

陕西省柞水县不稳定斜坡变形破坏模式研究

肖俊, 赵法锁, 陈新建, 祝艳波

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054)

摘要: 通过对柞水县 104 处不稳定斜坡的调查分析, 发现区内以堆积层不稳定斜坡为主; 最有利于不稳定斜坡发育的原始坡度区间为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$, 最有利于不稳定斜坡发育的原始坡高区间为 $50 \sim 100$ m, 且由于人类工程活动减弱, 在原始坡度大于 45° 、坡高大于 100 m 的高陡斜坡, 不稳定斜坡发育反而减少; 不稳定斜坡变形破坏模式主要表现为滑移-拉裂模式、滑移-压致拉裂模式和弯曲-拉裂模式三类, 其中以滑移-拉裂模式发育最为广泛。

关键词: 不稳定斜坡; 结构类型; 发育特征; 变形破坏模式; 柞水县

中图分类号: P642.4

文献标识码: A

Study on Deformation Failure Modes of Unstable Slopes in Zhashui County of Shaanxi Province

XIAO Jun, ZHAO Fasuo, CHEN Xinjian, ZHU Yanbo

(School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Through the investigation and analysis of 104 unstable slopes in Zhashui County, it is found that the stacked unstable slope is the main slope in the area. The original slopes range is $30 \sim 45$ degrees, which is most favorable to the development of unstable slopes, and the original height interval which is most conducive to the development of unstable slope is $50 \sim 100$ m. Due to the weakening of human engineering activities, the development of unstable slopes is reduced in high-steep slopes with original slopes greater than 45° and slope heights greater than 100 m. The deformation and failure modes of unstable slopes are mainly divided into three categories: slip-cracking pattern, slip-compression cracking pattern and bending-cracking pattern and slip-cracking pattern is the most common pattern.

Key words: unstable slopes; structure type; developmental characteristics; deformation and failure mode; ZhaShui Country

柞水县位于陕南地区, 地处秦岭腹地, 整体地势从西北至东南由高到低。该地年平均降水量 759.4 mm, 年内降水分布极不平均。在外界因素如降雨和人类工程活动的影响下, 有发育成山体滑坡、崩塌、泥石流等灾害的趋势, 对当地人民生命财产安全构成极大威胁^[1-4]。

目前, 国内外学者对于不稳定斜坡大多采用不同的方法研究不同地区, 研究结果差异巨大, 没有统一的规律性^[5-8], 且之前没有对柞水县不稳定斜坡方面做过研究工作。本文基于柞水县不稳定斜坡的区域特性, 研究柞水县不稳定斜坡总体发育分布特

征, 分析预测不稳定斜坡的变形破坏模式, 可为柞水县防灾减灾工作提供依据。

1 不稳定斜坡结构类型及分布特征

柞水县不稳定斜坡可分为堆积层不稳定斜坡(包括碎块石和土质不稳定斜坡)和岩质不稳定斜坡^[1]。据统计, 柞水县不稳定斜坡共 104 处, 其中堆积层不稳定斜坡发育 99 处(占 95.2%)。基岩不稳定斜坡共 5 处(占 4.8%)。柞水县不稳定斜坡结构类型发育统计如表 1 所示。

收稿日期: 2018-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41877247); 国家自然科学基金资助项目(41502278)

作者简介: 肖俊(1990-), 男, 河南汝南人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害研究。

表 1 柞水县不稳定斜坡结构类型发育统计表
Tab.1 Statistical table of structural types of unstable slopes in ZhaShui County

结构类型	灾点数 / 处	百分比 /%
堆积层不稳定斜坡	99	95.2
岩质不稳定斜坡	5	4.8
总计	104	100

1.1 堆积层不稳定斜坡

堆积层不稳定斜坡是指秦岭腹地的山地残积、坡积层形成的不稳定斜坡,该类斜坡多为浅层发育,物质组成主要以粘性土和碎石土为主,部分夹碎屑及风化岩屑^[9-10]。区内堆积层不稳定斜坡主要分布于缓坡地带,坡度一般在 15° ~ 35° 之间,亦有因开挖坡脚建房、修路等原因引发的较陡坡度的不稳定斜坡,但数量及规模都较小。此类斜坡在区内分布最广、数量最多,发生频次最高,在各镇均有发育,且主要集中在瓦房口镇、杏坪镇等地。由于堆积层不稳定斜坡形成规模大小不一,分布广泛,且地层结构疏松,透水性强,遇水易软化,干旱时易干裂,与下伏基岩差异明显,在连阴雨或暴雨条件下,斜坡多产生滑动或蠕动变形,发育成滑坡、崩塌等灾害,对当地人畜、公路、建筑等构成巨大威胁^[10]。

1.2 岩质不稳定斜坡

区内岩质不稳定斜坡岩土体组成主要为灰岩、白云质灰岩、砂岩、炭质板岩和片岩。岩体顺向节理面及风化、卸荷节理裂隙发育,岩体受不同性质节理裂隙切割,较为破碎,且该类斜坡坡度较陡,一般在 45° 以上,整体性差。区内岩质不稳定斜坡主要分布于有人类工程活动的沟谷边坡地带,由于人类修建房屋,公路等开挖坡脚,致使坡体表面产生卸荷裂隙,且岩体表面受风化作用强烈,坡面岩体破碎,加之岩性不同产生差异性风化,从而形成岩质不稳定斜坡。

1.3 分布特征

根据统计结果分析,区内不稳定斜坡的发育和分布特征跟柞水县地形地貌类型关系密切。柞水县位于秦岭南坡,县内山脉以秦岭为主脊,以乾佑河、金井河、社川河流域向南和东南延伸,为群山起伏,峰峦叠嶂的基岩山区^[11]。从地貌上可划分为河谷阶地区、低山区、中山区、高中山区,其中剥蚀中山

区面积最大,为柞水县主要地貌特征。县内各镇不稳定斜坡发育数量如表 2 所示。县内各地貌单元不稳定斜坡发育数量如表 3 所示。

由表 3 可看出,柞水县不稳定斜坡主要发育在剥蚀低山区和剥蚀中山区,主要位于区内东部、东南部地区。在这些地貌区域内,河流切割深度较深,坡体重力崩塌和侵蚀作用较强,且区内南部发育有凤镇大断裂活动性构造带^[12],加之人类活动频繁,自然植被破坏严重,致使大量不稳定斜坡发育。

表 2 柞水县各镇不稳定斜坡发育数量统计表
Tab.2 Statistics of unstable slope development in each town of ZhaShui County

乡 镇	结构类型	
	堆积层不稳定斜坡 / 处	岩质不稳定斜坡 / 处
柴庄镇	12	0
杏坪镇	19	0
瓦房口镇	21	0
丰北河镇	3	0
曹坪镇	4	0
蔡玉窑镇	1	0
凤凰镇	7	0
小岭镇	12	0
红岩寺镇	7	0
石瓮镇	2	1
下梁镇	3	0
营盘镇	6	0
乾佑镇	2	4
总计	99	5

表 3 柞水县地貌类型与不稳定斜坡分区统计表
Tab.3 Statistical table of landform types and unstable slopes in ZhaShui County

灾害类型	地貌类型				总计
	河谷阶地区	低山区	中山区	高中山区	
不稳定斜坡数量 / 处	0	64	38	2	104
百分比 /%	0	61.5	36.6	1.9	100

2 不稳定斜坡发育特征

斜坡的稳定性受多种因素控制,斜坡是否发生破坏及其变形破坏模式具有很大的不确定性^[13]。通过对柞水县不稳定斜坡原始坡度和坡高统计分析,

发现斜坡原始坡度和坡高很大程度控制着区内不稳定斜坡的发育。柞水县不稳定斜坡与原始坡度、坡高分布统计表如表 4、5 所示；分布直方图如图 1、图 2 所示。

从表 4 和图 1 可看出不稳定斜坡坡度高发区间是 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ；中易发区间是 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 和 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ；坡度小于 15° 和大于 60° 时，不稳定斜坡发育几率低。从表 5 和图 2 可看出不稳定斜坡坡高高发区间是 $50 \sim 100\text{ m}$ ；中易发区间是小于 50 m 和 $100 \sim 200\text{ m}$ ；坡高大于 200 m 时，不稳定斜坡发育几率低。

表 4 柞水县不稳定斜坡与原始坡度分布统计表 Tab.4 Statistical table of unstable slope and original slope distribution in ZhaShui County					
坡度 / $^{\circ}$	<15	15 ~ 30	30 ~ 45	45 ~ 60	>60
数量 / 个	4	28	46	21	5
百分比 /%	3.8	26.9	44.2	20.2	4.8

从图 1 可看出原始坡度小于 45° 时，不稳定斜坡数量与坡度成正比，而原始坡度大于 45° 时，不稳定斜坡数量与坡度成反比，从图 2 可看出原始坡高小于 100 m 时，不稳定斜坡数量与坡高成正比，而原始坡高大于 100 m 时，不稳定斜坡数量与坡高成反比。这与我们惯性认知的坡度越陡、坡高越高不稳定斜坡越发育相矛盾。造成这种现象的原因是：原始坡度大于 45° 或原始坡高大于 100 m 后，人类

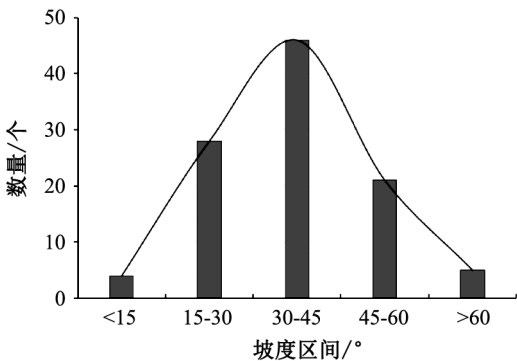


图 1 柞水县不稳定斜坡与原始坡度分布统计直方图
Fig.1 Statistical histogram of unstable slope and original slope distribution in ZhaShui County

工程活动减弱，植被较好，因此不稳定斜坡不发育。

3 变形破坏模式

根据野外调查发现，柞水县不稳定斜坡破坏模式主要分为滑移 - 拉裂模式、滑移 - 压致拉裂模式和弯曲 - 拉裂模式三类^[14]。其中以滑移拉裂模式发育最为广泛。柞水县不稳定斜坡变形破坏模式类型统计如表 6 所示。

表 6 柞水县不稳定斜坡变形破坏模式类型统计表 Tab.6 Statistical table of deformation failure modes of unstable slopes in ZhaShui County		
变形破坏模式	数量 / 个	百分比 /%
滑移 - 拉裂模式	63	60.6
滑移 - 压致拉裂模式	34	32.7
滑移 - 弯曲模式	7	6.7

3.1 滑移 - 拉裂模式

滑移 - 拉裂模式是区内斜坡变形破坏最普遍的模式。自然状态下，斜坡内部天然应力分布处于极限平衡状态，当坡脚（应力变化敏感处）受到破坏时，引起斜坡内部应力重分布，致使主应力迹线愈近临空面，坡脚应力集中；同时坡脚临空面增大，在重力和其他外力的作用下，易在坡体后缘形成与坡面平行的拉张裂缝^[14-15]，如图 3 所示：柴凤公路不稳定斜坡由于人类开挖坡脚在后缘形成拉张裂缝。在

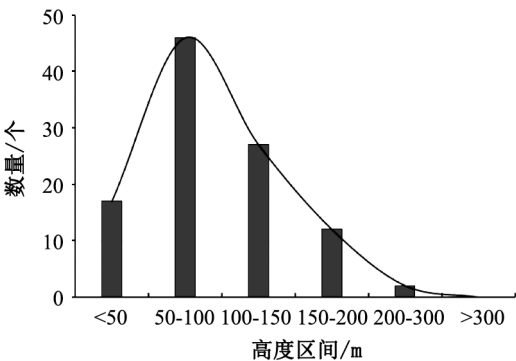


图 2 柞水县不稳定斜坡与原始坡高分布统计直方图
Fig.2 Statistical histogram of unstable slope and original slope height distribution in ZhaShui County

表 5 柞水县不稳定斜坡与原始坡高分布统计表 Tab.5 Statistical table of unstable slope and original slope distribution in ZhaShui County						
坡高 /m	<50	50 ~ 100	100 ~ 150	150 ~ 200	200 ~ 300	>300
数量 / 个	17	46	27	12	2	0
百分比 /%	16.3	44.2	26.0	11.5	1.9	0

地震或暴雨条件下,易发育滑坡、崩塌等灾害。区内沟谷流水对坡脚的下切、侧蚀以及人类修建房屋、公路等工程开挖坡脚都会引起斜坡产生滑移-拉裂破坏,从而引发滑坡或崩塌灾害。

3.2 滑移-压致拉裂模式

该变形破坏模式的不稳定斜坡在区内较普遍。图4为区内典型的滑移-压致拉裂破坏模式剖面。此变形破坏的斜坡是由下向上发展破坏,且主要受控于坡体内部主控制软弱结构面。区内该变形破坏模式发育主要有以下4种情形:(1)降雨情况下,大量流水聚集在坡体表面并沿着坡面裂缝贯入斜坡内部,在下伏基岩弱透水层汇集,引起地下水位上升,从而导致与基岩接触粘土堆积层的力学性质降低。在自然重力下,斜坡沿此软弱层向临空面方向产生蠕动滑移变形^[16]。(2)含碎石粘性土堆积层斜坡,其斜坡坡度通常较小,天然状态下,坡体稳定性较好,但在人类工程活动下,斜坡易发生变形破坏。柞水

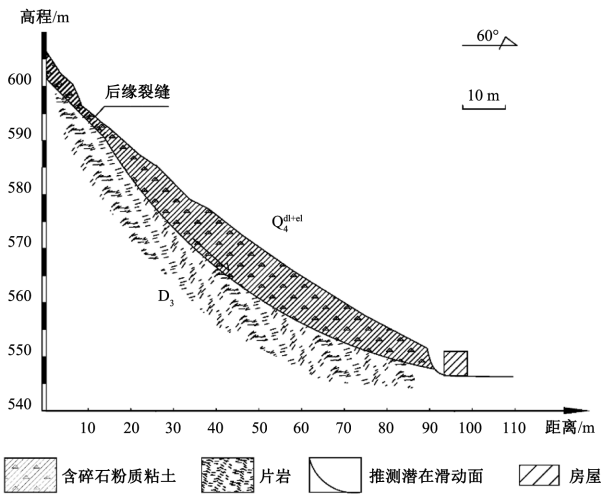


图3 柴凤公路不稳定斜坡剖面图
Fig.3 Profile of unstable slope of chaifeng highway

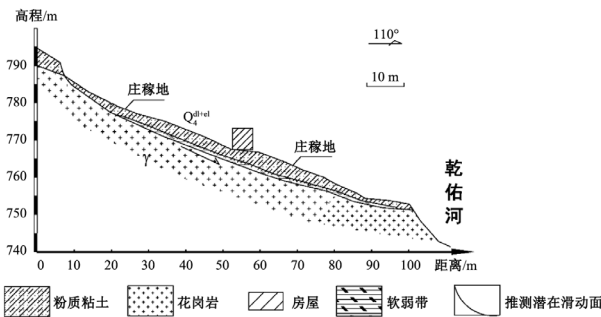


图4 凤凰山不稳定斜坡剖面图
Fig.4 Profile of unstable slopes of phoenix mountain

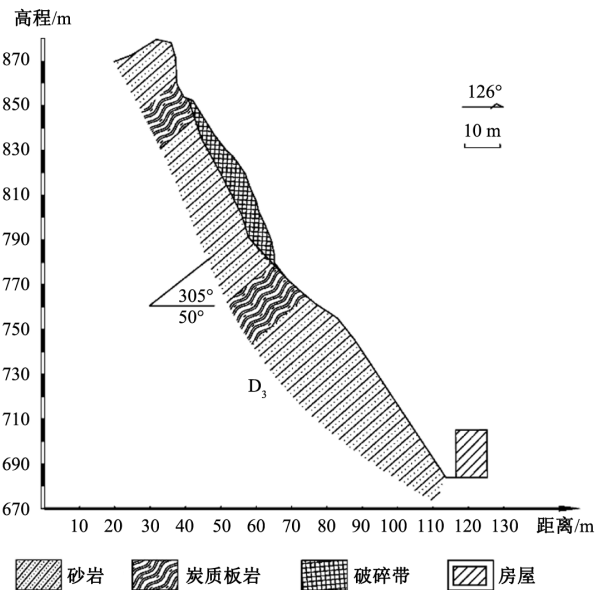


图5 乾佑镇河西路不稳定斜坡剖面图
Fig.5 Profile of unstable slope of hexi road in QianYou Town

县属陕南地区,年降水量集中且充沛,坡体内部地下水作用强烈,碎石粘性土堆积层斜坡结构松散,往往在坡体内部形成较好的地下水排泄通道,且以泉的形式在坡脚处排出,从而降低坡体内地下水位,致使斜坡保持稳定状态。但受外界因素影响,人类常常在坡面修建房屋、道路等致使坡体上部附加荷载增大,土体挤压变形,导致地下水排泄系统破坏,使得坡体内地下水无法及时排出,地下水位明显抬升,最终坡体土体力学性质降低,斜坡稳定性降低,产生蠕动滑移变形^[17-18]。(3)由矿山开采弃渣堆积而形成的碎块石堆积层斜坡,斜坡内部空隙较大,在降雨条件下,雨水入渗渣堆内部,对堆积层起到润滑作用,堆积层易沿下覆基岩滑动,多产生滑坡灾害。(4)岩质斜坡受河流侵蚀作用,坡体产生卸荷裂隙,加之长期风化作用下岩体节理裂隙发育,在降雨条件下,雨水沿山体裂缝及岩体节理面下渗,对不稳定岩体产生浮托力或静、动水压力,导致基岩抗剪强度及岩块间侧向摩擦力减小,多发育基岩崩塌灾害。

3.3 弯曲-拉裂模式

该变形破坏模式的不稳定斜坡在区内发育较少,多发育在高陡堆积层不稳定斜坡和近直立的岩质不稳定斜坡内。

区内高陡堆积层斜坡,堆积层厚度一般不大、粒径大小不等,由于斜坡坡度较陡、位置高,坡面

易产生裂缝,在斜坡变形过程中,坡面裂缝逐步扩展加深并相互贯通,坡面局部土体易沿裂缝面与斜坡分离,产生弯曲-拉裂变形。当分离土体重心偏移到一定程度时,与斜坡的联结强度不足以支撑其重力,多形成错落式崩塌或滑塌灾害^[18]。

区内基岩组成主要为灰岩、砂岩、炭质板岩和片岩。如图5所示:由于岩性不同产生差异性风化,自然条件下,较软基岩先风化剥落,致使斜坡岩体局部悬空,加之悬空岩体受节理裂隙切割,在自身重力作用下极易产生弯曲-拉裂变形,一般发育为岩质崩塌灾害。

4 结论

1) 柞水县内共发育104处不稳定斜坡,其中堆积层不稳定斜坡发育99处(占比95.5%);岩质不稳定斜坡发育5处(占比4.8%)。受区内地貌类型影响,不稳定斜坡主要发育在剥蚀低山区和剥蚀中山区,且多为堆积层不稳定斜坡。

2) 柞水县最有利于不稳定斜坡发育的原始坡度区间是 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$;最有利于不稳定斜坡发育的原始坡高区间是50~100 m且在原始坡度小于 45° 、坡高小于100 m时,不稳定斜坡数量与坡度、坡高成正比,在原始坡度大于 45° 、坡高大于100 m的高陡斜坡,由于人类工程活动减弱,不稳定斜坡发育反而减少。

3) 柞水县不稳定斜坡变形破坏模式可分为三类:滑移-拉裂、滑移-压致拉裂和弯曲-拉裂。其中滑移-拉裂破坏模式不稳定斜坡类型发育最为广泛。

参考文献:

- [1] 上官超超.柞水县地质灾害分布规律及防治对策[C]//陕西省地质调查院.秦巴山区地质灾害与防治学术研讨会论文集.陕西省地质调查院,2015:3.
- [2] 袁蒲菁.柞水县地质灾害风险评价[D].西安:长安大学,2015.
- [3] 刘彦随.柞水县山体滑坡及泥石流灾害研究[J].陕西师大学报:自然科学版,1993(4):55-57.

- [4] 姚翔龙,赵法锁,王雁林,等.陕南秦巴山区地质灾害隐患调查识别探讨——以柞水县为例[J].灾害学,2016,31(3):230-234.
- [5] CARLTON L H O. Development of an unstable slope management system [R].Gniversity of Massachusetts Amherst, 1991.
- [6] HO C L, KNUTSON R. A Pilot study of an unstable slope management system[R].Washington State Transportation Center, Pullman, 1994.
- [7] 乔建平.不稳定斜坡危险度的判别[J].山地研究,1991(2):117-122.
- [8] 马建青,谢宗英,李小林,等.青海省重大工程区潜在不稳定斜坡调查与灾害风险评价[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(2):91-94.
- [9] 强菲,赵法锁,段钊.陕南秦巴山区地质灾害发育及空间分布规律[J].灾害学,2015,30(2):193-198.
- [10] 赵法锁,王勇智,陈新建,等.陕西省柞水县地质灾害详细调查报告[R].西安:中国地质调查局西安地质调查中心,2013.
- [11] 强菲,赵法锁,党亚倩.陕南秦巴山区地质灾害与影响因素的相关性分析[J].南水北调与水利科技,2015,13(3):557-562.
- [12] 曹东宏,朱赖民,李桦,等.陕西省柞水县王家沟卡林型金矿床地质特征及成因初探[J].地质与勘探,2009,45(1):23-29.
- [13] 姜建伟,赵法锁,祝俊华,等.陕西省吴起县斜坡几何形态与地质灾害相关性研究[J].灾害学,2018,33(2):188-192.
- [14] 张茂省,校培喜,魏兴丽,等.延安市宝塔区滑坡崩塌地质灾害[M].北京:地质出版社,2009.
- [15] 张俤元,王士天,王兰生.工程地质原理[M].北京:地质出版社,1994.
- [16] 祝俊华,陈志新,赵法锁,等.延安市不稳定斜坡发育特征研究[J].灾害学,2016,31(4):61-64.
- [17] 李博融.秦巴山区堆积层滑坡发育规律及危险性研究[D].西安:西安科技大学,2012.
- [18] 徐建伟.水环境对边坡稳定性影响的分析[J].公路,2009(7):47-50.

(责任编辑 李新)