

地铁既有车站上盖增层明挖法施工的关键技术^{*}

王志康

(中铁十四局集团有限公司, 250014, 济南//工程师)

摘要 依托北京地铁苹果园站,提出了一种车站既有结构上盖增层的建造方法。结果表明:明挖法基坑的稳定性受车站既有结构影响较大,通过桩底与初支结构连接、桩后深孔注浆加固和预留反压土可有效抑制围护结构变形;为保障车站结构的整体性,下部暗挖结构应预留接头,同时对接头处进行超厚混凝土回填;地铁车站接头处采用 SBS(改性沥青防水卷材)搭接的方式能够保障结构的防水性能。

关键词 地铁;既有车站;上盖增层;明挖法施工

中图分类号 U231.3; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.032

Key Technology of Open Excavation Construction for Adding Overlaying Level on Existing Metro Station

WANG Zhikang

Abstract Based on Beijing Metro Pingguoyuan Station, a construction method for adding overlaying level on the station existing structure is proposed. Results show that the stability of open excavation foundation pit is greatly affected by the station existing structure. Through connecting pile bottom and primary support structure, connecting pile back deep-hole grouting reinforcement and reserved anti-pressure soil, the enclosure structure deformation can be effectively suppressed. To sustain the station structure integrity, the bottom underground-excavated structure should reserve joint heads and conduct super-thick concrete backfilling at the joint. The joints of metro station that adopt SBS(modified asphalt waterproofing roll) lapping connection method will ensure the waterproof performance of the structure.

Key words metro; existing station; adding overlaying level; open excavation construction

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

乘车站数量日益增多,车站多维拓建已成为新的建设趋势^[1]。地铁车站多维拓建主要包括以小扩大、密贴下穿、上盖增层等。其中,上盖增层可采用明挖法施工,其施工简便、受力直接,可作为地铁换乘车站拓建的一种新选择。

目前,针对既有车站结构的增层施工已有部分研究成果,但主要集中在向下增层改造方面^[2]。车站向下增层的关键是施工过程中保证上部结构的正常使用。文献[3]运用地基、基础和建筑物的相互作用关系,探讨了锚杆静压桩在建筑物向下增层过程中的应用。文献[4]考虑桩-土-结构的相互作用,分析施工引起的车站上部结构的拉应力、拉应变规律,发现锚杆静压桩可以有效控制车站上部结构变形。车站向下增层必然影响原有桩基承载刚度的改变,文献[5]通过数值分析、理论研究及模型试验方法研究了桩基承载及变形性状,认为基坑开挖导致桩侧阻力和桩端阻力非同步发挥现象明显。文献[6]结合软土地基下方拓建车库工程的案例,探讨了既有工程中桩支承结合拓建基坑中水平支撑实施的可行性,并提出差异变形控制技术。综上,国内外针对车站增层的研究多集中于其下部暗挖增层,目前采用明挖法施工车站上盖增层的研究却鲜见。

基于此,以北京地铁苹果园换乘站为依托,对车站上盖增层拓建的关键技术进行了研究,为我国地铁车站建设提供了新的思路与建设方法。

1 苹果园站工程背景

1.1 工程概况

北京地铁6号线(以下简称“6号线”)苹果园站位于苹果园南路与阜石路交汇口东侧、苹果园南路下方,沿苹果园南路北侧东西向设置。该车站与

随着我国大城市的地铁线路运营成网,地铁换

^{*} 山东省自然科学基金项目(ZR2020QE265);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2019JZZY010428);中国铁建股份有限公司2020年度科研计划课题(2020-B05)

北京地铁 1 号线(以下简称“1 号线”)苹果园站夹角约为 70° (见图 1)。苹果园站新建结构需在既有结构的基础上进行上盖增层拓建。

上盖增层拓建基坑分为东、西两个独立的基坑,两个基坑分别位于 1 号线车站的东、西两侧(见图 1)。两个基坑平面尺寸相同,长 37.4 m,宽 26.9 m,深约 12.0 m。地下水位在车站底板下方约 10.4 m。基坑围护结构采用人工挖孔桩 + 内支撑体系。

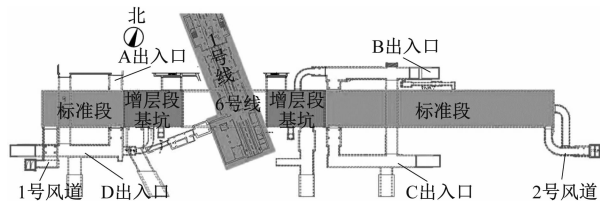


图 1 苹果园站平面示意图

Fig. 1 Planar diagram of Pingguoyuan Station

1.2 车站上盖增层基坑支护设计

车站断面宽 23.1 m,高 22.5 m,采用 C30 钢筋混凝土浇筑而成。车站覆土厚约 4.3 ~ 4.8 m,最浅埋深约 3.8 m,底板埋深约 27.5 m,见图 2。车站负二、三层采用洞桩法施工,施工完成后负一层采用明挖法施工。上盖增层基坑的围护桩采用 $\phi 1\,000$ mm 人工挖孔桩,桩间距为 1.6 m,桩间采用厚 100 mm 的钢筋网喷射混凝土。基坑内支撑布置及土层分布如图 2 所示。

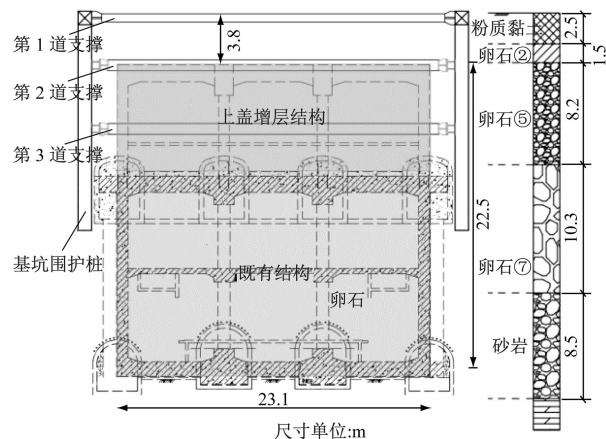


图 2 苹果园站南北向剖面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the north-south section of Pingguoyuan Station

2 车站上盖增层的施工技术

2.1 上盖增层的施工方法

车站上盖增层结构采用明挖法施工,围护桩采

用人工挖孔桩。开挖到既有车站小导洞拱顶后,将桩体与既有车站连接,施作桩顶冠梁和第 1 道混凝土支撑。开挖基坑并架设 3 道钢支撑。第 3 道支撑架设后,开挖除反压土之外的土体,凿除影响施工的既有车站初支结构和回填的素混凝土,并施作防水层及侧墙结构。待侧墙达到强度后,开挖剩余反压土。凿除剩余初支结构和回填的素混凝土,并施作剩余防水层和侧墙结构。待第 3 道支撑下部主体侧墙结构达到强度后,拆除第 3、2 道钢支撑,施作防水层和换乘厅剩余上部主体结构。对车站结构与围护结构间的肥槽采用同步回填。待顶板达到设计强度后,敷设顶板防水层,拆除第 1 道内支撑,破除地表下方 3 m 范围内的挡墙、冠梁及桩身结构,回填基坑。

2.2 上盖增层的安全控制措施

基坑东、西两侧围护桩直接落在既有车站结构上方,无法嵌入土体,为“吊脚桩”形式,影响基坑稳定性。因此,提出桩底与初支结构连接、桩后土体深孔注浆加固及预留反压土等 3 种安全控制措施以保证基坑安全。

1) 桩底与既有初支结构连接技术。施作无嵌固桩时,开挖至既有车站小导洞拱顶后,采用风镐破除其小导洞拱部初支结构(厚 200 mm)。对人工挖孔桩钢筋进行绑扎时,将桩的主筋和导洞的格栅主筋焊接成整体。

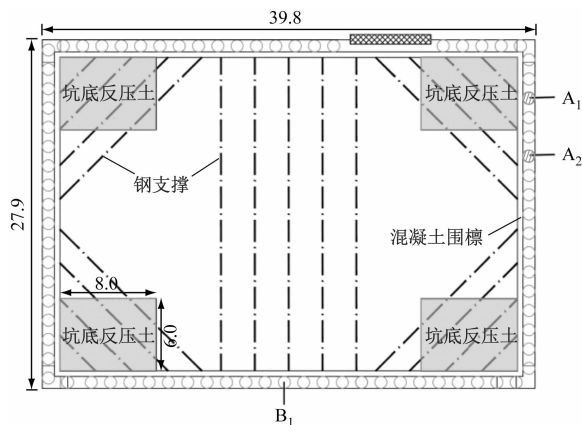
2) 桩后土体深孔注浆加固技术。为保证无嵌固桩一侧的桩体稳定性,施作无嵌固桩后,对桩后土体进行深孔注浆加固。注浆宽度为 3 m,注浆深度为地表下方 3.7 m 至基底。浆液与土体反应后可提升土体的力学参数,使原本松散、多孔的土体形成压缩性小、密实度高、稳定性好、抗渗强且具有一定抗压能力的胶结体^[8]。

3) 预留反压土。为进一步保证基坑安全施工,开挖到第 3 道支撑下方时,保留车站平面 4 个角部的原状土反压基底。反压土沿基坑纵向长 8 m,横向宽 6 m,高 2 m,如图 3 所示。在反压土范围外侧墙结构施工完成后,再进行反压土开挖。

2.3 上盖增层围护桩的变形规律

选取 H_0 (基坑开挖深度)为 4.0 m、8.7 m、12.2 m 和拆除第 3 道支撑等 4 个典型工况,对基坑 A_1 、 B_1 桩的水平位移进行了分析。

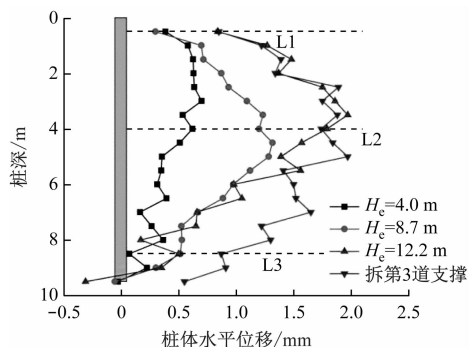
图 4、图 5 分别为 A_1 和 B_1 桩在不同工况下的水平位移监测曲线。由图 4 可见, A_1 桩桩底水平位移接近于 0,说明桩底与初支连接的措施可以有效



注:⊙为无嵌固桩;○为嵌固桩;尺寸单位为mm。

图3 基坑坑底反压土位置

Fig. 3 Anti-pressure soil location at the foundation pit bottom



注: H_c 为基坑开挖深度;L1—L3为钢支撑在 H_c 范围内的位置;图5同。

图4 A_1 桩体水平位移监测曲线

Fig. 4 Horizontal displacement monitoring curve of pile A_1

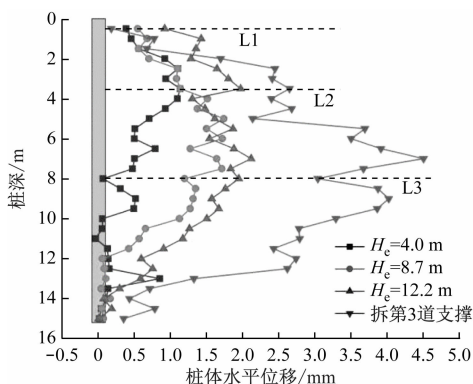


图5 B_1 桩体水平位移监测曲线

Fig. 5 Horizontal displacement monitoring curve of pile B_1

限制桩底变形。由图5可见,桩体最大位移出现在嵌固桩拆除第3道支撑后,其值约为4.50 mm,为基坑开挖深度的0.037%。这表明人工挖孔桩、桩底与初支连接、桩后土体注浆加固及预留反压土等措施能有效地抑制桩体变形。

3 车站上盖增层结构接头施工技术

在既有车站结构的基础上进行上盖增层拓建时,新、旧结构接头位置存在薄弱点,会影响车站结构的整体性。故新、旧结构接头是控制结构整体性、安全性的关键,有必要对车站结构接头施工进行研究。

3.1 车站接头搭接施工及结构防水设计

为保证车站结构连接的强度,在既有结构侧墙及钢管柱预留钢筋甩头及接驳器,并对顶纵梁与导洞间隙进行注浆填充。上部结构开挖完成后,凿除临时顶板上方导洞结构及内部回填的混凝土,剥离预埋钢筋及接驳器,绑扎上部结构侧墙及顶板钢筋,浇筑混凝土,从而使车站结构形成整体。

车站结构防水体系分期实施,下部结构有完整的外包防水(塑料防水板),同时在临时顶板外挑位置内附1层SBS(改性沥青防水卷材),与上盖增层结构侧墙外包SBS进行搭接,并对车站交接处的防水甩茬采取保护措施,见图6。

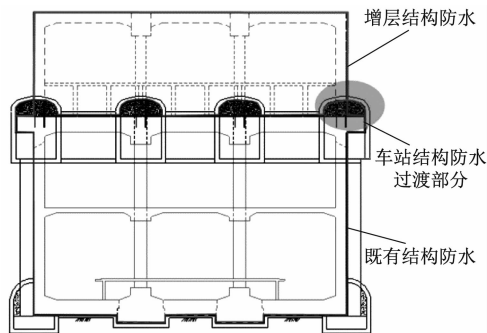


图6 苹果园站结构防水设计

Fig. 6 Waterproof design of Pingguoyuan Station structure

3.2 车站结构整体性分析

为了分析车站结构整体的安全性,研究超厚回填体抑制车站结构的应力集中作用,采用数值模拟分析其变形受力特征。考虑场区的水文地质条件和主体结构高度,计算模型的平面尺寸定为72 m × 36 m × 36 m。该模型的上表面为自由面,侧面限制水平位移,底面限制水平和竖直位移。本基坑涉及大体积卸载,对变形参数更为敏感,因此本模型粉质黏土和卵石层采用Hardening-Soil本构模型。其中,卵石取 $3E_{\text{oed,ref}}$ (主压密加载试验的切线刚度) = $3E_{50,\text{ref}}$ (三轴试验割线刚度) = $E_{\text{ur,ref}}$ (卸载弹性模量),粉质黏土取 $2E_{\text{oed,ref}} = 2E_{50,\text{ref}} = E_{\text{ur,ref}}$,并根据位移反分析确定 $E_{50,\text{ref}} = 3E_s(E_0)$ (E_s 、 E_0 分别为压缩

模量和弹性模量)。此外砂岩采用 Mohr-Coulomb 实体单元模拟。车站岩土层物理力学参数见表 1。模型。根据受力特点,车站结构和各层土体均采用

表 1 苹果园站岩土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of Pingguoyuan Station rock and soil stratum								
名称	重度/(kN/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	割线刚度/MPa	切线刚度/MPa	卸载刚度/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			

为了分析车站结构接头处防水层的性能,在结构受力分析计算模型的基础上,进一步分析新、旧结构交界处防水层的力学特性。交界处防水层厚度分别为 3 mm、4 mm,防水层细部模型见图 7。模拟中将防水层简化为弹性材料,弹性模量取 200 MPa。

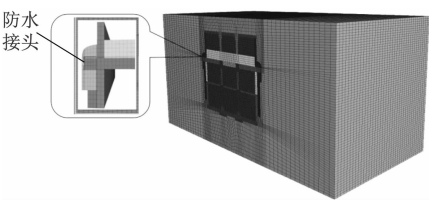


图 7 苹果园站结构计算模型

Fig.7 Calculation model of Pingguoyuan Station structure

图 8—图 9 为车站结构的位移及应力。由图 8—图 9 可见,车站结构的变形和受力较小;最大竖向位移为 0.2 mm,最大水平位移为 0.02 mm;最大拉应力为 0.8 MPa,仅为其抗拉强度设计值的 55.9%;最大压应力为 7.16 MPa,仅为其抗压强度设计值的 23.9%。由此可见,车站结构的拉、压应力远小于混凝土的容许应力,结构安全性能较高。

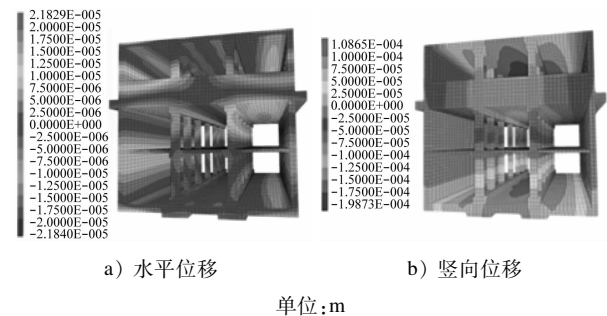


图 8 车站结构位移云图

Fig.8 Nephogram of station structure displacement

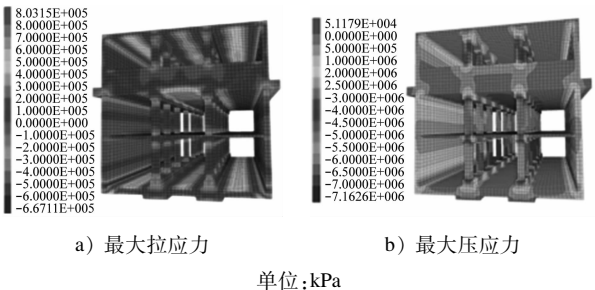


图 9 车站结构应力云图

Fig.9 Strain nephogram of station structure

侧墙为接驳的重点部位,单独提取侧墙的应力进行分析,如图 10 所示。由图 10 可见,侧墙最大拉应力位于超厚回填体位置,其值为 0.30 MPa,远小于混凝土的抗拉强度。此外,侧墙底部接驳部位整体受压,未出现拉应力,其最大值为 0.86 MPa。由此可见,超厚回填混凝土会使侧墙的最大拉应力位置上移,以提高车站结构的安全性能。

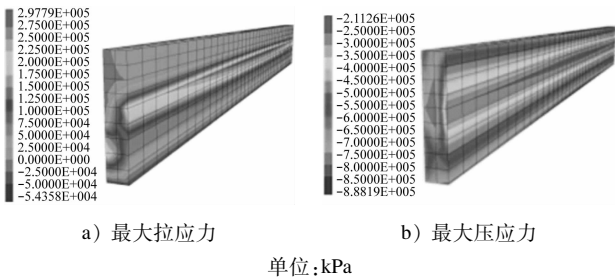


图 10 苹果园站侧墙结构受力云图

Fig.10 Force nephogram of Pingguoyuan Station sidewall structure

回填结构可使车站侧墙底部接驳部位整体受压,这对接驳部位的安全性具有积极意义,因此可对回填结构不同高度时侧墙的受力特征进一步研究。图 11 为回填结构厚度对侧墙受力的影响规律。由图 11 可见,回填结构厚度对侧墙的最大压应力基

本无影响,而对侧墙的最大拉应力具有一定影响;回填结构越厚,侧墙受到的拉应力越小。由此可见,回填结构可以有效抑制侧墙的应力集中,对缓解接驳处受力具有积极意义。回填结构厚度超过 2 m 后,随着其厚度增加,侧墙拉应力基本不再变化。因此,工程中回填结构厚度设置为 2.48 m 是比较合理的。

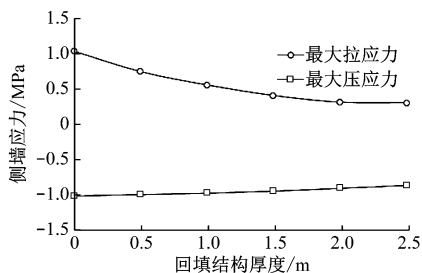


图 11 回填结构厚度与侧墙应力关系曲线

Fig. 11 Relationship curve of backfilling structure thickness and sidewall strain

图 12 为防水层的应力图。由图 12 可见,车站结构接头处防水层整体处于受压状态,这对防水层的搭接具有积极意义。接头处防水层受压时可有效避免因防水层搭接而造成的层间开裂,也进一步降低了防水层失效的可能性。由此可见,接头处防水层受压对防水层的防水性能是有利的。

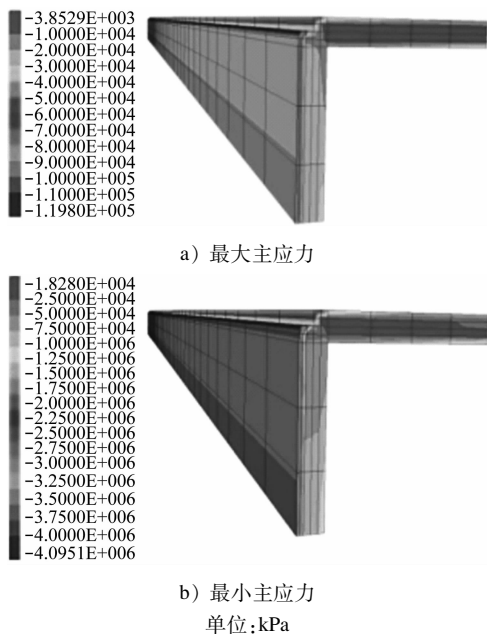


图 12 苹果园站防水层应力图

Fig. 12 Stress diagram of Pingguoyuan Station waterproof layer

4 结论

1) 车站既有结构上盖增层明挖法施工简单、受

力直接,可作为地铁车站多维拓建的一种新方法。针对车站下部结构影响上盖明挖法围护结构稳定性的问题,提出了桩底与初支结构连接、桩后深孔注浆加固及预留反压土 3 种安全控制措施,有效地抑制了围护结构变形。

2) 为保障车站结构的整体性,下部暗挖结构需预留接头,同时对接头处进行超厚混凝土回填。数值分析显示,超厚回填结构有效地抑制了车站接头处的应力集中,结构应力满足设计要求。

3) 提出了在车站既有结构顶板外挑位置内附一层 SBS,后期与地下一层侧墙外包 SBS 进行搭接,重新形成车站结构外包防水体系整体设计方案。通过有限元模拟发现,车站结构交界处防水层整体受压,这对防水层搭接具有积极意义。

参考文献

- [1] 曹宗豪. 北京轨道交通车站的过去、现在和未来[J]. 世界建筑, 2008(8): 74.
CAO Zonghao. Beijing metro station's past, present and future [J]. World Architecture, 2008(8): 74.
- [2] 滕延京, 宫剑飞, 李建民. 基础工程技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012(5): 126.
TENG Yanjing, GONG Jianfei, LI Jianmin. State of arts of foundation engineering technology development [J]. China Civil Engineering Journal, 2012(5): 126.
- [3] 贾强, 应惠清, 张鑫. 锚杆静压桩技术在既有建筑物增设地下空间中的应用[J]. 岩土力学, 2009(7): 2053.
JIA Qiang, YING Huiqing, ZHANG Xin. Construction of basement in existing buildings by static bolt-pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009(7): 2053.
- [4] 文颖文, 刘松玉, 胡明亮, 等. 地下增层工程中既有结构变形控制技术研究[J]. 岩土工程学报, 2013(10): 1914.
WEN Yingwen, LIU Songyu, HU Mingliang, et al. Deformation control techniques for existing buildings during construction process of basement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013(10): 1914.
- [5] 郑刚, 张立明, 刁钰. 开挖条件下坑底工程桩工作性状及沉降计算分析[J]. 岩土力学, 2011(10): 3089.
ZHENG Gang, ZHANG Liming, DIAO Yu. Analysis of working performance of piles beneath excavation bottom and settlement calculation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011(10): 3089.
- [6] 杨学林, 祝文畏, 周平槐. 某既有高层建筑下方逆作开挖增建地下室设计关键技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2018(增刊 1): 3775.
YANG Xuelin, ZHU Wenwei, ZHOU Pinghui. Design key technique of additional basement constructed by top-down excavation below the existing high-rise building [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018(S1): 3775.

(收稿日期: 2021-04-02)