

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0159

多次落石冲击下棚洞结构动力响应数值模拟*

刘红岩¹, 吕泽鹏², 刘康琦¹, 周月智¹, 常书瑞¹, 薛雷³, 张光雄⁴

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;

2. 北京市规划和自然资源委员会密云分局, 北京 101599;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

4. 保利民爆哈密有限公司, 新疆 哈密 839000)

摘要: 为探究多次落石冲击下棚洞结构的动力响应特征, 建立并验证了基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件的落石冲击棚洞 FEM-SPH 耦合数值模型, 并结合 LS-DYNA 完全重启动技术, 研究了落石冲击速度、质量、冲击角度、形状等 4 个因素对多次落石冲击棚洞结构动力响应的影响。结果表明: 冲击力、缓冲层顶部冲击位移、棚顶位移、棚洞塑性应变均与落石质量、速度、冲击方向与棚洞平面的夹角呈正相关; 长方体落石冲击产生的冲击力、棚顶位移和塑性应变均大于球体落石, 球体落石产生的冲击位移大于长方体; 对于长方体落石, 冲击位移、棚顶位移、塑性应变与接触面积呈负相关; 随着落石冲击次数的增加, 峰值冲击力通常会先增大而后趋于稳定。

关键词: 棚洞结构; 动力响应; FEM-SPH 耦合数值模型; 冲击力; 多次落石

中图分类号: O344; TU443

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Numerical simulation on dynamic response of the shed-tunnel structure under multiple rockfall impacts

LIU Hongyan¹, LYU Zepeng², LIU Kangqi¹, ZHOU Yuezhi¹, CHANG Shurui¹, XUE Lei³, ZHANG Guangxiong⁴

(1. *School of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *Miyun Branch, Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources, Beijing 101599, China;*

3. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

4. *Poly Explosive Hami Co., Ltd., Hami, 839000, Xinjian, China)*

Abstract: To exploring the dynamic response characteristics of the shed-tunnel structure under multiple rockfall impacts, an FEM-SPH coupled numerical model is established based on ANSYS/LS-DYNA and is also tested with the data before. Then, the model is combined with the full restart technique to study the effects of the shed-tunnel structure dynamic response under multiple rockfall impacts by considering four factors, e.g., rockfall impact velocity, rockfall mass, impact angle and rockfall shape. The results show that the impact force, buffer top impact displacement, roof displacement and plastic strain of the shed-tunnel are positively correlated with the rockfall mass, velocity and angle. The impact force, roof displacement and plastic strain of the shed-tunnel structure generated by the cuboid rockfall impact are all larger than those of the spherical rockfall, and the impact displacement generated by the spherical rockfall impact is larger than that of the cuboid. For the cuboid rockfall, the impact displacement, roof displacement and plastic strain are negatively correlated with the contact area. Under the multiple rockfall impacts, the peak impact force usually increases firstly and then tends to be stable.

Keywords: shed-tunnel structure; dynamic response; the FEM-SPH coupled numerical model; impact force; multiple rockfalls

* 收稿日期: 2024-05-25; 修回日期: 2024-07-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509701); 新疆维吾尔自治区“天池英才”领军人才计划项目(2023)

第一作者: 刘红岩(1975—), 男, 博士, 教授, Lhyan1204@126.com

崩塌落石发生的高频性及运动特征的强随机性, 导致对其发生时间、运动路径及造成危害等方面的准确预测十分困难^[1-2]。为此, 实际工程中多采用拦石墙、柔性防护网、棚洞等被动防护结构对山区公路、建筑物等进行防护。其中由于棚洞结构可最大限度地适应原始地形, 减少对山体和植被的破坏, 因而在实际工程中得到了广泛应用^[3]。为此, 落石冲击下棚洞结构的动力响应研究引起了学者的广泛关注。概括而言, 目前研究主要集中在以下 3 个方面: 落石冲击力计算方法、落石冲击力影响因素和棚洞结构的动态响应及破坏机理。

在落石冲击力计算理论方面, 最早是由 Hertz^[4] 基于弹性接触理论提出了两球体对心碰撞时的接触压力, 而后很多学者在此基础上进行了一系列的研究。何思明等^[5] 将构筑物视为理想弹塑性体, 通过对经典的 Hertz 接触理论^[4] 进行修正, 提出了考虑材料弹塑性变形的大块石冲击力计算方法; 陈颖骐等^[6] 基于经典的 Hertz 接触理论^[4] 和 Thornton 弹塑性假设^[7], 考虑拦石墙的相关因素, 提出了相应的落石冲击力计算方法, 并用于锚索抗滑桩冲击力计算。Zheng 等^[8] 通过考虑层状复合板的塑性变形及冲击损伤效应, 基于经典的 Hertz 接触理论^[4] 及永久压痕理论, 提出了相应的冲击力计算方法。陈泰江等^[9] 将落石简化为刚体, 基于 Hertz 接触理论^[4], 考虑棚洞结构的非弹性变形, 采用函数拟合法得到了落石法向冲击力理论计算公式。刘红岩^[10] 通过考虑落石对钢筋混凝土桩板墙的动态损伤特性, 提出了考虑损伤的落石冲击力计算方法。

在冲击力影响因素方面, 相关研究主要集中在落石及缓冲层参数对落石冲击力的影响。闫鹏等^[11] 开展了球形、锥形和平头等 3 种典型形状落石冲击棚洞垫层的模型试验, 发现落石形状对试验结果有显著影响, 在相同条件下, 平头落石的冲击力最大。Wu 等^[12] 利用室外落石冲击试验, 研究了上覆砂土垫层的钢筋混凝土板所受冲击力与垫层厚度的关系, 发现作用于缓冲层表面的冲击力与缓冲层厚度呈指数关系。Nakajima 等^[13] 通过一系列实验, 研究了落石重量、尺寸、形状、刚度、材料、运动方式等对冲击力的影响, 发现最大落石冲击力与上述参数之间存在较大的离散性。苏宇宸等^[14] 采用室内模型试验研究了多次落石重复冲击下再生混凝土垫层的缓冲性能, 认为相比石英砂垫层, 首次冲击下采用前者防护的棚洞顶板中心处传递力减小了 83%, 且应力分布更均匀。Shen 等^[15] 利用离散元法模拟研究了颗粒状土壤缓冲层对落石冲击力的影响机制, 结果表明落石最大冲击力随着落石圆形度的增加而增加。Ouyang 等^[16] 提出了一种结合土工格栅加筋土和发泡聚苯乙烯土工泡沫的新型棚洞隧道保护系统, 通过有限元方法对落石冲击的瞬态力学过程进行了计算分析, 结果表明该系统可以有效地吸收落石能量, 进而降低落石冲击力。王爽等^[17] 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 研究了落石冲击下隧道大跨度棚洞的动力响应, 比较了普通土与轻质土两种垫层对落石冲击的缓冲作用, 认为后者可明显减小落石冲击力。Zhong 等^[18] 基于 SPH-FEM 耦合方法, 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了动态冲击数值模型, 分析了动态冲击响应特性和惯性效应, 并计算了随机样本扩展量, 提出了冲击力和惯性效应系数的评估方法。Wang 等^[19] 采用近场动力学方法研究了落石冲击下棚洞结构的动态响应规律, 认为非圆形落石对棚洞的冲击力较大。黄福有等^[20] 采用离散元-有限差分耦合方法研究了颗粒级配对落石冲击垫层动态响应的影响, 认为颗粒级配对落石冲击力等影响较大。

在棚洞结构的动态响应及破坏机理方面, Olsson^[21] 基于 Hertz 接触理论提出了各向异性复合板在小质量冲击下的动态响应模型; 王东坡等^[22] 在此基础上研究了钢筋混凝土棚洞在落石冲击下的弹塑性动力响应机制。如前所述, 很多学者如王爽等^[17]、Zhong 等^[18]、Wang 等^[19] 均采用数值模拟方法研究了落石冲击下棚洞结构的动态响应及破坏机理。

然而上述研究大多均着眼于单次落石冲击对棚洞造成的影响, 而对多次落石冲击对棚洞结构造成的累积破坏关注较少。而在实际工程中, 棚洞结构服务年限较长, 因此往往会承受多次落石冲击。为此, 基于 ANSYS/LS-DYAN 有限元软件, 建立有限元 (finite element method, FEM)-光滑粒子流体动力学 (smooth particle hydrodynamics, SPH) 方法数值模型, 利用 ANSYS/LS-DYAN 软件的完全重启动技术, 对多次落石冲击下棚洞结构的动力响应进行更加系统研究, 以探究落石速度、质量、角度、形状等 4 个因素对多次落石冲击下棚洞结构动力响应的影响规律。

1 数值计算模型的建立

1.1 有限元模型

根据 Wu 等^[12]开展的模型试验进行建模, 数值模型与实验模型比例为 1 : 1, 混凝土支座尺寸为 0.2 m×1.6 m×0.25 m; 钢筋混凝土板尺寸为 2.4 m×1.6 m×0.25 m, 板内垂直正交上下铺设 2 层 $\varnothing 14@200$ mm 钢筋网, 保护层厚度为 20 mm; 缓冲层尺寸为 2.4 m×1.6 m×0.3 m。约束条件为: 支座底部全约束, 缓冲层四周法向约束, 数值模型见图 1。

虽然 FEM 方法在处理落石、混凝土等连续结构的动态响应问题时具有较高的计算效率; 但因缓冲层是砂、土等松散颗粒集合体, 受到冲击后易发生较大变形, 若采用一般的有限元方法建模, 多次撞击后容易发生网格畸变, 出现错误。故混凝土支座及钢筋混凝土板采用 FEM 建模, 而缓冲层则采用 SPH 方法建模, 直接将模型离散为节点的集合, 无需划分网格, 如此可有效避免网格畸变问题。综上, 本文采用 FEM-SPH 耦合的方法进行模拟。交界面处 FEM 单元与 SPH 粒子采用罚函数的形式进行耦合, 通过罚函数算法将 SPH 粒子力作用到 FEM 单元上, 相当于在 FEM 和 SPH 之间加上法向接触弹簧限制质点穿透主面, 如图 2 所示。由于 SPH 粒子可以看作节点, 计算程序中采用从节点与主表面的绑定定义有限元单元与 SPH 粒子的接触。这种接触中仅约束从节点的平动自由度, 且不考虑接触失效, 不允许从节点的偏置。因此, 采用 FEM-SPH 耦合方法建立棚洞结构模型, 既可以有效避免网格畸变问题, 又能提高结构动态大变形响应过程模拟的可靠性和计算效率。

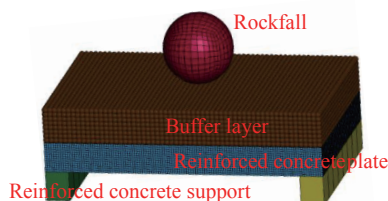


图 1 FEM-SPH 耦合数值模型

Fig. 1 Numerical model coupling FEM and SPH

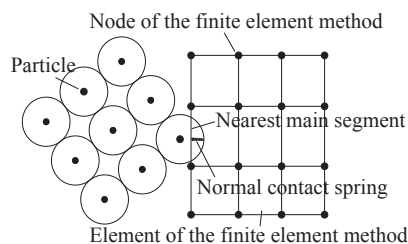


图 2 FEM-SPH 接触算法

Fig. 2 Contact algorithm of FEM-SPH

1.2 材料参数

在图 1 所示的计算模型中, 涉及的材料包括落石、缓冲垫层、钢筋混凝土, 其中对钢筋混凝土采用分离式模型, 即将其视为混凝土与钢筋的组合, 由于钢筋嵌固在混凝土内部, 二者存在很强的相互作用, 因此这里采用 CONstrained_LaGrange_in_Solid 关键字实现钢筋与混凝土之间的连接, 不考虑二者之间的相互滑移。结合 ANSYS/LS-DYNA 软件的已有材料模型, 并借鉴文献 [18,23], 这里分别给出上述 4 种材料的本构模型: 落石采用刚体模型, 缓冲垫层选用 MAT_FHWA_SOIL 模型, 混凝土选取 MAT_CSCM 模型, 钢筋选用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 随动强化模型。相应的材料参数如表 1 所示。同时 LS-DYNA 软件采用生死单元技术以模拟材料失效, 对于混凝土和钢筋, 这里均采用最大主应变 ε_{\max} 失效准则, 参考文献 [24], 取 $\varepsilon_{\max}=0.1$ 和 0.12 以分别模拟混凝土和钢筋的失效行为, 即当二者某单元的最大应变分别达到相应的失效准则时则自动删除相应的单元以模拟材料的破坏。

表 1 材料物理力学参数表

Table 1 Material physical and mechanical parameters

材料	弹性模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	抗压强度/MPa	屈服强度/MPa
落石	33 500	2 097.86	0.3	--	--	--	--
缓冲垫层	15	1 540	0.27	30	20	--	--
混凝土	30 000	2 400	0.167	--	--	30	--
钢筋	200 000	7 850	0.3	--	--	--	335

1.3 模型可靠性验证

首先利用缓冲层冲击力验证数值模型的可靠性,将缓冲层冲击力定义为落石在冲击过程中所受到的力并进行相应的监测。设置球体正向冲击缓冲层,共进行3次冲击,冲击高度分别为5、6、7 m,即接触到缓冲层时的冲击速度分别为9.90、10.84、11.71 m/s。缓冲层冲击力模拟结果分别与Wu等^[12]的试验结果以及常用冲击力计算公式^[25-29]比较,以验证模型可靠性,结果见图3。可以看出,模拟值与实验值吻合较好,冲击力随落石下落高度的增加均呈近似线性增加。各方法计算得到的冲击力均有所不同,在相同工况下冲击力计算结果最大相差约5倍。这是因为每种方法考虑的因素各有侧重,比如瑞士法^[28]和日本道路公团法^[29]因为没有考虑缓冲层厚度因素,导致计算结果较其他方法偏大。总体来看,由本文数值模型得到的冲击力计算结果介于瑞士法和隧道手册法之间,计算结果较可靠。

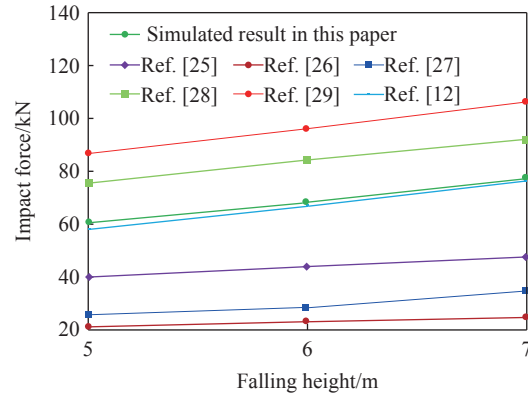


图3 冲击力计算结果对比图

Fig. 3 Comparison of impact force calculation results

除了验证缓冲层冲击力的可靠性外,还需验证钢筋混凝土板破坏过程与实验结果是否相符。设置球体连续多次正向冲击,每次冲击间隔0.05 s,冲击速度均为20 m/s,观察钢筋混凝土板破坏情况。由图4可知,数值模拟结果显示跨中主裂纹首先出现在底部,而后向上不断扩展、延伸与贯通,与试验结果较为吻合,说明该数值模型可以很好地用于模拟落石冲击下钢筋混凝土板的破坏过程。为此,下面采用该模型对多次落石冲击下的棚洞结构动力响应进行模拟研究。

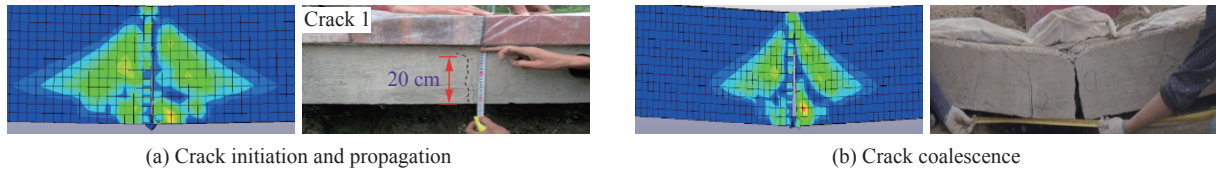


图4 钢筋混凝土板破坏过程的模拟与试验结果对比

Fig. 4 Comparison between the simulated and test results of the reinforced concrete plane damaging process

2 数值模拟及结果分析

多次落石冲击下棚洞结构动力响应的数值模拟采用LS-DYNA软件的完全重启技术,即将前一次落石冲击的计算结果作为下一次落石冲击计算的初始条件,通过*STRESS_INITIALIZATION关键字实现初始化过程,保证数值计算过程中信息的连续性。下面分别研究不同落石质量 m 、速度 v 、冲击角度 θ 、形状条件下,棚洞在间隔 $\Delta t=0.05$ s的多次落石冲击下的动力响应规律,如棚洞受到的冲击力、冲击深度、棚顶位移、塑性应变等,其中:冲击力是指落石与缓冲层相互作用的冲击力时程关系曲线,从中可以判断缓冲层所受峰值冲击力及其变化规律;冲击深度是指缓冲层受冲击后表面节点发生的纵向位移,可以直观表明撞击的作用效果,将落石直接接触的点即缓冲层上表面中心点确定为位移监测点;棚顶位移是指钢筋混凝土板上表面节点最大纵向位移,选取上表面中心点作为监测点;棚洞塑性应变可以直观表明钢筋混凝土板受破坏情况。

这里需要说明的是,通过试算发现,部分工况下当落石冲击为5次时,棚洞就已经发生了完全破坏,导致计算结果不收敛。因此,为了进行对比,本研究的落石冲击次数选定为5次。

2.1 落石质量的影响

为讨论落石质量对棚洞在落石冲击下响应的影响,对形状为球形、落石速度为 20 m/s、冲击方向垂直于缓冲层面向下、落石半径分别为 0.2、0.25、0.3 m、冲击间隔 0.05 s 的工况进行模拟,其中:三种半径对应落石质量 m 分别为 70.3、137.31、237.26 kg,冲击次数分别为 5、5、4($m=237.26$ kg 时,第 5 次冲击后模型已完全破坏,计算不收敛)。

2.1.1 缓冲层冲击力

不同落石质量下缓冲层冲击力时程曲线如图 5 所示。可以看出:(1)冲击力时程曲线均呈现脉冲状变化,每次冲击之后冲击力时程曲线的趋势大致相同,冲击力随时间增长均为先增大到某一峰值后减小至 0;(2)质量越大,峰值冲击力越大;(3)当落石质量一定时,随着冲击次数的增加,峰值冲击力在第 2 次冲击后快速增大,随后趋于相对稳定,这主要是因为第 1 次冲击时,缓冲层还未被压缩,缓冲性能最强,随着冲击次数的增大,缓冲层缓冲能力减弱,故峰值冲击力一开始会变大,但当继续冲击时,缓冲层几乎不能再被压缩,故缓冲性能趋于稳定,导致峰值冲击力也趋于稳定;(4)落石质量越大,峰值冲击力达到最大所需要的冲击次数越少。

2.1.2 缓冲层顶部冲击位移

不同落石质量下缓冲层顶部冲击位移时程曲线如图 6 所示。可以看出:(1)每次冲击后缓冲层均会出现一定程度的回弹现象,这是因为缓冲层是弹塑性材料,当冲击力卸载后,一部分弹性变形会恢复;(2)落石质量越大,缓冲层冲击位移越大;(3)当落石质量一定时,随着冲击次数的增加,产生的最大冲击位移逐渐增大,但是之后的几次冲击增加幅度都不如第 1 次冲击,当落石质量为 70.3、137.31 和 237.26 kg 时,第 2 次冲击产生的位移分别仅为第 1 次冲击的 35.35%、33.91%、55.46%。这主要是因为第 1 次冲击之后土体被压实,导致第 1 次冲击产生的冲击位移远大于之后几次冲击;当落石质量较小时,每次冲击的回弹比例均很大;但是当落石质量较大时,回弹比例则较小。

2.1.3 棚顶位移

不同落石质量下棚顶位移时程曲线如图 7 所示。可以看出:(1)棚顶位移存在回弹现象,这主要是因为钢筋的存在,使得其弹性增加所致;(2)落石质量越大,棚顶位移增加得越快;(3)随着落石质量的增加,棚顶位移回弹比例减小,因此质量较大时棚顶位移逐渐累积增大,而落石质量较小时,稳定后的棚顶位移几乎不发生变化。

由图 7 所示计算结果可知棚顶位移存在回弹现象,而混凝土为典型的脆性材料,基本上不会出现回弹现象,因此推测可能是因为钢筋的存在使得棚顶发生了回弹。为验证该设想,另设计一个不含钢筋的

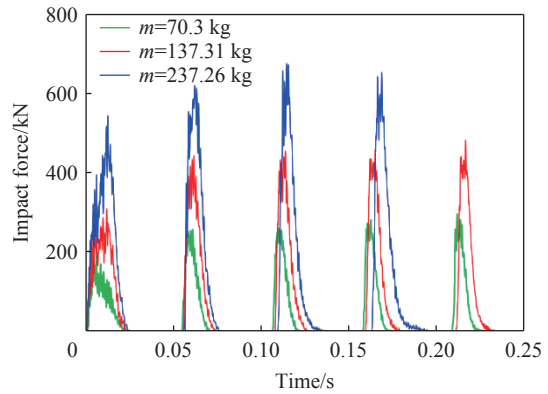


图 5 不同落石质量下缓冲层冲击力时程曲线

Fig. 5 Time history of the impact forces on the buffer with different rock mass

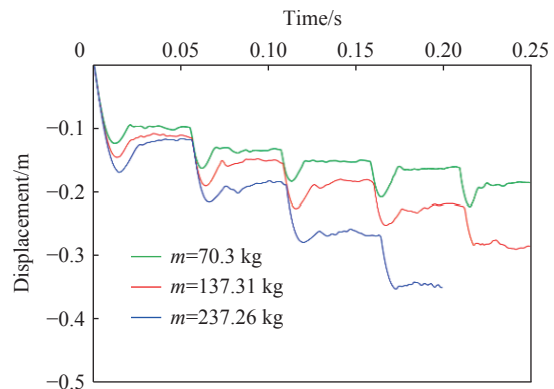


图 6 不同落石质量下缓冲层顶部冲击位移时程曲线

Fig. 6 Time history of the buffer top displacements with different masses of the rock

模型进行对比实验,其他条件相同,即落石重 137.31 kg,冲击速度 20 m/s,冲击方向垂直向下,计算结果如图 8 所示,可以看出:当模型不含钢筋时,棚顶位移呈单调递增,无回弹现象,且位移量显著变大。这说明钢筋对混凝土板的变形及破坏影响很大,因此在实际工程中,对混凝土棚洞合理配筋十分重要。

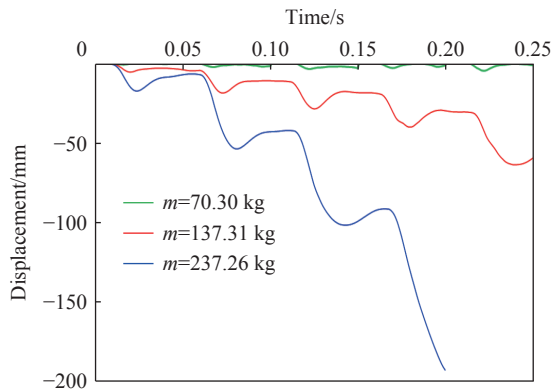


图 7 不同落石质量下棚顶位移时程曲线

Fig. 7 Time history curve of the shed roof displacements with different masses of the rock

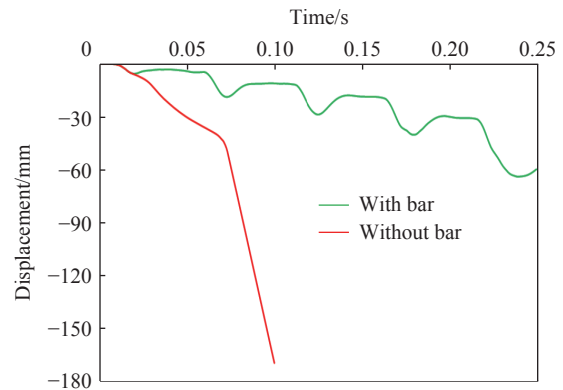


图 8 钢筋对棚顶位移影响

Fig. 8 Effect of the rebar on the shed roof displacement

2.1.4 棚洞塑性应变

不同落石质量下棚洞钢筋混凝土板的塑性应变如图 9 所示。可以看出,在历经多次撞击之后,棚洞均发生了较大范围的塑性变形,且塑性变形主要集中在棚洞中心及中心周边区域;落石质量越大,钢筋混凝土板塑性区越大,破坏程度越大;棚洞钢筋混凝土板塑性应变对落石质量敏感性较高,70.3 kg 的落石 5 次冲击产生的塑性应变范围远不及 237.26 kg 的落石 4 次冲击产生的塑性应变范围;板的破坏是从跨中下方开始产生裂纹,并逐渐向上部及向两侧延伸。

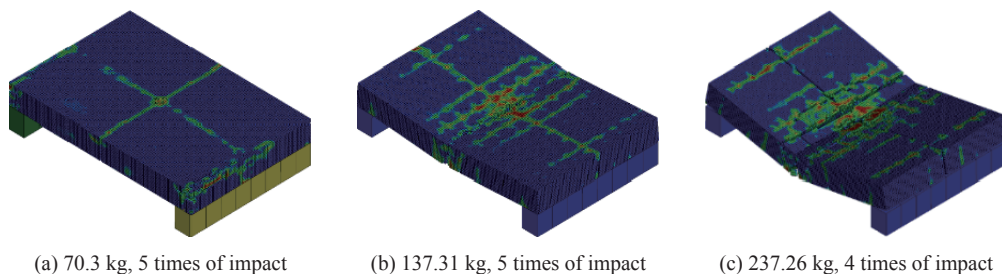


图 9 不同落石质量下棚洞塑性应变云图

Fig. 9 Plastic strain contours of shed-tunnel with different masses of the rock

2.2 冲击速度的影响

为讨论冲击速度对棚洞在落石冲击下响应的影响,对球形落石半径固定为 0.25 m ($m=137.31$ kg)、冲击速度分别为 15、20、25 m/s 的垂直冲击工况进行模拟。

2.2.1 缓冲层冲击力

不同落石冲击速度下缓冲层冲击力时程曲线如图 10 所示,可以看出:(1)落石冲击速度越大,峰值冲击力越大;(2)在不同的冲击速度下,随着冲击次数增加,峰值冲击力在第 2 次冲击后快速增大,随后趋于相对稳定;(3)落石冲击速度越大,峰值冲击力达到最大所需要的冲击次数越少。

2.2.2 缓冲层顶部冲击位移

不同落石冲击速度下缓冲层顶部冲击位移时程曲线如图 11 所示。可以看出:(1)冲击速度越大,缓冲层冲击位移就越大;(2)随着冲击次数的增加,最大冲击位移也逐渐增大,但是之后的几次冲击位移增

大的幅度都不如第 1 次冲击, 当落石冲击速度为 15、20、25 m/s 时, 第 2 次冲击产生的位移分别为第 1 次的 28.42%、33.91%、40.00%; (3) 落石冲击速度为 25 m/s 时, 第 4 次冲击后, 冲击位移增加相对第 2、3 次更大, 可能是因为棚洞破坏程度已经很大, 带动缓冲层向下的位移增大; (4) 当落石冲击速度较小时(15 m/s), 每次冲击的回弹比例均很大, 但是当落石冲击速度较大时(25 m/s), 回弹比例则较小。

2.2.3 棚顶位移

不同落石冲击速度下棚顶位移时程曲线如图 12 所示, 可以看出: (1) 对比 3 种落石冲击速度下的冲击力时程曲线可知, 落石质量越大, 棚顶位移增加越快; (2) 随着冲击次数增加, 棚顶位移不断增加, 且具有回弹现象, 回弹比例随着冲击速度的增加而减小。

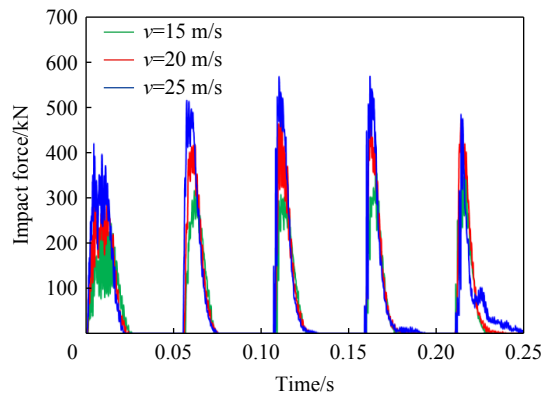


图 10 不同冲击速度下缓冲层冲击力时程曲线

Fig. 10 Time history of the impact forces on the buffer with different velocities

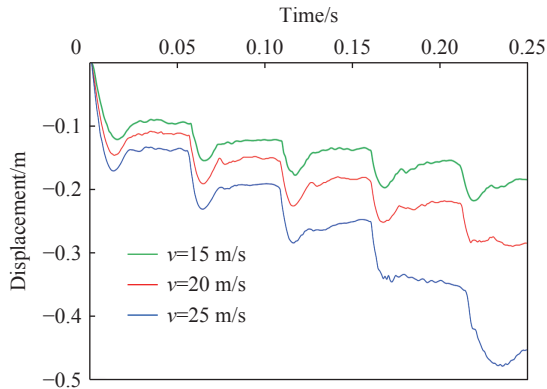


图 11 不同冲击速度下缓冲层顶部冲击位移时程曲线

Fig. 11 Time history of the buffer top displacements with different impact velocities

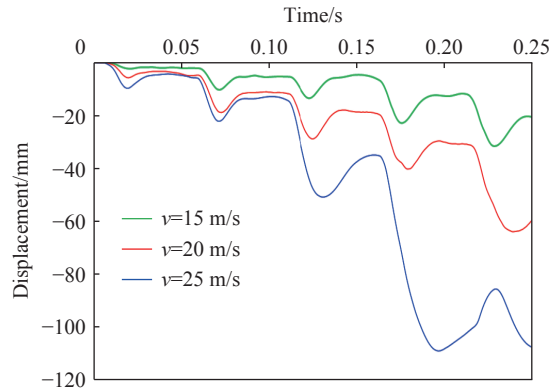


图 12 不同冲击速度下棚顶位移时程曲线

Fig. 12 Time history of the shed roof displacements with different impact velocities

2.2.4 棚洞塑性应变

不同落石冲击速度下棚洞钢筋混凝土板的塑性应变如图 13 所示。可以看出, 在历经多次撞击之后, 棚洞均发生了一定范围的塑性变形, 且塑性变形主要集中在棚洞中心, 呈垂直带状分布; 落石冲击速度越大, 钢筋混凝土板塑性区越大, 破坏程度越大; 棚洞钢筋混凝土板塑性应变对落石冲击速度敏感性较高, 速度为 15 m/s 的落石 5 次冲击产生的塑性应变远不及速度为 25 m/s 的落石 5 次冲击产生的塑性应变; 当落石冲击速度为 25 m/s 时, 5 次冲击后钢筋混凝土板几乎已经完全破坏。

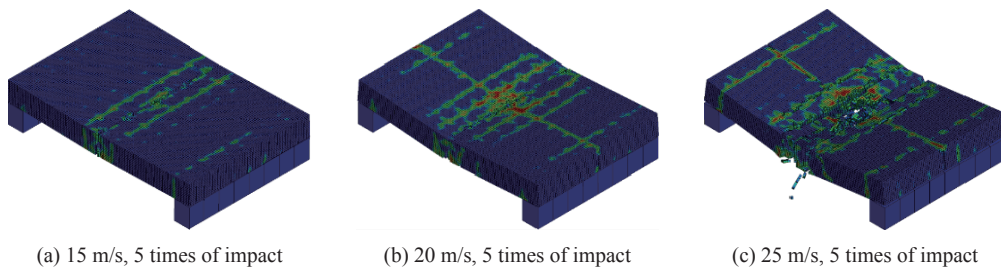


图 13 不同冲击速度下棚洞塑性应变云图

Fig. 13 Plastic strain contours of shed-tunnel with different impact velocities

2.3 落石形状的影响

实际工程中的落石形状不一, 需要对不同形状的情况加以分析。对于半径 0.25 m 的球体落石, 其质量为 137.31 kg。保持落石质量和密度不变, 设置两种长方体落石: (1) 长方体落石 1: 0.403 m×0.403 m×0.403 m, 接触面为 0.403 m×0.403 m; (2) 长方体落石 2: 0.570 m×0.570 m×0.201 m, 接触面为 0.570 m×0.570 m。落石速度固定为 20 m/s, 冲击方向固定为垂直于缓冲层面向下。

2.3.1 缓冲层冲击力

不同落石形状下缓冲层冲击力时程曲线如图 14 所示, 可以看出: (1) 长方体落石冲击产生的冲击力远大于球体落石, 且长方体接触面积越大, 冲击力越大; (2) 与球体落石不同, 长方体落石在第 1 次冲击下受到的峰值冲击力最大, 其后几次冲击产生的冲击力反而迅速减小。

2.3.2 缓冲层顶部冲击位移

图 15 给出了不同落石形状下的缓冲层顶部冲击位移历史, 可以看出: (1) 球体落石冲击产生的缓冲层冲击位移大于长方体, 而对长方体, 接触面积越大, 产生的冲击位移越小; (2) 当落石形状一定时, 随冲击次数的增加, 产生的最大冲击位移逐渐增大, 但是之后的几次冲击增大的幅度不如第 1 次冲击; (3) 当落石形状为长方体时, 每次冲击的回弹比例均很大; 但是当落石形状为球体时, 回弹比例则相对较小。

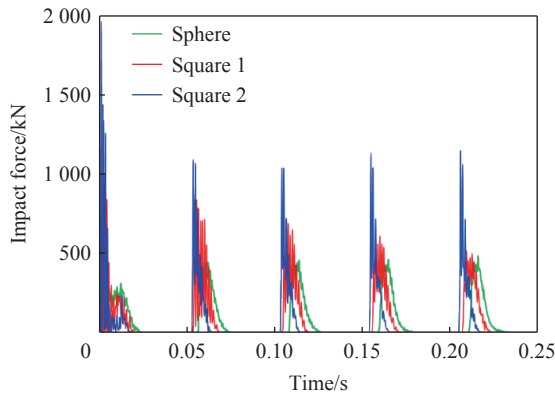


图 14 不同落石形状下缓冲层冲击力时程曲线

Fig. 14 Time history of the impact forces on the buffer with different rock shapes

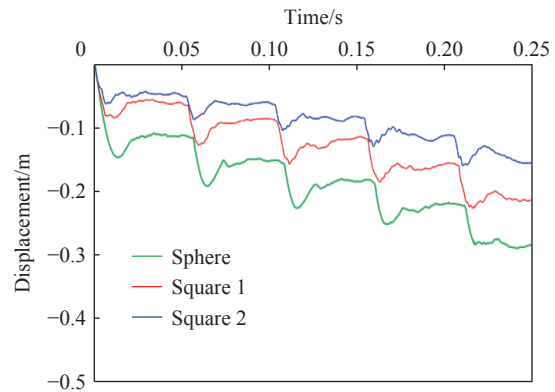


图 15 不同落石形状下缓冲层顶部冲击位移时程曲线

Fig. 15 Time history of the buffer top displacement with different rock shapes

2.3.3 棚顶位移

不同落石形状下棚顶位移时程曲线如图 16 所示, 可以看出: (1) 对比 3 种形状下的冲击力时程曲线可知, 落石形状为长方体时, 棚顶位移增加比球体落石快, 且接触面积越大, 棚顶位移增加越慢; (2) 单独比较每一种落石形状下的时程曲线, 可以看出随着冲击次数的增加, 棚顶位移逐渐增大; (3) 当落石形状为球体时, 每次冲击的回弹比例均很大, 但是当落石形状为长方体时, 回弹比例则相对较小。

2.3.4 棚洞塑性应变

不同落石形状下棚洞钢筋混凝土板的塑性应变如图 17 所示。可以看出: 在历经多次撞击之后, 棚洞均发生了较大范围的塑性变形, 且塑性变形主要集中在棚洞中心及中心周边区域; 棚洞钢筋混凝土板塑性应变对落石形状敏感性较高, 长方体落石冲击产生的塑性区要大于球体落石; 对于长方体

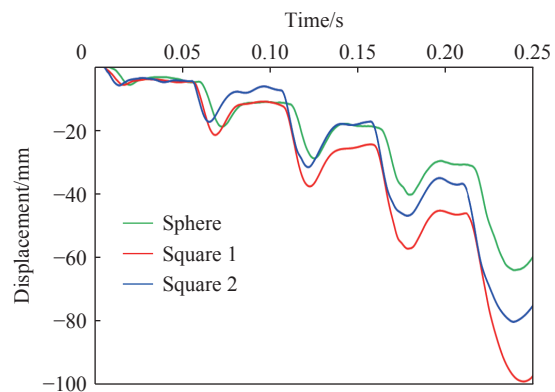


图 16 不同落石形状下棚顶位移时程曲线

Fig. 16 Time history of the shed roof displacement with different rock shapes

落石来说, 接触面积越小, 钢筋混凝土板塑性区越大, 破坏程度越大; 当冲击次数达到 5 次后, 钢筋混凝土板基本完全破坏。

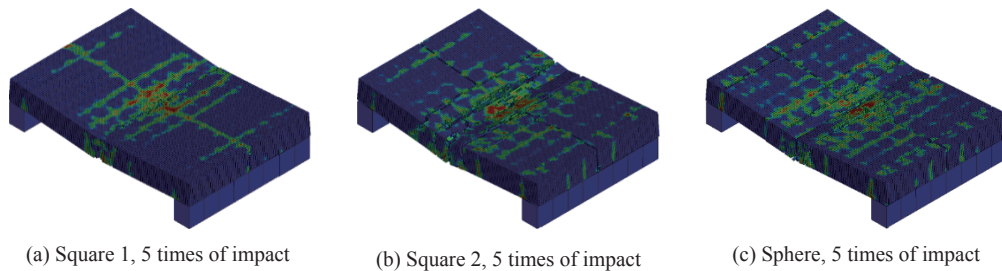


图 17 不同落石形状下棚洞塑性应变云图

Fig. 17 Plastic strain contours of shed-tunnel with different rock shapes

2.4 冲击角度的影响

为讨论冲击角度的影响, 对半径为 0.25 m 的球形落石 ($m=137.31$ kg) 以 20 m/s 的速度冲击棚洞的过程进行模拟, 将冲击角度 (落石速度方向与缓冲层平面的夹角) 分别设置为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 。

2.4.1 缓冲层冲击力

不同落石冲击速度下缓冲层的冲击力时程曲线如图 18 所示, 可以看出: (1) 对比 5 种冲击角度下的冲击力时程曲线可知, 冲击角度越大, 峰值冲击力越大; (2) 当冲击角度一定时, 随着冲击次数的增加, 峰值冲击力均是在第 2 次冲击后迅速增大, 然后趋于稳定。

2.4.2 缓冲层顶部冲击位移

不同落石冲击速度下缓冲层顶部冲击位移时程曲线如图 19 所示, 可以看出: (1) 冲击角度越大, 缓冲层冲击位移越大; (2) 当冲击角度一定时, 随着冲击次数的增加, 产生的最大冲击位移逐渐增大, 但是之后的几次冲击增大的幅度都不如第 1 次冲击, 当落石冲击角度为 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 时, 第 2 次冲击产生的位移为第 1 次冲击的 48.21%、32.93%、52.38%、52.33%、33.91%。

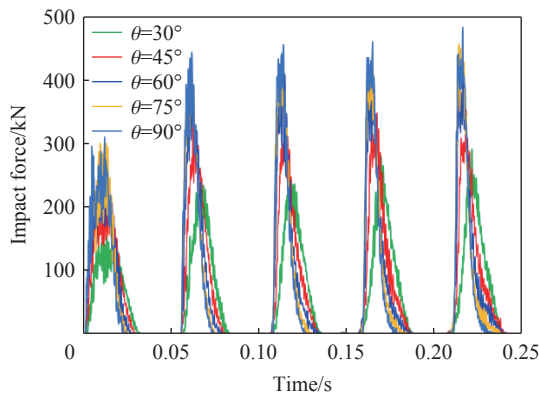


图 18 不同冲击角度下缓冲层冲击力时程曲线

Fig. 18 Time history of the impact forces on the buffer with different impact angles

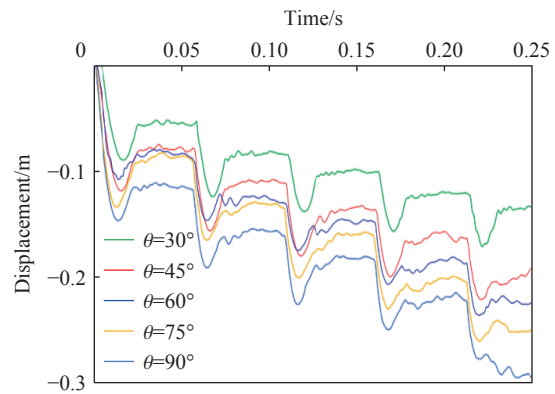


图 19 不同冲击角度下缓冲层顶部冲击位移时程曲线

Fig. 19 Time history of the buffer top displacements with different impact angles

2.4.3 棚顶位移

不同落石冲击角度下棚顶位移时程曲线如图 20 所示, 可以看出: (1) 冲击角度越大, 棚顶位移增加得越快; (2) 当冲击角度一定时, 随着冲击次数的增加, 棚顶位移逐渐增大; (3) 每次冲击后棚顶位移的回弹比例, 随冲击角度的增大而减小。

2.4.4 棚洞塑性应变

不同落石冲击角度下棚洞钢筋混凝土板的塑性应变如图 21 所示, 可以看出: 在历经多次撞击之后,

棚洞均发生了一定范围的塑性变形,且塑性变形主要集中在棚洞中心及中心周边区域;落石冲击角度越大,钢筋混凝土板塑性区越大,破坏程度越大;棚洞钢筋混凝土板最大塑性应变对落石角度敏感性较高,冲击角度 30° 的落石 5 次冲击产生的塑性应变远不及冲击角度 90° 的落石 5 次冲击产生的塑性应变。

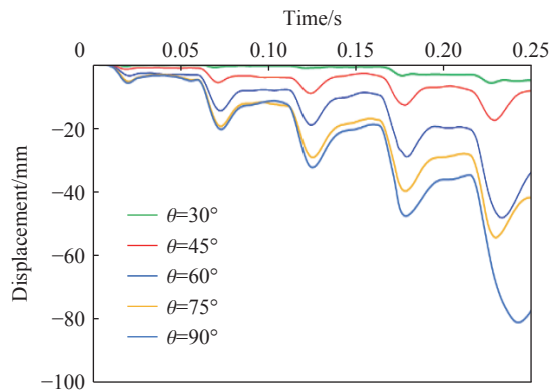


图 20 不同冲击角度下棚顶位移时程曲线

Fig. 20 Time history of the shed roof displacements with different impact angles

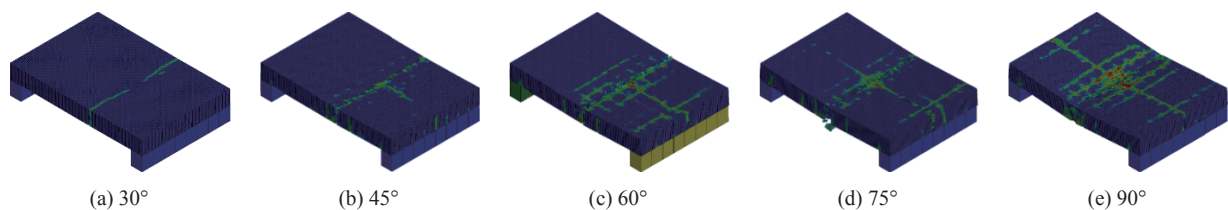


图 21 5 次冲击后不同冲击角度下棚洞塑性应变云图

Fig. 21 Plastic strain contours of shed-tunnel after five times of impact with different impact angles

3 动态响应机理分析

由第 2 节的模拟结果可知,在多次落石冲击下棚洞结构呈现出显著不同于单次冲击下的动态响应机理。

当冲击次数累积到一定程度时,棚洞结构的动力响应特征如棚顶位移等将出现突变(图 7、12、16 及 20),这说明棚洞出现了明显的破坏特征,这是多次冲击造成的损伤累积到一定程度的结果,即多次冲击造成的累积破坏不是单次冲击的简单累加,而是存在某一临界值下的突变效应。

多次冲击造成的突变效应还与落石的质量、冲击速度等密切相关,只有当其达到或超过某一临界值时,才会出现相应的突变效应。如图 7 所示,当落石质量为 70.30 和 137.3 kg 时,在相同的冲击次数下,二者几乎没有突变效应产生。而当落石质量为 237.26 kg 时,在第 4 次冲击时,棚洞位移就出现了明显的突变效应。

图 22 给出了不同落石质量和冲击速度下冲击力随冲击次数的变化规律(其中 $m=137.31$ kg 与 $v=20$ m/s 对应的曲线重合)。可以看出,当落石质量较小时,随着冲击次数的增加,冲击力逐渐增加。这是因为,在初始阶段缓冲层比较松散,因此其耗能作用较强,相应的落石冲击力较小。而随着冲击次数的增加,缓冲层逐渐被压实,其耗能作用逐渐减弱,进而冲击力逐渐增大。然而当落石质量进一步变大,如 $m=237.26$ kg 时,随着冲击次数的增加,混凝土棚洞将出现破坏,导致无法承受落石的冲击作用,因而导致其冲击力降低。这也可以由图 9 所示的棚洞破坏特征看出,当 $m=70.30$ 和 137.31 kg 时,棚洞并未出现明显的破坏特征,而当 $m=237.26$ kg 时,棚洞则出现了明显的破坏。

如图 22 所示,不同落石冲击速度下的计算结果与不同落石质量下的基本类似,即当冲击速度较小时,冲击力总体上随着冲击次数的增加而增加,当冲击速度较大时,冲击力随冲击次数的变化规律与大

落石质量类似。这也可以由图 13 所示的棚洞破坏特征看出。因此,重复冲击下棚洞受到的冲击力与缓冲层的压实情况和棚洞结构的破坏情况密切相关,要结合起来进行综合分析。

因此,若要使棚洞出现明显的累积破坏效应,落石产生的冲击力应足以使棚洞出现明显的塑性变形甚至损伤破坏,而不是仅仅处于弹性变形范围,这样棚洞在每次落石冲击下均会出现不同程度的塑性变形即结构的细观损伤破坏,进而多次冲击作用造成的损伤累加效应将最终导致棚洞结构出现宏观破坏。因而在实际工程中应重视棚洞结构在多次落石冲击下的累积破坏效应。

4 结 论

(1) 根据冲击力、钢筋混凝土板破坏过程等 2 个角度的验证结果,本文建立的 FEM-SPH 耦合模型对于模拟落石对棚洞结构的冲击具有较强的适应性。

(2) 冲击力、冲击位移、棚顶位移、棚洞塑性应变范围均与落石质量、速度、角度呈正相关;落石形状不同时,长方体落石冲击产生的冲击力、棚顶位移、塑性应变均大于球体落石,球体落石冲击产生的缓冲层顶部冲击位移大于长方体落石,而且对于长方体落石而言,缓冲层顶部冲击位移、棚顶位移、塑性区与接触面积呈负相关;随着冲击次数的增加,在不同落石质量、速度、形状 3 种工况下,峰值冲击力均在第 2 次冲击后快速增大,随后趋于相对稳定。但是当落石形状为长方体时,第 1 次冲击产生的冲击力最大;随着冲击次数的增加,最大冲击位移逐渐增大,但是之后的几次冲击增加幅度基本都不如第 1 次冲击,第 2 次冲击产生的冲击位移普遍只有第一次冲击的 28.42%~55.46%;冲击位移及棚顶位移在落石冲击后均会出现回弹现象。钢筋的存在可以有效延缓棚洞破坏,因此要注重对棚洞结构的合理配筋。

(3) 在实际工程中,棚洞必然会遭遇多次落石冲击作用,且随着冲击次数的增加,棚洞位移等将出现突发性增加,因此建议采用增加棚洞易遭受冲击位置处的配筋、缓冲层厚度等措施以提高其抗冲击性能。

另外需要说明的是本文主要采用数值模拟对多次落石冲击下棚洞结构的动力响应进行研究,其准确性在很大程度上受材料本构模型及其参数影响,而由于材料在冲击等动力作用下的复杂性,导致本文选取的材料本构模型与参数可能会与实际情况存在一定误差,因而该研究结果的合理性仍需通过相关试验进行验证或完善。

参考文献:

- [1] DORREN L K A. A review of rockfall mechanics and modelling approaches [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2003, 27(1): 69–87. DOI: 10.1191/0309133303pp359ra.
 - [2] LI L P, LAN H X. Probabilistic modeling of rockfall trajectories: a review [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74(4): 1163–1176. DOI: 10.1007/s10064-015-0718-9.
 - [3] 吴长, 丁金伟, 黄贵武. 滚石冲击下新型组合棚洞结构的动力响应分析 [J]. *建筑结构*, 2018, 48(S2): 546–549. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.S2.110.
- WU C, DING J W, HUANG G W. Dynamic response analysis of a new composite shed-tunnel structure under the rockfall impact [J]. *Building Structure*, 2018, 48(S2): 546–549. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.S2.110.

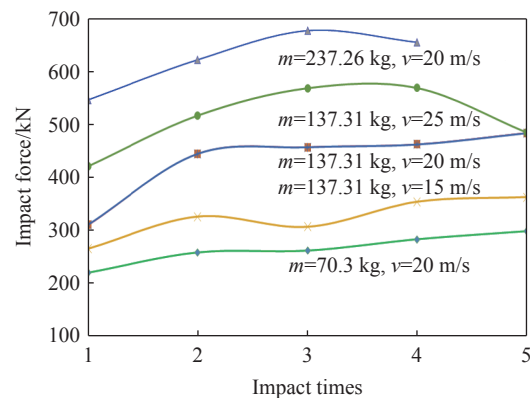


图 22 冲击力随冲击次数的变化曲线

Fig. 22 Variation of the impact force with the impact number

- [4] HERTZ H. Über die Berührung fester elastischer Körper [J]. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, 1882, 92: 156–171.
- [5] 何思明, 李新坡, 吴永. 考虑弹塑性变形的泥石流大块石冲击力计算 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(8): 1664–1669. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.08.017.
HE S M, LI X P, WU Y. Calculation of impact force of outrunner blocks in debris flow considering elastoplastic deformation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(8): 1664–1669. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.08.017.
- [6] 陈颖骐, 王全才. 基于 Hertz 弹性理论和 Thornton 弹塑性假设的滚石冲击力的修正计算 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(13): 37–41. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.13.006.
CHEN Y Q, WANG Q C. Correction calculation of impact force of rockfall based on Hertz contact theory and Thornton elastoplasticity hypothesis [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(13): 37–41. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.13.006.
- [7] THORNTON C. Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic – perfectly plastic spheres [J]. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 1997, 64: 383–386. DOI: 10.1115/1.2787319.
- [8] ZHENG D, BINIENDA W K. Effect of permanent indentation on the delamination threshold for small mass impact on plates [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(25/26): 8143–8158. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2007.06.005.
- [9] 陈泰江, 章广成, 向欣. 落石冲击混凝土棚洞力学特性研究 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(1): 277–285, 298. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0890.
CHEN T J, ZHANG G C, XIANG X. Investigations on mechanical characteristics of rockfall impact on concrete shed cave [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(1): 277–285, 298. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0890.
- [10] 刘红岩. 落石冲击下钢筋混凝土桩板墙的动态响应 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2022, 53(6): 2290–2299. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.06.029.
LIU H Y. Dynamic damage model for reinforced concrete pile-plate retaining wall under rockfall impact [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(6): 2290–2299. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2022.06.029.
- [11] 闫鹏, 方秦, 张锦华, 等. 不同典型形状落石冲击砂垫层试验与量纲分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(7): 073303. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0219.
YAN P, FANG Q, ZHANG J H, et al. Experimental study of different typical shape falling-rocks impacting on the sand cushion and dimensionless analysis [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(7): 073303. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0219.
- [12] WU J L, MA G T, ZHOU Z H, et al. Experimental investigation of impact response of RC slabs with a sandy soil cushion layer [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 1562158. DOI: 10.1155/2021/1562158.
- [13] NAKAJIMA S, ABE K, SHINODA M, et al. Experimental study on impact force due to collision of rockfall and sliding soil mass caused by seismic slope failure [J]. *Landslides*, 2021, 18(1): 195–216. DOI: 10.1007/s10346-020-01461-z.
- [14] 苏宇宸, 王媛, 唐辉明, 等. 落石连续冲击下废弃混凝土垫层宏观观缓冲机制研究 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(10): 2698–2706. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1709.
SU Y C, WANG Y, TANG H M, et al. Macro-mesoscopic investigation of cushioning mechanism of recycled concrete aggregate under successive rockfall impacts [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(10): 2698–2706. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1709.
- [15] SHEN W G, ZHAO T, DAI F, et al. DEM analyses of rock block shape effect on the response of rockfall impact against a soil buffering layer [J]. *Engineering Geology*, 2019, 249: 60–70. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.12.011.
- [16] OUYANG C J, LIU Y, WANG D P, et al. Dynamic analysis of rockfall impacts on geogrid reinforced soil and eps absorption cushions [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(1): 37–45. DOI: 10.1007/s12205-018-0704-4.
- [17] 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. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0548-09.
WANG S, ZHOU X J, JIANG B, 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. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0548-09.
- [18] ZHONG H Q, LYU L, YU Z X, et al. Study on mechanical behavior of rockfall impacts on a shed slab based on experiment and SPH-FEM coupled method [J]. *Structures*, 2021, 33: 1283–1298. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.05.021.
- [19] 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. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104625.
- [20] 黄福有, 张路青, 周剑, 等. 落石冲击作用下棚洞垫层动力响应的颗粒级配效应耦合数值模拟研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(2): 413–428. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0519.
- HUANG F Y, ZHANG L Q, ZHOU J, et al. Coupled numerical simulation study on particle gradation effect of the dynamic response of shed cushion under rockfall impact [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(2): 413–428. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0519.
- [21] OLSSON R. Analytical model for delamination growth during small mass impact on plates [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(21): 2884–2892. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.06.015.
- [22] 王东坡, 刘洋, 裴向军, 等. 滚石冲击钢筋混凝土板的弹塑性动力响应研究 [J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(6): 1147–1153. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2016.06.014.
- WANG D P, LIU Y, PEI X J, et al. Elasto-plastic dynamic responses of reinforced concrete slabs under rockfall impact [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(6): 1147–1153. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2016.06.014.
- [23] 王东坡, 刘浩, 裴向军, 等. 基于离散元-有限差分耦合的滚石冲击棚洞垫层动力响应研究 [J]. *振动与冲击*, 2021, 40(19): 246–253. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.19.031.
- WANG D P, LIU H, PEI X J, et al. Dynamic response of shed tunnel cushion under rolling stone impact based on discrete element-finite difference coupling [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(19): 246–253. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.19.031.
- [24] PHAM A T, TAN K H, YU J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse [J]. *Engineering Structures*, 2017, 149: 2–20. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.07.042.
- [25] 铁道部第二勘测设计院. 铁路工程设计技术手册·隧道 (修订版) [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 141–191.
- [26] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30-2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [27] 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. DOI: 10.3321/j.issn:1001-8360.1996.01.017.
- YANG Q X, GUAN B S. Test and research on calculating method of falling stone impulsive force [J]. *Journal of the China Railway Society*, 1996, 18(1): 101–106. DOI: 10.3321/j.issn:1001-8360.1996.01.017.
- [28] LABIOUSE V, DESCOEUDRES F, MONTANI S. Experimental study of rock sheds impacted by rock blocks [J]. *Structural Engineering International*, 1996, 6(3): 171–176. DOI: 10.2749/101686696780495536.
- [29] 日本道路协会. 落石对策便览 [M]. 东京: 丸善株式会社出版事业部, 2000.

(责任编辑 王小飞)