

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.032

大古与街需水电站工程区泥石流基本特征 及冲击力试验研究

孙兴伟¹, 刘云鹏²

(1. 福建华东岩土工程有限公司, 福建 福州 350003;

2. 中国电建集团 成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 在现场调查和大量试验数据的基础上, 分析了西藏大古与街需水电站工程区的泥石流基本特征, 包括泥石流物源、沟道、堆积物组成、爆发频率、流体重度等。通过室内物理模拟试验获取泥石流冲击力的具体试验结果, 确定泥石流暴发频率下的浆体重度以及三种普通坡度。研究这两种泥石流影响因素对冲击力的影响, 试验发现: 若重度没有差别, 泥石流冲击力峰值会随坡度的增大而增大, 且两者为非线性关系。在斜坡坡度一样的条件下, 冲击力会随重度的增大而减小, 两者同样呈现出非线性关系。根据试验数据分析其原因, 最后建立数学模型, 为合理设计提供重要参数, 以便更好解决泥石流对工程影响的问题。

关键词: 西藏地区; 泥石流特征; 物理模拟试验; 泥石流冲击力

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)02—0167—06

Debris Flow Characteristics and its Impact Force Test in The Engineering Areas Of Dagu And Jiexu Hydropower Stations in Tibet

SUN Xingwei¹, LIU Yunpeng²

(1. Fujian Huadong Geotechnical Engineering Co. Ltd., Fuzhou, Fujian 350003, China;

2. Chengdu Engineering Co. Ltd., Power China, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: Based on field investigation and a large number of experimental data, the basic characteristics of debris flow in the engineering areas of Dagu hydropower station and Jiexu hydropower station of Tibet was analyzed, including the debris flow provenance, channel, bulk composition, outbreak frequency, flow body weight, etc. Through the physical simulation test to obtain detailed test data of impact force of debris flow, to determine the influence of debris flow body weight under the four kinds of outbreak frequency and slope including three common slope angle. The test results show that under the condition of the same debris flow bulk density, the greater the gully slope is, the greater the impact force peak value is, both of which have a rising nonlinear relationship; when the debris flow gully slope is the same, the larger the bulk density is, the smaller the impact force peak value is, and both have a declining nonlinear relationship. According to the experimental data to analyze the reasons, a mathematical model was finally developed to provide important parameters for the reasonable design and better solve the problem of debris flow influence on the project.

Keywords: tibet region; debris flow characteristics; physical simulation test; impact force of debris flow

我国是受泥石流地质灾害危害和威胁最为严重的国家之一, 泥石流灾害不仅造成大量的生命财产损失, 而且严重影响工程建设的实施和后期运营^[1-3]。随着各类工程建设向西藏地区的扩展, 对特殊高原环境下泥石流地质灾害的认识和研究越来越

越受到广泛重视。由于欧亚板块受印度板块俯冲和推移而隆起的地壳运动影响, 导致西藏地区地貌复杂、高原气候突出、自然环境条件恶劣, 形成了地质灾害发育的独特地质背景, 有学者通过对 1970 年—2006 年西藏泥石流、滑坡的时空分布特征与降水条

件分析,得出西藏地区泥石流、滑坡主要发生在藏东地区、喜马拉雅山南侧及沿雅鲁藏布江一线,且具有分布广、发生频率高的特点^[4]。原因可以概括为:首先,由于青藏高原地壳抬升,物质移动,生成区域断裂,地震发生较频繁,以至高原地区岩体较破碎,为滑坡、泥石流、崩塌等不良地质作用现象的发生提供了必要条件。其次,青藏高原持续抬升,雅鲁藏布江的切割较迅速,然而,雅鲁藏布江两岸的支流切割速度较雅鲁藏布江切割速度较缓慢,支流发育程度较差,支流纵坡降较大,发生泥石流时流速较大。西藏地区海拔较高,历史上存在冰期及间冰期,由于冰川的作用,较高处山体的刃脊、角峰及沟谷中部的 U 型谷发育,在沟谷的中下部产生了很多的堆积物,提供了地质灾害的物质来源。

针对西藏地区泥石流地质灾害的特征、分布、成因、发展趋势和危险性分区等因素,众多学者做了大量的研究工作^[4-11]。但同西藏以外地区泥石流的对比研究并不多见。冲击力是表征泥石流发育特征的重要参数,也是泥石流治理的关键指标。一些学者通过野外测量试验和理论计算等研究方法获得了很多有价值的研究成果^[12-17]。但对于沿江泥石流而言,当具体到某一地区时,根据当地实际情况确定影响因素(如泥石流浆体重度及沟道坡度等)的冲击力测试研究尚不曾看到。

研究区位于青藏高原、西藏山南地区桑日县和加查县交界部位,属于雅鲁藏布江区域(见图 1)。地势呈北西面较高东南侧较低,从西向东逐步降低,从南向北延绵起伏。山顶海拔在 4 800 m 以上,谷底高程 3 200 m~3 300 m,相对高差 1 500 m~2 000 m;雅鲁藏布江以总体近东西向从研究区流过,纵坡降较大,河流切割较深,河床宽度较小,支沟相对较发育。

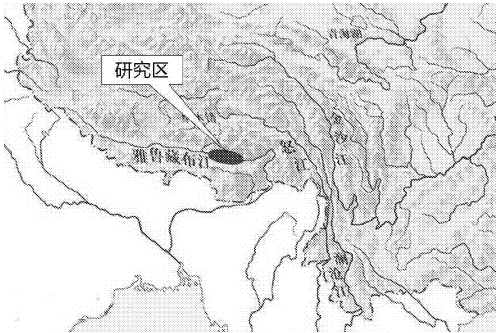


图 1 研究区所在位置

研究区位于雅鲁藏布江构造岩石地层区,沉积

岩、岩浆岩、变质岩三大岩类均有出露,其中岩浆岩、变质岩相对发育,未变质的沉积岩相对较少,地层岩性复杂。第四系堆积物有冲洪积、崩坡积等,出露在河谷、冲沟及山麓斜坡等地势低洼地带。

本文根据西藏地区特有的自然和环境地质条件,在现有勘察资料及现场调研的基础上,总结研究区 17 条泥石流的基本特征,包括发育特征、沟道特征、堆积特征等。同时,根据研究区不同暴发频率下的浆体重度及常见坡度的调查结果,通过试验的方法,建立数学模型,分析这两种泥石流影响因子对冲击力的影响,从而为工程防护措施提供重要依据。

1 自然环境条件

研究区位于西藏自治区东南部,气候主要受西南季风的影响,冬半年属风季,境内受西风带控制,降雨少而干旱;夏半年为雨季,受西南孟加拉湾暖湿气流影响,雨水稍多。降雨集中在每年的 5 月—9 月,由于所处地域相对高差大,所以气候的垂直分带极为明显。

同时,相比内地气候,高原海拔高,空气含氧量较低,气压较低,光照时间长,夜晚,热量传递至空气中,深度下降速度较快,早晚温差大。岩石的热胀冷缩作用显著、风化作用强烈。

2 泥石流基本特征

2.1 物源特征

研究区内 17 条泥石流沟流域面积总和约为 420 km²,泥石流不稳定物质储量较多,天然不稳定物质储量主要由沟道堆积物、崩坡积物、岸坡侵蚀物三种类型组成,由于泥石流上游沟谷纵坡降较小,下游沟谷纵坡降较大,物源分布的主要形式为:上游沟谷以岸坡侵蚀为主,下游沟谷以沟道堆积为主,位于沟谷岸坡及山脊分水岭部位(见表 1)。

表 1 研究区各类泥石流物源统计表

泥石流物源类型	$V_{动}/V_{总}$ (平均值)	主要分布 高程/m	$S_{总}/V_{总}$ (平均值)	厚度 /m
沟道堆积物源	0.47	3280~4316	0.10	3~22
崩坡积物源	0.30	3300~4500 及 4100~5000	0.09	5~35
坡面侵蚀性物源	0.20	3400~4800 以 及 4000~5300	0.13	3~17

注: $V_{动}/V_{总}$ 表示可参与泥石流活动的动储量与提供物源量的比值; $S_{总}/V_{总}$ 总面积与体积的比值。

(1) 沟道堆积物。泥石流沟谷整体坡度较大,地形较陡,固体物质在沟床中的堆积厚度相对较薄。

研究区出露的地层岩性为喜山期及燕山期侵入的黑云母花岗闪长岩,岩质坚硬,冰川作用对沟道作用较小,切割不深,在坡降较缓部位堆积了滚石及孤石,使沟道堆积物分布位置主要集中在高程 3 280 m ~ 4 316 m,厚度以 3 m ~ 22 m 为主。

(2) 崩坡积物。研究区在地质历史上经历了多期构造作用,断裂构造十分发育,造成岩体结构破碎,此外,昼夜温差大,热胀冷缩作用显著,岩石的风化作用强烈,这为崩坡积物源的形成提供了必要条件;并且由于海拔较高、气候寒冷,岩石冻融作用十分强烈,所以崩坡积物源在 3 300 m ~ 5 000 m 均有分布。但由于沟道综合纵坡降较大,沟谷顺直,在冲沟流水的影响下,粒径较小的物质被流水冲走,在沟谷底部堆积其它物质,故崩坡积物储量与沟道堆积物相比,其总量少于沟道堆积物,厚度一般为 5 m ~ 35 m。

(3) 岸坡侵蚀性物源。现场调查发现,研究区岸坡侵蚀性物源堆积较松散,岩体风化较强烈,大多位于沟谷岸坡,容易受到暴雨冲蚀、沟水淘蚀,个别部位会有坍岸的现象,坡度为 $40^{\circ} \sim 56^{\circ}$,且受侵蚀的部位主要位于岸坡较陡处,这些部位植被稀少,河道纵坡降大,降水较容易集中,沿陡坎侵蚀坡角部位。研究区内沟道岸坡侵蚀性物源主要为滚石及孤石,由于降水坡面冲刷较弱,坡度平缓,物源基本稳定。在下游部位,坡度相对较大,岸坡侵蚀性物源主要为碎石土、混合土,仅少部分细粒土被流水作用带走,故泥石流可活动储量相对较少。岸坡侵蚀性物源主要位置与崩坡积物位置相差不大,发育高程高,气候恶劣,冷热作用交替,植被稀少,水土保持能力差。沟道岸坡坡度相对较大,故岸坡侵蚀性物源堆积于岸坡较困难,厚度一般在 3 m ~ 17 m。

2.2 沟道特征

调查表明,研究区内泥石流沟道形态包括了“V”字型和“U”字型两种类型。

(1) 汇水物源区:研究区泥石流汇水物源区地势相对平坦,沟谷开阔。沟谷呈切割的“V”型,后缘山体呈半椭圆型,植被覆盖率低,无覆盖层,基岩出露,沟道底部切割不深,高程多为 3 580 m ~ 5 700 m,纵坡降多为 $118\% \sim 578\%$,相对较大,长度多为 0.87 km ~ 17.03 km。

(2) 流通区:流通区的纵比降普遍都在 $500\% \sim 700\%$ 范围内,纵比降较大。所在区段分布高程 3 400 m ~ 4 680 m,沟谷长度 0.40 km ~ 6.9 km。流通区沟道切割深,呈“V”型,局部有跌坎,沟谷狭窄,

为泥石流的发生提供条件。

(3) 堆积区:泥石流堆积区的纵比降范围一般介于 $86\% \sim 286\%$ 。高程为 3 270 m ~ 3 530 m,高差较小。沟道长度一般在 500 m 以内,也有个别沟谷由于地形特别开阔,汇水条件好,长度可达 1 000 m 以上。堆积区的沟口开阔,局部地区沟道深切狭窄,堆积扇两侧界限明显,可见大量的块碎石堆积于沟口。

(4) 弯道特征:泥石流沟道平顺,存在陡坎,沟道弯曲部位较少。个别地段存在弯曲,及其个别存在直角转弯。转弯部位可见清晰泥痕,但由于整体沟道纵比降较大,泥石流物质不易壅高,泥痕高度较矮,一般为 3 m ~ 5 m。

另外,研究区新构造运动发育,泥石流沟道的侵蚀速度与雅鲁藏布江切割速度相对较小,沟道的综合坡降较大,实际上,可将研究区泥石流看成是冲沟型泥石流向沟谷型泥石流的过渡阶段^[18]。

2.3 堆积特征

堆积物停留于沟道前缘,形状似扇形,堆积物坡度较平缓,堆积物植被稀少,由泥石流冲击物及崩积物组成,泥石流冲击物位于崩积物下部。泥石流冲击物为滚石及块石混合土,结构紧密,细粒物质充填,崩积物粒径较大,细颗粒物质含量较小,局部架空。

对研究区泥石流沟口典型堆积物采集探槽表层土样进行现场筛分试验统计(见图 2、图 3),计算求得不同粒级颗粒重量所占百分比为:占比 21% ~ 50% 的物质粒径为 40 mm ~ 60 mm,占比 21% ~ 35% 的物质粒径为 10 mm ~ 40 mm,占比 10% 的物质粒径为 5 mm ~ 10 mm,占比 10% 的物质粒径为 1 mm ~ 5 mm,占比 10% ~ 15% 的物质粒径为 0.075 mm ~ 1 mm,0.075 mm 以下占 5% ~ 10%。试验得到的不均匀系数 $C_u > 5$,曲率系数 C_c 多在 0.20 ~ 1.50,分析结论:研究区的颗粒粒径范围较大,且不均匀,为级配良好土。

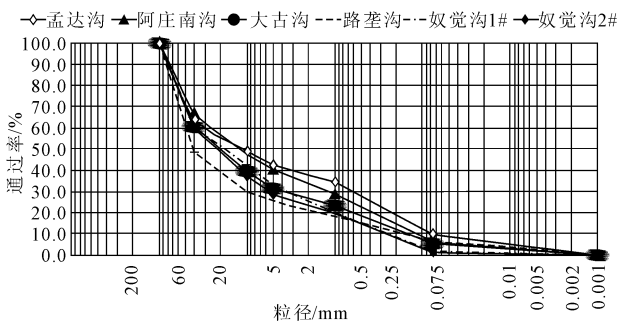


图2 大古水电站工程区泥石流物源级配曲线

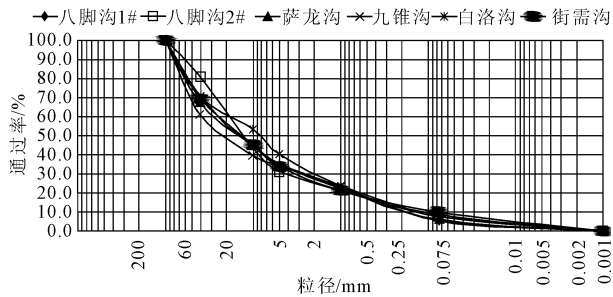


图3 街需水电站工程区泥石流物源级配图

堆积物由块石、混合土、碎石组成,次磨圆,分选性较差。研究区基岩岩性为黑云母花岗岩闪长岩,岩质坚硬,抗风化能力较强,变形模量高,冻胀作用剥落的岩块堆积于沟道,形成不稳定物源,细粒物质较少,故堆积物中粉粒、粘粒占比小,砾石的占比较大。

在高海拔地区,植被稀少,且受冻胀作用影响,第四系堆积物中细颗粒含量相对较少,流态为紊流或者半紊流,这是造成研究区内大多数泥石流都是稀性泥石流的主要原因。

2.4 流体重度

泥石流性质的重要指标为重度,根据规范查表法及理论公式法计算出泥石流的重度,综合分析提出泥石流沟的重度(见图4)。

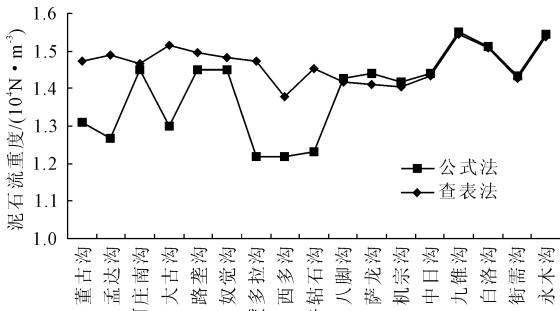


图4 研究区泥石流重度统计

根据结果,泥石流重度全部不大于 1.60 t/m^3 ,根据泥石流灾害防治工程勘查规范,研究区泥石流均为稀性。自然及地质条件影响泥石流重度,且受气候条件影响,研究区多为稀性泥石流。

3 泥石流冲击力试验

泥石流冲击力试验是研究在不同暴发频率下重度和坡度对泥石流冲击力的影响,组建数学模型,分析泥石流对工程的影响。

3.1 试验方案

(1) 试验参数。试验级配根据原始泥石流物质组成,参考其它泥石流形态,对比得出具体级配,完

成试验(见图5)。

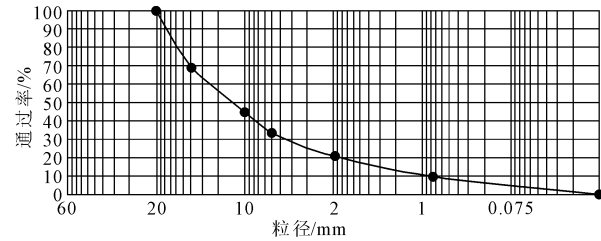


图5 试验级配图

试验水槽的设计坡度根据区域调查结果确定,选取四种暴发频率(1%,2%,5%,10%)下泥石流重度,底面糙率系数根据现场调查和类比工程经验取值。具体试验参数(见表2)。

(2) 试验装置。试验装置包括料斗:长80 cm、宽60 cm、高70 cm,料斗连接水槽,连接处有闸门,可控制水的流量大小;拉动拉链可改变沟道坡度;模拟沟道的水槽坡度也可改变;传感器安装在沟口,电荷放大器连接在中部可接收电压,通达采集仪可收集冲击力信号,试验装置(见图6)。

表2 试验参数

槽底糙率系数	0.30
坡度/(°)	14、18、21
重度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.57(1%),1.53(2%), 1.47(5%),1.4(10%)
相似比系数	2839

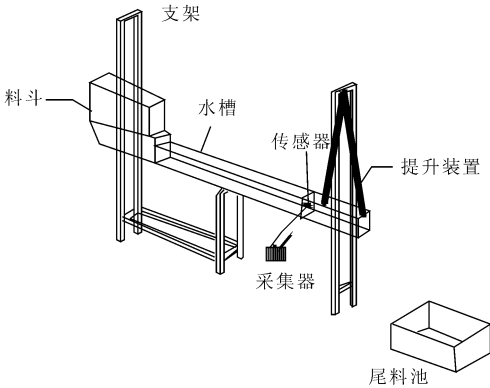


图6 试验装置展示图

(3) 试验步骤。试验在 14° 、 18° 、 21° 坡度条件和1%,2%,5%,10%暴发频率下进行。首先,根据试验参数,选取合适的颗粒土体,加水使其饱和,并充分搅拌。其次,根据试验装置,调节坡度至合适位置,采用冲击力传感器收集信号,并用摄像机记录。再次,选择充分搅拌好的土体放至料斗,打开摄像机,并打开料斗开关;泥石流冲击传感器,传感器可接收到信号,记录冲击力变化过程。改变沟道的坡

度和重度,重复上述试验过程。

3.2 试验过程

在试验沟口安装冲击力传感器,通过采集仪采集冲击信号,以冲击峰值表征其冲击力。本次试验统计以计算机软件为主。

对试验结果进行分析,得到不同条件下泥石流的冲击力,绘制成冲击力曲线,冲击力曲线表现为连续间断起伏(见图 7)。

3.3 成果分析

根据试验成果,得到冲击力统计表(见表 3)。

由表 3 可以看出,在重度相同的条件下,泥石流坡度和冲击力峰值呈非线性关系,坡度越大,峰值越大。

由表 3 可以看出,在坡度相同的条件下,泥石流重度和冲击力呈下降的非线性关系,重度越小,峰值越大。

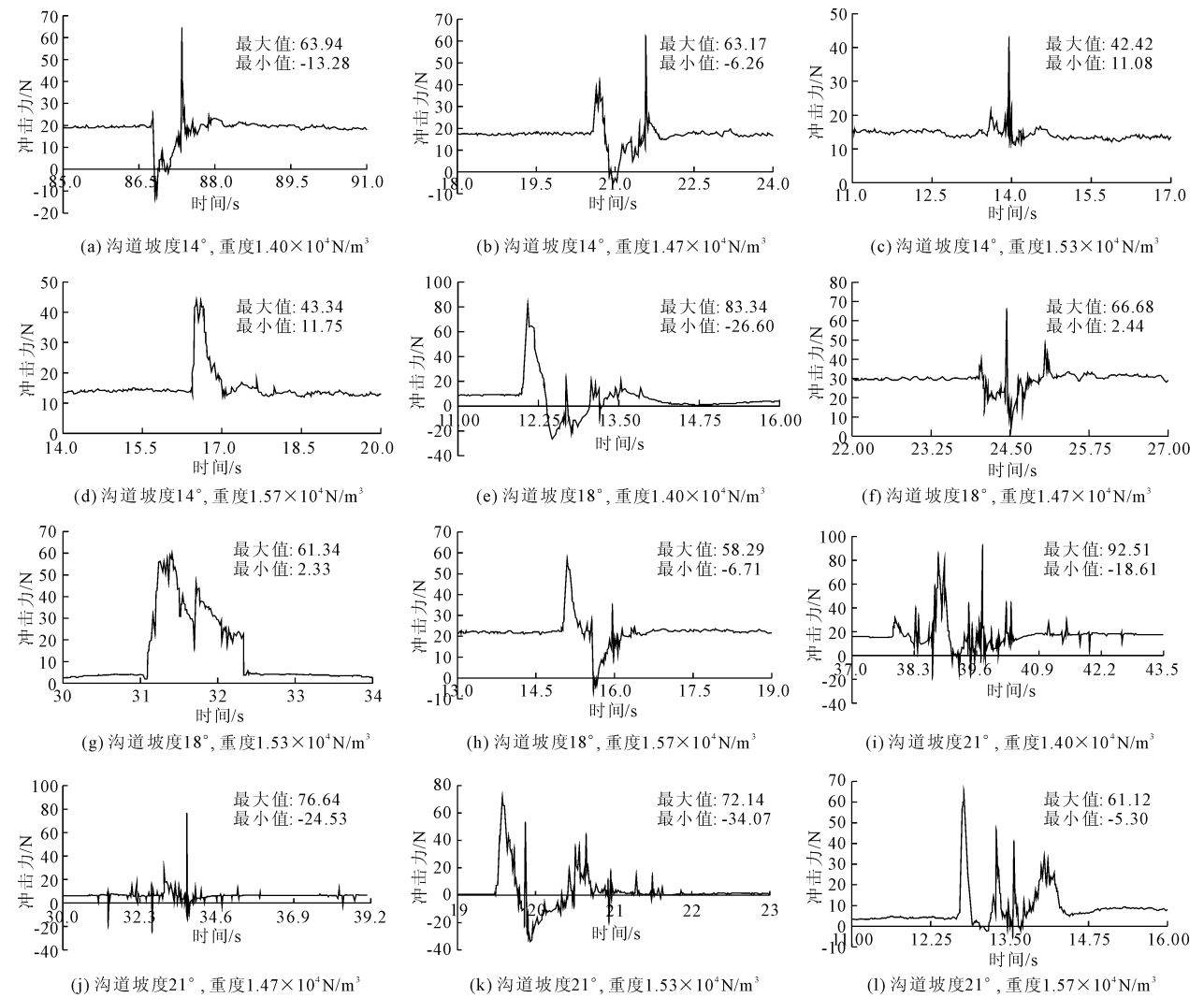


图 7 冲击力折线图

表 3 冲击力试验结果统计表

重度/($10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.40	1.47	1.53	1.57	1.40	1.47	1.53	1.57	1.40	1.47	1.53	1.57
坡度/(°)	14	14	14	14	18	18	18	18	21	21	21	21
冲击力峰值/N	62.8	62.3	41.3	42.5	82.1	66.3	62.0	58.2	92.5	75.7	71.8	60.9

3.4 数学模型

重度和坡度是影响冲击力的指标,采用趋势面分析法建立数学模型。假定回归方程为 $\hat{z} = b_0 + b_1x + b_2y$, x 为重度, y 为坡度,冲击力为 z ,采用最小二

乘法分析。

一次趋势面方程为

$$\hat{z} = 2839 \times (243.863 - 156.337x + 173.034y)$$

式中: x 为泥石流重度; y 为泥石流坡度,相似比系数

为 2839。

显著性验算：

$$S_{\text{总}} = \sum (z_i - \bar{z})^2 = 2336.51$$

$$Q = \sum (z_i - \hat{z}_i)^2 = 166.41$$

$$U = S_{\text{总}} - Q = 2168.65$$

故

$$F = \frac{U/2}{Q/9} = \frac{2168.65/2}{166.41/9} = 58.17 > F_{0.005}(2,9) = 10.11$$

说明线性回归方程可以表示重度、坡度和冲击力的关系。

将重度和坡度代入数学模型,计算结果(图 8)对比规范中单块最大冲击力值,从图 8 可以看出,变化趋势一致,因此,该数学模型具备在研究区内应用的条件。

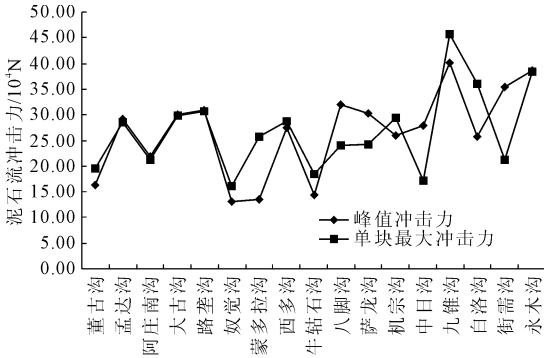


图 8 模型冲击力比较图

4 结 论

(1) 研究区泥石流不稳定物质储量较多,主要由沟道堆积物、崩坡积物、岸坡侵蚀物三种类型组成,由于泥石流上游沟谷纵坡降较小,下游沟谷纵坡降较大,物源分布的主要形式为:上游沟谷以岸坡侵蚀为主,下游沟谷以沟道堆积为主,位于沟谷岸坡及山脊分水岭部位。

(2) 研究区泥石流沟发育不成熟,植被稀少,冻胀作用较强,崩坡积物和岸坡面侵蚀物源发育较多。由于新构造运动,泥石流沟道的侵蚀速度与雅鲁藏布江切割速度相对较小,沟道的综合坡降较大。从堆积物颗粒级配来看,研究区泥石流堆积物主要表现在细颗粒(特别是粉粒)的严重缺失;而强烈的冻融风化作用形成了大量的粗颗粒物质,所占比重较大。

(3) 泥石流冲击力试验表明:在重度相同的条件下,泥石流坡度和冲击力峰值呈非线性关系,坡度越大,峰值越大。在坡度相同的条件下,泥石流重度和冲击力呈下降的非线性关系,重度越小,峰值越大。

在重度相同的条件下,泥石流沟道坡度越大,冲击力峰值越大,呈上升的非线性关系。在坡度相同的条件下,泥石流重度越大,冲击力峰值越小,整体呈下降的非线性关系。

参考文献:

- [1] 张业成.中国崩塌、滑坡、泥石流灾害基本特征与防治途径[J].地质灾害与环境保护,1993,4(1):11-18.
- [2] 段永侯.我国地质灾害的基本特征与发展趋势[J].第四纪研究,1999,19(3):208-216.
- [3] 李 媛,孟 晖,董 颖,等.中国地质灾害类型及其特征—基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):29-34.
- [4] 马艳鲜,余忠水.西藏泥石流、滑坡时空分布特征及其与降水条件的分析[J].高原山地气象研究,2009,29(1):55-58.
- [5] 杜榕桓,章书成.西藏高原东南部冰川泥石流的特征[J].冰川冻土,1981,3(3):15-16.
- [6] 杜友平,杨 勇.西藏八一电厂沟泥石流的特征及发展趋势[J].地质灾害与环境保护,1999,10(1):57-61.
- [7] 朱平一,程尊兰,汪阳春.西藏雅鲁藏布江中游地区泥石流及防灾对策[J].水土保持学报,2002,16(6):69-70,75.
- [8] 耿学勇,程尊兰,李 泳,等.正负矩阵权重分析法在西藏泥石流危险性分区中的应用[J].山地学报,2006,24(6):769-774.
- [9] 余忠水,德庆卓嘎,罗布次仁.西藏波密县天摩沟“9·4”特大泥石流灾害成因初步分析[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(1):6-10.
- [10] 罗 飞,许 虎,刘培培.金沙水电站肖家沟泥石流危险性评价[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):145-150.
- [11] 徐腾辉,冯文凯,魏昌利,等.高寒高海拔山区南门关沟泥石流成因机制分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):90-96.
- [12] 刘雷激,魏 华.泥石流冲击力研究[J].四川联合大学学报(工程科学版),1997,1(2):99-102.
- [13] 胡凯衡,韦方强,洪 勇.泥石流冲击力的野外测量[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S1):2813-2819.
- [14] 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.
- [15] 蒋 树,文宝萍.国内外泥石流活动关键指标估算方法之比较[J].水文地质工程地质,2012,39(3):86-96.
- [16] 曾 超,苏志满,雷 雨,等.泥石流浆体与大颗粒冲击力特征的试验研究[J].岩土力学,2015,36(7):1923-1930,1938.
- [17] 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.
- [18] 倪化勇.基于地貌特征的泥石流类型划分[J].南水北调与水利科技,2015,13(1):78-82.