

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.02.01

青藏高速公路某隧道出口溜砂坡形成机理分析

邢 军, 王建斌

(西安中交公路岩土工程有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 基于青藏高速公路某隧道出口溜砂坡的现场勘察、测试及室内试验, 通过工程地质分析与相似模型试验, 对该溜砂坡的发育特征、影响因素、形成机理进行了探讨, 并提出了防治对策。结果表明: 该溜砂坡为大型砂粒、碎屑牵引式中强活动溜砂坡; 不同颗粒比重条件下溜砂坡的影响因素主要包括含水率、冻融、地震力、工程活动等方面, 中砂的天然休止角小于粗砂、砾砂等粗颗粒, 含水率与砂粒的天然休止角呈正相关, 在含水率达到 10% 以后影响效果减弱, 冻融作用对粗颗粒的休止角影响较大, 当含水率达到一定条件后, 冻融作用才开始凸显, 当含水率增大到一定程度时, 冻融对休止角的影响呈减弱趋势, 地震力作用在低含水率条件下, 作用显著, 随着含水率的增加, 效果减弱; 将溜砂坡划分出了砂源区、溜动区、堆积区三个分区, 从力学、运动学角度分析了该溜砂坡的形成、运动与复活全过程; 提出了砂源区控制 + 固砂 + 排砂综合防护对策。

关键词: 青藏高速; 溜砂坡; 形成机理; 模型试验

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)02-0001-08

Development mechanism of the sand-sliding slope at a tunnel exit in Qinghai-Tibet Expressway

XING Jun, WANG Jianbin

(The Xi'an China Highway Geotechnical Engineering Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: The development characteristics, influencing factors and formation mechanism of the sand-sliding slope were discussed based on the site survey, testing and laboratory tests of the sand-sliding slope at the exit of a tunnel on the Qinghai-Tibet Highway, through engineering geological analysis and similar model tests, and then prevention and control strategy were proposed. The results show: The sand-sliding slope is a large-sized sand and debris-dragging medium-strong active sand-sliding slope; Influencing factors under different particle specific gravity conditions include moisture content, freezing and thawing, seismic forces, and engineering activities. The natural angle of repose in sand is smaller than that of coarse sand, gravel, etc. The moisture content is positively correlated with the natural angle of repose of the sand, and the effect is reduced after the moisture content reaches 10%. Freeze-thaw effects have a great influence on the angle of repose of coarse particles. When the moisture content reaches a certain condition, the freeze-thaw effect begins to become prominent. When the moisture content increases to a certain extent, the influence of freezing and thawing on the angle of repose tends to decrease. Seismic force acts at a low moisture content and has a significant effect. As the moisture content increases, the effect decreases. The sand-sliding slope was divided into three zones: the sand source zone, the slip zone and the accumulation zone. The whole process of formation, movement and resuscitation of the sand-sliding slope was analyzed from the perspective of mechanics and kinematics. The comprehensive protection measures of sand source area control, sand consolidation and sand discharge are put

收稿日期: 2018-06-27; 修订日期: 2018-12-26

基金项目: 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室自主创新基金项目(ZC20170511)

第一作者: 邢 军(1980-), 男, 内蒙古人, 高级工程师, 主要从事高速公路勘察设计 & 科研工作。E-mail: 57496139@qq.com

forward.

Keywords: Qinghai-Tibet Expressway; sand-sliding slope; development mechanism; model test

0 引言

随着我国西部大开发战略的逐步实施,青藏高原地区的基础设施建设不断完善,然而受高寒、高海拔特殊的气候环境与地质条件的控制,在工程建设中难免会遇到许多特殊工程病害,如溜砂坡。溜砂坡主要分布于我国西部较干旱的高寒山区,如西藏、新疆等地,虽然单次溜动量不大,但其活动频率高且无长期有效的防治措施,严重影响公路、铁路工程的正常建设与运营。

国内外学者对溜砂坡的研究尚处于探索阶段。李宾等^[1]对天山公路溜砂坡病害的形成条件和影响因素进行了分析,并基于模糊数学与层次分析对溜砂坡的危险性进行了评价;张元才等^[2]认为细颗粒层是导致滑塌式大规模失稳的关键;张小刚等^[3-4]、梁光模等^[5]对藏东南溜砂坡的形成过程、影响因素与综合防治技术进行了研究;薛现凯等^[6]对冻融、含水量、粒组影响因素进行了正交试验分析,并据此预测了溜砂坡的发展趋势;罗路广等^[7]采用 AHP-模糊综合评价法对天山北麓溜砂坡的易发性进行了评价。前人关于溜砂坡的研究多集中于藏东南、新疆天山地区溜砂坡的形成条件、失稳机制、演化规律等方面,对于藏北高寒、高海拔、高烈度地区的研究尚空缺。随着以青藏高速公路为代表的一大批国家重点工程的相继实施,藏北地区工程建设中同样遇到了溜砂坡病害,为此有必要对藏北地区溜砂坡病害的形成机理及防治对策进行研究。

本文在总结分析前人研究成果的基础上,以在建青藏高速公路某隧道工程的出口处溜砂坡为研究对象,通过工程地质分析与相似模型试验,对该溜砂坡的发育特征、形成条件及失稳机制进行探讨,并提出防治对策,为本工程及本地区类似工程设计提供参考。

1 区域气候与地质条件

1.1 气候特征

溜砂坡区属于高原寒温带半干旱季风气候区,海拔 4 300 m,主要气候特点为:冬季寒冷、干燥,昼夜温差大;夏季温暖湿润,雨热同期,干湿季分明,天气变化大。年平均气温为 1.3℃,冬季气温低至 -15 ~ -25℃,年均降雨量 481 mm,年均蒸发量 1 725.7 mm,

年均日照时数 2 880.9 h,地表温度平均为 5.9℃。

1.2 地形地貌

溜砂坡位于堆龙曲右岸斜坡上,处于“V”字形峡谷与宽缓河谷接壤地带,坡面相对平坦,冲沟发育。山梁呈上缓中陡下缓的凸形山坡,山顶因基岩风化剧烈呈馒头状。斜坡整体倾向东,倾角 20°~35°。山顶高程为 4 580.0 m,沟底高程为 4 260.0 m,相对高差 320.0 m。地表零星覆盖草甸,自然斜坡冲刷严重,无整体变形破坏迹象,新建高速公路某隧道出口位于坡脚区域,处于溜砂坡堆积区。



图 1 溜砂坡地貌照片

Fig. 1 Topography of sand-slide slope

1.3 地层岩性

该处古近系岩浆活动活跃,出露的花岗岩为古近系黑云母花岗岩。从现场勘察结果判定,此处河道两岸山区在第四系早—中更新世曾发生过大型滑坡,并且堵塞堆龙曲河道形成了堰塞湖,导致上游水位上涨,裸露的基岩经过水的长时间浸泡与酸性雨的淋蚀,破坏了花岗岩内部的粒径组成^[8]。至第四系全新世,河道恢复时,该区地表植被稀少,生态环境脆弱,地表水侵蚀作用严重,岩体物理风化作用显著,为溜砂坡的形成提供了丰富的物质来源与环境条件。斜坡中、下部已形成大规模花岗岩风化砂砾堆积区,厚度 20~30 m。

1.4 地质构造

溜砂坡区东侧约 1.5 km 处为羊八井盆地东南边界活动断层(F₅₉),属于古近系压扭性断层在第四纪重新活动断层,受地质构造影响,溜砂坡区基岩破碎,发育有多组张性节理面,延伸长度 1~8 m 不等,张开度 0.5~2 cm,充填物多为细砂、粉土,线密度 1~3 条/m,这些张性节理面在长期外界风化营力作用下贯通,形成风化碎块,为溜砂坡的形成提供了良好的物质来源。

1.5 地震

溜砂坡区新构造运动活动强烈,地震活动频发。根据《中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306—

2015),该区地震动峰值加速度为 0.30g,地震基本烈度为Ⅷ度,反应谱特征周期为 0.45 s,为强震区。在水平地震力作用下,砂砾的天然休止角进一步降低,不利于溜砂坡的稳定。

1.6 水文地质条件

斜坡中部两侧发育有两处泉点,均系地下裂隙水遇阻溢出排泄,右侧泉点标高 4 300 m,左侧泉点标高

4 326 m,基岩裂隙发育一较发育,泉水量受季节变化较大,冬季枯水,夏季水量充沛。

2 溜砂坡发育特征

根据现场调查,将溜砂坡划分出了砂源区、溜动区、堆积区三个地貌分区(图 2、图 3)。

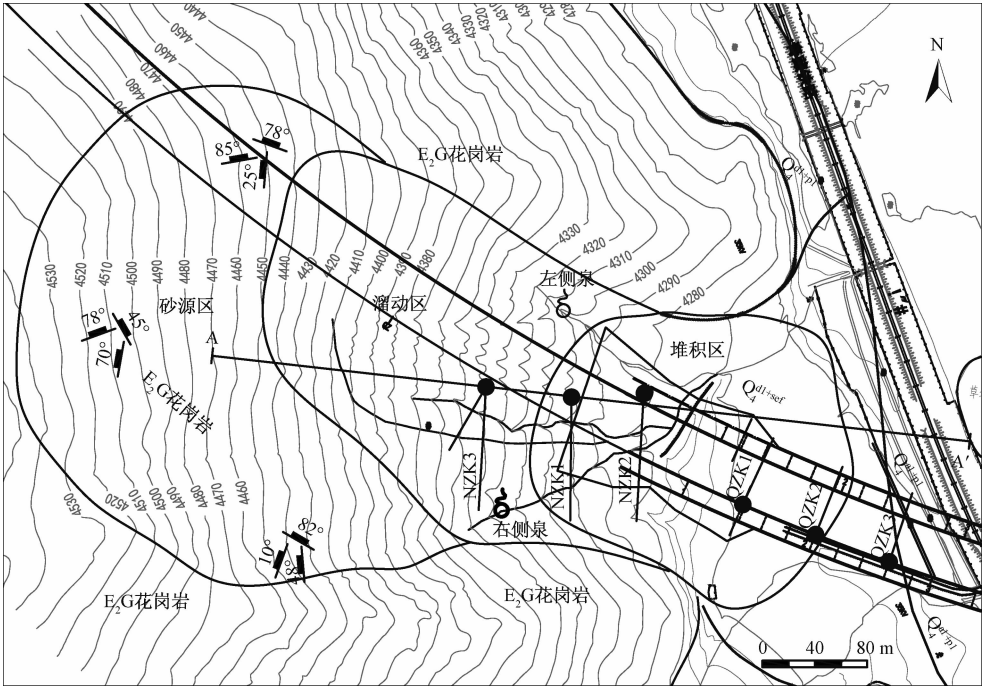


图 2 溜砂坡工程地质平面图
Fig.2 Engineering geological plan of sand-slide slope

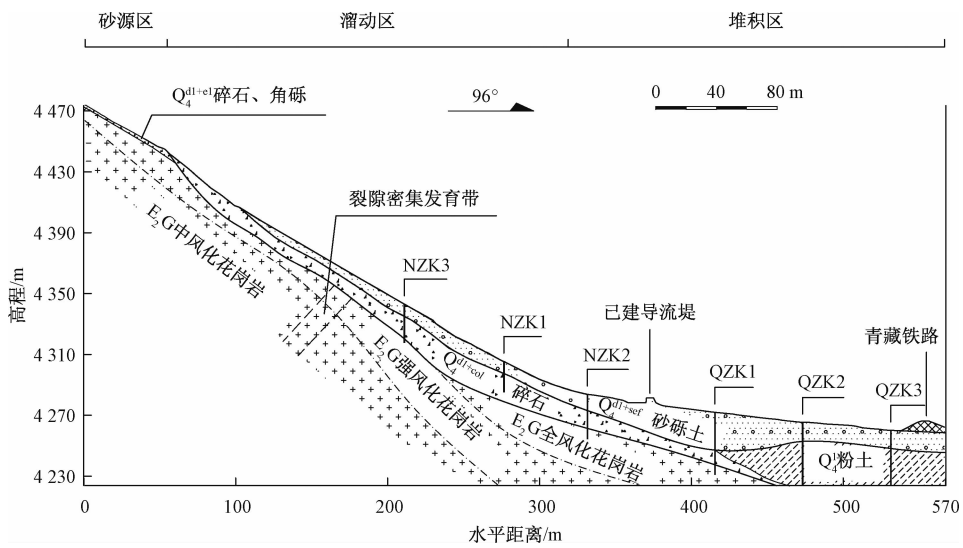


图 3 溜砂坡工程地质纵断面
Fig.3 Engineering geological profile of sand-slide slope

砂源区位于坡体上段,自然斜坡坡度约 26° ,该区基岩物理风化强烈,出露面积约 $20\,000\text{ m}^2$,地层岩性为 E_2G 花岗岩,节理裂隙很发育,岩体风化呈碎块状,加之地形陡峭,风化碎屑的运动形式以岩屑崩落为主,是该溜砂坡的砂源区。

溜动区是溜砂溜动的区域,自然斜坡坡度约 39° ,溜动区宽度约 200 m ,本区基岩仍发生着强烈的物理风化作用,根据现场调查溜动区边界发育有两处泉点,该区坡面上可见冲沟系统,由于坡面流水侵蚀作用相对较弱,风化砂粒沿沟系汇集顺坡运动,砂粒具有较强的磨蚀作用,因而沟系的地貌形态宽浅,且具有沟槽边沿平缓,沟系流线平缓的特征。

堆积区位于高陡斜坡的坡脚,是溜砂坡堆积的场所,自然斜坡坡度约 20° ,溜砂堆的组成物质主要为粗砂、砾砂与中砂、细砂,夹 $5\% \sim 10\%$ 的角砾,可见少量碎石;宏观上物质的颗粒较为均一,分选性较好,级配差。

本文所研究溜砂坡系隧道口开挖,坡脚前缘临空面突然加大导致的牵引式溜砂坡。物质组成以砂粒为主,含量大于 80% ,母岩成分为花岗岩,属于砂粒、碎屑溜砂坡。由于坡表植被稀少,物源区基岩以中风化为主,间断性向溜动区供砂,属于中强活动溜砂坡。溜砂坡的面积约为 $43\,000\text{ m}^2$,属于大型溜砂坡。综上,该溜砂坡可定性为大型砂粒、碎屑牵引式中强活动溜砂坡。

3 多种因素作用下溜砂坡天然休止角变化规律

根据前人的研究经验^[9-11],溜砂坡砂粒的起动受控于砂坡的天然休止角,而天然休止角一般与物质组成(粒径)、含水量、冻融作用、地震力水平等因素有关。本文通过建立相似模型试验,采集溜砂坡区的砂粒样品,模拟多因素组合条件下溜砂坡的天然休止角变化规律,对溜砂坡的稳定性影响因素进行探讨。

3.1 实验装置

在借鉴前人研究的基础上,采用自制溜砂坡模型试验装置(图4)对多因素组合条件下溜砂坡的运动过程进行模拟,并测量其天然休止角。

试验装置的上半部 AB 段坡度为 50° ,大于一般砂粒的天然休止角;下半部 BC 段为模拟堆积区缓倾段,坡度为 8° 。本试验装置的操作为:在试样漏斗中装满砂粒(模拟砂源区),打开 A 处阀门,砂粒从 A 点向下溜至 B 点(模拟溜动区)开始堆积,并形成砂自由堆积

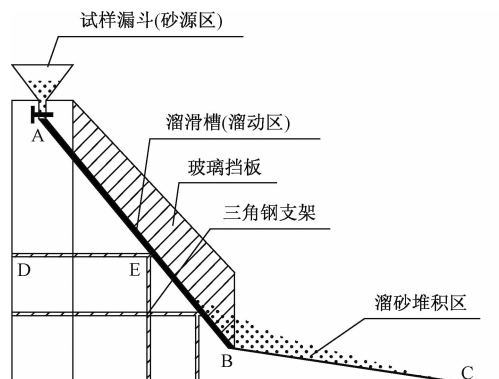


图4 溜砂坡模型试验装置示意图

Fig.4 Model test of sand slide slope

体(模拟堆积区),在透明玻璃挡板侧面可以测量砂堆斜坡角度,即为天然休止角。

3.2 试验样制作

对溜砂坡堆积区进行取样,并进行颗粒分析试验,对筛分结果进行统计,得到各砂粒所占百分比见表1。

表1 溜砂坡试样颗粒分析成果

Table 1 Grain analysis results of sand-slip slope samples

土的名称	砾砂	粗砂	中砂	细砂	粉粒
粒径/mm	2~20	0.5~2	0.25~0.5	0.075~0.25	0.075
占百分比/%	27.4	25.5	11.5	32	3.6

溜砂坡的物质组成以砾砂、粗砂、中砂、细砂为主,粉粒含量较少,故本模型试验样品制作主要考虑砾砂、粗砂、中砂、细砂,各粒组样品的制作主要通过筛分试验完成。样品烘干后,将四种砂样的含水率分别设定为 0% 、 2% 、 4% 、 6% 、 8% 、 10% 、 12% 、 15% 的状态下进行试验。

3.3 试验过程

(1)将图4所示试验装置置于冻融循环箱中,冻融循环箱处于关机状态。

(2)依照3.2节中制作的四种砂样分别在不同含水率状态下按照3.1节试验装置操作进行堆积试验,并通过侧面透明玻璃挡板测定天然休止角变化情况。

(3)冻融循环箱开机,将四种砂样分别在 -20°C 环境下冻结 12 h 后进行堆积试验,然后将温度设定为 20°C 持续融化 12 h 后进行堆积试验,并及时通过侧面透明玻璃挡板测定天然休止角变化情况。

(4)地震工况试验过程:采用榔头敲击支架 D 处施加水平地震荷载,并通过 DE 横杆传递至 AB 坡体,实现模拟水平地震力的效果,堆积试验过程中保持 2 次/s 的固定频率敲击,单次敲击能量保持固定,直至坡表砂粒稳定为止。

3.4 含水率影响分析

从图5可知,四种砂样的休止角与含水率呈正相关,当含水率达到10%以后,休止角变化趋势减弱,其中中砂、细砂的变化趋势灵敏度高,这可能是因为中砂、细砂的颗粒较细,含水率趋于饱和后,土的重度增加,土体压密,颗粒的接触关系由支架点接触转变为棱角与粒面接触^[12-13],颗粒之间的咬合力加大导致的。

在干燥条件下,细砂的天然休止角最大,中砂最小,粗砂、砾砂相当,说明在高寒干旱环境下,中砂含量越高,形成溜砂坡的可能性越大。

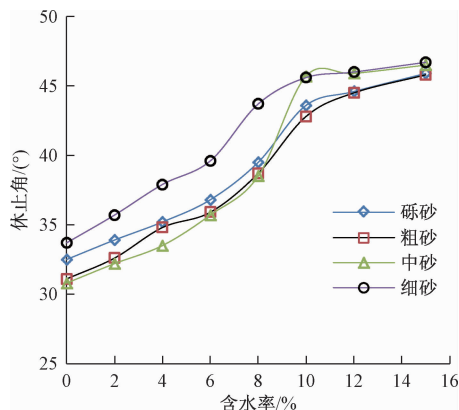


图5 不同粒径砂土的休止角随含水率变化曲线

Fig. 5 Curve of resting angle with moisture content

3.5 冻融影响分析

对比分析图6(a、b、c)可知,冻融作用对粗砂与中砂的影响较大,对细砂的影响较小,但只有当含水率达到一定程度时,冻融作用才开始凸显,当含水率增大到一定程度时,冻融对休止角的影响呈减弱趋势。

对于粗砂,含水率在6%~10%时冻融作用明显,在含水率为10%时作用最明显;粗砂的变化呈凹曲线,这可能是由于随着含水率的增加,对粗砂颗粒之间起到了一定的润滑作用,颗粒之间的摩擦力减小,曲线下降(融化状态4%~10%,冻结状态4%~6%);随着含水率的持续增加,融化状态下颗粒之间的润滑作用增势削弱,冻结状态的砂粒挂水降低了整体颗粒的磨圆度,颗粒之间的咬合程度进一步加大,随着含水率的增加颗粒持续压密,两种状态的颗粒咬合力均增加,曲线表现为上升(融化状态10%~15%,冻结状态6%~15%)。

对于中砂,含水率在0%~10%时冻融作用显著,在含水率10%时作用最显著;中砂的变化呈递增曲线,这可能是由于中砂的颗粒相对粗砂较细,中砂的运动形式为“滑动摩擦+克服颗粒咬合翻转^[2]”的组合

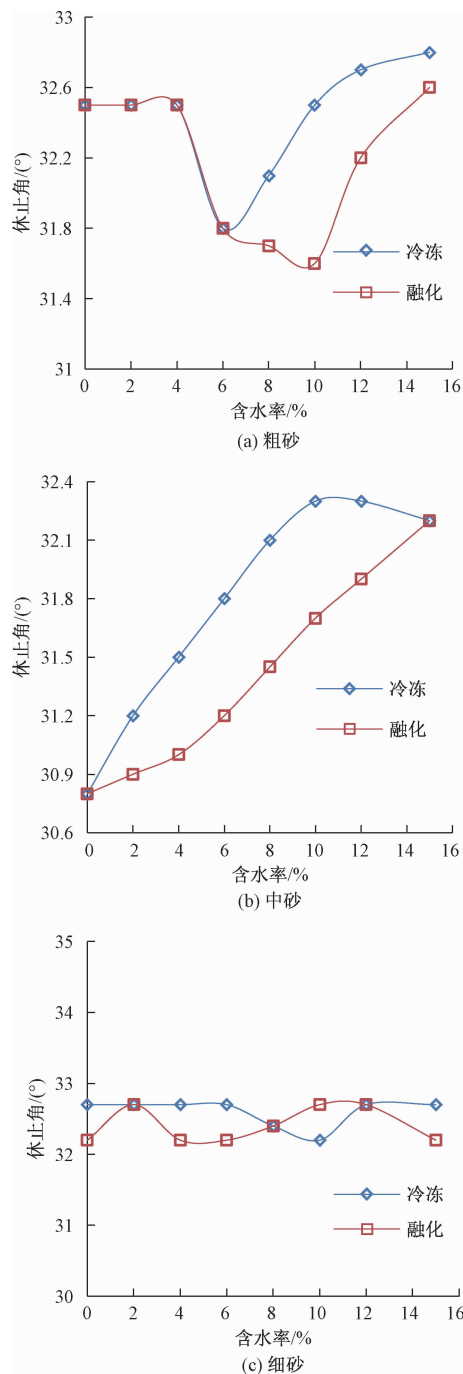


图6 冻融条件下砂的含水率与休止角关系曲线

Fig. 6 Relationship between the moisture content of sand and the stopping angle in freezing-thawing process

模式,在融化状态下随着含水率的增加,砂粒的容重增大,颗粒进一步压密,虽然含水率对中砂颗粒之间能够起到一定的润滑作用,但随着含水率的持续增大压密作用更为显著,表现为曲线的先缓增(含水率<4%)后递增(含水率4%~15%)。而在冷冻状态下,颗粒挂水结冰,一方面增加了容重,同时又降低了颗粒的磨

圆,咬合力不断加大,颗粒的运动形式由“滑动摩擦+克服颗粒咬合翻转”逐渐转变为“克服颗粒咬合翻转”为主,曲线表现为上升;当含水率增大到一定程度时,颗粒之间被固态水充填,冻胀力对颗粒连接链起到一定的松动作用,表现为曲线的平缓甚至下降(含水率10%~15%)。

对于细砂,随含水率的变化,冻融作用对休止角有一定作用,但效果不明显,变化幅度不超过 0.5° 。细砂的曲线表现为反复,这是由于在低含水率状态下,冻结状态的挂水颗粒磨圆度较差,颗粒之间的运动以克服咬合而翻转为主,对应的曲线增大;当含水率增大到一定程度时,固态水充填颗粒间隙,冻胀力对颗粒连接链起到一定的松动作用,休止角有减弱的趋势,但增加的容重会导致颗粒之间压密,休止角有增加的趋势,两者处于相互抵消状态,导致了曲线的反复变化。

在极端低温与高温循环交替条件下,随着含水率的变化,坡体粗砂、中砂等粗颗粒的休止角处于反复变化中,随着休止角的不断变化,溜砂坡的力学状态也在不断改变,当休止角小于自然斜坡坡度时,可能进一步产生溜滑。

3.6 地震力影响分析

为了突出地震荷载影响,将试样按照溜砂坡天然物质组成进行配比,得到的结果见图7。

当含水率较低时,地震力作用显著,砂土的休止角明显变小;当含水率增大到一定程度时,地震作用影响减弱,砂土的休止角变化很小。在水平地震力作用下原始坡表的应力分布发生了变化,坡体表面颗粒动能增大,颗粒之间的接触面积减小,宏观表现为坡体更加松散,溜砂坡的下滑力大于砂粒与坡面之间的摩擦阻力,增加的动能转化为势能耗散,溜砂坡继续向下溜动,直至力学状态再次达到平衡。

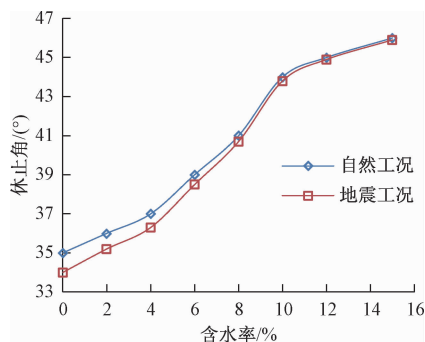


图7 地震力对休止角的影响变化曲线

Fig. 7 Influence of seismic force on resting angle

4 溜砂坡形成机理

溜砂坡的形成与运动是受多因素组合影响的复杂过程,主要可分为内在因素与外在因素。内在因素主要受地形地貌、地层岩性、地质构造控制,是溜砂坡形成的先决条件;外在因素主要包括物质组成、冻融循环、含水率、地震力、人类工程活动等,是溜砂坡运动与复活的启动条件。溜砂坡的形成需经历碎屑、砂粒的形成→运动→在山坡脚堆积等过程,可概化为如图8所示模型。

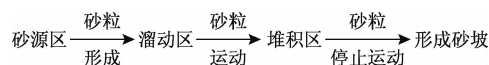


图8 溜砂坡形成过程概化模型

Fig. 8 Generalized model of sand slide slope formation

溜砂坡的形成首先应具备物质来源,即砂源区的形成。溜砂坡孕育于隧道出口高陡斜坡上,地形高差300 m,自然斜坡坡度大于 40° ,具备产生溜砂坡的地形条件。地层岩性为古近系(E_2G)花岗岩,受地质构造与外界风化营力作用,岩体风化强烈,经过剥落解离后,形成了溜砂坡的物质来源。

随着砂源区物质的增多,以及风化程度的加剧,粗颗粒物质进一步细化,砂粒占比不断增大,堆积物因物理状态的变化引起内部应力的不均匀分布,沿着溜动区不断向下运动,受物质之间摩擦阻力的影响,势能耗散,待力学状态重新达到平衡后堆积于斜坡中下部,形成暂时稳定的溜砂坡。

随着极端低温、高温的不断循环交替(冻融循环),溜砂坡物质的颗粒成分比例、含水率不断变化以及地震作用的影响,溜砂坡的天然休止角处于不断变化中,当冻融循环次数、颗粒成分比例、地震力达到一定水平后,溜砂坡的休止角小于自然斜坡坡度,坡表砂粒因应力不平衡而向下溜动,溜砂坡重新复活,直至再次达到应力平衡状态为止。人类工程活动对溜砂坡的改变最为显著,隧道出口边坡工程的开挖扰动,势必会改变坡体的临空条件,坡表产生应力集中,致使溜砂坡失稳,形成工程型牵引式溜砂坡。

由于溜砂坡影响因素的复杂性,特别是砂源区的不断供砂、堆积区的反复复活,导致了溜砂坡长期处于活跃状态。溜砂坡地处高海拔干旱地区,低含水率条件下不利于溜砂坡的稳定,细颗粒物质、高地震烈度及工程活动是溜砂坡复活的主要诱发因素,冻融作用在低含水率作用下效果不明显,但对砂源区岩体风化有促进作用。

5 防治对策建议

近年来的研究与工程实践多集中于藏东南地区^[14-16],对溜砂坡灾害的防治对策主要可归纳为绕避与清除、砂源区控制、固砂、拦砂、排砂等工程措施。针对本工程,由于溜砂坡规模大、活动性强、砂粒占比例高,建议采用砂源区控制+固砂+排砂综合防护。

砂源区控制,可采用喷砂防冻快速固结剂的方式进行控制,可以达到停止或少量产砂的目的。

固砂工程,可通过表部+深部固砂的形式,表部固砂可采用SNS柔性主动防护网,深部固砂可采用注浆固砂。

排砂工程,可在隧道出口设置排砂棚洞。

6 结论

(1)青藏高速公路某隧道出口溜砂坡溜砂坡作为一种特殊病害,因其成因复杂、活动性强、治理难度大等特点,严重威胁工程建设及工后运营安全,这也是我国青藏高原地区公路建设中遇到的普遍性难题。

(2)天然状态下,中砂的天然休止角小于粗砂、砾砂等粗颗粒的天然休止角;含水率与砂粒的天然休止角呈正相关,在含水率达到10%以后影响效果减弱;冻融作用对粗颗粒的休止角影响较大,当含水率达到一定条件后,冻融作用才开始凸显,当含水率增大到一定程度时,冻融对休止角的影响呈减弱趋势;地震力作用在低含水率条件下,作用显著。

(3)溜砂坡的形成与运动是受内在因素(地形地貌、地层岩性、地质构造)与外在因素(物质组成、冻融循环、含水率、地震力、人类工程活动)影响的复杂过程,其中低含水率、细颗粒所占比重、高地震烈度及工程活动是溜砂坡复活的主要诱发因素。溜砂坡的形成与运动过程可概化为砂粒的形成、运动与堆积三个阶段。

(4)在分析溜砂坡成因的基础上,提出了砂源控制+固砂+排砂的综合防护对策,可供类似工程设计参考。

参考文献:

- [1] 李宾,裴向军. 国道217线天山公路溜砂坡病害形成机制分析及防治对策[J]. 路基工程, 2012(2): 174-177.
- LI Bin, PEI Xiangjun. Formation mechanism analysis and prevention countermeasures of sand-sliding slope

along Tianshan Highway of state road 217 [J]. Subgrade Engineering, 2012(2): 174-177.

- [2] 张元才,黄润秋,傅荣华,等. 溜砂坡大规模失稳动力学机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 70-77.
- ZHANG Yuancai, HUANG Runqiu, Fu Ronghua, et al. Experimental research on dynamic failure mechanism of large-scale talus slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 70-77.
- [3] 张小刚,杨天军,陈伟. 藏东南溜砂坡的发育特征与防治[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 47-51.
- ZHANG Xiaogang, YANG Tianjun, CHEN Wei. Development characteristics and prevention of the sand-sliding slope in south-east Tibet [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 47-51.
- [4] 张小刚,杨天军,田金昌. 川藏公路特殊碎屑流灾害综合防治技术[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 2031-2037.
- ZHANG Xiaogang, YANG Tianjun, TIAN Jinchang. The comprehensive prevention and control measures of debris flow along the Sichuan-Tibet Highway [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(12): 2031-2037.
- [5] 梁光模,王成华,张小刚. 川藏公路中坝段溜砂坡形成与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 33-38.
- LIANG Guangmo, WANG Chenghua, ZHANG Xiaogang. The formation of sand-sliding slope and its controlling countermeasure for Zhongba section of Sichuan-Tibet Highway [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(4): 33-38.
- [6] 薛现凯,田荣燕,谢庆雪,等. 基于正交试验的溜砂坡休止角分析[J]. 公路, 2018(3): 9-14.
- XUE Xiankai, TIAN Rongyan, XIE Qingxue, et al. Slope angle analysis of sand-sliding based on orthogonal experiment [J]. Highway, 2018(3): 9-14.
- [7] 罗路广,裴向军,裴钻,等. 天山北麓溜砂坡分布特征及易发性研究[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 200-205.
- LUO Luguang, PEI Xiangjun, PEI Zuan, et al. Distribution characteristics and susceptibility of talus slopes in the northern piedmont of Tianshan Mountain [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 200-205.
- [8] 潘懋,李铁峰. 灾害地质学(第2版)[M]. 北京:

- 北京大学出版社, 2008.
- PAN Mao, LI Tiefeng. Disastergeology (Version 2) [M]. Beijing: Peking University Press, 2008.
- [9] 常旭, 吴国雄, 郭迁, 等. 溜砂坡形成机理及防治措施研究[J]. 公路, 2006(1): 89 - 91.
- CHANG Xu, WU Guoxiong, GUO Qian, et al. Study on formation mechanism and prevention measures of sand-slide slope[J]. Highway, 2006(1): 89 - 91.
- [10] KEITH A. HOLSAPPLE. Modeling granular material flows; The angle of repose, fluidization and the cliff collapse problem[J]. Planetary and Space Science, 2013(82/83): 11 - 26.
- [11] SHUNZO KAWAJIRI, SATORU SHIBUYA, et al. Evaluating slope stability of a sand dune by in-situ surveys and laboratory tests[J]. J-STAGE, 2009: 233 - 244.
- [12] LANMIN WANG, JIN DENG. The loess microstructure kinds and its seismic subsidence[J]. Natural Science, 2013(7): 792 - 795.
- [13] FULI MA, JING YANG, XIAOHONG BAI. Water sensitivity and microstructure of compacted loess[J]. Transportation Geotechnics, 2017(11): 41 - 56.
- [14] 王成华, 徐骏, 何思明, 等. 粒状碎屑溜砂坡树根桩固砂防护技术[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 93 - 96.
- WANG Chenghua, XU Jun, HE Siming, et al. Consolidation techniques by micro-root pile [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 93 - 96.
- [15] 金仁祥, 尚岳全, 孙红月. 川藏公路西藏境内溜砂坡防治工程研究[J]. 地球与环境, 2005, 33(1): 375 - 379.
- JIN Renxiang, SHANG Yuequan, SUN Hongyue. Study on engineering control of sand-sliding slope along the Sichuan-Tibet Highway within the bounds of Xizang[J]. Earth and Environment, 2005, 33(1): 375 - 379.
- [16] 叶唐进, 谢强, 王鹰. 国道 G318 西藏境内溜砂坡水砂流的防治措施[J]. 公路, 2017(4): 283 - 286.
- YE Tangjin, XIE Qiang, WANG Ying. Measures for prevention and control of water and sand flow in the sand-slide slope of Tibet on national highway G318 [J]. Highway, 2017(4): 283 - 286.

封面照片说明

山西省乡宁县枣岭乡滑坡

2019 年 3 月 15 日 18 时 10 分许, 山西省乡宁县枣岭乡卫生院北侧山体滑坡, 致卫生院一栋家属楼(6 户) 和一座简易用房, 信用社一栋家属楼(8 户)、一座小型洗浴中心楼垮塌, 其中一栋楼整体滑落半山腰, 两栋垮塌散落沟坡, 大部分被黄土掩埋, 造成人员被困, 当地紧急组织力量全力搜救。截至 21 日 11 时 22 分, 乡宁县 3.15 山体滑坡致房屋坍塌事故最后一名失联人员被找到, 此次灾害共造成 20 人遇难。

滑坡所处位置位于枣岭乡卫生院北侧, 属于典型的黄土残垣沟壑区, 地貌特点为黄土沟梁相间出现, 黄土残垣呈近东西向展布, 中间发育近东西向狭窄的 V 型狭长深切冲沟。形上东北略高于西南。坡体岩性主要由杂填土、 Q_3 马兰黄土、 Q_2 离石黄土组成。

山西省相关部门组织专家组进行次生灾害评估, 在灾害现场设立了观测点和观测哨, 24 小时值班预警, 全面排除地质灾害隐患, 确保不发生次生灾害。同时, 划定了危险区域, 妥善疏散周边群众, 确保了周边群众安全。

(自然资源部地质灾害技术指导中心 刘秋强供稿)