

甘肃南部坪定-化马断裂带锁儿头滑坡成因机制

黄 晓^{1,2}, 杨为民¹, 张春山¹, 申俊峰², 刘 廷^{1,2}

HUANG Xiao^{1,2}, YANG Wei-min¹, ZHANG Chun-shan¹, SHEN Jun-feng², LIU Ting^{1,2}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

摘要: 甘肃坪定-化马断裂是现今仍在活动的断裂, 具左旋走滑性质。锁儿头滑坡沿坪定-化马断裂带发育, 属典型的蠕滑型断裂带滑坡。野外调查及监测资料表明, 锁儿头滑坡规模大, 为巨型滑坡, 其上发育多个次级小滑坡。滑坡体由断层破碎带、碎石土和堆积黄土组成。该滑坡变形强烈, 拉张裂缝、剪张裂缝多见, 目前处于蠕滑变形状态, 是在内外动力耦合条件下形成的。活动断裂对滑坡的形成、发展起控制作用, 而降雨则是滑坡复活的主要诱发因素。因此, 对锁儿头滑坡成因机制的深入研究可为蠕滑型断裂带滑坡的预测防治提供理论依据。

关键词: 断裂带滑坡; 锁儿头滑坡; 坪定-化马断裂; 成因机制; 蠕滑

中图分类号: P642.22; P694

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2013)12-1936-07

Huang X, Yang W M, Zhang C S, Shen J F, Liu T. The formation mechanism of Suoertou landslide in Pingding-Huama fault zone, Southern Gansu. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(12): 1936-1942

Abstract: Pingding-Huama fault in southern Gansu Province is an active fault at present with characteristics of sinistral strike-slip. Suoertou landslide is a typical creep fracture zone landslide developed along Pingding-Huama fault zone. Field investigation and monitoring data reveal that Suoertou landslide is a giant landslide characterized by the development of many secondary landslides; landslide is composed of fault fracture zone, gravel soil and accumulated loess; the deformation of the landslide is intense; the landslide has many tension fractures and shear fractures lying in the creep deformation state. Suoertou landslide is formed under the coupling of endogenic and exogenic geological processes: the active fault controls the formation and development of the landslide, the rainfall is the main factor triggering the revival of the landslide. Therefore, the further study of the formation mechanism of Suoertou landslide can provide theoretical basis for the prediction and control of the creep fracture zone landslide.

Key words: fracture zone landslide; Suoertou landslide; Pingding-Huama fault zone; formation mechanism; creep

近年来,随着全球进入构造活动期,构造活动对地质灾害的控制作用越来越引起人们的关注。特别是地震常伴随断裂的粘滑运动,继而诱发大规模的崩、滑、流灾害。构造活动与崩、滑、流灾害的关系已成为国内外地质灾害研究的热点之一^[1-4]。邹瑾敞等^[5]通过对古浪地震滑坡的研究,提出其与断裂带的发育具有相关性并受断裂构造控制的观点。康来迅等^[6]提出了昌马断裂带上地震滑坡的展布特征、

规模、数量与断裂之间的关系。田述军等^[7]研究了汶川地震地质构造对山地灾害发育的影响。张永双等^[8]通过对汶川地震活动断裂和大型滑坡的调查,揭示了活动断裂带大型地震滑坡的分布特征、形态特征、启动特征和分段特征及其相关影响因素。许强等^[9-10]提出了地震诱发滑坡的分布规律。上述研究成果多集中于典型地震滑坡的平面发育特征、空间分布及其与断裂的关系,对断裂带滑坡的剖面结构、断

收稿日期: 2013-06-30; 修订日期: 2013-09-22

资助项目: 中国地质调查局项目(编号: 1212011120072)、国家科技支撑项目(编号: 2011BAK12B09)和国家自然科学基金项目(批准号: 41072269)

作者简介: 黄晓(1989-), 女, 在读硕士生, 从事地质灾害和活动构造研究。E-mail: xhuangchn@163.com

裂对滑坡的控制程度的研究较少;并且提到的滑坡均为剧动型断裂带滑坡,对蠕滑型活动断裂诱发的地质灾害的研究目前很少涉及,这可能是由断裂构造现今蠕滑活动常不易被觉察所致。杨为民等^[1]对坪定-化马断裂带上断裂带的滑坡特征进行了论述,并对典型的断裂带滑坡的防治提出了对策。针对锁儿头滑坡,前人^[12-16]主要进行了滑带土工程特性试验研究、微结构的分形研究、裂缝变形特征研究和风险评估。本文以坪定-化马活动断裂带上典型滑坡——锁儿头滑坡为例,通过现场调查、变形监测资料综合分析,深入探讨锁儿头滑坡的特征及其形成机理,为活动断裂带上蠕滑型滑坡的预测、防治提供科学依据。

1 滑坡形成的环境地质条件

锁儿头滑坡发育于甘肃舟曲县城西侧的白龙江左岸,距舟曲县城 1.0km。构造上位于西秦岭构造带南侧,为高山峡谷地貌。

区内构造复杂,主要发育有白龙江复背斜、光盖山-迭山南麓断裂、迭部-白龙江断裂等,主构造线方向为 NW—NWW 向。其次区内尚发育 NE、NNE 及近 EW 向的次级断裂构造,切断 NW 方向的走向断裂,使地层、岩体更为破碎。区内地层主要为中泥盆统古道岭组(D_{3g})炭质板岩、千枚岩、砂岩夹薄层硅质灰岩,下石炭统灰岩、炭质千枚岩、板岩和砂岩,中—上石炭统灰—灰白色中厚层块状致密灰岩、灰—深灰色中厚层夹薄层灰岩和少量钙质砂岩、板岩。

坪定-化马断裂是光盖山-迭山南麓断裂的分支断裂,断裂带宽度大、延伸长 50~60km,断裂错断中泥盆统古道岭组和石炭系。据现有成果,坪定-化马断裂现今活动性明显,为走滑逆冲活动断裂兼有挤压的特征,走滑速率为 1.4mm/a,垂直于断层方面表现为挤压特征,挤压速率为 3.7mm/a^[17-18]。

区域多年平均降水量为 435.8mm,汛期为每年的 6~9 月,日最大降水量 63.3mm,小时最大降水量 47.0mm,年均蒸发量 2000mm,年均气温 12.9℃。白龙江为研究区内最大的水系,由 NWW 流向 SEE,在迭部—武都段,白龙江与主构造线延伸方向近一致。

2 滑坡基本特征

锁儿头滑坡沿坪定-化马断裂带发育,地貌上

呈凹形槽地。滑坡平面形态呈纺锤形,长宽比为 10:1(图 1),平均坡度 12°,前缘和后壁较陡、中部略缓。滑坡长 4200m,宽 80~700m,平均宽度 350m,厚 20~100m,平均厚度 60m,不同部位滑坡体厚度差异很大,滑坡体积 $8800 \times 10^4 \text{m}^3$,为巨型滑坡。锁儿头滑坡没有明显的后壁,后缘顶部高程 2200m;前缘剪出口高程在 1302~1310m 之间,与白龙江河床基本持平;前后缘相对高差近 900m(图 2)。滑动面发生于断层破碎带中。

锁儿头滑坡滑体主要由断层破碎带、碎石土和次生黄土组成,剖面上呈“三层”结构。下部为断层破碎带的灰黑色炭质板岩碎屑,岩体破碎,风化强烈;中部为杂色、青灰色粗粒碎石土;上部堆积有次生黄土。滑坡体上发育多个次级滑坡,分别为 1~12 号(图 1)。锁儿头滑坡两侧断层崖部位有小型崩塌、滑坡群的堆积体,由于滑坡多次复活滑动,断层破碎带、风化破碎带和次生黄土混杂在一起,属于一种特殊类型的堆积层滑坡。

依据滑坡体物质组成、坡体表面特征、水文特征等,将滑坡体大致划分为上、中、下 3 段。上段滑坡体长约 1450m,宽 200~700m,平均宽度 450m,最大厚度 78m,平均 60m,平均坡度 12.5°。滑体以杂色、青灰色碎石土为主,灰黑色炭质板岩碎屑次之,表面覆盖次生黄土。上段中后部裂隙发育,有两级反坡平台,最大平台面积达 0.2km²,反坡洼地深 30m 左右,雨季积水是滑坡体内地下水的补给源。

中段滑坡体长约 1250m,宽 80~350m、平均宽 300m,厚度 20~100m、平均厚度 65m 左右,中段后部与上段的连接处滑体厚度显著变小,平均坡度 12.8°。中段上部杂色、青灰色碎石土和灰黑色炭质板岩碎屑各占约 50%,中部以灰黑色炭质板岩碎屑为主,下部以杂色、青灰色碎石土为主,此段滑体表面基本没有次生黄土堆积。滑体表面出露大小不一的灰岩岩块,为坪定-化马断裂带下石炭统的断夹块。滑坡两侧发育长 300m 左右的侧壁,见明显的滑痕发育,然而由于长期慢速滑动使早期滑动时形成的滑体地形特征变得较为模糊。滑坡东西两侧发育冲沟,可见地下水排出。

下段滑坡体长约 1500m,宽 350~600m,平均宽度 450m,最大厚度 82m,平均厚度 60m,平均坡度 11°。下段后部以灰黑色炭质板岩为主,上覆杂色、青灰色碎石土,厚度约 20m;前部则以杂色、青灰色碎

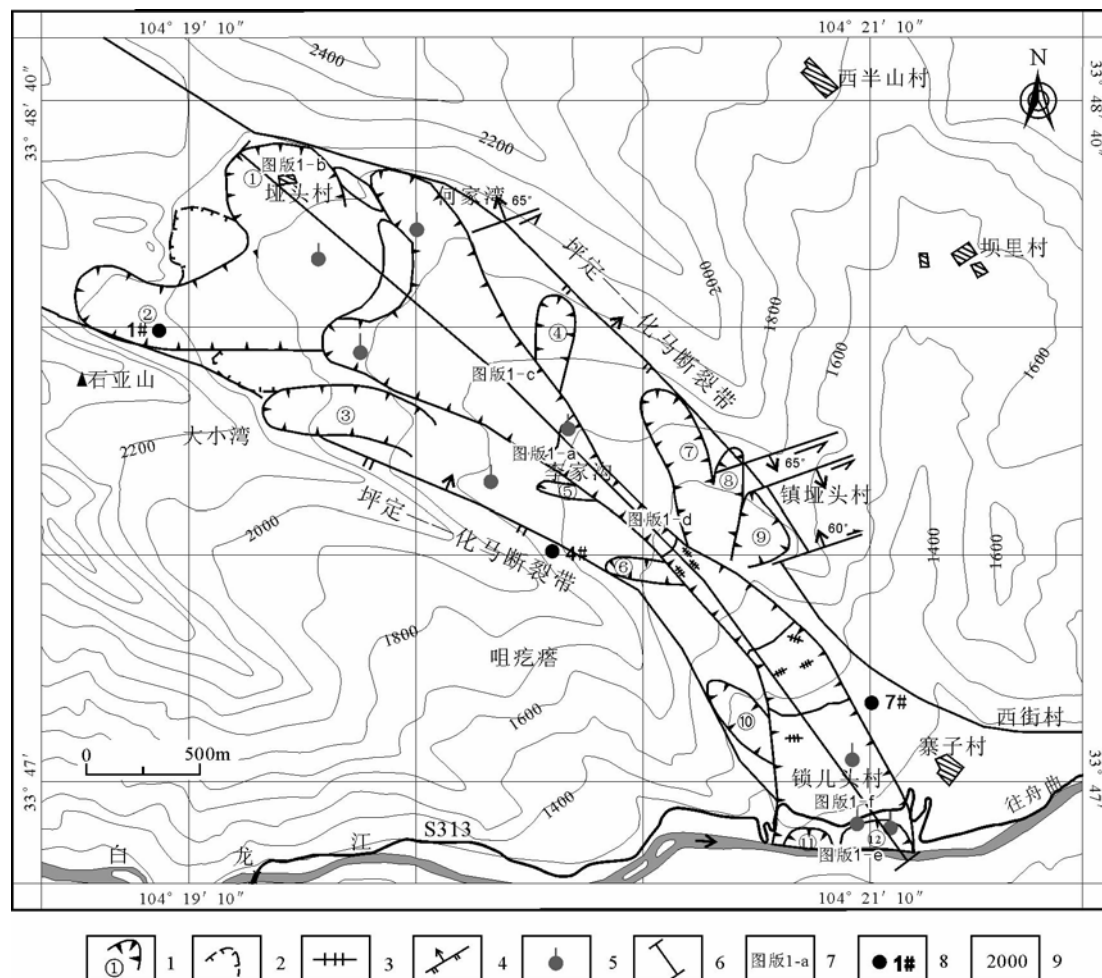


图 1 锁儿头滑坡平面图

Fig. 1 Planar diagram of Suoertou landslide

1—滑坡;2—崩塌;3—地裂缝;4—逆断层;5—泉;6—剖面线;7—照片位置;8—监测桩;9—等高线(m)

石土为主,局部夹有薄层次生黄土。滑坡在前缘向两侧扩散,呈扇形,并形成一反坡洼地。滑体前缘拔河高度 40~50m,坡体平均坡度 35°,发育 2 个次级滑坡,滑坡体堆积于白龙江左岸,前缘坡脚冲入白龙江,堵塞河道,致使河道宽仅 18~30m。

滑床为坪定—化马断裂断层破碎带,由搓碎的板岩、千枚岩、砂岩、灰岩夹断层泥组成,岩体破碎易风化。

3 滑坡蠕滑变形特征

现场调查和监测结果表明,锁儿头滑坡一直处于缓慢蠕滑变形状态,但由于地形地貌、滑坡体物质组成的差异,各段变形速率不一。锁儿头滑坡的变形复活表现为整体缓慢蠕滑变形和局部加速蠕滑变形。

3.1 滑坡体变形特点

据现场调查和滑坡变形监测资料,锁儿头滑坡体变形强烈,变形现象丰富(图版 I)。

滑坡体纵向剪张裂缝发育,自滑坡中段贯通至前缘,长度达 2000 余米,裂缝宽度数厘米至数十厘米,且有地下水渗出(图版 I-a)。上段坝头村民房每年都会形成新的开裂(图版 I-b)。中段后缘处为一高 60~80m 的灰岩断夹块,断夹块下部碎石土发育挤压鼓丘,滑坡体上的公路每年均会下挫数厘米(图版 I-c),滑体上的大块石每年向下蠕滑 2~3m,李家沟向下滑坡变窄的部位发育密集的剪张裂缝。滑体由断裂破碎带、次生黄土和崩坡积体混杂在一起,向下蠕滑变形,形态上呈“碎屑流”状(图版 I-d)。下段滑移量大,各种弧形拉裂缝遍布(图版 I-e)。

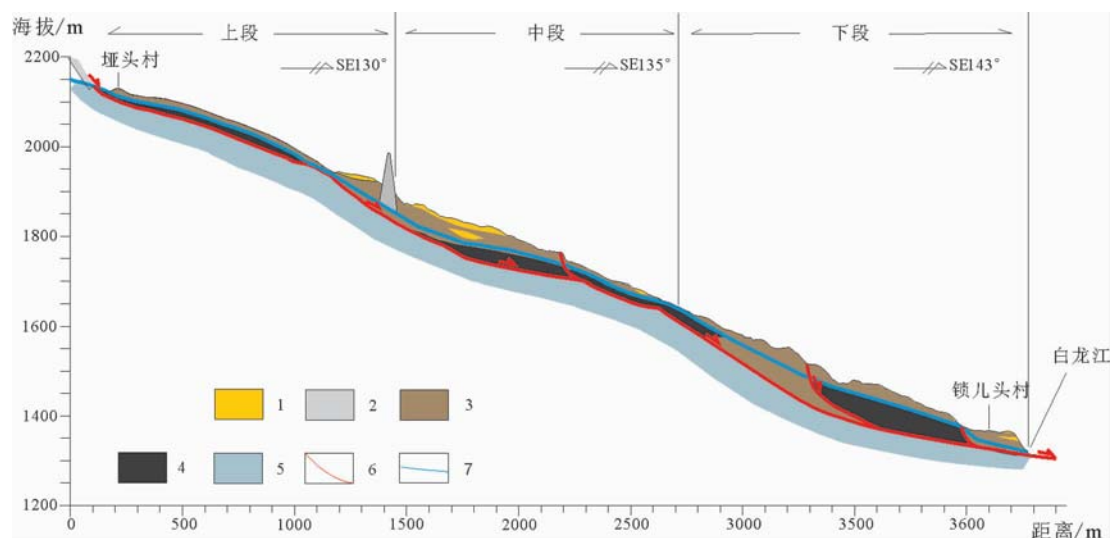


图 2 锁儿头滑坡剖面图

Fig. 2 Profile of Suoertou landslide

1—原生黄土;2—灰岩;3—碎石土;4—断层破碎带;5—滑床;6—滑动面;7—地下水位线

e),致使锁儿头村房屋开裂、灌溉引水渠错断。滑体前缘边坡发育数条宽 1~2cm 密集成带的裂缝,带宽约 2m;前缘次级滑坡剪出口处滑体向下滑移,致使挡土墙受挤压开裂(图版 I—f)。

3.2 滑坡整体呈缓慢蠕滑变形

滑坡体自上而下布置 1#、4# 和 7# 监测桩,自 1991 年 8 月—1999 年位移量达到 3~8m,东侧裂缝位移 4.7~5.7m,西侧裂缝位移 3~4m^①。据 2000—2010 年部分年份的监测数据统计结果(图 3),滑坡体每年均向下滑动,且自上而下位移量依次减小。由于滑体位移量大,1# 监测桩在 2000—2004 年遭到破坏,4# 和 7# 监测桩在统计的年份里累计位移量已达到 5~7m(图 4)。2008—2010 年监测桩累计位移量显示(图 5),滑坡体位移量随时间增长而增加,两者具有很强

的线性相关关系。由 1#、4# 和 7# 监测桩位移量可知,锁儿头滑坡各段变形量不一,滑坡自上而下变形量递减,年位移量由上部的 0.8~1.1m 递减到下部的 0.4~0.5m。相比前 10 年的位移量,锁儿头滑坡位移量有增大的趋势,滑坡整体处于缓慢蠕滑状态。

3.3 局部次级滑坡体发育,呈加速蠕滑变形

锁儿头滑坡前缘长期受白龙江江水浸泡侧蚀,加之滑坡侧壁地表水渗出,坡体不稳,前缘滑动形成 11、12 号次级滑坡。12 号滑坡为堆积土滑坡,滑体为碎石土。滑体变形量较大,弧形拉裂缝遍布,裂缝走向 NE(10~15°),宽 0.1~0.3m,深度大于 3m,延伸大于 50m。1994 年前缘出现小范围快速滑动,现仍处于不稳定状态。西侧 11 号滑坡与东侧 12 号滑坡成因相似,但规模较小,坡体高陡。11 号滑坡滑体上拉

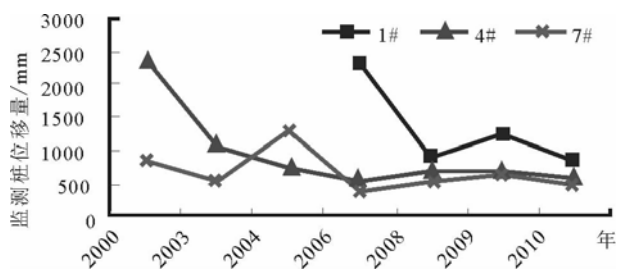


图 3 2000—2010 年监测桩位移量曲线

Fig. 3 Displacement curve of the monitoring piles in 2000—2010

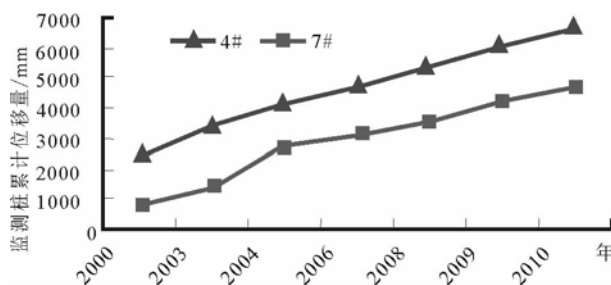


图 4 2000—2010 年监测桩累计位移曲线

Fig. 4 Cumulative displacement curve of the monitoring piles in 2000—2010

图版 I Plate I



a.滑坡侧壁纵向冲沟中的裂隙水;b.滑坡上段垭头村房屋墙体开裂;c.滑坡中段公路弧形裂缝;
d.滑坡体中段碎屑流;e.滑坡前缘弧形拉张裂缝;f.滑坡前缘剪出口挡墙破坏

张裂缝和落水洞密布,落水洞局部成带状,拉裂缝走向 150° ,宽度 $0.1\sim 0.2\text{m}$,深度大于 3m ,堆积物杂乱,整体性差,亦处于不稳定状态。

综上所述,锁儿头滑坡目前整体处于蠕滑变形阶段,滑坡变形特征明显。若遭遇强降雨、地震作用局部可能失稳,形成次级小滑坡。当滑坡受到上段推

移和下段牵引、推移的联合作用时,锁儿头滑坡有可能发生整体滑动。

4 滑坡成因机理分析

4.1 断裂对滑坡的形成起控制作用

坪定-化马断裂带由SE至NW发育有一系列

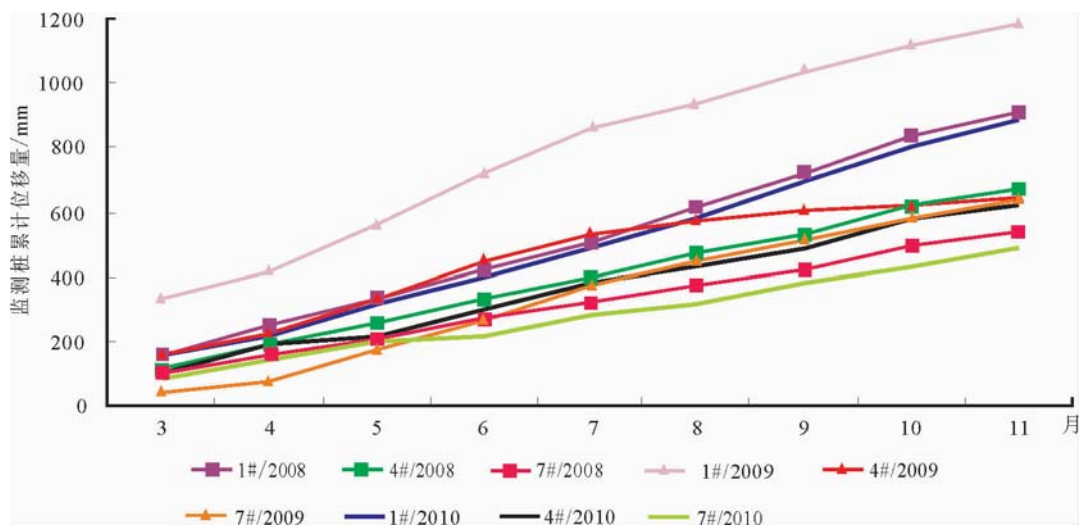


图 5 2008—2010 年监测桩累计位移曲线

Fig. 5 Cumulative displacement curve of the monitoring piles in 2008–2010

的断裂带滑坡,断裂控制着滑坡的形成、展布和规模,断裂破碎带物质是滑坡体的组成部分,断裂的长期活动对滑坡的变形发展有重要影响。

锁儿头滑坡主滑方向 $SE130^\circ$ 左右,与坪定-化马断裂走向近平行。受坪定-化马断裂带南北两分支断裂的控制,该滑坡发育在断裂带凹槽中,南北两侧壁为较高陡的灰岩,滑坡长度大而宽度相对较小,为典型的狭长型滑坡。滑坡体上发育 10 余个次级小滑坡,滑向朝向滑体内部,次级滑坡的发育常受主断裂伴生构造结构面的控制。

石炭系主要分布于坪定-化马断裂带南北 2 条分支断裂之间,强硬岩层如厚层状灰岩多以断夹块的形式存在,软弱岩层如炭质板岩、千枚岩等则为搓碎的断层构造岩、断层泥。灰岩断夹块在滑坡体滑动过程中起到一定程度的阻挡作用,相当于滑坡体中的抗滑桩或挡土墙,可减缓滑坡上段向下滑动的速率,是滑坡各部位滑动速率不均一的原因之一。炭质板岩、千枚岩等受断裂长期挤压、搓碎,极其破碎。在滑坡体蠕滑过程中,搓碎的板岩、千枚岩岩片发生转动,逐渐与主滑面平行,减小了滑动面的抗剪强度,降低了坡体的稳定性。

断裂破碎带岩体破碎、裂隙发育,有利于水的渗入和渗流;而断层泥的透水性差,又不利于渗入的水体快速排泄。

4.2 降雨是滑坡复活的主要诱发因素

锁儿头滑坡所在区降雨量较小但不均匀,降雨

主要集中在 5~9 月,并且常以连阴雨和暴雨形式出现。滑坡位移监测资料表明(图 6),滑坡滑动量与降雨量之间具有较好的相关性,降雨量大,滑坡位移量相应增大,反之降雨量小,滑坡位移量也小。降雨在时间上的集中性决定了滑坡发生时间的集中性。2009 年 7 月降雨量出现高峰达到 96mm,监测桩位移量明显增大;有趣的是,降雨量在 7 月达到最大值而监测桩位移量 8~9 月才达到峰值,说明滑坡滑动量相对降雨量有一个滞后期,为 1~2 个月。

降雨是区内地下水的主要补给来源,雨水通过各种裂缝、落水洞等通道渗入滑坡体,使滑坡岩土体饱和,降低了岩土体的力学强度指标;增加了滑体的重量,从而增加了下滑力;有效压力降低,导致滑带土摩擦阻力降低,加剧了滑坡变形,导致滑坡再次发

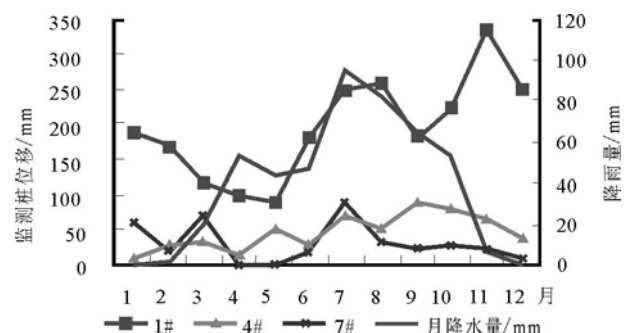


图 6 2009 监测桩位移量与降雨量相关图

Fig. 6 The relationship between rainfall and displacement of monitoring piles in 2009

生。以往的研究结果也证实了这一观点^[12],锁儿头滑坡体滑带土在同一法向压力下, $G_{0.1}$ (剪应变力为 0.1 时的剪切模量)随含水率增加而线性减小。

此外,地震、人类工程活动、坡脚冲刷等对锁儿头滑坡的稳定性也有影响。

舟曲处于舟曲—武都地震亚带,属地震强烈活动区,地震较为频繁,地震烈度为 8 度。受地表震动影响,坡体结构松动,抗剪强度降低,坡体稳定性降低。地震发生时,滑坡体滑移量有明显加快的趋势;2008 年 5·12 汶川地震后,锁儿头滑坡变形量有增大的趋势。

锁儿头滑坡及其周边人类工程活动较强烈,主要包括锁儿头村、垭头村房屋的修建,坡脚 S313 的通过,滑坡体上种植农作物及引水灌溉,人为活动促进了滑坡变形作用。白龙江河水强烈侵蚀滑坡前缘坡脚,亦对滑坡的发生起到诱发作用,滑坡前缘的 2 个牵引式滑塌就是江水冲刷淘蚀直接引发的。这种特殊类型的断裂带滑坡,主要是通过修建排、截水沟对其治理,而拦挡坝等工程在滑坡蠕滑过程中极易被破坏,治理效果不佳。

5 结 论

(1)锁儿头滑坡属于典型的蠕滑型断裂带滑坡,坪定—化马断裂带控制了滑坡的形成和发展,滑坡发育在断裂带形成的凹槽中,断裂破碎带是滑床和滑体的组成物质。破碎带中的强硬岩层和软弱岩层在滑坡滑动过程中扮演了不同的角色,断裂活动促使滑坡发生蠕滑运动。

(2)锁儿头滑坡体具有上、中、下 3 层结构,由堆积黄土、碎石土和断层破碎带组成,属特殊类型的松散堆积层滑坡。

(3)锁儿头滑坡体变形强烈,目前整体处于缓慢蠕滑变形状态。滑体各段变形程度不同,自上而下位移量由 800~1100mm/a 到 400~500mm/a,有再次发生整体复活的可能性,需要对其进行以截、排水为主的防治和长期的监测预警。

(4)降雨是滑坡复活的主要诱发因素,多年的降雨量和滑坡的位移量监测结果表明,二者具有较好

的相关性。

致谢: 甘肃省环境监测院和舟曲县国土局提供滑坡勘探资料和部分变形监测资料,在此表示感谢。

参考文献

- [1]Martel S J. Mechanics of landslide initiation as a shear fracture phenomenon[J]. Marine Geology, 2004, 203(3/4): 319-339.
- [2]Lian C W, Shien C L, Yuan B D, et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2004, 71(1/2): 49-61.
- [3]王思敬.地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探[J].工程地质学报, 2002, 10(2): 115-117.
- [4]李晓,李守定,陈剑,等.地质灾害形成的内外动力耦合作用机制[J].岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1792-1806.
- [5]邹谨敏,邵顺妹.古浪地震滑坡及其与断裂带的关系[J].西北地震学报, 1994, 16(3): 60-65.
- [6]康来迅,王建荣.昌马断裂带地震滑坡的展布特征[J].山地研究, 1995, 13(1): 35-41.
- [7]田述军,孔纪名,阿发友,等.地质构造对汶川大地震山地灾害发育的影响[J].水土保持通报, 2010, 30(6): 52-59.
- [8]张永双,苏生瑞,吴树仁,等.强震区断裂活动与大型滑坡关系研究[J].岩石力学与工程学报, 2011, 30(增 2): 3503-3513.
- [9]许强,李为乐.汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J].工程地质学报, 2010, 18(6): 818-826.
- [10]许强,李为乐.汶川地震诱发滑坡方向效应研究[J].四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(增 1): 7-14.
- [11]杨为民,黄晓,张永双,等.坪定—化马断裂带滑坡变性特征及其防治[J].地质通报, 2013, 32(12): 1925-1935.
- [12]宋丙辉,谌文武,吴玮江,等.锁儿头滑坡滑带土不同含水率大剪试验研究[J].岩土力学, 2012, 33(增 2): 77-84.
- [13]宋丙辉.滑坡滑带土工程特性试验研究[D].兰州:兰州大学硕士学位论文, 2012.
- [14]宋丙辉,谌文武,吴玮江,等.舟曲锁儿头滑坡滑带土微结构的分形研究[J].岩土工程学报, 2011, 33(增 1): 292-297.
- [15]李文彦,张媛,韩鑫,等.舟曲锁儿头滑坡裂缝变形特征研究[J].人民长江, 2013, 44(3): 33-35, 43.
- [16]李桦.甘肃舟曲县锁儿头滑坡风险评估研究[D].北京:中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2012.
- [17]余志山.泄流坡滑坡灾害损失预测及成灾方式研究[J].甘肃科技, 2007, 23(12): 72-76.
- [18]陈长云,任金卫,孟国杰,等.巴颜喀拉块体北东缘主要断裂现今活动性分析[J].大地测量与地球动力学, 2012, 32(3): 27-30.
- ①甘肃地质灾害防治工程勘查设计院. 甘肃省舟曲县锁儿头滑坡防治工程勘查报告. 2011.