

# 球度对落石冲击棚洞贯入深度的影响

王小艳 陈瀛玉 鄢义华 袁昱轩 王鑫

吉林大学建设工程学院 吉林长春 130026

**摘要:** 落石灾害是我国常见的地质灾害之一, 频发的落石灾害造成了我国严重的经济损失。国内外研究现状表明, 落石质量, 冲击速度, 坡面角度, 摩擦系数等均会影响落石冲击棚洞的效果。本文采用控制变量法, 以球度为试验的主要变量, 研究球度对落石冲击棚洞装置时的贯入深度的影响。试验结果表明, 随着球度增大, 贯入深度逐渐减小。  
**关键词:** 落石灾害; 棚洞; 球度; 贯入深度

## Influence of Sphericity on Penetration Depth When Falling Rock Hit the Shed

Xiaoyan Wang, Yingyu Chen, Yihua Yan, Yuxuan Yuan, Xin Wang

College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin, 130026, China

**Abstract:** In China, rockfall is one of the common geological hazards, and frequent rockfall disasters have caused serious economic losses. Current research both domestically and internationally shows that rockfall quality, impact velocity, slope angle, and friction coefficient all affect the effectiveness of rockfall impact protection systems. In this paper, the control variable method was used, with sphericity as the main variable, to study the effect of sphericity on the penetration depth of the rockfall impact protection system. The experimental results show that as sphericity increases, the penetration depth gradually decreases.

**Keywords:** rockfall disaster, shed, sphericity, penetration depth

### 引言

落石是山区常见地质灾害, 具有高发性、难预测性<sup>[1]</sup>。目前国内外对于落石灾害的研究主要集中于落石的形成条件<sup>[1-2]</sup>、运动特性<sup>[3-4]</sup>、冲击力计算<sup>[5-6]</sup>、防护结构设计<sup>[7-8]</sup>等方面。当落石冲击力超过结构承受能力时, 结构会发生破坏<sup>[9]</sup>。为了确保防护结构有效且安全, 研究落石冲击动力响应是十分必要的。国内外学者通过一系列研究表明, 对落石冲击力影响较大的是落石质量和落石冲击高度, 且均与落石冲击力呈正相关<sup>[10]</sup>。然而, 在这些研究落石冲击动力响应实验中, 大多将落石视为质点, 或简化为球体, 忽略了落石形状对于冲击力的影响。

Fityus 等<sup>[11]</sup>将澳大利亚东部山区落石形状分为球体、圆柱体、圆盘体、圆锥体和锥体, 用不同形状落石冲击垫层, 结果表明不同形状的落石会产生不同冲击效果。宋东旭等<sup>[12]</sup>学者将落石形状简化为球体、立方体和长方体, 建立有限元模型进行冲击力对比, 发现落石形状对落石冲击力有显著影响, 长方体和立方体落石的冲击力大于球体落石, 而冲击深度比球体落石小。闫鹏等<sup>[12]</sup>开展了球形、锥形、平头 3 种典型形状落石冲击垫层试验, 得出结论: 平头落石的冲击力最大, 贯入深度最小; 锥形落石的冲击力最小, 贯入深度最大; 球形落石介于两者之间。张瑜等<sup>[13]</sup>则是探究了尖端椭球体、球体、

扁平椭球体形状的落石在冲击砂垫层时对落石冲击力带来的影响, 得出与闫鹏等相似的结论。

本文通过对落石形状的综合考虑, 采用不同球度的落石进行冲击砂垫层试验, 研究落石形状对于落石冲击动力响应的影响。

### 一、试验设计

#### 1.1 试验材料与装置

从临江至长白山沿山公路挑选颜色、光泽、风化程度相同且无节理裂隙的磨圆较好的花岗岩石块若干作为本试验的试验材料。打磨过程中使用的是富格工业款角磨机, 对落石试件的棱角进行打磨, 并控制其质量相同。将打磨好的试件按照球度由小到大从 S1~S5 进行编号标记, 每组试件的球度计算公式如下:

$$S_p = \frac{3\sqrt{\frac{R_2 \times R_3}{R_1^2}}}{3\sqrt{\frac{R_2 \times R_3}{R_1^2}}}$$

$R_1$ : 椭球体的长轴长;  $R_2$ : 椭球体的中轴长;  $R_3$ : 椭球体的短轴长

试验装置主要包括抛射装置和棚洞装置两部分。抛射装置高两米, 顶部为两块矩形木板, 在木板中心有一椭圆孔用以放置落实试件, 当两块木板向两侧移动时,

试件从椭圆孔静止掉落并以一定的速度冲击底部棚洞装置。棚洞装置为  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$  的钢筋混凝土平顶棚洞，上覆  $10\text{cm}$  取自长白山的粒径小于  $0.7\text{mm}$ ，内摩擦角为  $30^\circ$  的砂土垫层。当落石冲击棚洞后在砂土垫层中留下一个近似椭圆的沙坑，沙坑的深度即为落石冲击棚洞的贯入深度。

### 1.2 试验方案

现有研究表明，落石质量、冲击高度、速度、角度、抛射轨迹以及棚洞顶部垫层的物理力学性质等均对落石冲击效果有一定影响。因此本试验采用控制变量法，改变其球度，从而研究球度对落石冲击的影响。

为研究不同球度的落石对棚洞的冲击效果，本次共使用了 5 种不同球度的椭球体进行试验。将所有打磨好的试件依次静止抛落，保证所有试件以长轴方向垂直于棚洞表面中心冲击棚洞，且在冲击棚洞时的冲击速度、角度和位置一致。试验过程中，尤其需要注意落石试件冲击棚洞时的角度，部分试件下落过程中其角度会发生偏转，导致试件冲击棚洞的角度发生变化，这种情况要重复抛射。其次因重复抛射，砂土垫层会因此变得密实，为保证实验结果的准确性，在每次抛射完毕后要进行松砂。

抛射完成后，在底部砂土垫层中冲击形成具有一定深度的沙坑，测量并记录每组落石试件冲击棚洞的贯入深度，以每组沙坑中心最大深度处的数据为本次试验的贯入深度数据，测量并取其贯入深度的平均值。

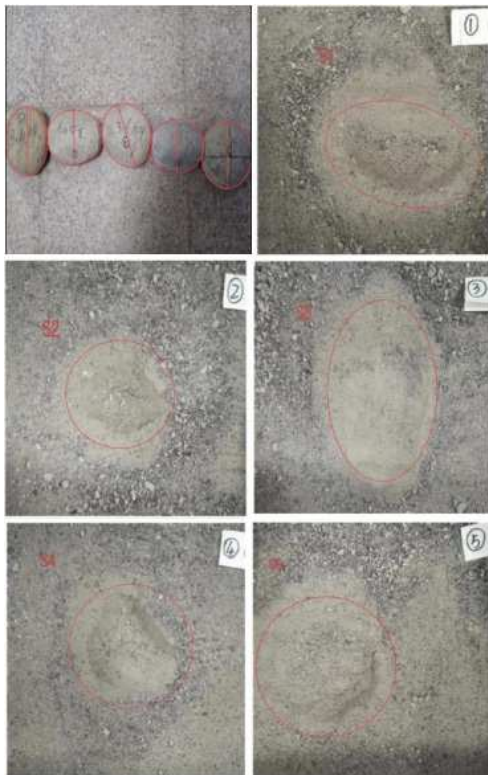


图 1 落石试件及其抛射

Fig.1 Falling rock specimens and it's ejection

## 二、试验结果分析

试验结束后，对五组不同球度的落石试件冲击棚洞装置时的贯入深度结果进行记录分析。本次试验只研究了球度从  $0.6 \sim 1.0$  的五组不同球度的落石冲击效应。其贯入深度从  $3.4\text{cm} \sim 2.12\text{cm}$  不等。具体如下图所示：

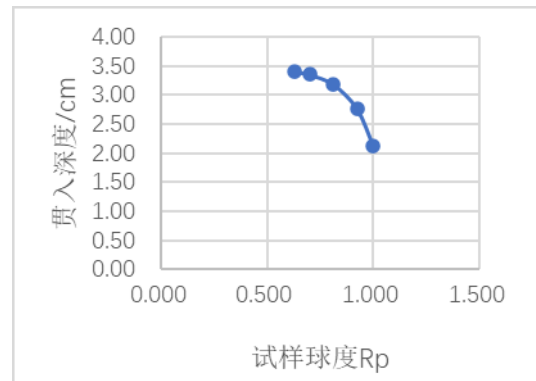


图 2 贯入深度随球度变化曲线

Fig.2 Penetration depth varies with sphericity

由试验结果可知，在落石试件的质量相同，冲击速度相同，冲击角度相同以及砂土垫层的物理力学系数相同的情况下，落石冲击棚洞结构时的贯入深度随落石球度增大而减小。当落石试件为球体时，其贯入深度最小。

Shen 等<sup>[15]</sup>等采用离散元方法进行不同球度的落石冲击砂垫层试验，结果表明落石的冲击力和贯入深度与球度呈正相关。但是未保证不同球度的落石应具有相同的体积（颗粒密度）。

本试验只研究球度  $0.6 \sim 1.0$  的落石试件，其他球度范围内落石贯入深度随球度变化关系不予讨论。

## 三、结论

本试验主要在其他参数条件相同的条件下探讨球度对落石冲击棚洞结构时的贯入深度的影响，得出如下结论：

- (1) 在本文试验的前提条件下，在其他参数条件相同的基础上，落石冲击棚洞结构的贯入深度随落石球度增大而减小。
- (2) 球度对落石冲击棚洞贯入深度的影响是独立的，不受其他条件的影响。

### 参考文献：

- [1] 张自标, 陈钦宗. 公路崩塌落石灾害机理及防治 [J]. 交通世界 (建养·机械), 2014(09):80-81. DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/ut.2014.09.021.
- [2] 李亨, 舒伟富, 谢力欢, 郭代泉, 袁明. 某公路边坡落石形成条件及运动特性研究 [J]. 重庆建筑, 2023, 22(01):58-60.
- [3] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石运动过程偏移与随机特性的试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2011, 32(03):74-79.

[4] 黄俊光, 张帅. 基于动力有限元法的落石运动轨迹研究 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38(11): 73-79+93.

[5] Labiouse V., Heidenreich B.. Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2009, 9(104).

[6] 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(06): 56-62.

[7] Francesco Calvetti. Rockfall shelters covered by granular layers [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2011, 15(sup1).

[8] 严广艺, 付兵先. 3种隧道洞口落石防护方案对比分析 [J]. 铁道建筑, 2020, 60(03): 54-58.

[9] 张瑜, 何柏, 谢凌志, 赵鹏. 不同形状落石冲击砂垫层试验结果及分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(32): 14347-14352.

[10] 王林峰, 唐红梅, 唐芬, 叶四桥. 基于正交设计的不同垫层落石冲击力试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2017, 38(05): 16-21.

[11] 柏雪松, 李俊峰, 祁小博, 陈红旗, 刘红岩. 落石冲击棚洞结构的动力响应研究 [J]. 公路交通科技, 2020, 37(08): 73-80.

[12] S.G. Fityus, A. Giacomini, O. Buzzi. The significance of geology for the morphology of potentially unstable rocks [J]. *Engineering Geology*, 2013, 162.

[13] 宋东旭. 落石冲击隧道洞口结构形状因素影响研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(09): 34-37. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2021.09.011.

[14] Weigang Shen, Tao Zhao, Feng Dai, Mingjing Jiang, Gordon G.D. Zhou. DEM analyses of rock block shape effect on the response of rockfall impact against a soil buffering layer [J]. *Engineering Geology*, 2018, 249.

作者简介: 第一作者: 王小艳, 女, 吉林大学建设工程学院本科生.

基金项目: 吉林大学大学生创新训练项目基金

Support by Jilin University College Student Innovation Training Project Fund.