

粘性泥石流残留层的形成及减阻作用 ——以云南蒋家沟泥石流为例

张军, 吴积善, 游勇, 程尊兰

(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: 通过对云南蒋家沟粘性泥石流的野外观测, 讨论了粘性泥石流残留层的定义特征, 在大量实测数据基础上, 分析了残留层易形成时段的特性; 分别对一次泥石流过程、若干阵泥石流和一阵泥石流残留层的变化进行了相关分析; 最后用观测数据分析了泥石流残留层的减阻作用。

关键词: 泥石流; 残留层; 形成变化; 减阻

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

1 粘性泥石流残留层的定义及特征

粘性泥石流残留层是其流体通过粗糙不同的沟床后, 粘附在床面上的一层泥石流流体, 一般情况下厚度为 0. 15~ 0. 50 m, 有时候可达 1 m 左右, 它使沟床面变得光滑平顺。观测发现, 残留层对粘性泥石流的运动速度、冲淤变化和流动状态等方面的一些独特性质具有重要作用, 同时残留层在一定的泥石流规模内还具有缓和冲淤、孕育波动流的作用, 如云南东川蒋家沟当粘性泥石流龙头流量 $< 1\ 500\text{ m}^3/\text{s}$, 尤其处于 $150\sim 800\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 阵性流仿佛沿残留层“溜滑而过”, 不发生明显的冲淤, 但一旦超过 $1\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ 左右或出现连续流时, 残留层则可能遭到破坏, 会出现大幅度的冲刷。

2 残留层的形成特征

观测发现, 残留层通常在粘性泥石流暴发的前期形成, 表 1 纪录了 2001- 07- 19 云南东川蒋家沟粘性泥石流残留层的形成过程, 便是其中一例。

表 1 中, 流速、容重、时间、泥深、残留层厚度变化观测值 H 等均为实测值, 流量和输沙率为计算

值, 其中残留层厚度变化观测值 H 是指悬挂沟床上空的超声波探头到沟床面的距离。从表 1 可以看出, 在泥石流未暴发前(15: 27: 55), 超声波探头到沟床面的距离 H 为 3. 70 m, 15: 43: 30 第一阵泥石流后, H 值观测值为 3. 67 m, 表示形成了厚 0. 03 m 的薄薄一层残留层, 到 16: 01: 00 第 12 阵后, H 值实测为 3. 21 m, 表明残留层 ΔH 厚度已发展到 0. 49 m, 此后, 残留层厚度变化不大, 为 0. 45~ 0. 50 m, 处于基本平衡阶段, 在 16: 18: 22 第 20 阵后, 又略有减小。

3 残留层的冲淤变化特征

观测研究表明, 粘附在床面上的残留层同样具有明显的冲淤变化特征。

3. 1 一次泥石流全过程的残留层变化

蒋家沟一次粘性泥石流一般由几十阵至上百阵组成(其中也会出现连续流), 其全过程长达 3~ 4 h, 甚至数十小时^[1]。而残留层的形成与消亡亦与每一次的粘性泥石流过程相辅相成, 即形成于粘性泥石流暴发之始, 消亡于粘性泥石流结束之后。表 2 记录了蒋家沟一次粘性泥石流残留层变化情况。这次泥石流发生在 6 月中旬, 晨 4: 27 暴发, 9: 16

收稿日期(Received date): 2003- 02- 26; 改回日期(Accepted): 2003- 03- 20。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(编号: 49971012)。[Supported by the National Science Foundation (Grant No. 49971012).]

作者简介(Biography): 张军(1949-), 该所研究员, 主要从事泥石流野外勘察和防治工程研究, 参加 7 部专著编写和发表论文 30 余篇。[ZHANG Jun(1949-), Professor researcher of IMHE, major research fields on engineering and field observation of debris flows, co-

表 1 2001- 07- 19 泥石流前期残留层变化(蒋家沟)

Table 1 Residue layer of debris flow on July 19, 2001 (Jiang jia Gully)

泥石流阵 次序号	时间 (h: min: s)	龙头泥深 (m)	流速 (m/s)	流量 (m ³ /s)	容重 r_c (t/m ³)	输沙率 (t/s)	残留层厚度 变化观测值 H (m)	残留层厚度 ΔH (m)
	1	2	3	4	5	6	7	8
暴发前	15: 27: 55	0. 40					3. 70	0
1	15: 43: 30	0. 40	5. 71	57. 1	2. 00	91. 70	3. 67	0. 03
2	15: 45: 30	0. 40	5. 89	70. 7	2. 00	113. 54	3. 40	0. 30
3	15: 46: 35	0. 40	6. 29	75. 5	2. 00	121. 25	3. 53	0. 17
4	15: 47: 00	0. 60	6. 94	83. 3	2. 00	133. 77	3. 53	0. 17
5	15: 49: 04	0. 70	7. 47	134. 5	2. 00	215. 99	3. 50	0. 20
6	15: 50: 40	0. 40	6. 24	131. 7	2. 00	211. 50	3. 42	0. 28
7	15: 52: 13	0. 70	6. 11	73. 3	2. 15	135. 39	3. 45	0. 25
8	15: 54: 47	0. 80	7. 89	165. 7	2. 15	306. 05	3. 32	0. 38
9	15: 56: 31	0. 80	7. 43	178. 3	2. 25	358. 15	3. 38	0. 32
10	15: 58: 21	1. 00	7. 90	189. 6	2. 25	380. 85	3. 33	0. 37
11	15: 59: 31	0. 70	8. 68	277. 8	2. 25	558. 02	3. 26	0. 44
12	16: 01: 00	0. 70	8. 54	191. 3	2. 24	381. 22	3. 21	0. 49
13	16: 02: 22	0. 60	7. 95	194. 8	2. 24	388. 20	3. 25	0. 45
14	16: 05: 08	0. 70	7. 20	138. 2	2. 24	275. 40	3. 24	0. 46
15	16: 06: 25	0. 70	8. 17	183. 0	2. 24	364. 68	3. 20	0. 50
16	16: 07: 54	0. 70	7. 88	176. 5	2. 24	351. 73	3. 24	0. 46
17	16: 10: 51	0. 80	8. 53	238. 8	2. 24	475. 88	3. 21	0. 49
18	16: 12: 04	0. 80	7. 70	215. 6	2. 24	429. 65	3. 22	0. 48
19	16: 14: 11	0. 50	6. 62	105. 9	2. 24	211. 04	3. 23	0. 47
20	16: 18: 22	0. 40	6. 15	78. 7	2. 24	156. 83	3. 30	0. 40
21	16: 19: 27	0. 80	8. 43	215. 8	2. 24	430. 05	3. 32	0. 38
22	16: 22: 18	0. 60	7. 99	167. 8	2. 37	369. 08	3. 38	0. 32
23	16: 24: 37	0. 60	7. 44	142. 8	2. 37	314. 09	3. 40	0. 30
24	16: 27: 07	0. 30	5. 82	55. 9	2. 37	122. 95	3. 38	0. 32
25	16: 32: 31	0. 40	6. 58	92. 1	2. 37	202. 57	3. 28	0. 42

1) 暴发前沟床纵坡 $i=6.60\%$ 。

结束, 其中 4: 27~ 5: 20 为粘性连续流, 5: 20~ 8: 03 为阵性流, 共发生粘性泥石流 49 阵, 8: 03~ 9: 16 为连续流, 容重由 2. 12 t/m³ 逐步明显降低。

从表 2 资料分析, 残留层形成与前述相似, 主要发生在前期时期, 该次泥石流残留层集中形成在 4: 25~ 5: 28, 残留层的最高淤积厚度达 0. 93 m; 此后至 8: 00 表现为冲淤交替出现; 8: 00 之后, 泥石流进入后期稀性阶段, 残留层被冲刷, 沟床出现粗化现

象。

观测研究发现, 当容重 r_c 不变时, 残留层厚度变化不大, 一般在 0. 4~ 0. 5 m 左右, 超过或不足此值, 就存在沟床的冲淤。

3.2 若干阵之间残留层的变化

一次泥石流残留层的变化通常是与若干阵泥石流暴发前后残留层变化相关联, 表 3 是同年 6 月 15 日的泥石流中第 16~ 28 阵的残留层变化情况。

表 2 一次泥石流残留层的冲淤变化过程(蒋家沟)¹⁾

Table 2 Variation of residue layer in a debris flow event (Jiang jia Gully)

时间 (h: min)	观测值 <i>H</i> (m)	残留层厚度变化 ΔH (m)	时间 (h: min)	观测值 <i>H</i> (m)	残留层厚度变化 ΔH (m)
4: 25	8. 88	0	6: 54	9. 30	- 0. 42
4: 32	8. 52	+ 0. 36	7: 00	9. 13	- 0. 25
4: 35	7. 95	+ 0. 93	7: 01	9. 41	- 0. 53
4: 50	7. 84	+ 1. 04	7: 16	8. 55	+ 0. 33
4: 55	8. 51	+ 0. 37	7: 24	9. 11	- 0. 23
5: 21	8. 09	+ 0. 79	7: 43	8. 82	+ 0. 06
5: 28	8. 96	- 0. 08	7: 56	8. 87	+ 0. 01
5: 42	9. 14	- 0. 26	8: 00	8. 93	- 0. 05
6: 06	8. 70	+ 0. 18	8: 26	9. 21	- 0. 33
6: 16	9. 0	- 0. 12	8: 28	9. 60	- 0. 72
6: 24	8. 20	+ 0. 68	9: 00	9. 75	- 0. 87
6: 32	9. 02	- 0. 14	9: 16	9. 80	- 0. 92

1) 沟床纵坡 $i=6.63\%$; 2) 残留层厚度变化值= 8.88m(暴发前观测值);
“+”表示淤高;“-”表示冲刷。

表 3 若干阵泥石流残留层的变化值(蒋家沟)¹⁾

Table 3 Variations of residue layers of several debris flow surges (Jiang jia Gully)

暴发时间 (h: min: s)	阵次 编号	龙头泥深 (m)	龙头流速 (m/ s)	流量 (m ³ / s)	容重 (t/ m ³)	阵流前残留层 观测值 H_1 (m)	阵流后残留层 观测值 H_2 (m)	残留层厚度 变化值 ΔH (m)
6: 18: 41	16	1. 00	6. 45	96. 8	2. 10	8. 90	8. 92	- 0. 02
6: 20: 15	17	1. 45	5. 88	127. 9	2. 10	8. 92	8. 91	+ 0. 01
6: 24: 12	18	1. 56	6. 25	146. 2	2. 15	8. 91	8. 93	- 0. 02
6: 26: 16	19	0. 94	6. 06	85. 4	2. 15	8. 93	8. 98	- 0. 05
6: 27: 32	20	0. 57	6. 90	59. 0	2. 15	8. 98	8. 99	- 0. 01
6: 32: 37	21	0. 67	5. 41	54. 4	2. 15	8. 94	8. 84	+ 0. 10
6: 34: 10	22	0. 51	6. 90	52. 8	2. 15	8. 84	9. 00	- 0. 16
6: 38: 26	23	1. 10	6. 90	136. 6	2. 10	9. 04	9. 16	- 0. 12
6: 42: 20	24	0. 87	5. 41	84. 7	2. 05	9. 13	9. 05	+ 0. 08
6: 45: 00	25	0. 57	5. 26	45. 0	2. 05	9. 06	9. 01	+ 0. 05
6: 48: 45	26	0. 42	5. 88	37. 0	2. 05	9. 01	9. 00	+ 0. 01
6: 52: 28	27	1. 09	6. 45	126. 5	2. 05	9. 08	9. 30	- 0. 22
6: 58: 04	28	0. 62	4. 76	44. 3	2. 10	9. 23	9. 13	+ 0. 10

1) 表中残留层厚度变化值冲刷为负号, 淤高为正号; 2) 沟床纵坡 $i=0.066\%$ 。

通过表 3 分析看出, 当泥深和流速较小时, 残留层厚度有增大的趋势, 见第 21、28 阵; 当泥深和流速增大时, 残留层厚度减小, 见第 23、27 阵。

3.3 一阵泥石流中残留层的变化特征

观测研究表明, 粘性泥石流残留层在一阵泥石

流中也存在着明显的冲淤变化特征, 即残留层的厚度在一阵泥石流中也是动态变化着的。同年 6 月 15 日第 25 阵泥石流残留层的变化说明这一点。该阵泥石流从 6: 45 开始, 6: 48: 05 结束, 历时 3 min 5s, 共观测得到 28 个数据, 见表 4。根据现场观测并结

合上述资料点图分析,表 4 中 6: 45: 01~ 6: 46: 27 (观测序号 1~ 14) 为泥石流龙头、龙身和龙尾; 6: 46: 27~ 6: 47: 30(序号 14~ 24), 即该次阵性流的中后期残留层迅速形成; 6: 47: 30 之后在冲刷下残留层发生消亡。

4 残留层的减阻作用

4.1 减阻现象实例

残留层形成后具有明显的减阻作用, 这一现象

在野外和室内槽子实验时均可明显观测到, 以下是在蒋家沟一次泥石流野外现场实地观测到的数据, 见表 5。由于该场泥石流发生在白天, 这给资料收集带来难得的机会。当 8: 53: 47 和 8: 56: 52(表 5 序号 1、2) 第 1、2 阵泥石流时, 由于沟床残留层尚未形成, 流速低, 分别为 2. 38 m/s 和 3. 19 m/s, 之后第 3、4 阵泥石流后, 残留层逐渐形成, 流速逐渐增大, 从第 5 阵泥石流后, 残留层已经形成, 流速达到 6. 45 m/s。

表 4 一阵¹⁾泥石流的残留面变化(蒋家沟)

Table 4 Variation of the residue surface of a debris flow surge (Jiang jia Gully)

观测 序号	时间 (h: min: s)	观测值 H (m)	层面及厚度 变化(m)	观测 序号	时间 (h: min: s)	观测值 H (m)	层面及厚度 变化(m)
1	6: 45: 01	9. 05	0	15	6: 46: 32	8. 64	0. 41
2	6: 45: 02	8. 48	0. 57	16	6: 46: 38	8. 54	0. 51
3	6: 45: 04	8. 55	0. 50	17	6: 46: 41	8. 59	0. 46
4	6: 45: 07	8. 67	0. 38	18	6: 46: 46	8. 80	0. 25
5	6: 45: 12	8. 90	0. 15	19	6: 46: 55	8. 85	0. 20
6	6: 45: 18	8. 95	0. 10	20	6: 47: 01	8. 88	0. 17
7	6: 45: 24	8. 93	0. 12	21	6: 47: 07	8. 93	0. 12
8	6: 45: 30	8. 77	0. 28	22	6: 47: 13	8. 95	0. 10
9	6: 45: 35	8. 77	0. 28	23	6: 47: 22	8. 97	0. 08
10	6: 45: 41	8. 82	0. 23	24	6: 47: 30	8. 97	0. 08
11	6: 45: 52	8. 89	0. 16	25	6: 47: 36	9. 00	0. 05
12	6: 45: 58	8. 92	0. 13	26	6: 47: 54	9. 02	0. 03
13	6: 46: 10	8. 94	0. 11	27	6: 48: 00	9. 04	0. 01
14	6: 46: 27	8. 94	0. 11	28	6: 48: 05	9. 05	0. 03

1) 该阵泥石流的龙头流速 $v=5.88\text{m/s}$, 流面宽度 $B=15\text{m}$, 龙头高度 $h=0.57\text{m}$, 容重 $r_c=2.05\text{t/m}^3$, 沟床纵坡 $i=0.066$, 泥石流通过观测断面时间为 6: 45: 00。

表 5 残留层的减阻现象(蒋家沟)¹⁾

Table 5 Observation of resistance reduction of the residue layer (Jiang jia Gully)

阵次 编号	到观测断面时间 (h: min: s)	龙头泥宽 (m)	泥深 (m)	容重 (t/m ³)	龙头流速 (m/s)	沟床糙 率 n_c	残留层情况
1	8: 53: 47	30	0. 30	1. 520	2. 38	0. 048	未形成
2	8: 56: 52	40	0. 35	1. 520	3. 19	0. 040	未形成
3	8: 59: 37	35	0. 40	1. 804	4. 44	0. 031	开始形成, 厚 0. 15m
4	9: 03: 04	50	0. 40	1. 804	4. 82	0. 029	开始形成, 厚 0. 25m
5	9: 06: 48	45	0. 60	2. 104	6. 45	0. 028	已形成, 厚 0. 30m
9	9: 20: 17	60	0. 70	2. 116	7. 41	0. 027	已形成, 厚 0. 42m

1) 观测段沟床纵坡 $i=0.066$ 。

4.2 沟床糙率 n_c 的变化

由于残留层的铺床作用, 使沟床糙率变小, 运动流速加快, 在表 5 中已明显看出。如果将上述原始数据代入相关公式, 反推沟床糙率, 则更易直观分析出其变化。公式采用下式^[2]

$$U_c=(1/n_c)H_c^{2/3}I^{1/2}$$

(1)

式中 U_c 为泥石流流速(m/s); n_c 为泥石流沟床糙率, H_c 为泥石流泥深(m), I 为沟床纵坡(%), 将表 5 中相关数据代入公式(1), 可得表 5 中的沟床糙率 n_c 值及变化情况。

从表 5 中可明显看出, 由于泥石流残留层的铺床作用, 使泥石流暴发前原本凸凹粗化的床面变化

得平滑, 沟床糙率减小, 由于残留层的减阻作用, 泥石流流速增大。分析研究表明, 蒋家沟泥石流由于残留层的作用, 沟床糙率在泥石流运动流速超过 6 m/s 后, 沟床糙率 n_c 一般< 0.029。

参考文献(References):

[1] Wu Jishan, Kang Zhicheng, Tian Lianqian, *et al.* Observational Studies on Debris Flows in Jiangjiagou, Yunnan. Beijing: Science Press, 1990. 1~ 15. [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. 1~ 15.]

[2]Zhou Bifan, Li Deji, Luo Defu, *et al.* Guide to Prevention of Debris Flows. Beijing: Science Press, 1991. 80~ 95. [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. 80~ 95.]

Formation of Residue Layer of debris Flow and the Reduction of Resistance

ZHANG Jun, WU Ji-shan, YOU Yong, and CHENG Zen-lan

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

Abstract: On the basis of observations of viscous debris flows in Jiangjiagou, characteristics of the residue layer are discussed. Observation data has revealed the stage feature of the formation of residue layer; and variations of residue layers have been analyzed for many surges in a certain course of debris flow and for a special surge. In the end, reduction of resistance by the residue layer are discussed using the data.

Key words: debris flow; residue layer; resistance reduction