

既有暗挖车站上盖增层基坑围护结构力学效应研究*

梁尔斌

(中铁十四局集团有限公司, 250014, 济南//高级工程师)

摘要 既有暗挖地铁车站的上盖增层扩建明挖基坑直接坐落在既有车站拱顶,既有车站结构和基坑围护结构之间存在复杂的相互影响。基于北京地铁苹果园站,针对围护结构嵌固桩与无嵌固桩的受力特点,建立三维有限元数值模型,对不同桩体展开关键参数分析,并对围护桩桩体及既有结构的受力变形规律进行深入分析。研究结果表明:无嵌固桩底部与既有车站结构不连接时,桩体最大位移比二者连接时增大约 2.7 倍;随着嵌固桩桩体与既有车站结构距离的增加,桩与车站结构间的土体变形呈趋于平缓的非线性增加,且嵌固桩位移增大、受力减小;当桩体与既有车站结构距离大于 4.7 m 后,桩体位移和受力基本不再变化;桩体嵌固深度对桩体受力变形影响主要体现在桩体下半部分;随着嵌固深度的增加,桩体最大位移最多可减少约 16.9%。

关键词 暗挖车站增层; 基坑围护结构; 桩体变形

中图分类号 TU311.2; TU94⁺²

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.015

Mechanical Effect of Enclosure Structure of Existing Underground Excavated Station Overlaying Level Foundation Pit

LIANG Erbin

Abstract The overlaying level open excavation foundation pit of existing underground excavated metro station is located above the arch of the existing station directly. There are complex interactions between the existing station structure and the foundation pit enclosure structure. Based on Beijing Metro Pingguoyuan Station, targeting the stress characteristics of enclosure structure with embedded or non-embedded retaining piles, three-dimensional finite element models are established to carry out the key parametric analysis on different piles, and to analyze the stress deformation pattern of enclosure piles and existing structure in-depth. Research results show that when the bottom of the non-embedded retaining pile walls is connected to the existing station structure, the maximum displacement of the pile is increased by about 2.7 times. As the distance between

the embedded retaining pile wall and the existing station structure increases, the soil deformation between the pile and the station structure shows a nonlinear increase tending to be gentle. The displacement of the embedded retaining pile wall increases and the inner force decreases. When the distance is greater than 4.7 m, displacement and the force almost stop changing. The effect of the pile embedded depth on the force and deformation of the pile is mainly in the lower part of the pile. As the embedded depth increases, the maximum displacement decreases by about 16.9%.

Key words underground excavated station overlaying level; foundation pit enclosure structure; pile deformation

Author's address China Railway 14th Group Co., Ltd., 250014, Ji'nan, China

基于国家创新驱动发展战略,在新时代网络化地下空间建设需求下,我国既有地下结构的扩建工程不断涌现。地铁换乘车站的上盖增层扩建虽具有显著的经济优势,但基坑内大体积土体卸载会对既有结构产生显著影响,且基坑围护结构部分与既有结构相连,其施工力学效应与常规基坑不同,设计和施工比邻近建筑物基坑更为复杂。文献[1]基于有限差分数值模拟和极限平衡法,提出基坑失稳模式更接近于圆弧滑动面,工程桩能有效限制基坑塑性剪切带的延伸。此类研究多针对天然场地基坑展开,同周围环境及建筑物的相互影响较少。当有邻近既有结构时,基坑与既有结构间会产生复杂的相互影响。文献[2]基于 Plaxis 有限元软件建立数值模型,对近接浅基础建筑物深基坑施工对围护结构和邻近建筑物的变形影响进行研究,并基于潜在失稳破坏区对基坑后方土体进行主次影响区域划分。

目前,地下结构扩建相关研究尚不深入,尤其

* 中国铁建股份有限公司 2020 年度科研计划课题(2020-B05);山东省博士后创新项目(202003080);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2019JZZY010428)

对于上盖增层基坑与既有结构的相互作用影响分析尚属空白,理论尚不成熟,亟待展开相关研究分析。

本文依托北京地铁6号线(以下简为“6号线”)苹果园站扩建工程项目,对基坑嵌固桩和无嵌固桩关键节点展开分析,研究不同参数条件下围护桩和既有车站的受力变形规律,并给出合理的参数优化建议,为今后类似的扩建工程提供理论依据。

1 工程概况

如图1所示,6号线苹果园站斜交70°密贴下穿既有北京地铁1号线(以下简为“1号线”)车站结

构。该站主体结构采用洞桩法+明挖法施工。车站增层扩建的2个明挖基坑分别位于既有1号线东西两侧。增层扩建部分的地下2、3层采用洞桩法施工,在下部结构施工完成后进行地下1层的上盖增层明挖扩建。2个明挖基坑尺寸相同,东西向长39.8 m,南北向宽27.9 m,深12.2 m。基坑围护结构采用 $\phi 1\,000\text{ mm}$ 人工挖孔桩+3道内支撑形式,桩间距为1.6 m,桩间采用100 mm厚挂网喷射混凝土支护。竖向设3层内支撑(自上而下分别为L1、L2及L3),其中L1的角撑为混凝土支撑,截面尺寸为 $0.6\text{ m}\times 1.0\text{ m}$;其余支撑结构均为钢支撑,采用直径为0.8 m、壁厚为16 mm的钢管。

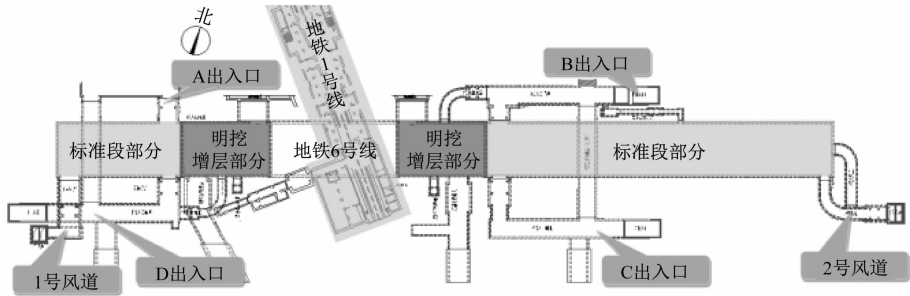
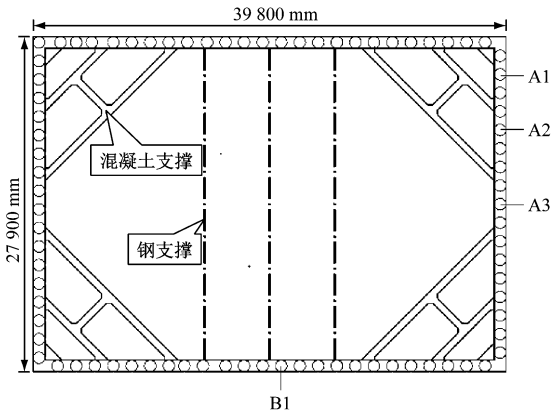


图1 苹果园站平面位置图
Fig. 1 Plan layout of Pingguoyuan Station

增层结构位于既有结构上方,东西两端围护桩直接落于车站顶拱。该部分围护桩为无嵌固桩,属于吊脚桩。南北两侧围护桩嵌入土体一定深度,为嵌固桩。围护桩邻近既有车站结构导洞侧壁,最小净距离仅为0.2 m。对不同支护结构进行编号。基坑支护结构平面图见图2。



注:A为无嵌固桩;B为嵌固桩。

图2 基坑支护结构平面图

Fig. 2 Plan of foundation pit retaining structure

2 上盖增层明挖基坑的有限元模型

2.1 有限元模型的建立

根据文献[3],无嵌固桩对基坑外侧土体的影响范围约为 $1.5H_e$ (H_e 为基坑开挖深度)。本文在此基础上考虑一定富余量,水平方向取 $3.3H_e$,竖向从车站底部向下取 $2H_e$,建立三维有限元模型,具体尺寸为 $119\text{ m}\times 105\text{ m}\times 55\text{ m}$ (见图3)。有限元模型边界条件包括应力位移和渗流^[4-5],因本工程地

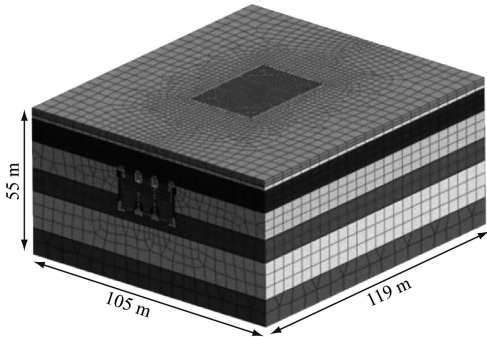


图3 苹果园站明挖上盖增层项目的有限元模型
Fig. 3 Finite element model of overlaying level open excavation project of Pingguoyuan Station

下水位于车站底板以下 10.4 m,故不考虑渗流影响。模型上表面为自由面,不设置约束;四周限制水平方向约束;底部限制水平和竖直方向约束。在有限元模型中,施加荷载除材料自重外,根据基坑周围堆载和施工机械放置情况,在围护桩后 2~10 m 范围内施加 20 kPa 的均布荷载模拟施工荷载。

2.2 参数的选取

根据实际受力特征,土体和既有车站主体结构采用实体单元,初衬结构采用板单元模拟,围护桩、冠梁、混凝土支撑和钢管柱采用梁单元模拟,钢支撑采用桁架单元模拟。通过修改单元属性实现注浆加固区土体到浆土混合体的材料性质转换。模型中,除土体外均采用弹性本构模型进行模拟。有限元模型主要部位的物理力学参数见表 1。

表 1 模型主要部位的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of the main model parts

部位	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	E/MPa	ν
冠梁、混凝土支撑	24	30 000	0.2
基坑围护桩	24	24 000	0.2
初次衬砌	24	20 400	0.2
主体结构	25	32 500	0.2
钢管柱	25	34 500	0.3
深孔注浆加固区	20	100	0.3
钢管支撑	78	210 000	0.3

注:γ 为重度,E 为弹性模量,ν 为泊松比。

由于基坑开挖涉及到大体量土体卸载问题,对变形参数较为敏感^[6],故本模型中的粉质黏土和卵石层采用 Hardening-SoiL 本构模型。车站范围内主要为卵石。根据 PLAXIS 用户手册和已有研究的经验值^[2,7],卵石取 $3E_{\text{oad}}=3E_{50}=E_{\text{ur}}$ (其中, E_{oad} 为主固结模量, E_{50} 为割线模量, E_{ur} 为回弹模量),粉质黏土取 $2E_{\text{oad}}=2E_{50}=E_{\text{ur}}$,根据位移反分析可确定, $E_{50}=3E_0$ (E_0 为初始压缩模量)。砂岩采用 Mohr-Coulomb 模型,各参数取值见表 2。

2.3 模型准确性的验证

为验证模型的准确性和参数的合理性,需对模型进行标定。图 4 为无嵌固桩 A2 开挖至 12.2 m 时,桩体水平位移实测值与计算值对比曲线。从图 4 可以看出:模拟数据与监测数据变形规律基本一致;水平位移最大值均出现在埋深 4 m 左右位置,分别为 1.41 mm 和 1.89 mm,且两者数值相近。实测数据曲线与模拟值曲线的形状和大小均相近。

表 2 土体主要材料力学参数

Tab.2 Main material mechanical parameters of soil

材料	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	E_0/MPa	ν	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$E_{\text{oad}}/\text{MPa}$	E_{50}/MPa	E_{ur}/MPa
粉质黏土	16.5		0.30	8	10	12	12	48
卵石②	17.0		0.26	0	25	20	20	60
卵石⑤	21.0		0.26	0	40	50	50	150
卵石⑦	21.5		0.26	0	42	70	70	210
卵石⑪	21.5		0.26	0	45	100	100	300
砂岩	28.3	1 000	0.35	100	35			

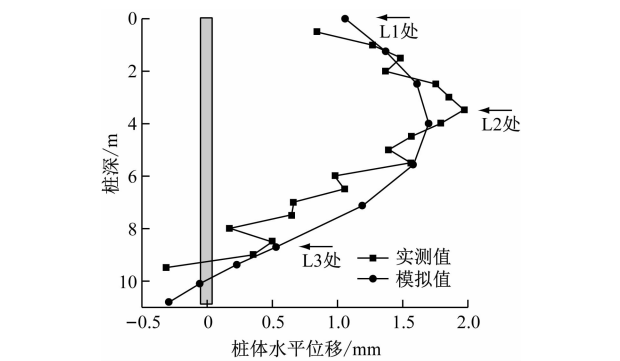


图 4 围护桩桩体水平位移对比曲线
Fig.4 Comparison curve of horizontal displacement of retaining pile

由此可见,该模型的准确性满足研究要求。

3 有限元模型计算结果分析

3.1 无嵌固桩与车站连接情况的影响

图 5 为桩体与既有车站结构连接关系不同情况下的 A3 桩桩体水平位移曲线。从图 5 可以看出,当 H_e 较小时,桩底是否连接对桩体的水平位移影响不大,主要是桩后被动区土体对桩体的约束作用^[8];随着基坑内部土体开挖量增大,当拆除第 3 道支撑(L3)后,桩底不连接时的水平位移增量更大,最大增量约为 2.02 mm,水平位移值增加约 2.7 倍,桩体产生踢脚式破坏^[9]。拆除第 3 道钢支撑后, $H_e=4.0$ m 以下桩体缺乏约束,对桩体水平位移产生不利影响。此时的最大水平位移约为 2.82 mm,位于 $H_e=8.7$ m 处,最大位移位置出现上移。

3.2 嵌固桩关键参数

由于增层部分的明挖基坑嵌固桩一侧邻近既有车站结构,且嵌固桩桩体与既有车站导洞净距 L_p 仅为 0.2 m,故其受力模式与常规基坑存在区别,势必产生较为显著的相互作用。嵌固桩桩体与既有

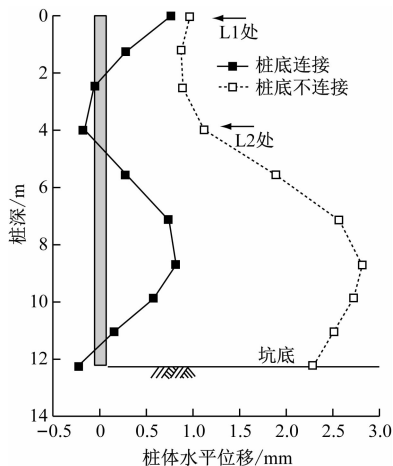


图5 A3 无嵌固桩桩体水平位移对比曲线

Fig. 5 Comparison curve of horizontal displacement of No. A3 non-embedded pile

车站导洞关系见图6。对不同 L_p 情况下的对围护桩 B1 桩进行受力和变形数值模拟分析,结果如图7所示。

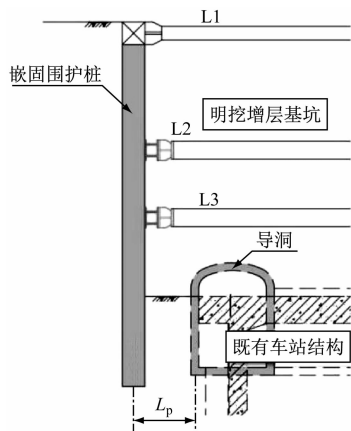


图6 嵌固桩与既有车站结构距离示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the distance between the embedded pile and the existing station structure

由图7可知:当 H_e 较小时,不同 L_p 对桩体水平位移曲线形状和大小影响不大;当 $H_e = 12.2$ m 时, L_p 由 0.7 m 增至 4.7 m, 桩体最大水平位移增加 0.82 mm, 增幅约 39.4%; 当 L_p 由 4.7 m 增至 6.7 m 时, 桩体水平位移几乎无增加;随着 L_p 增加, 既有车站结构对嵌固桩的约束效果逐渐减弱, 导致桩体下部位移增大; 当 L_p 增大到一定值后, 不再产生约束作用, 桩体水平位移趋于稳定。

3.3 嵌固围护桩嵌固深度的影响规律

本工程 L_p 仅为 0.2 m, 嵌固桩深度 H_p 对整个增层基坑的稳定性有显著影响。针对不同 H_p 研究

对比围护桩受力变形情况如图8所示。

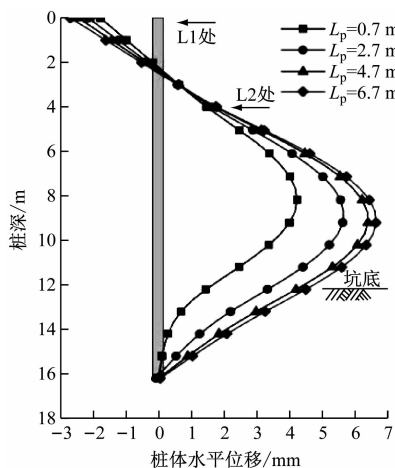


图7 不同近接距离 B1 嵌固桩桩体水平位移曲线

Fig. 7 Horizontal displacement curve of the No. B1 embedded pile at different close distances

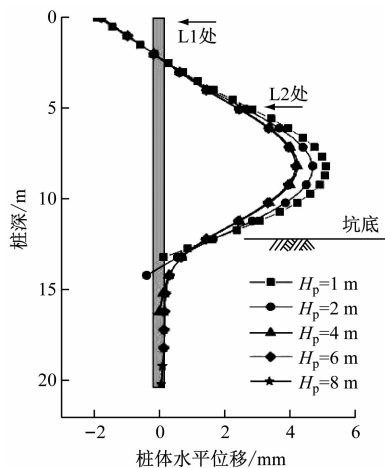
图8 不同 H_p 下的 B1 嵌固桩桩体水平位移曲线

Fig. 8 The horizontal displacement curve of the No. B1 embedded pile at different embedded depths

由图8可知:随着 H_e 的增加, 当基坑拆除第3道支撑后, H_p 由 1.0 m 增加至 4.0 m 时, 桩体最大水平位移由 5.08 mm 减少至 4.22 mm, 减少约 16.9%; 当 $H_p > 4.0$ m 时, 桩体水平位移几乎不再随着 H_p 的增加而减少; 随着 H_p 的增加, 土体与既有车站结构对嵌固桩底部的约束作用增大, 限制了桩底水平位移; 当 H_p 增加到一定值后, 桩底约束作用不再增加, 桩体变形趋于稳定。

4 结语

本文以苹果园站增层扩建基坑为研究背景, 建立有限元模型, 模拟基坑动态开挖过程, 并对基坑

围护桩与既有车站结构间复杂的相互影响展开分析,得出结论:

1) 同无嵌固桩与车站结构连接时相比,如无嵌固桩与车站结构不连接,则桩体水平位移会显著增大,且最大位移量增加约 2.7 倍,可见桩底连接和桩后注浆加固具有良好的工程效果。

2) 在 $L_p = 4.7 \text{ m}$ 时,桩体最大水平位移增加 39.4%;随着 L_p 的继续增加,桩身位移变化趋于缓慢,说明 L_p 越大,桩体受既有车站结构约束越小,并在 L_p 足够大后不再受既有车站约束。

3) H_p 对桩体受力变形的影响,主要体现在桩体的下半部分:当 H_p 由 1.0 m 增至 4.0 m 时,桩体最大位移降幅约为 16.9%;当 H_p 超过 4.0 m 后桩体变形基本不再变化,故建议类似工程 H_p 取 4.0 m 左右。

参考文献

- [1] 郑刚,张涛,程雪松.工程桩对基坑稳定性的影响及其计算方法研究[J].岩土工程学报,2017(增刊2):5.
ZHENG Gang, ZHANG Tao, CHENG Xuesong. Effect of foundation piles on excavation stability and its calculation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017(S2): 5.
- [2] 韩健勇,赵文,李天亮,等.深基坑与邻近建筑物相互影响的实测及数值分析[J].工程科学与技术,2020(4):149.
HAN Jianyong, ZHAO Wen, LI Tianliang, et al. Field measurement and numerical analysis of the influences between the deep excavation and adjacent buildings[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020(4): 149.
- [3] 吴晓刚.地铁吊脚桩深基坑围护结构及土体变形规律[J].科学技术与工程,2016(14):280.

(上接第 69 页)

- [11] 钟可,傅鹤林,张加兵.富水砂卵石地层中超近距离盾构下穿既有运营隧道加固方案研究[J].公路工程,2018(5):10.
ZHONG Ke, FU Helin, ZHANG Jiabing. Research on the influence of ultra-close shields on existing operated tunnels in water and sandy boulder stratum[J]. Highway Engineering, 2018(5): 10.
- [12] 张品,钟志全,陈仁朋,等.MJS桩加固对上覆地铁运营隧道影响研究[J].地下空间与工程学报,2019(4):1164.
ZHANG Pin, ZHONG Zhiquan, CHEN Renpeng, et al. Study on influence of MJS columns reinforcement on overpass subway operation tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019(4): 1164.
- [13] 谭鑫.考虑流固耦合影响的水下隧道施工力学效应研究[D].长沙:中南大学,2009.
TAN Xin. Research on mechanical effects of underwater tunnel

WU Xiaogang. The deformation pattern of enclosure structure and soil of suspending pile deep foundation pit of metro[J]. Science Technology and Engineering, 2016(14):280.

- [4] 王湧,岳建勇.主体与支护结构结合的水平支撑系统数值分析[J].地下空间与工程学报,2005(4):591.
WANG Yong, YUE Jianyong. Numerical simulation of horizontal brace system in bracing structure combined with underground structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(4): 591.
- [5] 郑颖人,赵尚毅.岩土工程极限分析有限元法及其应用[J].土木工程学报,2005(1):91.
ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Limit state finite element method for geotechnical engineering analysis and its applications[J]. China Civil Engineering Journal, 2005(1): 91.
- [6] 黄书岭,冯夏庭,张传庆.岩体力学参数的敏感性综合评价分析方法研究[J].岩石力学与工程学报,2008(增刊1):2624.
HUANG Shuling, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing. Study of method of comprehensive evaluation for parameters of constitutive model of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(S1): 2624.
- [7] KHOIRI M, OU C Y, TENG F C. A comprehensive evaluation of strength and modulus parameters of a gravelly cobble deposit for deep excavation analysis[J]. Engineering Geology, 2014(8):61.
- [8] 戴自航.抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J].岩石力学与工程学报,2002(4):517.
DAI Zihang. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(4): 517.
- [9] 张俊,陈志新,门玉明.锚杆抗滑桩嵌固深度研究[J].东北大学学报(自然科学版),2008(11):1637.
ZHANG Jun, CHEN Zhixin, MEN Yuming. Study of built-in depth of anchored piles against landslide[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008(11): 1637.

(收稿日期:2021-05-15)

construction considering the influence of fluid-solid coupling [D]. Shangsha: Central South University, 2009.

- [14] 郭磊,傅鹤林,欧阳刚杰,等.考虑流固耦合效应的水下隧道岸坡深基坑开挖数值模拟[J].现代隧道技术,2010(4):12.
GUO Lei, FU Helin, OUYANG Gangjie, et al. Numerical simulation of pit excavation of a subaqueous tunnel considering fluid-solid coupling effect[J]. Modern Tunnelling Technology, 2010(4): 12.
- [15] 王乾訥,封坤,李德斌,等.泥水平衡盾构施工对地层孔隙水压力的扰动规律研究[J].隧道建设(中英文),2019(增刊1):266.
WANG Qianshen, FENG Kun, LI Debin, et al. Ground pore water pressure disturbed by slurry balanced shield tunneling[J]. Tunnel Construction, 2019(S1): 266.

(收稿日期:2020-09-10)