

# 处于上软下硬地层的青岛某地铁车站初支拱盖法 施工变形规律及控制

龚旭东

(陕西省铁道及地下交通工程重点实验室, 710043, 西安 // 高级工程师)

**摘要** 以处于上软下硬地层的青岛地铁某车站修建为背景,采用数值模拟及现场监测相结合的方法,对初支拱盖法施工变形规律及控制进行了研究。结果表明:拱盖中间导洞的开挖、拱盖施作和临时支撑的拆除,是车站修建中的几个关键工序;拱盖施工阶段,拱脚与拱肩部位受力转换频繁,沉降变形较明显,临时支撑拆除造成拱部围岩二次应力释放,需采用一定支护手段控制沉降;沉降槽最大值随开挖推进不断发生移动,直到中间导洞开挖时沉降最大值逐渐向隧道中心线上移动;适当缩小施工进尺距离与增加支护系统的刚度,对控制车站结构变形速率与变形量具有积极作用。

**关键词** 地铁车站施工;初支拱盖法;施工变形;数值模拟;上软下硬地层

**中图分类号** TU433:O231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.06.024

## Deformation Pattern and Control of Qingdao Metro Station Adopting Primary Arch Cover Construction Method in Upper Soft and Lower Hard Stratum

GONG Xudong

**Abstract** Taking the construction of a station of Qingdao Metro as an example, by adopting combination of numerical simulation and field monitoring, the deformation pattern and control of primary arch cover construction method is studied. The results show that: Excavation of the middle guide of the arch cover, construction of the arch cover and removal of temporary support are some of the key procedures during station construction. In the operation stage of arch cover, the stress forced on arch foot and arch shoulder is switching between each other frequently, and the settlement deformation is obvious. Removal of temporary support results in secondary stress release of arch surrounding rock, which requires certain supporting measures to control the settlement. Maximum value of settlement trough moves as excavation progress advances. Until the middle guide tunnel is excavated, the maximum settlement gradually moves to the center line of the tunnel.

nel. Appropriately reducing the length of footage and increasing the stiffness of the support system have positive influence on controlling the deformation rate and magnitude of the station structure.

**Key words** construction of metro station; primary support arch cover method; construction deformation; numerical simulation; upper soft and lower hard stratum

**Author's address** Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory, 710043, Xi'an, China

国内地铁修建车站的施工方法在早期主要采用洞桩法和双侧壁导坑法<sup>[1-2]</sup>。文献[3]通过对浅埋暗挖车站多种施工方案进行对比研究,认为浅埋暗挖法在围岩条件较好、受外界干扰因素小的地区较为适用,其工期与经济效益较好;文献[4]结合青岛某车站现场施工数据,对双侧壁导坑法中导洞支护形式进行了优化,改变了出入口与车站相接部位,缩短了工期也降低了施工成本。随着地铁建设发展,相关技术人员提出了一种针对上软下硬地层的地铁车站施工方法——拱盖法<sup>[5-7]</sup>。该施工方法不仅能更好地适应钻爆法施工的暗挖隧道,而且具有施工工作面大、施工效率高和施工安全性好等优点。

文献[8-9]通过对拱盖法开挖车站进行模拟,认为拱盖法施工时,开挖中部导洞与拱盖处临时支撑拆除为整个施工过程中的关键工序;文献[10]通过对使用拱盖法开挖的车站进行三维有限元模拟,并结合现场施工过程中的地表和拱顶沉降、支护结构内力等数据分析,认为在上软下硬地层中采用拱盖法开挖其上部拱盖断面中间导洞的开挖是施工关键一环,中部导洞开挖后需要及时初期支护的施工,以保证洞室施工的安全。

本文以青岛地铁某暗挖车站为例,采用数值模拟对暗挖车站初支拱盖法开挖施工及其变形进行

分析,并结合监测数据提出优化的施工参数,针对施工中受力较大及变形较明显的部位进行研究,以期为类似工程施工提供技术参考。

## 1 工程概况

青岛某地铁车站为地下双层标准岛式车站。其顶板覆岩厚度为 0~14.8 m,洞身主要位于中-微风化花岗岩,局部位于微风化煌斑岩岩脉及微风化碎裂岩,围岩级别主要为Ⅳ级,为典型的上软下硬地层。车站位于某交通主干道下方,且周边购物广场与住宅区密集,如图 1 所示。



图 1 青岛某地铁车站位置平面图

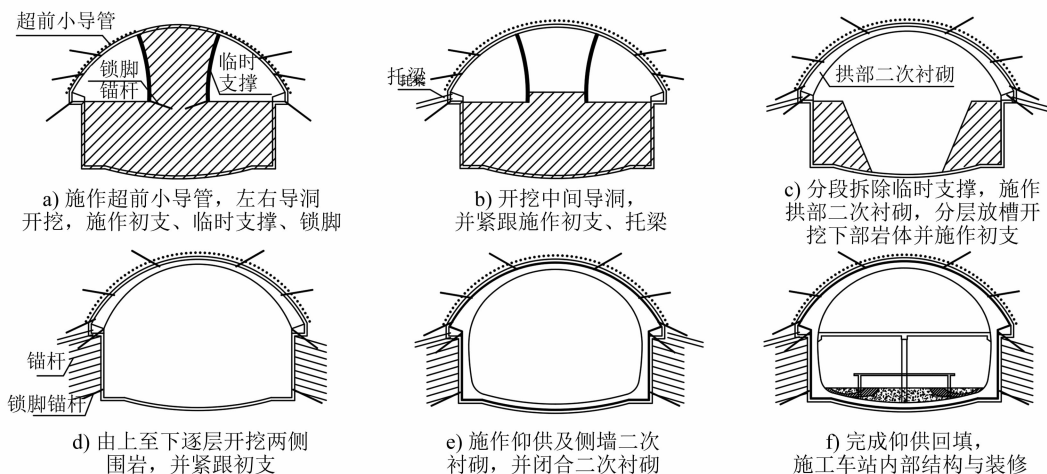


图 2 初支拱盖法施工顺序

了不必要的支护结构;②车站开挖工序较少、施工难度较小、产生的废弃工程小,提高了施工效率与经济效益;③二次衬砌一次性模筑成环,避免了开挖与二次衬砌施工交叉进行,缩短了施工周期。

## 2 初支拱盖法介绍

该车站主体采用初支拱盖法施工,先沿车站纵向采用左中右三导洞分部开挖拱部并进行初期支护,通过围岩-初支在拱部形成整体支撑体系,以保证下部直墙断面开挖的安全性。

根据青岛地区地层条件,对传统的拱盖法施工车站的开挖顺序进行了一定的优化,如图 2 所示。该车站具体施工工序为:①开挖拱部左、右两侧土体,并及时架设钢拱架、挂钢筋网、架设临时支撑以及锁脚锚杆;②开挖拱部中间土体并及时施作支护体系,随后在大拱脚位置打设托梁;③待初支拱盖混凝土强度达到设计标准后,逐步拆除临时支撑,施作拱部二次衬砌,在拱盖的保护下车站下部中央逐层放槽开挖;④车站下部两侧土体采用分层开挖方式,边开挖边施作侧墙支护结构,以便加强下部围岩稳定性;⑤车站主体结构开挖结束后,铺设防水层、进行防水施工,再按顺作法施工自下而上浇筑二次衬砌;⑥完成仰供回填,施工车站内部结构与装修。

与传统矿山法相比,初支拱盖法更加适用于青岛这类上软下硬土岩复合地层。其优势在于:①充分利用了硬质围岩的自承载能力,初支与围岩共同形成稳定的拱盖保护后,再进行大面积作业,既保证了拱部和下部直墙断面开挖的安全性,又减少

## 3 数值模拟计算

### 3.1 模型建立

本文通过 MIDAS-GTS/NX 软件对地铁车站施工变形过程进行三维有限元计算,采用地层-结构法

进行模拟,土层采用摩尔-库伦本构材料,初支、二次衬砌等结构采用弹性介质。模型上边界取至地层表面,下边界取3倍隧道拱顶跨度,左右边界取5倍隧道拱顶跨度,约束条件为位移约束。计算荷载考虑岩土体自重及开挖释放荷载,不考虑水平构造应力的影响。隧道初支与二次衬砌均采用实体单元,车站拱顶埋深14.5 m。有限元计算模型如图3所示。车站所在地层的数值模拟计算参数如表1所示。

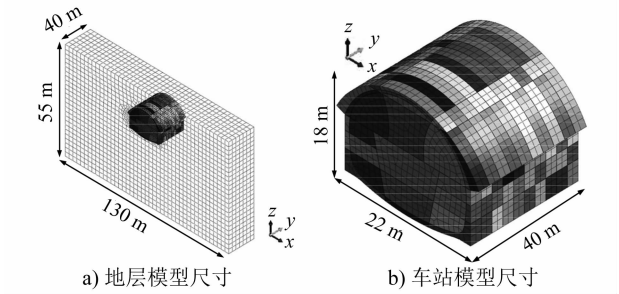


图3 青岛某地铁车站三维有限元计算模型

表1 青岛某地铁车站计算模型参数						
土层或材料类别	厚度/ m	弹性模量/ MPa	泊松比	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)
人工填土	5.0	10	0.45	18.0	9.0	8.0
粉质黏土	4.0	33	0.35	19.6	20.3	14.7
强风化花岗岩	5.5	225	0.32	23.0	68.0	32.0
中风化花岗岩	7.0	630	0.27	25.2	106.0	41.0
微风化花岗岩	33.5	1 500	0.25	26.1	207.0	53.0
初支		15 000	0.20	24.0		
拱盖二次初支		28 000	0.20	24.0		
二次衬砌		32 000	0.20	24.0		
锚杆		206 000	0.20	78.5		

### 3.2 计算结果分析

#### 3.2.1 净空收敛

对车站进行净空收敛的监测是研究支护结构形态与围岩变化最直接的参数,也是安全施工的保障和施工质量的体现。

1) 初支净空收敛。通过有限元模拟得到初支净空收敛变化,如图4所示。由图4可知:左、右导洞开挖之初,净空收敛分别减小了0.04 mm和0.06 mm;当中导洞开挖时,净空收敛迅速减小到-0.13 mm;随导洞继续开挖,左、右导洞净空收敛出现缓慢而明显的增加,最终净空收敛稳定在0.62~0.76 mm左右;而中导洞开挖净空收敛值先减小,后出现明显增大,最终稳定在1.03 mm左右。

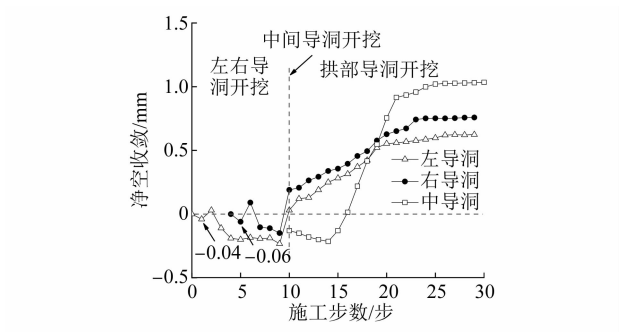


图4 拱部导洞开挖初支净空收敛变化趋势

2) 下部直墙断面处净空收敛。车站主体第1层断面开挖之初,直墙断面净空收敛变形较小;随着开挖推进,两个测点的变化逐渐显著,由于开挖面距离监测面逐渐拉长,净空收敛逐渐趋于稳定,最终两个测点净空收敛分别稳定在-1.07 mm和-1.27 mm,如图5所示。

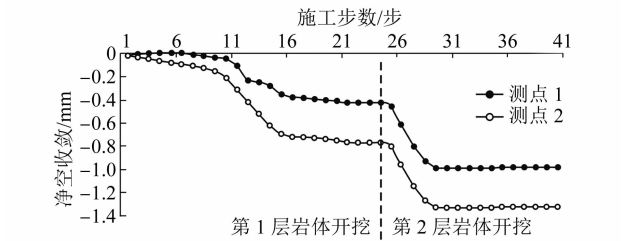


图5 下部直墙断面净空收敛变化趋势

#### 3.2.2 拱顶沉降

受开挖影响,拱顶出现明显下沉,随后逐渐趋于稳定;左、右导洞沉降量一致且相对较小,而中导洞开挖使初步稳定的围岩发生二次应力释放,初支变形拱部最大,如图6所示。综上,拱部各导洞开挖对初支产生的相互影响较小,建议中导洞施工过程中随时对拱部进行监测。

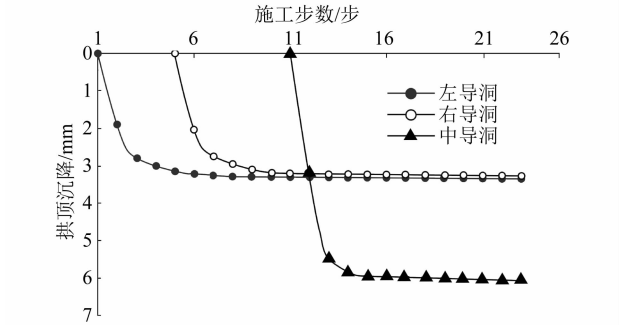


图6 拱部导洞开挖时初支沉降变化趋势

#### 3.2.3 地表沉降

取地表6个监测点的模拟沉降进行分析,每个测点相距10 m。车站主体结构施工过程中,地表出

现了较明显沉降,并伴随着整个施工过程中(见图7)。硐室周边一定范围内产生了较长时间、不同幅度的沉降变形;拱部施工过程中,由于左、右导洞开挖后及时施作初支与大拱盖,对地表沉降影响较小且沉降逐渐稳定;临时支撑逐步拆除时,地表再次发生沉降且沉降一直延续到下部直墙断面的前期施工过程;当拱盖强度达到标准时地表沉降逐渐稳定。

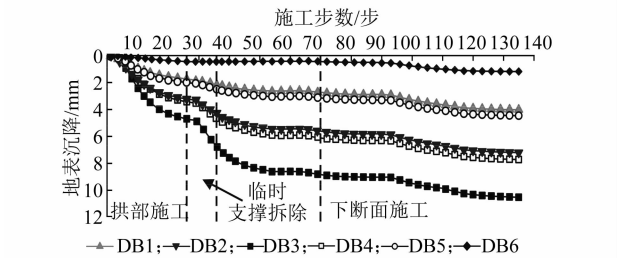


图7 地表沉降变化趋势

开挖过程中,沉降槽随开挖推进而发生变化如图8所示。左、右导洞开挖之初,地表沉降最大值先是出现在左导洞上方;随着左、右导洞一并开挖,出现双拱形沉降槽。开挖中导洞时,沉降最大值逐步移动到隧道开挖中线正上方处,说明拱部中导洞开挖与临时支撑拆除以及拱盖施作是施工的关键时期也是变形控制的关键时期。

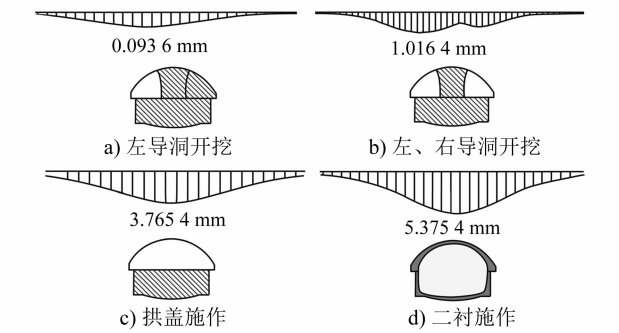


图8 地表沉降槽曲线

通过上述模拟分析可见,大跨度暗挖车站进行多个导洞开挖时,合理制定导洞开挖顺序与开挖距离,以及配合做好各施工工序的衔接,对开挖后暴露面进行及时的支护与加强,可以有效地降低地表沉降值。

4 现场监测结果及分析

4.1 现场监测点布设

根据车站特点与开挖方案进行有针对性的断面测点布设。在车站开挖过程中布设4个典型断面

进行净空收敛、拱顶沉降和地表沉降分析。测点布设如图9所示。对车站主要选取车站中部监测断面变形稳定后的数据进行净空收敛、拱顶沉降和地表变形的分析。其主要原因是车站中部监测断面受边界效应的影响较小,并与有限元模拟的结果进行对比的代表意义较强。

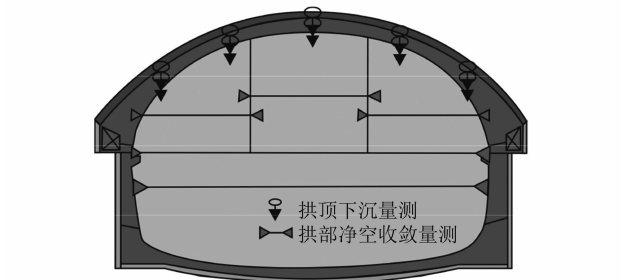


图9 4个典型断面的监测点布设

4.2 施工阶段净空收敛特征

拱部净空收敛监测数据如图10所示。现场实际监测结果比有限元计算结果明显偏大,但变化趋势基本保持一致。左、右导洞在开挖初期净空收敛值稳定增长,当中导洞开挖时,围岩再次受到扰动;左、右导洞净空收敛出现小幅度上涨后逐渐趋于稳定。

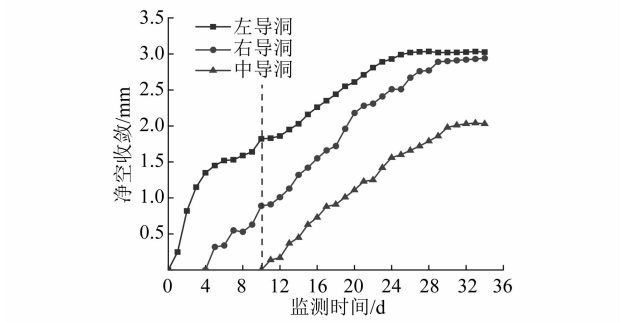


图10 实测拱部导洞开挖后的净空收敛变化

由直墙断面的净空收敛变化可以看出(见图11),整个净空收敛变化趋势较为稳定。第1层岩

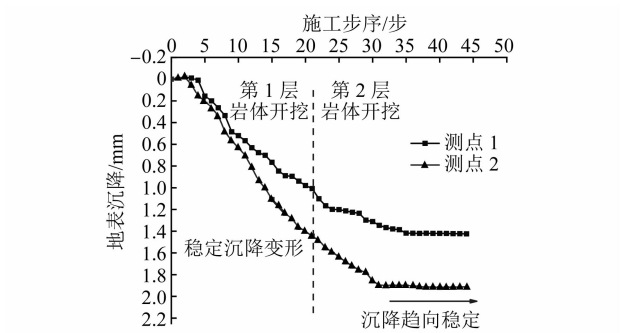


图11 实测直墙断面净空的收敛变化

体开挖之初,净空收敛由变化微弱到逐渐增加,直到第2层岩体开挖时,收敛逐渐变得缓慢。随着开挖推进,掌子面距监测断面距离逐渐增大,对其影响逐渐减弱,收敛速率也随之变得缓慢,最终净空收敛保持在一个稳定阶段。

#### 4.3 施工阶段初支沉降特征

在开挖初期左导洞初支沉降略微大于右导洞,总体来看整个沉降趋势较为稳定平缓;待中部导洞开挖时,初支出现明显沉降,沉降速率明显大于其他导洞开挖;随开挖推进,沉降速率逐渐减小,最终沉降值稳定在 10 mm 左右。实测沉降变形如图 12 所示。

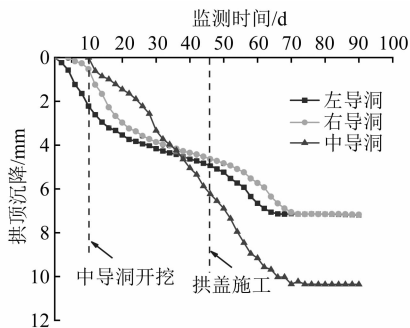


图 12 拱顶初期支护的实测沉降变形

#### 4.4 施工阶段地表沉降特征

如图 13 所示,取施工过程中该车站中间监测断面 DB003 的 7 个监测点的地表监测数据进行分析。隧道开挖之初,地表沉降受到的影响较小,沉降缓慢;中导洞开挖时,车站正上方的地表出现了明显沉降,沉降一直伴随着整个中间导洞的开挖,且隧道中线两侧的地表也表现出了较明显的沉降,沉降速率明显较前一阶段增大;拱盖施作阶段地表沉降继续增加,且地表沉降波动明显,表明车站结构正上方的扰动强烈,这与数值模拟计算到的情况类似。

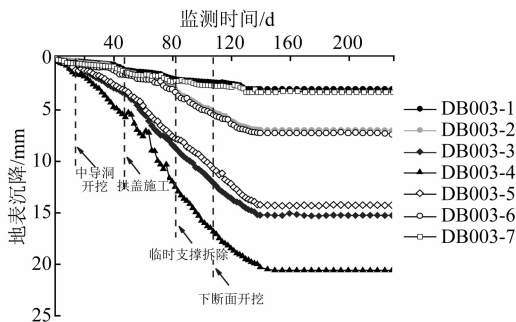


图 13 地表实测沉降变形

### 5 施工优化

根据现场实测数据与有限数值模拟结果可以看出,在整个车站施工过程中,其拱顶和拱顶上方地表沉降最为明显。这就需要对现有的施工环节进行一定优化,以控制变形量。

#### 5.1 改变施工进尺长度

针对临时支撑拆除环节,采用控制单一变量方法对上述建立的模型进行施工方案优化模拟。优化工序为拱盖施作 10 m 后再进行临时支撑逐步拆除,如图 14 所示。

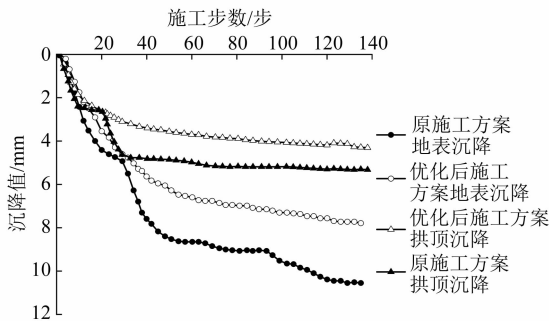


图 14 优化施工前后沉降变形的模拟对比

优化后的施工方案,最终拱顶沉降与地表沉降分别为 4.32 mm 与 6.56 mm,均低于原施工方案稳定沉降值,表明了改变施工进尺长度能更好地控制施工中围岩的沉降,提高了开挖支护的稳定性,可保障现场施工更加安全。因此,实际施工中,在保证开挖安全的前提下,可以适当地缩短拱盖施作与拆撑的距离。

#### 5.2 改变支护结构参数

改变拱盖支护强度也可对沉降变形起到一定的控制效果,即:将拱盖弹性模量变为 32 000 MPa,其他参数不变。对方案优化施工前后沉降变形的模拟对比如图 15 所示。

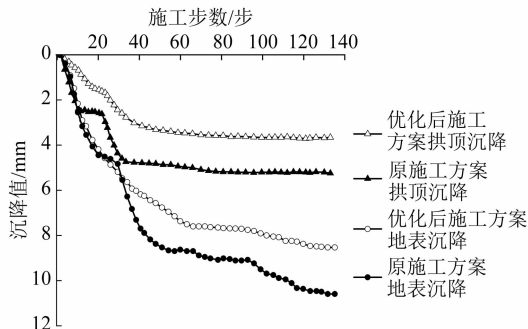


图 15 优化施工前后沉降变形的模拟对比

优化后拱顶沉降与地表沉降缓慢增加,最终其沉降值分别稳定在 4.11 mm 和 8.58 mm,均低于原施工方案沉降稳定值,且拱顶沉降与地表沉降速率均匀,表明了加大拱盖的支护强度对控制拱顶支护结构沉降与拱顶上方地表沉降具有积极作用。在围岩条件较差或地表建(构)筑物繁多的地方,有针对性地增大支护强度,不仅可保证车站建设施工安全,而且对地铁今后长期运营安全也起到了保障作用。

## 6 结语

本文以青岛地铁某暗挖车站工程为研究背景,通过现场监测与有限元模拟相结合的方法,分析该车站采用初支拱盖法施工的各个工序对围岩与支护结构产生的影响,并提出施工优化方案,主要得出如下结论:

1) 数值模拟与实测数据变化趋势基本一致,各施工工序下围岩及支护变化均满足强度与稳定性要求,证实了初支拱盖法在上软下硬地层中适用性较好。

2) 拱盖中导洞的开挖、拱盖施作和临时支撑的拆除对车站支护结构与地表沉降影响较大,是车站施工中的关键阶段,需要在实际施工过程中,增加关键阶段的监测频率,对围岩与支护结构产生的变形应及时反馈。

3) 地表沉降槽随不同导洞开挖而发生变化。左右导洞开挖之初,左导洞上方沉降值最大,直到中导洞开挖时,沉降最大值逐渐向中导洞上方移

动,最终地表沉降最大值回归到隧道中心线上。车站施工时,需要着重对中导洞的变形进行持续监测。

4) 适当缩小施工进尺长度与增加支护结构强度,对控制围岩变形与结构变形具有积极作用,不仅能提高车站施工的安全性,还能对后期车站运营的安全提供保障。

## 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.
- [2] 纪召启. 土岩组合地层拱盖法隧道施工动态风险评估[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [3] 范育辉. 重庆轨道交通浅埋暗挖地铁车站快速施工方案比选[J]. 隧道建设,2011(增刊2): 187.
- [4] 肖永强. 拱盖法车站细部优化设计及施工[J]. 国防交通工程与技术,2016(2): 50.
- [5] 朱晓雨. 上软下硬地层超浅埋大跨地铁车站拱盖法施工优化研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2019.
- [6] 王盟. 青岛地铁浅埋暗挖大跨度车站双层叠合初支拱盖法技术应用研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2017.
- [7] 张世杰. 岩层地铁车站初支拱盖法开挖力学效应与适用性研究[D]. 济南:山东大学,2017.
- [8] 杜子建,刘云. 地铁车站拱盖法施工地表沉降分步控制探讨[J]. 铁道建筑技术,2014(4): 1.
- [9] 张光权,杜子建,宋锦泉,等. 地铁车站拱盖法施工沉降监测分析及控制对策[J]. 岩石力学与工程学报,2012(增刊1): 3413.
- [10] 吴学锋. 土岩复合地层拱盖法施工三维有限元数值模拟[J]. 城市轨道交通研究,2012(8): 135.

(收稿日期:2020-10-12)

## 西南交通大学成立城市轨道交通学院

2021 年 5 月 14 日,西南交通大学城市轨道交通学院开工建设。西南交通大学城市轨道交通学院是隶属于西南交通大学的教学科研单位,为一所国际化、研究型、开放式实体学院,是新工科学院、研究型学院、未来技术学院。学院于 2021 年正式启动办学,招收首批重点本科生和硕士生、博士生。办学进入稳定期后,年均定向为成都输送高层次人才 1 000 人、向全球输出 1 500 人。该学院面向国家重大战略,服务城市可持续发展,坚持产业需求导向与教育目标导向相统一,紧扣新工科内涵和轨道交通全产业链需求,聚焦智慧城市、智慧交通两大前沿交叉学科领域,确立城市化、智能化、国际化办学方向,开办智能建造、智能制造工程、新能源科学与工程、城市设计、智慧交通、智慧运维、城市运营等特色专业,开展本-硕-博人才培养和高水平科学研究,面向社会开放办学,构建创新型大学全新形态,建设成为新时代城市轨道交通高层次、复合型、创新型、国际化人才培养摇篮,全球“轨道营城”产学研用重镇,支撑“人、城、产”融合发展未来大学样板。该学院是在成渝地区双城经济圈上升为国家战略的时代背景下,由成都市人民政府与西南交通大学携手合作,以“产教、科教‘双融合’”理念,在成都东部新区高起点、高规格建立的新型办学实体。学院正式办学所在地——西南交通大学东部校区,位于成都市正在全力建设的“未来之城”——东部新区核心区,是以 TOD(交通引导发展)理念打造的开放式智慧校园和未来大学的样板校园。

(摘自 2021 年 5 月 15 日西南交通大学新闻网)