

辉绿岩侵入花岗岩地层条件下大跨度地铁车站 暗挖施工方法比选*

殷小亮

(中铁二局第二工程有限公司, 610091, 成都//高级工程师)

摘要 目的:青岛地铁6号线华山一路站处于辉绿岩侵入花岗岩地层而形成的复杂异质地层中,不同施工方法下车站开挖力学响应、围岩变形与地面沉降差异较大,需要从中优选出最优的施工方法。方法:依托青岛地铁6号线华山一路站(该站为辉绿岩侵入花岗岩地层复杂异质地层)工程,对CD(中隔壁)法、CRD(交叉中隔壁)法、双侧壁导坑法和初支拱盖法4种施工方法进行了三维数值模拟分析,对比了各施工方法下地面沉降、隧道洞周围岩变形和车站塑性区的分布规律,进而优选出合理的施工方法。结果及结论:车站开挖后围岩产生非对称变形,辉绿岩一侧的地面沉降及围岩变形均大于花岗岩一侧,辉绿岩一侧的塑性区也大于花岗岩一侧;双侧壁导坑法和初支拱盖法在地面沉降及围岩变形上的控制效果较好;在变形程度和破坏区域发展方面,双侧壁导坑法和初支拱盖法优于CRD法,CRD法优于CD法,所以双侧壁导坑法和初支拱盖法控制变形的效果较好,数值分析后认为这2种施工方法均可行。初支拱盖法是最优施工方法。监测结果表明,初支拱盖法在控制围岩变形和地面沉降上效果良好。

关键词 地铁车站;辉绿岩侵入地层;施工方法比选;数值模拟;初支拱盖法

中图分类号 U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.030

Comparative Selection of Large-span Metro Station Underground-excavated Construction Method under Diabase Intrusion into Granite Formation Condition

YIN Xiaoliang

Abstract Objective: Qingdao Metro Line 6 Huashan 1st Road Station is in complex and heterogeneous stratum formed by diabase intrusion into granite formation, different construction methods adopted for the station excavation will cause distinct mechanical responses, surrounding rock deformation and land subsidence, thus the optimal construction method needs to

be selected. **Method**: Based on the engineering project of the above station (located in the complex and heterogeneous stratum of diabase intrusion into granite formation), a 3D numerical simulation analysis is carried out on four construction methods, including CD (center diaphragm) method, CRD (cross diaphragm) method, double-side heading method and primary support arch-cover method. The land subsidence, tunnel hole surrounding rock deformation and station plastic zone distribution due to different construction methods are compared and the optimal construction method is selected. **Results & Conclusion**: After station excavation, the surrounding rock exhibits asymmetric deformation, with greater land subsidence and surrounding rock deformation on the diabase side compared to the granite side; the double-side heading method and primary support arch-cover method demonstrate better control over land subsidence and surrounding rock deformation; in the aspect of deformation and destruction area development, the double-side heading method and primary support arch-cover method outperform the CRD method, and the CRD method outperforms the CD method. Therefore, the double-side heading method and primary support arch-cover method are effective in controlling deformation, and both methods are deemed feasible based on numerical analysis. The primary support arch-cover method is considered the optimal construction method. Monitoring results indicate that the primary support arch-cover method effectively controls surrounding rock deformation and land subsidence.

Key words metro station; diabase invasion into formation; comparison of construction method; numerical simulation; primary support arch-cover method

Author's address China Railway Second Bureau Second Engineering Co., Ltd., 610091, Chengdu, China

目前关于浅埋暗挖地铁车站施工方法等关键控制技术的研究呈现多样化特征^[1]。在施工方法

* 山东省自然科学基金项目(ZR2021QE187)

的适应性方面,文献[2]通过对工程实测数值进行分析,研究得出了双侧壁导坑法对于软岩小净距隧道变形控制效果显著的结论。文献[3]把数值模拟与监测数据进行对比分析,研究了软岩隧道采用CD(中隔壁)法和台阶法施工时的围岩变形、应力变化和塑性区分布规律。文献[4]研究分析了全断面法、台阶法、CD法和CRD(交叉中隔壁)法这4种施工方法对隧道围岩稳定性的影响。文献[5]采用数值模拟,对CD法、CRD法及双侧壁导坑法进行分析,确定了双侧壁导坑法为大断面黄土暗挖地铁隧道的最优施工方法。总体来看,目前国内外学者的研究重点普遍集中在单一岩性地层地铁车站施工方法的适应性上,鲜有关于侵入地层大跨度地铁车站施工的围岩力学响应及其施工方法适应性研究。

因此,本文以青岛地铁6号线新建浅埋暗挖地铁车站(华山一路站)为工程背景,针对辉绿岩侵入花岗岩地层而形成的复杂异质地层条件,采用数值模拟研究不同施工方法下车站开挖力学响应、围岩变形与地面沉降等特征,优选出合理的施工方法,以为为类似地层条件下地铁车站的设计与施工提供借鉴。

1 工程概况

华山一路站所处地层左右两侧岩土分布不均,车站左侧主要为微风化花岗岩,车站右侧主要为微风化辉绿岩。车站顶部围岩的整体厚度为20~27 m。岩体间黏结强度较差,围岩分级主要以Ⅳ级为主。Ⅳ级围岩的稳定性较差,施工时若拱顶及侧壁支护不及时,可能会发生小范围的坍塌。

2 数值模型与施工备选方案

2.1 计算模型及参数

根据华山一路站施工图纸的设计要求,本文建立了三维的地铁车站数值模型,其长度、宽度和高度分别为100 m、54 m和72 m,如图1所示。

在模拟的数值模型中,围岩采用摩尔-库伦模型,初期支护采用实体单元通过刚度等效格栅钢架+喷混组合体,锚杆采用cable单元。华山一路站数值模型的围岩土体及支护力学参数如表1所示。

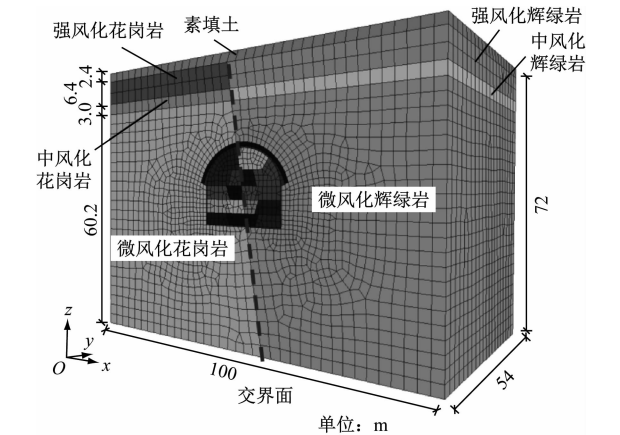


图1 华山一路站三维数值模型
Fig. 1 Three-dimensional numerical model of Huashan First Road Station

表1 华山一路站数值模型的围岩土体及支护力学参数
Tab. 1 Mechanical parameters of surrounding rock mass and supporting structure in numerical model of Huashan First Road Station

地层名称	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	重度/ (kN/m ³)
素填土	8	0.40	12	15	20.0
微风化辉绿岩	15 × 10 ³	0.23	32	320	26.6
中风化辉绿岩	1 × 10 ³	0.27	20	290	25.2
强风化辉绿岩	35	0.28	10	240	24.5
微风化花岗岩	40 × 10 ³	0.20	35	390	25.9
中风化花岗岩	8 × 10 ³	0.26	28	310	25.8
强风化花岗岩	60	0.27	14	270	23.0
初期支护	23 × 10 ³	0.20			22.0
锚杆	200 × 10 ³	0.20			78.5

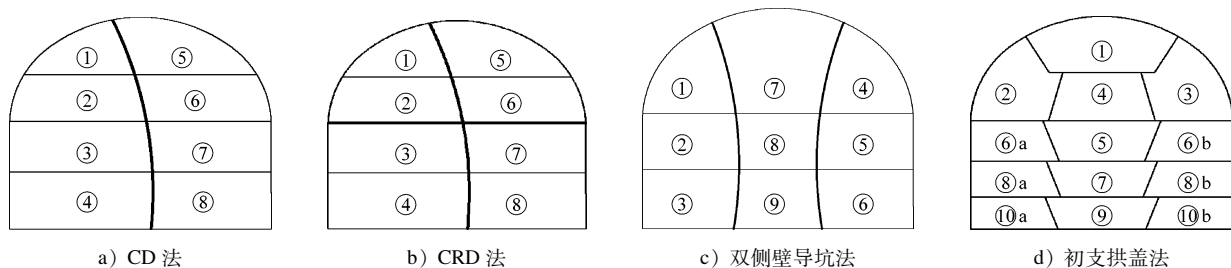
2.2 施工备选方案

为确定因辉绿岩侵入而形成的软硬不均地层下大跨度地铁车站合理的施工方法,本文选取了CD法、CRD法、双侧壁导坑法及初支拱盖法4种不同的开挖施工方法,并进行对比分析。各施工方法的施工顺序如图2所示。模拟开挖步距均为2 m,各施工方法须严格按图2所示顺序施工,直至隧道全部贯通,且开挖后应立即进行支护并安装临时支撑。初支拱盖法施工时,需按顺序开挖并及时施作初期支护,待上部开挖贯通后再进行下部开挖。

3 模拟计算结果分析

3.1 地面沉降分析

模拟计算各施工方法的施工过程,图3为各施工方法在施工完成后的地面沉降曲线。由图3可



注:分图 d)中,⑥a和⑥b同步施工。余类同。

图2 各施工方法的施工顺序示意图

Fig. 2 Diagram of construction sequence for each construction method

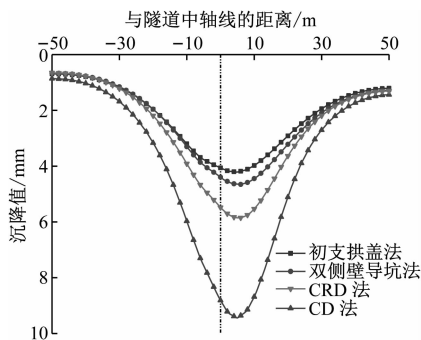


图3 各施工方法下的地面沉降曲线

Fig. 3 Curves of land subsidence under various construction methods

知:①4种施工方法下地面沉降最大值均出现于强度较低的辉绿岩一侧(即中轴线右侧),这是由于车站主体左右两侧围岩性质不同造成的;②4种施工方法中,CD法的地面沉降值最大(9.5 mm),CRD法、双侧壁导坑法和初支拱盖法的地面最大沉降值

分别为5.8 mm、4.4 mm和4.0 mm,由此可以认为初支拱盖法和双侧壁导坑法在地面沉降上的控制效果较好。

3.2 隧道洞周变形分析

3.2.1 竖向变形分析

3.2.1.1 隧道洞周围岩竖向变形

各施工方法下隧道洞周围岩竖向位移变形云图如图4所示。由图4可知:①在车站左右围岩不同的复杂地质条件下,围岩竖向变形的最大值位置明显偏右,即倾向于强度较弱的辉绿岩一侧;②在4种施工方法中,采用CD法开挖时产生的隧道洞周围岩竖向位移最大值最大,为15.9 mm;CRD法次之,其隧道洞周围岩竖向位移最大值为10.2 mm;采用双侧壁导坑法和初支拱盖法开挖时隧道洞周围岩的竖向位移最大值较小,分别为7.6 mm和7.3 mm。

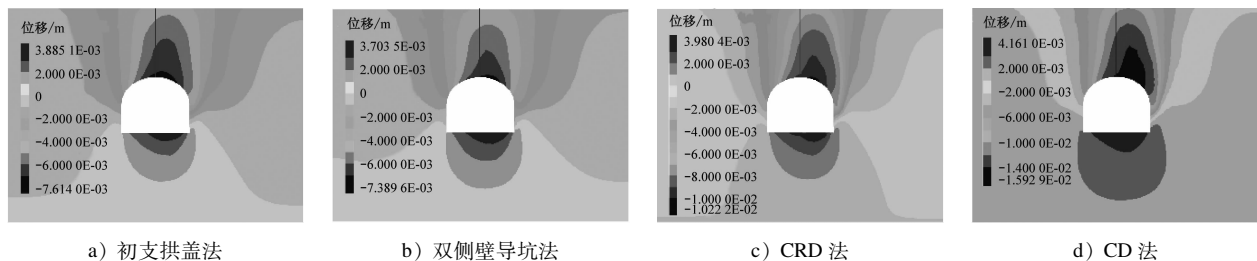


图4 各施工方法下隧道洞周围岩竖向位移变形云图

Fig. 4 Nephogram of tunnel hole surrounding rock vertical displacement and deformation under various construction methods

各施工方法下隧道洞周围岩竖向位移最大值差别较大,其原因主要为:①采用CD法时车站左右2个开挖面的跨度较大,所以该施工方法对围岩的竖向变形控制能力较弱,由此隧道洞周围岩的竖向变形较大;②CRD法相对于CD法增加了钢支撑,所以其承载围岩应力变化的能力较CD法得到了提高;③采用双侧壁导坑法时,导洞的跨度较小,且支护及临时支撑能及时闭合,所以对围岩的变形起到

了较好的控制作用;④初支拱盖法将车站上部分4个步骤开挖,加上该法在微风化岩层中能够有效发挥微风化岩体的作用,所以在4种施工方法中采用初支拱盖法施工时隧道洞周围岩的竖向沉降最大值最小,其抵抗竖向沉降的能力要优于双侧壁导坑法。

3.2.1.2 拱顶累计沉降变化曲线

在车站底部,各施工方法引起的底部隆起变形

情况相差不大,在此不作论述。本文以距离模型初始开挖面 20 m 处的纵向断面作为监测断面,对拱顶累计沉降进行分析。图 5 为各施工方法下随着施工步推进所产生的拱顶累计沉降变化曲线。

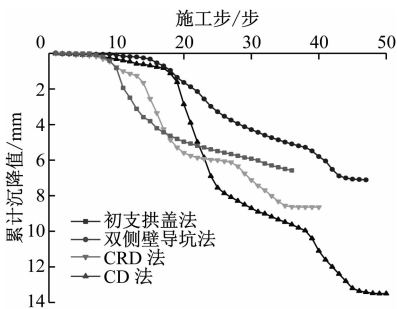


图 5 各施工方法下拱顶累计沉降变化曲线
Fig. 5 Curves of vault cumulative settlement change under various construction methods

由图 5 可知,除初支拱盖法以外,其余 3 种施工方法的拱顶累计沉降变形规律基本相同,大致分为 3 个阶段:①第 1 阶段为施工开始至监测断面开挖阶段,该阶段的拱顶沉降缓慢增长;②第 2 阶段为开

挖监测断面至监测断面沉降稳定阶段,该阶段的拱顶累计沉降速率先增大后趋于平缓,CD 法下累计沉降速率最大(2.0 mm/施工步),CRD 法下累计沉降速率(1.3 mm/施工步)较小,双侧导坑法下累计沉降速率最小(1.0 mm/施工步);③第 3 阶段为沉降稳定至拆除临时支撑阶段,该阶段拱顶累计沉降速率再次增大,但最终趋于平稳。

由于初支拱盖法没有临时支护,所以与其他 3 种施工方法相比,其拱顶累计沉降变形规律仅有前 2 个阶段,且拱顶累计沉降值影响较大(5.8 mm)。该施工方法初期支护可以很快形成承载拱,所以从拱顶累计沉降量来看,其施工效果与双侧壁导坑法的施工效果大致相当。

3.2.2 隧道洞周围岩水平位移

在车站开挖时,围岩产生的水平位移主要体现在车站两侧的直墙段上,其水平位移云图如图 6 所示。车站左侧直墙处于微风化花岗岩区域,右侧直墙处于微风化辉绿岩区域,所以在同一个施工方法下两侧直墙的水平位移也不相同,右侧直墙的水平位移大于左侧直墙的水平位移。

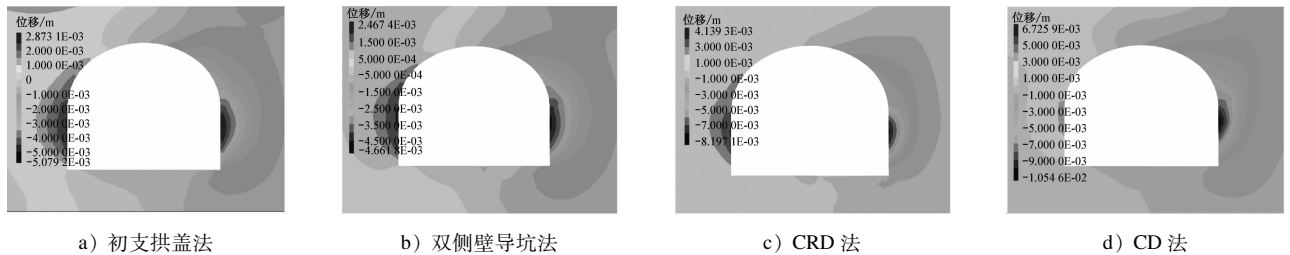


图 6 隧道洞周围岩水平位移云图
Fig. 6 Nephogram of tunnel hole surrounding rock horizontal displacement

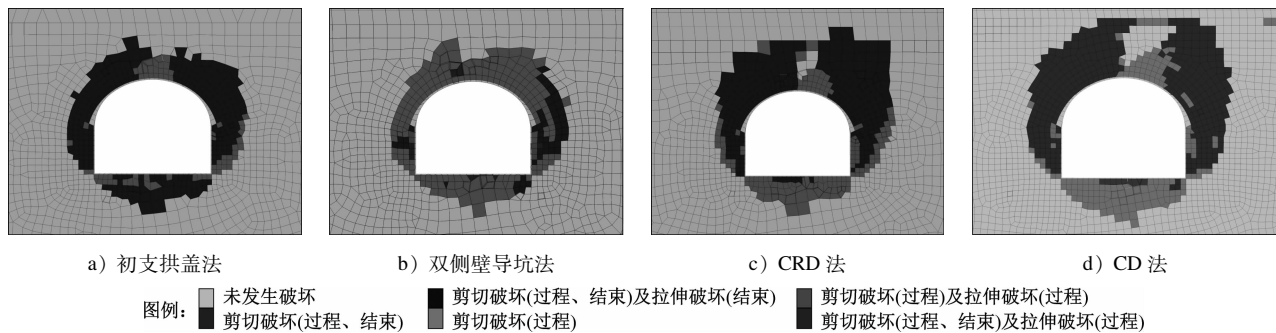
由图 6 可知:CD 法开挖产生的隧道洞周围岩水平位移最大,左侧直墙处的水平位移为 6.7 mm,右侧直墙处的水平位移为 10.1 mm,这是由于 CD 法开挖面过大所致;CRD 法增加了横向支撑,其隧道洞周水平位移比 CD 法小,左侧直墙处的水平位移为 4.1 mm,右侧直墙处的水平位移为 8.2 mm;双侧壁导坑法和初支拱盖法下隧道洞周水平位移相差不大,前者引起左右直墙处的水平位移分别为 2.5 mm 和 4.7 mm,后者引起左右直墙处的水平位移分别 2.8 mm 和 5.0 mm。因此在隧道洞周水平位移控制上,双侧壁导坑法和初支拱盖法要优于 CD 法和 CRD 法。

3.3 车站塑性区分布

车站塑性区的发展受地层影响呈现出不同的

发展趋势,各施工方法下塑性区分布云图如图 7 所示。由图 7 可知,左侧微风化花岗岩区域内塑性区的分布范围比右侧微风化辉绿岩区域内的小。在同一个施工方法下,拱腰、拱脚和直墙处的塑性区分布范围都呈现出左侧小于右侧的特征。

由图 7 可知:CD 法对车站塑性区发展的控制力最弱,其最大塑性区位于右侧拱腰处;CRD 法较 CD 法减小了开挖面,且增设的横向支撑增强了拱脚的承载能力,因此 CRD 法塑性区范围较 CD 法小,其最大塑性区仍位于右侧拱腰处。双侧壁导坑法与初支拱盖法的塑性区分布范围大小相似,这两种施工方法的塑性区均比 CD 法和 CRD 法的小。此外,由于初支拱盖法的拱部在初期支护时及时成拱,且充分发挥了岩体的承载作用,所以其拱部塑



注:“过程”是指在模拟计算过程中产生破坏;“结束”是指在模拟计算结束后产生破坏;“过程、结束”是指模拟计算过程与结束均发生破坏。

图7 各施工方法下塑性区分布云图

Fig. 7 Nephogram of plastic area distribution under various construction methods

性区范围较小。因此在塑性区发展的控制上,双侧壁导坑法和初支拱盖法的效果较CD法和CRD法好,初支拱盖法在特殊地层中限制塑性区发展的效果最佳。

4 施工方法确定及现场监测

4.1 施工方法确定

上文通过对地面沉降、围岩变形和塑性区分布进行对比分析,可以得出结论如下:在辉绿岩侵入花岗岩的地层条件下,双侧壁导坑法和初支拱盖法更加适合大跨度地铁车站的暗挖施工。但是由于双侧壁导坑法的施工效率低、工期长,而初支拱盖法拱部开挖效率高、工序转换少、拱部一次成形,其结构的整体性和防水性更好,更加适合IV级围岩稍差地层施工^[6]。由此,本文确定初支拱盖法为华山一路站暗挖施工的最优施工方法。

4.2 现场监测与数据分析

在现场施工过程中,要对地面沉降和拱顶累计沉降进行监控测量,并对监测数据进行分析,以便掌握围岩的变化情况。

4.2.1 地面沉降分析

监测断面开挖完成后,其实测地面沉降值与模拟沉降值对比如图8所示。由图8可知:实测的地面沉降趋势与数值模拟的地面沉降趋势一致,二者的沉降值最大差值仅为0.35 mm,这说明了数值模拟结果的可靠性。实测的地面沉降最大值(4.45 mm)发生在辉绿岩区域,该沉降值并未超出施工允许范围,这表明初支拱盖法对地面沉降的控制良好。

4.2.2 拱顶沉降分析

图9为监测断面拱顶累计沉降的实测值与模拟值对比情况。由图9可知:在监测断面开挖完成后,

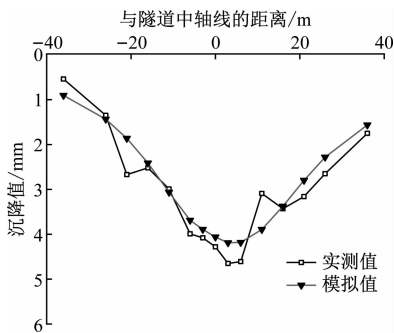


图8 监测断面实测地面沉降值与模拟沉降值对比

Fig. 8 Comparison of field-measured and simulated land subsidence values in monitoring section

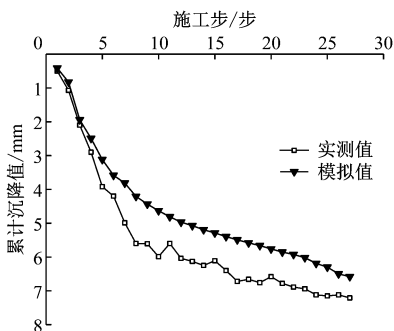


图9 监测断面拱顶累计沉降的实测值与模拟值对比

Fig. 9 Comparison of field-measured and simulated values of vault cumulative settlement in monitoring section

拱顶累计沉降迅速增大,其实测累计沉降值达到6.0 mm;随着掌子面远离监测断面,拱顶累计沉降速率逐渐减小,直至沉降稳定。稳定后的拱顶累计沉降实测最大值为7.0 mm,这表明初支拱盖法对拱顶沉降的控制良好。

综上所述,华山一路站的地面沉降及拱顶沉降均在允许的变形范围内,且控制效果良好。采用初支拱盖法进行车站暗挖施工具有可靠性。

5 结语

1) 在辉绿岩侵入花岗岩形成软硬不均地层的条件下,地铁站暗挖施工时围岩将产生明显的非对称变形,地面沉降与围岩竖向变形最大值均偏离隧道中心轴线,产生在强度较弱的微风化辉绿岩一侧。塑性区同样在微风化辉绿岩一侧明显发育。因此,施工中要加强对较软弱岩体侧的支护控制与监控量测。

2) CD 法、CRD 法、双侧壁导坑法和初支拱盖法 4 种施工方法在地面沉降、塑性区分布及围岩变形 3 个方面的变化规律基本相同。但在变形程度和破坏区域发展方面,双侧壁导坑法和初支拱盖法优于 CRD 法,CRD 法优于 CD 法,所以双侧壁导坑法和初支拱盖法对变形的控制效果较好。考虑到初支拱盖法工期短、预期经济效益好,本文的案例车站最终确定将初支拱盖法作为最优施工方法。

3) 辉绿岩侵入花岗岩地层条件下,地铁站暗挖施工采用初支拱盖法的监测结果表明,该法在控制围岩变形和地面沉降上效果良好。

参考文献

[1] 王凯. 浅埋暗挖地铁车站结构型式和施工方法优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
WANG Kai. Optimization study on structure type and construction method for shallow subway station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong

University, 2016.
[2] 鲍先凯, 杨东伟, 段东明, 等. 施工工法对浅埋软岩小净距隧道地表沉降和围岩稳定的影响研究[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 22.
BAO Xiankai, YANG Dongwei, DUAN Dongming, et al. Influence of construction methods on surface subsidence and surrounding rock stability of shallow buried soft rock with small-distance tunnel[J]. Highway Engineering, 2019, 44(4): 22.
[3] 贾晓旭, 赵玉成. 软弱围岩隧道 CD 法和台阶法施工力学行为分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(7): 121.
JIA Xiaoxu, ZHAO Yucheng. Analysis of mechanical behavior of tunneling in weak surrounding rock by CD method and benching method[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(7): 121.
[4] 朱宝合, 戴亦军. 开挖技术对隧道围岩稳定性数值模拟分析[J]. 公路, 2020, 65(2): 316.
ZHU Baohe, DAI Yijun. Numerical simulation analysis of tunnel surrounding rock stability by excavation technology[J]. Highway, 2020, 65(2): 316.
[5] 任建喜, 陈旭, 曹西太郎. 大断面黄土地铁隧道不同浅埋暗挖施工方法比较分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 120.
REN Jianxi, CHEN Xu, CAO Xitailang. Comparative analysis of different shallow buried excavation methods for large section loess subway tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 120.
[6] 李克先, 李术才, 赵继增. 大跨度暗挖地铁车站开挖工序优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1329.
LI Kexian, LI Shucan, ZHAO Jizeng. Study on optimizing excavation construction of large span subway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(5): 1329.

(收稿日期:2022-09-07)

全球首条轨道交通零碳运营线路建成

2023 年 6 月 6 日,由宜宾智轨打造的“零碳未来号”智轨列车在宜宾智轨 T1 线上正式运行。就在 5 月底,宜宾智轨 T1 线已获得全球轨道交通行业第一张零碳运营线路 PAS2060 碳中和证书。

“零碳运营线路”是根据国际公信力最强的 PAS2060 碳中和规范,经过有资质的第三方机构认证后获得碳中和声明的运营线路。智轨列车具有自主导向、轨迹跟随、全电驱动、智能驾驶等功能,融合了轨道交通和地面交通的优势,清洁环保、续航里程长、建设周期短、不依赖于复杂的地面供电系统和弓网系统等优点突出,成为轨道交通绿色低碳化发展的重要方向,承担着城市转型升级的重任。

近年来,中车株洲电力机车研究所有限公司积极应对现代城市轨道交通迭代发展的全新挑战,旗下碳资源研究部携手多地踏入轨道交通新赛道,探寻能源战略转型路径,打造“零碳运营线路+零碳园区+减排方法学”碳中和绿色零碳交通新模式。

宜宾智轨 T1 线,全长 21.4 km,共设置 19 座车站,于 2019 年开始运营。目前 T1 线已安全运营智轨列车 19.07 万对,累计运行 448.77 万列·km,列车正点率为 98.40%,累计载客人数为 1395.45 万人次。

(摘编自《湖南日报》)