

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.10.019

温州中心片污水处理厂深基坑工程的设计与施工

赵 璋

(温州市城市建设开发项目前期研究中心, 浙江 温州 325000)

摘 要: 温州市中心片污水处理厂基坑支护工程设计及施工面临很多技术难题, 实施过程中对整个基坑支护设计、施工全过程进行了精细化研究。采用数值反分析手段建立考虑盆边留土作用的基坑支护结构分析计算参数 m 的取值公式; 根据开挖深度、土体性质、周边情况综合比选基坑支护形式, 优化施工方案, 并着重对高压旋喷预应力锚杆工艺中的斜向引孔、锚杆安装、成桩等工序进行详细方案设计; 针对土方开挖及运输工程制定了完善详细的施工组织计划; 通过不断优化全过程方案, 在保证安全可靠的前提下, 节约了大量投资, 取得了较好的经济效益。

关键词: 半地下污水处理厂; 深基坑支护; 预应力锚杆; 土方开挖; 施工组织; 施工优化

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2024)10-0114-07

Design and Construction of a WWTP Deep Foundation Pit in Wenzhou Central Area

ZHAO Zhang

(Wenzhou Urban Construction and Development Project Preliminary Research Center, Wenzhou 325000, China)

Abstract: There are many technical challenges in the design and construction of foundation pit support project in Wenzhou central area wastewater treatment plant (WWTP). The entire foundation pit support design and construction process during implementation are studied. The numerical inverse analysis method is used to establish the formula for calculating parameter m of foundation pit supporting structure considering soil retention at basin edge. According to the comprehensive comparison of excavation depth, soil properties and surrounding conditions, the supporting form of foundation pit is selected, the construction scheme is optimized, and the exhaustive scheme design is focused on the diagonal pilot hole, anchor installation, pile formation and other processes in the high-pressure rotary spray prestressing anchor process. Detailed construction organization plan is developed for earthwork excavation and transportation engineering. Through continuous optimization of the whole process scheme, under the premise of ensuring safety and reliability, a lot of investment has been saved, and better economic efficiency has been achieved.

Key words: semi-underground wastewater treatment plant; deep foundation pit support; prestressed anchor; earth excavation; construction organization; construction optimization

1 项目简介

1.1 工程概况

温州市中心片污水处理厂迁建工程BOT项目坐落于温州市鹿城区滨江街道杨府山涂村,占地面积约 6.3 hm^2 ,总建筑面积约 $12\times 10^4\text{ m}^2$,所有污水、污泥处理构(建)筑物及附属生产建筑物、管理用房等均位于半地埋式箱体内,箱体顶部为杨府山体育休闲公园的组成部分。该工程建设时为亚洲最大的半地埋式污水处理厂,也是温州市公用事业设施的重要组成部分,对削减温州市水体污染负荷量、改善温州城市水环境起到了重要的作用。温州中心片污水处理厂迁建工程污水处理采用“预处理-改良 A^2O -高效沉淀池-纤维滤池-紫外消毒”工艺,其核心工艺为改良 A^2O +高效沉淀池+纤维滤池组合工艺,处理尾水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准,达标出水就近排入瓯江。

温州市中心片污水厂迁建工程深基坑专项工程有3个特点:①地质条件复杂,基坑处于环境敏感的滨海软土地区,地质条件差,地下水与瓯江连通,砂层较厚,水流动性较强且有两层承压水,对支护结构和止水帷幕影响大;②项目建设场地周围存在

大量既有建(构)筑物,其中部分障碍物会对基坑工程的设计和施工产生较大不利影响,基坑开挖范围西南侧靠近既有污水厂处DN200排江管距基坑开挖线仅2.3 m,埋深2~2.3 m,场地东侧有现状电塔,高压电线走向和基坑边线存在空间上的交叉,施工安全隐患较大;③本项目基坑支撑方式多样复杂,内部支撑也根据场地及受力形式分别采用不同类型支撑形式。综上,该项目必须进行详细的施工组织设计,明确施工过程的关键点。

1.2 地质条件

根据岩土工程勘察报告,基坑开挖深度影响范围内土层自地面往下分别为:①₁杂填土,全场分布,层厚2.30~10.20 m;②₁淤泥夹粉砂,全场分布,厚1.00~5.60 m;②₂中砂夹淤泥,全场分布,厚7.80~11.80 m;②₃淤泥夹粉砂,全场分布,厚1.10~5.10 m;②₄淤泥,全场分布,厚6.90~14.20 m;③₁淤泥质黏土,全场分布,厚2.60~12.40 m;③₂淤泥质黏土夹粉砂,全场分布,厚2.40~10.30 m;④₂粉质黏土,个别孔缺失,厚0.40~4.70 m;④₃₁圆砾石,个别孔缺失,厚0.40~3.80 m;④₃₂卵石,全场分布,未揭穿该层,揭露厚度大于7.40~12.90 m。

典型地质剖面见图1。

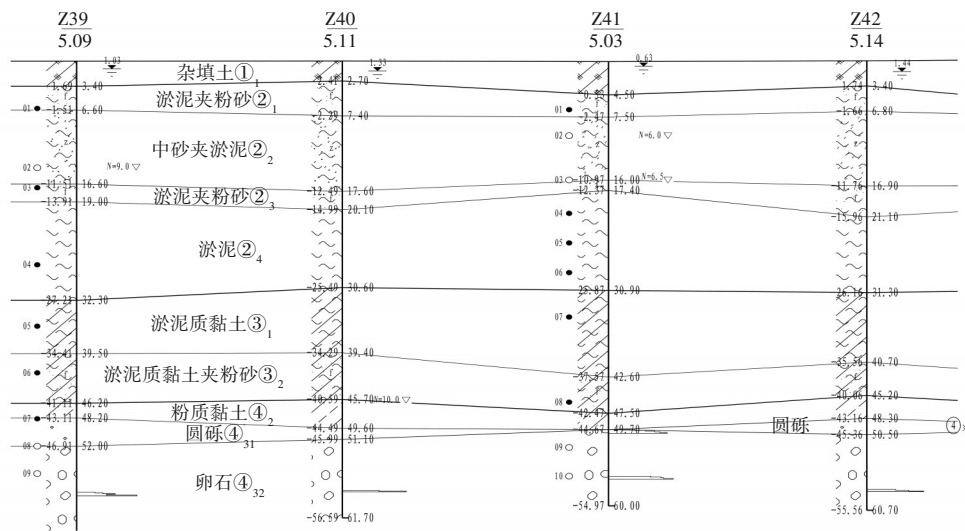


图1 典型地质剖面

Fig.1 Typical geological profile

1.3 深基坑支护结构选型

本工程基坑开挖最大深度为 15.00 m, 基坑支护工程整体采用排桩+内支撑体系, 并结合场地实际情况在部分区域采用桩锚、复合土钉墙、水泥土

重力式挡墙和拉森钢板桩等复合支护体系,在坑外主动区设置三轴水泥搅拌桩或拉森钢板桩作为止水帷幕,同时在局部坑内被动区采用双重管高压旋喷桩进行加固。基坑平面布置见图2。

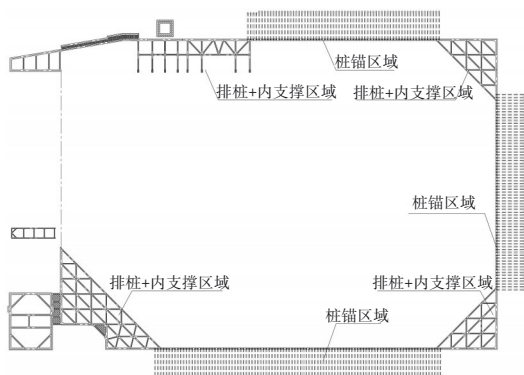


图 2 围护结构平面布置

Fig.2 Layout plan of enclosure structure

2 工程重难点分析

本项目基坑施工主要面临特殊地质情况下计算参数取值、基坑支护选型、土方开挖顺序等难题,具体分析如下:

① 在实际工程中,计算参数选择的合理性是影响有限元计算模拟准确程度的主要因素。对于深大基坑,考虑盆边留土可有效控制深基坑变形量,然而现有的弹性抗力梁法却未能充分考虑其有利作用。因此,需要通过数值反分析的方法建立考虑盆边留土作用的基坑支护结构分析计算参数 m 的取值公式,这对提高基坑支护结构的设计准确性和可靠性非常重要。

② 本工程基坑开挖深度 1.50~15.00 m,围护结构采用排桩+两道内支撑、排桩+一道内支撑、桩锚、复合土钉墙、水泥土重力式挡墙和拉森钢板桩等多种支护体系,并在主动区设置三轴水泥搅拌桩或拉森钢板桩作为止水帷幕,在局部被动区采用双重管高压旋喷桩进行加固,基坑围护结构种类多、形式复杂,设计及施工难度均很大。

③ 在盆式开挖逆作法中,需要处理大量的挖掘土方,特别是在空间有限或地理条件复杂的情况下,一旦土方的运输、储存和处理等施工措施处理不当,都将对工期、造价带来不利的影响。

3 土体等效 m 值的计算

利用现行国家建筑行业推荐的基于弹性抗力法的杆系有限元软件,根据工程现场无盆边留土剖面(Z-3剖面)的实测数据,反算出土体初始 m 值 m_0 ,然后根据变形结果反演得到Plaxis 2D中土体刚度参数,采用有限元计算软件分别模拟得到深基坑在不同开挖条件下的变形特征;最终得到考虑盆式开

挖逆作法基坑盆边留土高度、宽度、坡率等因素影响的等效 m 参数计算公式^[1-3],在平面有限元数值分析中土体本构模型采用弹塑性硬化模型——HS模型。

Z-3剖面支护结构见图3。

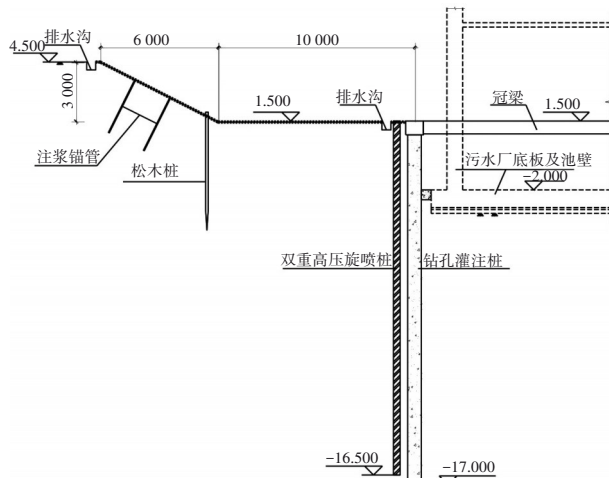


图 3 Z-3剖面支护结构

Fig.3 Support structure of Z-3 section

取基坑对称面一半进行分析,根据基坑开挖影响范围选取计算模型宽度为 100 m、计算模型高度为 30 m。为便于反分析,将地基简化为单层土地基,即具有代表性的粉砂夹淤泥土层。围护结构根据刚度等效原则,采用 0.54 m 厚板单元模拟为地连墙,墙高 18.5 m。盆边留土坡率定位 1:3。模型网格划分见图4。

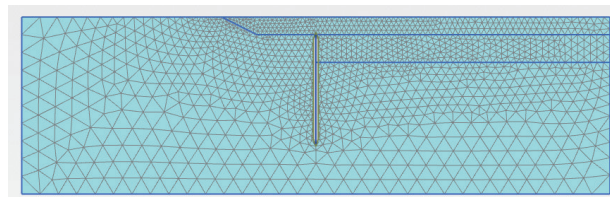


图 4 模型网格划分

Fig.4 Model grid division diagram

根据Z-3剖面拆撑工况的实测数据,反算得到有限元计算土体参数(见表1)。

表 1 土体相关参数

Tab.1 Soil parameters

土层	土层重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ /(°)	m_0 /($\text{MN}\cdot\text{m}^{-4}$)
粉砂夹淤泥	16.8	7.5	11.6	1

根据有限元软件计算得到的围护结构变形反分析得到土体刚度模量,有限元土体参数见表2。

表2 有限单元法土体参数

Tab.2 Soil parameters of the finite element method

土层	本构模型	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	标准三轴排水试验割线模量 E_{50}/MPa	标准固结试验 $E_{\text{ocd}}/\text{MPa}$	卸载/重加载刚度 E_{ur}/MPa	黏聚力 c'/kPa	内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$
粉砂夹淤泥	HS	16.8	15	15	45	2	25

计算模型中地下连续墙为钢筋混凝土结构,采用弹性模型,参数见表3。

表3 地连墙参数

Tab.3 Parameters of retaining walls

地连墙参数	弹性模量 E/GPa	拉伸(压缩)刚度 EA/kN	弯曲刚度 $EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2)$
数值	30	1.6×10^7	3.9×10^5

综合分析,得到基于该工程粉砂夹淤泥土体等效 m 值关于盆边留土高度 h 、宽度 b 及坡率 n 的关系式:

$$m = [1.426 1e^{3.7497 \frac{h}{h_0}} - 1.535 3 \left(\frac{b}{h_0} \right)^2 + 36.308 9 \frac{b}{h_0} + 31.5n - 94.5] m_0 \quad (1)$$

选取本项目深基坑工程典型盆边留土剖面,采用此参数利用深基坑支护工程结构分析计算软件对留土工况支护水平位移进行计算,并与现场变形观测值进行比较,结果表明本文推导的土体等效 m 值计算公式可应用于实际工程,具有较高的可信度和实用性。

4 基坑支护施工技术

本工程基坑现状场地绝对标高为 1.50~5.00 m,不同区域开挖深度差别较大,故依据场地现状标高、开挖深度以及场地现状障碍物情况,选择不同基础形式:提升泵房及粗格栅部分基坑设计开挖深度为 9.00~15.00 m,围护结构采用排桩+内支撑形式;纤维滤池及紫外消毒池部分基坑设计开挖深度为 1.50~6.50 m,围护结构采用水泥土重力式挡墙形式;二沉池、好氧池、缺氧池、厌氧池等部分基坑设计开挖深度为 4.70~8.20 m,围护结构主要采用排桩+内支撑形式、桩锚、拉森钢板桩形成的综合性支护体系形式,并在局部被动区采用双重管高压旋喷桩进行加固;为节约工期及工程造价,本项目创

新性地在基坑非角部区域采用高压旋喷预应力锚杆拉锚式围护结构代替传统的内撑式结构(见图5)。

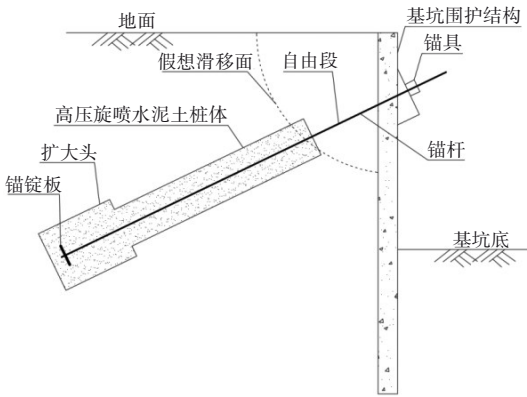


图5 高压旋喷预应力锚杆结构

Fig.5 Schematic structure of high pressure spinning prestressing anchors

该方法利用高压旋喷技术改善基坑开挖影响区域的土体性能。高压旋喷预应力锚杆工艺流程见图6。

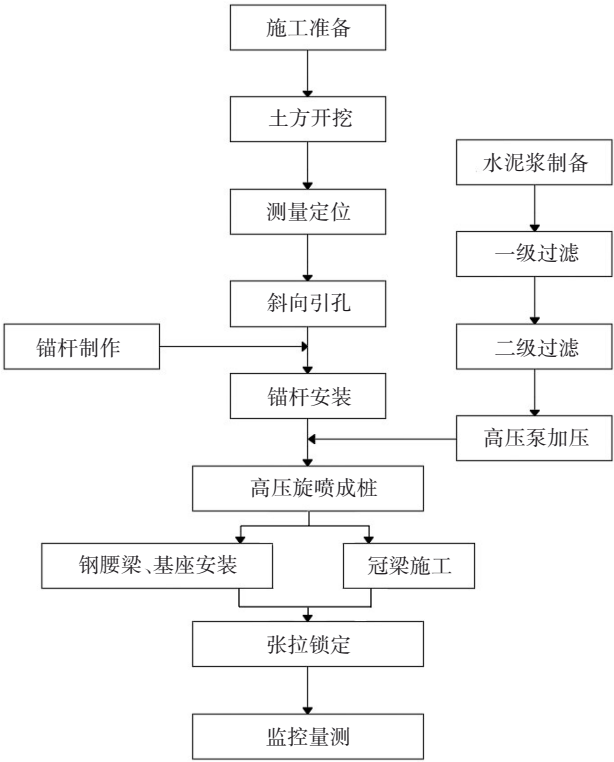


图6 预应力锚杆工艺流程

Fig.6 Flow diagram of prestressing anchor process

选择斜向引孔、锚杆安装、成桩这三道对工程质量起到关键作用的施工工序进行介绍。

4.1 斜向引孔

引孔钻机的安装定位不仅会影响最终的成桩质量,还会对施工工期控制以及施工现场人员的生命安全造成影响,故钻机安装定位必须严格按照“正、平、稳、固”的要求严格施工。使用XL-50钻机成孔,采用硬质合金高压旋转三叶钻头,钻头直径200 mm,边钻进边搅拌边注清水;自由段注浆泵的泵压 ≤ 6 MPa,锚固段泵压保持8 MPa,起步钻机转速为慢档,当第一根被动钻杆(3 m长)钻入土体以后,缓缓提高转速,最终保持在快档。在土质不佳的区段,整段应为慢档钻进,当钻进困难时,调换为快档;应严格控制引孔的最终深度处于设计深度和设计长度+50 mm范围内。在施工过程中,需要进行间隔施工且相邻锚杆施工间隔必须控制在24 h以上,以确保不会对锚杆施工质量造成不利影响。使用高压旋转钻头(喷头)时,要确保旋转均匀,并根据现场情况选择合理的扩孔方式。喷射管应分段提升或下沉,每段搭接长度为100 mm,并确保操作的稳定性。

斜向引孔工艺示意图7。

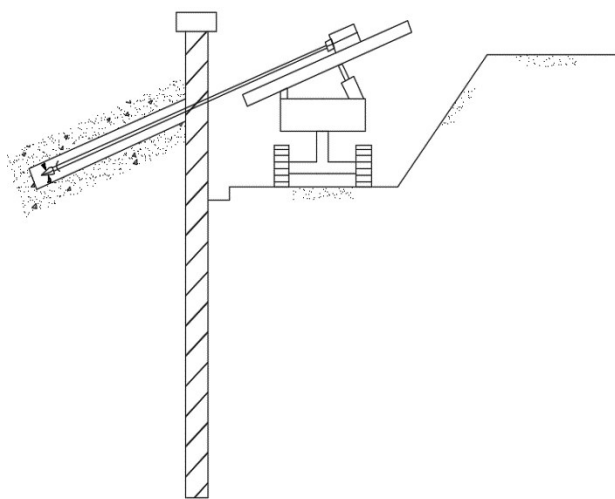


图7 斜向引孔示意

Fig.7 Schematic diagram of diagonal pilot hole

4.2 锚杆安放

引孔完毕后,将制作好的钢绞线安装于钻杆上,利用特制直杆钻头穿过并顶住锚盘,然后将被动钻杆与主动钻杆连接再送入钻孔中,高压注浆泵控制泵压 ≤ 8 MPa,清水从钻头根部和侧面喷嘴喷出,切割孔壁土层,并将孔内塌陷的砂置换出来形成孔洞以便锚杆和锚盘下沉。在钻进过程中,控制

钻机转速为慢档,根据钻杆长度确保锚盘和钻头一起被送到设计孔深位置。在推送锚杆时,必须确保锚杆位于桩体中心点,并严格按照钻进角度缓慢、均衡地推送锚杆体。

4.3 高压旋喷成桩

4.3.1 水泥浆制备

本项目注浆材料选用普通硅酸盐水泥净浆,水泥强度为42.5级,水泥掺量25%,水灰比0.8;为改善水泥浆在淤泥夹砂软弱地层条件下的成桩性能,经试桩试验,按水泥掺量掺加0.05%的三乙醇胺、0.15%的SN201-A型复合掺加剂、0.2%的木质素和5%的石膏粉4种外加剂,以增强水泥浆凝结速度和强度;在注浆过程中,采用机械强制拌合的方式进行水泥浆搅拌,以保证浆液搅拌均匀。现场按照每桶水泥浆水泥含量控制外加剂添加量,并由实验室进行用量标定,现场严格执行全程旁站,并实时抽检;浆液应随搅随用,并在初凝前(1~3 h)用完。

4.3.2 成桩

开始施工时,将锚盘和钻头一起送至设计孔深后开始高压旋喷水泥净浆。在扩大头处,泵压采用25 MPa,同时适当增加旋喷搅拌的进退次数,以确保扩大头的直径符合要求。桩身部位的泵压降至20 MPa。提升速度为20 cm/min(约15 min退出1根3 m长的钻杆),旋转速度为10次/min。此外,在施工过程中相邻锚杆之间施工间隔应保证在24 h以上,在拔出钻杆后,必须立即封堵孔口,以防止漏浆、漏砂和漏水^[4-6]。

5 土方开挖方案

在土方开挖过程中,必须严格遵守“开槽支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖”的施工原则。同时,应有计划地进行现场工程监测,并将监测数据与预测值进行比较,以判断施工工艺和参数是否符合预期要求,通过这种方法可以确定和优化下一步的施工参数。

根据基坑形式确定开挖分层的层数为3层,第一层开挖4 m,第二层开挖3.8 m,第三层开挖4.7 m。

5.1 第一层土方开挖

根据支撑结构布置及构筑物后浇带和变形缝的位置,第一层土方开挖深度4 m,整体放坡开挖至+0.5 m标高处(高压线塔处预留三角土,卸土平台

开挖至+1.5 m 标高),以管廊为中心向东西两侧开挖。

第一层土方开挖顺序平面见图 8。

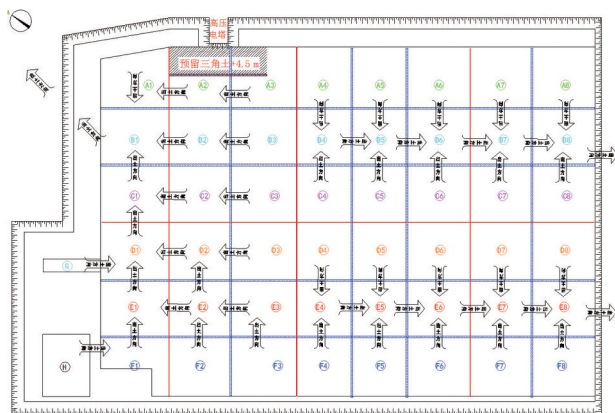


图 8 第一层土方开挖顺序(开挖至+0.5 m 标高)

Fig.8 Sequence diagram of the first layer of earth excavation (excavation to +0.5 m elevation)

5.2 第二层土方开挖

第二层土方开挖深度为 3.8 m,以管廊为中心向东西两侧开挖,出土坡道按 1:10 设置。

第二层土方开挖顺序平面见图 9。

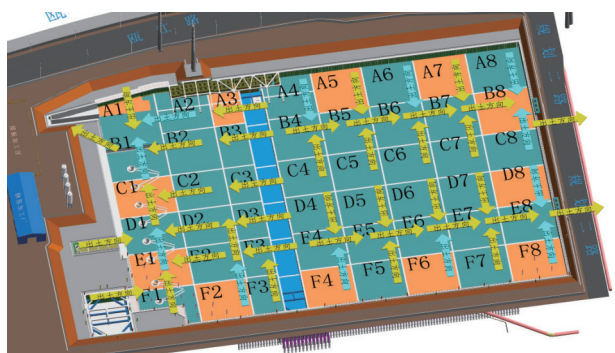


图 9 第二层土方开挖顺序(开挖至-3.0 m 标高)

Fig.9 Sequence diagram of the second layer of earth excavation (excavation to -3.0 m elevation)

① 管廊西侧

以 B 系列和 E 系列为出土坡道,基坑边缘 12 个区块(即 A4~A8, F4~F8, C8, D8 等)结合现场实际情况,采用分区分块、跳仓开挖(即底板浇筑完成后,利用底板作为围护结构的支撑,再进行相邻区块的开挖),中心 8 个区块(C4~C7, D4~D7)采用大开挖方式开挖, B 系列和 E 系列在管廊第三层土方开挖完成后,采用倒退方式开挖。

② 管廊东侧

以 B 系列、E 系列和 1 系列为出土坡道,基坑边缘 12 个区块(即 A1~A3, F1~F3, B1、C1、D1、E1 等)

结合现场实际情况,采用分区分块、跳仓开挖,中心 8 个区块(B2~E2, C3~E3)采用大开挖,根据坡道运输情况以倒退方式进行开挖,粗格栅和细格栅通过全面开挖方式进行,其中 D1、E1 和 F1 三个区作为出土便道,需在粗格栅和细格栅第三层开挖完成后才能开挖。

5.3 第三层土方开挖

第三层开挖深度 4.7 m,分两层阶梯倒退开挖,整体采用分区分块开挖, A3、B3 和 C3 由 B 系列出土, D3、E3 和 F3 由 E 系列便道出土;粗格栅及提升泵房开挖深度分别为 8.8、11.3 m,由基坑南侧向北侧分层开挖,每层开挖深度 2 m,挖掘机在基坑内将土翻倒至基坑东侧出土口,长臂挖机在出土口配合装车。

第三层土方开挖顺序平面见图 10。

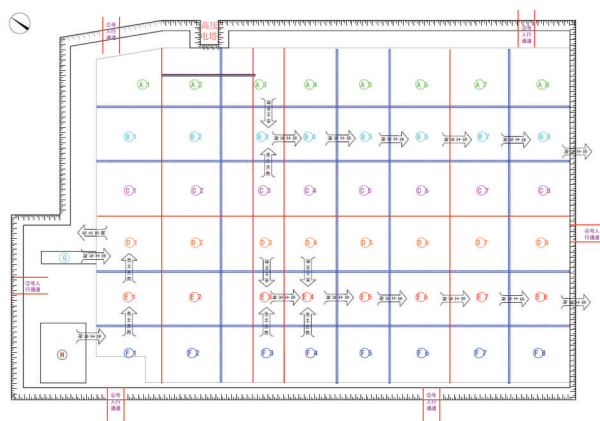


图 10 第三层土方开挖顺序

Fig.10 Sequence diagram of the third layer of earth excavation

6 结论

① 通过数值反分析手段,综合得到基于该工程粉砂夹淤泥土体基坑支护结构分析计算参数 m 的取值公式,并将试算结果和现场实测值进行比较,结果证明其具有较高的可信度和实用性。

② 本工程根据开挖深度、土体性质、周边情况综合比较选取基坑支护形式,并不断优化施工方案,特别是创新性地部分区域采用高压旋喷预应力锚杆工艺代替传统内支撑基坑结构形式,同时对其中斜向引孔、锚杆安装、成桩等三道对工程质量起到关键作用的工序进行详尽的方案设计,项目实施过程中对坑外土体水平位移、沉降监测、深层土体水平位移监测、支撑轴力监测、围护桩顶水平位

移监测、立柱竖向位移监测、管线水平位移及沉降监测等均制定了详细方案,监测结果均符合国家相关规范标准要求;本项目基坑支护设计方案不仅有效地解决了高压旋喷预应力锚杆应用于沿海软土地区的技术难题,也为后续项目技术解决方案提供了宝贵的经验。

③ 施工过程中对挖土、土方运输、土方储存、土方处理等均制定了详细的施工组织计划,并通过监测数据和预测值的比较,不断对施工工艺参数进行调整,安全高效地完成了场区基坑开挖工程。

该项目于2018年正式投入运行,目前已安全稳定运行5年,对于保障温州的水环境、提升周边生态环境起到了重要作用。

参考文献:

- [1] 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.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ 120-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012 (in Chinese).
- [2] 《深基坑工程工程设计施工手册》编委会. 深基坑工程工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Editorial Committee of Deep Foundation Pit Engineering Design and Construction Manual. Deep Foundation Pit Engineering Design and Construction Manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018 (in Chinese).
- [3] 王小刚. 逆作法和狭长基坑工程的若干问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
WANG Xiaogang. Study on Some Problems in Top-down Method and Long-narrow Foundation Pit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 (in Chinese).
- [4] 金鸣, 唐建中, 李光明. 高压旋喷锚杆的试验研究[J]. 建筑科学, 2003, 29(7): 49-53.
JIN Ming, TANG Jianzhong, LI Guangming. Test study on high-pressure rotary jet grouting bolt [J]. Building Science, 2003, 29(7): 49-53 (in Chinese).
- [5] 熊伟芬, 潘凯. 深基坑支护设计中高压旋喷锚杆工艺的实践[J]. 工程技术研究, 2019, 4(17): 93-94.
XIONG Weifen, PAN Kai. Practice of high-pressure rotary spray anchor process in deep foundation pit support design [J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(17): 93-94 (in Chinese).
- [6] 蒋忠银, 娄鹏, 路威. 高压旋喷锚杆在软土深基坑支护设计中的应用研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(2): 46-49.
JIANG Zhongyin, LOU Peng, LU Wei. Study on application of high-pressure rotary jet grouting anchor-bolt to design of supporting for deep soft soil foundation pit [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(2): 46-49 (in Chinese).

作者简介: 赵璋(1974—), 男, 浙江温州人, 公共管理硕士, 高级工程师, 主要从事城市市政公用设施建设管理工作。

E-mail: 24539406@qq.com

收稿日期: 2023-10-09

修回日期: 2023-11-14

(编辑: 衣春敏)

强化依法治水, 携手共护母亲河