

文章编号:1001-4179(2011)20-0075-04

# 深厚软弱地层超深基坑支护分析

——以武汉香港路地铁车站工程为例

朱 敏, 陈容文, 郭晓刚

(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**以武汉市香港路地铁车站超深基坑开挖施工为实例,利用目前国内基坑设计中常用的理正软件和天汉软件,分析了在软弱地层深厚、承压水位高、地层渗透系数大的水文地质条件下超深基坑围护结构的设计要点和难点,并采用有限元软件进行对比分析,提出了确保深厚软弱地层地区超深基坑。施工安全的对策措施。以期为类似基坑围护结构设计提供借鉴与参考。

**关键词:**软弱地层;超深基坑;地连墙;地铁车站

**中图法分类号:** U231.4 **文献标志码:** A

随着国民经济和城市建设的快速发展,我国各大城市大型地下空间开发进展迅速,涌现出大量复杂的基坑工程建设项目,尤其以地铁轨道交通建设为代表,深基坑甚至是超深基坑不断出现。日本明石海峡大桥一锚碇深基坑开挖深度为 61 m;江苏润扬长江大桥北锚碇深基坑开挖深度达 48 m;上海地铁董家渡修复工程开挖深度平均达 38 m,外环隧道浦西暗埋段基坑、世博变电站等基坑开挖深度均超过 30 m<sup>[1]</sup>;武汉地铁汉口、武昌地区的风井开挖深度为 39 m。由于地铁车站基坑工程常位于城市的中心区域,不仅需要保障基坑的稳定安全,紧邻基坑周边的建(构)筑物安全和正常使用亦作为重要控制因素。

本文所分析的深基坑工程为武汉市轨道交通 3 号线香港路车站的 28.5 m 超深基坑,车站为 3,6,7 号线三线换乘车站。3,7 号线合建,为地下 3 层叠错式站台车站,车站总长度为 252.0 m,车站主体宽 23.64 ~ 40.7 m;6 号线为地下一层侧式站台车站,车站总长度为 215.0 m,车站主体宽 38.7 ~ 61.78 m,与 3,7 号线形成“十”字相交,地下一层为站台层,站台层与 3,7 号线站厅层在同一平面。

武汉香港路地区位于工程风险敏感地区,地质条

件差,历史上曾出现多次工程事故,而且目前汉口城区此类超深基坑工程案例较少,缺乏此类地层开挖大型超深基坑的工程经验。根据本场地周边环境、地质条件、水文条件和国内超深基坑工程经验,经分析比较,设计确定采用地下连续墙+内支撑的支护方案。本文主要从设计、施工两方面,在保证周边密集高层建(构)筑物安全、车站结构安全的前提下,分析在深厚软弱地层中开挖超深基坑的结构设计要点和难点,提出确保施工安全的工程对策,以期为类似工程提供借鉴与参考。

## 1 工程地质与水文地质条件

工程场地地貌单元主要为河流堆积平原,属长江 I 级阶地,地形平坦,地面高程 20 ~ 22 m。表层为松散的人工填土层(Q<sub>ml</sub>),局部分布有淤泥;上部主要为第四系全新统冲积相(Q<sub>4<sup>al</sup></sub>)可塑-软塑状态的黏性土,软塑-流塑的淤泥质粉质黏土、粉砂、粉土、粉质黏土互层;中部为稍密-中密的粉细砂,中密-密实状态的细砂,厚度不等的中粗砂夹砾卵石;下伏基岩为白垩-下第三系东湖群(K-E<sub>dn</sub>)砂砾岩、泥质粉砂岩。

根据详勘报告,各土层主要物理力学参数见表 1。

收稿日期:2011-08-30

作者简介:朱 敏,男,工程师,硕士,主要从事基坑及其它地下工程技术工作。E-mail:zhumin1584@163.com

表 1 土层物理力学参数

土层 编号	名称 岩土	密度 状态	层厚/ m	天然重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	承载力特征/ kPa	抗剪强度指标		静止侧 压力系数	渗透系数/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
						$C/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$		
1-3	淤泥	流塑	0.7~3.7	17.5	50	11	5	0.75	$4.6 \times 10^{-6}$
3-2	粉质黏土	软塑	1.3~4.2	18.0	75	15	7	0.61	$4.6 \times 10^{-6}$
3-3	淤泥质黏土	流塑	2.4~19.5	17.0	55	13	6	0.80	$(2.6 \sim 7.9) \times 10^{-6}$
3-4	粉质黏土夹粉土	软塑	0.8~10.4	18.1	80	15	9	0.64	$(2.7 \sim 7.2) \times 10^{-5}$
3-5	粉砂、粉土、粉质黏土互层	软塑(稍密)	1.2~11.6	18.2	90	12	15	0.55	$(6 \sim 60) \times 10^{-4}$
4-1	粉细砂	稍密-中密	2.0~10.9	17.9	170	0	30	0.41	$(0.8 \sim 1.5) \times 10^{-2}$
4-2	细砂	中密	0.5~21.3	18.9	230	0	37	0.38	$6 \times 10^{-1}$
15-1	强风化砂砾岩			22.6	400	100	25		$1.2 \times 10^{-4}$
15a-2	中风化泥质粉砂岩			24.2	900	460	38		$2.0 \times 10^{-5}$
15b-2	中风化砂砾岩			26.1	1600	2820	39		$2.0 \times 10^{-5}$

场地周边地下水主要类型有上层滞水、孔隙承压水和基岩裂隙水,其中以覆盖层中孔隙承压水对工程的影响最为突出。

## 2 设计方案

### 2.1 工程区环境

(1) 周边环境情况复杂,需要考虑对周边建筑物的影响。最近的建筑物距离基坑边 8.0 m 左右,而且地处商业区,基坑开挖过程中不能对商铺及周边办公场所产生影响。

(2) 地下管线复杂。本基坑前期施工时距离黄孝河排水箱涵(其结构为砖混,约 20 世纪 80 年代末修建)最小仅为 0.5 m,后期施工时距离箱涵 0.1~3.8 m;此外,基坑周围尚有较多天然气、输水管、排水管等市政管线。

(3) 基坑深度为 28.5~29.5 m,为武汉市少有的超深基坑,缺乏类似工程经验。

(4) 基坑施工处于交通干道区域,工期紧,且施工期间不能对周边交通造成不利影响。

### 2.2 工程设计方案

(1) 围护结构设计。本站 3,7 号线车站主体基坑深度标准段为 28.5 m,车站两端深度为 29.5 m。车站底板位于表 1 中(4-1)粉砂和(4-2)粉细砂层。孔隙承压水赋存于(3)单元过渡性土层及(4)单元砂土层中(见表 1 的土层编号),与长江水体及区域承压水体联系密切,水量丰富,要求围护结构有良好的抗渗性和较大的刚度。

按照国家和湖北省建筑基坑支护的有关技术规范和规定,本车站基坑支护工程安全等级为一级。结合车站周边环境、道路交通以及武汉地区在建地铁车站基坑的技术要求<sup>[2-3]</sup>,支护结构最大水平位移值  $\delta \leq$

$0.15\% H$  且不大于 40 mm,基坑周边地表最大沉降量  $f \leq 0.15\% H$  ( $H$  为基坑深),对于本工程,其围护结构最大水平位移、周边地表最大沉降量均应小于 40 mm。

结合本站工程地质、水文地质条件以及类似工程实例,推荐采用刚度大、防水效果好、对控制地表沉降及周边建(构)筑物、管线变形有利、施工工艺成熟、施工难度小的地下连续墙方案。

(2) 支撑结构设计。围护结构的水平受力体系有两种形式,分别为锚杆和内支撑。根据车站周边建筑物、构筑物、地下管线和已有的施工经验来看,本基坑难以采用预应力锚杆,且将来车站周边新建建筑物的基础也会受到锚杆的影响。考虑钢管支撑安装方便,施工速度快,可反复使用,综合造价低,故内支撑宜采用钢管方案;在车站端头与结构较复杂部位,为了加强支撑刚度与整体围护结构体系的稳定性,采用钢筋混凝土支撑,综合考虑基坑整体稳定性和施工便利,采用 4 道混凝土支撑+3 道钢支撑。

## 3 结构计算

### 3.1 计算图式与荷载

地下连续墙内力计算沿车站结构纵向取单位长度,根据设定的开挖工况和施工顺序,按竖向弹性地基梁模型逐阶段进行其内力及变形计算。

围护结构开挖阶段计算时必须计入结构的先期位移值以及支撑的变形,按“先变形,后支撑”的原则进行结构分析。

其荷载主要有以下几种:

(1) 结构自重。钢筋混凝土自重按  $25 \text{ kN/m}^3$  考虑。

(2) 水土侧压力。施工阶段按朗肯主动土压力进行计算,使用阶段按静止土压力进行计算,对黏性土地层采用水土合算,对砂性土地层采用水土分算。

(3) 地面均布荷载按  $20 \text{ kN/m}^2$  考虑。

### 3.2 结构分析

采用理正深基坑支护结构设计软件增量法和天汉软件进行内力计算,基坑施工模拟计算按照施工步骤进行。

理正软件采用的指标为直剪固结快剪或三轴固结不排水剪,水土分算,主动土压力为太沙基-佩克包络图;天汉软件采用的指标为直接快剪,黏性土为水土合算,主动土压力为朗肯土压力。通过对比分析设计软件的计算结果可以看出,两者变形规律一致,内力和位移均在设计变化幅度范围内,满足规范要求(见表 2)。

表 2 计算结果

项目	位移/mm	弯矩/( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	剪力/ $\text{kN}$
理正软件	23.3	2336	1272
天汉软件	28.0	2446	1537

注:两软件位移相差 20.2%;弯矩相差 4.7%;剪力相差 20.8%。

## 4 有限元分析

由于 3,7 号线基坑施工时,基坑一侧的浅基坑已经完工,上述软件无法考虑这类已有构筑物的影响,为了更好的模拟基坑施工过程中的各个工况,采用有限元软件进行分析。

根据有限元计算分析,可以得出以下结论:① 左右两侧的地连墙位移、弯矩由于周边已有结构的影响呈现出不同的变化规律,但总体上差别不大;② 左侧已竣工的一期结构有利于减小地连墙的内力和变形;③ 右侧结构与原设计软件计算结果规律性基本一致,计算结果对比见表 3。

表 3 有限元软件计算结果

位移/mm	弯矩/( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	剪力/ $\text{kN}$
30.0	3950	/

## 5 工程难点分析及对策

(1) 地连墙嵌入深度及基底处理。为减小基坑开挖降水对周边建(构)筑物的不利影响,综合考虑工程投资、施工进度以及周边工程降水施工经验,确定地连墙底部应深入强风化砂砾岩 5.0 m。地连墙底部至中风化砂砾岩或中风化泥质粉砂岩顶面线以下 1.0 m 之间的岩层采用钻孔注浆,注浆后的围岩防渗标准为透水率  $q$  不大于 3 Lu,以提高围护结构隔水能力。

(2) 地连墙成槽质量控制及施工工艺。因地连墙成槽深度达 50 m 左右,且周边建筑物及管线众多,故对成槽施工质量的控制要求更加严格。而地连墙成槽过程中的槽壁稳定性与墙体的施工质量密切相关,成

槽过程中槽壁失稳往往造成槽壁坍塌、地连墙平整度及垂直度达不到设计要求、墙体露筋等现象,甚至影响到周边建筑物安全,因此成槽施工中应对槽壁稳定性问题引起足够重视,并应采取有效的技术措施确保槽壁的稳定性。文献[7]研究表明,地连墙施工阶段引起周边房屋的沉降可能会占总沉降量的相当比重,故针对此类深厚软弱地层,采取了以下措施:① 地连墙施工前,应先进行成槽试验,以确定合理的施工参数;② 采用优质膨润土泥浆护壁;③ 地连墙成槽两侧搅拌桩预先加固流塑土层;④ 缩短地连墙槽段长度。

基坑围护结构的施工质量、施工进度直接关系到基坑的安全稳定、周边环境保护以及整体工期,建议采用液压抓斗与铣槽机配合使用,以确保围护结构施工阶段的顺利进行。

(3) 地连墙槽段间防渗措施。基坑采用 1.2 m 厚地下连续墙作为围护结构,具有较好的防水效果和较大的刚度。但基坑深度大,表 1 中的(4)砂层孔隙承压水水头高,水量丰富,一旦地连墙槽段接缝十字钢板止水失效,开挖过程中有可能被高压水击穿,发生突水、流砂现象,对基坑稳定不利,不利于保护周边高层建筑。综合考虑本站的重要性,为防止地连墙接头处突水、流砂,在接缝处外侧预埋 PVC 管,施工过程中若发现渗漏,应立即进行高压旋喷,保障周边建筑物和基坑安全。

(4) 基坑降水。本场地孔隙承压水赋存于粉土、砂土层(地层编号为(3-5)及(4)层)中,水量丰富,基坑底部已经开挖至砂层。根据汉口地区(3-5)地层施工降水经验,(3-5)层水平与垂直方向渗透性差异大,难以疏干降水,易引起土层流失。

基坑内降水分疏干降水井、减压井,根据此地层结构及区域形状,疏干性降水、减压降水均采用真空深井井点法,需布置 34 口疏干井,9 口减压井,并在坑内布置备用兼观测井 3 口,其中减压井降水深度应保证在开挖面以下 1.5 m。降水前应先行抽水试验,以检测降水井的降水能力。

由于基坑地连墙的阻滞作用,坑内潜水的疏干性降水对抗外环境的影响较小。但承压含水层的减压降水对周边环境有一定的影响。在降水影响半径范围内,因土层产生压缩变形而引起一定范围内的地面沉降,其沉降量大小与减压降水强度、抽水时间长短等因素有关。

为减小减压降水对周边建(构)筑物及各类管线的影 响,除专业监测单位监测外,尚应采取以下措施:① 根据基坑开挖施工方案和施工进度确定减压井的开启顺序和降水强度,基坑开挖过程中,随着开挖深度

的增加按需降水,避免过度降压对环境造成影响;②采用信息化施工,对周围环境进行监测,发现问题及时调整抽水井数量及抽水流量,以指导降水运行和修复施工。

(5) 地表沉降及周边建筑物变形监测。根据国内相关文献研究<sup>[4-7]</sup>,基坑降水与开挖所产生的周边地表沉降量基本相当,而远端的地表沉降主要由降水引起。因此,本基坑开挖期间需密切监测周边地表沉降。

周边建筑物均在基坑 1 倍开挖深度范围内,其基础采用摩擦或端承桩,但本站场地地质条件差,软弱地层分布厚度大,承压水与长江水位关系密切。在开挖至基底标高时,地连墙需承受 25.5 m 高的内外水头差,为保障基坑及周边建筑物结构安全,必须对基坑的深层土体变形、表层土体位移、沉降以及周边建筑物沉降变形进行监测。在基坑开挖过程中,应加强施工降水和变形监测,做好应急预案,确保工程安全。

## 6 结论与建议

在深厚软弱地层中开挖 28.5 ~ 29.5 m 的超深基坑,采用地连墙支护结构方案是可行的。计算分析表

明,基坑支护结构的变形、内力以及对周边建构筑物的影响均在规范允许范围内。

根据周边工程案例调查,本基坑虽已采取全落底的地连墙方案,但如何保证地连墙接缝施工质量(避免高承压水击穿地连墙的接缝)、地连墙快速合格成槽,实属本工程难点。实际基坑施工过程中,应尽量避免大范围内降低地下水和过长的成槽时间,避免对基坑周边的建(构)筑物产生破坏性影响。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] JGJ120-99 建筑基坑支护技术规程[S].
- [3] DB42/159-2004 基坑工程技术规程[S].
- [4] 施成华,彭立敏. 基坑开挖及降水引起的地表沉降预测[J]. 土木工程学报,2006,39(5).
- [5] 吴林高. 基坑工程降水案例[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [6] 黄文亮. 武汉地铁范湖站深基坑降水技术应用[J]. 隧道建设,2009,29(1).
- [7] 刘国彬,鲁汉新. 地下连续墙成槽施工对房屋沉降影响的研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(2).

(编辑:徐诗银)

## Analysis on extra - deep foundation pit support in deep soft clay : the case of Xianggang Road subway station in Wuhan

ZHU Min, WU Weixing, GUO Xiaogang

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** In order to ensure the construction safety of extra - deep foundation pit in deep soft clay, by taking the excavation of sbway station project of Xianggang Road in Wuhan as an example, and with the Lizeheng software commonly used in domestic foundation pit design and Tianhan software, we analyzed the key and difficult points in design under the hydro - geologic conditions such as high confined water level, deep soft clay and stratum with high seepage coefficient, and conducted comparative analysis by the finite element software. The countermeasures to ensure construction safety are proposed.

**Key words:** soft clay; extra - deep foundation pit; diaphragm wall; subway station

(上接第 74 页)

## Analysis on deep pit of Mingdu Station of Wuhan subway by FEM

OUYANG Yuanping, GUO Xiaogang, DONG Zhichao

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** In order to guarantee the smooth construction of deep pit of a subway station, the action on surrounding protection structure under soil pressure should be analyzed. In the design of Mingdu Station of Wuhan subway, the force condition of deep pit was simulated and analyzed by FEM, using MIDAS - GTS software. Through analysis of horizontal displacement, settlement, internal force in drilling hole and support axial force etc., the safety and stability of deep pit of the station in construction were demonstrated. The monitoring data in practical construction showed that the monitored data was in accordance with the simulation results.

**Key words:** deep pit; settlement; FEM; subway station; Wuhan subway