

紧邻盾构隧道超深基坑注浆止水帷幕的设计与施工参数研究*

庞小朝

(铁科院(深圳)研究设计院有限公司, 518041, 深圳//正高级工程师)

摘要 周边工程活动导致地下水位下降是引起地铁盾构隧道变形超标和破坏的主因之一,止水措施对紧邻地铁隧道超深基坑项目施工极为关键。梳理了深圳恒大中心超深基坑项目花岗岩破碎带注浆帷幕工程原位测试、帷幕注浆施工资料,通过对原位数据分析,研究了破碎花岗岩地层透水率-注浆量的统计关系,探讨了注浆止水帷幕透水率设计值、注浆量等关键指标。研究表明:破碎花岗岩地层注浆量随岩层透水率增大而线性增加;采取适当的注浆工艺,破碎花岗岩地层注浆帷幕透水率可控制在1.0 Lu以下,实测12.4%的注浆段注浆量大于500 kg/m,中风化岩面以下0~20 m范围内,10%超越概率的注浆量控制值可取1 381 kg/m。

关键词 超深基坑;破碎花岗岩地层;注浆帷幕;透水率;注浆量;地铁隧道保护

中图分类号 TU472.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.040

Study on Design and Construction Parameters of Grouting Waterproof Curtain for Ultra-deep Foundation Pit Adjacent to Shield Tunnel

PANG Xiaochao

Abstract The descending of underground water level caused by surrounding engineering activities is one of the main reasons for the deformation and damage of metro shield tunnel, and waterproof measures are key to ultra-deep foundation pit project adjacent to shield tunnel. In-situ test, curtain design and construction of grouting curtain in fractured granite layer of Shenzhen Evergrande center project are systematically sorted. Through analysis of original position data, the statistical relation between fractured granite stratum permeability and grouting volume is studied, and key values including the grouting waterproof curtain permeability design value and grouting volume are discussed. Research result shows that: the grouting volume of fractured granite layer increases with permeability. With appropriate

grouting technology, the permeability of grouting curtain of broken granite layer can be controlled below 1.0 Lu. As a result, the grouting volume of 12.4% grouting section measured is more than 500 kg/m, and the grouting volume of 10% exceeding probability within 0~20 m below moderately weathered rock surface is 1 381 kg/m.

Key words ultra-deep foundation pit; fractured granite layer; grouting curtain; permeability; grouting volume; metro tunnel protection

Author's address China Academy of Railway Sciences Shenzhen Research and Design Institute, 518041, Shenzhen, China

作为提高岩土体抗渗性能和强度的主要技术手段,注浆技术被广泛应用于地下工程建设领域。广州地铁越秀公园站基坑工程中^[1]人工挖孔桩施工期间出现大量地下水渗入,威胁邻近已建地下室安全,通过在破碎花岗岩层设置注浆帷幕实现了工程的顺利推进。某灰岩地层矿区,通过对注浆帷幕关键参数的研究^[2],实现了该项目矿产资源安全回采和含水层水资源保护的双重目的。

针对注浆浆液在岩土体中的扩散规律、注浆对岩土体性能的影响、注浆施工方法与工艺等方面问题,国内外学者开展了大量研究。文献[2]针对裂隙开度不同岩体,提出了注浆充填方法,并基于原位试验检验了注浆帷幕的截流保水能力。文献[3]分析了岩层中浆液扩散的影响因素,提出了扩散范围与注浆量的预测方法。文献[4]自主研发了水泥基复合注浆材料(CGM),并研究了其加固机理。

在城市建成区,减少施工对周边环境的影响尤为重要,基坑中注浆帷幕相关研究和应用案例逐渐增加。注浆帷幕的止水效果与地层特性、注浆工艺等因素息息相关,设计与施工参数的选取十分关

* 中国铁道科学研究院基金项目(2019YJ181)

键。然而,目前既有文献中针对花岗岩破碎带地层近地铁超深基坑的注浆帷幕关键参数、施工工艺和实测数据鲜见报道,本文依托深圳恒大中心超深基坑项目(以下简称“恒大中心项目”)的注浆止水帷幕施工全过程,梳理破碎花岗岩层原位试验和帷幕设计施工经验;通过实测数据分析,研究破碎花岗岩地层透水率-注浆量关系,探讨帷幕透水率设计值、注浆量等关键指标确定方法,以供类似项目参考。

1 恒大中心项目概况

恒大中心项目是目前深圳地区设计与施工难度最大的基坑工程项目之一。其基坑开挖面积为8 760.00 m²(113.00 m长×73.00 m宽),开挖深度为38.95~42.35 m。项目邻近的地铁盾构隧道底部埋深为18.00 m~22.00 m,隧道外边缘距基坑围护结构最近距离仅3.00 m。场地内下伏的粗粒花岗岩层存在压扭型破碎带,构造裂隙极发育,场地水位埋深为0.20~3.40 m。项目基坑围护结构、盾构隧道、破碎带、注浆帷幕平面关系如图1所示。

为了控制该工程基坑施工期间邻近地铁隧道的变形,必须稳定基坑外侧地下水位,控制基坑开挖导致的地下水绕渗和坑底涌水,围护结构底部和坑底注浆帷幕已成为该项目成功推进的关键。破碎带、注浆帷幕的断面布置如图2所示。注浆止水帷幕采用42.5级普通硅酸盐水泥净浆,其设计参数见表1。

表1 注浆止水帷幕设计参数

Tab.1 Design parameter of grouting waterproof curtain		
项目	基坑周边墙下帷幕	基坑内部封底帷幕
布置方式	沿基坑内侧梅花形布置3排,注浆点的中心距为2.0 m×1.5 m	梅花形布置于推定破碎带范围,注浆点的中心距为2.0 m×2.0 m
起注位置	中风化花岗岩层顶面	中风化岩层顶面
注浆段长度	地铁侧为30.0 m;破碎带端头为40.0 m;其他处为20.0 m	10.0 m
搭接长度	与相邻孔搭接不少于6.0 m,与地下连续墙搭接不少于2.0 m	与相邻孔不少于6.0 m,与地下连续墙搭接不少于2.0 m
合格标准	帷幕透水率小于1.0 Lu,注浆段最上段、地下连续墙与基岩接触段合格率应达到100%	帷幕透水率小于1.0 Lu,注浆段最上段、地下连续墙与基岩接触段合格率应达到100%

2 帷幕设计关键参数

2.1 破碎花岗岩地层实测透水率

恒大中心项目的注浆帷幕设计前,为掌握场地透水情况,对场地内的中微风化花岗岩层进行了大规模压水试验,选取场地内16个代表性位置进行压

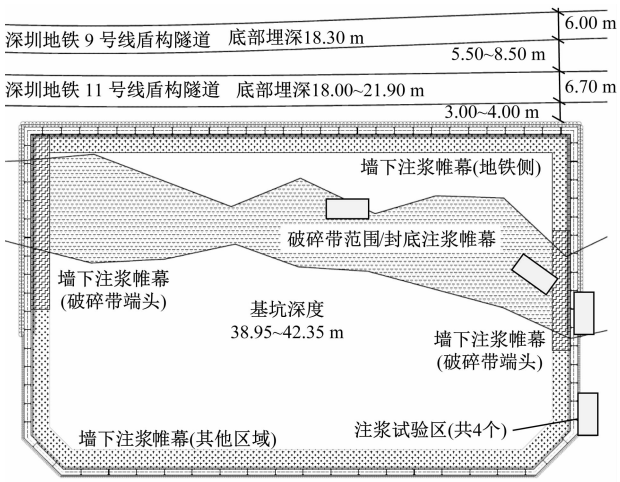


图1 基坑注浆帷幕、盾构隧道、破碎带平面关系图
Fig.1 Relationship of grouting curtain, shield tunnel and fracture zone

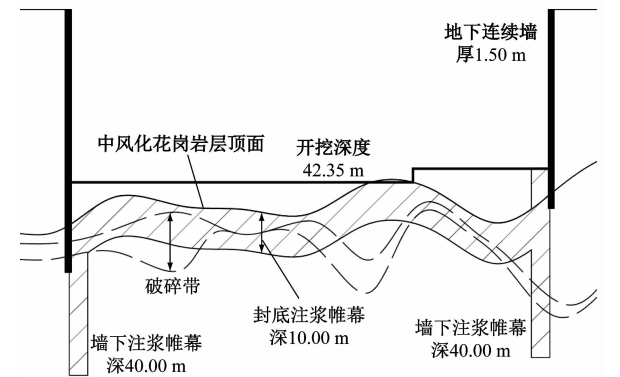


图2 破碎带、注浆帷幕断面关系图
Fig.2 Section arrangement of fracture zone and grouting curtain

水试验钻孔,各孔每5~10 m设置一个试验段,共计126个试验段;非破碎带区5孔,合计21个压水试验段;破碎带区11孔,合计105个压水试验段。试验得到花岗岩层破碎带区和非破碎带区的透水率占比情况如表2所示,压水试验的主要结果如图3所示。

表2 恒大中心项目花岗岩层透水率的占比情况

Tab.2 Proportion of permeability of granite layer in Evergrande Center Project

试验区	透水率区间值占比/%			
	透水率小于等于 1.0 Lu	透水率大于 1.0 Lu 且小于等于 5.0 Lu	透水率大于 5.0 Lu 且小于等于 10.0 Lu	透水率大于 10.0 Lu
破碎带	24	59	13	4
非破碎带	100	0	0	0

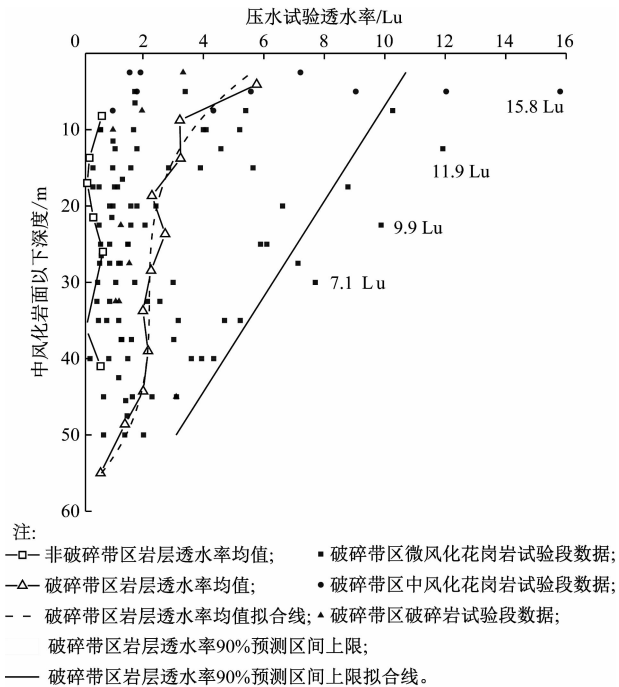


图3 压水试验的主要结果

Fig.3 Main result of water pressure test

由表2和图3可知,该项目中微风化花岗岩层的实测透水率具有如下特征:

破碎带区以弱透水层为主,实测最大透水率15.8 Lu;非破碎带区以微透水层为主,实测透水率小于1.0 Lu。破碎带区的岩层透水率明显高于非破碎带区,破碎带区中风化岩及浅层微风化岩的透水率最高。随着深度加深,岩层透水率均值呈逐渐下降趋势。因此,靠近中风化岩面的注浆段上段应作为帷幕注浆的重点区段。破碎带区岩层透水率均值与中风化岩面以下深度关系拟合结果如式(1):

$$q = 6.530\,0 - 0.399\,0\,d + 0.012\,4\,d^2 - 0.012\,8 \times 10^{-2}\,d^3$$

(1)

式中:

d ——距中风化岩层顶面的竖向距离,m;

q ——透水率,Lu。

本文采用90%预测区间上限来估计破碎花岗

岩地层透水率的概率分布。如图3所示,得到破碎带区岩层透水率90%预测区间上限拟合线值为:

$$q = 11.1 - 0.16\,d$$

(2)

经统计,92.4%实测透水率小于该拟合线值,即小于11.1 Lu。

2.2 帷幕设计关键参数

为确定基坑注浆止水帷幕的深度、布置形式及帷幕透水率,本文采用Plaxis 3D软件建立三维有限元渗流计算分析模型,用以计算该基坑开挖期间在不同帷幕设置条件下隧道侧的地下水下降深度和渗流速度,如图4所示。

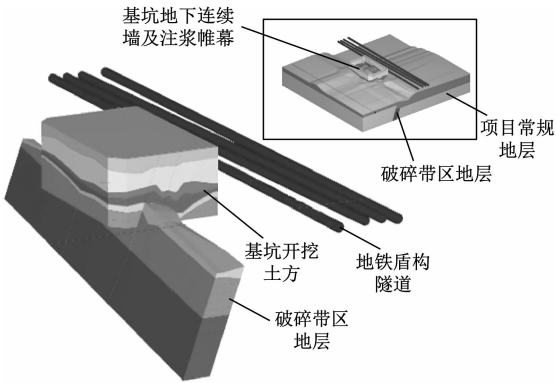


图4 Plaxis 3d 软件计算模型

Fig.4 Calculation model of Plaxis 3d

计算时,岩层透水率取90%预测区间上限透水率,边界条件为定水头边界,水头高度跟场地地下水水位相同。计算假定如下:岩体中水流动符合达西定律,同一地层为均一、各向同性材料,初始地下水位以下各岩土层均为饱和无压含水层。

根据深圳地铁运营主管部门的要求,该基坑施工期间隧道周边水位下降深度控制值为6 m。本文设计了9个方案,封底帷幕注浆深度分别为10 m、20 m和30 m,基坑周边墙下帷幕注浆深度分别为10 m、20 m和30 m。在帷幕透水率为1.0 Lu的情况下,经比选计算,该基坑帷幕设计关键参数的计算结果如图5所示。

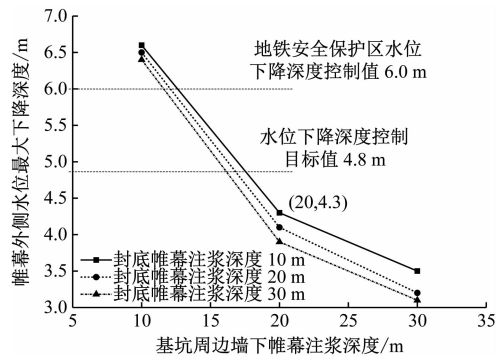


图5 基坑注浆帷幕关键参数计算结果

Fig. 5 Calculation results of key parameters of foundation pit grouting curtain

由图5可见:该基坑帷幕外侧水位下降深度受墙下帷幕注浆深度的影响较大,受封底帷幕厚度的影响并不显著。当帷幕透水率为1.0 Lu时,封底帷幕注浆深度10 m、墙下帷幕注浆深度20 m,基坑开挖导致帷幕外侧水位下降深度为4.3 m,小于水位降深控制目标值(4.8 m),且相对其他帷幕深度组合经济合理,将以上参数选取为帷幕透水率设计值。

2.3 原位注浆试验验证

为论证注浆止水帷幕设计参数的科学性及施工工艺可行性,本文在破碎带区选取3个试验区,在非破碎带区选取1个试验区,对该项目中风化花岗岩层顶面至以下20~30 m范围进行注浆帷幕施工,并在注浆前后对试验区进行压水试验。试验区的平面布置如图1所示。

注浆施工采用分段注浆、孔口封闭、孔内循环、自上而下的施工工艺,每个注浆段3:1、2:1、1:1、0.8:1.0、0.5:1.0 五级灰水比依次进行注浆,浆液由稀至浓逐级变换。止水帷幕注浆段的段长和注浆压力如表3所示。注浆过程中,单个注浆段的单次注浆量达到1 000 kg/m时,停浆待凝,后重复此施工流程。注浆段在设计压力下,当浆液的注入速率不大于1 L/min,继续灌注30 min即可结束注浆。

表3 止水帷幕注浆段的段长及注浆压力				
Tab.3 Length and pressure of waterproof curtain section				
项目	1 段次	2 段次	3 段次	≥4 段次
段长/m	2.0	3.0	5.0	5.0
注浆压力/MPa	0.5	1.5	2.0	3.0

经统计,注浆试验的破碎带区注浆段的最大注浆量为450.7 L/m,注浆前的透水率为0.35~12.03 Lu,注浆后的透水率为0.06~0.49 Lu。非破碎带

区注浆段的最大注浆量为98.3 L/m,明显小于破碎带区的最大注浆量。注浆前后透水率对比和统计如表4所示。

表4 注浆试验的主要结果			
Tab.4 Main result of grouting test			
状态	透水率/ Lu		
	破碎带区中风化岩层	破碎带区微风化岩层	非破碎带区微风化岩层
注浆前	3.33~12.03	0.35~11.92	0.16~0.68
注浆后	0.06~0.49	0.08~0.39	0.08~0.14

根据岩层透水性及原位注浆试验的统计结果,采用试验选用的注浆工艺进行施工,可以达到注浆帷幕透水率不大于1.0 Lu的设计要求。考虑到工程实施过程中地层不确定性、注浆质量控制复杂性等因素,止水帷幕透水率应从严把控,故将透水率的设计值确定为1.0 Lu。

3 帷幕施工关键指标

3.1 实测透水率-注浆量关系

注浆量是注浆帷幕工程质量和造价控制的重要指标,对工程造价及质量管理、工程设计研究均具有重要价值。本文选取项目破碎带区8个代表性压水试验孔,统计各孔周边3 m范围内的止水帷幕注浆孔(合计80孔,335个注浆段)注浆量,得到破碎带区注浆段的注浆量占比情况如表5所示,注浆前透水率和注浆量分布图如图6所示,均值拟合曲线如图7所示。

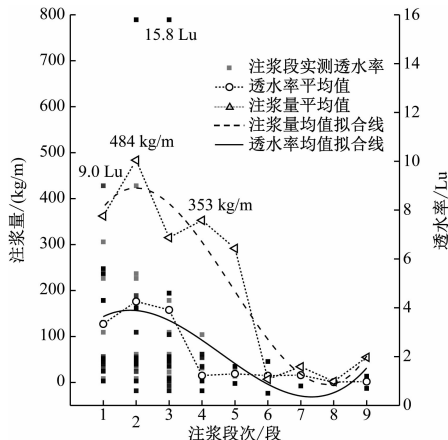


图6 各注浆段的注浆量、注浆前透水率

Tab.6 Grouting volume and permeability performance of all grouting sections

根据对注浆前透水率、帷幕施工实际注浆量的统计分析,可得到以下结果:

表 5 破碎带区注浆段的注浆量占比情况

注浆前透水率/ Lu	破碎带区注浆段不同的每延米注浆量区间值占比/%				
	<100 kg/m 时	100 ~ >500 kg/m 时	500 ~ >1 000 kg/m 时	1 000 ~ >2 000 kg/m 时	2 000 kg/m 时
<1	22.6	2.1	0.6	0.6	1.7
1 ~ 10	52.0	9.0	3.3	2.4	2.7
>10	1.2	0.6	0.6	0.6	0
合计	75.8	11.7	4.5	3.6	4.4

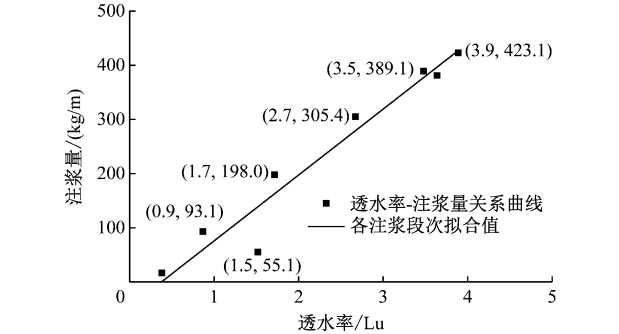


图 7 透水率-注浆量关系曲线

Tab. 7 Relationship of permeability performance and grouting volume

1) 破碎花岗岩地层中,约有 97.0% 的注浆段注浆前的注浆前透水率小于 10.0 Lu,约有 75.9% 的注浆段的注浆量小于 100 kg/m,约有 12.4% 的注浆段注浆量大于 500 kg/m。

2) 注浆前透水率大于 10.0 Lu 的注浆段中,约有 40.0% 的注浆段注浆量小于 100 kg/m,约有 20.0% 的注浆段注浆量大于 1 000 kg/m。

3) 注浆后,对破碎中微风化岩层注浆帷幕进行了压水试验检测,检测结果表明,透水率达到设计要求。

从统计结果可见,每延米注浆量随注浆段岩层平均透水率上升而增加,透水率-注浆量关系的一阶回归曲线为:

$$Q = -83.19 + 136.79 q \quad (3)$$

式中:

Q ——采用本文注浆方法的预估注浆量, kg/m。

需说明的是,式(3)中的透水率采用的是相邻位置和临近深度压水试验数据,与注浆段实际注浆前透水率间存在少量差异。

3.2 注浆量关键指标

通过压水试验确定的注浆前透水率与预估注浆量是注浆止水工程关键指标,考虑到地层的变异性,其相关关系很难用解析公式表达,采用统计和拟合方法给出近似公式供相关工程参考。

基于岩层深度-透水率拟合(式(1))及透水率-注浆量关系(式(3)),可估计不同深度的注浆量平均值,进而预估浆液用量:

$$Q = 810.05 - 54.58 d + 1.70 d^2 - 0.018 d^3 \quad (4)$$

基于岩层深度-透水率 90% 预测区间上限拟合(式(2))及岩层透水率-注浆量关系(式(3)),可估计不同中风化岩面以下深度注浆段的 10% 超越概率注浆量,将此注浆量定义为注浆量控制值,用于工程管控:

$$[Q] = 1\,435.18 - 21.89 q \quad (5)$$

式中:

$[Q]$ ——本文施工方法注浆量控制值, kg/m。

恒大中心项目破碎花岗岩层注浆量的关键指标及实测值如图 8 所示,破碎花岗岩层中风化面以下 0 ~ 20 m,注浆量控制值取 1 381 kg/m,中风化面以下 20 ~ 40 m,注浆量控制值取 942 kg/m。经统计,约有 94.3% 注浆段的实测值小于其对应深度的注浆量控制值。

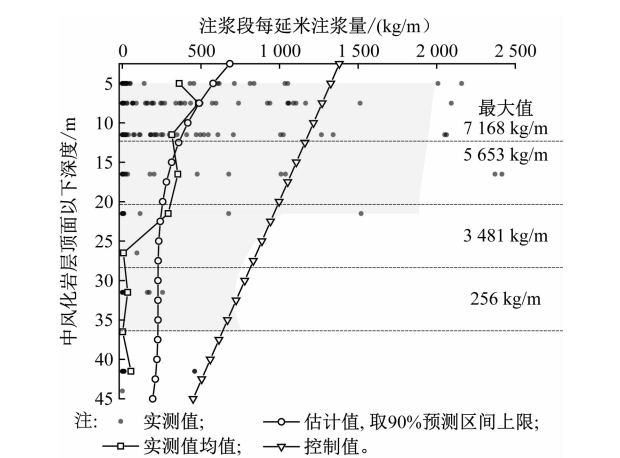


图 8 注浆量关键指标、实测值对比

Fig. 8 Comparison of key indexes and measured values of grouting volume

在施工过程中,当出现注浆量大于其控制值时,应检查施工设备情况(尤其是注浆管路是否存在泄漏),并确认是否存在未知不良地质现象。

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)