

地铁大跨度隧道垂直挑顶施工中的围岩力学分析

陈佳玮^{1,2} 李元海² 刘毅³

(1. 重庆电力高等专科学校, 400053, 重庆; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 221116, 徐州; 3. 中交第二航务工程局有限公司技术中心, 430040, 武汉//第一作者, 工程师)

摘要 基于深圳地铁2号线新秀站—莲塘口岸站区间隧道工程,提出了一种适用于软弱围岩大跨度隧道垂直挑顶开挖的施工方法,并采用FLAC3D软件对该挑顶施工全过程进行模拟计算,对施工过程中的围岩进行了力学分析,以解决交叉段隧道挑顶开挖过程中围岩变形控制的难题。模拟计算结果表明:挑顶开挖主要影响了拱顶处的围岩应力重分布,斜井开挖使得正洞相邻拱腰处产生压应力集中,正洞开挖顺序造成斜井拱腰处应力分布不对称;落斜井坡道和正洞下台阶时斜井拱腰水平收敛发生突变,这对隧道拱腰应力分布产生了较大影响,应作为施工的重点关注区域;挑顶开挖使正洞和斜井拱顶的围岩塑性区贯通,在落斜井坡道和正洞下台阶时该塑性区进一步扩展,此区段施工时应加强支护,并减缓施工进度。

关键词 地铁; 大跨度隧道; 垂直挑顶; FLAC3D 软件; 围岩变形

中图分类号 U456.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.039

Analysis of Surrounding Rock Mechanical Behavior of Metro Large-Span Tunnel Vertical Propping Construction

CHEN Jiawei, LI Yuanhai, LIU Yi

Abstract Based on the tunnel project between Xinxu Station and Liantang Port Station of Shenzhen Metro Line 2, a construction technology suitable for vertical propping excavation of weak surrounding rock large-span tunnels is proposed, and FLAC3D software is used to simulate and calculate the whole propping process construction, and the mechanical behavior of the surrounding rock during the construction process is analyzed to solve the problem of surrounding rock deformation control during the excavation of the cross-section tunnel. Simulation results show that the propping excavation mainly affects the gravity distribution of the surrounding rock stress at the vault, and the excavation of the inclined shaft induces compressive stress concentration at the adjacent arch waist of the positive hole. The order of the excavation of the positive hole causes asymmetrical stress distribution at the arch of the inclined shaft.

The vertical convergence of inclined shaft arch undergoes sudden change when falling shaft slope and positive hole takes lower step, making great impact on the stress distribution of tunnel arch, which should be considered as the focus area of construction. The propping excavation makes the surrounding rock plastic area of the positive hole and inclined well arch penetrate, and when the inclined shaft slope and positive hole takes lower step. The plastic zone is further expanded and should be supported, and construction speed should slow down.

Key words metro; large-span tunnel; vertical propping construction; FLAC3D software; surrounding rock deformation

First-author's address Chongqing Electric Power College, 400053, Chongqing, China

0 引言

地铁长大隧道建设受城市复杂的地面、地下环境限制,往往不具备明挖或暗挖竖井的条件,因此,通常采用向区间隧道中部开挖斜井挑顶进洞、从正洞向区间两端开挖的施工方法,以增加工作面、满足施工工期要求。由于斜井与正洞交叉地段的围岩受力情况复杂、安全隐患大,二者的转换施工往往是工程的重点和难点^[1]。现有研究主要对斜井进洞的施工方法、围岩变形及支护结构响应等方面^[2-4]进行研究,如文献[2]介绍了郑西铁路客运专线函谷关隧道较早采用垂直挑顶的施工工艺等。此外,部分学者利用数值模拟,探讨了挑顶隧道的围岩应力及位移情况,为设计和施工提供依据^[5-7],如文献[5]通过对郑西客运专线大断面隧道挑顶施工进行数值分析,认为台阶上的支护结构强度和密度直接影响隧道围岩位移分布。

上述研究大多针对公路和铁路隧道,而针对城市复杂施工条件下,对环境影响和变形控制要求较高的地铁隧道斜井进洞的研究较少。本文以深圳地铁2号线新秀站—莲塘口岸站区间(以下简称

“新莲区间”)隧道斜井进正洞段为研究对象,提出了适用于地铁工程软弱围岩中大跨度隧道垂直挑顶开挖的施工技术,并采用 FLAC3D 软件对该区间的挑顶施工全过程进行模拟计算和分析,验证该施工方法的合理性。

1 工程简介

新莲区间隧道长度为 491.05 m,采用矿山法施工,断面支护采用锚网喷复合式衬砌。斜井与正洞的衬砌断面如图 1 所示,支护措施如表 1 所示。

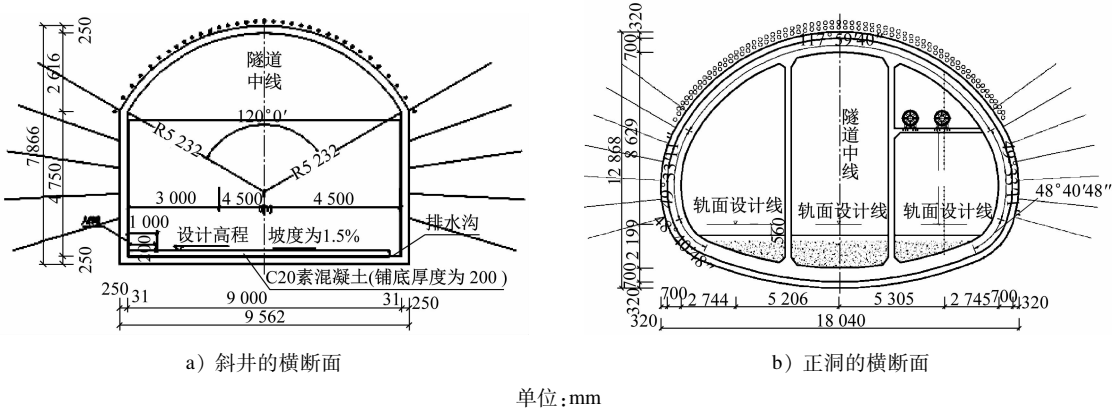


图 1 新莲区间隧道衬砌横断面图
Fig. 1 Cross-sectional view of Xinlian interval tunnel lining

表 1 新莲区间隧道断面支护措施及参数

Tab.1 Section support measures and parameters of Xinlian interval tunnel				隧道支护措施及参数
施工区域	宽度/m	高度/m	施工方法	
斜井	9.56	7.87	台阶法	① 在拱部 120°区域内布置单层 $\Phi 42$ mm \times 3.5 m 超前小导管,导管环向间距 0.3 m、纵向间距 1.5 m;② 在拱腰处设置 $\Phi 22$ mm 锚杆,锚杆长 3.0 m,环向、纵向间距均为 1.0 m,呈梅花形布局;③ 布置单层 $\Phi 8$ mm 钢筋网,钢筋的环向、纵向间距均为 15 cm;④ 设置格栅钢架,钢架的纵向间距 1.0 m;⑤ 喷射 25 cm 厚的 C25 混凝土
正洞	18.04	12.87	双侧壁导坑法	① 在拱部 180°区域内布置双排 $\Phi 42$ mm \times 4.0 m 超前小导管,导管环向间距 0.3 m,纵向间距 2.0 m;② 在拱腰处设置 $\Phi 22$ mm 锚杆,锚杆长 4.0 m,环向间距 0.8 m,纵向间距 0.5 m;③ 布置双层 $\Phi 10$ mm 钢筋网,钢筋的环向、纵向间距均为 10 cm;④ 设置工 25 型钢架,钢架的纵向间距 0.5 m;⑤ 喷射 32 cm 厚的 C25 混凝土;⑥ 施作防水层;⑦ 浇筑面层厚 70 cm 的 C35 抗渗混凝土,抗渗等级为 P12

新莲区间隧道处于丘陵地带,地形起伏交错,地面高程为 20 ~ 70 m,隧道埋深为 18 ~ 87 m。该区间穿过的地层多为中、微风化石英砂岩,岩石风化、破碎,节理、裂隙发育,地下水主要为基岩裂隙渗水。

该隧道在线路右侧设置了 1 处临时斜井,采用矿山法施工。斜井穿过强、中风化岩地层进入正洞隧道时,斜井断面和正洞断面的尺寸差距较大,施工难度显著增加。

2 施工方法

针对上述工程的施工难点,本文提出大跨度隧道斜井进正洞的施工方法,包括以下施工步骤:

1) 对交叉口加强支护。该工程的交叉口断面如图 2 a) 所示,在斜井距正洞 7.0 m 的区段内加强

支护,交叉口处施工超前支护。正洞和斜井加强环最外侧之间采用仰拱钢架焊接,将正洞仰拱衬砌钢筋与斜井仰拱衬砌中的预埋钢筋连接,以确保正洞和斜井交叉口处共同受力。

2) 采用导洞方式挑顶进洞。挑顶开挖至正洞拱顶,水平开挖至正洞左拱腰,使正洞拱架有稳定基础。小导洞断面(见图 2 b))的宽度为 3.5 m、高度为 5.0 ~ 6.5 m,在导洞顶部设置双排超前小导管,采用全断面注浆对掌子面前方的围岩进行加固。

3) 安装正洞拱架。导洞施工完毕后,在导洞内安装正线拱架并进行初期支护,待支护达到强度后再进行正洞开挖。

4) 正洞施工。按双侧壁导洞法施工正线隧道。先施工小里程段,后施工大里程段,在交叉口处往

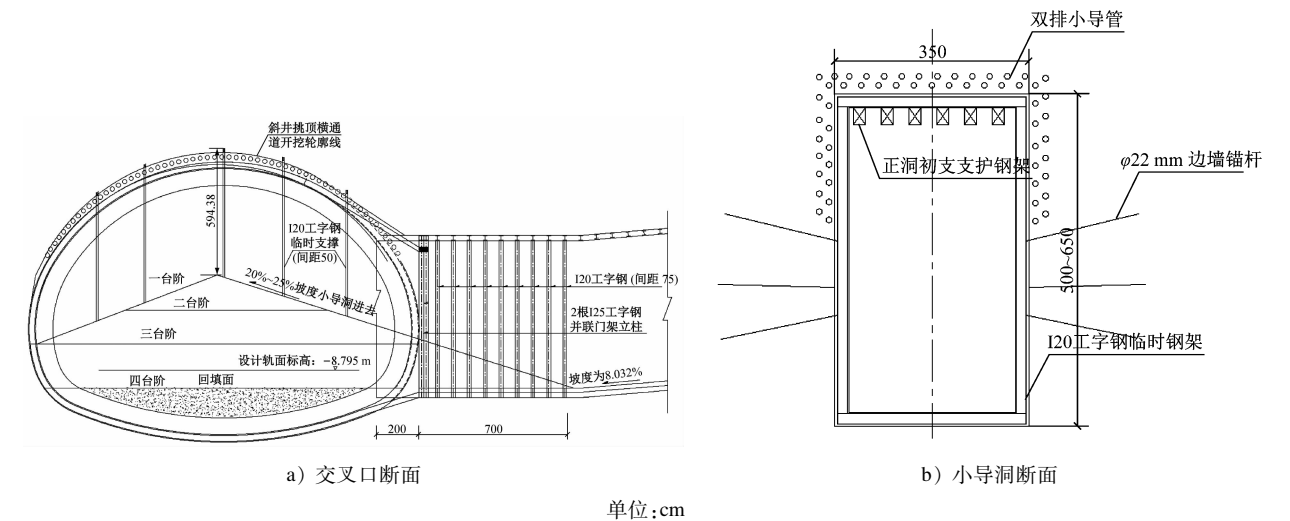


图2 交叉口、小导洞及正洞断面示意图

Fig. 2 Diagram of intersection, small pilot tunnel and main tunnel arch frame

大里程方向施工 40.0 m 后,再进行两端同步开挖。

在斜井与正洞交叉口处设置加强支护,末端设置门架,纵向设置连接板,可增强交叉口处结构的稳定性,有效解决斜井及正线断面尺寸差距大的问题。但该施工方案对围岩扰动次数较多,交叉区域应力情况复杂,挑顶施工存在一定风险。为此,需要进一步分析该施工过程中围岩的力学特征,以验证该施工方法的安全性与有效性。

3 数值分析模型

3.1 建立数值模型

依据新莲区间的工程实际,本文建立了斜井进正洞挑顶施工的三维计算模型,如图 3 所示。

3.2 力学参数

隧道围岩采用弹塑性材料模型,其计算参数如表 2 所示,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 准则。衬砌利用 Shell 单元模拟,锚杆采用 Cable 单元模拟。

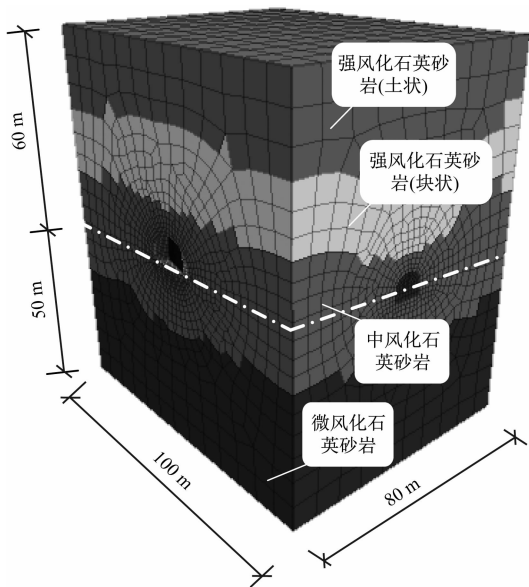


图3 新莲区间斜井进正洞挑顶施工的数值模型

Fig. 3 Numerical model of inclined shaft into the main hole propping construction in Xinlian interval tunnel

表 2 数值模型采用的岩层计算参数

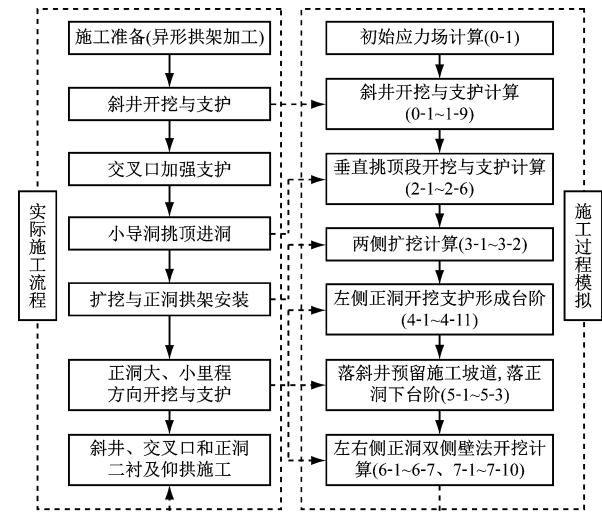
Tab. 2 Calculation parameters of the rock formation used in the numerical model						
地层名称	重度/(kN/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	平均厚度/m
中风化石英砂岩	25.5	2.75	0.24	50	55	29
微风化石英砂岩	26.5	2.85	0.23	54	70	
强风化石英砂岩(土状)	19.0	0.12	0.27	40	29	22
强风化石英砂岩(块状)	21.5	0.27	0.26	45	45	20

3.3 施工过程模拟与监测布置

斜井进正洞挑顶施工的实际施工流程及与之对应的模拟计算施工步如图 4 所示。在交叉段布置了 8 个监测点,选取距交叉段中线处左侧 2 m 处作

为正洞监测断面(以下简称“测面”),并在测面上布置测点 4、测点 5、测点 6。如图 5 所示,测点 1 为斜井拱顶测点,测点 4 和测点 7 为正洞拱顶测点,测点 2 和测点 3 为斜井拱腰测点,测点 5、测点 6 和测点 8

为拱腰测点。



注:施工过程中模拟中的数字用以表述具体的模拟计算施工步。
图4 斜井进正洞挑顶的施工流程及对应的模拟计算步
Fig. 4 Process of inclined shaft into positive hole propping construction and corresponding simulation calculation step

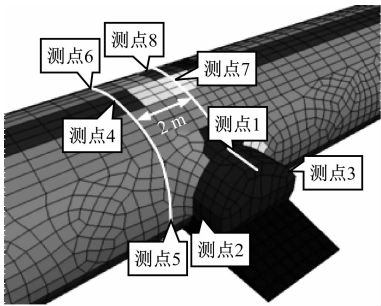


图5 交叉段内测点布置图

Fig. 5 Layout of the measurement points in cross section

4 模拟计算结果分析

4.1 交叉段的围岩应力变化情况

图6为各测点最大主应力变化情况,其中:取拉应力为正,压应力为负,正洞右侧为靠近斜井一侧。由图6可知:①正洞左右拱腰处、斜井左右拱腰处测点的最大主应力呈现非对称分布特点。正洞开挖后,围岩的最大主应力差值持续扩大,在正洞右拱腰处出现明显的应力集中,且正洞后期的开挖次序对斜井的应力变化产生影响;②落斜井坡道和挑顶段下台阶的施工使得斜井拱腰处及正洞右拱腰处的应力突然增大,这说明交叉段分台阶开挖、预留台阶的施工措施可以改善围岩的应力分布,在落斜井坡道和挑顶段下台阶的施工时应予以重点

关注并加强监测;③拱顶开挖后,拱顶处的压应力突降,有产生拉应力的趋势,而之后的施工对拱顶应力分布影响有限,需要在拱顶施工前加固该处围岩。

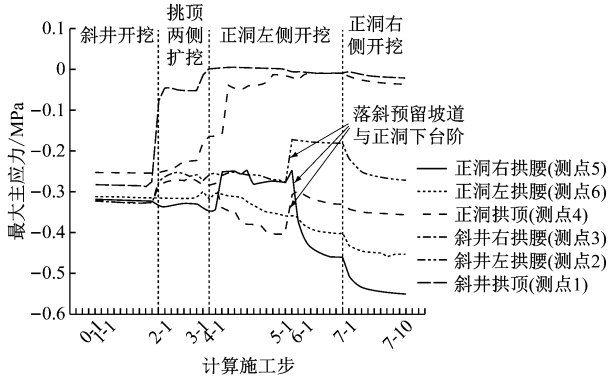


图6 交叉段围岩最大主应力变化曲线
Fig. 6 Maximum principal stress change curve of intersecting section surrounding rock

图7为交叉段围岩应力影响范围示意图。由图7可知,挑顶后交叉段围岩应力松弛范围明显减少,这说明小导洞挑顶对围岩控制效果较佳。

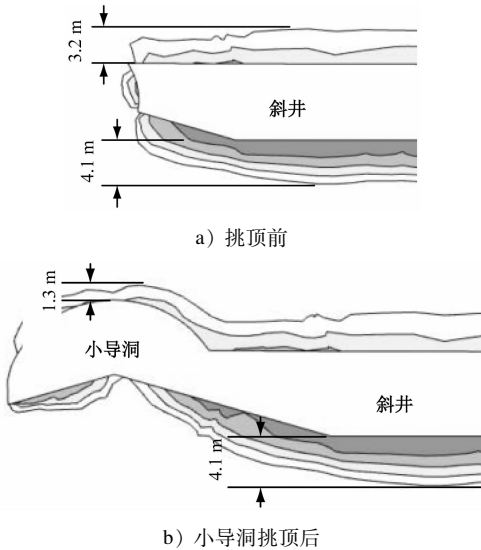


图7 交叉段围岩应力影响范围示意图
Fig. 7 Influence range of intersecting section surrounding rock stress

4.2 交叉段的围岩位移变化情况

4.2.1 拱顶沉降

图8为交叉段拱顶3个测点竖向位移随计算施工步的变化情况,其中,负值表示发生了向下方向的位移。从图8可知:在计算步1-8~2-1和2-6~3-2中,拱顶各测点的沉降量快速增加,其增量分别占总沉降量的35.1%和21.1%,这说明斜井开挖和

两侧扩挖施工对斜井拱顶沉降的影响最大;在计算施工步 2-1~3-2 中,挑顶段拱顶的沉降量在总沉降量中的占比为 44.1%,这说明挑顶和两侧扩挖施工对挑顶段拱顶沉降的影响最大。随着正洞左右侧开挖,各测点拱顶沉降略增并趋于平缓。

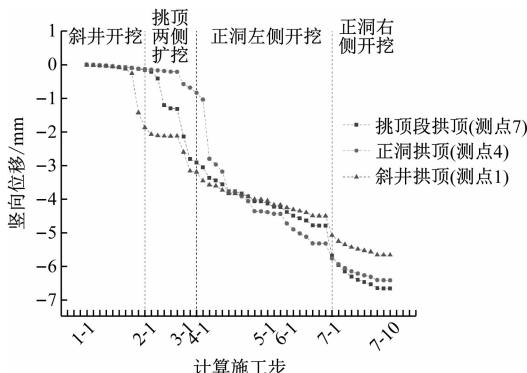


图8 交叉段拱顶沉降变化曲线

Fig.8 Variation curve of vault settlement in intersecting section

4.2.2 拱腰水平位移

图9为测面上拱腰处各测点的水平位移情况,其中,水平位移取正值表示拱腰向内侧变形。由图9可知:①在正洞两侧扩挖和正洞左右侧开挖前期,交叉段正洞左拱腰(测点8)的水平位移均明显增大,施工时应对该处加强支护和监测;②正洞左右侧前期开挖对正洞测面的拱腰水平收敛(测点6的水平位移减去测点5的水平位移)的影响较大,正洞右侧后续开挖对测面水平位移的影响较小,且在落正洞下台阶时正洞测面的拱腰处水平收敛突然减小;③斜井水平收敛(测点2的是水平位移减去测点3的水平位移)在落预留坡道和落正洞下台阶时突然反向增加,水平方向的变形由向外微扩变

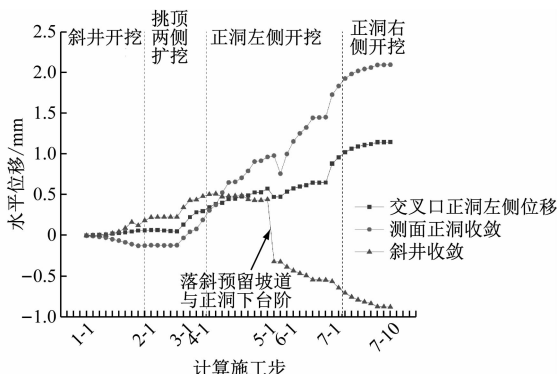


图9 测面上拱腰处各测点的水平位移变化曲线

Fig.9 Horizontal displacement change curve of each measurement point on arched waist surface

为向内收敛。对应图6的应力分析结果,交叉处的斜井(测点2、测点3)产生明显的应力集中,建议在对该区域进行施工时应重点关注,减缓施工速度,并加强支护。

4.3 围岩塑性区变形情况分析

分析斜井进洞挑顶施工过程围岩的变形情况,可得到以下结论:在挑顶施工过程中,掌子面围岩受剪切破坏严重,且斜井拱顶围岩和挑顶区域正洞拱顶围岩的塑性区基本贯通,施工时需重点关注。

5 结语

本文以深圳地铁2号线新莲区间隧道垂直挑顶施工为依托,通过数值模拟,对地铁大跨度隧道垂直挑顶施工中的围岩进行了力学综合分析。在该工程的垂直挑顶实际施工中,耗时约45d完成了斜井进洞,取得了较好的变形控制效果,保证了施工安全。基于该工程的施工经验,本文提出大跨度隧道垂直挑顶开挖施工方法,并给出施工应关注的重点区域及改进建议:

1) 挑顶开挖施工对正洞拱顶处和斜井拱顶处的围岩应力影响较大,右侧斜井开挖施工使正洞右拱腰压应力集中,正洞开挖顺序造成斜井拱腰处应力分布不对称。挑顶区域分台阶开挖,可有效改善该区域的围岩应力分布。

2) 落斜井坡道和正洞下台阶时斜井拱腰水平收敛发生突变,应作为施工的关注重点。

3) 挑顶开挖导致正洞和斜井拱顶处围岩的塑性区贯通,在落斜井坡道和正洞下台阶时,该塑性区进一步扩展,存在围岩垮塌风险。该区段应作为施工的关键部位,需加强支护,并减缓施工速度,以确保施工安全。

参考文献

- [1] 史振宇. 包家山隧道大断面斜井进正洞挑顶技术[J]. 隧道建设, 2010(3):313.
SHI Zhenyu. Technology of roof ripping between large cross-sectional inclined shaft and main tunnel: case study on Baojiashan Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2010(3):313.
- [2] 魏彪平, 刘阳. 垂直挑顶进入正洞工法研究[J]. 铁道标准设计, 2007(增刊1):151.
WEI Biaoping, LIU Yang. Study on the construction method of vertical propping into the main tunnel[J]. Railway Standard Design, 2007(S1):151.

(下转第202页)

4 结论

1) 较之完整花岗岩层,含破碎岩的中微风化花岗岩层透水率偏高;恒大中心项目中,破碎花岗岩层透水率与中风化花岗岩面以下深度的 90% 预测区间上限拟合曲线为 $q = 11.1 - 0.16 d$ 。

2) 经注浆试验及工程实践验证,破碎花岗岩层采用本文注浆方法及设计参数,施工后注浆帷幕透水率可控制在 1.0 Lu 以下;注浆帷幕上段为注浆施工、检测的重点位置。

3) 经恒大中心项目共计 335 个注浆段数据统计,该项目的破碎花岗岩层中约 75.9% 的注浆段注浆量小于 100 kg/m,约 12.4% 的注浆段注浆量大于 500 kg/m。破碎花岗岩层注浆量随岩层透水率增大而上升,岩层透水率-注浆量关系一阶回归曲线可表示为 $Q = -83.19 + 136.79 q$,中风化岩面以下 0 ~ 20 m 范围内,超越概率 10% 的注浆量控制值可取 1 381 kg/m。

参考文献

[1] 张民庆,汪玉华,郭小华. 以太广场沉降分析与复合式截水

(上接第 191 页)

LI Tao, LIU Bo, CHU Weihong, et al. Measurement and analysis on retaining structure deformation for super deep and big foundation pits by synchronous cross-excavation of the bottom-up and top-down construction method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018(14): 829.

[2] 刘波. 上海陆家嘴地区超深大基坑邻近地层变形的实测分析 [J]. 岩土工程学报, 2018(40): 1950.

LIU Bo. Measurement and analysis of deformation of adjacent strata super deep and large foundation pits in Lujiazui District of Shanghai [J]. China Civil Engineering Journal, 2018(40): 1950.

(上接第 196 页)

[3] 黎冬来. 横洞进正洞挑顶技术在新关坡隧道施工中的应用 [J]. 铁道建筑技术, 2011(增刊 1): 140.

LI Donglai. Application of adit into main tunnel propping technology in Xinguanpo tunnel construction [J]. Railway Construction Technology, 2011(S1): 140.

[4] 宋志荣. 二郎山特长深埋隧道通风斜井反井法施工技术 [J]. 现代隧道技术, 2017(2): 202.

SONG Zhirong. Raise construction techniques for inclined ventilation shaft of the long, deep-buried Erlangshan tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017(2): 202.

[5] 鲁建邦. 大断面隧道挑顶施工三维数值计算分析 [J]. 铁道标准设计, 2012(1): 77.

LU Jianbang. Three-dimensional numerical analysis of roof-ripping construction of the large section tunnel [J]. Railway Con-

struction Technology, 2012(1): 77.

ZHANG Mingqing, WANG Yuhua, GUO Xiaohua. Subsidence analysis and construction technique of complex cut water curtain construction of Yitai Plaza [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(15): 2647.

[2] 董书宁, 柳昭星, 郑士田, 等. 基于岩体宏观细观特征的大型帷幕注浆保水开采技术及应用 [J]. 煤炭学报, 2020(3): 1137.

DONG Shuning, LIU Zhaoxing, ZHENG Shitian, et al. Technology and application of large curtain grouting water conservation mining based on macroscopic and mesoscopic characteristics of rock mass [J]. Journal of China Coal Society, 2020(3): 1137.

[3] 王强, 冯志强, 王理想, 等. 裂隙岩体注浆扩散范围及注浆量数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2016(10): 2588.

WANG Qiang, FENG Zhiqiang, WANG Lixiang, et al. Numerical analysis of grouting radius and grout quantity in fractured rock mass [J]. Journal of China Coal Society, 2016(10): 2588.

[4] 李召峰, 李术才, 刘人太, 等. 富水破碎岩体注浆加固实验与机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017(1): 198.

LI Zhao Feng, LI Shucai, LIU Rentai, et al. Grouting reinforcement experiment for water-rich broken rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017(1): 198.

(收稿日期: 2021-10-27)

[3] 黄沛, 陈华, 张倩. 大型基坑分区开挖对邻近地铁的影响 [J]. 工程勘察, 2015(8): 15.

HUANG Pei, CHEN Hua, ZHANG Qian. Impact of large scale partitioned excavation on nearby metro [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015(8): 15.

[4] 贾坚, 谢小林. 上海软土地区深大基坑的卸荷变形及控制 [J]. 岩土工程学报, 2008(增刊 1): 376.

JIA Jian, XIE Xiaolin. Deformation and control measures of deep and large foundation pits in Shanghai soft clay area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(S1): 376.

(收稿日期: 2021-12-08)

struction Technology, 2012(1): 77.

[6] 章剑, 高波, 周佳媚, 等. 软弱围岩斜井转正洞工法动态施工力学行为分析 [J]. 现代隧道技术, 2013(2): 46.

ZHANG Jian, GAO Bo, ZHOU Jiamei, et al. Analysis of dynamic mechanical behavior during construction from an inclined shaft to the main tunnel in soft surrounding rock [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013(2): 46.

[7] 罗彦斌, 陈建勋, 王梦恕. 隧道斜交横通道施工对主隧道衬砌结构的影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010(增刊 2): 3792.

LUO Yanbin, CHEN Jianxun, WANG Mengshu. Study of influence of skew horizontal adit tunnel construction on main tunnel lining structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010(S2): 3792.

(收稿日期: 2019-04-03)