

竖向增层基坑开挖对既有车站结构变形影响规律^{*}张志伟¹ 尤 强¹ 张嘉树² 许明杨² 王海涛²

(1. 中铁十四局集团隧道工程有限公司, 250002, 济南; 2. 大连交通大学土木工程学院, 116028, 大连)

摘 要 [目的] 近距离基坑开挖的施工扰动会导致既有运营车站产生较大的变形, 进而影响列车正常运行, 因此需要研究竖向增层情况下, 基坑开挖对下方既有车站的结构变形影响规律。[方法] 以北京地铁6号线苹果园站三层段基坑工程为例, 采用 Midas GTS NX 有限元软件建立基坑模型, 分析竖向增层深基坑开挖引起的既有车站结构变形规律, 并将模拟结果与现场监测结果进行对比。[结果及结论] 随着基坑开挖的进程, 既有车站结构的竖向变形不断增加, 顶板变形曲线呈正态分布形式。车站顶板中跨变形值 > 边跨变形值, 车站顶端竖向变形值 > 底端竖向变形值。当所取车站截面距基坑大于 9.7 m (即 0.81 倍基坑开挖深度) 时, 边跨、中跨顶板的差异变形消失。对比数值模拟数据与实际监测结果可知, 数值模拟分析所得的既有车站变形规律与实际监测结果一致, 且最大变形量均小于控制值 10.0 mm。

关键词 地铁; 基坑开挖; 既有车站

中图分类号 U231; TU753

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.07.029

Influence Law of Vertical Layer-incremental Foundation Pit Excavation on Existing Station Structural Deformation

ZHANG Zhiwei¹, YOU Qiang¹, ZHANG Jiashu², XU Mingyang², WANG Haitao²

(1. China Railway No. 14 Group Corporation Tunnel Engineering Co., Ltd., 250002, Jinan, China; 2. School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, 116028, Dalian, China)

Abstract [Objective] Construction disturbances from nearby excavation of foundation pit can cause significant deformation of existing stations in operation, thereby affecting the normal operation of trains. Therefore, it is necessary to study the influence of foundation pit excavation in vertically incremental layers on existing stations located below. [Method] Taking the construction project of Beijing Subway Line 6 Pinguoyuan Station three-level-section foundation pit as example, the Midas GTS NX finite element software is used to build a founda-

tion pit model. The deformation law of existing station structures caused by deep foundation pit excavation in vertically incremental layers is analyzed, and the simulation results are compared with field monitoring results. [Result & Conclusion] With the progress of foundation pit excavation, the vertical deformation of existing station structures continuously increases, and the deformation curve of the roof plate exhibits a normal distribution. The mid-span deformation of the station roof is greater than the edge-span deformation, and the vertical deformation at station top is greater than that at the bottom. When the distance between the selected station section and the foundation pit exceeds 9.7 m (approximately 0.81 times the excavation depth), the differential deformation between edge-span and mid-span roof plates disappears. A comparison between numerical simulation data and actual monitoring results reveals that the deformation law of existing stations obtained from numerical simulation analysis is consistent with actual monitoring results, and the maximum deformation is less than the control value of 10.0 mm.

Key words metro; foundation pit excavation; existing station

0 引言

城市深基坑工程不仅要考虑围护结构的稳定性, 还要有效控制周围地层及临近建(构)筑物的变形。针对基坑开挖对临近地铁隧道变形的影响, 已有学者通过数值分析、理论计算等方法开展研究。文献[1-3]采用各类有限元分析软件对基坑施工导致的临近隧道变形规律进行了研究。文献[4-5]通过数值模拟对不同基坑施工方案及隧道加固措施进行了模拟分析。文献[6]基于 Winkler 地基模型, 根据 Mindlin 理论计算分析了基坑开挖面积、深度、地质条件等因素引起的隧道附加应力问题。文献[7]采用两阶段法, 将荷载与地铁隧道纵向变形转化为一维方程进行计算分析。

^{*} 辽宁省自然科学基金计划项目(2020-MS-271); 辽宁省教育厅科学研究项目(JDL2020014); 中铁十四局集团科技研究开发计划项目(2020QT03)

已有研究大多为深基坑工程邻近或上跨既有车站、隧道引起的既有建(构)筑物变形规律^[7-8],对于竖向增层基坑开挖引起的既有车站变形机理尚未明确。鉴于此,本文以北京地铁6号线(以下简称“6号线”)苹果园站三层段基坑工程为例,通过数值模拟、实际监测对竖向增层基坑开挖导致的既有地铁车站结构变形的影响规律进行研究。本文研究可为后续地铁车站竖向增层工程提供参考与借鉴。

1 工程概况

6号线苹果园站工程为三层段基坑,三层段基坑能够实现6号线与北京地铁1号线、北京地铁S1线的换乘。三层段基坑对充分利用有限的空间资源,完善城市交通网络布局,带动周边经济发展具有重大的意义。三层段基坑为三层三跨框架结构,宽为23.2 m,高为23.1 m。其中:地下二层、三层车站结构采用PBA(洞桩逆作)法施工,覆土高度约为11 m;地下一层采用明挖法施工,覆土高度约为4 m。三层段基坑分为东、西两部分,两个基坑平面尺寸相同,东西走向长38.8 m,宽26.9 m,西侧基坑深约12.2 m,东侧基坑深约11.8 m。基坑围护结构采用 $\phi 1\,000\text{ mm}@1\,600\text{ mm}$ 灌注桩+竖向3道内支撑的形式。苹果园站三层段基坑平面位置示意图如图1所示,基坑东西走向横断面及地质剖面示意图如图2所示。

基坑跨越土层为粉质黏土层、杂填土层、卵石2-5层、卵石⑤层,既有车站主要穿越的地层为卵石

⑦、卵石⑨层,车站底板埋深约为27 m,位于卵石⑨层。地下水为潜水,位于底板下10.25 m处。土体主要物理力学参数如表1所示。

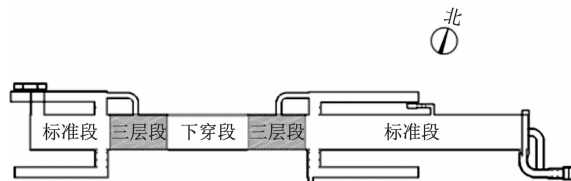


图1 苹果园站三层段基坑平面位置示意图

Fig. 1 Planar position diagram of Pingguoyuan Station three-level-section foundation pit

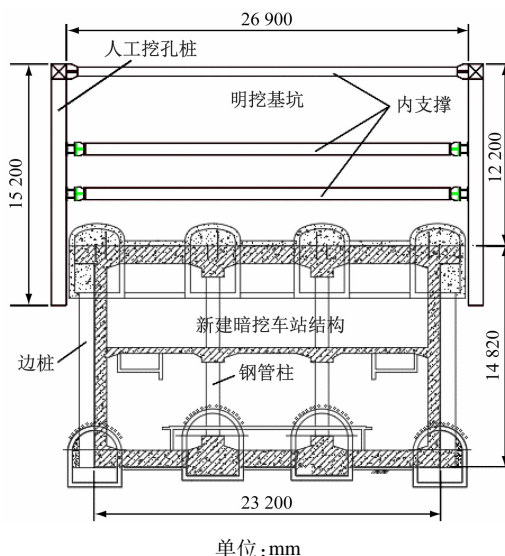


图2 基坑东西走向横断面及地质剖面示意图

Fig. 2 Diagram of foundation pit east-west cross-section and geological profile

表1 土体主要物理力学参数

Tab. 1 Soil mass main physical and mechanical parameters

土层	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	天然密度/(g/cm ³)	孔隙率
粉质黏土	1.8	8	0.32	8	10	1.65	—
杂填土	0.5	7	0.31	0	8	1.70	—
卵石2-5	1.5	30	0.20	0	25	2.02	0.34
卵石⑤	8.0	40	0.29	0	40	2.10	0.33
卵石⑦	11.0	45	0.29	0	42	2.15	0.32
卵石⑨	8.5	50	0.29	0	45	2.15	0.31
卵石⑩	7.6	55	0.29	0	45	2.15	0.31

2 建立数值模型

采用 Midas GTS NX 有限元软件建立基坑模型,基坑模拟尺寸为38.8 m(长)×26.9 m(宽)×

12.0 m(高),基坑底板密贴既有车站顶板,既有车站宽为23.2 m,高为14.9 m。基坑-土体模型总高度为50 m,总宽度为60 m,总长度为80 m。基坑-土体模型中,岩土体采用修正摩尔-库伦本构模型模

拟,并对力学参数相近土层进行简化合并,划分为实体单元;既有车站主体结构、冠梁(1 m×1 m)、回填混凝土均采用弹性本构模型模拟,划分为实体单元;既有车站边桩(φ 1.0 m)、钢管柱(φ 0.9 m)、基坑内支撑、腰梁(1.0 m×0.6 m)均采用弹性本构模型模拟,划分为梁单元。基坑围护结构依据等效刚度原则简化为 0.6 m 厚的地下连续墙(以下简称

“地连墙”)模拟。

基坑-土体模型边界条件为:上表面施加 20 kPa 均布荷载;下表面完全约束;四周限制各边界水平位移。基坑-土体模型地层参数和结构参数如表 2 和表 3 所示,基坑-土体有限元模型及网格划分示意图如图 3 所示。

模拟施工工序主要包括基坑围护施工及基坑

表 2 基坑-土体模型地层参数
Tab.2 Foundation pit-soil model stratigraphic parameters

名称	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉质黏土	4.0	8	0.32	16.5	8	10
卵石层⑤	8.0	30	0.29	20.2	0	40
卵石层⑦	11.0	40	0.29	21.0	0	42
卵石层⑨	10.5	45	0.29	21.5	0	45
卵石层⑪	26.5	50	0.30	21.5	0	45

表 3 基坑-土体模型结构参数
Tab.3 Foundation pit-soil model structural parameters

项目	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN/m ³)	厚度/m
超前注浆区域	20	0.20	24.0	1.0
注浆加固区域	80	0.20	24.0	—
既有车站结构	32 500	0.22	24.4	—
回填混凝土	25 500	0.30	21.5	—
边桩、中柱、地连墙	30 000	0.20	24.4	—
钢管柱	32 500	0.20	24.4	—
既有车站中板	32 500	0.20	21.5	0.6
东西腰梁、内支撑	206 000	0.20	78.5	—
南北腰梁	30 000	0.20	21.5	—
冠梁	30 000	0.20	21.5	—

开挖施工,主要包括:①阶段 1——保留既有车站结构,进行初始地应力平衡;②阶段 2——激活地连墙,改变注浆加固区地层属性;③阶段 3——钝化土体 5 m,激活第 1 道内支撑;④阶段 4——钝化土体 3 m,激活第 2 道内支撑;⑤阶段 5——钝化土体至既有车站顶板,激活第 3 道内支撑。

3 计算结果与分析

对既有车站开展既有车站钢管混凝土柱变形及拱顶变形情况监测,三层段基坑监测点布设示意图如图 4 所示。既有车站钢管混凝土柱下沉监测点(GG-01—GG-07)位于钢管柱柱顶、柱底两处(两个

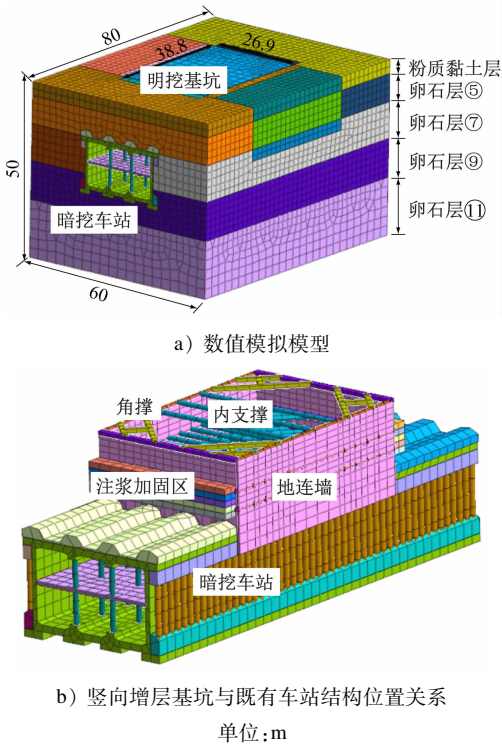


图 3 基坑-土体有限元模型及网格划分示意图
Fig.3 Diagram of foundation pit-soil finite element model and mesh division

监测点之间的距离为 6.5 m)。既有车站拱顶沉降监测点(GD-01—GD-12)位于中跨、边跨三处(两个监测点之间的距离为 10.0 m),其中:GD-02、GD-05、GD-08、GD-11 为既有车站中跨拱顶变形监测点;GD-01、GD-03、GD-04、GD-06、GD-07、GD-09、GD-10、GD-12 为既有车站边跨拱顶变形监测点。

由基坑开挖卸载导致的车站变形,以向上为正,向下为负。

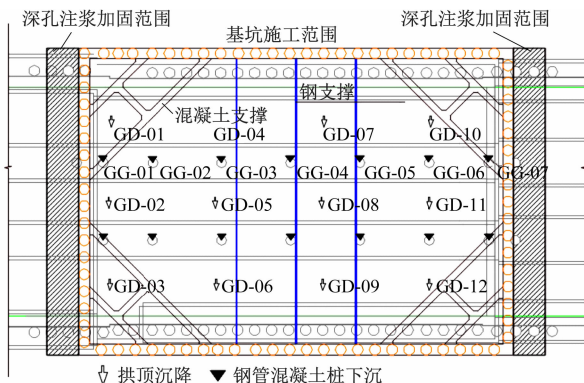


图4 三层段基坑监测点布设示意图

Fig. 4 Layout diagram of monitoring points in three-level-section foundation pit

3.1 拱顶位移

不同阶段下,提取数值模型中基坑开挖引起的中跨、边跨拱顶监测点沿线的变形值,绘制既有车站拱顶变形曲线图,如图5所示。由图5 a)可知:①随着三层段基坑施工的进程,既有车站边跨拱顶的隆起量呈增长趋势。②阶段2中,地连墙与注浆加固区位于既有车站拱顶,地连墙与注浆加固区土体在自重效应下对顶板施加作用力,故车站顶板在围护结构处发生差异变形。③阶段3中,土体卸荷导致基坑范围内既有车站上方的围岩压力有所降低,在既有车站顶部失衡的围岩压力作用下,既有车站结构上浮,车站顶板边跨的变形曲线呈正态分布。④随着基坑施工的进程,基坑范围内既有车站上方的土压力逐渐消失,既有车站结构隆起变形区域不断增加,基坑外侧既有车站结构围岩土应力重分布发生隆起。

不同阶段下,既有车站最大左侧边跨拱顶变形分别为0、0.18 mm、1.57 mm、2.66 mm、4.37 mm,位于基坑中轴线附近。阶段3—阶段5为开挖阶段,既有车站边跨拱顶变形最大值分别变化了1.39 mm、1.09 mm、1.71 mm,其变化值占最终变形值的31.8%、24.9%、39.1%。随着开挖卸荷的进程,既有车站顶板距开挖面距离越来越小,直接作用于既有车站的附加应力变化速度增加,但模拟时,阶段3—阶段5的开挖深度存在差异,分别为5 m、3 m、4 m。在上述原因的综合作用下,既有车站边跨拱顶最大位移变形速率受基坑开挖的影响先减小后增大,呈非线性变化。

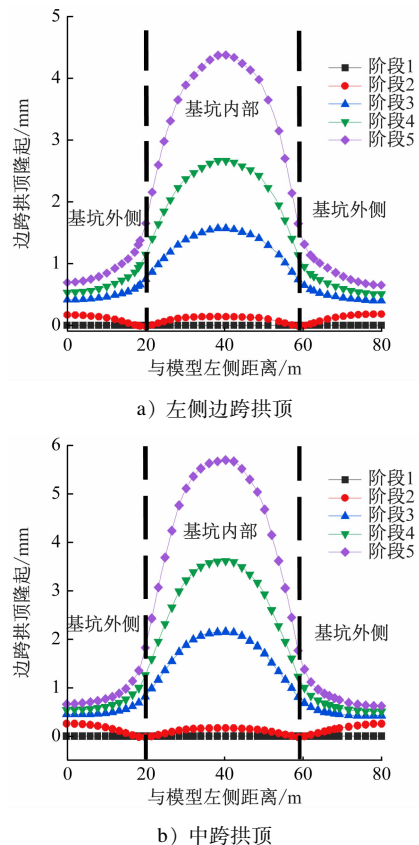


图5 不同阶段下既有车站左侧边跨及中跨拱顶的变形曲线

Fig. 5 Deformation curves of existing station left side edge-span and mid-span vault at different stages

由图5 b)可知:随着三层段基坑施工的进程,既有车站中跨拱顶隆起呈增长趋势,其同样阶段的隆起变形值大于边跨拱顶的隆起变形值,既有车站顶板隆起变形曲线呈正态分布。不同阶段下,既有车站最大中跨拱顶变形分别为0、0.17 mm、2.15 mm、3.61 mm、5.70 mm,靠近基坑中心位置。阶段3—阶段5由基坑开挖引起的最大中跨拱顶变形值分别为1.98 mm、1.46 mm、2.09 mm,其变化值占最终变形值的34.7%、25.6%、36.7%。

基坑开挖导致的车站中跨顶板隆起变形大于边跨顶板隆起变形,但各阶段引起的车站顶板变形的变化规律大致相同。阶段3破坏了原土体与既有车站间的稳定状态,既有车站顶板产生的最大变形值约占既有车站顶板总变形的33.3%,即理想化情况下,基坑每开挖1 m,车站顶板产生的变形约为6.94%。阶段4导致的既有车站顶板产生的最大变形值约占既有车站顶板总变形的25.3%,即理想化情况下,基坑每开挖1 m,车站顶板产生的变形约为

8.4%。阶段5导致的既有车站顶板产生的最大变形值约占既有车站顶板总变形的37.9%,即理想化情况下,基坑每开挖1 m,车站顶板产生的变形约为9.5%。开挖土体与既有车站顶板距离越小,土体卸荷对既有车站顶板变形的影响越大。

基坑开挖导致既有车站拱顶隆起呈正态分布,在围护结构的保护削弱和地层自稳条件下,靠近基坑外侧的既有车站顶板变形逐渐减小。基坑开挖完成后,围护结构位置处边跨竖向变形约为1.65 mm,中跨竖向变形约为1.82 mm。当所取车站截面距基坑9.7 m(0.81倍基坑开挖深度)以上时,处于同一横截面处的车站边跨、中跨顶板变形差异几乎消失,且变形值小于1 mm。基坑围护结构的存在极大地减小了既有车站受基坑开挖隆起的影响区域。

3.2 钢管柱竖向位移

不同阶段下,提取数值模型中由基坑开挖引起的钢管柱上、下端位移监测点沿线的变形值,绘制钢管柱顶、柱底位移曲线图,如图6所示。

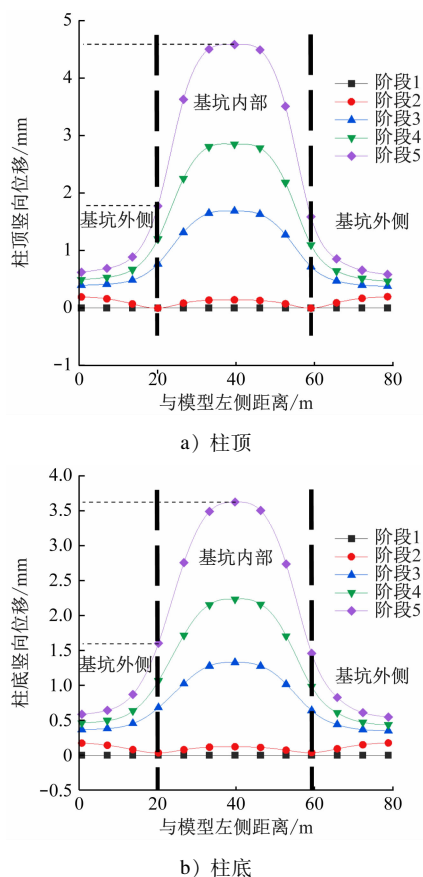


图6 不同阶段下既有车站钢管柱顶与柱底的竖向位移

Fig. 6 Vertical displacement of existing station steel pipe column top and bottom at different stages

由图6可知:不同阶段下,既有车站钢管柱顶与柱底的竖向变形曲线呈正态分布,类似拱顶变形。地连墙与注浆加固区位于既有车站拱顶,在重力作用下对车站顶板密贴处产生向下的作用力,既有车站拱顶变形带动钢管柱发生相应变形。其中,位于基坑中心部位的3根钢管柱顶位移基本一致,曲线略平,与既有车站拱顶变形产生的光滑弧线存在差异。随着基坑施工开挖的进程,位于基坑范围内的钢管柱竖向变形明显大于基坑范围外的钢管柱竖向变形,既有车站钢管柱顶与柱底的竖向变形曲线中部凸起,且其凸起程度随着基坑开挖的进程愈来愈明显。

基坑开挖完成后,围护结构处的钢管柱顶竖向变形值约为1.73 mm,最大柱顶竖向变形值约为4.58 mm,缩减幅度约为62.2%。基坑开挖完成后,基坑围护结构处的柱底竖向变形值约为1.59 mm,最大柱底竖向变形值约为3.62 mm,缩减幅度约为56.1%。最大钢管柱顶、柱底竖向位移发生在GG-04测点,变形值约为0.96 mm。

4 工程实测

各阶段完工日期下,车站拱顶与钢管柱顶竖向位移的实测值与模拟值对比如图7所示。随着基坑施工的进程,在临近既有车站顶板土体开挖过程中,既有车站上各监测点的变形速率加快,既有车站可能发生结构破坏、同时出现裂缝,需适当增加监测频率。在数值模拟中,开挖阶段均为一次性完成土体卸载和围护结构施作,但在实际工程中,需采用挖掘机、渣土车等施工设备对基坑进行开挖作业,反复卸载、加载,导致了既有车站实际监测值略大于模拟提取值。

由图7 a)可知:在2019-06-16—2019-07-17的基坑围护桩施工期间,车站边跨拱顶竖向变形测点GG-01的监测数据为负值,这可能是由于围护桩开挖浇筑过程中,混凝土散热成型导致的。

由图7 b)可知:随着基坑施工的进程,钢管柱顶的竖向位移值逐渐增加,其变化与拱顶位移变化趋势一致。钢管柱顶的模拟值略小于实测值,基坑围护施工阶段GG-01测点处的监测结果为负,与实际工程相吻合。

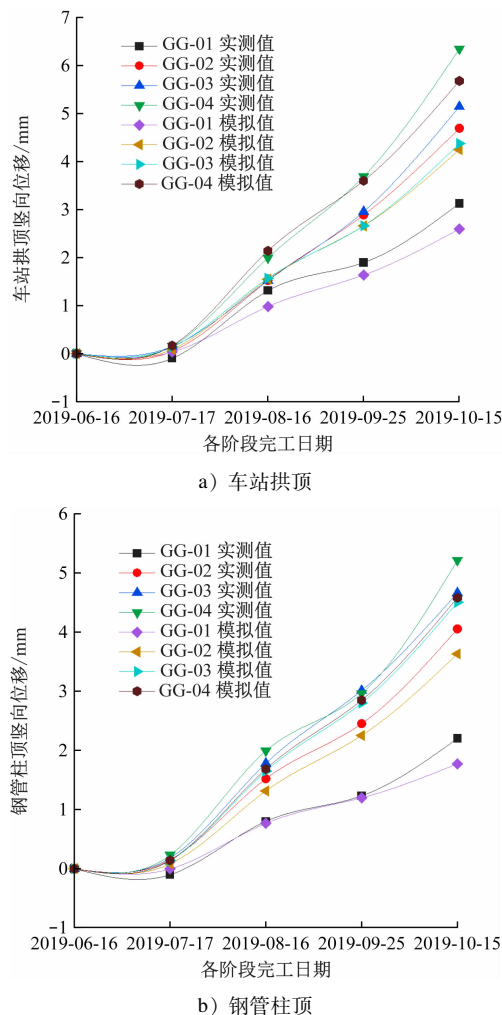


图7 各阶段完工日期下的车站拱顶与钢管柱顶竖向位移实测值与模拟值对比

Fig. 7 Comparison between measured and simulated values of station vault and steel pipe top vertical displacement on the completion dates at each stage

5 结语

本文以6号线苹果园站三层段基坑工程为例,通过数值模拟研究竖向增层开挖对既有车站结构变形的影响规律。主要获得以下结论:

1) 随着基坑范围内既有车站上方土压力的逐渐消失,既有车站结构竖向变形不断增大,顶板变形曲线呈正态分布,既有车站围岩土应力发生重分布。

2) 随着开挖卸荷的进程,直接作用于既有车站顶板的附加应力变化速率逐渐增加,施工阶段的边跨、中跨拱顶最大位移发生非线性变化。

3) 同一车站截面内,既有车站中跨顶板变形值

大于既有车站边跨顶板变形值;钢管柱桩端位移受既有车站结构影响,顶端竖向位移值大于底端竖向位移值,最大拉伸变形值为0.96 mm。在围护结构的削弱和地层自稳的保护作用下,当所取车站截面距基坑9.7 m(0.81倍基坑开挖深度)以上时,边跨、中跨顶板差异变形基本消失,且车站顶板变形值小于1 mm。

4) 数值分析所得的既有车站变形规律与实际监测变形规律一致,且最大变形量均小于控制值10 mm。

参考文献

- [1] 岳云鹏,刘晓玉,张龙云,等. 基坑分块开挖对下卧盾构隧道的变形影响分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(9): 113.
YUE Yunpeng, LIU Xiaoyu, ZHANG Longyun, et al. Study on the influence of partitioned excavation of foundation pit on the deformation of subterranean shield tunnel[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(9): 113.
- [2] 文仁学. 地铁保护区明挖基坑施工技术[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
WEN Renxue. Construction technology of open excavation foundation pit in subway protection area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [3] 魏纲,胡凌威,朱佳定. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的数值分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 46.
WEI Gang, HU Lingwei, ZHU Jiading. Numerical analysis of effect of foundation pit excavation on underneath existed shield tunnel[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2014, 36(4): 46.
- [4] 吴剑秋,孙旻,蔡庆军,等. 基坑开挖对紧邻下卧地铁隧道变形的影响与控制研究[J]. 建筑施工, 2020, 42(2): 145.
WU Jianqiu, SUN Min, CAI Qingjun, et al. Study on influence and control of foundation pit excavation on deformation of adjacent subway tunnel[J]. Building Construction, 2020, 42(2): 145.
- [5] 郭晓欢. 北京某深大基坑工程紧邻既有地铁车站风险分析与控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
GUO Xiaohuan. Research on risk analysis and control of existing subway station affected by the adjacent construction of deep and large foundation pit in Beijing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [6] 张海生. 基坑开挖对下方地铁隧道变形的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
ZHANG Haisheng. Study of influence on deformation of the subway tunnel induced by foundation excavation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [7] 陈启辉,刘颜磊,韩健勇,等. 既有暗挖车站上盖增层基坑施工力学响应[J]. 山东建筑大学学报, 2021, 36(4): 1.

(下转第180页)

及轨道板拉应力最大值同路基变形量呈线性关系。

2) 当波长为 20 m、水平变形幅值为 10 mm 时,路基余弦型水平变形对轨道轨向不平顺造成的影响最大,对轨道水平不平顺的影响次之,对轨距及高低不平顺的影响可以忽略。

3) 当水平变形幅值为 20 mm 时,钢轨水平变形最大值随着水平变形波长的增大而增大;随着水平变形波长的增大,轨向不平顺、轨道板及支承层拉应力呈先增大后减小的变化趋势。

4) 获得了不同水平变形波长下的路基余弦型水平变形幅值限值,水平变形幅值限值随着水平变形波长的增大而增大,二者满足二次函数关系式。此关系式可作为高速铁路路基余弦型水平变形的控制准则,在一定程度上补充了高铁 CRTS II 型板式无砟轨道线路路基变形控制指标的研究,并为高速铁路其他形式变形控制指标的确定提供了参考方法。

参考文献

- [1] LIN Z, NIU F, LI X, et al. Characteristics and controlling factors of frost heave in high-speed railway subgrade, Northwest China [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153: 33.
- [2] 张炳楠. 地下煤矿开采对高速公路路基路面变形影响研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
ZHANG Bingnan. Underground coal mining on highway subgrade road surface deformation impact study [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [3] YE G, CAI Y, ZHANG Z. Numerical study on load transfer effect of stiffened deep mixed column-supported embankment over soft soil [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(3): 703.
- [4] 王作洲. 基于轨道板抗弯疲劳强度的高速铁路基不均匀沉降控制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
WANG Zuozhou. Uneven settlement control of subgrade based on bending fatigue strength of slab in high-speed railway [D]. Hang-

zhou: Zhejiang University, 2012.

- [5] 徐庆元, 范浩, 李斌, 等. CRTS-II 型板式无砟轨道线路路基不均匀沉降限值研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2013, 44(12): 5038.
XU Qingyuan, FAN Hao, LI Bin, et al. Limited value for uneven settlement of subgrade under CRTS-II type slab track [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(12): 5038.
- [6] 韦强文. 时速 400 公里高速铁路无砟轨道设计荷载及基础沉降限值研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
WEI Qiangwen. Study on design loads and subgrade settlement limits of ballastless track for 400 km/h high-speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [7] 魏婷. 盾构施工对高速铁路安全的影响研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
WEI Ting. Study of high-speed railway safety influence by the shield construction [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.
- [8] 方浩. 软土地区基坑开挖对邻近高速铁路基变形影响及保护距离研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
FANG Hao. Study on the influence of excavation on deformation of adjacent high-speed railway subgrade in soft soil area and the protection distance [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [9] 赵伟. 新建路基对临近高速铁路基变形的影响因素辨识及控制 [D]. 上海: 同济大学, 2019.
ZHAO Wei. Identification and control of influencing factors of new subgrade on deformation of adjacent high-speed railway subgrade [D]. Shanghai: Tongji University, 2019.

· 收稿日期:2022-01-18 修回日期:2022-03-23 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-18 Revised:2022-03-23 Published:2024-07-10
· 第一作者:殷威,高级工程师,258156480@qq.com
通信作者:倪婉昱,硕士研究生,846197751@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 174 页)

- CHEN Qihui, LIU Yanlei, HAN Jianyong, et al. Construction mechanics response of the excavated foundation pit above the excavated station [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2021, 36(4): 1.
- [8] 王占生, 潘皇宋, 庄群虎, 等. 基坑围护 SMW 工法桩施工对下卧盾构隧道变形影响分析 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 53.
WANG Zhansheng, PAN Huangsong, ZHUANG Qunhu, et al. Analysis on the influence of SMW pile construction on the deforma-

tion of underlying shield tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 53.

· 收稿日期:2022-02-11 修回日期:2022-03-14 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-11 Revised:2022-03-14 Published:2024-07-10
· 第一作者:张志伟,高级工程师,zhangzhiwei@163.com
通信作者:王海涛,教授,whtdjtu@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license