

DOI: 10.11779/CJGE2021S2003

# 工程桩对基坑回弹变形影响的数值模拟分析

张翔<sup>1, 2</sup>, 刘松玉<sup>\*1, 2</sup>, 吴恺<sup>1, 2</sup>, 蔡国军<sup>1, 2</sup>, 鲁泰山<sup>1, 2</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏南京 211189; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏南京 211189)

**摘要:** 基坑开挖过程中的卸荷作用, 会导致基坑坑底产生回弹变形, 而工程桩的存在对基坑回弹变形的影响不可忽视。利用有限元软件 PLAXIS 3D, 以某长大隧道工程为依托, 通过模拟不同工况的计算, 研究坑内工程桩对基坑回弹变形的影响规律。结果表明, 坑底工程桩的桩长、桩径、桩刚度在一定范围内对基坑回弹变形有着非常显著的影响, 而超过一定范围后影响并不明显, 因此合理选取工程桩参数可以实现对基坑回弹变形的有效控制。

**关键词:** 基坑开挖; 工程桩; 回弹变形; 数值模拟

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0011-04

作者简介: 张翔(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事地下空间工程研究。E-mail: seu-zx@seu.edu.cn。

## Numerical analysis of influences of engineering piles on rebound deformation of foundation pit

ZHANG Xiang<sup>1, 2</sup>, LIU Song-yu<sup>1, 2</sup>, WU Kai<sup>1, 2</sup>, CAI Guo-jun<sup>1, 2</sup>, LU Tai-shan<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground, Engineering and Environmental Safety, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** The unloading effect during the excavation process of a foundation pit will cause the rebound deformation of its bottom, and the influences of the existence of engineering piles on the rebound deformation of the foundation pit cannot be ignored. Based on a long and large tunnel project, by using the finite element software PLAXIS 3D and simulating different working conditions, the influences of engineering piles in the pit on the rebound deformation of the foundation pit are studied. The results show that the pile length, pile diameter, and pile stiffness of the engineering piles have significant influences on the rebound deformation of the foundation pit within a certain range, but the influences are not obvious after a certain range. Therefore, reasonable selection of parameters of the engineering piles can achieve effective control of the rebound deformation of the foundation pit.

**Key words:** excavation of foundation pit; engineering pile; rebound deformation; numerical simulation

## 0 引言

随着城市建设的快速发展和建筑技术的不断进步, 城市地下空间得到大规模开发和利用, 超深超大基坑工程不断涌现。近年来, 基坑开挖面积在  $10 \times 10^4$  m<sup>2</sup> 以上, 开挖深度达 40 m 以上的工程项目越来越多。例如, 上海地铁 4 号线修复工程深基坑开挖深度接近 41 m, 上海世博地下变电站基坑开挖深度接近 34 m, 天津的高层建筑基坑最大平面尺寸已达 548 m × 187 m。同时, 基坑工程中也出现了一些亟待解决的问题, 坑底土体回弹问题就是其中之一<sup>[1-4]</sup>。基坑开挖产生坑底回弹, 同时周边围护结构变形, 也会造成基底的隆起, 回弹再压缩变形往往是建(构)筑物沉降变形的主要组成部分。

已有学者对基坑回弹变形的特点及其对坑内桩基承载力的影响进行了研究。Iwasaki 等<sup>[5]</sup>最早认为坑底

土体竖向回弹会影响坑底桩基, 认为土体回弹会对桩产生向上的侧摩阻力从而导致桩身上拔。对于基坑开挖与桩基的相互作用, Finno 等<sup>[6]</sup>利用平面有限元对一基坑开挖引起临近桩基破坏的实例进行了分析。刘畅等<sup>[7]</sup>采用有限元数值模拟分析结合现场实测数据, 研究了采用逆作法施工的基坑回弹变形问题, 分析了工程桩、支护结构、楼板对坑底回弹变形的影响。查甫生等<sup>[8]</sup>通过有限元软件 ABAQUS, 以坑底无桩和坑底群桩两种基坑为研究对象, 对比分析了有桩、无桩情况下, 深基坑开挖卸载的变形特性, 得出了工程桩可以使基坑周围沉降、基坑中心隆起、围护结构向坑内位移这几种变形明显减小。曹力桥<sup>[9]</sup>利用 ABAQUS 软件分析了存在工程桩和不存在工程桩基坑开挖和降水

基金项目: 江苏省交通工程建设局科技项目 (CX-2019GC02)

收稿日期: 2021-08-15

\*通信作者 (E-mail: liusy@seu.edu.cn)

下的三维模型, 通过对对比分析了基坑开挖降水过程中基坑隆起的基本规律, 得出工程降水对深基坑土体的压密作用及工程桩对坑底变形有明显的抑制作用。冯虎等<sup>[10]</sup>利用FLAC数值模拟软件研究了坑内工程桩对软土超深基坑抗隆起稳定的影响规律以及作用机理, 结果表明, 墙趾土层特性、地连墙插入深度、基坑宽度和潜在滑裂面之内的工程桩对基坑抗隆起稳定有着非常显著的影响。

本文结合江苏某隧道明挖基坑工程, 利用PLAXIS 3D软件, 采用小应变土体硬化(HSS)模型作为土层的本构模型, 建立了太湖隧道第二仓基坑的1/4模型, 应用该模型, 分析研究了坑底工程桩的桩长、桩径、桩刚度对基坑回弹变形的影响规律。

## 1 工程概况

江苏某湖底隧道工程, 公路等级为双向六车道(全线紧急停车带)高速公路, 设计速度100 km/h, 隧道总长10709 m, 净宽16.75 m, 湖中最大开挖深度达15 m, 建成断面示意图见图1。

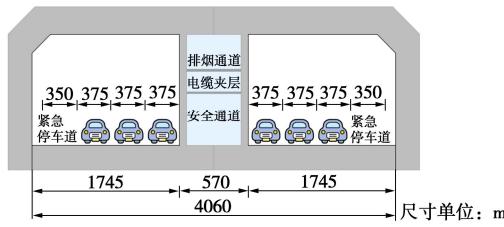


Fig. 1 Schematic diagram of tunnel section

本文研究的基坑地层分布较均匀, 项目隧道工程场地主要为粉土及粉质黏土, 局部夹软土层, 设计采用明挖施工, 主要采用放坡加垂直支护形式进行开挖, 基坑工程规模大、施工时间长、施工工序和工艺流程复杂等特点, 研究基坑开挖卸荷引起的坑底回弹变形是该项目长期变形控制的关键技术问题之一。

现场监测由施工方进行, 由于在施工过程中隆起测点遭到施工破坏, 所以图2只给出了第二仓基坑孔隙水压力、立柱隆沉、桩土深层水平位移、围护结构水平位移及支撑轴力的测点图。

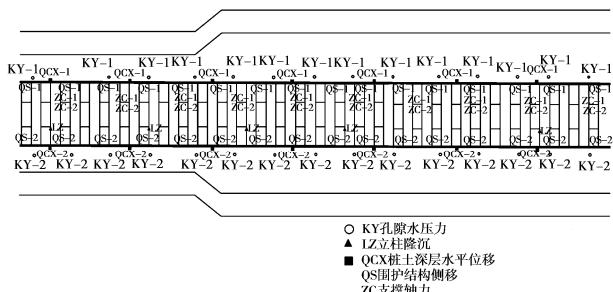


图2 第二仓基坑测点布置图

Fig. 2 Survey point layout of the second warehouse foundation pit

## 2 数值模型的建立

数值模拟标段选用第二仓K25+135—K25+515标段, 基坑尺寸为400 m×80 m, 开挖深度为15 m, 为了便于数值计算, 选取1/4的基坑进行建模, 基坑三维模型及网格划分如图3所示。

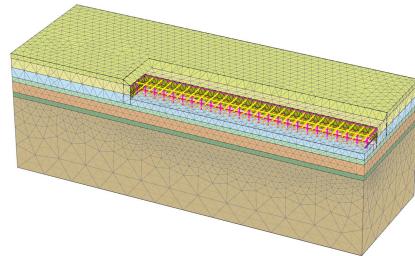


图3 基坑三维模型及网格划分示意图

Fig. 3 Three-dimensional model and grid drawing of foundation pit

土层分层情况已进行适当简化, 已在断面图4中标明。自上而下分别为: 2-1粉质黏土, 2-3粉土, 2-4淤泥质粉质黏土, 3-1粉质黏土, 3-2粉质黏土, 4-1b粉质黏土, 4-1黏土, 层底标高-90 m。

### 2.1 土体本构模型

基坑开挖一般属于临时性工程, 工期较短, 所以按不排水条件进行分析, 且不考虑开挖过程对土体扰动的影响; 土体本构模型采用小应变硬化模型。通过标准固结试验获得土体参考切线模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ , 通过三轴固结排水剪切试验获得土体参考割线模量 $E_{50}^{\text{ref}}$ 、破坏比 $R_f$ 和土体强度参数 $c'$ 、 $\varphi$ 值, 通过三轴固结排水加卸载剪切试验获得参考加卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ , 具体试验过程与试验数据处理不再赘述。HSS模型参数取值见表1。

表1 土层小应变本构模型参数取值表

Table 1 Parameter value table of soil layer HSS model

土层	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{50}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	$G_0^{\text{ref}}$ /MPa	$\gamma_{0.7}$ /10 <sup>-4</sup>	$R_f$ /kPa	$c'$ /kPa	$\varphi'$ /°
2-1	5.067	3.24	41.32	112.0	2.0	0.70	5.0	37.5
2-3	8.592	4.03	26.93	100.0	2.0	0.62	4.7	32.2
2-4	2.190	7.32	29.11	58.1	2.0	0.90	7.2	29.0
4-1	2.566	7.06	32.87	115.8	2.0	0.86	16.5	38.0

### 2.2 围护结构及工程桩模型

基坑采用上部放坡与钻孔灌注桩结合的围护结构形式, 如图4所示, 围护结构及支撑均按弹性材料考虑, 三维模型见图5。

(1) 采用两道内支撑, 第1道为钢筋混凝土支撑, 间距为8 m, 截面为800 mm×1000 mm, 刚度为 $3 \times 10^7$  kPa, 重度为25 kN/m<sup>3</sup>; 第2道支撑为钢管支撑, 间距为4 m, 截面直径为609 mm, 厚度为16 mm, 刚度为 $2.1 \times 10^8$  kPa, 重度为78.5 kN/m<sup>3</sup>。

(2) 止水帷幕及连续墙采用板单元进行模拟, 本

文在计算时将连续墙的刚度按C30混凝土模量的80%取值, 即为 $2.4 \times 10^7 \text{ kPa}$ , 泊松比取为0.2。

(3) 被动加固区截面尺寸为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ , 沿着基坑纵向满长布置, 材料为水泥土, 莫尔-库仑模型, 刚度为 $1.5 \times 10^5 \text{ kPa}$ , 泊松比为0.25, 抗剪强度为750 kPa。

(4) 工程桩直径为600 mm, 桩长为15 m, 桩间距为8 m, 桩的刚度为 $3 \times 10^7 \text{ kPa}$ , 桩的重度为 $7 \text{ kN/m}^3$ 。

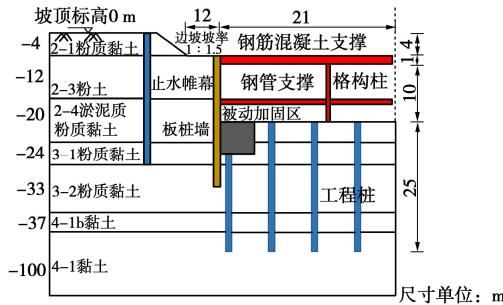


图 4 基坑断面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of excavation section

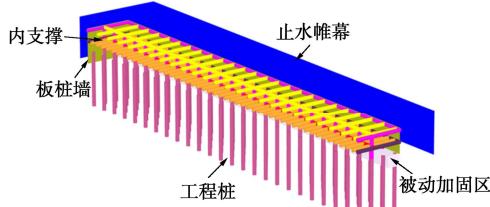


图 5 支护体系模拟示意图

Fig. 5 Schematic diagram of support system simulation

### 2.3 边界条件

对称侧面约束法向自由度及垂直于另外两个方向的转动自由度, 非对称侧面仅约束法向自由度, 底面约束所有自由度。

### 2.4 施工工况模拟

数值模拟开挖方案采取在模型竖直方向上开挖一层土, 施工一道撑的做法, 工况描述见表2。

表 2 计算工况

Table 2 Calculation conditions

施工阶段	工况描述
初始阶段	平衡初始地应力
1	施工围护结构与工程桩
2	放坡开挖至-4 m, 降水至-4 m
3	开挖至-5 m, 降水至-5 m
4	施工第一道内支撑
5	开挖至-10 m, 降水至-10 m
6	施工第二道内支撑
7	开挖至-15 m, 降水至-16 m

### 2.5 模型结果验证

为保证有限元数值模拟计算结果的准确可靠, 提取了基坑的砼支撑轴力监测数据与基坑围护墙水平位移数据, 与PLAXIS模拟结果进行对比, 结果见图6。可以看出钢支撑轴力模拟值的变化趋势与实测值的变化趋势一致, 开挖至坑底时的误差为7.5%, 可以看出

钢支撑轴力曲线吻合度较高。

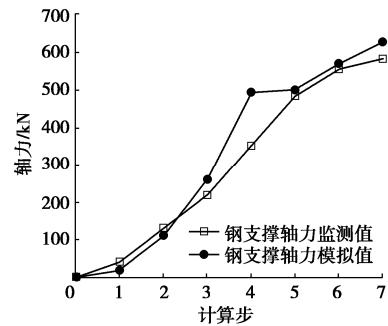


图 6 钢支撑轴力对比图

Fig. 6 Axial force contrast diagram of steel bracing

## 3 工程桩对基坑回弹变形的影响研究

### 3.1 桩长对基坑回弹变形的影响分析

研究工程桩桩长对基坑回弹变形的影响, 保持工程桩桩径( $d=0.6 \text{ m}$ )、刚度( $E=3 \times 10^7 \text{ kPa}$ )不变, 分别取工程桩桩长为5, 10, 15, 20, 25 m以及无工程桩共6种条件。

由图7看出, 无桩的回弹变形曲线与有桩的回弹变形曲线存在明显区别。无桩的回弹变形曲线呈现较为平滑的“凸”形, 最大回弹变形量为33 mm, 当桩即不施工工程桩时, 基坑回弹增长较快, 当距坑边约10 m, 基坑回弹量不再增长, 保持在约33 mm左右。

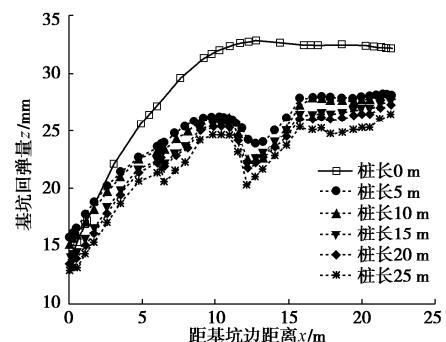


图 7 桩长 - 回弹曲线图

Fig. 7 Pile length - rebound curves

当工程桩存在时, 有桩的回弹变形曲线呈现波浪型, 波谷处即为打桩的位置, 此时, 基坑回弹量增长较慢, 在距坑边7 m左右就不再增长, 最大值为27 mm左右; 并且施工工程桩的位置, 基坑回弹出现显著的减小。桩长每增加5 m, 基坑中心回弹量减小约8%。

### 3.2 桩径对基坑回弹变形的影响分析

研究工程桩桩径对基坑回弹变形的影响, 保持工程桩桩长( $L=25 \text{ m}$ )、刚度( $E=3 \times 10^7 \text{ kPa}$ )不变, 分别取工程桩桩径为 $d=0.6 \text{ m}$ ,  $L=0.8 \text{ m}$ ,  $d=1.0 \text{ m}$ ,  $d=1.2 \text{ m}$ ,  $d=1.4 \text{ m}$ 以及无工程桩共6种条件。

由图8可以看出, 各个桩径工况下, 随着桩径的增加, 基坑回弹变形量逐渐减小, 工程桩桩径每增加0.2 m, 基坑中心的回弹量减小4%。

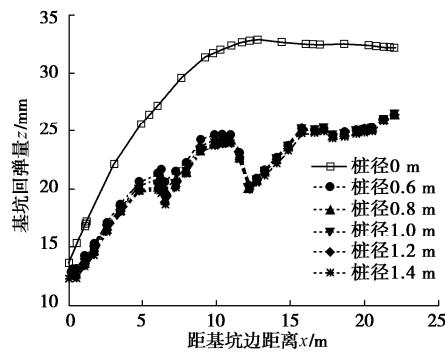


图 8 桩径 - 回弹曲线图

Fig. 8 Pile diameter - rebound curve

### 3.3 桩刚度对基坑回弹变形的影响分析

研究工程桩刚度对基坑回弹变形的影响,保持工程桩桩长( $L=25\text{ m}$ )、桩径( $d=0.6\text{ m}$ )不变,分别取工程桩刚度为 $E=2.5\times 10^7\text{ kPa}$ , $E=3.0\times 10^7\text{ kPa}$ , $E=3.5\times 10^7\text{ kPa}$ , $E=3.8\times 10^7\text{ kPa}$ 以及无工程桩5种工况。

由图9可以看出,改变工程桩桩刚度后,基坑回弹变形并未产生明显变化,结果表明,坑底工程桩的桩刚度对基坑回弹变形的影响最小。

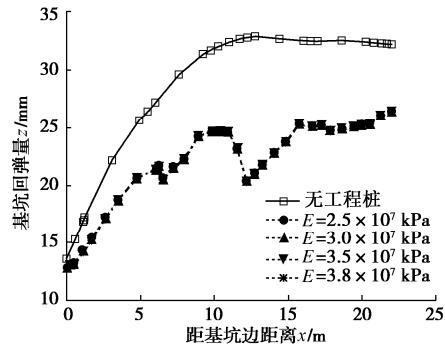


图 9 桩刚度 - 回弹曲线

Fig. 9 Pile stiffness-rebound curves

## 4 结 论

(1) 基坑开挖初期,开挖深度较浅,基坑回弹变形为弹性变形,呈现四周小中间大的特点;随着开挖深度的增加,侧向卸荷逐渐增大,基坑内部土体产生塑性变形,基坑回弹变形呈现四周小中间大的特点。

(2) 由基坑回弹变形曲线可以看出,工程桩附近土体回弹量明显小于相邻土体,最终开挖完成时,有桩较无桩可以减小约20%的回弹变形。

(3) 结合基坑回弹变形曲线可以看出,桩长每增加5 m,基坑回弹变形减小约5%左右;桩径每增加0.2 m,基坑回弹变形减小约2%左右;工程桩桩身刚度的变化对基坑回弹变形的影响不是特别明显。

## 参考文献:

[1] 郑刚, 焦莹. 深基坑工程设计理论及工程应用[M]. 北京:

- 中国建筑工业出版社, 2010: 183 - 185. (ZHENG Gang, JIAO Ying. Deep Excavation Engineering: Design Theory and Engineering Applications[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 183 - 185. (in Chinese))
- [2] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 1 - 2. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Handbook of Foundation Pit Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 1 - 2. (in Chinese))
- [3] LAMBE T W. Stress path method[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, **93**(6): 309 - 331.
- [4] LAMBE T W. Braced excavation[C]//Specialty Conference on Lateral Stress in Ground and Design of Earth-Retaining Structures, ASCE, Ithaca, 1970, New York: 149 - 218.
- [5] IWASAKI Y, WATANABE H, FUKUDA M, Et al. Construction control for underpinning piles and their behaviour during excavation[J]. Géotechnique, 1994, **44**(4): 681 - 689.
- [6] FINNO R J, LAWRENCE S A, ALLAWH N F, et al. Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, **117**(6): 934 - 955.
- [7] 刘畅, 郑刚, 张书鸳. 逆做法施工坑底回弹对支护结构的影响[J]. 天津大学学报, 2007, **40**(8): 995 - 1001. (LIU Chang, ZHENG Gang, ZHANG Xiao-yuan. Effect of foundation bottom heave due to excavation on supporting system in top-down method[J]. Journal of Tianjin University, 2007, **40**(8): 995 - 1001. (in Chinese))
- [8] 查甫生, 林志月, 崔可锐. 深开挖卸载条件下基坑应力和变形特性的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊1): 484 - 488. (ZHA Fu-sheng, LIN Zhi-yue, CUI Ke-rui. Numerical analysis of stress and deformation characteristics of foundation pits under deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 484 - 488. (in Chinese))
- [9] 曹力桥. 软土地区深基坑开挖坑底隆起的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊2): 819 - 824. (CAO Li-qiao. Finite element method analysis of bottom upheaval of deep foundation pits in soft clay ground due to excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 819 - 824. (in Chinese))
- [10] 冯虎, 刘国彬. 考虑工程桩影响软土深基坑隆起破坏的数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊2): 314 - 320. (FENG Hu, LIU Guo-bin. Numerical simulation of failure mechanism of deep foundation pits in soft soil considering impact of piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S2): 314 - 320. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)