

# 泥石流源地降雨渗透深度检测仪的研制及应用

李朝安<sup>1,2</sup>, 胡卸文<sup>1</sup>, 王良玮<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 611731)

**摘要:** 目前的泥石流预报模型主要是利用单一降雨信息为基础的统计模型, 预报模糊区间较大, 而泥石流形成的本质是泥石流源地土体在饱水浸润以及地表径流作用下失稳移动, 因而可通过增加泥石流源地降雨后的土壤饱和渗透深度等下界面信息, 为泥石流预报增加物理要素。在介绍土体渗透深度检测仪结构及工作原理基础上, 探讨了将泥石流源地土体渗透深度信息与实时降雨信息相结合预报泥石流发生的应用技术, 并进行了实测试验。实测结果表明, 通过监测源地土体降雨渗透深度, 可以提高预报泥石流发生的准确性, 具有良好的应用前景。

**关键词:** 泥石流; 土壤渗透深度; 检测仪

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2012)02-0168-04

中图分类号: P642.23

## Design of a Rainfall Infiltration Depth Detector and Its application in Debris Flow Source Area

LI Chao-an<sup>1,2</sup>, HU Xie-wen<sup>1</sup>, WANG Liang-wei<sup>2</sup>

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering of Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611731, China)

**Abstract:** A debris flow prediction model is often a statistical model which mainly uses the information of rainfall as the single basis, resulting substantial inaccuracy and indeterminacy in the forecast. Debris flows occur when the soil mass lost its stability owing to the pressure of surface runoff and the lubrication of the infiltrated water. The saturated soil depth by infiltrated rainfall can therefore be used as the lower boundary of debris flow source to enhance the physical elements of debris flow forecast. We described the working principles and the structure design of the detector for saturated soil depth. The technique was then employed to obtain the depth of rainfall saturated soil in the source of the debris flow. In addition to the real-time rainfall data, the saturated soil depth was used to forecast the occurrence of debris flow. According to the field experiment and the instrument observations, the accuracy of debris flow forecasting can be improved by monitoring the rainfall infiltration depth in soil of the debris flow source.

**Keywords:** debris flow; infiltration depth of rainfall; detector

泥石流是山区常见的一种自然灾害之一, 具有极大的破坏力。近年来, 随着全球环境的恶化, 泥石流灾害频发, 对山区人类生产与生活极具威胁性。泥石流暴发前如能及时抓住其前兆信息, 进行泥石流预报, 可争取防灾减灾时间, 变被动防治为主动防治, 减少灾害损失。

国内泥石流的预警研究是从 20 世纪 50 年代开始, 经过数十年的防灾实践, 至今取得很大发展<sup>[1]</sup>, 提出了利用降雨条件进行暴雨泥石流预报的原理和方法<sup>[2]</sup>, 并在泥石流成灾信息采集与传输技

术上取得了较好的成果, 实现了灾害信息采集与传输的实时化和网络化<sup>[3]</sup>。但是由于近年来泥石流形成机理方面研究未有突破, 目前泥石流预报技术还主要是建立以降雨信息的统计基础上, 缺乏物理模型的支撑, 预报模糊区间较大, 有必要增加泥石流下界面物理预报要素。降雨型泥石流形成过程系指源地泥石流的起动过程, 是降雨、地形地貌、固体松散堆积物等因素共同作用的结果, 对于一段时期的特定泥石流沟, 其地形是固定不变的, 固体物源的稳定性则与降雨条件密切相关, 因而泥石流的发生可以看作是由降

收稿日期: 2011-08-02

修回日期: 2011-10-19

资助项目: 中国铁路工程总公司科学技术发展项目“西南山区铁路沿线泥石流灾害预警研究”(2002J19); 科技部科研院所专项技术发展项目“山区隧道洞口段滑坡(地下水)监测预警研究”(2008EG123205)

作者简介: 李朝安(1978—), 男, 土家族, 贵州省印江县人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: lichaoan625@126.com。

雨因素作用于固体物源因素而形成的,其相互组合关系可以作为泥石流的预报基础。而泥石流的形成本质是泥石流源地土体在降雨入渗浸泡作用下,土体物理力学强度降低,以及地表径流作用下失稳移动,因此可在原降雨预报模型中增加源地土体降雨渗透深度预报要素。泥石流源地降雨渗透深度检测仪正是基于该应用要求而进行研制开发的,其应用必将使泥石流预报技术提升到一个新的高度。

## 1 土体渗透深度检测仪结构及原理

### 1.1 土壤渗透深度检测原理

采用单一的降雨信息预报泥石流发生只能得到模糊区间较大的结果,其问题核心是未知地表下界面的水分状态,自然降雨过程又是随机的,实验室只能得到理想化的降雨过程与土壤水分状态的关系;与洪水不同,泥石流发生的最大差异在于固体物质的贡献,无论是边坡冲蚀、河道冲蚀,还是大规模的块体运动等土壤固体物质进入沟床汇流的过程,均与土体的物理力学状态有关,而土壤抗剪、抗冲蚀强度等物理力学性质与土体含水量密切相关,因而可表征为土体含水量及其随土体深度的分布,故可简化为土体的饱和和含水层的深度和位置,对野外土体来说,降雨入渗深度在一定程度上反映了源地土体饱和深度(田间持水量)。

对特定土体,任意两点间的电导率与该两点间的土壤的含水量有关,电阻越低,反映其含水量越高,沿深度方向的土体的电阻值分布规律,也就表示了土壤不同深度的水分分布状态。当其间电阻值达到最小值,应当表示其间土壤处于饱和状态。因此可设计一种传感器,在降雨期间监测其土体内两点间的电阻值相对变化,就可得知土体实时渗透深度,为泥石流预报提供依据。针对某一种确定的土壤而言,还可以通过标定的方法,大致确定极间电阻与土壤含水量的关系曲线。

### 1.2 土壤渗透深度检测仪结构及电路设计

土壤渗透深度检测仪正是基于上述原理和设想而研发的泥石流前兆信息检测仪,该仪器采用与电导法土壤含水量计相同原理,通过测量土壤的电导率反演土壤的含水量。其与单点的土壤电导率计不同,土壤渗透深度检测仪土壤渗透深度传感器是在一个绝缘长杆上等距离布设电极(图1),相邻电极间的电阻值即表示了其间土壤的含水分高低,其电阻值越低,则含水量越大。

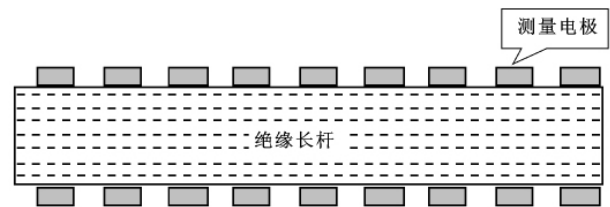


图1 土壤渗透深度传感器结构示意图

该传感器具有以下特点:(1)考虑到现场的安装条件,将仪器分成两部分,传感器部分和测量电路相分离。(2)根据1983年和1984年在蒋家沟流域暴发23次泥石流观测资料,雨季土层最大浸润深度为80 cm<sup>[4]</sup>,因而设计传感器长度为100 cm。(3)极间距离40 mm,为避免现场土壤砾石的影响,采用面电极,宽度20 mm。(4)为避免沿检测杆面快速下渗,除对安装角度有所要求外,电极将固定在测量杆的凹隙部位。(5)除电极材料及表面钝化处理之外,传感器平时不通电,快速扫描测量(<0.2 s/路),同时正负极交叉采样,将电化学腐蚀的影响降到最低。(6)采用高级CMOS低导通电阻、超低漏电流模拟开关。(7)校正电阻及土壤温度同时检测,保证数据的可靠度。

土壤渗透深度检测仪既可单独运行,也可与雨量计联动工作,为泥石流预报提供信息数据,该仪器主要与降雨雨量传感器联动工作。泥石流源地土壤渗透深度检测仪与实时降雨雨量计组合成泥石流形成区检测终端,该终端与远方的无线接收机和计算机中心控制系统构成无线网络泥石流灾害监测预报系统。

### 1.3 土壤渗透深度检测控制流程

检测终端采用了一种无降雨不主动发报数据的方式,此方式与人类观察降雨的方式相似,即,“下雨了一报”;“还在下一报”和“雨停了一报”的“3-STEP”方式。为了便于及时掌握形成区状态,终端每间隔一定时间要发出短于100 ms的联络信号,检测中心可在其后的5 s内建立与终端的无线联络。这样,既便于系统的实时性,又实现了检测终端的低耗电。硬软件设计融合了事件触发的观念,在无降雨的时段里,检测终端处于休眠状态,终端内仅有时钟管理电路运行,一旦出现降雨或时钟管理事件,则将终端唤醒启动。

## 2 土体渗透深度检测仪的应用

### 2.1 基于源地土体降雨渗透深度的暴雨型泥石流预报原理

暴雨泥石流形成过程绝大部分均是源地土体在

降雨过程中首先失稳进入沟道中,然后在后继降雨和地表径流作用下形成沟道泥石流。在泥石流形成之前,源地碎屑固体物质一般处于非饱和状态,随着降雨时间的延续,雨水的下渗,源地土体的含水量由非饱和变为饱和,甚至过饱和,在雨水的浸润和淋滤作用下,土壤特性发生变化使内摩擦角 $\varphi$ 和内黏聚力 $C$ 下降,加之土体的自重的增加,在合适的沟床坡降和土体物理力学状态的条件 下失稳启动,汇入沟道形成泥石流。因而泥石流的形成与源地土体的降雨渗透深度及降雨实时雨型和降雨强度有关。因此可通过土体渗透深度监测及降雨监测实时数据,预报泥石流的发生。

源地土体失稳启动的降雨渗透临界土层厚度取决于泥石流源地地面坡度、土层状况和充水情况,当源地降雨渗透土层厚度超过临界土层厚度时均可暴发泥石流。根据在 1983 和 1984 年内蒋家沟流域暴发 23 次泥石流的观测资料<sup>[4]</sup>,各次暴发期日降雨量变化于 8.6 ~ 105.7 mm 之间,最大日降雨量饱和土层厚度为 33 ~ 58 cm。从大量调查资料表明,我国亚热带山区泥石流沟饱和启动厚度约 2 ~ 5 cm,切沟沟床土层启动临界饱和厚度约 0.2 ~ 1.0 m,冲沟沟床土层临界饱和启动厚度 0.5 ~ 2 m<sup>[5]</sup>;对于均匀无明显软弱结构面的固体物源饱和和临界启动渗透深度存在以下关系<sup>[6]</sup>:

$$Z = \frac{\gamma_w Z_1 \cos\alpha \tan\varphi + c - \gamma'_s Z_1 \tan\alpha - \gamma_w Z_1 \sin\alpha}{\gamma_w \tan\alpha + \gamma'_s \sin\alpha - \gamma'_s \cos\alpha \tan\varphi} \quad (1)$$

式中: $\gamma_w$ ——水的容重; $\gamma'_s$ ——源地土体饱和容重; $Z_1$ ——地表径流深; $\alpha$ ——斜坡坡度; $c$ ——饱和土体黏聚力; $\varphi$ ——饱和土体内摩擦角。

在泥石流散流坡源地坡面上,如果在山区,则一般均有植被,斜坡面上形成地表径流很小;如果在无植被的诸如矿渣、人工弃土之类的斜坡面,则在地表径流的作用下往往形成纹沟、细沟,不会形成坡面漫流,因此地表径流深度 $Z_1$ 可取零。降雨入渗深度饱和带内形成的渗流力相当小,因此(1)式临界饱和渗透深度计算可简化为:

$$Z = \frac{c}{\gamma'_s \sin\alpha - \gamma'_s \cos\alpha \tan\varphi} \quad (2)$$

根据(2)式可知,泥石流源地土体启动深度与坡度成反比,与黏聚力 $C$ ,内摩擦角 $\varphi$ 成正比。这与定性分析结果是一致的。雨水下渗与植被、土体性质、降雨过程特征有关,而且泥石流源地斜坡坡度,土体性质差异性也较大,因此泥石流源地降雨入渗是一个非常复杂的问题,临界饱和和渗透深度计算公式需要对泥石流源地进行详细的调查研究才能应用。在实践

应用中应详细调查泥石流物源分布和特征,界定有效固体物源,针对有效固体物源土体的性质、坡度,选择具有代表性的物源点,确定代表性的物源点斜坡坡度和土体 $C$ 、 $\varphi$ 值,计算泥石流启动临界深度临界值,根据临界值确定泥石流降雨入渗深度多级预报阈值。但是从蒋家沟源地泥石流启动试验及船房沟泥石流现场观测试验来看,泥石流启动形成与临界深度的关系很复杂,对于同一条泥石流沟和物源点也是有差别的,目前这方面的研究还有待深入。根据研究的假设条件,仅对斜坡坡面物源补给为主的泥石流源地土体启动适用,而对以滑坡和崩塌为主要物源的源地物源启动不适用。

通过对成昆铁路甘洛试验区,天水水土保持科学试验站等各试验区发生与未发生泥石流的观测资料分析得到泥石流发生的降雨条件函数<sup>[2]</sup>:

$$R = K \left( \frac{H_{24}}{H_{24(D)}} + \frac{H_1}{H_{1(D)}} + \frac{H_{1/6}}{H_{1/6(D)}} \right) \quad (3)$$

式中: $K$ ——前期降雨量修正系数, $K > 1$ ;无前期降雨时 $K = 1$ ; $H_{24}$ ——24 h 最大降雨量; $H_{24(D)}$ ——该地区可能发生泥石流的 24 h 限界雨量; $H_1$ ——1 h 最大降雨量; $H_{1(D)}$ ——该地区可能发生泥石流的 1 h 限界雨量; $H_{1/6}$ ——10 min 最大降雨量; $H_{1/6(D)}$ ——该地区可能发生泥石流的 10 min 限界雨量。因此,可通过泥石流源地固体物质堆积体在降雨过程中的饱和层厚度变化以及实时降雨量结合起来进行泥石流预报。

## 2.2 应用方法

当源地土体降雨渗透深度达到临界深度后,后继降雨强度能够满足泥石流启动条件则物源启动形成泥石流,如果降雨强度不够(长历时细雨),则也形不成泥石流;反之,如果降雨强度够而渗透深度未达到临界深度(如短历时强暴雨),土体不会失稳启动,同样不能形成泥石流。降雨因素与固体物源因素的相互组合关系可以作为泥石流的预报基础。根据这几年的现场试验结果总结,其应用方法为:(1)对特定的泥石流沟进行详细地质调查,查明泥石流的地形地貌特征、降雨条件、物源条件,估算泥石流一次可能的最大流速、流量、冲出量和淤积量。(2)查明泥石流源地固体物源的特征,选取具有典型代表性的泥石流固体物源点埋设实时土壤降雨渗透检测仪,该点要求能代表 50% 物源点土体特征,根据物源点斜坡坡度及土体物理力学特性设置土体临界降雨渗透深度。(3)土壤渗透检测仪传感器埋设之前应在泥石流源地壤内进行标定。(4)调查和收集当地的降雨资料,确定 24 h,1 h,10 min 限界雨量,设置泥石流发生的

临界降雨量。(5) 调查泥石流沟道和铁路桥涵的过流能力,评价泥石流的成灾可能性及既有铁路的抗灾能力,确定预报阈值。(6) 为防止泥石流漏报或仪器损坏导致的漏报,同一泥石流流域应设2~3个以上的监测点。(7) 监测终端将实时监测的土壤渗透深度信息、降雨信息实时无线传输到计算机控制中心,控制中心根据接收到信息及两者的组合关系按照预设预报阈值进行泥石流预报。

### 3 实例验证

土壤渗透深度监测仪2004年7月起在成都铁路局管内桐子林养路工区船房沟泥石流进行了现场试验,到目前为止已连续观测了7a,目前已成功预报了多次小规模泥石流。

船房沟泥石流流域内谷坡陡峻,地质构造活跃,山体结构破碎,局部暴雨经常发生,并有采石场每天向沟中倾倒入大量的弃土,具有丰富的固体物质,属于泥石流灾害多发地区,是泥石流试验观测的最优点。现场试验布置两台无线远程检测终端机、一台中心监控计算机。第1台无线远程监测终端机配接遥测翻斗雨量计和土壤渗透深度计安装在渣场空压机房附近边坡土体内,该点位于船房沟泥石流源地,海拔1540m,监测实时降雨量及坡面土壤的雨水渗透深度数据采集并无线传输。第2台无线远程监测终端机配接遥测翻斗雨量计和水位计各一台。安装在王家沟出山口的铁路小桥涵洞旁边,海拔1030m。王家沟流域面积0.22km<sup>2</sup>,监测其流域雨量及汇流过程状态。中心监控计算机安装在新盐边县城,距远程监测终端机直线距离约5km。监测终端机采用蓄电池供电,在试验期间内,系统正常工作,不需充电。采集的数据用无线方式传送到终端及计算机系统,数据传送正常。

现场实测试验分别于2004年9月6日和9月21日观测到船房沟两场小规模泥石流。

对9月6日上午的实时降雨的土壤渗透深度数据进行分析可知,在10:00点左右,其土壤饱和浸润深度约达0.5m,此时一部分土体开始启动,但由于后继降雨持续时间不长,因此只形成了小规模泥石流,当场累积降雨量为55.1mm;对9月20日晚至凌晨的实时降雨和土壤渗透深度数据分析可知,当场累计降雨量只有21.6mm,因前期降雨,土体饱和渗透

深度已达到0.80m左右,土体渗透深度及饱和度(导电率)无变化,该场降雨量远没有9月6日降雨量大,但其泥石流规模比9月6日大,激发降雨量明显小很多。对9月6日和9月21日在降雨过程中实时土壤渗透深度数据以及累计降雨量对比分析可看出,土壤渗透深度对泥石流的预报起到了相当大的作用,现场观测结果跟预报模型理论分析相吻合,该预报模型是可行的。

### 4 结论

泥石流源地土壤渗透检测仪在降雨过程中可定性、半定量地实时检测源地土体的含水量及其随深度的分布状态,获取泥石流形成区雨水渗入土壤的过程及土壤水分分布状态。降雨渗透临界土体厚度结合实时降雨信息,就可为预报泥石流灾害提供科学依据。

土壤渗透检测仪与降雨雨量计结合成泥石流源地检测终端,与接收终端及中心控制计算机构成泥石流源地信息监测系统,满足了数据的实时采集与传输及预报功能,并对该系统进行了现场试验观测。从现场试验数据表明,利用泥石流源地土体降雨入渗饱和深度来预测泥石流发生是可行的。该技术弥补了以降雨信息为主的泥石流单因素预报模型的不足,增加了泥石流发生的地表土壤水分信息等下界面信息,提高了泥石流的预报准确度。但是从蒋家沟源地泥石流启动试验及船房沟泥石流现场观测试验来看,泥石流启动形成与临界深度的关系很复杂,目前这方面的工作还有待进一步深入研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] 谭炳炎. 二十世纪中国铁路沿线泥石流防治理论与实践[J]. 铁道工程学报, 2005(5): 369-372.
- [2] 谭炳炎, 段爱英. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(2): 43-52.
- [3] 李朝安, 魏鸿. 西南地区泥石流灾害及防灾预警[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(3): 34-37.
- [4] 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: 16-31.
- [5] 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: 81-89.
- [6] 李朝安. 土力类泥石流源地土体启动预报模型初步研究[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2004.