DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.013

胶结土坝漫顶溃坝模型试验研究

李兆宇[1],贾金生[2],苏安双[1],郑璀莹[2],李爱丽[2]

(1.黑龙江省水利科学研究院寒区工程研究所,黑龙江 哈尔滨 150080;2.中国大坝工程学会,北京 100048)

摘要:通过开展大尺度胶结土坝溃坝模型试验,对胶结土坝在洪水漫顶作用下的流速分布、坝体侵蚀的变化过程进行了分析,以验证胶结土坝漫顶不溃的可能性。试验结果表明:模型填筑胶结土 28 d 无侧限抗压强度达到 4 MPa 以上;胶结土坝在最大坝顶水头为 55 cm、下游坡比 1∶2、最大流速达 5.6 m/s 条件下,漫顶冲刷 44 h 未发生溃决破坏;漫顶冲刷后下游坝坡最大侵蚀深度为 10 cm,平均侵蚀深度仅为 1.07 cm;胶结土坝可有效防止洪水漫顶冲刷引发的溃决破坏。

关键词:胶结土坝;无侧限抗压强度;漫顶溃坝;土体侵蚀深度;冲蚀量

中图分类号:TV41;TV641.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-1980(2022)05-0098-07

Experimental study on overtopping and dam break model of cemented soil dam

LI Zhaoyu[1], **JIA Jinsheng**[2], **SU Anshuang**[1], **ZHENG Cuiying**[2], **LI Aili**[2]

(1. *Cold Region Engineering Research Institute, Heilongjiang Provincial Hydraulic Institute, Harbin* 150080, *China*; 2. *Chinese National Committee on Large Dams, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: Through the large-scale model test of cemented earth dam, the velocity distribution and the dam erosion process of cemented earth dam under the flood overtopping were analyzed to verify the feasibility of non-failure overtopping of cemented earth dam. The test results show that the unconfined compressive strength of cemented soil within the model is more than 4 MPa after 28 days. When the maximum water head at the crest of cemented earth dam is 55 cm, the downstream slope ratio is 1∶2 and the maximum velocity reaches 5.6 m/s, there is no collapse failure after the overtopping scouring for 44 h. After the overtopping scouring, the maximum erosion depth of downstream dam slope is 10 cm and the average erosion depth is only 1.07 cm, thus the cemented earth dam can effectively prevent the collapse caused by the overtopping scouring of flood.

Key words: cemented soil dam; unconfined compressive strength; overtopping and dam break; soil erosion depth; erosion amount

我国平原水库分布广泛,往往利用天然河道修建,水库大坝高度低、坝轴线长,多为采用当地材料修筑的均质土坝。许多平原水库限于当时的经济、技术条件,大坝病险问题突出,当遇到特大洪水时很容易产生大坝溃决的风险,而均质土坝溃坝所占比例较大,其中 1984—1999 年占 86.12%,2000—2018 年占 70.24%,漫顶是大坝溃决的主要原因[1-2]。据统计,我国一些水库在 1959—1961 年和 1973—1975 年两个时期是溃坝高发期,年均溃坝分别为 154.7 座和 414.3 座,如甘肃史家沟和李家嘴水库、河南石漫滩和板桥水库大坝等,这些大坝溃坝原因为泄洪能力不足或遭遇超标准洪水导致的漫顶溃决[3-4]。2018 年老挝南部地区的桑片-桑南内水库由于副坝坝顶结构缺陷导致溃坝,产生约 6 亿 m^3 的溃坝洪水[5]。2020 年美国密歇根州艾登维尔(Edenville)大坝由于强降雨产生的超标准洪水导致坝体部分溃决,同时大坝服役已经超过了 50 年的设计使用寿命,因年久失修无法抵御大规模洪水而产生了溃坝[6]。关于土石坝溃决问题国内外学者将研究重点放在大坝溃决机理方面,主要围绕漫顶和渗透破坏开展了不同尺度的模型试验研究[7-14]。但是这些研究都是针对采用天然土料填筑的土石坝,关于胶结土坝漫顶溃坝的模型试验研究在国内还未见报道。

基金项目:"十三五"国家重点研发计划(2018YFC0406801);黑龙江省应用技术研发与开发计划引导项目(GZ16B012);黑龙江省重点研发计划指导类项目(GZ20210208)

作者简介:李兆宇(1984—),男,工程师,硕士,主要从事工程冻土及寒区水工建筑物抗冻技术研究。E-mail:hljsky_leo2013@163.com

通信作者:苏安双(1980—),男,高级工程师,博士,主要从事工程冻土及寒区水工建筑物抗冻技术研究。E-mail:bridgecrete@163.com

引用本文:李兆宇,贾金生,苏安双,等. 胶结土坝漫顶溃坝模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):98-104.
LI Zhaoyu, JIA Jinsheng, SU Anshuang, et al. Experimental study on overtopping and dam break model of cemented soil dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(4):98-104.

胶结坝(cemented material dam)是贾金生等[15-16]于 2009 年总结提出的一种新型坝型,理念是调整坝体结构来适应材料特性,充分利用当地材料筑坝。胶结坝按照原材料的粒径,分为胶结土坝、胶结砂砾石坝和胶结堆石坝,由于胶结坝对地形地质条件的适应性强,在材料和施工方面要求低,对于环境弃料基本实现全利用,在经济环保、节约能源、施工效率和安全等方面具有综合优势。贾金生等[17]认为胶结土 90 d 龄期无侧限抗压强度达 4 ~ 5 MPa,可以满足硬填料坝、胶结砂砾石坝通常可接受的最低性能要求。国内外采用水泥、石灰处理粉土或黏性土的技术被广泛应用在公路工程和铁路工程中,然而用于水利工程中堤坝填筑或防护则相对较少。Herrier 等[18]研究了石灰处理土的力学特性,随后在距离法国里昂很近的地方修筑了石灰处理粉土的试验堤坝,现场原位试验结果表明采用石灰处理粉土能够有效改善土体力学性能和提升堤坝工程服役的稳定性。Lino 等[19]探讨了处理土坝(soil treated dam,STD)的力学特性,在坝高、坡比及基础处理等方面对处理土坝的断面进行了优化设计,给出了处理土坝的成套施工工艺并对施工成本进行了分析。

对于新建水库大坝,采用胶结土筑坝,有望解决传统均质土坝洪水漫顶易溃的问题。为了实现胶结土坝漫顶不溃,本文在胶结土物理力学性能研究的基础上,合理确定了胶结土坝设计配合比,并通过大尺度的胶结土坝漫顶溃坝模型试验验证其漫顶不溃的可能性,以期为胶结土坝在国内水利工程中推广应用提供技术支撑。

1　试验装置与试验方法

1.1　模型试验装置

胶结土坝漫顶溃坝模型试验装置如图 1 所示。箱体内部长 10 m、宽 3 m、高 2.2 m,前端设置坝前储水池,中间为坝体填筑区,坝后设置量水堰,其后设置沉砂池。模型试验供水系统由 3 个水泵和 3 个供水管组成,每个水泵的额定功率为 7.5 kW,每小时可供水 400 m^3。试验采用变频器调节电流频率以控制水泵的转速,实现对供水流量的控制。在坝体的上游、下游布设了高清摄像头,从不同角度记录坝体的漫顶冲刷过程。在坝顶、下游坝坡不同位置布设了流速仪,测量过坝水流的流速。

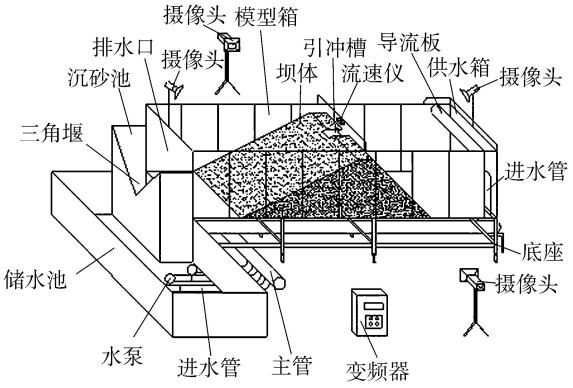


图 1　胶结土坝漫顶溃坝模型试验箱示意图

Fig. 1　Schematic diagram of overtopping and dam break model test box of cemented soil dam

采用三维激光扫描仪对漫顶冲刷后的胶结土坝下游坝坡的侵蚀情况进行监测。三维激光扫描仪的工作原理为激光发射器发射激光脉冲到目标物体表面测量其表面信息后,再反射回探测器,在测量过程中可自动记录大量的密集点云数据,以扫描坐标系为基准,将采集到的点云数据进行大面积、高分辨率扫描,重构被测物体的空间点位信息,以扫描仪发射激光束处为坐标系原点,测量目标物体表面与发射器之间的距离 S,同步记录扫描水平方向角度 α 和竖直方向角度 β,计算被测物体表面扫描点的三维坐标(x,y,z),如式(1)所示。试验采用 Trimble TX8 型三维激光扫描仪及其配套软件 Trimble RealWorks,该扫描仪的扫描速度可达 100 万点/s,扫描视场 360°×317°,测角精度为 80 μrad,最大测程 120 m,测距系统误差小于 2 mm。仪器工作温度范围为 0 ~ 40℃,湿度范围为 0% ~ 80%。

$$\begin{cases} x = S\cos\alpha\cos\beta \\ y = S\sin\alpha\cos\beta \\ z = S\sin\beta \end{cases} \tag{1}$$

1.2　模型试验设计

模型试验设计坝高为 1.6 m,上游坡比 1∶1,下游坡比 1∶2,坝顶宽度 0.5 m,模型为均质的胶结土坝。试验共设计了 5 种工况,对应坝顶水头分别为 5 cm、10 cm、16 cm、30 cm 和55 cm,坝体累计过流冲刷 44 h,如表 1 所示。

表 1　模型试验设计工况

Table 1　Designed conditions of model test

工况	电流频率/Hz	水泵流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	上游流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	坝顶水头/cm	冲刷时间/h	溢流孔宽度/cm
1	29.9	171.2	0.05	5	8	0
2	39.8	484.1	0.13	10	8	0
3	48.0	952.6	0.26	16	12	0
4	48.0	952.6	0.26	30	8	60
5	48.0	952.6	0.26	55	8	30

1.3 胶结土性能试验与模型制作

a. 原材料。模型采用胶结土填筑,配制胶结土用的土料为典型筑坝用黏性土,土粒径小于0.075 mm的细粒质量分数为91.39%,塑性指数为17.06。配制胶结土用的胶凝材料包括水泥、石灰和粉煤灰。水泥为亚泰集团哈尔滨水泥厂生产的天鹅牌P·O42.5水泥;生石灰为Ⅱ级钙质石灰,产地吉林省桦甸市,其中CaO质量分数为88%;粉煤灰为哈尔滨呼兰区热电厂粉煤灰,烧失量为12.5%。

b. 胶结土物理力学性能试验。胶结土击实试验参照TB 10102—2010《铁路工程土工试验规程》中第24节规定执行;胶结土无侧限抗压强度、三轴压缩试验参照GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》中第19、20节规定执行。

c. 胶结土坝模型填筑。胶结土制备全程采用机械化拌和工艺,按照试验方案设计的配合比将各种材料混合,采用JS500型双卧轴搅拌机进行搅拌(图2(a));将土料与胶凝材料充分搅拌均匀,将拌和后的胶结土采用履带式传输机输送到运输车辆中(图2(b))。胶结土含水率控制为w±2%(w为最优含水率),压实度为98%。为确保胶结土坝模型填筑的压实度,采用TRD-80型快速冲击夯进行分层填筑,每10 cm为一层,每层夯击次数相同,夯至试验要求的压实度(图2(c))。胶结土坝模型填筑完成后进行整形处理(图2(d)),最后覆盖洒水养护,养护龄期为28 d。

(a)胶结土拌和 (b)胶结土运输 (c)胶结土坝模型分层填筑 (d)胶结土坝模型整形

图2 胶结土坝模型填筑过程

Fig. 2 Filling process of cemented soil dam model

2 试验结果与分析

2.1 胶结土设计配合比及物理力学性能

根据前期已有研究成果,确定试验胶结土配合比如下:胶凝材料由水泥、石灰和粉煤灰组成,总量为土料质量的10%,其中水泥5%、石灰2.5%、粉煤灰2.5%。

a. 胶结土击实性能。胶结土的击实曲线如图3所示,胶结土最大干密度为1.676 g/cm^3,最优含水率为20.25%。

b. 胶结土无侧限抗压强度。对胶结土在不同含水率与不同龄期下的无侧限抗压强度进行了测试,结果如图4所示。从图4可以看出,胶结土无侧限抗压强度随养护龄期的增长而增大,强度与龄期呈对数关系,随着胶结土养护龄期的增长,胶材水化反应程度、水化产物数量随之增加,土体内部结构的胶结作用增强表现为抗压强度增大。不同含水率下3~7 d抗压强度相差不大,14~28 d抗压强度以最优含水率最大,最优含水

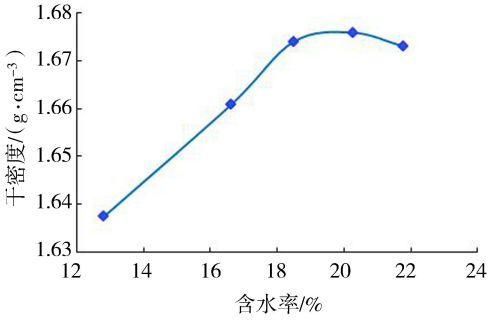


图3 胶结土击实曲线

Fig. 3 Compaction curve of cemented soil

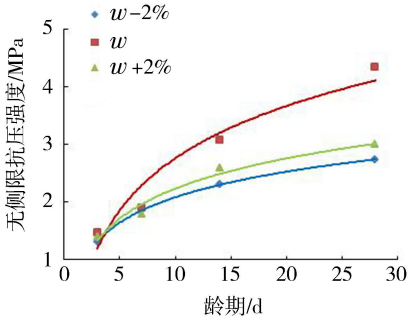


图4 胶结土无侧限抗压强度与养护龄期的关系

Fig. 4 Relationship between unconfined compressive strength and curing age of cemented soil

率下的胶结土 28 d 无侧限抗压强度达到 4 MPa 以上,满足胶结土筑坝可接受的最低性能要求。

c. 胶结土抗剪强度指标。对胶结土在不同养护龄期下进行不固结不排水三轴试验,得到胶结土的抗剪强度指标随龄期的变化规律如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着龄期的增长,胶结土的黏聚力和内摩擦角均随之增大,与龄期为 3 d 的抗剪强度指标相比,龄期 28 d 后土体黏聚力为 251.2 kPa,增大了 22%,内摩擦角为 21.51°,增大了 36%。

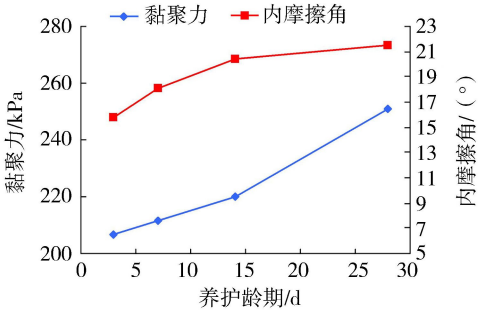


图 5　胶结土抗剪强度指标与养护龄期关系

Fig. 5　Relationship between shear strength parameters and curing age of cemented soil

2.2　胶结土坝模型填筑质量

胶结土坝模型填筑过程中对其填筑质量进行了 11 次测试,采用环刀法测试土体干密度与含水率,结果如表 2 所示,干密度为 1.59 ~ 1.65 g/cm^3,含水率为 20% ~ 22%。由于胶结土坝模型填筑压实度按 98% 控制,根据胶结土击实试验得到的最大干密度为 1.676 g/cm^3,最优含水率为 20.25%,胶结土填筑控制干密度为 1.64 g/cm^3,结合测试结果,干密度偏差±0.05 g/cm^3,含水率偏差±2%。填筑质量满足试验要求。

表 2　胶结土坝模型填筑质量测试结果

Table 2　Test results of filling quality of cemented soil dam model

测试序号	含水率/%	干密度/(g·cm^{-3})	测试序号	含水率/%	干密度/(g·cm^{-3})
1	19.5	1.59	7	21.1	1.61
2	19.6	1.60	8	21.6	1.59
3	20.4	1.61	9	21.8	1.62
4	20.7	1.60	10	22.0	1.65
5	20.6	1.63	11	22.4	1.62
6	20.8	1.64			

2.3　胶结土坝漫顶冲刷与流速分布

通过监控胶结土坝在漫顶水流作用下的形态变化,可知下游坝坡没有出现向上游逐渐发展的“陡坎”和形成溃口。通过在坝顶至下游坝坡沿程布设流速仪监测过坝水流流速分布情况,经过对监测数据的处理及插值计算,绘制成不同工况下过坝水流流速分布,结果如图 6 所示。

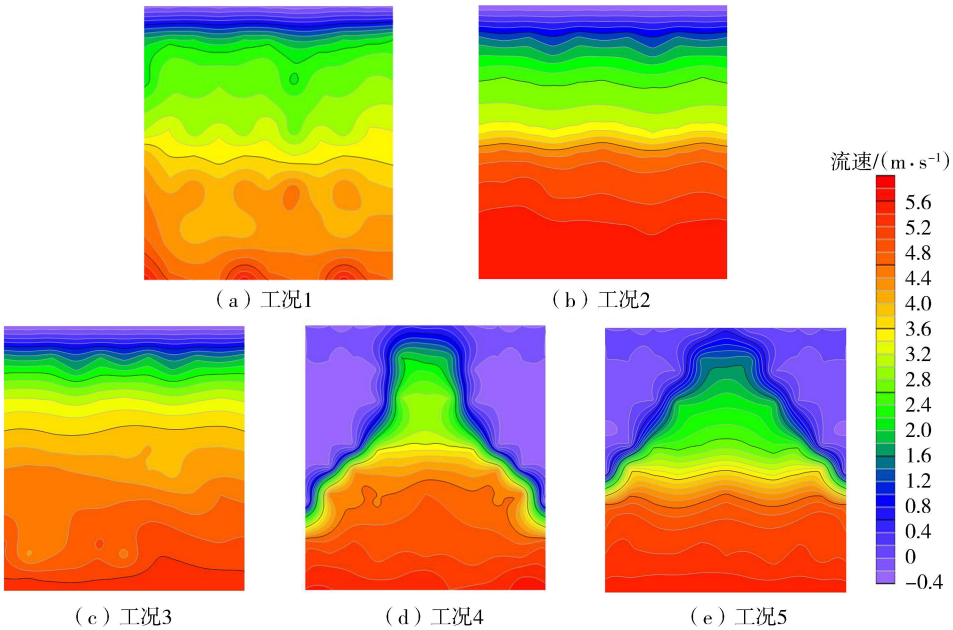


图 6　不同工况下过坝水流流速监测结果

Fig. 6　Monitoring results of flow velocity under different working conditions

通过对胶结土坝在漫顶水流作用下的下游坡面流速分布进行数值模拟,建立了二维数值模型,水流运动满足连续性方程和动量守恒方程,连续性方程和 x、y 方向的动量方程如下:

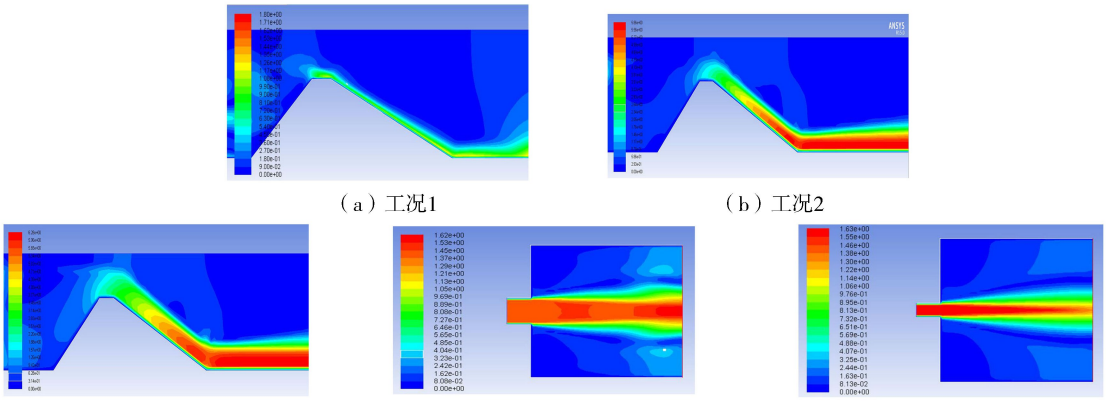
$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{\partial uH}{\partial x}+\frac{\partial vH}{\partial y}=q \tag{2}$$

$$\frac{\partial uH}{\partial t}+\frac{\partial uuH}{\partial x}+\frac{\partial uvH}{\partial y}=-gH\frac{\partial Z}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t H\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t H\frac{\partial u}{\partial y}\right)-g\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{C^2}+fvH \tag{3}$$

$$\frac{\partial vH}{\partial t}+\frac{\partial uvH}{\partial x}+\frac{\partial vvH}{\partial y}=-gH\frac{\partial Z}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu_t H\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu_t H\frac{\partial v}{\partial y}\right)-g\frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{C^2}+fuH \tag{4}$$

式中:H、Z 分别为水深和水位;u、v 分别为 x、y 向的水流流速;q 为流量;ν_t 为黏滞系数;g 为重力加速度;C 为谢才系数;f 为柯氏力系数,$f=2\omega\sin\varphi$,其中 ω 为地球自转角速度,φ 为计算水域所在地理纬度。

利用流体力学有限元法来计算控制方程的数值解,基本求解过程为控制方程分别在时间和空间上进行离散。其中时间离散采用差分法,空间离散采用有限元法,求解过程全部采用隐式格式。数值模拟计算结果见图7。



(a)工况1 (b)工况2 (c)工况3 (d)工况4 (e)工况5

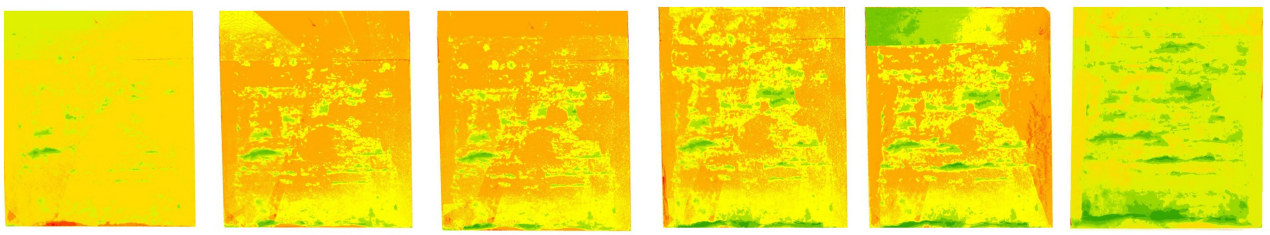
图7 不同工况下流速分布云图

Fig. 7 Cloud diagram of velocity distribution under different working conditions

从图6和图7可以看出,实际监测与数值模拟的坝坡坡面流速分布规律基本一致,过坝水流流速随坝顶水头的增加而增大,从坡顶到坡脚流速逐渐增大,下游有一定深度的淹没水流。胶结土坝在漫顶水流作用下累计冲刷28 h未发生溃决破坏。鉴于胶结土坝在前3种工况下漫顶未出现溃口,考虑在坝顶人为设置溢流孔模拟出现溃口的不利工况。当坝顶设置溢流孔时,孔口出流冲刷面积向下游逐步扩散,并且冲刷面积随溢流孔宽度的减小而增加,最大流速分布在1/3坝坡附近区域,监测最大流速达5.6 m/s。胶结土坝在有溃口工况下又累计冲刷16 h未发生溃决破坏。

2.4 胶结土坝下游坡面变化过程

对胶结土坝在不同工况漫顶冲刷后采用三维激光扫描仪监测坡面形态变化,通过处理获取的DEM数据得到各工况下坡面在漫顶水流冲刷下的动态变化如图8所示(图中不同高程用不同颜色区分)。从图8可以看出,胶结土坝在漫顶冲刷0.5 h后,在下游坝坡2/5坡长处形成了长0.5 m、宽0.1 m的冲坑,随着试验时间的增加,该冲坑逐渐扩大,冲刷44 h后冲坑发展为长1.5 m、宽0.4 m。同时在3/5~4/5坡长及坡脚处形成的冲坑也较为明显,冲坑在0~12 h内为点状分布,随着试验时间的增加,24 h后呈连续分布。根据三维激光



(a)累计冲刷0.5 h (b)累计冲刷6 h (c)累计冲刷12 h (d)累计冲刷24 h (e)累计冲刷36 h (f)累计冲刷44 h

图8 下游坡面侵蚀变化情况

Fig. 8 Change of erosion on downstream slope

扫描仪监测到的不同工况下坡面最大侵蚀深度的相对高程值,经过拟合分析,得到坡面冲坑的最大侵蚀深度随冲刷时间的变化关系如图 9 所示,对关系式求导得到不同工况下的最大侵蚀深度变化率,进而得到最大侵蚀深度变化率与流速的关系如图 10 所示。由图 9 和图 10 可以看出,坡面冲坑的最大侵蚀深度随冲刷时间的增加呈指数函数递增变化,并且最大侵蚀深度变化率与流速的关系曲线中未出现峰值,表明胶结土坝在试验工况下没有达到极限冲刷流速而发生溃决破坏。

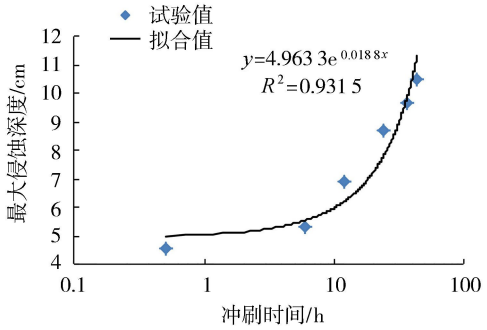


图 9　最大侵蚀深度随冲刷时间的变化关系

Fig. 9　Relationship between maximum erosion depth and flushing time

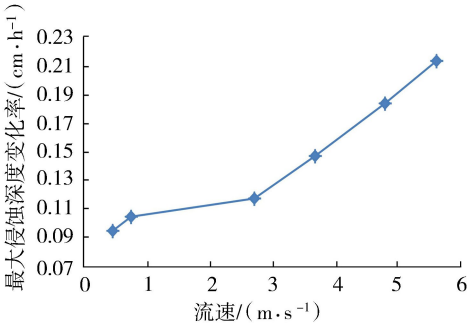


图 10　最大侵蚀深度变化率与流速的关系

Fig. 10　Relationship between change rate of maximum erosion depth and velocity

通过三维激光扫描仪监测下游坡面在不同工况下的侵蚀深度相对高程值和点云数据组成的栅格面积值,由二者相乘得到土体侵蚀体积,累计叠加计算得到侵蚀总体积,由侵蚀总体积除以侵蚀总面积得到土体平均侵蚀深度,由侵蚀总体积与土体密度相乘得到土体侵蚀量,计算结果如表 3 所示。

表 3　土体侵蚀参数计算

Table 3　Calculation results of soil erosion parameters

时间/h	坝顶水头/cm	侵蚀总面积/cm^2	侵蚀总体积/cm^3	平均侵蚀深度/cm	土体侵蚀量/kg
0.5	5	24 549.72	9 846.81	0.40	19.38
6	5	37 910.00	18 798.17	0.50	36.99
12	10	34 577.80	19 538.70	0.57	39.25
24	16	47 708.68	31 943.07	0.67	62.86
36	30	51 602.00	55 078.32	1.07	108.39
44	55	59 715.32	56 413.22	0.94	111.02

下游坡面土体冲蚀量随着冲刷时间的增加逐渐增加,特别设置溢流孔后侵蚀量增加 70%以上。下游坡面在 2/5 坝坡附近表层土体受水流侵蚀现象较为明显,最大侵蚀深度达 10 cm,平均侵蚀深度为 1.07 cm,随着冲刷时间的增加,坡面冲蚀逐渐趋于稳定,其原因为:一方面由于受到试验条件限制,坡面表层土体夯实程度不够,并且表层土体水分蒸发较快,导致胶凝材料水化反应不充分,土颗粒间胶结程度较差,存在散粒土颗粒,易被水流冲蚀;另一方面水流漫顶后流速沿程逐渐增大,对下游坝坡土体产生较强的冲蚀作用。当水流把表层不稳定的土体冲走后,坝坡不再进一步产生侵蚀,说明胶结土发挥了作用,能有效抵抗水流的侵蚀。胶结土坝从开始漫顶至试验结束共用时 44 h,坝体未发生溃决破坏。

3　结　　论

a. 设计的模型试验用胶结土龄期 28 d 无侧限抗压强度达到 4 MPa 以上,黏聚力为 251.2 kPa,内摩擦角为 21.51°,满足胶结土筑坝可接受的最低性能要求。

b. 胶结土坝在漫顶水流作用下,下游坡面在 2/5 坝坡附近表层土体产生明显冲蚀现象,最大侵蚀深度达 10 cm,平均侵蚀深度为 1.07 cm,随着冲刷时间的增加,坡面冲蚀逐渐趋于稳定。

c. 胶结土坝在最大坝顶水头为 55 cm、下游坡比 1∶2、最大流速达 5.6 m/s 条件下漫顶冲刷 44 h 未发生溃决破坏,具有良好的抗水流冲刷稳定性。

参考文献:

[1] 解家毕,孙东亚. 全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J]. 水利水电技术,2009,40(12):124-128. (XIE Jiabi,SUN Dongya. Statistics of dam failures in China and analysis on failure causations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2009,40(12):124-128. (in Chinese))

[2] 李宏恩,马桂珍,王芳,等. 2000—2018 年中国水库溃坝规律分析与对策[J]. 水利水运工程学报,2021(5):101-111. (LI

Hongen, MA Guizhen, WANG Fang, et al. Analysis of dam failure trend of China from 2000 to 2018 and improvement suggestions [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(5): 101-111. (in Chinese))

[3] 张建云,杨正华,蒋金平. 我国水库大坝病险及溃决规律分析[J]. 中国科学:技术科学,2017,47(12):1313-1320. (ZHANG Jianyun, YANG Zhenghua, JIANG Jinping. An analysis on laws of reservoir dam defects and breaches in China[J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 47(12): 1313-1320. (in Chinese))

[4] 周克发,李雷. 我国已溃决大坝调查及其生命损失规律初探[J]. 大坝与安全,2006(5):14-18. (ZHOU Kefa, LI Lei. Investigation for breached dams and its preliminary exploration to the characteristics of loss of life in China[J]. Dam & Safety, 2006 (5): 14-18. (in Chinese))

[5] 徐泽平. 老挝桑片-桑南内水电站溃坝事件初步分析与思考[J]. 水利水电快报,2018,39(8):6-10. (XU Zeping. Preliminary analysis and reflection on dam break event of Sangpian-Sangnannei Hydropower Station in Laos[J]. Express Water Resources Hydropower Information, 2018, 39(8): 6-10. (in Chinese))

[6] PRADEL D, LOBBESTAEL A. Edenville and sanford dam failures: field reconnaissance report[R]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2021.

[7] 陈生水,钟启明,陶建基. 土石坝溃决模拟及水流计算研究进展[J]. 水科学进展,2008,19(6):903-910. (CHEN Shengshui, ZHONG Qiming, TAO Jianji. Development in embankment dam break simulation and water flow simulation[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 903-910. (in Chinese))

[8] 张建云,李云,宣国祥,等. 不同黏性均质土坝漫顶溃决实体试验研究[J]. 中国科学:技术科学,2009,39(11):1881-1886. (ZHANG Jianyun, LI Yun, XUAN Guoxiang, et al. Experimental study on overtopping burst of different cohesive homogeneous earth dams[J]. Scientia Sinica Technologica, 2009, 39(11): 1881-1886. (in Chinese))

[9] 张大伟,黄金池,何晓燕. 无黏性均质土石坝漫顶溃决试验研究[J]. 水科学进展,2011,22(2):222-228. (ZHANG Dawei, HUANG Jinchi, HE Xiaoyan. Experimental study on overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankment dams[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 222-228. (in Chinese))

[10] 王秋生,王洪洋,苏瑞林. 加筋无黏性土石坝漫顶溃坝试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2017,15(4):263-271. (WANG Qiusheng, WANG Hongyang, SU Ruilin. Experimental study on overtopping of geotextile-reinforced noncohesive embankments[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15(4): 263-271. (in Chinese))

[11] 罗优,陈立,平妍容,等. 土石坝漫顶溃决模式与溃坝参数预测[J]. 长江科学院院报,2016,33(2):38-41. (LUO You, CHEN Li, PING Yanrong, et al. Impact of overtopping breach mode on dam-break parameters of homogeneous earth-rock dams [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(2): 38-41. (in Chinese))

[12] 钟启明,沈光泽,曹伟. 土石坝溃决机理模型试验研究进展[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(4):615-623. (ZHONG Qiming, SHEN Guangze, CAO Wei. Review on the model tests for earth-rock dam breach[J]. Journal of Disaster Prevention Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 615-623. (in Chinese))

[13] 钟启明,陈生水,梅世昂. 均质黏性土坝漫顶溃决机理及溃坝过程模拟[J]. 工程科学与技术,2019,51(5):25-32. (ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, MEI Shiang. Breach mechanism and breach process simulation of homogeneous cohesive earthen dam due to overtopping[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5): 25-32. (in Chinese))

[14] 陈淑婧,王秋生,于沭,等. 土石坝漫顶溃决模型的分析比较[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(5):406-411. (CHEN Shujing, WANG Qiusheng, YU Shu, et al. Comparative analysis of models for overtopping-induced earth-rock dam breach [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 406-411. (in Chinese))

[15] 贾金生,刘宁,郑璀莹,等. 胶结颗粒料坝研究进展与工程应用[J]. 水利学报,2016,47(3):315-323. (JIA Jinsheng, LIU Ning, ZHENG Cuiying, et al. Studies on cemented material dams and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 315-323. (in Chinese))

[16] 贾金生,郑璀莹,王月,等. 胶结颗粒料坝筑坝理论探讨与实践进展[J]. 中国科学:技术科学,2018,48(10):1049-1056. (JIA Jinsheng, ZHENG Cuiying, WANG Yue, et al. Theoretical discussion and practical progress of cemented material dam construction[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(10): 1049-1056. (in Chinese))

[17] JIA Jinsheng, LINO M, JIN Feng, et al. The cemented material dam: a new, environmentally friendly type of dam[J]. Engineering, 2016, 2(4): 490-497.

[18] HERRIER G, LECONTE P, NERINCX N, et al. Lime treated soil as an erosion-resistant material for hydraulic earthen structures: state of the art and presentation of the French Digue. Elite Project[C]//Proceedings of the South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction. Rostock: University of Rostock, 2014: 75-84.

[19] LINO M, DELORME F, PUIATTI D. The soil treated dam (STD) a new concept of cemented dam[C]//JIA Jinsheng, ZHOU Jianpin, POLIMON J, et al. Technical Progress on Sustainable Hydropower Development and Roller Compacted Concrete Dams. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2015: 461-471.

(收稿日期:2021-09-20 编辑:熊水斌)