

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.051



开放科学(资源服务)标识码OSID:



滚石冲击荷载下框架结构房屋的动力性能试验研究

刘欢^{1a,1b,2}, 樊晓一^{1b,1c}, 夏贵平^{1a,1b}, 何安江^{1b}, 陈家庆^{1b}

(1. 西南石油大学 a. 机电工程学院; b. 土木工程与测绘学院; c. 工程安全评估与防护研究院, 成都 610500; 2. 雅安市名山区住房和城乡建设局, 四川 雅安 625100)

摘要: 为了研究滚石冲击作用下框架结构房屋的动力响应、破坏机理与抗冲击性能, 基于自主设计的滑槽轨道试验装置, 开展9组不同工况下滚石冲击框架结构房屋模型的试验研究。试验考虑滚石质量、启动高度、冲击柱数量及坡脚距离4个关键因素, 采用正交试验设计方法, 以结构破坏形态、峰值冲击力与峰值加速度为评价指标, 系统分析多因素耦合效应及其敏感性。结果表明: 框架结构房屋的破坏模式呈现“材料-构件-整体”多尺度演化特征, 可分为微小破坏、轻度破坏、中等破坏、严重破坏与完全破坏5个等级, 其中冲击柱数量是影响结构整体稳定性的最敏感因素; 动力响应分析揭示了冲击能量由局部脉冲向整体惯性传递的耗散机制, 受冲击柱峰值加速度和冲击力分别处于9.91~25.42 m/s²和178.95~565.24 N; 引入塑性耗能折减系数对通过理论模型得到的冲击力经验公式进行修正, 修正后的经验公式计算值与通过试验实测得到的冲击力的误差为-9.98%~13.50%。

关键词: 框架结构房屋; 滚石冲击; 动力性能; 峰值冲击力; 峰值加速度

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-14

Experimental study on dynamic performance of frame structure building under rockfall impact load

LIU Huan^{1a,1b,2}, FAN Xiaoyi^{1b,1c}, XIA Guiping^{1a,1b}, HE Anjiang^{1b}, CHEN Jiaqing^{1b}

(1a. School of Mechanical and Electrical Engineering; 1b. School of Civil Engineering and Geomatics; 1c. Engineering Safety Assessment and Protection Research Institute, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China; 2. Housing and Urban-Rural Development Bureau of Mingshan District, Ya'an City, Ya'an 625100, Sichuan, P. R. China)

Abstract: In order to study the dynamic response, failure mechanism and impact resistance of frame structure building under the impact of rockfall, nine sets of rockfall impact tests on the frame structure building model under different working conditions were carried out based on the self-designed sliding track test device. The

收稿日期: 2026-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(41877524); 四川省科技厅项目(No.25NSFSC1319)

作者简介: 刘欢(1990-), 男, 博士生, 高级工程师, 主要从事防灾减灾工程研究, E-mail: 13568859694@163.com。

樊晓一(通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: fxy@swpu.edu.cn。

Received: 2026-02-27

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 41877524); Sichuan Provincial Department of Science and Technology Project (No. 25NSFSC1319)

Author brief: LIU Huan (1990-), PhD candidate, senior engineer, main research interests: disaster prevention and mitigation engineering, E-mail: 13568859694@163.com。

FAN Xiaoyi (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: fxy@swpu.edu.cn。

experiment considered four key factors: rockfall mass, release height, number of impacted columns, and toe distance. Following the orthogonal test design method, the failure modes, peak impact force, and peak acceleration were used as evaluation indicators to systematically analyze the multi-factor coupling effects and their sensitivity. The results indicate that the failure modes of the frame structure building exhibit multi-scale evolution characteristics from ‘material to component to global structure’, which can be classified into five levels: minor damage, slight damage, moderate damage, severe damage, and complete damage. Among the factors considered, the number of impacted columns is the most sensitive factor affecting the overall structural stability. Dynamic response analysis reveals the energy dissipation mechanism where impact energy transitions from a local impulse to global inertial forces. The peak acceleration and impact force of the impact column are $9.91\text{--}25.42\text{ m/s}^2$ and $178.95\text{--}565.24\text{ N}$, respectively. The empirical formula derived from the simplified model does not consider the structural plastic energy dissipation. By introducing the plastic energy dissipation reduction coefficient K_P , the error range between the measured impact force and the empirical formula is -9.98% to 13.50% . By introducing the plastic energy dissipation reduction coefficient to modify the empirical formula for impact force derived from the theoretical model, the error range between the measured impact force and the revised formula is -9.98% to 13.50% .

Keywords: frame structure building; rockfall impact; dynamic performance; peak impact force; peak acceleration

滚石灾害往往具有暴发突然、势能转换迅速、致灾性强等特点^[1-2],对山区基础设施、房屋建筑及人民生命财产安全构成严重威胁^[3]。岩土、滚石从坡顶滑动至坡脚,造成下方房屋倒塌和居民伤亡。同时,随着山区经济的快速发展和乡村振兴战略的全面推进,山区建筑结构形式已从石木、砌体结构逐步转变为钢筋混凝土框架结构^[4],这将成为未来灾害承灾体的主要形式。建筑结构是抵御滚石灾害的最后一道防线^[5],研究滚石冲击荷载作用下的房屋结构动力响应具有重要意义。

滚石与结构的相互作用是一种复杂冲击荷载作用下的非线性动力学问题,许多学者开展了相关研究,研究方法主要有现场调查、理论分析、数值模拟和模型试验。现场调查通常依赖于灾害事件的具体数据,侧重于运程距离、运动速度、破坏范围和结构损坏程度等整体特性^[6-7],虽能提供真实的灾情资料,但难以捕捉滚石运动及结构破坏的动态过程。

理论分析方面,何思明等^[8]在Hertz弹性接触理论的基础上,引入塑性修正以考虑滚石冲击防护结构造成的塑性变形,进而提出了考虑防护结构弹塑性变形的滚石冲击力计算公式。Zheng等^[9]基于Hertz接触理论,考虑防护结构塑性变形及损伤效应,提出了相应的冲击力计算方法。王东坡等^[10]结合冲击动力控制方程,提出一种滚石冲击钢筋混凝土板的弹塑性动力响应计算方法,其结果与实际更吻合,便于在工程实践中推广应用。数值模拟方面,刘欢等^[11]、张金等^[12]、Li等^[13]采用LS-DYNA软

件建立有限元模型,分别从结构破坏形态、冲击力时程、关键点位移和速度、系统能量等方面,研究含大石块泥石流冲击作用下框架结构房屋的动力响应和破坏机理。由于理论分析及数值模拟均存在一定的假设,且数值模拟的有效性高度依赖于本构模型和参数的准确性,可能会与真实情况存在一定偏差。相较于以上研究方法,室内物理模型试验能够复现灾害过程,精确测量关键参数,是揭示滚石-结构相互作用机理不可替代的研究手段。Wang等^[14]通过水槽模型实验探究了滚石尺寸、形状及碎屑流密度对滚石运动的影响规律。常礼安等^[15]研制了一套滚石冲击力测试装置,通过试验研究了在滚石质量、滚石高度、边坡坡度、防护结构倾角与缓冲层厚度等不同工况下,球形、柱形及不规则形等3种不同形状滚石对防护结构的最大冲击力。Li等^[5]提出一种新型的型钢包裹钢筋混凝土框架结构,通过一系列冲击加载实验,研究了新型框架结构在冲击荷载下的抗冲击性能,并传统框架结构进行了对比分析。然而,现有试验研究多聚焦于滚石自身动力特性演化及拦石墙、防护网等防护结构的抗冲击性能探究,针对建筑结构承灾体的相关研究相对薄弱,尤其针对框架结构房屋在滚石冲击作用下的系统性试验研究鲜有报道,涉及滚石质量、冲击高度、作用位置等多因素耦合效应的定量分析与敏感性研究更是亟待补充。

笔者基于正交试验设计方法^[16-17],通过可模拟滚石冲击的滑槽轨道试验装置,实现不同质量、高度、数量的冲击体对缩尺框架房屋模型的可控撞

击,以冲击力、加速度和破坏形态为评价指标,分析多因素的耦合影响。

1 运动原理及模型建立

1.1 运动过程及作用机理

斜坡滚石运动及其与结构的相互作用是一个复杂的非线性动力学问题,涉及能量转化、冲击力传递、结构响应与破坏等多个方面,包括下滑过程和冲击过程。滚石在滑槽轨道上下滑时,其做加速度先增大后减小的加速运动,整个下滑过程由重力势能向动能和摩擦内能转化。当滚石滑至房屋建筑时,产生冲击作用,冲击过程由滚石动能转化为冲击能。房屋建筑在冲击荷载下发生弹塑性变形和整体侧向位移,结构通过裂缝开展、塑性变形等方式耗能。若冲击能量超过结构构件或整体耗能能力,则导致构件破坏或整体失稳倒塌。

框架结构房屋以梁、柱和楼板为主要承重结构,柱体的破坏往往导致房屋失去支撑并发生结构性损伤。研究发现^[18],框架房屋柱体和梁的破坏比例超过40%时,会造成结构整体失稳倒塌。框架柱通常固定在梁、地面和基础上,其失效条件可以通过在固定端或跨中形成塑料铰链来描述。根据四川七盘沟中框架建筑破坏特点,曾超^[18]提出混凝土柱体固端两点塑性铰破坏、固端-跨中三点塑性铰破坏、柱体的剪切破坏模式,并根据静力学极限平衡理论建立柱体破坏的临界条件表达式。

在较低的冲击强度下,柱产生弹性变形。当施加在柱上的冲击弯矩达到柱的屈服力矩(M_c)时,柱开始出现塑性变形,在柱的固定端出现塑性区。当外部力矩增加到柱的极限力矩(M_u)时,塑性区继续变形,并在两端发展成塑性铰链。如果柱为非承载构件,则两端的塑性铰链将继续传递外弯矩,直到柱两端和跨中形成三点塑性铰链。同样,当冲击作用产生的剪力超过柱体的极限剪力,便出现剪切破坏。

1.2 简化模型构建

根据滚石下滑和冲击运动过程,建立简化模型如图1所示。

在下滑过程阶段,由能量守恒定律,可建立式(1)所示的运动方程。

$$mgH = 0.5mv^2 + \mu_1 mgL \cos \alpha + \mu_2 mgl \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ,取 $9.8 m/s^2$; m 为滚石的质量, kg ; v 为滚石的冲击速度, m/s ; H 为启动高度, m ; L 为滑槽斜长, m ,与启动高度 H 相关; l 为房屋与滑槽坡脚的距离,即水平段滑槽长度, m ; μ_1 、 μ_2 分别为滑槽斜段和水平段摩擦系数,根据试验条件

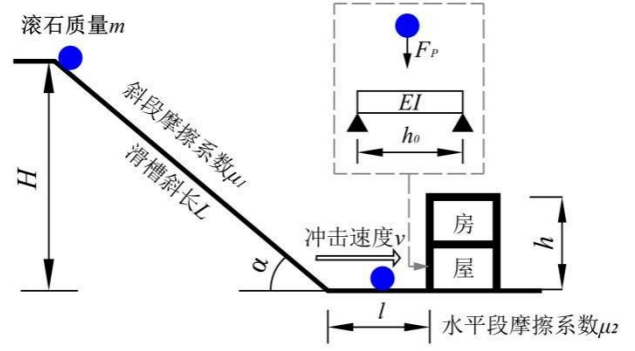


图1 运动过程简化模型

Fig.1 Simplified model of the motion process

并通过预试验分别取 0.15 、 0.30 ; α 为滑槽轨道坡度,取 30° 。

在冲击过程阶段,框架结构房屋受滚石冲击时,直接受冲击作用的是框架柱。在实际工程中,首层框架柱往往与基础、框架梁和楼板刚性连接^[18],故可将框架柱受滚石冲击简化为两端固定柱受到水平荷载作用,柱体视为两端固定的垂向超静定杆件。考虑最不利荷载作用^[19],结合试验中冲击力传感器测点位置位于首层框架柱中点,计算出两端固定柱跨中受水平集中荷载的弯矩分布,任意截面 x (从柱底起算)的弯矩为

$$M(x) = \frac{F_p}{2}x - \frac{F_p h_0}{8}, 0 \leq x \leq h_0 \quad (2)$$

首层框架柱弯曲变形能可表达为

$$W_1 = \int_0^{h_0} \frac{M^2(x)}{2EI} dx \quad (3)$$

式中: F_p 为水平冲击荷载,即滚石冲击力; h_0 为首层框架柱高度; EI 为结构抗冲击刚度,即框架柱侧向刚度; W_1 为框架柱弯曲变形能。

将式(2)代入式(3)并积分得到

$$W_1 = \frac{7F_p^2 h_0^3}{384EI} \quad (4)$$

滚石对框架柱的冲击不仅导致柱体发生弯曲变形,还会使接触面产生弹塑性变形。实际作用中,侧向力作用的时间很短,在滚石冲击作用下框架柱表面变形能与框架柱整体弯曲变形能相比很小^[20],可以忽略不计,故框架柱总变形能 $W = W_1$ 。假设单个滚石冲击结束后滚石与框架柱速度都为0,冲击能完全被框架柱吸收形成破坏能。根据系统能量守恒,则功能关系有

$$E_{k1} = 0.5mv^2 = W = W_1 \quad (5)$$

式中: E_{k1} 为滚石的冲击动能; W 为框架柱总变形能。

根据式(1)、式(4)、式(5)可计算得到该简化模型下所受的水平冲击荷载 F_p 。为有效区分滚石的冲击荷载计算值,通过式(6)、(7)、(9)计算得到的

F_p 均带有相应的下标。

$$F_{p6} = \sqrt{\frac{192mv^2EI}{7h_0^3}} = \sqrt{\frac{384mgEI}{7h_0^3}[(1-\mu_1 \cot \alpha)H - \mu_2 l]} \quad (6)$$

根据不同的结构设置和承受冲击荷载水平,结构存在极限承载力 F_m 。当 F_p 超过 F_m 时,结构处于破坏状态,结构发生破坏。反之,结构处于相对稳定状态。

2 室内模型试验

2.1 试验装置

目前,针对滑坡或滚石的动力特性和冲击力已开展了大量的研究,但有关建筑房屋在滑坡或滚石冲击作用下的试验研究相对较少。在试验中,滑坡动力荷载主要通过冲击力来模拟,Li等^[5]及常礼安等^[15]通过钢球或滚石在斜坡轨道上滚动来实现冲击加载,笔者采用类似的方法,并自主设计试验装置,

主要由滑槽轨道装置和数据采集系统组成。

滑槽轨道装置主要由钢架支撑、滑槽底板、滑槽侧板、滑动轨道组成,如图2所示。整个轨道由3段滑槽组成,每段滑槽长2 m、宽1.2 m,其中斜坡段轨道总长为4 m,距离地面高为2 m,轨道坡度 α 为30°。滑槽底板采用1.2 cm厚的聚乙烯PE板,以减少试验材料在滑动过程中的摩擦力效应。滑槽侧板采用1 cm厚且光滑透明的有机玻璃板,以便记录试验冲击的运动过程。在滑槽斜坡段,设置2.5 cm厚的木条进行分隔并通过钢钉将木条固定在滑槽底板形成滑动轨道。同时在滑槽底部水平段,利用宽16 cm聚氯乙烯PVC水槽(长度设置有0.5 m、1 m)作为水平轨道,从而保证滚石沿轨道滑动,并产生对框架房屋的冲击荷载。冲击加载时,滚石在滑槽不同高度位置无初速度释放,在重力作用下沿轨道自由滚动,对固定在滑槽底板上的房屋模型进行冲击。采用质量分别为1、2.5、4 kg的青石圆球,模拟不同级别滚石的冲击效果,滚石材质为石灰岩,密度约2 800 kg/m³。

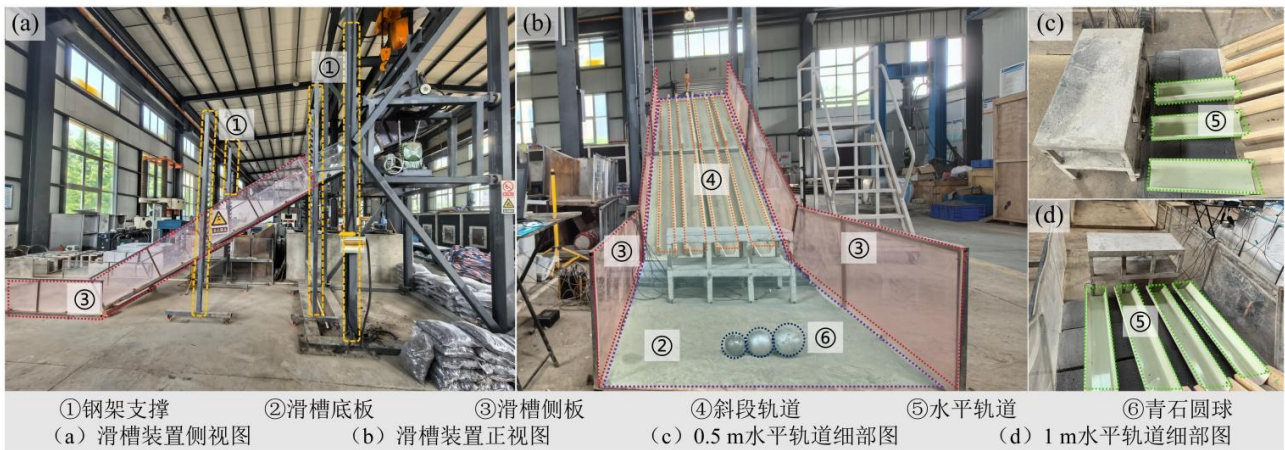


图2 滑槽轨道装置

Fig.2 Chute track device

数据采集系统包括对滚石冲击力、运动速度的采集和对模型关键测点加速度参数的采集,以及对结构损伤和变形的照片记录。冲击力采集系统主要由多通道数据采集仪、信号放大器以及压力传感器构成,如图3(a)所示。压力传感器受冲击面为圆形,直径约5 cm。数据采集仪最大通道数量为8通道,记录间隔为5 ms。冲击力信号转换原理为:首先通过压力传感器接收滚石的冲击力,再通过信号放大器、数据采集仪将应变信号转换为电信号,得到具体的冲击力时程曲线。试验中采用压电式加速度传感器(型号CT1010L,最大量程50g、电压灵敏度100 mV/g)对房屋框架柱在冲击荷载下的动态加速度进行测试,相应数据通过江苏东华DH5902N

测试分析系统采集,如图3(b)所示。

2.2 房屋模型

近年来,中国西南山区新建房屋多采用现浇钢筋混凝土结构,为此,试验房屋模型采用水泥-石膏砂浆^[21]浇筑,以等效模拟实际工程中的框架混凝土结构。模型设计遵循相似理论^[22-23],综合考虑试验场地条件、加载装置能力及模型制作工艺等约束,确定几何相似比 $C_l=1:15$ 。据此推导时间相似比 $C_t=C_l^{1/2} \approx 1:3.87$ 。在此基础上,以材料弹性模量为主导控制参数,确定其余物理量的相似关系。模型材料(水泥-石膏砂浆)与原形材料(钢筋混凝土)的弹性模量相似比取 $C_E=1:3$ 。模型与原型在密度及塑性阶段力学特性等方面存在差异,难以严格满足



(a) 冲击力采集系统



(b) 加速度采集系统

图3 数据采集系统

Fig.3 Data acquisition system

动力相似的全部要求。因此,试验以静力相似及破坏形态相似为主要相似原则,重点研究滚石冲击作用下框架结构破坏形态的演化规律与动力响应特

征,而非精确复现原型结构的绝对响应量值。

基于几何相似比,设计制作正面三跨、侧面一跨的两层结构房屋建筑模型,模型尺寸长 0.72 m、宽 0.36 m、高 0.4 m,框架柱、梁截面尺寸均为 30 mm×30 mm,楼板厚度为 10 mm。对应原始房屋整体尺寸长 10.8 m、宽 5.4 m、高 6 m,框架柱、梁的截面尺寸均为 400 mm×400 mm,楼板厚度为 150 mm,框架柱、梁中钢筋由纵向钢筋 8Φ18 和箍筋 Φ8@200 组成,楼板中横向、纵向钢筋为 Φ12@200。

在模型制作时,框架柱、梁的钢筋分别采用直径 4 mm 的 8#铁丝和直径 3.4 mm 的 10#铁丝通过焊接连接,楼板中横向、纵向钢筋使用成品细钢丝网替代,放置在模型木模板中。在水泥-石膏砂浆浇筑时,先后进行一层、二层框架的砂浆浇筑,并在一、二层柱板节点处加入 10#铁丝等效钢筋的拉结作用。待砂浆达到完全强度后,进行模板拆除。通过利用铆钉对房屋框架柱与滑槽底板进行固定,以模拟房屋地基的作用。暂未考虑填充墙的作用,详细的制作过程如图 4 所示。

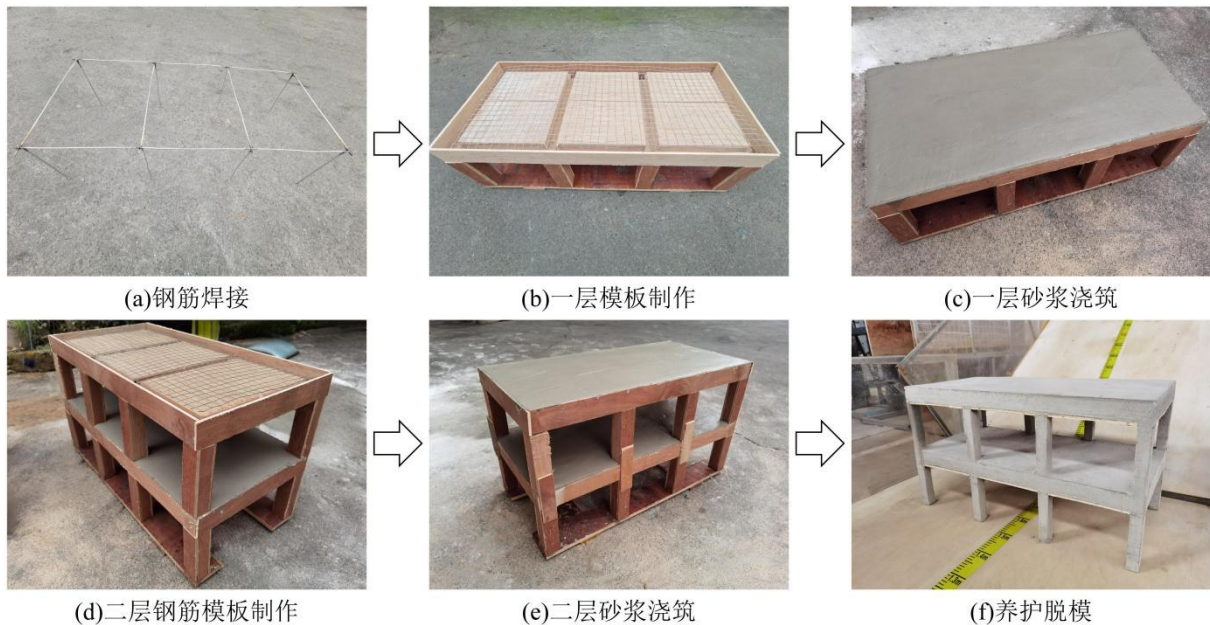


图4 房屋模型制作

Fig.4 Fabrication of the building model

2.3 试块强度测定

水泥-石膏复合湿拌砂浆常用于墙体抹灰工程,具有改善砂浆工作性、抑制开裂与空鼓等优点^[24]。为保证模型砂浆具备良好的流动性和正常的凝结特性,参考《抹灰石膏》(GB/T 28627—2023)和《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009),采用低强度石膏粉、R32.5 复合硅酸盐水泥、中砂和水按一定配比制备 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的标准立方体试件。根据唐志文等^[25]的研

究成果,选定配比为石膏粉:水泥:中砂:水=1:2:1:0.9(质量比),在常温环境下成型,经 24 h 初凝后脱模并标准养护 7 d,可使试件力学性能满足试验要求。共成型 9 个标准试件,采用微机控制电子压力试验机进行单轴压缩试验(见图 5)。试验过程中,6 号试件数据异常,予以剔除。最终,根据其余 8 个有效试件的试验结果取平均值,确定该水泥-石膏砂浆的抗压强度均值为 14.5 MPa,弹性模量均值为 10.8 GPa。

2.4 试验工况及测点布置

滚石的冲击压力受自身质量(m)和启动高度(H)影响^[26],因此,模型试验中采用质量1、2.5、4 kg的3种滚石,对应3种启动高度0.5、1、2 m。同时基于现有现场调查成果^[27],框架结构房屋在滑坡冲击下的损毁状态受房屋特征(如房屋距坡脚距离、房屋朝向等)显著影响,试验设置斜槽坡脚与房屋的3种水平距离(l):0.05、0.5、1 m。此外,山体滑坡夹带的大石块不但体积大,且数量多,因此,还要考虑大石块同时冲击框架柱的情形,设置冲击框架柱个数(N):1、2和3。

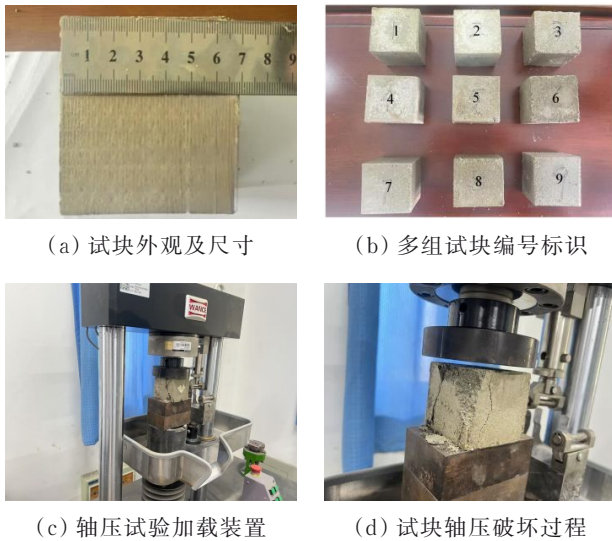


图5 试块尺寸及单轴压缩试验

Fig.5 Specimen dimensions and uniaxial compression test

为减少试验的数目,采用正交试验理论进行工况设计,考虑滚石质量、启动高度、冲击柱数量、坡脚与房屋的距离4种因素,每个因素设置3种水平,共进行9组模型试验,具体正交试验工况详见表1。

试验中,滚石沿滑槽轨道滚动并对框架房屋框架柱进行撞击,冲击点位于首层框架柱的中点位置。考虑不同工况和冲击能量等条件,每组工况加速度采集测点共有2个,冲击力采集测点根据冲击柱数量进行设置,具体布置情况见图6所示,其中A1、A2为加速度测点,F1~F3为冲击力测点。

3 试验结果分析

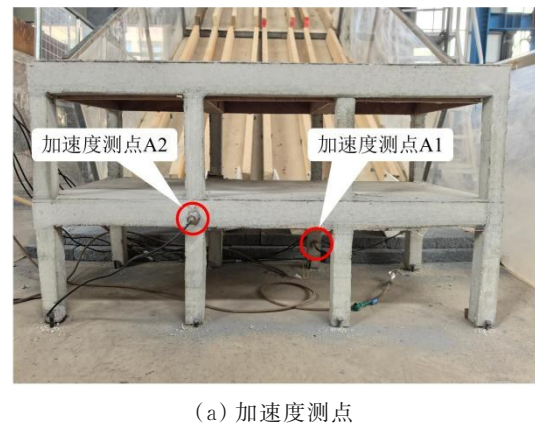
3.1 破坏形态

通过提取分析9组正交试验结果,发现框架结构房屋的破坏形态及程度随冲击工况参数(滚石质量、启动高度、冲击柱数量、坡脚距离)的不同而呈现显著差异。其破坏过程可概括为“构件变形-构件局部破坏-整体变形-整体破坏”4个渐进阶段,并在不同尺度上表现为“材料、构件、整体”层次的破坏

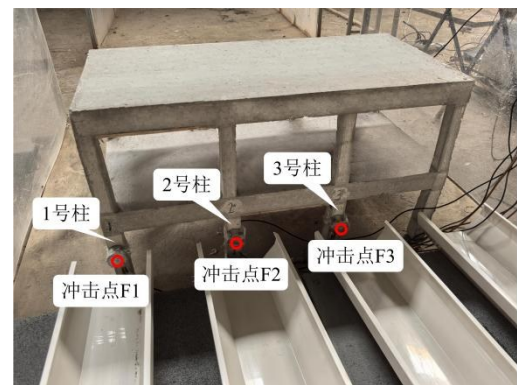
表1 工况分组

Table 1 Test conditions

工况 分组	因素及水平			
	滚石质量 m/kg	启动高度 H/m	冲击柱数量 $N/\text{根}$	与坡脚距离 l/m
G1	1	1	1	0.05
G2	2.5	1.5	3	0.05
G3	4	2	2	0.05
G4	1	1.5	2	0.5
G5	2.5	2	1	0.5
G6	4	1	3	0.5
G7	1	2	3	1
G8	2.5	1	2	1
G9	4	1.5	1	1



(a) 加速度测点



(b) 冲击力测点

图6 测点布置

Fig.6 Layout of Measuring Points

模式,典型破坏形态如图7、图8所示。根据冲击能量与作用方式的差异,试验中观察到的破坏状态可划分为5个等级。

1)微小破坏:以工况G1($m=1\text{ kg}$ 、 $H=1\text{ m}$ 、 $N=1$ 、 $l=0.05\text{ m}$)为代表,如图7(a)所示。该工况下冲击总能量仅6.62 J,结构处于弹性工作阶段,仅受冲击1号边柱上端出现轻微裂缝,未出现明显可见的倾斜或变位,整体稳定性未受影响。

2)轻度破坏:以工况G5($m=2.5\text{ kg}$ 、 $H=2\text{ m}$ 、 $N=1$ 、 $l=0.5\text{ m}$)为代表,如图7(b)所示。冲击导致

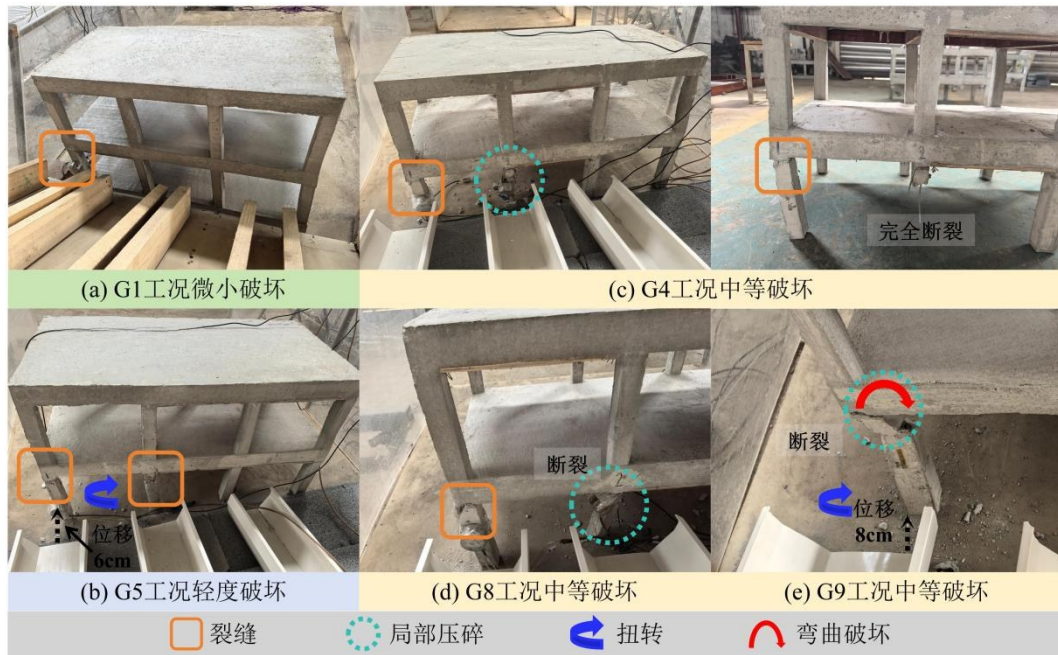


图7 破坏形态(微小破坏、轻度破坏和中等破坏)

Fig.7 Failure modes (no damage, slight damage, and moderate damage)

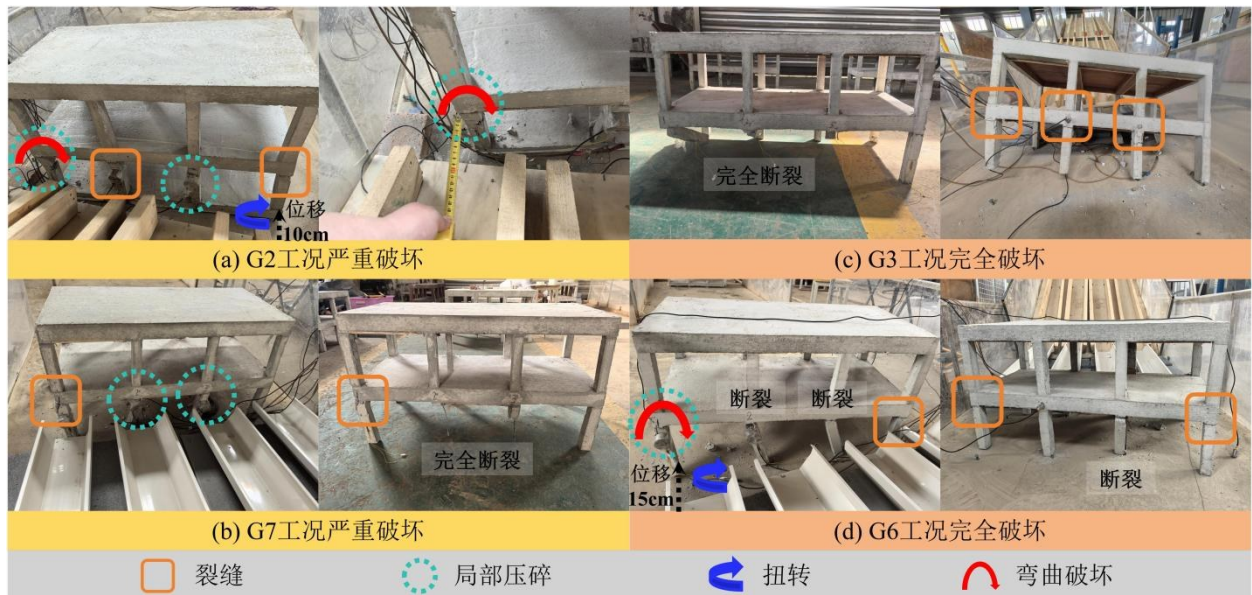


图8 破坏形态(严重破坏、完全破坏)

Fig.8 Failure modes (severe damage and complete collapse)

被撞边柱上端节点附近出现局部混凝土开裂与脱落。由于冲击力偏离结构质心,产生了明显的扭转效应,引发房屋整体偏转(最大位移6 cm),但受冲击柱丧失主要承重功能。

3)中等破坏:以工况 G4、G8、G9 为代表,此类工况下,结构出现局部构件失效,但整体仍保持稳定。工况 G4($m=1\text{ kg}$ 、 $H=1.5\text{ m}$ 、 $N=2$ 、 $l=0.5\text{ m}$)和 G8($m=2.5\text{ kg}$ 、 $H=1\text{ m}$ 、 $N=2$ 、 $l=0.05\text{ m}$)的破坏形态相似,其结果揭示了构件位置对破坏模式的显著影响:2号中柱发生完全破坏,而承受相同冲击能量的1号边柱仅出现未贯通的剪切裂缝。这表明

中柱因轴压比更高、延性较差,且在动力响应中可能承受能量叠加,故更易发生脆性破坏,如图7(c)、(d)所示。工况 G9($m=4\text{ kg}$ 、 $H=1.5\text{ m}$ 、 $N=1$ 、 $l=1\text{ m}$)中,约30.42 J较高冲击动能导致边柱在冲击点处近乎断裂,迅速失去承重能力,并伴随8 cm的整体偏转,如图7(e)所示。

4)严重破坏:以工况 G2、G7 为代表,承重构件严重受损,结构处于倒塌临界状态。在工况 G2($m=2.5\text{ kg}$ 、 $H=1.5\text{ m}$ 、 $N=3$ 、 $l=0.05\text{ m}$)中,如图8(a)所示。多柱非对称冲击引起结构剧烈“摇晃”与重心偏移(最大位移10 cm),导致1号边柱和3号中

柱冲击点处混凝土压溃、钢筋屈曲,形成塑性铰,结构已濒临失稳。工况 G7($m=1\text{ kg}$ 、 $H=2\text{ m}$ 、 $N=3$ 、 $l=1\text{ m}$)进一步揭示了冲击柱数量(N)的主导作用:尽管单个滚石冲击动能较小,约 12.01 J ,但 3 柱同时受冲击导致整体较大位移响应与关键节点断裂,结构抗连续倒塌能力几近耗尽,如图 8(b)所示。

5)完全破坏:以工况 G3、G6 为代表,结构发生不可逆的整体失稳倒塌。工况 G3($m=4\text{ kg}$ 、 $H=2\text{ m}$ 、 $N=2$ 、 $l=0.05\text{ m}$)是 3 柱冲击导致倒塌的典型案列,如图 8(c)所示。3 根框架柱受 110.25 J 冲击总动能撞击,均在梁柱节点区发生脆性剪切破坏,呈现混凝土崩碎、钢筋被剪断现象,最终柱体与梁完全脱离而丧失承载力。一侧竖向支承体系的瞬间失效,导致结构如同被砍断树根,向受损侧旋转倾倒。工况 G6($m=4\text{ kg}$ 、 $H=1\text{ m}$ 、 $N=3$ 、 $l=0.5\text{ m}$)则展示了偏心冲击的极端危险性:冲击形成的巨大扭转力矩使房屋产生 15 cm 的最大位移,导致前后排多根柱均发生明显偏移与断裂破坏,结构在纵横双向均失稳破坏,如图 8(d)所示。

在冲击作用下建筑易损性研究中,很多学者基

于特定损伤情景建立了不同的破坏分类体系。曾超等^[28]以半定量的方式和建筑物受损模式,将七盘沟建筑物的破坏划分为了 5 个等级;吴越等^[29]通过分析侧向位移所对应的各个构件塑性铰发展情况,提出了框架结构 6 类受灾体破坏状态等级;Luo 等^[30]提出了混凝土结构在滑坡冲击作用下的 5 类破坏等级划分。笔者以模型试验结果为基础,以半定量方式给出框架结构房屋破坏等级的划分标准,即微小损坏、轻度破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏 5 级(表 2)。建筑物损伤程度取值范围为 0(无损伤)到 1(完全损伤),该指标为多因素耦合的半定量量化判定结果,综合考虑框架柱体受损比率、试验峰值冲击力、冲击总能量 3 个核心指标,并参考滑坡灾害下建筑结构易损性评估相关研究成果^[30],结合试验实测数据标定确定。其中柱体受损比率为受冲击失效柱体数量占总框架柱数量的百分比,冲击总能量 E_k 为单滚石冲击动能 E_{k1} (式(5))与冲击柱数量 N 的乘积,指标取值随结构损伤程度的加剧呈线性递增趋势,可作为山区框架结构房屋滚石冲击灾害易损性评估的参考依据。

表 2 破坏形态分级表
Table 2 Classification of failure modes

破坏等级	破坏描述	破坏尺度	损伤程度	工况分组	试验冲击力 F_1/N	冲击总能量 E_k/J
微小破坏	主要承重结构构件(柱和梁)和次要构件基本完好	无结构性和非结构性损坏	(0,0.1]	工况 G1	178.95	6.62
轻度破坏	结构产生裂缝、少数混凝土元素脱落,柱体无明显损坏	无结构性损坏,部分非结构功能受损	(0.1,0.3]	工况 G5	388.36	32.39
中等破坏	结构产生裂缝,少数柱体出现混凝土压碎和断裂,柱体受损比率 $<25\%$	少部分结构性损坏或功能降低	(0.3,0.5]	工况 G4	218.41	16.73
				工况 G8	211.08	23.72
				工况 G9	389.62	30.42
严重破坏	大量柱体断裂,产生倾倒趋势,柱体受损比率处于 $25\%\sim40\%$	部分主体结构破坏或部分功能丧失	(0.5,0.7]	工况 G2	305.12	76.61
				工况 G7	275.51	36.02
完全破坏	一层柱体完全失效,柱体受损比率 $>40\%$	主体结构破坏或功能丧失	(0.7,1]	工况 G3	565.24	110.25
				工况 G6	332.08	65.34

3.2 测点加速度响应分析

3.2.1 冲击点局部响应(测点 A1)

测点 A1 位于各工况受冲击的首层框架柱中点(如图 6(a)所示),其加速度时程(图 9)直接反映冲击作用的局部剧烈程度和构件的瞬时响应。测点 A1 加速度峰值随着滚石冲击动能的增大而增大, G3 工况峰值加速度为 25.42 m/s^2 , G1 工况峰值加速度为 9.91 m/s^2 。所有工况下 A1 测点的加速度时程均呈现 3 个典型阶段,其幅值与频率特性与最终破坏程度高度相关,各阶段的形成存在明确的力学与结构响应内在原因。

脉冲上升阶段:曲线出现一个短促、高幅值的正向脉冲。该脉冲对应滚石与柱身接触的瞬间,反

映了极大的冲击力在很短时间内传递给结构,其形成源于滚石与柱身的瞬时刚性接触,滚石冲击动能可在极短时间内转化为冲击冲量,接触界面应力瞬间骤增并向柱体内部传递,使得测点处产生瞬时加速度峰值,该过程符合冲量定理中力与时间的耦合关系。其峰值加速度(PGA)是衡量冲击剧烈程度的关键指标,主要受滚石质量、冲击速度(启动高度)及接触点局部刚度控制。在试验中,工况 G3($m=4\text{ kg}$ 、 $H=2\text{ m}$)和 G6($m=4\text{ kg}$ 、 $N=3$)的 PGA 最高,与其较高冲击能量和多柱冲击的工况参数相符。

结构振动阶段:在高幅值脉冲之后,曲线表现为一系列幅值逐渐衰减的自由振动波形。此阶段由冲击脉冲激发结构以其固有频率振动,滚石与柱

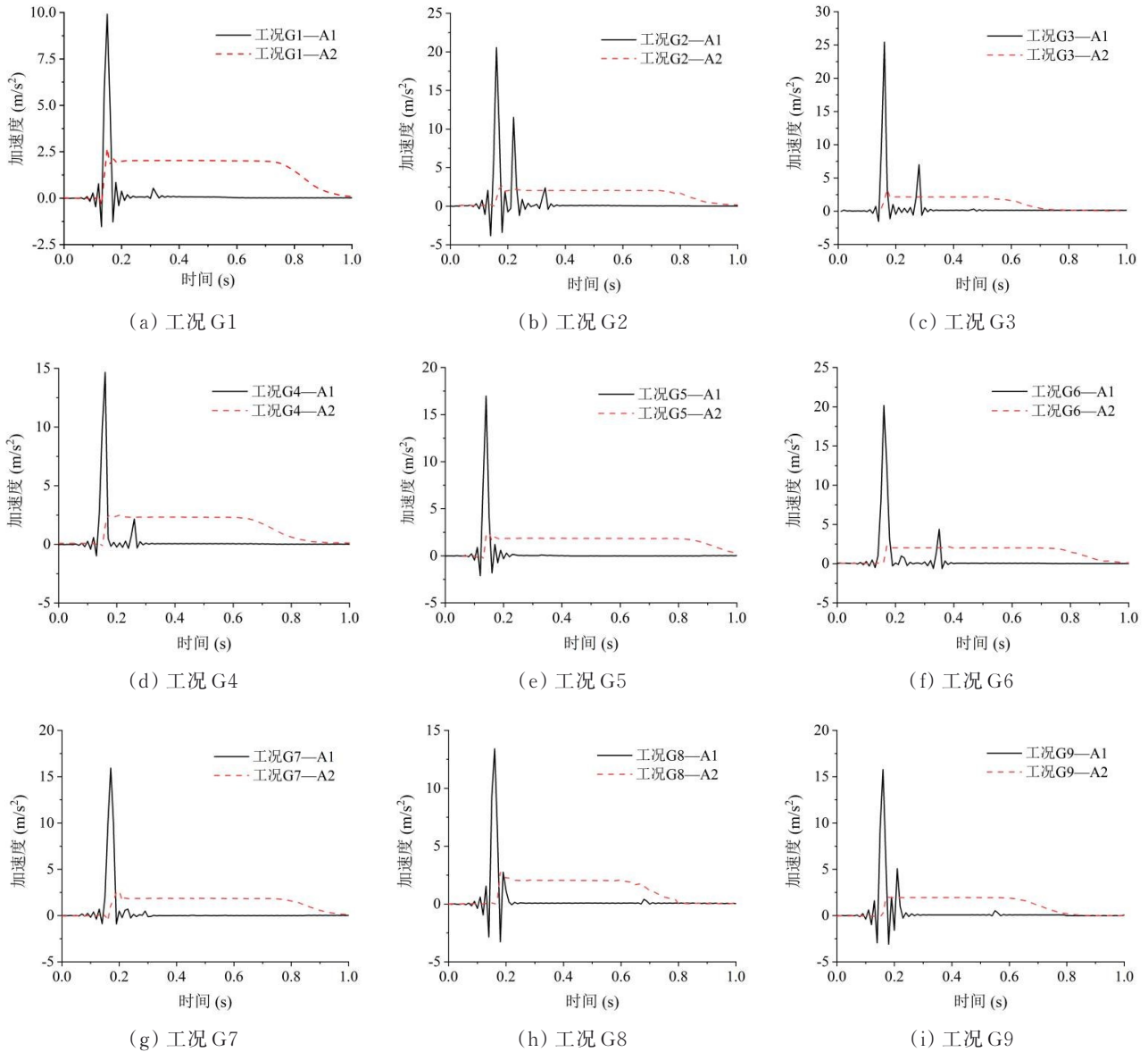


图9 测点加速度时程曲线

Fig.9 Time-history curves of acceleration at measuring points

体接触后发生分离,冲击脉冲的瞬时作用消失,结构因受迫振动激发固有频率的自由振动;而幅值逐渐衰减的核心原因,是框架柱在冲击作用下产生的混凝土微开裂、界面滑移及钢筋与砂浆的黏结滑移等非线性行为持续耗散振动能量,同时结构自身的材料阻尼与几何阻尼也会进一步削弱振动幅值。其衰减速率反映了结构的阻尼特性,频率变化则反映了刚度的演化,混凝土开裂、钢筋屈服等非线性行为耗散大量能量,导致振动迅速衰减。在中等破坏工况(如G4)中,可观察到主频率随刚度退化而明显降低;在严重破坏或倒塌工况(如G3、G7)中,柱体发生断裂,振动传递路径中断,曲线常在剧烈振动后突然中断,表明传感器随构件彻底失效而停止工作。

静止阶段:振动逐渐平息,曲线趋于平直。该

阶段的形成是因为结构的振动能量通过材料损伤、阻尼耗散及构件弹塑性变形等方式被完全耗散,结构在冲击荷载作用下完成弹塑性变形过程,最终达到新的静力平衡状态,此时冲击能量被完全耗散,结构达到一个新的静止平衡状态。

3.2.2 整体结构响应(测点A2)

测点A2位于框架房屋受冲击远端的一层梁板柱节点(如图6(a)所示),其加速度值(图9)用于评估冲击力在结构中的传递程度以及整体结构的惯性响应。

各工况下A2测点的加速度时程规律高度一致,与A1点的剧烈变化形成鲜明对比。在冲击瞬间达到峰值,但峰值加速度大小基本相同,均值约为 2.60 m/s^2 。这表明冲击能量在传递至结构远端后,其高频成分已被大幅过滤,响应主要由结构的

整体惯性主导。峰值加速度持续至 0.8~1.0 s 后, 曲线逐渐衰减至 0 m/s²。这一稳定的平台段表明结构作为一个整体在运动,体现了框架结构的整体性和工作性能。

综合对比 A1 与 A2 响应可知:冲击荷载首先表现为对直接冲击构件的局部剧烈作用(A1 点响应), 其后通过梁、板等水平构件传递,激发整个结构的整体惯性运动(A2 点响应)。A1 响应与局部冲击作用强度直接相关,其峰值可直观反映构件局部受荷剧烈程度,与局部混凝土开裂、压溃等损伤发展趋势高度关联;A2 响应可体现冲击能量在结构整体的传递与重分布特征,其幅值与衰减规律能间接反映结构整体惯性运动状态及空间协同工作性能,为评判结构抗整体倒塌能力提供重要动力响应参考。

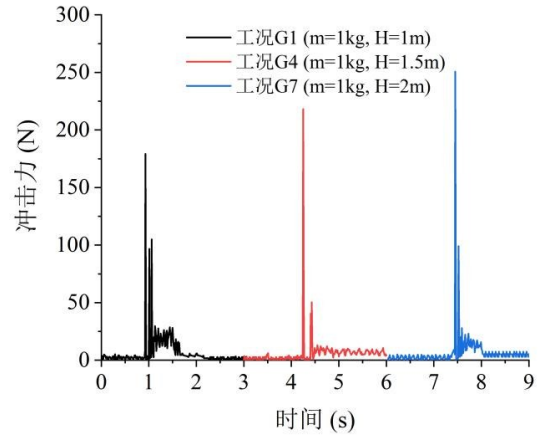
3.3 测点冲击力特征分析

在动力响应分析中,冲击力是衡量结构局部与整体破坏过程发展的关键参数,各工况冲击力测点位于受冲击的首层框架柱中点(如图 6(b)所示),冲击力时程曲线如图 10 所示。可以看出,各工况下框架柱测点的冲击力时程曲线具有高度的相似性,均表现为典型的短暂脉冲荷载形式。各工况下首层框架柱受到峰值冲击力 F_1 随着滚石质量 m 和启动高度 H 的增加而增大, G3 工况峰值冲击力为 565.24 N, G1 工况峰值冲击力为 178.95 N,滚石与房屋从接触到分离的历时仅约 0.1 s。

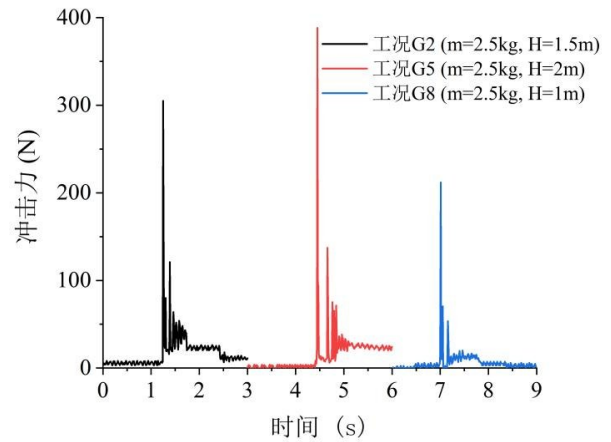
关于滚石冲击力的计算主要基于材料力学、Hertz 弹性碰撞理论、冲量定理和能量守恒定律,并通过理论推导、冲击试验和数据拟合等手段建立了一系列经验计算公式^[31-32],具有代表性的公式包括:吴积善、O. Hunger 等提出的梁式简化公式(式(6));Labouse 等提出的瑞士公式;Kawahara 等提出的日本公式;澳大利亚学者 Pichler、中国学者杨其新等提出的经验公式。研究表明,瑞士、日本及杨其新等经验公式的计算结果普遍高于实测值,其原因在于这些公式多基于自由落体的落石(或重锤)试验建立,其冲击速度高于试验中沿坡面滑槽滚动的滚石速度。同时,已有文献^[33]对学者提出的大石块冲击力计算公式进行对比分析,采取不同的计算方法,得到的结果相差甚远。鉴于上述情况,参照文献^[33]中《甘肃省地质灾害防治工程勘查设计技术要求》的冲击力公式,该公式也与 Ng 等^[34]根据实际工程推荐计算公式需引入折减系数 K_c ($K_c=0.1$) 相符,近似计算式为:

$$F_{p7} = 24\,100v^{1.2}r^2 \quad (7)$$

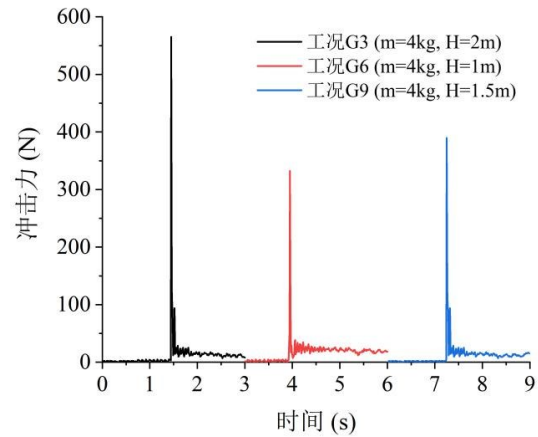
式中: F_{p7} 为滚石的计算冲击力, N; v 为滚石的冲击速度, m/s; r 为滚石的半径, m, 对应滚石质量为 1、



(a) 工况 G1、G4、G7



(b) 工况 G2、G5、G8



(c) 工况 G3、G6、G9

注:各工况为独立试验,曲线合并绘制仅作对比分析。

图 10 测点冲击力时程曲线

Fig.10 Time-history curves of impact force at measuring points

2.5、4 的半径分别为 0.044、0.05、0.06 m。

滚石的冲击速度 v 通过高速摄影机的图像追踪数据获得,并与经验公式(8)进行验证,误差范围在 $\pm 5\%$ 以内,各工况下对应的冲击速度见表 3。

$$v = \sqrt{2g[H - (\mu_1 H \cot \alpha + \mu_2 l)]} \quad (8)$$

式中: g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; H 为启动高度, m ; l 为房屋与滑槽坡脚的距离,即水平段滑槽长度, m ; μ_1 、 μ_2 分别为滑槽斜段和水平段摩擦系数,根据试验条件分别取 0.15 、 0.30 ; α 为滑槽轨道坡度,取 30° 。

根据式(6)、式(7)计算得到的各工况冲击力理论值 F_{P6} 、 F_{P7} 如表3所示,其中首层框架柱高度 h_0 为 0.2 m ;框架柱弹性模量 E 取水泥砂浆弹性模量值 10.8 GPa ,框架柱截面惯性矩 $I=(0.03\times0.03^3)/12=6.75\times10^{-8}\text{ m}^4$,即框架柱侧向刚度 EI 为 $729\text{ N}\cdot\text{m}^2$ 。

对比分析表明,冲击力峰值的试验结果 F_1 与经验公式解 F_{P7} 偏差 ∇_7 为 $-8.54\%\sim-20.26\%$,而试验结果 F_1 与经验公式解 F_{P6} 偏差 ∇_6 却高达 $-96.59\%\sim-97.30\%$ 。两者存在偏差主要是式(7)已经引入折减系数 K_C ($K_C=0.1$)。产生偏差的共同原因:首先是公式的简化假设。理论公式基于完全弹性碰撞假设,未考虑冲击过程中结构表面混凝土的塑性变形、局部压溃以及钢筋屈服所耗散的能量,而这些过程会延长实际撞击历时 Δt ,从而降低实测冲击

力峰值。其次是参数取值误差。摩擦系数 μ 、撞击历时 Δt 等关键参数受试验条件限制,存在一定的取值误差。最后测量系统局限。冲击过程历时极短,对测量仪器(如力传感器)的频率响应特性和精度提出了较高要求,任何较小的系统误差都可能造成峰值测量的偏差。

针对简化模型推导的式(6)未考虑结构塑性变形、局部压溃耗能等因素的影响,考虑引入塑性耗能折减系数 K_P ,基于全工况试验值反向计算,拟合得到修正模型系数如式(9)所示。

$$F_{P9}=K_P\sqrt{\frac{384mgEI}{7h_0^3}}\left[\left(1-\mu_1\cot\alpha\right)H-\mu_2l\right]\quad(9)$$

式中: K_P 为塑性耗能折减系数,综合反映冲击过程中结构的塑性变形、混凝土压溃及钢筋屈服等能量耗散,通过试验数据反演确定 K_P 为 0.03 。通过式(9)计算可得各试验工况下的修正冲击力 F_{P9} ,偏差 ∇_9 控制在 $-9.98\%\sim13.50\%$ (见表3),有效提升了模型的工程适用性。该修正经验公式能较好地预测冲击力的量级,可用于初步评估。

表3 冲击力理论公式值与试验值对比
Table 3 Comparison between theoretical and experimental values of impact force

工况 分组	滚石质 量 m/kg	启动高 度 H/m	冲击速 度 $v/(\text{m/s})$	试验冲击力 F_1/N	计算冲击力 F_{P6}/N	计算冲击力 F_{P7}/N	修正冲击力 F_{P9}/N	偏差 ∇_6 /%	偏差 ∇_7 /%	偏差 ∇_9 /%
G1	1	1	3.64	178.95	5 754.69	219.91	172.64	-96.89	-18.63	3.65
G2	2.5	1.5	4.52	305.12	11 298.71	368.23	338.96	-97.30	-17.14	-9.98
G3	4	2	5.25	565.24	16 600.06	634.62	498.00	-96.59	-10.93	13.50
G4	1	1.5	4.09	218.41	6 466.12	252.92	193.98	-96.62	-13.65	12.59
G5	2.5	2	5.09	388.36	12 723.55	424.64	381.71	-96.95	-8.54	1.74
G6	4	1	3.30	332.08	10 434.32	363.53	313.03	-96.82	-8.65	6.09
G7	1	2	4.90	250.51	7 746.69	314.16	232.40	-96.77	-20.26	7.79
G8	2.5	1	3.08	211.08	7 699.12	232.39	230.97	-97.26	-9.17	-8.61
G9	4	1.5	3.90	389.62	12 331.47	444.22	369.94	-96.84	-12.29	5.32

注:1. K_P 是通过试验反算求得的塑性耗能折减系数,值取为 0.03 ; ∇_6 表示试验冲击力 F_1 与经验公式值 F_{P6} 的偏差,即 $\nabla_6=\frac{(F_1-F_{P6})}{F_{P6}}\times 100\%$, ∇_7 、 ∇_9 与 ∇_6 类似。

4 结论

通过自主设计的滑槽轨道试验装置,开展9组正交工况的滚石冲击框架结构模型试验,系统分析滚石质量、启动高度、冲击柱数量及坡脚距离四因素耦合作用下结构的破坏模式与加速度、冲击力动力响应特性,得出主要结论和工程启示如下:

1)框架结构受滚石冲击的破坏呈“材料-构件-整体”多尺度演化特征,可划分为微小、轻度、中等、严重、完全破坏5个等级,破坏过程遵循“构件变形-局部破坏-整体变形-整体失稳”的渐进规律。冲击

柱数量是控制结构整体稳定性的最敏感因素,多柱冲击易引发结构重心偏移与系统性失稳,偏心冲击的扭转效应会显著加剧构件损伤与整体破坏;当框架柱破坏比例超过 40% 时,结构将发生不可逆整体倒塌。

2)滚石冲击下结构能量传递呈现“局部脉冲-整体惯性”两阶段耗散机制,冲击点测点(A1)加速度响应与局部受荷剧烈程度高度相关,远端测点(A2)加速度响应可反映结构整体惯性运动及空间协同工作性能,冲击能量通过结构变形、裂缝发展实现

有效耗散。试验实测受冲击柱峰值加速度 $9.91 \sim 25.42 \text{ m/s}^2$ 、峰值冲击力 $178.95 \sim 565.24 \text{ N}$, 该数值区间可作为山区框架结构滚石冲击易损性分级与承载力退化判断的定量阈值: 峰值加速度与冲击力低于区间下限, 结构处于弹性工作阶段, 仅发生微小破坏且承载力无明显退化; 接近或超过区间上限, 结构进入塑性发展阶段, 柱体出现压溃、钢筋屈曲等损伤, 承载力显著退化且易发生完全破坏。该阈值可为山区框架建筑滚石灾害现场快速评估、损伤等级判定及应急加固提供量化依据。

3) 现有基于弹性碰撞假设的滚石冲击力经验公式因未考虑结构塑性耗能效应, 计算值与试验实测值偏差显著, 其中式(6)偏差达 $-96.59\% \sim -97.30\%$, 式(7)偏差为 $-8.54\% \sim -20.26\%$ 。通过引入塑性耗能折减系数 $K_p=0.03$ 对式(6)修正后, 计算值与实测值误差控制在 $-9.98\% \sim 13.50\%$, 有效提升了公式的工程适用性。

4) 基于试验结果, 提出山区框架结构房屋滚石灾害防治工程建议: ①构件防护, 优先强化首层框架柱(尤以中柱为重点)的抗冲击能力, 可采用外包钢、粘贴纤维复合材料等方式提升柱体抗剪与抗弯性能, 避免早发性脆性破坏; ②结构布置, 优化建筑与坡脚的水平距离及柱网布置, 降低多柱同时受冲击与偏心冲击的概率, 增强结构整体抗扭与抗侧能力; ③灾害评估, 结合峰值加速度、峰值冲击力阈值与柱体受损比率, 建立滚石冲击易损性评估体系, 实现灾害风险快速分级与精准防控; ④防护工程, 在滚石易发区域, 依据修正后的冲击力公式设计拦石墙、缓冲层等被动防护措施, 合理确定防护结构承载力参数, 提升防护体系与建筑主体结构的协同抗冲击效果。

参考文献

- [1] 郑路, 陈元睿, 吴怡涵, 等. 节理影响下的滚石碰撞破碎规律研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(3): 729-749.
Zheng L, Chen Y R, Wu Y H, et al. Collision and fragmentation patterns of rockfalls under the influence of joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(3): 729-749. (in Chinese)
- [2] 褚云朋, 李勤, 古松, 等. 侧向冲击下新型分层装配式格构柱动态响应试验[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(5): 14-23.
Chu Y P, Li Q, Gu S, et al. Experimental study on the dynamic response of new layered prefabricated lattice columns under lateral impact[J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(5): 14-23. (in Chinese)
- [3] 汪峰, 唐现梓, 黄伟. 山区输电塔滚石撞击响应分析及撞击力计算[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12440-12448.
Wang F, Tang X Z, Huang W. Response analysis and simplified calculation of impact force of transmission tower in mountain area under rolling stone impact[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(28): 12440-12448. (in Chinese)
- [4] 雷雨, 崔鹏, 蒋先刚. 泥石流作用下砌体房屋破坏机理与结构优化[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(4): 61-69.
Lei Y, Cui P, Jiang X G. Failure mechanism and structure optimization of masonry building due to debris flow impact[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(4): 61-69. (in Chinese)
- [5] Li P Z, Rong K J, Lu Z, et al. Experimental and numerical study on the performance of novel RC frame structure encased with shaped steel under debris flow impact[J]. Engineering Structures, 2020, 212: 110472.
- [6] 杨金宁, 郑光, 李鑫武, 等. 2024年1月22日云南镇雄县凉水村滑坡特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(2): 556-571.
Yang J N, Zheng G, Li X W, et al. Characteristics and failure mechanism of rock Ava-lanche in Liangshui village, Zhenxiong county, Yunnan Province, on January 22, 2024[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(2): 556-571. (in Chinese)
- [7] 龚涛, 钱江澎, 张继, 等. 从四川筠连县金坪村滑坡论乌蒙山区“群蝶效应”致冬季滑坡机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(11): 2943-2958.
Gong T, Qian J P, Zhang J, et al. Mechanism analysis of winter landslides triggered by the “butterfly swarm effect” in the Wumeng Mountainous Region from the landslide in Jinping Village, Junlian County, Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(11): 2943-2958. (in Chinese)
- [8] 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.
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. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 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.
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. (in Chinese)
- [11] 刘欢,樊晓一,姜元俊,等.含大石块泥石流冲击作用下框架结构房屋动力响应研究[J].振动与冲击,2024,43(1): 9-19.
- Liu H, Fan X Y, Jiang Y J, et al. Dynamic response of frame structure building under impact of debris flow with large stones[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(1): 9-19. (in Chinese)
- [12] 张金,张忠耀,张高,等.SPH-DEM-FEM流固耦合模型下泥石流冲击框架损伤评估[J].振动与冲击,2026,45(6): 141-153, 163.
- Zhang J, Zhang Z Y, Zhang G, et al. Damage assessment of the debris flow impact on frame structures based on a SPH-DEM-FEM fluid-solid coupling model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2026, 45(6): 141-153, 163. (in Chinese)
- [13] Li X L, Li B L, Qie L W, et al. Dynamic response of a frame structure impacted by debris flow containing large boulders[J]. Structures, 2025, 74: 108543.
- [14] Wang F, Wang J D, Chen X Q, et al. Experimental study on the coupling motion mechanism of boulders in debris flow[J]. Landslides, 2025, 22(5): 1623-1645.
- [15] 常礼安,艾岩,刘红岩.滚石对防护结构最大冲击力影响因素试验研究[J].岩土工程技术,2025,39(2): 297-304.
- Chang L A, Ai Y, Liu H Y. Influence factors of the maximum impact force on the protective structure under rockfall[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2025, 39(2): 297-304. (in Chinese)
- [16] 陶志刚,朱淳,何满潮,等.基于正交设计的露天矿V形槽结构滚石防护试验[J].煤炭学报,2017,42(9): 2307-2315.
- Tao Z G, Zhu C, He M C, et al. Test of V shaped groove structure against rockfall based on orthogonal design[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2307-2315. (in Chinese)
- [17] 黄润秋,刘卫华.基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5): 882-891.
- Huang R Q, Liu W H. In-situ test study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 882-891. (in Chinese)
- [18] Zeng C, Cui P, Su Z M, et al. Failure modes of reinforced concrete columns of buildings under debris flow impact[J]. Landslides, 2015, 12(3): 561-571.
- [19] 何思明,吴永,沈均.泥石流大块石冲击力的简化计算[J].自然灾害学报,2009,18(5): 51-56.
- He S M, Wu Y, Shen J. Simplified calculation of impact force of massive stone in debris flow[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(5): 51-56. (in Chinese)
- [20] 陈旭丹,孙新利,程金星,等.单体滑坡灾害承灾体的有限元模拟与易损性评估[J].长江科学院院报,2015,32(9): 69-75.
- Chen X D, Sun X L, Cheng J X, et al. Finite element simulation and vulnerability assessment for bearing body caused by single landslide[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(9): 69-75. (in Chinese)
- [21] Xing L, Wang G Z, Gong W P, et al. Model tests of the failure behaviors of buildings under the impact of granular flow[J]. Landslides, 2025, 22(2): 373-392.
- [22] 王玉峰,许强,程谦恭,等.复杂三维地形条件下滑坡-碎屑流运动与堆积特征物理模拟实验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(9): 1776-1791.
- Wang Y F, Xu Q, Cheng Q G, et al. Experimental study on the propagation and deposit features of rock avalanche along 3D complex topography[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1776-1791. (in Chinese)
- [23] 金浏,李健,张仁波,等.强动载作用下构件相似理论与尺度效应研究进展[J].建筑结构学报,2025,46(8): 114-132.
- Jin L, Li J, Zhang R B, et al. Research progress on similarity theory and scaling effect of components under strong dynamic loads[J]. Journal of Building Structures, 2025, 46(8): 114-132. (in Chinese)
- [24] 周远忠,吴福飞,王宏杰,等.磷石膏水泥复合湿拌砂浆配合比优化研究[J].新型建筑材料,2022,49(5): 53-56, 61.
- Zhou Y Z, Wu F F, Wang H J, et al. The study on optimization of mix proportion for wet mixed mortar with phosphogypsum and cement[J]. New Building Materials, 2022, 49(5): 53-56, 61. (in Chinese)
- [25] 唐志文,彭国豪,林智城,等.配合比对水泥-石膏变形参数及能量性能的影响[J].混凝土世界,2023(10): 58-62.
- Tang Z W, Peng G H, Lin Z C, et al. Effect of mix ratio on the deformation parameters and energy properties of cement-gypsum[J]. China Concrete, 2023(10): 58-62. (in Chinese)
- [26] 冉永红,王秀丽,王朋,等.冲击荷载下钢管混凝土桩林动力性能试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(增刊1): 81-86.
- Ran Y H, Wang X L, Wang P, et al. Experimental study on dynamic performance of concrete filled steel tubular piles under impact loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1): 81-86. (in Chinese)
- [27] Hu K H, Cui P, Zhang J Q. Characteristics of damage to buildings by debris flows on 7 August 2010 in Zhouqu, Western China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(7): 2209-2217.

- [28] 曾超, 崔鹏, 葛永刚, 等. 四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏建筑物的特征与力学模型[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(2): 81-91.
- Zeng C, Cui P, Ge Y G, et al. Characteristics and mechanism of buildings damaged by debris flows on 11 July, 2013 in Qipangou of Wenchuan, Sichuan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(2): 81-91. (in Chinese)
- [29] 吴越, 刘东升, 陆新, 等. 基于功-能关系的滑坡典型受灾体易损性评估模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊1): 2946-2953.
- Wu Y, Liu D S, Lu X, et al. A quantitative vulnerability assessment model for typical element at landslide risk based on work-energy transformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2946-2953. (in Chinese)
- [30] Luo H Y, Zhang L L, Zhang L M. Progressive failure of buildings under landslide impact[J]. Landslides, 2019, 16(7): 1327-1340.
- [31] 袁进科, 黄润秋, 裴向军. 滚石冲击力测试研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 48-54.
- Yuan J K, Huang R Q, Pei X J. Test research on rockfall impact force[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 48-54. (in Chinese)
- [32] 刘洋, 游勇, 王海帆, 等. 颗粒流冲击力研究现状及讨论[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(5): 714-723.
- Liu Y, You Y, Wang H F, et al. Research status and discussion on granular flow impact force[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5): 714-723. (in Chinese)
- [33] 周明慧, 熊海贝, 赵书平, 等. 泥石流冲击力简化计算方法: 以舟曲县三眼峪泥石流为例[J]. 山地学报, 2017, 35(2): 187-194.
- Zhou M H, Xiong H B, Zhao S P, et al. Simplified calculation of impact force of debris flow based on the case study of Sanyan valley debris flow[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 35(2): 187-194. (in Chinese)
- [34] Ng C W W, Liu H M, Choi C E, et al. Impact dynamics of boulder-enriched debris flow on a rigid barrier[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(3): 04021004.
- (编辑 XXX)