

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.04.042

复杂边界条件下富水深基坑变形控制研究

刘本栋

(济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 城市地铁的迅速发展, 车站基坑工程的安全性愈发受到重视。为研究在地下水丰富、周边环境复杂的工况下基坑不同支护方案的安全性, 为类似工程设计施工提供指导及参考, 运用三维有限差分计算软件 FLAC^{3D} 对基坑工程施工过程进行数值模拟, 对基坑开挖过程中支护结构的水平位移、建筑不均匀沉降及管廊竖向位移进行研究。结果表明: 采用钻孔灌注桩(Φ800 mm@1 500 mm) + 内支撑及桩间旋喷形式, 基坑围护桩水平变形超过安全允许值, 且周边建筑物不均匀沉降较大; 若采用地连墙(厚 800 mm) + 内支撑的支护形式可有效控制基坑及周边构筑物的变形, 使结构处于安全状态。

关键词: 复杂边界; 深基坑; 支护结构; 渗流应力; 结构变形

中图分类号: U231.3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2017)04—0212—05

Selection and Optimization of Deep Basement Supporting Structure Under Complicated Environment

LIU Bendong

(Ji'nan Rail Transit Group Co., Ltd., Ji'nan, Shandong 250101, China)

Abstract: With the rapid development of city subway, the safety of foundation pit project in subway stations is becoming more and more important. To analyze the safety of different supporting schemes for foundation pit under the working condition with abundant groundwater and complex surrounding environment as well as provide guidance and reference for similar engineering design and construction, we use the 3D finite difference calculation software FLAC^{3D} to carry out numerical simulation during the construction process of the foundation pit project and calculate the horizontal displacement of supporting structure, uneven sedimentation of building and the vertical displacement of pipe track during the excavation process. Results show that by adopting the form of bored pile (Φ800 mm@1 500 mm) plus inner support and jet grouting between piles, the horizontal deformation of supporting pile of foundation pit exceeds allowable safety value and the uneven sedimentation of surrounding buildings is obvious. If the supporting form of diaphragm wall (thickness of 800 mm) plus inner support is used, it could effectively control the deformation of foundation pit and surrounding buildings so as to keep the structure in safe condition.

Keywords: complex environment; deep foundation pit; support structure; seepage stress; deformation of structure

随着我国经济的快速发展, 地下交通也蓬勃发展起来。在有限的城市空间中修建深基坑工程, 势必会对周边的建筑物造成影响, 而且在闹市中人口密度大, 交通繁忙, 若基坑支护形式不当, 极易引起基坑结构发生大变形, 同时引起周边构筑物出现倾斜, 甚至破坏^[1-6]。济南地区地层物理力学特征复杂, 且是全国有名的泉城, 地下水及其丰富, 地层水位较高, 在基坑开挖过程中会降低土体的自稳性。

在地下水丰富且周边存在多种构筑物的环境下

开挖深基坑, 国内研究人员对其研究不多。李进军等^[7]对紧邻地铁区间隧道深基坑施工方法进行了研究, 发现基坑采用临时隔断地连墙的支护效果较好, 可提高基坑稳定性; 黄俊光等^[8]对两个基坑相距较近的情况进行了模拟分析, 发现基坑围护结构形式直接影响基坑的安全性; 李宇升等^[9]对基坑紧邻区间隧道的影响进行了分析, 发现基坑采用灌注桩 + 内支撑的形式可保证基坑和隧道的变形在允许范围之内; 钟铮等^[10]分析了基坑附近存在高层建筑的逆

作法施工工艺,发现“两墙合一”设计联合地基加固可有效控制基坑及建筑变形;邹家南等^[11]对紧邻箱型隧道基坑施工中的双排桩应用进行了研究,发现双排桩可有效控制基坑及隧道结构的变形。

总结发现,国内学者对基坑周围存在单一构筑的情况研究较多,但针对基坑周边存在复杂构筑物的情况研究不多。本文对富水地层下基坑左侧存在高层建筑、右侧存在管廊和箱涵的情况研究基坑支护形式,分析了三种支护形式下的基坑及构筑物的变形特征,甄选出了最佳支护形式。

1 工程概况

济南地铁三号线一期工程位于济南市东部,起始于龙洞庄站沿龙鼎大道、奥体西路、工业北路方向延至滩头站,全长 21.6 km。沿线穿越许多重要构筑物,且周边环境较为复杂。济南地势由南往北地表标高逐渐降低,水位埋深逐渐变浅。位于工业北路的某车站,地下水位高,周边有高层住宅且有综合管廊及大直径输水管道。基坑标准段宽度为 20 m,开挖最大深度为 18.0 m,在基坑左边 10 m 位置存在高度为 30 m 的住宅楼,基坑右边 5 m 的位置存在大型管道和综合管廊。高层建筑为框架式结构,基础埋深 10 m,为管桩独立基础;市政管廊断面尺寸为 2

m × 2 m 的钢筋混凝土结构,埋深 3 m;大型输水管廊分左右两个,直径 6 m,埋深 10 m 左右,两管廊距离为 6 m,同样为钢筋混凝土结构,壁厚 1.2 m。基坑支护结构有三种方案:方案 1 是采用灌注桩 + 内支撑的形式;方案 2 是采用灌注桩 + 锚索的形式,止水形式均为桩间旋喷咬合;方案 3 是采用地连墙 + 内支撑的形式。具体方案分析见下文。

基坑开挖深度范围内(见图 1)主要以杂填土、粉质黏土、卵石层、黏土和胶结砾岩为主。且地下水位埋深距离地表 1 m 左右,同时卵石层渗透系数大,粉质黏土层相对卵石层渗透系数低,各地层物力学参数见表 1。

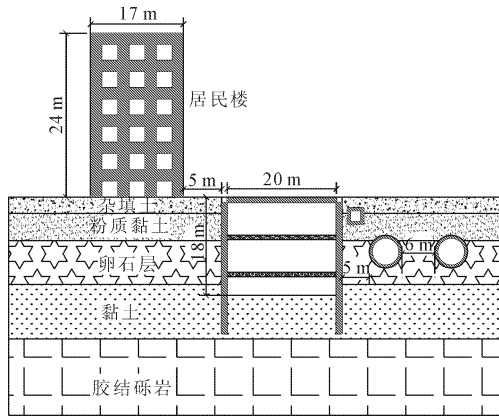


图 1 工程概况图

表 1 地层参数

地层名称	密度 /(kg·m ⁻³)	内黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /kPa	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)	泊松比
杂填土	1850	12	15	0.230	1.4 × 10 ⁻⁶	0.60
粉质黏土	1860	25	16	0.350	3.2 × 10 ⁻⁶	0.23
卵石	1950	20	14	0.800	4.1 × 10 ⁻³	0.31
黏土	1870	31	30	4.200	8.2 × 10 ⁻⁶	0.25
胶结砾岩	2400	600	45	500.000	2.0 × 10 ⁻⁶	0.18

2 数值模拟

2.1 计算软件及原理介绍

FLAC^{3D}(三维快速拉格朗日法)是一种基于三维显式有限差分法的数值分析方法,可以模拟岩土或其他材料的三维力学特性。三维快速拉格朗日分析将计算区域划分为若干四面体单元,每个单元在给定的边界条件下遵循指定的线性或非线性本构关系;如果单元应力使得材料屈服或者产生塑性流动,则单元网格可以随着材料的变形而变形。三维快速拉格朗日分析采用了显式有限差分格式来求解场的控制微分方程,并应用了混合单元离散模型,可以准确模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形,尤

其在材料的弹塑性分析、大变形分析以及模拟施工过程等领域有独特的优点。

计算模型是以有限差分单元体为载体,称为 Zone 或 Element,是分析现象(应力、变形)变化的最小几何区域。模型具有不同的形状,也可以根据实际情况建立具体的形状,例如隧道模型、基坑模型。模型中每一个单元都具有节点,相邻单元之间通过节点进行位移、应力传递,从而真实反映土体失稳引起的相邻地层或结构的变形规律。

2.2 数值模型建立

为了降低模型尺寸和边界对模拟结果的影响^[12-13],在建立模型时,选择模型尺寸分别为:模型长(X) × 宽(Y) × 高(Z)为 100 m × 80 m × 60 m,

模型共 852 150 个单元, 246 260 个节点。同时为了降低边界效应, 达到真实模拟基坑开挖的效果, 定义边界条件分别为: 模型顶部为自由面, 不受约束; 四周为对称边界条件, 只限制模型的水平位移, 不限制模型的竖向位移, 为水平链杆约束; 模型底部理论上讲应该是半无限边界, 因此模型下边界为固定约束, 即同时限制模型的水平及竖向位移^[14-16]。计算模型见图 2。

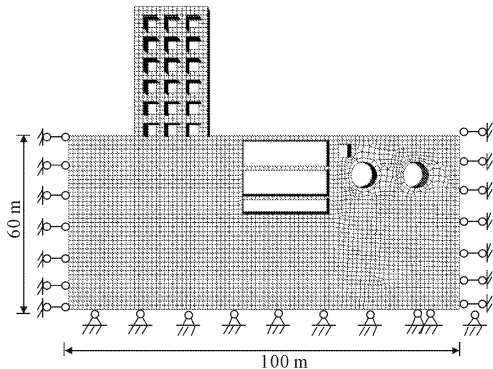


图 2 3D 数值模型

2.3 模拟步骤及参数选取

本工程最大特点是地下水丰富且地层渗透系数较大, 因此在初选模型地层参数时, 首先参照地勘资料, 分层定义各地层的渗透系数。定义土体破坏准则均服从摩尔库仑准则, 高层建筑选择实体单元模拟, 管廊、输水隧道也选择实体单元。锚索选择 Cable 单元, 横支撑选择实体单元。

首先在自重条件下运行模型至最大不平衡力为零, 设定软件每迭代 10 次记录一次最大不平衡力, 如图 3 所示为最大不平衡力曲线。可知, 模型在运行不到 2000 步时, 最大不平衡力便降低到了 0 N, 证明模型边界条件正确, 材料参数赋值无误。

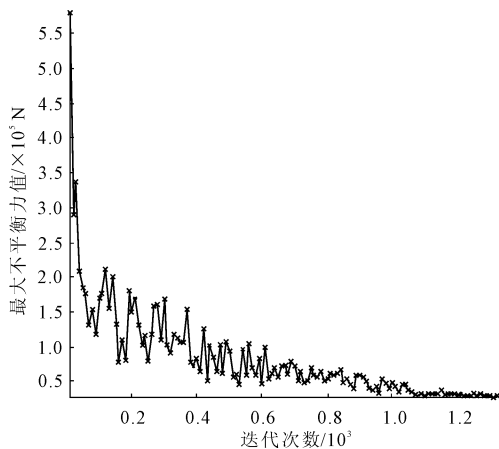


图 3 模型最大不平衡力曲线

3 方案模拟结果分析

3.1 方案 1 数值模拟结果

为了使支护结构更加经济, 同时保证基坑及周边构筑物的安全, 方案 1 选择单排灌注桩的支护形式, 桩长 24 m, 直径 800 mm, 桩间净距为 700 mm。基坑两侧均采用此种形式, 第一道支撑为混凝土支撑, 第二道及第三道支撑为钢管支撑。第一道、第二道及第三道的竖向距离均为 6 m。止水帷幕采用旋喷桩, 桩径 800 mm, 与围护桩咬合。

在模拟过程中, 基坑内部土体分层开挖, 每次开挖深度为 1 m, 且在开挖之前先将地下水水位降低至开挖面以下 0.5 m, 将模型运行至平衡后再进行下一步的开挖, 直至开挖坑底, 最后保证水位在基坑底部 1.5 m 处。如图 4 所示为基坑开挖之后的位移云图, 由图 4 可知: (1) 有高层建筑的一侧, 基坑变形较大, 横撑发生了弯曲, 基坑侧壁土体最大水平位移达 41.40 mm; (2) 由于高层建筑的存在, 第一道水平支撑受到较大轴力, 迫使支撑向基坑右侧移动, 造成管廊周边土体发生扭曲变形; (3) 管廊及输水隧道周边缺乏有效支护, 在土体位移、应力场发生重分布之后, 土体向管廊及隧道内部塌陷、涌动, 造成结构损坏; (4) 基坑底部出现隆起, 造成基坑底部两侧坑边发生应力集中, 位移差明显。

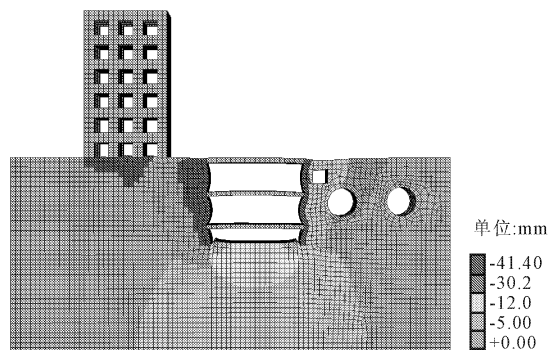


图 4 模型位移云图

图 5 为基坑孔隙压力速率图, 该图中箭头较大、较密区域代表孔隙压力较大及应力扩展剧烈区域。由图 5 可知: (1) 基坑右侧有构筑物一侧, 地层孔隙压力向基坑内部和底部发展, 同时在坑底应力向上发展, 表明高层建筑加剧了底部隆起趋势; (2) 基坑右侧, 管廊及输水隧道周边孔隙压力发展明显, 表明地层向基坑内部发展剧烈, 同时影响到临近侧壁土体应力场; (3) 整体分析来看, 基坑孔隙压力发展趋势集中较为明显, 多处应力波数值高, 不利于结构稳定。

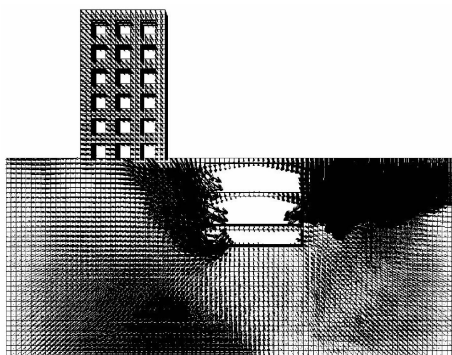


图5 模型孔隙压力场发展趋势

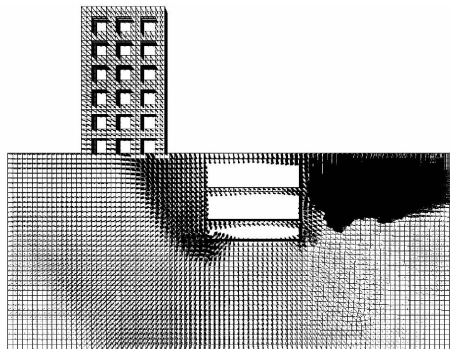


图7 方案2渗流应力场趋势

3.2 方案2数值模拟结果

方案1支护形式不能满足基坑安全性,因此在方案1的基础上继续提高支护结构强度。由原来的桩径800 mm提高至1 000 mm,桩间净距由原来的700 mm缩小至500 mm,旋喷桩直径降低至600 mm,仍采取桩间咬合形式,内支撑的形式及间距保持不变。图6为基坑开挖之后的位移云图,由图6可知:(1) 基坑左侧有建筑物的一侧,建筑底部地层竖向位移较大,建筑发生明显不均匀沉降,最大值为21.3 mm;(2) 基坑右侧坑壁,最大水平位移达34.1 mm,围护结构处于危险状态;(3) 基坑右侧管廊及输水隧道周围地层水平位移相对左侧小,管廊最大位移为15.3 mm。

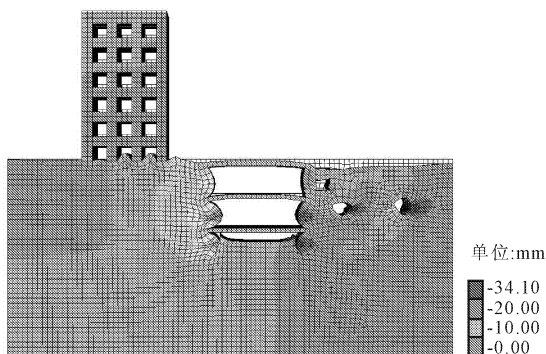


图6 方案2位移云图

孔隙压力场分布形式可反映基坑稳定性能,图7为基坑孔隙压力发展趋势。由图7可以看出:(1) 支护结构形式可改变地层应力应变分布形式,进而影响地层孔隙压力数值;(2) 该形式下基坑左侧孔隙压力明显降低,向基坑内部发展的趋势也有所降低,但左侧管廊部分由于内部土体遗失,孔隙压力向管廊内部发展,造成应力集中;(3) 基坑底部应力较低,未出现明显集中,从渗流应力上来说,基坑安全性较方案1略高。

3.3 方案3数值模拟结果

为进一步提高基坑稳定性,降低周边构筑物不均匀沉降,再次提高围护结构刚度,选择支护形式为厚1 000 mm的地连墙,墙深度至基坑底部5 m,基坑左右两侧对称设计,内支撑形式保持不变。图8为基坑位移云图,由图8可以看出:(1) 高层建筑最大不均匀沉降为15.3 mm。只在临近基坑一侧出现位移差值;(2) 基坑左侧土体水平位移最大值为17.6 mm,且位移支撑处的土体位移明显减小;(3) 基坑右侧土体主要发生竖向位移,在坑侧壁土体水平位移较左侧小,最大值仅为5.5 mm;(4) 管廊顶部及输水隧道顶部土体竖向位移仅为3.0 mm。结构整体安全性较高。

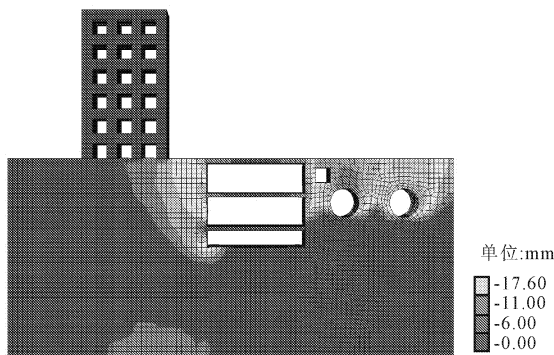


图8 方案3位移云图

图9为基坑孔隙压力场分布规律图,由图9可以看出基坑两侧孔隙压力基本对称,在坑顶部渗流应力较小,在坑底部渗流应力较大。地连墙对地下水的阻挡效果较好,且地面沉降大部分是由于地下水的损失引起的,因此在有效控制地下水的同时,地层有效应力基本不发生变化,与此同时,周边地层稳定性不会发生明显改变。可以判断,在该方案下基坑安全性及稳定性较高。

3.4 各方案围护结构变形规律

图10为基坑3种方案下围护结构水平位移曲

线,由图 10 可以看出:(1) 3 种方案围护结构变形规律相似,均呈侧“凸”型,但数值不同;(2) 方案 1 围护结构水平位移最大,最大值为 41.4 mm,最大值出现的深度在 15 m 左右;(3) 方案 2 围护结构最大水平位移为 34.1 mm,其深度位置与方案 1 相同;(4) 方案 3 围护结构水平位移明显减小,其最大值仅为 17.6 mm,相比方案 1 减少了 23.8 mm。对比分析可知,方案 3 下围护结构水平变形最小,可满足基坑安全使用的要求。

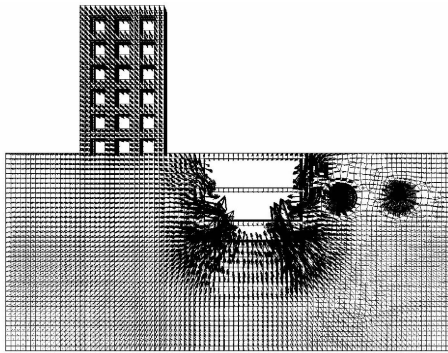


图 9 方案 3 渗流应力场趋势

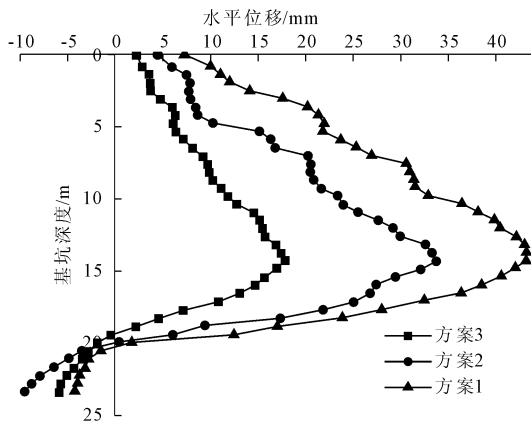


图 10 基坑左侧围护桩位移曲线

4 结论

地下水产生的应力场及孔隙压力对基坑安全性影响显著,在空间有限的区域采取基坑内部降水最重要的一点是保证坑外水位的稳定。同时,支护结构的强度及其对土体的稳固效果均会决定周边构筑物的安全。通过提出三种支护形式,在不考虑工程造价、施工周期等因素下,在结构变形及地层变形方面分析了各方案的结构变形规律,得到以下结论和建议。

(1) 含水地层基坑开挖,渗流应力对基坑地层沉降及结构变形影响极大,在施工过程中,应采取回灌等措施保证坑内水位保持稳定。

(2) 在基坑近距离存在高层建筑时,采用钻孔灌注桩+内支撑的形式难以有效保证结构的安全性,且会引起周边构筑物的稳定性降低。

(3) 采用地连墙的支护形式,将地连墙深入不透水层 1 m,可有效保证基坑外水位稳定,并且在基坑开挖过程中,高层建筑不均匀沉降较小,地连墙水平变形满足设计要求,方案可行。

参考文献:

- [1] 王安明,张淋柄.基坑桩锚支护变形监测与数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):25-29,117.
- [2] 陈俊生,莫海鸿,刘叔灼,等.复杂环境深基坑施工过程的模拟分析[J].岩土力学,2010,31(2):649-655.
- [3] 王树和,郑政,张举兵,等.土钉墙支护基坑对邻近地下管线的影响[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):19-24,74.
- [4] 黄俊宝,姚环.复杂环境软土基坑组合围护工程实践与评价[J].土工基础,2006,20(6):9-12,26.
- [5] 薛永申,黄玉林.复杂环境下软土地质深大基坑分区施工技术[J].上海建设科技,2014(1):36-39.
- [6] 齐振宇.基坑不同支护结构的数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):199-203.
- [7] 李进军,王卫东.紧邻地铁区间隧道深基坑工程的设计和施工[J].铁道工程学报,2011(11):104-111.
- [8] 李宇升,喻卫华.深基坑施工对紧邻地铁区间隧道结构影响分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(2):352-358.
- [9] 黄俊光,韩建强,张瑞华,等.紧邻深基坑施工相互影响的模拟分析[J].建筑结构,2012,42(6):112-114.
- [10] 钟铮,许亮,王祺国,等.紧邻保护建筑的深基坑逆作法设计与实践[J].岩土工程学报,2010,32(S1):249-255.
- [11] 邹家南,杨小平,刘庭金.双排桩在紧邻箱形隧道深基坑中的应用[J].施工技术,2014,43(17):14-17,56.
- [12] 王国富,路林海,王丹.基坑穿交既有管廊加固新方法及其变形控制技术[J].地下空间与工程学报,2015,11(S2):691-697.
- [13] 应宏伟,孙威,吕蒙军,等.复杂环境下某深厚软土基坑的实测性状研究[J].岩土工程学报,2014,36(S2):424-430.
- [14] 顾雷雨,黄宏伟,陈伟,等.复杂环境中基坑施工安全风险预警标准[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):4153-4162.
- [15] 王丹,王国富,路林海,等.基于不同本构模型黄河厚冲积层基坑开挖结构变形分析[J].防灾减灾工程学报,2016,36(6):936-942,949.
- [16] 王国富,王丹,路林海,等.基于改进西原模型的厚冲积地层基坑结构回弹参数敏感性分析[J].长江科学院院报,2016,33(10):84-92.