

# 深大基坑边坡绿色装配式面层防护结构 受力与变形分析\*

钟立超<sup>1</sup> 蒙 强<sup>1,2</sup> 罗贤民<sup>1</sup> 徐前卫<sup>2</sup> 韩宇峰<sup>2</sup> 蒋承志<sup>2</sup> 谢金利<sup>2</sup>

(1. 广西南宁机场综合交通枢纽建设有限公司, 530048, 南宁; 2. 同济大学交通运输工程学院, 201804, 上海)

**摘 要** [目的] 深大基坑开挖活动会破坏土体原始应力场的平衡状态而产生变形, 采用 GRF (绿色装配式) 面层防护结构能在绿色环保、高效施工的前提下控制基坑变形, 因此需对深大基坑边坡 GRF 面层防护结构的受力与变形性能进行深入研究。[方法] 以南宁国际空港综合交通枢纽深大基坑工程为依托, 采用有限元数值模拟与现场实测相结合的方法, 研究基坑边坡顶部 GRF 面层防护结构, 以及基坑内部桩间 GRF 面层防护结构的受力与变形规律。[结果及结论] 随着基坑开挖深度的增大, 基坑边坡顶部的最大水平位移出现位置逐渐向坡脚方向移动, 最大水平位移为 8.67 mm; 采用 GRF 面层防护结构能有效提高基坑顶部边坡的稳定性, 锚杆能将 GRF 面层所受的部分荷载传递至土层中, 进而减小 GRF 面层的变形与受力; 桩间距对土拱效应发挥的影响较大, 本工程桩间距可提高至 2.5 m 左右, 桩间土拱效应在桩顶下方 7~8 m 处最为明显。

**关键词** 深大基坑; 边坡绿色装配式面层防护结构; 受力; 变形

中图分类号 U213.1+3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.036

## Stress and Deformation Analysis of Green Prefabricated Slope Surface Protection Structure for Deep and Large Foundation Pit

ZHONG Lichao<sup>1</sup>, MENG Qiang<sup>1,2</sup>, LUO Xianmin<sup>1</sup>, XU Qianwei<sup>2</sup>, HAN Yufeng<sup>2</sup>, JIANG Chengzhi<sup>2</sup>, XIE Jinli<sup>2</sup>

(1. Guangxi Nanning Airport Comprehensive Transportation Hub Construction Co., Ltd., 530048, Nanning, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Excavation of deep and big foundation pit destroys the equilibrium state of the original stress field in the soil, leading to ground deformation. Foundation pit deformation can be controlled by adopting GRF (green prefabricated) surface protection structure with the premises of green

environmental protection and high construction efficiency. An in-depth research on stress performance and deformation properties of GRF surface protection structure for deep and large foundation pit is required. [Method] Relying on the deep and large foundation pit project of Nanning International Airport Comprehensive Transportation Hub, a combination of finite element numerical simulation and on-site measurements is employed to study the stress and deformation law of the GRF surface protection structure for foundation pit top slope and the GRF surface protection structure between retaining piles in foundation pit. [Result & Conclusion] With the increase in foundation pit excavation depth, the location of the maximum lateral displacement of foundation pit top slope gradually shifts towards slope toe, with a maximum lateral displacement of 8.67 mm. The use of GRF surface protection structure effectively enhances the stability of foundation pit top slope. Anchor rods help transfer part of the load borne by GRE surface layer to the soil layer, thereby reducing deformation and stress GRF surface layer. The spacing between retaining piles has a great influence on soil arching effect. In this project, retaining pile spacing can be increased to around 2.5 m, and soil arching effect is most obvious at 7-8 meters below the pile top.

**Key words** deep and large foundation pit; slope surface green prefabricated protection structure; stress; deformation

深大基坑开挖活动会破坏土体原始应力场的平衡状态, 当土体抗剪强度下降或应力超过基坑支护体系承载极限时, 基坑就会发生失稳破坏。文献[1-3]针对基坑失稳以及支护结构变形和承载力等方面开展了大量研究, 并提出相关的计算方法和支护措施。传统的支护措施虽然能满足基坑稳定需求, 但存在诸多不足, 如工期长、造价高、建筑材料消耗大, 以及碳排放量增加等<sup>[4]</sup>。鉴于此, 在保证质量安全、节约成本及绿色环保的前提下, 推广应

\* 国家自然科学基金项目(2023YFC3009400)

用 GRF(绿色装配式)防护技术已成为基坑工程的新热点<sup>[5-6]</sup>。目前,针对深大基坑边坡 GRF 防护结构体系受力、变形特性的研究还不够深入。本文依托南宁国际空港综合交通枢纽深大基坑施工实例,深入分析边坡 GRF 面层防护结构体系的力学特性,为深大基坑工程设计与施工服务。

## 1 工程概况

南宁国际空港综合交通枢纽工程(以下简称“枢纽工程”)位于 T2 航站楼与待建的 T3 航站楼之间,该工程区域长度约为 2 000 m,宽度为 400 m。枢纽工程位置图如图 1 所示。枢纽工程集铁路、公路、城市轨道交通、城市公共交通等多种交通方式于一体,并配备完善的社会停车设施,包含地面一层和地下两层。

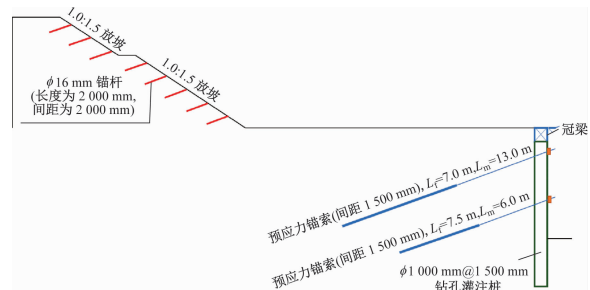


图 1 枢纽工程位置图

Fig. 1 Location map of transportation hub project

枢纽工程基坑长约 1 350 m,采用明挖法施工,分两层开挖。地下一层宽度约为 200 m,深度约为 9.14~11.14 m;地下二层为坑中坑部分,用于修筑铁路与城市轨道交通的换乘车站,宽度约为 70 m,深度约为 18.7~23.2 m。枢纽工程基坑横剖面图如图 2 所示。地下一层采取放坡开挖,分两级台阶,台阶边坡的坡率为 1.0:1.5,边坡宽度为 15.21 m,

高度为 9.14 m。边坡采用 GRF(绿色装配式支护)面层+锚杆支护,锚杆长度为 2 m,间距为 2 m,GRF 面层幅宽为 6 m。地下二层基坑高度为 9 m,采用灌注桩-锚索支护体系,灌注桩直径为 1.0 m,长度为 14.0 m,桩间距为 1.5 m。桩间采用 GRF 面层防护结构示意图,如图 3 所示。



注: $L_f$  为锚索自由段长度;  $L_m$  为锚索锚固段长度。

图 2 枢纽工程基坑横剖面图

Fig. 2 Cross section diagram of transportation hub project foundation pit

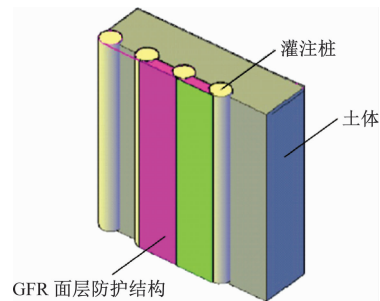


图 3 桩间 GRF 面层防护结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of GRF surface layer protection structure between piles

枢纽工程基坑所在位置地层自上而下依次为素填土<1-3>、粉质黏土<6-1>、黏土<7-1>、角砾土<8-1>、白云质灰岩<10-1>。白云质灰岩内部岩溶发育,溶洞被黏土<5-1>充填。土层物理力学参数见表 1。

表 1 土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical properties of soil stratum

土层	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	泊松比	三轴割线刚度/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
<1-3>	19.39	0.20	30.75	13.40	51.80
<6-1>	19.51	0.30	28.44	8.87	31.79
<7-1>	18.60	0.36	29.16	9.18	17.50
<8-1>	20.58	0.17	105.00	21.45	35.35
<10-1>	26.66	0.17	105.90	20.91	6.37
<5-1>	17.64	0.42	11.40	9.18	17.50

## 2 计算模型

选取 3 根灌注桩,建立灌注桩-土体-桩间 GRF 面层防护结构有限元模型(见图 4),考虑对称性,该模型只包含基坑一半的开挖宽度,即模型外边界到基坑中心距离为 128 m,沿基坑纵向距离为 6 m,高度为 44 m。

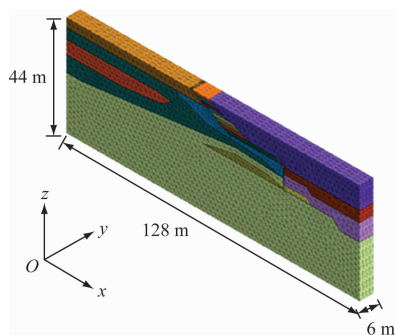


图 4 灌注桩-土体-桩间 GRF 面层防护结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of cast-in-place piles, soil and GRF surface layer protection structure between piles

在有限元计算分析中:地层采用三维实体单元,选择修正 Mohr-Coulomb 本构模型;灌注桩采用梁单元,GRF 面层和底板采用板单元,锚杆、锚索采用弹性植入式桁架单元。边坡土层和防护结构的物理力学参数见表 1 和表 2。

表 2 边坡防护结构的物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical properties of slope protection structure

名称	单元属性	弹性模量/ MPa	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	泊松比
灌注桩	梁单元	$3.45 \times 10^4$	25.0	0.2
GRF 面层	板单元	$2.00 \times 10^3$	22.5	0.2
底板	板单元	$3.25 \times 10^4$	24.5	0.2
压边	板单元	$2.55 \times 10^4$	22.5	0.2
锚索	桁架单元	$1.95 \times 10^5$	77.0	0.3
锚杆	桁架单元	$2.00 \times 10^5$	77.0	0.3

## 3 结果分析

### 3.1 基坑边坡土体变形分析

图 5 和图 6 分别给出了基坑边坡土体竖向和侧向位移云图。由图 5 和图 6 可见:坡顶最大沉降为 9.19 mm,出现在靠近基坑一侧;边坡面侧向位移自上至下不断增大,有侧向滑移的趋势,最大侧向位移为 19.20 mm,出现在边坡面第 7 层锚杆处。

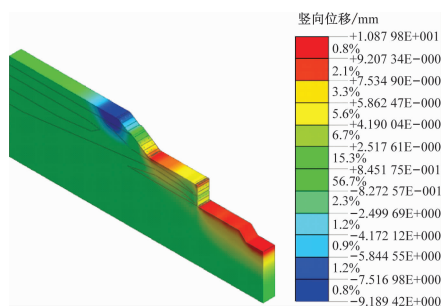


图 5 基坑开挖后边坡土体竖向位移云图

Fig. 5 Vertical displacement nephogram of slope soil after foundation pit excavation

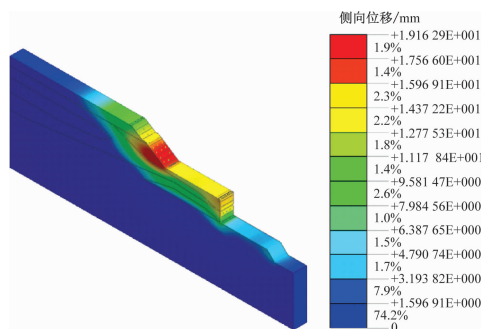


图 6 基坑开挖后边坡土体侧向位移云图

Fig. 6 Lateral displacement nephogram of slope soil after foundation pit excavation

### 3.2 基坑边坡 GRF 面层受力变形分析

图 7 为不同施工步下边坡 GRF 面层的侧向位移。由图 7 可见:在施工步 2—施工步 6 前,开挖土层较浅,坡面侧向位移较小。随着基坑继续开挖,坡面侧向位移沿深度方向逐渐增大,但总体趋势渐缓,呈鼓肚子状,说明 GRF 面层抑制坡体侧向位移的能力进一步提高。

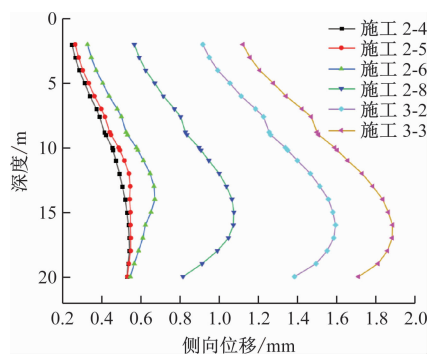


图 7 不同施工步下边坡 GRF 面层的侧向位移

Fig. 7 Lateral displacement of slope GRF surface layer at different construction steps

图 8 为基坑开挖后边坡 GRF 面层最大主应力。由图 8 可以看出:第 7 层锚杆位置处 GRF 面层的主

应力最大,其值为 256.3 Pa,呈受拉状态,这与该位置处 GRF 面层向外鼓出变形最明显相对应。位于第 1 层台阶之上的放坡区域 GRF 面层出现的最大主应力为 -62.8 kPa,这是因为面层本身具有一定的弱刚度,在锚筋拉结作用下,开挖卸荷导致 GRF 面层底端向坑内位移高于顶端,使得该位置处 GRF 面层呈受压状态。

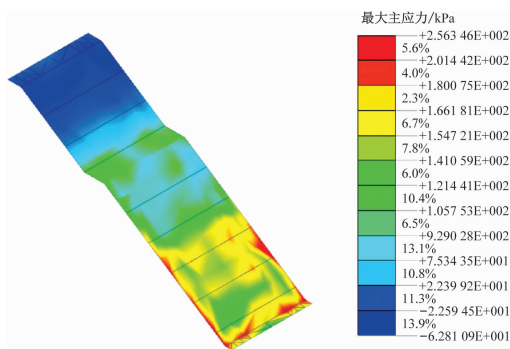
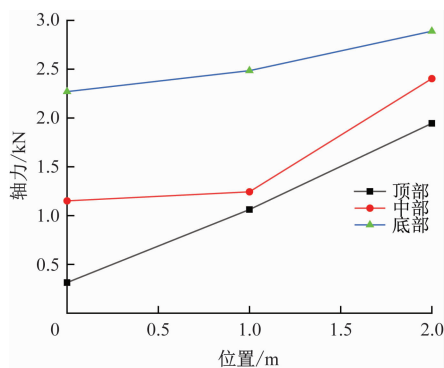


图 8 基坑开挖后边坡 GRF 面层的最大主应力

Fig. 8 Maximum principal stress of slope GRF surface structure after foundation pit excavation

图 9 为基坑开挖后边坡不同位置处 GRF 面层锚杆轴力分布图。由图 9 可见:锚杆主要受拉应力,尤其以边坡底部锚杆最为明显;边坡顶部锚杆靠近自由段一侧轴力相对较小,说明浅层锚杆长度偏短,未能穿过潜在滑动面;边坡中部锚杆靠近自由段一侧轴力上升明显,这与该处距离潜在滑动面更近有关;边坡中部锚杆受力主要集中在锚固段向内 1/3 的范围,且轴力沿锚杆长度方向急剧减小后趋于稳定,符合锚杆受力分布特征<sup>[7]</sup>。



注:靠近原点处为锚杆自由端;远离原点处为锚杆锚固端。

图 9 基坑开挖后边坡不同位置处 GRF 面层锚杆轴力分布图

Fig. 9 Distribution diagram of GRF surface layer anchor rod axial force at different slope positions after foundation pit excavation

### 3.3 基坑防护结构受力分析

图 10 为施工结束后 3 根灌注桩弯矩分布云图。由图 10 可见:灌注桩桩体弯矩反弯点位于桩体与基坑底部交界面处,表现为灌注桩承担基坑开挖面以上朝基坑方向的土压力,以及开挖面以下与之反向的土压力,这与围护桩的挡土功能吻合。

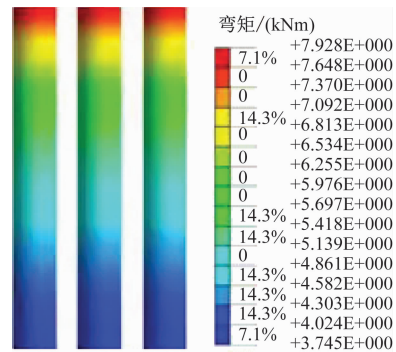


图 10 施工结束后 3 根灌注桩弯矩分布云图

Fig. 10 Bending moment distribution nephogram of three cast-in-place piles after construction completion

图 11 为施工结束后锚索轴向应力分布图。由图 11 可见:第一层锚索在靠近地面锚头位置处轴力相对较大,中部锚索自由段相对较小,底部锚固端一侧应力有所上升,究其原因为该段可能穿过桩身背后土体潜在滑动面,导致锚索体应力升高;第二层锚索轴向应力在靠近地面端较大长度范围内保持平稳,而在接近锚固端时则减至极小值,说明锚固端位于潜在滑移面内侧。

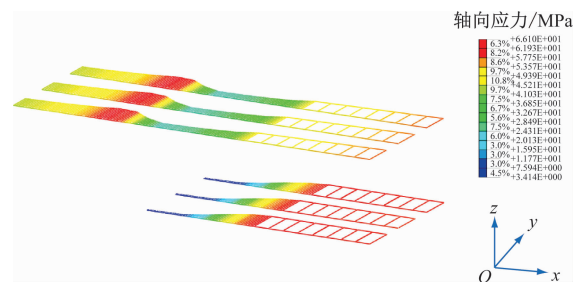


图 11 施工结束后锚索轴向应力分布图

Fig. 11 Distribution diagram of anchor cable axial stress after construction completion

### 3.4 基坑桩-土支护力学效应分析

基坑开挖后,桩间土应力状态发生改变。为方便研究,对垂直于桩身的水平面 ( $Oxy$  平面) 内的土体应力进行分析,将三维问题转化为平面问题。 $Oxy$  平面内土体最大主应力  $\sigma_1$  为:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (1)$$



式中:

$\sigma_x, \sigma_y$ ——沿  $x, y$  方向的应力;

$\tau_{xy}$ —— $Oxy$  平面内剪应力。

其中,土体主应力矢量的方位角满足:

$$\frac{2 \tan \theta}{1 - \tan^2 \theta} = \frac{2 \tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (2)$$

式中:

$\theta$ —— $Oxy$  平面内主应力与  $x$  轴正方向的夹角。

对于桩顶以下 7 m 深度处土体,按照式(1)、式(2)计算得到距离桩身不同位置的土体在  $xy$  平面内的最大主应力分布,如图 12 所示。由图 12 可见:两桩之间紧挨着桩身的土体应力几乎降至 0,而位于桩身背后 1 m 处土体应力升高明显,即基坑开挖后,桩间存在水平向土拱效应,使得侧向土压力向桩身转移。

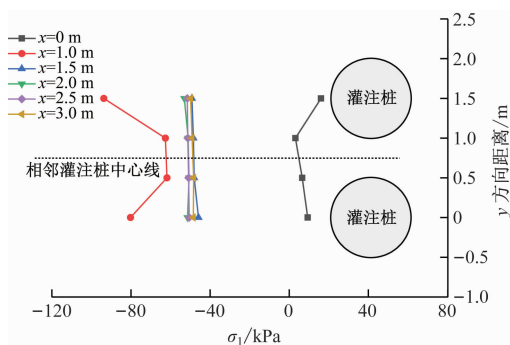


图 12 灌注桩桩身背后土体在  $Oxy$  平面内的  $\sigma_1$  分布

Fig. 12 Distribution of maximum principal stress  $\sigma_1$  in the  $Oxy$  plane of soil behind cast-in-place piles

将两桩中心线上不同位置土体与桩身背后土体最大主应力相比,得到如图 13 所示的不同桩间距下的桩土应力比。由图 13 可以看出:除了桩间距为 1.5 m 的工况,桩土应力比均在基坑外 1.0 m(即桩身表面)处发生明显变化;其中当桩间距增大为

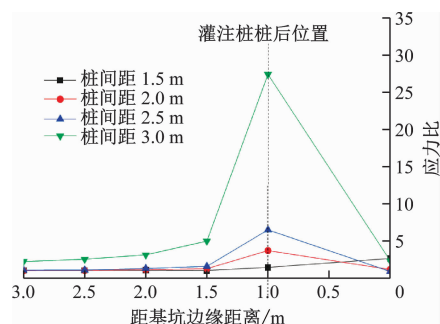


图 13 不同桩间距下的桩土应力比

Fig. 13 Pile-soil stress ratio under different pile spacing conditions

2.5 m 后,桩土应力比变化不再明显,表明此时土拱效应发挥得最好,灌注桩承载力得到有效发挥,而过小的桩间距不能有效成拱。

## 4 实测数据分析

在施工过程中,在基坑边坡顶部和地下二层基坑挡墙处分别布置地面沉降监测点(D365 和 D366),以及坡顶、桩顶及桩身水平位移监测点(S271、S98、B115),以监测基坑边坡顶部和灌注桩顶部的竖向及水平位移,以及灌注桩的挠曲变形。基坑边坡监测断面如图 14 所示。

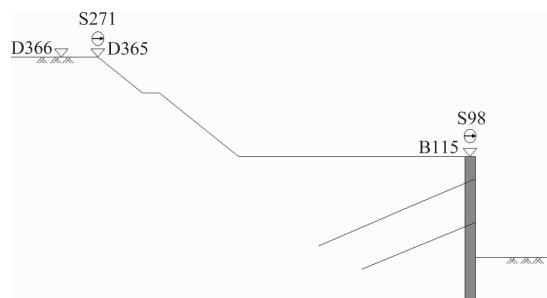


图 14 基坑边坡监测断面

Fig. 14 Monitoring section of foundation pit slope

图 15 为坡顶监测点沉降时程曲线。由图 15 可以看出:坡顶监测点沉降的数值模拟结果与实测结果总体趋势吻合,实测结果跳跃性较大,这与施工期间受到扰动有关。

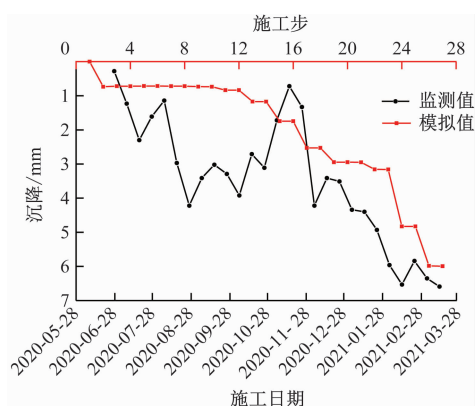


图 15 坡顶监测点沉降时程曲线

Fig. 15 Time-history curves of settlement at slope top measuring points

图 16 为基坑开挖后灌注桩水平位移-深度关系曲线。由图 16 可见:最大水平位移实测值为 7.04 mm,与最大水平位移计算值 7.63 mm 较为接近;桩身水平位移沿深度方向呈不断减小趋势,且桩身较大水平位移主要集中在埋深 9 m 范围内,埋深 9 m

以下桩身水平位移迅速减小,故需对埋深 9 m 以上桩身加强监测,避免水平位移超限。

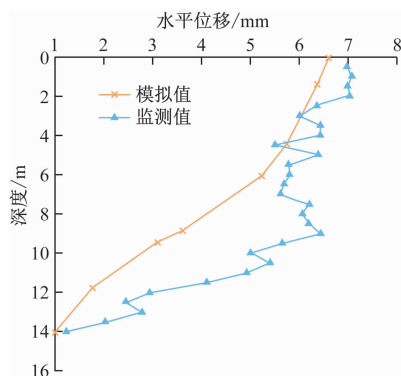


图 16 基坑开挖后灌注桩水平位移-深度关系曲线

Fig. 16 Relationship curves of cast-in-place pile lateral displacement to depth after foundation pit excavation

## 5 结论

1) 基坑深部土体开挖对 GRF 面层边坡的影响较为明显,故在施工到深部区域时,需加强坡体监测与保护。

2) 锚杆能将边坡 GRF 面层所受的荷载传递至土层中,进而减小边坡 GRF 面层的变形与受力,但锚杆具有一定的控制范围,超出其控制范围的 GRF 面层受力需额外关注。

3) 基坑开挖后桩间存在土拱效应现象,故宜对桩间距进行优化,从而充分利用土体自承载作用。本工程中桩间距可提高至 2.5 m 左右。

## 参考文献

- [1] 廖丽萍,朱颖彦,杨志全,等. 中巴喀喇昆仑公路顺层岩质边坡受力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 243.  
LIAO Liping, ZHU Yingyan, YANG Zhiqian, et al. Analysis on rock bedded slope of karakoram highway, Pakistan[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 243.
- [2] 何矾,刘泽,陈丽,等. 坡顶超载下加筋三维网-锚杆防护边坡的模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊1): 2665.

- HE Fan, LIU Ze, CHEN Li, et al. Model test of reinforced three dimensional mat-anchor rod protected slope under overloading on slope top[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S1): 2665.
- [3] 郭楠,陆发,杨校辉,等. 装配式框架预应力锚索支护结构承载特性及装配式框架计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊1): 254.  
GUO Nan, LU Fa, YANG Xiaohui, et al. Bearing characteristics and method of prefabricated for support structure frame-prestressed anchor cable[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S1): 254.
- [4] 刘学武,崔江余,闫会玲. 装配式面层在高填方边坡防护的应用[C]//张可文. 第十二届建筑物建设改造与病害处理学术会议论文集. 北京:施工技术,2018: 137.  
LIU Xuwu, CUI Jiangyu, YAN Huiling. Application of prefabricated surface layer in high fill slope protection[C]//ZHANG Kewen. The 12th Symposium on Building Construction, Reconstruction and Disease Treatment. Beijing: Construction Technology, 2018: 137.
- [5] 彭志勇,武经哲,樊一龙. 绿色装配式技术在基坑临时工程中的应用[J]. 建筑技术, 2023, 54(17): 2085.  
PENG Zhiyong, WU Jingzhe, FAN Yilong. Application of green assembly technology in temporary engineering of foundation pit[J]. Architecture Technology, 2023, 54(17): 2085.
- [6] 刘俊良. 绿色装配式护坡在基坑围护中的施工技术应用[J]. 科技创新与生产力, 2022(11): 61.  
LIU Junliang. Application of construction technology of green prefabricated slope protection in foundation pit support[J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2022(11): 61.
- [7] 王洪涛,王琦,王富奇,等. 不同锚固长度下巷道锚杆力学效应分析及应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 509.  
WANG Hongtao, WANG Qi, WANG Fuqi, et al. Mechanical effect analysis of bolts in roadway under different anchoring lengths and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 509.

· 收稿日期:2023-09-25 修回日期:2024-02-02 出版日期:2024-08-10  
Received:2023-09-25 Revised:2024-02-02 Published:2024-08-10  
· 第一作者:钟立超,高级工程师,285125070@qq.com  
通信作者:徐前卫,副教授,xuqianwei@tongji.edu.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao.umt1998.com