

引用本文:李煜峰,傅 怡,徐中华. 软土地区紧邻地铁隧道深基坑支护设计与实践[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(6):128-137.
LI Yu-feng, FU Yi, XU Zhong-hua. Supporting Design and Application of Deep Excavation Adjacent to Metro Tunnels in Soft Soil Area[J].
Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 128-137.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08052

软土地区紧邻地铁隧道深基坑支护设计与实践

李煜峰^{1,2}, 傅 怡³, 徐中华^{1,2}

(1. 华东建筑设计研究院有限公司 上海地下空间与工程设计研究院, 上海 200002; 2. 上海基坑工程环境安全控制工程技术研究中心, 上海 200002; 3. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235)

摘要:以上海竹园 2-16-1 地块项目深基坑工程为背景,介绍了邻近地铁的软土深基坑变形控制方法及其效果。根据基坑工程的特点,设计时采取了多种地铁保护专项技术措施,包括基坑分区实施方案、支护体系、钢支撑轴力补偿系统、坑内被动区加固、承压水控制措施等。结果表明:基坑各分区地下连续墙最大侧向位移小于上海软土地区基坑地下连续墙最大侧移的统计平均值 $0.42\% H$ (H 为基坑最大开挖深度),特别是靠近地铁侧的地下连续墙最大侧向位移接近上海软土地区基坑地下墙最大侧移的统计下限值 $0.1\% H$; 地铁侧坑外承压水位总体保持在比较平稳的水平,最大水位变化仅为 0.72 m ; 邻近的地铁隧道上行线和下行线的累计最大沉降量分别为 8.2 mm 和 5.1 mm ,均小于地铁下沉量允许值(20 mm),且隧道曲率半径满足控制值要求;本基坑采用的系统变形控制措施有效地保障了邻近地铁的安全,其设计和施工方法可以为软土地区同类基坑工程设计提供参考。

关键词:软土;深基坑;地铁隧道;支护设计;变形控制

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)06-0128-10

Supporting Design and Application of Deep Excavation Adjacent to Metro Tunnels in Soft Soil Area

LI Yu-feng^{1,2}, FU Yi³, XU Zhong-hua^{1,2}

(1. Shanghai Underground Space Engineering Design and Research Institute, East China Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Safety Control for Facilities Adjacent to Deep Excavations, Shanghai 200002, China; 3. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China)

Abstract: The deformation control methods of the deep excavation adjacent to metro and its effect are introduced based on the deep excavation of Shanghai Zuyuan 2-16-1 Block project. According to the characteristics of the excavation engineering, a variety of technical measures were taken to protect the adjacent metro tunnels, including zoned excavation method, proper supporting system, steel support automatic axial force compensation system, ground treatment, and confined ground water control design. The results show that the maximum lateral displacement of diaphragm wall for each excavation zone is less than the statistical average value ($0.42\% H$, H is

收稿日期:2021-08-11

基金项目:上海市优秀技术带头人计划项目(20XD1430300)

作者简介:李煜峰(1991-),男,江苏昆山人,工程师,工学硕士,E-mail:341066408@qq.com。

the excavation depth) in Shanghai soft deposit, while the maximum lateral displacement of diaphragm wall in the excavation zones adjacent to the metro tunnels is quite close to the statistical lower limit value, which is $0.1\% H$. The confined water level near the metro tunnel area maintains a relatively stable level and the maximum water level variation is only 0.72 m. The cumulative maximum settlement of the adjacent metro tunnels upstream and downstream are 8.2, 5.1 mm respectively, which are less than the 20 mm allowable limit. Moreover, the tunnel curvature radius meets the requirement of the control value. Deformation control methods adopted in the project are proved to be effective in protecting the safety of the adjacent metro tunnels. Design and construction methods in the project can provide a reference for similar excavation projects in soft soil area.

Key words: soft soil; deep excavation; metro tunnel; supporting design; deformation control

0 引言

地下空间作为城市发展的重要资源,其开发和利用得到了越来越多的重视。目前,上海轨道交通线路已近20条,中心城区地铁车站密布,区间隧道纵横交错。地铁的建设也带动了周边地块的开发,众多商业、住宅及其他配套设施的建设,使得紧邻地铁的深基坑工程越来越多,规模及深度也越来越大^[1-2]。邻近地铁的基坑工程施工必然会对已有的隧道造成一定的影响^[3-4]。地铁隧道对沉降、位移极其敏感,因此深基坑开挖引起的地铁隧道附加变形必须控制在相关规范^[5-6]要求范围内,基坑支护设计也应由强度控制转变为变形控制^[7]。上海是典型的软土地区,地面以下30 m范围内基本为软弱黏性土,其高压缩性、高含水率、高灵敏度等性质进一步增加了深基坑变形控制的难度^[8-9]。近年来,深基坑施工引起的地铁隧道事故逐渐增加,事故不仅造成了人员伤亡及财产损失,对社会的影响也极大^[10]。因此,采取针对性的保护和防治措施,减小基坑开挖时地铁区间隧道的影响,使其变形及受力处于可控范围,保证地铁区间运行正常和安全,是基坑工程设计和施工中亟需解决的问题。

针对这一问题,许多学者进行了相关研究。王卫东等^[7]等结合上海地区大量深基坑工程设计和施工的实践,探讨了敏感环境下深基坑工程的设计方法,并针对不同的敏感环境,提出了专项设计方案。冯龙飞等^[2]等结合广州地区紧邻地铁的深基坑工程的实践,探讨了基于地铁保护的深基坑支护体系的选型及合理的土方开挖方案。孔令荣等^[11]通过基坑开挖对邻近地铁隧道的案例分析,归纳了引起邻近地铁隧道侧向位移、沉降和收敛变形的主要因素,包括基坑与隧道的竖向和水平向距离、基坑开挖的

时空效应。

目前,众多学者针对基坑开挖对邻近地铁隧道的影响已进行了大量的研究,而其影响因素较多,现有的文献大多只对一部分重要因素如支护结构选型及基坑开挖方案等进行研究,很少考虑地下水的影响。上海地区浅层土软弱多变,地下水位较浅,且赋存地下水水量丰富^[12]。因此,本文以上海竹园2-16-1地块项目基坑为背景,研究并整合软土地区地铁保护的专项技术措施,结合现场监测对其在工程中应用的效果进行分析。项目基坑与正在运营的轨道交通9号线距离仅为14.2 m。考虑对邻近地铁的保护,基坑支护设计采用了系统的深基坑变形控制措施,包括分块实施、增大围护体刚度、采用自动轴力补偿钢支撑系统、坑内土体加固、承压水控制等。实测结果表明,这些措施有效地保护了地铁安全。

1 工程概况

1.1 基坑工程概况

竹园2-16-1地块项目位于浦东新区(图1),东至世纪大道,南至由由燕乔大厦和已建2-16-2地块(陆家嘴金控广场),西至规划竹林路,北至浦电路。项目主楼为地上27层,高135 m,裙房为地上7层,高45 m,地下均为3层,采用桩筏基础。

本工程基坑呈不规则梯形,基坑面积约为5 516 m²,周长约为414 m,开挖深度约为16.1 m,局部落深坑处深度约为16.9 m。

1.2 工程地质及水文地质概况

拟建场地位于正常地层沉积区,距地面115.3 m深度范围内所揭露的土层主要由软弱的黏性土、松散、稍密~中密粉性土及砂土组成,具有成层分布的特点。本基地的土层可分为9个主要层次,根据

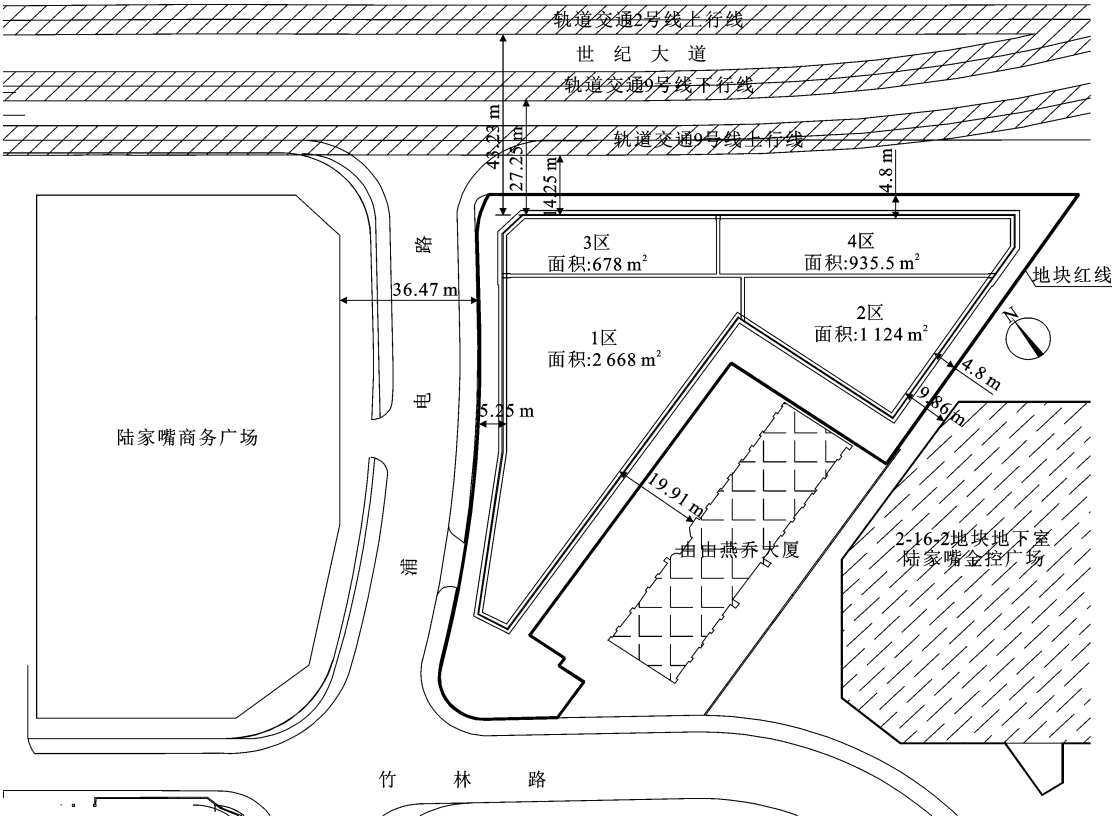


图 1 基坑周边环境

Fig. 1 Surrounding Environment of Excavations

其土性及成因的不同,第③,⑤,⑦,⑨层又可分为若干个亚层、次亚层及夹层。土层分布及物理力学指标如表 1 所示。基坑范围内浅部土层主要以软塑~流塑黏性土为主,含水量和压缩性均较大,土体的力学性质相对较差。基底主要位于第④层淤泥质黏土与⑤₁₋₁灰色黏土交界处。

本场地内地下水类型主要有浅部土层的潜水和深部砂性土层中的承压水。潜水主要为大气降水入渗及地表水侧向补给,以地面蒸发为主要排泄途径。水位埋深在地面以下 1.6~2.2 m 之间。场地内第⑦层为上海地区第一承压含水层,第⑨层为上海地区第二承压含水层,由于第⑧层黏性土层缺失,第⑦层与第⑨层承压水相互连通,赋存地下水水量丰富,实测的承压水位埋深为 5.1~5.3 m,层顶埋深最浅约为 28.5 m。

1.3 周边环境概况

本工程场地周边环境十分复杂,基坑北侧为浦电路,在基坑开挖深度 1 倍~2 倍范围内埋有大量市政管线,地下管线与基坑最近距离约为 6.5 m。浦电路北侧为陆家嘴商务广场,为地下 4 层结构,距离基坑最近处约为 37.5 m。

基坑南侧紧邻由由燕乔大厦及竹园 2-16-2 地

块地下室。由由燕乔大厦为框架核心筒结构,采用桩筏基础,距离基坑最近处约为 10.1 m。竹园 2-16-2 地块地下室结构距离基坑最近处约为 9.8 m。基坑东侧为世纪大道,基坑开挖深度 1 倍~2 倍范围内为运营中的轨道交通 9 号线世纪大道站—杨高中路站区间隧道以及大量市政管线,地下管线与基坑最近距离约为 11.5 m,9 号线区间隧道沿世纪大道路下布置,埋深约为 21.4 m,距离基坑最近处约为 14.2 m。地铁隧道与基坑剖面如图 2 所示。根据上海市工程建设规范《基坑工程技术标准》(DG/TJ 08-61—2018)^[5] 和《城市轨道交通设计规范》(DG/TJ 08-109—2017)^[6] 的相关规定,本工程基坑安全等级和环境保护等级均为一级。

2 基坑支护设计

2.1 基坑分区实施方案

本工程基坑开挖深度较大,基坑分区设计根据周边环境不同的保护要求,主要保护东侧地铁隧道,考虑基坑开挖的空间和时间影响因素。由于整个基坑外轮廓形状不规则,经过综合分析,本基坑采用“分区顺作,先深后浅”的方案将基坑分为 4 个区进行施工,靠近地铁侧采用 2 个狭长形的基坑,减小基

表 1 土层物理力学性质

Table 1 Physical and Mechanical Parameters of Soil Layers

| 层号 | 土层名称 | 重度/(kN·m ⁻³) | 含水量/% | 孔隙比 | 直剪固快试验 | |
|------------------|-----------|--------------------------|-------|------|-----------|------------|
| | | | | | 黏聚力 c/kPa | 内摩擦角 φ/(°) |
| ② | 粉质黏土 | 18.8 | 29.6 | 0.85 | 23 | 20.5 |
| ③ | 淤泥质粉质黏土 | 17.5 | 41.0 | 1.15 | 11 | 20.0 |
| ③ _夹 | 砂质粉土 | 19.0 | 28.4 | 0.80 | 7 | 29.5 |
| ④ | 淤泥质黏土 | 16.7 | 50.8 | 1.43 | 14 | 11.0 |
| ⑤ ₁₋₁ | 黏土 | 17.6 | 40.0 | 1.14 | 16 | 12.0 |
| ⑤ ₁₋₂ | 粉质黏土 | 18.3 | 33.2 | 0.95 | 17 | 16.0 |
| ⑥ | 粉质黏土 | 19.6 | 24.0 | 0.70 | 50 | 15.0 |
| ⑦ ₁₋₁ | 黏质粉土夹粉质黏土 | 19.2 | 26.5 | 0.76 | 24 | 23.5 |
| ⑦ ₁₋₂ | 砂质粉土 | 19.1 | 27.3 | 0.76 | 4 | 31.0 |
| ⑦ ₂ | 粉砂 | 19.3 | 25.8 | 0.72 | 0 | 33.0 |

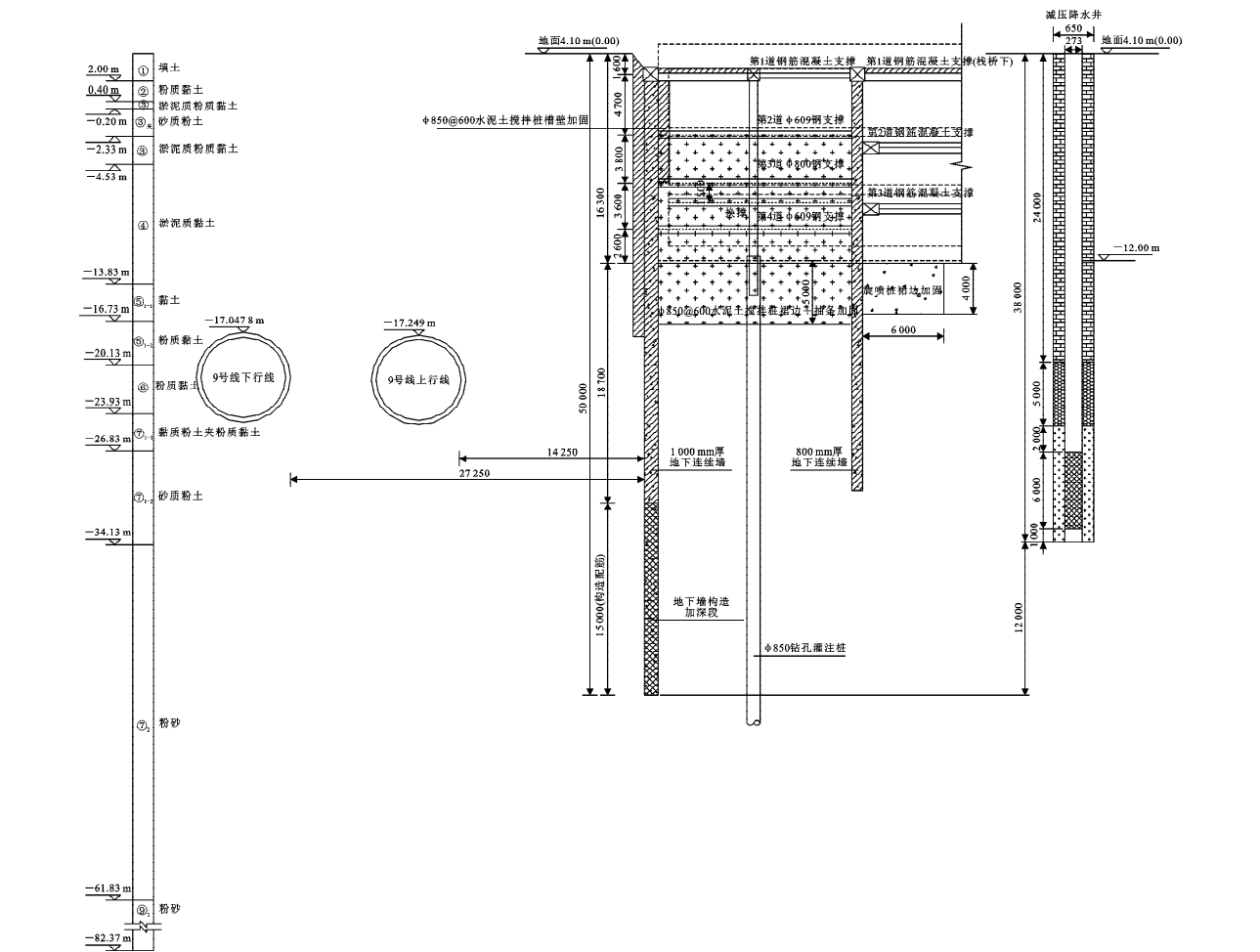


图 2 地铁隧道与基坑剖面(单位:mm)

Fig. 2 Sectional View of Metro Tunnels and Excavation (Unit:mm)

坑开挖空间,缩短基坑施工时间,降低基坑开挖过程中大范围卸土对 9 号线地铁隧道等周边环境的影响。具体分区如图 1 所示,分区施工顺序为 1 区→2 区、3 区→4 区。先施工远离地铁侧面积较大、深度较深的 1 区,此时基坑与 9 号线隧道距离较远,且

有 3 区地下连续墙作为屏障。1 区 B1 层板回筑完成后同时施工 2 区和狭长型的 3 区,避免相邻分区基坑同时开挖,也缩短了基坑施工的总工期,待 2, 3 区 B1 层板回筑完成后开始 4 区基坑的开挖施工。这样可以有效降低基坑开挖过程中大范围的卸土对

地铁隧道的空间效应影响,地铁区间的附加变形影响也将更容易得到控制。

2.2 基坑支护设计

2.2.1 围护结构

在综合考虑技术、经济、工期以及环境保护的基础上,本基坑最终确定采用刚度较大的地下连续墙作为围护结构。地下连续墙施工工艺成熟,水平变形小,施工过程中对周边环境影响较小^[13]。考虑到对地铁区间的保护,东侧邻近地铁侧地下连续墙厚度为 1 000 mm,其余侧及中隔墙地下连续墙厚度为 800 mm。地下连续墙墙身混凝土设计强度等级均为 C35,墙深为 33~35 m,接头形式均采用锁口管。

场地内普遍分布有第③夹层砂质粉土,土层渗透性强,易坍塌。为了防止地下连续墙在成槽施工过程中出现塌孔,对周边建(构)筑物造成影响,在地下连续墙两侧设置 $\phi 850@600$ 三轴水泥土搅拌桩作为槽壁加固,坑内加固深度约为 10 m,坑外加固深度约为 22 m,如图 2 所示。

本基坑开挖深度较大,开挖至一定深度后,需降低坑内的承压水头来控制降承压水对周边环境的影响,尤其是对地铁区间的影响。对地铁侧地下连续墙的深度进行了专项设计,墙体构造加深进入承压含水层,地下墙深度约为 50 m,其中 15 m 为构造段;其余侧采用地下墙外侧槽壁加固兼做止水帷幕并加深进入承压含水层,止水帷幕深度约为 47 m,增加了绕流路径,减小了坑内降水对周边环境产生的影响。

2.2.2 支撑体系

本工程不同分区的支撑体系如图 3 所示,支撑截面尺寸见表 2。1,2 区基坑采用整体水平刚度较大的十字对撑支撑体系,竖向设置 3 道钢筋混凝土支撑,支撑之间的水平间距不超过 9 m,有利于减少地下连续墙的侧向位移。3,4 区基坑采用对撑的支撑体系,竖向设置 1 道钢筋混凝土支撑和 3 道钢支撑。钢支撑不设置围檩,沿基坑长度方向每隔 2,4 m 布置,保证每幅地下墙平面位置均有 2 根钢支撑,并采用自动轴力补偿系统,当监测轴力达到设计值的 95%时开始自动补偿轴力,当监测轴力达到设计值时停止补偿,最大限度地增加地铁侧的支撑刚度,控制地下连续墙的侧向位移。混凝土支撑的混凝土设计强度等级为 C30,钢支撑采用 Q235B 级钢。

2.2.3 坑内被动区加固

坑内被动区土体加固在软土地区邻近地铁的基坑工程设计中应用广泛,是一种控制周边环境产生

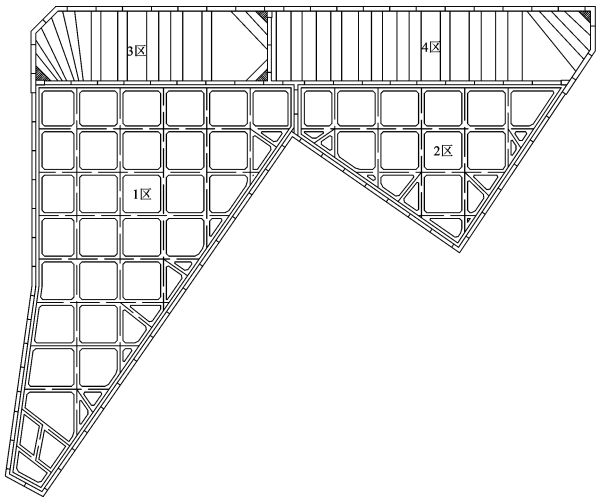


图 3 支撑体系平面布置

Fig. 3 Plane Arrangement of Supporting Systems

表 2 支撑截面尺寸

Table 2 Cross Section Size of Support

| 基坑分区 | 支撑 | 圈梁尺寸 | 主撑尺寸 |
|-------|-------|-------------------|---------------------|
| 1,2 区 | 第 1 道 | 1 100 mm×900 mm | 900 mm×800 mm |
| | 第 2 道 | 1 300 mm×1 000 mm | 1 200 mm×1 000 mm |
| | 第 3 道 | 1 200 mm×1 000 mm | 1 100 mm×1 000 mm |
| 3,4 区 | 第 1 道 | 1 100 mm×900 mm | 900 mm×800 mm |
| | 第 2 道 | | $\phi 609\times 16$ |
| | 第 3 道 | | $\phi 800\times 16$ |
| | 第 4 道 | | $\phi 609\times 16$ |

附加变形的有效手段^[7]。本项目基底处于软弱黏土中,需进行适当的被动区土体加固,以控制基坑开挖阶段围护体的侧向位移,保护周边建(构)筑物。本工程不同分区的坑内被动区加固区域如图 4 所示。1,2 区基坑靠近分隔墙侧采用 4 m 宽高压旋喷桩裙边加固,加固深度为坑底以下 4 m,其余侧采用 6 m 宽高压旋喷桩裙边加固,加固深度也为坑底以下 4 m。3,4 区基坑采用三轴水泥土搅拌桩裙边+抽条加固;靠近地铁侧裙边加固,加固宽度为 10 m;其余侧为 3 m@3 m 抽条加固,加固深度均为第 2 道支撑至坑底以下 5 m。高压旋喷桩坑内加固水泥掺量(质量分数) $D_h\geq 25\%$,加固后 28 d 无侧限抗压强度 $q_u\geq 1.0$ MPa;三轴水泥土搅拌桩坑内加固水泥掺量(质量分数) $D_t\geq 20\%$,加固后 28 d 无侧限抗压强度 $q_u\geq 0.8$ MPa。

2.2.4 承压水控制设计

根据岩土工程勘察报告,场地第⑦,⑨层存在承压含水层,随着基坑开挖深度的增加,承压含水层顶板处的覆土压力会减小,导致基坑底部抗突涌稳定性不足,会发生坑底突涌风险^[14]。

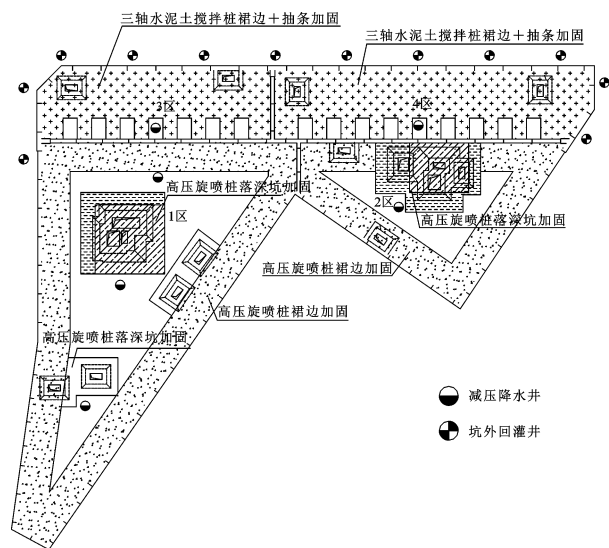


图 4 坑内加固区域及减压降水井平面示意

Fig. 4 Plane View of Excavation Reinforcements and Decompression Dewatering Wells

根据坑底抗突涌验算结果,本工程需在开挖过程中同步对第⑦层进行减压降水,最大水位降深约为 5.3 m。由于邻近地铁 9 号线,场地周围环境复杂,基坑降水将对周边环境产生较大影响,应以“按需降水,分层降水”的原则进行降水设计^[15],减压降水井平面布置见图 4。本项目共设置 6 口减压降水井,其中 1 区塔楼局部落深坑区域埋深较深,因此设置 3 口井,其余分区各设置 1 口井。降水井滤水管进入第⑦₁层,井底埋深约为 38 m。在地铁保护 50 m 范围内共布置了 12 口坑外承压水观测井兼作回灌井,井深与减压降水井相同,在减压降水井运行过程中,及时准确掌握承压含水层水位变化情况,必要时进行回灌。

结合上海基坑降水的工程经验以及本基坑工程降水引起的地面沉降预测可知,在未对地下水进行隔断的前提下对承压水进行降水,将造成较大的地面沉降^[16],降水引起的变形将超出地铁变形控制要求。本项目第⑦层与下部第⑨层连通,且第⑦层厚度较大,止水帷幕难以进入隔水层,为悬挂式止水帷幕。设计时考虑基坑降水过程中的群井效应,将减压降水井过滤器放置于第⑦₁层中,深度均不小于降水井底 10 m。针对本工程的承压含水层开展了群井抽水试验,并建立三维渗流分析模型对减压降水过程进行了模拟分析(图 5)。结果表明,降水 90 d 后,坑外地面最大沉降仅为 0.5 mm,满足地铁侧的保护要求。

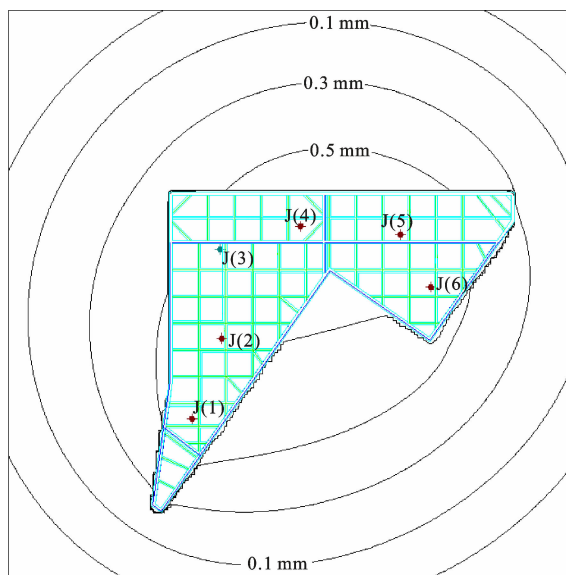


图 5 基坑降水 90 d 后地面沉降预测值等值线

Fig. 5 Contour Lines of Ground Settlement Prediction Values After 90 d Dewatering

2.2.5 针对地铁隧道的保护措施

为减小基坑开挖对邻近地铁隧道的影响,在本项目基坑支护设计过程中主要采取以下针对性保护措施:

(1)缩短邻近地铁侧的基坑开挖暴露范围,采用分区施工,化整为零;先顺作施工距离地铁隧道较远的分区,完成地下室结构后,再顺作施工邻近地铁隧道的分区,减小基坑大体量卸土对地铁隧道的影响。

(2)地铁侧采用刚度更大的地下连续墙,并在墙体两侧采用槽壁加固,防止因不良地层导致成槽时塌孔,从而对地铁产生不利影响。

(3)邻近地铁侧狭长形基坑第 2 道支撑以下采用钢支撑,挖土后可迅速架设支撑,减少基坑暴露时间,并采用自动轴力补偿系统,通过实时监控配合自动轴力调节系统,使钢支撑可以主动加压调控变形,及时补偿因墙体变形造成的部分预应力损失,以满足地铁侧的变形控制要求^[17-18]。

(4)地铁侧基坑采用三轴水泥土搅拌桩裙边+抽条进行加固,加固深度为第 2 道支撑至坑底以下 5 m,增大被动区土体抗力,控制基坑开挖阶段围护体的侧向位移,有效保护地铁隧道。

(5)基坑采用悬挂式止水,外侧地下墙进入承压含水层并比减压降水井深度深 12 m 以上,增加承压水绕流路径;在地铁侧坑外设回灌备用井,在承压水降降水时按需进行回灌,减小坑外周边土体的沉降,从而减少地铁隧道的沉降,满足地铁的保护要求。

要求。

(6)邻近地铁侧基坑采用分段开挖,每段开挖又分层、分小段,并限时完成每小段的开挖和支撑,每段开挖至坑底后立即浇筑垫层和底板。每小段每层挖土、钢支撑的安装和预应力的施加必须在 12~16 h 内完成。

3 基坑工程实施与监测分析

3.1 基坑工程实施情况

基坑工程从 2019 年 4 月开始 1 区土方开挖,目前 1,2,3 区地下结构已施工完成,4 区底板已浇筑完成。各工况实施进程如表 3 所示,基坑现场平面鸟瞰图如图 6 所示。

表 3 工程实施进程

Table 3 Construction Procedure of Project

| 施工步骤 | 施工内容 |
|------|--------------------------------|
| 1 | 地下连续墙、坑内加固、降水施工 |
| 2 | 1 区开挖第 1 层土方,施工第 1 道支撑及栈桥 |
| 3 | 1 区开挖第 2 层土方,施工第 2 道支撑 |
| 4 | 1 区开挖第 3 层土方,施工第 3 道支撑 |
| 5 | 1 区开挖至坑底,底板浇筑完成 |
| 6 | 1 区拆除第 3 道支撑,施工 B2 层板 |
| 7 | 1 区拆除第 2 道支撑,施工 B1 层板 |
| 8 | 2 区开挖第 1 层土方,施工第 1 道支撑及栈桥 |
| 9 | 2 区开挖第 2 层土方,施工第 2 道支撑 |
| 10 | 2 区开挖第 3 层土方,施工第 3 道支撑 |
| 11 | 2 区开挖至坑底,底板浇筑完成 |
| 12 | 2 区拆除第 3 道支撑,施工 B2 层板 |
| 13 | 2 区拆除第 2 道支撑,施工 B1 层板 |
| 14 | 3 区开挖第 1 层土方,施工第 1 道支撑及栈桥 |
| 15 | 3 区开挖第 2 层土方,架设第 2 道支撑 |
| 16 | 3 区开挖第 3 层土方,架设第 3 道支撑 |
| 17 | 3 区开挖第 4 层土方,架设第 4 道支撑 |
| 18 | 3 区开挖至坑底,底板浇筑完成 |
| 19 | 3 区拆第 3,4 道撑,设 1 道临时换撑,施工 B2 层 |
| 20 | 3 区拆除第 2 道支撑,施工 B1 层板 |
| 21 | 4 区开挖第 1 层土方,施工第 1 道支撑及栈桥 |
| 22 | 4 区开挖第 2 层土方,架设第 2 道支撑 |
| 23 | 4 区开挖第 3 层土方,架设第 3 道支撑 |
| 24 | 4 区开挖第 4 层土方,架设第 4 道支撑 |
| 25 | 4 区开挖至坑底,底板浇筑完成 |
| 26 | 4 区拆第 3,4 道撑,设 1 道临时换撑,施工 B2 层 |
| 27 | 4 区拆除第 2 道支撑,施工 B1 层板 |

3.2 基坑监测

本工程制定了详细的基坑监测方案,主要对围护结构、地下水位及周边建筑物布置监测点,以保证基坑工程的顺利实施。部分监测点布置如图 7 所



图 6 基坑现场平面鸟瞰图

Fig. 6 Aerial View of Excavation Site



图 7 基坑监测点平面布置

Fig. 7 Plane Arrangement of Partial Excavation Monitoring Points

示。监测结果表明,基坑工程开挖及地下结构回筑过程平稳顺利,基坑围护结构及其对周边环境的影响都在安全可控范围内。

3.3 基坑监测结果分析

3.3.1 围护体的侧向位移

图 8 为 1,2 区南侧 800 mm 厚地下连续墙各测孔在第 2,3,4 次挖土和浇筑底板及施工结构顶板等 5 个工况下的侧向位移发展情况。可以看出,各个测点处的侧向位移发展规律基本相同。首批土方开挖期间由于地下连续墙还没有侧向支撑,因此地下连续墙变形表现为上大下小的悬臂变形特征。在第 1 道支撑施加后再往下开挖,墙体侧向位移量均随着开挖深度增加而逐步增大,且发生最大位移的位置逐渐下移,主要发生在各段连续墙开挖面标高附

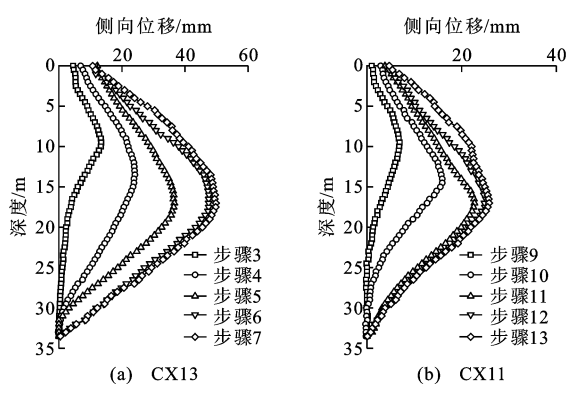


图 8 基坑围护结构侧向位移(1,2区)

Fig. 8 Lateral Displacements of Excavation Supporting Structures (Zone 1 and 2)

近,其中 1 区的施工步骤 4,5 和 2 区的施工步骤 10,11 阶段变形发展较为迅速,位移增量最大。这是因为自第 2 道支撑以下进入了第④层淤泥质黏土层,土力学性质较差,且底板施工速度缓慢,基坑暴露时间较长。测孔 CX13 及 CX11 开挖至基坑底时最大侧向位移分别为 36.6 mm 及 22.7 mm,回筑阶段围护结构变形分别增大至 49.7 mm 及 25.8 mm。

图 9 为 3,4 区靠近地铁侧 1 000 mm 厚地下连续墙各测孔在第 2,3,4,5 次挖土和浇筑底板及施工结构顶板等 6 个工况下的侧向位移。可以看出,各个测点处的侧移发展规律基本相同,在第 1 道支撑施加后再往下开挖,墙体侧向位移增长缓慢,局部区域侧移还有减小的趋势,这是由于采用了钢支撑自动轴力补偿系统,使钢支撑可以主动加压调控变形。测孔 CX21 及 CX28 开挖至基坑底时最大侧向位移分别为 18.4 mm 及 18.2 mm,回筑阶段换撑时围护结构变形分别增大至 20.6 mm 及 22.7 mm。

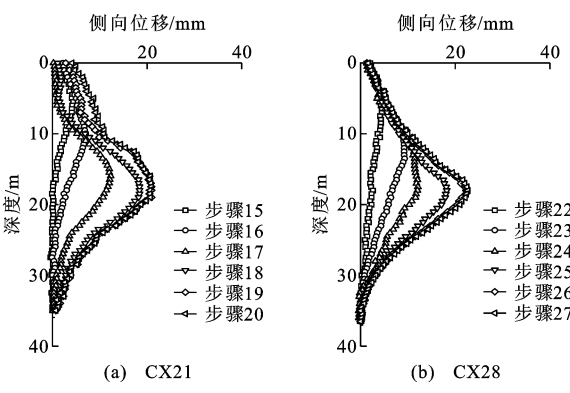


图 9 基坑围护结构侧向位移(3,4区)

Fig. 9 Lateral Displacements of Excavation Supporting Structures (Zone 3 and 4)

3,4 区的围护墙侧向位移相比于 1,2 区明显减小,其原因主要为以下几点:3,4 区采用了刚度更大

的地下连续墙,可以有效地减小墙体的侧向位移;钢支撑形成的速度相比于混凝土支撑更快,并采用自动轴力补偿系统调控围护墙的变形;3,4 区自第 2 道支撑以下进行了被动区裙边+抽条加固,加固区域覆盖淤泥质黏土层,减少了其土力学性质差对基坑变形的影响,而 1,2 区仅在基底以下区域采用了裙边加固。

徐中华^[19]统计了上海地区 94 个地下连续墙围护的基坑变形与开挖深度的关系,如图 10 所示。可以看出,本项目各分区的地下连续墙最大侧移均位于统计平均值 0.42% H (H 为基坑最大开挖深度)之下,说明本项目变形控制得较好;3,4 区的地下连续墙的最大侧移更是接近统计值的下限 0.1% H 。由此可见,本基坑在紧邻地铁侧采用刚度更大的地下连续墙、坑内加固、自动轴力补偿系统的钢支撑和分区卸载等相关措施后,基坑变形得到了有效控制。

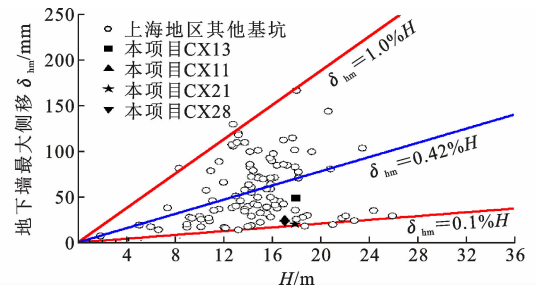


图 10 上海地区地下墙最大侧移与开挖深度的关系

Fig. 10 Relationship Between Maximum Lateral Displacement of Diaphragm Wall and Excavation Depth in Shanghai

3.3.2 坑外承压水位

在基坑开挖期间,分别对不同阶段邻近地铁隧道侧坑外承压水位进行了全过程监测,如图 11 所示。整个基坑分区开挖期间,由于坑内采用“按需降水”的原则进行减压降水,坑外承压水位略有下降,其中测孔 HG1 局部变化略大,但总体保持在比较平稳的水平,最大水位变化仅为 0.72 m。由此可见,采用地下连续墙构造加深,增加承压水绕流路径的措施效果良好,可有效减少减压降水对抗外水位的影响,从而减少坑外水位下降导致的土体沉降。

3.3.3 地铁隧道变形

图 12 为基坑 4 区开挖至基坑底时,邻近的地铁隧道竖向变形实测数据。可以看出,9 号线上、下行线区间隧道的竖向变形均表现为沉降,距离基坑较近的上行线累计最大沉降量约为 8.2 mm;距离基坑较远的下行线累计最大沉降量约为 5.1 mm。地铁隧道的沉降呈现出明显的空间效应,靠近基坑端

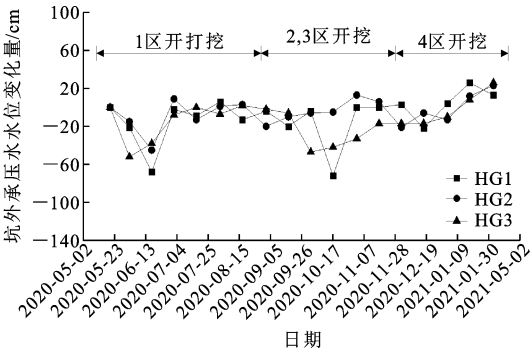


图 11 邻近地铁侧坑外承压水位变化

Fig. 11 Confined Water Level Variation Outside Excavation Adjacent to Metro Tunnel

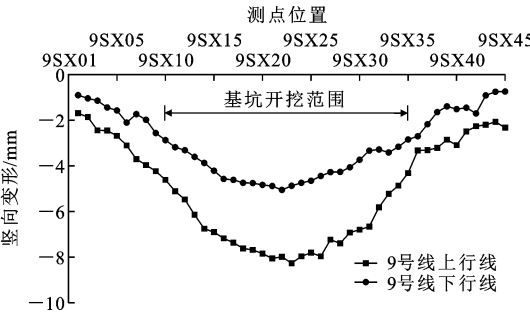


图 12 9 号线地铁隧道竖向变形

Fig. 12 Vertical Deformation of Metro 9 Line Tunnels

部的隧道沉降较小,而靠近基坑中部的隧道沉降最大,实测最大沉降量小于地铁下沉量允许值(20 mm)。计算结果和监测数据分析表明:合理的基坑分区布局可显著提高施工效率,减少基坑暴露时间;提高围护体刚度和采用自动轴力补偿系统钢支撑可有效地减小基坑的整体变形,从而使紧邻的地铁隧道变形得到更好的控制。此外,从隧道的沉降曲线还可以计算出隧道的曲率半径 $R=640\ 625\text{ m}$,远大于地铁隧道要求的控制值 $15\ 000\text{ m}^{[20]}$ 。由此可以看出,本工程采取的一系列技术措施有效地保证了地铁区间隧道的安全,施工期间地铁也处于正常运行状态。

4 结 语

本文以上海市竹园 2-16-1 地块项目基坑围护设计及施工为背景,对软土地区紧邻地铁区间的深基坑围护结构的专项保护设计方案进行了详细介绍,并根据现场实测数据对围护体位移及地铁区间隧道沉降进行分析。本工程采取了一系列基坑支护措施,包括分区施工、增大围护体刚度、远离地铁侧分区采用刚度大的十字正交对撑、邻近地铁侧长条形小基坑采用钢支撑自动轴力补偿系统、地下墙槽

壁加固及坑内土体加固、承压水控制技术等。监测结果表明,靠近地铁侧的地下连续墙变形仅为 20 mm 左右,地铁隧道最大沉降仅为 8.2 mm,隧道曲率半径满足控制值要求。本基坑所采取的深基坑变形控制系统有效地保护了周边环境安全,其设计和实践可以为软土地区同类基坑工程设计提供参考。

参考文献:

References:

[1] 闫静雅. 邻近运营地铁隧道的深基坑设计施工浅谈[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增 1): 234-237.
YAN Jing-ya. Design and Construction of Deep Foundation Pits near Metro Tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 234-237.

[2] 冯龙飞, 杨小平, 刘庭金. 紧邻地铁侧方深基坑支护设计及变形控制[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1581-1587.
FENG Long-fei, YANG Xiao-ping, LIU Ting-jin. Supporting Design and Deformation Control of Deep Excavation Adjacent to the Metro Side[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(6): 1581-1587.

[3] 王卫东, 沈健, 翁其平, 等. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增): 1340-1345.
WANG Wei-dong, SHEN Jian, WENG Qi-ping, et al. Analysis and Countermeasures of Influence of Excavation on Adjacent Tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S): 1340-1345.

[4] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 599-612.
ZHENG Gang, DU Yi-ming, DIAO Yu, et al. Influenced Zones for Deformation of Existing Tunnels Adjacent to Excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 599-612.

[5] DG/TJ 08-61—2018, 基坑工程技术标准[S].
DG/TJ 08-61—2018, Technical Code for Excavation Engineering[S].

[6] DG/TJ 08-109—2017, 城市轨道交通设计规范[S].
DG/TJ 08-109—2017, Urban Rail Transit Design Standard[S].

[7] 王卫东, 李进军, 徐中华. 敏感环境条件下深基坑工程的设计方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增): 349-354.
WANG Wei-dong, LI Jin-jun, XU Zhong-hua. Design Method for Deep Foundation Pits in Close Proximity to Sensitive Properties [J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2008, 30(S): 349-354.
- [8] 李进军, 王卫东. 紧邻地铁区间隧道深基坑工程的设计和施工[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(11): 104-111.
LI Jin-jun, WANG Wei-dong. Design and Construction of Deep Excavation Engineering Adjacent to the Subway Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(11): 104-111.
- [9] 季家俊. 软土地区双侧基坑施工对邻近地铁隧道的影响[J]. 建筑施工, 2021, 43(3): 478-482.
JI Jia-jun. Influence Analysis of Double Side Foundation Pit Construction on Adjacent Subway Tunnel in Soft Soil Area[J]. Building Construction, 2021, 43(3): 478-482.
- [10] 胡海英, 张玉成, 杨光华, 等. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2): 431-439.
HU Hai-ying, ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, et al. Measurement and Numerical Analysis of Effect of Excavation of Foundation Pits on Metro Tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 431-439.
- [11] 孔令荣, 崔永高, 隋海波. 基坑开挖对邻近地铁变形的影响分析[J]. 工程勘察, 2010, 38(6): 15-20.
KONG Ling-rong, CUI Yong-gao, SUI Hai-bo. The Influence of Foundation Pit Excavation on Adjacent Metro Deformation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(6): 15-20.
- [12] 王卫东, 吴江斌, 黄绍铭. 上海地区建筑基坑工程的新进展与特点[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 547-553.
WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, HUANG Shao-ming. Recent Progress and Characteristics of Pit Foundation in Shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 547-553.
- [13] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation Engineering Manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [14] 丁春林. 软土地区承压水基坑突涌稳定算法研究综述[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 333-338.
DING Chun-lin. Summary of Study on Calculation Method of Inrushing for Confined Water Foundation Pit in Soft Soil Area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 333-338.
- [15] 戴 斌, 王卫东. 受承压水影响深基坑工程的若干技术措施探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增): 1659-1663.
DAI Bin, WANG Wei-dong. Discussions on Technologies of Deep Foundation Pit Projects Affected by Confined Water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S): 1659-1663.
- [16] 周红波, 蔡来炳. 软土地区深基坑工程承压水风险与控制[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(1): 27-32.
ZHOU Hong-bo, CAI Lai-bing. Risk and Control of the Artesian Water for Deep Excavation Engineering in Soft Soil Area[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(1): 27-32.
- [17] 贾 坚, 谢小林, 翟杰群, 等. 软土基坑变形控制的微扰动技术[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(10): 1651-1657.
JIA Jian, XIE Xiao-lin, ZHAI Jie-qun, et al. Micro Disturbance Technology for Controlling Deformation of Soft Soil Excavation[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(10): 1651-1657.
- [18] 黄 彪, 李明广, 侯永茂, 等. 轴力自补偿支撑对支护结构受力变形影响研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增2): 359-365.
HUANG Biao, LI Ming-guang, HOU Yong-mao, et al. Effect of Auto-compensating Steel Struts on Stress and Deformation Behaviors of Supporting Structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 359-365.
- [19] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
XU Zhong-hua. Deformation Behavior of Deep Excavations Supported by Permanent Structure in Shanghai Soft Deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [20] 沪市政法(94)第854号, 上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定[S].
Shanghai Municipal Law(94) No. 854, Interim Provisions of Shanghai Municipality on the Technical Administration of Subway Construction Protection along Subway Lines[S].