

文章编号: 1008 - 2786 - (2013) 5 - 594 - 07

粘性泥石流坝后回淤比降的实验

吴鑫^{1 2} 马东涛^{1 3*} 杨敏^{1 2}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学 北京 100392; 3. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室 四川 成都 610041)

摘 要: 拦挡坝坝后回淤比降是泥石流防治工程设计中的一个重要参数。本实验选取粘性泥石流,开展了沟床纵比降为 9.5% ~ 26.2% 共 8 组和重度 17 ~ 22 kN/m³ 共 6 组的坝后回淤比降的模拟实验。实验发现: 1. 在沟床纵坡为 9.5%、12.1%、14.4%、16.7%、18.9%、21.3%、23.8% 和 26.2% 时,其回淤比降分别为 8.08%、9.8%、11.38%、12.69%、14.55%、16.61%、18.56% 和 20.96%; 2. 回淤比降比值在 0.76 至 0.85 间,平均 0.80; 3. 回淤比降随沟槽纵比降的增大而增大,二者呈线性正相关,相关系数在 0.95 以上; 回淤比降随重度的增大,总体呈缓慢增大的趋势,关系为二次函数关系。由此建立了回淤比降与重度和沟床纵比降的关系式: $i = 0.6014 \times \gamma^{0.0526} \times i_0^{0.9470}$, 据此可以初步确定回淤比降的设计值。

关键词: 粘性泥石流; 拦挡坝; 重度; 沟床纵坡; 回淤比降; 回淤比降比值

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

拦挡坝是泥石流防治的主要工程措施之一^[1], 坝后回淤纵比降或回淤比降比值是拦挡坝工程设计中的一个重要参数,直接关系到拦挡坝坝高、坝间距、拦砂库容的确定和减灾效益发挥、工程使用寿命等^[2]。回淤纵比降受沟床纵比降、泥石流重度、流速、流量、级配和拦挡坝高度、结构等多种因素的综合影响^[3-4], 其中与沟床纵比降和重度关系较为密切。目前,泥石流坝后回淤比降多采用经验方法,根据泥石流性质、重度、沟床纵坡、沟床宽度等综合确定。柳金峰等通过实验得到粘性泥石流在沟口回淤的发展过程中,累积回淤长度与泥石流累积总量呈线性正相关,相对累积回淤坡度与泥石流累积总量呈对数负相关,并根据相对累积回淤坡度的变化将粘性泥石流沟口回淤的发展过程分为三个阶段^[5]。周必凡^[2]、曾思伟等^[6]总结了坝后稳定和不稳定回

淤比降的设计值范围,即约在原沟床比降的 70% ~ 90% 间。祁龙等在对云南大桥河、蒋家沟等泥石流沟进行实地观测测量的基础上,研究了回淤坡度与沟床比降的关系,但仅仅给出了一个比降比值变化范围,未进行相关的定量研究^[7]。苏联学者鲍亚尔斯基通过模型试验对回淤纵坡做了研究,定性的得到回淤坡度随坝高增大而减小,随沟床纵比降增大而增大的结论^[8]。李峰^[9]等通过对稀性泥石流坝后回淤及坝前冲刷的模型实验,得到了坝后回淤比降与沟床比降及坝高的相关关系。本实验选取重度及沟床纵比降这两个影响回淤比降的主要因素,通过模型实验,揭示粘性泥石流回淤比降、回淤比降比值的规律,及其与沟床纵比降及重度之间的关系,期望为坝后淤积模型试验研究、拦挡坝工程设计等提供借鉴。

收稿日期(Received date): 2013 - 04 - 18; 改回日期(Accepted): 2013 - 06 - 09。

基金项目(Foundation item): 地质灾害防治与地质灾害保护国家重点实验室开放基金资助项目(GZ2007 - 15); 中铁二院工程集团有限责任公司科研项目“成兰铁路桥梁工程泥石流防治技术研究”。[Supported by Opening fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection Chengdu University of Technology(GZ2007 - 15); Control Technique on Debris Flow of Bridge Construction along Chengdu - Lanzhou Railway, China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd.]

作者简介(Biography): 吴鑫(1985 -), 男, 四川眉山人, 在读硕士研究生, 研究方向为地质灾害防灾减灾工程和岩土工程。[Wu Xin(1985 -), male, major in geohazards prevention and geo-engineering.]E-mail: 29520791@qq.com

* 通信作者(Corresponding Author): 马东涛(1965 -), 男, 陕西武功人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害基础理论和防灾减灾工程研究。[Ma Dongtao(1965 -), male, prof. & Dr., major in geohazards prevention theory and engineering.]E-mail: dtma@imde.ac.cn

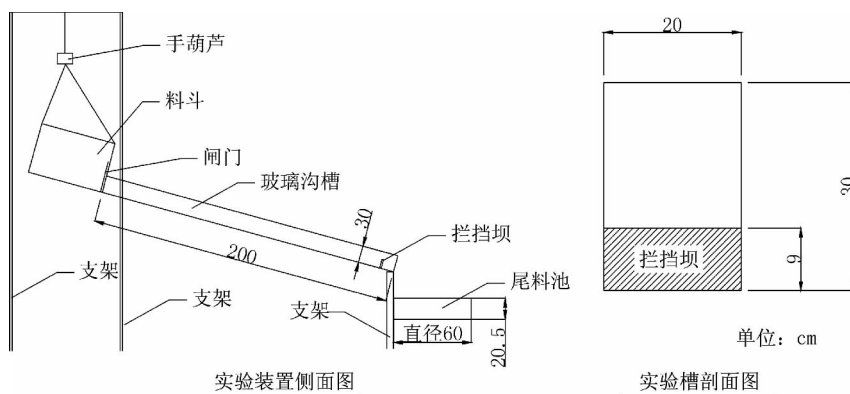


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental apparatus

1 实验设计

1.1 实验装置

模拟实验在中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室模拟实验厅开展。实验装置由料斗、模拟沟槽、模拟拦挡坝、尾料池等4个部分组成(图1)。其中,料斗为长方体,长50 cm,宽40 cm,高85 cm,下部设有闸门;模拟沟槽内宽20 cm,深30 cm,长2 m,底面为钢板,侧面为玻璃,以便观测;模拟拦挡坝为有机玻璃材质,厚15 mm,高9 cm,长20 cm,镶嵌于实验槽出口以上20 cm处,坝体未设溢流口;尾料池为塑料盆,可以简化为圆台,上底直径68 cm,下底直径60 cm,内高20.5 cm。

1.2 泥石流粒度组成

模拟实验流体中,粘粒部分采用钠基膨润土。钠基膨润土是以蒙脱石为主的含水粘土矿,pH值为8.9~10,蒙脱石含量在60%~88%。它的胶体悬浮液触变性、粘度、润滑性好,有较高的可塑性和较强的粘结性,能很好的将粗颗粒和细颗粒融合到一起,故可在本实验中模拟粘粒部分。但由于它吸水率和膨胀倍数较大,在实验时必须严格控制含量,否则会因流体粘性太大而影响实验结果。细颗粒部分采用天然河沙,粗颗粒部分采用碾碎后的天然河卵石,粒径10~20 mm。在准备物料时,参考野外采集的样品得到的级配曲线,又考虑到最大粒径不得超过实验槽的宽度的1/5,最终确定颗粒配比。实验结束,在将物料(不包括料斗内剩余物质)收集到尾料池后,每个重度采集一个样品。将样品烘干后,采用筛分法,测得各样品的级配,得到的最终粒度曲线见图2。从图2中可以看出,样品中所占比例最

多的粒径范围为5~20 mm,占总重量的45%~80%;小于0.25 mm的颗粒占总重量的15%~30%,其中0.075 mm及以下的颗粒占总重量的3%~5%。

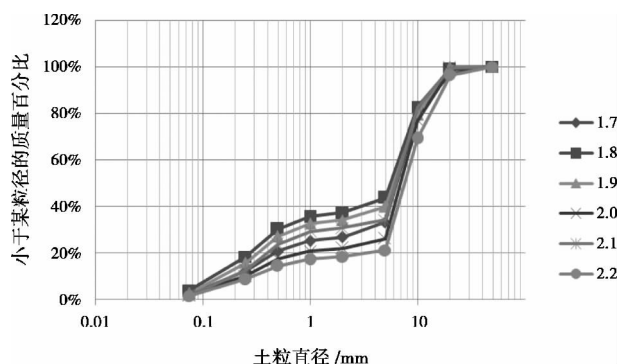


图2 实验泥石流粒度分析曲线

Fig. 2 Grain grading curve of experimental debris flow

1.3 实验条件及操作流程

选择粘性泥石流作为实验对象。为了能更好的找到粘性泥石流的变化规律,实验扩大了重度的选择范围,将重度为 17 kN/m^3 和 18 kN/m^3 的过渡性泥石流作为实验的主要对象,这样可以更清楚表示粘性泥石流的变化趋势。为了方便起见,后面所称粘性泥石流均包含重度为 17 kN/m^3 和 18 kN/m^3 的泥石流。具体实验条件及要素、参数取值见表1。

实验中,通过改变沟床纵坡和重度,测量泥石流坝后回淤坡度和回淤厚度。模拟实验整个过程采用手动操作,遵循实验要求,通过手动葫芦调整沟槽坡度,在沟槽的下游段固定事先设计好的拦挡坝模型。在沟槽坡度确定后,将泥石流样品反复搅拌至均匀,再装入料斗;实验中通过料斗阀门控制泥石流流量,

维持泥石流流性质不变(泥石流颗粒组成及重度一定)在沟槽正前方和侧面各安装一台摄像机记录淤积整个过程,待淤积稳定后,用探针和尺子测量坝后淤积厚度,实验过程见图3。实验后通过泥石流物质在塑料盆中的高度换算成体积,再与质量求出重度。完成一次实验后,再重复一次,完成一组;然后再通过改变纵坡、重度开始新的一组实验,直至按照设计完成全部实验,得到不同重度和沟床纵比降组合条件下的回淤比降,进而分析重度和沟床纵比降对回淤比降的影响规律。



a. 侧视



b. 正视

图3 粘性泥石流坝后回淤形态

Fig.3 The siltation forms of viscous debris flow behind check-dam

2 实验结果

本次实验设计共进行6组重度、8组沟床纵坡条件下的回淤纵比降实验48组,由于疏漏,重度20 kN/m³和纵坡9.5%的一组数据未能取得,实验结果较设计少了一组,因此共计取得47组实验数据,实验结果见表2。统计后发现,坝后回淤比降在沟槽纵坡9.5%和重度21 kN/m³时的一组数据因测量原因较原沟床比降大,出现异常,其余各组均比原沟床比降小,符合自然规律和设计要求。因此,本次实验取得的有效数据共有46组。

2.1 回淤比降

为了找出沟床纵比降和重度分别和回淤比降的关系,根据实验结果,将同一沟床纵比降和重度的实验数据进行平均,计算结果如表2所示。由表2可以看出,粘性泥石流在沟床纵坡为9.5%、12.1%、14.4%、16.7%、18.9%、21.3%、23.8%和26.2%时,其回淤比降分别为8.08%、9.8%、11.38%、12.69%、14.55%、16.61%、18.56%和20.96%。

表1 实验条件及参数一览表

Table 1 The experimental condition factors and related parameters

实验条件	实验要素	参数取值
流体	重度/(kN/m ³)	17、18、19、20、21、22
	颗粒组成	见图2
	深×宽×长/cm	30×20×200
沟槽	纵比降/%	9.5、12.1、14.4、16.7、18.9、21.3、23.8、26.2
	高×宽×厚/cm	9×20×1.5
拦挡坝	形状	矩形,无溢流口

表2 不同重度、沟床纵坡下粘性泥石流的回淤比降

Table 2 The siltation gradient from experiment

重度 /(kN/m ³)	沟槽纵坡/%							
	9.5	12.1	14.4	16.7	18.9	21.3	23.8	26.2
17	7.0	9.8	13.2	12.6	14.6	15.7	18.0	19.8
18	8.4	10.0	10.3	11.9	13.9	15.5	17.1	20.2
19	7.5	9.6	11.6	14.1	16.6	18.9	20.5	23.6
20	-	9.8	11.2	12.1	13.9	15.7	17.5	20.0
21	9.8	9.1	10.9	12.6	14.2	16.4	19.4	21.4
22	7.5	10.5	10.7	13.0	14.4	16.9	18.5	20.3
平均值	8.08	9.8	11.38	12.69	14.55	16.61	18.56	20.96

2.2 回淤比降比值

回淤比降比值是拦挡坝设计中的重要参数^[9]。回淤比降比值K是回淤比降*i*与原沟床纵比降*i*₀的比值, $K = i/i_0$ 。将表2中回淤比降除以原沟床比降,得到回淤比降比值K计于表3。由表3可见,回淤比降比值在0.76至0.85间,平均0.80,介于实际观测得到的0.70~0.90的中间值^[7],与实际情况较为接近,此值可以作为粘性泥石流回淤比降比值的

设计参考值。

表 3 不同重度、沟床纵坡下粘性泥石流的回淤比降比值
Table 3 The siltation gradient from experiment

重度 $/(kN/m^3)$	沟槽纵坡 / %								平均值
17	0.74	0.81	0.92	0.75	0.77	0.74	0.76	0.76	0.78
18	0.88	0.83	0.72	0.71	0.74	0.73	0.72	0.77	0.76
19	0.79	0.79	0.81	0.84	0.88	0.89	0.86	0.9	0.85
20		0.81	0.78	0.72	0.74	0.74	0.74	0.76	0.76
21	1.03	0.75	0.76	0.75	0.75	0.77	0.82	0.82	0.81
22	0.79	0.87	0.74	0.78	0.76	0.79	0.78	0.77	0.79
平均值	0.85	0.81	0.79	0.76	0.77	0.78	0.78	0.80	0.79

3 实验分析

3.1 回淤比降与重度的关系

重度是影响粘性泥石流坝后回淤一个较重要因素。在不同重度下,粘性泥石流坝后回淤比降的变化规律如图 4 所示。从图可见,回淤比降与重度的关系较复杂,总体表现为随重度的增加,回淤比降呈现增加的趋势,但在重度 19 kN/m^3 时,回淤坡度达到最大。在重度为 19 kN/m^3 ,坡度 $\geq 16.7\%$ 的实验中,由于泥石流流量控制得比其他实验小,得到的回淤厚度比相同坡度下其他实验数据大,回淤纵比降也比其他组实验数据大。

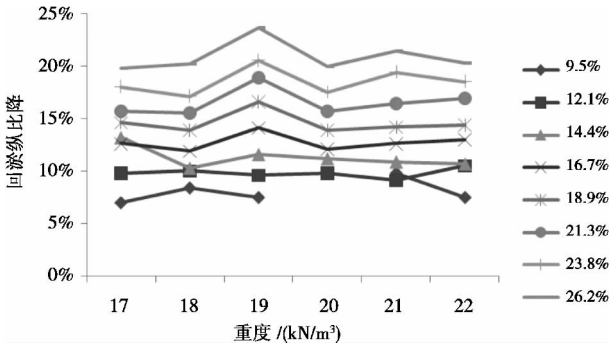


图 4 粘性泥石流回淤比降与重度的关系

Fig. 4 The relationship between siltation gradient and density of viscous debris flow

忽略重度为 19 kN/m^3 时,经过二次多项式拟合,得到回淤比降随重度变化曲线如表 4。从表 4 可以看出,在沟床纵比降一定的条件下,回淤比降随着重度的变化趋势基本相同,总的趋势均略微增大,

在重度区间内有小的波动。随着沟床纵比降的增大,回淤比降也呈现整体增大的趋势。但总体相关性不好,相关系数在 $0.279 \sim 0.967$ 间,平均为 0.63 。分析结果表明,重度在 $17 \sim 19\text{ kN/m}^3$ 时,回淤比降随着重度的增大,变化不明显,尤其在沟槽纵比降较大时基本保持不变。由于实验存在一定误差,导致在沟床纵比降为 23.6% 、 23.8% 和 9.5% 时,重度 21 kN/m^3 的回淤比降略比 22 kN/m^3 大,忽略误差后,仍然可以看出,回淤比降随着重度的增大,但变化不明显。

表 4 回淤纵比降和重度的相关关系
Table 4 Correlation between siltation gradient and density of viscous debris flow

纵比降 / %	相关关系	相关系数 R^2
9.5	$i = -0.006\gamma^2 + 0.582\gamma - 7.742$	0.883
12.1	$i = 0.001\gamma^2 - 0.039\gamma + 0.474$	0.279
14.4	$i = 0.003\gamma^2 - 0.118\gamma + 1.266$	0.622
16.7	$i = 0.001\gamma^2 - 0.041\gamma + 0.532$	0.869
18.9	$i = 0.001\gamma^2 - 0.041\gamma + 0.552$	0.831
21.3	$i = 0.001\gamma^2 - 0.036\gamma + 0.48$	0.967
23.8	$i = 0.001\gamma^2 - 0.035\gamma + 0.482$	0.388
26.2	$i = 0.001\gamma^2 + 0.004\gamma - 0.195$	0.402

从表 4 看出,同样由于实验误差,使得 12.1% 、 23.8% 和 26.2% 的相关系数较小。但从各组相关关系式中,得出当重度在 18 kN/m^3 至 20.5 kN/m^3 之间时,回淤比降达到最小值。据此估计在重度为 19 kN/m^3 时,粘性泥石流的流体性质产生了某些变化,这需要进行实验来得到验证。

3.2 回淤比降与沟床纵比降的关系

在相同重度条件下,回淤比降与沟槽纵比降关系如图 5 所示。实验表明:粘性泥石流回淤比降与沟槽纵比降呈正相关。在沟槽纵坡较小时,回淤纵坡变化较小;在沟槽纵坡较大时,回淤纵坡变化较大。

分析认为:粘性泥石流富含粗颗粒和粘粒,在沟槽中流动时,由于其具有塑性强度,流速明显比稀性泥石流小,在流动中更容易停下来。当遇到拦挡坝阻碍时,泥石流便会在拦挡坝处慢慢淤积。当堆积厚度超出坝高时,泥石流沿堆积体表面斜向下的切应力会越来越大,最终切应力大于其表面的粘滞力,部分流体会沿着某条光滑的残留层向下运动,最终溢出拦挡坝,这在实验中表现为过坝后阵流。而粘

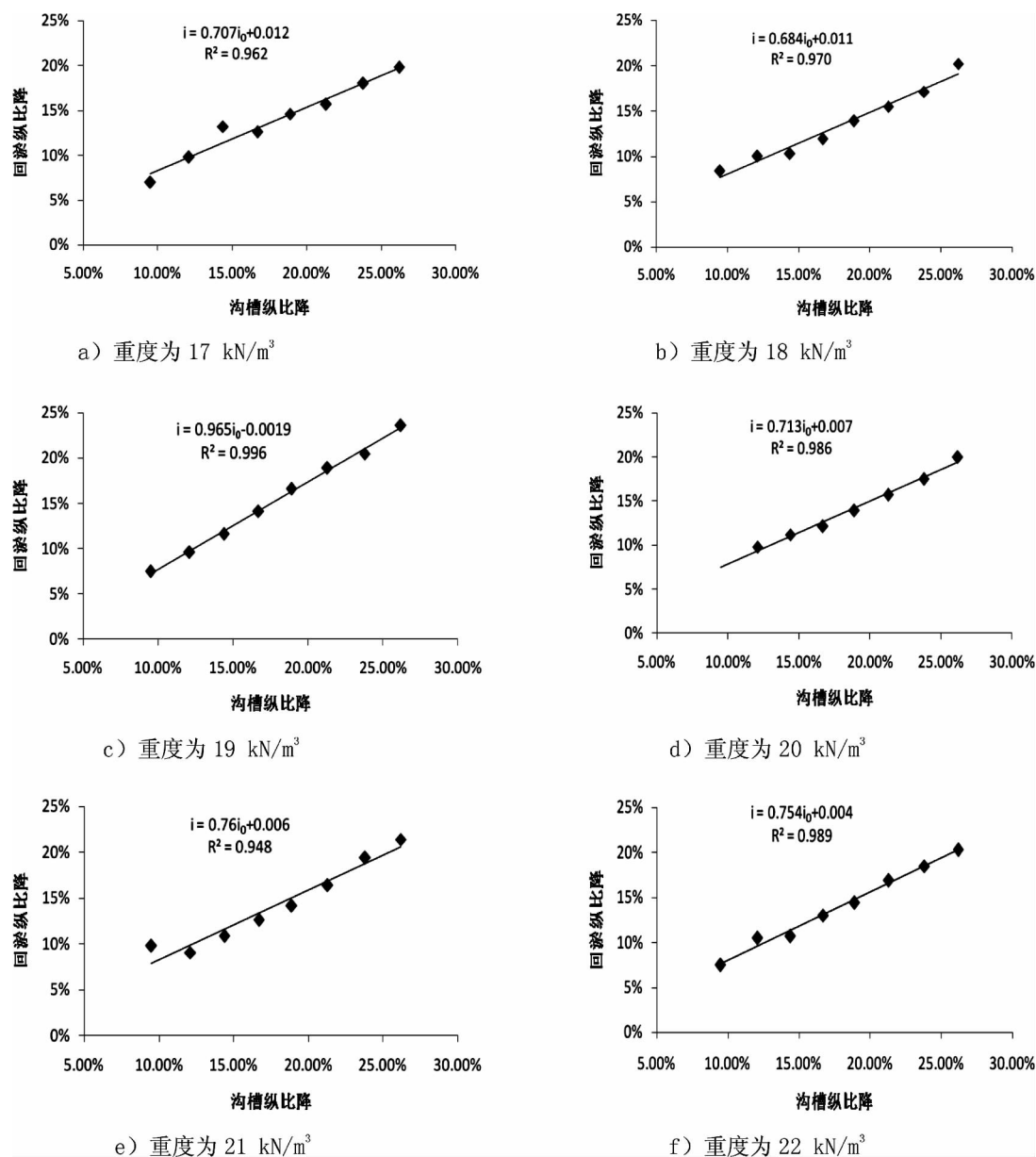


图5 粘性泥石流回淤比降与沟床纵比降的关系

Fig. 5 The relationship between siltation gradient and gradient of gully bed of viscous debris flow

滞力的水平分量与沟床纵坡紧密相关,因此,沟床纵比降必然会影响最终的回淤比降,从而表现为正相关。

为更好表征用沟槽纵比降与回淤比降的关系,采用 Matlab 软件对沟槽纵比降与回淤比降的关系进行了拟合,相关关系和相关系数如图 5 所示。由图 5 可以看出,其关系为线性正相关,相关系数在 0.95~0.99 间。

3.3 回淤比降与重度和沟床纵比降的关系

由前述的单一因素分析可以发现,粘性泥石流坝后回淤比降与沟床纵比降呈线性相关,而与重度

呈 2 次多项式关系。但在实际调查中发现,重度和沟床总比降对回淤比降的影响是交互的,即二者共同影响回淤比降的大小。本文尝试探讨和建立回淤纵比降 i 与重度 γ 和沟床纵比降 i_0 的关系式

$$\text{令 } i = a \times \gamma^b \times i_0^c \quad (1)$$

式中 a b c 为系数。对公式 1 两边取自然对数,得

$$\ln(i) = \ln(a) + b \ln(\gamma) + c \ln(i_0) \quad (2)$$

对式 (2) 再进行二元线性回归,求得 $a = 0.6014$, $b = 0.0526$, $c = 0.9470$,代入式 (1),得到回淤比降

$$i = 0.6014 \times \gamma^{0.0526} \times i_0^{0.9470} \quad (3)$$

该式相关系数 $R^2 = 0.9577$, 相关性极高, 说明利用幂函数能较好的综合模拟回淤比降与重度和沟床纵比降的关系。

由式(3)可以看出, 在重度与沟床纵比降对回淤比降的综合作用中, 回淤比降与重度及沟床纵比降呈正相关。与重度相比, 沟床纵比降对回淤比降的影响因子和相关系数更大, 能更大的影响回淤比降的变化, 是影响回淤比降的最主要因素。而回淤纵坡随重度的变化并不十分明显, 重度对回淤比降的影响相对较小。这也是目前泥石流拦挡坝设计中多以原沟床比降为参照, 来设计回淤比降的根本原因。因此, 本实验中取得的回淤比降比值(见表3)可作为今后拦挡坝回淤比降设计的参考, 而式(3)也可以作为今后坝后回淤比降设计的简算公式, 通过计算可以获取设计的参考值。实验同时表明, 今后在设计大型泥石流防治拦挡坝工程时, 可通过开展相关模型实验, 为设计提供更为精确的回淤比降值。

3.4 与稀性泥石流实验的对比分析

李峰实验发现, 稀性泥石流回淤比降与沟床纵比降呈正相关关系, 且相关性良好, 在坝高为 9 cm 时, 沟床纵比降分别为 12%、14%、16%、18% 和 20% 时, 回淤比降分别为 8.42%、10.31%、12.68%、13.87% 和 15.93%^[9]。粘性泥石流实验中同样发现回淤比降与沟床纵比降呈正相关, 相关性很好。在坝高为 9 cm 时, 沟床纵比降分别为 12.1%、14.4%、16.7%、18.9% 和 21.3% 时, 回淤比降分别为 9.8%、11.38%、12.69%、14.55% 和 16.61%。与稀性泥石流实验相比, 相同沟床比降条件下粘性泥石流的回淤比降稍大, 但总体而言稀性泥石流和粘性泥石流回淤比降基本接近, 说明泥石流流体性质对回淤比降的影响甚微。

4 结论

泥石流拦挡坝的坝后回淤比降是泥石流防治工程设计中的一个重要参数。它不仅牵涉到工程量的大小和经济指标的合理性, 而且直接关系到工程的预期效果和实用价值。本文通过模拟实验, 揭示了粘性泥石流坝后回淤比降的基本规律, 探讨了粘泥石流回淤比降与重度及沟床纵比降的关系, 初步建立了其基本定量关系式。研究得出如下结论:

1. 在重度一定的情况下, 当沟床纵坡为 9.5%、

12.1%、14.4%、16.7%、18.9%、21.3%、23.8% 和 26.2% 时, 其相应的回淤比降分别为 8.08%、9.8%、11.38%、12.69%、14.55%、16.61%、18.56% 和 20.96%;

2. 回淤比降比值在 0.76 至 0.85 间, 平均为 0.80, 与实际观测数据较为接近;

3. 回淤比降随沟槽纵比降的增大而增大, 二者呈线性正相关, 相关系数在 0.95 以上; 回淤比降随重度的增大, 基本保持不变;

4. 回淤比降与重度和沟床纵比降的关系式为: $i = 0.6014 \times \gamma^{0.0526} \times i_0^{0.9470}$, 沟床纵比降是影响坝后回淤的主要因素;

5. 相同坝高条件下, 粘性泥石流比稀性泥石流的回淤比降略大, 泥石流流体性质对回淤比降影响较小;

6. 本实验中取得的回淤比降比值可作为今后拦挡坝回淤比降设计的参考, 回淤比降关系式也可以用来计算坝后回淤比降设计参考值。

致谢: 本实验是在中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室实验大厅开展的, 王成华研究员、欧国强研究员、李泳研究员、张小平高级实验师、李战鲁工程师、郭绍平硕士提供了实验、样品测试帮助和论文指导, 在此一并致谢!

参考文献(References)

- [1] Zhou Bifan, Gao Kao. Role of silt-trap dams in preventing debris flows [G]//Proceedings debris flow. Chongqing: Scientific and Technical Publisher, Chongqing Branch, 1981: 118 - 121 [周必凡, 高考. 拦砂坝在泥石流防治中的作用 [G]//泥石流论文集. 重庆: 科学技术出版社重庆分社, 1981: 118 - 121]
- [2] Zhou Bifan, Li Deji, Luo Defu, et al. Debris flow prevention guidelines [M]. Beijing: Science Press, 1991. [周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [3] Li Feng. Experiment on relationship between slope of intercepted sediments behind gravity check-dam with the gradient of gully bed and the height of dam [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011 [李峰. 泥石流拦挡坝坝后回淤坡度与坝高及沟床纵比降关系的实验研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.]
- [4] Li Deji. Theory and practice of debris flow mitigation [M]. Science Press, 1997. [李德基. 泥石流减灾理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.]
- [5] Liu Jinfeng, You Yong. Experimental study on back siltation in the outlet of viscous debris flow channel [J]. Journal of Mountain Sciences, 2011, 29(2): 226 - 233 [柳金峰, 游勇. 粘性泥石流沟口回淤实验研究 [J]. 山地学报, 2011, 29(2): 226 - 233]
- [6] Zeng Siwei, Li Honglian. The highway engineering in debris flow re-

- gions [M]. Beijing: China Communication Press ,1981. [曾思伟 , 李鸿琰. 泥石流地区公路工程 [M]. 北京: 人民交通出版社 , 1981.]
- [7] Qi Long ,Cai Xiangxing. A preliminary study of gradient on the debris flow deposit surfaces along the upstream from the block barriers of Dongchuan in Yunnan [G]// Bulletin of Chinese Academy of Sciences ,Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology. Beijing: Science Press ,1985: 139 – 145 [祁龙 ,蔡祥兴. 云南东川大桥河拦挡坝上游泥石流淤积坡度的初步研究 [G]//中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊. 北京: 科学出版社 ,1985: 139 – 145]
- [8] Flieshman C M. Debris Flow [M]. Beijing: Science Press ,1986. [弗莱施曼 C M 著; 姚德基 译. 泥石流 [M]. 北京: 科学出版社 ,1986.]
- [9] Li Feng ,Ma Dongtao ,Ma Jianjun. Experiment on slope of intercepted sediment ,deposit and scour of diluted debris flow behind Check-dam [J] . China Railway Science 2012 ,B08: 7 – 11 ,59 [李峰 ,马东涛 ,马建军. 稀性泥石流拦挡坝后淤积及坝前冲刷规律实验研究 [J]. 中国铁道科学 2012 ,B08: 7 – 11 ,59]

Experiment on Siltation Gradient of Viscous Debris Flow behind Gravity Check-dam

WU Xin^{1 2} , MA Dongtao³ , YANG Min^{1 2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment ,Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy ,Chengdu 610041 ,China;

2. University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100039 ,China ;

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes ,Chinese Academy of Sciences ,Chengdu 610041 ,China)

Abstract: The siltation gradient is an important parameter for designing gravity check-dam of debris flow ,which is not only influencing the judgment of the height ,the distance between dams ,the deposit capacity of debris flow reservoir ,but also the mitigation benefit and engineering life of check-dams. The siltation gradient is affected by the gradient of gully bed ,the density ,flow velocity and discharge ,and grain compositions of debris flow et al factors ,among which the gradient of gully bed and the density are most important than others. By using the viscous debris flow in the laboratory ,simulation experiments are carried out under 8 groups of the gradient of gully bed and 6 groups of densities. After the experiment finished ,the influences of gradient of gully bed and the density of debris flow to siltation back check-dam ,and the relationship between them are studied and analyzed. The following results are achieved through the experiment: 1. under the same density ,the siltation gradient is 8.08% ,9.8% ,11.38% ,12.69% ,14.55% ,16.61% ,18.56 % and 20.96% respectively while the gradient is 9.5% ,12.1% ,14.4% ,16.7% ,18.9% ,21.3% ,23.8% and 26.2% ; 2. The gradient ratio parameter value K is between 0.76 and 0.85 ,the mean value is 0.80 ,which can be used as designing data; 3. The siltation gradient is increasing with the increase of the gradient of gully bed ,and there is a linear relationship between them. The gradient of back siltation is increased slowly with the increase of density of debris flow ,they have a quadratic relationship each other; 4. the relationship of the siltation gradient i with gradient of gully bed i_0 and the density of debris flow γ is: $i = 0.6014 \times \gamma^{0.0526} \times i_0^{0.9470}$,which can be used for calculating i ; 5. under the same dam height ,the siltation gradient viscous debris flow is relative greater than thin debris flow.

Key words: viscous debris flow; check-dam; gradient of gully bed; density; siltation gradient; the gradient ratio parameter