

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2011. 01. 003

松散及弱固结堰塞体溃坝形式与流量过程

邓明枫^{1 2 3} 陈宁生^{1 3} 胡桂胜^{1 2 3} 邓 虎⁴ 任海若⁵

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 四川 成都 610041 ; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049 ;
3. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室 四川 成都 610041 ; 4. 成都理工大学地球科学学院 四川 成都 610059 ;
5. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065)

摘要 :为了研究弱固结与松散堰塞体的不同破坏形式 ,在四川汶川地震灾区分别进行了松散及弱固结堰塞体在自然溢流条件下的破坏试验。通过对堰塞体溃决流量过程与溃决形式进行分析 ,发现与松散堰塞体相比 ,弱固结堰塞体溃坝流量的波动性更弱 ,溃决流量更小 ;松散堰塞体的溃口形式为宽深型 ,弱固结堰塞体的溃口形式为窄深型。侵蚀堰塞体并形成溃口的作用力主要包括因流速分布不均形成的剪应力 τ_v 和因水流在跌坎旋流运动时形成的陡坎剪应力 τ_e ,其中陡坎剪应力起主要作用 ,当陡坎剪应力与堰塞体临界剪应力达到平衡时 ,堰塞体达到侵蚀平衡 ,破坏停止。

关键词 松散堰塞体 ;弱固结堰塞体 ;溃坝流量 ;堰塞体溃决形式

中图分类号 :TV697.3+9 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2011)01-0011-04

Outburst patterns and discharge process for weakly consolidated and loose barrier dams//DENG Ming-feng^{1,2,3}, CHEN Ning-sheng^{1,3}, HU Gui-sheng^{1,2,3}, DENG Hu⁴, REN Hai-ruo⁵(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China* ; 2. *Graduate University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China* ; 3. *Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, CAS, Chengdu 610041, China* ; 4. *College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China* ; 5. *State Key Lab of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

Abstract : In order to study different outburst patterns of weakly consolidated and loose barrier dams , the outburst experiments on loose and weakly consolidated dams under natural overflows in the disaster area of Wenchuan Earthquake in Sichuan Province were carried out. The analytic results of discharge process and outburst patterns of barrier dams show that , compared with those of the loose barrier dam , the fluctuation of outburst discharge of the weakly consolidated dam is weaker and the outburst discharge is smaller. The breaches are wide-deep and narrow-deep patterns for loose and weakly consolidated dams , respectively. The forces to erode the barrier dams and to result in breaches mainly include the shear stress τ_v induced by uneven distribution of water velocity and the headcut shear stress τ_e resulted from the circulation of water at the headcut. The headcut shear stress τ_e is dominant , and the barrier dams will reach the erosion equilibrium when the headcut shear stress τ_e is equal to the critical stress of the barrier dams.

Key words : loose barrier dam ; weakly consolidated barrier dam ; outburst discharge ; outburst pattern

堰塞湖是在一定的地质与地貌条件下 ,由火山喷发物、滑坡体、泥石流和冰川堆积物等形成的自然堤坝横向阻塞河谷后造成上段壅水而形成的湖泊^[1]。2008 年 5 月 12 日四川汶川大地震诱发了大量滑坡、崩塌及泥石流 ,并导致 256 处堰塞湖的形成^[2] ,其中规模最大的为唐家山堰塞湖 ,其库容达 3.02 亿 m³。历史上曾有多处堰塞湖产生并溃决 ,如 2000 年 4 月 9 日西藏易贡扎木弄沟发生特大山体滑

坡 ,形成平均高 60 m 的天然大坝 ,最大库容达 40 亿 m³ [3] ; 1933 年 8 月 25 日 ,四川叠溪发生 7.5 级大地震 ,形成高 160 m 的叠溪堰塞坝 , 10 月 9 日叠溪堰塞坝溃决 ,溃决洪水造成 2 500 多人死亡^[4]。由此可见 ,堰塞湖的形成对下游居民的生命财产安全造成重大威胁 ,有效地评估堰塞湖的溃决形式对预测堰塞湖溃决可能造成的危害具有重要的指导意义。

由崩塌、滑坡、泥石流自然堆积而成的堰塞体大

小不一,随机分布性强,土体疏松,抗剪强度低,易在水流的侵蚀作用下发生破坏^[5]。Schuster^[6]指出堰塞体的入库流量、渗流速度、颗粒特征参数等是影响堰塞湖稳定性的主要特征参数。Costa 等^[7]统计了 73 处滑坡堰塞湖的溃决时间,发现近 50% 的堰塞湖会在其形成的 10 d 之内发生溃决,溃决的主要方式为溢流,而管涌和边坡失稳引起的溃决只占很小的比重。笔者的模型试验结果也证实了这一点。由此可见,堰塞湖的溃决时间与库区的水位有重要关系。堰塞湖水量平衡方程如下:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_1 - Q_2 \tag{1}$$

式中: ΔV 为 Δt 时间内堰塞湖的蓄水量; Δt 为考虑的时间段; Q_1 为 Δt 时间内堰塞湖的出库水量; Q_2 为 Δt 时间内堰塞湖的入库水量。

只有当堰塞湖出库水量小于入库水量时库区水位才会不断上升,最后发生溢流破坏。对堰塞湖而言,入库水量主要包括上游来水、降雨等,出库水量主要包括坝体渗流等。堰塞体由松散堆积体形成,均有不同程度的渗流特征。渗流特征与堰塞体的颗粒组成特征有很大关系,以粗大颗粒为主,含有较少细颗粒的堰塞体具有较大的渗流量。

由土石体组成的坝体的破坏形式,目前主要有 2 种破坏模式: ①底侵破坏。Chu-agor 等^[8]通过模型试验发现,底侵破坏是渗流作用下土坡破坏的主要形式。底侵破坏与土体强度有很大关系,松散土体的强度低,容易发生侵蚀破坏,弱固结土体的强度较高,侵蚀难度增加,侵蚀效果明显减弱。②陡坎冲刷^[9-10]。漫顶水流对跌水面的细沟冲刷易形成较大的陡坎,水流在陡坎处流动时形成旋流而产生垂直于跌水面方向的剪切力,剪切力不断侵蚀坝底,其侵蚀程度随过流量的增加而迅速扩大。底侵破坏和陡坎侵蚀的根本机制在于剪应力使土体发生剪切破坏^[8-9],这种破坏发生在剪应力大于土体抗剪强度的部位。

5.12 汶川大地震发生以来,地震灾区的堰塞体已经由松散土体转变为弱固结土体。此外,在我国的西藏地区也存在大量弱固结的堰塞湖和冰湖坝体,因此,研究松散堰塞体与弱固结堰塞体的溃决形

式,对地震灾区以及西藏地区冰湖和堰塞湖的危险性评估与除险具有重要的指导意义。

1 试验设计

试验槽选址于四川省阿坝藏族羌族自治州茂县宗渠沟内,根据对安县灌滩、肖家桥以及茂县宗渠等堰塞湖的实际调查与分析,确定模型槽两岸坡度为 60°,沿槽坡降为 3°,模型槽底宽 0.6 m,见图 1。上游流量采用三角堰供水,为保证在试验过程中上游流量保持不变,供水池的水流补给方式为小孔出流,试验中控制小孔出流水头为 0.5 m,多余的水流向外自由溢流。

汶川地震形成的堰塞湖在震后不久即发生溃决的案例占多数,皆缘于堰塞体松散,基本上呈未固结状态,根据宗渠堰塞湖溃决后堆积物的现场配样,得到松散堆积体的密度为 1.6 g/cm³。随着时间的推移,堰塞体在自重作用下发生固结,由于汶川地震所形成的堰塞湖距今时间不长,堰塞体处于弱固结状态,根据现场进行的固结试验,土体在不同程度的固结下密度达到 1.6 ~ 2.0 g/cm³,故试验中取 1.8 g/cm³ 为弱固结体的代表密度进行试验。鉴于堰塞湖多为溢流破坏^[7,11],本次试验中亦将主要考虑这种破坏形式。

试验分松散与弱固结堰塞体进行设计,控制 2 组试验具有各自条件下的对应密度,并保证其他设计参数基本一致。鉴于实际堰塞湖沿河向长度较长,且堰塞体的冲刷破坏为水头与土体的相互作用,而与堰塞体长度关系不大,同时为了节省试验用料,加快试验进度,故设计沿河堰塞体长度比尺(1:200)小于堰塞体高度与轴向比尺(1:100)。试验基本参数见表 1,试验堰塞体横纵剖面见图 2。

表 1 试验堰塞体基本设计参数

试验序号	坝高/cm	坝顶宽/cm	坝底长/cm	上下游坡脚/(°)	密度/(g·cm ⁻³)	上游来水量/(cm ³ ·s ⁻¹)
1	30	40	60	30	1.6	448
2	30	40	60	30	1.8	448

试验前通过颗分试验得到宗渠堰塞湖坝体的颗粒级配,然后将大于 5 mm 的颗粒按 1:100 进行缩放后进行等质量替换,小于 5 mm 的颗粒保持原级配不

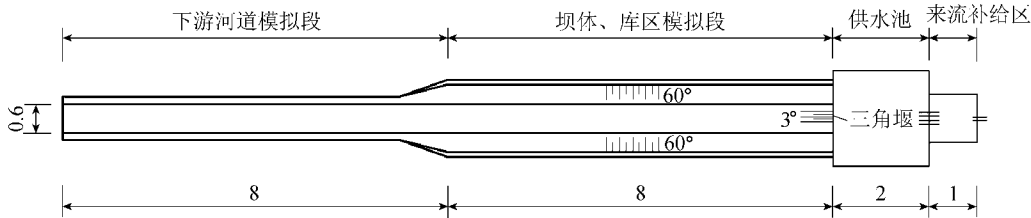


图 1 试验槽俯视图(单位:m)

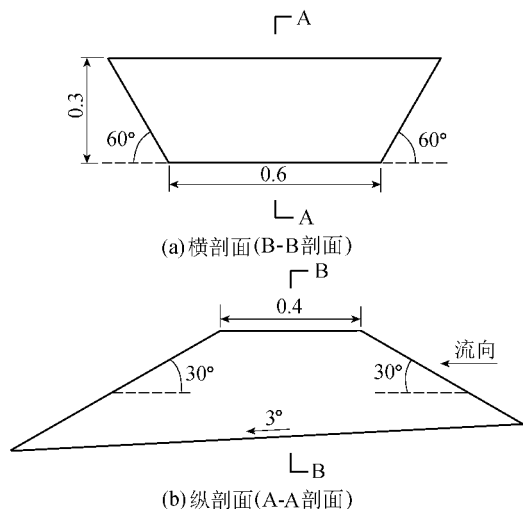


图2 试验堰塞体剖面(单位:m)

变。试验用料为2009年3月21日宗渠堰塞湖溃决后冲刷到下游的堆积体。将堆积体进行人工筛分后按试验设计的颗粒级配配样。最终采用的颗粒级配曲线见图3。

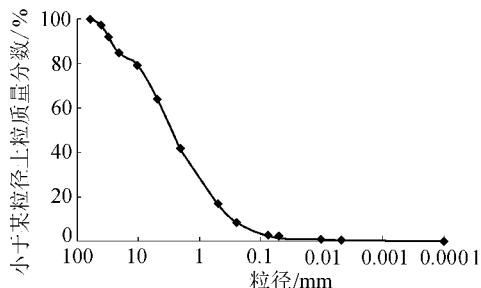


图3 试验用料颗粒级配曲线

2 试验过程与结果分析

2.1 试验过程

按规格建好坝体后,启动上游进水阀门,调节上游进水阀门以控制三角堰堰上水头,使堰上水头保持在4cm左右。按照直角三角堰流量计算公式 $Q = C_0 H^{5/2}$ (其中 C_0 为直角三角堰的流量系数,一般取1.4, H 为堰上水头),对应流量为 $448 \text{ cm}^3/\text{s}$ 。当水位逐渐上升到坝顶高程以上后堰塞体发生漫顶冲刷破坏。

用DV记录试验过程中的库区水位变化,通过对时间差分,按照库区水位平衡方程(式(1))推导出溃坝流量计算公式(式(2)):

$$Q_1 = \frac{\Delta V}{\Delta t} + Q_2 \quad (2)$$

2.2 试验结果

2.2.1 流量过程分析

试验结束后整理溃决过程中的库区水位变化录像资料,按式(2)进行时间差分计算,得到溃决流量随时间变化情况,如图4所示。

从图4可以看出,弱固结堰塞体溃决时间明显长于松散堰塞体溃决时间,松散堰塞体和弱固结堰塞体从坝顶开始过流到最大流量历时分别为164s和470s,而最大流量分别为 7 L/s 和 2.8 L/s 。另外,溃坝流量存在明显的波动特征,松散堰塞体的波动特征更为明显。

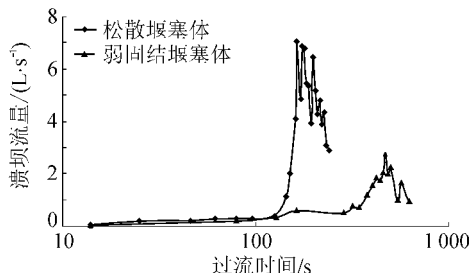


图4 溃坝流量随时间变化曲线

土体冲刷破坏是水流运动时产生的剪应力超过土体的抗剪强度所造成的。由于堰塞体组成物的颗粒大小不一,分布不均,各处的抗剪强度存在较大差异。细小颗粒间接触面小,抗剪强度低,最先发生剪切破坏,破坏后小颗粒即被水流搬运,大颗粒与其他颗粒的接触面积大,抗剪强度较高,不易发生剪切破坏,它们只有在与之接触的小颗粒完全被搬运后才会发生运动。由此可见,土体强度的差异使水流表现出差异性侵蚀(即水流在大小颗粒接触面表现出不同的侵蚀能力)并使溃坝流量随时间呈现出波动特征。与松散堰塞体相比,弱固结堰塞体强度较高,侵蚀难度增加,溃坝时间延长,流量减小;另一方面,弱固结堰塞体各部位的强度差异更小,水流的差异性侵蚀变弱,溃坝流量的波动特征也明显减弱。

2.2.2 溃决形式分析

试验结果表明,松散堰塞体和弱固结堰塞体呈现出完全不同的溃决形式。图5分别为松散堰塞体和弱固结堰塞体的溃口形态。由图5可见:松散堰塞体呈宽深型溃决,坝体中轴线溃口宽45cm、深24cm;弱固结堰塞体呈窄深型溃决,坝体中轴线溃口宽24cm、深20cm。

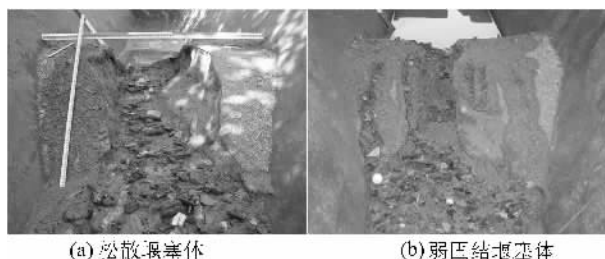


图5 堰塞体溃口形态

2种不同的溃决形式与土体强度有很大关系,其主要机制在于流体剪应力与土体抗剪强度的大小关系。水流运动产生的剪应力包括2部分:一是由

于液体的黏滞性和边界面的滞水作用,过水断面上流速分布不均,产生平行于水流方向的剪应力 τ_v ,作用于整个过流边界;二是水流垂向运动在陡坎处旋流形成的剪应力 $\tau_e^{[9]}$ 作用于水流作用的底面。堰塞体溃口在横向的发展受 τ_v 的影响,松散堰塞体的抗剪强度较低(小于 τ_v) 故在 τ_v 作用下便能形成较宽的溃口,弱固结堰塞体的抗剪强度较大,难以被 τ_v 侵蚀,故只能形成较窄的溃口。溃口在垂向上的发展受 τ_v 及 τ_e 的共同作用,由于 $\tau_e \gg \tau_v$,故溃口在垂向上的扩展主要受 τ_e 的影响。

根据陡坎冲刷理论,水流在陡坎处流动时形成旋流而产生垂直于跌水面方向的剪切力,剪应力不断侵蚀坝底,Hanson 等^[9]给出的侵蚀速率表达式为

$$\frac{dX}{dt} = \left(\frac{H}{2E_v} \right) k_d (\tau_e - \tau_c) \quad (3)$$

式中: H 为陡坎顶部与底部高差; E_v 为冲刷形成的临空面在水平方向上的长度; k_d 为侵蚀系数,与土体的含水量和密实度有关^[10]; τ_e 为临界剪应力,与土体的含水量和密实度有关^[10]。

由式(3)可以看出,对于特定土体,垂直方向上的侵蚀速率 $\frac{dX}{dt}$ 只与 H 、 E_v 和 τ_e 有关。初始时段 H 较大,水流发生旋流时产生的 τ_e 大于 τ_c ,垂直方向上的侵蚀便不断发展,随着 H 不断降低, τ_e 减小,当 H 降低到所产生的 τ_e 等于 τ_c 时,垂直方向上的侵蚀便不再发生。由于陡坎水流产生的 τ_e 较大,足以使弱固结堰塞体发生破坏,故松散堰塞体和弱固结堰塞体都呈现出较深的溃口。与松散堰塞体相比,弱固结堰塞体的 τ_c 更大,故当垂直方向上达到侵蚀平衡时,对应的 H 也更大,所以弱固结堰塞体的溃口较浅,溃决后库区中的残余水位较深。同时,由于 τ_c 越大,侵蚀速率 $\frac{dX}{dt}$ 越小,所以弱固结堰塞体破坏持续的时间比松散堰塞体的持续时间长。

3 结 语

试验结果表明,在自由溢流破坏情况下,松散堰塞体与弱固结堰塞体呈现出明显不同的流量特征与破坏形式。与松散堰塞体相比,弱固结堰塞体破坏过程的持续时间较长,最大溃坝流量较小,溃坝流量的波动性也较弱。

密度是堰塞体溃决形式的主要影响因素。溃口在横向上的发展主要受水流运动时因流速差异而产生的剪应力 τ_v 的影响, τ_v 一般较小,故只能侵蚀松散堰塞体,形成较宽的溃口,溃口在垂向上的扩展主

要受水流在陡坎冲刷时 τ_e 的影响,陡坎冲刷的 τ_e 较大,能够侵蚀弱固结土体,形成较深的溃口,所以松散堰塞体和弱固结堰塞体的溃口分别呈宽深型和窄深型。

通过试验发现,弱固结土体与松散土体相比更不易被水流侵蚀,形成的溃决流量较小,所以排导槽应选择 在固结程度较高的部位。由于大石块 视为局部的土体固结,所以大石块集中的部位也更不易被水流侵蚀。实际操作中可运用地质雷达等手段确定土体密度较高或含较大石块 的部位,从而设计出更加有效的排导槽,更好地进行堰塞湖的人工排除。

参考文献:

- [1] 国家减灾委员会科学技术部抗震救灾专家组.汶川地震灾害综合分析与评估[M].北京:科学出版社,2008:57.
- [2] 崔鹏,韩用顺,陈晓清.汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估[J].四川大学学报:工程科学版,2009,41(3):35-42.
- [3] 刘宁,蒋乃明,杨启贵,等.易贡巨型滑坡堵江灾害抢险处理方案研究[J].人民长江,2000,31(9):10-13.
- [4] 中国水利水电科学研究院水利史研究室.1933年岷江叠溪地震堰塞湖的形成及次生灾害[J].中国水利,2008(10):88-89.
- [5] 赵元弘.小南海水库地震堰塞坝体防渗处理[J].水利水电科技进展,2008,28(5):39-44.
- [6] SCHUSTER R L. Risk-reduction measures for landslide dams [J]. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 2006(Special Issue 1):9-13.
- [7] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100:1054-1068.
- [8] CHU-AGOR M L, FOX G A, CAMCIENNE R M, et al. Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes [J]. Journal of Hydrology, 2008, 359:247-259.
- [9] HANSON G J, ROBINSON K M, COOK K R. Prediction of headcut migration using a deterministic approach [J]. Transaction of ASAE, 2001, 44(3):525-531.
- [10] HANSON G J, COOK K R, SIMON A. Determining erosion resistance of cohesive materials [C]//WELLS S A. Proceedings of ASCE Water Resources Engineering Conference, Seattle, Wash, 1999.
- [11] XU Qiang, FAN Xuan-mei, HUANG Run-qiu, et al. Landslide dams triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, south west China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68:373-386.

(收稿日期:2010-06-04 编辑:高建群)