

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.005

颗粒流冲击力研究现状及讨论*

刘洋^{1,2,3}, 游勇^{1,2}, 王海帆⁴, 柳金峰^{1,2}, 李新坡^{1,2}, 赵曙熙^{1,2,3},
谢艳芳^{1,2,3}, 刘林⁵

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 云南林业职业技术学院, 云南 昆明 670224; 5. 酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 732750)

摘要: 颗粒流包括滑坡、泥石流、碎屑流、雪崩等, 通常对桥梁、公路、居民区具有较大危害。分析了颗粒流的运动过程及其侵蚀、堆积和爬高等特性; 此外, 对颗粒流冲击力计算模型及其野外观测结果进行阐述。结果表明: 现有冲击力计算模型认为冲击力在结构全断面呈均匀分布, 忽略了颗粒流的运动特性对冲击力的影响; 大块石冲击力计算忽略了颗粒破碎和浆体垫层效应对冲击力的影响, 造成巨大的计算误差; 由于传统传感器的缺陷, 现有野外观测结果也存在较大误差。对此本文提出野外观测需要通过引入或开发新式压力传感器以得到更准确的颗粒流冲击力大小及其分布形式, 从而更精确的修正理论模型; 理论计算模型研究工作需要考虑颗粒流浆体的垫层效应、流体与基底的相互作用及块石冲击破碎等对流体冲击力的影响, 从而推导出更准确的冲击力计算模型, 指导工程实际。

关键词: 颗粒流; 冲击力; 计算模型; 运动特性

中图分类号: P694 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0714-10

Research Status and Discussion on Granular Flow Impact Force

LIU Yang^{1,2,3}, YOU Yong^{1,2}, WANG Haifan⁴, LIU Jingfeng^{1,2}, LI Xinpo^{1,2}, ZHAO Shuxi^{1,2,3},
XIE Yanfang^{1,2,3}, LIU Lin⁵

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, CAS, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Yunnan Forestry Technological College, Kunming 670224, China; 5. Jiuquan Satellite Launch Centre, Jiuquan 732750, China)

Abstract: Granular flow movement such as landslide, debris flow and avalanche usually has tremendous harm. This review paper concludes the kinetic characteristics of the granular flow, including accumulation, run up and erosion. This review provides an overview of the impact computational models and the results of the field observations of granular flow. Consequently, we find some problems of the impact computational models and the results of the field observations of granular flow. First, the conclusion that impact is uniform distribution along the whole section is incomplete, and the existing computational models exclude kinetic characteristics of the granular flow. Besides, when calculating the

* 收稿日期: 2018-09-28; 修回日期: 2019-01-08

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(41661144028)、四川省国土资源厅“8.8”九寨沟地震灾区生态化地质灾害防治重大科技支撑研究课题(KJ-2018-24)、中科院成都山地所十三五项目(SDS-135-1701)资助

作者简介: 刘洋(1992-), 男, 博士研究生。主要从事碎屑流减灾理论与防治技术研究。Email: liuyang@imde.ac.cn

通讯作者: 游勇(1964-), 男, 研究员, 博导。主要从事泥石流运动机理及综合防治技术研究。Email: yyong@imde.ac.cn

impact of the boulder, the existing models exclude the cushioning effect of slurry as well as the grain crush of the boulder, which results in great errors. Due to the defects of traditional sensors, there exists great deviations in the field observation data. As for the above problems, our review provides some useful suggestions. For instance, a new pressure sensor need to be introduced or created in the field investigations, which can obtain the good value and distribution of impact in the whole section, then the theoretical models can be corrected more accurately. Meanwhile, correction factors on the cushioning effect of slurry as well as the crush of the boulders should be taken into consideration when crating new impact computational models. Thus, the corrected new computational models will provide a guidance for engineering design.

Keywords: granular flow, impact force, computational model, motion characteristics

引言

山区常见颗粒流运动包括崩塌、滑坡、泥石流、碎屑流、雪崩等,其主要危害形式包括淤埋、冲刷、撞击、堵塞^[1-2],其中撞击作用是最剧烈的破坏方式之一,通常对流通路径上的房屋、道路、桥梁等结构造成毁灭性的破坏。例如,1981年,成昆铁路利子依达沟发生特大泥石流,直径为4.0~5.6 m变直径桥墩在块石撞击下沿着主河道往下游移动2.1 m,被拦腰截断成3段,造成正在行驶的列车坠入泥石流沟,死伤数百人^[3]。由此可以看出颗粒流冲击力的准确计算直接关系工程及人民生命财产安全。

颗粒流运动是重力驱动的多相介质沿着坡面或沟道向下流动的一种过程^[4]。R. Delannay等^[4]根据颗粒流固相分数 φ 将颗粒流主要分为三类:极稀性颗粒流($0 < \varphi < 0.1$)、稀性颗粒流($0.1 < \varphi < 0.5$)和密集颗粒流($0.5 < \varphi < 0.59$)。极稀性颗粒流包括浊流、火山碎屑流等;稀性、密集颗粒流包括岩崩、雪崩、滑坡、泥石流和致密火山碎屑流等。

颗粒流是一种宽级配多相流,其粒径可达微米、厘米至米级。野外调查发现颗粒流堆积体横、纵向呈现出一定堆积规律。C. Gladstone等^[5]发现浊流、雪崩和火山碎屑流等稀性、极稀性颗粒流通常颗粒物浓度向下逐渐增加。王裕宜等^[6]认为泥石流堆积体纵向颗粒呈现3种主要堆积特征:稀性泥石流“上细下粗”的正序分布;高黏性泥石流混杂序分布;低黏性泥石流逆序分布。舒安平等^[7]发现泥石流容重较小时,堆积体颗粒纵向呈“上细下粗”的正序分布。胡凯衡等^[8-9]对蒋家沟泥石流的观测数据分析,发现块石主要集中在浆体上部。所以,极

稀性或稀性颗粒流堆积体纵向颗粒呈现正序分布,而密集型呈现出逆序或乱序分布的特性。

如图1所示,颗粒流体(泥石流、碎屑流)与结构发生作用时,流体将沿结构向上爬升。20世纪60年代开始,国外学者就对雪崩冲起爬高现象进行了报道和研究。1955年,A. Voellmy^[10]通过连续介质力学方法对雪崩冲起高度进行理论推导。1978年,T. Takahashi^[11]将 Voellmy 计算模型应用于泥石流滑动距离和冲起高度计算,得到 Takahasi 模型。1986年,O. Hungr^[12]在 Takahashi 模型基础上考虑基底侵蚀,推导得到雪崩冲起高度计算模型。F. Ceccato^[13]通过数值模拟物质点法研究碎屑流在坝上的爬高效应,得到颗粒流内摩擦角、基底摩擦将影响颗粒流爬高作用。M. Davide等^[14]结合室内实验结果,应用 Savage-Hutter 模型提出深度积分理论的颗粒流爬高动力学计算模型。颗粒流的冲起爬高特性会造成冲击力作用中心上移,形成更大的固端弯矩,从而影响工程的稳定性。



图1 室内实验中观察到的泥石流及颗粒流的冲起爬高现象

Fig.1 Runup phenomenon of debris flow and granular flow observed in lab tests

基底侵蚀是运动物体与浅层地表在沿滑动接触面产生的相互作用^[17]。颗粒流对基底具有“刮铲”效应^[18]。颗粒流与基底作用的方式取决于颗粒

流及基底物质的力学特性。A. Dufresne^[19]、李祥龙等^[20]、华曙光^[17]、G. Crosta等^[21]分别研究了基底阻力、基底物质的强度、饱和度及基底侵蚀速率对“刮铲”效应和流动性的影响,得到随着基底物质饱和度增大、强度降低、方量增大以及颗粒流物质强度增高,“刮铲”效应越强烈,流动性越高。为了准确刻画颗粒流的侵蚀过程,J. P. Bouchaud等^[22]和R. M. Iverson等^[23]提出了BCRE模型和Iverson侵蚀模型,BCRE模型主要适合于颗粒流的堆积侵蚀计算,而Iverson模型考虑了颗粒流与基底的相互作用,能准确刻画整个沟床的演化过程。许多学者对颗粒流与基底间相互作用力的计算方法提出了各种模型,例如,库伦摩擦模型、Bingham模型、Voellmy模型以及曼宁模型。华曙光^[17]认为在细颗粒较少粗颗粒较多的泥石流流体中,底部阻力主要表现为摩擦阻力,而在岩崩碎屑流等大块石为主的颗粒流中,考虑颗粒湍流和摩擦行为的Voellmy模型更适合。

上述分析看出颗粒流具有沿程堆积、侵蚀和爬高等运动特性,这些特性对颗粒流的冲击过程及冲击力大小、分布及冲击力偶的大小具有较大影响。然而现阶段上述特性对颗粒流冲击力的定量研究尚不深入,仍需进一步的加深,本文主要致力于现有颗粒流冲击力计算模型的总结、分析,并针对存在问题进行探讨。

1 颗粒流冲击力野外观测

颗粒流冲击力研究从20世纪60年代开始,H. W. Shen等^[24]、M. Mellor^[25]、K. Wiegardt^[26]根据室内实验结果总结出颗粒流冲击力计算模型。70年代后,随着监测技术的发展,一系列基于野外测量、观测结果的半经验计算模型涌现,现今颗粒流冲击力研究主要包括野外直接观测和理论计算等方法。

虽然室内模型实验能更好地反映颗粒流的运动特性及冲击力组成特点,但室内模型实验存在相似性难满足、块石冲击效应难以体现等缺陷。为了得到真实、有效的颗粒流冲击力野外观测数据,国内外学者做出了不懈努力。颗粒流冲击力野外观测包括直接测量冲击力和调查颗粒流运通路径结构的动力特征来反演颗粒流冲击力两种方法。目前冲击力的研究主要局限于颗粒流冲击现象及冲

击力大小的描述,而对颗粒流冲击力分布规律的研究甚少。

H. Suwa等^[27]根据安装在坝体上的应变仪和压痕计反算得到烧岳山沟道泥石流的最大冲击压力为32.26 MPa,结合流速等数据得到泥石流龙头速度、冲击力沿沟道的变化情况;L. Bugnion等^[28]通过大型坡面泥石流实验,得到泥石流最大冲击力为132.5 kPa,发现了泥石流最大冲击力是静压力的2~50倍。章书成等^[29]通过电感式冲击力传感器得到云南蒋家沟1975年的69组冲击信号,发现其中有11次泥石流的冲击力都超过920 kPa。在此基础上,吴积善等^[30]对蒋家沟泥石流冲击力数据进行分析,认为泥石流冲击荷载主要表现为三种脉冲形式,这三种形式反映了泥石流冲击力受到泥石流本身性质如流速、流量、颗粒组成的影响。J. Hübl等^[31-32]、C. Wendeler等^[33]根据阿尔卑斯地区泥石流防护工程监测数据提出了泥石流冲击力计算的混合模型,并分析得到泥石流冲击力计算动力学模型修正系数与流态相关。E. Thibert等^[34]根据法国Lautaret试验场传感器的变形量反算得到龙头速度为17 m/s的雪崩冲击力为35 kPa。B. Sovilla等^[35-37]根据VdlS观测站的数据,得到了雪崩冲击力计算的静力学模型,同时得出雪崩冲击力修正系数与雪崩流态相关。虽然野外观测结果具有一定局限性,但野外观测有利于理解颗粒流的动力过程及运动机理,揭示颗粒流运动特性与颗粒流自身性质的关系。

国内外学者对颗粒流冲击力在结构上的分布规律也进行了研究。胡凯衡等^[8]根据沿泥石流流深分层布置的传感器测量结果,发现阵性泥石流块石主要集中在“浆体”表面和龙头,泥石流冲击力与固相粒径密切相关;F. Vagnon等^[38]通过采用SPI实时压力测量系统,第一次得到了泥石流在刚性挡墙的冲击力分布情况。然而传统的传感器只能准确测量传感器截面范围内的冲击力,不能准确得到结构整个截面的冲击力大小及分布情况,从而不能准确分析颗粒流与结构的相互作用机理及其结构的响应机制等问题,相关的研究工作也需要进一步加深。

总体而言,国内外已有丰富的颗粒流野外冲击力观测数据,但这些监测数据是特定地域、特定时期的观测数据,没有普适性。此外,由于传统的面板传感器平均掉了冲击力峰值信号,得到的冲击力

数值并不能代表真实冲击力大小,而单点传感器虽能代表传感器所在点的真实冲击力,但传感器布置位置并不一定是最大冲击力所在位置,因此需要引入新型分布式传感器才能得到颗粒流的真实冲击力大小及分布。另一方面,现有野外监测工作未得到颗粒流实时动态的冲击力数据,未得到颗粒流沿着结构全截面冲击力的分布规律,妨碍了颗粒流冲击力的时空分布规律的研究工作,不利于指导工程实践。

2 颗粒流冲击力理论模型研究

本文以泥石流、碎屑流和雪崩为代表对现有冲击力计算模型进行阐述和分析。碎屑流、雪崩细颗粒运动特性与泥石流“浆体”相类似,尤其是高速远程特性的碎屑流细颗粒^[26,39]。颗粒流冲击力计算模型总体可概括“浆体”冲击力和大石块冲击力两部分^[32,40],下文分别论述两方面的研究成果。

2.1 “浆体”计算模型研究

“浆体”冲击力计算模型主要包括静力学模型、动力学模型、混合模型和二相流模型。

(1) 静力学模型

颗粒流静力学模型最早由 C. Lichtenhalhn^[41]提出, A. Armannini^[42]和 P. Scotton^[43]将其推广,其计算表达式为:

$$P = k\rho_{\text{mu}}gh_{\text{mu}} \quad (1)$$

式中, P 、 ρ_{mu} 、 h_{mu} 分别为颗粒流冲击力,密度和流深; k 为经验系数。C. Lichtenhalhn^[41]认为 k 的取值范围为 2.8~4.4; A. Armannini^[42]对室内实验结果分析后认为 k 等于 5; P. Scotton 等^[43]认为 k 的范围为 2.5~7.5。B. Sovilla 等^[35-37]根据法国 VdS 雪崩观测站冲击力数据得到湿雪崩的弗洛德数 (Fr) 小于 1 时, k 在 5~10 之间。

颗粒流静力学计算模型相对单一,但因该公式只有一个未知参数 h_{mu} 而被广泛使用。该模型中经验系数取值在 2.5~7.5 内变动,目前没有给出确切的计算方法, k 取值不同会造成冲击力波动较大。

(2) 动力学模型

颗粒流冲击力动力学计算模型来源于流体力学中流体动能表达式 ρv^2 , 其表达式为:

$$P = \alpha\rho_{\text{mu}}v_{\text{mu}}^2 \quad (2)$$

式中, v_{mu} 为颗粒流运动速度; α 为颗粒流动力修正系

数,其取值主要取决于颗粒流流态^[44]、结构类型^[44-45]、结构形状^[46]、流体的颗粒组成^[47]等因素。M. Watanabe 等^[48]、T. Egli^[49]认为泥石流处于层流状态时,泥石流固相少、粒径小和固相多、粒径大时, α 取值分别为 2.0 和 4.0; P. Cui 等^[44]、E. Thibert 等^[50]、Y. J. Jiang 等^[51-52]认为修正系数 α 是弗洛德数 (Fr) 的函数;其次, S. Zhang^[53]、A. Armanini 等^[54]、L. Bugnion 等^[28]、L. Canelli 等^[46]、O. Hungr 等^[55]、唐金波等^[56]的室内实验结果分析得到 α 的范围为 0.5~5。而现有的工程设计时,加拿大、日本、中国台湾等地对泥石流浆体冲击力计算取 α 为 1.0。《泥石流灾害防治工程勘察规范》^[57]认为工程截面为圆形、矩形和正方形时, α 取值分别为 1.0、1.33、1.47。

此外,许多基于式(2)变形推导得到的颗粒流半经验动力学计算模型还有很多,例如: T. Faug^[58]提出的雪崩对圆柱体冲击力计算模型; J. Hübl 等^[31,59]根据大型实验得到的泥石流冲击力计算模型; A. Armanini 等^[60]和 B. Zanuttigh 等^[61]考虑碎屑流对垂直墙体的冲击反弹作用得到的冲击力计算模型等。

目前,颗粒流动力学模型在实际工程中被广泛采用,国内外很多设计规范都是基于动力学模型,如加拿大、日本、中国台湾、中国香港等。但同样也存在动力修正系数变化范围大的困扰,修正系数的偏差会对冲击力计算结果造成巨大误差,因此开展更深入的修正系数计算方法研究是迫切需要的。

除了动、静力学模型外,很多学者认为颗粒流处于过渡流态时,冲击力由重力分力和惯性力两部分组成^[4]。M. Louge 等^[62]、L. Cascini 等^[63]、R. Brighenti 等^[64]、I. Kherkheulidze 等^[65]、M. Arattano 等^[66]都给出了过渡流态时颗粒流冲击力确定的混合计算模型,但混合计算模型同样也面临着修正系数选取困难的问题。

(3) 两相流模型

一维冲击力计算模型具有很多缺陷,如冲击力修正系数是取值范围,没有精确的计算公式。因此,国内外学者提出了不依靠修正系数的两相流模型。

在两相流模型提出之前, T. Takahashi^[67]、P. Coussot 等^[68]、C. L. Chen 等^[69]引入流变学将泥石流等流、固颗粒流看成一相体,颗粒间通过非牛顿流体的剪切应力来传递,然后根据质量和动量守恒推

导得到了颗粒流的速度以及应力分布等一系列动力学参数。虽然这种伪一相体的模型相对简单,计算方便,但其忽略了颗粒与流体之间存在相对运动的情况,同时也不能考虑到流、固颗粒流的固相体积分等参数对运动过程的影响,具有较大的误差。为了更精细刻画固、液颗粒流两相间的相互作用,T. B. Anderson等^[70]、A. Bedford等^[71]、R. Jackson^[72]假设颗粒流固、液相之间存在拖拽力、浮力作用,然后对固、液相分别建立质量和动量守恒方程,进而得到了颗粒流固、液相颗粒的运动速度等参数。

1998年,倪晋仁等^[73-74]提出两相流模型,把水和细颗粒组成的非沉降浆体看作“浆体”,把临界粒径以上的粗颗粒和大石块看成泥石流固相。当泥石流密度大于 $1\ 400\text{ kg/m}^3$ 时,临界粒径为 0.05 mm ;泥石流密度大于 $1\ 900\text{ kg/m}^3$ 时,临界粒径为 2 mm 。2006年,H. K. Chen等^[75]将粒径小于 2 mm 的颗粒视为“浆体”部分,且固相部分为均匀分布、粒径相同,运用牛顿第二定律推导了两相流冲击力计算式:

$$\left. \begin{aligned} P_s &= \frac{2\alpha}{3(1+\alpha)} d_c \rho_s a_s \\ P_f &= \rho_f a_f \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, P_s 、 P_f 、 ρ_s 、 ρ_f 、 a_s 、 a_f 分别为泥石流固、液相的冲击力、密度和加速度; α 、 d_c 分别为泥石流固相比和固相等效粒径。两相流模型现处于发展阶段,模型的基本假设与实际也有出入,该模型尚未在工程计算中广泛采用,有待进一步改进。

2.2 大石块计算模型研究

大石块对结构的冲击破坏是颗粒流最剧烈的破坏方式之一,通常会给桥梁等结构造成毁灭性破坏。目前,颗粒流大石块冲击力计算方法主要包括梁式计算法和Hertz接触理论计算法。

(1) 梁式计算法

吴积善等^[76]将结构看作悬臂梁或简支梁,推导了大石块对结构的冲击力,其表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \text{悬臂梁: } F &= \sqrt{\frac{3EI \cdot V^2 \cdot G}{gL^3}} \\ \text{简支梁: } F &= \sqrt{\frac{48EI \cdot V^2 \cdot G}{gL^3}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, EI 为结构抗弯刚度; V 为大石块碰撞速度; G 为大石块质量; L 为结构计算长度。

O. Hungr等^[55]将大石块与结构作用简化为球体对悬臂梁的冲击,大石块动能转化成悬臂梁弯曲形变能,得到大石块冲击力的计算方法:

$$F = \sqrt{MV^2 K} \quad (5)$$

式中, K 为结构刚度系数; M 为大块石质量; V 为大石块运动速度。

梁式算法把大块石与结构都看作弹性体,忽略了塑性变形,造成冲击力偏大。

(2) 接触理论计算法

接触理论计算法主要是基于Hertz接触理论推导的,包括弹性球碰撞、弹塑性球碰撞、粘弹性球碰撞及双弹塑性球碰撞。

① 弹性碰撞、理论冲击力计算法

1881年,H. Hertz^[77]提出Hertz接触法则,H. Hertz^[77]、K. L. Johnson^[78]、C. Braccesi等^[79]假设接触面为圆形,推导了弹性球碰撞的应力分布。假设碰撞球体和结构是理想弹性体且对心碰撞,忽略摩擦力的前提下,得到弹性接触条件下Hertz接触理论冲击力计算公式:

$$P = \frac{4}{3} ER^{0.5} \left[\frac{15 \cdot m \cdot (V \cos\theta)^2}{16ER^{0.5}} \right]^{0.6} \quad (6)$$

式中, m 、 V 分别为大石块的质量和速度。

T. Mizuyama^[80]、H. Huang等^[81]、章书成等^[82]根据野外观测和室内水槽实验数据结合材料特性代入式(6)推导得到的大石块冲击力计算公式为:

$$F = K \cdot V^{1.2} \cdot R^2 \quad (7)$$

式中, F 为大石块冲击力; R 为大石块的粒径; K 为经验系数。T. Mizuyama^[80]、H. P. Lien^[83]理论推导出得到 K 取值分别为241、426和80.8,而T. Mizuyama^[80]、H. Huang等^[81]根据野外或室内实验得到 K 取值分别为48.2、50和30.8。故T. Mizuyama、H. P. Lien、H. Huang等引入冲击力折减系数 K_c 对公式进行修正,最终得到大块石冲击力计算表达式为:

$$F = K_c \cdot K \cdot V^{1.2} \cdot R^2 \quad (8)$$

T. Mizuyama^[80]、H. P. Lien^[83]分别取 K_c 为0.2、0.1和0.2。J. Kwan^[84]、O. Hungr等^[55]、C. W. Ng等^[85]根据实际工程检验后,推荐 K_c 取值为0.1。修正后弹性理论计算公式形式简单,所以工程设计中被广泛用来确定大块石冲击力。

② Hertz接触理论的其他计算法

周必凡等^[1]将大石块与结构碰撞看作为弹性球与塑性平板碰撞,得到考虑塑性变形的大石块冲击

力计算方法,实际上结构非塑性,因此其计算结果偏小。R. Walton等^[86]引入粘弹性理论,将大石块考虑成粘弹性体,得到考虑粘弹性修正的大石块冲击力计算公式。C. Thornton等^[87]、何思明等^[88]、Q. C. Wang等^[89]均在Hertz接触理论基础上,把大石块和结构均假定为理想弹塑性体推导了考虑弹塑性修正的大石块冲击力计算公式。

综合来看,冲击力系数修正中考虑球体和结构均为弹塑性体的大石块冲击力计算方法相对更加合理,也更能真实反映大石块对结构的冲击作用,但计算公式复杂,目前尚未被广泛推广,需要进一步简化。

现有的大石块计算模型都是基于碰撞过程中颗粒或防护结构无损坏的前提,而野外观测发现大块石撞击结构后会发生破碎,块石破碎同样会对大冲击力造成影响。无论是梁式算法还是接触理论算法,都没有将大块石的破碎过程考虑进去。另一方面,现有计算方法都把颗粒流固相和液相冲击压力分开计算,假设其运动速度相对一致。然而当防护工程位于物源区时会出现颗粒流固、液相运动速度不一致的现象,从而先期到达的“浆体”对大块石有垫层作用,而现有计算模型都忽略了“浆体”垫层效应对冲击力的影响,造成冲击力计算偏差。因此工程设计中应考虑结构不同布置位置对冲击力的分布和大小的影响。

3 讨论与结论

颗粒流冲击力研究思路具有相似性,本文以泥石流、碎屑流、雪崩为代表,结合颗粒流的运动特征对现有冲击力的研究结果进行总结、分析,可以得到以下认识:

(1)颗粒流在运动、堆积过程中在流动方向的横向和纵向上具有分选特性,遇到障碍物时具有冲击爬高效应,同时运动过程中存在着对基床的“刮铲”及堆积效应。

(2)颗粒流的冲击力主要包括颗粒流“浆体”冲击力和大块石冲击力两部分。现有的颗粒流“浆体”冲击力计算模型假设“浆体”冲击压力全断面均匀分布,忽略“浆体”运动特性的影响,造成冲击力大小及作用范围的计算误差,影响防护工程的设计。另一方面,颗粒流大块石的冲击力计算现今主要包括梁式算法和接触理论算法两大类,这两

类方法都是单独考虑大块石与结构的冲击力,忽略了大块石与“浆体”的相互作用对大块石冲击力的影响,同时也忽略了块石解体对冲击力的影响。

(3)颗粒流野外观测目前主要局限于冲击力的数值大小,没有对颗粒流冲击力分布规律进行详细研究。同时由于传统传感器的局限性,得到的冲击力并不能反应真实冲击力。

综上所述,颗粒流冲击力的研究不论是冲击力本身的监测,还是冲击力计算模型方面都存在一定的缺陷和不足,仍然需要做进一步研究,具体可从以下几个方面着手:

(1)开发或引入新型分布式压力传感器测得颗粒流真实冲击力大小及分布情况,进而得到更准确的修正系数修正计算模型。

(2)应用高速摄影技术或深度传感器来判断颗粒侵蚀、堆积的实时变化,定量分析颗粒流的爬高效应,进而量化分析颗粒流的运动特性对冲击力的影响。

(3)引入断裂力学对大块石撞击过程进行分析,计算裂纹尖端应力强度因子及其裂纹扩展数据,通过J积分计算裂纹扩展消耗能量,结合能量法进行定量分析,推导大块石颗粒破碎对冲击力的影响。

参考文献:

- [1] 周必凡,李德基,罗德富,等. 泥石流防治指南[M]. 北京:科学出版社,1991.
Zhou B F, Li D J, Luo D F, et al. Handbook of debris-flow prevention [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)
- [2] He S, Liu W, Li X. Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4): 298.
- [3] 武 鸣. 世界铁路史上损失最大的泥石流灾害——四川省大渡河利子依达大桥事故[J]. 中国减灾, 2011(2):7.
Wu M. The largest debris flow disaster in the history of the world railway—the accident of lizi yida bridge in dadu river, sichuan province [J]. Disaster Reduction in China, 2011(2):7. (in Chinese)
- [4] Delannay R, Valance A, Mangeney A, et al. Granular and particle-laden flows: from laboratory experiments to field observations[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(5):053001.

- [5] Gladstone C , Sparks R S J . The significance of grain-size breaks in turbidites and pyroclastic density current deposits [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(1):182-191.
- [6] 王裕宜,詹钱登,韩文亮,等.泥石流堆积层理结构的分析研究[J].*水土保持学报*,2001,15(3): 68-71.
Wang Y Y, Jan Ch D, Han W L, et al. Analyzing study on graded bedding texture in debris flow deposits [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15 (3): 68-71. (in Chinese)
- [7] 舒安平,杨 凯,李芳华,等.非均质泥石流堆积过程粒度与粒序分布特征[J].*水利学报*, 2012, 43(11): 1 322-1 327.
Shu A P, Yang K, Li F H, et al. Particle size and grain sequence distribution characteristics of heterogeneous debris flow accumulation process[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(11): 1 322-1 327. (in Chinese)
- [8] 胡凯衡,韦方强,洪 勇,等.泥石流冲击力的野外测量[J].*岩石力学与工程学报*,2006,25(增1):2 813-2 819.
Hu K H, Wei F Q, Hong Y, et al. Field measurement of impact force of debris flow [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25 (Sup 1): 2 813-2 819. (in Chinese)
- [9] Hu K H, Wei F Q, Li Y. Real-time measurement and preliminary analysis of debris-flow impact force at Ji-angjia Ravine, China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(9): 1 268-1 278.
- [10] Voellmy A. *Über die Zerstörungskraft von Lawinen. III* [M]. Schweiz. Bauzeitg: Zur Dynamik der Lawinen, 1955: 212-217.
- [11] Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1978, 104(8): 1 153-1 169.
- [12] Hungr O. A model for the runout analysis of rapid flow-slides, debris flows, and avalanches [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995,32(4): 610-623.
- [13] Ceccato F. Run-up of granular avalanches on protective barriers: a numerical study with the Material Point Method [C] // *Proceedings of the IACMAG*, Wuhan: [s.n.], 2017.
- [14] Davide M, Hungr O. Analysis of run-up of granular avalanches against steep, adverse slopes and protective barriers[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2010,47:827-841.
- [15] 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, 51(3):17-25.
Liu D Ch, You Y, Du J, et al. Spatio-temporal distribution of the impact force of debris flow [J]. *Advanced Engineering Sciences*,2019,51(3):17-25. (in Chinese)
- [16] Ng C W W, Choi C E, Liu L H D, et al. Influence of particle size on the mechanism of dry granular run-up on a rigid barrier[J]. *Géotechnique Letters*, 2017, 7(1): 1-11.
- [17] 华曙光. 基底侵蚀作用下泥石流流动力过程分析[J]. *西北地质*, 2016(4): 219-227.
Hua Sh G. Numerical study about the influence of the basal erosional and block effectson dynamic process of debris flow[J]. *Northwestern Geology*, 2016(4): 219-227. (in Chinese)
- [18] Hungr O, Evans S G. Entertainment of debris in rock avalanches: an analysis of a long run-out mechanism [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116 (9):1 240-1 252.
- [19] Dufresne A. Granular flow experiments on the interaction with stationary runout path materials and comparison to rock avalanche events[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2012, aop (aop).
- [20] 李祥龙,唐辉明,熊承仁,等. 基底刮铲效应对岩石碎屑流停积过程的影响[J]. *岩土力学*, 2012, 33(5): 1 527-1 534,1 541.
Li X L, Tang H M, Xiong Ch R, et al. Influence of substrate ploughing and erosion effect on process of rock avalanche[J].*Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (5):1 527-1 534,1 541. (in Chinese)
- [21] Crosta G, Imposimato S, Roddeman D. Numerical modelling of entrainment/deposition in rock and debris-avalanches [J]. *Engineering Geology*, 2008, 109 (1): 135-145.
- [22] Bouchaud J P, Cates M E, Prakash J R, et al. A model for the dynamics of sandpile surfaces [J]. *Journal de Physique I*, 1994, 4(10):1 383-1 410.
- [23] Iverson R M, George D L, Allstadt K, et al. Landslide mobility and hazards: implications of the 2014 Oso disaster[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 412:197-208.
- [24] Shen H W, Roper A T. Dynamics of snow avalanche (with estimation for force on a bridge)[J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 1970, 15 (1):7-26.
- [25] Mellor M. Cold regions science and engineering part 3: engineering; section A3; snow technology, avalanches

- [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1968:753-779.
- [26] Wiegardt K. Forces in granular flow [J]. *Mechanics Research Communications*, 1974, 1(1): 3-7.
- [27] Suwa H, Okuda S, Yokoyama K. Observation system on rocky mudflow [J]. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, 1973, 23(3-4): 59-73.
- [28] Bugnion L, Mcardell B W, Bartelt P, et al. Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles [J]. *Landslides*, 2012, 9(2): 179-187.
- [29] 章书成,袁建模. 泥石流冲击力及其测试 [M]. 北京:科学出版社, 1985: 269-274.
Zhang Sh Ch, Yuan J M. Impact force of debris flow and its detection [M]. Beijing: Science Press, 1985: 269-274. (in Chinese)
- [30] 吴积善,康志成,田连权,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究 [M]. 北京:科学出版社, 1990.
Wu J Sh, Kang Zh Ch, Tian L Q, et al. Observation of debris flow in Jiangjia Valley, Yunnan Province [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
- [31] Hübl J. Vorläufige erkenntnisse aus 1: Imurenversuchen: prozessverständnis und belastungsannahmen [J]. *Geotechnik und Naturgefahren: Balanceakt zwischen Kostendruck und Notwendigkeit* Institut für Geotechnik, BOKU Wien, Geotechnik und Naturgefahren, 2006, 19: 1 125-1 140.
- [32] Hübl J, Suda J, Proske D, et al. Debris Flow Impact Estimation steep slopes [C]//11th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ohrid, Macedonia: [s.n.], 2009: 1-5.
- [33] Wendeler C, Volkwein A, Roth A, et al. Field measurements and numerical modelling of flexible debris flow barriers [C]//the 4th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Netherlands: Millpress Science, 2007: 681-687.
- [34] Thibert E, Baroudi D, Limam A, et al. Avalanche impact pressure on an instrumented structure [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54(3): 206-215.
- [35] Sovilla B, Kern M, Schaer M. Slow drag in wet-snow avalanche flow [J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56 (198): 587-592.
- [36] Sovilla B, Schaer M, Kern M, et al. Impact pressures and flow regimes in dense snow avalanches observed at the Vallée de la Sionne test site [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2008, 113(F1): 440-454.
- [37] Sovilla B, Faug T, Hler A K, et al. Gravitational wet avalanche pressure on pylon-like structures [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016: 126:66-75.
- [38] Vagnon F, Segalini A. Debris flow impact estimation on a rigid barrier [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(7): 1-17.
- [39] Heim A. *Bergsturz und menschenleben* [M]. Leipzig: [s.n.], 1932.
- [40] He S, Liu W, Li X. Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(4): 298.
- [41] Lichtenhahn C. Berechnung von sperren in beton und eisenbeton [J]. *Mitt Forstl Bundes Versuchsanst Wein*, 1973, 102: 91-127.
- [42] Armanini A. On the dynamic impact of debris flows [M]. Berlin: Springer, 1997: 208-226.
- [43] Scotton P, Deganutti A M. Phreatic line and dynamic impact in laboratory debris flow experiments [C]//Proceedings of the debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment, F. Colorado: American Society of Civil Engineers, 1997: 833-859.
- [44] Cui P, Zeng C, Lei Y, et al. Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(12): 1 644-1 655.
- [45] 李培振,高宇,郭沫君. 泥石流冲击力的研究现状 [J]. *结构工程师*, 2015, 31(1): 200-206.
Li P Zh, Gao Y, Guo M J. Research status and development trend of debris-flow impact force [J]. *Structural Engineers*, 2015, 31(1): 200-206. (in Chinese)
- [46] Canelli L, Ferrero A M, Migliazza M, et al. Debris flow risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers-experimental tests and impact analysis [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, 12 (5): 1 693-1 699.
- [47] Dok L. Review of natural terrain landslide debris-resting barrier design [R]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, 2000.
- [48] Watanabe M, Ikeya H. Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima Japan [J]. *Erosion Sediment Transport Measurement International Association on Hydrology*, Florence Science Publication, 1981, 133: 245-256.
- [49] Egli T. Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren [J]. *Mensurat Photogramm Genie Rural*, 2000, 98(3): 120-125.

- [50] Thibert E, Bellot H, Ravanat X, et al. The full-scale avalanche test-site at Lautaret Pass (French Alps)[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 115: 30-41.
- [51] Jiang Y J, Towhata I. Experimental study of dry granular flow and impact behavior against a rigid retaining wall[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(4): 713-729.
- [52] Jiang Y J, Zhao Y. Experimental investigation of dry granular flow impact via both normal and tangential force measurements [J]. *Géotechnique Letters*, 2015, 5(1): 33-38.
- [53] Zhang S. A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China[J]. *Natural Hazards*, 1993, 7(1): 1-23.
- [54] Armanini A, Michiue M. Recent developments on debris flows [M]. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- [55] Hungr O, Morgan G C, Kellerhals R. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, 21(4): 663-677.
- [56] 唐金波, 胡凯衡, 周公旦, 等. 基于小波分析的泥石流冲击力信号处理 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, 45(1): 8-13.
Tang J B, Hu K H, Zhou G D, et al. Debris flow impact pressure signal processing by the wavelet analysis [J]. *Journal of Sichuan University*, 2013, 45(1): 8-13. (in Chinese)
- [57] 泥石流灾害防治工程勘察规范(试行): T/CAGHP 006—2018[S]. 武汉: 中国地质大学出版社有限责任公司, 2018.
Specification of Geological Investigation for Debris flow Disaster Stabilization: T/CAGHP 006—2018[S]. Wuhan: China University of Geosciences Press Company, LTD, 2018. (in Chinese)
- [58] Faug T. Macroscopic force experienced by extended objects in granular flows over a very broad Froude-number range[J]. *European Physical Journal E*, 2015, 38(5): 1-10.
- [59] Hübl J, Nagl G, Suda J, et al. Standardized stress model for design of torrential barriers under impact by debris flow (according to austrian standard regulation 24801) [J]. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 2017, 10(1): 47-55.
- [60] Armanini A, Larcher M, Odorizzi M. Dynamic impact of a debris flow front against a vertical wall [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, Padua, Italy: [s.n.], 2011: 1041-1049.
- [61] 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.
- [62] Louge M, Steiner R, Keast S, et al. Application of capacitance instrumentation to the measurement of density and velocity of flowing snow [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1997, 25(1): 47-63.
- [63] Cascini L, Guida D, Romanzi G, et al. A preliminary model for the landslides of May 1998 in Campania Region [C]//Evangelista A, Picarelli L (eds) ProcInt Symp on The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks, Rotterdam, Netherlands: Napoli. Balkema Publishers, 2000: 1 623-1 652.
- [64] Brighenti R, Segalini A, Ferrero A M. Debris flow hazard mitigation: a simplified analytical model for the design of flexible barriers [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 54(3): 1-15.
- [65] Kherkheulidze I. Estimation of basic characteristics of mud flow [C]//Processings of the International Association of Hydrological Symposium and Floods Computation, Leningrad: [s.n.], 1967: 940-948.
- [66] Arattano M, Franzi L. On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, 3(6): 539-544.
- [67] Takahashi T. Debris flow [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1991, 13(13): 57-77.
- [68] Coussot P, Piau J M. On the behavior of fine mud suspensions [J]. *Rheologica Acta*, 1994, 33(3): 175-184.
- [69] Chen C L, Ling C H. Rheological equations in asymptotic regimes of granular flow [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(3): 301-310.
- [70] Anderson T B, Jackson R. Fluid mechanical description of fluidized beds. equations of motion [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1967, 6(4): 527-539.
- [71] Bedford A. Theories of immiscible and structured mixtures [J]. *International Journal of Engineering Science*, 1983, 21(8): 863-960.
- [72] Jackson R. The dynamics of fluidized particles [J]. *American Journal of Physics*, 2001, 69(10): 1118.

- [73] 倪晋仁,王光谦. 泥石流的结构两相流模型:I. 理论[J]. 地理学报,1998, 26(1): 67-77.
Ni J R, Wang G Q. Conceptual two phase flow model of debris flow:I. theory [J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 26(1): 67-77. (in Chinese)
- [74] 倪晋仁,王光谦,熊育武,等. 泥石流的结构两相流模型: II. 应用[J]. 地理学报,1998,26(1):78-86.
Ni J R, Wang G Q, Xiong Y W, et al. Conceptual two-phase flow model of debris flow : II. Application [J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 26(1):78-86. (in Chinese)
- [75] Chen H K, Tang H M, Chen Y Y. Research on method to calculate velocities of solid phase and liquid phase in debris flow [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006,27(3): 399-408.
- [76] 吴积善,田连权,康志成,等. 泥石流及其综合治理[M].北京:科学出版社,1993.
Wu J Sh, Tian L Q, Kang Zh Ch, et al. Debris-flow and comprehensive management[M]. Beijing: Science Press,1993. (in Chinese)
- [77] Hertz H. Über die berührung fester elastischer körper [J]. Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelles Journal), 1882,92: 156-171.
- [78] Johnson K L. Contact mechanics [M]. London: Cambridge University Press, 1987.
- [79] Braccisi C, Landi L. A general elastic-plastic approach to impact analysis for stress state limit evaluation in ball screw bearings return system [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(7): 1 272-1 285.
- [80] Mizuyama T. Computational method and some considerations on impulsive force of debris flow acting on sabo dams [J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 1979, 112,40-43.
- [81] Huang H, Yang K, Lai S. Impact force of debris flow on filter dam [J]. European Geosciences Union General Assembly,2007, 9: 1-32.
- [82] 章书成, Hungr O, Slaymaker O. 泥石流中巨石冲击力的计算[M]. 北京:科学出版社, 1996.67-72.
Zhang Sh Ch, Hungr O, Slaymaker O. The calculation of impact force of boulders in debris flow [M]. Beijing: Science Press, 1996. 67-72. (in Chinese)
- [83] Lien H P. Study on treatments of debris flow (II) [R]. Taiwan: Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture (COA), 2002.
- [84] Kwan J. Supplementary technical guidance on design of rigid debris-resisting barriers [R]. Hongkong: Geotechnical Engineering Office, 2012.
- [85] Ng C W, Choi C E, Su A, et al. Large-scale successive boulder impacts on a rigid barrier shielded by gabions [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(10): 1 688-1 699.
- [86] Walton R, Braun R L. Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks [J]. Journal of Rheology (1978-present), 1986, 30(5): 949-980.
- [87] Thornton C, Ning Z. A theoretical model for the stick/bounce behaviour of adhesive, elastic-plastic spheres [J]. Powder Technology, 1998, 99(2): 154-162.
- [88] 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):1 664-1 669.
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): 1 664-1 669. (in Chinese)
- [89] Wang Q C, Wang J, Zhang H, et al. Impact force of boulders conveyed in debris flows on bridge piers and collision protection measures [J]. International Journal of Geohazards and Environment, 2016, 2(2): 72-81.

(本文责编:赵霞)