

南宁复合地层地铁盾构选型与应用研究

郭松涛¹, 杨喜锋², 孟庆军³, 左 龙⁴, 杨 磊²

(1. 广西南宁机场综合交通枢纽建设有限公司, 广西 南宁 530048;

2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;

3. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 广西 南宁 530029;

4. 中铁隧道股份有限公司, 河南 郑州 450001)

摘 要: 盾构选型的合理性是盾构隧道能否顺利施工的前提, 特别是在复杂地质条件下合理的盾构选型显得尤为重要。本研究依托南宁机场引入线吴圩机场站-盾构始发井区间工程, 采用 *LEC* 方法开展了区间复合地层盾构施工风险分析, 并针对存在的风险特点进行了地铁盾构选型与现场应用研究。研究表明: 南宁复合地层地铁施工风险较高, 特别是岩溶地层、黏土-灰岩软硬不均地层风险达到了 IV 级; 针对本工程盾构掘进施工可能遇到的风险, 从盾构机刀盘与刀具配置、推进与驱动配置等关键部分进行优化设计。现场应用表明, 盾构在此区段内地质适应性较强、掘进工效高, 地表沉降及管片沉降均在安全可控范围内。研究成果可为南宁类似工程施工提供借鉴。

关键词: 盾构选型; 复合地层; 施工风险; 南宁地铁; 岩溶

中图分类号: U455.3⁺9

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)04-0028-07

Selection and Application of Shield Structure for Nanning Composite Stratum Subway

GUO Songtao¹, YANG Xifeng², MENG Qingjun³, ZUO Long⁴, YANG Lei²

(1. Guangxi Nanning Airport Comprehensive Transportation Hub Construction Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530048, China;

2. College of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan, 410075, China;

3. Nanning rail transit Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530029, China;

4. China Railway Tunnel Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450001, China)

Abstract: The reasonableness of shield selection is a prerequisite for the smooth construction of shield tunnels, especially in complex geological conditions. In this paper, based on the Nanning Airport Introduction Line Wuxu Airport Station - Shield Start Shaft interval project, the *LEC* method was used to carry out the risk analysis of shield construction in the interval composite stratum, and the metro shield selection and field application research were conducted for the existing risk characteristics. The results are as follows. The risk of metro construction in Nanning composite strata is high, especially the risk of karst strata and clay - chert soft and hard uneven strata reaches level IV. For the risks that may be encountered in the shield tunneling construction of this project, the key parts such as shield machine cutter and tool configuration, propulsion and drive configuration are optimally designed. The field application indicates that the shield has strong geological adaptability and high digging efficiency in this section, and the surface settlement and pipe settlement are within the safe and controllable range. The research results can provide reference for similar projects in Nanning.

Keywords: shield selection; composite strata; construction risk; complicated geology; Nanning metro; karst

收稿日期: 2022-03-24

修稿日期: 2022-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108389); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ41086)

作者简介: 郭松涛(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通工程等方面工作。E-mail: 15537013352@163.com

通讯作者: 杨喜锋(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为隧道与地下工程。E-mail: 1632356587@qq.com

随着我国城市轨道交通的快速发展^[1],盾构法施工因其安全性高、对环境的影响小以及工效高等优势在城市地铁建设中得到了广泛应用^[2-3]。与此同时,盾构隧道建设过程中的不良地质灾害控制已成为重要的研究课题,尤其是近些年就发生了数起盾构穿越复合地层的工程事故,给盾构隧道施工带来严重危害,甚至造成重大经济损失、人员伤亡等。大量工程实践表明,合理的盾构选型设计是复合地层盾构安全高效施工的关键。因此,开展复合地层条件下地铁盾构选型具有十分重要的现实意义与工程应用价值^[4-6]。

目前,国内外已有诸多学者围绕砂卵石地层、软硬不均地层、岩溶特殊地层等方面开展了系列盾构选型设计^[7]。在砂卵石地层方面,张伟等^[8]结合成都地区特殊水文地质,从地层条件、沉降控制等角度出发,总结出了大直径土压平衡盾构的合理掘进参数;杨晓华^[9]以兰州地铁轨道交通1号线某区间工程为背景,借助盾构扭矩和推力的数学计算模型,对双洞地铁隧道盾构进行了选型研究;江华等^[10]依托北京地铁新机场线某盾构区间工程,基于PFC数值模拟及现场测试方法,研究了刀盘、刀具参数对盾构掘进效率的影响。在软硬不均地层方面,杜闯东^[11]依托狮子洋隧道工程,对双模盾构和常压刀盘的应用进行了优化研究;王凯等^[12]依托南昌地铁3号线,进行了刀盘、刀具对上软下硬地层的适应性分析。在对岩溶特殊地层方面,谭庆洲^[13]、蒋磊等^[14]、侯凯文等^[15]分别针对贵阳、长沙、南宁等地的盾构工程,基于盾构施工风险分析开展了盾构设备选型及优化设计,并通过工程应用验证了其地层适应性。硬岩地层易发生刀具磨损大、掘进效率低、刀盘盾体易卡死等问题^[16],韩坤成等^[17]基于南京至句容城际轨道交通工程,提出调整刀盘开口率、配置超挖刀等处理措施;贾瑞华等^[18]以大东湖深隧工

程为例,对盾构设备进行了选型研究。综上可知,在盾构选型方面学者们已取得了较为丰富的研究成果,但对于盾构隧道连续穿越全断面泥质粉砂岩、全断面灰岩及软硬不均黏土-灰岩复合地层等特殊地质的选型研究则鲜有报道。

鉴于此,本文以南宁机场引入线吴圩机场站-盾构始发井区间工程为依托,结合沿线复杂地质水文特征,开展盾构施工风险分析,在此基础上对盾构设备进行针对性的选型设计,以期为类似工程盾构选型提供参考。

1 工程概况

南宁国际空港综合交通枢纽城市轨道交通机场线引入机场隧道工程吴圩机场站-盾构始发井区间线路由吴圩机场站后东北方向开始,与新建南崇铁路线近似平行敷设至机场第二高速立交桥后到达盾构始发井,施工线路概况如图1所示。区间左右线为分修的两单线隧道,埋深处于9.7 m~38.2 m范围,线间距为14.0 m~22.4 m,其中区间左线起止里程为ZDK11+091.533—ZDK14+046.213,隧道总长2 954.860 m,右线起止里程为YDK11+091.617—YDK14+045.042,隧道总长2 953.425 m。隧道最小曲线半径为2 000 m,线路最大坡度约6‰,盾构管片内径和厚度分别为6.00 m、0.35 m。该工程穿越建(构)筑物数量较多、类型多样,尤其涉及南崇铁路隧道的变形控制,对施工沉降控制要求较高。

1.1 地质特征

区间盾构穿越地层主要为全断面泥质粉砂岩、全断面白云质灰岩夹灰岩及软硬不均黏土-灰岩复合地层,隧道左、右线地质剖面图分别如图2和图3所示。



图1 施工线路概况图

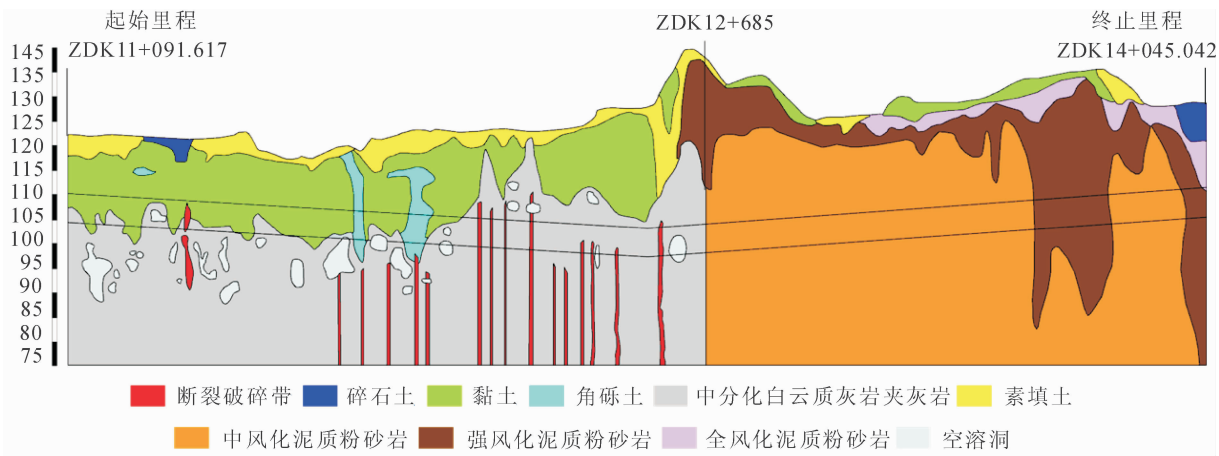


图 2 隧道左线地质剖面图

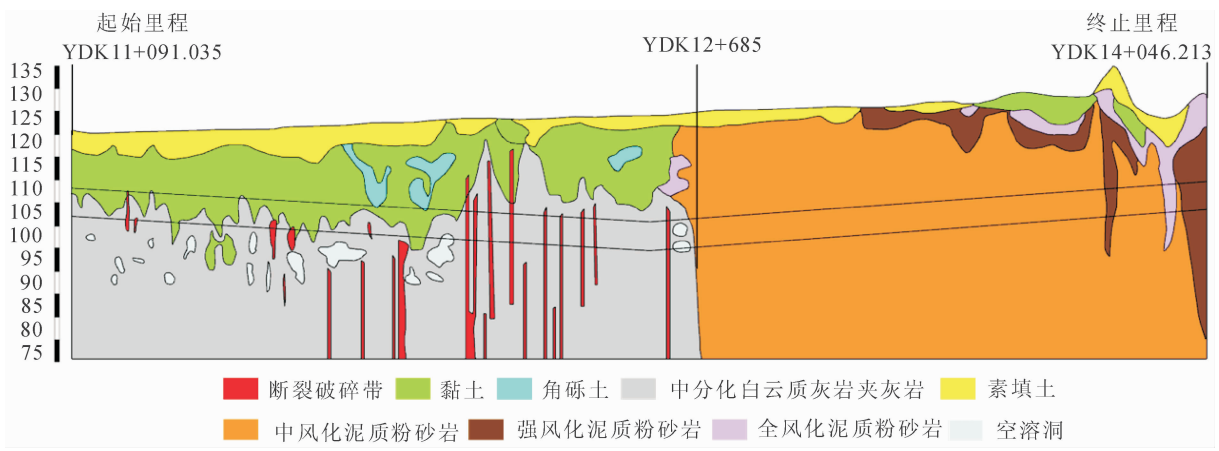


图 3 隧道右线地质剖面图

场区 DK11 +091—DK12 +685 段为可溶性岩白云质灰岩夹灰岩地段,岩溶大多强烈发育,属易塌陷区段。地勘资料显示,该段岩溶钻孔见洞率为 44.

3%,溶洞以水平发育的中小型无充填溶洞为主,溶洞连通性较好,充填物以软塑状或流塑状黏土为主。典型溶洞发育情况统计见表 1。

表 1 典型溶洞发育情况

序号	隧底高程/m	溶洞高程范围/m	相对隧道水平位置/m	岩溶顶板特征	充填情况
1	104.65	(104.65,105.95)	距左隧边线 7.94	0.70 m 厚中风化白云质灰岩夹灰岩	全充填软塑—流塑状黏土
2	100.23	(100.23,101.93)	距右隧边线 4.47	5.29 m 厚中风化白云质灰岩夹灰岩	半充填软塑—流塑状黏土
3	94.65	(94.65,97.41)	距右隧边线 1.53	7.64 m 厚中风化白云质灰岩夹灰岩	半充填软塑—流塑状黏土
4	98.10	(98.10,99.26)	距左隧边线 2.75	2.60 m 厚中风化白云质灰岩夹灰岩	全填充角砾土、砂
5	96.25	(96.25,99.25)	距左隧边线 8.70	4.00 m 厚中风化白云质灰岩夹灰岩	全填充角砾土、砂
6	100.99	(100.99,102.48)	距右隧边线 0.47	3.30 m 厚中风化白云质灰岩夹灰岩	无充填
7	98.02	(98.02,99.42)	距左隧边线 7.86	2.02 m 厚中风化白云质灰岩夹灰岩	无充填

1.2 水文特征

工程范围内地下水主要分为上层滞水、基岩裂隙水、岩溶水三种类型。其中上层滞水主要赋存于素填土、黏土中,水量较为贫乏,水位埋深处于 0.2 m~3.0 m 范围;基岩裂隙水赋存于泥质粉砂岩的浅

部风化裂隙中,岩层渗透性较差,属极弱富水区,水位埋深处于 3.1 m~14.6 m 范围;岩溶水赋存于白云质灰岩夹灰岩的溶洞、溶隙、溶孔及其溶蚀破碎带中,具有承压性,水位能在土、岩界面上下波动,地下水补给来源较为充足,水量较为丰富,水位埋深在

0.3 m~23.5 m 范围。

2 盾构施工风险分析

2.1 盾构施工主要风险辨识

根据工程项目地质勘察报告,盾构主要穿越的地层主要为:①粉质黏土;②泥质粉砂岩;③溶洞;④中风化白云质灰岩。盾构在掘进过程中存在的风险主要有穿越全断面软土地层风险、穿越岩溶地层风险、穿越黏土-灰岩软硬不均复合地层风险、穿越断层破碎带风险以及盾构设备风险,具体见表 2。

表 2 主要风险类别及分析

风险类别	风险分析
穿越全断面软土地层风险	由于软土渗透系数小,黏粒易形成刀盘泥饼,使刀具失去切削作用。
穿越岩溶地层风险	盾构穿越岩溶地段时易偏离轴线;溶洞内部填充物承载力较低时,易出现栽头风险;刀盘刀具在旋转过程中由于突然遇到凹凸不平的溶洞,会因为瞬间荷载增大造成刀具破坏。
穿越全断面灰岩地层风险	由于灰岩单轴抗压强度大、可掘性差,掘进时的刀盘刀具磨损量较大,同时对螺旋输送机造成严重磨损。
穿越黏土-灰岩软硬不均复合地层风险	盾构姿态控制较为困难,导致盾构容易偏离轴线,同时,由于地层不均匀极易造成刀具松动、偏磨。
穿越断层破碎带风险	碎裂岩稳定性差,盾构掘进时扰动易导致坍塌,且碎裂岩内可能存在孤石,盾构掘进时易导致刀盘卡死、无法出渣等情况。
盾构设备风险	盾构设备在长期服役情况下推进装置、同步注浆装置、密封装置等易发生故障。

2.2 风险等级评估

作业条件危险性评价法(LEC)是一种对操作人员在具有潜在危险性环境中作业时的危险性的半定量评价方法^[19~20]。该方法认为影响危险性的主要因素有 3 个:发生事故或危险事件的可能性(L)、人员暴露于这种危险环境的情况(E)、事故一旦发生可能产生的后果(C),通过给不同因素的不同等级分别确定不同的分值,再通过三个分值的乘积结果(D)来评价危险性的程度大小。具体如公式(1)表示:

$$D=L\times E\times C\tag{1}$$

本工程不良地质种类较多且分布复杂,为做好风险管控措施,减少事故发生,现对盾构掘进过程中存在的风险采用 LEC 法进行风险等级评估,对盾构施工风险评价对象进行赋值并进行计算,评价结果如表 3 所示。

表 3 盾构施工风险 LEC 评价表

风险类别	L	E	C	D	风险等级
穿越全断面软土地层风险	3	6	3	54	Ⅱ
穿越岩溶地层风险	6	3	15	270	Ⅳ
穿越全断面灰岩地层风险	3	6	7	126	Ⅲ
穿越黏土-灰岩软硬不均复合地层风险	6	6	7	252	Ⅳ
穿越断层破碎带风险	6	3	7	126	Ⅲ
盾构设备风险	3	2	7	42	Ⅱ

由盾构施工主要潜在风险的评估结果可知,盾构穿越岩溶地层风险与穿越黏土-灰岩软硬不均复合地层风险均达到Ⅳ级,存在高度危险;穿越全断面灰岩地层风险和穿越断层破碎带风险均达到Ⅲ级,存在中高风险;穿越全断面软土地层风险和盾构设备风险等级达到Ⅱ级,存在一般风险。为确保盾构能够在复合地层条件下顺利穿越岩溶发育区,有必要对盾构机械设备进行合理选型,提升盾构对地层的适应性,从而降低施工风险。

3 盾构选型针对性设计

3.1 总 述

本区间隧道左、右线均采用土压平衡盾构,开挖直径为 6.98 m,主机和整机的总长分别为 9.50 m 和 100.00 m,主要技术参数如表 4 所示。

表 4 盾构主要技术参数

开挖直径/m	6.98	刀盘转速/rpm	0.3~3.4
前盾直径/m	6.95	最大总推力/kN	49 588
中盾直径/m	6.94	最大工作压力/bar	10
盾尾直径/m	6.93	装机功率/kW	2 198
刀盘开口率/%	34	主驱动功率/kW	1 400
额定扭矩/kN·m	8 855	水平转弯半径/m	250
脱困扭矩/kN·m	10 625	纵向爬坡能力/‰	±50

3.2 刀盘结构与刀具配置

结合本区间盾构施工的重难点,应综合考虑刀盘刀具的设计、布置,使盾构能够完成不同地质条件下的隧道掘进工作。

(1) 刀盘结构设计。如图 4 所示为盾构机刀盘,刀盘的整体开口率为 36%,中心区域开口率为 38%,并采用 6 主梁+6 副梁的结构形式,此结构形式具有较强的刚度和强度,能够兼顾在黏土、砂层等软土地层和上软下硬、基岩突起、风化岩等复合地层的使用。

(2) 注浆系统。基于盾构施工中“保头护尾勤注浆”的原则,借助雷达检测设备实现对盾构壁后注浆厚度的检测。在盾体布置了 8 个超前注浆管,前盾布置了 7 个水平超前注浆孔,中心回转接头置有编码器+机械刻盘,能够实时定位并显示刀盘开口位置,便于超前钻机定位。

4 工程应用效果评价

选取穿越地质条件复杂、工程质量控制要求高、具有代表性的岩溶发育区段内试验段作为盾构的地质适应性评价区段,主要通过对掘进参数(总推力、扭矩、掘进速度等)的实测数据进行对比分析,进而评价本工程盾构的地质适应性。

4.1 掘进参数监测情况

该区段对应的管片环号范围为第 900 环~1 000 环,盾构机推进系统的实测推力在 5 685 kN~14 145 kN 之间,推进系统的最大推力为 50 600 kN,具体如图 5 所示;盾构掘进速度在 6.20 mm/min~21.56 mm/min 之间,盾构掘进最大速度为 70 mm/min,具体如图 6 所示;盾构机的实测刀盘扭矩在 1 065 kN·m~2 237 kN·m 之间,额定扭矩为 8 825 kN·m,具体如图 7 所示。

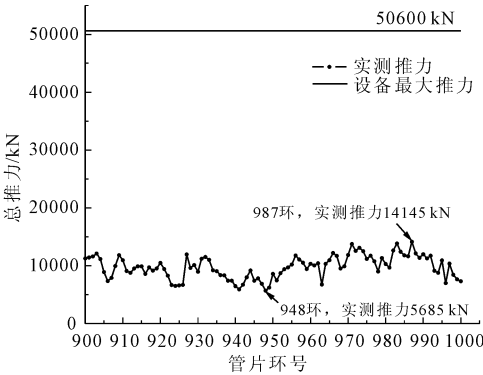


图 5 实测推力与设备最大推力对比

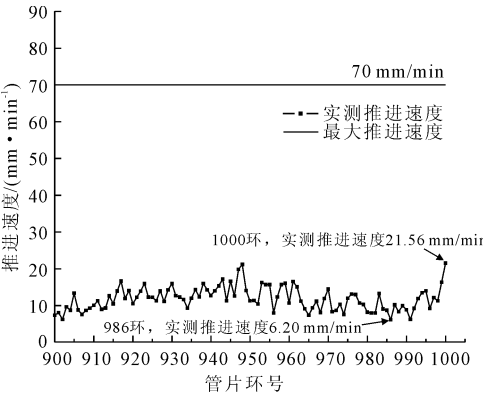


图 6 实测推进速度与最大推进速度对比

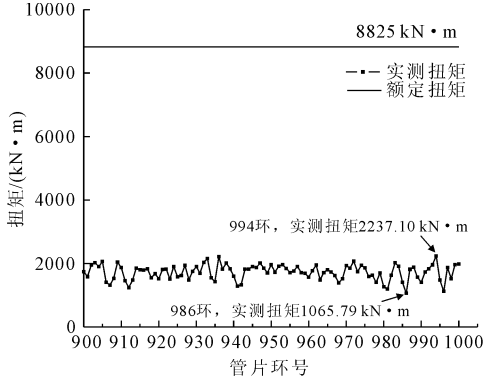


图 7 实测扭矩与额定扭矩对比

对盾构机施工实测参数方面进行分析,盾构在岩溶区段掘进时的顶推力和刀盘扭矩参数变化相对平稳,并没有出现明显的参数变化现象。盾构机在岩溶区段掘进时的顶推力为选型配置值的 11.2%~27.9%,刀盘扭矩为选型配置值的 12.1%~25.3%,均具有较大的安全余量。盾构机掘进从 950 环至 1 000 环的总推力在逐渐上升,掘进速度逐渐下降,具体如图 5、图 6 所示。由此可知,盾构机的总推力在一定程度上可以反映出盾构掘进情况,即顶推力处于上升阶段时盾构掘进较为困难,进而导致盾构掘进速度缓慢。此外,由于所选区段为高强度灰岩地层,盾构机故盾构掘进速度较缓,但参数未出现明显激增骤减情况。总体而言,在本工程中,盾构机配置的各项掘进参数较为安全,盾构机在灰岩地层中的适应性较好。

4.2 地表及管片沉降监测情况

如图 8 所示,对地表及管片沉降数据方面进行分析,地表累计沉降量在 101 d 时达到峰值 3.57 mm,且后续沉降曲线趋向于平稳;左、右线管片沉降量分别在 92 d、96 d 时达到峰值 5.14 mm、5.02 mm,后续沉降曲线均趋向于平稳。以上数据分析表明,地表沉降及管片累计沉降量均在安全可控范围内。

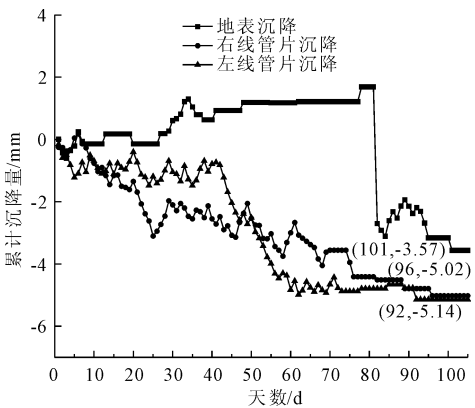


图 8 地表及管片累计沉降量

5 结 论

(1) 盾构施工风险分析表明:盾构穿越岩溶地层和黏土-灰岩软硬不均复合地层风险均达到Ⅳ级,存在高度危险;穿越全断面灰岩地层和断层破碎带风险均达到Ⅲ级,存在中高风险,施工前应提出有针对性的盾构选型方案。

(2) 针对南宁复合地层,对盾构进行了针对性选型设计:针对刀盘易结泥饼的特点,设计刀盘中心开口率为 38%;针对盾构脱困问题,配备 32 根推进油缸及 7 组变频驱动电机;针对盾构姿态控制,选用被动铰接型式系统;针对螺机磨损和喷涌问题,选用高铬合金块和轴式螺旋输送机;为保障盾构掘进过程中的风险判断与及时处理,配置超前地质预报与盾体超前注浆系统。

(3) 工程应用效果表明,盾构机掘进参数配置较安全、地质适应性较强,掘进过程中的顶推力等参数变化相对平稳,地表沉降及管片沉降均在安全可控范围内,说明上述针对南宁地区复合地层的盾构选型设计有效保证了盾构正常掘进及安全施工。研究成果可为南宁类似工程施工提供借鉴。

参考文献:

- [1] 郑宏利,牛豪爽. 综合交通枢纽施工对既有地铁隧道结构影响机制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(5):103-108.
- [2] 于宏福,高 登,李海锋. 地铁盾构区间下穿有轨电车道床沉降分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(6):63-69.
- [3] 何同继,张怀鹏,苏留锁,等. 基于数值模拟的土压平衡盾构机施工效率优化[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6):158-163.
- [4] Zhan J W, Li T, Guo C, et al. Geological adaptability analysis of $\Phi 7$ m EPB shield cutterhead in mixed ground of Shenzhen[J]. Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal, 2017, 50:75-80.
- [5] Kai C, Lin W K. Muck problems in subway shield tunneling in sandy cobble stratum[J]. Polish Maritime Research, 2016, 23(S1):175-179.
- [6] Liu R D, Zheng J G, Zhang K, et al. Prediction on ground surface settlement caused by subway shield construction in Xi'an[J]. Applied Mechanics and Materi-

- als, 2013, 353-356; 1534-1538.
- [7] Li L Y, Du X L, Zhou J. Numerical simulation of site deformation induced by shield tunneling in typical upper-soft-lower-hard soil-rock composite stratum site of Changchun[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(8):3156-3168.
- [8] 张 伟,赵东平,王卢伟,等. 砂卵石地层大直径土压平衡盾构选型研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(S1):441-450.
- [9] 杨晓华. 砂卵石地层中复合式土压平衡盾构掘进参数及地层变形规律研究[J]. 隧道建设, 2014, 34(8):721-730.
- [10] 江 华,张晋勋,苏一冉,等. 基于 PFC^{3D} 的北京砂卵石地层盾构刀盘选型及刀盘布置数值模拟研究[J]. 机械工程学报, 2021:1-11.
- [11] 杜闯东. 基岩破碎带与软硬不均等不良地层盾构掘进技术分析[J]. 隧道建设, 2015, 35(9):920-927.
- [12] 王 凯,赵 辉,林宝刚,等. 南昌地铁 3 号线上软下硬地层盾构机选型[J]. 铁道建筑技术, 2020(1):111-114, 120.
- [13] 谭庆洲. 贵阳岩溶地层盾构机选型分析与风险控制[J]. 市政技术, 2019, 37(3):117-121.
- [14] 蒋 磊,钟 可,戴 勇,等. 穿越湘江水下岩溶发育区地铁盾构选型研究与应用[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(2):85-90, 131.
- [15] 侯凯文,王 崇,江 杰,等. 南宁地铁 2 号线盾构选型设计与适应性分析[J]. 隧道建设, 2017, 37(8):1037-1045.
- [16] Hong K R, Yang R H. The major problems and counter-measures on the shield machine tunneling in the hard rock stratum[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 105-107:1438-1442.
- [17] 韩坤成,李旭东,魏 畅,等. 硬岩地层中土压平衡盾构机的选型研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(9):5-7.
- [18] 贾瑞华,谷海华,叶亦盛,等. 大东湖深隧长距离大埋深复杂地层盾构选型研究[J]. 施工技术, 2020, 49(19):67-70.
- [19] 黄新任,黄静宇. 岩溶隧道施工风险 LEC 区间分析方法研究[J]. 湖南交通科技, 2014, 40(2):141-143, 157.
- [20] 李常茂. 作业条件危险性评价法在盾构施工安全评价中的应用[J]. 黑龙江科技信息, 2014(18):198-199.