

天水市水眼寨滑坡特征及稳定性分析^①

钟秀梅^{1,2}, 王 谦^{1,2}, 张国信³, 袁中夏⁴, 车高凤^{1,2}, 侯鹏博⁵

(1. 甘肃省地震局(中国地震局黄土地震工程重点实验室), 甘肃 兰州 730000;
2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000;
4. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050; 5. 甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:在对天水市水眼寨滑坡进行地质勘察和现场调查的基础上, 结合区域环境研究滑坡的主要特征, 分析地形条件、地层岩性、地质构造、地震、降水和人类活动对滑坡的影响, 并利用 GeoStudio 计算软件, 运用多种稳定性评价方法对滑坡静力和不同地震强度作用下的动力稳定性进行计算分析。结果表明, 水眼寨滑坡属于黄土—泥岩滑坡, 经过多期滑动, 滑坡物质和滑坡体具有显著地平面分区性和剖面分层性, 地层岩性和地质构造运动是其形成的主要内因, 降水和地震是影响其稳定性重要外因。滑坡目前处于稳定状态, 但未来环境变化会导致该滑坡稳定性降低, 在Ⅶ度地震作用影响下该滑坡处于极限平衡状态, 在Ⅶ度强以上地震作用影响下($>0.15g$), 该滑坡稳定性大为降低, 存在复活的可能性。

关键词: 天水市水眼寨; 滑坡特征; 地震作用; 稳定性

中图分类号: TU413.6⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0887-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0887

Characteristics and Stability Analysis of Shuiyanzhai Landslide in Tianshui City

ZHONG Xiu-mei^{1,2}, WANG Qian^{1,2}, ZHANG Guo-xin³,
YUAN Zhong-xia⁴, CHE Gao-feng^{1,2}, HOU Peng-bo⁵

(1. Earthquake Administration of Gansu Province (Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA),
Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;
3. Geological Hazard Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

4. Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 5. Gansu Electric Design Institute, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: On the basis of the geologic investigation and field survey, this paper studied the main characteristics of the 2013 Shuiyanzhai landslide; analyzed the influence of terrain conditions, formation lithology, geologic structure, earthquake, rainfall, and human activities on the landslide; and calculated the dynamic landslide stability of the analyzed formation under the simulated action of static forces and different earthquake intensities using GeoStudio software and a variety of stability evaluation methods. The results showed that the landslide originated in a giant loess of mudstone tractive type. Landslide material and landslide mass have significant regionalization in the plane and stratification in profile. Stratum lithology and tectonic movement are the main internal causes, whereas rainfall and earthquake are important external causes. The landslide area is currently in a steady state, but the stability can be reduced and even reactivated by environmental change in the future. The landslide is in a limited equilibrium state under a Ⅶ degree seismic ac-

① 收稿日期: 2014-09-15

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH12046); 甘肃地震局科技发展基金项目(2012S01)

作者简介: 钟秀梅(1981—), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事地震岩土灾害方面的研究. E-mail: xmzhong26@163.com

tion. Failures occurred in the region when horizontal peak ground accelerations (PGA) reached greater than 0.15 g.

Key words: Shuiyanzhai of Tianshui City; characteristics of landscape; seismic action; stability

0 引言

水眼寨滑坡位于甘肃省天水市麦积区花牛镇二十里铺乡水眼村,是G310天北高速公路沿线的大型滑坡之一。地质环境复杂,滑坡规模大,历史上曾多次活动。滑坡下方有靳庄村、吴庄村、峡口村和刘家庄约3 000人,滑坡南1 500 m处为天水机场。随着工程建设和人类活动的增加以及未来可能的地震活动,使当前暂时处于稳定状态的滑坡可能再次复活、滑动并造成灾害,对机场、公路的正常运行及附近居民的生命财产安全带来巨大的威胁^[1]。因此有必要预测其在未来条件下的稳定状态及发展趋势。基于此,本文根据该滑坡的发育特征以及滑坡区地质环境,分析其形成条件和影响因素,建立数值分析模型进行模拟计算,评价其动力稳定性,为工程布局和设计提供参考依据。

1 滑坡体基本特征

1.1 工程地质环境

滑坡区位于陇西黄土高原东南部,渭河及其支流藉河河谷地带,属于祁连—北秦岭造山带的接合部位^[2]。第四系以来间歇性升降运动频繁而剧烈,形成河谷阶地不对称性和各级阶地间的高差悬殊,上升幅度北岸明显大于南岸。全新世以来河谷地带处于相对下降阶段,普遍接受沉积,下降幅度东部大于西部。受祁连—北秦岭造山带的影响,区内构造应力场强度大,构造应力集中,四周褶皱、活动断裂叠加交错,活动频繁^[3]。新构造运动以断裂和断块活动为基本特征。受河流、沟谷中水体的垂向及侧向侵蚀,区内山高坡陡,沟壑纵横。

近2 000年以来,研究区及外围地区共发生的有记载的地震129次,其中1556年陕西华县8级地震、1654年天水8.0级地震、1718年通渭7.5级地震、1879年武都7.5级地震和1920年海原8.5级地震对区内影响最大,造成惨重的地质灾害。根据抗震设计规范,该区地震基本烈度为Ⅷ度,设计地震动加速度峰值为0.30 g。

1.2 基本特征

水眼寨滑坡为一老滑坡,滑坡后部由于滑坡错断了黄土类土孔隙潜水含水层,致使潜水沿黄土层与基岩接触面出露地表,水眼寨由此泉而得名。

滑坡位于黄土梁状山地。斜坡的基底岩层为新近系泥岩,含水量较大;上部覆盖约150 m厚的黄土层,土质疏松,大孔隙,具强湿陷性;黄土层底部有一层厚度约24 m的河流相卵石层,属残存高阶地的一部分。滑坡为黄土—泥岩滑坡,平面形态呈“簸箕”状,滑坡后壁由四个小滑坡体组成,滑坡平均坡度 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$,后壁坡度 $58^{\circ}\sim 66^{\circ}$,局部处于直立状态。滑体长约1 600 m,平均宽度1 150 m,滑坡残体土方量达 $4.0\times 10^7\text{ m}^3$ 以上(图1)。滑坡群的后缘发育两条弧形拉张裂缝,裂缝走向 $275^{\circ}\sim 285^{\circ}$,长度230~700 m,宽度10~30 cm,距离滑坡群后壁90~220 m。沿两条拉张裂缝发育方向有许多集水洼地和落水洞,为地表水的入渗透提供了有利条件,加快了斜坡变形速度。



图1 水眼寨滑坡远景

Fig.1 Panorama of the Shuiyanzhai Landslide

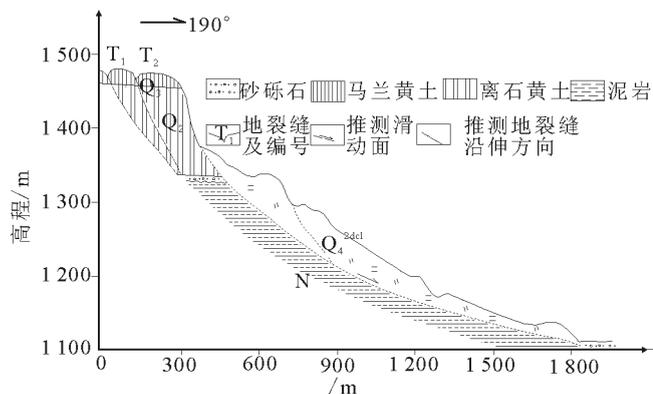


图2 水眼寨滑坡纵剖面地质图

Fig.2 Longitudinal profile of the Shuiyanzhai Landslide

1.3 滑体物质

滑坡体的物质组成为黄土、杂色泥岩,从坡顶往

下依次是马兰黄土、离石黄土和泥岩(图 2)。通过室内试验,各层基本物理力学参数见表 1。

表 1 计算参数表

Table 1 Calculation Parameters

	密度/(g·cm ⁻³)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
新近堆积黄土(Q ₁)	1.54	56	18
马兰黄土(Q ₃)	1.64	65	22
离石黄土(Q ₂)	1.82	107	32
泥岩	1.95	125	15

晚更新世马兰黄土(Q_{3^{col}}):风成黄土,厚约 20 m,颜色从浅黄到褐黄色,质地均一,具有大孔隙和强湿陷性。天然容重 1.72 g/cm³,天然含水率 17%。

中更新世离石黄土(Q_{2^{col}}):风成黄土,厚约 130 m,位于马兰黄土之下,节理发育,中间夹杂数层棕红色古土壤及钙质结核透镜体。天然容重 1.90 g/cm³,天然含水率 19%。

新近系泥岩(N):红褐色、灰绿色互层,间夹数层灰绿—灰白色砂质泥岩,质地致密,较坚硬,半成岩状,节理裂隙发育,天然容重 2.10 g/cm³。该层在区内分布广泛,厚度大,属于断陷湖盆沉积,其顶部普遍有一层 1 m 左右的风化壳,多呈土状,遇水软化厚强度降低,成为上伏黄土滑动带物质。

2 滑坡影响因素

(1) 地形条件

地形地貌是导致滑坡形成的重要条件^[4-5]。区内大部分为新近系泥岩、砂岩为基底的黄土丘陵,沟壑发育密集,形成高陡的斜坡,其中坡度在 25° 以上的约占 50%,相对高差多为 140~330 m,为滑坡的发生创造了有利的地形条件。

(2) 地层岩性条件

黄土的物质组成以粉粒为主,泥岩以黏粒为主,粉粒和黏粒的矿物成分都以黏土矿物为主。黄土的结构以单粒为主,泥岩则属片状密集排列。这种特殊的物质组成和结构具有比表面积大、活性大、亲水性较强等特性,使其工程性质多变,在浸水或外力作用下易产生膨胀和岩层面错动位移。因此区内特殊的岩土体结构为滑坡的形成提供了有利的岩性条件^[6]。

黄土湿陷性强^[7],遇水易崩解,产生落水洞、地裂缝等,有利于雨水渗透使其结构破坏;再者,黄土垂直节理发育,易形成陡坡而具备良好的临空面,可促使滑坡形成。新近系泥岩虽具较强隔水性,干燥

的时候强度较高,但遇水软化后强度迅速下降,膨胀软化,形成软弱面和软弱带,易导致上部坡体失稳。

(3) 地质构造条件

大地构造控制地貌格局和地层岩性,是地质灾害发生、发展最主要的控制因素。天水市坐落于祁连—北秦岭造山带的接合部位,经历多次构造运动,使坚硬完整的岩石支离破碎,各种结构面发育,为滑坡的产生提供了有利条件。

(4) 新构造运动与地震条件

天水市位于青藏高原东北缘地貌阶梯带,新构造运动十分活跃,主要表现为断裂构造活动的继承性和新生性,在时间上具有阶段性,空间上具有差异性。加之河流、沟谷中水体的垂向及侧向侵蚀,使得区内山高坡陡、沟壑纵横,高陡的斜坡为滑坡的形成提供了有利的地形条件。概括起来,天水市新构造运动有以下特点:

① 第四系以来,间歇性升降运动频繁而剧烈,形成河谷阶地不对称性和各级阶地间的高差悬殊,上升幅度北岸明显大于南岸。全新世以来,河谷地带处于相对下降阶段,普遍接受沉积,下降幅度东部大于西部。

② 受祁连—北秦岭造山带的影响,区内构造应力场强度大,构造应力集中,四周褶皱、活动断裂叠加交错,活动频繁。

地震是新构造运动的表现,在短时间内释放出大量的能量破坏岩土结构,触发大量的、大规模的滑坡^[8-9]。天水及其外围断裂构造活动强烈,发生过多次强震,地震对滑坡的诱发作用十分强烈。从天水市的滑坡分布情况和特征来看,本区大型和巨型低角度黄土老滑坡均由强震诱发。

(5) 降水条件

水在滑坡的形成过程中扮演着重要的角色。地下水不仅具有软化土体、弱化土体结构、降低抗滑能力的作用,同时在斜坡内部产生静、动水压力,破坏斜坡的稳定状态。流水侵蚀也起着很大的作用。由于流水侵蚀增大了斜坡的坡度和斜坡土体的临空高度,降低坡脚土体的支撑从而处于失稳状态,在降雨多的季节极易产生滑坡灾害。如 1990 年 8 月天水市普降暴雨,最大降雨量达 113 mm,造成了 10 多处危险滑坡^[3]。

降水是促成滑坡形成的重要条件,主要表现在增加岩土体的自重、冲蚀、软化、润滑等作用。降水渗入黄土层,增加土体的自重,土壤被浸湿以后自重可增加 1.3~1.4 倍;另一方面,浸湿的黄土结构被

破坏,强度下降,湿陷下沉形成裂缝、孔洞及陷穴;当降水渗入相对隔水层时,可使结构面软化、膨胀,促进滑动面的形成;较强的降雨形成的地表径流冲刷坡脚及坡体,加速了滑坡的发生。

据统计,天水市平均降水量为 531 mm,年最大降雨量 772.2 mm(1967年)(表 2),年最小降水量 30.1 mm(1969年),降雨在年内分布不均,全年降雨量的 60%集中于 6—9 月份。

表 2 天水市历年最大降水量统计表 (mm)

Table 2 Historical statistics of the maximum precipitation in Tianshui city (mm)

地名	4 h	12 h	24 h	72 h	全年
天水	31.3	72.7	81.5	101.4	772.2

(6) 人类工程与生产活动

人类工程与生产活动对滑坡影响较大,道路建设、垦荒造地、人类不合理居住、不合理工程活动等工程不可避免的削坡和开挖自然坡脚,容易使边坡失稳,引起滑坡灾害。如果施工不当,在滑坡抗滑区段开挖、削坡,也会造成死滑坡的复活。

3 滑坡稳定性分析及危险性评估

目前滑坡后缘黄土梁顶面形成较多集水洼地,落水洞大量发育,最大直径大于 4 m,加快了斜坡变形速度。后缘发育有两条弧形拉张裂缝,形成于 1920 年海原大地震,之后在 1965 年、1980 年和 2001 年暴雨期间,裂缝进一步扩大。当地村民虽多次对裂缝进行了填埋,但每年暴雨季节裂缝又会重新拉开,局部山体出现小规模滑塌。滑坡体于 1990 年和 1994 年经有关部门勘察论证,确认为不稳定老滑坡,大部分村民已搬迁至水眼寨新村。

从整体稳定性分析,本滑坡属黄土—泥岩推移式巨型滑坡,具有较高的重力势能,一旦失稳,可能形成高速远程滑坡,还可能引发老滑坡体前缘已经趋于稳定的滑坡残体的复活,直接危及水眼寨几千个村民的生命财产安全,所造成的危害难以预料。水眼寨滑坡现状条件下稳定性差,危险性大。

GeoStudio 是一套专业、高效而且功能强大的适用于岩土工程和岩土环境模拟计算的仿真软件。本文使用该软件,采用简化 Bishop 法、简化 Janbu 法和 Morgenstern 法定量计算综合评价表明(表 3),在目前的天然状态下,该滑坡处于稳定状态($F_s > 1$);在Ⅶ度地震作用影响下(0.10 g),该滑坡稳定性普遍降低而处于极限平衡状态($F_s \approx 1$),有失稳的可能性;在Ⅶ度强地震作用影响下(0.15 g),该滑

坡处于失稳状态($F_s < 1$);在Ⅷ度地震作用影响下(0.20 g 和 0.30 g),该滑坡稳定性大为降低($F_s < 1$)并存在全面复活的可能性。

表 3 水眼寨滑坡稳定性计算结果

Table 3 The calculation results of landslide stability

状态	剖面安全系数 F_s		
	Bishop 法	Janbu 法	Morgenstern-price 法
静力	1.416	1.320	1.386
0.10 g	1.022	0.969	1.020
0.15 g	0.902	0.856	0.895
0.20 g	0.810	0.767	0.802
0.30 g	0.683	0.675	0.643

4 结论

(1) 水眼寨滑坡是黄土—泥岩滑坡,且经过多期滑动,黄土泥岩特殊的岩性条件和地质构造运动是其主要形成条件,降水和地震是其主要影响因素。

(2) 受诸多因素影响和制约,该滑坡整体滑动后,各部分的应力状态的不同使滑坡产生差异性的分解运动,从而使其在滑坡物质和坡体结构等表现出显著的平面分区性和剖面分层性特征。

(3) 数值模拟结果显示:天然状态下该滑坡处于稳定状态($F_s > 1$);在Ⅶ度地震作用影响下(0.10 g),该滑坡稳定性普遍降低而处于极限平衡状态($F_s \approx 1$),有失稳的可能性;在Ⅶ度强地震作用影响下(0.15 g),该滑坡处于失稳状态($F_s < 1$);在Ⅷ度地震作用影响下(0.20 g 和 0.30 g),该滑坡稳定性大为降低($F_s < 1$)并存在全面复活的可能性。

(4) 综合分析表明,该滑坡当前暂时处于稳定状态。在未来环境条件变化情况下滑坡将向不稳定方向发展,其中地震将导致滑坡稳定性降低,甚至可能整体失稳复活

参考文献(References)

- [1] 钟秀梅,陈文凯,侯景瑞,等.汶川地震触发武都区 and 文县地质灾害发育特征研究[J].岩土工程学报,2011,33(S1):349-353. ZHONG Xiu-mei, CHEN Wen-kai, HOU Jing-rui, et al. Distribution Rules of Geo-hazards Induced by Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Geological Engineering, 2011, 33(S1): 349-353. (in Chinese)
- [2] 吴玮江.天水市滑坡泥石流灾害[J].水文地质工程地质,2003(5):75-78. WU Wei-jiang. Landslide and Debris Flow Hazards in City of Tianshui [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003(5): 75-78. (in Chinese)
- [3] 冯学才,陈瑾,白晓华,等.天水市居民聚居区活动滑坡特征及

- 防灾减灾对策[J].甘肃科学学报,1992(3):60-68.
- FENG Xue-cai, CHEN Jin, BAI Xiao-hua, et al. The Characteristics of the Moving Landslides and Counter Measures for Control and Disaster Prevention in the Densely Populated Area of Tianshui City, Gansu Province, China[J]. Journal of Gansu Sciences, 1992(3): 60-68. (in Chinese)
- [4] 刘高, 刘从友, 王有林, 等. 黄河某水电站顺层岩质滑坡形成机理与演化过程[J]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 249-254.
- LIU Gao, LIU Cong-you, WANG You-lin, et al. Formation Mechanism and Evolution Process of the Consequent Rock Landslide in a Hydropower Station on the Yellow River[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(3): 249-254. (in Chinese)
- [5] 张帆宇, 刘高, 邓建丽, 等. 甘肃 G212 线石阡子滑坡特征与演化机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 39-43.
- ZHANG Fan-yu, LIU Gao, DENG Jian-li, et al. Characteristics and Evolution Mechanism of Shi'ezhi Landslide in Gansu Province Section of G212 Highway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 39-43. (in Chinese)
- [6] 王家鼎, 张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 670-674.
- WANG Jia-ding, ZHANG Zhuo-yuan. A Study on the Mechanism of High-speed Loess Landslide Induced by Earthquake[J]. Chinese Journal of Geological Engineering, 1999, 21(6): 670-674. (in Chinese)
- [7] 王谦, 袁中夏, 王兰民, 等. 汶川地震后甘肃临夏北塬黄土场地大面积沉降研究[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 180-185.
- WANG Qian, YUAN Zhong-xia, WANG Lan-min, et al. Study on Large Scale Subsidence of Loess Site After Wenchuan M_s 8.0 Earthquake in Beiyuan, Linxia County, Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 180-185. (in Chinese)
- [8] 卓莉, 何江达, 谢红强, 等. 不同边界和地基条件的大型滑坡体动力响应分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 2419-2425.
- ZHUO Li, HE Jiang-da, XIE Hong-qiang, et al. Research on Seismic Response of Large-slipmassa Based on Different Boundary Condition and Foundation Conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 2419-2425. (in Chinese)
- [9] 徐舜华, 吴志坚, 孙军杰, 等. 岷县漳县 6.6 级地震典型滑坡特征及其诱发机制[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 471-476.
- XU Shun-hua, WU Zhi-jian, SUN Jun-jie, et al. Study on the Characteristics and Inducing Mechanism of Typical Earthquake Landslides of the Minxian-Zhangxian M_s 6.6 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 471-476. (in Chinese)

(上接 886 页)

- [11] 孙宏磊, 蔡袁强, 徐长节. 移动列车荷载作用下路轨系统及饱和半空间土体动力响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1705-1712.
- SUN Hong-lei, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie. Dynamic Responses of Track System and Saturated Soil in Half Space Subjected to a Moving Train Load[J]. Chinese J Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1705-1712. (in Chinese)
- [12] Kouroussis G, Verlinden O, Conti C. Finite-dynamic Model for Infinite Media; Corrected Solution of Viscous Boundary Efficiency[J]. Eng Mech ASCE, 2011, 137(7): 509-511.
- [13] 高广运, 赵宏, 张博, 等. 饱和分层地基上列车运行引起的地面振动分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(12): 1805-1811.
- GAO Guang-yun, ZHAO Hong, ZHANG Bo, et al. Analysis of Ground Vibration Induced by Trains on Saturated Layered Ground[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(12): 1805-1811. (in Chinese)