

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.107

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



泥石流冲击桥梁 2019 年度研究进展

姚昌荣¹, 王友彪², 李亚东¹, 强斌¹, 刘赛智¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081)

摘要:随着中国经济建设的发展,山区公路、铁路桥梁越来越多,其中有很大一部分位于不良地质区。泥石流灾害及其诱发的次生灾害是山区桥梁主要灾害之一,即将开建的川藏铁路桥梁工程也面临泥石流的威胁。当前,对泥石流冲击桥梁结构方面的研究相对较少,为促进对该方向更加深入的研究,综述了近两年关于泥石流冲击桥梁研究的新进展,从研究方法、泥石流冲击力以及桥梁防灾3个方面进行回顾总结。研究发现,在泥石流冲击桥梁研究方面,应跨学科联合研究,对多个泥石流损坏桥梁的案例进行研究,结合试验和数值模拟制定简化的泥石流冲击桥梁结构的荷载分布形式,并进一步研究大块石对桥梁结构的作用,加强对泥石流中块石冲击作用的研究。

关键词:泥石流;冲击力;桥墩;数值模拟;水槽试验

中图分类号:U445.7 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0028-09

State-of-the-art review of debris flow impact forces on bridges in 2019

Yao Changrong¹, Wang Youbiao², Li Yadong¹, Qiang Bin¹, Liu Saizhi¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, P. R. China)

Abstract: With the development of national economic construction, there are more and more mountain highway and railway bridges, and a large part of them are locate in bad geological areas. Debris flow disasters and the secondary disasters induced by them are one of the major disasters of mountain bridges. The upcoming Sichuan-Tibet railway bridges will be also faced the threat of debris flow. At present, there are relatively few studies reviewed three aspects of the influence of debris flow impacting bridges at home and abroad. In order to promote more in-depth research in this direction, this paper briefly reviews the three aspects of debris flow impacting bridges at home and abroad in the past two years, including research methods, debris flow impact force and bridge disaster prevention. Finally, it was proposed that interdisciplinary joint research should be conducted in the study of debris flow impact bridges. Multiple cases of debris flow damage bridges should be studied. The simplified debris flow impact bridge structure load should be combined with tests and numerical simulations. The focus should be on the effect of large stones on the bridge structure and strengthen research on the impact of debris flow.

Keywords: debris flow; impact force; bridge piers; numerical simulation; flume experiment.

收稿日期:2020-04-03

基金项目:四川省重点研发项目(2019YFG0460);国家自然科学基金(51478400)

作者简介:姚昌荣(1974-),男,博士,副教授,主要从事桥梁地质灾害防控、钢结构稳定与疲劳、健康监测及施工控制研究, E-mail: chryao-1016@163.com.

Received:2020-04-03

Foundation items: Sichuan Science and Technology Program (No. 2019YFG0460); National Natural Science Foundation of China (No. 51478400)

Author brief: Yao Changrong (1974-), PhD, associate professor, main research interests: geological disaster prevention and mitigation of bridge engineering, stability and fatigue of steel structure, health monitoring and construction control of bridge structure, E-mail: chryao-1016@163.com.

泥石流是山地和丘陵地区常见的地质灾害之一,具有爆发突然、历时短暂、能量大等特点,严重威胁到人民群众的生命和财产安全。泥石流会对桥梁造成严重的破坏,如利子依达沟泥石流事故,泥石流冲断桥墩,列车冲入大渡河,造成200余人死亡,这是世界上最大的一次泥石流破坏桥梁的事故。2019年,四川“8.20”强降雨特大山洪泥石流被国家应急管理部^[1]列为2019年全国十大自然灾害之一,阿坝州爆发数十处泥石流,导致多条公路受损严重,多座桥梁被泥石流损毁。

随着中国西部经济日益发展,山区植被破坏,自然环境恶化,短时强降雨极端事件频发,大地震诱发大量次生山地灾害,种种原因加剧了泥石流的发生。同时,中国在西部山区规划了大量的铁路、公路线路,大量桥梁不可避免地穿越泥石流多发区域。研究泥石流冲击桥梁,厘清桥梁在泥石流作用下的破坏机理,提出合理的减灾措施,对西部地区的发展建设有重要意义。

“泥石流冲击桥梁”这一研究课题同时涉及桥梁结构和岩土两个专业方向,是新兴的研究领域,并逐步成为热点研究方向。笔者主要对近年泥石流冲击桥梁的研究方法、泥石流冲击桥梁和泥石流减灾3个方面的研究进行回顾。

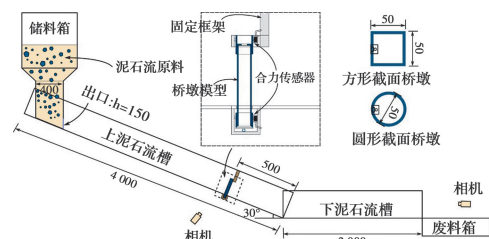
1 研究方法

野外调查、室内试验和数值模拟是研究泥石流冲击桥梁的3种常用方法。野外调查可以获得第一手资料,分为区域调查和沟谷调查。野外调查除常规方法外,近年也发展了一些新的技术手段,如GPS(北斗)、航空遥感、激光扫描、无人机等^[2-4]多技术融合的现场勘察方法。而室内试验和数值模拟方面,近两年也取得了较大进展。

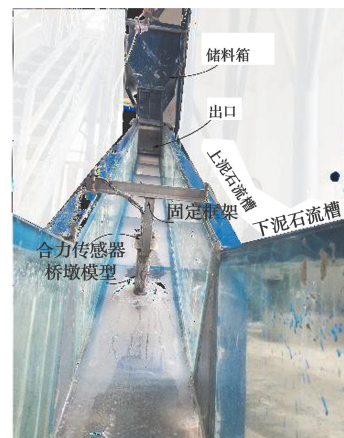
1.1 室内试验

由于泥石流的发生具有偶然性,要在泥石流发生现场测得泥石流冲击力实属不易,为此,1961年,中国科学院在有“泥石流天然博物馆”之称的云南蒋家沟建立了野外观测站,采集了大量的泥石流观测资料,为泥石流研究做出了巨大贡献。相比于野外试验,室内试验更容易开展,而且可以按照不同的配比组合进行有针对性的试验,是目前绝大多数泥石流研究的方式。泥石流冲击试验是通过在泥石流槽内或出口布设压强传感器进行,泥石流沿水槽冲击

到传感器上,从而测得冲击压强,缺点在于不能考虑桥墩的影响。王东坡等^[5]把桥墩模型置于泥石流槽出口,在模型迎流面布置9个压强传感器,测量泥石流冲击压强在桥墩上的分布。该试验水槽总长度18 m,料斗距地面高度12 m、最大容积4.71 m³,桥墩置于水槽之外,试验测得了很多有价值的数。但是,一般的试验水槽规模都较小,长度在5 m左右,容量小于0.5 m³,如果将桥墩(或立柱)放置在水槽外,泥石流出水槽之后比较分散,很难测到有用的数据。鉴于此,王友彪等^[6-7]把桥墩模型安装在泥石流槽的中央、距离槽口约50 cm处,并在桥墩模型上同时安装压强传感器和合力传感器(图1),测得泥石流对方形和圆形截面桥墩模型的冲击压强及冲击力,并采用移动平均法对小波降噪后的冲击力合力去除石子的随机冲击瞬时效应,效果较好。因为一般泥石流冲击试验测得的压强是由压力传感器测得的压力除以传感器的面积得到的,所以,测点的压强只能代表该点的值,而泥石流的冲击力分布本身不均匀,因此,难以准确地计算冲击合力的大小。该试验除了得到压强外,还采用合力传感器测得泥石流冲击的合力,可以更准确地计算桥墩冲击效应。为了能够准确地测试迎流面上的压力分布,刘道川



(a) 泥石流冲击桥墩试验示意图(单位:mm)



(b) 泥石流冲击桥墩试验现场照片

图1 泥石流水槽试验布置^[7]

Fig. 1 Layout plan of debris flow flume experiment^[7]

等^[8]在实验中采用 SPI TACTILUS 内置式压力分布测量传感器测量坝体的冲击压力,每个传感器单元测量面积为 $1.5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$,传感器阵列为 32×32 ,实现了对整个冲击面上冲击压力的测量,得到了冲击压力的时空分布特性。这种分布式传感器用于测试平面模型效果较好,但测量圆柱式或矩形结构的冲击力难以得到好的效果。因此,笔者拟采用膜式传感器测量墩身的压力分布,该传感器测点密度可达到 $20\text{ 点}/\text{cm}^2$ 。

1.2 数值模拟

泥石流是由水、土、砂、石等材料组成的复杂多相流体,其物理运动和动力学特征都非常复杂,结合泥石流冲击试验开展数值模拟是探究泥石流复杂运动现象背后的机理、展示泥石流冲击作用过程的一种有效研究手段。为了准确模拟泥石流的冲击作用过程,选择合适的泥石流运动模型至关重要。目前已有多种泥石流运动模型,如单相的库伦混合模型^[9]、库伦-非牛顿流体模型^[10],两相的库伦-非牛顿流体模型^[11]、颗粒-牛顿流体模型^[12]等等。根据假设不同,这些模型考虑的物理作用不同,描述的物理现象存在差异。Pudasaini 等^[13]提出了三相的粗颗粒-细颗粒-黏性流体模型(图 2):粗颗粒代表泥石流中的大块石,用库伦塑性模型表示;细颗粒代表泥石流中的砂子,用随剪切和压强改变的塑性主导粘塑体表示;黏性流体代表泥石流中的水和粘土混合物,用黏性主导的流变参数表示。

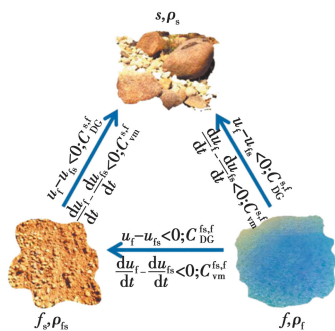


图 2 三相(粗颗粒-细颗粒-黏性流体)泥石流物理模型^[13]

Fig. 2 The drags C_{DG} between the solid (s), fine-solid (fs), and fluid (f) phases^[13]

从工程角度出发,选择可靠、稳定、高效的数值模拟方法对泥石流冲击桥梁更有实际应用价值。Wang 等^[7]基于有限体积法(FVM)采用开源软件 OpenFOAM 对泥石流冲击不同截面形状的桥墩进

行研究。Zhan 等^[14]用光滑粒子流动力学(SPH)方法模拟颗粒流冲击结构体,该方法可模拟颗粒流动、流固耦合以及结构的变形和应力。Luo 等^[15]基于任意拉格朗日欧拉方法(ALE)使用软件 LS-DYNA 对泥石流冲击作用下房屋的破坏进行研究。陈庭宇^[16]基于离散元方法(DEM)模拟分析滑坡体对桥墩的冲击作用,并用试验验证。为了准确模拟泥石流中浆体和固体颗粒的物理性质,研究者常把泥石流和结构分别用不同的方法进行模拟,然后进行耦合计算分析。Liu 等^[17]使用 DEM 和有限元(FEM)耦合的方法研究碎屑流冲击柔性拦挡网,其中碎屑流用 DEM 模拟,拦挡网用 FEM 模拟。柳春^[18]用 SPH 模拟泥石流浆体和大块石,用 FEM 模拟结构研究泥石流冲击拦挡坝。这些数值模拟研究提升了对泥石流-结构相互作用的理解。

2 泥石流冲击桥梁结构研究

2.1 冲击力

虽然泥石流成分复杂,其运动难以准确描述,但从桥梁结构分析来看,可以将泥石流对桥的冲击力看作一种外部荷载(冲击力)。围绕泥石流冲击力的确定,近年来取得了一些进展。泥石流可看作是由水、土、砂混合而成的浆体和粗颗粒组成的物质,相应的冲击力可分为浆体冲击压强和大块石撞击力。

黄远红等^[19]进行了稀性泥石流冲击力水槽试验,结果表明,泥石流冲击压强概率密度函数随机分布函数符合 Log-Logistic 形式,函数变量与粗颗粒最大粒径有关。王东坡等^[5, 20]的水槽试验研究表明,泥石流的冲击压强可表达为弗汝德数 Fr 或雷诺数 Re 的幂函数形式,在竖向分层,且与泥石流的类型(稀性、粘性)相关。刘道川等^[7]的水槽试验表明,泥石流的冲击压强需要考虑爬高因素的影响。王友彪等^[21-22]通过一系列试验,得出泥石流的冲击合力系数受到泥石流流动形态、截面形状的共同影响;并采用 OpenFOAM 模拟泥石流水槽试验过程,较为清晰地展示了泥石流冲击桥墩的过程(图 3),用无量纲化处理冲击合力和冲击压强,发现泥石流浆体产生的冲击力可简化为剪切层、栓塞层和爬高层 3 层(图 4)^[21];在此基础上,进一步采用 OpenFOAM 模拟分析了长 174.5 m 、宽 19.5 m 的“足尺模型试验”(图 5)^[21]。

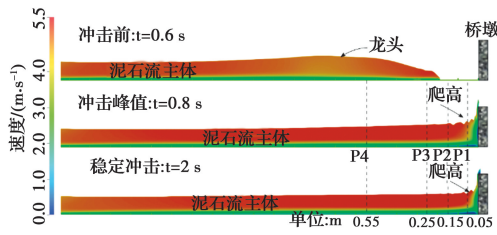
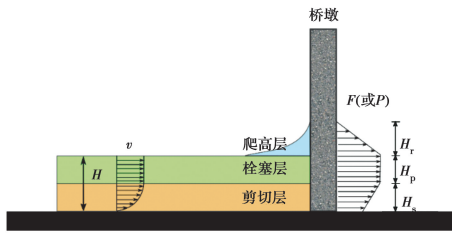


图 3 泥石流冲击桥墩过程示意图^[7,21]

Fig. 3 Side view of the debris-flow impact process^[7,21]



注: v 为上游流速; F 为冲击力; P 为冲击压强

图 4 泥石流冲击力 3 层结构示意^[21]

Fig. 4 Three-layer impact structure diagram of debris flow^[21]

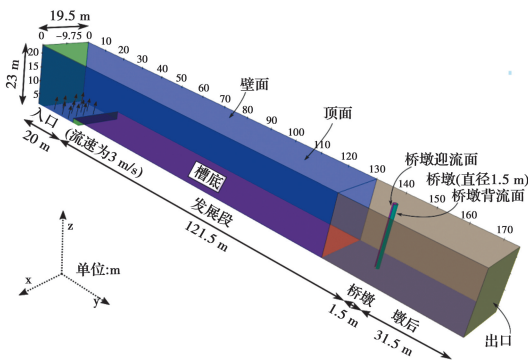


图 5 足尺数值模型示意^[21]

Fig. 5 Schematic diagram of full scale numerical model^[21]

泥石流浆体冲击压强用动压强或静压强形式表达,大块石的撞击力可用 Hertz 理论计算^[23]。使用这两类公式的临界粒径长期以来一直没有明确。Cui 等^[24]进行了水槽试验和 DEM 数值模拟研究,当颗粒粒径流动深度(δ/h)大于 0.9 且 F_r 小于 3.5 时,应考虑使用弹性碰撞理论求解。Song 等^[25]进行了泥石流离心机试验,用大小不同的玻璃球模拟大块石、砂子模拟浆体,冲击拦挡坝模型,认为 $h = \delta/0.6$ 可作为临界粒径判断标准。文献^[26]进一步对柔性拦挡网进行含大块石的泥石流离心机试验,结果表明,柔性拦挡网由于变形大而使大块石的冲击力迅速衰减,防泥石流的柔性拦挡网设计中不需要考虑大块石的作用。柳春^[18]对浆体和块石同时冲击拦挡坝进行了数值模拟,认为浆体与块石的耦合加大了块石单独作用时的撞击力。

2.2 结构响应

泥石流冲击作用下结构的响应分析既可通过泥石流-结构耦合模型^[27-28],又可通过将泥石流冲击力施加到结构模型上进行^[29-30]。文献^[31-34]使用 LS-DYNA 进行数值模拟,研究泥石流中大块石冲击下新型泥石流拦挡坝、桩林、圆钢管等结构的响应,对破坏机理进行探讨。Luo 等^[15]和 Li 等^[34]均对框架房屋结构在泥石流冲击下的响应和破坏机理进行研究。张迅等^[35]提出了一种泥石流简化荷载模型,并将其施加到一座多孔简支梁无砟轨道铁路桥数值模型上,研究泥石流冲击作用下桥梁结构和轨道的动力响应;张迅等^[36]进一步建立了列车-轨道-桥梁系统数值模型,对泥石流冲击作用下的列车行车安全性进行研究^[37]。研究泥石流冲击桥梁中的桥梁对象多为简支梁桥或刚构桥这种有桥墩支撑的桥梁,主要研究泥石流冲击桥墩的作用。而文献^[38]则以石拱桥为研究对象,系统地分析了作用在石拱桥上的泥石流横向冲击力,并进行室内拱桥缩尺模型试验(图 6),测试泥石流冲击作用下石拱桥结构的响应。分析泥石流冲击作用下桥梁结构的响应,首先要选择合适的冲击荷载分布模式(包括冲击力大小及其分布,以及随时间的变化规律),其次要分析冲击荷载作用下桥梁结构的整体响应,将来可以考虑分析更为复杂的桥梁结构形式在泥石流冲击作用下的综合响应。

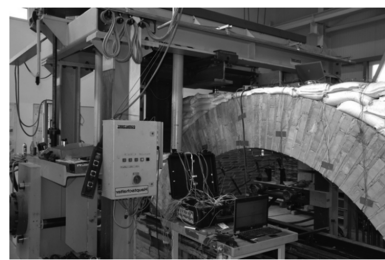


图 6 泥石流冲击石拱桥模型试验^[38]

Fig. 6 Model test of debris flow impact masonry arch bridge^[38]

3 泥石流减灾

3.1 易损性分析

易损性这一概念广泛地应用于各类自然灾害研究,如地震^[39]、洪水^[40]、海啸^[41]、飓风^[42]、滑坡^[43]、泥石流^[44]等。易损性结果可为自然灾害风险评估提供依据,为政策制定者的规划提供支持,是减灾的重要手段。

过去,针对泥石流易损性的研究多基于历史数据或专家判断,研究的结构对象也多为房屋建筑^[45]。近年来,对桥梁结构应用理论分析的易损性研究逐渐展开。陈希虎^[46]采用灰色系统评价模型对都汶公路上 9 座桥梁的泥石流灾害易损性进行研究,结合桥梁所处的环境、泥石流灾害影响以及人类活动评价各座桥梁的易损性,并提出相应的防治对策。在评价指标体系上主要考虑泥石流本身,桥梁结构方面也仅是针对桥梁结构类型、长度、孔度、桥下净空、墩台结构等形式的参数,并没有涉及桥梁受泥石流冲击的响应。Dagá 等^[47]基于 15 座桥梁过去 50 年内所受到的火山泥石流冲击数据,使用流动深度作为泥石流强度指标,研究火山泥石流冲击作用下桥梁结构的易损性,指出桥梁的破坏模式更可能为由桥墩或桥台倾覆引起的梁体掉落,而不是梁体被直接推移。Liang 等^[48]进行了 150 个工况的有限元模拟,将损伤指标定义为桥墩上部相对位移,计算分析了双柱带盖梁桥墩在泥石流冲击作用下的易损性曲线,易损性为对数正态分布形式。Yan 等^[49]同时考虑了泥石流和结构的不确定性,破坏指标基于弯矩-墩顶位移曲线,得到了粘性和稀性泥石流冲击作用下的单柱墩易损性曲线。文献^[48-49]用实例说明损伤指标的选择,具体选择什么样的指标来评估泥石流冲击桥梁结构的易损性,则还需要根据不同的桥型和泥石流冲击的特性来确定。

3.2 结构防护

为减轻泥石流带来的桥梁灾害,可在桥梁周围或桥墩上设置排挡结构进行防护。在泥石流沟底设置横向护道(排导沟)可以约束泥石流的移动路径,以降低泥石流造成的破坏。Qiu 等^[50]研究了横向护道的外形对防护效果的影响,认为减小护道宽度能增加泥石流流速,从而避免桥下淤积和淤积导致的泥石流漫过桥面现象。在泥石流沟内设置桩林能将泥石流中的大块石拦截在上游,避免对下游桥梁结构的撞击。张万泽等^[32]研究了典型品字形桩林结构在大块石撞击下的破坏机理,为类似防护结构的合理设计提出建议。

更多防护相关的研究集中在桥墩防撞技术上。王东坡等^[51]研究了 5 种不同结构形式夹芯板的力学性能,其中,Ⅲ型结构形式可以吸收更多能量而被应用于实际桥墩防护工程。Lu 等^[52]将泡沫铝应用

在框架结构房屋中,结果表明,泡沫铝加固后的框架结构存在双重保护机制:泥石流冲击力小时,完全吸收冲击能量;冲击力足够大时,泡沫铝被反复的冲击力强化,限制住包裹在其中的混凝土,从而提高框架结构的承载能力。蒲黔辉等^[53]提出一种正六边形多胞结构,并在每个正六边形蜂窝结构中加入圆形钢管,采用 ANSYS LS-DYNA 软件进行仿真分析计算,最终确定出合理的耗能材料配合比,使其在满足耗能要求情况下减小撞击力。Su 等^[54]利用废的碎玻璃抵抗大块石的冲击耗能效果,并进一步研究了颗粒粒径和堆积厚度对石笼耗能能力的影响^[55]。

桥梁防泥石流冲击措施,可以采取主动防护,也可以采取被动防护。主动防护就是疏导,避免泥石流冲击桥梁结构,如排导^[50]和桩林结构^[32];而被动防护是在桥墩上添加防撞设施,减小冲击力对桥梁结构的作用,如文献^[52-55]。这两种方式是目前主要的防护手段。

4 结论

近年来,对泥石流冲击桥梁的研究不断深入,取得了丰硕成果。研究方法方面,室内模型试验及野外试验相结合;新型传感器和各种数值模拟方法为未来研究提供了更好的手段。泥石流冲击方面,提出了新的荷载模型可供结构分析使用;桥梁结构的响应分析全面展开。结构防灾方面,易损性研究从历史经验判断进入到数值模拟;新的防护措施不断涌现。

后续研究可以从几个方面开展工作:

1)开展广泛的跨学科合作,土木学科应与地球学科加强联系,从野外调查、泥石流物理模型、桥梁结构分析等方面开展交流。

2)调查分析泥石流区桥梁冲毁事故,结合数值模拟探究泥石流冲击作用下桥梁结构的破坏机理,做到数值分析结果与野外调查事故案例一一对应。

3)通过泥石流冲击桥墩试验,采集足够多的冲击力数据,分析不同特性泥石流冲击桥墩的力的特性,在此基础上制定适合桥梁结构的泥石流荷载标准,为泥石流区桥梁结构设计计算提供依据。

4)泥石流中大块石对桥梁结构的冲击力有时甚至大于浆体的冲击力,是导致桥梁结构损坏的主要因素,后续可对泥石流中大块石的运动规律及其与

桥梁结构的耦合作用进行研究。

5)在泥石流灾害作用下,对桥梁结构的易损性方面继续深入研究,达到快速评估桥梁安全性的目的。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部公布2019年全国十大自然灾害[EB/OL]. (2020-01-12)[2020-03-16]. https://www.mem.gov.cn/xw/bndt/202001/t20200112_343410.shtml
- [2] 王诜, 孙永彬, 高丽辉, 等. 基于多种方法调查的泥石流特征及动力学研究: 以延庆车道沟为例[J]. 矿产与地质, 2019, 33(4): 743-752.
WANG S, SUN Y B, GAO L H, et al. Debris flow characteristics and dynamic study based on various survey methods: Taking Chedaogou of Yanqing as an example [J]. Mineral Resources and Geology, 2019, 33(4): 743-752. (in Chinese)
- [3] 罗真富, 齐信, 易静. 遥感三维可视化在南沟泥石流调查中的运用[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(1): 144-146.
LUO Z F, QI X, YI J. Application of three-dimensional visualization of remote sensing images in the investigation of the Nangou debris flow [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(1): 144-146. (in Chinese)
- [4] 白志勇. 陆地卫星 SPOT、TM 数据复合影像在泥石流调查中的应用[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 116-118, 121.
BAI Z Y. Application of synthetic satellite image of SPOT and TM data in debris flow investigation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(1): 116-118, 121. (in Chinese)
- [5] 王东坡, 陈政, 何思明, 等. 泥石流冲击桥墩动力相互作用物理模型试验[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3363-3372.
WANG D P, CHEN Z, HE S M, et al. Physical model experiments of dynamic interaction between debris flow and bridge pier model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3363-3372. (in Chinese)
- [6] 王友彪, 姚昌荣, 刘赛智, 等. 泥石流对桥墩冲击力的试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 616-623.
WANG Y B, YAO C R, LIU S Z, et al. Experimental study of debris flow impact forces on bridge piers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 616-623. (in Chinese)
- [7] WANG Y B, LIU X F, YAO C R, et al. Debris-flow impact on piers with different cross-sectional shapes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(1): 04019045.
- [8] 刘道川, 游勇, 杜杰, 等. 泥石流冲击力的时空分布特征[J]. 工程科学与技术, 2019(3): 17-25.
LIU D C, YOU Y, DU J, et al. Spatio-temporal distribution of the impact force of debris flow [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2019(3): 17-25. (in Chinese)
- [9] 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
- [10] VON BOETTICHER A, TUROWSKI J M, MCARDELL B W, et al. DebrisInterMixing-2.3: A finite volume solver for three-dimensional debris-flow simulations with two calibration parameters - Part 1: Model description [J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(9): 2909-2923.
- [11] PUDASAINI S P. A general two-phase debris flow model [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, 117(F3): F03010.
- [12] ZHAO T. Investigation of landslide-induced debris flows by the DEM and CFD [D]. Oxford, United Kingdom: University of Oxford, 2014.
- [13] PUDASAINI S P, MERGILI M. A multi-phase mass flow model [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2019, 124(12): 2920-2942
- [14] ZHAN L, PENG C, ZHANG B Y, et al. Three-dimensional modeling of granular flow impact on rigid and deformable structures [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 112: 257-271.
- [15] LUO H Y, ZHANG L L, ZHANG L M. Progressive failure of buildings under landslide impact [J]. Landslides, 2019, 16(7): 1327-1340.
- [16] 陈庭宇. 滑坡冲击桥墩的离散元模拟及桥墩动力响应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
CHEN T Y. DEM simulation of landslide impacting on bridge pier and dynamic response analysis of pier [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)

- Chinese)
- [17] LIU C, YU Z X, ZHAO S C. Quantifying the impact of a debris avalanche against a flexible barrier by coupled DEM-FEM analyses [J]. *Landslides*, 2020, 17(1): 33-47.
- [18] 柳春, 余志祥, 骆丽茹, 等. 含大块石泥石流冲击作用下混凝土拦挡坝的动力学行为研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(14): 161-168, 238.
LIU C, YU Z X, LUO L R, et al. Dynamic behavior of a concrete dam impacted by debris flows with rock [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(14): 161-168, 238. (in Chinese)
- [19] 黄远红, 胡凯衡, 唐金波, 等. 稀性泥石流冲击力随机分布特征实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(Sup2): 3918-3925.
HUANG Y H, HU K H, TANG J B, et al. Experimental study of random distribution characteristics of diluted debris-flow impact forces [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Sup2): 3918-3925. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] 王友彪. 泥石流对桥墩冲击力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
WANG Y B. Debris flow impact forces on bridge piers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [22] WANG Y B, LIU X F, YAO C R, et al. Finite release of debris flows around round and square piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(12): 06018015.
- [23] 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)
- [24] CUI Y F, CHOI C E, LIU L H D, et al. Effects of particle size of mono-disperse granular flows impacting a rigid barrier [J]. *Natural Hazards*, 2018, 91(3): 1179-1201.
- [25] SONG D, CHOI C E, ZHOU G G D, et al. Impulse load characteristics of bouldery debris flow impact [J]. *Geotechnique Letters*, 2018, 8(2): 111-117.
- [26] SONG D, CHOI C E, NG C W W, et al. Load-attenuation mechanisms of flexible barrier subjected to bouldery debris flow impact [J]. *Landslides*, 2019, 16(12): 2321-2334.
- [27] 勾婷颖. 泥石流冲击连续刚构桥的动力响应分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
GOU T Y. Dynamic response analysis of continuous rigid frame bridge under impact load of debris flow [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [28] 陈子俊. 泥石流冲击作用下桥墩的动力响应分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
CHEN Z J. Dynamic response analysis of pier under impact of debris flow [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [29] 姚昌荣, 王友彪, 刘赛智. 重力式桥墩在泥石流冲击作用下的响应分析[J]. *桥梁建设*, 2017, 47(4): 18-23.
YAO C R, WANG Y B, LIU S Z. Analysis of responses of gravity bridge pier under impact of debris flow [J]. *Bridge Construction*, 2017, 47(4): 18-23. (in Chinese)
- [30] LIU W, YAN S X, HE S M. Landslide damage incurred to buildings: A case study of Shenzhen landslide [J]. *Engineering Geology*, 2018, 247: 69-83.
- [31] 王秀丽, 杜媛媛, 冉永红, 等. 泥石流冲击荷载下圆钢管的破坏机理分析[J]. *兰州理工大学学报*, 2019, 45(3): 132-138.
WANG X L, DU Y Y, RAN Y H, et al. Analysis of failure mechanism of circular steel pipe under impact load of debris flow [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2019, 45(3): 132-138. (in Chinese)
- [32] 张万泽, 黄海峰, 孔伟, 等. 泥石流大块石冲击作用下桩林结构的破坏形式及其优化分析[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(4): 15-22.
ZHANG W Z, HUANG H F, KONG W, et al. Failure mode and optimization analysis of pile structure under the impact action of boulders in debris flow [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(4): 15-22. (in Chinese)

- [33] 李俊杰, 王秀丽, 冉永红. 泥石流块石冲击下新型拦挡坝动力响应试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(5): 889-896.
- LI J J, WANG X L, RAN Y. Experimental study dynamic response of a new dam to the impact of block stones in debris flow [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(5): 889-896. (in Chinese)
- [34] 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.
- [35] 张迅, 温志鹏, 刘蕊, 等. 泥石流冲击作用下无砟轨道桥梁的动力响应[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(1): 70-77.
- ZHANG X, WEN Z P, LIU R, et al. Dynamic responses of a ballastless track bridge under debris flow impacts [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(1): 70-77. (in Chinese)
- [36] ZHANG X, WEN Z P, CHEN W S, et al. Dynamic analysis of coupled train-track-bridge system subjected to debris flow impact [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(4): 919-934.
- [37] 温志鹏. 泥石流冲击作用下车-线-桥系统的动力响应及高速列车运行安全研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- WEN Z P. Dynamic responses of coupled train-track-bridge system subjected to debris flow impacts and running safety analysis of high-speed train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [38] PROSKE D, KRAWTSCHUK A, ZEMAN O, et al. Debris flow impacts on masonry arch bridges [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 2018, 171(1): 25-36.
- [39] 李宏男, 成虎, 王东升. 桥梁结构地震易损性研究进展述评[J]. 工程力学, 2018, 35(9): 1-16.
- LI H N, CHENG H, WANG D S. A review of advances in seismic fragility research on bridge structures [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(9): 1-16. (in Chinese)
- [40] 彭子祥. 洪水环境下群桩基础桥梁易损性分析与评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- PENG Z X. Fragility analysis and assessment for bridge supported on pile-group foundations under flood condition [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [41] TARBOTTON C, DALL'OSSO F, DOMINEY-HOWES D, et al. The use of empirical vulnerability functions to assess the response of buildings to tsunami impact: Comparative review and summary of best practice [J]. Earth-Science Reviews, 2015, 142: 120-134.
- [42] SEO D W, CARACOGLIA L. Estimating life-cycle monetary losses due to wind hazards: Fragility analysis of long-span bridges [J]. Engineering Structures, 2013, 56: 1593-1606.
- [43] ALEXANDER D. Vulnerability to landslides [M]// Landslide Hazard and Risk. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2012: 175-198.
- [44] 曾超, 贺拿, 宋国虎. 泥石流作用下建筑物易损性评价方法分析与评价[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11): 1211-1220.
- ZENG C, HE N, SONG G H. Analysis and assessment of methods to assess vulnerability of building in debris flow hazard [J]. Advance in Earth Sciences, 2012, 27(11): 1211-1220. (in Chinese)
- [45] PAPATHOMA-KÖHLE M, GEMS B, STURM M, et al. Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 171: 272-288.
- [46] 陈希虎. 都汶公路泥石流灾害桥梁易损性评价: 以映秀至彻底关段为例[D]. 湖南湘潭: 湘潭大学, 2019.
- CHEN X H. Bridge vulnerability assessment of debris flow disaster on Duwen Highway [D]. Xiangtan, Hunan: Xiangtan University, 2019. (in Chinese)
- [47] DAGA J, CHAMORRO A, DE SOLMINIHAC H, et al. Development of fragility curves for road bridges exposed to volcanic lahars [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, 18(8): 2111-2125.
- [48] LIANG Y Z, XIONG F. Quantification of debris flow vulnerability of typical bridge substructure based on impact force simulation [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 1839-1862.
- [49] YAN S X, HE S M, DENG Y, et al. A reliability-based approach for the impact vulnerability assessment

- of bridge piers subjected to debris flows [J]. *Engineering Geology*, 2020, 269: 105567.
- [50] QIU F, HUANG J L, LI Y G, et al. Protecting highway bridges against debris flows using lateral berms: a case study of the 2008 and 2011 Cheyang debris flow events, China [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2018, 9(1): 196-210.
- [51] 王东坡, 李伟, 何思明, 等. 泡沫铝夹芯板加固山区跨泥石流桥墩抗冲结构优化研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(10): 108-114.
- WANG D P, LI W, HE S M, et al. Structural optimization of aluminum foam sandwich panel for bridge pier reinforcement across debris flow in mountain areas [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(10): 108-114. (in Chinese)
- [52] LU Z, RONG K J, ZHOU Z G, et al. Experimental study on performance of frame structure strengthened with foamed aluminum under debris flow impact [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(2): 04020011.
- [53] 蒲黔辉, 黄俨, 高玉峰, 等. 桥墩防护装置研究[J]. *西南公路*, 2017(2): 101-105.
- PU Q H, HUANG Y, GAO Y F, et al. Research on bridge pier protection device[J]. *Southwest Highway*, 2017(2): 101-105. (in Chinese)
- [54] SU Y C, CHOI C, NG C W W, et al. Eco-friendly recycled crushed glass for cushioning boulder impacts [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(9): 1251-1260.
- [55] SU Y C, CUI Y, NG C W W, et al. Effects of particle size and cushioning thickness on the performance of rock-filled gabions used in protection against boulder impact [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(2): 198-207.

(编辑 章润红)