

引用格式: 王文沛, 殷跃平, 胡卸文, 等, 2022. 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, 28 (6): 1081-1089. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222834

Citation: WANG W P, YIN Y P, HU X W, et al., 2022. Effectiveness and mechanical characteristics of a pile-beam composite structure in blocking debris flows [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 1081-1089. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222834

碎屑流冲击下桩梁组合结构拦挡效果及受力特征研究

王文沛¹, 殷跃平¹, 胡卸文², 李 滨³, 刘明学¹, 祁小博¹

WANG Wenpei¹, YIN Yueping¹, HU Xiewen², LI Bin³, LIU Mingxue¹, QI Xiaobo¹

1. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

2. 西南交通大学, 四川 成都 610031;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. *China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China;*

2. *Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;*

3. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*

Effectiveness and mechanical characteristics of a pile-beam composite structure in blocking debris flows

Abstract: The pile-beam composite structure in high-elevation debris flow areas is selected as the research object. Based on characterizing the pile-beam composite structure, the particle-flow simulation analysis program and the explicit dynamic analysis program were used to study comparatively the blocking effects of single-row piles and two-row piles, as well as that of a pile-beam composite structure at different positions. Besides, We simulated the mechanical characteristics of the pile-beam composite structure and discussed debris flow accumulation and structural stress transfer after the blocking. The calculation results show that the blocking effect of the pile-boulder force chain formed by the contact between large-size particles in the debris flow with the blocking structure and side boundaries on both sides of the gully could effectively block and delay the subsequent debris flow movement. The blocking effect of the pile-beam composite structure is the best. Meanwhile, the transition zone between the two-row piles further suppressed the flow velocity. When choosing the position for a pile-beam composite structure, we should consider suppressing the debris flow velocity as early as possible at the beginning and the potential energy-kinetic energy conversion process. Meanwhile, we also need to emphasize the design of the reservoir capacity, beware of the escape of debris flow due to a low-head barrier, and choose the optimal solution for the layout. The impact stress by debris flow boulders will be transmitted to the rear pile through the connecting beams, and the connecting parts at both ends of the beam almost reach the yield strength, which needs reinforcement to strengthen.

Keywords: debris flow; pile-beam composite structure; numerical simulation; accumulation characteristics; blocking effect

摘 要: 以高位泥石流、碎屑流区桩梁组合新型拦挡结构为研究对象, 在总结已有桩梁组合结构的基础上, 运用颗粒流分析仿真程序、通用显示动力分析程序分别对碎屑流冲击下单排、多排桩林及桩梁组合结构拦挡效果、不同位置桩梁组合结构拦挡效果对比模拟以及桩梁组合结构受力特征模拟研究, 探讨了

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3004301, 2018YFC1505404); 甘肃省自然资源厅重点科学技术研究项目 (2021-001); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221748)

This research is financially supported by the National Key R&D Program of China (Grants 2022YFC3004301, 2018YFC1505404), the Key Science and Technology Program of Gansu Provincial Department of Natural Resources (Grant No. 2021-001) and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant DD20221748)

第一作者简介: 王文沛 (1985—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: jcywangwenpei@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 祁小博 (1978—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查工作。E-mail: 527672432@qq.com

收稿日期: 2022-06-24; **修回日期:** 2022-09-28; **责任编辑:** 范二平

拦挡结构阻挡后碎屑流堆积特征和结构应力传递特征。计算结果表明：碎屑流中较大粒径颗粒与拦挡结构、两侧沟道边界接触形成的桩-巨石力链拦挡效应可有效阻挡、迟滞后续碎屑流运动，桩梁组合结构桩-巨石力链拦挡效应最佳；第一排桩和第二排桩之间改流区进一步抑制了碎屑流速度；桩梁组合结构在设计布置位置时，一方面要考虑在碎屑流启动、势动转换过程中尽早抑制碎屑流速度，另一方面仍需重视库容的设计，谨防跃顶造成部分碎屑流逃逸，在上述二者之间选择最优解进行位置布置；碎屑流巨石冲击桩梁组合结构时，冲击应力将通过连梁分散传递到后排桩，连系梁两端连接部分的应力几乎达到屈服强度，需加强配筋。

关键词：碎屑流；桩梁组合结构；数值仿真；堆积特征；拦挡效果

中图分类号：U443.15 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-6616 (2022) 06-1081-09

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222834

0 引言

桩梁组合结构多指在呈雁列型交错布置的桩林结构同排间，以及前后排间利用“一”字型、“Y”型水平连系梁联结形成整体刚度的可抵御泥石流、碎屑流的新型拦挡结构（殷跃平和张永双，2013；冉永红等，2018；张楠，2018），该组合结构是由国内专家在2010年甘肃舟曲“8·8”特大泥石流灾害的防治工作中率先提出，充分考虑了结构对泥石流的“水石分流”功能，以及泥石流中巨石对结构的强大冲击作用（李瑞冬等，2011；胡向德等，2012）。桩梁组合结构现已成功运用于甘肃舟曲三眼峪、四川汶川七盘沟、云南鲁甸龙头山、西藏波密县古乡沟等强震区高位泥石流防治工程中（王秀丽等，2015；许彬，2018；杨开成，2020）。目前研究表明，桩梁结构在泥石流中巨石撞击下具有良好的抗冲性能和侧向极限抗压性能（李瑞冬等，2011；杨开成，2020）。此外，桩梁组合结构前部拦截的巨石静止堆积后还可进一步形成“拱圈效应”，避免组合结构承受巨石连续冲击（孙其诚等，2015；张楠，2018）。

虽然桩梁组合结构具有上述优点，然而该组合结构由于应用时间较短，现有案例不够多，防护机理、力学规律尚不明确，理论研究还未达到可直接指导设计和工程实践的程度。基于此，国内外众多学者对桩梁组合结构动力响应及拦挡效果进行了卓有成效的研究。王东坡等（2020）通过物理模型试验开展了碎屑流冲击作用下桩林拦挡结构动力响应研究，发现桩林拦挡结构可有效降低碎屑流运动距离并减缓其运动速度，并认为可形成缓冲垫层的内凹型弧形桩拦挡效果更为明

显。张万泽等（2018）则以七盘沟泥石流沟桩梁组合结构中单“品”字型结构单元为原型，利用数值模拟方法模拟发现巨石撞击桩身时的破坏形式为弯剪破坏，撞击点剪切裂缝呈45°向上下展开。王朋（2016）选用钢管混凝土桩梁组合结构进行冲击物理模型试验，发现撞击过程中会发生应力波的传递，出现破坏状态为擦伤、凹陷、节点处裂开和梁管剪切破坏四种。Bi et al.（2018）将多排减速墩柱结构布置在滑坡碎屑流源区，从而对碎屑流的能量进行充分耗散，使得碎屑流不至形成整体流一次性冲击到下游成灾。杨开成（2020）从桩林拦挡结构拦截调控泥石流角度提出，泥石流重度越大，拦挡结构的拦截效果越好；根据泥石流拦截调控能力可将其划分为全闭塞类型、部分闭塞类型、不闭塞类型三种类型。刘铁骥等（2020）利用Massflow连续介质力学模型对比分析了泥石流防治工程效果，为拦挡防治结构空间布置提供了新思路。

近年来，随着铁路、水电开发等国家大型工程兴建，高位碎屑流、泥石流、崩塌等链式灾害防灾减灾的需求日趋强烈（Wang et al., 2020a; 王靖，2021），尤其高位碎屑流、泥石流的体积放大效应和流化增速效应易造成巨大的生命财产损失（高杨等，2020；李壮等，2020）。因此，加强高位碎屑流、泥石流防治工程的建设，特别是加快桩梁组合结构等行之有效的新型拦挡技术理论研究迫在眉睫（郭长宝等，2006；邹子南等，2019；刘铮等，2020；边江豪等，2021）。

文章在总结已有桩梁组合结构的基础上，通过碎屑流冲击下单排、多排桩林及桩梁组合结构的拦挡效果对比模拟，提出桩-巨石力链拦挡效应及桩梁组合结构空间优化布置思路。通过碎屑流

巨石撞击桩梁组合结构动力模拟, 获得结构应力和传递特征。研究将对今后桩梁组合结构设计应用提供些许的参考价值。

1 桩梁组合结构拦挡效果模拟

1.1 不同结构拦挡效果对比

基于前述桩梁组合结构实际工程现场调查结



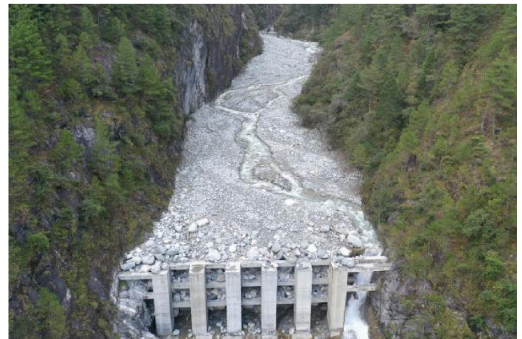
(a) 甘肃舟曲泥石流桩梁组合结构



(b) 鲁甸龙头山镇泥石流沟桩梁组合结构



(c) 汶川七盘沟桩梁组合结构



(d) 西藏波密县古乡沟桩梁组合结构

图 1 桩梁组合结构

Fig. 1 Photos of pile-beam composite structures

桩梁组合结构设置为刚体, 不考虑结构自身的受力变形特征。EDEM[®] 是一款模拟颗粒介质运动及其相互作用的数值仿真软件 (Cundall and Strack, 1979; Wang et al., 2020b)。它通过牛顿第二运动定律计算颗粒间的相对位移及不平衡力。以记录和输出每个颗粒的物理信息和受力情况, 并通过时步迭代进行数据更新。相关模型设置及参数详见图 2 和表 1。

初始碎屑流滑体初始方量 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 放置于坡角 30° 斜坡上, 斜坡两侧为直立的边界, 滑坡颗粒粒径 D 为 $0.6 \sim 6 \text{ m}$ 随机分布, 结构的基本尺寸见表 1、图 2, 其中前排桩均为前端圆弧形马蹄形结构, 一般而言, 圆形所受最大冲击力小于矩形结构 (毕钰璋等, 2017)。现选用以下四种型

果 (图 1), 选取舟曲三眼峪高位泥石流桩梁组合结构作为原型, 研究桩梁组合结构对于碎屑流的拦挡效果。

初始碎屑流滑体位于斜坡上, 桩梁组合结构位于斜坡下部水平面上, 两侧直立的边界近似模拟沟谷形态。为说明桩梁拦挡组合结构空间位置、桩梁结构型式及间距对于高位滑坡碎屑流的拦挡效果, 利用颗粒流分析仿真软件 EDEM 展开模拟,

式的拦挡结构进行工况对比模拟, 便于分析桩间距关键设计参数依据。

工况 1: 单排桩结构 (图 2a), 桩间距 n_1 。工况 2: 单排桩结构 (图 2b), 桩间距 n_2 。工况 3: 双排桩林结构 (图 2c)。工况 4: 桩梁组合结构 (图 2d)。

碎屑流及拦挡结构参数详见表 2。碎屑流最终堆积数值模拟结果如图 3 所示, 红色条纹为接触力形成的力链, 该力链主要由较大粒径颗粒与结构、边界接触形成的, 稳定的力链进而在桩前形成新的拦挡体系, 能有效拦挡、迟滞后续碎屑流运动, 可称之为桩-巨石力链拦挡效应。结合碎屑流最终堆积形态, 可发现:

(1) 工况 1 单排桩未能如同工况 2—工况 4 形

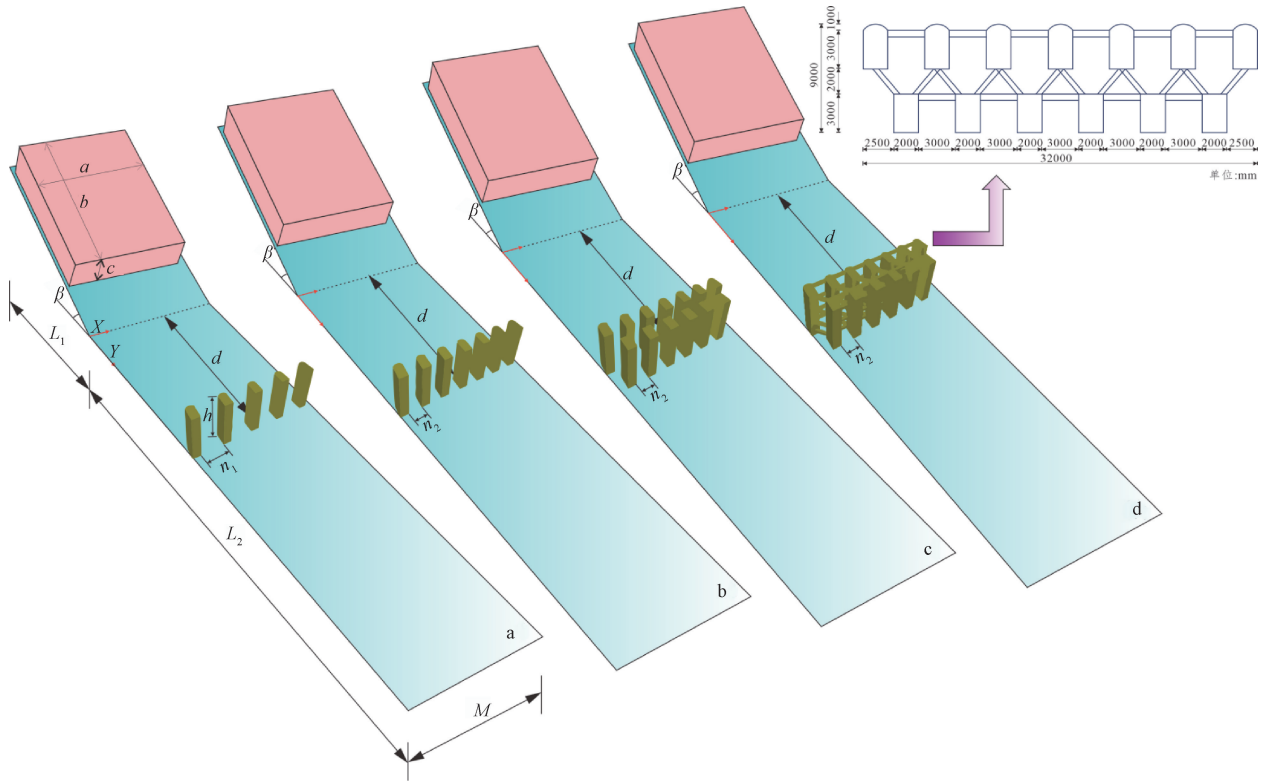


图2 理想碎屑流拦挡结构布局

Fig. 2 Layout of blocking piles in an idealized avalanche zone

表1 碎屑流及拦挡结构几何参数

Table 1 Geometric parameters for the blocking structures and the debris flow

名称	符号	对应值
初始碎屑流滑体宽度/m	a	30
初始碎屑流滑体长度/m	b	40
初始碎屑流滑体厚度/m	c	10
初始碎屑流所在斜坡转角处与拦挡结构前缘距离/m	d	60
初始碎屑流所在斜坡投影长度/m	L_1	43
碎屑流运动堆积区长度/m	L_2	81
碎屑流运动堆积区宽度/m	M	32
初始碎屑流所在斜坡转角/ $(^\circ)$	β	30
拦挡结构高度/m	h	12
工况1 桩间间距/m	n_1	5.5
工况2—工况4 桩间间距/m	n_2	3

表2 碎屑流及拦挡结构参数

Table 2 Dynamic coefficient of the blocking structures and the debris flow

名称	对应值
恢复系数	0.3
静力摩擦系数	0.2
滚动摩擦系数	0.01
碎屑流颗粒密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2600
碎屑流颗粒弹性模量/GPa	50

成连续的力链体系，较大粒径颗粒从桩间逃逸出来，后续碎屑流随即也在桩间逃逸堆积在远处；

(2) 对比工况1—工况4，碎屑流最终堆积范围从大到小依次为单排桩结构（桩间距 n_1 ）>单排桩结构（桩间距 n_2 ）>双排桩林结构>桩梁组合结构，拦挡后堆积形态依次为矩形、梯形、船形和窄带形，桩梁组合结构拦挡效果最明显；

(3) 工况2 虽然在桩前形成了连续的力链体系，拦挡效果显著，但仍有相当一部分细颗粒以较高的速度逃逸堆积到远处，也就是说细颗粒一旦成功从桩间逃逸，并无抑制其速度的方法；相反，工况3、工况4 只有很少细颗粒以较高的速度逃逸堆积到远处，说明逃逸的细颗粒第一排桩和第二排桩之间由于改流区存在（谭援强等，2016），速度得到抑制；该现象与 Bi et al. (2019) 文献中提到的阻挡区是一致的。

因此在拦挡结构设计计算中，需注意桩间距的设定与颗粒尺寸相关性较大，若间距超过较大粒径颗粒，造成较大粒径颗粒逃逸，进而导致力链非连续，结构拦挡将不能起到很好的拦截作用。即使桩—巨石形成连续的力链体系，细颗粒的逃逸不可忽视，需注意有多排减速障桩进行逐级抑制速度，或通过双排桩林结构、桩梁组合结构提前利用改流区迟滞细颗粒逃逸。

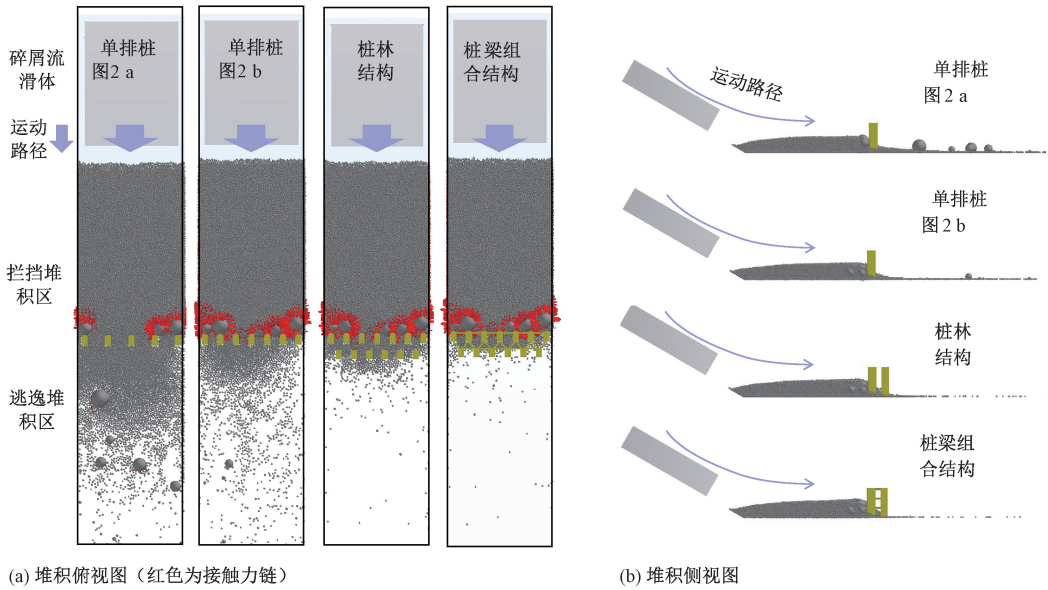


图 3 理想碎屑流不同结构拦挡效果对比图

Fig. 3 Comparison diagrams showing the blocking effectiveness of different blocking structures

1.2 不同位置桩梁组合结构拦挡效果对比

为进一步说明桩梁组合结构位置对于碎屑流

拦挡效果的影响, 文中设置了三种工况 (图 4) 用以模拟对比。

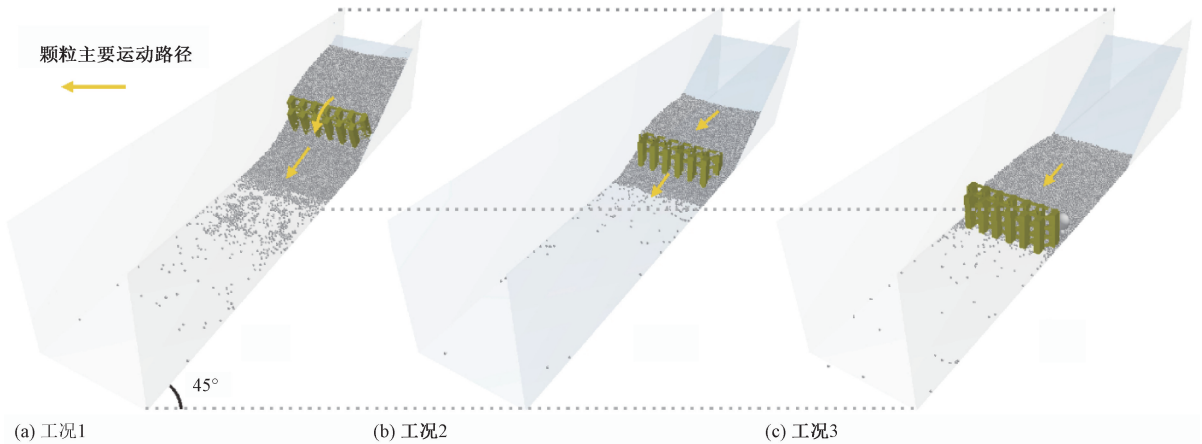


图 4 理想碎屑流区不同位置桩梁组合结构拦挡效果对比图

Fig. 4 Comparison diagrams showing the blocking effectiveness of a pile-beam composite structure laid out in different positions

工况 1: 桩梁组合结构设置于斜坡上, 初始碎屑流滑体下方。工况 2: 桩梁组合结构设置于斜坡转角处。工况 3: 桩梁组合结构设置情况同图 2d。三种模拟结果对比可发现:

(1) 工况 1 由于距离初始碎屑流最近, 受到休止角作用, 碎屑流上部出现桩顶跃顶逃逸的现象, 部分细颗粒以较高的速度逃逸堆积到远处; 工况 2 桩顶跃顶逃逸的现象较工况 1 不明显, 细颗粒高速逃逸到远处的现象几乎没有; 工况 3 未出现桩顶跃顶逃逸的现象;

(2) 虽然工况 1、工况 2 均出现碎屑流跃顶逃

逸的现象, 但碎屑流主体堆积位置前缘均未有工况 3 远。

因此桩梁组合结构在设计布置位置时, 一方面要考虑在碎屑流启动、势动转换过程中尽早抑制碎屑流速度, 另一方面仍需重视库容的设计, 谨防跃顶造成部分碎屑流逃逸, 在上述二者之间选择最优解进行位置布置。

2 桩梁组合结构受力特征

考虑到上述桩梁组合结构拦挡效果模拟并未考

考虑结构自身的受力特征，因此专门针对碎屑流中巨石撞击桩梁组合结构引起的结构受力特征展开研究，以期获得规律性的结果。根据陈古华等（2022）的研究成果，大粒径颗粒具有“跳动”现象且对桩林的瞬时冲击作用明显，大粒径颗粒冲击甚至可能导致结构撞毁破坏（He et al., 2019），因此文中以大粒径巨石冲击桩梁组合结构开展研究。

2.1 模型建立

选用 ANSYS/Explicit dynamics 通用显示动力分析软件，结构模型仍以舟曲三眼峪高位泥石流桩

梁组合结构作为原型（图 5），尺寸与图 2d 完全一致，其中钢筋混凝土单桩水平截面呈马蹄形，长为 3 m（含弧形段 0.5 m），宽 2 m，桩长 12 m，采用梅花型布置二排，桩间设钢筋混凝土连梁，保护层厚度 92 mm，混凝土均采用 C30 浇筑。桩内纵筋采用 $96\Phi 32$ mm（其中，迎冲面弧形段 $66\Phi 32$ mm，并在底部增设 10 m 长 $30\Phi 32$ 进行加密），箍筋采用 $56\Phi 14$ mm，间距 200 mm。碎屑流巨石采用的是直径 2.5 m 球体，冲击速度 10 m/s。冲击位置为 $2/3$ 桩长处（8 m）。

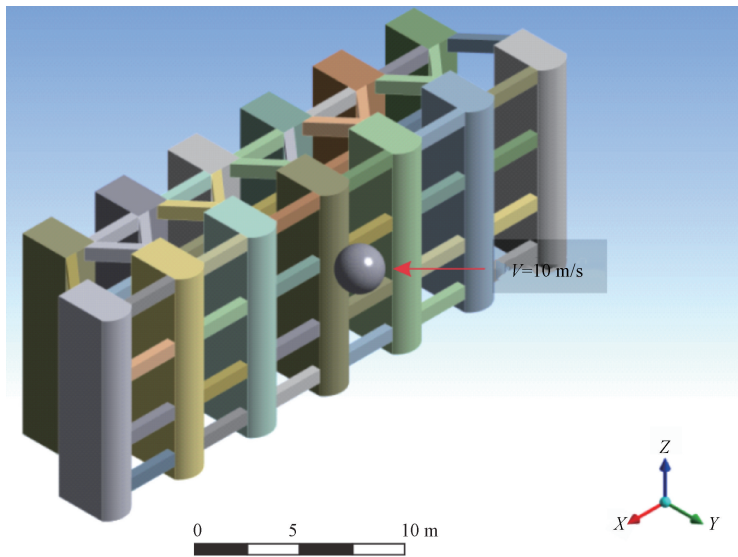


图 5 碎屑流巨石撞击桩梁组合结构模型图

Fig. 5 Model diagram showing a pile-beam composite structure impacted by a debris flow boulder

混凝土结构采用八节点 Solid 实体单元模拟，钢筋则采用两节点 beam 线单元模拟。钢筋材料为常用的 Johnson-Cook 金属模型，桩体混凝土材料混凝土用 RHT 本构模型（李广博和罗乙杰，2022）。RHT 模型有三个极限面，即弹性极限面、失效极限面和残余强度极限面，分别代表混凝土的初始屈服强度、峰值屈服强度及峰后残余强度。基本计算参数详见表 3。

表 3 结构与滚石基本参数

Table 3 Basic parameters of the pile-beam composite structure and the boulder

参数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	失效应变
混凝土	2314	35	0.2	30	0.1
钢筋	7800	200	0.3	400	0.2
碎屑流巨石	2600	50	0.16	—	—

混凝土单元与钢筋单元之间采用强化连接 (Reinforcement)，钢筋单元与单元钢筋之间采用绑

定连接 (Bonded)。滚石与混凝土单元、钢筋单元采用无摩擦 (Frictionless) 连接。

2.2 模拟结果

碎屑流巨石冲击桩梁组合结构应力图（图 6，图 7）可发现，桩梁组合结构将桩林悬臂力学承载结构转化为多点承载结构后，冲击力在撞击位置迅速将应力通过连梁分散传递到后排桩，将冲击造成的局部区域混凝土侵入深度 77 mm，未达到混凝土保护层厚度 (92 mm)，巨石未能直接与钢筋接触造成变形。

钢筋应力更直观地反映出虽然冲击局局部区域钢筋未有实质塑性变形，但冲击过程中出现的应力传递已使得连系梁两端连接部分几乎达到屈服，这也是今后需要考虑加强的部位。

3 结论与建议

文章针对近年来在高位泥石流、碎屑流区运

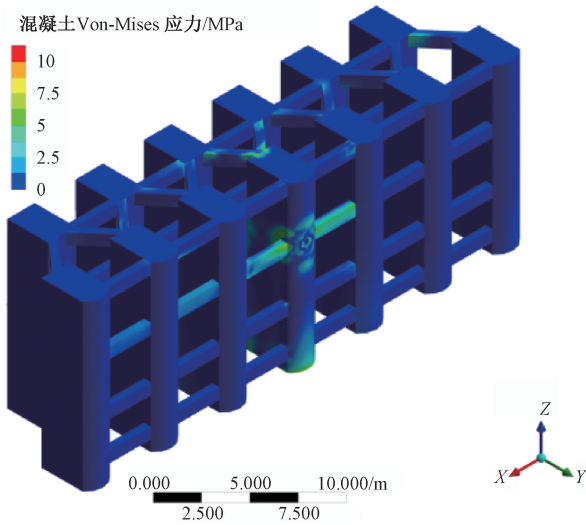


图6 桩梁拦挡组合结构混凝土等效力图

Fig. 6 Von-Mises stress of the pile-beam composite structure

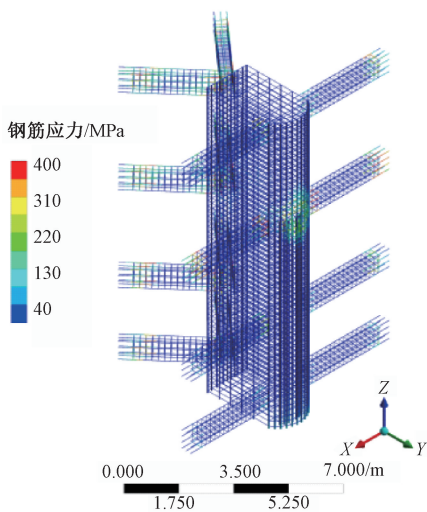


图7 桩梁拦挡组合结构钢筋应力

Fig. 7 Steel stress of the pile-beam composite structure

用的桩梁组合新型拦挡结构为研究对象,以舟曲三眼峪高位泥石流流桩梁组合结构作为原型,开展碎屑流冲击下单排、多排桩林及桩梁组合结构拦挡效果、不同位置桩梁组合结构拦挡效果对比模拟以及桩梁组合结构受力特征模拟研究,得出以下结论:

(1) 较大粒径颗粒与拦挡结构、两侧沟道边界接触形成的桩-巨石力链拦挡效应可有效拦挡、迟滞后续碎屑流运动,桩梁组合结构桩-巨石力链拦挡效应最佳;同时,第一排桩和第二排桩之间改流区进一步抑制了碎屑流速度;

(2) 桩梁组合结构在设计布置位置时,一方面要考虑在碎屑流启动、势动转换过程中尽早抑

制碎屑流速度,另一方面仍需重视库容的设计,谨防跃顶造成部分碎屑流逃逸;在上述二者之间选择最优解进行位置布置;

(3) 碎屑流巨石冲击桩梁组合结构时,冲击应力将通过连梁分散传递到后排桩,连系梁两端连接部分应力几乎达到屈服强度,需加强配筋。

文中未耦合考虑碎屑流冲击下结构拦挡效果及结构本身的受力损伤情况,这将是今后研究工作的重点考虑方向。

致谢: 审稿专家与编辑老师对本文提出了许多宝贵意见与建议,甘肃省地质环境监测院、四川省华地建设工程有限责任公司提供相关数据,在此一并表示衷心的感谢。

References

- BI Y Z, HE S M, WANG D P, et al., 2017. Discrete-element investigation of rock avalanches impact on the bridge pier [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 28 (4): 16-21. (in Chinese with English abstract)
- BI Y Z, DU Y J, HE S M, et al., 2018. Numerical analysis of effect of baffle configuration on impact force exerted from rock avalanches [J]. *Landslides*, 15 (5): 1029-1043.
- BI Y Z, HE S M, DU Y J, et al., 2019. Effects of the configuration of a baffle-avalanche wall system on rock avalanches in Tibet Zhangmu: discrete element analysis [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78 (4): 2267-2282.
- BIAN J H, LI X Z, XU R C, et al., 2021. Hazard zonation of large-scale landslides along Sichuan-Tibet Railway based on contributing weights model [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32 (2): 84-93. (in Chinese with English abstract)
- CHEN G H, HAN P F, WANG Y M, et al., 2022. Discrete element simulation of retaining effect of retaining piles on debris flow of landslide [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 19 (1): 129-140. (in Chinese with English abstract)
- CUNDALL P A, STRACK O D L, 1979. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. *Géotechnique*, 29 (1): 47-65.
- GAO Y, LI B, GAO H Y, et al., 2020. Progress and issues in the research of impact and scraping effect of high-elevation and long-runout landslide [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (4): 510-519. (in Chinese with English abstract)
- GUO C B, LEI W Z, ZHANG Y S, et al., 2006. Main geohazard types and their occurrence characteristics along the Yunnan-Tibet railway in NW Yunnan [J]. *Journal of Geomechanics*, 12 (2): 228-235. (in Chinese with English abstract)
- HE S M, YAN S X, DENG Y, et al., 2019. Impact protection of bridge piers against rockfall [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78 (4): 2671-2680.
- HU X D, BI Y H, WEI X P, et al., 2012. An analysis of treatment

- project of debris flow disaster in Sanyanyu gully of Zhouqu County [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 32 (3): 267-270, 300. (in Chinese with English abstract)
- LI G B, LUO Y J, 2022. Analysis of dynamic response of reinforced concrete beams based on impact load of RHT model [J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 39 (1): 11-16. (in Chinese with English abstract)
- LI R D, MA Z Y, HU X D, 2011. Limit analysis of blocking structure of pile group for Zhouqu debris flow [J]. *Gansu Geology*, 20 (2): 60-65. (in Chinese with English abstract)
- LI Z, GAO Y, HE K, et al., 2020. Analysis of the fluidization process of the high-position and long-runout landslide in Shuicheng, Liupanshui, Guizhou Province [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (4): 520-532. (in Chinese with English abstract)
- LIU T J, SUN S Q, ZHAO Z, et al., 2020. Massflow model-based evaluation on effect of engineering treatment of debris flow in Lengzigou Gully [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 51 (10): 195-201. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z, LI B, HE K, et al., 2020. An analysis of dynamic response characteristics of the Yigong Landslide in Tibet under strong earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (4): 471-480. (in Chinese with English abstract)
- RAN Y H, WANG X L, WANG P, et al., 2018. Experimental study on dynamic performance of concrete filled steel tubular piles under impact loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40 (S1): 81-86. (in Chinese with English abstract)
- SUN Q C, LIU C Q, ZHOU G D, 2015. Relaxation of granular elasticity [J]. *Acta Physica Sinica*, 64 (23): 236101. (in Chinese with English abstract)
- TAN Y Q, XIAO X W, ZHENG J H, et al., 2016. Effect of outlet diameter of cone-in-cone insert on silo flow pattern [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32 (19): 82-87. (in Chinese with English abstract)
- WANG D P, LI Q Z, BI Y Z, et al., 2020. Optimal layout of a new type of baffle based on high-risk areas of rock avalanches [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 41 (4): 1323-1332, 1365. (in Chinese with English abstract)
- WANG J, 2021. Research on the geological disasters remediation project of the Baoji-Chengdu railway [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 47 (4): 80-84. (in Chinese with English abstract)
- WANG P, 2016. Dynamic response analysis and experimental research of concrete-filled steel tubular piles under debris flow [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- WANG W P, YIN Y P, ZHU S N, et al., 2020a. Investigation and numerical modeling of the overloading-induced catastrophic rockslide avalanche in Baige, Tibet, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79 (4): 1765-1779.
- WANG W P, YIN Y P, YANG L W, et al., 2020b. Investigation and dynamic analysis of the catastrophic rockslide avalanche at Xinmo, Maoxian, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79 (1): 495-512.
- WANG X L, GUAN B L, LI J J, et al., 2015. Dynamic response analysis of "trefoil" -shap unit of concrete-filled steel tubular piles under impact of big stone in debris flow [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 26 (2): 69-75. (in Chinese with English abstract)
- XU B, 2018. The activity characteristics and engineering prevention and control measures of Gangou debris flow in Longtuo town, Ludian county, Yunnan Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- YANG K C, 2020. Experimental study on control performance of debris flow with pile-group dam [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, University of the Chinese Academy of Sciences. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, ZHANG Y S, 2013. Engineering geology analysis of geo-hazards induced by Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- ZHANG N, 2018. Study on formation mechanism and comprehensive Prevention of Debris flow Disasters in Sanyanyu Valley, Zhouqu [D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG W Z, HUANG H F, KONG W, et al., 2018. Failure mode and optimization analysis of pile structure under the impact action of boulders in debris flow [J]. *Science Technology and Engineering*, 18 (4): 15-22. (in Chinese with English abstract)
- ZOU Z N, WANG Y S, XIN C C, et al., 2019. Analysis on the factors influencing the high level rock avalanches in the Yarlung Zangbo Grand Canyon [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 30 (1): 20-29. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 毕钰璋, 何思明, 王东坡, 等, 2017. 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*, 28 (4): 16-21.
- 边江豪, 李秀珍, 徐瑞池, 等, 2021. 基于贡献率权重模型的川藏铁路沿线大型滑坡危险性区划 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 32 (2): 84-93.
- 陈古华, 韩培锋, 王月明, 等, 2022. 拦挡桩群对滑坡碎屑流挡流效果的离散元模拟 [J]. *铁道科学与工程学报*, 19 (1): 129-140.
- 高杨, 李滨, 高浩源, 等, 2020. 高位远程滑坡冲击铲刮效应研究进展及问题 [J]. *地质力学学报*, 26 (4): 510-519.
- 郭长宝, 雷伟志, 张永双, 等, 2006. 滇藏铁路滇西北段主要地质灾害类型及发育规律的探讨 [J]. *地质力学学报*, 12 (2): 228-235.
- 胡向德, 毕远宏, 魏新平, 等, 2012. 舟曲县三眼峪泥石流灾害治理工程分析 [J]. *水土保持通报*, 32 (3): 267-270, 300.
- 李广博, 罗乙杰, 2022. 基于 RHT 模型的冲击荷载作用下钢筋混凝土梁动力响应分析 [J]. *吉林建筑大学学报*, 39 (1): 11-16.
- 李瑞冬, 马宗源, 胡向德, 2011. 舟曲泥石流桩林拦挡结构抗冲压极限分析 [J]. *甘肃地质*, 20 (2): 60-65.
- 李壮, 高杨, 贺凯, 等, 2020. 贵州省六盘水水城高位远程滑坡流态化运动过程分析 [J]. *地质力学学报*, 26 (4): 520-532.
- 刘铁骥, 孙书勤, 赵峥, 等, 2020. 基于 Massflow 模型的冷渍沟泥石流工程治理效果评价 [J]. *水利水电技术*, 51 (10): 195-201.
- 刘铮, 李滨, 贺凯, 等, 2020. 地震作用下西藏易贡滑坡动力响应特征分析 [J]. *地质力学学报*, 26 (4): 471-480.

- 冉永红,王秀丽,王朋,等,2018.冲击荷载下钢管混凝土桩林动力性能试验研究[J].岩土工程学报,40(S1):81-86.
- 孙其诚,刘传奇,周公旦,2015.颗粒介质弹性的弛豫[J].物理学报,64(23):236101.
- 谭援强,肖湘武,郑军辉,等,2016.锥形改流体下部孔径对筒仓卸料流态的影响[J].农业工程学报,32(19):82-87.
- 王东坡,李沁泽,毕钰璋,等,2020.碎屑流高风险区桩群防护结构优化布局研究[J].岩土力学,41(4):1323-1332,1365.
- 王靖,2021.宝成铁路地质灾害整治工程方案研究[J].铁道勘察,47(4):80-84.
- 王朋,2016.泥石流作用下钢管混凝土桩林结构动力响应分析与试验研究[D].兰州:兰州理工大学.
- 王秀丽,关彬林,李俊杰,2015.泥石流块石冲击下新型钢管混凝土桩林坝“品”单元动力响应分析[J].中国地质灾害与防治学报,26(2):69-75.
- 许彬,2018.云南鲁甸龙头山集镇甘沟泥石流活动特征与防治对策[D].北京:中国地质大学(北京).
- 杨开成,2020.桩林坝调控泥石流的性能实验研究[D].成都:中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所).
- 殷跃平,张永双,2013.汶川地震工程地质与地质灾害[M].北京:科学出版社.
- 张楠,2018.舟曲三眼峪沟泥石流灾害形成机理及综合防治研究[D].武汉:中国地质大学.
- 张万泽,黄海峰,孔伟,等,2018.泥石流大块石冲击作用下桩林结构的破坏形式及其优化分析[J].科学技术与工程,18(4):15-22.
- 邹子南,王运生,辛聪聪,等,2019.雅鲁藏布大峡谷高位岩质崩塌影响因素分析[J].中国地质灾害与防治学报,30(1):20-29.