

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.014

山区交通工程路堑边坡失稳机制及对策研究

李刚¹, 尹小涛²

(1. 武汉建诚工程技术有限公司, 湖北 武汉 430000;

2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 山区交通工程建设会产生大量由于开挖形成的路堑边坡, 此类卸荷作用强烈的人工边坡的防护工程设计不能等同于一般自然斜坡。为了弄清路堑边坡设计安全下的失稳力学机制并提出考虑补偿效应的路堑边坡加固设计方法, 在调研和追踪多个失稳路堑边坡的基础上, 复核路堑边坡设计措施的安全性, 检查当前计算方法存在的问题, 分析设计安全下路堑边坡加固失效的原因。结果表明: 路堑边坡的失稳在于开挖卸荷造成的侧向约束解除使得边坡的变形发展超出了岩土体的变形允许值, 且应力损失没有得到及时充足的补偿。设计措施提供的水平加固力 4 277 kN/m, 小于理正计算得到的剩余水平下滑力 5 278 kN/m, 小于考虑力的补偿效应的水平加固力 5 878 kN/m, 加固力不足和空间布局不合理是造成路堑边坡失稳的根本原因。利用考虑力的补偿效应的极限平衡法估算路堑边坡水平加固力, 所得结果大于剩余推力法, 方法简单易操作, 既达到安全标准也小于静止土压力且不浪费。

关键词: 路堑边坡; 失稳; 剩余推力法; 设计安全; 加固力; 力的补偿效应

中图分类号: TU416.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0100-07

Instability Mechanism and Countermeasures of Cutting Slope in Mountain Traffic Engineering

LI Gang¹, YIN Xiaotao²

(1. Wuhan Jiancheng Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;)

Abstract: The construction of traffic engineering in mountainous area could produce a large number of cutting slopes due to excavation, and the protective engineering design of artificial slopes with strong unloading effect cannot be equal to the general natural slope. To clarify the mechanical mechanism of the instability of the cutting slope under the safety of the design, and to propose a design method for the reinforcement of the cutting slope considering the compensation effect. Based on the investigation and tracking of several unstable cutting slopes, the safety of the design measures of cutting slope was reviewed, the existing problems of the current calculation methods were reviewed, the essential reasons for the failure of the reinforcement of the design safety cutting slope were discussed, and the reinforcement strategies for cutting slope engineering were put forward considering the compensation effect of force. The conclusions are as follows. The instability of cutting slope lies in the fact that the deformation development of slope exceeds the allowable deformation value of rock and soil mass due to the release of lateral constraints caused by excavation unloading, and the stress loss value is not timely and adequately compensated. The horizontal reinforcement force provided by the design measures is 4 277 kN/m, which is less than the remaining horizontal sliding force of 5 278 kN/m calculated by the Lizeheng, and less than the horizontal reinforcement force of 5 878 kN/m considering the compensation effect of force. Insufficient reinforcement force and unreasonable spatial layout are the fundamental reasons for the instability of K9 +700 cutting slope. The limit

收稿日期: 2025-05-15

修稿日期: 2025-08-20

基金项目: 云南省交通运输厅项目(云交科教便[2020]98号); 交通运输部科技示范项目(2017-09)

作者简介: 李刚(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事工程检测、建筑工程管理等方面工作。E-mail: 1289613762@qq.com

通讯作者: 尹小涛(1975—), 男, 博士, 硕导, 副研究员, 主要从事工程防灾减灾等方面研究工作。E-mail: yxt9406@163.com

equilibrium method, which considers the compensation effect of force, is used to estimate the horizontal reinforcement force of cutting slope. The results obtained are greater than the residual thrust method, and it is simple and easy to operate. It not only reaches the safety standard, but also is less than the static earth pressure and does not waste.

Keywords: cutting slope; unstable; residual thrust method; design safety; reinforcement; compensation effect of force

山区交通工程建设经常会通过挖填的方式穿跨山脊或沟谷,不可避免的会形成填筑路堤或者路堑边坡,这两类边坡对自然地形的改变比较大,使得自然斜坡的稳定性产生不同程度的劣化^[1-4],路堤是自然斜坡上的堆填加载,符合超载安全系数的定义;路堑是自然斜坡上的开挖卸荷,不符合强度储备和超载安全系数的定义,属于卸荷造成的扰动劣化破坏,当前边坡稳定性评价方法和边坡加固设计方法,没有考虑开挖卸荷作用造成的参数劣化和边坡地层岩土体的扰动,静态参数和没有考虑开挖卸荷造成的应力损失的有效及时足量补偿的防护工程设计肯定存在安全风险,所以急需研究适用于路堑边坡的加固设计方法。

当前对于路堑边坡的研究主要集中在以下几个方面:①路堑边坡岩土材料的卸荷力学特性^[5];②路堑边坡的开挖卸荷扰动机制^[6]和变形破坏机理^[7];③路堑边坡稳定性评价方法^[7-10]或者加固设计方法^[11-13];④路堑边坡安全控制技术开发。虽然针对路堑边坡的研究取得了一些进步,但是当前的技术标准及规范,对于路堑边坡仍采用传统的极限平衡法评价其稳定性^[14-15]。采用剩余推力法计算其余推力,利用余推力进行加固设计。李梅等^[16]考虑风化作用和滑体不同岩层对条块划分与计算的影响,引入弹性模量弱化系数与黏聚力弱化系数对力学参数进行弱化处理,采用双向两次条分的改进条分法计算桩后滑坡推力。肖世国等^[17]、杨涛等^[18]在 Winkler 弹性地基梁模型的基础上,充分考虑受荷段与嵌固段的变形协调关系,结合极限平衡条件,推导出滑坡推力的计算方法。主流方法和技术体系没有考虑岩土材料的卸荷特性、没有考虑开挖卸荷造成的路堑边坡的扰动机制,这里的扰动主要是开挖造成的原有地形的改变及由此引起的应力重分布和原有地层岩土体物理力学特性的扰动分区,这个扰动相对于机械施工造成的表层扰动要大、范围要广、造成的岩土力学参数变化要显著很多,这些误差在最不利条件下可能造成一定的安全风险,即采用规范方法的路堑边坡设计安全并不能保证路堑边坡的真正安全。

在调研和长期追踪交通工程路堑边坡的基础

上,针对失稳路堑边坡,采用规范方法复核设计加固措施的安全性,再利用基础的土力学计算理论,计算开挖卸荷造成的实际应力损失值,对比后分析失稳的力学机制,提出路堑边坡加固力的计算方法,为此类工程的安全控制提供技术支撑。

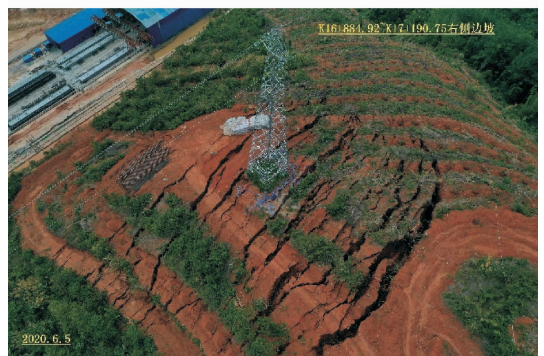
1 路堑边坡失稳原因分析

1.1 路堑高边坡失稳事件

根据课题组的多年追踪调查,路堑高边坡出现失稳问题逐步增多,设计安全下的边坡,为什么会频繁地在施工期和工后出现问题?图 1 为几个典型路堑边坡失稳事例照片。



(a) 运行路堑边坡



(b) 施工完成路堑边坡



(c) 在建路堑边坡

图 1 路堑边坡失稳事例

由图 1 可知,很多山区公路挖方路堑边坡按规范勘察、设计安全、按图施工,但出现了这么多的安全问题,这其中有岩土体是否考虑卸荷特性试验和考虑力的补偿的设计方法的问题,如果这些均作了充分考虑,那么这类路堑边坡的工程灾害问题能否得到有效控制? 后续围绕如何补偿和设计加固力展开论述。

1.2 失稳原因辨析

1.2.1 路堑边坡变形失稳机制分析

路堑边坡区别于自然斜坡的最大特点在其开挖卸荷造成的扰动、再平衡和原有岩土体参数的劣化影响,属于卸载形成的人工边坡,区别于一般意义上超载造成的边坡变形破坏,破坏主要是由于侧向约束解除造成的,回弹变形的影响范围及破坏威胁相对有限,主要是水平变形超过岩土体自身或者工程措施的承受范围即可造成不同程度的不可恢复变形破坏,详见概化图 2。

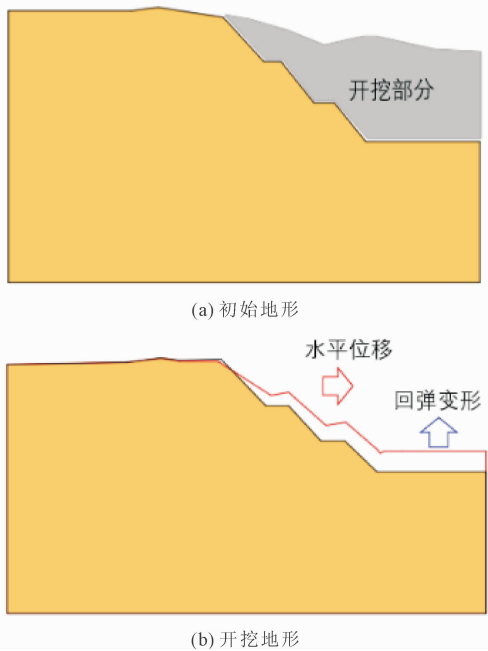


图 2 路堑边坡变形失稳机制概化图

1.2.2 路堑边坡失稳的力学机制剖析

路堑边坡开挖卸荷力学行为主要表现为开挖临空面侧向及竖向约束解除造成的应力偏转及应力路径变化造成累积损伤效应,浅表的影响主要是岩土材料的挤伸破坏或者拉剪破坏,具体厚度由材料的拉伸强度控制;深部主要还是剪切破坏控制,具体深度由材料的剪切强度控制。这些都是路堑边坡区别于一般边坡破坏力学行为的特点,这些特征也说明路堑边坡稳定性评价和加固设计无论在试验设计和

计算方法等方面均需要体现上述特点,否则针对性不强,也是安全隐患。路堑边坡由于开挖卸荷扰动造成的变形破坏由浅往深逐步扩展的变形破坏机制,以某路堑边坡为例,采用有限元分析,揭示了这种变形发展规律,详见图 3。



图 3 基于有限元的路堑边坡破坏模式分析

由图 3 可知,路堑边坡的破坏是主动破裂面主动基础上综合叠加了坡面有限深度加固(一般为一级坡有限长度锚杆或者锚索加固)和地层自身强度调动一定范围岩土体联合承载的变形破坏,即变形破坏由浅部往深部发展。

同时加固设计离不开主动土压力、被动土压力和静止土压力等岩土基础理论,具体公式如下:

静止土压力:

$$P_0 = K_0 \gamma h = \frac{\mu}{1 - \mu} \gamma h \quad (1)$$

主动土压力:

$$P_a = \gamma h K_a - 2c \sqrt{K_a} \quad (2)$$

被动土压力:

$$P_p = \gamma h K_p + 2c \sqrt{K_p} \quad (3)$$

式中: μ 为泊松比,为无量纲量; γ 为地层容重, kN/m^3 ; h 为地层厚度, m ; K_0 为侧压力系数,一般可通过 $\mu/(1 - \mu)$ 求取; K_p 为被动土压力系数,一般可通过 $\tan^2(45^\circ + \varphi/2)$ 求取; K_a 为主动土压力系数,一般可通过 $\tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ 求取; c 为地层黏聚力, kPa ; φ 为地层内摩擦角, ($^\circ$)。如果为多层可以分层计算叠加即可。

主动土压力是土体主动充分变形达到极限状态时作用于挡土结构上的力,由于土体自身承载性能得到充分发挥,所以一般相对较小;被动土压力是土体在外力作用下被动变形达到极限状态时作用于挡土结构上的力,一般相对较大;静止土压力是土体不产生变形时作用于挡土结构上的力。从定义可知,被动土压力强调强约束,静止土压力约束中等,主动

土压力弱约束,所以 $P_p > P_0 > P_a$ 。路堑边坡的特点决定了其加固力应该小于静止土压力、大于主动土压力,三种土压力代表了三种破坏模式或者稳定状态,这里进行对比,是因为在实际设计中,尤其是挡土墙的设计中,会针对不同破坏模式,考虑不同的土压力计算方法估算土压力,保证挡土结构的安全,这个主要是为了后面突出这类路堑边坡开挖卸荷造成的实际破坏模式,即既不是主动破裂,也不是被动破裂,应该是主动基础上的破坏,基于宏观认知和分析的路堑边坡加固力概化见图4。

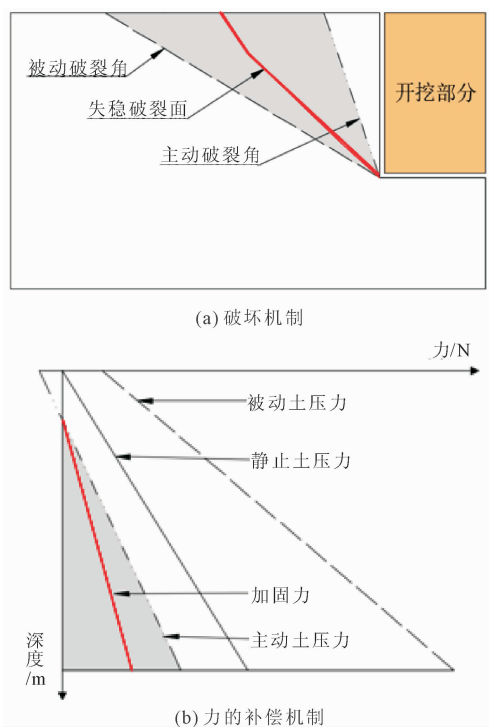


图4 路堑边坡加固力补偿机制概化图

由图4可知,路堑边坡力的损失机制和变形破坏机理相互作用,使得其加固力是介于0与主动土压力之间,静止土压力相当于总的损失力,实际需要的加固力应该是总的损失力减去岩土体自身没有充分变形且部分发挥自身承载性能承受的力,所以随着变形破坏的发展阶段逐步逼近主动土压力。失稳事件的出现是加固力没有及时补偿到位造成的后果,即“设计安全”下变形仍然发展,也是对坡体稳定状态认识不到位或者判断不当造成的后果。下面将通过实例验证上述认知是否正确。

针对主要考虑水平方向剩余下滑力补偿加固的缘故,聚焦于路堑边坡,此类边坡因开挖卸荷改变了自然坡体的初始应力状态。山区公路多建于自然斜坡中下部的缓坡地带,该区域通常处于斜坡的阻滑

段,水平方向的抗滑力对维持边坡稳定起着主导作用。常见的加固措施,如抗滑桩、锚杆(索)及挡土墙等,均以提供水平向抗力为核心机制。垂直方向的分力亦通过相应措施得以处理:抗滑桩与挡墙将其传递至基底地基承担;锚杆(索)则通过增强锚固将法向力转化为滑面摩擦阻力。此外,由于坡体临空面缺乏有效侧向约束,水平方向的剩余下滑力成为最不利的控制因素;而垂直方向则受底部地层约束,稳定性相对更有保障。拟静力法主要考虑水平地震加速度的原因与路堑边坡加固的道理类似。因此,本文加固分析以水平力补偿为重点。

2 工程案例析

2.1 工程简介

依托西南山区某高速公路路堑边坡系统分析问题产生的根源,该开挖形成的人工边坡为7级坡,坡顶后方45 m位置有1座高压铁塔,坡率上缓下陡,坡体主要是强风化砂岩与泥岩,具体初始地形、地层和加固措施见图5。

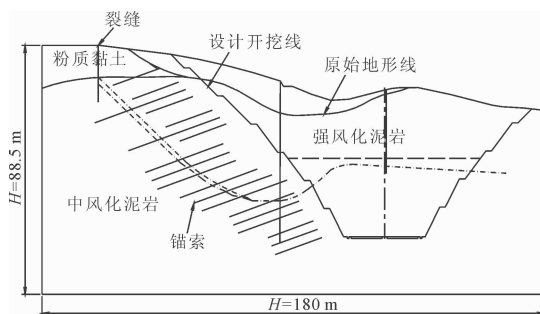


图5 某高速公路 k9+700 路堑边坡剖面图

在五级坡开挖过程中,路堑边坡的坡顶开始出现4条弧形裂缝,最外侧裂缝距离铁塔约25 m,局部失稳,问题路堑边坡见图6。



图6 失稳路堑边坡概貌

根据勘察提供的路堑边坡各地层的物理力学性

质指标详见表 1。

表 1 k9+700 路堑边坡各土层岩土力学参数表

边坡级数	地层	容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	泊松比 μ	弹模 E /MPa
七级坡	粉质黏土	17.5	20.0	18.0	0.38	30
六级坡	粉质黏土	17.5	20.0	18.0	0.38	30
五级坡	强风化泥岩	24.0	25.0	27.0	0.36	100
四级坡	强风化泥岩	24.0	35.0	28.5	0.36	100
三级坡	强风化泥岩	24.0	50.0	30.0	0.33	100
二级坡	中风化泥岩	24.0	65.0	31.5	0.33	1500
一级坡	中风化泥岩	24.0	80.0	33.0	0.30	2000

2.2 失稳的根本原因分析

2.2.1 变形破坏模式

利用有限元建立数值模型,模拟了开挖施工过程中,随着分级开挖和分级加固,路堑边坡的塑性区逐步贯通,边坡产生变形破坏,有整体失稳风险,塑性区云图和水平位移云图见图 7。

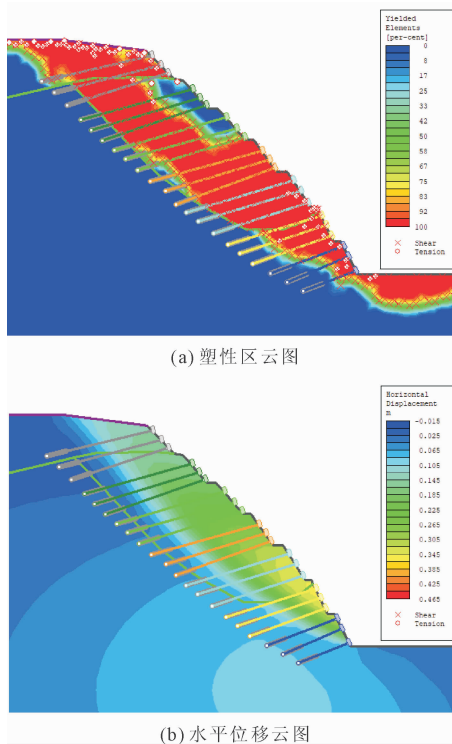


图 7 路堑边坡变形破坏模式

由图 7 可知,在分级开挖和分级加固下,随着最后两级边坡的开挖和加固,边坡塑性区仍然逐步贯通,最大水平变形约 400 mm。破坏形态和变形量级与该路堑边坡的实际施工记录基本一致。这是开挖卸荷造成的水平应力损失没有及时补偿到位造成的灾难。

2.2.2 力学机制分析

根据图 5 的勘察资料,锚索框格梁空间布局沿坡面竖向 3 m × 横向 4 m,锚索孔径 130 mm,入射角 20°,顶部 4 排锚索,锚固段长度 18 m,强风化泥岩属于极软岩,岩体与锚固体之间的粘结强度特征值为 135 kPa;中部 5 排锚索,锚固段长度 25 m,强风化泥岩粘结强度特征值 135 kPa;下部 4 排锚索,锚固段长度 25 m,中风化泥岩粘结强度特征值 180 kPa,设计锚索提供的总水平加固力为 17 107 kN,横向每米提供的水平加固力为 4 277 kN/m,计算参数和计算结果统计列于表 2。

表 2 k9+700 路堑边坡设计锚索提供加固力计算表

部位	锚固长度 /m	锚孔直径 /m	粘结强度 /kPa	入射角度 /($^{\circ}$)	加固力 /($\text{kN} \cdot \text{孔}^{-1}$)	水平加固力 ($\text{kN} \cdot \text{孔}^{-1}$)	水平加固力 汇总 /kN
上 4 排	18	0.13	135	20	992	932	3729
中 5 排	25	0.13	135	20	1378	1295	6473
下 4 排	28	0.13	180	20	1837	1726	6905
合计							17107

利用理正岩土计算软件,对开挖完成后的路堑边坡,采用表 1 参数,计算得到了路堑边坡的剩余下滑力,计算模型和计算结果见图 8。

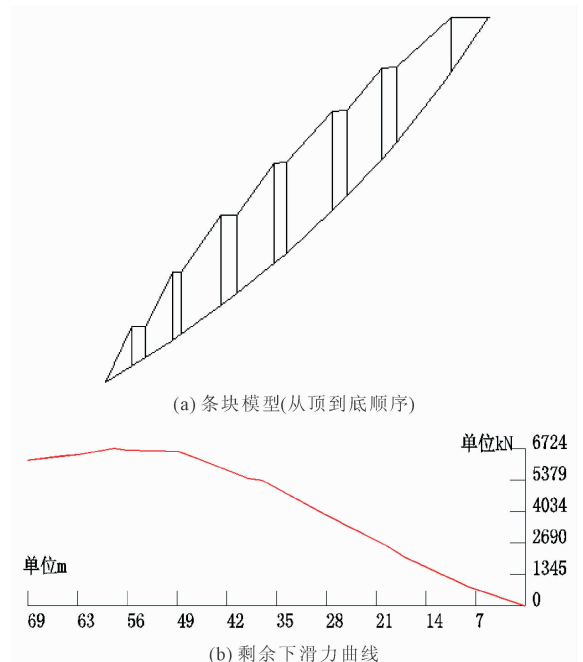


图 8 理正软件计算得到的 k9+700 路堑边坡下滑力

由图 8 可知,理正计算得到的剩余下滑力 6 229 kN/m,方向 32.1°,则水平力为 5 278 kN/m。

利用 slide 建立路堑边坡模型,按照 7 级坡分别

施加补偿力使其正常运行工况边坡稳定性系数达到1.35安全标准,则该补偿力可作为所需加固力参考值,计算结果见图9。

由图9可知,考虑力的补偿作用的路堑边坡的水平加固力约为5 878 kN/m。

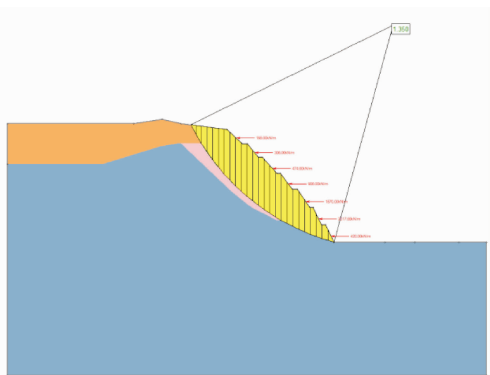


图9 slide 软件计算得到的k9+700路堑边坡补偿力

综上,计算了设计措施提供的水平加固力、理正软件计算得到的剩余水平下滑力、考虑补偿效应的水平加固力,同时也利用式(1)一式(3),采用表1参数计算得到了该路堑边坡初始地形下的主动土压力、静止土压力、被动土压力值,上述计算结果统计列于表3。

表3 不同方法计算得到的k9+700路堑边坡水平加固力
单位:kN/m

设计 加固力	剩余 下滑力	补偿 加固力	主动 土压力	静止 土压力	被动 土压力
4277	5278	5878	13861	22716	150198

由表3可知,土压力计算结果普遍较大,这是因为土压力的计算基本都是在直立条件下得到的,且没有解除侧向约束条件下的坡体稳定状态远大于开挖后路堑边坡的稳定状态,所以不可能全部补偿土压力数值,仅需补偿到满足工程稳定性要求的量值即可。由图4(b)可知,实际所需补偿加固力要比水平应力的损失值要小,也比主动土压力小一些,可以考虑通过基于形态折减的主动土压力方式简单估算补偿加固力,这里的坡面剩余形态相对于垂直矩形的面积比约为0.5,也可以通过施工断面计算挖出部分的面积与对应投影矩形面积(高度乘以宽度)比求取形态折减系数,则基于形态折减主动土压力估算得到的水平加固力为6 931 kN/m,相对于利用极限平衡法考虑力的补偿作用确定的水平加固力为5 878 kN/m和理正岩土计算软件确定的剩余水平下滑力5 278 kN/m具有显著的保守特征。至于设

计加固力、理正计算得到的下滑力、文章计算得到的需要补偿的加固力均小于主动土压力、静止土压力和被动土压力的问题,主要是这些土压力的计算多数是水平地基等理想条件下得到的结果,实际斜坡地形下的土压力计算需要考虑临空条件造成的差异,所以提出了一种简单的几何修正方法做了近似逼近,修正后的结果与上述设计加固力、理正计算得到的下滑力、文章计算得到的需要补偿的加固力处于同一量级。因此,原有加固措施不能提供足够的加固力是工程失效的根本原因,同时现有方法评估路堑边坡这类扰动较大边坡存在安全风险,可以考虑采用考虑补偿效应的加固力估值方法作为路堑边坡设计的依据。

在水平加固力5 878 kN/m下,原设计的3 m×4 m空间布局需要调整为3 m×3 m,方可满足工程稳定性要求;如果继续采用3 m×4 m空间布局,则需要增补5排锚索才能满足工程稳定性要求,空间布局不合理也是造成失稳的一个因素,锚索类空间布局不宜大于3 m。

针对极端工况-后缘裂缝垂直或反倾、主要产生竖向变形的危岩体,本文理论框架仍可给出合理解释。此类危岩多因坡脚开挖形成悬垂式临空,其失稳机制主要表现为竖向约束解除,与常规路堑边坡以水平向约束解除有所不同。在此情况下,加固的重点并非水平抗力,而是通过锚杆(索)等锚固措施,使危岩体与母岩紧密联结,增强沿潜在滑面的法向约束与摩擦承载力;亦可采用大直径岩梁锚等工程措施,提供有效竖向支撑。本文所提出的分析方法,本质上适用于由开挖引起的任一临空方向上的稳定性问题,其核心在于识别失稳的主导方向并施加相应约束。因此,文中理论可通过明确“临空方向”与“约束方向”的对应关系,扩展至此类以竖向变形控制为主的特殊工况。

综上,对开挖卸荷部分损失的水平应力进行补偿,补偿依据是考虑到初始自重应力场的稳定特征,即自重应力不产生变形,通过静止土压力的方式进行量值估算,但在实际问题中可能会存在偏大或者偏小的问题,对应过度加固或者加固不足的情况,在安全基础上兼顾经济性,提出了对于补偿力的修正,从整个思路看应该是稳定的也是安全,但是也要看到实际问题的复杂性,不论是区域构造、地层结构和岩土环境的改变都是动态的,基于某个阶段的判断只能是当时条件下的稳定和安全,需要辩证的动态的发展的方式进行分析判断,才符合该问题的本质,

这里只是站在损失和补偿的角度给出了一套设计方法和加固考虑,并不能说一定会安全,只能说开挖卸荷在得到足够补偿的条件下边坡是安全的。

3 结论与建议

针对路堑边坡失稳的原因,利用不同方法得到水平应力损失值和所需补偿的水平加固力,探讨了路堑边坡失稳的根本原因,所得结论如下:

(1) 路堑边坡的变形破坏机制在于开挖卸荷造成的侧向约束解除使得边坡的变形发展超出了岩土体的变形允许值,造成局部到整体的变形破坏。

(2) 路堑边坡失稳的力学机制在于开挖卸荷造成的应力损失值没有得到及时和充足的补偿,补偿值应该是总的损失力减去岩土体在自身没有充分变形且部分发挥自身承载性能基础上承受的力,随着变形发展逐步逼近主动土压力。

(3) 经复核,设计措施提供的水平加固力 4 277 kN/m,小于理正岩土软件计算得到的剩余水平下滑力 5 278 kN/m,小于利用极限平衡法考虑力的补偿作用确定的水平加固力 5 878 kN/m,小于初始地形主动土压力 13 861 kN/m、小于初始地形静止土压力 22 716 kN/m、小于初始地形被动土压力 150 198 kN/m,加固力不足和空间布局不合理是造成 k9 + 700 路堑边坡失稳的根本原因。

(4) 经对比,利用极限平衡法考虑力的补偿作用确定的水平加固力为 5 878 kN/m,基于形态折减系数乘以主动土压力估算得到的水平加固力为 6 931 kN/m,方法简单便捷,经依托工程路堑边坡稳定性验算,满足工程稳定性要求,所以考虑力的补偿效应的水平加固力的估算方法可以为路堑边坡设计提供依据。

参考文献:

- [1] Postill H, Helm P R, Dixon N, et al. Forecasting the long-term deterioration of a cut slope in high-plasticity clay using a numerical model[J]. *Engineering Geology*, 2021, 280: 105912.
- [2] Xu Jingshu, Zhao Xu, Li Pengfei, et al. Stability of a 3D unsaturated vertical cut slope subjected to variable rainfall infiltration[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 134:

104110.

- [3] Chen Hongjie, Zhang Guangcheng, Chang Zheng, et al. Failure analysis of a highway cut slope with anti-slide piles[J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 6622214.
- [4] 袁从华,童志怡,卢海峰. 牵引式滑坡特征及主被动加固比较分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(10): 2853-2858.
- [5] 师海. 沪昆高速铁路堑边坡岩溶化岩体力学特性及振动疲劳效应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [6] Sheng Qian, Yue Zhongqi, Lee Chackfan, et al. Estimating the excavation disturbed zone in the permanent shiplock slopes of the Three Gorges Project, China[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(2): 165-184.
- [7] 梁玺,刘博峰,吴银亮. 基于变形分析的路堑边坡稳定性研究[J]. *路基工程*, 2021(4): 129-132.
- [8] 刘维娟,程谓,张朔. 云临高速桥改路基路堑边坡与填方路堤稳定性评价[J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, 19(4): 125-130, 143.
- [9] 蒋志琳. 基于有限元强度折减法的路堑边坡稳定性分析[J]. *黑龙江交通科技*, 2020, 43(9): 20-22.
- [10] 戚乐方. 公路岩质高陡边坡爆破开挖稳定性研究[J]. *路基工程*, 2020(6): 178-182.
- [11] 王洪存. 华南山区某深路堑边坡加固处治技术[J]. *公路交通技术*, 2021, 37(4): 19-26.
- [12] 夏天,张亚伟. 市政工程高边坡防护施工工艺[J]. *中国高新科技*, 2021(4): 47-48.
- [13] 万茂青. 路堑高边坡工程加固方案优化及稳定性评估[J]. *青海交通科技*, 2021, 33(2): 76-80.
- [14] 何昌杰,李建新,粟元甲. 矿坑生态修复工程边坡加固稳定性分析研究[J]. *施工技术*, 2021, 50(2): 15-19.
- [15] 申永江,杨明,项正良. 柔性双排长短组合桩滑坡推力的计算方法[J]. *岩土力学*, 2018, 39(10): 3597-3602.
- [16] 李梅,贺国宇,韩高升,等. 抗滑桩桩后滑坡推力分布形式研究[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(12): 1-5.
- [17] 肖世国,何洪. 双排抗滑桩上滑坡推力近似解析方法[J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 376-380.
- [18] 杨涛,周德培,张俊云. 抗滑桩滑坡推力分布形式的计算确定[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(3): 322-326.