文章编号：1671－8496－(2026)－04－0013－06

软土地区深基槽施工变形特性分析与控制技术研究

荆奇
（中铁十八局集团第五工程有限公司，天津 300450）

摘　要：以软土地区深基槽工程为背景，针对厚层淤泥质粉质黏土等软弱地层引发的施工变形控制难题，综合采用现场监测与数值模拟方法，系统研究了深基槽施工全过程的变形特性与控制技术。通过 Midas GTS NX 建立三维有限元模型，验证了模型的可靠性，并分析了地表沉降与围护结构水平位移的变形特性，同时从桩体嵌固深度、钢支撑预加轴力及钢管直径等关键参数出发进行了优化设计研究。研究结果表明：地表沉降呈“凹槽形”分布，峰值在距坑边约 5 m 处；围护结构水平位移呈“弓形”分布，最大位移发生于淤泥质粉质黏土层深度范围内，且所有变形值均处于规范限值以内，证实了施工的安全性。在此基础上，通过对关键参数进行优化分析，提出了施工桩体嵌固深度 9 m、钢支撑预加轴力 160 kN、钢支撑钢管直径 609 mm 的优化组合方案。该方案有效兼顾了变形控制效果与工程经济性。本研究可为类似软土地区深基槽工程的设计与施工提供理论依据和技术参考。

关键词：软土地区；深基槽；钢板桩；变形特性；参数优化
中图分类号：TU753　　**文献标识码**：A

Analysis of Deformation Characteristics and Control Techniques for Deep Excavations in Soft-Soil Areas

JING Qi
(China Railway 18th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Taking a deep excavation project in a soft-soil area as the research background, this study addresses the challenges of deformation control induced by weak strata such as thick layers of silty clay and muddy silty clay. By integrating field monitoring with numerical simulation, the deformation characteristics and control techniques throughout the entire deep-excavation construction process are systematically investigated. A three-dimensional finite element model is developed using Midas GTS NX to verify the model reliability and to analyze the deformation behaviors of ground surface settlement and retaining-structure lateral displacement. Furthermore, optimization studies are conducted on key parameters including pile embedment depth, pre-applied axial force of steel struts, and steel pipe diameter. The results indicate that ground surface settlement exhibits a “trough-shaped” pattern, with the maximum settlement occurring approximately 5 m from the excavation edge. The lateral displacement of the retaining structure shows an “arch-shaped” distribution, with the maximum displacement located within the depth range of the muddy silty clay layer. All deformation values remain within the allowable limits specified by relevant standards, confirming the safety of the construction. On this basis, an optimization analysis of critical parameters suggests an optimal combination consisting of a 9 m pile embedment depth, a pre-applied axial force of 160 kN for the steel struts, and a steel pipe diameter of 609 mm. This optimized scheme effectively balances deformation control performance and engineering economy. This study provides theoretical support and technical references for the design and construction of similar deep-excavation projects in soft-soil regions.

Key words: soft-soil areas; deep excavation; steel sheet piles; deformation characteristics; parameter optimization

收稿日期：2025-11-25
作者简介：荆奇，工程师，本科，研究方向为工程技术管理

1 引言

随着我国城市化进程的不断加快，城市地下空间的开发利用日益受到重视，各类深基坑工程在城市基础设施建设中扮演着越来越重要的角色[1-2]。在沿海软土地区，由于地质条件的特殊性，深基槽工程施工面临着严峻挑战[3-4]。软土地区具有含水量高、压缩性大、强度低、透水性差等工程特性，进行深基槽开挖时，容易引发围护结构变形过大、坑底隆起、周边地表沉降等一系列岩土工程问题，这不仅会直接影响工程施工安全，还可能损害周边建筑物、地下管线等设施。

近年来，许多学者对软土地区深基坑工程变形特性进行了大量研究。梁艳春[5]结合宁波地铁车站施工实际，综合评估基坑施工对周边既有建筑及不利环境的影响后，进一步加强基坑围护支护，并落实周边环境全过程监控。监测数据表明，邻近建筑与基坑距离越近，沉降变形越大，其中浅基础老旧小区建筑的沉降风险尤为突出。王伟[6]以深厚软土分布区邻近地铁隧道深基坑工程的成功实施为背景，按照地铁隧道保护要求对基坑支护进行专项设计，对项目实施过程中可能涉及的各种工况进行计算分析。杨潇[7]采用有限元方法建立深基坑－车站－区间三维数值模型，研究深基坑开挖施工对车站区间的影响。王俊[8]以宁波软土地区某邻近既有轨道交通结构和地下室结构的超深大基坑为依托，介绍了该深基坑工程的特点及采取的设计与施工方面的变形控制措施；同时，采用有限元法分析了开挖所引起的环境变形规律，并与实测结果进行了对比。朱剑钦[9]以福州某软土地基深基坑工程为背景，采用地下连续墙作为竖向围护结构，通过现场监测与数值模拟相结合的方法，系统分析地下连续墙成槽及基坑开挖阶段的变形特性，重点探讨土方开挖顺序及地层分布等因素对基坑变形的影响规律及控制措施。武玉山[10]以佛山地铁4号线绿岛湖北站深基坑为工程背景，采用数值模拟与现场实测相结合的方法分析基坑开挖施工过程中，支护结构与周边环境的变形规律及影响因素。这些研究成果为软土地区基坑工程的设计与施工提供了重要参考。

尽管既有成果为软土基坑工程提供了有益参考，但值得注意的是，在厚层淤泥质土中采用钢板桩支护时，其变形机理与控制方法仍具有复杂性。现有研究在参数优化方面多集中于单一因素的影响，而对桩体嵌固深度、钢支撑预加轴力及钢管直径等影响因素研究较少，实践中也缺乏系统且经济的参数组合方案。因此，本文依托北塘地区某深基槽工程，针对场地内广泛分布的厚层淤泥质土及软黏性土等不良地质条件，采用现场监测与数值模拟相结合的方法，系统研究深基槽施工过程中的变形响应规律。通过建立三维有限元模型，分析基槽开挖各阶段的地表沉降和围护结构水平位移的发展规律，验证数值模型的准确性。在此基础上，重点研究桩体嵌固深度、钢支撑预加轴力和钢管直径等关键参数对变形控制效果的影响，提出优化设计方案，为类似地质条件下的深基槽工程提供技术参考和实践指导。

2 工程概况

本工程道路位于北塘污水处理厂及北塘热力厂北侧，即塘汉路以西，西中环快速路与在建的津秦高速铁路以东，杨北公路以南。场地勘察报告显示，工程场地地形较平坦，其地下覆土依次为杂填土、素填土、黏土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土，厚度依次为1 m、2.3 m、2 m、3.4 m、6.2 m，各地层物理力学参数如表1所示。本工程沿线广泛分布厚层淤泥质土与软黏性土，土层厚度差异较大，施工安全风险突出。为此，本文针对该工程基槽开挖阶段的土体变形开展研究。

表1 地层物理力学性质

名称	弹性模量/MPa	容重/(kN/m³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	6.9	18.4	0.45	21.8	26
素填土	7.4	18.3	0.43	16.7	23
黏土	3.6	19.6	0.35	10.5	14
淤泥质粉质黏土	6.3	20.9	0.27	21.6	23
粉质黏土	10.2	22.7	0.27	22.6	28

3 数值模型建立

3.1 模型建立

本文采用Midas GTS NX进行有限元模型建立与分析。根据圣维南原理，考虑到边界效应的影响，基槽两侧范围取基槽施工深度的5倍，底部范围取基槽施工深度的4倍，因此，模型尺寸

为 100 m × 80 m × 60 m（长 × 宽 × 高）。本文采用莫尔－库仑模型作为土体的本构模型，土体力学物理参数参照表 1 进行设置，钢板桩、内支撑采用线弹性本构。在数值模型中，土体采用实体单元，钢板桩采用板单元，内支撑采用梁单元，其物理力学参数如表 2 所示。同时，考虑到拉森钢板桩的几何截面较为复杂（图 1），因此依据等效弯曲截面法，将钢板桩的几何截面等效为截面弯矩相等的矩形截面，其截面宽度和高度分别为 B 和 h_0，按照式（1）进行计算。

$$\left(\frac{B\times t_1^3}{12}+t_1Bh^2\right)+\left(\frac{t_2^2\times h^3}{12}+\frac{t_2h^3}{4}\times 2\right)=\frac{Bh_0^3}{12} \tag{1}$$

表 2　材料物理力学参数

材料类型	密度/（g/cm³）	弹性模量/MPa	泊松比
钢板桩	8. 02	206 000	0. 31
钢管内支撑	7. 84	200 000	0. 20
地下连续墙	2. 46	31 500	0. 20

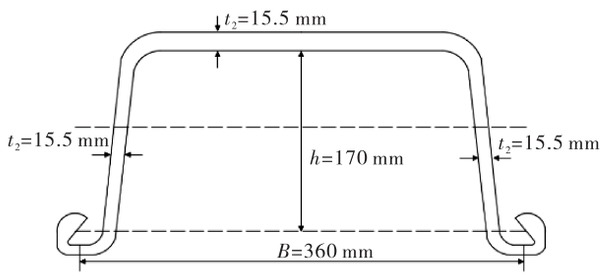

图 1　拉森钢板桩截面示意图

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 2 所示，模型共 236 168 个节点和 178 325 个单元。模拟施工过程如表 3 所示。

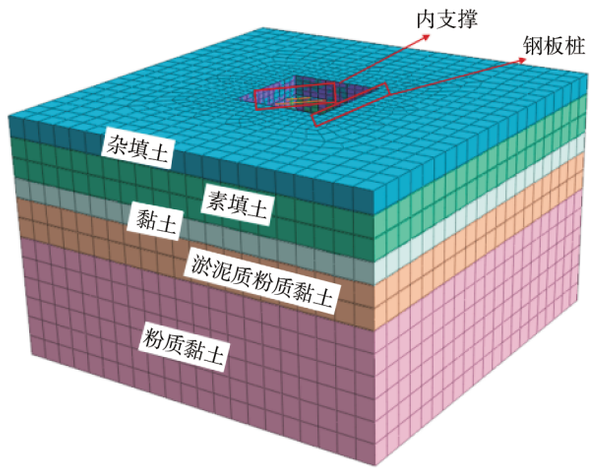

图 2　数值模型

表 3　模拟施工过程

施工步序	施工内容
Ⅰ	地应力平衡
Ⅱ	钢板桩施工
Ⅲ	基坑开挖至 2. 6 m
Ⅳ	施作第一道内支撑
Ⅴ	基坑开挖至 5. 8 m
Ⅵ	施作第二道内支撑
Ⅶ	基坑开挖至 8. 9 m
Ⅷ	钢板桩拆除

3. 2 模型准确性验证

为验证数值模型的准确性，同时依据《城市轨道交通工程监测技术标准》（DB22/T5020—2019）要求并结合深基槽周边环境条件，在基坑边缘每隔 3 m 布设地表沉降监测点，沿钢围堰竖向布设水平位移监测点，测点布置见图 3 所示。

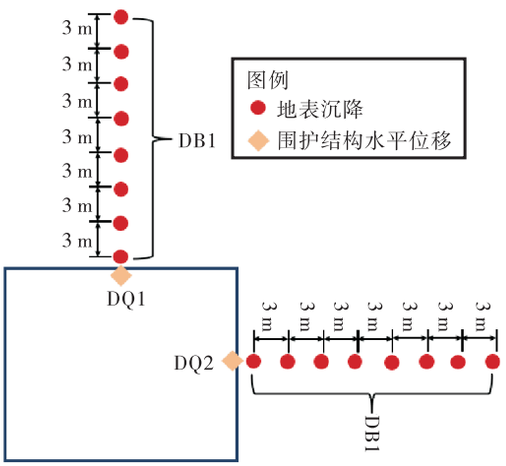

图 3　测点布置图

选取测点 DB1 及 DQ1 提取数据，并与数值模拟对应位置处变形数据对比，如图 4、图 5 所示。由图可知，深基槽施工完成后，各监测点地表沉降和钢围堰水平位移的模拟值与现场监测值变化规律基本一致，这说明了数值模拟的准确性。可以发现，各监测点现场监测的平均地表沉降值比数值模拟结果高 23. 5%，现场监测的平均钢板桩侧向横移值比数值模拟结果高 12. 5%。其原因在于，数值模拟中采用的莫尔－库仑模型是理想弹塑性模型，无法反映软土在持续荷载下的变形；同时数值模拟对施工步骤进行了简化和理想化设定，但现场施工存在更多不确定因素，如开挖面的不平整、支撑安装的延时、预应力损失以及机械振动等扰动等，都会增大土体的变形[11]。尽管数值模拟结果与现场监测数据存在小幅偏差，但各测点变形演化规律基本一致，可验证该数值模型的合理性与可靠性。

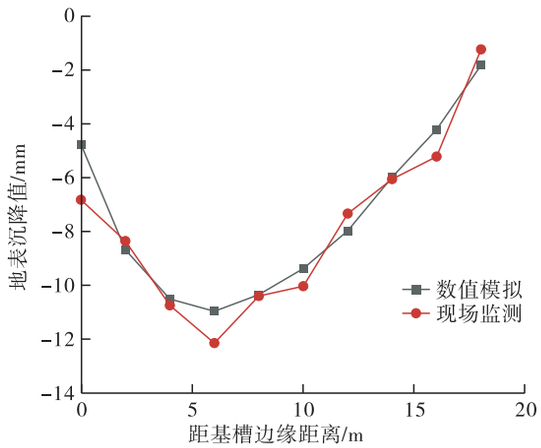

图4 地表沉降

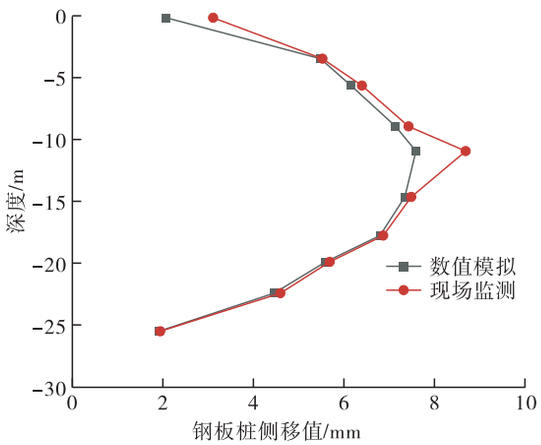

图5 围护结构变形

4 深基槽施工过程变形特性分析

4.1 地表沉降

为研究不同深基槽施工阶段的地层变形特性，提取数值模拟中从阶段Ⅱ（钢板桩施工）至阶段Ⅷ（钢板桩拆除）全过程的地表沉降数据，其分布规律如图6所示。

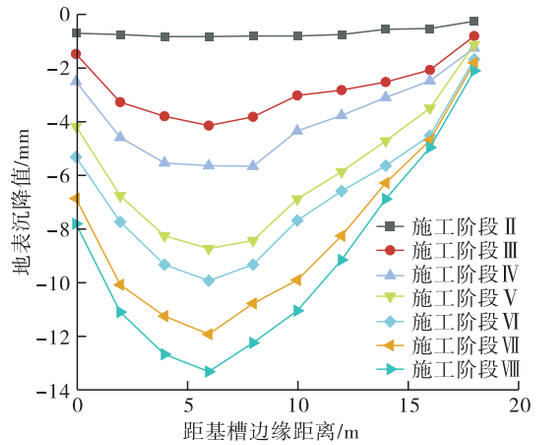

图6 不同施工阶段地表变形图

由图可知，整体而言，地表沉降曲线均呈现出典型的“凹槽形”分布特征。地表沉降量随着与基槽边缘距离的增加而先增大后减小，在距基槽边缘约5 m处达到变形峰值，而后其影响逐渐减弱，沉降量随之减小。分析其原因在于场地内广泛分布的淤泥质粉质黏土强度低、压缩性高，在基槽开挖卸荷后，槽壁土体产生的水平位移向周边土体传递剪切应力，从而引发地表沉降[12]。在距离槽边过近即小于3 m时，由于受到钢板桩及内支撑的刚性约束作用，土体竖向变形受到直接抑制；而在距离槽边较远即大于10 m区域时，开挖引起的附加应力已通过土体充分扩散而显著衰减。因此，在距槽边约5 m的区域范围内，土体同时处于应力影响显著且支护约束降低，使得此范围成为沉降变形的集中发生区，即沉降曲线的峰值点。因此在类似软土深基槽施工过程中，需要重点关注5 m区域内的沉降。

从施工全过程来看，沉降的发展与施工进度呈现出明显的正相关性。在开挖初期（施工阶段Ⅲ），坑壁暴露面积和深度较小，对周边土体的扰动有限，此时最大地表沉降仅约5.8 mm。同时，随着在施工阶段Ⅳ中内支撑的施作，可以观察到沉降曲线的增长趋势明显放缓，说明第一道支撑的安装有效约束了围护结构的上部位移，从而抑制了其上方土体的沉降发展[13]。随着开挖深度增至5.8 m，地表沉降继续增大，最大沉降随之增至约9.2 mm；而后，在施工阶段Ⅵ施作第二道内支撑后，沉降曲线并未出现如第一道支撑施作后的显著平缓变化，这表明在开挖深度较大时，下道支撑对控制坑口附近地表沉降的效果有所减弱；最终，当施工结束后，最大沉降为13.8 mm，小于规范控制限值，说明深基槽施工处于安全状态。

4.2 围护结构水平位移

不同施工阶段钢板桩的水平位移情况如图7所示。由图可知，围护结构的水平位移随开挖深度增加而先增大后减小，呈现出典型的“弓”形分布特征。从钢板桩随施工进度变形情况分析可知，在开挖初期，位移最大值出现在深度4.2 m处，位移量为5.3 mm，此时变形主要发生在砾砂层和上部黏土层。当开挖至5.8 m至施工结束时，位移峰值下移至深度5.3 m，位移量增至9.6 mm，此时变形已深入至淤泥质粉质黏土层下部。该区域是淤泥质粉质黏土层，具有高压缩性和较低强度的工程特性，在开挖卸荷作用下易发

生塑性流动，成为围护结构变形的主要地层区域[14]。因此，在软土地区进行深基槽设计时，应特别关注软弱土层的分布深度与力学特性，通过适当增加支撑道数、优化支撑位置或提高支撑刚度等措施，有针对性地控制软弱土层引起的围护结构变形。同时，围护结构的嵌固深度应充分考虑软弱土层的影响，确保有足够的嵌固段进入下部相对较好的土层，以提供有效的变形约束。

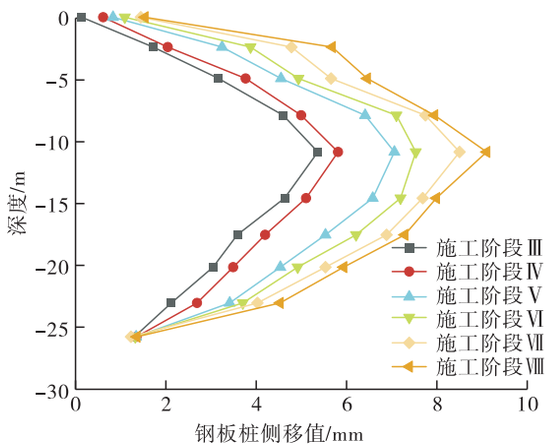

图 7　不同施工阶段钢板桩水平位移

5 优化设计与控制技术研究

上述分析指出，控制围护结构变形与周边地表沉降是软土地区深基槽施工安全的核心。尽管本工程现有支护方案已使变形量处于规范容许范围内，但软土地层力学性质具有显著时空变异性，且工程实践始终追求安全性与经济性的统一。因此，进一步对支护体系开展优化研究具有明确的现实意义。本节将围绕桩体嵌固深度、钢支撑预加轴力及钢支撑钢管直径这三个关键设计参数，通过数值模拟方法，系统分析各参数变化对深基槽变形行为的影响规律，以期为软土地区类似工程的变形控制与优化设计提供理论依据与技术参考。

5.1 桩体嵌固深度影响

桩体嵌固深度是影响基坑稳定性和变形控制的关键因素[15]。为研究其影响规律，本文对比分析了 8 m、9 m、10 m、11 m 四种嵌固深度方案，对应的地表沉降情况如图 8 所示。

从地表沉降控制效果分析，随着嵌固深度增加，各测点的地表沉降值均呈现递减趋势。在距基槽边缘 6 m 处的最大沉降点，嵌固深度从 8 m 增加至 11 m 时，沉降值从 14.80 mm 减小至

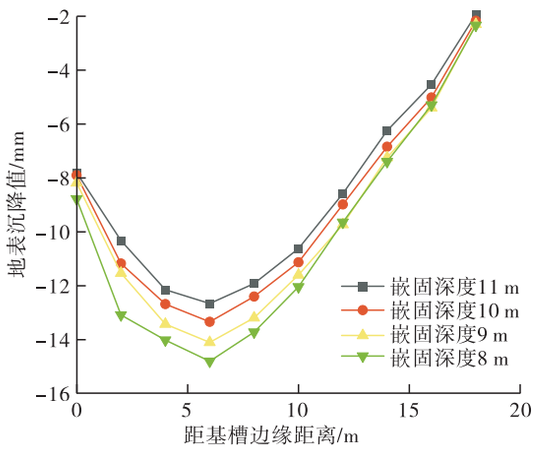

图 8　不同嵌固深度对地表沉降的影响

12.65 mm，降幅为 14.5%。值得注意的是，嵌固深度从 10 m 增加至 11 m 时，沉降变化明显变小。因此从经济性和安全性角度考虑，嵌固深度的增加意味着钢板桩用量和施工难度的同步增加。本工程中，嵌固深度从 8 m 增加至 11 m，钢板桩用量增加 37.5%，而最大地表沉降仅减少 14.5%。综合考虑变形控制效果与经济性，当嵌固深度为 9 m 时，既能将最大地表沉降控制在规范限值内，又避免了过度设计造成的材料浪费。这一深度使桩端嵌入到力学性质较好的泥质砂岩层中，为围护结构提供了足够的底部约束，有效限制了软土层引起的深部变形。

5.2 钢支撑预加轴力影响

不同预加轴力工况下的地表沉降如图 9 所示。预加轴力的增加能有效减小各测点的地表沉降值。在距基槽边缘 6 m 处的最大沉降点，预加轴力从 0 kN 增加至 300 kN 时，沉降值从 14.80 mm 减小至 12.65 mm，降幅为 14.5%。值得注意的是，预加轴力从 160 kN 增加至 300 kN 时，沉降减小值从 1.07 mm 降至 0.68 mm，控制效果的提升趋于平缓。在实际施工中，预加轴力的增加虽然能提高变形控制效果，但需要更大吨位的千斤顶和更复杂的施工工艺，同时也对支撑系统的稳定性提出更高要求。预加轴力从 0 kN 增加至 300 kN，设备成本和施工难度显著增加，而地表沉降控制效果的提升却呈现递减趋势。因此，预加轴力为 160 kN 方案性价比最高，该方案能将最大地表沉降控制在 13.33 mm 以内，桩顶水平位移控制在 10.1 mm，既能有效发挥主动控制的作用，又符合工程经济性的要求，是软土地区深基槽工程的合理选择。

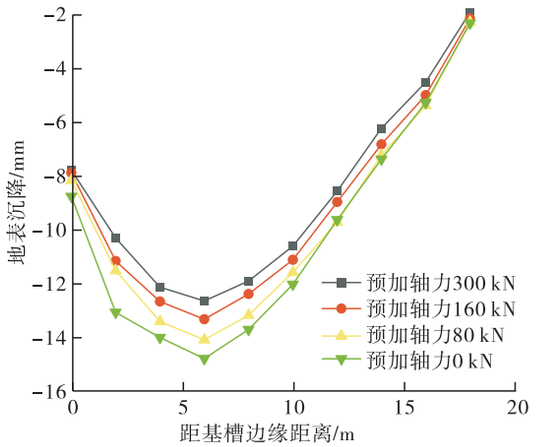

图 9　不同预加轴力对地表沉降的影响

5.3 钢支撑钢管直径影响

钢支撑的截面尺寸是影响基坑变形控制效果的关键参数。为研究钢管直径的优化取值，本文选取 508 mm、580 mm、609 mm、630 mm 四种规格的钢管进行对比分析，具体如图 10 所示。

钢管直径的变化直接影响支撑系统的抗弯刚度。分析结果表明，随着直径从 508 mm 增大至 630 mm，地表沉降值不断减小，具体表现为当钢管直径为 508 mm 时，地表最大沉降值为 12.13 mm；当钢管直径为 580 mm 时，地表最大沉降值为 11.92 mm；当钢管直径为 609 mm 时，地表最大沉降值为 11.50 mm；当钢管直径为 630 mm 时，地表最大沉降值为 11.04 mm。可以发现，当直径从 508 mm 增至 609 mm 时，直径每增加 25 mm 可降低 0.21 mm 沉降；而当直径从 609 mm 继续增至 630 mm 时，直径每增加 25 mm 仅能降低 0.11 mm 沉降，控沉效率显著降低。另一方面，直径从 508 mm 增至 630 mm，钢材用量增加约 24%，而最大沉降仅减少 9%，因此选用直径为 609 mm 的钢管作为内支撑结构材料，既可以保证深基槽的稳定性控制，又能达到成本控制的目的。

综上，数值模拟分析结果得出，适用于本工程地质条件的参数优化组合为桩体嵌固深度 9 m、钢支撑预加轴力 160 kN、钢管直径 609 mm。在该参数组合下，地表最大沉降可控制在 11.50 mm 左右，围护结构最大水平位移为 9.6 mm，均满足规范限值要求，且相较于初步设计，可节省钢材约 10%，对应降低支护工程造价约 8%，同时最大地表沉降量较未优化工况减少约 13%，实现了安全性与经济性的有效统一。

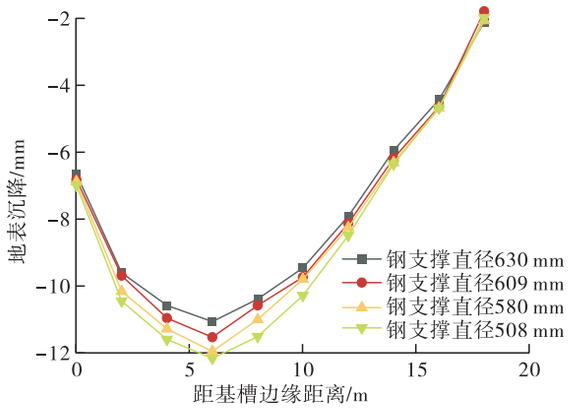

图 10　不同钢管直径对地表沉降的影响

6 结论

通过对软土地区深基槽施工过程的数值模拟与变形特性分析，本研究得出以下主要结论：

（1）软土环境下深基槽开挖引发过程中，地表沉降表现在距基槽边缘 5 m 处变形最大，最大值为 12.45 mm；围护结构水平位移在深度 5.3 m 达到最大，最大值为 9.56 mm。地表最大沉降和围护结构最大水平变形均小于规范限值要求，表明在现有支护条件下，深基槽施工处于安全可控状态。

（2）通过系统优化支护体系参数，可进一步提升变形控制效果。研究表明，桩体嵌固深度 9 m、钢支撑预加轴力 160 kN、钢管直径 609 mm 的优化方案，能够有效控制地层变形，在确保工程安全的同时取得了较好的经济效益。

（3）施工过程中应根据开挖深度和地层条件变化及时调整控制措施，开挖初期应重点控制第一道支撑的施作质量，随着进一步开挖，要特别关注软土层的变形发展，通过优化支护参数实现安全控制与工程造价的平衡。

本文采用的单因素优化方法可明确各关键参数对变形的单独影响规律，但未综合考虑参数间的耦合效应，难以得到兼顾安全、经济与使用性能的全局最优方案。后续研究将引入正交试验、响应面分析及智能优化算法，开展多参数协同优化；通过对比单因素与多因素优化结果，量化分析参数耦合作用对变形控制及工程效益的改善效果，进而构建更为完善的软土深基槽支护设计优化体系。

（下转第 31 页）

TransCAD 和 TransModeler 的 OD 数据一体化贯通，可有效提升运行数据输入的准确性；多元技术融合的高精度三维仿真，对于提升复杂方案的专业性、汇报的可理解性具有重要作用，可有效提升相关参与方对项目的认可度，进而对整个设计方案的推动具有积极的作用。

本研究仍存在以下不足：驾驶行为模型的标定基于现状数据，需进一步验证改扩建后的驾驶行为标定；实现高精度三维仿真，依赖多套软件协同，需多次数据的导出及融合。在今后的研究中，需进一步标定复杂交通组织模式下车辆运行特征和自动驾驶车辆特征参数，进一步优化交通驾驶行为模型；同时推动轻量化三维渲染技术的应用，降低硬件门槛并提升交互性；交通仿真评估中需构建适宜内外幅交通组织方案的安全性评价指标。

参考文献：

[1]罗桑,姚金悦,严紫薇,等. 一种基于 BIM 与 VISSIM 微观仿真的双向交通导改模拟方法:202110339138.4[P]. 2021-07-06.
[2]王欣南,黄炎,陈中治,等. 一种基于 BIM 的道路驾驶模拟环境建立方法:202110798420.9[P]. 2022-05-20.
[3]黄颖铭,柯博欣,戴剑敏,等. BIM + 交通仿真在市政交通项目中的应用研究[J]. 武汉交通职业学院学报,2024,26(1):118-124.
[4]邓博,赵红征,沈伯昭,等. 基于 BIM 交通仿真技术的交通疏堵工程设计评价方法研究[J]. 交通工程,2023,23(4):29-34.
[5]姜荣斌,朱星. 基于 BIM 技术的公路工程交通组织设计模拟研究[J]. 江苏科技信息,2021,38(14):41-44.
[6]罗瑶,莫文波,颜紫科. 倾斜摄影测量与 BIM 三维建模集成技术的研究与应用[J]. 测绘地理信息,2020,45(4):40-45,126.
[7]李谦,周鹏光,马天奕. 基于 Unity3D 的立体枢纽交通组织仿真分析[J]. 公路,2024,69(7):26-30.
[8]江佳鑫,潘健军,陈越文,等. BIM + GIS 技术在高速公路市政化改造中的应用[J]. 施工技术(中英文),2024,53(21):33-36.
[9]李嘉,龚瑞铭,李洁,等. 基于交通仿真的高速公路桥隧结合段交通安全评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2023,43(4):82-94.
[10]朱向飞. 基于 OpenGL 的客运枢纽三维仿真子系统的设计与实现[D]. 长春:吉林大学,2018.

(上接第 18 页)

参考文献：

[1]程雪松,张雨明,张天奇,等. 软土小直径顶管隧道施工对周边环境影响研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(S2):19-24.
[2]张奎. 邻近既有建筑深基坑开挖变形特性及支护结构优化分析[J/OL]. 施工技术(中英文),(2026-03-25)[2026-03-30]. https://link.cnki.net/urlid/10.1768.tu.20260325.1613.024.
[3]黄建华,邓宇辉,柯静雯. 滨海软土深基坑开挖对近邻地铁车站与盾构隧道影响特性研究[J/OL]. 铁道标准设计,(2025-06-13)[2026-03-30]. https://doi.org/10.13238/j.issn.1004 - 2954.202506130005.
[4]宋许根,程雪松,衣凡,等. 工程桩对软土地区窄基坑稳定性的影响研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(S2):74-80.
[5]梁艳春. 富水软土地基深基坑开挖对周边建筑的影响及沉降监测分析[J]. 科学技术创新,2025(21):174-178.
[6]王伟,邓松峰. 深厚软土区邻近地铁深基坑工程关键技术研究[J]. 江苏建筑,2024(5):120-126.
[7]杨潇,刘波. 软土地层深基坑施工对邻近地铁车站区间的影响分析[J]. 工程技术研究,2024,9(18):12-14.
[8]王俊,邱豪磊,宋林丰,等. 软土地区邻近地下结构深基坑开挖环境效应分析[J]. 工程质量,2025,43(9):68-74.
[9]朱剑钦. 福州软土深基坑工程全过程变形特性与控制研究[J]. 福建建筑,2025(9):51-58.
[10]武玉山,畅建伟,马玉龙,等. 佛山软土地区深基坑开挖变形特性研究[J]. 施工技术(中英文),2025,54(11):53-57.
[11]姚志雄,方佳斌,蔡亦来,等. 滨海软土地层邻近高铁桥的深基坑支护结构力学性状及对环境的影响[J]. 城市轨道交通研究,2025,28(8):65-71.
[12]张治国,万启蒙,李骏杰,等. 流变软土地层深基坑开挖对既有车站影响与加固效应分析:以上海金桥地铁上盖项目为例[J]. 隧道建设(中英文),2025,45(S2):97-106.
[13]马建峰. 富水软土地层轨道交通车站深基坑工程施工影响分析[J]. 隧道与轨道交通,2025(4):11-15,73.
[14]林文龙. 软土地区地下五层超深地铁车站基坑变形特性研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(S2):169-175.
[15]罗玉强. 复杂地基软土深基坑岩土工程支护设计技术探究[J]. 现代工程科技,2024,3(23):69-72.