

文章编号:1004-4116(2021)04-0067-08

天陇铁路上倪滑坡工程地质特征分析及地质选线

李旭方

(中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043)

摘要:在天陇铁路勘察设计工作中,发现上倪滑坡是新建天水至陇南铁路一处控制性不良地质体。本文在充分获取地质资料的基础上,从地形地貌角度出发,结合其地层岩性特征,分析了滑坡成因,认为上倪滑坡在北侧和南侧各存在一个软弱面,滑坡整体稳定性较差,尤其是滑坡北侧危险性较大。通过力学计算,显示该滑坡自然状态下能够保持相对稳定,但在地震或暴雨天气下发生滑动的可能性极大,对线路工程具有严重影响。经过对三种线路方案的综合比选,建议以深埋隧道形式从后壁通过上倪滑坡,保证工程安全性。

关键词:天陇铁路;上倪滑坡;地质选线

中图分类号:P 642. 22 **文献标志码:**A

滑坡是山区铁路选线的重要影响因素,是工程地质行业的研究重点。针对滑坡的研究主要集中在滑坡的实地勘探与室内试验、机理分析、力学模拟计算、稳定性评价、工程治理以及变形监测等方面^[1-3]。

新建天水至陇南铁路由天平铁路杨家碾站引出,向南跨渭河,穿越秦岭至陇南,沿途跨越黄土梁峁区、天水—西礼盆地中山区和秦岭中山区三大地貌单元,工程地质情况极为复杂。上倪滑坡位于黄土梁峁区,区内沟壑纵横,黄土覆盖薄厚不一,勘察期间发现其黄土厚度最大超过30 m;且其位于西秦岭北缘断裂带上,地震频发,滑坡对铁路选线方案影响极大。

自2020年12月初至2021年1月中旬,通过对上倪滑坡开展实地调查,进行了详细的工程地质调绘;进而开展钻探及室内试验,探明地层岩性,分析了上倪滑坡的成因及稳定性。并运用Geo-Studio软件slope模块对其稳定性进行了计算和评价,深化了对上倪滑坡的认识,有效指导了天陇铁路的地质选线工作。

1 地质条件环境

天水地区地震频发,有记载的地震达129次,其中7.0级以上12次,地震为滑坡的发生创造了条件,在历史上,天水地区出现了不少因地震诱发大量滑坡的事例^[4]。上倪滑坡位于甘肃省天水市清水县红堡镇倪家村上倪东侧,滑坡后壁地理坐标:N 34° 37'54. 1",E 105°57'11. 6",为铁路勘测过程中发现的一处巨型滑坡,严重影响天陇铁路的线路方案稳定(图1)。

研究区域位于西秦岭北缘断裂带上,地质构造复杂,整体走向为NWW。主河谷为牛头河,属渭河二级支流,河流蜿蜒,水量随季节变化明显。根据清水县气象站的气象资料显示,2010—2019十年内,区域内年平均气温9.8℃,最高气温36.2℃,最低气温-24.9℃;最大冻结深度为77 cm。降雨量随季节变化,多集中于6~8月,年平均降水量为586 mm,最大年降水量为866.8 mm;一次性最大降雨量及延续时间为84.7 mm/17天。年平均蒸发量为1374.7 mm,远大于降雨量。

根据地质调查及钻探资料显示,区域内主要地层岩性有:第四系黄土,以风积、冲积成因为主;第三系泥岩、砂岩、砾岩;早古生界大理岩、片麻岩以及花岗岩。

收稿日期:2021-01-31

作者简介:李旭方(1993~),男,河南安阳人,硕士,主要从事铁路勘察设计工作。E-mail:13121919453@163.com

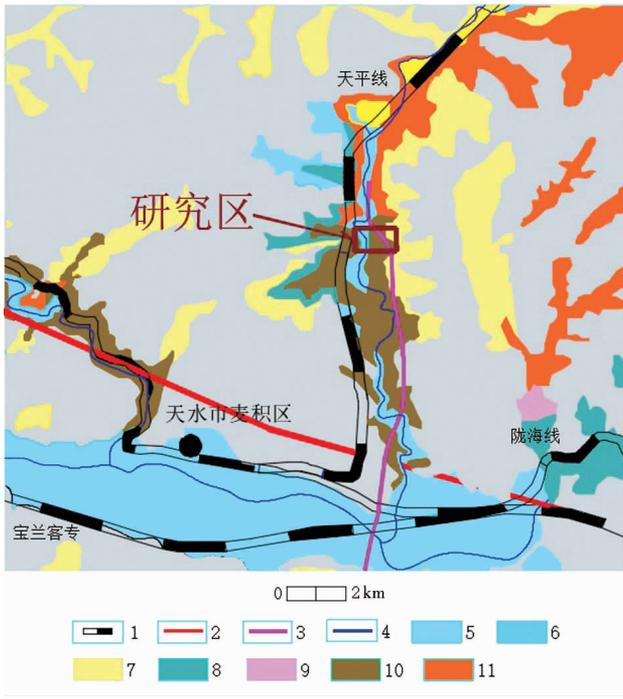


图1 区域地质简图

Fig. 1 Regional geological sketch

- 1—既有铁路;2—西秦岭北缘断裂;3—天陇铁路;4—水系;
- 5—第四系全新统;6—第四系更新统;7—第三系N;
- 8—第三系E;9—泥盆系;10—早古生界;11—燕山期、印支期

2 上倪滑坡特征及成因分析

2.1 地形地貌特征

研究区所在区域为典型黄土梁峁地貌,高程在1 120 ~ 1 450 m之间,第四系黄土广布,多为风积成因;区域内沟壑连绵,地形起伏较大,相对高差

200 ~ 330 m,沿河谷两岸发育大量滑坡群。上倪滑坡发育在NNW向的山体上,整体较陡,平均坡度约20°,山体底部为牛头河,常年流水、水量较丰;滑坡后壁高程约1 287 m,滑坡前缘紧邻牛头河,高程约1 155 m。牛头河谷内有既有天平铁路和在建天庄高速公路。

上倪滑坡工程地质平面图如图2所示,其主轴长度约345 m,横向宽度达42 m,滑体厚度达30 ~ 40 m,滑体体积约500万方,为一巨型深层滑坡。滑坡后壁呈圈椅状,坡面具鼓包状特征,可见滑坡台阶,后壁高陡。

(1) 滑坡后壁(图3)

上倪滑坡后壁陡峭,高度10 ~ 15 m,出露地层为上更新统风积黄土,受降雨影响,后壁冲沟发育;其上部为一自然平台,平台较为平整,植被较发育,且以多年落叶类乔木为主;平台稳定性较好,推测上倪滑坡向后发展的可能性较低。

(2) 滑坡上部(图4)

上倪滑坡坡面破碎,植被较发育,多为杂草灌木,局部可见马刀树。坡面受自然环境和人为改造影响较为严重,主要表现为以下两个方面:一是坡面上存在已被弃用的窑洞、弃耕的农田以及人工开挖的“Z”形道路,破坏了斜坡覆盖层的稳定性;二是受降雨冲刷影响,坡面破碎,发育多条“V”形冲沟,其中北侧冲沟向下深切达15 m以上,两侧无植被生长,尚处于冲沟发育的下切阶段,严重影响滑坡的稳定性。根据钻探资料揭示,冲沟两侧滑体厚度和成分不一,因此,推测上倪滑坡应以冲沟为界,在南侧和北侧各存在一个软弱面。

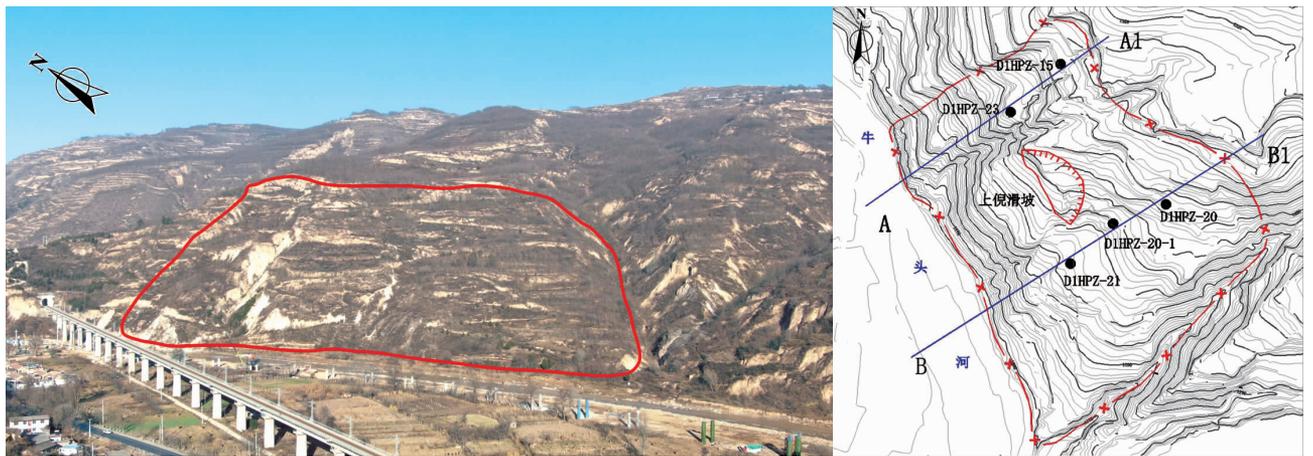


图2 上倪滑坡全貌及工程地质平面图

Fig. 2 Overall view of Shangni landslide and plan sketch of engineering geology



图 3 上倪滑坡后壁
Fig. 3 Shangni landslide scarp



图 4 上倪滑坡上部
Fig. 4 Upper part of Shangni landslide

(3) 滑坡前缘(图 5)

滑坡前缘为牛头河,牛头河为自北向南流向。上倪滑坡北侧为牛头河凹岸,受到较强的河流冲蚀,与之对比,滑坡南侧受冲蚀作用相对稍弱,从而形成“北侧较陡、南侧稍缓”的滑坡前缘特征。滑坡前缘出露地层为黏质黄土和碎石土,成分主要为片麻岩、大理岩。



图 5 上倪滑坡前缘
Fig. 5 Front edge of Shangni landslide

2.2 滑坡地层结构特征

为进一步研究上倪滑坡发育特点、分析其结构特征及形成条件,共布置了 5 个钻孔。根据地质调查和钻探资料揭示,上倪滑坡地层结构复杂,结合其规模、形态特点,推测其为多期次滑坡形成。

上倪滑坡坡面分布有第四系黏质黄土,薄厚不一,整体呈现“南侧薄、北侧厚”的特点:南侧黄土层厚约 5 ~ 8 m,北侧厚约 11 ~ 30 m。黄土以下主要为因滑动产生的碎石土,成分以早古生界灰白色、灰褐色大理岩和片麻岩为主。下伏基岩主要为早古生界大理岩、片麻岩,二者上部为全风化片麻岩呈柱状,较完整,强度较高,力学性质较好;大理岩岩质坚硬、

节理发育,岩石破碎,在钻探时受钻压及旋转切削作用,钻取岩芯多呈碎块状(图 6)。地下水主要为第四系孔隙水,钻探揭示其主要赋存于碎石土类地层中。

2.3 滑坡剖面结构分析

基于以上分析,结合地质调查和实地钻探资料,滑体中的主要成分互层分布,认为上倪滑坡为多期次滑坡;受地形地貌和地层岩性的控制,其在北侧和



图 6 典型岩芯照片(左为大理岩、右为片麻岩)
Fig. 6 Photo of typical rock core sample (left is marble, right is gneiss)

南侧应各存在一个软弱面,对两个软弱面分析如下:

(1) 滑坡北侧软弱面(图7)

上倪滑坡北侧黄土较厚,地形陡峭,是研究上倪滑坡稳定性的重要部分。通过钻探资料揭示,北侧剖面结构图。

上倪滑坡北侧具有“地形陡、黄土厚”的特点,滑坡后壁错动明显。上层黄土最厚处约30 m;下部基岩为片麻岩;中间滑带土主要为碎石土,厚度约8 m。稳定水位线位于滑带土附近,长期受水浸泡,形成软弱面。

从地形角度看,该坡面起伏较大,能够提高抗滑力的地层段落较短;其水位以上黄土及碎石土,易沿软弱面产生“顺坡溜”现象;加之前缘不断受牛头河流水冲刷,易行成临空面,综合分析认为上倪滑坡北侧坡面稳定性差,推测滑面应位于岩性分界面附近。

(2) 滑坡南侧软弱面

上倪滑坡南侧坡度相对北侧较缓,本次研究布置了3个钻孔,根据钻孔资料揭示,其剖面结构如图8所示。

地层结构主要为表层的黄土,薄厚不一;碎石土,成分主要为大理岩、片麻岩;下伏基岩为早古生界大理岩和片麻岩;水位线位于碎石土中。

上倪滑坡南侧软弱面与北侧差异较大,呈现“黄土薄、碎石土厚、滑带埋藏深”的特点。下部基岩处于稳定状态。上部碎石土岩性混杂、排列无序,为古滑坡堆积物,中间夹有两个棱镜状砂层;表层黄土为滑坡堆积,厚度较薄。坡面上“Z”字形道路的修建使其产生了多个小平台,对滑体的势能有一定程度的削弱;滑坡前缘距牛头河左岸约45 m,相对较远。

综合分析,认为上倪滑坡南侧整体稳定性一般,推测滑面应位于岩性分界面附近。

2.4 滑坡成因分析

根据上倪滑坡地形地貌、地层岩性特点及现场调绘资料,推测其应为多期次滑坡,滑

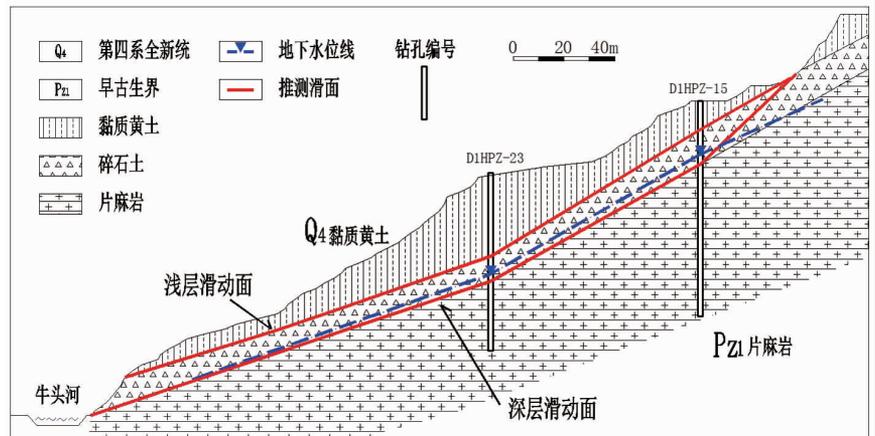


图7 上倪滑坡北侧软弱面

Fig. 7 Weak surface on the north side of Shangni landslide

坡物质主要为黏质黄土、成分为片麻岩和大理岩的碎石土。该滑坡坡度陡,滑坡堆积体较厚,地层稳定性差,后期发生滑坡的可能性大;尤其是上倪滑坡北侧,黄土堆积、边坡高陡、地裂缝较多,前缘受牛头河流水冲刷,危险性高,对线路工程造成严重影响。推测其成因如下:

(1) 黄土—基岩地层结构

推测该滑坡在滑动前应为“上部黄土、下部基岩”的结构,表层黏质黄土为风积成因,结构疏松、孔隙率大,覆盖于坡度较大的边坡上,稳定性较差;受重力牵引、河流冲刷、天气等因素影响产生初次滑坡,并形成巨大冲击力,携带基岩产生滑动,将部分岩石撞碎;形成的碎石土结构松散、孔隙发育,具有蓄水功能,其水量在降雨时获得补给,在非降雨天气时缓慢流失;深部碎石土长期处于饱水状态,岩性逐渐变弱,向软弱带演变,为后续滑坡创造了条件。与此同时,坡体由于局部失稳还会产生局部小规模溜坍、滑坡,从而逐渐达到相对稳定状态。

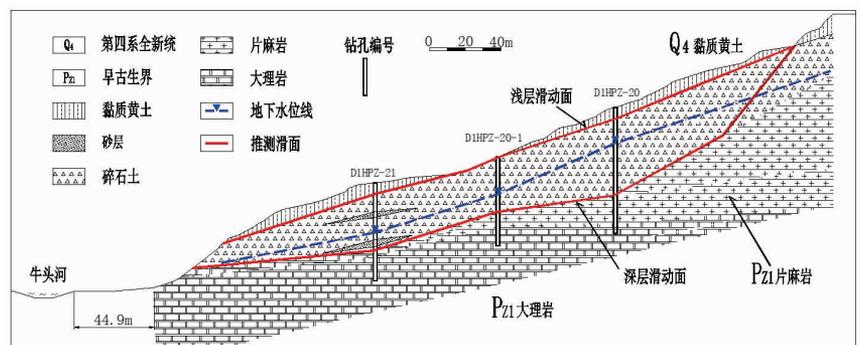


图8 上倪滑坡南侧软弱面

Fig. 8 Weak surface on the south side of Shangni landslide

(2) 降雨影响

表层黄土极易受降雨影响,发生雨水沿坡面径流和雨水下渗、黄土结构破坏,逐渐向临空面蠕动,并形成冲沟、地裂缝等,而后慢慢发展,影响滑坡稳定性;同时,水的下渗会形成渗透力并破坏地层岩石间的胶结状态,导致滑动力增大而抗滑力减小。降雨是现今状态下,影响上倪滑坡稳定性的最主要因素。

(3) 地震影响

研究区位于西秦岭北缘断裂带上,地震频发。地震可能导致上倪滑坡坡体开裂,局部产生应力集中现象,改变坡体原有的相对稳定结构,使得坡体形成临空面,起到卸载作用,易诱发裂缝上部坡体的势能释放,形成滑坡。并与降雨等因素相互叠加,加剧对坡体稳定性的破坏。

(4) 河流冲蚀

上倪滑坡前缘不断受牛头河水流冲刷,滑坡前缘堆积物在水流作用下不断被带走,临空面不断增大,滑坡阻力不断减小,持续降低上倪滑坡的稳定性。

3 滑坡稳定性计算

通过以上对上倪滑坡的综合分析,定性认为上倪滑坡稳定性差,为印证上述分析结果的可靠性,根据基础资料,利用 Geo-Studio 软件 slope 模块对上倪滑坡南侧和北侧两个软弱面进行力学计算。

3.1 计算参数及工况

根据所取岩样、土样相关试验结果,结合宝兰客专对渭河区域黏质黄土的研究经验进行综合取值,取计算参数如表 1 所示。

表 1 计算参数取值

Table 1 Parameter values for calculation

地层	强度参数		容重
	C(Mpa)	$\varphi(^{\circ})$	$\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$
黏质黄土	22	21.5	17.8
碎石土	0	40	22
砂	0	20	18
片麻岩	0	52	28
大理岩	0	52	28

表 2 滑坡稳定状态分级表

Table 2 Classification of landslide stability

稳定性系数Fs	$F_s < 1.00$	$1.0 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < 1.15$	$F_s \geq 1.15$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

降雨是影响滑坡稳定性的主要因素,尤其是在黄土层广布的黄土梁峁区,降雨应是滑坡研究的重点;上倪滑坡区域位于断裂构造带上,地震频发,对铁路这种世纪工程必须考虑地震的影响。因此,对上倪滑坡两个推测滑面的稳定性计算分析,考虑以下 4 种工况:

(1) 天然工况

即上倪滑坡的现有自然状态,仅考虑土体自重和稳定水位等。

(2) 天然 + 暴雨工况

上倪滑坡表层黄土覆盖,上部为碎石土,渗透性好,其稳定性受降雨影响极大。

(3) 天然 + 地震工况

在天然状态的基础上,考虑地震的影响,进行稳定性分析。各行业规范对地震影响系数的取值有一定差异,根据工程地质手册并借鉴殷跃平等^[5]研究经验,考虑地震作用效应折减系数的影响,水平地震作用力按如下公式计算:

$$F_h = K \frac{ah}{g} W$$

其中,K 为地震作用效应折减系数,取 0.25。竖向地震作用力对滑坡稳定安全系数影响很小,本文取其水平地震作用力的一半。

上倪滑坡所在区域地震动峰值加速度为 0.3g,取水平地震系数为 0.12,竖向地震系数为 0.06。

(4) 暴雨+地震工况

考虑极端情况,探究在地震和暴雨叠加状态下上倪滑坡的稳定性。

3.2 计算结果分析(表 2)

通过计算获得上倪滑坡的稳定系数,并根据《滑坡防治工程勘察规范》(DZ/T0 218-2006)对滑坡稳定状态进行划分。

(1) 滑坡北侧稳定性分析

针对岩性分界面进行计算,计算模型及结果如图 9 和图 10 所示。

从计算结果可以看出,对于上倪滑坡北侧:①在各工况下,黄土—碎石土界面的安全系数小于基

岩—碎石土界面，表层黄土滑动的可能性相对较高；②黄土—碎石土界面在天然工况下能够保持稳定，但在暴雨、地震及暴雨+地震的极端工况下的安全系数都小于1，发生滑坡的可能性极大；③基岩—碎石土界面在天然工况和地震工况下都处于稳定状态，但在暴雨和极端工况下稳定性大幅降低，有可能产生滑动；④上倪滑坡北侧整体稳定性差，发生滑坡的可能性大。

(2) 滑坡南侧稳定性分析

从图 11 和图 12 的计算结果可以看出，上倪滑坡南侧的稳定相较于北侧稍好：①对于深部基岩—碎石土界面来说，在 4 种工况下其安全系数最小为 1.269 > 1.15，始终处于稳定状态；②下部黄土—基岩界面在天然工况下稳定性较好，在地震工况下处于欠稳定—基本稳定状态，在暴雨、极端工况下都不能保持稳定；③上部黄土—基岩界面只能在天然条件下保持稳定，在其它三种工况下发生滑坡的可能性极大；④上倪滑坡南侧的安全系数整体大于北侧，说明上倪滑坡北侧发生滑坡的可能性较南侧更大。

基于以上计算分析，认为上倪滑坡整体稳定性差，安全系数较低。其在自然状态下可以保持相对稳定状态，但北侧的黄土—碎石土界面稳定安全系数较低；地震时上倪滑坡表层黄土可能发生滑坡；暴雨和极端工况下，上倪滑坡北侧或整体可能发生大面积深层滑动，滑面深度可达三十多米，对铁路工程具有严重影响。

4 线路方案比选

天陇铁路自杨家碾站引出后接轨天水站，区间内地质情况复杂，为降低不良地质因素带来的影响，节约铁路建设成本，决定从上倪滑坡区域通过，如前文图 1 所示。上倪滑坡位于天陇铁路自杨家碾站引出后的咽喉位置，是天陇铁路地质选线工作的控制性因素，此滑坡坡度陡、稳定性差、

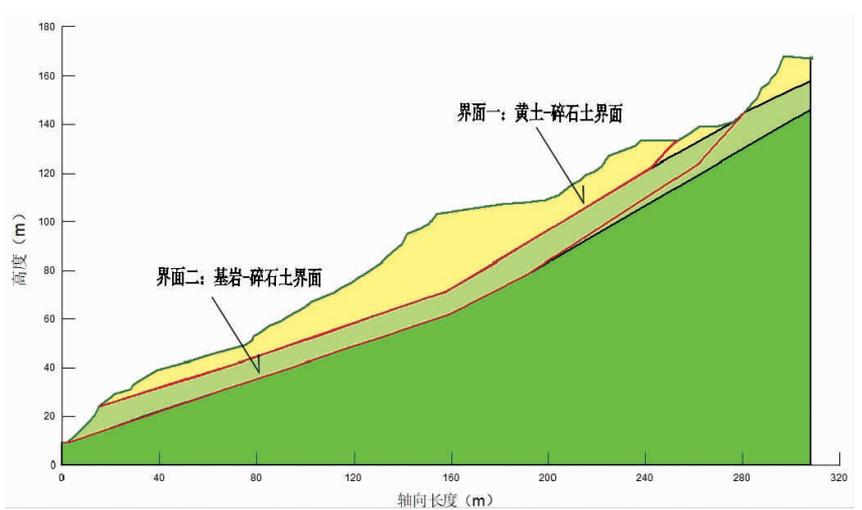


图 9 上倪滑坡北侧软弱面模型

Fig. 9 Model of weak Surface on the north side of Shangni landslide

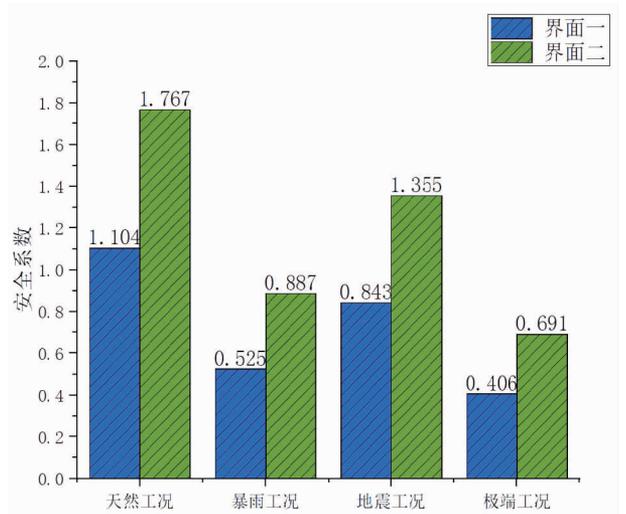


图 10 上倪滑坡北侧软弱面计算结果

Fig. 10 Calculation results of weak surface on the north side of Shangni landslide

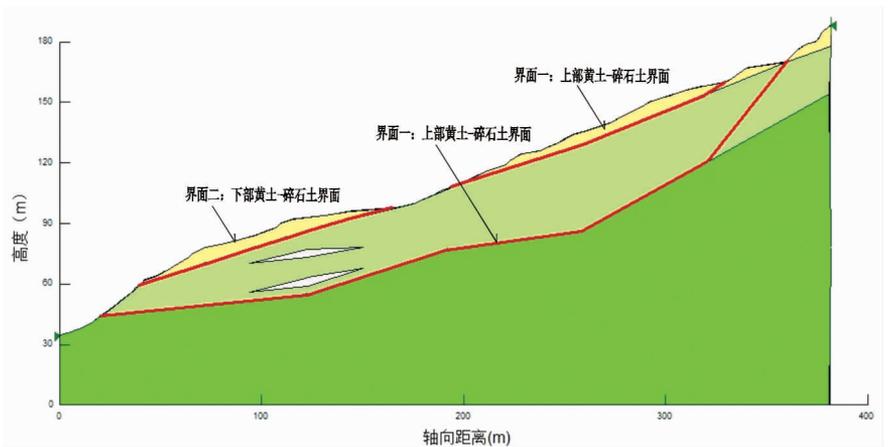


图 11 上倪滑坡南侧软弱面模型

Fig. 11 Model of weak surface on the south side of Shangni landslide

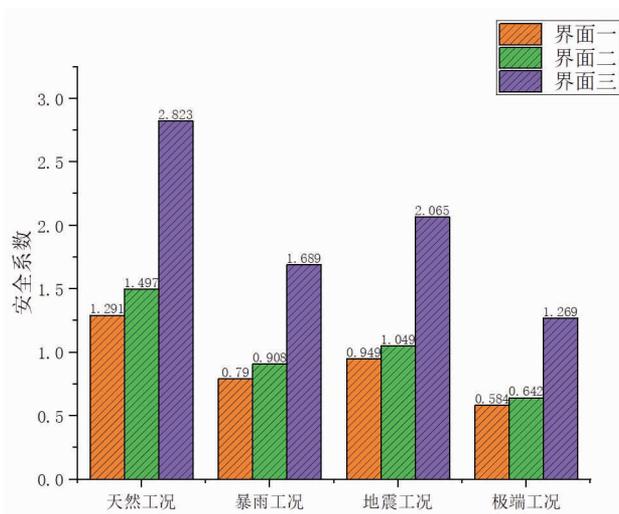


图 12 上倪滑坡南侧软弱面计算结果

Fig. 12 Calculation results of weak surface on the south side of Shangni landslide

滑面深、滑体体积大。因此,线路在通过该滑坡时,应遵循“优先绕避、再后通过;优先隧道、再后路桥;综合比选”的原则。优先对滑坡等不良地质体进行绕避;必须通过时,应尽可能减少桥梁工程的设置;以路基形式通过滑坡时,应尽量采用滑坡前缘填方的方式;以隧道形式通过滑坡时,要尽可能深埋,并远离滑体。

针对天陇铁路通过上倪滑坡的 3 种方案(DK、

D1K、D2K)进行分析比选,3 种方案与上倪滑坡的相对位置关系如图 13 所示。

DK 和 D1K 方案是以隧道形式下穿上倪滑坡,但二者埋深和下穿位置不同,D2K 方案是以桥梁形式将线路摆在牛头河谷,对上倪滑坡进行绕避。

D2K 方案绕避了上倪滑坡,从地质角度考虑其为最优方案,但该方案需要三跨天庄高速公路,工程设计、施工难度较大,不稳定因素较多,且易受牛头河季节性洪水影响,具有潜在风险,此方案予以舍弃;对于 DK 方案和 D1K 方案,可以看出 D1K 方案是在上倪滑坡中部穿过,且埋深较浅,部分隧道洞身位于滑体内,受滑坡影响严重,工程治理措施难以施行、成本高昂,DK 方案则是从上倪滑坡后壁通过,且埋深较大,安全性较高。因此,经综合比选,DK 方案安全性较高,可行性较强。

考虑到运营期间的震动以及工程施工期间爆破、车辆、动力机械等因素的扰动,有可能导致已有的结构面发生拓展和松动,逐渐破坏上倪滑坡现有的自然稳定状态,进一步加大滑坡发生的可能性,因此,应对上倪滑坡进行工程治理:减少上部黄土厚度,使用抗滑桩、锚索等工程措施。在施工期间,应划定危险区、加强监测预警、做好人群疏散,确保安全建设。

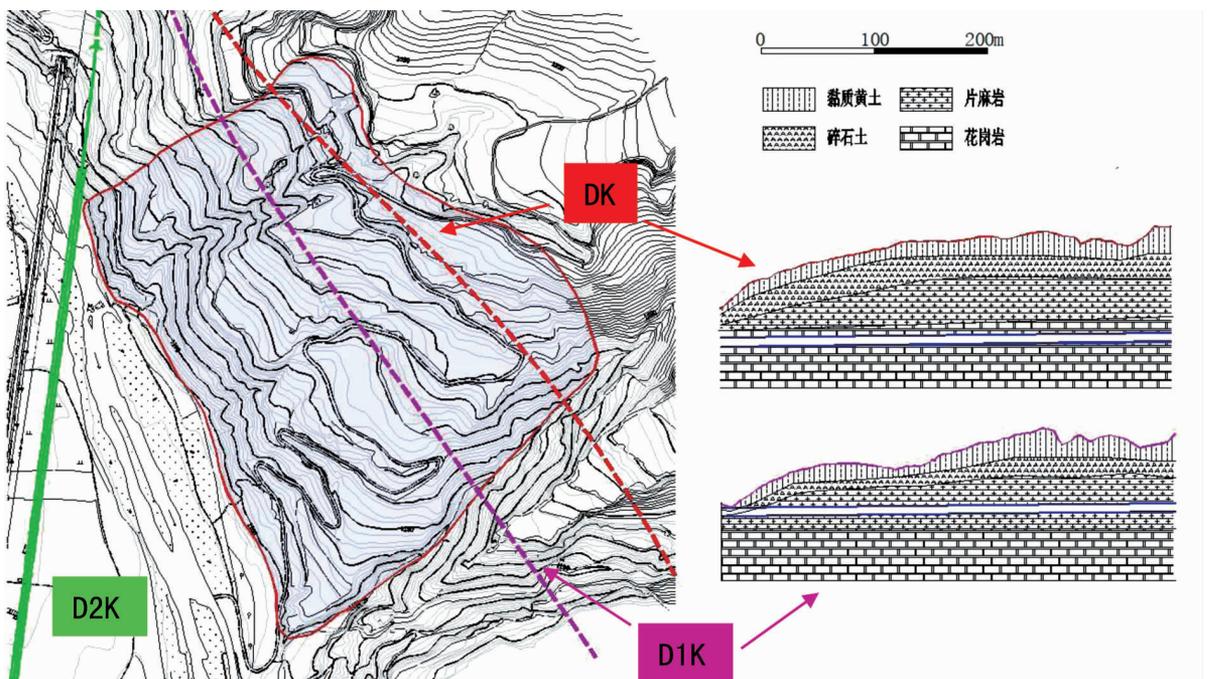


图 13 上倪滑坡与线路方案位置图(右为沿线路方向剖面)

Fig. 13 Location map of Shangni landslide and route plan (right is the section along the route scheme)

5 结 论

上倪滑坡是新建天水至陇南铁路牛头河谷局部方案的控制性地质因素,推测其为多期次滑坡形成,后壁错动明显,上部冲沟、地裂缝等发育,南侧坡面有“Z”形道路,前缘较陡,受牛头河水流冲蚀;表层黄土覆盖,下部为碎石土、砂层等,分析认为其整体稳定性差,尤其是北侧极易产生滑动。经力学计算表明:上倪滑坡在自然状态下能够维持相对稳定状态,但在暴雨、地震工况下有可能发生深层滑动,对线路工程具有严重影响。

经过对上倪滑坡区域的 3 种线路方案(DK、

D1K、D2K)进行综合比选,认为以深埋隧道形式下穿上倪滑坡后壁的 DK 方案最优,并应进行相应的工程治理,确保工程施工安全和运营安全。

参 考 文 献

- [1] 王家柱,高延超,冉涛,等. 川藏铁路交通廊道某大型古滑坡成因及失稳模式分析[J]. 现代地质:1-12
- [2] 张崇军,王星,张二钢,等. 无人机滑坡地质灾害监测技术及应用研究[J]. 测绘地理信息:1-4
- [3] 占样烈,梁军. 某铁路黄土工程滑坡成因分析及治理方案研究[J]. 路基工程,2020(06):190-196
- [4] 钟秀梅,李伟利,袁中夏,等. 地震作用下天水市区滑坡危险区划研究[J]. 国际地震动态,2019(08):118-119
- [5] 殷跃平,王文沛. 论滑坡地震力 [J]. 工程地质学报,2014,22(04):586-600

ENGINEERING GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND GEOLOGICAL ROUTE SELECTION OF SHANGNI LANDSLIDE ON TIANSHUI-LONGNAN RAILWAY

LI Xu-fang

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Shangni landslide is a controlled geological factor on the newly built Tianshui-Longnan Railway. Based on the full acquisition of geological data, this paper analyzes the causes of landslides from the perspective of topography and geomorphology, combined with the lithological characteristics of the strata. Shangni landslide has a weak surface on the north and south sides, and the overall stability of the landslide is poor, especially on the north side. Mechanical calculations show that the landslide can remain relatively stable in its natural state, but it is highly likely to slip under earthquakes or heavy rain, which has a serious impact on the line project. After comprehensive comparison and selection of the three route schemes, it is recommended to pass through the Shangni landslide from the scarp in the form of a deep buried tunnel to ensure the safety of the project.

Key words: Tianshui-Longnan Railway; Shangni landslide; geological condition; route selection