

泥石流冲击力的野外测量

胡凯衡^{1,2}, 韦方强¹, 洪 勇¹, 黎小宇¹

(1. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 北京大学 湍流和复杂系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 冲击作用是泥石流最为剧烈的一种破坏方式。泥石流的冲击力因此也成为泥石流工程防治和危险性分区中的重要参数。然而, 由于其破坏力巨大, 可靠的野外泥石流的冲击力数据比较少。2004 年通过在云南蒋家沟建立的泥石流冲击力野外测试装置和新研制的力传感器以及数据采集系统, 首次测得不同流深位置、长历时、波形完整的泥石流冲击力信号。原始信号经过低通滤波处理后, 得到真实的泥石流冲击力数据。对数据的初步分析发现, 在同等流速的条件下, 连续流的冲击力要比阵性流的大得多。单就阵性流而言, 泥石流的冲击力最大值也不是随流速而单调增加的, 而应该跟它所携带的固体物质的大小有很密切的关系。最后, 对不同位置的冲击力过程线的分析说明泥石流中中等粒径的石块多集中在龙头和流体表面, 而大粒径的石块应该是在泥石流流体中半悬浮运动。

关键字: 岩土力学; 泥石流; 冲击力; 泥石流流速; 野外测量

中图分类号: TU 43; P 642.23

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 1 - 2813 - 07

FIELD MEASUREMENT OF IMPACT FORCE OF DEBRIS FLOW

HU Kaiheng^{1, 2}, WEI Fangqiang¹, HONG Yong¹, LI Xiaoyu¹

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China;*

2. *State Key Laboratory of Turbulence and Complex Systems, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The impacting manner of debris flow is the most destructive way for artificial constructions in the alluvial fan. Because of difficulties under the field condition, it is hard to directly obtain reliable field data of impact force. Model experiment and investigation of structural damage are the most usual approaches to acquire this kind of data. On August 25, 2004, the channel change of Jiangjia Gully(Dongchuan, Southern China) brought an opportunity to measure the impact force in virtue of new pile foundation work and three sensors with gauge 10 kN. It is the first time to achieve a long-duration hydrograph of impact force with perfect wave profile at different flow depths. The sampling frequency of data acquisition system is 2 kHz, which is enough to capture the impulse caused by large-sized grain in the debris flows. After the raw data are denoised by low-pass filter designed using the combination of Fourier and wavelet transforms, it is found that the continuous flows in the first stage show greater impact than the subsequent surge flows at the similar velocity. As far as the surge flows are concerned, the velocity is not the predominant element which determines extreme impact pressure. It is argued that the collisions of big boulders suspended in the debris flows are responsible for the extreme values. The maximum impact pressure is equal to 2 628.4 kPa. Preliminary analysis of three pressure hydrographs of the same surge at different

收稿日期: 2005 - 08 - 16; **修回日期:** 2005 - 11 - 07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40201009); 国家杰出青年科学基金项目(40025103)

作者简介: 胡凯衡(1975 -), 男, 1997 年毕业于四川大学数学系计算数学专业, 现为助理研究员、博士研究生, 主要从事地理过程的计算机模拟方面的研究工作。E-mail: khhu@imde.ac.cn

flow depths indicates that most of moderate-sized grains in the debris flows concentrate on the front and the upper surface of the fluid. This is of special significance for debris-flow protecting engineering design.

Key words: rock and soil mechanics; debris flow; impact force; debris flow velocity; field measurement

1 引言

泥石流是山区频发的自然灾害,以淘蚀、淤埋、冲击等方式造成危害。其中,冲击方式的破坏作用最为剧烈,往往给泥石流泛滥范围内的房屋、桥梁等造成毁灭性的破坏。比如,成昆铁路利子依达沟1981年7月9日发生的特大泥石流,其强大的冲击力将桥墩自基底沿主河方向朝下游移动了2.1 m,整个直径4.0~5.6 m阶梯变截面圆柱形桥墩裂为3段。当时正在行驶的一辆客车因之跌入泥石流沟中,造成数百人死亡^[1]。山区民房被泥石流摧毁的事例众多,钢筋混凝土框架结构的高楼也常被摧毁。1999年委内瑞拉泥石流灾害曾连续将2座十多层的楼房切掉一半^[2]。所以,泥石流的冲击力既是泥石流危险度评估、建筑物抗泥石流强度评估的重要指标,也是设计各种泥石流防治工程时的重要参量。

可靠的冲击力数据对与泥石流冲击力相关的各种研究来说是必不可少的。获取冲击力数据的一个重要途径是通过模型实验。一些学者^[3~5]对泥石流撞击坝体时的冲击力进行过试验研究,并分析了泥石流冲击力的各种组成。A. Armanini和P. Scotton^[6]通过小型水槽研究了泥石流冲击刚性结构后完全竖直雍起和形成向上游传播的波的2种不同情况,并用动量平衡分析了这2种情况下泥石流的动水压力。虽然室内试验可以得到一些有用的结果,但是一方面试验中相似性原则很难得到满足,另一方面试验中很难反映出大石块的作用。所以得到的数据往往偏小于野外数据。另一种途径是泥石流事件过后根据现场的调查资料所做的估算。如C. A. 弗莱施曼根据小阿拉木图河上一道钢架挡坝被泥石流破坏的情况估计泥石流的冲击力达400 kPa^[7]。G. Zanchetta等^[8]根据调查资料,用3种不同方法估算了1998年5月发生在意大利南部Campania地区的泥石流的流速,然后通过流速得到泥石流冲击力的最大值为400~600 kPa。P. Revellino等^[9]则记录了1997~1999年发生在上述同一地区的泥石流事件中,不同的建筑物在不同速度下的破坏情况。而对野外原型泥石流冲击力的测量虽然能够获取最为可

信的第一手资料,但是由于各种极端条件,比如泥石流暴发的不可预测性、泥石流的巨大破坏力、泥石流流路的摆动、恶劣的地形条件和气象条件等,使得野外冲击力测量开展比较困难。国外关于这方面的研究有日本曾在烧岳山上冲沟泥石流观测站于1975年7月13日和8月23日采用安装在坝上的压痕计和应变仪观测了泥石流冲击力,其最大的测量值达到 3.226×10^4 kPa^[1]。

我国在冲击力的野外测量方面的研究开展得比较早,持续时间比较长,获得的数据也比较丰富。这些测量是由中国科学院东川泥石流观测研究站利用云南蒋家沟这条高频泥石流沟的天然优势采取长期观测、不断尝试和改进的方式完成的。章书成和袁建模1973~1975年在蒋家沟采用电感式冲击力仪实测了泥石流的冲击力^[10]。1975年共测69次,其中龙头正面直接冲击的有35次,量级均在195 kPa以上,这中间又有11次量级在920 kPa以上。其余34次的量级均在195 kPa以下。1982~1985年,章书成、陈精日和叶明富改进了测量仪器,又测得了59个泥石流冲击力过程线^[11],测量值多在1 000 kPa左右,其中最大值超过5 000 kPa(仪器的满量程为5 000 kPa)。但是这些结果都没有给出不同流深位置时的数据。

2003~2004年作者在云南蒋家沟又进行了冲击力的测量研究。2003年因为泥石流沟道太宽,泥石流的主流线偏离设立的混凝土墩台,导致测量测试结果不理想。2004年重新建立冲击力测试装置后于8月25日获得了长历时(近2 h)、大数据量、泥石流过程完整的冲击力数据。本次测量不仅获得了3个不同垂直位置的数据,而且采样频率也高于前几次。这为分析泥石流在短时间内的冲击作用和不同流深的冲击力变化提供了非常宝贵的资料。本文主要报告了这场原型泥石流冲击力测量的情况,并对获得的数据进行初步分析。

2 测量系统

整个测量系统包括冲击力采集装置、安装仪器的固定基台以及辅助装置。

2.1 冲击力采集装置

(1) 泥石流冲击力传感器

传感器是测量的核心设备, 要求传感器既要能够准确测量冲击力变化过程, 又要能够抵抗泥石流强大的冲击力, 不被泥石流破坏。既要有较高的抗过载能力, 又要保证正常情况下传感器的灵敏度。为此采用了一种高频响的硬心圆膜片结构应变式传感器。每个传感器使用前都经成都市计量监督检定测试所用 JJG144-92 标准测力仪检定。传感器的技术参数见表 1, 外形及尺寸见图 1。

表 1 泥石流冲击力传感器技术参数
Table 1 Parameters of impact force sensor

冲击力/kN	电压/mV	分辨率/N	误差/%
10	0.152 6	0.305 2	3

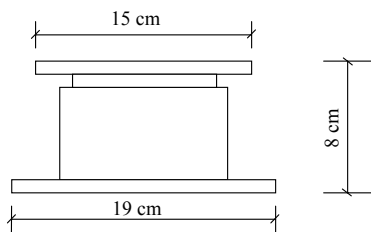


图 1 泥石流冲击力传感器外形示意图

Fig.1 Schematic diagram of debris flow impact sensor

(2) 泥石流冲击力数据采集卡

因实验要求 3~6 台传感器能够同时独立工作, 因此, 要求泥石流冲击力数据采集卡为多通道数据采集卡, 共有 6 个通道(本次测量实际使用了 3 个通道)。采集卡的采样频率在传感器的频响频率之内。

(3) 泥石流数据采集软件

开发了与数据采集卡相适应的多通道数据采集软件, 以采集、存储泥石流冲击力测试数据。

2.2 固定基台

冲击力传感器必须安装在能承受泥石流冲击的固定构件上。以往的测量都是在泥石流沟沟床的主流线位置浇筑钢筋混凝土墩台, 然后将传感器安装在墩台的迎水面。但是混凝土墩台施工难度大, 造价高, 往往因为难于准确估计泥石流的冲击力而需要放大安全系数。而墩台过大的尺寸对场流也产生很大的干扰。当然其最大的缺点还在于天然泥石流沟床难以预料的纵横向变形或冲刷淤埋作用会使得墩台顷刻间失效, 而不能重复使用。这方面已

经有不少失败的教训^[8]。

本次测量的基台是由按五点十字形排列的 5 根钢轨组成的桩台。中间的钢轨为 30B# 的工字钢, 埋深为 1 m, 出露为 3 m。左右两侧为 4 m 的三角型钢材, 全部打入沟床, 并楔在 30B# 工字钢的两侧。前后再嵌入 2 根 3 m 长的 24A# 工字钢, 也全部打入沟床。左右两岸各埋设一锚桩, 2 段较紧的钢索一端固定在锚桩一端系在中间钢轨的顶部。整个桩台按抗 2 000 kPa 冲击力能力设计。30B# 工字钢的槽内从下到上按间隔 30 cm 安装 1 个传感器, 共安装了 3 个。最下面的一个传感器离沟床大约 65 cm, 如图 2, 3 所示。

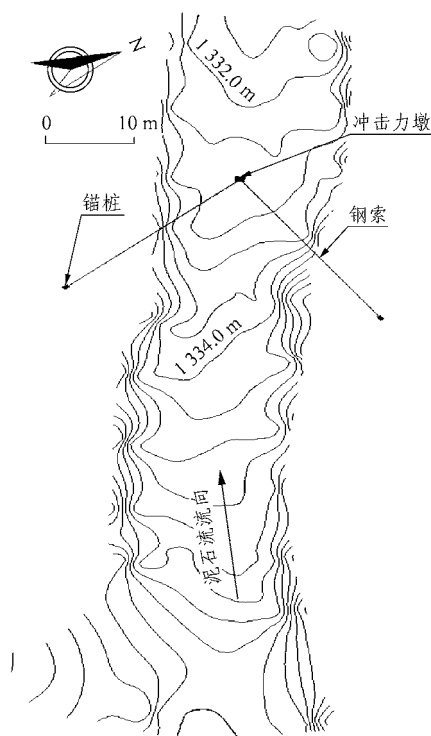


图 2 桩台的平面布置图

Fig.2 Layout of pile foundation work

2.3 辅助装置

(1) 数字摄像机(包括三脚架和 10 盒录像带)2 台和笔记本电脑 1 台, 校对 3 台机器的时钟, 使其时钟完全一致。如果要进行图像解析, 还需准备 2 台照相机和控制照相机同步工作的 1 台电脑, 并调校时钟, 并进行控制测量。

(2) 泥石流取样设备采用中国科学院东川泥石流观测研究站的取样设备, 事先要检测设备, 保障其能正常工作。

(3) 泥位观测采用中国科学院东川泥石流观测



图3 冲击力桩台和传感器

Fig.3 Pile foundation work and sensors

研究站超声波泥位观测仪。

此外，同时还用秒表和双断面控制方法人工测量泥石流的龙头流速。

3 泥石流的基本情况

2004年8月25日的云南蒋家沟泥石流是由短历时的强降雨激发的。根据设在蒋家沟上游蚂蚁坪的雨量点的记录，该次降雨过程从11:24:00开始，到13:14:00结束。其中最大1min雨强达到1.4mm，总降雨量为17.6mm。在冲击力测试装置位置观测到的泥石流从12:40:00开始到15:00:00结束，共49阵。这场泥石流开始为持续25min左右的高黏性连续流，随后是几十米长、大龙头的阵性流，最后变成小股的小阵性流。观测到的最大流深为2.0m，最大流速为11.79m/s，最大流量为840.0m³/s。开始阶段泥石流的密度达2200kg/m³，然后逐渐降到2000kg/m³。整场泥石流从出山口流出后没有归入原来的沟槽，而是在中游山谷间的平地漫流，之后束流经过观测站前一段新形成的沟道后又流入下游的旧沟道。其中泥石流携带的一部分物质铺积在平地上，导致经过测量断面的泥石流流量减少。但因为沟道是新生成的，断面比较小。所以流速并没有相应减小。观测区段的纵剖面 and 横断面见图4。

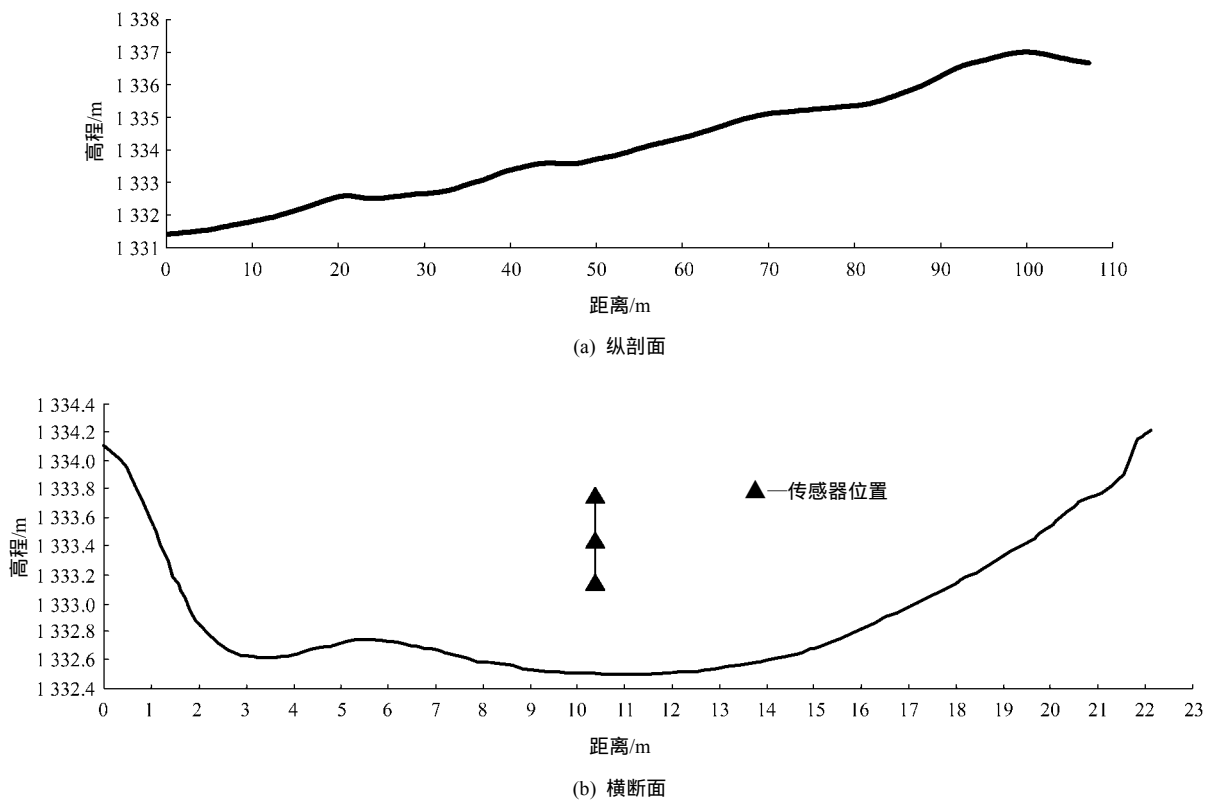


图4 观测的纵剖面 and 横断面

Fig.4 Longitudinal and transverse profiles of the observation channel

4 测量的结果

冲击力的数据从2004年8月25日12:56:00开始记录,一直记录到14:55:00。中间中断了几次,但时间不长。原始数据是传感器的电压信号(mV)。每个通道的采样频率是2 kHz。图5所示为测量到的原始信号,记录的起始时间为13:21:25。图6所示为滤除噪声后的冲击力数据(对应图5中的第3个波形)。

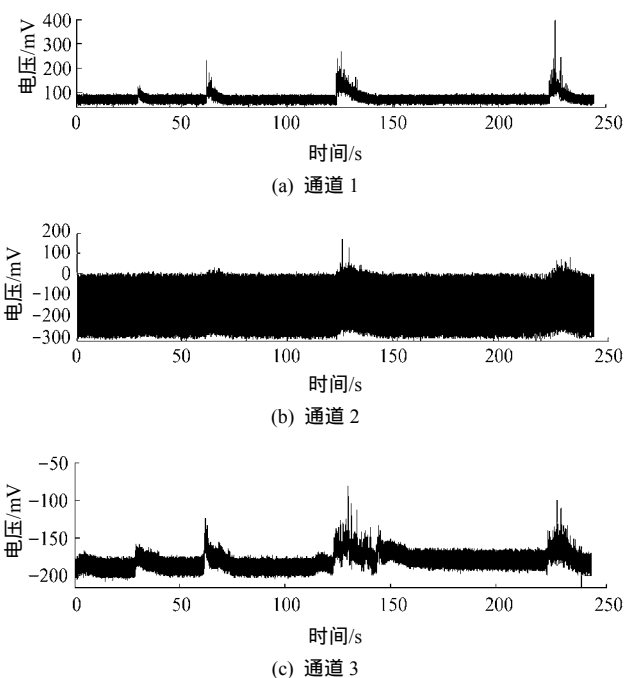


图5 测量到的原始信号

Fig.5 Original measured signal vs. time

由图5可知,每阵泥石流冲击时信号的明显变化,但是因为各种内部和外部的噪声混杂在传感器输出的冲击力原始信号中,所以对原始信号进行去噪处理,恢复实际的泥石流冲击力信号。这些噪声都是高频信号,所以应使用低通滤波。这里采用傅里叶变换和小波变换的方法去除原始数据中的噪声。得到滤波信号之后,再减去每个通道的初始电位,并乘以每个通道的标定值(即1 mV电压的变化对应的作用力)再除以传感器的面积就得到以压力计的冲击力数据。

5 结果的初步分析

表2所示为本次野外测量的数据,包括人工观

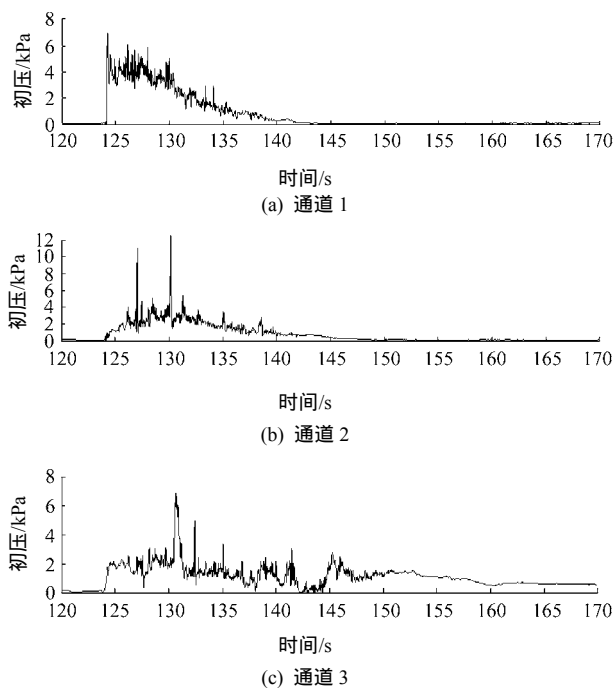


图6 滤除噪声后的冲击力数据(对应图5中的第3个波形)

Fig.6 Filtered impact force vs. time (for the third wave in Fig.5)

测的平均流速。由表2可知,一开始连续流的流速为6.19 m/s,比后续的大部分阵性流都要小。但从传感器记录到的最大冲击力数据而言,连续流的冲击力比同等流速的阵性流要大得多。单就阵性流而言,泥石流的冲击力也不是随流速而单调增加的。比如,速度最大的第24,27阵(分别为11.79和10.62 m/s)测量到的冲击力最大值比第19阵要小1个数量级。仅仅靠泥深和密度上的差异是完全解释不了如此之大的差别的。这只能归咎于泥石流运动过程中随机携带的粒径非常大的石块的直接撞击作用。

图5中显示得非常清楚的4个完整波形,分别对应表2中编号为10~13的4阵泥石流。图6是第3个波形的冲击力过程线。由图6可知,上部的传感器(即通道1)每个波形的前端比较陡直,宽度比下面2个通道要窄。第1个波形3个通道的冲击力都很小,不到30 MPa,第3个波形通道2的记录最大,为126.10 MPa。波形前端陡直说明龙头对上面传感器的冲击是瞬间完成的。而位置靠下的2个传感器波形前端平缓上升说明它们受到的冲击是逐渐增加的,这就意味着龙头的前端是悬空的。上面的传感器的波形比下面的较窄则说明龙头过后,泥位马上降低。所以位置越低的传感器受冲击的时间

表2 泥石流的观测参数和冲击力数据
Table 2 Measured parameters and impact force data

编号	流型	记录时刻 /时:分:秒	平均流速/(m·s ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	冲击力/kPa		
					通道 1	通道 2	通道 3
1	连续流	12: 56: 00	6.19	2.15	206.30	790.80	2 628.40
2	连续流	13: 07: 00	6.19	2.15	138.20	333.40	451.80
3	阵性流	13: 09: 33	6.74	2.20	45.40	50.10	73.30
6	阵性流	13: 14: 26	6.02	2.20	64.20	27.30	43.20
8	阵性流	13: 16: 36	6.87	2.20	343.30	93.40	475.0
9	阵性流	13: 19: 08	6.68	2.04	105.80	156.50	68.400
10	阵性流	13: 21: 57	5.24	2.04	25.40	10.50	12.50
11	阵性流	13: 22: 30	6.36	2.20	61.230	29.200	39.040
12	阵性流	13: 23: 30	6.76	2.20	70.80	126.10	68.80
13	阵性流	13: 25: 12	6.59	2.20	64.70	66.30	54.90
14	阵性流	13: 27: 18	8.40	2.20	131.20	381.40	434.20
15	阵性流	13: 29: 12	6.47	2.20	53.20	205.00	76.90
18	阵性流	13: 34: 35	5.79	2.20	28.50	30.80	34.50
19	阵性流	13: 37: 24	8.40	2.20	1 140.20	588.20	566.60
20	阵性流	13: 39: 48	6.82	2.20	64.00	83.60	101.70
21	阵性流	13: 41: 26	6.59	2.18	46.80	360.50	145.70
23	阵性流	13: 45: 58	7.00	2.18	54.80	138.80	75.60
24	阵性流	13: 46: 48	11.79	2.18	77.54	471.09	178.78
27	阵性流	13: 53: 58	10.62	2.18	80.00	117.90	211.80
28	阵性流	13: 56: 29	6.95	2.18	110.90	135.60	125.00
29	阵性流	13: 59: 30	6.79	2.04	51.80	54.30	69.80
30	阵性流	14: 01: 41	5.99	2.04	31.20	122.30	35.80
31	阵性流	14: 03: 04	5.88	2.04	22.90	40.00	109.4
33	阵性流	14: 05: 41	6.52	2.04	36.30	37.90	75.50
35	阵性流	14: 08: 04	6.11	2.04	31.50	290.10	33.60
36	阵性流	14: 10: 25	5.04	2.04	8.40	130.00	22.80
39	阵性流	14: 12: 09	5.75	2.04	21.90	32.00	44.50
42	阵性流	14: 15: 22	6.58	2.04	36.60	77.40	56.10
44	阵性流	14: 17: 44	4.91	2.04	0.00	62.50	31.40
47	阵性流	14: 21: 42	5.73	1.99	4.80	48.50	80.60

注: 表中的编号对应东川站人工观测数据的编号, 冲击力值为每阵泥石流期间测到的最大值。

也越长。

另外, 通道 1 的波形有许多的尖峰, 通道 2 的要少一些, 而通道 3 更少。以往对泥石流冲击力的研究都认为泥石流的冲击力包括浆体的动压力和石块的撞击力^[5, 7, 8]。也就是说冲击力波形中的尖峰值

都认为是泥石流挟带的石块的撞击造成的, 尖峰越多说明石块也越多, 所以泥石流中大部分的石块应该是位于流体的表面。但是, 这些石块的粒径应该小于传感器的垂直间距(0.3 m)。比这大的石块很可能是半悬浮的, 例如本次测量到最大冲击力的

(2 628.40 kPa)就是第3个传感器(离沟底 0.65 m)。整个泥石流的过程中有冲有淤,同一阵泥石流中也有可能龙头冲、龙尾淤。假如最下面的传感器没有被淤埋,那么它最可能受到大石块的撞击。反之,如果被淤埋了,那么它所受的力主要是桩台传递的力和泥石流的静压力。而这2种力加起来都小于大石块的直接撞击力。这就解释了为什么有些阵次中通道3测量的最大值反而小于上面2个通道的值(表2)。此外,虽然传感器所受的最大冲击压力超过了桩台的设计值。但这个最大的冲击力只是局部的瞬间压力,而不是整个桩台都受到如此大的压力。所以整个桩台所受的冲击力并没有超出它的极限荷载范围,在泥石流结束后只是有点弯曲变形。

6 结论和讨论

(1) 使用新研制的传感器,对野外原型泥石流的冲击力高频采样,获得了完整可靠的冲击力过程线,整个冲击力数据历时长,波形完整。

(2) 首次测量了不同流深的泥石流冲击力,由此可以估计泥石流的流速分布,甚至可以研究原型泥石流的剪切率和剪切力的关系。

(3) 在同等流速的条件下,连续流的冲击力要比阵性流的大得多。单就阵性流而言,泥石流的冲击力也不是随流速而单调增加的,跟泥深、密度以及所携带的固体物质的大小也有很密切的关系,尤其是后者决定了冲击力的极端值。

(4) 通过对其中一段数据的初步分析,发现泥石流中中等粒径的石块多集中在龙头和流体表面。而粒径很大的石块应该是半悬浮运动的。下一步需要借助这些数据研究冲击力和流速的关系,并推导和验证泥石流冲击力的计算公式。

致谢 感谢中国科学院东川泥石流观测研究站为本研究提供了良好的工作条件和相关观测数据!

参考文献(References):

- [1] 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 Jishan, Tian Lianquan, Kang Zhicheng, et al. Debris Flow and Its Comprehensive Control[M]. Beijing: Science Press, 1993.(in Chinese))
- [2] 韦方强,谢洪, Lopez J L, 等.委内瑞拉1999年特大泥石流灾害[J].山地学报,2000,18(6):580-582.(Wei Fangqiang, Xie Hong, Lopez J L, et al. Extraordinarily serious debris flow disasters in Venezuela, 1999[J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(6): 580-582.(in Chinese))
- [3] 三好岩生,鈴木雅一.土石流の衝撃力に関する試験的研究[J].新砂防,1990,43(2):4-13.
- [4] 大同淳之.土石流による衝撃力[A].见:水工学论文集[C].[s.l.]:[s.n.],1994.20-26.
- [5] 魏鸿.泥石流龙头对坝体冲击力的试验研究[J].中国铁道科学,1996,17(3):50-61.(Wei Hong. Experimental study on impact force of debris flow heads[J]. Chinese Railway Science, 1996, 17(3): 50-61.(in Chinese))
- [6] Armanini A, Scotton P. On the dynamic impact of a debris flow on structures[A]. In: Proceedings of XXV Congress of IAHR. Technical Session B, Debris Flows and Landslides[C]. [s.l.]: [s.n.], 1993. 203-210.
- [7] 弗莱施曼 C M. 泥石流[M]. 姚德基译.北京:科学出版社,1986.(Флейшман C M. Debris Flow[M]. Translated by Yao Deji. Beijing: Science Press, 1986.(in Chinese))
- [8] Zanchetta G, Sulpizio R, Pareschi M T, et al. Characteristics of May 5-6, 1998, volcanoclastic debris flows in the Sarno area(Campania, southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 133: 377-393.
- [9] Revellino P, Hungr O, Guadagno F M, et al. Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania Region, Italy[J]. Environmental Geology, 2004, 45(3): 295-311.
- [10] 章书成,袁建模.泥石流冲击力及其测试[A].见:中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第4号(中国泥石流研究专辑)[C].北京:科学出版社,1985.269-274.(Zhang Shucheng, Yuan Jianmo. Impact force of debris flow and its detection[A]. In: Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology of Chinese Academy of Sciences(No.4)[C]. Beijing: Science Press, 1985. 269-274.(in Chinese))
- [11] 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 Jishan, Kang Zhicheng, Tian Lianquan, et al. Observation and Research of Debris Flow in Jiangjia Valley in Yunnan Province[M]. Beijing: Science Press, 1990.(in Chinese))