特殊地质环境条件研究在超大基坑支护设计中的意义

——复杂地质环境下超大异形基坑支护设计优化分析

郭书兰[1)],阎长虹[1,2)],杨战勇[3)],王清明[3)],张立丰[3)],王实[4)],车灿辉[4)],史庆涛[3)]

1)南京大学地球科学与工程学院,南京,210046;2)南京大学金陵学院,南京,210089;
3)中铁十四局集团公司,济南,250014;4)安徽省地矿局第一水文工程地质勘查院,安徽蚌埠,233000

内容提要:近年来,在长江下游地区地下工程建设日益增多,其基坑呈现开挖深、规模大、形状复杂等特点,由于这一地区地质环境非常复杂,其支护结构设计和施工难度非常大。本文以南京江边某特大型地下交通枢纽工程为例,探讨地质环境条件研究在深基坑支护结构设计的重要作用。该地下交通工程为地下三层结构,最下层连接过江隧道,上部两层连接附近场馆和多条地面道路,基坑开挖深、深度变化大、形态异常复杂。该工程位于南京青奥中心西侧,靠近长江岸堤。这一地区广泛分布第四系松散沉积物,近地表主要为新近沉积的软土,且厚度较大,下部为河床相砂性土,地下水丰富,且多为承压水,工程地质条件非常复杂。这里主要针对这一特大型基坑工程的核心区,分析其工程地质条件,提出可能出现的工程地质问题,结合基坑功能及形态对其基坑范围内土层从平面及剖面上进行分区和分层,以此进行基坑支护结构设计优化分析,提出采用放坡开挖(上部)和地下连续墙(下部)相结合的支护设计方案,有效解决大型异形基坑群施工技术难题,而且施工速度快、建设成本低。这一研究成果对于长江下游地区类似特大型异形超深基坑的支护及施工设计具有积极借鉴意义。

关键词:深大异形基坑群;支护设计;放坡开挖;地下连续墙;钻孔灌注桩

近年来,随着城市化进程的加快,长江中下游地区涌现出一系列大型和特大型地下工程,超深异形基坑越来越多。这一地区第四系松散沉积物厚度较大,特别是全新世新近沉积的软土广泛分布且厚度很大,深基坑工程多位于这一软土层中(阎怀瑞等,2015;张玉成等,2014)。而基坑支护是一个临时工程,设计安全系数较小,稍有不慎就会发生工程事故。近年来,在江苏、上海、浙江等地的城市深基坑施工中就出现了因基坑场地工程地质条件及周边环境条件复杂及支护结构选型不当,而引发了一些重大工程事故,造成了巨大的经济损失(赵彤等,2010)。设计人员在超深基坑支护方案设计中多考虑基坑的安全、工程造价和工期以及基坑群的整体开发流程、标段划分、开发进度及相邻基坑的相互影响等因素(刘国彬等,2009),对于合理利用场地地质条件考虑不足,认为支护技术可以解决一切难题,有时为提高基坑支护的安全性,盲目采用一些支护方法,由此造成很大的浪费,有的因方案选型不当而诱发工程事故。目前就如何合理利用岩土体的地质结构特征和工程地质性质有效降低工程造价、解决基坑施工技术难题和加快施工速度等方面的研究相对较少。

本文结合南京河西某地下交通工程,通过分析场地地质环境条件,选择合理的基坑支护设计方案开展了相关研究。该地下工程是我国目前最大规模的城市地下交通枢纽工程(工程位置如图1所示),是南京梅子洲过江通道的重要组成部分,始于长江南岸扬子江大道,沿江山大街地面以下经过青奥中心地下停车场,下穿并连接多条地面道路。其基坑开挖深,深度变化大,结构复杂。该工程的核心控制区B2-J1区是一典型异形深大基坑,呈现三层地下立交结构,下层为主线隧道连接拟建的梅子洲过江隧道;中层为连接地下通道及附近道路的匝道;上层为扬子江大道下穿通道和连接南京青奥会主会场

注:本文为教育部博士点基金项目(编号:20130091110020),江苏科技厅社会发展支撑项目(编号:BE2015675)的成果。
收稿日期:2016-08-15;改回日期:2017-07-24;责任编辑:章雨旭。Doi:10.16509/j.georeview.2017.05.020
作者简介:郭书兰,女,1992年生。硕士研究生,主要从事岩土工程技术研究。Email:guoshulan1221@163.com 通讯作者简介:阎长虹,男,1959年生。教授、博士生导师,主要从事工程地质、环境岩土工程方面的教学和研究。Email:yanchh@nju.edu.cn。

场馆及附近地面道路的匝道。

该地下立交工程采用基坑方法进行施工,基坑面积近1.0km^2。其基坑紧邻青奥中心、国际风情街和长江大堤,其场地工程地质与水文地质条件非常复杂。场地地层岩性:上部为漫滩相软土、粉土,下部为河床相粗颗粒土—中粗砂,底部为泥岩。且场地地基中含有多层承压水,地下水非常丰富。面对这样一个工程地质条件复杂、基坑形态不规则的基坑工程,如何根据场地地质环境条件进行基坑支护设计,实现工程支护结构有效、经济合理、施工方便和有效保证工期的设计方案成为这一工程建设的关键(汪中卫等,2006)。本文针对 B2-J1 区基坑形态复杂、设计难度大这一技术问题,综合考虑其特点、开发进度、造价及可能出现的工程地质问题等方面的因素,根据场地工程地质条件和地下结构的差异性,将基坑在平面上划分为二区,在垂直方向上划分为四层。并结合基坑形状和隧道功能,进行分层分区基坑支护结构设计,有效解决了 B2-J1 区深大异形基坑支护设计和施工技术难题。



图 1 南京江边某特大型地下交通枢纽工程位置图(图中黑线加粗部分)(来源于 google 地图)

Fig. 1 Location map of the large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing (shown in bold black line part) (From the Google Earth)

1 工程地质条件分析

1.1 工程地质层组划分

根据其工程地质勘察报告,场地位于现行长江下游漫滩区,地面标高 6.0 ~11.0m,地势较平坦,水系发育,河流纵横交错,且紧邻长江。场地岩土体共划分了 20 多层工程地质层,这一分层方案划分层

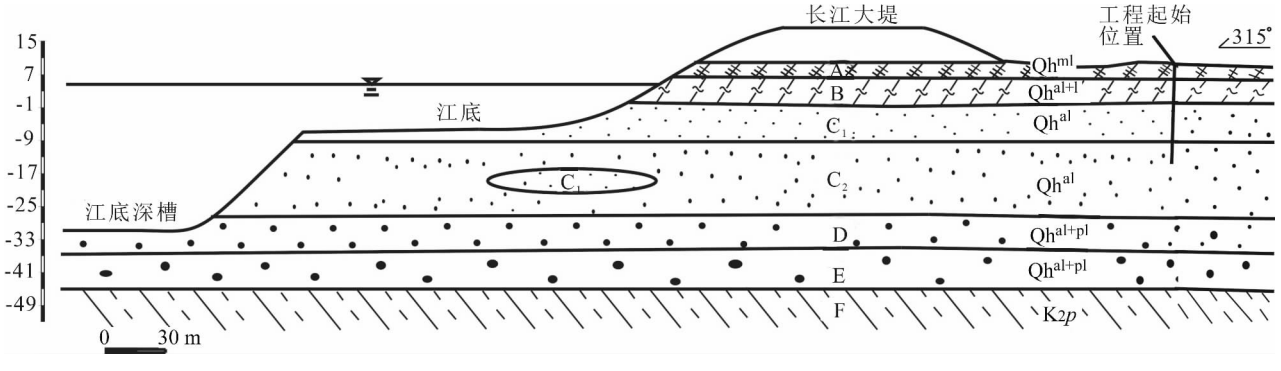


图 2 南京江边某特大型地下交通枢纽工程场地工程地质条件剖面图

Fig. 2 Section of engineering geological conditions of the large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing

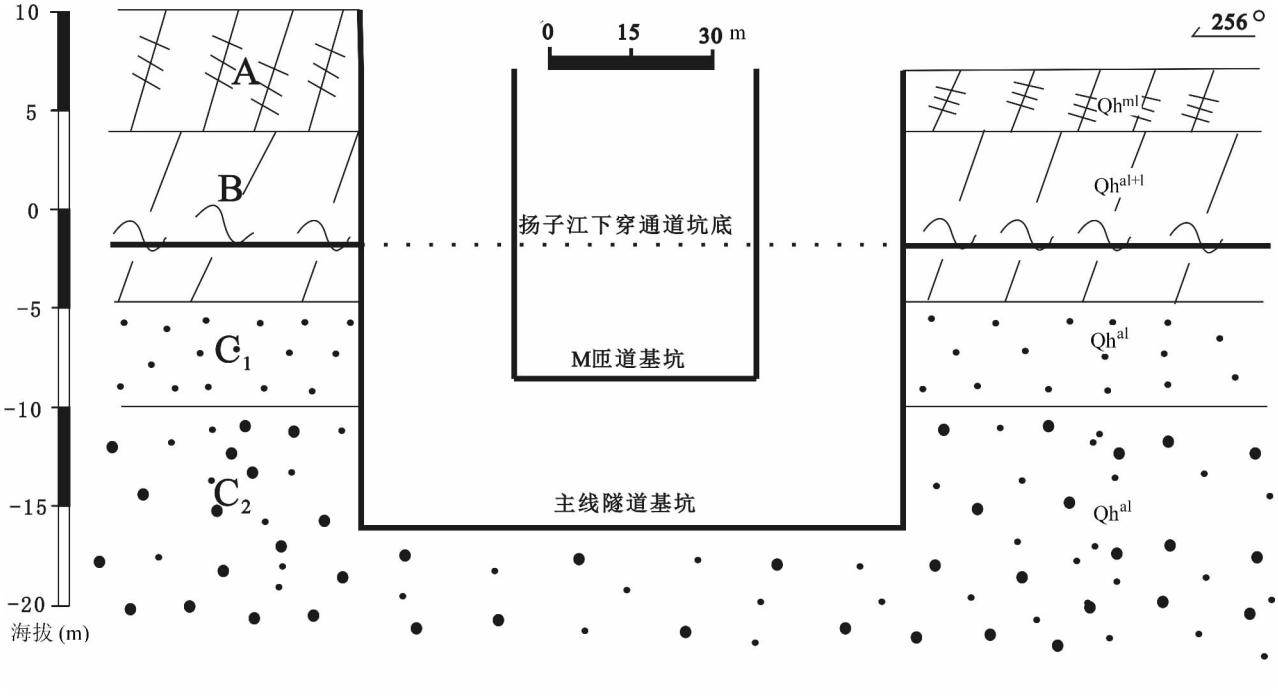


图 3 南京江边某特大型地下交通枢纽工程地下立交部分基坑剖面图

Fig. 3 Underground interchange part excavation section of the large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing

多不利于设计人员使用。为此,本文根据岩土层的成因、形成时代、埋深及岩石的风化程度,将基坑开挖深度内的地层合并划分为 6 大层,如图 2、图 3 所示,工程地质层组的岩性特征如表 1 所示。

工程区地基地层主要为长江漫滩相和河床相沉积地层,第四系全新统地层较厚。从表 1 可以看出,工程区地层岩性可分为四个部分,其上部为杂填土,场区普遍分布,其中靠近长江大堤处,厚度最大,达 10 余米;中部以全新统灰色、灰褐色粉质黏土、粉土及淤泥质土为主;下部为粉细砂、中粗砂、砾砂及含卵砾石混合土;底部为强—中风化泥岩。

1.2　工程地质层组综合评价

(1)岩土层工程地质评价: 根据工程地质勘察报告,场地的岩土体的物理力学性质指标如表 2 所

表 1 南京江边某特大型地下交通枢纽工程 B2-J1 区场地地层基本情况

Table 1 Site engineering geological layers in B2-J1 area of the large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing

层号	地层名称	地层时代	地层描述	层厚(m)
A	杂填土		杂色,松散,主要为建筑垃圾混黏性土,表层见植物根系	0.70 ~ 10.6
B	淤泥质土	Qh^{ml}	灰色,流塑—软塑,夹少量腐植质及贝壳碎片、夹粉土或粉砂薄层	3.10 ~ 10.0
C_1	粉砂	Qh^{al+l}	青灰色,饱和,松散 ~ 稍密,级配差,局部夹粉质黏土薄层,	5.20 ~ 23.0
C_2	粉细砂	Qh^{al}	青灰色,中密 ~ 密实,级配差,局部夹少量粉质黏土薄层	4.50 ~ 20.0
D	粗砂	Qh^{al+pl}	青灰色,饱和,密实,级配一般,含粗砂、砾石颗粒	0.55 ~ 16.0
E	砾砂、卵砾	$Qh^{al+pl}4$	灰色,饱和,密实,级配一般,砾石直径 2 ~ 15mm	0.50 ~ 12.5
F_1	强风化泥岩	K_2p	棕红色,泥质结构,以黏土矿物为主,浸水软化,手折易断	0.48 ~ 9.20
F_2	中风化泥岩	K_2p	棕红色,岩质较软,节理裂隙不发育,裂隙由石膏充填,浸水易软化	1.10 ~ 30.5
F_3	弱风化泥岩	K_2p	棕红色,泥质结构,层状构造,主要以黏土矿物为主,节理裂隙不发育	15.55 ~ 16.1

表 2 南京江边某特大型地下交通枢纽工程区各土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of each soil layer in engineering area of the large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing

层号	含水率(%)	重度标准值 γ(kN/m^3)	孔隙比	压缩系数 MPa^{-1}	粘聚力(kPa)	内摩擦角(°)	渗透系数(m/d)
A	32.6	19.3	0.870	0.45	23	25.30	2E-06
B	41.9	18.3	1.170	0.69	18	5.10	4E-06
C_1	26.5	19.1	0.748	0.14	10	24.0	8E-04
C_2	25.3	19.4	0.735	0.13	10	30.3	2E-05
D	17	19.9	0.572	0.09	—	—	5E-03
E	—	20.0	—	—	—	—	—

示。由表 2 可以看出,上部土层工程性质一般,较密实,其强度较高,属中等压缩性土,其透水性差;中部为软土,其工程性质差,土质疏松,属高压缩性土,透水性差;下部为粗颗粒土工程地质性质好,密实,透水性强,地下水丰富,为承压水含水层;底部为强风化的泥岩,为不透水层,埋深在 41 ~56m。

(2)工程稳定性评价及主要工程地质问题:本工程场地地层岩性上部为河流相第四系松散沉积物,下伏白垩系泥岩,基岩埋深较大。从图 2 可以看出岩土层在空间上分布不均匀,起伏变化大,厚度不稳定,岩性复杂多变,层理发育。工程区土层具有典型的二元结构特征,形成多个含水层,且有多层承压含水层,承压含水层地下水位高,同时含水层地质条件复杂,施工中对施工降水控制要求高,施工难度大,容易引发环境岩土工程问题和地质灾害,造成突发性工程事故(Zhu Dapeng et al. ,2015)。

该地下立交工程采用明挖法施工,基坑中部最大开挖深度 27m,向外开挖深度逐渐变小(图 3)。开挖深度内涉及土层中的 A 层杂填土,在开挖过程中易产生坍塌。基坑开挖深度中下部主要涉及 B 层淤泥质土及 C_1、C_2层粉细砂,其岩性变化大,压缩性大,局部存在与 B 层软土互层现象。B 层淤泥质土属软土,压缩性大,厚度不均匀,部分地段少数基坑的坑底位于 B 层中,其稳定性差,基坑底部须采用搅拌桩对其进行加固处理。B 层淤泥质土具有显著的流变性和触变性,在施工过程中多种动静荷载的作用下,容易发生缓慢流动变形,特别是动力荷载作用下软土结构遭到破坏,易发生液化、悬浮、流动和沉陷。因此,软土的流变性和触变性对基坑稳定性和支护结构的变形影响很大,易引发基坑支护结构倾覆失效,严重时造成基坑边坡失稳破坏(房鹏等,2015)。工程区基坑坑底大多数位于 C_1、C_2层中,C_1层和 C_2层为稍密粉细砂,属液化土层,由于位于地下水位以下,以此土层作为地下结构的地基时,可与抗浮措施一并考虑对该层进行加固处理。基坑底部以下为 D 层粗砂和 E 层卵砾石,地下水丰富,为承压含水层,与 C_1、C_2层粉细砂含水层水力联系密切。由于工程区位于高地下水位区,毗邻长江,有潜水含水层和多层承压含水层,地下水丰富,必须进行工程降水,而大幅度的降低地下水位会引发土体中渗流场和应力场的改变,造成基坑内外地下水位差,产生巨大的水压力,极易发生突涌、管涌、流土,容易导致基坑侧壁变形和坍塌破坏。而且基坑开挖会破坏土体的天然应力状态,在基坑开挖过程中基坑侧向和底部发生卸荷作用,特别是在基坑底部土层为二元结构的地质结构时,上部软土透水性差视为隔水层,下部粉细砂层为承压含水层,当基坑开挖到软土层及承压含水层顶部时,因软土及松散粉细砂层抗剪强度低,易发生坑底突涌破坏(吴旭东等,2010;何长军等,2013)。另一方面巨大的水压力将增大基坑支护结构上压力,引起支护结构变形和止水帷幕失效渗漏,对周围环境造成不可预想的破坏。

2 基坑主要特点及分区分层

该地下立交工程的核心部位 B2-J1 区基坑为一规模宏大、形状不规则的特大型基坑群。该基坑最大开挖深度达 27m,开挖宽度(东西向)约 258m,长度(南北向)达 320m。其中,基坑开挖最深处为与梅子洲过江隧道的连接处,基坑还设有 J 匝道、M 匝道、L 匝道和 I 匝道与地面路道和相邻建筑相连。基坑各区块开挖深度范围内工程地质条件变化大,基坑的形状和深度也不同,基坑深度范围内涉及到多个工程地质层组、基坑深度如表 3 所示。

2.1 基坑水平分区

根据基坑不同区段开挖深度、场区工程地质条件及周围环境等因素,将 B2-J1 区在平面上划分为 NW 区和 SE 区,如图 4 所示。NW 区紧临长江大堤,基坑形状最为复杂,基坑开挖深度最大,开挖深度内的土体以软土及粉细砂为主。这种情况下的基坑周围土体塑性区范围较大,土体的塑性流动变形

表 3 南京江边某特大型地下交通枢纽工程 B2-J1 区各地块基坑涉及到地层及形状概况

Table 3 Foundation pit situation in B2-J1 area of the large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing

基坑	放坡前基坑深度(m)	开挖深度内地层	基坑平面形状
主线隧道	27	A、B、C_1、C_2	直线状
M 匝道	17	A、B、C_1、C_2	弯曲率较大的抛物线状
J 匝道	16.3	A、B、C_1、C_{22}	弯曲率较小的曲线状
L 匝道	13.5	A、B、C_1	弯曲率较小的曲线状
I 匝道	12	A、B、C_1	弯曲率较小的曲线状

也较大,容易从支护结构外侧向坑内和坑底移动,从而使支护结构外侧地表产生地面沉降(杨校辉等,2014)。SE 区距离大堤较远,基坑形状主要为曲线状,基坑深度相对浅一些,周围同期建筑物较多,基坑开挖深度内的土体以软土为主。由于软土的触变性和流动变形,在开挖过程中一定要保证支护结构和周围建筑物的稳定性,其变形量必须控制在合理的范围内(高大钊等,1995;何长军等,2013)。

2.2　基坑垂直分层

由表 3 可以看出,基坑在垂直方向上不仅土体的工程性质变化很大,而且地下结构功能也不同。根据基坑各区块的开挖深度、形状及地层性质可以将 NW 区从下至上划分为 I、II、III 三层,将 SE 区划分为 I、IV 二层。具体情况如图 5 所示。

NW 区基坑第 I 层是连接梅子洲主线隧道的重要通道,向东南延伸至 SE 区,连接主体隧道,其开挖深度沿轴线方向向外逐渐变浅。第 II 层位于 NW 区地下结构的中部,是 M、J 匝道穿越区,其深度在 16 ~ 17m 之间;第 III 层是扬子江下穿通道,位于 NW 区地下结构的最上层;第 IV 层是 SE 区 L 和 I 匝道,其开挖深度范围内以淤泥质土为主,基坑形状皆为曲线状。其中 NW 区第 I 层、第 II 层基坑涉及到的粉砂、粉细砂地层级配较差,颗粒不均,且为含水层,在基坑开挖过程中极易发生流砂、管涌和基底的突涌等地质灾害(李国维等,1998)。

总体来看,该基坑的主要特点为:① 基坑形状异常:由于该地下立交工程为连接地面及地下道路大型通道,基坑开挖面积超大,各区块开挖深度不一,且形状极不规则,基坑出现“坑中坑,坑靠坑”。同时基坑施工要分段开挖,进度不一,周围环境复杂,变形控制要求高,支护结构设计难度很大。② 工程地质条件差:基坑大部分坐落于软土层中,基坑坑壁及坑底主要由软塑—流塑状淤泥质粉质黏土层和粉细砂层组成,且厚度较大,其中淤泥质粉质黏土具有触变性和流变性,及压缩性高、强度低的特点,在基坑施工过程中容易发生固结沉降及蠕变,坑底易发生隆起变形,对基坑支护结构的稳定性极为不利。③ 水文地质条件非常复杂:上部有孔隙潜水,水位埋深浅,下部有两层承压水,且承压含水层顶面起伏变化大,局部地段有可能揭穿承压含水层,必须

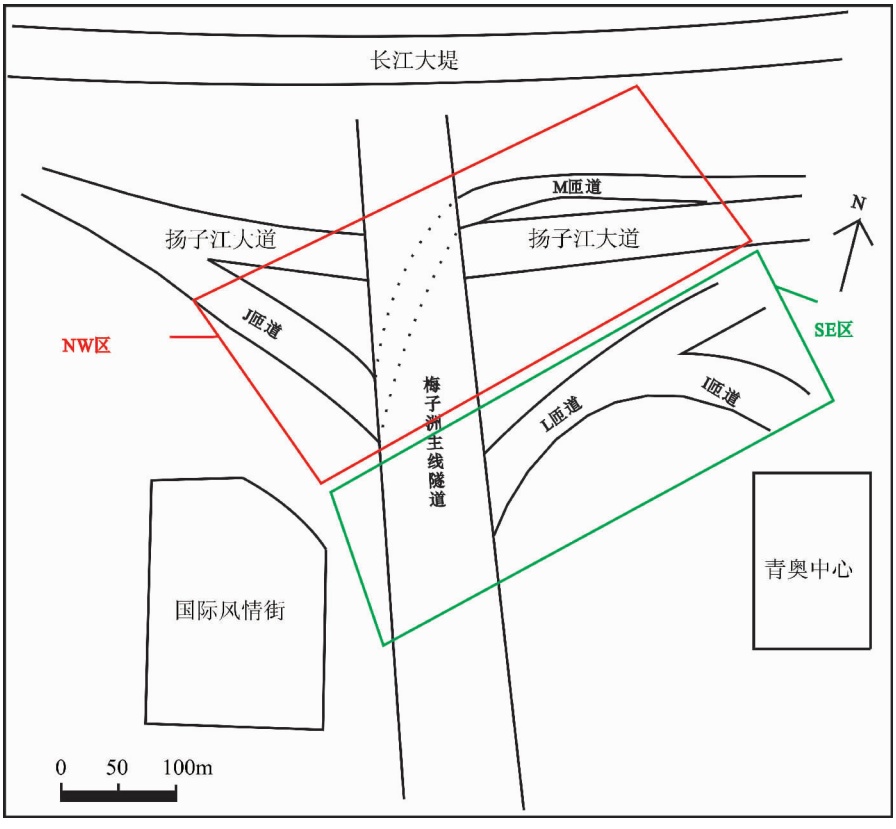


图 4 南京江边某特大型地下交通枢纽工程 B2-J1 区基坑平面分区图

Fig. 4 Division map of B2-J1 foundation pit of the large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing

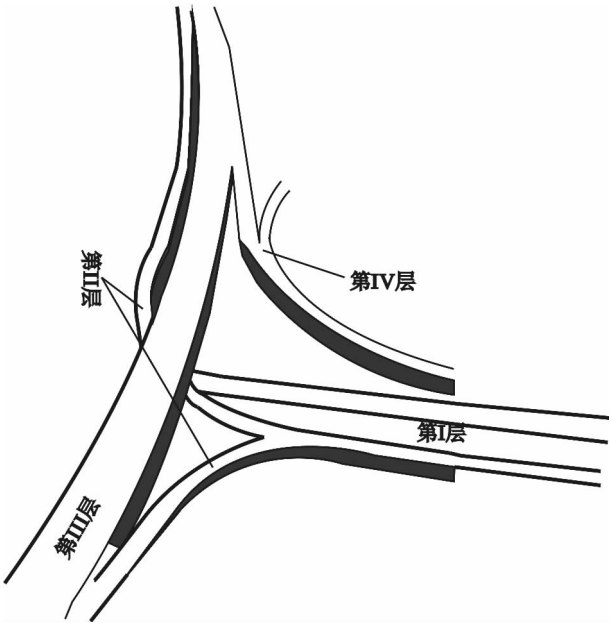


图 5 南京江边某特大型地下交通枢纽工程
基坑垂直分层立体图

Fig. 5 Vertical layered three-dimensional map of foundation pit of the large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing

进行降水、降压措施,防止坑底发生突涌。

3 基坑支护结构设计

综合考虑该工程的场地工程地质条件和可能遇到的地质问题,同时考虑到基坑的形态、功能以及环境条件,将基坑的开挖支护结构分为 NW、SE 两部分进行设计。

3.1 NW 区基坑的支护结构设计

NW 区场地工程地质条件最为复杂,地下结构特殊,场地内地面地形起伏较大,高差约 4 ~ 5m,涉及到的土层主要为杂填土和淤泥质土。地下水为潜水,地下水水位埋深变化大,工程施工期间处于枯水期,地下水埋藏较深。基坑北侧紧邻长江大堤,为一土质堤岸,大堤顶部地面标高 11 ~ 12m,堤顶为一宽 6m 的水泥道路,堤内侧填有大量建筑垃圾,坡角约 10° ~ 15°,植被发育,堤外侧坡角约 5° ~ 10°,临长江建有挡墙,墙外采用砌石护岸。大堤坡脚地面标高 8 ~ 9m,大堤及其部分地基土层为多年的老填土,经多年的压实作用土层强度较高。基坑周围道路较多,有较大的放坡空间,且基坑开挖越深造价越高,所以将 NW 区基坑的开挖支护分为 2 期:第一期对最上层的第 III 层基坑进行放坡开挖,盆式开挖至设计标高 -0.4m。为了保证大堤的安全、控制大堤的变形,在大堤处采用格构梁(梁) + 喷锚的支护方式进行护坡。第二期再针对第 I、第 II 层基坑进行支护结构的设计。其中第 I 层基坑位于整个场地的正中间,经放坡开挖后基坑深度约 15m。由于紧邻长江大堤,为保证大堤及附近其他基坑的稳定,防止基坑发生突涌和变形,对基坑下部第 I 层采用地下连续墙 + 内支撑的方式进行支护开挖(图 6),另外 B 层为软土,厚度变化大,虽开挖掉一部分但其厚度仍较大,遂须用三轴水泥搅拌桩进行加固,且在基坑底部设置 15cm 厚的 C20 混凝土和 5cm 细石混凝土垫层,其中地下连续墙的厚度为 1m,嵌入深度为 41.7m,进入基岩。

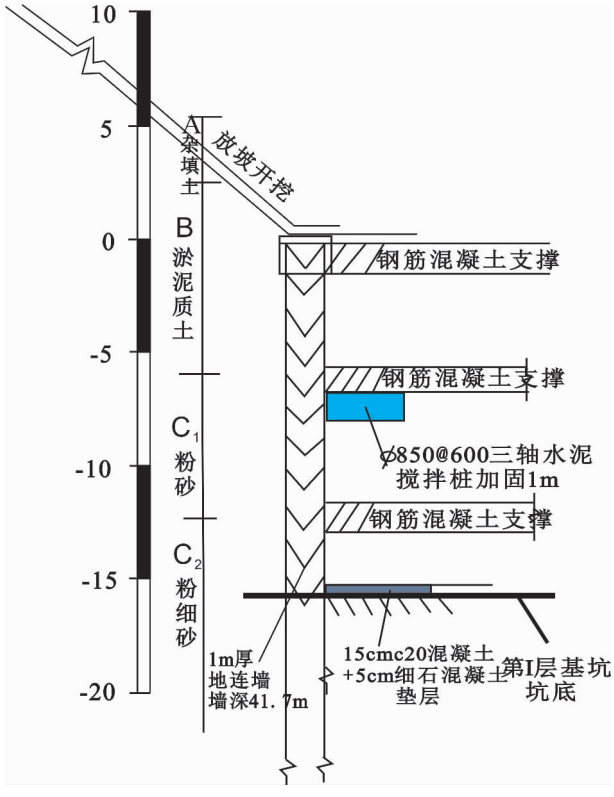


图 6 南京江边某特大型地下交通枢纽工程
第 I 层基坑支护结构剖面图

Fig. 6 Section of the layer I excavation support structure of the large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing

NW 区第 II 层基坑的形状比较特殊,类似于抛物线,地下连续墙很难满足其形状上的要求,经放坡后基坑深度约为 9 ~ 11m,开挖范围内的土层主要为 B 淤泥质土和 C_1 粉砂层。其中淤泥质土层的厚度达 4m,工程性质较差,且 C 层为承压含水层,基坑北侧

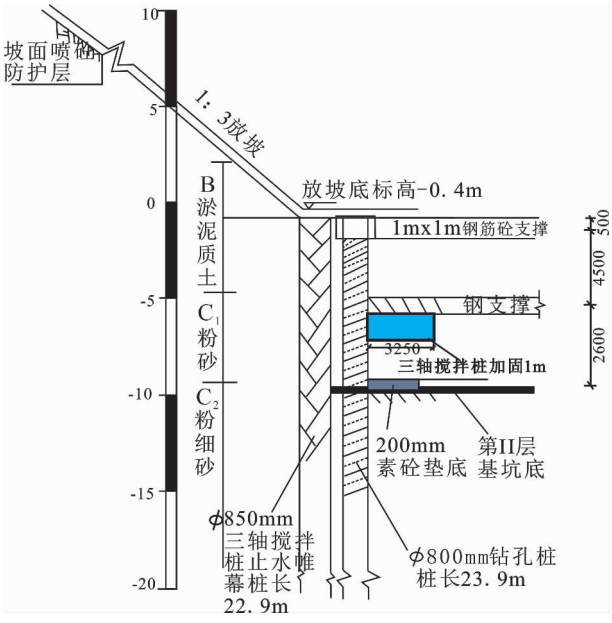


图 7 南京江边某特大型地下交通枢纽工程第 II 层基坑支护结构剖面图

Fig. 7 Section of the layer II excavation support structure of the large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing

有长江大堤,西侧有国际风情街,周围环境对变形要求高,桩基持力层较深。另外由于形状的特殊性,第 I 层和第 II 层的连接处也是支护的难点。为了满足基坑在形状上的特殊性,保证第 I 层基坑与国际风情街的安全,在基坑外侧设计三轴搅拌桩止水帷幕来保证基坑的安全,防止地下水渗漏,支护方式采用钻孔灌注桩 + 内支撑的支护结构(图 7),其中三轴搅拌桩桩长 22.9m,钻孔灌注桩桩长 23.9 m。为了保证基坑底的稳定在其开挖完成后对其立刻进行 200 mm 的素砼垫层,C_1 为稍密粉砂,属液化土层,遂 C1 地层下 2m 处进行三轴搅拌桩加固。在与第 I 层连接处采用格形地下连续墙进行支护(王建华等,2016)。

3.2　SE 区基坑支护结构设计

SE 区基坑距离长江大堤较远,在垂直方向上包括第 I 层基坑的南侧部分和第 IV 层基坑,其中该第 I 层基坑与 NW 区情况相似,其上部较浅,利用两侧支护结构,而下部采用地下连续墙 + 内支撑的支护方式。第 IV 层基坑紧邻青奥中心,周围建筑物较多。基坑深度较浅,基坑形状呈现曲线状,开挖范围内的地层以淤泥质土为主,其北侧青奥中心正在进行基坑施工。为了保证青奥中心在建基坑的稳定,不宜采用放坡开挖方式,为此在靠近青奥中心一侧采用 800mm 的地下连续墙 + 钢支撑进行支护,其中地连墙的嵌固深度 21m。其余段距离青奥中心较远,且基坑深度较浅,采用钻孔灌注桩 + 钢支撑的方式进行支护,其中钢支撑的直径 609mm,壁厚 16mm。另外在基坑开挖过程中,应注意排水,基坑紧邻长江且基坑超深,采用降压井 + 疏干井相结合的方式进行降水,基坑开挖后再及时设置坑内排水沟和集水井。本工程已于 2014 年 6 月施工完成,根据监测数据,基坑从开挖至回填,基坑及周边环境变形均在可控范围内,未超过预警值。说明这一支护方案是成功有效的。

从上述分析来看,在其深基坑支护设计中应对其场地工程地质条件进行综合分析,充分利用地质体的特点和发挥地质体潜能,采用有效的支护方式,不仅可以确保基坑施工安全,而且可以大大节约工程建设成本、缩短施工工期。

4　结语

本文以南京临江某地下立交工程深大基坑群支护设计为例,通过对该工程 B2-J1 区场地工程地质条件分析评价,给出在施工过程中可能出现的工程地质问题;根据场地地层岩性特征、水文地质条件和地下工程结构特点,对施工区水平和垂直方向进行分区分层,以此对基坑群支护结构设计进行优化分析。主要取得以下认识。

(1)根据场地工程地质条件对大型异形基坑支护方案选型进行优化分析,给出合理的支护方案,这不仅可以有效保证施工安全,还可以大大节约工程建设成本、缩短施工工期。

(2)针对 NW 区地下水位埋深大、土颗粒级配差,极易发生管涌、流砂等地质灾害以及其地下结构极其复杂的特点,提出第 III 层可以采用放坡式开挖,挖掉性质较差的土层,卸除部分土体荷载,有效减小了整个场区的主动土压力;并采用格构梁(梁) + 喷锚的支护方式进行护坡。这一支护开挖施工方式大大降低地下连续墙的整体开挖深度,加快了基坑施工工期,解决了异形结构带来支护难度大的问题。

(3)由于 NW 区的第 I 层基坑开挖深度最大,涉及 C_1 粉砂层和 C_2 粉细砂层,承压水头高,土侧向压力大。因此,采用地下连续墙 + 内支撑和三轴搅拌桩底板加固相联合的支护结构,使土体侧向变形和地下水渗透得到有效控制。

(4)第Ⅱ层基坑结构形状简单,基坑开挖深度相对较浅,为此采用排桩加止水帷幕的支护结构。由于场区内有较厚软土分布,其下部有承压水,为此需适当加深止水帷幕。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

房鹏,廖秋林,徐艳艳. 2015. 南京德基广场二期基坑支护设计. 工程地质学报,23(1):155~160.

高大钊. 1995. 软土深基坑支护技术中的若干土力学问题. 岩土力学,(3):1~6.

何长军,王慧,荣杰,郑伟涛. 2013. 滨海软土地基深基坑支护方案设计与优化分析. 工业建筑,(增刊):555~558.

李国维,刘汉东,朱普生. 1998. 深基坑开挖引发的环境工程地质问题及其防治措施. 华北水利水电大学学报(自然科学版),(4):46~48.

刘国彬,王卫东. 2009. 基坑工程手册:第二版. 北京:中国建筑工业出版社.

王建华,李江腾,廖峻. 2016. 土钉墙+排桩在明挖隧道深基坑支护中的几个问题. 岩土力学,37(4):1109~1117.

汪中卫,刘国彬,王旭东,宰金珉. 2006. 复杂环境下地铁深基坑变形行为的实测研究. 岩土工程学报, 28(10):1263~1266.

闫怀瑞,阎长虹,丁倩文. 2015. 深厚软土地区基坑开挖主要工程地质问题与对策. 地质论评,61(1):149~154.

张玉成,杨光华,胡海英,陈富强,黄致兴,陈伟超. 2014. 珠三角深厚软土地区浅基坑支护若干问题探讨. 岩土工程学报,36(s1):1~11.

赵彤. 2010. 特大型基坑群工程基坑支护方案分析与比选. 中国建筑学会地基基础分会 2010 学术年会.

Fang Peng, Liao Qiulin, Xu Yanyan. 2015&. Nanjing Deji Plaza two excavation design . Journal of Engineering Eeology, 23 (1): 155~160.

Gao Dazhao. 1995#. Some soil mechanics problems in support technology of soft soil deep foundation pit . Rock and Soil Mechanics, (3): 1~6.

He Changjun, Wang Hui, Rong Jie, Zheng Weitao. 2013&. Design and optimization analysis of support scheme for deep foundation pit of coastal soft ground . Industrial Building, (S1): 555~558.

Li Guowei, Liu Handong, Zhu Pusheng. 1998&. Environmental engineering geological problems caused by deep foundation pit excavation and their prevention and control measures . Journal of North China University of Water Conservancy and Hydropower (Natural Science), (4): 46~48.

Liu Guobin, Wang Weidong. 2009#. Excavation Engineering Handbook: 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press.

Wang Jianhua, Li Jiangteng, Liao Jun. 2016&. Some problems of soil nailing wall and row piles in deep excavation of open cut tunnel . Rock and Soil Mechanics, 37 (4): 1109~1117.

Wang Zhongwei, Liu Guobin, Wang Xudong, Zai Jinmin. 2006&. Study on the deformation of a deep metro excavation under complex environment . Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 28 (10):1263~1266.

Yan Huairui, Yan Changhong, Ding Qianwen. 2015#. The deep soft soil foundation pit excavation the main engineering geological problems and countermeasures. Geological Review, 61(1):149~154.

Zhang Yucheng, Yang Guanghua, Hu Haiying, Chen Fuqiang, Huang Zhixing, Chen Weichao. 2014&. Discussion on some problems of shallow foundation pit support in deep soft soil area of Pearl River Delta . Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 36 (S1): 1~11.

Zhao Tong. 2010&. Analysis and comparison of foundation pit support schemes for extra large foundation pit. In: Chinese Society of Building Foundation 2010 Annual Academic Meeting.

Zhu Dapeng, Qin Liangkai, Lin Yundian. 2015. Analytical Study on Dynamic Response of Deep Foundation Pit Support Structure under the Action of Subway Train Vibration Load: A Case Study of Deep Foundation Pit of the New Museum Near Metro Line 2 in Chengdu, China. Shock and Vibration, (5):1~10.

Geological Conditions Study Playing Significant Role in the Supporting Design of Super Large Foundation Pit

——Optimization of the Supporting Design for a Super Large and Special Shaped Foundation Pit in Complicated Geological and Environmental Conditions

GUO Shulan[1)], YAN Changhong[1,2)], YANG Zhanyong[3)], WANG Qingming[3)], ZHANG Lifeng[3)], WANG Shi[4)], CHE Canhui[4)], SHI Qingtao[3)]

1) *School of Earth Science and engineering*, *Nanjing University*, *Nanjing*, 210046;

2) *Nanjing University Jinling College*, *Nanjing*, 210089;

3) *China Railway* 14*th Construction Bureau Co.*, *LTD*, *Jinan*, 250014;

4) *The First Institute of Hydrology and Engineering Geological Prospecting*, *Anhui Prospecting Bureau*, *Bengbu*, *Anhui*, 233000

Objectives: In recent years, along with the increasing of underground engineering constructions, which presents deep excavation pit, large-scale, complex shape and other characteristics. The geological environment is very complicated in the lower reaches of the Yangtze River, as a result, the supporting structure design and construction is very difficult. Taking a large underground transportation hub project along the Yangtze River in Nanjing as an example, the paper discusses the important role of the research of geological environment on the

design of the supporting structure of deep foundation pit. The structure of the project has three layers. The bottom layer would connect river-bottom tunnel, and the upper two layers would connect nearby venues and a plurality of ground road. The foundation pit excavation is very deep, the excavation depths are very different and the shape of foundation pit is very irregular. The project is located on the west side of Nanjing Youth Olympic Center, the place that is near the Yangtze River embankment. The Quaternary loose sediments are widely distributed in this area.

Methods: This paper aims at the core area of the super large foundation pit engineering, analyzes its engineering geological conditions and raises the possible engineering geological problems. According to the function and shape of the foundation pit, the soil layer of the foundation pit is partitioned and layered from the plane and section and the supporting structure design has been optimized. The scheme of foundation pits supporting was a combination method of open cut excavation in the upper part and the diaphragm wall in the lower part. The successful completing and deformation monitoring of foundation pit has illustrated the rationality of the design scheme.

Results: It solves the problem of large irregular foundation pit construction technology, improves the construction speed and reduces the construction cost.

Conclusions: This result can be applied for the design of support scheme and deformation control of some super large foundation pit engineering in the area of the Yangtze River.

Acknowledgements: This paper is the doctoral program of the Ministry of Education and the result of the social development support project of Jiangsu Science and Technology Departmen. Thank you for their help and support. Thanks are due to tutor YAN Changhong for assistance with on-the-spot investigation and valuable discussion.

Keywords: deep and large special-shaped foundation pit group; supporting design; slope technology; diaphragm wall; bored pile

First author: GUO Shulan, female, born in 1992, Graduate students, mainly engaged in geotechnical engineering research. Email: guoshulan1221@163.com

Corresponding author: YAN Changhong, male, born in 1959, professor and doctoral supervisor of Nanjing University, engaged in engineering geology, environmental geotechnical engineering teaching and research. Email: yanchh@nju.edu.cn

Manuscript received on:2016-08-15; Accepted on:2017-07-24; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.05.020

GEOLOGICAL REVIEW

Vol. 63　No. 5　2017

CONTENTS

Scholarly Discussion

From Geosyncline—Platform Theory, Plate Tectonics to the Multisphere Tectonic View of Earth System ····· REN Jishun, XU Qinqin, ZHAO Lei, ZHU Junbin(1139)

Study on Thermal Deformation and Lower Crust Channel Flows in Qinghai—Xizqng (Tibet) Plateau ····· YANG Wencai, HOU Zunze, XU Yixian, YAN Ping(1151)

Geochemistry and Its Tectonic Significance of the Clastic Rock in the Neoproterozoic Xiajiang Group, Southeast Guizhou, South China ····· DAI Wei,XU Yajun, DU Yuansheng, QIN Yongjun(1167)

New Petrographic and Mineralogical Analyses of the Wangpo Shale, Wujiaping Formation (Basal Lopingian, Permian) in the Liangshan Area of Shaanxi ····· GUO Junfeng, SONG Zuchen, XIAO Liang, LI Xiangchuan, ZHENG Yajuan, YAO Xiaoyong, ZHOU Xuerou(1179)

Deformation Characteristics of the Neoproterozoic Langshan Group in Langshan Region and Their Tectonic Implications ····· TIAN Rongsong, XIE Guoai, ZHANG Jin, QU Junfeng, ARKIN Amirdin, LI Fahao, ZHANG Beihang, ZHAO Heng(1191)