

某高等级公路反倾向层状高边坡倾倒变形分析

汪 鹏

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 倾倒变形是山区反倾向层状岩质边坡失稳的典型模式之一,以某高等级公路连接线反倾向岩质高边坡变形破坏为例,通过对高边坡的坡体结构和岩体结构分析及建模理论计算,进行边坡倾倒机理研究,并对边坡的稳定性和破坏形式进行了客观评价。在此基础上提出了相关工程处置措施,对类似岩质边坡的分析防治有一定的参考作用。

关键词: 斜坡;岩质边坡;反倾岩层;弯曲倾倒;变形机制

中图分类号: U412.16

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0051-04

Analysis on Toppling Deformation of Anti-dip Stratified High Slope on High-grade Highway

WANG Peng

(CCCC Second Shipping Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Toppling deformation is one of the typical instability modes of anti-dip stratified rock slope in mountainous areas. Taking the deformation and failure of anti-dip rock high slope of a high-grade highway connection line as an example, the slope toppling mechanism is studied through the analysis of the high slope structure and rock mass structure and the modeling theory calculation. The stability and failure form of the slope are objectively evaluated. On this basis, the relevant engineering treatment measures are put forward, which have a certain reference for the analysis and prevention of similar rock slopes.

Keywords: slope; rock slope; anti-dip rock formation; bend toppling; deformation mechanism

0 引 言

山区公路工程地质条件复杂,影响路线展线因素多、干扰多,拟线过程中不可避免需要开挖山体而形成高边坡,在自然条件或人工扰动情况下,常发生边坡失稳破坏。岩质边坡常见破坏类型有崩塌、倾倒、错落、滑动、溃屈等。公路岩质边坡岩体结构类型有块体、层状、碎裂及散体等结构。而层状结构又分为层状同向结构(顺倾)、层状反向结构(反倾)、层状斜向结构(切层)及层状平叠结构(平层)^[1-3]。蒋良滩等通过实例计算及探析,反倾岩层应主要为弯折破坏^[4]。刘品等针对惠罗高速施工过程中的边坡变形失稳,通过地质结构分析和极限平衡法计算,进行了边坡倾倒变形机理研究,由此提出相关工程措施^[5]。邢一飞等通过西南地区弯曲-拉裂实例分析与数值模拟计算,提出了弯曲倾倒式滑坡应用锚杆

防治的优化设计方法^[6]。从边坡工程特性出发,一般认为坡体顺倾结构稳定性较差,可能会沿层面或组合结构面破坏,而坡体反倾结构稳定性较好,容易导致人们的忽视。

本文将以某反倾层状岩质边坡为例,分析了反倾岩层弯曲变形机理,弯曲-拉裂(倾倒)是岩质边坡失稳破坏模式之一,经历一定发展后形成贯通性滑动面而发生滑动破坏。

1 工程概况

1.1 工程简介

连接线SNK3+430~SNK3+515左侧,边坡长度为85 m,路线走向约16°。原边坡设计为最大坡高39.12 m的四级边坡,第一级高10 m,坡率1:0.75,采用窗式护面墙防护;第二级坡高10 m,坡率1:1.0,SNK3+445~SNK3+490段采用四排全长粘结锚杆格梁+客土喷播植草防护,其余段采用客土喷播植草防护;第三级坡高10 m,坡率1:1.0,SNK3+452~SNK3+476段采用四排全长粘结锚杆格梁+客土喷播植草防

收稿日期: 2024-04-25

作者简介: 汪鹏(1991—),男,学士,工程师,从事工程地质勘察工作。

护,其余段采用客土喷播植草防护;第四级坡高9.12 m,坡率1:1.0,采用挂网+植草防护(见图1)。



图1 现场实景

边坡开挖已完成,其中一级边坡孔窗式护面墙、二级边坡、三级边坡框格梁及四级边坡挂网+植草防护已施工完成。因持续强降雨,导致边坡岩土体自重增加、强度降低,尤其一级边坡中上部分布断层破碎带,受断层挤压岩体非常破碎,强降雨条件下该层饱和和软化,导致一级边坡垮塌牵引上部岩土体发生倾倒破坏。一级边坡护面墙大部分破坏,一级边坡平台、二三级边坡发育密集纵向拉裂缝,锚杆框格梁部分遭到破坏,框格梁悬空折断,四级边坡坡顶至堑顶后缘约50 m范围内形成多条环形张拉裂缝(见图2)。

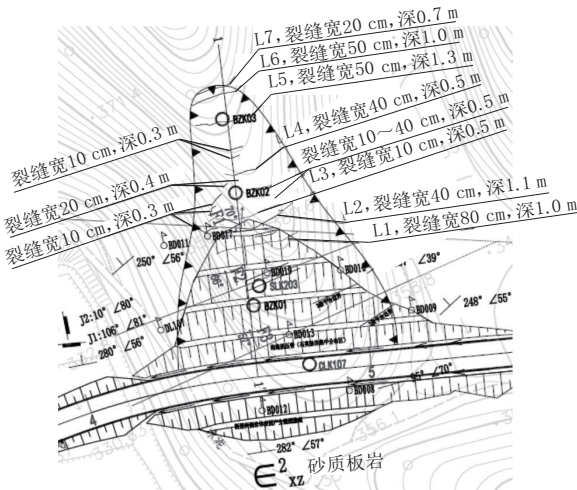


图2 边坡工程地质平面图

1.2 工程地质条件

路堑区属于构造剥蚀、侵蚀丘陵地貌。地貌上呈现小山梁与冲沟相间地貌形态,山脊走向近东西向,地形起伏较大,地面标高320~450 m,南北两侧冲沟山坡较陡,坡度约33°~42°,山体植被较发育,以乔木为主,间有灌木杂草,表层覆盖残坡积粉质黏土,坡脚可见基岩出露。已建深挖路堑两侧冲沟深切,山体三面临空,地表水不发育,降雨条件下坡面汇水沿山坡面渗流。

地层岩性自上而下可分为:粉质黏土(Q_4^{el+dl}),下伏基岩为砂质板岩(ϵ^2),岩体板理产状受断裂构造影响变化较大,岩体陡倾,岩层产状 $250^\circ\sim 266^\circ\angle 56^\circ\sim 75^\circ$,岩体节理裂隙极发育,优势节理面产状 $124^\circ\sim 145^\circ\angle 39^\circ\sim 52^\circ$,8~10组/m。

路堑边坡位于黄双坪—绥宁向斜西翼,断层发育,褶皱遭破坏而支离破碎,形态极不完整。断裂与褶皱较明显地显示出成生上的一致性。

2 倾倒式边坡的特征

2.1 形态及规模特征

SNK3+430~SNK3+515段路堑左侧边坡开挖后形成陡立边坡,坡高39.12 m,坡面东倾,单级边坡 $45^\circ\sim 53^\circ$,整体坡度约 38° 。而原状山体坡度仅 $18^\circ\sim 22^\circ$,边坡在开挖后,其原始应力状态发生了显著改变,导致坡脚应力集中。在边坡开挖后,7月份经长时间强降雨,边坡岩土体以松散堆积层以及全强风化砂质板岩为主,透水性良好,贮水性弱,而且开挖坡面植被遭到破坏,坡面汇水渗流导致岩土体饱和,自重增加,同时岩体强度降低;尤其一级边坡分布断层破碎带(F3),受断层挤压岩体非常破碎,强降雨条件下该层饱和软化,导致一级边坡岩土体垮塌牵引上部岩土体发生弯折倾倒破坏,俗称“点头哈腰”,边坡后缘山坡面形成多条清晰可见的拉裂缝。

勘测显示,路堑边坡一级边坡上部及平台、二级边坡及平台、三级边坡小里程坡面及四级边坡可见密集弯折倾倒形成拉裂缝,裂缝宽度约为20~60 cm坡体后缘约50 m范围内形成7条环形张拉裂缝,裂缝宽度0.2~0.8 m,可量测深度0.5~1.6 m,裂缝延伸长度12~30 m不等。自路堑边坡开挖面向西依次编号L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7,相关特征见表1所列。

表1 坡体发育主要裂缝统计表					单位:m
裂缝编号	发育位置	距离路线中线距离	缝宽	可量测缝深	延伸长度
L1	四级边坡中部	47	0.8	1.0	30
L2	四级边坡坡顶	52	0.4	1.1	25
L3	边坡坡顶	55	0.4	0.5	20
L4	开挖坡体后缘	72	0.4	0.5	13
L5	开挖坡体后缘	91	0.5	1.3	20
L6	开挖坡体后缘	101	0.5	1.0	17
L7	开挖坡体后缘	104	0.2	0.7	12

2.2 物质组成特征

根据现场已开挖坡面调查及机械钻孔揭示地层情况,滑体上部物质组成以残坡积粉质黏土为主,分

布于边坡后缘;中部(二、三、四级边坡)以砂质板岩风化岩块为主,节理裂隙发育,岩体破碎;下部断裂破碎带物质的组成凌乱无序,含风化岩块、石英脉体及砂土混杂。

2.3 滑坡变形机制

通过详细的野外调查工作,分析边坡岩土层分布、地质构造以及边坡失稳破坏特征,SNK3+430~SNK3+515 左侧路堑坡体失稳变形属于典型的倾侧式破坏,针对斜坡演化过程中出现的变形破坏迹象进行机制分析。边坡失稳变形的演变过程大致可分为下列几个阶段。

(1)初始变形阶段(见图3):路堑边坡三面临空,道路边坡不断开挖伴随着卸荷作用,边坡岩土体应力状态改变,向临空面方向产生拉应力,边坡坡脚形成应力集中区。由于卸荷回弹,结构松弛,堑坡坡体中的中上部岩土体沿板理面和劈理面发生拉裂和错动,表面呈现微小台阶或在坡肩处形成张拉裂缝。

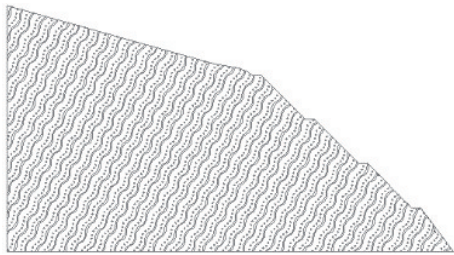


图3 初始变形阶段

(2)岩层弯曲(倾侧)阶段(见图4):在平行斜坡表面的单向最大主应力作用下,层状结构岩层受其影响产生弯矩作用,由外向下开始作悬臂梁弯曲,发生弯曲开裂,并向路堑深部发展。当弯曲持续发展一定程度时,可造成岩层下部断裂,从而形成不同折断面的断续分布。

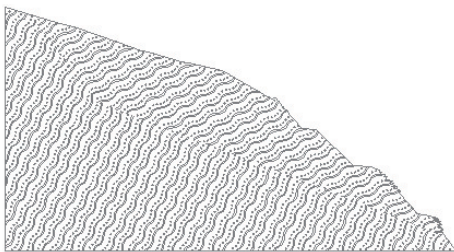


图4 弯曲(倾侧)阶段

(3)破坏阶段(见图5):随着上述变形的继续发展,在7月连续强降雨天气的影响下,坡面汇水渗流导致岩土体饱和,自重增加,同时岩体强度降低,尤其一级边坡中上部分布断层破碎带,在强降雨条件下该层饱和软化,强度显著降低,同时坡体折断带产生的剪应力超过了其抗剪强度,坡体开始逐渐下滑

错动,坡体浅表部位移总体上向临空面发生偏转,导致上部岩土体发生弯折倾侧破坏。其显著特征表现为坡脚位移较大,坡体上部位移较小。当变形逐步累计到一定程度后,浅表层堆积体沿岩体倾覆界面发生整体滑动,路堑边坡后缘山坡面形成多条环形拉裂缝。

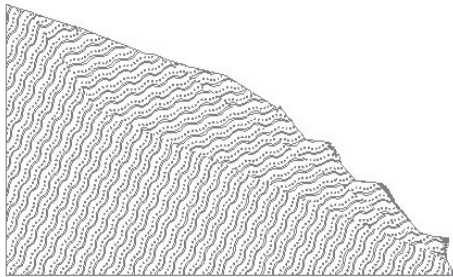


图5 破坏阶段

现场调查成果也显示,一级边坡中上部、二级边坡因倾侧形成台阶宽度以及台阶密集程度要明显多于三、四级边坡,且台阶面多处可见受构造错动、挤压产生的镜面擦痕及泥化现象,三级边坡小里程侧倾侧形成台阶规模及数量要高于大里程侧(未防护边坡段),四级边坡坡面可见3~5道倾侧台阶,其中中上部最严重处形成宽约0.8~1.0 m台阶,造成该台阶处已然形成天然集水槽。

3 边坡稳定性分析

3.1 定性分析

现场调查成果显示,7月份长时间的强降雨致使边坡岩土体饱和,自重增加,同时岩体强度降低;边坡多处断裂发育,尤其一级边坡分布断层破碎带,强降雨条件下该层饱和软化而强度显著降低,导致一级边坡岩土体垮塌牵引上部岩土体发生弯折倾侧破坏,路堑边坡后缘山坡面形成多条环形拉裂缝。路堑边坡一级边坡中部及一级边坡平台、二级边坡及平台、三级边坡小里程坡面及四级边坡可见密集弯折倾侧形成拉裂缝,裂缝宽度为20~60 cm。

路堑边坡两侧排水沟破坏,两侧出现羽状裂缝和剪切裂缝,但尚未贯通;前缘(一级边坡中上部、二级边坡下部)局部存在鼓胀破坏;一级边坡孔窗式护面墙大部分破坏,二三级边坡框格梁被剪断。

边坡失稳破坏特征表明坡体处于挤压变形阶段,一级边坡部分垮塌失稳形成主滑段,后缘牵引拉裂向下推挤抗滑段;中段表层岩土体倾侧拉裂向下变形,下部尚未形成贯通滑动面,边坡整体上处于极限平衡状态,现状边坡稳定性系数约为1.0~1.05。故

而需要尽快进行工程处治,避免坡体变形持续发展,滑坡范围进一步扩大,一旦遭遇强降雨气候条件将导致滑坡加速滑动,给道路工程造成严重损害。

3.2 定量计算

本次勘察在路堑边坡段补充钻孔3孔,并绘制典型地质断面,详细查清了路堑边坡岩土体分布及特性。选定正常工况Ⅰ与非正常工况Ⅱ(连续降雨)两种工况选择典型横断面进行稳定性验算。

3.2.1 典型断面稳定性计算

结合路堑边坡坡脚局部垮塌牵引上部陡立岩体倾倒破坏的失稳变形特征及场址区工程地质条件,推断其潜在的破坏边界条件和可能的失稳方式。基于这种破坏模式,对现状边坡采用不平衡推力传递系数法进行稳定性分析(计算剖面见图6),计算公式如下:

$$T_i=F_sW_i\sin\alpha_i+\psi_iT_{i-1}-W_i\cos\alpha_i\tan\varphi_i-c_iL_i$$
$$\psi_i=\cos(\alpha_{i-1}-\alpha_i)-\sin(\alpha_{i-1}-\alpha_i)\tan\varphi_i$$

当 $T_i<0$ 时,应取 $T_i=0$ 。

式中: T_i 、 T_{i-1} 为第*i*和*i-1*滑块剩余下滑力,kN/m; F_s 为稳定系数 W_i 为第*i*滑块的自重, kN/m; α_i 、 α_{i-1} 为第*i*和*i-1*滑块对应滑面倾角,°; φ_i 为第*i*滑块滑面内摩擦角,°; c_i 为第*i*滑块滑面岩土黏聚力,kN/m; L_i 为第*i*滑块滑面长度,m; ψ_i 为传递系数。

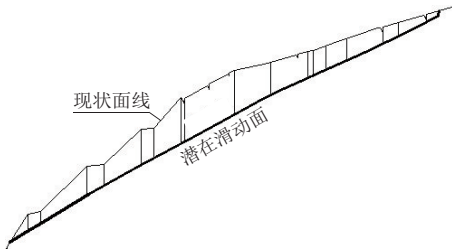


图6 计算剖面条分图

3.2.2 边坡稳定性评价

边坡稳定性评价采用多种方法进行比较,综合了历次勘察成果、指标反算、有关规范和经验数值,得出边坡岩石土体物理力学参数(见表2),计算结果见表3。

由计算结果可知,边坡正常工况下稳定性系数在1.002~1.175,非正常工况下稳定性系数在0.796~0.957,均小于《公路路基设计规范》(GTG-D30—2015)公路工况Ⅰ稳定安全系数1.10~1.15,工况Ⅱ1.05~1.10要求,且在外因素作用下,如挖坡、持续降

表2 边坡横断面稳定性计算参数推荐表

计算层位	内聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦 角 φ /(°)	重度 γ / (kN·m ⁻³)	饱和容重 γ_{st} / (kN·m ⁻³)
粉质黏土	20	19	18.8	19.8
全风化砂质板岩	28	20	21.0	22.0
强风化砂质板(上)	30	21	21.5	22.5
强风化砂质板(下)	50	25	22.0	23.0
断层破碎带	25	19	21.5	22.5

表3 稳定性计算成果表

典型断面	滑面	工况	稳定性 系数	稳定状态
SNK3+460	浅层滑动	正常工况Ⅰ	1.175	基本稳定
		非正常工况Ⅱ	0.957	不稳定

雨、地震等,将进一步下滑扩大边坡垮塌范围。

4 结 语

(1)基于野外地质调查和模型计算,该斜坡变形破坏演化过程可分为初始变形阶段、岩层弯曲(倾倒)阶段、破坏阶段3个阶段。

(2)在分析与计算基础上,确定边坡现状为欠稳定,明确倾倒边坡在暴雨工况下可能发生滑动。提出了“应急处置+削坡减载+锚杆框架及加强边坡排水”的综合治理措施。

(3)治理滑坡应本着“治早治小、一次根治、不留后患”的原则,为避免边坡岩土体暴露时间过长,岩体风化,强度进一步降低,建议加快边坡治理进程。建设过程中实行信息化设计和施工。

参考文献:

[1] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等.岩质边坡稳定分析[M].北京:中国水利水电出版社,2005.

[2] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994.

[3] 王贡先,徐峻龄,刘光代,等.滑坡学与滑坡防治技术[M].北京:中国铁道出版社,2004.

[4] 蒋良潍,黄润秋.反倾向层状岩体斜坡弯曲-拉裂两种失稳破坏之判据探讨[J].工程地质学报,2006,14(3):289-294;429.

[5] 刘品,龙森,吁燃.惠罗高速公路罗甸互通边坡倾倒变形机理与加固效果分析[J].路基工程,2018(1):220-224.

[6] 邢一飞,张诚,王建辉.西南地区典型弯曲倾倒式滑坡变形演化机理及防治研究[J].科学技术与工程,2016,16(22):156-161.