

双排桩支护在既有水厂改造工程中的应用研究

孙任运^{1,2}, 何剑平^{1,2}, 雷 晗^{1,2}

[1. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2. 上海水业设计工程有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 既有水厂改造工程中, 基坑开挖需注意对现有建构筑物 and 管道的保护。某工程中基坑面积较大且深度较浅, 适合无支撑式围护结构, 因此结合现场情况采用双排桩进行支护。利用 MIDAS GTS 有限元软件, 建立有限元模型分析了基坑开挖过程中双排桩支护对邻近构筑物及管道的保护作用。研究分析发现: 随桩径的增大及桩间距的减小, 双排桩的侧向刚度增大, 对于周边环境的保护作用增强; 在软土地区, 采用前强后弱的方式可以更有效提升支护效果; 综合计算结果及监测数据, 优化后的支护方案均满足基坑对周边环境变形的控制要求。

关键词: 水厂改造; 基坑; 双排桩; 有限元

中图分类号: TU46

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0174-06

Research on Application of Double-row Pile Support in Reconstruction Project of Existing Waterworks

SUN Renyun^{1,2}, HE Jianping^{1,2}, LEI Han^{1,2}

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Water Industry Design Engineering Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In the reconstruction project of the existing waterworks, when excavating the foundation pit, the attention should be paid to the protection of the existing buildings, structures and pipelines. In a project, the foundation pit is large in area and shallow in depth, making it suitable for the unsupported retaining structures. Therefore, the double-row piles are adopted for support in combination with the on-site conditions. By using the MIDAS GTS finite element software, a finite element model is established to analyze the protective effect of double-row pile support on adjacent structures and pipelines during the excavation process of foundation pit. The research and analysis reveal that with the increase of pile diameter and the decrease of pile spacing, the lateral stiffness of double-row piles increases, and the protective effect on the surrounding environment is enhanced. In soft soil areas, adopting a method of strong support at the front and weak support at the back can more effectively enhance the support effect. Based on the comprehensive calculation results and monitoring data, the optimized support schemes all meet the control requirements of the foundation pit for the deformation of the surrounding environment.

Keywords: reconstruction of waterworks; foundation pit; double-row pile; finite element

0 引 言

随着城市的发展及人民生活水平的提高, 对供水水质的要求也在不断提升, 因此很多水厂会进行升级改造。为避免改造工程对现有水厂的运营造成影响, 新开挖基坑对于厂内现有建构筑物及管道的保护尤为重要^[1]。

在水厂工程中, 很多构筑物基坑具备开挖深度浅、面积大的特点, 并且由于构筑物结构形式复杂,

基坑难以形成可靠的换撑体系, 因此水厂构筑物基坑会优先考虑采用无支撑式围护结构体系。双排桩由于具有良好的侧向刚度^[2], 近些年在给排水厂站工程中应用广泛。现阶段, 由于大部分双排桩支护结构采用前后排等刚度的规则形式, 容易造成基坑支护费用较高, 因此对其进行优化设计也开始得到了众多学者的关注。申永江^[3]通过建立有限元模型对长短组合桩进行了研究分析; 孙涛等^[4]则是根据模拟及监测结果, 针对双排桩的排距进行了优化分析; 宣锋^[5]通过对比弹性支点法及有限元法对双排桩在软土地区的应用进行了分析, 并探究了桩间距、桩径以及桩间土等因素对于支护效果的影响。

收稿日期: 2024-10-05

作者简介: 孙任运(1996—), 男, 硕士, 工程师, 从事结构设计工作。

本文基于上海某水厂深度处理改造工程的案例,利用 MIDAS GTS 建立了有限元模型,对桩间距、桩径以及前后刚度对于双排桩支护效果的影响规律进行了探究,并结合监测数据对优化后的支护方案对现有构筑物及管道的保护作用进行了分析,可为后续相关工程的优化设计提供参考。

1 工程基坑概述

1.1 工程基坑特点

上海某水厂为了提升水质的需要,计划新建深度处理单元。工程概况及现场地质有以下难点:

- (1)受限于场地条件,拟建构筑物间距小,施工过程中需共用一个基坑,占地超过 7 000 m²,最大开挖深度为 7.7 m。基坑开挖深度相对不深,但平面尺寸较大,更适合无支撑支护方式。
- (2)根据工艺流程,新建构筑物均为叠合式构筑物,结构型式复杂,中间层横向楼板标高不统一,围护结构架设支撑后难以形成可靠的换撑体系。
- (3)基坑紧邻现有正在运行的构筑物及主要生产管线,现场施工空间紧张且对构筑物及生产管线的保护尤为重要。

(4)基坑开挖涉及的砂质粉土深度较大,透水性较强,同时坑底分布有软弱土层,因此需保证基坑的整体稳定性。

1.2 基坑方案

基坑支护方案见图 1。由于基坑周边分布有厂区内现有建构筑物,开挖过程中需注意对其进行保护,根据表 1,基坑的东北侧及西南侧现有构筑物距离基坑均较远,因此基坑的东侧、西侧及南侧在放坡卸土后采用水泥土重力式挡墙。基坑东南侧为现状综合楼,与基坑的距离小于 2H_d(H_d为基坑开挖深度,下同),但考虑其采用桩基础(桩长 32 m),因此可认为基坑开挖对其影响也较为有限;考虑其距离基坑较近,基坑局部东南角凸出区域处采用 SMW 工法桩+内支撑的方案来增大其支护刚度。

而根据表 1,,基坑北侧距离现状清水池仅仅 1 倍 H_d,且基坑开挖深度要大于现状清水池埋深,因此需重点考虑基坑对于现状清水池的影响。同时如图 2 所示,目前有一条清水管道在新建和现状清水池之间,没有足够的空间施工水泥土搅拌桩,因此基坑北侧考虑采用双排桩进行支护:在钢管两侧施工灌注桩并用连板相连,现状管道从双排桩中穿过,管道四周采用注浆加固。该方案充分考虑了现场施工空

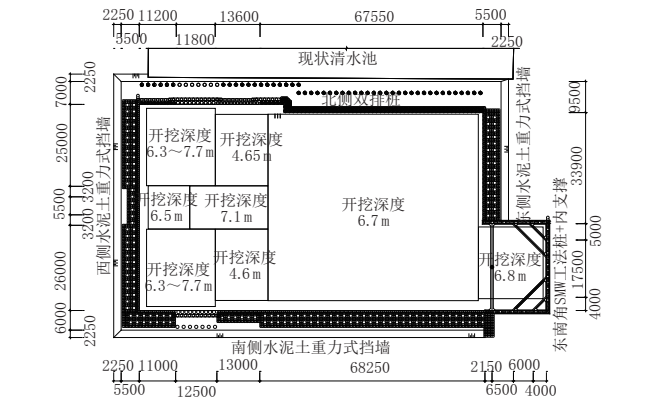


图 1 基坑方案(单位:mm)

表 1 现有建构筑物基本情况

位置	现有构筑物	基础型式	开挖深度 H _d /m	距基坑距离/m
北侧	一期清水池	筏板基础 (碎石桩)	7.7	7.78(接近 1H _d)
东北侧	吸水井	筏板基础 (碎石桩)	6.7	28.9(大于 4H _d)
西南侧	鼓风机房	筏板基础 (碎石桩)	6.3	22.7(大于 3.5H _d)
东南侧	综合楼	桩基承台	6.8	8.3(大于 1H _d)

间,双排桩也会对现状清水池提供支护,本文对双排桩的支护重点分析。

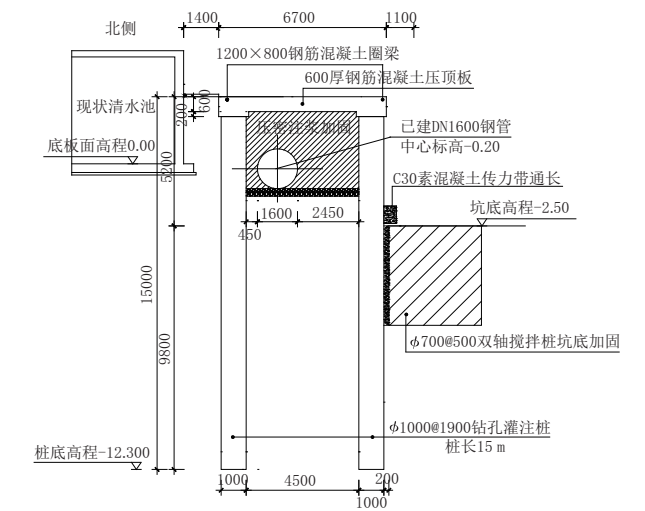


图 2 双排桩方案示意(单位:mm)

2 模型建立

2.1 等效刚度法

在计算过程中,由于排桩为圆形截面,网格划分难度较大,模型容易出现网格不耦合或者畸形等情况,最终导致计算不收敛^[6]。目前很多研究表明,按等效刚度法将圆形截面的双排桩等效为矩形截面具备可行性。因此为简化计算、提高计算效率,本文将圆截面的前后排桩分别按照等效刚度法将其简化为等刚度的方形截面进行计算,并将前后排桩通过连

板相连。排桩的等效公式见式(1)^[7]:

$$H=0.838\times d\times\sqrt[3]{\frac{d}{t}}$$

(1)

式中: H 为等效为矩形截面的厚度; d 为桩径; t 为桩间距(桩中心点间距离)。

2.2 土层参数

MIDAS GTS有限元分析软件提供了修正摩尔-库伦模型(Modified Mohr Coulomb model, MMC),修正摩尔-库伦理论是在摩尔-库伦基础上改善的本构模型,可适用于大部分土体,模型中具体参数的取值见表2。

模型中土层采用修正摩尔-库伦模型,具体参数按实际地勘选取,见表3;同时将基坑方案中的重力式挡墙以及注浆处理后的土体以加固土作为材料属

表2 修正摩尔-库伦模型取值原则^[8]

参数	说明	参考值
E_{oed}^{ref}	主固结仪加载中的切线刚度	可按勘察报告中的压缩模量或变形模量
E_{50}^{ref}	标准排水三轴试验中的割线刚度	$E_{50}^{ref}=0.9\sim1.3E_{oed}^{ref}$
E_{ur}^{ref}	卸载/重新加载刚度	$E_{ur}^{ref}=(4\sim6)E_{50}^{ref}$
m	应力水平相关幂指数	$0\leq m\leq 1$
c	黏聚力	摩尔-库伦模型中的破坏参数
φ	摩擦角	摩尔-库伦模型中的破坏参数
ψ	最终剪胀角	$0\leq\psi\leq\varphi$
R_f	失效率	一般取0.9
p^{ref}	参考压力	一般取100 kPa
K_{onc}	正常固结下的侧压力系数	$1-\sin\varphi(<1)$

性进行表示,加固土采用摩尔-库伦模型。

表3 土地勘参数

材料名称	重度/(kN·m ⁻³)	层厚/m	压缩模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
① ₁₂ 素填土	18.5	2.7	5.90	0.3	13.3	20.2
② ₃₋₁ 灰黄色~灰色黏质粉土	18.3	2.1	6.45	0.3	13.5	22.0
② ₃₋₂ 灰色砂质粉土	18.4	13.6	8.51	0.3	3.4	30.5
④灰色淤泥质黏土	16.8	20	4.54	0.4	12.4	12.0

2.3 有限元模型建立

有限元模型见图3,为探究基坑开挖对于周边环境的影响,将现有构筑物及管道也进行建模处理,模型尺寸长×宽×高为800 m×400 m×40 m。土层侧面施加 x 和 y 两个方向约束,底面施加 x 、 y 和 z 三个方向约束,其中 z 为竖直方向。

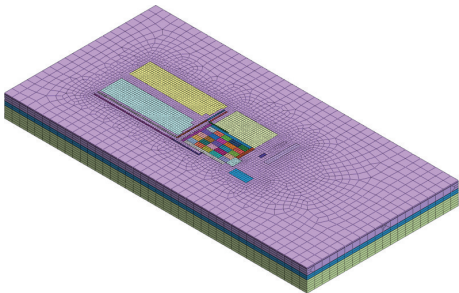


图3 有限元模型

基坑支护结构主要依据现场基坑的实际特点建立,东侧、西侧及南侧支护形式为水泥重力式挡墙,以加固土为材料建立3D单元来进行模拟;局部东南侧采用SMW法进行支护,模型中则是分别通过析取2D和1D单元来模拟支挡结构及支撑。基坑北侧采用双排桩进行支护,图4为模型示意。前后排桩的嵌固深度为1.0倍 h_d ,桩长取值为15 m,按等效刚度法等效为挡墙进行建模。将双排桩的桩体及连板视为弹性材料,弹性模量按混凝土取值,采用2D单元表示,桩和连板为刚性连接。现有清水池按照实际

尺寸建立结构的基础或底板,建立3D单元并按池内水重对其施加竖向荷载;管道同样以弹性材料建模,弹性模量按钢材取值。

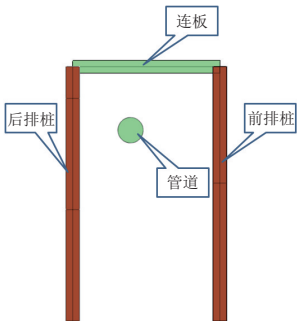


图4 双排桩支护模型

3 双排桩支护效果分析

为探究双排桩各参数对于支护效果的影响,本节对不同桩径、桩间距及前后不同刚度组合对支护效果的影响进行分析。

3.1 桩径影响

为探究桩径的影响,前后排桩间距取值为2 m,前后排桩桩径相同,桩径分别取0.6、0.8、1.0、1.2 m建立模型进行分析。根据计算结果,桩身侧向最大位移位于前桩桩顶,符合文献中的规律,提取桩身最大位移。从图5可以看出,当桩径增大,桩身自身侧向位移下降明显,当桩径从0.6 m增大至1.2 m时,排

桩等效刚度增长约 150%,桩身最大变形由 23.59 mm 减小为 13.03 mm,下降约 44.78%。通过清水池以及管道的位移情况看出,随着桩径的增大,双排桩对于周边环境的保护作用增强,当桩径从 0.6 m 增大至 1.2 m 时,清水池的最大位移由 14.10 mm 减小至 8.19 mm,下降 41.91%,管道的最大位移由 6.79 mm 减小为 5.68 mm,下降 16.05%。

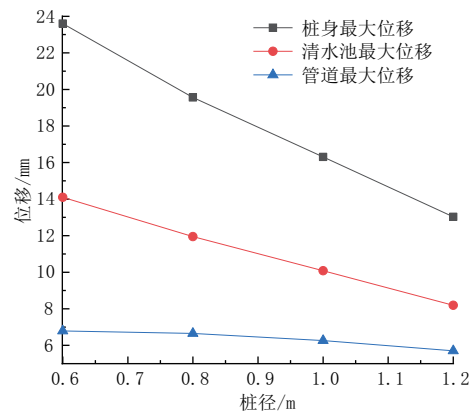


图5 桩身、构筑物及管道最大位移与桩径的关系曲线

3.2 桩间距影响

为探究桩间距的影响,桩径取值为 1 m,令前后排桩的桩间距相同并分别取值 1.5、2.0、2.5、3.0、5.0 m 来计算并提取结果进行分析。如图 6 所示,随着桩间距的增大,桩身的侧向位移会增大,当桩间距从 5.0 m 减小至 1.5 m 时,排桩等效刚度增长约 49.4%,桩身最大变形由 18.36 mm 减小至 15.39 mm,下降 16.12%。通过清水池以及管道的位移情况看出,随着桩间距的减小,双排桩自身侧向刚度增大,会加强对于周边环境的保护作用。当桩间距从 5.0 m 减小至 1.5 m 时,现状清水池的最大位移由 10.96 mm 减小至 9.58 mm,下降 12.59%,管道的最大位移由 6.55 mm 减小至 6.12 mm,下降 6.56%。从图 6 中可以看出,当桩间距在 3.0~5.0 m 时,减小桩间距对于桩身变形及周边环境的影响不大,因此可认为存在临界桩间距,实际工程中为保证支护效果,桩间距不应大于该临界值。

3.3 前后桩不同刚度组合分析

为探究前后排桩刚度组合对于支护效果的影响,分别改变前后排桩的桩径、桩间距建立模型进行计算。由 3.1、3.2 节可以看出,双排桩刚度对于管道的影 响相对较小,因此本节不再对管道位移进行重点分析。

从表 4 可以看出,由于桩径不同,前后排桩的侧向刚度不同,桩身及现状清水池的位移存在差

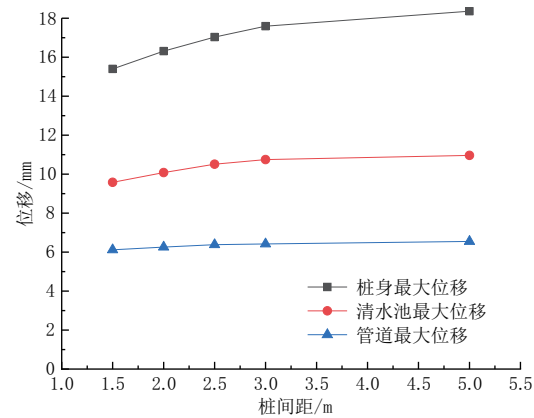


图6 桩身、构筑物及管道最大位移与桩间距的关系曲线

异。当后排桩径不变时,前排桩桩径从 0.6 m 增大到 1.2 m 时,桩身位移下降 36.68%,现状清水池位移下降 31.39%;当前排桩径不变时,后排桩桩径从 0.6 m 增大到 1.2 m 时,桩身位移下降 14.64%,现状清水池位移下降 13.64%。综合来看,前桩桩径对于支护效果的影响要大于后桩,例如当前后桩径分别为 0.6 m 和 1.0 m 时,桩身及现状清水池的最大位移分别为 20.77 mm 和 12.87 mm;而当前后桩径分别为 1.0 m 和 0.6 m 时,桩身及现状清水池的最大位移分别为 17.15 mm 和 10.56 mm,相比于前者下降明显,可证明增大前桩桩径可以获得更好的支护效果。

表 4 前后桩不同桩径情况下桩身及构筑物的最大位移

桩径(前排桩/后排桩)/ (m/m)	桩身最大位移/ mm	现状清水池/ 最大位移/mm
0.6/1.0	20.77	12.87
0.8/1.0	17.92	10.34
1.2/1.0	13.15	8.83
1/0.6	17.15	10.56
1/0.8	16.24	10.28
1/1.2	14.64	9.12

从表 5 可以看出,由于桩间距不同,前后排桩的侧向刚度不同,桩身及现状清水池的位移存在差异。当后排桩间距不变时,前排桩桩间距从 1.5 m 增大到 5.0 m 时,桩身位移增大 11.13%,清水池位移增大 6.07%;当前排桩径不变时,后排桩桩间距从 1.5 m 增大到 5.0 m 时,桩身位移增大 5.41%,清水池位移增大 2.45%。从计算结果也可看出,缩小前桩桩间距相比于缩小后桩桩间距可以获得更好的支护效果。

综合来看,双排桩支护结构中采用“前强后弱”的组合方式优于“前弱后强”,这符合软弱土层地区的工程经验,实际工程中需要考虑结合现场实际情况对双排桩的桩径、桩间距进行优化分析,从而可

以在保证支护效果的前提下,达到降本增效的目的。

表5 前后桩不同桩间距情况下桩身及构筑物的最大位移		
桩间距(前排桩/后排桩)/(m/m)	桩身最大位移/mm	现状清水池最大位移/mm
1.5/2.5	15.82	10.20
2.0/2.5	16.45	10.37
3.0/2.5	16.95	10.42
5.0/2.5	17.58	10.82
2.5/1.5	16.65	10.63
2.5/2.0	16.85	10.70
2.5/3.0	17.42	10.88
2.5/5.0	17.55	10.89

4 工程实测及分析

根据第3节计算结果,采用“前强后弱”的刚度组合方式可以起到提高支护效果及降低造价的目的。结合现场实际情况,将原先后后等刚度的方案修改为“前强后弱”的方式,具体的支护方案为:前排桩桩径1 m、桩间距1.2 m,后排桩桩径1 m、桩间距1.9 m。本节提取计算结果中双排桩的位移曲线及周边建筑物和管道的位移,并与现场监测值进行对比,对支护效果进行分析。

4.1 双排桩位移情况

如图7所示,当基坑开挖到底后,双排桩最大水平位移为14.86 mm;而现场实测数据中双排桩最大侧向位移为18.85 mm,计算结果与监测值接近,均满足《基坑工程技术标准》(DG/TJ08-61—2018)^[9]所规定围护结构最大侧移0.3% H_0 的要求。

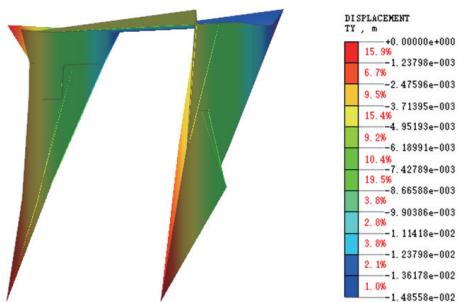


图7 双排桩变形特性

如图8所示,双排桩最大水平位移发生在桩顶部,前后桩位移基本一致,前桩位移略大于后桩,计算变形趋势与文献^[6]中三维地层结构法的趋势基本一致。而实测值中,桩身变形总体呈现随着桩身深度增大,侧向位移减小的趋势,但是桩身最大位移在深度约2 m处。出现差异的主要原因可能在于:在软土基坑工程中,双排桩的连系梁板刚度较大,空间

效应明显,导致其最大侧移位置下移^[10];而有限元模型中采用简化的2D单元模拟,可能弱化了其刚度作用,但整体趋势及数值与监测值相近。

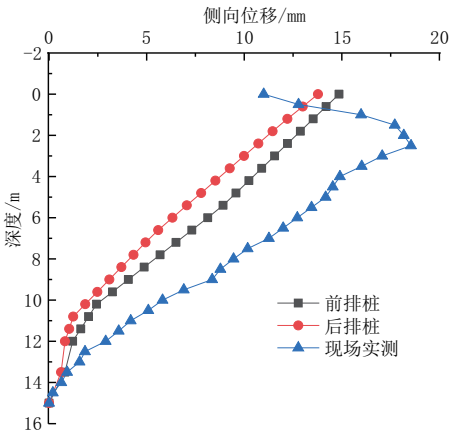


图8 双排桩侧向位移随深度变化曲线

4.2 基坑开挖对于清水池及管道的影响

图9为基坑北侧现有清水池及管道的位移云图,从计算结果可以看出,清水池及管道的位移以靠近基坑方向的水平位移以及竖向沉降为主。现状清水池的水平最大位移为6.63 mm,竖向最大位移为5.35 mm;管道的水平最大位移为5.08 mm,竖向最大位移为2.43 mm,均满足基坑对周边环境变形的控制要求。根据监测结果,现状清水池竖向位移现场最大监测值为5.75 mm,计算结果与之相近。综合看来,本工程中双排桩支护对于周边现状清水池及管道的保护起到了较好的效果。

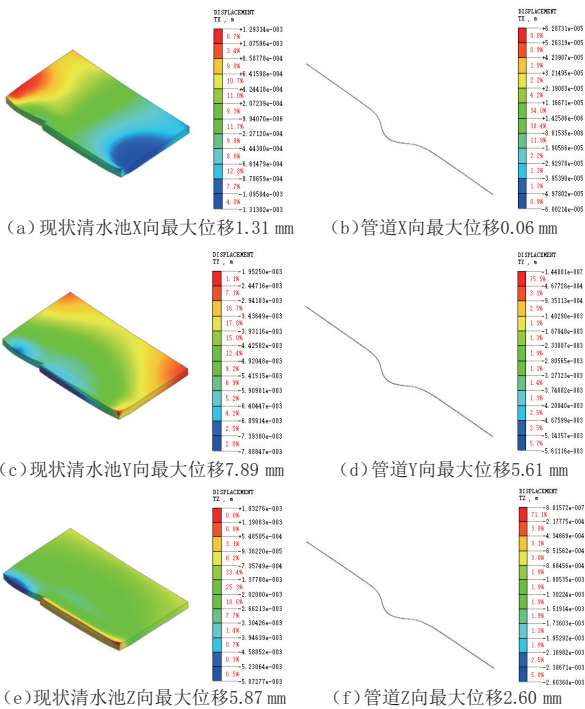


图9 现状清水池及管道的位移情况

5 结 论

(1)随着桩径的增大及桩间距的减小,双排桩的侧向刚度增大,对周边环境的保护作用增强。当桩径从 0.6 m 增大至 1.2 m 时,排桩的等效刚度增长约 150%,桩身变形下降了 44.78%,邻近构筑物的最大位移下降 12.59%,邻近管道的最大位移下降 6.56%。当桩间距从 5.0 m 减小至 1.5 m 时,排桩等效刚度增长约 49.4%,桩身变形下降 16.12%,邻近构筑物的最大位移下降 12.59%,邻近管道的最大位移下降 6.56%。

(2)增大前排桩桩径相比于增大后桩桩径可以有效降低桩身位移及邻近构筑物的位移;缩小前排桩相比于缩小后桩桩间距也可以降低桩身位移及邻近构筑物的位移。综合来看,采用前强后弱的方式可在满足支护要求的基础上降低工程造价。

(3)根据现场方案计算可得,双排桩最大水平位移为 14.86 mm,最大位移发生在双排桩顶部,桩身位移总体呈现出随着深度增大、侧向位移减小的趋势,变化规律及数值与现场实测总体趋势相近。计算所得邻近构筑物的水平最大位移为 6.63 mm,竖向

最大位移为 5.35 mm;邻近管道的水平最大位移为 5.08 mm,竖向最大位移为 2.43 mm,均满足基坑对周边环境变形的控制要求。双排桩可有效控制邻近构筑物及管道的位移。

参考文献:

- [1] 张明兴,宣锋.水厂浅基坑开挖时邻近构筑物保护分析[J].城市道桥与防洪,2010(4):103-105.
- [2] 史海莹.双排桩支护结构性状研究[D].杭州:浙江大学,2011.
- [3] 申永江,杨明,项正良.双排长短组合桩与常见双排桩的对比研究[J].岩土工程学报,2015,37(增刊2):96-100.
- [4] 孙涛,刘俊岩,刘燕.双排桩支护排距的优化研究[J].岩土工程学报,2012,34(增刊1):616-620.
- [5] 宣锋.双排桩支护在软土地区基坑中的应用与分析[J].特种结构,2020,37(2):34-39.
- [6] 何珊珊.软土中双排桩支护结构体系受力分析与计算研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [7] 熊巨华.一类双排桩支护结构的简化计算方法[J].勘察科学技术,1999(2):32-33.
- [8] 陈玉新.不同刚度及长短组合双排桩支护结构在汕头深厚软土中的分析及应用[D].广州:华南理工大学,2020.
- [9] DG/TJ08-61—2018,基坑工程技术标准[S].
- [10] 蔡袁强,王立忠,陈云敏,等.软土地基深基坑开挖中双排桩式围护结构应用实录[J].建筑结构学报,1997(4):70-76.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

