

某边坡预应力锚索抗滑桩设计参数优化

张生才

(山西交控汾石高速公路有限公司,山西 孝义 032399)

摘要:为探明预应力锚索抗滑桩在不同参数下边坡的稳定性情况,以某边坡工程为依托,采用有限元软件 Midas GTS NX 对抗滑桩设计参数进行模拟,分析预应力锚索抗滑桩的截面尺寸、桩间距、锚索预应力变化对边坡稳定性的影响规律。结果表明:预应力锚索抗滑桩可以提高边坡稳定性,采用支护方案的边坡稳定性从 1.02 提高到 1.30 以上。通过对抗滑桩不同参数工况的模拟,得出边坡的稳定性随抗滑桩截面尺寸的增大、桩间距的减小、锚索预应力的增大而增大,反之减小;锚索预应力的增大会在一定程度上提升边坡的稳定性,但边坡稳定性的增长幅度值在逐渐减小,当锚索预应力持续增大后,对边坡稳定性的贡献作用将逐渐降低。本文成果可为预应力抗滑桩边坡的设计参数选定提供一定的借鉴与参考。

关键词:边坡稳定性; 抗滑桩; 锚索; 数值模拟

中图分类号:U416.1⁺4

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)02-0021-04

doi:10.13402/j.gcjs.2025.02.017

Optimization on design parameter of a pre-stressed anchor cable anti slip pile in a slope

ZHANG Shengcai

(Fenshi Expressway Co., Ltd. of Transportation Holdings Group Co., Ltd., Xiaoyi 032399, Shanxi, China)

Abstract: To investigate the stability of slopes with prestressed anchor anti slip piles under different parameters, based on a certain slope project, finite element software Midas GTS NX is used to simulate the design parameters of anti slip piles. The influence of the cross-sectional size, pile spacing, and pre stress changes of prestressed anchor anti slip piles on slope stability is analyzed. The results indicate that prestressed anchor anti slip piles can improve slope stability, and the slope stability using the support scheme increased from 1.02 to over 1.30. By simulating the working conditions of different parameters of anti slip piles, it is found that the stability of slopes increases with the increase of the cross-sectional size of anti slip piles, the decrease of pile spacing, and the increase of anchor cable prestress, and vice versa; The increase of anchor cable prestress will improve the stability of the slope to a certain extent, but the growth amplitude of slope stability is gradually decreasing. When the anchor cable prestress continues to increase, its contribution to slope stability will gradually decrease. The results of this article can provide some reference and guidance for the selection of design parameters for prestressed anti slip pile slopes.

Key words: slope stability; anti slip pile; anchor rope; numerical simulation

我国地形地貌复杂,在工程建设过程中往往需要进行边坡治理。抗滑桩因其出色的抗滑特性和适用性在边坡治理中得到广泛应用。预应力锚

索抗滑桩是在传统抗滑桩的基础上发展起来的,兼顾了预应力和抗滑桩的优点,结构简单的同时受力更加合理。对于锚索抗滑桩边坡的研究,王

收稿日期:2024-06-18

作者简介:张生才(1988—),汉,工程师,从事公路工程建设运营等工作。

成汤等^[1]对抗滑桩的破坏形式开展了室内试验和数值模拟研究,发现桩身弯矩最大点在整个加压过程中始终未变,锚索的设置能够有效限制桩身位移;刘耿仁等^[2]分析了失效抗滑桩的原因,从勘察、设计到施工各阶段进行复核,整理了抗滑桩失效的一套系统方法;吴阿龙等^[3]对悬臂双排抗滑桩边坡治理进行了综述研究;李晓翠等^[4]采用有限差分法分析不同状态下的滑坡体变形和受力分布,给出了抗滑桩截面尺寸、桩距、锚索角度建议值。本文以某边坡工程为例,采用有限元软件 Midas GTS NX 对预应力锚索抗滑桩的参数进行优化设计研究,以期为工程实际提供理论依据。

1 有限元数值模拟研究

1.1 工程概况

某边坡工程,边坡土层自上而下分别为风化土和软岩,风化土层堆积于边坡表面,平均厚度约为 3 m,边坡高为 15 m,抗滑桩的截面尺寸为 1.2 m × 1.5 m,抗滑桩长为 17 m,全部埋入土体,抗滑桩间距为 2.5 m。锚索的锚固段长度为 7 m,直径为 300 mm,锚索的自由段长度为 13.5 m,直径为 150 mm,预应力锚索的预应力为 250 kN。

1.2 模型假定与建立

结合文献 [5]—[7] 经验,采用 Midas GTS NX 进行数值模拟计算,结合材料的属性模拟不同结构的本构模型。采用强度折减法(SRM)计算边坡的稳定性。强度折减法原理:通过折减土层的抗剪强度参数黏聚力、内摩擦角值进行迭代计算,直至滑动面形成,边坡破坏,此时的折减系数就作为边坡的稳定系数。基本假定:1) 土层为理想弹塑性材料,采用摩尔-库伦本构模型;2) 抗滑桩、锚索为弹性本构模型;3) 抗滑桩与土层单元之间无相对滑动,预应力锚索的锚固段与土层单元无相对滑动;4) 模型仅考虑重力场作用。

考虑到桩间土的土拱效应,采用三维实体单元模型进行数值模拟,模型截面如图 1 所示。采用扩展延伸功能对土层单元进行 Y 轴拉伸 24 m,模型尺寸为 70 m × 30 m × 38 m (X × Y × Z),如图 2 所示。

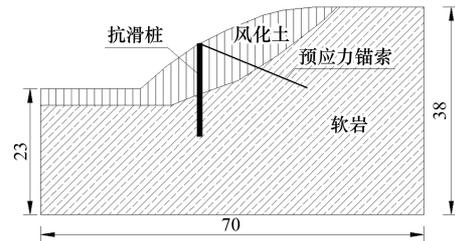


图 1 几何模型

m

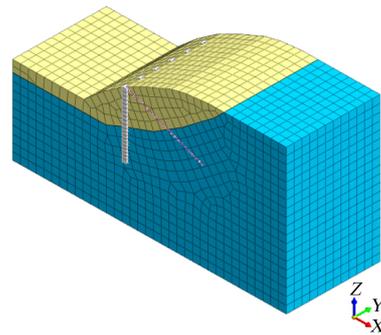


图 2 有限元模型

m

1.3 模型参数及模拟步骤

根据地勘资料对模型参数进行适当调整,各模拟单元的参数如表 1 所示。选定模型参数后对模型进行网格划分,抗滑桩和锚索的网格密度均取 1 m,土层单元的网格密度均取 2 m。锚索分为固定端和自由端进行处理,在自由端施加 250 kN 预应力,整个模型添加重力作用。模型底面采用 X、Y、Z 的三向约束,两侧面竖直方向自由,其余两向固定。

在模型模拟计算中,首先对原始地应力状态进行恢复,激活风化土和软岩单元,施加重力约束和边界条件,然后对模型进行计算和位移清零处理,模拟原始的地应力状态,再进行抗滑桩和

表 1 模型参数

名称	单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	本构模型
风化土	三维实体	45	0.30	18.5	28	21	摩尔-库伦
软岩	三维实体	1 800	0.25	21.0	51	32	摩尔-库伦
锚索	一维单元	200 000	0.30	78.0	—	—	弹性
抗滑桩	一维单元	30 000	0.20	24.0	—	—	弹性

锚索单元的激活，并施加 250 kN 的锚索预应力，最后对边坡的变形和工作状态进行计算分析。

2 计算结果分析

2.1 抗滑桩截面尺寸的影响

由于自然边坡稳定系数不满足建筑规范边坡的设计要求，需要对边坡采取支护措施。相比传统的支护措施，预应力锚索抗滑桩的处理效果更好，施工工期短，能够很好地满足工程要求，适应工程进度。

边坡支护原方案抗滑桩的截面尺寸为 1.2 m × 1.5 m，考虑矩形截面惯性矩的影响程度，选择桩长进行研究。选择截面尺寸分别为 1.2 m × 1.2 m (工况 1)、1.2 m × 1.5 m (工况 2)、1.2 m × 1.8 m (工况 3)、1.2 m × 2 m (工况 4) 进行研究，对不同工况下边坡和抗滑桩的变形和位移情况进行分析，结果如表 2 所示。

由表 2 可知：水平位移最大值随着抗滑桩截面尺寸的增大而逐渐降低，减小的幅值有限，而边坡的垂直最大位移值在 4 种工况下的最大值几乎一致，这说明边坡的垂直最大位移值与抗滑桩的截面尺寸无关。

锚索抗滑桩的边坡稳定性整体呈上升的趋势，随着抗滑桩截面尺寸的增大，边坡的稳定性随之增大。对比自然边坡稳定系数，施加锚索抗滑桩后的边坡稳定性最小值为 1.33，符合不小于规范

值 1.3 的要求。另外，在抗滑桩截面尺寸增大的过程中，边坡的稳定性增大并非呈线性增大趋势，在工况 2、3 时的边坡稳定系数相差较小。

各个工况下抗滑桩水平位移值均小于竖向位移值，水平位移值随抗滑桩截面增大而逐渐减小，竖直位移变化相较于水平位移值小。综合抗滑桩的位移和稳定系数来看，截面尺寸越大对边坡的稳定性越有利，但工程中应充分考虑经济性，在合理的范围内应尽量选择经济性较好的方案，因此推荐采用工况 1 中的截面尺寸进行设计。

2.2 抗滑桩间距的影响

在边坡设计中，抗滑桩间距太小，会使抗滑桩性能发挥不完全，造成工程浪费；抗滑桩间距过大，则容易造成桩间土的土拱效应无法形成，导致桩间土被挤出，边坡失稳。鉴于此，采用工况 1 的抗滑桩截面尺寸进行抗滑桩间距的分析研究，其锚索的预应力为 250 kN，抗滑桩的桩间距分别取 1.5、2.5、3.5、4.5 m，结果如表 3 所示。

由表 3 可知：在各种桩间距工况下，边坡的垂直最大位移和抗滑桩的垂直最大位移基本保持不变。当抗滑桩桩间距为 1.5 m 时，抗滑桩的最大水平位移值为 8 mm，边坡最大水平位移值为 51.2 mm；随着抗滑桩桩间距的增大，抗滑桩和边坡的最大水平位移值均增大，水平位移最大值的增大幅值也逐渐上升。这说明，抗滑桩间距的变化在一定范围能有效控制抗滑桩和边坡的水平位

表 2 不同工况下边坡和抗滑桩的最大位移值

mm

工况	边坡水平最大位移	边坡垂直最大位移	抗滑桩水平最大位移	抗滑桩垂直最大位移	边坡稳定系数
1	55.5	73.8	12.0	14.0	1.330
2	53.8	73.9	11.0	13.4	1.360
3	51.5	74.0	10.5	13.2	1.365
4	50.4	74.2	10.2	13.2	1.382

表 3 不同桩间距边坡和抗滑桩的最大位移值

间距/m	边坡水平最大位移/mm	边坡垂直最大位移/mm	抗滑桩水平最大位移/mm	抗滑桩垂直最大位移/mm	边坡稳定系数
1.5	51.2	72.5	8	13.8	1.45
2.5	55.5	73.8	12	14.0	1.33
3.5	60.2	73.2	16	14.5	1.28
4.5	70.2	74.4	24	14.32	1.12

移,同时抗滑桩桩间距的增大对“土拱效应”的减弱效果会逐渐增强。

当桩间距为 1.5 m 时,边坡的稳定系数为 1.45;当桩间距为 2.5 m 时,边坡的稳定系数为 1.33,下降了 8.3%。这两种抗滑桩间距边坡的稳定系数均大于规范要求值。当抗滑桩桩间距为 3.5、4.5 m 时,边坡的稳定系数为 1.28、1.12,此时的边坡稳定系数已不符合规范要求。同时,在此阶段的稳定系数变化幅度相较于桩间距为 1.5、2.5 m 的大,这也符合桩间土“土拱效应”减弱的情况。

2.3 锚索预应力的影响

预应力锚索抗滑桩是抗滑桩与锚索形成的共同作用结构,兼具了锚索的柔性和抗滑桩的刚性,因此锚索的预应力大小也是影响边坡稳定性的重要因素。选取符合规范要求的抗滑桩截面(1.2 m × 1.2 m),桩间距 2.5 m,对锚索的不同预应力(150、250、350、450 kN)进行分析研究,结果如图 3 所示。

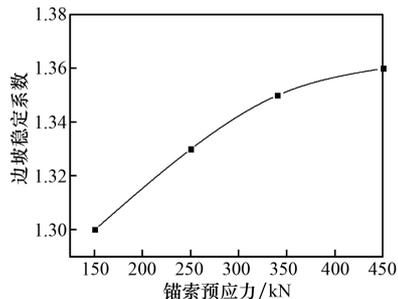


图3 不同锚索预应力边坡稳定系数变化

由图 3 可知:边坡的稳定系数随锚索预应力的增大而增大,呈弧线增大趋势。在锚索预应力较小时,锚索预应力的增大对边坡稳定性的贡献作用较大;当锚索预应力持续增大后,对边坡稳定性的贡献作用将逐渐下降。因此,在工程设计中,应将锚索的预应力控制在合理范围内。

3 结 语

本文通过对预应力锚索抗滑桩边坡进行数值模拟,分析不同影响因素下的边坡和抗滑桩的变形和稳定性,得到主要结论如下。

(1) 采用预应力锚索抗滑桩支护后的边坡稳定性得到提高,明确了预应力锚索抗滑桩对提高边坡稳定性的有效性。

(2) 在研究抗滑桩截面尺寸对边坡的影响中得出,边坡的稳定性随抗滑桩截面尺寸的增大而增大,同时边坡的水平位移最大值和抗滑桩的水平位移最大值均减小,但垂直位移值基本不变。

(3) 抗滑桩的桩间距的增加会减小边坡的稳定性,减弱边坡的桩间土的“土拱效应”,使得边坡的稳定系数减小,边坡和抗滑桩的水平位移最大值均增大。

(4) 锚索预应力的增大会在一定程度上提升边坡的稳定性,但边坡稳定性的增长幅度会逐渐减小;当锚索预应力持续增大时,对边坡稳定性的贡献作用将逐渐下降。

(5) 边坡预应力锚索抗滑桩的支护参数:抗滑桩截面尺寸为 1.2 m × 1.2 m,桩间距为 2.5 m,预应力为 250 kN,此时的边坡稳定系数为 1.33,满足规范的设计要求。

参考文献:

- [1] 王成汤,王浩,张玉丰,等. 锚索抗滑桩加固堆积型滑坡的受力特性模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土力学,2020,41(10):3343-3354.
- [2] 刘耿仁,田建雄. 某顺层边坡锚索抗滑桩失效变形分析[J]. 公路,2021,66(5):93-100.
- [3] 吴阿龙,董晨辉,邓友生,等. 悬臂双排抗滑桩边坡治理综述[J]. 工程建设,2024,56(1):1-6;13.
- [4] 李晓翠,甘磊,甘胜,等. 滑坡体预应力锚索抗滑桩参数优化设计研究[J]. 水利水电科技进展,2023,43(4):98-104.
- [5] 何海波,杨雄,刘泽,等. 多级粉砂岩质顺层边坡抗滑桩支护参数研究[J]. 湖南交通科技,2023,49(3):32-36.
- [6] 黄良启,常晋沙. 某高速公路高边坡滑坡加固抗滑桩施工技术[J]. 工程建设,2019,51(3):60-64.
- [7] 王鳌杰. 预应力锚索抗滑桩支护结构在路基边坡防护中的应用研究[J]. 公路工程,2018,43(1):145-148;190.