均质土坝坝体材料冲蚀特性试验研究

李云^{1,2*}, 王晓刚¹, 宣国祥^{1,2}, 祝龙¹

1. 南京水利科学研究院, 南京 210029;

2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029

* E-mail: yli@nhri.cn

收稿日期: 2017-04-21; 接受日期: 2017-07-18; 网络版发表日期: 2018-01-29

“十一五”国家科技支撑计划“水库大坝安全保障关键技术研究”(编号: 2006BAC14B00)、水利部公益性行业科研专项(编号: 201401027)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 51409173)和南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号: Y116018)资助项目

摘要 土石坝坝体冲蚀特性直接关系到坝体是否溃决, 何时溃决, 是土石坝溃坝研究的核心难题. 本文通过物理模型试验, 对不同坝体土料冲蚀特性进行研究. 基于大量试验研究, 分析了土料干密度、净切应力、冲刷系数、泥沙指数等与土体冲蚀特性的关系. 提出泥沙指数宜依据土料冲蚀速率和净切应力确定, 而不宜设为定值1(黏性土)或者1.5(非黏性土); 冲刷系数与泥沙指数呈现明确的对数关系; 起动切应力对土料冲蚀速率影响权重较大; 利用泥沙指数变量, 可以有效地区分坝体土料的抗冲蚀能力, 并评估坝体抗溃决能力.

关键词 土石坝, 坝体材料, 冲蚀, 泥沙指数, 溃决

1 引言

土石坝坝体材料的冲蚀特性在土坝漫顶溃决发展过程中起着至关重要的作用, 不同材料特性的坝体在相同的洪水来流情况下将呈现不同的溃决发展模式, 直接导致不同的洪水流量和洪水演进过程, 给下游防洪预警带来极大的不确定性. 各国学者分别从不同的角度针对土料冲蚀开展了大量的研究工作, Albertson等人^[1]、Fogle等人^[2]和Robinson^[3]对水流剪切应力进行了研究. Arulanandan等人^[4]、Stein等人^[5]、Jang等人^[6]以及Hanson等人^[7]通过开展物理模型试验对影响土体冲蚀的各因素进行了探讨; Stein等人^[5]对不同试验条件下土体冲蚀深度随时间的变化规律进行了总

结. 洪大林等人^[8,9]、Wahl^[10]和Briaud等人^[11,12]曾分别开展试验研究, 对不同条件下的冲蚀主导因素进行了探讨分析, 并尝试利用各土料参数建立相应的预测公式. 研究发现, 在漫顶溃坝洪水作用下, 影响土体侵蚀的因素多种多样, 按照其本质属性可简单划分为: 土料特性、水流特性和几何特性三大类. 土料特性包括颗粒粒径、压实度、含水量、级配、液限、塑限、抗剪强度、黏土成分、孔隙率、黏粒含量、内摩擦角、渗透性、温度、干密度等; 水流特性包括密度、黏性、速度、温度、pH、盐度、钠含量、水力梯度、雷诺数等; 几何特性包括冲刷形式、冲射角度等.

各影响因素与冲蚀速率之间的主要代表性结论如下. 洪大林等人^[9]通过大量研究发现, 对于黏性土料,

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 200–208

Li Y, Wang X G, Xuan G X, et al. Experimental study of erosion characteristics of soils in homogeneous embankments (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 200–208, doi: 10.1360/N092017-00120

土壤颗粒之间的黏性力通常要比单颗粒的重力要大很多, 其抗冲蚀特性主要依赖于黏性土料之间的黏结力, 由于黏性土物质组成的复杂性使得它的冲刷不仅是复杂的物理、力学现象, 同时还与其结构特点、化学特性、矿物组成等密切相关. 对于同一河道原状土, 淤泥质黏土的起动切应力随抗剪强度、含水量的增大而减小; 粉质黏土的起动切应力与抗剪强度、含水量为非线性关系; 黏土的起动切应力则随抗剪强度以及含水量的增大而增大^[8]. Hanson等人^[7]物理模型试验结果表明土料的颗粒级配、含水量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会相差好几个数量级. Jang等人^[6]试验认为: 对于低黏粒含量土壤(15%), 黏粒含量增大将增大土抗冲能力; 中等黏粒含量(20%左右), 压实度再增大, 抗冲能力未必增大, 主要是受到材料崩解性的影响; 黏粒含量达到20%~25%, 孔隙率对抗冲性能影响较大, 一般呈现不利影响, 即孔隙率越大, 抗冲性能越差. 对于高岭土混合物, 规律是一样的. 低黏粒含量时压实度与黏土含量增加均会增大抗冲刷能力, 而20%~30%的黏土含量是临界区域, 这个范围内增大压实度并不会增大抗冲能力. 2009年张建云等人^[13]认为, 黏性土坝土料内聚力对坝体冲蚀过程影响很大. Briaud等人^[12]基于大量土料冲蚀试验、室内和现场溃坝试验和数值模拟研究成果, 认为土壤参数与冲蚀速率间不存在相关关系.

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. 定义土体的冲蚀速率 E 为在单位时间内, 水流冲刷土体的高度. 1977年Foster等人^[14]提出了“陡坎”冲蚀速率基本表达式:

$$E = K_d(\tau_b - \tau_c)^\xi, \quad (1)$$

式中, E 为冲蚀速率; τ_b 为壁面剪切应力; τ_c 为起动剪切应力; K_d 为土体冲刷系数; ξ 为泥沙指数.

Shaikh等人^[15]通过在矩形水槽中开展平面水流冲刷试验, 提出对于高岭土, 土体冲蚀速率与壁面切应力之间呈线性关系. 2001年, Zhu^[16]提出土体冲蚀速率计算公式如下:

$$\begin{cases} E = 0, & \tau_b < \tau_c, \\ E = C_E \tau_b, & \tau_b > \tau_c, \end{cases} \quad (2)$$

式中,

$$C_E = \frac{1.85 \times 10^{-4}}{\tau_c}. \quad (3)$$

1977年Foster基于非黏性土冲蚀数据推荐泥沙指数 ξ 为1.5. 1989年Nearing等人、Hanson以及1991年Stein和Julien等研究后建议, 对于黏性土, 推荐泥沙指数 ξ 为1.0^[14].

综上所述, 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, 与净剪切应力 $(\tau_b - \tau_c)$ 成幂函数关系, 各参数的影响集中体现在土体冲刷系数 K_d 和泥沙指数 ξ 两个参数上. 因此, 土体冲蚀速率 E 应以净剪切应力 $(\tau_b - \tau_c)$, 土体冲刷系数 K_d 和泥沙指数 ξ 分析为基础. 本文拟通过室内模型试验, 结合前人研究成果, 对土石坝冲蚀速率进行探讨, 提出对土石坝坝体材料冲蚀特性的新认识和土石坝溃决预测的新思路.

2 物理模型试验

坝体的溃决过程主要受到来水量及土体的抗冲蚀能力影响. 本文重点研究土体的抗冲蚀能力. 利用自制的黏土起动-表面冲刷速率量测水槽(图1)测定不同土料的起动切应力、不同切应力条件下的冲蚀速率, 以期获得土料在不同水力条件下的抗冲蚀能力. 黏土起动-表面冲刷速率量测水槽是在以往众多泥沙起动水槽试验经验的基础上改进而成, 由水库、供水装置(水泵)、输水管道、电动阀门、试验水槽、超声波流量计、顶土装置、高清摄像机及回水设施等部分构成.

图1 黏土起动-表面冲刷速率测定水槽(单位: cm)

试验段采用封闭有压的矩形有机玻璃水槽, 断面尺寸为350 cm(长)×14 cm(宽)×4 cm(高), 在距进口2.5 m, 下游出口1.0 m的位置放置带有升降顶土装置的试样筒, 试样筒的内径10 cm, 顶土装置采用电动机、变频器及减速装置来控制其升降速度(试验土样见图2)。在土样的上下游两侧均布置测压管, 上游测压管位置距土样中心1.0 m, 下游测压管位置距土样中心0.6 m; 采用高精度超声波流量计测读流量; 由进口段的电动阀门进行控制流量大小。

利用布设在土样上下游的测压管, 获取不同水力条件下土样的上下游水头差, 并通过式(4)计算土样所受剪切应力。

$$\tau = \gamma R J = \gamma \frac{\Delta Z}{L} R = \gamma R \frac{p_1 - p_2}{L}, \quad (4)$$

式中, γ 为水的容重, R 为水力半径, J 为水力坡降, $J = \Delta Z / L$, ΔZ 为上下游水头差; L 为测压管间距; p_1 和 p_2 分别为上下游测压管压力。

本文试验选取的3种土料均取自安徽省滁州市大洼水库的筑坝料场及周边山区。在制作试验制样前, 首先对土样进行了基本土力特性测定。按照土工试验方法标准, 分别采用筛析法和密度计法开展颗粒分析试验(粒径在0.075 mm以上的采用筛析法, 粒径在0.075 mm以下的采用密度计法), 获取了3种土料的级配曲线及黏粒含量、平均粒径等指标; 通过击实试验, 获取了各土料的最大干密度、最优含水率指标; 黏聚力等强度指标则由直剪快剪试验获得。三种土料的颗粒级配曲线如图3所示, 各土料的主要力学特征指标见表1。将制备的21组试样按照标准试验步骤进行起动剪切应力试验, 试验结果如表2所示。

3 主要试验结果

3.1 土壤参数与冲蚀速率

依据式(1), 净剪切应力($\tau_b - \tau_c$)与冲蚀速率 E 呈幂

图2 (网络版彩图)试验用土样

图3 (网络版彩图)试验土料颗粒级配曲线

函数关系。本文试验数据典型曲线见图4。各试验组次中, 净剪切应力与冲蚀速率呈现较好的幂函数相关性(幂函数回归方程, 拟合优度 R^2 平均为0.97), 也证实了理论公式的合理性。这里需要指出, 在本文泥沙指数 ζ 中并不设定为定值, 这样设定的好处是可以忽略坝体土料的预分类, 将黏性土与非黏性土用一个公式分析。

基于各土样实验结果获得的净剪切应力-冲蚀速率幂函数拟合参数见表3。

依据净剪切应力与冲蚀速率曲线及表3, 可以确认, 同一个土样, 其净剪切应力与冲蚀速率确实存在幂函数关系。本文土样的泥沙指数范围 $\zeta=0.48\sim 1.16$ 。由表3可见, 泥沙指数 $\zeta>1$ 的两个组次, 压实度均很小, 起动切应力很小($\tau_c<2$ Pa), 而压实度很大, 起动切应力大的几个组次则泥沙指数 ζ 很小($\zeta<1$)。

表1 试验土料主要特征指标

土料种类	黏粒含量 (<0.005 mm) (%)	平均粒径 d_{50} (mm)	最大干密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	最优含水率 w_{op} (%)	黏聚力 C_q (kPa)
土料1—粉砂质黏壤土	25.0	0.011	1.68	20.6	43
土料2—黏壤土	18.4	0.074	1.79	16.3	33
土料3—砂质壤土	12.4	0.280	1.85	15.1	33

表 2 筑坝土料起动试验结果

土样	编号	压实度 $K(\%)$	干密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	黏粒含量 $(\%)$	剪切应力 $\tau_c(\text{N}/\text{m}^2)$
土料1	1-90	90.000	1.512	25.000	2.22
	1-95	95.000	1.596	25.000	28.89
	1-98	98.000	1.646	25.000	53.98
	1-99.4	99.388	1.670	25.000	76.99
	1-93	93.325	1.568	25.000	5.86
	1-86	86.152	1.447	25.000	0.79
	1-96	96.361	1.619	25.000	30.33
	1-100	100.000	1.680	25.000	83.16
土料2	2-90	90.000	1.611	18.400	1.68
	2-95	95.000	1.701	18.400	7.36
	2-98	98.000	1.754	18.400	20.54
	2-94.8	94.874	1.698	18.400	6.38
	2-95	95.031	1.701	18.400	8.01
	2-93	93.505	1.674	18.400	4.18
土料3	3-90	90.000	1.665	12.400	0.93
	3-95	95.000	1.758	12.400	3.37
	3-98	98.000	1.813	12.400	7.51
	3-90.8	90.816	1.680	12.400	1.11
	3-93.8	93.783	1.735	12.400	2.72
	3-100	100.000	1.850	12.400	11.61

图 4 (网络版彩图)典型净剪切应力-冲蚀速率曲线. (a) 1-90; (b) 1-96; (c) 2-90; (d) 3-98

将泥沙指数设为变量, 一个明显的优势是, 可以较容易地辨识土样的抗冲蚀特性(不用事先区分土样原始属性). 依据幂函数性质, 当土样的泥沙指数 $\zeta > 1$ 时,

表 3 净剪切应力-冲蚀速率幂函数拟合参数

对应试验编号	冲刷系数 K_d	泥沙指数 ζ	拟合优度 R^2
1-90	9.16	0.98	1.00
1-93	4.32	0.83	0.99
1-95	1.81	0.62	0.96
1-96	1.19	0.55	0.98
1-98	0.87	0.48	0.94
2-90	13.97	1.16	0.99
2-94	4.93	0.91	0.95
2-95	3.98	0.80	0.99
2-98	1.11	0.56	0.90
3-90	23.40	1.10	0.97
3-94	6.83	0.93	0.99
3-95	5.97	0.89	0.99
3-98	3.06	0.74	0.97
3-100	1.92	0.63	0.99

随着净剪切应力增大, 冲蚀速率呈幂指数增大, 通常对应易冲蚀的非黏性土料(或结构松散的黏性土料);

当泥沙指数 $\zeta < 1$ 时, 随着净剪切应力增大, 冲蚀速率增长将趋于平缓, 通常对应难冲蚀的黏性土(或结构紧密的非黏性土)。这一性质与试验结果非常吻合, 说明泥沙指数的物理意义就是土体综合抗冲能力指数。

将各组数据点绘在一张图中(图5)可以看到, 各土样自身符合幂函数分布, 但是不同土样间, 由于泥沙指数 ζ 与冲刷系数 K_d 差别较大, 数据非常分散。从曲线型式看, 若将各曲线拟合成直线, 即泥沙指数 ζ 取1, 实际拟合优度也较高(本文土样均为黏性土)。这也从一个侧面反映了本文试验数据规律与前人黏性土冲蚀速率研究结果近似。

将泥沙指数与冲刷系数点绘在一张图中(图6), 采用对数拟合, 可以看到, 冲刷系数与泥沙指数存在很好的对数关系, 拟合方程为式(5), 拟合优度达0.97。

$$\zeta = 0.21 \ln(K_d) + 0.52. \quad (5)$$

结合式(5)对数函数性质, 其物理意义为: 泥沙指数越大, 冲刷系数越大, 土体越容易冲蚀。可见拟合公式符合土体冲蚀基本公式(1)基本原理。泥沙指数与冲刷系数之间的高相关性, 使得分析变得更为容易, 因此, 研究的重点可以放在泥沙指数的分布规律上。

大量数据分析显示, 土壤参数与冲蚀速率间不存在相关关系^[12]。因此, 直接分析干密度、含水量、粒径等参数与冲蚀速率之间的关系是非常困难的。图7为本文试验获得的干密度与泥沙指数的关系, 可见数据点分布非常散乱, 也证明了这一观点。但是点绘起动切应力与“泥沙指数”(非前人采用的固定值)可以发现(图8), 两者相关性较好。考虑到本文采用土样均来自一个地区, 且距离相近, 这种相关性并不具有很好的普适性, 但是从一定程度上说明, 起动切应力对冲蚀速率的影响权重很高。

为了进一步讨论泥沙指数与其他参数之间的相互关系, 同时避免本文试验土样的同质性可能引入的误解。这里引入2008年Briaud等人^[12]开展的24组EFA试验数据。并按照本文方式将净剪切应力与冲蚀速率拟合成幂函数型式, 获得的冲刷系数、泥沙指数、拟合优度等见表4。由表4可见, 各组数据均符合幂函数关系, 且相关性非常高(幂函数回归方程拟合优度 R^2 平均为0.96), 再一次证明了冲蚀速率与净剪切应力之间存在明确的幂函数关系。利用Briaud数据获得的泥沙指数 ζ 在0.29~2.04之间, 冲刷系数则在0.33~1429.5之间,

图5 (网络版彩图)净剪应力与冲蚀速率关系曲线

图6 (网络版彩图)冲刷系数与泥沙指数关系曲线

图7 (网络版彩图)干密度与泥沙指数

跨度非常大, 主要是由于试验土样来源较广所致。同样点绘其干密度与“泥沙指数”关系曲线(图9)、

图 8 (网络版彩图)起动切应力与泥沙指数关系(本文试验)

图 9 (网络版彩图)干密度与泥沙指数(Briaud数据)

表 4 基于Briaud试验数据的冲蚀特性参数表

编号	干密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	起动切应力 $\tau_c(\text{Pa})$	冲刷系数 K_d	泥沙指数 ζ	R^2
S4-(0-0.5ft)-HC-SW	3.38	0.22	0.33	0.29	0.93
S3-B3-(1-1ft)-SW	1.42	27.10	0.39	0.30	0.98
S12-B1-(2-4ft)-SW	1.29	2.54	0.38	0.30	0.95
S2-B1-(0-2ft)-TW	1.73	24.58	0.47	0.34	0.96
S3-B1-(2-4ft)-SW	1.41	23.29	0.50	0.35	1.00
S2-B1-(2-4ft)-SW	1.71	21.48	0.46	0.36	0.93
S7-B1-(0-2ft)-TW	1.40	0.23	0.58	0.40	0.98
S3-B2-(0-2ft)-SW	1.76	0.38	0.64	0.43	0.96
S1-B1-(0-2ft)-TW	1.57	2.48	0.69	0.45	0.91
S8-B1-(0-2ft)-TW	1.37	2.19	0.89	0.51	0.96
S8-B1-(2-4ft)-L2-SW	1.43	7.04	1.07	0.55	0.96
S1-B1-(2-4ft)-SW	1.60	0.13	1.94	0.66	0.96
S12-B1-(0-2ft)-TW	1.04	0.29	4.17	0.74	0.95
S8-B1-(2-4ft)-L1-SW	1.43	0.40	2.79	0.78	0.90
S7-B1-(2-4ft)-SW	1.37	1.31	2.74	0.79	0.95
S15-CannalSide-(0-0.5ft)-HC-SW	1.77	0.26	24.31	1.11	0.95
S15-CannalSide-(0-0.5ft)-LC-SW	1.25	0.07	60.95	1.54	0.97
S15-Levee Crown-(0-0.5ft)-LT-SW	1.22	0.89	220.41	1.56	0.97
S11-(0-0.5ft)-HC-TW	1.34	0.01	151.53	1.60	1.00
S5-(0-0.5ft)-LT-SW	1.85	0.69	227.59	1.61	0.99
S6-(0-0.5ft)-LC-SW	1.31	0.04	315.46	1.81	0.99
S11-(0-0.5ft)-LC-TW	1.25	0.02	384.70	1.86	0.98
S4-(0-0.5ft)-LC-SW	1.06	0.09	463.62	1.92	0.97
S15-Levee Crown-(0.5-1.0ft)-LT-SW	1.27	0.00	1429.50	2.04	0.99

起动切应力(部分起动切应力, 利用论文数据, 采用同种土样切应力与冲蚀速率呈幂函数关系拟合获得)与“泥沙指数”关系曲线(图10)可见, 干密度与“泥沙指数”

关系散乱, 而起动切应力与“泥沙指数”之间总体呈现对数函数关系, 但两者的拟合优度降低为0.56.

观察起动切应力与“泥沙指数”之间的相关关系可

图 10 (网络版彩图)起动切应力与泥沙指数(本文试验数据+Briaud数据)

见, 起动切应力小于5 Pa时(图10), 起动切应力与泥沙指数之间关系出现散乱, 而当大于5 Pa时, 两者相关性很好. 说明, 当起动切应力很小时, 泥沙冲蚀规律性较差. 分析原因, 主要是由于一些土料起动切应力很小, 其冲蚀过程非常不稳定所致. 该种条件下, 试验中对冲蚀速率的计算本身也会存在较大的误差. 但是可以明确的是, 当起动切应力大于5 Pa时, 两者的对数函数关系是较好的.

将本文试验数据与Briaud数据^[12]获得的泥沙指数与冲刷系数点绘在一张图中(图11), 可以发现两者相关性依然很好, 且拟合方程与本文试验数据拟合方程的系数几乎一致(见式(5)和式(6)).

$$\zeta = 0.22 \ln(K_d) + 0.52. \quad (6)$$

表 5 泥沙指数与土石坝溃决对照表

编号	起动切应力 τ_c (Pa)	冲刷系数 K_d	泥沙指数 ζ	溃决状态
S3-B3-(1-1ft)-SW	27.1007	0.39	0.30	未溃决
S2-B1-(0-2ft)-TW	24.5824	0.47	0.34	未溃决
S3-B1-(2-4ft)-SW	23.2910	0.50	0.35	未溃决
S2-B1-(2-4ft)-SW	21.4799	0.46	0.36	未溃决
S3-B2-(0-2ft)-SW	0.3776	0.64	0.43	未溃决
S15-CannalSide-(0-0.5ft)-HC-SW	0.2571	24.31	1.11	溃决
S15-CannalSide-(0-0.5ft)-LC-SW	0.0708	60.95	1.54	溃决
S15-Levee Crown-(0-0.5ft)-LT-SW	0.8910	220.41	1.56	溃决
S5-(0-0.5ft)-LT-SW	0.6894	227.59	1.61	溃决
S6-(0-0.5ft)-LC-SW	0.0361	315.46	1.81	溃决
S4-(0-0.5ft)-LC-SW	0.0900	463.62	1.92	溃决
S15-Levee Crown-(0.5-1.0ft)-LT-SW	0.0003	1429.50	2.04	溃决

图 11 (网络版彩图)泥沙指数与冲刷系数关系曲线

说明尽管数据来源不同, 但是不同土样的泥沙指数 ζ 与冲刷系数 K_d 确实存在很好的对数相关性, 且该关系非常确定, 这对于简化分析非常有益.

3.2 泥沙指数与土石坝溃决判别分析

由上可见, 依据泥沙指数, 坝体土料可分为两类: 当泥沙指数 $\zeta < 1$, 土料属于抗冲蚀土, 当泥沙指数 $\zeta > 1$, 土料属于易冲蚀土. Briaud等人^[12]记录了卡特里娜飓风中12个土石坝受灾案例(其中5个未溃决, 7个溃决案例). 采用本文方法, 计算泥沙指数与对应的坝体“溃决状态”关系见表5.

由表可见, 所有“未溃决”的5个坝体, 其泥沙指数均小于1, 而所有“溃决”的坝体其泥沙指数均大于1. 特别地, 多数“溃决”坝体, 其土料起动切应力较小, 但是, 有部分“溃决”坝体土样的起动切应力(如S15-Levee Crown-(0-0.5ft)-LT-SW和S5-(0-0.5ft)-LT-SW)大于“未

溃决”坝体S3-B2-(0-2ft)-SW土料的起动切应力, 却发生了溃决. 因此, 利用泥沙指数判断坝体土料抗冲能力较起动切应力效果更好. 也充分体现了利用泥沙指数判断坝体土料抗冲能力的有效性.

4 结论

土石坝坝体材料冲蚀特性一直是困扰溃坝研究者的主要难题之一, 本文通过土样冲蚀特性试验, 基于净剪切应力与冲蚀速率基本公式, 探讨了泥沙指数、冲刷系数、干密度、土料起动切应力、净剪切应力等之间的相关关系, 并将研究成果应用于土石坝溃决预测. 本文获得的主要成果如下.

(1) 冲蚀速率与净剪切应力呈幂函数关系. 对先前冲蚀速率表达式中泥沙指数的简化进行了讨论, 认为泥沙指数设为变量非常必要.

(2) 获得了泥沙指数与冲刷系数的转换公式. 两者

可利用式(5)或式(6)相互转换.

(3) 相比于土料的其他物理指标, 起动切应力对泥沙指数(冲蚀速率)的影响权重较高, 应给予充分重视. 基于本文试验数据及Briaud试验数据, 建立了基于起动切应力的泥沙指数预测公式(图10). 当土料起动切应力大于5 Pa时, 可利用该公式估算泥沙指数, 但当起动切应力小于5 Pa时, 该公式预测效果不佳. 尽管如此, 偏安全考虑, 对于起动切应力小的坝体土料, 一般为易冲蚀土料, 应引起充分重视.

(4) 泥沙指数可很好地描述坝体土料的抗冲蚀能力, 当泥沙指数大于1, 表明土料容易冲蚀, 当泥沙指数小于1, 表明不易冲蚀. 这一结论对于评估土石坝溃决风险非常有益. 12组溃坝案例数据验证显示, 利用泥沙指数进行溃决预测是可行的.

(5) 对于有溃决风险的土石坝, 有必要对其土料泥沙指数进行测定, 对土石坝溃决风险评估非常有益, 且该项实验花费不高, 应给予推广.

参考文献

- 1 Albertson M L, Dai Y B, Jensen R A, et al. Diffusion of submerged jets. *Trans Am Soc Civil Eng*, 1950, 11: 639–664
- 2 Fogle A W, McBurnie J C, Barfield B J, et al. Modeling free jet trajectory at an overfall and resulting shear stress distribution in the plunge pool. *Trans ASAE*, 1993, 36: 1309–1318
- 3 Robinson K M. Predicting stress and pressure at an overfall. *Trans ASAE*, 1992, 35: 561–569
- 4 Arulanandan K, Loganathan P, Krone R B. Pore and eroding fluid influences on surface erosion on soil. *J Geotech Eng Div*, 1975, 100: 51–66
- 5 Stein O R, Julien P Y, Alonso C V. Mechanics of jet scour downstream of a headcut. *J Hydraulic Res*, 1993, 31: 723–738
- 6 Jang W, Song C R, Kim J, et al. Erosion study of new orleans levee materials subjected to plunging water. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2011, 137: 398–404
- 7 Hanson G J, Temple D M, Hunt S L, et al. Development and characterization of soil material parameters for embankment breach. *Appl Eng Agric*, 2011, 27: 587–595
- 8 洪大林, 缪国斌, 邓东升, 等. 黏性原状土起动切应力与物理力学指标的关系. *水科学进展*, 2006, 17: 774–779
- 9 洪大林, 缪国斌, 邓东升, 等. 黏性土起动及其在工程中的应用. 南京: 河海大学出版社, 2005
- 10 Wahl T L. Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. *J Hydraulic Eng*, 2004, 130: 389–397
- 11 Briaud J L. Case histories in soil and rock erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River meander, Normandy cliffs, and New Orleans levees. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2008, 134: 1425–1447
- 12 Briaud J L, Chen H C, Govindasamy A V, et al. Levee erosion by overtopping in New Orleans during the Katrina Hurricane. *J Geotech Geoenviron Eng*, 2008, 134: 618–632
- 13 Zhang J Y, Li Y, Xuan G X, et al. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 3024–3029
- 14 Foster G R, Meyer L D, Onstad C A. An erosion equation derived from basic erosion principles. *Trans ASAE*, 1977, 20: 0678–0682
- 15 Shaikh A, Ruff J F, Abt S R. Erosion rate of compacted Na-montmorillonite soils. *J Geotech Engng*, 1988, 114: 296–305
- 16 Zhu Y. Breach growth in clay-dikes. Dissertation of Doctor Degree. Netherlands: Delft University of Technology, 2006

Experimental study of erosion characteristics of soils in homogeneous embankments

LI Yun^{1,2}, WANG XiaoGang¹, XUAN GuoXiang^{1,2} & ZHU Long¹

¹ *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;*

² *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China*

The erosion characteristics of soils in homogeneous embankments is the key problem of dam breach which is directly related to the breach formation and the rate of breaching. The Erosion characteristics of several soils in embankment have been researched. On the basis of the erosion test results, the effects of dry density, net shear stress, sediment detachment exponent on the rate of erosion were analyzed. According to the results the sediment detachment exponent should be calculated based on the erosion velocity and net shear stress. It is not convenient for analysis if the value of sediment detachment exponent was set 1 for cohesive soil or 1.5 for non-cohesive soil. It has an definite logarithmic relationship between erosion coefficient and sediment detachment exponent. The critical shear stress has an significant effect on the rate of erosion of soils. The erosion resistance of soils in embankment dams and the dam safety can be evaluated well by using the sediment detachment exponent.

embankment dam, dam material, erosion, sediment detachment exponent, dam break

doi: [10.1360/N092017-00120](https://doi.org/10.1360/N092017-00120)