

兰州市九州石峡口滑坡形成机制与稳定性分析

穆 鹏^{1,2}, 董兰凤¹, 吴玮江³

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 武警工程学院, 陕西 西安 710086;
3. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:基于滑坡区地质环境, 通过区域地质调查、大比例尺平面图测绘、滑坡微地貌和变形破坏特征测量、扫描电镜(SEM)分析滑带土微观结构等手段, 对兰州市九州石峡口滑坡的特征和形成机制进行了系统研究。结果表明, 该滑坡具有显著的分级分块滑动特性, 降雨、不合理的人工绿化灌溉及滑坡区高陡的地形是诱发该滑坡复活的主要因素。采用多种极限平衡计算方法并结合滑坡所处的地质环境评价该滑坡在天然、降雨、地震以及降雨和地震耦合作用下的稳定性, 为该滑坡的治理提供理论指导。

关键词: 兰州九州; 滑坡; 稳定性; 降雨; 地震

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2008)04-0332-05

Forming Mechanism and Stability Analysis of Shixiakou Landslide at Jiuzhou, Lanzhou

MU Peng^{1,2}, DONG Lan-feng¹, WU Wei-jiang³

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Engineering College of Armed Police Force, Xi'an 710086, China;

3. Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on geological environment where landslide located, the characteristics and forming mechanism of the Shixiakou landslide at Jiuzhou, Lanzhou, are researched systematically in terms of regional geological investigation, large scale topographical mapping, measurement of micro physiognomy and failure, geophysical survey, soil microtextures in the slipping zone analysis by Scanning Electron Microscope(SEM). The results show that this landslide has the characteristics of remarkable classification and partitioning, the key elements of inducing the landslide to be revivable are rainfall, unreasonable false virescence irrigation and the high and steep topography in the landslide region. The stability of state is evaluated by different limit equilibrium methods, combining geological environment, on effects of natural state, or rainfall, or earthquake, or rainfall and earthquake. The result can take a theoretic guide rule in treatment of the landslide.

Key words: Jiuzhou of Lanzhou; Landslide; Stability; Rainfall; Earthquake

0 前言

2007年9月17日, 兰州市城关区通往九州开发区咽喉要道的石峡口南部山体发生滑坡灾害, 体积约 $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑坡体整体缓慢蠕动下滑, 大量黄土和岩块滑落、堵断罗锅沟主洪道, 并压埋部分

九州大道。由于九州大道是目前九州开发区的唯一出口通道, 滑坡严重影响了交通安全, 给九州开发区的5万居民、100多家单位的正常生活、生产造成了极大的不便。滑坡灾害险情发生后, 虽然采取了一系列的应急工程措施, 但应急工程并不能从根本上

收稿日期: 2008-03-14

作者简介: 穆 鹏(1979-), 男(汉族), 安徽萧县人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事岩土工程研究。

消除滑坡的险情和威胁,在暴雨、地震等外部不利因素的影响和引发作用下,还可能发生整体复活滑动,所以必须实施永久性治理工程。因此,根据滑坡区的地质环境及该滑坡的特征,分析其形成条件及形成机制,通过定性评价方法^[1]和定量计算评价该滑坡在天然、降雨、地震以及降水和地震耦合作用下的稳定状态,为该滑坡永久性治理工程设计提供依据。

1 滑坡区地质环境

1.1 气候

滑坡区气候类型属温带半干旱气候。年平均降雨量 316.7 mm,最大可达 546.7 mm(1978 年)。本区降水年内分配不均,多集中于 7~9 月份,占全年降水量的 60% 以上。年平均蒸发量 1 399 mm。最大冻土层深度 103.00 cm(1967 年 1 月),为季节性冻土,时间由 11 月至翌年的 3 月。滑坡区 2007 年的降雨量较往年普遍偏高,进入 9 月份以来出现近年少见的连阴雨天气,从 9 月 27 日至 10 月 18 日连续降雨量达 87.9 mm。

1.2 地形地貌

该滑坡位于罗锅沟沟谷西侧,所处地段为黄河 V 级高阶地,地势相对较高。总体为西北高,东南低,海拔高程为 1 540~1 700 m,相对高差 100~150 m。由于受后期水流侵蚀切割和人为改造破坏,阶地形态已不明显。现阶面残留部分东西宽 70~150 m,南北长 260 m 左右,其余地段受水流侵蚀切割已失去原有河流阶地地貌的基本形态。

1.3 地层岩性

滑坡区出露地层相对简单,从新到老分别为:全新统滑坡堆积物(Q_4^{del}),主要分布于滑坡体的中部和前缘一带,岩性多为马兰黄土和皋兰群片岩破碎后的重新堆积;上更新统(Q_3^{col})主要为马兰黄土,分布较广泛,披覆于老地层之上;中更新统多埋藏于马兰黄土之下,在沟谷两侧和坡体前缘陡壁下部有零星出露,可分为两期,早期堆积物为冲洪积物(Q_2^{al-pl}),晚期堆积物为风积离石黄土(Q_2^{col});前寒武系皋兰群($An \in gl$)岩性为黑云角闪片岩、黑云绢云片岩和片麻岩、夹薄层石英岩和酸性侵入岩岩脉,主要分布于坡体的下部。

1.4 地质构造与新构造运动

滑坡地处青藏高原与陇西黄土高原交接带附近,并处于马岷山—雾宿山 NWW 向构造带与大黄山—积石山 NNW 向构造带复合部位。大地构造属于祁连山褶皱系中祁连隆起带东段。新构造时期滑

坡区附近以整体间歇性隆升为主要特征,差异活动不甚强烈,无区域性深、大、活动断裂切割。滑坡区附近主要发育有规模不大的金城关断裂及雷坛河断裂,这两条断裂至少在晚更新世晚期以来处于稳定状态。

1.5 地震活动

兰州市抗震设防烈度为Ⅷ度,设计基本地震加速度为 0.20 g。史料记载兰州附近曾发生 4 次 5~6 级地震,最大为 1125 年兰州 7 级地震(震中位置北纬 36.1°,东经 103.7°),对该滑坡区附近可能造成最大地震烈度达Ⅸ度的影响,使“兰州六城城坏,仓库皆没,陷数百家”,同时发生大规模滑坡和地裂缝产生。另外,邻区强烈地震也可波及本区,造成崩塌、滑坡的发生。

2 滑坡特征

2.1 基本特征

滑坡位于石峡口南侧,罗锅沟右岸斜坡中下部的黄山梁上,地形高陡,山体总高度 140 m。滑坡平面上呈扇形,滑坡体长 75 m,后缘宽 25 m,前缘宽 95 m,滑坡前后缘高差近 60 m,主滑方向为 56°。滑坡体上部平均坡度约为 35°,下部平均坡度约 43°。滑坡面积 4 050 m²,平均厚度约 13 m 左右,总体积约为 6.2×10^4 m³。

滑坡后壁及侧界明显呈不规则的圈椅状,长 110 m,顶部一带后壁高 6~7 m,向两侧逐渐降低为 2 m 左右。

剪出口位于前寒武系变质片岩中,低于基岩顶面下 6~8 m,呈波状起伏,位置高于前部的九州大道约 30 m。

滑体物质主要由第四系中更新统的黄土和前寒武系皋兰群变质片岩强风化层组成。按照滑坡体规模和滑坡体的地层岩性,石峡口滑坡属小型黄土-基岩滑坡^[24](图 1、2、3)。

2.2 分级分块滑动特征

石峡口滑坡具有分级分块滑动的特点(图 1)。以与滑坡滑动方向基本垂直的裂缝带为界,主要分为前、后两级滑体。

后级滑体以黄土为主,基本上为整体滑动,是主动滑动部分,推动挤压前部滑体变形滑动,以致在前、后两滑体之间明显的看到有因后部滑体向下推挤并插入下部滑体的现象(图 6(c))。

前级滑体的物质成分为风化基岩和碎石,前缘受基岩面起伏、风化程度和结构面发育情况的影响,

滑动状态和特征又有所差异,分为南、北、中三个滑块,其中南、北两块滑动较为剧烈。南部块体主滑方向70°左右,宽35 m,长50 m,面积1 750 m²;北部滑块主滑方向40°左右,在地形上呈现为陡直的凹槽状,成为后部滑体继续向下滑动的通道,中部滑块因下部基岩相对较为完整具有一定的抗滑作用,故其滑动较弱,前缘除部分岩块崩塌外,大部分滑体还停留在滑床上(图1)。

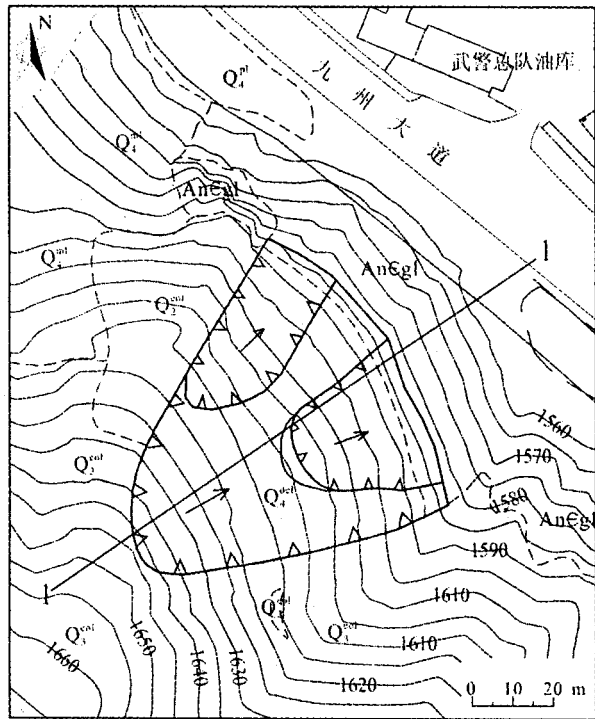


图1 滑坡区工程地质平面图

Fig. 1 Engineering geological map of the landslide.



图2 滑坡后壁特征

Fig. 2 The characteristics of the landslide back.

2.3 滑动面的发育特征

该滑坡的滑动面发育在上部的晚更新统黄土和下部的前寒武系皋兰群中。总体来说,该滑坡的滑动面较陡,后壁一带滑动面的倾角在60°左右,最陡处达62°,向下逐渐变缓,在剪出口一带滑动面较为平直,为15°左右。据探井(T13)揭露,上部滑面有2~3层,受滑体挤压和错动作用,滑面呈光亮面,颜

色较一般黄土的深,呈浅褐黄色,其上擦痕较为清晰,为深度1 mm,宽2 mm的浅细凹凸沟槽。利用扫描电镜(SEM)分析该滑坡上部黄土滑带土的矿物成份,发现矿物发生了一定程度的定向排列(图3、4)。

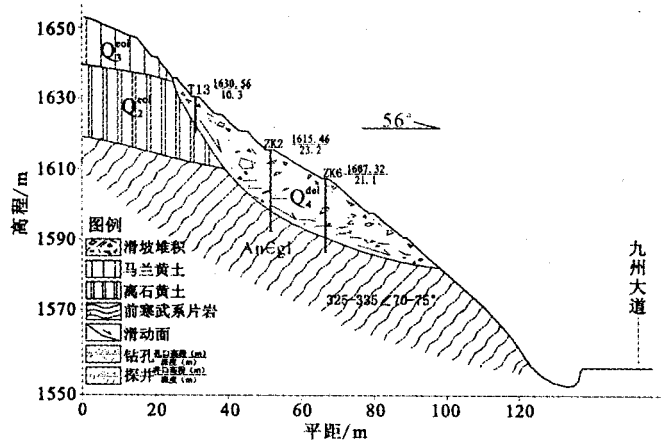


图3 滑坡纵剖面图

Fig. 3 The profile of the landslide.

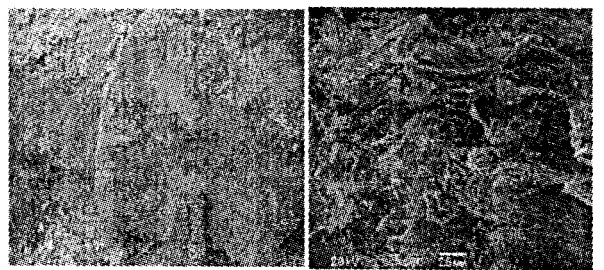


图4 黄土滑面上的矿物定向排列

Fig. 4 The directional distribution of mineral in loess slipping face.

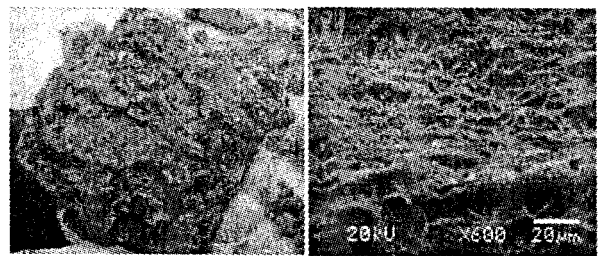


图5 片岩滑面上的矿物定向排列

Fig. 5 The directional distribution of mineral in schist slipping face.

下段滑面发育在前寒武系皋兰群变质片岩上部的强风化层中。据钻孔(ZK2)揭露,滑动面主要发育在强风化层中更为软弱的夹层部位,局部为全风化的土状物(图5)。滑动面近似呈弧形,仅在前缘局部地段受结构面的控制,向下滑动面的倾角在15°~40°之间。由于风化层岩土破碎,土质不均,滑

动面多呈现为一定厚度的带状,利用扫描电镜(SEM)分析,滑带土体也有一定的定向排列(图3.5)。

3 滑坡形成机制

3.1 滑坡形成条件和影响因素分析

(1) 研究表明,合适的坡度和坡高能为滑坡的发育和形成提供必需的势能和物质积累^[5]。九州石峡口南岸山坡地形高陡,山体总高度140 m左右,平均坡度35°左右,上缓下陡;上部坡度约45°,下部60°~70°,局部呈直立或倒坡,总体上坡型呈凸型,是滑坡发育的有利地形条件。

(2) 组成斜坡的岩土体工程地质性质较差,上部黄土疏松,垂直节理和落水洞发育,具有自重湿陷性,强度低,遇水易软化;下部变质岩结构破碎,裂隙发育,风化强烈,强风化层厚度达7~9 m,强度也较低,易失稳滑动。

(3) 降雨是该滑坡滑动的主要诱发因素,暴雨除对滑坡表面土体造成冲刷外,雨水渗入裂隙及潜在滑面,将导致滑面软化,力学性质降低,并可能由于相对隔水层而导致水体滞留形成高动水压力,从而导致滑坡体变形加剧^[6]。2007年,兰州地区降雨较多,特别是滑坡前一天9月16日晚的降水量高达11.3 mm。

(4) 不合理的人为活动对滑坡的发生也有很大影响。据现场调查,石峡口滑坡上部山体上树木较多,是重点绿化区,灌水量较大,可能使灌溉水和管道渗漏水渗入坡体,因此灌溉水和管道渗漏水对本次滑坡的发生也有一定的引发作用。

(5) 滑坡研究区内地质构造复杂,附近发育的几条断裂使滑坡区的前寒武系地层受到一定影响,节理裂隙发育,结构破碎,有利于风化作用向深部的发展和地下水向深部的渗入,使斜坡的稳定性降低,为滑坡的发育提供了有利的地质构造环境。

3.2 滑坡形成机制

滑坡区地形高陡,坡体结构上部为疏松的第四系黄土,下部为风化破碎的前寒武系变质片岩。滑坡后壁一带有老裂缝分布,本次滑坡后缘拉张裂缝是在老裂缝的基础上发生发展而来的。在9月份降雨的影响下,裂缝水位上升,静水压力急剧增加,同时在动水压力的作用下,裂隙水沿层面流动,致使层面附近土的内聚力和内摩擦角减小,后缘裂缝首先拉裂下错(图6(a));前部斜坡上的黄土、强风化基岩受到挤压,分别发生多次小规模滑坡和崩塌

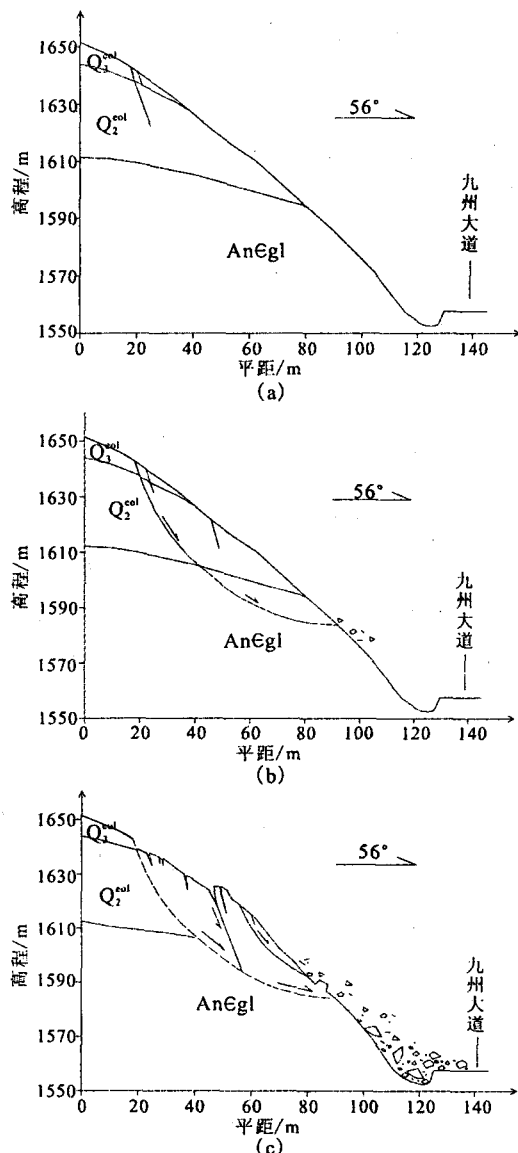


图6 滑坡演化机制图

Fig. 6 Evolution mechanism of the landslide.

(图6(b));后部滑体下错插入了前部滑体,滑动面倾角达45°~62°(图6(c))。根据监测资料反映出的前部滑体整体位移量相对较小,稳定时间早和后部滑体整体位移量相对较大的实际情况,分析得出上部黄土滑坡体是主动部分,是滑坡推力的主要来源。挤压推动了下部滑坡体和部分基岩,下部滑坡体因前缘地形陡峭,临空条件好,受后部挤压推动,边缘部分岩土体不断滑落。前缘中部现存的基岩相对完整,抗滑能力较强,对整个滑体有一定的支挡作用,滑坡的大部分推力已集中在该部位,一旦破坏将有可能使整个滑坡体失稳,产生大规模滑动。

4 滑坡稳定性分析

4.1 滑坡稳定性定性分析

根据钻孔、探井等勘察资料,石峡口滑坡的滑体主要是由风成马兰、离石黄土(粉土)和前寒武系强风化片岩组成,滑动面近似呈圆弧形。滑坡自9月17日发生整体滑动以来,一直处于整体缓慢蠕动滑移和前缘频繁塌落状态。虽然频率和速度在逐渐降低,但由于该滑坡的整体滑动距离仅5~7 m,滑动势能未完全释放,大部分滑体未脱离滑床,加上滑面较陡,前部临空条件好,剪出口高于九州大道30 m左右,由此分析滑坡体的稳定性差,在降雨、地震等外因影响下滑体将可能再次复活滑动。

4.2 滑坡稳定性定量计算

滑坡滑带土力学参数是滑坡稳定性定量评价的重要参数,能否正确选取十分关键^[7]。该滑坡定量计算的有关力学参数是在试验资料的基础上,根据本滑坡的岩土体组成,滑动面上矿物颗粒因挤压发生定向排列的特征,并参考了当地有关黄土抗剪强度经验值,再以该滑坡目前还处于活动状态的实际情况运用参数反分析法^[8,9],最后综合确定的。目前,降雨条件下的滑坡稳定性计算方法还不成熟,在参数的选取时结合黄土的增湿试验,将上部黄土的重度适当增加,并降低滑带土的 C 、 φ 值。不同岩性的滑面上稳定性计算所选用的参数见表1。

表1 滑坡稳定性计算参数表

岩土层	重度 $\gamma/[\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}]$	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	备注
黄土	15.5	5	25	
强风化片岩	26.1	10	26	
黄土	15.9	4.6	22	降雨条件
强风化片岩	26.1	8.0	24	降雨条件

在天然条件、降雨条件(强度按日降雨量50 mm计算)、地震条件(抗震设防烈度为Ⅷ度,设计基本地震加速度为0.20 g)、降雨和地震耦合作用这四种工况下,利用简化 Bishop 法(B)、Morgenstern - price 法(M)、简化 Janbu 法(J)和不平衡推力法(U)进行定量计算。计算结果(表2)表明,天然状态下该滑坡处于暂时稳定状态,但稳定系数很低;在暴雨条件、地震条件、降雨和地震耦合作用下滑坡将整体复活滑动。

表2 滑坡稳定性计算结果

状态	不同方法计算的 F_s			
	B	M	J	U
天然	1.068	1.079	1.022	1.049
降雨	0.977	0.986	0.933	0.956
地震	0.951	0.959	0.927	0.945
降雨和地震耦合作用	0.886	0.897	0.857	0.873

5 结论

(1) 石峡口滑坡平面上呈不规则的扇形,总体积约 $6.2\times 10^4\text{ m}^3$,主滑方向 56° ;滑坡前缘剪出口位于变质片岩的强风化层中,滑体由第四系中上更新统马兰黄土、离石黄土和前寒武系皋兰群变质片岩的强风化层组成,属小型黄土-基岩滑坡。

(2) 该滑坡有分级分块滑动的特点,主要分为前、后两级滑体。前级滑体又分为南、北、中三个滑块。后级滑体为整体滑动,是主动滑动部分,推动挤压前部滑体变形滑动,后级滑体下错插入了前级滑体。

(3) 降雨、不合理的人工绿化灌溉及滑坡区高陡的地形是诱发该滑坡复活的主要因素。

(4) 滑坡的大量滑体还滞留在较陡的滑动面上,滑动势能高,临空条件好,稳定性差。经稳定性计算,在降雨、地震等因素的影响下,将会发生整体复活滑动。

[参考文献]

[1] 王恭先,徐峻龄,刘光代. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社,2004.

[2] 吴玮江,王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.

[3] 吴玮江,王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报,2002,13(2): 36-40.

[4] 刘红玫,石玉成. 黄土地区不同类型滑坡的特征及影响因素[J]. 西北地震学报,2006,28(4): 360-363.

[5] 唐永仪. 新构造运动在陇南滑坡泥石流形成中的作用[J]. 兰州大学学报(自然科学版),1992,23(4): 153-156.

[6] 肖学沛,李天斌,张志龙. 三峡水库区严家坡滑坡成因分析及稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,16(1): 39-43.

[7] 郑明新. 论滑带土强度特征及强度参数的反算法[J]. 岩土力学,2003,24(4): 528-532.

[8] Sonmez H, Ulusay R, Gokceoglu C. A practical procedure for the back analysis of slope failures in closely jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(2): 219-233.

[9] Deng J H, Lee C F. Displacement back analysis for a steep slope at the Three Gorges Project site[J]. International Journal of Rock-Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(2): 259-268.