

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.011

引用格式: 黄达. 某高速公路顺层高边坡灾害分析及治理[J]. 公路与汽运, 2024, 40(6): 62-65.

Citation: HUANG Da. Disaster analysis and treatment of bedding high side slope of an expressway[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(6): 62-65.

某高速公路顺层高边坡灾害分析及治理

黄达

(湖南省高速公路集团有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要: 高速公路沿河展线过程中出现的高陡岩质顺层边坡的稳定性问题一直是公路建设中的难点。文中以某高速公路顺层高边坡滑塌为例, 结合地质勘探资料及深孔位移监测结果, 分析顺层高边坡变形特点及滑坡发生规律和性质, 研究治理措施。结果表明, 岩质顺层高边坡的稳定性主要受层面厚度、结构面强度的影响, 长锚杆和预应力锚索两种加固方式对高陡岩质顺层边坡治理均有效。

关键词: 公路; 顺层高边坡; 结构面; 滑坡; 加固处理

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)06-0062-04

斜坡失稳尤其是顺层边坡失稳是岩质边坡常见病害^[1]。公路沿河展线的过程中, 受地形地貌及工程规模限制, 常遇到顺层边坡。学术界对顺层边坡的变形机制进行了许多研究, 李树森等将层状结构顺层斜坡的变形过程分为弯曲变形、岩层褶断、滑坡3个阶段并建立板梁力学模型进行分析, 得到了简化条件下顺层边坡溃屈破坏的临界坡长计算公式^[2]; 汪鸣飞等研究顺层陡倾岩质边坡的变形机制和影响因素, 认为该类边坡倾倒变形的典型特征为中上部岩体呈现滑移-倾倒变形、中下部岩体呈现弯曲-倾倒变形, 整个变形演化过程可概括为卸荷回弹、滑移-倾倒和蠕变-滑移3个阶段^[3]; 李进元等通过典型实例分析了顺向河谷陡倾角层状岩体且倾向坡外边坡的变形破坏模式和特征^[4]; 丁戈媛等基于弹性板梁稳定理论和能量平衡原理建立顺层岩质滑坡溃屈型破坏力学模型进行分析, 提出了综合考虑滑坡自质量、地下水与振动荷载作用的顺层岩质滑坡溃屈段长度条件方程^[5]; 董好刚等针对缓倾角层状岩质边坡, 考虑其形成机制, 将三峡库区缓倾层状高边坡典型破坏模式概化为风化-崩落型、压剪-滑移崩落型、拉剪-倾倒崩落型、拉裂坠落型4种^[6]; 张勃成等建立了考虑水力作用的顺层岩质边坡失稳破坏模型及临界失稳高度计算方法^[7]; 曹运江等将工程区边坡岩体结构和地质结构分别分为4大类9亚类、6大类11亚类, 分析了其变形破坏模式^[8]。工

程界针对顺层边坡提出了相应处治方案, 易巍将顺层边坡的破坏模式分为9类, 提出了刷方减载、锚固工程(锚索、锚杆或注浆钢锚管)、支挡+锚固与地下排水相结合等处治方案, 并在平兴(平远—兴宁)高速公路、梅河(梅州—河源)高速公路、云南元磨(元江—磨黑)高速公路进行了应用^[9]; 李剑伟等研究砂泥岩互层缓倾长大顺层边坡的稳定性, 提出了抗滑桩、框架锚索等加固处理措施及严格实施分段施工、采取动态设计和信息化施工、重视截水和排水措施的处理原则^[10]; 罗小飞研究顺层单面山硅质板岩边坡的加固措施, 提出了采用齿墙和填碎石台阶处理构造单面山基底的加固措施^[11]; 赵锡灿利用果蝇算法全局搜索最优解的优势, 结合边坡实际情况合理布设传感器, 实现了高陡边坡稳定性的动态监测^[12]。本文结合运营期高速公路顺层高边坡滑塌实例, 研究高陡顺层边坡水毁病害处治技术, 重点研究贯通结构层厚度对边坡稳定性的影响, 在此基础上提出相应处治方案。

1 工程概况

湖南省株洲市某双向四车道高速公路, 设计速度为80 km/h, 路基宽度为24.5 m, 2009年开工建设, 2013年建成通车。2021年2—5月, 在连续降雨作用下, 该高速公路上行K521+400处边坡坡脚出现路面变形、路基边沟挤裂、桩板墙开裂现象。该边坡为高大路堑边坡, 坡面较陡, 且坡顶处已形成马蹄

形张拉裂缝,若滑坡继续发展,将导致整体滑移,严重威胁高速公路的运营安全。

该边坡历史上出现过两次滑移:初次滑移出现在项目新建时期,采取坡脚处设置 2 m 高挡土墙、坡面用三维网植草防护的处治措施,处治后,边坡分为四级,坡比均为 1:1.5,每级边坡均设有平台,平台宽 2~3 m。第二次滑移发生于 2016 年 8 月,处治措施为拆除坡脚处挡土墙,增设桩板墙,桩板墙共设 18 根抗滑桩,桩长 12 m,外露高度 2 m;1 级坡坡面采用框架锚杆防护,2~5 级坡坡面采用三维网植草防护。处治后,边坡分为 5 级,坡比均为 1:1.2;每级坡均设有平台,平台宽 2~3 m。

2021 年 5 月发生滑移的桩号范围为 K521+320—450,滑移周界位于 5 级边坡顶部,高度约 55 m;滑移后缘至坡顶为自然边坡,滑移后缘形成长约 80 m 的圆弧状贯穿裂缝及错台,裂缝宽度约 0.8 m,错台高度为 1 m;坡脚处边沟因挤压严重外鼓变形,边沟底板在滑移推力作用下发生隆起开裂,

盖板相继被挤出(见图 1);硬路肩外侧及中央隔离带有明显隆起迹象;坡脚处混凝土桩板墙竖向裂隙密集发育,新老裂缝均有发育,裂缝宽度 2 mm 左右,沿竖向呈线条状分布。



图 1 滑移后缘及范围

该边坡中上部主要为灰色、浅灰色强风化石英砂岩,为中厚层状构造,坡面岩层面产状为 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \angle 30^{\circ} \sim 42^{\circ}$,边坡坡面产状为 $50^{\circ} \angle 35^{\circ}$,预测滑动面位于 3 级坡中部。下伏岩层为泥盆系棋子桥组灰岩,为薄~中厚层构造,节理裂隙发育。图 2 为该边坡地层剖面图。

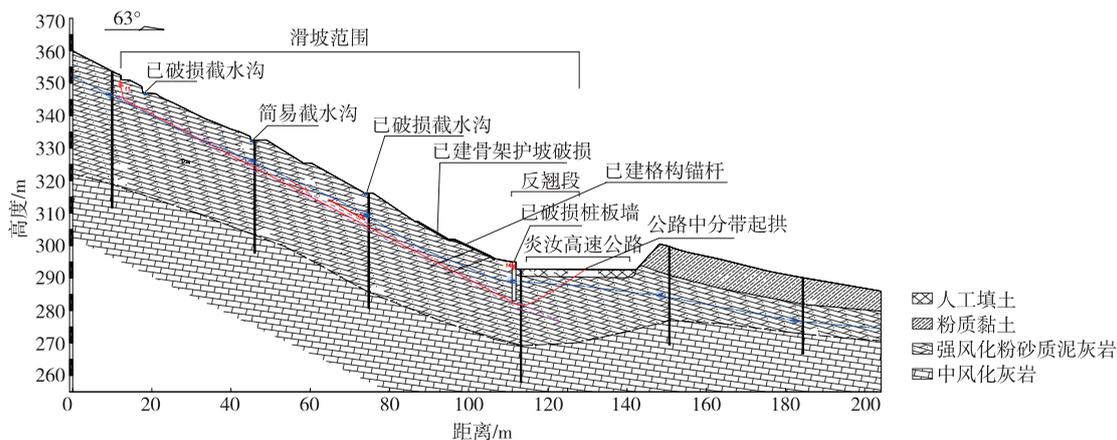


图 2 病害边坡地层情况

2 稳定性分析

从坡体病害历史及地形地质情况出发,该滑边治理需解决的问题主要有两个:一是进行坡长与岩层倾角对比分析,得到岩层层面的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 等力学参数;二是进行层面厚度对稳定性的影响分析,找到安全系数的分布规律。根据地质调绘及钻孔情况,岩石的结构强度较高,边坡的稳定受层面之间结构面强度控制。

2.1 坡面变形深度确定

为确定溃屈面深度,在边坡上布置 12 个钻孔,其中主滑断面布置 6 个孔,选取主滑断面 2 个深部位移监测孔的监测结果进行分析,2 个孔分别编号

为 1[#]孔、2[#]孔,孔深均为 30 m。待测斜孔钻孔安装完毕稳定后,于 8 月 20 日测量初始值,之后分别于 8 月 24 日、9 月 15 日进行测量。2[#]孔累积深层水平位移见图 3。1[#]孔情况类似,不再列出。

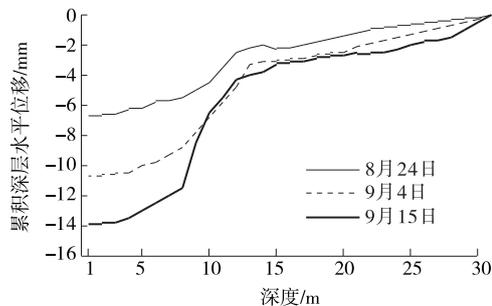


图 3 2[#]孔深层水平位移监测结果

从图 3 可看出:坡面以下 12 m 变形收敛,判断岩层溃屈深度约为 12 m。

2.2 岩层结构面参数反算

该边坡的岩性为砂岩,属于沉积岩,岩体力学性质一方面受岩石材料性质的影响,另一方面受结构面和赋存条件的控制。沉积结构面一般分为层理、岩层面、不整合面、软弱夹层等类型,结构面的存在削弱了岩体的力学强度,控制着岩体的变形和破坏,对该边坡影响较大的为软弱夹层。

该边坡为顺层边坡,坡面最大溃屈深度 B 为 12 m。通过现场测量,得溃屈临界坡长 $L_{cr} = 116$ m。通过岩土力学试验,得到天然状态下黏聚力 $c = 12.6$ kPa。参考文献[2]中板梁破坏理论反算结构面的内摩擦角 φ ,公式如下:

$$L_{cr} = h \left\{ \frac{\pi^2 n E}{6[\gamma n h \sin \alpha - (\gamma n h \cos \alpha \cdot \tan \varphi + c)]} \right\}^{1/3}$$

式中: h 为岩体单层厚度(m),该边坡为 0.2 m; n 为岩层层数; E 为岩体变形模量(MPa),该边坡为 3 500 MPa; γ 为岩体重度(kN/m^3),该边坡为 $21 \text{ kN}/\text{m}^3$; α 为斜坡倾角($^\circ$),该边坡取岩层面倾角,为 20° 。

假设各层厚度基本一致,溃屈段岩层主要为强风化粉砂质泥灰岩,岩层单层厚度按 0.1 m、0.2 m、0.5 m、1.0 m、2.0 m、3.0 m、4.0 m、6.0 m 取值,岩体重度为 $21 \text{ kN}/\text{m}^3$,黏聚力为 12.6 kPa,临界坡长及溃屈厚度均已知,由结构面参数反算得到的 φ 值见表 1。

表 1 结构面内摩擦角反算值

岩层单层厚度/m	内摩擦角/ $^\circ$	岩层单层厚度/m	内摩擦角/ $^\circ$
0.1	17.27	2.0	17.23
0.2	17.27	3.0	17.18
0.5	17.26	4.0	17.11
1.0	17.25	6.0	16.91

由表 1 可知:在临界坡长、溃屈厚度、层面黏聚力一致的情况下,层面的内摩擦角随岩层厚度增加而降低,若坡体岩层厚度较大,坡体维持稳定的内摩擦角可适当降低。

2.3 稳定性分析

坡体的稳定性分析需考虑结构面的影响,主要外力为岩体自质量和地下水头。采用有限元分析方

法分析结构稳定性的主要影响因素。岩体的力学参数根据地质勘探结果及反算结果确定,参数取值见表 2。

表 2 岩土参数取值

岩土名称	重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	变形模量/MPa	内摩擦角/ $^\circ$	黏聚力/kPa
粉质黏土	19.8	60	23	15
强风化粉砂质泥灰岩	21.0	3 300	55	40
中风化灰岩	23.5	20 000	60	128

为分析岩层厚度对顺层边坡的影响,根据岩层产状,按表 1 中岩层厚度计算边坡的稳定性,岩层采用界面单元进行模拟。界面单元使用等参数单元调节刚度到适当的数值来实现,剪切应力由接触单元的剪切刚度承担,稳定性按剪切应力是否超过莫尔-库伦屈服标准中的最大剪切强度来判断。界面单元按法线方向和切线方向生成拥有指定刚度的单元,根据相邻单元的刚度和非线性参数,虚拟厚度取 0.065 m,分别按照强度不折减(强结构面,取表 2 中参数值)和强度折减(弱结构面,取表 1 中反算值)分别计算。计算模型见图 4,计算结果见图 5。

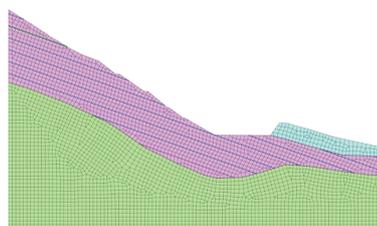


图 4 考虑坡体结构面的计算模型

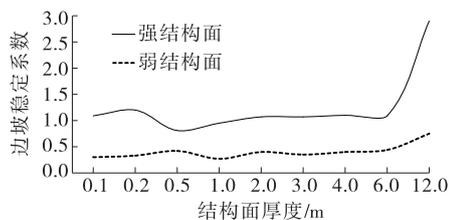


图 5 不同结构面厚度下边坡稳定系数

由图 5 可知:坡体结构面对边坡稳定性影响很大,无结构面时,边坡稳定系数达 2.9,一旦形成贯通的结构面,即使强度没有降低,坡体的稳定系数也将迅速降低到 1.09。坡体稳定系数受结构面厚度影响较大,一般结构面厚度越大,稳定性越好。坡体岩层厚度为 0.1 m 时,发育有结构面的坡体强度按实测

临界坡长进行反算折减后,坡体的稳定系数仅为 0.3,坡体已破坏。受原状坡体地质构造、工程扰动及环境的影响,发育有贯通型结构面坡体的稳定系数为 0.3~1.1,如不采取加固支挡措施,坡体将很快发生溃屈破坏。

3 结论

通过对湖南株洲某运营高速公路顺层边坡滑塌的分析,得到以下结论:1) 坡长接近或超过溃屈长度的高陡顺层岩质边坡风险较大,随时间推移,其软弱结构面易贯通而产生病害。2) 高陡顺层岩质边坡的典型病害特征为路堑边缘挤压上鼓错位,坡顶部位形成环状拉裂缝。裂缝的形成有利于地表径流渗入,进一步软化结构面,严重威胁到公路的运营。3) 顺层边坡的贯通结构面一旦形成,将大大降低坡体的稳定系数,即使结构面为强度较高的硬性结构面,也会使整个坡体处于极限平衡状态。4) 顺层边坡的安全系数一般随贯通结构面厚度的增大而增大,但强结构面和弱结构面稍有不同,强结构面在厚度为 0.2 m、弱结构面在厚度为 0.5 m 时较安全,主要原因与结构面的物理力学特性相关。5) 顺层边坡的加固处理可从提高结构面强度、减少坡体层面下滑力两个方面着手,长锚杆和预应力锚索两种加固方式均有效。

高速公路沿河展线过程中遇到的顺层高边坡风险较大,需加强高边坡的勘察和监测,将潜在不利结构面探查清楚,按照全寿命周期理念进行边坡支挡设计。同时适当考虑高边坡结构面的强度衰减,完善自然坡体及人工边坡的防水、排水体系,防止出现不利的贯通结构面。

参考文献:

- [1] 龚啸.含软弱夹层岩质高边坡稳定性影响因素分析[J].公路与汽运,2020(6):85-89.
- [2] 李树森,任光明,左三胜,等.层状结构岩体顺层斜坡失稳机理的力学分析[J].地质灾害与环境保护,1995,6(2):24-29.
- [3] 汪鸣飞,章广成,包刘磊,等.顺层陡倾岩质边坡变形机理探究[J].安全与环境工程,2021,28(5):107-120.
- [4] 李进元,施裕兵.顺向河谷陡倾角层状岩体边坡变形破坏模式及特征[J].四川地质学报,2014,34(1):104-108.
- [5] 丁戈媛,胡新丽.大奔流顺层岩质滑坡溃屈型破坏力学机制研究[J].地质科技通报,2020,39(2):186-190.
- [6] 董好刚,彭轩明,陈州丰,等.缓倾层状高边坡典型破坏模式及宏观判据研究[J].长江科学院院报,2009,26(8):36-40.
- [7] 张勃成,唐辉明,申培武,等.基于岩石损伤与水力作用的顺层岩质边坡临界失稳高度研究[J].安全与环境工程,2020,27(2):42-49.
- [8] 曹运江,黄润秋,沈军辉,等.岷江上游某水电工程边坡典型失稳模式及发育条件研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2006,33(5):441-447.
- [9] 易巍.高速公路顺层边坡破坏模式分类及防治对策[J].铁道建筑,2015(8):93-96.
- [10] 李剑伟,何勇,杨培果,等.某砂泥岩互层缓倾长大顺层边坡稳定性分析[J].水运工程,2023(增刊 1):143-149.
- [11] 罗小飞.顺层单面山硅质板岩边坡加固技术[J].公路与汽运,2018(2):68-70.
- [12] 赵锡灿.公路高陡边坡施工稳定性动态监测研究[J].公路与汽运,2022(3):65-68.

收稿日期:2023-12-10

(上接第 61 页)

- [12] 张亮.陕甘地区公路黄土高边坡防护技术研究[D].西安:长安大学,2012.
- [13] 崔淑林.路基拱形骨架防护工程施工技术探讨[J].公路与汽运,2015(3):138-139.
- [14] 吴兵,梁瑶,赵晓彦,等.破碎岩质边坡锚墩式主动防护网设计方法[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(3):101-108.
- [15] 李有志,彭伟,阳友奎,等.论 SNS 边坡柔性防护工程实践中的几个问题[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(增刊 1):47-50.
- [16] 贺咏梅,阳友奎.SNS 边坡柔性防护系统的标准化问

题[J].路基工程,2002(3):18-22.

- [17] 罗阳明,雷承弟,周德培,等.SNS 主动防护条件下边坡绿化及稳定性探讨[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):235-240.
- [18] 陈江,夏雄.金温铁路危石治理中柔性防护技术应用研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):312-317.
- [19] 赵勇,孟雄,凌时光.膨胀土柔性面层土钉支护结构设计研究[J].公路与汽运,2023(1):69-74.
- [20] 贡力.黄土高原降雨雨滴动能的侵蚀计算[J].兰州交通大学学报,2005,24(4):43-45.

收稿日期:2023-11-15