

## 上土下岩地铁车站基坑变形及支护参数分析

姜君霖<sup>1</sup>, 孔令瑞<sup>2</sup>, 赵建锋<sup>1,\*</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 中铁二十三局集团第一工程有限公司, 日照 276826)

**摘要:**以青岛某地铁站的上土下岩深基坑支护工程为例,通过分析各开挖工况下的监测数据总结深基坑开挖的变形特性,并运用数值模拟软件对支撑预加轴力、竖向间距及桩体刚度进行分析,从而提出优化措施。研究结果显示:在开挖上部浅层土体时,对基坑围护结构及周边地表沉降的影响较小;而当粉质黏土层及风化程度较高的岩层开挖时,会导致基坑围护结构产生较大水平位移增量,其变形量约占最大水平位移量的 23%~58%。相较于常规软土基坑,上土下岩的桩体最大水平位移位置上移,最大水平位移值减小,且基坑变形存在显著的空间效应。改变钢支撑的预加轴力对其附近的桩体变形产生影响较大,对于本工程而言,采用 50%~75% 的支撑轴力标准值对基坑变形控制和基坑整体稳定性效果较好。相较于上部土层,将支撑位置架设在土岩交界面附近,可有效限制土层中桩体水平位移的增长。

**关键词:**基坑工程;变形特性;数值模拟;参数分析;土岩地层

中图分类号: TU473.1<sup>+</sup>4

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)05-0047-11

## Analysis of the deformation and supporting parameters of foundation pit in upper-soil and lower-rock subway station

JIANG Junlin<sup>1</sup>, KONG Lingrui<sup>2</sup>, ZHAO Jianfeng<sup>1,\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. China Railway 23rd Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Rizhao 276826, China)

**Abstract:** Taking the support project of the upper-soil and lower-rock deep foundation pit in a subway station in Qingdao as an example, the deformation characteristics of deep foundation pit excavation were summarized by analyzing the monitoring data under various excavation conditions, and the pre-stressed axial force of the support, vertical spacing and pile stiffness were analyzed by numerical simulation software to propose optimization measures. The research results show that when the upper shallow soil is excavated, the influence on the foundation pit envelope structure and the surrounding surface settlement is small, but when the silty clay layer and the weathered rock layer are excavated, the horizontal displacement increment of the foundation pit envelope structure is large, with the deformation amount accounting for about 23%~58% of the maximum horizontal displacement amount. Compared with the conventional soft soil foundation pit, the maximum horizontal displacement position of the upper-soil and lower-rock pile body is shifted upward, the maximum horizontal dis-

收稿日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(52171264)

作者简介: 姜君霖(1999—), 男, 山东烟台人。博士研究生, 研究方向为深基坑工程及周边环境保护。E-mail: yananhuoche@163.com。

\* 通信作者: 赵建锋(1976—), 男, 河南叶县人。博士, 教授, 主要从事桥梁抗震方面的研究。E-mail: zhaojf@qut.edu.cn。

placement value is reduced, and the deformation of foundation pit has a significant spatial effect. Changing the pre-stressing axial force of steel supports has a significant impact on the deformation of nearby piles. For this project, the standard value of 50% ~ 75% support axial force has a better effect on the deformation control of foundation pit and the overall stability of foundation pit. If the support position is set up near the soil-rock interface rather than in the upper soil layer, it will effectively limit the increase of horizontal displacement of the piles in the soil layer.

**Key words:** foundation pit engineering; deformation characteristics; numerical simulation; parametric analysis; earth-rock formations

随着现代化城市建设的发展,城市交通压力增大,为缓解地面交通压力,地铁建设成为必然趋势。但拟建地铁站的位置多为建筑、管线和交通密集区域,基坑开挖和车站结构施工面临复杂环境中多种风险源的挑战<sup>[1]</sup>,为了保证基坑及周边环境的稳定,需要安全的支护体系,并辅以合理的施工方案<sup>[2]</sup>。

近年来,众多学者对深基坑的支护优化进行了大量研究。胡建林等<sup>[3]</sup>通过 MIDAS GTS 建立各个典型截面的二维模型,通过试算不同钢支撑位置得到最小的地下连续墙弯矩的峰值,进而减小墙体配筋,实现成本优化。曹雪山等<sup>[4]</sup>通过研究单双道预加轴力及支撑架设的条件对钢支撑轴力、墙体位移和弯矩的影响,揭示了上述条件不改变轴力发展趋势,但较大预加值对上道支撑的轴力有卸荷调整的作用。LI 等<sup>[5]</sup>比较了硬岩深基坑工程中的支护方案与延迟支护方案的实测数据与数值计算结果,得出在硬岩层中采取延期支护同样具有较好的稳定性,满足安全要求并且能够缩短工期,增大施工面。

在深基坑开挖过程中,空间效应对围护结构的影响不可忽视。王玉田等<sup>[6]</sup>结合现场自动化监测与有限元模拟,研究了基坑开挖过程中围护结构和地表沉降的变化规律,指出基坑施工时应重点关注标准段中部及截面变化处。朱文斌<sup>[7]</sup>通过有限元软件对 2 种基坑开挖方式进行模拟,并与实测数据对比,发现二者变化趋势基本一致,证明该分析方法有能力对不同开挖方式下基坑及周围既有建筑变形进行有效的定量分析。林之航<sup>[8]</sup>通过对上软下硬基坑的监测数据分析得出开挖上层软弱土体会引起围护结构产生较大侧移增量,并表现出显著的空间效应。SU 等<sup>[9]</sup>以兰州某实际工程为例,对比正常施工和异常施工顺序下支护结构内力,发现预应力锚索施加不及时会增大桩体最大位移和最大弯矩。WEI 等<sup>[10]</sup>依据杭州某基坑周围存在超载的情况,利用监测数据分析超载侧和卸载侧的变形和土压力差异,依据朗肯土压力理论计算得出超载侧的主动土压力高于卸载侧且随着开挖进行向下偏移。

传统优化方案多考虑单个参数影响和软土地区,对于上土下岩地层下基坑的开挖变形特性及优化研究较少。青岛地区普遍存在第四系全新统人工填土层和上更新统粉质黏土层,其下通常是风化程度不一的花岗岩层,由此形成了许多上土下岩深基坑工程。因此,本文依托青岛市某地铁深基坑工程,借助 MIDAS GTS NX 建立基于实际情况的计算模型,通过对基坑围护结构支撑预加轴力、支撑竖向架设间距和围护结构刚度进行研究,并以降低基坑围护结构深层水平位移及地表沉降为目标进行支护参数分析。

## 1 工程概况

拟建车站为明挖 3 层岛式车站,车站主体长度约 156 m,标准段宽 20.3 m,基坑开挖深度约 27.5 m。围护结构采用钻孔灌注桩,基坑设 4 道内支撑,典型位置剖面如图 1 所示。

拟建车站位于城区,车站南北两侧建筑距离基坑较近,分别为北侧 2 层地下室及 32 层住宅建筑,距离开挖面 40.0 m,基础形式为筏板基础,局部为桩基础;南侧 3 层地下室及 27 层住宅建筑,距离开挖面 17.1 m,基础形式为筏板基础。本车站涉及管线众多,主要风险源为位于车站南侧埋深约 1.5 m、迁改后距离基坑 8.0 m 的中压燃气管,北侧埋深约 4 m、迁改后距离基坑 3.5 m 的暗渠,基坑平面及周边环境如图 2 所示。

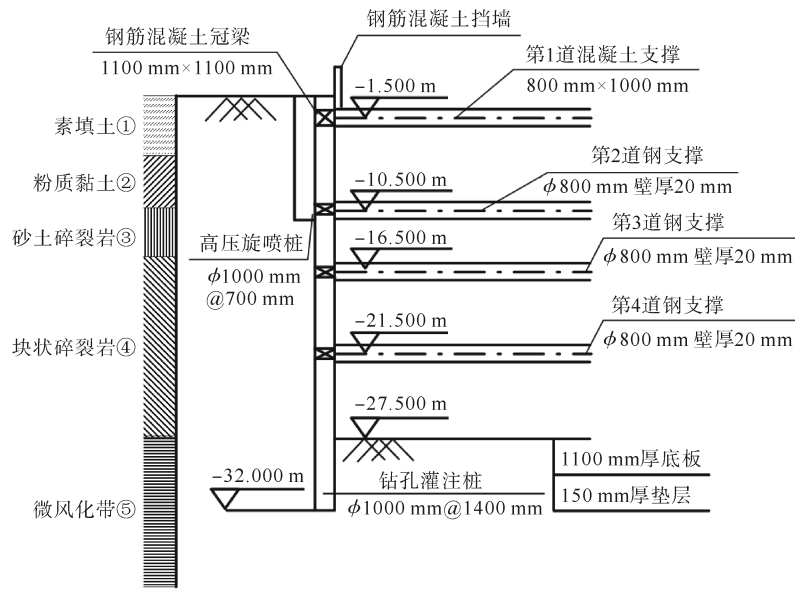


图 1 典型围护结构剖面

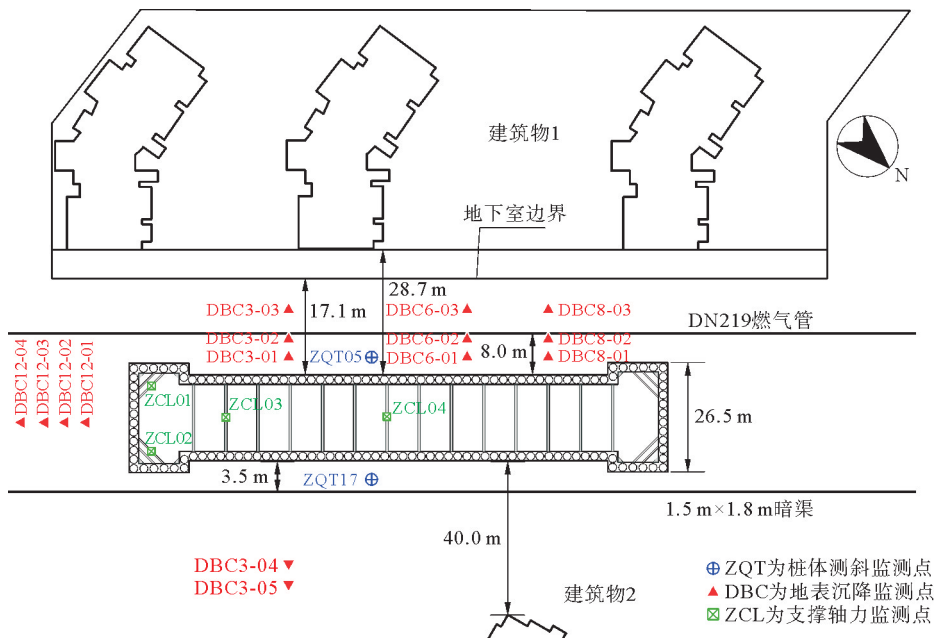


图 2 基坑平面及周边环境

## 2 基坑实测数据分析

表 1 展示了基坑开挖的基本工况,每施工步开挖岩土体约为 2 m,为保证支撑架设在足够的施工面上,各工况岩土体开挖深度位于支撑位置下 0.5 m 处。基坑中部位位置测点桩体水平位移随时间变化曲线如图 3 所示。在开挖初期桩体水平位移大致呈线性增长。随着开挖深度增加,由于支撑的架设及深层岩体对桩端的限制作用使桩体水平位移曲线呈现“鼓肚形”,桩体最大位移点逐渐下移。

表 1 基本工况

工况	工况说明	深度/m
工况 1	灌注桩、冠梁及第 1 道混凝土支撑施作	-2.0
工况 2	开挖并施作围檩及第 2 道钢支撑	-11.0
工况 3	开挖并施作围檩及第 3 道钢支撑	-17.0
工况 4	开挖并施作围檩及第 4 道钢支撑	-22.0
工况 5	开挖至坑底,施作底板、防水层	-27.5

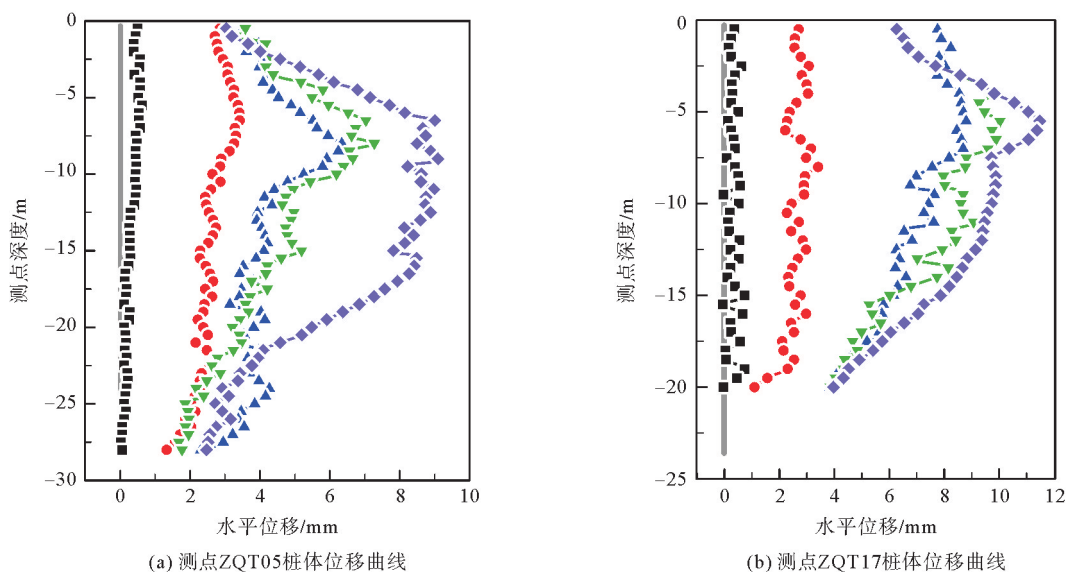


图3 桩体水平位移

—■— 工况1; —●— 工况2; —▲— 工况3; —▼— 工况4; —◆— 工况5

图4展示了不同工况下各典型位置处桩体水平位移情况,在开挖前期由于先开挖基坑端部导致前期短边中部位移增长较快,随着开挖深度的增加桩体水平位移呈现基坑长边中部>基坑短边中部>基坑坑角的空间效应。

选取基坑长边及短边不同测点绘制地表沉降随时间变化曲线,如图5所示。开挖前期大部分测点地表沉降值发展速率较快,随着开挖深度增加地表沉降增长速率减缓,且沉降最大点距离基坑一定距离。最大地表沉降值约为8.57 mm。此外,部分测点出现隆起现象,其原因可能是临近基坑边缘围护结构与土体间摩擦力较大,带动周围土体产生位移。由测点 DBC12-04 可以看出该现象在短边处更为显著。表明基坑尺寸及空间效应影响地表沉降的分布。

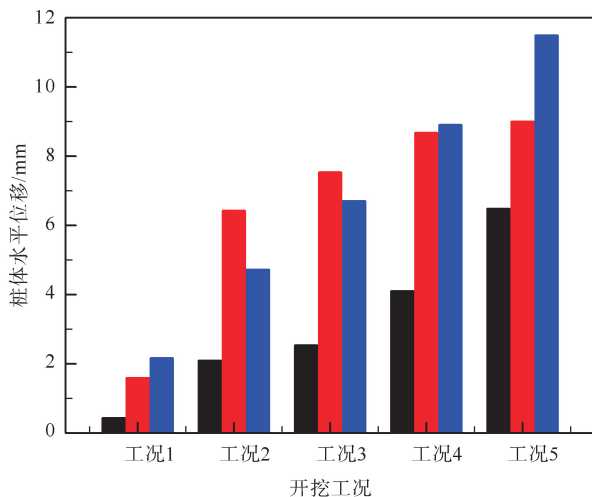
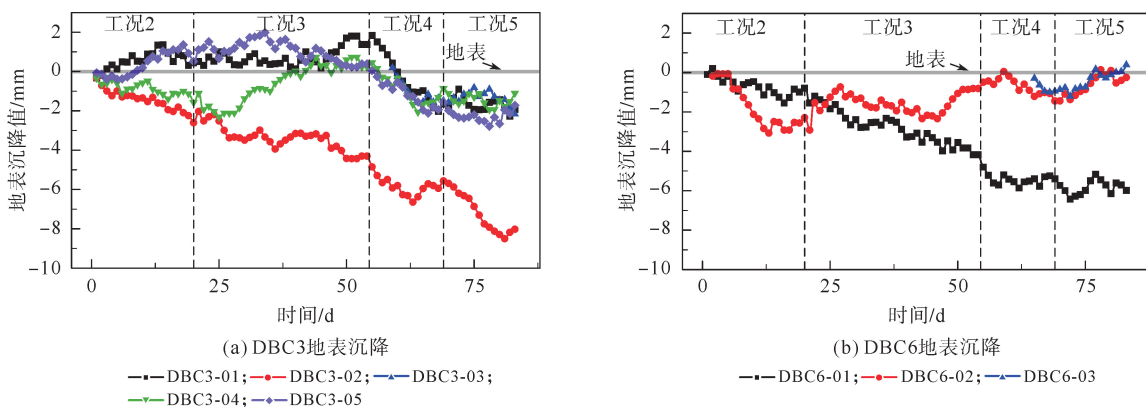


图4 不同位置处桩体水平位移

■ 坑角位置处桩体; ■ 短边中部位置处桩体; ■ 长边中部位置处桩体



(a) DBC3地表沉降

—■— DBC3-01; —●— DBC3-02; —▲— DBC3-03; —▼— DBC3-04; —◆— DBC3-05

(b) DBC6地表沉降

—■— DBC6-01; —●— DBC6-02; —▲— DBC6-03

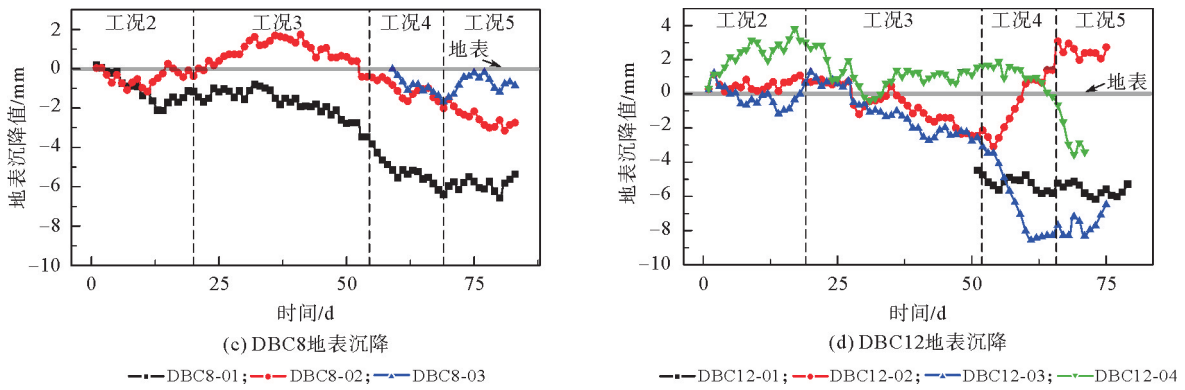


图 5 地表沉降随时间变化曲线

根据 PECK<sup>[11]</sup> 所提出的墙后地表沉降分区,本工程监测点沉降值都在 I 区(图 6),地表沉降影响范围主要集中于 0~1.0 倍开挖深度  $H_e$  范围内,与谢锡荣等<sup>[12]</sup> 对金华土岩组合基坑地表沉降的结论相吻合。

图 7 为坑外最大地表沉降值与开挖深度关系,可以看出地表最大沉降值  $\delta_{vm}$  介于  $0.013\% H_e \sim 0.06\% H_e$ ,地表沉降最大值与开挖深度呈线性增长,与无锡<sup>[13]</sup>、上海<sup>[14]</sup> 软土地区对比可看出上土下岩地层基坑开挖的影响明显小于软土地层。

通过对桩体最大水平位移  $\delta_{hm}$  的统计,得出桩体最大水平位移与开挖深度的关系如图 8 所示。桩体最大水平位移出现在开挖深度  $0.004\% H_e \sim 0.28\% H_e$ 。通过对上海和杭州地区<sup>[15]</sup>、苏州地区<sup>[16]</sup> 的对比,本工程岩面埋置较浅的地质条件相较于总体刚度较小的软土地区,基坑开挖对围护结构最大水平位移的影响显著降低。

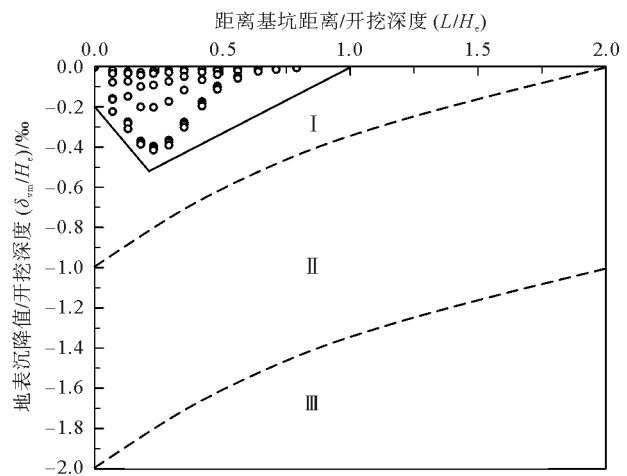


图 6 地表相对沉降范围

● 模拟值; — 本研究; ---- PECK 预测

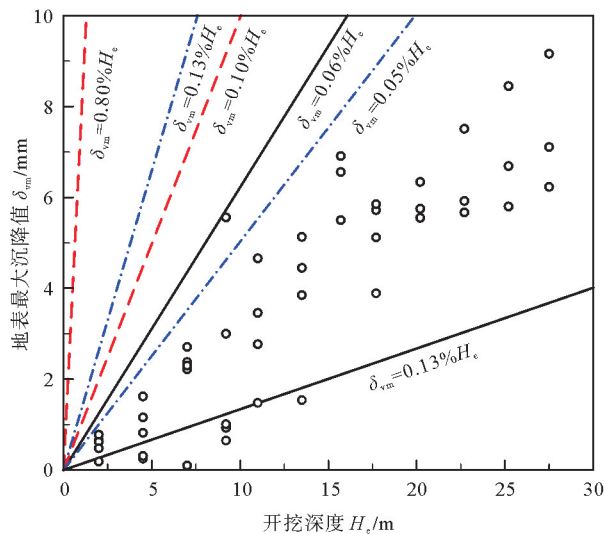


图 7 坑外最大地表沉降与开挖深度的关系

○ 实测值; — 本研究;  
· · · 文献[13]; - - - 文献[14]

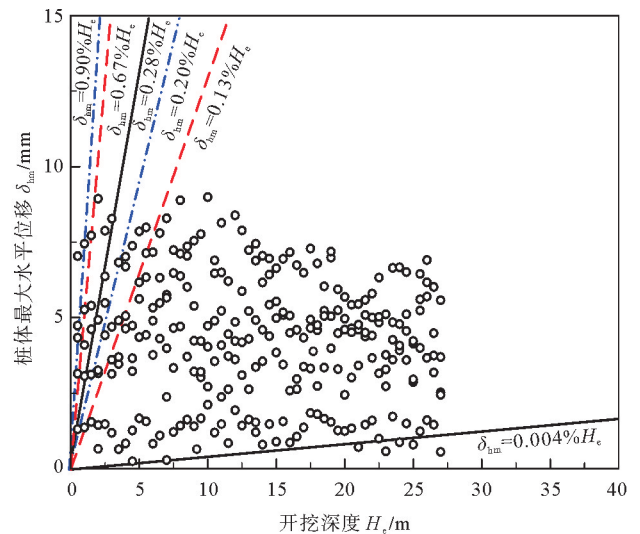


图 8 桩体最大水平位移与开挖深度的关系

○ 实测值; — 本研究;  
· · · 文献[15]; - - - 文献[16]

从图9的典型断面支撑轴力实测结果来看,支撑在施加预加轴力后会出现一定程度的轴力衰减,这主要与支撑活络头端加载及锁定方式有关。为减小预应力衰减对围护结构稳定性的影响,现场采用二次加压的方式来调整支撑轴力。当增加某道支撑的预加轴力时,虽然该支撑的最终轴力会增加,但相邻的支撑轴力则会减小。增加多道钢支撑预加轴力会使整个支撑系统内力分布更加均匀。开挖至基坑深部时,第3道支撑架设时间较晚,导致开挖面距离上道支撑较远,加大了临空面的深度,改变了桩体内力。在此期间,第1道支撑轴力持续增长,限制了桩顶位移,对基坑变形控制有重要作用。

### 3 基坑数值模拟

#### 3.1 地表沉降分析

图10为MIDAS GTS NX模拟基坑周围土体地表沉降云图,可以看出地表沉降呈现明显的“凹槽形”,且基坑南侧沉降值明显大于基坑北侧。这可能是南侧建筑群距基坑较近,加剧了地表沉降。此外,基坑周围土体沉降值呈现出长边>短边>坑角的空间效应,沉降较大值多集中于标准段。提取基坑短边观测点的地表沉降值绘制变化曲线,如图11所示。分析可知,在工况1时,地表最大沉降值 $\delta_{vm}=0.77$  mm,距基坑6.34 m;在工况4中基坑开挖至地表以下22 m, $\delta_{vm}$ 增加为5.56 mm,距基坑7.97 m,随着开挖进行,沉降最大点位置逐渐向坑外移动。

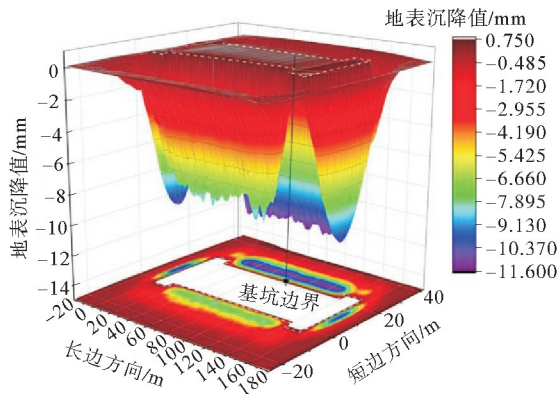


图10 地表沉降分布云图

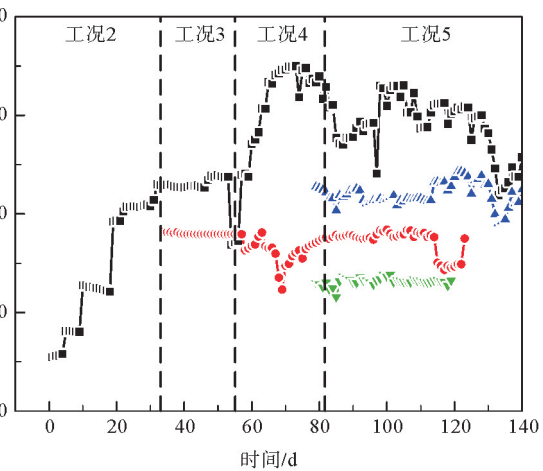


图9 典型断面支撑轴力曲线随时间变化曲线

—■— ZCL01; —●— ZCL02; —▲— ZCL03; —▼— ZCL04

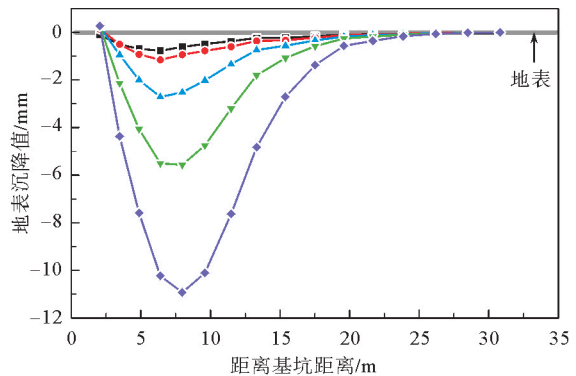


图11 地表沉降曲线

—■— 工况1; —●— 工况2; —▲— 工况3; —▼— 工况4; —◆— 工况5

#### 3.2 围护结构水平位移分析

选取基坑中部断面位置处,绘制桩体水平位移曲线,如图12所示,随着基坑开挖卸荷,桩体水平位移不断增加,且最大值位置不断下移,工况1的桩体水平位移曲线大致呈线性分布,桩顶变形明显,桩体下部受岩土体限制变形较小,此时属于基坑开挖的初始阶段,即悬臂式位移变形阶段。随着基坑开挖,水平位移值逐渐增大,水平位移曲线呈现“鼓肚形”,符合桩撑基坑桩体水平位移曲线的一般规律。然而,随着开挖进行,桩体水平位移增长速率逐渐减慢,这主要是由于下部开挖卸荷为变形模量较大的岩体,且桩底嵌岩深度为4.5 m,有效地限制了桩底部位移。

在工况 2 到工况 3 之间,桩体变形量突然增加,占最大水平位移量的 23%~58%。这是因为在该阶段,基坑开挖卸荷导致上部粉质黏土及风化程度较高的砂土状碎裂岩受到较大影响,而在后续工况中开挖岩体为完整性较好的花岗岩,对基坑变形影响较小。

## 4 支护参数分析

### 4.1 支撑预加轴力分析

选取 5 种预加轴力值进行对比分析,见表 2。轴力设计值  $F_k$  按照《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)的要求确定,且最大轴力设计值在轴力标准值  $N_k$  的 70%以内。

由图 13 可知,桩体水平位移与地表沉降随着预加轴力的增加逐渐减小。特别是位于土岩交界处,预加轴力的改变对桩体水平位移曲线变化影响较大。随着预加轴力的增大,其对桩体水平位移及地表沉降的限制也逐渐减小。实际上,当预加轴力为设计值的 50%~75%时,效果较好。

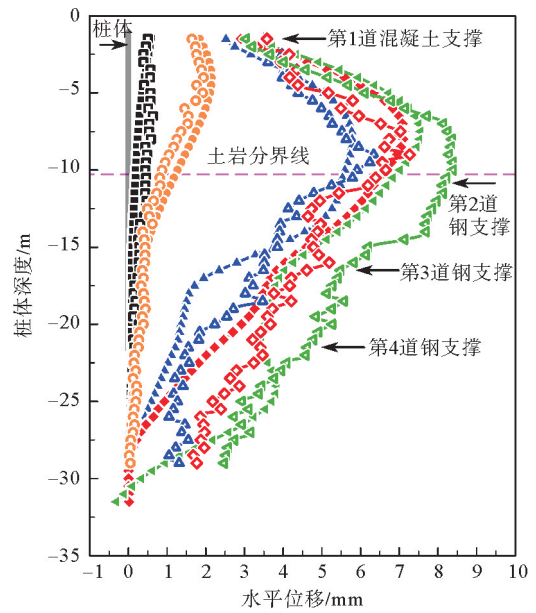
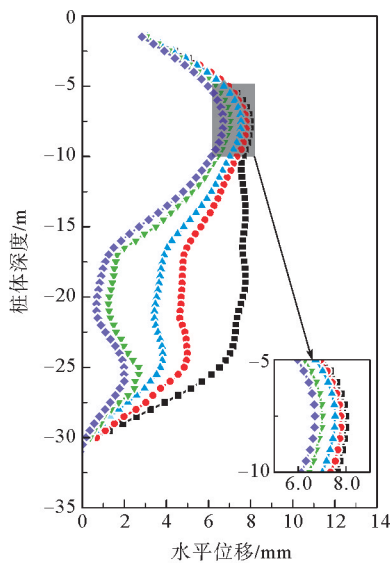


图 12 桩体水平位移曲线

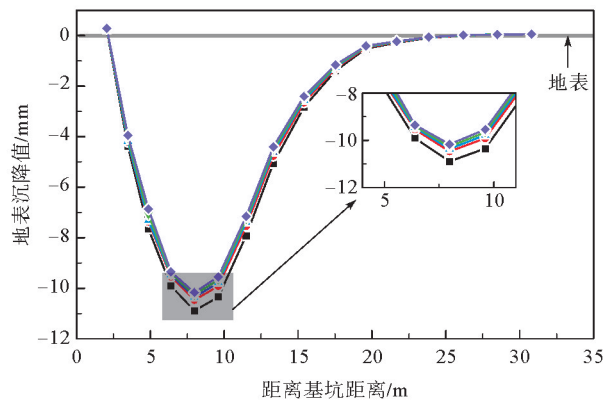
- 模拟工况1; —□— 实测工况1;
- 模拟工况2; —◇— 实测工况2;
- △— 模拟工况3; —▽— 实测工况3;
- ◇— 模拟工况4; —◇— 实测工况4;
- ▽— 模拟工况5; —▽— 实测工况5

表 2 预加轴力施加方案

预加轴力	预加轴力取值/kN		
	第 2 道支撑	第 3 道支撑	第 4 道支撑
$0F_k$	0	0	0
$0.25F_k$	626	649	497
$0.50F_k$	1251	1297	994
$0.75F_k$	1876	1946	1491
$1.00F_k$	2502	2594	1988



(a) 桩体水平位移曲线



(b) 地表沉降曲线

图 13 不同支撑预加轴力下对比曲线

- $0F_k$ ; —●—  $0.25F_k$ ; —▲—  $0.50F_k$ ; —▼—  $0.75F_k$ ; —◆—  $1.00F_k$

当钢支撑预加轴力为  $0.25F_k$  时, 桩体呈现出在上部土层及风化程度较高岩层中变形缩小的趋势, 整体变形还是呈现“鼓肚形”。然而, 随着预加轴力增大, 在支撑架设处的桩体均出现局部凹陷。具体来说, 预加轴力每增大  $0.25F_k$ , 桩体的局部变形会减小约  $1.5\text{ mm}$ 。

当预加轴力达到  $1.00F_k$  时, 桩体受预加轴力的影响变小, 限制桩体变形速率明显减弱。但在坑底附近出现拐点, 主要是因为有多道支撑的深基坑工程中, 相邻支撑具有阻隔作用, 每道支撑的作用范围仅为相邻支撑所围成的区域。因此, 盲目增加支撑的预加轴力可能会对变形控制产生不利影响。

对比分析不同预加轴力条件下各支撑轴力(图14)可知, 随着钢支撑预加轴力的施加, 第1道混凝土支撑的轴力会降低, 且增长速度会随着预加轴力的增大而逐渐减缓; 支撑轴力是由预加轴力和抵抗主动土压力共同作用产生的结果, 随着预加轴力的增大, 抵抗主动土压力所产生的轴力逐渐减小, 这有利于基坑整体稳定, 然而, 这种减小速率会随着预加轴力的增大而逐渐减小。

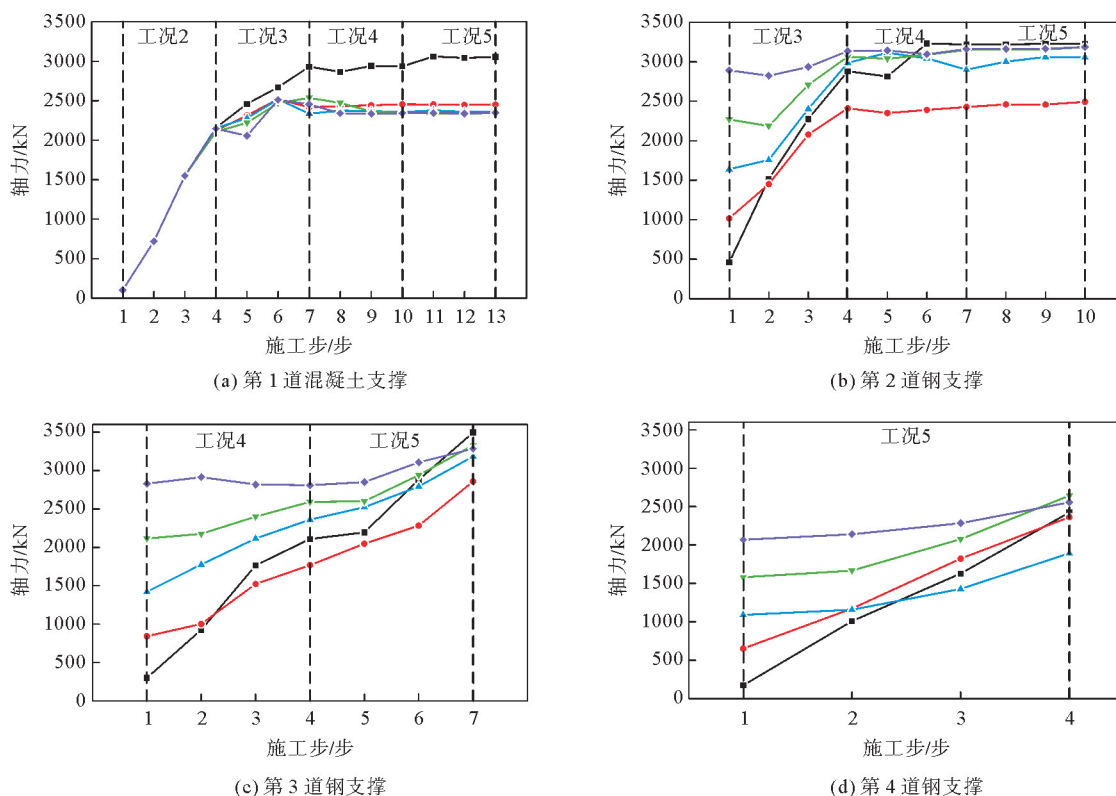


图14 支撑轴力变化曲线

—■—  $0F_k$ ; —●—  $0.25F_k$ ; —▲—  $0.50F_k$ ; —▼—  $0.75F_k$ ; —◆—  $1.00F_k$

## 4.2 支撑竖向间距分析

在桩撑支护的基坑中, 支撑的竖向间距通常不应小于  $3\text{ m}$ 。通过对各道支撑位置进行分析, 得出第2道支撑位置的改变对基坑变形影响最大, 后续仅对第2道支撑位置进行分析。分别取距离第1道混凝土支撑  $4\text{ m}$ 、 $5\text{ m}$ 、 $6\text{ m}$  的位置进行建模分析, 并与实际工况对比。从图15(a)可以看出, 当间距为  $4\text{ m}$  时,  $\delta_{\text{lim}}$  所在位置位于桩体(ZQT05)  $11\text{ m}$  处, 随着钢支撑逐渐靠近土岩分界面,  $\delta_{\text{lim}}$  持续减小, 最大值位置迅速上移, 减小幅值约  $30.8\%$ , 但增大了桩顶位移, 减小土层中的支撑间距, 能够减小桩上部最大位移值, 但不能确保降低桩的整体水平位移。因此, 围护结构的变形不仅与钢支撑间距和距坑底的距离有关, 而且对于土岩地层还与土岩交界面位置有关, 三者共同影响围护结构变形。从图15(b)可得, 将支撑下移至靠近土岩交界面时,  $\delta_{\text{vm}}$  由  $14.03\text{ mm}$  减小至  $10.36\text{ mm}$ , 减少了  $26.16\%$ 。

由图16可知, 桩体(ZQT05)最大正弯矩发生在第1、2道支撑间。因为上土下岩地层中, 上部土体对围护桩内力、位移变化影响较大, 且上部只设置了1道混凝土支撑, 支撑架设位置与开挖面相距较远。然

而随着后续施工,其余支撑不断架设并缩小支撑间距,使桩体的最大弯矩逐渐减小。在第 2 道支撑所在深度范围内桩体弯矩发生突变,是因为此处外部土体变形模量变化较大,导致上下位置间土体压力产生差异,进而影响桩体内力。

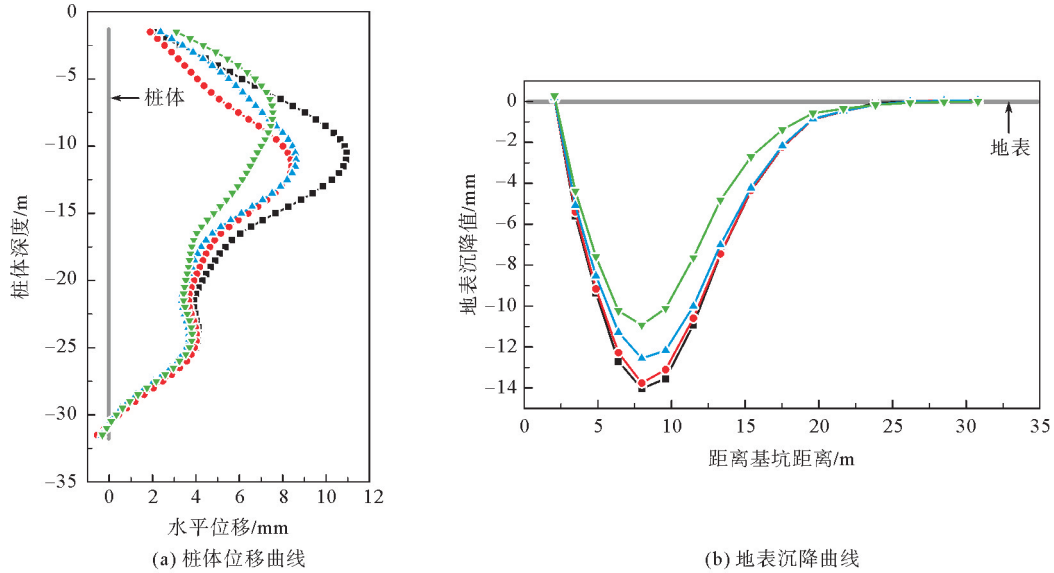


图 15 支撑竖向间距对比曲线

—■— 距第1道支撑4 m; —●— 距第1道支撑5 m; —▲— 距第1道支撑6 m; —▽— 实际工况

通过距离第 1 道支撑 4 m 模拟中可看出第 1、2 道支撑间支护桩最大弯矩值小于其他方案和实际工况,这是由于上调了第 2 道支撑的位置,从而缩小了与混凝土支撑的距离,增大了位于土层位置围护结构的整体刚度,进而引起最大弯矩值的减小及其发生位置的上移。

### 4.3 桩体刚度分析

通过改变围护结构材料的弹性模量  $E$  来模拟围护结构刚度的变化,分析  $0.6E$ 、 $0.8E$ 、 $1.0E$ 、 $1.2E$ 、 $1.4E$  5 种不同刚度下基坑开挖对围护结构水平位移和地表沉降的影响,如图 17 所示。

由图 17(a)可知围护结构水平位移随着地连墙刚度的增加而线性减小,随着围护结构刚度从  $0.6E$  增大到  $1.4E$ ,其对应的  $\delta_{lm}$  从 8.84 mm 减小到 6.18 mm。由图 17(b)可知, $\delta_{vm}$  从 12.78 mm 减小到 7.97 mm。当桩体弹性模量为  $1.4E$  时,围护结构水平位移和地表沉降值均最小;当弹性模量大于  $1.2E$  时,桩体水平位移和地表沉降的变化幅度明显减弱,这表明在一定范围内提高围护结构的刚度对减小基坑变形有积极作用,超过  $1.2E$  后,提高桩体刚度对基坑变形及地表沉降影响很小。

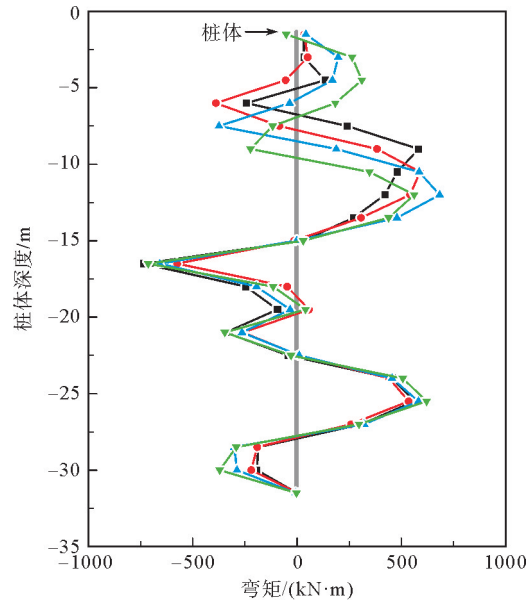


图 16 弯矩位置对比曲线

—■— 距第1道支撑4 m; —●— 距第1道支撑5 m; —▲— 距第1道支撑6 m; —▽— 实际工况

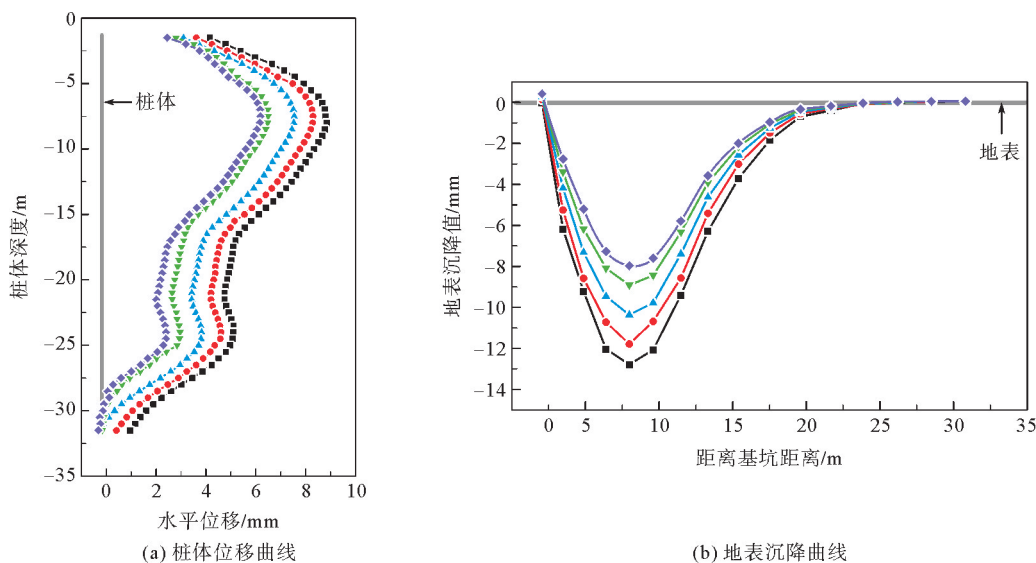


图17 桩体刚度对比曲线

—■—0.6E; —●—0.8E; —▲—1.0E; —▼—1.2E; —◆—1.4E

## 5 结论

以青岛某地铁车站深基坑工程为研究对象,结合实测数据总结上土下岩基坑围护结构变形规律,并通过 MIDAS GTS NX 对多种支护参数进行对比分析,系统深入地研究了其对基坑围护结构及地表沉降的影响,得出以下主要结论:

1) 上土下岩地质基坑开挖相较于软土地质桩体水平位移量和地表沉降量明显减小,基坑围护结构水平位移量与土岩交界面所在深度密切相关;第1道支撑在全过程中轴力持续增长,对桩顶位移的限制效果明显,支撑及时架设对围护结构变形及支撑轴力发展有重要作用。

2) 预加轴力的改变会影响支撑附近的桩体变形,下部支撑的及时架设可以减少上层支撑轴力的增长。针对本工程,预加轴力值在轴力标准值75%以下,每增加25%,局部桩体位移会减少1.5 mm。超过轴力标准值的75%时,对基坑变形及周边地表沉降的限制将会减弱,根据本工程模拟,建议上土下岩地层基坑钢支撑预加轴力控制在设计轴力的50%~75%。

3) 在上部土层中,缩小支撑间距可以有效降低局部桩体的弯矩,而在土岩交界面架设支撑可以使得桩整体受力更加合理。因此,支撑位置的确定不仅要考虑开挖面距离上层支撑的高度,还需要考虑土岩交界面的位置。

4) 围护结构刚度从 $0.6E$ ( $E$ 为围护结构材料的弹性模量)增大到 $1.2E$ 会使围护结构水平位移及地表沉降呈线性减小,且减小速率较快;当围护结构刚度超过 $1.2E$ 时对基坑变形控制的限制明显减弱,还提高了施工成本。

### 参考文献(References):

- [1] 刘红梅,李建,吕振潭. 青岛市硬质岩地区明挖地铁车站安全管理浅析[J]. 青岛理工大学学报,2018,39(3):122-126.  
LIU Hongmei, LI Jian, LÜ Zhenan. Safety management of metro station in hard rock area of Qingdao[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2018, 39(3): 122-126.
- [2] 孙克国,李术才,李树忱,等. 明挖法地铁车站围护结构变形模拟与预测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008(S1):3210-3215.  
SUN Keguo, LI Shucui, LI Shuchen, et al. Simulation and prediction research of enclosure structure deformation for an open-cut metro station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(S1): 3210-3215.
- [3] 胡建林,冯桂帅,梁玲玉,等. 深基坑水平支撑间距优化设计研究[J]. 铁道建筑,2017,57(11):90-93.  
HU Jianlin, FENG Guishuai, LIANG Lingyu, et al. Design study on spacing optimization of horizontal braces in deep foundation pit[J]. Railway Engineering, 2017, 57(11): 90-93.

- [4] 曹雪山,陆新宇,顾祎鸣.深基坑内钢支撑轴向压力变化规律研究[J].岩土工程学报,2022,44(11):1988-1997.  
CAO Xueshan,LU Xinyu,GU Yiming. Variation of axial force of steel struts in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(11):1988-1997.
- [5] LI Y,MA Z G,GAO F R,et al. Deformation characteristics of a deep subway foundation pit in hard rock strata under a delayed supporting condition[J]. Shock and Vibration,2023(1):5155504.
- [6] 王玉田,范思广,姜福香,等.城市地铁车站基坑施工变形监测与数值模拟[J].青岛理工大学学报,2019,40(6):1-7.  
WANG Yutian,FAN Siguang,JIANG Fuxiang,et al. Deformation monitoring and numerical simulation of foundation pit construction of urban metro station[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2019,40(6):1-7.
- [7] 朱文斌.深基坑开挖方式对支护结构与围岩的影响分析[D].合肥:安徽建筑大学,2018.  
ZHU Wenbin. Analysis of the influence of deep foundation pit excavation method on supporting structure and surrounding rock[D]. Hefei:Anhui University of Architecture,2018.
- [8] 林之航.上软下硬深基坑变形规律与空间效应分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1792-1800.  
LIN Zhihang. Research on deformation and spatial effect of upper-soft and lower-hard deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(6):1792-1800.
- [9] SU T T,ZHOU Y,WANG Z Z,et al. Influence of construction sequence on the force characteristics of foundation pit support structure[J]. International Journal of Civil Engineering,2023,21(11):1751-1767.
- [10] WEI G,ZHOU X X,XU Y F,et al. Deformation behavior of deep foundation pit under both overloading and unloading conditions[J]. Mathematical Problems in Engineering,2020(1):6675531.
- [11] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico,1969:225-290.
- [12] 谢锡荣,王立峰,韦康,等.土岩组合地层地铁深基坑开挖性状分析及预测[J].地下空间与工程学报,2020,16(S1):247-254.  
XIE Xirong,WANG Lifeng,WEI Kang,et al. Analysis and prediction of excavation behavior of metro deep foundation pit in soils underlain by rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(S1):247-254.
- [13] 乔亚飞,丁文其,王军,等.无锡地区地铁车站深基坑变形特性[J].岩土工程学报,2012,34(S1):761-766.  
QIAO Yafei,DING Wenqi,WANG Jun,et al. Deformation characteristics of deep excavations for metro stations in Wuxi[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012,34(S1):761-766.
- [14] 王卫东,徐中华,王建华.上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J].岩土工程学报,2011,33(11):1659-1666.  
WANG Weidong,XU Zhonghua,WANG Jianhua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(11):1659-1666.
- [15] 刘兴旺,施祖元,益德清,等.软土地区基坑开挖变形性状研究[J].岩土工程学报,1999,21(4):456-460.  
LIU Xingwang,SHI Zuyuan,YI Deqing,et al. Study on deformation characteristics of foundation pit excavation in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1999,21(4):456-460.
- [16] 张佳莉.苏州地区软土深基坑围护结构变形特性及稳定性研究[D].苏州:苏州大学,2020.  
ZHANG Jiali. Deformation and stability of support structure of deep excavation in soft soil in Suzhou[D]. Suzhou:Suzhou University,2020.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)