上软下硬地层浅埋大跨地铁车站施工技术*

牛富生 [1,2]，**郑若泓** [1,2]，**卫心怡** [1,2]，**杨朝帅** [1,2]，**李达强** [1,2]

（1.中铁隧道局集团有限公司，广东　广州　511458;2.广东省隧道结构智能监控与维护企业重点实验室，广东　广州　511458）

[摘要] 针对上软下硬地层浅埋大跨地铁车站施工技术需求，融合双侧壁导坑法和拱盖法，提出一种适用于上软下硬地层的浅埋大跨地铁车站施工方法。在提炼出一些创新技术内容的基础上，开发出一套上软下硬地层浅埋大跨地铁车站施工技术。通过工程应用案例示范，给出了具体施工工序和施工参数。

[关键词] 地铁车站；浅埋大跨；施工技术；上软下硬地层

[中图分类号]　U231+.3　　[文献标识码]　A

Construction Technology of Shallow Large Span Subway Station in Upper-soft and Lower-hard Stratum

NIU Fusheng [1,2] , ZHENG Ruohong[1,2], WEI Xinyi[1,2], YANG Chaoshuai [1,2] ,

LI Daqiang[1,2]

(1. China Railway Tunnel Group Co.,Ltd.,Guangzhou, Guangdong　511458, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Monitoring and Maintenance of Tunnel Structure,Guangzhou, Guangdong　511458, China)

Abstract: Aiming at the construction technical requirements of shallow large span subway stations in upper-soft and lower-hard stratum, the fusion of double side wall guide pit method and dome method, a construction method for shallow large span subway stations suitable for upper-soft and lower-hard stratum is proposed. On the basis of extracting some innovative technical content, a set of construction technology for shallow large span subway stations in upper-soft and lower-hard stratum is developed. Through the engineering application case, the specific construction procedures and construction parameters are given.

Keywords: subway stations；shallow large span；construction；upper-soft and lower-hard stratum

*国家自然科学基金项目(52078213)；中铁隧道局集团有限公司科技创新计划项目（2021-08）

[作者简介] 牛富生，博士，正高级工程师，E-mail：niufusheng3@crecg.com

[收稿日期]2023-11-02

0 引言

目前浅埋大跨隧道开挖方法主要有双侧壁导坑法和二衬拱盖法[1-2]。

双侧壁导坑法又称为眼睛工法，即把开挖断面分块，每个分块在开挖后独立闭合成环，可较好地控制变形，保证施工安全，但由于工序多导致工期长[3]。在上软下硬地层中，尤其是下硬地层（中风化、微风化岩石）中采用爆破施工时应用双侧壁导坑法存在局限性：①下部岩体爆破开挖会冲击破坏已施作的初期支护和临时支护；②施工二次衬砌前拆除临时支撑的风险较高。

针对上软下硬大跨隧道，目前使用较多的是二衬拱盖法[4]，即隧道拱部左、中、右3部采用机械开挖，中间施作临时中隔壁；拱部开挖完成后拆除临时中隔壁，再施作拱部二衬形成拱盖，后续在二衬拱盖保护作用下以台阶法爆破开挖下部岩体，最后施作剩余主体结构，该方法已成功在青岛地铁3号线[5]、大连地铁[6]、广州地铁11号线[7]等工程中得到应用。实际上二衬拱盖法拱部施工

也借鉴了双侧壁导坑法的一些理念，后来在此基础上发展创新了如拱部采用复合式衬砌（初期支护+二次衬砌）、叠合拱等结构形式，但拱盖法仍存在以下不足：①隧道拱部和边墙结合部留有的施工缝导致大拱脚位置渗漏水严重；②由于上部拱部空间有限，隧道下部岩体爆破作业时对拱顶结构可能造成冲击破坏[8-9]。

1 创新技术内容

针对现有浅埋大跨地铁车站在穿越上软下硬地层时采用双侧壁导坑法和拱盖法存在的不足之处，提出一种适用于上软下硬地层的浅埋大跨地铁车站的施工方法。上软下硬地层浅埋大跨地铁车站断面结构布置如图 1 所示。

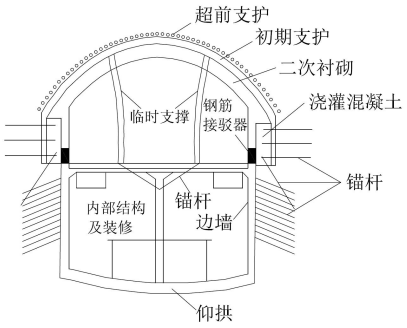


图 1 上软下硬地层浅埋大跨地铁车站断面结构布置

Fig.1 Cross section structure layout of shallow large span subway station in upper-soft and lower-hard stratum

创新技术内容如下。

1)因开挖跨度较大且浅埋条件下拱部锚杆作用不显著，超前支护可沿车站拱部设计开挖轮廓线布设 1 排超前大管棚或超前小导管，必要时 2 种超前支护措施可组合使用，用于软弱地层预加固；当围岩情况较差时，可采用超前帷幕注浆、水平旋喷桩方式对围岩及掌子面进行加固。

2)拱盖法施工采用复合衬砌结构（初期支护、二次衬砌），硬层分布较深时，适当调整第①步开挖范围，使第①步隧道拱脚尽可能落在Ⅳ级及以上较好围岩上，确保此处岩石有足够的地基承载力。

3)超前支护也分块支护，真正实现隧道拱部“快速超前支护、快速开挖、快速支护”的特点。

4)车站上半断面采用双侧壁导坑法爆破施工，下半断面采用拉槽台阶式分部爆破施工。

5)由于下部岩体坚硬，拉槽台阶式施工时先爆破施工中部，然后再爆破施工左边墙和右边墙，直到隧道底部。拉槽台阶式先施工中部，可消除两侧岩体（边墙）水平方向受到的较强夹制作用，这样耗能较低，相应地对围岩扰动较小。

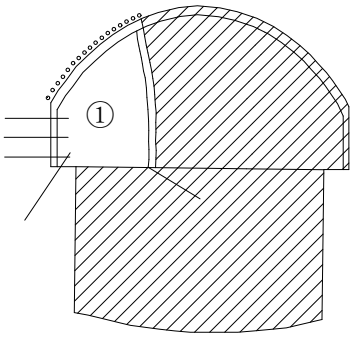
6)鉴于拱脚与边墙结合整体性不好的原因，拱部修筑时初期支护采用钢拱架，不再使拱脚直接落底到坚硬岩石，而是线性向下延长一段直到坚硬岩石（Ⅳ级围岩及以上），这样不仅可减缓隧道拱和边墙结合部留有的施工缝导致大拱脚位置渗漏水严重问题，还可增加车站拱部空间，减少或缓冲下半断面岩体爆破振动时对上部拱部结构的冲击影响。

7)在拱部二次衬砌结构与下部岩体的接触面处，预埋边墙钢筋接驳器，以便与边墙二次衬砌钢筋做好连接。

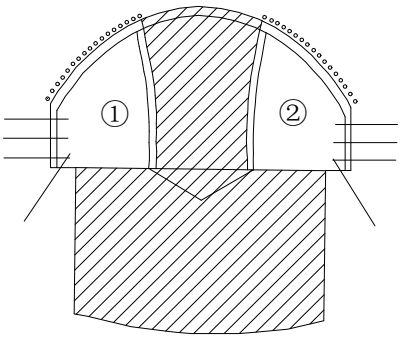
2 创新施工工艺

在上述技术内容的基础上，参照 JTG 3370.1—2018《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》[10]、GB 50157—2013《地铁设计规范》[11]、GB/T 50299—2018《地下铁道工程施工质量验收标准》[12]和 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》[13]，开发出一套上软下硬地层浅埋大跨地铁车站施工技术。其施工工艺流程为：施作超前支护→第①步机械开挖后，及时施作初期支护和临时支撑→第②步施工与第①步工序类似→第③步施工拱部中部，浇筑两侧拱脚锚杆处混凝土→第④步分段拆除临时支撑，施工拱部防水层及模筑二次衬砌，预埋边墙钢筋接驳器→第⑤，⑥步采用台阶拉槽式分部开挖车站下半断面，并及时施工初期支护→第⑦，⑧步采用与第⑤，⑥步类似方法→第⑨步施工边墙防水层及模筑二次衬砌，施工车站内部结构及装修设施。

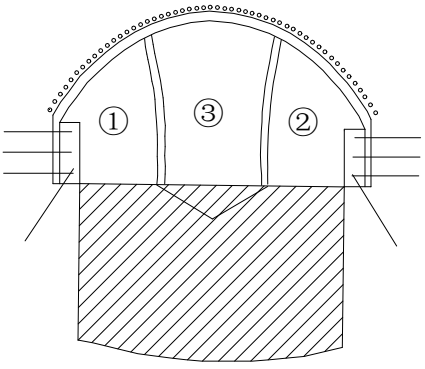
具体施工工艺如图 2 所示。



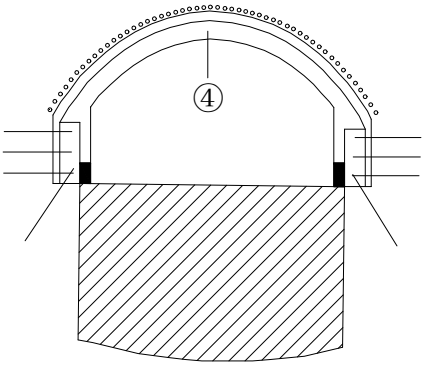
（a）第一步



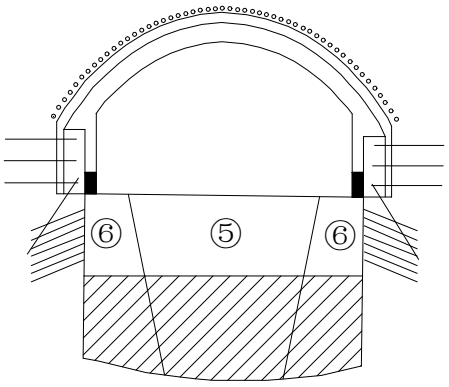
（b）第二步



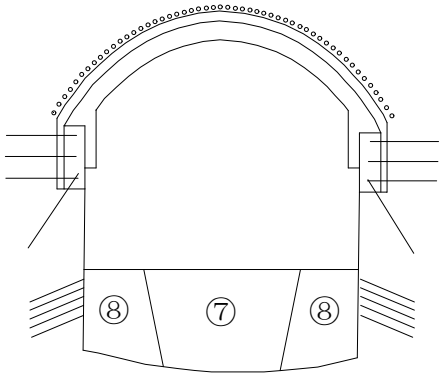
（c）第三步



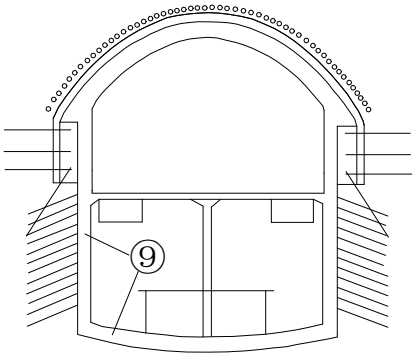
（d）第四步



（e）第五、六步



（f）第七、八步



（g）第九步

图 2 施工工艺流程示意

Fig.2 The construction process flow

3 工程应用案例

3.1 地铁车站概况

青岛市地铁一期工程（3 号线）浮山所车站起点里程为 K8+358.491，终点里程为 K8+605.491，中心里程为 K8+513.891。车站设计采用浅埋暗挖法，施工采用钻爆法，提升采用竖井塔架卷扬机。车站主体中部设计为大拱脚薄边墙结构。隧道拱设计为双层大拱脚复合衬砌结构，高 15.5m，宽 20.6m，

拱顶埋深为 9.3~10.5m，覆岩 2.8~6.4m。车站设风井 2 座，出入口 4 座。车站主体施工时利用风井、风道作为竖井和通道。

3.2 工程地质概况

地层由上到下依次为第四系全新统人工填土层（Q_4^{ml}）、第四系上更新统冲洪积层（Q_3^{al+pl}）、燕山晚期花岗岩（γ 53）、燕山晚期侵入岩脉（X53）、构造岩。其中，第四系全新统人工填土层（Q_4^{ml}）分为第①层杂填土和①$_1$ 素填土，第四系上更新统冲洪积层（Q_3^{al+pl}）分为第⑪层冲洪积粉质黏土和第⑫层含砂黏性土，燕山晚期花岗岩（γ 53）分为第⑯中层强风化花岗岩中亚带、第⑯下层强风化花岗岩下亚带、第⑰层花岗岩中风化带、第⑱层花岗岩微风化带，燕山晚期侵入岩脉（X53）分为第⑰$_1$ 层中风化带煌斑岩、第⑰$_2$ 层中风化带花岗斑岩、第⑱$_2$ 层微风化带花岗斑岩，构造岩为第⑰$_4$ 层中风化碎裂岩。

地层物理力学指标参数如表 1 所示。

表 1 地层物理力学指标参数

Table 1 Physical and mechanical index parameters of the stratum

	岩土名称	时代与成因	天然密度 ρ/(g·cm^{-3})	承载力 f_{ak}/kPa	剪切试验		压缩系数	变形或弹性模量	岩层或土层基床系数		静止侧压力系数	泊松比 μ	围岩分级
					直接快剪				水平	垂直			
					c/kPa	φ/(°)	$\alpha_{0.1\text{-}0.2}$/MPa^{-1}	E_0/MPa	C_0/(MPa·m^{-1})	C_1/(MPa·m^{-1})	K_0		
①$_1$	杂填土	Q_4^{ml}	1.75	70	0	15	—	—	8	6	—	—	—
⑪	冲洪积粉质黏土	Q_3^{al+pl}	1.89	200	29	9	0.36	4.7	28	20	0.43	0.30	—
⑫	含砂黏性土	Q_3^{al+pl}	1.92	260	30	20	0.35	8.0	40	35	0.39	0.28	—
⑯$_{中}$	强风化花岗岩	γ 53	2.30	1 000	100	45	—	60	230	180	0.39	0.28	Ⅴ
⑯$_{下}$	强风化花岗岩	γ 53	2.35	1 200	100	45	—	100	250	200	0.39	0.28	Ⅴ
⑰	中风化花岗岩	γ 53	2.45	2 500	700	55	—	5 000	550	500	0.33	0.25	Ⅳ
⑰$_1$	中风化煌斑岩	X53	2.45	2 500	700	55	—	5 000	400	350	0.37	0.27	Ⅴ
⑰$_2$	中风化带花岗斑岩	X53	2.45	2 500	700	55	—	5 000	550	500	0.33	0.25	Ⅳ
⑰$_4$	中风化碎裂岩	γ 53	2.45	2 000	600	50	—	4 500	300	250	0.37	0.27	Ⅴ
⑱	微风化花岗岩	γ 53	2.45	5 000	1 800	65	—	22 000	1 000	900	0.22	0.22	Ⅲ
⑱$_2$	微风化	X53	2.45	5 000	1	65	—	22	1 000	900	0.23	0.23	Ⅲ

花岗斑岩	800	000

3.3 施工方法

浮山所站拱顶埋深约 10m，拱顶处于强风化花岗岩中，上部为人工填土、粗砾砂层，地层软弱且透水性强，因此必须控制地表沉降，封堵围岩裂隙渗水才能保证施工安全。

车站采用钻爆法施工，对于大拱脚结构，由于拱部围岩软弱，且开挖跨度大，因此上半断面采用双侧壁导坑法施工，设立了 2 道竖向支撑，起到了较好减跨作用，使初支结构受力更合理。同时，由于下部围岩为完整性较好的微风化花岗岩，模筑拱部衬砌，将拱脚支承于完整岩石上，形成可靠的支撑结构，待上部混凝土拱浇筑完成后再进行下部开挖。

车站结构形式为单拱直墙复合式衬砌结构，上半断面采用双侧壁导坑法施工，下半断面采用拉槽台阶式施工。

3.4 施工工序

车站施工工序如下。

1)做好超前支护措施：在第①步爆破开挖前，先在车站上半断面拱部左侧开挖轮廓线上方进行预加固。车站里程 K8+371.191—K8+595.591 段，由于拱顶位于强风化花岗岩中且覆岩厚度小，为确保隧道前方掌子面稳定，更好地控制地表沉降，采取 ϕ76 自进式管棚+ ϕ32 超前小导管对掌子面上前方岩体进行预加固。超前大管棚长 25m，搭接长度 5m，环间距 0.4m；超前小导管为 ϕ32×3.25 焊接钢管，L=3.5m，纵向间距 1.5m，环间距 0.4m。

2)采用双侧壁导坑法施工车站上半断面拱部岩体，第①步爆破开挖后，及时施作初期支护和临时支撑。架设拱部格栅拱架（ ϕ25， ϕ14 钢筋，纵间距 0.5m），焊接纵向连接筋（ ϕ22 钢筋，环向间距 1m，双层设置），铺设钢筋网（ ϕ8，200mm×200mm，单层设置），喷射混凝土（C25 湿喷混凝土厚 0.3m，网喷混凝土厚 0.15m），施打锁脚锚杆（ ϕ25 中空注浆锚杆），架设型钢临时支撑（I22a，I16 型钢，纵间距 0.5m），型钢临时支撑脚下也需施打锚杆。使第①步拱脚能落在Ⅳ级中风化花岗岩上，确保此处岩石有足够的地基承载力。

3)第②步施工与第①步工序类似，快速超前支护，快速开挖，快速支护。车站上半断面拱部左侧和右侧导洞错开应≥15m。

4)第③步施工拱部中部岩体，同时浇筑左、右两侧拱脚锚杆处 C25 混凝土。车站拱部上半断面开挖、支护完毕后，覆土荷载作用在拱上部，表现为两端水平荷载，此时有一部分荷载作用在锚杆上。为分担水平荷载作用，浇筑 C25 混凝土，使两端的锚杆与混凝土成为一体。

5)第④步分段拆除临时支撑，施工拱部防水层及模筑二次衬砌，预埋边墙钢筋接驳器。以 6m 长为一段，分段拆除临时支撑。防水层为 400g/m^2+2mm ECB 防水板，纵向渗水管为 DN100 HDPE 双壁波纹塑料排水管，横向泄水管为 ϕ50 PVC 管。二次衬砌采用 C45，P10 防水钢筋混凝土。同时，在拱部二次衬砌结构与下部岩体的接触面处，预埋边墙钢筋接驳器，以便与边墙二次衬砌钢筋做好连接。

6)施工完车站上半断面后，第⑤，⑥步采用台阶拉槽式分部开挖车站下半断面，并及时施作初期支护。在边墙处施打 ϕ25 砂浆锚杆，并喷射混凝土（C25 网喷混凝土，厚 0.3m）。车站下半断面开挖位置与上半断面开挖位置间距 50~100m。

7)第⑦，⑧步采用与第⑤，⑥步类似方法，上、下台阶间距 7~9m，分台阶开挖可实现多个断面同时施工，相互影响小，作业效率高。

8)第⑨步施工边墙防水层及模筑二次衬砌，施工车站内部结构及装修设施。边墙防水层及二次衬砌所用材料与拱部相同。

3.4 施工效果

在施工过程中，使隧道的大拱脚下方具有一条直线段，延长了拱盖距离下方岩体的高度，该设计为混凝土块浇筑提供了空间，混凝土块与锚杆配合能有效分担覆土荷载形成的水平荷载，使得此处拱体结构稳定；

另外，混凝土块浇筑形成了厚度较大大拱脚，可减缓拱脚位置的渗漏水问题。该施工方法有效避免了双侧壁导坑法和拱盖法等工法缺点，既安全又经济，可供该类地铁车站施工参考。

4 结语

1)针对现有浅埋大跨地铁车站在穿越上软下硬地层时采用双侧壁导坑法和拱盖法存在的不足之处，提出一种适用于上软下硬地层的浅埋大跨地铁车站的施工方法，提炼出一些创新技术内容。

2)在上述创新技术内容的基础上，开发出一套上软下硬地层浅埋大跨地铁车站施工技术，给出了具体的创新施工工艺。

3)通过工程应用案例示范，展示了开发出的创新工法在实际工程中的具体施工工序和施工效果，尤其是一些施工参数，以供类似地下工程施工参考借鉴。

参考文献：

[1]李利平,李术才,赵勇,等.超大断面隧道软弱破碎围岩空间变形机制与荷载释放演化规律[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):2109-2118.

LI L P, LI S C, ZHAO Y, et al. Spatial deformation mechanism and load release evolution law of surrounding rock during construction of super-large section tunnel with soft broken surrounding rock masses[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2012, 31(10): 2109-2118.

[2]李新志,李术才,李树忱.浅埋大跨度隧道施工过程地表沉降变形特征研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):3348-3353.

LI X Z, LI S C, LI S C. Ground settlement deformation characteristic study of shallow large-span tunnel in construction process[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(S1): 3348-3353.

[3]陈磊.双侧壁导坑法在高速公路隧道进口段进洞施工中的应用[J].工程建设与设计,2021(13):184-186.

CHEN L. The application of double-wall tunnel guide method in the construction of the entrance section of expressway tunnel[J]. Construction & design for engineering, 2021(13): 184-186.

[4] 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.

ZHU X Y. Construction optimization of super-shallow buried large-span metro station with arch-cap method in upper soft and hard stratum[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.

[5] 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,2012,15(8):135-138.

WU X F. 3D finite element simulation of arch-cover method in soil-rock compound stratum[J]. Urban mass transit, 2012, 15(8): 135-138.

[6] 钟国.地铁车站的一种新型暗挖施工工法——拱盖法[J].城市轨道交通研究,2012,15(8):145-148.

ZHONG G. Arch-cover method: a new subsurface excavation construction for metro station[J]. Urban mass transit, 2012, 15(8): 145-148.

[7]高晓刚,尹学鑫,崔凯,等.浅埋超大跨多导洞拱盖法地铁区间导洞施工方案优化研究[J].城市轨道交通研究,2023,26(8):65-70.

GAO X G, YIN X X, CUI K, et al. Optimization of pilot tunnel construction scheme for shallow-buried super-large-span metro interval by multi guiding-hole arch-cover method[J]. Urban mass transit, 2023, 26(8): 65-70.

[8] 杨林德. 公路施工手册：隧道[M]. 北京：人民交通出版社，2011.

YANG L D. Handbook of highway construction: tunnel[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.

[9] 王毅才. 隧道工程[M]. 北京：人民交通出版社，2006.

WANG Y C. Tunnel engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2006.

[10] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路隧道设计规范 第一册 土建工程：JTG 3370.1—2018 [S]. 北京：人民交通出版社, 2018.

China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co., Ltd. Specifications for design of highway tunnels section1 civil engineering:JTG 3370.1—2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018.

[11] 北京城建设计研究总院有限责任公司.

地铁设计规范：GB 50157—2013 [S]. 北京：中国建筑工业出版社, 2013.

Beijing Urban Construction Planning and Design Institute Co., Ltd. Code for design of metro:GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

[12] 北京城建集团有限责任公司. 地下铁道工程施工质量验收标准：GB/T 50299—2018 [S]. 北京：中国建筑工业出版社, 2018.

Beijing Urban Construction Group Co., Ltd. Stndard for construction quality acceptance of metro engineering:GB/T 50299—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.

[13] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路隧道设计规范：TB 10003—2016 [S]. 北京：中国铁道出版社, 2016.

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Code for design of railway tunnel:TB 10003—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.