

汶川地震触发文家沟高速远程滑坡-碎屑流成因机理分析*

王涛 石菊松 吴树仁 张永双 李滨 辛鹏 孙萍

(国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室 中国地质科学院地质力学研究所 北京 100081)

摘要 文家沟高速远程滑坡-碎屑流位于映秀—北川断裂带与灌县—安县断裂带夹持的文家沟向斜断块中,地震断裂的强烈活动引起的振动效应是形成滑坡的先决条件。滑坡源区顶端与文家沟沟口高差约 1360m,突兀山体下临深切峡谷的地形使地震荷载在山脊部位的放大效应显著,并直接导致坡体破坏;滑坡源区的地震动加速度 3 分量峰值分别为 $a_{EW}=2.4g$, $a_{NS}=2.3g$, $a_{UP}=1.2g$ 。D₂gn 观雾山组石灰岩斜坡具有强度渐进式分层结构,坡体表层以下约 50m 内的结构相对松散的残坡积层~新鲜岩体上部无法抵抗地震纵横波的周期性拉压与剪切耦合作用,被切割成为初始滑体;滑体在第八级台地边缘高位剪出后,在文家沟上游地区最高滑移速度约介于 $93\text{m}\cdot\text{s}^{-1} \sim 122\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。滑体上部的干碎屑流在两处路径转折端瞬间压缩沟谷内的圈闭气体,形成明显的“气垫效应”,滑体下部泥石流底层液化和颗粒有效动摩擦系数随剪切速度增大而减小的效应都是导致碎屑流体高速远程滑移的关键;同时,碎屑物流通过程中还伴有明显的岸坡铲刮与翻越效应、以及树木摧削效应。汶川地震后截至 2009 年 9 月,降雨诱发碎屑堆积物形成多次泥石流,反映了地震地质灾害的链生性和长期性。

关键词 汶川地震 文家沟 高速远程 滑坡-碎屑流 成因机理

中图分类号:P65 文献标识码:A

FORMATION MECHANISM OF WENJIAGOU HIGH-SPEED AND LONG-RUNOUT DEBRIS AVALANCHE TRIGGERED BY WENCHUAN EARTHQUAKE

WANG Tao SHI Jusong WU Shuren ZHANG Yongshuang LI Bin XIN Peng SUN Ping

(Key laboratory of Neotectonic Movement & Geo-hazard, Ministry of Land and Resources, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081)

Abstract The seismic geological context, morphology, formation mechanism and evolution of Wenjiagou high-speed and long-runout debris avalanche are introduced. The debris avalanche was located at Wenjiagou syncline block between Yingxiu-Beichuan fault and Guanxian-Anxian fault of which severe activity provided precondition for the debris avalanche. The peak of debris avalanche source area was 1360m higher than Wenjiagou valley mouth. Seismic load showed remarkable amplification effect at the ridge due to the terrain of towering hill with deep valley at the foot, and directly results in the landslide. The peak values of ground motion acceleration in 3 directions in the ridge were $a_{EW}=2.4g$, $a_{NS}=2.3g$, $a_{UP}=1.2g$ (g : the acceleration of gravity). The Guanwushan formation (D₂gn) lime-

* 收稿日期: 2009-11-11; 收到修改稿日期: 2010-03-08.

基金项目: 973 计划项目课题专题 (NO. 2008CB425803); 汶川地震重大次生山地灾害风险管理系统研究; 中国地质调查局项目 (NO. 1212010914025); 龙门山及邻近构造带地震工程地质调查评价; 国家“十一五”科技支撑课题 (NO. 2006BAC04B05); 地质灾害风险评估技术研究.

第一作者简介: 王涛, 主要从事地质灾害研究. Email: wangtao820707@163.com

stone slope had layered structure with progressive strength. About 50m below the slope surface was loose structural Q^{el+dl} ~ upper part of fresh rock, which was cut into initial landslide mass results from the tension-compression and shear coupling effect due to seismic P-wave and S-wave. The sliding mass sheared out from edge of the 8th platform; the maximum traveling velocity of sliding mass was accelerated up to 93 ~ 122 m · s⁻¹ in Wenjiagou valley upstream. Trapped air inside of the valley was compressed by upper part of landslide mass, the dry debris flow, at 2 turnings of Wenjiagou valley; distinct "air cushion effect" was generated. Besides, the bottom layer of debris flow was liquefied; effective dynamic friction coefficient was decreased with increasing of shearing velocity; all of these effects led to the high-speed and long-runout traveling of debris flow. Simultaneously, the valley slope was scraped and crossed; the trees were cut as debris flow passed. After Wenchuan earthquake and before Sept. 2009, rainfall triggered several debris flows, which indicated the continuity and long-term nature of seismic geohazard.

Key words Wenchuan earthquake, Wenjiagou, High-speed and Long-runout, Debris avalanche, Formation mechanism

1 引言

汶川“5.12”地震 ($M_s = 8.0$) 在龙门山地区诱发了约 15000 处崩滑地质灾害, 导致 2 万余人死亡, 约占汶川地震总死亡人数的 1/3^[1]; 因此, 进行地震地质灾害成因机理及危害方式研究举足轻重, 其中地震触发的高速远程滑坡-碎屑流^[2] (Debris Avalanche) 因其规模大、滑得快、滑程远、破坏力强等特点, 成为地震地质灾害研究的焦点^[1, 3, 4]。在国际上, Heim (1932) 利用“雪橇”模型在阿尔卑斯山 Linthal 地区开展了岩崩的滑距预测研究, 开创了高速远程滑坡-碎屑流 (最初称为 sturzstrom) 机理研究的先河^[5]; 此后针对碎屑流态化和高速远程机制提出的理论模型很多, 其中具有代表性的观点包括 3 种: 其一, 与碎屑物压缩或圈闭气体有关, 包括 Kent 提出圈闭气体导致岩质碎屑物流态化且具有高速运动特性^[6], Shreve 以 Blackhawk 等滑坡为例研究提出孔隙气体压缩形成“气垫效应”导致滑坡产生高速远程运移^[7, 8]; 其二, 与碎屑物孔隙超静水压力有关, 包括 Voight 等以 Ontake-san 崩滑-碎屑流为例提出不排水剪切作用产生超孔隙水压力, 同时导致碎屑粒度形态变化及强度参数降低, 进而导致滑体底层液化^[9]; Sassa 利用动三轴及环剪等不排水剪切试验手段, 研究提出冲击荷载作用于饱和的滑坡碎屑物上, 产生瞬时超孔隙水压力, 进而在滑坡底部产生液化润滑层^[10]; 其三, 基于摩擦及碰撞理论的高速剪切导致液化观点, 包括 Davies 提出碎屑物内部及其与滑床间的高速剪切运动导致碎屑物粒间相互碰撞, 引起碎屑物呈发散式运动, 内部有效应力相应降低, 进而导致固体碎屑流态化^[11]; Campbell

否认高速远程特性源于滑体底部存在摩擦力较低的基底层, 认为远程滑移距离与滑体体积具有正相关性, 具体因为滑体内部的剪切速率与滑体规模呈负相关性, 即剪切速率随滑体厚度增大而减小, 同时由于碎屑物表观摩擦系数与剪切速率正相关, 因此相应的摩擦系数也随滑体厚度增大而减小, 从而导致滑坡发生远程滑移, 而不同规模滑坡的平均滑移速度基本相同^[12]。由上述可见, 国际针对高速远程滑坡的研究主要集中在滑体运移过程中的动力学机制方面。

国内对高速远程滑坡-碎屑流机理研究起步较晚, 但研究领域涉及较多, 迄今具有代表性的成果包括, 胡广韬于 1995 年出版了《滑坡动力学》, 分别论述了高速远程滑坡的启程剧动和行程高速机制, 提出了滑坡启动阶段的峰残强降加速效应^[13]; 胡厚田、程谦恭等通过岩土体常规三轴试验、高速摩擦试验、风洞试验和数值模拟等手段深化了滑体破碎和二相碎屑流内部作用机理的研究, 弥补了众多模型停留在理论设想层面的不足, 促进了高速远程滑坡-碎屑流全过程动力学特性研究^[14, 15]。与此同时, 熊传祥^[16]、肖盛燮^[17]等基于突变理论模型, 对高速远程滑坡临滑阶段的变形能、滑动速度及滑动时间进行判据及预测研究。刘涌江^[18]、赵晓彦^[19]等通过理论分析和碰撞模型试验, 对滑体碰撞的能量传递及滑体加速效应进行了研究。殷跃平^[20]、黄润秋^[21]以西藏波密县易贡高速远程滑坡为例, 进行了滑坡-碎屑流的阶段划分及全过程运动学分析; 刘忠玉建立了块体运动模型, 对高速远程滑坡的运动全程, 及最大滑移速度和距离进行了预测研究^[22]。

上述研究多以降雨诱发或坡体重力导致的滑坡启动机制实例为主, 但是汶川地震触发的高速远程

滑坡-碎屑流启动机制与此不同。殷跃平分析了汶川地震诱发滑坡的区域发育规律和典型滑坡类型,并对安县大光包滑坡等系列典型滑坡的成因机理进行了研究^[1]。黄润秋等以安县大光包滑坡为例,对滑坡形成的地质背景、形态特征、动力条件及运动过程等进行了分析研究^[3, 23]。本文基于对绵竹市清平乡文家沟高速远程滑坡-碎屑流(下文简称‘文家沟滑坡-碎屑流’)现场调查和室内分析,较为详细地阐述了其所处地震地质背景和形成条件,初步揭示了滑坡的强烈地震触发启动机制和碎屑流的高速远程运移过程,以为后期开展深入研究作为参考。

2 地质背景与形成条件

2.1 地质构造与地表破裂

文家沟滑坡-碎屑流位于龙门山断裂带中段偏北地区,主中央断裂(映秀—北川断裂)与前山断裂(灌县—安县断裂)所夹持的断块中,其中滑坡源区与映秀—北川断裂相距约4km,与灌县—安县断裂相距约2km(图1)。文家沟及邻区发育一系列直立~倒转的纵弯褶皱,并被多条逆冲推覆断裂依次切

割,指示了区域构造演进过程中NW~SE的强烈挤压应力(图1、图2)。另外,滑坡所在断块也是文家沟向斜核部所在位置,该向斜为直立倾伏向斜,枢纽倾伏向NE50°;滑坡源区处于向斜核部偏南东翼部分。

汶川地震期间,映秀—北川断裂和灌县—安县断裂在文家沟邻区的活动较为强烈,调查发现多处典型地表破裂,其中距离滑坡最近的两处地表破裂由映秀—北川断裂活动引起,其一位于滑坡北西绵远河右岸棋盘石(图1第①破裂点和图3),距离滑坡源区约4.5km,混凝土路面形成高约3.3m的挤压推覆陡坎,破裂带走向NE40°;其二位于滑坡北西绵远河左岸一级支流走马岭沟(图1第②破裂点和图3),距离滑坡源区约4.5km,混凝土路面形成高约30cm的挤压隆起带,走向NE50°。另外,在位于滑坡源区南东侧约10km的汉旺镇,灌县—安县断裂活动也形成了明显的地表破裂,具体位置在官宋堰堰取水枢纽南东侧,混凝土路面形成高约1.5m的逆冲挤压隆起带,走向NE65°,隆起带延伸至西侧绵远河中,形成高约1m的跌流^[24]。可见,在文家沟东西两侧约15km范围内,映秀—北川断裂和灌县—安县断裂作为发震和同震断裂均发生了强烈活

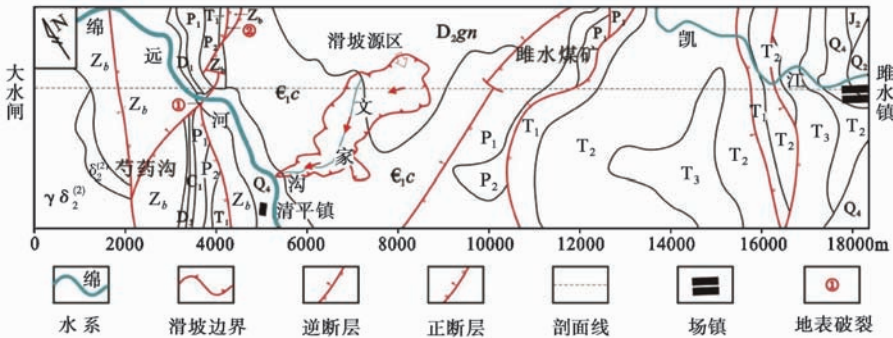


图1 文家沟滑坡-碎屑流区域构造纲要图

Fig. 1 Wenjiagou debris-avalanche regional tectonic framework map

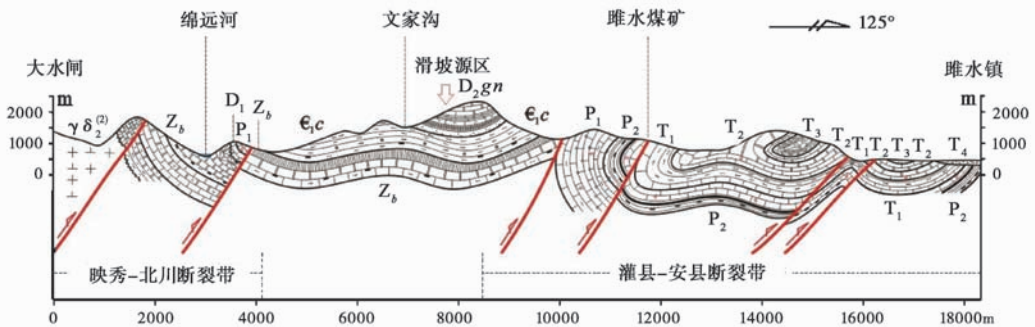


图2 文家沟滑坡-碎屑流区域地质剖面图

Fig. 2 Wenjiagou debris-avalanche regional geological section map

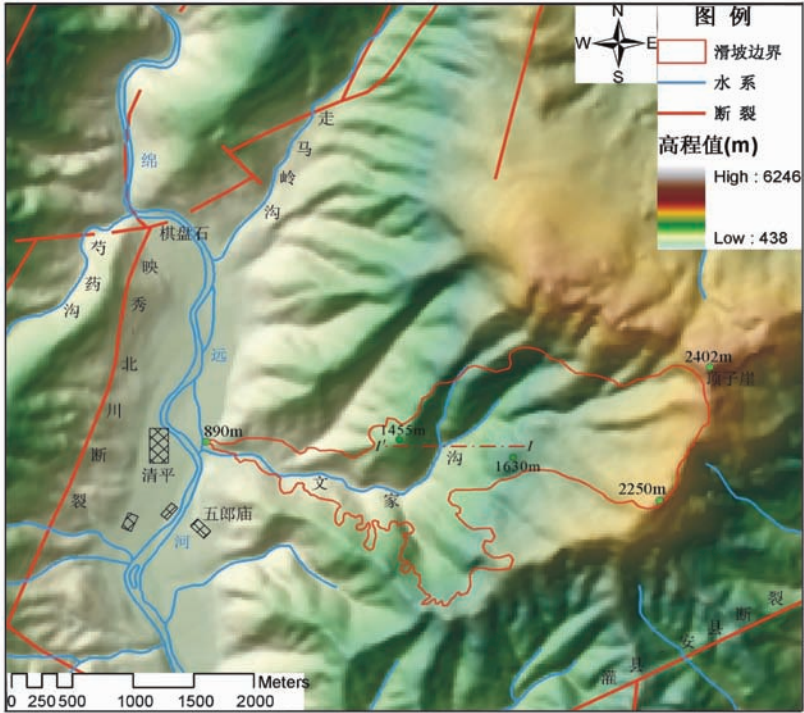


图3 文家沟滑坡-碎屑流区域地貌与构造简图(图中 I - I' 剖面见图 12)

Fig. 3 Wenjiagou debris-avalanche regional geomorphology and tectonic simplified diagram (the I - I' profile)

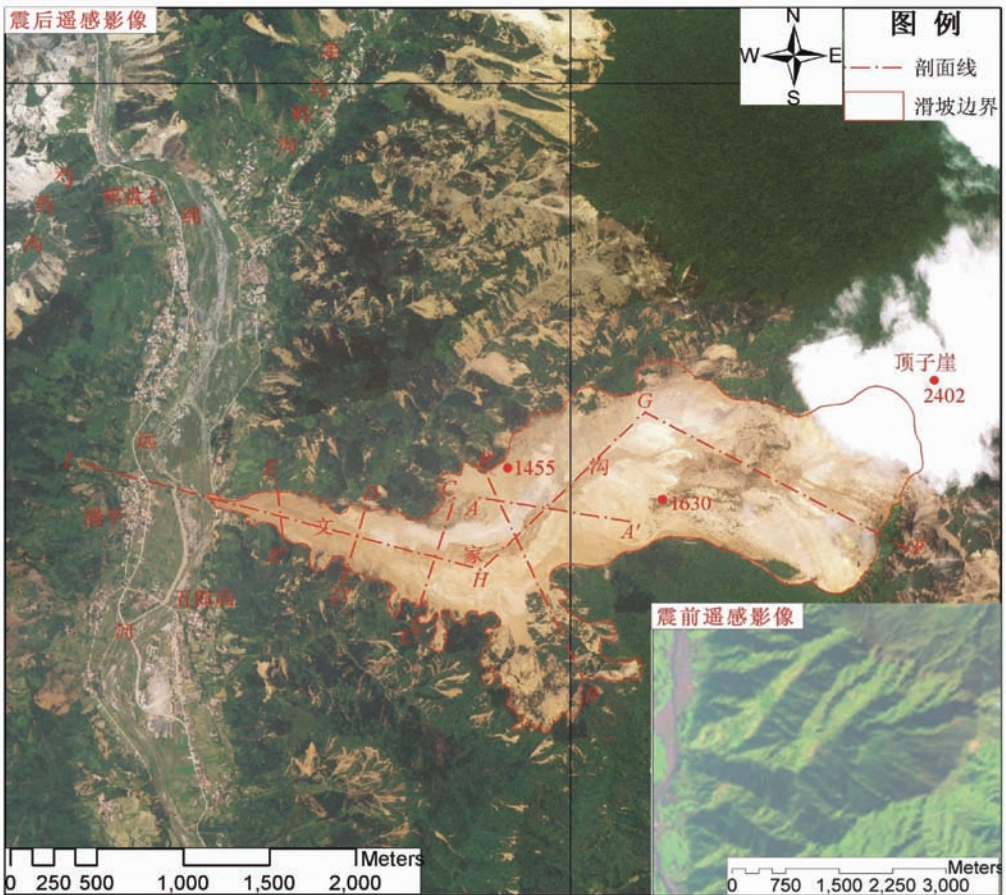


图4 文家沟滑坡-碎屑流区域遥感影像图(据国土资源部航遥物探中心 2008 年 5 月 18 日航摄影像)

Fig. 4 Wenjiagou debris-avalanche regional remote sensing image (after AGRS, 2008-05-18)

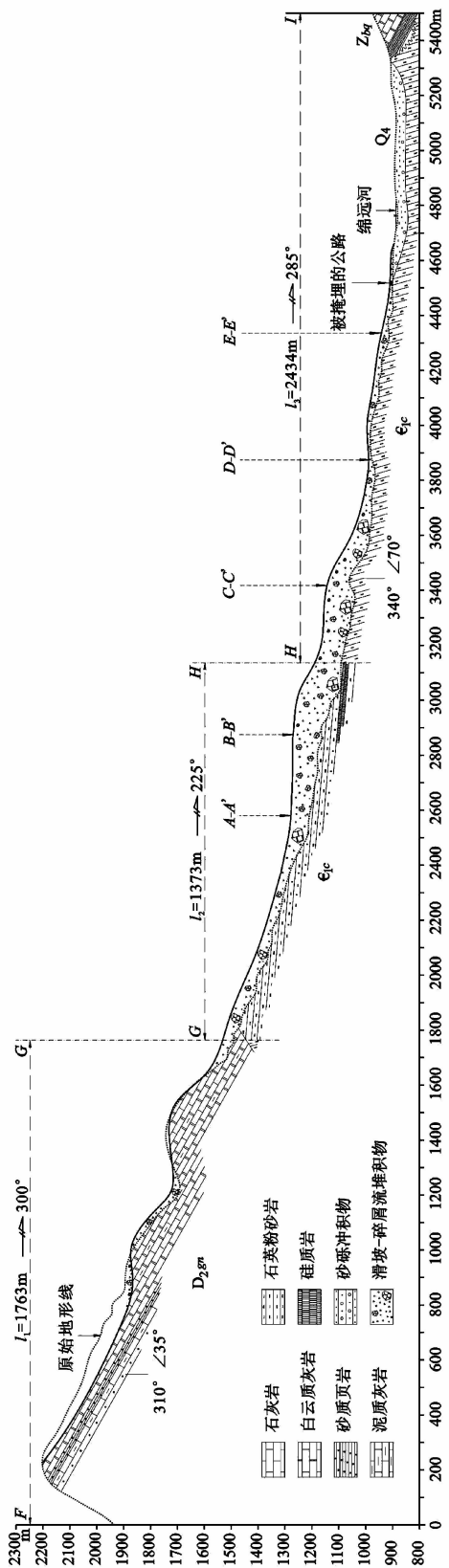


图 5 文家沟滑坡—碎屑流分段纵剖面图

Fig. 5 Wenjiagou debris-avalanche sub-vertical section diagram

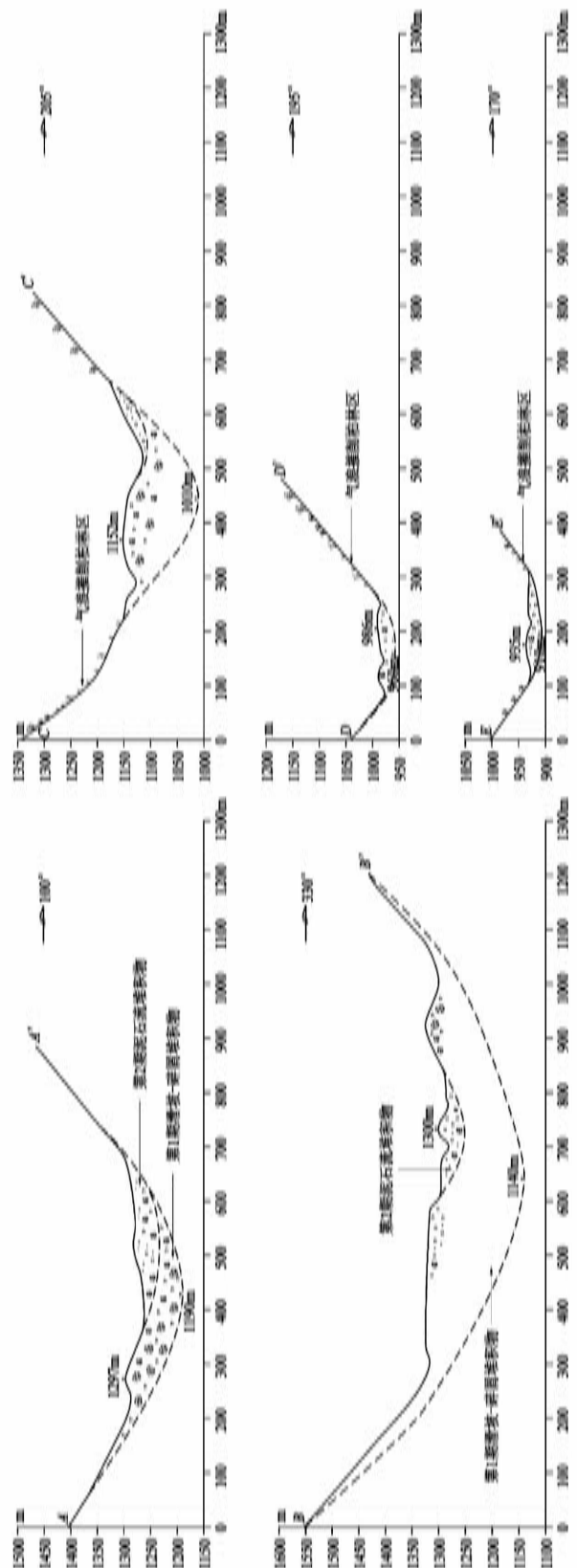


图 6 文家沟滑坡—碎屑流分段横剖面图

Fig. 6 Wenjiagou debris-avalanche sub-transverse section diagram

动,文家沟断块也因此相继受到振荡式地震动惯性力,为文家沟滑坡-碎屑流的形成提供了直接触发动力。

2.2 地形地貌

文家沟滑坡-碎屑流地区整体表现为高山峡谷地貌,其中滑坡源区地貌为孤立突兀的向斜山体(图3),原始坡度约 30° ;滑坡后壁边缘沿顶子崖南侧山梁分布,后壁南端顶点高程2250m;源区山梁西麓为缓坡~台地形态,边缘高程1630m,该平台即为滑体高位剪出部位;台地西侧紧邻文家沟上游,地貌类型为深切峡谷,谷底与平台相对高差约435m;文家沟再向下游,沟谷横剖面逐渐展宽,至沟口处汇入绵远河,高程890m;沟口与滑坡源区顶端相对高差约1360m,高山峡谷对峙的地貌形态致使滑坡源区山脊部位地震动放大效应显著^[25];同时,地形高差悬殊使滑体具有将巨大的重力势能向动能转化的潜势,从而增大了滑体运移速度和破坏能力。

2.3 地层岩性与斜坡结构

文家沟滑坡-碎屑流源区(即FG段,图4、图5)的岩性以碳酸盐岩为主,具体地层为 D_2gn 观雾山组,上部灰~深灰色石灰岩夹白云质灰岩;下部砂页岩夹泥质灰岩夹有铁质砂岩;底部黄褐色灰色中厚层石英砂岩。GHI段主要为碎屑物质流通区(图4、图5),地层岩性为 ϵ_1c 清平组,上部灰色薄层状长石云母石英粉砂质板岩及钙质泥质粉砂岩;中部暗紫~暗灰绿色薄层板状钙质粉砂岩;下部由灰绿色细粒状磷块岩、灰色含磷泥灰岩、薄层硅质岩及深灰色钙质磷块岩与磷质灰岩互层,统称为磷矿段。

通过调查发现,滑坡和泥石流的地表碎屑堆积物岩性主要以滑坡源区的观雾山组灰岩和白云质灰岩为主,岩体中溶蚀孔洞及节理裂隙面十分发育,且局部角砾化(图7和图9),形成蜂窝状架空结构,岩体强度相比新鲜原岩明显弱化。如图9所示,在源区原始斜坡层序中,这种溶蚀节理化岩体(第②层)上覆为碎裂~散体状岩体以及残坡积土层(第①层),下伏为轻度风化的层状~块状原岩(第③层),斜坡岩土体强度自上而下依次增强,形成3层过渡式斜坡结构。第①层和②层为崩滑敏感地层,坡体最易发生破坏的深度大致处于第②层和③层之间,但其具体破坏深度深浅不一,主要受地震力、地形地貌和斜坡结构等因素共同控制。文家沟滑坡源区岩体破坏深度已至第③层新鲜灰岩及白云岩岩层之

中,但破坏深度不均,滑壁所裸露的基岩层面呈台阶状产出,其平均深度约50m。

另外,滑坡源区位于文家沟向斜核部转折端偏南东翼部位,观雾山组岩层与坡面产状近乎一致,呈顺向坡结构,这也成为导致坡体破坏的要素之一;后缘滑壁所裸露的巨幅平整层理面指示滑体主要沿白云质灰岩层理面发生破坏,印证了顺向坡结构的制约作用。

清平组岩层主要出露在GHI段两侧斜坡上(图4、图8),岩性以陡倾的薄层~中厚层砂质板岩为主,岩层产状不稳定,其中发育小型断裂和褶皱构造;岩体表层风化严重,地震期间坡体以弯折倾倒和残坡积层碎屑流的破坏形式为主,沿滑移路径两侧和沟底形成了大量松散碎屑堆积物;高速运移的主碎屑流和泥石流途径此处,极易产生铲刮或侵蚀效应,类似“滚雪球”,致使碎屑物质体积不断增大。

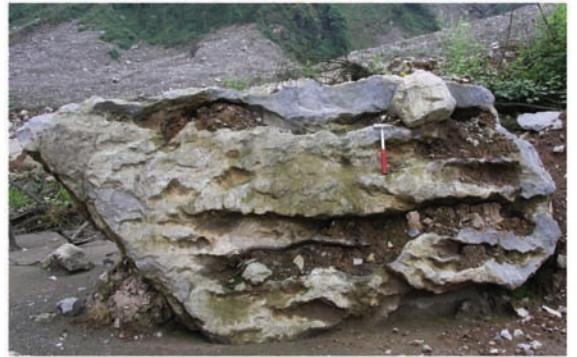


图7 GH段遭溶蚀的泥质灰岩巨石(镜向SE)
Fig. 7 Solution argillaceous-limestone boulder in GH section(lens direction SE)

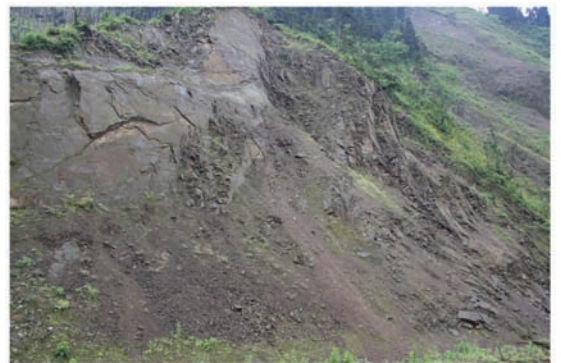


图8 HI段南侧边界粉砂质板岩斜坡(镜向S)
Fig. 8 Silty slate slop on south bank of HI section(lens direction S)

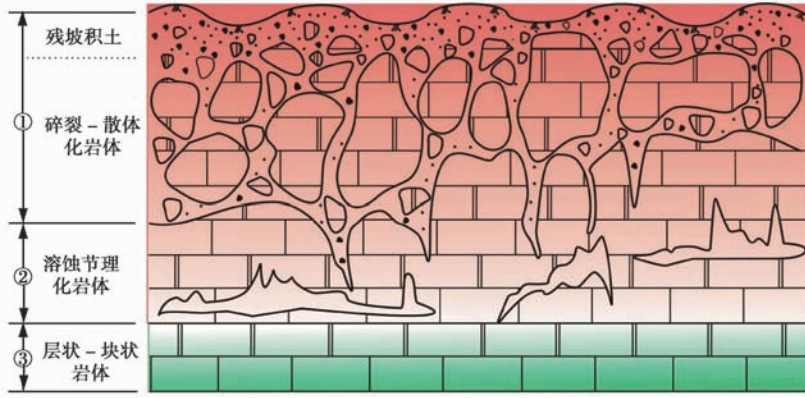


图9 滑坡源区观雾山组斜坡岩土体结构剖面

Fig. 9 Rock and soil structure section of Guanwushan formation slope in landslide source area

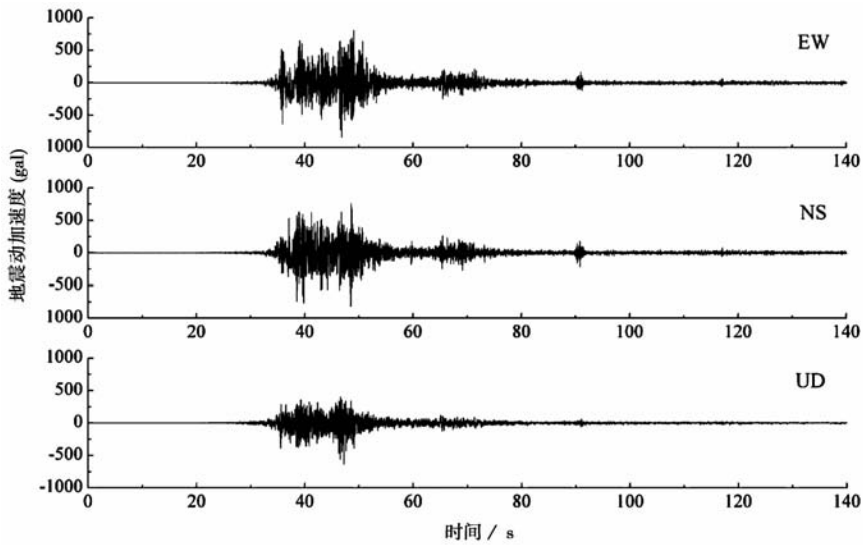


图10 清平地震台站记录的汶川地震主震地震加速度反应谱

Fig. 10 Ground motion acceleration response spectrum of Wenchuan earthquake main shock, recorded by Qingping seismic station

表1 文家沟地区地震动加速度的监测与合成峰值

Table 1 Monitoring and composing peak value of ground motion acceleration in Wenjiagou area

地震动加速度方向	清平站地震动峰值 加速度监测值	滑坡源区综合地震影响系数			滑坡源区地震动加速度3分量与合成峰值	
		地震影响系数	放大系数 λ	综合地震影响系数	加速度3分量峰值	加速度合成峰值
水平 EW	824.3 gal	$\alpha_h = 1.95$	1.5	$\beta_h = 2.9$	$a_{EW} = 2.4g$	3.5 g
水平 NS	802.5 gal				$a_{NS} = 2.3g$	
竖向 UD	622.9 gal	$\alpha_v = 1.27$	$\beta_v = 1.9$	$a_{UP} = 1.2g$		

2.4 地震动加速度

地震动荷载是文家沟滑坡-碎屑流形成的直接触发因素,绵竹市清平镇地震台站位于映秀—北川断裂东侧约 1.5km 处,与文家沟地区处在同一断块中,距离文家沟滑坡源区约 3.5km;清平站记录的地震动加速度反应谱真实的反映了文家沟地区的地

震动特征背景值(图 10)^[26],其中沿东西(EW)、南北(NS)和上下(UD)3 个方向的地震动加速度峰值(PGA)(表 1)。

文家沟滑坡源区为脊状山梁,西麓边缘下部为高约 440m 的陡崖,陡崖下部为文家沟上游峡谷底部,该处谷底与源区山脊相对高差约 1050m;而滑坡-碎屑流后壁顶点与碎屑堆积区前缘相对高差可

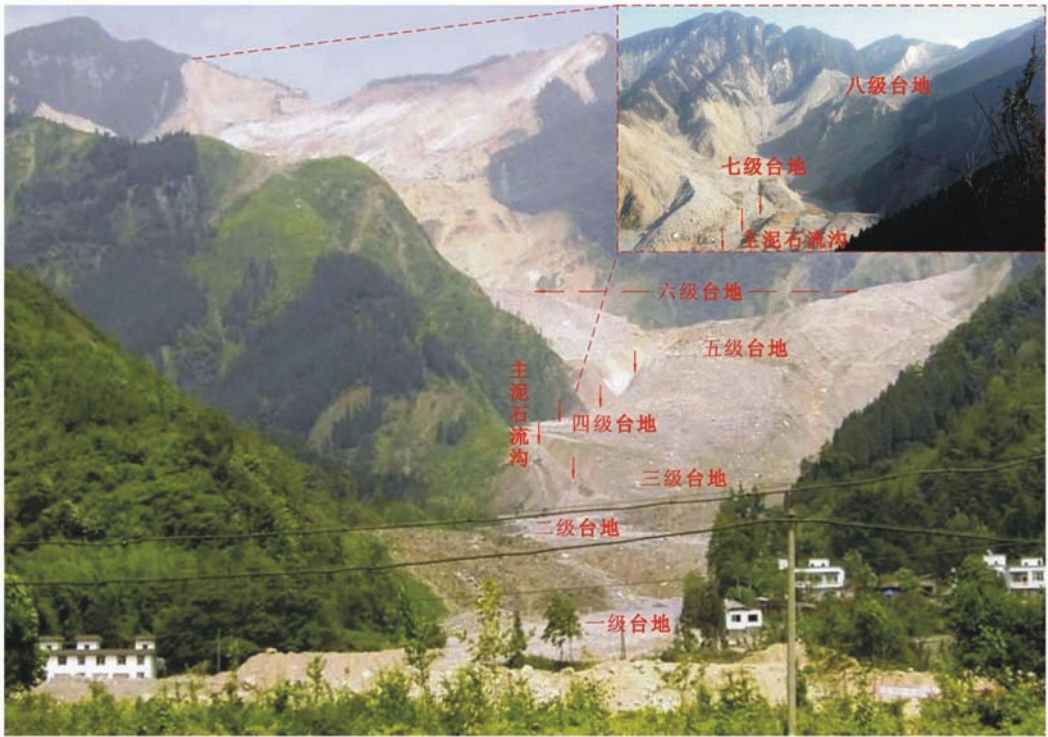


图 11 文家沟滑坡-碎屑流全貌(镜向 E,右上图镜向 NE)

Fig. 11 Wenjiagou debris-avalanche full view(lens direction: E,lens direction of the upper right photo: NE)

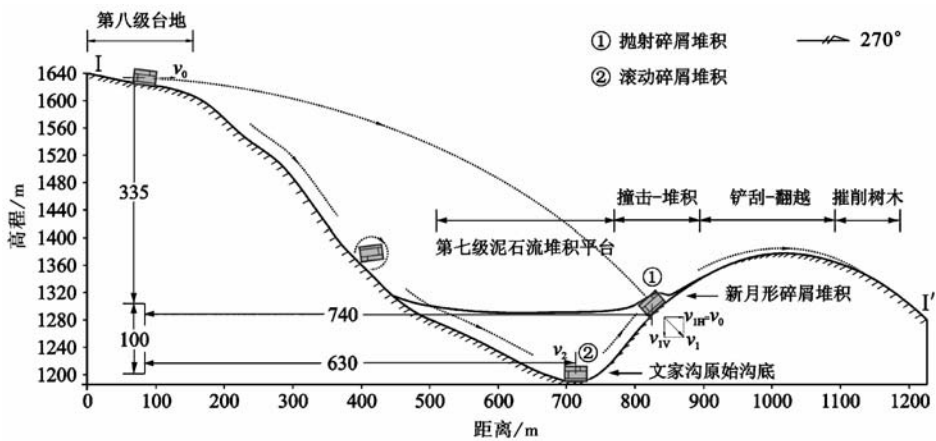


图 12 文家沟上游滑坡-碎屑流 I - I' 运动形式示意图

Fig. 12 Diagram showing the I - I' movement form of debris-avalanche in Wenjiagou upstream

达 1360m; 无论从局部还是整体地形分析, 区内高山峡谷地貌都必然导致滑坡源区山梁处显著的地震力放大效应, 下文将对地震放大效应进行定量分析计算。

目前针对不同形态和岩性边坡的地震动响应研究辅助工程设计的能力尚显不足; 基于宏观震害调查和针对不同形态和岩土构成的地形二维地震响应分析, 《建筑抗震设计规范》(下文简称‘规范’)

中第 4.1.8 条提供了针对局部突出地形的地震动参数放大效应的经验计算公式^[27]:

$$\lambda = 1 + \xi \times \alpha \quad (1)$$

其中: λ 为局部突出地形顶部的地震影响系数的放大系数; α 为局部突出地形地震动参数增大幅度; ξ 为附加调整系数, 与斜坡离突出台地边缘的距离 L_1 与相对高差 H 有关。

2008 年汶川地震之后, 为加强山区建筑的抗震

能力,“规范”对该条款进行了局部修订,将其作为强制性条文,要求必须严格执行;根据(1)式可得滑坡源区地震影响系数的放大系数(表1)。同时,根据中国地震局公布的《汶川8.0级地震烈度分布图》,文家沟地区烈度为X度;基于此,根据“规范”中第5.1~5.3节的相关求解方法,可以保守估算出文家沟地区的水平和竖向地震影响系数,即 α_h 和 α_v (表1)。将上述所得滑坡源区地震影响系数及其放大系数相乘,分别可得到水平和竖向综合地震影响系数 β_h 和 β_v (表1);据此将清平站的地震动峰值加速度监测值与滑坡源区的综合地震影响系数 β 相乘,即可推算出滑坡源区3个方向的地震动加速度峰值,即 a_{EW} 、 a_{NS} 和 a_{UP} (表1);由反应谱时程曲线可知,3个峰值走时差约在2s之内,延时较短,可将3者进行空间合成后,作为文家沟滑坡源区地震动峰值加速度真实响应值的近似值(表1)。

由表1可知,由于文家沟地区突兀山脊与峡谷并存的地形组合对地震力的放大效应,地震动荷载在滑坡源区的水平和竖向峰值分量均超越了岩土体自重 mg ;自坡体表层向下约50m范围内,结构松散的残坡积土层、碎裂-散体化岩体、乃至节理化~新鲜层状岩体的内聚力及内摩擦角相对较低,无法抵抗地震波周期性的拉张与剪切耦合作用,从而形成了大规模初始滑体。

3 文家沟滑坡-碎屑流的形态特征

由于山坡和峡谷地貌形态的限制作用,文家沟滑坡-碎屑平面形态可分为3阶段(图4),即第1段沿NW向山坡(FG段)、第2段沿SW向文家沟上游(GH段)和第3段沿NWW文家沟下游(HI上段);其中滑移路径中G和H两处主要转折对沟谷内的自由气体进行分段圈闭,使滑体和碎屑途经此处时对圈闭气体进行瞬时压缩,产生“气垫效应”以及对转折部位的横挡边坡产生撞击、铲刮及翻越效应。

文家沟滑坡-碎屑流曲线滑移距离总长约4.5km(图4、图5);滑坡运移区宽度由上而下逐渐变窄,由滑坡后壁处1.3km,至堆积区前缘为35m,滑坡-碎屑流平面面积总计约 $361 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。滑移路径在G点和H点处的转折角约为 60° ,平面形态酷似平卧的“S”型;FG段与HI段近似平行,滑移方向为 285° ,GH滑移方向为 225° 。按照运动特征进行阶段划分,依次包括FG上部:滑坡启动源区→FG下部:高位剪出区→文家沟上游GH段:滑体上部为

滑体飞行撞击转折区,中部滑体碎屑沿陡崖以滚动为主运动之文家沟上游,下部为文家沟沟谷泥石流形成区,西侧伴有铲刮翻越和气浪摧削树木区→H转折端以下的文家沟中下游:上部为干碎屑流飞行撞击区,下部为泥石流流通区,两侧伴有坡体侵蚀和气浪摧削树木区→文家沟下游至沟口:剖面底部为干碎屑流坠落区,上覆为泥石流堆积区,南侧气浪刮倒树木区。另外,该滑坡平面内以碎屑流堆积物为主,同时大致沿文家沟的原始水系发育主泥石流沟,其平面流迹在文家沟上游位于堆积物中间部位,在中下游摆动至堆积物北侧(图4、图11)。

文家沟滑坡-碎屑流的纵剖面呈梯级形态发育,共形成8级台地(图11),其中第一级和第七级台地为滑坡发生后降雨诱发泥石流堆淤积而成;其余各级台地尽管被后期泥石流堆积物覆盖,但主体为第一期滑坡-碎屑流发生时堆积而成。值得注意的是,通过分析各级台地的形成机制和物质组成,有助于反演文家沟滑坡-碎屑流自形成至今所经历的多期降雨对碎屑堆积物的改造过程,以及滑坡-碎屑流向泥石流转化的地质灾害链生机理。

文家沟滑坡-碎屑流沿纵剖面的碎屑堆积物厚度不均(图5、图6),堆积物厚度最大的段落分布在文家沟中游H转折处上下约1km范围内,平均厚度达150m左右;其余段落的堆积物厚度相对较小,如在滑坡启动源区的滑床被剥离出来,滑体碎屑物质所剩无几;而自文家沟中游至下游,由于碎屑流和泥石流的动势能都逐渐消耗,对堆积物的搬运能力也随之削弱,直至沟口一级台地的泥石流堆积物仅厚约数米。根据滑坡-碎屑流堆积物厚度的分段性及其平面特征,分段计算然后累计得出文家沟滑坡-碎屑流总体积约为 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

4 文家沟滑坡-碎屑流的运移与演化

文家沟滑坡-碎屑流的形成机制主要包含两部分,即滑坡启程剧动机和高速远程运移机制。滑坡启动机制源于地震波循环荷载作用,由于滑坡源区紧邻汶川地震震中(震源沿映秀—北川断裂呈线状分布),地震纵波与横波传播至此处的时差甚短,因此对坡体的作用力表现为周期性的拉压和剪切耦合惯性力形式^[28],加之滑坡源区突兀的山脊下临文家沟上游峡谷地貌使地震动加速度在山脊上部显著放大,原始斜坡为近顺向坡上部的岩土体发生了拉张剪切破坏。在斜坡岩土体强度由峰值跌落至残余

值的同时,原始坡体积聚的弹性势能也在瞬间释放,转化为滑体的初始动能^[14]。值得注意的是,斜坡表层一定厚度的松散结构岩土体抗拉强度很低,被竖向地震力直接抛掷脱离坡体,以斜抛或平抛形式运动,与平移式的块体滑动方式不同。

由连续平整的后缘滑壁可知,除以抛掷形式运动的表层滑体外,主滑体在启动后经历了块体平移式滑动,直至 1630m 高程处的第八级台地边缘高位剪出(图 4、图 11),并有小部分滑体滞留于此。随后,滑移路径发生第一次转折(图 4 中 G 点),滑体也进入最主要的重力提速阶段;一部分滑体沿 300° 方向运移经过第一转折端处,滞留在文家沟上游东侧深切支沟中,形成楔形堆积体(图 11);另一部分滑体沿 270° 方向由第八级台地崖边约 1635m 处高位剪出。

如图 12 所示,滑体由东侧第八级台地边缘剪出,滑体上部物质速度较高,呈抛射运动方式,撞击文家沟上游西侧山梁并解体成为碎屑物质,部分滞留于山梁东侧,形成新月型碎屑堆积(图 12 中①处),并明确指示出气浪由东向西的方向性(图 11 中七级台地西侧,图 6 中 A-A' 横剖面);而碎屑物前锋裹挟着气体对山梁坡面进行铲刮,导致山梁东坡及坡顶树木被扫荡一空,随后少量残余细粒碎屑物翻越至山梁西侧,并导致山梁西侧树木一定程度的被摧削破坏。由第八级台地边缘剪出滑体的下部及底部碎屑物质,运动速度较低,主要呈滚动~流滑运动方式,于文家沟沟底处堆积(图 12 中②处),碎屑物的高速前锋沿文家沟西侧山梁坡面爬升,最终与上部滑体碎屑汇聚止于新月形堆积处。

由于重力加速作用,文家沟上游西侧的新月形碎屑堆积物(图 12 中①处)经过抛射运动后获得很高的速度 v_1 ; 同时由于山体在地震期间的持续性振动作用,文家沟上游沟底的碎屑物(图 12 中②处)经过沿坡面的滚动加速,也获得较高的速度 v_2 。对 v_1 和 v_2 进行估算和比较,即可获得文家沟滑坡-碎屑流最高运动速度的估算区间。为了便于计算,这里不考虑空气阻力,利用平抛运动的公式即可求得上部滑体运动至①处的相关参数:

滑体自第八级台地剪出至①处的运动时间: $t_1 = (335 \times 2/g)^{0.5} \approx 8.2\text{s}$;

滑体自第八级台地剪出时水平初速度: $v_0 = 740/t_1 \approx 90.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

滑体运移至①处的垂向速度分量: $v_{1V} = gt_1 \approx 82\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

滑体运移至①处的水平速度分量: $v_{1H} = v_0$;

滑体运移至①处的合成速度: $v_1 = (v_{1V}^2 + v_{1H}^2)^{0.5} \approx 122\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

下部滑体物质自第八级台地剪出时的初速度较低,这里取值为 $0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 碎屑物沿坡面以滚动方式运动至文家沟沟底②处时,速度达到峰值 v_2 ; 这里碎屑物与坡面滚动摩擦力忽略不计,根据重力势能转化为动能的能量守恒定律,即可求得滑体运移至②处的速度:

$v_2 = (2gh) = (2 \times 10 \times 435)^{0.5} \approx 93\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;

根据计算过程可知,由于未考虑碎屑平抛运动中的空气阻力,使 v_1 的估算值略高于实际速度; v_2 的估算过程也简化了碎屑剪出时的初速度、沿坡面的滚动摩擦及沿途碰撞运动等因素; 尽管如此,文家沟滑坡-碎屑流的最高运移速度应大致处于 $93 \sim 122\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。

碎屑化滑体沿文家沟上游向 H 转折端处运移,沟谷中圈闭的原始气体既 G 转折端之后再次被压缩,其对碎屑物质施加的膨胀式反推力,导致碎屑颗粒发生向沟谷两侧的散逸式运动,致使沟谷北侧相对较低的山梁被碎屑铲刮翻越,南侧堆积过程也出现明显的爬升效应,堆积物仰坡角约到达 15° (图 6 中 C-C' 剖面)。

通过平面形态分析易知碎屑运动形态具有明显的流动性(图 4),其实质是气体和水作为流体介质,碎屑颗粒在其中作高速运动,颗粒表面的“伯努利效应”是干碎屑流和泥石流高速远程运移机制的主导因素之一。其中,干碎屑流的隙间流体为压缩空气,野外调查发现颗粒在抛掷过程中的飞行形式以“翻滚”为主,类似乒乓球的“上旋球”运动,由于碎屑颗粒主要并非以平移式飞行,因此颗粒几何形状并非决定其顶底面由于“边界层表面效应”而形成压力差的主要原因; 而是由于颗粒在沟谷中向前翻滚飞行时,其顶面和底面除了具备相对于颗粒轴心相同的速率之外,沟谷气体还具有相对颗粒表层反向的流动速度,假设以颗粒重心为原点建立参考系,对颗粒顶底面分别进行速度合成可知,颗粒底面相对空气的合成速度小于顶面,根据伯努利定律可知,碎屑颗粒受到周围气体施加向上的“浮托力”,并随着颗粒运移速率增大而增大,甚至会增至大于颗粒自重,因此延长了颗粒的坠落时间,进而使干碎屑流能够远程运移。与此同时,文家沟流水储量相对滑体碎屑物质体积较小,因此在沟谷中上部飞行的干碎屑流以下,主要形成了黏性泥石流,一方面在不饱

和碎屑物质与沟谷底部饱和的冲积物以冲击方式接触时,易使混杂的泥石流中空隙水和空隙气体压力在瞬间升高,使碎屑颗粒间的有效应力减小,甚至发生“液化”,从而降低了泥石流系统内部及其与基底沟床之间的动摩擦力;另一方面,泥石流在流通过程中,系统内部不同流层及其与基底沟床之间的有效动摩擦系数,还随着剪切速率的增加而减小,从而使泥石流能够进行远程流通^[10]。

碎屑流及泥石流经过上述过程之后,沿文家沟中下游至沟口期间,由于能量衰减,运移形式表现为持速~减速~堆积过程。导致流体动势能衰减的因素主要包括两种,即文家沟下游沟谷展宽和北侧发育支沟导致沟谷圈闭气体散逸,使其蕴蓄的弹性势能迅速降低,碎屑物质也以惯性运动为主,“气垫效应”及“伯努利效应”明显削弱;同时,随着对沟谷两侧岸坡的铲刮和侵蚀作用,碎屑物质的储量不断增多,颗粒间碰撞和摩擦使其自身能量的损耗加剧,而且随着碎屑运移速度的降低,颗粒间有效应力进一步增加,超孔隙水及气体压力相应降低,导致泥石流内部液化作用逐渐削弱直至消失,同时有效动摩擦力不断增大。值得注意的是,沟谷圈闭气体在短时散逸过程中,气场将沟谷两侧的柏树齐刷刷地斩断,而且树木斩断部位自坡脚至坡顶依次沿树干上移,直至树木保存完好区域为止,表明气浪由下而上呈能量衰减的特征(图13)。

文家沟滑坡-碎屑流在汶川地震期间爆发之后,2008年6月~9月及2009年7月期间经历了多次降雨过程,导致碎屑堆积物形成多次泥石流活动,其中2008年9月24日泥石流活动最剧烈,2009年7月中旬泥石流次之;泥石流不仅在文家沟北侧形成深切冲沟,而且将原本堆积于文家沟沟口的碎屑物质搬运至绵远河主流下游数百米,掩埋了部分民房、公路和农田等。无独有偶,调查发现汶川地震诱发的绝大部分崩滑流灾害在震后降雨作用下,都会形成一定规模的新生泥石流,集中体现了地震地质灾害的链生性和长期性。

5 结 论

文家沟滑坡-碎屑流的形态特征和成因机理在汶川地震诱发的众多高速远程滑坡-碎屑流实例中具有典型性,其形成条件与触发机制涉及多种因素;首先,地质构造格架奠定了文家沟地区的基本地表形态特征和岩土体完整性程度,区内断裂和褶皱分布密集较高,地块在NW~SE的强烈挤压应力作用下,变形破碎程度剧烈,映秀—北川断裂等一系列产状相似的逆冲推覆断裂,塑造了区内山梁与沟谷呈NE走向的基本地表形态,文家沟沿途的两处转折为圈闭沟谷气体提供了条件。

其次,文家沟向斜核部的D₂gn观雾山组灰岩



图13 文家沟下游南侧气浪摧削区

Fig. 13 Blast cutting area on Wenjiagou downstream bank

等相对坚硬地层与两侧的 ϵ_{1c} 清平组粉砂质板岩等较软弱地层存在差异风化作用,导致滑坡-碎屑流源区相对文家沟形成了突兀山体下临深切峡谷的高差悬殊地貌,这不仅加剧了地震动荷载的地形放大效应,而且使初始滑体能够具备极高的重力势能向动能转化。

再次,文家沟滑坡源区的原始斜坡由观雾山组灰岩及白云岩组成,为顺向坡,坡体剖面具有3层强度渐进式结构;在特定的地震动荷载作用下,坡体剖面结构决定了地震动荷载的切割深度,调查发现滑体已切入第③层新鲜基岩之中。除滑坡源区之外,沿文家沟两岸分布的清平组砂质板岩表层破碎,补给了主碎屑流体,且为震后降雨诱发泥石流提供了物源。

最后,映秀—北川断裂带和灌县—安县断裂带距离文家沟滑坡源区最近处分别为4km和2km,在汶川地震期间二者均发生强烈活动,并在距离文家沟东西两侧15km区域内发现多处显著地表破裂,文家沟地区处在强烈振动地块之中,地震烈度达X度;加之显著的地形放大效应,滑坡源区的地震动加速度3分量峰值均大于重力加速度 g ,地震纵波及横波在数秒钟之内产生了震荡式拉压和剪切的耦合作用,导致自坡体表层至以下部分新鲜基岩发生张剪性破坏,地震抛掷作用兼之岩土体强度峰残变化导致的势能向动能转换,使初始滑体获得较高的初始速度。

文家沟滑坡-碎屑流的曲线滑移路径长约4.5km,平面形态主要受制于山坡和沟谷地貌,形似平卧的“S”型,滑坡-碎屑流运动阶段划分主要包括滑坡启动源区(FG上部)→高位剪出区(FG下部)→滑体上部为碎屑抛射飞行区,中部为沿陡崖坡面的碎屑滚动区,下部为沟谷泥石流流通区(文家沟上游至中游,)→滑体底部为干碎屑流坠落区,上覆为泥石流堆积区(文家沟下游至沟口)。文家沟滑坡-碎屑流的纵剖面呈梯级发育,共形成八级台地;各级台地碎屑堆积物厚度不均,最厚部分位于文家沟中游H转折处上下约1km范围内,平均厚度达150m左右;其余段落的堆积物厚度相对较小;文家沟滑坡-碎屑流累积体积约 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

文家沟滑坡-碎屑流的初始滑体在启程剧动之后,整体滑移至第八级台地边缘高位剪出,随后在向文家沟上游飞行过程中进入重力提速阶段,滑移速度最高达 $93 \sim 122 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。上部干碎屑物质在G和H两处发生路径转折,并将沟谷气体在瞬间压缩,产生

了明显的“气垫效应”,以及下部泥石流底层液化及颗粒有效动摩擦系数随剪切速度增大而减小的效应都是致使碎屑流体高速远程滑移的主要因素。此外,在滑坡-碎屑流运移过程中,还伴有显著的岸坡“铲刮和翻越效应”,以及对沿沟谷两侧树木的“摧削效应”。震后截至2009年9月,降雨诱发了碎屑堆积物形成多次泥石流,其中2008年9月24日泥石流活动最剧烈,反映了地震地质灾害的链生性和长期性。

6 问题与讨论

本文对文家沟高速远程滑坡-碎屑流形成机理及演化过程的分析阐述以定性为主,定量为辅,后期需要进一步获取原始坡体的岩土动静物理力学参数,以及碎屑堆积物沿滑移路径不同部位的物质组成和颗粒级配分布特征,以便进行滑坡-碎屑流启动和高速远程运移机制的数值反演与模拟研究。此外,滑坡(或崩塌)-碎屑流的启动与运移机制不同,目前只有通过多种力学分析和模型试验手段,以及数值模拟方法将滑移全程化整为零,进行分阶段研究,然后再化零为整,将各阶段整合才能获取更加真实的认识。其中,地震动荷载自震源传播至滑坡(或崩塌)源区的衰减规律,及其与原始斜坡的几何形态和岩土分层结构的作用关系,是研究坡体初始破坏机制的关键。

在空间分布上,沿龙门山主中央断裂带附近区域发育许多滑坡(或崩塌)-碎屑流,文家沟高速远程滑坡-碎屑流作为典型实例之一,其形成及运移机制对于其他具有不同地质背景的危害实例而言,往往不具备普适性,需分别进行研究;在时间分布上,汶川地震的频繁余震活动及震后降雨是诱发新生崩滑流地质灾害的主控因素,对灾后恢复重建工作构成威胁,因此有必要建立地质灾害动态监测的长效机制,以满足地震地质灾害链生机理研究及防灾减灾的实际需求。

致谢 感谢地质力学研究所姚鑫博士在GIS图件编绘中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, (1): 29~38.

- Yin Yueping. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 2009, **17**(1): 29 ~ 38.
- [2] Highland, L. M., P. Bobrowsky, *The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides*. 2008, U. S. Geological Survey Circular 1325: Reston, Virginia. p. 129.
- [3] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. *工程地质学报*, 2008, **16**(6): 730 ~ 741.
Huang Runqiu, Pei Xiangjun, Li Tianbin. The basic characteristics and formation mechanism of Daguangbao large-scale landslide triggered by Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 2008, **16**(6): 730 ~ 741.
- [4] 许强, 黄润秋. 5.12 汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. *工程地质学报*, 2008, **16**(6): 721 ~ 729.
Xu Qiang, Hu Runqiu. Kinetics characteristics of large landslides triggered by May 12th Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 2008, **16**(6): 721 ~ 729.
- [5] Heim, A., *Bergsturz und Menschenleben*. Fretz und Wasmuth, Zurich, 1932, 218.
- [6] Kent, P. E., *The transport mechanism in catastrophic rock falls*. *J. Geol.*, 1966, **74**: 79 ~ 83.
- [7] Shreve, R. L., *The Blackhawk landslide*. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 1968, **108**: 1 ~ 47.
- [8] Shreve, R. L., *Leakage and fluidisation in air-layer lubricated avalanches*. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1968b, **79**: 653 ~ 658.
- [9] Voight, B., J. Sousa, *Lessons from Ontake-san: A comparative analysis of debris avalanche dynamics* *Engineering Geology*, 1994, **38**(3 ~ 4): 261 ~ 297.
- [10] Sassa, K. *Access to the dynamics of landslides during earthquakes by a new cyclic loading high-speed ring shear apparatus*. in 6th Int. Symp. Landslides. 1992. Christchurch: Balkema, Rotterdam.
- [11] Davies, T. R. H., *Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization* *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1982, **15**(1): 9 ~ 24.
- [12] Campbell, C. S., P. W. Cleary, M. Hopkins, *Large-scale landslide simulations: global deformation, velocities and basal friction*. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 8267 ~ 8273.
- [13] 胡广韬. *滑坡动力学*[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
Hu Guangtao. *Landslide Dynamics*. Beijing: Geology Press, 1995.
- [14] 胡厚田, 刘涌江, 邢爱国, 等. 高速远程滑坡流体动力学理论的研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
Hu Houtian, Liu Yongjiang, Xing Aiguo, et al. Study on fluid dynamics theory of high-speed and long-runout landslide. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003.
- [15] 程谦恭, 彭建兵, 胡广韬, 等. 高速岩质滑坡动力学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999.
Cheng Qiangong, Peng Jianbing, Hu Guangtao, et al. High-speed rock landslide dynamics. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999.
- [16] 熊传祥, 龚晓南, 王成华, 高速滑坡临滑变形能突变模型的研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2000, **34**(4): 443 ~ 447.
Xiong Chuanxiang, Gong Xiaonan, Wang Chenghua. A deformation energy catastrophic model of high-speed landslide before sliding. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2000, **34**(4): 443 ~ 447.
- [17] 肖盛燮, 周小平, 杨海清, 等. 二维高速滑坡力学模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(3): 456 ~ 461.
Xiao Shengxie, Zhou Xiaoping, Yang Haiqing, et al. Two-dimensional mechanical model of high-speed landslides. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(3): 456 ~ 461.
- [18] 刘涌江, 胡厚田, 白志勇. 大型高速滑坡体运动的空气动力学研究[J]. *西南交通大学学报*, 2002, **37**(1): 6 ~ 9.
Liu Yongjiang, Hu Houtian, Bai Zhiyong. Aerodynamic Effect of Large-Scale and High-Speed Landslide. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2002, **37**(1): 6 ~ 9.
- [19] 赵晓彦, 胡厚田, 齐明珠. 云南头寨沟大型岩质高速滑坡碰撞模型试验[J]. *自然灾害学报*, 2003, **12**(3): 99 ~ 103.
Zhao Xiaoyan, Hu Houtian, Qi Mingzhu. Model experiment of high-speed collision of landslide rock masses in Touzhai Gully, Yunnan. *Journal of Natural Disasters*, 2003, **12**(3): 99 ~ 103.
- [20] 殷跃平. 西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. *水文地质工程地质*, 2000, (4): 8 ~ 11.
Yin Yueping. Features and hazard mitigation of Yigong rapid huge landslide, Bomi, Tibet. *Hydrogeology and engineering geology*, 2000, (4): 8 ~ 11.
- [21] 黄润秋, 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. *地球科学进展*, 2004, **19**(3): 443 ~ 450.
Huang Runqiu. Mechanism of large scale landslides in western China. *Advance in earth sciences*, 2004, **19**(3): 443 ~ 450.
- [22] 刘忠玉, 马崇武, 苗天德, 等. 高速滑坡远程预测的块体运动模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, **19**(6): 742 ~ 746.
Liu Zhongyu, Ma Chongwu, Miao Tiande, et al. Kinematic block model of long run-out prediction for high-speed landslides. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, **19**(6): 742 ~ 746.
- [23] 黄润秋, 裴向军, 张伟锋, 等. 再论大光包滑坡特征与形成机制[J]. *工程地质学报*, 2009, **17**(6): 725 ~ 736.
Huang Runqiu, Pei Xiangjun, Zhang Weifeng, et al. Further examination on characteristics and formation mechanism of Daguangbao landslide. *Journal of Engineering Geology*, 2009, **17**(6): 725 ~ 736.
- [24] 王涛, 马寅生, 龙长兴, 等. 四川汶川地震断裂活动和次生地质灾害浅析[J]. *地质通报*, 2008, **27**(11): 1913 ~ 1922.
Wang Tao, Ma Yinsheng, Long Changxing, et al. Fault activity of the Wenchuan earthquake in Sichuan, China and seismic secondary geohazards. *Geological Bulletin of China*, 2008, **27**(11): 1913 ~ 1922.
- [25] 张俅元, 王士天, 王兰生. *工程地质分析原理*[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. *Principles of*

engineering geology analysis. Beijing: Geology Press, 1994.

- [26] Li, X., Z. Zhou, H. Yu, et al. Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan Earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008, 7(3): 235 ~ 246.
- [27] 中华人民共和国建设部, 建筑抗震设计规范 (GB 50011 - 2001) [S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2001.
- The People's Republic of China Ministry of Construction. Code for Seismic Design of Buildings (GB 50011 - 2001). Beijing:

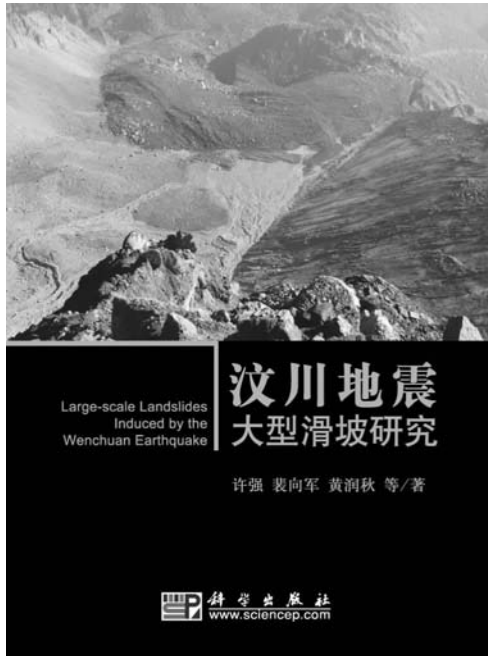
China Academy of Building Research, 2001.

- [28] 崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 地震纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应研究[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(4): 455 ~ 462.
- Cui Fangpeng, Hu Ruilin, Yin Yueping, et al. Numerical simulation of slope collapsing and sliding due to single or combined actions of seismic p- and s-waves with time difference. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(4): 455 ~ 462.

新书介绍

汶川地震大型滑坡研究

作者: 许强、裴向军、黄润秋等, 科学出版社出版, 2009



本书选取汶川地震诱发的 18 个规模相对较大(一般大于 100 万立方米)、具有典型特征和代表性的滑坡作为典型实例(具体包括安县大光包滑坡、罐滩滑坡、老鹰岩滑坡;北川唐家山滑坡、王家岩滑坡、北川中学新区滑坡、陈家坝鼓儿山滑坡;青川东河口滑坡、马公窝前滑坡、石板沟滑坡、大岩壳滑坡、董家滑坡;汶川牛眠沟滑坡、映秀—卧龙公路 K24 滑坡;绵竹文家沟滑坡;彭州谢家店子滑坡;平武平溪村滑坡、郑家山滑坡等),采用现场调查、遥感解译、工程测绘和勘探、以及室内分析等手段,对各滑坡的工程地质特征和成因机理进行了较系统地描述和分析评价,并从统计分析的角度对汶川地震诱发大型滑坡的发育分布规律、动力过程、运动特性及成因模式进行了初步分析研究。

全书共分 19 章,470 余页,70 万字,全彩色、铜版纸、精装订,是第一本详细介绍汶川地震诱发大型滑坡的专著。定价 260 元,邮费 20 元。

订购请与《工程地质学报》编辑部联系,(100029)北京北土城西路十九号,中国科学院地质与地球物理研究所,《工程地质学报》编辑部收

电话:82998121(兼传真),邮箱:gcdz@mail.igcas.ac.cn