

列车动荷载作用下软土深基坑结构变形时空效应数值模拟

黄英喷

(广西有色勘察设计院有限公司, 南宁 530031)

摘要: 针对软土深基坑结构在列车动荷载作用下的结构变形问题进行研究分析。基于实际的工程项目, 采集并勘测相关数据, 在 FLAC 3D 软件中构建软土深基坑结构的数值模型。构建列车动荷载的微分方程, 结合达朗伯原理在数值模型中模拟列车动荷载作用, 以此模拟分析软土深基坑结构的变形状态。结果表明: 在列车动荷载作用下, 软土深基坑结构的变形主要分为过渡松弛阶段、稳定松弛阶段以及加快松弛阶段, 在不同的阶段中, 软土深基坑结构呈现出不同规律的变形状态。在软土深基坑结构的实际工程应用中, 应在加快松弛阶段之前对深基坑结果进行维护, 以确保其安全性。该研究能够在实际工程中设计更加合理的软土深基坑施工参数方案, 可为类似软土深基坑施工和设计提供参考依据, 为软土深基坑的施工与安全管控提供理论与技术支持。

关键词: 软土深基坑; 结构变形; 列车动荷载作用; 时空效应; 数值模拟; 深基坑结构

中图分类号: TU753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0107-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.017

Numerical Simulation of Spatiotemporal Effects of Deformation in Soft Soil Deep Foundation Pit Structures under Dynamic Loads of Trains Passing Through Tracks

HUANG Yingpen

(Guangxi Nonferrous Survey & Design Institute Co., Ltd., Nanning 530031, China)

Abstract: Research and analysis are conducted on the structural deformation of soft soil deep foundation pit structures under the action of train dynamic loads. Based on actual engineering projects, collect and survey relevant data, and construct a numerical model of soft soil deep excavation structure in FLAC 3D software. Construct differential equations for train dynamic loads and simulate the action of train dynamic loads in numerical models based on the d'Alembert principle, in order to simulate and analyze the deformation state of soft soil deep foundation pit structures. The results show that under the action of train dynamic loads, the deformation of soft soil deep foundation pit structures is mainly divided into transitional relaxation stage, stable relaxation stage, and accelerated relaxation stage. In different stages, the soft soil deep foundation pit structures exhibit different deformation states with different laws. In the practical engineering application of soft soil deep excavation structures, maintenance of the deep excavation results should be carried out before accelerating the relaxation stage to ensure its safety. This research enables the design of more rational construction parameter schemes for deep excavations in soft soil in practical engineering projects. It provides a reference basis for similar deep excavation construction and design in soft soil, offering theoretical and technical support for the construction and safety management of deep excavations in soft soil.

Key words: soft soil deep foundation pit; structural deformation; train dynamic load effect; space-time effect; numerical simulation; deep foundation pit structure

岩土力学

0 引言

在地铁工程等建设中,深基坑开挖是控制施工区土体位移与沉降、降低对周边道路及地下管线的关键环节^[1]。由于列车与轨道之间的相互作用,会通过轨道结构传递至深基坑表面,使得深基坑受到了较大的列车动荷载作用力^[2]。当软土深基坑结构发生变形后,易引发周围土体位移与沉降,导致地下管线开裂等问题,甚至加剧深基坑更为明显的结构变形问题^[3]。为了确保深基坑支护结构能够有效地支撑周边土体、预防塌方风险,开展软土深基坑结构变形研究具有重要意义。

在软土深基坑结构变形研究方面,诸多学者已取得一系列研究成果。赵建武等^[4]针对地铁深基坑工程,构建数值模型分析连续墙厚度等四种深基坑结构因素对基坑变形沉降的影响;郁志伟等^[5]针对上海杨浦区黄浦江畔的典型软土地层为背景,深入探讨了不同厚度地下连续墙的变形规律,发现其变形模式均为“内凸型”,且 800 mm 厚墙体变形较 1 000 mm 更为显著,墙体顶部水平位移则随基坑开挖深度加深而增大,但规律性不明显;赵鹏飞等^[6]基于 FLAC 3D 软件模拟基坑开挖,结合监测数据解析了支护结构的变形特性,并提出了控制软土基坑变形的有效策略,说明了被动区加固能显著减少基坑水平位移、坑内隆起及坑外地表沉降;乔丽平等^[7]以深圳填海地区地铁安保区内某超大直径圆环撑软土深基坑为例,通过理论计算与三维有限元分析,揭示了支护结构水平位移随基坑开挖深度增加而增大,且变化趋势一致但变化幅度存在差异;朱殷航等^[8]针对深矩形基坑,采用地下连续墙和钢筋混凝土进行支护。通过 Plaxis 3D 构建基坑有限元模型,结合 HS-Small 本构模型对矩形软土地层基坑支护结构受力变形情况进行了分析;李芳宝等^[9]基于监测数据,分析深基坑围护结构在不同工况下的变形特性;裴学军等^[10]通过有限元模型,探讨了复杂环境下深大基坑开挖变形的时空效应及规律;张坤勇等^[11]针对软土地区深基坑开挖工程,考虑开挖时空效应影响,构建有限元模型分析该工程开挖过程中支护结构的变形特性;周东波等^[12]分析了基坑开挖深度增加条件下沿海软土地区地铁深基坑开挖支

护地连墙结构的侧向变形特征规律;马昕等^[13]针对软土地区超深圆形基坑,结合 Biot 固结理论和监测数据构建水土双向耦合有限元模型,分析基坑受力后的变形特性;方能榕等^[14]基于有限元模型分析了预留土台尺寸对深厚软土地区基坑开挖后围护结构变形的影响;张雅荻^[15]研究了软土深基坑围护结构受力变形监测方法。通过设计地下水位监测点,分析基坑开挖过程中的受力和变形特性。

为进一步探究列车动荷载作用对软土深基坑结构变形的影响,通过建立软土深基坑模型,研究在列车动荷载作用下,对软土深基坑结构变形的时空分布规律进行分析,观察列车动荷载作用对软土深基坑结构变形影响。研究结果有助于相关工作人员更深入地掌握软土深基坑的结构变形规律,从而能够在实际工程中设计更为合理的软土深基坑施工参数,可为类似软土深基坑施工和设计提供参考依据。

1 工程概况

1.1 软土深基坑工程项目

依托于某地铁隧道挖掘工程。该工程变形控制保护等级为一级,工程监测等级为二级。基于工程所处环境,该工程在主体施工区域采用明挖法施工,在交叉段则采用盖挖法施工。工程项目主体施工结构呈东西走向的矩形框架结构,包含三层高度的地下施工区域,主要施工参数见表 1。

表 1 工程施工参数

Table 1 Engineering construction parameters

| 施工段 | 施工标准 | 顶板覆土 | 底板埋深 | 基坑深度 | 冠梁尺寸 |
|------|-------|------|--------|--------|---------------|
| 总长/m | 段宽度/m | 厚度/m | /m | /m | /mm |
| 285 | 21.5 | 3.25 | 17.249 | 17.496 | 1 000 × 1 100 |

深基坑加固深度是坑下 4 m。深基坑的支撑材料是冠梁 c35、腰梁 c30、钢支撑 $\phi 609$ mm、主筋是 HRB400。在基坑范围内支撑,支撑长度为 19.1 m。混凝土支撑间距是 9 m,钢支撑间距是 3 m。混凝土撑有 2 个,钢支撑有 1 个,连续墙的厚度是 800 mm,埋深约 32 m,宽度是 6 m,墙体材料使用 c35 钢筋。

1.2 地质条件概况

所依托工程项目的深基坑施工段主要包含流水地貌、黄土地貌两种类型,均为软土地形。工程施工范围的表面整体较为平坦,呈现自西向东略微倾斜态势。勘测深基坑开挖范围地质条件,得到的结

果见表 2。

表 2 深基坑结构范围地质条件
Table 2 Geological conditions within the scope of deep foundation pit structure

| 地质层 | 土质特性 | 层底标高 /m | 层底深度 /m | 平均层厚/m |
|------|-------|-----------------|---------------|--------|
| 杂填土 | 稍湿、稍密 | 106.78 ~ 112.55 | 0.82 ~ 3.21 | 1.55 |
| 粉土 | 稍湿、中密 | 103.57 ~ 106.20 | 3.20 ~ 8.00 | 4.31 |
| 粉砂 | 稍湿、密实 | 100.41 ~ 102.08 | 6.70 ~ 10.10 | 2.81 |
| 粉土 | 稍湿、中密 | 97.12 ~ 103.45 | 9.70 ~ 14.50 | 3.17 |
| 粉土 | 稍湿、密实 | 89.37 ~ 93.62 | 16.50 ~ 21.50 | 6.12 |
| 粉土 | 中湿、密实 | 56.65 ~ 89.57 | 21.20 ~ 25.50 | 4.78 |
| 粉质黏土 | 稍湿、中密 | 75.56 ~ 88.76 | 22.00 ~ 33.60 | 6.24 |
| 粉土 | 稍湿、中密 | 71.87 ~ 79.42 | 32.60 ~ 37.80 | 5.56 |
| 粉质黏土 | 稍湿、中密 | 68.91 ~ 74.58 | 37.20 ~ 40.60 | 3.67 |
| 粉质黏土 | 稍湿、中密 | 66.87 ~ 70.78 | 39.80 ~ 42.70 | 2.75 |
| 粉土 | 中湿、密实 | 72.34 ~ 85.16 | 13.80 ~ 28.40 | 3.48 |

1.3 水文条件概况

该工程附近 2.6 km 处含有一条地下河，对施工范围土质湿度造成了一定的影响。根据该地区历史水位监测数据显示，其地下水位埋深约为 27.87 m，水位年变幅约为 3.58 m，五年内监测的最大水位变幅为 3.94 m。

2 软土深基坑结构变形时空效应数值模拟

2.1 软土深基坑结构数值模型

以基坑开挖过程中对周边区域产生影响范围为边界，建立软土深基坑结构数值模型。在基坑边缘的 2 倍基坑深度范围外，基坑开挖影响很小，因此可以忽略不计，将数值模型计算域设定为软土深基坑深度的 2 倍，以此构建考虑结构位移边界影响的软土深基坑结构数值模型。

选用 FLAC 3D 软件，构建软土深基坑结构数值模型，如图 1 所示。

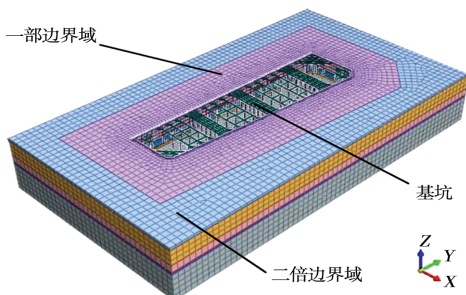


图 1 软土深基坑结构数值模型

Fig. 1 Numerical model of deep foundation pit structure of soft soil

为构建软土深基坑结构数值模型设置边界条件。基于土体自身的复杂材料特性，基于摩尔库伦强度准则以及屈服准则来定义模型的边界条件。利用深基坑土体的黏聚力特性分析其剪切强度，相应的表达式如式 (1) 所示。

$$\tau_n = C \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \sigma_n \sin \varphi \quad (1)$$

式中： τ_n 为模型在法向量分量上的剪切强度； C 为深基坑土体的黏聚力； σ_n 为在法向量分量上的正应力； σ_1 和 σ_2 分别为在水平面两个方向上的土体颗粒正应力； φ 为模型土体结构之间的内摩擦角。

根据勘测的土体数据，已知各地质层的 C 值的取值分别为 20、27、35 kPa。结合屈服准则定义模型的法向刚度，具体的计算方法如公式 (2) 所示。

$$H = \max \left(\frac{K + 4G}{\Delta n_{\min}} \right)^{\tau_n} \quad (2)$$

式中： H 为模型法向刚度； Δn_{\min} 为四面体单元的最小法向量分量宽度； G 为土体的切变模量； K 为体积模量。

依托软土深基坑的实际施工方案，在建立的数值模型中添加各结构的模拟参数，见表 3。

表 3 软土深基坑结构参数

Table 3 Soft soil deep foundation pit structural parameters

| 结构 | 项目 | 模型参数 |
|---------|---------------------|-------------|
| 壳单元围护结构 | 弹性模量/GPa | 地下连续墙：30 |
| | | 钢管支撑：30 |
| | 泊松比 | 钢筋混凝土支撑：200 |
| 梁结构 | 横截面积/m ² | 地下连续墙：0.2 |
| | | 钢管支撑：0.2 |
| | 弹性模量/GPa | 钢筋混凝土支撑：0.2 |
| 接触面 | 法向刚度/(GPa/m) | 钢支撑：0.3 |
| | | 混凝土支撑：0.9 |
| | 切向刚度/(GPa/m) | 钢支撑：200 |
| 土质层 | 惯性矩/m ⁴ | 混凝土支撑：30 |
| | | 钢支撑：0.0013 |
| | 法向刚度/(GPa/m) | 混凝土支撑：0.075 |
| 土质层 | 抗拉强度/MPa | 0.1 |
| | | 0.1 |
| | 变形模量/MPa | 0 |
| 土质层 | 泊松比 | 15 ~ 35 |
| | | 0.30 ~ 0.36 |

2.2 列车动荷载作用模拟

将列车动荷载作用简化为剔除了车厢碰撞等非线性因素的运动系统。基于此，建立列车动荷载的微分方程，由于列车质量与软土深基坑结构的整体

岩土力学

质量相差较大,则列车对深基坑作用力可以视为重力与惯性力的差值:

$$f(t) = (m + m_0)g + (m + m_0)a \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为时间 t 下的列车作用力; g 为重力加速度; a 为列车行驶的竖向加速度。

根据达朗伯原理,将列车动荷载作用转换为简谐荷载的形式,以便在软土深基坑结构的数值模型中施加。通过模拟循环加载,施加正弦波荷载,以逐步分析软土深基坑结构在时空效应下的变形状态。

3 结构变形时空效应分析

结合施工工况,分析软土深基坑结构在不同列车行驶时间下的结构变形情况。

通过列车动力荷载模拟,选取软土深基坑结构模型应力变化的关键节点。以深基坑边界为例,得出相应时间点下应力云图如图2所示。

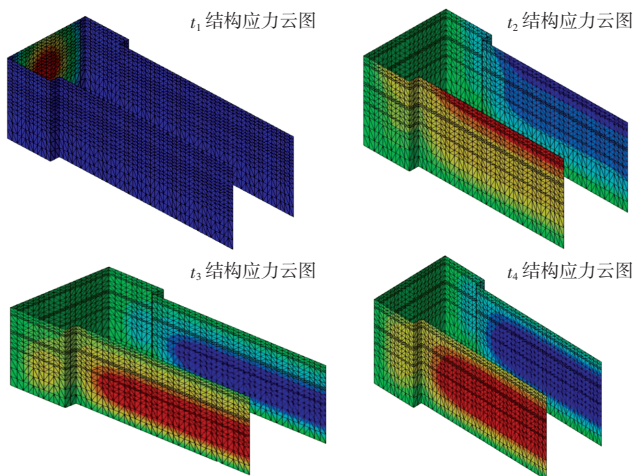


图2 软土深基坑结构变形关键点应力云图

Fig. 2 Stress cloud map of key points of structural deformation in deep soft soil excavations

由图2可知,在列车动荷载作用下,软土深基坑结构受到荷载作用应力值变化的关键节点主要有四个时间点。由此可以分析得知深基坑周围土体的应力松弛特性,如图3所示。

基于列车动荷载作用力的模拟分析,软土深基坑结构的变形可以划分为三个主要阶段。在前两个时间点之间,深基坑结构的变形为过渡松弛阶段。这一阶段,深基坑结构周围的软土在列车动荷载作用下,土压力增加,这一过程伴随着深基坑结构在内部方向上位移,在列车重力挤压作用下,结构的

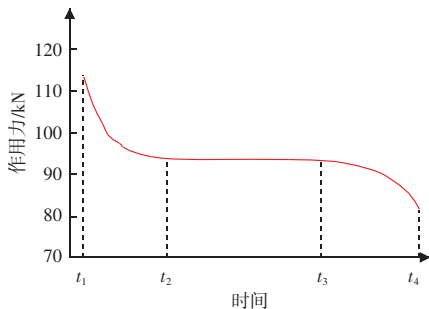


图3 软土深基坑土体松弛特性

Fig. 3 Relaxation characteristics of soil in deep soft soil excavations

变形程度尚不明显。在第二和第三个时间点之间,深基坑结构变形为稳定松弛阶段。这一阶段,其变形程度与时间变化呈正比关系,空间尺度上的变形频率较为稳定。在后两个时间点之间,深基坑结构的变形为加快松弛阶段。这一阶段,深基坑结构周围的土体承受了长时间列车动荷载作用,积累的应力较多,软土的支撑力不足,结构变形的程度急速上升,深基坑结果濒临坍塌。

4 结论

依托某地铁隧道挖掘工程,采用数值模拟分析方法,结合时空效应分析了在列车动荷载作用下,软土深基坑结构变形规律,得出如下结论:

(1) 研究发现,其变形过程可依据四个时间点划分为三个阶段,软土深基坑结构变形的第一阶段,深基坑结构变形程度与时间的变化呈现正比关系,变形频率较为稳定。

(2) 第二和第三个时间点之间,深基坑结构变形为稳定松弛阶段。

(3) 在第三阶段,深基坑结构变形进入加快松弛阶段。

在后续的研究工作中,还需采集更多的软土深基坑工程数据,对开挖过程的软土水含量变化进行模拟分析,从而进一步提高深基坑结构变形分析结果的有效性。

参 考 文 献

- [1] 陈浩,杨双锁,师雯琦,等. 列车动荷载扰动对近接基坑稳定性影响分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42 (5): 168 - 174.
- [2] 吴波,夏倩,刘聪,等. 富水软土深基坑多元信息模糊可拓风险评估模型及应用 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24 (1): 1 - 10.

- [3] 赵意晋, 刘恒, 蔡晓慧, 等. 深厚软土地层中异形地铁车站深基坑开挖三维数值模拟分析 [J]. 南京工业大学学报 (自然科学版), 2023, 45 (5): 563-572.
- [4] 赵建武, 杨昊, 杨美霞, 等. 软土地区明挖车站深基坑变形影响因素数值模拟分析与优化研究 [J]. 公路, 2023, 68 (11): 349-356.
- [5] 郁志伟, 张克胜, 宋卓华, 等. 软土地层深基坑围护结构变形分析及模拟研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊2): 2373-2377.
- [6] 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 (增刊1): 1087-1094.
- [7] 乔丽平, 李韵迪, 杨超. 填海区临地铁超大直径圆环撑基坑变形控制及监测分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (7): 2838-2847.
- [8] 朱殷航, 徐中华, 王卫东, 等. 软土地层超深基坑支护结构变形特性三维分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (增刊2): 767-777.
- [9] 李芳宝, 龙喜安. 佛山地区深厚软土地层地铁深基坑支护结构变形特性与适用性分析 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (增刊2): 294-304.
- [10] 裴学军, 帅彬, 王洪涛, 等. 复杂环境下深大基坑开挖变形与数值模拟分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊1): 2777-2783.
- [11] 张坤勇, 张梦, 孙斌, 等. 考虑时空效应的软土狭长型深基坑地连墙变形计算方法 [J]. 岩土力学, 2023, 44 (8): 2389-2399.
- [12] 周东波, 梅源, 刘子扬, 等. 东部沿海软土车站深基坑开挖地连墙变形规律 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2024, 43 (12): 41-46.
- [13] 马昕, 孙德安, 刘树佳. 软土地区某超深圆形基坑变形特性及流固耦合分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51 (6): 74-85.
- [14] 方能榕, 李继光, 余国梁, 等. 深厚软土地区预留土台对基坑围护结构变形及稳定性影响分析 [J]. 福建建设科技, 2024 (2): 48-53.
- [15] 张雅荻. 枢纽工程软土深基坑围护结构安全监测方法 [J]. 建筑技术, 2025, 56 (3): 326-329.

(上接第 106 页)

- Mathematical Problems in Engineering, 2021.
- [9] 胡海英, 杨光华, 张玉成, 等. 基于沉降控制的刚性桩复合地基设计方法及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32 (10): 2135-2146.
- [10] 张泉钰. 长短桩复合地基的 ABAQUS 分析及优化思路 [D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- [11] WANG T, GAO W S, LIU J. Study on implementation method for optimization design of pile foundation stiffness to reduce differential settlement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010.
- [12] HU H, JI X, LIANG H. Study on construction schedule optimization of bored pile based on genetic algorithm [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 300 (2): 022020-022020.
- [13] 孔凯歌, 伍晓伟, 王晓, 等. 大直径钻孔灌注桩优化设计研究 [J]. 西部交通科技, 2022, (5): 132-135.
- [14] 何志俊. 基于数值模拟的 h 型抗滑桩优化设计研究 [J]. 山西交通科技, 2020, (4): 8-11.
- [15] 林维康, 张嘉荣. 桩帽连梁式路堤变形与荷载传递规律 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (35): 15247-15257.
- [16] 林乔宇. 厦门花岗岩残积土 HSS 模型参数的研究及工程应用 [D]. 福建: 华侨大学, 2019.
- [17] 刘硕天. 承台对群桩水平承载力影响的数值分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [18] 杨亚新. 基于改进的蚁群算法路径规划方法研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [19] JGJ 79—2012 《建筑地基处理技术规范》[M].