

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

THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL

慈竹对小型落石的拦截效果分析

陈海东,叶四桥,曾 彬,张立舟,崔开林,刘 蓓,辛立平 Analysis on the interception effect of neosinocalamus affinis on small falling rocks CHEN Haidong, YE Siqiao, ZENG Bin, ZHANG Lizhou, CUI Kailin, LIU Bei, and XIN Liping

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202206024

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105-112

基于无人机航测的丹霞地貌区危岩结构面识别与三维裂隙网络模型

Identification of dangerous rock structural planes and fracture network model in Danxia landform based on UAV aerial survey: A case study at simianshan scenic area of Chongqing

熊开治,任志远,赵亚龙,杨忠平,张黎健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 62-69

北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析

Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing 夏相骅, 刘德成, 李玉倩, 高雪媛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 28-34

基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟

Numerical simulation of impact resistance of debris flow dam: A case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province

刘兴荣,魏新平,陈豫津,王翔宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 78-83

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

土质滑坡地表倾斜变形特征与基于MEMS的倾斜变形监测技术初探

Evolution of deformation and monitoring techniques of surface tilt for soil landslides using MEMS technique 刘晓宇, 樊智勇, 吴疆 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 69-77



关注微信公众号,获得更多资讯信息

第 34卷第 5期	中国地质灾害与防治学报	Vol. 34 No. 5
2023年10月	The Chinese Journal of Geological Hazard and Control	Oct., 2023

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202206024

陈海东,叶四桥,曾彬,等. 慈竹对小型落石的拦截效果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(5): 97-106. CHEN Haidong, YE Siqiao, ZENG Bin, et al. Analysis on the interception effect of neosinocalamus affinis on small falling rocks[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(5): 97-106.

慈竹对小型落石的拦截效果分析

陈海东^{1,2}, 叶四桥^{1,3}, 曾 彬^{1,3}, 张立舟¹, 崔开林¹, 刘 蓓¹, 辛立平¹ (1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆高速集团有限公司, 重庆 401121; 3. 重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾 重庆市高校市级重点实验室, 重庆 400074)

摘要:落石灾害是我国西南地区常见的一种小型崩塌。落石对下方公路、桥梁、铁路等基础设施安全造成严重威胁。因此,如何对落石进行有效的拦截就显得尤为重要。常见的拦截设施,如拦石沟,拦石网,挡墙等,在布设时极易受地形、施工等因素的限制,有时难以大面积地布置,导致拦挡效果大为减弱。我国的西南地区生长着大量慈竹,慈竹具有生长快、繁殖能力强、抗弯折等特点,对落石具有很好的拦截效果。文章通过模型试验与数值模拟相结合的方法,对慈竹的抗冲击能力进行了研究并提出了慈竹拦截小型落石的方案。结果如下:(1)慈竹破坏所需能量随着直径和壁厚的变大而上升,随着年龄、长重比和长径比的增大而降低;(2)一丛慈竹在抗冲击过程中最少能消耗3975.55J能量,最多能消耗10890.88J能量;(3)结合 CRockfall软件进行慈竹落石拦截效应计算,结果显示拦截边坡高度43m、直径0.5m的危岩,需栽种2列3行6丛慈竹。

关键词:慈竹;落石灾害;危岩治理;冲击能量;数值模拟

中图分类号: P642.21 文献标志码: A 文章线

文章编号: 1003-8035(2023)05-0097-10

Analysis on the interception effect of neosinocalamus affinis on small falling rocks

CHEN Haidong^{1,2}, YE Siqiao^{1,3}, ZENG Bin^{1,3}, ZHANG Lizhou¹, CUI Kailin¹, LIU Bei¹, XIN Liping¹
(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Expressway Group Co. Ltd., Chongqing 401121, China; 3. Key Laboratory of Geological Hazards Mitigation for Mountainous Highway and Waterway, Chongqing Municipal Education Commission, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Dangerous rock disaster is prevalent geological hazard in southwest China. Under the influence of gravity, dangerous rock masses can easily trigger rockfalls, posing a significant threat to infrastructure such as roads, bridges, and railways. Therefore, it is crucial to effectively intercept rockfalls. Common interception facilities, including stone-blocking trenches, stone-blocking nets, and retaining walls, are often constrained by terrain and construction limitations, making it difficult to implement them on a large scale and resulting in reduced interception effectiveness. The southwestern region of China is rich in Cizhu bamboo, which exhibits rapid growth, strong reproductive capabilities, and resistance to bending, rendering it highly effective in intercepting falling rocks. This study employs a combination of model testing and numerical simulation to

收稿日期: 2022-06-20;修订日期: 2022-10-09 投稿网址: https://www.zgdzzhyfzxb.com/

基金项目:重庆市研究生导师团队建设项目(JDDSTD2022009)

第一作者:陈海东(1997-),男,重庆石柱人,硕士研究生,主要从事岩土工程防灾减灾方面研究。E-mail: 1217430861@qq.com

通讯作者:叶四桥(1978-),男,湖北孝感人,博士(后)、教授,博士生导师,主要从事岩土工程防灾减灾方面研究和教学工作。 E-mail: yesiqiao@cqitu.edu.cn

中国地质灾害与防治学报

investigate the impact resistance of Cizhu bamboo and proposes a strategy for using Cizhu bamboo to intercept small-scale rockfalls. The research findings are as follows: (1) The energy requirements of Cizhu bamboo increase with diameter and wall thickness, while decreasing with age, length-to-weight ratio, and aspect ratio. (2) A cluster of Cizhu bamboo can consume a minimum of 3 975.55 J and a maximum of 10 890.88 J of energy during impact resistance. (3) Utilizing the CRockfall software, the interception effect of Cizhu bamboo on rockfalls is calculated, indicating that a slope with a height of 43 m and a dangerous rock of 0.5 m in diameter requires the planting of 2 rows, 3 lines, and 6 clusters of Cizhu bamboo.

Keywords: neosinocalamus affinis; dangerous rock disaster; dangerous rock treatment; shock energy; numerical simulation

0 引言

落石灾害是我国山区三大地质灾害之一,已成为我 国山区经济社会建设和发展的重要制约因素^[1]。受特 殊地质和气候条件影响,西南地区发育有我国近 1/3 的 地质灾害点^[2],其中落石灾害异常频发。据统计,仅重 庆市万州城区及其周边就分布有 20 余处危岩带包括大 大小小约 3 000 多个危岩。三峡库区和西部川藏地区 危岩分布的数量之多、范围之广,已经严重影响山区经 济社会建设和山区人民生命财产安全。

我国在危岩治理技术上已经发展得相对成熟,现今 危岩治理技术主要分为两大类:主动防治和被动防治。 主动防治技术主要包括主动防护网、清除、锚固、支 撑、封闭岩腔等;被动防护主要包括被动防护网、截石 沟、挡石墙、拦石栅栏等。此外,一些学者还对天然林 木用于危岩拦截的效果进行了研究。Dorren 等^[3-5]通过 进行现场试验和数值模拟,研究了落石在经过不同种树 木和不同直径树木拦截后所消耗的能量。STOKES 等^[6] 认为用树木拦截落石是一种有效治理落石灾害的办法, 但是不同树木对危岩的拦截能力又各不相同,造成这种 差异的主要参数有,树木的稳定性和根系的生长特点、 树干抵抗冲击破坏的能力等。黄润秋等^[7]通过滚石与 树木碰撞概率的研究基础上,得出了用树木拦截落石时 所需树木排数的计算方法。

慈竹是日常生活中常见的森林资源,它遍布于三峡 库区和西部山区,具有生长快、成材早、繁殖力强、产 量高、体轻质坚、下粗上细,高而不折、嘴尖皮厚腹中 空,抗弯抗扭能力强等诸多特征。韩国刚等^[8]研究了四 川慈竹的密度,发现四川慈竹气密度和干密度从基部到 梢部逐渐增大且慈竹竹竿密度随着年龄的增大而增 大。汪淑芳等^[9]通过对1~5a竹龄的慈竹进行随机取 样测其含水率,发现慈竹竹秆的含水率随其竹龄的增加 而逐渐降低;从基部到梢部,随秆高的增加而呈现下降 趋势。杨喜^[10]用单根纤维拉伸和纳米压痕技术等手段, 得出梁山慈竹弹性模量和顺纹抗压强度随着年龄的增 大呈现先增大后减小的结果。谢九龙等^[11-12]通过对四 川庐山慈竹的物理力学性质进行研究,发现慈竹年龄 在3a时竹杆的密度、顺纹抗压强度和抗剪强度达到最 大,2a时最小。杜文君^[13]对黔北地区的各种竹子进行 调查研究,发现慈竹的各种顺纹力学性质在丛生竹属于 较好的。

目前关于慈竹对危岩的拦截效果研究没有文献可 以参考。黄志良等^[14]在生态防护中提到在公路边坡种 植慈竹来拦截落石,但是没有具体说明能拦截落石的大 小和其他参数。鉴于此,本文采用单根慈竹抗冲击实验, 对不同年龄、直径、壁厚、径厚比、长径比和冲击位置的 慈竹破坏时需要的能量进行了系统的研究,并推算出一 丛慈竹所消耗的能量。以此为基础将其运用于危岩治 理,在边坡缓坡段以合理的间距栽种慈竹,不仅能实现 防治危岩而且能绿化环境,从而提供一种既环保又经济 的危岩防治方法,促进中国特色防灾减灾事业的发展^[15]。

1 单根慈竹抗冲击试验

1.1 试验目的

由于对一丛慈竹进行现场试验的难度较大且各种 影响因素变量难以控制,现考虑用单根慈竹进行抗冲击 试验。研究不同年龄、直径、壁厚、径厚比、长径比和 冲击位置的慈竹破坏时需要的能量,得出不同慈竹砸折 时所需能量,然后依据一丛慈竹的年龄组成、根数、直 径估计出一丛慈竹能消耗的能量。最后在一丛慈竹拦 截能力的基础上,对慈竹进行栽种、布置,从而确定拦 截能力和拦截方案。

1.2 试验过程

将慈竹从根部往上 50 cm 左右砍下, 去掉多余枝 叶, 留下 3 m 长的竹竿, 沿水平方向进行固定。将落石 试件提升至不同高度, 自由落下对竹竿进行冲击, 直至 竹竿破坏为止。试验时, 所使用的慈竹遵循砸一次没有 出现损伤就继续使用该慈竹, 若出现损伤而慈竹没有 被砸折就换同竹龄、同直径的竹子进行试验, 以保证试 验条件的可比性。落石试件为 C30 混凝土浇筑, 直径 0.2 m, 质量 8.78 kg 的球体(图 1)。试验过程如图 2、图 3 所示, 示意图见图 4。



图 1 落石试件 Fig. 1 Falling stone test specimen



图 2 固定慈竹 Fig. 2 Diagram of fixed smash bamboo

1.3 试验数据及结论

每个试验分别对 74 根慈竹进行抗冲击试验,其中 新生竹 44 根,老竹 30 根。按照《岩土工程勘察规范》 (GB50021—2019)^[16]对各个因素影响下的能量取标准值。

$$\phi_{\rm m} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \phi_i}{n} \tag{1}$$

$$\sigma_{\rm f} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^{n} \phi_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} \phi_i\right)^2}{n} \right]}$$
(2)

$$\delta = \frac{\sigma_{\rm f}}{\phi_{\rm m}} \tag{3}$$

式中: ϕ_m ——参数的平均值;

 $\sigma_{\rm f}$ ——岩土参数的标准差;

δ——参数的变异系数。

参数的标准值 (φ_k) 可按下列方法确定:



图 3 落石冲击慈竹 Fig. 3 Falling rocks impact on smash bamboo



图 4 试验全要素示意图 Fig. 4 Schematic diagram of full-factor experimental design

$$\phi_k = \gamma_s \phi_m \tag{4}$$

$$\gamma_{\rm s=}1 \pm \frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}}\delta\tag{5}$$

式中: *t_a*——统计学中的学生氏函数的界限值, 一般取置信概率为 95%。

为了便于应用,也为了避免工程上误用统计学上的 过小样本容量,在规范中一般不宜出现学生氏函数的界 限值。因此,通过拟合求得下面的近似公式(注:式中正 负号按不利组合考虑):

$$\frac{t_{\alpha}}{\sqrt{n}} = \left\{ \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right\}$$
(6)

从而得到实用公式:

$$\gamma_{\rm s} = 1 \pm \left\{ \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right\} \delta \tag{7}$$

1.3.1 试验结果

通过对新生竹和老竹的直径、壁厚、年龄、长重比、 长径比、砸折位置、径厚比分别进行抗冲击试验,然后 对其最大值、最小值、平均值进行分析发现如下规律: 新生竹和老竹砸折所需能量随着直径和壁厚的变大而 上升(表1)。慈竹随着年龄的增大最大值和平均值都相 应减小而最小值出现少量增大的波动但总体还是减小; 新生竹和老竹随着长重比和长径比的增大而降低,长径 比增大表明相同长度的慈竹直径更大,这符合新生竹和 老竹砸折所需能量随着直径变大而增大规律;新老慈竹 随着长径比的增大而降低,查阅慈竹相关物理力学试验 相关论文可推得可能是由于慈竹的含水量增大而力学 性质减弱导致(表 2)。新生竹和老竹的砸折位置和径厚 比对砸折慈竹所需能量的影响没有明显规律(表 3)。

通过对新生竹和老竹抗冲击试验各个因素的能量数据统计,发现砸折慈竹所需能量分布在197.90~344.18 J,其中主要分布在232.32~258.13 J(图 5—11)。

1.3.2 破坏模式

通过对不同慈竹的抗冲击试验发现慈竹的破坏模 式为纤维束与薄壁组织之间的界面破坏,裂纹沿界面纵 向扩展,纤维束之间发生纵向劈裂。裂纹沿着纵向扩 展,而纤维束没有砸断(图 12)。

表1 慈竹直径、壁厚试验结果

Table 1 Experimental results of diameter and wall thickness of bam	boo
--	-----

试验参数		数值	最大值/J	最小值/J	平均值/J	样本/根	平均值/J	标准差	变异系数	修正系数	标准值/J
		35 ~ 40	275.34	197.90	251.68	4	251.68	36.76	0.146 1	0.832 9	209.61
	东止竹	$51 \sim 45$	283.95	223.71	253.11	12	253.11	20.90	0.082 6	0.956 7	242.15
	初土1]	$46 \sim 50$	309.76	223.71	255.44	16	255.44	22.16	0.086 7	0.961 5	245.6
直径/mm		51 ~ 55	344.18	240.92	268.06	13	268.06	27.85	0.103 9	0.948 0	254.13
		39 ~ 40	240.92	206.51	223.71	3	223.71	17.21	0.076 9	0.884 4	197.84
	老竹	$41 \sim 45$	258.13	215.11	240.92	11	240.92	15.39	0.063 9	0.964 7	232.42
		46 ~ 51	275.34	223.71	241.54	15	245.22	18.32	0.074 7	0.965 6	236.78
		4	275.34	197.90	250.60	8	250.60	26.22	0.104 6	0.929 3	232.89
	Ar 11.44	5	283.95	223.71	246.45	14	246.45	19.86	0.080 6	0.961 4	236.94
	新生们	6	283.95	240.92	260.43	15	260.43	13.98	0.053 7	0.975 3	253.99
壁厚/mm		7~9	344.18	240.92	281.79	8	281.79	33.09	0.117 4	0.920 7	259.44
		4	249.53	206.51	240.92	3	238.05	13.15	0.055 2	0.917 0	218.29
	老竹	5	258.13	223.71	240.92	15	240.35	18.24	0.075 9	0.965 0	231.94
		6 ~ 7	275.34	240.92	258.13	12	243.79	19.18	0.078 7	0.958 7	233.73

注:竹龄小于等于1 a的为新生竹,竹龄2~3 a的为老竹。

表 2 长重比、年龄和长径比试验结果

Table 2 Experimental results of length-to-weight ratio, age and length-to-diameter ratio

试验参	参数	数值	最大值/J	最小值/J	平均值/J	样本/根	平均值/J	标准差	变异系数	修正系数	标准值/J
在影/。	新生竹	1	344.18	197.90	258.13	44	258.13	24.95	0.096 7	0.975 2	251.73
-т-ш 7 /а	老竹	2 ~ 3	275.34	206.51	241.50	30	241.50	17.78	0.073 6	0.976 3	235.77
		0.9 ~ 1.3	344.18	240.92	269.60	15	269.60	28.66	0.106 3	0.951 0	256.40
	新生竹	1.4 ~ 1.8	275.34	223.71	254.16	14	254.44	18.40	0.072 3	0.965 3	245.63
长重比		1.9 ~ 2.7	283.95	197.90	250.60	16	250.60	23.70	0.094 6	0.958 0	240.07
$/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg}^{-1})$		1.2 ~ 1.3	275.34	223.71	245.70	9	245.70	22.81	0.092 8	0.941 9	231.43
	老竹	1.5 ~ 1.6	258.13	215.11	241.78	10	241.78	14.88	0.061 5	0.964 0	233.07
		1.7 ~ 2.2	258.13	206.51	237.79	11	237.79	16.45	0.069 2	0.961 8	228.71
		$65 \sim 70$	292.55	240.92	259.85	10	259.85	18.50	0.071 2	0.958 3	249.02
	新生竹	71 ~ 76	344.18	249.53	278.21	9	278.21	30.42	0.109 4	0.931 6	259.17
	柳工口	77 ~ 85	283.95	223.71	253.21	14	253.21	18.71	0.073 9	0.964 6	244.25
长径比		86 ~ 103	275.34	197.90	247.37	12	247.37	25.19	0.101 8	0.946 6	234.17
		$65 \sim 70$	275.34	223.71	251.44	9	251.44	19.61	0.078 0	0.951 2	239.17
	老竹	71 ~ 79	258.13	223.71	237.79	11	237.79	13.48	0.056 7	0.968 7	230.34
		81 ~ 97	258.13	206.51	236.62	10	236.62	18.25	0.077 1	0.954 8	225.93

注: 竹龄小于等于1 a的为新生竹, 竹龄2~3 a的为老竹

					or impace	position ai					
试验参数 数值		数值	最大值/J	最小值/J	平均值/J	样本/根	平均值/J	标准差	变异系数	修正系数	标准值/J
		0.5 ~ 0.9	344.18	223.71	260.82	16	260.82	26.79	0.102 7	0.954 4	248.92
	新生竹	$1.0 \sim 1.5$	275.34	197.90	251.51	13	251.51	23.6	0.093 9	0.953 0	239.70
油土台署/m		$1.7 \sim 2.6$	309.76	223.71	260.82	16	260.82	24.69	0.094 6	0.958 0	249.85
11山区直/Ш		0.6 ~ 0.9	275.34	215.11	246.66	9	246.66	20.63	0.083 7	0.947 7	233.75
	老竹	$1.0 \sim 1.5$	266.74	223.71	243.79	9	243.79	15.51	0.063 6	0.960 2	234.08
		1.6 ~ 1.9	258.13	206.51	235.90	12	235.90	17.00	0.072 0	0.962 2	226.99
		6 ~ 7	309.76	240.92	268.89	8	268.89	20.44	0.076 0	0.948 6	255.08
	Arr 1 11	8	344.18	233.71	266.74	13	266.74	31.42	0.1178	0.941 1	251.02
	新生们	9	283.95	197.90	250.24	12	250.24	23.91	0.095 5	0.949 9	237.71
径厚比		10 ~ 13	275.34	223.71	249.53	12	249.53	15.99	0.064 1	0.966 4	241.14
11.7776		7	275.34	223.71	246.05	5	246.08	18.85	0.076 6	0.927 3	228.19
	-lat 1.1.	8	275.34	206.51	234.66	11	234.66	20.03	0.085 3	0.952 9	223.60
	 花竹	9	266.74	223.71	245.84	7	245.84	15.60	0.063 4	0.953 1	234.30
		$10 \sim 12$	258.13	223.71	244.61	7	244.61	15.60	0.063 8	0.952 8	233.07

表 3 冲击位置和径厚比试验结果 Table 3 Experimental results of impact position and diameter-to-thickness ratio

注: 竹龄小于等于1 a的为新生竹, 竹龄2~3 a的为老竹



图 5 不同直径慈竹被砸折所需能量

Fig. 5 The energy required to smash bamboo in different diameters



30 ■ 新生竹 ■ 老竹 20 频数 10 0 197.90~ 232.32~ 266.74~ 301.15~ 258.13 292.55 223.71 344.18 砸折慈竹所需要的能量/J

图 7 不同年龄慈竹被砸折所需能量

Fig. 7 The energy required to smash bamboo at different ages



Fig. 8 The energy required to smash bamboo at different length-to-weight ratios

 \cdot 101 \cdot

· 102 ·



图 9 不同长径比慈竹被砸折所需能量





图 10 不同冲击位置慈竹被砸折所需能量

Fig. 10 The energy required to smash the bamboo at different impact positions





图 12 慈竹的破坏模式图 Fig. 12 Diagram of the bamboo destruction pattern

2 单根慈竹抗冲击数值模拟

2.1 有限元模型的建立

慈竹是由维管束和薄壁细胞组成的有机复合材料, 因此应用复合材料力学知识来分析竹材的抗冲击过 程^[17]。碰撞主要研究分析大变形部分,建模时变形体为 主要的研究对象。通过慈竹的物理模型试验可以看出 慈竹变形远大于落石,因此慈竹为主要研究对象,建模 时不考虑落石变形,将其设置成刚体。

落石模型直径为 0.2 m、质量为 8.78 kg, 慈竹模 型选用的直径为 *D*=5 cm, 长度为 *L*=2 m, 壁厚为 δ= 0.005 m(图 13)。运用 ANSYS/LS-DYNA, 慈竹用 4 节 点的 SHELL163 薄壳单元和 elytschko-Tsay 单元算法, 网格尺寸采用 0.02, 划分后有 1 598 个网格单元, 落石 试件用 8 节点的 SOLID164 实体单元, 划分后有 4 043 个网格单元。落石设置成沿 Y 轴负方向运动, 初速度 为-7.6 m/s。



Fig. 13 Finite element model of smash bamboo

2.2 数值模拟结果

2.2.1 冲击过程

落石经过一段距离后与慈竹发生碰撞, 慈竹经冲击 后获得一定速度。由于速度远小于落石, 大概经过 0.034 s 后, 慈竹受冲击处首先产生破裂, 同时四周上下 出现裂纹, 竹竿的位移变形也逐渐变大, 最大达到 22 cm。最后落石滚落到地面, 竹杆回弹到碰撞前位置 (图 14—15)。



图 14 碰撞过程 Fig. 14 Illustration of collision process



图 15 碰撞过程应力变化 Fig. 15 Illustration of changes in stress during the collision process

2.2.2 能量变化

以直径为5 cm,长度为2 m,壁厚为0.005 m 为例,落 石试件能量最大值为247.79 J,经碰撞后剩余46.806 J, 碰撞过程中大约损失了200 J 能量(图 16)。



慈竹在冲击过程中总能量最大时增加到了 207.23 J, 碰撞完后能量逐渐减少(图 17)。慈竹的内能和总能量 的变化趋势大致相同,总体先上升后下降(图 18)。



Fig. 18 Curve of internal energy variation in bamboo

从慈竹动能变化曲线中可知,慈竹动能变化分为三段,中间段动能增加速率大于开始段,在慈竹内能最小时动能达到最大值,此后以略小于中间段增加速率减小(图 19)。





2.2.3 其他工况模拟结果

由于砸折位置对砸折慈竹的能量影响没有明显规

表 4 不同直径不同厚度模拟结果

律而慈竹年龄对砸折慈竹的能量影响目前无法准确模

	表 4	L)),
--	-----	----	----

		Table 4 Simulat	tion results for dif	fferent diameters	and thicknesses		
直径/cm	厚度/m	最大值/J	最小值/J	位移/cm	总能量/J	内能/J	动能/J
	0.003	240.86	110.670	-14.51	145.53	143.60	1.932 7
5	0.004	247.79	10.194	-14.58	187.17	180.43	16.878
3	0.005	269.17	52.546	0.12	224.54	211.99	14.560
	0.006	338.63	37.174	12.50	314.85	301.52	13.328
	0.003	276.50	102.050	-12.40	86.27	53.23	33.035
6	0.004	276.50	30.800	-0.18	158.52	116.95	41.572
0	0.005	314.60	63.086	0.11	97.08	73.519	24.421
	0.006	372.06	18.030	0.19	155.13	116.19	38.930
	0.003	299.07	77.015	-24.83	107.97	75.00	32.939
7	0.004	306.78	44.891	-46.61	103.42	85.59	17.833
,	0.005	330.53	37.910	0.10	142.89	126.14	32.950
	0.006	414.25	0.830	-0.11	177.09	147.70	29.392

2.3 物理模型试验与数值模拟对比

对得到的数值模拟结果,以位置1m直径为50cm, 厚度为5mm的物理模型试验进行了对比。在模型试验中,此种情况下落石破坏一根慈竹所需的能量约为 234.44 J,数值模拟的结果是 224.54 J,二者相差很小。

本文又在相同的工况下,只改变慈竹的壁厚,进行 了物理模型和数值模拟试验。试验结果表5所示。

从表 5 可以看出,物理模型试验与数值模拟在落石 冲击慈竹破坏所需能量上具有良好的一致性,数值模拟 的计算结果略低于真实值。

表 5 物理模型试验与数值模拟对比 Table 5 Comparison between physical model experiment and numerical simulation

原 帝/	慈竹破坏所	需能量/J
序度/m -	物理模型试验	数值模拟
0.003	153.87	145.53
0.004	198.55	187.17
0.005	234.44	224.54
0.006	328.62	314.85

3 慈竹拦截落石方案

3.1 一丛慈竹消耗能量估算

根据单根慈竹抗冲击试验和数值模拟得到直径小于4 cm 的慈竹最小消耗 180.97 J 能量,直径在 4-6 cm 的慈竹最小消耗 239.83 J 能量,直径在 6-8 cm 的慈竹 最小消耗 251.60 J 能量,然后根据前人对慈竹丛密度的 调查,参考曹小军等^[18]对四川慈竹以每 667 m² 密度对 33 个调查样地采用欧氏距离类平方法进行聚类分析得 到一丛慈竹最少能消耗 3 975.55 J 能量,最多能消耗 10 890.88 J 能量(表 6)。

表 6 一丛慈竹消耗能量 Table 6 The energy consumption of a bamboo cluster

		-	_		-	
根/丛	<4:4 ~ 6:6 ~ 8cm	<4	4~6	6~8	J/丛	
26	21.38:58.15:20.17	6	15	5	5 941.27	
18	31.14:61.83:6.92	6	11	1	3 975.55	
30	72.18:26.99:0.83	22	8	0	5 899.98	

3.2 慈竹拦截落石方案

慈竹拦截落石适用于陡崖下方有缓坡段或者陡崖 与保护目标中间有缓冲带可用于大量栽种慈竹的情况。

CRockfall 是由重庆交通大学叶四桥教授及其团队 研究开发的一款落石运动分析与被动防治辅助设计软 件。该软件在落石运动分析计算精度和速度上比起国外 软件做了很大的提升,且加入了被动防治辅助设计系统。

现有一边坡(高度 43 m, 平均坡角 52)顶部有一块 危岩(直径 0.5 m, 重度 22.0 kN/m³)(图 20)。边坡由上 到下各个坡段的详细参数见表 7。



设落石横向偏移比为 0.2, 计算次数为 100 次。计 算结果见图 21。

Table 7 Falling rock section information										
序号	水平投影长度/m	竖向投影长度/m	坡段长/m	坡角/(°)						
1	9.8	0	9.800	-0						
2	1.6	8.2	8.355	78.959						
3	2.1	7.6	7.885	74.554						
4	3.9	11.0	11.671	70.478						
5	4.0	8.1	9.034	63.719						
6	14.1	6.6	15.568	25.084						
7	25.8	1.7	25.856	3.770						
8	25.7	0.3	25.702	-0.669						

表 7 落石坡段信息



图 21 落石运动轨迹图

Fig. 21 Trajectory of rockfall movement

在缓坡位置设置数据采集器,也就是绿线所示位置 (图 20—21),采集数据结果见表 8。

表 8 数据采集器结果 Table 8 Data collector results

参数	最大值	95%保证率值	平均值
速度/(m·s ⁻¹)	10.405	8.848	4.177
冲击能量/kJ	7.794	1.849	0.468
弹跳高度/m	0.766	0.636	0.244
采集点位置/m		27.043	
横向威胁范围/m		3.207	

表中最大冲击能量为 7.794 kJ, 最大弹跳高度为 0.766 m, 横向威胁范围 3.207 m。安全系数取 1.5, 即设 计最大能量为 11.691 kJ, 最大弹跳高度为 1.149 m, 最大 横向威胁范围 4.811 m。

根据一丛慈竹消耗能量为3975.55~10890.88 J, 所以拦截此落石需要最大需要约3丛,最小只需要约 1丛。以最大丛数栽种慈竹,一般一丛慈竹以4m×4m 成林,除去慈竹丛外围零散慈竹,一丛慈竹大约能保护 的横向宽度为3m。所以拦截此落石最大需在(图20— 21)绿线所示位置后栽种2列3行6丛慈竹。

3.3 慈竹拦截与柔性网拦截对比

慈竹拦截落石与被动柔性防护网的工作原理类似, 都是通过自身来抵抗落石的冲击,将落石拦截在其预定 的保护区域以外,已达到对公路、桥梁和房屋等落石直 接冲击目标的保护作用。但两者在对落石的拦截上又 有着各自的优点和缺点。

(1)环保性。竹子作为森林资源的重要组成部分, 其生态作用相对于被动柔性防护网更具优势,生态功能 更强,不会对环境造成破坏。

(2) 经济性。慈竹与被动柔性防护网相比,造价更低,且竹子是可再生资源,生长速度快,用途广泛,具有一定的经济效益。

(3)适应性。慈竹的应用情形应该与森林防治落 石的情形类似,当陡崖或山坡脚部存在平台或危岩威胁 不太严重时,可以通过种植竹丛防治危岩。被动柔性防 护网则可以针对不同的地质条件、环境与地形进行布 设,在地形条件上相对于慈竹来说,有着更好的适应性。

(4) 拦截效果。慈竹可以大面积栽种,相较于被动 柔性防护网,慈竹对于小型的落石防护效果更好。但对 于大型落石,因竹子在抗冲击方面的力学性质要低于柔 性金属网。因此,被动柔性防护网在大型落石的拦截方 面要优于慈竹。

4 结论及建议

(1)经单根慈竹抗冲击试验结果显示砸折慈竹所需 能量随着直径和壁厚的变大而上升;随着年龄、长重比 和长径比的增大而降低,径厚比和砸折位置对砸折慈竹 所需能量的影响没有明显规律。每种影响因素分别有 74 根竹子进行了试验,其中新生竹 44 根,老竹 30 根, 发现砸折慈竹所需能量分布在 197.90~344.18 J,其中 主要分布在 232.32~258.13 J。

(2)经单根慈竹抗冲击数值模拟对比抗冲击试验直 径为 5 cm,长度为 2 m,壁厚 0.005 m 的结果显示,抗冲 击试验中最低消耗 231.94 J,数值模拟结果为 224.54 J。 二者大致相同,对比验证了两种方法结果的可靠性。

(3)根据单根慈竹的抗冲击试验和抗冲击数值模拟 再结合前人对一丛慈竹密度的调查,得到一丛慈竹最少 能消耗 3 975.55 J 能量,最多能消耗 10 890.88 J 能量。

(4) 慈竹拦截落石适用于陡崖下方有缓坡段或者陡 崖与保护目标中间有缓冲带可用于大量栽种慈竹的情况。根据 CRockfall 软件以边坡高度 43 m 危岩直径 0.5 m 为例, 安全系数取 1.5, 计算得出最大能量 11.691 kJ, 最大弹跳高度 1.149 m, 最大横向威胁范围 4.811 m。在 结合一丛慈竹消耗的能量, 最终计算出要拦截此落石最 大需栽种 2 列 3 行 6 丛慈竹。

(5)慈竹栽种后,由于是用于拦截落石,需要定期抚

育管理。包括竹林管护,防止人为偷盗破坏和牲畜践 踏,竹苗补植、合理施肥、培土、合理砍伐(去老留新)等。

参考文献(References):

- [1] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅.危岩落石防治技术体系及其 特点[J].公路,2010,55(7):80-85. [YE Siqiao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Rockfall mitigation techniques and its characteristics [J]. Highway, 2010, 55(7):80-85. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 铁永波,徐伟,向炳霖,等.西南地区地质灾害风险"点面双控"体系构建与思考[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):106-113.[TIE Yongbo, XU Wei, XIANG Binglin, et al. The thoughts on construction of "double-control of point and zone" system of geological hazard risk in southwest China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3):106-113. (in Chinese with English abstract)]
- [3] DORREN L K A, BERGER F. Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts [J]. Tree Physiology, 2006, 26(1): 63 71.
- [4] DORREN L K A, BERGER F, IMESON A C, et al. Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 195(1/2): 165 176.
- [5] DORREN L K A, BERGER F, LE HIR C, et al. Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests [J].
 Forest Ecology and Management, 2005, 215(1/2/3): 183 195.
- [6] STOKES A, SALIN F, KOKUTSE A D, et al. Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 107 – 117.
- [7] 黄润秋,刘卫华,龚满福,等.树木对滚石拦挡效应研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):2895-2901. [HUANG Runqiu, LIU Weihua, GONG Manfu, et al. Study of trees resistance effect test on rolling rock blocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1):2895-2901. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 韩国刚,陈立新,程志华,等.慈竹密度和微纤丝角变异规 律研究[J].木材加工机械,2012,23(4):22-24.[HAN Guogang, CHEN Lixin, CHENG Zhihua, et al. Study on the Tsz bamboo density and the variation of microfibril angle[J]. Wood Processing Machinery,2012,23(4):22-24. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 汪淑芳,梁梓,杨瑶君,等.不同秆龄慈竹竹秆含水率与 生物量的分配特征及其生物量模型的构建[J].西部 林业科学,2013,42(1):42-45.[WANG Shufang, LIANG Zi, YANG Yaojun, et al. Biomass distribution characteristics and model construction of neosinocalamus affinis at different ages [J]. Journal of West China Forestry Science,2013, 42(1):42-45.(in Chinese with English abstract)]
- [10] 杨喜.梁山慈竹多尺度力学性能研究 [D].长沙:中南 林业科技大学, 2014. [YANG Xi. The research on multi-scale

mechanical properties of dendrocalamus farinosus [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]

- [11] 谢九龙,齐锦秋,周亚巍,等.慈竹材物理力学性质研究
 [J].竹子研究汇刊,2011,30(4):30-34. [XIE Jiulong, QI Jinqiu, ZHOU Yawei, et al. A study on bamboo physicomechanical properties of neosinocalamus affinis [J]. Journal of Bamboo Research,2011,30(4):30-34. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 谢九龙,齐锦秋,黄兴彦,等.生长发育进程中慈竹秆形结构及物理力学性质[J].四川农业大学学报,2012,30(1):46-49. [XIE Jiulong, QI Jinqiu, HUANG Xingyan, et al. Culm form structure and physico-mechanical properties of neosinocalamus affinisin growth process [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2012, 30(1):46-49. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 杜文军. 黔北地区主要竹种生长情况及物理力学性能初步研究[D].贵阳:贵州大学,2010. [DU Wenjun. Preliminary study on growth and physical and mechanical properties of main bamboo species in northern Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 黄志良,刘亿,向波.山区高速公路崩塌落石勘察设计 浅析[J].公路交通技术,2010,26(1):12-15.[HUANG Zhiliang, LIU Yi, XIANG Bo. Analysis of survey and design against collapse and rockfall in mountainous expressways [J]. Technology of Highway and Transport, 2010,26(1):12-15. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 陈其针,仲平,张贤,等.构建中国自然灾害防灾减灾新体系[J].水文地质工程地质,2020,47(4):1-4.[CHEN Qizhen, ZHONG Ping, ZHANG Xian, et al. Establishment of an innovative system of natural disaster prevention and mitigation in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4):1-4. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 中华人民共和国建设部.岩土工程勘察规范:GB 50021— 2019 [S].中国建筑工业出版社,2002. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Geotechnical engineering survey specification: GB 50021-2019 [S]. China Architecture and Building Press,2002. (in Chinese)]
- [17] 任海青,张东升,潘雁红.竹材抗压动态破坏过程分析
 [J].南京林业大学学报(自然科学版),2007,31(2): 47-50. [REN Haiqing, ZHANG Dongsheng, PAN Yanhong. Dynamic compressive mechanical behavior of bamboo [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2007,31(2):47-50. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 曹小军,李呈翔,魏素才,等.四川慈竹生长现状调查与分析[J].世界竹藤通讯,2009,7(6):24-28.[CAO Xiaojun, LI Chengxiang, WEI Sucai, et al. Investigation and analysis of Neosinocalamus affinis growth condition in Sichuan [J]. World Bamboo and Rattan, 2009,7(6):24-28. (in Chinese with English abstract)]