

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.004

深海淤泥地层深基坑施工数值模拟与监测分析

雷 振

(中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要:以深圳益田停车场深基坑开挖为案例,以确保地铁车站及周边环境安全为目标,介绍该工程场区的地质条件、支护形式及施工工序;并根据施工过程的监测结果,借助有限元软件对基坑开挖进行数值模拟,对地表沉降、桩顶水平位移、支撑轴力和桩顶沉降进行了一系列的分析处理。研究表明:基坑的中上部位置变形最大,横向变形值约为8 mm,支撑轴力会随着施工和气温的不同而有所变化。随着基坑的开挖,支撑轴力不断增加,最后趋于稳定。研究结果可为该支护形式下的深基坑设计与施工提供一定参考。

关键词:淤泥地层;深基坑;数值模拟;监测分析

中图分类号: TU447

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)03—0020—05

Simulation and Monitoring of Deep Foundation Pit in Deep Sea Silt Based on Numerical Simulation

LEI Zhen

(Sinohydro Bureau 8 Co., Ltd., Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: Taking the case of deep foundation pit excavation at Shenzhen Yitian parking lot as a case, with the goal of ensuring the safety of subway stations and the surrounding environment, the geological conditions, supporting forms, and construction procedures of the project site area are introduced; and based on the monitoring results of the construction process, there is limited assistance. FEM software was used to conduct numerical simulations of excavation of foundation pits, and on-site monitoring data analysis of ground settlement, horizontal displacement of pile tops, support axial force and settlement of pile tops. The results show that the largest deformation is located in the upper middle of the pit, and the lateral deformation value is about 8 mm. The supporting axial force will fluctuate with the construction and temperature and other factors. As the excavation depth of foundation pit increases, the supporting axial force will increase as well. It increased sharply and eventually stabilized. The research results could provide some references for the design and construction of deep foundation pits under this support form. The foundation pit is a deep foundation pit under complex environmental conditions. The key technologies for its support and construction can provide reference for similar projects.

Keywords: silt stratum; deep foundation pit; numerical simulation; monitoring analysis

随着经济的发展,城市土地需求增加,地下空间有效开发成为拓宽交通、节省资源的重要方式。地铁车站施工是地铁建设的重点,而在车站基坑建设中围护结构对于深基坑的安全稳定和工程造价有着重要的影响,当围护结构设计不合理,施工工艺不当时容易发生事故,带来事故隐患^[1-5]。因此,地铁工程中围护结构的安全稳定性研究是一项重要的研究内容。

本文以深圳益田停车场施工为背景,调查研究

了地铁车站附近地质状况,介绍了围护形势和施工工艺,并对基坑开挖进行了数值模拟研究,对地表沉降、桩顶水平位移、支撑轴力和桩顶沉降进行了一系列的分析处理^[6-9]。

1 工程概况与地质情况

1.1 工程概况

益田停车场是全地下双层停车场,用地性质为城市绿地,是规划选址用地。益田停车场主体基坑

长 555.70 m, 宽 50.75 m, 基坑开挖深度 21.70 m, 南北侧分别为福荣路及广深高速公路。

基坑采用明挖顺筑法施工, 基坑宽度约 6.20 m ~ 10.80 m, 基坑深度约 14.76 m ~ 17.14 m; 主体围护结构主要选用 800 mm 地下连续墙。场地范围内淤泥层厚度为 10 m 左右, 结合主体结构型式, 基坑竖向设置 3 道支撑。第一道钢支撑采用钢筋混凝土, 水平间距为 4 m。第二、三道支撑采用 $\Phi 609 @ 2000$ 钢管支撑。施工平面图如图 1 所示。

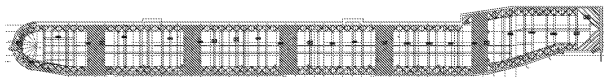


图 1 施工平面图

1.2 地质情况

基坑范围地层自上而下依次为素填土、淤泥、淤泥质黏性土、强风化花岗岩。支护结构的类型是地下连续墙和内支撑的形式。地连墙槽壁采用双排搅拌桩, 并设置隔墙来防止滑移。淤泥质土具有抗剪性能低, 承载力低等特点会影响地层的沉降规律^[10-15]。

2 数值模拟

2.1 模拟软件

目前进行的是一号隧道东侧已开挖段的数值模拟, 得到开挖各步骤的位移及应力云图, 与监测数据进行比较, 用以结合勘察和室内试验资料, 反演施工地的各地层力学参数。

目前 3D 模型完成有限元建模, 但尚未进行计算。采用 2D 模型进行了 12 组试算。

本次模拟采用大型有限元软件 ANSYS 进行建模, FLAC^{3D} 有限差分软件进行有限差分计算。

2.2 三维建模

依托 1 号隧道东侧开挖段建立三维有限元模型。广深高速路基、福荣路路基和 1 号隧道按实际位置走向建模。有限元模型如图 2、图 3、图 4 所示。

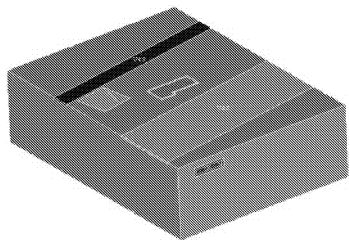


图 2 整体模型

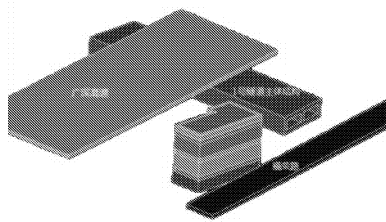


图 3 主要结构位置关系

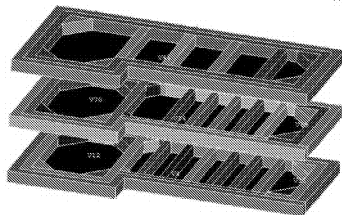


图 4 支护结构

2.3 二维建模及计算

2.3.1 模型建立

取 1 号隧道东侧基坑中部截面建立二维有限元模型。模型宽 124 m, 高 50 m。两侧道路宽分别为 38 m 和 10 m, 采用实体单元划分网格, 共划分为 12 441 个单元和 4 035 个节点。在广深高速地表布设 20 kN 的均布竖向压力。模拟开挖位移从地连墙施工完成开始计。

2.3.2 模型参数

模拟中土体采用 Mohr - Coulomb 屈服准则, 支撑部分采用弹性屈服准则。模拟中弹性模量 E 的取值目前根据经验公式一般取 2 倍 ~ 5 倍 E_s 。用目前进行的 12 组试算结果, 对比监测结果, 大致确定 $E = 4E_s$ 。其他土层参数按照勘测报告取值, 勘测报告没有给出的, 采用深圳地区其他工程取值暂时代替, 材料参数取值见表 1。

表 1 材料参数取值

地层	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	密度/(kg·m ⁻³)
素填土	13.5	0.45	10	8	1790
淤泥	0.8	0.30	9	2	1620
淤泥质黏性土	3.1	0.30	23	23	1800
强风化花岗岩	55.0	0.25	24	25	1890

2.3.3 计算结果分析

开挖完成时土体横向变形云图如图 5、图 6 所示, 由于土体开挖, 基坑周边的地连墙由三向应力状态变为二向应力状态, 原有平衡被打破, 在后方土体的挤压下, 地连墙向基坑方向产生变形。此次模拟结果显示, 变形最大的位置位于基坑中上部, 横向变

形值约为 8 mm。对比图 6 施作第二道支撑步横向变形云图,桩顶横向位移在第二道支撑完成后即发育完成,后期变形对桩顶位移影响较小。

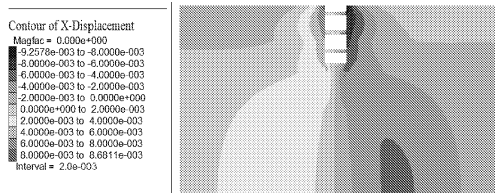


图 5 开挖完成横向变形云图

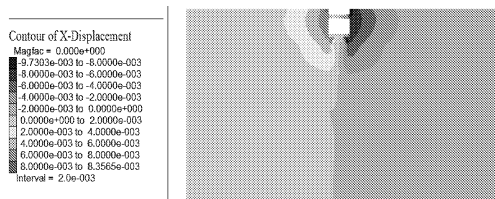


图 6 施作第二道支撑横向变形云图

竖向沉降计算结果如图 7 所示,在卸载作用下,坑底回弹较大,回弹值为 6 cm,因本次模拟采用摩尔-库仑屈服准则,地表也产生一定回弹。

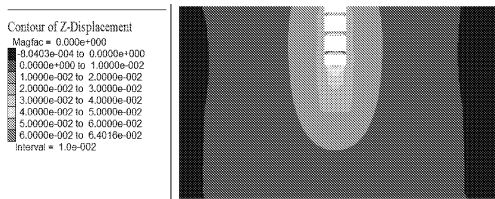


图 7 竖向沉降计算

横向应力云图如图 8 所示,压应力最大位置位于第二道支撑,应力值为 1.80 MPa,最大拉应力位于地表,应力值为 0.24 MPa。第一道支撑压应力数值为 0.90 MPa,第三道支撑应力值为 0.50 MPa。第一道和第二道支撑应力分布规律与设计院给出的设计轴力规律一致,第三道支撑模拟值略小。

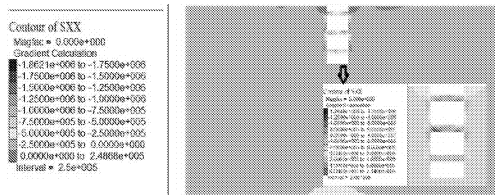


图 8 横向应力云图

塑性区分布图如图 9 所示,在开挖过程中,基坑两侧的素填土、淤泥、淤泥质黏性土均进入塑性剪切应变状态,地连墙两侧土体受地连墙影响均进入塑性剪切应变状态。淤泥层出现一定的拉伸破坏。

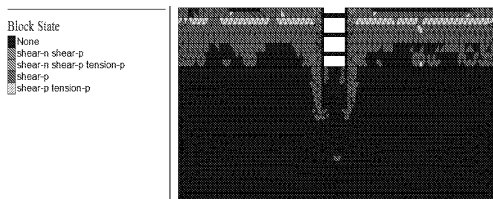


图 9 塑性区分布

2.3.4 模拟值与监测值对比

在基坑工程中,地表竖向沉降量是监测控制的重要组成部分,对地表沉降量监测图如图 10 所示。

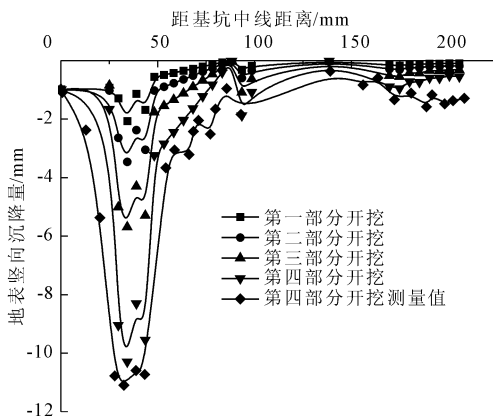


图 10 地表竖向沉降量

由图 10 可知,在不同开挖阶段,基坑的地表竖向沉降量大致相同,随着距基坑中线距离的增加,沉降量先增加后减小最后趋于稳定。在距中线 28 m 处模拟最大沉降值达到了 10.2 mm,在 77 m 后地表沉降变化不大,在 1.0 mm 左右波动。第四部分开挖后实际测量最大值为 11.0 mm,比模拟值大 10% 左右,且变化趋势与模拟大致相同。由此可知,模拟结果接近实际情况,较为正确。

3 现场监测

根据工程设计的需要,现对地表沉降、支撑轴力、水位沉降等进行检测,监测点布置图如图 11 所示。

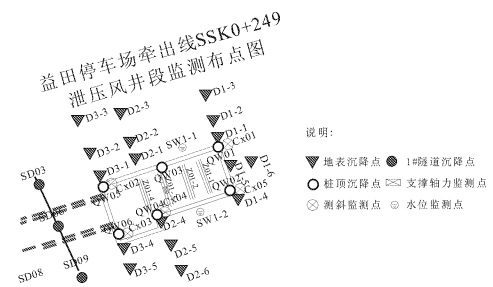


图 11 监测点布置图

3.1 地表沉降

通过对 1 号隧道东侧基坑外地表沉降监测数据的汇总统计,地表沉降数据如图 12、图 13 所示(数值为正代表隆起,数值为负代表沉降)。

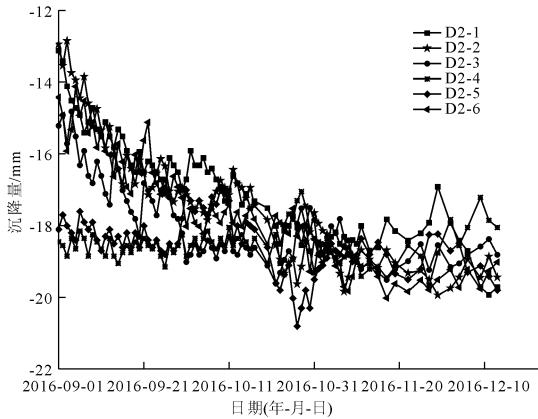


图 12 D2 方向地表沉降数据图

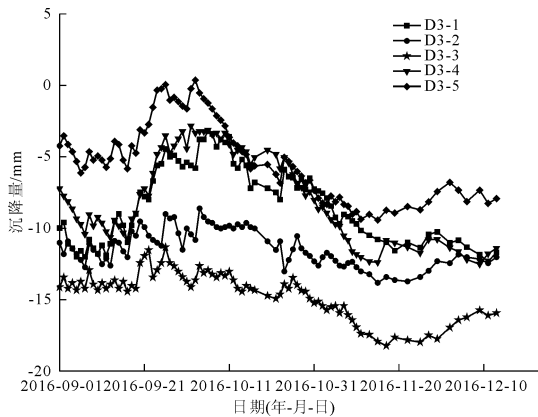


图 13 D3 方向地表沉降数据图

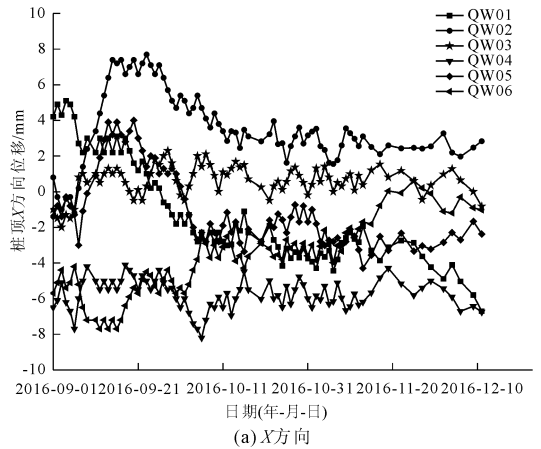
由图 12、图 13 的沉降量曲线可知, D2-1、D2-2、D2-3 与 D2-6 监测点从 9 月 1 日至 10 月 15 日沉降量比较大, 随后的沉降量的累计变形量有逐渐趋于稳定的趋势。而 D2-4 与 D2-5 监测点的沉降量从 9 月 1 日开始, 其变形沉降量已经稳定。D3 方向上, 可以看出 D3-1—D3-5 监测点在 9 月 1 日至 10 月 31 日之间, 其沉降变形量是稳定的, 随后的变形量随着施工的进行明显增大, 但是其变化总量没有超过 5 mm。

基坑周围的地表沉降跟到基坑的距离有关。距离基坑越近, 受基坑开挖的影响越大。但基坑北部个别点出现沉降过大的情况, 主要是因为施工机械干扰, 在承受载荷部位沉降较大。

3.2 桩顶水平位移

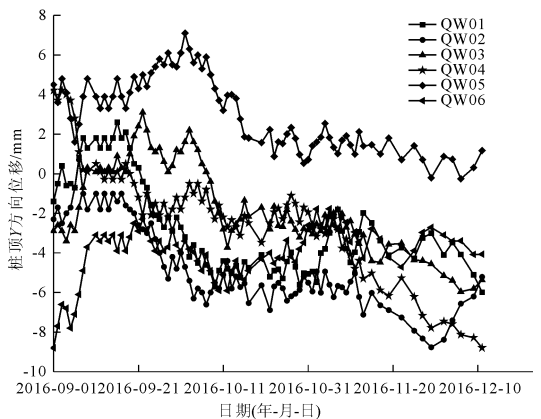
为研究基坑边坡随土方施工过程的稳定性, 最直接有效的方法就是监测基坑围护桩的水平位移变

化规律。桩身位移可以由变形反映出来, 位移既是监测的主要内容之一, 也是考察围护结构安全性能的重要指标。通过分析已有的监测数据, 分析基坑维护结构的变形规律。桩顶水平位移如图 14 所示。



(a) X 方向

注: X 变化量为“+”代表往基坑外侧, X 变化量为“-”代表往基坑内侧



(b) Y 方向

注: Y 变化量为“+”代表向东位移, Y 变化量为“-”代表向西位移

备注: X 变化量为“+”代表往基坑外侧, X 变化量为“-”代表往基坑内侧; Y 变化量为“+”代表向东位移, Y 变化量为“-”代表向西位移

图 14 桩顶水平位移

由桩顶 X 方向位移曲线可以看出: 在施工期内, QW01 监测点逐步向基坑内倾斜, QW03 与 QW04 监测点变化基本不大, 可以认为在此施工期内是稳定的。QW06 监测点有逐步向基坑外倾斜的趋势。

由桩顶 Y 方向位移曲线可以看出, QW01 与 QW02 在 9 月 21 日至 10 月 11 日期间随着施工的进行向西的位移增量比较剧烈, 在 10 月 11 日之后其只有少许的波动, 变化量不大; QW04 随着施工的进行稳步向西移动; QW05 同样随着施工的进行稳步向西移动, 但是较 QW04 而言, 其幅度较小。

由于基坑周围地表施工机械荷载的影响, 曲线表现出一定的不规律性, 但总体来说, 水平位移量较

小。总体上广深高速一侧的位移大于福荣路一侧。

本基坑明挖法施工过程中,第一层支护完成初期,桩身呈现出前倾型变形模式。之后,随着第二层土层开挖,支撑开始施作,桩身水平位移向基坑内外均有不同幅度发展,随着第二层支护开始施工,位移趋于稳定。

3.3 支撑轴力

通过对 1 号隧道东侧基坑支撑轴力监测数据的汇总统计,支撑轴力如图 15 所示(数值为正代表拉伸,数值为负代表压缩)。

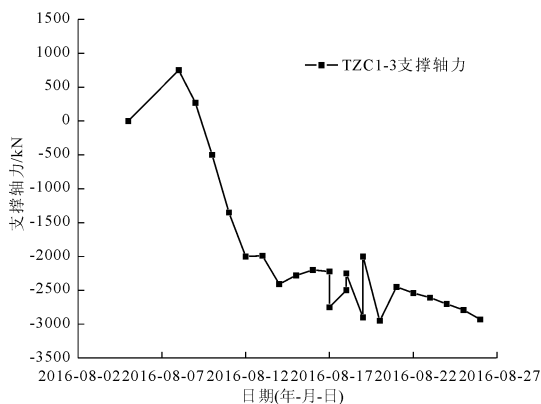


图 15 支撑轴力

由图 15 可以看出:8 月 6 日,监测点布置后,第一层支撑结构开始承受压力,支撑轴力迅速增加,另外随着第一层和第二层支护结构之间的土体开挖,轴力增加速度较大。8 月 14 日第二层土体基本开挖结束,支撑轴力达到 2 373 kN,并基本趋于稳定,8 月 20 日左右因第二层支护开始施工,支护预应力的存在,第一层支撑轴力减小至 1 810 kN,随后由于土体的固结变形作用增加到 2 887 kN,此过程变化速率较缓,变形基本稳定。支撑应力相比模拟结果较大。钢支撑的轴力变化与水平位移变化规律有一定的相似性,说明轴力的变化在一定程度上也能反映水平位移。

3.4 桩顶沉降

通过对 1 号隧道东侧桩顶沉降位移监测数据的汇总统计,结果显示:桩顶沉降位移累计均小于 9 mm。结果表明,桩顶沉降位移均可控制在要求范围内。

桩顶沉降位移如图 16 所示(数值为正代表隆起,数值为负代表沉降)。

从桩顶沉降曲线图中可以看出:QC01、QC02、QC03、QC04 与 QC05 监测点于 10 月 20 日左右,其沉降量逐步增大,并达到 6 mm 左右,而 QC06 监测点的沉降量依然稳定在 2 mm 附近,变化量并不大。

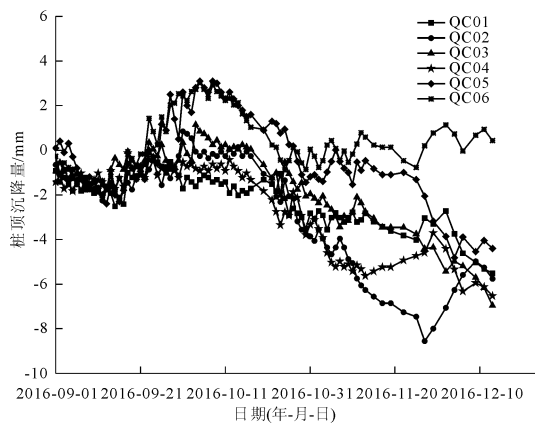


图 16 桩顶沉降位移

4 结论

本文在益田停车场的基础上,研究了支护结构的稳定性与合理性,并对基坑开挖进行了数值模拟研究,对地表沉降、桩顶水平位移、支撑轴力和桩顶沉降进行了一系列的分析处理。得出以下结论:

(1) 支护形式的确定要考虑地质条件、周边环境和工程造价的影响,单一支撑形式是很难满足要求的。

(2) 第一层支护完成初期,桩身呈现出前倾型变形模式。随着第二层土层开挖,支撑开始施作,桩身水平位移向基坑内外均有不同幅度发展,位移趋于稳定。

(3) 支撑轴力会随着施工和气温等因素有所波动,随着基坑开挖深度的增加,支撑轴力会急剧增加,最后趋于稳定值。

参考文献:

- [1] 李昌友. 淤泥质地层地下通道暗挖施工风险分析与地层加固研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
- [2] 朱彦鹏,杨校辉,周勇,等. 兰州地铁车站深基坑支护选型分析与数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016,14(1):55-59.
- [3] Ma C, Wang X G, Hu B, et al. Numerical simulation analysis of isolation pile-steel shotcrete combined support of deep foundation pit excavation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,638-640(1):507-511.
- [4] Shu Min Nie, Feng Ren. Study on risk management of deep foundation pit engineering[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014,638:574-579.
- [5] 蔡炜. 深圳前海片区海积淤泥地层条件下地铁车站基坑降水的数值模拟分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(18):2572-2573.

(下转第 29 页)

- [6] 蔡武林.深基坑开挖对临近地铁车站及区间影响的数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):222-226.
- [7] Nianqing Zhou, Pieter A. Vermeer, Rongxiang Lou, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence[J]. Engineering Geology, 2010,114(3):251-260.
- [8] Liang L. Monitoring and numerical simulation of structure behavior of supporting piles in a deep foundation pit[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20(1):245-257.
- [9] Wang X Q, Sun T T. Numerical simulation of construction of super-large deep soft soil foundation pits and analysis of its spatial and temporal effects[J]. Applied Mechanics & Materials, 2015,724(10):79-83.
- [10] 于雅琳,武 科,王亚君,等.深圳地铁在建明挖隧道区间基坑工程施工过程数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):158-162.
- [11] 周瑞锋,苏 莹.浅埋淤泥地层地铁隧道下穿城市干道技术研究[J].科技视界,2015(33):58-59.
- [12] 孙 挺.温州地区含深厚淤泥层的基坑开挖变形特性研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [13] 蒋明镜,肖 俞,朱方园.深海能源土宏观力学性质离散元数值模拟分析[J].岩土工程学报,2013,35(1):157-163.
- [14] 刘 鹭.深厚淤泥条件下被动区加固在深基坑工程应用与三维分析[J].福建建设科技,2015(1):14-16.
- [15] 王子哲.含深厚淤泥层的地铁深基坑变形特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.