

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.01.12

堰塞坝堆积演化过程及开发利用研究进展

王环玲¹, 屈 晓², 徐卫亚², 王如宾², 刘士奇²

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:堰塞坝险情的形成演化与综合开发治理是防灾减灾领域研究的焦点问题, 因坝体形成过程特殊、内部结构复杂、组成材料不均且堆积形态迥异, 导致其与人工坝体差异较大, 目前仍缺乏有效的安全性评估方法及科学的开发治理措施。本文列举了国内外典型的堰塞坝事件, 从堰塞坝的形成、类型和结构特征等方面, 总结了已有的研究成果, 阐述了堰塞坝的形成机理, 重点分析了崩塌、滑坡、泥石流堰塞坝的堆积演化过程研究。归纳了目前堰塞坝应急处置和综合治理的工程措施与非工程措施, 列举了堰塞坝蓄水发电、引水灌溉、环境旅游等开发利用的成功案例。通过文献和案例汇编, 建立了堰塞坝事件研究的文献资料库。鉴于堰塞坝较高的溃决风险和开发潜能, 提出当前研究存在的主要问题和继续努力的研究方向, 为堰塞坝的风险预测及开发利用提供有益参考。

关键词: 防灾减灾; 堰塞坝; 成因; 堆积演化; 开发利用; 研究进展

中图分类号: P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2021)01-0084-11

Research progress on the evolution and utilization of the barrier dam accumulations

WANG Huanling¹, QU Xiao², XU Weiya², WANG Rubin², LIU Shiqi²

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: The formation mechanism and utilization of barrier dam are the research hotspots in the field of disaster prevention and reduction. Due to the special formation process, complex internal structure, uneven composition materials and different accumulation patterns, there is still a lack of effective stability evaluation methods and development and control measures. In this paper, from the formation process, types, and structural characteristics, we have summarized the formation mechanism and process of barrier dam formed by mountain collapse, landslides and mud-rock flows. Meanwhile, we have summarized the engineering and non-engineering measures for emergency treatment of dams, and have introduced the successful cases of barrier dams in hydroelectric power generation, diversion irrigation and environmental tourism. Through the literature and case compilation, a literature database for the study of barrier dam is established. Finally, due to the high risk and development potential of barrier dam, we pointed out the main problems and the further research direction, which provides a useful reference for the risk prediction, development and utilization of barrier dam.

Keywords: disaster prevention and reduction; barrier dam; formation mechanism; accumulation evolution; development and utilization; research progress

收稿日期: 2020-02-26; 修订日期: 2020-03-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508501); 国家自然科学基金(11772116)

第一作者: 王环玲(1976-), 女, 甘肃庆阳人, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程防灾减灾的研究工作。E-mail: wanghuanling@hhu.edu.cn

0 引言

由降雨、地震、火山活动等原因,引起山体岩土体崩塌、滑坡、泥石流等堵截河道、河床,在山谷中形成类似大坝的挡水体,称为堰塞体或堰塞坝^[1-4]。堰塞体不是永固不变的,受湖水雨水冲刷、侵蚀、溶解、渗透等容易被破坏,一旦破坏,湖水便漫溢倾泻,形成洪灾。

与人工坝体相比,堰塞坝体结构松散,架空普遍,颗粒之间胶结作用弱,颗粒级配差且级配超宽,堰塞体处于欠固结或非固结状态,因而易在溢水或渗透作用下发生漫顶或渗透破坏而溃决。多数堰塞坝寿命极短且易诱发一系列地质灾害,带来极大危害。

典型的堰塞坝事件有:1987年意大利北部阿尔卑斯山强降雨诱发 ValPola 河谷滑坡形成堰塞体,导致附近村庄及6个企业被摧毁^[5];2004年日本新潟县发生6.6级地震,沿芋川干流及支流大规模滑坡形成50多座堰塞坝^[6];2005年巴基斯坦 Hattian Bala 岩崩碎屑流形成堰塞湖,致使1000余人伤亡^[7]。1911年,吉克斯坦帕米尔地区发生里氏7.7级的地震,导致乌索伊堰塞坝形成^[8],地震后,大量坍塌堆积的岩石在后方形成了萨雷兹堰塞湖。乌索伊堰塞坝坝高约600m,是世界上最高的天然形成的挡水堰塞坝,形成堰塞湖的滑坡体体积达 $2.1 \times 10^9 \text{ m}^3$,相比1968年的意大利瓦伊昂(Vajont)滑坡堰塞坝的滑坡体体积(约 $3.2 \times 10^8 \text{ m}^3$),此滑坡堆积体庞大,但由于该地区水文情势适宜,乌索伊堰塞坝能够长期保持安全稳定,这在世界堰塞坝中都很少见^[8]。我国西南地区山壑纵横、水系密布,处于强地震活动带,近年来发生多起堰塞坝堵江事件,2000年西藏林芝地区发生巨型高速山体滑坡堵塞易贡藏布江形成滑坡堰塞坝,造成沿线公路、光缆等设施破坏严重^[9];2008年汶川地震形成100多个堰塞湖,其中危险系数高的为唐山山堰塞坝^[10];2014年,云南昭通市鲁甸县发生6.5级地震,造成牛栏江红石岩村附近右岸山体滑塌,并阻塞牛栏江,形成堰塞湖,淹没了上游的红石岩水电站首部枢纽,同时还威胁下游天花板、黄角树等水电站的安全,造成了极大危害^[11];2018年川藏高原玉县山体滑坡阻塞金沙江形成白格堰塞坝,米林县雅鲁藏布江滑坡堵江形成堰塞湖,造成了巨大的经济损失和危害^[12]。

目前,国内针对堰塞坝的形成机理、稳定性评价和应急处置开展了理论分析、模型试验及数值模拟,涉及堰塞坝形成全过程的演化机理、动态模拟及综合治理的研究相对较少。本文总结了典型堰塞坝事件、堰塞坝形成机理与类型及稳定性评价的研究成果;通过分析国内外堰塞坝开发利用的成功经验,归纳了堰塞坝的综

合治理措施及其开发利用方案;提出未来需要研究的问题,为堰塞坝的抢险救灾、堰塞湖溃决研究及开发利用提供文献资料和数据。

1 堰塞坝形成

堰塞坝的形成与其内在因素分不开,受内因的影响主要有地质条件、地貌条件、地层岩性等。其中岩土体中软弱结构面对边坡失稳起控制作用,在河流冲刷强烈的高山峡谷地带更易发生坡体变形失稳,另外岩土体的性质对边坡的稳定性也起重要作用。

20世纪70年代,美国地质调查局倡议地质学家对崩、滑、流等地质灾害引发的堵江事件进行调查研究,Costa等通过收集各国堵江资料,指出滑坡失稳形成堰塞坝的地质地貌条件:堰塞湖坝体处于河谷陡峭的山岭地区,高山峡谷有河流经过;区域地质现象活跃,有丰富的物质来源,如破碎的岩石碎屑等^[13]。2004年,基于对我国141个地震堰塞湖进行初步统计^[2],分析认为地震形成堰塞湖的3个基本条件:地震区内有河流经过;河道两侧有山体且河床高程明显低于周边山体;地震产生山体滑坡,且堵塞了河道。匡尚富^[14]根据现场调查及以往研究对以上条件进行了补充:崩塌岩体能到达河床及对岸,到达河床的崩塌体不因水流作用形成泥石流被冲走,且水流挟沙能力、冲刷能力较小,不能将岩土体瞬时冲失。并非所有的崩、滑、流灾害都能堵江形成堰塞坝,堰塞坝形成还取决于河宽、水量、滑入物质体积等相互影响,滑坡体积越大,形成堰塞坝的概率越大^[15-18]。

1.1 堰塞坝诱因与成因

1.1.1 堰塞坝诱因

堰塞坝触发因素主要包括降雨、地震、融雪、火山喷发、人类活动、冰川融化以及各因素混合。COSTA等^[5]对128例堰塞坝的形成原因进行了分析,认为降雨和地震是堰塞坝形成的主要诱因,其次是火山爆发。降雨和地震引起的堰塞坝约占调查总数的90%,并且降雨和地震所形成的堰塞坝规模较大。地震使岩土体能量突然释放,一次地震诱发的崩塌及滑坡型堰塞坝数量也较多。如1783年意大利卡拉布里亚地区地震一次诱发200多个堰塞坝^[19];2004年日本新潟县6.6级地震形成50个堰塞坝^[20];2008年汶川8.0级地震造成沿断裂带附近形成30多处堰塞湖^[10]。范天印^[21]对国内外近五年的堰塞坝诱因进行了总结(图1):国外557例堰塞坝中,地震诱发的堰塞坝为22.6%,降雨诱发的堰塞坝为35.4%;发生在中国的761例堰塞坝中,53.2%的堰塞坝由地震诱发,38.0%的堰塞坝由降雨诱发。

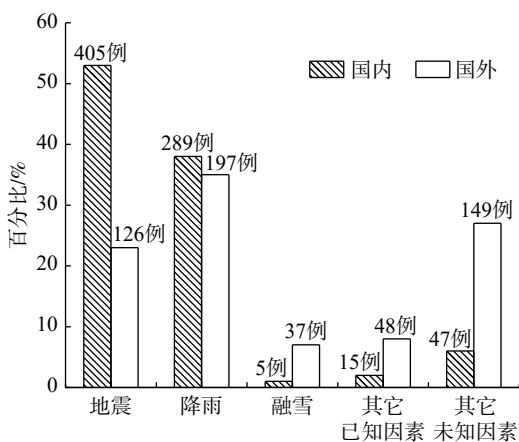


图 1 堰塞坝形成的诱发因素^[21]

Fig. 1 Triggering factors of barrier dam

另外,地形地貌、板块构造及气候特征对堰塞坝的形成亦有重要影响,中国西南地区地处板块交界处的地震多发区域,近年来的汶川、雅安、玉树、鲁甸等地区地震频发,地震诱发的堰塞坝数量较多,规模较大且较为频繁。

1.1.2 堰塞坝成因

年廷凯等通过国内外 907 例堰塞坝的成因统计分析(图 2),得出因滑坡形成的堰塞坝最多,占调查总数的 41%,其次是泥石流和崩塌形成的堰塞坝,分别占调查总数的 22% 和 17%,落石形成的堰塞坝占 3%,还有 17% 的堰塞坝由多种地质灾害混合诱发,且多数泥石流堰塞坝也是以滑坡为基本原因,洪水带动非河道堆积物形成泥石流堵塞河道^[22]。因此,滑坡、泥石流、崩塌是形成堰塞坝的主要成因,且地震多形成滑坡及崩塌型堰塞坝,多数泥石流滑坡由降雨触发,泥石流容易导致中型和大型堰塞坝,滑坡容易诱发大型堰塞坝,崩塌可能会造成巨型堰塞坝。

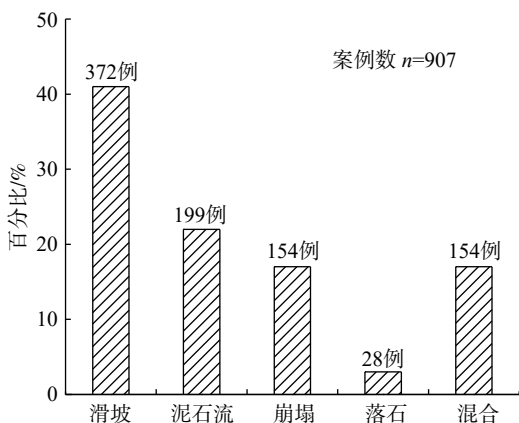


图 2 堰塞坝形成的成因^[22]

Fig. 2 Causes of barrier dam

1.2 堰塞坝寿命

堰塞坝存活的时间年限跨度不等,有些几分钟就消除,有些甚至上千年。按照堰塞坝寿命的长短可分为:即生即消型(数天内消失)、高危型(数天到 100 年)、稳态型(100 年以上)。针对 204 座堰塞坝溃决时间的统计分析,34% 的堰塞坝一天内溃决,51% 的堰塞坝存在时间不大于一周,87% 的堰塞坝一年内溃决^[1, 23]; ERMINI 等^[24]也得出 80% 的堰塞坝在形成一年内发生溃决,堰塞坝的寿命在几分钟至 2000 年不等。此外,年廷凯等分析 280 例不同成因堰塞坝的寿命发现,堰塞坝寿命与其成因相关,滑坡及崩塌形成的堰塞坝寿命类似,泥石流形成的堰塞坝寿命较短,易在短期内消除^[22]。堰塞坝发生溃决的形式一般有漫顶溢流、潜蚀与管涌、坝前边坡失稳 3 种形式,且漫顶溢流型破坏形式最为常见^[25]。根据研究总结出不同堰塞坝的寿命年限见图 3。

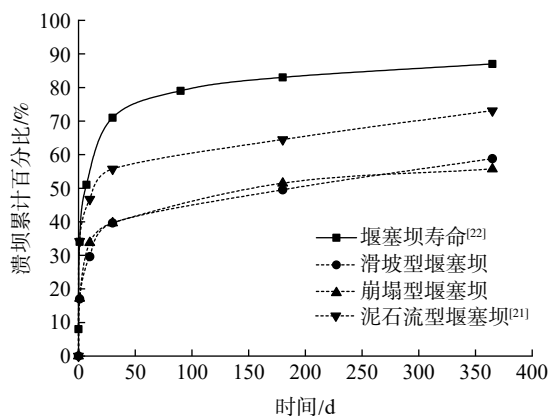


图 3 堰塞坝寿命

Fig. 3 Lifetime of barrier dam

2 堰塞坝类型与结构特征

滑坡是形成堰塞坝的最主要形式,在降雨、地震等诱因作用下,河谷两岸山体软弱结构面上的剪切力超过抗剪强度时,山体将沿软弱结构面发生剪切滑动,滑动过程中山体将不断松弛、解体^[26]。根据滑坡堰塞坝的形成特征,可将滑坡破坏形成堰塞坝的过程概括为坡体上部拉裂、底部滑移隆起、中部快速剪断以及整体的高速滑动,先后经历启动、凌空飞跃、撞击—弹落—重夯成坝 3 个阶段^[27]。地震、降雨、冰雪融水等自然作用均可形成滑坡堰塞坝,如 1929 年新西兰南岛布勒地区地震诱发 11 座滑坡堰塞坝^[28]; 1889 年日本 Totsu 河流域强降雨致使上游形成 53 座滑坡堰塞坝^[16]; 2000 年,西藏林芝地区的易贡藏布河扎木弄沟因气温转暖冰雪融化导致了大规模山体滑坡,滑坡堆积体形成天然坝,堵塞易贡藏布河^[9]; 10 年来,中国滑坡堰塞坝主要有唐

家山堰塞坝、肖家桥堰塞坝、大光包堰塞坝、三交乡堰塞坝等^[29-31]。

崩塌形成的堰塞坝主要指危岩体沿潜在滑移面的弯曲折断力大于结构面的抗滑力时,突然脱离山体急剧向下倾倒、翻滚、跳跃,产生崩滑,堵塞江河形成的堰塞坝^[32]。崩塌形成的堰塞坝主要有倾倒型和坠落型两种破坏方式。倾倒型崩塌是指山体上部的危岩体,在外力作用下顶部或中上部产生向临空面的弯曲倾倒滑落,多存在陡倾角的垂直节理、柱状节理岩体等岩质山体。坠落型是指山体上部岩体在外力作用下发生坠落,块体在坠落过程中推动坡面的岩土体发生滑动,多发生在缓倾角节理岩体或倾角较缓的岩层中^[33]。崩塌型堰塞坝形成过程可分为重力崩坠、撞击—回弹—重夯两个阶段。如猴子岩堰塞坝、金沙江虎跳峡堰塞坝^[11,34-35]以崩塌为主型。

泥石流的形成需有物源条件和动力条件,外力因素震裂的松散岩土体堆积在河谷内,是泥石流形成的物质来源,降雨诱发的洪水和大沟床比降是泥石流形成的强大动力^[36]。泥石流能否堵江形成堰塞坝取决于泥石流的峰流量与河道的泄洪能力,当前者大于后者时即可堵河道形成堰塞坝。根据泥石流运移特征,泥石流型堰塞坝的形成过程可分为3个阶段:堆积材料与水混合、旋转、滑动,堆积土体流动、携带崩塌土石体、汇入主流、堆积成坝^[37]。典型泥石流堰塞坝有舟曲白龙江堰塞坝、银洞子沟堰塞坝,西藏天摩沟4次泥石流堰塞坝,汶川地震诱发岷江上游多处泥石流堵江事件^[38-40]。

3 堰塞坝体演化过程研究

堰塞坝体的形成集滑动、崩塌、张拉、堆积、沉降等复杂动态运动过程,其过程研究主要包括堆积体的运动速度、运动路径、堆积范围及堆积厚度和堆积形态等。不同成因堰塞坝的运动机理与形成过程也存在较大差异。

研究堰塞坝形成过程中的一般规律及堆积特征,需再现堰塞坝形成过程。由于堰塞坝发生时间、地点等不确定因素使得通过现场观测研究其过程存在难度。数值模拟和模型试验是比较可行的有效方法,可以再现堰塞坝的形成过程。

在数值模拟及仿真方面,采用极限平衡法和有限元法模拟岩土体破坏前的应力变形状态,采用有限单元法和有限差分法研究滑坡、崩塌等形成堰塞坝的启动机制和运动过程^[41-43]。HUNGR^[44]依据流体运动的拉格朗日公式,建立了基于有限元的连续模型来模拟流滑的

运动过程;钟登华等^[45]基于三维极限平衡法,提出了滑坡运动过程可视化的动态分析流程,实现了运动全过程的三维可视化动态表达;SUN^[46]利用有限差分法通过设置界面单元来模拟滑体的运动过程,该方法可以模拟滑体的滑动过程。

离散单元法将动力学与运动学结合,再现堰塞坝的形成过程。李欣泽^[47]、冯文凯等^[48]利用离散元(UDEC)模拟了坡体的变形破坏过程,分析了滑坡堆积体的堆积演变规律;王宇等^[49]基于颗粒流程序(PFC),对滑坡渐进破坏全过程进行了模拟研究;曹文^[50]提出了利用等高线地形图建立三维复杂模型的前处理方法,基于二次开发的PFC^{3D}重现了红石岩堰塞坝的形成过程,为堰塞坝形成过程模拟提供有益参考;王志超等^[51]采用光滑粒子流体动力学和离散元法(DEM),基于达西渗透原理开发了用于离散体与流体之间的流-固耦合算法,模拟了块体滑坡问题以及滑坡涌浪产生过程,殷坤龙等^[52]应用该方法对新滩滑坡的运动全过程进行了仿真模拟,很好地复演了新滩滑坡发生的整个动态过程;邬爱清等^[53]以唐家山堰塞坝形态和位置为目标函数,对岩体参数、地震荷载等影响滑坡发生的参数深入研究,采用该方法反演了堰塞坝形成的全过程;HATZOR等^[54]、SITAR等^[55]也利用该方法进行了二维边坡的动态破坏运动及堆积过程研究。

近年来,BIM(Building Information Modeling)以其信息化、可视化、参数化等特点,应用于滑坡地质灾害研究中,基于BIM平台建立动态地质灾害模型反馈机制,可实现三维滑坡模型的动态变化和协同^[56]。基于极限平衡法、有限元法以及离散元法开发的适用于非连续、大变形的非连续变形分析方法(DDA)也是堰塞坝形成过程模拟的一种方法。另外,可借助于坡体的运动仿真进行研究,如:CROSTA等^[57]利用GIS的空间分析能力,对边坡运动全过程进行仿真研究,分析运动过程中的受力状况、运动方向和速度变化;戴兴建等^[58]运用DAN^{3D}和FLOW^{3D}对易贡滑坡-碎屑流-堰塞坝溃坝全过程进行了模拟研究,分析了滑坡-堰塞坝溃坝链生灾害的动力学特征;杨秀明^[59]开发了滑坡失稳运动过程仿真程序(HSYGFX),实现了二维和三维滑坡失稳后运动过程的动态可视化;杨克俭等^[60]设计开发了“库区滑坡智能仿真系统”,可以对崩、滑体的变形、失稳、滑移、入江、涌浪、堆积全过程实时模拟,定量描述堆积体堵江形成堰塞坝的形态特征。

模型试验主要包括现场试验和室内试验两类。日本在现场试验方面研究较多,MORIWAKI、OCHIAI

等^[61-62]进行了足尺人工降雨滑坡模型试验,揭示了坡体运动机理、失稳运动特征;胡明鉴等^[63]研究了坡体物源、岩体结构、雨强及降雨量等对坡体运动过程的影响规律。室内试验方面,罗先启等^[64]选用刚性模型箱研究了边坡的变形破坏机理以及坡体滑动距离、路径及在河谷的堆积形态;郝明辉等^[65]利用滑槽模型试验研究了滑坡失稳解体后形成的碎屑流的颗粒运动情况;刘翠容等^[66]通过水槽试验模拟了高容重泥石流流入汇河道的过程,分析了泥石流堵河的特点及其灾害链效应。近年来逐渐开展了堰塞坝的振动台模型试验,以及还原真实应力状态的离心模拟试验。董金玉等^[67]利用振动台模拟研究了顺层岩质边坡动力响应问题,根据试验破坏后的特征和试验过程的视频回放,分析了地震作用下边坡的破坏特征和堰塞坝的堆积过程;黄小福^[68]采用振动台模型试验和数值模拟相结合的方法,研究了地震条件下倾倒式崩塌的破坏过程,分析了崩塌块体的运动过程及在河谷中的堆积形态;陈家兴^[69]利用大型土工离心机模拟研究了滑坡在天然和降雨工况下的变形破坏特征,分析了滑坡失稳的滑动机制和滑移过程。

采用数值模拟和模型试验的方法对坡体失稳形成堰塞坝的过程进行模拟研究,对推进堰塞坝形成过程的掌握起到了重要作用。各种研究方法有自身的优势也有局限性。数值计算方面,极限平衡法和有限元法可解决岩体是否滑动问题,但最终破坏形态及失稳破坏的动态过程还欠缺;离散单元法可以再现崩、塌滑体的运动过程及堰塞坝的形成过程,适合模拟岩土体大变形的问题,但岩土体的破坏准则在离散元理论中目前难以实现与实际相符,并且缺少非连续介质相关的动态本构模型;非连续变形分析方法兼有实时变量和大变形问题计算于一体的优势,具有研究动力作用堰塞坝形成机制的潜力。模型试验方面,由于模型尺寸和监测手段的限制,不能获取有效的监测数据,对于堰塞坝形成过程中的速度、加速度、应力、位移等难以准确监测,影响结果的可靠性。

数值模拟和模型试验多集中在滑坡、泥石流等灾害的失稳、运动过程,对于灾害发生后堰塞坝的形成过程及堆积形态和材料的空间分布少有研究。此外,不同成因堰塞坝的触发机制和破坏机理各异,当前主要集中在降雨和地震诱发的滑坡型堰塞坝的形成机制研究,对于崩塌、泥石流型堰塞坝的研究较少。

堰塞坝稳定性分析主要借鉴土石坝的分析方法,年廷凯等^[22]从定性分析、非确定性分析、定量分析及试验分析 4 个方面总结了堰塞坝稳定性分析方法。其中定

性分析和定量分析是堰塞坝稳定性评价最常用方法,随着随机、模糊、区间等理论发展以及试验条件的提升,越来越多非确定性分析方法和试验手段运用到堰塞坝稳定性分析中,常用堰塞坝稳定性分析方法见表 1。

表 1 堰塞坝稳定性分析方法
Table 1 Stability analysis methods of barrier dam

分类	方法
定性分析	工程类比法、历史分析法、图解法、数据库、专家系统法等
非确定性分析	可靠性分析方法、模糊评判法、灰色系统理论评价法、人工神经网络分析法、区间分析法
定量分析	极限平衡法、数值分析法、统计学法
试验分析	水槽试验、振动台试验、离心机试验

堰塞坝稳定性分析方法中,除了常用的定性分析、非确定性分析和定量分析方法外,模型试验因能够直观反映堰塞坝在水、地震动力作用下的渐进破坏过程和稳定性程度等被越来越多地应用。模拟试验主要以水槽试验居多,例如:WISHART^[70]、CHEN^[71]、陈华勇、杨阳等^[72-73]均运用水槽试验研究了坝体的溃口发展、变化过程,分析堰塞坝溃决的模式;彭铭等^[74]采用波流水槽模型试验的方法,研究了不同水深、浪高波浪作用下坝体稳定性,得出堰塞坝在滑坡涌浪作用下的破坏机理。此外,基于大型振动台模型试验,石振明、董金玉等^[75,67]研究了地震作用下堰塞坝的动力特性参数并评估了坝体的整体稳定性;艾洪舟^[76]研究了地震滑坡涌浪机理及堰塞湖溃决风险;周亦良等^[77]研究了地震动水压力的分布规律,分析了地震力与共振动水压力综合作用下堰塞坝的失稳机制。虽然离心机试验已广泛应用于坝体的失稳破坏与稳定性分析中^[78],但堰塞坝的离心机试验成果相对较少。

近年来,BIM 技术基于大量信息监测数据,可以仿真模拟滑坡、坝体全生命周期的稳定状态。张菡等^[56]基于 BIM 技术提出了滑坡灾害监测方法,通过实时数据迭代对滑坡稳定性进行了有限元分析;陈浩平等^[79]基于 BIM 技术集成坝体建模、溃坝发展和溃坝洪水模拟方法,分析了坝体的稳定性和溃坝风险。各种方法研究中各有其优势与局限,堰塞坝的稳定性需多种方法综合评价。

4 堰塞坝综合治理研究

堰塞坝的处理方式多样,险情发生首先需进行应急处理,然后判断堰塞坝的整体稳定性,按照应急工程治理和长期综合治理相结合的原则,确定堰塞坝是否彻底清除还是开发利用。

4.1 快速疏浚、及时处置

堰塞体(坝)形成后,需要在短时间内进行应急处置,最大程度降低堰塞湖的蓄水量,保证堰塞坝的安全与稳定。堰塞湖应急处置措施主要分为工程措施和非工程措施,常用的处置方式有开挖泄流槽及引水泄流隧洞、临时加固、爆破拆除以及非工程应急避险等,实际工程通常采用多种方案结合的处置方式。

常见的工程措施是利用堰塞坝的结构形态及物质组成特点,在坝顶或其它位置开挖满足过流要求的泄流槽,降低堰塞湖水位和堰塞坝溃坝风险。如1956年智利San Pedro河流上的地震堰塞坝、1983年美国Spanish Fork Canyon河上的滑坡堰塞坝均取得了很好的除险效果。对于堰塞湖初期险情已排除,坝体稳定性好且希望永久保留的,为避免泥石流淤堵泄流槽,可以采用开挖引水泄流隧洞的处置方式。如2014年鲁甸红石岩滑坡堰塞坝,新建278 m隧洞与原红石岩电站引水隧洞相接,形成应急引水泄流隧洞,有效控制了水位上涨速度^[1]。如果堰塞坝组成材料块石较多,坝体渗流难以控制,可采用爆破拆除的处置方式。另外,对于上游水量不大,规模较大且结构稳定的崩塌型堰塞坝可加固成坝,同时通过抽水、倒虹吸等方法降低坝前水位。如2009年乌江支流的石梁河崩塌堰塞坝,加固成坝后采用水泵抽水,有效控制了堰塞坝险情^[80]。

堰塞坝的应急处置减灾措施应工程措施和非工程措施结合,非工程措施主要有堰塞湖影响区域的计算和调查、下游群众的避险安置、灾害预测预报以及灾区恢复、重建方案等。“5·12”汶川地震唐家山堰塞湖应急处置阶段,同步实施了应急处置工程措施和群众避险转移的非工程措施,并且建立了水雨情预测预报系统、坝体及湖区实时监控系統、防溃坝专家决策机制等应急保障措施,确保洪水下泄过程中无人员伤亡,重要基础设施完好^[81];2018金沙江白格堰塞湖应急处置借鉴前述经验,堰塞坝险情成功解除^[82]。

4.2 蓄水发电、引水灌溉

堰塞湖多形成于河流经过的高山峡谷地区,本身就具有修建水利设施的地理条件,且降雨、地震诱发滑坡形成的天然坝体和导流渠,为修建水电工程提供有利条件。利用堰塞坝修建水利设施,在我国早有先例,最为著名的就是重庆小南海水库地震堰塞坝。1856年黔江县地震导致山崩堵塞河流形成总库容 $7.02 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的堰塞湖水库,经人工改造,现已修建为26 km的引水灌溉渠,形成了以农业灌溉、城市供水为主,兼具发电、旅游的综合水利工程^[83]。2001年,中国地震局同意将小南海建设成国家级典型地震遗址保护区和全国防震减灾科普宣传教育基地^[84]。

成功的案例还有新西兰利用坝高400 m的委克瑞莫纳堰塞坝,建造了总装机容量124 MW的3座梯级水电站,年发电量达109 kW·h,这是堰塞坝开发变害为利的典范^[85]。在国内,2014年鲁甸发生6.5级地震,造成牛栏江堵塞形成堰塞湖,中国电建集团按照“先除害、再兴利”的思路,将红石岩堰塞湖改造为一个装机201 MW、年发电量7.879 kW·h、集发电、灌溉、供水、养殖的综合性水利枢纽工程,充分发挥水资源综合效应,开拓了地震灾后重建的新篇章^[11]。

4.3 景观建设、开发旅游资源

堰塞湖如果能持续稳定,不仅蕴藏着巨大水电资源,还将塑造十分丰富、多样和异质的自然景观,隐藏着巨大的旅游景观开发潜能。

堰塞湖在维持稳定多年后成了景色宜人的旅游景点。1933年叠溪地震形成的大、小海子堰塞湖已成为世界自然文化遗产九寨沟、黄龙旅游沿线一道独特的风景线^[86];素有“中国山崩奇观”、“地质地貌博物馆”的陕西翠华山山崩景观国家地质公园也是多次山崩的结果^[87];以滑坡堰塞湖地质灾害链而著称的易贡国家地质公园,其以易贡巨型山体崩塌地质遗迹为特色^[88]。在国外,美国蒙大拿州地震形成的堰塞湖也是世界上最有特色的地质湖泊,地震形成绵延22.5 km的断层悬崖景观及上游的赫布根坝等^[89];塔吉克斯坦东部的地震湖萨雷兹湖,为一座蓄水丰富、风光绮丽的高原湖泊,是探险爱好者向往的圣地^[90]。

5 结论与展望

调研国内外典型堰塞坝事件,从现场调查、模型试验、解析和数值计算方法等不同角度,对堰塞坝的形成、堰塞坝类型和结构特征、坝体稳定性、堰塞坝演化过程、堰塞坝的应急处置与开发利用等方面进行了深入总结,通过梳理和分析近年来堰塞坝领域的相关研究成果和存在的问题,展望需要继续努力研究几个问题:

(1) 堰塞坝的成因机理与形成过程

堰塞坝的形成涉及山体破坏、运动和堆积等过程,以及水-岩耦合作用和水、地震动力学效应。开展不同影响因素堰塞坝形成过程的振动台及离心机模型试验,研究堰塞坝在水、地震动力耦合作用下的破坏机制;开发基于连续-离散的水-岩耦合数值方法和非连续介质相关的动态本构模型,研究影响堰塞坝形成的关键因素和相互关系,探究堰塞坝的成因机理与结构特征及形成过程,是需要继续解决的问题。

(2) 堰塞坝风险分析与快速评估模型

堰塞坝应急抢险后的安全评估至关重要。基于随

机可靠度分析和风险分析, 辨识地震滑坡形成堰塞坝险情的主要风险因子, 建立堰塞坝险情风险分析评价方法, 判定堰塞坝安全性。

从统计分析角度出发, 基于大数据的堰塞坝稳定快速评价方法, 是堰塞坝应急处置时广泛采用的判定方法, 建立典型区域统一的快速评价模型, 根据坝体的材料特性及河道的水动力条件进一步提升堰塞坝稳定性快速评价方法。

(3) 堰塞坝应急处置与开发利用关键技术

应急处置技术与综合治理方法相结合, 确保堰塞坝长期稳定是其开发利用的前提。研究堰塞坝的应急抢险措施、检测与监测技术, 构建堰塞坝险情的应急指挥系统; 根据堰塞坝的地质条件、结构安全、渗流评价与抗震要求等, 建立堰塞坝开发利用评价模型也是一个难点。此外, 堰塞坝防渗控制与加固处置是其开发利用的关键技术, 通过模型试验和数值计算方法研究堰塞坝的渗流特性与渗流理论, 研究防渗效果可靠的渗流控制措施, 以及坝体的加固方法、加固工艺参数、灌浆材料选择和加固效果的检验也是堰塞坝开发利用的重要课题。总结经验, 编制堰塞坝应急处置与开发利用关键技术的行业技术标准也尤为重要。

参考文献 (References) :

- [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. [YAN Zuwen, WEI Yingqi, CAI Hong. Formation mechanism and stability analysis of barrier dam [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2009, 20(4): 55 - 59. (in Chinese with English abstract)]
- [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 - 301. [NIE Gaozhong, GAO Jianguo, DENG Yan. Preliminary study on earthquake-induced dammed lake [J] . *Quaternary Sciences*, 2004, 24(3): 293 - 301. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡 [M] . 北京: 科学出版社, 2008. [HUANG Runqiu, XU Qiang. Catastrophic landslides in China [M] . Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]
- [4] 费杰, 何洪鸣, 杨帅, 等. 公元前 221 年—公元 1911 年陕甘地区堰塞湖成因浅析 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(6): 117 - 125. [FEI Jie, HE Hongming, YANG Shuai, et al. Landslide lakes in Shaanxi and Gansu Provinces in the period between BC 221 and AD 1911 [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(6): 117 - 125. (in Chinese with English abstract)]
- [5] COSTA J E, SCHUSTER R L. Documented historical landslide dams from around the world [J] . Open-File Report, 1991: 91 - 239.
- [6] 刘蓓. 日本 2004 年中越地震堰塞湖的治理 [J] . *水利水电技术*, 2008, 39(7): 100 - 102. [LIU Qian. Treatment of barrier lake in 2004 Sino Vietnam earthquake in Japan [J] . *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2008, 39(7): 100 - 102. (in Chinese with English abstract)]
- [7] KONAGAI K, SATTAR A. Partial breaching of hattian bala landslide dam formed in the 8th October 2005 Kashmir earthquake, Pakistan [J] . *Landslides*, 2012, 9(1): 1 - 11.
- [8] A. 帕尔米耶里. 塔吉克斯坦萨雷兹堰塞湖减灾工程及其发展机遇 [J] . *水利水电快报*, 2017, 38(10): 28 - 32. [A PARMIERI. Disaster reduction project and development opportunity of sazez barrier lake in Tajikistan [J] . *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2017, 38(10): 28 - 32. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 殷跃平. 西藏波密贡嘎高速巨型滑坡特征及减灾研究 [J] . *水文地质工程地质*, 2000, 27(4): 8 - 11. [YIN Yueping. Study on the characteristics and disaster reduction of the giant landslide of Yigong Expressway in Bomi, Tibet [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000, 27(4): 8 - 11. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究 [J] . *工程地质学报*, 2008, 16(4): 433 - 444. [YIN Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(4): 433 - 444. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张宗亮, 张天明, 杨再宏, 等. 牛栏江红石岩堰塞湖整治工程 [J] . *水力发电*, 2016, 42(9): 83 - 86. [ZHANG Zongliang, ZHANG Tianming, YANG Zaihong, et al. Remediation project of hongshiyuan dammed lake in niulan river [J] . *Water Power*, 2016, 42(9): 83 - 86. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王立朝, 温铭生, 冯振, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(1): 1 - 9. [WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the Baige Landslide at Jinshajiang River, Tibet, China [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 1 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [13] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams [J] . *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100(7): 1054 - 1068.
- [14] 匡尚富. 斜面崩塌引起的天然坝形成机理和形状预测 [J] . *泥沙研究*, 1994(3): 50 - 59. [KUANG Shangfu. Formation mechanism and shape prediction of natural dam due to slope failure [J] . *Journal of Sediment Research*, 1994(3): 50 - 59. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 滑坡堵江的基本条件 [J] . *地质灾害与环境*, 1996, 7(1): 41 - 46. [CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan. The main conditions of landslide dam [J] . *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1996, 7(1): 41 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [16] SWANSON F J, OYAGI N, TOMINAGA M. Landslide dams in

- Japan[C]. *Landslide Dams*, 1986: 131-145.
- [17] FAN X M, VAN WESTEN C J, XU Q, et al. Analysis of landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 57: 25 - 37.
- [18] ZHAO T, DAI F, XU N W. Coupled DEM-CFD investigation on the formation of landslide dams in narrow rivers [J]. *Landslides*, 2017, 14(1): 189 - 201.
- [19] COTECCHIA V. Systematic reconnaissance mapping and registration of slope movements [J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Geologie de l'Ingenieur*, 1978, 17(1): 5 - 37.
- [20] 徐方军, 韩丽宇. 部分国家和地区地震诱发堰塞湖及其抢险概况 [J]. *水利发展研究*, 2008, 8(6): 7 - 9. [XU Fangjun, HAN Liyu. Earthquake induced dammed lakes in some countries and regions [J]. *Water Resources Development Research*, 2008, 8(6): 7 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 范天印, 汪小刚. 堰塞坝险情特征与应急处置 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. [FAN Tianyin, WANG Xiaogang. Characteristics and emergency treatment of barrier dam [M]. Beijing: China Water Power Press, 2016. (in Chinese)]
- [22] 年廷凯, 吴昊, 陈光齐, 等. 堰塞坝稳定性评价方法及灾害链效应研究进展 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(8): 1796 - 1812. [NIAN Tingkai, WU Hao, CHEN Guangqi, et al. Research progress on stability evaluation method and disaster chain effect of landslide dam [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(8): 1796 - 1812. (in Chinese with English abstract)]
- [23] PENG M, ZHANG L M. Breaching parameters of landslide dams [J]. *Landslides*, 2012, 9(1): 13 - 31.
- [24] ERMINI L, CASAGLI N. Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(1): 31 - 47.
- [25] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元, 等. 天然土石坝稳定性初步研究 [J]. *地质科技情报*, 2001, 20(1): 77 - 81. [CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan, et al. Preliminary stability analysis of natural rock field dam resulting from damming landslide [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(1): 77 - 81. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 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. [HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1239 - 1249. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 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. [CHENG Qiangong, PENG Jianbing, HU Guangtao. Dynamics of high-speed rock landslide [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999. (in Chinese)]
- [28] ADAMS J. Earthquake-dammed lakes in New Zealand [J]. *Geology*, 1981, 9(5): 215..
- [29] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(1): 181 - 189. [HU Xiewen, HUANG Runqiu, SHI Yubing, et al. Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan Landslide and dam-breaking mode of its barrier dam [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(1): 181 - 189. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 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. [XU Wenjie, CHEN Zuyu, HE Binshun, et al. Research on river-blocking mechanism of xiaojiaqiao landslide and disasters of chain effects [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 933 - 942. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析 [J]. *工程地质学报*, 2008, 16(6): 730 - 741. [HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, LI Tianbin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at dagungbao occurred during the Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(6): 730 - 741. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 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1): 33 - 38. [ZHAO Yunhui. Investigation evaluation and control of dangerous-rock slumping geological hazard [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(Sup1): 33 - 38. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 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. [ZHANG Liang, ZHANG Yecheng, LUO Yuanhua. Theory and practice assessment of geological disaster [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. (in Chinese)]
- [34] 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. [GE Yonggang, CHEN Xingchang, FANG Hua, et al. Study on the disaster of Dadu river block induced by the rock fall occurred at Hanyuan County on August 6th, 2009 [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(1): 123 - 128. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 余国安, 王兆印, 黄河清, 等. 崩滑堰塞坝(湖)的地貌环境效应 [J]. *地球科学进展*, 2010, 25(9): 934 - 940. [YU Guoan, WANG Zhaoyin, HUANG Heqing, et al. Geomorphology and environment effects of landslide dams (dammed lakes) [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(9): 934 - 940. (in Chinese with English abstract)]

- [36] 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. [WANG Bin, WANG Weizao, YU Kaining, et al. Forming characteristics and mechanism of debris flows in Pingshan County [J] . *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2008, 19(4): 59 – 62. (in Chinese with English abstract)]
- [37] BRUNSDEN D, PRIOR D B. SLOPE INSTABILITY [J] . *Journal of Geology*, 1984: 257 – 361.
- [38] 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. [HU Kaiheng, GE Yonggang, CUI Peng, et al. Preliminary analysis of extra-large-scale debris flow disaster in Zhouqu County of Gansu Province [J] . *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(5): 628 – 634. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 高波, 张佳佳, 王军朝, 等. 西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征 [J] . *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 144 – 153. [GAO Bo, ZHANG Jiajia, WANG Junchao, et al. Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 144 – 153. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 赵高文, 王萌, 杨宗佑, 等. 震后泥石流沟内滑坡堰塞坝的侵蚀特征分析——以银洞子堰塞坝为例 [J] . *工程科学与技术*, 2019, 51(5): 68 – 77. [ZHAO Gaowen, WANG Meng, YANG Zongji, et al. Eroding characteristics of landslide dams in debris flow gullies after earthquakes—case study of yindongzi landslide dam [J] . *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(5): 68 – 77. (in Chinese with English abstract)]
- [41] OKURA Y, KITAHARA H, SAMMORI T, et al. The effects of rockfall volume on runout distance [J] . *Engineering Geology*, 2000, 58(2): 109 – 124.
- [42] QUECEDO M, PASTOR M, HERREROS M, et al. Numerical modelling of the propagation of fast landslides using the finite element method [J] . *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 59(6): 755 – 794.
- [43] SASSA K, NAGAI O, SOLIDUM R, et al. An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide [J] . *Landslides*, 2010, 7(3): 219 – 236.
- [44] HUNGR O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches: O. Hungr, Canadian Geotechnical Journal, 32(4), 1995, pp 610 – 623 [J] . *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 33(2): 88.
- [45] 钟登华, 安娜, 李明超. 库岸滑坡体失稳三维动态模拟与分析研究 [J] . *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(2): 360 – 367. [ZHONG Denghua, AN Na, LI Mingchao. 3D dynamic simulation and analysis of slope instability of reservoir banks [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 360 – 367. (in Chinese with English abstract)]
- [46] SUN H W. Review of fill slope failures in Hong Kong[R]. Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, 1999.
- [47] 李欣泽. 马湖滑坡群发育特征与形成、演化过程研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015. [LI Xinze. Research on development characteristics and the formation and evolution process of Mahu landslide group[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.(in Chinese)]
- [48] 冯文凯, 何川, 石豫川, 等. 复杂巨型滑坡形成机制三维离散元模拟分析 [J] . *岩土力学*, 2009, 30(4): 1122 – 1126. [FENG Wenkai, HE Chuan, SHI Yuchuan, et al. Simulation analysis of formation mechanism of some complex and giant landslides using three-dimensional discrete elements [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(4): 1122 – 1126. (in Chinese with English abstract)]
- [49] 王宇, 李晓, 王声星, 等. 滑坡渐进破坏运动过程的颗粒流仿真模拟 [J] . *长江科学院院报*, 2012, 29(12): 46 – 52. [WANG Yu, LI Xiao, WANG Shengxing, et al. PFC simulation of progressive failure process of landslide [J] . *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(12): 46 – 52. (in Chinese with English abstract)]
- [50] 曹文. 红石岩地震滑坡的运动过程离散元模拟分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017. [CAO Wen. Discrete element modelling of earthquake-induced red rock landslide[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.(in Chinese with English abstract)]
- [51] 王志超, 李大鸣. 基于SPH-DEM流-固耦合算法的滑坡涌浪模拟 [J] . *岩土力学*, 2017, 38(4): 1226 – 1232. [WANG Zhichao, LI Daming. Fluid-structure coupling algorithm based on SPH-DEM and application to simulate landslide surge [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 1226 – 1232. (in Chinese with English abstract)]
- [52] 殷坤龙, 姜清辉, 汪洋. 滑坡运动过程仿真分析 [J] . *地球科学*, 2002, 27(5): 632 – 636. [YIN Kunlong, JIANG Qinghui, WANG Yang. Simulation of landslide movement process by discontinuous deformation analysis [J] . *Earth Science*, 2002, 27(5): 632 – 636. (in Chinese with English abstract)]
- [53] 邬爱清, 林绍忠, 马贵生, 等. 唐家山堰塞坝形成机制DDA模拟研究 [J] . *人民长江*, 2008, 39(22): 91 – 95. [WU Aiqing, LIN Shaozhong, MA Guisheng, et al. Simulation of formation mechanism of Tangjiashan barrier dam using the DDA method [J] . *Yangtze River*, 2008, 39(22): 91 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [54] HATZOR Y H, ARZI A, ZASLAVSKY Y, et al. Dynamic stability analysis of jointed rock slopes using the DDA method: King Herod's Palace, Masada, Israel [J] . *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(5): 813 – 832.

- [55] SITAR N, MACLAUGHLIN M M, DOOLIN D M. Influence of kinematics on landslide mobility and failure mode [J] . *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(6): 716 - 728.
- [56] 张菖,陈志文,韦猛,等.基于BIM的三维滑坡地质灾害监测方法及应用 [J] . 成都理工大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 377 - 384. [ZHANG Chang, CHEN Zhiwen, WEI Meng, et al. 3D monitoring of landslide geological disaster and its application based on BIM [J] . *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2017, 44(3): 377 - 384. (in Chinese with English abstract)]
- [57] CROSTA G B, CHEN H, FRATTINI P. Forecasting hazard scenarios and implications for the evaluation of countermeasure efficiency for large debris avalanches [J] . *Engineering Geology*, 2006, 83(1/2/3): 236 - 253.
- [58] 戴兴建,殷跃平,邢爱国.易贡滑坡-碎屑流-堰塞坝溃坝链生灾害全过程模拟与动态特征分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 1 - 8. [DAI Xingjian, YIN Yueping, XING Aiguo. Simulation and dynamic analysis of Yigong rockslide-debris avalanche-dam breaking disaster chain [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 1 - 8. (in Chinese with English abstract)]
- [59] 杨秀明.滑坡失稳后运动过程三维分析模型及其应用 [D]. 重庆:重庆大学, 2014. [YANG Xiuming. The three-dimensional analysis model of runoff of landslide instability and its application [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [60] 杨克俭,刘舒燕,陈定方,等.三峡滑坡仿真系统中的关键技术 [J] . 计算机仿真, 1999, 16(2): 1 - 5. [YANG Kejian, LIU Shuyan, CHEN Dingfang, et al. The key technology of Three Gorges landslide emulation system [J] . *Computer Simulation*, 1999, 16(2): 1 - 5. (in Chinese with English abstract)]
- [61] MORIWAKI H, INOKUCHI T, HATTANJI T, et al. Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator [J] . *Landslides*, 2004, 1(4): 277 - 288.
- [62] OCHIAIHIROTAKA, SAMMORI TOSHIKI, OKADA YASUHIKO. Landslide Experiments on Artificial and Natural Slopes [M]. 2007.
- [63] 胡明鉴,汪稔,张平仓.斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究——以蒋家沟流域滑坡堆积角砾土坡地为例 [J] . *岩土工程学报*, 2001, 23(4): 454 - 457. [HU Mingjian, WANG Ren, ZHANG Pingcang. Primary research on the effect of rainfall on landslide—take the slope piled by old landslide in Jiangjiagou valley as example [J] . *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 454 - 457. (in Chinese with English abstract)]
- [64] 罗先启,陈海玉,沈辉,等.自动网格法在大型滑坡模型试验位移测试中的应用 [J] . *岩土力学*, 2005, 26(2): 231 - 234. [LUO Xianqi, CHEN Haiyu, SHEN Hui, et al. Application of automatic mesh methods to landslide model test [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(2): 231 - 234. (in Chinese with English abstract)]
- [65] 郝明辉,许强,杨磊,等.滑坡-碎屑流物理模型试验及运动机制探讨 [J] . *岩土力学*, 2014, 35(增刊1): 127 - 132. [HAO Minghui, XU Qiang, YANG Lei, et al. Physical modeling and movement mechanism of landslide-debris avalanches [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Sup1): 127 - 132. (in Chinese with English abstract)]
- [66] 刘翠容,姚令侃,杜翠,等.震后灾区泥石流阻塞大河判据与成灾模式试验研究 [J] . *土木工程学报*, 2013, 46(增刊1): 146 - 152. [LIU Cuirong, YAO Lingkai, DU Cui, et al. Experimental research on criteria and disaster-forming patterns of damming large river by debris flow in earthquake disaster areas [J] . *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(Sup1): 146 - 152. (in Chinese with English abstract)]
- [67] 董金玉,杨继红,伍法权,等.顺层岩质边坡加速度响应规律和滑动堵江机制大型振动台试验研究 [J] . *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊2): 3861 - 3867. [DONG Jinyu, YANG Jihong, WU Faquan, et al. Large-scale shaking table test research on acceleration response rules of bedding layered rock slope and its blocking mechanism of river [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(Sup2): 3861 - 3867. (in Chinese with English abstract)]
- [68] 黄小福.地震条件下崩塌落石运动特性研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2016. [HUANG Xiaofu. Mobility character of earthquake-induced rockfall [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [69] 陈家兴.甘肃舟曲锁儿头滑坡失稳机制离心模型试验研究 [D]. 成都:成都理工大学, 2013. [CHEN Jiaying. The centrifuge model test for the sliding mechanism of the suo'ertou landslide in Zhouqu County Gansu Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [70] WISHART JEREMY SCOTT. Overtopping Breaching of Rock-Avalanche Dams [D]. University of Canterbury, 2007.
- [71] CHEN S C, LIN T W, CHEN C Y. Modeling of natural dam failure modes and downstream riverbed morphological changes with different dam materials in a flume test [J] . *Engineering Geology*, 2015, 188: 148 - 158.
- [72] 陈华勇,崔鹏,唐金波,等.堵塞坝溃决对上游来流及堵塞模式的响应 [J] . *水利学报*, 2013, 44(10): 1148 - 1157. [CHEN Huayong, CUI Peng, TANG Jinbo, et al. The response of upstream flow and blockage patterns to the failure of landslide dam [J] . *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(10): 1148 - 1157. (in Chinese with English abstract)]
- [73] 杨阳,曹叔尤.堰塞坝漫顶溃决与演变水槽试验指标初探 [J] . *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(2): 1 - 7. [YANG Yang, CAO Shuyou. Preliminary study on similarity criteria of the flume experiment on the breach process of the landslide dams by overtopping [J] . *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(2): 1 - 7.

- (in Chinese with English abstract)]
- [74] 彭铭, 蒋明子. 滑坡涌浪作用下堰塞坝稳定性研究 [C]//2017中国地球科学联合学术年会, 中国, 北京: 2017: 3. [PENG Ming, JIANG Mingzi. Study on the stability of barrier dam under the action of landslide surge[C]//China Geoscience Union Annual meeting. Beijing, China: 2017: 3. (in Chinese with English abstract)]
- [75] 石振明, 王友权, 彭铭, 等. 堰塞湖坝体动力特性及加速度分布规律大型振动台模型试验研究 [J] . 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 707-719. [SHI Zhenming, WANG Youquan, PENG Ming, et al. Large-scale shaking table model tests on dynamic characteristics and acceleration distribution of landslide dams [J] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 707-719. (in Chinese with English abstract)]
- [76] 艾洪舟. 地震涌浪机理及冰碛堰塞湖溃决风险研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. [AI Hongzhou. Study of Seismic surge mechanism and Glacierlake outburst risk[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.(in Chinese with English abstract)]
- [77] 周亦良, 姚令侃, 艾洪舟, 等. 地震力与共振动水压力综合作用下冰碛堰塞坝失稳机制研究 [J] . 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1726-1735. [ZHOU Yiliang, YAO Lingkan, AI Hongzhou, et al. Instability of moraine dams under the combined action of seismic forces and resonant hydrodynamic pressures [J] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1726-1735. (in Chinese with English abstract)]
- [78] 陈生水, 徐光明, 钟启明, 等. 土石坝溃坝离心模型试验系统研制及应用 [J] . 水利学报, 2012, 43(2): 241-245. [CHEN Shengshui, XU Guangming, ZHONG Qiming, et al. Development and application of centrifugal model test system for break of earth-rock dams [J] . Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 241-245. (in Chinese with English abstract)]
- [79] 陈浩平, 苑鹏飞. 基于BIM技术的土石坝溃坝仿真模拟研究 [J] . 陕西水利, 2019(8): 10-11. [CHEN Haoping, YUAN Pengfei. Simulation study of earth-rock dam failure based on BIM technology [J] . Shaanxi Water Resources, 2019(8): 10-11. (in Chinese with English abstract)]
- [80] 邓宏艳, 孔纪名, 王成华. 不同成因类型堰塞湖的应急处置措施比较 [J] . 山地学报, 2011, 29(4): 505-510. [DENG Hongyan, KONG Jiming, WANG Chenghua. The comparison of emergency treatment on dammed lakes caused by different types geologic hazards [J] . Journal of Mountain Science, 2011, 29(4): 505-510. (in Chinese with English abstract)]
- [81] 杨启贵. 唐家山堰塞湖应急疏通工程关键技术 [J] . 中国水利, 2008(16): 8-11. [YANG Qigui. Key technologies of emergency treatment of Tangjiashan Dammed Lake [J] . China Water Resources, 2008(16): 8-11. (in Chinese with English abstract)]
- [82] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究 [J] . 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534-1551. [XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha river in baige village on october 11 and November 3, 2018 [J] . Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1534-1551. (in Chinese with English abstract)]
- [83] 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. [ZHAO Yuanhong. Seepage control of the earthquake-induced barrier bar of Xiaonanhai Reservoir [J] . Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5): 39-44. (in Chinese with English abstract)]
- [84] 燕乔, 王立彬, 毕明亮. 地震堰塞湖的综合治理与开发利用 [J] . 湖北水力发电, 2009(4): 33-35. [YAN Qiao, WANG Libin, BI Mingliang. Comprehensive harnessing and development utilization of seismic choked lake [J] . Hubei Water Power, 2009(4): 33-35. (in Chinese with English abstract)]
- [85] A READ S, D BEETHAM R. Lake Waikaremoana barrier-a large landslide dam in New Zealand, Landslide News[J]. 1991, 1(54):1481-1487.
- [86] 何宁, 娄炎, 何斌. 堰塞体的加固与开发利用技术 [J] . 中国水利, 2008(16): 26-28. [HE Ning, LOU Yan, HE Bin. Technologies of dammed lake strengthen and utilization [J] . China Water Resources, 2008(16): 26-28. (in Chinese with English abstract)]
- [87] 吕艳, 董颖, 张茂省, 等. 陕西翠华山山崩地质遗迹特征、成因及景观价值 [J] . 地球学报, 2015, 36(2): 220-228. [LYU Yan, DONG Ying, ZHANG Maosheng, et al. Characteristics, genetic mechanism and landscape value of the rock avalanche in Cuihua mountain area, Shannxi Province [J] . Acta Geoscientica Sinica, 2015, 36(2): 220-228. (in Chinese with English abstract)]
- [88] 曹晓娟. 地质灾害遗迹与科学利用 [J] . 城市与减灾, 2019(3): 46-49. [CAO Xiaojuan. The relics of geological disaster and their scientific utilization [J] . City and Disaster Reduction, 2019(3): 46-49. (in Chinese with English abstract)]
- [89] 陈献耘. 美国蒙大拿州堰塞湖的旅游开发 [J] . 水利水电快报, 2008, 29(7): 4-5. [CHEN Xianyun. Tourism development of barrier lake in Montana, USA [J] . Express Water Resources & Hydropower Information, 2008, 29(7): 4-5. (in Chinese with English abstract)]
- [90] SCHUSTER R L. Usoi landslide dam and lake sarez, Pamir mountains, Tajikistan [J] . Environmental and Engineering Geoscience, 2004, 10(2): 151-168.