

舒和平, 韩拓, 齐识, 等. 甘肃省南部泥石流运动规律的分析与研究——以甘肃舟曲三眼峪沟为例[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 119–124, 137. [SHU Heping, HAN Tuo, QI Shi, et al. Analysis and Research on the Law of Motion of Debris Flows in Southern Gansu Province——A Case Study of Sanyanyu Gully in Zhouqu of Gansu Province[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(3): 119–124, 137.]

## 甘肃省南部泥石流运动规律的分析与研究 ——以甘肃舟曲三眼峪沟为例\*

舒和平, 韩拓, 齐识, 马金珠

(兰州大学 资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**以相似性原理为基础, 选择恰当的比尺, 在甘肃省陇南市武都区野外构建泥石流物理模型, 重现了舟曲“8·8”特大泥石流灾害发生过程。通过物理实验模拟, 测得泥石流运动的平均流速为 0.741 7 m/s, 冲击力为 1.99 N, 最大堆积厚度为 6.1 cm, 堆积面积达 3.64 m<sup>2</sup>, 并勾勒出堆积形态。选取经验公式, 将实测值与经验公式计算结果相比较, 验证了物理模型的合理性, 进一步分析了泥石流的运动规律。根据泥石流形成的要素提取危险度评价因子, 结果表明三眼峪为高度危险泥石流沟, 这为泥石流灾害防治工程提供可靠的科学依据。

**关键词:**三眼峪; 泥石流; 模型; 危险度; 冲击力; 流速; 甘肃舟曲

**中图分类号:** S157.8; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2016)03–0119–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2016.03.020

泥石流是一种广泛分布于高寒、温暖湿润山区及干旱半干旱山区的常见自然现象, 常发生于山区沟谷和坡地, 是山区沟谷和坡地地貌的外在营力, 是山地环境退化、生态平衡失调的产物, 具有流量大、容重大、流动速度快、历时短暂和破坏性大的特点<sup>[1–4]</sup>。我国是世界上遭受泥石流灾害最严重的国家之一, 尤其是甘肃省南部位于新生代亚洲印度板块碰撞边界, 新构造运动频繁; 加之该区生态脆弱、降雨频繁集中, 且多暴雨, 因此该区成为我国地质灾害高发区之一。三眼峪沟位于甘肃省南部舟曲县, 自 1823 年以来, 该沟就曾爆发过约 11 次大型泥石流, 以 2010 年的“8·8”舟曲特大泥石流灾害最为严重<sup>[5]</sup>。因此, 针对具有代表性的舟曲泥石流, 研究其发生机理、运动及堆积规律, 具有很强的现实意义, 可为泥石流灾害防治工程提供可靠的科学依据。

为了研究泥石流的运动规律, 国内外学者做过不少的模拟实验<sup>[6–9]</sup>。日本泥沙所高桥保教授做了水槽实验, 并首次在实验中测量了纵向速度分布<sup>[10]</sup>; 王光谦等<sup>[11]</sup>在云南东川蒋家沟泥石流观测研究站现场进行了粘性泥石流现场模拟实验, 构建出了泥石流堆积模型, 并进行了不同堆积坡度的模拟, 验证出了泥石流团模型的准确性; 刘丽

和陈洪凯<sup>[12]</sup>首次提出了“通过实测泥石流运动速度, 利用频率分析, 建立泥石流流速谱、冲击力谱等重要参数”, 进而准确分析泥石流运动规律; 陈中学等<sup>[13]</sup>在室内通过颗粒级配筛选出 9 种不同量级的土体, 并设计出边坡模型, 模拟了在雨强为 85 mm/s 下的降雨实验。但这些模型适用范围较窄, 对泥石流的运动过程研究不够全面<sup>[14–16]</sup>。因此, 选取具有代表性的舟曲泥石流沟, 建立物理模型, 进行运动过程模拟, 实测流速、冲击力及冲淤范围等运动因素, 另外将理论经验公式计算结果与实测结果进行对比分析, 并验证模型的合理性, 分析其运动规律, 为当地相关政府部门在防治减灾过程中提供建议, 从而尽量减少泥石流灾害对人民生产生活的危害和影响。

### 1 研究区概况

舟曲县位于甘肃省南部甘南藏族自治州, 地理坐标是 105°51′39″~104°45′31″E, 33°13′06″~34°01′00″N。它地处青藏高原东缘, 西秦岭西翼与岷山山脉交汇地区, 属构造、侵蚀山地, 舟曲县河

\* 收稿日期: 2016–01–28 修回日期: 2016–03–07

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAK12B05)

第一作者简介: 舒和平(1989–), 男, 瑶族, 湖南溆浦县人, 博士研究生, 主要从事水文过程与泥石流灾害方面的研究。

E-mail: shuhp15@lzu.edu.cn

流属长江流域嘉陵江水系,主要发育河流有白龙江、拱坝河等。舟曲县属北亚热带向北温带的过渡区,受大气环流和地形影响,具有垂直气候分带明显和干湿季分明两大特点。区内多年平均降雨量为 435.8 mm,日最大降雨量为 63.3 mm,小时最大降雨量为 47.0 mm,降雨以连阴雨和暴雨形式出现,降水主要集中在 6-9 月。气温变化较小,昼夜温差不大,多年平均气温 12.9℃,最热 7 月平均气温 23.0℃<sup>[17]</sup>。

舟曲县城依白龙江而建,夹于南北两山之间,依山傍河,地域狭窄,主城区建于三眼峪沟、罗家峪沟、寨子沟、硝水沟等泥石流堆积扇上。三眼峪沟流域位于舟曲县城北侧,属白龙江一级支流,流域面积 24.1 km<sup>2</sup>(图 1)。区域上该处为西秦岭南带印支期冒地槽褶皱带西段白龙江复式背斜北翼,整个流域处在两条北西走向的区域性断裂带所夹的断块之间,与区域性断裂走向一致的两条正断层、一条逆断层分别横穿沟谷的中段和前段<sup>[18]</sup>。断裂两侧岩层破碎,褶曲强烈。流域内出露的前第四纪地层以二叠系为主,分布于流域中、上游,岩性主要为厚层块状灰岩、中到薄层硅质条带灰岩、白云质灰岩、大理岩化灰岩及白云岩化鲕状灰岩,岩层产状 192°~210°∠68°~72°。流域下游,即出山口一带,出露中泥盆统古道岭组,岩性为炭质板岩、千枚岩夹薄层灰岩及砂岩,岩层产状 234°∠54°。流域内第四系广泛分布,其成因类型复杂,主要有风积黄土、残坡积、冲洪积及崩塌、滑坡堆积物等<sup>[19]</sup>。

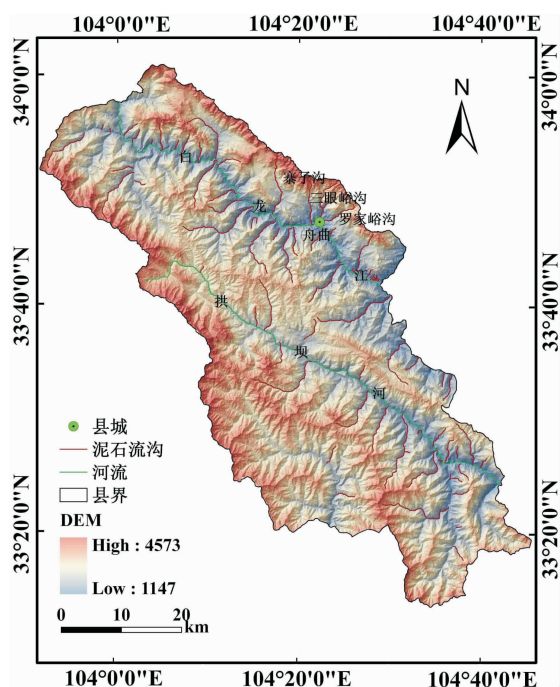


图 1 研究区位置图

## 2 实验方法

通过调查泥石流灾情和灾害特征,获取泥石流运动规律的基本要素,总结以往发生泥石流灾害发生事件和技术方法,统计分析后,建立了泥石流运动规律研究技术路线,最后计算出泥石流灾害发生危险程度,具体技术路线如图 2 所示。

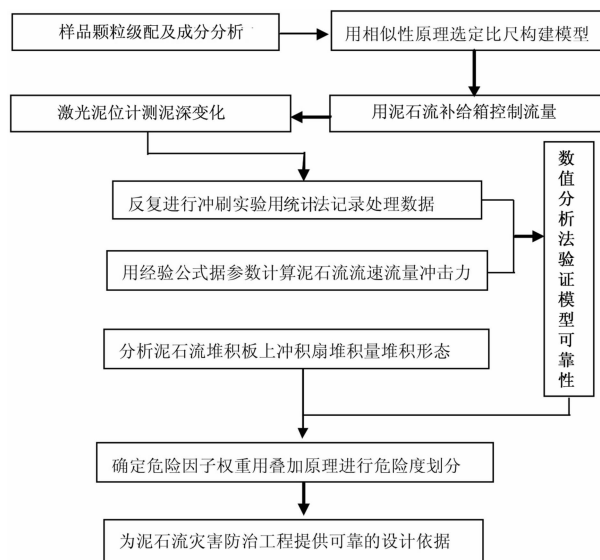


图 2 技术路线图

(1)野外构建物理模型,重现舟曲“8·8”特大泥石流灾害发生过程;

(2)通过物理实验模拟,得到流速、流量、冲击力、堆积形态、堆积面积、堆积厚度等多组数据,并进行统计分析;

(3)选取经验公式,计算流速、流量、冲击力;

(4)通过对比实测实验数据与经验计算数据,验证物理模型的合理性。

(5)针对物理模型模拟时泥石流运动形成的堆积扇,分析其堆积面积、堆积形态、堆积厚度;

(6)根据泥石流形成的要素提取危险度评价因子,划分危险度等级。

## 3 实验设计

### 3.1 模型构建

模型建立是实验的关键,既要保证微地形和地物同原型相似,又要确保模型实验能准确反映原型的演变情况,因此在严格相似有困难的地方,就要合理进行简化和理想化。按原型区实测地形图和野外调查资料,并参照录像和照片,进行模

表 1 评价因子表

| 流域面积/km <sup>2</sup> | 主沟比降/% | 相对高差/m | 主沟长/km | 松散固体物<br>质储量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> | 植被覆<br>盖率/% | 24 h 最大<br>降雨量/mm |
|----------------------|--------|--------|--------|---|-------------|-------------------|
| 24.1                 | 20     | 916    | 6.8    | 41312.52                                    | 13.2        | 96.3              |

表 2 泥石流危险评级因子分级、评分表

| 因素/评分                                      | I 级   | II 级      | III 级      | IV 级   |
|--|-------|-----------|------------|--------|
| 松散固体物质储量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ) | <200  | 200~5000  | 5000~10000 | >10000 |
| 因素评分 $w_{s6}$                              | 1     | 8         | 16         | 24     |
| 相对高差/km                                    | <0.5  | 0.5~1.0   | 1.0~1.5    | >1.5   |
| 因素评分 $w_{s3}$                              | 1     | 8         | 16         | 24     |
| 沟谷长度/km                                    | <1    | 1.1~5     | 5~10       | >10    |
| 因素评分/ $w_{s2}$                             | 1     | 7         | 14         | 21     |
| 植被覆盖率/%                                    | >50   | 30~50     | 20~30      | <20    |
| 因素评分 $w_{s8}$                              | 1     | 5         | 10         | 15     |
| 主沟比降/%                                     | <0.10 | 0.10~0.15 | 0.15~0.20  | >0.20  |
| 因素评分 $w_{s4}$                              | 1     | 2         | 3          | 4      |
| 流域面积/km <sup>2</sup>                       | <0.5  | 50~100    | 30~50      | 0.5~30 |
| 因素评分/ $w_{s1}$                             | 1     | 2         | 3          | 4      |
| 24 h 最大降雨量/mm                              | <50   | 50~100    | 100~150    | >150   |
| 因素评分 $w_{s11}$                             | 1     | 3         | 6          | 9      |
| 因素总评分                                      | 7     | 34        | 68         | 101    |

型制作。因此在甘肃省陇南市武都区典型泥石流沟段河坝沟建立了物理模拟实验平台, 实验平台的平面示意图及全景图如图 3 和图 4 所示。

(1) 泥石流补给箱, 为四棱锥体, 边长为 120 cm, 底部设置正方形供给孔, 边长为 20 cm, 实验时, 泥石流的补给由闸板开关控制。

(2) 泥石流流通槽, 形态呈矩形, 其内宽 40 cm, 内高 40 cm, 有效流动长度为 500 cm。

(3) 泥石流堆积板, 为平面铁板, 其宽 200 cm, 长 300 cm, 以斜口方式将其与流通槽以平整形式衔接, 模拟时可随意调节其坡度。

通过记录堆积扇在钢质米格板上的分布, 勾勒堆积形态, 以数格子的形式推算堆积面积, 并测量出扇缘、扇中、扇尾堆积厚度。可进一步分析一次泥石流过程后的堆积形态及堆积量, 为以后危险度的划分提供了依据。

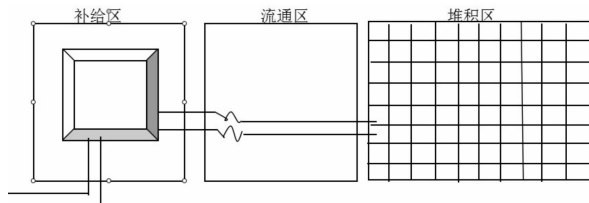


图 3 实验平台平面图



图 4 实验全景图

经验公式<sup>[23]</sup>。因此在研究三眼峪沟运动规律过程中, 选取了通过颗粒级配、沟床比降、过水断面面积等水力学参数的计算方法来计算<sup>[24-25]</sup>, 该方法所需参量简便易得, 计算简单。它不仅使我们对泥石流灾害有更深入的认识, 并且对于以后的防灾减灾也有重大的现实意义<sup>[26]</sup>。

泥石流断面平均流速<sup>[25]</sup>:

$$v = 1.1 (gr)^{\frac{1}{2}} i^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{R_{50}}{R_{10}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

泥石流流量:

$$Q = V \times S \quad (2)$$

泥石流冲击力<sup>[27]</sup>:

$$F = A_d \rho_d v_1 v_d \quad (3)$$

式中:  $\gamma$  为水力半径 (m);  $S$  为过水断面面积 (m<sup>2</sup>);  $i$  为沟床比降 (%);  $g$  为重力加速度 9.81 (m/s<sup>2</sup>);  $R_{50}$  为泥沙颗粒中百分比小于 50% 的颗粒粒径 (mm);  $R_{10}$  为泥沙颗粒中百分比小于 10% 的颗粒粒径 (mm);  $C$  为泥石流的容重 (t/m<sup>3</sup>);  $t$  为

### 3.2 经验公式

在泥石流运动规律分析、危险性评价和泥石流流预防过程中, 平均流速、流量以及冲击力的研究是十分重要的<sup>[20-22]</sup>。国内外学者经过多年的数学建模, 总结出了许多计算平均流速和冲击力的

泥石流持续时间(s);  $A_d$ 为石块与被撞物体接触面积;  $\rho_d$ 为石块密度;  $v_l$ 为纵波波速;  $v_d$ 为石块运动速度(视为与泥石流流体速度相等)。

### 3.3 危险度评价

危险度的划分采用了简单直观的模型赋值法,这种方法有三种模型:分级评分模型、分级赋值模型和函数赋值模型。由于研究的区域为三眼峪,因此选用了符合单沟泥石流危险度评价模型中的分级评分模型,其具体划步骤如下所示。

(1) 根据实地情况选取泥石流危险度评价因子。我们共选取了7个评价因子,分别是:流域面积  $p_1$ , 主沟比降  $p_2$ , 相对高差  $p_3$ , 主沟长  $p_4$ , 松散固体物质储量  $p_5$ , 植被覆盖率  $p_6$ , 24 h 最大降雨量  $p_7$ , 各参量数值如表1所示。

(2) 依据一定的原理方法和测度(如关联度),确定各危险度评价因子的权重和权数。

(3) 根据一定分级评分方法确定单沟泥石流危险度查找表(如表2所示),然后计算各危险因子的分数。

(4) 计算各危险因子在危险度查找表中的评分总和,即为单沟泥石流危险度,其危险度  $W$  计算公式可表达为:

$$W = \sum_{i=1}^n P_i, (i=1, 2, 3 \cdots n). \quad (4)$$

式中:  $P_i$ 为第  $i$  个评价因子在危险度查找表中的评分;  $n$  为评价因子总个数。

(5) 根据表3的危险度划分区间确定泥石流沟危险等级。

表3 危险度划分区间表

| 危险度划分 | 极轻度 | 轻度   | 中度    | 重度     |
|-------|-----|------|-------|--------|
| 评分区间  | 1~7 | 8~34 | 35~68 | 68~101 |

## 4 实验结果

### 4.1 参数律定

实验模型目的是为泥石流灾害整治工程提供可靠的设计依据。首先将三眼峪沟道原型概化为实物模型,并在模型上重演与原型条件相似的流体运动。再将实验模型成果应用到原型上,因而要求模型与原型之间应满足一定的相似条件。此

次实验要求实验流体与原型流体的水动力学特征值相似,原型与模型流体的容重相等且所含固体颗粒组成相似并遵守模拟边界条件,模型流体与原型流体的弗劳德数相等。实验采用正态动床模型,根据实验目的要求和模型场地大小条件,模型和原型之间各物理量相似比尺如表4所示。

表4 各物理量相似比尺

| 比尺名称   | 符号             | 比尺数值     |
|--------|----------------|----------|
| 水平比尺   | $\lambda_l$    | 1313.66  |
| 垂直比尺   | $\lambda_h$    | 351.99   |
| 流速比尺   | $\lambda_v$    | 7.56     |
| 糙率比尺   | $\lambda_n$    | 1.00     |
| 时间比尺   | $\lambda_t$    | 180.00   |
| 流量比尺   | $\lambda_q$    | 1394 000 |
| 容重比尺   | $\lambda_c$    | 1.00     |
| 级配比尺   | $\lambda_m$    | 1.00     |
| 粒径比尺   | $\lambda_l$    | 270.00   |
| 孔隙率比尺  | $\lambda_r$    | 1.00     |
| 河床变形相似 | $\lambda_{z1}$ | 273.04   |
| 水平垂直比尺 | $\lambda_{z2}$ | 90.46    |

### 4.2 流速和流量计算

#### 4.2.1 经验计算值

根据舟曲县三眼峪沟相关地形参数(5)和水动力参数(6),然后利用经验公式进行流速计算。

将相关地形参数及水动力学参数分别带入式(1)和式(2),即得到断面平均流速  $v$  和流量  $Q$  的理论计算值,即:  $v = 8.025 \text{ m/s}$ ;  $Q = 410.48 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

#### 4.2.2 实验值

把上述所得数据用相似性比尺处理,得到实际参量、模型参量及比尺对照表(表7)。

流通区流速及泥位测量采用 LDM41 型激光测距仪观测。激光测距传感器采用相位比较原理来测定出传感器激光发射点与物源之间的距离。实验所选用的激光测距仪为 10 Hz,即每秒记录 10 个距离  $h_0$ ,将仪器端口到流通槽的距离设为  $H$ ,则得到泥位  $\Delta h = H - h_0$ 。将流通槽底部宽度设为  $a$ ,则断面平均流量  $q$  为  $a \times h$ ,进而单位时间断面平均流量为  $a \times h$ ,即断面瞬时流速  $v$  为  $40 \times a \times h$ 。其中,已知  $H = 1.4 \text{ m}$ ,  $a = 0.4 \text{ m}$ 。具体流速和流量如表8所示。

表5 三眼峪相关地形参数

| 流域面积/ $\text{km}^2$ | 沟床比降/% | 主沟长/km | 最高海拔/m | 沟口海拔/m | 相对高度/m |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 24.1                | 25     | 7.6    | 2431   | 1457   | 916    |

表6 三眼峪沟水动力学参数

| $\gamma/\text{m}$ | $i/\%$ | $R_{10}/\text{mm}$ | $R_{50}/\text{mm}$ | $S/\text{m}^2$ | $v/(\text{m/s})$ | $Q/(\text{m}^3/\text{s})$ | $t/\text{s}$ |
|-------------------|--------|--------------------|--------------------|----------------|------------------|---------------------------|--------------|
| 10.16             | 25.00  | 7.80               | 0.029              | 51.15          | 7.90             | 1830                      | 1800         |



表 7 实际参量、模型参量及比尺对照表

|    | 沟长/m | $\Delta h$ /m | 水平/m    | 流速/(m/s) | 时间/s  | 容重/(g/cm <sup>3</sup> ) | 流量/(m <sup>3</sup> /s) | 糙率/n | 最大粒径/m |
|----|------|---------------|---------|----------|-------|-------------------------|------------------------|------|--------|
| 实际 | 6800 | 454.07        | 6344.98 | 6.00     | 10800 | 2.00                    | 1830                   | —    | 5.40   |
| 模型 | 5.0  | 1.29          | 4.83    | 0.79     | 60    | 2.00                    | 0.013                  | —    | 0.02   |
| 比尺 | 1360 | 351.99        | 1313.66 | 7.56     | 180   | 1                       | 140000                 | 1.56 | 270    |

表 8 流速和流量表

| 序号  | $h_0$ /m | $H$ /m | $\Delta h$ | $Q/(m^3/s)$ | $v/(m/s)$ |
|-----|----------|--------|------------|-------------|-----------|
| 1   | 1.2231   | 1.4    | 0.1769     | 0.0177      | 0.7076    |
| 2   | 1.1684   | 1.4    | 0.2316     | 0.0232      | 0.9264    |
| 3   | 1.2057   | 1.4    | 0.1943     | 0.0194      | 0.7772    |
| 4   | 1.2057   | 1.4    | 0.1943     | 0.0194      | 0.7772    |
| 5   | 1.2114   | 1.4    | 0.1886     | 0.0189      | 0.7544    |
| 6   | 1.2146   | 1.4    | 0.1854     | 0.0185      | 0.7416    |
| 7   | 1.2164   | 1.4    | 0.1836     | 0.0184      | 0.7344    |
| 8   | 1.2183   | 1.4    | 0.1817     | 0.0182      | 0.7268    |
| 9   | 1.2210   | 1.4    | 0.1790     | 0.0179      | 0.7160    |
| 10  | 1.2228   | 1.4    | 0.1772     | 0.0177      | 0.7088    |
| 11  | 1.2218   | 1.4    | 0.1782     | 0.0178      | 0.7128    |
| 12  | 1.222    | 1.4    | 0.1780     | 0.0178      | 0.7120    |
| 13  | 1.2220   | 1.4    | 0.1780     | 0.0178      | 0.7120    |
| 14  | 1.2225   | 1.4    | 0.1775     | 0.0178      | 0.7100    |
| 15  | 1.2230   | 1.4    | 0.1770     | 0.0177      | 0.7080    |
| 平均值 | 1.2146   | 1.4    | 0.1854     | 0.0185      | 0.7417    |

根据数据计算得到实测模型平均流速为 0.7417 m/s, 理论计算值为 0.79 m/s, 误差  $\Delta = \frac{0.79 - 0.7417}{0.7417} = 0.06$ , 在野外模型允许误差范围内, 证明模型构建合理。

### 4.3 冲击力

#### 4.3.1 经验计算值

基于表 2 和表 3 的基础数据, 并参考相关参数: 由遥感地质图可知, 研究区以灰岩为主, 其密度约为  $2.74 \text{ g/cm}^3$ ; 通过查阅“岩性密度纵波波速测试表”得到, 该区纵波波速为 4 614 m/s; 石块与被撞物体的接触面积按堆积扇上最大石块的中、短径所在平面面积的 10% 计算<sup>[28]</sup>; 经文献查阅及实地调查, 该区泥石流流体流速约为 5.4 m/s。将相关参数代入式(3)中, 得到冲击力:  $F = 19\,784 \text{ t}$ 。

#### 4.3.2 实验值

实验中, 冲击力的测量采用光栅传感分析仪, SA-1 系列光栅传感分析仪是采用扫描激光技术的光纤光栅传感解调分析仪器。在流通槽上、中、下部 3 个断面分别布设圆饼状压力传感器 FX-FBG-P-0004、FX-FBG-P-0005、FX-FBG-P-0006, 再将压力传感器与调节仪相连, 最后连入电脑。当泥石流流体流过传感器时会产生一定的应力, 力以数据的形式呈现在电脑上, 具体实验数据如表 9 所示。

三个测点的应力总体呈现下降趋势。其中测点 1 应力变化平缓; 测点 2 应力先变小再变大, 最

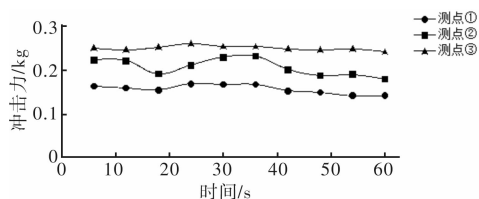


图 5 应力变化趋势图

后减小; 测点 3 应力变化幅度也相对较小。经过计算可知: 实验冲击力为 1.99 N, 换算成质量为 0.204 kg, 而实际冲击力为 19 784 t, 进而算得相似性比尺约为 1: 96 000 000, 符合相似性标准。

表 9 实测冲击力数据统计表

| 编号  | 测点①    | 测点②    | 测点③    | 平均值/kg |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| 1   | 0.163  | 0.223  | 0.251  | 0.212  |
| 2   | 0.159  | 0.221  | 0.247  | 0.209  |
| 3   | 0.154  | 0.191  | 0.253  | 0.199  |
| 4   | 0.168  | 0.211  | 0.261  | 0.213  |
| 5   | 0.167  | 0.229  | 0.254  | 0.216  |
| 6   | 0.167  | 0.232  | 0.254  | 0.217  |
| 7   | 0.152  | 0.201  | 0.249  | 0.200  |
| 8   | 0.149  | 0.187  | 0.247  | 0.194  |
| 9   | 0.141  | 0.190  | 0.249  | 0.193  |
| 10  | 0.141  | 0.179  | 0.242  | 0.187  |
| 平均值 | 0.1561 | 0.2064 | 0.2507 | 0.204  |

### 4.4 堆积结果

钢质米格板由 150 的小正方形组成, 每小格边长 20 cm, 通过堆积形态图分析可知: 堆积物所占格数约为 91 格, 总格数为 150 格, 占钢板总面积的 60.67%。堆积形态呈梨形。最高泥位出现在纵向第 5 格和第 6 格之间、横向第 2 格交汇处, 最大泥位深度为 6.1 cm。具体堆积形态如图 6 所示。

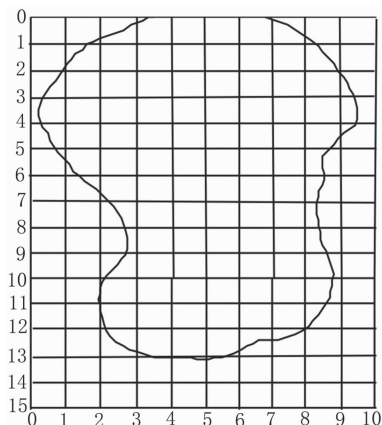


图 6 实测堆积形态分布图

将图6中最上面第一条横线设为横0线,第二条横线设为横1线,以此类推,最下面一条横向线则为横15线;同理,将左数第一条纵向线设为纵0线,则右端最后一条纵向线为纵10线。其交点以坐标形式记录,则部分交点泥位深度表如表10所示。

表10 堆积区堆积深度统计表 cm

| (横,纵) | 纵3线 | 纵5线 | 纵7线 |
|-------|-----|-----|-----|
| 横0线   | 0   | 5.1 | 0   |
| 横1线   | 3.9 | 6.1 | 4.2 |
| 横2线   | 4.8 | 5.8 | 5.2 |
| 横3线   | 4.9 | 5.4 | 4.3 |
| 横4线   | 5.0 | 4.9 | 3.2 |
| 横5线   | 4.2 | 4.8 | 3.1 |
| 横6线   | 3.9 | 4.2 | 3.1 |
| 横7线   | 3.1 | 4.2 | 3.0 |
| 横8线   | 2.4 | 3.8 | 2.5 |
| 横9线   | 1.6 | 3.1 | 2.1 |
| 横10线  | 1.2 | 2.2 | 2.0 |
| 横11线  | 0.9 | 1.1 | 1.3 |
| 横12线  | 0.5 | 0.9 | 0.4 |
| 横13线  | 0   | 0.1 | 0   |

根据表10可以得出如下几个结论。

(1) 纵5线为泥石流堆积体的轴线,最大堆积厚度就出现在轴线尾部,且在轴线后部堆积厚度明显高于左右两侧。

(2) 在扇尾,堆积厚度明显高于扇中及扇缘。

(3) 在扇中,左侧堆积厚度略高于右侧;在扇缘,右侧堆积厚度则高于左侧。

(4) 轴线在扇缘堆积厚度较浅,且低于左右两侧。

#### 4.5 危险度

基于三眼峪沟的相关参数,并结合表1的单沟泥石流危险度评价因子取值表可知: $p_1=4$ ,  $p_2=3$ ,  $p_3=8$ ,  $p_4=14$ ,  $p_5=24$ ,  $p_6=15$ ,  $p_7=3$ , 得到危险度  $W = \sum_{i=1}^7 p_i = 71$ 。根据危险度分区数值,三眼峪沟为重度危险泥石流沟。

## 5 结论

通过对舟曲三眼峪沟泥石流运动相关参数进行分析,依据相似性原理,选择恰当的比尺,在陇南市武都区野外构建了泥石流模型,然后进行模拟实验,测出流速、冲击力,并将模型实测数据与经验公式计算值对比分析,通过堆积面积、堆积厚度、堆积形态划分危险度。得出的主要结论如下。

(1) 舟曲泥石流形成区面积达  $22.64 \text{ km}^2$ , 占流域总面积的94%。形成方式有支沟雨洪汇流型和主沟冲蚀型两类,为“8.8”舟曲特大泥石流灾害提供了丰富的物源;流通区位于大小眼峪交汇处至峪门口沟段,占流域总面积的2.4%,径流通道

对泥石流的形成及流速、流量、冲淤情况等起着控制作用;三眼峪口至白龙江之间为泥石流的堆积区,占流域总面积的1.7%。

(2) 通过公式计算出流速为  $8.025 \text{ m/s}$ 、流量  $410.48 \text{ m}^3/\text{s}$ 、冲击力为  $19\,784 \text{ t}$ 。经过相似比尺计算,在误差允许范围内与实测值吻合,验证了模型的合理性。

(3) 构建物理模型,概化后完全遵循相似性原理,对泥石流模型进行调节,旨在保证模型实验的合理性和科学性,从而再现“8·8”特大灾害性泥石流发生时的情形;经过实验测试得到平均流速为  $0.7417 \text{ m/s}$ ,冲击力为  $1.99 \text{ N}$ ,最大堆积厚度为  $6.1 \text{ cm}$ 。

(4) 对泥石流流体以及堆积扇的堆积面积、堆积形态、堆积厚度进行了详细的分析研究,根据泥石流形成要素提取危险度评价因子,计算得到危险度值为71,确定三眼峪沟为重度危险泥石流沟。

## 参考文献:

- [1] 王继康. 泥石流防治工程技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [2] 陈洪凯, 唐红梅, 马永泰, 等. 公路泥石流研究及治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] 任非凡. G212线陇南段泥石流危险性区划研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [4] 康志成, 李焯芬, 马嵩乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] 胡桂胜, 陈宁生, 邓明枫, 等. 甘肃舟曲三眼峪沟泥石流粗大颗粒冲击力特征分析[J]. 地球与环境, 2011, 39(4): 478-484.
- [6] 唐兴邦, 章书成. 泥石流研究[J]. 中国科学院院刊, 1992, 31(2): 119-123.
- [7] Hutter K, Svendsen B, Rickenmann D. Debris flow modeling: A review[J]. Continuum Mechanics & Thermodynamics, 1994, 8(1): 1-35.
- [8] Gordon E G. Critical flow constrain flow hydraulics in mobile-bed streams; a new hypothesis[J]. Water Resources Research, 1997, 33(2): 349-358.
- [9] Mergili M, Fellin W, Moreiras S M, et al. Simulation of debris flows in the Central Andes based on Open Source GIS: possibilities, limitations and parameter sensitivity[J]. Natural Hazards, 2011, 61(3): 1051-1081.
- [10] Iverson R M, Vallance J W. New views of granular mass flows[J]. Geology, 2001, 29(29): 115-118.
- [11] 王光谦, 邵颂东, 费祥俊. 泥石流模拟: I-模型[J]. 泥沙研究, 1998(3): 7-13.
- [12] 刘丽, 陈洪凯. 泥石流运动力学研究现状及趋势[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 233-239.
- [13] 陈中学, 汪稔, 胡明鉴, 等. 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动影响分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2197-2011.
- [14] 魏新功, 王振国, 包红霞. 降水原因造成的舟曲县地质灾害分析[J]. 甘肃科技, 2008, 24(21): 84-88.
- [15] 赵成. “8.8”舟曲暴雨泥石流的成灾模式[J]. 西北地质, 2011, 44(3): 63-70.
- [16] 韩国营. 甘肃省白龙江流域苔类植物的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2009.
- [17] 舒和平, 刘东飞, 顾春杰, 等. 中小尺度区域泥石流灾害风险评价[J]. 山地学报, 2015, 32(6): 754-760.

(下转第137页)

- 47–48.
- [9] 山东省地震局. 乳山近海 4.6 级地震现场调查报告[R]. 济南: 山东省地震局, 2015: 11–12.
- [10] 新疆维吾尔自治区地震局. 2015 年 7 月 3 日新疆皮山县 6.5 级地震灾害直接损失评估报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆维吾尔自治区地震局, 2015: 59–60.
- [11] 云南省地震局. 2015 年 10 月 30 日云南省昌宁县 5.1 级地震灾害直接损失评估报告[R]. 昆明: 云南省地震局, 2015: 30–31.
- [12] 楼宝棠. 中国古今地震灾情总汇[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- [13] 中国地震局监测预报司. 中国大陆地震灾害损失评估汇编(1990–1995)[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
- [14] 中国地震局监测预报司. 中国大陆地震灾害损失评估汇编(1996–2000)[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [15] 中国地震局震灾应急救援. 2001–2005 年中国大陆地震灾害损失评估汇编[M]. 北京: 地震出版社, 2010.
- [16] 中国地震局震灾应急救援. 2006–2010 年中国大陆地震灾害损失评估汇编[M]. 北京: 地震出版社, 2015.

## Review of Earthquake Damage Losses in Mainland China in 2015

CHEN Tong and ZHENG Tongyan

(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

**Abstract:** We list the catalog of earthquakes occurred in mainland China in the year 2015 with magnitude greater than 5.0, and summarize relevant basic data and damage information of these earthquake events. Combined with earthquake damage assessment data from the earthquake administration of the events-occurring provinces (and autonomous regions and municipalities), the main data and features of earthquake damage in mainland China in 2015 are summarized and induced. In the end, related data of earthquake damage in mainland China since 1990 are presented and simple comparisons are made.

**Key words:** mainland China; earthquake; disaster loss; 2015

(上接第 124 页)

- [18] 陕西省地质局区测队. 武都幅区域地质图及说明书(1:20 万)[R]. 西安: 陕西省地质局区测队, 1970.
- [19] 胡向德, 黎志恒, 魏洁, 等. 舟曲县三眼峪沟特大型泥石流的形成和运动特征[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 82–87.
- [20] 马东涛, 祁龙. 三眼峪沟泥石流灾害及其综合治理[J]. 水土保持通报, 1997, 17(4): 26–31.
- [21] 张成检. 舟曲县自龙江流域地质环境及地质灾害分布特征[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(12): 26–28.
- [22] 胡凯衡, 葛永刚, 崔鹏, 等. 对甘肃舟曲特大泥石流灾害的初步认识[J]. 山地学报, 2010, 28(5): 628–634.
- [23] 黎志恒, 朱立峰, 胡向德, 等. 三眼峪特大泥石流沟流域分区特征[J]. 西北地质, 2011, 44(3): 38–43.
- [24] 牛最荣. 建设水文应急监测队伍提高水文应急监测能力—舟曲特大山洪泥石流水文应急监测思考[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(12): 8–14.
- [25] 余斌. 粘性泥石流的平均运动速度研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 524–531.
- [26] 陈洪凯, 唐红梅, 陈野鹰. 公路泥石流流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [27] 章书成, Oldrich Hungr, Olav Slaymaker. 泥石流中巨石冲击力的计算[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 67–72.
- [28] 余斌, 杨永红, 苏永超, 等. 甘肃省舟曲 8.7 特大泥石流调查研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 437–443.

## Analysis and Research on the Law of Motion of Debris Flows in Southern Gansu Province

—A Case Study of Sanyanyu Gully in Zhouqu of Gansu Province

SHU Heping, HAN Tuo, QI Shi and MA Jinzhu

(Key Laboratory of Western China's Environment Systems of the Ministry of Education, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 73000, China)

**Abstract:** Based on the similarity principle, we chose the appropriate scale to construct a debris flow model in Wudu district of Longnan City in the southern Gansu Province, it can rebuilt the “8.8” catastrophic debris flow in Zhouqu. Through physical simulation experiment, we can know the average velocity was 0.7417 m/s, the impact force is 1.99N, the thickness of the accumulation is 6.1 cm and the accumulation area is 3.64 m<sup>2</sup>. At the same time, we have also draw accumulation form. In addition, empirical formulas were selected to calculate debris flows dynamic values which are compared with the experimental data, and they can verify the accuracy of the model. Meanwhile, the motion law of debris flows is further analyzed. According to the elements of debris flow formation, hazard assessment factors are extracted. The result showed that Sanyanyu gully is a high hazard debris flow gully. This result can provide reliable scientific basis for debris flow disaster prevention project.

**Key words:** Sanyanyu gully; debris flow; model; hazard; impact force; flow velocity; Zhouqu of Gansu Province