

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250227002

复杂地形下碎屑流冲击混凝土桥墩的损伤机理研究*

程麦理, 郭少恒, 拓鹏鹏, 程巨田

(延安大学建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘要:为探究艰险山区复杂地形下碎屑流对混凝土桥墩的冲击致灾机理,利用离散元软件PFC^{3D}开展了凸型、直线型及凹型三种斜坡滑槽仿真模拟试验,分析了碎屑流的运动规律及堆积特征,深入研究了混凝土桥墩在碎屑流动力冲击作用下的损伤演化规律。结果表明:凹型斜坡碎屑流启动阶段速度最大且峰值平均速度最高(6.38 m/s),但运动时间最短,凸型斜坡碎屑流启动阶段速度最小且峰值平均速度最低(2.53 m/s),但运动时间最长;凸型斜坡碎屑流堆积最为分散、致灾范围最广、桥墩前堆积高度最高,凹型斜坡碎屑流堆积规律则相反;凸型斜坡碎屑流对桥墩的峰值冲击力在X向、Z向均最大,墩顶位移响应最显著(5.0 mm),凹型斜坡碎屑流对桥墩冲击力峰值在三向均最小,且墩顶位移最小仅1.07 mm;凸型斜坡场地下桥墩损伤最严重,损伤高度范围最大(距墩底0.27~1.32 m),直线型斜坡次之,凹型斜坡下桥墩损伤高度范围最小(0.06~0.31 m);桥墩损伤率与主冲击方向(X向)峰值冲击力排序相同,即凸型斜坡>直线型斜坡>凹型斜坡。研究结果可为艰险山区桥梁碎屑流冲击灾害防治提供参考。

关键词:碎屑流;混凝土桥墩;复杂地形;数值模拟;冲击损伤

中图分类号: U443.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0400-09

Study on Damage Mechanisms of Concrete Piers Impacted by Debris Flow in Complex Terrain

CHENG Maili, GUO Shaoheng, TA Pengpeng, CHENG Jutian
(School of Architectural Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: To investigate the disaster-causing mechanisms of debris flow impact on concrete piers in complex terrain within hazardous mountainous areas, simulation tests were conducted using discrete element software PFC3D on three types of slope flumes: convex, linear, and concave. The movement patterns and accumulation characteristics of the debris flow were analyzed, and the damage evolution patterns of concrete piers under dynamic impact of debris flow were deeply studied. The results indicated that the debris flow on the concave slope exhibited the largest start-up velocity and the highest peak average velocity (6.38 m/s), but the shortest movement duration. In contrast, the debris flow on the convex slope showed the smallest start-up velocity and the lowest peak average velocity (2.53 m/s), but the longest movement duration. The debris flow accumulation on the convex slope was the most dispersed, covered the widest disaster area, and resulted in the greatest accumulation height in front of the pier, while the accumulation patterns on the concave slope exhibited the opposite trend. The peak

* 收稿日期:2025-02-27;修回日期:2025-06-03

基金项目:国家自然科学基金项目(52368026)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-437)资助

作者简介:程麦理(1987—),男,教授,博士。主要从事桥梁结构抗震防灾研究。E-mail: cml3635@163.com

通信作者:郭少恒(1999—),男,硕士研究生。主要从事滑坡灾害防治研究。E-mail: gsh27407@163.com

impact force of the debris flow on the pier under the convex slope condition was the largest in both the X and Z directions, and the displacement response at the pier top was the most significant (5.0 mm). Under the concave slope condition, the peak impact force of the debris flow on the pier was the smallest in all three directions, and the pier-top displacement was minimal at only 1.07 mm. The pier damage was the most severe under the convex slope terrain, with the largest damage height range (0.27 m to 1.32m from the bottom of the pier), followed by the linear slope, while the concave slope exhibited the smallest damage height range (0.06 m to 0.31 m). The pier damage rate followed the same ranking as the peak impact force in the main impact direction (X-direction): convex slope > linear slope > concave slope. The research findings can provide a reference for the prevention and mitigation of debris flow impact disasters on bridges in hazardous mountainous areas.

Keywords: debris flow; concrete pier; complex terrain; numerical simulation; impact damage

0 引言

我国西南地区地势险峻、生态环境脆弱,强降雨、地震及不科学的工程活动极易诱发碎屑流滑坡灾害,且该类灾害具有突发性强、破坏力大的特点,严重威胁山区基础设施和人民生命财产安全^[1]。碎屑流冲击作用下山区桥梁主要表现为桥墩剪断、主梁塌落等破坏模式^[2],造成桥梁结构功能丧失,对碎屑流冲击混凝土桥梁结构的致灾机理研究迫在眉睫。国内外关于桥梁冲击研究主要集中在车撞桥^[3-4]、船撞桥^[5-6]方面。随着山区桥梁建设日益增多,深沟陡坡地区的桥梁结构遭受泥石流、滑坡、崩塌等地质灾害诱发的桥梁致灾案例也相应增加,碎屑流冲击桥梁结构的灾害研究逐渐得到学者关注。毕钰璋等^[7]利用离散元法建立了滑坡冲击桥墩模型,研究了碎屑流冲击不同截面桥墩受冲击力变化规律。M. L. Cheng^[8]借助颗粒流程序(PFC)开展了碎屑流冲击混凝土桥墩的仿真模拟研究,以桥墩截面形式、冲击距离、坡度等为参量,探讨了碎屑流冲击桥墩的冲击力分布、桥墩动力响应规律。陈勇等^[9-10]通过室内模型试验,结合DEM-FEM耦合分析,完整再现了碎屑流的启动、加速、冲击与堆积过程,并建立了不同变量与最大冲击力的关系。在桥梁冲击防护方面,主动防护通过偏转结构、桩梁结构等形式避免崩滑体对桥墩的直接冲击^[11-12];被动防护是在桥墩周围设置防撞装置,降低桥梁灾损^[13-14]。

场地地形对碎屑流运动冲击效应有显著影响。樊晓一等^[11]基于物理模型试验探究了偏转约束条件下碎屑流的速度变化及颗粒分布规律。M. L. Cheng等^[15]对V形山谷的双柱式桥墩进行了碎屑流

冲击模拟分析,通过改变桥墩布置方式及冲击夹角,探究了碎屑流对桥墩冲击作用的影响规律。胡晓波等^[16]从能量角度分析了场地条件对碎屑流运动堆积及冲击效应的影响。

综上所述,现有碎屑流冲击桥梁研究主要关注单一坡形、滑槽坡度、碎屑体体积等变量因素,较少考虑碎屑流在不同地形下对混凝土桥墩的冲击效应研究。本文借助颗粒流软件(PFC^{3D}),通过建立碎屑体、桥墩和凹型、直线型、凸型滑槽三维模型,开展碎屑流冲击混凝土桥墩的滑槽仿真模拟试验,探究复杂场地条件下碎屑流对混凝土桥墩的动力冲击作用规律,揭示碎屑流对混凝土桥墩的冲击致灾机理。

1 三维离散元模型

1.1 接触模型

本文采用线性模型表征碎屑体与碎屑体、碎屑体与滑槽各组件间的接触行为。图1为线性接触模型示意,线性接触模型中法向和切向线弹性力组件与阻尼力组件相互平行,并在线弹性力组件中存在弹簧摩擦行为,而阻尼力组件中存在黏结行为,两种组件间不能传递接触力矩^[17],其接触力与力矩表现为:

$$F_c = F^l + F^d, M_c = 0 \quad (1)$$

式中, F_c 为接触力; F^l 为线性力; F^d 为阻尼力; M_c 为接触力矩。线性力和阻尼力均可分解为法向力和切向力:

$$F^l = -F_n^l \hat{n}_c + F_s^l \quad (2)$$

$$F^d = -F_n^d \hat{n}_c + F_s^d \quad (3)$$

式中, F_n^l 为法向线性力; \hat{n}_c 为接触平面法线方向; F_s^l 为切向线性力; F_n^d 为法向阻尼力; F_s^d 为切向阻尼力。当颗粒表面间隙之差小于或等于零时,开始对接触行为进行计算。

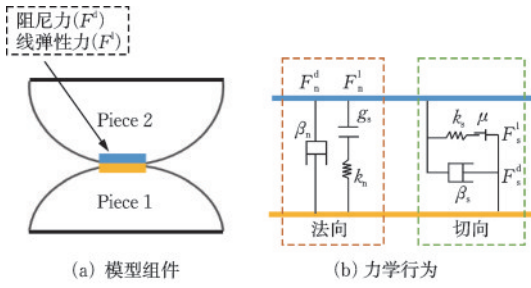


图1 线性模型示意

Fig.1 Schematic diagram of linear model

文献[8,18]指出,线性平行黏结模型能有效模拟混凝土材料的黏结作用。图2为线性平行黏结模型示意,它提供了两个界面行为,未黏结时界面相当于线性模型,不抵抗颗粒体的相对旋转;黏结时界面称为平行键,它能抵抗颗粒体的相对旋转^[17],其接触力与力矩表现为;

$$F_c = F^l + F^d + \bar{F}, M_c = \bar{M} \quad (4)$$

式中, \bar{F} 为黏结力; \bar{M} 为黏结力矩。线性和阻尼力按线性模型更新,而平行键中的力和力矩更新如下:

$$\bar{F} = -\bar{F}_n \hat{n}_c + \bar{F}_s \quad (5)$$

$$\bar{M} = \bar{M}_t \hat{n}_c + \bar{M}_b \quad (6)$$

式中, \bar{F}_n 为法向平行键力; \bar{F}_s 为切向平行键力; \bar{M}_t 为平行键扭矩; \bar{M}_b 为平行键弯矩。当两个接触块颗粒体的表面间隙为零或存在黏结行为时,开始进行接触计算。

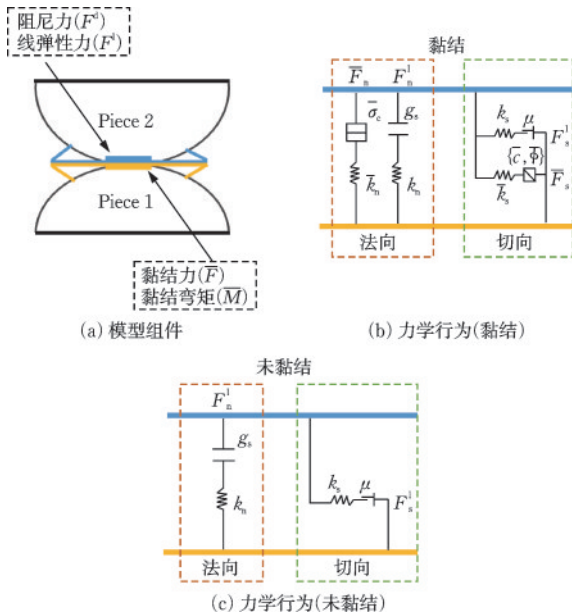


图2 线性平行黏结模型示意

Fig.2 Schematic diagram of linear parallel bond model

1.2 参数选取

本研究中碎屑体材料的细观参数参照文献[15-16,18]选取。桥墩混凝土强度等级C30,容重 25 kN/m^3 ,弹性模量 $E_c=30 \text{ GPa}$,轴心抗压强度 $f_c=20.1 \text{ MPa}$,抗拉强度 $f_t=2.01 \text{ MPa}$,桥墩材料的细观参数参照文献[8,19-20]选用。表1给出了离散元模型材料的具体细观参数。

表1 PFC模型材料参数

Table 1 PFC model material parameters

接触模型	颗粒类型	参数	值
块体-块体	块体-块体	$k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.0×10^6
		$k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.0×10^6
		μ	0.1
		β_n	0.2
		$k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.5×10^6
		$k_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.5×10^6
线性模型	块体-墙体	μ	0.45
		β_n	0.2
		$k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.0×10^7
块体-球体	块体-球体	$k_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.0×10^7
		μ	0.5
		β_n	0.2
		$\bar{k}_n/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	1.4×10^8
		$\bar{k}_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	4.0×10^7
		$\bar{\sigma}_c/\text{Pa}$	6.0×10^6
线性平行键模型	球体-球体	\bar{c}/Pa	3.5×10^7
		$\bar{\phi}/(^{\circ})$	50
		β_n	0.2

1.3 模型建立

本文以某25 m跨径高架桥为原型,墩高20 m,直径1.6 m,同时考虑实际滑坡体粒径^[21]、地形尺寸^[18]因素,按1:4缩尺比建立本研究模型。

多球颗粒体组成的块体相较单球颗粒体能更好表征实际碎屑体的棱角不规则特点,使模拟结果更符合实际情况^[22]。本研究采用两种块状刚性簇模拟碎屑体,两种块状体均由等大球体颗粒组成,滑坡碎屑体中两种块状体体积比1:1,块体粒径分布范围10~15 cm,块体间无黏结效应。

混凝土桥墩为圆柱墩,离散元模型采用粒径相等的球体颗粒模拟,桥墩直径0.4 m、高5.0 m。图3为碎屑流冲击桥墩的滑槽模型。

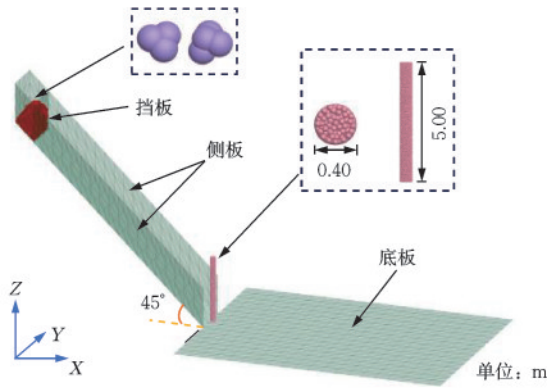


图3 碎屑流冲击桥墩滑槽模型

Fig.3 Flume model of debris flow impacting pier

为准确模拟不同复杂地形,本研究通过改变两段槽体坡角以达到对凸型、直线型及凹型斜坡的模拟。凸型斜坡由 30° 斜槽和 60° 斜槽组成(图4(a)),直线型斜坡坡角为 45° 斜槽(图4(b)),凹型斜坡由 60° 斜槽和 30° 斜槽组成(图4(c))。三类滑槽模型装置均由物料箱、斜槽、侧板与堆积区底板组成,斜槽宽 3.0 m ,侧板高 3.0 m ,底板尺寸为 $(15.0 \times 20.0)\text{ m}$,物料区位于后挡板 2.0 m 的位置。

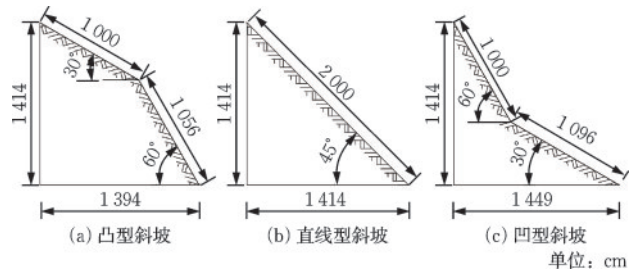


图4 三种地形示意

Fig.4 Schematic diagrams of three terrain types

1.4 试验设置

为研究凹型、直线型、凸型地形下碎屑流对混凝土桥墩的冲击作用规律,故保持三种地形物源区高度、碎屑体体积、桥墩坡前冲击距离不变。滑槽物源区高度均为 14.14 m ,碎屑体体积为 6.0 m^3 ,桥墩位于滑槽坡脚处,坡前距离为 0 。

2 碎屑流运动及堆积

2.1 碎屑体运动规律

图5给出了碎屑体在三种地形下冲击混凝土桥墩的运动过程,其可分为启动、加速、冲击与堆积

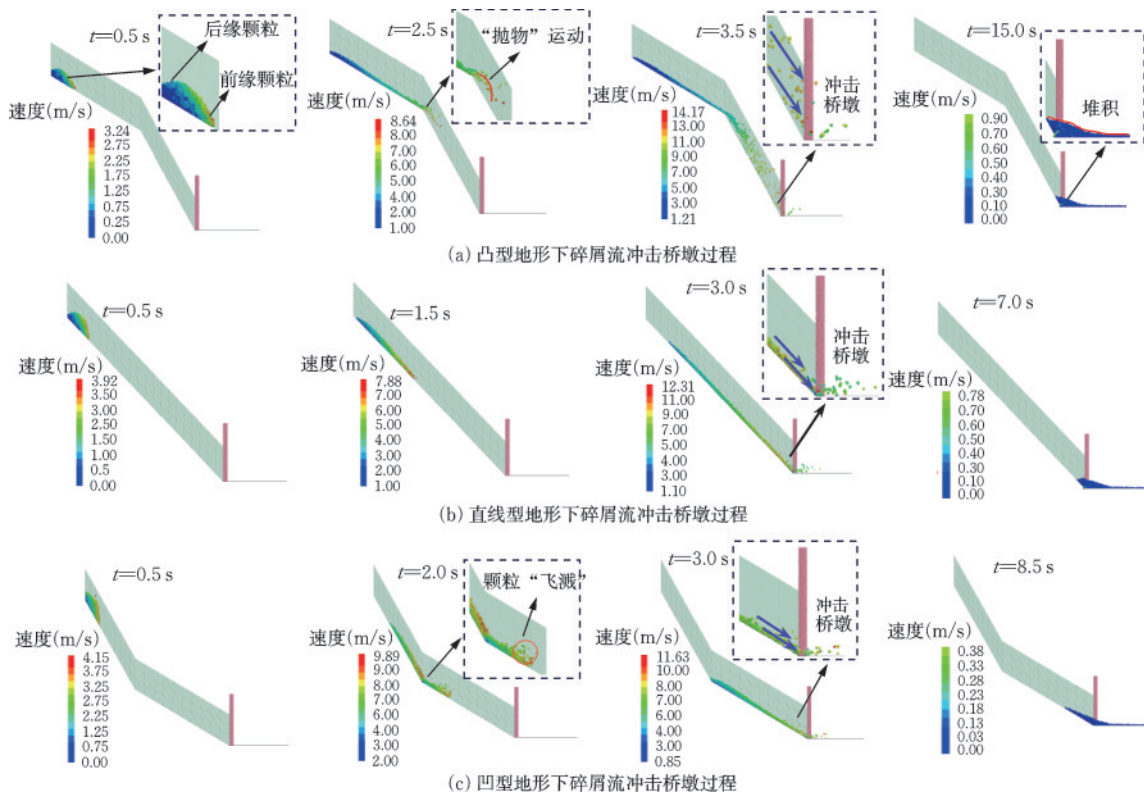


图5 三种地形下碎屑流冲击桥墩过程

Fig.5 Process of debris flow impacting pier under three terrain types

四个阶段。

启动阶段:碎屑体受重力作用初始速度逐渐增大,前缘碎屑体启动阶段速度表现为:凹型斜坡>直线型斜坡>凸型斜坡,这是由于碎屑体在凹型斜坡上重力的竖向分力大,因而加速度较大,相反凸型斜坡上的碎屑体启动阶段速度最小。加速阶段:凸型斜坡碎屑流运动路径由缓变陡,由于惯性作用部分前缘碎屑在小范围内做“抛物”运动,直线型斜坡碎屑流未经变坡,速度逐渐增大,凹型斜坡碎屑流运动路径由陡变缓,前缘碎屑受后缘碎屑体在变坡处挤压及碰撞,产生“飞溅”效果。冲击阶段:直线型斜坡碎屑流和凹型斜坡碎屑流在同一时间3.0 s开始冲击桥墩,凸型斜坡碎屑流在3.5 s开始冲击桥墩。堆积阶段:受地形影响,碎屑体完成滑坡并堆积的时间不同,即直线型斜坡(7.0 s)<凹型斜坡(8.5 s)<凸型斜坡(15.0 s)。

图6给出了不同地形下碎屑流平均速度变化曲线。分析图6可知,凹型斜坡碎屑流平均速度曲线斜率最大,表明速度增长最快,而凸型斜坡碎屑流平均速度曲线斜率最小,速度增长最慢。三种斜坡地形下碎屑流平均速度峰值时刻不同,具体表现为凹型斜坡(1.89 s)<直线型斜坡(3.58 s)<凸型斜坡(5.29 s)。碎屑流在三种斜坡地形上平均速度变化呈现先增大后减小规律,但也存在一定差异,在平均速度增加阶段,凸型斜坡上碎屑流加速时间最长,但其峰值平均速度最低(2.53 m/s),而凹型斜坡下的碎屑流峰值平均速度最高(6.38 m/s),且用时最短,直线型斜坡上碎屑流峰值平均速度位于二者之间(6.19 m/s)。在平均速度减小阶段,碎屑流在直线型斜坡上速度下降最快,在凸型斜坡下碎屑流减速持续时间最久。

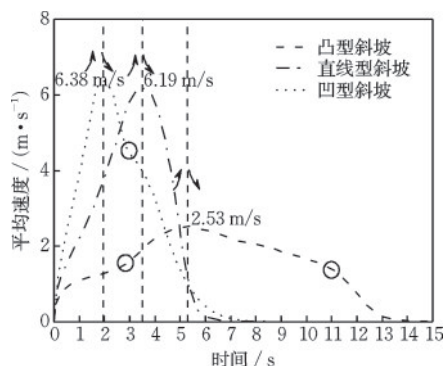


图6 不同地形下碎屑流平均速度时程曲线

Fig.6 Time history curves of average debris flow velocities under different terrain conditions

分析图6可知,凹型斜坡碎屑流平均速度变化曲线在减速阶段出现一个反弯点,原因是大部分碎屑体在陡坡段滑动后到缓坡段起始位置形成二次堆积,多数颗粒速度减小导致整体碎屑体平均速度下降减缓。凸型斜坡碎屑流平均速度变化曲线在速度增加和减小阶段各存在一个反弯点,增速阶段反弯点出现的原因是部分碎屑体已经开始过渡到陡坡段,以更高的速度向前运动,导致平均速度有所提升;减速阶段反弯点出现的原因是大部分碎屑体在坡脚处已形成堆积,少量颗粒在陡坡段处向下运动,导致整体速度减小加快。

2.2 碎屑体堆积

图7为三种地形下碎屑流冲击桥墩后的堆积形态。由图7可知,三种地形下碎屑体均在冲击桥墩后形成竖向堆积,后缘碎屑受前缘碎屑的堆积阻碍向两侧分散流动。在平面堆积形态方面,凸型斜坡下碎屑扩散范围最广,而凹型斜坡则因坡度影响大量碎屑体未滑冲至底板。由于凸型斜坡坡度由缓变陡使得碎屑体速度增大,导致碎屑体“跳跃”“碰撞”加剧,碎屑散落范围变大;凹形斜坡由陡变缓,前缘碎屑冲击桥墩后形成堆积致使后缘碎屑体无法充分加速而提前堆积在斜坡上,此时碎屑流对桥墩的作用表现为侧向“挤压”力。

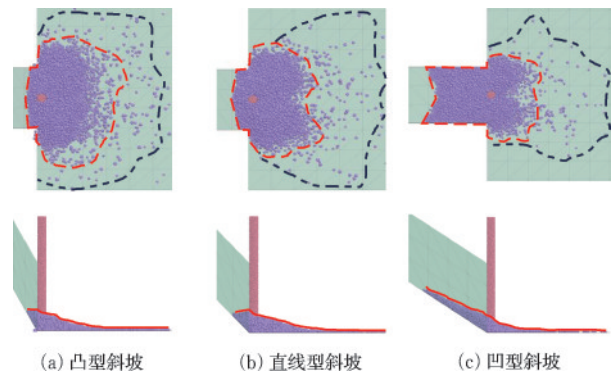


图7 不同地形下碎屑体堆积形态

Fig.7 Debris accumulation patterns under different terrain conditions

为明确桥墩前碎屑体的高度变化,图8给出了三种斜坡地形下碎屑体在桥墩前的堆积高度时程曲线。分析图8易知,碎屑体堆积高度均呈先增大后稳定的规律。不同地形下桥墩前碎屑体堆积起始时刻为:直线型斜坡($t=2.5$ s)<凹型斜坡($t=3.0$ s)<凸型斜坡($t=5.5$ s)。分析不同地形下碎屑

体堆积高度峰值及对应时刻发现,直线型斜坡碎屑流在 $t=6.0$ s最先达到堆积高度峰值 0.83 m(A点),凹型斜坡在 $t=6.5$ s达到堆积高度峰值 0.65 m(B点),凸型斜坡在 $t=10.0$ s达到堆积高度峰值 0.85 m(C点)。分析墩前堆积高度易知,凸型斜坡碎屑流在桥墩前堆积高度最大,其对桥墩形成的侧向主动挤压力最大,而凹型斜坡则最小。

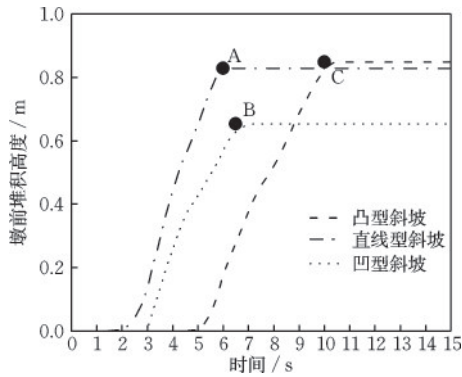


图8 不同地形下桥墩前碎屑堆积高度时程曲线

Fig.8 Time history curves of debris accumulation heights in front of piers under different terrain conditions

3 桥墩动力冲击及损伤

3.1 桥墩冲击力

为探究不同地形下碎屑流对桥墩的冲击作用,图9给出了桥墩XYZ方向的冲击力时程曲线。分析图9可知,凸型斜坡碎屑流对桥墩的冲击力峰值在X向、Z向均最大,表明桥墩在凸型斜坡下受碎屑流的冲击力最为显著。凹型斜坡的冲击力峰值在三个方向上均最小,说明在凹型斜坡下桥墩所受冲击力最小。碎屑流滑动方向(X向)为桥墩的主要迎面面,三种地形下峰值冲击力大小为:凹型斜坡(5.62 kN) $<$ 直线型斜坡(23.83 kN) $<$ 凸型斜坡(37.67 kN)。

碎屑流对桥墩的冲击过程可分为动态冲击与准静态堆积两个阶段。在动态冲击阶段,三种地形下桥墩峰值冲击力出现时间表现为直线型斜坡(2.93 s) $<$ 凹型斜坡(4.51 s) $<$ 凸型斜坡(7.85 s),在达到峰值冲击力后的其他动态冲击时刻均有冲击力动态增减现象。在准静态堆积阶段,直线型斜坡与凹型斜坡均在约 5.6 s进入准静态堆积,而凸型斜坡则在经较长动态冲击后进入准静态堆积,该阶段墩前碎屑体堆积高度基本不变,桥墩冲击力主要为后缘碎屑体经堆积体对桥墩传递的挤压力。

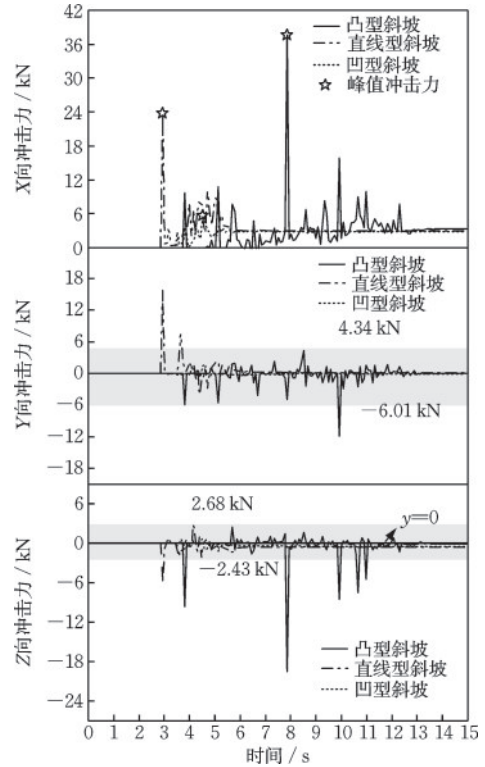


图9 不同地形下XYZ向冲击力时程曲线

Fig.9 Time history curves of impact force in X, Y, and Z directions under different terrain conditions

三种地形下桥墩Y向冲击力主要分布于 $-6.01\sim 4.34$ kN,未在此范围的冲击力是由于少数碎屑体动能较大,转化为冲击力所做的功也越大,因此存在较大冲击力。桥墩Z向冲击力主要分布于 $-2.43\sim 2.68$ kN,冲击力分布较均匀,且三种地形下桥墩Z向冲击力多为负值,说明碎屑流符合陡坡俯冲作用效果,但也有少数正向冲击力,这是由于凸型斜坡碎屑体的“跳跃”“碰撞”运动导致的Z轴正向冲击分力。碎屑流对桥墩的冲击持续时间直接影响了桥墩的灾损状态,对比不同地形下碎屑流的冲击力持时可知,凸型斜坡的三向冲击持续时间最长,而凹型斜坡最短。

3.2 墩顶位移

为研究三种地形下碎屑流冲击桥墩时墩顶位移响应,图10给出了墩顶位移在主冲击方向(X向)的动力响应。由图10可知,不同地形条件下,碎屑流冲击桥墩产生的墩顶位移增长规律不同。虽然直线型斜坡与凹型斜坡碎屑流最先对桥墩产生冲击位移,但其墩顶位移最大值仅为 1.47 、 1.07 mm。对于凸型斜坡碎屑流,由于冲击持续时间长、冲击力度大,桥墩墩顶位移峰值响应可达 5.0 mm。因此,

凸型斜坡场地的碎屑流对桥墩的动力作用最为显著,在该地形下桥墩的冲击防护设计应重点关注。

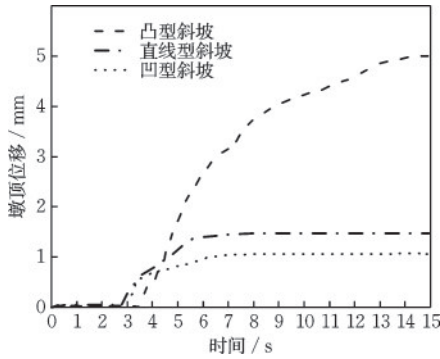


图10 不同地形下墩顶位移时程曲线

Fig.10 Time history curves of pier-top displacement under different terrain conditions

3.3 桥墩损伤

山区碎屑流对桥墩的冲击毁损模式复杂,通过监测混凝土桥墩材料黏结键的断裂情况,图11给出了三种地形下桥墩的开裂损伤状况。

分析图11(a)可知,三种地形下碎屑体对混凝土桥墩的冲击均产生不同程度损伤。凸型斜坡下桥墩损伤数量最多,桥墩损伤主要集中在距墩底0.27~1.32 m区域,这表明受凸型斜坡变坡影响,碎屑体下滑出现短距离“抛物”现象,碎屑体下落至较陡坡面时发生“弹跳”“碰撞”,致使碎屑体冲击桥墩位置不在墩底。直线型斜坡下桥墩损伤主要集中在距墩底0.14~1.0 m区域,较凸型斜坡的损伤位置低。凹型斜坡下桥墩的损伤主要集中在距墩底0.06~0.31 m区域,且损伤数量最少,其损伤高度位置较凸型斜坡低1.01 m(76.5%)。三种地形下碎屑

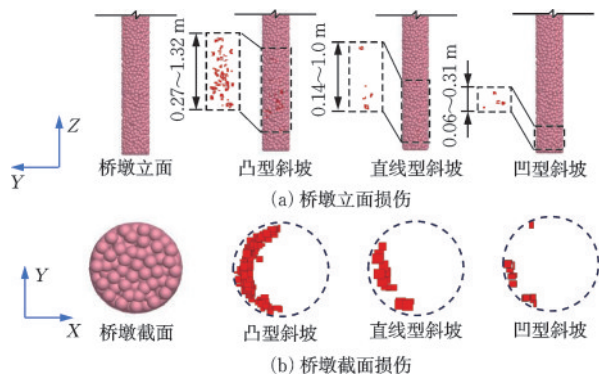


图11 不同地形下混凝土桥墩损伤分布

Fig.11 Damage distribution of concrete piers under different terrain conditions

流对桥墩的冲击损伤范围表现为凸型斜坡>直线型斜坡>凹型斜坡规律,因此在进行桥墩防护设计时需考虑碎屑流对桥墩的冲击高度,尤其关注凸型斜坡下碎屑流冲击损伤范围广、高度大。

由图11(b)可见三种地形下桥墩受损表现出较强规律性,损伤主要集中在弧型迎冲面,堆积在桥墩后的碎屑体未对桥墩形成侧压损伤,且桥墩未形成贯通破坏。对比三种地形下损伤位置及形状可知,凸型斜坡下桥墩受损最严重,直线型斜坡下桥墩损伤较小,而凹型斜坡下桥墩损伤最小。因此,在进行桥墩防护装置布设时应重点加强凸型斜坡地形下的桥墩迎冲面防护,降低碎屑流对桥墩的致损作用。

为探究桥墩损伤形成时间规律,图12给出了三种地形下桥墩产生冲击损伤数量的时程曲线。

由图12可知,凹型斜坡与直线型斜坡碎屑体于2.6~2.9 s先后对桥墩产生冲击损伤,凸型斜坡下桥墩在3.3 s开始产生冲击损伤。对于直线型斜坡和凹型斜坡,桥墩损伤数量增长速度快,但在短时间内(2.5~3.5 s)增长后再无新损伤,原因是堆积碎屑体受后缘碎屑冲击,传递到桥墩的冲击作用表现为“挤压”作用,并不会产生冲击损伤,两种地形下桥墩黏结键损伤数量分别为17个和14个。凸型斜坡下,碎屑体对混凝土桥墩的冲击损伤持续时间长,桥墩破坏严重,损伤数量达160个。这是由于凸型斜坡下陡坡段碎屑体运动的流动性态不明显,碎屑体离散程度高、相互作用少、能量损耗小,对桥墩冲击致损效应明显。

文献[23]采用体积损伤率 ρ_f 为指标建立了桥墩在滚石冲击下的损伤评估方法,其可表示为:

$$\rho_f = \frac{V_f}{V_0} \quad (7)$$

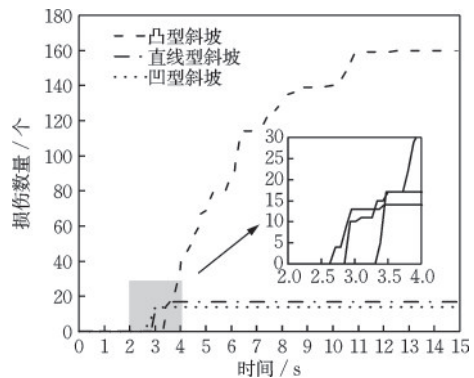


图12 不同地形下损伤数量时程曲线

Fig.12 Time history curves of damage quantity under different terrain conditions

式中, V_f 为失效体积; V_0 为桥墩原体积。

为定量评价碎屑流对混凝土桥墩的损伤作用, 本文采用相同粒径球体颗粒建立混凝土桥墩, 并以桥墩“球体”单元周围存在三个及以上的黏结键断裂即视为桥墩“球体”单元失效, 通过监测碎屑流冲击桥墩过程中混凝土颗粒的破坏数量来评估桥墩损伤率。混凝土桥墩的损伤率 γ 可表示为:

$$\gamma = \frac{A_0}{A} \quad (8)$$

式中, A_0 为桥墩损坏球体个数; A 为组成桥墩整体的球体总数。

图 13 给出了三种地形下桥墩受碎屑流冲击后组成桥墩球体总个数的时间变化曲线。分析图 13 可知, 凸型斜坡下混凝土桥墩失效球体单元持续增长, 且数量最多, 桥墩损伤率为 0.086 3%。直线型斜坡碎屑流对桥墩损伤相对较小, 桥墩球体单元损伤较少, 桥墩损伤率为 0.000 8%, 而凹型斜坡下桥墩损伤率最小仅为 0.000 6%。

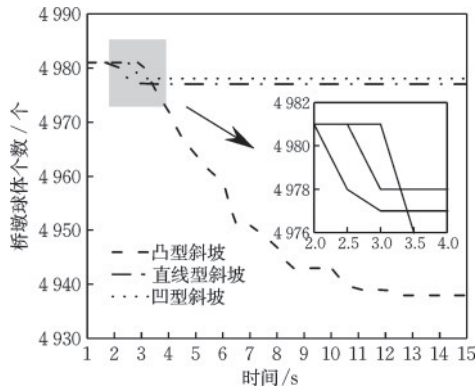


图 13 不同地形下桥墩球体变化曲线

Fig.13 Variation curves of pier spheres under different terrain conditions

4 结 论

本文利用 PFC^{3D} 开展了凸型、直线型及凹型三种斜坡滑槽的冲击模拟试验, 分析了不同地形条件下碎屑流的运动规律及堆积形态, 探讨了桥墩的冲击力及损伤演化行为, 得到如下结论:

(1) 不同地形下碎屑流冲击桥墩运动过程存在差异。加速阶段碎屑流在“凸”地形与“凹”地形下分别存在“抛物”“飞溅”现象。凹型斜坡碎屑流峰值平均速度最高达 6.38 m/s, 而凸型斜坡碎屑流峰值平均速度最低仅 2.53 m/s。

(2) 碎屑流的分散范围、桥墩前堆积高度受地

形影响显著。凸型斜坡碎屑流最分散且桥墩前堆积高度最高(0.85 m), 而凹型斜坡碎屑流大部分堆积在下坡段上, 导致碎屑体分散范围最小, 桥墩前堆积高度最低(0.65 m)。

(3) 不同地形下桥墩冲击力与墩顶位移响应规律存在显著不同。凸型斜坡下桥墩峰值冲击力在 X 向、Z 向均最大, 且墩顶位移响应最显著(5.0 mm); 直线型斜坡下桥墩峰值冲击力仅 Y 向最大, 墩顶位移为 1.47 mm; 凹型斜坡下桥墩峰值冲击力与墩顶位移均最小。

(4) 桥墩冲击损伤在不同地形下表现出不同的破坏模式。凸型斜坡下桥墩损伤最严重, 桥墩损伤率最高达 0.086 3%, 且损伤高度范围最广; 而在其余两种地形下桥墩损伤相对较轻, 损伤率相对较小, 且损伤高度范围也较小。

参考文献:

- [1] Langdon S, Johnson A, Sharma R. Debris flow syndrome: Injuries and outcomes after the montecito debris flow[J]. *The American Surgeon*, 2019, 85(10): 1094-1098.
- [2] Yan S X, He S M, Deng Y, et al. A reliability-based approach for the impact vulnerability assessment of bridge piers subjected to debris flows[J]. *Engineering Geology*, 2020, 269: 105567.
- [3] Auyeung S, Alipour A, Saini D. Performance-based design of bridge piers under vehicle collision[J]. *Engineering Structures*, 2019, 191: 752-765.
- [4] 赵武超, 钱江. 重型车辆撞击桥墩的破坏模式及抗撞性能分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(1): 67-74, 88.
Zhao W C, Qian J. Failure mode and impact performance of bridge piers subjected to heavy vehicle collision[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(1): 67-74, 88. (in Chinese)
- [5] 邵俊虎, 占玉林, 陈宁, 等. 驳船撞击下 RC 桥墩的非线性动力响应与损伤特征分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(1): 81-91.
Shao J H, Zhan Y L, Chen N, et al. Nonlinear dynamic response and damage characteristic analysis of RC pier under barge collision[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(1): 81-91. (in Chinese)
- [6] Sha Y Y, Amdahl J, Dørum C. Numerical and analytical studies of ship deckhouse impact with steel and RC bridge girders[J]. *Engineering Structures*, 2021, 234:

- 111868.
- [7] 毕钰璋, 何思明, 王东坡, 等. 碎屑流冲击下的桥墩动力响应特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(4): 16-21.
Bi Y Z, He S M, Wang D P, et al. Discrete-element investigation of rock avalanches impact on the bridge pier[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(4): 16-21. (in Chinese)
- [8] Cheng M L. Numerical analysis of the dynamic response of concrete bridge piers under the impact of rock debris flow[J]. Buildings, 2024, 14(6): 1504.
- [9] 陈勇, 姚昌荣, 朱永发, 等. 碎屑流冲击桥墩的最大冲击力影响因素试验研究[J]. 铁道建筑, 2023, 63(8): 76-81.
Chen Y, Yao C R, Zhu Y F, et al. Experimental study on influencing factors of maximum impact force of debris flow impacting bridge pier[J]. Railway Engineering, 2023, 63(8): 76-81. (in Chinese)
- [10] 陈勇, 姚昌荣, 周迅, 等. 基于DEM-FEM耦合方法的碎屑流对桥墩最大冲击力的影响因素研究[J]. 自然灾害学报, 2024, 33(2): 65-74.
Chen Y, Yao C R, Zhou X, et al. Influential factors of the maximum impact force of rock avalanche flow on bridge piers using DEM-FEM coupled method[J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(2): 65-74. (in Chinese)
- [11] 樊晓一, 夏贵平, 温翔, 等. 偏转地形约束条件下滑坡-碎屑流运动速度与颗粒分布的试验研究[J]. 山地学报, 2024, 42(3): 389-400.
Fan X Y, Xia G P, Wen X, et al. An experimental study on the velocity and particle distribution of landslide-debris flow motion under deflected terrain constraints [J]. Mountain Research, 2024, 42(3): 389-400. (in Chinese)
- [12] 王文沛, 殷跃平, 胡卸文, 等. 碎屑流冲击下桩梁组合结构拦挡效果及受力特征研究[J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 1081-1089.
Wang W P, Yin Y P, Hu X W, et al. Effectiveness and mechanical characteristics of a pile-beam composite structure in blocking debris flows[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 1081-1089. (in Chinese)
- [13] Yan S X, He S M, Wang D P, et al. Design and optimisation of a protective device for bridge piers against debris flow impact[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(7): 3321-3335.
- [14] Zhong H Q, Yu Z X, Zhang C, et al. Dynamic mechanical responses of reinforced concrete pier to debris avalanche impact based on the DEM-FEM coupled method [J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 167: 104282.
- [15] Cheng M L, Gao W W. Study on the impact law of V-shaped gully debris avalanches on double-column piers [J]. Buildings, 2024, 14(3): 577.
- [16] 胡晓波, 樊晓一, 姜元俊. 运动场地地形条件对碎屑流动力特征的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增1): 2940-2953.
Hu X B, Fan X Y, Jiang Y J. Study on the influence of topography conditions on the dynamic characteristics of dry granular flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Sup1): 2940-2953. (in Chinese)
- [17] 王涛, 韩彦辉, 朱永生, 等. PFC2D/3D 颗粒离散元计算方法及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [18] Li B, Gong W P, Tang H M, et al. DEM simulation of the bridge collapse under the impact of rock avalanche: A case study of the 2020 yaoheba rock avalanche in southwest China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(4): 104.
- [19] Shiu W J, Lee C F, Chiu C C, et al. Analyzing landslide-induced debris flow and flow-bridge interaction by using a hybrid model of depth-averaged model and discrete element method [J]. Landslides, 2023, 20(2): 331-349.
- [20] Zhang H B, Gao S L, Li H B, et al. Triaxial test analysis and discrete element simulation of CFBC [J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: 133754.
- [21] 王玉峰, 许强, 程谦恭, 等. 复杂三维地形条件下滑坡-碎屑流运动与堆积特征物理模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1776-1791.
Wang Y F, Xu Q, Cheng Q G, et al. Experimental study on the propagation and deposit features of rock avalanche along 3D complex topography [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1776-1791. (in Chinese)
- [22] Zhan L, Peng C, Zhang B Y, et al. Three-dimensional modeling of granular flow impact on rigid and deformable structures [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 112: 257-271.
- [23] 顾乡, 赵雷, 余志祥, 等. 落石冲击对山区桥墩的损伤研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(3): 72-75, 98.
Gu X, Zhao L, Yu Z X, et al. Research on the damage of bridge pier in mountain area under impact of rockfall [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(3): 72-75, 98. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)