

深厚软土中超大深基坑支护设计与实践

吴西臣, 徐杨青

(中煤科工集团武汉设计研究院, 湖北 武汉 430064)

摘要: 以武汉地区长江一级阶地上深厚软土中某超大深基坑支护工程为例, 提出了“大坑化小、分区(段)设计、轻重结合、组合支护”的设计理念。根据基坑工程地质条件及施工部署, 综合采用了卸土减载、桩撑、双排桩、坑内被动区加固等多种支护结构形式, 并进行合理的平面组合和空间结合, 既保证了基坑支护结构及周边环境安全和经济, 又实现了土方及地下室结构的便捷施工, 可为类似基坑工程的设计与施工提供参考。

关键词: 深厚软土; 超大型深基坑; 联合支护; 地下水处理

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0404-05

作者简介: 吴西臣(1980-), 男, 湖北潜江人, 硕士, 主要从事岩土工程勘察、设计及科研工作。E-mail: wuxichen1031@163.com。

Design and practice of large-scale deep excavations in deep soft soils

WU Xi-chen, XU Yang-qing

(Wuhan Design and Research Institute of Sinocoal International Engineering Group, Wuhan 430064, China)

Abstract: An excavation located in 1st terrace near Yangtze River in Wuhan City is taken as an example. The design concept of large scale being divided into small, segment design, severity and combined bracing is put forward. According to engineering geological conditions and construction deployment, different retaining structures such as pile-strut, double-row piles and reinforcement in passive zone are combined reasonably both in the plane and space, respectively. It achieves the convenience of earthwork and basement construction under the premise of safety and economy of supporting structures and surrounding environment. It may provide a good reference for other similar projects.

Key words: deep soft soil; large-scale deep excavation; combined retaining; groundwater control

0 引言

随着经济的发展及城市化步伐的加快, 在用地紧张的密集城市中心进行大型地下空间的开发利用成为一种必然, 因此产生了大量的深基坑工程。另外, 基坑周边环境越来越严峻、深度越来越大、开挖规模越来越大, 导致基坑支护工程的设计和施工难度也越来越大。

基坑工程是一个复杂的系统工程^[1], 主要包括支护体系设计及施工和土方开挖两部分, 即除了必须确保基坑侧壁及周边环境安全外, 还应在安全可靠、经济合理的前提下最大限度地满足土方及主体结构施工便利的要求。对于深厚软土中超大型深基坑支护工程, 因其涉及因素众多, 此方面的要求及矛盾更为突出。许多学者对深开挖课题中的支护结构计算方法、基坑稳定性、施工环境影响、优化设计等课题开展了大量的理论和数值分析研究, 取得了大量成果^[2-5]。

然而, 超大面积深基坑工程因其周边环境、地层条件复杂多样、差异较大, 在满足基坑安全和环境保

护要求的前提下, 多种围护结构的结合应用在此类基坑支护设计中显得更为合理和有效, 但因此而引发的另一大难题是基坑工程的整体设计中如何通过合理的平面组合和空间结合以减小不同支护结构间的不平衡力及差异变形, 使其在工程安全性、合理性、经济性等方面发挥更好的作用。

本文以作者设计的位于武汉地区长江一级阶地上深厚软土层中某超大型深基坑支护工程为例, 总结了该工程在维持基坑安全稳定及土方、主体结构便捷施工等方面所取得的成功经验, 供类似基坑工程的设计与施工参考。

1 工程概况

该项目设两层地下室, 由A、B两地块组成, 呈不规则“吕”字形, 两地块相距约40 m, 局部设联络通道。基坑周边开挖深度介于10.0~11.5 m之间, 局

表 1 地层分布情况及基坑支护设计参数一览表

Table 1 Distribution of soil strata and design parameters for retaining structures of excavation

地层编号及 岩土名称	层顶埋深 /m	层厚 /m	状态	重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	地基土承载力 特征值 f_{ak}/kPa	压缩模量 E_s/MPa	c /kPa	φ ($^{\circ}$)
①杂填土	现地面	0.5~4.4	松散—稍密	18.0			8	18
①-2 淤泥	0.8~2.9	0.3~3.3	流塑	16.8	40	2.0	8	3
②-1 黏土	0.7~4.0	0.5~2.7	软—可塑	18.0	105	5.0	18	8
②-2 淤泥质粉质 黏土	0.5~6.1	5.8~17.5	软—流塑	17.0	60	3.0	9	5
②-3 粉质黏土混 粉土	8.7~19.3	0.8~6.6	软—可塑	17.3	100	5.2	16	11
③粉土夹粉砂、粉 质黏土	10.0~19.5	0.8~5.5	中密	17.5	130	7.0	12	20
④-1 粉砂	13.3~21.0	0.8~9.5	松散—稍密	19.2	145	12.5	0	27
④-2 粉细砂	18.0~24.5	0.5~13.2	中密	19.7	205	18.5	0	33
④-3 粉细砂	28.0~32.7	0.2~14.4	密实	20.0	260	24.0	0	35

部开挖深度达 13.0 m, 开挖面积达 5.7 万 m^2 , 周长达 1700 m, 属超大型深基坑工程; 基坑周边分布有厚达 17.5 m 的软—流塑状淤泥或淤泥质粉质黏土层, 对基坑支护与土方挖运极为不利; 且基坑周边紧邻交通主干道及已有建(构)筑物, 地下管网密集, 基坑周边环境复杂, 基坑支护与降水设计及施工的挑战性极大。

场地地貌单元属长江 I 级阶地, 地势较平坦, 场地平场标高约 21.00 m, 地层分布情况及支护设计参数详见表 1。

场地地下水类型可分为上层滞水和第四系孔隙承压水。上层滞水主要赋存于①层杂填土中, 受地表水

源及大气降水补给, 无统一的自由水面, 水量有限; 承压水赋存于③粉土夹粉砂、粉质黏土层及下部砂性土层中, 与长江存在较密切水力联系, 呈互补关系, 水位年变幅为 3~4 m, 丰水期水位标高达 20.0 m。

根据项目总体部署情况, A、B 两地块需同步开挖, 且要求 A 地块内两栋 26F 办公楼、B 地块内至少一栋住宅楼先行施工, 联络通道及地下室出入口后期开挖施工。基坑开挖施工期间材料堆场、临建主要布置于两地块间及场地东侧, 共布置 4 个出土口, 施工部署详见图 1。

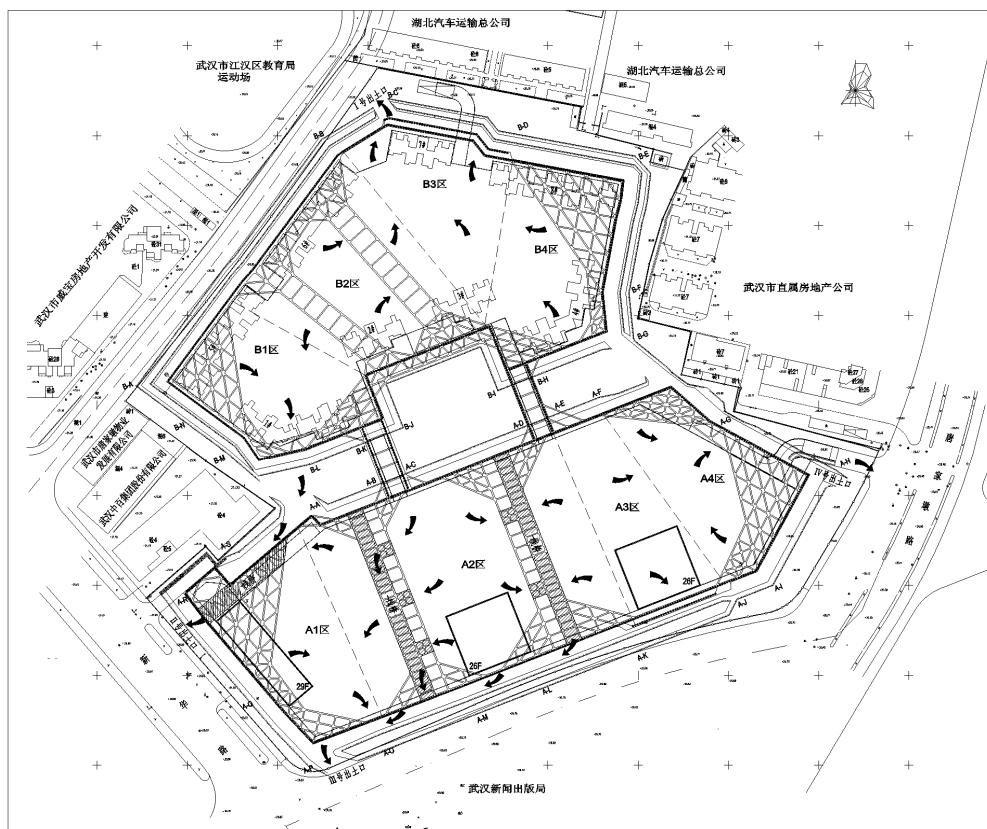


图 1 基坑支护结构平面布置及施工部署图

Fig. 1 Plan layout of retaining structure and construction plan for excavation

表 2 支护方式及其优劣性分析表

Table 2 Analysis of advantages and disadvantages of retaining structures

支护方式	主要特点	质量可靠性	工期	造价	在本工程中的适宜性
桩撑支护	可适用于不同深度的基坑, 有成功地区经验。但施工周期很长, 尤其对后续施工影响很大。	好	较长	较高	通过合理布置支撑, 保证土方挖运便利, 优先采用。
双排桩	适用于不同深度基坑, 在地区有多个成功应用实例, 尤其适用于地层差、受红线限制地段。	较好	较短	较高	在周边环境开阔、变形要求不严的出土口地段优先采用。
坡顶减载 放坡	可有效降低支护结构承受的主动土压力, 普遍采用。	较好	短	低	场地周边具有一定放坡卸载空间, 可以采用。

2 基坑特点及支护方案选择

2.1 基坑特点

基坑工程的主要特点如下:

(1) 基坑开挖深度大, 开挖面积超大且极不规则, 周边环境复杂, 如不采取合理、有效的支护结构, 将造成了基坑暴露时间长, 维持期间受大气降水、周边施工动、静荷载等诸多不利因素影响的可能性大。

(2) 地层条件差: 基坑坑壁及坑底主要由湖泊相新近沉积的软塑—流塑状淤泥或淤泥质土层组成, 厚达 17.5m, 具有触变性 (灵敏度 S_t 高达 3.6)、高流变性、高压缩性 (压缩系数 a_{v1-2} 平均值高达 0.8 MPa^{-1}) 及强度极低 ($f_{ak}=40 \sim 60 \text{ kPa}$, $E_s=2.0 \sim 3.0 \text{ MPa}$, $c=8 \sim 9 \text{ kPa}$, $\varphi=3^\circ \sim 5^\circ$) 等特点, 在基坑土方开挖或降水作用下, 易发生蠕变及固结沉降, 位移量大且持续时间长, 对基坑支护结构的稳定性及周边环境十分不利。

(3) 水文地质条件复杂: 基坑开挖面积超大, 承压水含水层顶面起伏变化大, 层顶埋深介于 10.0~19.5 m, 局部已揭穿承压含水层, 必须采取降水措施防止坑底突涌现象。

(4) 工期紧: 根据项目总体进度安排, 基坑土方工程要求在 3 个月内完成, 地下室结构施工要求在 6 个月内完成。对于深厚软土中如此超大规模深基坑工程而言, 工期异常紧张。

(5) 施工进度要求不一, 要求部分主楼先行施工, 对分段开挖、分段支护提出了很高要求。

2.2 基坑支护设计总体思路

由于场地土质软弱且基坑开挖面积超大, 一次性支护开挖无论从技术还是经济、工期上均有相当大的难度。本基坑支护设计方案结合了主体结构及场地特点, 提出了“大坑化小、分区(段)设计、轻重结合、组合支护”的设计理念, 即根据场地工程地质、水文地质条件和基坑周边环境特点优化选择支护方案^[5], 其主要目的有三: ①基坑规模超大, 将其分区分块后便于控制变形, 确保安全; ②满足业主对不同单体的进度要求; ③进行重点保护区域及非重点保护区域划分, 根据不同的周边环境特点, 有针对性地制定支护

措施, 达到经济、合理目的。

降水井平面布置需结合地层条件、开挖深度、施工进度合理布置, 需满足局部开挖时承压水处理要求。

2.3 基坑支护方案选择

根据本基坑工程的开挖深度、周边环境、地层性质, 结合地区经验^[6], 本工程可供选择的支护方式主要有“支护桩+内支撑”、“双排桩”及“坡顶放坡减载”等, 其优劣性分析见表 2。

在基坑支护设计过程中, 首先根据地层、开挖深度、周边环境、施工进度及部署的不同, 详细对基坑支护分区(段), 然后对每一段按由简单到复杂、由低价到高价的先后原则试算、比较, 同时兼顾工期及其它条件, 因地制宜地选用相应支护结构, 才能获得最佳支护方案。

另外, 基坑坑底分布有厚约 3~7 m 的淤泥质软土层, 不能为支护体系提供有效的被动土压力, 对基坑稳定性十分不利。为保障基坑安全, 对基坑周边坡脚以下一定范围、深度内的软土层进行改良加固处理是必要的。

根据本基坑工程特点, 将基坑划分为 8 个小区、22 个工程地质段, 分别采用了“支护桩+对顶撑”、“支护桩+角撑”、“双排悬臂桩”、并辅以“被动区加固”及“坡顶卸土减载”等联合支护手段。为使多种支护结构形式在平面及空间上的有机结合, 采取了设置不同宽度的卸土平台、支护桩及支撑结构刚度、坑内加固深度及范围等多种手段。

3 基坑支护结构设计

3.1 放坡减载设计

利用周边开阔的环境条件, 对上部杂填土进行放坡卸载。根据土方挖运通道及支护结构设计要求, 坡中设置宽 3.0~8.0 m 的卸土平台。

3.2 支护桩设计

桩撑支护地段支护桩采用 $\phi 1000$ 钻孔灌注桩, 间距 1.20~1.40 m, 桩长介于 15.30~17.30 m, 桩身强度 C30。基坑支护结构典型剖面详见图 2。

对于无内支撑地段采用双排桩支护, 桩径 1.0 m, 桩距为 1.4 m, 排距 3.6 m, 桩长介于 15.30~16.30 m,

桩身强度 C30。为充分发挥双排桩作用, 桩间土采用粉喷搅拌桩加固(兼作止水帷幕), 加固深度为 12 m, 搅拌桩间距为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$, 水泥用量 50 kg/m 。基坑支护结构剖面详见图 3。

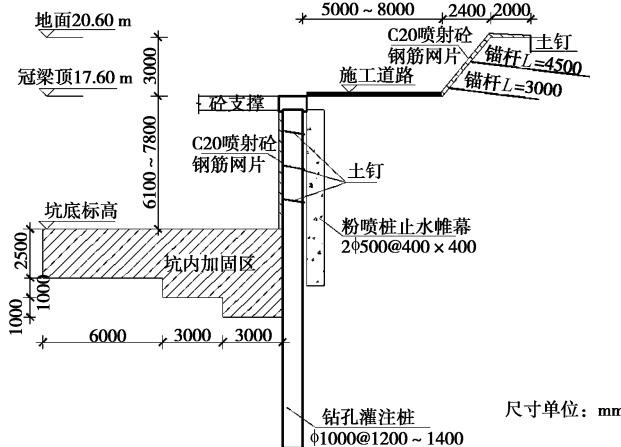


图 2 桩支撑段支护结构剖面图

Fig. 2 Structural section of pile bracing

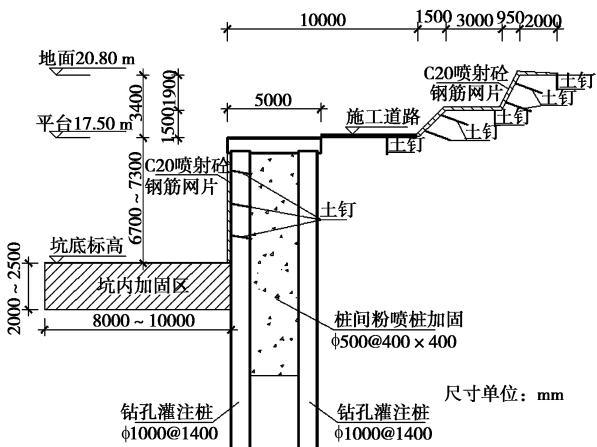


图 3 双排桩支护结构剖面图

Fig. 3 Structural section of double-row piles

3.3 内支撑设计

基坑呈大致不规则“吕”形, 基坑开挖面积超大, 且多个拐角为阳角, 对基坑稳定性十分不利。在确保基坑安全稳定的前提下, 对支撑结构进行优化布置, 尽量减少内支撑数量及相邻区(段)间的连接; 同时对分段拆、换撑的可行性及可能存在的不利影响进行了充分论证, 最大限度地降低了内支撑对结构施工的不利影响, 为土方开挖及部分主楼先行施工提供便捷条件。

内支撑平面布置具体为在基坑拐点设置以角撑为主的内支撑桁架结构; 基坑中部在满足部分主楼先行施工的前提下布置两道对顶撑桁架结构; 基坑阳角处支护桩轴线向外作适当偏转以充分发挥内支撑作用, 结合坑内留土反压控制基坑变形, 确保基坑安全(详见图 1)。本基坑支撑构件共分为围图、对顶撑、角撑、

斜撑、联系梁及外拉梁等 11 种类型, 均为砼构件。

3.4 坑内加固设计

为提高坡脚被动区土强度, 保障基坑安全, 对基坑周边坡脚以下一定范围、深度内的软土层采用粉喷桩加固, 加固宽度 $9.0 \sim 12.0 \text{ m}$, 厚度 $2.0 \sim 5.5 \text{ m}$, 粉喷桩设计桩径 500 mm , 间距为 400 mm , 采用满铺台阶状布置, 摆灰量 50 kg/m 。

3.5 土方挖运通道设计

基坑开挖面积大、土质软弱且周边环境严峻, 坑内外土方挖运通道相当紧张, 如控制不当, 土方挖运极易造成坑内工程桩(尤其是管桩)出现倾斜、断桩现象。因此, 土方挖运通道设计是本基坑支护工程的一个重要内容。

本基坑土方挖运通道专项设计中, 除利用基坑周边卸载平台作为运土通道外, 还充分考虑到重型车辆动荷载对内支撑结构的不利影响, 在 A 基坑的中部对顶撑上通过增设立柱桩、联系梁及混凝土板以形成施工栈桥(图 1), 不仅增加了基坑短边方向的支撑刚度, 对控制基坑变形极为有利, 而且为土方及主体结构施工提供便捷及开阔的空间。

3.6 地下水控制设计

上层滞水埋藏于表层杂填土中, 因含水层不连续, 往往成孤立的含水体, 侧向补给有限, 该类地下水主要通过明排加以解决。

赋存于粉质黏土夹粉土中的层间水及③层交互层中的承压水, 其垂向渗透系数小, 不易排水疏干, 采用隔渗帷幕进行控制。根据止水帷幕长度及深度分别采用搅拌桩和高压旋喷工艺。

对于砂性土层中的承压水, 采用中深井疏干降水及减压降水相结合的处理措施。经计算以及优化后, 基坑内共布置 60 口降水井, 其中 A 基坑 36 口, B 基坑 24 口, 降水井设计深度为 A 区 36 m 、B 区 37 m , 滤管长度 18 m , 沉淀管 1 m ; 成孔直径为 550 mm , 管径为 273 mm ; 单井出水量要求 80T/H 。

4 监测结果分析

基坑监测内容主要包括基坑周边建筑物及道路沉降观测、基坑支护结构水平位移观测、支撑梁钢筋应力监测、支护桩测斜及立柱沉降等, 共布设位移观测点 353 处, 钢筋应力计 10 组, 支护桩测斜孔 33 个。

基坑自 2009 年 9 月开挖到底至 2010 年 4 月地下室施工完成并回填, 基坑周边道路、建筑物沉降介于 $21.3 \sim 29.5 \text{ mm}$, 未对基坑周边环境造成明显不利影响; 钢筋应力计测试成果表明支撑梁应力变化幅度均较小, 且处于设计值的 80% 以内; 基坑各区域内支护结构位移统计值详见表 3。

表 3 支护结构位移监测结果统计表

Table 3 Statistic displacements of retaining structures mm

基坑	支护结构型式	桩顶位移			桩身侧斜
		最小值	最大值	平均值	
A 坑	桩+对顶撑	21.9	31.5	26.8	22.63
	桩+角撑	16.2	34.4	22.6	20.72
	双排桩	55.1	56.6	55.8	41.16
B 坑	桩+对顶撑	22.2	31.1	26.7	29.52
	桩+角撑	14.5	42.5	34.0	33.92
	双排桩	48.8	65.2	59.4	43.32

从表 3 可以发现:①除双排桩地段因作为出土通道长期遭受重型车辆动荷载作用导致该处支护结构^[6-7]位移达 56.6 mm 外,其余地段位移均满足设计及规范位移小于 40 mm 的要求;②就控制基坑支护结构位移而言,桩撑支护结构相对于双排桩悬臂支护结构具有明显的优势,且由于对顶撑刚度大于角撑刚度,“支护桩+对顶撑”支护段位移小于“桩+角撑”支护结构型式;③对顶撑兼作运土栈桥时,对支护结构位移存在一定不利影响。总体而言,本基坑所采用的基坑支护结构型式较好地控制了基坑周边及支护结构位移,在土方开挖及主体结构施工方面提供了很大便利条件,深基坑工程取得了圆满成功。

5 结 语

深厚软土层中超大型深基坑支护设计与施工的关键技术问题在于不仅要确保基坑自身结构及周边环境的安全,同时要考虑到后续土方及主体结构施工的快捷方便。本基坑支护设计基于“大坑化小、分区(段)设计、轻重结合、组合支护”的设计理念,通过采用多手段相结合的联合支护手段,并合理布置内支撑,为土方及主体结构施工提供了空间,达到了经济合理、施工时间短的目的。本基坑支护设计与施工的成功经验可供类似基坑工程借鉴。

参考文献:

- [1] 徐杨青. 深基坑支护结构的优化设计计算[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 57-61. (XU Yang-qing. Design optimization of bracing structure of deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(2): 57-61. (in Chinese))
- [2] 俞建霖, 龚晓南. 深基坑空间效应的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 21-25. (YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Spatial behavior analysis of deep excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 21-25. (in Chinese))
- [3] 徐前卫, 马险峰, 朱合华, 等. 软土地基超深基坑开挖的离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 154-161. (XU Qian-wei, MA Xian-feng, ZHU He-hua, et al. Centrifugal model test on extra-deep foundation pit excavations in soft ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 154-161 (in Chinese))
- [4] 王晓辉. 软土深基坑支护结构内力与变形的影响因素分析[D]. 南京: 河海大学, 2003. (WANG Xiao-hui. Analysis of factors on effect of internal force and deformation frame bracing for retaining structure of deep foundation pit under soft soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [5] 徐杨青. 深基坑工程设计方案优化决策与评价模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 844-848. (XU Yang-qing. Study on the optimum decision-making and evaluation model for the design of deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 844-848. (in Chinese))
- [6] DB42/159—2004 基坑工程技术规程[S]. 2004. (DB42/159—2004 Technical specification for engineering of foundation excavation[S]. 2004. (in Chinese))
- [7] JGJ120—99 建筑基坑支护技术规程[S]. 1999. (JGJ120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavation[S]. 1999. (in Chinese))

(本文责编 明经平)