

# 土岩组合地层地铁深基坑土钉墙支护轴力分析

王珂,王立峰,韦康,寿凌超

(浙江科技学院 土木与建筑工程学院,杭州 310023)

**摘要:** 为研究土钉墙支护在土岩组合二元地层地铁深基坑的受力特性,以金华市地铁深基坑秦塘站为背景,通过现场监测、理论分析与有限元数值模拟等方法对土钉墙支护轴力展开研究。首先,根据监测结果分析得到土钉沿钉长方向的轴力分布:在土质相对较差的黏土层中,土钉轴力沿钉长方向分布呈中间大、两头小的形式;在岩土层内,土钉轴力主要集中在钉头附近,轴力相对较小。然后,拟合得到边坡最危险滑裂面在见岩面附近存在拐点。最后,通过 Midas GTS NX 有限元软件分析得到,随着岩面高度的变化土钉轴力最大值大体呈线性发展。因此,对于土岩组合二元地层,根据岩面深度分布,当见岩面离地表较近时,结合土钉墙被动受力的特点可以适当调整土钉配筋或减少土钉道数;当见岩面离地表较远时,可适当增加土钉长度和土钉道数。研究表明,土钉支护在土岩二元地层中能够对土岩界面处土体起到良好的支护作用,这可为后续相似地质条件基坑工程的设计和施工提供一定的参考。

**关键词:** 土岩组合;见岩面;土钉轴力;滑裂面;有限元

**中图分类号:** TU432

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2021)05-0399-09

## Axial force analysis of soil nailing wall support for deep foundation pit of subway in soil-rock combination stratum

WANG Ke, WANG Lifeng, WEI Kang, SHOU Lingchao

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to probe into the mechanical characteristics of soilnailing wall support in a deep foundation pit of subway in a binary soil-rock combination stratum, the axial force of soilnailing wall support was studied through on-site monitoring, theoretical analysis and finite element numerical simulation by taking the Jinhua subway deep foundation pit Qintang Station as the background. First, according to the analysis of the monitoring results, the axial force distribution of soil nails along the nail length direction was obtained: in a clay layer with

**收稿日期:** 2020-09-23

**基金项目:** 浙江省金华市科技局计划项目(0401104117)

**通信作者:** 王立峰(1968—),男,安徽省宿州人,教授,博士,主要从事地基处理、深基坑工程学研究。E-mail: wanglfzust@163.com。

relatively poor soil quality, the axial force of soil nails along the nail length direction is distributed in the form of large in the middle and small at both ends; in the rock and soil layer, the axial force of soil nails is mainly concentrated near the nail head, with relatively small axial force. Second, the fitting results show that the most dangerous slip surface of the slope has an inflection point near the rock surface. Finally, the analysis of MIDAS GTS NX finite element software reveals that the maximum axial force of soil nailing develops approximately linearly with the change of rock surface height. Therefore, for the soil-rock combination binary formation, the depth distribution of the rock surface is different; when the rock surface is close to the ground surface, the soil nailing reinforcement can be appropriately adjusted or the number of soil nailing can be reduced according to the characteristics of the passive force of the soil nailing wall; when it is far away, the length of soil nails and the number of soil nailing can be appropriately increased. The results show that the soil nailing support in the soil-rock binary stratum can play a good role in supporting the soil at the soil-rock interface, and provide a certain reference for the subsequent design and construction of foundation pit projects with similar geological conditions.

**Keywords:** soil-rock combination; the rock surface; axial force of soil nailing; critical slip surface; finite element

土钉墙支护由于其经济、可靠和施工快速简便等优点得到迅速推广和应用<sup>[1]</sup>。研究者通过现场测试、理论研究及有限元模拟等方式,对土钉墙支护的工作性状、内力特性等进行了大量的探索。国外,最早关于土钉墙的记载是 1972 年法国凡尔赛附近铁路路基的边坡工程中使用了土钉墙支护技术<sup>[2]</sup>;之后 Juran<sup>[3]</sup>提出了土钉墙机动分析方法。国内对土钉墙支护结构的工作机制研究,多为从土钉抗拔承载力和土钉墙稳定性两方面展开。土钉墙的内力主要包括土钉轴力、钉土剪力和面层受力,其中关于单根土钉轴向拉力计算方法,目前常用的是根据经典朗肯(Rankine)土压力理论得到的沿深度自上而下呈线性增大的规范法<sup>[4]</sup>。然而由于规范法计算所得自上而下线性增大的结论与实测结果相差较大,有一部分研究者根据土钉施工特性及实测结果提出了土钉轴力增量算法<sup>[4-6]</sup>、土钉支护体系增量解析法<sup>[7]</sup>和考虑土拱效应的边坡桩间土钉墙受力算法<sup>[8]</sup>等。在土钉墙面层土压力早期研究中部分研究者假定其不受力,在土钉轴力计算过程中根据工程经验及理论研究得到土钉墙面层力与土钉轴力的关系及其计算方法<sup>[9]</sup>。而土钉墙变形的过程是土钉、面层和土体之间相互协调共同作用的过程。因此为了研究三者之间的关系,郑晓静等<sup>[10]</sup>结合实际工程案例对既有土钉墙支护基坑加深加固设计及变形展开分析;此外还有研究者<sup>[11-13]</sup>通过极限平衡法对土钉墙内部稳定性及潜在最危险滑裂面的变化形态展开研究,或用有限元法分析探讨土钉墙支护体系的变形特性和稳定性<sup>[14-15]</sup>。而由于不同地质条件下土钉墙支护的受力特性往往存在极大的差异性,许多研究者针对不同的地质环境,例如软弱土层<sup>[16]</sup>、黄土地区<sup>[17]</sup>、风化凝灰岩<sup>[18]</sup>的土钉墙支护特性展开研究。

土钉墙支护在民建开挖深度较浅的基坑中较为常见,但在土岩组合的特殊地质条件下应用到地铁基坑中相对较少。一般而言,地铁基坑较为规整,长宽比较大,与民建基坑有较大不同,为全面研究土钉墙支护形式在土岩组合地质条件下的工作机制与支护工作性状,本研究通过对金华市某地铁深基坑土钉墙支护进行现场测试、理论分析和有限元计算,研究土钉墙支护结构在土岩组合地质条件下施工全过程的内力特性,探索土钉墙支护结构在土岩组合特殊地质条件下的轴力时空分布规律和作用机理。

## 1 工程概况和现场实测

### 1.1 工程概况

金华市秦塘地铁站车站主体布置在城北路与国贸大道交叉口西北侧(城北路与口岸路交叉口东南

侧),平行于国贸大道和口岸路方向呈一字形布置。车站周边主要为金华海关义乌驻地、现状厂房及汽车 4S 店(已拆除),站点周边尚待开发。城北路道路红线宽 60 m,现状道路宽 60 m,国贸大道道路红线宽 60 m,现状道路宽 60 m,均属于城市干道,车流量较大,另外口岸路道路红线宽 22 m,现状道路宽 12 m,为双向两车道。场地地表水发育较弱,钻探显示勘探深度范围内地下水类型主要可分为松散岩类孔隙潜水(以下简称潜水)和基岩裂隙水。场地潜水主要为赋存于第四系松散地层的孔隙水,潜水水量较小,勘察期间测得钻孔内地下水水位高程为 58.59~73.29 m,埋深为 4.5~20.5 m。基岩裂隙水赋水空间较小,水量较小,对本工程影响较小。

秦塘站主体结构长为 305.5 m,宽为 43.3~48.2 m,开挖深度为 17.5~22 m,车站范围内地质情况自上而下主要为素填土、粉质黏土、强风化泥质粉砂岩,车站基底位于中风化泥质粉砂岩中,见岩面高度约为-4.38 m,土层基本物理力学参数见表 1。

表 1 土层基本物理力学参数  
Table 1 Basic physical and mechanical parameters of soil layer

土层名称	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/(kPa)	内摩擦角/(°)	弹性模量/(MPa)	泊松比
素填土	16.0	10.0	20.6	5	0.32
粉质黏土	19.4	14.4	40.3	10	0.32
全风化泥质粉砂岩	20.5	25.0	25.0	20	0.30
强风化泥质粉砂岩	19.4	30.0	25.0	30	0.30
中风化泥质粉砂岩	25.6	50.0	35.0	70	0.25

1.2 围护结构方案

基坑南北两侧存在约 7 m 的高差,基坑标准段南北两侧采用不同的支护方案,其中基坑北侧采用土钉放坡加桩锚支护,南侧采用二级土钉墙放坡支护。我们主要针对南侧土钉墙放坡支护展开研究,南侧采用土钉墙支护,第一级坡高为 6.7 m,坡度为 1:0.75,设 4 道土钉,钉长均为 6 m,孔径为 100 mm,间距为 1.5 m,倾角为 15°,坡面挂网喷混凝土。地质剖面图和轴力监测布置如图 1 所示,每排土钉各设置 3 个监测点,各监测点之间的距离为 1.5 m。第 1 道和第 2 道土钉位于素填土和粉质黏土中,第 3 道和第 4 道土钉位于粉砂岩层中。

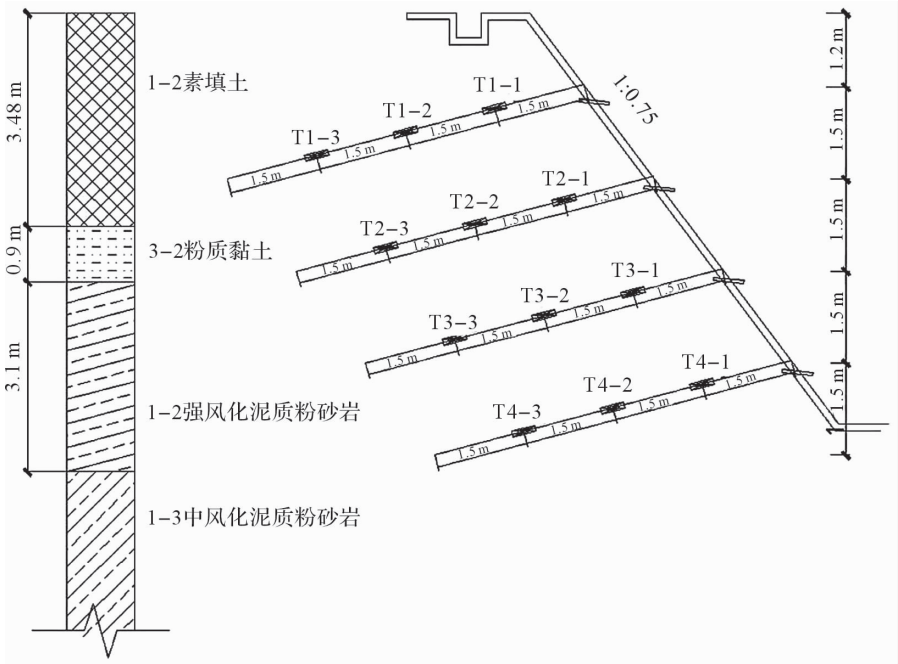


图 1 地质剖面图和轴力监测布置

Fig. 1 Geological profile and axial force monitoring layout

## 2 土钉轴力实测结果分析

### 2.1 土钉轴力变化分析

基坑开挖过程中,荷载通过钉土摩擦作用及面层与土钉的拉拔作用,逐步施加并转移到土钉上<sup>[19]</sup>。由于土钉墙边开挖边支护的特点,土钉轴力与墙后土体变形等都具有较强的开挖效应。该工程南侧某典型剖面现场实测各道土钉轴力随时间和基坑开挖深度的变化情况如图 2 所示,由图可以看出:

1)在基坑开挖过程中,4 道土钉轴力随着基坑的开挖均呈增长的趋势,开挖初期土钉轴力分布较均匀,随着开挖的进行,土钉轴力逐渐呈现中间大、两端小的规律,4 道土钉最大轴力值为 14.52 kN,第 2 道土钉轴力远大于其余 3 道土钉轴力。由图 1 所示地质剖面可以看出,见岩面位于地表以下约 4.38 m 处,第 1、2 道土钉位于土质条件相对较差的土层中,轴力较大,第 3、4 道土钉位于土质条件较好的粉砂岩层内,轴力相对较小。

2)第 2 道土钉轴力随着土体的开挖,整体上呈增大的趋势,尾部轴力点 T2-3 轴力最大值较小,而 T2-1、T2-2 则快速增长,其最大轴力值约为 T2-3 轴力值的 3~7 倍。土钉墙第 1 道和第 2 道土钉位于较差土层,总体而言所受土压力较大,传递到土钉尾部的拉力也较大,而位于岩石中第 3 道和第 4 道土钉墙侧向主动土压力较小,因此承受较小的拉力。

3)在开挖后期,4 道土钉均存在轴力值减小的趋势,其原因是随着底板浇筑完成,产生了约束外部土体的变形,因此土钉在后期出现轴力减小的趋势。

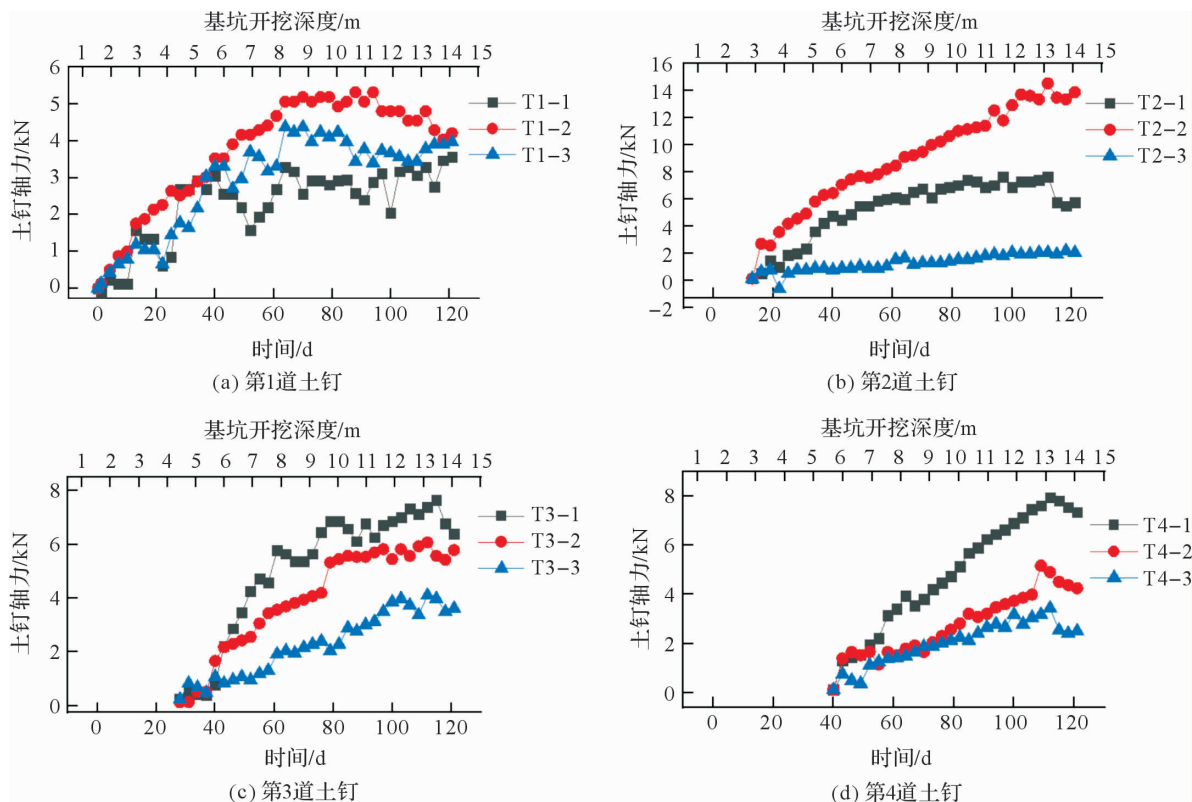


图 2 土钉轴力时程曲线图

Fig. 2 Time history curve of soil nail axial force

对各典型开挖阶段的土钉轴力最大值做进一步分析,表 2 为各开挖阶段土钉轴力最大值统计。随着基坑的开挖,第 2 道土钉 T2-2 测点轴力一直呈增长趋势,初期轴力增长速率较大,开挖至 -4.5 m 处时,土钉轴力增大至 8.19 kN 左右,为开挖到底时轴力值的 59.12%;第 3 道土钉轴力最大值点 T3-1 在置入土钉后开挖至 -4.5 m 处时,土钉轴力增至 5.47 kN,为开挖到底时轴力值的 81.4%。结

合表2中土钉轴力增长速率可以看出,T2-2和T3-1测点处随着土钉与开挖面之间距离的增大,每开挖1 m土钉轴力增长值均越来越小,但是T2-2测点处土钉轴力增长速率在各开挖阶段均大于T3-1测点处,上部土钉轴力增长更明显,这是因为第2道土钉位于土质条件相对较差的土层中,而第3道土钉则位于粉砂岩层中。

表2 各开挖阶段土钉轴力最大值统计

Table 2 Statistics of maximum axial force of soil nail in each excavation stage

施工阶段	轴力/kN		速率/(kN·m <sup>-1</sup> )	
	T2-2	T3-1	T2-2	T3-1
开挖至-3.0 m	0	—	—	—
开挖至-4.5 m	8.2	0	5.47	—
开挖至-6.0 m	10.0	5.78	1.20	3.59
开挖至-6.7 m	11.4	6.85	2.00	1.53
二级放坡,开挖至-10.2 m	12.5	7.00	0.31	0.04
开挖至-13.7 m	14.52	7.40	0.57	0.05
底板施工	13.9	6.39	—	—

图3为基坑开挖完成后实测土钉轴力分布,在深度方向,位于见岩面上下的第2、3两道土钉轴力值及其分布相差悬殊,这有别于一般土质地区基坑土钉支护实测规律。对于一般黏土、粉砂土地区,土钉墙支护最大轴力值发生在基坑边坡中部<sup>[20-21]</sup>。

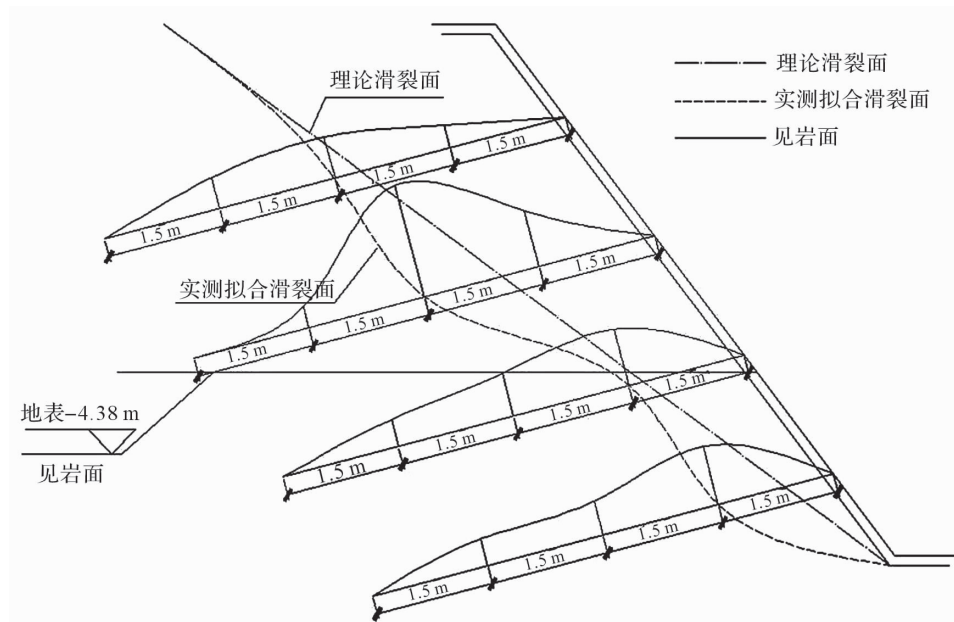


图3 实测土钉轴力分布

Fig. 3 Axial force distribution of soil nail measured

土岩组合地质基坑深为13.7 m,最大轴力值为14.52 kN,位于土质条件较差土层内的第2道土钉轴力值远大于位于粉砂岩层内的第3道土钉轴力值,土钉墙支护最大轴力值点发生在见岩面附近。通过计算得到4道土钉最大轴力比值分别为:36.7%、100%、52.7%、53.7%,其中第2道土钉轴力最大,第3道土钉最大轴力值仅为第2道的52.8%。而如图3所示,其中一条曲线表示经典的朗肯主动土压力理论求得的理论滑裂面,滑裂面与水平面的夹角为 $45^\circ + \varphi/2$  ( $\varphi$ 为土层内摩擦角),另一条为根据实测土钉轴力最大值结果拟合得到的边坡最危险滑裂面;由实测可知,土岩组合地质条件下土钉墙支护最危险滑裂面不是一条光滑的曲线,在见岩面附近存在拐点,与均匀土层相比,见岩面以上外移,见岩面以下内移。这与土岩的地质条件相符,见岩面以上土钉轴力较大,见岩面以下土钉轴力较小,因此对土岩组合地质条件下土钉墙支护,可根据见岩面高度来调整位于不同土层内的土钉长度、道数

等,对土钉进行优化设计。

## 2.2 土钉轴力在空间上的变化

各道土钉在不同开挖阶段沿土钉长度方向轴力分布如图 4 所示,在基坑开挖过程中,各道土钉整体上表现为中间大、两端小的受力形式,其中第 1、3、4 道土钉轴力较小,第 2 道土钉轴力增长迅速,第 3、4 道土钉在埋设初期轴力变化幅度不大,相比前两道土钉轴力最大值所在位置略靠近钉头,整体上仍表现为中间大两头小。这是由于第 3、4 道土钉位于岩土层内,岩石变形较小,内部岩石与土钉的相互作用则更小,土钉刚刚开始发挥作用即可承受全部的主动土压力,轴力值最大值处较靠近面层一侧,因此靠近下部和岩石层的土钉长度可适当减小。总之,位于上部土质条件略差的黏土层中的土钉轴力相对较大,且随着基坑的开挖,轴力始终保持增长的趋势;位于下部土质条件较好的岩土层内的土钉,除埋设初期的轴力有相对明显的增长外,后期轴力值基本上趋于稳定。

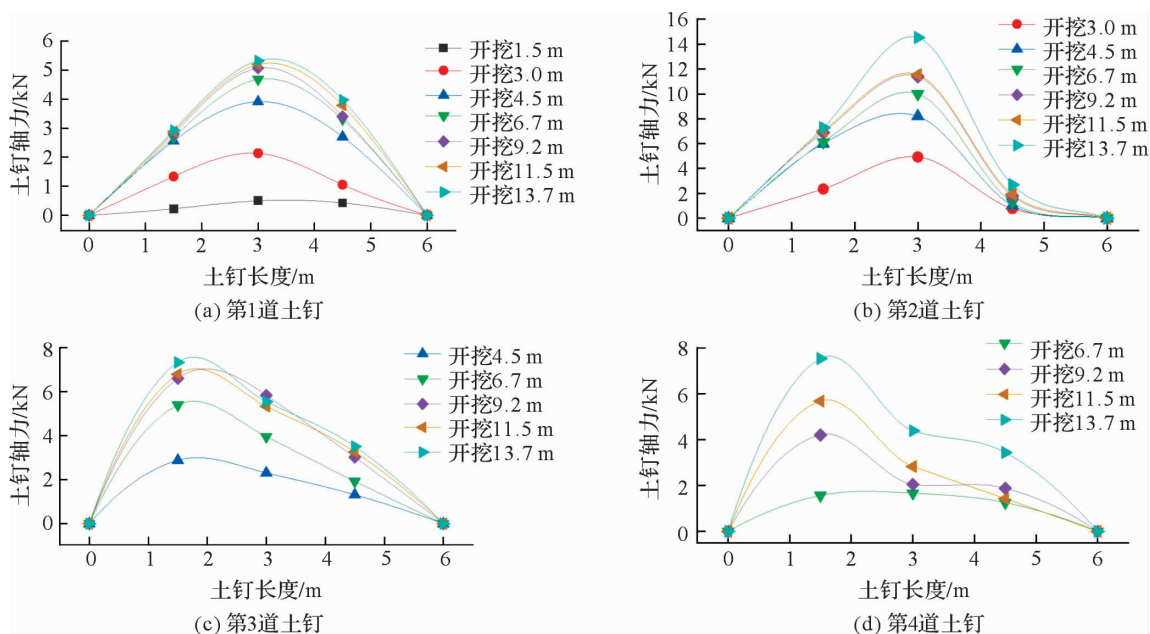


图 4 土钉轴力沿钉长方向分布图

Fig. 4 Distribution of soil nail axial force along nail length

## 3 土钉墙有限元分析的建立与分析

### 3.1 模拟工况与网格划分

本研究采用 Midas GTS NX 进行建模分析,土体采用修正摩尔-库伦本构模型,土钉采用线弹性材料模型,土体采用实体单元模拟,土钉采用桁架单元模拟,土钉与土体间的作用力通过添加接触单元模拟。其中模型土层参数根据表 1 取值,结构计算参数见表 3。根据基坑开挖影响范围设置边界条件分别为:在水平方向距基坑边界  $2.5H$  ( $H$  为基坑开挖深度)处控制  $x$ 、 $y$  方向的变形为 0;在竖直方向距坑底  $3H$  处控制  $z$  方向的变形为 0。

表 3 结构计算参数

Table 3 Structural calculation parameters

构件名称	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	截面参数/m	泊松比
土钉	78.5	27 200	直径 0.10	0.25
土钉面层	25.0	20 452	厚 0.10	0.30
底板	25.0	31 500	厚 0.75	0.20

结合工程实例所处地质条件,为研究见岩面高度对土钉支护的影响,在保证支护形式不变的情况下,我们通过调整见岩面高度来分析不同地质条件下土钉墙的作用性状,模拟工况类型见表 4。



表4 模拟工况类型

Table 4 Simulation condition types

工况	说明
工况 1	二级放坡,4道土钉钉长6 m,排间距1.5 m,见岩面高度为地表-4.38 m
工况 2	二级放坡,4道土钉钉长6 m,排间距1.5 m,见岩面高度为地表-3.00 m
工况 3	二级放坡,4道土钉钉长6 m,排间距1.5 m,见岩面高度为地表-6.00 m
工况 4	二级放坡,4道土钉钉长6 m,排间距1.5 m,见岩面高度为地表-7.50 m
工况 5	二级放坡,4道土钉钉长6 m,排间距1.5 m,见岩面高度为地表-9.00 m

数值计算过程按实际施工顺序进行,在基坑开挖前对模型进行重力作用下的平衡计算,获得土体的初始应力状态;开挖过程共分15步,挖至坑底后,进行稳定性计算,得出其安全系数,以保证见岩面调整后基坑的稳定性。三维有限元模型如图5所示。

### 3.2 模拟与实测结果比较

工况1为实际工况模拟,见岩面高度为地表-4.38 m,图6为工况1有限元计算中开挖完成后各排土钉轴力分布,对比图3所示实测土钉轴力分布情况可以看出,各道土钉轴力和分布与实测拟合较好,最大土钉轴力均出现在第2道土钉处,模拟最大轴力值为9.22 kN,与实测轴力较为接近,沿钉长方向土钉轴力分布规律与实测分布曲线吻合较好。

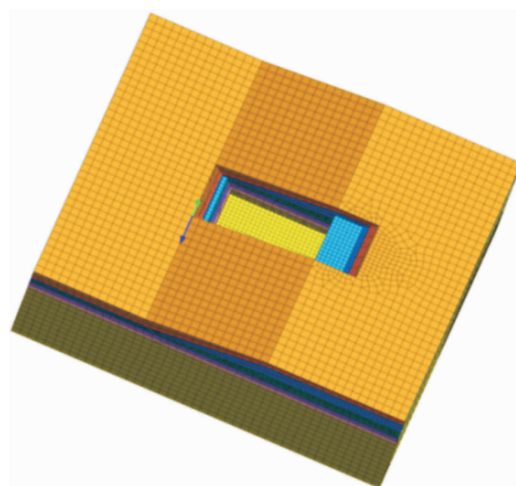


图5 三维有限元模型

Fig. 5 Three-dimensional finite element model

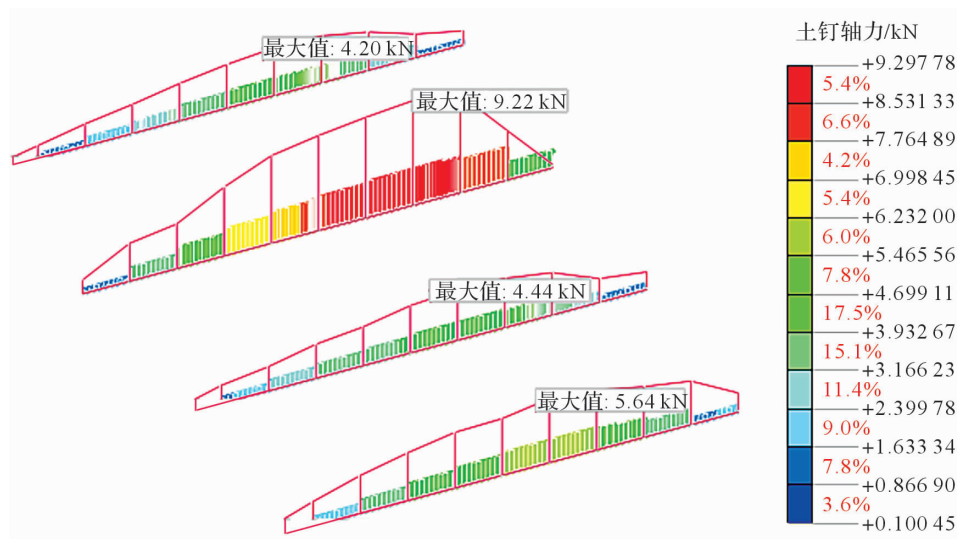


图6 工况1土钉轴力分布

Fig. 6 Axial force distribution of soil nail in working condition 1

### 3.3 见岩面高度

在金华地区土岩组合地质下,见岩面分界线上下土质条件相差较为悬殊,故通过工况2~5调整见岩面高度,以研究土岩组合地质条件下土钉受力特征。实际地质条件见岩面高度为地表-4.38 m,工况2~5见岩面高度分别为地表-3.48、-6.00、-7.50、-9.00 m。通过有限元法计算基坑开挖过程中的安全系数,其结果满足安全要求。

图7为工况2~5的4种不同见岩面高度的轴力计算结果,当见岩面位于地表-3.48 m时,第2道土钉轴力值最大,且最大值仅为6.18 kN;当见岩面位于地表-6.00 m时,第2、3道土钉轴力值均较大,最大值约为13.80 kN;当见岩面位于地表-7.50 m时,第3道土钉轴力最大,且最大值约为20.23 kN;当

见岩面位于地表-9.00 m 时,第 4 道土钉轴力最大,且最大值约为 25.61 kN。由图 7 可知,见岩面越低,墙后土体所受主动土压力越大,土钉轴力越大,土钉轴力最大值向下部移动,最大值位置在见岩面附近,且在深度方向土钉轴力分布相对较均匀,整体上呈现基坑中部土钉轴力大,上下部较小的规律;而见岩面较高时,土钉拉力在上部最大,中、下部较小,不能很好地发挥下部土钉的作用。

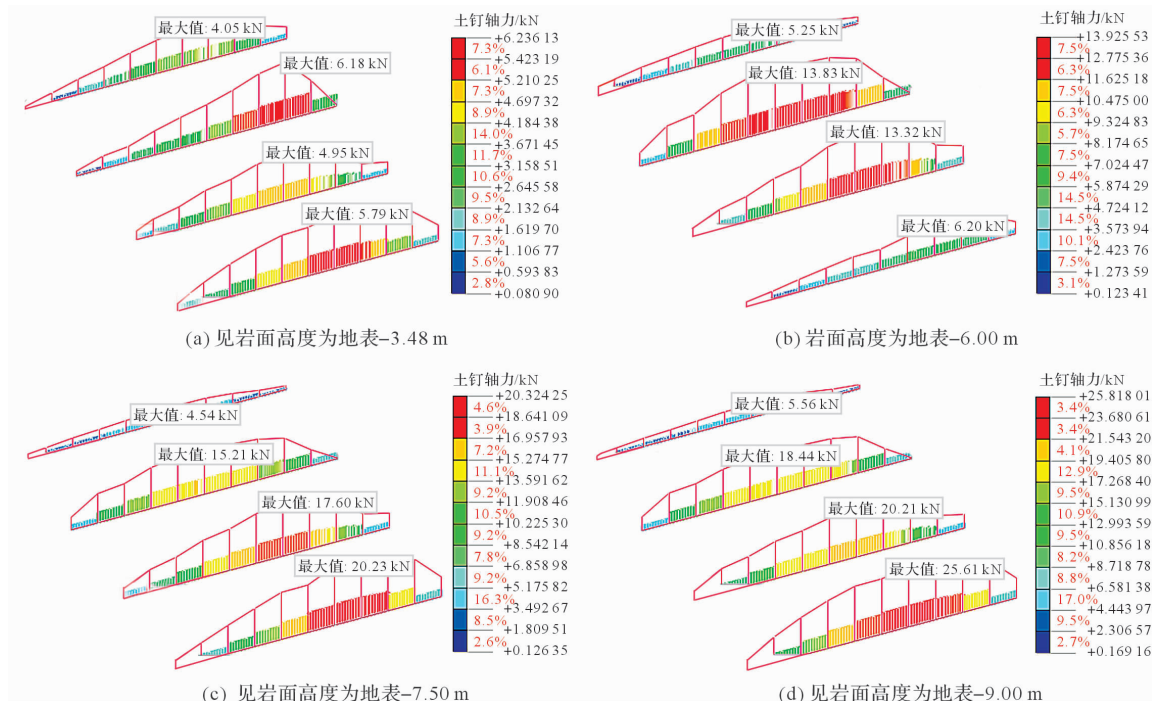


图 7 工况 2~5 土钉轴力分布

Fig. 7 Axial force distribution of soil nail in working conditions 2-5

图 8 为各道土钉轴力与见岩面关系,由图可知,当见岩面较高时,第 2 道土钉轴力值最大;随着见岩面越来越低,第 1 道土钉轴力基本上保持不变,第 3、4 道土钉轴力值迅速增长,第 2 道土钉最大轴力值增长趋势较为缓慢,即见岩面高度的变化对基坑顶部土钉轴力影响相对较小,而对见岩面附近的土钉轴力值影响较大;整体而言,随着见岩面降低,下部土钉轴力会越来越大,例如当见岩面高度由-4.38 m 变化为-9.00 m 时,第 2 道土钉最大轴力增长 63.8%,而第 3 道土钉轴力增长了 351.2%。

为进一步分析土钉轴力随见岩面高度的变化规律,根据各工况下土钉最大轴力值变化情况得到图 9 所示工况 1~5 轴力变化情况,从图中可以看出,最大值随见岩面高度下降,土钉轴力大致呈线性增大,见岩面每下降 1 m 土钉轴力值增加约 3.88 kN。

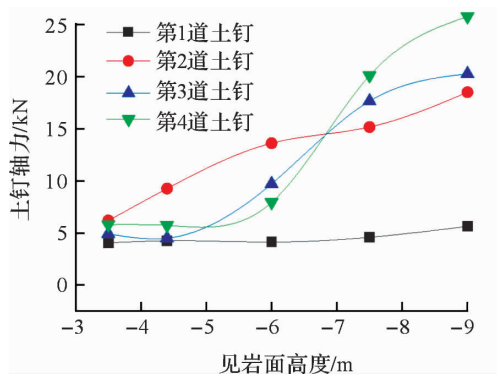


图 8 各道土钉轴力与见岩面关系

Fig. 8 Relationship between axial force of each soil nail and rock surface

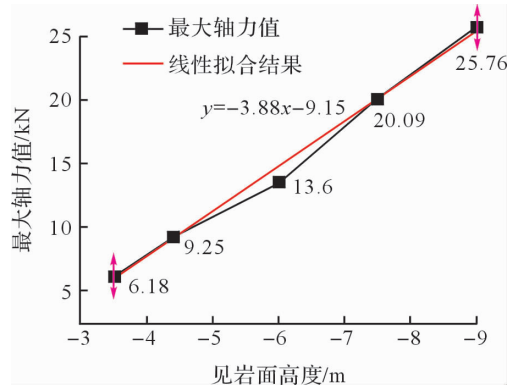


图 9 工况 1~5 土钉轴力变化情况

Fig. 9 Variation of axial force of soil nail in working conditions 1-5



## 4 结 论

本文通过对金华市秦塘站地铁基坑土钉墙支护的实测结果与有限元模拟,研究了土岩组合二元地层深基坑土钉墙支护土钉轴力随基坑开挖和见岩面高度的变化关系和分布规律,得出如下结论:

1)有限元分析可以很好地模拟土钉轴力分布规律,与现场监测结果吻合较好。基坑开挖过程中,土钉墙支护各排土钉轴力呈逐渐增大的趋势,在土钉设置初期至下一步开挖时增大较明显。

2)在土质相对较差的黏土层中,土钉轴力沿钉长方向呈中间大、两头小的分布形式,而在土质较好的岩土层内,土钉轴力主要集中在钉头附近,岩层内部轴力较小,实际拉力远小于土钉抗拔力设计值,故设计时可以考虑进一步优化以适当减小岩层内的土钉长度。根据轴力最大值拟合得到的土钉墙最危险滑裂面不是一条光滑的曲线,在土岩界面处存在拐点,与均匀土层相比,界面以上外移,界面以下内移。

3)见岩面上下排土钉承担的土压力存在较大的差异,土钉轴力最大值发生在见岩面附近,对于土岩组合地质条件,见岩面离地表深度可以作为土钉支护设计的重要指标,当见岩面高度离地表较近时,结合土钉墙被动受力的特点可以适当调整土钉配筋或减少土钉道数。

## 参考文献:

- [1] 陈肇元,崔京浩.土钉支护在基坑工程中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [2] BRUCE D A, JEWELL R A. Soil nailing: application and practice[J]. Ground Engineering, 1986, 11(9): 10.
- [3] JURAN I, BAUDRAND G, FARRAG K, et al. Kinematical limit analysis for designing of soil nailed structures[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 116(1): 54.
- [4] 中国建筑科学研究院.建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—99[S].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [5] 杨光华,黄宏伟.基坑支护土钉力的简化增量计算法[J].岩土力学,2004(1):15.
- [6] 杨光华.土钉支护中土钉力和位移的计算问题[J].岩土力学,2012,33(1):137.
- [7] 阙云,黄瑞,林沛元,等.简化增量法计算土钉轴力的模型准确性分析[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):158.
- [8] 郭院成,李明宇,张艳伟.预应力锚杆复合土钉墙支护体系增量解析方法[J].岩土力学,2019,40(增刊1):253.
- [9] 李登峰,赵晓彦,胡卸文,等.考虑土拱效应的边坡桩间土钉墙受力计算[J].中国公路学报,2018,31(5).
- [10] 王立峰.土钉墙面层土压力的计算分析[J].岩土力学,2010,31(5):1615.
- [11] 郑晓静.既有土钉墙支护基坑加深加固设计及变形分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(12):115.
- [12] 余金,程祖锋.浅析土钉墙内部稳定性计算的几种方法[J].工程建设与设计,2018(17):64.
- [13] 李建军,冯振桥,董洁,等.土钉墙潜在破裂面确定方法[J].中北大学学报(自然科学版),2017,38(2):133.
- [14] 郭红仙,周鼎.软土中基坑土钉支护稳定性问题探讨[J].岩土力学,2018,39(增刊2):398.
- [15] 孙林娜,徐福宾.水泥土墙复合土钉墙的协同作用机理数值模拟[J].华侨大学学报(自然科学版),2020,41(3):314.
- [16] 何渊,廖瑛.深基坑土钉支护结构的稳定性分析及三维有限元数值模拟[J].苏州科技大学学报(工程技术版),2017,30(2):6.
- [17] 赵永志.软弱土层深基坑支护中加强型土钉墙的应用[J].低碳世界,2021,11(2):119.
- [18] 邳彬,武李和乐,王晟博,等.黄土地区超深基坑复合土钉支护受力分析及优化建议[J].建筑结构,2020,50(21):126.
- [19] 严耿明,黄建华.风化凝灰岩土钉支护基坑工程的数值分析和模拟[J].福建建筑,2020(5):75.
- [20] 刘国彬.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:283.
- [21] 吴超凡,邱占林,杨为民,等.基坑土钉拉力现场试验研究[J].工业建筑,2012,42(6):112.
- [22] 张钦喜,段勇刚,李继红,等.CNC 科研中心办公楼土钉拉力现场监测研究[J].岩土工程学报,2010,32(增刊2):545.