

# 宽台阶对路堑高边坡变形破坏的阻断机制研究

张翔<sup>1</sup>, 李斯涛<sup>2</sup>, 李培锋<sup>2</sup>, 尹小涛<sup>3\*</sup>

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 云南玉临高速公路建设有限责任公司, 云南 昆明 650000;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**路堑高边坡经常由于开挖卸荷造成变形破坏事故,急需对其变形破坏的阻断机制进行研究。该文以云南临沧某路堑深挖高边坡为研究对象,设计不同台阶宽度和宽台阶位置的二维极限平衡法计算工况,据此确定宽台阶的最优宽度和最佳位置。在此基础上,建立宽台阶不同宽度和位置的Flac<sup>3D</sup>有限差分三维数值模型,目的在于分析宽台阶对变形破坏的影响机制。结果表明:在2 m常规宽度台阶下7级路堑高边坡开挖会造成边坡的渐进变形破坏,破坏过程可分为卸荷回弹、剪切破坏及整体失稳3个阶段,现场施工过程发现的变形开裂现象也证实了上述破坏阶段特征;分别设置5、10 m宽台阶下的7级坡开挖,边坡处于欠稳定状态,但不会产生整体变形失稳,塑性区和剪应变增量云图均证实了宽台阶对于变形破坏的阻断机制,宽台阶的设置将高边坡分割为几个高度相对较低的边坡,每部分的变形量和施工扰动范围大大减小,且有效阻断了整体滑动面的形成;两个5 m宽台阶所组成的“宽窄台阶交替”设计方案对变形破坏的阻断效果优于一个10 m宽台阶所组成的“单个超宽台阶”的加固效果;基于费效比原则,采用宽台阶方案的挖方量相对于常规开挖增加5.0%~13.6%,锚索数量减少20.4%~27.2%,保证了施工期间坡体的自稳。

**关键词:**路堑边坡;台阶位置;台阶宽度;破坏机制;数值计算

随着“西部大开发”及“一带一路”等国家战略的实施,中国山区高速公路建设正在如火如荼地进行。山区高速公路路堑高边坡由于开挖深度大、危险程度高等特点,通常需要将边坡分级修建成台阶状,路堑高边坡的安全稳定对保障公路安全通行至关重要。

JTG D30—2015《公路路基设计规范》<sup>[1]</sup>对30 m以下岩质路堑边坡有明确的设计标准,但对于30 m以上的深挖路堑高边坡仅要求设计成台阶形,对于台阶的具体设计没有明确规定。当前实际工程中,一般按常规台阶对路堑高边坡进行设计,遇到问题通常采取不断放缓坡度、多次卸载刷方等方式稳定坡体,往往导致坡面汇水面积增大,且冲刷严重,给路堑高边坡施工过程及长期安全埋下隐患<sup>[2-5]</sup>。因此,需要探讨台阶对路堑高边坡安全稳定的作用机制。

目前国内外学者对路堑高边坡安全性及失稳破坏机制等方面进行了诸多研究。王浩等<sup>[6-7]</sup>对超高

路堑高边坡失稳机制及整治措施进行了研究;叶万军等<sup>[8-9]</sup>、高德彬等<sup>[10]</sup>通过资料收集、数值模拟等方法对黄土路堑高边坡进行了较为系统的稳定性分析及优化设计研究;宋从军等<sup>[11]</sup>、马思明等<sup>[12]</sup>对软质岩路堑高边坡的加固与防护进行了研究,对该类高边坡的综合治理进行了探讨;王婉<sup>[13]</sup>、刘小丽等<sup>[14]</sup>探究了二阶阶梯形均质边坡的开挖效应;言志信等<sup>[15]</sup>、黄诗渊等<sup>[16]</sup>采用数值计算方法研究了在地震作用下不同台阶宽度对边坡稳定性的影响,分析了边坡动力响应特性和边坡地震动力失稳机制;李建宇等<sup>[17]</sup>以某路堑边坡为例,探讨了锚索支护方案中的参数优化问题。在多台阶矿山排土场方面,GB 50771—2012《有色金属采矿设计规范》<sup>[18]</sup>对边坡台阶的分类较为细致,主要分为安全台阶、清扫台阶、运输台阶。规范中要求,安全台阶宽度不小于2 m,清扫台阶宽度不小于6 m,运输台阶宽度甚至达30~50 m,单级坡高度往往达到

收稿日期:2020-06-04

基金项目:云交科教项目(编号:云交科教[2018]45号);中国工程科技发展战略湖北研究院武汉分院咨询研究项目(编号:Y933230101)

作者简介:张翔,男,硕士研究生.E-mail: zhangshuo960606@163.com

\* 通信作者:尹小涛,男,博士,副研究员.E-mail: xtyin@whrsm.ac.cn



3 级坡坡率为 1 : 0.75,2 级坡、1 级坡坡率为 1 : 0.5,建模范围详见图 3。

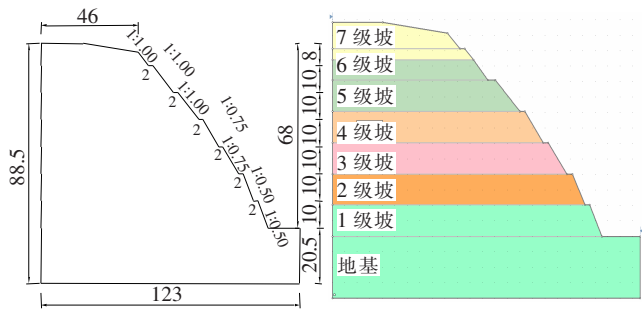


图 3 二维计算模型示意图(单位:m)

在初始设计计算模型的基础上通过改变台阶位置和宽度对坡体稳定性系数的影响,以此综合判断台阶敏感位置及宽度。综合资源节约及经济性等方面的考量且实际工程中台阶形路堑边坡台阶宽度通常少见于 10 m 以上,多为 2~5 m。因此该文将台阶宽度分别设置为 3、5、7、10 m,并将增宽后的台阶分别置于 2~7 级坡坡脚位置,其余坡脚位置台阶宽度仍为 2 m,共计 24 个计算模型。

2.2 宽台阶最佳宽度和最佳位置的确定

计算过程中采用简化 Bishop 方法将滑面剪入口控制在坡顶后方 25 m(即现场调查最外缘裂缝处),剪出口控制在 1 级坡坡脚位置,自动搜索潜在滑面并计算安全系数。不同台阶宽度和位置下边坡整体稳定性系数演化曲线如图 4、5 所示。

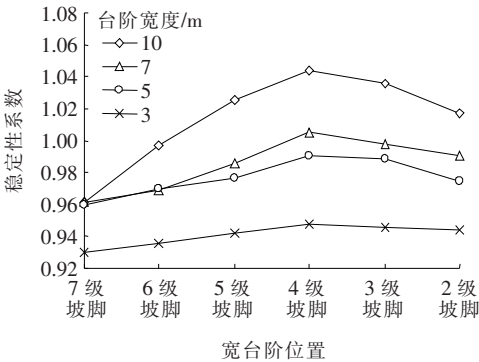


图 4 不同台阶宽度下稳定性系数演化曲线

从图 4 可以看出:边坡稳定性系数随着宽台阶位置的降低,稳定性系数曲线均呈现出先增大后减小的趋势,且随着宽度的增加,曲线中间凸起更为显著,这些均证明将宽台阶设置于 4 级坡脚位置(边坡中部位置)最优,稳定性系数最大约 1.04;7 m 及以下宽度的台阶稳定性系数曲线几乎都在 1.00 稳定性系数之下,说明路堑高边坡整体相对不稳。原因在于,对高边坡

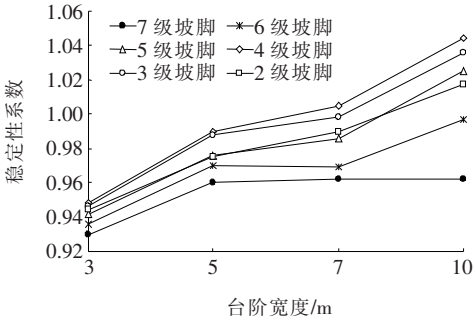


图 5 不同台阶位置下稳定性系数演化曲线

来说,一般坡体中下部是阻滑段,中上部是下滑段,宽台阶设置在中部,对于高边坡相当于提供了卸载减荷作用;另外,中部宽台阶的施加使高边坡弱化为两个相对高度较低的次级边坡,因此稳定性系数达到最大,宽台阶再往下则效果降低。

从图 5 可以看出:随着台阶宽度的增大,边坡整体稳定性系数逐渐提高,且宽台阶位于第 4 级坡脚处时稳定性系数最高,台阶宽度从 3 m 增加至 5 m 以及从 7 m 增加至 10 m,稳定性系数提高明显,而台阶宽度从 5 m 增加至 7 m,稳定性系数提高程度不大。

从理论上讲,边坡平台的宽度越大,边坡的综合坡率越小,边坡越平缓,边坡的稳定性越高。但由于资源、经济、施加宽台阶的有效性等综合要素考虑,宽台阶仅能在有施作条件的地区采用,该文仅探讨其加固机理,为宽台阶的采用提供技术支撑,这也是对传统设计的有益补充和推进。

3 宽台阶对路堑高边坡变形破坏的阻断机制

3.1 三维计算模型及边界条件

在上述研究的基础上建立三维计算模型,采用大型商业软件 FLAC<sup>3D</sup> 仿真分析路堑高边坡开挖的变形破坏过程及宽台阶对高边坡变形破坏的干预机制。共设计 4 个三维计算模型:初始常规台阶设计方案(台阶宽度均为 2 m)为工况 1;4 级坡坡脚台阶宽度 5 m,其余台阶宽度 2 m 为工况 2;4 级坡坡脚台阶宽度 10 m,其余台阶宽度 2 m 为工况 3;6 级坡坡脚和四级坡坡脚台阶宽度 5 m,其余台阶宽度 2 m 为工况 4。相应的计算模型如图 6 所示。

三维模型均采用六面体网格划分,网格类型为 Quads&Triangles,考虑模型计算效率及精度,保证最大网格尺寸为 2 m×2 m。边界条件采用边坡模型底



面固定约束,侧面法向约束,表面自由。边坡材料参数详见表 1,计算采用理想弹塑性本构模型,破坏准则选取 Mohr—Coulomb 屈服准则<sup>[23]</sup>。计算过程中通过移除单元体实现土体分层开挖。

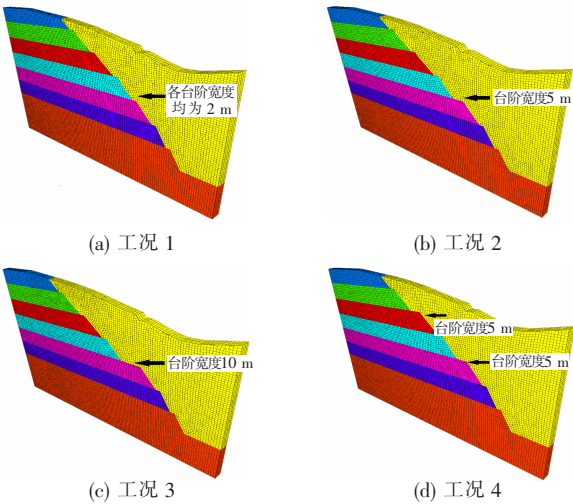


图 6 三维计算模型示意图

三维工况 1 用于分析开挖造成的高边坡变形破坏过程;工况 1~3 用于对比分析宽台阶对高边坡破坏机制的影响;工况 2、4 用于对比分析宽台阶个数变化对高边坡变形破坏的影响。三维计算工况见表 2。

表 2 三维数值计算工况

三维工况编号	宽台阶个数	台阶宽度/m	宽台阶位置
1	0	2	
2	1	5	4 级坡脚
3	1	10	4 级坡脚
4	2	5	4、6 级坡脚

3.2 常规台阶下开挖变形破坏过程及稳定状态变化

路堑高边坡滑裂面的产生及失稳破坏是一个动态过程。在 FLAC<sup>3D</sup> 中通过移除各级边坡单元体模拟实际边坡开挖过程,图 7、8 分别为工况 1 下边坡开挖过程中不同开挖步对应的塑性区及最大剪应变增量揭示的边坡变形破坏过程。

在高边坡开挖初期,开挖面附近岩土体主要以坡脚应力集中,剪切破坏为主,开挖卸荷回弹显著;剪切塑性区范围主要集中在各级坡脚及坡面位置,随着边坡开挖深度的加大,剪切塑性区逐渐向坡体中上部延展扩大,坡顶附近出现小范围张拉塑性区,边坡临近极限状态,各级近坡面塑性区逐渐连通,塑性区出现明显分界面。坡体开挖完成后,塑性区完全贯穿坡体,坡顶后缘出现大量张拉塑性屈服区。

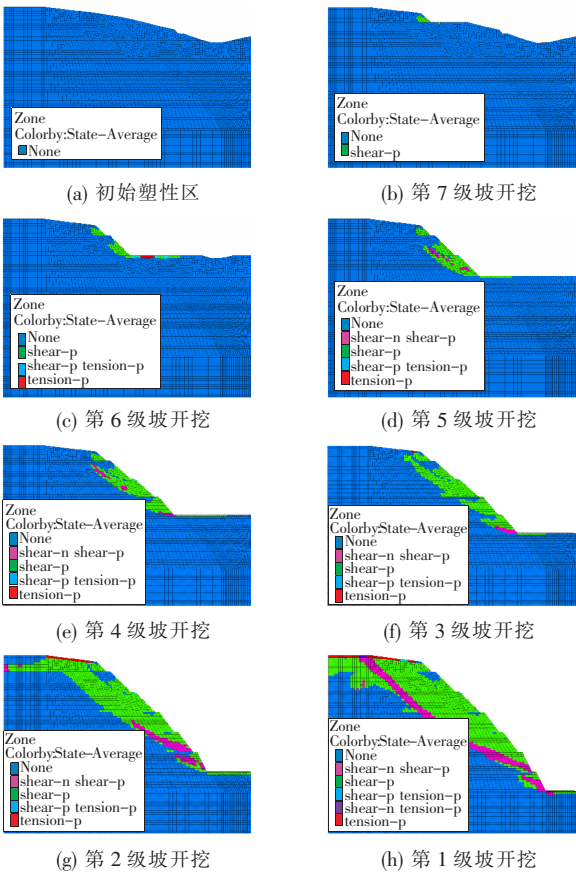


图 7 塑性区云图揭示的边坡变形破坏机制

从图 8 可以看出:边坡的变形失稳过程是由于开挖卸荷过程中应力释放,边坡岩土体应变逐渐积累,滑裂面从坡脚位置初步形成并逐渐向坡体内部延展扩大最终贯通的过程。在开挖初期,开挖卸荷导致每一级坡均在坡脚位置出现剪应变集中,与上述塑性区分布情况相吻合,说明坡脚位置容易产生塑性变形和剪应力集中,属于边坡薄弱部位。随着开挖深度的增加,剪应变集中带逐渐扩大,并逐渐发育成剪切滑裂面,主滑面最终贯穿坡体。坡体全部开挖完成后,出现 4 个潜在剪切滑面,剪入口位于坡顶后方 13~26 m 处,剪出口分别位于 5 级坡至 2 级坡坡脚处,潜在滑裂面深度 6~20 m,最大剪应变为 0.006 7。潜在滑面的位置均为现场调查时裂缝出现的位置,间接说明了数值模拟中计算参数选取和模型搭建的正确性。

从边坡开挖过程中塑性区及剪应变变化情况来看:其变形破坏大致分为 3 个阶段:前期卸荷回弹阶段、中期剪切破坏阶段和后期整体失稳破坏阶段。采用每 10 m 坡高增设一个宽 2 m 的台阶平台的初始常规设计方案,开挖过程中形成明显的主滑裂面,边坡无法保证自稳。

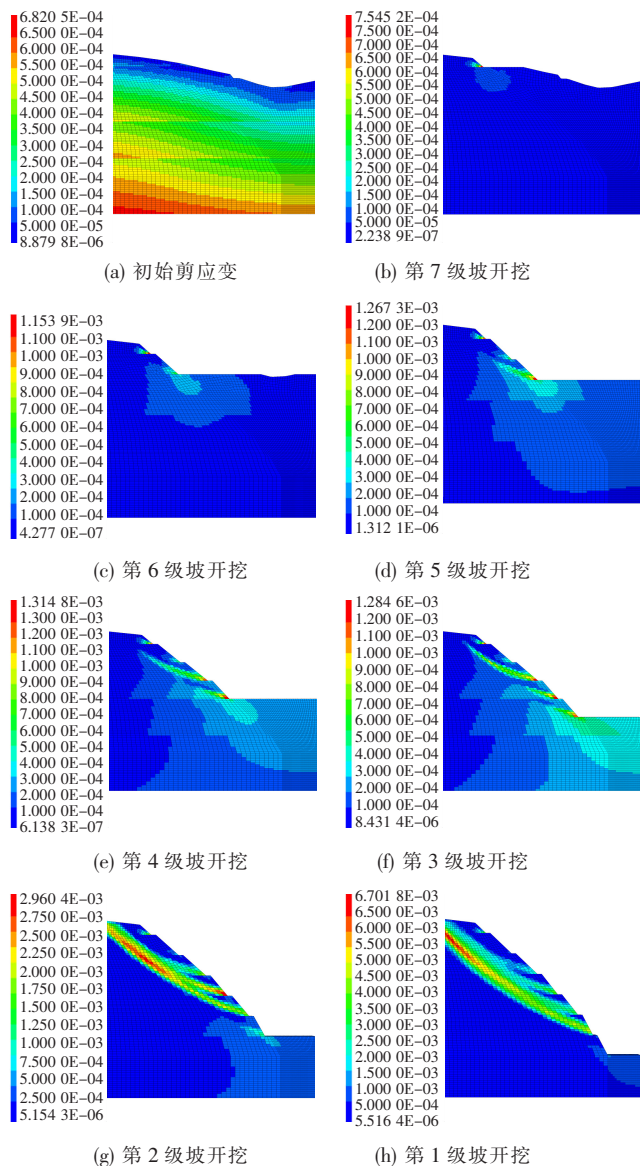


图 8 最大剪应变增量云图揭示的边坡变形破坏机制

### 3.3 台阶宽度对路堑高边坡破坏机制的影响

为对比分析宽台阶对高边坡破坏机制的影响,探讨台阶宽度对路堑高边坡破坏机制的干预作用,图 9(a)、(b)、(c)分别为工况 1、2、3 开挖完成后的塑性区云图。

从图 9 可以看出:在高边坡中部施加宽台阶后边坡塑性屈服范围明显减少,仅宽台阶上部部分坡体塑性区贯通,坡体内以及浅层坡面以剪切破坏为主,坡顶一定范围内主要发生张拉破坏。

在宽台阶作用下,塑性区范围于宽台阶处被分解为上下两部分。随着台阶宽度增加,坡体内的剪切塑性区深度明显减小并逐渐向各级边坡坡脚上方的坡面贴近,对坡体深部土体的扰动有所减轻,高边坡的整体

破坏趋势得到分解,宽台阶下部稳定性有明显改善。设置宽台阶后,虽然将边坡的整体破坏分解,但是对于宽台阶上部的各级边坡干预作用并不明显,上部坡体失稳风险程度仍然很高。

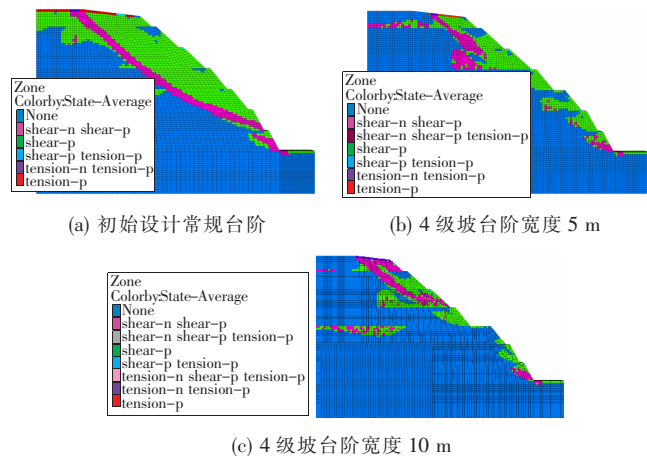


图 9 台阶宽度对破坏形态的改变

为了探讨宽台阶对路堑高边坡潜在滑面及破坏深度影响,图 10(a)、(b)、(c)分别为工况 1、2、3 开挖完成后最大剪应变增量云图。

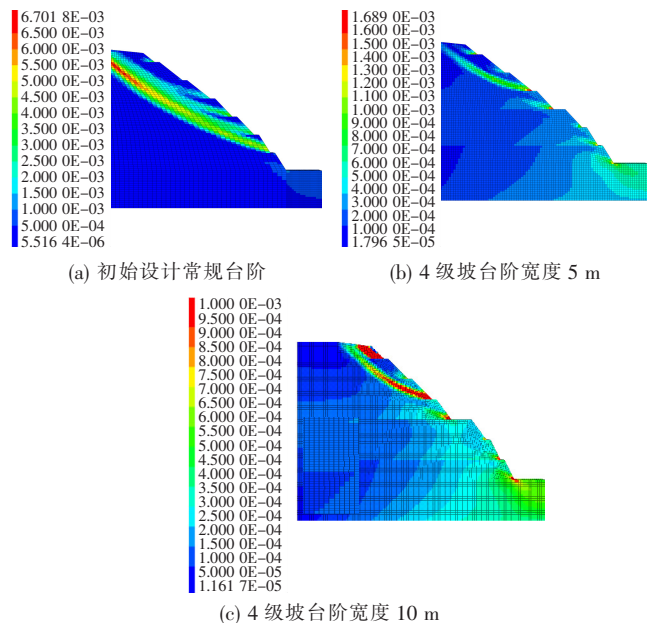


图 10 不同台阶宽度下最大剪应变增量云图对比

从图 10 可以看出:施加宽台阶后,贯穿整个坡体的深层滑裂面被阻断成上部坡体的浅层滑裂面,滑裂面的范围及深度有所减小,宽台阶下的各次级边坡仅在坡脚位置出现应力集中,说明宽台阶的施加有效地阻断了边坡整体滑裂面的形成,路堑高边坡的破坏由整体破坏分解为局部破坏。

从定量方面分析,工况 2 潜在滑裂面剪入口位于

坡顶后方 9~15 m 处,剪出口位于 5 级坡脚处,潜在滑裂面深度 5~12 m,最大剪应变增量为 0.001 7,较初始设计常规台阶降低 74.6%。工况 3 潜在滑裂面剪入口位于坡顶后方 7~14 m 处,剪出口位于 5 级坡脚处,潜在滑裂面深度 5~10 m,最大剪应变增量为 0.001,较初始设计常规台阶降低 85.1%,且 7 级坡处剪切塑性区范围和最大剪应变急剧增大,出现应力集中现象,考虑到坡顶上覆土体性质弱,且开挖方量过大,这些是其破坏的原因。

在高边坡中部设置宽台阶,边坡整体破坏被分解,说明宽台阶对边坡的开挖变形破坏具有显著的阻断机制,通过增加台阶的宽度,使得原本已经设计成常规台阶的边坡再次分级,边坡的整体破坏分解为两个局部破坏,在一定程度上减小了边坡失稳的规模,降低了整体破坏的风险,提高了边坡的整体稳定性,改善了边坡的自稳能力。

### 3.4 宽台阶对路堑高边坡破坏的阻断机制

工况 4 在工况 2 的基础上在 6 级坡脚增设一个宽 5 m 的宽台阶,形成“宽窄台阶交替”的台阶形式。从开挖完成的塑性区对比图(图 11)中可以看出:随着宽台阶个数的增加,剪切塑性区范围在宽台阶处明显减小,边坡上部塑性区贯通趋势得到分解,仅在 6 级坡和 5 级坡附近形成小范围连通区域,且尚未贯穿坡体,坡体上部的整体破坏被分解。

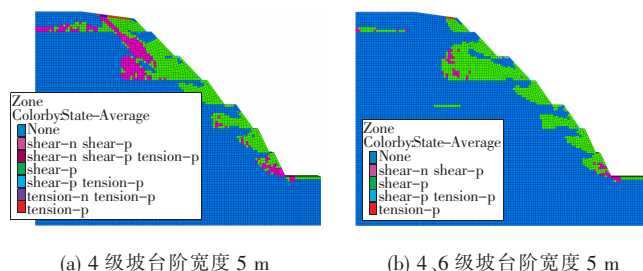


图 11 宽台阶对破坏形态的改变

从开挖完成后的最大剪应变增量对比图(图 12)中可以看出:在第 6 级坡脚增加宽台阶后,有效地阻断了在 5 级坡脚处产生的潜在滑裂面,改善了上部坡体的稳定性。随着开挖深度的加大,仅在各坡脚处出现应力集中,未形成明显的剪切滑裂面。

将路堑高边坡设计成“宽窄台阶交替”的台阶状边坡优于工程中常见的“常规台阶”形式和“中部超宽台阶”形式。主要原因如下:

(1) 在常规台阶的基础上间隔增设宽台阶,可将高边坡弱化成多个高度相对较低的独立坡体,可以有

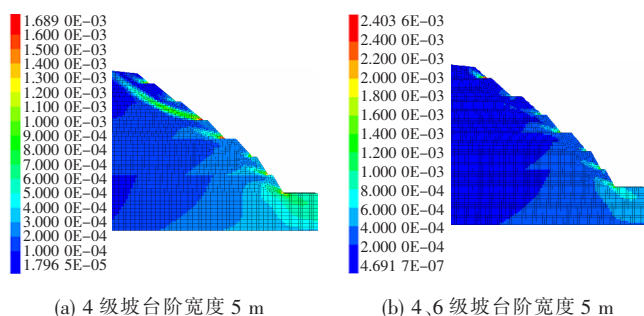


图 12 不同宽台阶个数下最大剪应变增量云图对比

效地分解高边坡整体破坏趋势,使坡体内部应力优化分布,避免应力集中现象,对提高坡体稳定性、减少边坡破坏区域等方面均有一定优势。

(2) 可在多个宽台阶处增设截排水措施,雨水通过坡面径流汇集到宽台阶处得到有效分流,有效减少坡面冲刷及径流量,避免雨水下渗,有利于坡体稳定性提高。

(3) 施加宽台阶可以有效降低坡面小型滚石滑落风险,起到一定缓冲作用,有助于高边坡施工及道路通行安全。

## 4 宽台阶作用下的费效比分析

由于上覆土层岩土力学性质较差,常规台阶直接开挖将导致边坡整体失稳破坏,即使考虑宽台阶作用,边坡虽不至于整体失稳,但也要看到其整体处于欠稳定状态,安全保障依然不足。因此,仍需在分阶段开挖中及时采取加固措施,且加固措施的深度需要加强。在原有锚索框格梁加固方案下,探讨不同加固措施的费效比和加固效果。

根据初始设计选择采用 4 种不同类型的锚索,分别编号为  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 。锚索水平射入角为  $20^\circ$ ,7 级坡至 5 级坡锚索( $L_3$ 、 $L_4$ )布置横坡向间距为 4.0 m,纵坡向间距为 3.0 m,5 级坡以下锚索( $L_1$ 、 $L_2$ )布置横坡向间距为 3.0 m,纵坡向间距为 3.0 m。 $L_1$ 、 $L_3$  型锚索由 4 束公称直径为 15.2 mm 钢绞线组成, $L_2$  型锚索由 10 束公称直径为 15.2 mm 钢绞线组成, $L_4$  型锚索由 6 束公称直径为 15.2 mm 钢绞线组成。锚索框格梁规格为 500 mm×500 mm,由于在锚索布置中存在横坡向间距 3.0 m 和 4.0 m 两种情况,因此选取 12.0 m 横坡向宽度开展开挖方量和加固措施量化对比分析。工况 1 常规台阶锚索布置图见图 13。锚索设计参数见表 3。

将该加固措施分别施加至工况 2、3、4,经计算,结



果均满足安全稳定性评价标准。挖方量自道路中线左侧计算,开挖深度取 12 m。表 4 为不同工况下初始设计加固前后边坡稳定性计算结果及开挖方量统计。

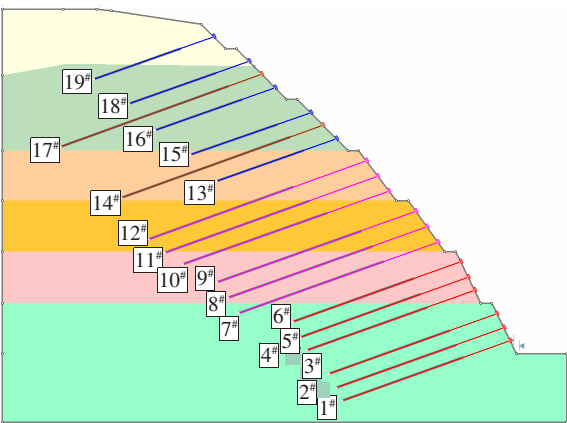


图 13 常规台阶锚索布置图

表 3 常规台阶锚索参数设置					
锚索类型	锚索编号	锚索长度/m	自由段长度/m	锚固段长度/m	抗拔力/kN
L <sub>1</sub>	1 <sup>#</sup> ~6 <sup>#</sup>	35	10	25	450
L <sub>2</sub>	7 <sup>#</sup> ~12 <sup>#</sup>	42	7	35	1 000
L <sub>3</sub>	13 <sup>#</sup> 、15 <sup>#</sup> 、16 <sup>#</sup> 、18 <sup>#</sup> 、19 <sup>#</sup>	25	7	18	450
L <sub>4</sub>	14 <sup>#</sup> 、17 <sup>#</sup>	42	7	35	650

表 4 初始设计加固前后边坡稳定性计算结果及挖方量				
工况	挖方量/ m <sup>3</sup>	整体稳定性系数		安全系数标准
		加固前	加固后	
1	24 511.56	0.937	1.220	1.20
2	25 742.88	0.991	1.338	1.20
3	27 849.56	1.044	1.406	1.20
4	26 293.20	1.034	1.393	1.20

从表 4 可以看出:在保证边坡稳定的前提下,若工况 2、3、4 施加与常规台阶工况 1 采取相同的加固措施,计算结果偏于保守。经过反复试算综合确定不同工况的最优加固措施方案,工况 2 在常规台阶锚索布置的基础上将 3、4 级坡锚索纵坡向间距调整为 5.0 m;工况 3、4 在常规台阶的基础上将 1 级坡至 4 级坡锚索纵坡向间距均改为 5.0 m。经验算调整后各工况仍满足边坡稳定性要求。各工况调整后的加固措施见图 14。加固措施调整后的边坡稳定性计算结果见表 5。不同工况下边坡加固所需锚索量见表 6。

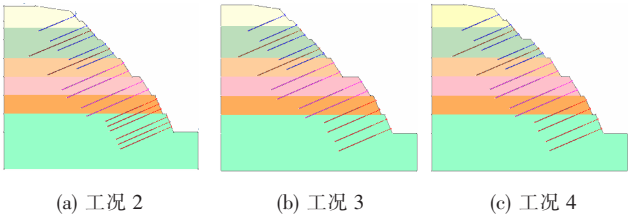


图 14 不同工况下锚索布置图

表 5 加固措施调整后边坡稳定性计算结果				
工况	加固措施调整	稳定性系数	安全系数	标准
2	3、4 级坡锚索纵坡向间距 5 m	1.205	1.20	
3	1~4 级坡锚索纵坡向间距 5 m	1.228	1.20	
4	1~4 级坡锚索纵坡向间距 5 m	1.225	1.20	

表 6 不同工况下边坡加固所需锚索数量						
工况	锚索类型	长度/ m	拉拔力/kN	数量/ 根	钢绞线长度/m	钢绞线总长度/m
1	L <sub>1</sub>	35	450	24	3 360	16 452
	L <sub>2</sub>	42	1 000	24	10 080	
	L <sub>3</sub>	25	450	15	1 500	
	L <sub>4</sub>	42	650	6	1 512	
2	L <sub>1</sub>	35	450	24	3 360	13 092
	L <sub>2</sub>	42	1 000	16	6 720	
	L <sub>3</sub>	25	450	15	1 500	
	L <sub>4</sub>	42	650	6	1 512	
3、4	L <sub>1</sub>	35	450	16	2 240	11 972
	L <sub>2</sub>	42	1 000	16	6 720	
	L <sub>3</sub>	25	450	15	1 500	
	L <sub>4</sub>	42	650	6	1 512	

通过对比各工况挖方量与加固所施加的锚索量,发现随着台阶宽度的增加及宽台阶个数的增多,挖方量的增加为初始设计挖方总量的 5.0%~13.6%,锚索数量的减少为初始设计总锚索数量的 20.4%~27.2%。采用工况 4“宽窄台阶交替”的设计方案总体挖方量增加约为初始常规台阶设计总挖方量的 7.3%,锚索减少量为总锚索量的 27.2%,且“宽窄台阶交替”的设计方案相较其他设计有诸多优势,一方面能够有效地提高路堑高边坡的自稳能力,将边坡的整体破坏趋势分解;另一方面,可以减少边坡加固措施的用量,节约工程开支,为最优设计方案。

## 5 结论

依托出现问题的实际工程路堑高边坡案例,探讨了宽台阶对边坡的加固机理,同时探讨了宽台阶的最大效能加固方案,所得结论如下:

(1) 宽台阶造成的稳定性系数演化曲线揭示宽台阶的施作位置以中部为佳,宽度不是越大越好,均存在最佳位置和最佳宽度。

(2) 塑性区和剪应变增量云图揭示的路堑高边坡的变形破坏可以分为3个阶段,即前期卸荷回弹阶段、中期剪切破坏阶段和后期整体失稳破坏阶段。

(3) 由设置宽台阶和设置常规宽度台阶的路堑高边坡塑性区和剪应变增量云图对比分析发现:宽台阶对路堑高边坡的整体变形破坏具有显著的阻断效果。宽台阶加固效果显著,机理在于边坡中上部为滑移段,中下部为阻滑段,中上部的卸荷作用是其阻断机制的力学本质,即高边坡分解为几个有限高度边坡,从而实现风险管控的目标。

(4) “宽窄台阶交替”的设计方案可以使坡体内部应力优化分布,有效减少坡面冲刷,降低坡面小型滚石滑落风险,优于“常规台阶”和“中部超宽台阶”方案。

(5) 通过费效性对比发现,设置宽台阶后挖方量的增加为初始设计挖方总量的5.0%~13.6%,锚索用量的减少为初始设计总锚索用量的20.4%~27.2%。经过多种工况对比,该路堑深挖高边坡工程在第4、6级坡脚分别设置宽度为5 m的“宽窄台阶相结合”为最佳设计方案。

## 参考文献:

- [1] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].
- [2] 林杭,曹平,李江腾,等.层状岩质边坡破坏模式及稳定性的数值分析[J].岩土力学,2010,31(10):3 300—3 304.
- [3] 王红明,代先尧,罗红明,等.谷竹高速公路某滑坡形成机制数值模拟分析[J].中外公路,2019,39(4):6—10.
- [4] 魏小楠.考虑岩土应变软化特性的开挖扰动诱发路堑边坡渐进性破坏机理分析[J].中外公路,2019,30(1):23—27.
- [5] 刘新喜,张平,邓宗伟.炭质泥岩软岩基座路堑边坡开挖

过程稳定性分析[J].中外公路,2016,36(6):14—16.

- [6] 王浩,王晓东,泮俊.超高路堑边坡治理工程案例研究Ⅰ:边坡失稳机制模拟分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4):899—909.
- [7] 王浩,王晓东,泮俊.超高路堑边坡治理工程案例研究Ⅱ:治理对策及其过程控制[J].岩石力学与工程学报,2017,36(5):1 152—1 161.
- [8] 叶万军.黄土路堑高边坡优化设计理论和方法研究[D].长安大学博士学位论文,2006.
- [9] 叶万军,折学森.阶梯状黄土路堑高边坡稳定性分析方法[J].水文地质工程地质,2005,32(6):75—78.
- [10] 高德彬,倪万魁,赵之胜.公路黄土路堑高边坡坡型选择研究[J].公路,2007,52(7):94—98.
- [11] 宋从军,周德培,鄢宏庆.软质岩路堑高边坡的加固与防护技术研究[J].岩土力学,2003,24(S2):244—248.
- [12] 马思明,王国余,靳莉.软质岩路堑高边坡的综合治理措施探讨[J].公路交通技术,2005,24(4):23—25.
- [13] 王婉.开挖效应对阶梯型挖方边坡稳定性影响研究[D].中国海洋大学硕士学位论文,2014.
- [14] 刘小丽,王婉,英姿,等.阶梯型均质边坡的开挖效应[J].山地学报,2015,33(6):726—732.
- [15] 言志信,郭斌,贺香,等.多级边坡平台宽度对边坡地震动力响应及破坏机制的影响[J].岩土力学,2012,33(S2):352—358.
- [16] 黄诗渊,刘健,李书杰,等.地震作用下边坡平台对边坡的动力响应及失稳破坏影响分析[J].长江科学院院报,2015,32(7):70—76.
- [17] 李建宇,耿文林,潘家奇,等.路堑高边坡稳定性分析与支护参数优化设计研究[J].中外公路,2018,38(5):31—34.
- [18] GB 50771—2012 有色金属采矿设计规范[S].
- [19] 毛权生,乐陶.多台阶覆盖式排土场边坡结构参数的确定[J].金属矿山,2013(5):56—58.
- [20] 陈印,杨溢,刘磊,等.排土场边坡稳定性分析及台阶高度的确定[J].中国锰业,2016,34(2):21—24.
- [21] 李海臣,高战敏.矿山排土场边坡上下台阶裂缝形成机理的研究[J].矿业工程,2019,17(2):23—25.
- [22] 李文新,李睿,王珊.针对不同台阶高度对某矿山排土场边坡位移变形分析研究[J].云南冶金,2017,46(3):5—10.
- [23] 徐干成,郑颖人.岩石工程中屈服准则应用的研究[J].岩土工程学报,1990(2):93—99.