



堆积层滑坡格构预应力锚杆锚固角度优化研究

纪红亮¹, 贺可强², 刁之旺², 逢淑祥², 李精昆¹

(1. 中建七局交通建设有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 预应力锚杆锚固角度是影响格构锚固体系支护效果的重要参数, 合理的预应力锚杆锚固角度可以对堆积层滑坡提供更有利的支护效果。文章以青岛返岭前滑坡 BP2 号堆积层滑坡为研究对象, 采用 Midas GTS NX 有限元软件分别建立了自重、地震、极端降雨与极端降雨地震四种工况滑坡数值模拟模型, 以此为基础分析了其不同工况与锚杆锚固角度条件下边坡稳定性系数、受力、变形变化规律, 确定了格构锚固体系最优预应力锚杆锚固角度设计公式, 从受力条件和加固工程成本两个角度对预应力锚杆锚固角度进行了整综合分析优化设计, 从而使最大化发挥格构锚固体系支护效果, 可为堆积层滑坡格构锚固体系的参数优化设计提供参考。

关键词: 堆积层滑坡; 预应力锚杆; 锚固角度优化; 数值模拟

中图分类号: P642. 22

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)11-0027-09

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.11.135

Research on the optimization of pre stressed anchor rod anchoring angle in the grid anchoring system of accumulated landslides

Ji Hongliang¹, HE Keqiang², DIAO Zhiwang², PANG Shuxiang², LI Jingkun¹

(1. Communications Construction Company of CSCEC 7th Division Co., Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China;

2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China)

Abstract: The anchoring angle of prestressed anchor rods is an important parameter that affects the support effect of lattice anchoring systems. A reasonable anchoring angle of prestressed anchor rods can provide more effective support effects. Taking the BP2 landslide in Qingdao Huilingqian as the research object, four working conditions were designed based on different environmental conditions: self weight, earthquake, extreme rainfall, and extreme rainfall earthquake. The Midas GTS NX finite element software was used to establish its numerical simulation model, and analyze the slope stability coefficient, stress, deformation changes, etc. under different working conditions and anchor rod anchoring angles. Thus, the optimal design formula for the prestressed anchor rod anchoring angle of the lattice anchoring system can be obtained. Thus, maximizing the support effect of the lattice anchoring system can provide reference for the parameter optimization design of the lattice anchoring system for landslide deposits.

Key words: accumulation layer landslide; prestressed anchor rod; optimization of anchoring angle; numerical simulation

在我国所有的滑坡灾害类型中, 堆积层滑坡是分布范围最广、暴发概率最高、突然性和破坏性最大的一类滑坡形式, 极易受到降雨、地震、

人类活动等外力的影响而产生破坏, 造成严重的物质财产、生命财产损失。在大量的滑坡治理结构中, 格构锚固体系作为一种新型的主动抗滑结

收稿日期: 2024-12-14

基金项目: 山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KE004); 中建七局科技研发课题(CSCEC7b-2023-Z-12)

作者简介: 纪红亮(1981—)男, 高级工程师, 从事轨道交通、桥梁隧道施工及技术研究。

通信作者: 贺可强(1960—)男, 教授, 博士, 博士生导师, 从事地质灾害预测、评价与防治方面的研究。

构,其结构受力合理,可以有效进行坡面防护和高边坡灾害防治,可以与植被结合,提高绿化,也可以同其他支护方式联合使用,灵活方便,具有施工简单快速、造价低、风险小等优点,近年被广泛运用到高边坡、堆积层边坡灾害治理等领域。在格构梁的设计参数中,格构梁的预应力锚杆锚固角度是对其体系稳定性影响较大的一个参数,然而当前对其优化研究成果相对较少,得出的结论也不近相同,因此如何选取最优预应力锚杆锚固角度参数成为了当前急需解决的问题。

许英姿等^[1-3]、唐辉明等^[4]利用 Winkler 弹性地基梁法对格构梁进行了内力和变形分析,对格构锚固体系的设计提出了相关建议。吴礼舟等^[5]基于 Winkler 弹性地基梁法,提出了考虑摩擦阻力的格构梁内力计算式。殷跃平^[6]利用倒梁法对格构梁内力计算进行了分析,为格构锚杆的合理设计提供了依据。朱大鹏等^[7]基于格构梁弹性假设和 Winkler 模型变形协调条件所得的解析解,结合现场试验,研究了格构梁与边坡岩体相互作用机制。梅岭等^[8]基于 Winkler 弹性地基模型对格构梁节点荷载的分配进行了分析,并与 ABAQUS 软件模拟所得结果进行对比分析,验证了其结论的正确性。彭社琴等^[9]、刘晶晶等^[10-11]通过建立预应力锚索格构梁室内模型试验,对此复合结构的受力特征进行了分析,为预应力锚索格构梁计算模型的完善与结构的设计优化提供了基础。张涛等^[12]建立了滑坡格构锚固体系试验模型,分析了支护体系格构梁下土体反力的分布规律,为格构锚固体系优化设计提供了一定的借鉴。王娟娟等^[13-14]、邓军涛等^[15]通过建立大型预应力锚杆格构梁物理模型试验,对其内力计算方法进行了深入的研究,并分析了预应力锚杆格构梁的受力特点及规律。何健等^[16]采用有限元软件 FLAC3D 对不同锚固间距下的预应力锚杆格构体系进行了分析,为其设计提供了一定的参考依据。王志俭等^[17]利用 FLAC^{3D} 软件,进行了格构锚固体系中格构梁最优悬臂长度的分析。刘展等^[18]采用 Midas GTS NX 软件对格构锚杆体系进行了数值模

拟,对格构梁在高边坡工程中的受力特征进行了分析。张勇等^[19]利用 Midas GTS NX 软件分析了格构锚固支护顺层岩质边坡时的作用机理,为类似工程设计提供一定参考。郝廷伟等^[20]通过 ABAQUS 有限元软件对一种新型柔性轻型格构梁的受力、变形等特征进行了分析。

通过上述的研究分析表明,滑坡的格构梁设计优化还存在问题,最优参数的选取因为滑坡类型、周边环境等不同而不同。为此本文以青岛典型堆积层滑坡—返岭前 BP2 号滑坡为例,结合堆积层滑坡与格构梁的相互作用关系,分析确定了不同工况条件下最优锚固角度的选取,并进行了格构锚固体系支护预应力锚杆锚固角度参数优化研究,可为类似工况下预应力锚杆锚固角度的设计与优化提供参考依据。

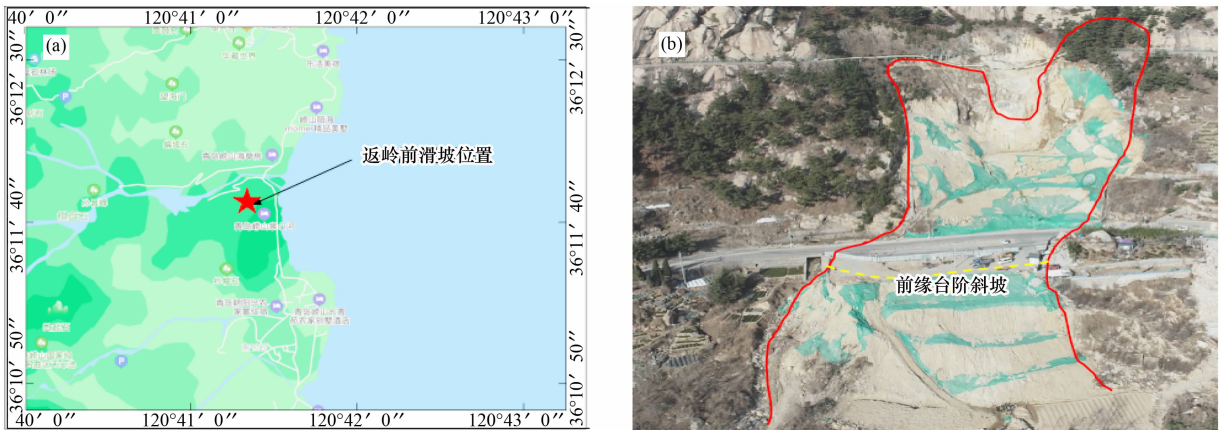
1 滑坡概况

返岭前 BP2 号滑坡位于青岛市崂山区王哥庄街道办事处返岭社区返岭前停车场及其对面山坡,地理坐标为:东经 120°41'9.81",北纬 36°11'50.36",见图 1(a),属于较典型的堆积层滑坡。

BP2 号滑坡坡向 115°,长度为 175~228 m,宽度约为 75 m,平面面积约 19 500 m²,该边坡已于 2020 年 7 月发生滑动,剪出口为旅游专用路与斜坡交汇处,滑体物质在旅游专用路东侧停车场堆积,经应急抢险清障后,边坡前缘现已被改造为多级台阶斜坡,高 19~21 m,宽约 96 m,整体坡度为 22°~25°,平面呈矩形(图 9)。据钻探、物探揭露深度范围内,BP2 号滑坡垂直向上岩土层分为五层,自上而下分别为杂填土(堆积土层)、漂石土(仅在西北角分布)、全风化黑云角闪石英二长岩、强风化黑云角闪石英二长岩和中风化黑云角闪石英二长岩,局部揭露中风化碱长花岗岩。杂填土、漂石土和全风化岩在边坡中间厚,两侧薄,厚度 0~28.5 m,平均厚度约 10 m,其中下部最厚达 28.5 m。其基岩面形态为不规则折线形,接触面坡脚 3°~56°。返岭前滑坡 BP2 号滑坡全貌图见图 1(b),滑坡概况如表 1 所示。

表 1 返岭前 BP2 号滑坡概况

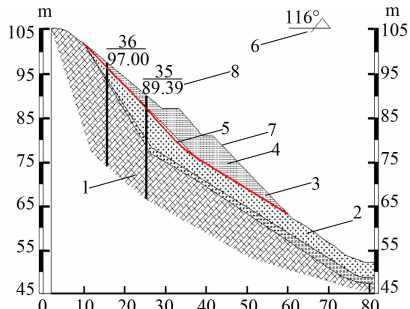
面积/m ²	坡向/°	总体积/m ³	破坏模式	接触面坡脚/°	滑坡体型
1.95 × 104	115	1.95 × 105	折线形滑移破坏	3~56	中型滑坡



(a) 滑坡位置; (b) 滑坡全貌

图 1 返岭前 BP2 号滑坡

经现场实地调查, 边坡勘察期间整体基本稳定, BP2 号滑坡在钻孔施工时, 坡面岩石有位移迹象。在某些条件下, 此已滑滑坡本身可能会再次发生滑动, 所以本文着重研究 BP2 号滑坡。针对此高边坡工程来讲, 其支护工程过于庞大, 为了便于进行模拟, 选择 BP2 滑坡 5-5 剖面(图 2)进行分析与评价, 并以此为对象建模。



1—中风化黑云角闪石英二长岩; 2—强风化黑云角闪石英二长岩; 3—全风化黑云角闪石英二长岩; 4—杂填土; 5—潜在滑移面; 6—剖面线方向; 7—岩土层分界线; 8—钻孔挖槽及高度。

图 2 BP2 滑坡 5-5 剖面

2 计算模型

2.1 滑坡概化模型

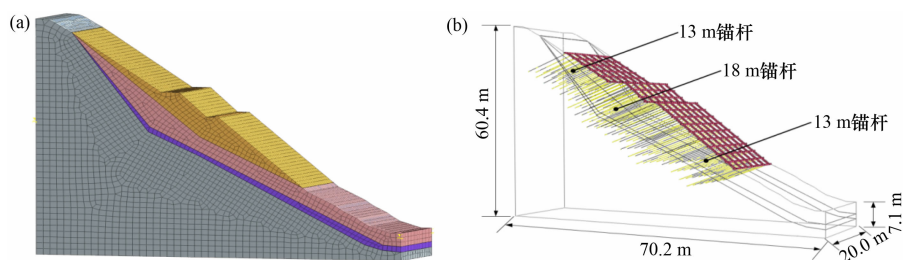
根据实际工程参数, 平台宽度自上而下分别为 4、2.5 m; 格构梁采用钢筋混凝土材料, 混凝土标号 C30, 梁内配筋纵筋为 HRB400, 箍筋为 HRB335, 横梁与纵梁正方形截面尺寸均为 0.40 m, 格构梁(正方形)格构尺寸为 3.00 m×3.00 m, 悬臂长度 1 m; 预应力锚杆长度为 13、18 m 两种图 3.11 (b), 锚固段长度均为 5 m, 入射锚固角度 25°, 预应力 200 kN, 圆形截面。模型材料物理力学参数如表 2 所示, 建立的有限元模型及支护模型见图 3。

2.2 模拟工况设置

以典型堆积层滑坡—返岭前滑坡为基础, 分别设计了自重、地震、极端降雨以及极端降雨与地震联合工况。由于本地区地形陡峭, 地震时可能引发滑坡, 为建筑抗震危险地段; 同时滑坡地区属于温带季风气候, 受海洋调节影响, 表现出海洋性气候, 降雨频繁且易有较大降雨量; 加之

表 2 数值模型物理力学参数

材料参数	弹性模量/ MPa	容重/ (kN·m ⁻³)	饱和容重/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	饱和黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	饱和内摩擦角/(°)	泊松比
堆积杂填土	80	19.0	21.85	18.0	15.0	23	20	0.33
全风化石英岩	95	21.0	24.15	26.0	24.0	34	32	0.32
强风化石英岩	400	23.0	23.00	35.0	34.0	45	44	0.30
中风化石英岩	4 000	25.0	25.00	74.5	74.5	55	55	0.22
锚杆	195 000	78.5	—	—	—	—	—	0.30
格构梁	30 000	25.0	—	—	—	—	—	0.30



(a) 边坡原始模型; (b) 边坡支护模型

图 3 边坡原始及支护模型

滑坡位于崂山风景区内,紧邻景区专用旅游公路与专用停车场,人员活动十分频繁,对于其极端情况下的稳定分析是十分必要的,因此建立了地震工况、极端降雨工况与两者联合工况。

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),青岛地区位于地震烈度 7 度区,对应地震动峰值加速度为 $0.1g$,地震动加速度反应谱特征周期 0.4 s ,据此设置地震工况条件参数;根据《返岭前停车场周边环境整治工程岩土工程勘察报告》(青岛地质工程勘察院,2021 年 8 月),本地区年最大降水量 $1\,227.6\text{ mm}$,50 a 一遇暴雨强度为 140.9 mm/h ,依此设置极端降雨工况条件参数。以此为基础进行不同工况受力条件下预应力锚杆最优锚固角度参数分析。

自重工况:在此条件下,边坡中前缘产生明显的变形和张拉裂缝,与此同时出现的是塑性破坏,坡体的下滑力传递给坡体后缘,使得坡体后缘的应力失衡,最终使得产生变形和滑移。在这个工况下,边坡最大位移为 21 mm ,潜在最危险滑移面位于中风化黑云角闪石英二长岩与强风化黑云角闪石英二长岩分界处,滑坡稳定系数为 1.17 。

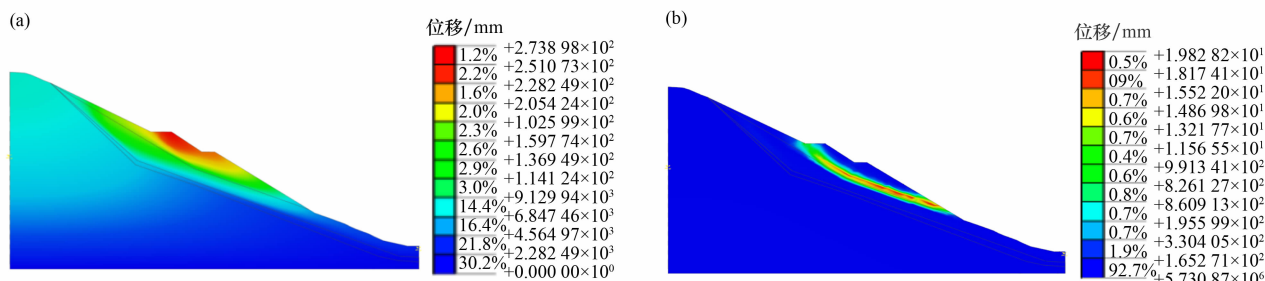
地震工况:返岭前滑坡在地震工况条件下,坡体位移和滑移面发展与自重工况相同,坡体的

中前缘产生明显的变形和张拉裂缝,滑坡的抗滑力减小,前缘变形。数值模拟中边坡最大位移为 31 mm ,在此工况下潜在最危险滑移面与自重工况位置相同,滑坡稳定系数为 1.10 。

极端降雨工况:坡体的前缘出现明显的变形和张拉裂缝,首先产生塑性破坏,坡体前缘的抗滑力遭到破坏,前缘坡体的应力失衡,最终使得边坡产生变形和滑移现象。在这一条件下数值模拟中边坡最大位移远大于 1 m ,边坡已经发生破坏,此工况下边坡的潜在最危险滑移面位于堆积层杂填土与全风化黑云角闪石英二长岩分界处,滑坡稳定系数为 1.00 。

极端降雨与地震工况:与极端降雨工况下类似,坡体前缘呈现出更加明显的变形和张拉裂缝,前部阻滑段失去稳定性,抗滑力不足,最终导致位移和滑移的产生,坡体的应力失衡。此时数值模拟中边坡最大位移已经远大于 1 m ,边坡已经发生破坏,在此工况下潜在最危险滑移面位于堆积层杂填土与全风化黑云角闪石英二长岩分界处,滑坡稳定系数为 0.95 。

本节利用控制变量法,在其他条件相同的基础上,将预应力锚杆锚固角度分别设置为 13° 、 17° 、 21° 、 29° 、 33° 、 37° 这 6 种不同的参数(依次递增),用来分析锚固角度对堆积层滑坡稳定性的影



(a) 总位移云图; (b) 滑移面发育图

图 4 自重工况下滑坡发育特征

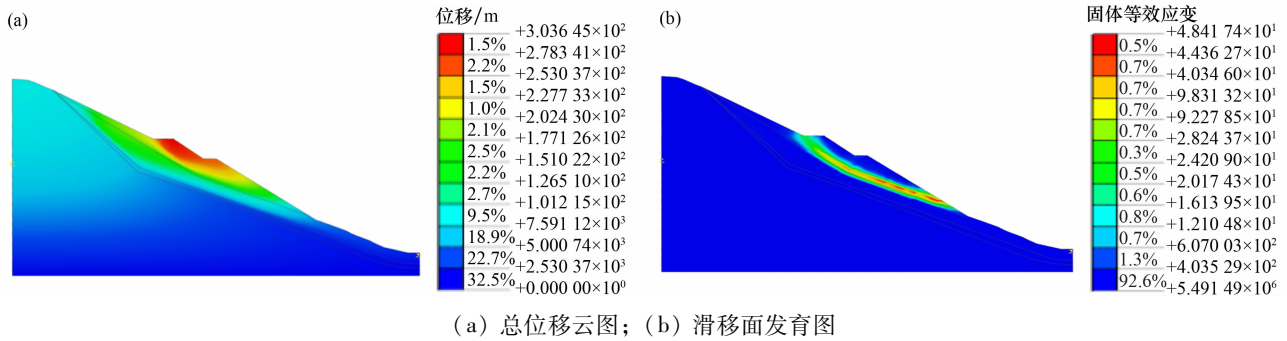


图 5 地震工况下滑坡发育特征

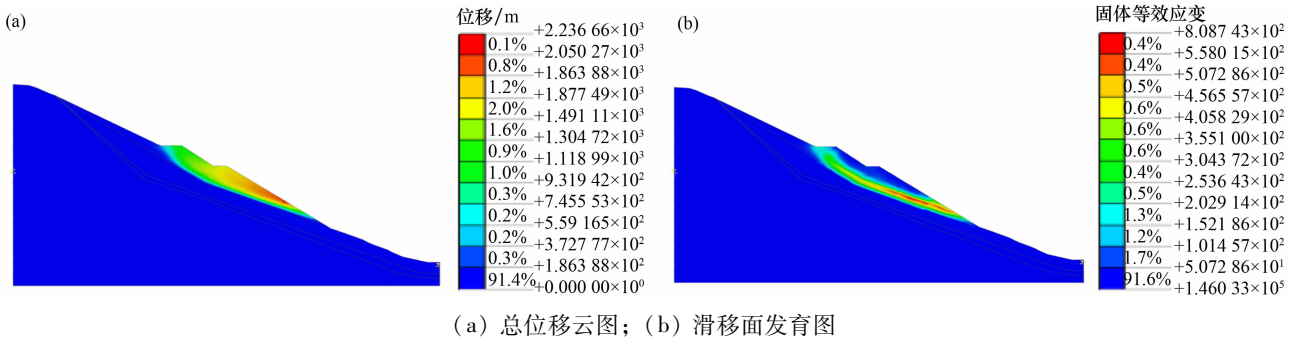


图 6 极端降雨工况条件下滑坡发育特征

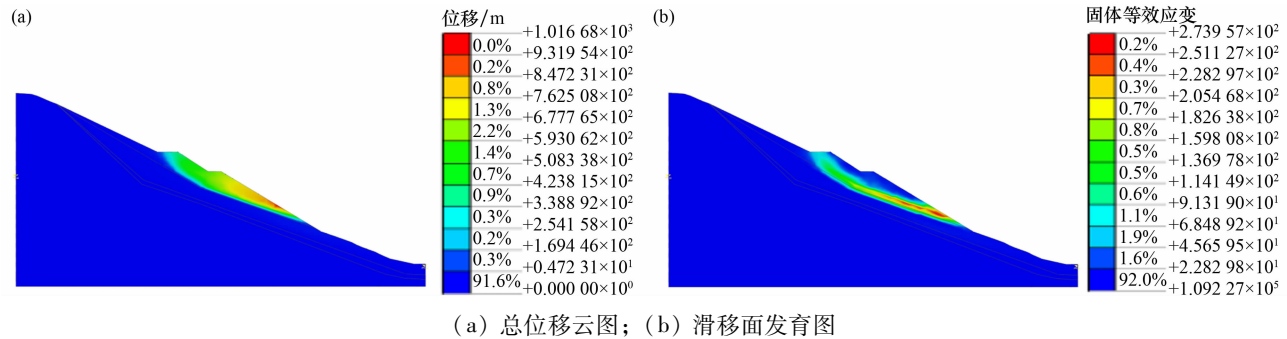


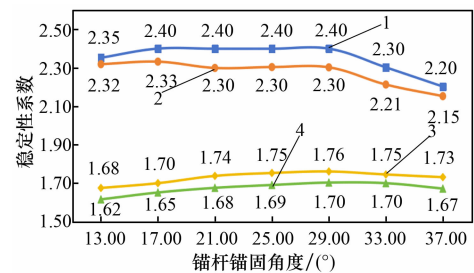
图 7 极端降雨地震工况条件下滑坡发育特征

响。建立 6 种数值模型进行模拟分析, 得到 6 种不同参数下, 支护体系完工后的边坡稳定性系数、最大水平位移、最大垂直位移、支护体系最大位移、格构梁最大弯矩以及锚杆的最大轴力数据, 通过分析以上几种数据得到相关结果。

3 模拟结果分析

3.1 稳定性分析

为研究预应力锚杆格构梁支护体系中正方形格构预应力锚杆锚固角度对返岭前堆积层滑坡稳定性的影响, 本文采用控制变量法, 对应建立 6 种数值模型进行模拟分析, 从而得到 6 种不同参数下, 边坡支护体系完工后的边坡稳定性系数。4 种工况不同格构尺寸下边坡稳定性系数如图 8 所示。



1—自重工况; 2—地震工况; 3—极端降雨工况; 4—极端降雨地震工况。

图 8 4 种工况不同锚固角度下边坡稳定性系数

由图 8 可知, 当预应力锚杆锚固角度大于 29° 时, 边坡稳定性系数随着锚固角度的增大而减小, 边坡的稳定性系数在预应力锚杆锚固角度为 29° 时为最大值。在 4 种工况下, 边坡的稳定性系数随着锚固角度的增大而呈现出先增大后减小的规律, 当锚固角度大于 29°

时,减小幅度过大。通过上述分析表明,为了保证滑坡的稳定安全,预应力锚杆最优锚固角度大约为 29° 。

3.2 边坡剪应变模拟分析

通过 Midas GTS NX 软件对边坡岩土体进行强度折减计算,得出支护后返岭前滑坡的稳定性变化,以及各种因素对滑坡稳定性的影响规律。

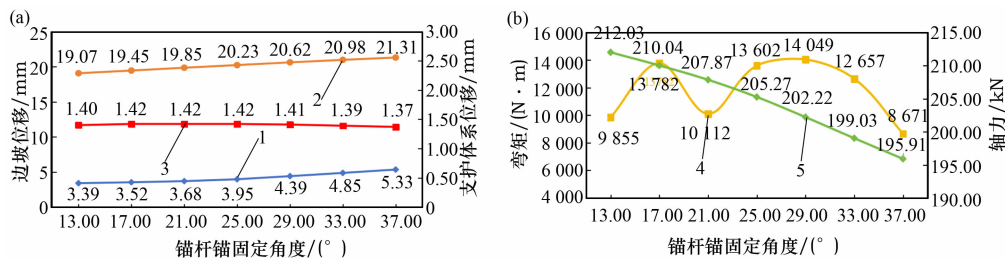
在其他条件相同的条件下,随着锚固角度的持续增大,边坡的最大剪应变逐渐从边坡支护部位的底部向边坡中部发展。同时,在四种工况中,随着锚固角度的持续增大,剪应变的贯通也得到了较大幅度的限制。

3.3 位移及受力分析

采用控制变量法,通过数值模型模拟分析,

得到 4 种工况下边坡支护体系完工后的边坡最大水平位移、最大垂直位移、支护体系最大位移、格构梁最大弯矩以及锚杆的最大轴力见图 9~12。

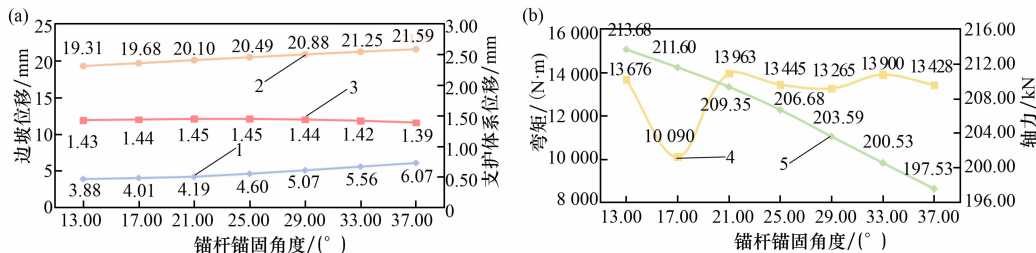
图 9~12 中(a)表明,在其他条件保持不变的情况下,4 种工况的边坡最大水平位移、最大垂直位移都呈现出随着锚固角度的增大而出现逐渐增大的趋势,支护体系最大位移也呈现出增大的趋势,但是数值变化幅度较小。在自重工况、地震工况中,支护体系的最大位移随着锚固角度的增大出现先增大后减小的趋势,但是同样数值变化小,变化幅度不明显,说明改变锚固角度对支护体系位移影响较小,两者关联性弱。



(a) 边坡位移与支护体系位移; (b) 格构梁弯矩与锚杆轴力

1—边坡水平位移; 2—边坡垂直位移; 3—支护体系位移; 4—格构梁弯矩; 5—锚杆轴力。

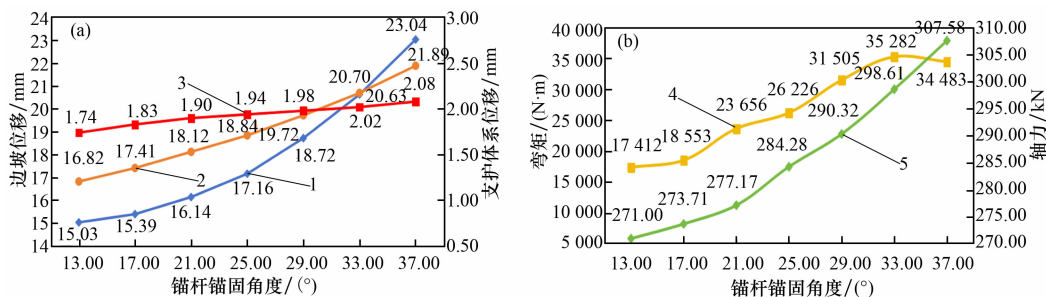
图 9 自重工况不同锚固角度下位移、格构梁弯矩与锚杆轴力模拟结果统计



(a) 边坡位移与支护体系位移; (b) 格构梁弯矩与锚杆轴力

1—边坡水平位移; 2—边坡垂直位移; 3—支护体系位移; 4—格构梁弯矩; 5—锚杆轴力。

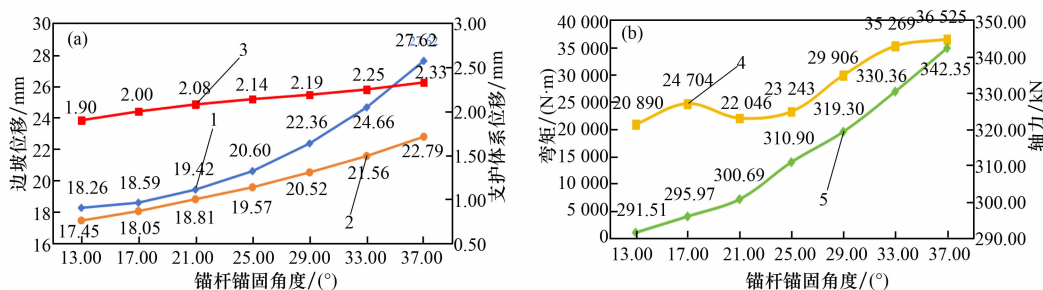
图 10 地震工况不同锚固角度下位移、格构梁弯矩与锚杆轴力模拟结果统计



(a) 边坡位移与支护体系位移; (b) 格构梁弯矩与锚杆轴力

1—边坡水平位移; 2—边坡垂直位移; 3—支护体系位移; 4—格构梁弯矩; 5—锚杆轴力。

图 11 极端降雨工况不同锚固角度下位移、格构梁弯矩与锚杆轴力模拟结果统计



(a) 边坡位移与支护体系位移; (b) 格构梁弯矩与锚杆轴力

1—边坡水平位移; 2—边坡垂直位移; 3—支护体系位移; 4—格构梁弯矩; 5—锚杆轴力。

图 12 极端降雨地震工况不同锚固角度下位移、格构梁弯矩与锚杆轴力模拟结果统计图

通过图 9~12 中(b)可以看出, 在其他条件都相同时, 在自重工况、地震工况中预应力锚杆最大轴力随着锚固角度的增大而减小, 格构梁最大弯矩出现波动式变化; 对于两种具有极端降雨条件的工况, 预应力锚杆最大轴力和格构梁最大弯矩都随着锚固角度的增大而不断增大。4 种工况的对比, 表明了极端降雨条件对支护体系具有较大的影响, 也表明对边坡位移、支护体系位移具有较大作用。

通过上述分析, 当锚固角度为 29° 时, 边坡的最大水平、垂直位移都相对较小, 边坡的稳定性系数在极端降雨条件下达到最大, 因此为了保证滑坡的稳定安全, 预应力锚杆最优锚固角度约为 29° 。

4 格构锚固体系最优预应力锚杆锚固角度优化

预应力锚杆作用原理是给堆积层边坡岩土体提供锚固力、抗滑力, 而其锚固角度很大程度上会影响锚固力、抗滑力的大小与边坡稳定性, 因此, 在设计中应充分重视锚固角度的选取, 以获取更好的加固效果和更大的工程效益。

4.1 最大抗滑力锚固角度

应用预应力锚固技术可将岩土体置于高围压应力状态, 从而有效改善边坡的刚度特性和变形性能。同时, 其锚固力亦可直接影响滑动面上的应力分布情况, 如图 13 所示。

通过预应力锚杆锚固力得到的抗滑力 P 如公式(1)所示:

$$P = P_v \tan \varphi + P_t = P_n [\sin(\alpha + \beta) \tan \varphi + \cos(\alpha + \beta)]$$

(1)

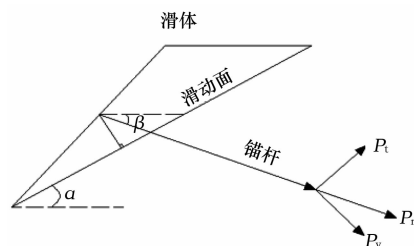


图 13 预应力锚杆受力示意

式中: P_n 为锚杆设计的预应力; P_v 为预应力沿滑动面的法向分力; P_t 为预应力沿滑动面的切向分力; α 为滑动面倾斜角度; β 为锚固角度; φ 为内摩擦角。

通过图 13 及公式(1), 也可以验证预应力锚杆的作用机理: 提供抗滑阻力和锚固力。

对公式(1)进行求导, 可以得到锚杆所能提供的最大抗滑力 $P_{\max}$ 时锚固角度值, 即使 $dP/d\beta$:

$$\beta = \varphi - \alpha \quad (2)$$

当以公式(2)所示锚固角度来设置锚杆可以得到最大抗滑力 $P_{\max}$, 也就是最大抗滑力锚固角度。不过, 该种支护方式的经济性可能存在分歧, 因其在支护滑动面倾角较小的情况下需要较长的锚杆以保证其有效性。因此综合考虑来讲, 最优锚固角度应该是兼顾最大抗滑力和最小锚杆长度两者的情况下才可称为最优锚固角度。

4.2 最经济锚固角度

锚杆包含内外锚固段和自由段, 其中外锚固段长度为常量; 内锚固段长度为定值; 而只有其自由段的长度与锚杆的锚固角度有关联。因此在评价锚固效果的经济性时, 可以采取把自由段长度作为经济指标的方法:

$$l = B / \sin(\alpha + \beta) \quad (3)$$

联立公式(1)和公式(3), 得:

$$q = \frac{P}{l} = \frac{P_n}{B} \sin(\alpha + \beta) [\sin(\alpha + \beta) \tan \varphi + \cos(\alpha + \beta)] \quad (4)$$

式中: B 为锚杆设置处到滑动面的垂直距离, m 。

对公式(4)求导, 即令 $q = \frac{dq}{d(\alpha + \beta)}$ 等于 0, 可得:

$$\alpha + \beta = 45^\circ + \varphi/2 \quad (5)$$

所以, 当 $\alpha + \beta = 45^\circ + \varphi/2$ 时, P/l 取得最大值。由此可以得出: 最经济的锚固角度为 $\beta = 45^\circ + \varphi/2 - \alpha$ 。

4.3 最优锚固角度

在具体的工程实践中, 只有锚杆的锚固角度在满足工程施工条件的影响、经济性以及边坡结构整体性的要求时, 方才有可能被视为最优锚固角度。根据式(5), 可确定格构梁最大抗滑力锚固角度与最经济锚固角度。其中, 最大抗滑力锚固角度: $\beta = \varphi - \alpha = 55^\circ - 26^\circ = 29^\circ$ 。最经济锚固角度: $\beta = 45^\circ + \varphi/2 - \alpha = 45^\circ + 55^\circ/2 - 26^\circ = 46.5^\circ$ 。

因此, 为了实现良好的加固效果, 边坡加固工程应针对不同情况, 综合考虑施工条件和边坡特征, 合理兼顾加固能力和经济因素, 依此确定格构梁最优锚固角度为 29° 。

5 结 论

(1) 基于控制变量法, 运用 Midas GTS NX 软件对格构锚固支护体系格应力锚杆锚固角度对返岭前堆积层滑坡稳定性的影响进行了系统性的数值模拟分析, 通过对稳定性、位移及内力等综合分析, 得出格构预应力锚杆锚固角度对滑坡稳定性具有显著影响。

(2) 通过数值模拟分析得出, 综合自重、地震、极端降雨、极端降雨与地震 4 种工况来看, 正方形格构梁预应力锚杆最优锚固角度约为 29° , 此时边坡的最大水平、垂直位移都相对较小, 边坡的稳定性系数接近合理值, 不会产生过度支护加固问题, 既保证了返岭前堆积层滑坡的边坡稳定安全, 又可最大降低加固工程成本。

(3) 从受力条件和加固工程成本两个角度对预应力锚杆锚固角度进行了整综合分析, 基于两者关系进行了堆积层滑坡格构锚固体系中预应力

锚杆锚固角度参数的优化设计, 确定了格构锚固体系中预应力锚杆最优锚固角度参数。

参考文献:

- [1] 许英姿, 唐辉明. 滑坡治理中预应力锚索格构梁受力分析[J]. 安全与环境工程, 2002(3): 24-26.
- [2] 许英姿, 唐辉明. 滑坡治理中格构锚固结构的解析分析[J]. 地质科技情报, 2002(3): 89-93.
- [3] 许英姿, 唐辉明. 格构梁与预应力锚索复合结构的设计方法研究[J]. 中南公路工程, 2004(2): 1-4; 27.
- [4] 唐辉明, 许英姿, 程新生. 滑坡治理工程中钢筋混凝土格构梁设计理论研究[J]. 岩土力学, 2004(11): 1683-1687.
- [5] 吴礼舟, 胡瑞林, 黄润秋等. 护坡格构与坡面相互作用的研究[J]. 工程地质学报, 2005(2): 275-279.
- [6] 殷跃平. 滑坡钢筋砼格构防治“倒梁法”内力计算研究[J]. 水文地质工程地质, 2005(6): 52-56.
- [7] 朱大鹏, 晏鄂川, 宋琨. 格构梁与边坡岩体相互作用机制及现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2947-2953.
- [8] 梅岭, 张太玥, 姜朋明. 基于 Winkler 弹性地基模型格构梁节点荷载分配研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(7): 52-56.
- [9] 彭社琴, 赵其华. 预应力锚索格构模型试验加载系统设计[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 2): 151-154.
- [10] 刘晶晶, 赵其华, 彭社琴等. 预应力锚索格构梁作用下边坡土中应力分布的室内模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006(4): 9-12.
- [11] 刘晶晶, 赵其华, 张文居等. 多节点加载预应力锚索格构梁室内模型试验研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 264-266; 270.
- [12] 王娟娟. 预应力锚杆格构梁模型试验及计算方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- [13] 张涛, 石胜伟, 谢忠胜等. 格构锚固体系梁下土体反力分布规律的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 70-75.
- [14] 王娟娟, 邓军涛, 门玉明. 锚杆格构梁模型试验及格构梁内力计算[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 64-68; 76.
- [15] 邓军涛, 王娟娟, 门玉明. 锚杆格构梁模型试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(4): 542-545; 577.
- [16] 何健, 李建国. 预锚格构体系中不同锚固间距的仿真分析[J]. 建筑技术开发, 2007(12): 23-24; 38.

- [17] 王志俭, 宁万辉, 赵家成. 锚杆格构梁支护中格构梁最优悬臂长度讨论[J]. 人民长江, 2011, 42(3): 34-38; 42.
- [18] 刘展, 孙赤, 冯超等. 大型高边坡群锚格构梁的优化研究[J]. 应用数学和力学, 2015, 36(增刊1): 139-146.
- [19] 张勇, 吴礼浩, 方龙建. 格构梁联合锚杆在顺层岩质边坡加固中的数值模拟分析[J]. 山西建筑, 2019, 45(12): 60-62.
- [20] 郝廷伟, 李驰, 高瑜等. 轻型格构边坡防护数值应力及稳定性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(6): 176-188.
- [21] 陈春利. 滑坡格构锚固防治工程大型物理模型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [22] 贺可强, 阳吉宝, 李显忠等. 堆积层滑坡预测预报及其防治[M]. 北京: 地震出版社, 1996.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵, 不再另行支付), 对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明, 如有异议请来稿说明, 本刊将作适当处理。