

地铁车站开挖过程中的变形监测及仿真分析

林 彰 银

(邵阳学院城市建设系 湖南 邵阳 422000)

摘要 为研究地铁车站开挖过程对地下连续墙、管线、墙顶和周边建筑的影响,采用 ANSYS 有限元方法建模计算,并与实测数据进行对比,验证了模型的可靠度,其最大误差为 7.45%。利用该模型计算各部位的沉降,得出:随着开挖过程的进行,第一道支撑轴力从 644.8 kN 变化到 3 610 kN,增长 460%;墙顶在第 10 天的沉降位移为 0.82 mm;管线在第 10 天的沉降位移为 0.35 mm;考虑地下水位变化时,周边 5 m 处的建筑会产生 0.79 mm 的沉降位移。根据力学平衡方程从理论上分析了地下连续墙的变形曲线。结合模拟结果,对不同因素引起的位移变化进行分析并提出解决方案,为今后绿色安全施工提供指导方法。

关键词 地铁 开挖 变形 监测 仿真

中图分类号 TP391.41 U455 文献标志码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.03.012

DEFORMATION MONITORING AND SIMULATION ANALYSIS IN THE PROCESS OF METRO STATION EXCAVATION

Lin Zhangyin

(Department of Urban Construction, Shaoyang University, Shaoyang 422000, Hunan, China)

Abstract In order to study the influence of the excavation process of the metro station on the underground diaphragm wall, pipeline, wall top and surrounding buildings, the ANSYS finite element method is used to model and calculate. Compared with the measured data, the reliability of the model is verified, and maximum error of the model is 7.45%. Using this model to calculate the settlement of each part, and it was concluded that with the progress of excavation, the first supporting axial force changed from 644.8 kN to 3 610 kN, with an increase of 460%. The settlement displacement of the wall top was 0.82 mm on the 10th day. The settlement displacement of the pipeline was 0.35 mm on the 10th day. When the change of groundwater level was taken into account, the surrounding buildings around 5 m would produce a settlement displacement of 0.79 mm. According to the mechanical equilibrium equation, deformation curve of the diaphragm wall was theoretically analyzed. Combined with the simulation results, the displacement changes caused by different factors are analyzed and solutions are proposed to provide guidance for green safety construction in the future.

Keywords Metro Excavation Deformation Monitoring Simulation

0 引 言

地铁已经成为各个城市不可缺少的交通工具,截至 2018 年 1 月,已经有 34 座城市开通了地铁,还有十几座城市正在建设地铁。但地铁车站基坑在开挖过程中会出现许多问题,其中地表沉降变形是最为重要的。

李方明等^[1]研究了地铁深基坑施工引起的周边地

表沉降规律。李文聪等^[2]对中洞法施工各施工工序引起的地表沉降变形规律进行了分析和总结。许有俊等^[3]揭示了在注浆压力作用下矩形顶管隧道周围土体的变形模式。孙庆先等^[4]研究了老采空区地表残余变形和煤矸石高填方沉降变形预计方法,提出了 2 种变形联合预计的技术思路。许树生等^[5]采用 FLAC3D 对基坑开挖及支护全过程进行数值模拟。刘重庆等^[6]研究在上软下硬地层中过渡区盾构法隧道施工对地表沉

降变形规律的影响。罗跃等^[7]推了解耦三维地面沉降数学模型。秦亚斌等^[8]研究盾构下穿大型立交时掘进速度对桩基的影响。范凡等^[9]研究了分隔型基坑群施工过程中隔墙变形、围护结构侧向变形和坑后土体沉降的发展规律。任连伟等^[10]提出一种适合于采空区地基的荷载影响深度 HD_z 确定方法。闫静雅等^[11]对上海地铁隧道近 25 年的变形数据进行分析,总结了隧道纵向不均匀沉降原因及典型特征。邱明明等^[12]提出了一种双线盾构施工引起的地表沉降计算公式,并根据实测数据显示该方法的可靠性。段宝福等^[13]围绕国内外地表沉降预测与控制的研究现状,对浅埋暗挖地铁隧道的变形预测、施工技术展开分析。王海涛等^[14]针对砂土地层的高斯沉降模式,建立了不同埋深处砂土地层损失与地表损失间的关系。张立亚等^[15]对深圳地铁的线路隧道进行了安全状态问题分析,并提出了解决办法。张书丰等^[16]解释了盾构隧道不均匀沉降是由不均匀分布的下卧软土与外部影响因素共同作用所造成。张学华等^[17]分析研究隧道变形发展在各个时期的规律,发现该区域隧道变形主要受软弱地质条件及周边物业开发影响。

本文以实际工程为背景,提供一种建模方法,计算地下连续墙、管线、墙顶和周边建筑的沉降数值,为今后施工预测方案提供依据。

1 工程概况

1.1 工程背景

上海轨道交通 17 号线工程主要位于青浦区,由沪青平公路至虹桥枢纽,线路走向为沪青平公路-淀山湖大道-盈港路-崧泽大道-诸陆东路,全长 35.30 km,其中高架线 18.28 km,地下线 16.13 km,过渡段 0.89 km;共设站 13 座,其中高架站 6 座,地下站 7 座,平均站间距 2.897 km。设徐泾车辆段 1 座,朱家角停车场 1 座。设主变电站 2 座,分别位于某车站附近和徐泾车辆段内。设控制中心 1 座,位于徐泾车辆段内。17 号线在已建的虹桥火车站站与 2 号线、10 号线和原规划 17 号线形成换乘。

上海某车站共设 3 个出入口及 2 个风亭。电力管廊长 87.24 m,净宽 2 m,净高 1.8 m,覆土 0.9~4.5 m。为确保东端头井盾构施工,在离东端头井约 70 m 处设置了一道临时封堵墙,将基坑分成 A、B 两个区域,如图 1 所示。



图 1 某车站分区

1.2 工程难点及周边建筑

某车站位于漕盈路东侧,平行布置在盈港路下方。车站北侧为吉富绅房地产开发工地(目前正在桩基施工),南侧为佳邸别墅,17 号线主变电站(待建)位于车站东北侧(与车站通道连接)。佳邸别墅为筏型基础,基础底标高 0.950 m,基础平面尺寸 20.7 m×14 m,与车站出入口基坑平面距离 5.46 m。盈港路存有大量通信、上水、污水、电力管线。距离基坑最近的 $\Phi 600$ 污水管(砼,深 2.8 m)距离基坑约 5 m,以及 $\Phi 400$ 雨水管线距离基坑约 7 m。

某车站地下连续墙穿越 2 层土,土层易塌方并且本地场周边环境较为复杂,其南侧皆为居民楼,距离基坑较近,地墙施工时极易对其产生沉降位移影响;基坑南侧存在雨污水、电力等管线,距地墙外边线最近距离为 5 m,地墙施工时也极易对其产生沉降位移影响。因此基坑施工期间应加强监测。

2 仿真方法及可靠度验证

2.1 方法与模型建立

本文采用大型通用有限元软件 ANSYS 来对工程开挖期的基坑变形和开挖过程中对周边环境的影响进行模拟分析。结合实际工程的受力分析,绘制出基坑内部支撑体系结构图,如图 2 所示。为确保 ANSYS 分析方法的合理性,对模型计算过程做一些假设:不考虑降水对土体性质的影响;不考虑土体的剪胀性,即理想弹塑性模型;地下连续墙、支护桩、支撑等采用弹性模型;不考虑土的流变;不考虑施工荷载对围护结构的影响。

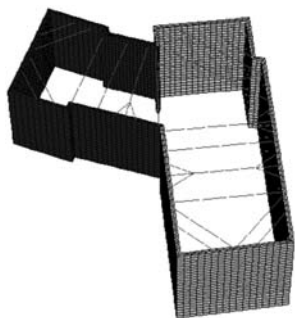


图 2 基坑结构

上海地处长江三角洲,覆盖层厚、土质松软、地下水位浅、成陆时间不长,故沉积物多为近代松软沉积物。区域内人类工程活动众多,区域工程地质、水文地质研究程度高。据区域地质资料,上海全境除西南部少数地区外,基岩之上覆盖着巨厚的松散沉积土层,属第四纪河(湖)一滨海相沉积层。由于上海地区地基土层受沉积环境及海进、海退、海陆交互作用影响,土层的变化比较复杂,粘性土、粉性土和砂土在垂直方向有规律相间分布,局部地层结构受古河道切割而有所变化。

根据工程沿线及邻近场地的已有勘察资料,通过钻孔取样得到车站附近的土层基本性能参数,如表1所示,并将得到的参数输入有限元软件。

表1 土层基本性能参数

土层	含水量/%	重度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	孔隙比
粘土	31.8	18.5	0.914
砂纸粉土	30.5	18.5	0.868
砂质粉土	29.4	18.6	0.850
粉砂	30.7	18.4	0.835

2.2 可靠度验证

当挖掘机作业时,通过埋入的传感器,监测地下施工0~29.5 m处的基坑变形情况,并与有限元软件计算进行对比,得到图3。

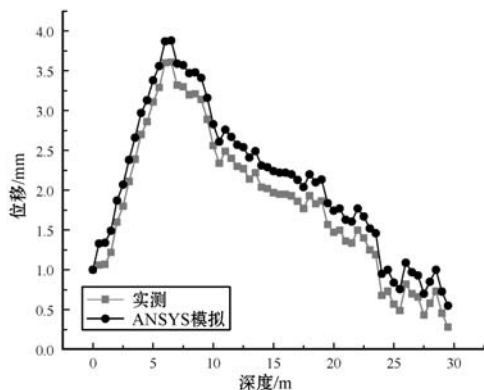


图3 模拟与实测对比图

从图3中可以看出,当深度为0~6.5 m时,地下连续墙的位移逐渐增大,最大处位移为3.61 mm;而当深度为6.5~29.5 m时,其位移变化逐渐降低,在监测的最低部位移为0.55 mm。可见地下连续墙的位移变形曲线呈一啤酒肚型。出现这一变化规律与它的受力方式有关,基坑结构的顶部有一支撑,因而可认为接触处为刚接,刚接能够限制地下墙的变形;另外,在施工过程中地下墙通过嵌入底部基岩来达到整体稳定性,而嵌入基岩中也被认为是刚接,受力分析如图4所示。因而,从力学角度来分析可以得出基坑底部围护结构的变形规律为中间大、两头小。

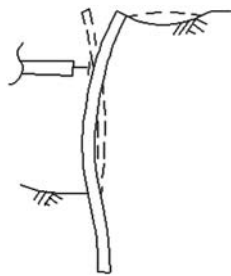


图4 地下连续墙的受力分析

ANSYS 模拟计算结果与实测数据较为吻合,而且计算结果比实测数据偏大,其最大误差为0.27 mm。出现这一原因是因为在实际工程中会根据现场监测得到的位移变化情况来调整施工进度、方案和临时制定加固措施。因而,实测数据比模拟计算结果略小且最大误差为7.45%,小于10%。这一结论在工程中是可以接受的。

3 模拟结果分析

3.1 轴力变化

由于该工程是分段开挖,利用本文模型,对第一道支撑的压力进行分析,得到了支撑轴力随时间的变化曲线,如图5所示。

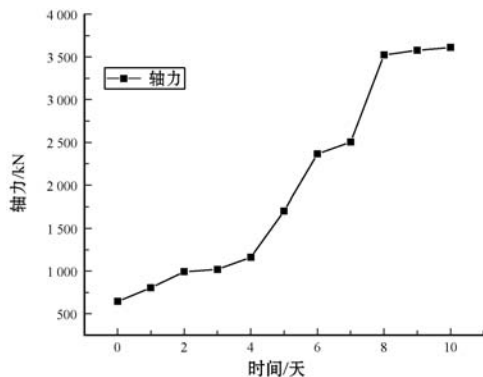


图5 轴力随时间的变化

从图5可以看出,在ANSYS模拟下,当基坑开始开挖时,第一道支撑的轴力为644.8 kN;而当开挖的4天内,第一道支撑轴力的变化缓慢,这是因为第一道支撑嵌固于连续墙中,可假定为固定端,致使的轴力变化缓慢。但当基坑逐渐开挖至第二道支撑(即第4~6天)时,第一道支撑轴力增长率迅速增加,第6天时第一道支撑轴力值为2363.3 kN。当基坑继续向下开挖时,第一道支撑轴力也在逐渐增大,支撑轴力增长率和0~6天开挖过程类似。当开挖到第10天(即第三道支撑)时,第一道支撑轴力值达到最大为3610 kN,增长460%。

忽略施工过程对混凝土支撑的扰动,可见开挖过程中会导致第一道支撑的受力逐渐增大,一方面可以根据结构力学平衡方程进行分析,但主要原因是因为

随着开挖深度的延长,其受力面积的增大导致支撑结构受力增大^[18]。

因此,为了解决支撑轴力过大的因素,通常可以减小受力面积或受力均布荷载。因而,可以利用三轴混凝土搅拌桩对地下连续墙两侧进行槽壁加固,增加槽壁自身稳定性,降低槽壁坍塌的可能,将工程风险降低。

3.2 墙顶沉降

利用本文模型,对第一道支撑的沉降进行分析,得到了墙顶沉降随时间的变化曲线,如图 6 所示。

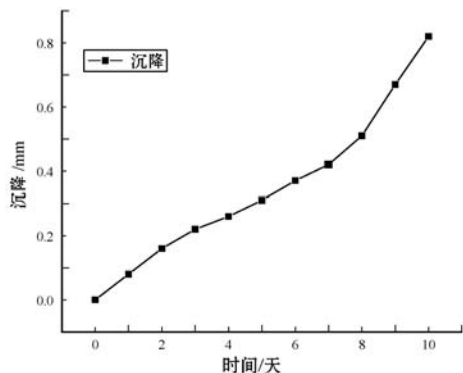


图6 墙顶沉降与时间的关系

从图 6 中可以看出,随着开挖时间的推移,墙顶沉降位移也逐渐增大。当开挖时间在 0~6 天内时,即开挖到第二道支撑,墙顶沉降变化呈线性增长趋势,但斜率较小变化缓慢。而当基坑继续向下开挖时,墙顶沉降变化率迅速增大,在第 10 天时,墙顶沉降高达 0.82 mm。

这是因为开挖过程会导致土体结构发生变化:一方面土体本身会发生固结沉降,而扰动土体后则会加快土体自身的沉降;另一方面开挖过程中会产生较大的附加应力,从而使得墙顶发生沉降^[19]。

为了解决墙顶沉降过大问题,可以采取钻孔灌注或打锚杆等方式,能够加强土体的凝结作用,使得土体不会因松软而发生沉降。

3.3 管线沉降

结合有限元模型,对地表管线进行分析,得出其沉降随时间的变化曲线,如图 7 所示。

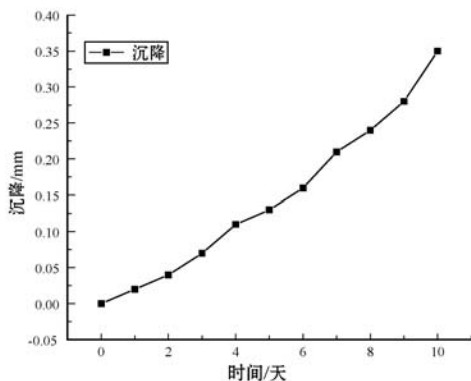


图7 管线沉降与时间的关系

从图 7 中得出,在第 10 天时,管线沉降为 0.35 mm,管线沉降变化比墙顶沉降变化较小。这是因为管线的布置较长,不会因基坑开挖而产生过大的沉降。因此,针对管线沉降主要是防止管线在施工过程中被破坏。通常可以采取设立警告牌或者对开挖阶段的管线外裹一层不锈钢套筒。

3.4 周边 5 m 处建筑沉降

利用本文模型,对距离开挖点处 5 m 的建筑进行沉降模拟仿真,得到了周边 5 m 处的建筑沉降随时间的变化曲线,如图 8 所示。

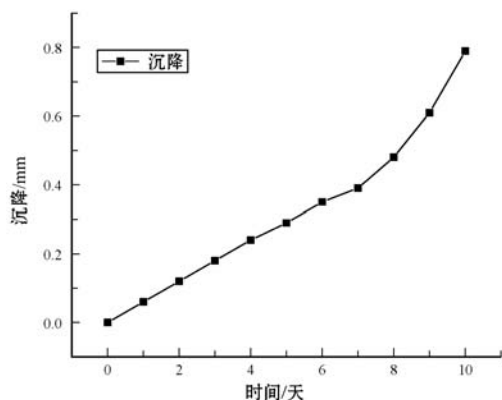


图8 周边建筑沉降与时间的关系

从图 8 中可以看出,基坑开挖对周边建筑会产生较大的沉降问题,在第 10 天时建筑沉降为 0.79 mm,这一沉降值比墙顶沉降值偏小。出现这一问题的原因与墙顶沉降过程原因类似^[19]。但本文模型在模拟建筑沉降时,考虑了地下水位的变化。根据施工方案,在开挖过程中对地下水进行抽取,使得地下水位下降至开挖低层。而地下水位的变化,会使得基坑土体失水而形成不饱和土体,从而导致沉降。

为了解决这一问题,可以采用多滤头深井,在每一道支撑下设计滤头,以多次加真空降水,同时发现地墙漏水要及时封堵。结合基坑开挖时,在坑内设置明水坑,让坑内明水引流到明水坑内,及时排出坑内。

4 结 语

通过有限元仿真模拟方法,能够分析出施工过程对支撑轴力、墙顶沉降、管线沉降和临近建筑沉降的影响,得到以下结果并给出技术解决方案:

(1) 地下连续墙的最大变形约在其长度的 1/3 处,因而可以采取增添支撑来解决变形过大的问题;有限元软件 ANSYS 计算的结果与实测数据较为吻合,最大误差为 7.45%;并且计算结果比实测结果始终偏大,当工程中采用模拟分析结果时,可以及时发现潜在的最大位移变化情况,为安全施工提供依据。

(2) 开挖过程中会导致第一道支撑的受力逐渐增大, 轴力最大变化高达 460%。因而可以利用三轴混凝土搅拌桩对地下连续墙两侧进行槽壁加固, 增加槽壁自身稳定性, 降低槽壁坍塌的可能, 将工程风险降低。

(3) 随着开挖时间的推移, 墙顶沉降位移第 10 天时高达 0.82 mm。在工厂中可以选择采用打锚杆并灌浆的方法减少墙顶沉降。管线不会因开挖施工而产生较大的沉降, 但对管线本身采取保护措施不可避免。

(4) 地下水位的变化对周边建筑沉降有着较大的影响, 周边建筑 5 m 处在施工后的第 10 天内会产生 0.79 mm 的沉降。在实际工程中需要对地下水位进行一定的控制, 可以采取多点式排水方法使得周边建筑底部的地下水位不发生变化, 而仅仅改变施工部位的水位变化。

参 考 文 献

- [1] 李方明, 陈国兴. 江漫滩悬挂式止水帷幕基坑地表沉降变形研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(1): 33-40.
- [2] 李文聪. 地铁车站中洞法施工地表沉降变形规律研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(2): 189-193.
- [3] 许有俊, 王雅建, 冯超, 等. 矩形顶管施工引起的地面沉降变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 192-199.
- [4] 孙庆先, 李杰, 陈清通, 等. 采煤沉降和高填方沉降双重影响下的地表移动变形预计方法与应用[J]. 煤矿开采, 2018, 23(2): 72-74.
- [5] 许树生, 侯艳娟, 刘美麟. 天津地铁 6 号线车站深基坑开挖下围护结构及墙后地表变形特性分析[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(1): 25-33.
- [6] 刘重庆, 曾亚武, 朱泽奇, 等. 厦门地铁上软下硬地层盾构施工引起的地表沉降研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 444-449.
- [7] 罗跃, 叶淑君, 吴吉春. 三维区域地面沉降数值模拟[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1063-1070.
- [8] 秦亚斌, 朱大勇, 张振华, 等. 盾构下穿大型立交时掘进速度对桩基及地表沉降的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 94-99.
- [9] 范凡, 章红兵, 王建华, 等. 软土地区分隔型基坑群变形特性实测分析[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(2): 133-140.
- [10] 任连伟, 周桂林, 顿志林, 等. 采空区建筑地基适宜性及沉降变形计算工程实例分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2922-2932, 2940.
- [11] 闫静雅, 王如路. 上海软土地铁隧道沉降及横向收敛变形的原因分析及典型特征[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 178-187.
- [12] 邱明明, 杨果林, 吴镇清, 等. 双孔平行地铁隧道盾构施工地表沉降分布规律研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 96-105.
- [13] 段宝福, 宋立坤, 周鑫明, 等. 浅埋暗挖地铁隧道地表沉降研究现状[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(4): 25-32.
- [14] 王海涛, 金慧, 涂兵雄, 等. 砂土地层地铁盾构隧道施工对地层沉降影响的模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(6): 70-78.
- [15] 张立亚, 张宏梅, 李黎, 等. 地铁盾构线路穿越运营隧道的沉降影响[J]. 测绘科学, 2017(2): 109-113.
- [16] 张书丰, 高永, 孙泽信. 南京河西地区地铁盾构隧道不均匀沉降分析[J]. 都市轨道交通, 2017, 30(2): 52-57, 74.
- [17] 张学华, 王怀东. 软土地区地铁矩形隧道长期沉降规律及预测[J]. 都市轨道交通, 2017, 30(5): 70-77.
- [18] 武进广. 粉砂土深基坑支护结构受力变形特性分析[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(5): 91-96.
- [19] 曹书文, 赵冬, 张卫喜. 顶管施工对上部墙体沉降影响分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(2): 292-295.
- [20] 金艳平, 李小刚, 陈明, 等. 深基坑开挖对邻近建筑物的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(6): 1219-1226.

(上接第 44 页)

- [13] Ling G, Lyu M R, King I. Ratings meet reviews, a combined approach to recommend [C]//Proceedings of the 8th ACM Conference on Recommender systems. New York: ACM, 2014: 105-112.
- [14] Feng S, Cao J, Wang J, et al. Recommendations based on comprehensively exploiting the latent factors hidden in items' ratings and content [J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, 2017, 11(3): 1-27.
- [15] 袁正午, 陈然. 基于多层次混合相似度的协同过滤推荐算法[J]. 计算机应用, 2018, 38(3): 633-638.
- [16] 李琳, 刘锦行, 孟祥福, 等. 融合评分矩阵与评论文本的商品推荐模型[J]. 计算机学报, 2018, 41(7): 1559-1573.
- [17] Rendle S. Factorization machines [C]//Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Data Mining. 2010: 995-1000.
- [18] He X, Chua T S. Neural factorization machines for sparse predictive analytics [C]//Proceedings of the 40th International ACM SIGIR conference on Research and Development in Information Retrieval. New York: ACM, 2017: 355-364.
- [19] Li P, Wang Z, Ren Z, et al. Neural rating regression with abstractive tips generation for recommendation [C]//Proceedings of the 40th International ACM SIGIR conference on Research and Development in Information Retrieval. New York: ACM, 2017: 345-354.