

高秀青. 共生型泥石流对建筑物结构损伤的多尺度分析[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 13–16, 32. [GAO Xiuqing. Multi-scale Analysis of Damage Caused by Symbiotic Debris Flow to Building Structure[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 13–16, 32. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.003.]

共生型泥石流对建筑物结构损伤的多尺度分析^{*}

高秀青

(吕梁学院 建筑系, 山西 吕梁 033000)

摘要: 为了获得泥石流对建筑物结构损伤情况, 提高泥石流下建筑结构损伤检测精确性, 针对共生型泥石流对建筑物结构损伤进行多尺度分析。结合 LiDAR 点云数据和航空摄像数据, 提取泥石流灾害建筑物结构相关信息; 分析泥石流的冲击机理和地貌形迹。结合实际观测和基础信息, 计算泥石流的冲击力和建筑结构最大位移, 获得共生型泥石流对建筑物结构冲击作用下的影响因素。利用简化泥石流作用力, 对一个二层建筑结构在共生型泥石流冲击下的损伤位移情况进行模拟, 设计四种工况, 通过不同工况在泥石流下的冲击响应实现结构损伤多尺度分析。结果表明: 结构柱产生位移的主要影响因素为泥石流整体作用力, 一旦遇到大石块, 位移会有增加趋势; 建筑结构最大位移和泥石流密度、刚度等因素相关; 结构最大位移模拟值与理论值拟合度高; 泥石流中比较大的石块为建筑物结构受到损伤的关键因素, 可利用减小结构刚度减缓冲击力。

关键词: 共生型泥石流; 建筑物结构; 损伤; 多尺度分析; LiDAR 点云数据

中图分类号: TU312; X43; X915.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)04-0013-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.003

共生型泥石流的产生有其特殊成因。基于共生作用方式, 主要含有滑坡型、山崩型、湖岸溃决型、地震型以及火山型等泥石流^[1]。因人类一些不科学和不合理的活动, 导致形成的泥石流, 是具有特殊性的共生型泥石流。无论哪种泥石流, 均为突发性的自然灾害, 有着时间短暂和破坏力强等特点^[2-3]。其严重危害交通和各种工程, 其中建筑物是抵挡泥石流的一道防线, 一旦遭到破坏, 会给大众生命财产安全带来很大威胁。因此, 获取泥石流冲击作用下建筑结构的损伤形态, 优化建筑物结构, 对抵御泥石流冲击具有重要意义。

为此, 许多学者对此进行了研究, 取得了一定的进展。陈鸿志^[4]等人将尤特台风造成的基础设施破坏当作重点进行研究。过程中, 利用灾后现场相关调研, 分析了泥石流活动特征和对公路基础设施带来的危害。经研究可知, 台风降雨引发的泥石流具有群发性特点, 且各场泥石流重现周期大致 100 年。泥石流没有造成路基和隧道等工程结构上的破坏, 但对其功能起到了破坏作用。涵洞和挡墙等附属性的设施或者施工设施受到的破坏需要长时间才能够修复。邱皓廷^[5]等人针对泥石流活动对砌体墙的冲击损伤进行了测试, 分析了墙体破坏形态与特征, 依据三维数字散斑影像有关方法对砌体墙面受到泥石流冲击之

后的位移场进行相应测量, 对比分析了砌体墙的整体位移场和墙体受到冲击之后动力响应及破坏形态间存在的相关性, 探讨了砌体墙抗冲击能力和冲击破坏机理。测试结果显示, 泥石流冲击影响下, 墙体破坏呈横纵裂缝交叉形式贯通, 且受到撞击的部位呈局部突起的状态, 纵向裂缝开展的宽度比横向裂缝要大, 墙体最薄的地方是中上位置。王秀丽^[6]等人提出具备自复位性能的泥石流拦挡坝, 同时使用钢球取代泥石流中比较大的石块, 通过有限元软件 ABAQUS 实现冲击模拟, 由坝体变形、位移等方面和普通坝体进行比较。比较结果显示: 自复位拦挡坝与普通的坝体相比具有较强的抗冲击能力, 其应力比较小, 应力整体分布更为均匀, 位移情况也优于普通拦挡坝。

上述研究成果在一定程度上显示泥石流冲击作用下建筑物结构损伤情况, 但是模拟结果的精确性仍需改善, 为了更全面地分析泥石流对建筑物结构损伤形态, 本文提出多尺度分析方法。

1 共生型泥石流对建筑物结构损伤的多尺度分析

1.1 泥石流灾害建筑物结构相关信息提取

为了精准地分析泥石流对建筑物结构带来的

* 收稿日期: 2020-03-06 修回日期: 2020-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801084)

作者简介: 高秀青(1976-), 女, 汉族, 山西吕梁人, 讲师, 主要从事建筑学、结构工程研究. E-mail: Gaoxq123@2980.com

损伤,本文首先提取出泥石流灾害建筑物结构相关信息。

结合 LiDAR 点云数据和航空摄像数据,通过图像分析技术实现图像分割,并对多数据的光谱及纹理特征进行相应提取。

数据采集系统根据 WASP 摄像系统与激光雷达传感设备构成,以此采集泥石流灾害建筑物结构相关影像。

在 LiDAR 点云数据处理过程中,具体处理过程为:①将 GPS 和惯性测量系统的观测数据相结合,以此对各点云三维坐标进行计算;②对系统误差与粗差点进行检测与清除,并通过自适应 TIN 法对点云数据实行滤波分类操作,实现地面与非地面点的分离;③利用 Kriging 插值法构建数字地面模型,并通过 LiDAR 首次返回的数据构建数字表面模型,即 DSM;④根据 DSM 减 DEM 能够获取地表物体高度信息,该模型记作 nDSM。通过 nDSM 检测提取建筑物可以将地形影响直接消除。

实际应用中,用在损伤建筑物提取的分割目标特征包含航空彩色图像均值以及 nDSM 高程均值和绿度指数等信息数据提取到的纹理特征。

上述中的绿度指数主要应用在提取植被覆盖率,表达式为:

$$\text{Greenness} = (G - R) / (G + R). \quad (1)$$

式中: G 为绿波段的像元值, R 为红波段的像元值。

在大部分情况下,没有倒塌损伤的建筑物结构图像纹理特征相对一致,纹理变化相对小,相反的则比较杂乱,且变化比较大^[7-8]。在此,分别选取对比度、差异性与方差等灰度共生矩阵下的纹理特征,表达式为:

$$\begin{cases} C = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} p(i,j) g(i-j)^2; \\ D = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} p(i,j) g|i-j|; \\ V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} [p(i,j) g(i-\mu)^2 + p(i,j) g(j-\mu)^2] \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ 为均值, i, j 为尺寸一定窗口内的共生矩阵点对灰度, $p(i, j)$ 为图像中某点灰度值是 i , 并在某方向上和其间隔一定距离灰度是 j 点所出现的频率, N 为灰度共生矩阵规模。

1.2 泥石流的冲击机理和形迹

根据上述信息提取,分析泥石流的冲击机理和形迹,为接下来的建筑物结构损伤多尺度分析奠定基础。

以某雨季引发的共生型泥石流现场采集数据为基准,得到的泥石流冲击情形如图 1 所示。泥石流灾害一旦发生,在其冲击会流槽整个过程中,浮在表面的流体会出现壅高现象。其中,壅高流体富含着固相颗粒,并近似抛物线逐渐向上游抛出,此时形成的颗粒以及浆体环流,会依据一种非定型的路径向速流槽中流入^[9-10]。围在汇流槽前方的流体一般情况下会形成一种顺时针与逆

时针环流,分界点一般在流体深度的三分之二部位,其中靠上部分是顺时针形式的环流,靠下部分是逆时针形式的环流。其中,顺时针形式的环流由流体表面逐渐向下减弱,而逆时针环流内掺杂的颗粒会近似成 S 型,顺着流体地层逐渐进到速流槽。

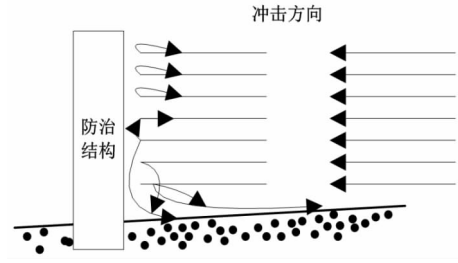


图1 泥石流冲击示意图

在每次泥石流之后,防治结构面墙,亦或是泥石流沟岸位置都会有大规模冲击形迹。

1.3 泥石流对建筑物结构损伤多尺度模拟

结合实际观测和上述内容,在泥石流对建筑物结构损伤多尺度模拟前,分别计算泥石流的冲击力和结构最大位移。

(1) 流体冲击力

共生型泥石流流体对建筑物结构产生的作用可划分成两部分。其中一部分是流体静力作用,而另外一部分是流体冲击下产生的动力作用。计算泥石流静力作用均值公式为:

$$F_{st} = p_{st} A = \frac{\rho g b h^2}{2}. \quad (3)$$

式中: F_{st} 为泥石流作用于建筑物结构上的静力值, p_{st} 为泥石流静力均值, A 为作用面积, ρ 为泥石流的密度值, b 为泥石流在建筑物结构上作用宽度值, g 为重力加速度, h 为泥石流的泥深。

泥石流冲击作用计算式为:

$$F_{dy} = p_{dy} A = \lambda \rho v_c^2 A \sin \alpha. \quad (4)$$

式中: F_{dy} 为流体作用于结构上的冲击力, V_c 为泥石流流速, P_{dy} 为泥石流的冲击力, λ 为建筑物结构形状系数, α 为建筑物结构受力面和流体产生的冲击力方向之间夹角。

(2) 结构框架最大位移

利用 u_{\max} 表征共生型泥石流作用下的结构框架最大位移,其根据流体对结构框架静力位移 u_{st} 与冲击力下最大位移 $u_{dy, \max}$ 构成。

$$u_{\max} = u_{st} + u_{dy, \max}. \quad (5)$$

建筑物结构在共生型泥石流静力下产生的位移取决于 u_{st} 流体静力 F_{st} 与结构刚度 k :

$$u_{st} = \frac{F_{st}}{k} = \frac{p_{st} A}{k} = \frac{\rho g b h^2}{2k}. \quad (6)$$

建筑物结构框架最大位移 $U_{dy, \max}$ 的下冲击力为 F_{dy} , 基于结构框架自身的动力学相关知识,定义三种脉冲力:矩形、半周正弦、三角形。在此,给出最大反应比 R_{\max} , 其定义为:

$$R_{\max} = U_{dy, \max} / U_{st, dy} = U_{dy, \max} \times k / F_{dy, \max}. \quad (7)$$

结构框架的自振周期为 T_n , 因流体对结构框

架冲击时间一般情况下比 $T_n/2$ 大, 进而可将冲击作用描述为矩形脉冲:

$$p'(t) = \begin{cases} p'_0, & t \leq \gamma; \\ 0, & t > \gamma. \end{cases} \quad (8)$$

泥石流冲击期间, $F_{dy, \max} = p'_0$ 。建筑物结构刚度 $k = 4\pi^2 m/T^2$, m 代表结构质量。综上, 能够获得结构最大的动位移:

$$u_{dy, \max} = R_{\max} \frac{p'_{dy, \max}}{k}. \quad (9)$$

根据式(9)能够获得建筑物结构最大位移:

$$u_{\max} = \frac{\rho g b h^2}{2k} + \frac{\lambda \rho v_c^2 A \sin \alpha}{2\pi^2 m} T_n. \quad (10)$$

综上可知, 共生型泥石流下结构框架产生的最大位移有关影响因素主要为: 流体密度值、速度值、结构框架的自振周期和刚度。

以多尺度分析共生型泥石流对建筑物结构损伤为目的, 以一个二层框架结构为例进行模拟。该结构使用 C35 混凝土, 结构框架见图 2。将流体密度设定为 $2.13 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$, 泥石流整体流速设定为 8 m/s , 泥石流和结构框架作用位置深度设置为 2.7 m , 冲击压力是 181.4 kPa , 其中泥石流中的石块冲击力是 597.5 kPa 。分别将流体和石块整体冲击力定义为矩形和三角形荷载, 在叠加之后获得理想时间和力之间相关性变化情况, 将四种工况作用于底层结构框架柱上, 实现泥石流对建筑物结构损伤的多尺度分析。

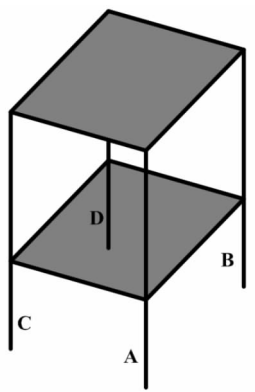


图2 建筑物结构框架示意图

工况 1: 结构柱仅受到泥石流整体冲击。

工况 2: 结构柱受到泥石流整体冲击, 并在 1 s 至 2 s 时对结构柱作用大石块冲击力。

工况 3: 结构柱受到泥石流整体冲击, 并在 1 s 至 2 s 、 3 s 至 4 s 时对结构柱作用大石块冲击力。

工况 4: 结构柱受到泥石流整体冲击, 且每隔 1 s 对结构柱作用一次大石块冲击力。

2 实验结果与分析

在得到上述工况相关信息下, 针对结构框架底层 A 柱柱底、柱顶与石块作用部位整体位移变化情况进行相应分析(图 3)。

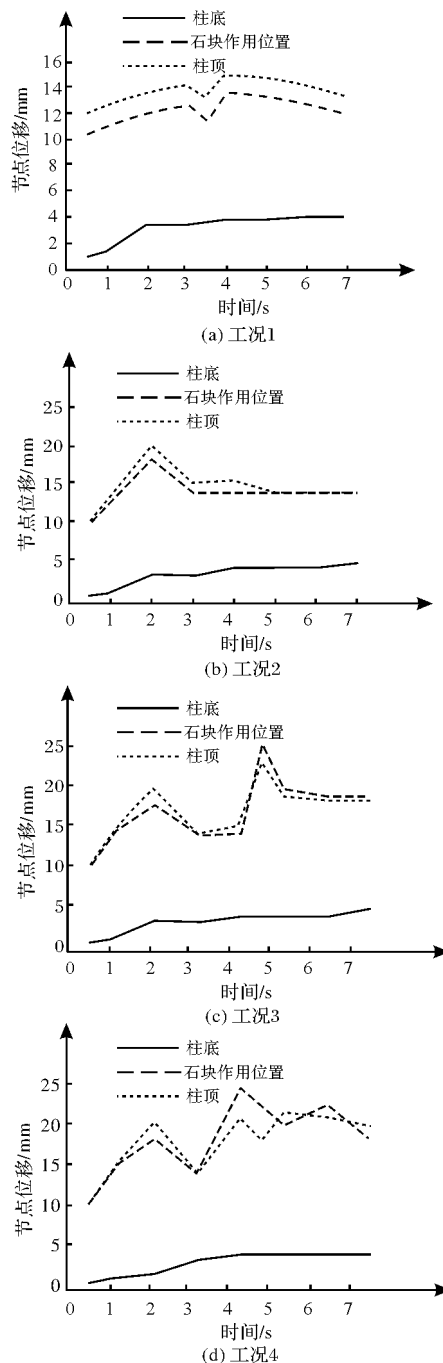


图3 建筑物结构柱 A 时间位移变化示意图

分析图 3, 有如下发现:

工况 1 下, 没有石块冲击压力, 结构柱顶和柱底以及石块作用位置的位移在一定时间内为增加趋势, 之后位移变化不大。

工况 2 下, 首次石块冲击力导致结构框架的柱顶和石块作用部位整体位移变化为先大后小, 有突起, 在相同时间结构框架柱顶产生的位移要大于柱底, 之后呈逐渐下降趋势。结构框架柱底产生的位移与工况 1 有着很高相似性, 且石块对结构框架柱底产生的影响并不大。

工况 3 下, 首次石块冲击位移和工况 2 存在相似性, 但是二次石块冲击之后, 结构柱顶与石块作用位置的位移有所增加, 且高于第一次, 石块

作用位置位移比柱顶大,柱底位移与工况 1 近似,在最大位移时刻存在突起。

工况 4 下,当施加 3 次冲击后,结构框架柱顶与石块作用部位每次都会有突起。第一次作用下结构框架柱顶产生的位移比石块作用部位大,之后两次石块作用位置的位移有所增加,其中二次冲击作用下产生的位移是最大的。

不同工况作用下,尽管荷载仅作用在结构柱 A 上,然而其临近的柱同样受到了影响,针对不同工况下结构柱 A 和其临近柱石块作用位置进行比较,获取其位移在时间变化下的变化情况(图 4)。分析图 4 可知,荷载作用在结构柱 A 上,由此其位移变化比较大,B、C 柱位移近乎相同,柱 D 是对角柱,和 A 的邻柱比较,位移变化略低。

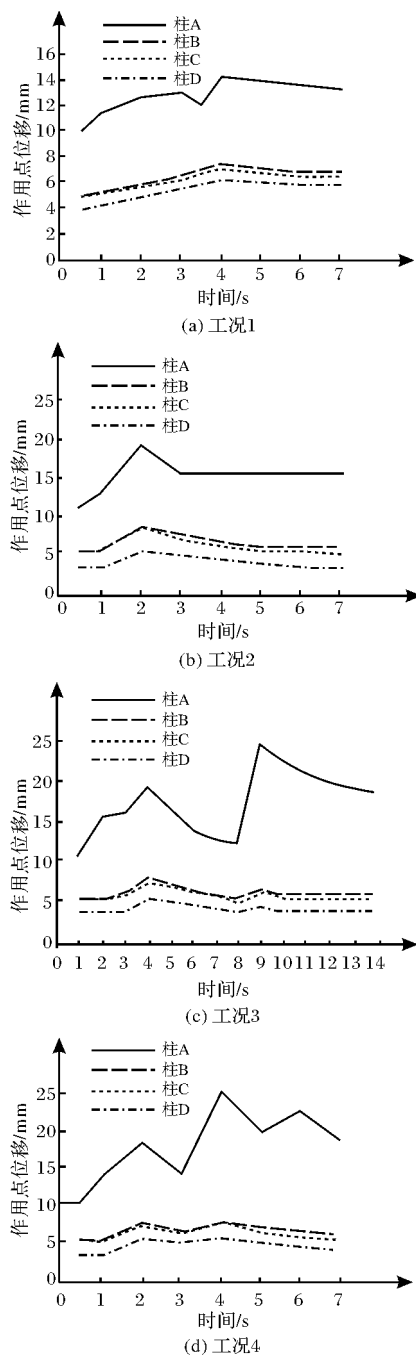


图 4 结构底层各柱时间位移变化示意图

考虑到流体的最大位移和速度之间有着密切的联系,图 5 为不同流速下结构最大位移理论与模拟值之间拟合情况。由图 5 可知,在持续时间下,最大位移的模拟值与理论值非常相近,准确性高,说明本文方法具有实用性,能够当作工程设计过程中的判定依据。

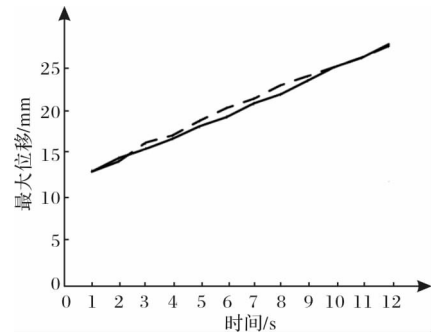


图 5 模拟与理论对比结果

3 结束语

针对泥石流自然灾害带来的危害,多尺度分析共生型泥石流对建筑物结构损伤。以提取的泥石流灾害下建筑物结构信息、泥石流的冲击机理以及形迹为分析依据,通过模拟工况实现泥石流下建筑物结构损伤分析。结果显示,模拟结果精确性强,可为该领域进一步研究提供一定的借鉴。下一步对如何完善建筑物结构,防御自然灾害进行深入研究,结合灾害下结构损伤分析,找到侧重点强化建筑物构件,更好地保护大众的生命安全与财产安全。

参考文献:

- [1] 陈鸿志,苏志满,徐林荣,等. 2013 年尤特台风诱发广乐高速公路泥石流活动特征及危害[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(1): 65-73.
- [2] 陈荟竹,刘希林,邱锦安. 基于 CiteSpace 的近三十年中国泥石流灾害风险研究综合分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 286-295.
- [3] 罗文文,李英民,韩军. 基于全概率 PBEE 方法的 RC 框架结构地震损失分析[J]. 工程力学, 2016, 33(9): 186-194.
- [4] 卢俊龙. 实心砖石古塔动力特性与结构损伤分析[J]. 力学与实践, 2016, 38(5): 560-566.
- [5] 邱皓廷,刘曙光,张洪,等. 砌体墙抗泥石流冲击性能试验研究[J]. 结构工程师, 2019, 35(2): 184-192.
- [6] 王秀丽,高芳芳,张嘉懿,等. 具有自复位功能的泥石流拦挡坝抗冲击性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 50-57.
- [7] 王翔宇,尚岳全,潘攀,等. 泥石流虹吸分流排水能力理论计算方法[J]. 山地学报, 2016, 34(5): 537-544.
- [8] 赵仕通,肖黎,屈文忠. 框架结构非线性损伤的主成分分析识别方法研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(1): 8-12.
- [9] 袁建力. 墙体参与工作的木构架古建筑抗震分析方法[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 45-52.
- [10] 宋兵,沈军辉,阮壮,等. 九-绵高速公路鲁家沟泥石流形成机制与数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 25-30.

(下转第 32 页)

- [7] 吴景红, 刘迅. ZigBee 技术与信息融合在煤矿安全监测中的应用与研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(10): 55–58.
- [8] 边江豪, 李秀珍, 胡凯衡. 横断山区山地灾害的区域分布特征与动态演化规律研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 6–13.
- [9] 杨建莹, 霍治国, 吴立, 等. 西南地区水稻洪涝灾害风险评估与区划[J]. 中国农业气象, 2016, 37(5): 564–577.
- [10] 刘春玲, 童立强, 祁生文, 等. 喜马拉雅山地区冰川湖溃决灾害隐患遥感调查及影响因素分析[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3): 110–115.
- [11] 罗冬莉, 赵尔旭, 解莉燕, 等. 2007 年 7 月云南洪涝灾害天气原因分析[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 10–13.

Design of Flood Disaster Characteristic Statistics System Based on Large Precipitation Data

WANG Haiying

(Zhengzhou Business University, Gongyi 451200, China)

Abstract: When using the statistical system designed by the current method to make statistics on the characteristics of flood disasters in different regions, it takes a long time to get the statistical results with large errors, and there are problems of low statistical efficiency and low statistical accuracy. Based on the principle of correlation and independence, a statistical system framework of flood disaster characteristics in different regions is constructed, which includes basic function module, data processing module, information extraction module and sample management module. The design net rainfall duration of flood peak flow is calculated by empirical formula method Rainfall duration, designed net rainfall depth and average rainfall of the basin, as well as flood peak flow, constructed SCS runoff generation model, confluence model, base flow model and channel evolution calculation model, used the above models to make statistics on the characteristics of flood disasters in different regions, and realized the design of statistical system of flood disaster characteristics in different regions.

Key words: precipitation data; flood disaster; feature statistics; rainfall duration

(上接第 16 页)

Multi-scale Analysis of Damage Caused by Symbiotic Debris Flow to Building Structure

GAO Xiuqing

(Architectural Department, Lvliang University, Lvliang 033000, China)

Abstract: In order to obtain the damage of debris flow to the building structure and improve the accuracy of the damage detection of the building structure under debris flow, multi-scale analysis is carried out for the damage of the building structure caused by the symbiotic debris flow. Combined with LIDAR point cloud data and aerial camera data, the information of debris flow disaster building structure and is extracted the impact mechanism and geomorphic trace of debris flow is analyzed. Combined with the actual observation and basic information, the impact force of debris flow and the maximum displacement of building structure are calculated, and the influencing factors of the impact of symbiotic debris flow on building structure are obtained. Using the simplified debris flow forces, the damage displacement of a two-story building structure under the impact of symbiotic debris flow is simulated. Four kinds of working conditions are designed, and the multi-scale analysis of structure damage is realized by the impact response of different working conditions under debris flow. The results show that the main influencing factor of the displacement of structural column is the whole force of debris flow. Once encountering large rock blocks, the displacement will increase. The maximum displacement of the building structure is related to the density and rigidity of debris flow, and the simulation value of the maximum displacement of the structure is highly consistent with the theoretical value. The larger rocks in debris flow are the key factors of building structure damage, which can be used to reduce the structural stiffness and reduce the impact force.

Key words: symbiotic debris flow; building structure; damage; multi-scale analysis; LIDAR point cloud data