

泥石流源地土体应力应变特性对降雨响应过程的分析 ——以蒋家沟泥石流为例

王裕宜^{1,2}, 詹钱登³, 洪勇^{1,2}, 田冰⁴, 邹仁元²

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 中国科学院东川泥石流观测研究站, 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; 3. 台湾成功大学水利及海洋工程系, 台湾 台南 701013;

4. 河北师范大学资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050016)

摘要: 根据对蒋家沟泥石流源地的崩塌、滑坡、散流坡, 在旱季与雨季不同时段, 降雨入渗后的土壤含水状况观测, 以及泉水季节性变化, 详细分析了泥石流源地崩塌、滑坡、散流坡土体的应力应变特性对降雨的响应过程差异。在雨季滑坡临空面和滑坡体内的土体含水量分别为 6.67%、4.8%, 滑坡活动主要是通过前缘剪出口崩塌方式补给下方沟床。崩塌体由于土体结构极为松散, 在雨季该土体含水量通常高达 8.85% ~ 16%, 使其土体的抗剪强度 (C, φ) 处于极限应力状态, 一旦遇到降雨浸润和冲刷, 迅速触变液化, 转化为高浓度泥石流的侵蚀产沙过程。

关键词: 崩塌; 滑坡; 含水量; 极限应力; 泥石流

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

泥石流是山区的一种严重自然灾害, 因暴发突然、来势凶猛、破坏力强, 致使当地人民的生命和财产毁于一旦。形成泥石流的三个条件是大量的松散固体堆积物、充分的水源及陡峻的地形。其中水源不仅是泥石流的组成物质, 更是泥石流发生的激发因素。因此在不同地区, 根据泥石流形成源地的崩塌、散流坡土体在雨季不同时段, 不同土源的应力应变对降雨的响应差异特征, 制定切实可行的泥石流预报模式和防灾避险对策具有重要的应用前景和现实意义。对某一地域而言, 尽管在一定时间尺度内松散固体物质和地形变化不大, 而对于泥石流形成源地的崩塌、滑坡、散流坡, 在旱季与雨季不同时段, 由于降雨入渗土体的空间与深度的滞后期, 以及泉水季节性变化, 其泥石流源地崩塌、滑坡、散流坡土体的侵蚀产沙对降雨响应的应力应变特点是有差异的。

本文根据滇东北的蒋家沟流域, 在旱季和雨季不同时段, 降雨入渗后的土壤含水状况观测, 以及泉

水季节性变化, 详细分析了泥石流源地崩塌、散流坡土体的侵蚀产沙对降雨响应特点的差异。在雨季该地区滑坡临空面和滑坡体内的土体含水量分别为 6.67%、4.8%, 滑坡活动是往往通过前缘剪出口形成溜滑、崩塌。而崩塌土体结构极松散, 在雨季含水量通常在 8.85% ~ 16%, 使其土体的抗剪强度 (C, φ) 处于极限应力状态^[1], 一旦遇到降雨浸润和冲刷, 迅速触变液化, 转化为高浓度泥石流的侵蚀产沙过程, 崩塌、滑坡的侵蚀产沙大约占蒋家沟泥石流年输沙量的 64%。在雨季, 斜坡松散堆积物的土体含水量通常在 6% ~ 10%, 一旦遇到降水, 表层松散物土体极易失稳, 容易形成坡面侵蚀产沙, 该类侵蚀产沙大约占蒋家沟泥石流年输沙量的 27.7%^[2]。这一研究揭示了临空面高的滑坡转化为泥石流的侵蚀产沙过程, 重力坡和散流坡土体的侵蚀产沙应力应变特点对降雨响应过程的差异, 可为雨季不同成因的泥石流降水警戒值的确定, 以及提高泥石流预测预报的准确率提供帮助。

收稿日期 (Received date): 2009 - 03 - 27。

基金项目 (Foundation item): 自然科学基金资助 (40671026)。[Funded by NSFC (40671026).]

作者简介 (Biography): 王裕宜 (1944 -), 女, 研究员, 从事于泥石流应力应变特性和泥石流预测预报的观测研究。[Wang Yuyi (1944 -), Researcher (Prof.), Specialized in observational research on rheological characters and forecast prediction of debris flow.] Tel: 028 - 5246169, Email: wyyzou@imde.ac.cn

1 泥石流源地崩滑坡、散流坡分布特点

蒋家沟位于云南省长江上游金沙江支流小江河谷的右岸,流域面积 48.6 km²,是一条典型的暴雨型泥石流沟,因该沟的泥石流暴发频繁、规模巨大、危害严重,而著称于世。蒋家沟全流域除泥石流堆积扇外,均可视为泥石流源地。蒋家沟泥石流源地面积占全流域面积的 94.6%^[2]。泥石流形成区源地有两大类,即坡地和沟道。坡地又可分为崩塌、滑坡、散流坡,如图 1^[2]。

1.1 泥石流滑坡源地^[2,3]

蒋家沟泥石流滑坡源地分布面广,面积达 16.4 km²,约占泥石流源地面积 36.27%。蒋家沟流域滑坡成群、成片地分布于干、支沟两岸与分水岭地带。滑床剪出口最底海拔 1 421 m,滑床后壁最高

海拔 2 940 m,滑体厚度可达数米(3~5 m)至百余米(195.5 m),总储量为 12.3 × 10⁸ m³。滑坡前缘临空面高,地下水充足、活动性强,成为蒋家沟泥石流土体补给的主要源地之一。

1.2 泥石流崩塌坡源地

蒋家沟泥石流崩塌源地,分布面广泛,面积达 13.3 km²,约占泥石流源地面积 26.41%。蒋家沟流域崩塌坡的坡度较大,一般在 30°以上,陡的可达 70°~80°^[1]。蒋家沟流域崩塌坡源地和滑坡源地合称为泥石流重力坡源地。

1.3 泥石流散流坡源地

泥石流散流坡是以片蚀、散流侵蚀作用为主的地带,主要分布在分水岭及其邻近地区。蒋家沟流域重力坡和散流坡也可合称为泥石流坡面源地,这两源地在一定条件下也可相互转化^[2],即转化的条件是重力坡的活动性,或者称滑坡活动性减弱以及趋向稳定的,又被转化为散流坡。

1.4 沟道源地

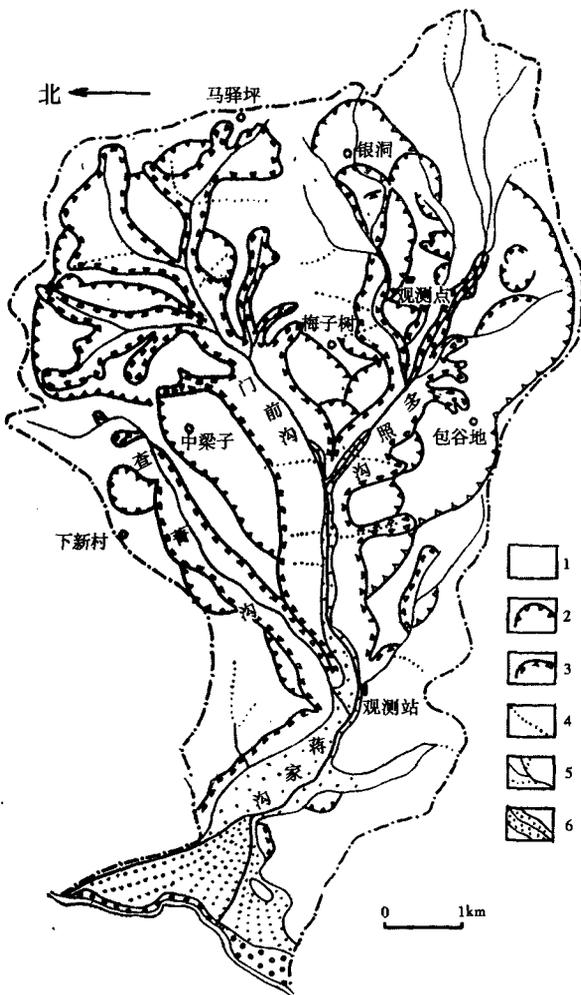
蒋家沟流域有 154 条切沟^[2],切沟狭窄,纵坡陡急,可达 30°。切沟两岸谷坡峻,多崩塌、滑坡体,切沟的极限深度为坡积层厚度或为滑坡滑床埋藏深度。沟槽无常流水,仅在暴雨中或者稍后有水流;蒋家沟流域有 43 条冲沟,纵坡为 9°~23.6°。其中堆积层沟段占 25%,堆积土层与基岩相间沟段占 56%,基岩沟段占 9%。土质冲沟堆积层厚度可超过 2 m。冲沟沟槽无常流水,或枯水流量极其弱小;蒋家沟流域主沟系一条溪沟,纵坡为 3.5°~4.5°,沟床堆积层一般 > 5 m,有的可超过 50 m,主要为粘性泥石流堆积层。这部分沟道源地与散流坡源地面积,约占泥石流源地面积 37.32%。

2 泥石流滑坡源地土体的应力应变特点

滑坡源地泥石流侵蚀产沙过程取决于滑坡体的活动性,活动性弱的大多为水力型泥石流产沙过程;活动性强的大多为土力型泥石流产沙过程。

2.1 滑坡活动特点

蒋家沟泥石流源地内,有的滑坡活动性强,年位移量可达 5~10 m,地面裂缝纵横,有的滑坡后缘裂缝甚至宽达 50 m(包谷地第 II 级滑坡),其滑坡土体松散,雨水均可全部入渗滑坡体内,故缺失地表径流,以地下径流汇入滑床,在前缘剪出口流出成泉水,其季节性泉水出没时间,大致滞后雨季始末的



1. 散流坡; 2. 滑坡; 3. 崩塌坡; 4. 切沟; 5. 冲沟; 6. 溪沟

图 1 蒋家沟泥石流源地图

Fig. 1 Debris flow formation at Jiangjia Ravine

15~30 d^[2]。此类滑坡容易形成土力型泥石流产沙过程;也有的滑坡活动性小的,年位移量 < 2 m,地面裂缝稀少,常出现地表径流。此类滑坡容易形成水力型泥石流产沙过程。

由于滑坡活动受自重应力和水动力的控制,因此具有连续性、季节活动性和年周期活动性的特征。无论是旱季还是雨季,滑坡的活动主要是以前缘剪出口的崩塌方式补给下方沟床,并随降雨量的增加而加剧。以本流域的莽莲子滑坡为例^[3],1983-05~10的雨季,该滑坡的崩塌补给泥石流的土方量为 $15.39 \times 10^4 \text{ m}^3$,1983-11~1984-04的旱季,滑坡的崩塌物为 $4.47 \times 10^4 \text{ m}^3$,则雨季滑坡活动的崩塌土方量 ($15.4 \times 10^4 \text{ m}^3$) 是旱季土方量 ($4.47 \times 10^4 \text{ m}^3$) 的 3.45 倍。

2.2 滑坡土体含水量的观测

通常在雨季中期,滑坡体表层、侧面和剪出口临空面的土体含水量,分别平均为 7.1% (8.85%)、4.85% (表1) 和 6.67% (表2);而滑坡体内的土体平均含水量只有 4.8% (见表1)。

2.2.1 滑坡剪出口临空面含水量(剖面A)的垂直变化

因为7月是雨热同季,无雨日地面温度高达 40℃~60℃,蒸发极高,因此雨季滑坡剪出口临空面土体含水量干湿变化很大。采样点的滑坡坡向 NW10°,临空面剖面走向 NE-NW,滑坡剪出口临空面高 360 cm,该剖面(A)采样厚度为 10 cm。

1. 图2中的系列1和系列2分别代表7月21

日和23日的,滑坡临空面剖面土体含水量的垂直变化曲线。21日之前10d几乎没有降雨。如果以前一次的过程降雨0.8系数衰减,20d就基本耗尽计算^[2],21日的土体含水量仅受到5.81mm的前期降水量的影响。观测表明,该滑坡临空面表层(0~40cm)土体含水量只有2%左右,土层剖面80~360cm土体的平均含水量也只有为2.6%。同时在土层剖面120cm以下的土体含水量还出现从1.4%→4.4%的递增现象。这一方面是因为360cm处的剪出口正好是位于公路排水沟底线,受雨水汇流的影响;其次是因为临空剖面210cm以上是坡度为68°的陡坎,而210cm以下则甚至是坡度为78°的陡坎,垂直降落的雨水对这类型的陡坎影响不大,反映了80~360cm土体的含水量垂直变化对降雨的响应情况。

2. 7月22日有22.9mm降雨,所以7月23日临空面土体含水量明显增加,临空面表层0~20cm土体含水量为8.99%,土层剖面80~360cm土体的平均含水量为7.8%。至于在土层剖面20~40cm土体含水量为6.9%,确出现低于上下层含水量的现象,这是因为该处剖面上空有70%的合欢林遮蔽,影响了这层土体的含水量对降雨的响应。这层土体含水量的现象,也同样反映在系列3、系列4的曲线中。以上分析说明雨季滑坡剪出口临空面含水量干湿变化很大,7月21日(2.6%)与7月23日(7.8%)尽管只相差2天,但土体的平均含水量却相差5.2%。

表1 滑坡体表层(b1)、滑坡体内(b2)土体含水量的差异和切沟堆积物含水量的比较

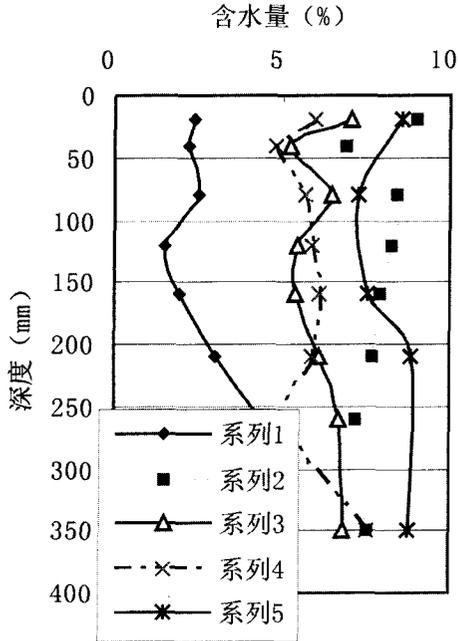
Table 1 Comparison of soil moisture of debris flow deposit in gully to different one in surface and inside of landslide

日期	b1-1	b2-1	b1-2	b2-2	切沟堆积物
2008-07-23	0.0827	0.1116	0.0633	0.0748	0.1113
2008-08-01	0.0489	0.0993	0.0317	0.0520	0.0894
2008-08-10	0.0686	0.0774	0.0421	0.0277	0.1389
2008-08-18	0.0820	0.0658	0.0570	0.0359	0.1095
平均值	0.0705	0.0885	0.0485	0.0476	0.1123

表2 滑坡(A)临空面与崩塌(C)土体含水量观测资料比较

Table 2 Comparison of soil moisture in collapse to one in landslide

日期	A-1 表层%	A-2 平均%	C1-1 %	C1-2 平均%	C2-1%	C2-2 平均%
2008-07-23	9.00	7.83	11.03	16.42	8.58	9.52
2008-08-01	7.02	6.17	14.05	10.80	13.78	9.00
2008-08-10	5.99	6.03	9.98	11.95	13.83	11.02
2008-08-18	8.53	8.12	13.62	12.18	14.59	11.35
平均	7.33	6.67	11.69	13.06	12.07	9.85



(图内系列1,2,3,4,5分别表明2008年07-21,07-23,08-01,08-10,08-18这5个时日的观测资料)

图2 滑坡剪出口临空面土体含水量的垂直变化

Fig. 2 Plumbing change of soil moisture of front surface in shear outlet of landslide

3. 图2中系列3、系列4分别是8月1日、8月10日、8月18日临空面土体含水量的曲线。8月1日降雨量为14.11 mm(前期+本次降雨5.61+8.5)、8月10日的为11.47 mm(5.07+6.4)和8月18日的15.06 mm(只有前期)。临空面土体含水量的垂直变化曲线与前期、本次降雨量,降雨强度、风向等都有相当的关系。

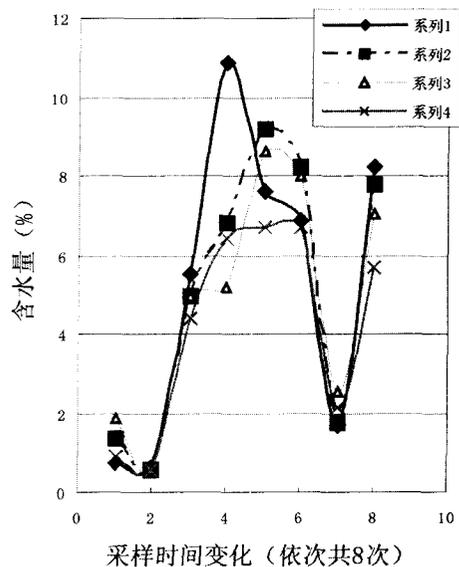
2.2.2 滑坡表面不同覆盖物土体含水量的垂直变化

图3是两个滑坡体(B与C)表面不同覆盖物土体含水量的垂直变化图。这两个滑坡坡面都为北坡(NW8°),坡度都是35°左右,采样地点都在滑坡体的侧面,该侧面被一条走向NW5°的切沟切开,采样剖面离坡脚5 m高。图3中的系列1、2分别代表65%合欢林覆盖(滑坡B)与荒裸地(滑坡C)的表层土层剖面0~20 cm土体含水量的情况;系列3、4分别代表以上这两滑坡B与C的相对应的,表层以下土层剖面20~210 cm的5个不同深度的平均值,即分别是40 cm,60 cm,100 cm,140 cm和210 cm的样品平均值。采样时间共8次,先后在旱季第1、2次分别为3月21日和4月9日,在雨季第3~8次分别为6月24日、6月28日、7月2日、7月11日、7

月21日和8月18日采样。

1. 在雨季,滑坡表层土体含水量都大于表层以下土体含水量,但在旱季的3月21日的滑坡B合欢林的表层以下土体含水量(0.92%),却大于滑坡C荒裸地表层土体含水量(0.7%),而在旱季的4月9日则滑坡B与C的上下层土体含水量变化相差不大。

2. 滑坡表面不同覆盖物土体含水量,对前期与本次降雨量响应过程的差异:如果它们不仅有15~18 mm的丰富的前期降雨量,其次又有较强的本次过程降雨量(28.33~21.31 mm),共计达到近40 mm的降雨过程,则合欢林(系列1)的滑坡表层土体含水量都比荒裸地(系列2)表层土体含水量高、保水性能好。如图3的6月24日(3点)、6月28日(4点)的降雨过程分别为39.32 mm(15.03+28.33)、43.36 mm(18.01+21.31)以及8月18日(8点)15.06 mm(只有前期)。相对而言,如果只有30~20 mm的降雨过程,如7月2日(5点)、7月11日(7点)降雨过程分别为29.84 mm(11.78+18.08)、19.52 mm(10.6+8.9),而荒裸地(系列2)的表层土体含水量确分别大于合欢林(系列1)表层土体含水量,说明在比较弱的降雨过程荒裸地表层土体含水量也一样比较容易侵蚀产沙。



(本图的系列1,2分别代表滑坡B与滑坡C表层土体含水量,系列3,4分别代表滑坡B与滑坡C表层以下土体含水量变化状况)

图3 滑坡表面不同覆盖物土体含水量的垂直变化

Fig. 3 Plumbing change of soil moisture in different ground covers of landslide

3. 以上分析还说明雨季滑坡体侧面土体含水量干湿变化也很大,以合欢林表层以下(系列3)为例,从4.96%(6月24日)→5.21%(6月28日)→上升到8.60%(7月2日)、7.98%(7月11日)→下降到2.55%(7月21日)→又上升到8月18日(7.04%),这与2.2.1小节的分析基本一致。同时在7月21日的较长时间无降雨的情况下,合欢林的表层土体含水量(1.7%),与荒裸地的表层土体含水量(1.7%)几乎一致,而在表层以下合欢林土层剖面土体含水量(2.5%)却比荒裸地的(2.1%)要多0.4%,说明在干旱情况下合欢林的土壤保水功能好。

2.2.3 滑坡体表层与体内土体含水量的差异

表1是在同一滑坡体B,采样地点b1离坡脚5m高,在切沟边的近垂直滑坡体侧向剖面;与采样地点b2离坡脚3m高,离切沟1m多远、坡向NW8°、坡度为30°的坡面上,向坡体垂直开挖70cm深、60cm高的剖面b2,分析雨季滑坡体内土体含水量的变化状况。b1-1和b2-1分别代表b1与b2土层剖面的表层(0~20mm)土体含水量;b1-2和b2-2分别代表b1与b2土层剖面表层以下(20~80mm)的土体含水量。

3. 图4分别是7月23日(a)、8月1日(b)、8月10日(c)的0~20cm、20~40cm、40~60cm的土体含水量随深度的变化状况。即一方面滑坡体内土体含水量对降雨响应的敏感性要差多了,即降雨对滑坡体内土体含水量变化要滞后一些;同时观测

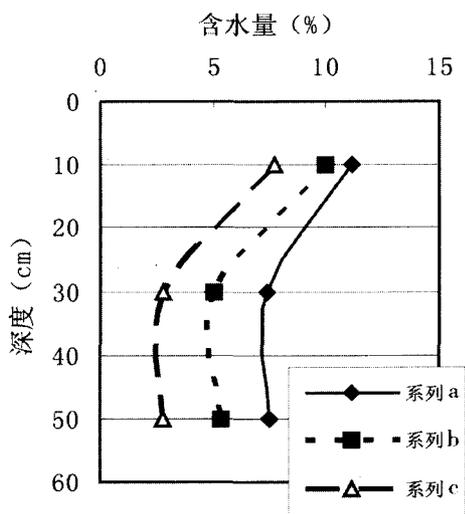


图4 滑坡内70cm处表层与深度土体含水量的差异

Fig. 4 Plumbing change of soil moisture in surface and depth of landslide inside(70 cm)

也说明,实际上在雨季中期,滑坡体内土体含水量也并不是很高(2.8%~7.5%),即其土体的抗剪强度也还未达到或者处于极限应力状态下。

2.3 滑坡侵蚀产沙的特点

1. 在雨季观测期间,尽管该滑坡体表面基本无径流,但在雨后采样的时间间隔的差异,以及雨量的大小等因素也会影响坡上、坡下的表层土体含水量差异。因为蒋家沟松林径流系数为0.11,一般讲如果离降雨间隔近的b2-1表层土体含水量就要高。但如7月23日的和8月18日的土体含水量样品,尽管都是与前期降雨间隔15h,但因为前者是7月22日有22.9mm降雨,而后者8月18日是16日(16.5mm)、17日(2.8mm)的降雨,所以前者土体含水量就要大于后者的土体含水量。但从表1中b2-1与b1-1的表层土体含水量平均值对比可知,总体讲的b2-1表层土体含水量比b1-1的表层土体含水量要高。

2. 滑坡体向内挖70cm,滑坡体深处内部剖面的表层(0~20cm)b2-1土体含水量与表层以下b2-2深度的土体含水量比较,通常表层土体含水量b2-1(平均值:8.85%)是远远大于滑坡内部(b2-2)土体含水量(平均值:4.76%),如表1。

蒋家沟碎屑土的抗剪强度(τ)实验表明,蒋家沟碎屑土的内摩擦角(φ)随含水量(W)增加的变化过程中,内摩擦角(φ)从递增到递减之间存在着一个最大值,这个最大值的临界含水量为11.5%(式1)。当含水量 $W > 11.5\%$ 时(式2),其斜率随含水量增加而减少的趋势是 $W < 11.5\%$ (式1)的3.05倍。而内聚力(C)则随含水量增加呈指数减少(式3)^[4]

$$W < 11.5\%, \varphi = -34.9W + 32.03 \quad (1)$$

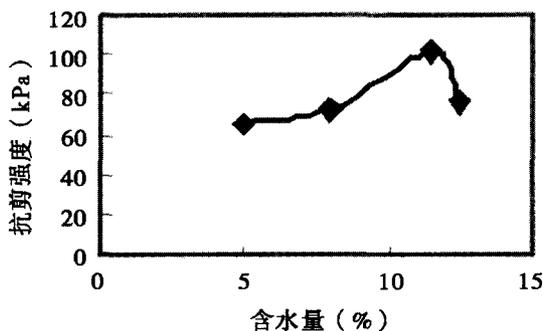


图5 角砾土抗剪强度随含水量变化曲线

Fig. 5 Change curves of shear strength of gravel soil along with its moisture

$$W > 11.5\%, \varphi = -106.5W + 40.13 \quad (2)$$

$$C = 0.03982(W) - 0.95 \quad (3)$$

因此碎屑土的抗剪强度($\tau_w = C + (P - P_w) \tan\varphi$ (式中 P 为重力, P_w 为附加孔隙压力))随含水量增加的变化过程中,抗剪强度从递增到递减之间存在着一个最大值,这个最大值的临界含水量为11.5%,即为该土的饱和含水量(图5)。当斜坡碎屑土的含水量达到饱和时,其容重为 2.078 t/m^3 ,容积含水量为0.366,接近该土体的总孔隙度持水量(0.368),此时该土体所产生的抗剪强度为最大(临界值)。当含水量过饱和时,抗剪强度迅速下降(图5),因为处于滑坡表层或者剪出口临空面饱和土体的抗剪强度迅速减少,在滑坡表层或者剪出口临空面上土体形成滑溜、剥塌,并迅速触变液化形成土力型泥石流。如滑坡体比较稳定,或可产生地表径流,地表径流冲刷滑坡表层,并极易于后壁和左右两侧侧壁汇集成含沙水流沟槽水流。含沙沟槽水流冲刷滑体,含沙量增大,超过挟沙水流而演变成水力型泥石流。

同时又因为蒋家沟季节性泉眼较多,且分布于滑床泉眼群带内。季节性泉水出没时间,大致滞后雨季始末的15~30 d^[2]。并由滑坡前缘剪出口补给崩塌、演化为泥流体的情况,极大多数发生在雨季中期的7~8月。在雨季中期,当暴雨来临时,受前期降雨入渗范围和深度,以及滑坡前缘剪出口泉水水量大小的影响,滑坡启动以后,剪出口临空面土体成片崩塌,与暴雨汇流的迅速增加的沟水、泉水混合,迅速触变液化形成土力型泥石流。

3 泥石流崩塌源地土体的应力应变特点

崩塌源地泥石流侵蚀产沙过程取决于崩塌的活动性,当崩落作用强烈,崩积坡的松散崩积层深厚,崩槽沟水量不足时,大多形成土力型泥石流产沙过程^[2]。

3.1 崩塌活动特点

蒋家沟流域崩塌活动性强,几乎全年均在活动,一是因为崩塌位于活动性滑坡的前缘;二是因为崩塌位有泉群带;三是因为坡麓有沟道流水掏挖强烈的侵蚀作用^[2]。因此蒋家沟流域滑坡的活动性决定了崩塌活动的强度,以本流域的养莲子滑坡为例^[4],雨季滑坡活动的崩塌土方量($15.4 \times 10^4 \text{ m}^3$)是旱季土方量($4.47 \times 10^4 \text{ m}^3$)的3.45倍。在旱季

或者雨季泥石流间歇期,崩落物堆积成崩积体,构成极为松散碎屑层;或堆积于峡谷沟床上,成为沟床堆积层或堵塞体。

3.2 崩积体结构和含水量的观测

通常在雨季中期,崩塌体表层和崩塌体内的土体含水量,分别平均为11.69%~12.07%、13.06%~9.85%(表2),该数值接近蒋家沟碎屑土的抗剪强度应力应变的临界含水量。

3.2.1 崩积体的土体结构

观测的样品是来自滑坡剪出口临空面剖面A在雨季6月24日大雨时崩落下来的崩积体。

1. 崩积体的颗粒级配:崩积体上层细 $d_{50} = 3.79 \text{ mm}$, <2 mm 颗粒占44.85%,而崩积体下层粗 $d_{50} = 19.34 \text{ mm}$, <2 mm 颗粒只占1.99%,如图6。

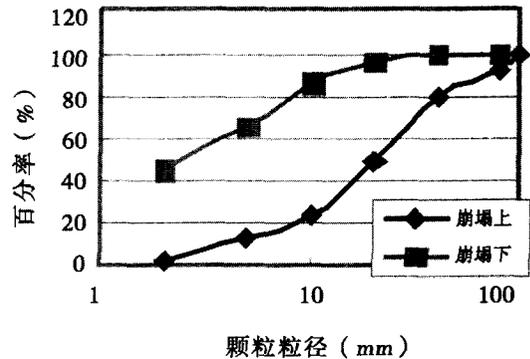


图6 崩塌体上下颗粒级配曲线

Fig. 6 Grain composition curves in upper and under layer in collapse and landslide

2. 崩积体结构:崩积体颗粒结构极为松散,崩塌体上层与下层的松散孔隙率实验表明,它们分别为45.51%和47.71%。蒋家沟碎屑土孔隙率(e_c)与渗透系数(K_s)的实验表明^[5],此类土体的渗透系数分别为 0.008929 mm/s 、 0.009205 mm/s 。而滑坡体土体的孔隙率则为紧密孔隙率39.68%,渗透系数为 0.008197 mm/s 。而且又因为崩塌锥体的坡度是 45° ,而滑坡临空面是 $68^\circ \sim 78^\circ$ 的陡坎,因此即使在同一地点经历降雨入渗,其土体含水量的差异也很大。

3.2.2 崩塌土体含水量

1. 表2是在同一地点的滑坡体前缘(A)临空面与崩塌(C)土体含水量观测资料比较:崩积体顶部C1-1(离顶点20 cm)表层土体含水量(11.69%)比滑坡临空面表层(A-1)土体含水量

(7.33%)高4.36%。其崩积体底部C2-1(离底部30 cm)表层土体含水量(12.07%)比滑坡临空面表层以下(A-2)土体含水量(6.67%)高5.4%。同时因为降雨强度、降雨入渗时间的差异,各部位土体含水量也相差很大。

2. 雨后采集样品间隔时间的差异比较:以7月23日与8月1日的土体含水量资料对比为例,尽管8月1日降雨14.11 mm(本次5.61+前期8.5),比7月23日的有20.53 mm(前期7月22日有25.1 mm降雨)少6.42 mm。但因为8月1日的土体含水量是间隔6 h采集,7月23日是间隔15 h采集,8月1日崩积体C1-1表层的0~5 cm的土体含水量(14.05%)反而比7月23日的C1-1的土体含水量(11.03%)高3.01%(表2)。

3. 清晨有降雨与前期降雨,间隔6 h采集上层与内外的比较:因为8月1日清晨有降雨,其崩积体顶部C1-1表层的0~5 cm的土体含水量(14.05%)比崩积体顶部采样点向内(C1-2)5~15 cm的土体含水量的(10.8%)高3.25%。而7月23日崩积体(C1-1)表层的0~5 cm的土体含水量(11.03%)确比崩积体顶部采样点(C1-2)5~15 cm的土体含水量的(16.42%)少5.39%。

4. 图7是7月23日崩积体顶部采样点的0~5 cm的土体含水量(11.03%)与崩积体顶部采样点向内5~15 cm的土体含水量的(16.42%)和顶部采样点向内15~25 cm的土体含水量的(15.86%)比较曲线;以及崩积体底部((C2-1)表层的0~5

cm的土体含水量(8.58%)与崩积体采样点向内5~15 cm的土体含水量的(8.65%)和15~25 cm的土体含水量的(10.4%)比较曲线。

3.2.3 崩塌侵蚀产沙的特点

泥石流崩塌侵蚀产沙特点的实验方法是:将土体前期含水量分别为5%(图8中的A)、8%(B)、11.5%(C)、12.5%(D)的角砾土,按序相似崩塌体堆积成斜坡(β),用每分钟6 mm的雨强进行试验,观测崩塌体表面形成坡面流和坍塌所需的总降水量(R_{mm}),实验结果如图8。试验开始时,角砾土形成坡面流所需的总降水量随着土体前期含水量(W)不同而变化的规律如图8中的曲线1。它与抗剪强度的变化规律曲线(图5)基本一致。在含水量饱和之前,该曲线变化很平缓,当超过土体含水量的11.5%时,只要少量降水便会形成坡面流。实验的相关系数 $y = -0.994$, t 值显著性检验达显著水平($t_{0.01}$)

$$W > 11.5\% \quad R_{mm} = 12.86 - 92.0 \times W \quad (4)$$

$$W < 11.5\% \quad R_{mm} = 4.11 - 11.83 \times W \quad (5)$$

坡面流使较大颗粒堆积于坡脚(坡面应力集中点),当沟水侧蚀冲走坡脚堆积物时,坡面就演变为坍塌,试验后可见坍塌体厚3~5 cm。从坍塌所需降水量与土体前期含水量相关曲线看,坍塌所需降水量明显受土体前期含水量的影响,这一阶段是泥石流侵蚀重要阶段,与有关方面的研究结论相似^[6]。图8中的曲线2各段斜率不同,CD段的递减

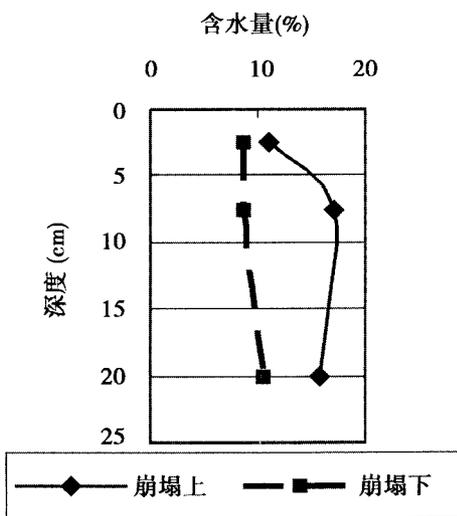


图7 崩塌体上下层土体含水量分布状况

Fig. 7 Distributing status of soil moisture in upper and under layer in collapse and landslide

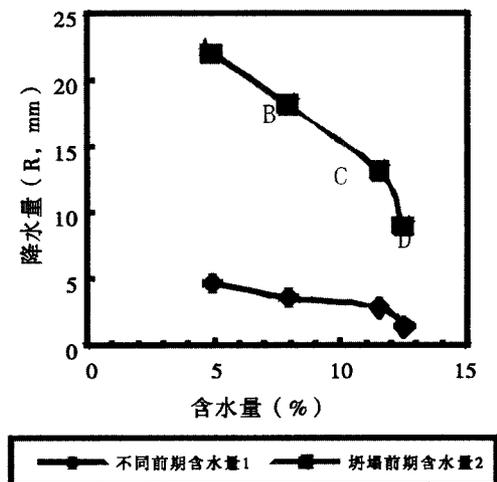


图8 不同前期含水量(W)形成崩塌体斜坡出现的坡面流和坍塌所需降水量(R)的关系

Fig. 8 Relationship between slope flows formed by different moistures and precipitation need by collapse

趋势是 AB 段的 4.7 倍,说明当土体含水量超过 11.5% 时,形成坍塌所需的降水量显著减少

$$AB: R_{mm} = a - B_w = 25.71 - 92 * W \quad (6)$$

$$BC: R_{mm} = a - B_w = 30.72 - 154 * W \quad (7)$$

$$CD: R_{mm} = a - B_w = 61.82 - 437.33 * W \quad (8)$$

在雨季,崩塌体表层和体内的土体含水量土体含水量,分别平均为 11.69% ~ 12.07%、13.06% ~ 9.85% (表 2),该数值接近蒋家沟碎屑土的抗剪强度应力应变的临界含水量。一旦遇到降水冲刷,迅速触变液化,转化为高浓度土力型泥石流。因为崩塌是由滑坡前缘剪出口补给,因此它与滑坡共同提供泥石流的土体量为 $153 \times 10^4 \text{ m}^3$,占蒋家沟泥石流年均输沙量 ($240 \times 10^4 \text{ m}^3$) 的 64%^[1,2]。

4 泥石流散流坡源地侵蚀产沙的特点

在雨季,斜坡松散堆积物的土体含水量通常在 6% ~ 10%,一旦遇到降水,表层松散物土体极易失稳,容易形成坡面侵蚀产沙。同时,切沟泥石流堆积物的土体含水量通常在 8% ~ 13% (表 1),接近蒋家沟碎屑土的抗剪强度应力应变的临界含水量,一旦遇到降水,准泥石流流体再次启动,与崩塌、滑坡、散流坡形成的泥石流,一起汇流成沟道泥石流。

根据本流域 1983 ~ 1984 年散流坡侵蚀量观测,旱季(当年 11 月至来年 4 月)坡面无径流^[1]。而在雨季 5 ~ 10 月的观测中,坡面侵蚀产沙量随着降雨量增加而增加(图 9)。根据以上降雨入渗的分析,我们将 1983 年雨季月降雨量(mm)和其相对应观测的月散流坡产沙量($\times 10^4 \text{ m}^3$)的比值(R/s),与雨季的每个月进行相关性分析。结果发现:雨沙比随雨季的进程,从雨季初期的 5 月($28.17 \text{ mm}/\times 10^4 \text{ m}^3$)、6 月($9.66 \text{ mm}/\times 10^4 \text{ m}^3$)→雨季中期的 7 月($7.73 \text{ mm}/\times 10^4 \text{ m}^3$)、8 月($7.05 \text{ mm}/\times 10^4 \text{ m}^3$)→雨季后期的 9 月($13.15 \text{ mm}/\times 10^4 \text{ m}^3$)、10 月($21.33 \text{ mm}/\times 10^4 \text{ m}^3$),其雨沙比(R/s)的变化与雨季 6 个月成 3 阶次关系,相关系数 $Y = 0.978$ (图 10)。这特点与雨季不同时段蒋家沟泥石流侵蚀产沙特征一致^[7]。从图 9 ~ 10 和以上前期土体含水量侵蚀产沙实验(图 2 ~ 8)可知,雨季初期(5 ~ 6 月)泥石流侵蚀产沙需要的降雨量较多,也就是雨沙比值较高;雨季中期(7 ~ 8 月)泥石流产沙需要的降雨量就比雨季初期少得多,也就是雨沙比值低;而至于雨季后期(9 ~ 10 月),由于土源供应不足的原因,泥

石流产沙需要的降雨量又与前二者有所不同。而在雨季观测中,7 ~ 8 月的坡面径流量占全年坡面径流量的 60.87%,其中裸露地、坡耕地、坡林地和坡牧地的坡面径流量分别占全年径流量的 71.4%、19.3%、0.6% 和 8.7%^[2,4]。可见下垫面的状况对坡面径流影响极大,裸露地径流量是坡林地的 119 倍。蒋家沟流域坡面年侵蚀量大约为 $66.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,占蒋家沟泥石流年输沙量的 27.7%。

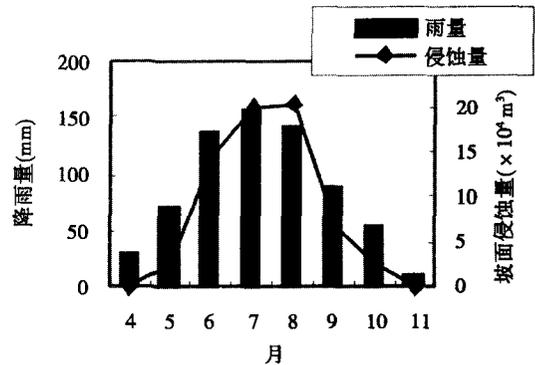


图 9 坡面侵蚀量随雨季月份变化曲线

Fig. 9 Change curves of erode quantities on slope along with different month in rainy season

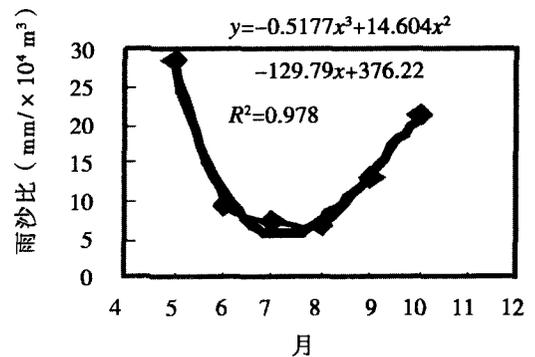


图 10 雨沙比随雨季各月份变化曲线

Fig. 10 Change curves along Ratio of sand to rain with different month in rainy season

5 结论

1. 通常在雨季中期,滑坡体表层、侧面和剪出口临空面的土体含水量,分别平均为 7.98%、4.85% 和 6.67%;而滑坡体内的土体平均含水量仅为 4.8%。滑坡的活动都是以前缘剪出口的崩塌方式补给下方沟床。

2. 通常在雨季中期,崩塌体表层和体内的土体含水量,分别平均为 11.69% ~ 12.07%、13.06% ~

9.85%,该数值接近蒋家沟碎屑土的抗剪强度应力应变的临界含水量。因为崩塌是由滑坡前缘剪出口补给,因此它与滑坡共同提供泥石流的土体量为 $153 \times 10^4 \text{ m}^3$,占蒋家沟泥流年均输沙量($240 \times 10^4 \text{ m}^3$)的64%。

3. 在雨季,斜坡松散堆积物的土体含水量通常在6%~10%,一旦遇到降水,表层松散物土体极易失稳,容易形成坡面侵蚀产沙。同时,切沟泥石流堆积物的土体含水量通常在8%~13%,接近蒋家沟碎屑土的抗剪强度应力应变的临界含水量。蒋家沟流域坡面年侵蚀量大约为 $66.4 \times 10^4 \text{ m}^3$,占蒋家沟泥流年均输沙量的27.7%。

参考文献(References)

- [1] Wang Y. Y., Jan C. D., Chen X. Q. Shlf-organization criticality of debris flow rheology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(17): 1857~1861
- [2] Wu J. S., Kang Z. C., Tiang L. Q., *et al.* Observation and Research of Debris Flow in Jiangjia Ravine [M]. Beijing: Publishing Company of Science, 1990: 197~199 [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: 197~199]
- [3] Hu F. D., Tian L. Q. Preliminary study of the landslid types in source area of debris flow in Jiangjia ravine [A]. Observation and Research of Debris Flow [C]. Beijing: Publishing Company of Science, 1996: 66~72 [胡发德,田连权. 蒋家沟泥石流源地滑坡类型初探[A]. 泥石流观测与研究[C]. 北京: 科学出版社, 1996: 66~72]
- [4] Wang Y. Y., Jan C. D., Yan B. Y. Debris Flow Structure and Rheology [M]. Changsha: Publishing Company of Science and technology in Hunan. [王裕宜,詹钱登,严璧玉,等. 泥石流流体结构和流变特性[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2001: 43~54]
- [5] Wang Y. Y., Zou R. Y., Liou X. F. Relationship between soil erosion and critical rain [J]. *Journal of soil erosion and soil and water conservation*, 1999, 5(6): 34~38 [王裕宜,邹仁元,刘岫峰. 泥石流土体侵蚀与始发雨量的相关性[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(6): 34~38]
- [6] Zang L. P., Tang K. Li. Manpower rain model for relax soil to start - up in source area of debris flow in and scouring experiment [J]. *Journal of Mountain Science*, 1999, 17(1): 45~51 [张丽萍,唐克利. 泥石流源地松散体启动人工降雨模型及放水冲刷实验[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 45~51]
- [7] Wang Y. Y., Jan C. D., Hong Y., *et al.* Analysis of the character of eroded sediment for debris flow in different periods of rainy season [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 118~124 [王裕宜,詹钱登,洪勇,等. 雨季不同时段蒋家沟泥石流侵蚀产沙特征的分析[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 118~124]

Analysis of Rheological Characteristics of Soil in Source Area of Debris Flow to Answer Process to Rainfall

WANG Yuyi^{1,2}, JAN Qiandeng³, YONG Hong^{1,2}, TIAN Bing⁴, ZOU Renyuang²

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Chengdu Institute of Mountain Hazards & Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. Dept. of Hydraulics & Ocean Engineering, Cheng Kung University, Tainan 70101, China;

4. College of Resources & Environment Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Rheological characteristic of soil on collapse-landslid and stream slop in debris flow formation-zone to answer process to rainfall are analyzed in this article, which is through different periods of rainy season, observation of different soil moisture status after rainfall infiltration and season change of fountain. Analyzed results indicated that the rheological characteristics of soil on collapse-landslid in debris flow formation will answer different process to rainfall. The soil moisture on free face of landslide is 6.67%、4.8% respectively in rainy season, activity in landslide mostly is supplied down gully bed by collapse manner action passed its forward edge. It is easily thixotropic liquefaction for the soil to locate limit stress state under infiltrate and washed out of rainfall, because the soil in collapse is the most loose, also when the soil moisture generally is higher 8.85%~16% in rainy season. Then it will translate into eroded process of debris flow with hiper-concentration.

Key words: collapse; landslid; moisture; limit stress; debris flow