

甘建军, 樊俊辉, 唐春, 等. 浙江遂昌苏村滑坡基本特征与成因机理分析[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 73-78. [GAN Jianjun, FAN Junhui, Tang Chun, et al. Characteristics and Failure Mechanism of Suciang Landslide in Suichang County of Zhejiang Province: Characteristics and Failure Mechanism[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 73-78. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.012.]

## 浙江遂昌苏村滑坡基本特征与成因机理分析\*

甘建军<sup>1</sup>, 樊俊辉<sup>2</sup>, 唐春<sup>1</sup>, 万程辉<sup>1</sup>, 刘至伟<sup>1</sup>, 李健<sup>1</sup>

(1. 南昌工程学院 鄱阳湖流域水工程安全与资源高效利用国家地方联合工程实验室, 江西 南昌 330099;  
2. 江西省勘察设计研究院, 江西 南昌 330000)

**摘要:** 2016年9月28日17:28, 浙江省遂昌县苏村发生一处中型岩质滑坡, 约40万m<sup>3</sup>的岩土体从华上尖冲向桃源溪沟谷, 摧毁了苏村部分居民住宅并形成长约523 m, 宽约536 m的堰塞体, 最大堆积厚度达到20 m, 造成重大损失。该文以工程地质分析为基础, 结合详细地质调查、三维扫描、遥感解译、室内试验等手段, 分析了苏村滑坡的基本特征, 并提出滑坡发生成因及机理的初步认识。结果表明: 强降雨在I区促发碎裂基岩崩塌, 在后缘形成长426 m、宽190 m的崩滑堆积体, 滑动距离48 m, 在锁固段两侧挤出第一次加速; 中部坡度大于60°的顺层基岩在I区滑体冲击下, 沿153 m的滑道加速推进, 形成滑坡的第2次加速; 滑坡中前缘平缓地带古滑体在上部滑体的冲击下, 复活面积达3 553 m<sup>2</sup>, 滑距超过800 m, 破坏性强; 苏村滑坡发生大规模挤出楔裂型岩质滑坡, 促发古滑坡复活形成堰塞湖, 这对类似地质条件区域滑坡的判定及防治具有重要意义。

**关键词:** 顺层岩质滑坡; 挤出楔裂效应; 地质分析; 形成机理; 苏村滑坡; 浙江遂昌

**中图分类号:** X43; P642.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)04-0073-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.012

2016年9月28日17:28, 浙江省丽水市遂昌县苏村发生大型滑坡, 摧毁屋舍20余幢, 死亡27人, 公路交通中断, 水管及通信线路受损。滑坡体前部高速滑入苏村上村河流, 形成高约20 m的堆积坝, 堵塞河道约800 m, 导致村中河流断流24 h, 河流形成的堰塞湖汇水3 km, 水位上涨15~20 m, 库容约1 000万m<sup>3</sup>。

据遂昌县气象台数据, 2016年9月14-16日, 遂昌县累计降雨量118.1 mm, 受台风“鲇鱼”影响, 9月27日10-29日10时, 降雨达到157 mm, 其中9月28日9时至12时出现强降雨, 3 h降雨量就达57 mm。苏村上村破崩石处后缘从2010年3月就开始崩滑, 28日8-15时后缘加速蠕滑并向两侧扩展不断有岩石滚落, 下午17:35滑坡突然加速下滑, 后缘滑体高速起滑, 推动中部老滑坡体复活, 汇入主滑带加速冲入村前河流, 并冲到河流对岸形成堰塞体。

### 1 滑坡区地质条件

苏村滑坡区位于浙江省丽水市遂昌县北界镇苏村北东处, 属于钱塘江上游的衢水流域。滑坡区从地貌分区上属于浙江南构造侵蚀中低山区的仙霞岭-洞宫山中山亚区, 山顶绝对高程871 m, 地形相对高差513 m。苏村上村(325 m)位于桃源溪两侧沟谷上, 北东向以上斜坡以陡坡地貌为主, 一般坡度45°~70°, 岸坡植被一般发育。山体以白垩系熔结凝灰岩夹中酸性熔岩、火山碎屑岩夹熔岩、流纹岩、正长斑岩、砂岩和第四纪碎块石堆积物为主, 熔结凝灰岩及火山碎屑岩为滑面的底面, 砂岩、第四纪碎块堆积物为老滑坡体和新滑体主要组成物质。滑坡体后缘70°~85°, 滑体中部斜坡度为40°~60°, 滑体前缘近河处较平缓, 为12°~30°(图1)<sup>[1]</sup>。

\* 收稿日期: 2017-02-28 修回日期: 2017-05-31

基金项目: 国家自然科学基金应急管理项目(41641023); 江西省自然科学基金(20161BBG70051); 江西省教育厅科技项目(GJJ151124); 江西省科技厅科技项目(2016H0022); 江西省水工程安全与资源高效利用工程研究中心开放基金重点项目(OF201603)

第一作者简介: 甘建军(1975-), 男, 江西永新人, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害和边坡稳定性的研究和实践工作。

E-mail: sedkj2006@126.com



滑坡后缘属于危岩滑移崩塌区(I区), 该滑坡在元朝时发生过一次滑坡灾害, 伤亡 300 多人; 在 2010 年初又开始出现滑动, 至 2016 年 9 月灾前已经形成面积约 2 万  $m^2$ , 体积约 5 万  $m^3$  的崩滑堆积体。灾后崩滑堆积体垂直下座 8~50 m, 水平前移约 40~50 m, 在 600~720 m 处形成体积 3 万  $m^3$  滑坡堆积平台, 滑面为圆弧形, 后缘陡壁高 8~35 m, 呈陡立状。

滑坡中部为冲击滑坡区(II区), 平面上近似喇叭形, 上窄下宽, 后缘顶端宽 129~180 m, 至前缘堆积体处宽为 123~220 m, 坡度约 10~65°, 纵向长约 984.9 m, 并在高程 425 m 处锁固段遇阻滑向由 225° 转为 210°, 滑坡左右两侧均见有 2~5 m 的深切割擦痕。

滑坡前缘为堆积区(III区), 平面上为扇形, 堆积体长(南北向)220~650 m, 宽(东西向)180~450 m, 坡度 10°~30°, 厚度 3~25 m, 体积约 30 万  $m^3$ 。

滑坡左侧为不稳定斜坡区(IV区), 位于破崩石平面上呈心形, 植被覆盖较好, 但崩滑体已经延伸到该区域, 由该区域后缘毗邻主滑体后缘, 并有横向滑坡裂缝, 裂缝深度 0.3~2 m, 目前仍处于变形状态(见图 1、图 2)。

## 2.2 滑坡的结构组成特征

滑坡区由华上尖至破崩石, 岩性主要由第四系全新统滑坡残坡积层( $Q_4^{de+el}$ )、早白垩建德群黄尖组熔结凝灰岩夹酸性熔岩( $K_1h$ )、西头山组酸性火山碎屑岩夹熔岩( $K_1x$ )及侵入花岗岩( $\eta\gamma k_1$ )组成。根据岩性结构及物质组成特点, 从剖面上可将滑体分为三类: ( $Q_4^{de+el}$ )<sup>(1)</sup> 主要为碎块石、粘性土, 碎块石母岩成分为砂岩, 块径 3~50 mm, 棱角状, 土石比约 4:6, 结构松散, 厚度 2~20 m, 广泛分布于滑坡后缘 614 m 平台以上的 I 区; 熔结凝灰岩夹中酸性熔岩( $K_1h$ )<sup>(2)</sup> 以碎块石、漂石、砾石为主, 碎块成分主要为凝灰岩、熔岩、正长斑岩和流纹岩, 主要分布了滑体中部(高程 425~614 m), 漂石、块石粒径 30~350 cm, 碎裂结构, 土石比约 1:9; 酸性火山碎屑岩夹熔岩( $K_1x$ )<sup>(3)</sup> 以碎块石、粉质粘土为主, 块径 5~300 cm, 棱角状, 土石比约 3:7; 近桃源溪坡角下覆粉细砂, 埋深; 结构松散, 厚度最大达 28 m。

滑床面后缘呈圆弧滑动, 中部平面滑动, 前缘深埋堆积的特点。其中后部为土质圆弧滑坡, 滑床面平均埋深约 15 m, 后缘陡壁擦痕明显; 中部为岩质平面滑坡, 滑面埋深约 3~7 m, 优势结构面产状 210° $\angle$ 30°; 前缘堆积体反翘, 最大埋深 26 m, 堆积长度 246 m。

总体来讲, 苏村滑坡属综合性顺层岩质滑坡(图 3), 主要表现有: 后缘为圆弧型蠕滑老滑坡,

受台风和强降雨影响, 老滑坡积水起滑, 在其剪出口高速冲出; 后缘滑体起滑后, 冲刷中部高陡边坡岩土体, 滑坡中部断层发育, 岩石受层理及节理控制, 结构松散, 滑体在平滑层面上加速掀盖下滑, 滑距约 640 m, 费时约 80 s, 滑速高达 8 m/s, 属于高速滑坡; 滑体的古滑坡体规模大, 岩石碎块堆积于坡体前缘, 极不稳定; 滑体冲击力大, 以碎块石为主, 含粘性土、腐殖土被逆冲掩于对岸<sup>[3]</sup>。

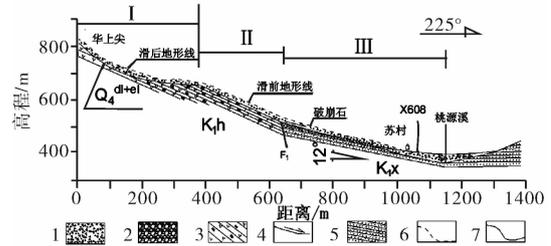


图 3 苏村滑坡工程地质剖面图

## 3 苏村滑坡的成因分析

现场调查分析表明, 苏村滑坡高差超过 500 m, 受降雨、地形地貌与地质条件的综合影响, 启滑初速度大, 势能足, 成因机制复杂, 具有独特的变形破坏特征和动力特征, 并且仍有超过 8 万  $m^3$  的不稳定结构体(见图 1)。

### 3.1 后缘碎石土滑坡体(I区)的水垫与挤出效应

后缘古滑坡区域(II区)为构造侵蚀中山地貌, 受新构造运动影响, 断裂构造发育, “圈椅状”凹槽堆积了规模超过 5 万  $m^3$  的碎石土, 基底为透水性很差的熔结凝灰岩, 极有利于汇水, 形成了类似于“浴缸”原理的“顶托”作用和“水垫效应”(黄润秋, 2005); 据遂昌资料分析, 研究区 2016 年 9 月份有 13 d 都在降雨, 全月只有 2 d 晴天, 滑坡成灾时间与降雨累积效应具有一定的相关性<sup>[4]</sup>(图 4)。

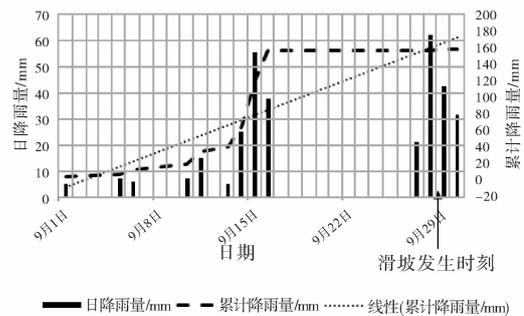


图 4 滑坡区 9 月份降雨量统计分析图

当滑坡在降雨累进性破坏作下, 大量的碎石土在 641 m 平台的较窄出口(宽约 150 m)挤出, 形成“束口”效应, 而且 641 m 平台出口中间出露宽约 60~70 m 的侵入岩, 这些岩石密度大, 硬度大, 起到阻流

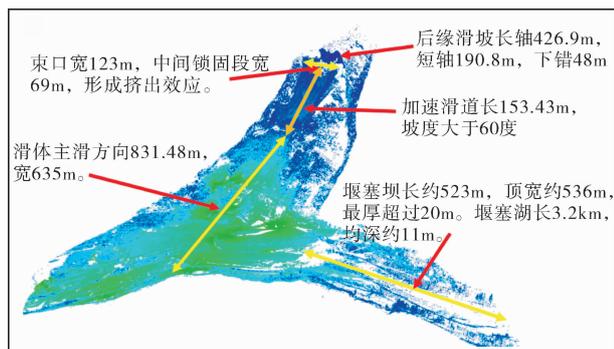


图5 苏村滑坡三维扫描分析图

和分流作用,使滑体分别左右两侧深V型切割峡谷“挤出”,增大了滑体的流速和冲刷力,在南南向形成了一个长3.2m,平均深度约11m堰塞湖(图5)。

### 3.2 滑坡中上部(Ⅱ区)的楔裂与切割冲刷效应

Ⅱ区位于高程380~641m之间的区域,以薄-中厚层状熔结凝灰岩夹酸性熔岩为岩体深大节理裂隙发育,岩体为顺层层状块裂结构,区内岩体主要发育有两组陡倾角构造裂隙:L1产状为 $230^{\circ}\angle 25^{\circ}$ ,3~5条/m,裂面较平直,张开度0.6~3.5cm,局部泥质充填,延伸长度1.5m以上;L2产状为 $260^{\circ}\angle 75^{\circ}$ ,2~5条/m,裂面略弯曲,张开度0.4~2.8cm,无充填,延伸长度1.8~16m。L1结构与坡向基本一致,是控制斜坡稳定性优势结构面,加之坡陡岩脆,易发生压弯及隆起现象;而L2产状与F1断层产状相同,在完全切割了斜坡坡趾处的岩层,有利于岩体的碎裂化,有助于该区岩体的变形破坏。该顺层结构还有利于Ⅰ区汇水及细粒土沿着顺层裂隙渗入,在高压水石混合体的楔入作用下,具有楔裂效应,层状碎块岩体被剥离,掀盖及滚落下滑,形成了大量碎块石堆积体,在坡度大于 $50^{\circ}$ 岩体冲刷切割沟谷两侧岩体,切割深度最高达 $35\text{m}^{[5]}$ (图5)。

### 3.3 滑坡中下部(Ⅲ区)古滑体的复活与软弱基底前

Ⅲ区滑体位于高程380m地段至苏村上村,据现场调查及勘查,该区为古滑坡体碎石滑覆堆积体,厚度5.66~25.18m,古滑体上横向裂缝宽0.3~1.2m,滑坡前缘南侧有鼓丘、隆升及鼓胀裂缝,孔隙度大,结构碎裂;在滑坡右侧农田有反翘地形,山坡可见大量的“马刀树”,树林中间杂大量古滑坡碎块石,在“9.28”苏村滑坡中上部滑体的推动下,这些古滑体发生了复活,有利于滑坡的迅速下滑。在近桃源溪斜坡趾尖区域,受北东向断层F2控制,下伏5.6~12.7m砂卵石及3.3~9.7m厚的砂岩,这两种地层组成了滑坡的软弱基底,抗剪强度较低,在滑体冲击下,迅速

剪出,加速了滑体的发生<sup>[6]</sup>。

## 4 滑坡形成演化过程分析

基于上述现场勘查及工程地质分析,初步判定苏村滑坡变形破坏主要受到连续降雨的累积效应触发,在坡顶平台汇水、顶托,滑体受到束口遇锚固体受阻形成挤出效应,随即在坡面产生楔裂-冲刷-切割效应,推动中下游古滑坡体复活,其演化特征如下。(1)百万年以前,丽水-祝村水东一带的火山运动发育,浅灰块状沉凝灰岩侵入到三叠系地层中,蚀变成酸性岩屑坡玻璃角砾凝灰岩,地壳迅速抬升;到几十万年前,龙泉-遂昌断隆苏村段基底褶皱强烈,NNEE断裂和EW向断裂在苏村北东侧错发育,并在地层错动和河流快速侵蚀切割综合作用下,形成了不对称的“V”字形的峡谷和河谷地形地貌,在谷坡临空面产生卸荷回弹,而顺层的硬质熔岩易发生脆性破坏,并在卸荷过程产生应变能;在隆起岩体中,构造应力和卸荷回弹产生压致拉裂缝,在降雨作用下斜坡浅表岩土体会产生崩滑堆积,残留在后缘平台(图6a)。

(2)在长期降雨累积效应作用下,斜坡浅表体自重增加,加之水流的渗透、冲刷,斜坡中压致裂缝被掏空,斜坡体失稳,加速崩滑堆积于坡脚,因而641平台的堆积体规模越来越大;当堆积体容量超过平台的承载容量时,孔隙水压力迅速增加,抗剪强度降低,浸泡在潜在滑动面上的堆积体被“顶托”,当发生极端降雨时,在滑体自重和雨水增量的共同作用下,“悬浮体”以一定的初速度被推出平台。这些悬浮泥水流及碎屑物楔入到顺向纵张节理中,起了鼓胀充填的作用,使顺向岩体沿层面剥离,进行蠕动和胀裂,促进软弱结构面的延伸乃至贯通,当原始的泥水流的“楔入”顺层基岩层理、节理裂隙,具有一定的加速度,促进软弱结构面的加速贯通,岩体被“掀盖”和碎裂,斜坡发生粘滑<sup>[7]</sup>(图6b)。

(3)由于斜坡中上部的岩体为顺层陡峭基岩滑坡,形成一个天然的加速滑道,混杂着泥水和岩体进一步加速,高速楔入到岩石节理裂隙当中,将浅表岩层“掀开”和“撕裂”,并冲刷切割中下部的岩土体,形成深切拉槽破坏。加之中下部是岩质古滑坡体,结构松散,裂隙度大,泥水直接渗入潜在滑动面,形成地下水富集的基岩顶面,迅速降低基底面的抗剪强度,沿着倾向下流的坡面形成了一定的动水压力,使残留浅表的古滑体与高速冲下的碎块石整体滑动,形成一个突发性强、

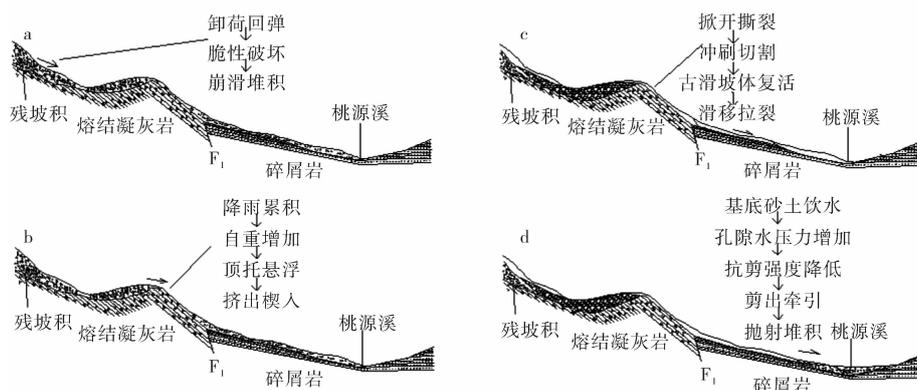


图6 苏村滑坡形成演化过程示意图

冲击力巨大的大型滑坡灾害(图6c)。

(4) 在基底流动的地下水流到斜坡趾尖时, 岩性由熔结凝灰岩转为厚度较大的砂土和力学性质相对较差的砂岩, 由于砾土渗透系数中等, 具有一定的吸水储水功能, 导致基底含水量大大地增加, 孔隙水压力也增强, 抗剪强度迅速降低, 形成剪出牵引蠕滑, 以上共同作用导致堆积体抛射堆积, 在桃源溪形成堰塞坝(图6d)。

## 5 结论与建议

(1) 苏村滑坡是受特大暴雨而诱发的顺层岩质滑坡, 目前正处于发展期(壮年期)。因构造作用和差异性地壳抬升作用导致华上尖滑坡坡积物丰富, 区内存在可能参与滑动的物源有增加的趋势, 一旦再次遭遇强降雨, 再次暴发滑坡的可能性极大。

(2) 苏村滑坡发生过程中, 降雨的累进性效应起到重要的作用。在华东、华南中低山地区, 特别是武夷山、怀玉山及罗霄山脉沿线, 类似于苏村滑坡的斜坡分布较为广泛。2015年5月在赣南山区花岗岩因降雨诱发了大量的顺层滑坡, 统计资料表明, 当连续降雨量达到150 mm以上时, 就会诱发花岗岩中的顺层滑坡。这些滑坡还具有多发性的特征, 因此, 研究此类滑坡具有现实意义<sup>[8]</sup>。

(3) 该滑坡形成演化过程分明, 滑坡是一个外因与内因的综合影响形成的结果<sup>[7]</sup>。除了降雨这个诱因之外, 特殊的地形地貌、地层岩性及地质构造等地质条件是滑坡形成的重要基础。苏村滑坡后缘碎裂岩体崩滑于坡脚形成堆积体, 在降雨作用下滑面摩擦降低, 率先失稳启动, 并挤出口

遇坚硬岩体向两加速, 在中部陡峭顺层基岩楔裂加速, 冲击中前缘古滑体复活, 促进熔岩碎裂高速下滑。从防灾减灾的角度, 研究此类地形地貌的斜坡体在降雨作用下的启滑识别与防治, 特别是降雨量与顺层熔岩坡体稳定性、初滑挤出效应与不同角度岩层的楔裂程度对应关系等, 将有助于对这类滑坡危险性作出正确的评价<sup>[9]</sup>。

## 参考文献:

- [1] Adhikary D P, Dyskin A V. Modelling of progressive and instantaneous failures of foliated rock slope[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007, 40(4): 349-362.
- [2] HUANG R Q, ZHAO S J, SONG X B, et al. The formation and mechanism analysis of Tiantai landslide, 2005, 11(3): 513-525.
- [3] YIN Y P, CHENG Y L, LIANG J T, et al. Heavy-rainfall-induced catastrophic rockslide - debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. *Landslide*, 2015. doi: 10.1007/s10346-015-0554-9.
- [4] 胡仰文, 吕小平, 黄润秋, 等. 唐家山堰塞湖大水沟泥石流发育特征及堵江危害性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(4): 850-858.
- [5] Pankaj J, Cees J, van W. Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rain - fall thresholds[J]. *Geomorphology*, 2009, 112: 96-105.
- [6] 甘建军, 吴晗, 黄润秋, 等. 汶川地震区典型堆积体成灾模式研究[J]. *灾害学*, 2013, 28(4): 40-44.
- [7] 邓茂林, 许强, 韩蓓, 等. 降雨条件下河流冲刷型滑坡的基本特征及滑动机制分析 - 以四号宣汉樊哙大桥滑坡为例[J]. *地球与环境*, 2014, 42(1): 62-64.
- [8] 代贞伟, 魏云杰, 侯时平. 三峡库区杨家井滑坡变形失稳机理研究[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(4): 527-535.
- [9] Kuo Yushu, Tsai Yuanjung, CHEN Yushui, et al. Movement of deep - seated rainfall - induced landslide at Hsiaolin Village during Typhoon Morakot[J]. *Landslide*, 2013, 10: 101-202.

## Sucun Landslide in Suichang County of Zhejiang Province: Characteristics and Failure Mechanism

GAN Jianjun<sup>1</sup>, FAN Junhui<sup>2</sup>, TANG Chun<sup>1</sup>, WANG Chenhui<sup>1</sup>, LIU Zhiwei<sup>1</sup> and Li Jian<sup>1</sup>

(1. Nanchang Institute of Technology, National-Local Joint Engineering Laboratory of Water Engineering Safety and Efficient Utilization of Resources in Poyang Lake Watershed, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Survey and Design Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330099, China)

**Abstract:** At 17: 28 of September 28, 2015, a medium-sized landslide triggered by the heavy rainfall in Sucun, Suichang county of Zhejiang Province, causing heavy casualties and property loss. The volume of the instability rocks is about  $4.0 \times 10^5$  m<sup>3</sup> and it runs from the Huashang ridge to the Taoyuanxi valleys. The mudstone barrier dam is 523m long, 536m wide and the largest thickness of deposit is 15m. On the basis of geologic analysis, combined with the detailed geologic investigation, 3d scanning, remote sensing, laboratory test and other means, the basic features and mechanism of formation of Sucun landslide has analyzed in this paper, and put forward causes and mechanism of landslide by preliminary understanding. The results show that: There are two accelerations at Sucun landslide from the time. The heavy rainfall in the area I had contributed to cataclastic rock collapse, then accumulation near trailing fault of landslide. The deposit of collapse is 426m and 190m wide, its sliding distance 48m, for the first time of extrusion speed in beam mouth. Such deposits sailed down the middle bedding rock body slope which is 60 degrees and 153m long, the speed accelerates quickly, this is the second slide speed; The ancient sliding body in the front flat has impact of the upper sliding body, resurrection area about 3533m<sup>2</sup>, slide distance more than 800m and destructive stronger. The Sucun landslide begins to mass extrusion wedge fracture rock slope, and it has promote the ancient landslide revivification and block up river channel to form barrier lake, which is of great significance that is the research about other similar geological condition of landslides and prevention.

**Key words:** consequent rock landslide; extrusion wedging effect; geological analysis; formation mechanism; Sue village landslide; Suichang county in Zhejiang province

(上接第 16 页)

## Reflections on High Speed, Long Run-out and Chain Sudden Geological Hazards Prevention

NING Kuibin, LIU Hainan, YAO Chaowei, HE Qian and LI Yonghong

(1. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Geological Survey, Xi'an 710065, China; 3. Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054, China; 4. College of Geology & Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Based on the case of different types of sudden geological hazards, analyze and summarize the concept of high speed, long run-out and chain sudden geological hazards, think high speed, long run-out and chain sudden geological hazards have features of high speed, long run-out, chain, severe destruction and complex mechanism. Affected by natural location, earthquake, precipitation and human activities, high speed, long run-out and chain sudden geological hazards are a common occurrence in recent years. The author combined with the current situation of geological hazard prevention and many years of experience, put forward a series of prevention measures, to prepare for the future provides ideas on geological hazards prevention and control.

**Key words:** high speed; long run-out; chain; sudden geological hazards; development characteristics; disaster forming factor; prevention measures