

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.03.001

落石作用下岩溶隧道衬砌结构响应试验研究

祝方才¹, 何文², 杨志佳¹, 刘冬², 罗睿³

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 中铁北京工程局集团第二工程有限公司, 湖南 长沙 410116; 3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 以四川某高速公路岩溶隧道为工程背景, 采用相似理论构建室内缩尺模型, 研究了不同工况下落石对隧道护拱和衬砌结构的影响。通过高速摄影仪捕捉落石掉落瞬间的运动轨迹, 同时利用应变片和动态信号测试分析系统监测了衬砌结构的应变响应, 并利用加速度传感器研究了结构的加速度响应。研究发现, 落石的反弹能量逐渐衰减导致其反弹高度减小; 衬砌结构拱顶位置的加速度与位移响应明显, 且随着落石质量和下落高度增加, 衬砌结构的应变变化显著增加。

关键词: 岩溶隧道; 支护结构; 落石; 动力响应; 缩尺模型试验

中图分类号: TU457; U453 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2025)03-0001-07

引文格式: 祝方才, 何文, 杨志佳, 等. 落石作用下岩溶隧道衬砌结构响应试验研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(3): 1-7.

An Experimental Study on the Mechanical Response of Karst Tunnel Lining Structure Under a Rockfall Action

ZHU Fangcai¹, HE Wen², YANG Zhijia¹, LIU Dong², LUO Rui³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 2. 2nd Engineering Co., Ltd., China Railway Beijing Group Engineering Co., Ltd., Changsha 410116, China; 3. School of Resources, Safety and Environmental Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: Taking the karst tunnel on a highway in Sichuan Province as the engineering target, an indoor scaled model is constructed by using similarity theory to study the effects of a rockfall action on tunnel arch protection and lining structures under different working conditions. The motion trajectory of a rockfall action is captured by a high-speed camera, with the strain response of the lining structure monitored by using strain gauges and a dynamic signal testing and analysis system, followed by a study on the acceleration response of the structure by using an accelerometer. Research has found that the rebound energy of a rockfall action gradually decreases, leading to a decrease in their rebound height; the acceleration and displacement response of the arch top position of the lining structure are significant, with the strain change of the lining structure increasing significantly with the increase of rockfall mass and height.

Keywords: karst tunnel; supporting structure; rockfall; dynamic response; scale model test

0 引言

落石是隧道工程中常见的地质灾害之一, 落石

冲击^[1-3]不仅会对隧道本身造成损坏, 还会对隧道支护结构造成影响。落石撞击隧道支护结构^[4-5]会对支护结构的稳定性造成威胁, 可能导致支护结构变形、

收稿日期: 2024-03-11

基金项目: 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目 (2022JJ50087)

作者简介: 祝方才, 男, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为边坡稳定和隧道施工, E-mail: zhufangcai@hut.edu.cn

破坏或脱落。特别是在隧道曲线段和坡面，由于地形条件的限制，支护结构的设计^[6]和施工比较复杂，落石的撞击可能造成更严重的影响。

宋东旭^[7-8]依托大岩隧道洞口处明洞工程，以实际棚洞结构样机为基础，对落石冲击下棚洞的接触力、位移、损伤、能量等进行了研究。Yang L.等^[9]通过ABAQUS有限元软件模拟滚落冲击过程，得知棚洞落石不同速度和入射角冲击对混凝土防护结构的接触力和位移影响较大，混凝土防护结构损伤最严重的区域为滚落接触区域，其次是斜腿柱顶和与支柱连接的横梁。B. Bağrıaçık等^[10]采用1/30比例相似模型，室内研究了落石冲击引起的隧道洞口结构变形情况。Wang Y. S.等^[11]研究表明，当坡度为10.5，且坡面湿滑时，结构变形、岩石自重和落石高度之间存在简单的线性关系，而结构变形、岩石自重和落石高度之间呈多重线性关系。S. Sinha等^[12]对冲击载荷下相互平行的双圆形隧道，使用ABAQUS软件，研究了由于冲击载荷的发生而在岩石模型中引起的应力和位移变化情况，发现荷载作用点对隧道的变形有着重要影响。K. Tsuno等^[13]描述了一种定量评估隧道衬砌混凝土块脱落的方法，并在模拟实际隧道条件下采用该方法估算了混凝土块的抗坠能力。

本研究拟运用相似理论制作室内缩尺模型，试验研究岩溶隧道顶部衬砌的力学响应。

1 岩溶落石室内试验模型

本次模型试验以四川某高速公路隧道为参考，采用几何相似比1:20为基础相似比，衬砌结构采用C30钢筋混凝土，试验模型尺寸大小为原型的1/20，纵向长度为0.8 m。隧道衬砌结构断面如图1所示。

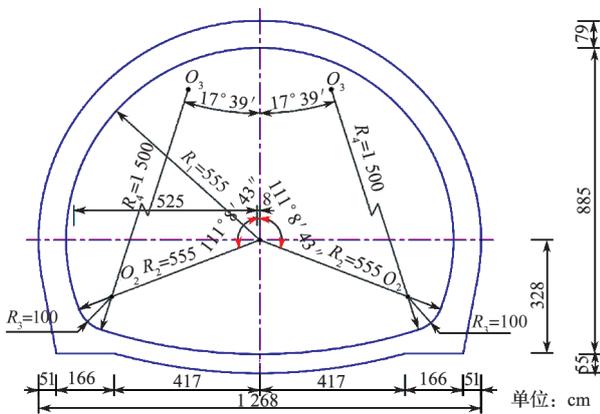


图1 隧道衬砌断面图

Fig.1 Tunnel lining section diagram

1.1 试验材料

1) 衬砌相似材料。为了在模拟试验中准确还原衬砌内部钢筋结构，采用直径为0.8 mm、网格间距

为1 cm的铁丝网进行模拟。为模拟C30混凝土力学特性，采用水胶比为1:1石膏相似材料^[14]，并通过对石膏圆柱体试件进行标准试验，测得其弹性模量为1.54 GPa，抗压强度为1.27 MPa，泊松比为0.2。

2) 围岩相似材料。灰岩是岩溶地区最常见的岩石类型之一，根据现场围岩情况，同样选用相似材料模拟灰岩，根据上述衬砌模型几何相似比20和密度比1.27，采用相似理论得出灰岩的相关力学参数相似比： $C_\sigma=25.4$ 、 $C_E=25.4$ 、 $C_c=25.4$ 和 $C_\phi=1.0$ 。计算得到模拟围岩的物理力学参数要求范围如下：容重为18.11~22.05 kN/m³，抗压强度为1.26~4.92 MPa，弹性模量为(0.08~0.32)×10⁴ MPa，内摩擦角为30~44.6°，黏聚力为0.13~0.25 MPa。

石膏水泥砂浆与灰岩的物理力学性能和化学性质方面都存在着较大的相似性。因此，模型试验选用石膏水泥砂浆作为灰岩的相似材料，水泥为中国建材集团有限公司生产的425普通硅酸盐水泥；砂子为产自湘江株洲段的中河沙，根据《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》^[15]进行筛分试验，测得其细度模数为2.7，筛孔尺寸-累计筛余曲线如图2所示，依照《土工试验方法标准》^[16]中的烘干法测得其含水率为10%；石膏为特级熟石膏粉，细度为200目，最大抗压强度为4.99 MPa。并且按照配比 $w_{水}:w_{砂}:w_{水泥}:w_{石膏}=1.1:5:0.7:0.3$ 进行制样，通过岩石的基本试验测得其各项物理力学参数，具体如表1所示，对比发现，该材料符合计算所得到的参数要求范围，即可被用作模拟围岩的相似材料。

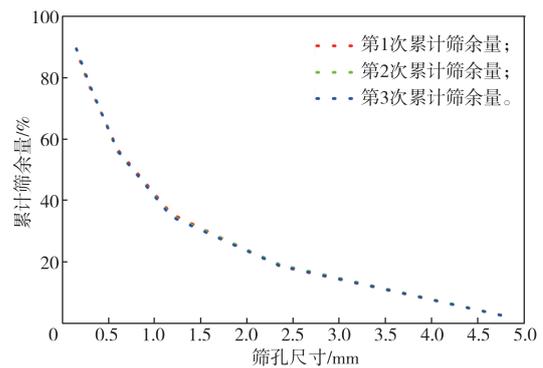


图2 砂的筛孔尺寸-累计筛余曲线

Fig.2 Sieve pore size of sand-cumulative sieve residue curve

表1 相似材料的物性参数

Table 1 Physical properties of similar materials

材料	容重 / (kN·m ⁻³)	抗压强度 / MPa	弹性模量 / (10 ⁴ MPa)	泊松比
灰岩	23~28	32~125	1.8~8	0.18~0.35
模拟灰岩	20.5	3.04	0.164	0.2

1.2 测点布置

本研究中, 采用陕西中航电测仪器股份有限公司生产的 BFH120-3AA-D-D150 型应变片, 其电阻为 $(120.1 \pm 0.1) \Omega$, 灵敏度系数为 $(2.22 \pm 0.1) \%$ 。沿隧道环向方向贴应变片, 将应变片分别贴在衬砌内外侧的拱顶、拱肩、拱腰和仰拱处, 并分别在落石中间位置与沿隧道径向前后各 10 cm 处粘贴了应变片。为防止应变片在模型浇筑过程中被损坏, 在衬砌内外两侧与沿径向对称的拱肩、拱腰位置粘贴了应变片。如图 3、图 4 所示, 图中尺寸单位为 cm。

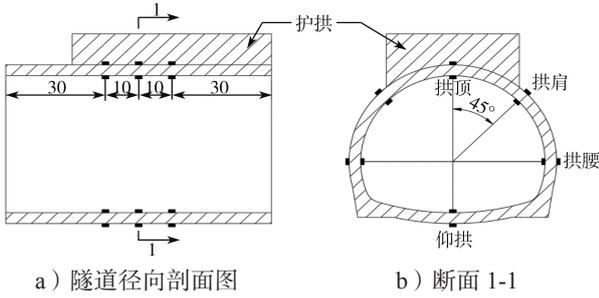


图 3 应变片布置设计图

Fig. 3 Strain gauge layout design diagram



图 4 应变片布置示意图

Fig. 4 Strain gauge layout schematic diagram

加速度传感器为江苏联能电子技术有限公司生产的 CA-YD-109B 压电式加速度传感器, 其安装沿隧道环向方向及落石落点位置进行, 将加速度传感器分别安装在衬砌内侧的拱顶、拱腰和仰拱处。首先, 在衬砌内部用 502 胶水将螺杆的一头粘牢, 再用 AB 胶将螺杆与衬砌相连的周边加固, 待胶水凝固后便安装加速度传感器。加速度传感器布置见图 5, 图中单位为 cm, 圆圈标记为加速度传感器。

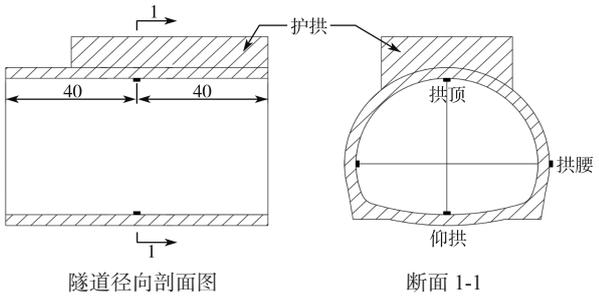


图 5 加速度传感器布置设计图



图 5 加速度传感器布置示意图

Fig. 5 Acceleration sensor schematic diagram

完成落石冲击试验后, 需要对护拱及衬砌结构的损伤情况进行判断, 选用声发射仪进行损伤测试, 在护拱表面安装 3 个声发射传感器, 探头的间距为 10 cm。探头位置示意图如图 6 所示。

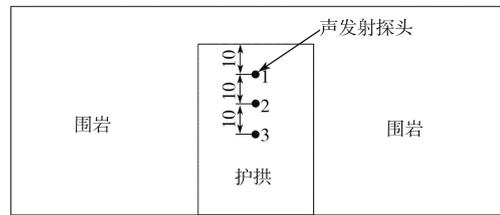


图 6 声发射传感器布置示意图

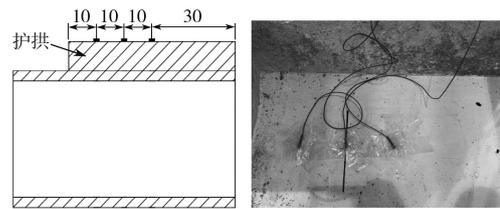


图 6 声发射传感器布置示意图

Fig. 6 Acoustic emission sensor layout schematic diagram

1.3 模型箱及衬砌模具

模型实验根据相似理论^[17]采用缩尺模型试验, 试验模型尺寸为原型的 1/20。隧道工程中围岩应力的影响范围一般约为隧道洞径的 3 倍, 因此, 模型箱长宽高为 1 700 mm × 800 mm × 1 500 mm, 该模型箱结构框架采用宽 50 mm 的方钢焊接而成。模型箱设计图及模型示意图见图 7 和 8, 图中单位为 mm。

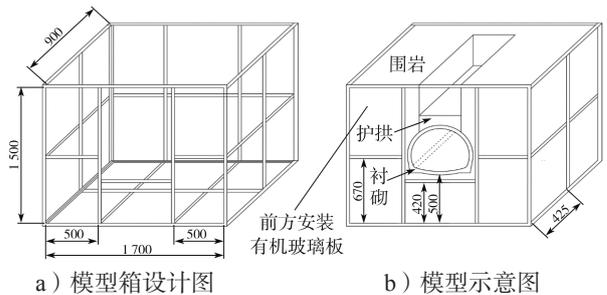


图 7 模型箱设计图及模型示意图

Fig. 7 Model box design diagram and schematic diagram model box

衬砌材料选用具高流动性的石膏相似材料,在凝固前需使用模具进行浇筑,衬砌模具见图9。



图8 室内模型试验模型箱
Fig. 8 Indoor model test model box



图9 衬砌浇筑模具
Fig. 9 Lining pouring mold

2 试验装置

2.1 高速相机和图像分析系统

落石下落过程中的运动速度较快,为捕捉其运动轨迹需要用高速相机进行拍摄。本次实验使用美国Phantom公司生产的Miro LAB110高速摄影仪,该相机拍摄速率在1~1 600帧/s可调,本次拍摄速率设定为1 000帧/s,与动态应变仪采集速率匹配(1 000次/s)。

本次试验使用合肥富煌君达高科信息技术有限公司生产的千眼狼高速图像分析系统,它可以实现对高速运动物体的轨迹、速度、加速度等信息的提取和分析。

2.2 AdCras 数据采集系统及加速度计

实验选用江苏联能电子有限公司生产的CA-YD-109B压电式加速度传感器^[18](如图10所示)与南京安正软件工程有限公司生产的AdCras数据采集系统。4个加速度计的灵敏度系数分别为249.7, 265.4, 263.9, 256.1 pC/m·s⁻²。



图10 压电式加速度传感器
Fig.10 Piezoelectric acceleration sensor

2.3 动态信号测试分析系统

为了测量衬砌结构的动态应变^[19-20],本次试验选用东华测试公司生产的DH3823分布式信号测试分析系统。

2.4 声发射测试系统

本次试验使用的是美国物理声学公司(PAC)的声发射检测系统。通过在护拱表面安装多个声发射

传感器,利用每个传感器依序在介质中生成声波信号,随后其他传感器捕获该信号在介质中的传播时间,从而计算出声波的传播速度。通过测量介质中声波的传播速度,可以评估材料的物理性质,如密度、弹性模量和泊松比等,以及介质中的缺陷和裂纹等信息^[21-22]。进行声发射系统参数设置时,需根据当前试验环境设置阈值,经不断调整,最终将阈值设为30 dB,同时设定浮动门宽为6 dB。其他软件参数均选择软件默认值。

3 试验结果与分析

为了研究落石质量和下落高度对衬砌结构的影响,本次室内模型试验选用3种不同工况下的落石掉落对隧道护拱和衬砌结构的影响进行分析,这3个工况分别如下:落石边长为10 cm,下落高度为2 m;落石边长为10 cm,下落高度为1 m;落石边长为7 cm,下落高度为1 m。落石制作材料选用水胶比为1:2的石膏试件制成。

3.1 落石掉落运动过程分析

试验测得落石坠落后的位移-时间变化曲线如图11所示。

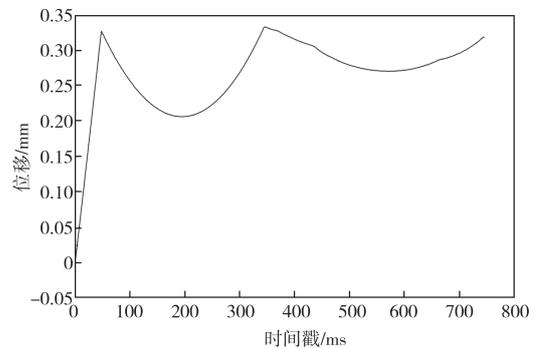


图11 落石的位移-时间曲线

Fig. 11 Displacement-time curve of falling rocks

分析图11所示的位移-时间曲线,可知落石在坠落后经历了两次反弹,且每次反弹的高度呈现逐步减小的趋势。当落石撞击护拱时,护拱会吸收部分撞击能量,而未被吸收的能量则转化为落石的反弹能量。此外,在撞击与反弹过程中,落石的物理形态可能会发生改变,例如发生碎裂或磨损等现象。随着反弹次数增加,反弹能量逐渐衰减,进而导致反弹高度持续降低。

3.2 衬砌结构加速度响应

本次模型试验的加速度传感器采样频率设定为1 kHz,经过3次不同工况下的试验,得到各个衬砌部位的加速度响应曲线,如图12所示。从加速度响应曲线图中可以看出,在落石掉落之后,衬砌结构受

到冲击力的影响发生了明显振动, 拱顶位置的振动相较于其他位置处更为明显, 且振动影响持续时间较

长, 相反, 仰拱处受到的冲击力较小, 因而其振幅与振动影响时间也较小。

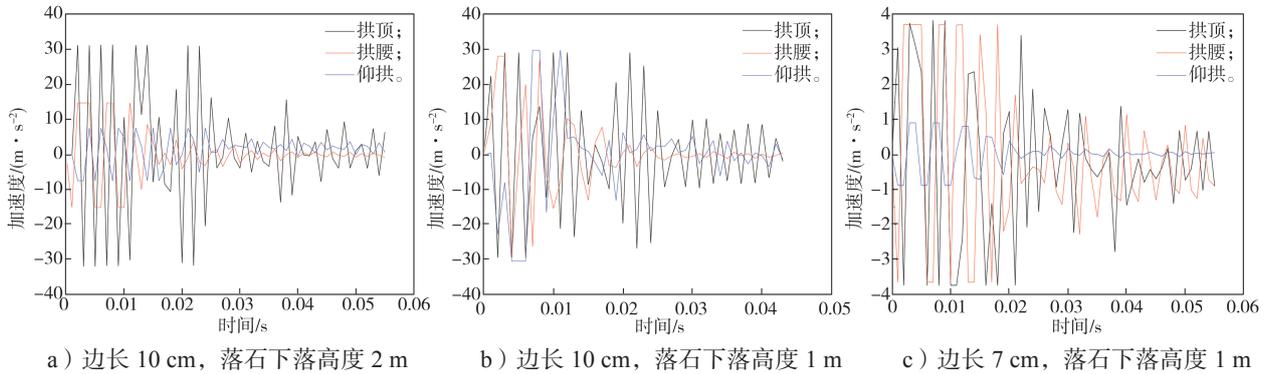


图 12 不同工况下衬砌部位的加速度响应曲线

Fig.12 Acceleration response curves of lining parts under different working conditions

由牛顿运动定律可知, 加速度 a 是速度 v 随时间 t 的变化率, 而速度是位移 x 随时间的变化率。根据这个关系, 可以通过积分来从加速度求解位移。

首先, 对加速度函数 $a(t)$ 进行一次积分, 得到速度函数 $v(t)$:

$$v(t) = \int a(t)dt + v_0$$

式中 v_0 为初速度。

然后, 对速度函数 $v(t)$ 进行一次积分, 得到位移函数 $x(t)$:

$$x(t) = \int v(t)dt + x_0$$

式中 x_0 为初始位移。

通过这两次积分, 可以从给定的加速度 - 时间曲线求解出位移。因试验落石是从静止开始自由落体掉落, 故 v_0 和 x_0 均为 0。

利用 AdCras 数据采集系统, 可以对加速度 - 时程曲线进行分析, 通过软件进行两次积分, 得到每次落石掉落时衬砌结构的最大位移, 具体见表 2。通过对比 3 组不同工况的结构位移结果, 发现拱顶的位移

值最大, 拱腰次之, 仰拱最小。同时, 衬砌结构位移的大小随落石下落高度的增加而增加, 随落石质量的增加而增加。

表 2 不同工况结构位移表

Table 2 Structure displacement table under different working conditions mm

工 况	拱顶位移	拱腰位移	仰拱位移
边长 10 cm, 下落高度 2 m	0.250	0.140	0.040
边长 10 cm, 下落高度 1 m	0.160	0.055	0.037
边长 7 cm, 下落高度 1 m	0.070	0.025	0.008

3.3 衬砌结构动力响应

本次室内模型试验中, 动态应变仪的数据采集频率设置为 1 kHz。为确保实验数据的真实性与可靠性, 实验开始前先使用动态应变仪对应变片进行预先测试, 以验证应变片的正常且处于稳定工作状态。基于预测测试结果, 本次试验选定了衬砌内侧面的应变片作为测量对象, 得到不同工况下衬砌结构不同位置的应变情况, 如图 13 所示。

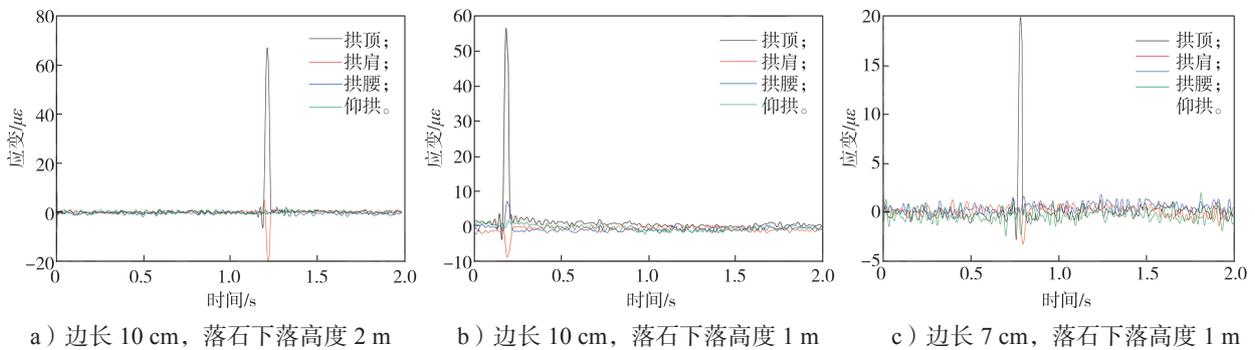


图 13 不同工况下衬砌结构不同位置处的应变曲线

Fig.13 Strain curves at different positions of the lining structure under different working conditions

观察图 13 可知, 在落石冲击作用下, 隧道衬砌结构, 特别是拱顶和拱肩部位的应变变化明显, 表现为波峰或波谷的形式, 并且在达到峰值后迅速恢复至

初始状态。这一现象表明, 衬砌结构在落石冲击作用下处于弹性变形阶段。相比之下, 拱腰和仰拱部位的应变变化微小, 以至于在曲线图中难以观察到明显的

变化。出现这一差异的原因在于,由于拱顶位于冲击点最近的位置,因此受到的冲击荷载最为显著。而拱肩位于拱顶下方,通过衬砌结构的荷载传递效应,导致其应变变化相对较小。拱腰和仰拱部位由于周围围岩的约束作用,当能量传递至此,围岩的吸能作用减缓了应变变化,使得这些区域的应变几乎不变。

此外,当落石经过反弹后再次落下时,应变未见明显变化,表明落石再次落下时的重力势能大幅衰减,加之护拱的荷载分散作用,余下荷载不足以引起隧道衬砌结构的明显形变。同时,随着落石质量增加,应变大小相应增加;落石下落高度增加,也会导致应变大小增加。

3.4 衬砌结构损伤测试

衬砌结构的损伤测试是评估其安全性和健康状况的重要手段之一。本次试验中,通过在护拱表面安装3个声发射传感器,并且使用声发射软件中的自动传感器测试(AST)模块,对衬砌结构进行波速测定,以此作为损伤评估的一部分。基于传感器间的距离与时间差,进而确定声波的传播速度,所得测试结果如表3所示。经过计算得出,在3次落石掉落前后的护拱内部的平均波速分别约为2 179, 2 134, 2 343 m/s,由此可以看出,这3次落石试验对护拱和衬砌结构的损伤极小,表明结构损伤对实验结果的影响可以忽略不计。

表3 落石掉落后的损伤测试结果

Table 3 Damage test results under a rockfall action

两探头 间编号	第一次落石		第二次落石		第三次落石	
	时间差/ μs	距离/ cm	时间差/ μs	距离/ cm	时间差/ μs	距离/ cm
1-2	46	10.1	48	10.2	44	10.2
2-1	45	10.1	46	10.2	43	10.2
1-3	93	19.9	99	19.8	89	20.7
3-1	93	19.9	99	19.8	89	20.7
2-3	45	9.8	43	9.6	44	10.5
3-2	45	9.8	43	9.6	45	10.5

4 结论

本文进行了室内模型试验,利用落石冲击试验对护拱以及衬砌结构进行了结构响应测试。通过3种不同工况的落石掉落模拟,研究支护结构在落石冲击作用下的动态响应特性,得到的结论如下:

1) 落石在反弹过程中的能量将会因多种原因遭受损失,包括摩擦损耗及形态变化等,这些因素共同作用,导致反弹能量逐步衰减,进而使得反弹高度逐渐降低。

2) 衬砌拱顶位置的加速度响应最为明显,其次是拱腰处,而仰拱处的加速度响应最小。根据加速度传感器的数据进行两次积分,可以得出各个位置的位移情况。在相同下落高度下,落石质量越大,引起的位移越大;在相同落石质量下,落石高度越高,位移亦越大。

3) 在落石的掉落作用下,衬砌结构拱顶位置的应变变化最为明显,拱肩处的应变相对较小,而拱腰与仰拱位置处的应变变化几乎为零。随着落石质量的增加应变大小同样增加,落石下落的高度增加也会导致应变增加。

4) 经过3次落石掉落试验的损伤测试,得知护拱和衬砌结构造成的损伤较小。

参考文献:

- [1] CHAU K T, WONG R H C, LIU J, et al. Shape Effects on the Coefficient of Restitution During Rockfall Impacts[C]//9th ISRM Congress. S. l.: OnePetro, 1999: 541-544.
- [2] XIE R H, FAN W, LIU B, et al. Dynamic Behavior and Vulnerability Analysis of Bridge Columns with Different Cross-Sectional Shapes Under Rockfall Impacts[J]. Structures, 2020, 26: 471-486.
- [3] NAITO N, MAEDA K, KONNO H, et al. Rockfall Impacts on Sand Cushions with Different Soil Mechanical Characteristics Using Discrete Element Method[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(2): 384-397.
- [4] ZHAO P, XIE L Z, LI L P, et al. Large-Scale Rockfall Impact Experiments on a RC Rock-Shed with a Newly Proposed Cushion Layer Composed of Sand and EPE[J]. Engineering Structures, 2018, 175: 386-398.
- [5] WANG H B, GUO C C, WANG F M, et al. Peridynamics Simulation of Structural Damage Characteristics in Rock Sheds Under Rockfall Impact[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 143: 104625.
- [6] SCHELLENBER G K. On the Design of Rockfall Protection Galleries[D]. Switzerland: ETH Zurich, 2008.
- [7] 宋东旭. 落石冲击隧道洞口结构砂垫层的缓冲效果研究[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(8): 136-139.
SONG Dongxu. Study on Cushioning Effect of Rockfall Impacting Sand Cushion at Tunnel Entrance[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2021, 49(8): 136-139.
- [8] 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(9): 34-37.
SONG Dongxu. Influence of Rockfall Impact on Tunnel Entrance Structure Shape Factors[J]. Heilongjiang

- Hydraulic Science and Technology, 2021, 49(9): 34–37.
- [9] YANG L, LI S M, CHEN D H, et al. Impact Dynamics Analysis of Shed Tunnel Structure Hit by Collapse Rock-Fall[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 99/100: 1023–1026.
- [10] BAĞRIAÇIK B, ALTAY G, ÖNAL S, et al. Numerical Modelling of Concrete Tunnels Exposed to Rock Fall[J]. Revista De La Construcción, 2022, 21(2): 215–227.
- [11] WANG Y S, ZHAO J M, TANG J H, et al. Model Test Research of the Influences of Rock-Fall Impaction on Deformation of the Cut-and-Cover Tunnel Structure[J]. Advanced Materials Research, 2011, 368/369/370/371/372/373: 2716–2721.
- [12] SINHA S, MISHRA S, RAO K S, et al. Analysis of Twin Circular Tunnels Subjected to Impact Loads[M]// Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2021: 683–694.
- [13] TSUNO K, KOJIMA Y, KISHIDA K. Estimation Method of Falling Concrete Piece from Tunnel Lining[J]. Quarterly Report of RTRI, 2013, 54(1): 12–17.
- [14] CHEN S J, WANG H L, ZHANG J W, et al. Experimental Study on Low-Strength Similar-Material Proportioning and Properties for Coal Mining[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015: 696501.
- [15] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准: JGJ 52—2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 19–21.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for Technical Requirements and Test Method of Sand and Crushed Stone (or Gravel) for Ordinary Concrete: JGJ 52—2006[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 19–21.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 16–17.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019: 16–17.
- [17] LUO F, YANG B S, HAO B B, et al. Mechanical Properties of Similar Material Under Uniaxial Compression and the Strength Error Sources[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(1): 93–99.
- [18] GAUTSCHI G. Piezoelectric Sensors[M]//Piezoelectric Sensorics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002: 73–91.
- [19] EBELTOFT R, LARSEN J O, NORDAL S. Instrumentation of Buried Flexible Culvert Subjected to Rockfall Loading[C]//Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering. Montréal: s.n., 2006: 95–103.
- [20] SY HO T, MASUYA H. Finite Element Analysis of the Dynamic Behavior of Sand-Filled Geocells Subjected to Impact Load by Rockfall[J]. International Journal of Erosion Control Engineering, 2013, 6(1): 1–12.
- [21] 任昂岭, 李加辉, 张亚平, 等. 煤岩受热及损伤过程的声发射特性研究 [J]. 陕西煤炭, 2023, 42(2): 11–15.
REN Angling, LI Jiahui, ZHANG Yaping, et al. Study on Acoustic Emission Characteristics of Coal and Rock During Heating and Damage[J]. Shaanxi Coal, 2023, 42(2): 11–15.
- [22] 虞爱平, 钟展明, 陈哲涵, 等. 混凝土不同深度裂纹对声发射波传播特性影响 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 57–61, 81.
YU Aiping, ZHONG Zhanming, CHEN Zhehan, et al. Acoustic Emission Signal Propagation Characteristics of Concrete at Different Crack Depths[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2023, 45(2): 57–61, 81.

(责任编辑: 廖友媛)