泥石流作用下路基易损性模型试验研究

朱志鹏[1]，钱德玲[1]，叶潇潇[1]，杨 罡[1]，谢 乐[1]，刘 杰[2]

(1.合肥工业大学 土木与水利工程学院，安徽 合肥 230009；
2.新疆维吾尔自治区 交通规划勘察设计研究院，新疆 乌鲁木齐 830001)

摘 要：[目的] 采用模型试验研究泥石流对路基的冲淤作用规律，为泥石流作用下路基易损性的研究提供一定依据。[方法] 以中巴公路 K1561 泥石流沟谷为研究原型，应用相似试验原理建立模型。根据原型沟谷设置试验条件，得到原型沟谷模型试验数据；然后又采用控制变量法进行 6 个因素共 25 组模型试验，以研究不同因素在泥石流作用下对公路路基的冲淤作用规律。[结果] 原型沟谷模型试验数据与现场调查结果相吻合；流通区坡度、路基与泥石流出山口之间的距离、一次泥石流冲出物最大方量、泥石流重度和泥石流爆发频率 5 个因素对易损性的影响较为明显，泥石流主沟道与路基之间的夹角对路基易损性的影响不明显。[结论] 5 个因素对路基易损性有重要影响，可作为泥石流易损性评价中的重要评价指标。

关键词：泥石流；模型试验；易损性；相似比；控制变量法

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)03-0086-08 **中图分类号**：P642.23

文献参数：朱志鹏，钱德玲，叶潇潇，等. 泥石流作用下路基易损性模型试验研究[J]. 水土保持通报，2018，38(3)：86-93. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.014. Zhu Zhipeng, Qian Deling, Ye Xiaoxiao, et al. Model test of subgrade vulnerability under debris flow[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 86-93.

Model Test of Subgrade Vulnerability Under Debris Flow

ZHU Zhipeng[1], QIAN Deling[1], YE Xiaoxiao[1], YANG Gang[1], XIE Le[1], LIU Jie[2]

(1. *College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui* 230009, *China*;
2. *Xinjiang Transportation Planning Surveying and Design Institute, Urumqi, Xinjiang* 830001, *China*)

Abstract: [Objective] To provide a basis for studying the vulnerability of subgrade under the action of debris flow, model test is used to research the scouring and silting mechanism of the debris flow on the subgrade. [Methods] The debris flow gully in China-Pakistan K1561 highway was selected as the research prototype. A similar test model of the debris flow gully was built. Test data was obtained from the simulation of the prototype valley. The scouring and silting mechanism of highway subgrade was studied by control variate method, based on the model tests performed on 6 factors of 25 groups. [Results] The results of prototype gully model test were in good agreement with the field investigation results. Five factors, namely circulation area slope, the distance between the subgrade and the mountain pass, the maximum amount, the severity and the frequency of debris flow, showed obvious impacts on the subgrade vulnerability, while the influence of the angle between the main channel and the subgrade was not significant. [Conclusion] Five factors have important influences on subgrade vulnerability, and can be used as important evaluation indexes for debris flow vulnerability assessment.

Keywords: **debris flow; model test; vulnerability; similitude ratio; control variate method**

易损性是乘灾体属性的表现，是灾害作用的下垫面[1]。研究泥石流作用下路基的易损性，是为了尽可能的规避由于泥石流灾害带来的区域内的所有人、财、物的损失。中巴公路地处昆仑山北麓，沿线是冰

收稿日期：2017-09-25 **修回日期**：2017-12-27
资助项目：国家自然科学基金项目“基于液化地基大变形桩基—高层建筑结构体系动力响应的研究”(51378168)；中央高校基本科研业务费专项资金项目“高速列车冲击荷载下隧道共振及其减震降噪的研究”(2012HGZY0024)
第一作者：朱志鹏(1995—)，男(汉族)，安徽省宿州市人，硕士研究生，研究方向为岩土工程。E-mail：1475046336@qq.com。
通讯作者：钱德玲(1956—)，女(汉族)，安徽省合肥市人，博士，教授，博士生导师，从事地基—基础—上部结构体系动力相互作用、地铁及隧道工程、工程抗震、基坑工程及泥石流相关问题。E-mail：dlqian@sina.com。

川型泥石流和暴雨型泥石流的主要发育区,特别是奥依塔克—布伦口段约 70 km 线路,是全线泥石流的重灾区。因泥石流灾害该路段年平均阻断交通达数 10 d 之久,交通的阻断严重制约了当地经济发展。同时,研究区因地处高原,气候环境恶劣,泥石流现象及其灾害很少有过专门调查研究和记载工作,因此可以说学术界对研究区的泥石流的灾害特点知之甚少。

采用相似模型的目的是要用模型试验的方法替代原型试验,使试验变得容易进行,并且试验结果可以推广到原来的现象中去[2]。模型试验可以严格控制试验对象的主要参数不受外界条件的限制,从而得到准确的结果。王永强等[3]利用模型试验研究了矿山排土场滑坡泥石流的危害;陈洪凯等[4]以天山公路代表性沟谷泥石流为原型,建立了室内试验模型,模拟了沟谷泥石流的运动过程;王协康等[5]提出了不同类别泥石流模型试验的相似条件;胡明鉴等[6]通过大型人工降雨滑坡泥石流试验和小型模型试验,研究了滑坡土体转化成泥石流的全过程。目前模型试验在土木工程中应用虽然较多,但是针对泥石流破坏路基的模型试验还非常少见,所以本文利用模型试验对泥石流作用下对路基的冲淤作用进行研究就显得十分重要。影响泥石流对公路路基的冲淤作用的因素有很多,根据相关学者的研究[7-10],选定 6 个因素进行研究,即路基与泥石流主沟道之间的夹角、流通区坡度、路基与泥石流出山口之间的距离、一次泥石流冲出物最大方量、泥石流重度和泥石流爆发频率 6 个因素。

本试验拟基于原型沟谷的原始数据,通过建立室内试验模型,探究选定的 6 个因素对路基易损性的不同影响,从而初步确定泥石流综合评价指标,保证公路改建工程的顺利进行和安全运营。

1　试验设计

1.1　变量控制

泥石流对路基的影响关键在于达到路基时的流速,这关系对路基的冲击、冲刷等作用,因此保证泥石流到达路基时的拟定流速至关重要,查阅泥石流灾害防治工程设计规范得到泥石流的流速公式,见公式(1):

$$V_c=\frac{1}{\sqrt{\gamma_H\varphi+1}}\cdot\frac{1}{n}\cdot H_c^{2/3}\cdot I_x^{1/2} \tag{1}$$

式中:γ_H——固体物质重度(N/m^3);H_c——计算断面的平均泥深(m);I_x——泥石流水力坡度;n——泥石流沟床的糙率系数;φ——泥石流泥沙修正系数。

由公式(1)可知,泥石流流速与泥石流水力坡度、泥石流沟床粗糙率系数、泥石流断面平均泥深、泥石流泥沙修正系数、泥石流固体物质重度等因素有关,因为每组试验用的装置不变且泥石流物料均选自新疆泥石流沟谷现场,所以泥石流到达路基时的流速可以保证一致,使得试验结果更具有参考价值。

1.2　相似比确定

本试验采用选定物理法则方式确定相似比,即先选定支配原型现象的物理法则,然后直接导出相似法则,再根据某些已知条件确定相似比[11]。运用该方法的过程中,需要找出那些在原型和模型上取得一致的物理定律,但适用的物理定律不一定都是主要的,因此要突出主要矛盾,剔除次要定律。

本次试验需要考虑的物理定律是胡克弹性定律、牛顿惯性定律和重力法则。如下:

(1) 胡克弹性定律:

$$F_1=\sigma l^2=El^2\varepsilon \tag{2}$$

式中:F_1——胡克弹性力;σ——应力;l——长度;E——弹性模量;ε——应变。它们均为代表值。

(2) 牛顿惯性定律:

$$F_2=ma=\rho\frac{l^4}{t^2} \tag{3}$$

式中:F_2——牛顿惯性力;m——质量;a——加速度;ρ——密度;l——长度;t——时间。它们均为代表值。

(3) 重力法则:

$$F_3=\rho g l^3 \tag{4}$$

式中:F_3——重力;ρ——密度;g——重力加速度;l——长度。它们均为代表值。

上述 3 个物理法则既支配原型现象又支配模型现象,故而对模型来说,公式同样成立,即:

$$F_1'=E'l'^2\varepsilon' \tag{5}$$

$$F_2'=\rho'\frac{l'^4}{t'^2} \tag{6}$$

$$F_3'=\rho' g' l'^3 \tag{7}$$

式中带"′"号的都是对应于模型的数值,亦均为代表值。根据几何相似 $\varepsilon=\varepsilon'$ 求得力的相似比为:

$$F^*=\frac{F_1}{F_1'}=\frac{F_2}{F_2'}=\frac{F_3}{F_3'} \tag{8}$$

式中带 * 的值为相似比。将式(2)—(4)代入式(8)中可得:

$$F^*=E^* l^{*2}=\frac{\rho^* l^{*4}}{t^{*2}}=\rho^* g^* l^{*3} \tag{9}$$

这里假定模型与原型材料相同,且处于同一重力场,即:

$$E^*=\rho^*=g^*=1 \tag{10}$$

由此可得到相似比之间的关系：$l^* = t^* = t^{*2} = 1$，这是一个不相容条件。因此需要放宽相似法则[2]，即找出次要作用的物理法则，把它从相似法则中除去。牛顿惯性定律和重力法则在泥石流的运动起着重要作用，相比较之下胡克弹性定律在泥石流运动过程中的影响小，故选取牛顿惯性定律和重力法则作为支配原型的物理法则。试验装置选取的比例为1∶200，由此得到各物理量的相似比见表1。

表1 试验模型的相似比

物理量	表达式	相似比
长度	l^*	200
密度	ρ^*	1
面积	$s^* = l^{*2}$	40 000
时间	$t^* = (l^*/a^*)^{1/2}$	14.14
重力加速度	g^*	1
重度	$\gamma^* = \rho^* g^*$	1
力	$F^* = \rho^* g^* l^{*3}$	8 000 000
冲击力	$P^* = \rho^* g^* l^*$	200

1.3 物理模型

本次模型试验所研究的泥石流沟谷位于喀喇昆仑公路K1561＋952—K1562＋306处。该泥石流属于冲淤变动型沟谷泥石流，整体呈Y字形，有2条较大的支沟，沟谷呈“V”形，宽度为40～70 m；沟床纵坡10°～15°，横坡3°～6.5°，多有急弯；两侧山体坡度为60°～70°，山体强风化，为灰色—灰绿色砂岩，夹有少量的红褐色泥岩；山体顶部覆盖层为盖孜河冲积卵漂石，剥蚀严重，坡脚堆积为卵石、碎石及砾砂。该泥石流为稀性泥石流，现在该泥石流沟正处于发育期，一旦降雨过大时，便会发生较大的泥石流，危害程度严重。

试验过程中，取几何相似比为1∶200。试验模型由泥石流供给箱、流通槽、堆积板和路基模型构成。泥石流供给箱尺寸为0.5 m×0.33 m×0.5 m，最大容积82.5 L，泥石流的供给可由闸板开关控制；流通槽有效长度2.4 m，宽0.35 m，可调节坡度，调节范围为10°～30°，流通槽底部平铺一层水泥砂浆模拟摩擦阻力；堆积板长、宽均为2.5 m，坡度可调节；路基模型高8 cm，边坡长14.4 cm，坡度为1∶1.5，上下排列的2个压力传感器被放置在路基模型正中间，压力传感器连接配套的动态信号采集仪进行数据采集。

1.4 试验物料及设备

本次模型试验的物料取自中巴公路K1561＋952—K1562＋306处的泥石流堆积区，待物料运到实验室后，将其风干处理并进行筛分，得知该泥石流堆积物的级配很宽，含有黏粒、粉粒、砂砾、卵石和砾石等组分。计算可得泥石流堆积物颗粒的曲率系数C_c＝1.41，不均匀系数C_u＝6.40，由此可知该泥石流堆积物的级配良好。参考陈洪凯等[4]对天山公路K630泥石流沟的试验研究，取样时剔除粒径大于40 mm的粗颗粒。

本次试验采用适于室内模型试验的电阻式压力传感器，其灵敏度分别为1.382和1.434 mV/(MPa·V)，量程为50 kPa，具有灵敏度高、寿命长、结构简单、频响特性好并且测量范围广等特点，适用于动态测试。采用配套的东华动态信号采集仪进行数据采集，共有16个通道，本次试验使用2个通道，分别与2个传感器连接。其他设备有搅拌设备、提升装置、测角器、电子秤、卷尺等。

1.5 试验条件设计

从沟谷纵断面图中可以看出主沟纵坡约为20°，堆积区坡度约为2°，所以流通槽和堆积板的坡度分别设置为20°和2°。从新疆公路部门的养护资料得知，该地区泥石流的重度在1.8～2.1 t/m^{3}之间，据此设置泥石流重度为2.0 t/m^{3}左右，泥石流总量在14 L左右(认为泥石流总量与泥石流冲出量近似相等)。从泥石流重度和粒径级配判断泥石流为黏性，考虑到黏性泥石流具有明显的铺床作用，也为了使泥石流总量与泥石流冲出量近似相等，故在试验开始前均补给与试验相同的泥石流让其完成自然铺床过程[12]。根据路基距泥石流沟口的距离由相似比计算得路基模型距流通槽出口的距离为0.9 m。

1.6 测量内容

泥石流对路基的作用主要是冲击和淤埋，因此试验除了需要采集冲击力数据之外，还需要测量泥石流体对路基坡顶和坡脚的淤埋长度、沿边坡的淤积厚度及对路基的淤埋面积。

2 试验过程

(1) 第1步。配置所需泥石流体，放置在供给箱中。为了防止泥石流体出现离析沉积现象，静置期间使用搅拌设备进行匀速搅拌。

(2) 第2步。根据要研究的因素的不同，采用控制变量法设置每组模型的试验参数。

①原型沟谷模型试验。试验参数设置：路基与流通槽夹角90°，泥石流重度2.0 t/m^3，流通槽坡度20°，堆积区坡度2°，泥石流总量14 L，路基距流通槽出口0.9 m。

②路基与泥石流主沟道之间的夹角模型试验。试验参数设置:其他参数同原型沟谷模型试验参数设置,路基与流通槽主轴线的夹角依次设置为 90°,75°,60°,45°,30°。

③流通区坡度模型试验。试验参数设置:其他参数同原型沟谷模型试验参数设置,流通槽坡度依次设置为 10°,15°,20°,25°。

④路基与泥石流出山口之间的距离模型试验。试验参数设置:其他参数同原型沟谷模型试验参数设置,路基至泥石流流通槽出口的距离依次设置为0.3,0.6,0.9,1.2,1.5 m。

⑤一次泥石流冲出物最大方量模型试验。试验参数设置:其他参数同原型沟谷模型试验参数设置,设置泥石流总量依次设置为 6,10,14,18 L。

⑥泥石流重度模型试验。试验参数设置:其他参数同原型沟谷模型试验参数设置,泥石流重度依次设置为 1.4,1.6,1.8,2.0,2.2 t/m^3。

⑦泥石流爆发频率模型试验。在泥石流首次冲击路基完成的基础上进行第 2 次冲击试验。试验参数设置:参数设置同原型沟谷模型试验参数设置。

(3) 第 3 步。控制供给箱中的泥石流体的流量,开启闸板开关,使泥石流体流入堆积板。

(4) 第 4 步。记录路基的淤埋情况及动态采集仪所采集的数据,并进行试验结果分析。

3　结果与分析

3.1　原型沟谷模型试验(Ⅰ)

试验结束,泥石流停止流动时,试验量得的淤埋数据及通过相似比计算所得的原型预测数据见表 2。

表 2　试验测量数据及原型预测数据

测量项目	试验测量值	原型预测值
路基上部淤埋长度/cm	24.0	4 800
路基下部淤埋长度/cm	154.5	30 900
泥石流体沿斜坡爬高高度/cm	11.7	2 340
泥石流堆积物最高部分到路基顶面距离/cm	2.6	5 200
淤积厚度/cm	6.4	1 280
淤积面积/cm^2	1 047.2	41 888 000

从表 2 可以看出,路基淤埋情况比较严重,路基坡脚处的最大淤埋长度达 154.5 cm,泥石流体最高部分距路基表面仅有 2.6 cm,淤埋厚度达 6.4 cm,淤积面积达 1 047.20 cm^2,对路基造成了大面积的淤埋。路基表面上散落着冲起爬高的泥浆与部分固体颗粒,大的粗颗粒并没有越过路基。这些粗颗粒大部分集中在堆积物的表面,堆积物近似呈梯形分布。传感器 1 并未受到淤埋,传感器 2 局部被泥石流体淤埋,但仍可以正常使用。

冲击力数据由动态采集仪采集,传感器 1 采集路基上部受到的冲击力大小,传感器 2 采集路基下部受到的冲击力大小。以 0.05 s 为时间间隔,把每个时间点上的冲击力绘制成冲击力时程曲线(如图 1 所示)。

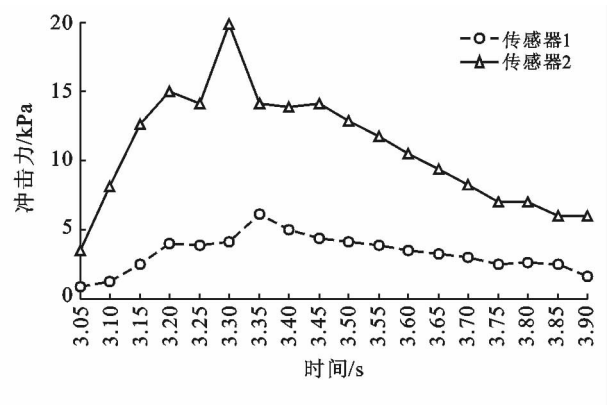


图 1　冲击力时程曲线

从图 1 中,可以看出冲击力大小在短时间内便达到峰值,并逐渐减小,而且由于传感器受到堆积体挤压力的作用,路基下部安置的传感器 2 测得的冲击力大小并未减小到零。冲击力时程曲线上还出现多处“跳跃点”,这是因为水中存在固体颗粒,这些固体颗粒导致冲击力突然增大。从图 1 可知,路基下部传感器 2 测得数据的波动幅度比上部传感器 1 要大,由此可得出泥石流对路基下部的冲击远大于上部的结论。除去动态采集仪在最初响应过程中的误差点,通过 1∶200的相似比计算得到原型预测值,路基上部受到的最大冲击力为 1 300 kPa,路基下部受到的最大冲击力为 3 900 kPa,由此可见泥石流对路基的破坏作用很大。

由原型沟谷模型试验的结果可知,一旦该处沟谷爆发泥石流,必将会产生大面积淤埋,而且会对路基造成一定的破坏,甚至有可能会造成路基的损毁,由此可以判断该处路基为中度到高度易损性。参照当地公路部门养护资料及后期现场调查数据,得知该处泥石流沟谷正处于发育期,一旦降水稍大,就会发生泥石流,泥石流裹挟着山体顶部覆盖层中的冲积卵漂石冲下,会对路基造成淤埋甚至破坏。原路位于泥石流沟口的开阔区,泥石流爆发后往往淤埋道路。由于该泥石流沟沟口宽度较小,导致泥石流流速大,破坏能力强,危险性高。

现场对泥石流冲淤路基的调查结果与模型试验结果吻合较好，从而证明了本文模型试验方法的准确性和可靠性，也为公路的设计选线、方案优化和泥石流的防灾减灾工作提供了科学的指导方法。

3.2 不同因素起主导作用时的模型试验(Ⅱ—Ⅵ)

3.2.1 试验数据及分析 研究试验一共设计了6组25个回次，每次都只改变一个控制参数，即路基与泥石流主沟道之间的夹角、流通区坡度、路基与泥石流出山口之间的距离、一次泥石流冲出物最大方量、泥石流重度和泥石流爆发频率6个参数其中之一，等待堆积过程完全结束之后，量出泥石流体对路基坡顶和坡脚的淤埋长度、沿边坡的淤积厚度及对路基的淤埋面积。由于爆发频率是在泥石流首次冲击路基完成的基础上进行第2次冲击试验，通过2次相同的试验来研究泥石流爆发频率对路基淤埋情况的影响，而冲击力不做研究，故而单独分析。试验结果见表3—4。

表3 泥石流易损性多因子综合模型试验数据

组别	试验次数/次	路基与泥石流主沟夹角/(°)	堆积板坡度/(°)	路基与泥石流出山口距离/m	泥石流冲出量/cm^3	泥石流容重/($t \cdot m^{-3}$)	坡顶淤埋长度/cm	坡脚淤埋长度/cm	堆积厚度/cm	堆积面积/cm^2	路基上部最大冲击力/kPa	路基下部最大冲击力/kPa
Ⅱ	1	90	20	0.9	1 400	2.00	23	138	6.2	898.38	19.21	5.01
	2	75	20	0.9	1 400	2.00	32	144	5.6	887.04	21.19	5.98
	3	60	20	0.9	1 400	2.00	16	112	5.1	587.52	20.56	7.34
	4	45	20	0.9	1 400	2.00	18	108	4.8	578.34	18.22	6.15
	5	30	20	0.9	1 400	2.00	33	145	4.4	704.88	21.15	7.36
Ⅲ	6	90	10	0.9	1 400	2.00	21	103	2.9	323.64	13.45	1.87
	7	90	15	0.9	1 400	2.00	25	124	5.5	737.55	14.56	3.13
	8	90	20	0.9	1 400	2.00	24	156	6.4	1 036.80	19.11	4.92
	9	90	25	0.9	1 400	2.00	31	159	7.7	1 316.70	22.31	5.25
Ⅳ	10	90	20	0.3	1 400	2.00	25	151	7.4	1 172.20	24.35	6.78
	11	90	20	0.6	1 400	2.00	33	143	6.8	1 077.10	15.78	4.65
	12	90	20	0.9	1 400	2.00	24	155	6.5	1 047.20	19.14	4.23
	13	90	20	1.2	1 400	2.00	38	133	6.1	938.79	40.00	1.72
	14	90	20	1.5	1 400	2.00	35	108	5.2	669.24	10.01	0
Ⅴ	15	90	20	0.9	1 800	2.00	25	159	7.1	1 175.80	21.78	6.89
	16	90	20	0.9	1 400	2.00	23	153	6.5	1 029.60	19.20	4.31
	17	90	20	0.9	1 000	2.00	18	125	4.1	527.67	15.78	2.31
	18	90	20	0.9	600	2.00	15	117	3.7	439.56	12.36	2.25
Ⅵ	19	90	20	0.9	1 400	1.46	16	113	3.4	394.74	10.01	2.37
	20	90	20	0.9	1 400	1.65	14	127	5.8	736.02	12.13	2.45
	21	90	20	0.9	1 400	1.78	18	143	5.7	825.93	17.02	4.10
	22	90	20	0.9	1 400	2.00	23	157	6.3	1 020.60	19.94	4.85
	23	90	20	0.9	1 400	2.19	25	146	6.2	954.18	27.11	5.95

表4 爆发频率综合模型试验资料

测量项目	泥石流爆发频率	
	第1次	第2次
路基上部淤埋长度/cm	24.0	27
路基下部淤埋长度/cm	148.0	162
淤积厚度/cm	6.3	6.7
淤积面积/cm^2	975.2	1 139.67

将测得的试验数据绘制成折线图(图2)，根据折线图分析表明：

(1) 路基与泥石流主沟道的夹角对路基淤埋情况和最大冲击力的影响并不十分明显。

(2) 随着流通区坡度的增加，淤埋长度、淤积厚度、淤积面积与最大冲击力均逐渐增大，它们与坡度的正相关性比较明显，其中淤积面积的变化幅度最为显著，随坡度的增加近似呈线性变化(图3)。

(3) 随着路基与泥石流出山口之间距离的增大，路基上部与下部受到的冲击力以及淤积厚度和淤积面积均呈下降趋势(图4)。在距离设置为1.2 m时上部最大冲击力突然增大40 kPa，推测应该是大石块突然撞击了传感器。

(4) 由图 5 中以看出,上部和下部淤埋长度、淤积厚度及淤埋面积均随着泥石流总量的增加而增大,且正相关性良好,且最大冲击力与泥石流总量呈正比关系。

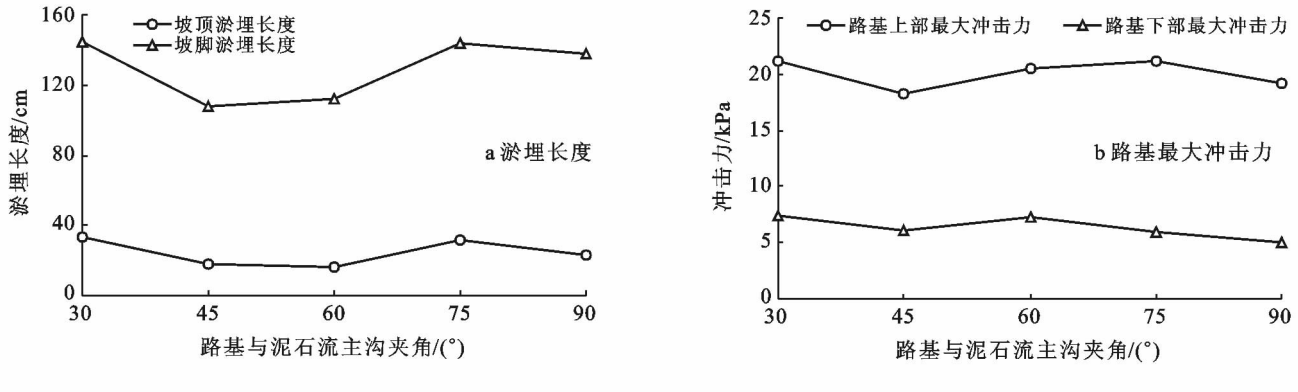


图 2　路基与泥石流主沟夹角模型试验测量数据趋势

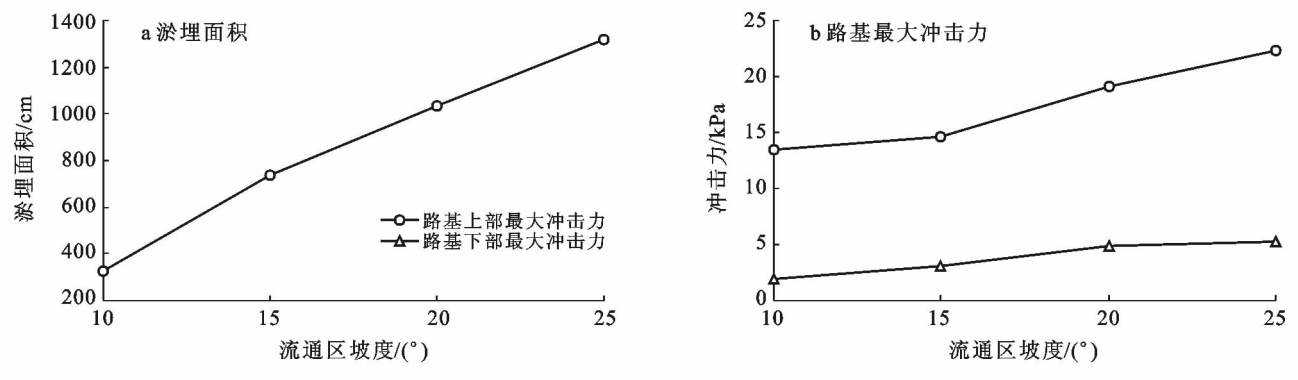


图 3　流通区坡度模型试验测量数据趋势

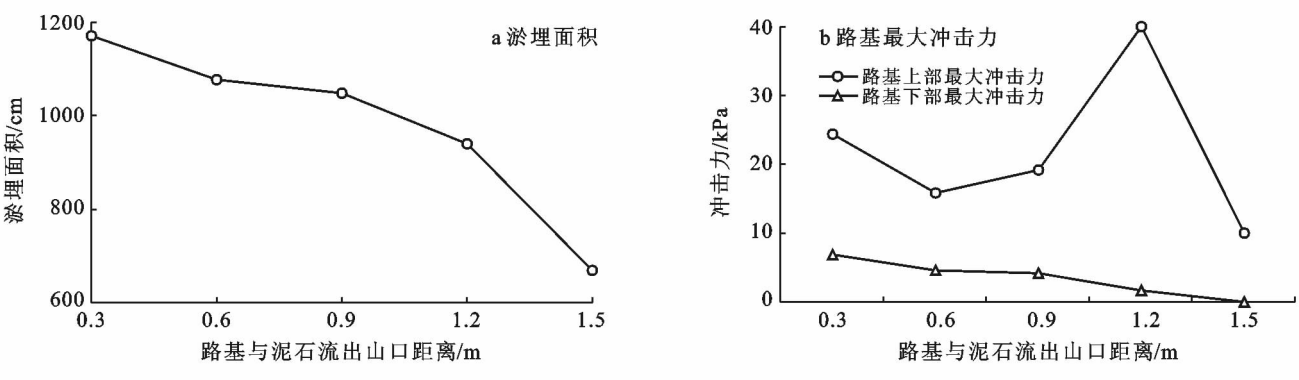


图 4　路基与泥石流出山口模型试验测量数据趋势

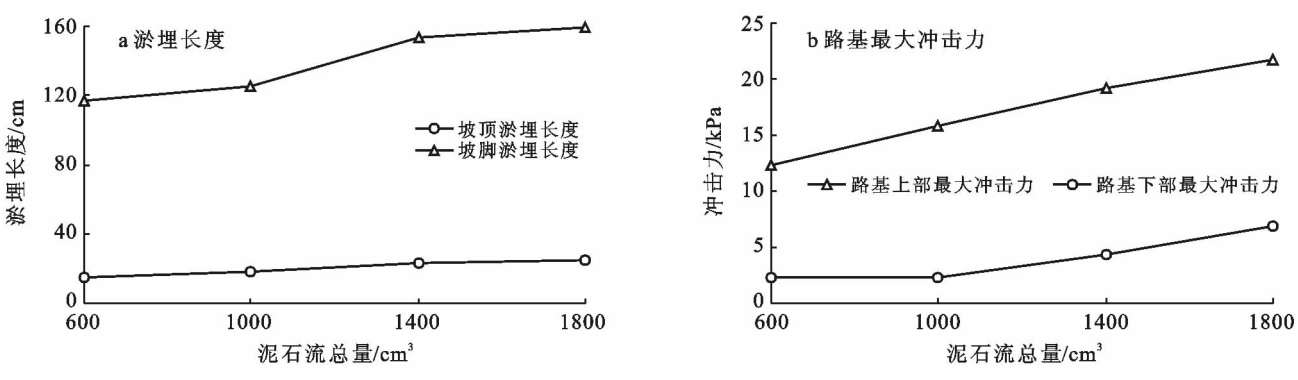


图 5　泥石流冲出物最大方量模型试验测量数据趋势

(5) 随着泥石流重度的增加,淤埋长度、淤积厚度和淤积面积均呈现先上升后下降趋势,并且在重度取 2.00 t/m^3 时达到极值,最大冲击力与泥石流重度的正相关性比较明显,近似线性变化(图 6)。

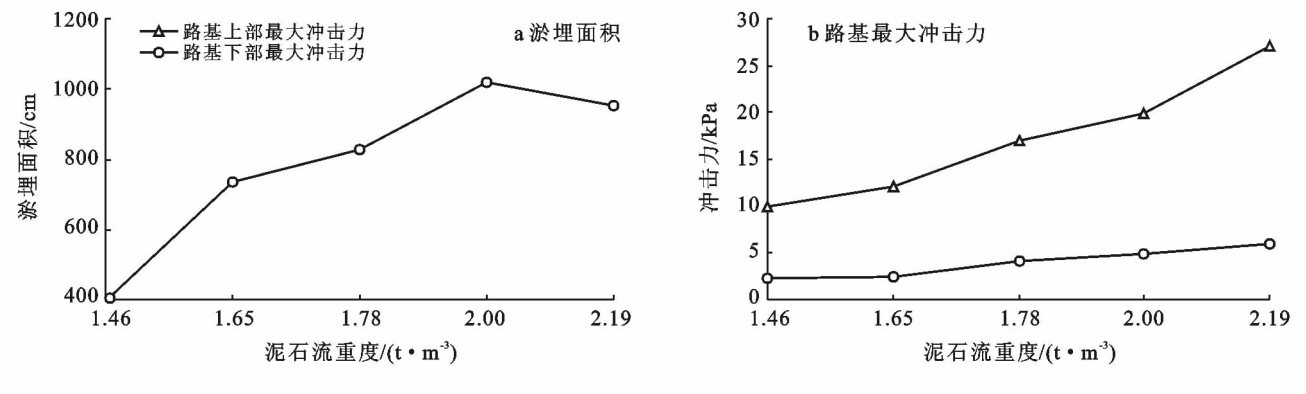


图 6 泥石流重度模型试验测量数据趋势

(6) 当 2 次泥石流爆发时间间隔较长,前 1 次泥石流体固结的前提下,第 2 次泥石流体将大部分直接堆积在第 1 次泥石流体之上,因此淤积厚度和路基上部淤埋长度将显著增加。可见泥石流爆发频率对路基的淤埋情况有显著影响。

3.2.2 试验意义 这 6 组模型试验对易损性综合评价方法有一定作用,具体表现为对选取评价指标及确定评价指标权重有着指导作用。

(1) 对选取评价指标的指导作用。通过模型试验的结果可以研究各个因素对路基易损性的影响程度的大小,从而确定各个因素是否为路基易损性的重要影响因子,作为初步选取评价指标的依据。根据试验结果分析如下:①在路基与泥石流主沟道的夹角模型试验中,夹角对路基淤埋程度的影响并不显著,且夹角的改变对路基中部受到的冲击力的影响也不明显,因此不将路基与泥石流主沟道的夹角作为易损性评价指标。②由泥石流流通区坡度模型试验可知坡度是影响路基淤埋程度的重要因素,坡度越大路基的淤埋情况将越严重。通过试验数据和能量原理分析得出相同结论:流通区坡度越大,泥石流体具有的能量就越大,因而路基受到的冲击力也就越大,导致路基受到的损坏越严重。因此泥石流流通区平均坡度也是路基易损性评价中的重要评价指标。③由路基与泥石流出山口之间的距离模型试验可知距离是影响路基易损性的一个重要因素,随着距离的增大,路基受到的冲击力大小和淤埋程度均呈下降趋势,因此将路基与泥石流出山口之间的距离作为易损性影响因素之一。④由泥石流重度模型试验可知,泥石流重度是影响泥石流破坏能力的重要因素,泥石流重度的变化对路基的淤埋和冲击都有十分明显的影响。分析可知影响泥石流重度的因素主要为固体颗粒的含量和水的含量,因此松散固体物质储量和降雨量是路基易损性的重要评价指标。⑤在一次泥石流冲出物最大方量和泥石流暴发频率模型试验中,由试验数据可知泥石流冲出量和泥石流暴发频率对路基受损程度有重要影响,因此,将一次泥石流冲出物最大方量和泥石流暴发频率作为易损性的主要评价指标。

(2) 对确定指标权重的指导作用。模型试验对确定指标权重的作用主要体现在构造判断矩阵时各评价指标标度的选择方面。根据相关学者们对易损性综合评价方法的研究[13-15],采用 Fuzzy-AHP 评价法和集对分析与三角模糊数 α-截集耦合方法两种方法进行易损性综合评价的时候,确定各指标权重十分重要。根据模型试验中各因素对路基易损性影响程度的相对大小可以近似确定各指标的相对重要性,从而赋予各指标对应的标度,初步确定判断矩阵。由于通过模型试验所确定的各指标的相对重要性是近似的,因而构造的判断矩阵并不一定满足一致性要求,当判断矩阵不满足一致性要求时还需要重新确定各指标的标度,直至满足一致性为止。

4 结 论

(1) 根据原型泥石流沟谷的资料设置模型试验(Ⅰ),待泥石流停止运动时,测得淤埋数据,冲击力数据由动态采集仪采集。由模型试验数据分析得,该处路基属于中度到高度易损性,这与现场调查结果相吻合,印证了模型试验的准确性。

(2) 为了研究不同因素对路基易损性的影响大小,采用控制变量法设置 6 组模型试验(Ⅱ—Ⅶ),共 25 个回次,记录了不同试验条件下泥石流的淤埋情况及冲击力的大小,从而研究不同因素起主导作用时泥石流对路基的冲淤作用规律,极大地丰富了泥石流

冲淤路基的试验研究。依据记录到的数据分析得到,流通区坡度、路基与泥石流出山口之间的距离、一次泥石流冲出物最大方量、泥石流重度和泥石流爆发频率对路基易损性的影响比较显著,路基与泥石流主沟道之间的夹角对路基易损性的影响不太明显。

(3) 本文利用了模型试验,研究了不同因素对路基易损性的影响,这些模型试验为泥石流综合评价初步确定了评价指标,亦对指标权重的确定起到了指导作用。

[参 考 文 献]

[1] 刘希林,莫多闻. 泥石流易损度评价[J]. 地理研究,2002,21(5):569-577.

[2] 江守一郎,郭廷伟,李安定. 模型试验的理论和应用[M]. 北京:科学出版社,1984.

[3] 王永强,张继春. 相似试验在排土场滑坡泥石流研究中的应用[J]. 安全与环境学报,2013,19(5):195-198.

[4] 陈洪凯,唐红梅,鲜学福. 沟谷泥石流运动过程模型试验[J]. 自然灾害学报,2009,18(6):160-165.

[5] 王协康,方铎. 泥石流模型试验相似律分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2000,32(3):9-12.

[6] 胡明鉴,汪稔. 蒋家沟流域暴雨滑坡泥石流共生关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(5):824-828.

[7] 徐林荣,王磊,苏志满. 隧道工程遭受泥石流灾害的工程易损性评价[J]. 岩土力学,2010,31(7):2153-2158.

[8] 刘希林,唐川,张松林. 中国山区沟谷泥石流危险度的定量判定法[J]. 灾害学,1993,8(2):1-7.

[9] 贾涛. 成兰铁路松潘段泥石流灾害风险评估[D]. 成都:成都理工大学,2015.

[10] 舒安平,张欣,唐川,等. 不同坡度条件下非均质泥石流堆积过程与特征[J]. 水利学报,2013,44(11):1333-1337.

[11] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京:农业机械出版社,1982.

[12] 刘希林,唐川,陈明,等. 泥石流危险范围的模型试验预测法[J]. 自然灾害学报,1993,2(3):67-73.

[13] 何志虎. 基于 Fuzzy-AHP 法的泥石流评价方法及其应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.

[14] Saaty T L. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource Allocation. McGraw-Hill, NY, USA [M] // The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, 1980.

[15] 汪明武,金菊良,周玉良. 集对分析耦合方法与应用[M]. 北京:科学出版社,2014.

(上接第 85 页)

[16] Jain C K. Metal fractionation study on bed sediments of River Yamuna, India[J]. Water Research, 2004,38(3):569-578.

[17] 孔明,董增林,晁建颖,等. 巢湖表层沉积物重金属生物有效性与生态风险评价[J]. 中国环境科学,2015,35(4):1223-1229.

[18] 钱翌,张玮,冉德超. 青岛城市土壤重金属的形态分布及影响因素分析[J]. 环境化学,2011,30(3):652-657.

[19] 刘霞,刘树庆,王胜爱. 河北主要土壤中 Cd 和 Pb 的形态分布及其影响因素[J]. 土壤学报,2003,22(3):393-400.

[20] 林淑芬,李辉信,胡锋. 蚯蚓粪对黑麦草吸收污染土壤重金属铜的影响[J]. 土壤学报,2006,43(6):911-918.

[21] 郝汉舟,靳孟贵,李瑞敏,等. 耕地土壤铜、镉、锌形态及生物有效性研究[J]. 生态环境学报,2010,19(1):92-96.

[22] 霍文毅,黄风茹,陈静生,等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. 地理科学,1997,17(1):82-87.

[23] 林承奇,胡恭任,于瑞莲. 九龙江和厦门西港近岸表层沉积物中汞的赋存形态及生态风险评价[J]. 环境化学,2016,35(4):749-756.

[24] 安永龙,黄勇,刘清俊,等. 北京城区表层土壤多元素分布特征及重金属元素污染评价[J]. 地质通报,2016,35(12):2111-2120.

[25] 吴金莲. 北京城市流域底泥重金属形态特征及其生态风险评价[J]. 水土保持研究,2017,24(5):321-328.

[26] 刘艳. 北京市崇文区绿地表层土壤质量研究与评价[D]. 北京:中国林业科学研究院,2009.

[27] 于君宝,王金达,刘景双,等. 典型黑土 pH 值变化对微量元素有效态含量的影响研究[J]. 水土保持学报,2002,16(2):93-95.

[28] 青长乐,牟树森,蒲富永,等. 论土壤重金属毒性临界值[J]. 农业环境科学学报,1992,11(2):51-56.