

钢筋混凝土环形围檩在黄土地区小尺寸 深基坑中的应用

张勇, 何腊平, 龙照, 刘一俊

(甘肃中建市政工程勘察设计院有限公司, 甘肃兰州 730030)

摘要:为解决周边环境条件异常复杂、无锚索施工空间、紧邻对变形异常敏感的多层建筑物的自重湿陷性黄土地区开挖尺寸小深度大的顶管工作井的难题,以西安市东郊某直径10.0 m,深度24.50 m的深基坑为代表,采用钢筋混凝土环形围檩替代传统的内支撑来抵抗土压力,既不影响狭窄空间的土方开挖,又很好的控制了围护结构的变形,保护了周边环境的安全。数例工程实践表明,在直径小于12 m,深度不大于25 m的圆形深基坑中,采用钢筋混凝土环形围檩体系,支护费用低、围护结构变形很小、周边环境安全可靠、土体中无锚杆(索)残留,对邻近地下空间后期开发利用无影响。项目的顺利实施为自重湿陷性黄土地区类似深基坑开挖提供了一种解决问题的思路,具有一定的借鉴意义。

关键词: 环形围檩; 自重湿陷性黄土; 小尺寸深基坑; 围护结构

中图分类号: TU473 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2023)02-0099-09

Application of circular reinforced concrete purlins in the small-size deep foundation pit in the loess area

ZHANG Yong, HE Laping, LONG Zhao, LIU Yi Jun

(Gansu CSCEC Municipal Engineering Investigation and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou Gansu 730030, China)

Abstract: In the case of a typical circular deep foundation pit with a diameter of 10.0m and a depth of 24.50m in the eastern suburb of Xi'an, in order to solve the difficulties in excavating a pipe jacking well with a small size and a large depth in the loess area collapsible under overburden pressure, including the extremely complex surrounding environment, close proximity of the working well to multi-storey buildings which are extremely sensitive to deformation, no anchor cable construction space, the circular reinforced concrete was used to resist the earth pressure instead of the traditional inner support, which not only eliminated disturbance on the excavation in the narrow space, but also controlled the deformation of the enclosure structure and protected the safety of the surrounding environment. Several engineering practices show that in a circular deep foundation pit with a diameter of less than 12m and a depth of no more than 25m, the designed system has low cost, small deformation with the enclosure structure, safe and reliable surrounding environment, no anchor rod (cable) remaining in the soil, and no impact on the later development and utilization of the adjacent underground space, which provides reference for excavating similar deep foundation pits in the loess area collapsible under overburden pressure.

Key words: circular purlin; loess collapsible under overburden pressure; small size deep foundation pit; enclosure structure

收稿日期:2022-07-12; 修回日期:2022-11-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.02.014

基金项目:甘肃省建设科技攻关计划(编号:JK2019-01);甘肃省科技计划(编号:20JR10RA570)

第一作者:张勇,男,汉族,1982年生,注册土木工程师(岩土),高级工程师,岩土工程专业,硕士,从事岩土工程勘察、设计及施工工作,陕西省西安市高新三路9号,29665011@qq.com。

引用格式:张勇,何腊平,龙照,等.钢筋混凝土环形围檩在黄土地区小尺寸深基坑中的应用[J].钻探工程,2023,50(2):99-107.

ZHANG Yong, HE Laping, LONG Zhao, et al. Application of circular reinforced concrete purlins in the small-size deep foundation pit in the loess area[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(2):99-107.

0 引言

顶管工艺在市政给排水、电力通信、天然气、热力等各类管道(线)、穿越箱涵及地下综合管廊等非开挖敷设施工中的应用已非常广泛。随着顶管设备施工能力的不断提高(目前在西安市地下综合管廊中已经有截面尺寸 $7.25\text{ m}\times 4.2\text{ m}$ 的矩形顶管穿越市区河流的实例),传统的造价高、工艺复杂、风险大的盾构和地下浅埋暗挖工艺逐渐开始被更经济、安全、高效的顶管工艺替代。

目前,随着城市地下空间开发向纵深发展,以及避让埋深越来越大的地下各类建(构)筑物、排水管道等,规划的顶管线位越来越深,在西安地区,深度超过 20 m 的顶管工作井已经比较常见。顶管工作井相较于常规深基坑,其尺寸比较小,且多位于闹市区,或道路红线内,施工场地往往十分狭窄,周边环境对变形也比较敏感。考虑到避让地下各类设施及管线、地下空间后期开发利用、控制变形等综合因素,锚索往往无法实施,因而内支撑体系的优势就体现出来了。

圆形基坑具有明显的空间效应,环形围檩替代传统的内支撑体系,各构件均受压,较小的弯矩也仅由其自重及平面变形引起,充分利用了混凝土抗压承载力高的特点^[1]。环形围檩在轴对称平面应力情况下,环向只受压应力作用^[2]水平刚度大,对竖向围护结构的变形及周边土体的变形控制能力强,尤其适用于周边环境条件复杂,对变形敏感的区域^[3]。

西安市位于典型的黄土地区,城区东部和南部塬上风积黄土具有强烈的湿陷性,有些区域常常达到自重湿陷IV级。原状黄土是典型的非饱和土,其结构性很强,黄土裂隙竖向发育,导致作用在支护结构上的实际土压力较规范采用的朗肯土压力理论计算得出的数值小得多^[4],非饱和土中存在的第四相,气-液相是产生基质吸力的根本原因,这也是非饱和土计算理论和传统经典土力学饱和和重塑土计算理论的最大区别,这种基质吸力减小了支护结构上的荷载^[5],故本文讨论的基坑深度虽然达到 24.50 m ,但是其施工过程中的变形很小,开挖到底后其水平位移、竖向位移及深层水平位移最大值均小于 10 mm ,变形控制很好。

通过研究,西安黄土地区直径不超过 12 m ,深度小于 25 m ,采用钢筋混凝土环形围檩作为内支撑的圆形深基坑设计、施工及监测资料,本文拟在湿陷

性黄土地区开挖顶管工作井的各类项目基础上,研究其共性,以一深度 24.50 m ,直径 10 m 的圆形顶管工作井深基坑开挖设计为例,介绍一种控制变形好、造价低、尽可能提供最大的施工空间的设计思路,以期在类似项目中参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

根据西安市幸福林带管线迁改方案,长乐东路东西方向穿越幸福林带范围内的6回 110 kV 线路做永久改迁。其中2号工作井直径 10 m ,基坑开挖深度 24.50 m ,自然地面高程 424.62 m ,基坑底部高程 400.12 m ,为本文主要研究对象。

1.2 工程水文地质条件

拟建场地地层自上而下分别为:全新统人工填土(Q_4^{ml}),上更新统风积(Q_3^{col})黄土及残积(Q_3^{el})古土壤,中更新统风积(Q_2^{col})黄土及残积(Q_2^{el})古土壤,中更新统冲积(Q_2^{al})粉质粘土及其中的砂夹层和透镜体,场地为自重湿陷性黄土场地,湿陷等级为III(严重)~IV级(很严重)。

勘察期间实测稳定地下水位埋深 $20.00\sim 23.40\text{ m}$,高程 $395.40\sim 403.03\text{ m}$ 。地下水类型为潜水,主要赋存于中更新统黄土、古土壤、粉质粘土层及其中的砂层中,含水层的厚度 $>50\text{ m}$ ^[6]。2号工作井位置处地下水位高程 399.50 m ,位于基底以下 0.62 m ,正常工况下可不进行地下水控制设计,若开挖到基底,施工受地下水位变幅影响,可采用集水明排措施。

1.3 周边环境条件

2号顶管工作井位于幸福路以东长乐东路以北,紧邻高4层的黄河宾馆和8层的黄河温泉小区1号楼,黄河宾馆与2号工作井最近距离为 2.87 m ,采用 8.50 m 长的灰土挤密桩复合地基,处理后的地基承载力特征值为 200 kPa 。基础主梁宽 2.4 m ,间距 $4.50\sim 6.20\text{ m}$ 之间,基础埋深 3.40 m 。黄河温泉小区1号楼,地下一层,地上七层,为框架剪力墙结构,与2号工作井最近距离 2.39 m ,靠近顶管工作井一侧基础埋深 7.70 m ,基础下设 2.0 m 厚3:7灰土垫层,垫层底标高 -9.70 m 。

1.4 设计基本原则及岩土参数

深基坑支护设计遵循“分层开挖、分段开挖、先支撑后挖、先支后拆、严禁超挖、动态设计、信息法施工”的基本原则。施工临时荷载按 30 kPa 计取,黄

河宾馆基底荷载按 60 kPa 计取,黄河温泉小区基底荷载按 120 kPa 计取。根据项目岩土工程勘察报告建议,并结合地区类似地层基坑工程经验,经类比分析后,综合确定本工程基坑支护设计计算采用的主要岩土参数指标如表 1。

表 1 主要岩土层物理力学参数
Table 1 Main physical properties of rock and soil formation

| 层号 | 土层名称 | 重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 抗剪强度 | | 压缩模量 E_s / MPa | 变形模量 E_0 / MPa | 层厚 / m |
|----------------|------|--|--------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|-----------|
| | | | c / kPa | φ / ($^\circ$) | | | |
| ① ₁ | 杂填土 | 18.0 | 5.0* | 10.0* | | 6.0* | 1.2 |
| ① ₂ | 素填土 | 16.5 | 10.0 | 15.0 | 5.50 | | 1.3 |
| ② | 黄土 | 15.3 | 29.6 | 24.4 | 6.90 | | 8.6 |
| ③ | 古土壤 | 16.3 | 32.2 | 24.4 | 8.80 | | 4.8 |
| ④ | 黄土 | 16.3 | 33.5 | 22.0 | 9.00 | | 14.6 |
| ⑤ | 粉质粘土 | 19.3 | 42.6 | 23.4 | 8.14 | | 17.4 |
| ⑥ | 中粗砂 | 21.0 | 0.0 | 33.0 | | 22.0* | 7.1 |

带“*”号的为地区经验值。

2 基坑工程支护设计概况

2.1 支护设计

2号顶管工作井基坑开挖深度 24.50 m,采用钢筋混凝土围护桩+钢筋混凝土环形围檩支护,桩长 38 m,桩径 0.9 m,桩间距 1.5 m,沿竖向布置 6 排钢筋混凝土环形围檩替代传统内支撑。1~4 道围檩宽 800 mm,高 600 mm,主筋配筋率约 1.54%,5~6 道围檩宽 1000 mm,高 800 mm,主筋配筋率约 1.25%,桩顶设置钢筋混凝土冠梁。为防止桩间土垮塌、降低顶管破桩进洞风险、抵御可能的地下水位因变幅升高等不利情况,在围护桩之间设置 2 排高压旋喷桩,桩径 0.5 m,桩间距 0.4 m,高压旋喷桩深入基底 2.0 m 以下。开挖至基底附近若出现地下水,可采用集水坑明排措施。基坑开挖到底后顺做主体结构,为节省空间,采用单侧支模技术,要求围护桩施工偏差及变形累计值不大于 100 mm。基坑支护体系的平面布置及剖面见图 1 和图 2。

2.2 围护结构变形计算

在围护结构分析计算中,有研究者^[7-9]将地连墙或排桩、环形梁当做一个整体,考虑其与土体共同作用,建立三维弹塑性空间结构模型对支护结构内力及稳定性进行分析,取得了良好的效果。本文参照

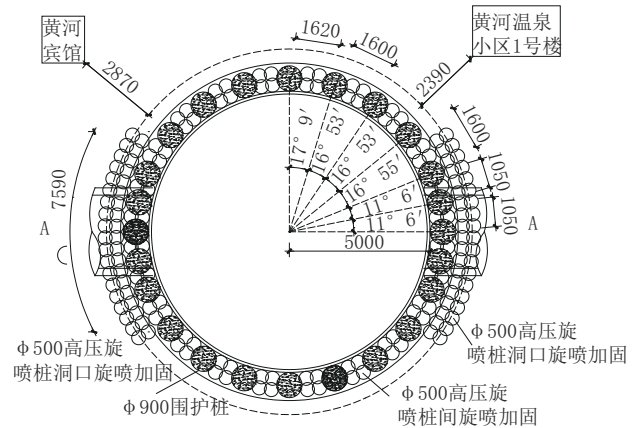


图 1 围护结构平面布置

Fig.1 Plan view of the enclosure

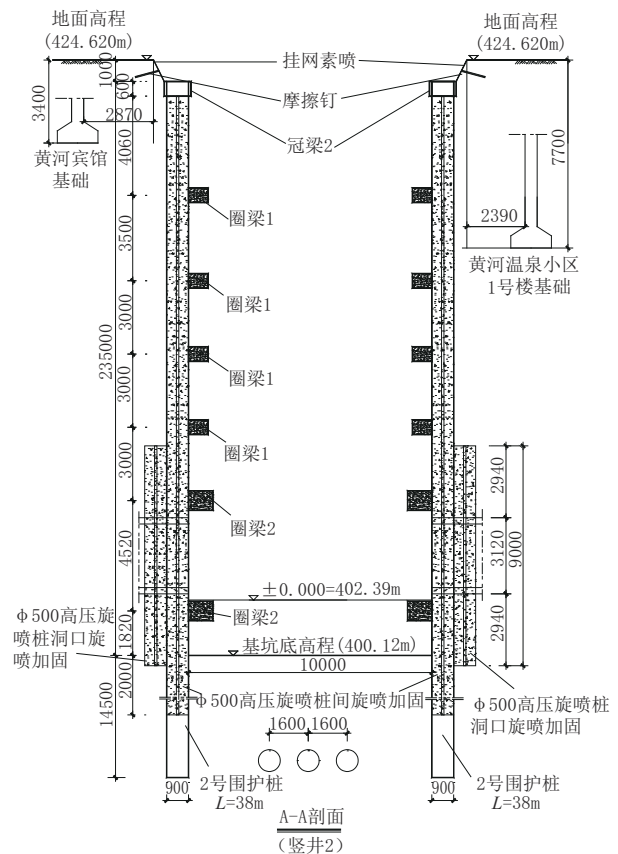


图 2 围护结构剖面

Fig.2 Sectional view of the enclosure

上述处理方法,基于 Midas GTS NX 有限元软件及理正深基坑整体协调计算软件分别进行基坑变形分析。

2.2.1 基坑变形分析

变形分析基于岩土领域通用有限元软件 Midas GTS NX 进行。

模型材料参数设置原则如下：

(1)建模过程中不考虑地下水及渗流的影响。

(2)采用弹塑性摩尔-库伦模型。

(3)土体采用3D实体单元,运用四一六面体混合网格进行模拟。

(4)由于基坑支护结构中采用的支护结构构件较多,为简化有限元计算过程,将支护桩结构使用2D板单元模拟,板单元厚度采用刚度等效法确定,桩径900 mm,桩间距1500 mm,具体如图3。

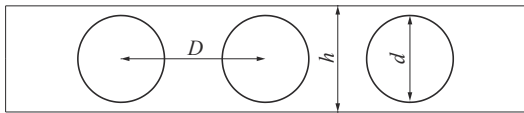


图3 等效替换示意

Fig.3 Equivalent substitute diagram

等效刚度法： $(D+d)h^3/12=\pi d^3/64$,计算支护桩等效板厚度为 $h=659\text{ mm}$ ；

(5)支护结构冠梁及围檩采用1D梁单元模拟,坑顶部混凝土面层采用2D板单元模拟；

(6)边界条件为自动地面支撑。

基坑平面净尺寸为10 m,基坑深度为24.50 m,为尽可能减小边界条件对计算结果的影响,考虑基坑开挖水平及竖向变形主影响区,本次有限元模型尺寸选用75 m×75 m×60 m,邻近基坑处网格间距取1 m,边界处网格间距取3 m,为避免网格质量导致计算精度不高,长度比率取1,采用Midas GTS NX有限元软件建立基坑支护结构模型如图4所示,基坑有限元模型网格划分如图5所示。

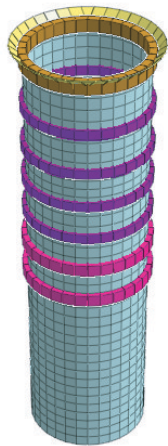


图4 围护结构模型

Fig.4 Model of the enclosure

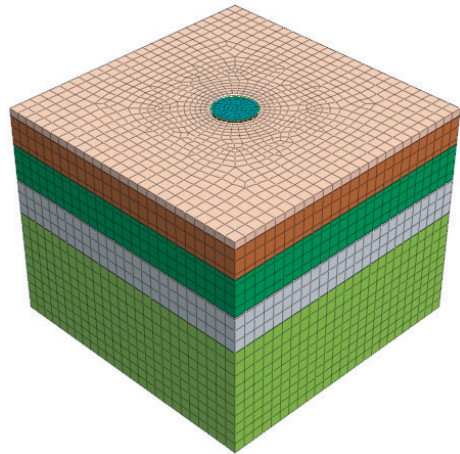
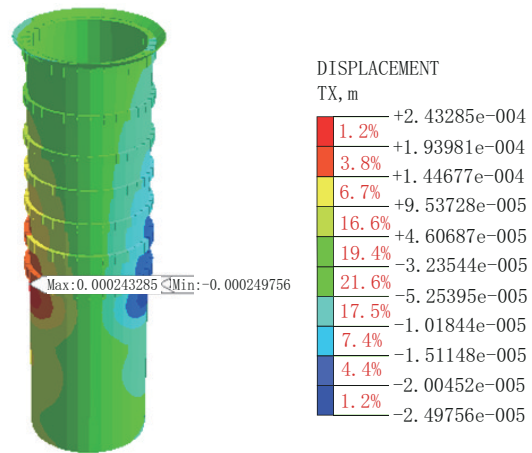


图5 基坑有限元模型网格划分

Fig.5 Mesh division of the pit finite model

通过施工阶段时程控制分析,计算位移自动收敛,获得计算结果。围护结构水平位移云图及竖向位移云图见图6和图7。



[DATA] 基坑工程, 开挖-8, INCR=1 (LOAD=1.000), [UNIT] kN, m

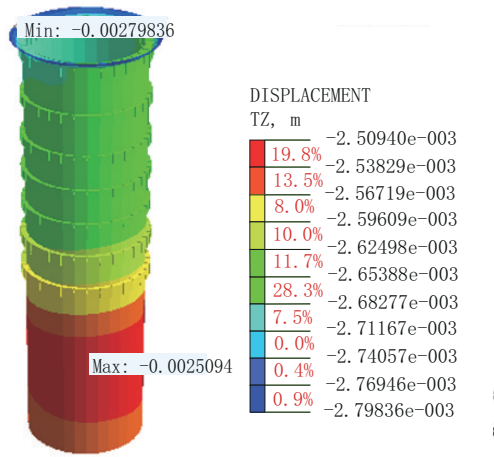
图6 围护结构水平位移云图

Fig.6 Cloud diagram of horizontal displacement of the enclosure

计算结果分析:根据数值计算结果可以看出,基坑开挖完成后支护结构最大水平位移0.24 mm,最大竖向位移为2.8 mm,有限元数值计算结果满足规范规定的一级基坑监测预警值要求,且变形控制很好,模拟结果表明顶管工作井支护结构满足安全稳定性要求^[10-13]。

2.2.2 基坑整体协同计算

考虑到围护体系尺寸及形状效应,采用理正深基坑整体协同模块较理正深基坑单元计算更加符合



[DATA] 基坑工程, 开挖-8, INCR=1 (LOAD=1.000), [UNIT] kN, m

图 7 围护结构竖向位移云图

Fig.7 Cloud diagram of vertical displacement of the enclosure

工程实际情况。理正深基坑软件整体协同计算模型支护结构及土层参数同前述 Midas GTS NX 数值模拟计算, 基坑开挖尺寸为 10.0 m, 开挖深度为 24.50 m, 计算模型见图 8, 模型基本信息见表 2。

表 2 模型基本信息

Table 2 Basic data of the model

| | |
|------------------------------|--------------------------------|
| 规范与规程 | 《建筑基坑支护技术规程》 (JGJ 120—2012) |
| 内力计算方法 | 增量法 |
| 支护结构安全等级 | 一级 |
| 支护结构重要性系数 γ_0 | 1.10 |
| 基坑深度 h/m | 24.50 |
| 桩材料类型 | 钢筋混凝土 |
| 混凝土强度等级 | C30 |
| 桩直径/m | 0.90 |
| 桩间距/m | 1.50 |
| 冠梁宽度/m | 1.00 |
| 冠梁高度/m | 0.80 |
| 围檩 1~4 宽度/m | 0.80 |
| 围檩 1~4 高度/m | 0.60 |
| 围檩 5~6 宽度/m | 1.00 |
| 围檩 5~6 高度/m | 0.80 |
| 水平侧向刚度/(MN·m ⁻¹) | 50.00 |
| 超载值 1/kPa | 120.00(条形) |
| 超载值 2/kPa | 60.00(条形) |
| 超载值 3/kPa | 30.00(条形) |

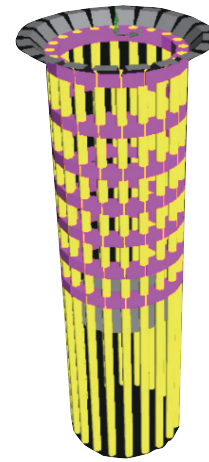


图 8 围护结构三维图

Fig.8 3D view of the enclosure

以具有代表性的 Z1 号桩为例, 提取桩身弯矩、位移及剪力包络图如图 9 所示, 位移及内力计算结果见表 3, 周边地表沉降如图 10 所示, 整体稳定性验算如图 11 所示。

计算方法: 瑞典条分法; 应力状态: 有效应力法; 圆弧半径 $R=35.555$ m, 圆心坐标 $X=-5.441$ m, 圆心坐标 $Y=20.485$ m。

整体稳定安全系数 $K_s=1.76 > 1.35$, 满足规范要求。

由以上数据可知, 理正深基坑软件整体协同计算结果满足规范规定的一级基坑监测预警值要求, 且变形控制良好, 模拟结果表明顶管工作井支护结构满足安全稳定性要求^[10,12-13]。

3 基坑变形监测

3.1 监测点布置

根据《西安市幸福林带建设工程长乐路 6 回 110 kV 电力改迁顶管工程监测报告》, 为监测 2 号工作井的变形情况, 在支护结构顶部设置水平位移监测点及竖向位移监测点各 4 个, 深层水平位移监测点 2 个, 周边环境沉降观测点 11 个。监测点平面布置如图 12。

3.2 基坑变形监测结果

截至 2020 年 1 月 5 日, 2 号顶管工作井基坑支护结构施工完毕, 基坑开挖至设计标高。监测成果统计见表 4。

由监测成果可以看出:

(1) 支护结构顶部水平位移累计最大值为监测

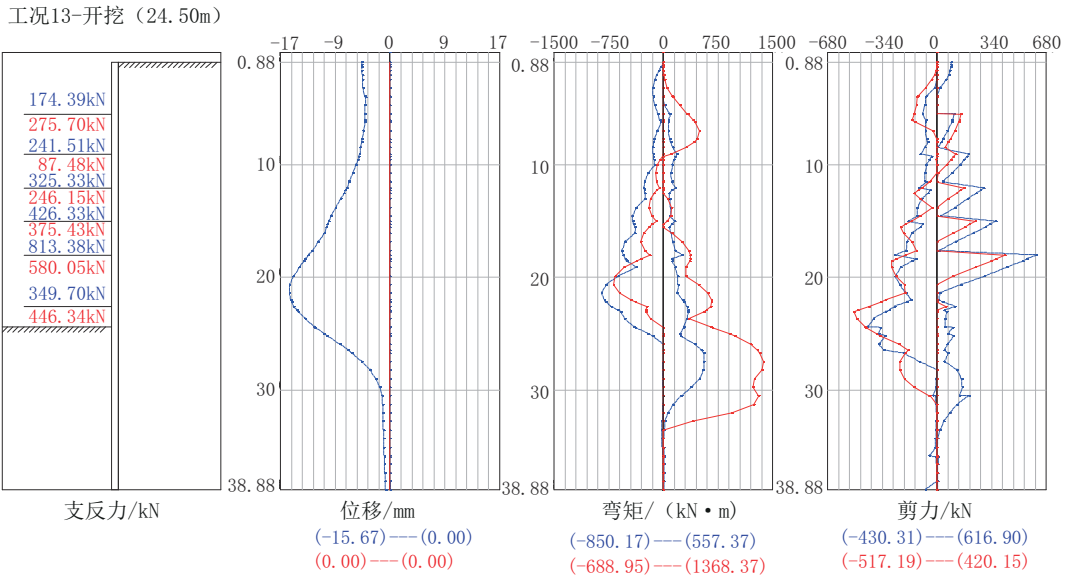


图9 弯矩、位移及剪力包络图

Fig.9 Envelope diagram of bending moment, displacement and shear force

表3 位移及内力计算结果

Table 3 Calculation of displacement and internal force

| | |
|----------------|----------|
| 桩顶最大位移/mm | 0.233 |
| 基坑底最大位移/mm | 7.537 |
| 桩底最大位移/mm | 0.709 |
| 弯矩(基坑侧)/(kN·m) | 768.276 |
| 弯矩(挡土侧)/(kN·m) | -988.749 |
| 剪力最大值/kN | 796.565 |
| 最大弯矩处轴力/kN | 162.202 |
| 扭矩/(kN·m) | 0.043 |

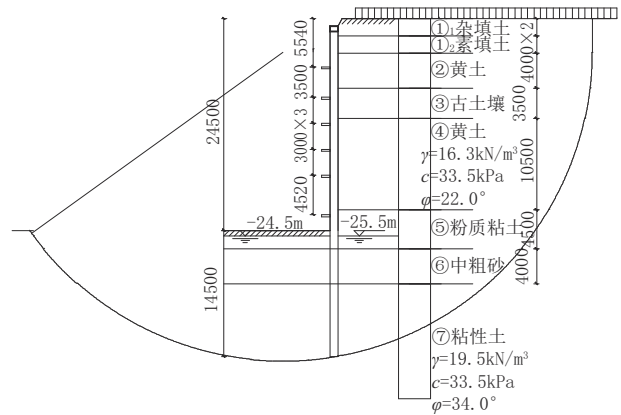


图11 基坑稳定性验算

Fig.11 Checking calculation of pit stability

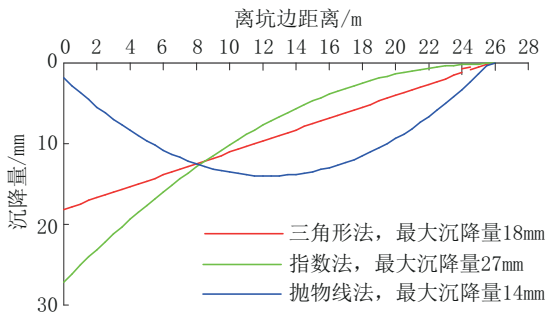


图10 周边地表计算沉降

Fig.10 Calculated surface subsidence in the surrounding

点 WS24,位移量 8.20 mm;支护结构顶部竖向位移累计最大值为监测点 ZS21,沉降量为 -5.74 mm;深层水平位移累计最大值为监测点 SD21,位移量为 6.95 mm(-3.5 m处);净空收敛累计最大值为监测点 2SLA2,收敛值为 -8.00 mm。

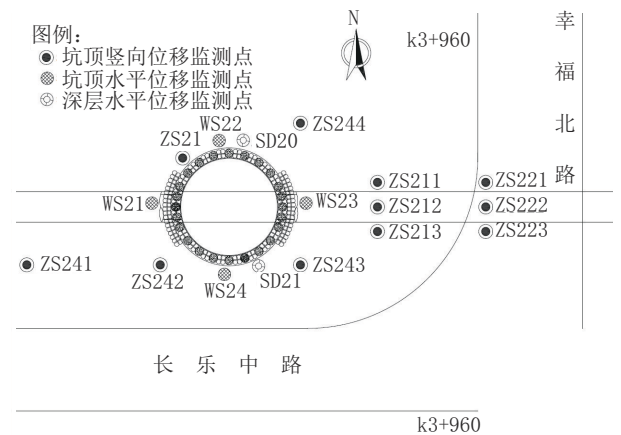


图12 基坑监测点平面布置

Fig.12 Layout arrangement of pit monitoring points

表 4 监测情况统计

Table 4 Summary of monitoring results

| 监测项目 | 累计变化量 | | 预警情况 |
|----------|-------|--------|------|
| | 点号 | 最大值/mm | |
| 结构顶部水平位移 | WS24 | 8.20 | 无 |
| 结构顶部竖向位移 | ZS21 | -5.74 | 无 |
| 深层水平位移 | SD21 | 6.95 | 无 |
| 净空收敛 | 2SLA2 | -8.00 | 无 |

(2)监测数据表明支护结构顶部水平位移、竖向位移、深层水平位移变化速率及累计变化量均较小,按照现行国家、行业及地方相关规范要求,均未达到一级基坑的预警值^[7,9-10]。

3.3 数值分析与现场监控量测对比分析

3.3.1 深层水平位移

根据深层水平位移监测点布置位置,提取 Midas 计算模型相应点,数值计算值及监控量测实测值对比见图 13。由图看出,监测深层水平位移最大值为 6.95 mm,出现在-3.5 m 位置处附近,最小值出现在坑底,近似悬臂桩支护体系变形特征;计算深层水平位移最大值为 2.50 mm,出现在基坑底部附近,近似多道桩+内支撑支护体系测斜曲线,呈大肚子状特征;分析监测数据发现,冠梁施做完毕后,支护桩水平位移减少,且收敛趋势明显;数值计算较现场监测结果差异较大,其主要原因为:数值模拟为理想均匀对称情况下结果,而监控量测值与理论值之间的偏差主要由地层的不均匀性、土体的蠕变性,前期

冠梁施做不及时等产生的不可恢复的塑性变形,以及施工质量及测量误差等原因产生^[14]。在围护结构弯矩最大处,桩身深层水平位移计算值与监测值基本一致。

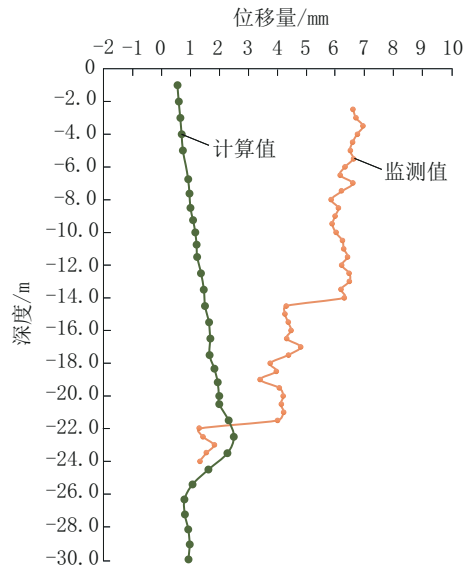


图 13 深层水平位移监测值与计算值

Fig.13 Monitored values vs calculated values of deep horizontal displacement

3.3.2 支护结构顶部竖向位移

根据支护结构顶部竖向位移监测点布置位置,提取 Midas 计算模型相应点,计算值与监控量测实测值对比见图 14。

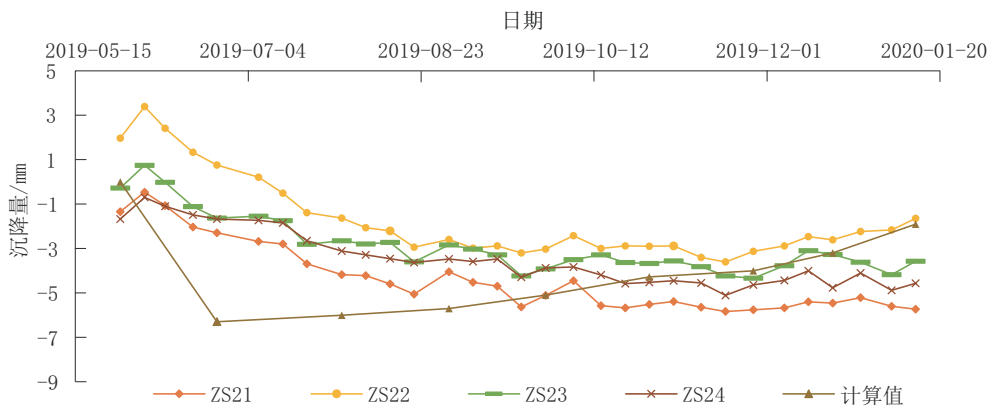


图 14 基坑顶部竖向位移监测值与计算值

Fig. 14 Monitored values vs calculated values of vertical displacement at the top of the pit

由图 14 可以看出,监测所得支护结构顶部累计沉降量最大值为-5.74 mm,计算所得支护结构顶

部累计沉降量最大值为-6.30 mm,二者数据很接近,且竖向位移累计最大变化量及速率均较小,各监

测点实测及数值计算位移量均未达到一级基坑预警值^[10-13],围护结构变性控制良好。

4 结果与讨论

(1)原状黄土是典型的非饱和土,其结构性很强,裂隙竖向发育,作用在支护结构上的实际土压力较规范采用的朗肯土压力理论计算得出的数值小的多^[15],非饱和土中存在的第四相,即气-液相是产生基质吸力的原因,这也是非饱和土计算理论和传统经典土力学饱和重塑土计算理论的最大区别,这种基质吸力减小了作用在围护结构上的荷载,故本基坑虽然深度达到24.50 m但是开挖后变形很小,水平位移、竖向位移及深层水平位移均在10 mm以内。

(2)现行国家及行业规范^[11]在深基坑土压力计算上均采用了简化的、计算更方便的朗肯土压力公式,朗肯理论计算的主动土压力偏大,被动土压力偏小^[16-18],相当于人为加大荷载,减小抗力,虽然使岩土设计安全系数增加,但是无形之中会造成浪费,尤其是在湿陷性黄土这种结构性很强的特殊性土场地。

(3)采用钢筋混凝土环形围檩作为内支撑体系,此种体系里的内力主要是压应力,充分发挥了混凝土抗压强度高的优势,提高了材料的利用率,控制变形很好^[19];理论上环形围檩在几何形状轴对称平面应力情况下,无论是径向还是环向只受压应力作用,环向压应力内侧最大,外侧最小,弯矩和剪力为零,环梁按抗压构件考虑,可按照构造要求配筋,但是考虑到施工偏差,环形围檩难以达到理想的圆形,梁内部还是存在一定的弯矩和剪力,故可在常规构件基础上适当降低配筋率^[9]。

5 结语

深基坑支护设计必须考虑土的性质对荷载和抗力的影响,饱和和软土工程性质最差,其次是普通砂土、粉土及粉质粘土,黄土因其特殊的结构和非饱和特性,其作用在支护结构体系上的土压力是远小于一般土的,在设计计算时要考虑这种因素,避免造成太大浪费。

围护桩加环形围檩的支护形式不只在湿陷性黄土地区有明显优势,在其他地区也有其优势,控制变形好、造价低、施工速度快,支护体系以外土体中无

锚杆等残留,对地下空间后期开发利用无影响,无支撑面积最大,出土空间大,出土速度快,尤其是面积小而深的基坑更适用,相对于其他支护形式,降低了工程造价,具有良好的社会效益和经济效益。

参考文献(References):

- [1] 龚晓南,侯伟生.深基坑设计施工手册(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
GONG Xiaonan, HOU Weisheng. Deep Foundation Pit Design and Construction Manual (Second Edition) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [2] 李森林,葛玉祥.圆形基坑排桩环梁内撑弹性支点刚度系数算法[C]//第八届深基础工程发展论坛论文集.北京:知识产权出版社,2018:26-31.
LI Senlin, GE Yuxiang. Algorithm for elastic fulcrum stiffness coefficient of circular foundation pit pile ring beam internal support [C]//Proceedings of the 8th China Construction Industry Press Deep Foundation Engineering Development Forum. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2018:26-31.
- [3] 邵晨晨.复杂地质条件和敏感环境中基坑设计实践及关键技术[J].钻探工程,2021,48(6):102-108.
SHAO Chenchen. Design practice and key technology for the foundation pit in complex geology and sensitive environments[J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):102-108.
- [4] 陈正汉.非饱和土与特殊土近期研究进展[C]//岩土春秋——中国土木工程学会土力学与岩土工程分会成立六十周年纪念文集.北京:清华大学出版社,2019:179-185.
CHEN Zhenghan. Recent research progress of unsaturated soil and special soil[C]//Rock and Soil Spring and Autumn—Festschrift of the 60th Anniversary of the Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Branch of the Chinese Society of Civil Engineering, Beijing: Tsinghua University Press, 2019:179-185.
- [5] 张嘎,王刚,尹振宇,等.土的基本特性及本构关系[C]//第十三届全国土力学及岩石工程学术大会论文集.北京:清华大学出版社,2019:2-3.
ZHANG Ga, WANG Gang, YIN Zhenyu, et al. Basic characteristics and constitutive relation of soil[C]//Proceedings of the 13th National Conference on Soil Mechanics and Rock Engineering. Beijing: Tsinghua University Press, 2019:2-3.
- [6] 王沈力,郭斌.西安市幸福林带建设工程岩土工程勘察报告[R].甘肃中建市政工程勘察设计院,2017:6.
WANG Shenli, GUO Bin. Geotechnical investigation report of Xi'an happiness forest belt construction project[R]. Gansu CSCEC Municipal Engineering Investigation and Design Institute, 2017:6.
- [7] 张家国,肖世国,邹力,等.砂卵石地层圆形深基坑排桩支护结构受力特征[J].地下空间与工程学报,2015,11(6):1603-1610.
ZHANG Jianguo, XIAO Shiguo, ZOU Li, et al. Mechanical characteristics of row piles supporting structure of circular deep

- foundation pit in sandy gravel stratum[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(6):1603-1610.
- [8] 陆新征,宋二祥,吉林,等.某特深基坑考虑支护结构与土体共同作用的三维有限元分析[J].岩土工程学报,2003,25(4):488-491. LU Xinzheng, SONG Erxiang, JI Lin, et al. Three dimensional finite element analysis of an extra deep foundation pit considering the interaction between retaining structure and soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4):488-491.
- [9] 王洪新.圆形基坑围护结构稳定性分析[J].地下空间与工程学报, 2011, 7(S2):1653-1659. WANG Hongxin. Stability analysis of circular foundation pit retaining structure[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S2):1653-1659.
- [10] GB 50497—2019,建筑基坑工程监测技术标准[S]. GB 50497—2019, Technical standard for monitoring of building excavation engineering[S].
- [11] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S]. JGJ 120—2012, Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S].
- [12] JGJ 167—2009,湿陷性黄土地区建筑基坑工程安全技术规程[S]. JGJ 167—2009, Technical specifications for safe retaining and protection of building foundation excavation engineering in collapsible loess regions[S].
- [13] DBJ 61/T 105—2015,建筑基坑支护技术与安全规程[S]. DBJ 61/T 105—2015, Specification of technology and safety for retaining and protection of building foundation excavations[S].
- [14] 李毅,仲海蛟.北京世园小镇接待中心基坑监测分析[J].钻探工程,2021,48(5):113-118. LI Yi, ZHONG Haijiao. Foundation pit monitoring and analysis for Beijing Shiyuan Town Reception Center[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5):113-118.
- [15] 李家贵,陈正汉,黄雪峰,等.原状非饱和 Q_3 黄土的土压力原位测试和强度特性研究[J].岩土力学,2010,31(2):433-440. LI Jiagui, CHEN Zhenghan, HUANG Xuefeng, et al. In-site test on earth pressure and saturating collapse test for unsaturated loess Q_3 on high slope[J]. Rock and soil Mechanics, 2010, 31(2):433-440.
- [16] 李广信,张丙印,于玉贞.土力学(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2013:223-241. LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil Mechanics (2nd Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013:223-241.
- [17] 杨光华.深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[M].北京:地质出版社,2004:15,26. YANG Guanghua. Practical Calculation Method and Application of Deep Foundation Pit Supporting Structure [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004:15,26.
- [18] 施文华.深基坑桩锚支护设计中的几个问题[J].建筑技术, 1993(20):3. SHI Wenhua. Some problems in the design of pile anchor support for deep foundation pit[J]. Building Technology, 1993(20):3.
- [19] 龚晓南,宋二祥,郭红仙,等.基坑工程实例7[M].北京:中国建筑工业出版社,2018:46. GONG Xiaonan, SONG Erxiang, GUO Hongxian, et al. Example of Foundation Pit Engineering 7 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018:46.

(编辑 王文)