

汶川地震区文家沟泥石流成因模式分析

刘传正^{1,2)}

1) 国土资源部地质灾害应急指导中心,北京,100081; 2) 中国地质环境监测院,北京,100081

内容提要:文家沟2008~2010年期间8次泥石流事件是在地震滑坡堆积体上因持续强降雨渗透变形溃决和后续侵蚀产生的,不同于一般的沟谷型和坡面型泥石流。文家沟滑坡堆积体上新生的泥石流沟共冲出松散固体物质总体积约 $180 \times 10^4 \text{ m}^3$,2010年的“8·13”泥石流事件是其中规模最大的一次,冲出的松散固体物质体积约在 $115 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。文家沟泥石流的成因模式是,强降雨过程在滑坡堆积体上先期出现“渗流管涌、暂态壅水、溃决滑塌”的造沟作用模式,后期出现“溯源侵蚀、冲刷刨蚀、侧蚀坍塌、混合奔流(搅拌机)”的扩沟作用模式。2008年的“6·21”和2010年的“7·31”泥石流事件主要起因于前者,其他事件主要起因于后者。松散堆积体因排泄持续降雨入渗的能力不足而造成地下水滞留和水位升高是导致斜坡体稳定性降低的内因。当地下水壅高水位面达到水平时,堆积体内渗透动水压力达到最大,堆积斜坡的稳定性最低,成为堆积体表层发生滑塌溃决的临界条件。

关键词:文家沟泥石流;渗流作用;溃决滑塌;造沟作用模式;溯源侵蚀;扩沟作用模式

2010年8月13日,四川省绵竹市清平乡暴雨引发文家沟特大泥石流灾害,共造成5人死亡、1人失踪,冲毁掩埋房屋400余间、公路1000余米,损毁桥梁2座,初次治理工程的谷坊坝群基本损毁,绵竹至茂县的公路全面中断。文家沟“8·13”泥石流灾害事件引起中国各级政府和社会各界的高度关注,学术界对文家沟“8·13”特大泥石流灾害的特点、地质环境和形成原因也多有研究。2011年5月,二次治理工程基本竣工,并在2011年汛期发挥重大防灾减灾作用。回顾2010年“8·13”事件以后,笔者多次赴现场考察、应邀参与二次防治工程方案比选论证,深感仍有一些关键科学问题,如泥石流的规模、序次、成因模式和渗流作用过程等值得深入分析研讨,以便为强烈地震区滑坡泥石流灾害的防治提供借鉴。

1 文家沟流域地质环境

汶川“5·12” $M_s 8.0$ 级地震在四川绵竹清平乡文家沟上游韩家大坪引发泥盆纪观雾山组中厚层石灰岩顺层大滑坡,滑坡体体积约 $4450 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑坡碎屑填满了文家沟主沟段,并造成48人遇难(黄河清等,2010)。文家沟流域地处汶川地震X—XI烈度

区内(黄河清等,2010;许冲等,2010;王涛等,2010)。滑坡后缘沿顶子崖南侧分布,顶点高程2250m。滑体剪出部位高程1630m,与谷底(沟脑)相对高差约435m。文家沟汇入绵远河处高程890m。沟口与滑坡源区顶端相对高差约1360m。滑坡碎屑流填充覆盖文家沟沟道长度达3.6km。据调查,文家沟流域在“5·12”地震前斜坡稳定,生态环境良好,无泥石流发生历史。

文家沟位于绵远河左岸,平面形态呈口袋型,腹大口小。文家沟流域面积 7.81 km^2 ,主要由一条主沟和一、二号支沟组成,主沟源头发育多条小冲沟。文家沟主沟沟口海拔高程910m,韩家大坪以上分水岭高程2400m,相对高差1490m,总长4.9km。一号支沟位于主沟右岸,长3.18km,汇水面积 1.65 km^2 ,并与主沟在接近出山口处相交。二号支沟位于主沟左岸,在主沟1300m高程处汇入,汇水面积 0.57 km^2 。1390m高程至沟口走向近东西,原沟床被滑坡堆积物填满,降雨时坡面呈漫流。二号支沟的汇流也被阻于此区域南侧,并形成水塘。

2008年汶川“5·12”地震以来,文家沟共发生8次泥石流,分别是2008年6月21日、7月25日、9月24日、2010年7月31日、8月13日、8月19日、9

注:本文为国家地质调查计划研究项目(编号1212011220125)的成果。

收稿日期:2011-11-18;改回日期:2012-03-22;责任编辑:章雨旭。

作者简介:刘传正,男,1961年生。博士,研究员,国土资源部地质灾害应急指导中心副主任。主要从事灾害地质、工程地质与环境地质等研究。通讯地址:100081,北京市海淀区大慧寺路20号;电话:010-62175999。Email:liucz@mail.cigem.gov.cn。

月16日和9月18日。引发泥石流的过程降雨量多在50mm以上,10min降雨强度大于10mm。2010年8月13日降雨强度最大,历时最长,泥石流规模也最大。泥石流规模与降雨量基本成正相关关系。

现场调查发现,引发8次泥石流活动的汇水主要来自主沟系,涉及流域面积约5.6km²。1300m高程平台(1270~1390m高程段)以上区域主要是汇聚地表水,各支沟山洪携带的固体物基本停积在1300m平台之上,未进入中下游参与泥石流活动。8次泥石流的物源主要是文家沟主沟段(1300~960m高程区段)的滑坡堆积物,山洪泥石流冲刷作用在滑坡松散堆积体右侧形成“V”字型冲沟,主体方向向西。960m高程以下区域地势平缓,成为泥石流固体物停积区(图1)。因此,“V”型冲沟是文家沟8次泥石流作用遗留的产物,主沟段既是物源区,又是流通区。文家沟泥石流的物源区和流通区处于同一空间区域,明显不同于通常意义上的沟谷型泥石流(刘传正等,2011)。

2 文家沟泥石流活动特点

2.1 初次治理工程实施前阶段

初次治理工程实施前曾经发生3次泥石流活动,这些活动对滑坡堆积体表层的破坏和泥石流活动的启动具有重要意义。2008年6月18~21日、7月24~25日因绵竹地区普降暴雨引发文家沟2次泥石流活动,1300m平台以下堆积体被携带冲出,沿

原沟谷右侧形成深度在5~20m的沟槽,并将大量松散物携带至沟口地带堆积,但未冲出山口形成明显灾害。9月22~24日再次降雨导致新冲沟刷深,泥石流冲出山口将绵远河部分主河道掩埋淤塞,并损毁沿途的土地、道路。“9·24”泥石流的过程降雨量为88mm,10min最大雨强为11.5mm。

2.2 初次治理工程及其破坏阶段

2010年7月下旬,文家沟泥石流初次治理工程基本完成。工程单元包括高程1243~1095m区段的19座谷坊坝,1095~1075m区段的护坡导流堤和6座潜坝,1075~985m区段的护坡挡墙及35座潜坝,沟口942m高程处215m长8m高的停淤场拦挡坝,高程940~913m区段沟坡护坡挡墙及12座潜坝和进入绵远河的255m长排洪沟。

2010年7月31日3~6时,绵竹市清平乡一带强降雨引发文家沟堆积体斜坡发生滑塌和泥石流,造成基本竣工的大量谷坊坝的库容很快被淤满,9座谷坊坝被破坏(主要为坝肩土体被流水冲刷掏蚀后逐渐冲毁谷坊坝、个别谷坊坝被直接冲毁,最后仅冲沟右侧残留部分坝体)。“7·31”泥石流发生后,坝基及坝肩在流水掏蚀下切作用下沉陷破坏,泥石流冲击作用使谷坊坝群发生串珠状破坏及整体溃决,并发出巨大闷响声。“7·31”泥石流固体物主要堆积在停淤场内,未冲出文家沟口。“7·31”泥石流的过程降雨量为60.2mm,降雨历时约3h,最大降雨强度为51.7mm/h。

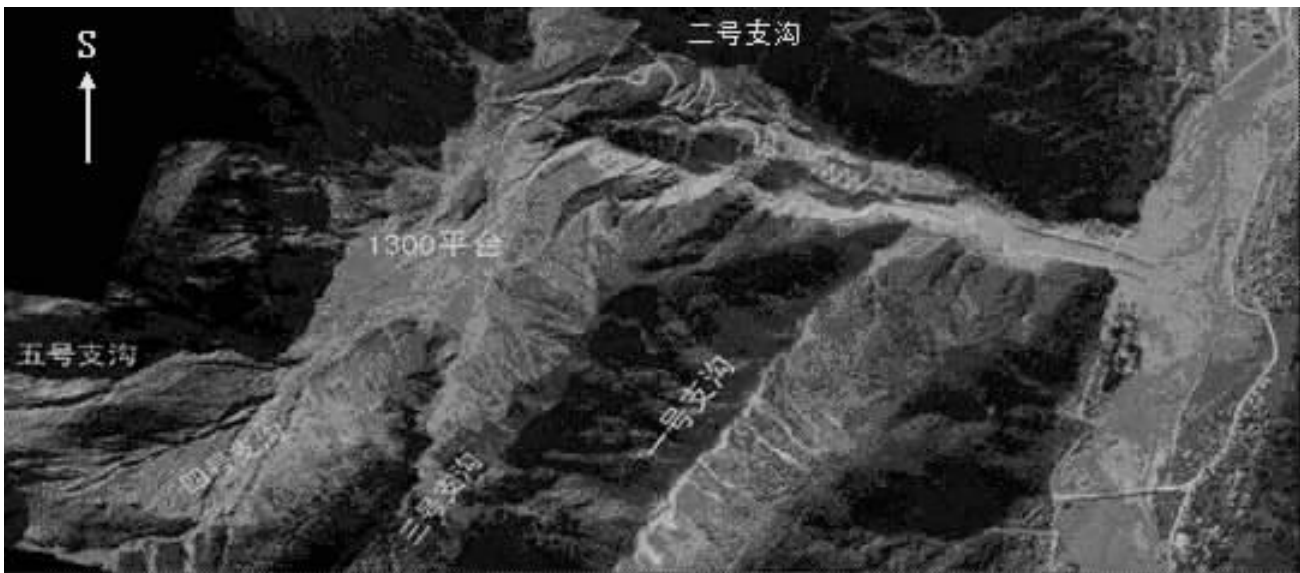


图1 绵远河流域文家沟泥石流汇水区、冲沟物源区和堆积河道区域航空影像
Fig.1 The aerial image of catchment area, soil and stone resource area and depositing area
in the Mianyuan river of Wenjiagou debris flows

2010年8月12日18时至13日4时,四川绵竹市清平乡再次出现强降雨。12日19时至22时,雨量较小。22:30至13日1:30时为持续暴雨。12日23:45时清平乡绵远河流域的文家沟开始暴发泥石流,至13日凌晨1时规模最大,13日4时基本结束,持续时间约4h。此次泥石流基本损毁已建成的初次防治工程。泥石流冲入绵远河后,造成河上老大桥堵塞,清平乡乡镇的学校、加油站、安置房淹没,盐井村6人死亡失踪,1500多人接警撤离。泥石流固体物主要源于1300m平台以下新生冲沟两侧滑坡堆积体,并造成冲沟扩大加深。“8·13”泥石流后的沟床扩宽至10~20m,沟岸高度40~70m,沟坡平均坡度48°。冲沟长度1150m,前后缘高差291.5m,坡降256.8‰。“8·13”泥石流过程降雨量为227.5mm,最大降雨强度70mm/h。

“8·13”泥石流后,8月19日、9月16日、9月18日文家沟又先后发生泥石流,其中情况比较清楚的是“9·18”泥石流。2010年9月18日10:05~11:40的泥石流主要表现为冲刷“8·13”泥石流形成的冲沟,掏蚀左岸沟坡产生滑塌进一步增加物源量,冲出固体物质约 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。“9·18”泥石流过程降雨量52.0mm,30分钟最大降雨强度18.5mm,5分钟最大降雨强度12.5mm。

2.3 二次实施防治工程及其效果检验

为了避免类似2010年“8·13”泥石流灾害的再次发生,2011年实施的文家沟泥石流二次防治工程采用了“水砂分离、固底护坡、拦阻停淤”的综合防治理念。“水砂分治”即把上游1300m平台以上流域的汇水采用引水隧洞分流到一号支沟,使其不进入滑坡堆积体;“固底护坡”即在中游新冲沟段采用分层回填和钢筋石笼固底护坡,使其能够抗冲蚀而不提供固体物质;“拦阻停淤”即在下游至沟口段设置拦挡工程使可能冲出的固体物停积下来。

文家沟泥石流综合防治工程于2011年5月底竣工。治理工程单元包括上游的谷坊坝、集水池和导水隧洞,中游的排导槽、钢筋石笼和下游的拦挡坝等。2011年入汛以来,文家沟流域连续经历了“5·9”、“6·16”、“6·30”三次暴雨天气过程。在6月30日至7月4日,清平场镇过程降雨量达247mm,文家沟一带过程降雨量最大达387.5mm,10分钟最大降雨强度10.5mm。强降雨在文家沟上游形成的山洪通过引水隧洞顺利下泄,使其未能进入1300m平台以下的滑坡碎屑流堆积区。

2.4 文家沟泥石流冲出松散固体物的体积问题

文家沟多期泥石流事件冲出松散固体物的体积是一个尚未解决的重要问题,仅仅是2010年“8·13”事件冲出的松散固体物就有两个差别较大的提法:一说 $450 \times 10^4 \text{ m}^3$ (许强,2010),另一说 $310 \times 10^4 \text{ m}^3$ (余斌等,2010;倪化勇等,2011)。这个问题不仅涉及对灾害事件规模的认定,同时也是防治工程方案论证无法回避的问题,因为工程量的巨大差别也就涉及工程投资的可接受程度。

比较正确地核算文家沟泥石流冲出的松散固体物的体积是可能的,因为有关的调查研究者和公共管理者都承认文家沟泥石流的松散固体物主要来源于主沟段地震崩滑碎屑流堆积斜坡体。那么,根据科学哲学还原论(Reductionism)的合理思想内核,可以认为文家沟崩滑堆积体斜坡上新生冲沟的容积就是8次泥石流活动冲出松散固体物的总体积。核算堆积斜坡上多次泥石流冲刷遗留的新生沟道的容积,也就基本可以确认8次泥石流事件冲出的松散固体物质体积(图2、图3)。

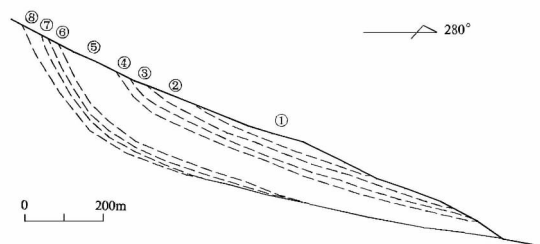


图2 2008~2010年间文家沟滑坡堆积区沟道塑造纵断面

Fig. 2 The vertical section resulted from 8 debris flow rush out events in the depositing area of the Wenjiagou landslide from 2008 to 2010

- ① 2008-06-21 冲出 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$; ② 2008-07-25 冲出 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$; ③ 2008-09-24 冲出 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$; ④ 2010-07-31 冲出 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$; ⑤ 2010-08-13 冲出 $115 \times 10^4 \text{ m}^3$; ⑥ 2010-08-19 冲出 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$; ⑦ 2010-09-16 冲出 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$; ⑧ 2010-09-18 冲出 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$
- ① rush out $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ on 2008-06-21; ② rush out $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ on 2008-07-25; ③ rush out $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ on 2008-09-24; ④ rush out $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ on 2010-07-31; ⑤ rush out $115 \times 10^4 \text{ m}^3$ on 2010-08-13; ⑥ rush out $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ on 2010-08-19; ⑦ rush out $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ on 2010-09-16; ⑧ rush out $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ on 2010-09-18

根据多次现场考察和防治工程勘查资料,可以采用的文家沟堆积斜坡新生沟道容积粗算数据是:上游入口上宽70m、下宽10m、深60m;下游出口上宽40m、下宽20m、深20m,沟道总长1200m,则新生

沟道容积为 $180 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。参考前述 8 次泥石流活动过程描述,可以基本核定 8 次泥石流冲出固体堆积物的规模分别为:2008 年“6·21”冲出 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、“7·25”冲出 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和“9·24”冲出 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$,2010 年“7·31”冲出 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、“8·13”冲出 $115 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、“8·19”冲出 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、“9·16”冲出 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和“9·18”冲出 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。这个论证虽然是粗略的,在绝对数值上是不准确的,但 8 次的总量和各次的相对大小是接近实际的,是可以用来说明文家沟堆积斜坡新生沟道塑造过程的。

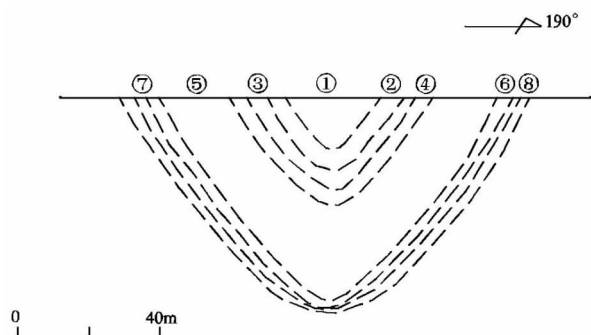


图 3 2008 ~ 2010 年间文家沟滑坡堆积区
沟道塑造横断面

Fig. 3 The cross section resulted from 8 debris flow events in the depositing area of Wenjiagou landslide from 2008 to 2010

① ~ ⑧ 表示 8 次泥石流事件,详细参数参见图 2

① ~ ⑧ express relevant debris flow events,
their details are the same to figure 2

3 文家沟泥石流成因模式分析

3.1 成因模式定性分析

文家沟主沟段滑坡堆积物的渗透溃决和持续冲刷形成的 8 次泥石流事件,既不同于一般的沟谷型泥石流,也不同于坡面型泥石流,而是具有强震背景下的特殊成因模式,很值得分析研究。

(1) 文家沟 8 次泥石流事件的主要物源为 1300m 平台以下的松散堆积体。主要支沟仅在“8·13”时出现泥石流,但未参与主沟泥石流的活动。一号支沟泥石流堆积于与主沟交汇处的平台上,二号支沟泥石流堆积于其沟口地震时形成的小堰塞湖(1300m 平台南侧)中,三、四、五号支沟泥石流堆积于 1300m 平台的北侧。

(2) 地震形成的滑坡碎屑土堆积体物源丰富,结构松散,形成泥石流的激发雨量远低于非地震影

响区,这是文家沟泥石流在同一区段反复发生的物质结构条件。2008 年滑坡堆积体上初次泥石流冲刷沟槽的形成明显改善山洪流通条件,同时利于松散堆积体在多次降雨渗透作用下加速自身的固结稳定,导致基本相同降雨历程和激发强度作用下,泥石流活动规模和频率呈现逐渐减弱趋势。

(3) 松散堆积体空隙排泄地下水潜(伏)流能力不足,快速降雨汇水因自然排泄不及导致松散体内滞留的地下水位迅速壅高,瞬态或短时地下水压力急剧增大,渗透变形逐步加大致使表层坡体失稳、溃决和滑塌,这是文家沟 2008 年“6·21”、“7·25”事件中崩滑堆积体上塑造冲沟的根本原因。“6·21”、“7·25”泥石流事件虽未冲出沟口造成灾害,但对于表层堆积体溃决,破坏坡面完整性和形成冲刷沟槽起了关键作用。

(4) 松散堆积体表层渗透溃决形成初期冲沟后,后续的暴雨汇流过程产生溯源侵蚀、冲刷刨蚀和侧蚀坍塌等作用使新生冲沟不断扩宽加长,并持续提供松散固体物质,是后期多次泥石流形成的根本原因。阶段性强降雨也使文家沟后续的泥石流表现为间歇(阵发)性,表现出即雨即流、流动过程时间长、冲击速度小和堆积距离短的特征,而不同于一般山洪泥石流暴发过程的短历时特征。

(5) 初次治理工程的 19 座谷坊坝座落在松散的滑坡堆积体上,它们可以拦挡一般坡面水流的携带物,在松散体可以承受的渗透条件下起到一定拦挡、迟滞和停淤作用,使固体物不致冲出文家沟口。在大规模长历时暴雨汇流和渗流条件下,多级谷坊坝反而会阻(滞)止水流的排泄,增进松散坡体内地下水流的形成与停滞时间,加剧地下水位抬升和动水压力的形成,从而增大松散坡体溃决的规模,这是“7·31”及后期多次泥石流溯源侵蚀、冲刷刨蚀和侧蚀坍塌扩大冲沟规模的重要背景。另外,初次防治工程虽然暂时阻止了“6·21”、“7·25”事件塑造的沟槽继续冲刷,但却加剧了上游来水的滞留,超常降雨条件下再次出现崩滑堆积体内因渗流能力不足以排泄来水,谷坊坝体破坏和滑坡堆积体表层溃决共同参与泥石流活动也就增大了后续事件的规模。溃决效应造成泥石流的流速和冲击力等剧增,这是“7·31”泥石流初期发出巨大闷响声的原因。

(6) “8·13”泥石流的形成过程为山洪泥石流体强烈的溯源侵蚀、冲刷刨蚀和侧蚀坍塌增加物源而形成。“8·13”泥石流规模大主要起因于总降雨量大,持续时间长。因为冲沟右壁为基岩,侧蚀坍塌

主要来源于冲沟左岸。“8·13”事件可初步划分为多个降雨阶段,每个阶段都不同程度地存在新冲沟源头跌水的溯源侵蚀、沟槽刷深和侧蚀坍塌添加物质导致沟道扩展,整个过程表现为不断添加物质,暂态壅堵的后续洪流不断饱水液化坍塌堆积物,而后向下运输的“天然搅拌机”机制。这个过程存在因大坨物质加入,坍塌体在沟道内短暂停留堵沟,形成多处短暂的小型壅堵再溃决的现象,但只是“插曲”性的,因为完整的输移通道在“7·31”时已经形成。

归纳起来,2008~2010年期间文家沟泥石流表现为多期活动、每期呈现多个阶段的特征。概括起来,每期甚至每个阶段都不同程度地存在“渗流管涌、暂态壅水、溃决滑塌、溯源侵蚀、冲刷刨蚀、侧蚀坍塌、混合奔流(搅拌机)”等多种作用,只是2008年的“6·21”和2010年的“7·31”事件更多地表现为“渗流管涌、暂态壅水、溃决滑塌”的造沟作用模式,其它事件更多地表现为“溯源侵蚀、冲刷刨蚀、侧蚀坍塌、混合奔流(搅拌机)”的扩沟作用模式(图4)。

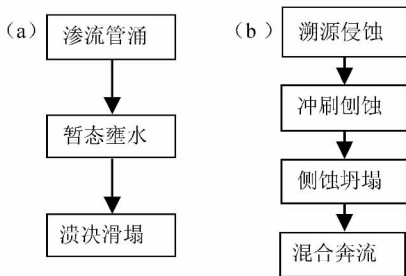


图 4 文家沟滑坡堆积区新生沟道的塑造过程

Fig. 4 Process paradigm of the paligenetic narrow channel made from debris flow erosion in the Wenjiagou landslide area from 2008 to 2010

(a) 造沟模式;(b) 扩沟模式

(a) Valley-forming model; (b) Valley-enlarging model

总之,文家沟泥石流提供了一种完全不同于通常的山洪积聚,物源区饱水液化,沿沟道冲击而突然暴发泥石流的一般模式。因此,在滑坡堆积体未完成固结过程之前,治理文家沟泥石流的关键就是防止滑坡松散堆积体表层冲刷破坏和地下水渗流压力过大造成斜坡体浅层溃决滑塌,进而演化为持续演进的沟道侵蚀性泥石流。可以说,文家沟泥石流是一种起源于滑坡松散堆积体上的沟道塑造和沟道侵蚀型泥石流。

3.2 造沟模式渗流机理分析

文家沟2008年“6·21”事件、2010年“7·31”事件是启动后期泥石流灾害的关键。这两次事件中滑坡堆积体浅表层的渗透变形、滑移溃决是造成坡体破损冲出、发生类似堤坝的溃决式破坏和塑造形成泥石流沟道的关键环节,也是后期沟道扩展的必要前提。因此,研究滑坡堆积体内渗水排泄不及形成暂态性壅水的临界渗透压力与松散斜坡体稳定性的关系,就可以分析滑坡堆积体渗透变形破坏乃至溃决的机理。

图5表示了渗透压力下斜坡非竖直条分的水动力环境模式。斜坡垂直条分土条渗透力的计算可采用方玉树(2011)建立的近似计算公式(据方玉树,2011):

$$D = \gamma_w A \tan \beta_0 \cos[(1 - \eta)\beta_0 + \eta\beta_1] \quad (1)$$

对于类似文家沟滑坡堆积体的渗流稳定问题,可以建立松散斜坡体内渗透力、下滑力和抗滑力三者的平衡关系。

取滑坡堆积体松散岩土的内聚力 $C = 0$,可以建立近似的单宽滑坡堆积体土条的抗滑力、下滑力与渗透力三者的力学平衡方程:

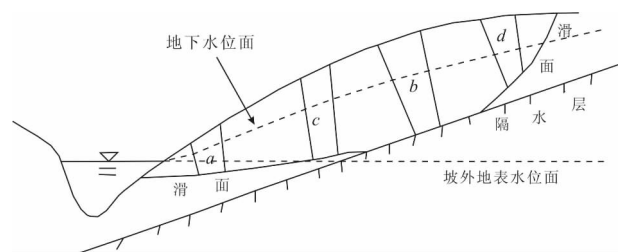


图 5 斜坡土条底面与渗流下界面的相对位置 (据方玉树,2011)

Fig. 5 Bottom position of a soil slice in slope with seepage flow (from Fang Yushu, 2011)

$$\gamma_w A \tan \beta_0 \cos[(1 - \eta)\beta_0 + \eta\beta_1] = (N\gamma - \gamma_w) A \cos \beta_1 \tan \varphi - (N\gamma - \gamma_w) A \sin \beta_1 \quad (2)$$

取 $\eta = 0.5$; $\gamma = 2.7 \text{ t/m}^3$; $\gamma_w = 1.0 \text{ t/m}^3$; $N = 70\%$ 。则(2)式可简化为:

$$\tan \beta_0 \cos(0.5\beta_0 + 0.5\beta_1) = 0.89(\cos \beta_1 \tan \varphi - \sin \beta_1) \quad (3)$$

式中, A ——滑坡堆积体中地下水水位面以下部分的面积(m^2); β_0 ——地下水水位面倾角($^\circ$); β_1 ——渗流下界面倾角,取滑坡堆积体底面平均坡角,相当于地震前主沟道平均坡降角($^\circ$); η ——渗流下界面倾角权重百分数,根据土条底面与渗流下界面的相对位

置确定:土条底面为渗流下界面时(图5中土条b)取0.5; γ ——石灰岩石的重度(t/m^3); γ_w ——水的重度(t/m^3); N ——滑坡堆积松散岩土의 密度度(%); φ ——滑坡堆积松散岩土的内摩擦角($^\circ$)。

利用(3)式,可进行几点讨论:

(1)取 $\beta_0 = \beta_1 = 15^\circ$,得到 $\varphi \sim \beta_1$ 的关系式:

$$\tan\varphi = 2.1236 \tan\beta_1 \quad (4)$$

可反算出 $\varphi = 29.5^\circ$,即不出现地下水壅塞的情况下,松散堆积体岩土的内摩擦角最大。

(2)若取 $\beta_0 = 0^\circ, \beta_1 = 15^\circ$,即持续强烈降水致使地下水排泄不及而急剧壅水,形成的地下水位面达到水平,(3)式简化为:

$$\tan\varphi = \tan\beta_1 = 0.2679 \quad (5)$$

得到 $\varphi = 15^\circ$ 。说明在最大动水压力下松散堆积体急剧离散化,造成 φ 值急剧降低到最小,斜坡失稳溃决。

(3)若取 $\beta_1 = 15^\circ$,得到 $\varphi \sim \beta_0$ 的关系式:

$$\tan\beta_0 \cos(0.5\beta_0 + 7.5) = 0.8597 \tan\varphi - 0.2303 \quad (6)$$

表1显示 φ 与 β_0 基本成正比关系。当地下水位面倾角(β_0)与渗流下界面倾角(β_1)均为 15° 时,此时地下水渗流梯度最大,但渗透压力最小,松散岩土堆积体基本不受地下水影响($\varphi = 29.5^\circ$)。

表1 斜坡体内地下水位面倾角(β_0)与松散土的内摩擦角(φ)的关系

Table 1 The correlation between obliquity (β_0) of the groundwater level plane and internal friction angle (φ) of the loosened soil in the slope

$\beta_0(^\circ)$	15	13	11	9	7	5	3	0
$\varphi(^\circ)$	29.5	28	26	24	22	20	18	15

随着 β_0 的减小,即地下水壅高逐渐增加,地下水位面逐渐变缓,地下水压力逐渐增大,松散岩土逐渐饱水液化,岩土颗粒逐渐离散,导致松散堆积岩土体的内摩擦角 φ 值逐渐变小,斜坡表层逐渐失稳破坏。显然, β_0 出现 15° 向 0° 方向的趋势变化时,也就是渗透水压力逐渐增大的过程。当地下水壅高水位面达到水平时($\beta_0 = 0^\circ$),地下水渗流梯度最小,地下水压力达到最大,松散堆积体的稳定性最低,松散岩土的内摩擦角最小($\varphi = 15^\circ$),也就是堆积体斜坡发生滑塌溃决的临界条件。

取 $\beta_0 = 0^\circ$,最大水位(压力)高度(H)与影响松散斜坡体的水平长度(L)存在关系 $H = L \tan 15^\circ$,可

计算出地下水壅高与失稳斜坡体长度的关系(表2)。可见,当滑坡堆积坡体内的地下水位壅高达到8m时,影响松散坡体的水平长度接近30m。若地下水位壅高达到15m时,相应影响松散坡体的水平长度达到56m,由此引发的斜坡表层松散体初次滑塌溃决的体积可超过 $1 \times 10^4 m^3$ 。

表2 斜坡体内最大水位高度(H)与水平影响长度(L)的关系

Table 2 The relation between maximum height (H) of the groundwater level and its affecting length (L) in the slope

$H(m)$	3	5	8	10	12	15
$L(m)$	11.2	18.7	29.9	37.3	44.8	56

表层坡体溃决产生突破口后,后继溯源侵蚀、冲刷刨蚀和侧蚀坍塌作用添加的土体方量会成倍增加。若考虑初期治理工程的短时阻水作用,地下水位壅高将明显增大,影响坡体长度相应增大,引发的松散斜坡滑塌溃决体积也急剧增加,这也是“8·13”泥石流事件规模巨大的重要背景之一。

4 结论和对策

4.1 基本结论

(1)文家沟2008~2010年期间的8次泥石流事件是在地震滑坡堆积体上因持续强降雨渗透变形溃决与后续侵蚀产生的,不同于一般的沟谷型和坡面型泥石流。

(2)文家沟滑坡堆积体上新生的泥石流沟共冲出松散固体物质的总体积约 $180 \times 10^4 m^3$ 。2010年的“8·13”泥石流事件是其中规模最大的一次,冲出松散固体物的体积约在 $115 \times 10^4 m^3$ 。

(3)文家沟泥石流的成因模式是,强降雨过程在滑坡堆积体上先期出现“渗流管涌、暂态壅水、溃决滑塌”的造沟作用,后期出现“溯源侵蚀、冲刷刨蚀、侧蚀坍塌、混合奔流(搅拌机)”的扩沟作用。因此,文家沟泥石流是一种起源于滑坡松散堆积体上的沟道塑造和沟道侵蚀型泥石流。

(4)初次治理工程因考虑松散滑坡堆积体的沉降固结和降雨渗透变形作用不足,出现强降雨过程中谷坊工程暂态性阻水加剧降雨汇水的滞留,导致拦挡工程地基基础沉陷和地下水壅堵作用效应增强,也就意味着会孕育更大规模的泥石流。

(5)地下水渗流壅高计算表明,随着地下水位升高,松散堆积体自稳性降低。当地下水壅高水位

面达到水平时($\beta_0 = 0^\circ$),渗透压力达到最大,松散堆积体的稳定性最低,也就达到了堆积体表层发生滑塌溃决的临界条件,从而导致造沟作用模式开始实现。在此情况下,堆积坡体内壅堵的地下水位最高,相应坡体渗透溃决的规模就越大,泥石流事件规模也越大。由于初次治理工程加剧了地下水壅堵作用,所以2010年的“7·31”事件规模远大于2008年“6·21”事件。

4.2 几点对策

(1)引水隧洞安全的主要威胁来源于1600m以上韩家大坪(一级平台)堆积物是否会孕育泥石流,应评估研究确定其启动的可能性及其规模,以便正确应对和及时维护,保证引水隧洞上游的两道拦砂坝起作用,不致因泥石流掩埋引水洞入水口使其排水功能失效。

(2)文家沟1300m高程平台南侧二号沟的排水通畅与相关坡体的稳定也是重要的,要保证现有堰塞塘不被冲决乃至引发南侧新的坡体破坏,形成新的泥石流隐患。

(3)主沟道一千多米长钢筋石笼的锈蚀和水污染应引起重视,经观测证明松散岩土固结密实达到一定程度,坡体基本稳定后,部分工程完成其历史使命,应论证拆除外露钢筋笼的可能性,增强生态恢复能力。必要时,对拆除钢筋笼的某些关键区段浇筑混凝土,增强沟道抗冲刷能力。

(4)汶川地震区因斜坡岩土松动或崩滑堆积引发滑坡泥石流的剧烈活动时限是一个复杂问题。一方面,持续强降雨会引发滑坡泥石流,另一方面,降雨渗透作用又有利于松散岩土体的沉降压密,加速

松散岩土的固结和环境生态修复。因此,选择若干典型地段,开展不同地震烈度区、不同地质环境类型区的松散堆积体沉降速率的立体观测,研究松散岩土体的密实度与其固结稳定的关系,是值得重视、亟待开展研究的重要科学问题。因为,这种研究将为强烈地震区滑坡泥石流活动的滞后效应延续时间研判,为区域地质环境的合理开发利用提供科学依据。

致谢:四川省国土资源厅、四川省地质矿产勘查局、四川省地质环境监测总站和四川省地质工程集团公司等单位提供了野外考察便利和应急勘查资料,特此说明并致以衷心的感谢!

参 考 文 献 / References

- 黄河清,赵其华. 2010. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡—碎屑流基本特征及成因机制初步分析. 工程地质学报,18(2): 168 ~ 177.
- 许冲,戴福初,徐锡伟. 2010. 汶川地震滑坡灾害研究综述. 地质论评,56(6):860 ~ 874.
- 王涛,石菊松,吴树仁,张永双,李滨,辛鹏,孙萍. 2010. 汶川地震触发文家沟高速远程滑坡—碎屑流成因机理分析. 工程地质学报,18(5):631 ~ 644.
- 刘传正,苗天宝,陈红旗,董抗甲,黎志恒,李海军. 2011. 甘肃舟曲2010年8月8日特大山洪泥石流灾害的基本特征及成因. 地质通报,30(1):141 ~ 150.
- 许强. 2010. 四川省8.13特大泥石流灾害特点、成因与启示. 工程地质学报,18(5):610 ~ 621.
- 余斌,马煜,吴雨夫. 2010. 汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究. 工程地质学报,18(6):827 ~ 836.
- 倪化勇,郑万模,唐业旗,徐如阁,王德伟,陈绪钰,宋志. 2011. 汶川震区文家沟泥石流成灾机理与特征. 工程地质学报,19(2): 262 ~ 270.
- 方玉树. 2011. 有渗流边坡稳定性一般条分法分析中的水力近似计算. 中国地质灾害与防治学报,22(3):125 ~ 128.

Analysis on Genetic Model of Wenjiagou Debris Flows in Wenchuan Earthquake Area, Sichuan

LIU Chuangzheng

1) Steering Centre for Geo-Hazard Emergency, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100081;

2) China Institute for Geo-Environment Monitoring, Beijing, 100081

Abstract: The eight events of debris flow happened in Wenjiagou catchment in the Wenchuan earthquake area, Sichuan, are different from either the general ravine type or the slope slipping type of debris flow, they are resulted from rainfall-induced infiltrating deformation-failure and erosion of the earthquake—landslide mass. The total volume of the eight events of debris flow from the Wenjiagou earthquake—landslide mass is about $180 \times 10^4 \text{ m}^3$, in which, the maximum one with the volume of $115 \times 10^4 \text{ m}^3$ happened in Aug. 13, 2010. The mechanism of the Wenjiagou debris flows is that of rainfall-induced seepage and piping, temporary dam water, bursting mass sliding of landslide mass in the early valley-forming stage, and headward erosion, washing and digging away, side

erosion and collapse, mixing flow (similarly to the stirring machine action) in the late valley-enlarging stage. The two events of debris flow happened in June 21, 2008, and July 31, 2010, are resulted from the mechanism of the early valley-forming stage, and the others are resulted from the mechanism of the late valley-enlarging stage. The inherent mechanism of the slope failure and induced debris flow is that the capacity of rainfall infiltration is not enough to cause groundwater stagnant and water-level increasing in losing landslide mass. When temporary dam water is increasing up to the horizontal level, the hydrodynamic pressure is up to the maximum value, then the slope stability decreases to the lowest, and finally, the critical condition of failure slide will be appeared in the surface of landslide mass.

Key words: Wenjiagou debris flow; infiltration and seepage; slope failure and slide; valley-forming model; headward erosion; valley-enlarging model; Wenchuan earthquake area, Sichuan

2012年海峡两岸地质灾害防治学术研讨会在厦门召开

2012年6月16日至19日,“2012年海峡两岸地质灾害防治学术研讨会”在厦门召开。全国政协委员、中国地质学会常务副理事长孟宪来,中国工程院王思敬院士,成都理工大学副校长、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室主任黄润秋,国土资源部咨询研究中心副主任王宝才,中国地质学会秘书长、中国地质科学院常务副院长朱立新,台湾中央大学应用地质研究所所长李锡堤,福建省国土资源厅副厅长何南飞,福建省科学技术协会副主席柯少愚,台湾水土保持技术协会理事长王德镛,国土资源部地质灾害应急技术指导中心副主任、总工程师殷跃平等出席研讨会。会议开幕式由朱立新秘书长主持。

研讨会作为海峡科技专家论坛主要内容之一,由中国地质学会、国土资源部地质灾害应急技术指导中心、福建省国土资源厅及台湾“中央”大学、台湾大学共同主办,福建省地质学会、厦门国土资源与房产管理局承办,共有来自海峡两岸各高等院校、科研院所、地勘单位的120余名代表参会,其中近20名代表来自台湾。

孟宪来常务副理事长在开幕式上发表致辞。他首先向来自台湾和大陆的各位来宾表示热烈地欢迎。他指出,地质灾害的有效防治具有重大现实意义。我国地质条件复杂,构造活动频繁,崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地裂缝等灾害隐患多、分布广,且隐蔽性、突发性和破坏性强,防范难度大,是世界上地质灾害较为严重、受威胁人口较多的国家之一。未来十几年是我国经济社会快速发展时期,也是地质灾害的高发期。做好地质灾害防治具有十分重要的意义。他强调,国家对地质灾害防治高度重视。去年国务院出台了《关于加强地质灾害防治工作的决定》,今年四月份又批复了《全国地质灾害防治“十二五”规划》,这既是以人为本,关注民生的具体举措,同时也给我们地质灾害防治工作提出了新的更高要求。他指出,这次地质灾害防治学术研讨会就是推进海峡两岸地质科技工作者相互交流和学习、促进共同

发展的一次极好的机会,他希望通过两岸的交流研讨,推进地质灾害防治水平提升,让地质工作在经济社会发展中发挥更大的作用。

福建省科学技术协会副主席柯少愚、福建省国土资源厅副厅长何南飞及台湾“中央”大学应用地质研究所所长李锡堤分别在开幕式上致辞,共同表达对海峡两岸地质学家就地质灾害防治相互交流学习、促进共同发展的美好祝愿。

会上,18位来自海峡两岸的专家学者分别作了主题发言。汶川震后地质灾害、三峡库区地灾防治、台湾集水区崩塌、台湾草岭山崩、台湾小林村山崩……,发言主题涵盖了大陆和台湾地质灾害热点地区的众多防治案例。从中看到,未来十几年是我国经济社会快速发展时期,东部地区现代都市圈逐渐形成,水资源供需矛盾加剧,地下水超采严重,城市地面塌陷、地面沉降和地裂缝灾害仍呈上升趋势;西部大开发战略实施中人类工程活动引发的地质灾害也在不断增加。一些地震灾区和三峡等重点工程地区也是未来一段时期内的防治重点。另外,本世纪前期强降雨和地震引发的滑坡、崩塌、泥石流、地裂缝灾害均趋于活跃期。专家学者就以上两岸地质灾害的热点、难点问题的成因、演化态势、防治技术等内容进行了深入交流。

会议期间,孟宪来、王思敬、王宝才等领导 and 专家及部分台湾代表,出席了2012海峡科技专家论坛。部分专家学者还实地考察了漳州滨海火山国家地质公园。

2012年海峡两岸地质灾害防治学术研讨会的顺利召开,让两岸地质学家共聚一堂,展示科技成果、交流学术思想、探讨科学原理,共同破解地质灾害难题、推动防治地灾科技进步,必将进一步推动海峡两岸地质灾害防治的研究再上一个新台阶,让地质工作作为经济建设保驾护航,为人民生活谋福祉,促进社会、经济和环境协调发展提供安全保障做出新的贡献。

(孟庆伟 供稿 章雨旭 编辑)