

DOI: 10.11779/CJGE201709006

# 圆砾泥岩复合地层泥水盾构下穿房屋沉降控制技术研究

谢雄耀<sup>1, 2</sup>, 王 强<sup>1, 2</sup>, 齐 勇<sup>3</sup>, 李 军<sup>1, 2</sup>, 于兴国<sup>3</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 中铁十六局集团北京轨道交通工程建设有限公司, 北京 101100)

**摘 要:** 圆砾泥岩复合地层中盾构微扰动施工控制是岩土工程实践中面临的难题。南宁地铁 1 号线盾构下穿友爱居民小组面临圆砾与泥岩复合地层的挑战, 首先对泥水盾构泥浆性能指标进行优化, 采用现场试验确定了富水圆砾地层袖阀管注浆加固浆液配合比; 利用自动化监测系统对盾构下穿房屋的沉降进行实时监控, 并借助及时通讯工具实现穿越施工中信息化施工; 定义圆砾泥岩复合地层盾构开挖面内泥岩高度与盾构机刀盘直径的比值为复合比  $\lambda$ , 分析掘进参数平均值随  $\lambda$  的变化规律。通过现场实测结果表明: 袖阀管注浆能够有效的控制建筑物沉降, 自动化监测能够实时反映盾构推进导致房屋变形, 为施工反馈控制提供依据, 泥水盾构在圆砾泥岩复合地层中会遇到开挖仓压力波动过大, 刀盘扭矩、推力增大, 贯入度降低等现象。当  $\lambda \leq 0.15$  上述现象基本不发生; 当  $0.15 \leq \lambda < 0.6$  时, 参数平均值波动最剧烈, 对沉降控制十分不利; 当  $\lambda \geq 0.6$  时, 扭矩和总推力进一步增大, 但开挖仓压力波动情况稍弱而贯入度会进一步降低。要以盾构开挖仓压力控制为指标而非追求推进速度, 提高转速、降低泥浆黏度是减少参数波动的有效手段。

**关键词:** 泥水盾构掘进; 自动化监测; 袖阀管注浆; 复合比; 参数分析; 圆砾泥岩

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)09-1591-09

**作者简介:** 谢雄耀(1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道与地下工程健康检测、风险与防灾方面的教学与研究工作。E-mail: xiexiongyao@tongji.edu.cn。

## Settlement control of slurry shield tunnelling crossing adjacent buildings in mixed ground of round gravel and mudstone

XIE Xiong-yao<sup>1, 2</sup>, WANG Qiang<sup>1, 2</sup>, QI Yong<sup>3</sup>, LI Jun<sup>1, 2</sup>, YU Xing-guo<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 2. Department of

Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Railway 16th Bureau Group Beijing Metro Engineering

Construction Co., Ltd., Beijing 101100, China)

**Abstract:** The micro-disturbed construction in mixed ground is a major challenge in the shield tunnelling construction. The Nanning metro line 1 crossing You'ai buildings is confronted with the challenge of mixed ground of round gravel and mudstone. The sleeve-valve-pipe grouting technology is applied in the round gravel with strong permeability by using the field tests to determine the mixture ratio of composite grout. The deformation monitoring of adjacent buildings and structures of shield-driven tunnels together with feedback-control during construction is the core part of the micro-disturbed construction control. The mixed ratio  $\lambda$  of round gravel and mudstone is defined and the variation of tunnelling parameters is analyzed with different  $\lambda$ . The measured results show that the sleeve-valve-pipe grouting is quite useful to reduce settlement. The automatic monitoring can reflect the influence of the shield tunnelling construction on the surroundings. The average values of slurry pressure, torque and total thrust significantly increase, while the penetration rate decreases when  $0.15 \leq \lambda < 0.6$ , which is quite bad for settlement control. When  $\lambda \geq 0.6$ , the torque and total thrust continue to increase while the fluctuation of slurry pressure diminishes and the penetration rate is very low. The priority is to control the slurry pressure in excavation chamber and the grouting is crucial to control settlement. Moreover, it is beneficial to modify the slurry properties, to reduce the advance speed and to increase the cycle time when tunnelling in mudstone.

**Key words:** shield tunnelling; automatic monitoring; sleeve-valve-pipe grouting; mixed ratio; parametric analysis; round gravel and mudstone

基金项目: 上海市科学技术委员会资助计划项目 (15DZ1203800);

广西科学研究与技术开发计划项目 (2015BC17047, 2015AA08192)

收稿日期: 2016-05-30

## 0 引言

复合地层中的盾构施工一直是岩土工程界面临的巨大挑战<sup>[1-2]</sup>,而盾构下穿临近建构筑物的沉降控制则是各方共同关注的问题<sup>[3-4]</sup>。南宁地铁 1 号线白火区间盾构掘进断面存在上部圆砾、下部泥岩复合地层,其典型特点为圆砾地层松散、软弱、强透水,泥岩地层致密、较硬、高黏性<sup>[5]</sup>。盾构在圆砾泥岩复合地层掘进中容易出现超挖、开挖面失稳、地表变形过大、掘进速度变慢等风险,同时泥水盾构更加容易出现泥水循环堵塞,泥水压力波动过大的情况<sup>[6]</sup>,可能会出现地面冒浆等现象,对地表沉降控制十分不利。例如东莞市城市轨道交通 R2 线工程西平站—哈地站区间,在上软下硬地层施工时隧道曾出现螺旋输送机喷涌,地面塌陷等问题<sup>[7]</sup>。

围绕复合地层盾构下穿建构筑物的沉降控制问题,国内外学者通过不同的工程背景做了许多有益的研究。谭忠盛等针对广州地区软硬不均复合地层的盾构下穿京广铁路沉降控制进行了研究,从渣土改良、同步注浆、施工监测等方面探讨了微扰动施工控制技术<sup>[8]</sup>。冯欢欢等针对大连地铁 2 号线所面临的富水复合地层,从盾构选型、隧道轴线控制、刀盘推进速度控制、刀具管理等角度阐述了在小半径、富水碎裂带、硬岩地层等情况下盾构施工情况<sup>[9]</sup>。叶新宇等针对南昌地区上覆富水砂砾石下卧泥质粉砂岩地层中盾构掘进存在渣土改良困难的挑战,利用室内试验结合现场测试的方法,得到了盾构切削断面砂砾与泥质粉砂岩不同比例情况下的泡沫添加剂比例,在南昌地铁 1 号线 5 标的上软下硬地层中得到了良好应用<sup>[10]</sup>。朱宏海总结了国内大量上软下硬复合地层中盾构施工案例,从线路设计、盾构选型和施工措施等方面进行讨论,提出了合理绕避复合地层,选取适应硬岩掘进的刀具配置和软岩保压的盾构类型,严格控制掘进参数,制定应急预案等措施来保障复合地层盾构施工安全<sup>[7]</sup>。需要注意到,在不同的地区,由于岩土体物理力学性质的差异性,施工经验是不能完全复制的,同时沉降控制依赖于单一手段是不可取的<sup>[11]</sup>。

本文针对南宁地铁 1 号线白苍岭站—火车站区间盾构下穿友爱居民楼,提出了基于自动化监测技术的盾构施工实时反馈技术。采用袖阀管注浆加固,给出了富水强渗透圆砾地层袖阀管注浆浆液配比,同时在定义圆砾泥岩地层复合比 $\lambda$ (盾构开挖面内泥岩高度与盾构机刀盘直径的比值)的基础上对泥水盾构在复合地层中的掘进参数变化规律进行分析,揭示了掘进参数波动与 $\lambda$ 的关系,并据此提出圆砾泥岩复合地层

泥水盾构掘进沉降控制建议。

## 1 工程背景

南宁地铁 1 号线白苍岭站—火车站区间采用气垫式泥水平衡盾构机掘进,盾构机刀盘直径 6.28 m,隧道管片外径 6.0 m,环宽 1.5 m。区间隧道在左线转弯段 284-291 环侧穿友爱居民小组 159-3 号楼(图 1(a)),隧道埋深约 17.3 m,房屋基础到隧道顶距离为 11.5 m,如图 1(b)所示。友爱居民小组为居民自建房,经鉴定,认定盾构下穿友爱居民楼为重大风险源<sup>[12]</sup>。隧道穿越地层主要为圆砾层,底部为圆砾与泥岩的复合地层。

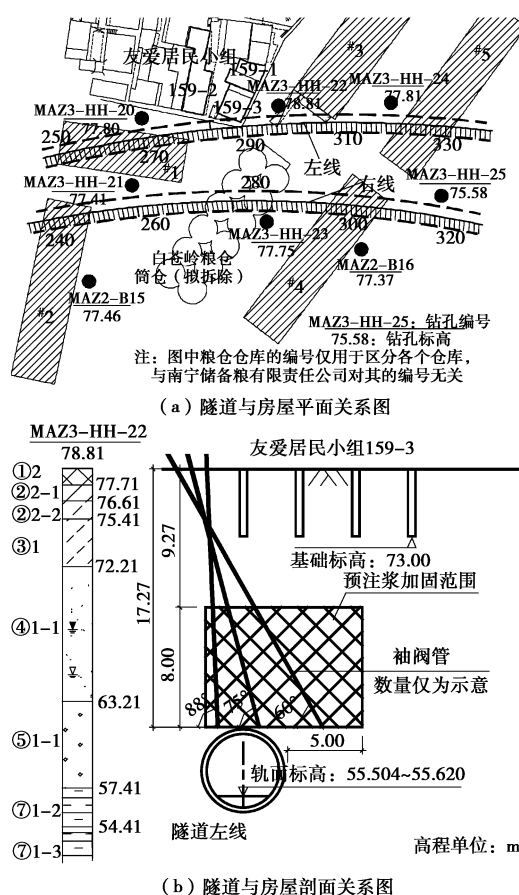


图 1 隧道与房屋相对位置关系图

Fig. 1 Relative position of tunnels and buildings

盾构主要穿越的⑤<sub>1-1</sub>圆砾层为灰色、乳白色、褐黄色等,稍密—中密,饱和,以砾石为主,少部分卵石,不均匀系数 $C_u$ 平均 25.3,属不连续级配。圆砾地层与邕江水系存在水力联系,渗透系数高达 90 m/d,属于高渗透性地层。盾构主要穿越的⑦<sub>1-3</sub>泥岩层为灰色、青灰色,成岩程度较深,呈半岩半土状。天然抗压强度 1.70~3.14 MPa,标准值 1.24 MPa,为极软岩,岩体基本质量等级 V 级<sup>[13]</sup>,典型的圆砾与泥岩地层表现形态见图 2。



图 2 典型圆砾地层(左)与泥岩地层(右)  
Fig. 2 Round gravel (left) and mudstone (right)

各土层物理力学参数见表 1, 从表 1 中可知, 盾构穿越的地层为典型的复合地层, 圆砾层和泥岩层在黏聚力  $c$  (圆砾层与泥岩层差值, 下同  $\Delta c = -70 \sim -90$  kPa)、内摩擦角  $\varphi$  ( $\Delta\varphi = 13^\circ \sim 14^\circ$ ) 和渗透系数  $K$  ( $\Delta K = 89.99$  m/d) 上的差异会导致泥水平衡盾构施工控制存在很大挑战。根据区间类似地层施工经验, 在圆砾泥岩复合地层盾构掘进中, 会遇到开挖仓压力波动大, 推进速度降低, 扭矩增大且变动频繁等问题, 十分不利于控制沉降。

表 1 土层物理力学参数表  
Table 1 Soil properties

土层 编号	名称	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	黏聚力 /kPa	内摩 擦角/(°)	变形模 量/MPa	渗透系数 /(m·d <sup>-1</sup> )
① <sub>2</sub>	素填土	1.84	11.0	7.5	5.0	0.100
② <sub>2-1</sub>	黏土	1.95	45.5	13.0	20.0	0.001
② <sub>2-2</sub>	粉质黏土	1.99	45.0	16.0	16.0	0.003
③ <sub>1</sub>	粉土	2.02	0.0	21.0	6.0	0.500
④ <sub>1-1</sub>	粉细砂	2.01	0.0	21.0	5.0	4.000
⑤ <sub>1-1</sub>	圆砾	2.05	0.0	35.0	25.0	90.000
⑦ <sub>1-2</sub>	泥岩、粉砂	2.16	70.0	22.0	25.0	0.010
⑦ <sub>1-3</sub>	质泥岩	2.15	90.0	21.0	30.0	0.010

2 圆砾泥岩复合地层泥水盾构泥浆性能指标优化

由于下穿友爱居民楼处于转弯段且会遇到圆砾与泥岩复合地层, 沉降控制难度大, 因此将友爱居民楼作为重大风险源进行对待, 主要从盾构机选型、掘进参数优化、同步注浆浆液配比等方面<sup>[14]</sup>采取措施来控制房屋的沉降, 其中泥浆浆液性质在圆砾泥岩复合地层沉降控制中起到关键性作用, 故针对采用现场试验对浆液配比进行验证。

通过泥浆配合比试验, 确定富水圆砾地层泥浆最佳配合比为膨润土:CMC(羧甲基纤维素钠):水=86:3:1000, 泥浆相对密度为 1.09 g/cm<sup>3</sup>, 失水量 13 mL, 漏斗黏度 32 s。对于强渗透的圆砾地层, 泥浆的黏度作为关键参数需要进一步的现场验证。

泥浆黏度对泥浆的渗透性质有重要影响, 特别是对孔隙较大的砂卵石地层。在盾构机停止掘进过程中,

设定停机保持液位 0.6 m, 通过观察盾构机自身的间接气垫调压控制模式对空压机补气情况及工作仓液位变化量对泥浆黏度指标进行分析。

由图 3 可知, 泥浆的黏度在 21 s 时, 空压机及液位变化量均较大, 说明泥浆溢出进入土层, 影响开挖仓的压力, 不利用地层沉降量的控制。当黏度在 24 s 时, 工作仓液位及空压机补气次数均较小, 有效地抑制了泥浆的渗透。当泥浆的黏度增大到 32 s 时, 工作仓液位及空压机补气次数几乎不变, 泥浆中的固相细颗粒有效地填充了圆砾土层中固相颗粒间隙, 稳定了开挖面。

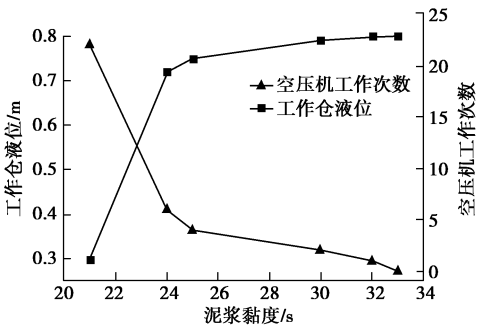


图 3 泥浆黏度与工作仓液位、空压机工作次数的关系  
Fig. 3 Relationship among mud viscosity, liquid level in working chamber and operating frequency of air compressor

经过现场试验优化后, 修正泥浆的性能指标建议值为: 泥浆密度为 1.07~1.15 g/cm<sup>3</sup>之间, 泥浆黏度为 24~32 s 之间, 泥浆失水量为 14~12 mL/30 min 之间。

考虑到圆砾地层要求比重较高, 黏度较大的泥浆以维持开挖面稳定; 而泥岩地层为了顺利排出渣土, 则选择比重和黏度均较小的泥浆。因此在圆砾泥岩复合地层掘进时, 要求各种指标能够达到平衡, 选择泥浆密度为 1.05 g/cm<sup>3</sup>, 黏度 25 s, 同时加入 3%的工业洗涤剂<sup>[5]</sup>降低堵管堵仓风险, 减少开挖仓压力波动, 同时能够有效控制地表沉降。

3 富水圆砾地层袖阀管预注浆加固技术

3.1 注浆加固工艺

袖阀管注浆技术可以对注浆压力和注浆范围进行可操作控制同时能够极大减少冒浆的风险, 作为一种可靠的注浆手段在房屋预注浆加固中得到了广泛应用<sup>[15-16]</sup>。南宁地区的圆砾地层由于其含水率高、渗透系数大, 与周围水系存在紧密联系, 同时圆砾地层孔隙率大, 骨架松散受扰动易坍塌等特点, 导致注浆加固出现止水效果不明显, 预注浆浆液易随水流失, 加固质量差, 经济成本高等问题。因此设计合理的注浆加固工艺并优化注浆浆液配比是十分必要的。



本次注浆施工是沿着建筑物区域四周预埋袖阀管，预先对友爱居民楼基础下方隧道上方的圆砾层和砂土层进行加固处理，在盾构施工过程中加强监测，及时跟踪补偿注浆。袖阀管采用直径 48 mm 硬质 PVC 管，间距 1.0 m×1.0 m，梅花形布置，见图 4。加固区范围（隧道横断面方向）按照 Peck 公式估算，一般设置袖阀管在地表距离被加固建筑为 4 m。注浆加固的主要对象为隧道顶部和建（构）筑物基础之间圆砾层、砾砂层，故纵向加固位置为隧道顶部至隧顶以上粉质黏土层，见图 1（b）

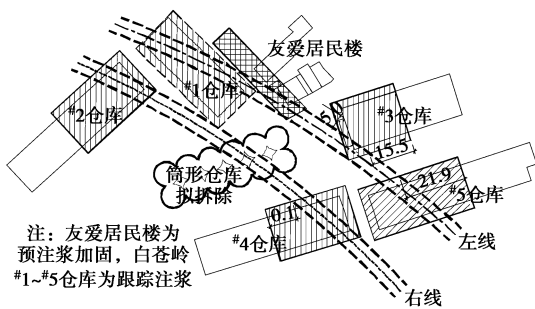


图 4 袖阀管注浆加固范围

Fig. 4 Scope of reinforcement using sleeve-valve-pipe grouting

3.2 浆液材料配合比试验

根据已有施工经验<sup>[17]</sup>，设计建议的普通单液浆和普通水泥-水玻璃双液浆（表 2）难以满足富水圆砾地层的加固需求，因此采用加添加剂的复合型浆液。复合浆液主要由水泥（C）、水玻璃（ $\text{Na}_2\text{O} \cdot m \text{SiO}_2 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ , S）及抗分散型外加剂组成，浆液具有较好的稳定性和抗分散性。其中水泥为 P.O42.5 普通硅酸盐水泥，水玻璃浓度（水玻璃在水溶液的含量，常用波美度 Be' 表示）为 45Be'，模数（水玻璃中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  的摩尔数之比）为 2.4~2.8。

表 2 设计建议浆液配比参数

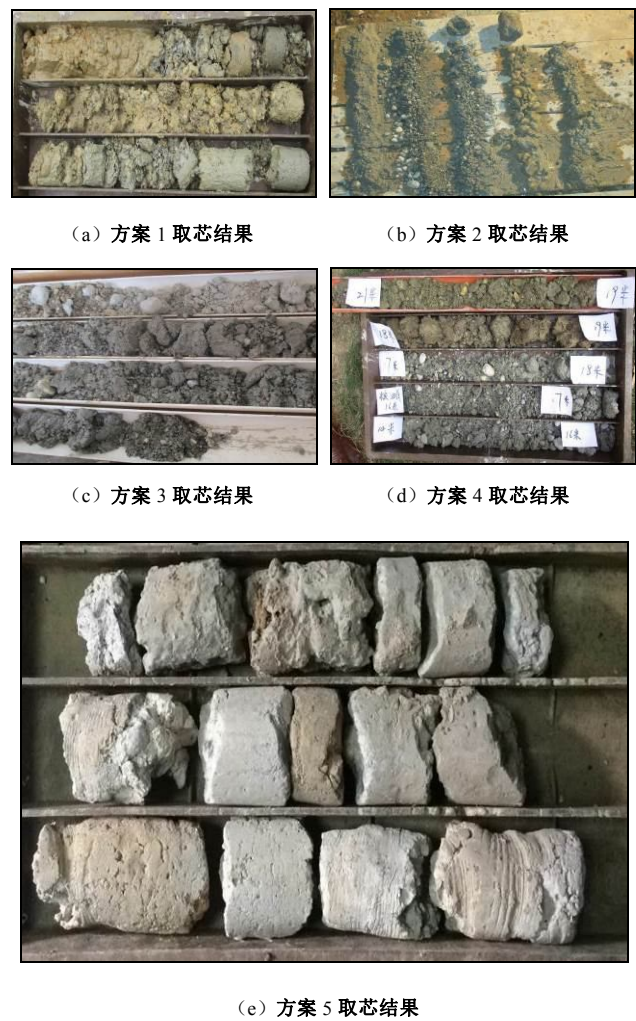
Table 2 Designed mixture ratios of sleeve-valve-pipe grouting			
序号	浆液名称	浆液配比	
		W : C	C : S
		(水灰比)	(体积比)
1	普通水泥单液浆	(0.8~1) : 1	
2	普通水泥-水玻璃双液浆	(0.8~1) : 1	1 : (0.3~1)
3	复合型浆液	(0.6~1) : 1	1 : (0.3~0.1)

根据表 2 浆液配比结合现场实际情况，设计复合浆液配比应该是同等体积的，故 C : S=1 : 1，因此需要调整复合浆液的水灰比来满足工程需求，具体试验方案设计如下：注浆孔采用梅花型布置，浆液扩散半径为 0.6~0.8 m， $V_{\text{水玻璃}} : V_{\text{水}} = 3 : 7$ ， $V_{\text{水玻璃液}} : V_{\text{水泥液}} = 1$ ，初压 2.5~2.0 MPa，稳压 1.5~2.0 MPa，注浆速度 40~60 L/min，水玻璃模数为 2.8。方案 1~5 的水

灰比（W : C）分别：1 : 0.6，1 : 0.8，1 : 1，0.6 : 1，0.8 : 1。

对上述 5 个不同水灰比方案进行取芯来验证实际注浆效果，见图 5。从图中的取芯结果来看，方案 1 样体内含水泥浆液少；方案 2~方案 4 样体内含水泥浆液相对较多，但加固体不能成型，上述加固体的质量不能满足设计要求。

从图 5 的结果看，方案 5 样体内含水泥浆液较多，加固体成型较好，加固体的质量能满足设计要求，从而达到加固止水的效果。由此确定当  $V_{\text{水玻璃}} : V_{\text{水}} = 3 : 7$ ， $V_{\text{水玻璃液}} : V_{\text{水泥液}} = 1$  时，确定最佳的水灰比（W : C）=0.8 : 1，能够实现加固止水的效果。



(e) 方案 5 取芯结果

图 5 袖阀管注浆现场试验不同水灰比取芯结果

Fig. 5 Core results of valve-pipe grouting field test

4 基于自动化监测系统的沉降反馈控制

4.1 自动化监测系统设计

本文采用的基于静力水准仪的沉降自动化监测系统<sup>[11]</sup>，由现场监测仪器通过无线网络将数据上传到工

作站, 经过处理后数据上传到云服务器, 利用 PC 端或移动端的软件客户端可以实现对监测信息的实时查看, 详见文献[14]。

4.2 自动化监测系统实施

自动化监测测点布置见图 6, S1\_0 为基准点, 各个测点与 S1\_0 的相对沉降来反映房屋的变形。本次自动化监测采用的静力水准仪相关技术指标见表 3, 数据自动采集的时间间隔为 30 min。

表 3 静力水准仪主要技术指标

Table 3 Key technical indexes of hydrostatic level			
测量范围	精度	灵敏度	工作温度范围
100 mm	±0.1%FS	0.025%FS	-20~+80℃ (使用防冻液)

4.3 监测结果及反馈施工

白火区间左线盾构于 2015 年 3 月 1 日—3 日侧穿友爱居民小组 159-3 号楼, 期间自动化监测系统工作正常, 圆满完成了房屋变形的监测任务。各个测点监测结果如图 6 所示, 从图中可以看到监测数据很好的体现了盾构推进导致房屋发生沉降变形的过程。除 S1-6 测点发生轻微隆起外, 其余测点沉降在-0.5~-2 mm 之间, 最大沉降为-2 mm, 发生在 S1-4 测点, 说明袖阀管预注浆加固能够很好的控制房屋沉降, 实现了盾构微扰动施工控制。

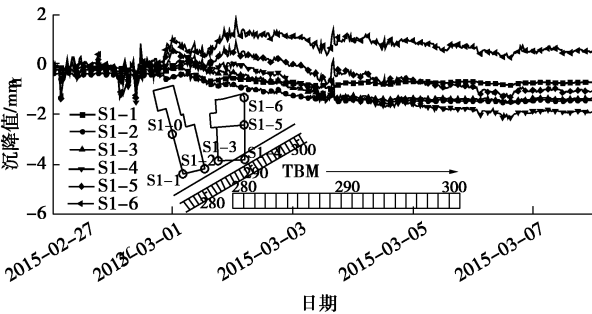


图 6 测点布置及监测结果

Fig. 6 Deformation monitoring series

本次盾构下穿友爱居民小组, 为更好地进行施工反馈控制, 搭建了以远程自动化监控等硬件为基础、

以施工参数优化为内核、借助白苍岭地表监控中心为载体集成的信息化施工平台, 实现盾构掘进参数和施工监测数据的远程自动化获取, 在数值模拟<sup>[18]</sup>的基础上实现盾构掘进参数实时优化、正常掘进信息反馈、预警信息及时上报、重大险情现场指挥及处理等功能, 使得“地下”与“地上”联动。例如在 2016 年 3 月 3 日, 自动化监测数据显示 S1-4 点的沉降速率有增大趋势, 通过实施反馈, 监理方要求增大同步注浆量, 并做好二次注浆, 经过注浆后, 监测数据显示沉降发展趋势变缓, 保障了友爱居民小组的安全。

5 泥水盾构在圆砾泥岩复合地层中掘进参数分析

5.1 掘进参数变化规律分析

盾构在下穿友爱居民小组刚开始进入圆砾与泥岩复合地层, 为全面了解泥水盾构在圆砾泥岩复合地层中的掘进参数变化规律, 有针对性的提出解决参数波动的方案, 特针对盾构穿越圆砾泥岩复合地层施工参数进行总结分析, 本次以白火区间左线隧道 250 环~440 环掘进参数进行分析, 数据来自盾构机数据记录系统 (PDV), 取每环平均值为代表。本次选取的区段地层包含了全断面圆砾层, 圆砾泥岩复合地层, 全断面泥岩层, 十分具有代表性。

区段 250 环—440 环地层剖面图见图 7, 由于泥岩层 ⑦<sub>1-2</sub> 和 ⑦<sub>1-3</sub> 仅在黏聚力上有些许差距 ( $\Delta c = -20 \text{ kPa}$ ), 两者的差值要远小于圆砾层与泥岩层在黏聚力  $c$  上的差值, 为了简化分析和计算, 故此处将 ⑦<sub>1-2</sub> 和 ⑦<sub>1-3</sub> 均视为同层土。根据施工经验可知, 泥岩层的厚度 ( $h$ ) 是影响掘进的重要因素。为表征复合地层中泥岩层的影响 (图 8), 定义复合比  $\lambda = h / D$ , 式中  $h$  为泥岩层厚度, 源自地勘报告;  $D$  为盾构机刀盘直径, 本文取为 6.28 m。图 7 中给出了几个典型勘探孔的开挖断面复合地层的情况,  $\lambda$  的变化情况表明该区段能够涵盖从全断面圆砾到全断面泥岩的情况。

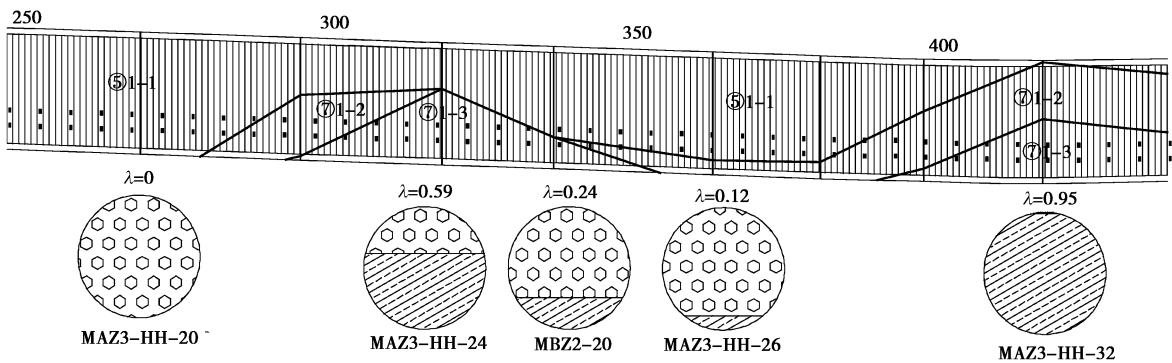


图 7 白火区间左线 250 环—440 环地层剖面及典型断面复合比

Fig. 7 Stratigraphic section of ring NO. 250-440 of left line and the typical mixed ratios

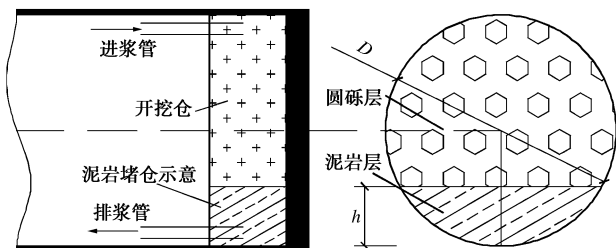


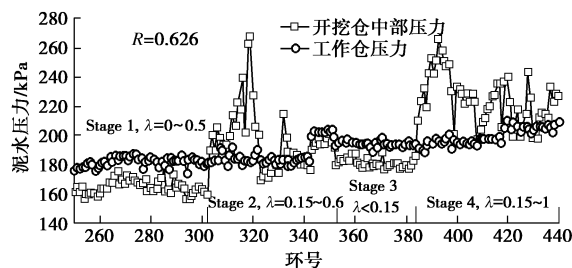
图8 泥岩堵仓及复合比计算示意图

Fig. 8 Schematic diagram of clogging and calculation of mixed ratios

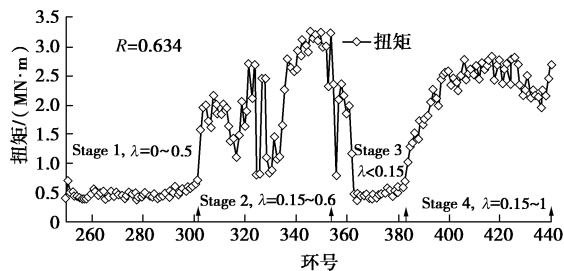
图9(a)~(d)反映了盾构掘进参数的变化情况。经过计算,泥水压力、刀盘扭矩、总推力、贯入度(盾构机刀盘掘进速度与转速的比值,即每转切深)与复合比 $\lambda$ 之间存在较强的相关性(相关系数 $|R| \geq 0.6$ )。本文将以开挖仓中部和工作仓的泥水压力差值(正常状态下,工作仓泥水压力要比开挖仓中部泥水压力高10~20 kPa)为主要依据,结合扭矩和刀盘总推力的波动来判定是否堵仓。图9(a)中显示了开挖仓和工作仓泥水压力的变化情况,在250环—302环之间,泥水压力处于正常范围,此时盾构机从全断面圆砾层过渡到开始切削圆砾泥岩复合地层,泥岩在开挖仓中积累并不多。同时扭矩等其他参数也符合设定值,此段命名为Stage 1。

当隧道断面的泥岩层厚度增加后,在303环—354环, $\lambda$ 在0.15~0.6范围变化,属于典型复合地层,此段命名为Stage 2。切削下的泥岩累积在开挖仓排渣口堵塞导致通往开挖仓的泥浆无法顺畅返回工作仓,结果会出现图9(a)中开挖仓压力急剧增大,超过工作仓压力;开挖仓压力的波动导致膨润土液位波动严重,同时开挖仓压力的增大会导致泥浆反流回盾构,造成盾尾喷浆等事故,进而导致同步注浆无法跟进。开挖仓压力的剧烈波动对地表沉降控制十分不利,容易造成地层扰动产生较大沉降,还有可能发生地面冒浆等事故。而随着盾构逐步脱离复合地层进入全断面圆砾层,开挖仓压力逐步恢复正常。在此过程中,工作仓压力始终保持在180~190 kPa,说明间接式压力控制在维持开挖面平衡方面具有明显优势。与此同时,图9(b)、(c)显示在复合地层中扭矩和刀盘总推力都急剧增大,主要是由于切削下的泥岩在开挖仓结泥饼严重且泥岩累计越多,扭矩越大,扭矩的增大及频繁变动会导致刀盘电机长期超负荷运转,影响盾构机使用寿命。掘进过程中增加刀盘转速,是为了将开挖仓中大块的渣土(主要是泥岩)细化,以便于顺利排出。图9(e)中刀盘贯入度( $<10$  mm/r)远低于预期值(20~40 mm/r),一方面是由于泥岩的存在导致刀盘推进缓慢,

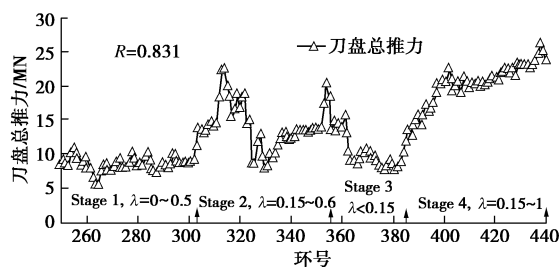
另一方面减缓掘进速度是为了减小开挖仓压力波动对地层的扰动,存在工期延误风险。



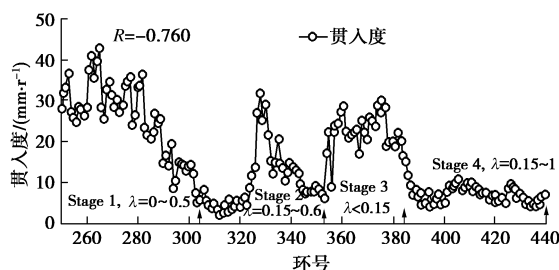
(a) 开挖仓中部和工作仓泥水压力变化情况



(b) 刀盘扭矩变化情况



(c) 刀盘总推力变化情况



(d) 刀盘贯入度变化情况

图9 白火区间左线250环—440环掘进参数变化情况

Fig. 9 Variation of tunnelling parameters of ring No. 250-440

当盾构进入355环—384环后, $\lambda \leq 0.15$ ,该段命名为Stage 3。此时的泥岩层对盾构掘进并未造成很大的影响,各项参数逐步恢复正常水平,扭矩和总推力的恢复存在滞后性,说明 $\lambda = 0.15$ 是一个临界值。

在385环—440环, $\lambda$ 逐渐增大并接近于1,此段命名为Stage 4。各项参数出现了与Stage 2类似的变化规律,但不同于Stage 2的情形,当 $\lambda > 0.6$ 后(约400环后),开挖仓压力、扭矩和总推力的波动相对于Stage 2要小,此时虽然贯入度仍然维持较低水平,但开挖仓压力波动的减小意味着对地层的扰动性减小,这相对于Stage 2的情形对于控制沉降是有利的。注意

到刀盘扭矩和总推力与  $\lambda$  的变化规律基本一致, 表明泥岩的存在是导致刀盘扭矩和推力增大的最主要因素。与 Stage 1 相比, 此段参数的变动从  $\lambda$  开始变大立即开始, 可能的原因是 Stage 3 中累积的泥岩没有完全随泥浆排出, 累积到导致突变。

通过对图 9 中参数变化规律的分析可知, 泥岩的堵仓是导致开挖仓泥水压力、扭矩、总推力增大且变动频繁的主因, 三者变化的规律存在一致性; 增加刀盘转速对解决上述问题有一定的效果但不明显, 而贯入度在有泥岩存在 ( $\lambda > 0.15$ ) 情况下一直处于较低水平, 严重影响进度。

表 4 列出了  $0 \leq \lambda < 0.15$ ,  $0.15 \leq \lambda < 0.6$  和  $0.6 \leq \lambda \leq 1$  三种情形下, 盾构掘进参数的平均值情况。以  $0 \leq \lambda < 0.15$  为基准情形, 当  $0.15 \leq \lambda < 0.6$  时, 开挖仓中部压力、扭矩、和刀盘总推力相比于基准情形分别增加了 15%, 230%, 51%, 而贯入度则下降 57%; 当  $0.6 \leq \lambda \leq 1$  时, 开挖仓中部压力、扭矩、和刀盘总推力相比于基准情形分别增加了 27%, 355%, 141%, 而贯入度则下降 73%。

表 4 不同  $\lambda$  取值范围内掘进参数平均值

Table 4 Average values of tunnelling parameters with different ranges of  $\lambda$

$\lambda$	开挖仓压力 /kPa	扭矩 /(MN·m)	总推力 /MN	贯入度 /(mm·r <sup>-1</sup> )
[0,0.15)	171.9	0.54	9.01	27.44
[0.15,0.6)	197.5	1.79	13.61	11.17
[0.6,1]	218.1	2.47	21.70	7.30

从掘进参数平均值在  $\lambda$  不同取值下的比较来看, 刀盘扭矩是受到泥岩比例影响最大的参数, 复合地层中 ( $\lambda > 0.15$ ) 扭矩可以达到正常掘进时的 3~6 倍, 且从现场反馈来看, 扭矩的变动也是十分频繁的, 这对于盾构机的使用寿命是一个极大的挑战。另外受泥岩比例影响大则是贯入度,  $\lambda$  的增加显著降低了贯入度, 复合地层中 ( $\lambda > 0.15$ ) 贯入度只有正常水平下的 1/2~1/4, 严重延误了工期。

图 10 利用箱线图表示的各个掘进参数在  $\lambda$  不同取值范围内的离散情况。每个箱线图的水平线从上到下依次代表数据集的最大值 Max、第三四分位数  $Q_3$ , 中位数 M, 第一四分位数  $Q_1$  和最小值 Min。另外还有数据集的平均值 (Mean) 和异常值 (Outlier) [19], 见图 10 (b), 图中出现的 3 个数据为 Max, Mean, Min。利用箱线图可以清晰地表示数据的离散程度, 图 10 (a) 显示开挖仓中部泥水压力的平均值在  $0.15 \leq \lambda < 0.6$  时离散性最大, 说明此种情形下开挖仓泥水压力波动最大, 这对于控制地表沉降十分不利, 而当  $0.6 \leq \lambda \leq 1$  时, 虽然开挖仓泥水压力平均值增大

(堵仓堵管更加严重), 但波动变小, 类似的规律出现在扭矩 (图 10 (b)) 和刀盘总推力 (图 10 (c)) 上, 参数的波动不仅对掌子面稳定性造成影响, 同样会影响盾构的掘进姿态。而贯入度 (图 10 (d)) 的情况则说明泥岩比例越大, 盾构推进越慢。

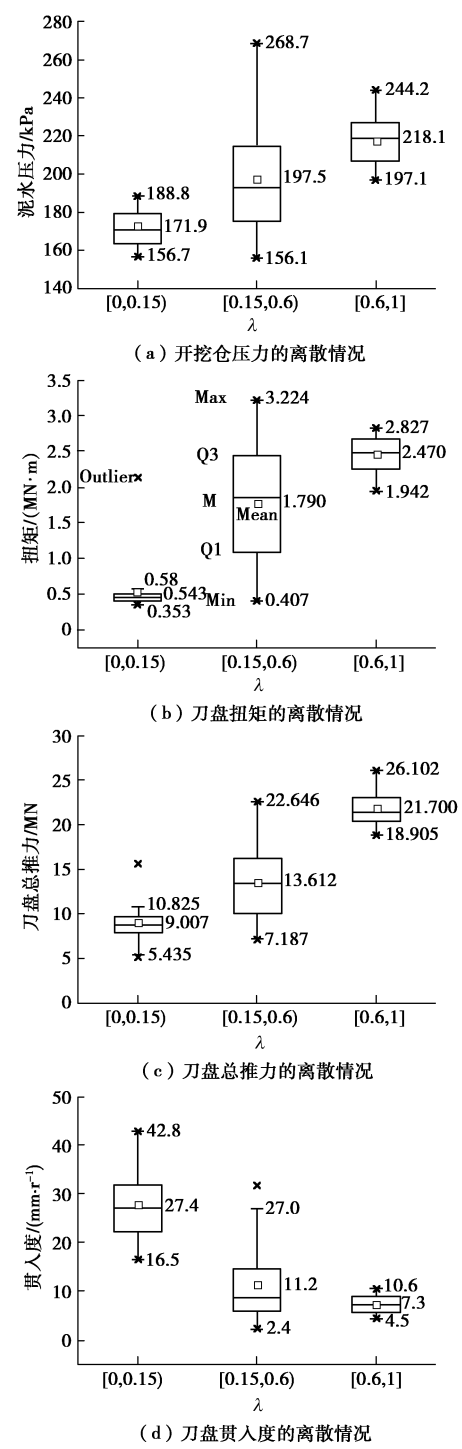


图 10 不同  $\lambda$  取值范围内掘进参数的离散情况  
Fig. 10 Box-plot of tunnelling parameters with different ranges of  $\lambda$

5.2 圆砾泥岩复合地层泥水盾构掘进建议

通过对盾构在圆砾泥岩复合地层掘进的参数变化规律进行分析, 发现泥水盾构在复合地层中极易发生



开挖仓压力增大,刀盘扭矩和总推力增大,推进速度减慢等现象,可能造成地表沉降过大、地面冒浆、盾构刀盘超负荷运转、盾构姿态不良、工期延误等风险。通过对上述现象进行原因分析,特针对泥水盾构在圆砾泥岩复合地层掘进提出如下建议措施:

(1)当开挖仓泥水压力出现波动时,要以控制地层稳定为原则,以开挖仓压力控制为导向,放慢掘进速度,增加泥水循环时间,尽可能减小泥水压力波动;参数调整要循序渐进,不可冒进。

(2)对开挖仓压力控制采取精细化操作,要时刻根据膨润土液位变化进行泥水循环管路的开闭,当开挖仓压力快速上升或降低时,必须马上将部分或全部通往开挖仓的进浆管路关闭或开启,以减小压力波动。

(3)增大泥水循环流量,增大压力充分利用泥水管路中反循环“逆洗功能”来清理渣土,  $0.15 \leq \lambda < 0.6$  时考虑利用管路对开挖仓中渣土堆积位置进行重点冲刷,但不得开启冲刷圆砾层的泥浆管,防止掌子面失稳;  $0.6 \leq \lambda \leq 1$  时可以考虑带压进仓清理渣土,在仅考虑  $\lambda$  情形下,全断面泥岩 ( $\lambda=1$ ) 进行开仓风险是最小的。

(4)优化泥浆浆液配比,可适当降低浆液的比重和黏度,同时加入润滑剂降低刀盘结泥饼的概率。

(5)增大刀盘转速(增量 20%~50%),同时增加刀盘反转次数,将渣土细化以便于排出。

(6)高度重视注浆的效用,尤其是  $0.15 \leq \lambda < 0.6$  的地层需做好穿越前房屋预注浆,掘进过程中同步注浆,穿越后二次补注浆;做到注浆量和注浆压力双控制,重点位置重点控制,注浆对于控制地表沉降是十分有效的。

(7)做好地表建筑物沉降监测及反馈,增加地表巡查频率,发现险情立即启动相关预案。

## 6 结 论

以南宁地铁 1 号线白火区间盾构下穿友爱居民楼为工程背景,从盾构施工参数控制方案、房屋袖阀管注浆加固、沉降自动化监控及反馈等方面阐述了圆砾泥岩复合地层盾构下穿房屋变形控制技术,并分析了泥水盾构在圆砾泥岩复合地层掘进参数变化规律,得到的结论如下:

(1)房屋预注浆加固是控制沉降的关键措施,采用袖阀管注浆对富水圆砾地层的沉降控制是十分有效的,通过现场试验表明,采用复合型浆液,在  $V_{\text{水玻璃}}:V_{\text{水}}=3:7$ ,  $V_{\text{水玻璃液}}:V_{\text{水泥液}}=1$  时,采用水灰比(W:C)=0.8:1 时能够满足加固止水目的。

(2)采用远程自动化监测对盾构穿越期间房屋沉

降进行实时监测,借助微信等即时通讯工具对沉降信息实时反馈,能够实现掘进过程中“地上”和“地下”联动,做到沉降可知,险情可控,保障穿越区房屋安全。

(3)定义了圆砾泥岩复合地层复合比  $\lambda$ ,通过分析掘进参数平均值随  $\lambda$  的变化情况,发现  $\lambda \leq 0.15$  情况下,泥岩对掘进参数基本无影响;  $0.15 \leq \lambda < 0.6$  情况下,开挖仓压力、扭矩、总推力的平均值会出现增大且剧烈波动的情况,而贯入度会降低;  $\lambda \geq 0.6$  情况下,扭矩和总推力进一步增大,而贯入度继续降低,开挖仓压力的平均值增大但波动情况要弱于  $0.15 \leq \lambda < 0.6$  情况。

(4)为减少参数波动控制沉降,盾构掘进时适当降低掘进速度,要以控制开挖仓压力为原则,循序渐进调整掘进参数;增大刀盘转速,优化泥浆配比,充分利用泥水循环系统,能够减小堵仓堵管发生概率。

## 参考文献:

- [1] CUI Q L, WU H N, SHEN S L, et al. Protection of neighbour buildings due to construction of shield tunnel in mixed ground with sand over weathered granite[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6): 458 - 469.
- [2] ZHAO J, GONG Q M, EISENSTEN Z. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: a case history in Singapore [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(4): 388 - 400.
- [3] BAI Y, YANG Z, JIANG Z. Key protection techniques adopted and analysis of influence on adjacent buildings due to the Bund Tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 41: 24 - 34.
- [4] 朱合华, 丁文其, 乔亚飞, 等. 盾构隧道微扰动施工控制技术体系及其应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 1983 - 1993. (ZHU He-hua, DING Wen-qi, QIAO Ya-fei, et al. Micro-disturbed construction control technology system for shield driven tunnels and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 1983 - 1993. (in Chinese))
- [5] 于兴国. 圆砾泥岩复合地层泥水盾构下穿建筑物施工技术[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(2): 57 - 60. (YU Xing-guo. Construction technology of slurry shield crossing under buildings in mixed ground of round gravel and mudstone[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(2): 57 - 60. (in Chinese))
- [6] 温兴泉. 泥水盾构机在复合地层中掘进参数的控制[J]. 西部探矿工程, 2014(6): 183 - 186. (WEN Xing-quan. Tunnelling parameters control of slurry TBM in mixed



- ground[J]. West-China Exploration Engineering, 2014(6): 183 - 186. (in Chinese))
- [7] 朱宏海. 上软下硬复合地层地铁盾构隧道设计及施工探析[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 144 - 148. (ZHU Hong-hai. Design and construction of shield-bored metro tunnels in hard-soft heterogeneous ground[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(2): 144 - 148. (in Chinese))
- [8] 谭忠盛, 洪开荣, 万姜林, 等. 软硬不均地层复合盾构的研究及掘进技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3945 - 3952. (TAN Zhong-sheng, HONG Kai-rong, WAN Jiang-lin, et al. Study on composite shield and construction technique in complex uneven strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3945 - 3952. (in Chinese))
- [9] 冯欢欢, 陈 馈, 王助锋, 等. 大连富水复合地层盾构施工关键技术探讨[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 186 - 191. (FENG Huan-huan, CHEN Kui, WANG Zhu-feng, et al. Discussion of key construction techniques for a shield-driven tunnel in a water-rich mixed ground[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(1): 186 - 191. (in Chinese))
- [10] 叶新宇, 王树英, 肖 超, 等. 上软下硬地层碴土改良试验及应用研究[J]. 现代隧道技术, 2015(6): 147 - 153. (YE Xin-yu, WANG Shu-ying, XIAO Chao, et al. Soil conditioning test for soft upper and hard lower mixed stratum and its application[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015(6): 147 - 153. (in Chinese))
- [11] 谢雄耀, 郁宏杰, 王庆国, 等. 基坑开挖引起下卧既有电力隧道变形的控制技术研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 36(1): 88 - 97. (XIE Xiong-yao, YU Hong-jie, WANG Qing-guo, et al. Deformation control of operating tunnels induced by deep excavation of overlying metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 36(1): 88 - 97. (in Chinese))
- [12] 广西壮族自治区建筑工程质量检测中心. 南宁轨道交通一号线区间施工阶段房屋安全性检测鉴定报告[R]. 南宁, 2014. (Guangxi Construction Testing Centre. House security inspection report of adjacent buildings along Nanning metro line 1 during shield tunnelling construction[R]. Nanning, 2014. (in Chinese))
- [13] 化工部郑州地质工程勘察院. 南宁市轨道交通一号线一期工程白苍岭站一火车站区间详细勘察阶段岩土工程勘察报告[R]. 郑州, 2012. (Geological Engineering Investigation Institute of Ministry of Chemical Industry in Zhengzhou. Detailed geotechnical investigation report of Baicangling station-railway station in Nanning metro line 1[R]. Zhengzhou, 2012. (in Chinese))
- [14] 谢雄耀, 王 强, 刘 欢, 等. 富水圆砾地层盾构下穿火车站股道沉降控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 2): 3960 - 3970. (XIE Xiong-yao, WANG Qiang, LIU Huan, et al. Settlement control study of shield tunnelling crossing railway station in round gravel strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3960 - 3970. (in Chinese))
- [15] 吴顺川, 金爱兵, 高永涛. 袖阀管注浆技术改性土体研究及效果评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1353 - 1358. (WU Shun-chuan, JIN Ai-bing, GAO Yong-tao. Studies of sleeve-valve-pipe grouting technique and its effect on soil reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1353 - 1358. (in Chinese))
- [16] 徐泽民, 韩庆华, 郑 刚, 等. 地铁隧道下穿历史风貌建筑影响的实测与分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 364 - 374. (XU Ze-min, HAN Qing-hua, ZHENG Gang, et al. Field monitoring and analysis of effects of metro tunnels under historic buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 364 - 374. (in Chinese))
- [17] 魏晨亮, 王玉卿, 唐高洪. 南宁地区富水圆砾层袖阀管注浆加固技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(5): 499 - 502. (WEI Chen-liang, WANG Yu-qing, TANG Gao-hong. Case study on consolidation of water-rich cobble ground in Nanning by means of soletanche grouting[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(5): 499 - 502. (in Chinese))
- [18] 蒋胜光, 张子新. 圆砾地层双线盾构施工参数及沉降特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊 2): 698 - 705. (JIANG Sheng-guang, ZHANG Zi-xin. Analysis of boring parameters and ground settlement characteristics during double-line tunneling in circular-gravel layer[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S2): 698 - 705. (in Chinese))
- [19] 盛 骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 132 - 135. (SHENG Zhou, XIE Shi-qian, PAN Cheng-yi. Probability and mathematical statistics[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2008: 132 - 135. (in Chinese))