

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.006



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



冲击荷载作用下泥石流堆积体的力学响应特征

于洋洋¹, 赵士忠¹, 田洪雷¹, 左建平², 王洋³, 刘家顺^{2,3}

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 3. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为研究冲击荷载作用下泥石流堆积体力学响应特征, 采用堆积体土工试验、冲击荷载作用相似模型试验和数值模拟相结合的方法, 研究圆柱弹体侵彻泥石流堆积体的加速度、速度、位移、应力等时程曲线以及弹体侵彻过程中的运动姿态、阻力和空腔特征演化规律。结果表明: 弹体侵彻泥石流堆积体时, 位移增加较快, 随着弹体在泥石流堆积体中运动姿态的失稳, 其减加速度逐渐增加, 在弹体轴向与其运动方向垂直时, 接触面最大, 阻力达到最大值, 负加速度也达到最大值。在弹体的侵彻过程中, 弹体将泥石流堆积体向四周排开, 形成大的空腔, 弹体速度随之降低, 位移增加趋于缓慢; 随着时间的增加, 弹体翻转, 最后尾部向前, 与泥石流堆积体接触面减小, 阻力降低, 加速度减小, 速度相对减缓, 位移曲线的曲率随着速度的减小而减小。

关键词: 泥石流; 堆积体; 冲击荷载; 高速列车; 动力响应

中图分类号: P642.23 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2025)06-0075-11

Mechanical response characteristics of debris flow accumulation under impact load

YU Yangyang¹, ZHAO Shizhong¹, TIAN Honglei¹, ZUO Jianping², WANG Yang³,
LIU Jiashun^{2,3}

(1. CRRC Qingdao Sifang Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao 266111, Shandong, P. R. China;
2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, P. R. China;
3. College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China)

Abstract: To investigate the mechanical response characteristics of debris flow deposits under impact load, a combination of geotechnical tests on deposits, similar model tests under impact load, and numerical simulation was adopted to analyze the time-history curves of acceleration, velocity, displacement, and stress of cylindrical projectiles penetrating debris flow deposits, as well as the evolution characteristics of motion attitude, resistance, and cavity during the projectile penetration process. The experimental results show that when the

收稿日期: 2023-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(52104088、52225404、52374091); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJKZ0361)

作者简介: 于洋洋(1988-), 男, 高级工程师, 主要从事轨道车辆轻量化设计、被动安全、结构强度与疲劳技术研究, E-mail: yuyangyang@cqsf.com。

刘家顺(通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: liujiashun000@163.com。

Received: 2023-10-31

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52104088, 52225404, 52374091); Scientific Funding Project of Liaoning Provincial Department of Education (No. LJKZ0361)

Author brief: YU Yangyang (1988-), senior engineer, main research interests: lightweight design of rail vehicles, passive safety, structural strength and fatigue technology, E-mail: yuyangyang@cqsf.com.

LIU Jiashun (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: liujiashun000@163.com.

projectile penetrates the debris flow deposit, the displacement increases rapidly. With the instability of the projectile's motion attitude in the debris flow deposit, the deceleration gradually increases. When the axial direction of the projectile is perpendicular to its motion direction, the contact surface is the largest, the resistance reaches the maximum, and the negative acceleration also reaches the maximum. During penetration, the projectile displaces the debris flow deposit to the surrounding area to form a large cavity, and the velocity of the projectile decreases while the displacement tends to slow down. With the increase of time, the projectile flips over, and finally the tail faces forward. Additionally, the contact surface between the projectile and the debris flow deposit decreases, the resistance reduces, the acceleration decreases, the speed slows down relatively, and the curvature of the displacement curve decreases as the speed decreases.

Keywords: debris flow; accumulation body; impact load; high-speed trains; dynamic response

泥石流是在山区沟谷中或山地坡面上由暴雨水、雪融水等水源激发的含有大量泥沙、石块等固相颗粒和液相流体的特殊洪流^[1],具有突发性、流速快和破坏性强等特点。其快速运动的固液泥石流混合物破坏力显著,会对建筑物、构筑物和生态环境产生毁灭性破坏^[2],是一种常见的严重威胁高速列车安全的地质灾害。据统计,中国45%的地区都曾遭受泥石流的侵害^[3-4]。如2013年7月汶川县群发性泥石流使得都汶高速及铁路严重破坏,交通受阻^[5];2020年8月白龙江流域武都区段遭遇百年一遇的强降雨,引发群发性泥石流灾害,造成了极大危害^[6]。世界上发生过多起泥石流行车事故,2001年1月5日,在TGV大西洋线的Mayenne附近,TGV 8720次列车(布雷斯特—巴黎)司机在距离300 m处发现泥石流淹没了轨道,虽然实施了紧急制动,但由于距离太近,列车以120 km/h的速度驶入了泥石流淹没区,头部动车脱轨^[7-8];2020年3月5日,法国TGV列车以270 km/h的速度撞击了侵入线路的山体滑坡异物^[9],导致21人受伤;2020年3月30日,T179次列车运行时撞上了马田墟至栖凤渡站下行区间线路的塌方体,导致第2~6节车厢脱线倾覆,造成1名乘警死亡,120多人受伤^[10]。由此可见,运行列车撞击泥石流等侵线灾害体安全事故时有发生^[11-12],亟需开展列车冲击荷载作用下泥石流堆积体动力响应研究,以有效应对泥石流灾害,减轻泥石流堆积体对车辆、轨道和人员造成的伤害,为列车安全运行提供理论支持。

学者们对泥石流的形成机理^[13-15]、成灾机理^[16]和灾害防治等^[17-21]进行了深入研究,认为泥石流堆积体饱和和抗剪强度降低、斜坡的不稳定性以及地质条件的影响是诱发泥石流灾害的主要原因,提出了泥石流防治的工程治理措施。姚昌荣等^[22]对多个泥石流损坏桥梁进行试验和数值模拟,研究了泥石流中块石冲击对桥梁结构的影响。谷丰宇等^[23]结合泥石流致灾特征和导流堤承灾时的特点,建立了泥石流危害作用下导流堤的工程易损性评价方法。张亮亮等^[24]采用因子回归分析方法研究流域特征参数

与峰值流量的内在关系,建立了泥石流峰值流量多元预测模型,定义了震区“特大型高位远程型泥石流”的特征参数。但以往的研究主要关注泥石流发生对工程结构造成危害,而未关注泥石流发生后高速运行冲击物撞击泥石流引起的结构损伤,甚至列车倾覆等问题。

泥石流是由不同粒径的固相颗粒和液相流体组成的固液混合体,一般将其简化为单相流体模型^[25]和多流体混合模型^[26]。常用的单相流体模型有膨胀体模型^[27]、Voellmy模型^[28]和Bingham模型^[29]。常用的多流体混合模型有库伦混合流模型^[30]和广义两相流模型^[31]。研究表明:泥石流固体颗粒和流体的相互作用会显著改变泥石流的运动特性以及冲击力。除此之外,现场调查和遥感技术也在泥石流堆积体动力响应研究中发挥了重要作用。对泥石流灾害发生地进行现场调查,可以获取到更真实、全面的数据,为冲击荷载作用下泥石流堆积体动力响应研究提供有力的数据支持。

然而,目前的研究大多聚焦于泥石流的产生机理以及泥石流冲击其他物体时的力学特性,而对冲击荷载作用下泥石流堆积体动力学响应的研究则鲜见报道。笔者通过室内土工试验获得泥石流堆积体的基本特性,并开展冲击荷载作用下泥石流堆积体动力响应相似模拟试验和数值模拟试验,研究冲击荷载作用下泥石流堆积体的加速度、位移和应力演化规律。利用LS-DYNA建立冲击荷载作用下泥石流堆积体动力效应数值仿真分析模型,研究不同冲击荷载作用速度时模型的动力响应,确定冲击荷载下泥石流堆积物材料本构模型参数,为高速列车冲击泥石流堆积体力学响应特征分析提供数据支撑。

1 泥石流堆积体基本特性测试

1.1 堆积体的基本特性

对坍塌泥石流进行现场采样并运回实验室,如图1所示。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—

2019)测试泥石流堆积体的含水率、容重、比重、抗剪强度指标和压缩性指标,得到泥石流堆积体的材料基本特性参数,如表1所示。采用筛析法测定3组泥石流堆积体的粒径分布情况,其颗粒级配曲线如图2所示。



图1 坍塌泥石流堆积体

Fig. 1 Collapse debris accumulation body

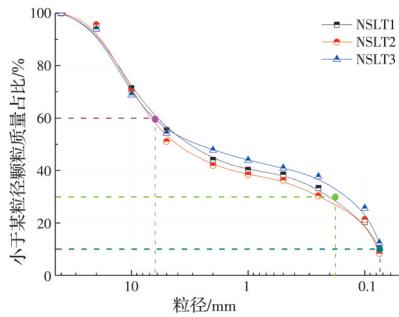


图2 泥石流堆积体颗粒级配特征曲线

Fig. 2 Particle grading characteristic curves of debris flow accumulation body

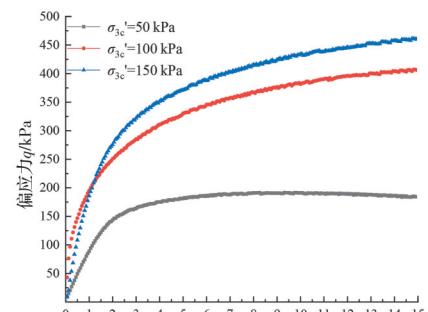
表1 泥石流堆积体物性参数

Table 1 Physical parameters of debris flow accumulation body			
容重 γ /(kN/cm ³)	含水率 w /%	比重 G_s	黏聚力 c /kPa
20.2	21.63	2.71	37.91
摩擦角 φ /(°)	压缩系数 a_{1-2} /MPa ⁻¹	压缩模量 E_{1-2} /MPa	饱和度 S_r
18.70	0.31	5.30	0.88

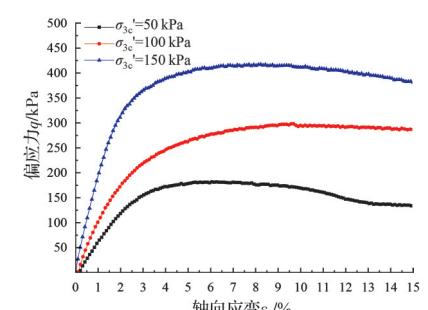
综合3组颗粒级配曲线结果,得到所取泥石流堆积体的限制粒径 $d_{60}=6.25$ cm,平均粒径 $d_{50}=3.25$ cm,连续粒径 $d_{30}=0.18$ mm,有效粒径 $d_{10}=0.08$ mm。据此计算得到泥石流堆积体的不均匀系数 $C_u=d_{60}/d_{10}=78.125$,曲率系数 $C_c=d_{30}^2/(d_{60}d_{10})=0.06$ 。可见,泥石流堆积体主要以粒径 $0.1 \text{ mm} \leq d \leq 10 \text{ mm}$ 为主,不均匀系数较大,说明土样的粒径分布范围较广,但级配不良,存在中间粒径的缺失。

1.2 抗剪强度特性

将泥石流堆积体制备成直径 $\varphi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱试样,利用GDS-DYNtS土动三轴仪开展泥石流堆积体三轴固结不排水(CU)试验、三轴固结排水(CD)试验,获得泥石流堆积的静力特性参数,试验结果如图3和表2所示。



(a) CU 试验



(b) CD 试验

图3 泥石流堆积体三轴试验结果

Fig. 3 Triaxial test results of debris flow accumulation body

表2 三轴试验获得的泥石流堆积体强度

Table 2 Strength of debris flow deposits obtained from triaxial tests

有效固结 围压 σ_{3c} / kPa	固结排水		固结不排水	
	峰值强度 q_f /kPa	残余强度 $q_{f,res}$ /kPa	峰值强度 q_f /kPa	残余强度 $q_{f,res}$ /kPa
50	208.48	178.43	234.53	155.68
100	326.25	288.14	387.70	215.20
150	424.08	343.87	462.43	239.80

LS-DYNA147#本构模型参数中,包括应变软化参数 ξ_0 和 G_f ,孔隙水效应参数 K_{sk} 、 D_1 和 D_2 ,应变硬化参数 A_n 和 E_t 等。

ξ_0 为在初始损伤阈值下的体积应变,由三轴排水试验得到,结果如表3所示。

孔隙形成参数 G_f 计算如式(1)所示。

$$G_f = V^{\frac{1}{3}} \int_{\epsilon_{vp}}^{\alpha} P d\epsilon_v = \frac{P_{peak}(\alpha - \epsilon_{vp}) V^{\frac{1}{3}}}{2} \quad (1)$$

式中: S 为饱和度; ϵ_{vp} 为峰值压力下的体积应变; P_{peak} 为峰值偏应力。

参考 Manual for LS-DYNA Soil Material Model 147 手册中关于应变硬化参数的规定,根据式(2)计算应变硬化参数。

$$\Delta\varphi = E_t \left(1 - \frac{\varphi - \varphi_{init}}{A_n \varphi_{max}} \right) \Delta\epsilon_{eff,plas} \quad (2)$$

式中: $\Delta\epsilon_{\text{effplas}}$ 为有效塑性应变, %; A_n 为非线性行为开始时峰值强度内摩擦角的占比, $0 < A_n < 1$; E_t 为决定非线性硬化速率的模量。

如果不发生应变硬化, 则 $\varphi_{\text{max}} = \varphi_{\text{init}} = \varphi$ 。

参数 A_n 可根据固结不排水三轴试验结果中峰值强度计算结果和弹塑性起点强度计算获得的内摩擦角结果, 按式(3)确定。

$$A_n = \frac{\varphi_{\text{ep}}}{\varphi_{\text{max}}} = \frac{17.43}{32.53} = 0.5358 \quad (3)$$

将式(3)的结果带入式(2), 即可得到非线性硬化速率的模量 E_t , 结果如表3所示。

表3 模型参数 DINT、VDFM 和 E_t

Table 3 Model parameters of DINT, VDFM and E_t

有效固结围压 σ_{3c} /kPa	ξ_0 /%	G_f	E_t /MPa
50	5.307	472.07	-0.2021
100	9.028	455.74	0.3967
150	6.226	858.07	0.5181

无孔隙体积模量 K_{sk} 根据式(4)估算。

$$K_{\text{sk}} = \frac{K}{1 - \frac{3(1-v)}{2(1-2v)}n} \quad (4)$$

孔隙水对有效压力的影响参数 D_2 可由 Skempton 孔隙水压力参数 B 求得, 其参数 B 为

$$B = \frac{1}{1 + nK_{\text{sk}}/K} \quad (5)$$

$$D_2 = \frac{1 - B}{BK_{\text{sk}}[n(1 - S)]} \quad (6)$$

为了模拟超孔隙水压力的影响, 采用无孔隙体积模量、孔隙率和饱和度的函数

$$K = \frac{K_{\text{sk}}}{1 + K_{\text{sk}}D_1n} \quad (7)$$

通过该模型可得到孔隙水对体积模量的影响参数 D_1 。

$$D_1 = \frac{K_{\text{sk}} - K}{K \cdot K_{\text{sk}}n} \quad (8)$$

式中: v 为泊松比; n 为孔隙率; S 为饱和度; K 为体积模量; K_{sk} 为无孔隙体积模量; B 为 Skempton 孔隙水压力参数。

各参数计算结果见表4。

表4 模型参数 B 、 D_1 和 D_2

Table 4 Model parameters of B , D_1 , and D_2

孔隙比 e	饱和度 S_r	无孔隙体积模量 K_{sk} /MPa	B	D_1	D_2
0.63	0.88	25.0914	0.704	0.738	0.357
0.64	0.91	20.1979	0.704	0.594	0.591
0.70	0.81	35.7914	0.693	1.169	0.158

根据砂土、粉土和饱和固结黏土的动力学试验研究结果, 一般取轴向应变或最大剪应变的 5%、8% 或 10% 作为破坏标准。主要考虑列车撞击泥石流堆积体过程中泥石流堆积体的应变损伤或破坏对列车的影响, 因此, 建议取最大应变 $\epsilon_{\text{ps},\text{max}} = 5\% \sim 10\%$ 。

2 冲击荷载作用模型试验

2.1 模型试验设计

为研究高速冲击荷载作用下泥石流堆积体的动力响应, 基于电磁炮原理, 自主研发了高速冲击荷载作用试验系统, 如图4所示。该装置包括蓄电装置、加速线圈、充电按钮和触发按钮、导轨和圆柱弹体等部分, 最大冲击时速为 60 m/s。

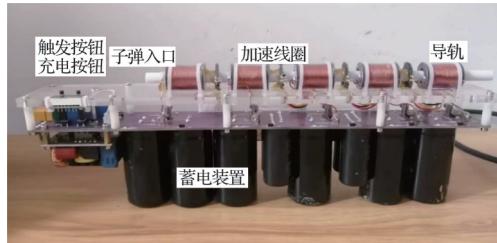


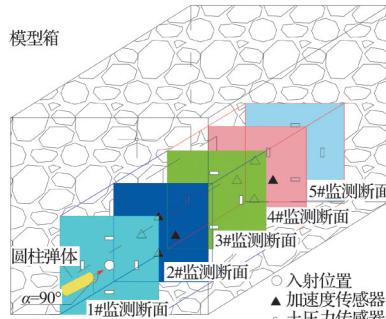
图4 冲击试验系统

Fig. 4 Shock test system

采用长度为 1.0 m、宽度和高度均为 0.6 m 的模型试验箱作为泥石流堆积体。盛放容器采用厚度为 30 cm 的原状泥石流堆积物分层铺设, 充填于模型内部, 在距离箱壁 5 cm 范围附近采用泡沫隔振板和细砂, 缓冲冲击荷载对箱壁的影响。弹体入射位置位于模型箱前方, 呈 90°角入射。内设 5 个监测断面, 如图5(a)所示。每个断面相距 5 cm, 按冲击方向顺序排列, 其中 1、3、5 监测断面监测冲击过程中土体的纵向土体压力, 将土压力传感器编号为 11~22 号, 均匀布置在距入射中轴 5 cm 的每个断面上, 每个断面安装 4 个。2 和 4 监测断面监测冲击过程中的纵向振动加速度, 将加速度传感器编号为 1~8 号, 均匀布置在距入射中轴 5 cm 的每个断面上, 每个断面安装 4 个。采用 1C101 加速度传感器和 BW 微型土压力传感器测试冲击荷载作用过程中泥石流堆积体的加速度和土动压力, 如图5(b)所示。为了探究冲击荷载作用下泥石流堆积体的动力响应, 设计冲击荷载作用速度 $v = 25, 30, 35, 40, 45$ m/s。采用 DH5981 分布式动态信号测试分析系统进行数据采集, 如图5(c)所示。

2.2 泥石流堆积体加速度分析

冲击速度 $v = 35$ m/s 时侵彻泥石流堆积体的加



(a) 模型监测断面设置



(b) 传感器埋设



(c) 数据采集

图5 冲击荷载作用模型试验

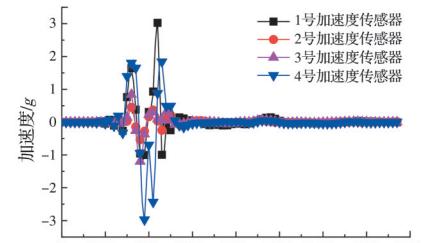
Fig. 5 Model test under impact load

速度时程曲线如图6所示。其中,埋深10 cm处为1~4号加速度传感器,埋深20 cm处为5~8号加速度传感器。

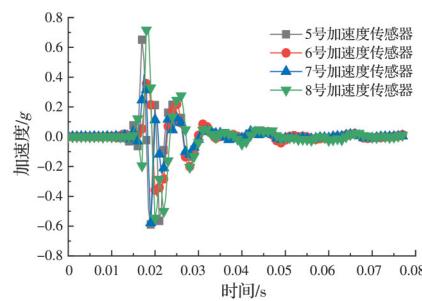
从图6可知,埋深10 cm处泥石流堆积体加速度峰值分别为3.02g、0.54g、1.20g和2.97g;埋深20 cm处泥石流堆积体加速度峰值分别为0.65g、0.36g、0.58g和0.72g。表明加速度随埋置深度的增加而显著减小,并在波动后迅速趋于稳定,当弹体穿透并进入泥石流堆积体时,在其附近以及一定深度范围内产生应力。这种应力导致堆积体的微元在未恢复到平衡状态之前产生加速度,随着时间的推移,在偏离其平衡位置的往复运动中逐渐衰减。

将加速度时程曲线分别进行一次和二次积分,获得冲击荷载作用过程中泥石流堆积体速度和位移曲线,如图7和图8所示。

图7和图8表明,冲击荷载作用会导致泥石流



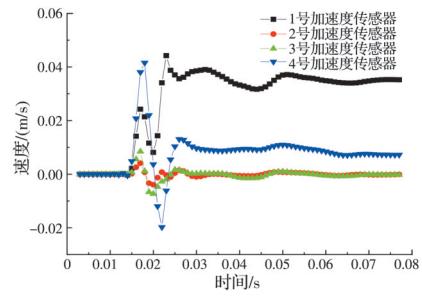
(a) 埋深 10 cm



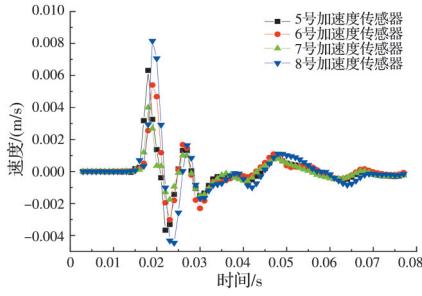
(b) 埋深 20 cm

图6 泥石流堆积体加速度变化曲线图

Fig. 6 Acceleration curves of debris flow accumulation body



(a) 埋深 10 cm



(b) 埋深 20 cm

图7 泥石流堆积体速度变化曲线图

Fig. 7 Velocity curves of debris flow accumulation body

堆积体产生动力响应,表现为冲击荷载作用于泥石流堆积体时,其速度产生一定波动,之后迅速衰减,最终冲击单体停止运动。监测面位置1号和4号测点速度和位移最大,20 cm处的速度和位移远小于10 cm位置,说明泥石流堆积体内部的阻尼特性导致冲击波动的能量逐渐耗散。同时,堆积体中的剪应力调整作用有助于使深部及两侧的应力分布更

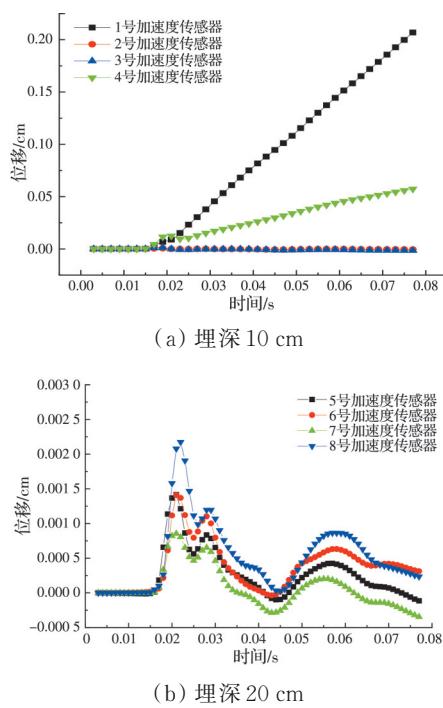


图8 泥石流堆积体位移时程曲线图

Fig. 8 Displacement history curves of debris flow accumulation body

趋均匀,表明冲击荷载对泥石流堆积体的影响主要集中在局部区域,而非整个堆积体范围。

不同冲击荷载作用速度时测得的泥石流堆积体加速度值如图9所示。

从图9可以看出,冲击荷载作用速度 $v=25, 35, 45\text{ m/s}$ 时,1号位置处泥石流堆积体加速度值分别为 $0.5g, 3.02g, 3.36g$;2号位置处泥石流堆积体加速度值分别为 $0.4g, 0.54g, 0.79g$;3号位置处泥石流堆积体加速度值分别为 $0.45g, 1.2g, 1.34g$;4号位置处泥石流堆积体加速度值分别为 $1.32g, 2.97g, 3.52g$;5号位置处泥石流堆积体加速度值分别为 $0.56g, 0.65g, 1.23g$;6号位置处泥石流堆积体加速度值分别为 $0.25g, 0.36g, 1.01g$;7号位置处泥石流堆积体加速度值分别为 $0.18g, 0.58g, 0.68g$;8号位置处泥石流堆积体加速度值分别为 $0.63g, 0.72g, 0.94g$ 。由此可见,随着弹体初始入射速度的增大,不同位置处泥石流堆积体受到的加速度值也相应增加。具体而言,随着冲击物侵彻泥石流堆积体纵向深度的增加,各个测点的加速度逐渐减小,表明冲击荷载的影响随着弹体入射距离的增加而逐渐减弱。

2.3 泥石流堆积体应力分析

图10为试验得到的冲击荷载作用速度为 35 m/s 时侵彻泥石流堆积体的应力时程曲线图。

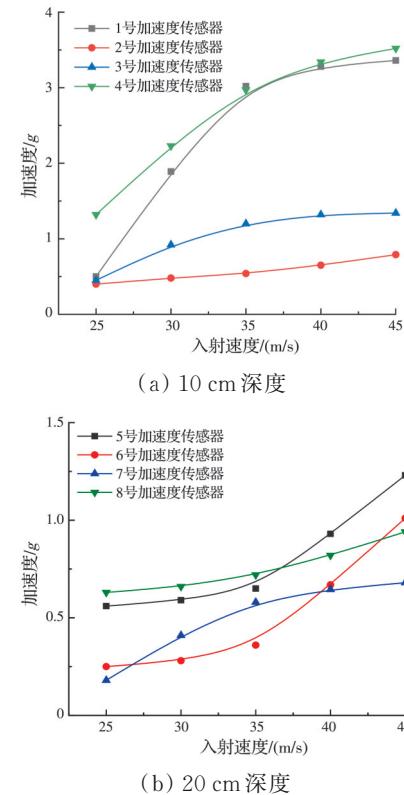


图9 不同冲击速度的泥石流堆积体加速度变化

Fig. 9 Acceleration values of debris flow accumulation body under different impact velocities

从图10可以看出,埋深 5 cm 处的11~14号土压力传感器测得的泥石流堆积体应力峰值分别为 $-6.55, 5.27, 5.69, 6.99\text{ kPa}$;埋深 15 cm 处的15~18号土压力传感器测得的泥石流堆积体应力峰值分别为 $-8.75, 5.9, 5.87, 7.75\text{ kPa}$,埋深 25 cm 处的19~21号土压力传感器测得的泥石流堆积体应力峰值分别为 $-5.05, 6.13, -8.02\text{ kPa}$ 。数据表明,不同埋深下,泥石流堆积体的应力峰值表现出显著差异。随着埋深的增加,应力峰值呈逐渐减小的趋势;泥石流堆积体所经历的附加动应力减小。表明冲击荷载的影响主要集中于表层,且随埋置深度的增加而逐渐减弱。

不同冲击荷载作用速度时测得的纵向埋深 $5, 15, 25\text{ cm}$ 处泥石流堆积体应力值如图11所示。

从图11可以看出,5 cm深度处泥石流堆积体应力随着弹体入射速度的增大而增大,15、25 cm深度处泥石流堆积体应力随着冲击荷载入射速度的增大先增大后减小。说明冲击物侵彻泥石流堆积体过程中冲击荷载作用能量逐渐衰减,在15、25 cm位置,圆柱弹体将发生轨迹偏转,导致其附近堆积体动应力衰减。

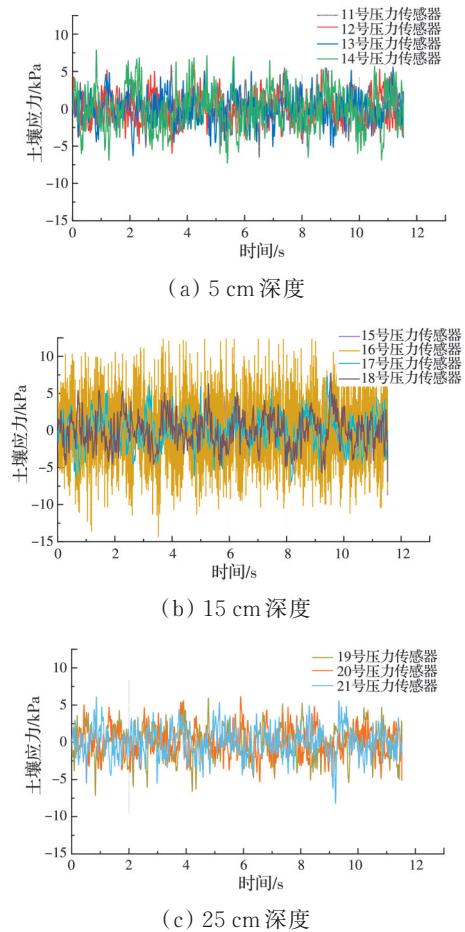


图 10 泥石流堆积体应力时程曲线

Fig. 10 Stress curves of debris flow accumulation body

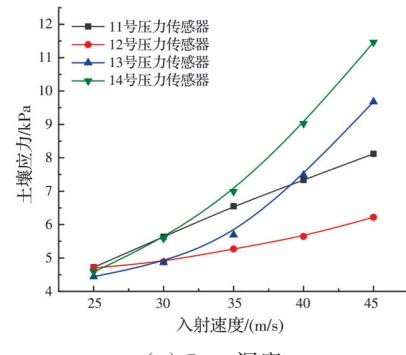
3 冲击荷载作用下泥石流堆积体动力响应有限元数值模拟

3.1 模型建立与参数设置

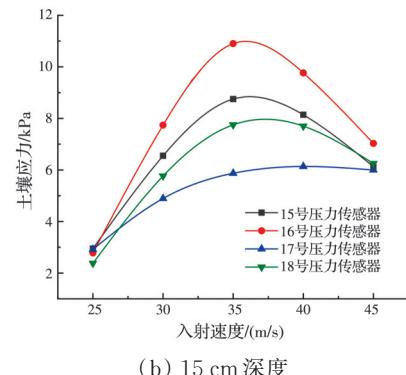
采用 Workbench^[32]建立冲击荷载作用泥石流堆积体动力响应数值计算模型,研究冲击荷载作用于泥石流堆积体过程的运动轨迹。将冲击荷载简化为长3 cm、直径0.6 cm且具有初始冲击速度的圆柱体,泥石流堆积体厚度(X向)为1 m,宽度(Z向)为1 m,高度(Y向)为0.3 m,且弹体模型与泥石流堆积体之间的夹角为90°,模型如图12所示。

在LS-DYNA显示的动力分析中,对建好的实体模型划分有限元网格,弹体侵彻泥石流堆积体模型建立好后,进行网格划分。弹体结构体共255个单元;泥石流堆积体区域采用多区域映射六面体单元,共11 404 995个单元。整个模型共11 405 250个单元,11 565 696个节点。模型的边界约束条件设置为:泥石流堆积体上表面为自由边界,两侧和底面设置边界条件为固定约束。

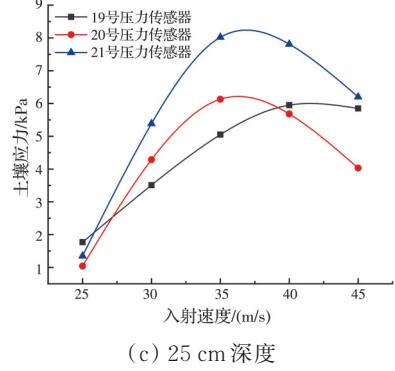
泥石流堆积体采用147号*MAT_FHWA_SOIL材料模型,模型参数通过前述试验得到。弹体



(a) 5 cm 深度



(b) 15 cm 深度



(c) 25 cm 深度

图 11 不同深度石流堆积体应力变化
Fig. 11 Stress changes of debris flow accumulation body at different depths

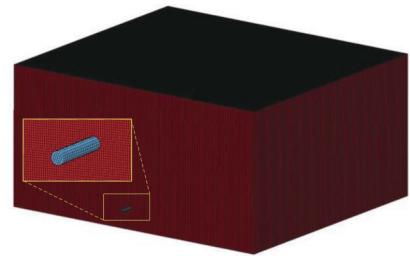


图 12 弹体侵彻泥石流堆积体模型

Fig. 12 Model of train penetrating debris flow accumulation boday

和泥石流堆积体模型的材料参数如表5、表6所示,由于土壤材料模型中没有失效,为了准确模拟材料在极端载荷下的行为,通过*MAT_ADD_EROSION关键词定义失效剪应变来表示材料的损伤和失效。计算终止时间为0.01 s,时间步长系数取0.9。

表 5 弹体材料参数

Table 5 Material parameters of train

部件	材料模型	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
弹体	MAT-020	7.850	200	0.3

表 6 泥石流堆积体材料参数

Table 6 Material parameters of debris flow accumulation body

部件	材料模型	密度/(kg/m ³)	剪切模量/MPa	体积模量/MPa
泥石流堆积体	MAT-147	2 000	2.5	23

3.2 结果分析

3.2.1 冲击荷载作用结果对比分析

将不同速度弹体侵彻泥石流堆积体的侵彻深度、加速度和应力试验结果与数值计算结果进行对比,如表 7 所示。由表 7 可见,数值模型计算结果与弹体侵彻泥石流堆积体试验得到的穿透深度吻合度很高,误差范围均在 16% 以内,具有较高的可靠性。

图 13 为试验实测曲线与数值模拟得到的弹体侵彻泥石流堆积体的速度时程曲线图。图 13 表明,模型试验曲线与数值模拟获得的冲击荷载作用下

表 7 弹体侵彻泥石流堆积体的试验结果与数值模拟结果

Table 7 Experimental and numerical simulation results of projectile penetrating debris flow accumulation body

速度/(m/s)	侵彻深度			峰值加速度			峰值应力		
	试验值/mm	数值模拟/mm	误差/%	试验值/g	数值模拟/g	误差/%	试验值/kPa	数值模拟/kPa	误差/%
25	160	185	15.63	1.33	1.44	8.27	4.92	5.53	12.40
35	206	227	10.19	3.02	3.31	9.60	8.79	9.76	11.04
45	295	350	18.64	3.52	3.76	6.82	11.52	12.42	7.81

圆柱弹体冲击泥石流堆积体介质时,碰撞的瞬间,泥石流堆积体的阻力与泥石流堆积体表面垂直,施力点为弹体与泥石流堆积体的接触点。随着摩擦力的增加,泥石流堆积体阻力方向向圆柱弹体轴方向偏转,阻力方向不通过弹体的质心,阻力产生的力矩使弹体翻转,导致弹体失稳。

3.2.2 数值模拟结果分析

图 14 为弹体侵彻泥石流堆积体的运动轨迹图。由图 14 数值计算得到的弹体侵彻泥石流堆积体运动轨迹可以看出, $t=0.025$ s 时,弹体侵彻深度为 7.1 cm; $t=0.05$ s 时,弹体侵彻深度为 13.5 cm; $t=0.075$ s 时,弹体侵彻深度为 18.9 cm; $t=0.1$ s 时,弹体侵彻深度为 22.7 cm。说明弹体侵入泥石流堆积体过程中,由于泥石流堆积体的阻力,引起冲击能量的衰减和损失,弹体侵入位移增量逐渐减小,速度逐渐衰减至 0。同时,弹体侵彻泥石流堆积体后,产生姿态失稳现象,使泥石流堆积体产生较大

泥石流堆积体速度结果较为接近。表明冲击初始阶段,弹性侵彻迅速增加,随着圆柱弹体在泥石流堆积体中运动姿态的失稳,其减加速度逐渐增加,在弹体轴向与其运动方向垂直时,接触面最大,阻力达到最大值。在弹体的侵彻过程中,弹体将泥石流堆积体向四周排开,形成大的空腔,弹体速度随之降低,位移增加趋于缓慢。弹体侵彻过程中,随着时间的推移,弹体发生翻转,最后尾部朝前运动,与泥石流堆积体接触面减小,阻力降低,加速度减小,速度相对减缓,位移曲线的曲率随着速度的减小而减小。

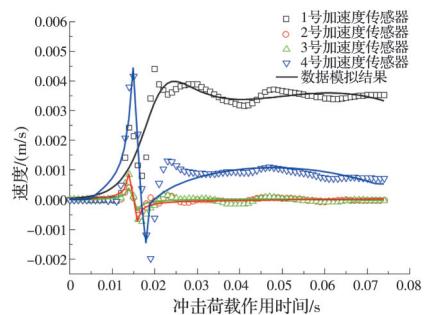


图 13 弹体侵彻泥石流堆积速度时程曲线

Fig. 13 Time history curve of accumulation velocity of projectile penetrating debris flow

空腔,与试验结果吻合。弹体产生偏转现象,最终会产生翻转,弹体尾部朝前运动,与试验得到的特征十分相似。

图 15 为弹体侵彻泥石流堆积体的应力云图。由图 15 可见, $t=0.025$ s 时,弹体侵彻方向泥石流堆

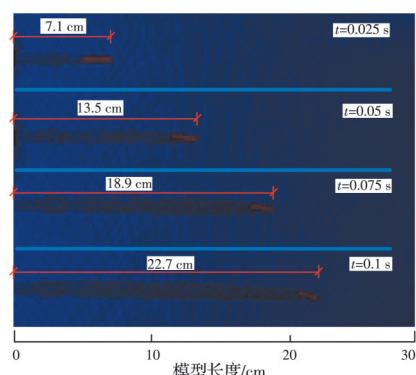


图 14 弹体侵彻泥石流堆积体的运动轨迹

Fig. 14 Movement paths of projectile penetrating debris flow accumulation body

积体受到压应力,由于受摩擦力影响,两侧泥石流堆积体主要受到拉应力,应力波呈放射状且与入射方向有较小夹角,影响范围较小; $t=0.05$ s时,弹体产生倾斜,泥石流堆积体产生空腔,应力波与入射方向夹角增大,影响范围增大; $t=0.07$ s时,弹体持续倾斜,应力波与入射方向夹角进一步增大且数量增多,影响范围持续增大; $t=0.1$ s时,弹体进一步倾斜,应力波与入射方向夹角进一步增大,但影响范围持续增大,影响到泥石流堆积体上表面。

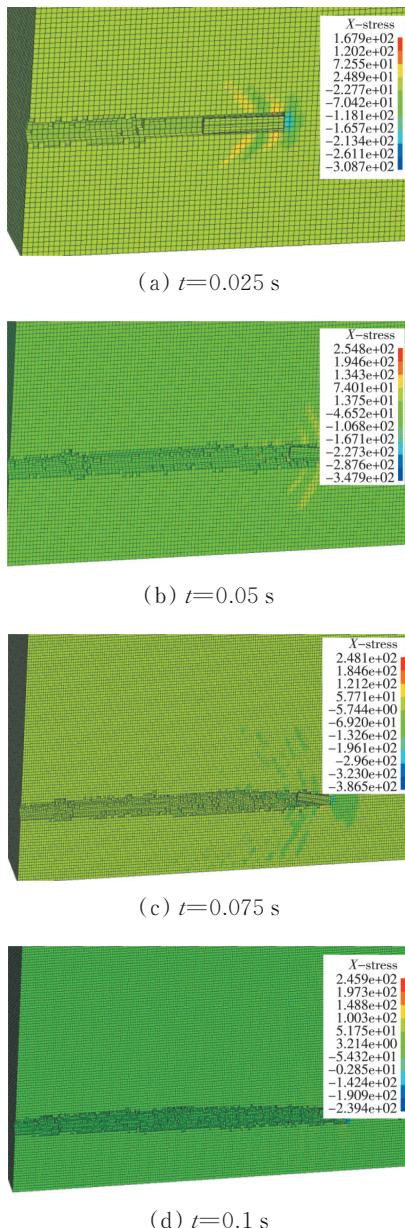


图15 弹体侵彻泥石流堆积体应力云图

Fig. 15 Stress cloud maps of train penetrating debris flow accumulation body

4 结论

1) 利用GDS DYNTTS动三轴仪开展排水和不排水条件下泥石流堆积体的三轴试验,测试泥石

流堆积体的物理力学特征参数以及用于LS-DYNA的147#模型参数。

2) 研制冲击荷载作用试验装置,设计冲击荷载作用下泥石流堆积体动力特性测试模型试验,测试不同冲击速度下泥石流堆积体的动力时程曲线,分析冲击荷载作用下泥石流堆积体的加速度、位移和应力演化规律。随着冲击荷载的作用,泥石流堆积体的应力先增大后减小,侵入速度逐渐降低,说明弹体侵彻泥石流堆积体轨迹产生了变化,将导致弹体尾部发生偏转。

3) 利用ANSYS/LS-DYNA3D建立冲击荷载作用下泥石流堆积体动力响应数值仿真分析模型,研究不同冲击荷载作用速度时模型的动力响应。结果表明,数值模拟获得的侵彻深度与模型试验测得的侵彻深度误差在20%以内,说明试验得到的模型参数可以用于对冲击荷载作用下泥石流堆积体的动力响应预测。

参考文献

- [1] 康志成,李焯芬,马蔼乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] 周裕旭.花岗岩地区小流域泥石流灾害发育特征及防治对策[D].长沙:中南大学,2022.
- [3] ZHOU Y X. Development characteristics and prevention countermeasures of debris flow disaster in small water-shed of granite area [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [4] ZHANG J Q, LUO D Z, LI H T, et al. Experimental study on gully erosion characteristics of mountain torrent debris flow in a strong earthquake area [J]. Water, 2023, 15(2): 283.
- [5] HONG Y, WANG J P, LI D Q, et al. Statistical and probabilistic analyses of impact pressure and discharge of debris flow from 139 events during 1961 and 2000 at Jiangjia Ravine, China [J]. Engineering Geology, 2015, 187: 122-134.
- [6] 蒋先刚,葛永刚,雷雨,等.苏坡店沟“7·10”泥石流破坏都汶公路毛家湾大桥机理[J].山地学报,2015,33(3): 311-317.
- [7] JIANG X G, GE Y G, LEI Y, et al. The failure mechanism of Maojiawan bridge by “7·10” debris flows [J]. Mountain Research, 2015, 33(3): 311-317. (in Chinese)
- [8] 崔开林,范玮佳,向灵芝,等.白龙江流域武都区段新发泥石流堆积物基本特征及颗粒级配分维研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(4): 674-682.

- CUI K L, FAN W J, XIANG L Z, et al. Study on the basic characteristics and particle gradation fractal dimension of new debris flow deposits in Wudu section of Bailong River basin [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(4): 674-682. (in Chinese)
- [7] 史俊玲, 沈通, 荆晓霞, 等. 国外典型新一代高速列车研制综述[J]. 中国铁路, 2022(5): 35-41.
- SHI J L, SHEN T, JING X X, et al. Review of development of foreign typical new-generation high speed trains [J]. China Railway, 2022(5): 35-41. (in Chinese)
- [8] GU G M. Resonance in long-span railway bridges carrying TGV trains [J]. Computers & Structures, 2015, 152: 185-199.
- [9] KRAFT S, PUEL G, AUBRY D, et al. Improved calibration of simulation models in railway dynamics: Application of a parameter identification process to the multi-body model of a TGV train [J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(12): 1938-1960.
- [10] 王崇明, 周磊, 邓锐, 等. 基于碰撞有限元法的地铁列车脱轨碰撞事故分析[J]. 铁道车辆, 2023, 61(5): 134-142.
- WANG C M, ZHOU L, DENG R, et al. Analysis of metro train derailment collision accident based on collision finite element method [J]. Rolling Stock, 2023, 61(5): 134-142. (in Chinese)
- [11] LEHEIS S. High-speed train planning in France: Lessons from the Mediterranean TGV-line [J]. Transport Policy, 2012, 21: 37-44.
- [12] CHIEN-YUAN C, LIEN-KUANG C, FAN-CHIEH Y, et al. Characteristics analysis for the flash flood-induced debris flows [J]. Natural Hazards, 2008, 47(2): 245-261.
- [13] TANG C, ZHU J, LI W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(2): 187-194.
- [14] 杨丰荣, 周宏伟, 霍苗, 等. 汶川震后降雨诱发型泥石流特征及成灾机理[J]. 中国农村水利水电, 2016(12): 38-42, 48.
- YANG F R, ZHOU H W, HUO M, et al. Rainfall induced debris flow characteristics and mechanisms of plagues after the outbreak of the earthquake in Wenchuan [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(12): 38-42, 48. (in Chinese)
- [15] 黄勋, 唐川, 乐茂华, 等. 汶川震区银厂沟区域8·18暴雨泥石流灾害成灾机理与特征[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 761-769.
- HUANG X, TANG C, LE M H, et al. Mechanism and characteristics on debris flow hazards in Yinchanggou Area triggered by rainstorm on August 18, 2012 [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 761-769. (in Chinese)
- [16] 杜野, 裴向军, 张御阳, 等. 云南东川区烧房沟“7·31”弃渣型泥石流成灾机理[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 171-175.
- DU Y, PEI X J, ZHANG Y Y, et al. Hazard mechanism analysis of Shaofang ditch waste slag debris flow in Yunnan Dongchuan district on July 31th [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(6): 171-175. (in Chinese)
- [17] LU X B, YE T L, CUI P, et al. Numerical investigation on the initiation mechanism of debris-flow under rainfall [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(4): 619-628.
- [18] HU M J, WANG R, SHEN J H. Rainfall, landslide and debris flow intergrowth relationship in Jiangjia Ravine [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(4): 603-610.
- [19] JAKOB M, OWEN T, SIMPSON T. A regional real-time debris-flow warning system for the District of North Vancouver, Canada [J]. Landslides, 2012, 9(2): 165-178.
- [20] 朱云波, 余斌, 马敏, 等. 打便沟泥石流成因及其形成机理判定[J]. 水电能源科学, 2014, 32(5): 119-122.
- ZHU Y B, YU B, MA M, et al. Cause and formation mechanism of debris flow in dabian gully [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(5): 119-122. (in Chinese)
- [21] 李滨, 冯振, 赵瑞欣, 等. 三峡地区“14·9”极端暴雨型滑坡泥石流成灾机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 118-127.
- LIB, FENG Z, ZHAO R X, et al. Mechanism of “14·9” rainstorm triggered landslides and debris-flows in the Three Gorges Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 118-127. (in Chinese)
- [22] 姚昌荣, 王友彪, 李亚东, 等. 泥石流冲击桥梁2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 28-36.
- YAO C R, WANG Y B, LI Y D, et al. State-of-the-art review of debris flow impact forces on bridges in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 28-36. (in Chinese)
- [23] 谷丰宇, 徐林荣, 李永威. 导流堤遭受泥石流灾害的易损性评价[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(1): 145-154.
- GU F Y, XU L R, LI Y W. Evaluation of vulnerability of diversion dike suffering from debris flow disasters [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(1): 145-154. (in Chinese)
- [24] 张亮亮, 徐林荣, 李永威, 等. 强震区沟谷型泥石流峰值流量预测研究及应用[J]. 土木与环境工程学报(中英

- 文), 2023, 45(2): 81-88.
- ZHANG L L, XU L R, LI Y W, et al. Prediction of the gully debris flow peak discharge prediction in strong earthquake area [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(2): 81-88. (in Chinese)
- [25] DAI Z L, XU K, JIANG M T. Three-dimensional modeling of the impact behavior of debris flows in areas affected by earthquakes [J]. Natural Hazards, 2023, 117 (2): 1767-1791.
- [26] 杨昶, 铁永波, 张宪政, 等. 我国泥石流数值模拟研究历程及发展趋势[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5):1-11. YANG C, TIE Y B, ZHANG Z J, et al. Research history and development trend of numerical simulation of debris flow in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):1-11. (in Chinese)
- [27] TAKAHASHI T. Mechanical characteristics of debris flow [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1978, 104 (8): 1153-1169.
- [28] RICKENMANN D, LAIGLE D, MCARDELL B W, et al. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events [J]. Computational Geosciences, 2006, 10(2): 241-264.
- [29] 马宗源, 廖红建, 张骏. Bingham型黏性泥石流流体的三维数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1146-1150.
- MA Z Y, LIAO H J, ZHANG J. Three dimensional numerical simulation of Bingham viscous debris flow fluid [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42 (9): 1146-1150. (in Chinese)
- [30] IVERSON R M, DENLINGER R P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2001, 106(B1): 537-552.
- [31] PUDASAINI S P. A general two-phase debris flow model [J]. Journal of Geophysical Research (Earth Surface), 2012, 117(F3): F03010.
- [32] 周宇. 泥石流作用下车桥耦合振动的系统响应[D]. 河北秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- ZHOU Y. The response of vehicle bridge coupling vibration system under the debris flow [D]. Qinhuangdao, Hebei: Yanshan University, 2017. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)