

Analysis of Anti-Elevation Effect of Cement Soil Mixing Pile System on Soft Soil Foundation

Haozhen Qin Bowen Sun

School of Urban Geology and Engineering Hebei University of Geosciences, Shijiazhuang, Hebei, 052160, China

Abstract

During the excavation of soft soil foundations, significant heaving of the pit bottom often occurs. To explore effective methods for reducing excessive deformation of the pit bottom during excavation in soft soil foundations, this study is based on the actual engineering project of Licun Station on Foshan Metro Line 3. It investigates the deformation patterns of the maximum heaving value at the pit bottom under different embedded depths of diaphragm walls and the heaving values under varying lengths of mixing pile reinforcement. Simulation analyses were conducted on the pit bottom heaving with embedded depths ranging from 2m to 12m and reinforcement using cement mixing piles of 3m, 4m, and 5m in length. The results indicate that when the embedded depth exceeds 6m, the variation in the maximum heaving value stabilizes. Additionally, using 4m-long cement mixing piles for pit bottom reinforcement can effectively reduce the heaving amount.

Keywords

deep excavation; numerical simulation; support optimization; soft soil stratum

地连墙 - 水泥土搅拌桩组合体系对软土基坑抗隆起效应分析

秦浩朕 孙博雯

河北地质大学城市地质与工程学院, 中国 · 河北 石家庄 052160

摘要

软土地基在开挖过程中往往会伴随较大的坑底隆起, 为探究如何有效降低软土地基基坑开挖过程中的坑底变形过大问题, 本文基于佛山地铁3号线荔村站实际工程, 探究不同地连墙嵌固深度下的坑底最大隆起值变形规律及不同搅拌桩加固长度下的坑底隆起值。分对嵌固深度设置为2m-12m和分别采用3m、4m、5m长的水泥搅拌桩进行加固下的坑底隆起情况进行模拟分析; 结果表明, 当嵌固深度大于6m时, 坑底隆起最大值变化量趋于稳定, 采取4m长水泥搅拌桩进行坑底加固可有效减少坑底隆起量。

关键词

深基坑; 数值模拟; 支护优化; 软土地层

1 引言

在珠江三角洲等软土分布区域, 狭长形深大基坑工程面临诸多技术挑战: 该区域高灵敏度淤泥土层普遍发育、周边建筑物密集, 在这种复杂环境的影响下, 支护结构选取不当可能会使得工程结构变形过大, 进而引发倒塌事故。目前, 对于软土地基深基坑支护优化研究多聚焦单一参数优化, 缺乏对支护形式与加固措施协同作用的系统性分析^[1-7], 本文拟对此进行分析。

本文依托于佛山地铁3号线荔村站实际工程, 对于该工程所处的软土地基, 通过研究不同水泥搅拌桩加固深度及地连墙嵌固深度对坑底隆起的影响, 选出最适合于本工程的

优化方案, 并将优化结果与工程检测数据进行对比, 确保设计的可靠性。

2 工程概况

2.1 深基坑概况

车站总长度 276.0m。车站站台中心距轨面高程为 -11.450m, 标准段线间距为 14m, 基坑宽度为 20m, 基坑深度为 16.58m, 底板面距轨面距高度 0.58m。本工程基坑开挖采用明挖顺作法施工工艺, 支护体系主要采用地下连续墙与钢筋混凝土复合结构相结合的方式。施工流程分为三个阶段: 首先在坑底区域完成搅拌桩加固作业, 随后进行地下连续墙的构筑。土方开挖过程中严格遵循分层开挖原则, 每层土方开挖至设计标高后立即架设钢支撑体系, 形成 "随挖随支" 的作业循环, 有效控制基坑变形。具体挖掘工作情况详见表 1。

【作者简介】秦浩朕 (1999-), 男, 中国河南安阳人, 在读硕士, 从事岩土工程研究。

表 1 开挖工况表

工况	土体开挖情况	支撑搭设情况
1. 对初始渗流场进行分析		
2. 对初始地应力进行分析		
3. 搅拌桩进行施工		
4. 地下连续墙施工		
5. 基坑降水		
6. 第一部分土体进行开挖	厚 5.5m	搭设第一道混凝土支撑
7. 第二部分土体进行开挖	厚 4.7m	搭设第二道混凝土支撑
8. 第三部分土体进行开挖	厚 4.5m	搭设第三道钢支撑
9. 施作坑底垫层		

2.2 工程地质条件

荔村站位于荔奇路和羊大路交叉口，地面高程为 3.01 ~ 3.90m 之间，与羊大河站平行而行，呈东西向分布。工况开挖下范围主要包含人工填土层、海陆交互沉积层、冲积 - 洪积砂层、岩石全风化带、强风化岩层。具体地层物理力学参数见表 2。

表 2 地层物理力学参数表

地层名称	厚度 H(m)	泊松比 μ	孔隙比 (e)	重度 γ (kN/m ³)
人工填土	3.09	0.3	1.09	17.7
淤泥层	2.05	0.43	1.76	15.7
淤泥质土	5.63	0.41	1.07	17.9
粉细砂层	7.08	0.39	0.67	19.7
中粗砂层	3.35	0.31	0.7	20.1
粘土层	4.51	0.47	0.73	19.7
冲积洪积粉细砂层	3.10	0.3	0.53	20.6
冲积洪积中粗砂层	8.10	0.25	0.56	20.1

2.3 参数选取及关键参数选取分析

岩土体和深基坑结构的物理力学参数根据《佛山市城市轨道交通三号线工程荔村站详细勘察阶段岩土工程勘察报告》、国家标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》^[8]以及《岩土工程勘察规范》^[9]、《土的工程分类标准》^[10]等相关标准进行选取。

表 3 岩土体物理力学参数表

土类名称	厚度 H(m)	重度 γ (kN/m ³)	粘聚力 c(kPa)	内摩擦角 ϕ (°)	泊松比 μ	压缩模量 Es(MPa)
杂填土	2.75	18	10	10	0.37	4.5
淤泥	7.80	17	7	9.5	0.38	1.95
淤泥质土	7.20	17.9	7	11.6	0.42	2.34
粉细砂岩	8.15	20.5	15	22.5	0.33	8.03
中粗砂岩	10.30	20	10	30	0.3	14

3 初步设计分析

3.1 初步设计

本站初步设计拟采用 0.8m 地连墙+三道支撑形式：其中第一道为混凝土八字撑，第二、三道均采用钢支撑。盾构扩大头第一道采用混凝土支撑，第二、第三道采用钢支撑；采取 3m 混凝土搅拌桩进行坑底加固。地连墙采取 c35 混凝土浇筑，基坑底部布置 3m 长水泥搅拌桩进行加固。

3.2 有限元模型建立

本文选取有限元分析软件 Midaas GTS NX 建立基坑模型，模型选取长度为 375m，宽度为 100m，高度为 35m，模型总计 117, 281 个单元，46, 204 个节点。具体模型如图 1 所示。

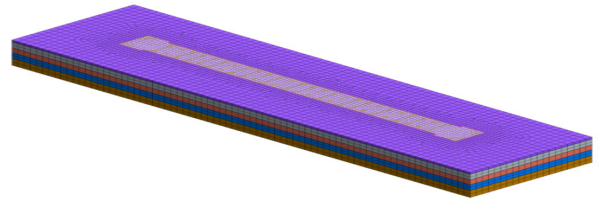


图 1 基坑三维有限元模型示意图

由于土体内部环境复杂，具有多孔多相的特性，且该车站位于珠江三角洲冲积平原，淤泥质土以及淤泥分布广泛，因此采用修正摩尔 - 库伦模型来模拟土的多孔多相特性。同时结合弹性材料参数，进一步分析支护结构的稳定性。

3.3 支护材料参数选取

在模型建立过程中，用实体网格模拟各土层，选取梁单元模拟钢支撑及混凝土支撑，选取植入式梁单元模拟搅拌桩，板单元模拟地下连续墙及垫层。基于岩土特性，本构关系选取修正库伦模型，考虑到模型建立的准确性及稳定性，加固土体、垫层、内部支撑及地下连续墙均采用弹性本构模型，各项支护材料物理参数信息如表 4 所示。

表 4 支护结构材料物理力学参数表

材料名称	弹性模量 (kPa)	重度 γ (kN/m ³)	泊松比 (μ)
C35 混凝土	3.45E+07	23	0.22
C30 混凝土	3.05E+07	25	0.2
水泥土	90000	19	0.3
钢支撑	2.05E+08	77	0.2

3.4 模拟结果对比分析

根据对初始支护方案下的模拟结果可以看出

1) 初步设计下坑底隆起量值较大，超出控制值。其中第三步开挖下达到坑底隆起量峰值 33.48mm。

2) 监测数据与模拟数据对比折线走势基本一致，第三步开挖下坑底隆起峰值均在坑底中部产生。

通过对初步支护设计模拟下的数据及监测数据进行对比分析可知，该初步支护设计模拟数据较为准确，且初步支护设计下产生的坑底隆起量值超过控制值，因此需要对初步

支护设计进行优化。三步开挖下的坑底隆起量值见图 2。

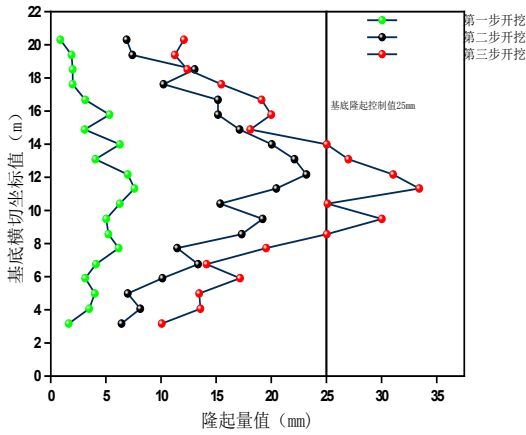


图 2 三次开挖下的坑底隆起量值图

4 支护优化设计分析

4.1 不同水泥土搅拌桩长度对坑底隆起的影响

基坑底部隆起变形主要是由于坑周土体挤压及坑底土体弹性回弹引起的，尤其在软土地基且地下存在潜水层时变形更为明显。在初步设计中采用 3m 长水泥搅拌桩加固长度，旨在通过水泥土固结提升软土层承载力，模拟结果显示，3m 长搅拌桩坑底隆起仍超过坑底隆起监测预警值。现对 3m、4m、5m 长水泥搅拌桩进行数值模拟。根据模拟结果可知，适当增加水泥土搅拌桩长度有利于减少坑底隆起量，4m、5m 水泥搅拌桩下的坑底隆起量值均符合坑底隆起监测预警值，结合工程实际，4m 水泥土搅拌桩在施工上更为简便，因此选取 4m 水泥土搅拌桩进行支护优化。三种方案下的坑底隆起量对比见图 3。

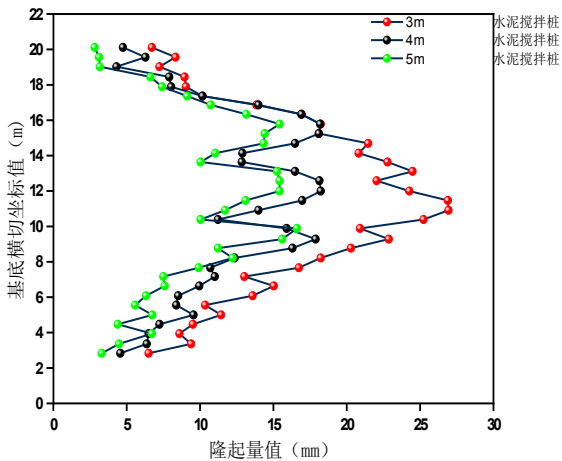


图 3 不同长度的水泥搅拌桩下坑底隆起量对比图

4.2 不同嵌固深度下坑底隆起最大值的变形特征

软土地基的基坑开挖过程中，常采用地下连续墙进行基坑支护，既有研究表明，适当增加地连墙嵌固深度有利于

增强地连墙对坑底土体的约束作用，从而减少坑底隆起值。现通过对不同嵌固深度下坑底的最大隆起值进行模拟分析，拟确定适用于本工程的最佳嵌固深度。为确保嵌固深度对坑底隆起的影响研究的准确性。根据模拟结果可知，当嵌固深度达到 6m 时，坑底最大隆起位移量趋于稳定。

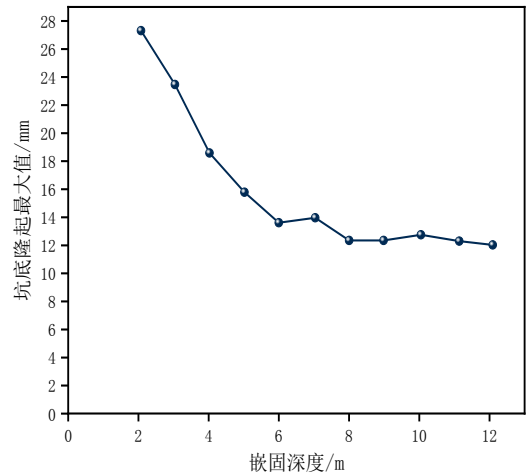


图 4 不同嵌固深度下坑底隆起量值图

4.3 支护优化方案

根据对影响坑底隆起的参数进行分析，最终确定优化方案为选取 4m 水泥土搅拌桩进行坑底加固，将地连墙嵌固深度增加至 6m。支护方式仍选取两道混凝土+一道钢支撑，现利用有限元软件对优化后的支护方案进行模型建立，并通过与监测数据对比证明其有效性。

4.4 优化结果对比分析

通过对优化后的模拟结果可以看出：

(1) 优化后的的支护方案可有效减少坑底隆起值，优化后三步开挖下坑底最大隆起量值为 15.34mm，符合坑底隆起控制值。

(2) 模拟数据与实际数据最大相对误差为 8.9%，符合精度要求。可以认为该优化真实有效。

优化后的墙体水平位移和坑底隆起量值如图 5—图 7 所示。

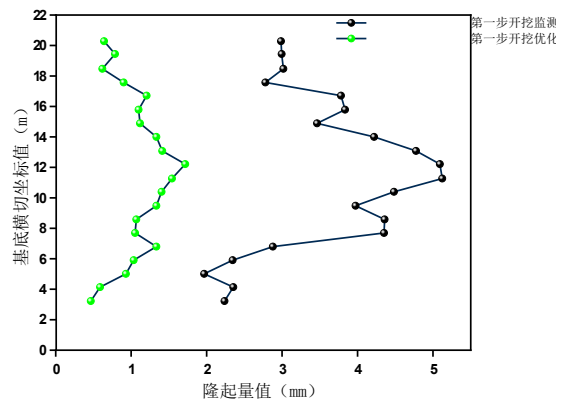


图 5 第一步开挖下坑底隆起对比图

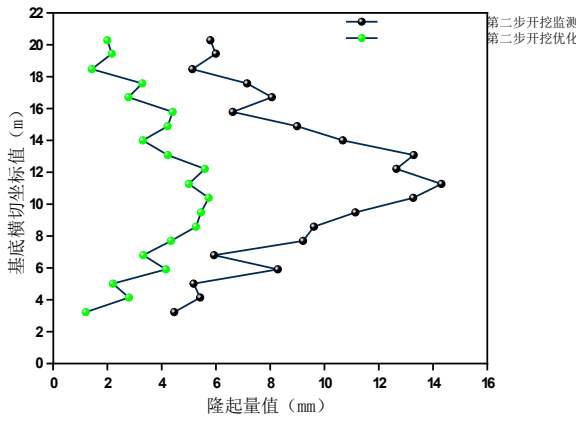


图 6 第二步开挖下坑底隆起对比图

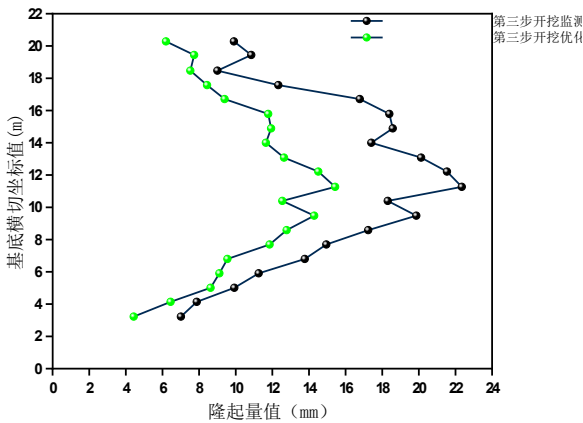


图 7 第三步开挖下坑底隆起对比图

5 结论

1) 在软土地基中, 可通过适当增加水泥搅拌桩加固长

度提升坑底土体的硬度, 从而减少坑底隆起值。

2) 以本工程为例, 适当增加地连墙嵌固深度可减少坑底隆起量, 但嵌固深度大于基坑宽度约 3.3 倍时, 坑底最大隆起值趋于稳定。

3) 在实际工程中, 针对软土地基坑底隆起过大的问题, 可根据工程实际, 利用地连墙加水泥搅拌桩等多种支护方式的协同作用对其进行约束。

参考文献

- [1] 陈志仙, 王志人. 某深厚软土中深基坑支护优化设计与监测[J]. 土工基础, 2022, 36(06): 829-833.
- [2] 钱嘉, 芮凯军. 临近地铁深基坑支护优化设计实践分析[J]. 安徽建筑, 2023, 30(10): 140-141+163. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2023.10.055.
- [3] 彭镇东, 谢敏, 刘英俊, 等. 泥塘区域深基坑支护优化设计技术研究[J]. 住宅与房地产, 2019, (22): 209.
- [4] 邓祖保, 季郑杰, 孙丽. 某深基坑支护优化设计及监测分析[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(06): 9-11.
- [5] 黄江, 吴国华. 南昌某深基坑支护优化设计及变形监测研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(16): 78-80. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2016.16.042.
- [6] 邱绍伟. 基于MIDAS的桩锚支护优化设计[D]. 安徽建筑大学, 2017.
- [7] 马露, 李琰庆, 蔡怀恩. FLAC3D在深基坑支护优化设计中的应用[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2007, (04): 35-38.
- [8] 国家标准《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307-2012).
- [9] 国家标准《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001).
- [10] 国家标准《土的工程分类标准》(GB/T 50145-2007).
- [11] 国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2001).