2009 年兰州市九州石峡口滑坡成因 及其西侧高边坡稳定性研究

穆 鹏^{1,2},吴玮江³,杨 涛³

(1.长安大学公路学院,陕西西安 710064; 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:2009年5月16日兰州市九州石峡口小区西侧山体发生滑坡灾害,造成重大生命和财产损 失。本文对石峡口滑坡的特征和成因进行了系统研究,认为滑坡区高陡的地形、不合理的绿化灌溉 和不良的岩土体工程地质性质是诱发该滑坡的主要因素。在分析石峡口滑坡成因的基础上对与该 滑坡相邻的西侧高边坡进行了稳定性研究,采用有限元强度折减法计算出潜在滑面的位置和稳定 系数,并和极限平衡法计算结果做比较,结果表明有限元强度折减法与传统极限平衡法计算的稳定 性系数很接近,增强了计算结果的可靠性。

关键词:兰州;石峡口滑坡;成因;稳定性;有限元强度折减法;极限平衡法 中图分类号:P642.22 文献标识码:A 文章编号:1000-0844(2010)04-0343-06

Study on the Forming Cause of Shixiakou Landslide at Jiuzhou, Lanzhou City, in 2009 and Stability of Its Western Neighbouring High Slope

MU Peng^{1,2}, WU Wei-jiang³, SHE Xue-sen¹, YANG Tao³

(1. School of Highway; Chang'an University, Xian 710064, 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: A landslide disaster happened at the hill west to Shixiakou district in Jiuzhou, Lanzhou city, on May 16, 2009, which caused great life and property lose. A systematic research on the characteristics and forming cause of Shixiakou landslide is achieved in this paper. It is considered that the key factors of the landslide are unreasonable false virescence irrigation, the high and steep topography in landslides region, and poor rock and soil mass engineering geological properties. Based on the cause analysis of Shixiakou landslide, research on Stability of its western neighbouring high slope is done. The safety coefficient and the potential failure surface are evaluated by strength reduction FEM. As a comparison, limit equilibrium method is executed. The calculation results show that the safety factor calculated by the strength reduction FEM is fairly close to the that calculated by the traditional limit equilibrium method , which ensured the reliability of the result.

Key words: Lanzhou; Shixiakou landslide; Forming cause; Stability; Strength reduction FEM; Limit equilibrium method

0 引言

2009年5月16日21时05分左右,兰州市九

收稿日期:2009-07-23

基金项目:武警工程学院基础研究基金(WJY201038);甘肃省科学院项目(2008YS-JK-16);交通运输部行业联合科技攻关项目 (2008353361420)

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

州石峡口小区西侧山体发生滑坡灾害,体积约2.0 ×10⁴ m³ 的滑坡体整体快速下滑,摧毁了石峡口小 区 4 号楼 5、6 两个单元 30 户居民的住房和锅炉房。 该滑坡造成7人死亡、1人受伤,堵塞罗锅沟洪道约 60 m,并压埋部分九州大道。该事件引起了党中 央、省、市各级政府和社会各界的极大关注。由于该 滑坡主滑体的滑动能量释放较彻底,并且滑坡灾害 发生后采取了削坡减载、临时支挡等一系列的工程 措施,故其稳定程度较高。但与"5·16"滑坡相邻的 西侧高边坡与该滑坡地质结构相似,并且该高边坡 西侧相邻山体在 2007 年 9 月 17 日也发生过大规模 滑动,故该高边坡对九州大道交通安全的潜在威胁 非常大。因此在分析"5·16"滑坡成因基础上,采用 工程地质分析法、有限元(FEM)强度折减法和极限 平衡法,定性与定量相结合的对其西侧高边坡稳定 性进行评价,为下一步该区的综合治理提供理论指 导。

1 滑坡区地质环境

该滑坡所处地段为黄河 V 级高阶地地区,地势 相对较高,总体为西北高,东南低,海拔高程为1540 ~1700 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。

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^{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^{sel})主要为马兰黄土,分 布较广泛,披覆于老地层之上;中更新统,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^{al-pl}),晚期堆积物为风积离 石黄土(Q^{eel});前寒武系皋兰群(An < 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。

构造上滑坡地处青藏高原与陇西黄土高原交接 带附近,并处于马御山一雾宿山 NWW 向构造带与 大黄山一积石山 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。

兰州市抗震设防烈度为 11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 3 6 . 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。

滑坡区地下水主要有松散岩类孔隙水和基岩裂 隙水两种类型。松散岩类孔隙水赋存于更新统黄土 和碎石层中,受补给条件、赋存条件及排泄条件控 制,地下水量贫乏;基岩裂隙水主要赋存于皋兰群变 质岩的风化裂隙和构造裂隙中,补给来源于大气降 水和绿化灌溉水的入渗。

2 滑坡发生过程及滑坡特征

2.1 滑坡发生过程

据对现场目击者杨开义老人的访问,2009年5 月16日19时许,他发现自己居住的楼侧面不断有 土石坠落,于是上山去察看情况,发现山顶出现20 ~30 cm 宽的裂缝,急忙通知山下的住户;19时40 分许,石块和黄土不断地涌向山下石峡口小区,数量 和规模都较四十分钟前有所增大,此时绝大部分住 户都已撤离;21时05分左右山体整体下滑,土体剧 烈倾泻到山下的石峡口小区,轰隆的巨响声伴随着 尘土弥漫,在几秒钟内滑坡就摧毁了石峡口小区4 号楼5、6两个单元(图1、2)。



图 1 石峡口滑坡滑前全貌 Fig. 1 Scope of Shixiakou landslide before sliding.

2.2 滑坡特征

滑坡位于九州石峡口小区西侧山体上,平面上 呈不规则的哑铃形(图 2、3、5),滑坡体长 160 m,后 缘宽 50 m,前缘宽 60 m,滑坡前后缘高差近 60 m,



图 2 石峡口滑坡滑后全貌 Fig. 2 Scope of Shixiakou landslide after sliding.

主滑方向为 27°。滑坡体上部平均坡度约为 40°,下 部平均坡度约 30°。滑坡面积约 7 500 m²,平均厚度 约 4 m 左右,总体积约为 3.2×10⁴ m³,主体剧烈滑 动部分约 2.0×10⁴ m³。



Fig. 3 Engineering geological map of the landslide area.

滑坡后壁呈典型圈椅状(图 2、3),由马兰黄土 和冲洪积黄土(夹砾卵石)组成,长约 50 m,高 15~ 20 m,坡度 62°左右,较平直光滑,擦痕明显,土体含 水量高。 滑坡剪出口位于黄土底部和皋兰群强风化片岩 顶部,高程1590 m 左右,高出石峡口小区地面约40 m。剪出口以上的滑动区长约60 m,宽50 m,坡度 约40°,由黄土组成。由于滑体重心和剪出口高,临 空条件好,滑动势能大,导致该滑坡的滑动速度快, 破坏力强。

该滑坡的滑动面发育在上部的晚更新统黄土 中。总体来说,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。受滑体挤压和错动作 用,滑面呈光亮面,顔色较一般黄土的深,呈浅褐黄 色,其上擦痕较为清晰。

滑体主要由第四系风积和冲洪积黄土组成,前 缘部位挤压铲动了少量的下部前寒武系皋兰群片岩 强风化层。按照滑坡体积规模和滑坡体的地层岩 性,石峡口"5 • 16"滑坡属小型黄土滑坡^[1-3](图 2, 3,4)。



图 4 滑坡纵剖面图(1-1) Fig. 4 The profile (1-1) of the landslide.

3 滑坡成因分析

滑坡的发生是多方面因素综合影响的结果,既 有内在原因也有外在因素作用^[4]。石峡口滑坡形成 的内在因素有斜坡地形地貌、组成斜坡的岩土体工 程地质性质、地质构造;外因归纳起来主要是水的作 用和人类工程活动。

3.1 内因

(1)地形地貌条件。研究表明,合适的地形坡 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]。石峡口小区西南侧山体地形高陡,山 体总高度 100 m 左右,平均坡度 35°左右,上陡下 缓,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。坡

体上部黄土疏松,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 5~8 m,强度 也较低,易失稳滑动。

(3)构造条件。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 外因

(1)水是滑坡的重要触发因素,故有"无水不 滑"之说。5月26日,在滑体剪出口以上地段布置 的3个钻孔中均发现,滑体下部黄土滑体的含水量 高达20%左右,处于过湿一饱和状态,远高于兰州 地区斜坡地带黄土10%左右的自然含水量。滑坡 发生后第二天看到滑坡壁下部土体非常潮湿,此后 的几天内因蒸发而干燥,滑壁上潮湿处形成白色盐 斑。据现场调查,滑坡上部山体上树木较多,是重点 绿化区,灌水量较大,滑坡壁后部近滑壁处分布有4 处直径0.4~0.8 m的落水洞,坡面上长期绿化灌 溉水和近期的降水沿落水洞和黄土的垂直结理渗入 斜坡体深部,水的大量入渗增加了坡体物质的容重, 使得斜坡土体含水量增高,强度降低。

(2)人类工程活动也是影响滑坡的重要因素。 如工程建设过程中由于不适当过量开挖坡脚,造成 斜坡失稳。据原1:1万地形图资料和当地人介绍, 该滑坡区下部山体原为一凸出的基岩山嘴,20世纪 90年代以来的工程建设活动中将此山嘴削除,削弱 了斜坡前缘支撑作用,降低了斜坡的稳定性。

4 西侧高边坡稳定性研究

"5 • 16"滑坡相邻的西侧高边坡与该滑坡地质 结构相似,并且该边坡西侧山体在 2007 年 9 月 17 日也发生过大规模滑动^[6](图 3、5),对九州大道的 交通安全、电力线路和输气管道存在的潜在威胁非 常严重。因此必须对该高边坡进行稳定性分析,为 下一步该区的综合治理提供理论指导。

4.1 高边坡稳定性定性分析

边坡地形高陡,顶部高程为1688 m,底部九州 大道高程1550 m,高差138 m,平均坡度约为40°。 由于两侧山体都发生了滑坡,故其三面临空,降低了 坡体的整体稳定性。

边坡的坡体结构也是上部披覆着厚层的第四系



图 5 西侧高边坡全貌 Fig. 5 Scope of the western high slope

中上更新统黄土,马兰黄土厚约 20 m,离石黄土厚 约 40 m;下部为前寒武系变质片岩,强风化层厚 5~ 8 m,基岩顶面呈波状,总体倾向坡外,倾角 10°~ 15°,出露高程为1 585~1 610 m之间(图 6)。斜坡 区 1 590~1 640 m高程斜坡地带的黄土中垂直落 水洞和顺坡面的水平向落水洞十分发育,且相互贯 通,是影响边坡稳定性的重大隐患,由于落水洞的发 育,使冲沟两侧的斜坡由于下部空虚,支撑力弱而发 生局部小的滑塌和变形,产生裂缝。在斜坡上部重 点绿化的地段因灌水量较大,形成了多处短浅的裂 缝,这都有利于各种水体的入渗,使边坡的稳定性降 低。



此外,高边坡东侧发生了"5•16"滑坡,西侧 2007年9月17日也发生过大规模的滑动,该边坡 与这两个滑坡的坡体结构相似,而且高度更大。采 用工程地质类比法,并综上所述,可以定性的判断该 第4期

边坡的稳定性很差。

4.2 高边坡稳定性定量评价

4.2.1 有限元强度折减法的基本原理

随着计算机技术及岩土材料的非线性弹塑性有 限元计算技术的发展,有限元强度折减法近年来受 到国内外岩土工程界的青睐,取得了较好的成果,并 证实了该法应用于工程实践中的可行性。所谓边坡 稳定分析的有限元强度折减法,就是在理想弹塑性 有限元计算中将边坡岩土体抗剪强度参数逐渐降低 直到其达到破坏状态为止,程序可以自动根据弹塑 性计算结果得到潜在滑动面(塑性应变和位移突变 的地带),同时得到边坡的强度储备安全系数 $f^{[7]}$, 将有限元应用于边坡的稳定分析,为边坡稳定开辟 了一条新的途径。该法认为:滑动面塑性区贯通是 岩土体破坏的必要条件,但不是充分条件,岩土体破 坏的标志应该是部分土体出现无限移动,此时滑移 面上的应变或者位移出现突变,这种突变同时会引 起有限元计算的不收敛现象。因而,采用有限元数 值计算是否收敛作为土体破坏的依据是合适的[8]。 4.2.2 有限元模型的建立

本次计算选取 2-2 剖面作为计算模型。合理

的计算网格是保证有限元计算能够顺利和强度折减 法精度的必备因素,本文在计算分析过程中采用平 面应变问题来处理,有限元网格划分后生成的结点 总数为4053个,六结点三角形平面应变元有800 个(图7)。计算模型所采用的边界条件为:设定模 型的上部为自由边界,左右两侧为水平约束,底面边 界采用固定约束。此外,计算中考虑由自重应力引 起的初始地应力。



图 7 高边坡有限元划分网格 Fig. 7 The FEM grid of the high slope.

4.2.3 计算参数与计算工况

该边坡有限元计算的有关力学参数是在试验资 料的基础上,并参考了当地有关黄土抗剪强度经验 值综合确定的。此外,将前寒武系片岩按风化程度 不同分为强风化和微风化两层。目前,降雨条件下 的边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, 并降低岩土体的 C、φ 值。计算模型岩土体的物理 力学参数见表 1,采用莫尔一库仑等面积圆屈服准 则计算。

选则模型计算的工况为天然工况、降雨工况(强 度按日降雨量 50 mm 计算)和地震工况(抗震设防 烈度为 m度,设计基本地震加速度为 0.20 g)。本文 仅图示天然工况下的数值计算。

表1 计算模型岩土体物理力学参数

岩土层	重度γ [kN・m³]	内聚力 C/kPa	内摩擦角 <i>φ</i> /°	弹性模量 E/MPa
马兰黄土	14.4(15.0)	15(10)	28(25)	170(150)
离石黄土	15.5(16.0)	25(20)	30(28)	220(210)
强风化片岩	26.1(26.5)	110(105)	33(32)	350(345)
微风化片岩	26.9	800	38	1100

注:括号内数值为降水条件下采用值

4.2.4 有限元强度折减法计算结果

根据上述边坡的计算模型和各类岩土体力学参数,通过数值模拟获得了研究区的应力应变图和边 坡塑性剪应变破坏区随强度折减系数 F 的变化情况。据此推断出潜在滑面,包括一个深层潜在滑面 和一个浅层潜在滑面(图 8、9)。通过有限元强度折 减法计算,天然条件下深层潜在滑面破坏模式,当折 减系数为 1. 117 时,边坡处于临界破坏状态,当折 减系数为 1. 125 时,有限元程序计算不再收敛,由 此确定边坡的稳定系数为 1.117。

为将有限元强度折减法计算结果与极限平衡法 计算结果进行对比,建立极限平衡计算模型(图 10)。有限元强度折减法(Y)计算结果和极限平衡 法(利用简化 Bishop 法(B)、Morgenstern-price 法 (M)、规范方法(G))计算结果对比如表 2、表 3 所 示。从表 2、表 3 可知,天然工况下边坡深层潜在滑 面破坏模式的稳定系数在 1.103~1.117 之间,浅层 滑面稳定系数在 1.081~1.102 之间,稳定系数都比 较低,说明该边坡稳定性较差。当在降雨和地震工 况下,其稳定系数分别为 0.971~1.065 和 0.961~ 1.012 之间,该边坡将有可能失稳滑动。此外,有限 元强度折减法与极限平衡法计算得出的稳定系数很 接近,但有限元强度折减法计算值略大。究其原因,



图 8 最大主应力云图

Fig. 8 The nephogram of maximum principal stress.



图 9 剪应变云图(F=1.117)

Fig. 9 The nephogram of shear strain (F=1, 117).

笔者认为是有限元强度折减法更好地发挥了岩土体 的弹塑性变形所致,其结果更能符合实际情况,也更 趋于合理。

表 2	不同计算方法	下的稳定系数	(潜在深层滑面)
-----	--------	--------	----------

工况	—————————————————————————————————————			
	Y	В	М	G
天然	1.117	1.103	1,098	1.11
降雨	1.065	1.03	1.01	1.05
地震	1.01	0.985	0.971	0.995

表 3 不同计算方法下的稳定系数(潜在浅层滑面)

工况	不同方法计算的 Fs			
	Y	В	М	G
天然	1.102	1.089	1.081	1.094
降雨	1.012	0.988	0.973	0.995
地震	0.997	0.970	0.961	0.980

5 结论

(1) 兰州"5·16"石峡口滑坡平面上呈不规则



学 报

Fig. 10 Model of limit equilibrium method.

的哑铃形,总体积约 3.0×104 m³,主滑方向 27°;滑 坡前缘剪出口位于黄土底部和强风化片岩顶部,高 出石峡口小区地面约 40 m, 滑动势能大, 导致该滑 坡的滑动速度快,破坏力强。滑体主要由第四系风 积和冲洪积黄土组成,属小型黄土滑坡。

(2) 滑坡区高陡的地形、不合理的绿化灌溉和 不良的岩土体工程地质性质是诱发"5·16"滑坡的 主要因素。

(3) 本文利用有限元强度折减法和极限平衡法 来计算分析西侧高边坡稳定性,计算结果显示边坡 在天然状态深层潜在滑面破坏模式下稳定系数在 1.103~1.17 之间,浅层滑面稳定系数在 1.081~ 1.102之间,达不到规范要求,稳定性很差。为保证 九州大道交通安全,必须要对该边坡进行治理。将 两种方法计算结果相比较,表明有限元强度折减法 与传统极限平衡法计算的稳定性系数很接近,增强 了计算结果的可靠性。

「参考文献]

- [1] 吴玮江,王念秦.甘肃滑坡灾害[M].兰州:兰州大学出版社, 2006.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 杨海平,王金生.长江三峡工程库区千将坪滑坡地质特征及成 因分析[J]. 工程地质学报,2009,17(2):233-239.
- [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] 穆鹏,董兰凤,吴玮江.兰州市九州石峡口滑坡形成机制与稳定 性分析[J]. 西北地震学报,2008,30(4):332-336.
- [7] DUNCAN J M. State of the art: Limit equilibrium and finite -element analysis of slope[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122(7): 577-596.
- [8] UGAI K. A method of calculation of total factor of safety of slopes by elastic-plastic FEM[J]. Soils and Foundations, 1989, 29(2):190-195.