

# 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

高晓刚<sup>1</sup> 尹学鑫<sup>1</sup> 崔凯<sup>1</sup> 舒文韬<sup>2</sup> 马龙祥<sup>2</sup>

(1. 中铁三局集团广东建设工程有限公司, 510510, 广州; 2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 目的: 为了保障施工安全, 有效控制地层变形, 对浅埋超大跨多导洞拱盖法地铁隧道修建过程中的合理导洞施工方案进行了研究。方法: 采用数值模拟结合正交试验分析的方法, 研究了导洞施工顺序、施工错距及施工进尺对隧道-围岩体系受力与变形特征的影响, 在兼顾对施工周边环境的影响小以及满足围岩-支护系统受力安全要求的条件下, 优化了导洞施工方案。结果及结论: 与传统开挖方式相比, “先边后中”和“非对称开挖”的导洞施工原则更有利于施工风险管控和围岩位移控制; 在上软下硬地质条件下, 影响超大跨多导洞拱盖法导洞施工力学效应的施工参数, 按影响显著性由大至小依次为施工进尺、施工顺序及施工错距。

**关键词** 地铁隧道; 大跨地下工程; 拱盖法; 多导洞开挖; 数值模拟; 正交试验

**中图分类号** U455.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.08.011

## Optimization of Pilot Tunnel Construction Scheme for Shallow-buried Super-large-span Metro Interval by Multi Guiding-hole Arch-cover Method

GAO Xiaogang, YIN Xuexin, CUI Kai, SHU Wentao, MA Longxiang

**Abstract** Objective: To ensure construction safety and effectively control ground deformation, the reasonable pilot tunnel construction scheme for the shallow-buried super-large-span metro tunnel excavation by multi guiding-hole arch-cover method is studied. Method: By employing the method of numerical simulation combined with orthogonal experimental analysis, the effects of pilot tunnel excavation sequence, construction stagger and construction advance on the stress and deformation characteristics of the tunnel-surrounding rock system are investigated. Under the premises of accommodating the requirements of minimal impact on the surrounding construction environment and fulfilling the safety requirements of surrounding rock-supporting structure system under stress, the pilot tunnel excavation

scheme is optimized. Result & Conclusion: Compared to conventional excavation methods, the 'side-first, middle-later' and 'asymmetric excavation' principles for guiding-hole construction are more favorable for construction risk control and surrounding rock displacement control. Under the upper-soft lower-hard stratigraphical conditions, the construction parameters that significantly affect the mechanical effects of super-large-span tunnel by multi guiding-hole arch-cover method are ranked in order of descending significance as follows: construction advance, excavation sequence, and construction stagger.

**Key words** metro tunnel; large-span underground engineering; arch-cover method; multi guiding-hole excavation; numerical simulation; orthogonal experiment

**First-author's address** China Railway Third Bureau Group Guangdong Construction Engineering Co., Ltd., 510510, Guangzhou, China

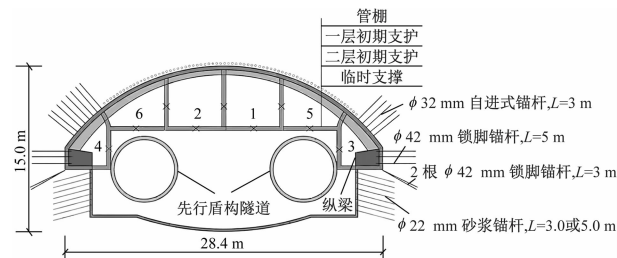
近些年来,随着城市地铁的大规模建设以及为满足地铁运营的自身需求,以地铁折返线为代表的浅埋大跨暗挖地铁区间隧道在地铁建设中愈发频繁地出现<sup>[1]</sup>。为了减小施工风险,浅埋大跨暗挖地铁隧道往往采用多导洞分部开挖的方式进行修建,在此背景下,导洞的施工力学效应及开挖方案对隧道施工安全及周边环境的影响的控制至关重要。大量学者针对大断面暗挖隧道导洞开挖的合理施工方案及其对环境的影响开展了研究,取得了系列成果。文献[2-4]分别对CRD(交叉中隔壁)法及洞桩法施工中导洞施工顺序、施工错距等施工参数对施工安全及周边环境的影响进行了研究,并对导洞施工方案进行了优化;文献[5-6]以拱盖法3导洞地铁隧道为工程背景,分析了导洞施工对围岩变形及结构受力的影响。

综合既有研究成果可以看到,目前关于城市大跨暗挖地下工程导洞施工力学效应及合理施工方

案的研究主要是针对洞桩法及 CRD 法修建的地下工程,而关于拱盖法地下工程导洞施工力学效应的研究较少,且既有研究也仅针对跨度较小、导洞数量不多的拱盖法地下工程开展了相应研究。然而,随着地下空间开发的不断深入,采用多导洞(多于 3 个导洞)拱盖法施工的超大跨地下工程在近些年也开始涌现。随着导洞数量的增多,拱盖法施工中多个导洞的群洞力学效应将变得十分显著,而寻求大跨度拱盖法多个导洞的合理施工方案以充分保障施工安全及环境影响可控也成为了目前一个重要且亟待解决的现实问题。有鉴于此,本文以广州地铁 11 号线华景路站—华师站区间超大跨拱盖法施工工程为依托对此问题开展系统性研究,以期为类似工程提供一定参考。

## 1 工程概况

广州地铁 11 号线在华景路站—华师站区间设地铁折返线,该折返区段为 4 线并行区段,长 39.95 m,断面宽 28.4 m、高 15.0 m,平均埋深约为 19 m。该折返区段位于广州繁华城区,其所处地层为典型的上软下硬地层。该隧道是目前广州市地铁断面跨度最大的地铁隧道(见图 1),且周围环境极其敏感。为了缩短建设工期并保障施工安全与低环境影响,该超大跨度区间隧道拟在盾构隧道先行通过的条件下,采用双层初支拱盖法的施工方式进行修建。由于隧道跨度大,扣拱的浇筑通过 6 个导洞的开挖来提供建造空间(见图 1)。大跨区段具体施工时,先在隧道拱部 80°范围内打设直径 159 mm、壁厚 10 mm、长度 45 m、环向间距 350 mm 的超前大管棚,然后进行导洞分部开挖并及时施作拱脚锚杆、一层初期支护和临时支撑,待边导洞贯通后开始施做纵梁,在纵梁强度达到设计要求且全部导洞贯通



注:1,2,...,6 代表 6 个导洞编号;L 为锚杆长度。

图 1 广州地铁 11 号线华景路站—华师站隧道横剖面图

Fig. 1 Diagram of Guangzhou Metro Line 11 Huajing Road station - Huashi Station tunnel cross-section

后再施做二层初期支护,最后在两层初期支护与纵梁共同组成的拱盖承载体系保护下进行临时支撑拆除、下部空间开挖和二次衬砌施做等剩余工序的施工。显然,在拱盖承载体系形成之前的导洞开挖过程中,存在较大的施工安全及地层过量沉降变形风险。鉴于此,有必要对该工程导洞的施工方案开展优化研究,以指导导洞的高质量施工,从而最大限度地降低隧道施工风险及对周围环境的影响。

## 2 数值分析模型

### 2.1 模型建立

采用三维有限差分数值计算软件 FLAC3D 建立三维数值模型,从导洞施工顺序、施工错距及施工进尺等关键施工参数出发,研究多导洞拱盖法地铁工程的合理导洞施工方案。模型尺寸(长度×高度×宽度)为 200.0 mm×86.9 mm×40.0 mm(见图 2),模型的左右、前后以及下边界采用法向位移约束条件。由于大跨段埋深较浅,采用自重应力场作为初始地应力场。隧道围岩考虑为均质理想弹塑性材料,服从 Mohr-Coulomb(摩尔-库仑)屈服准则,并合理简化为水平地层,采用三维实体单元进行模拟;盾构管片、第一层初期支护和临时支撑考虑为弹性材料,采用壳单元模拟;超前支护通过设置等效加固区进行模拟<sup>[7]</sup>;锚杆采用软件内置结构单元——锚索单元进行模拟,所建立的三维数值模型如图 2 所示。

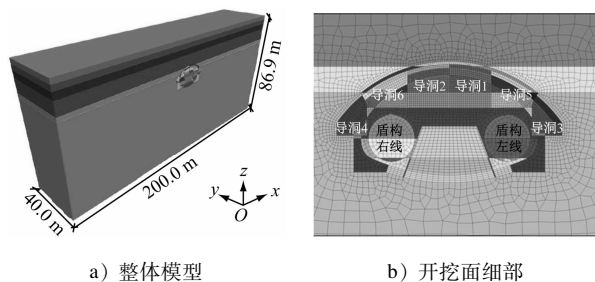


图 2 三维数值模型

Fig. 2 Three-dimensional calculation model

### 2.2 计算参数选取

在数值模拟中,围岩与结构的物理力学参数依据地质勘察报告、室内物理力学试验资料和相应材料参数进行选取。第一层初期支护与临时支撑均采用根据等刚度换算后的均质模型模拟<sup>[8]</sup>。由于它们分别承担外荷载产生的弯矩和轴力,因此相应弹性模量分别按照抗弯刚度等效和抗压刚度等效

计算。模型的计算参数如表 1 所示。

表 1 岩土体材料及支护结构的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of rock soil material and supporting structure					
项目	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
〈1-2〉填土	1.90	8	0.35	15	18
〈4N-2〉粉质黏土	1.95	10	0.31	22	23
〈4-2B〉淤泥质土	1.76	4	0.42	7	6
〈7-3〉泥质粉砂岩强风化	2.10	85	0.25	54	32
〈9-3〉泥质粉砂岩微风化	2.71	6 000	0.15	480	40
〈9-1〉砾岩微风化	2.68	8 000	0.15	600	42
盾构衬砌	2.60	35 500	0.20		
超前支护	2.50	10 000	0.20	800	45
第一层初期支护	2.20	31 900	0.20		
临时支撑	2.20	31 800	0.20		
纵梁	2.50	31 500	0.20		

2.3 施工过程模拟

本文主要对依托工程导洞的施工方案进行优化研究,因此仅对工程导洞开挖过程及邻近工序进行模拟。为了探明导洞的合理施工方案,论文将设置多种导洞开挖方案进行分析研究。对于每一种导洞施工方案,相应的数值模拟施工步骤均为:形成初始地应力场→盾构隧道开挖贯通→施做超前管棚→各导洞依照相关顺序与施工参数进行全断面开挖并施做第一层初期支护与临时支撑→施做边导洞纵梁。

表 2 不同导洞施工顺序

Tab.2 Different guiding hole construction sequences	
工况	导洞开挖顺序
1-1	12→34→56
1-2	34→12→56
1-3	56→12→34
1-4	56→34→12
1-5	1→2→3→4→5→6
1-6	3→4→1→2→5→6
1-7	3'→4→1→2→5→6

注:“12”代表导洞 1 和导洞 2 对称开挖,其他同理。

3 导洞施工参数对周边环境的影响

3.1 导洞施工顺序影响分析

考虑对称施工和非对称施工条件下各导洞的施工顺序,并根据施工现场的可行性,确定如表 2 所示的 7 组不同导洞施工顺序作为分析计算工况(导洞编号见图 2),研究导洞施工顺序对周边环境的影响。其中,工况 1-7 中的 3'指 3 号导洞与其余导洞对向开挖,这样可以在一定程度上避免或减轻施工过程中不同导洞施工的时空交叉,有利于施工组织,从而可有效提高施工效率。

在分析中,各导洞施工进尺统一取为 1 m,不同导洞掌子面纵向错距统一取为 5 m。以大跨区段中间断面(模型纵向距离 20 m 处的断面)作为研究目标面,选取各工况中有代表性的几个施工状态,探究在不同导洞施工顺序过程中的围岩竖向变形规律。各工况分析的施工状态依次包括各导洞依照

相应顺序开挖至目标面状态及后面纵梁施做至目标面与导洞全部贯通状态,即对于表 2 中 1-1—1-4 的对称开挖工况,分析 5 个施工状态;而对于 1-5—1-6 的非对称开挖工况,均分析 8 个施工状态。具体以工况 1-1 为例,施工状态 1、2、3 分别对应于导洞 12、34、56 开挖至目标面,而施工状态 4 与 5 则分别对应于纵梁施做至目标面状态及导洞全部贯通状态。其余工况依此类推。

不同导洞施工顺序条件下目标面处围岩最大竖向位移随施工进度变化曲线如图 3 所示。由图可以看出:位于拱盖跨中的导洞 1、2 的开挖对于围岩竖向位移的影响较大,工况 1-1 和工况 1-5 由于先开挖导洞 1 和导洞 2,其围岩竖向位移在施工初期就会发展到比较大的量值;非对称开挖(工况 1-5—1-7)相较于对称开挖(工况 1-1—1-4)对于控制围岩竖向位移更有优势,这是因为对称开挖同时挖除的

断面面积要明显大于非对称开挖,因而会对围岩产生更大的扰动。因此,从周边环境影响的控制出发,并进一步考虑到施工组织的便利性,导洞的施工顺序采用工况 1-7 的方案是最为有利的。

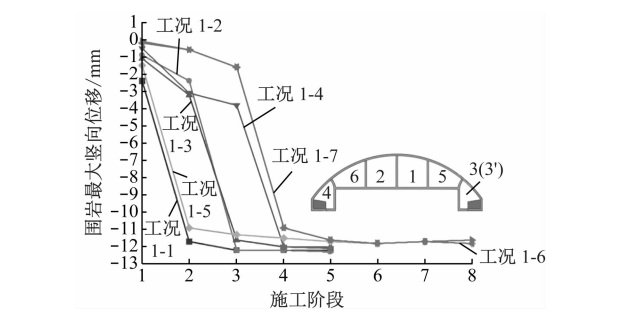


图3 围岩最大竖向位移随施工过程变化曲线(不同导洞施工顺序)

Fig.3 Variation curves of surrounding rock maximum vertical displacement throughout construction process (different pilot tunnel excavation sequences)

3.2 导洞施工进尺影响分析

为探究导洞施工进尺对围岩变形的影响,设置施工进尺分别为 0.5 m、1.0 m、2.0 m、4.0 m 的 4 种工况进行计算分析。各工况分析中,导洞施工错距统一取为 5 m,施工顺序统一按工况 1-7 进行。同样选取中间断面作为研究目标面,分析工况 1-7 中 8 个典型施工状态下目标面的围岩最大竖向位移,如图 4 所示。

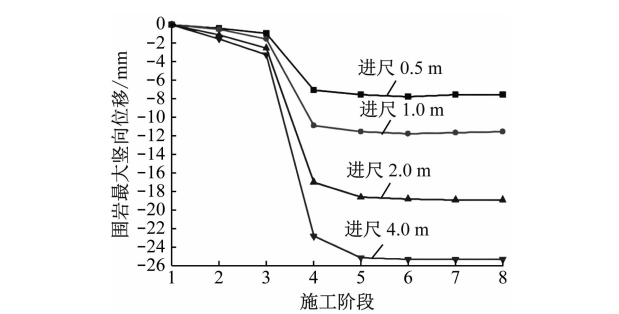


图4 围岩最大竖向位移随施工过程变化曲线(不同导洞施工进尺)

Fig.4 Variation curves of surrounding rock maximum vertical displacement throughout construction process (different pilot tunnel excavation footages)

从图 4 中可以看出:不同导洞施工进尺条件下,围岩位移在施工过程中存在显著差异,进尺越大,围岩位移越大;就最终状态而言,施工进尺由 0.5 m 增加到 4.0 m 时,围岩最大竖向位移会从 -7.6 mm

增加到 -25.3 mm,量值增加 3.33 倍。显然,这是由于施工进尺越短围岩应力释放越不充分的缘故所造成的。因此,为了控制对周边环境影响,本工程导洞的施工进尺选择为 0.5 m 最为有利。

3.3 导洞施工错距影响分析

为探究导洞施工错距对围岩变形的影响,设置 4 m、6 m、8 m、10 m 的 4 种施工错距工况进行计算分析。在分析中,导洞施工进尺统一取为 0.5 m,施工顺序统一按工况 1-7 进行。同样选取中间断面作为研究目标面,分析施工顺序工况 1-7 中 8 个典型施工状态下目标面的围岩最大竖向位移变化规律,如图 5 所示。

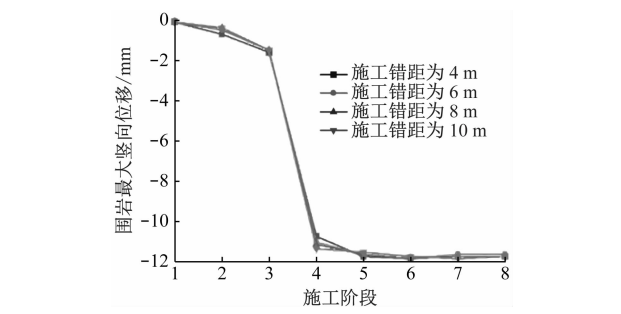


图5 围岩最大竖向位移随施工过程变化曲线(不同导洞施工错距)

Fig.5 Variation curves of surrounding rock maximum vertical displacement throughout construction process (different pilot tunnel excavation offsets)

从图 5 可以看到:由于不同的导洞施工错距会导致围岩横向和纵向的成拱效应产生一定差别,因此不同施工错距对不同施工阶段围岩变形的影响有所不同,但总体而言,不同错距对围岩竖向位移的影响并不显著。

4 基于数值模拟的导洞合理施工方案正交试验研究

为了进一步探明导洞合理施工方案,通过正交试验方法综合考虑导洞施工顺序、施工错距和施工进尺 3 种关键施工参数联合作用下的围岩-支护结构施工力学效应,并结合前述分析,得出最优的现场导洞施工方案。

4.1 正交试验方案设计

以导洞施工顺序(A)、施工错距(B)和施工进尺(C)为影响因素,设计 3 种因素 3 个水平的无交互作用的等水平正交试验,试验的因素和水平如表 3 所示。

表 3 导洞合理施工方案正交试验因素和水平

Tab.3 Pilot tunnel reasonable construction scheme orthogonal experimental factors and levels

水平	因素		
	施工顺序 (A)	施工错距 (B)/m	施工进尺 (C)/m
1	3'→4→1→2→5→6	4	0.5
2	34→12→56	6	1.0
3	56→34→12	8	2.0

在具体试验时,依据 L9(3<sup>3</sup>) 正交表进行相应工况的数值计算,并选择最终状态围岩位移、围岩应力及支护结构内力作为评价指标,综合评价各工况施工力学响应的优劣。

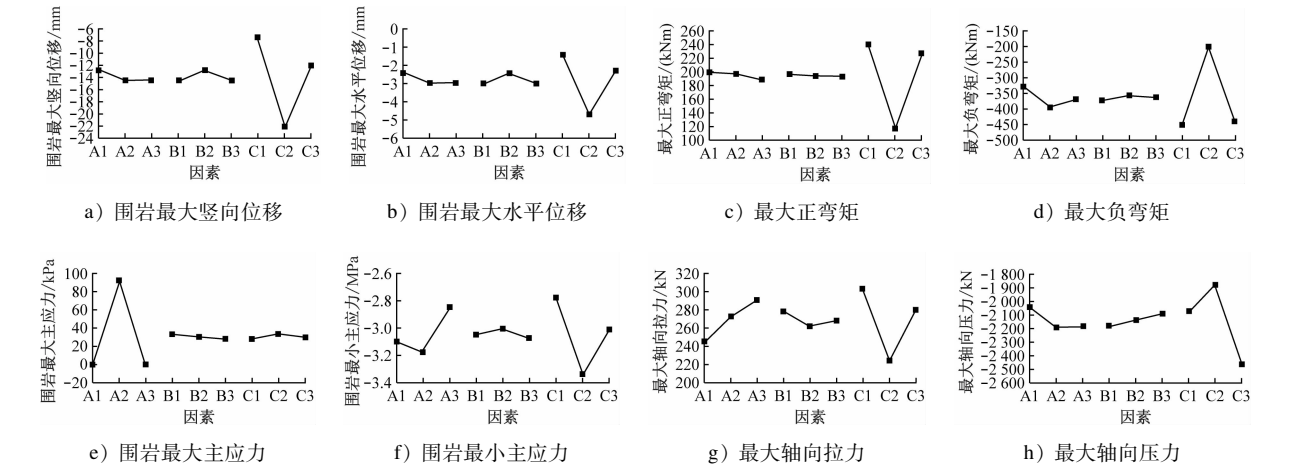


图 6 导洞合理施工方案正交试验因素与评价指标关系

Fig.6 Relationship between pilot tunnel reasonable construction scheme orthogonal experimental factors and evaluation indicators

对于围岩位移而言,围岩位移越小方案越好,因此仅从围岩位移来看最优施工方案为:A1B2C1。对于围岩应力而言,围岩最大主应力应小于 0 以保证围岩处于稳定状态;若大于 0(受拉),则量值越小越好;同时围岩最小主应力的绝对量值也是越小越好,因此仅从围岩应力来看最优施工方案为:A3B2C1。对于支护结构内力而言,支护结构内力越小越好,因此仅从支护结构内力来看最优施工方案为:A1B2C2。对于依托工程,需综合考虑围岩位移、应力和支护结构内力,以最终确定导洞最优施工方案。基于此,结合本文第 3 章中关于关键施工参数对围岩最大竖向位移影响的分析,选择 A1B2C1 作为导洞施工方案最为合适,即导洞的最优施工顺序为 3'→4→1→2→5→6,最优施工错距为 6 m,最优施工进尺为 0.5 m。因为采用这样的导洞施工方案,不仅能控制本工程对周边环境的影响,而且还可同时兼顾围岩与支护结构受力安全以及

## 4.2 正交试验结果分析

通过数值计算得出正交试验结果,并按照正交试验分析原理<sup>[9]</sup> 计算各因素每个水平试验值的平均值,并绘制其与评价指标的关系曲线,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,导洞施工顺序、施工错距和施工进尺对于围岩最大位移、围岩最小主应力、支护结构内力的影响显著性排序依次为:施工进尺>施工顺序>施工错距。而各种施工参数对于围岩最大主应力的影响显著性排序依次为:施工顺序>施工进尺>施工错距。因此,总的来说对于导洞施工效果影响最大的施工参数为施工进尺,其次为施工顺序,而影响最小的是施工错距。

对现场施工效率的要求。

## 5 优化方案现场应用效果分析

依据导洞方案优化结果,现场按照建议的导洞施工方案进行了施工。截至目前,最后开始施工的导洞 6 已施工了约 19.5 m,导洞 5 已施工了约 25.5 m。在此施工状态下,选取 DK7+852 里程处(该断面滞后于当前状态导洞 6 掌子面约 5 m,即所有导洞均已开挖通过该断面)导洞拱顶沉降实测值与导洞施工数值模拟结果进行对比分析,如图 7 所示。通过对比可知,导洞拱顶位移现场实测值与数值模拟结果具有较好的一致性,验证了数值模拟的正确性。从两者的结果都可以看出,拱顶位移基本沿隧道中线呈对称分布,导洞 1、2 的拱顶位移较大,导洞 5、6 和导洞 3、4 的拱顶位移较小,且导洞拱顶最大沉降均小于控制值 20 mm。由此可见,导洞施工优化方案在现场取得了良好的应用效果。



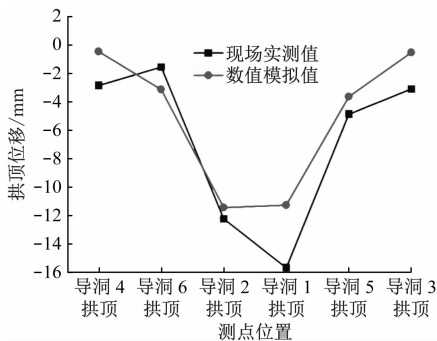


图7 DK7+852 里程处导洞拱顶位移实测值与数值模拟值对比

Fig. 7 Comparison of field-measured and numerical simulated results of guiding hole arch crown displacement at DK7 + 852 mileage

## 6 结论

1) 非对称开挖方式相较于对称开挖方式对于控制围岩位移更为有利,同时,先开挖中间导洞会导致整个施工过程中围岩位移始终处于较大值水平,不利于施工风险管控。因此,超大跨多导洞拱盖法地铁隧道导洞的施工宜遵循“先边后中”及“非对称开挖”的原则。

2) 导洞施工参数对于围岩变形、围岩最小主应力、支护结构内力的影响显著性排序依次为:施工进尺>施工顺序>施工错距;对于围岩最大主应力的影响显著性排序依次为:施工顺序>施工进尺>施工错距。因此,总体而言,在上软下硬地质条件下,对于超大跨多导洞拱盖法导洞施工力学效应影响最大的施工参数为施工进尺,其次为施工顺序,而影响最小的是施工错距。

3) 依托广州地铁 11 号线折返区段工程的导洞最优的施工顺序为 3'→4→1→2→5→6,最优的施工错距为 6 m,最优的施工进尺为 0.5 m。

## 参考文献

- [1] 冯爱军. 中国城市轨道交通 2021 年数据统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(2): 336.
- FENG Aijun. Statistics and development analysis of urban rail transit in China in 2021[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(2): 336.
- [2] 丁文娟. 采用洞桩法施工的地铁车站导洞开挖所引起的群洞

效应影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.

DING Wenjuan. A study on the multi-tunnel effect caused by pilot tunnel excavation for subway station constructed in PBA method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

- [3] LI C K. Optimization analysis of different excavation offsets in railway pilot tunnel by CRD method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(505/506): 134.
- [4] 黄俊. 乌鲁木齐地铁八楼站洞桩法群洞效应研究[D]. 兰州: 兰州交通大学,2018.
- HUANG Jun. Study on group hole effect of hole pile method in the Balou Station of Urumqi Subway[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [5] 杨忠年, 纪召启, 刘泉维. 拱盖法隧道围岩稳定性模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 85.
- YANG Zhongnian, JI Zhaoqi, LIU Quanwei. Model test on the stability of the surrounding rock of a tunnel constructed by the arch-cover method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 85.
- [6] 龚旭东. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 109.
- GONG Xudong. Deformation pattern and control of Qingdao Metro station adopting primary arch cover construction method in upper soft and lower hard stratum[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 109.
- [7] 伍振志, 傅志锋, 王静, 等. 浅埋松软地层开挖中管棚注浆法的加固机理及效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1025.
- WU Zhenzhi, FU Zhifeng, WANG Jing, et al. Study of support mechanism and effect of shedpipe grouting technology for tunneling construction in shallow-buried soft stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1025.
- [8] 张德华, 刘士海, 任少强. 基于围岩-支护特征理论的高地应力软岩隧道初期支护选型研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 139.
- ZHANG Dehua, LIU Shihai, REN Shaoqiang. Research on selection of preliminary support for tunnel in high ground-stress soft rock based on surrounding rock-support characteristic curve theory[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 139.
- [9] 谢军, 段龙, 梁金晓, 等. 隧道-土-地表建筑相互作用体系的减震分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 136.
- XIE Jun, DUAN Long, LIANG Jinxiao, et al. Analysis of the shock absorption of tunnel-soil-surface building interaction system [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 136.

(收稿日期:2022-12-15)