

文章编号: 1673-2049(2012)04-0025-07

边坡分级柔性支护数值模拟研究

朱彦鹏, 王立文

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了探讨土钉与框架预应力锚杆分级支护边坡的锚固效果及其协同工作性能, 采用快速拉格朗日差分软件 FLAC^{3D}, 对兰州某边坡进行分级柔性支护数值模拟研究; 考虑分级支护施工顺序, 对比分析了边坡支护前后的塑性破坏发展趋势、安全系数变化规律、位移变化情况以及土钉与预应力锚杆的受力性状。结果表明: 边坡分级支护后, 坡体的侧移与沉降得到了有效的控制, 边坡稳定安全系数明显提高, 同时分析得出了土钉与预应力锚杆的受力分布规律, 为此类工程设计提供了一定的参考和建议。

关键词: 边坡分级支护; 土钉; 框架预应力锚杆; 边坡稳定安全系数; 数值模拟

中图分类号: TU435 **文献标志码:** A

Research on Numerical Simulation of Slope Grading Flexible Reinforcement

ZHU Yan-peng, WANG Li-wen

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In order to study the classification of soil nailing and pre-stressed anchor supporting slope anchoring effect and the cooperative working performance, a fast Lagrange difference software FLAC^{3D} was adopted to finish the numerical simulation of grading supporting on the slope around Lanzhou. A comparative analysis of the plastic zone and the safety factor was made between unreinforced and reinforced slopes according to the construction order of grading reinforced slope. The displacement change of the slope, and the force character of soil nailing and pre-stressed anchor were also studied. The results show that horizontal displacement and vertical displacement of the soil are controlled effectively, and the safety factor of slope stability is improved significantly due to the reinforcement. Inner stress distribution law of soil nailing and pre-stressed anchor are also studied. The conclusions have reference values for engineering optimum design.

Key words: slope grading reinforcement; soil nailing; frame pre-stressed anchor; safety factor of slope stability; numerical simulation

0 引言

中国是一个多山的国家, 在山区修建公路、铁路和房屋建筑往往涉及到边坡加固的问题。目前, 边

坡加固方法中, 锚固支护作为一种原位岩土体加固的方法已成为应用最广的直接加固方法之一。近年来, 土钉、框架预应力锚杆等新型柔性支护结构, 克服了传统边坡支护结构笨重、造价高、稳定性差、支

收稿日期: 2012-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978129)

作者简介: 朱彦鹏(1960-), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学硕士, E-mail: zhuyp@lut.cn.

护高度受限等缺点,作为一种有效提高边坡岩土体承载力和稳定性的加固措施已被许多工程实践所证实^[1-11]。

土钉与框架预应力锚杆各有特点,在近年来的边坡加固设计中有将两者相结合进行分级支护的趋势,既获得经济合理的支护方案,又提高边坡加固的安全度。目前这方面的研究工作相对工程实践较为滞后,且大多集中于对单级边坡同一支护结构的模拟分析。周勇等^[12]对黄土地区框架预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度进行了分析,提供了具有指导意义的初始设计参数取值范围,但研究仅考虑了一种支护结构作用于土体;曾祥勇等^[13]对锚索与锚杆联合锚固支护岩坡进行了有限元分析,结果证明,采用预应力锚索和锚杆交错布设方案进行边坡锚固支护可较好地达到安全与经济并重的边坡处治目的;冯永等^[14]对基坑中锚杆与土钉复合支护进行数值分析,研究了在基坑开挖过程中土钉和锚杆的内力分布规律及基坑的位移变化。而随着高陡边坡在实际工程中的大量出现,对边坡采用不同锚固结构进行分级支护逐渐成为一种新的边坡治理防护趋势^[15-17]。本文中笔者结合实际工程,采用有限差分软件FLAC^{3D}对边坡分级加固过程中2种支护结构的力学行为进行模拟,分析了边坡加固前后的位移变化及塑性破坏发展趋势,得到了一些有意义的结论,对工程实践有一定的参考价值。

1 有限元模型的建立

结合兰州市九州大道边坡加固工程,采用有限差分软件FLAC^{3D}建立有限差分模型,依据施工顺序,对边坡分级支护进行数值模拟。

1.1 FLAC^{3D}基本原理

FLAC^{3D}是由美国Itasca公司研发推出的连续介质力学分析软件,是一种基于三维显式有限差分法的面向工程力学问题计算的数值分析方法。该软件可以较好地模拟岩土体或其他材料的三维力学行为,在材料的弹塑性分析、应变软化和大变形分析以及施工过程与支护结构的模拟等方面具有其独到的优点。

1.2 工程概况

兰州市九州大道边坡加固工程位于兰州市九州开发区南部。根据现场勘察资料,道路沿线地层主要由杂填土、黄土状粉土和泥质砂岩等组成。道路沿线坡体高度为13~19 m,坡度较陡,由于连续降雨,多处填土及粉土边坡已有明显的崩塌、崩落现

象。加固边坡为市政道路永久性边坡,安全等级为一级,局部地段为二级。

1.3 基本假定

为了便于建立分析模型,结合该边坡工程的实际支护情况,做如下假定:

(1)支护结构为平面应变问题。

(2)锚杆、土钉与周围土体、浆体完全粘结,满足变形相容条件。

(3)地下水埋藏较深,在模拟计算过程中,不考虑地下水的影响。

1.4 计算模型及参数选取

计算模型选取九州大道K0+120~K0+160段南侧坡体,地形较陡,坡体较高,坡度在50°~70°之间,具有代表性。为降低工程造价并利用场地条件,经多方案比选后采用两级放坡,支护施工顺序按逆作业法进行。一级边坡采用土钉及喷射混凝土面层进行支护,竖向共设6排土钉,呈梅花状布置;二级边坡采用框架预应力锚杆进行支护,竖向共设4排锚杆。土钉与锚杆布置见图1。

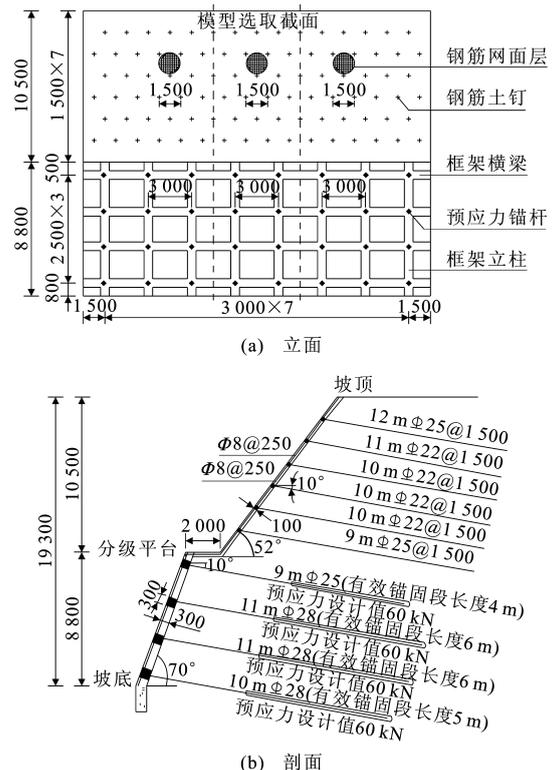


图1 边坡分级加固立面及剖面(单位:mm)

Fig. 1 Elevation and Section Plane of Slope Grading Reinforcement (Unit:mm)

计算模型包括边坡土体、支护结构(土钉、网喷混凝土、预应力锚杆与框架梁)以及边坡周边一定影响范围内的土体等。按照平面应变建立三维计算模

型,如图 2 所示。边坡土体采用实体 Zone 单元模拟,并符合 Mohr-Coulomb 破坏准则。土层条件及力学参数见表 1;护坡网喷混凝土及钢丝网采用壳单元 ShellSEL 模拟,但仅考虑壳单元的薄膜效应,而不考虑其抗弯刚度;土钉及预应力锚杆采用锚单元 CableSEL 模拟,锚固预应力设计值为 60 kN;框架梁采用梁单元 BeamSEL 模拟,力学行为采用线弹性准则。模型中支护结构的力学参数分别通过工程现场试验或理论计算获得,见表 2~4。

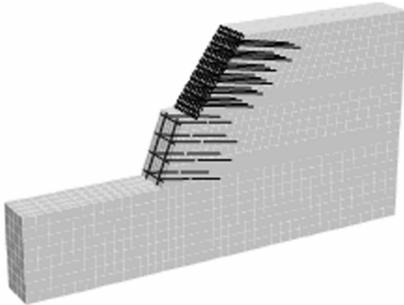


图 2 三维计算模型

Fig. 2 3D Calculation Model

表 1 边坡岩土材料计算参数

Tab. 1 Calculation Parameters of Slope Soil

参数	厚度 h/m	重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 $c/$ kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	粘结强度 τ/kPa
杂填土	5.8	16.0	13	30	40
黄土状粉土	11.9	12.8	21	26	50
砂质泥岩	13.6	22.0	30	35	80

表 2 锚单元计算参数

Tab. 2 Calculation Parameters of CableSEL

参数	土钉	锚杆
钢筋弹性模量/GPa	210	210
剪切连接弹簧粘结强度/MPa	1	1
剪切连接弹簧内摩擦角/ °	20	20
剪切连接弹簧刚度/ $(10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})$	2	2
注浆孔周长/m	0.408	0.471
钢筋拉伸强度/kN	220	220

表 3 壳单元计算参数

Tab. 3 Calculation Parameters of ShellSEL

参数	喷射混凝土面层
弹性模量/GPa	10
泊松比	0.2
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 500
厚度/m	0.1

2 计算结果分析

2.1 塑性区分析

采用 FLAC^{3D} 中弹塑性本构模型进行模拟时,

表 4 梁单元计算参数

Tab. 4 Calculation Parameters of BeamSEL

参数	框架横(纵)梁
弹性模量/GPa	200
泊松比	0.3
横截面积/ m^2	0.09
极惯性矩/ m^4	0.00
绕 y 轴惯性矩/ m^4	6.75
绕 z 轴惯性矩/ m^4	6.75

Plot Block State 命令可以显示那些应力符合屈服准则的区域(或称为塑性区)以观察潜在破坏区域的范围。边坡失稳破坏可以看作是塑性区逐渐发展、扩大直至贯通而进入完全塑流状态、无法继续承受荷载的过程。

如图 3 所示,边坡未锚固前,坡体发生的塑性破坏以剪切破坏为主,塑性区由坡角向坡体上缘延伸,几乎贯通至坡顶。在对一级边坡进行喷网混凝土与土钉加固后,剪切塑性破坏在土钉锚固区域内减少较为明显。框架预应力锚杆加固二级坡体后,坡体内剪切塑性区迅速减少,逐渐向边坡内部发展,锚杆锚固区域内变化尤为显著。由此可见,当土钉与锚杆同时发挥锚固作用时,坡体发生剪切破坏的塑性区域明显减少,坡体趋于稳定。同时,依据塑性区分布情况可推断边坡加固前后最危险滑移面的发展趋势,为支护结构参数设计提供一定的理论参考。

2.2 安全系数分析

FLAC^{3D} 中基于强度折减法求解边坡稳定安全系数,其定义为:使边坡刚好达到临界破坏状态时,对岩土体的抗剪强度进行折减的程度,即岩土体的实际抗剪强度与临界破坏时的折减后抗剪强度的比值^[18]。强度折减法的原理是利用式(1),(2)来调整岩土体的强度指标 c 和 φ , 然后对边坡稳定性进行数值分析,不断增加折减系数,反复计算直至其达到临界状态,此时得到的折减系数即为边坡稳定安全系数 F_s 。

$$F_s = F_{\text{trial}} = c/c_F \quad (1)$$

或

$$F_s = F_{\text{trial}} = \tan(\varphi)/\tan(\varphi_F) \quad (2)$$

式中: c_F 为折减后的粘聚力; φ_F 为折减后的摩擦角; F_{trial} 为折减系数; c, φ 均为强度材料参数。

表 5 为边坡稳定安全系数。由表 5 可知,根据 FLAC^{3D} 强度折减法所得到的边坡加固前的稳定安全系数小于 1,说明该边坡在开挖后处于不稳定状态,极有可能发生滑移;土钉与喷网混凝土加固一级

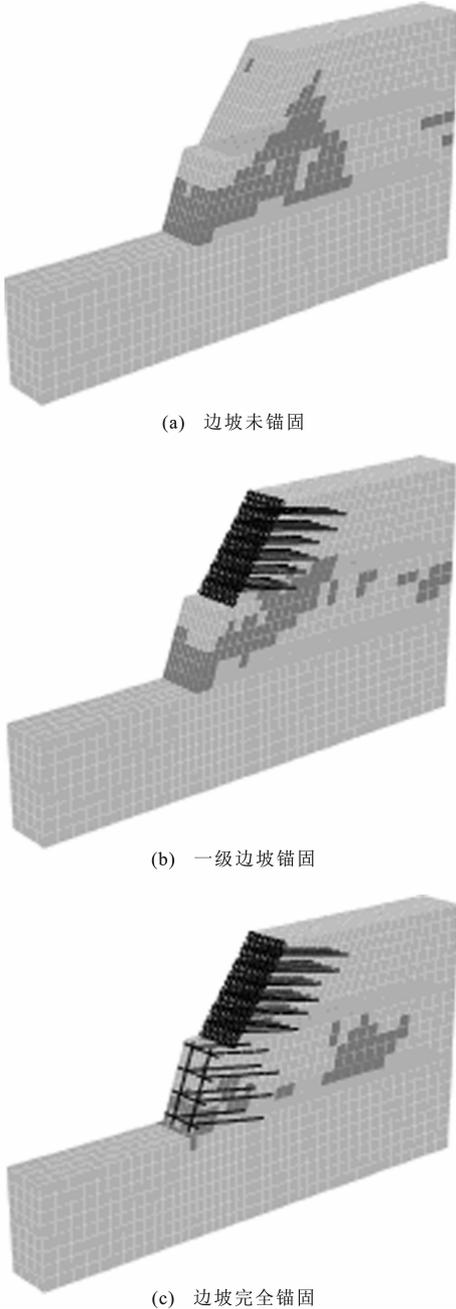


图3 边坡岩体塑性区分布情况

Fig. 3 Slope Distributions of Plastic Zone

表5 边坡稳定安全系数

Tab. 5 Safety Factors of Slope Stability

加固方式	未加固边坡	一级边坡加固	边坡完全加固
F_s	0.834	1.092	1.318

边坡后,稳定安全系数提升,略大于1,说明土钉发挥锚固效果,边坡处于极限平衡状态;框架预应力锚杆加固二级边坡后,稳定安全系数明显提高($F_s \geq 1.3$),满足《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2002)中的规定^[19],说明边坡分级加固后土钉与框架预应力锚杆发挥各自锚固效果,边坡趋于稳定。

基于FLAC^{3D}强度折减法得到的安全系数,为准确判定边坡的真实受力状态提供了理论依据。

2.3 边坡水平位移

为了模拟研究边坡的水平位移,在模型边坡边坡壁上由坡顶向坡底方向依次设置15个位移分析点,由FLAC^{3D}中的History命令来监测位移情况,如图4所示。边坡从加固前到一、二级坡体完全加固,坡面水平位移情况如图5所示。图5中规定背离坡体位移方向为正值。

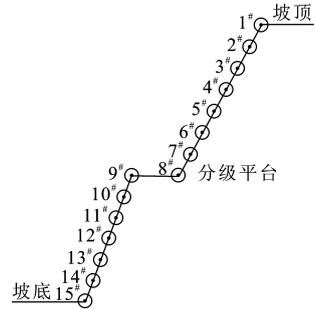


图4 水平位移分析点布置

Fig. 4 Allocation of Analysis Points for Horizontal Displacements

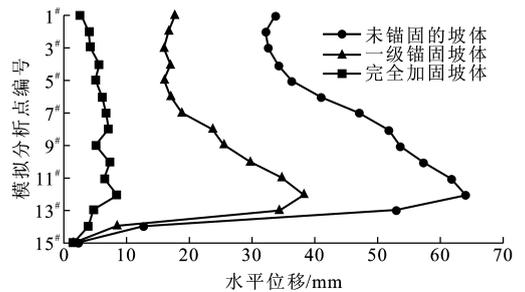


图5 边坡水平位移

Fig. 5 Horizontal Displacements of Slopes

由图5可以看出:

(1)边坡加固前水平位移最大,坡面水平位移呈现从坡顶向下逐渐增大直至峰值,又逐渐减小的趋势,坡底水平位移最小。二级坡体的中部(点10#~13#之间)水平位移普遍较大,最大位移为64 mm(点12#),距离坡底4 m左右。因此这个部位是边坡变形破坏的重要部位,施工过程中要严密注意其水平位移发展。

(2)土钉与喷网混凝土加固一级边坡后,坡面水平位移普遍减小,水平位移减小值平均在20 mm左右。一级边坡从坡顶到分级平台,坡面水平位移基本一致,均在17 mm左右,未出现逐渐增加的现象,只有坡角位置(点8#)较大,为23 mm;而二级边坡的水平位移虽较未加固前有所减小,但仍然存在明

显的滑动趋势,且水平位移普遍较大。说明土钉和喷网混凝土加固后,对一级边坡水平位移控制较为明显。

(3)坡体完全加固后,坡面水平位移进一步减小。从坡顶到坡底,坡面水平位移基本一致,控制在8 mm以内,满足边坡位移控制要求,坡体基本稳定,尤其是二级坡体在框架预应力锚杆的作用下,位移控制效果较为显著,水平位移减小值最大为30 mm,加固效果较为理想。

2.4 边坡竖向沉降

为了模拟分析边坡分级后的垂直位移,在模型坡顶、分级平台及坡底分别设置若干沉降分析点,由FLAC^{3D}中的History命令来监测位移情况,如图6所示。边坡加固后的各点竖向位移如图7所示。

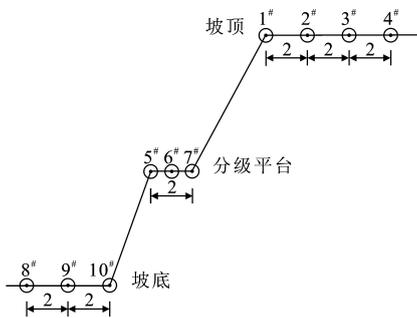


图6 竖向位移分析点布置(单位:m)

Fig.6 Allocation of Analysis Points for Vertical Displacements (Unit:m)

由图7可以看出:

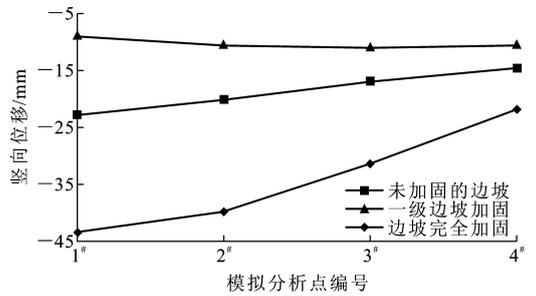
(1)坡体加固前,坡顶竖向位移沿坡面向坡体内部逐渐减小,竖向位移最大值位于坡顶与坡面相交处(点1#)。土钉(喷网混凝土)与框架预应力锚杆加固后,坡顶竖向位移趋于稳定,竖向位移控制在10 mm左右。

(2)分级平台处竖向位移由平台边缘(点5#)向一级坡体坡角处(点7#)逐渐增加,变化梯度较缓。随着土钉(喷网混凝土)与框架预应力锚杆的加固,沉降逐渐减小,最后控制在6 mm以内。

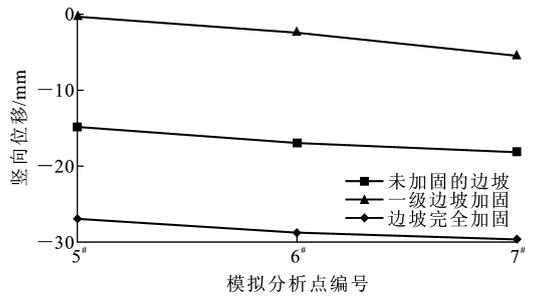
(3)边坡加固前以及一级边坡加固后,坡底均出现隆起现象。边坡完全加固后,由于预应力锚杆对周围土体的影响,坡底隆起现象消失,发生竖向沉降,位移明显减小,控制在1 mm以内,最大沉降值为0.8 mm,位于坡角处(点10#)。可见,分级加固后,边坡竖向沉降得到了有效控制。

2.5 锚杆和土钉轴力分析

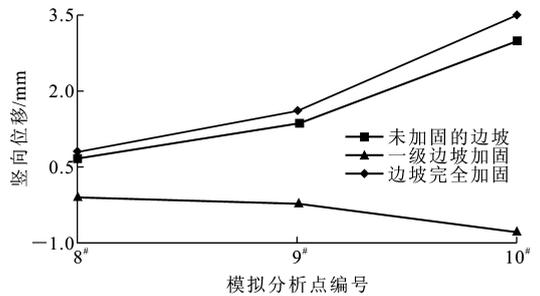
根据土钉工作的机理分析,土钉轴力最大点位于边坡潜在滑动面处,即土钉所受剪力的方向发生



(a) 坡顶



(b) 分级平台



(c) 坡底

图7 边坡竖向位移

Fig.7 Vertical Displacements of Slope

变化的点,因此研究重点是其最大轴力的分布规律。根据数值模拟计算得到的土钉轴力沿长度方向的分布情况见图8。

由图8可知,对于同一根土钉而言,其内力并不均衡,土钉的轴力(拉力)沿其长度变化。其中一级边坡加固后,土钉轴力表现为中间大两边小的规律,呈枣核状。坡底最后一排(第6排)土钉受力明显大于其他排土钉。而随着二级边坡框架预应力锚杆的锚固作用,土钉受力明显降低,最后一排(第6排)土钉所受拉力最大值由64.51 kN降低至10.59 kN。边坡完全加固后,土钉受力呈现由坡顶向坡底逐渐增大的趋势。受力最大的土钉发生在边坡最底部(第6排土钉),说明一级边坡坡底处土体变形最大,为提高边坡的稳定性,设计中应增加此处土钉的设计参数。

预应力锚杆最大轴力在自由段,且在自由段轴力相同,在锚固段逐渐减小,锚杆末端的轴力很小,几乎为0,如图9所示。位于二级边坡中下部的第3

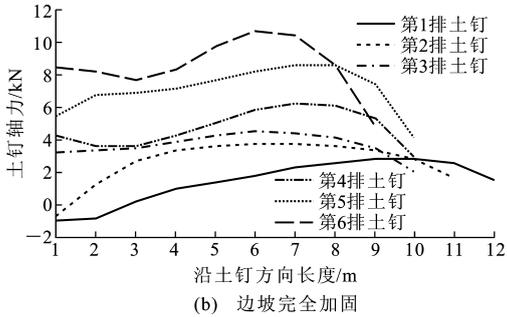
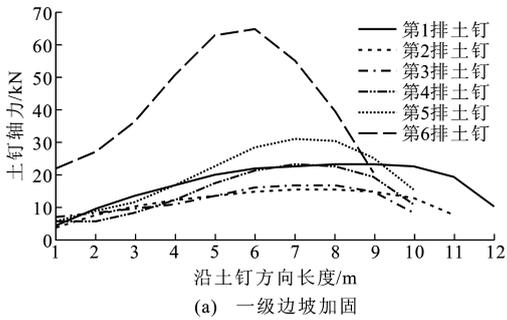


图8 土钉轴力分布

Fig. 8 Shaft Force Distributions on Soil Nailings

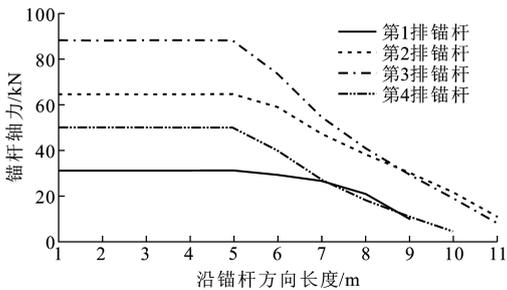


图9 锚杆轴力分布

Fig. 9 Shaft Force Distributions of Anchors

排预应力锚杆轴力最大,为 88.2 kN,而位于二级边坡顶部的第 1 排预应力锚杆轴力最小,为 31.33 kN。为有效提高边坡稳定性,可适当加大二级边坡中部锚杆的预应力。

3 结语

(1)土钉与框架预应力锚杆分级加固后,边坡锚固区域内塑性破坏显著减少,且向坡体内部发展。依据塑性区的分布规律,可推断边坡发生破坏时潜在滑移面的发展趋势。计算得出边坡的安全系数,以此判断是否达到规范要求,从而确定边坡稳定性。

(2)分级支护后边坡位移得到有效控制,坡面水平侧移控制在 8 mm 以内,最大侧移较加固前减少了 55 mm;竖向沉降以坡顶处最大,加固后控制在 10 mm 以内,边坡趋于稳定。

(3)受力最大的土钉和锚杆分别出现在一级边

坡的底部和二级边坡的中部,土钉受力从坡顶到分级平台逐渐增大。得出的土钉、锚杆最大轴力分布规律可为其支护参数优化设计提供科学的理论依据。

(4)边坡分级支护过程中,同一排土钉在不同支护阶段轴力有所变化,一级边坡加固后土钉最大轴力为 64.51 kN,边坡完全加固后最大轴力减小为 10.59 kN,设计时应考虑施工进度的影响。

参考文献:

References:

- [1] ZHU Y P, ZHOU Y. Analysis and Design of Frame Supporting Structure with Pre-stressed Anchor Bars on Loess Slope[R]. Perth: ACMMSM, 2004.
- [2] 李忠, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆边坡支护结构稳定性计算方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3922-3926.
LI Zhong, ZHU Yan-peng. Stability Calculation Methods for Grillage Supporting Structure with Pre-stressed Anchor and Its Application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3922-3926.
- [3] 董建华, 朱彦鹏. 地震作用下土钉支护边坡稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 20-25.
DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng. Stability Analysis of Slope Supported by Soil Nailing Retaining Wall Under Earthquake[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 20-25.
- [4] 苏永华, 赵明华, 李志勇, 等. 基于虚拟试验的边坡失稳概率分析方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 14-19.
SU Yong-hua, ZHAO Ming-hua, LI Zhi-yong, et al. Instability Probability Analysis Method of Slope Based on Dummy Test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(6): 14-19.
- [5] 柳厚祥, 廖雪, 李宁, 等. 公路边坡稳定性分析的二维变分方法[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 7-11.
LIU Hou-xiang, LIAO Xue, LI Ning, et al. Variational Method of Highway Slope Stability Analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 7-11.
- [6] 李伟. 边坡稳定性联合评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(5): 8-11.
LI Wei. Combined Evaluation Method of Slope Stability[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 8-11.
- [7] 王思长, 折学森, 李毅, 等. 基于尖点突变理论的岩质边坡稳定性分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10

- (3):23-27.
WANG Si-chang, SHE Xue-sen, LI Yi, et al. Stability Analysis of Rock Slope Based on Cusp Catastrophe Theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(3):23-27.
- [8] 李 炜, 康海贵. 边坡稳定性模糊随机可靠度分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1):19-23.
LI Wei, KANG Hai-gui. Fuzzy-random Reliability Analysis of Slope Stability[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1):19-23.
- [9] 冯光乐, 凌天清, 许志鸿. 公路边坡支护方案优化设计[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(1):43-47.
FENG Guang-le, LING Tian-qing, XU Zhi-hong. Optimizing Design Method of Highway Slope[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(1):43-47.
- [10] 邵 勇, 覃仁辉. 预应力锚索框架梁边坡支护数值模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(3):307-310.
SHAO Yong, QIN Ren-hui. Numerical Simulation of Slope Supporting for Prestressed Anchor with Frame Beam[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32(3):307-310.
- [11] 徐文杰, 胡瑞林, 骆祥君. 一种新型的软体结构在边坡防护中的应用[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2008, 28(5):86-90.
XU Wen-jie, HU Rui-lin, LUO Xiang-jun. Application of a New Kind of Soft Structure to Slope Protection [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(5):86-90.
- [12] 周 勇, 朱彦鹏. 黄土地区框架预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1):3115-3122.
ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. Sensitivity Analysis of Design Parameters of Grillage Supporting Structure with Prestressed Anchor in Loess Region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1):3115-3122.
- [13] 曾祥勇, 邓安福. 锚索与锚杆联合锚固支护岩坡的有限元分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4):790-794.
ZENG Xiang-yong, DENG An-fu. Finite Element Analysis of Rock Cutting Slope Reinforced by Combined Action of Prestressed Anchor Cable and Anchor Bolt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4):790-794.
- [14] 冯 永, 王琳鸽. 基坑锚杆与土钉复合支护的 FLAC 数值分析[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1):56-61.
FENG Yong, WANG Lin-ge. Numerical Analysis on the Composite Support Technique of Prestressed Anchor Arm and Brad by FLAC[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1):56-61.
- [15] 韩爱民, 李建国, 肖军华, 等. 预应力锚杆框架梁的支护力学行为研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9):2894-2900.
HAN Ai-min, LI Jian-guo, XIAO Jun-hua, et al. Mechanical Behaviors of Frame Beam Supporting Structure with Prestressed Anchors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9):2894-2900.
- [16] 赵 杰, 邵龙潭. 深基坑土钉支护的有限元数值模拟及稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4):983-988.
ZHAO Jie, SHAO Long-tan. Numerical Simulation and Stability Analysis of Soil Nailing Support for Deep Foundation Pit by FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4):983-988.
- [17] 张利洁, 黄正加, 雷 菁. FLAC-3D 在边坡岩体稳定性分析中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(增2):61-64.
ZHANG Li-jie, HUANG Zheng-jia, LEI Jing. Application of FLAC-3D to Stability Analysis of Slope Rock Mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S2):61-64.
- [18] 杨有成, 李 群, 陈新泽, 等. 对强度折减法若干问题的讨论[J]. 岩土力学, 2008, 29(4):1103-1106.
YANG You-cheng, LI Qun, CHEN Xin-ze, et al. Discussion on Strength Reduction Using FLAC[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4):1103-1106.
- [19] GB 50330—2002, 建筑边坡工程技术规范[S].
GB 50330—2002, Technical Code for Building Slope Engineering[S].