

文章编号:1674-2869(2017)03-0259-08

钢支撑对基坑的影响分析 —以武汉地铁2号线为例

代 祥,周春梅*

武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074

摘 要:以武汉地铁2号线机场线盘龙城车站出入口基坑为例,采用围护桩水平位移监测及数据采集方法,分析有无架设钢支撑支护桩深度-位移曲线,探讨围护桩水平位移变化规律.然后采用有限元软件PLAXIS 2D模拟分析基坑开挖过程有无架设钢支撑支护桩内力和水平位移变化规律,并与现场监测数据相互验证.由围护结构水平位移的监测数据和数值模拟结果可得,在基坑内架设钢支撑可以减缓基坑偏移速率以及在距围护桩桩底的 $H/3\sim 2H/3$ 处,偏移量最为明显,偏移量也最大,呈“弓”字型.

关键词:基坑;现场监测;数值模拟;钢支撑;围护桩

中图分类号:TU473.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2017.03.010

Influence of Steel Supports on Deformation of Foundation Pit: a Case of No.2 Subway Line in Wuhan

DAI Xiang, ZHOU Chunmei*

School of Resource and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Taking entrance foundation pit of Panlongcheng station of airport section in line 2 Wuhan Metro System as a case, we employed the horizontal displacement monitoring and data collection method to analyze the depth-displacement curves of the steel supporting and retaining pile and the rules of horizontal displacement of retaining pile. And then we used the finite element software PLAXIS 2D to explore variation law of the horizontal displacement and inner stress of supporting piles in the project of foundation. By comparing the data of field monitoring and simulation, the results show that the installing steel support slows down the displacement's development rate and the change of development rate is significant at the $1/3\sim 2/3$ height from the bottom of the pile, showing a bow appearance.

Keywords: foundation pit; field monitoring; numerical simulation; steel support; supporting pile

随着我国经济飞速发展,地铁建设成为当前的一股热潮,随之而来,地铁深基坑工程数量越来越多,伴随着施工难度也越来越大^[1]. 基坑的施工

过程中,随着土体开挖,基坑周围土体应力释放,会产生地面沉降、围护结构变形,过大的变形将直接影响到施工现场的安全^[2]. 所以对深基坑变形进

收稿日期:2016-06-20

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20151511);武汉工程大学青年科学研究基金(Q201403);武汉工程大学重点教学建设工程项目(J201403)

作者简介:代 祥,硕士研究生. E-mail:1197781736@qq.com

*通讯作者:周春梅,博士,副教授. E-mail:2564937223@qq.com

引文格式:代祥,周春梅. 钢支撑对基坑的影响分析—以武汉地铁2号线为例[J]. 武汉工程大学学报,2017,39(3):259-266.

DAI X, ZHOU C M. Influence of steel supports on deformation of foundation pit: a case of No.2 subway line in Wuhan[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(3): 259-266.

行研究,为地铁建设提供有利保障^[3-4]。

在深基坑开挖中,近年通过现场监测以及支撑轴力变化监测,分析钢支撑对支护结构偏移的影响。刘利民^[5]、胡钧^[6]和李爱民^[7]通过在支护结构中埋设测斜管,监测现场支护结构水平位移,能反映真实基坑水平位移情况。Long^[8]在统计分析了大量基坑现场监测数据的基础上,得到软土地区的基坑最大水平位移与开挖深度之间的关系。陈军^[9]和任建喜^[10]对深基坑进行监测,通过设计、施工和监测相结合,得出基坑变形规律。刘杰等^[11]建立弹塑性有限元模型,对地铁车站深基坑开挖进行仿真模拟计算,得出了钢支撑+围护桩的围护形式对基坑土体的侧向变形有较好的限制作用结论。Thomas^[12]和张明聚^[13]通过现场监测数据与FLAC3D软件模拟计算数据做对比,得出不同的支撑轴力作用和刚度变化与维护结构变形的关系。郭楠^[14]对基坑支护结构钢支撑施加轴向施加预应力,发现钢支撑可以防止因土体流变而产生较大的位移。朱彦鹏^[15]采用FLAC3D软件模拟基坑开挖、钢支撑施工,得到支护桩的水平位移曲线呈弓型分布,最大值位于距离坑底 $H/2 \sim H/3$ 处。

前人虽然在深基坑开挖方面做了很多的监测,但并没有分析钢支撑的架设对围护结构变形、围护结构水平位移的影响规律,没有结合数值建模验证监测数据是否符合变形规律。本文根据基坑围护桩变形的监测数据,分析围护桩水平位移影响变化规律。对比有无架设钢支撑、基坑开挖深度及开挖速率,分析围护桩水平位移的动态变化规律。采用有限元软件PLAXIS 2D建立有限元模型,模拟分析基坑开挖过程有无架设钢支撑,对围护桩内力变化规律,并与监测数据进行对比,验证监测数据真实性。

1 工程概况

1.1 工程概况及地质情况

本文以武汉市轨道交通2号线北延线工程盘龙城车站为例,对出入口基坑围护桩水平位移进行监测,分析有无钢支撑对桩体水平位移影响。盘龙城车站位于盘龙大道与汤云海路相交路口,盘龙大道西侧。周边现状为绿化空地和新阳光地产开发用地。车站东侧为盘龙城遗址保护区域,车站沿盘龙大道南北向布置,西北方为已建成巢上城居住小区。

盘龙城站为地下两层11 m单柱双跨明挖岛式站台车站,车站共设4个出入口、2组风亭。车站起

点里程为右 BDK11+182.700,车站终点里程为右 BDK11+474.697,有效站台中心里程为右 BDK11+349.000,全长 292.0 m。盘龙城站现地面标高一般 26.35 m~27.73 m,Ⅱ号出入口基坑开挖深度约 2.75 m~13.25 m,基坑开挖面积 535 m²,为了支撑深基坑土方侧压力,防止土体变形产生位移,采用钻孔灌注桩进行基坑支护;Ⅳ号出入口基坑开挖深度约 10.65 m~13.70 m,基坑开挖面积 717 m²,采用钻孔灌注桩支护。出入口采用明挖法施工。

1.2 工程地质

图1为Ⅱ号出入口工程地质剖面图。根据钻探资料、原位测试和土工试验成果分析,基坑地面以下10 m深度范围内地基土主要由人工填土、可塑-硬塑状态黏性土、稍密-中密状碎石土、软塑-硬塑状红黏土、可塑-硬塑状残积土、中风化灰岩构成。

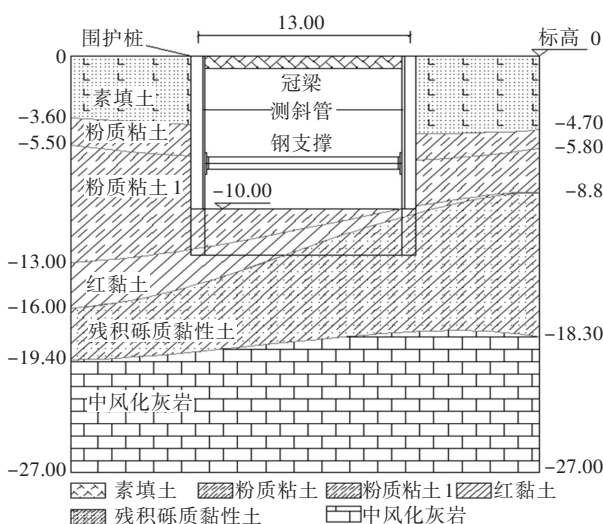


图1 Ⅱ号出入口工程地质剖面图(单位:m)

Fig. 1 Engineering geological profile of entrance II (unit:m)

2 围护结构水平位移监测过程

2.1 监测内容

基坑监测内容包括围护桩顶水平位移和竖向位移、钢支撑的轴力。本文重点监测出入口基坑在开挖过程中,在围护桩架设钢支撑前后围护桩水平位移。

2.2 监测频率

为了更好的反应围护结构的变形,监测的初始值一定要在基坑开挖之前相对稳定时进行测量,对所有的监测项目进行连续三次独立的监测,取其算术平均值,得出的数值做为监测初始值,基坑开挖的过程中,按表1监测频率来进行监测,当监测变化量超过有关预警值或者地表沉降变化较

大时,要及时预警,反馈数据给施工方或有危险事故征兆时加大监测次数。

表1 基坑监测频率
Tab. 1 Monitoring frequency of foundation pit

施工状况 construction condition	监测频率 monitoring frequency
基坑开挖期间	$H \leq 5\text{ m}$ 1次/3天
	$5\text{ m} < H \leq 10\text{ m}$ 1次/2天
	$10\text{ m} < H \leq 15\text{ m}$ 1次/天
	$H > 15\text{ m}$ 2次/天
基坑开挖完成后	1~7天 1次/天
	7~15天 1次/2天
	15~30天 1次/3天
	30天以后 1次/周
	经数据分析确定达到基本稳定后 1次/月

注: H 表示出入口基坑开挖深度

2.3 现场监测点位布置及埋设原则

2.3.1 监测点布置原则 在基坑围护桩内安装测斜管,沿基坑纵向每20 m~30 m布设。深度等同围护结构长度,以盘龙城Ⅱ出入口和Ⅳ出入口为基坑监测点平面布置图,如图2所示。

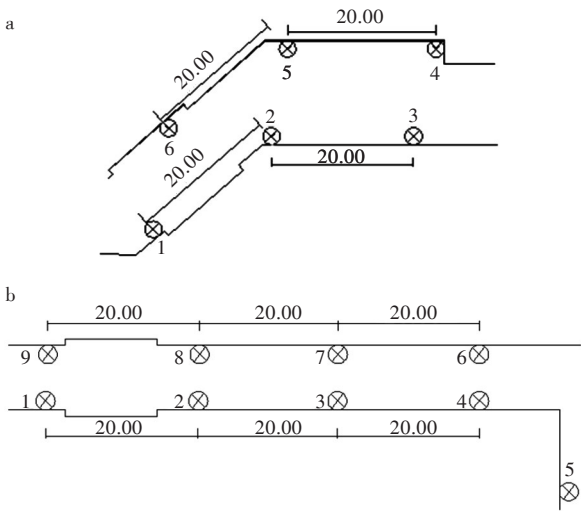


图2 (a)Ⅱ出入口基坑,(b)Ⅳ出入口基坑监测点平面布置(单位:m)

Fig. 2 Plane layout of foundation pit monitoring points (a)Ⅱ entrance pit and (b)Ⅳ entrance pit(unit:m)

2.3.2 测点的埋设技术要求 测点埋设方法:本工程测斜管采用绑扎,测斜管通过扎带直接绑扎

固定在围护桩钢筋笼上,图3为钢筋笼内绑扎测斜管,钢筋笼导入钻孔后,浇筑混凝土。将测斜管拼接后放入钢筋笼迎土侧,并按0.5 m左右间距用扎丝或者扎带固定,顶底用盖子封堵,并保证测量槽与基坑边垂直。

围护结构测斜管埋设与安装应按照以下要求:1)测斜管底部应与钢筋笼底部保持水平或略低于钢筋笼的底部,顶端到达地面以上;2)测斜管与围护桩的钢筋笼绑接时,绑接间距不宜大于0.5 m;3)上下测斜管应对接良好,无缝隙,底部用地帽用螺丝固定,顶端密封;4)测斜管绑扎时应调正方向,使管内的一对测槽垂直于基坑内;5)地面以上的测斜管,做好标记和防护工作。



图3 绑扎测斜管
Fig. 3 Binding inclinometer pipe

2.4 监测方法和数据采集

图4为测斜仪的测量原理。探头下滑动轮作用点相对上滑动轮作用点的水平偏差长度可以通过仪器测得的倾角 φ 计算得出,计算公式:

$$\Delta\delta_i = L_i \times \sin \Delta\varphi_i \tag{1}$$

式(1)中: $\Delta\delta_i$ 第*i*测量段的相对水平偏差增量值; L_i 第*i*测量段的垂直长度,值取1.0 m; $\Delta\varphi_i$ 第*i*测量段的相对倾角增量值。

每段间隔 L_i 为常数,则相对水平偏差总位移量与水平位移一同计入管端水平位移量值 δ ,即 $\delta = \delta_0 + \sum_{i=1}^n L_i \sin \Delta\varphi_i$,这样就可以求出每个深度的位移量。

工程属于地铁车站深基坑,对围护桩水平位移进行监测,主要采用CX-06A型测斜仪及其配套 $\phi 70$ PVC测斜管。

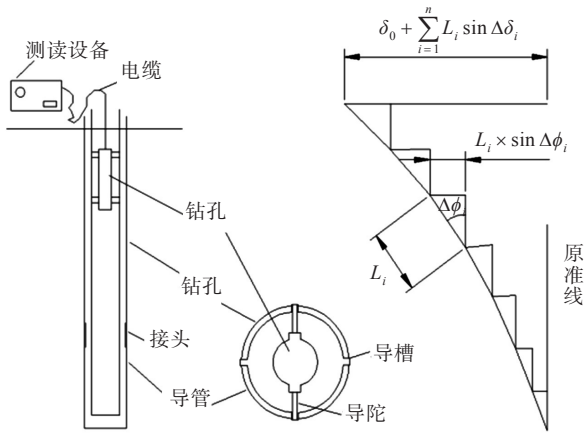


图 4 测斜仪测量原理

Fig. 4 Measuring principle of the inclinometer

3 监测结果分析

3.1 架设钢支撑位移监测结果

深基坑变形分析过程中,由于基坑开挖,基坑中围护桩受土压力作用下产生的水平位移最能反映基坑变形问题. 本文以盘龙城站Ⅱ号出入口 CX3 和Ⅳ号出入口 CX3 水平位移对比分析,探讨围护桩的任意深度水平位移随着基坑开挖深度的变化而变化关系,以及对比基坑开挖有无架设钢支撑对围护桩水平位移影响. 图 5 为Ⅱ号出入口架设钢支撑桩体深度-位移图,所有数据经过处理(本次累计位移量减去上次累计位移量),有助于分析桩体单次变化量.

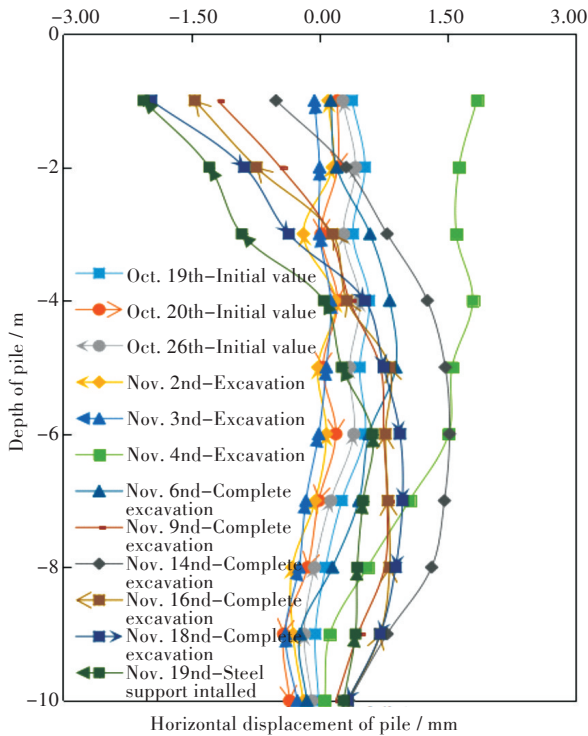


图 5 Ⅱ号出入口架设钢支撑桩体深度-位移曲线

Fig. 5 Depth-displacement curves of entrance II with steel support installed

图 6 是Ⅱ号出入口基坑架设钢支撑桩体部分深度-位移曲线.

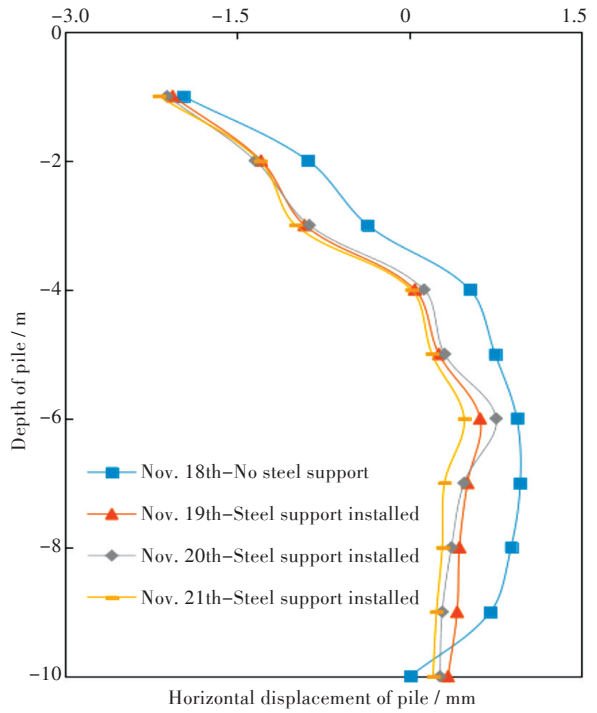


图 6 Ⅱ出入口架设钢支撑的桩体部分深度-位移曲线

Fig. 6 Partial depth-displacement curves of entrance II with steel support installed

由图 6 可知,在基坑内侧,11 月 19 日的围护桩水平位移量比 11 月 18 日位移量较小,钢支撑对围护桩有明显减缓偏移的趋势作用,11 月 20 日,11 月 21 日的围护桩水平位移比 11 月 19 日水平位移有减少的趋势,表明钢支撑起到了减少围护桩向基坑内水平位移的作用. 表 2 为架设钢支撑前后围护柱水平位移的变化量,钢支撑的架设对围护桩向基坑内偏移的速率有明显的减缓作用.

表 2 架设钢支撑围护桩水平位移变化量

Tab. 2 Horizontal displacement variation of supporting pile with steel support installed

深度 depth / m	11 月 18 日位移 Nov. 18th displacement/mm	11 月 19 日位移 Nov. 19th displacement / mm	变化速率 variation rate / (mm/d)
-1	-1.97	-2.06	-0.09
-2	-0.88	-1.29	-0.41
-3	-0.36	-0.91	-0.55
-4	0.53	0.05	0.48
-5	0.75	0.26	0.49
-6	0.94	0.62	0.32
-7	0.97	0.51	0.46
-8	0.89	0.44	0.45
-9	0.71	0.42	0.29
-10	0.01	0.34	0.33

注:11 月 18 日的位移是未架设钢支撑,11 月 19 日的位移是架设钢支撑后的位移

3.2 未架设钢支撑监测结果分析

图7为Ⅳ号出入口未架设钢支撑桩深度-位移图,图8为Ⅳ号出入口基坑未架设钢支撑桩体部分深度-位移曲线. 整个出入口开挖过程历时5天(11月5-9日).

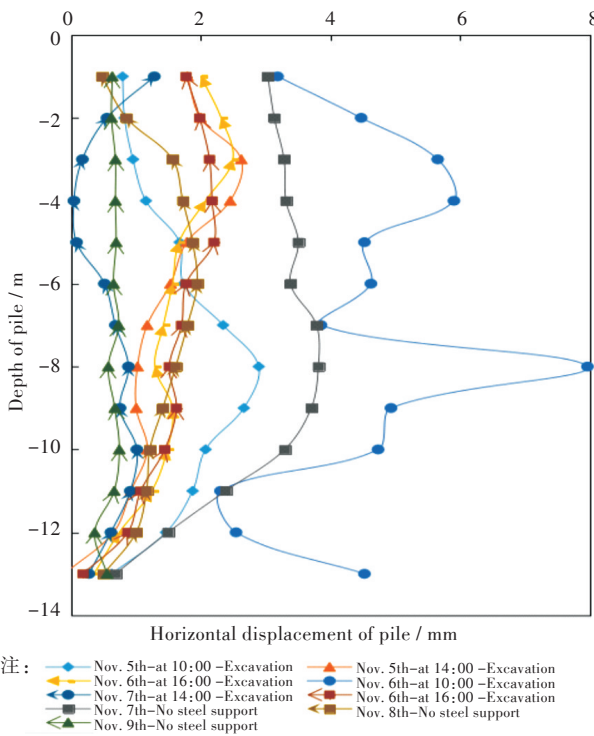


图7 Ⅳ号出入口未架设钢支撑深度-位移曲线
Fig. 7 Depth-displacement curves of entrance IV without steel support installed

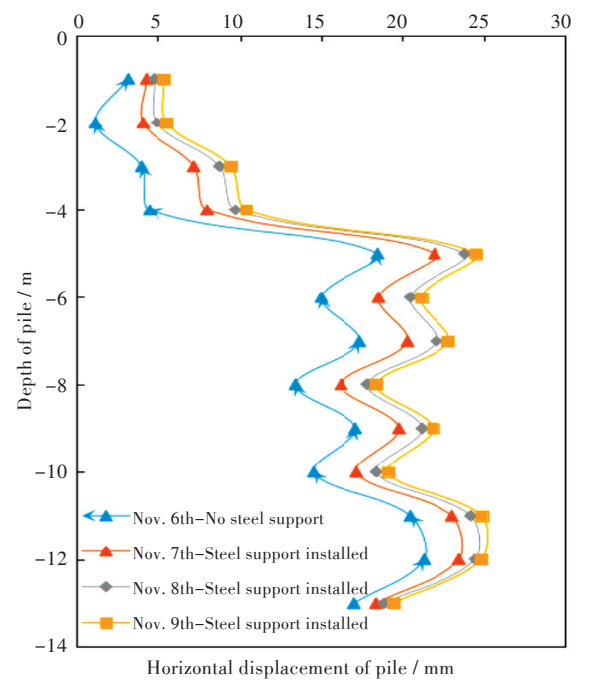


图8 Ⅳ号出入口未架设钢支撑桩体部分深度-位移曲线
Fig. 8 Partial depth-displacement curves of entrance IV without steel support installed

由图7可知:1)测斜管的水平位移偏移量在距围护桩桩底的 $H/3\sim 2H/3$,偏移最明显,位移量也最大. 2)该基坑的测斜管的测量深度为13 m,基坑连续开挖2天(11月5日-11月6日)围护桩向基坑内单次最大水平位移量为7.96 mm. 3)当基坑开挖完成,土体应力释放产生向基坑内水平位移,测量的频率为1天/次~3天/次,由于基坑开挖完成,未架设钢支撑,水平位移单次变化量最大值在基坑深度6 m处(11月7日)为3.53 mm. 4)基坑开挖深度13 m,在11月5日-11月6日2天内完成,单次变化量最大7.96 mm. 表3为Ⅳ号出入口基坑未架设钢支撑桩体深度-位移变化量. 5)从表3可以看出:11月7日、8日、9日基坑开挖完成后,未架设钢支撑围护桩总位移量、位移偏移速率呈增加趋势.

表3 未架设钢支撑围护桩水平位移累计量
Tab. 3 Cumulant of horizontal displacement of supporting pile without steel support installed

深度 depth / m	水平位移累计量 cumulant of horizontal displacement / m				11月6日与 11月7日变 化量 variation rate of Nov. 6th-7th / (mm / d)
	11月6日 Nov.6th	11月7日 Nov.7th	11月8日 Nov.8th	11月9日 Nov.9th	
-1	3.15	4.27	4.60	4.84	1.12
-2	1.16	4.06	4.25	4.41	2.9
-3	3.96	7.19	7.33	7.38	3.23
-4	4.46	8	7.93	7.87	3.54
-5	18.48	21.97	21.98	22.16	3.49
-6	15.01	18.54	18.46	18.57	3.53
-7	17.37	20.3	20.38	20.31	2.93
-8	13.44	16.23	16.37	16.43	2.79
-9	17.12	19.78	20.06	20.12	2.66
-10	14.55	17.19	17.42	17.55	2.64
-11	20.48	23.05	23.13	23.27	2.57
-12	21.32	23.48	23.55	23.62	2.16
-13	17.05	18.39	18.58	18.64	1.34

对比图6和图8可得:1)架设钢支撑的影响: 在施工过程中,基坑开挖深度将直接影响围护桩各个深度位置水平位移;在基坑开挖前期,围护桩的水平位移偏移相对较小,当开挖的速度加大,其水平位移变化速率有着明显的增大趋势. 2)开挖速率的影响:相比Ⅱ号基坑在3天内开挖10 m,单次变化量最大为1.84 mm,说明开挖速度较大时,基坑开挖偏移量随之增大.

刘杰^[11]钢支撑+围护桩的围护形式对基坑土

体的侧向变形有较好的限制作用,与本监测数据规律一致,结果表明架设钢支撑对基坑偏移起一定减缓速率作用。

4 有限元计算模拟及分析

4.1 数值计算模型

在 PLAXIS 2D 中建立如图 9 所示的不同土层模型,模型大小 27 m×27 m,地质土层深 27 m,宽 27 m。基坑的模型大小 13 m×10 m,基坑的宽为 13 m,开挖深度为 10 m,钢支撑架设在距冠梁为 7 m,围护桩的桩长 13 m,基坑土层分层开挖以 2 m 为标准,钢支撑的设计轴力为 1 980 kN,预加轴力为 190 kN。网格划分疏密度为“很细”;采用平面应变模型,15 节点单元。围护桩、钢支撑采用板单元,冠梁采用 embedded beam rom 单元模拟。采用软件 PLAXIS 2D 建立有限元模型,有限元计算模型见图 9。

4.2 计算参数的选取

根据实验室试验得到盘龙城地铁站出入口基坑的周边土体的基本物理力学参数数据,见表 4。围护桩采用 C30 混凝土,根据经验将围护桩弹性

模量 E 取为 30 GPa,泊松比 ν 取为 0.25,其重度为 24 kN/m³。钢支撑采用线弹性杆单元模拟,弹性模量 E 取为 206 GPa,泊松比 ν 取为 0.24。各层土物理力学参数是武汉市轨道交通机场线工程 4 标段,盘龙城站的地质勘察。

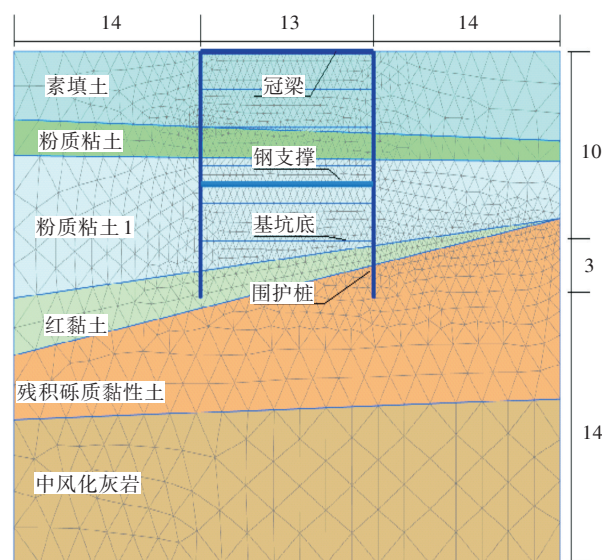


图 9 PLAXIS 2D 中基坑模型及网格(单位:m)

Fig. 9 Foundation pit model and grid in PLAXIS 2D(unit:m)

表 4 各层土物理力学参数

Tab. 4 Mechanical parameters of soil in each layer

地层 layer	重度 unit weight / (kN·m ⁻³)	黏聚力 effective cohesion / kPa	内摩擦角 effective friction / (°)	弹性模量 young' modulus / MPa	泊松比 Poisson' ratio
素填土	18.00	10.00	8.00	7.50	0.20
粉质黏土	19.50	22.00	12.00	7.50	0.25
粉质黏土 I	19.40	52.00	15.00	13.00	0.26
红粘土	18.10	40.00	16.00	11.00	0.30
残积砾质黏性土	19.20	50.00	18.00	12.00	0.32
中风化灰岩	30.00	600.00	40.00	10 000.00	0.35

4.3 数值计算结果对比

根据现场施工过程的模拟,将盘龙城车站出入口基坑开挖施工过程分成初始地应力状态、基坑围护桩的施工、基坑内土体开挖至设计标高、架设钢支撑 4 个过程。

图 10 是 PLAXIS 2D 模拟桩体位移和弯矩随深度的变化规律。由图 10 可知:

1)位移变化。在基坑初始地应力状态下,基坑内土体开挖完成,在桩体深度 8 m 处,桩体的水平位移量最大值 12.236 mm。在架设钢支撑位置桩体 7 m 处,水平位移量为 12.161 mm。架设钢支撑后,在桩体深度 5 m 处,桩体水平位移量最大值为 5.493 mm;在架设钢支撑桩体深度 7 m 处,水平位移为 0.584 mm,基坑内偏移水平位移量减缓

11.577 mm。经过有无架设钢支撑对比发现基坑开挖完成,架设钢支撑对基坑向基坑内偏移量有着明显减缓速率作用。

2)弯矩变化。运用 PLAXIS 2D 有限元软件模拟计算围护桩的弯矩内力,架设钢支撑,围护桩所受弯矩整体变大,在距桩底 $H/3 \sim 2H/3$ 处,水平位移较为明显。

3)架设钢支撑。在距桩底 $H/3 \sim 2H/3$ 处,桩体所受弯矩整体变大,围护桩的水平位移减小,这与 II 号基坑围护桩加了钢支撑后实际监测的位移和曲线变化规律相一致。

由此可知,运用有限元软件 PLAXIS 2D 模拟计算得出的基坑开挖架设钢支撑对桩体偏移影响规律与现场的实测数据得出的规律相一致。

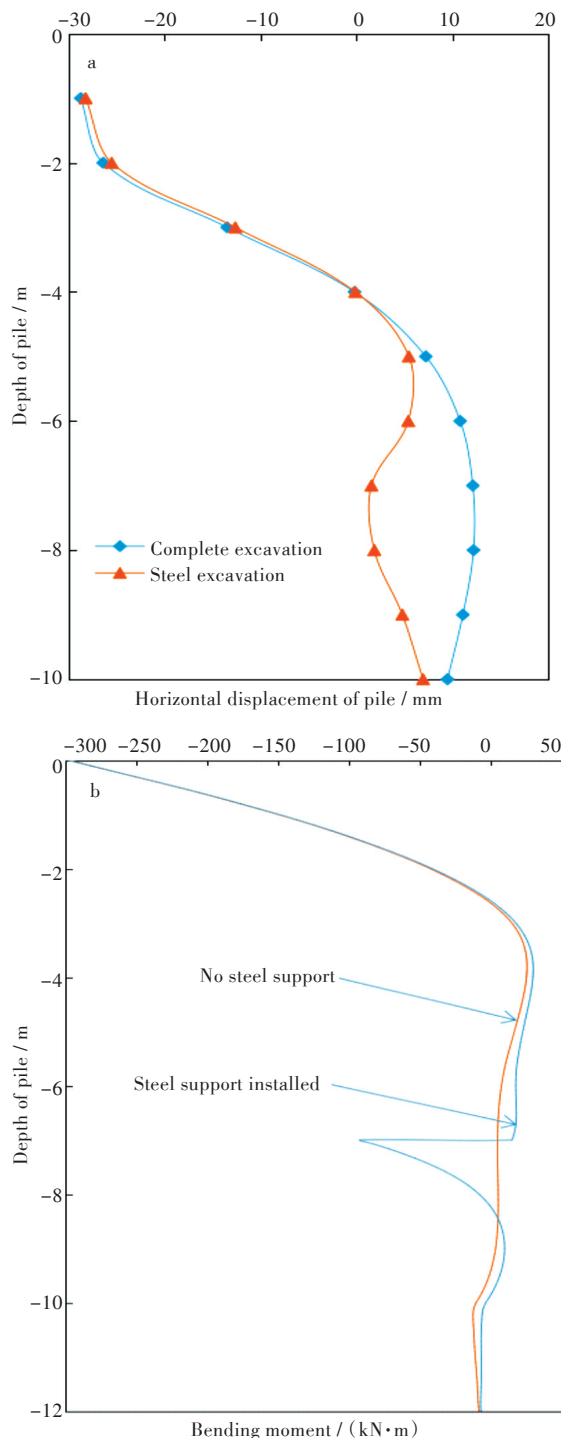


图10 桩体位移和弯矩随深度变化规律
(a)深度-水平位移;(b)深度-弯矩曲线

Fig. 10 Rules of displacement and moment changed with depth

(a) Curves of depth-horizontal displacement ;
(b) Curves of depth-bending moment

5 结 语

本文以武汉地铁2号线盘龙城地铁站为例,分析在基坑开挖过程中架设钢支撑对围护结构水平位移的影响。

1)基坑开挖过程中,Ⅱ号出入口开挖深度为10 m,最大位移在距桩底3 m处;Ⅳ号出入口开挖深度为13 m,最大位移在距桩底4 m处,桩体的水平位移偏移量在距围护桩桩底 $H/3 \sim 2H/3$ 处最明显,偏移量也最大,呈“弓”字型。

2)在基坑开挖完成后及时地架设钢支撑,桩体累计位移量持续增加,但单增加速率减小。

3)通过 PLAXIS 2D 模拟计算,模拟基坑开挖完成到添加钢支撑板单元,未架设支撑7 m处位移12.161 mm,架设支撑7 m处位移0.584 mm,架设钢支撑有减小变化量速率的作用,与实际监测数据结果相吻合,变化规律相一致,表明有限元分析可以为基坑设计提供理论参考。

4)在架设钢支撑处,加载轴力对桩体产生负弯矩(向基坑外),所受弯矩比未架设钢支撑时反向弯矩变大。

参考文献:

- [1] 黄山. 广州地铁九号线高增站深基坑数值分析与研究[D]. 广州:广州大学,2011.
- [2] 吴晓旺,付建军,杜学飞. 某隧道基坑监测及安全稳定性分析[J]. 城市地质,2009,15(3):26-28.
WU X W, FU J J, DU X F. Monitoring and stability analysis on a tunnel foundation pit[J]. Urban Geology, 2009, 15(3): 26-28.
- [3] 曾繁慧,邹存静. 巷道围岩变形破坏数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(12):1664-1668.
ZENG F H, ZOU C J. Numerical simulation of roadway surrounding rock deformation and destruction [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2013, 32(12): 1664-1668.
- [4] 俞建霖,龚晓南. 基坑工程变形性状研究[J]. 土木工程学报,2002,35(4):89-90.
YU J L, GONG X N. Traits of excavation deformation[J]. Journal of Civil Engineering, 2002, 35(4): 86-90.
- [5] 刘利民,张建新. 深基坑开挖监测时测斜管不同埋设位置量测结果比较[J]. 勘察科学技术,1995,78(6):37-39.
LIU L M, ZHANG J X. Comparison of measuring result for different setting position of the inclinometer tube for the monitoring of deep foundation pit excavation [J]. Exploration Science and Technology, 1995, 78 (6) : 37-39.
- [6] 胡钧,杨熙章,杜坚. 上海人民大舞台商厦深基坑监测与分析[J]. 上海同济大学学报,1997,129(5):604-608.
HU J, YANG X Z, DU J. Deep foundation pit monitoring of shanghai renmindawutai business mansion [J].

- Journal of Tongji University, 1997, 129(5): 604-608.
- [7] 李爱民. 关于深基坑水平位移监测方案的探讨[J]. 测绘学院学报, 2000, 17(1): 19-21.
- LI A M. Research on horizontal displacement monitoring project of the deep foundation [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2000, 17(1): 19-21.
- [8] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 2001, 127(33): 203-224.
- [9] 陈军. 深基坑支护工程的设计、施工与监测[J]. 湖南大学学报, 2002, 29(3): 117-121.
- CHEN J. Design, construction and monitoring of deep foundation pit support engineering[J]. Journal of Hunan University, 2002, 29(3): 117-121.
- [10] 任建喜, 冯晓光, 刘慧, 等. 地铁车站深基坑围护结构变形规律监测研究[J]. 铁道工程学报, 2009, 137(3): 89-92.
- REN J X, FENG X G, LIU H, et al. Research on the deformation law of supporting structure for deep foundation pit of metro station[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 137(3): 89-92.
- [11] 刘杰, 姚海林, 任健喜. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊2): 456-461.
- LIU J, YAO H L, REN J X. Monitoring and numerical simulation of deformation of retaining structure in subway station foundation pit [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Suppl. 2): 456-461.
- [12] ADDENBROOK T I. Displacement flexibility number for mutilpropped retaining wall design [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(1): 718-726.
- [13] 张明聚, 何欢, 李春辉, 等. 明挖地铁车站围护结构受力变形监测与数值模拟分析[J]. 北京工业大学学报, 2013, 209(6): 875-880.
- ZHANG M J, HE H, LI C H, et al. Deformation and force analysis on retaining structure of an open-excavated subway station by monitoring and numerical simulation [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 209(6): 875-880.
- [14] 郭楠. 兰州地铁车站某深基坑桩撑支护结构施工监测与数值模拟分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [15] 朱彦鹏, 杨校辉, 周勇, 等. 兰州地铁车站深基坑支护选型分析与数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 55-59.
- ZHU Y P, YANG X H, ZHOU Y, et al. Deep foundation pit retaining structure selection in Lanzhou metro station and its numerical simulation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(1): 55-59.

本文编辑: 苗 变