

# 软土深基坑开挖卸载对地下车站桩基的影响分析

陆玉和<sup>1</sup> 朱海星<sup>2</sup> 丁春林<sup>2</sup> 李桂颖<sup>1</sup>

(1. 中国中铁四局集团第四工程有限公司, 242074, 宣城; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海)

**摘要** [目的] 深厚软土地层地下车站深基坑开挖施工过程中, 坑内上覆土体的开挖卸载会对先行施工的坑内超长桩基产生较为明显的影响, 威胁结构稳定和工程安全。为探究大面积深基坑开挖卸载对车站基坑底群桩的影响, 须分析超长桩受力变形规律。[方法] 利用 Midas GTS NX 数值分析软件, 建立某地下车站 S2 东端头井有限元数值计算模型, 进行开挖施工模拟分析。结合该地下车站项目施工现场实际监测数据, 与数值计算结果进行对比, 探讨了基坑开挖对坑底群桩变形影响的规律。[结果及结论] 结果表明, 桩身受拉区随着开挖深度不断增大, 端头井桩基最大拉力、最大压力均大于标准段; 坑底桩基竖向位移量在开挖过程中不断增加, 位移最大的桩出现在距离端头井边缘最远处, 且在开挖后期, 桩基的上浮量增量显著提高, 需要实时监控桩顶竖向位移量, 防止发生工程事故。

**关键词** 市域铁路车站; 深基坑开挖; 桩基; 有限元分析  
**中图分类号** TU473.1:U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.025

## Effect Analysis of Excavation and Unloading of Deep Foundation Pit in Soft Soil Stratum on Pile Foundation of Underground Station

LU Yuhe<sup>1</sup>, ZHU Haixing<sup>2</sup>, DING Chunlin<sup>2</sup>, LI Guiying<sup>1</sup>

(1. The Fourth Engineering Co., Ltd., China Tiesiju Civil Engineering Group, 242074, Xuancheng, China; 2. Road and Traffic Engineering Key Laboratory of Education Ministry, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] In the excavation process of deep foundation pit of underground station in deep soft soil stratum, excavation and unloading of the overlying soil in the pit will obviously impact the previously constructed superlong pile foundation in the pit, threatening the structure stability and engineering safety. In order to explore the effects of large-scale deep foundation pit excavation and unloading on the pile group at the station foundation pit bottom, it is necessary to analyze the deformation law of the superlong pile under pressure. [Method] A numerical analysis software Midas GTS NX is used to establish a finite element numerical calculation model

for the underground station S2 east end well and make the excavation simulation analysis. Based on a comparison of the on-site actual monitored data and the numerical calculation results, the deformation law of the pile group at the pit bottom affected by the foundation pit excavation is discussed. [Result & Conclusion] The results show that the pile area under tension increases with the deepening of excavation, both the maximum tension and the maximum pressure of the end well pile foundation are greater than the standard range. The vertical displacement of the pile foundation at the pit bottom continuously increases in the process of excavation. The largest pile displacement occurs at the farthest distance from the edge of the end well. In the later stage of excavation, as the incremental uplift of the pile foundation increases significantly, the vertical displacement of the pile top needs to be monitored in real time to prevent engineering accidents.

**Key words** suburban railway station; deep foundation pit excavation; pile foundation; finite element analysis

深厚软土地层地下车站设计时考虑到地基承载能力的需要, 往往会在坑底设置超长桩作为车站基础。当车站基坑开挖施工过程中, 在土质较差、加固设计不完善的情况下, 坑内上覆土体的开挖卸载会对先行施工的坑内超长桩基产生较为明显影响, 可能会引起桩顶高达数 cm 的回弹<sup>[1]</sup>, 破坏坑底结构, 在一定程度上威胁结构稳定和工程安全。上海某基坑开挖土体回弹导致坑内工程桩被拉断<sup>[2]</sup>; 厦门某基坑工程发生土体回弹, 开挖至坑底部后发现有 25% 的工程桩发生断裂<sup>[3]</sup>。可见, 在深大基坑施工过程中, 研究基坑开挖对坑底工程桩的影响, 对于保证结构稳定和工程安全至关重要。

目前, 对于基坑开挖对桩基的影响研究主要集中在讨论深基坑开挖对邻近桩基的影响, 对于深基坑开挖对坑底桩基的影响研究较少。其中, 文献[4]就上海软土地区基坑回弹引起桩拉力的问题进行探讨, 根据 ABAQUS 软件得出基坑回弹引起桩拉力的计算结果。文献[5]在考虑桩间土承受附加荷

载与变形下,研究了坑内桩基因基坑开挖而上浮的分析方法。文献[6]基于经典土体压缩回弹理论,建立考虑基坑分层降水开挖的坑底回弹理论模型,并基于有限元分析了分层降水开挖时坑底回弹及桩身轴力分布。文献[7]通过有限差分软件研究软土深基坑开挖条件下考虑坑底蠕变时坑底单桩变形规律。文献[8]以陆家嘴某基坑工程为背景,考虑桩土之间的滑移作用,分析软土地区不同布桩方式对桩顶回弹量等的影响。

上述研究大多数从理论研究和数值计算出发,并未和施工桩顶竖向位移的实际监测情况相结合,且没有考虑深基坑开挖过程中桩顶的动态变化过程。在实际施工过程中,深基坑的开挖为动态过程,随着开挖进行,桩顶上覆土方量变少,土层厚度变小,开挖对桩基的扰动效果增加,因此在深基坑工程设计中考虑开挖过程对坑底工程桩基的影响更有实际意义。本文将结合工程实际,对深厚软土

地区深基坑工程端头井基坑开挖建立数值分析模型,探讨基坑开挖对坑底桩的影响,进一步分析研究坑底桩基在基坑开挖过程中的变形规律,为工程实际施工提供指导。

## 1 工程概况

某地下车站为市域铁路 S1 线、S2 线的换乘站。其中该站 S2 线部分(以下简称“S2 站”)主体结构形式为三层二跨框架结构,采用明挖顺作法施工。拟建工程场地属海积平原区,深厚层软土为本工程的主要特殊岩土,软土地基的强度低,有稳定性差和不均匀沉降及变形大等问题。为保持软土地层中基坑的承载能力且控制变形,在坑底设置桩基础,S2 站基坑及桩基纵断面图如图 1 所示,S2 站东端头井(图 1 的右侧)及附近桩基的具体布置如图 2 所示。由于实例中桩数较多,故本研究仅取图 2 中的 1#—10#桩基作为研究对象。

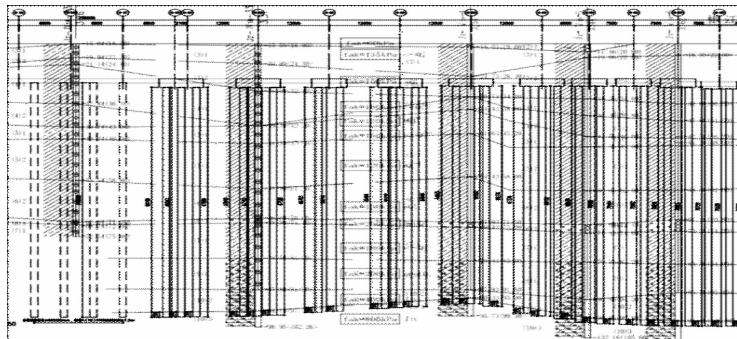


图 1 S2 站基坑及桩基纵断面图

Fig. 1 Longitudinal profile of foundation pit and pile foundation of S2 station

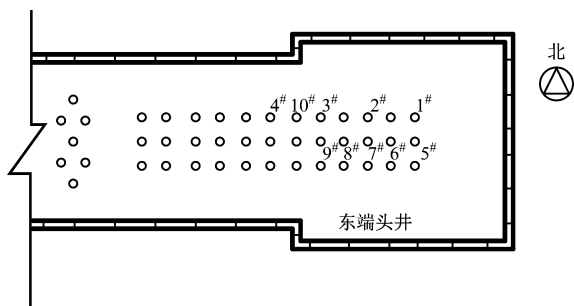


图 2 S2 站基坑东端头井及附近桩基布置图

Fig. 2 Layout of foundation pit east-end head well and nearby foundation piles at S2 station

## 2 有限元模型

### 2.1 计算模型

S2 站东端头井南北走向(y 向)宽度约为 31.9

m,东西走向(x 向)长度约为 32.8 m,z 向深度约为 31.9 m。本文采用 Midas GTS NX 大型有限元数值计算软件建立有限元模型进行计算。为了减小有限元模型中边界约束条件对计算结果产生的不利影响,计算模型的边界范围在各方向上均大于 3 倍的端头井深度。具体模型尺寸为 162 m(x 向)×210 m(y 向)×160 m(z 向)。根据软件功能,将各土层土体视为均质、连续、各向同性的弹塑性介质,岩土体破坏准则符合摩尔-库伦破坏模型。边界条件除了施工相关的表面外,4 个侧面仅设法向约束,底面采用固定端约束。

### 2.2 桩基及围护结构参数

模型中工程桩按实际工程布置:有 43 根工程桩,桩径为 1.2 m,混凝土等级为 C35,桩间距为 3.6 m 或 3.4 m(标准段最西处除外),桩长 70 m;桩单

元采用一维梁单元模拟;混凝土材料弹性模量取  $3.15 \times 10^4$  MPa。考虑到桩与桩周土体之间的相对位移,模型中通过定义桩界面单元来模拟桩与土之间的接触关系。地下连续墙及工程桩相关参数根据勘察报告取值,地下连续墙厚 1.2 m,深 71.0 m,混凝土等级为 C35,在数值计算模型中使用三维板单元进行模拟,混凝土材料弹性模量取  $3.15 \times 10^4$  MPa。支撑围护结构采用一维梁单元来模拟混凝土支撑和钢支撑。根据 S2 站东端头井及标准段部分建立的计算模型如图 3 所示。

根据勘测设计报告,该工程场地土层物理力学参数取值如表 1 所示。

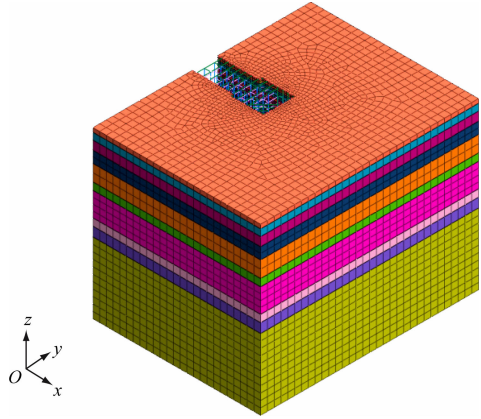


图 3 S2 站东端头井数值计算模型  
Fig. 3 Numerical calculation model of east-end head well at S2 station

表 1 土层物理力学参数表  
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layer

层序	压缩模量 $E/\text{MPa}$	重度 $\gamma_0/(\text{kN}/\text{m}^3)$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c/(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
①黏土	3.24	18.40	0.35	16.70	8.72
②2 淤泥	1.43	16.30	0.40	2.28	2.15
②3 淤泥质黏土	3.49	18.80	0.40	14.32	7.76
③黏土	5.47	19.20	0.35	28.58	12.86
④黏土	5.30	19.50	0.35	29.55	11.88
⑤黏土	6.04	19.70	0.30	32.65	12.59
⑥黏土	5.79	19.70	0.30	35.00	15.40
⑦黏土	6.80	20.00	0.25	34.27	14.16
⑨含砾粉质黏土	6.08	20.10	0.25	33.00	14.20
⑩2 强风化凝灰岩	50.00	24.00	0.20	50.00	50.00

2.3 施工步骤模拟

根据施工过程中分层开挖的实际情况,将开挖过程分成 6 个施工步骤。在计算模型中,按这 6 个施工步骤模拟随挖随撑的施工情况。施工步骤内容如表 2 所示。

表 2 施工步骤内容  
Tab. 2 Working steps

施工步骤	内容
步骤 1	施加第 1 道支撑,开挖至第 2 道支撑底
步骤 2	施加第 2 道支撑,开挖至第 3 道支撑底
步骤 3	施加第 3 道支撑,开挖至第 4 道支撑底
步骤 4	施加第 4 道支撑,开挖至第 5 道支撑底
步骤 5	施加第 5 道支撑,开挖至第 6 道支撑底
步骤 6	施加第 6 道支撑,开挖至端头井坑底

3 结果分析

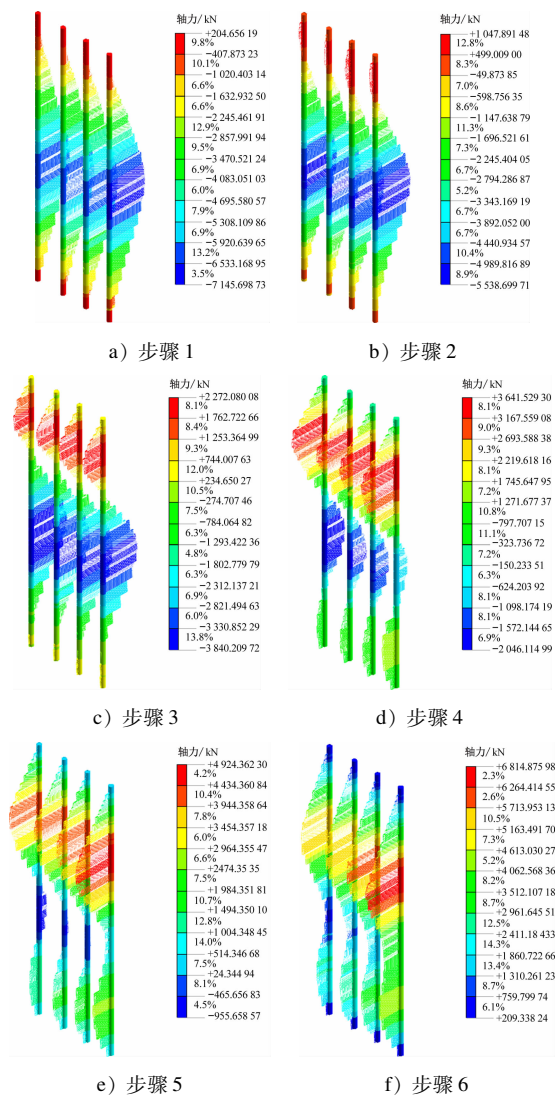
3.1 计算结果分析

根据数值计算模型运算,图 4 为各施工步骤完成时的桩身轴力分布图。其中,1#桩位于端头井最接近中心处。

在步骤 1 中,因桩顶上部土体和泥浆荷载,超长桩整体处于受压状态,从桩顶到桩底,轴力分布呈先增大后减小的趋势,桩身中部达到最大值。随着开挖进行,超长桩桩顶部分先出现受拉情况,桩身压力逐渐减小;之后,每根桩各位置的桩身拉力均在增加;当上层土体开挖到桩顶(步骤 6)时,桩体全部处于受拉状态,桩身最大拉力达到 6 815 kN。

随着开挖进展,桩顶最大竖向位移的变化情况如图 5 所示。由图 5 可知:随着开挖的不断进行,桩





注:从左至右分别为 4<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、1<sup>#</sup>桩。

图 4 各施工步骤完成时的桩身轴力分布云图

Fig. 4 Cloud map of axial force distribution of pile shaft when construction steps completed

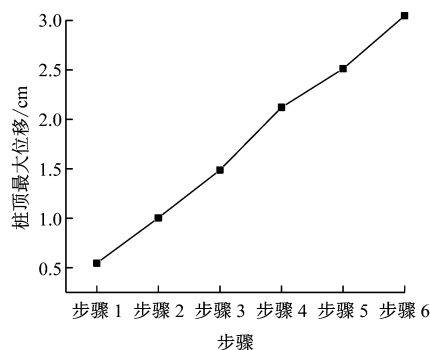


图 5 桩顶最大竖向位移变化情况

Fig. 5 Maximum vertical displacement changes of the pile top

顶最大竖向位移不断增大;6 个开挖施工步骤的桩顶最大竖向位移分别为 0.546 cm、1.004 cm、1.488

cm、2.121 cm、2.511 cm、3.048 cm。由计算结果可知,桩顶竖向位移最大的桩为 1<sup>#</sup>桩,处于端头井中心位置的 5<sup>#</sup>桩桩顶竖向位移略小一些。

进一步分析基坑开挖引起的 5<sup>#</sup>—9<sup>#</sup>桩桩基上浮情况。9<sup>#</sup>桩至 5<sup>#</sup>桩距离端头井西边界的距离分别为 3.6 m、7.0 m、10.6 m、14.0 m、17.6 m,与端头井的距离越来越远。随着开挖进行,不同施工步骤完成时的 5<sup>#</sup>—9<sup>#</sup>桩竖向变形情况如图 6 所示。由图 6 可见:桩顶竖向位移随着开挖深度的加大而不断变大;随着距离端头井边缘越远,桩顶竖向位移变大的幅度也越大;开挖至坑底时(步骤 6),上升趋势最为明显。

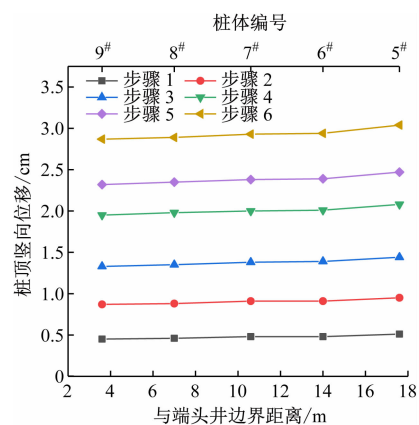


图 6 不同施工步骤完成时的 5<sup>#</sup>—9<sup>#</sup>桩桩顶竖向位移

Fig. 6 Vertical displacement of the tops of Pile 5—Pile 9 when construction steps completed

### 3.2 计算结果与测试结果对比

在深基坑开挖过程中,随着开挖的进行,桩顶竖向位移不断增加。本文结合现场实际情况,测量了 10<sup>#</sup>桩从步骤 4 到步骤 6 过程中桩顶竖向位移的变化量,10<sup>#</sup>桩在六次开挖中,桩顶的竖向位移分别为:0.5 cm、0.94 cm、1.42 cm、2.02 cm、2.38 cm、2.91 cm。将 10<sup>#</sup>桩步骤 4 的初始竖向标高设定为和实测标高相同(均取 0),随着开挖的进行,桩顶竖向位移实测值和计算值的对比图如图 7 所示。2020 年 10 月 27 日开挖到坑底时(步骤 6),9<sup>#</sup>桩竖向位移实测值为 1.45 cm,计算值为 1.49 cm,且实测值和计算值的位移变化过程吻合。其中,由于开挖卸载上浮过程是缓慢的,故在完成步骤 4(2020 年 9 月 1 日)和步骤 5(2020 年 10 月 13 日)时,桩顶位移实测值小于计算值;在完成步骤 6 时,桩顶以上覆土厚度为零,故最终上浮值与计算值十分接近。这说明计算结果具有实际参考意义。

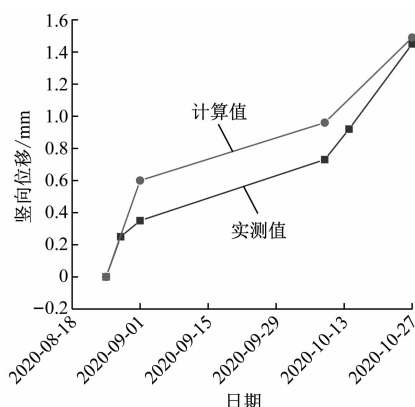


图7 桩顶竖向位移的实测值及计算值

Fig. 7 Measured and calculated values of the pile top vertical displacement

## 4 结语

本文利用数值计算软件对实际工程进行模拟分析,对深厚软土地层深大基坑开挖引起的桩顶位移进行了分析,得到的结果对工程实际施工有一定的参考价值。根据工程实际建立数值计算模型,计算结果可得到以下结论:

1) 在基坑开挖时,桩顶首先出现受拉区域,开挖过程中,桩体不断受拉,拉力逐渐增大,最终桩体全部受拉。

2) 基坑中不同位置处的桩顶竖向位移是有差异的,随着桩基距离端头井边界的距离增大,桩顶的竖向位移也会变大,所以在实际施工过程中,需要注意对端头井中间部分桩的位移控制,防止桩顶竖向位移过大对工程结构稳定性和安全性造成影响。

3) 随着开挖深度的不断增加,桩顶竖向位移也在不断增加,因此,在深大基坑开挖过程中,建议要实时监测桩顶的位移情况,以便采取必要的控制措施。

## 参考文献

[1] 秦帅. 超深基坑开挖对坑底工程桩受力及位移影响的数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2013.  
QIN Shuai. Numerical analysis of the influence of ultra-deep foundation pit excavation on the stress and displacement of engineering piles at the bottom of the pit[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.

[2] 朱火根, 孙加平. 上海地区深基坑开挖坑底土体回弹对工程桩的影响[J]. 岩土工程界, 2005(3): 43.  
ZHU Huogen, SUN Jiaping. Influence of soil rebound at the bottom of deep foundation pit excavation in Shanghai on engineering piles[J]. Mineral Exploration, 2005(3): 43.

[3] 陈孝贤. 深基坑开挖坑底土体隆起对工程桩影响的探讨[J]. 福建建设科技, 2006(3): 15.  
CHEN Xiaoxian. The discussion of pile risk for bottom soil resilience with deep foundation pit excavation[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2006(3): 15.

[4] 巢斯, 王磊, 雷小虎, 等. 上海软土地区深基坑回弹引起桩拉力的探讨[J]. 结构工程师, 2009, 25(5): 88.  
CHAO Si, WANG Lei, LEI Xiaohu, et al. Discussion on tensile force of piles caused by subsoil rebound in soft soil area[J]. Structural Engineers, 2009, 25(5): 88.

[5] 楼晓明, 李德宁, 杨敏. 上海地区基坑底部粉质黏土回弹变形参数分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 535.  
LOU Xiaoming, LI Dening, YANG Min. Statistical analysis for rebound deformation parameters of silty clay at bottom of deep excavation in Shanghai[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(4): 535.

[6] 徐震, 周维祥, 曾盛. 分层降水开挖对超大平面深基坑坑底回弹及桩基的影响[J]. 特种结构, 2019, 36(6): 78.  
XU Zhen, ZHOU Weixiang, ZENG Sheng. Influence of layered dewatering and excavation on pile foundation and base rebound in a super-large deep foundation pit[J]. Special Structures, 2019, 36(6): 78.

[7] 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.  
WU Bo, PENG Yiyong, MENG Guowang, et al. Analysis on time-space effect of excavation construction of adjacent deep foundation pit in Ningbo soft soil area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 82.

[8] 陈明, 李镜培. 软土地区开挖过程对立柱桩的影响分析[J]. 路基工程, 2013(4): 85.  
CHEN Ming, LI Jingpei. Analysis on influence of excavation process in soft soil area on erect column piles[J]. Subgrade Engineering, 2013(4): 85.

· 收稿日期:2021-12-10 修回日期:2022-04-05 出版日期:2024-06-10  
Received:2021-12-10 Revised:2022-04-05 Published:2024-06-10  
· 第一作者:陆玉和,高级工程师,270794076@qq.com  
通信作者:朱海星,硕士研究生,1423624006@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license