

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230415002

泥石流冲击作用下隧道明洞结构变形及损伤规律研究*

李兆锋, 易昊杰, 卢臣涛, 郭东, 李锦辉

(哈尔滨工业大学(深圳)智能土木与海洋工程学院, 广东 深圳 518005)

摘要: 西部山区交通线路上, 山岭隧道容易遭受泥石流的冲击, 进出口处的明洞结构损毁尤为严重。然而, 泥石流对隧道明洞结构的灾害作用机理尚不清晰, 其难点在于协调描述泥石流的流体力学响应与明洞的固体损伤响应。为此, 发展了耦合欧拉-拉格朗日数值方法, 采用宾汉姆模型描述泥石流的流体力学性质, 采用混凝土塑性损伤模型描述明洞结构的应力应变关系, 通过模拟福堂隧道明洞受灾的真实案例, 阐明了泥石流冲击作用下明洞结构的变形及损伤规律。仿真结果显示, 迎流面冲击合力与冲击速度的平方成正比, 明洞结构的损伤主要形成于冲击合力达到峰值的过程中。位移最大位置出现在迎流侧的边墙上, 衬砌内表面出现沿轴向的张拉裂缝, 外表面出现成片的剥落损伤。随着泥石流冲击速度和泥石流屈服应力的提高, 明洞损伤加剧, 裂缝斜向延伸到过流断面以外的区域, 并可导致衬砌的失稳破坏。相较于侧面冲击, 压顶冲击能够大幅降低明洞损伤程度及其对冲击速度的敏感性。上述结果表明, 为提高我国隧道工程的泥石流灾害防治能力, 需要对泥石流发育位置及成分进行现场勘查, 建立相应措施降低泥石流冲击速度, 同时可通过隧道-山体空间关系的设置导向冲击发生位置, 以降低泥石流的损伤作用。

关键词: 泥石流; 明洞隧道; 衬砌损伤; CEL方法; 冲击力

中图分类号: TU458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1163-11

Deformation and Damage Patterns of Open-cut Tunnel Structures under Impact of Debris Flow

LI Zhaofeng, YI Haojie, LU Chentao, GUO Dong, LI Jinhui

(School of Intelligent Civil and Marine Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518005, China)

Abstract: Along the transportation routes in mountainous areas of western China, mountain tunnels are susceptible to debris flow impacts, with the open-cut tunnel structures at tunnel entrances and exits being particularly prone to severe damage. However, the disaster mechanism of debris flow acting on open-cut tunnel structures remains unclear. The primary challenge lies in the coordinated description of the hydrodynamic response of debris flow and the solid damage response of open-cut tunnel structures. To address this, a coupled Eulerian-Lagrangian numerical method was developed. The Bingham model was used to describe the hydrodynamic properties of debris flow, and the concrete damage plastic model was employed to characterize the stress-strain relationship of open-cut tunnel structures. By simulating a real disaster case at the Futang Tunnel, the deformation and damage patterns of the structure

* 收稿日期: 2023-04-15; 修回日期: 2023-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1511101)资助

作者简介: 李兆锋(1991—), 男, 助理教授, 博士, 硕导。主要从事岩土材料本构的研究。E-mail: lizhaofeng@hit.edu.cn

通信作者: 李锦辉(1978—), 女, 教授, 博士, 博导。主要从事岩土工程灾害防控的研究。E-mail: jinhui.li@hit.edu.cn

under the impact of debris flow were elucidated. The simulation results showed that the total impact force on the upstream side was proportional to the square of the impact velocity, and the damage to the open-cut tunnel structure primarily occurred during the process when the total impact force reached its peak. The maximum displacement was observed on the sidewall of the upstream face, with axial tensile cracks developing on the inner surface of the lining and extensive spalling damage on the outer surface. As the debris flow impact velocity and yield stress increased, the damage to the open-cut tunnel intensified, with the cracks extending obliquely beyond the flow cross-section and potentially leading to the instability failure of the lining. Compared with the side impacts, crown impacts could significantly reduce the damage level of the open-cut tunnel and its sensitivity to impact velocity. The above findings indicate that to enhance the debris flow disaster prevention and control capacity of tunnel engineering in China, it is necessary to conduct field investigations to determine the development locations and composition of debris flow. Corresponding measures should be established to reduce debris flow impact velocity. Moreover, the spatial relationship between tunnels and mountains can be utilized to guide the impact location, thereby mitigating the impact damage of debris flow.

Keywords: debris flow; open-cut tunnel; lining damage; CEL method; impact force

0 引言

近年来,我国西部山区基础设施方面投入巨大,尤其是公路、铁路等设施的建设过程中修筑了大量的山岭隧道。典型如在建的川藏铁路工程,设有隧道 198 座(包括国内最长的易贡隧道,42.5 km),隧线比高达 70.2%。然而,西部山区容易受降雨等因素影响诱发泥石流灾害,对隧道造成严重的冲击和破坏,位于隧道进出口的明洞结构的受灾情况尤为严重。2013 年 7 月 9 日,四川西部普降特大暴雨,映秀至汶川高速上多处受泥石流灾害,全线最长的福堂隧道右线明洞结构被冲毁一环(长 20 m,图 1),左线被全部冲毁和掩埋^[1]。2022 年 6 月 4 日,贵广线月寨隧道口突发溜坍侵入线路的泥石流,并造成 D2809 次高铁列车脱线、1 死 12 伤的惨痛事故^[2]。截至 2020 年底,中国已建公路隧道 19 067 座、铁路隧道 16 798 座^[3-4],当中众多的山岭隧道正同样面临着泥石流灾害的严重威胁,亟需深入认识泥石流冲击对隧道结构的破坏规律和机理,提高我国隧道工程的灾害防治能力。

泥石流具有突发性、体量大和破坏力大的特点,导致野外观测数据较少,且难以开展相关的现场试验。因此,室内模型试验是研究泥石流冲击隧道明洞等结构物的重要手段之一。魏鸿^[5]通过室内试验研究了泥石流龙头对坝体的冲击力,发现泥石流流速是影响冲击力最重要因素,给坝体的防灾减灾设计提供了一定的指导。D. P. Wang 等^[6]通过室



图 1 福堂隧道明洞案例

Fig.1 Case study of open-cut tunnel in Futang Tunnel

内试验研究了不同黏度的泥石流对桥墩的冲击力,并指出低黏度泥石流与高黏度泥石流相比,具有更高的流速、更强的冲击力以及更高的冲击频率。陈洪凯等^[7]进一步探讨了不同固相粒径和固相比(与黏度相关)泥石流的冲击力,并发现冲击力随着固相比和粒径增大而增大。此外,B. Zanuttigh 等^[8]还通过试验分析了不同形状阻挡屏障受干性泥石流冲击时的响应,并认为屏障的形状对冲击力大小会产生较大的影响。

近年来,数值模拟方法的不断发展,为泥石流

冲击结构物的研究提供了更高效的解决方案。一般认为,隧道明洞等结构物属于固体范畴,而泥石流属于流体范畴,需要在同一空间内融合不同数值方法以实现泥石流冲击结构物的模拟。W. G. Shen等^[9]将泥石流视为颗粒流,采用离散元DEM方法模拟了干性泥石流冲击刚性挡墙时的运动特征和冲击力时程变化;柳春等^[10]同样采用了离散元DEM模拟干性泥石流,并采用了有限元FEM方法模拟棚洞,即通过DEM-FEM耦合再现了泥石流对棚洞的冲击过程,分析了泥石流物理性质和流动速度等因素对最大冲击力的影响。DEM方法一定程度上反映了泥石流中颗粒成分的离散性,但泥石流往往为固液两相混合,更倾向于连续介质的特性。为此,H. Y. Luo等^[11]发展了ALE方法(任意拉格朗日-欧拉方法, Arbitrary Lagrangian Eulerian Method),在连续介质体系中模拟了泥石流冲击作用下框架结构房屋的破坏倒塌过程,明确了不同部位结构柱的失效顺序及机制;K. Lee等^[12]则发展了CEL方法(耦合欧拉-拉格朗日方法, Coupled Eulerian-Lagrangian Method),模拟了韩国 Umyeon-san山体发生的泥石流灾害对山脚建筑物的冲击过程,即采用欧拉法描述泥石流、采用拉格朗日法描述建筑物,分析了冲击速度等因素的影响。

综上,采用CEL等数值仿真方法能有效实现泥石流冲击结构物的研究,但当前工作集中于房屋等对象,较少涉及隧道明洞结构。同时,当前工作主要关注泥石流造成的最大冲击力,对隧道明洞结构的变形和损伤等功能性指标缺乏研究。为此,本文拟发展CEL数值方法实现泥石流冲击隧道明洞结构的仿真分析,深入探讨冲击过程中隧道明洞的变形和损伤规律,分析冲击速度、泥石流参数、冲击位置等关键因素的影响,助力西部山区大型线路沿线隧道的灾害防治。

1 泥石流冲击明洞的数值仿真方法

本节主要介绍所发展的耦合欧拉-拉格朗日CEL数值方法,用于泥石流冲击隧道明洞结构的动力过程仿真和深入分析。其中,泥石流采用欧拉体描述,隧道明洞则采用拉格朗日体描述。

1.1 隧道明洞模型

以2013年7月9日福堂隧道明洞受泥石流灾害案例为基准进行建模,明洞受灾前的现场情况如

图1(a)所示。该隧道位于国道213线映秀至汶川段,属于“5·12汶川地震”极重灾区中心区域。汶川地震产生了巨量的松散物堆积于山坡和沟谷,导致该线路上泥石流灾害频发,福堂隧道为典型案例之一,本次研究对沿线及西部山区防灾减灾工作均具有重要的参考意义。

福堂隧道明洞的截面几何尺寸如图2所示,符合《公路隧道设计规范》^[13]中关于设计时速100 km/h的高速公路需求。明洞结构包括衬砌结构和洞门墙结构两部分。二者均采用C30混凝土浇筑,并采用C30素混凝土回填实现紧密连接。衬砌厚度为70 cm,明洞结构的轴向长度按图1(a)实际工程取为20 m。

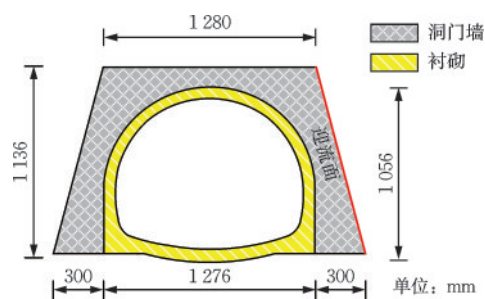


图2 隧道明洞结构截面及尺寸

Fig.2 Cross-section and dimensions of open-cut tunnel structure

明洞结构采用拉格朗日单元进行建模,并采用CDP本构模型(混凝土塑性损伤模型, Concrete Damage Plastic Model)描述其应力应变关系,该模型提供了损伤因子参数量化每个单元的损伤情况。参考《公路隧道设计规范》(JTGD70-2004)^[13],对应明洞衬砌使用的C30混凝土材料,设定材料单元密度为2400 kg/m³,弹性模量为30.0 GPa,泊松比为0.2。CDP模型中受拉/压强度参数按照《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[14]的建议取值列于表1,其中单轴受压和受拉强度分别为20.1、2.01 MPa,对应的压和拉应变为1471.8、95.24 $\mu\epsilon$ 。

为从单轴参数扩展到双轴,CDP模型中设定双轴受压强度和单轴受压强度之比为1.16,拉伸子午线与压缩子午线上第二应力不变量的比值为2/3。模型中黏塑性参数根据经验和规范取值如下:剪胀角为30°,流动势偏移量为0.1,黏滞系数为 5×10^{-4} 。另外,CDP模型中材料受拉劣化响应如图3所示,即随着拉应变的增大,材料单元的屈服应力不断下降,而拉伸损伤参数不断上升。

表1 C30混凝土的CDP模型参数

Table 1 CDP model parameters for C30 concrete

模型参数	取值
单轴受压强度代表值 $f_{c,r}$ /MPa	20.1
单轴受拉强度代表值 $f_{t,r}$ /MPa	2.01
单轴抗压强度对应的压应变 $\epsilon_{c,r}/10^{-6}$	1 471.8
单轴抗拉强度对应的拉应变 $\epsilon_{t,r}/10^{-6}$	95.24
单轴受压应力应变曲线下降段的参数值 α_c	0.746 4
单轴受拉应力应变曲线下降段的参数值 α_t	1.264
双轴受压强度和单轴受压强度比值 ξ	1.16
拉伸与压缩子午线上第二应力不变量比值 K	2/3
剪胀角 $\varphi/(^\circ)$	30
流动势偏移量 β	0.1
黏滞系数 α	5×10^{-4}

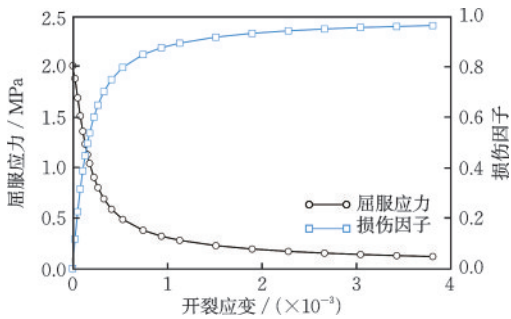


图3 C30混凝土的CDP模型受拉劣化响应

Fig.3 Tensile degradation response of CDP model for C30 concrete

1.2 泥石流模型

本文采用8节点的欧拉单元进行泥石流的建模,网格尺寸为0.02 m。根据C. H. Lin等^[15]的模拟结果,该网格精度能较好地描述泥石流的流动形态。同时,本文采用宾汉姆模型(Bingham Model)描述泥石流的应力应变关系,如式(1)所示:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中, τ 为泥石流单元的剪切应力,Pa; τ_0 为屈服应力,Pa; η 为黏度,(Pa·s); $\dot{\gamma}$ 为剪切应变率,(s⁻¹)。

B. Yu等^[16]通过试验发现,泥石流因其成分及比例的不同而具有不同的屈服应力和黏度,并提出了相应的经验计算公式。案例现场泥石流属于黏性泥石流,根据王友彪等^[17]的统计分析,该类型泥石流具有如表2所示的成分含量。采用B. Yu等^[16]提出的经验公式算得屈服应力为6 654 Pa,通过室内试验测得黏度为5.0 Pa·s^[17]。本文将表2为基准,采用不同的泥石流黏度和屈服应力参数进行数值模拟,以表征和分析当地不同泥石流对隧道明洞冲击的影响。

表2 泥石流材料特性参考值

Table 2 Reference values of debris flow material properties

参数	取值
密度/(kg·m ⁻³)	2 000
碎石质量百分比/%	39.7
砂土质量百分比/%	23.8
黏土质量百分比/%	15.9
水质量百分比/%	20.6
黏度 η /(Pa·s)	5.0
屈服应力 τ_0 /Pa	6 654

实际上,王友彪等^[17]曾根据表2的数据配制泥石流并进行室内试验,研究泥石流对桥墩的冲击作用,试验装置如图4所示。本文为验证上述泥石流模拟方法的合理性,对该试验进行了仿真。整个冲击试验装置包括泥石流槽和结构物模型,供给箱内装有配好的泥石流材料,下方出口高度为0.15 m,倾斜槽长4 m,宽0.3 m,高0.4 m,坡度可以调整。结构物模型为刚性材料,高0.2 m,截面为半径和边长为0.05 m的圆形,被固定在离出口0.5 m的位置。仿真与试验之间的几何设定和材料设定保持高度一致。

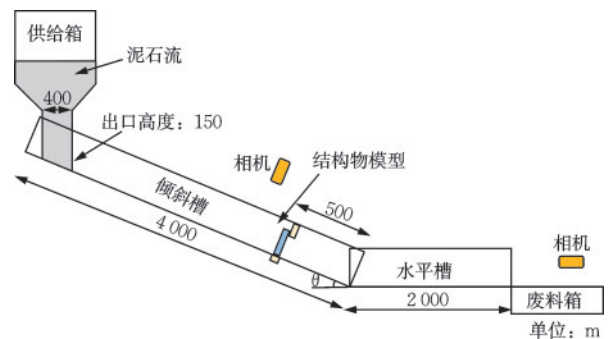


图4 泥石流模拟方法验证的室内试验

Fig.4 Laboratory test for validation of debris flow simulation method

仿真和试验得到的泥石流冲击桥墩作用力时程曲线如图5所示。可以看到,二者在冲击力发展趋势上高度一致,即在相近的时间达到相近的峰值冲击力,随后逐渐下降。其中,仿真得到的峰值冲击力为76.9 N,而试验实测的峰值为81.1 N,误差仅5.2%。另外,在泥石流的流动形态上,二者也具有较高的吻合度,如图6所示。试验中,在桥墩前泥石流出现“爬高”现象,在桥墩后泥石流则出现“无流区”,这两种现象均在仿真中得到重现。上述对比结果表明,无论是从定性还是定量角度出发,采用本文所提出的方法模拟泥石流均具有出较好的合理性。

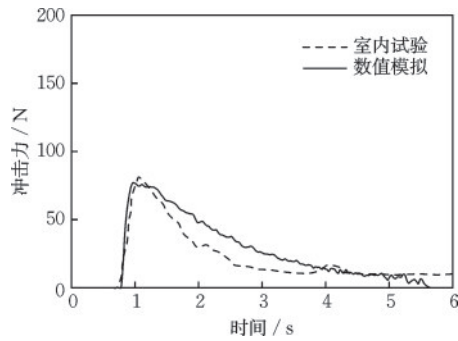


图5 桥墩的冲击力时程曲线

Fig.5 Time-history curves of impact force on bridge pier

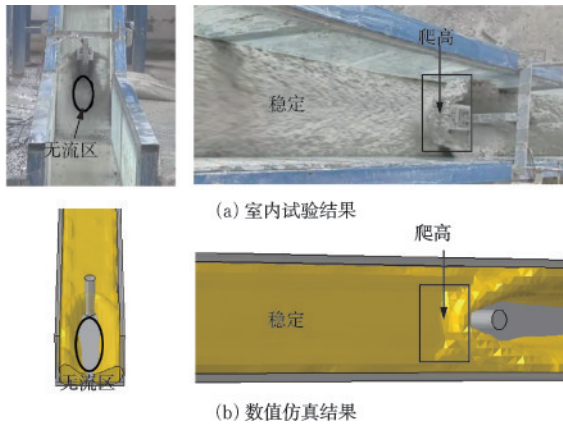


图6 泥石流流动形态对比

Fig.6 Comparison of debris flow movement patterns

1.3 泥石流冲击隧道明洞的模拟

《泥石流灾害防治工程勘查规范》^[18]按集水区地貌特征将泥石流分为沟谷型泥石流和坡面型泥石流。沟谷型泥石流形成于山沟中,时空发展规律性可识别,隧道选址一般事先避开,而坡面型泥石流无恒定沟槽且一般形成在30°以上的斜面,发生隐蔽,难以防范。如图1(a)所示,福堂隧道案例的情况近似于坡面型泥石流。为此,本文主要关注该类型泥石流的作用,并将发育泥石流的坡面简化为平面,但依然允许泥石流经历加速至冲击的发育过程。所设置泥石流冲击隧道明洞结构的初始模型如图7所示。

泥石流初始设置为长度30 m、宽度20 m和深度4 m的长方体,其体积与实际灾害中的量级相近。泥石流从坡面冲下,以此模拟大体积的泥石流对明洞的持续冲击。考虑到福堂案例中泥石流冲毁了右线10 m一环,本文选取了一种较为常见的冲击形式,即部分泥石流冲击到隧道明洞结构,部分泥石流漫流至道路或侵入洞内。泥石流初始位置与明

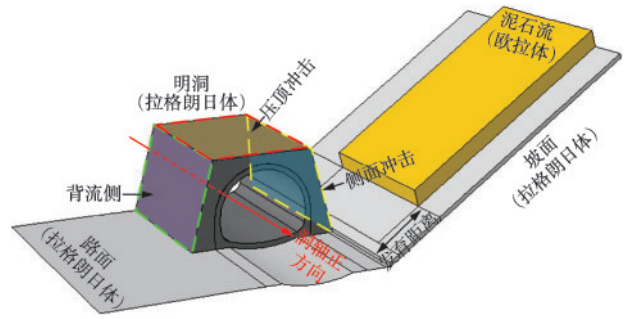


图7 泥石流冲击隧道明洞结构的数值模型

Fig.7 Numerical model of open-cut tunnel structure impacted by debris flow

洞的距离为8 m,确保在接触结构之前泥石流具有一段形态发育过程。

坡面、道路和明洞等泥石流以外的对象均采用拉格朗日单元进行建模。计算域内设有固定网格,泥石流欧拉体在固定网格中自由流动,其他拉格朗日体则设置在欧拉域以内。泥石流欧拉体与拉格朗日体之间设置为通用接触,摩擦系数设为0.5。再次考虑到福堂案例中右线情况,明洞结构底部设为固定端,位于洞轴负方向一端的结构面也设为固定端,以模拟与山体隧道的良好连接。洞门墙与衬砌之间采用绑定约束,用于表征洞门墙和衬砌之间用C30混凝土填充后的良好黏结。整个模型施加重力作用,分析总时长为10 s。

本文共设定15个模拟工况,见表3。所有工况

表3 数值模拟方案

Table 3 Numerical simulation schemes

工况	初速度/(m·s ⁻¹)	冲击位置	泥石流参数	
			黏度/(Pa·s)	屈服应力/Pa
1	10	侧面	5	6 654
2	12	侧面	5	6 654
3	15	侧面	5	6 654
4	10	侧面	1	3 000
5	10	侧面	1	6 654
6	10	侧面	1	9 000
7	10	侧面	5	3 000
8	10	侧面	5	9 000
9	10	侧面	10	3 000
10	10	侧面	10	6 654
11	10	侧面	10	9 000
12	10	压顶	5	6 654
13	15	压顶	5	6 654
14	20	压顶	5	6 654
15	25	压顶	5	6 654

中,泥石流均沿坡度 35°的山体(与图 1 实际工况一致)倾泻而下冲击明洞结构,冲击方向与洞轴垂直。本文通过工况 1~3 的设置,分析不同泥石流初速度对明洞结构变形和损伤的影响规律。文献[19]调查发现实际工况中泥石流冲击速度达到 15~20 m/s,本文以调查结果为准并考虑泥石流的发育过程,将模拟中泥石流初速度范围设置为 10~25 m/s。同时,本文通过工况 4~11 的设置分析泥石流流变参数的影响。文献[17]表明天然泥石流由于组分不同而具有不同的流变参数,本文以表 2 现场泥石流材料参数为基准,考虑黏度为 1、5、10 Pa·s 以及屈服应力为 3 000、6 654、9 000 Pa 的情况,阐明不同组分泥石流的损伤作用。另外,本文通过工况 12~15 的设置,分析泥石流冲击位置对明洞结构变形和损伤的影响规律,考虑侧面冲击(与图 1 实际工况一致)和压顶冲击(见下文麻柳湾等案例)两种情况,对应被冲击的结构面如图 7 所示。

如图 8 所示,本文在隧道明洞的衬砌中均匀布置了多个观测点,以分析表 3 中不同工况下明洞的变形响应。测点沿洞轴方向的间隔为 2 m,共分为 10 组(图 8(a))。每组测点均在同一衬砌剖面上,分别位于该剖面的拱顶、拱肩、拱腰、边墙、拱脚以及仰拱处,共包含 10 个测点(图 8(b))。

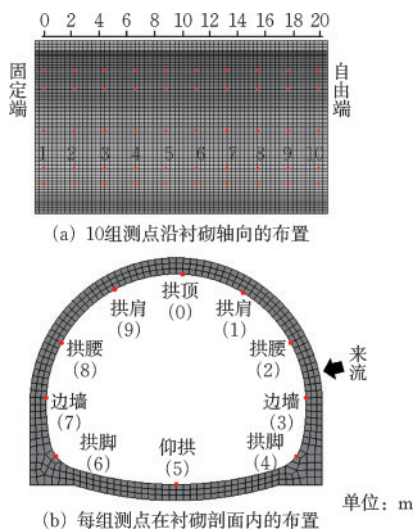


图 8 明洞结构响应输出点

另外,为方便下文阐述,做出如下定义:“迎流侧”为明洞结构被泥石流直接冲击的结构面,与之相背的一侧为“背流侧”,“固定端”为与山体内隧道连接的明洞结构面,“自由端”为暴露在山体外部与路面连通的另一端(图 7)。

2 泥石流冲击下隧道明洞结构的响应

2.1 泥石流冲击过程

图 9 为工况 1 中作用在明洞迎流面上(见图中箭头所指结构面)冲击合力的时程曲线,曲线整体呈现先迅速攀升后逐渐下降的趋势,最后趋于某一稳定值。在 0.6 s 时刻,泥石流开始冲击明洞结构,在 1.4 s 时刻,冲击合力上升至峰值 1.41×10^4 kN。冲击合力随后下降,但由于后续泥石流的持续冲击以及洞门墙角淤积产生的静压力,合力保持在 0.38×10^4 kN,为峰值的 1/3。

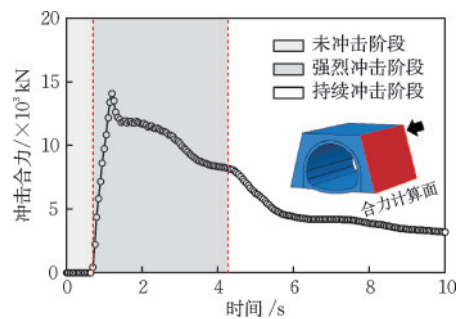


图 9 迎流面冲击合力的时程曲线

Fig.9 Time-history curve of total impact force on upstream side

《泥石流灾害防治工程勘查规范》^[18]给出了泥石流对结构物冲击压力 δ 的估算公式,如式(2)所示:

$$\delta = \lambda \frac{\gamma_c}{g} V_c^2 \sin \alpha \quad (2)$$

式中, λ 为建筑物形状系数,此处将明洞视为矩形建筑物,取值 1.33; γ_c 为泥石流容重,此处按表 2 取 20.0 kN/m³; g 为重力加速度,取 9.8 m/s²; V_c 为泥石流平均流速,此处取数值模拟中 0.6 s 时刻对应的数值 14.5 m/s; α 为建筑物受力面与泥石流冲击方向的夹角,此处近似取 75°。公式(2)估算得到工况 1 中冲击压力为 551 kPa。由于图 5 显示过流断面宽度和泥石流深度分别约为 10 m 和 4 m,因此按冲击面积为 40 m²计算,明洞受到的冲击合力为 2.20×10^4 kN。数值结果与规范估算值处于同一量级且数值相近,表明了数值模拟的有效性和可靠性。显然,规范估算值偏大、偏于保守,并且将冲击力简化为恒定均布荷载,忽略了真实情况下冲击力的时空

分布特征。因此,在隧道工程泥石流灾害防治的问题上,采用本文的数值仿真方法具有重要的参考意义,有助于精细化工作的开展。

工况1中泥石流的冲击过程可进一步划分为三个阶段,如图10所示。其中,第一阶段为未冲击阶段,泥石流完成形态发育,流速达到14.5 m/s,但并未冲击明洞结构(图10(a))。第二阶段为强烈冲击阶段,从泥石流开始冲击明洞到冲击合力下降至峰值50%,此阶段内泥石流材料震荡飞溅,沿迎流面爬高,对结构的破坏最为强烈(图10(b))。第三阶段为持续冲击阶段,冲击合力逐渐下降并趋近于某一定值。向上冲起的泥石流跌落,洞口附近的路面被泥石流淤积堵塞,同时小部分泥石流涌入明洞内部路面,与现场观察的情况相似(图10(c))。为更好地分析和对比泥石流冲击下明洞的响应,后文各工况中冲击过程均按上述标准划分为三个阶段。

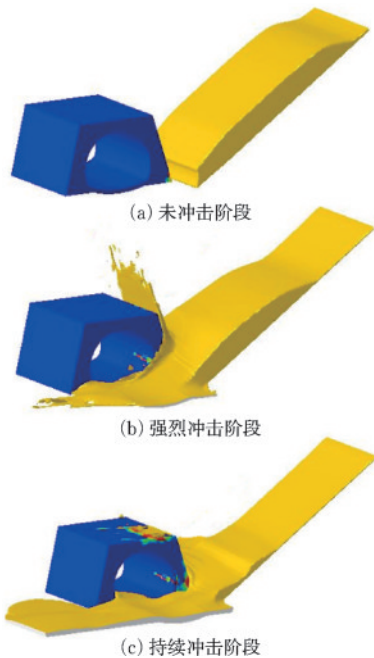


图10 泥石流冲击的三个阶段
Fig.10 Three stages of debris flow impact

2.2 衬砌结构的位移响应

衬砌是隧道的主要承载结构,因此从衬砌的角度出发分析明洞的变形规律。如1.3节所述,本文在衬砌10个剖面上布设了10组测点,首先取第9号剖面(靠近自由端)拱顶、迎流侧的边墙、拱腰和拱肩以及背流侧拱肩5处测点分析同一剖面内的响应。图11为以上5个测点的位移量时程曲线,可以发现在同一剖面上各测点位移变化趋势一致,并与

图6冲击力的模式相近:在0.6 s的时刻由于泥石流接触迎流面,开始产生位移;均在1.4 s左右达到峰值后逐渐下降,但由于冲击导致的塑性变形以及泥石流淤积产生的静压力,位移最终趋于稳定。对比5个测点数据发现,离冲击部位越近的测点峰值及残余位移也越大,例如边墙处峰值为0.55 mm而残余值为0.42 mm(峰值的76%),但拱肩处这二者仅为0.26 mm和0.09 mm(峰值的35%)。

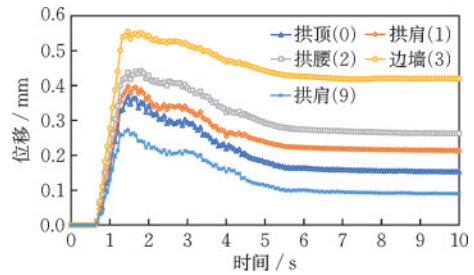


图11 第9剖面上5个观测点的位移时程曲线
Fig.11 Displacement time-history curves of five observation points on cross-section 9

图12为1.4 s时刻衬砌的变形情况及位移量云图,变形放大系数为500。从图12可以看出,在过流断面上的剖面,位移最大位置一般出现在迎流侧的边墙上(即泥石流的冲击位置),该位置向隧道内部凹进。背流侧位置的边墙等位置位移相对较小,拱顶位置则朝着来流的反方向移动,导致整体呈现出绕迎流侧边墙扭转的变形模式。在过流断面以外的剖面,包括迎流侧边墙在内各个位置的位移均较小,并且沿进入山体方向的逐渐减小,这是由于明洞与山体隧道连接良好的边界条件所导致。从上述变形结果来看,在隧道工程防治泥石流灾害的问题上,由于剖面内各点以及不同剖面间位移模式的一致性使监测设备的布置更具有弹性,同时防护措施应主要布置于远离山体且位移更为强烈的自由端。

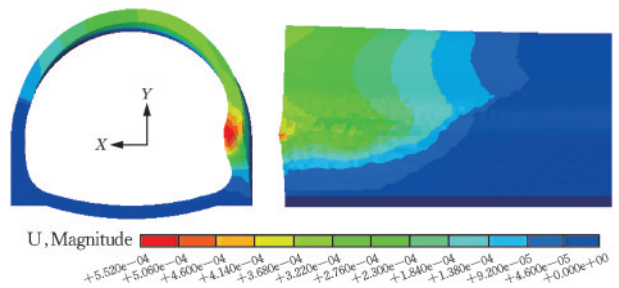


图12 1.4 s时刻衬砌的位移云图
Fig.12 Displacement contour maps of lining at 1.4 s

2.3 衬砌结构的损伤特征

本文以单元损伤因子值衡量衬砌结构的损伤程度,该因子能够一定程度上表征混凝土从开裂到整体结构失效的发展过程。混凝土的损伤可以分为受拉应力和压应力引起的损伤,但由于混凝土材料受压性能远大于受拉性能的特性,结合图10可以推断,在泥石流冲击作用下混凝土以受拉损伤为主。因此,下文采用受拉损伤因子表征明洞结构的损伤情况。

图13为第二阶段和第三阶段结束时衬砌的损伤分布云图,第一阶段由于泥石流未接触到洞门墙,衬砌上不存在损伤,此处不作展示。在第二阶段中(图13(a)),迎流侧衬砌内外呈现不同的损伤模式:内表面的边墙位置出现了一条长约6 m的轴向损伤,应变在 $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$,超过了规范规定的极限拉应变限值 1×10^{-4} ,可认为结构已发生开裂;外表面在过流断面范围内则出现成片损伤,对应的损伤表现近似为混凝土材料的剥落。在第三阶段中(图13(b)),由于部分泥石流在洞口前流过,衬砌的自由端受到途径泥石流的磨蚀,同时背流侧拱脚受到挤压产生损伤,其余没有新的薄弱位置出现,原有迎流侧的损伤没有进一步发展为更严重的破坏。可见,衬砌损伤在第二阶段已经主要形成,因此在实际工程中预测泥石流造成的损伤时,可以着重分析峰值附近冲击合力的累积作用。上述损伤模式与汶川S463亚三路中肯着明洞的灾后情况

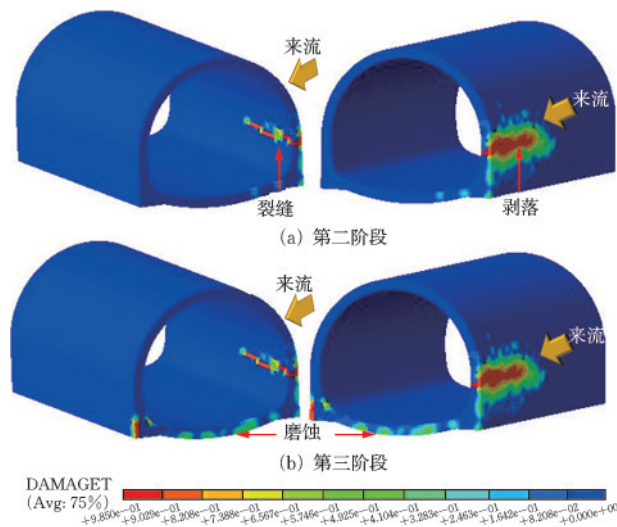


图13 不同阶段衬砌结构损伤云图

Fig.13 Damage contour maps of lining structure at different stages

类似,经事后调查,该明洞在泥石流冲击后出现了3处结构开裂、1处结构破坏^[19]。

3 结构损伤的敏感性分析

衬砌的损伤程度是隧道结构受泥石流冲击后进行灾后评价的关键,因此本文选取泥石流冲击速度、泥石流流变参数(即屈服应力和黏度)和冲击位置三大关键影响因素,针对泥石流冲击作用下明洞结构的损伤进行敏感性分析。

3.1 泥石流冲击速度

根据文献[17]调查发现,实际明洞结构在损毁瞬间,泥石流冲击速度达到15~20 m/s。以此为基准,本文将泥石流初速度设置为10、12、15 m/s(对应工况1、2、3),从而研究泥石流冲击速度对明洞结构损伤的影响。

工况1~3中,泥石流经过发育后,冲击明洞前的平均速度分别为14.5、15.9、18.6 m/s。泥石流作用于迎流面的冲击合力均呈现先迅速攀升后缓慢下降的趋势,冲击合力峰值分别达到 1.41×10^4 、 1.64×10^4 、 2.45×10^4 kN,与冲击速度平方呈正比关系,与2.1节中《泥石流灾害防治工程勘查规范》^[18]采用的估算公式一致,再次表明了本文数值方法的可靠性和有效性。

图14为三种泥石流初速度下迎流侧衬砌内外表面损伤情况的展开平铺,有利于更加清晰地展现损伤特征。对于衬砌内表面,在泥石流初速度为10 m/s时,边墙位置出现了一条长约6 m的轴向裂缝(图14(a))。当初速度增大到12 m/s时,裂缝宽度增加且轴向延伸增加至8 m,在末端有斜向上扩展的趋势,但仍集中在边墙附近(图14(b))。当泥石流初速度达到15 m/s时,裂缝继续扩宽且长度增加到9 m,同时改变裂缝发展方向,即裂缝从边墙(即冲击位置)延伸到拱肩斜向上发展,形成长约9 m的斜裂缝,达到了过流断面以外的区域(图14(c))。

对于衬砌外表面,泥石流冲击位置附近材料出现类似于混凝土剥离的损伤,随着冲击速度的增大,损伤范围越大(图14(d)至图14(f))。当泥石流初速度为15 m/s时,产生斜裂缝的位置与内表面对应相同,说明此时斜裂缝贯通了衬砌截面。此时,

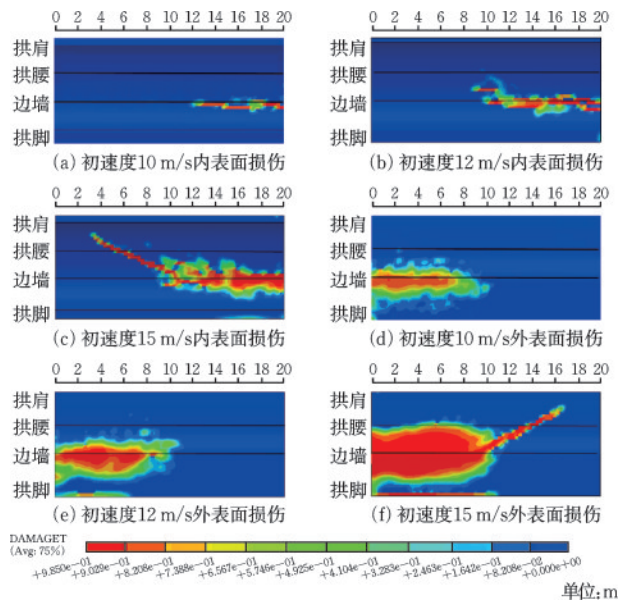


图 14 不同冲击速度下衬砌损伤

Fig.14 Lining damage under different impact velocities

拱脚位置也出现了较为严重的损伤,因此受灾过程中可能出现基础被掏蚀、结构整体倾覆等破坏情况。值得一提的是,对桃关隧道左线明洞(与福堂隧道明洞同一时间受灾)的调查显示,该明洞经历了与上述类似的损伤/破坏过程^[20]。

为表征明洞衬砌整体的损伤情况,本文选取沿轴向 10~20 m(与过流断面位置相同的范围)、沿高度 0~5 m 的区域(模型中损伤集中出现的范围),统计此区域内 816 个单元的损伤因子平均值。对于上述三个工况,平均损伤值分别为 0.25、0.43 和 0.78,即冲击速度越大,损伤程度越高。通过对泥石流冲击速度的研究可以发现,随着冲击速度的提高,隧道明洞结构迎流侧边墙的自由端位置处率先产生破坏,随后沿着边墙位置的纵向裂缝和斜向裂缝开展“拉链状”破坏,最后剩余结构无法继续承载而进一步破坏直至结构完全倒塌损毁。由此可知,泥石流冲击速度是影响泥石流冲击力的关键因素,而冲击力的增加会直接导致明洞结构受损程度的加剧。上述仿真结果与实际工程观察高度吻合,例如 2011 年麻柳湾公路明洞(同样位于汶川地震灾区)在速度为 7.8 m/s 的泥石流冲击下保持良好^[21],而 2019 年窄板沟公路明洞则被速度 15~20 m/s 的泥石流严重摧毁^[17](图 15),二者的差别同样表明了本文仿真方法及结果的有效性。需要一提的是,以上两个案例所发生泥石流在组分等方面可能有不同,但二者发生地点相距 180 km 上述对比分析仍具有



(a) 麻柳湾公路明洞, 7.8 m/s 冲击速度



(b) 窄板沟公路明洞, 15~20 m/s 冲击速度

图 15 泥石流冲击速度对明洞损伤影响的真实案例

Fig.15 Real cases of influence of debris flow impact velocity on open-cut tunnel damage

一定的参考意义。另一方面,此处分析的不足说明了数值仿真与现场和室内试验的优势,即能够改变参数(如泥石流流变参数)进行定性分析。综上,仿真结果和现场案例对比表明,为提高隧道泥石流灾害的防治能力,需要对其可能发育的高度位置进行详尽的调查,选择合适的拦挡措施降低泥石流冲击前的速度。

3.2 泥石流流变参数

天然泥石流由于成分和组成的不同,而具有不同的流变参数,且取值范围较大。本文以现场泥石流材料参数为基准,考虑黏度为 1、5、10 Pa·s 以及屈服应力为 3 000、6 654、9 000 Pa 的情况,分析泥石流材料特性对明洞损伤的影响。本文共计对 9 种工况进行计算分析(对应工况 1 和 4~11)。针对如前节所述的区域,本文分析了各工况下衬砌的冲击力峰值和平均损伤值,分析结果见表 4 和表 5。

表 4 不同流变参数下冲击合力峰值

Table 4 Peak values of total impact forces under different rheological parameters 单位: 10^4 kN

黏度/(Pa·s)	屈服应力/Pa		
	3 000	6 654	9 000
1	1.361	1.404	1.481
5	1.364	1.406	1.483
10	1.365	1.409	1.487

表5 不同流变参数下衬砌平均损伤值

Table 5 Average values of lining damage under different rheological parameters

黏度/(Pa·s)	屈服应力/Pa		
	3 000	6 654	9 000
1	0.082	0.264	0.279
5	0.084	0.267	0.283
10	0.085	0.269	0.284

从表4和表5可以看出,在同一黏度值下,泥石流的屈服应力越高,冲击合力和衬砌的损伤值越高。当屈服应力为3 kPa时,冲击合力为 1.361×10^4 kN,损伤值仅为0.082;当屈服应力为9 kPa时,冲击合力提高到 1.481×10^4 kN,而损伤值则显著地提高到0.279(提高了近30倍)。但在同一屈服应力值下,黏度的显著增加(如从工况6中的1 Pa·s增加到工况11中的10 Pa·s)只轻微地提高损伤值(从0.279增加到0.284,增加比例为0.2%)。可见,泥石流的冲击力及损伤作用与屈服应力呈正相关关系,但与黏度相关度较低,也因此造成了不同泥石流对明洞冲击作用的异同,该发现与C. W. W. Ng等^[22]在室内泥石流冲击力试验发现的规律类似。根据B. Yu等^[16]提出的经验公式,上述结果进一步表明泥石流的成分和比例同样影响着泥石流的冲击力,因此在相关灾害防治的问题上,应当对当地材料进行详尽的调研。但与3.1节中的冲击速度相比,泥石流材料特性的改变对泥石流冲击明洞产生的破坏力影响相对较低,上述常见材料取值范围内泥石流导致的损伤并没有达到破坏失稳的程度。

3.3 泥石流冲击位置

图1福堂隧道案例和图15麻柳湾公路明洞案例显示,由于明洞与山体关系的不同,泥石流可能沿明洞不同的结构面进行冲击。为此,本文对7种工况进行计算(对应工况1~3和12~15),对比分析侧面冲击(与图1工况一致)和压顶冲击(与图15工况一致)下明洞的损伤规律。图16为两种冲击位置下不同泥石流初速度引起的单元平均损伤值。可以看出,在相同的初速度下,侧面冲击引起的损伤较压顶冲击的更高。同时,侧面冲击对泥石流的速度更为敏感,曲线具有更高的斜率。当速度从10 m/s增加为15 m/s时,侧面冲击造成的损伤值从0.25迅速攀升至0.78,对应结构可能已经完全倒塌损毁,而压顶冲击从0.05增加到0.26,结构仍具有良好完整性和稳定性。

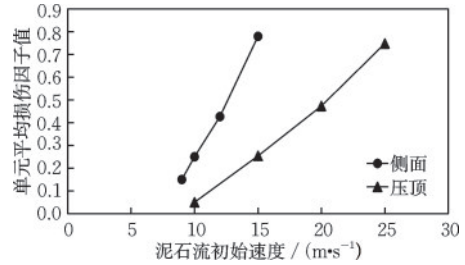


图16 泥石流冲击位置对明洞损伤的影响

Fig.16 Influence of debris flow impact position on open-cut tunnel damage

表6进一步详细分析相同泥石流冲击速度下(初速度为15 m/s)不同冲击位置导致的迎流侧衬砌损伤特征的不同。见表6,侧面冲击产生了长为19 m的裂缝,沿边墙纵向和拱肩斜向延伸,衬砌内外侧90%以上的单元已经达到开裂对应的应变。而在压顶冲击下仅产生沿拱肩纵向延伸的裂缝,长度为6 m,衬砌内侧大幅开裂比例减少为31.25%,单元平均损伤值也仅为0.26(图16)。由此可见,对于明洞这类特定的结构形式,压顶冲击能够极大地减少损伤情况。换言之,在泥石流冲击明洞灾害问题上,应该通过隧道—山体空间关系的设置充分利用结构特性,使泥石流发生时尽可能呈压顶冲击形式,从而使灾害影响降至最低。

表6 初速度15 m/s冲击下迎流侧衬砌损伤特征对比

Table 6 Comparison of lining damage characteristics on upstream side under impact at initial velocity of 15 m/s

冲击位置	裂缝走向	裂缝长度/m	开裂位置	衬砌内侧开裂占比/%	衬砌外侧开裂占比/%
侧面	纵向	9	边墙	98.90	100
	斜向	10	拱肩		
压顶	纵向	6	拱肩	31.25	55.15

4 结论

发展了耦合欧拉—拉格朗日数值方法对泥石流冲击隧道明洞结构灾害问题进行了深入研究,采用欧拉体模拟泥石流的流体特性,采用拉格朗日体模拟隧道结构的固体响应,明确了泥石流冲击力的演化过程、结构的变形和损伤特征,分析了泥石流冲击速度和流变参数对明洞结构损伤的影响。所得主要结论如下:

(1)位移最大位置一般出现在迎流侧的边墙上(即泥石流冲击位置),衬砌内表面出现沿轴向的张拉裂缝,外表面出现成片的剥落损伤。因此,在远离山体的隧道明洞结构边墙位置应加强防护措施。

(2)泥石流初速度的增加会显著增加明洞结构的损伤,迎流面冲击合力与冲击速度的平方成正比。当泥石流初速度达到15 m/s时,同时出现了轴向裂缝以及沿冲击位置到过流断面外拱顶的斜向裂缝。平均损伤度达到0.78,可能出现衬砌的失稳破坏。因此,需要对泥石流可能发育的高度位置进行详尽的调查,采取措施降低泥石流冲击前的速度。

(3)泥石流屈服应力对明洞损伤的影响较黏度系数更为显著,但在屈服应力为3.0~9.0 kPa、黏度为1~10 Pa·s的取值范围内,均未出现衬砌失稳破坏的现象。因此,与泥石流初速度相比,泥石流材料特性的改变对明洞的破坏力相对较低。

(4)与侧面冲击相比,压顶冲击能够大幅降低明洞的损伤程度,在15 m/s的冲击初速度下,裂缝长度从19 m下降为6 m,平均损伤度从0.78下降为0.26。因此,可通过隧道—山体的空间关系设置导向冲击发生位置(如压顶冲击),从而利用结构特性降低冲击的损伤作用。

参考文献:

[1] 廖炜,李玉文,朱长安,等.地震区公路隧道洞口山洪泥石流受灾分析及启示[J].现代隧道技术,2014,51(4):8-12.
Liao W, Li Y W, Zhu C A, et al. Analysis of a flash-flood induced debris flow at a highway tunnel portal in a seismic region [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(4): 8-12. (in Chinese)

[2] 宋智慧.逆行六月使命催征[J].湖南安全与防灾,2022,6(1):1-2.
Song Z H. A retrograde mission in June [J] Hunan Security and Disaster Prevention, 2022, 6(1): 1-2. (in Chinese)

[3] 洪开荣,冯欢欢.中国公路隧道近10年的发展走势与思考[J].中国公路学报,2020,33(12):62-76.
Hong K R, Feng H H. Development trends and views of highway tunnels in China over the past decade [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 62-76. (in Chinese)

[4] 田四明,王伟,巩江峰.中国铁路隧道发展与展望(含

截至2020年底中国铁路隧道统计数据)[J].隧道建设(中英文),2021,41(2):308-325.
Tian S M, Wang W, Gong J F. Development and prospect of railway tunnels in China (including statistics of railway tunnels in China by the end of 2020) [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 308-325. (in Chinese)

[5] 魏鸿.泥石流龙头对坝体冲击力的试验研究[J].中国铁道科学,1996,17(3):50-62.
Wei H. Experimental study on impact force of debris flow faucet on dam body [J]. China Railway Science, 1996, 17(3): 50-62. (in Chinese)

[6] Wang D P, Chen Z, He S M, et al. Measuring and estimating the impact pressure of debris flows on bridge piers based on large-scale laboratory experiments [J]. Landslides, 2018, 15(7): 1331-1345.

[7] 陈洪凯,唐红梅,鲜学福,等.泥石流冲击特性模型试验[J].重庆大学学报,2010,33(5):114-119.
Chen H K, Tang H M, Xian X F, et al. Experimental model of debris flow impact features [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(5): 114-119. (in Chinese)

[8] Zanuttigh B, Lamberti A. Experimental analysis of the impact of dry avalanches on structures and implication for debris flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 2006, 44(4): 522-534.

[9] Shen W G, Zhao T, Zhao J D, et al. Quantifying the impact of dry debris flow against a rigid barrier by DEM analyses [J]. Engineering Geology, 2018, 241: 86-96.

[10] 柳春,余志祥,刘宇鹏,等.碎屑流冲击棚洞的最大冲击力影响因素研究[J].振动与冲击,2020,39(2):195-203,222.
Liu C, Yu Z X, Liu Y P, et al. Influential factors of the maximum impact force of rock avalanche flow on a shed tunnel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(2): 195-203, 222. (in Chinese)

[11] Luo H Y, Fan R L, Wang H J, et al. Physics of building vulnerability to debris flows, floods and earth flows [J]. Engineering Geology, 2020, 271: 105611.

[12] Lee K, Jeong S. Large deformation FE analysis of a debris flow with entrainment of the soil layer [J]. Computers and Geotechnics, 2018, 96: 258-268.

[13] 公路隧道设计规范:JTG D70-2004[S].北京:人民交通出版社,2004.

[14] 混凝土结构设计规范:GB50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

(本文编辑:周小潭)

(下转第1221页)