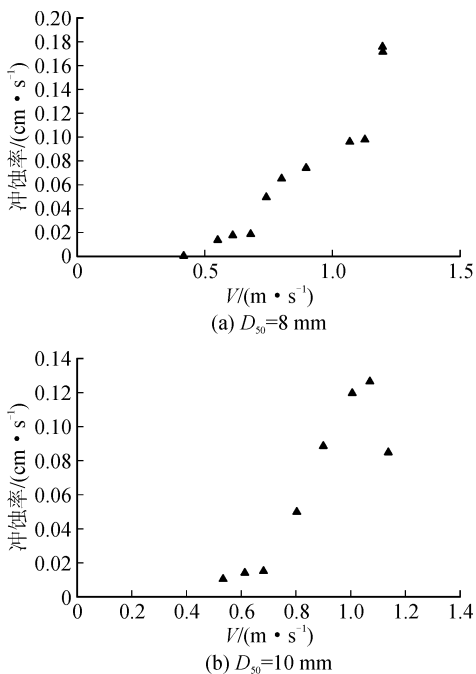


图9 典型粒径级配冲蚀率

Fig. 9 Erosion rate of particle size gradation

3.1 冲蚀率

Briaud^[14]运用EFA设备对干净粗砂开展了冲蚀率研究。此土体的 $D_{50}=3.375\text{ mm}$,其冲蚀率最大为 $12\ 000\text{ mm/h}=0.33\text{ cm/s}$,见图10,其冲蚀流速与冲蚀率呈双曲线函数关系。采用圆筒型冲蚀试验设备针对易贡的典型土料($D_{50}=8\text{ mm}$, $D_{50}=10\text{ mm}$)开展冲蚀试验,试验结果见表4和表5。分别对以上数据运用R语言进行线性回归,建立冲蚀流速和冲蚀率之间的关系式,见式(7)和式(8)。

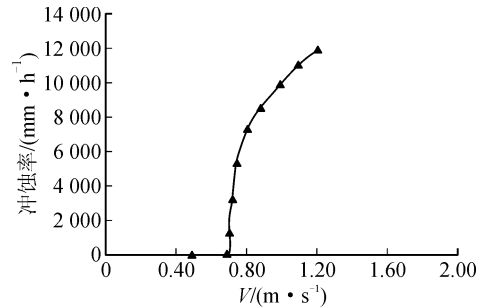


图10 砂土的冲蚀曲线

Fig. 10 Erosion curve for coarse sand

冲蚀流速与冲蚀率的关系,经回归后当 $D_{50}=8\text{ mm}$ 时:

$$y = 0.21095 - \frac{0.10569}{v} \quad (7)$$

当 $D_{50}=10\text{ mm}$ 时:

$$y = 0.21567 - \frac{0.11944}{v} \quad (8)$$

式中: v 为冲蚀流速(m/s), y 为冲蚀率(m/s)。

由图10可知,冲蚀流速与冲蚀率之间呈双曲线函数关系,试验中得到冲蚀率的最大值为 0.17 cm/s ,试验结果中的量级和图10中关于干净粗砂的量级一致,数值略小于文献中 0.33 cm/s 的数值。之所以出现此情况是因为EFA试验选用的材料为干净粗砂,而易贡主要堆积区材料除了块石、砂之外还包含一些粉尘及碎屑,所以试验结果稍小于Briaud^[14]的数值。

Briaud^[14]提到,EFA设备中的相同平均速度为 1 m/s ,砂的冲蚀率约是粘土的 $1\ 000$ 倍,表明不同土体的冲蚀率可能存在较大差异。文献中提到干净的砂和砾石的冲蚀率数值量为 10^4 mm/h ,与本文试验结果一致。

综上所述,试验结果显示冲蚀流速与冲蚀率呈双曲线函数关系,且有很大的相关性,通过结果分析认为圆筒型冲蚀试验设备的可靠性值得信赖,也验证了冲蚀率试验结果的可靠性,可用来开展冲蚀剪应力研究。

表4 粒径级配 $D_{50}=8$ mm 冲蚀率
Tab. 4 Erosion rate of particle size gradation $D_{50}=8$ mm

| 冲刷后土 湿重/g | 仪表转速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 时间/ s | 总含 水率 | 剩余 干重/g | 冲刷 干重/g | ΔH / cm | $\Delta H \cdot \Delta t^{-1}$ / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 实际流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|--------------|---|----------|----------|------------|------------|--------------------|---|---|
| 3 125 | 0.83 | 40.0 | 0.088 | 2 850.174 | 1 149.826 | 0.580 | 0.014 | 0.553 |
| 3 175 | 1.02 | 30.0 | 0.095 | 2 874.777 | 1 125.223 | 0.567 | 0.019 | 0.682 |
| 1 165 | 1.20 | 22.5 | 0.098 | 1 051.263 | 2 948.737 | 1.487 | 0.066 | 0.805 |
| 4 150 | 0.63 | 90.0 | 0.097 | 3 747.549 | 252.451 | 0.127 | 0.001 | 0.417 |
| 2 265 | 1.11 | 20.0 | 0.103 | 2 030.655 | 1 969.345 | 0.993 | 0.050 | 0.743 |
| 2 680 | 0.92 | 43.0 | 0.084 | 2 454.800 | 1 545.200 | 0.779 | 0.018 | 0.614 |
| 2 150 | 1.34 | 14.0 | 0.108 | 1 917.656 | 2 082.344 | 1.050 | 0.075 | 0.900 |
| 1 270 | 1.59 | 15.0 | 0.123 | 1 113.784 | 2 886.216 | 1.455 | 0.097 | 1.069 |
| 1 810 | 1.78 | 7.0 | 0.115 | 1 602.607 | 2 397.393 | 1.209 | 0.173 | 1.198 |
| 1 750 | 1.78 | 7.0 | 0.121 | 1 539.071 | 2 460.929 | 1.241 | 0.177 | 1.198 |
| 2 000 | 1.68 | 11.0 | 0.080 | 1 839.732 | 2 160.268 | 1.089 | 0.099 | 1.130 |

表5 粒径级配 $D_{50}=10$ mm 冲蚀率
Tab. 5 Erosion rate of particle size gradation $D_{50}=10$ mm

| 冲刷后 土湿重/g | 仪表转速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 时间/ s | 总含 水率 | 剩余 干重/g | 冲刷 干重/g | ΔH / cm | $\Delta H \cdot \Delta t^{-1}$ / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 实际流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|--------------|---|----------|----------|------------|------------|--------------------|---|---|
| 1 789 | 1.69 | 14.0 | 0.072 | 1 660.033 | 2 059.967 | 1.198 | 0.086 | 1.137 |
| 1 910 | 1.59 | 9.0 | 0.084 | 1 749.587 | 1 970.413 | 1.146 | 0.127 | 1.069 |
| 1 135 | 1.49 | 12.8 | 0.056 | 1 071.538 | 2 648.462 | 1.540 | 0.120 | 1.001 |
| 1 650 | 1.34 | 14.0 | 0.041 | 1 582.862 | 2 137.138 | 1.243 | 0.089 | 0.900 |
| 2 750 | 1.02 | 40.0 | 0.046 | 2 623.726 | 1 096.274 | 0.637 | 0.016 | 0.682 |
| 2 700 | 0.92 | 43.0 | 0.037 | 2 600.282 | 1 119.718 | 0.651 | 0.015 | 0.614 |
| 1 850 | 1.20 | 22.5 | 0.041 | 1 774.362 | 1 945.638 | 1.131 | 0.050 | 0.805 |
| 3 050 | 0.80 | 40.0 | 0.035 | 2 942.508 | 777.492 | 0.452 | 0.011 | 0.533 |

3.2 冲蚀剪应力

参照 EFA 计算公式、圆柱的剖面为长方形,计算湿周,参考公式(2)~(6)计算剪应力,并采用回归方程寻找冲蚀流速、冲蚀率和冲蚀剪应力 τ 之间的关系。其冲蚀流速、冲蚀率和冲蚀剪应力之间关系见表 6 和表 7。

冲蚀流速与冲蚀剪应力的关系,经回归后当 $D_{50}=8$ mm 时指数曲线为如下:

$$y = 0.13571 - \frac{0.08491}{\tau} \quad (9)$$

当 $D_{50}=10$ mm 时指数曲线为如下:

$$y = 0.13167 - \frac{0.10153}{\tau} \quad (10)$$

式中: τ 为冲蚀剪应力($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$); y 为速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

表6 $D_{50}=8$ mm 时冲蚀速度与冲蚀剪应力的关系

Tab. 6 Relationship between velocity and critical shear stress in $D_{50}=8$ mm

| 速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 冲蚀率/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 剪应力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$) |
|---------------------------------------|---|--|
| 0.553 | 0.014 | 0.773 |
| 0.682 | 0.019 | 1.116 |
| 0.805 | 0.066 | 1.489 |
| 0.417 | 0.001 | 0.472 |
| 0.743 | 0.050 | 1.297 |
| 0.614 | 0.018 | 0.929 |
| 0.900 | 0.075 | 1.810 |
| 1.069 | 0.097 | 3.859 |
| 1.198 | 0.173 | 4.846 |
| 1.198 | 0.177 | 4.846 |
| 1.130 | 0.099 | 4.313 |

表7 $D_{50}=10$ mm 时冲蚀速度与冲蚀剪应力的关系Tab. 7 Relationship between velocity and critical shear stress in $D_{50}=10$ mm

| 速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 冲蚀率/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 剪应力/($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$) |
|---------------------------------------|---|--|
| 1.137 | 0.086 | 4.688 |
| 1.069 | 0.127 | 4.145 |
| 1.001 | 0.120 | 3.635 |
| 0.900 | 0.089 | 1.810 |
| 0.682 | 0.016 | 1.116 |
| 0.614 | 0.015 | 0.929 |
| 0.805 | 0.050 | 1.489 |
| 0.533 | 0.011 | 0.724 |

3.3 冲蚀率剪应力模型

本课题组^[19]基于唐家山实测的冲蚀率,认为土体材料抵抗冲蚀时,不应有无限“强度”,建议采用双曲线模型,其形式如下:

$$\dot{z} = \Phi(\tau) = \frac{v}{a + bv} \quad (11)$$

式中: v 为扣除临界剪应力后的剪应力:

$$v = k(\tau - \tau_c) \quad (12)$$

k 为在剪应力 τ 范围内允许 \dot{z} 接近 \dot{z}_{ult} 的单位变换因子。

双曲线模型的冲蚀率是具有物理意义的,认为土体包含一定的强度,当冲蚀达到一定程度后,将不再增加(见图11)。即双曲线有一当 v 接近无限值时的渐进线,即 $d\dot{z}/d\tau$ 的极值 $1/b$ 。其中单位变换因子 k 为100,其含义为 v 等于0时曲线的斜率。

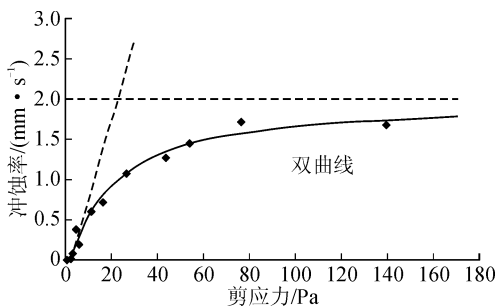


图11 堰塞湖土料冲蚀剪应力与冲蚀率的关系图
Fig. 11 Relationship between erosion shear stress and erosion rate of dam-lake soil

在所有溃决洪水分析方法中,研究人员多选用继承了泥沙-水力学领域中开发的土体冲蚀模型,如Engelund-Hansen、Meyer-Peter-Mueller及Einstein-Brown,分别应用于计算机程序MIKE11模型、BREACH模型和BEED模型。这些模型多用来评价低流速河床上的泥沙运输模式,高速溃决洪水过程中的土体冲蚀行为很少研究。由于流速的定义关系,冲蚀剪应力与冲蚀率有很大的相关性,较快的流速产生

较大的冲蚀剪应力。上述大多数用于测量粘性土体和岩石的冲蚀率分析表达式包含大量参数。Trammell^[20]认为基于这些变量参数准确的预测其相关性是不切实际的,而且评估大量参数导致成本过高。

Einstein^[21], Partheniades^[22], van Prooijen和Winterwerp^[23]都认为冲蚀率可由与冲蚀剪应力相关的函数关系式表示。Slagle^[24]还认为可运用类似EFA-SRICOS或Miller-Sheppard模型^[24-25]方法,使用纯经验公式模拟冲蚀率剪应力关系。因此,纯粹的经验方法可用来拟合冲蚀率-冲蚀剪应力关系。van Prooijen和Winterwerp认为在低于原定义的临界剪应力时仍可能发生冲蚀;在大于临界应力时,该线性近似仍是有效的。因此,通过首先计算冲蚀率,再绘制其与剪应力的函数关系图,建立冲蚀率与冲蚀剪应力的冲蚀模型。

Briaud^[14]提出,在干净的砂和砂砾中,影响 τ_c 的主要土体参数是由 D_{50} 引起的。本文改变 D_{50} 的大小,研究冲蚀率和冲蚀剪应力的关系。冲蚀率与冲蚀剪应力数值见表3和表4。通过对冲蚀率和冲蚀剪应力的关系回归后公式见下。

$D_{50}=8$ mm:

$$y = 0.13571 - \frac{0.08491}{\tau} \quad (13)$$

$D_{50}=10$ mm:

$$y = 0.13167 - \frac{0.10153}{\tau} \quad (14)$$

式中: τ 为剪应力($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$); y 为速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

本课题组^[19]基于唐家山实测的冲蚀率,提出了冲蚀率-剪应力双曲线模型,认为土体材料抵抗冲蚀时,不应有无限“强度”。上述研究证实冲蚀率与剪应力之间呈双曲线函数关系。当剪应力较小时,冲蚀率与剪应力存在较强的双曲线函数关系。

4 结论

土料冲蚀特性可以用水流引起的冲蚀剪应力和土料冲蚀函数(即冲蚀速率与剪应力曲线)表征。本文介绍了一种新型土料冲蚀测量系统,该测量系统包括一个圆筒型冲蚀试验装置(CETA)和一种计算剪切应力的方法。所研制的CETA具有空间小、耗水量少、流速高等优点,并能对 D_{50} 小于30 mm的土体颗粒进行测量。运用此系统开展了易贡土料的启动流速、冲蚀率、冲蚀剪应力研究。

试验结果表明:该装置的冲蚀率结果可靠,与原有文献的冲蚀率数值处于同一量级,与Briaud的实验结果一致,可用来进行堰塞湖土料冲蚀率-剪应力

分析;提出了堰塞湖土料冲蚀剪应力的精确计算方法,发现冲蚀率与剪应力呈现双曲线关系,建立了堰塞湖土料双曲线冲蚀模型,可应用于堰塞湖溃决分析模拟。

参考文献:

- [1] 蔡耀军,杨兴国,张利民,等. 堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发研究构想与成果展望[J]. 工程科学与技术,2020,52(2):10-18.
CAI Yaojun, YANG Xinguo, ZHANG Liming, et al. Research framework and anticipated results of the rapid detection of risk assessment, research and development of emergency disposal technology and equipment of dammed lakes [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(2): 10-18.
- [2] CHEN Chen, ZHANG Limin, XIAO Te, et al. Barrier lake bursting and flood routing in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon in October 2018[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124603.
- [3] SHEN Danyi, SHI Zhenming, PENG Ming, et al. Longevity analysis of landslide dams[J]. *Landslides*, 2020, 17(8): 1797-1821.
- [4] WANG Lin, CHEN Zuyu, WANG Naixin, et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode[J]. *Engineering Geology*, 2016, 209: 70-81
- [5] ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, MEI Shiang, et al. Numerical simulation of landslide dam breaching due to overtopping [J]. *Landslides*, 2018, 15 (6): 1183-1192.
- [6] CHEN Shujing, CHEN Zuyu, TAO Ran, et al. Emergency response and back analysis of the failures of earthquake triggered cascade landslide dams on the Mianyuan River, China [J]. *Natural Hazards Review*, 2018, 19(3): 05018005.
- [7] 邓建辉,高云建,余志球,等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. 工程科学与技术,2019,51(1):9-16.
DENG Jianhui, GAO Yunjian, YU Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 9-16.
- [8] CAI Yaojun, CHENG Huaiyun, WU Shuaifeng, et al. Breaches of the Baige barrier lake: emergency response and dam breach flood[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2020, 63: 1164-1176.
- [9] ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, WANG Lin, et al. Back analysis of breaching process of Baige landslide dam[J]. *Landslides*, 2020, 17(7): 1681-1692.
- [10] 周兴波,陈祖煜,李守义,等. 不同推移质输沙模型在溃决洪水模拟中的对比分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(6):1097-1108.
- [11] MOSTAFA T S, IMRAN J, CHAUDHRY M H. Erosion resistance of cohesive soil[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2008, 46(6): 777-787.
- [12] AL-RIFFAI M. Experimental study of breach mechanics in overtopped noncohesive earthen embankments [D]. Ottawa: University of Ottawa, 2014.
- [13] LIM S S. Experimental investigation of erosion in variably saturated clay soil[D]. Sydney: The University of New South Wales, 2006.
- [14] BRIAUD J, TING F, CHEN H, et al. SRICOS: prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(4): 237-246.
- [15] WAN C F, FELL R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130 (4): 373-380.
- [16] HANSON G, COOK K, SIMON A. Determining erosion resistance of cohesive materials[C]//Proceedings of the ASCE International Water Resources Engineering Conference, Seattle: 1999.
- [17] WAHL T L. Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(5): 389-397.
- [18] CROWLEY R, BLOOMQUIST D, SHAH F, et al. The sediment erosion rate flume (SERF): a new testing device for measuring soil erosion rate and shear stress[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012, 35(4): 649-659.
- [19] CHEN Zuyu, MA Liqiu, YU Shu, et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan Barrier Lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(4): 682-688.
- [20] TRAMMELL M A. Laboratory apparatus and methodology for determining water erosion rates of erodible rock and cohesive sediments [M/OL]. http://etd.fcla.edu/UF/UF0008980/trammell_m.pdf.
- [21] EINSTEIN H A, KRONE R B. Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1962, 67(4): 1451-1461.
- [22] PARTHENIADES E A. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1965, 91(1): 105-139.
- [23] VAN PROOIJEN B C, WINTERWERP J C. A stochastic formulation for erosion of cohesive sediments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C1): 104-118.
- [24] SLAGLE P. Correlations of erosion rate-shear stress relationships with geotechnical properties of rock and cohesive sediments[R]. FDOT Report No. BD-545, RPWO # 3. Gainesville: University of Florida, 2006.
- [25] SHEPPARD D M, BLOOMQUIST D, MARIN J, et al. Water erosion of Florida rock materials[R]. FDOT Report No. BC354 RPWO # 12. Tallahassee: Florida Department of Transportation, 2005.