

软土地层环境敏感区深基坑变形特性分析及施工关键技术研究

罗向东

(中铁十八局集团市政工程有限公司, 天津 300222)

摘要: 针对软土地层环境敏感区深基坑施工变形问题, 本文依托浦江高铁站场综合交通枢纽深基坑工程, 采用现场监测与数值模拟相结合的方法, 明确了软土深基坑施工中围护结构、地表及建筑物的变形特性, 进而从围护结构厚度和嵌入深度两个角度出发, 对围护结构进行了优化设计, 同时总结了实际施工中采取的关键技术, 研究结果表明: 围护结构水平位移峰值位于0.5倍基坑深度处, 最大位移达16.87 mm, 满足安全阈值要求; 地表沉降呈凹槽形分布, 距坑边5 m处最大沉降达24.9 mm; 邻近敏感建筑65%的沉降发生于基坑开挖至7.5 m阶段, 23%发生于基坑开挖至9.9 m阶段, 最大沉降速率为0.45 mm/d。优化设计中, 地下连续墙厚度增至500 mm时地表沉降减少30%, 超过550 mm后效果减弱, 因此建议经济厚度为500~550 mm; 同时, 围护结构嵌入深度为25.5 m时可进一步使地表沉降减少18.9%。研究成果可为相同工况下的基坑施工提供参考。

关键词: 软土地层; 深基坑; 变形控制; 围护结构优化; 关键技术

中图分类号: TU473

文献标识码: A

Response Mechanisms of Deep Excavations in Environmentally Sensitive Soft Soil Strata: Core Technologies for Deformation Control and Construction Optimization

LUO Xiangdong

(China Railway 18th Bureau Group Municipal Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Regarding deformation issues in deep excavation construction within soft soil strata and environmentally sensitive areas, this paper, based on the deep excavation project of Pujiang High-Speed Railway Station Comprehensive Hub, employs a combined approach of field monitoring and numerical simulation to clarify the deformation characteristics of the retaining structure, ground surface, and adjacent buildings during deep excavation in soft soil. Subsequently, an optimized design for the retaining structure was conducted from the perspectives of its thickness and embedded depth, while key techniques implemented during actual construction are summarized. The research results indicate: The peak horizontal displacement of the retaining structure occurs at 0.5 times the excavation depth, with a maximum displacement of 16.87 mm, meeting safety threshold requirements; Ground surface settlement exhibits a trough-shaped distribution, with a maximum settlement of 24.9 mm at 5 m from the excavation edge; For the adjacent sensitive building, 65% of its settlement occurred during the excavation stage to 7.5 m depth, and 23% occurred during the excavation stage to 9.9 m depth, with a maximum settlement rate of 0.45 mm/d. In the optimized design: When the thickness of the diaphragm wall was increased to 500 mm, ground surface settlement decreased by 30%; The effect diminished beyond 550 mm, suggesting an economical thickness range of 500~550 mm; When the embedded depth of the retaining structure reached 25.5 m, ground surface settlement was further reduced by 18.9%. The research findings can provide references for excavation construction under similar conditions.

Key words: soft soil strata; deep excavation; deformation control; retaining structure optimization; key technologies

收稿日期: 2025-09-22

作者简介: 罗向东, 工程师, 本科, 研究方向为工程技术管理

1 引言

随着城市地下空间开发的深入推进，软土层环境敏感区的深基坑工程面临严峻挑战。这类工程在开挖过程中易引发围护结构位移、地表沉降及邻近构筑物变形等问题；尤其在高铁站等重大基础设施周边区域，基坑变形控制水平直接关系到区域公共安全。

众多国内外学者对深基坑进行了研究，主要集中在两方面，一方面是基坑开挖自身的变形特性，另一方面是施工对周边环境的影响效应。在变形特性方面，张鑫祺^[1]结合太原地铁基坑监测数据与数值模拟，分析了支撑轴力、围护结构位移与地表沉降的变化规律。杨新兴^[2]针对北京某超大深基坑，模拟了开挖降水过程中地表沉降、锚杆受力及其对紧邻铁路的影响。方智淳^[3]通过数值模拟研究了珠海某基坑地下连续墙位移、地表变形及内支撑的受力性能，指出开挖初期内支撑可有效限制邻近建筑的水平位移。在环境影响方面，李鹏川^[4]以成都双流国际机场提质改造工程为背景，分析了基坑开挖对邻近高铁车站抗浮稳定性与变形规律的影响。王林^[5]结合理论分析、数值模拟与现场监测，探究了基坑施工对下卧地铁隧道的变形影响并提出控制措施。袁国发^[6]通过数值模拟与实测对比，探讨了围护结构、支撑体系等对邻近高架桥桩变形的影响。吕光璐^[7]则模拟了基坑开挖对邻近既有隧道变形及内力的全过程影响。

综上所述，已有研究多聚焦于基坑自身变形规律或其对单一邻近结构的影响，而对在软土层与环境敏感区双重约束下，基坑施工引发的围护结构、地表及邻近敏感建筑协同变形特性缺乏系统性分析。此外，针对软土深基坑的围护结构优化设计多集中于单一参数，缺乏对厚度与嵌入深度的综合优化分析，同时缺少针对环境敏感区的施工关键技术系统总结。

本文依托某高铁站综合枢纽深基坑工程，针对典型软土地质条件及环境高敏感性建筑物，采

用现场监测与数值模拟相结合的方法，明确了软土深基坑全周期施工中围护结构、地表及建筑物的变形特性；从围护结构厚度和嵌入深度角度，对围护结构及内支撑进行了优化设计，同时总结了实际施工中为提高施工安全阈值所采取的关键技术，为相同工况下的深基坑施工提供了参考。

2 工程概况

该工程为浦江高铁站场综合交通枢纽建设工程，位于金华市浦江县岩头镇后叶村东北侧，在建浦江县高铁站房及铁路路基西南侧，G351 国道以东。基坑总长 213 m，标准段主体结构净宽度为 16.3 m，平均埋深为 9.8 m，两侧扩大端埋深分别为 9.3 m 和 9.2 m，车站围护结构采用灌注桩法，灌注桩桩径为 900 mm，桩距为 0.6 m，鉴于场地条件及开挖深度可控，基坑东、南、北三侧采用 1：1 自然放坡开挖支护方案。基坑支护体系未设置内支撑系统。基坑西侧现有一座钢筋混凝土梁厂，该梁厂距基坑最近距离为 10.5 m。工程施工现场见图 1。



图 1 工程施工现场

根据场地勘察报告，工程场地地形较为平坦，其地下覆土依次为素填土、含砾粉质黏土、强风化粉砂岩、中风化粉砂岩，各土层厚度依次为 1.8 m、2.5 m、3.8 m、33.4 m，各地层物理力学参数如表 1 所示，其地质图如图 2 所示。

表 1 地层物理力学性质

名称	弹性模量/MPa	压缩模量/MPa	容重/(kN/m ³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	6.9	3.2	17.6	0.46	22.8	26
淤泥质粉质黏土	6.5	4.9	20.5	0.24	21.9	23
强风化泥质砂岩	38.9	13.3	23.1	0.27	38.9	28
中风化泥质砂岩	90.6	35.8	24.5	0.21	45.8	30

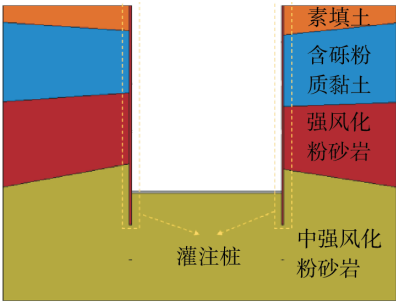


图2 地层分布图

场地地表水分布较少，仅局部存在水塘，工程实施后将其填平。勘察期间，地下水埋深在1.3~15.0 m，稳定水位埋深为1.4~15.2 m，相应高程为73.40~98.5 m。场地地下水位动态主要受季节性降水影响，年变化幅度约2.50 m。

3 基坑监测及数值模拟

3.1 监测方案

依据《城市轨道交通工程监测技术标准》(DB22/T5020—2019)并结合基坑周边环境条件，对围护结构水平位移、基坑周边地表沉降及邻近敏感建筑物进行监测，测点布置如图3所示，监测项目与限值如表2所示。其中，地表沉降监测点遵循“近密远疏”原则布置：距坑边10 m范围内每2 m设一测点，10 m以外每5 m设一测点。

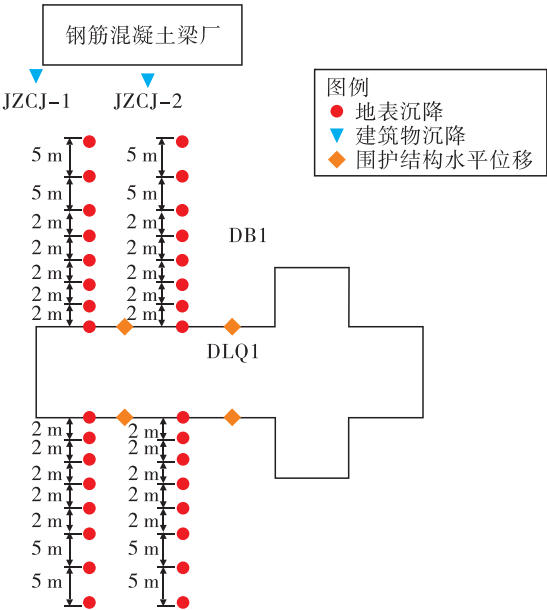


图3 测点布置图

表2 监测项目及限值

监测项目	位置及监测对象	测试元件	监测限值	
			设计值 /mm	变化速率 /(mm/d)
桩顶水平、竖向位移	钻孔桩上端部	经纬仪、水准仪	30	3
地表沉降	基坑周边	水准仪	30	3

3.2 数值模拟

3.2.1 基本假定

本文基于工程地质特征及既有研究基础，为提高计算效率并满足工程适用性，对模型建立作如下理论简化^[8]：①将岩土体视为连续、均质且各向同性的介质；②岩层按均质层状分布处理，初始地应力场仅考虑自重应力作用；③假定围护结构等材料为理想弹性材料；④不考虑岩土时效变形及时间相关因素对围岩稳定性的影响；⑤不考虑流固耦合和降水对基坑变形的影响。

3.2.2 模型建立

依据圣维南原理，为削减边界效应，基坑横向、纵向两侧土体与模型边界的距离均大于3倍基坑开挖深度，据此确定模型尺寸为500 m×260 m×27 m（长×宽×高）。地层选用可以模拟加载和卸载刚度的修正摩尔库伦本构模型，单元类型选取实体单元；结构物理力学参数按照表3设置，所需设置刚度参数包括割线刚度、切线刚度、卸载弹性模量则参考相关研究^[9-10]，由压缩模量和弹性模量换算得到，换算公式如式(1)~(3)所示。

$$E_{50}^{ref} = k_{50} \cdot E_s \tag{1}$$

$$E_{oed}^{ref} = k_{oed} \cdot E_s \tag{2}$$

$$E_{ur}^{ref} = k_{ur} \cdot E \tag{3}$$

式中 E_{50}^{ref} 、 E_{oed}^{ref} 、 E_{ur}^{ref} 分别为割线模量、切线模量和卸载弹性模量，其中 k_{50} 、 k_{oed} 、 k_{ur} 为比例系数，取值参考同类软土地区经验和文献^[9-10]的建议取值。

围护结构采用弹性模型，考虑到深基坑面积过大，若采用桩体加网喷混凝土的方式建模将存在结构单元庞大、计算复杂、收敛难度大的问题，因此按照等效刚度理论^[11]运用公式(4)将围护桩体等效转化为地连墙；同时，建筑物楼板采用板单元模拟，建筑物柱、梁均采用梁单元模拟，各结构的物理力学参数如表3所示。

$$(d+l) \cdot h^3/3 = \pi d^4/16 \tag{4}$$

式中， $h=0.838d^3 \sqrt{1/(1+l/d)}$ ， d 为围护

桩桩径，背景工程中桩径为 900 mm； l 为围护桩桩间净距，背景工程中桩距为 0.6 m； h 为地连墙厚度。

基坑模型底部采用固定约束，四周设置为法向约束，上部为自由边界。数值模型网格划分如图 4 所示，模型共 143 168 个节点和 68 345 个单元。模拟施工过程如表 4 所示。

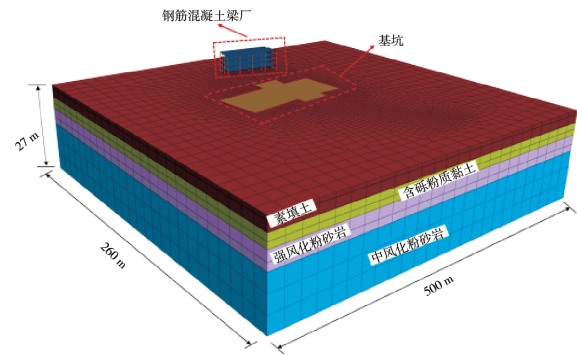


图 4 数值模型图

表 3 结构物理力学参数

材料名称	弹性模量 /MPa	容重 /(kN/m ³)	泊松比
围护桩	32 000	24.5	0.34
建筑物柱	32 500	25	0.2
建筑物梁、板	30 500	25	0.2

表 4 基坑开挖模拟施工工序

工序	模拟施工阶段
1	初始地应力平衡
2	施作围护结构
3	基坑开挖至 3.5 m
4	基坑开挖至 7.5 m
5	基坑开挖至 9.9 m

4 结果分析

4.1 基坑施工过程中围护结构水平位移分析

考虑到基坑开挖过程中围护桩体水平位移变形规律具有相似性，故本文提取典型测点 DLQ1 的数据绘制了不同施工阶段的围护桩水平变形曲线如图 5 所示。同时在数值模型对应测点位置提取不同施工阶段的围护桩水平位移分布如图 6 所示。

由图 5 可知，随开挖深度增加，围护桩水平位移自开挖至 7.5 m 处显著增大，曲线呈两端小、中间大的“凸”形。最大位移位于深度约 4.5 m 处，约 0.5 倍基坑深度，对应地层为强风化粉砂岩，其值为 16.87 mm，未超过控制阈值，表明支护方案安全可靠。

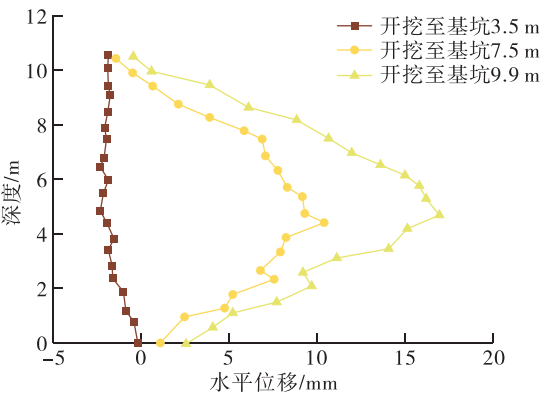


图 5 围护结构水平位移监测图

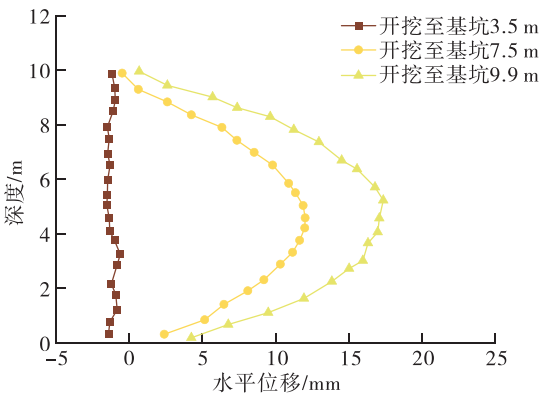


图 6 围护结构水平位移数值模拟图

由图 6 可知，在开挖初期，受到浅层开挖深度作用的影响，围护桩的水平位移始终控制在 1.4 mm 以内；当基坑开挖至 7.5 m 处，最大位移上升至 12.75 mm；当基坑开挖至 9.5 m 处，相邻施工阶段变形增长不足 10 mm，最大值为 17.07 mm。对比发现，不同施工工况下实测值的变形趋势基本一致，其各阶段最大水平变形模拟值和监测值存在一定偏差。经分析，造成该差异的主要原因是现场施工环境复杂，模型未考虑施工机械、车辆等临时荷载，以及开挖过程中的地层差异和机械扰动，进而导致模拟结果与实际监测值存在一定偏差。同时为了定量评估模型，本文进一步对围护结构水平位移的预测精度及各施工阶段沿深度的位移曲线进行了对比分析，误差指标如表 5 所示。

表 5 误差分析

施工阶段	均方根误差 /mm	平均绝对 误差/mm	决定系数
第一道支撑施作后	0.47	0.38	0.85
第二道支撑施作后	1.12	0.88	0.97
第三道支撑施作后	1.53	1.18	0.99
综合评价	1.15	0.87	0.98

由表5可知。整体均方根误差为1.15 mm，决定系数为0.98，表明模型能高精度地复现围护结构的实际变形规律。分阶段来看，误差随开挖深度增加而略有增大，但始终控制在较低水平，这验证了模型的可靠性。

4.2 地表沉降影响

选取典型监测断面 DB1 进行分析。图7显示了该断面不同距离处的地表沉降曲线。结果表明：开挖初期沉降不明显；随开挖加深，沉降逐渐增大并趋于稳定。距坑边5 m 范围内，沉降量随距离增加而增大；超过5 m 后，沉降量逐渐减小。

图8对比了该断面地表沉降的模拟值与实测值。两者变化趋势一致，均呈近似凹槽形分布，且最大沉降均出现在距坑边约5 m 处。模拟值整体略低于实测值，但差异在合理范围内。

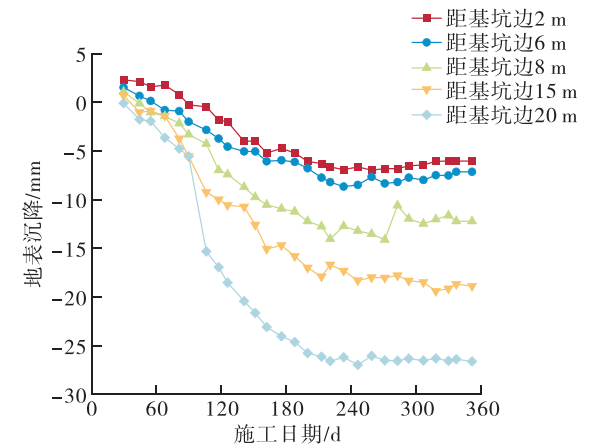


图7 不同距离基坑边缘处地表沉降

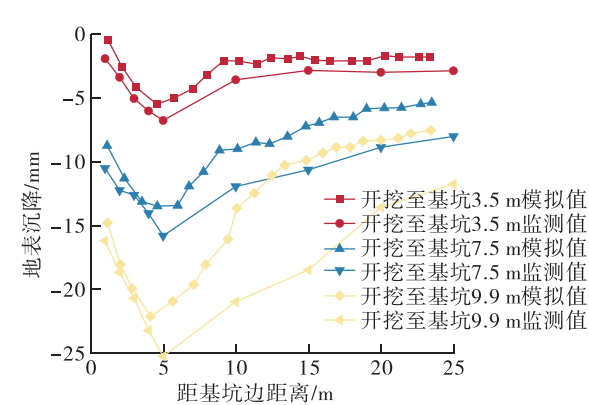


图8 不同施工阶段地表沉降监测值与数值模拟值对比图

4.3 敏感性建筑变形分析

考虑到基坑与建筑物最近距离为10.5 m，在施工过程中可能会对建筑物造成影响。因此，选取了典型沉降点 JZCJ-1 和 JZCJ-2，对邻近建筑物的沉降变化进行分析，结果如图9和表5所示。

由图9可知，数值模拟得到的建筑物沉降规律与实际监测值相似，即建筑物沉降随基坑施工的推进持续增加。尤其是当基坑开挖至7.5 m 时，沉降速率显著提升；当基坑开挖至9.9 m 时，建筑物沉降仍呈现持续增长趋势。由表5可知，基坑开挖至7.5 m 处和9.9 m 处两个阶段是邻近建筑物变形的主要时期，前者占总沉降的59%至65%，后者占21%至23%。在这两个阶段，沉降速率分别达到0.45 mm/d 和0.16 mm/d。

表5 沉降统计表

监测点	JZCJ-1			JZCJ-2			数值模拟监测点		
	基坑开挖至3.5 m	基坑开挖至7.5 m	基坑开挖至9.9 m	基坑开挖至3.5 m	基坑开挖至7.5 m	基坑开挖至9.9 m	基坑开挖至3.5 m	基坑开挖至7.5 m	基坑开挖至9.9 m
沉降量/mm	2.04	14.03	18.36	2.75	14.80	18.96	3.53	15.51	20.15
占总沉降量比值/%	11.1	65.3	23.5	14.5	63.5	21.9	17.5	59.4	23.1
沉降速率/(mm/d)	0.06	0.45	0.16	0.05	0.44	0.16	0.07	0.48	0.15

5 优化设计及施工关键技术

5.1 围护结构设计优化

上述研究内容虽分析了基坑工程施工过程中围护结构、土层及敏感性建筑物的变形特性，明确了基坑施工过程中的变形处于安全范围内，但在相似工况下实现软土基坑施工的优化设计与施工管理，仍需在现有研究基础上进一步开展针对性研究，提升软土基坑施工的安全性，为类似工况

下的软土基坑施工提供理论与技术参考。

5.1.1 围护结构设计优化

通过上述研究发现，灌注桩作为围护结构能够满足施工安全控制要求，但已有研究发现，相较于灌注桩，地下连续墙整体刚度大、防渗性好，更适用于软土敏感区^[13]。而地连墙厚度是影响其结构功能的重要因素^[14]。因此本节将围绕不同地连墙厚度下地表沉降变化开展研究，以对围护结构进行优化设计。

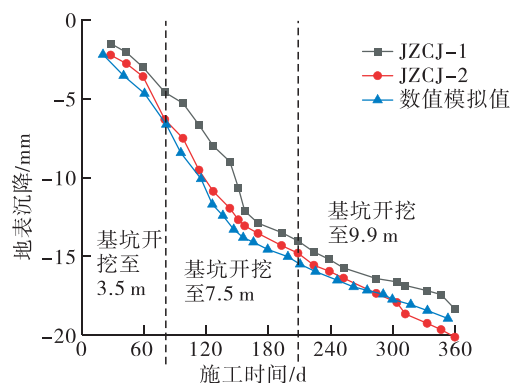


图9 敏感性建筑沉降曲线

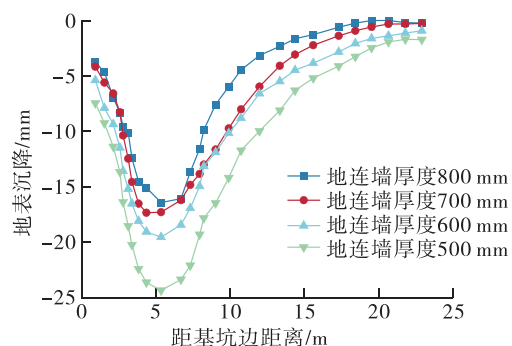


图10 不同地连墙厚度地表沉降

通过图10可以看出，随着地连墙厚度的增加，地表沉降值呈现逐步减小的趋势。具体而言，800 mm、700 mm、600 mm、500 mm不同厚度条件下，基坑的最大沉降值分别为24.90 mm、19.45 mm、17.42 mm和16.28 mm。同时，研究还发现，地连墙厚度的增加使得相邻最大沉降差逐渐缩小，尤其是在厚度超过500 mm后，再增加墙体厚度对控制地表沉降的效果变得不明显。此外，增加墙体厚度还会显著增加工程成本。因此，建议在软土地质条件下进行基坑施工时，地连墙的合理厚度范围应控制在500 ~ 550 mm之间，以兼顾沉降控制效果和经济性。

5.1.2 围护结构嵌入深度优化

已有研究发现，围护结构嵌入深度与地层变形存在相关性。故本节从围护结构嵌入深度的角度出发进行设计优化，其工况设置如表6所示。

由图11可知，基坑周围地表沉降随开挖深度增加逐渐形成“凹”形分布。与未施加预应力的情况相比，随着围护结构嵌入深度的增大，地表最大沉降量呈减小趋势，从23.5 mm降至10.8 mm，降幅达12.7 mm。总体来看，地表沉降量的变化趋势逐步减缓，尤其是当围护结构嵌入深度超过工况3设置值时，沉降量的减小幅度明显降低。

综合考虑上述因素，建议后续工程施工时，将围护结构嵌入深度控制在25.5 m左右，可使地表沉降降低约18.9%。

表6 不同围护结构嵌入深度设计值

工况设置	嵌入深度/m
工况1	15.5
工况2	20.5
工况3	25.5
工况4	30

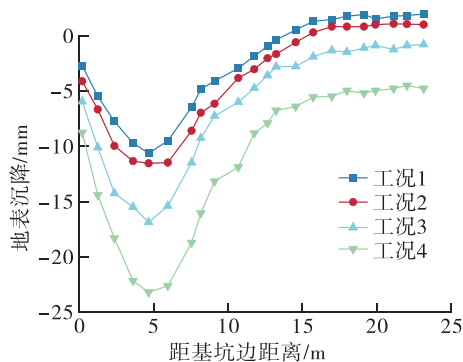


图11 不同围护结构嵌入深度设计值地表沉降曲线

5.2 施工关键技术

虽然上一节从基坑围护结构和支撑布置的角度进行了优化设计，但考虑到实际施工过程中可能出现的突发风险，结合有限元分析软件和现场监测数据，背景工程采取了一系列针对性的施工措施，增强基坑施工的安全保障，以确保工程能够按计划顺利完成。

5.2.1 注浆预加固技术研究

软弱土层内采用水泥-水玻璃双液浆预加固，加固效果良好。考虑到预计浆液的扩散半径为1.2 m，能够在软弱土层形成厚度达3 m的加固壳体^[15]。为了确保施工安全与加固效果，工程将注浆压力设置在0.3 ~ 0.4 MPa范围内，浆液配比为C:S=1:0.8，水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥，水玻璃浓度控制在35 ~ 40° Be'，模数为2.4 ~ 2.8。在施工的同时，密切监测地下水位变化，并结合现场实际及时调整注浆压力，采取相应的止水措施，确保浆液的稳定扩散和加固效果。

5.2.2 分阶段开挖动态调控

在基坑开挖施工中，科学合理的工序设计是确保施工安全、减少突发事件的关键^[16]。在施工过程中，基于现场地质条件，应严格控制工程开挖速度。每次施工完毕后，应立即进行支护结构的施工，以确保土体得到充分支撑。每段施工完

毕后,工程应同步进行变形监测,包括基坑边坡变形、支护结构变形及裂缝发展情况。应将监测仪器如水准仪、裂缝计、应变计等布置在关键位置,且监测范围应覆盖整个基坑边坡和支护体系。同时,工程应合理安排排水措施。基坑底部设置集水井,配备潜水泵,以确保基坑内水位不超过设计水位。基坑水位应控制在 -0.5 m ,以防土体软化和支护失稳。降水系统应设计为多点布置,间距不超过 10 m ,采用潜水泵连续抽水,抽水流量根据现场水文条件确定,一般每个井点的抽水能力在 $2\sim 5\text{ m}^3/\text{h}$ 。此外,在施工过程中,应严格控制施工机械的振动和冲击,以避免引发土层不稳定。每次开挖后,及时进行土体变形和裂缝监测,确保变形范围在允许范围内。若出现异常,应立即采取加固措施或暂停施工,直至问题解决,由此保证基坑施工的顺利进行。

6 结论

(1) 围护结构水平位移在 0.5 倍基坑深度处达到峰值,最大位移达 16.87 mm ;地表沉降呈凹槽形分布,距基坑边缘 5 m 处沉降量最大,约 24.9 mm ;邻近敏感建筑的沉降主要集中于基坑开挖至 7.5 m 和基坑开挖至 9.9 m 阶段,分别占总沉降量的 65% 和 23% ,沉降速率最高达 0.45 mm/d 。

(2) 地连墙厚度增至 500 mm 时地表沉降降低 30% ,超过 550 mm 后沉降控制效果明显减弱,建议经济厚度为 $500\sim 550\text{ mm}$;围护结构嵌入深度为 25.5 m 时地表沉降可进一步降低 18.9% ,实现安全性与经济性的平衡。

(3) 采用水泥-水玻璃双液浆进行预加固,配比 $1:0.8$,压力 $0.3\sim 0.4\text{ MPa}$,形成 3 m 厚的加固壳体;严格实施分阶段开挖,每层深度不超过 2.5 m 并即时支护,同步监测控制变形速率在 0.45 mm/d 以内;配合坑内水位动态管理,确保水位不高于 -0.5 m 。通过综合措施,显著降低了深基坑施工对地层的影响效应,保证了施工的安全。

本研究在软土地层环境敏感区深基坑变形特性分析与控制方面取得了一定成果,但受限于模型简化假定、特定地质与施工条件,以及实际施工中动态风险因素的复杂性,所提出的优化参数与技术的普适性仍有待在更广泛的工程实践中验证。未来将引入更精细化的本构模型与流固耦合分析方法,进一步丰富软土地层复杂环境下深基

坑工程的研究内容。

参考文献:

- [1] 张鑫祺,张启亮,王骁,等.典型地质条件下太原某地铁深基坑开挖变形特点研究[J].施工技术(中英文),2025,54(13):38-43.
- [2] 杨新兴,宋永涛,刘辉,等.邻河超大深基坑降水开挖变形特性及影响[J].建筑技术开发,2025,52(7):157-160.
- [3] 方智淳,朱正国.深基坑不同阶段开挖自身受力变形分析[J].黑龙江工业学院学报(综合版),2025,25(6):129-134.
- [4] 李鹏川,王俊,王彦明,等.机场开挖施工对邻近既有高铁车站结构的安全影响分析[J].广东建材,2025,41(8):149-152.
- [5] 王林,王根,周卓,等.大型基坑施工对下邻地铁隧道变形影响分析[J].安全与环境学报,2026,26(2):620-630.
- [6] 袁国发,施液峰,张婷,等.低净空下地铁车站深基坑施工对高架桥桩变形影响研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2025,47(3):81-88.
- [7] 吕光璐.近接既有地铁隧道的深基坑施工过程影响分析[J].工程机械与维修,2025(6):104-106.
- [8] 孙超,辛庆飞,孙志成,等.土岩复合地层地铁车站深基坑锚索预应力损失规律及变形控制研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(6):87-93.
- [9] 刘治国,田水,谷倩,等.基于修正摩尔库伦理论的装配式混凝土结构湿式连接接缝抗剪承载力研究[J].建筑科学,2023,39(9):1-7.
- [10] 胡建林,孙利成,崔宏环,等.基于修正摩尔库伦模型的深基坑变形数值分析[J].科学技术与工程,2021,21(18):7717-7723.
- [11] 蒙国往,农忠建,吴波,等.地铁车站深基坑开挖变形及数值模拟分析[J].中国安全生产科学技术,2020,16(7):145-151.
- [12] 吴波,彭逸勇,蒙国往,等.宁波软土地区相连深基坑开挖施工时空效应实测分析[J].铁道科学与工程学报,2020,17(1):82-94.
- [13] 黎心海,曹成勇,张寻龙,等.城际铁路深大圆形工作井基坑开挖受力变形特性[J/OL].铁道标准设计:1-10(2025-08-05)[2026-01-26].<https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202412110003>.
- [14] 叶如,王毅,曹昱,等.软土地层地铁车站超深地下连续墙槽壁稳定性分析[J].城市轨道交通研究,2025,28(3):118-122.
- [15] 郭子伟.软土地区地铁深基坑变形特性与数值模拟研究[D].大连:大连交通大学,2025.
- [16] 张恩重.邻近在建地铁隧道的深基坑施工安全风险评估研究[D].济南:山东建筑大学,2024.