

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

中国科技核心期刊 《中国科学引用文数据库》来源期刊 Caj-cd规范获奖期刊

坡面泥石流冲击下被动柔性防护网的动力响应

赵 雷, 邹定富, 张丽君, 余志祥

Coupled dynamic response analysis of a flexible barrier under slope debris flow impact

ZHAO Lei, ZOU Dingfu, ZHANG Lijun, and YU Zhixiang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202308031

# 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

# 破碎岩质边坡锚墩式主动防护网设计方法

Design method of anchor pier type active protective net on fractured rock slopes 吴兵,梁瑶,赵晓彦,唐晓波,吴晓春,罗天成 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 101-108

# 地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应

Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake 王来贵, 向丽, 赵娜, 刘向峰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 18-25

# 火后泥石流启动降雨阈值分析

Analysis of the rainfall threshold for post-fire debris flow initiation: A case study of the debris flow at Ren' eyong gully in Xiangcheng County, Sichuan Province

王元欢, 沈昊文, 谢万银, 鲁科, 胡桂胜 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 108-115

# 四川西昌电池厂沟火后泥石流成灾特征及防治措施分析

Analysis on disaster characteristics and prevention measures of the post-fire debris flow in Dianchichang gully, Xichang of Sichuan Province

杨相斌, 胡卸文, 曹希超, 金涛, 席传杰, 黄健, 杨瀛 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 1-8

# 基于面积高程和面积坡度积分的泥石流物质供给能力分析

The material supply ability analysis of debris flows based on area-hypsometric integral and area-gradient integral 张静, 田述军, 侯鹏鹂 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 9-16

雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流过程模拟及运动特征分析

Numerical runout modeling and dynamic analysis of the ice avalanche–debris flow in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet

李昆仲, 张明哲, 邢爱国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 18-27



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202308031

赵雷, 邹定富, 张丽君, 等. 坡面泥石流冲击下被动柔性防护网的动力响应[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 118-125. ZHAO Lei, ZOU Dingfu, ZHANG Lijun, et al. Coupled dynamic response analysis of a flexible barrier under slope debris flow impact[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 118-125.

# 坡面泥石流冲击下被动柔性防护网的动力响应

赵 雷,邹定富,张丽君,余志祥

(西南交通大学土木工程学院,四川成都 610031)

摘要:目前,被动柔性防护网相关性能检验仅针对落石冲击场景,在坡面泥石流冲击作用下,其耦合动力响应的研究匮 乏。基于此现状,文章借用LS-DYNA软件展开深入研究。首先,对某标称能级为5000kJ的被动柔性防护网足尺落石冲 击试验进行反演分析。通过对比关键绳索内力、耗能器伸长量及缓冲距离等关键指标,验证了所构建计算模型的准确性 和可靠性。其次,构建了ALE-FEM耦合计算模型,研究了坡面泥石流冲击作用下被动柔性防护网力学响应特征,并与落 石冲击工况进行了差异对比。最后,以泥石流流速和冲击能量作为变量,开展了参数化数值模拟。分析了冲击能量耗散 转化特征,并从能量的角度,探究被动柔性防护网的极限防护能力。结果表明:被动柔性防护网能够成功拦截标称能级 下的坡面泥石流,且相较于落石冲击工况,整体力学响应明显偏小;在冲击过程中,能量主要转化为泥石流内能;此外,被 动柔性防护网具备成功拦截4倍标称能级坡面泥石流的能力。

关键词:坡面泥石流;被动柔性防护网;ALE-FEM;耦合动力响应;防护能力

中图分类号: P643.23; TU42; X43 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2025)02-0118-08

# Coupled dynamic response analysis of a flexible barrier under slope debris flow impact

ZHAO Lei, ZOU Dingfu, ZHANG Lijun, YU Zhixiang

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Currently, performance testing of flexible barrier only focus on rockfall impacts, lacking research on the coupled dynamic response under slope debris flow impact. In this study, based on LS-DYNA, a full-scale impact test with a nominal energy level of 5 000 kJ of flexible barrier was firstly back-analyzed, comparing and analyzing the key rope forces, elongation of energy dissipators, and buffer distance to verify the effectiveness of the computational model. Next, an ALE-FEM numerical calculation model was built to investigate the mechanical response characteristics of the flexible barrier under slope debris flow velocity and impact energy were carried out to analyze the dissipation and transformation characteristics of impact energy and explore the ultimate protective capacity of flexible barrier from an energy perspective. The results showed that the flexible barrier can successfully intercept slope debris flows under the nominal energy levels, with overall mechanical responses significantly smaller than those under rockfall impacts. The impact energy mainly converted into internal energy of debris flows. Flexible barriers can successfully intercept slope debris flows up to four times the impact energy of rockfalls.

Keywords: slope debris flow; flexible barrier; ALE-FEM; coupled dynamic response; preservation capacity

**收稿日期**: 2023-08-19; 修订日期: 2023-10-08 **投稿网址**: https://www.zgdzzhyfzxb.com/ **基金项目**: 四川省科技计划项目(2024NSFSC0910); 西南交通大学新型交叉学科培育基金项目(2682023KJ004) **第一作者:** 赵 雷(1990—), 男, 湖北荆州人, 结构工程专业, 博士, 讲师, 主要从事结构冲击与防护方面的研究。 E-mail; zhaolei@swjtu.edu.cn

#### 0 引言

汶川地震、九寨沟地震、泸定地震等强震的发生, 使得坡面岩土体变得松散破碎。一旦遭遇强降雨天气, 极易发生泥石流灾害,给沿线交通带来极大威胁<sup>[1]</sup>。 2022年6月4日,由贵阳北开往广州南站的D2809次 列车,在行驶至贵广线榕江站进站前的月寨隧道口时, 遇到侵入线路的突发坡面泥石流,列车脱轨并撞上月 台,造成1人遇难、8人受伤<sup>[2]</sup>。也有较为幸运的例子,2020 年6月13日,渝怀铁路田湾隧道口发生过类似的坡面 泥石流,此前安装在该处用于拦截落石的被动柔性防护 网发挥了关键作用,成功阻挡住泥石流,使其未对铁路 造成任何影响,这张网因此被称为"救命的防护网"<sup>[3]</sup>。

柔性防护网具有防护能级高、技术经济性好、施工 安装便捷、环境友好等特点,被广泛用于落石灾害防 治,取得了较好的防护效果,相关研究也主要集中于落 石冲击[4-6]。近年来,随着实际工程案例表明柔性防护 网对泥石流也有较好的拦截效果后,采用柔性防护网进 行泥石流灾害防治逐渐引起了相关学者的广泛关注。 美国地质调查局印率先组织开展了泥石流冲击柔性防 护网大型水槽试验,验证了柔性防护网拦截泥石流的有 效性,考察了网形、网孔尺寸、钢柱边界条件等因素影 响,测试了柔性防护网索力、变形及泥石流沉积特征。 随后,瑞士联邦森林、雪与景观研究所在修整后的天然 边坡上开展了足尺试验研究<sup>18</sup>,测试了泥石流运动和动 力特征及柔性防护网力学响应,并开展了相关野外实测 研究。香港土木工程拓展署组织岩土及结构工程专家 针对泥石流-柔性防护网耦合作用开展了系列大型水槽 试验<sup>[9]</sup>,探究了柔性防护网在泥石流连续多次冲击下的 动力学行为。王秀丽等[10]提出了由钢筋构成的泥石流 柔性防护体系,并参考舟曲泥石流资料,考察了泥石流 中大块石冲击作用下结构的动力性能。王东坡等[11]开 展了底部开口柔性防护网对泥石流调控性能的试验研 究,通过 PIV 技术获取了泥石流运动轨迹及堆积特征。 Song 等<sup>[12]</sup>开展了离心机试验,分析了柔性防护网的缓 冲性能。Wendeler<sup>[13]</sup>探究了模型缩尺效应,针对网孔尺 寸、泥石流粒径级配等因素开展了参数化研究。赵雷 等<sup>[14]</sup>构建了泥石流冲击柔性防护网的 ALE-FEM 耦合 计算模型,并对前端含有大块石泥石流与柔性防护网的 耦合动力学行为开展了研究<sup>[15]</sup>。Kong 等<sup>[16]</sup>采用 CFD-DEM 耦合计算模型, 探讨了柔性防护网的失效机制及 泥石流流变特性等对冲击运动模式的影响。

不足的是,目前相关研究主要集中于沟道型泥石流

冲击作用下 VX 型柔性防护网的动力响应,而 VX 型柔 性防护网的几何构型与适用于坡面泥石流防治的被动 柔性防护网存在显著差异。而目前被动柔性防护网的 性能检验仅考虑单一的落石冲击工况<sup>[17-18]</sup>,但落石冲 击未能体现泥石流的流变特性,荷载作用模式明显不 同,显然被动柔性防护网的冲击动力学行为将存在显著 差异。基础研究的不足导致实际应用时,如何合理选用 经落石冲击检验的被动柔性防护网用于坡面泥石流防 治也成为工程人员的广泛困惑。

据此,本文基于 LS-DYNA 反演了某标称能级为 5000 kJ 被动柔性防护网足尺落石冲击试验,验证了数 值模型有效性。在此基础上,构建了 ALE-FEM 耦合计 算模型,研究了坡面泥石流冲击作用下被动柔性防护 网力学响应特征。最后,以泥石流冲击能量及流速作为 变量,开展了参数化数值计算,分析了冲击能量耗散转 化特征,从能量角度探究了被动柔性防护网极限防护 能力。

# 1 足尺落石冲击试验反演

# 1.1 试验模型

试验模型为 Geobrugg 公司生产的型号为 GBE-5000A 的被动柔性防护网,标称能级为 5 000 kJ。实际落石的 运动及几何特征均较随机,被动柔性防护网性能检验的 试验通常依据 ETAG-027<sup>[19]</sup>(现已更新为 EAD 340059-00-0106<sup>[18]</sup>)开展,试验时采用 26 面体的混凝土试块,以 不低于 25 m/s 的速度冲击 3 跨模型中心。针对该特定 冲击工况与实际可能遭受的冲击工况下被动柔性防护 网力学性能的差异,相关学者分别考察了落石形状、冲 击位置等因素影响,并给出了设计建议<sup>[6,20-21]</sup>。本次试 验跨度为 10 m,总长 30 m,防护高度为 5.86 m,具体配 置如表 1 所示。试验时将重量为 15.5 t 的试块提升至 距网片 33.5 m 高度处释放,试块冲击速度为 25.6 m/s,

表1 试验模型配置

 Table 1
 Configuration of the test model

部件	截面	破断力/kN
网片	R16/3/350	
上/下支撑绳	2Ø22	610
辅助支撑绳	2Ø20	504
其余绳索	1Ø22	305
中柱	HEA220	
边柱	RRW300/300/10	
耗能器	U-300-R20	

注: R16/3/350指16圈的环形网, 钢丝直径3 mm, 环网直径350 mm; 2022指2根直径22 mm的钢丝绳; HEA指H型钢截面; RRW指方管截面; U-300-R20指U型耗能器, 长度3 m、直径20 mm的钢棒。

#### 上拉锚绳 落石 上支撑绳 90° 辅助绳 上拉锚绳 侧拉锚绳 辅助支撑绳 柱顶绳 67 #1 #2 #2 网片 #3 钢柱 23 耗能器 #4 82° 下支撑绳 边柱 (a) 平面图 (b) 侧视图 图1 试验模型

Fig. 1 Test model

#### 1.2 数值模型

采用 LS-DYNA 软件, 基于显式动力分析法模拟落 石冲击被动柔性防护网。为节省计算时间, 将落石与网 片设置为临界接触状态, 并根据试验结果设置落石冲击 速度为 25.6 m/s。数值模型中网片采用梁单元, 钢丝绳 为索单元, 耗能器为弹簧单元, 钢柱为壳单元, 基座与落 石为实体单元, 相关参数详见表 2。关于被动柔性防护

表 2 数值模型参数 Table 2 Numerical model parameters

构件	材料模型	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa
钢柱	随动塑性	7 900	210	0.3	355
网片	分段线性弹塑性	7 900	150	0.3	1 200
钢丝绳	索	7 900	120		
耗能器	塑性弹簧				

网数值模型的其他细节,诸如滑移单元、接触条件与耗能器等设置详见既有文献<sup>[6]</sup>。

# 1.3 模型验证

足尺试验与数值试验变形结果如图 2 所示。试验 后,各支撑绳处耗能器均已启动,中跨防护网发生大变 形,各部件均未发生破坏。其中,落石缓冲距离分别为 8.15,8.38 m,误差为 2.82%。

将绳索内力与耗能器伸长量的数据进行对比分析 (表 3),可知:虽然个别数值存在一定误差,但整体吻合 较好。针对钢丝绳内力,数值模型计算结果较试验值整 体偏小,分析可知:耗能器动静力学性能存在明显差异, 在动力作用下耗能器启动力明显增大。由于本模型耗 能器动静力性能关系不知,故数值计算采用了静力试验 数据,因此存在一定误差。针对耗能器伸长量,分析存



Fig. 2 Deformation comparison

#### 冲击能量为 5 079 kJ, 冲击位置为模型中心。试验模型

#### 结构信息见图 1,更多信息详见试验报告<sup>[22]</sup>。

衣 5 结禾刈比				
Table 3   Comparison of results				
结果	数据	试验模型[22]	数值模型	误差/%
内力峰值/ kN	上支撑绳	286	209	-26.92
	下支撑绳	250	212	-15.20
	辅助支撑绳	299	262	-12.37
	上拉锚绳	242	187	-22.73
	侧拉锚绳+ 辅助支撑绳#1	456	90+237=327	-28.29
耗能器伸长量 (左/右)/cm	上支撑绳	141/95	175/187	24.11/96.84
	下支撑绳	241/234	308/217	27.80/-7.26
	辅助支撑绳#1	85/33	50/48	-41.18/45.45
	辅助支撑绳#2	128/114	112/117	-12.50/2.63
	辅助支撑绳#3	217/199	200/177	-7.83/-11.06
	辅助支撑绳#4	194/174	223/210	14.95/20.69

在 2 种可能: 足尺试验时, 落石冲击位置并没有在系统 中部, 导致自身两侧耗能器伸长量存在不对称且差异较 大, 如系统右侧耗能器伸长量均小于左侧, 在辅助支撑 绳#1 处偏差达 52 cm; 此外, 耗能器存在工作缺陷且性 能较为离散, 因此右侧耗能器可能没有及时响应。

# 2 泥石流冲击分析

鉴于坡面泥石流柔性防护中,防护网的结构形式和 设置方式与既有落石柔性防护一致<sup>[23]</sup>,本节参考渝怀铁 路田湾隧道口坡面泥石流柔性防护案例的地形特征,构 建 ALE-FEM 耦合计算模型,比较分析上述被动柔性防 护网在相同冲击能量的坡面泥石流与落石冲击作用下 力学响应的差异。

# 2.1 耦合数值模型

被动柔性防护网采用上文已验证的模型,竖直放置在 15°的坡面底部,坡底与水平地面相连,作为泥石流堆积区,坡面及地面均采用壳单元模拟(图 3)。

对于泥石流,由于其在移动过程中会发生较大变 形,使用拉格朗日方法模拟泥石流会造成网格畸变,故 使用 ALE 方法进行模拟,并采用基于罚函数耦合算法 的\*Constrained\_Lagrange\_in\_Solid 关键字建立泥石流与 防护网的耦合作用。由于模拟泥石流的 ALE 单元无法 与模拟网片的梁单元直接作用,故在网片模型中引入虚



拟膜单元,从而实现了泥石流与被动柔性防护网之间的 耦合作用。泥石流的材料模型采用\*MAT\_SOIL\_AND\_ FOAM 关键字模拟,虚拟膜单元使用 NULL 材料模拟, 仅起到传递力的作用,不能为柔性防护网提供任何刚 度。为减少计算消耗,将泥石流初始放置在临近网片 处,冲击被动柔性防护网中部,后涌入堆积平台。将泥 石流冲击能量与落石保持一致,为5080 kJ,宽度为15 m, 流深为 1.0 m,其余相关参数详见表 4<sup>[23-24]</sup>。更多耦合 模型的介绍详见既有文献<sup>[14-15]</sup>。

表 4 泥石流模拟相关参数 Table 4 Parameters of debris flow simulation

变量	参数取值
体积/m <sup>3</sup>	48.9
流速/(m·s <sup>-1</sup> )	10
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 200
剪切模量/kPa	500
体积模量/kPa	1 000
黏聚力/kPa	2
库伦摩擦系数	0.4

# 2.2 结果分析

# (1)冲击特征

泥石流被柔性防护网成功拦截,绳索、钢柱及其基 座均未发生破坏<sup>[25-26]</sup>。冲击运动过程的典型状态如图 4 所示,泥石流冲击过程呈现显著的 3 阶段特征:碰撞、 爬升与堆积。同时,支撑绳内力时程曲线(图 5)的变化 趋势与泥石流 3 阶段冲击特征相符:在碰撞阶段,随着 直接拦截泥石流体积的增加,绳索内力快速增大并达到





Fig. 5 Support rope cable force versus time curves

峰值,系统急剧变形;在爬升阶段,后续泥石流持续冲击,但已沉积的泥石流起到较好的缓冲作用,出现内力 峰值平台;在堆积阶段,泥石流冲击作用逐渐衰退,绳索 内力逐渐减小,最后仅表现为自重的影响,绳索内力趋 于稳定。

(2)结果对比

为直观描述被动柔性防护网在相同能量的落石和 坡面泥石流冲击作用下关键力学响应的差异,定义比值 (*λ*),如式(1)所示:

$$\lambda = \frac{P_{\rm d}}{P_{\rm r}} \tag{1}$$

式中: P<sub>d</sub>、P<sub>r</sub>——坡面泥石流、落石冲击作用下被动柔性 防护网的力学响应。

被动柔性防护网冲击变形及关键绳索内力的对比 如表 5 所示,可知:落石冲击时被动柔性防护网的最大 变形为 8.38 m, 而泥石流冲击时为 4.31 m, λ (仅为 0.51, 差异明显。显然这与冲击作用模式相关,落石冲击类似 于集中加载, 而泥石流冲击则类似于均布加载。绳索内 力差异不大,除侧拉锚绳的λ为 0.57 外,其余绳索内力 相近。这一方面是由于绳索上面都布置了耗能器, 耗能 器的工作拉力很大程度上决定了绳索内力峰值, 另一方 面坡面泥石流冲击作用下被动柔性防护网冲击变形 相对较小, 未能有效激活布置于远端外侧侧拉锚绳的耗 能器。

表 5 结果对比 Table 5 Comparison of results

结果数	据	落石冲击	泥石流冲击	λ
冲击变形/m		8.38	4.31	0.51
	上支撑绳	209	221	1.06
	下支撑绳	212	258	1.22
绳索内力峰值/kN	辅助支撑绳	262	263	1.00
	上拉锚绳	187	158	0.84
	侧拉锚绳	90	51	0.57

耗能器伸长量的对比如图 6 所示,可知: 泥石流冲 击作用下耗能器伸长量均显著小于落石冲击工况,而且 越是连接于被动柔性防护网上侧绳索的耗能器,λ的值 越小,总体而言,λ小于 0.3。表明坡面泥石流冲击作用 下,主要的受力及耗能部件位于结构下侧,这与泥石流 冲击被动柔性防护网底部区域相一致;同时说明,耗能 器并非主要耗能部件,这与落石冲击差异明显。因此, 采用基于落石冲击校验的被动柔性防护网标称能级,用 于坡面泥石流灾害防治是偏保守的。



# 3 能量耗散转化特征

为了进一步探究坡面泥石流冲击被动柔性防护网 时能量的耗散转化关系,以及从能量的角度探究被动柔 性防护网的极限防护能力,以泥石流流速和冲击能量作 为变量,开展了参数化分析。

3.1 能量耗散分布

定义能量耗散比(γ)来考察泥石流冲击能量耗散的 分布特征,如式(2)所示:

$$\gamma = \frac{E_{\rm c}}{E_{\rm k}} \tag{2}$$

式中: E<sub>c</sub>——冲击过程各部分耗散的能量,包括耗能器 耗能、摩擦能、泥石流内能与被动柔性防 护网的其他部件(除耗能器)弹塑性耗能/kJ;

E<sub>k</sub>——泥石流冲击能量/kJ。

泥石流冲击能量的耗散分布如图 7 所示,可知:泥石 流冲击能量主要转化为泥石流内能,最大占比可超过 70%;其次为摩擦阻尼耗能,占比在 25%~46%;耗能器 耗能低于 30%,这远低于落石冲击时约 80% 耗能占 比<sup>[24]</sup>;被动柔性防护网其他部件耗能低于 10%,这进一 步说明泥石流冲击能量并非由被动柔性防护网耗散。



3.2 整体能量耗散率

定义整体能量耗散率(η)来进一步考察坡面泥石流 冲击条件下被动柔性防护网的能量耗散情况,如式(3) 所示:

$$\eta = \frac{E_{\rm s}}{E_{\rm k}} \tag{3}$$

式中: E<sub>s</sub>——被动柔性防护网耗散的能量/kJ。

不同工况下,整体能量耗散率如图 8 所示,可知:所 有工况下,η均小于 40%,表明被动柔性防护网并不是 泥石流冲击能量的主要耗散源。在一定冲击能量下, η随着流速增加而增加,相反,当流速一定时,η随着总 能量增加而近似线性下降。分析可知,随着冲击能量的 增加和流速的降低,泥石流的体积和质量会增加,因此



Fig. 8 Energy dissipation ratio of flexible barrier

通过内部和边界剪切摩擦耗散的能量会增加,主要转化 为内能<sup>[23]</sup>,进而被动柔性防护网耗散的能量减小。

3.3 耗能器工作效率

定义耗能器工作效率(β)来考察坡面泥石流冲击条 件下被动柔性防护网耗能器的工作情况,如式(4)所示:

$$\beta = \frac{E_{\rm b}}{E_{\rm d}} \tag{4}$$

式中: E<sub>b</sub>——耗能器实际耗散能量/kJ;

E<sub>d</sub>——耗能器设计耗能能量/kJ。

耗能器工作效率如图 9 所示,可知:安装于上支撑 绳的耗能器,当流速为 4 m/s 时,β稳定且较小,随着冲 击能量增加,β略有增加。当流速为 6~10 m/s 时,β随



Fig. 9 Energy dissipation ratio of energy dissipator

着冲击能量增加而线性增加。在相同冲击能量条件下, 冲击速度越大, $\beta$ 越高。当冲击能量为 20 000 kJ,流速 为 10 m/s, $\beta$ 达到 73%。安装于下支撑绳的耗能器,当 流速为 6~10 m/s 时,随着冲击能量增加, $\beta$ 迅速增加, 随后趋于稳定。当流速为 4 m/s 时, $\beta$ 小于 25%。当冲 击 能量 为 20 000 kJ,流速为 8,10 m/s 时, $\beta$ 分别为 88%、100%,考虑到工程实践中 $\beta$ 一般应限制在 80% 以 内<sup>[4]</sup>,所以上述工况下被动柔性防护网可被认定为已达 到极限状态。

总体来看,下支撑绳耗能器工作效率大于上支撑 绳,即被动柔性防护网拦截泥石流冲击的防护性能由下 支撑绳控制,这与拦截落石冲击是一致的。从下支撑绳 耗能器工作效率可以看出,被动柔性防护网可以承受泥 石流的冲击能量为 20 000 kJ,是落石冲击标称能量的 4 倍。此外,随着泥石流流速的降低,系统防护性能将 进一步提高。

# 4 结论

(1) 被动柔性防护网可成功拦截标称能级下的坡 面泥石流冲击,相较于落石冲击,力学响应明显偏小。

(2)坡面泥石流冲击作用下,被动柔性防护网并不 是泥石流冲击能量的主要耗散源,且其能量耗散率随着 坡面泥石流冲击能量的增加而近似线性减小。

(3)坡面泥石流冲击下被动柔性防护网的防护能 级由下支撑绳控制,被动柔性防护网可成功拦截4倍落 石冲击能量的坡面泥石流。

需要指出的是,本文的研究结果只涉及特定类型的 被动柔性防护网模型(GBE-5000A)及特定的坡面特征 和泥石流运动场景。其他冲击工况和被动柔性防护网 类型需要进一步研究。此外,还需开展大型足尺试验来 进一步探究坡面泥石流冲击作用下被动柔性防护网的 力学行为。

#### 参考文献(References):

- [1] 陈晓清,游勇,崔鹏,等.汶川地震区特大泥石流工程防治新技术探索[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(1):14-22.[CHEN Xiaoqing, YOU Yong, CUI Peng, et al. New control methods for large debris flows in Wenchuan earthquake area [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(1): 14 22. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 程广志.基于激光雷达与图像融合的铁路入侵目标检测系统设计[D].北京:北京交通大学,2023.[CHENG Guangzhi. Design of railway intrusion target detection system

based on LiDAR and image fusion [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023. (in Chinese with English abstract)]

- [3] ZHAO Lei, ZHANG Lijun, YU Zhixiang, et al. A case study on the energy capacity of a flexible rockfall barrier in resisting landslide debris [J]. Forests, 2022, 13: 1384.
- [4] 赵世春,余志祥,韦韬,等.被动柔性防护网受力机理 试验研究与数值计算[J].土木工程学报,2013,46(5): 122-128. [ZHAO Shichun, YU Zhixiang, WEI Tao, et al. Test study of force mechanism and numerical calculation of safety netting system [J]. China Civil Engineering Journal, 2013,46(5):122-128. (in Chinese with English abstract)]
- [5] KOO R C H, KWAN J S H, LAM C, et al. Dynamic response of flexible rockfall barriers under different loading geometries
   [J]. Landslides, 2017, 14(3): 905 916.
- [6] ZHAO Lei, YU Zhixiang, LIU Yaopeng, et al. Numerical simulation of responses of flexible rockfall barriers under impact loading at different positions [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167: 105953.
- [7] DENATALE J, IVERSON R M, MAJOR J, et al. Experimental testing of flexible barriers for containment of debris flow [R].
   Department of the Interior & Geological Survey, 1999.
- BUGNION L, MCARDELL B W, BARTELT P, et al. Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles [J]. Landslides, 2012, 9(2): 179 - 187.
- [9] LAM H W K, SZE E H Y, WONG E K L, et al. Study of dynamic debris impact load on flexible debris-resisting barriers and the dynamic pressure coefficient [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2022, 59(12): 2102 - 2118.
- [10] 王秀丽,乔芬,冉永红,等.新型泥石流柔性防护体系冲击动力响应分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(5):108 115. [WANG Xiuli, QIAO Fen, RAN Yonghong, et al. Dynamic response analysis for a new type of debris flow flexible protection system [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(5):108 115. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王东坡,赵军,张小梅,等.开口柔性防护网调控泥石流性能试验研究[J].岩土力学,2022,43(5):1237-1248.
  [WANG Dongpo, ZHAO Jun, ZHANG Xiaomei, et al. Experimental study of regulation performance of open flexible debris flow barriers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(5):1237-1248. (in Chinese with English abstract)]
- [12] SONG D, CHOI C E, NG C W W, et al. Geophysical flows impacting a flexible barrier: Effects of solid-fluid interaction [J]. Landslides, 2018, 15(1): 99 – 110.
- [13] WENDELER C. Debris-flow protection systems for mountain torrents [M]. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, 2006.
- [14] 赵雷,张丽君,余志祥,等.泥石流柔性防护系统耦合作

用数值模拟 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 606-613. [ZHAO Lei, ZHANG Lijun, YU Zhixiang, et al. Coupled numerical simulation of flexible debris flow barrier [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 606-613. (in Chinese with English abstract)]

- [15] ZHAO Lei, HE Jianwen, YU Zhixiang, et al. Coupled numerical simulation of a flexible barrier impacted by debris flow with boulders in front [J]. Landslides, 2020, 17(12): 2723 – 2736.
- [16] KONG Yong, LI Xingyue, ZHAO Jidong. Quantifying the transition of impact mechanisms of geophysical flows against flexible barrier [J]. Engineering Geology, 2021, 289: 106188.
- [17] 国家铁路局.铁路边坡柔性被动防护产品落石冲击试验 方法与评价:TB/T 3449—2016 [S].北京:中国铁道 出版社, 2017. [National Railway Administration of the People's Republic of China. Rockfall impact test method and evaluation of railway slope flexible passive protection product: TB/T 3449—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)]
- EOTA. Falling rock protection kits: EAD 340059-00-0106 [S]. Brussels: European Organization for Technical Approvals, 2018.
- [19] EOTA. Guideline for european technical approval of falling rock protection kits: ETAG 027 [S].Brussels: European Organization for Technical Approvals, 2008.
- [20] QI Xin, PEI Xiangjun, HAN Rui, et al. Analysis of the effects of a rotating rock on rockfall protection barriers [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36: 3255 – 3267.
- [21] 赵雷, 邹定富, 张丽君, 等. 落石被动柔性防护网冲击力
   学响应的参数化研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(12):

8 - 17. [ZHAO Lei, ZOU Dingfu, ZHANG Lijun, et al. Parametric study on the mechanical response of a flexible rockfall barrier [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(12); 8 - 17. (in Chinese with English abstract)]

- [22] EOTA. Evaluation report for the assessment of ETA- 11/0305 (Falling Rock Protection Barrier GBE-5000A) [R]. European Organization for Technical Approvals, 2011.
- [23] CHEUNG A K C, YIU J, LAM H W K, et al. Advanced numerical analysis of landslide debris mobility and barrier interaction [J]. HKIE Transactions, 2018, 25(2): 76 – 89.
- [24] 赵世春,余志祥,赵雷,等.被动防护网系统强冲击作用下的传力破坏机制[J].工程力学,2016,33(10):24-34. [ZHAO Shichun, YU Zhixiang, ZHAO Lei, et al. Damage mechanism of rockfall barriers under strong impact loading [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(10):24-34. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 吴兵,梁瑶,赵晓彦,等.破碎岩质边坡锚墩式主动防护 网设计方法[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(3):-101-108. [WU Bing, LIANG Yao, ZHAO Xiaoyan, et al. Design method of anchor pier type active protective net on fractured rock slopes [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 101-108. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 吴建利,胡卸文,梅雪峰,等.高位落石作用下不同缓冲层与钢筋混凝土板组合结构动力响应[J].水文地质工程地质,2020,47(4):114-122.[WU Jianli, HU Xiewen, MEI Xuefeng, et al. Dynamic response of RC plate with different cushion layers under the high-level rockfall impact [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4):114-122.(in Chinese with English abstract)]