

堰塞坝的形成机理与溃决风险

任 强 ,陈生水 ,钟启明 ,曹 伟

(南京水利科学研究院 ,江苏 南京 210029)

摘要 :基于多座溃决堰塞坝案例的调查 ,对堰塞坝的形成机制、溃决风险及其影响因素进行分析总结 ,认为堰塞坝主要是由地震或降雨或火山喷发引起的山体滑坡、崩塌、泥石流所形成 ,形成方式可概括为滑坡、崩塌、泥石流以及碎屑流 ,其中滑坡是形成堰塞坝最主要的形式。堰塞坝的工作条件、坝体几何特征以及坝体物质组成和内部结构都与人工土石坝存在明显差别 ,其溃决的可能性远高于人工土石坝。指出堰塞坝的溃决风险主要取决于上游来水量、坝的拦蓄水量、坝的几何尺寸和坝的结构与物质组成 ,并讨论了降低堰塞坝溃决风险的应对措施。鉴于堰塞坝极高的溃决可能性与严重的致灾后果 ,建议今后加强堰塞坝溃决机理、溃坝过程的试验与数值模拟研究工作 ,提出能合理反映堰塞坝溃口发展规律、溃坝洪水流量过程的数值模型与相应计算方法 ,为科学预测堰塞坝溃决致灾后果 ,制定堰塞坝溃决应急预案提供技术支撑。

关键词 堰塞坝 ;形成机理 ;溃决风险 ;影响因素

中图分类号 :TV698.2+37 ;P642.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)05-0030-05

Formation mechanism and breaching failure risk of barrier dams//REN Qiang , CHEN Sheng-shui , ZHONG Qi-ming , CAO Wei(*Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China*)

Abstract :Based on the investigation of several broken barrier dams , the formation mechanism , breaching failure risk and impact factors were analyzed. The barrier dams were regarded to be formed by landslides , collapses and debris flows caused by earthquakes , rainfall or volcanic eruption. The modes of formation of barrier dams could be categorized into those by landslides , collapses , debris flows and clastic flows , among which the mode of formation aroused by the landslides should be the uppermost. There were obvious differences in the working conditions , characteristics of dam and substance composition , and internal structures between barrier dams and artificial earth-rock dams. The breaching failure risk of the former was much higher than that of the latter and mainly depended on the upstream flows , water storage , geometrical sizes as well as structure and composition of materials. The countermeasures for the reduction of the breaching failure risk were discussed. In view of great possibility of dam break and serious catastrophic consequences , it was suggested that the studies on the failure mechanism and the experiments on the process of the dam breach should be strengthened , and reasonable numerical models and evaluation approaches for the process of breach development and flood discharge should be proposed so as to evaluate the consequences due to dam break and to provide technical support for emergency plans of barrier dams.

Key words :barrier dam ; formation mechanism ; breaching failure risk ; impact factor

堰塞湖是在一定的地质与地貌条件下 ,由于地震、降雨或火山喷发等原因引起山崩、滑坡、泥石流、熔岩流等堵截山谷、河谷 ,造成上游段壅水而形成的湖泊。阻塞山谷、河道的堆积体称为堰塞坝^[1-2]。自然界中形成堰塞坝的方式很多 ,据统计^[3] ,90%以上的堰塞坝是由地震或降水引起的山体滑坡、崩塌、泥石流所诱发的。火山喷发触发的堰塞坝占 8% ,位于第 2 位 ;其他因素 ,如砍伐、河水下切和人工开挖

等触发的堰塞坝仅占 2% ;有的堰塞坝则是几种因素同时作用而触发的。资料表明^[4-5] ,自 1856 年以来我国有 44 次地震诱发产生了堰塞坝。2008 年“5.12”汶川特大地震诱发的堰塞坝就达 100 多处 ,不少河流上滑坡、泥石流密集成群 ,如绵竹市绵远河一把刀至徐家坝 28.4 km 河道就有高度超过 10 m 的堰塞坝 16 处 ,仅清平乡场镇内就有王家沟、银杏沟 2 处的泥石流总量超过 500 万 m³。

基金项目 :国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB714103) ;“十一五”国家科技支撑计划(2009BA56B03) ;水利部公益性行业科研专项(201001034)

作者简介 :任强(1981—) ,女 ,天津人 ,高级工程师 ,博士 ,从事土石坝溃决机理及模型研究。E-mail :qren@nhri.cn

· 30 · 水利水电科技进展 2011 31(5) Tel :025-83786335 E-mail :jz@hhu.edu.cn http://hkb.hhu.edu.cn

堰塞体堆积在河道中,一旦溃决将导致下游发生洪水灾害。如 1933 年 8 月 25 日四川叠溪发生 7.4 级大地震,千年古城即刻为地震滑坡和崩塌所毁灭,岷江两岸山体崩塌形成 3 座高达 100 余 m 的堰塞坝,14 d 后最下游 1 个堰塞坝溃决形成高约 40 m 的巨浪顺河而下,席卷两岸村镇^[6]。1950 年 8 月 15 日,西藏察隅 8.5 级大地震,崩塌、滑坡堵塞河流形成堰塞湖,并于 8 d 后溃决,形成 7 m 高的巨浪淹没下游成干个村镇,造成的死亡人数为地震死亡人数的 3 倍以上^[7]。因此,深入研究和探讨不同形式下的堰塞坝形成和破坏机理对于评估其安全性及潜在次生灾害可能造成的损失尤为重要。

1 堰塞坝形成机理

1.1 滑坡形成的堰塞坝

滑坡是形成堰塞坝最主要的形式。在地震作用下,河谷两岸山体内部某一潜在软弱结构面上的剪应力可能超过其抗剪强度,而使其上山体沿坡内软弱结构面发生整体滑动,山体在滑动过程中本身也将出现松弛、解体^[8]。滑动体离开剪出口后大多脱离滑床,堆积在前缘河谷台地上,有的越过河谷,以一定速度向河床方向运动,在受到对面岸坡的阻挡后停积在河床上,形成堰塞坝。根据滑坡形成的特征,一般可将滑坡变形破坏形成的堰塞坝过程概括为岸坡上部拉裂、下部滑移隆起、中段快速剪断及整体的高速滑动^[9],可划分为启动阶段、凌空飞越阶段、撞击-弹落-重夯成坝等 3 个阶段。

汶川地震所触发的大量堰塞坝中,肖家桥堰塞坝(图 1(a))是一个典型地震诱发型的顺层岩质滑坡型堰塞坝。肖家桥滑坡体位于安昌河右岸支流茶坪河流域内的安县晓坝镇上游约 6.5 km,滑坡区距离安县县城约 31 km。滑坡区地处四川盆地西北边缘,距离“汶川特大地震主震断层(中央断裂)最短距离约 20 km^[10]。滑源处岩层走向与河流流向基本平行,倾向坡外,为顺向坡,河流不断下切过程中切割了岩质边坡的坡脚,形成临空面,垂直于岸坡的裂隙发育,贯通性好,在地震力的作用下,坡面一定范围内的岩体不断被破坏,直至坡体内部影响相对较小的岩层,使该岩层贯通形成整体滑裂,最终高速下滑。失稳过程总持续时间约为 80 s,最大滑坡速度约为 5 m/s。由于滑程较短,滑体未能完全解体,尤其在滑体底部有些部位的岩体仍然保持原来的结构特征^[11]。堰塞坝形成过程大致可概括为:地震触发及岩体的累进破坏→滑体破坏、高速下滑→撞击解体、堵江形成堰塞体(图 1(b))。



(a) 顺层滑坡产状



(b) 堰塞体下游状况

图 1 肖家桥堰塞体灾害特征

1.2 崩塌形成的堰塞坝

崩塌形成的堰塞坝是指陡坡上部岩土体被裂缝切割、拉裂后,在自重和地震等外力作用下失去稳定,突然脱离母岩土体急剧向下翻滚、跳跃,造成江河堵塞的堆积体^[1,12]。

崩塌主要包括倾倒型和坠落型 2 种主要的失稳方式。倾倒型崩塌是位于斜坡上部高凸部位的岩体,在自重及外力作用下中岩层顶部或中上部发生倾倒滑落,大多发生在陡倾角岩层或卸荷裂隙岩体中。在大的区块上,主要发生在河谷深切以及两岸岩体裸露、卸荷变形严重的区段。其特点为:斜坡中部坡面浅层壁为高倾角岩层的倾倒滑落裂面或残留危岩,坡脚形成倒石堆^[13]。坠落型是位于高陡斜坡的上部岩体在外力作用下发生坠落,块体(石)在坡面快速运动产生的作用力推动坡面的岩土体发生滑动,这种状况大多发生在缓倾角岩层或具有缓倾角节理的岩体中。其特点为:滑坡后壁为崩塌坠落裂面或残留危石,斜坡中部坡面浅层滑动明显,坡脚形成倒石。崩塌形成堰塞坝的过程可分为重力崩坠以及撞击-弹落-重夯成坝 2 个阶段^[14]。

四川汉源县猴子岩堰塞坝为典型的崩塌型堰塞坝^[15]。崩塌体源于距大渡河河面约 150 m 的省道 S306 新线上方的猴子岩山体。地处大渡河峡谷区,山体坡度超过 60°,受两边支沟的切割作用,为三面临空的突出山体。2009 年 8 月 6 日受到 S306 新线施工扰动的不稳定裸露岩体率先发生崩塌,引起公路上部约 260 m 高、顺河方向长 300 m 的山体整体发生失稳破坏,崩塌的山体下落进入大渡河。上部崩塌体又触发了下部松散堆积物发生浅层滑坡,与上

部崩塌的山体一起迅速进入大渡河,并阻断大渡河(图2)。崩塌持续大约5 min,崩塌体在大渡河河道迅速形成高约40 m、顺河方向300余 m、顶部宽约373 m的堰塞坝,堵断了大渡河。



图2 汉源猴子岩崩塌灾害特征

1.3 泥石流形成的堰塞坝

泥石流的形成有其物源条件和动力条件。地震等外力作用造成的山体滑坡使沟谷内堆积了大量松散破碎的岩土体,是泥石流形成的物质来源;降雨形成的洪水和大的沟床比降则是泥石流暴发的强大动力。至于泥石流能否形成堵塞江河的堰塞坝还与泥石流的峰流量和主河道行洪能力有关,当前者大于后者时就可能形成堵塞江河的堰塞坝^[16-18]。

根据泥石流的形成特征^[19],泥石流形成堰塞坝的过程可分为3个阶段^[19]:①大部分堆积材料与充分的水混合,旋转、滑动、推挤后失去了凝聚力,堆积土体开始流动;②泥石流流动过程中,混合带走流路中的堆积物和两岸的崩塌土石体;③泥石流继续大面积流动,最终汇入江河中形成堰塞坝,上游形成堰塞湖。

舟曲白龙江堰塞坝就是一例典型的泥石流形成的堰塞坝,如图3、图4所示。舟曲县为地震强烈活动区,是我国四大泥石流活跃区之一。现场实地调查显示,受地震影响,甘肃省舟曲县城北面三眼峪和罗家峪沟域内崩塌和滑坡较为发育,形成了丰富的松散物源,具备发生坡面和沟谷泥石流的条件。2010年8月7日23:00左右,三眼峪和罗家峪受强暴雨影响,暴发了特大泥石流灾害。三眼峪泥石流出口后形成长约2 km、最宽350 m、平均宽度200 m左右的堆积区,淤积厚度为2~7 m,平均淤积厚度约为4 m;罗家峪泥石流出口后形成长约2.5 km、平均宽度约为70 m的堆积区,平均堆积厚度为2 m(图3、图4)。泥石流冲进白龙江,形成堰塞湖,使江水位上升10 m左右,淹没了大半个县城,造成重大财产损失和人员伤亡^[17]。

1.4 碎屑流形成的堰塞坝

碎屑流是一种高速松散固体流,又称碎石流。根据碎屑流形成的地质、运移条件,可将碎屑流分为崩塌型碎屑流与解体型碎屑流。崩塌型碎屑流的形成是滑坡体后缘的危岩体在地震等外力作用下直接



图3 三眼峪峪口的堰塞坝^[17]



图4 舟曲泥石流阻塞白龙江形成堰塞坝

崩塌脱落,在碰撞冲击作用下直接形成碎屑体,当危岩体下侧坡面较陡、不具备自稳条件时就形成碎屑流。该类碎屑流一般为高陡危岩体突发式脱落,碎屑流流速较快,运动形式由跳跃转为滚动。解体型碎屑流由高速滑动的滑坡体在滑动过程中破碎解体形成,该类碎屑流的形成条件直接受岩体破碎程度和下滑速度双重因素控制^[20]。碎屑流形成堰塞坝的过程可分为滑移(碰撞)阶段和崩滑-跳跃-碎屑成坝2个阶段。

碎屑流形成的堰塞坝以西藏波密县易贡堰塞坝为代表。2000年4月9日西藏自治区波密县易贡乡扎木弄沟源区发生巨大山体崩塌,扎木弄沟为易贡藏布-帕隆藏布深大断裂带与易贡-鲁朗走滑断裂的交汇部位,源头花岗岩体内的断裂结构面极其发育,特别是2组相向倾斜的长大张裂隙,将花岗岩体切割成倾向沟内的巨大楔形岩体,使其处于临界稳定状态。气温转暖,大量雪水进入山体,加上连续降雨,雪崩的冲击力使山体完全失去稳定而凌空崩落。崩落岩体在高位垂直下落2 580 m后以巨大的冲击力撞击沟床及沟内松散堆积物,崩塌岩体自身发生解体形成超高速远程滑坡。在气垫效应与惯性作用下加速运动的滑坡体扫动沟内两侧的堆积物,在整个沟谷内形成高速滑坡碎屑流。巨大的高程差使滑坡物质具有极大的势能,滑坡物质冲出扎木弄沟后继续运动,一直冲到河对岸的泥石流堆以上才停止运动,堵断了易贡藏布河易贡藏布江^[21],形成长约2 500 m、宽约2 500 m、平均高约为100 m、体积约3亿m³的堰塞坝。如图5所示。

2 堰塞坝溃决风险分析

调查表明,绝大多数堰塞坝最终都将发生溃决,



图5 碎屑流形成的西藏波密县易贡堰塞坝

据统计^[3 22],大部分堰塞坝的寿命不超过 1 a,有 20%的堰塞坝在形成后 1 d 内溃决,50%的在 10 d 内溃决,80%在 6 个月内溃决,90%在 1 a 内溃决(如图 6 所示)。堰塞坝溃决形式主要包括漫顶溃坝、管涌侵蚀、坝坡失稳、人工破坏或上述几种方式的组合。堰塞坝一旦发生溃决,所产生的洪水和泥石流将会对下游人民生命财产造成严重危害,因此深入研究堰塞坝的溃决风险、影响溃决的主要因素及其应对措施对于制定堰塞坝应急抢险预案十分必要。

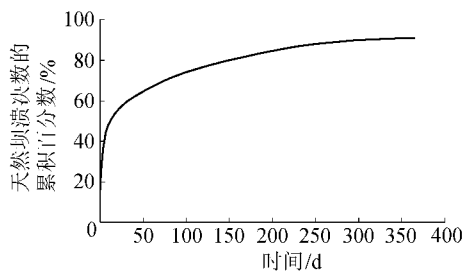


图6 堰塞坝的寿命曲线^[22]

2.1 堰塞坝的特点

作为自然作用的产物,堰塞坝的工作条件、坝体几何特征以及坝体物质组成和内部结构都与人工土石坝存在明显差别。首先表现在工作条件上,堰塞坝没有溢洪道和其他泄洪设施,上游持续来水使坝前水位快速上涨,堰塞坝很容易发生漫顶溃决;其次为坝体形态,堰塞坝坝顶一般凹凸不平,存在天然凹槽,且体型多呈不规则形状,沿河流方向堆积范围明显超过狭窄河谷的宽度,多数堰塞坝比较宽厚,如肖家桥堰塞坝宽高比约为 6.5,唐家山堰塞坝宽高比为 9.8^[23];再从坝体结构来讲,因坝料没有经过人工选择和施工碾压,大部分堰塞坝结构疏松,不均匀性强,坝料级配变化范围宽,有的堆积体中还夹杂着巨石,直径从几十厘米到数米;5.12 汶川特大地震灾区河流就形成了不少由块石、巨石组成的堰塞坝,如岷江干流映秀镇上游约 4 km 的老虎嘴堰塞坝(图 7)、绵远和官宋棚堰乡以上 32 km 的徐家坝堰塞体(图 8)。需要指出的是,多数堰塞坝体内存在天然滑动面和明显架空带,在余震、暴雨及上游水位作用下坝体易发生局部失稳或出现集中渗漏而发生管涌破坏。因此,堰塞坝的溃决可能性远远高于人工土石坝。



图7 老虎嘴堰塞坝



图8 徐家坝堰塞体

2.2 堰塞坝溃决风险分析

调查表明,堰塞坝的溃决风险主要取决于以下几个因素:上游来水量、堰塞坝的拦蓄水量(堰塞湖的库容)、堰塞坝的几何尺寸和堰塞坝的结构与物质组成。Schuster 等^[22]对 40 多座已溃决堰塞坝的统计分析表明,堰塞坝的拦蓄水量与上游来水量之比越小则其溃决的风险越高。

Ermini 等^[23]通过对 84 座堰塞坝资料的分析,提出了一个用无量纲堆积体指数(I_{db})来判定堰塞坝稳定性的经验公式:

$$I_{db} = \lg\left(\frac{A_b H_d}{V_d}\right)$$

式中: A_b 为汇水面积; H_d 为坝高; V_d 为坝体体积。

判定堰塞体稳定性与否的条件如下: $I_{db} < 2.75$ 为稳定域, $2.75 < I_{db} < 3.08$ 为不确定域, $I_{db} > 3.08$ 为不稳定域。可以看出,堰塞坝越高,上游汇水面积越大,坝体的稳定性越低;坝体体积越大,其稳定性越高。需要指出的是,堰塞坝的稳定性和溃决风险还与形成堰塞坝的物源及形成过程有关,如果堰塞坝体内存在天然滑动面和明显架空带,其失稳与溃决的风险将会加大。Costa 等^[31]从能量观点出发,结合多个已溃决堰塞坝的调查资料建立了如下关系式

$$Q = 0.063 E_p^{0.42}$$

式中: Q 为溃坝洪水的洪峰流量,决定着溃坝致灾后果; E_p 为堰塞湖水潜在势能,它与库容和坝高有关,库容越大、坝高越大高则湖水潜在势能越大。

为防止堰塞坝发生灾难性后果的溃决,降低堰塞湖水潜在势能,常用的方法是在堰塞湖尚未达到危险水位之前,在堰塞体顶部人工开挖或爆破形成

导流槽,或者修建临时溢洪道,使堰塞湖水位有控制地下降。“5.12”汶川特大地震中形成的唐家山与肖家桥堰塞湖^[11-24-26]就是采用上述方法有效避免了灾难性后果的发生。

3 结论和建议

a. 堰塞坝主要是由地震或降雨或火山喷发引起的山体滑坡、崩塌、泥石流所形成,形成方式可概括为滑坡、崩塌、泥石流以及碎屑流。滑坡是形成堰塞坝最主要的形式。

b. 堰塞坝的工作条件、坝体几何特征、坝体物质组成和内部结构都与人工土石坝存在明显差别,堰塞坝溃决的可能性远高于人工土石坝。调查统计表明,90%的堰塞坝都在其形成1a内溃决。

c. 堰塞坝的溃决风险主要取决于上游来水量、堰塞坝的拦蓄水量(堰塞湖的库容)、堰塞坝的几何尺寸和堰塞坝的结构与物质组成。堰塞坝的拦蓄水量与上游来水量之比越小,坝体越高、库容越大,其溃决的风险越高,致灾后果越严重。为防止堰塞坝发生灾难性后果的溃决,常用的方法是在堰塞湖尚未达到危险水位前,在堰塞体顶部人工开挖或爆破形成导流槽,或者修建临时溢洪道,使堰塞湖水位有控制地下降。

d. 鉴于堰塞坝的工作条件、坝体几何特征、坝体物质组成和内部结构都与人工土石坝存在明显差别,以及极高的溃决可能性与严重的致灾后果,建议今后加强堰塞坝溃决机理、溃坝过程的试验与数值模拟研究工作,提出能合理反映堰塞坝溃口发展规律、溃坝洪水流量过程的数值模型与相应的计算方法,为科学预测堰塞坝溃决致灾后果、制定堰塞坝溃决应急预案提供技术支撑。

参考文献:

[1] 严祖文,魏迎奇,蔡红.堰塞坝形成机理及稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(4):55-59.

[2] 聂高众,高建国,邓砚.地震诱发的堰塞湖初步研究[J].第四纪研究,2004,24(3):293-300.

[3] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(7):1054-1068.

[4] 张世殊,杨建,巩满福,等.汶川地震堰塞湖分布规律初步研究[M].成都:四川科学技术出版社,2008.

[5] 孙其诚,王光谦,胡凯衡.汶川地震堰塞体及相关力学问题[J].物理,2009(4):248-253.

[6] 王兰生,杨立铮,李天斌,等.四川岷江叠溪较场地震滑

坡及环境保护[J].地质灾害与环境保护,2000,11(3):195-199.

[7] 李忠生.地震作用下滑坡稳定性研究[D].西安:长安大学,2001.

[8] 黄润秋.汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1239-1249.

[9] 程谦恭,彭建兵,胡广韬.高速岩质滑坡动力学[M].成都:西南交通大学出版社,1999.

[10] 徐文杰,陈祖煜,何秉顺,等.肖家桥滑坡堵江机制及灾害链效应研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5):933-942.

[11] 何秉顺,丁留谦,王玉杰,等.四川安县肖家桥堰塞湖稳定性初步评估[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S2):3626-3631.

[12] 赵允辉.危岩崩塌地质灾害调查评价与防治[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(增刊):332-338.

[13] 孔纪名,阿发友,吴文平.汶川地震滑坡类型及典型实例分析[J].水土保持学报,2009,23(6):66-70.

[14] 张梁,张业成,罗元华.地质灾害灾情评估理论与实践[M].北京:地质出版社,1998.

[15] 葛永刚,陈兴长,方华,等.汉源县大渡河“8.6”崩塌堵河灾害研究[J].山地学报,2010,28(1):123-128.

[16] 王滨,王维早,于开宁,等.平山县泥石流的形成特征和机理分析[J].地质灾害与环境保护,2008,19(4):59-62.

[17] 胡凯衡,葛永刚,崔鹏,等.对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识[J].山地学报,2010,28(5):628-634.

[18] 唐川,梁京涛.汶川震区北川9.24暴雨泥石流特征研究[J].工程地质学报,2008,16(6):751-758.

[19] JOHNSON A M, RODINE J R, RODINE J R. Debris flow in slope instability[M]. New York: John Wiley, 1984: 257-361.

[20] 贺可强,安振远.崩滑碎屑流的形成条件与形成类型[J].河北地质学院学报,1996,19(4):345-351.

[21] 吕杰堂,王治华,周成虎.西藏易贡大滑坡成因探讨[J].地球科学:中国地质大学学报,2003,28:107-110.

[22] SCHUSTER R L, COSTA J E. A perspective on landslide dams [C]//ASCE, Landslide Dams: Processes, Risk, and Mitigation, Geotechnical Special Publication. New York: Geotechnical, 1986: 1-20.

[23] ERMINI L, CASSGLI N. Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index[J]. Earth Surface Processes and Landforms 2003, 28(1):31-47.

[24] 陈晓清,崔鹏,程尊兰,等.5.12汶川地震堰塞湖危险性应急评估[J].地学前缘,2008,15(4):244-249.

[25] 谢作涛,陈肃利.唐家山堰塞坝溃坝可能性及冲刷形式初步分析[J].人民长江,2008,39(22):71-72.

[26] 王光谦,钟德钰,张红武,等.汶川地震唐家山堰塞湖泄流过程的数值模拟[J].科学通报,2008,53(24):3127-3133.

(收稿日期:2011-04-13 编辑:高建群)