

DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2017. 02. 16

六盘山东麓断裂带滑坡类型与变形机理研究 ——以泾河源区为例

王高峰¹, 王爱军¹, 陈宗良¹, 姚亚辉¹, 李永波²

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心 河北 保定 071051;

2. 中国地质大学(北京) 北京 100083)

摘要: 六盘山东麓地层结构特殊, 断裂褶皱等构造发育, 滑坡及其隐患点等不良地质灾害较多, 特殊的地理、构造位置和潜在的孕震背景, 致使该区具有产生大型滑坡的可能。本文依据新一轮以图幅带专题研究的地质灾害调查获取大量的数据, 通过统计分析, 对六盘山东麓断裂带滑坡产生的孕灾地质环境条件及其滑坡特性等进行了剖析, 将研究区滑坡归纳为红层软岩滑坡、断层影响型滑坡、堆积层滑坡、黄土型滑坡 4 种不同类型, 同时对其形成机理进行了探讨分析与研究, 为完成地质灾害风险性区划评价, 提出地质灾害防治对策建议提供了重要的理论依据。

关键词: 六盘山东麓断裂带; 泾河源区; 滑坡机理

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017) 02-0102-08

Study on types and deformation mechanism of landslide in the fault zone of eastern Liupanshan: Taking source district of Jinghe river as an example

WANG Gaofeng¹, WANG Aijun¹, CHEN Zongliang¹, YAO Yahui¹, LI Yongbo²

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geology Survey, Baoding, Hebei 071051, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The stratigraphic in the eastern Liupanshan is special and the structure like the fault and fold is developed. There are many bad geological disasters such as landslide and hidden danger disaster. Special geographical, structural locations and potential seismogenic background make the area have the possibility of large landslide. Based on the new round of map investigation and evaluation with special subject research of geological hazards in the eastern Liupanshan, large amounts of data were obtained in the fault zone of source district Jing River. Through statistical analysis, geological environmental conditions and landslide characteristics in the fault zone of eastern Liupanshan were analyzed. The landslides in the study area were classified into the red bed soft rock landslide, the fault impacted type, accumulation landslide and loess landslide. The formation mechanism of the landslide were also discussed and analyzed. It provide an important theoretical basis for the evaluation of geological hazard risk zoning, the comprehensive prevention and control countermeasures of geological hazards.

Keywords: the fault zone of eastern Liupanshan; the source district of Jinghe river; mechanism of landslide

收稿日期: 2016-10-08; 修订日期: 2017-01-05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“泾河流域地质灾害调查评价”(12120113008700)

第一作者: 王高峰(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害调查及 GIS 研究。E-mail: wgf_cgcs303@163.com

通讯作者: 王爱军(1963-), 男, 教授级高工, 主要从事地质灾害调查、监测预警研究。E-mail: ffswaijun@163.com

研究区位于六盘山东麓泾河源区,涉及行政区域包括宁夏回族自治区泾源县和甘肃省平凉市崆峒区,主要受控于六盘山东麓南端断裂和小关山断裂的影响^[1~3]。大多数崩滑流等地质灾害点集中分布在两条断裂带沿线及其影响范围内,亦是宁夏南部区域应力场的两条主要分界线^[4~7],特别是六盘山东麓南端断裂带的红层丘陵区地质灾害呈带状密集分布。断裂沿线差异性地貌效应和新构造活动异常强烈,在泾源县老龙潭发现白垩系紫红色砂岩夹灰绿色泥岩逆冲至中更新世末晚更新世早期的砂砾石层之上,相当Ⅳ级阶地地面的垂直位错可达90 m^[6]。在研究区东北部安国乡石咀子附近六盘山群逆冲推覆于第四纪马兰黄土之上,垂直推覆达75 mm^[8]。使该地段应力集中、岩层破坏,山体稳定性降低,增加了固体物质的来源,加剧了崩滑流等不良地质现象的活动。在2014年以图幅调查为思路的新一轮地质灾害调查中,在泾河源区共发现299多处规模不等的地质灾害点及隐患点,滑坡及隐患点约占72.9%。其中,有相当一部分与两条断裂带及古近纪、白垩系的红层泥岩密切相关,其诱发的滑坡及其隐患点达63.8%。另外,还发现在雨季长时间的阴雨天气后,泾河源区发生了多处泥石流与滑坡,其物质成份主要来自于强风化红色泥岩及其残积层与断裂带及其影响带破碎断层角砾岩。

在泾河源区红层软岩指白垩系与古近系泥灰岩、泥岩、页岩及砂岩、泥岩与页岩互层等软硬相间的层状岩体。该地层不仅是我国黄土地区的主要易滑地层,亦是我国滑坡地质灾害发育最严重的地层之一。1983年3月7日甘肃省东乡县洒勒山高速黄土泥岩滑坡,其后壁于1986年3月再次发生大规模的滑动,甘肃省永靖县盐锅峡黑方台黄土塬边先后发生20多次滑坡,又如天水锻压机床厂滑坡、天水孟家山滑坡、西安白鹿塬滑坡、陕西千阳石沟滑坡和甘肃张家川侯吴家滑坡等^[9~13],李保雄等^[14]认为我国西北部地区红层软岩滑坡约占各种类型滑坡总数的四分之一,在甘肃省东部地区约占各种类型滑坡总数的三分之一。在泾河源区红层软岩滑坡灾害频发,规模以中小型为主,但具有潜在的大规模滑动隐患,严重威胁经济建设和人民的生命财产安全。再者,随着经济建设和扶贫开发力度的加强,泾河源区高速公路、饮水管线、国道扩建、旅游资源开发等人类活动逐渐向丘陵区外延基岩山区发展,受断层特别是兼具走滑挤压逆冲性断裂影响,造成边坡失稳而形成的断层影响型滑坡在工程扰动中逐渐增多。挤压逆冲断裂除直接作为控制边坡变形及破

坏形式的主控软弱边界,还在其影响带范围内的岩体中产生大量的次级结构面,造成岩体力学性质的恶化循环,降低坡体的稳定性,进而造成边坡的失稳破坏,形成基岩或堆积层基岩滑坡。此外,陈晓利等^[15]认为断层倾角对滑坡空间分布范围也具有一定的控制作用,同时逆冲型断层所诱发滑坡崩塌的空间分布具有明显的上盘效应,而走滑型断层诱发滑坡在空间分布存在一定的差异性。

由于泾河源区地处宁南泾源县中南部,属六盘山扶贫区,区内地质技术力量薄弱,在该区虽说开展了相应的地质灾害详查和大比例尺基础地质研究,但是对滑坡类型分类和形成机理认识不足,有待进一步的总结研究。本文以“泾河流域地质灾害调查评价”及“陇东地区地质灾害详细调查”两个项目为依托,对泾源县境内泾河源区的滑坡灾害点进行统计分析,总结滑坡发育类型,分析各类滑坡特点、成因及成灾发展历程,对滑坡变形机理进行探讨。研究工作可以为该地区滑坡地质灾害防治提供参考依据,完成重点地段地质灾害风险区划评价提供理论支撑。

1 滑坡类型及分布

滑坡是研究区分布最广、数量最多的地质灾害类型,在2013年开展的“宁夏回族自治区泾源县地质灾害详查”中泾河源区确定滑坡及不稳定斜坡106处,在新一轮图幅调查开展“泾河流域地质灾害调查评价”确定滑坡及隐患点共218处,受2013年强降雨影响和人类工程扰动作用,新增滑坡及隐患点112处。按照原始斜坡地层组合关系和形成机理可将泾河源区滑坡分为4类:①红层软岩滑坡;②断层影响型滑坡;③堆积层滑坡;④黄土型滑坡。

将这些滑坡按地貌—地质—人类工程活动环境影响分为4个区。包括:①主要分布在软弱易滑的古近系清水营(E_q)、寺口子组(E_s)砂岩、泥岩互层和白垩系(K)泥灰岩、泥岩互层等红色地层区,主要沿着泾源断陷带呈NNW~NNE展布;②主要分布在断裂带附近,在六盘山东麓逆冲断裂带及小关山断裂带两侧呈线性带状展布,坡度在大于25°陡坡上的中大型滑坡;③主要发生在受挤压型构造影响,经流水侵蚀兼具红层狭长的泾源县城—六盘山镇剥蚀构造丘陵区及局部夹侵蚀堆积而成的冲积河流阶地区域,坡度在5°~25°斜坡上的中小型滑坡;④因穿越陡坡大于35°的公路建设导致的坡体失稳。

2 滑坡发育影响因素分析

依据对各类型滑坡成因的剖析,研究区内滑坡分布是各孕灾致灾因素相互耦合作用结果。归纳起来,滑坡发育分布的主要孕灾因素包括地形地貌、地层岩性、地质构造;致灾因素包括气象水文及人类工程活动^[16~19]。

2.1 地形地貌

地形地貌是崩塌、滑坡、不稳定斜坡以及泥石流等突发性地质灾害类型和规模的主控因素,为地质灾害提供能量和活动场所^[20]。研究区位于我国地质地貌南北向分界线、第一梯级向第二梯级的转折过渡地带,跨地台与地槽区。东面是鄂尔多斯断块,西北为阿拉善断块,西南系青藏断块及祁连地槽褶皱系。新生代时期,北部受华北应力场的影响,南部受青藏应力场的影响,使该区域具有挤压型弧形地貌格局。再者该区西部即六盘山基岩山区(大关山)为中更新世以来在挤压或剪切挤压型断裂构造作用下,后经流水侵蚀的泥质碎屑岩岩组中山区地貌类型;中部为上新世末—更新世初以来受挤压型构造影响,经流水侵蚀兼具红层狭长的泾源县城—六盘山镇剥蚀构造丘陵区地貌,局部夹侵蚀堆积而成的冲积河流阶地地貌;东部即小关山为前第三纪以来在挤压和剪切挤压型断裂构造共同作用下形成的软硬相间的碎屑岩低山区地貌类型。

这种特殊的大地构造位置或特定的地质构造背景以及独有的新生代应力状态,深刻地影响着该区地貌的形成与发展,决定了区域地貌的基本特征。野外实地调查统计分析表明,滑坡主要发育在剥蚀构造丘陵区及低山区地貌,沿地貌边界带密集分布发育,尤其是沿断层呈线状展布。

2.2 地层岩性

通过研究区典型滑坡钻孔岩芯的测试分析、野外滑坡滑动面的调查,认为研究区中大型滑坡主要滑动地层为古近系红色泥岩、粉砂质泥岩等软岩及白垩系乃家河组的兰灰色泥岩。不同岩土体具有不同的力学性质、不同的岩性组合及斜坡结构类型具有不同的稳定性,其发育的滑坡类型不同^[21]。研究区的岩性组合大致有以下几点:①层状含软弱层碎屑岩是浅层滑坡主要控滑面,主要发育红层软岩滑坡;②软弱层状碎屑岩组是深层滑坡主要控滑面,多发育红层软岩滑坡和断层影响型滑坡;③弱湿陷性黄土是研究区黄土层内滑坡和黄土基岩滑坡的主要易滑土体;④软硬相间的厚层状碎屑岩岩组沿断裂带分布,多发育断层影响型

滑坡,也是研究区主要易崩岩体;⑤第四系松散粘砂—砾石层为堆积层滑坡的易滑岩组,也是泥石流主要固体物质来源。

2.3 地质构造

地质构造条件对地质灾害的发育分布有重要的影响,主要包括构造格局、新构造运动、断裂等方面对滑坡的控制作用。断裂使岩体破碎,并为地下水渗流创造了条件,常常控制着滑坡、崩塌的发育地带的延伸方向、发育规模及分布密度^[22]。研究区受 NNW—近 SN 向构造控制,从西部到东部依次形成了六盘山背斜、六盘山东麓断裂、泾源断陷向斜、小关山断裂、崆峒山背斜大地构造格局。

六盘山主体是一个断坡型背斜构造,由于断裂的挤压逆冲活动,在六盘山东麓山前形成了挤压向斜盆地。盆地主体第三系地层发生了明显的挤压褶皱变形。六盘山东麓断裂主断层控制了山前第三系盆地的边界,上盘下白垩统地层逆冲压覆于下盘始新统寺口子组(Es)红层之上,断裂逆冲作用使这两套地层卷入挤压变形。靠近断层附近,基岩强烈破碎,断层附近下盘第三系地层局部发生倒转现象。断裂上盘白垩系地层的变形随着远离断层而逐渐减弱,整体呈现出不对称的歪斜背斜褶皱。基岩地层记录了断裂带构造发育历史中长期的构造变形,而断裂的最新活动已经扩展至主断裂下盘的第四系之中。小关山断裂大部分从下白垩统马东山组中穿过,在海子口至蒿店一段,控制着白垩系和第三系的边界,多处可见马东山组逆冲压覆于第三系红层之上,断裂上盘背斜褶皱的核部有古老的奥陶系灰岩出露,断裂上盘构成一个断坡型背斜构造。由于区内褶皱、断裂构造极为发育,各种构造形成的裂隙、孔隙成为岩石风化通道,致使多数岩体破碎、松动,并且在多因素耦合作用下易发生滑坡破坏,尤其在区域性大断裂的位置,其特征表现更为强烈(图1)。

泾河源区滑坡灾害一般沿地貌边界带密集分布发育,尤其是沿断裂呈线状展布,区域地质构造不仅控制着区域地层的展布,也控制着区域滑坡的发育,不同断裂也凸显出一定的差异性。

2.4 气象水文

泾河源区地处宁南六盘山山区,属于多雨地区,多年平均降雨量 525.4 mm,年最大降雨量 684 mm。该区滑坡灾害多集中在 6~9 月份,在其余月份也有发生,雨水的滞后时间长,特别在黄土砂砾石混合岩组中表现最为明显。2013 年 7 月泾源县境内发生强降雨,引发了较多新的滑坡、崩塌,而在 2014 年 9 月底连续

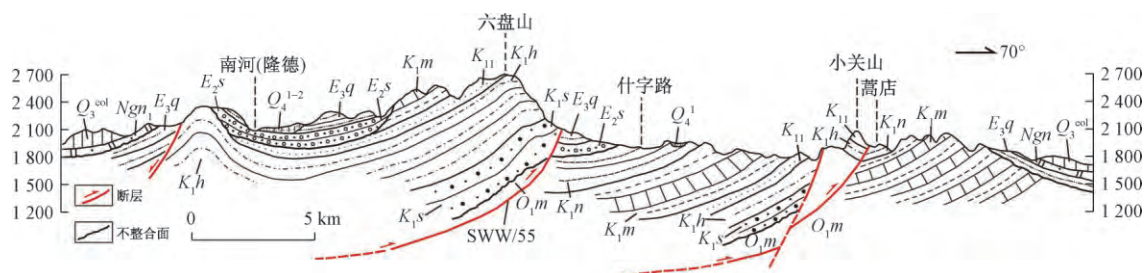


图1 六盘山东麓构造带地质剖面图

Fig. 1 Geological section map in the Fault Zone of eastern Liupanshan

的降雨使调查区滑坡集中发生,主要沿 S101 省道及人类活动强烈区,大部分发生在软弱红层区域。大气降水入渗到斜坡岩土体后,可以使组成斜坡的岩土体受到浸润而软化,其抗压强度和抗剪强度下降,下滑阻力减少,则斜坡的稳定性随之下降。整体上滑坡灾害的产生表现为“雨水同期性、同时又有滞后效应”的特点。

研究区地下水分布具有以下 3 个特点: (1) 沿地层分界区域分布,该类地下水出露点主要沿岩层分界面渗出而形成下降泉水,流量较大,渗出带主要为含泥岩、粉砂质泥岩地层,在降雨时沿节理裂隙面渗入岩层到达该类岩层后形成软弱带,成为隔水层;另一方面原因是地层分界点往往是应力集中的部位,裂隙常较发育,岩层透水性较好。(2) 沿断裂构造带分布,主要原因是受六盘山东麓断裂的影响,伴生次级断裂、褶皱,使古近系与下白垩系以断层接触,下盘古近系泥岩阻止了上盘白垩系地层含水层中地下水的径流,造成断裂带附近局部地段富水,该类型下降泉主要呈线、面状分布,个别可见呈串珠状分布,散流成面而后汇集于一点。(3) 沿松散堆积物与强风化软弱基岩接触面分布,在研究区近代河流、沟谷以及河漫滩地带,在古近系基岩上部覆盖一层砂砾石层或者是碎石土层,这些第四纪堆积层极易富水,而古近系砂岩地层极易形成阻水层,故而在接触面形成泉水渗出,再者,古近系泥岩、砂岩互层,形成软硬相间结构面,由于泥岩地层透水性好,成为地下水的潜流带,构成易滑结构面。

2.5 人类工程活动

研究区总体属中山—低山丘陵峡谷地貌区,受地形地貌条件制约,人类工程活动如城乡建设、道路修建等活动频繁,对斜坡进行大挖大填、人工切坡等,人工切坡对斜坡的主要影响为改变斜坡形态,使斜坡坡脚临空面增大,斜坡的应力平衡状态受到破坏,极易变形失稳转化为崩塌或滑坡灾害。如位于 S101 省道沿线小型滑坡群,泾(泾源县)隆(隆德县)公路沿线的崩滑

群,福银高速横穿研究区小关山断裂带,发育许多断裂影响型的滑坡崩塌隐患点。此外,研究区受地形地貌条件制约,丘陵缓坡地段部分和黄土梁茆区为旱作耕地,旱作耕地的种植和开发加剧了水土流失,特别是红层强风化软岩斜坡体,同时使斜坡地表的降水入渗量增大,容易引发斜坡失稳,也为泥石流灾害的发生提供了丰富的物源。在扶贫城乡一体化建设进程中,切坡往往使斜坡中上部坡度较缓、前部较陡,剖面形态多为凸形坡,易发生小型滑坡群。

3 不同类型滑坡的变形机理分析

3.1 红层软岩滑坡

泾河源区广泛分布古近系(E)和白垩系(K)红色、浅红色泥岩、粉砂质泥岩地层,44%的滑坡都发生于该地层中,其根本原因在于古近系红层为半成岩状,成岩性差,强度低,具膨胀性,遇水易软化;而白垩系泥岩、泥灰岩风化破碎,坡脚处在雨水的浸泡软化作用中,滑坡易沿此面发生滑动,表层雨水后崩解产生“剥皮”现象,逐渐使坡体重力卸荷,相对于泥岩来说泥灰岩岩性较硬,成为隔水层,这些为中小型滑坡的形成提供了必要的物质基础;同时地壳强烈抬升,沟谷下切,侧向卸荷作用使岩体强度进一步降低、地震、降雨、冻融等不利因素的影响,最终导致滑坡的形成。该类型滑坡的形成和变形机理可以归纳为:原始地貌→临空面增大→坡体卸荷松弛→岩土强度降低→雨水和地下水的双重作用→岩土强度进一步降低→地震或降雨作用→坡体整体滑移(图2)。此外,李保雄等^[14]认为红层软岩滑坡变形机制与均质体滑坡既有相似性,又有相异性,滑坡一般经历蠕变变形、滑动、失稳剧滑和固结压密4个阶段(图3)。

3.2 断层影响型滑坡

受断层特别是压性断裂影响,造成边坡失稳而形成的基岩滑坡在工程中的接触逐渐增多。压性断层除直接作为控制边坡变形及破坏形式的主控软弱边界,

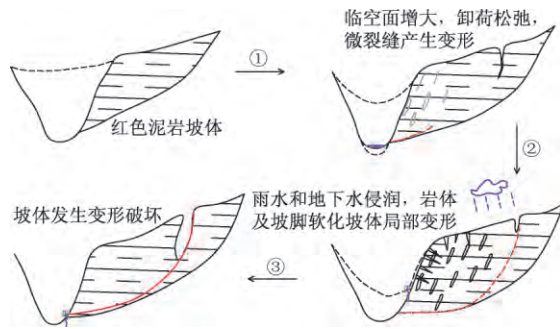


图2 红层软岩滑坡变形破坏过程

Fig. 2 The deformation and failure process of landslide with red bed soft rock



图3 香水镇白马泉红层软岩滑坡变形过程分区

Fig. 3 Zoning map of landslide with red bed soft rock during the deformation and failure process in Xiangshui town

还在其影响带范围内岩体中产生大量的次级结构面,造成岩体力学性质的恶化,降低坡体的稳定性,进而造成边坡的失稳,形成基岩或断层破碎带滑坡,如六盘山镇李家村顿家川滑坡(图4),断层影响型滑坡破坏机理大致分为4个过程(图5)。



图4 六盘山镇顿家川断层影响型滑坡分区图

Fig. 4 landslide zoning map affected by the fault of Dunjiachuan in Liupanshan town

第一阶段: 断层产生,白垩系六盘山群(K_h)粉砂质泥岩,逆冲于古近系清水营组(E_q)泥岩为主的沉积

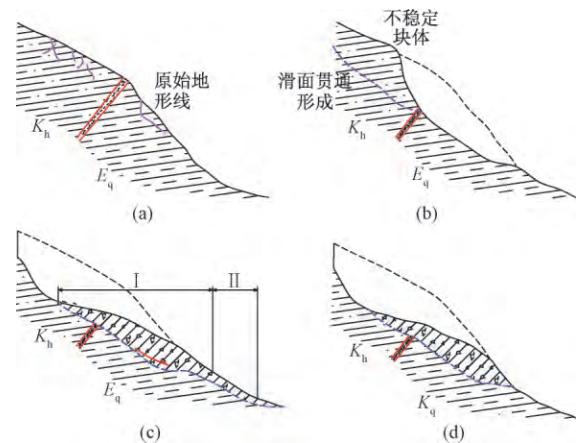


图5 断层影响型滑坡变形破坏过程

Fig. 5 Deformation and failure process of landslide affected by fault

岩之上,导致岩体破碎,易于风化、剥落和滑塌。其中断裂带下盘的断层结构面是最初坡体滑塌的控制结构面,加速了坡体临空高度的增加和断层上盘白垩系地层的出露,即“碎裂效应”。第二阶段: 在山体剥蚀后退过程中,临空面增高,坡体卸荷荷载增大,卸荷裂隙逐渐贯通,不稳定块体形成,其中倾向坡外胶结较差的层面为不稳定块体的形成提供了便利条件。第三阶段: 在地震、暴雨的激发作用下,不稳定块体失稳,滑坡形成,顺坡堆积于坡表,因滑床物质运动机制的差异,使滑床分成 I、II 两部分。第 I 部分,以顺着卸荷裂隙剪切滑动为主,伴有滑距较大,后壁可见擦痕或镜面特征明显;第 II 部分,坡表崩滑堆积层夹杂强风化泥岩以推移式滑动为主,表现为蠕滑变形或局部滑动,滑距小。第四阶段: 在重力、坡面水流、以及冲沟径流的作用下,滑坡体部分物质被冲蚀,逐渐形成现有滑坡微地貌,表现为“碎化冲蚀效应”。

3.3 堆积层滑坡

指发育于斜坡中下部一带第四系松散混杂堆积物之中的滑坡,主要发育于泾河源基岩山调查区河谷或沟谷两侧谷坡地带,以中、小型滑坡为主,主要分为残坡积层滑坡、残坡积层—基岩滑坡。残坡积层滑坡是泾河源区基岩山区分布最为普遍的滑坡类型,其物质源于山区基岩表层广泛堆积了岩体风化、剥蚀、搬运和堆积形成的残坡积松散层;残坡积层—基岩滑坡指由上覆残坡积层与下伏红色或兰灰色软岩组成的斜坡沿层位接触部位发生剪切滑移的滑坡,其中上覆残坡积层包括粉质粘土层、碎石土层等。

堆积层滑坡形成机理上多为山坡或者沟谷类的凸凹斜坡在日积月累的风化及剥离搬运过程中缓变而

来,大都在坡体表面、山脚、坡脚下堆积,形成暂时或永久平衡。滑坡堆积物往往由于重力效应上层砾石含量较少而向下逐渐增多,在相对分界的薄弱地带被降雨下渗和地面人类灌溉下渗透水共同作用形成滑动带,地下水渗透紊流逐渐卸下并带走相对轻的细粒的砂土颗粒而留下较粗的砾石颗粒,滑动面附近的土体组织结构强度被降低,整个滑动面的阻滑力减小,形成滑坡逐渐失稳下滑,即“承轴效应”。此外,人类活动是加剧该类滑坡失稳的一个重要因素,包括工程增负及土地耕种灌溉等,主要因为增大了滑动力或者减小了阻滑力从而导致平衡被打破,破坏滑坡的稳定或者增大其失稳程度(图6)。

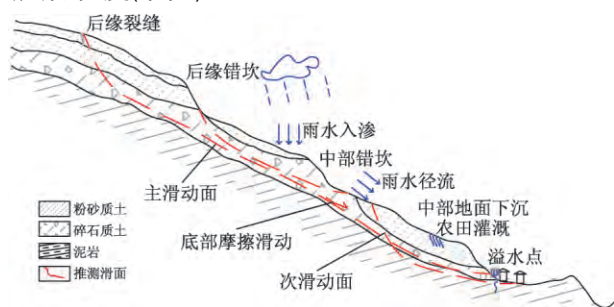


图6 堆积层滑坡变形机理模式

Fig. 6 The deformation mechanism and mode of accumulation landslide

其发育模式按照孕灾背景条件该滑坡形成的过程可分为两种类型:①局部滑塌引发后续大规模滑动;②斜坡因后缘裂缝突然大规模滑动。第一种滑动类型发育过程为原始斜坡上的堆积物在前缘发生局部滑塌并向坡体后缘增生发展(图7),在后期影响因素的加剧作用下引发大规模滑动,此种滑坡多发生在控滑面为土岩接触面的类型中。而第二种类型滑动(图8),斜坡后缘发育即宽且长的变形裂缝,在降雨、震动或开挖坡脚的工程活动扰动下,在某时期发生突然的、快速的、大规模的滑动,该种滑坡发生的滑面有时为土岩接触面,有时为岩石风化差异面。

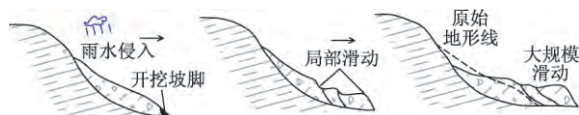


图7 堆积层滑坡局部滑动引发变形破坏模式

Fig. 7 The deformation and failure mode about the local deformation of accumulation landslide

3.4 黄土型滑坡

组成黄土丘陵区斜坡的第四系黄土、古近系、白垩系泥质岩由于岩土体物理力学性质较差,抗剪强度低,

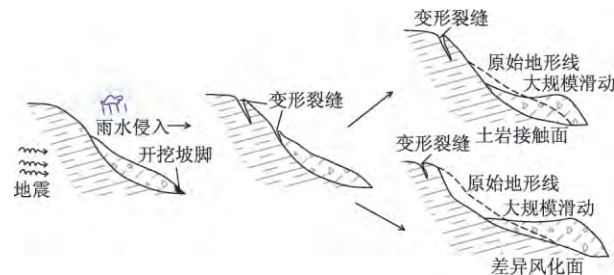


图8 堆积层滑坡裂缝控制下发生突发性变形破坏模式

Fig. 8 The emergent deformation and failure mode under the control of accumulation layer landslide cracks

且水敏感性强,遇水软化,强度进一步降低,均为研究区的主要易滑地层。

地下水作用是黄土基岩滑坡的重要引发因素。斜坡上部黄土的渗透性较好,且垂直渗透系数大于水平渗透系数。同时,黄土中垂直节理和落水洞发育,是大气降水入渗的快捷通道;下部泥岩的渗透性差,为隔水层。此类坡体结构更加有利于大气降水的入渗,连阴雨沿孔隙长期缓慢入渗,暴雨则沿落水洞大量快速“灌入”坡体深部。入渗水体长期储存于黄土层中并不断向下入渗,在黄土—泥岩接触面的低洼部位易汇集形成地下水,并沿接触面向下游渗流,常有泉水出露。入渗水体使黄土底部接触面一带的岩土长期处于过湿软塑—饱和状态,强度软化弱化,成为滑坡发育的有利软弱结构面。雨季随着入渗补给量的增大,地下水位上升,含水软化范围扩大,同时产生一定的孔隙水压力和动水压力,促发滑坡发生,即“泥化剥蚀效应”(图9)。

另外,地震、冻融和人工开挖也可能引发和加剧黄土—泥岩接触面滑坡。研究区内多以发生滑壁小、滑体厚、滑距短、形态多呈矩形状多期次型黄土—泥岩滑坡;而单期次型滑坡一般滑壁大、滑体薄、滑距长、形态多呈舌形状、常堵塞沟道;老滑坡一般后缘落水洞发育,后壁和侧壁明显,中部凸出,有大型落水洞发育,前缘冲刷临空垮塌;新滑坡后壁特征不明显,侧壁明显,前缘临空,滑体坑穴、落水洞发育,坡面冲刷严重。

4 结语

研究归纳六盘山东麓断裂带泾河源区4类滑坡类型,其相应的变形机理各不相同。红层软岩滑坡主要发育在软弱的紫红色泥岩岩组内,变形破坏主要表现为“剥皮效应”;而断层影响型滑坡在区域活动断裂带及相互交织的次级小断裂周边滑坡集中发育,前期的致灾机理主要为“碎裂效应”,而后期则为“碎化冲蚀效应”;堆积层滑坡主要在断层破碎带内,河谷阶地砂

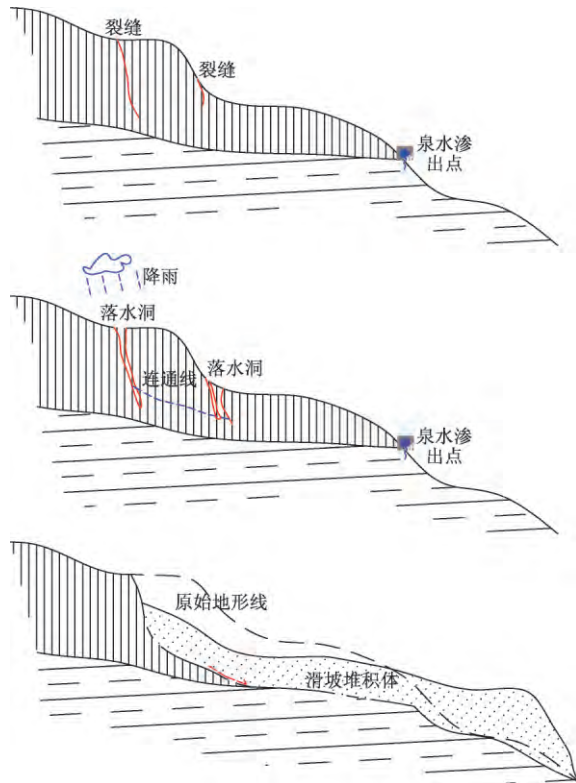


图9 黄土—泥岩接触面滑坡变形破坏机理模式图

Fig. 9 The deformation and failure mechanism of landslide about loess-mudstone contact surface

砾层中及在地貌分区边界或转换地带内集中分布,以“承轴效应”致灾机理为主;黄土型滑坡广泛分布在上覆粉砂质粘土地层区域内,斜坡以“泥化剥蚀效应”产生局部或整体性破坏。

从变形破坏形式讲,在影响泾河源区斜坡稳定性的各种因素中,要么通过改变其应力,要么降低其强度,打破了二者的平衡即发生破坏。改变斜坡应力的因素包括地质构造孕震条件、工程卸载与加载等产生附加荷载的因素;降低强度的因素包括降雨、冻融、地下水渗流等促使地下水位升高的因素,实地调查发现滑坡的形成往往是多因素的耦合效应。

参考文献:

- [1] 宋友桂,方小敏,李吉均,等.晚新生代六盘山隆升过程初探[J].中国科学D辑:地球科学,2001,31(增刊1):142-148. [SONG Y G, FANG X M, LI J J, et al. The preliminary discuss of the uplift process of the Liupan Mountains in late Cenozoic[J]. Science in China (Series D), 2001, 31(Sup 1): 142-148. (in Chinese)]
- [2] 赵秋晨,张绪教,何泽新,等.六盘山东麓泾河上游河流阶地的形成年代及新构造运动意义[J].现代地质,2014,28(6):1202-1212. [ZHAO Q C, ZHANG X J, HE Z X, et al. Age of Upper Jinghe River Terraces at the Eastern Piedmont of Liupanshan and Its Significance for Neotectonic Movement[J]. Geoscience, 2014, 28(6): 1202-1212. (in Chinese)]
- [3] 章贵松,张军,任军峰,等.六盘山弧形冲断体系构造新认识[J].新疆石油地质,2006,27(5):542-544. [ZHANG G S, ZHANG J, REN J F, et al. Approach to Liupanshan Arc Thrust System in Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(5): 542-544. (in Chinese)]
- [4] 邓起东,张培震,冉勇康,等.中国活动构造基本特征[J].中国科学D辑:地球科学,2002,32(12):1020-1030. [DENG Q D, ZHANG P Z, RAN Y K, et al. Basic characteristics of active tectonics of China[J]. Science in China (Series D), 2002, 32(12): 1020-1030. (in Chinese)]
- [5] 向宏发,熊顺民,张秉良,等.六盘山东麓活动逆断裂构造带晚第四纪以来的活动特征[J].地震地质,1998,20(4):34-40. [XIANG H F, GUO S M, ZHANG B L, et al. Active features of the eastern Liupanshan piedmont reverse fault zone since late Quaternary[J]. Seismology and Geology, 1998, 20(4): 34-40. (in Chinese)]
- [6] 向宏发,熊顺民,张秉良,等.六盘山东麓地区活动构造研究[J].国际地震动态,1998(7):24-27. [XIANG H F, GUO S M, ZHANG B L, et al. Research on the active structure of the eastern foot of Liupanshan Mountain[J]. Recent Developments in World Seismology, 1998(7): 24-27. (in Chinese)]
- [7] 向宏发,池田安隆,张晚霞,等.六盘山东麓断裂的古地震研究[J].中国地震,1999,15(1):77-84. [XIANG H F, YASUTAKA IKEDA, ZHANG W X, et al. Study on Paleoeearthquakes of the Eastern Liupanshan Piedmont Fault Zone[J]. Earthquake Research in China, 1999, 15(1): 77-84. (in Chinese)]
- [8] 王高峰,王爱军,田运涛,等.基于图幅调查的六盘山镇孕灾地质条件分析[J].水土保持研究,2016,23(5):1202-1212. [WANG G F, WANG A J, TIAN Y T, et al. Disaster-pregnant Geological Environment Analysis of Liu Pan Shan Town Based on map sheet Survey[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(5): 1202-1212. (in Chinese)]
- [9] 曲永新,张永双,覃祖森.三趾马红土与西北黄土高原滑坡[J].工程地质学报,1999,7(3):257-265.

- [QU Y X, ZHANG Y S, TAN Z M, *et al.* Hipparion laterite and landslide hazards on loess plateau of northwestern China [J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(3): 257 – 265. (in Chinese)]
- [10] 吴玮江, 何琼, 程建祥, 等. 甘肃省东北滑坡发育规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1993, 4(3): 89 – 95. [WU W J, HE Q, CHENG J X, *et al.* The first team of hydrogeology and engineering geology Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993, 4(3): 89 – 95. (in Chinese)]
- [11] 田尤, 杨为民, 刘廷, 等. 天水锻压机床厂滑坡变形破坏机制及形成演化[J]. 地质力学学报, 2015, 21(2): 298 – 308. [TIAN Y, YANG W M, LIU T, *et al.* Deformation mechanism and evolutionary process of the Tianshui forging machine plant landslide in Gansu [J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21(2): 298 – 308. (in Chinese)]
- [12] 文宝萍. 黄土地区典型滑坡预测预报及减灾对策研究[M]. 北京: 地质出版社, 1997. [WEN B P. Research on the forecast and disaster reduction of typical landslides in loess area [M]. Beijing: Geology Press, 1997. (in Chinese)]
- [13] 赵发锁, 胡广韬. 西安白鹿塬边坡破坏规律及防治建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(增刊): 53 – 59. [ZHAO F S, HU G T. Occurrence regularities prevention and control of slope failures of the Bailuyuan Xi'an [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, 5(Sup), 53 – 59. (in Chinese)]
- [14] 李保雄, 苗天德. 红层软岩滑坡运移机制[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2004, 40(3): 95 – 98. [LI B X, MIAO T D. The sliding mechanism of red mudstone layer landslides [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2004, 40(3): 95 – 98. (in Chinese)]
- [15] 陈晓利, 惠红军, 赵永红. 断裂性质与滑坡分布的关系—以汶川地震中的大型滑坡为例[J]. 地震地质, 2014, 36(2): 358 – 367. [CHEN X L, HUI H J, ZHAO Y H. Study on the fault mechanics influences on the landslides distribution: A case study from the Wenchuan earthquake [J]. Seismology and Geology, 2014, 36(2): 358 – 367. (in Chinese)]
- [16] 张福忠. 宁南山区黄土滑坡形成机理探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 11 – 15. [ZHANG F Z. The formation mechanism's research of loess landslides in the mountain area of the Southern Ningxia [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2011, 22(1): 80 – 86 (in Chinese)]
- [17] 蒋树, 文宝萍, 黎志恒, 等. 甘肃舟曲锁儿头滑坡活动特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 69 – 92. [JIANG S, WEN B P, LI Z H, *et al.* An analysis the activity features of the Suoertou landslide in Zhouqu County of Gansu [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(2): 69 – 92. (in Chinese)]
- [18] 李滨, 冯振, 赵瑞欣, 等. 三峡地区“14·9”极端暴雨型滑坡泥石流成灾机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 118 – 127. [LI B, FENG Z, ZHAO R X, *et al.* Mechanism of “14·9” rainstorm triggered landslides and debris-flows in the Three Gorges area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2016, 43(4): 118 – 127. (in Chinese)]
- [19] 代贞伟, 殷跃平, 魏云杰, 等. 三峡库区藕塘滑坡特征、成因及形成机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(6): 145 – 153. [DAI Z W, YIN Y P, WEI Y J, *et al.* Characteristics, origin and formation mechanism of the Outang landslide in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(6): 145 – 153 (in Chinese)]
- [20] 任凯珍, 冒建, 陈国浒. 关于地质灾害孕灾因子权重确定的探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(1): 80 – 86. [REN K Z, MAO J, CHEN G H. A discussion on the weights of the influence factors of geological hazards [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2011, 22(1): 80 – 86. (in Chinese)]
- [21] 刘春玲, 祁生文, 童立强, 等. 喜马拉雅山地区重大滑坡灾害及其与地层岩性的关系研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 669 – 676. [LIE C L, QI S W, TONG L Q, *et al.* Great landslides in Himalaya mountain area and their occurrence with lithology [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 669 – 676. (in Chinese)]
- [22] 盛海洋, 李红旗. 我国滑坡、崩塌的区域特征、成因分析及其防御[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 208 – 210. [SHENG H Y, LI H Q. Distribution of slip and fall in China and reason analysis and study of prevention and control [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 208 – 210. (in Chinese)]