

DOI: 10.11779/CJGE20240589

土体冲蚀特性试验设备研制与应用研究

卢洪宁¹, 钟启明^{*1,2,3}, 单熠博¹, 杨蒙¹, 胡亮⁴

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 土体冲蚀特性主要包括临界起动切应力和冲蚀速率两个指标, 是土石坝溃口流量和溃口形态演化的控制性要素。传统冲蚀试验通过将测量获取的断面水流流速转化为摩阻流速, 进而推求水流切应力。本文研发了采用桥式微应变切应力传感器直接获取水土交界面切应力的测试技术, 在此基础上研制了一套土体冲蚀特性试验设备, 该设备包括水动力系统、土体冲蚀系统和数据采集系统。水动力系统能够提供 0~6 m/s 的水流条件; 土体冲蚀系统利用切应力传感器直接记录切应力的动态变化, 通过将抬升装置与声波测距装置并联形成伺服位移控制系统, 实现试样高度的自动调整, 并实时监测冲蚀深度的变化; 数据采集系统记录水流切应力与冲蚀速率之间的关系。试验结果表明, 黏性土的冲蚀速率与水流切应力之间呈线性相关性, 黏性土临界起动切应力随着压实度和黏粒含量的增加而显著增加, 含水率对临界起动切应力影响较小。基于试验数据建立了黏性土临界起动切应力及冲蚀系数预测模型, 验证结果表明, 通过优化模型参数和引入更多土体相关特征, 模型能够较好地反映黏性土临界起动切应力及冲蚀系数与土体特性之间的关系, 为土石坝溃决模拟时坝料冲蚀参数的选择提供了科学依据。

关键词: 土体冲蚀设备; 水流切应力; 断面流速; 临界起动切应力; 冲蚀速率

中图分类号: TV122

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)10-2066-10

作者简介: 卢洪宁(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事土体冲蚀特性与土石坝溃决机理研究。E-mail: hnlu@nhri.cn。

Research on development and application of test equipment for measuring soil erosion characteristics

LU Hongning¹, ZHONG Qiming^{1,2,3}, SHAN Yibo¹, YANG Meng¹, HU Liang⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China; 3. Key Laboratory of Reservoir and Dam Safety, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The soil erosion characteristics mainly include two indexes: critical shear stress for incipient motion of soil and soil erosion rate, which are controlling factors of breach flow and breach morphology evolution during embankment dam breaching. Traditional erosion experiments deduce flow shear stress by converting measured sectional flow velocity into friction velocity. This study has developed an innovative technique for directly measuring shear stress at the water-soil interface by using a bridge-type micro-strain shear stress sensor. Based on this method, a device for measuring soil erosion characteristics has been developed. The soil erosion testing device includes a hydrodynamic system, a soil erosion system, and a data acquisition system. The hydrodynamic system can provide water flow conditions ranging from 0 to 6 m/s. The soil erosion system utilizes strain sensors to directly capture dynamic changes in shear stress. By connecting a lifting device in parallel with an acoustic distance measurement device, a servo displacement control system is formed. This setup allows for adaptive adjustment of the specimen height and real-time monitoring of changes in erosion depth. Validation tests indicate that erosion rate of cohesive soils has a good linear correlation with water flow shear stress. Critical shear stress of cohesive soils significantly increases with higher compaction and clay content, while the influence of water content on critical shear stress is minimal. The paper also proposed a predictive model for critical shear stress and erosion coefficient of cohesive soil based on experimental data. Validation

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22A20602, U24A20182); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y324006) This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U22A20602, U24A20182), the Fundamental Research Funds for Central Public Research Institutes (Grant No. Y324006).

收稿日期(Received): 2024-06-17 **修回日期(Revised):** 2025-01-16 **接受日期(Accepted):** 2025-02-27 **网络出版日期(Online):** 2025-02-28

***通信作者** (E-mail: qmzhong@nhri.cn)

results show that the model can accurately reflect the relationship between the critical shear stress, erosion coefficient, and soil properties by optimizing model parameters and incorporating more soil-related features, which provide a scientific basis for selecting erosion parameters for dam materials in simulations of earth-soil dam failure.

Key words: soil erosion testing device; flow shear stress; sectional velocity; critical shear stress; erosion rate

0 引言

水库大坝是重要的基础设施,在世界范围内被广泛修建,其主要功能是防洪、发电、灌溉和供水。在各种类型的水库大坝中,土石坝因其就地取材的经济性、对适应复杂地形和地质条件的适应性、以及施工的便利性而受到青睐。水库大坝在给人类社会带来巨大的经济效益的同时,也存在溃坝的风险^[1]。据水利部大坝安全管理中心统计^[2],1954 年 1 月—2023 年 12 月,中国共有 3558 座水库大坝发生溃决,其中 94.3%为土石坝。对国内外 3504 座土石坝的溃决原因调查发现^[3],水流漫顶、质量问题、坝坡失稳或综合因素是土石坝溃决的主要原因,占比分别为 48%, 35%, 4%, 13%。但无论何种诱因,土石坝的最终溃决模式均表现为漫顶或渗透破坏^[4-5]。然而,由于土体冲蚀特征的差异,即使在相同的洪水条件下,不同坝料的土石坝也表现出不同的溃口形态发展过程,这直接影响了溃口洪水流量过程^[6-7]。因此,研究土体的冲蚀特性对于土石坝溃决风险评估意义重大。

土体的冲蚀特性一般以临界起动切应力和冲蚀速率为表征^[8],临界起动切应力是溃口底床表面土颗粒由静止转变为运动状态时的最小切应力,冲蚀速率表示在一定的水流强度下一段时间内土体被冲刷损失的质量或高度。临界起动切应力反映土体冲蚀的开始,而冲蚀速率表征土体的可冲蚀性^[9]。学者们从不同角度对土体冲蚀特性进行了广泛的研究,并开发了一系列测试土体冲蚀特性的方法,如孔洞冲蚀试验^[10-11],射流冲蚀试验^[12-13],旋转圆柱冲蚀试验^[14-15]和水槽冲蚀试验^[16]。孔洞冲蚀试验是在土样内部挖孔,测量水流经预设孔后孔径的发展情况,一般用于研究渗透破坏时土体的冲蚀,但孔洞堵塞、孔径变化不均匀等因素对土体冲蚀的研究影响较大;射流冲蚀试验通过对土样表面进行射流冲击,根据冲蚀量推求土体冲蚀系数和临界起动切应力,但试验结果常表现出随机性,导致计算的冲蚀参数存在较大不确定性;旋转圆柱冲蚀试验通过在圆柱形土样周围施加旋转水流提供切应力来测量表面冲蚀,这种方法适用于重塑土样和原状土样,但该试验要求土样具有足够的塑性,以便保持其形状;此外,圆柱体内侵蚀土颗粒的积累可能会影响冲蚀速率测量的准确性。水槽冲蚀试验是研究土体冲蚀特性最常见的方法,近年来伴随着测试技术的发

展,在测量精度方面取得了显著进步。值得一提的是,由 Briaud 等^[17]开发的“冲蚀功能仪”(erosion function apparatus,简称 EFA)是一种被广泛认可的封闭水槽冲蚀设备,可测量土体冲蚀速率与水流速度(或界面切应力)之间的关系,但试验过程中以肉眼确定土样的冲蚀深度并手动控制样品提升。随后, Crowley 等^[18-19]对冲蚀功能仪进行了改进,研制了“泥沙冲蚀速率水槽”(sediment erosion rate flume,简称 SERF),该水槽使用具有不同粗糙度的圆盘来模拟土体表面,通过霍尔传感器测量水力作用在这些圆盘上引起的偏转,进而转换为剪切力。此外,由于测试管道的宽度为 3.5 英寸,泥沙冲蚀速率水槽对土样的测量能力仅限于较小颗粒尺寸的样品。表 1 总结了的常用水流切应力测量方法,但各类方法基本上依赖于间接测量,误差无法避免,目前仍缺乏能够直接测量水土界面切应力的设备。

表 1 常用的水流切应力测试方法
Table 1 Commonly used flow shear stress test methods

方法	作者	测试方法	方法简述	计算公式
孔洞冲蚀试验	文献 [10, 11]	间接测量	测量水头差	$\tau_t = \rho_w g s_t \frac{\phi_t}{4}$
射流冲蚀试验	文献 [12, 13]		测量冲刷坑的扩展	$\tau_i = C_f \rho_w U_0^2 \left(\frac{J_p}{J_i} \right)^2$
旋转圆柱冲蚀试验	文献 [14, 15]		测量扭矩	—
水槽冲蚀试验	文献 [16, 17]	替代测量	测量断面流速	$\tau = \frac{f \rho_w v^2}{8}$
	文献 [18, 19]		测量切应力	—

注: τ_t 为 t 时刻预设孔表面的水流切应力 (Pa); ρ_w 为水的密度; g 为重力加速度 (m/s^2); s_t 为 t 时刻土样上的水力梯度 (Pa/m); ϕ_t 为 t 时刻预设孔的直径 (mm); τ_i 为边壁处的水流初始切应力 (Pa); C_f 为摩擦系数; U_0 为喷嘴处的流速 (m/s); J_p 为势流核心区长度 (mm); J_i 为射流孔初始高度 (mm); τ 为水流切应力 (Pa); v 为断面流速 (m/s); f 为由雷诺数和相对粗糙度,通过穆迪图确定。

本文研制了一套土体冲蚀特性试验设备,与其它设备相比具有如下优点:①设备的切应力测量组件与土样直接接触,可直接测量水土界面处的水流切应力;②试验过程中冲蚀深度和切应力的测量协同进行,可

同时获取土体冲蚀率和水流切应力；③设备具有试验流速范围宽、操作简单、测量精度高、量程宽等特点，可用于黏性土和无黏性土冲蚀特性的研究。本文将详细介绍土体冲蚀特性试验设备的设计原理和测试方法，并通过黏性土试样冲蚀试验验证设备测试结果的合理性，同时基于试验结论提出黏性土临界切应力及冲蚀系数的预测模型。

1 土体冲蚀特性设备

1.1 设备组成

土体冲蚀特性试验设备由水动力系统、土体冲蚀系统和数据采集系统组成（图 1），设备各组件分段构造，便于拆卸和更换组件。

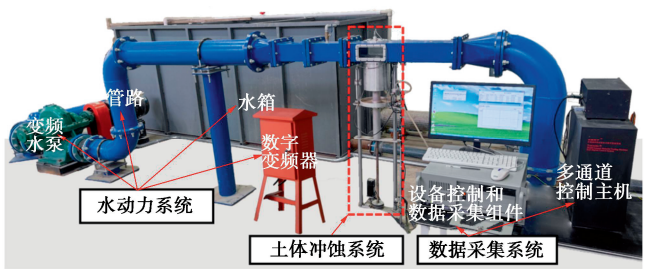


图 1 土体冲蚀特性试验设备

Fig. 1 Soil erosion testing device

(1) 水动力系统

水动力系统的主要功能是模拟特定的试验条件，调节流速和流量，为土体冲蚀试验提供持续且可控的水动力条件。水动力系统包括：水箱（图 2（a））、进水口（图 2（b））、出水口（图 2（c））、变频水泵（图 2（d））和数字变频器（图 2（e））。水箱尺寸为 3 m×1.5 m×1.8 m（长×宽×高），进水口和出水口的截面均为圆形，半径均为 200 mm；为了保证冲蚀过程中试验段水流的稳定，试验段的截面为矩形，尺寸为 200 cm×20 cm×10 cm（长×宽×高）；水泵由数字变频器控制，额定功率为 18 kW，频率范围为 0~60 Hz，可为试验提供 0~6 m/s 的水流流速。

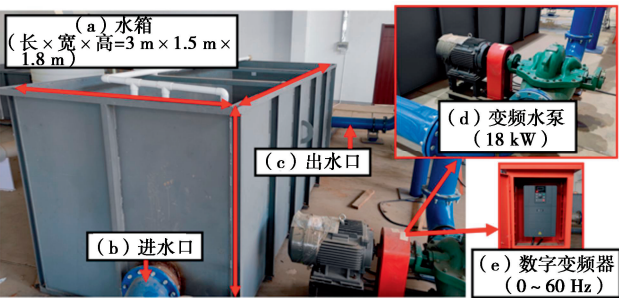


图 2 水动力系统

Fig. 2 Hydrodynamic system

(2) 土体冲蚀系统

土体冲蚀系统是设备的核心部件，主要包括：冲

蚀管道（图 3（a））、切应力测量组件（图 3（b））、试样提升组件（图 3（c））、流速测量组件（图 3（d））、距离测量组件（图 3（e））和土颗粒收集箱（图 3（f））。其中，试样直径最大为 150 mm，可对原状土或重塑土体进行取样，在冲蚀管道底部设置直径为 150 mm 的圆形试样通道，样品盘借助活塞穿过冲蚀管道底部的圆形通道进入试验段；土样托盘为可拆卸式连接切应力测量组件（包括应力传感器和支撑板），切应力测量组件直接固定在活塞上；电机驱动履带的旋转协调螺旋伸缩杆的伸展和收缩，从而控制土样的上升和下降；活塞和提升部件构成一个整体结构，通过两侧的钢柱固定在矩形试验段的下侧壁上，以确保样品的稳定性；双层橡胶密封圈贴于活塞侧壁，防止通道底部漏水和外部空气进入。在样品托盘截面的后部，安装了流速测量组件，实时监测土体冲蚀过程中的断面流速；在试验段管道顶部的测距组件为矩阵式分布的声波测距探头，通过记录探头与样品表面的垂直距离计算得到土样冲蚀高度，精度为±0.01 mm；为了保证试样冲蚀过程的连续性，通过编程将距离测量组件与试样抬升组件并联组成伺服位移控制系统，即根据来自声波探头的反馈信号可以自动且准确地获得样品的位置，同时调整试样抬升速率保持与水流经过试样的冲蚀速率一致，这样做的优点在于，一是避免类似装置在冲蚀过程中通过目测土样冲蚀高度再手动抬升试样产生的误差，二是最大减小试样高度与管道不一致对切应力测量造成的误差。土体冲蚀系统的工作原理如图 4 所示。

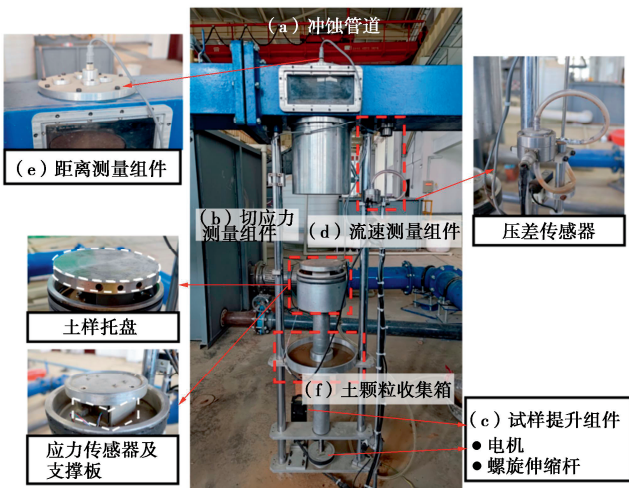


图 3 土体冲蚀系统组件示意图

Fig. 3 Diagram of soil erosion system

(3) 数据采集系统

数据采集系统是自行编制的数采分析软件，主要功能是自动记录土体冲蚀过程中的各项参数，该系统

与多通道控制主机、切应力传感器、流速传感器和距离测量组件相连, 可以在试验过程中实时监测和记录水温、变频器频率、水流切应力、冲蚀深度和断面水流流速, 并以参数曲线的形式呈现测试结果并存储试验数据, 数据采集系统界面如图 5 所示。为了能够在试验中观察和拍摄冲蚀过程, 在试验段的侧壁上安装了左右观察窗, 观测窗两侧放置了 LED 补光灯和高清摄像机用于记录试样实时冲蚀过程。

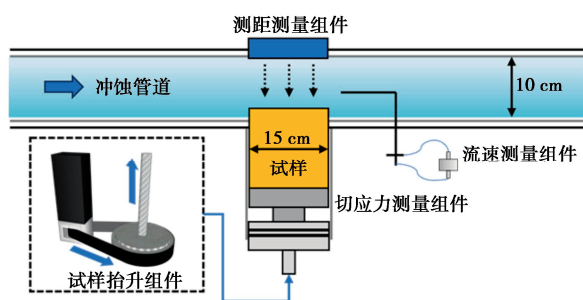


图 4 土体冲蚀系统工作原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of working principle of soil erosion system

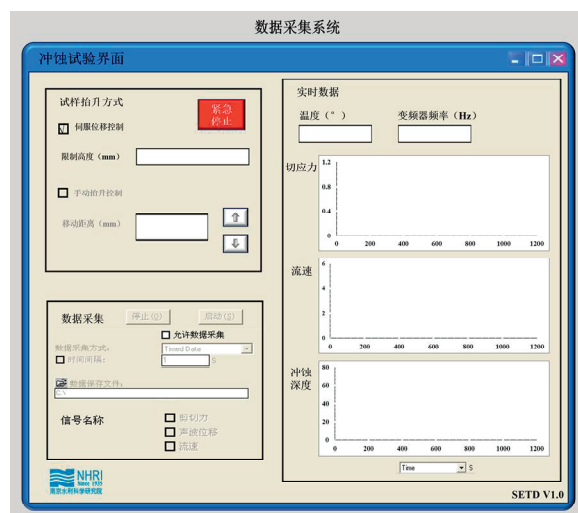


图 5 数据采集系统界面

Fig. 5 Schematic diagram of data acquisition system

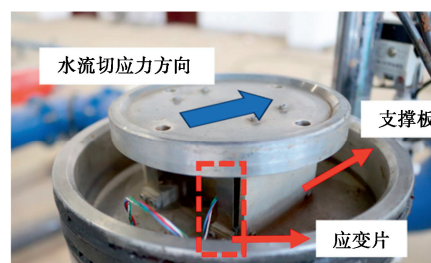
1.2 试验流程

科学有效的试验方法是试验准确性的关键, 土体冲蚀特性试验设备的试验流程如下: ①检查设备的密封性, 校准传感器参数; ②按试验要求准备土体试样, 将准备好的试样和试样盘固定在切应力传感器上; ③将试样放置在冲蚀管道中, 保证试样表面与管道底部水平, 冲蚀段初始高度为 0 mm。将冲蚀管道注满水, 等待 5~10 min; ④根据试验所需流速设置泵频, 打开摄像设备和 LED 灯; ⑤将土样推入水流之中, 根据试验要求利用伺服位移控制土样入水高度; ⑥当土样高度达到 0 mm 时结束冲蚀; ⑦重复步骤②~⑥; ⑧

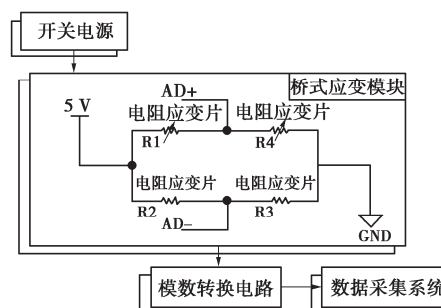
保存并导出试验数据。

1.3 水流切应力测试方法

土体临界切应力既是土石坝溃决起始的先决指标, 也是决定溃口形态发展的重要物理参数, 目前国内确定切应力最常用的方法是采用水力学的计算公式来间接计算切应力^[19], 计算过程较为繁琐, 且涉及界面流速与切应力的转化, 不可避免会增加结果的误差, 而本设备通过自主设计的桥式微应变切应力传感器来直接获得切应力, 测量结果直观, 测量组件包括应力传感器和支撑板组件, 4 个电阻应变片采用桥式电路并联, 并分别粘贴在应变片夹具的前后位置, 由螺丝固定上下两侧, 垂直支撑板安装在应变片夹具的中央和侧面位置, 以提供垂直支撑和保护功能。切应力测量组件照片如图 6 (a) 所示, 桥式电路示意图如图 6 (b) 所示。



(a) 切应力测量组件照片



(b) 桥式微应变切应力测量电路示意图

图 6 切应力测量组件

Fig. 6 Shear stress measuring component

在土体冲蚀过程中, 土样在水流方向上受到瞬时切应力, 电阻应变片受力发生线应变, 电阻应变片的电阻值发生相应的变化, 切应力传感器利用电阻丝的应变效应, 即将电阻变化转换成应变值, 从而确定冲蚀过程中的水流切应力。测量信息通过桥式电路中的模数转换电路传输到数据收集组件, 实现了水流切应力的非接触式测量。切应力传感器中电阻应变片的电阻可用下式计算:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \varepsilon \times S \quad (1)$$

式中: $\Delta R/R_0$ 为电阻的相对变化率; ε 为应变; S 为应

变片的灵敏度系数。

应变片的灵敏度系数是一个取决于应变片材料和几何形状的参数，一般在试验前通过校准得到。水流切应力 τ 与相应应变 ε 的关系可表示为

$$\tau = G \times \varepsilon \quad (2)$$

式中： G 为应变片的剪切模量 (Pa)。

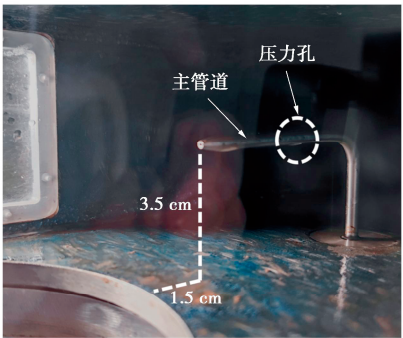
将式 (1) 代入式 (2)，可得

$$\tau = G \times \frac{\Delta R / R_0}{S} \quad (3)$$

利用式 (3)，通过数据采集系统，可以直接获得切应力与时间的关系。采用电阻应变片测量切应力，具有实时性强（反馈时间小于 0.01 s）、量程宽（0~80 N）、测试精度高（精度为 0.01 Pa）、成本低等特点，适用于土体冲蚀特性的研究。

1.4 断面水流流速测试方法

在冲蚀管道中，由于流动条件（即管道形状、液体性质、流体动力等）的影响，水流在不同位置的流速可能会发生变化。因此，在流速测量组件中包括一个皮托管（图 7（a））和一个压差传感器（图 7（b））。皮托管由主管和压力孔组成。为了准确测量冲蚀过程中的断面水流速度，皮托管主管略高于样品；此外，皮托管的高度还可以根据样品和流体的性质及时调整。



(a) 皮托管流速测量装置



(b) 压差传感器

图 7 流速测量组件

Fig. 7 Velocity measuring component

当水流通过皮托管主管时，收缩段增加流速，导

致压力降低，产生压差。通过测量压差来计算流速。根据伯努利方程，断面流速可由下式确定：

$$v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_w}} \quad (4)$$

式中： p_1 为主管压力 (Pa)； p_2 为支管压力 (Pa)。

变频器与水泵相连，控制水泵的运行频率，可根据差压传感器的读数监测和计算冲蚀管道内的流速。进水流速标定需建立水泵运行频率与流速之间的关系，通过多次初步试验得到拟合参数，然后将试验结果输入数据采集系统完成标定。通过调节频率，可以快速准确调节水流速度。

1.5 土体冲蚀率测试方法

由于冲蚀速率对水流切应力的高度敏感性，当试样顶部低于冲蚀管道底部时，土体冲蚀率实测值将会偏低；当试样顶部过度暴露于水流中，则试样受到的切应力会更大，从而产生偏高的冲蚀速率。为按照试验要求保持试样在水中的高度，超声波测距传感器通过反馈回路与电机协同组成伺服位移控制，控制和冲蚀率测量方法如下：①在进行测试前，确认样品的顶部与管道齐平。②测试中，声波测距瞄点会发射声波，并通过测量超声波往返的时间来计算样品与瞄准点之间的实际距离。③测试过程中，为确保深度读数准确，数据采集系统首先消除每个瞄准点读数中的最大值和最小值。系统随后自动舍弃每个瞄准点的错误读数（即误差超过 5% 的读数将在输出中记录为“0.00”）。之后，取所有瞄准装置的有效读数的平均值作为“真实”的冲蚀深度。④超声波测距传感器的信号输出连接到伺服控制系统，该系统解释传感器信号并将其转换为交流伺服电机的输入信号。在接收到信号后，交流伺服电机驱动同步履带的液压伸缩杆，提升样品至指定的测试高度，直至冲蚀试验结束。⑤试验过程中，冲蚀速率为从土体起动到冲蚀结束试样损失的高度，计算公式为

$$E = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (5)$$

式中： E 为冲蚀速率 (mm/h)； ΔH 为试样冲蚀深度增量 (mm)； Δt 为时间增量 (h)。

2 土体冲蚀特性试验设备应用测试

为了验证土体冲蚀特性试验设备的可行性，使用黏性土样品进行测试。通过设备内的切应力传感器确定了土体的临界起动切应力，同时利用超声波测距传感器和数据采集系统计算了冲蚀速率。根据设备的实测数据，对土体冲蚀特性进行分析，并将试验结果与传统水力学转换获得的切应力进行比较，证明设备在测量临界起动切应力和冲蚀速率方面的合理性。

2.1 试验设置

试验开始前, 将原状土进行烘烤、筛分, 并控制初始含水率 (图 8 (a) ~ (c)); 为了样品制备, 设计了一个特殊的模具 (图 8 (d)), 模具内径与样品托盘一致, 样品高度为 3~10 cm (图 8 (e)); 压实完成后, 取出样品, 将样品装入冲蚀管道中开展试验 (图 8 (f))。

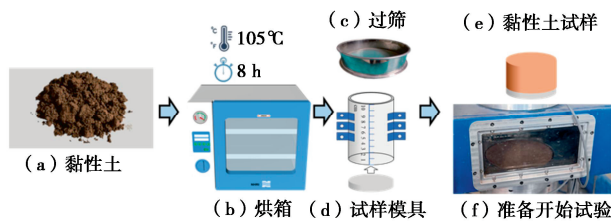


图 8 试样制备过程示意图

Fig.8 Sample preparation process diagram

2.2 黏性土起动形式

以某土石坝的筑坝黏土为试验用土, 黏土试样的物理力学特性指标见表 2 所示, 图 9 是一组黏性土瞬时水流切应力的记录, 从图 9 中可以看出, 水流切应力逐步增加至土体的抗冲蚀极限, 切应力值最终趋于一个稳定的波动状态, 这一现象反映了土体对冲蚀的抵抗能力。此外, 图中亦描述了土样在冲蚀过程中高度损失的变化趋势, 其中冲蚀高度损失的曲线呈现出阶梯式的增长模式, 当试样冲蚀结束时通过公式 (5) 定量化为平均冲蚀速率 E 。

表 2 黏土试样特性参数

Table 2 Properties of clay soil samples

序号	参数	取值
1	相对质量密度	2.72
2	液限/%	42.8
3	塑限/%	23.6
4	塑性指数	19.2
5	最优含水率/%	18.4
6	最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.73
7	平均粒径/mm	0.012

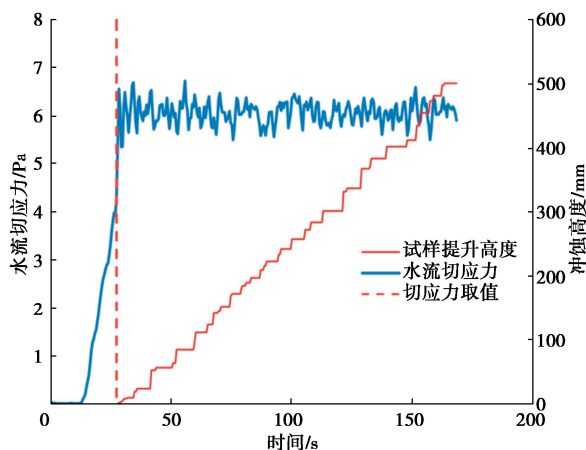


图 9 水流切应力随土样冲蚀高度的变化

Fig. 9 Variation of flow shear stress with soil erosion height

利用高速摄像技术, 捕捉并记录了黏性土样冲蚀起动的瞬间过程, 如图 10 所示。观察发现, 在水流切应力达到土体抗冲蚀强度阈值后, 土体表面迎水面开始遭受侵蚀, 随后侵蚀现象逐步向土样后方扩展。侵蚀区域的表面粗糙度相较于未受影响部分略有增加, 而且起动的土颗粒主要呈微小点状微团分布, 其粒径一般在 0.01~1 mm, 部分较轻的微团由于与水密度相近而被水流携带形成悬浮颗粒, 造成了浑浊水流。这表明在冲蚀过程中土体以黏土微团的形式发生了团体剥离现象, 黏性微团重力与颗粒之间黏结力共同构成了土体的抗冲蚀能力^[17], 因此在冲蚀试验过程中, 黏性土的冲蚀过程可表征为“个别微团运动—大量微团起动并形成浑浊水流—土体表面出现连续冲蚀”, 该现象也证实了冲蚀高度损失曲线呈现出阶梯式增长的模式, 由于冲蚀试验中前两个过程相对与整个试验进程历时较短, 因此可将黏性土冲蚀视为连续过程。

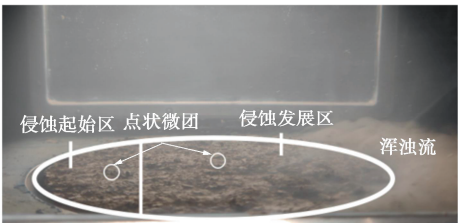


图 10 黏性土试样冲蚀起动瞬间

Fig. 10 Erosion start moment of clay sample

2.3 黏性土测试结果分析

图 11 给出了本文试验获取的测量数据, 由图 11 可知, 冲蚀速率与水流切应力之间呈现较好的线性相关性, 线性回归方程的拟合优度 R^2 均高于 0.9。根据土体临界起动切应力定义, 试验测得的最优含水率下 3 种压实度 (87%, 93%, 96%) 黏性土临界起动切应力 τ_c 分别为 0.54, 1.65, 5.01 Pa。此外, 通过水力学分析方法计算了样品 A1、B1 和 C1 的水流切应力 (如图 11), 得出样品 A1、B1 和 C1 的有效临界切应力值基本趋近于 0 Pa。这主要是由于在水流与固体颗粒界面直接接触的区域, 局部流速趋近于零, 传统方法使用平均流速代替界面流速, 无法准确反映流态变化及固体界面形态对冲蚀过程的影响。相较之下, 切应力综合考虑了水流速度、水深、流态和试样表面粗糙度等多种因素, 更全面反映水流对冲蚀的影响。本研究采用的试验方法不仅快捷简便, 所获得的临界切应力结果也比传统水力学公式转化方法更为可靠。

Hanson 等^[20]及 Jang 等^[21]通过试验发现, 土体的颗粒级配、黏粒含量、含水率以及干密度对于其抗冲蚀特性起重要的作用, 不同土样的抗冲蚀特性可能会相差几个数量级。图 12, 13 中记录了 45 组黏性土冲蚀试验结果。由图 12 可知, 黏性土临界起动切应力随着干密度和黏粒含量的增加而显著增加, 而含水率对

黏性土临界起动切应力的影响相对较小。图 13 显示,黏性土土体冲蚀系数与干密度、黏粒含量和含水率均有密切联系,其中黏粒含量对土体冲蚀系数影响最为显著,干密度和含水率的影响次之。具体而言,较高的黏粒含量和干密度能够显著提高临界起动切应力,从而增强土体的抗冲蚀能力。尽管含水率对临界起动切应力的影响较小,但其对冲蚀系数的作用仍然显著。

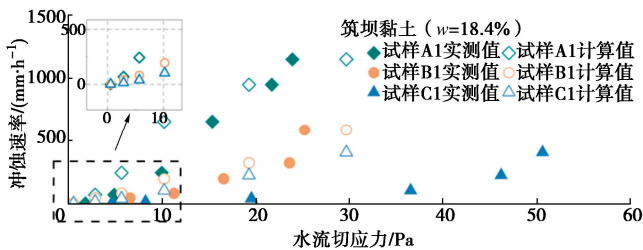


图 11 土体冲蚀速率与水流切应力的关系

Fig. 11 Relationship between soil erosion rate and flow shear stress

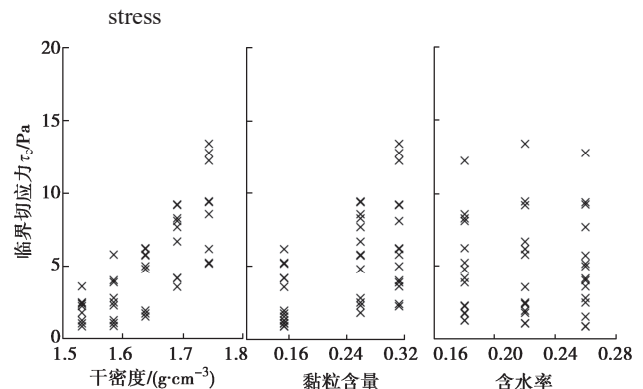


图 12 临界起动切应力与土体参数的关系

Fig. 12 Relationship between critical shear stress and soil parameters

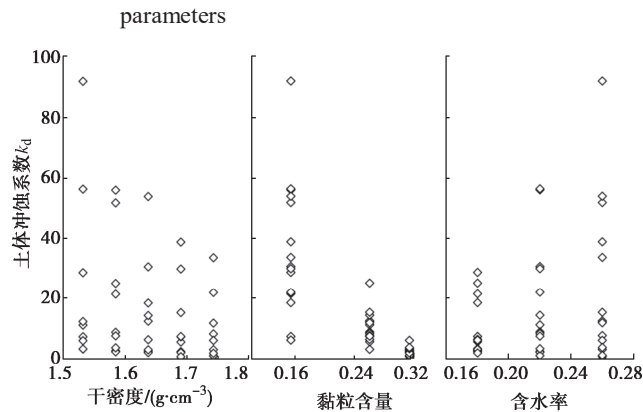


图 13 土体冲蚀系数与土体参数的关系

Fig. 13 Relationship between soil erosion coefficient and soil parameters

当土体在水流作用下起动之后,其冲蚀速率取决于土体自身抗冲蚀特性以及作用在土体的水流特性两方面。其中水流作用为冲蚀主动力,土体的抗冲蚀特性则为被动抗力。1977 年 Foster 等^[22]提出了底床冲蚀速率表达式:

$$E=k_d(\tau-\tau_c)^\zeta$$

(6)

式中: τ 为水流切应力 (Pa); k_d 为土体冲蚀系数; ζ 为泥沙指数。

从式(6)可以看出,土体冲蚀速率与水流切应力、土体起动切应力及土壤特性相关,Hanson 等^[20]研究后建议,对于黏性土,推荐泥沙指数为 1.0。因此,土体冲蚀速率与净切应力 ($\tau-\tau_c$) 可表示为线性函数关系,拟合得到的直线斜率即为 k_d ,而临界切应力 τ_c 是土石坝溃口流量和溃口形态演化的控制性要素,尽管进行了大量的试验,可蚀性参数和岩土性能之间的关系尚未取得任何程度的共识。本设备研发目的是提供最全面快捷的方法来建立可靠的相关方程量化土壤的可蚀性。本研究基于 45 组试验数据及文献公开的 85 组土壤冲蚀资料(见表 3),建立土壤可蚀性参数与其岩土性质之间的相关方程式,从而更好地预测土体冲蚀对土石坝溃决过程的影响。

多元回归分析方法被广泛应用于因变量与多个自变量之间的关系表述,近年来已被多次应用于土石材料冲蚀参数的预测模型之中^[23]:

$$Y=A\times(P_1)^{\alpha_1}\times(P_2)^{\alpha_2}\times(P_3)^{\alpha_3}\times\cdots\times(P_n)^{\alpha_n}$$

(7)

式中: Y 为因变量,在此例中为临界切应力 τ_c (Pa), $P_1, P_2, P_3, \cdots, P_n$ 为选定的岩土特性, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \cdots, \alpha_n$ 是待定参数,通过最小二乘法拟合试验数据确定。

表 3 黏性土冲蚀参数及数据统计

Table 3 Erosion parameters and data statistics of cohesive soils

序号	数据来源	文献	数据量	试验装置	岩土特性	冲蚀参数
1	Kwak	[24]	10 组	—	PL, LL, PI, w , d_{50} , τ , γ	τ_c
2	ILIT	[25]	5 组	—	PL, LL, PI, w , γ	τ_c
3	Briaud	[17]	12 组	水槽试验	PL, LL, PI, w , PF, d_{50} , τ , γ	τ_c , k_d
4	Thoman	[26]	21 组	射流冲刷试验	ρ_d , PC, PL, LL, PI, w , PF	τ_c , k_d
5	Govindasamy	[27]	7 组	—	PL, LL, PI, w , d_{50} , τ , γ	τ_c
6	Bernhardt	[28]	3 组	—	PL, LL, PI, w , d_{50} , γ	τ_c
7	Kimiaghalam	[8]	13 组	水槽试验	ρ_d , PC, PL, LL, PI, w , PF, d_{50}	τ_c , k_d
8	李云	[29]	14 组	水槽试验	DC, ρ_d , PC, w	τ_c
9	本文试验	—	45 组	本文装置	DC, ρ_d , PC, PL, LL, PI, w , PF, d_{50}	τ_c , k_d

注: PL 为塑限 (%); LL 为液限 (%); PI 为塑性指数 (%); w 为含水率 (%); d_{50} 为中值粒径 (mm); τ 为剪切应力; γ 为重度 (kN/m³); PF 为粒径小于 0.075 mm 的比例 (%); ρ_d 为土体干密度 (g/cm³); PC 为黏粒含量 (%); DC 为压实度 (%).

在本研究中,选择图 12 中 32 组临界起动切应力 (τ_c) 和土体冲蚀系数 (k_d) 的测试结果进行回归分析和模型训练。使用剩余的 13 组数据进行模型验证,以

表 4 冲蚀参数模型预测精度对比
Table 4 Comparison of prediction accuracy of erosion parameter models

参数	序号	作者	文献	表达式	数据量	RMSE	R ²
τ_c	1	Briaud	[23]	$\tau_c = 3.347 \times 10^{-10} \times (\text{PI}^{2.766})(d_{50}^{-1.05})(\text{WC}^{6.707})$	式(10)	37	14.834
				$\tau_c = 2.28 \times 10^{-15} \times (\text{PI}^{-1.732})(\text{WC}^{3.106})(\text{PF}^{6.412})$	式(11)	34	4.7853
				$\tau_c = 1.354 \times 10^{-7} \times (\text{PL}^{0.666})(d_{50}^{-0.189})(\text{WC}^{4.046})$	式(12)	13	1.637
	2	Smerdon and Beasley	[30]	$\tau_c = 0.163 \times \text{PI}^{0.84}$	式(13)	16	2.787
				$\tau_c = 0.493 \times 10^{0.0182\text{PC}}$	式(14)	16	3.031
	3	Owen	[31]	$\tau_c = 6.85 \times 10^{-6} \rho_d^{2.44}$	式(15)	16	16.628
k_d	4	Thorn and Parsons	[32]	$\tau_c = 5.42 \times 10^{-6} \rho_d^{2.28}$	式(16)	16	11.620
	5	Julian and Torres	[33]	$\tau_c = 0.1 + 0.1179(w\%) + 0.0028(w\%)^2 - 2.34 \times 10^{-5}(w\%)^3$	式(17)	16	4.462
	6	本文模型	—	$\tau_c = 9.366 \times (\rho_d^{10.859})(\text{PC}^{1.176})(w^{-0.099})(\text{PI}^{2.766})$	式(8)	29	1.171
	7	Hanson and Simon	[20]	$k_d = 0.2\tau_c^{-0.5}$	式(18)	12	3.365
	8	Thoman	[26]	$k_d = 1.11\tau_c^{-0.37}$	式(19)	12	2.918
	9	本文模型	—	$k_d = 0.39 \times (\rho_d^{-7.744})(\text{PC}^{-4.979})(w^{2.26})(\text{PI}^{-1.453})$	式(9)	25	3.155

评估模型性能并调整参数以防止过拟合。最后，引入文献[8, 26]较完整的冲蚀数据进行最终模型验证，以评估模型的泛化性能。通过该方法可以确保模型在未见过的数据上也能有良好的预测性能，从而为土石坝的设计和评估提供坚实的科学依据。

通过回归分析得到关系式为

$\tau_c = 9.366 \times (\rho_d^{10.859})(\text{PC}^{1.176})(w^{-0.099})(\text{PI}^{2.766})$, (8)

$k_d = 0.39 \times (\rho_d^{-7.744})(\text{PC}^{-4.979})(w^{2.26})(\text{PI}^{-1.453})$ 。(9)

由式(8)可知，相比于其它 3 个参数，含水率指数的取值较小且为负值，这表明其参数敏感性较低，同时对临界起动切应力贡献度为负。式(9)显示，相比于临界起动切应力，土体冲蚀系数与土体基本参数相关性更强，同时其大小也能直接体现土体的抗冲蚀能力。由图 14 可知，式(8)，(9)的非线性回归方程可决系数(R²)值较高，均方误差(MSE，预测误差的平方的平均值)值也在可接受的范围内，表明预测模型能较好地反映黏性土临界起动切应力及土体冲蚀系数的变化规律。

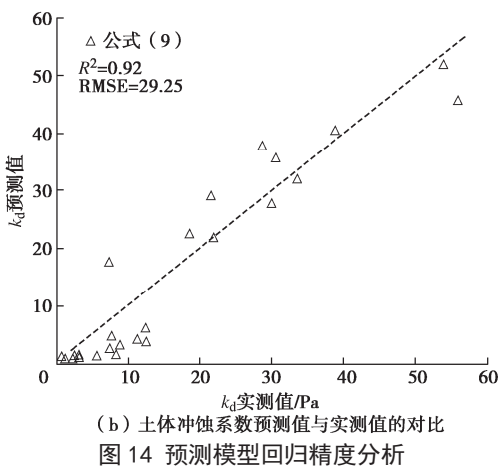
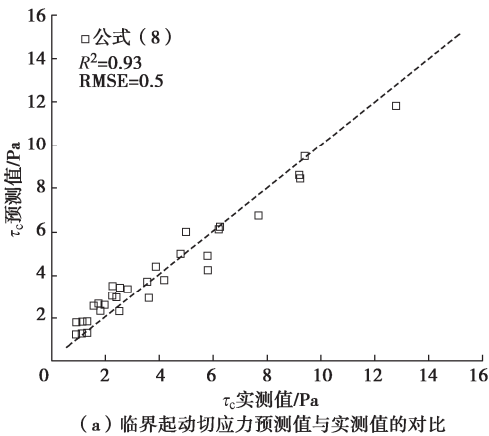


图 14 预测模型回归精度分析

Fig. 14 Regression accuracy analysis of prediction model
为了验证新模型在冲蚀参数预测中的准确性，并与现有典型模型的预测结果进行比较，本研究选择均方根误差(RMSE)和可决系数(R²)作为评估指标。RMSE 值越小，模型预测值的精度越高。R² 的取值范围为 0 到 1，越接近 1 表明预测值与实测值的拟合程度越高。本文模型与国内外已有的黏性土冲蚀参数快速预测模型进行了比较，计算结果如表 4 所示。

由表 4 的计算结果可以看出，本文模型在预测临界起动切应力 τ_c 方面表现出最优的性能，预测值的均方根误差(RMSE)最小，可决系数(R²)最大。相比之下，Briaud 模型和 Smerdon and Beasley 模型的临界切应力预测值的 RMSE 虽然仅次于本文模型，但其 R² 低于本文模型。尽管 Briaud 三参数模型具有较高的 R²，但与本文模型相比仍偏低。其原因在于，Briaud 模型使用的水槽装置通过目测法测量土体起动，可能导致测量所得的切应力值与真实的水流切应力存在误差，其大小在真实水流切应力值上下波动。此外，该

水槽装置通过水力学方法将流速转化为切应力值,由于水流切应力大小涉及水动力与土体强度二者的耦合特性,单从流速测量得到的水流切应力方法准确度仍需检验,因此,在实际数据上 Briaud 模型表现出较高的离散性,预测精度虽达到 0.625,但仍低于本文模型。

对于土体冲蚀系数 (k_d), Hanson 模型和 Robert 模型的预测值虽然具有较小的 RMSE,但其 R^2 均为负值,表明这些模型对数据的拟合效果一般。这是因为 Hanson 模型和 Robert 模型是与临界切应力直接建立联系,但从结果可知临界切应力与土体冲蚀系数关联系不高,本文通过引入更多土体特征参数,建立模型的 R^2 最高,这表明多参数模型能更好地反映了土体冲蚀系数 (k_d) 与土体基本岩土特性之间的实际关系。

综上所述,本文模型在临界起动切应力和土体冲蚀系数预测方面均表现出更高的准确性和可靠性。研究表明,通过优化模型参数和引入更多相关特征,可以显著提高土体冲蚀特性预测的精度,为土石坝溃决机理研究和溃坝过程模拟提供重要的科学依据。

3 结 论

(1) 研制了一套新型的土体冲蚀特性试验设备,该设备包含水动力系统、土体冲蚀系统和数据采集系统,能够直接测量水土交界面的水流切应力,从而获取水体的临界起动切应力和冲蚀速率。设备可提供最大 6 m/s 的水流流速,可用于测定粒径小于 15 cm 的土体冲蚀特性。

(2) 传统的测量方法通常通过水力学计算公式来间接计算切应力,而本研究自主设计了一种桥式微应变切应力传感器来直接测量切应力。传感器由电阻应变片、支撑板组件等构成,通过电阻变化量来确定水流对土体的切应力。这种技术具有实时性强、量程宽、测试精度高、成本低等特点。

(3) 针对黏性土开展了土体临界起动切应力和冲蚀速率的测量。试验结果表明,黏性土主要通过层状方式冲蚀,起动的土颗粒主要以微团形式为主,黏性土的冲蚀过程可分为 3 个阶段:个别微团运动、大量微团起动并形成浑浊水流、土体表面出现连续的冲蚀。

(4) 基于本文试验结果,提出了土体临界切应力及冲蚀系数的多元回归分析模型。回归分析显示,模型计算结果与试验结果的拟合优度较高,通过优化模型参数和引入更多相关特征,可以显著提高土体冲蚀参数的预测精度。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 卢洪宁和钟启明设计研究内容,钟启明和单熠博提供研究指导,卢洪宁和单熠博完成分析

和解释数据,杨蒙和胡亮完成统计分析,卢洪宁和钟启明参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

This study was designed by LU Hongning and ZHONG Qiming. ZHONG Qiming and SHAN Yibo provided research guidance. LU Hongning and SHAN Yibo completed the analysis and interpretation of the data. YANG Meng and HU Liang completed the statistical analysis. The manuscript was drafted and revised by LU Hongning and ZHONG Qiming. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 陈生水, 钟启明. 土石坝溃坝数学模型及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019. (CHEN Shengshui, ZHONG Qiming. Numerical Models for Earth-Rock Dam Breaching and Their Applications[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019. (in Chinese))
- [2] 水利部大坝安全中心. 全国水库垮坝登记册[R]. 南京: 水利部大坝安全中心, 2024. (Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources of China. Dam Breach Register Book of the National Reservoirs[R]. Nanjing: Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources of China, 2024. (in Chinese))
- [3] ZHONG Q M, WANG L, CHEN S S, et al. Breaches of embankment and landslide dams-state of the art review[J]. Earth-Science Reviews, 2021, **216**: 103597.
- [4] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (CHEN Shengshui. Failure Mechanism and Simulation of Earth-Rock Dam Failure Process[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))
- [5] CHEN Shengshui, FANG Xushun, ZHONG Qiming, et al. Centrifugal model tests and numerical simulations for break of earth-rock dams due to overtopping[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(5): 922-932.
- [6] RIFAI I, ERPICUM S, ARCHAMBEAU P, et al. Overtopping induced failure of noncohesive, homogeneous fluvial dikes[J]. Water Resources Research, 2017, **53**(4): 3373-3386.
- [7] 任 强, 陈生水, 钟启明. 黏土心墙坝漫顶溃决数值模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(4): 562-566. (REN Qiang, CHEN Shengshui, ZHONG Qiming. Numerical model for clay core dam break due to overtopping failure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(4): 562-566. (in Chinese))
- [8] KIMIAGHALAM N, CLARK S P, AHMARI H. An experimental study on the effects of physical, mechanical, and electrochemical properties of natural cohesive soils on critical shear stress and erosion rate[J]. International Journal

- of Sediment Research, 2016, **31**(1): 1-15.
- [9] GUO J K, JULIEN P Y. Shear stress in smooth rectangular open-channel flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, **131**(1): 30-37.
- [10] 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.
- [11] SHIDLOVSKAYA A, BAHMANI M, BRIAUD J L, et al. Improvements in test procedure and data reduction for the borehole erosion test[J]. Geotechnical Testing Journal, 2023, **46**(2): 295-315.
- [12] HANSON G J. Development of a jet index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways[J]. Transactions of the ASAE, 1991, **34**(5): 2015-2020.
- [13] CLARK L A, WYNN T M. Methods for determining streambank critical shear stress and soil erodibility: implications for erosion rate predictions[J]. Transactions of the ASABE, 2007, **50**(1): 95-106.
- [14] MOORE W L, MASCH JR F D. Experiments on the scour resistance of cohesive sediments[J]. Journal of Geophysical Research (1896-1977), 1962, **67**(4): 1437-1446.
- [15] YU S, CHEN Z Y, et al. A new measurement method of the erodibility of soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2021, **44**(1): 3-14.
- [16] HANSON G J. Surface erodibility of earthen channels at high stresses part i: open channel testing[J]. Transactions of the ASAE, 1990, **33**(1): 127-131.
- [17] BRIAUD J L, TING F C K, CHEN H C, et al. Erosion function apparatus for scour rate predictions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(2): 105-113.
- [18] CROWLEY R W, BLOOMQUIST D B, SHAH F D, 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] CROWLEY R W, BLOOMQUIST D, HAYNE J R, et al. Estimation and measurement of bed material shear stresses in erosion rate testing devices[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, **138**(11): 990-994.
- [20] HANSON G J, SIMON A. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA[J]. Hydrological Processes, 2001, **15**(1): 23-38.
- [21] JANG W, SONG C R, KIM J, et al. Erosion study of new Orleans levee materials subjected to plunging water[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(4): 398-404.
- [22] FOSTER G R, MEYER L D, ONSTAD C A. An erosion equation derived from basic erosion principles[J]. Transactions of the ASAE, 1977, **20**(4): 678-682.
- [23] BRIAUD J L, GOVINDASAMY A V, SHAFII I. Erosion charts for selected geomaterials[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, **143**(10): 04017072.
- [24] KWAK K. Prediction of Scour Depth Versus Time for Bridge Piers in Cohesive Soils in the Case of Multi-Flood and Layered Soil Systems[D]. TX: Texas A&M Univ, College Station, 2000.
- [25] ILIT. Investigation of the Performance of the New Orleans Flood Protection Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005[R]. Berkeley: University of California, 2006.
- [26] THOMAN R W, NIEZGODA S L. Determining erodibility, critical shear stress, and allowable discharge estimates for cohesive channels: case study in the powder river basin of Wyoming[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, **134**(12): 1677-1687.
- [27] GOVINDASAMY A V. Simplified Method for Estimating Future Scour Depth at Existing Bridges[D]. TX: Texas A&M Univ, College Station, 2009.
- [28] BERNHARDT M L. 2008 Midwest Levee Failures: Erosion Studies[D]. TX: Zachry Dept of Civil Engineering, Texas A&M Univ, College Station, 2009.
- [29] 李 云, 王晓刚, 宣国祥, 等. 均质土坝坝体材料冲蚀特性试验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, **48**(2): 200-208. (LI Yun, WANG Xiaogang, XUAN Guoxiang, et al. Experimental study of erosion characteristics of soils in homogeneous embankments[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, **48**(2): 200-208. (in Chinese))
- [30] SMERDON E T, BEASLEY R P. Critical tractive forces in cohesive soils[J]. Journal of Agricultural Engineering, 1961, **42**(1): 26-29.
- [31] OWEN M W. Erosion of Avonmouth Mud Report No. INT 150[R]. Wallingford: Hydraulic Research Station, 1975.
- [32] THORN M F C, PARSONS J G. Erosion of cohesive sediments in estuaries: an engineering guide[C]// Proceedings of the 3rd International Symposium on Dredging Technology. Bedford BHRA, 1980.
- [33] JULIAN J P, TORRES R. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks[J]. Geomorphology, 2006, **76**(1/2): 193-206.