

复杂环境条件下软土地基地铁车站基坑 变形特性与控制

刘德欣¹, 刘志贺¹, 过锦^{2,3}, 俞建霖^{2,3}, 龚晓南^{2,3}

(1. 苏州中车建设工程有限公司, 江苏 苏州 215000; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;
3. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 本文介绍了浙江台州地区环境条件复杂的某地铁站基坑的变形特性及相关控制措施, 内容主要包括工程概况与环境条件、场地工程地质条件、基坑围护结构设计、围护体系施工要求及监测成果等, 可供类似条件下的基坑工程借鉴参考。

关键词: 复杂环境; 软土地基; 地铁站基坑; 变形控制

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)06-0509-07

Deformation characteristics and control of subway station foundation pit in soft soil base under complex environment

LIU De-xin¹, LIU Zhi-he¹, GUO Jin^{2,3}, YU Jian-lin^{2,3}, GONG Xiao-nan^{2,3}

(1. Suzhou CRRC Construction Engineering Co., Ltd., Suzhou 215000, China;

2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China)

Abstract: This paper introduces the deformation characteristics and related deformation control measures of the foundation pit of a subway station in Taizhou, Zhejiang under complex environmental conditions. The contents mainly include engineering overview and environmental conditions, site engineering geological conditions, foundation pit enclosure structure design, enclosure system construction requirements and monitoring results. This paper can be used as a reference for foundation pit engineering under similar conditions.

Key words: complex environment; soft soil foundation; subway station foundation pit; deformation control

0 引言

随着我国经济发展, 城市建设及地铁建设随之高速发展, 用以缓解城市交通的压力。地铁站的施工往往采用明挖法。基坑开挖需要对土体进行挖掘和支护, 不可避免地会影响周边环境, 尤其是开挖深度深、开挖面积大的地铁站基坑。在周边复杂环境下, 基坑引起的变形有可能造成周边建(构)筑物的破坏。各地对地铁基坑变形有着严格的要求, 在这种情况下, 基坑围护设计要充分考虑周边

复杂环境对基坑变形的影响以及基坑变形对周边建(构)筑物是否产生破坏, 保证其安全和正常使用。在围护体系施工、土方开挖的过程中严格控制基坑的变形, 使基坑四周土体的水平位移和竖向变形控制在容许的范围之内。

1 工程概况与环境条件

(1) 车站概述

地铁车站由主体建筑、I~IV号4个出入口及2

个风亭组成, 站台形式为岛式站台, 车站前后侧均接隧道区间, 车站全长 216 m, 站台宽度 12 m, 标准段开挖深度约为 20.6 m (端头井 23.1 m); 车站采用明挖法施工, 小里程端及大里程端均为盾构始发井。

(2) 周边建(构)筑物

车站北侧约 300 m 处为体育场, 西侧为多层居民小区, 主要为住宅小区, 小区地下室边线距车站主体基坑最近处约 18.7 m, 小区建筑物距车站主体基坑最近处约 18.0 m; 车站东侧为城市绿地与河道, 河堤边线离车站主体基坑最近处约 17.0 m (图 1)。

(3) 重要控制性管线

车站建筑范围内地下市政管线较多, 经当地主管部门及规划院勘测, 车站范围内主要管线为: DN800 给水管, 埋深 1.79 m; DN300 给水管, 埋深 0.32 m; DN1 000 污水管, 埋深 3.61 m; 直径 160 mm 燃气管, 埋深 0.8 m; 600×300 mm 电信管线, 埋深 1.03 m。车站基坑施工前应对车站范围内的管线进行临时、永久迁改, 或原地保护处理措施。

2 场地工程地质条件

(1) 地形地貌

该地铁车站所在地貌为海积平原, 地形平缓开阔, 绝对标高在 2.5~4.0 m 之间。主场地现为城市交通主要干道、房屋建筑及居民住宅区等。

(2) 地基土层物理力学性质

地基各土层厚度及主要物理力学性质指标见表 1。

(3) 水文地质条件

a) 地表水

站点东侧为市政河道, 河道宽约 30~40 m, 勘察期间河面标高约 1.5 m, 水深 1.5~2.5 m 左右, 河底淤泥厚约 0.5~0.8 m, 河岸设置有浆砌块石护坡。

b) 地下水

场地分布的地下水主要为赋存于浅部黏性土层中的孔隙潜水及下部碎砂砾石层中的孔隙微承压水。

c) 孔隙潜水

全新统海积孔隙潜水广泛分布于平原表部, 含水层岩性为灰色淤泥质黏土, 透水性差, 地下水埋深 2.30~4.00 m, 相应标高-0.49~1.26 m, 动态随季节变化明显, 年变幅在 1.0 m 左右。

d) 孔隙承压水

主要赋存于 3₃ 层砾砂、4₃ 层含黏性土圆砾层中, 含水层分布不连续, 不稳定及厚度不均, 总体厚度较薄, 黏粒含量较大, 富水性一般, 渗透性一般, 根据测量承压水位埋深一般 30~45 m。承压含水层主要接受上部含水层的越流或侧向补给, 通过人工抽汲或越流等方式排泄, 地下水位动态随季节变化较小。承压水层上部为透水性极差的黏性土层, 且埋藏深, 因此场地孔隙承压水对本工程施工影响小。

表 1 各土层主要物理力学性质指标

Tab. 1 Main physical and mechanical property indexes of each layer

层号	土层名称	厚度/m	w/%	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	e	地基承载力 特征值/kPa	直接快剪		固结快剪	
							$\phi/^\circ$	c/kPa	$\phi/^\circ$	c/kPa
1 ₀	填土	1.20~4.20	-	19.0	-	-	12.00	8.00	-	-
1	黏土	0.40~1.70	39.97	18.1	1.15	100	6.00	14.00	8.00	16.00
2 ₂	淤泥	13.50~19.40	53.26	16.9	1.50	45	5.47	3.93	13.13	15.08
3 ₁	黏土	0.80~4.20	29.5	19.2	0.85	135	15.30	21.51	15.90	24.00
3 ₂	黏土	1.30~12.50	45.18	17.5	1.27	100	7.03	4.40	12.02	21.13
3 ₂₋₁	淤泥质黏土	1.30~10.70	48.51	17.3	1.36	80	7.10	4.50	12.67	16.83
3 ₃	砾砂	1.10~4.20	-	-	-	180	32.00	2.00	-	-
4 ₁	黏土	0.90~7.70	32.49	18.8	0.94	150	12.14	19.00	15.62	32.00
4 ₂	黏土	2.60~14.40	43.95	17.8	1.24	110	9.30	4.74	13.57	22.15
4 ₃	含黏性土圆砾	1.10~1.70	-	-	-	200	35.00	0.00	-	-
5 ₁	黏土	1.90~8.90	34.15	18.7	0.98	160	-	-	17.35	37.00
5 ₂	黏土	1.50~8.90	38.29	18.1	1.09	120	-	-	13.50	30.00

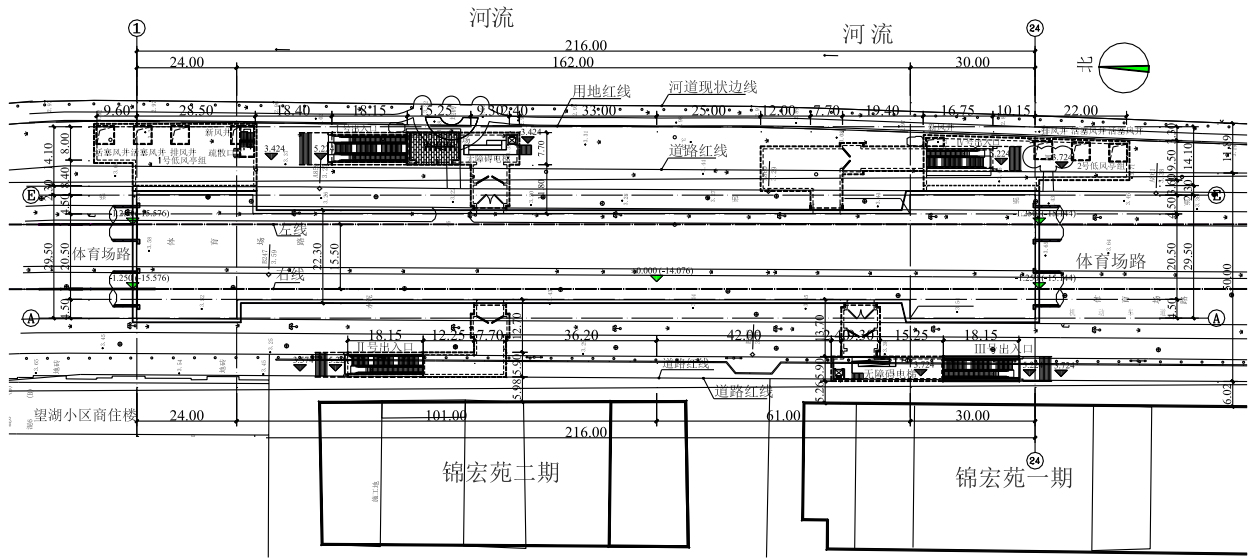


图1 基坑周边环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the surrounding environment of foundation pit

3 围护结构设计

(1) 围护结构形式简述

综合车站的特点、周边环境、水文地质条件和工程造价,车站基坑采用地下连续墙结合内支撑的支护型式,地下连续墙标准段及两端端头井厚度均为1000 mm,采用工字型钢接头。车站标准段设置四道支撑(另设一道钢管换撑),其中第一、三道为混凝土支撑,第二、四道为钢管支撑(Φ800, t=16)。端头井设置五道支撑(另设两道钢管换撑),其中第一、三、四道为混凝土支撑,第二、五道为钢管支撑。其中标准段基坑典型围护剖面见图2。

(2) 设计技术标准

基坑安全等级为一级,支护结构重要性系数1.1。根据《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497-2009),围护结构的最大深层水平位移值应 $\leq 0.4\% H$ (H 为基坑深度),且 ≤ 62 mm;顶部水平位移应 $\leq 0.2\% H$,且 ≤ 30 mm。基坑周边地表竖向位移 ≤ 30 mm;立柱竖向位移 ≤ 30 mm。

(3) 计算荷载

a) 结构自重:钢筋混凝土结构重度 $\gamma=25$ kN/m³,钢材重度 $\gamma=78.5$ kN/m³。

b) 地层压力:施工期间作用在围护结构上的主动区土压力按朗金公式的主动土压力计算,综合地勘报告各土层渗透系数及规范规定,对于淤泥、黏土、粉质黏土采用水土合算,其余土层采用水土分算。

c) 水压力:施工期间最不利水位按场地平整标

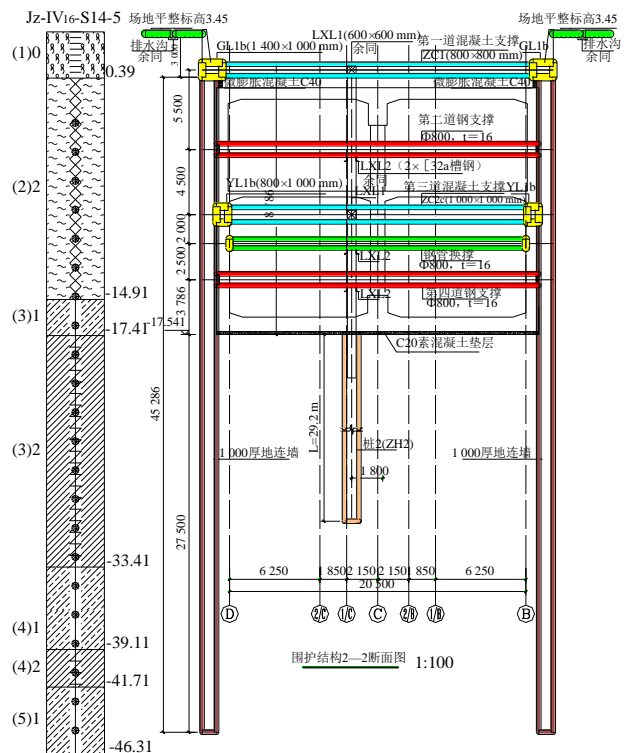


图2 标准段基坑围护结构典型剖面图

Fig. 2 Typical profile of foundation pit enclosure in standard section

高以下0.5 m计算。

d) 地面超载按活载计入,考虑施工车辆,机具超载值标准段及端头井均按30 kPa(离基坑边线6 m内区域),20 kPa(离基坑边线6 m外区域)计入(主体结构端头井盾构环梁施工完成前,周边场地严禁堆放盾构管片)。

e) 荷载组合

根据《建筑基坑支护技术规程》3.1.6条规定,作用基本组合的综合分项系数不应小于1.25。本基坑支护的设计使用年限为2年。

4 围护结构施工要求

根据上述分析,基坑围护体系具体做法如下:

(1) 地下连续墙

①地下连续墙施工顺序:导墙→成槽→下钢筋笼→插入导管→浇灌混凝土→下一幅槽段循环。

②导墙

导墙的形式和分段长度宜根据现场的地质情况确定并与地下连续墙的接头错开,应保证导墙面与土面密贴,防止坍塌。导墙与地下墙中心线重叠,导墙宽度为地下墙厚度加30~50 mm的施工余量,导墙顶部应高出地100~200 mm,平面中心线容许偏差为±10 mm,墙面不平整度小于5 mm。现浇钢筋混凝土导墙拆模后沿其纵向每隔2 m左右加设上下两道支撑,在导墙混凝土未达到设计强度前,禁止任何重型机械和运输设备在旁边行走,以防导墙受压变形。

③成槽和泥浆护壁

a) 地下连续墙成槽施工前进行成槽试验,并通过试验确定施工工艺及施工参数。

b) 成槽垂直精度不得低于1/150,接头处相邻两槽段的中心线在任一深度的偏差不得大于50 mm。

c) 成槽后认真清槽,清槽质量应达《建筑地基基础工程施工质量验收规范》等相关要求;槽底沉淀物淤积厚度不大于100 mm,槽底500 mm处泥浆密度不大于1.15,将相邻已浇筑完成的混凝土槽段接头上附贴的浆皮、灰渣清除干净。

d) 根据工程水文地质、挖槽方式、泥浆循环方式等因素,成槽与浇筑混凝土期间,不同工作状态下的泥浆性能指标应满足有关规范、技术规程的要求;槽内泥浆液面不低于导墙面0.3 m,且高于地下水位0.5 m以上。

e) 单元槽段长度宜为4~6 m。成槽机应具备垂直度显示仪表和纠偏装置,成槽过程中及时纠偏。

④钢筋笼的制作、吊装及预埋件埋设

a) 分节制作钢筋笼同胎制作采用焊接或机械连接。

b) 钢筋笼制作时应预留导管位置,并上下贯通。

c) 钢筋笼设置纵横向桁架、剪刀撑等措施加强

钢筋笼的整体刚度,并进行整体吊放安全验算。

d) 钢筋笼应设保护层垫板,纵向间距为3~5 m,横向设置2~3块。

e) 钢筋笼吊点布置根据吊装工艺和计算确定,并进行整体起吊安全验算,按计算结果配置吊具、吊点加固钢筋、吊筋等。

f) 钢筋笼在清基后及时吊放。

g) 异形槽段钢筋笼起吊前对转角处进行加强处理,并随入槽过程逐渐割除。

⑤混凝土浇筑

a) 混凝土与泥浆密度差>1.1。

b) 混凝土浇灌前,利用导管进行约15 min以上的泥浆循环,以改善槽内泥浆质量。

c) 钢筋笼入槽6 h内开始浇灌混凝土,刚开始浇灌时速度要快,使槽底沉渣随着混凝土表面一起上升,一次性保证连续浇灌6 m³以上的混凝土,混凝土连续浇灌,每小时上升速度控制在3~5 m/h,导管埋入混凝土中长度控制在2~4 m。

(2) 支撑系统

①标准段支撑做法

车站标准段基坑共设五道支撑,以图2为例,做法如下:

a) 待地连墙、冠梁及其上挡土墙达到设计强度后,开挖基坑至第一道支撑下方0.5 m,设置第一道支撑。向下开挖至第二道支撑下方0.5 m,架设第二道支撑。这样依次开挖土体至基底。每道支撑均开槽设置,不得先开挖后支撑。

b) 开挖到基底后注意对钢支撑复加预加轴力,施工接地网后浇筑混凝土垫层、结构底板,设置泄水孔并预留内部结构钢筋,待底板混凝土强度达到设计强度后,拆除第五道支撑,然后施工侧墙至第四道支撑位置处,拆除第四道支撑。

c) 侧墙混凝土强度达到85%后,在第三道支撑以下2.0 m架设临时支撑,拆除第三道支撑。

d) 浇筑地下二层内衬墙、柱和中板,混凝土强度达到设计强度85%后拆除第二道支撑。

e) 浇筑地下一层内衬墙、柱和顶板,混凝土强度达到设计强度85%后拆除第一道支撑。

f) 回填顶板以上覆土并夯实,恢复路面。

②支撑预加轴力

在施工过程中要求对支撑预加轴力,钢支撑预加轴力为设计轴力50%~80%左右(换撑预加力不大于30%,以避免侧墙裂缝)。为控制墙体水平位移,钢支撑必须有重复预加轴力的装置,下道支撑安装

后需对其上所有支撑调整预加轴力。钢支撑的预加压力应分级施加,施加每级压力后应保持压力稳定10 min后方可施加下一级压力;预加力加至设计规定值后,应在压力稳定10 min后,方可按设计预压力值进行锁定。

(3) 基坑排水

根据地勘资料,承压水主要赋存于3₃层砾砂、4₃层含黏性土圆砾层中,含水层分布不连续,不稳定及厚度不均,总体厚度较薄,黏粒含量较大,富水性一般,渗透性一般,本基坑可不考虑承压水突涌和地下水渗流的流土稳定性的可能。

基坑开挖前20 d采用明沟,集水井对坑底进行预降水、疏干,以加固坑内土体,基坑内的降水深度控制在基坑绝对标高最低处(集水井、下翻梁等局部下沉位置的垫层下方)以下1.5 m,以保证降水效果。

5 施工过程监测及成果分析

监测是围护结构动态设计、信息化施工得以实现的依托。施工期应进行全过程监测,根据由施工现场和监测结果反馈的信息,对围护结构的设计作出调整,使最终的围护方案达到既安全又经济。为了实施对施工过程的动态控制,掌握地层与围护结构体系的状态,及施工对既有建(构)筑物的影响,必须进行现场监控量测。通过对量测数据的整理和分析,及时确定相应的施工措施,确保施工过程和既有建筑的安全。本基坑监测内容如下:

(1) 围护墙顶水平、竖向位移

共布置32个测点,测点平均间距19 m布置。

(2) 基坑周边地表竖向位移

共设置18个监测剖面。监测剖面应与坑边垂直,每个监测剖面上的监测点数量不宜少于5个。

(3) 深层水平位移

共设置22个测点。测斜管须在围护墙中心处预埋,底部同桩底,顶部预留出冠梁的高度。灌注混凝土时,需注意对测斜管的保护,并保证其铅垂向下。

(4) 支撑轴力

布置在支撑靠近端头处。支撑轴力布置在9个断面上,其它地方酌情布设。

(5) 地下水水位

共布置22个测孔,测孔平均间距38 m布置。

(6) 基底隆起

在基底开挖面中部布置,共设置有5个监测断

面,共15个监测点。

(7) 地下管线位移

基坑周边重要市政管线,特别是煤气管、给水管、排水管、通讯电缆、供电电缆等。

(8) 周边建筑物位移、倾斜

基坑周边保护性建筑监测点的布置应满足《建筑基坑工程监测技术规范》的要求。

基坑监测成果如下:

图3为基坑监测平面布置图,如图所示:测斜管CX1~CX15依次位于基坑东侧,CX17~CX31依次位于基坑西侧,CX16与CX32分别位于基坑南侧和北侧中点处。其中,CX1、CX15、CX17、CX31位于基坑角点处。基坑周边地表沉降测点分布同测斜管分布。

图4为基坑各测点最大水平位移的空间分布,总体上呈现基坑角点处水平位移较小,越靠近基坑边中点水平位移越大,其空间分布主要受空间效应的影响。而CX5、CX21、CX27的水平位移值比更加靠近中点的测点的水平位移值更大,且CX11的值也较大,这可能是由于这几个位置附近存在基坑阳角,这部分土体容易产生较大的位移,从而导致基坑水平位移增大。整个基坑的最大水平位移平均值为41.37 mm,约为开挖深度的0.21%。

图5为测斜管水平位移沿深度发展的曲线,呈“弓形”变化趋势,即土体侧向位移呈“中间大,两头小”的变化趋势,最大侧移发生在坑底位置处。从图中可以看出,角点处的土体水平位移值更小,变化幅度也更小。

图6为各测斜管最大水平位移随时间的发展变化规律。随着基坑的开挖,水平位移不断增大。在土方开挖阶段,土体侧移迅速增大;在架设支撑阶段,土体侧移发展仍有一定增长但速率减缓;当基坑开挖到坑底后,土体水平位移接近于最大值;待地下室底板浇筑完成后,土体侧移趋于稳定。

图7为基坑周边地表沉降空间分布规律, d 为测点到基坑边的距离, H_c 为基坑开挖深度。从图中可以看出,曲线呈现“凹槽型”分布,即随着离基坑边距离的增大,地表沉降先增大后减小;在 $0.5 H_c$ 与 $0.75 H_c$ 附近,地表沉降取得最大值;在地表沉降达到最大前,地表沉降随着离基坑边越来越远,增长速度逐渐放缓。

图8为地表沉降随施工时间的发展规律。由图可见:随着开挖深度增大,地表沉降也随之不断增加,直到地下室底板浇筑完成后,地表沉降趋于稳

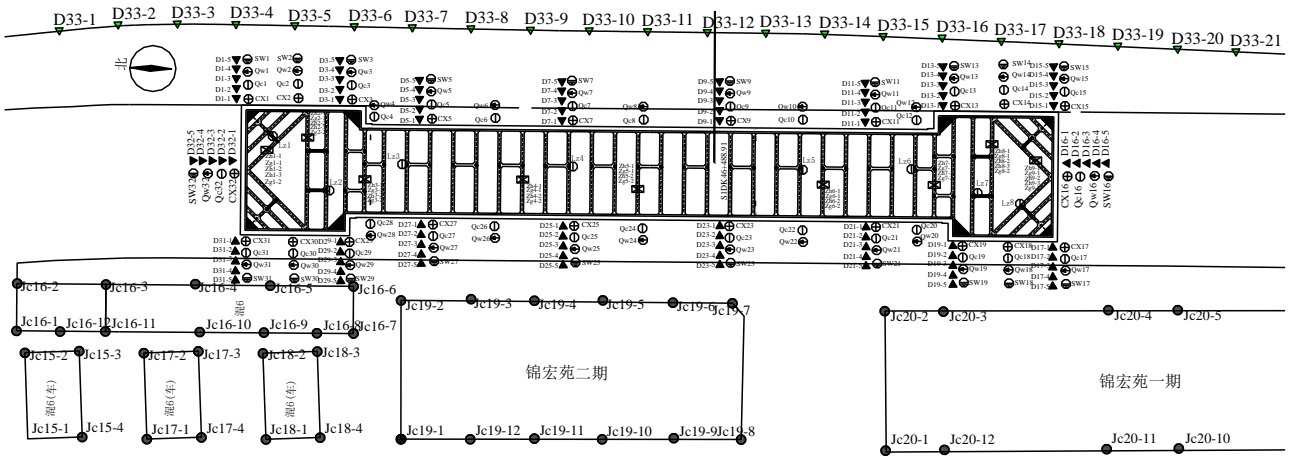


图3 基坑监测平面布置图

Fig. 3 Monitoring plan of foundation pit

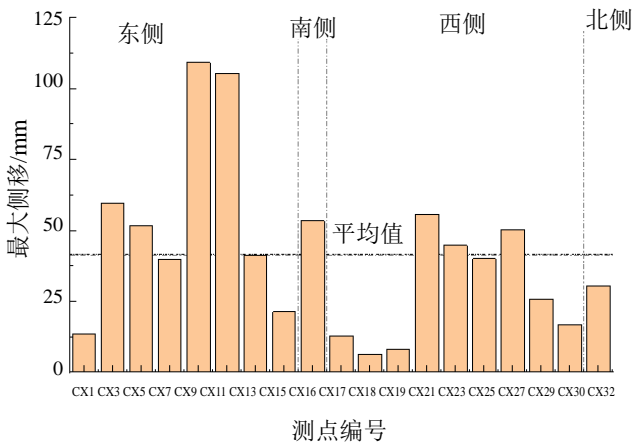


图4 测斜管最大侧移空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution diagram of maximum lateral movement of inclinometer pipe

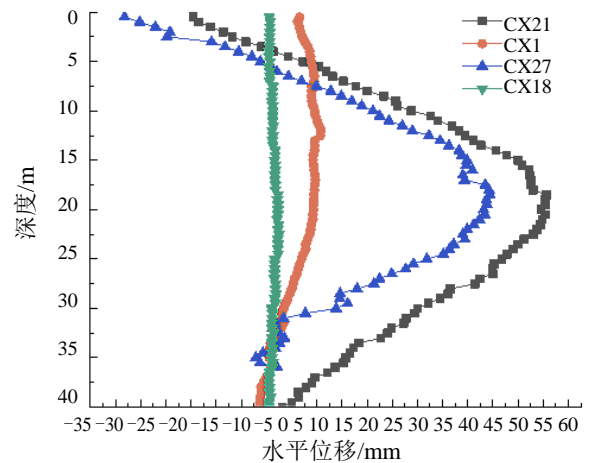


图5 测斜管侧移沿深度的分布图

Fig. 5 Distribution of lateral displacement with depth

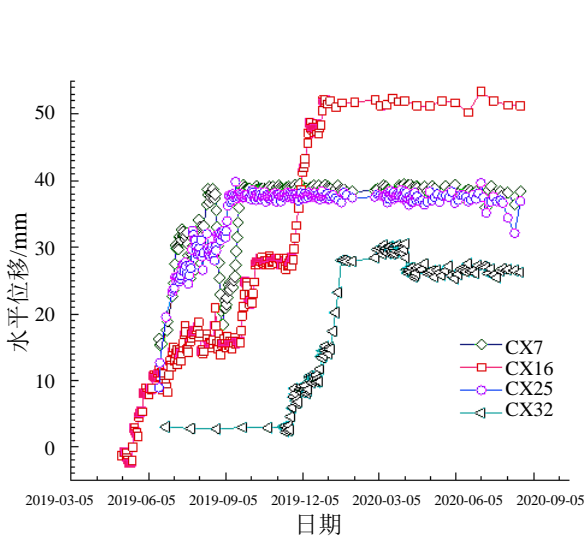


图6 测斜管最大水平位移随时间的发展规律

Fig. 6 The development of maximum horizontal displacement of inclinometer tube with time

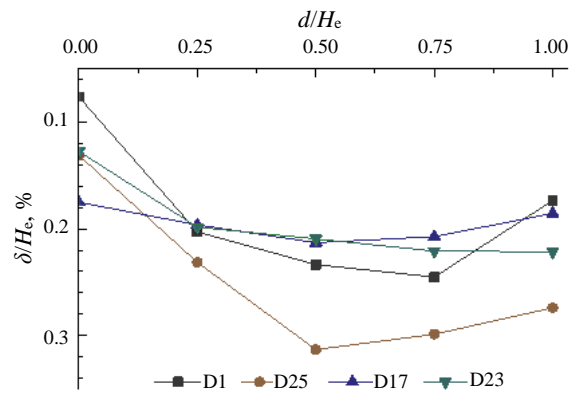


图7 地表沉降空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of surface settlement

定。从图中可以看出，地表沉降呈现波动式增长，这是由于架设支撑时，地表沉降增速放缓甚至沉降量减小；但随着土体的继续开挖，地表沉降又继续增大。地表最大沉降量约为该处深层土体水平位移

最大值的 133.24%。

周边建筑物最大平均沉降约为 36.50 mm, 管线在基坑中部及附近的测点沉降较大, 约为 61.36 mm。周边建筑物和管线均未出现异常情况。

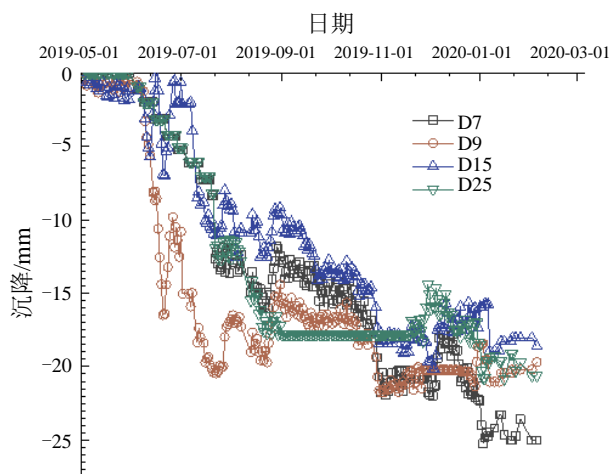


图8 地表沉降随时间的发展

Fig. 8 Surface subsidence version time

6 结 论

(1) 地铁车站基坑处于深厚淤泥土地基中, 周边环境条件复杂, 采用地下连续墙结合多道内支撑的支护体系, 既保证了基坑的安全, 也保证了临近建(构)筑物的安全和正常使用。

(2) 基坑周边土体水平位移分布呈现明显的空间效应: 在基坑角点处水平位移较小, 在基坑边中点处水平位移较大。同时, 受基坑阳角的影响, 阳角附近的坑外土体容易产生较大的水平位移。

(3) 基坑外地表沉降随着与基坑边距离的增大, 先增大后减小, 呈现“凹槽型”分布; 沉降最大点与基坑边距离在 $0.5 H_e$ 与 $0.75 H_e$ 附近。在沉降达到最大前, 沉降增长的速度随着离基坑边距离的增大而逐渐减小。

(4) 在基坑土方开挖期间, 深层土体水平位移和地表沉降发展较快, 在支撑架设之后, 增长率明显放缓。支撑的架设对深层土体水平位移和沉降的发展都有明显的抑制作用, 在施工过程中应及时架设支撑。

参考文献

[1] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

- [2] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] 黄强. 建筑基坑支护技术规程使用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [5] 李镜培, 陈浩华, 李林, 等. 软土基坑开挖深度与空间效应实测研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 208-217. LI Jing-pei, CHEN Hao-hua, LI Lin, et al. Observation on depth and spatial effects of deep excavation in soft clay[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 208-217.
- [6] 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 Jiao Tong University, 2007.
- [7] 丁智, 王达, 王金艳, 等. 浙江地区软弱土深基坑变形特点及预测分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 506-512. DING Zhi, WANG Da, WANG Jin-yan, et al. Deformation characteristics of Zhejiang soft soil deep foundation pits and their predictive analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 506-512.
- [8] 李淑, 张顶立, 邵运达. 复杂环境下北京地铁车站深基坑变形时空规律研究[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(4): 29-36. LI Shu, ZHANG Ding-li, SHAO Yun-da. Research on spatio-temporal law of deep excavation deformation under complicated environment in Beijing subway station[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(4): 29-36.
- [9] 奚家米, 付垒. 基于时空效应的深基坑工程变形规律分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(16): 290-297. XI Jia-mi, FU Lei. Analysis of deformation law of deep foundation pit based on space-time effect[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(16): 290-297.
- [10] 陈涛, 宋静, 翟超. 考虑时空效应软土地区深基坑开挖变形分析[J]. 岩土工程技术, 2019, 33(3): 149-153, 187. CHEN Tao, SONG Jing, ZHAI Chao. Analysis and study of deformation of foundation pit excavation in soft soil considering time-space effect[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2019, 33(3): 149-153, 187.