

一次扣拱暗挖逆作法车站结构设计要点分析*

荣 冰¹, 郭 宁²

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037; 2. 浙江大学岩土工程计算中心, 浙江 杭州 310058)

[摘要] 随着城市地铁的快速发展, 地铁线路通常会穿越人口密集、地面交通繁忙、地面建筑物林立、地下管线密布的市中心繁华地段, 全暗挖法施工地铁车站为避免管线迁改、减少交通影响、改善施工环境等方面具有显著优势, 但也具有施工条件受限、结构受力转换复杂、变形控制不利等特点。基于北京地铁 14 号线大望路站工程, 分析了由于条件受限而采用全暗挖法施工的必要条件, 针对一次扣拱暗挖法施工采用理论分析、数值计算、现场监测等手段对其结构受力体系、施工过程中地层变形控制等关键技术进行了系统分析和总结, 揭示了该类型车站施工的受力和变形规律。

[关键词] 地铁车站; 一次扣拱法; 暗挖法; 结构设计; 受力体系; 地层变形; 施工技术

[中图分类号] U231⁺.4 [文献标识码] A [文章编号]

Analysis on the Structural Design Essentials of Subway Station by Top-down Bored Excavation Method with Cast-in-situ Arch

RONG Bing¹, GUO Ning²

(1. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China; 2. Computing Center for Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: With the rapid development of urban subway, subway lines usually pass through densely populated and busy areas with numerous surface transportation and buildings, as well as complex underground pipelines in the bustling downtown area. The construction of subway stations by undermining method has obvious advantages in avoiding pipeline relocation, reducing i traffic impact and improving construction environment and so on. However, it also has characteristics such as limited construction conditions, complex structural force conversion, and unfavorable deformation control. Based on Dawanglu Station project of Beijing Subway Line 14, the necessary conditions for using the full-face excavation method due to limited conditions are analyzed. The force system and key technologies of the construction process and stratum deformation control are systematically analyzed and summarized using theoretical analysis, numerical calculation, and on-site monitoring for the top-down bored excavation method with cast-in-situ arch. The stress and deformation laws of this type of station construction are revealed.

Keywords: subway stations ; top-down bored excavation method with cast-in-situ arch ; undermining method; structure design; force system; stratum deformation; construction

0 引言

随着地铁快速发展, 地铁工程的施工环

*国家自然科学基金 (52078456)

[作者简介] 荣 冰, 正高级工程师, 国家注

册土木工程师 (岩土), E-mail:

rongbing@bjucd.com

[收稿日期] 2023-05-17

境也越来越复杂,浅埋暗挖法得到越来越广泛的应用^[1-3]。根据国内外浅埋暗挖车站工程经验,常用的施工方法有“中洞法”“侧洞法”“柱洞法”和“PBA法”等^[4-5]。前3种为分部开挖法,均以“CRD”法为核心,施工较简单,但对多层多跨断面地层沉降控制较差^[4-6]。PBA法利用小导洞施作桩、梁形成主要传力结构,在暗挖拱盖保护下进行内坑开挖,变形控制较好,得到较广泛应用^[7-10]。

一次扣拱暗挖逆作法最早在北京地铁海淀黄庄站中得到应用^[11-12],主要特点是在导洞内一次形成由顶拱、边桩、中柱和底板组成的完整的稳定框架结构体系,有效减少了结构施工期间的受力转换次数。该工法目前工程案例应用还较少,有必要针对其结构受力体系和地层变形特点进行深入研究。

1 工程概况

1.1 工程简介

北京地铁14号线是一条沿西南至东北走向的轨道交通干线,大望路站为14号线与1号线的换乘站^[13]。1号线大望路站沿建国路东西向敷设,位于西大望路西侧。14号线大望路站沿西大望路南北向敷设,与既有1号线车站呈L形布置,车站总平面布置如图1所示。

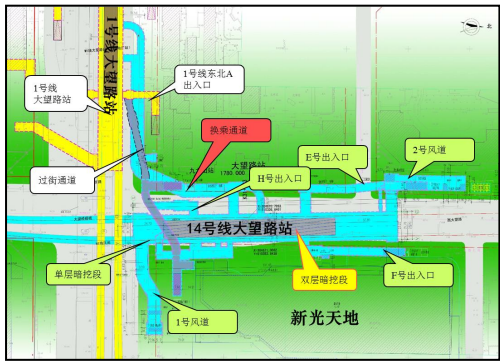


图1 大望路站总平面示意

Fig.1 General layout of Dawanglu Station

1.2 工程水文地质条件

本工程地层自上而下依次为:粉土填土①层、杂填土①₁层、粉土③层、粉细砂④₃层、中粗砂④₄层、圆砾卵石⑤层、中粗砂⑤₁层、粉质黏土⑥层、黏土⑥₁层、粉土⑥₂层、粉细砂⑦₂层、中粗砂⑦₁层、圆砾卵石⑦层。车站双层段顶拱覆土约9.5m,底

板埋深约25m。顶拱处在③粉土、④₃粉细砂等土层中,底板处在⑥₃细中砂、⑥粉质黏土土层中,车站主要穿越粉细砂层、中粗砂层及圆砾卵石层,车站地质纵剖面如图2所示。

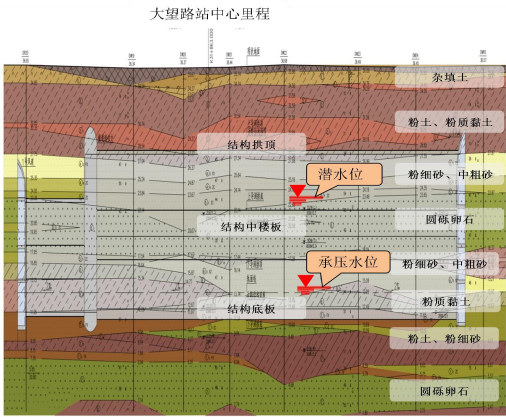


图2 车站地质纵剖面

Fig.2 Geological longitudinal section of the station

车站范围主要有3层地下水,分别为上层滞水、潜水、承压水。其中,上层滞水水位埋深为1.90~6.75m;潜水水位埋深为13~14m,含水层以粉细砂④₃层、中粗砂④₄层、圆砾卵石⑤层、中粗砂⑤₁层为主,水量较大,在施工过程中可能产生潜蚀作用;站底板进入承压水层约2m,对车站结构施工存在较大影响。

2 施工工法研究论证

地铁车站施工方法应根据车站的场地条件、水文地质条件、周边建筑物、地下管线、环保要求、车站功能等特点,综合考虑施工工艺、工期、造价、工程质量等多方面因素确定^[14-15]。

车站场区周围为华贸中心、建外SOHO等商城及写字楼,地面交通异常繁忙,车站范围内地下管网密集,有多条热力、电力管沟和雨污水管等深大管线,以及新光天地既有地下过街通道,主要风险源如图3所示。综合考虑,明挖法与盖挖法均不适宜,推荐采用浅埋暗挖法施工。

经充分论证,车站主体采用一次扣拱暗挖逆作法施工,如图4所示。

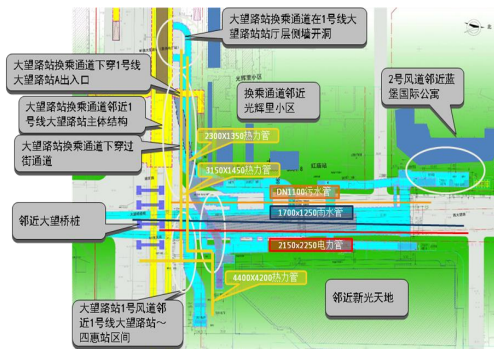


图3 车站场地范围重要风险源示意
Fig.3 Important risk sources in the station site

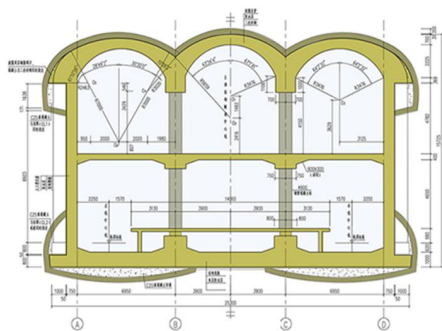


图4 车站主体横断面

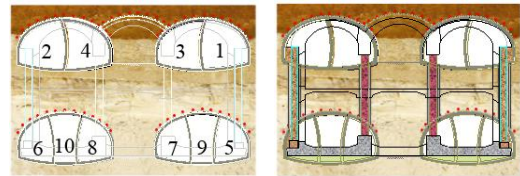
Fig.4 Cross section of station main body

3 一次扣拱暗挖逆作法关键技术

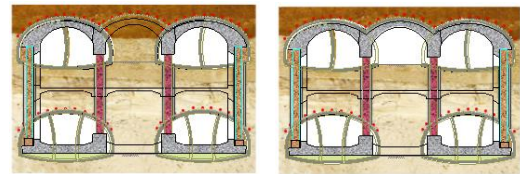
3.1 受力体系分析

一次扣拱暗挖逆作法可在暗挖导洞内一次形成由顶拱、边桩、中柱和底板组成的完整、稳定的边跨承力结构体系，并在其保护下实现大基坑逆作施工。一次扣拱暗挖逆作法施工步骤如图5所示，技术要点如下。

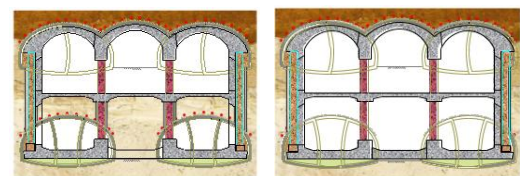
1) 上下四导洞设计结合车站边跨大小、顶底纵梁、中柱及边桩的施工空间要求综合考虑。由于四导洞外侧初支是按永久结构尺寸拟合，导洞宽度一般是结合边跨尺寸、顶底纵梁高度及中柱、边桩的施作空间要求确定；导洞高度除满足必要的尺寸外，还应满足钢管柱及边桩钢筋笼的吊装要求，一般 $\geq 4\text{m}$ ；根据地层情况及沉降控制要求，导洞开挖方法通常有中隔壁法和双侧壁导坑法，由于上导洞需施作中柱及边桩，一般采用中隔壁法，如图5a所示。



a 开挖上下导洞 b 施作底板、边桩及中柱



c 边跨扣拱 d 施作中跨顶拱



e 施作中板及地下一层侧墙 f 完成车站

图5 一次扣拱暗挖逆作法施工步骤示意

Fig.5 Construction steps of one-time arch excavation reverse method

1) 边桩在上导洞内采用人工挖孔或钻孔灌注桩形成，中间立柱为钢管混凝土柱或型钢组合柱，在上导洞内通过人工挖孔竖井架设。在底板浇筑的同时，即可进行中柱和边桩开挖。由于施作空间较小，且开挖量相对较小，一般采用人工方式开挖。待底板达到设计强度，则可施作中柱及边桩，如图5b所示。

3) 边跨封闭受力体系+中跨顶拱支护：在上导洞内破除中隔壁一次施作二衬顶拱，形成由顶拱、边桩、中柱和底板组成的封闭受力体系，如图5c所示。与传统分部开挖法主要采用格栅（或工字钢）等刚度较弱的临时支护结构形式相比，该封闭受力体系具有刚度大和空间受力特点，具有更高结构承载力和稳定性。待边跨达到设计强度后，施作中跨初支及二衬结构，形成中跨顶拱支护，如图5d所示。

4) 在形成的受力体系保护下，开挖土体并依次逆作完成中板、侧墙及剩余底板结构，如图5e，5f所示。

3.2 二衬结构受力分析

远期使用工况是结构设计中首先要考

除远期使用工况外,二衬结构的受力尚应考虑以下施工工况。

1) 开挖地下 1 层工况, 指施作边跨及中拱受力体系并开挖地下 1 层土体后, 地下 1 层侧墙及中板尚未完成阶段, 对应步序为图 5d。此工况下, 竖向荷载由顶拱通过边桩和中柱传递至底板, 侧向土压力由边桩承受。

2)开挖地下2层工况,指开挖完成地下2层土体后,地下2层侧墙及中跨底板尚未完成阶段,对应步序为图5e。此工况下,地下2层侧向土压力由边桩承受,中板荷载通过边桩及中柱传递至底板。

3)近期无水工况,指二衬结构形成,地下水位尚未恢复阶段,对应步序为图5f。此工况与远期使用工况计算模型一致,只是荷载计算中去掉水压力。

针对以上几种施工工况,由于荷载是逐渐加载,还应采用增量法考虑施工步序受力及变形的递加性。

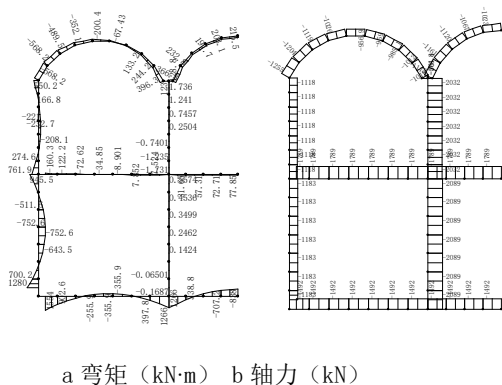
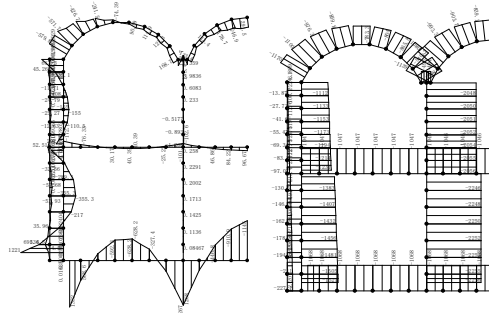


图 6 远期使用工况下受力分布
Fig.6 Stress distribution under long-term
operating condition

图6表明, 远期使用工况下, 顶拱结构所受弯矩较小, 最大负弯矩出现在边跨拱脚处, 中柱与拱顶连接处为正弯矩。侧墙结构在与底板连接处支座弯矩最大, 为 $1280\text{kN}\cdot\text{m}$, 其余部位弯矩均较小; 底板结构

支座处为负弯矩,最大弯矩出现在与侧墙连接处,为 $1\,554\text{kN}\cdot\text{m}$;跨中为正弯矩,最大弯矩出现在中跨跨中,为 $838\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

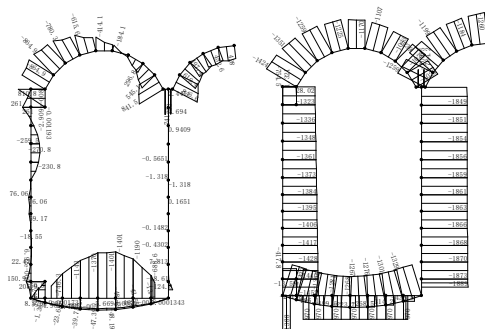


(a) 弯矩图 ($\text{kN}\cdot\text{m}$) (b) 轴力图 (kN)

图 7 近期无水工况下受力分布
Fig.7 Stress distribution under recent waterless condition

图 7 表明, 近期无水工况下, 顶拱结构弯矩分布与远期使用工况基本一致, 只是中柱与拱顶连接处的正弯矩值略小。侧墙结构在与底板连接处支座弯矩最大, 为 $1\,221\text{kN}\cdot\text{m}$; 底板结构支座处为负弯矩, 最大弯矩在侧墙处, 为 $1\,332\text{kN}\cdot\text{m}$; 跨中最大正弯矩出现在中跨, 比远期使用工况略大。

增量法计算的受力分布如图 8 所示。该条件下, 工况 d 的拱顶边跨最大负弯矩出现在边跨拱脚处, 中柱与拱顶连接处为正弯矩, 弯矩值相对较大, 中跨均为正弯矩, 并从支座到跨中逐渐减小。地下 1 层围护桩承受弯矩较小。底板均承受正弯矩, 且弯矩最大值位置偏向中柱一侧, 为 $1401\text{kN}\cdot\text{m}$, 该现象主要是由于边桩和中柱传递的竖向荷载大小不同, 导致底板所受地基反力分布不均匀, 从轴力分布图也可得到验证。



(a) 工况 d 弯矩图(kN·m) (b) 工况 d 轴力图(kN)

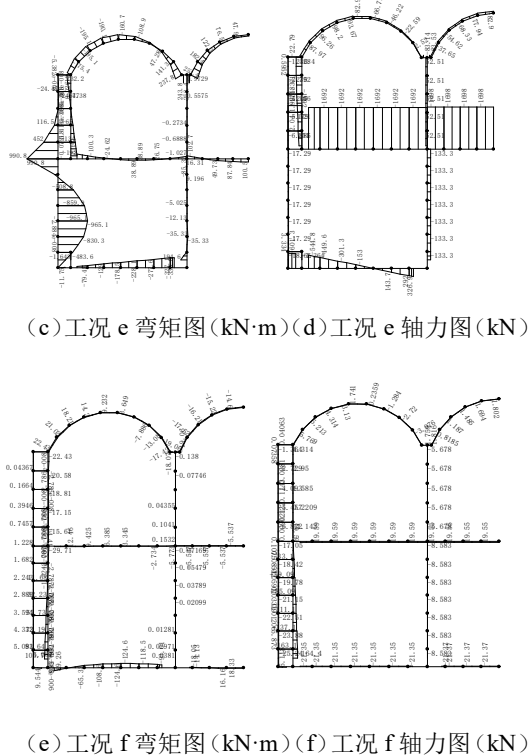


图 8 施工工况下受力分布

Fig.8 Stress distribution under construction conditions

在工况 e 阶段，顶拱弯矩略有增加，主要由于下部土体开挖引起侧向受力增大，最大增加 237.8kN·m，位于中柱支座处。侧墙产生了一定拉力，主要是由于中板自重及其施工荷载作用。底板弯矩略增加，主要是由中板及其施工荷载传递到基底产生的反作用力引起。本阶段边桩受力增大，最大弯矩增加 990.8kN·m。工况 f 是指开挖完成后施作中跨底板封闭框架结构的过程，受力增加不大。

通过以上 d, e, f 工况叠加，得到增量法计算的施工工况受力图，并与近、远期使用工况进行包络设计，从而确定车站的构件尺寸和配筋。

3.3 地表变形分析

采用有限元方法对车站施工过程进行了分析，计算软件采用 MIDAS，建立的地层模型如图 9 所示。

模型横向宽度取 180m，竖向深度取 54m，地层分为 12 层。模型的侧面和底面为位移边界，侧面限制水平移动，底部限制竖向移动，上边界为自由地表。模型中地层采用修

正莫尔-库仑模型，参数根据详勘报告选取，如表 1 所示；车站结构采用弹性单元，如表 2 所示。

表 1 车站地层物理力学参数

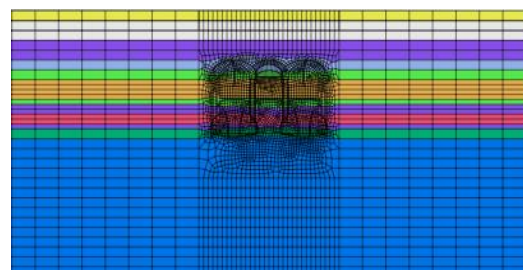
Table 1 Physical and mechanical parameters of the station stratum

地层	重度 (kN·m ⁻³)	压缩 模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩 擦角 (°)
杂填土	16.5	7	10	8
粉土	19.4	8.65	22	25
粉细砂	20.5	22.5	0	35
粉质黏土	19.6	5.9	32	20
中粗砂	20.8	42.5	0	38
圆砾卵石	21.0	55	0	40
中粗砂	20.8	42.5	0	38
粉质黏土	19.6	5.9	32	20
粉土	19.4	8.65	22	25
粉质黏土	19.6	5.9	32	20
粉细砂	20.5	22.5	0	35
圆砾卵石	21.2	65	0	42

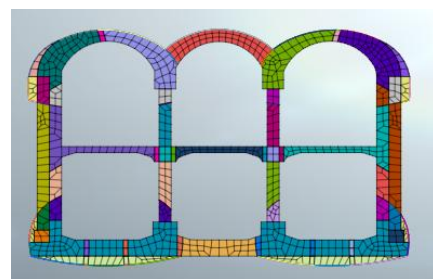
表 2 车站结构力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the station structure

结构	弹性模量 /GPa	重度 (kN·m ⁻³)	泊松比
初支 C20	25.5	25	0.2
二衬 C40	32.5	25	0.2



(a) 地层网格



(b) 结构网格

图 9 车站有限元计算模型

Fig.9 Finite element analysis model of the

station

各阶段地面沉降曲线如图 10 所示, 可看出, 地表在开挖导洞时沉降较大, 待中跨扣拱完成后, 沉降趋于稳定, 最终沉降量为 144.2mm。由上导洞开挖引起的沉降量为 37.5mm, 由下导洞开挖引起的沉降量为 76.9mm, 施工边跨结构、边桩和中柱引起的沉降量为 10.5mm, 由中拱开挖引起的沉降量为 15.7mm, 剩余部分施工引起的沉降量为 3.6mm。

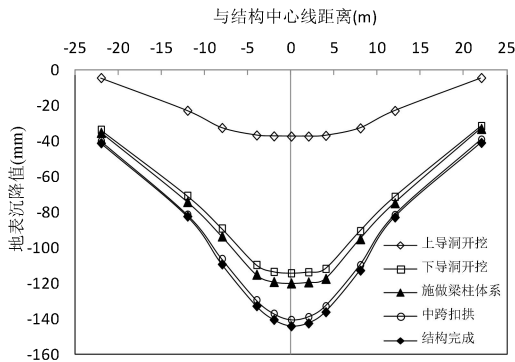
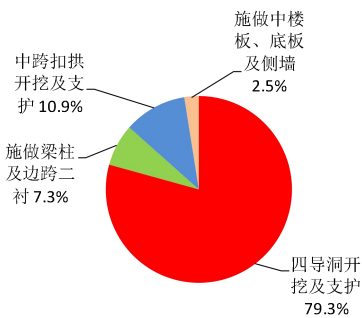


图 10 各施工阶段地表沉降曲线

Fig.10 Surface subsidence curves in each construction stage

各施工阶段地表沉降分配比例如图 11a 所示。分析表明, 开挖 4 个导洞引起的地表沉降量占总沉降量的 79.3%, 中拱开挖扣拱完成后引起的地表沉降量达到 97.5%, 远大于开挖剩余土体及施作二衬结构引起的沉降。

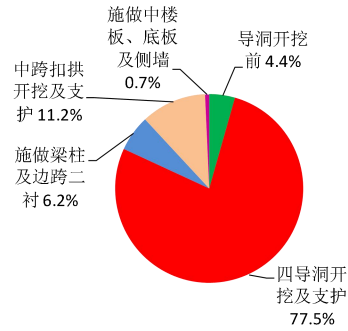


a 数值计算

3.4 现场监测与验证

选取大望路站工程现场典型监测断面, 提取监测结果并进行分析, 现场实际监测各施工阶段地面沉降分布如图 11b 所示, 结果表明, 开挖 4 个导洞引起的地表沉降量约占总沉降量的 77.5%, 形成中跨支护结构后引起的地表沉降量约占总沉降量的 94.9%, 现

场监测与数值计算结果基本一致。需要指出的是, 与数值计算相比, 监测表明导洞开挖前已存在地表沉降, 其可能是受降水影响。



b 现场监测

图 11 数值计算与现场监测各阶段地表沉降分布

Fig.11 Surface subsidence distribution in each stage by numerical calculation and field monitoring

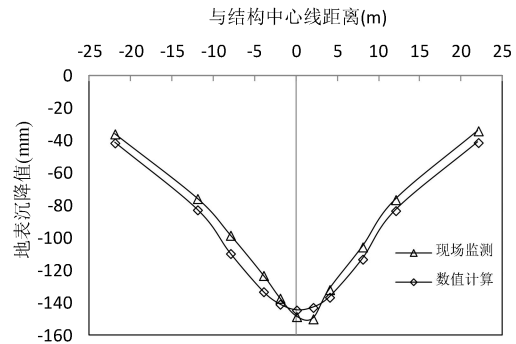


图 12 地表沉降曲线对比

Fig.12 Comparison of surface subsidence trough curves

现场监测与数值计算沉降曲线对比如图 12 所示, 两者总沉降量相差 $\leq 5\%$, 且沉降曲线也基本吻合。2 种研究方法共同揭示了一次扣拱暗挖逆作法施工地铁车站地表沉降的发展规律及分布。

4 结语

1)暗挖法施工地铁车站避免管线迁改、减少交通影响、改善施工环境等方面具有明显优势。

2)一次扣拱暗挖逆作法可在暗挖导洞内一次形成由顶拱、边桩、中柱和底板组成的完整、稳定的结构受力体系, 在其保护下可实现大基坑逆作施工, 对提高结构整体稳

定性和施工安全性起到十分重要的作用。

3)一次扣拱暗挖逆作法二衬结构受力计算需考虑远期使用工况、近期无水工况及施工工况的包络设计,针对荷载逐渐加载的施工工况,应采用增量法考虑受力及变形的递加性。

4)通过数值计算及现场监测揭示了一次扣拱暗挖逆作法施工地铁车站地表沉降的发展规律及各阶段沉降分布,其中开挖4个导洞引起的地表沉降量占总沉降量的75%以上,形成中跨支护结构后引起的地表沉降量达到95%左右。

参考文献:

[1] 施仲衡. 地下铁道设计与施工[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.

SHI Z H. Design and construction of underground railway[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.

[2] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2005.

WANG M S. Shallow underground engineering technology general theory[M]. Hefei: Anhui Education Press, 2005.

[3] 王梦恕. 隧道工程浅埋暗挖法施工要点[J]. 隧道建设, 2006, 26(5): 1-4.

WANG M S. Outline of tunnel construction by means of method of undercutting with shallow overburden[J]. Tunnel construction, 2006, 26(5): 1-4.

[4] 贺长俊, 蒋中庸, 刘昌用, 等. 浅埋暗挖法隧道施工技术的发展[J]. 市政技术, 2009, 27(3): 274-279.

HE C J, JIANG Z Y, LIU C Y, et al. Development of shallow tunnel construction method[J]. Journal of municipal technology, 2009, 27(3): 274-279.

[5] 梁韵. 暗挖地铁车站设置原则与施工工法选取研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.

LIANG Y. Study on setting principle and construction method selection of subsurface excavation metro station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.

[6] 罗光财, 陈章林, 卢智强. 大断面浅埋暗

挖地铁车站开挖技术研究[J]. 施工技术, 2020, 49(19): 114-117, 120.

LUO G C, CHEN Z L, LU Z Q. Research on excavation method for shallow-buried subway station tunnels with super-large section[J]. Construction technology, 2020, 49(19): 114-117, 120.

[7] 黄瑞金. 地铁浅埋暗挖洞桩法车站扣拱施工技术[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 268-271, 276.

HUANG R J. PBA method applied in the construction of arch in subway station[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2007, 3(2): 268-271, 276.

[8] 刘波, 付春青, 聂亚抄, 等. 洞桩法施工对地表沉降影响的数值模拟及实测研究[J]. 施工技术, 2018, 47(4): 115-119.

LIU B, FU C Q, NIE Y C, et al. The influence of PBA method construction on surface settlement by numerical simulation and measured study[J]. Construction technology, 2018, 47(4): 115-119.

[9] 罗富荣, 汪玉华. 北京地区PBA法施工暗挖地铁车站地表变形分析[J]. 隧道建设, 2016, 36(1): 20-26.

LUO F R, WANG Y H. Analysis on ground surface deformation of mined metro station constructed by PBA method in Beijing[J]. Tunnel construction, 2016, 36(1): 20-26.

[10] 李晓余. 洞桩法(PBA)地铁车站施工关键技术[J]. 施工技术, 2017, 46(S1): 789-791.

LI X T. Key techniques for construction of metro station by PBA method[J]. Construction technology, 2017, 46(S1): 789-791.

[11] 黄美群. 一次扣拱暗挖逆作法修建地铁车站新技术[J]. 都市快轨交通, 2009, 22(6): 66-71.

HUANG M Q. Technology of top-down bored excavation with cast-in-situ arch for metro station construction[J]. Urban rapid rail transit, 2009, 22(6): 66-71.

[12] 黄美群. 地铁十字交叉换乘车站全暗

挖同步建造技术[J]. 都市快轨交通, 2010, 23(3):75-80.

stations[J]. Urban rapid rail transit, 2010, 23(3):75-80.

[13] 北京城建设计研究总院有限责任公司. 北京地铁十四号线工程大望路站施工图文件[Z]. 北京, 2012.

Beijing Urban Construction Design And Research Institute Co., Ltd. Construction drawing documents for Dawanglu Station of Beijing metro line 14 project[Z]. 2012.

[14] 北京城建设计研究总院有限责任公司, 中国地铁工程咨询有限责任公司. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国

HUANG M Q. Simultaneous mining construction technology for cross interchange subway

建筑工业出版社, 2014.

Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., China Metro Engineering Consulting Corporation. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[15] 北京城建设计研究总院有限责任公司. 城市轨道交通工程设计规范: DB11/995—2013[S]. 2014.

Beijing Urban Engineering Design & Research Institute Co., Ltd. Code for design of urban rail transit: DB11/995—2013[S]. 2014.