

紧邻道路的双排桩支护的深基坑设计施工与监测

孙宽¹, 张宗志¹, 韩文奇¹, 王成¹, 宋谦¹, 宋大伟²

¹中建八局浙江建设有限公司, 浙江 杭州

²江苏先行建设有限公司, 江苏 常州

收稿日期: 2023年2月28日; 录用日期: 2023年3月20日; 发布日期: 2023年3月30日

摘要

在复杂环境条件下, 软土地区大面积基坑工程围护结构选型关系到基坑工程的经济与安全, 双排桩围护结构是一种韧性好、开挖便利的支护形式, 很受业界欢迎。但是双排桩的受力机理比较复杂, 以至于一些重要参数如何取值, 现行基坑规程仍难明确, 需待更多工程实践予以丰富。本文结合江苏南沿江城际铁路武进站综合交通枢纽基坑工程, 对双排桩的工程应用进行了现场实测和数值模拟。结果表明, 悬臂双排桩围护在周边环境复杂的武进软土地区也是适用的, 位移控制效果良好。鉴于某些设计中双排桩变形高估导致过于保守的情况, 有限元数值模拟却得到了与实测值较为吻合的结果, 证明有限元数值模拟是工程设计中需要特别重视的辅助手段。

关键词

悬臂双排桩支护, 深基坑, 现场监测, 有限元数值模拟

Design, Construction and Monitoring of Double-Row Contiguous Pile for Deep Foundation Pit Adjacent to Road

Kuan Sun¹, Zongzhi Zhang¹, Wenqi Han¹, Cheng Wang¹, Qian Song¹, Dawei Song²

¹Zhejiang Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division Co. Ltd., Hangzhou Zhejiang

²Jiangsu Xianxing Construction Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

Received: Feb. 28th, 2023; accepted: Mar. 20th, 2023; published: Mar. 30th, 2023

Abstract

Under complex environmental conditions, the selection of contiguous structure for large-scale foundation pit engineering in soft soil areas is related to the economy and safety of foundation pit en-

文章引用: 孙宽, 张宗志, 韩文奇, 王成, 宋谦, 宋大伟. 紧邻道路的双排桩支护的深基坑设计施工与监测[J]. 土木工程, 2023, 12(3): 331-338. DOI: 10.12677/hjce.2023.123037

engineering, and cantilever double-row contiguous pile (CDRCP) is a support form with good toughness and convenient excavation, which is very popular in the industry. However, the mechanical mechanism of double-row piles is complicated, so the value of some important parameters is still difficult to determine the current rules of the foundation pit, which needs to be enriched by more engineering practice. In this paper, combined with the foundation pit engineering of Wujin Transportation Hub of Express Railway Station in Jiangsu Province, the field measurement and numerical simulation of the double-row pile are carried out. The result shows that the double-row pile is also suitable for the soft soil area of Wujin where the surrounding environment is complex, and the displacement control effect is good. In view of the overestimation of the deformation of double-row piles in some designs, the results obtained by finite element numerical method (FEM) are in good agreement with the measured values, which proves that finite element numerical method (FEM) is an auxiliary means that needs special attention in engineering design.

Keywords

Cantilever Double-Row Contiguous Pile, Deep Foundation Pit, Site Monitoring, Finite Element Numerical Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

基坑工程的围护形式分为支挡式围护和自稳式围护两种形式,当基坑开挖面积较大时,由于内支撑和立柱的存在,导致支挡式围护形式造价较高,经济效益较差,进行工法比选时常被舍弃。然而,在大面积基坑工程周边环境较为复杂,存在较多需要保护的建构筑物时,基坑工程的围护设计要考虑严格限制围护结构的变形,从而不宜采用包括放坡、土钉墙、锚杆(索)在内的一些对周边环境影响较大的基坑围护形式,较多采用自稳式围护结构形式。马可[1]对周边环境复杂、开挖面积较大、开挖深度7 m左右的软土基坑,采用多种重力式围护结构形式(包括双排桩)的安全性、经济性及施工便利性进行了分析比较。由具有一定间距的前后双排围护桩以及桩顶刚性系梁所组成的双排桩围护形式,具有侧向刚度大、施工场地小及相对于重力坝较高的围护结构韧性,较适宜于大面积基坑工程。张静[2]针对双排桩计算变形的问题,推导双排桩新水压计算公式,使得计算变形与实测变形更为接近。赵鹏飞等[3]针对武汉市地处深厚软土地区的某双排桩基坑施工过程中双排桩变形及地面和房屋开裂,采用三维数值模拟分析研究双排桩的变形规律,提出控制变形的办法。姜广占等[4]采用三维数值模型对包括桩排间距、后排桩长和桩径等双排桩关键设计参数进行了参数敏感性分析。蒋宏鸣等[5]通过分析深圳地区某基坑工程双排桩围护结构及周边建筑物变形,总结了开挖全过程双排桩围护结构变形规律。另外,赵成江等[6]采用极限分析法对“前桩短,后桩长”的双排桩+锚拉围护结构进行了多工况分析计算,虽然这种围护形式值得商榷且造价较高。双排桩前后排桩相互作用机理方面,薛德敏等[7]基于桩土变形协调假定和位移关系,考虑土拱效应,采用莫尔圆坐标平移法和斜微分单元法,所建立的非极限状态下双排桩桩后滑坡推力计算方法所得到的理论计算结果与实测值更为符合。虽然已有的研究在包括设计、施工、监测、数值模拟以及理论计算等方面取得了较为丰硕的研究成果,但是双排桩作为较为新颖的围护结构形式,其机理还远未得到深入的揭示,需要结合工程实践开展进一步的深入研究。江苏南沿江城际铁路武进站综合交通枢纽工程位于常州市武进高新区北部,拟建场地北侧为工业厂区建筑物,距离基

坑开挖较近,对水平变形要求较高,设计采用双排桩,最大开挖深度 11.19 m,软土地区采用如此深度的双排桩比较少见。

本文以枢纽基坑北侧为依托,对双排桩围护结构展开二维数值模拟分析,结合同济启明星进行围护结构的设计,对施工工序进行优化,并结合监测结果对双排桩围护结构受力和变形规律进行总结,可为类似工程实践提供参考。

2. 工程概况

江苏南沿江城际铁路武进站综合交通枢纽工程规划建设成一个集铁路车站、地铁、公交车站、出租车及社会停车场、商业及办公用的一个综合客运枢纽,同时兼顾远期地铁、城市轨道交通发展的规划要求。综合交通枢纽工程平面图如图 1 所示。

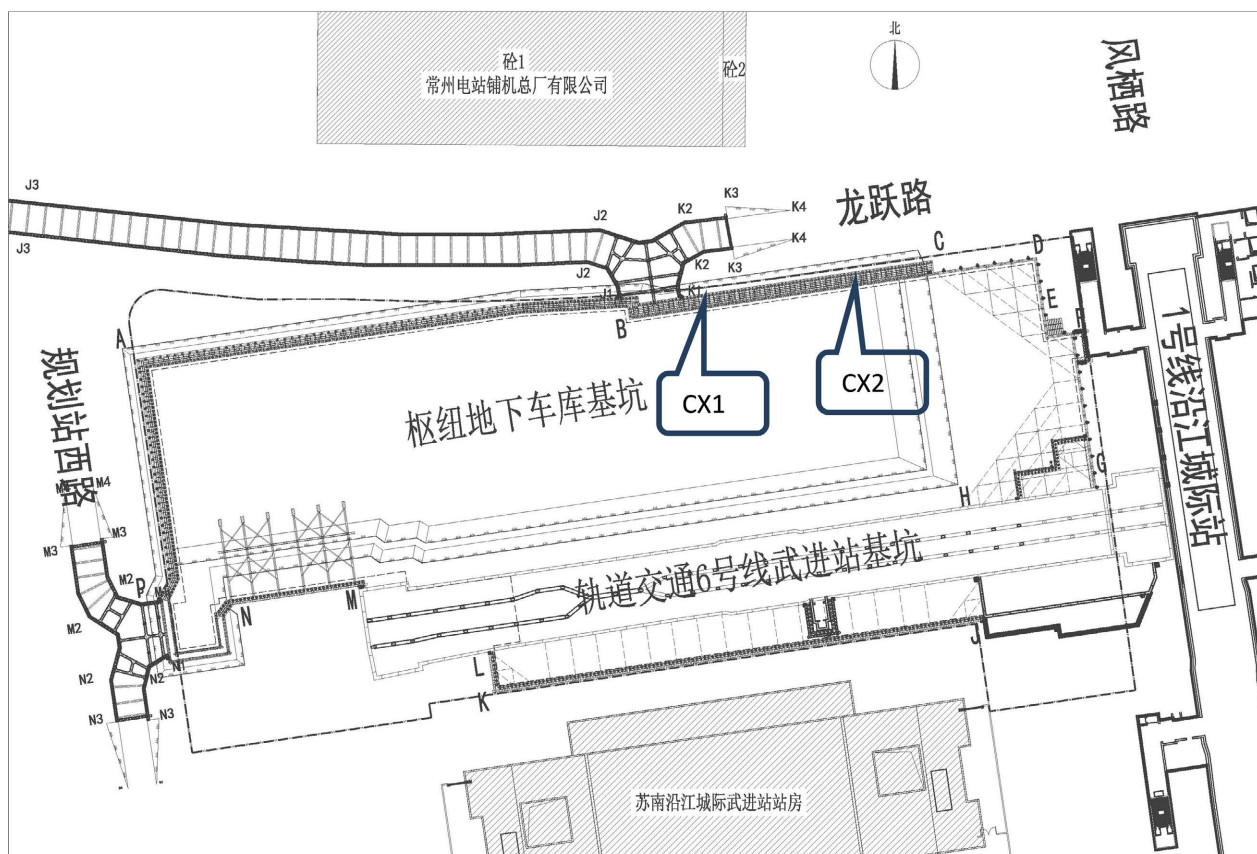


Figure 1. Layout of comprehensive transportation hub project

图 1. 综合交通枢纽工程平面图

场地土层情况

场地土层的物理力学指标如表 1 所示。

3. 双排桩围护设计与监测点布置

枢纽基坑 PA、AB 和 BC 段周边环境较为复杂,同时考虑工期要求,设计采用了双排桩的施工方案,代表性剖面如图 2 所示为 BC 段剖面,PA、AB 段桩前坑内留土,绝对开挖深度小于 BC 段,考虑到篇幅有限,本文重点针对 BC 段进行分析。

Table 1. Physical and mechanical parameters of soil layers
表 1. 土层物理力学参数

层号	土层名称	天然重度 kN/m ³	天然 含水量 %	初始 孔隙比	渗透系数		内摩 擦角°	粘聚 力 kPa	压缩模量 E _{s0.1-0.2} MPa	回弹指 数
					垂直 cm/s	水平 Cm/s				
③ ₁	黏土	19.7	28.1	0.79	4.2×10^{-8}	5.5×10^{-8}	47.1	16.4	7.5	
④ ₁	粉质黏土夹粉土	19.1	30.1	0.843	7.2×10^{-6}	8.4×10^{-6}	21.2	17.1	5.65	0.040
④ ₂	粉土夹粉质黏土	19.0	31.1	0.863	1.2×10^{-5}	1.5×10^{-5}	14.5	23.2	5.57	0.035
⑤ ₁	黏质粉土	19.0	30.7	0.860	2.4×10^{-5}	3.0×10^{-5}	13.0	28.2	7.65	0.022
⑥ ₂	粉质黏土	19.5	26.4	0.767	2.4×10^{-7}	2.8×10^{-7}	51.8	16.4	8.51	0.021
⑥ ₃	黏土	20.0	25.2	0.724	2.5×10^{-8}	3.1×10^{-8}	63.8	18.9	9.45	0.021
⑥ ₄	粉质黏土	19.3	28.9	0.81	5.6×10^{-7}	6.7×10^{-7}	36.3	17.0	6.93	0.030
⑦ ₁	粉质黏土	19.0	32.6	0.891	—	—	—	—	5.44	
⑦ ₂	粉质黏土	19.3	29.1	0.819	1.0×10^{-5}	1.2×10^{-5}	35.8	16.1	7.13	0.024
⑧ ₁	粉质黏土夹粉土	19.1	30.6	0.854	1.3×10^{-5}	1.7×10^{-5}	18.3	17.1	5.57	0.021
⑧ ₂	粉砂夹粉土	18.9	30.5	0.857	2.2×10^{-4}	2.6×10^{-4}	9.1	25.5	8.87	0.016
⑧ ₂₁	粉土夹粉质黏土	18.9	30.5	0.858	6.7×10^{-5}	8.0×10^{-5}	9.5	27.0	7.80	0.021
⑨ ₁	粉质黏土	18.9	31.9	0.889	1.3×10^{-7}	1.6×10^{-7}	18.2	11.4	4.57	0.028
⑨ ₂	粉质黏土	19.3	28.6	0.805	6.2×10^{-8}	7.2×10^{-8}	37.0	16.3	6.86	0.025
⑨ ₂₁	粉砂夹粉土	1.88	30.1	0.855	—	—	—	—	8.48	
⑨ ₂₂	粉质黏土	1.90	32.0	0.884	1.3×10^{-8}	1.5×10^{-8}	23.5	17.1	4.76	0.026
⑨ ₃	粉质黏土	1.94	27.6	0.784	3.6×10^{-8}	3.7×10^{-8}	43.6	17.1	8.32	
⑨ ₆	黏土	20.1	24.9	0.711	3.9×10^{-8}	4.9×10^{-8}	65.9	17.5	9.79	

3.1. 双排桩围护设计

BC 段采用双排 $\phi 900$ 钻孔灌注桩 + 4 排 $\phi 850@600$ mm 三轴搅拌桩(土体加固) + 一排 $\phi 850@600$ mm 三轴搅拌桩(止水帷幕), 如图 2 所示。采用设计软件启明星进行了初步试算, 变形及内力结果如图 3 所示, 围护结构最大位移 $33.7 \text{ mm} = 0.3H$ (H 为基坑开挖深度), 参考上海市基坑工程技术标准(DG/TJ 08-2018), 满足二级基坑变形控制指标。根据张静[2]所指出的, 目前采用设计软件计算得到的双排桩的变形量有大于实测变形量的问题, BC 段的设计方案满足工程要求。

3.2. 双排桩围护 BC 段测斜点布置

双排桩围护结构作为一种悬臂支护, 如图 3 所示, 其最大变形一般发生在桩顶, 周边地表和建构筑物可能会发生明显的沉降; 由于悬臂桩体没有沿开挖深度方向的支撑, 桩体的整体也会发生明显的侧向变形; 因此, 监测方案应重点关注双排桩围护桩顶和桩身的侧向位移, BC 段重点关注的测点为 CX1 和 CX2, 布置见图 1。

4. BC 段施工方案及有限元数值分析

4.1. BC 段施工流程

BC 段施工流程为: 止水帷幕施工——钻孔灌注桩施工——冠梁施工——土方分层开挖至基础底标高

——基础及主体结构施工——回填至设计地面标高，土方分层开挖工况如图4所示。

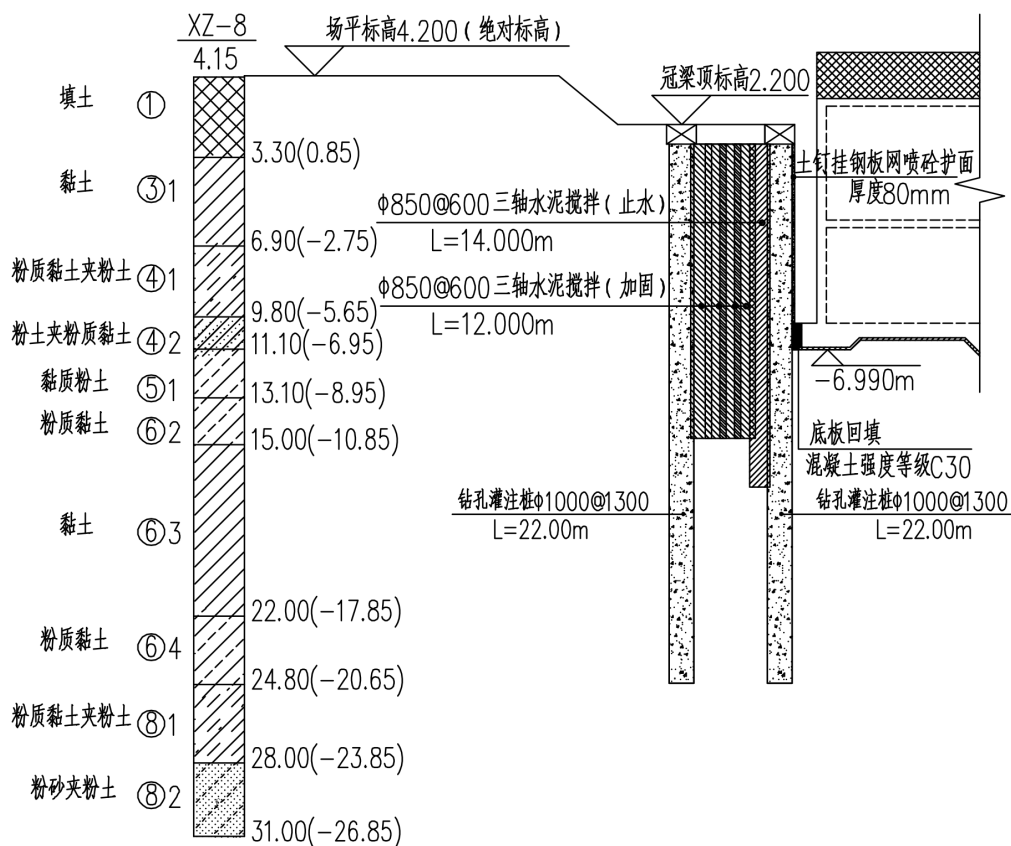


Figure 2. Profile of double-row contiguous pile structure
图2. 双排桩围护结构剖面图

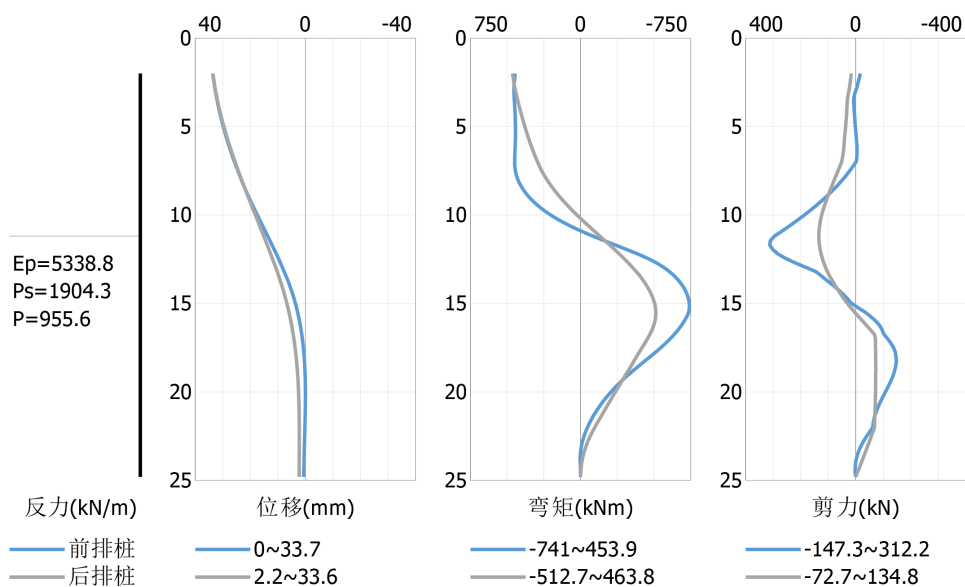


Figure 3. Calculation results of Tongji Qiming-star
图3. 同济启明星计算结果

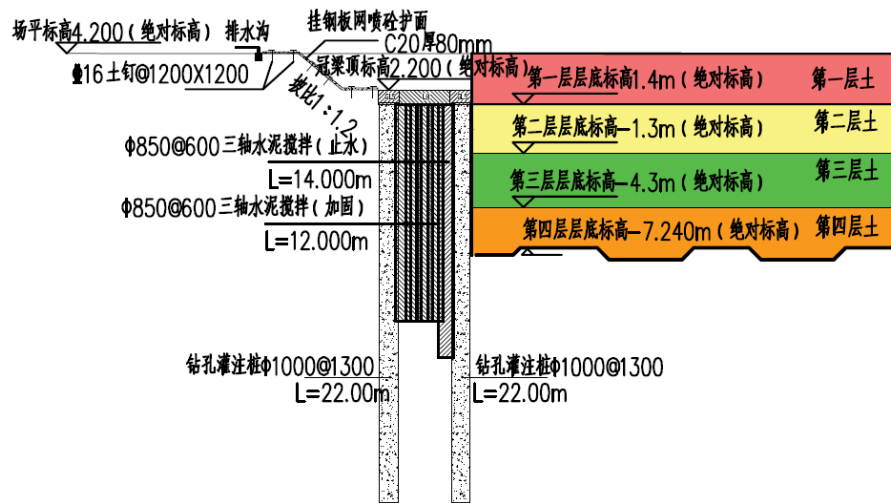


Figure 4. Layered excavation conditions
图 4. 分层开挖工况

4.2. 有限元数值模型

建立尺寸为 105 m (宽) × 50 m (高) 二维有限元模型，如图 5 所示。模型的边界条件：模型顶部为自由边界，模型两边为法向约束边界，模型底部为固定约束边界。在地下工程研究中，为了得到对位移的可靠预测，必须适当考虑小应变刚度和该刚度对于应变幅度的非线性依赖性。Benz 等[8] [9]提出的 HS-Small 模型，具有可考虑小应变条件下土体初始弹性模量以及开挖回弹模量的优点，可有效地解决开挖引起的回弹过大问题，本模型土体本构为小应变硬化土模型，根据岩土勘察报告，现场土层参数取值见表 1。用实体单元模拟土层、双排桩围护结构和加固体。

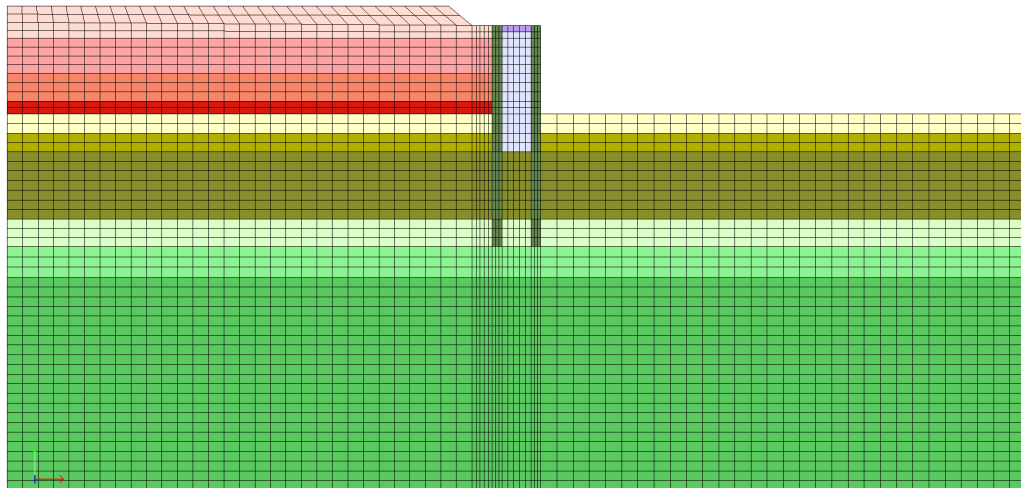


Figure 5. 2D finite element model
图 5. 二维有限元模型

4.3. 有限元计算结果

图 6 所示为双排桩围护结构水平位移云图，桩顶最大水平位移约 11.1 mm，采用有限元模型可以较好地考虑土层特点、桩土相互作用等信息，以及采用可考虑土体小应变的本构模型，是进行工程设计不

可或缺的辅助手段。计算得到的最大地表沉降约 4.15 mm.

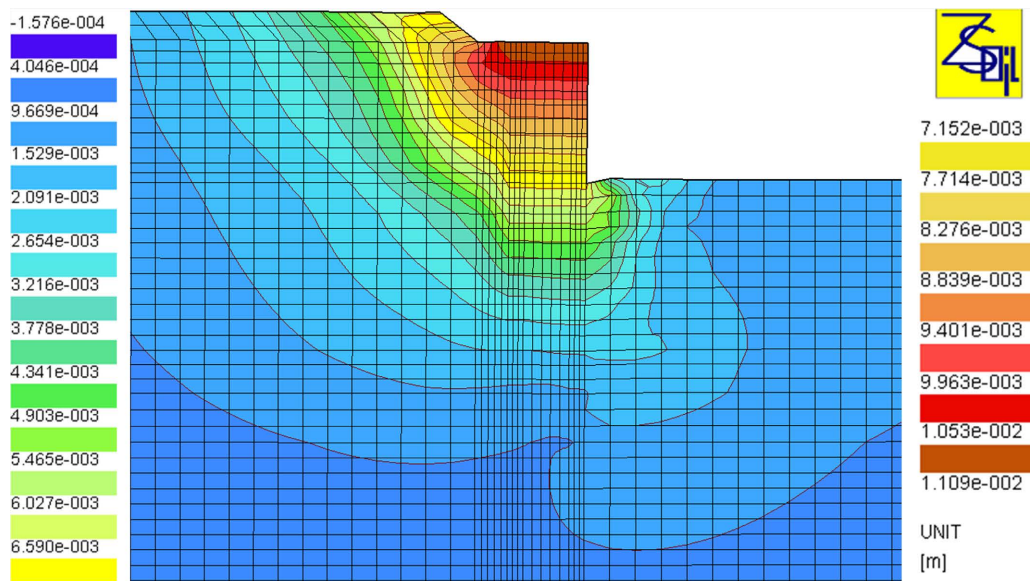


Figure 6. Nephogram of horizontal displacement

图 6. 水平位移云图

5. 现场监测与有限元计算对比分析

双排桩围护 BC 区段共布设两个围护桩测斜管监测围护桩水平位移；同时对照有限元计算的结果，得到如图 7 所示的对照曲线。从图 7 可以看出，二者位移峰值点略有差距，变化趋势总体吻合。相对于专业设计软件，虽然数值模拟能考虑较多的因素，但是由于实际工程千变万化，而数值模拟软件也做了较多的简化，因此在细节上，预测值与实测值仍存在一定的差异。

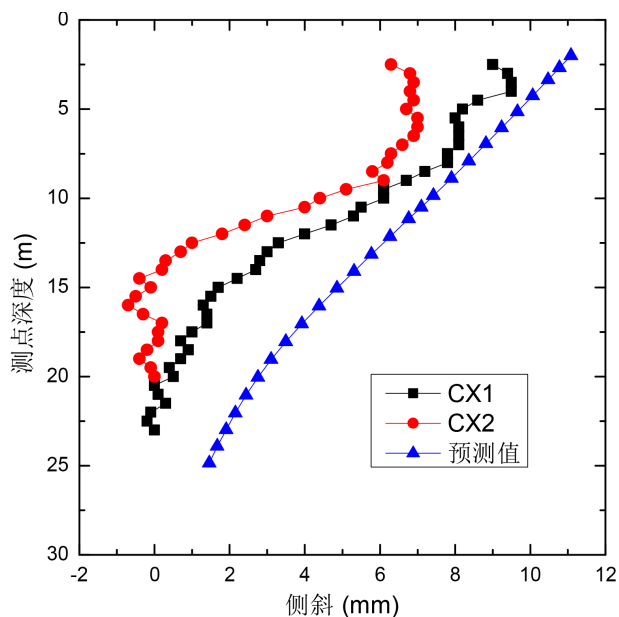


Figure 7. Measured and calculated values of the horizontal displacement of double-row piles

图 7. 双排桩水平位移的实测值和计算值

另外,其他监测项目显示,双排桩区段围护墙顶最大水平位移为 9.6 mm;周边建筑物最大沉降 5.5 mm;桩顶放坡边坡最大沉降 7.1 mm,最大水平位移 7.4 mm;地下水位最大变化量为 0.62 m。地表测点因为周边环境复杂及施工过程中的扰动与破坏,并未收集到有效数据。

6. 结论和建议

根据前述分析,可以得到如下结论:

1) 在软土地区周边环境较为复杂的情况下,由于双排桩围护结构具有较大的韧性,是一种可选择的围护形式。

2) 由于计算假定的合理性仍待进一步研究,目前工程设计过程中存在双排桩计算变形大于实测变形的情况,造成设计阶段高估双排桩围护结构的变形,从而可能造成工程浪费。

3) 采用有限元模型可以较好地考虑土层特点、桩土相互作用等信息,以及采用可考虑土体小应变的本构模型,预测双排桩结构的变形与实测值较为吻合,是进行工程设计不可或缺的辅助手段。

参考文献

- [1] 马可. 软土地区 7 m 左右挖深基坑几种支护形式分析比较[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2626-2031.
- [2] 张静. 双排桩自稳式基坑支护结构计算方法研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1519-1522.
- [3] 赵鹏飞, 王泽希, 方成全, 等. 双排桩支护下软土深基坑开挖的变形分析与控制[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(z1): 1087-1094.
- [4] 姜广占, 罗隽旻, 蒋凯. 双排桩支护体系方案优化研究[J]. 土工基础, 2022, 36(3): 344-349.
- [5] 蒋宏鸣, 刘春林. 深基坑双排桩支护的设计与变形监测研究[J]. 岩土工程技术, 26(2): 87-92.
- [6] 赵成江, 张世径, 玄超群, 等. 锚索布置对长短双排桩的受力影响分析研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2819-2825.
- [7] 薛德敏, 李天斌, 张帅. 基于位移控制的双排桩桩后滑坡推力计算方法[J]. 岩土工程学报. <http://cge.nhri.cn/cn/article/doi/10.11779/CJGE20220687>
- [8] Benz, T. (2007) Small-Strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences. Ph.D. Thesis, Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart, 193 p.
- [9] Benz, T., Vermeer, P.A. and Schwab, R. (2009) A Small-Strain Overlay Model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **33**, 25-44. <https://doi.org/10.1002/nag.701>