

文章编号: 1674—8247(2021)06—0089—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.06.017

沪昆客运专线路堑缓倾顺层滑坡分析

蔡家鹏¹ 喻洪平¹ 贺玉龙² 张建文¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘 要: 本文根据沪昆客运专线 D1K 970 + 460 ~ D1K 970 + 675 段路堑顺层滑坡的地质背景和形成过程, 深入分析滑坡滑动破坏机理及主要影响因素, 综合评价滑坡稳定性, 并提出工程处置措施。研究表明: (1) 在碳酸盐岩地区缓倾顺层地段, 岩溶溶槽、溶隙发育, 岩体呈硬夹弱或软硬岩互层时, 降雨后溶槽、溶隙充水产生静水压力, 雨水下渗沿相对隔水的软弱夹层富集并向边坡低处渗流, 软化软弱夹层, 导致边坡临空后顺软弱夹层产生顺层滑坡, 属顺层滑移-压致拉裂型破坏; (2) 综合评价滑坡稳定性, 采用卸载、锚固桩、锚索桩等措施对滑坡及后壁顺层进行综合治理, 治理效果良好。本文可为类似顺层工点的预防、滑坡治理提供指导及参考。

关键词: 沪昆客运专线; 缓倾顺层滑坡; 强降雨; 成因分析

中图分类号: U418.5+5 文献标志码: A

Analysis of Gently Inclined Consequent Landslide of Cutting in Shanghai-Kunming High-speed Railway

CAI Jiapeng¹ YU Hongping¹ HE Yulong² ZHANG Jianwen¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the geological background and formation process of the consequent landslide of cutting in section D1K 970 + 460 ~ D1K 970 + 675 of Shanghai-Kunming High-speed Railway, this paper deeply analyzed the failure mechanism and main influencing factors of landslide sliding, comprehensively evaluated the stability of landslide, and put forward the corresponding engineering measures. Conclusions: (1) There are karst troughs and solution cracks developed in the gently inclined bedding section of the carbonate rock area. Where there is rock mass with interbedding of weak or soft rock and hard rock, hydrostatic pressure is generated by filling the karst troughs and solution cracks after rainfall, and the rainwater seeps down along the weak intercalated layer which is relatively waterproof, and into the lower part of the slope, where it will soften the weak intercalated layer, resulting in bedding landslide along the weak intercalated layer after the slope is free, which is recognized as bedding slip-pressure-induced cracking failure. (2) After comprehensive evaluation of the stability of landslide, unloading, anchoring piles and anchor piles were used in a comprehensive manner to treat the landslide and back wall bedding, which proves a good effect. This practice can provide guidance and reference for the prevention and landslide control of similar bedding construction sites.

Key words: Shanghai-Kunming High-speed Railway; gently inclined consequent landslide; heavy rainfall; cause analysis
在工程建设过程中经常遇到顺层边坡, 当开挖导致顺层岩体临空时, 发生顺层滑坡的现象较为普遍。

收稿日期: 2021-04-19

作者简介: 蔡家鹏 (1976-), 男, 高级工程师

引文格式: 蔡家鹏, 喻洪平, 贺玉龙, 等. 沪昆客运专线路堑缓倾顺层滑坡分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(6): 89-94.

CAI Jiapeng, YU Hongping, HE Yulong, et al. Analysis of Gently Inclined Consequent Landslide of Cutting in Shanghai-Kunming High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(6): 89-94.

目前,专家学者针对顺层滑坡问题进行了大量研究,吴坤^[1]对砂泥岩地层长大顺层滑坡的破坏机理进行了研究;冯文凯^[2]等对砂泥岩地层缓倾角顺层高边坡破坏机制进行了物理模拟研究;温树林^[3]对粉砂岩地层顺层滑坡形成机理及治理措施进行了研究;刘轶、谭冷^[4]对灰岩地层浅层顺层滑坡的形成机制和变形破坏特征进行了研究;刘洋^[5]对泥岩泥灰岩地层顺层滑坡成因及整治进行了研究;李安洪^[6]等针对渝怀铁路中顺层岩质边坡稳定性及支挡防护设计进行了专项研究。这些研究多针对岩层倾角较陡或者缓倾非碳酸岩地层,对缓倾碳酸岩地层的顺层研究较少。碳酸岩地层在西南地区分布较广,由于碳酸岩多为硬质岩,岩层倾角较缓时,勘察设计及施工过程中易忽视其顺层危害,在

工程建设过程中缓倾顺层滑坡时有发生。本文结合沪昆客运专线1处典型的碳酸岩地层缓倾角顺层滑坡工程整治工程,深入分析了滑坡机理及其稳定性,提出了相应的工程整治措施,可为后续类似工点的预防、治理提供指导和参考。

1 工程概况

D1K 970 + 460 ~ D1K 970 + 675 段为挖方路基,中心最大挖高约 25 m,左侧边坡坡脚设桩间挡土墙,边坡按 1:1.25 分两级刷坡,中间设置 1 处平台,边坡采用锚杆框架梁内喷混植生护坡,如图 1 所示。施工阶段因小里程端隧道涌水增设泄水洞,于路基右侧红线边开凿泄水渠。

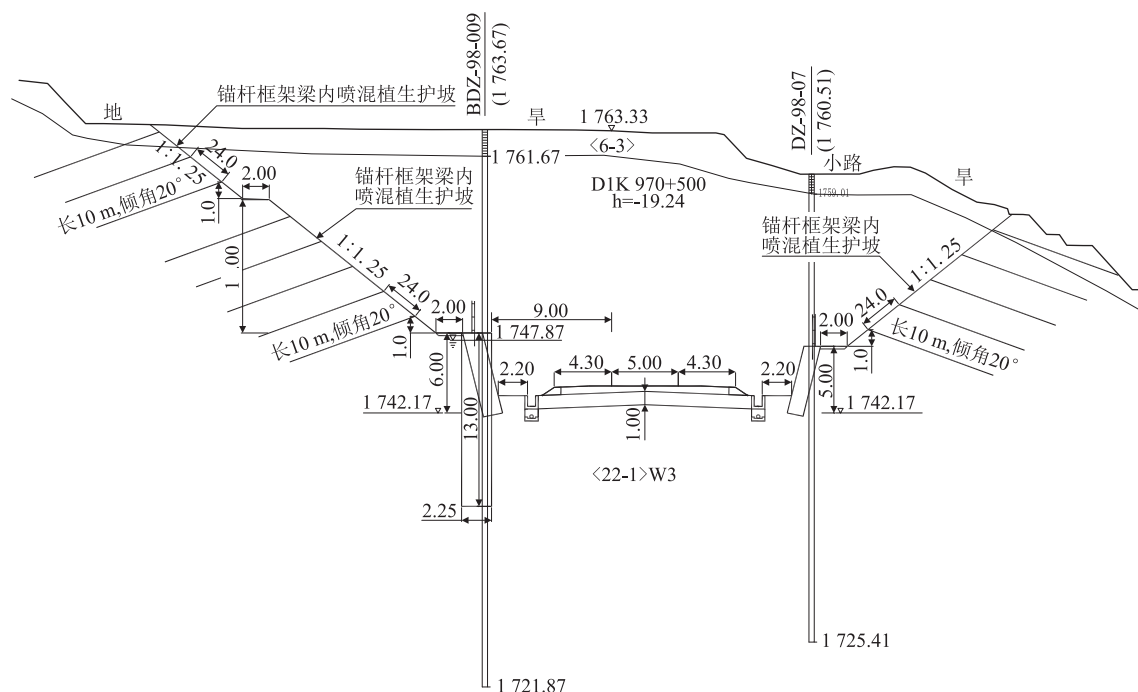


图1 施工图设计代表性横断面图(m)

2 工程地质条件

2.1 地貌特性

此段路基穿越一单面斜坡,地形左高右低,地面坡度 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$,左侧为山脊,右侧沟槽毗邻村庄,距村民房屋最近 4.1 m;地面高程 1 720 ~ 1 805 m,相对高差 85 m。

2.2 地层岩性

边坡上覆坡残积红黏土,厚度 0 ~ 4 m,属弱膨胀土,线路左侧原设计堑顶附近斜向小里程方向发育 1 处充填溶槽,长约 150 m,宽约 8 m,最深约 15 m;下

伏基岩为三叠系中统关岭组二段(T_2g^2)泥质白云岩夹泥灰岩,泥质白云岩薄至中厚层,泥灰岩薄层状,岩体差异性风化较严重,泥灰岩夹层多呈强风化状,层面及节理裂隙间多溶蚀充填黏土。

2.3 地质构造及地震动参数

线路右侧顺沟槽发育 1 处区域性向斜,路基位于向斜南东翼,为单斜地层;DK 970 + 675 处发育 1 处近垂直线路小断层,破碎带宽约 1 ~ 2 m。该段左侧边坡层理产状 $N20^{\circ} \sim 54^{\circ}E/11^{\circ} \sim 12^{\circ}NE$,受构造影响局部扭曲,发育两组垂直节理,岩体被切割成大块体状。地震动峰值加速度 0.113 g。

2.4 地下水

地下水主要为土层中孔隙水及岩溶裂隙水。黏性土层中孔隙水贫乏,岩溶裂隙水较发育,主要接受大气降雨补给,由于地表溶沟、溶槽及岩体节理裂隙、溶隙发育,降雨后部分下渗进入基岩中,通过基岩裂隙、溶隙向右侧低处运移,现场调查发现降雨后多呈股状从路堑边坡及泄水渠左侧边坡流出。

2.5 缓倾顺层

该段左侧路堑顺层,岩层产状 $N20^{\circ} \sim 54^{\circ}E/11^{\circ} \sim 12^{\circ}NW$,与线路夹角 $18^{\circ} \sim 52^{\circ}$,视倾角 $6.8^{\circ} \sim 11.4^{\circ}$ 。

3 滑坡形态及成因分析

3.1 滑坡形成过程

2014年11月开始进行边坡开挖,2015年6月中旬开挖至挡墙顶位置,边坡基本成形。2015年6月18日—6月22日,当地连续强降雨,D1K 970+580~D1K 970+655段左侧边坡发生下滑,后缘错台高约2~7 m,下滑位移约16 m,主轴长约70 m;并牵引造成路堑边坡顶外10 m内产生多道拉张裂缝,缝宽8~20 cm,深度10~40 cm。由于正值雨季,现场降雨频繁,处理措施尚未来得及施作,坍滑体进一步向前滑动,后缘进一步向上方扩展,地表开裂,最远至线路左侧66 m^[7]。由于该段岩体为整体滑动,滑动岩块整体性较好,现场测得滑块岩层倾角为 12° 。

在2015年7月2日降雨后,D1K 970+460~D1K 970+490段左侧边坡于二级边坡脚产生滑塌。2015年8月24日—8月28日,当地再次连降大雨,D1K 970+460~D1K 970+580段边坡沿开挖临空面再次发生滑动,在中线附近反翘剪出,并推动右侧泄水渠间地梁,掩埋右侧泄水渠。

3.2 滑坡形态及规模

滑坡分为两个分区,I区位于D1K 970+580~D1K 970+675段,II区位于D1K 970+460~D1K 970+580段。

I区滑坡平面上呈“舌”状,前宽后窄,后缘呈明显圈椅状,滑坡后壁及两侧滑坡边缘明显,主轴与线路近垂直,长70 m、宽80 m,滑体厚5~16 m,约3.5万m³,后缘滑壁较陡,倾角 $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$,为整体滑动,滑动后形成巨型岩块,滑动距离约25 m,滑体后缘形成宽达30 m的凹槽。

II区滑坡平面上呈“舌”状,前窄后宽,后缘裂缝顺 $N85^{\circ}E$ 垂直节理拉开,大致呈直线,滑坡后壁及两土体饱水自重增大,后缘溶槽充水产生静水压力,加大

侧滑坡边缘明显,主轴与线路近垂直,长103 m、宽125 m,滑体厚5~16 m,约12.5万m³,后缘顺 $N85^{\circ}E$ 垂直节理形成近垂直后壁,滑体中上部形成多条拉张裂缝、多级错台,滑坡滑动后于中线附近隆起,并推动中线与右侧泄水渠间地梁,掩埋右侧泄水渠。

3.3 滑体、滑床及滑带特征

滑坡自然边坡 $5^{\circ} \sim 25^{\circ}$,滑体原为三叠系中统关岭组第二段(T_2g^2)泥质白云岩夹泥灰岩,后缘发育1处长约150 m的狭长溶槽,溶槽内覆土厚2~15 m。I区滑动后,形成以岩块为主的滑体,整体性好,厚5~16 m;II区滑动后,岩体松散形成块石土状,厚5~16 m。滑坡A-A主轴断面如图2所示。

滑床为泥质白云岩,质较硬。I区、II区后缘滑动面为溶槽低部,滑床相对较陡,I区中部及前缘滑动面顺岩层面,滑床倾角 11° ;II区中部滑动面大致顺层面,倾角 $7^{\circ} \sim 12^{\circ}$,滑动后前缘受泄水渠地梁阻挡局部反翘。

滑带土为砖红色、灰黄色泥灰岩,属夹层泥灰岩遇水软化,钻探揭示其呈土夹角砾状、软塑状,力学性质差。

3.4 滑坡滑动机理及影响因素分析

3.4.1 滑动机理

岩体变形破坏主要有滑移-拉裂、滑移-压致拉裂、塑流-拉裂、滑移-弯曲、弯曲-拉裂型5种破坏模式^[8]。

施工开挖揭示路堑边坡岩性为泥质白云岩夹泥灰岩,堑坡基岩可见多层薄层状的软弱夹层,边坡岩体呈硬夹软状,岩层差异性风化严重,泥灰岩夹层部分呈强风化状,岩层倾角 $11^{\circ} \sim 12^{\circ}$,边坡岩体沿堑坡底部泥灰岩夹层发生滑动,属典型的岩质缓倾顺层滑坡。

地质调查及钻探表明,本段路基基岩层间普遍夹泥灰岩,属典型的软弱夹层,该层为相对隔水层;同时滑坡后缘发育1处长约150 m、宽约8 m、最深约15 m的充填型狭长溶槽。降雨后滑坡后缘溶槽充水形成静水压力,同时由于边坡岩体裂隙发育,贯穿性好,有利于水的下渗,雨水渗入坡体后易在夹层处富集,并顺层面向前缘运移,于路堑开挖坡脚、泄水渠边坡处流出,形成降雨期间地下水的临时排泄通道,地下水渗流过程造成泥灰岩软化,甚至泥化。

根据工程勘查资料以及现场调查情况,确定该滑坡的滑坡机理。由泥质白云岩中夹泥灰岩所控制的顺层滑坡,在边坡开挖以后,形成开挖临空面,降雨后岩了下滑力;雨水渗流中软化了泥灰岩夹层,抗滑力减

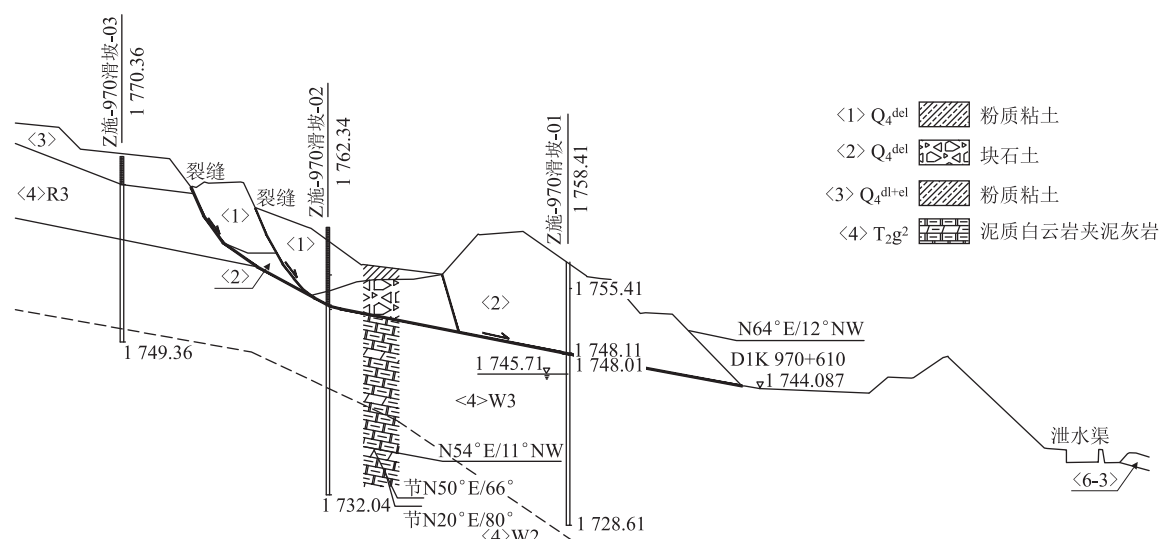


图2 滑坡 A-A 主轴断面图

小,从而导致受垂直节理切割呈大块状的边坡岩体沿开挖临空面底部产生顺层滑动。该滑坡属于典型的顺层滑移-压致拉裂型破坏。

3.4.2 影响因素分析

(1) 岩溶

地表溶沟、溶槽极为发育,多沿两组构造裂隙发育而成,尤其在滑坡后缘发育1处长达150 m的狭长溶槽。边坡开挖揭示,岩体结构面受水的溶蚀作用部分发展成溶隙,其间多充填有黄色软~硬塑状粘土。这些岩溶现象均利于地表水下渗、运移,在降雨后边坡脚有多处股状水流出,说明岩溶裂隙连续性、贯通性较好。

(2) 工程活动

本段路基一、二级边坡开挖形成有效临空面,临空面形成后边坡加固、防护措施未及时施作,边坡暴露时间过长,且因附近隧道涌水在坡体前缘增设了泄水渠,泄水渠的开挖一方面在前缘形成了更低一级的临空面,另一方面降低了地下水排泄标高,致使Ⅱ区滑动面再次下降。

(3) 水的作用

降雨是影响斜坡稳定的自然因素中最经常发生的和最直接的因素,雨水渗入对岩土体的不利因素主要可归纳为两个方面:一方面,水对岩土体的物理化学作用将引起岩石体积的膨胀或收缩,从而导致岩体松散破碎,强度降低,尤其水作为层间润滑介质,造成软弱夹层强度急剧下降,从而大幅降低边坡的抗滑能力;另一方面,雨水渗入对岩土体内部孔隙压力有影响^[9],对边坡岩体产生浮托力、裂隙静水压力和渗透水压力

等附加荷载作用。

3.5 滑动面参数

根据顺层滑坡工程经验取值,顺层面力学指标应采用综合内摩擦角^[10]。本工点为顺层滑坡,由于泥灰岩层薄,受现场条件及工期影响未能现场试验取得滑动面及层间参数,经过对滑坡主轴断面按滑动前和滑动后两种情况下进行稳定性反演分析,结合工程经验确定滑动带综合值 ϕ 取 10° ,岩层层间综合值 ϕ 取 12° 。

3.6 滑坡稳定性分析

(1) 滑坡滑动后,滑体仍处于欠稳定状态,在雨水浸润下,滑体饱和重度进一步增大,滑面力学性质降低,滑坡有再次复活可能。

(2) 滑坡后壁基岩临空,后壁基岩与滑体属同性质岩体,岩层产状基本一致,仍属缓倾顺层,在雨水浸润下,软弱夹层力学性质降低后,滑坡后壁存在进一步顺层滑动可能。

(3) 滑坡前缘即为路堑及泄水渠边坡开挖面,路堑已开挖至1746 m,设计基底高程约1740 m,按施工图设计还需向下开挖6 m,继续直接开挖可能引起更大规模的深层顺层滑坡,同时左侧泄水渠边坡临空亦对顺层路堑稳定不利。

综合上述三种不利情况,对该段路堑边坡进行稳定性检算。结果显示,已滑动部分滑体剩余下滑力较小,故对边坡分上部(滑坡后壁)、下部(路堑坡脚)按顺层进行稳定性检算,不考虑地震影响安全系数取1.3,考虑地震影响安全系数取1.15,顺层体后缘计算长度按50 m考虑。代表性断面计算结果如表1所示,

上排桩处最大下滑力为 1 012 kN/m,下排桩处最大下滑力为 336 kN/m。

表 1 代表性断面计算结果表

断面里程	顺层体面积 /m ²	顺层体容重 /(kN/m ³)	安全系数 <i>K</i>	顺层视倾角 $\alpha/(^{\circ})$	层面综合 $\phi/(^{\circ})$	地震动峰值加 速度/ <i>g</i>	剩余下滑力 /(kN/m)
D1K 970 + 666. 168 下部顺层	284	25	1. 3	11	12	0. 125	279. 74
	284	25	1. 15	11	12	0. 125	336. 00
D1K 970 + 666. 168 上部顺层	930	23	1. 3	11	12	0. 125	842. 77
	930	23	1. 15	11	12	0. 125	1012. 25
D1K 970 + 541 下部顺层	162	25	1. 3	11	12	0. 125	159. 57
	162	25	1. 15	11	12	0. 125	281. 36
D1K 970 + 541 上部顺层	750	23	1. 3	11	12	0. 125	679. 66
	750	23	1. 15	11	12	0. 125	816. 33

4 主要工程处理措施

以 B-B 整治断面为例(如图 3 所示),滑坡主要工程处理措施如下。

- (1)对滑体进行部分清除。
- (2)左侧路堑坡脚设锚固桩,桩间距均为 6.0 m,

桩截面 1.75 m×2.5 m,桩长 15~18 m,共 42 根。路堑边坡第二级平台处设第二排锚固桩,桩间距均为 6 m,桩截面 1.75 m×2.5 m、2.0 m×3.0 m,桩长 14~24 m,共 41 根。桩间内置挡土板,挂板高度 4~10 m。其中锚索桩 72 根,锚索桩上各设 2 孔锚索,共 154 孔,锚索长 28~35 m。

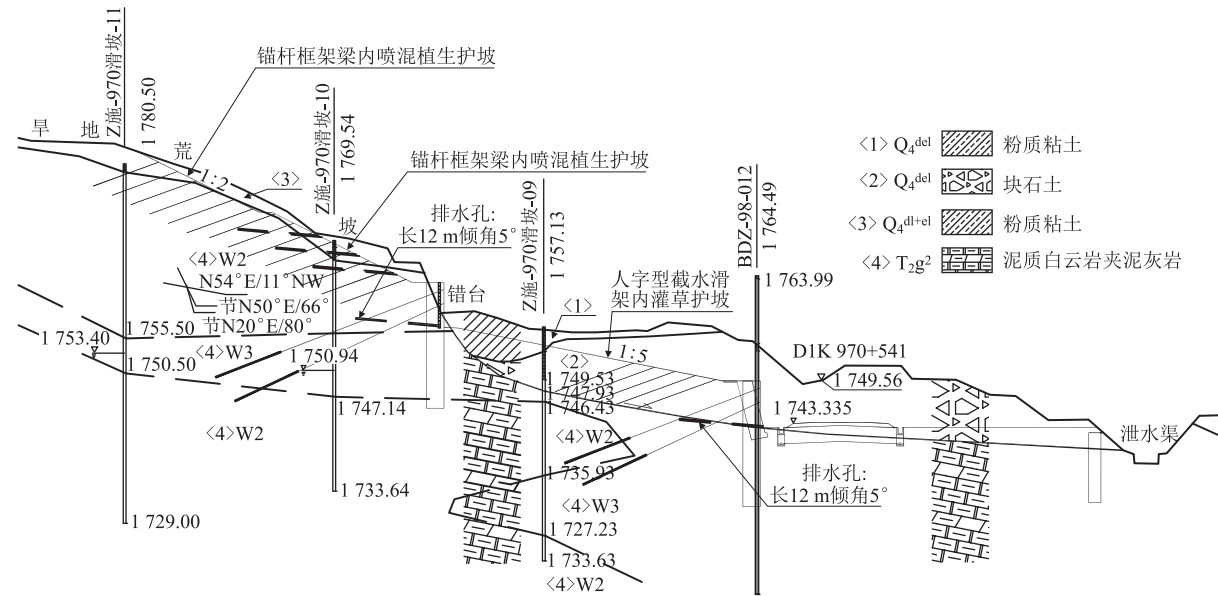


图 3 滑坡 B-B 整治断面图

(3)路堑坡脚设重力式路堑挡土墙,墙高 4~8 m。墙顶第一级边坡按 1:5~1:2 坡率清方,边坡采用人字型截水骨架护坡结合锚杆框架梁护坡防护;第二排锚固桩顶以上边坡按 1:2~1:1.75 坡率开挖,边坡采用锚杆框架梁护坡防护。墙顶及墙顶以上各级边坡平台设 0.4 m×0.4 m 的截水沟排水,沿挡墙、坡面布置深层毛细透排水管。

(4)右侧泄水渠边坡设侧向约束桩,桩间距均为 6.0 m,桩截面 1.5 m×1.75 m,桩长 10 m,共 37 根。

(5)路堑坡顶设 0.8 m×0.8 m 梯形及 1.0 m×

1.0 m 矩形天沟。

5 结束语

本文通过对沪昆客运专线 D1K 970 + 460~D1K 970 + 675 段路堑顺层滑坡进行研究,得出以下主要结论:

(1)对碳酸盐岩地区缓倾顺层而言,岩溶溶槽、溶隙发育,边坡岩体呈软硬相间或硬夹弱是缓倾顺层滑坡发育的物质基础。降雨后溶槽、溶隙充水产生静水压力,雨水下渗沿相对隔水的软弱夹层富集并向边坡

低处渗流,软化软弱夹层,导致边坡临空后顺软弱夹层产生顺层滑坡,属顺层滑移-压致拉裂型破坏。

(2)综合考虑影响滑坡稳定性的各种因素,最终确定采用卸载、锚固桩、锚索桩等措施对滑坡及后壁顺层进行综合治理,沪昆客运专线开通运营已5年,治理效果良好。

(3)本滑坡工点顺层倾角较缓,路堑开挖后在雨水的作用下,发生了多次顺层滑动,通过反演分析滑动面综合值 ϕ 仅为 10° ,在山区类似顺层工点需引起重视。

参考文献:

- [1] 吴坤. 渝湘高速公路某顺层滑坡渐进破坏机理及防治措施研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(5): 13-16.
WU Kun. Study on Progressive Destroy Mechanism and Protection Methods for Bedding Plane Landslide[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(5): 13-16.
- [2] 刘轶, 覃冷. 浅层基岩顺层滑坡的形成机制和变形破坏特征[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(6): 1052-1055.
LIU Yi, QIN Leng. Analysis on Forming Mechanism and Deformation Characteristics of Shallow Bedded Rock Landslide[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(6): 1052-1055.
- [3] 温树林. 广东云浮至罗定高速公路顺层滑坡形成机理分析及治理措施[J]. 铁道建筑, 2014, 54(4): 86-89.
WEN Shulin. Formation Mechanism Analysis and Control Measures of Bedding Landslide on Yunfu-Luoding Expressway in Guangdong Province[J]. Railway Engineering, 2014, 54(4): 86-89.
- [4] 冯文凯, 石豫川, 柴贺军, 等. 缓倾角层状高边坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 32-36.
FENG Wenkai, SHI Yuchuan, CHAI Hejun, et al. Study of Mechanism of Deformation Failure of a Low-Angle Bedded High Slope

with Physical Simulation Method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 32-36.

- [5] 刘洋. 水柏铁路银山顺层滑坡整治工程[J]. 路基工程, 2001(5): 66-68.
LIU Yang. Treatment Engineering of Yinshan Bedded Landslide of Shuibai Railway[J]. Subgrade Engineering, 2001(5): 66-68.
- [6] 李安洪, 周德培, 冯君. 顺层岩质边坡稳定性分析与支挡防护设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
LI Anhong, ZHOU Depei, FENG Jun. Stability Analysis and Retaining Protection Design of Bedding Rock Slope[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [7] 中铁二院工程集团有限责任公司. 长昆客专 D1K 970+460~D1K 970+675 段路基左侧高边坡滑坡地质报告[R]. 成都: 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 2015.
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Landslide Geological Report of High Slope at Left Side of D1K 970+460~D1K 970+675 Subgrade Section of Changsha-Kunming High-speed Railway[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2015.
- [8] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
Zhang Zhuoyuan, Wang Tutian, Wang Lansheng, et al. Principle of Engineering Geology Analysis[M]. Beijing: Geological, 2009.
- [9] 张楠. 水与顺层滑坡的关系及防治[J]. 河南水利与南水北调, 2014(4): 29-30.
ZHANG Nan. Relationship and Prevention between Water and Bedding Plane Landslides[J]. Henan Water Resources & South-to-North Water Diversion, 2014(4): 29-30.
- [10] 韩康, 张升文, 付开隆. 顺层层面力学参数取值探讨[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(1): 34-37.
HAN Kang, ZHANG Shengwen, FU Kailong. Discussion on Value of Bedding Layer Mechanical Parameter[J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(1): 34-37.