

文章编号: 1008-2786-(2007)6-747-06

西藏波密县古乡沟泥石流模型试验中的模型砂配制

何淑芬^{1,2}, 吕娟^{1,2}, 刁惠芳²

(1 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2 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)

摘要: 对西藏古乡沟泥石流模型试验中的模型砂配制进行了研究, 旨在保证模型试验的合理性和科学性, 从而为泥石流灾害防治工程提供可靠的设计依据。通过对泥石流形成区和堆积区样品的粒径分析, 根据模型试验的目的和条件, 选定模型的几何比尺为 1:100, 但模型砂的配制采用泥砂分段模拟法, 原型中小于 0.1 mm 的颗粒不缩小, 仍按重量百分比配制; 原型中大于 0.1 mm 的颗粒按相似比尺缩小后用小于 0.1 mm 模型砂代替。并通过模型样品的选用和粒径组合对泥石流体以及堆积扇的模型砂配制过程进行了详细的分析研究, 使模型试验获得了比较好的结果。

关键词: 西藏古乡沟; 泥石流; 模型试验; 模型砂; 配制

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

古乡沟位于西藏波密县古乡村西, 川藏公路 K4044~K4047段, 属帕隆藏布右岸一级支流, 流域面积 25.2 km², 主沟道长 8.69 km, 山体平均坡度 36.9°, 主沟道平均纵比降 25.61‰, 局部沟段纵坡可达 400‰~600‰。沟源头及上游区三面环山, 中间低洼, 为高山环抱的冰蚀围谷盆地; 中下游是两山夹峙的狭窄而幽深的基岩峡谷, 沟谷深切, 横断面呈“V”型, 古乡沟流域特征值见表 1。

1 古乡沟泥石流概况

古乡沟发源于念青唐古拉山东延余脉的向阳山坡, 流域最高海拔 6298 m, 最低海拔 2530 m, 相对高度 3768 m。古乡沟是发育在高山围谷中的一条大型冰川泥石流沟, 该沟在晚更新世古乡冰期之后, 就开始了泥石流活动。在青藏高原隆升过程中, 随着气候干、湿、冷、暖的周期性波动及其所引起的冰川前进后退, 导致了泥石流活动的周期性变化。古乡沟近期泥石流活动以 1953—09 暴发的一场特大

型泥石流为起点, 自此以来, 几乎每年都暴发泥石流。一年少则几次, 多则几十次 (1964 年 85 次)。一场泥石流中, 粘性泥石流和稀性泥石流交替出现, 粘性泥石流 (最大容重可达 2.24 t/m³) 能将大于 5 m 的石块带到堆积扇。粘性泥石流以巨大的搬运能力, 将数以千百万立方米计的泥砂石块搬出山外, 成为堆积扇物质的主要输送者, 控制着堆积扇的规模扩展和总体形态; 稀性泥石流的搬运能力远小于粘性泥石流, 它的主要作用是对堆积扇进行侵蚀雕塑, 刷深沟槽, 粗化沟床和扇面, 加大扇面起伏, 并将细粒物质运移至堆积扇的边缘地带停积。暴发泥石流时, 龙头挟带着大量石块, 卷着沿沟扫荡下来的树木, 奔涌而下, 经一段基岩峡谷 (流通区) 后, 冲出山口。山麓的农田、村庄、森林、寺庙被毁于一旦; 出山口的泥石流散流堆积, 淤埋川藏公路, 形成一个宽约 4 km 的泥石流堆积扇 (面积 4.23 km²), 扇形地堵塞帕隆藏布河道, 形成堵塞湖 (古乡湖)。由于泥石流频繁活动, 导致扇形地极不稳定, 通过此段的川藏公路几乎每年都受到泥石流或洪水的危害, 通行极

收稿日期 (Received date): 2007-10-08; 改回日期 (Accepted): 2007-11-01。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金, 项目编号 40371016; 交通部西部交通建设科技项目 (2006 31879284)。[National Science Foundation Grant No. 40371016 and Project of the Ministry of Communications (2006 31879284)]。

作者简介 (Biography): 何淑芬 (1952—), 女, 高级工程师, 主要从事泥石流观测试验工作。E-mail: Shf2004@yahoo.com.cn; He Shufen (1952—) is a superior engineer majoring in the observation of debris flow. E-mail: Shf2004@yahoo.com.cn

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

表 1 古乡沟流域特征值表
Table 1 Characteristics of Guxiang Gully

汇水面积 (km ²)	主沟长 (km)	沟床纵坡 (‰)	相对高度 (m)	山坡平均坡度 (°)	松散物质补给量 (× 10 ⁴ m ³)	堆积扇扇径 (km)	扇缘长 (km)	扩散角 (°)
25.2	8.69	256.1	3574	36.9	22.555	2.25	4.25	95

其困难,并经常断道,成为川藏公路最严重的病害点之一。

2 模型试验目的和模型相似准则

模型试验目的

为了确保川藏公路畅通,必须对活动频繁、规模巨大的古乡沟泥石流灾害进行有效的整治。模型试验目的就是为泥石流灾害整治工程提供可靠的设计依据。因为,在制订整治方案和布置防治工程时,首先必须了解出山口后,不同频率的稀性泥石流、过渡性泥石流、粘性泥石流在堆积扇上的运动、堆积及其对公路的危害情况。了解这种情况,最好是进行现场泥石流观测,但观测的难度很大,虽然 1964 年至 1965 年进行过现场观测,掌握了不少情况,但嗣后一直没有进现场观测。因此要全面了解三种不同类型的泥石流在堆积扇上的运动、堆积及其对公路危害的情况,只有在原来观测和现场详细考察的基础上,借助于模型试验,并根据试验成果分析研究防治工程的平面形式、尺寸大小、工程的作用和效果,以及成灾范围及工程的防灾减灾效益。

模型相似准则

泥石流模型试验尚处于探索阶段。古乡沟泥石流堆积扇模型为正态动床模型。根据试验的目的要求和模型场地大小条件,确定模型的几何比尺为 1 : 100。将古乡沟堆积扇原型缩小为模型,在模型上重演与原型条件相似的泥石流流体运动和堆积情况。再将模型试验成果应用到原型上。因而要求模型与原型之间应满足一定的相似条件。根据相似准则,参考国内外通常做法,此次试验要求模型砂与原型砂的物理力学特征值相似;原型流体与模型流体的容重相等,堆积扇模型与堆积扇原型的堆积物密度相同、孔隙度相同,土体颗粒粒径和颗粒级配相似,并遵守模拟边界条件,模型流体与原型流体的弗汝德数 $Fr = V / \sqrt{gh}$ (式中 V 为流体流速, g 为重力加速度, h 为流体深度) 相等。根据模型几何比尺确

定,与泥石流体和堆积物有关的模型和原型之间相似比尺如表 2。

表 2 与模型砂有关的相似比尺
Table 2 Ratio for similarity of the experiment

比尺名称	符号	比尺数值	比尺名称	符号	比尺数值
级配比尺	λ_{pi}	1	容重比尺	λ_{rc}	1
粒径比尺 ($> 0.1\text{ mm}$)	λ_d	100	孔隙率比尺	λ_e	1
粒径比尺 ($< 0.1\text{ mm}$)	λ_d	1	河床变形相似	λ_{1i}	100
			水平垂直比尺	λ_{1h}	100

3 原型样品的颗粒组成

泥石流土体的颗粒组成

鉴于 1965 年以后古乡沟一直没有进行泥石流观测,也没有取得泥石流体原样。因此主要是通过泥石流形成物和堆积物的样品,再参照 1964 ~ 1965 年间的泥石流体样品资料,来确定目前泥石流体(原型)的颗粒组成。

在泥石流形成区,具有丰富的松散土体。有现代或古冰碛物、雪崩堆积物及坡残积物等。这些土体颗粒大小不同,形状各异,有大到数米的巨石,也有 $< 0.005\text{ mm}$ 粘粒。古乡沟的粘性泥石流能搬运的最大颗粒粒径,根据 1964 年和 1965 年观测资料^[5] 一般为 3 m,个别可大于 5 m,平均粒径在 0.2 ~ 0.5 m 间;就是稀性泥石流,也可将粒径在 1.0 m 左右的石块带到堆积扇上堆积。我们所取的形成区原始土体样品是 $< 100\text{ mm}$ 的土体,它们占泥石流原始土体重量的一半左右。图 1 是古乡沟形成区土体和堆积区土体的颗粒大小分配曲线。系列 1 和系列 2 二条曲线为形成区土体的颗粒大小分配曲线;系列 3 到系列 6 四条曲线是泥石流堆积物土体的颗粒大小分配曲线。泥石流堆积物样品取于出山口附近,有粘性、过渡性、稀性三类,值均未包括 $> 100\text{ mm}$ 的粗颗粒部分。

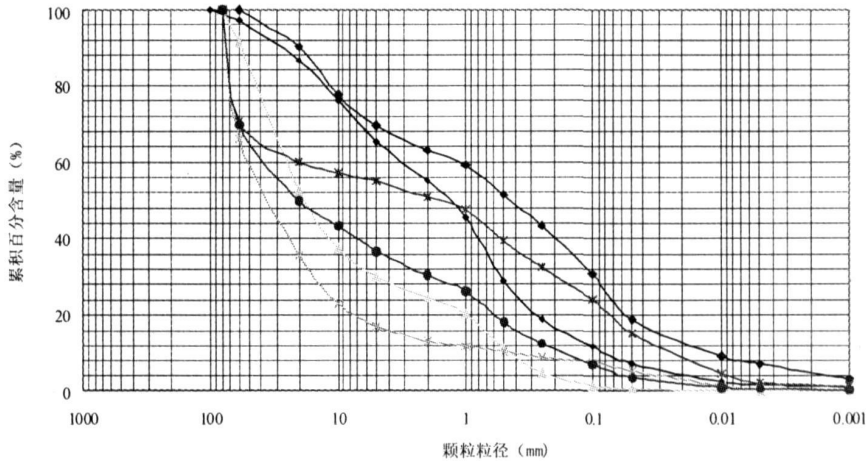


图 1 古乡沟泥石流形成区土体和堆积物土体颗粒大小分配曲线

Fig 1 Grain compositions of debris flow soil samples of Guxiang Gully
土粒直径 (mm)

根据上述形成区土体、泥石流堆积物土体样品的颗粒大小分析结果, 结合野外考察见到的情况和 1964年至 1965年所取泥石流体粒径资料, 最大粒径取了 3 000 mm, 从而增加了 3 000 mm至 100 mm

的粗颗粒部分。最后选定的各类型泥石流土体颗粒组成如表 3 作为本次泥石流模型试验的泥石流原型土体。

表 3 选定的各类型泥石流原型土体颗粒组成
Table 3 Grain compositions of soil samples used for experiment

粒径 (mm)	小于某孔径土的重量百分数 (%)		
	稀性泥石流 ($\gamma_c=1.55\text{ t/m}^3$)	过渡性泥石流 ($\gamma_c=1.8\text{ t/m}^3$)	粘性泥石流 ($\gamma_c=2.0\text{ t/m}^3$)
<3 000	100	100	100
<20 00	99	98	97
<1 000	90	88	70
<500	80	62	48
<200	68	58	43
<100	62	55	40
<50	55	50	35
<20	48	46	32
<10	40	38	28
<5	35	30	20
<2	25	18	16
<1	18	15	11
<0.5	13	10	7
<0.25	11	9	6
<0.10	8	7	5
<0.05	6	5	4
<0.01	4	3	2.5
<0.005	2	1.5	1

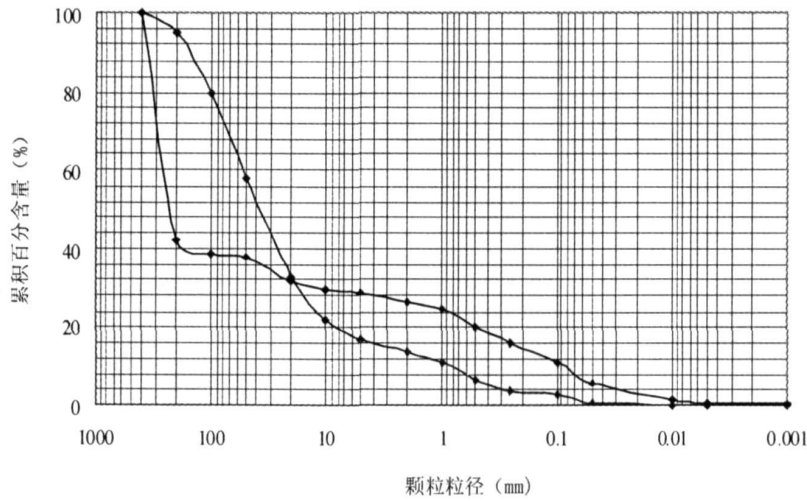


图 2 古乡沟泥石流堆积扇土体颗粒大小分配曲线
Fig 2 Grain composition of soils in deposit fans of Guxiang Gully

泥石流堆积扇堆积物土体的颗粒组成
古乡沟泥石流堆积扇是一个扇顶角 95° ，半径约 2.25 km，扇缘长 4.25 km，面积约 4.23 km² 扇体。堆积扇上部（距峡谷 300~500 m 范围）平均纵坡为 7.5° （131.65‰），表面堆积形态呈垅岗状，表层物质由粗大的块石、卵石等组成，含沙量泥砂。块石最大粒径一般为 3 m，个别达 5 m 以上，粗大颗粒在沉积剖面上具有架空结构；中部（距峡谷 500~1 000 m 范围）呈倾斜向下宽坦面，平均纵坡为 9° （158.38‰），物质组成变细，石块粒径大多 0.2~0.5 m，砂粒增多；下部（距峡谷 1 000 m 以下），纵坡为 $5^{\circ}\sim6^{\circ}$ （89.49‰~105.10‰），表面向下平缓倾斜，砾石变小，细砂和粘土增加，与湖泊接触处有湖相沉积的细砂和淤泥。堆积扇表面砾石测定情况见表 4。公路附近堆积扇下部取有二个堆积物土体样品，取的都是小于 400 mm 的土体。另外，我们采用

单位平面采样法，测定了堆积扇不同部位的石块分布情况（见表 4），最大粒径不超过 3 000 mm。

表 4 古乡沟泥石流堆积扇砾石测量统计表
Table 4 Sizes of boulders in the deposit fans

测量位置	砾石数 (个)	平均砾径 (mm)	最大砾径 (mm)	最小砾径 (mm)
堆积扇上部	45	696	2 100	100
堆积扇中偏上部	81	196	420	100
堆积扇中偏下部	123	102	290	30
堆积扇下部	173	84	260	30

根据图 2 和表 4 实际测定的堆积扇堆积物土体颗粒的组成，并考虑公路通过的情况，选定了堆积扇原型土体样品颗粒组成（表 5）。

表 5 选定的堆积扇原型样品的颗粒组成
Table 5 Grain compositions of deposit soils used for experiment

粒径 (mm)	<3 000	<2 000	<1 000	<500	<200	<100	<60	<20	<10	<5	<1	<0.5	<0.005
小于某粒径土的 总土质量百分数 (%)	100	98	95	90	80	70	60	45	25	10	5	2	1

4 模型砂配制

古乡沟泥石流土体的粒径范围很宽，颗粒粒径有大到数米（5~7 m）的巨砾，也有小于 0.005 mm

的粘粒。通常当原型砂很粗时，模型砂一般采用与原型砂比重相同的天然砂，但需保证模型砂与原型砂的物理力学性质相似。由于原型样品颗粒组成是连续的，要求模型砂颗粒组成也是连续的。级配比尺 $\lambda_{ps}=1$ ；粒径比尺 $\lambda_d=100$ 。古乡沟泥石流土体

的粒径范围很宽, 如果用同一粒径比尺来满足试验要求的模型砂与原型砂的物理力学特征值相同是不可能, 细粒土按比尺缩小后, 也没有合适的材料替换它。因此在考虑各粒组模型砂颗粒粒径比尺时, 采用泥砂分段模拟法, 即原型中 $<0.1\text{ mm}$ 的颗粒不缩小, 仍按原重量百分比配制; 原型中 $>0.1\text{ mm}$ 的颗粒按相似比尺缩小, 并用相应的模型砂代替。

4.1 泥石流流体模型砂配制

分别采购了比重与原样相同的砾石、砂、粉砂和

粘土等颗粒作物料, 并按表 3 的要求百分比和分段模拟法配成模型砂。然后加入一定比例的水, 经浸泡、搅拌均匀后, 分别制成稀性 ($\gamma_c: 1.55\text{ t/m}^3$)、过渡性 ($\gamma_c: 1.80\text{ t/m}^3$) 和粘性 ($\gamma_c: 2.00\text{ t/m}^3$) 等泥石流模型样品 (砂)。这些样品在流动均匀后在流体中任一点取样, 其粒径组成, 与原样基本相似, 但由于经过分段模拟法处理, 粗细颗粒的比例略有变化, 细粒部分增加。

表 6 各类型泥石流模型样品颗粒组成
Table 6 Grain compositions of soil models experiment

粒径 (mm)	小于某孔径土的重量百分数 (%)					
	稀性泥石流		过渡性泥石流		粘性泥石流	
	$(\gamma_c=1.55\text{ t/m}^3)$		$(\gamma_c=1.80\text{ t/m}^3)$		$(\gamma_c=2.00\text{ t/m}^3)$	
<30	100	100	100	100	100	100
<20	99.6	99.89	99.46	99.10	99.41	98.69
<10	82.54	84.29	88.01	74.98	64.77	68.87
<5	67.14	66.04	59.33	59.90	43.50	47.22
<2	62.12	56.15	55.48	56.87	40.50	42.73
<1	58.83	52.73	53.90	55.03	39.15	40.90
<0.5	56.44	50.84	52.26	53.03	37.73	39.22
<0.2	51.53	46.84	47.47	49.95	34.14	35.72
<0.1	44.55	39.82	38.48	41.52	27.38	28.74
<0.05	38.02	32.35	30.09	29.15	19.28	20.51
<0.01	19.07	16.25	14.36	14.39	9.70	10.09
<0.005	13.32	11.25	11.18	9.57	6.57	6.87

堆积扇模型砂配制

堆积扇模型样品选用与原型土体样品比重相同的天然土、砂、石。由于堆积扇模型样品用物料数量很大, 在选购物料时, 分别从两个地方选物料。第一批物料比较粗, 粒径从 21 mm 到 0.1 mm 。第二批样品比较细, 粒径都小于 0.1 mm 。将两批样品按表

5 并考虑表 4 配制成模型样品, 然后将配制好的不同模型样品铺在模型台相应的位置上。铺好后在模型的上部、中部、下部各段各取有一个样品。样品的颗粒组成情况如表 7。虽然与流体一样, 因分段模拟后, 细粒部分增加, 但堆积扇模型土体与原型土体样品的相似基本上是满足试验要求的。

表 7 堆积扇模型样品颗粒组成
Table 7 Grain compositions of soil models for deposit fans

取样部位	小于某孔径土的重量百分数 (%)											
	$<30\text{ mm}$	$<20\text{ mm}$	$<10\text{ mm}$	$<5\text{ mm}$	$<2\text{ mm}$	$<1\text{ mm}$	$<0.5\text{ mm}$	$<0.2\text{ mm}$	$<0.1\text{ mm}$	$<0.05\text{ mm}$	$<0.01\text{ mm}$	$<0.005\text{ mm}$
堆积扇模型顶部	100	98.99	94.83	86.35	75.98	73.64	68.94	46.55	23.54	10.60	3.31	2.17
堆积扇模型中部	100	98.07	92.18	87.73	85.28	82.65	77.37	52.24	26.42	11.29	3.72	2.44
堆积扇模型尾部	100	98.65	96.61	94.75	93.42	90.59	84.76	57.23	28.94	12.37	4.07	2.67

5 模型试验结果

在稀性泥石流、过渡性泥石流运动情况下公路段所受的危害形式相似和范围相同, 受害长约 950 m 淤积危害为主, 局部地段受到冲刷; 堆积扇上中部位以冲刷为主, 冲刷深度 1.2 ~ 0.4 m; 中下部位以淤积为主, 淤积厚度 1.2 ~ 0.6 m。在粘性泥石流的作用下, 公路受危害长也为 950 m 最主要是淤积危害, 淤积厚度一般可达 1 m; 在堆积扇上部以淤积为主; 中下部位淤积尤为严重, 淤积厚度最大可达 2.7 m。一场泥石流在设计标准 (50 a—遇) 下, 堆积扇上的最大淤积量, 稀性为 $8.18 \times 10^4 \text{ m}^3$, 过渡性泥石流为 $34.25 \times 10^4 \text{ m}^3$, 粘性泥石流为 $36.62 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。实验结果基本上达到预期目的。

6 结语

1. 古乡沟泥石流流体和堆积扇堆积物中土体颗粒粒径范围很宽, 有大到数米的巨石, 也有小于 0.005 mm 的粘粒, 采用比重与原型相同的天然土砂石材料做模型砂进行试验是可行的。

2. 由于泥石流流体及其堆积物中土体颗粒粒径范围很宽, 如果用同一比尺来满足颗粒粒径相似的话, 很难找到合适的低价格材料来代替细粒粒径的模型沙。采用颗粒粒径分段模拟法可使这一问题得到基本解决。

3. 采用上述方法配制的泥石流流体和泥石流堆积扇土体的模型砂所进行的泥石流模型试验, 在三类不同性质泥石流运动时, 所出现的淤积、冲刷及其对公路的危害, 与原型过去出现过的某些情况颇会吻合。从而说明采用此类模型沙是合理的。

参考文献

- [1] Zhu Pingyi, He Zhen, Wang Yangchun, et al. Study of Typical Mountain Hazards Along Sichuan-Tibet Highway [M]. Chengdu: Chengdu Press of Technical University, 1999. 54~102 [朱平一, 何子文, 汪阳春等. 川藏公路典型山地灾害研究 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999. 54~102]
- [2] You Yong, Cheng Zunlan. Experimental Research of Guxiang Gully Debris Flowing Model in Tibet [J]. Journal of Natural Hazards, 1997, 6(1): 52~58 [游勇, 程尊兰. 西藏古乡沟泥石流模型试验研究 [J]. 自然灾害学报, 1997, 6(1): 52~58]
- [3] C M Debris Flow [M]. Beijing: Press of Science, 1986. 36~251 [费莱施曼 (姚德基译). 泥石流 [M]. 北京: 科学出版社, 1986. 36~251]
- [4] Hua Guoxiang, et al. Research of Non-Newton Hydromechanical Similarity [J]. Journal of Chengdu Technological University, 1981, 3(2): 9~20 [华国祥等. 非牛顿流体运动相似律的研究 [J]. 成都科技大学学报, 1981, 3(2): 9~20]
- [5] Wang Wenru, Zhang Shucheng, Wang Jiayi, et al. Properties of glacial debris flow in the Guxiang Gully [A]. In Tibet Memoirs of Lanzhou Institution of Glaciology and Cryopedology Chinese Academy of Sciences [J]. Beijing: Press of Science, 1985. 19~35 [王文濡, 章书成, 王家义等. 西藏古乡沟冰川泥石流特征 [A]. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第 4 号 [J]. 北京: 科学出版社, 1985. 19~35]

Sediment Sample Preparation for Simulation Experiment of Debris Flow in Guxiang Gully, Tibet

HE Shufen², LÜ Juan², DIAO Huijiao²

- (1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper is contributed to the sediment sample preparations for simulation experiment of debris flow in Guxiang Gully, Tibet. According to samples from the source areas and deposit areas of debris flow, the geometrical ratio is chosen as 1 : 100. The preparation is made separately in different domains of grain size. Grains smaller than 0.1 mm is used as the original composition while grains bigger than 0.1 mm are placed by the model grains smaller than 0.1 mm according to the model ratio. Combinations of the sediment models and their size distributions are analyzed in details, and the result is satisfactory.

Key words: sediment model preparation, simulation experiment, debris flow, Guxiang Gully