

落石冲击作用下拦石桩设计方法研究

田琳, 罗刚, 邹鹏, 张龙睿, 候易凡

Study on design method of rockfall retaining pile under rockfall impact

TIAN Yuelin, LUO Gang, ZOU Peng, ZHANG Longrui, and HOU Yifan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202304026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[土垫层缓冲落石冲击力特性离散元数值模拟分析](#)

Analysis of soil cushion buffering characteristic for rockfall impact force through discrete element numerical simulation

陈宇, 沈位刚, 宋忠友, 高攀, 鄢发斌, 雍平, 张锐 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 90–97

[力法计算锚索抗滑桩内力分担比及其应用](#)

Application of the structural mechanics method to calculate the internal force sharing ratio of anchor cable and anti-slide pile for retaining structure

石洋海, 王贤能 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 92–97

[山区天然气管道—滑坡体系下花管微型桩与螺纹微型桩支护性能对比试验](#)

Physical model tests on supporting performance of micro-pile and micro-pile with thread in natural gas pipe-landslide system in mountainous area

高建章, 方迎潮, 王学军, 葛华, 沈茂丁, 梁栋, 孟建 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(2): 120–131

[桩板墙不同类型挂板的技术经济比较](#)

Technical and economic comparison for different types of hanging board method of pile sheet wall

李菊芳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 135–142

[强震区隧道软弱围岩洞口段桩-筏抗震措施的作用效果分析](#)

Analysis on the effect of pile-raft anti-seismic measures for the tunnel section of weak surrounding rock in strong earthquake area

崔光耀, 李鹏宇, 王庆建 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 106–112

[嵌固段顶部拓宽型抗滑桩计算方法](#)

Calculation method of stabilizing piles with broadened top at the built-in section

邓时容, 肖世国 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 84–91



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202304026

田玥琳, 罗刚, 邹鹏, 等. 落石冲击作用下拦石桩设计方法研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 88-96.

TIAN Yuelin, LUO Gang, ZOU Peng, et al. Study on design method of rockfall retaining pile under rockfall impact[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 88-96.

落石冲击作用下拦石桩设计方法研究

田玥琳, 罗刚, 邹鹏, 张龙睿, 侯易凡

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 610031)

摘要: 桩板拦石墙是一种拦截落石的新型被动防护结构,由悬臂桩、桩间板和缓冲垫层组成。这种结构具有地形适应性强、占地面积小、拦截高度大等优点,在落石高发区得到了应用。然而,由于悬臂桩的极限承载力缺乏详细的报道,因此无法为工程实践提供指导。文章首先根据落石冲击力传播特征,提出缓冲垫层的合理厚度;然后根据桩身的受力和变形特性,采用弹性固支悬臂梁模型和Winkler弹性地基梁模型推导了桩身内力、位移的理论计算方法,实现了落石冲击作用下悬臂桩设计参数的自动求解。结果表明:当落石直径为2 m、冲击高度为7.0 m,冲击速度为10 m/s,且砂土垫层厚度为落石直径的1.5倍时,双排三肢钢筋1.5 m×1.2 m悬臂桩可承受冲击力为 2.51×10^6 N且冲击能量为565 kJ的落石冲击。对于冲击能量更高的情况,建议优先提高拦石桩的抗弯能力。研究可为西部山区岩崩防灾减灾提供科学依据。

关键词: 落石; 缓冲垫层; 拦石桩; 桩身内力; 优化设计

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)03-0088-09

Study on design method of rockfall retaining pile under rockfall impact

TIAN Yuelin, LUO Gang, ZOU Peng, ZHANG Longrui, HOU Yifan

(Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, 610031, China)

Abstract: Pile-slab rockfall retaining wall is a novel passive protective structure designed to intercept falling rocks. It is made up of cantilever piles, pile-intermediate slabs, and cushion layers. This structure features strong terrain adaptability, small footprint, and high interception height, making it applicable in high-risk rockfall areas. However, due to the lack of detailed reports on the ultimate bearing capacity of cantilever piles, guidance for engineering practice is unavailable. This paper first proposes a reasonable thickness for the cushion layer based on the characteristics of the propagation of falling rock impact forces. Then, according to the stress and deformation characteristics of the pile body, theoretical calculation methods of the internal forces and displacements of the pile body are derived using the elastic support cantilever beam model and the Winkler elastic foundation beam model, enabling the automatic determination of design parameters for cantilever pile under falling rock impact. The results indicate that for a rockfall with a diameter of 2 m, impact height of 7.0 m, impact velocity of 10 m/s, and a cushion layer thickness of 1.5 times the rockfall diameter, a double-row triple-limb steel-reinforced 1.5 m × 1.2 m cantilever pile can withstand an impact force of 2.51×10^6 N and impact energy of 565 kJ. For cases with higher falling rock impact

收稿日期: 2023-04-26; 修订日期: 2023-07-10 投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3005704); 国家自然科学基金面上项目(42277143); 四川省自然科学基金面上项目(2024NSFSC0100); 四川省自然资源厅科研项目(KJ-2023-004)

第一作者: 田玥琳(2000—), 女, 重庆合川人, 地质资源与地质工程专业, 硕士研究生, 主要研究方向为地质灾害与防治。

E-mail: 1801236957@qq.com

通讯作者: 罗刚(1984—), 男, 满族, 甘肃天水人, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害防治研究。

E-mail: luogang@home.swjtu.edu.cn

energy, it is recommended to prioritize enhancing the bending resistance of the retaining wall. This research provides a scientific basis for disaster prevention and reduction in rockfall-prone areas in the western mountainous regions of China.

Keywords: rockfall; cushion; rockfall retaining pile; internal force of pile; optimal design

0 引言

崩塌落石是高山峡谷区主要的地质灾害类型之一,也是困扰我国山区基础设施建设的突出工程地质问题之一^[1-3]。截至2021年底,全国发生崩塌落石灾害的地点共计8.2万处,占全国地质灾害总数的28.2%^[4-5]。由于地形、地质条件和工程预算的限制,大部分高位崩塌落石主动加固措施难以实施,因此多采用被动防护措施^[6-7]。自2008年汶川地震以来,桩板拦石墙作为一种新型的防护结构,在西部山区得到了逐渐推广和实施

(图1)。该结构由悬臂桩、桩间板和缓冲垫层组成,具有地形适应性强(地形坡度介于25°~35°)、占地面积小、有效拦截高度大等特点^[8]。然而,拦石桩作为桩板拦石墙的关键支撑结构,其设计参数取值(包括冲击力、垫层厚度、桩径、桩长、嵌固段和悬臂段比例)均基于抗滑桩静定受力体系和工程经验来确定,缺乏严格的力学推导。因此,结合落石冲击力和缓冲垫层力学特性,推导拦石桩的弯矩、剪力和挠度,对于崩塌落石防治具有重要的工程实践意义。



图1 典型桩板拦石墙结构

Fig. 1 Typical pile-slab rockfall retaining wall structure

1 落石冲击力计算

作用于缓冲垫层表面的落石冲击力的合理估算,是防护结构设计的第一要素。为了得到相对准确的冲击力值,学者开展了大量试验和理论研究。在众多计算方法中,关宝树法、隧道手册法、路基法求得的冲击力均为平均力,小于峰值冲击力,对结构安全不利^[9-11];Hertz法计算结果明显高于冲击力实测值^[12-13];其他方法参数较多且计算量较大;袁进科法需要额外确定落石恢复系数和冲击力放大系数。而Perera等^[14]提出的修正瑞

士法与物理试验和数值模拟结果高度吻合,因此本文推荐采用该公式作为含垫层落石最大冲击力计算方法(式1)。

$$F = 0.65 \times 2.8e^{-0.5} r^{0.7} M_E^{0.4} \tan \varphi_k \left(\frac{mv_0^2}{2} \right)^{0.6} \quad (1)$$

式中: F —缓冲垫层表面的落石冲击力/N;

e —缓冲层厚度/m;

r —落石半径/m;

M_E —缓冲土层弹性模量/Pa;

φ_k ——垫层颗粒的内摩擦角/(°);
 m ——落石质量/kg;
 v_0 ——冲击速度/(m·s⁻¹)。

2 缓冲垫层设计

缓冲垫层是桩板拦石墙最主要的耗能组构,可以有效保护桩板结构的完整性,并提升其服役性能^[3]。合理设置缓冲垫层材料和厚度可以增加冲击时间、减缓落石冲击速度并扩散冲击力(图2),从而降低落石对桩板的冲剪破坏^[12-13, 15-16]。已有研究成果表明,砂土或碎石土作为一种多孔、松散、易压缩的颗粒材料,能够有效扩散冲击力和吸收冲击能量^[17]。在实际工程中,缓冲层可以由加筋土、钢筋石笼或袋装砂土码砌形成,高度与桩板高度一致。Zhu等^[18]研究了垫层的阻尼性能,发现垫层厚度和压实度对构筑物的冲击动力响应影响最大。Su等^[16]提出,颗粒尺寸越小、磨圆度越高、强度越低,垫层的耗能缓冲能力越强。因此,可以选择河沙或人工碎石作为填充材料。

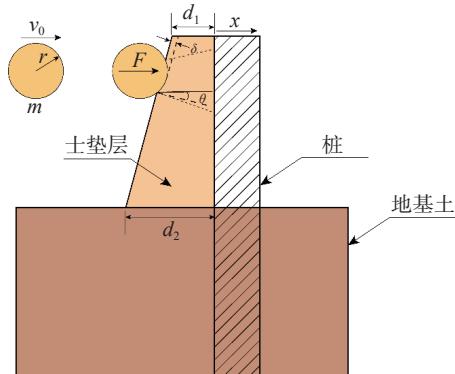


图2 落石冲击作用下悬臂桩受力分析计算示意图(θ 一般取 $45^\circ-\varphi_k/2$, φ_k 为垫层材料内摩擦角)

Fig. 2 Schematic diagram of stress analysis calculation of cantilever pile under rockfall impact (θ is generally taken as $45^\circ-\varphi_k/2$, where φ_k is the internal friction angle of the cushion material)

大量研究表明,在缓冲垫层中,冲击力的传播特性异常复杂。落石冲击力在冲击坑完全形成时达到峰值,作用于结构物表面的冲击力甚至大于落石与缓冲垫层表面的冲击力^[19-20]。力的放大系数与垫层厚度和落石直径之比有关(图3)。Su等^[20]提出,填充颗粒粒径应小于0.2倍落石等效直径,厚度应大于3倍落石等效直径。王爽等^[21]建议垫层厚度应为落石直径的1~2倍。考虑冲击坑深度、冲击力扩散面积(图2)和地形条件,建议垫层最小厚度应大于落石1.5倍等效直径。此外,当落石轨迹和桩位确定后,垫层高度需要大于落石冲击

作用点并且能够覆盖冲击力扩散后的均布荷载范围(图2),确保落石和垫层材料不会从桩顶剪出。

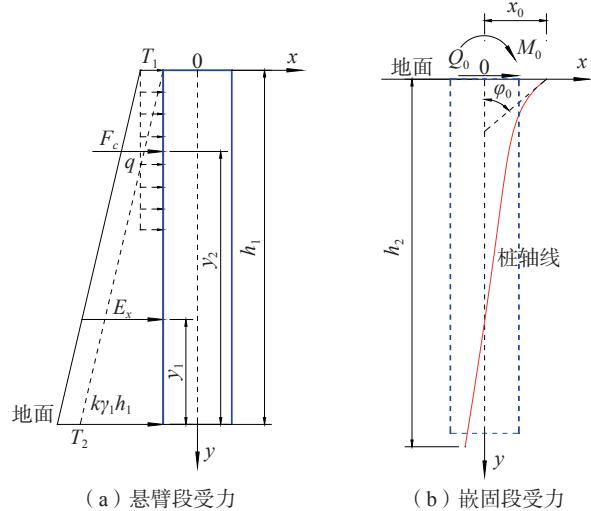


图3 桩身受力和位移示意图
Fig. 3 Schematic diagram of pile force and displacement

3 桩身受力分析及结构设计

悬臂桩是桩板拦石墙的主要支撑构件,其弯矩、剪力和挠度是结构设计的关键力学指标^[22]。实际工程中,桩板拦石墙的结构设计通常参考《滑坡防治工程设计与施工技术规范》^[23]中的抗滑桩要求。一般将受荷段看作一端固定的悬臂梁,将冲击力等效为作用在桩顶的横向荷载和力矩,并采用Winkler弹性地基梁模型计算嵌固段的弯矩和挠度^[24-25]。考虑到崩塌易发区坡脚存在的深厚崩坡积块碎石土,悬臂桩难以深入基岩,因此采用“m”法计算桩身内力和位移。桩身表面水平横向荷载以缓冲垫层扩散后的均布荷载 q 作为依据进行计算(图3)。

3.1 桩身内力及位移计算

根据《新型支挡结构设计与工程实例》中悬臂段和嵌固段的桩身内力及位移计算方法得到剪力 Q_{fy} ,位移 x_{fy} 及转角 φ_{fy} 的计算式分别为:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{fy} = x_0 A_1 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{a^2 EI} C_1 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_1 \\ \varphi_{fy} = \alpha \left(x_0 A_2 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_2 + \frac{M_0}{a^2 EI} C_2 + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D_2 \right) \\ M_{fy} = a^2 EI \left(x_0 A_3 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{a^2 E_3} C_3 + \frac{Q_0}{\alpha^3 E_3} D_3 \right) \\ Q_{fy} = \alpha^3 EI \left(x_0 A_4 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_0}{a^2 E_4} C_4 + \frac{Q_0}{\alpha^3 E_4} D_4 \right) \\ \sigma_{fy} = m_H y x \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i ——随桩的换算深度(αy)而异的系数, $\alpha = \sqrt{(m_H B_p) / (EI)}$;

y ——嵌固段深度/m;

m_H ——地基系数随深度增加的比例系数/(kN·m⁻⁴);

B_p ——桩截面的计算宽度/m;

B ——桩截面的实际宽度/m;

E 、 I ——受荷段混凝土的弹性模量/kPa 和截面惯性矩/m⁴。

当桩底为固定端时, $x_h = \varphi_h = 0$, 但 $M_h \neq 0$, $Q_h \neq 0$ 。将 $x_h = \varphi_h = 0$ 带入(2)的前两式, 联立求解得:

$$x_0 = \frac{M_0}{\alpha^2 EI} \cdot \frac{B_1 C_2 - C_1 B_2}{A_1 B_2 - B_1 A_2} + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} \cdot \frac{B_1 D_2 - D_1 B_2}{A_1 B_2 - B_1 A_2} \quad (3)$$

$$\varphi_0 = \frac{M_0}{aEI} \cdot \frac{C_1 A_2 - A_1 C_2}{A_1 B_2 - B_1 A_2} + \frac{Q_0}{\alpha^2 EI} \cdot \frac{D_1 A_2 - A_1 D_2}{A_1 B_2 - B_1 A_2} \quad (4)$$

式中: x_0 、 φ_0 ——嵌固段顶部的桩位移/m 和转角/rad。

3.2 控制方程

采用式(2)计算得到桩身各点的弯矩和剪力后, 需按照桩身极限抗弯、抗剪和扰度进行校核。

(1) 双筋矩形桩截面受弯(纵向受拉钢筋)验算:

$$\begin{cases} M_{fy} \leq M_u = \alpha_1 f_c B x' \left(l_0 - \frac{x'}{2} \right) + f'_y A'_s (l_0 - a'_s) \\ x' = \frac{f_y A_s - f'_y A'_s}{\alpha_1 f_c B} \\ l_0 = l - a_s \end{cases} \quad (5)$$

式中: M_u ——极限抗弯设计值/MPa;

α_1 ——系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 1.0, 混凝土强度等级为 C80 时, 取 0.94, 其间内插;

f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值/MPa, 约等于混凝土标准试样抗压强度 $f_{cu,k}$ 的 0.7~0.8;

l ——桩身截面高度/m;

l_0 ——矩形截面有效高度/m;

a_s ——纵向受拉钢筋拉应力的合力作用点至截面边缘的距离/m;

a'_s ——纵向受压钢筋压应力合力作用点至截面边缘距离/m;

f_y ——钢筋抗拉强度设计值/MPa;

f'_y ——钢筋抗压强度设计值/MPa;

A_s ——受拉区纵向钢筋总截面面积/m²;

A'_s ——受压区钢筋总截面面积/m²;

其余符号同上。

为了符合悬臂桩的超筋验算, 混凝土受压区高度还应满足条件:

$$w \leq \beta_1 l_0^2 / (1 + f_y/E_s \varepsilon_{cu}), \quad \varepsilon_{cu} = 0.033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (6)$$

式中: w ——桩身截面混凝土的受压区高度/m;

β_1 ——系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 0.8, 当混凝土等级为 C80 时, 取 0.74, 其间内插;

E_s ——钢筋弹性模量/MPa;

ε_{cu} ——混凝土极限压应变;

$f_{cu,k}$ ——混凝土立方体的抗压强度标准值/kPa。

其余符号同上。

(2) 桩截面的受剪(箍筋)验算:

桩身各点除了满足抗弯要求以外, 还需满足抗剪要求:

$$\begin{cases} V \leq 0.25 \beta_c f_c B l_0 \\ V \leq 0.7 f_t B l_0 + 1.25 f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} l_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: V ——斜截面最大剪力设计值/kN;

β_c ——混凝土强度影响系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 1.0, 当强度等级为 C80 时, 取 0.80, 其间内插;

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值/kN;

f_{yv} ——箍筋抗拉强度设计值/kN;

A_{sv} ——配置在同一截面内箍筋的全部截面面积/m²;

s ——箍筋间距/m。

(3) 桩顶挠度检验:

当桩身满足抗弯和抗剪要求, 还需校核桩顶水平位移。

$$\Delta \leq \frac{\varphi_y h_1^2}{3} = \frac{1.7 h_1^2 f_y}{3 I E} \quad (8)$$

式中: φ_y ——悬臂段的屈服曲率/(rad·m⁻¹)。

3.3 案例分析

通常情况下, 当落石体积超过 1 m³ 时, 被动防护措施存在较大风险。为了检验拦石桩的极限承载能力, 假设落石等效半径为 1 m, 落石密度为 2 700 kg/m³, 质量为 11 309.7 kg, 冲击速度分别为 5 m/s、10 m/s、15 m/s 和 20 m/s, 冲击力作用点距离地面 7 m(表 1), 拦截高度等于被动拦石网的极限高度。缓冲垫层厚度为 3 m, 满足落石直径 1.5 倍的要求(表 1)。桩长为 19 m, 悬臂段设置为 9.5 m(以确保落石和垫层材料不会越过顶部), 嵌固段为 9.5 m, 截面尺寸为 1.5 m×1.2 m(表 2)。这个桩的尺寸是最常见的挖孔桩, 既满足施工安全, 又具有经济合理性。若桩尺寸过大, 在崩塌的堆积物上开挖时, 孔壁坍塌的风险较高。尺寸过小则无法满足抗冲击

要求。混凝土选用C50标号,材料参数见表3。桩身配有两排三肢 $d=25\text{ mm}$ @ 273 mm HRB400纵向钢筋及均布 $d=16\text{ mm}$ @ 200 mm HRB335箍筋(表4和图4)。纵向受拉钢筋拉应力合力作用点至截面边缘的距离 a_s 为 0.195 m ,纵向受压钢筋压应力合力作用点至截面边缘距离 a'_s 为 0.0425 m ,受拉区纵向钢筋总截面面积 A_s 为 0.0147 m^2 ,受压区钢筋总截面面积 A'_s 为 0.0039 m^2 ,受压一侧纵向钢筋配筋率为 0.217% ,受拉一侧纵向钢筋配筋率为 0.817% ,满足最小配筋率 0.2% 的要求。根据式(1)得到落石冲击力计算结果如表2所示,根据式(1)(2)得到桩身内力计算结果如表5和图5所示。无论落石冲击速度如何,桩身剪力在桩底处达到最大,弯矩在距桩顶 3 m 处(地面以下 4.5 m)达到最大,桩顶位移最大。

表1 落石冲击力计算结果

Table 1 Calculation results of rockfall impact force

参数	落石半径/m	落石质量/kg	冲击速度/(m·s ⁻¹)	垫层厚度/m	垫层模量/kPa	垫层内摩擦角/(°)	落石冲击力/MN
取值	1	11 309.7	5	3	35 000	39.0	1.09
	1	11 309.7	10	3	35 000	39.0	2.51
	1	11 309.7	15	3	35 000	39.0	4.08
	1	11 309.7	20	3	35 000	39.0	5.76

表2 悬臂桩结构和材料参数

Table 2 Cantilever pile structure and material parameters

参数	悬臂段长度/m	嵌固段长度/m	冲击力作用点距离/m	截面宽度/m	截面高度/m	地基抗力的比例系数/(kN·m ⁻⁴)
取值	9.5	9.5	7.0	1.2	1.5	10 000

表5 桩身内力计算结果($h_2=9.5\text{ m}$)Table 5 Calculation results of pile body internal forces ($h_2=9.5\text{ m}$)

参数	冲击能量/kJ	横向荷载/MN	桩身最大弯矩/(MN·m)	允许弯矩/(MN·m)	桩身最大剪力/MN	允许剪力/MN	桩顶扰度/m	允许扰度/m
取值	141	0.286	3.34	6.57	0.578	3.06	0.031	0.3558
	565	0.656	6.54	6.57	1.125	3.06	0.063	0.3558
	1 272	1.07	10.09	6.57	1.75	3.06	0.097	0.3558
	2 261	1.51	13.91	6.57	2.41	3.06	0.136	0.3558

根据计算结果,对于半径为 1 m ,质量为 $11 309.7\text{ kg}$ 的落石,当冲击速度低于 10 m/s ,垫层厚度为 3 m (相当于落石直径的1.5倍)时,双筋矩形悬臂桩的抗弯、抗剪和扰度均符合要求。当冲击速度大于 15 m/s 且其他条件相同时,该悬臂桩的抗剪和扰度均符合要求,但抗弯不符合要求(表中不满足要求的数据已加粗)。因此,对于高能落石冲击工况(质量大于 $11 309.7\text{ kg}$,速度大于 15 m/s),可考虑采取以下措施来提高抗弯能力:增大缓

表3 混凝土物理力学参数
Table 3 Concrete physical mechanical parameters

材料类型	弹性模量/MPa	泊松比	抗压强度标准值/MPa	轴心抗压强度设计值/MPa	轴心抗拉强度设计值/MPa
C50混凝土	34 500	0.20	32.4	23.1	1.89

表4 钢筋材料参数
Table 4 Reinforcement material parameters

型号	弹性模量/MPa	泊松比	抗拉强度设计值/MPa	钢筋抗压强度设计值/MPa	极限拉应变
HRB400(纵筋)	2.0×10^5	0.27	360	360	0.0305
HRB335(箍筋)	2.0×10^5	0.27	300	300	0.0305

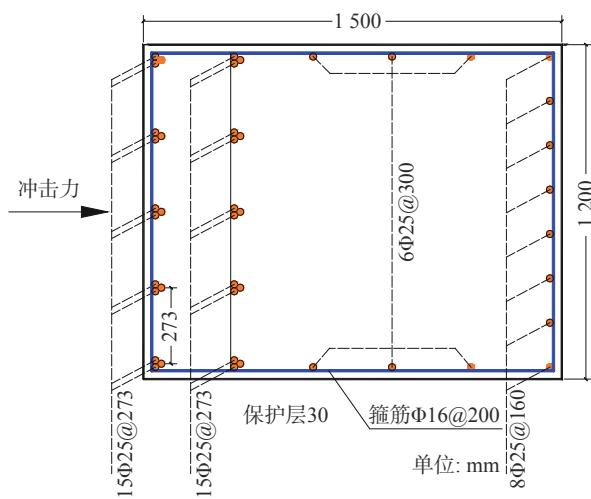


图4 桩身横截面钢筋配置图(参考樟木口岸扎美拉崩塌治理设计)

Fig. 4 Cross-sectional reinforcement layout of pile body (reference to the zhumu port zameila collapse treatment design)

冲垫层厚度、改善垫层材料的力学性能、增加纵向受拉钢筋的配筋率、将桩型改为锚拉桩,或者采用冠梁等措施。

为了优化满足弯矩、剪力和挠度条件的落石冲击速度时的经济效益,可以通过降低桩的嵌固段长度来实现。当冲击能量超过 565 kJ 时,桩不满足抗剪要求。相反,当冲击能量 $\leq 565\text{ kJ}$ 时,桩同时满足抗弯、抗剪和挠度要求。优化过程涉及减短桩的嵌固段长度。然而,由

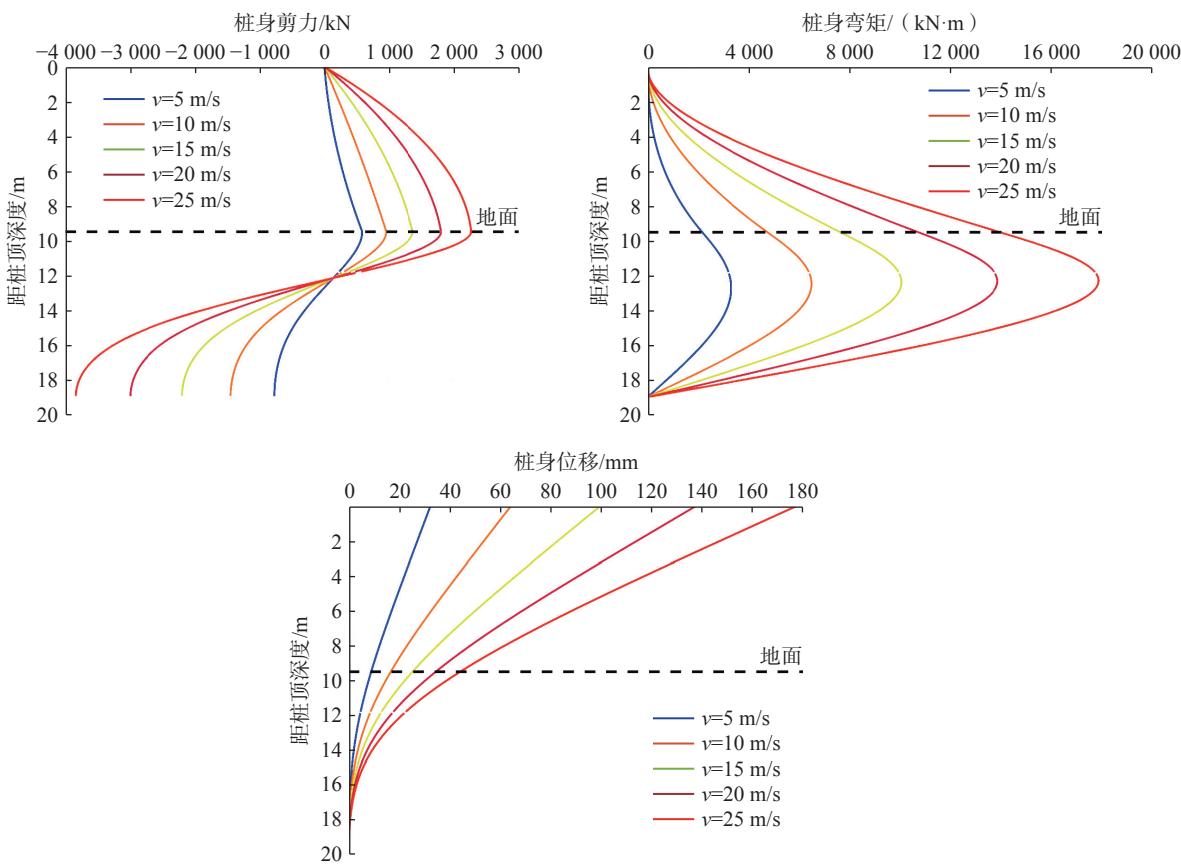


图 5 桩身剪力、弯矩和位移的计算结果

Fig. 5 Calculation results of shear force, bending moment, and displacement of pile body

于减少幅度较小, 桩身内力值的改变不是特别明显, 并且会增加很多计算量, 因此使用减少 1 m 的减少幅度进

行计算。通过这种方式, 得到了嵌固段长度分别为 8.5 m、7.5 m 和 6.5 m 时的内力计算表 6、表 7 和表 8。

表 6 桩身内力计算结果($h_2=8.5$ m)Table 6 Calculation results of pile body internal forces ($h_2=8.5$ m)

参数	冲击能量/kJ	横向荷载/MN	桩身最大弯矩/(MN·m)	允许弯矩/(MN·m)	桩身最大剪力/MN	允许剪力/MN	桩顶扰度/m	允许扰度/m
取值	141	0.286	3.37	6.57	0.581	3.06	0.032	0.355 8
	565	0.656	6.58	6.57	0.952	3.06	0.063	0.355 8
	1 272	1.07	10.15	6.57	1.425	3.06	0.098	0.355 8
	2 261	1.51	13.98	6.57	1.984	3.06	0.136	0.355 8

表 7 桩身内力计算结果($h_2=7.5$ m)Table 7 Calculation results of pile body internal forces ($h_2=7.5$ m)

参数	冲击能量/kJ	横向荷载/MN	桩身最大弯矩/(MN·m)	允许弯矩/(MN·m)	桩身最大剪力/MN	允许剪力/MN	桩顶扰度/m	允许扰度/m
取值	141	0.286	3.48	6.57	0.581	3.06	0.031	0.355 8
	565	0.656	6.71	6.57	0.952	3.06	0.061	0.355
	1 272	1.07	10.33	6.57	1.363	3.06	0.095	0.355 8
	2 261	1.51	14.21	6.57	1.803	3.06	0.132	0.355 8

通过计算发现, 当落石冲击能量为 1 272 kJ 和 2 261 kJ 时, 桩身无法同时满足抗弯抗剪和挠度的要求。当落石能量为 565 kJ 时, 桩身满足要求, 嵌固段长度可以优化, 减少 0.8m 长度, 进而钢筋和混凝土用量分

别减少 135.57 kg 和 1.44 m³。

通过比较表中的计算结果的拟合效果, 最终选择拟合效果最好的三次多项式, 绘制出了桩身内力值与冲击能量的变化关系图 6。结果表明, 无论 h_2 为多少, 桩身

表 8 桩身内力计算结果($h_2=6.5\text{ m}$)Table 8 Calculation results of pile body internal forces ($h_2=6.5\text{ m}$)

参数	冲击能量/kJ	横向荷载/MN	桩身最大弯矩/(MN·m)	允许弯矩/(MN·m)	桩身最大剪力/MN	允许剪力/MN	桩顶扰度/m	允许扰度/m
取值	141	0.286	3.88	6.57	0.581	3.06	0.028	0.355 8
	565	0.656	7.12	6.57	0.952	3.06	0.057	0.355 8
	1 272	1.07	10.84	6.57	1.363	3.06	0.089	0.355 8
	2 261	1.51	14.84	6.57	1.803	3.06	0.122	0.355 8

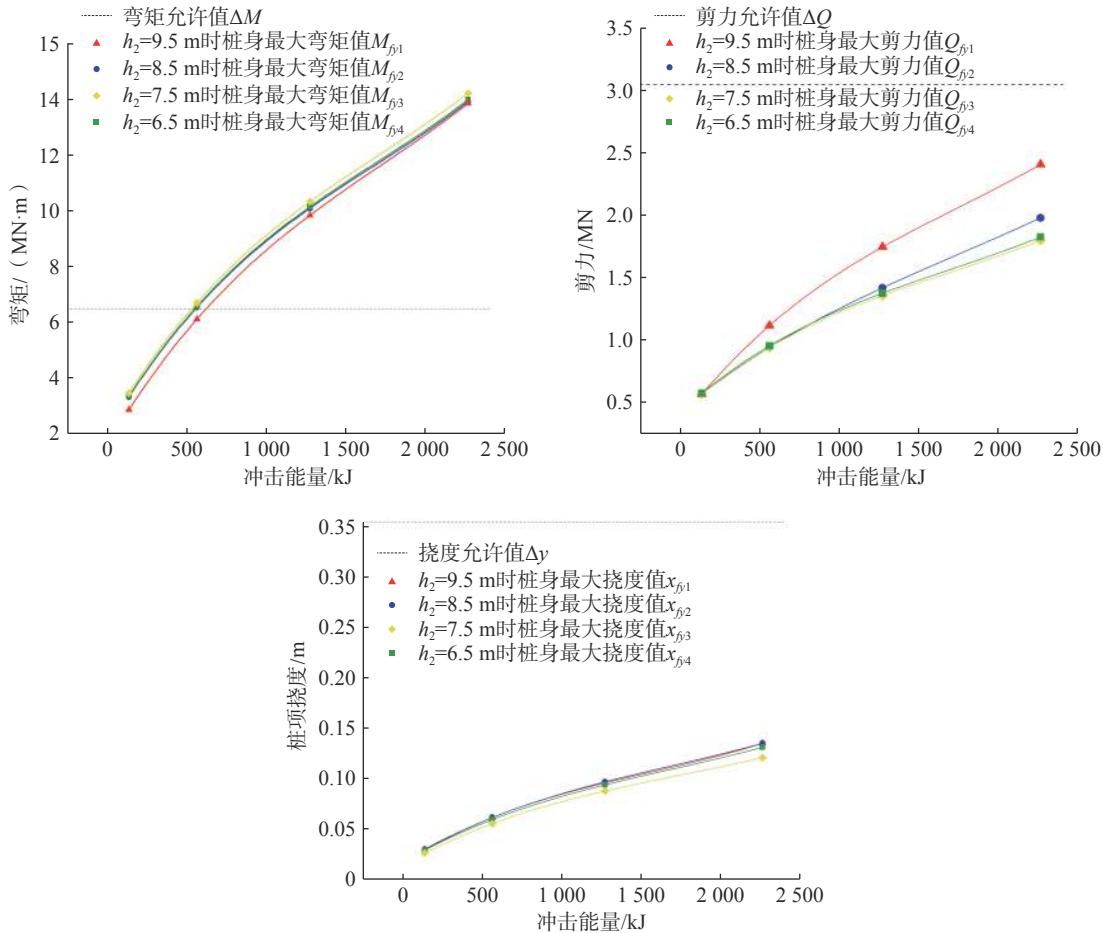


图 6 桩身最大弯矩、剪力和挠度与冲击能量的关系图

Fig. 6 Relationship graph between maximum bending moment, shear force, deflection of pile body, and impact energy

内力和挠度都会随着冲击能量的增大非线性增加。值得注意的是,在桩身最大剪力与冲击能量的关系图中有,当 h_2 从 8.5 m 增加到 9.5 m 时,剪力的增量幅度远大于其他情况。

4 讨论

(1) 本论文提出的计算方法都是基于二维模型建立的,而拦石桩属于三维结构体系,两侧的桩板能够有效分担作用于桩身的水平荷载并提供抗弯和抗剪能力。目前的理论方法无法对这种情况做出合理的评估。因此,未来的研究方向包括对该结构体系进行三维非线性

动力学数值模拟和物理模型试验研究。

(2) 本文仅关注桩身的抗弯、抗剪和扰度要求,未涉及桩身损伤的问题。下一步的工作重点是研究损伤积累问题,特别是在考虑非线性动力学效应的情况下。

5 结论

(1) 在确定落石轨迹和桩位之后,垫层的高度应该大于落石冲击作用点,并且能够覆盖冲击力扩散后的均布荷载范围,以确保落石和垫层材料不会从桩顶剪出。

(2) 由于混凝土的抗拉强度和抗剪强度较低,为了

避免结构物发生局部冲剪破坏,应优先选择合适的缓冲垫层材料。本文建议垫层尽可能选择粉质黏土,不建议使用悬挂式橡胶轮胎,并且垫层厚度应大于落石等效直径的1.5倍。

(3)对于落石冲击能量小于等于565 kJ的情况,两排三肢钢筋1.5 m×1.2 m悬臂桩均能满足抗弯、抗剪和桩顶位移的允许要求。当落石冲击能量大于565 kJ时,拦石桩的挠度和抗剪强度仍然能够满足要求,但抗弯强度不足。此时,可以通过优化缓冲垫层的力学性能、提高混凝土水泥标号、增大纵向受拉钢筋配筋率或增设锚拉措施来提高拦石桩的抗弯能力。

(4)对于满足抗弯、抗剪和挠度要求的拦石桩,可以通过缩短桩身嵌固段长度的方式来实现优化。

参考文献(References):

- [1] 刘传正,肖锐铧.湖北远安盐池河1980年“6·3”山崩灾难题成因分析[J].*灾害学*,2021,36(2):130–133. [LIU Chuanzheng, XIAO Ruihua. Mechanism analysis on Yanchihe avalanche disaster in Yuan'an, Hubei [J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, 36(2): 130 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 罗刚,程谦恭,沈位刚,等.高位高能岩崩研究现状与发展趋势[J].*地球科学*,2022,47(3):913–934. [LUO Gang, CHENG Qiangong, SHEN Weigang, et al. Research status and development trend of the high-altitude extremely-energetic rockfalls [J]. *Earth Science*, 2022, 47(3): 913 – 934. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 黄维,艾东,胡胜华,等.鄂西山区崩塌落石运动特征及危险性分析——以远安县瓦坡崩塌区为例[J].*中国地质灾害与防治学报*,2022,33(6):37–43. [HUANG Wei, AI Dong, HU Shenghua, et al. Characteristics of rockfall trajectory and hazard assessment in western Hubei Province: A case study of the Wapo collapse area in Yuan'an County [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(6): 37 – 43. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 尚寒春,刘科,郦亚军,等.预制拼装式明洞结构在成昆铁路K279崩塌落石治理中的应用[J].*隧道建设(中英文)*,2023,43(增刊1):330–336. [SHANG Hanchun, LIU Ke, LI Yajun, et al. Application of Precast Assembled Open-cut Tunnel Structure in chengdu-kunming railway K279 Collapse and Rockfall Control [J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43(Sup 1): 330 – 336. (in Chinese)]
- [5] 冉龙洲,袁松,王希宝,等.明棚洞落石冲击荷载计算方法研究[J].*岩土力学*,2023,44(6):1748–1760. [RAN Longzhou, YUAN Song, WANG Xibao, et al. A method for calculating rockfall impact load on shed tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(6): 1748 – 1760. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 易靖松,王峰,程英建,等.高山峡谷区地质灾害危险性评价——以四川省阿坝县为例[J].*中国地质灾害与防治学报*,2022,33(3):134–142. [YI Jingsong, WANG Feng, CHENG Yingjian, et al. Study on the risk assessment of geological disasters in alpine valley area: A case study in Aba County, Sichuan Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 134 – 142. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅.落石冲击力计算方法的比较研究[J].*水文地质工程地质*,2010,37(2):59–64. [YE Siqiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Comparative research on impact force calculation methods for rockfalls [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(2): 59 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 胡卸文,梅雪峰,杨瀛,等.落石冲击荷载作用下的桩板拦石墙结构动力响应[J].*工程地质学报*,2019,27(1):123–133. [HU Xiewen, MEI Xuefeng, YANG Ying, et al. Dynamic response of pile-plate rock retaining wall under impact of rockfall [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1): 123 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 蔡向阳,铁永波.崩塌落石运动计算模型综述[J].*地质灾害与环境保护*,2016,27(3):100–104. [CAI Xiangyang, TIE Yongbo. Overview of calculation model for collapse and rockfall movement [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2016, 27 (3): 100 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 吴建利,胡卸文,梅雪峰,等.落石冲击混凝土板与缓冲层组合结构的动力响应[J].*水文地质工程地质*,2021,48(1):78–87. [WU Jianli, HU Xiewen, MEI Xuefeng, et al. Dynamic response of RC slab with cushion layer composed of sandy soil to rockfall impact [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 78 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 姬中民,张晟,伍法权,等.落石法向恢复系数的多因素联合影响研究[J].*水文地质工程地质*,2022,49(2):164–173. [JI Zhongmin, ZHANG Sheng, WU Faquan, et al. Research on the joint influence of multiple factors on the normal coefficient of restitution of rockfall [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 164 – 173. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅.落石冲击力计算方法[J].*中国铁道科学*,2010,31(6):56–62. [YE Siqiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. The calculation method for the impact force of the rockfall [J]. *China Railway Science*,

- 2010, 31(6): 56–62. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 袁进科, 黄润秋, 裴向军. 滚石冲击力测试研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 48–54. [YUAN Jinke, HUANG Runqiu, PEI Xiangjun. Test research on rockfall impact force [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 48–54. (in Chinese with English abstract)]
- [14] PERERA J S, LAM N, DISFANI M M, et al. Experimental and analytical investigation of a RC wall with a gabion cushion subjected to boulder impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 151: 103823.
- [15] 杨其新, 关宝树. 落石冲击力计算方法的试验研究 [J]. 铁道学报, 1996, 18(1): 101–106. [YANG Qixin, GUAN Baoshu. Experimental study on calculation method of rockfall impact force [J]. Journal of the China Railway Society, 1996, 18(1): 101–106. (in Chinese)]
- [16] SU Y, CHOI C E, LYU Y R, et al. Towards realistic simulations of the impact dynamics of boulders on rock-filled gabion: Combined effects of rock shapes and their crushing strength [J]. Engineering Geology, 2021, 283: 106026.
- [17] 裴向军, 刘洋, 王东坡. 滚石冲击棚洞砂土垫层耗能缓冲机理研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(1): 15–22. [PEI Xiangjun, LIU Yang, WANG Dongpo. Study on the energy dissipation of sandy soil cushions on the rock-shed under rockfall impact load [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(1): 15–22. (in Chinese with English abstract)]
- [18] ZHU Chun, WANG Dongsheng, XIA Xing, et al. The effects of gravel cushion particle size and thickness on the coefficient of restitution in rockfall impacts [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(6): 1811–1823.
- [19] SCHELLENBERG K. On the design of rockfall protection galleries [M]. Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, 2008.
- [20] SU Y, CUI Y, NG C W W, et al. Effects of particle size and cushioning thickness on the performance of rock-filled gabions used in protection against boulder impact [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(2): 198–207.
- [21] 王爽, 周晓军, 姜波, 等. 落石冲击下隧道大跨度棚洞的动力响应数值分析与抗冲击研究 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(4): 548–556. [WANG Shuang, ZHOU Xiaojun, JIANG Bo, et al. Numerical analysis of dynamic response and impact resistance of a large-span rock shed in a tunnel under rockfall impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(4): 548–556. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 温宇轩, 贺九平. 水泥搅拌桩在软土路基施工中的应用研究 [J]. 灾害学, 2019, 34(增刊1): 236–242. [WEN Yuxuan, HE Jiuping. Study on application of cement mixing pile in soft soil subgrade construction [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(Sup 1): 236–242. (in Chinese)]
- [23] 中华人民共和国国土资源部. 滑坡防治工程设计与施工技术规范: DZ/T 0219—2006. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of design and construction for landslide stabilization: DZ/T 0219—2006. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)]
- [24] 地质灾害拦石墙工程设计规范(试行): T/CAGHP 060-2019 [S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2019. [Code for design of geological hazard retaining wall engineering: T/CAGHP 060-2019 [S]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 2019. (in Chinese)]
- [25] 李海光. 新型支挡结构设计与工程实例 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. [LI Haiguang. Design and engineering example of new retaining structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)]