

北京地铁平乐园站盖挖逆筑深基坑设计

王志红

(广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 盖挖逆筑法是在盖挖条件下进行逆筑施工, 能较好的适用城市繁华地区大型地下工程的施工。通过对北京地铁十四号线平乐园站深基坑支护工程设计方案的介绍, 针对盖挖逆筑法的受力特点、选用原则、基坑水平体系、竖向体系的设计要点等进行了深入探讨, 对盖挖逆筑车站基坑设计中的关键问题进行分析, 以期对同类工程提供参考。

关键词: 地铁车站; 深基坑; 盖挖逆筑法; 钢管柱; 一柱一桩; 梁柱节点

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0699-06

作者简介: 王志红(1967-), 女, 河北邯郸人, 学士, 高级工程师, 主要从事轨道交通工程结构设计工作。E-mail: wangzhihong@dtsjy.com。

Design of deep excavation of Pingleyuan Station of Beijing Metro using covering top-down method

WANG Zhi-hong

(Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: The covering top-down method can be better applied to large urban underground construction in city downtown areas, which is inverse in construction under the covering conditions. The design scheme for deep excavation of Pingleyuan Station of Beijing Metro line No. 14 is introduced. The stress characteristics, selection principles, design points of horizontal and vertical systems of the excavation are discussed. Some key problems are also analyzed. It may provide reference for similar projects.

Key words: metro station; deep excavation; covering top-down method; steel pipe pile; one column-one pile; beam-column node

0 引言

随着经济的发展, 城市化步伐的加快, 城市交通日益拥挤, 快速发展地下轨道交通建设成为必然。地下铁道建设的不断发展, 使得深基坑工程应用越来越广泛。这些深基坑大多位于城市中心区, 基坑工程周围密布着各种地下管线、各类建筑物、交通干道、地铁隧道等各种地下构筑物, 基坑的开挖均面临着各种环境风险, 鉴于地铁车站设于城市主干道上, 交通流量较大, 如果基坑开挖面积大, 覆土浅, 基坑距周围建筑物近, 为了尽量防止开挖基坑而引起临近建筑物的沉降变形, 及早恢复路面交通, 盖挖逆筑法是修建浅埋地铁车站的有效的方法。

1 工程概述^[1]

1.1 工程概况

北京地铁十四号线平乐园站是北京市地铁十四号线工程的一个中间站, 车站位于北京市朝阳区西大望路与南磨房路交叉口北侧, 沿西大望路南北向布置。

车站为地下3层、双柱三跨岛式站台车站, 站台宽度12 m。车站主体建筑面积为12713.8 m², 外包总长172.6 m, 有效站台长度为138 m, 车站中心覆土约为3.1 m, 标准段宽度为21.1 m, 标准段基坑深度为22.9 m, 盾构段宽度为24.8 m, 盾构段基坑深度24.25 m。

车站共设置3个通道和3个出入口(负一层设备区设置2个消防出入口, 负二层公共区设置3个出入口)及2组4个风亭。本工程位于北京市朝阳区的主干道下, 周边地下管线密集, 并紧邻多栋建筑物, 其中东侧有市政工程管理处机械厂办公楼、友金大厦、宏久写字楼等建筑物, 西侧有平乐园市场、机动车检测场等建筑物。市政工程管理处机械厂办公楼建设于1980年左右, 为4~5层砖混结构, 建筑物边墙距离基坑悬臂桩外缘3.1~3.8 m。友金大厦建设于1992年, 6层混凝土框架结构, 为柱下独立基础, 埋深约2.5 m, 基础外缘距离基坑悬臂桩外缘约13 m。主要地下管线

有车站主体基坑南端的双层电力管沟，上层为 1950 mm，埋深 5.5 m；下层为 2 m×2.3 m 电力管，管内底埋深 8.9 m，与车站主体结构最小净距约 1.93 m；车站主体西侧的热力管，尺寸为 1.0×0.6 m，埋深约 1.6 m，与车站主体结构净距约 6.1 m。

站址周边环境和总平面见图 1，2。



图 1 站址环境图

Fig. 1 Site environment

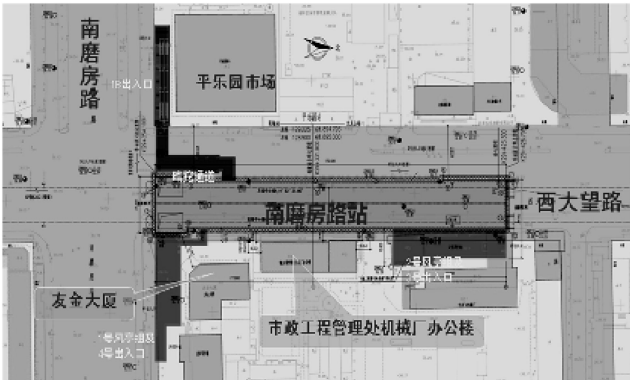


图 2 车站总平面图

Fig. 2 General plan of station

本工程周边环境复杂，位于城市主干道下，临近多条市政管线及建筑物，环境保护要求较高，其中车站东侧的市政工程管理处机械厂办公楼、临近东南口的宏久写字楼、友金大厦作为一级风险源是本工程的重点保护对象。

1.2 工程地质及水文地质概况

(1) 工程地质概况

车站基坑边坡土层按其沉积年代及工程性质可分为人工堆积层、第四纪沉积层，场地土层分部情况及物理力学指标详见表1。

(2) 水文地质概况

拟建场地地下水实测到两层地下水，地下水类型为潜水（二）及层间水～微承压水（三）。

潜水（二）：含水层主要为粉土④₂层、中粗砂④₄及褐灰色中粗砂④₆层，其下部相对隔水层主要为粉质黏土④₃层、黏土④₁层，稳定水位埋深12.70～13.10 m，标高22.94～24.01 m，主要接受侧向径流及大气降

水补给，以侧向径流和蒸发为主要排泄方式。

层间水～微承压水（三）：含水层主要为中粗砂④₄层及中粗砂⑦₁层，其下部相对隔水层主要为粉质黏土⑧₂层、黏土⑧₁层，稳定水位埋深 20.20～22.70 m，标高 13.37～16.61 m，主要接受侧向径流补给，以侧向径流、越流和人工开采为主要排泄方式，受地层分布影响，该层水局部表现有微承压性。

表 1 土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soil layers

土层代号	土层名称	固结快剪 C_q		钻孔桩的 极限 侧阻 力标 准值 q_{sik} /kPa	钻孔桩的 极限 端阻 力标 准值 q_{pk} /kPa	钻孔灌 注桩 桩周极 限摩阻 力 f_i /kPa
		黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)			
①	粉土素填土	5	12			
① ₁	杂填土	0	8			
① ₃	圆砾卵石素填土	0	15			
① ₄	粉质黏土素填土	8	10			
③	粉土	15	23	50		50
③ ₁	粉质黏土	26	15	55		55
③ ₂	黏土	32	10	60		60
③ ₃	粉细砂	0	26	45		45
③ ₅	粉质黏土	30	15	55		55
③ ₆	粉土	15	22	55		55
④	粉质黏土	30	15	65		65
④ ₁	黏土	33	10	60		60
④ ₂	粉土	15	23	65		65
④ ₃	粉细砂	0	28	60		60
④ ₄	中粗砂	0	32	70		70
④ ₆	中粗砂	0	32	70		70
⑥	粉质黏土	30	15	65		65
⑥ ₁	黏土	33	10	60		60
⑥ ₂	粉土	15	23	65		65
⑦	卵石	0	40	150	2900	150
⑦ ₁	中粗砂	0	32	75	1300	75
⑧	粉质黏土	30	12	60	700	
⑧ ₁	黏土	33	10	60	700	
⑧ ₂	粉土	15	23	65	750	
⑨ ₁	中粗砂			80	1800	
⑨ ₃	粉土			65	750	
⑨ ₄	粉质黏土			60	700	
⑩	粉质黏土			60	800	
⑩ ₁	黏土			65	800	

2 基坑设计方案^[1]

2.1 总体设计方案

本车站基坑周边环境条件复杂，环境保护要求条

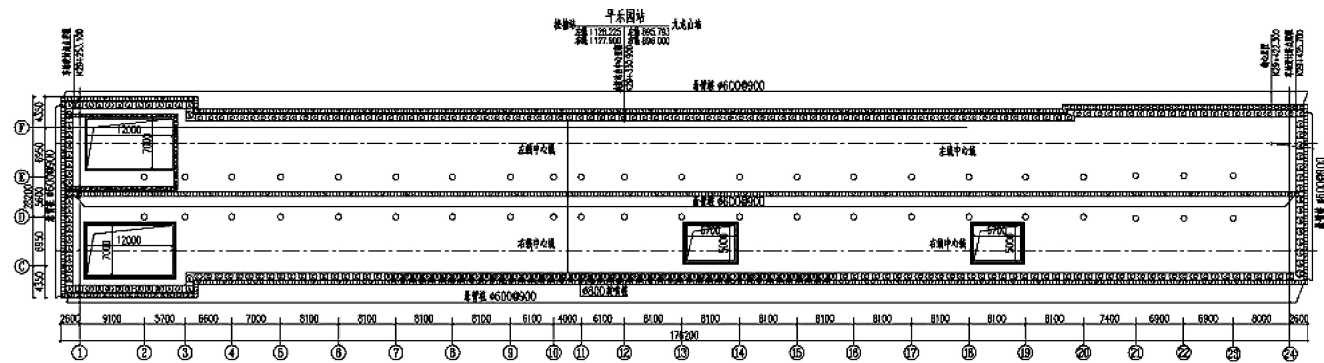


图3 围护结构总平面图

Fig. 3 General plan of retaining structures

件较高,且本工程处于闹市区,位于城市主干道一侧,交通繁忙。道路下方管线密集,管径较大。站位周边建筑物年代久远,且离车站主体较近,场地条件紧张。此外,业主对工程建设周期要求较高,若采用常规的明挖顺做法设计,交通疏解、管线迁改需分多期进行,工期上不可控,也难以满足现状通行能力,考虑本工程周边环境的实际情况,建设工期、工程造价等综合因素,确定本基坑采用盖挖法施工。盖挖法按基坑开挖和施作顺序的不同,又可分为盖挖顺筑法和盖挖逆筑法两大类,盖挖顺筑法对地面交通影响时间短,造价较低、工程难度不大、作业环境较好、结构防水可靠,适用于地层较稳定、一般挖深的双层地铁车站。盖挖逆筑法通常以结构顶板代替临时路面,在其上覆土后即可恢复地面交通,在顶板的下面自上而下分层开挖基坑和施作结构,适用于地层软弱、挖深大、需要严格控制施工引起的地面沉降的情况。因此,根据本站的地面交通情况、地层情况、临近建筑物的沉降要求、基坑深度等综合考虑,采用顶板纵向分幅盖挖逆筑方案。围护结构平面图详见图3。

2.2 围护结构设计

(1) 主体围护结构设计

车站基坑深度为22.9~24.25 m,站位周边管线密集、临近建筑物为一级风险源,基坑侧壁安全等级按一级设计。车站基坑围护结构采用钻孔灌注桩+内支撑形式,主体基坑盾构井、市政工程管理处办公楼前围护结构采用 $\Phi 1000@1400$ mm 钻孔灌注桩,其余部位采用 $\Phi 1000@1500$ mm 钻孔灌注桩;钻孔桩的插入深度根据基坑的变形、稳定性、周边建筑物的保护确定,盾构井处围护桩的嵌固深度为8 m,标准段及市政工程管理处办公楼前围护桩嵌固深度为7 m。

本工程为地下3层车站,基坑底进入层间水~微承压水(三)层,该层水局部表现有微承压性,本站采用基坑内、外降水,其中市政工程管理处机械厂办公楼距离基坑较近,为防止水土流失导致楼房产生较

大沉降,拟在楼房范围内的围护桩间施做 $\Phi 800$ mm 旋喷桩防止由于层间水的降水效果不好引起土体涌水涌砂。

(2) 临时围护结构设计

车站采用纵向分幅盖挖逆筑方案,在施做顶板前需开挖基坑至顶板底,施作临时围护结构,临时基坑深约4 m。临时基坑在车站主体围护桩外侧增加悬臂桩支护,悬臂桩采用 $\Phi 600@900$ mm的钻孔灌注桩,施工期间对悬臂桩进行严密监控,桩顶最大水平位移 $\leq 0.15\%H$ 。基坑围护结构典型剖面图见图4。

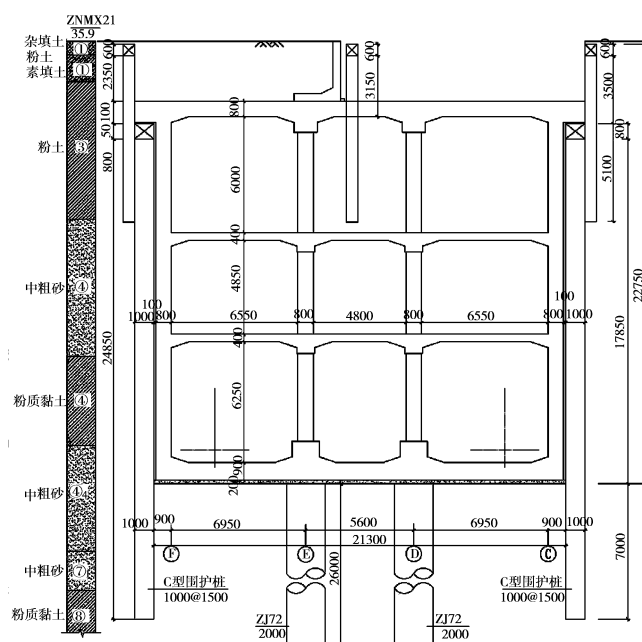


图4 车站基坑典型横剖面图

Fig. 4 Typical transverse section of excavation

2.3 结构梁板替代水平支撑设计

本车站主体结构梁板组成水平结构体系,代替水平支撑,水平刚度大,可有效控制基坑变形。在施工阶段,主体结构梁板体系兼做施工平台,要有足够的强度和刚度,满足施工阶段和正常工作阶段的各种功能要求,按照水平向和竖向两种不同工况受荷的联合

作用进行设计。施工阶段顶板承担覆土荷载、车辆荷载、结构主体自重和施工荷载,通过纵梁及伸出的翼缘传递到中间桩柱及围护桩上;使用阶段顶板、中板承受竖向荷载,通过纵向主梁下的柱子和边墙将荷载传递到底梁和底板。

由于逆做阶段土方开挖的需要,本站尽量利用中楼板在楼扶梯开洞位置作为土方、设备、材料等的垂直运输通道,利用原盾构孔作为一出土口,还需在车站顶板上开两个洞预留出土口。出土口大小 $5\times 6.7\text{ m}$,在孔洞周边预留钢筋接驳器,设置临时挡土墙,在施工结束后进行封闭。

2.4 竖向支承体系设计^[3]

(1) 竖向支承体系的组成

竖向支承体系为中间立柱及其基础,施工阶段还包括围护结构。为了简化施工、加快暗挖作业进度和降低造价,竖向支承系统的中间立柱选用临时柱和永久柱合一的方案。车站立柱的纵向间距考虑建筑功能的需要、地层条件以及工期的要求,纵向间距为 8.1 m 。主体围护结构采用钻孔桩,围护桩顶仅做到顶板搭接处标高,顶板搭接在围护桩上,同中立柱一起共同承担顶板传递的竖向荷载,并增加顶板和围护结构之间的抗剪能力。

(2) 中立柱、桩设计

中立柱是结构封底前承受和传递竖向荷载的主要受力构件,其承载能力、刚度和稳定性关系工程的成败。本站的中间立柱在施工阶段与围护桩一起作为临时竖向受力构件,在使用阶段和侧墙作为竖向承载力和竖向传力的永久构件。为了顺利地荷载传给地基,并把地基沉降控制在结构变形的允许范围内,必须合理选定竖向支撑及其下部的形式和施工方法。

本站中间立柱为一柱一桩,采用钻孔灌注桩桩内插钢管柱的形式。由于结构的梁板自重及顶板上覆土较大,中间柱采用直径 $\phi 800\text{ mm}$,壁厚 $t=20\text{ mm}$ 的钢管混凝土柱,桩身材料为 16 Mn 钢,柱内浇筑的核心混凝土为 C50 微膨胀混凝土。柱下采用 C30 , $\phi 2000\text{ mm}$ 的钻孔灌注桩基础,施工中柱时采用 $\phi 1860\text{ mm}$ 、 $t=18\text{ mm}$ 的钢套筒和定位器,钢板型号为 Q235 ,钢管柱下端利用定位器插入桩基中不少于 2 m ,在钢管柱锚固段上设置抗剪栓钉。

中立柱按照施工和使用阶段取最不利工况计算确定,在施工阶段,中立柱按压弯构件计算,进行强度和稳定性分析,计算中需考虑施工误差的影响,允许最大偏心距为 $\pm 30\text{ mm}$ 。在使用阶段,按主体结构的中柱计算,中立柱的桩顶沉降不应大于 20 mm 。围护桩除受水平荷载外,在主体结构完成前,还和立柱一起共同承受顶板、楼板传来的竖向荷载,围护桩按

压弯构件进行设计。围护桩的入土深度满足在此竖向荷载作用下地基承载力和沉降验算。

(3) 中立柱桩定位和精度要求

中间立柱安装于直径 1000 mm 的深孔内,它的准确就位,是逆筑法施工中的一项关键技术。为了保证中间立柱的承载能力和连接节点传力可靠,必须严格控制中间立柱的定位精度,并在柱的设计中根据施工允许偏差计入偏心的影响。本站为地下三层车站,中间柱的就位精度,允许定位偏差不大于 20 mm ,中间柱的垂直度偏差不大于 2% ,围护桩的垂直度偏差不大于 3% 。桩顶沉降不大于 15 mm ,围护桩与中间桩差异沉降累计值不大于 $0.003L$,且 $\leq 20\text{ mm}$,并在结构分析中计入其影响。

2.5 中间桩、围护桩沉降控制

逆筑法施工时,边中桩的升沉控制是关键点之一。结构变形和节点连接精度的允许范围内,本站要求围护桩与中间桩差异沉降累计值不大于 $0.003L$ (L 为边墙和立柱轴线间的距离),且 $\leq 20\text{ mm}$ 。采取以下措施:

- 选择粉质黏土层、粉土及黏土层作为桩端持力层;
- 选择直径 2000 mm 的大直径钻孔桩提高摩阻力、抗沉降能力。
- 增强边墙的整体刚度。由于采用钻孔灌注桩做护壁,设置了足够刚度的内衬墙,并在桩顶设置刚度较大的冠梁。
- 选择合理的施工工艺、加强施工质量把控,施工时要求桩底沉渣不得大于 100 mm 。
- 除临时围护悬臂桩以外所有围护桩及钢管柱下桩基础均需实施后注浆以提高桩底混凝土的密实度及围岩强度,减少桩长,降低中立柱和围护桩之间的不均匀沉降差,围护桩采用桩底后注浆、中间桩采用桩底及桩侧复式注浆。

2.6 梁柱节点设计

逆筑法施工的车站结构,其交汇于同一节点的各种构件,并非同步完成,构件之间的相互连接能否真正反映预期的工作状态,主要取决于节点的构造形式、施工精度和施工质量。逆筑车站的关键节点有后浇梁与中间立柱的连接、中间立柱与其基础的连接。本站支承立柱采用钢管混凝土柱,梁端剪力通过柱上的环形抗剪钢牛腿传给立柱,钢管柱在其两侧设置双梁承受节点弯矩。

(1) 钢管柱与顶纵梁的节点设计

钢管混凝土立柱与主体顶板梁的连接节点处设有环形抗剪钢牛腿作为钢柱帽,使用阶段在钢柱帽外包细石混凝土解决防锈和防火的问题,钢管柱内钢筋锚入顶纵梁。节点构造详见图5。

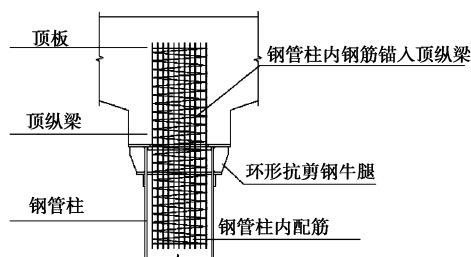


图5 顶板梁柱节点

Fig. 5 Beam-column node on roof

(2) 钢管柱与中纵梁的节点设计

钢管混凝土立柱与主体中板梁柱节点处设钢翼缘板即加强环,用来连接负弯矩钢筋,设置钢抗剪环牛腿,节点区弯矩和剪力分别由梁和抗剪环牛腿承担;节点处柱宽范围外梁上部纵筋通长布置,柱宽范围内梁上部纵筋焊在上加强环上;柱宽范围外梁下部纵筋通长布置,柱宽范围内内梁下部纵筋锚固在钢牛腿支座内且伸至柱边,锚固钢筋末端采用机械锚固措施。节点构造详见图6。

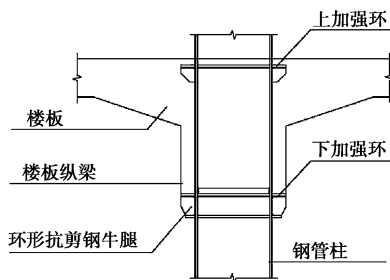


图6 中楼板梁柱节点

Fig. 6 Beam-column node on middle plate

(3) 钢管柱与底纵梁的节点设计

钢管混凝土立柱与主体底板梁柱节点处设钢翼缘板加强环,用来连接下部弯矩钢筋,设置钢抗剪环牛腿,节点区弯矩和剪力分别由梁和抗剪环牛腿承担;柱与钢筋混凝土底板接触面处及其以下设置传力环等传递压力装置,并设置加劲肋板提高传力环的刚度。节点处柱宽范围外梁上部纵筋通长布置,柱宽范围内梁上部纵筋锚固在钢牛腿支座内且伸至柱边,锚固钢筋末端采用机械锚固措施;柱宽范围外梁下部纵筋通长布置,柱宽范围内梁下部纵筋焊在加强环上。节点构造详见图7。

(4) 钢管柱与桩基础的节点设计

钢立柱与桩基混凝土之间力的传递,主要靠钢柱和混凝土之间的黏着力、钢管混凝土柱底部的支撑力和栓钉头的剪切力共同作用。

柱与基础的交接面上设置柱脚环板传递压力,钢管柱插入桩内2000 mm,在此范围内沿柱周围梅花形

布置栓钉。节点构造详见图8。

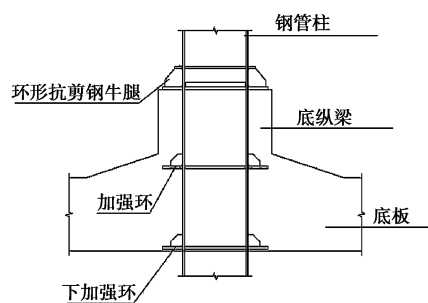


图7 底板梁柱节点

Fig. 7 Beam-column node on floor

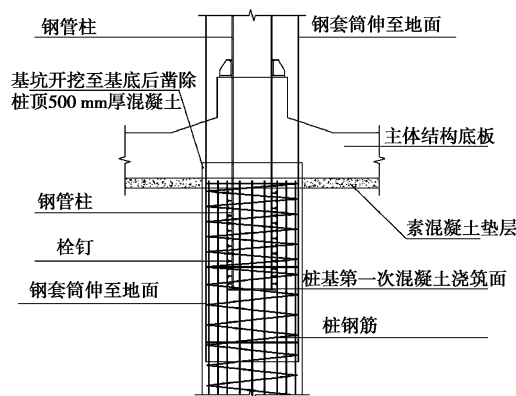


图8 桩柱节点

Fig. 8 Pile-column node

3 基坑工程施工步骤

本站为盖挖逆做法施工,钢管混凝土柱作为施工期间中部竖向支座,兼作车站结构永久柱。顶板结构施工前施作 $\phi 600@900$ 钻孔灌注桩,作为临时围护结构,施作主体围护钻孔桩,中间柱桩基础,顶板施工完成后回填覆土,并在顶板保护下向下开挖土体,依次施作侧墙、中楼板和底板;各段施工步序详见图9车站施工步序图。

步序1:平整场地,施做车站西侧的钻孔灌注桩、悬臂桩、车站西侧的中间桩基础,定位吊装钢管柱、浇筑钢管柱内混凝土,并开始降水。

步序2:开挖至顶板设计标高;利用土模施作车站西侧的顶板结构,铺设盾构吊出孔上方的临时路面,顶板及临时盖板达到设计强度后,铺设顶部防水层及部分覆土,并恢复交通。

步序3:施做车站东侧的钻孔灌注桩、悬臂桩、旋喷桩;施做车站东侧的中间桩基础,定位吊装钢管柱、浇筑钢管柱内砼。

步序4:开挖至顶板设计标高;利用土模施作车站东侧的顶板结构、出土孔处挡土墙,铺设顶部防水层及部分覆土。

步骤 5: 开挖土方, 依次施工车站负一、二层板。

步骤 6: 继续开挖至设计坑底标高, 施作垫层、底板及侧墙防水层、浇筑底板结构及部分侧墙结构, 主体结构施工完成。

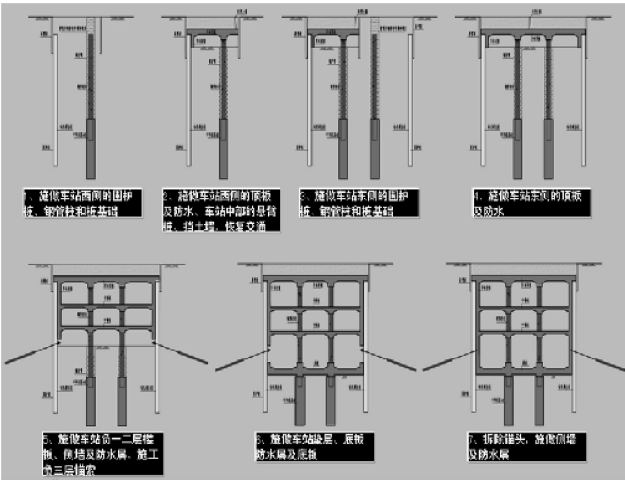


图 9 车站施工步骤图

Fig. 9 Construction steps of station

4 结 语

资料检索表明, 盖挖逆筑法修建车站在城市中心区地铁建设中的优势越来越明显, 本文根据盖挖逆做

车站的适用条件、其结构构件的受力特点, 从平乐园站围护结构方案的选择、水平支撑的设计、中间支撑系统的选择、关键节点设计几方面进行探讨和分析, 旨在提供一些类似工程设计经验及思路, 为以后同类工程提供参考。

参考文献:

[1] 北京地铁十四号线平乐园站施工设计[R]. (Construction design of Pingleyuan station of Beijing metro line No.14[R]. (in Chinese))

[2] GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. (GB 50157—2003 Code for design of metro[S]. (in Chinese))

[3] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))

[4] 刘 钊, 余才高, 周振强. 地铁工程设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (LIU Zhao, SHE Cai-gao, ZHOU Zheng-qiang. Design and construction of metro engineering[M]. Beijing China Communications Press, 2004. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)