

上盖物业对复杂地层中的地铁车站影响效应预测

王呼佳¹ 许炜萍² 赵楚轩² 杨 朋¹ 肖支飞²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都;

2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘 要 采用理论分析、数值分析和现场实测等手段, 对广州地铁鹅掌坦站施工安全和上盖物业效应进行研究。结果表明: 基坑施工导致的地面最大沉降为 19 mm, 围护结构最大水平位移为 11 mm(位于基坑 2/3 开挖深度处), 且地面沉降与围护结果水平位移均小于允许值 30 mm; 在基坑深度方向下部支撑轴力大于上部支撑, 在纵向上支撑轴力呈现中间大、两边小的分布规律; 上盖物业导致的地表沉降具有不均匀沉降特性, 建筑物倾斜值为 0.001, 小于允许倾斜度, 车站中柱应力增幅约为 3.6 MPa, 表明上盖物业对车站的附加影响不大, 车站主体结构处于安全状态。研究结果可为类似复杂地层中地铁车站的修建和上盖物业的开发提供借鉴。

关键词 地铁车站; 上盖物业; 复杂地层; 数值分析; 现场监测

中图分类号 U291

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.07.006

Impact Effect Prediction of Overhead Property on Metro Station Built in Complex Strata

WANG Hujia, XU Weiping, ZHAO Chuxuan, YANG Peng, XIAO Zhifei

Abstract By means of theoretical analysis, numerical test and field measurement, the construction safety of Ezhangtan Station in Guangzhou metro and the effect of overhead property are studied. The result shows that the maximum ground settlement caused by foundation pit construction is 19 mm, the maximum horizontal displacement of enclosure structure is 11 mm, which is located at 2/3 excavation depth of the foundation pit. Both settlement and lateral displacement are less than the allowable value of 30 mm. The axial force of lower support is larger than that of upper support along the depth direction of foundation pit, and the distribution law of middle support is larger than that of the upper support in the longitudinal direction. The ground settlement caused by the overhead property has the characteristics of uneven settlement, and the inclination value of the building is 0.001 which is small than the allowable inclination. The increase of the stress in the middle column of

the station is about 3.6 MPa, indicating that the overhead property has little additional influence on the station, and the main structure of the station is in safety. This research results provide technical guidance and reference for metro stations built in complex strata and the overhead property development.

Key words metro station; overhead property; complex strata; numerical analysis; field monitoring

First-author's address China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

针对目前大中城市有限的土地供给资源和高昂的地价, 地铁上盖物业的合理开发已成为发展趋势, 对于上盖物业与地铁车站相互影响的研究亦逐渐得到关注。

近年来, 众多学者对处于复杂地层的车站安全性问题进行了研究。文献[1-3]就砂土及黏土地层基坑开挖支护特性对深基坑施工的稳定性影响进行了研究。文献[4-6]针对软土地层基坑施工围护结构的变形以及施工所造成邻近结构的影响规律进行了分析。文献[7-9]通过数值分析方法对深基坑施工过程中土体及支护的稳定性进行了研究。

针对地表建筑物与车站之间的相互影响关系, 诸多学者也进行了深入研究。文献[10]以建筑物抵抗变形的能力作为衡量基坑外建筑物安全的指标, 提出城市轨道交通深基坑周边建筑物安全的评估方法。文献[11]以三维有限元数值分析的手段验证了基础托换的技术方法能够有效地减小基坑开挖对地表建筑物的影响。

综上所述, 地铁车站的施工安全已成为业界的研究热点, 并取得了诸多成果, 但对于复杂地层, 尤其是溶蚀风化凹槽区的地铁车站修建技术和上盖物业的影响与预测分析尚不多见。本文以广州地铁 8 号线鹅掌坦站为工程依托, 采用数值分析和现场实测相结合的方法对复杂地层地铁车站的安全评价和上盖物业效应进行预测分析。

1 工程概况

1.1 依托工程概况

鹅掌坦站属于广州地铁 8 号线,全长 294 m,位于双向四车道的西槎路东侧。该站为地下 3 层的岛式站台车站,标准段宽度为 20.5 m,加宽段宽度为 24 m,基坑开挖深度达到 24 m。

1.2 车站施工方案

车站采用明挖顺筑法施工,围护结构为 1 m 厚的地下连续墙,内支撑采用竖向 4 道支撑。第 1 道支撑为 C30 钢筋混凝土支撑,截面为 800 mm×1 000 mm,水平间距为 9 m;第 2 道支撑为 C30 混凝土支撑,截面为 800 mm×1 100 mm,水平间距为 9 m;第 3、4 道钢支撑为 ϕ 600 mm、壁厚 16 mm 的 Q235 钢管,并施加预应力。

车站结构形式为地下三层两跨钢筋混凝土框架结构,顶板、中板、底板与中柱、内衬墙形成闭合框架,顶板、中板和底板设计为梁板体系。主要构件尺寸如下:顶板厚 900 mm,中板厚 400 mm,底板厚 1 100 mm,车站边墙的厚度取 900 mm。顶板、中板和底板均采用 C35 混凝土,中柱采用 C50 混凝土。鹅掌坦站地层剖面如图 1 所示。

1.3 工程地质

根据现场勘察情况及报告,站址区地层主要包括杂填土、淤泥、砾砂、可塑状的粉质黏土、强风化的碳质灰岩和中风化碳质灰岩,具体物理力学参数见表 1。

1.4 现场监测

在施工过程中,为保证车站施工安全,对周边

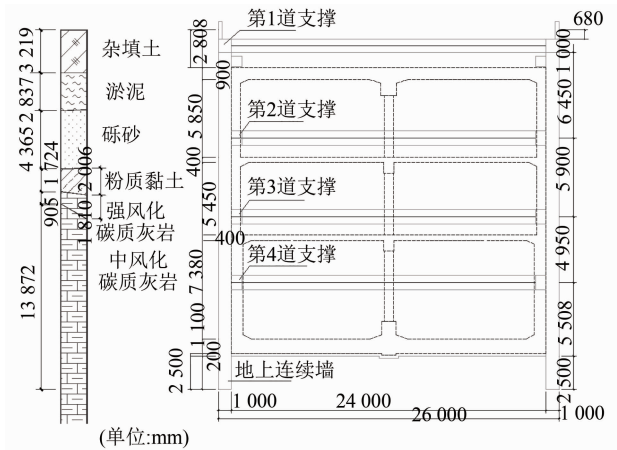


图 1 鹅掌坦站地层剖面图

表 1 鹅掌坦站地层参数表

土层	密度/ (g/cm ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	变形模量/ MPa	泊松比
杂填土	1.65	9.4	5.7	8.0	0.33
淤泥	1.56	5.4	4.7	2.5	0.45
砾砂	2.03	0	32.0	20.0	0.21
粉质黏土	2.02	15.6	9.8	15.0	0.33
强风化碳质灰岩	2.05	28.0	25.0	35.0	0.28
中风化碳质灰岩	2.40	400.0	25.0	1 500.0	0.25

道路沉降、围护结构顶面水平位移、墙体变形、墙体后土体侧向变形和支撑轴力等项目进行了全方位监控。本文仅选取部分地表沉降及混凝土支撑轴力的测点作为分析对象,从中发现其变化规律并与后续的数值分析进行验证。共选择 12 个地表沉降测点(分别为 D1、D2、D6、D9、D13、D17、D20、D23、D27、D31、D34、D38)以及 9 个支撑轴力测点(分别为 Z16、Z15、Z14、Z10、Z8、Z6、Z3、Z2、Z1)进行分析。具体测点布置见图 2。

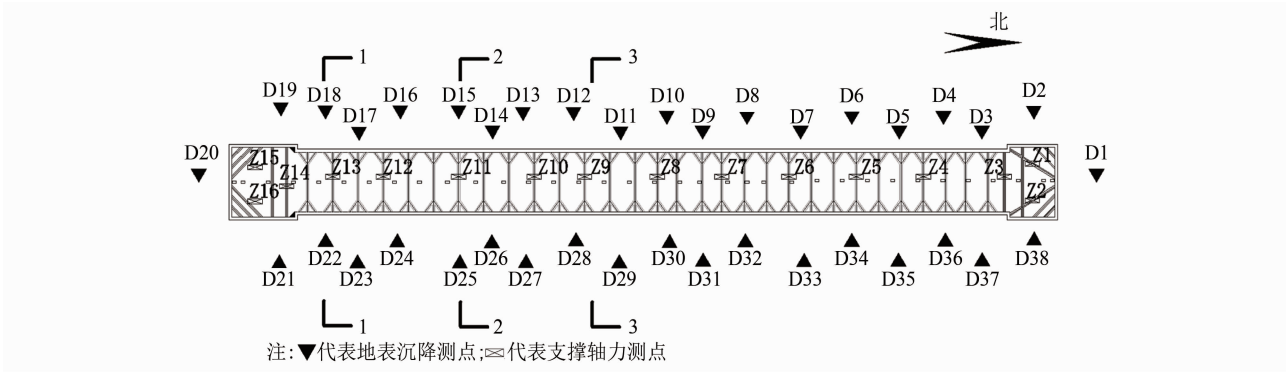


图 2 基坑测点布置图

基坑各测点处的最终地表沉降如图 3 所示。由图 3 可以看出,基坑东西侧的地表沉降呈非对称分布,其中基坑西侧的沉降值略大于相同断面处基坑

东侧的沉降值,分析其原因是由基坑周边施工物品堆放及车辆荷载导致;从整体来看,基坑中部的沉降要大于两端的沉降量,最大沉降发生于基坑西侧

距离基坑北端部 270 m 处,为 20.5 mm,未达到施工控制的 330 mm 的预警值。各测点的实测轴力如图 4 所示。从图 4 可以看出,在基坑深度方向上支撑轴力呈现增长态势,在平面上支撑轴力分布呈现中间轴力大、两端头轴力小的特点,整体轴力均小于本工程混凝土支撑轴力设计值 10 802 kN。

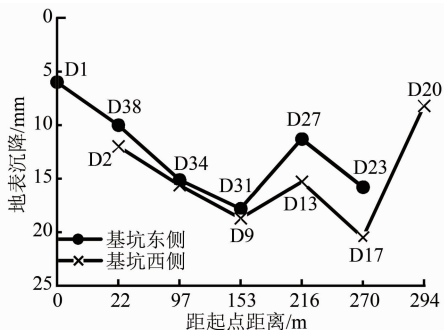


图 3 基坑各测点处实测地表沉降图

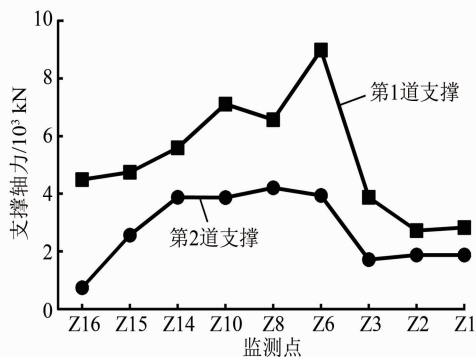


图 4 基坑各测点实测轴力图

2 数值分析

2.1 计算方法

采用三维快速拉格朗日计算方法^[12]进行数值仿真。该方法为显式有限差分法,可以有效模拟岩土体的屈服、软化乃至大变形,在弹塑性、大变形及施工过程仿真等领域有显著优势。岩土体是一种复杂的各向异性体,在外力作用下,不仅产生弹性变形,亦会产生塑性变形。因此,本文采用莫尔-库伦弹塑性准则进行模拟,其屈服准则为:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} = 0 \quad (1)$$

$$N_\varphi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (2)$$

式中:

c ——黏聚力;

φ ——内摩擦角;

σ_1 ——第一主应力;

σ_3 ——第三主应力。

岩土体屈服后的变形是弹性和塑性的复合结果,任意应力增量所对应的应变 $d\varepsilon_{ij}$ 均由弹性分量 $d\varepsilon_{ij,e}$ 和塑性分量 $d\varepsilon_{ij,p}$ 两部分组成,即:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij,e} + d\varepsilon_{ij,p} \quad (3)$$

其中, $d\varepsilon_{ij,e}$ 容易求得, $d\varepsilon_{ij,p}$ 与塑性势函数 Q 存在如下关系:

$$d\varepsilon_{ij,p} = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

式中:

$d\lambda$ ——非负的瞬时比例系数;

σ_{ij} ——应力张量。

FLAC3D 软件分别对剪、拉塑性流动进行了定义,且对应不同的流动法则。其中,剪塑性流动对应非关联流动法则,其势函数为:

$$Q_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (5)$$

$$N_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (6)$$

式中:

ψ ——剪胀角。

拉塑性流动对应关联流动法则,其势函数为:

$$Q_t = \sigma_3 \quad (7)$$

2.2 计算模型与参数

鹅掌坦站实际长度为 294 m,基于论文的研究对象,考虑计算能力和效率,依据对称原理对其进行简化,仅选取了南侧长度为 133 m 的一段进行分析,最终确定的计算模型如图 5 所示。模型整体尺寸为 193 m×146 m×54 m,车站标准段宽度为 20.5 m,扩大段宽度为 24 m,基坑开挖深度为 24 m。计算模型的上边界为自由边界,底部以及左右前后边界为法向约束。同时,在模型顶部结合道路分布考虑 20 kN/m² 的路面荷载。站址区的具体地层分布以地勘报告为准,典型地质横剖面如图 6 所示。在计算模型中,土体采用莫尔-库伦模型,地下连续

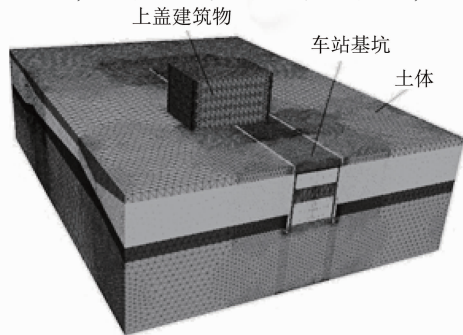


图 5 鹅掌坦站 Flac3D 计算模型图

墙、车站主体结构及上盖建筑物均采用弹性实体模型,钢筋混凝土内支撑采取 beam 单元,钢支撑采取 cable 单元。

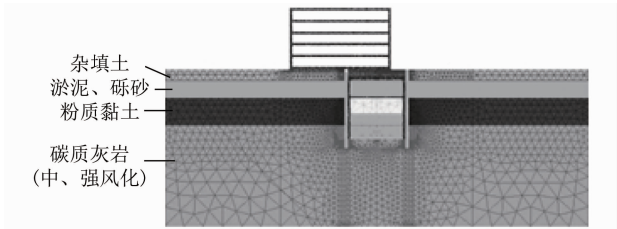


图 6 鹅掌坦站地质横剖面图

2.3 计算工况

根据设计图纸及勘察报告,结合现场施工情况,数值计算分为 14 个工况,如表 2 所示。

表 2 数值计算工况

工况	描述
1	激活土体,进行初始地应力平衡
2	地下连续墙模型赋值,开挖至第 1 道支撑底面处
3	设置第 1 道支撑,开挖至第 2 道支撑底面处
4	设置第 2 道支撑,开挖至第 3 道支撑底面处
5	设置第 3 道支撑,施加预应力 1 200 kN,开挖至第 4 道支撑底面
6	设置第 4 道支撑,施加预应力 1 200 kN,开挖至基坑底面
7	拆除第 4 道支撑,构建车站底板及部分侧墙
8	拆除第 3 道支撑
9	建筑车站侧墙及中板,拆除第 2 道支撑
10	建筑剩余部分侧墙顶板,拆除第 1 道支撑
11	回填覆土
12	上盖建筑物基础激活
13	上盖建筑物逐层施作

2.4 现场监测与数值计算结果对比

本文在基坑端头、中部以及尾部各选取部分测点的沉降值和支撑轴力的监测数据与计算结果进行对比验证分析,如图 7~8 所示。从图 7 可以看出,计算结果与监测数据的吻合度较高,所有测点的相对误差均不超过 20%;从图 8 混凝土支撑轴力对比来看,整体吻合度较好,仅测点 Z12 的相对误

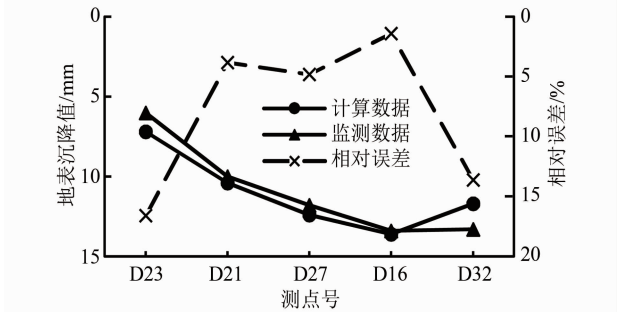


图 7 地表沉降数据对比图

差超过了 20%,但考虑支撑轴力监测设备受天气温度等环境因素影响较大,故数值分析方法依然具有较好的可行性。

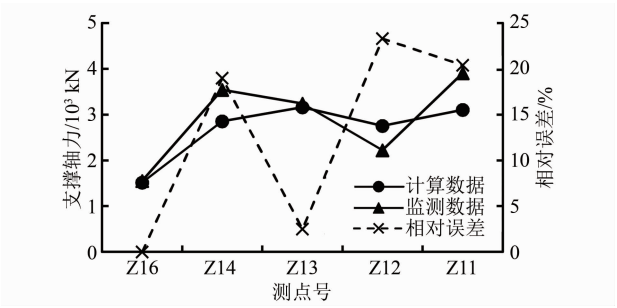


图 8 混凝土支撑轴力对比图

2.5 计算结果

2.5.1 位移空间效应

为了更好地表现基坑地表沉降及水平位移深度方向的分布规律,提取工况 5 的基坑标准段断面 1~3 沉降横向分布以及基坑中部水平位移云图,具体如图 9~10 所示。从图 9 可以看出:距离基坑侧边缘 10 m 处有沉降槽出现,其中基坑东侧最大沉降为 11 mm,基坑西侧最大沉降为 12 mm;在基坑两侧 1 m 范围内存在隆起现象,最大值为 2 mm。从图 10 可以看出,基坑整体均发生向开挖方向的位移,顶部及底部水平位移小,中下方位移大,整体呈现匀型,水平侧移最大值为 11.6 mm,小于《基坑工程技术规范》规定的一级基坑开挖水平位移允许值 30 mm。

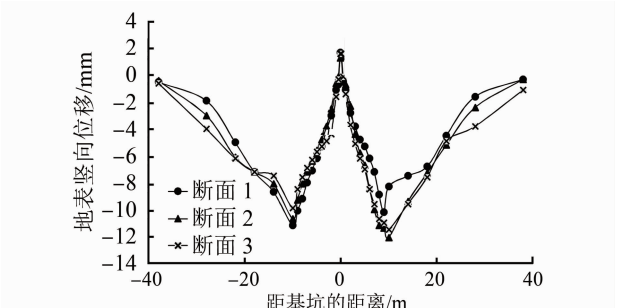


图 9 基坑标准段两侧沉降分布图

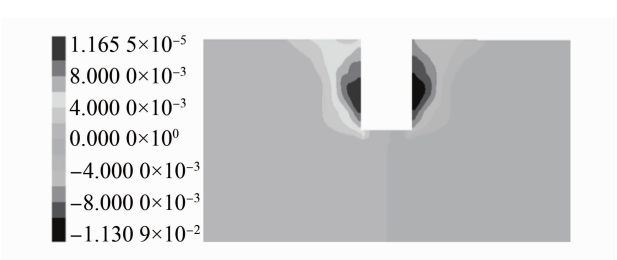


图 10 基坑中部水平位移云图

2.5.2 支撑轴力随开挖步变化

基坑开挖过程中的内支撑轴力对基坑安全和变形控制至关重要。本文提取基坑加宽段斜撑轴力测点 Z15、横撑轴力测点 Z14 及基坑标准段轴力测点 Z11、Z12、Z13 的数据,如图 11 所示。

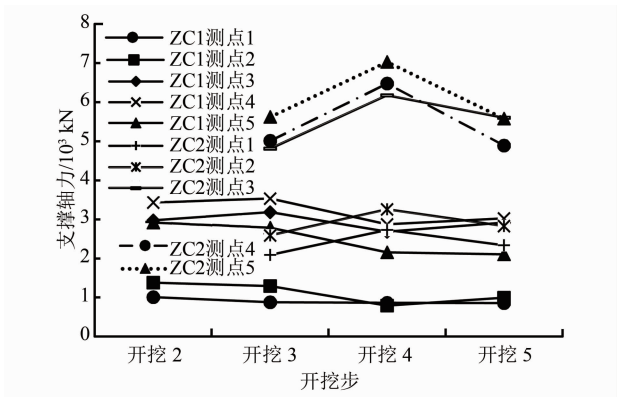


图 11 支撑轴力随开挖步变化图

从图 11 可以发现:支撑轴力随着开挖的进行呈现先增大后减小的规律,第 1 道支撑轴力变化幅度小于第 2 道支撑;下部支撑轴力大于上部支撑轴力,且总体轴力值均未超过施工所布置的轴力预警值 9 800 kN。

3 上盖物业对地铁车站的影响效应预测

3.1 计算模型参数

采用上述经过校验的计算方法和参数,在鹅掌坦站原有模型的基础上修建多层建筑物,以预测上盖物业与车站的相互影响。结合上盖物业规划,确定其平面尺寸为 25 m×35 m,高度为 21 m,采用板加侧墙、中隔墙的结构形式进行仿真,基础采用 1 m 深的浅基础,其剖面示意图见图 12。

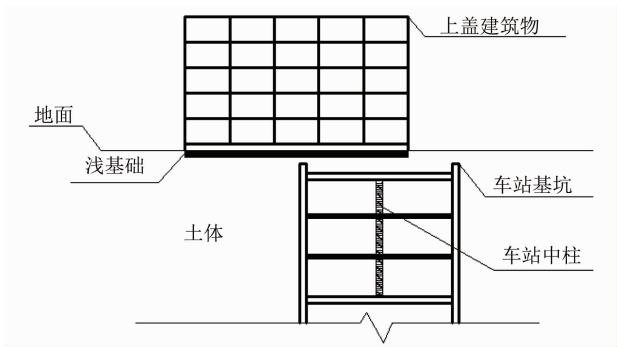


图 12 上盖物业剖面示意图

3.2 地表沉降

上盖物业的修建势必会引起地表沉降,为了研究上盖物业对地表沉降的影响规律,提取上盖物业

影响范围内的沉降等值线,具体如图 13 所示。

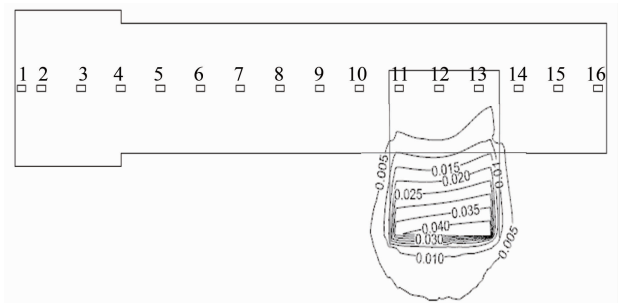


图 13 上盖建筑物地表沉降等值线图

从图 13 可以看出,沉降具有明显的不均匀性,上盖物业沿基坑横断面方向的不均匀沉降较为明显,车站上方的沉降很小(大部分小于 5 mm),靠近车站侧沉降为 5 mm,远离车站侧沉降为 40 mm。根据《建筑物倾斜标准》规定的房屋倾斜值计算公式计算得到建筑物倾斜值为 0.001,小于规范中的允许倾斜标准 0.006。但上盖物业沿基坑纵断面方向呈现均匀沉降态势,究其原因是车站结构刚度大及抵抗变形能力强,所以靠近基坑侧沉降小;但是远离基坑侧的下方为天然土体,变形较大,由此造成两侧沉降不一致。所以在实际工程中,建议对远离基坑侧的地基进行强化处理,或采取合理的基础形式来抑制不均匀沉降。基坑侧的沉降较小,对周边环境的位移影响不大,但在实际施工中尚应对车站的受力状态进行关注,避免上盖物业的附加荷载超过车站结构的承载能力。

3.3 中柱受力

中柱作为车站承载体系的重要一环,其应力变化可以用来评价上盖物业对车站受力的影响。提取车站中柱(柱号从南至北以 1~16 排列)的应力数据与未施作前的中柱应力值进行对比,见图 14。

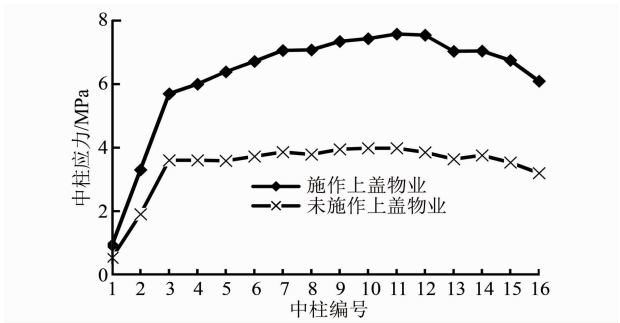


图 14 上盖物业对车站中柱应力影响曲线图

从图 14 可以看出,施作上盖物业会造成中柱应力增加,最大增幅位于中柱 12,为 3.6 MPa,并于中

柱 12 两侧应力逐渐递减。施作上盖物业后车站中柱轴力最大为 6 280 kN,中柱极限承载力按不利的偏心受压构件计算,其承载力为 15 246 kN,故施作上盖建筑物对车站结构影响不大。

4 结论

1) 构建了鹅掌坦站数值分析简化模型,通过与现场多项实测数据对比分析,对计算模型、方法和参数的合理性进行了验证,可为上盖物业效应预测和类似工程提供技术支持。

2) 地表沉降最大值为 20.5 mm,且在基坑两侧沉降呈槽型,沉降槽出现位置在基坑两侧 $0.5H$ (H 为开挖深度) 处附近。受支撑作用的影响,基坑顶部位移小,底部位移大,整体呈现“勺型”;最大位移为 11 mm,位于 $2/3H$ 处,沉降与水平侧移均小于允许值。

3) 在基坑深度方向上,下层混凝土支撑轴力大于上层支撑;在基坑长边方向上,支撑轴力则呈现中间大、两边小的态势。

4) 上盖物业在车站横断面方向上呈现明显的不均匀沉降特性,建筑物倾斜值为 0.001。实际施工时可对远离车站侧的土体进行加固处理;车站中柱所受荷载小于柱承载力,表明上盖物业的附加荷载影响不大,车站主体结构处于安全状态。

参考文献

- [1] 陈阳,赵文,贾鹏蛟,等. 砂土地区深基坑稳定性评价及力学效应分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018(9):1353.
- [2] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2007(1):30.
- [3] 李佳宇,陈晨. 坑角效应对基坑周围建筑物沉降变形影响的研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(12):2238.
- [4] 于廷新. 软土地区某临近高铁基坑支护设计及监测分析[J]. 铁道工程学报,2015(11):23.
- [5] 汪俊杰,刘少伟. 软土地层深基坑地下连续墙支护参数敏感分析与优化[J]. 地下空间与工程学报,2015(增刊2):666.
- [6] 糕一,张军,宋顺忱. 软土地区基坑开挖对临近高铁影响数值仿真分析[J]. 铁道工程学报,2014(2):41.
- [7] 唐仁,林本海. 基坑工程施工对邻近地铁盾构隧道的影响分析[J]. 地下空间与工程学报,2014(增刊1):1629.
- [8] 沈辉,罗先启,李野,等. 深基坑施工对地铁车站影响的数值仿真分析[J]. 地下空间与工程学报,2011(5):1018.
- [9] 杨贵生,李雨润,李雨辰. 超深基坑支护开挖对土体变形影响数值模拟研究[J]. 铁道工程学报,2008(6):32.
- [10] 龚迪快,成怡冲,汤继新,等. 城市轨道交通深基坑周边建筑物安全评判方法[J]. 城市轨道交通研究,2017(10):48.
- [11] 李靖,徐中华,王卫东. 基础托换对基坑周边建筑物变形控制作用的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报,2017(增刊2):163.
- [12] 孙克国,李术才,李树忱,等. 明挖法地铁车站围护结构变形模拟与预测研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008(增刊1):3210.

(收稿日期:2019-01-30)

(上接第 20 页)

分别双向连通,以便于双向列车进出,高峰时还可以用于停放备车,有利于上下行不对称交路的运营组织。

随着城市范围的扩张,中心城区范围不断外移,存在小交路外移的可能性,此时终点站与小交路折返站之间需新设小交路折返站。建议在小交路折返站与终点站区段设计停车线,并应具有自动折返功能,且站台布置应具有完善的乘降功能。

4 结语

随着我国经济社会发展,城市化进程不断加快,对城市人口增长预测比较难把控,建议在城市轨道交通线路总体设计时适当提高设计标准,加大设计余量,加强专业的匹配性设计,提高总体设计能力。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 城市轨道交通工程技术规范:DG/TJ 08—2232—2017[S]. 上海:同济大学出版社,2017.
- [3] 毕湘利. 从可持续发展角度谈轨道交通的规划和设计[J]. 城市轨道交通研究,2008(12):1.
- [4] 毕湘利. 城市轨道交通的规划建设理念应适度超前[J]. 城市轨道交通研究,2015(9):1.
- [5] 上海申通地铁集团有限公司. 城市轨道交通列车运行速度限制与匹配技术标准:STB-CL-010002—2015[S]. 上海:上海申通地铁集团有限公司,2015.
- [6] 刘循. 城市轨道交通折返能力的匹配性设计研究[J]. 现代城市轨道交通,2012(5):64.

(收稿日期:2018-10-25)