

# 基于高速公路边坡坍塌灾害治理的坡率过渡段 适宜长度研究\*

赵虎刚, 安博, 王开洋, 孟定宇

(云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041)

**摘要:** 通过对边坡衔接过渡设计现状的分析确定模型条件, 建立正常段边坡与坍塌段边坡过渡设计模型, 采用几何法对模型进行求解。结果表明, 对于一般均匀地质边坡, 确定最陡坡率  $n_m$  后, 坡率过渡段长度只与坡高  $H$  和坡率变化值  $\Delta n$  有关; 若最陡坡率  $n_m = 0.8n_1$  ( $n_1$  为由地质、地形、地物条件判定的放缓坡率), 则坍塌边坡坡率过渡段长度为坡高  $H$  与坡率变化值  $\Delta n$  乘积的  $4/3$  倍; 若最陡坡率  $n_m = 0.9n_1$ , 则坍塌边坡坡率过渡段长度约为坡高  $H$  与坡率变化值  $\Delta n$  乘积的  $2$  倍。实例验证结果显示, 对于一般均匀地质边坡, 应用该模型求解结果可快速得到坍塌段边坡坡率过渡段长度。

**关键词:** 公路; 边坡坍塌; 灾害处理; 坡率过渡

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)03-0073-03

高速公路边坡坍塌灾害不可避免。边坡坍塌后, 一般需要清方并重新设置防护。清除坍塌的土方后, 正常段边坡较陡, 而坍塌段边坡较缓, 产生坍塌段边坡与正常段边坡坡率渐变的问题。目前主要是凭设计或施工经验处理坡率渐变问题, 即给出一段  $20\text{ m}$  或  $30\text{ m}$  长度边坡进行渐变, 没有系统地地质、边坡高度、坡率差值等方面进行计算。且因经验不一, 凭经验给出的过渡段长度要么过长, 要么过短。过渡段过长, 需拆除废置的完好段落防护较多, 造成不经济和浪费, 也会增加占地; 过渡段过短, 坡率变化较快, 局部边坡不稳定, 边坡坍塌隐患仍然存在, 若处理不当, 极易发生二次坍塌事故。在地质情况、边坡高度、边坡坍塌范围确定的情况下, 求解较合理的坡率过渡段长度对保证边坡安全、降低经济损失很重要。

目前, 边坡稳定性研究方法主要有试验研究、理论研究、数值模拟三类<sup>[1]</sup>, 通过试验研究、理论研究, 结合数值模拟形成了较完整的边坡稳定性分析体系<sup>[2-6]</sup>, 但针对公路边坡衔接过渡的研究较少。许斯伟在路基与隧道接合部的衔接设计中, 针对隧道仰坡和路基边坡坡高差太大的问题, 利用隧道  $20\text{ m}$  明洞渐变段, 在保证边坡安全和稳定的前提下, 采用边坡渐变的方式, 通过改变不同层级边坡的坡率和

坡高实现边坡平顺、美观地衔接<sup>[7]</sup>。但这是凭实践经验进行的处理, 缺少理性的计算推理, 不一定适用于其他地质情况。对于公路边坡坍塌修复过渡的设计目前还没有系统研究, 特别是没有系统地研究坍塌段与正常段的过渡方式、坡率过渡段长度等。本文对高速公路边坡坍塌灾害治理中坡率过渡段适宜长度进行研究。

## 1 建立模型及求解

### 1.1 假设条件

(1) 因一般坍塌段规模较小, 段落长度不大, 假设坍塌段与完好段地质相同, 即在均匀地质条件下建立模型。

(2) 为简化模型, 假设坡顶为平面, 即不考虑坍塌后边坡高度增加的情况。

(3) 假设坍塌段边坡坡率为  $1:n_1$ , 正常段边坡坡率为  $1:n_2$ ,  $n_1$  为综合地质、地形、地物条件判定的放缓坡率, 一般  $n_1 > n_2$ 。为直观地表现模型, 假设  $n_1 = 2, n_2 = 1$ 。假设模型边坡高度为  $H$ , 坡率过渡段长度为  $L$ 。

(4) 假设过渡段边坡的最陡坡率为  $1:n_m$ ,  $n_m$  为可接受的最陡坡率,  $n_m = Rn_1$ 。  $R$  为可接受度值, 一般  $0.7 < R < 1$ ,  $R$  值越大边坡越安全。

\* 基金项目: 云南省交通运输厅科技项目(KJZSW-2021-04-3); 云南省数字交通重点实验室项目(202205AG070008)

## 1.2 建立模型

如图2所示,模型中正常段边坡坡率为1:1;坍塌段边坡为清方放缓边坡,坡率为1:2;中间为过渡段边坡,本文主要研究合理的坡率过渡段长度 $L$ 。模型中横线为等高线,等高距为2 m,边坡高度 $H=16$  m。正常段边坡的水平距离为 $1H=16$  m,坍塌段边坡的水平距离为 $2H=32$  m;过渡段边坡坡面由两条不共面的脊线形成,坡面即为异面直线上各点连接形成的曲面,因曲面各点的切面不一样,所以坡面上各点的坡率方向都不一样,通过等高线作图法可知最陡坡率点在A位置,坡率方向为过渡段边坡坡面上等高线的垂直方向,最陡坡率方向与 $n_1$ 和 $n_2$ 都不相同,应偏向放缓的坡面。

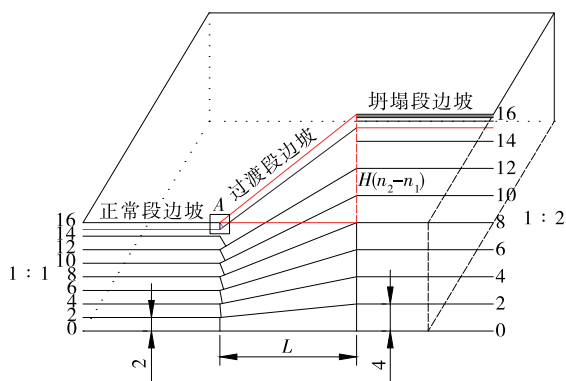


图1 边坡坍塌模型示意图(单位:m)

## 1.3 几何法求解

### 1.3.1 模型分析

在模型A位置,于14 m与16 m等高线中间作出15 m等高线,这样,在A位置模型变成了1 m等高距。把A位置放大,过正常段与过渡段边坡顶等高线的交点作15 m等高线的垂线,则垂直距离为 $n_m$ ,所构成的直角三角形斜边距离为 $n_1$ (见图2)。图1中虚线所示的直角三角形中,水平直角边长度为 $L$ ,竖向直角边长度为 $H(n_2 - n_1)$ 。在等高线平面中, $n_1$ 与 $n_m$ 的夹角 $\alpha$ 等同于过渡段边坡顶的等高线与水平线的夹角。

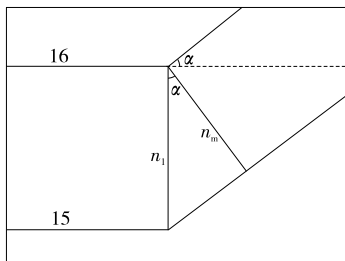


图2 A位置大样图(单位:m)

由以上分析可得:

$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_m^2}}{n_m} = \frac{H(n_2 - n_1)}{L}$$

解得:

$$n_m = \frac{Ln_1}{\sqrt{L^2 + [H(n_2 - n_1)]^2}} < n_1$$

$$L = \frac{H(n_2 - n_1)n_m}{\sqrt{n_1^2 - n_m^2}}$$

令 $n_m = Rn_1$ ,  $\Delta n = n_2 - n_1$ ,可得:

$$L = \frac{R}{\sqrt{1 - R^2}} H \Delta n$$

### 1.3.2 求解结果分析

根据假设条件, $R$ 可接受度值应根据地质和地形条件设置。根据以往设计经验,对于一般强风化岩质边坡, $R$ 取0.8较为安全。若 $n_m = 0.8n_1$ ,令 $\Delta n = n_2 - n_1$ ,则:

$$L = \frac{H \Delta n 0.8n_1}{\sqrt{n_1^2 - 0.64n_1^2}} = \frac{4}{3} H \Delta n$$

根据以往设计经验,针对一般土质边坡, $R$ 取0.9较为安全。若 $n_m = 0.9n_1$ ,令 $\Delta n = n_2 - n_1$ ,则:

$$L = \frac{H \Delta n 0.9n_1}{\sqrt{n_1^2 - 0.81n_1^2}} \approx 2 H \Delta n$$

从上述几何法求解结果不难看出,确定最陡坡率 $n_m$ (即确定可接受度值 $R$ )后,坡率过渡段长度只与坡高 $H$ 和坡率变化值 $\Delta n$ 有关。模型中坡高为16 m,原设计坡率为1:1的正常边坡坍塌为坡率为1:2的边坡,若可接受的最陡坡率为1:0.8,则所需坡率过渡段长度为21.33 m;若可接受的最陡坡率为1:0.9,则所需坡率过渡段长度为32 m。若模型中坡高为30 m,原设计坡率为1:1的正常边坡坍塌为坡率为1:1.5的边坡,可接受的最陡坡率为1:0.8,所需坡率过渡段长度为20 m;若可接受的最陡坡率为1:0.9,则所需坡率过渡段长度为30 m。

## 2 实例分析

某高速公路互通区有A、B、C、D匝道,原设计边坡坡率均为1:1,均为挖方边坡。A、B、C匝道为三级边坡,D匝道为二级边坡,坡高分别约为20 m、24 m、20 m、16 m。土体均为红黏土,局部夹杂窑泥土,土体呈浸润状态,局部位置出现渗水现象。原防护形式为现浇混凝土拱形格防护,并已全部施工完成。

受强降雨影响,A、B、C、D匝道的部分段落发生

坍塌,已设置的边坡防护被损毁,并威胁到距A匝道坡顶30 m处的高压线塔;B匝道边坡局部坍塌,阻塞后续施工的运梁通道;D匝道边坡局部坍塌,边坡沉降开裂(见图4)。滑坡原因为:匝道边坡高度较大,边坡较陡,且边坡土体均为红黏土,局部夹杂窑泥土,在强降雨作用下土体吸水饱和,自重增加,造成边坡失稳滑塌。

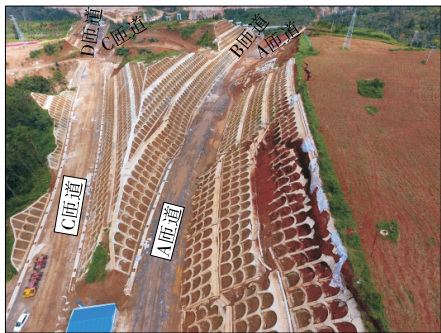


图3 某高速公路互通区域边坡坍塌现状

采取边坡清方放缓+坡面强防护+坡脚设置抗滑挡墙的处理方案,对边坡坍塌段进行清方放缓,尽量保留未损毁的混凝土拱形格防护,正常段与坍塌段之间实现合理过渡。下面以A匝道处理为例予以说明:

(1) 清方放缓边坡。AK0+060—080段(右侧)为过渡段,坡比由1:1渐变为1:2;AK0+080—180段(右侧)坡比为1:2;AK0+180—200段(右侧)为过渡段,坡比由1:2渐变为1:1;AK0+200—300段(右侧)坡比为1:1,平台两端的宽度随坡渐变;AK0+300—320段(右侧)为过渡段,坡比由1:1渐变为1:1.5;AK0+320—440段(右侧)坡比1:1.5;AK0+440—460段为过渡段,坡比由1:1.5渐变为1:1。

(2) 坡面强防护。AK0+060—180段(右侧)第一级采用锚杆框格梁防护,二级、三级为现浇混凝土拱形格防护;AK0+180—460段(右侧)第一级至第三级边坡坡面采用锚索框格梁防护。

(3) 坡脚设置抗滑挡墙。AK0+060—478段(右侧)设置抗滑挡墙,墙高3 m,抗滑挡墙露出路面0.5 m,边沟沿墙设置,并在坡底打疏干孔。

A匝道共发生2处坍塌:第1处坍塌段在清方放缓后的坡比为1:2,过渡段坡高约10 m,即坍塌段边坡坡率 $n_1=2$ ,正常段边坡坡率 $n_2=1$ ,边坡坡高 $H=10$  m,可接受度值 $R$ 取0.9,采用上述模型计算,适宜过渡段长度 $L \approx 2H\Delta n=20$  m。第2处

坍塌段在清方放缓后的坡比为1:1.5,过渡段坡高约20 m,即坍塌段边坡坡率 $n_1=1.5$ ,正常段边坡坡率 $n_2=1$ ,边坡坡高 $H=20$  m,可接受度值 $R$ 取0.9,采用上述模型计算,适宜过渡段长度 $L \approx 2H\Delta n=20$  m。该互通匝道边坡按该设计施工后,运营至今未再出现坍塌灾害。

### 3 结论

通过对边坡衔接过渡设计现状、边坡稳定性分析现状的分析确定模型条件,建立正常段边坡与坍塌段边坡过渡设计模型,采用2 m等高距的等高线将模型转换为平面,在平面上运用几何法对模型进行求解。主要结论如下:确定最陡坡率 $n_m$ (即确定可接受度值 $R$ )后,坡率过渡段的长度只与坡高 $H$ 和坡率变化值 $\Delta n$ 有关。对于一般强风化岩质边坡, $n_m=0.8n_1$ ,则坍塌段边坡坡率过渡段长度为坡高 $H$ 与坡率变化值 $\Delta n$ 乘积的4/3倍;对于一般土质边坡, $n_m=0.9n_1$ ,坍塌段边坡坡率过渡段长度约为坡高 $H$ 与坡率变化值 $\Delta n$ 乘积的2倍。对于一般均匀地质边坡,应用该模型求解,可快速得到坡率过渡段长度,既能保证边坡安全,又能做到经济节约,可为边坡坍塌灾害处理中坡率过渡设计和施工带来较大方便。

### 参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国路基工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(3):1—49.
- [2] 程永辉,程展林,张元斌.降雨条件下膨胀土边坡失稳机理的离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(增刊):416—421.
- [3] 赵瀚天.基于滑面正应力修正三维边坡稳定性计算软件开发及工程应用[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [4] 詹永祥,周波,姚海林.基于圆弧破坏模式下边坡危险性可靠度评价[J].公路工程,2019,44(5):36—41.
- [5] 尹小涛,薛海斌,汤华,等.边坡局部和整体稳定性评价方法的辩证统一[J].岩土力学,2018,39(增刊):98—104.
- [6] 沈华章,郭明伟,王水林,等.基于离散元的边坡矢量和稳定分析方法研究[J].岩土力学,2016,37(2):592—600.
- [7] 许斯伟.隧道边坡与路基边坡顺接设计[J].山西建筑,2016,42(4):180—182.

收稿日期:2022-08-08