

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201024001

通渭黄土滑坡变形特征及致灾机理分析*

陈大伟¹, 吴志坚¹, 梁超¹, 周晗旭²

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 2019年9月14日, 甘肃省定西市通渭县发生大型黄土滑坡。通过对该黄土滑坡的现场调查和无人机航测, 查明了孕育滑坡的地形地貌、水文地质等条件, 对滑坡体的形态特征、结构特征和运动模式进行深入研究, 揭示了常家河滑坡的致灾机理。运用高密度电法对滑坡体进行探测, 探明滑坡区域的地层结构、滑体厚度、地下水分布及空间展布情况。结合有限元法和严格的极限平衡法计算坡体的稳定性, 得到降雨条件下滑坡坡体的最大剪应变区域分布及斜坡稳定性随着降雨持时的变化规律。研究表明: (1) 通渭滑坡整体形态呈圈椅状, 分为3个典型破坏区域, 形成大量垂直陡坎, 黄土滑动厚度约为8~50 m; (2) 通渭滑坡属“牵引-推移”式顺层滑坡, 运动方式为“坡脚失稳牵引-中部受阻滑移-后部失稳推移”; (3) 地下水多为裂隙岩溶水, 地层结构不明显, 早期地震等地质构造活动对地层形状影响较大; (4) 黄土斜坡稳定性受降雨持时影响持续降低, 斜坡最大剪应变区域多分布于斜坡中上部, 且从泥岩接触面向坡面发展; (5) 降雨是触发通渭滑坡的最直接因素, 冲沟发育、河流侵蚀与农业生产活动是重要的孕灾条件。

关键词: 通渭滑坡; 黄土; 变形特征; 高密度电法; 致灾机理

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0024-10

Deformation Characteristics and Disaster-causing Mechanism Analysis of Tongwei Loess Landslide

CHEN Dawei¹, WU Zhijian¹, LIANG Chao¹, ZHOU Hanxu²

(1. School of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: On September 14, 2019, a large loess landslide occurred in Tongwei County, Dingxi City, Gansu Province. Through on-site investigation of the loess landslide and drone aerial survey, the topography, geomorphology, hydrogeology and other conditions that gave birth to the landslide were ascertained, and the morphological characteristics, structural characteristics and movement patterns of the landslide body were studied in-depth, revealing the Tongwei landslide Disaster mechanism. The high-density electrical method is used to detect the stratum structure, thickness of the sliding body, groundwater distribution and spatial distribution of the landslide area. Combining the finite element method and Morgenstem-Price method to calculate the stability of the slope, the distribution of the maximum shear strain and the variation of slope stability with rainfall duration are obtained. The re-

* 收稿日期: 2020-10-24; 修回日期: 2021-02-05

基金项目: 地震联合基金重点项目(U1939209)、南京工业大学引进人才科研启动经费项目(2017年)资助

作者简介: 陈大伟(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事岩土工程研究。E-mail: 18715068883@163.com

通讯作者: 吴志坚(1974—), 男, 教授, 博士。主要从事岩土工程与地震工程研究。E-mail: zhijian@njtech.edu.cn

sults show that: (1) the shape of the Tongwei landslide is a chair-like shape, which is divided into three typical failure areas, forming a large number of vertical ridges, and the thickness of the loess sliding is approximately 8~50 m; (2) the Tongwei landslide belongs to the "traction-push" type of bedding landslide, and the movement mode is "pull toe instability traction-hindered sliding in the middle part-instability shift in the rear part"; (3) the groundwater is mostly fissure karst water, and the geological structure is not obvious. The geological structure activities such as early earthquakes have a great influence on the stratum; (4) the stability of loess slope decreases continuously with rainfall duration, and the maximum shear strain region is mainly distributed in the middle and upper part of the slope, and develops from mudstone contact to slope surface; (5) rainfall is the most direct factor triggering the Tongwei landslide, and the development of gullies, river erosion and agricultural production activities are important disaster-generating conditions

Keywords: Tongwei landslide; loess; deformation characteristics; high-density electrical method; disaster mechanism

引言

黄土是第四纪以来形成的一种多孔隙弱胶结的特殊沉积物,具有大孔隙、水敏性、力学性质差和节理裂隙发育等特点^[1]。中国黄土广泛分布在西北、华北与东北等地,面积达到64万km²。由于黄土本身具有的特殊性质,使得黄土滑坡成为中国发生数量最多、带来破坏最严重、影响最恶劣的突发性地质灾害之一^[3],我国三分之一的滑坡灾害发生在黄土地区^[4]。滑坡在短时间内会对建(构)筑物,人民生命财产安全造成严重损失,如8级左右地震(1920年海原地震、1927年古浪地震、1718年通渭地震以及2008年四川汶川地震等)引起的大规模密集连片黄土滑坡,共造成了数十万计人员伤亡^[5]。

滑坡致灾机制与地质构造、地层岩性、地形地貌、边坡地质结构和水文地质条件等地质要素有关,同时还与降雨、地震和人类工程活动密切相关^[3]。上述所述因素中,地质环境是基础,构造动力是内在驱动力,降雨、地震和人类活动是外在牵引力,滑坡正是内外动力耦合协同作用的结果。众多学者对黄土滑坡的形成机理进行了大量深入研究。部分学者认为^[6-8],农业灌溉或降雨的入渗,改变地下水文条件,劣化土体抗剪强度。杨文琦等^[9]通过对膨胀土边坡的研究,分析雨强和持时对边坡稳定性的影响,雨水入渗使得裂隙两侧土体吸水膨胀并产生较大的膨胀力,从而对膨胀土边坡稳定性产生不利影响,但是当雨强及持时超过一定程度时,因素的影响会受到限制。王家鼎等^[10-11]研究了饱和黄

土蠕动液化机理和灌溉诱发高速黄土滑坡的运动机理。一些学者^[12-14]认为滑坡不仅与强烈的地震有关,还与黄土发育裂隙等复杂的地质条件、地形地貌等有关。对于一些山体滑坡,山带的地貌和构造过程也会导致不同类型滑坡的发生^[15]。另外,由于人类经济或者工程活动,例如斜坡边缘进行大量堆载(建、构筑物或建筑材料)或斜坡外无组织排水等都会影响坡体构造,使坡体内部应力场发生改变,坡体安全系数逐渐降至安全临界点以下^[16]。

作为工程物探中常用的方法之一,高密度电阻率法具有施工快、效率高、经济节省的特点,且获取的岩土体物性信息量大、精度高,尤其对电性不均匀体探测效果较好^[17]。通过该方法,能够查明滑坡体的地层结构、空间展布等特征,获取滑坡体的岩土体组成、滑动面埋深、地下水位等数据,有助于研究滑坡的形成机理,进一步开展滑坡防治工作。许多学者已将高密度电阻率法应用于滑坡勘察方面,目前已经积累了较为丰富的经验。例如,杨杰等^[18]对某岩质滑坡进行高密度电阻率法探测,查明了该滑坡体的滑动面及相关裂隙的空间信息,验证了该方法针对基岩滑坡的有效性。张光保等^[19]利用高密度电阻率法基本上查明了褚家营巨型滑坡的坡体结构、滑面的形态、滑体的成分及厚度分布等特征。

通过对2019年9月14日发生的通渭大型黄土滑坡进行现场调查,并采用Geo-Studio有限元数值模拟软件SIGMA/W和SLOPE/W模块进行了耦合计算,对该滑坡稳定性进行分析。

1 滑坡区工程地质环境概况

通渭滑坡地处甘肃省定西市通渭县常家河镇小庄村,滑坡中心点地理位置坐标约为:34°59'46.8"N, 105°11'44.4"E(图1)。该滑坡后缘高程1 625 m,前缘

高程1 475 m,该滑坡体东西长约1 000 m,主滑方向为125°,南北宽约500 m,滑坡高差约50 m,体积约1 300万m³。此次滑坡灾害致使县道X087部分路段出现严重下错、拉剪开裂破坏,常河前进砖瓦厂砖窑裂缝和工人宿舍后墙坍塌,阳坡大桥受滑坡体挤压造成垮塌,苦水河出现堵塞现象。

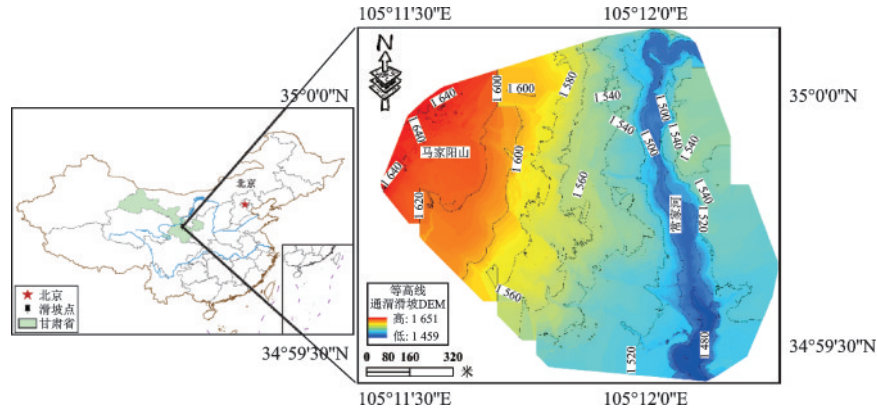


图1 通渭滑坡地理位置示意

Fig.1 Geographical location of Tongwei landslide

1.1 地形地貌

滑坡区属于陇中黄土高原丘陵沟壑区,多黄土梁、峁和河谷阶地,地势西北高,东南低(图2(a))。

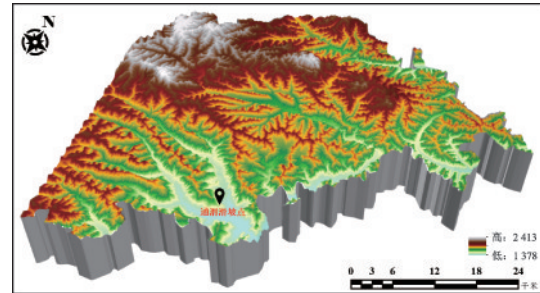
区内地貌依据成因和形态特征可分为构造剥蚀黄土低山丘陵区 and 侵蚀堆积河谷两个单元地貌。其中,前者地貌为滑坡研究区内主要地貌类型,山顶浑圆、平缓,山梁呈垅岗状、长条状展布。区内剥蚀、侵蚀作用强烈,沟谷下切,冲沟发育,植被稀少,沟谷两侧滑坡、崩塌发育(图2(b))。

1.2 地层岩性

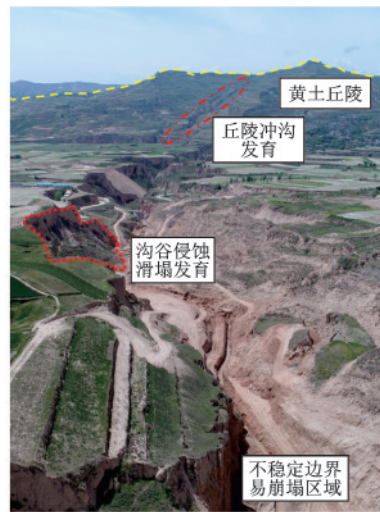
区内出露的主要地层有新近系(N)和第四系(Q),以第四系分布最为广泛。新近系地层以平坦的棕红色砂质泥岩为主,零星出露于侵蚀河谷下部。第四系(上更新统)黄土覆盖泥岩和河流阶地,沉积层中发育垂直节理和溶蚀微地貌(陷坑、盲沟)。第四纪(全新统)冲洪积物(含黏质砂、圆砾和解脱自黄土层中的姜结石)产于苦水河和常家河的河谷和一级阶地。

1.3 水文地质条件

该区属半干旱半湿润季风气候区,属温带大陆



(a) 通渭县数字高程模型



(b) 研究区典型地貌

图2 滑坡数字高程模型与研究区地貌

Fig.2 Digital elevation model of the landslide and geomorphologic map of the study area

性气候,年平均气温约 7.7 °C,年平均降水量 380 mm,年蒸发量 1 500 mm 以上。降雨主要集中在 7~9 月份,以连续降雨形式出现,总降雨量占年降雨量的 70%。地下水赋存条件、运移条件及富水性与地形地貌、地层岩性和构造等因素密切相关。研究区内地下水分为三类型,即基岩孔隙裂隙水、碳酸盐岩裂隙岩溶水和松散岩类孔隙水。其中,松散岩类孔隙水分布于上覆黄土、古滑坡堆积体和沟谷冲积层中,主要受大气降水入渗补给。

2 滑坡变形破坏特征

根据详细的现场调查,通渭滑坡整体呈圈椅状。为了便于详细描述和分析滑坡变形破坏特征,文中将整个滑坡划分成 I 区、II 区和 III 区(图 3)。

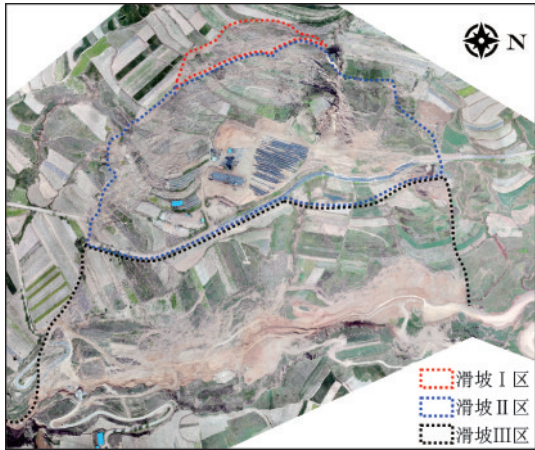


图 3 滑坡分区

Fig.3 Landslide zoning

滑坡发生之前,该区域为多级阶地农业种植区,滑坡改造了原有地形地貌,整体上滑坡体呈现阶梯状破裂下沉。I 区,滑坡后缘形成一个高约 20 m,坡度约 85°~90°的主断壁。后缘平台整体性较差,结构特征不明显,图 4(a)显示平台区域多为横向圆弧条状多级“土墙”,且横向结构保留完整。靠近后缘阶地倾向大致与滑坡方向相同,而下部阶地倾向与之相反,多为朝坡脚方向倾覆(图 4(b))。当 I 区土体下部向下运动时,由于支撑性丧失,土体朝运动方向牵移且倾覆,后部土体因被牵引向后倒伏滑移。I 区南部边界部分受滑坡体的拉剪作用,在坡体下沉滑移后,形成带有深裂隙的不稳定变形区域。在现场调查时,一些陡壁已经发生崩塌(图 4(c))。

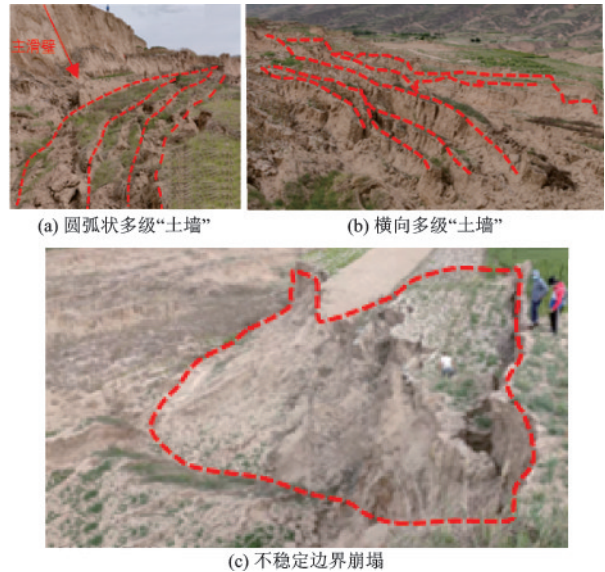


图 4 滑坡 I 区变形特征

Fig.4 Deformation characteristics of landslide area I

滑坡中部(II 区)变形破坏程度较 I 区更为复杂和剧烈,II 区中心部位(图 5(a))仅因受到上部土体推移挤胀而出现多条纵向宽深裂缝。因常进砖厂生产活动,II 区中部留存一个约 20 m 的黄土陡峭“绝壁”,虽没有发生崩塌,但是由于上部土体向下运动挤压也产生了较多深宽裂缝(图 5(e))。II 区两侧翼部分均发现地表径流侵蚀形成的冲沟,并且地面破碎,滑移量较大。这些地貌条件扮演了控制滑坡边界的角色。II 区下部则是本次滑坡破坏最

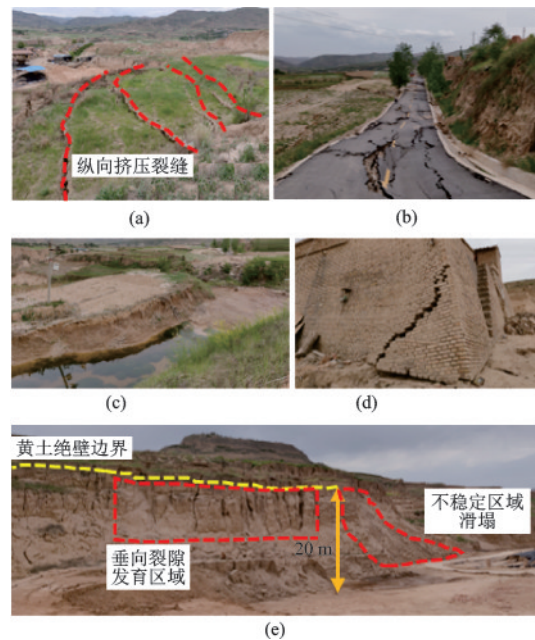


图 5 滑坡 II 区变形特征

Fig.5 Deformation characteristics of landslide area II

为严重的建筑设施—县道 X087,主要表现为“脆性错断”和“松散解体”的破坏特征(图 5(b))。两种不同破坏形式的原因主要在于路基下方土体含水量不同。在滑坡体南部,没有地表径流入渗亦无明渠补给,仅包含降雨入渗且下渗深度有限。在北部存在山坡径流路径且在道路下方发现面积约数十平米小型封闭储水坑(图 5(c))。从而导致两处土体含水率有着很大差异,土体强度受到影响,结果道路破坏形式存在差异。II 区常进砖厂,因滑坡停业且窑厂主体部分受损严重,窑洞和转角处受地面运动影响,均出现半“八”字裂缝(图 5(d))。根据滑坡整体来看,滑坡主滑方位角为 125° ,而窑厂横向方位角为 100° ,从而造成建筑主体受力不均,形成特有的破坏特征。

滑坡下部为 III 区(滑坡堆积区),其破坏特征特别明显,主要表现为堵塞河道、剪切道路、极发育纵向宽深裂缝、冲垮阳坡大桥和形成不稳定陡坎(图 6)。阳坡大桥跨度为 32 m,结构形式为拱式桥,受力方式为将桥面荷载转化为对桥墩或桥台的水平推力,所以此类型桥梁对地基的要求较高。大桥位于主滑方向的正下方,当滑坡底部发生很大位移时,导致桥基发生移动,大桥垮塌。大量堆积体冲进河道,掩盖桥梁主体,基本将河道填埋殆尽。随着河流流向自北向南时,河道堆积体减少,依傍原有河岸形成大量裂缝陡坎。

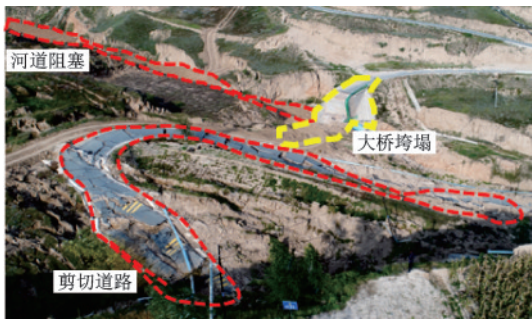


图 6 滑坡 III 区变形特征

Fig.6 Deformation characteristics of landslide area III

3 高密度电阻率探测

3.1 现场数据采集

根据现场施工条件、滑坡体形态及勘探要求,在滑坡区共布置三条测线(图 7)。采用高分辨率无

人机进行低空地表地形测绘,对每条测线的位置进行定位,以便在后期数据处理时进行地表地形校正。野外进行电法数据采集时,现场将测得的数据传输到便携式笔记本中进行初步处理,做出初步推断解释,并与滑坡区现场情况进行对比,找出异常点位置,对异常点及突变点进行检查和核实,以确保获取的电性数据具有可靠性。

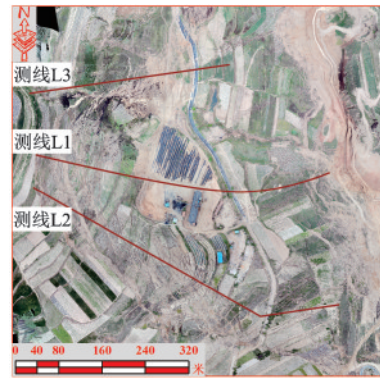


图 7 通渭滑坡高密度电法测线布置

Fig.7 Layout of high-density electrical survey line of Tongwei landslide

3.2 各测线电阻率剖面成果及解释

通渭滑坡测线 L1 位于滑坡体的主滑方向(图 7),为纵向剖面,位于通渭滑坡体中间部位,共布设 311 个电极,电极距 2 m。根据地形特征将测线 L1 划分为“上部”、“中部”和“下部”三个部分以作详细解释。整条剖面上部和下部表层及中上部深层表现为中高电阻率特征,电阻率大约 $275 \sim 1000 \Omega \cdot m$,上部表层以下 20 m 范围内分布有数个高阻晕团(图 8(a))。推测表层为滑坡造成的第四系松散疏松黄土,表层以下一定深度为松散滑裂面,这和现场勘察结果一致,推测深层为基岩。在中部表层延纵向分布有数个低阻晕团,推测为下渗雨水汇集形成的水包带。中部深层为高阻显示,推测可能存在小范围的基岩突起,在滑坡过程中起到抗滑作用,解释了 II 区中间部位地面变形小的原因。

通渭滑坡测线 L2 沿着滑坡南面边界展开,为纵向剖面,共布设 239 个电极,电极距 2 m。L2 所经过的滑坡区域地形较为平缓,表层视电阻率为 $100 \sim 800 \Omega \cdot m$,推测为滑坡松散疏松干燥黄土,变形厚度大约为 8 m,与现场勘查结果一致(图 8(b))。表层以下 30 m 范围内为低电阻分布区,根据此次造成滑坡的主要诱因推测此区域黄土含有大量下渗雨水。

电阻率剖面图下部存在近乎垂直地面的低阻异常区,根据此区域的水文地质资料推测此低阻区为裂隙岩溶水分布区。

通渭滑坡测线L3位于滑坡体的北部边界,为纵向剖面,共布设239个电极,电极距2m。从无人机航拍及现场调查结果显示,此边界地形条件较为复杂,包含有破碎冲沟、柏油县道和小型储水坑等。所以在电阻率剖面图上反映为视电阻率异常不规则分布,但是总的规律为滑坡中上部表层视电阻率高阻显示,大约为100~800 $\Omega\cdot m$,为滑坡松散破碎带,下伏低阻团晕为湿黄土。中部存在异常高阻团体,推测为大体积碎散基岩块体。测线L3电阻率剖面图中显示有“N”低阻异常区,根据现场调查发现测线附近20m处有地下暗河存在,总体推测此区同样为裂隙岩溶水发育区(图8(c))。

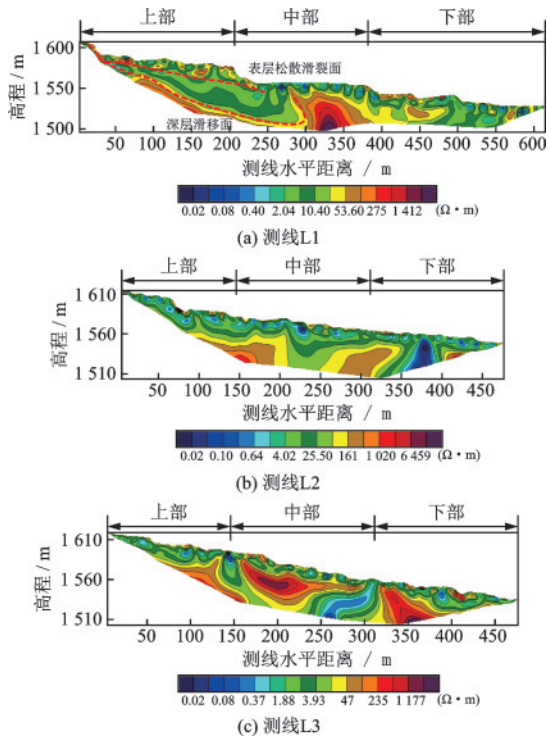


图8 通渭滑坡物探电阻率色谱剖面
Fig.8 Resistivity chromatographic profile of Tongwei landslide

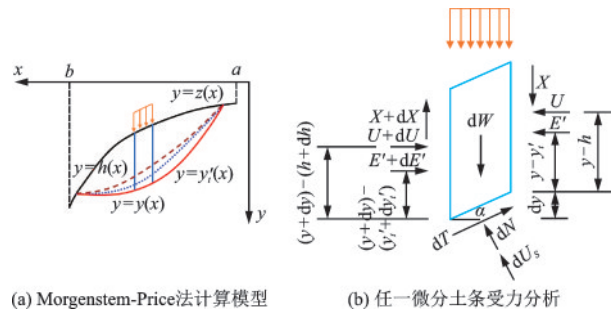
4 数值计算

Geo-Studio有限元分析软件是二十世纪七十年代由加拿大著名的岩土软件开发商Geo-slope公司面向岩土工程、水利工程、地质工程以及公路工程

等相关领域开发,具有高效、专业、功能强大等优点,在众多人群中被普遍使用^[20]。

4.1 稳定性计算方法

本文选取Morgenstem-Price法,相较于其他极限平衡算法能严格满足力和力矩的平衡,且不要滑面是圆弧形,更适用于一般情形下边坡的稳定分析计算^[21]。Morgenstem-Price法假定两相邻土条的法向条间力和切向条间力之间存在一对水平方向坐标的函数关系,根据整个滑动土体的边界条件进行迭代求出问题的解(图9)。



(a) Morgenstem-Price法计算模型 (b)任一微分土条受力分析
图9 Morgenstem-Price法斜坡稳定性分析
Fig.9 Slope stability analysis by Morgenstem-Price method

图9(a)中, $z(x)$ 、 $y(x)$ 、 $h(x)$ 和 $y'(x)$ 分别为坡面线、滑裂线、地下水水位线和有效推力线。图9(b)中, dW 为土条重力, dN' 为土条底面的有效法向应力, dT 为切向阻力, E' 、 $E'+dE'$ 为土条两侧有效法向条间力, X 、 $X+dX$ 为土条两侧切向条间力, U 、 $U+dU$ 为作用于土条两侧的孔隙水压力, dU 为作用于土条底部的孔隙水压力。

4.2 模型的建立

根据前述通渭滑坡特征分析,在此基础上采用Geo-Studio软件中SEEP/W、SIGMA/W和SLOPE/W模块,进行降雨条件下孔隙压力与应力耦合的最大剪应变及斜坡稳定性分析。结合滑坡发生时当地降雨数据,模拟以30mm/d的降雨强度,连续降雨5d,累计降雨量为150mm。滑坡简化模型及计算参数取值根据文献[22-23]及经验参数决定,模型和计算参数见图10及表1。

4.3 计算结果

4.3.1 最大剪应变

将SEEP/W模块计算出瞬时孔隙水压力导入SIGMA/W模块进行耦合计算,得到斜坡的最大剪

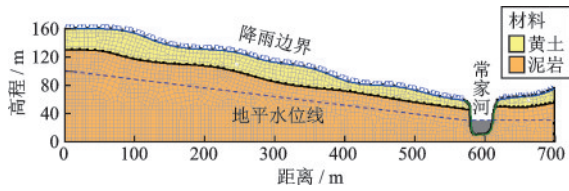


图 10 通渭滑坡简化模型

Fig.10 Simplified model of Tongwei landslide

表 1 岩土体材料力学特性

Table 1 Mechanical properties of rock and soil

材料	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)	弹性 模量/ kPa	饱和渗透 系数/ ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
马兰黄土	1.6	15	22	50 000	0.216
红层泥岩	2.0	140	40	300 000	0.005

应变云图(图 11)。由图可知,由于地形的原因,斜坡的中、后部顺向地层最大剪应变区域较大,而临向河道的斜坡部分区域较小,但是应变数值较大,为非常不稳定区域。随着降雨时长增加,斜坡最大剪应变区域发生扩展,如降雨 1 天后,在距离 500 m 位置出现细长条状剪应变区(图 11(a)),伴随降雨时长增加,该细长条状剪应变区沿着坡脚不稳定区域发展(图 11(b)),至降雨第 5 天时,该条状剪应变区域与坡脚不稳定区域贯通连接(图 11(c))。从图上

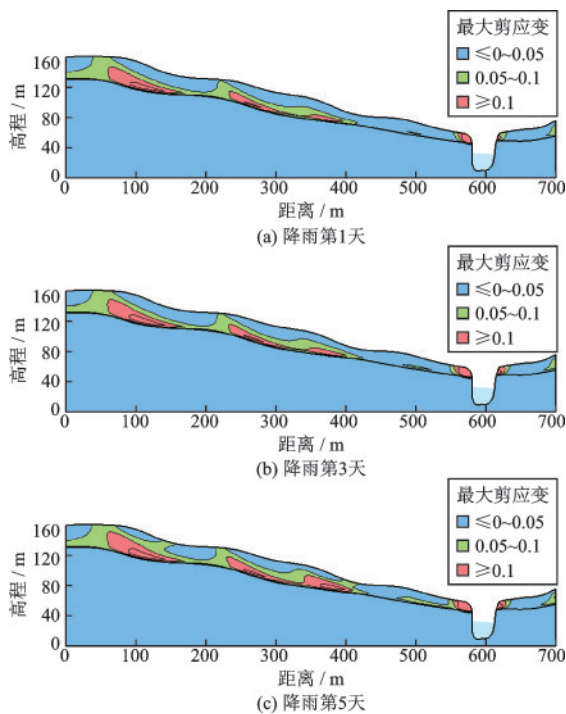


图 11 不同降雨时长斜坡最大剪应变云图

Fig.11 Maximum shear strain contour of the slope with different rainfall durations

看,最大剪应变集中部位与实际斜坡体上出现的滑动面位置、宽深裂缝、变形较大区域等变形迹象一致。

4.3.2 稳定性系数

在 SLOPE/W 模块中使用 Morgenstem-Price 法,得到了滑动面的形状和位置(图 12)。斜坡的剪出口发生在剪应变集中的临向河道位置,后缘滑动面较缓,总体滑动位置及形态与实际相一致。图 13 是斜坡稳定性系数随着降雨历时变化规律图,稳定性系数从 2.4 随降雨继续降到 1 左右,最小值出现在第 8 天,随后数值增大。系数变化过程和原因具体如下:降雨量数值小于模型材料渗透系数,因此降雨后(第 1 天)雨水快速下渗,土体饱和度升高,基质吸力减小,土粒胶结劣化,导致降雨初始稳定性系数明显降低;雨水下渗路径较长,并且在坡体内部经复杂路径向下迁移(1~2 天),加之坡体内部含水量较表层土体高,所以稳定性系数降低速率放缓;随着雨水下渗至隔水层上汇集,一方面增加了整个滑体的总体重量,另一方面孔隙水压增大,造成稳定性系数加速减小(2~4 天);最终斜坡抗滑力小于剪切力,坡体发生失稳(第 6 天);滑坡发生的本质是其力学系统的平衡状态被打破,由原来的平衡状态转换成另一平衡状态的过程^[24],所以发生滑坡后,滑体内部产生不同尺寸的裂隙,坡内积水顺渗流通道流出,孔隙水等压力消散,斜坡积蓄的能量发生转换,滑体重新达到稳定状态,稳定性系数有所增大(第 8 天)。

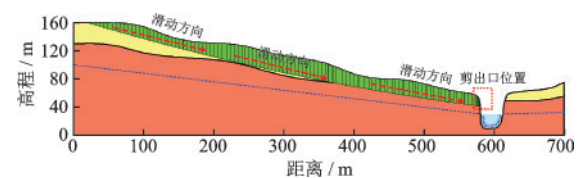


图 12 滑坡滑动面示意

Fig.12 Schematic diagram of the landslide sliding surface

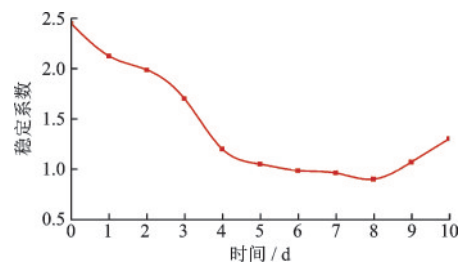


图 13 黄土斜坡稳定性系数随降雨历时的变化

Fig.13 Variation in stability coefficient of the loess slope with rainfall duration

5 讨论

通过对通渭滑坡的地质环境、滑坡基本特征、研究区域下部地层分布进行研究,并结合高密度电法勘探及水文地质数值模拟结果,对滑坡形成机理进行相关讨论。

5.1 地层地貌因素

区内有常家河和苦水河两条渭河水系,流经坡脚的为苦水河,年均径流量达 $932.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,侵蚀模数为 11.5 kg/m^2 ,河道两边受到河流的严重侧向侵蚀。河道两侧斜坡前缘呈陡坎地貌,坡体呈单面临空状态,坡脚坡度近乎与河面垂直,现场勘察发现常有崩塌堆积体分布于河道两侧。以上特征为滑坡形成提供高陡的临空面条件。另外由于河流冲蚀,斜坡坡脚作为阻滑段的效用降低。

地层是滑坡的物质基础,其结构和性质对滑坡的发生有着关键性的影响。新生代第四系(上更新统)马兰期风成黄土层特殊性质为降雨提供天然优势入渗通道。现场调查时发现滑坡边界周围土质松软,孔隙率很大,具有很高的压缩性。黄土下层为盐碱土层和红色胶黏土层,透水性极差,起到隔水作用。高密度电法测试结果也表明滑坡表层一定深度下方土体含水率较高。新生代第四系中更新统红土层广泛分布滑坡所在地域,以披覆状被覆于各地质时代岩层之上。黏土岩具有润滑性能,加之一定角度倾斜坡度,滑坡多从此面开始滑动。红土层含三氧化二铁,呈鲜红,结构致密,质地黏重,是烧制砖瓦的重要原料。实地现场调查时发现滑坡体正有一座烧制砖厂,更加验证此地的红土层分布广泛,其为滑坡提供重要物质因素。

5.2 降雨因素

据统计分析,多数滑坡是由于水起到了决定性作用。降雨是通渭滑坡失稳的主要诱因,根据通渭县气象站收集的当地气象资料,2018年当地累计降水量为 680.3 mm (图14)。2019年9月9日至14日连续降雨量为 141.8 mm ,最大日降雨量在9日为 43.2 mm ,滑坡当天(14日)的累计降水量为 15.6 mm (图15)。降雨入渗后,一方面黄土斜坡渗流场发生变化,土体饱和度及孔隙水压上升,土体基质吸力

降低,水对土体的渗透力和土体的重度随之逐渐增大,斜坡稳定性快速降低;另一方面,黄土内部所含易溶盐成分遇水后胶结性质发生劣化,继而坡体强度降低。最终在连续降雨后,黄土斜坡先后出现数个剪应变区域即破坏区,先前的潜在滑动体被激活,产生明显且破坏严重的大型深层缓慢性滑坡。

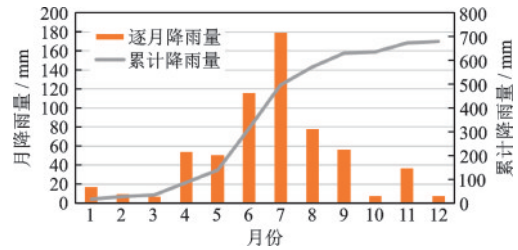


图14 2018年通渭逐月降雨示意

Fig.14 Monthly rainfall of Tongwei River in 2018

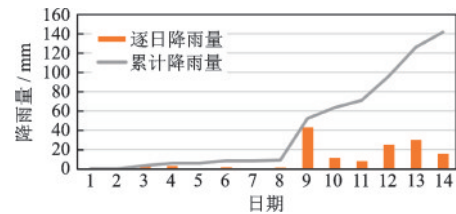


图15 2019年9月通渭逐日降雨示意

Fig.15 Daily rainfall diagram of Tongwei in September, 2019

5.3 人类农业生产活动

根据对滑坡区的调查,该区原滑坡上存在农业生产活动,植被稀少,造成水土流失严重,且在周围未滑塌区域农田表面发现多处落水洞。此外,本地农业活动形式与南方不同,种植作物时没有类似田垄排水沟样结构,导致雨期淋浇在农田上的雨水不能排出继而长久入渗土体。上部雨水渗透到松散黄土汇集在泥岩表面软化岩土,在上部坡体自重作用下,整体沿着一定坡度缓慢的发生变形。

5.4 历史地震

强震可显著降低岩土体强度,直接松动斜坡岩土体。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[25],常家河镇地震动峰值加速度为 $0.2g$ 。据《通渭县志》记载^[26],1718年通渭7.5级地震、1920年宁夏海原8.5级地震、1927年古浪地震以及2008年四川汶川8.0级地震,使常家河镇处于VI~Ⅷ度的高烈度区,在区内诱发大量超大型、大型滑坡,极大破

坏了地层结构的整体性。经过长期发育,逐渐形成不稳定地质结构,导致频繁诱发土质滑坡。

6 结 论

(1) 通渭滑坡属“牵引-推移”式顺层滑坡,运动方式为“坡脚失稳牵引-中部受阻滑移-后部失稳推移”。滑坡边界受冲沟位置约束,降雨入渗致使坡体含水量逐渐增加,浅层坡面变形更为剧烈。

(2) 通过高密度电法二维反演地电断面,推测整个滑体厚度为8~50 m左右。滑体下方地质条件复杂,地层分布和形态不规则。地下水赋存方式多样,其中裂隙岩溶水占比较多。

(3) 降雨作用与坡体自重应力耦合使坡体内部产生多处剪应变区,分别出现在斜坡坡脚、中下部、中部和坡顶,与高密度电法反演结果近似相同。另外,随降雨历时增加,使有效应力水平下降,导致土体抗剪强度降低,斜坡稳定性系数减小。经过滑坡体稳定和坡体内部孔隙水压重新平衡后,斜坡稳定性系数有小幅增加。

(4) 滑坡区冲沟发育及河流侵蚀是滑坡发生的重要因素,地下水和顺向地层构造提供了滑坡孕育地质环境,持续降雨是滑坡形成的主要诱发因素。

参考文献:

- [1] 王兰民.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003.
Wang L M. Loess dynamic [M]. Beijing: Earthquake Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 徐张建,林在贯,张茂省.中国黄土与黄土滑坡[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):1297-1312.
Xu Z J, Lin Z G, Zhang M S. Loess in China and loess landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312. (in Chinese)
- [3] 彭建兵,王启耀,门玉明,等.黄土高原滑坡灾害[M].北京:科学出版社,2019.
Peng J B, Wang Q Y, Men Y M, et al. Landslide disaster in Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)
- [4] Zhou J X, Zhu C Y, Zheng J M, et al. Landslide disaster in the loess area of China[J]. Journal of Forestry Research, 2002, 13(2):157-161.
- [5] 王兰民,蒲小武,陈金昌.黄土高原地震诱发滑坡分布特征与灾害风险[J].城市与减灾,2019,126(3):33-40.

- Wang L M, Pu X W, Chen J C. Distribution feature and disaster risk of earthquake-induced landslide in Loess Plateau[J]. City and Disaster Reduction, 2019, 126(3): 33-40. (in Chinese)
- [6] 汪勇,刘瑾,张建忙.黄土边坡降雨入渗规律及其对稳定性的影响[J].中国煤炭地质,2017,29(1):48-52.
Wang Y, Liu J, Zhang J M. Loess slope rainfall influent seepage pattern and its impact on slope stability[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(1): 48-52. (in Chinese)
- [7] 程鹏翔,李宗发.大型堆积体滑坡持续降雨条件下破坏机制研究[J].贵州科学,2020,38(1):82-87.
Cheng P X, Li Z F. Failure mechanism of large accumulation landslide under continuous rainfall Condition [J]. Guizhou Science, 2020, 38(1): 82-87. (in Chinese)
- [8] 刘秀云,刘斌,秦龙.贵州省印江县赵家坝浅层滑坡成因机制分析[J].建材与装饰,2020(5):216-217.
Liu X Y, Liu B, Qing L. Mechanism analysis of shallow landslide in Zhaojiaba, Yinjiang County, Guizhou Province [J]. Construction Materials & Decoration, 2020(5):216-217. (in Chinese)
- [9] 杨文琦,周成,王林,等.降雨作用下考虑膨胀推力的膨胀土边坡稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(5):874-880.
Yang W Q, Zhou C, Wang L, et al. Stability analysis of an expansive soil slope under rainfall using the thrust line method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(5): 874-880. (in Chinese)
- [10] 王家鼎,肖树芳,张倬元.灌溉诱发高速黄土滑坡的运动机理[J].工程地质学报,2001,9(3):241-246.
Wang J D, Xiao S F, Zhang Z Y. The mechanism for movement of irrigation-induced high-speed loess landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 241-246. (in Chinese)
- [11] 王家鼎,惠泱河.黑方台台缘灌溉水诱发黄土滑坡群的系统分析[J].水土保持通报,2001,21(3):10-13,51.
Wang J D, Hui Y H. Systems analysis on heifangtai loess landslide in crows induced by irrigated water[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(3): 10-13, 51. (in Chinese)
- [12] Cui S H, Yang Q W, Pei X J, et al. Geological and morphological study of the Daguangbao landslide triggered by the M_s 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. Geomorphology, 2020, 370(1):107394.
- [13] Wu Z, Zhang D, Wang S, et al. Dynamic-response characteristics and deformation evolution of loess slopes

- under seismic loads [J]. *Engineering Geology*, 2020, 267:105507.
- [14] Wu Z J, Zhao D Y, Che A L, et al. Dynamic response characteristics and failure mode of slopes on the loess tableland using a shaking-table model test [J]. *Landslides*, 2020, 17(2):1-15.
- [15] Carlini M, Chelli A, Francese R, et al. Landslides types controlled by tectonics-induced evolution of valley slopes (Northern Apennines, Italy) [J]. *Landslides*, 2018, 15:283-296.
- [16] Cui Y L, Xu C, Xu S Y, et al. Small-scale catastrophic landslides in loess areas of China: an example of the March 15, 2019, Zaoling landslide in Shanxi Province [J]. *Landslides*, 2019, 17(5):1-8.
- [17] 王磊,李孝波,苏占东,等.高密度电法在黄土-泥岩接触面滑坡勘察中的应用[J].*地质力学学报*,2019,25(4):536-543.
Wang L, Li X B, Su Z D, et al. Application of high-density electrical method in loess-mudstone interface landslide investigation [J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(4): 536-543. (in Chinese)
- [18] 杨杰,李玥.高密度电阻率法探测某基岩滑坡应用及其特征分析[J].*工程与建设*,2020,34(4):686-688.
Yang J, Li Y. Application of high density resistivity method to detect a bedrock landslide and its characteristics analysis [J]. *Engineering and Construction*, 2020, 34(4): 686-688. (in Chinese)
- [19] 张光保.褚家营巨型滑坡的高密度电法勘察及效果分析[J].*地球物理学进展*,2012,27(6):2716-2721.
Zhang G B. Exploration and effectiveness analysis of high-density resistivity method on Chujiaying giant landslide site [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(6): 2716-2721. (in Chinese)
- [20] 钱璞,王瑞.岚皋县某边坡稳定性分析与治理[J].*黑龙江交通科技*,2020,43(10):8-10.
Qian P, Wang R. Stability analysis and treatment of a slope in Langao County [J]. *Communications Science and Technology Heilongjiang*, 2020, 43 (10): 8-10. (in Chinese)
- [21] 削丞民.用摩根斯坦-普赖斯法分析滑坡体的稳定性[J].*工程勘察*,1989(1):16-20.
Xiao C M. Analysis of landslide stability by Morgensten-Price method [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 1989(1):16-20. (in Chinese)
- [22] 石瑞红.黄土-红层接触面滑坡形成演化机理[D].兰州:兰州大学,2013.
Shi R H. Formation and evolution mechanism of the loess-red beds interface landslide [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)
- [23] Wang H J, Sun P, Zhang S, et al. Rainfall-induced landslide in loess area, Northwest China: a case study of the Changhe landslide on September 14, 2019, in Gansu Province [J]. *Landslides*, 2020, 17: 2145-2160.
- [24] 谭福林.基于不同演化模式的滑坡-抗滑桩体系动态稳定性评价方法研究[D].武汉:中国地质大学,2018.
Tang F L. Evaluation method for dynamic stability of landslides stabilizing pile system with different evaluation modes [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)
- [25] 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [26] 令续鹏.通渭县志[M].兰州:兰州大学出版社,1990.
L X P. Tongwei County annals [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1990. (in Chinese)

(本文责编:池营营)