DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0240 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-12

滑坡直接冲击下高拱坝破坏机理与模式

罗金良[1,2],王高辉[1,2],齐智勇[3],毛延翩[3],董顺[3],都旭煌[3]

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北武汉 430000; 2. 湖北省智慧水电技术创新中心,湖北武汉 430000; 3. 中国长江电力股份有限公司,湖北武汉 430072)

摘要: 在地震、降雨及水库蓄水等因素作用下高拱坝边坡容易失稳形成滑坡,滑坡直接冲击作用于高拱坝及其泄水建筑物,会对大坝结构造成一定程度的破坏毁伤。为了研究并揭示高拱坝在滑坡冲击作用下的损伤模式和机理,基于高拱坝模型试验建立滑坡体-拱坝-地基-库水三维耦合模型,利用SPH粒子模拟滑坡体冲击破碎及分散过程,并运用"分区分块"方法来描述滑坡体特性,采用声固耦合法模拟库水的动态作用行为,从而分析了滑坡冲击拱坝右岸坝肩顶部及泄水孔顶部平台两个重要部位的作用过程及损伤发展过程,阐明了高拱坝在滑坡直接冲击作用下不同部位的破坏模式,探讨了滑坡体积及速度因素对冲击作用的影响。研究表明,滑坡体冲击作用下坝肩主要发生压裂破碎、泄水孔平台主要发生冲切破坏、闸门桥墩发生倾倒破坏、泄水建筑物发生拉剪破坏;泄水孔顶部平台抗冲击能力比拱坝坝肩顶部弱。

关键词: 高拱坝;滑坡冲击;SPH粒子;分区分块;破坏模式

中图分类号: TV312 **文献标志码:** A

Damage mechanism and mode of high arch dam under direct landslide impact

LUO Jinliang[1,2], WANG Gaohui[1,2], QI Zhiyong[3], MAO Yanpian[3], Dong Shun[3], DOU Xuhuang[3]

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430000;
2. Hubei Technology Innovation Center for Smart Hydropower, Wuhan Hubei 430000;
3. China Yangtze Power Co., Ltd, Wuhan 430072)

Abstract: The rock of the slope of the high arch dam is easily destabilized by earthquake, rainfall and water storage in the reservoir to form landslides, landslides directly impact on the high arch dam and its spillway building, causing a certain degree of damage to the dam structure. Therefore, in order to investigate and reveal the damage mode and mechanism of high arch dams under the impact of landslides, a three-dimensional numerical coupling model of arch dam-landslide-foundation-reservoir water is established based on high arch dam model testing, the SPH particles are used to simulate the impact crushing and dispersion process of the landslide body, the "subdivided block" method is used to describe the characteristics of the landslide, and the acoustic-solid coupling method is used to simulate the dynamic behavior of the reservoir water, this paper analyses the process of landslide impact on two important parts of the arch dam, the right bank shoulder and the

收稿日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 王高辉,男,博士,教授,主要从事极端荷载作用下高坝结构安全分析,E-mail: wanggaohui@whu.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3005402),中国长江电力联合资助(Z152302011).

本文引用格式: 罗金良,王高辉,齐智勇,等.滑坡直接冲击下高拱坝破坏机理与模式[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-12.

Citation: LUO Jinliang, WANG Gaohui, QI Zhiyong, et al.Damage mechanism and mode of high arch dam under direct landslide impact[J].Engineering Journal of Wuhan University,XXXX,XX(XX):1-12.

top platform of the spillway hole, and elucidates the damage modes of different parts of high arch dams under the direct impact of landslides, and explores the influence of landslide volume and velocity factors on the impact. The results show that under the impact of landslide, the shoulder of the dam is mainly fractured and broken, the platform of the spillway hole is mainly damaged by scouring and cutting, the gate abutment is damaged by tipping, and the spillway building is damaged by pulling and shearing; and the platform on the top of the spillway hole has a weaker impact resistance than the top of the shoulder of the arch dam.

Key words: high arch dams; landslide impact; SPH particles; subdivided block; damage modes

随着我国西南地区高拱坝水利工程的相距建成和投产运行,水库边坡受地震及降雨等因素影响容易形成滑坡灾害,而库岸滑坡灾害严重影响工程安全稳定运行和威胁水库沿岸人民的生命财产安全,故高拱坝进行抗冲击研究及设计具有一定工程价值和社会意义。库岸滑坡除了会产生巨大涌浪间接冲击拱坝坝面而影响大坝整体安全运行,一定程度上还会直接冲击高坝及其泄水建筑物,对大坝结构造成不可估量的破坏,滑坡直接冲击作用下的大坝及泄水建筑物破坏模式与滑坡体的材质、方量、冲击速度等因素息息相关,它们也是影响滑坡体冲击作用大小的关键因素。

滑坡分类可以按滑坡体的体积、滑坡的滑动速度、滑坡体的物质组成等进行划分[1],其中按滑坡体的体积进行划分,滑坡体体积小于10万方属于小型滑坡,体积大于10万方小于100万方属于中型滑坡,体积大于100万方小于1000万方属于大型滑坡,体积大于1000万方属于特大型滑坡。

目前有关滑坡直接冲击作用研究集中于典型混凝土房屋框架、挡板或管道结构的毁伤分析,如张睿骁等[2]基于滑坡三维离散元方法,研究滑坡碎屑流对拦挡结构的冲击作用,以及研究滑坡碎屑流的不同坡脚角度和拦挡结构高度对滑坡冲击力、碎屑流最大水平运动距离的影响。李东黎[3]研究海底滑坡泥流及其对工程桩基的冲击作用,揭示滑坡产生的泥流粘度和流速对冲击力的影响规律。Luo等[4]基于LS-DYNA中显式积分分析方法,考虑高、中、低速度冲击强度三个滑坡强度等级,模拟典型钢筋混凝土框架建筑物在滑坡冲击作用下的渐进倒塌过程,揭示了房屋框架建筑物在滑坡冲击作用下的破坏机制和过程。Fan等[5]基于弹塑性地基梁理论,研究了滑坡冲击力、滑坡最大宽度、土体抗力系数、管道外径和管壁厚度等变量对埋地管道在横向滑坡冲击作用下的峰值位移和峰值应力的影响。以上研究表明,滑坡直接冲击作用会对混凝土结构造成一定的影响,而目前缺少滑坡直接冲击作用下高拱坝结构破坏模式的相关研究。

另外在采用SPH方法模拟滑坡体中,Dai等[6]基于光滑粒子流体动力学SPH方法和宾汉流模型,结合连续性与运动方程,建立Kumamoto地震三维数值模型,模拟了地震作用下滑坡的运动速度及距离的变化过程。Chen等[7]基于SPH光滑粒子运动学方法,采用非关联流动法则Drucker-Prager岩土本构模型模拟岩石的应力应变关系,模拟岩土颗粒材料的滑坡大变形过程。唐宇峰等[8]基于弹塑性本构模型及D-P屈服准则的SPH光滑粒子流体运动方法,研究不同流动法则和剪胀角对滑坡大变形分析精度的影响。Dai等[9]基于平滑粒子流体动力学的流体-结构耦合数值模型,模拟了文家沟和洪春沟滑坡泥石流对防砂坝的冲击影响。黄帅等[10]提出一种基于改进SPH法的流固耦合分析模型,再现了滑坡运动-崩塌破碎-涌浪形成-大坝结构变形这一整个滑坡灾害变化过程并模拟大坝结构的动态响应衰减过程。王占彬等[11]提出地震作用下边坡产生滑坡运动冲击桥桩结构的SPH流体动力学算法,研究地震波相关参数对滑坡体的冲击速度、体量的影响。综合来看,利用SPH方法模拟滑坡运动具有一定的有效性。

本文利用有限元分析软件ABAQUS平台,基于高拱坝试验模型研究对象,建立滑坡直接冲击作用下高拱坝-地基-库水三维耦合数值模型,采用SPH粒子来模拟滑坡体冲击破碎及碰撞分散过程,运用MC(摩尔库伦本构)本构来描述滑坡岩体变形特性,采用CDP(混凝土损伤塑性本构)本构来模拟拱坝混凝土结构应力应变关系;由于地基不是本文主要研究对象,地基视作线弹性体;库水则采用声学单元,利用声固耦合法模拟库水与地基及坝体的动态相互作用。综合考虑滑坡体的运动复杂性和充分研究滑坡体直接冲击作用对拱坝坝顶和泄水孔部位的损伤影响,提出滑坡体的分区分块方法,探讨滑坡体的冲击部位、体积及速度等因素对拱坝混凝土损伤的影响。研究结果可为相关类似工程

在滑坡冲击防护问题上提供一定的参考价值。

1 滑坡冲击下拱坝-地基-库水三维数值模拟方法

1.1 滑坡体分区分块方法

滑坡体在运动冲击过程中，常常不是以一个完整实体进行作用，故对滑坡体进行分区分块，其中滑坡条分法（Slope Discrete Method）是一种常用于对边坡稳定性进行分析和评估的方法之一。它基于土体内部的离散单元模型，将边坡分割为许多小的离散单元或条状滑块，每个滑块被视为一个独立的体系，其稳定性受到重力、土体内部的剪切强度和接触边界条件的影响。基于滑坡体稳定分析中的条分法基本思想，考虑到滑坡运动的复杂性以及岩体失稳后形成滑坡体时滑坡体内部分岩体发生相互碰撞或与边坡岩体发生碰撞分散作用，在滑坡直接冲击拱坝坝肩和泄水孔顶部平台部位时，对不同体积的滑坡体均进行“纵向分条横向分块”的划分处理，其中纵向分成竖向九条，横向均分成四块。滑坡体不同条块之间不考虑初始时刻分界面之间的粘结作用，滑坡体各条块之间只发生碰撞过程中的相互挤压及分散作用。对于中型滑坡冲击分析中10万m^3、25万m^3以及45万m^3滑坡体分区分块示意图如下图1～3所示：

考虑滑坡体在运动过程中的分散作用以及滑坡体内部的简化岩体结构面等因素，结合有关论文中谭海[12]运用SPH无网格方法，研究了多块体滑坡的水平运动过程；林棋文[13]在滑坡体模型冲击试验中将滑坡体视作高度及厚度方向由不同形状大小的块体组合而成来研究滑坡破碎过程；故本次研究中将滑坡体在高度及厚度方向上离散成多个块体。由于滑坡体中块体划分数量影响不是本文主要研究问题，控制不同体积滑坡体的块体划分数量，基于滑坡体分区分块方法，研究滑坡体体积因素对高拱坝破坏模式的影响。滑坡体冲击拱坝不同部位时，滑坡体最先接触拱坝的块体是滑坡体所有区域中体积最小的。对应网格数量分别为18.6、47.8、69.9万。其中滑坡体分区分块重要信息如下表1所示。

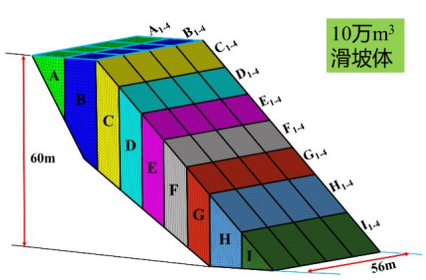


图1 10万m^3滑坡体分区分块示意图

Fig.1 Divided Zones within 100,000 m^3 Landslide

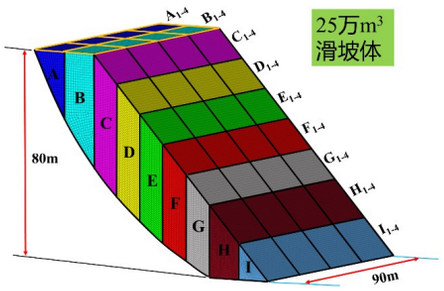


图2 25万m^3滑坡体分区分块示意图

Fig.2 Divided Zones within 250,000 m^3 Landslide

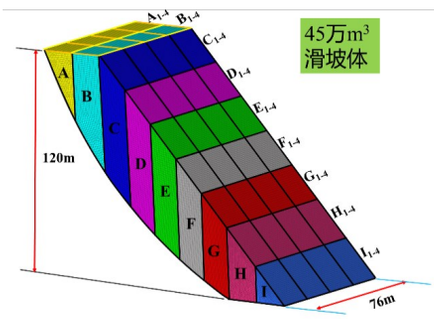


图3 45万m^3滑坡体分区分块示意图

Fig.3 Divided Zones within 450,000 m^3 Landslide

表1 滑坡体分区分块主要信息参数

Table 1 Key information parameters of Landslide Zoning Division

滑坡体体积（万m^3）	纵向高度（m）	横向宽度（m）	最大体积区域	最大体积（m^3）	最小体积区域	最小体积（m^3）
10	60	56	B	4500	I	880
25	80	90	B	9650	I	1900
45	120	76	C	17700	I	3140

1.2 基于SPH方法的滑坡冲击模拟

在滑坡冲击拱坝作用模拟中，往往因为数值计算中涉及大变形及多场耦合等问题，可能出现模拟结果不稳定收敛的问题，而SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）方法具有很多优势，如能够适应网格大变形或大位移，故不用担心网格畸变或破坏问

题;在模拟复杂流体运动时SPH方法无网格处理化能够使其运用时更加灵活,不受网格生成的限制;SPH方法中简化处理物体边界条件能够提高大规模运动模拟的速度等方面。特别考虑到滑坡体运动冲击时大变形、复杂运动特性等,从而SPH方法在模拟滑坡运动冲击时具有很高的适合度。

SPH方法将模拟的物体或流体等连续介质视作为一系列具有质量、速度及空间位置的光滑粒子的集合,集合中每一粒子代表为每一个离散元素,通过空间中每一粒子的运动来模拟整个物体的运动过程。SPH方法的核心思想是使用核函数来平滑粒子属性[14],对每个粒子周围的粒子进行加权求和,来估计局部性质如密度、速度和压力。通过对Navier-Stokes方程进行离散化并求解来模拟物体运动。SPH方法计算主要步骤包括初始化(确定粒子的初始位置、质量和速度)、密度估计(使用核函数对每个粒子周围的邻居粒子进行加权求和,估计局部密度)、力的计算(根据粒子之间的相互作用,计算压力、粘性力和重力等)、加速度和速度更新(根据计算得到的力,更新粒子加速度和速度)、位置更新(根据更新后的速度,更新粒子的位置)以及边界条件处理(固体或自由边界)。

本次在滑坡体冲击拱坝及泄水结构中运用SPH方法模拟滑坡体冲击破碎及碰撞分散的过程,滑坡体在开始下落运动时按照初始网格数相应转化为SPH粒子数(PPD=1),初始间距取为滑坡厚度方向单个网格宽度。光滑半径保证PC3D元素内部关联的最大粒子数不超过140,且每个分析中维持不变。SPH核函数采用内置三次样条多项式函数,滑坡SPH边界采用动态边界条件进行处理。滑坡体SPH粒子运动接触坝体网格时,采用通用接触法进行冲击耦合设置,从而更好地研究滑坡冲击中拱坝的破坏机理及模式以及研究滑坡体速度、体积等因素对拱坝冲击作用的影响。另外冲击过程中库水被视为声学单元,利用声固耦合法模拟库水的动态作用过程[15]。本次库水不是研究重点,其声固耦合简化过程如下图4所示。滑坡SPH粒子冲击拱坝数值模拟简化图如下图4所示。

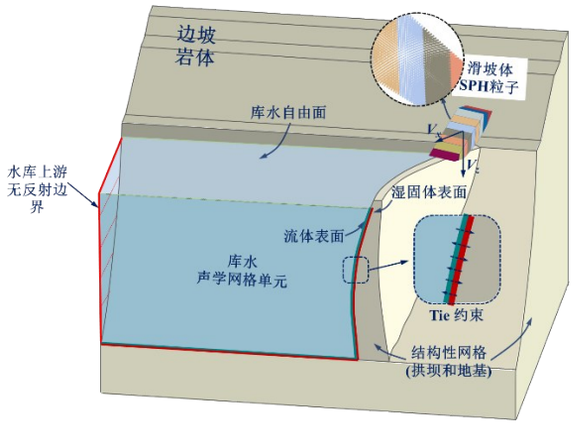


图4 滑坡SPH粒子冲击拱坝数值模拟简化示意图

Fig.4 Simplified schematic diagram of numerical simulation of landslide SPH particle impact on arch dam

2 滑坡体冲击拱坝三维结构数值模型

2.1 拱坝-库水-地基-滑坡体三维系统有限元模型

根据相关地形网格模型,将滑坡体体积10万m^3、速度25m/s作为典型工况,研究滑坡体冲击作用下拱坝的不同受冲部位。滑坡体后缘高度大概在100m之内时,右岸滑坡体下落冲击的部位在坝肩区域;滑坡体后缘高度大概在200m左右时,右岸滑坡体下落冲击作用的部位在右端泄水孔平台区域。故在滑坡体-拱坝三维模型中,滑坡体冲击部位主要有拱坝右岸坝肩和泄水孔平台(后续闸门桥墩),其示意图如下图5所示:

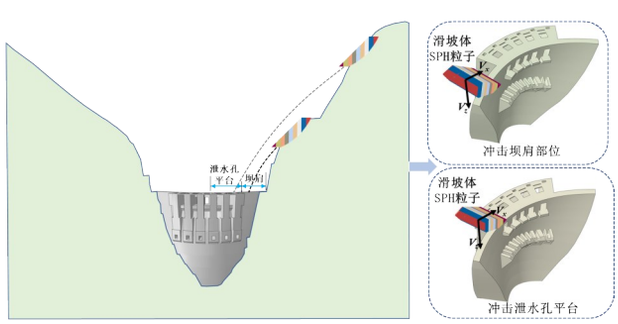


图5 滑坡体冲击拱坝不同作用部位模型图

Fig.5 Model of the different action location of the impact of the landslide on the arch dam

为了研究在滑坡冲击作用下高拱坝破坏机理及模式,选取高拱坝试验模型作为研究对象,建立拱坝-库水-地基三维数值模型,包括全貌图、拱坝结构图及拱坝网格图(如下图6(a)-(c)所示)。

该高拱坝最大坝高240m,泄水结构设计有6个中孔和5个表孔,正常蓄水高度为220m。下图6中可知该三维有限元模型主要由拱坝、泄水孔、闸门桥墩、地基及库水组成。拱坝和地基岩体采用六面体单元(C3D8R)单元模拟,滑坡体采用SPH粒子模拟,水域采用声学单元(AC3D4)模拟,故本次坝体冲击作用下采用声固耦合法来模拟水体与坝体、地

基的动态作用。拱坝采用CDP模型来模拟混凝土应力应变关系[16]-[17]，坝体混凝土弹性模量E为31.027GPa；泊松比ν为0.2；密度ρ为2643kg/m^3；滑坡体MC本构中摩擦角φ为20°；粘聚力C为0.18MPa；弹性模量E为1.8GPa；泊松比ν为0.36；密度ρ为2400kg/m^3；水体密度ρ为1000kg/m^3；体积屈曲模量为2.14GPa。有限元模型边界条件中地基底部采用三向位移约束，侧向采用法向位移约束；库水水面采用声学压强为零的边界处理方法，上游边界面采用无反射边界条件；滑坡体与坝体相互作用中接触属性中切向摩擦系数为0.25；滑坡体设置初始速度场。采用极限拉应变0.03和极限压应变0.1作为坝体单元失效准则。

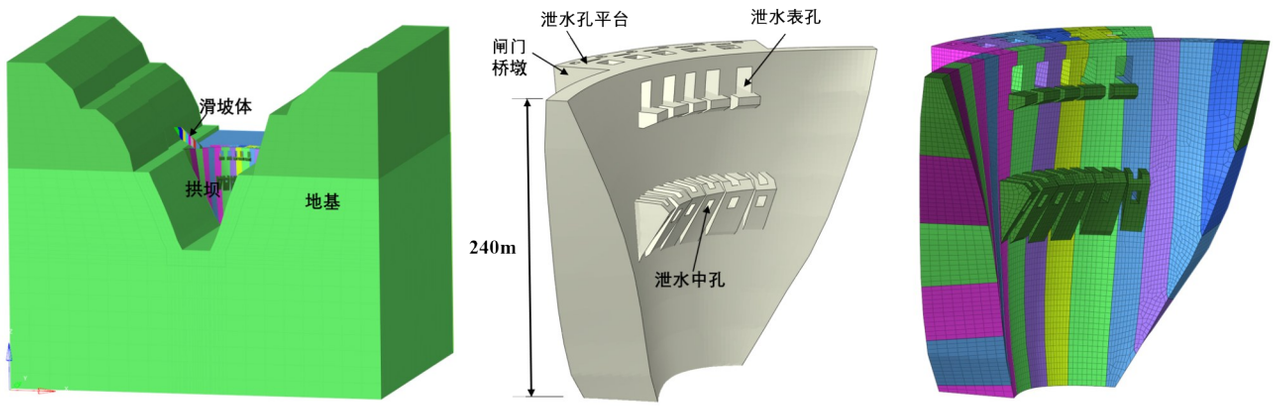


图6　三维有限元模型

Fig.6　Three-dimensional finite element model. (a) Panoramic view; (b) Arch dam structure; (c) Arch dam grid.

注：(a)全貌图 (b)拱坝结构图 (c)拱坝网格图

2.2　滑坡体相关因素分析

在滑坡作用体积参数研究分析中，拱坝右岸边坡上方存在体积60万m^{3}左右不稳定的堆积体，但是在堆积体形成滑坡运动后，滑坡体与边坡岩体发生碰撞分散作用，只有部分滑坡体冲击拱坝结构，故本次研究将10万m^{3}滑坡体作为典型工况，另外考虑滑坡体积25万及45万m^{3}这两种情况，综合分析滑坡体积这一因素对高拱坝破坏模式及损伤范围的影响。

在拱坝破坏模式研究中，需要考虑滑坡体冲击作用部位的影响。基于滑坡开始运动时的可能后缘高度，综合分析滑坡体可能冲击的拱坝部位，其中滑坡体可能冲击的部位如上图5所示，滑坡体冲击的拱坝部位考虑右岸坝肩顶部及上游泄水孔平台，从而对比分析拱坝结构不同部位在滑坡冲击作用下的破坏模式。

最后在研究滑坡体速度大小对滑坡体直接冲击拱坝产生的动力效应影响时，贺翠玲等[18]控制滑坡方量100万方，滑坡速度在区间3～35m/s内变化，从而来研究滑坡速度对涌浪特性的影响；肖莉丽等[19]研究岩质滑坡运动速度分析中提出滑坡运动四个阶段过程，结合千将坪滑坡具体实例，其滑坡前缘距离水面82m，得出其最大运动速度为17.8m/s；刘尚各[20]基于离散元法准确地预测某水库岸坡滑坡的速度，结合该库岸滑坡的高程和相对蓄水面高度580m左右的情况，计算出该滑坡速度大致为19.02m/s；故本次在滑坡体典型工况中速度为25m/s，另外考虑15m/s及20m/s这两种情况来综合分析滑坡速度这一因素的影响。其中滑坡体水平横河向与竖向速度之间比值均为0.75。

通过改变滑坡体的体积和初始速度，充分研究滑坡体相关参数对拱坝损伤模式的影响。通过考虑滑坡体不同的作用部位，综合研究高拱坝在滑坡冲击作用下的破坏模式。

3　滑坡冲击坝肩作用下拱坝破坏机理及模式研究

3.1　滑坡体作用过程分析

在滑坡体冲击拱坝右岸坝肩过程研究中，滑坡体在典型工况条件下运动过程如下图7所示。滑坡体经历启程下落、局部挤压、破碎分散和冲击减弱四个阶段。如在0～1.0s时间内，滑坡体未接触到坝肩顶部时，在一定的初始速度和重力加速度共同作用下整体启程下落。0.02s时刻左右滑坡体接触拱坝右岸坝肩顶部，之后拱坝受到冲击荷载作用而发生挤压破碎，在接触坝肩的部分岩体受到高强度的

拱坝结构和滑坡上部岩体的运动限制下,滑坡体达到局部挤压的状态。在1.0～1.5s时间内,后缘滑坡岩体速度较慢,在前方块体的运动阻碍情况下,后缘部分滑坡岩体向右岸边坡方向运动;其次在1.5～2.0s时间内,滑坡体存在局部破碎分散的现象。滑坡体处于2.0～3.5s时,未与坝肩区域发生作用的岩体继续向下运动,上游方向的滑坡体冲击闸门桥墩,下游方向的滑坡体冲击中孔泄水结构。在3.5～5.0s时间内,滑坡体破碎分散的现象更加明显,这段时间末滑坡体冲击拱坝结构的作用逐渐减弱,拱坝结构损伤不再发展。

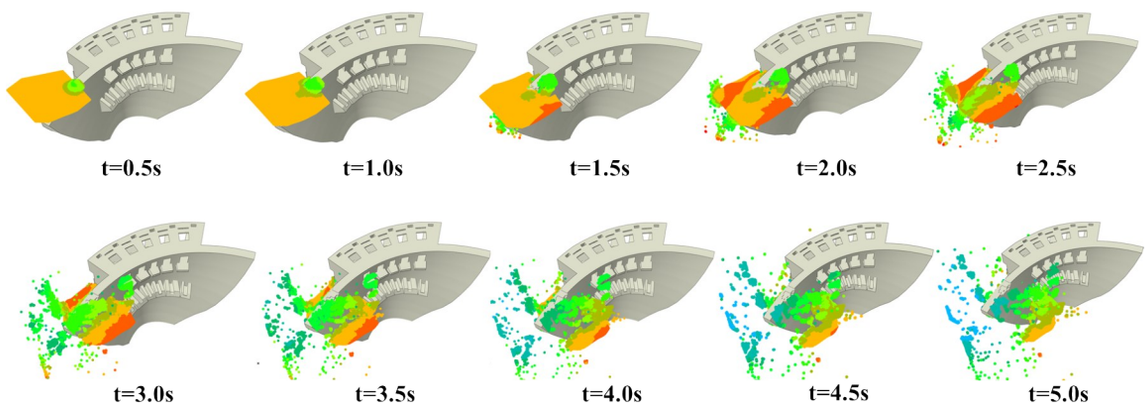


图7 滑坡体SPH粒子冲击拱坝坝肩过程

Fig.7 Process of Landslide SPH particle impact on arch dam shoulder

在滑坡体冲击拱坝右岸坝肩过程研究中,在典型工况条件下拱坝损伤发展过程如下图8所示。根据拱坝抗压损伤演化过程可知,在滑坡体冲击坝肩及后续过程中,拱坝主要经历坝肩损伤扩展阶段、中孔损伤初起阶段、中孔损伤扩展阶段及损伤稳定状态阶段这四个阶段。在0～0.5s时间内,滑坡散粒体主要作用于坝肩中部区域,该区域在冲击持续作用下,出现一定深度的冲击挤压坑。其次在0.5～3.0s时间内,随着滑坡体继续冲击挤压坝肩中部区域,其损伤(程度及深度)逐渐增大,该时间段内拱坝处于坝肩损伤扩展过程中;然后在3.0～3.5s内,中孔泄水结构在下游方向滑坡体冲击作用下,结构损伤开始渐渐发展。4.0s时刻左右,由于滑坡体冲击持续作用于拱坝中孔泄水结构上,中孔结构在应变超过极限拉应变(拉剪破坏)之后,出现单个泄水孔局部混凝土单元失效作用;最后在4.0～5.0s时间段内,由于中孔泄水结构属于“墙面”形式,两面中间支撑作用薄弱,“墙面”在强冲击作用下,与坝体连接处发生拉剪破坏。由于闸门桥墩大体上是一个大体积柱状结构,另外水体阻力作用能够减弱冲击效果,闸门桥墩损伤范围和程度较小。通过增大滑坡散粒体的体积或速度时,拱坝下游表孔墩和中孔泄水建筑物的损伤程度均有所增大。综上,坝肩主要发生压裂破碎、中孔主要发生拉剪破坏。

3.2 滑坡体体积影响分析

研究滑坡体体积对冲击拱坝右岸坝肩的影响中,滑坡体典型工况中初始速度维持25m/s不变,控制滑坡体体积值为10万m^3、25万m^3及45万m^3,从而对比分析滑坡体体积这一影响因素。

在不同体积的滑坡体冲击拱坝右岸坝肩作用下,拱坝抗压和最大破碎影响深度结果如下图9所示。不同体积的滑坡体以25m/s速度冲击拱坝右岸坝肩中部,由于滑坡体在该部位以冲击挤压作用为主,该区域抗压损伤程度大于抗拉损伤,滑坡体体积越大,坝肩部位破碎最大影响深度越大。10、25及45万m^3滑坡体冲击作用下坝肩最大破碎深度分别为10.3m、13.7m、31.9m。从下图10可看出,在不同体积的滑坡体全冲击过程中拱坝下游面单个中孔泄水结构损伤程度较大,并且主要以拉伸损伤为主,破坏形式也主要是拉剪破坏。

滑坡体在不同体积条件下冲击拱坝右岸坝肩部位,拱坝接触压力的峰值及变化情况如下图11所示。在小体积(10万m^3)、中体积(25万m^3)及大体积(45万m^3)滑坡冲击作用下,拱坝顶部特定位置的接触应力最值分别为41.28MPa、57.15MPa和113.56MPa。体积越大,接触应力到达峰值的时间也相对较长。

3.3 滑坡体速度影响分析

研究滑坡体速度对冲击拱坝右岸坝肩的影响

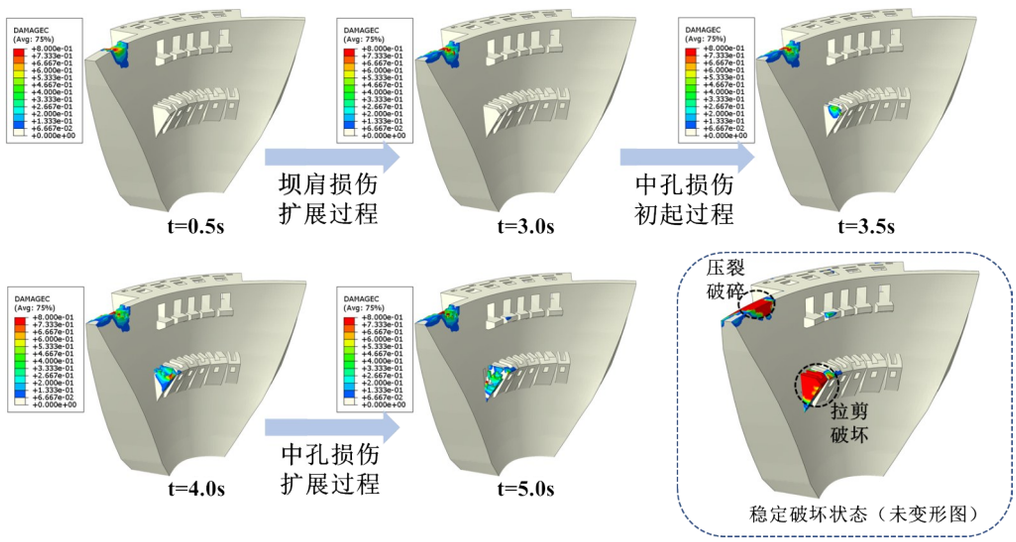


图 8　滑坡体冲击坝肩作用下拱坝损伤发展过程

Fig.8　Failure propagation process of arch dam under the landslide impact on the dam shoulder

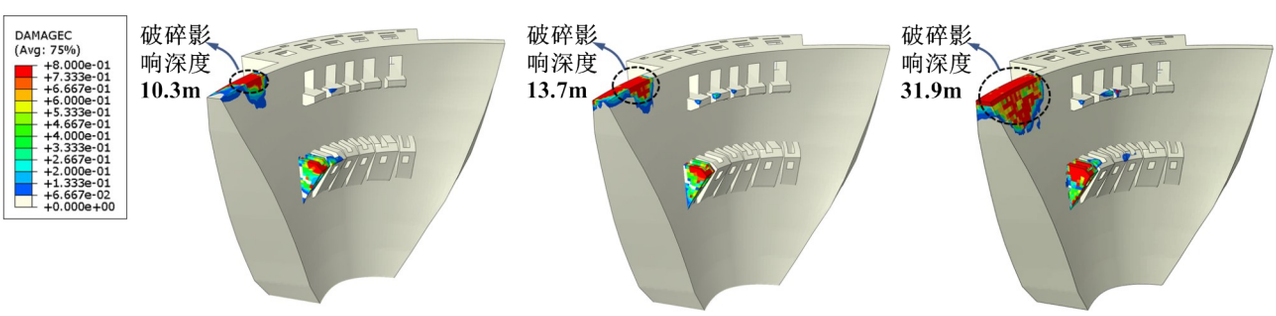


图 9　不同体积下滑坡体冲击坝肩作用下拱坝压缩损伤

Fig.10　Compression damage of arch dam under landslide impact at different volume on dam shoulder. (a)100000m^3; (b) 250000m^3; (c)450000m^3

注：(a)10 万 m^3 (b) 25 万 m^3 (c) 45 万 m^3

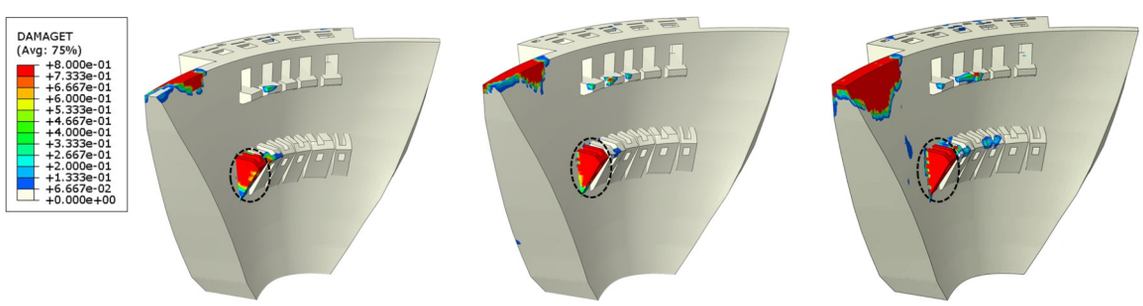


图 10　不同体积下滑坡体冲击坝肩作用下拱坝拉伸损伤

Fig.11　Tensile damage of arch dam under landslide impact at different volume on dam shoulder. (a)100000 m^3; (b)250000 m^3; (c)450000 m^3

注：(a)10 万 m^3 (b) 25 万 m^3 (c) 45 万 m^3

中，滑坡体典型工况中体积维持 10 万 m^3 不变，控制滑坡体速度值为 15、20 及 25m/s，从而对比分析滑坡体速度这一影响因素。

在 10 万 m^3 滑坡体散粒体以初始速度 15m/s 冲击拱坝右岸坝肩作用下，拱坝抗压及破碎影响如下图 12 所示。10 万 m^3 滑坡体以 15m/s 速度冲击拱坝右岸坝肩中部，该区域抗压损伤和抗拉损伤均较小，几乎无破碎影响深度。另外 10 万 m^3 滑坡体以 20m/s 和 25m/s 初始速度作用下坝肩部位最大破碎影响深度分别为 7.05m 和 10.3m。在滑坡体以 15 和 25m/s 速度冲击作用下，拱坝下游面中孔结构损伤较小，表孔墩损伤集中于边缘尖端处。在 25m/s 初

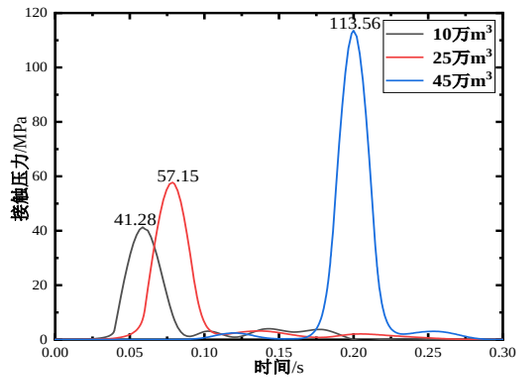


图 11　不同滑坡体积条件下拱坝接触应力变化曲线

Fig.11　Contact stress variation curves of arch dams under different landslide volume conditions

始速度冲击作用下拱坝中孔泄水结构损伤较大。

在研究滑坡体以不同速度冲击拱坝右岸坝肩的响应规律中,坝肩顶部表面中心竖向位移随时间变化情况如下图 13 所示。在滑坡体以一定初始速度运动时,拱坝在 0.02s 时间内位移无响应。滑坡以 15m/s、20m/s 和 25m/s 初始速度作用下拱坝冲击中心部位表面竖向位移最值分别达到 5.73cm、13.69cm 和 34.03cm(方向竖直向下),并在后续运动中分别达到稳定位移量 3.73cm、8.70cm 和 22.31cm。在滑坡散粒体冲击过程中,由于涉及部分单元应变超过极限应变值而出现失效情况,单元点位移时程变化情况复杂,重点集中于坝肩顶部表面刚接触冲击时刻的竖向位移峰值。

4　滑坡冲击泄水孔平台作用下拱坝破坏机理及模式研究

4.1　滑坡体作用过程分析

在滑坡体冲击拱坝泄水孔平台过程研究中,滑坡体在典型工况下冲击拱坝泄水孔过程如下图 14 所示。滑坡体经历下落挤压、冲击闸门桥墩顶部(泄水孔顶部平台)、冲击平台“轨道梁”、冲击桥墩中下部四个阶段。如滑坡体在 0～1.0s 时间内,在未接触拱坝泄水孔平台时滑坡体在一定的初始速度和重力加速度共同作用下整体下落。0.04s 时刻左右滑坡体接触拱坝泄水孔平台顶部,由于与桥墩顶部的冲击作用和滑坡体上部岩体的惯性运动,部分滑坡体受到挤压作用。在 1.0～2.5s 时间内,滑坡前缘先冲击闸门桥墩顶部,后冲击平台“轨道梁”结构。在 2.5～3.5s 时间内,位于泄水孔平台上部的滑坡体冲击效果逐渐消散,上游方向的滑坡体冲击桥墩中下部结构。滑坡体处于 3.5～5.0s 时,靠近上游方向的滑坡体继续冲击桥墩中下部区域,下游方向的滑坡体冲击表孔墩及中孔泄水建筑物。在 0～2.5s 时间内,滑坡体破碎飞散的现象不明显;2.5～5.0s 时,在冲击桥墩及下游表孔及中孔结构下,滑坡破碎飞散现象越来越明显。

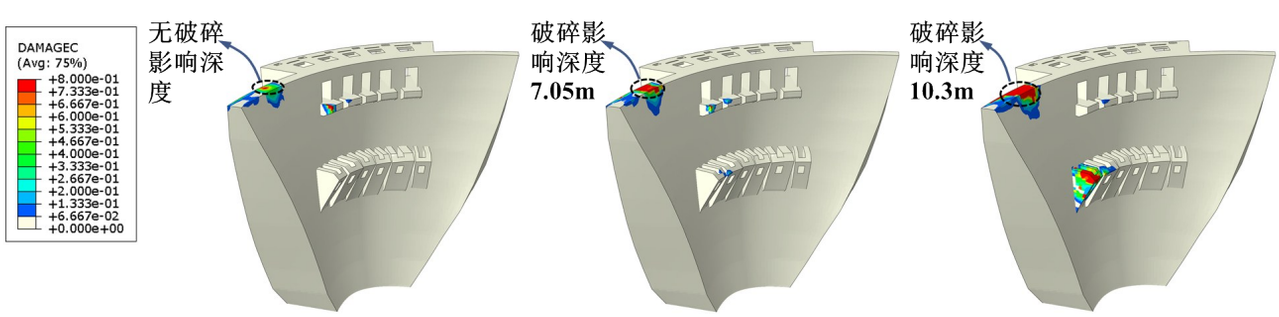


图 12　不同速度下滑坡体冲击坝肩作用下拱坝压缩损伤

Fig.12　Compression damage of arch dam under landslide impact at different speeds on dam shoulder. (a) 15m/s; (b) 20m/s; (c) 25m/s

注:(a)15m/s (b)20m/s (c) 25m/s

在滑坡体冲击拱坝泄水孔平台过程研究中,拱坝损伤发展过程如下图 15 所示。根据拱坝抗压损伤演化过程可知,拱坝在滑坡冲击荷载初始作用泄水平台顶部时及后续滑坡体散粒体运动过程中,拱坝主要经历泄水孔平台顶部冲切破坏和闸门桥墩倾倒破坏这两个主要阶段。

4.2　滑坡体体积影响分析

研究滑坡体直接冲击泄水孔顶部平台中滑坡体积这一影响因素时,考虑该部位离边坡远且薄弱细部结构多,未考虑配筋情况下承受冲击压力有限,故控制滑坡体速度 25m/s,滑坡体体积综合 10 万 m^3、25 万 m^3 两种情况分析。

在不同体积的滑坡体冲击拱坝泄水孔顶部平

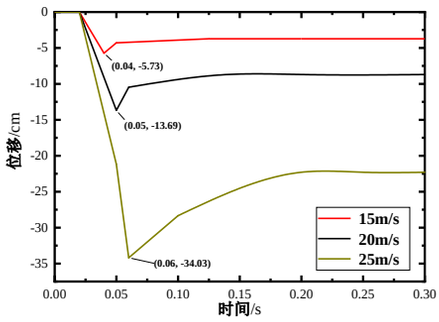


图 13　不同速度条件下坝肩顶部竖向位移变化

Fig.13　Vertical displacement variation at the top of the dam shoulder under different speed conditions

台作用下，拱坝抗拉损伤和最大破碎深度结果如下图 16 所示。该部位在冲击作用下以冲切破坏为主。在闸门桥墩发生倾倒整体破坏前，10 万及 25 万 m^3 滑坡体作用下泄水孔平台最大破碎影响深度分别为 12.6m、19.5m。通过下游面拉伸损伤云图对比，25 万 m^3 滑坡体作用下拱坝下游面顶部损伤影响宽度要大，中孔泄水结构损伤程度较大。

4.3　滑坡体速度影响分析

在研究滑坡体速度对冲击泄水孔平台作用的影响时，滑坡体冲击作用分析在典型工况（10 万 m^3 和 25m/s）基础上，再考虑滑坡速度 15 及 25m/s 两种情况，从而对比分析滑坡体速度这一影响因素。

10 万 m^3 滑坡体以 15m/s、20m/s 及 25m/s 的初始速度冲击拱坝泄水孔顶部平台，拱坝抗拉损伤和最大破碎深度结果如下图 17 所示。混凝土结构最大破碎影响深度分别为 9.9m、11.2m、12.6m。

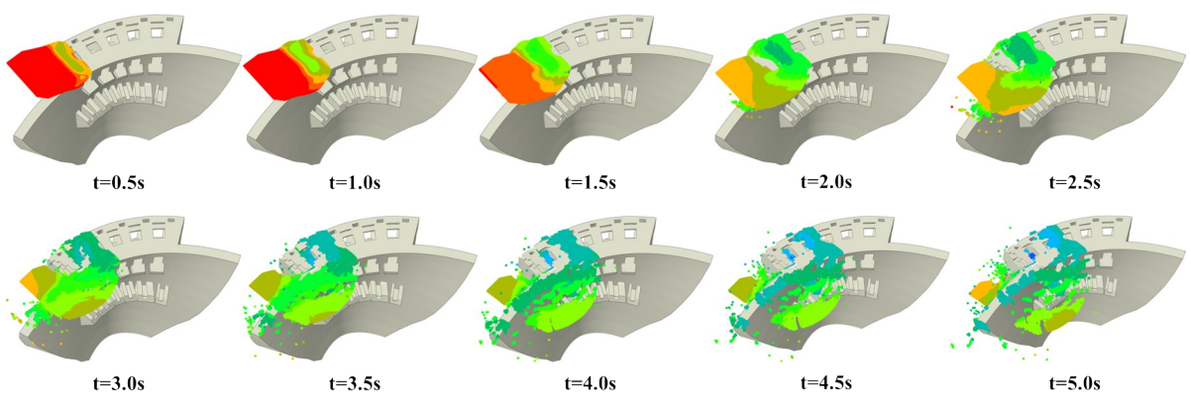


图 14　滑坡体 SPH 粒子冲击拱坝泄水孔平台过程

Fig.14　Process of Landslide SPH particle impact on the Platform of the Discharge Hole of Arch Dam

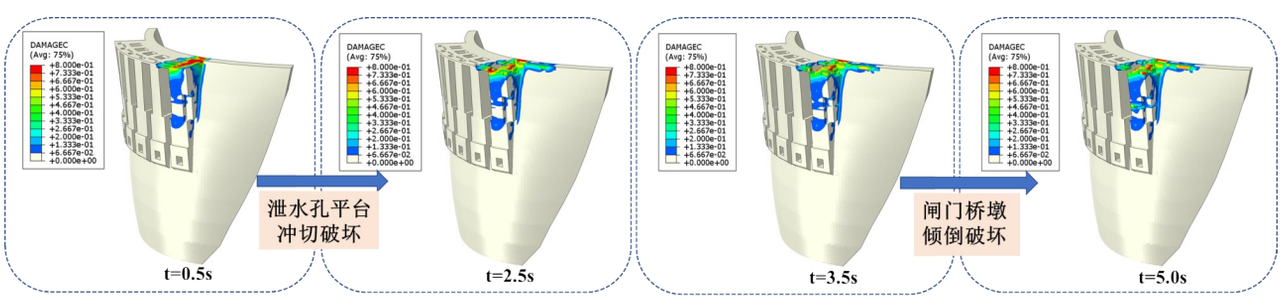


图 15　滑坡体冲击泄水孔平台下拱坝损伤发展过程

Fig.15　Failure propagation process of arch dam under the landslide impact on Platform of the Discharge Hole

在滑坡体不同体积及速度条件下，拱坝泄水孔平台冲击中心部位的接触应力变化情况如下图 18 所示。10 万 m^3 滑坡体分别以 15m/s、25m/s 的初始速度冲击拱坝泄水孔顶部平台，其初始接触应力峰值分别为 35.09MPa、47.96MPa；25 万 m^3 滑坡体以 25m/s 的初始速度冲击拱坝作用下，特定部位接触应力峰值为 73.72MPa。

5　结论

本文研究了高拱坝在滑坡直接冲击荷载作用下的破坏机理和模式，了解了其对大坝结构安全运行的影响。本文将高拱坝试验模型作为研究对象，基于实际坝体形状和地形，建立了三维耦合数值模型。采用 CDP 本构模拟大坝混凝土应力应变关系，利用 SPH 粒子模拟滑坡体冲击破碎和碰撞分散过

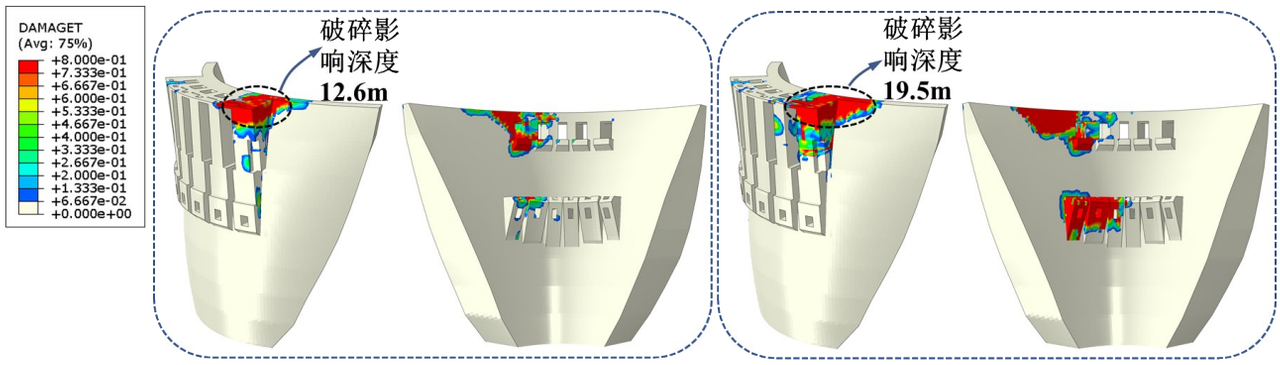


图16 不同体积下滑坡体冲击泄水孔平台作用下拱坝拉伸损伤

Fig.16 Tensile damage of arch dam under impact of landslide at different volume on Platform of the Discharge Hole. (a) 100000 m^3; (b)250000 m^3

注:(a)10万m^3 (b)25万m^3

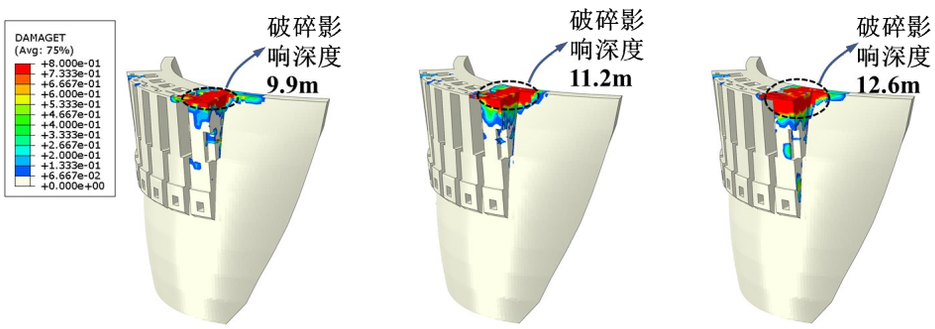


图17 不同速度下滑坡体冲击泄水孔平台作用下拱坝拉伸损伤

Fig.17 Tensile damage of arch dam under impact of landslide at different volume on Platform of the Discharge Hole. (a) 15m/s; (b)20m/s; (c)25m/s

注:(a)15m/s (b)20m/s (c)25m/s

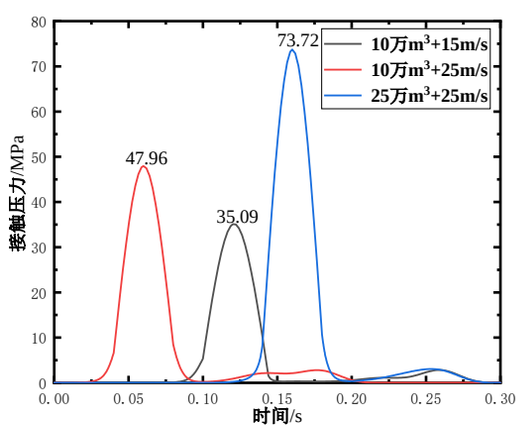


图18 不同滑坡体积条件下泄水孔平台接触应力变化曲线

Fig.18 Contact stress variation curves of Platform of Discharge Hole under different landslide volume

程,并运用MC本构和“分区分块”方法来描述滑坡体特性,库水采用声固耦合法模拟其动态作用行为。基于相关模型材料方法研究滑坡直接冲击拱坝坝肩顶部和泄水孔顶部平台下滑坡体作用过程,以及滑坡体体积及初始速度对冲击拱坝损伤模式的影响,从而得到以下相关结论。

(1)拱坝在滑坡体冲击坝肩作用下主要经历坝肩损伤扩展阶段、中孔结构损伤初起阶段、中孔损伤扩展阶段及损伤稳定状态阶段这四个阶段,滑坡体主要经历启程下落、局部挤压、破碎分散和冲击减弱四个阶段;坝肩破坏形式主要以压裂破碎为主,中孔泄水结构主要以拉剪破坏为主。

(2)拱坝在滑坡体冲击泄水孔顶部平台下主要经历泄水孔平台顶部冲切破坏和闸门桥墩倾倒破坏这两个主要阶段,滑坡体经历下落挤压、冲击闸门桥墩顶部(泄水孔顶部平台)、冲击平台“轨道梁”、冲击桥墩中下部四个重要阶段。泄水孔顶部平台主要发生冲切破坏,闸门桥墩则以倾倒破坏为主。

(3)滑坡体直接冲击拱坝作用下,滑坡体体积及速度对拱坝损伤具有一定的影响,且体积影响相对较大。滑坡体体积或速度越大,拱坝冲击部位的最大破碎影响深度越大,最大破碎深度可达31.9m;抗压或抗拉损伤范围也越大;中孔泄水建筑物损伤

程度越大;特定研究部位中心接触应力峰值也越大,最大峰值可达113.56MPa。同等速度情况下,滑坡体积越大,中孔泄水建筑物损伤程度越大;中低速度及小体积滑坡体作用下,拱坝下游面表孔及中孔泄水建筑物损伤程度小。

(4)对比分析滑坡体不同的冲击作用部位,滑坡体同等条件作用下,冲击泄水孔顶部平台下拱坝最大破碎深度要比较大,在典型工况下,泄水孔顶部平台破碎影响深度最大为12.6m,坝肩最大为10.3m;破坏模式也比较严重。泄水孔顶部平台附近区域的抗冲击能力要比坝肩部位要弱。

本文以高拱坝试验模型作为研究对象,研究结果得出的规律可能不能适用于所有类型的大坝,但是可以为拱坝设计和保护提供一定的参考,并对拱坝抗冲击相关研究具有一定的参考意义。但是滑坡体不同强度或本构模型对拱坝冲击动态响应与损伤模式特性的影响还待进一步研究。

参考文献:

[1] 刘广润,晏鄂川,练操.论滑坡分类[J].工程地质学报,2002(04):339-342.
LIU G R, YAN E C, LIAN C.: Discussion on classification of landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2002(04): 339-342.

[2] 张睿骁,樊晓一,姜元俊.滑坡碎屑流冲击拦挡结构的离散元模拟[J].水文地质工程地质,2019,46(01):148-155.
ZHANG R X, FAN X Y, JIANG Y J. Discrete element simulation of the impact of landslide debris flow on resistive structures[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 148-148.

[3] 李东黎.海底滑坡泥流运动对工程桩基的冲击作用研究[D].中国地质大学,2023.
LI D L. Study on mudflow movement impacts of submarine landslide on engineering pile foundation[D]. China University of Geosciences, 2023.

[4] LUO Y H, ZHANG L L, Zhang M L. Progressive failure of buildings under landslide impact[J]. Landslides, 2019, 16(7): 1327-1340.

[5] FAN Z Y, WU B, LIU T P, et al. An analytical calculation method and mechanical response laws of buried pipelines subjected to the impact of transverse landslides[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2519(1).

[6] DAI Z, WANG F, HUANG Y, et al. SPH-based numerical modeling for the post-failure behavior of the landslides triggered by the 2016 Kumamoto earthquake [J]. Geoenvironmental Disasters, 2016, 3(1): 1-14.

[7] CHEN W, QIU T. Numerical Simulations for Large Deformation of Granular Materials Using Smoothed Particle Hydrodynamics Method[J]. International Journal of Geomechanics, 2012, 12(2): 127-135.

[8] 唐宇峰,施富强,廖学燕,等.基于光滑粒子流体动力学的流动法则对土体滑坡大变形的影响探讨[J].岩土力学,2018,39(04):1509-1516.
TANG Y F, SHI F Q, LIAO X Y, et al. Determination on flow rules of large deformation analysis of slope using SPH method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1509-1516.

[9] DAI Z L, HUANG Y, CHENG H L, et al. SPH model for fluid–structure interaction and its application to debris flow impact estimation[J]. Landslides, 2017, 14(3): 917-928.

[10] 黄帅,王中根,李昱,等.基于改进SPH方法的滑坡涌浪对大坝结构冲击响应规律研究[J/OL].工程科学与技术:1-14[2024-04-18].
Huang S, Wang Z G, Li Y, et al. Research on impact response of dam affected by landslide surge based on improved SPH method[J/OL]. Advanced Engineering Sciences: 1-14(2024-4-18).

[11] 王占彬,张卫杰,张健,等.基于并行SPH方法的地震滑坡对桥桩的冲击作用[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(07):54-65.
Wang Z B, Zhang W J, Zhang J, et al. Impact of earthquake-induced landslide on bridge pile based on parallelized SPH method[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(07): 54-65.

[12] 谭海.基于无网格方法的滑坡及滑坡涌浪研究[D].武汉大学,2019.
TAN H. Study of landslides and landslide-induced waves based on meshfree methods[D]. Wuhan University, 2019.

[13] 林棋文.高速远程滑坡破碎相依渐进相变机理研究[D].西南交通大学,2021.
LIN Q W. Study on the mechanisms of fragmentation-dependent phase transition of rock avalanche[D]. Southwest Jiaotong University, 2021.

[14] 强洪夫.光滑粒子流体动力学新方法及应用[M].科学出版社,2017.
QIANG H F. A new method and application of smoothed particle hydrodynamics[M]. Science Press, 2017.

[15] 李艳朋,林皋,胡志强,等.基于声固耦合法的拱坝-库水-地基相互作用分析[J].哈尔滨工程大学学报,2022,43(04):451-457.
LI Y P, LIN G, HU Z Q, et al. Arch dam-reservoir-

foundation interaction analysis based on the acoustic-structure coupling method[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(4): 451-457.

[16] PAN X H, WANG G H, LU W B, et al. The effects of initial stresses on nonlinear dynamic response of high arch dams subjected to far-field underwater explosion [J]. Engineering Structures, 2022, 256: 114040.

[17] GAO Z, WANG G H, LU W B, et al. Dynamic stability of concrete structures with varying sections to underwater contact explosion: A case study of gravity dams[J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115855.

[18] 贺翠玲,李鹏峰,张智,等. 狭窄型水库不同滑速滑坡对涌浪特性及工程影响[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34 (05): 124-131.
HE C L, LI P F, ZHANG Z, et al. Influence of sliding velocity on landslide-generated wave characteristics and narrow reservoir structure[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34 (05): 124-131.

[19] 肖莉丽,殷坤龙,刘艺梁,等. 高速库岸岩质滑坡运动过程及速度分析[J]. 地质科技情报, 2012, 31 (04): 117-122.
XIAO L L, YIN K L, LIU Y L, et al. Analysis of the velocity and process of high-speed reservoir rockslide [J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31 (04): 117-122.

[20] 刘尚各,李震,殷秀文. 基于离散元法的某水库岸坡滑坡速度及涌浪预测[C]//中国建筑学会工程勘察分会,全国建筑工程勘察科技情报网,全国建工勘察科技情报网华北站.2018年全国工程勘察学术大会论文集. 2018:7.
LIU S G, LI Z, YIN X W. Prediction of landslide velocity and surge in a reservoir based on discrete element method[C]// Engineering Survey Branch of Architectural Society of China, National Construction Engineering Survey Science and Technology Intelligence Network, National Construction Engineering Survey Science and Technology Intelligence Network of North China. Proceedings of the 2018 National Engineering Survey Academic Conference. 2018:7.