

双层初支叠合拱盖结构组合形式研究

冯世杰 高鑫 李清菲 王文娟 吴琦

(中铁第六勘察设计院集团有限公司, 300308, 天津//第一作者, 工程师)

摘要 青岛地区大多采用双层初支叠合拱盖法修筑超浅埋暗挖大跨隧道。依托青岛某地铁站的实际施工情况,对等厚初支与初支拱盖的组合形式进行研究分析,提出两种施工方案:方案一为“外层初支拱盖+内层等厚初支”;方案二为“外层等厚初支+内层初支拱盖”。通过建立地层-结构计算模型,对这两种方案进行仿真模拟并对结果进行分析,最后对方案一进行了施工验证。得出结论如下:地层荷载主要由初支拱盖结构承担,荷载承担比例服从内外层结构刚度比原则,与二者组合形式的关系不大;在控制拱顶沉降、地表沉降方面,方案一能更好地约束围岩的松散变形,而在控制拱脚岩体塑性区发展及改善二衬结构内力分布方面,方案二略优于方案一。兼顾拱墙交界处的结构构造和施工便利,建议优先考虑采用方案一。

关键词 地铁车站;暗挖隧道;叠合拱盖结构;双层初支;组合形式

中图分类号 U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.031

Research on Double-layer Primary Support Composite Arch-Cover Structure Combination Form

FENG Shijie, GAO Xin, LI Qingfei, WANG Wenjuan, WU Qi

Abstract Ultra-shallow bored large-span tunnels in Qingdao mostly adopt double-layer primary support composite arch-cover method. Relying on the actual construction situation of certain Qingdao Metro station, the combination of equal thickness primary support and primary support arch-cover is studied and analyzed, and two construction schemes are proposed: scheme 1 is 'outer layer initial support arch-cover + inner layer equal-thickness initial support'; scheme 2 is 'outer layer equal thickness primary support + inner layer primary support arch-cover'. By establishing stratum-structure calculation model, the two schemes are simulated, and the results are analyzed. Finally, scheme 1 is verified through construction. Conclusions are as follows: stratum load is mainly borne by the primary arch-cover structure, and the load bearing proportion obeys the principle of inner-outer layer structure stiffness ratio and has little

relation with the combination form of the two layers. Scheme 1 can better restrain the loose deformation of surrounding rock in controlling vault settlement and surface settlement, while scheme 2 performs slightly better in controlling the development of arch foot rock mass plastic zone and improving the internal force distribution of the secondary lining structure. Considering the structure and construction convenience at the junction of arch wall, it is suggested to give priority to scheme 1.

Key words metro station; bored tunnel; composite arch-cover structure; double-layer primary support; combination form

Author's address China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., 300308, Tianjin, China

常规暗挖大跨隧道所采用的施工方法主要有双侧壁导坑法^[1]、洞桩法^[2]及拱盖法^[3]等。其中,采用双层初支叠合拱盖法修筑的无内支撑的单拱大跨隧道不仅可以避免爆破施工对内支撑的扰动,还可以实现大型机械快速施工、构筑宽敞地下空间的目的。该方法受到业界结构工程师的青睐^[4],目前已在青岛、成都、重庆及贵阳等岩质地区得以成功应用^[5-7]。其设计、施工经验比较成熟,尤其在确定隧道的合理埋深、覆岩厚度、施工工艺等方面有较为深入的研究^[8],并取得了不菲的经济效益^[9]。

上述文献的研究结论及应用情况均是基于拱部“外层等厚初支+内层初支拱盖”组合形式得出的,而对初支拱盖与等厚初支组合的研究相对匮乏。考虑到初支拱盖的结构刚度和强度远大于等厚初支结构,本文认为隧道结构稳定性的控制与双层初支结构的先后施作顺序有关,很有必要对双层初支叠合拱盖结构的组合形式进行研究,以期为后续类似工程提供参考。

1 工程概况

青岛地铁1号线某站采用明暗挖结合法施工,其暗挖区段横断面如图1所示。该隧道所处地貌类

型属剥蚀残丘,地势较平坦,拱顶埋深仅有7 m左右,属典型的暗挖大跨超浅埋施工项目。该项目采用双层初支叠合拱盖法施工,拱部采用CD(中隔壁)法施工。

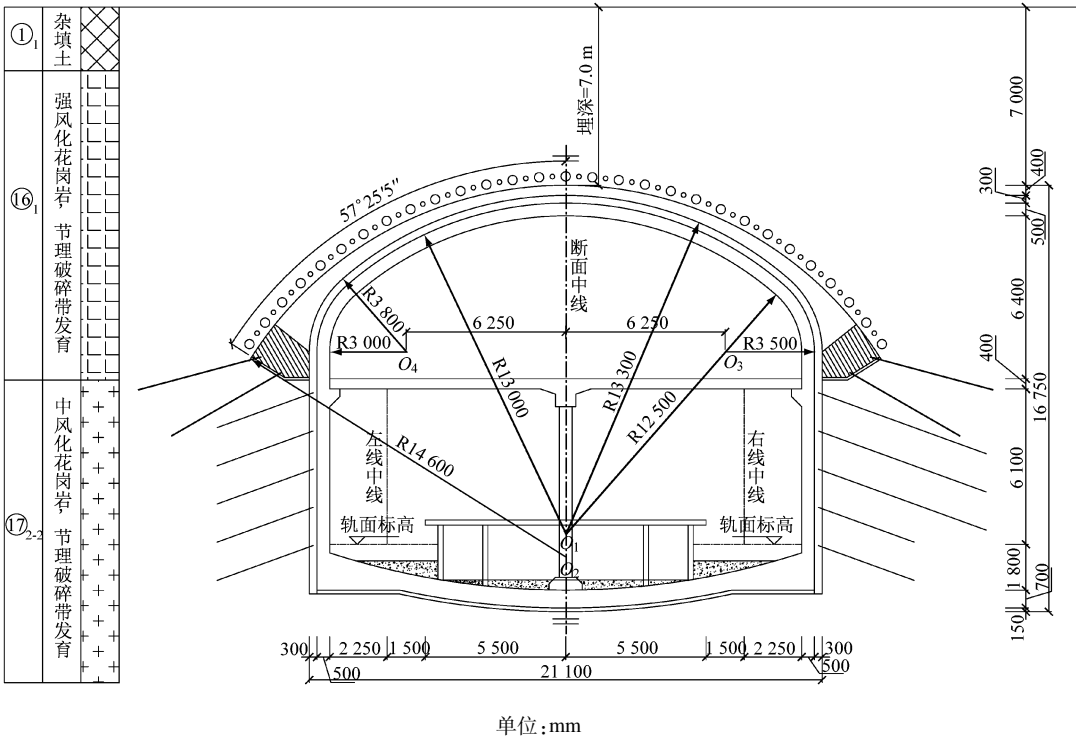


图1 案例车站主体结构的横断面
Fig. 1 Typical cross-section of case station main structure

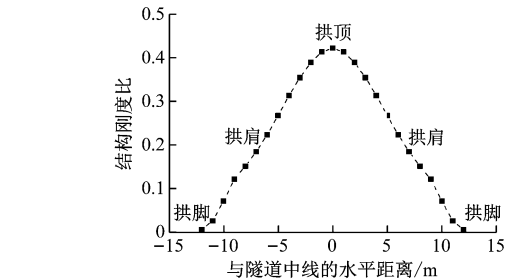
2 双层初支叠合拱盖法施工的组合形式
比选

本文拟定了两种拱部初支结构组合方案。方案一为“外层初支拱盖+内层等厚初支”;方案二为“外层等厚初支+内层初支拱盖”。二者的主要区别在于:① 方案一以刚度较弱的等厚初支置换竖撑,而方案二则是以刚度较强的初支拱盖置换竖撑。② 方案一拱墙交界处初支结构过渡圆顺、受力均匀、施工方便,而方案二拱墙交界处初支结构刚度突变、受力复杂。

绘制两种方案下结构的刚度比曲线,如图2所示。由图2可知,初支拱盖结构刚度是等厚初支结构刚度的数倍甚至数十倍,由此可以断定:结构施作的顺序对隧道结构的稳定性控制起到关键作用。

3 数值计算及结果分析

采用MIDAS GTS NX软件建立了这两种组合方案的地层-结构计算模型。其中:岩土体本构关系采用D-P屈服准则,锚杆、喷射混凝土及二次衬砌采



注: 结构刚度比是指等厚初支下结构刚度与初支拱盖下结构刚度之比。

图2 两种双层叠合结构的刚度比曲线
Fig. 2 Stiffness ratio curves of two double-layer composite structures

用线弹性本构关系;模型尺寸的高度为48 m、宽度为122 m、长度为30 m。岩土体的物理力学参数及支护结构材料参数分别如表1—2所示。

3.1 地表及拱顶沉降

两种方案引起地表、拱顶沉降值分别如图3、图4所示。由图3—4可看出:先行施作初支拱盖对控制地层变形有利(尤其是拱部岩体施工阶段),这是因为初支拱盖刚度大于等厚初支结构刚度,提供

表 1 计算模型的岩土体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil and rock in calculation model

地层	重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	层厚/ m
素填土	18.0	20	0.45	21	11	2.5
强风化岩	22.5	99	0.35	84	32	4.5
中风化岩	26.1	530	0.30	138	45	41.0

表 2 计算模型的支护结构材料参数

Tab. 2 Material parameters of supporting structure in calculation model

支护结构	模拟单元	截面类型	规格
超前小导管	实体单元	圆形	无缝钢管, φ 108 mm \times 6.0 mm 或 φ 42 mm \times 3.5 mm
等厚初支	壳单元	矩形	C25 湿喷混凝土, 厚 0.30 m
初支拱盖	壳单元	变截面矩形	C25 湿喷混凝土, 厚 0.4 ~ 1.5 m
支底梁	实体单元	异形	C35 模筑混凝土, 高 0.50 ~ 1.25 m
锚杆	梁单元	圆形	中空注浆锚杆, φ 25 mm \times 5.0 mm
内支撑	壳单元	矩形	C25 湿喷混凝土 + 25a 工字钢, 厚 0.30 m
二衬	壳单元	矩形	C45 钢筋混凝土, 拱墙厚 0.50 m, 仰拱厚 0.60 m

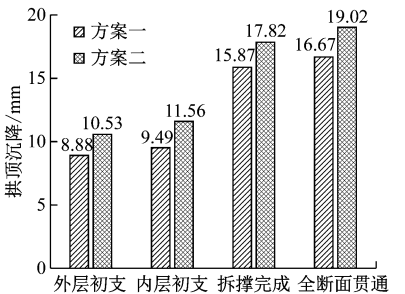


图 3 两种方案下施作各典型施工步的拱顶沉降对比

Fig. 3 Comparison of vault settlement at each typical construction step in the two schemes

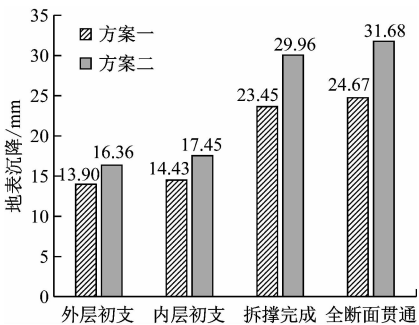


图 4 两种方案下施作各典型施工步的地表沉降对比

Fig. 4 Comparison of ground surface settlement at each typical construction step in the two schemes

给隧道围岩的支护反力较大,能够及时地约束并限制围岩的继续松动变形。

3.2 初支结构安全系数

选择最危险控制截面的强度安全系数(以下简称“安全系数”)作为隧道结构的安全性评价指标。分别计算出两种方案在各典型施工步下的初支结构的安全系数,结果如表 3 所示。

表 3 两种方案在各典型施工步下初支结构的安全系数

Tab. 3 Safety factor of primary support structure under each typical construction step of two schemes

方案	施工部位	各典型施工步下初支结构的安全系数			
		外层初支	内层初支	拆撑完成	全断面贯通
方案一	外层初支拱盖	77.19	70.26	8.53	7.67
	内层等厚初支		1 266.56	61.84	60.31
方案二	外层等厚初支	22.76	21.64	54.28	53.46
	内层初支拱盖		8 85.37	9.28	8.16

由表 3 可知:① 内层初支施作前,方案一的外层初支安全系数明显大于方案二。② 拆撑前内层初支结构基本不承受外部荷载,仍以外层初支 + 内支撑结构作为主要承载体系;拆撑后拱部地层荷载按照叠合结构刚度比重新分配,初支拱盖代替等厚初支成为主要承载结构。其中:方案一等厚初支结构作为安全储备,起到约束、控制外层初支变形的作用;方案二等厚初支结构仅起到将地层荷载传递至初支拱盖的作用,基本无承载效应可言。③ 全断面贯通后,两种方案内外层初支的结构安全系数均略有下降,这说明下部岩体施工对拱部叠合初支结构安全性的影响较小。

3.3 拱脚岩体塑性区

拱盖法隧道施工成败的关键在于拱脚岩体能否给上部桥拱结构提供稳定的持力地基。图 5、图 6 分别为方案一、方案二在典型施工步下拱脚岩体塑性区的分布等值线。

由图 5—6 可知,在隧道拱部施工过程中,两种方案的拱脚岩体均未发生塑性屈服或破坏;隧道下部岩体开挖卸荷后,与方案二相比,方案一侧墙塑性区水平破坏深度增大约 0.10 m,竖向破坏区深度增大约 0.15 m,可见拱脚设置在外侧对侧墙岩体的强度、刚度要求相对较高。

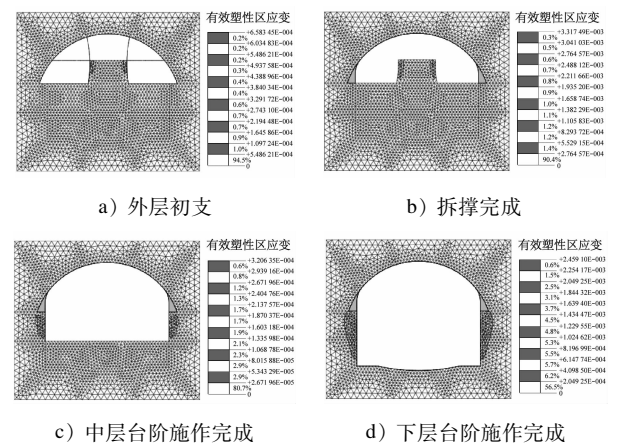


图 5 方案一在典型施工步下拱脚岩体塑性区分布等值线图截图

Fig. 5 Distribution contour line of arch foot rock mass plastic zone at typical construction steps in scheme 1

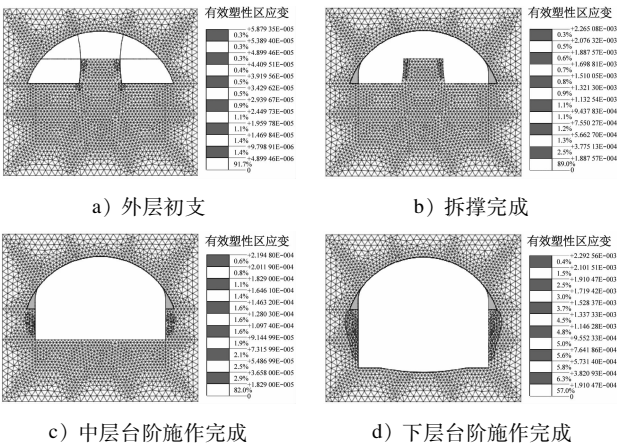


图 6 方案二在典型施工步下拱脚岩体塑性区分布等值线图截图

Fig. 6 Distribution contour line of arch foot rock mass plastic zone at typical construction steps in scheme 2

3.4 二衬结构内力

图 7 为两种方案的二衬结构弯矩图,可见二衬结构内力控制部位基本一致,其大小、分布也近似相同。方案一、方案二下的侧墙二衬控制弯矩分别为 17.89 kNm、16.84 kNm,前者较后者增加约 6.24%,远大于二衬其它部位的控制内力差值。这进一步印证了上文侧墙围岩塑性影响区分布规律的正确性。

4 施工验证

选择方案一作为最终实施方案,各监测项目的实测值与模拟值对比曲线如图 8 所示。最终隧道拱

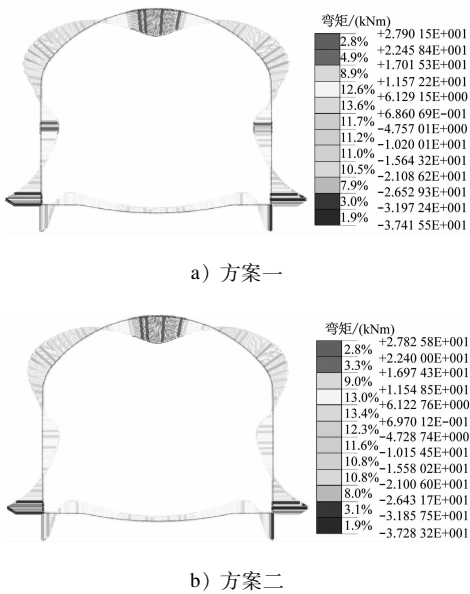


图 7 两种方案的二衬结构弯矩图对比截图

Fig. 7 Comparison of secondary lining structure bending moment in two schemes

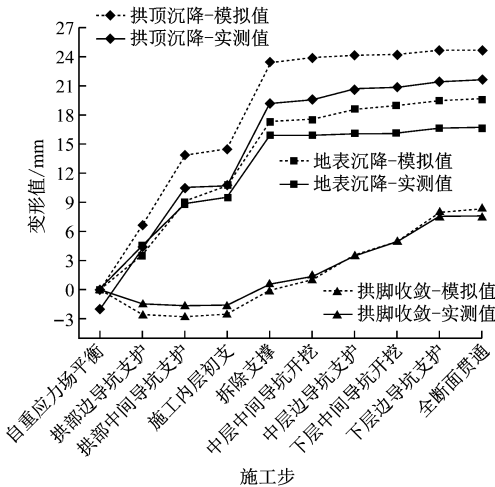


图 8 结构变形实测值与模拟值对比曲线

Fig. 8 Comparison curve between measured value and simulated value of structural deformation

顶沉降、地表沉降、拱脚水平收敛的实测值分别为 21.65 mm、16.67 mm、7.61 mm, 约占模拟值的 87.76%、84.83%、91.47%, 均能满足结构变形控制要求。

5 结语

1) 在隧道施工阶段,两种叠合形式初支拱盖法的荷载主要由初支拱盖结构承担,内外层初支结构的荷载承担比例服从内外层结构刚度比原则,与二者的组合形式关系不大,这与拱盖法隧道桥拱的设

计理念一致。

2) 方案一在隧道地表沉降、拱顶沉降及围岩松散变形上的控制效果要优于方案二;而在控制拱脚岩体塑性区发展及二衬结构内力分布方面,方案一比方案二略差。

3) 方案一内层等厚初支可在拱墙交界处圆滑过渡,不会形成阴阳角,其结构受力也更为合理;方案二内层初支拱盖与侧墙初支存在明显的变截面及阴阳角转角过渡,施工时不易操作,施工后容易导致结构受力不均。

综上所述,建议优先考虑采用方案一“外层初支拱盖+内层等厚初支”的双层初支组合形式,其工程性价较高。本文的研究结论是基于强-中风化岩地质条件,在保证2层叠合结构总刚度不变、仅改变相对位置关系的前提下得出的,建议后续对2层初支结构在不同地层条件下的合理厚度进行深入研究,进一步提高双层叠合初支拱盖结构对地层的适应性及工程经济性。

参考文献

- [1] 田利锋. 复杂环境下地铁暗挖车站双侧壁导坑法支撑体系优化[J]. 铁道标准设计, 2016(7): 130.
TIAN Lifeng. Support system optimization of double-side wall excavation method for subway station tunnel under complicated condition[J]. Railway Standard Design, 2016(7): 130.
- [2] 晏启祥, 徐亚军, 刘罡, 等. 洞桩法地铁车站施工力学行为及其修正荷载-结构模型研究[J]. 现代隧道技术, 2016(6): 165.
YAN Qixiang, XU Yajun, LIU Gang, et al. Study on the construction mechanical behaviors of a subway station by PBA method and optimization of the load-structure model[J]. Modern Tunneling Technology, 2016(6): 165.
- [3] 吕波. 暗挖地铁车站拱盖法关键施工技术[J]. 现代隧道技术, 2014(3): 181.

LYU Bo. Key techniques of the arch-cover method for bored metro stations[J]. Modern Tunneling Technology, 2014(3): 181.

- [4] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设, 2010(4): 351.
WANG Mengshu. An overview of development of railways, tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2010(4): 351.
- [5] 汤庆乐. 初支拱盖暗挖地铁车站施工变形规律及控制研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
TANG Qingle. Study on deformation law and control of subway station excavation using primary support arch cover method[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.
- [6] 熊田芳, 宋超亚, 乔春生. 上软下硬复合地层中拱盖法单拱大跨地铁车站的埋深影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016(2): 222.
XIONG Tianfang, SONG Chaoye, QIAO Chunsheng. Impacts of depths on the large-span and single-arch subway station with arch cover method in hard-soft heterogeneous stratum[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016(2): 222.
- [7] 张国华, 陈海勇, 邓昆, 等. 重庆地区层状岩地层超大断面暗挖地铁车站施工工法比选[J]. 城市轨道交通研究, 2019(3): 137.
ZHANG Guohua, CHEN Haiyong, DENG Kun, et al. Comparison of Chongqing metro station construction method in super-large section tunnel of the stratigraphic strata[J]. Urban Mass Transit, 2019(3): 137.
- [8] 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(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(5): 1329.
- [9] 董子龙, 隆卫. 大连地铁兴工街站复合地层超大跨浅埋暗挖施工关键技术[J]. 隧道建设, 2013(6): 489.
DONG Zilong, LONG Wei. Key construction technologies for mined metro station tunnels with super-large span and shallow cover located in complex ground: case study on Xingong Street Station of Dalian Metro[J]. Tunnel Construction, 2013(6): 489.

(收稿日期: 2020-05-15)

(上接第 151 页)

- [5] 谭仪忠, 刘元雪, 周结中. 隧道扩建合理开挖步序的研究[J]. 后勤工程学院学报, 2011(5): 8.
TAN Yizhong, LIU Yuanxue, ZHOU Jiezhong. Research on proper excavation steps in tunnel extension[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2011(5): 8.

- [6] 朱育才, 林志, 石波. 隧道扩建对地面建筑物的影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011(5): 938.
ZHU Yucai, LIN Zhi, SHI Bo. On influence of tunnel expansion on the ground buildings[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011(5): 938.

(收稿日期: 2021-11-29)