

文章编号: 1008-2786-(2014)3-327-09

# 喜德采书组“8·31”滑坡工程地质特征 及运动过程

白永健<sup>1,2</sup>, 倪化勇<sup>1,2</sup>, 王运生<sup>1</sup>, 王德伟<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

**摘 要:** 受青藏高原新生代快速隆升和河流的快速下切影响, 在我国西南山区高山峡谷、高地应力场、频繁的地震活动、暴雨及人类活动等内外动力作用下, 河谷地段常形成暴雨诱发滑坡→堵江→堰塞湖灾害链。2012-08-31, 四川喜德县遭遇200 a一遇的特大暴雨, 日最大降雨量达149.2 mm。热柯依达乡上游1.5 km处发生大型碎屑岩滑坡, 体积为 $520 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 堵河形成堰塞坝。堰塞湖水位上升28.6 m, 库容量达 $120 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 威胁下游9个乡镇与县城约1.29万人的生命财产安全。基于对滑坡及堰塞坝的工程地质测绘, 分析了滑坡的平面、空间形态, 滑坡体、堰塞坝的物质结构、变形破坏特征。研究了滑坡运动过程的地质力学模式, 推导出本构方程。主要认识有: 1. 滑坡体物质主要分为散体、层状碎裂、层状块裂结构。2. 滑坡失稳运动地质模式为: 强降雨诱发滑体产生后退式拉裂蠕滑启动; 在岩体裂隙中静水压力和动水压力作用下, 和前缘良好临空条件结合, 产生高速滑动, 凌空飞行; 受河谷、对岸山体阻挡, 急速停止, 解体、破碎, 堆积于河谷, 堵断河流形成堰塞体。3. 滑坡启动失稳力学模式主要为潜水和承压含水层混合模式。天然工况下稳定性系数为1.18, 处于基本稳定状态; 暴雨工况下为0.92, 失稳破坏。推导出滑坡短程飞行、碎屑流运动本构方程。4. 堰塞坝整体稳定性好, 发生管涌或流土溃决的可能性小, 主要以“漫顶”模式逐级冲刷破坏。

**关键词:** 滑坡; 堰塞坝; 灾害链; 工程地质特征; 运动过程

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

我国西南山区地处青藏高原周边地带, 受青藏高原新生代快速隆升, 和发育于青藏高原的长江(金沙江)及其支流(雅砻江、大渡河、岷江)等河流的快速下切, 形成典型的高山峡谷地貌。在高山峡谷、高地应力场、频繁的地震活动、暴雨及人类活动等内外动力耦合作用下, 河谷地段常形成暴雨诱发滑坡→堵江→堰塞湖灾害链<sup>[1-2]</sup>。如2004-09-05, 四川省宣汉县天台特大滑坡, 体积为 $2.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 滑体冲入前河, 形成宽1500 m、高20 m的堆石坝和库容达 $60 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的堰塞湖。回水淹没上游五宝镇及沿河两岸居民5770户, 紧急转移19360

人, 损失巨大<sup>[3]</sup>。2003-07-13, 三峡库区千将坪滑坡, 失稳滑体堵塞长江, 形成高149~178 m, 体积 $150 \sim 200 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的堰塞坝, 造成14人死亡, 10人失踪, 直接经济损失达5735万元<sup>[4]</sup>。1994-04-30, 四川省武隆县鸡冠岭滑坡, 体积为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 滑体堵断乌江达30 min, 致4人死亡, 12人失踪, 直接经济损失近千万元<sup>[5]</sup>。

2012-08-31, 四川省凉山彝族自治州喜德县遭遇200 a一遇的特大暴雨, 日最大降雨量达149.2 mm。距热柯依达乡1.5 km的采书组发生大型滑坡, 滑体前部堵断依呷洛河, 形成高52 m、宽200~

收稿日期(Received date): 2013-11-05; 改回日期(Accepted): 2013-11-25。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41102226), 科技基础性工作专项(2011FY110100-1)和中国地质调查局雅砻江地质灾害调查与研究(12120113010600)。[Supported by National Science Foundation of China (41102226), the special basic work of science and technology (2011FY110100-1) and Project of Investigation and Research of Geological Hazards along Yalongjiang river (12120113010600).]

作者简介(Biography): 白永健(1982-), 男, 四川巴中人, 博士研究生, 工程师, 主要从事环境地质、灾害地质方面的研究工作。[Bai Yongjian (1982-), male, doctor student, major in environmental and disastrous geology research.] E-mail: byj209@126.com

320 m、长 80 ~ 120 m 的堰塞堆石坝,断流 8 d,回水 2.5 km,水位上涨 10 ~ 32.8 m,库容约  $120 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。通过对采书组滑坡及堰塞体多次工程地质测绘,系统对滑坡发育特征、失稳过程、堰塞坝形成,从暴雨诱发滑坡→堵江→堰塞湖灾害链效应出发,进一步研究滑坡的形成机制及运动过程力学特征<sup>[6-7]</sup>,以期为这类灾害研究及应急处理提供科学依据。

## 1 滑坡堰塞坝工程地质特征

### 1.1 滑坡工程地质特征

#### 1.1.1 滑坡形态

采书组滑坡位于  $102^\circ 24' 25'' \text{E}$ 、 $28^\circ 5' 21'' \text{N}$ ,依呷河流域内的热柯依达乡上游约 1.5 km(图 1),距喜德县城 48 km,为一暴雨诱发顺层碎屑岩滑坡<sup>[8]</sup>。



图 1 滑坡地理位置图

Fig. 1 Geographical location of landslide

滑坡区属横断山脉大凉山山系,地貌为深切中山区,滑坡坡顶高程 2 880 m,坡脚高程 2 495 m,相对高度 385 m,地形沿滑动方向呈三级台阶状,自然平均坡度  $28^\circ$ 。滑坡平面形态呈舌状,边界明显,两侧发育冲沟,延伸 190 ~ 200 m,宽 2 ~ 5 m,纵坡降 320‰ ~ 400‰。降雨时冲沟水流量较大,沟底出露

紫红色泥岩夹砂岩,沟岸边坡向沟内崩滑破坏(图 2)。滑坡体纵向(近南北向)长 800 ~ 1 200 m,横向宽 260 ~ 380 m,主滑方向  $140^\circ$ ,滑动后平均坡度  $22^\circ$ 。滑体平面面积约  $1.28 \text{ km}^2$ ,平均厚度 36 m,体积  $520 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为一大型滑坡。

#### 1.1.2 滑坡物质结构特征

滑坡体物质结构可分为 3 种:

1. 散体结构。可分为第四系松散堆积层( $Q_4$ )和白垩系雷打树组( $K_2l^3$ )钙质泥岩、砂岩强风化岩体两类。主要分布在滑体浅表层,空间分布上具有显著的非均质性、非连续性以及与之密切相关的尺寸效应。厚 1 ~ 18 m,前缘厚,后部薄;中间厚,两侧薄<sup>[9]</sup>。松散堆积层主要由全新统滑坡堆积层( $Q_4^{del}$ )和残坡积层( $Q_4^{el+dl}$ )形成的混杂堆积体,成分主要为粉质粘土和碎块石土。粉质粘土呈灰黄色(图 3),胶结性差。强风化碎块石土呈褐黄色,结构松散~稍密,棱角状,块径 2 ~ 400 mm,最大可达 4 m,且从滑坡后缘往前块石含量逐渐减少,块径由大变小,碎块石含量占 50% ~ 60%。



图 2 采书滑坡堰塞坝遥感影像图(来自 Google earth)

Fig. 2 Remote sensing image of Caishu landslide and barrier dam (from Google earth)

2. 层状碎裂结构。紫红色钙质泥岩、砂岩(图 4),岩层产状  $220^\circ \sim 240^\circ \angle 15^\circ \sim 30^\circ$ 。分布在滑体周边斜坡地带及滑坡下部构成滑床。泥岩为薄层状构造,砂岩呈薄~中层状。砂岩中裂隙发育,表层强风化,厚 2 ~ 5 m,岩体质量较差,架空现象明显,工程性差,易构成滑坡失稳的潜在软弱层带。

3. 层状块裂结构。主要分布在滑面以下和滑坡剖面的中下部,以中厚泥岩夹砂岩为主,岩层产状

208°~230°∠10°~15°。厚度10~40 m,岩体质量为中等偏下。



图3 滑坡体松散堆积物结构特征

Fig.3 Loose structure characteristics of landslide



图4 滑坡体岩体结构特征

Fig.4 Rock mass structure characteristics of landslides

地下水主要为第四系松散孔隙水、基岩裂隙水。孔隙水主要分布于崩坡积、滑坡堆积体中,主要靠大

气降水补给,随季节变化大,向冲沟低洼处排泄或沿基岩裂隙下渗,具有就地补给就近排泄特征。基岩裂隙水主要赋存于泥岩、砂岩地层中。

### 1.1.3 滑坡体变形失稳特征

1. 滑坡壁。平面上似圈椅状,锯齿状展布,延伸20~80 m,高5~40 m,近直立的泥岩夹砂岩陡坡,有清晰的滑动擦痕,滑壁上发育不同方向的卸荷裂隙;滑壁下形成宽3~12 m的凹槽和坡度12°~18°反倾台地。

2. 滑坡体。滑坡体分为多级,由错落陡坎组成,拉张裂缝分隔。中部岩土体受挤压作用,形成鼓丘;中下部坍塌、拉裂、填塞等变形破坏迹象明显;前缘为高70 m的陡坎,为滑坡失稳破坏提供了良好的临空条件(图5)。

3. 滑带。受基岩岩层控制作用明显,滑面后缘陡、中部缓、前缘陡。后缘与前缘为顺层滑动;中部为切层滑动(图6)。顺层滑动滑带厚0.2~0.5 m,泥质含量高;切层滑动处厚度变化大,为0.2~2.0 m,角砾或碎石含量可达40%~70%。滑带土较密实,饱水条件下, $c = 35 \text{ kPa}$ , $\varphi = 24^\circ$ ,渗透系数 $< 0.01 \text{ m/d}$ ,具有隔水或相对隔水性。

4. 滑床。起伏大,内部发育众多规模不一的冲沟。主要发育2组节理:183°∠62°,85°∠87°,节理面平直,闭合,无充填。

### 1.2 堰塞坝工程地质特征

堰塞坝为梯形体,长80~120 m,顺河向宽220~260 m,高42~50 m,总体积约 $52 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡体上还有约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的松散体(图7)。

堰塞坝物质主要由原滑坡上部残坡积的碎石土和泥岩、砂岩经下滑、挤压、破碎形成的碎裂岩组成。其中碎石松散土约占32%,碎裂岩约占68%。碎石



图5 滑坡体结构特征

Fig.5 The structure characteristics of landslide

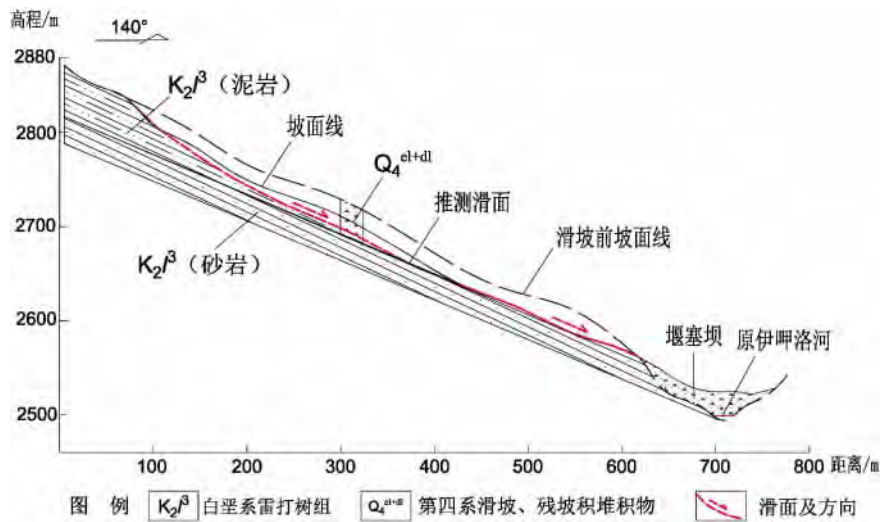


图 6 滑坡工程地质剖面图

Fig. 6 The engineering geological section for landslide



图 7 堰塞坝及坝体物质结构特征

a. 堰塞坝; b. 堰塞湖; c. 坝体物质结构特征; d. 泄流槽物质结构特征

Fig. 7 The structure characteristics of dam and dam body

a. barrier dam; b. barrier lake; c. the material structure characteristics of dam body; d. material structure characteristics of discharge groove

松散土呈土黄色,由粉砂质粘土、碎块石组成,粉砂质粘土占 65% 碎石 25% ~ 30% 块石( 粒径 5 ~ 20 cm) 占 5% ~ 10%。碎裂岩空间分布零乱,由泥岩形成的碎裂岩主要为碎石,粒径多 < 10 cm; 由砂岩形

成的碎裂岩主要为块石,粒径多为 1 ~ 3 m。坝体结构松散,架空现象明显,透水性强,在坝体左侧高程 2 498 m 处发育渗水泉( 流量 0.5 ~ 1 m<sup>3</sup>/s)。

## 2 滑坡失稳运动模式

滑坡变形失稳运动地质模式表现为:1.启动阶段。强降雨诱发滑坡体沿倾坡外的泥岩、砂岩层面产生后退式拉裂蠕滑启动。2.加速运动、近程飞行阶段。在不断强降雨入渗,泥岩、砂岩岩体中静水压力和动水压力作用下,滑坡体势能与动能不断增大,使滑面局部锁固段,产生突然“溃决”式滑动;滑坡前缘为河流侵蚀形成高60~80 m陡坡,临空条件较好,在重力作用下滑坡体产生高速滑动,凌空飞行。3.撞击、解体、堵江阶段。滑体受地形控制,即河谷、对岸山体阻挡,急速停止,产生巨大的冲击力,使得滑体解体、破碎,并堆积于河谷,堵断河流形成堰塞坝<sup>[10-12]</sup>。

### 2.1 滑体启动

强降雨是采书组滑坡的主要诱发因素,启动运动过程模式表现为:强降雨→浅表层松散物饱水→基覆界面泥岩充水饱和→下层砂岩滞水→滑坡滑动。降雨入渗坡体,对滑坡的形成起到顶托、楔裂和促动作用。前期降雨使斜坡体充分饱水,特大暴雨产生的径流使坡面积水下渗,致使坡体风化裂隙发育的泥岩层充水饱和,迅速降低了泥岩层的抗剪强度。滑动的起始阶段比较长,表现在地面的开裂、局部失稳、缓滑等<sup>[13-14]</sup>。

### 2.2 滑体加速滑动、凌空飞行

松散覆盖层饱水后下渗补给下部中风化砂岩,砂岩裂隙含水层不能及时排除使承压水头急剧增高,在斜坡内部形成“承压水盆”,上部厚度不大的隔水盖层(泥岩)被高水头压力“浮托”,产生“水垫效应”;同时下渗到裂隙中水形成高压水流,产生将坡体沿主要的构造裂缝“楔裂”、“撕开”效应。在砂岩裂隙承压水头产生的浮托力和裂隙静水压力(水平推力)共同作用下,滑体产生加速运动,加之前缘临空条件较好,滑坡体获得较大的势能而产生高速滑动。沿滑床高速滑过剪出口后,短程凌空飞行<sup>[15-16]</sup>。

### 2.3 解体、碎屑流堵江形成堰塞体

滑坡高速下滑、短程飞行后与地面发生剧烈碰撞。滑坡体原来的动能最大限度地转化为应变能,致使滑坡体完全破碎、解体成碎屑。碎屑借助颗粒间的碰撞力和流体的粘度进行支撑和悬浮,并继续向前运动。岩体解体破碎后各颗粒在重力、阻力、升

力的作用下向前运动,但它们并不是以同一速度向前运动,而是存在着较大的速度差。一部分获得较大的速度而得以加速向前运动、一部分则以相对较小的速度运动、一部分在碰撞后停止运动,原地堆积,而逐步形成堰塞坝。

## 3 滑坡失稳动力过程

### 3.1 滑坡体启动动力

根据滑坡体地下水补给、运移条件,将力学作用模式分为潜水含水层模式、承压含水层模式、潜水和承压含水层混合模式3种<sup>[17]</sup>。根据地质模型分析,采书组滑坡属于“潜水和承压含水层混合模式”。此模式假定滑面以上的岩土体为半渗透土体(弱透水层),而滑面以下的岩土体为透水性相对较强的透水层(承压含水层)(图8),进行地下水力学作用分析滑坡启动力学机制。潜水含水层引起地下水产生静水压力和渗透压力(动水压力),共同作用下,各滑块体先后启动,开始往下滑动。

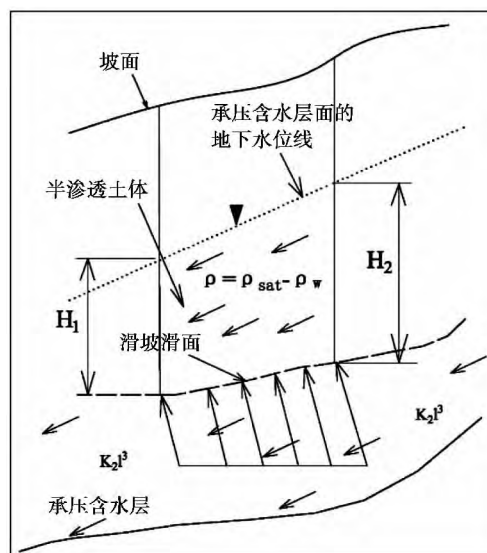


图8 潜水和承压含水层混合模式

Fig.8 The mixed mode of diving and confined aquifer

在图8所示的条块水力学模式中,条块的抗滑力( $F_1$ )和下滑力( $F_2$ )可表示为

$$F_1 = \left[ W \cos \alpha - \frac{1}{2} \rho_w g (H_1 + H_2) \cdot L \right] \cdot \tan \varphi + C \cdot L \quad (1)$$

$$F_2 = W \sin \alpha + \rho_w g V_2 (H_2 - H_1) / L \quad (2)$$

$$W = \rho_{nat} V_1 g + (\rho_{sat} - \rho_w) V_2 g \quad (3)$$

此模式下的稳定性系数  $K$  表达式为

$$K = \frac{F_1}{F_2} \quad (4)$$

将式(1)~(3)代入式(4)中可得滑坡稳定性系数。式中  $W$  为条块的重量;  $\alpha$  为条块滑面倾角;  $\rho_{nat}$ 、 $\rho_{sat}$ 、 $\rho_w$  分别为岩土体的天然密度、饱水密度、地下水密度;  $\varphi$  和  $C$  分别为滑带土的内摩擦角和内聚力;  $L$  为条块的滑面长度;  $V_1$ 、 $V_2$  分别为条块水位面以上和以下岩土体的体积;  $H_1$ 、 $H_2$  分别为条块的条间水头;  $g$  为重力加速度。

根据勘察资料及实验数据,结合现场调查,综合给出了滑坡各岩土体的物理力学参数(表1)。

表1 滑坡岩土体力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock and soil masses

岩土体	天然重度 $\rho_{nat}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	饱水重度 $\rho_{sat}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	粘聚力 $C/(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
坡面残积土	17.6	18.5	11	18
强风化泥岩	18.1	18.7	13	23
强风化砂岩	23.2	23.6	18	26
中风化泥岩	24.3	24.7	400	30
中风化砂岩	26.3	26.5	800	32

计算结果表明:滑坡在天然工况下稳定性系数为 1.18,处于基本稳定状态;在暴雨工况下为 0.92,产生失稳破坏。

### 3.2 滑体飞行运动

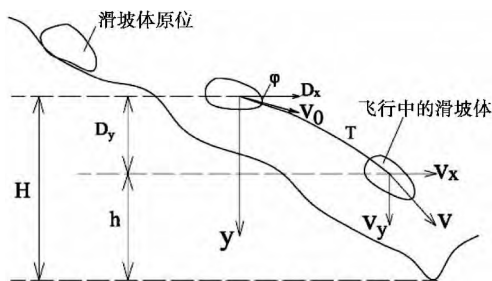


图9 仅在重力作用下的空中飞行示意图

Fig. 9 Sketch map of landslide flies under the gravity

滑坡在凌空飞行后进行短程飞行,但滑坡所处地貌为凸岸斜坡,空气动力圈闭条件差,滑坡体规模大,空气动力作用与重力作用相比较,空气动力在垂直方向上的作用显得非常微小。对滑坡的短程飞行仅考虑重力作用下对其进行运动过程分析<sup>[18-19]</sup>。

滑坡体质心的运动轨迹为一条抛物线(图9)。在空中飞行过程中其质心的运动轨迹为

$$V_x = V_{0x} = V_0 \times \cos\varphi \quad (5)$$

$$V_y = V_{0y} + g \times t = V_0 \times \sin\varphi + g \times t \quad (6)$$

$$D_x = V_0 \times \cos\varphi \times t \quad (7)$$

$$D_y = V_0 \times \sin\varphi \times t + g \times \frac{t^2}{2} \quad (8)$$

式中  $V_0$  为滑离剪出口时其质心速度;  $\varphi$  为  $V_0$  与水平面夹角;  $t$  飞行时间;  $g$  为重力加速度  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $D_x$ 、 $D_y$  为滑坡体水平与垂直方向距离。

已知条件:  $D_x = 765.62 \text{ m}$ ,  $D_y = 280 \text{ m}$ ,  $V_{0y} = 0 \text{ m/s}$

由式(5)~(8)可以解得:  $V_{0x} \approx 102.08 \text{ m/s}$ ,  $t \approx 7.5 \text{ s}$ 。

计算结果得出滑坡体飞行时的运动方程

$$V_{x0} = 102.08 \text{ m/s}$$

$$V_{yt} = 9.8 t$$

$$D_{xt} = 102.08 t$$

$$D_{yt} = 4.9 t^2$$

### 3.3 滑坡体撞击、碎屑流运动

滑坡体碰撞解体后各颗粒在升力、阻力、重力、颗粒间的相互作用力以及空气动力学效应的作用下向前运动,各颗粒运动状态各不相同,而且流体对固体颗粒的作用及固体颗粒之间的相互作用极其复杂。为了简化计算,取平均运动距离为碎屑流的运动距离  $D_t$ ,并将碎屑流理想化为一内部颗粒流向一致、物质均匀的质点,且质点在运动过程中受到重力及摩擦阻力的作用<sup>[20-21]</sup>。碎屑颗粒在流动过程的运动方程为

$$D_t = V_1 \times t + \alpha \times t^2 / 2 \quad (9)$$

$$V_1 = \alpha \times t \quad (10)$$

$$E_{\text{损失}} = (m \times V_t^2 - m \times V_1^2) / 2 \quad (11)$$

式中  $V_1$  为滑体碰撞解体后颗粒流动的初速度,  $V_t$  为滑坡体飞行至依呷洛河岸边与地面发生碰撞前的速度,  $\alpha$  为颗粒在流动过程中所受到的摩擦阻力引起的加速度,  $E_{\text{损失}}$  损失为滑坡体在碰撞前后损失的能量大小。

通过工程地质测绘,求得颗粒运动的平均位移  $D_t = 467.54 \text{ m}$ ,其中  $\alpha$  设为  $-4.8 \text{ m/s}^2$ ,从滑坡体飞行阶段计算分析中可以知道滑坡体在与地面发生碰撞前一刻的速度  $V$  大约为  $125.72 \text{ m/s}$ 。根据(9)~(10)可以计算出  $t \approx 8 \text{ s}$ ,  $V_1 = 38.4 \text{ m/s}$ ,  $E_{\text{损失}} = 1.32 \times 10^{10} \times (125.72^2 - 38.4^2) / 2 \approx 1.8 \times 10^{14} \text{ J}$ 。通

过本文的计算可知,滑坡体飞行至河岸边后,与地面发生剧烈碰撞,在碰撞过程中大约  $1.8 \times 10^{14}$  J 的动能被转化为应变能用于滑坡体破碎、解体。滑坡体完全破碎、解体成碎屑后,以平均初速度 38.4 m/s、加速度  $-5 \text{ m/s}^2$  向前运动。碎屑颗粒的平均运动方程为

$$D_t = 38.4 \times t - 4.8 \times t^2 / 2$$

$$V_t = 38.4 - 4.8 \times t$$

#### 4 堰塞坝稳定性及防治对策

滑坡失稳堵江后形成堰塞湖,水位上升 28.6 m,上游来水  $3 \sim 4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,库容量达  $120 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。坝体的稳定性,直接威胁着下游 9 个乡镇与县城约 1.29 万人的生命财产安全。

2012-09-07 在堰塞坝左侧人工开挖泄流槽,形成宽 1~2 m,深 0.6~1.0 m,长 100 m 的泄流槽。泄流槽两岸边坡由碎石土、块石土组成,抗冲刷能力弱,冲刷、侵蚀作用强烈,不断发生小规模坍塌,使泄流槽横断面不断扩大。9月8日,下泄流量约  $3 \sim 4 \text{ m}^3/\text{s}$  与来水持平;9月9日,对泄流槽内较大块石进行爆破,使泄流槽扩大,1 h 后库水位下降近 1 m;9日12时,堰前水深下降至 24 m,10日中午,库容水量下降至  $70 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,堰塞湖泄洪排险成功(图10)。

2013-07-25 对坝体进行工程地质调查测绘,坝体左侧高程 2498 m 处有水流渗出,水流清澈,坝体发生管涌或流土溃决的可能性小。泄流槽两侧边坡物质结构松散,在水流冲刷侵蚀作用使坝体逐渐溃决破坏,即不进行人工干预的条件下坝体以“漫顶”模式逐级冲刷破坏。

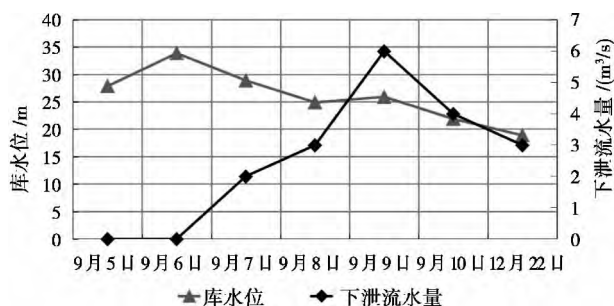


图10 泄流渠泄水过程水位流量变化曲线

Fig. 10 Change curve of water flow in process of discharge

#### 5 结论

1. 2012-08-31,四川省喜德县遭遇 200 a 一遇的特大暴雨,日最大降雨量达 149.2 mm,热柯依达乡上游 1.5 km 处发生大型碎屑岩顺层滑坡。滑坡平面形态呈舌状,前后缘高差 340 m,宽 260~380 m,平均厚 36 m,面积  $1.28 \text{ km}^2$ ,体积  $520 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡体空间形态,滑坡壁呈似圈椅、锯齿状展布,有清晰的滑动擦痕。滑体由错落陡坎组成,拉张裂缝分隔。中部岩土体受挤压作用,形成鼓丘;中下部坍塌、拉裂、填塞等变形破坏迹象明显。滑面受基岩控制作用明显,后缘陡、中部缓、前缘陡。

2. 滑坡体物质结构:1) 散体结构,滑坡堆积 ( $Q_4^{del}$ )、残坡积 ( $Q_4^{el+dl}$ ) 形成的混杂堆积体,和泥岩、砂岩强风化岩体;空间分布上具有显著的非均质性、非连续性以及与之密切相关的尺寸效应。2) 层状碎裂结构,薄~中厚层状泥岩、砂岩,工程性状差,易构成滑坡失稳的软弱夹层。3) 层状块裂结构,以中厚泥岩夹砂岩为主,岩体质量为中等偏下。

3. 滑坡失稳运动地质模式为:1) 强降雨诱发滑体沿倾坡外的泥岩、砂岩层面产生后退式拉裂蠕滑启动;2) 在泥岩、砂岩岩体中静水压力和动水压力作用下,滑坡体势能与动能不断增大,使滑面局部锁固段,产生突然“溃决”式滑动,以及滑坡前缘临空条件较好,在重力作用下滑坡体产生高速滑动,凌空飞行;3) 撞击、解体、堵江阶段,滑体受河谷、对岸山体阻挡,急速停止,使滑体解体、破碎,并堆积于河谷,堵断河流形成堰塞坝。

4. 滑坡启动失稳力学模式主要为潜水和承压含水层混合模式,泥岩、砂岩裂隙水产生静水和动水压力共同作用下,各滑块体先后启动,开始往下滑动。计算结果滑坡在天然工况下稳定性系数为 1.18,处于基本稳定状态;在暴雨工况下为 0.92,失稳破坏。滑坡快速滑动,短程飞行时,仅考虑重力作用下其力学模式分析。计算得出滑坡体飞行时的运动方程

$$V_{x0} = 149.67 \text{ m/s}$$

$$V_{yt} = 9.8 \text{ t}$$

$$D_{xt} = 149.67 \text{ t}$$

$$D_{yt} = 5 \text{ t}^2$$

滑坡体碰撞解体后各颗粒运动状态各不相同,而且流体对固体颗粒的作用及固体颗粒之间的相互

作用极其复杂。将碎屑流理想化为一内部颗粒流向一致、物质均匀的质点,且质点在运动过程中受到重力及摩擦阻力的作用。碎屑颗粒的平均运动方程为

$$D_t = 75 \times t - 5 \times t^2 / 2;$$

$$V_t = 75 - 5 \times t$$

5. 堰塞坝为梯形体,长 80 ~ 120 m,宽 220 ~ 260 m,高 42 ~ 50 m,总体积约  $52 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堰塞湖形成后,水位上升 28.6 m,库容量达  $120 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。一度威胁下游 9 个乡镇与县城约 1.29 万人的生命财产安全。2012-09-07 人工开挖形成泄流槽,9 月 10 日,堰前水深降至 24 m,库容水量降至  $70 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,泄洪排险成功。2013-07-25 对坝体进行工程地质调查测绘分析,坝体发生管涌或流土溃决的可能性小。坝体物质结构松散,在水流冲刷侵蚀作用,以“漫顶”模式逐级冲刷破坏。

## 参考文献(References)

- [1] Peng Jiangbing, Ma Runyong, Lu Quanzhong, et al. Geological hazards effects of uplift of Qinghai Tibet Plateau [J]. *Advance in Earth Science* 2004, 19(3): 459-466 [彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(3): 459-466]
- [2] Xu Wenjie, Chen Zuyun, He Bingshun, et al. Research on river blocking mechanism of xiaojiaqiao landslides and disasters of chain effects [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2010 29(5): 933-942 [徐文杰, 陈祖煜, 何秉顺, 等. 肖家桥滑坡堵江机制及灾害链效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010 29(5): 933-942]
- [3] Fan Xuanmei, Xu Qiang, Hhang Runqiu, et al. The formation mechanism of the Tiantai landslide induced by precipitation in Xuanhan, Sichuan and the design of drainage [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition* 2006 33(5): 448-454 [范宣梅, 许强, 黄润秋, 等. 四川宣汉天台大滑坡的成因机理及排水工程措施研究[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版* 2006 33(5): 448-454]
- [4] Yin Yueping, Peng Xuanmin. Failure mechanism on Qianjiangping landslide in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 11(3): 51-55 [殷跃平, 彭轩明. 三峡库区干将坪滑坡失稳探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2007, 11(3): 51-55]
- [5] Chen Zisheng, Zhang Xiaogang. A hazard chain of landslides→collapse→debris flow→river stoppage in Wulong County, Sichuan province on April 30, 1994 [J]. *Mountain Research*, 1994, 4(4): 225-229 [陈自生, 张晓刚. 1994-04-30 四川省武隆县鸡冠岭滑坡→崩塌→碎屑流→堵江灾害链[J]. *山地研究(现山地学报)*, 1994, 4(4): 225-229]
- [6] Korup O. Recent research on landslide dams—a literature view with special attention to New Zealand [J]. *Progress in Physical Geography* 2002 26(2): 206-235
- [7] Costa J, Schuster R L. The formation and failure of natural dams [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1998, 100(7): 1054-1068
- [8] Sichuan Coalfield Geology 137 General Corporation. Emergency troubleshooting report of Xide country geological disaster in 2012 [R]. 2012: 12-20 [四川煤田地质一三七总公司. 喜德县 2012 年地质灾害应急排查报告[R]. 2012: 12-20]
- [9] Liu Hengqiu, Hu Ruilin, Zeng Ruyi. Analysis of the basic features and the formation mechanism of Liangjiaren loose deposits in Tiger leaping Gorge Yunnan [J]. *Quaternary Science* 2005 25(1): 100-106 [刘衡秋, 胡瑞林, 曾如意. 云南虎跳峡两家人松散堆积体的基本特征及成因探讨[J]. *第四纪研究* 2005 25(1): 100-106]
- [10] J Bell. Fluid dynamics of porous media [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1983: 1-80 [J. 贝尔. 多孔介质流体动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983: 1-80]
- [11] Pan Yue, Li Aiwu. Analysis of relationship between deformation energy release of slope while locked slope bringing up rear shearing and starting velocity of landslide body [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2011 30(8): 1522-1530 [潘岳, 李爱武. 锁固边坡体剪断边坡变形能释放与滑体起动速度关系分析[J]. *岩石力学与工程学报* 2011 30(8): 1522-1530]
- [12] Wang Yunsheng, Xu Hongbiao, Luo Yonghong. Study of formation conditions and toss motion program of high landslides induced by earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2011 30(8): 1522-1530 [王运生, 徐鸿彪, 罗永红. 地震高位滑坡形成条件及抛射运动程式研究[J]. *岩石力学与工程学报* 2009 29(11): 2360-2369]
- [13] Zhang Yu, Xu Weiya, Zou Lifang, et al. Analysis of seepage stability of large-scale landslide under rainfall condition [J]. *Journal of Mountain Science* 2013 34(3): 833-842 [张玉, 徐卫亚, 邹丽芳, 等. 降雨条件下大型滑坡体渗流稳定性分析[J]. *岩土力学* 2013 34(3): 833-842]
- [14] Cai F, Ugai K. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability [J]. *International Journal of Geomechanics* 2004 4(2): 69-78
- [15] Fan Xiaoyi, Qiao Jianping, Han Meng, et al. Volumes and movement distances of earthquake and rainfall-induced catastrophic landslides [J]. *Journal of Mountain Science* 2012 33(10): 3051-3059 [樊晓一, 乔建平, 韩萌, 等. 灾难性地震和降雨滑坡的体积与运动距离研究[J]. *岩土力学* 2012 33(10): 3051-3059]
- [16] Chen Yupu. Fluid dynamics [M]. Nanjing: Hehai University Press, 1990: 18-120 [陈玉璞. 流体力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990: 18-120]
- [17] Huang Runqiu, Xu Qiang, Tao Lianjing, et al. Process simulation and process control research of geological hazards [M]. Beijing: Science Press, 2002: 56-140 [黄润秋, 许强, 陶连金, 等. 地质灾害过程模拟和过程控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 56-140]
- [18] Liu Yongjiang, Hu Houtian, Bai Zhiyong. Aerodynamic effect of large-scale and high-speed landslide [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University* 2002 37(1): 6-10 [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): 6-10]

- [19] Chen Qiangong, Hu Houtian. Discrete element simulation of full course kinematics of rocky high-speed landslide [J]. Journal of Southwest Jiaotong University 2000, 35(1): 18–23 [程谦恭, 胡厚田. 剧冲式高速岩质滑坡全程运动学数值模拟 [J]. 西南交通大学学报 2000, 35(1): 18–23]
- [20] Zhu Pingyi, Wang Chenghua, Tang Bangxing. The deposition characteristic of supper debris flow in Tibet [J]. Mountain Research, 2000, 18(5): 453–456 [朱平一, 王成华, 唐邦兴, 等. 西藏特大规模碎屑流堆积特征 [J]. 山地学报 2000, 18(5): 453–456]
- [21] Xing Aiguo, Hu Houtian, Yao Ling kai. Pore liquid pressure of large high-speed rockslide in initial Stage [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2001, 21(3): 17–20 [邢爱国, 胡厚田, 姚令侃. 大型高速岩质滑坡启程活动阶段孔隙流体压力效应 [J]. 水土保持通报 2001, 21(3): 17–20]

## Engineering Geological Characteristics and Motor Process of Caishu Landslide in Xide of Sichuan, China

BAI Yongjian<sup>1,2</sup>, NI Huayong<sup>1,2</sup>, WANG Yusheng<sup>1</sup>, WANG Dewei<sup>2</sup>

(1. Station Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu 610059, China;

2. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** Affected by Qinghai–Tibet Plateau rapid uplifted and the river fast incised since Cenozoic, in southwestern mountainous area of China, where are valley and mountain high stress field frequent seismic activity. Disaster chain that heavy rains induced landslides→blocking the river→dammed lake are distributed in river valley. Once-in-two-century heavy rainfall hit Xide county, Sichuan, rainfall 149.2 mm, on August 31, 2012. Large-scale clastic rock landslide was developed in 1.5 km upstream of Rekeyida town, volume  $520 \times 10^4 \text{ m}^3$ , blocking the river, forming dammed lake. The lake water level rise 28.6 m, the capacity of reservoir is  $120 \times 10^4 \text{ m}^3$ , threatening downstream 9 township, county and 12 900 people's life and property safety. Base on mapping and investigating of landslide and damming body, this paper analyzes plane and space shape, material structure, deformation and failure characteristics of landslide and damming body, studies geological mechanics model during movement process of landslide, deduces constitutive equation. The mainly consequences of this study are: 1. Landslide material structure mainly divided into loose fracture layer and crack layer block structure. 2. The geological model of landslide movement is that heavy rainfall induced that sliding bodies produce back type of cracking creep start; hydrostatic pressure and dynamic water pressure in rock fracture good front opening conditions result in high-speed sliding and flying; landslides body was stopped, collapsed, crushed by river valley and the other side of the mountain, accumulated in the valley, blocked river, formed dam. 3. The mechanics mod of landslide is diving and confined aquifer mixed mode. Stability coefficient is 1.18 under the natural condition, which is stable; Stability coefficient is 0.92 under heavy rain conditions, landslides failures, then concluded constitutive equation during landslide short-haul flights and debris flow movement. 4. Dam body is stability, the possibility of piping or earth dam flow is small, failure mode is step and step overtopping.

**Key words:** landslide; dam; disaster chain; engineering geological characteristics; motor process