

DOI: 10.11779/CJGE2021S2020

# 上覆新填土软土深基坑开挖变形控制数值模拟

王 龙<sup>1, 2</sup>, 朱长根<sup>3</sup>, 徐柯锋<sup>3</sup>, 俞 剑<sup>1, 2</sup>, 吕玺琳<sup>\*1, 2</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 上海宝冶集团有限公司, 上海 200941)

**摘 要:** 当存在上覆新填土条件下, 深基坑开挖导致的变形规律值得重视。针对深圳某填土区线型深基坑开展有限元模拟, 分析了不同围护桩插入比以及加固条件下坑底回弹变形和地表沉降的分布规律。结果表明, 在土质软弱的新填土沿海软弱土地地区, 增加围护桩插入比虽能显著减少坑外地表沉降, 但对于控制坑底隆起效果不佳; 坑底土体被动区搅拌桩加固可显著减少坑底隆起和地表沉降, 加固 9 m 深度时, 坑底隆起和地表沉降可减少 75% 以上。

**关键词:** 线型基坑; 坑底隆起; 地表沉降; 数值模拟

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0084-04

**作者简介:** 王 龙 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事基坑工程方面研究工作。E-mail: 452195214@qq.com。

## Numerical simulation of deformation control during excavation of deep foundation pit in soft soil with newly filled soil

WANG Long<sup>1, 2</sup>, ZHU Chang-gen<sup>3</sup>, XU Ke-feng<sup>3</sup>, YU Jian<sup>1, 2</sup>, LÜ Xi-lin<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Baoye Group Co., Ltd., Shanghai 200941, China)

**Abstract:** Under the overburden of newly filled soil, the deformation law of ground caused by excavation of foundation pits needs attention. Based on a linear deep foundation pit in the coastal Shenzhen-Hong Kong cooperation zone, the influences of different reinforcement plans and insertion ratios of retaining piles on the rebound deformation and surface settlement of the foundation pit are investigated through the finite element simulation. The conclusions can be drawn as follows: in the coastal soft soil areas with poor soil quality and newly filled soil, as the resistance to deformation in the passive areas is poor, the relevant measures should be taken to reduce the bottom uplift of pit and surface settlement deformation. Increasing the insertion ratio of retaining piles is not a useful way to control the uplift of pit bottom, but can significantly reduce the surface settlement outside the pit. Using the mixing piles to reinforce the passive areas of soil at the bottom of the pit can significantly reduce the uplift of the pit bottom and the surface settlement, and when the depth of reinforcement is 9 m, the uplift and surface settlement can be reduced by more than 75%.

**Key words:** linear foundation pit; uplift of pit bottom; surface subsidence; numerical simulation

## 0 引 言

中国沿海人口聚集造成土地资源日渐匮乏, 为缓解用地紧张以往出现了一些填方工程。由于新近沉积的滨海软土含水率高、压缩性高、强度低、承载力低以及结构性强<sup>[1]</sup>, 工程性质不良。因此, 在上覆新填土的软土地层中基坑开挖引起的坑底隆起变形难以把握, 其变形量是判断基坑稳定性和安全性的重要指标。在基坑开挖过程中, 随着土体卸荷效应, 坑底必然存在着一定的回弹变形, 变形量大小是判断基坑稳定性和安全性的重要指标。在坑底回弹变形方面。刘国彬等<sup>[2]</sup>根据上海地区的基坑实践, 提出应用残余应力原

理和应力路径方法建立基坑隆起变形计算模型, 还有许多学者沿用残余应力概念并对坑底变形计算进行了进一步延伸<sup>[3-5]</sup>。尽管在基坑隆起计算方面已有较多研究, 但以往研究以岩质基坑和软土基坑为主, 对于新近填土区基坑研究较少, 工程实践也较少见。

深层搅拌桩加固是加固软黏土地基的常用方法, 通过搅拌桩固化剂与软土的物理化学反应, 可使软土变成具有整体性、水稳定性和一定强度的优良地基<sup>[6]</sup>。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0800200)

收稿日期: 2021-08-16

\*通信作者 (E-mail: xilinu@tongji.edu.cn)

表 1 填土区线型深基坑地层土体模型参数  
Table 1 Model parameters of soil of linear deep foundation pit in filling area

土层	$c'/\text{kPa}$	$\phi'/(^{\circ})$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	$m$	$K_0$	$R_f$
人工填土	12	10	6.0	6.0	30.0	30.0	3.0	0.65	0.74	0.90
淤泥	10	8	—	—	—	—	—	—	—	—
黏土	20	18	5.1	5.0	31.0	96.0	3.0	0.65	0.69	0.90
砂质黏性土	22	20	3.9	3.2	24.5	67.5	3.0	0.65	0.66	0.90
全风化岩	25	30	4.5	4.5	30.0	67.5	3.0	0.65	0.50	0.90
强风化岩	30	35	3.9	3.9	24.5	67.5	3.0	0.65	0.43	0.90
加固土	60	25	15.0	15.0	85.0	170.0	20.0	0.50	0.50	0.95

对坑内被动区加固效应得到了关注, 黄宏伟等<sup>[7]</sup>就坑内被动区加固对改善和提高坑内土体力学参数的效果及对墙体位移影响进行了分析。秦爱芳等<sup>[8]</sup>通过模型试验和分析工程实践, 提出了基于卸荷后土体强度、竖向变形、侧压力变化的加固深度确定方法。刘溢等<sup>[9]</sup>通过有限元模拟, 得出坑底被动区加固可减少墙侧位移、坑底隆起和墙背土体沉降。

本文依托深圳某新填土层线型深基坑开挖导致的变形沉降开展有限元模拟, 并分析了增长基坑围护桩和地层加固方案对沉降的控制效果。进一步研究了围护桩深度变化对地表和坑底变形的影响, 坑底满堂搅拌桩加固深度变化对地表和坑底变形的控制效果, 研究能为以后填土区基坑施工设计提供参考。

1 依托工程概况

1.1 工程简介

深圳某填海工程所在区域原始地貌为海冲积平原及滨海滩涂, 从 2000 年开始陆续填海, 施工时现场已有新近人工填土 5~14 m。填土工程结束后开展了大量的工程建设, 深港合作区双界河路、听海路及其地下道路市政工程隧道主线长约 2.67 km, 开挖深度 13~22.8 m, 整体呈狭长线型分布, 典型断面宽约 40 m。

1.2 工程地质水文条件

工程所处地层原始标高约-2.32~-0.10 m, 后经填、挖、整平等人工改造, 形成现状低缓起伏地形地貌, 地面标高为 5.16~12.14 m。根据勘察报告, 该工程的地层主要由人工填土、淤泥、黏土、粗砂、粉质黏土、砂质黏性土、全风化岩、强风化岩组成。地下水类型主要有第四系松散层中的上层滞水、孔隙潜水和基岩裂隙潜水 3 种。基坑开挖期间水位处于地面以下 2.5 m。

2 线型基坑开挖导致地层变形模拟

2.1 有限元分析模型的建立

基坑整体呈线型分布, 所处地层变化较大。为便于分析, 选取一个典型断面如图 1 所示。该段基坑深 18.9 m, 宽约 40 m, 采用坑顶放坡和直径 1.4 m 间距 1.7 m 钻孔灌注桩+三道 1 m×1.2 m 混凝土支撑的支护形式, 钻孔灌注桩打入坑底 10 m, 混凝土支撑水平

间距约为 12 m, 采用直径 1 m 三管旋喷桩止水。除淤泥层外, 土层本构特性采取 HSS 模型描述, HSS 模型相关参数按照地勘报告值, 对于地勘报告没有的参数, 参照文献<sup>[10]</sup>建议方法取值, 具体参数详见表 1。由于淤泥层土质软弱, 采用基于莫尔库仑准则的理想弹塑性模型描述, 弹性模量和泊松比为 6.0 MPa 和 0.4。支护结构中钻孔灌注桩和混凝土支撑均采用 C30 混凝土, 重度取 25 kN/m<sup>3</sup>, 弹性模量取 25 GPa, 泊松比为 0.17。通过 PLAXIS 有限元软件建立分析模型, 将钻孔灌注桩按抗弯刚度等效为板单元, 混凝土支撑按刚度等效为锚杆单元。为减少边界效应, 模型水平方向取 3 倍基坑开挖深度, 竖向取 2 倍开挖深度, 水位位于地下 2.5 m, 取半结构建立模型如图 2 所示。

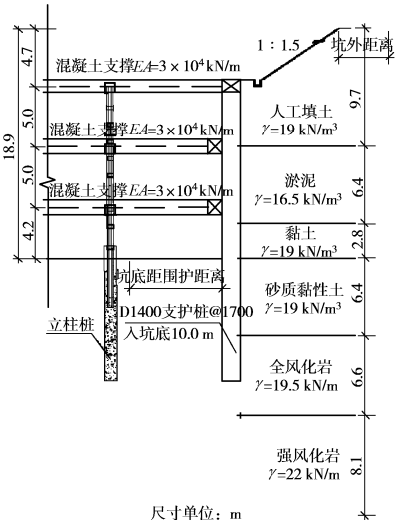


图 1 基坑剖面图

Fig. 1 Profile of foundation pit

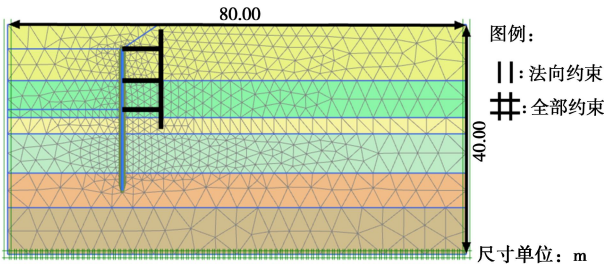


图 2 基坑数值计算模型

Fig. 2 Numerical model for foundation pit

2.2 基坑开挖导致的地层变形过程

基坑开挖分 4 个阶段, 如图 3 所示, 第一阶段为

放坡开挖至地面以下 4.7 m, 第二阶段为架设好第一道支撑后开挖到地面以下 9.7 m, 第三阶段为架设好第二道支撑后开挖到地面以下 14.7 m, 第四阶段为架设好第三道支撑后开挖到地面以下 18.9 m。为模拟施工过程中降水的影响, 将开挖面以上的土体设为干的状态, 围护桩底部以下的水位设为全局水平, 中间土体的水位按照线性内插设置。模拟得到基坑开挖时引起的坑底回弹和地表沉降如图 4 所示, 由图 4 可以看出, 随着开挖深度的加深, 坑底回弹和地表沉降也在不断增大, 回弹最大值出现在坑中心附近, 为 410 mm; 最大地表沉降为 79 mm, 坑底回弹和地表沉降均较大, 因而有必要对基坑采取相关措施减小变形。

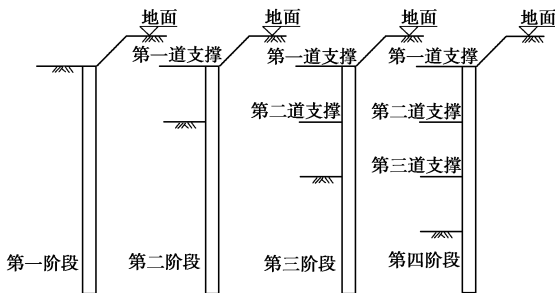


图3 基坑不同开挖阶段示意图

Fig. 3 Schematic diagram of excavation stage for foundation pit

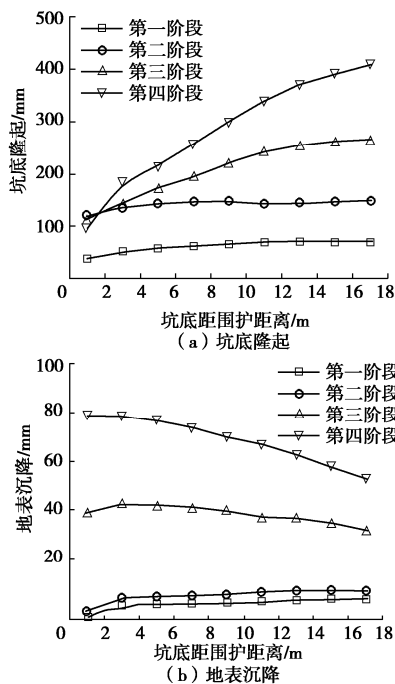


图4 基坑不同开挖阶段地层变形

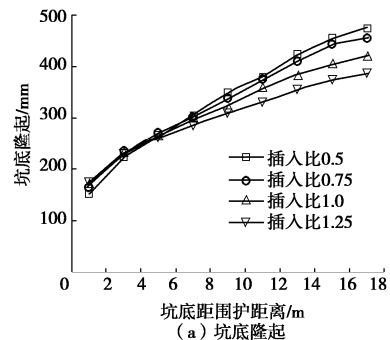
Fig. 4 Ground deformations at different excavation stages

### 3 基坑开挖导致的地层变形控制分析

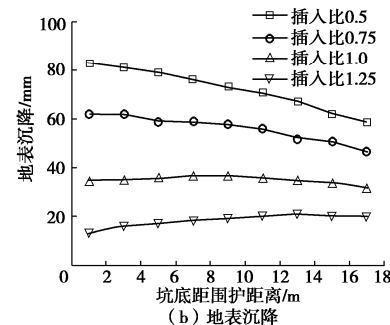
#### 3.1 围护桩插入比对地层变形影响分析

加大围护桩插入比可有效增加土体被动区范围, 从而增大圆弧滑动所需土体范围, 因此可增加基坑抗隆起稳定性, 在一定程度上也可减少基坑隆起变形和地表沉降。为探究围护桩长对坑底隆起和地表沉降的

影响, 参考工程中常见的不同插入比, 设置了插入比分别为 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 四组情况进行比较, 原设计围护桩插入比为 0.5, 以插入比 0.5 为对照分析围护插入比对坑底隆起和地表沉降的影响, 分析开挖到坑底的最不利工况, 对比结果见图 5 所示。从图 5 (a) 可看出, 当插入比为 1.25 时坑底隆起可减少 19%, 虽然增加插入比可以在一定程度上减少最大坑底隆起量, 但效果不佳, 在满足坑底稳定性的情况下, 通过增加围护桩插入比来减少坑底隆起变形并不能满足工程需求, 因而需要采取坑底加固措施。不同插入深度下地表沉降的变化规律如图 5 (b) 所示, 增加插入比可有效减少地面沉降, 近似呈线性变化趋势。



(a) 坑底隆起



(b) 地表沉降

图5 围护插入比对地层变形的影响

Fig. 5 Influences of enclosure insertion ratio on ground deformation

#### 3.2 坑底加固对地层变形影响分析

为进一步控制地层变形, 分别采用坑底满堂搅拌桩加固深度 3, 5, 7, 9 m 等不同措施, 分析坑底加固对地表沉降和坑底隆起变形的影响。加固土相关参数参考文献[10]详见表 1。分别计算开挖到坑底时最不利工况, 坑底隆起变形对比分析结果见图 6 所示。由图中可看出, 坑底加固能有效减少坑底隆起, 坑底搅

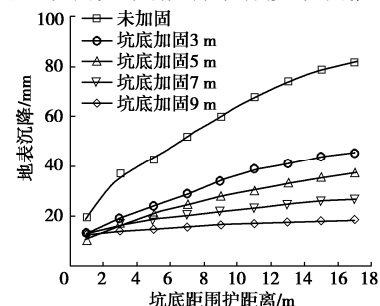


图6 基坑坑底隆起变形

Fig. 6 Uplift deformations of bottom of foundation pit

拌桩加固 7 m 时能减少的 68% 的坑底隆起, 加固 9 m 时能减少的 77% 的坑底隆起变形。地表沉降结果见图 7 所示, 坑底搅拌桩加固 9 m 时可减少 86% 的地表沉降, 可见坑底加固对地表沉降控制具有显著效果。

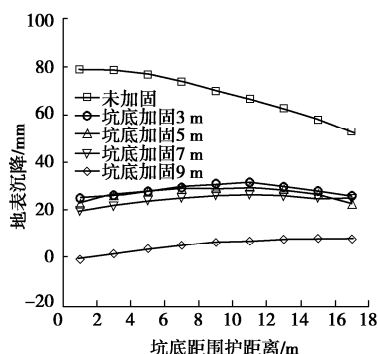


图 7 地表沉降

Fig. 7 Ground deformations

## 4 结 论

通过对深圳某填土区线型深基坑进行有限元模拟, 分析了围护桩插入比和不同坑底加固措施对坑底隆起变形和地表沉降的影响, 得到以下 3 点结论。

(1) 在土质较差的新近填土的沿海软弱土层地区, 随着开挖深度增大, 坑底回弹和地表沉降也逐步增大, 坑底回弹变形最大出现在基坑中心附近, 由于被动区抵抗变形能力较差, 坑底回弹和地表沉降变形过大, 须采取相关措施减少变形。

(2) 在满足基坑稳定性的前提下, 增加围护桩插入比在一定程度上可以减少坑底回弹, 但效果不佳, 增加围护桩插入比可显著减少坑外地表沉降, 插入比和地表沉降近似呈线性变化趋势。

(3) 坑底土体被动区搅拌桩加固可显著减少坑底隆起以及地表沉降, 加固范围越大坑底隆起和地表沉降越小, 在实际工程中可根据变形控制要求灵活选择加固措施和加固范围。

## 参考文献:

- [1] 丘建金, 文建鹏. 深圳地区滨海软土工程特性及加固技术[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 567 - 571. (QIU Jian-jin, WEN Jian-peng. Engineering characteristics and reinforcement technology of marine soft soil in costal area of Shenzhen[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 567 - 571. (in Chinese))
- [2] 刘国彬, 侯学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力分析法[J]. 地下工程与隧道, 1996(2): 2 - 7. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Residual stress analysis method for heave deformation of soft soil foundation pit[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1996(2): 2 - 7. (in Chinese))
- [3] 孙玉永, 周顺华, 庄 丽. 考虑残余应力的基坑被动区土压力及强度计算[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 94 - 99. (SUN Yu-yong, ZHOU Shun-hua, ZHUANG Li. Calculation of passive earth pressure and shear strength in foundation pits considering residual stress[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 94 - 99. (in Chinese))
- [4] 孔令荣. 考虑残余应力的基坑回弹变形分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 79 - 82. (KONG Ling-rong. Rebound deformation of foundation pits considering residual stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 79 - 82. (in Chinese))
- [5] 谢征兵, 俞 峰, 苟尧泊, 等. 软土地区基坑回弹变形预测方法研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 479 - 486. (XIE Zheng-bing, YU Feng, GOU Yao-bo, et al. Methods for predicting the rebound deformation of foundation pit in soft soil area[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2016, 35(3): 479 - 486. (in Chinese))
- [6] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GONG Xiao-nan. Foundation Treatment Manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [7] 黄宏伟, 任 臻, 钱 伟. 深基坑内加固与墙体侧向位移的相互影响实测分析[J]. 建筑结构, 2000, 30(11): 55 - 57. (HUANG Hong-wei, REN Zhen, QIAN Wei. Interaction analysis on consolidation of soil and lateral deformation of retaining wall in excavation pit[J]. Building Structure, 2000, 30(11): 55 - 57. (in Chinese))
- [8] 秦爱芳, 胡中雄, 彭世娟. 上海软土地区受卸荷影响的基坑工程被动区土体加固深度研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 935 - 940. (QIN Ai-fang, HU Zhong-xiong, PENG Shi-juan. Depth of soil stabilization in passive area of foundation pits for Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 935 - 940. (in Chinese))
- [9] 刘 溢, 李镜培, 陈 伟. 被动区深层搅拌桩加固对超大深基坑变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 465 - 469. (LIU Yi, LI Jing-pei, CHEN Wei. Effect of reinforcement of deep mixing piles on deformation of ultra-deep excavations in passive zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 465 - 469. (in Chinese))
- [10] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833 - 845. (GU Xiao-qiang, WU Rui-tuo, LIANG Fa-yun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 833 - 845. (in Chinese))

(编校: 孙振远)