

渣土泵送技术在土压平衡盾构机分体始发中的应用*

熊栋栋^{1,2,3} 陈祥龙^{1,2,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 430040, 武汉; 2. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 430040, 武汉; 3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 430040, 武汉//第一作者, 工程师)

摘要 为解决地铁隧道盾构机分体始发阶段空间狭小、无法按常规方法进行渣土运输的难题,以吉隆坡地铁 MRT2 号线地下段 B 标区间为研究对象,对土压平衡盾构机始发阶段渣土泵送技术的设备选型、工艺流程、施工工效、地层适应性,以及实施过程中遇到的问题进行了分析,提出了针对性的优化改进措施,形成了一整套具有可操作性的土压平衡盾构机始发阶段渣土泵送关键技术。利用该技术成功完成了 MRT 2 号线地下段 B 标区间盾构机分体始发掘进阶段共计 71 环的盾构掘进出渣任务。

关键词 地铁; 土压平衡盾构机; 渣土运输; 渣土泵送技术; 盾构机分体始发

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.020

Application of Muck Pumping Technology in the Separate Initiation of Earth Pressure Balance TBM

XIONG Dongdong, CHEN Xianglong

Abstract In order to solve the small space problem in the initial stage of metro EPB TBM (earth pressure balance tunnel boring machine) construction, which leads to the muck transportation failure in the conventional method, the tunneling section of the Package B of Kuala Lumpur MRT Line 2 is taken as an example to carry out the research. Problems in tunnel construction, like equipment selection, technological process, construction efficiency and stratum adaptability of the muck pumping technology in the initial stage of metro EPB TBM construction are analyzed, corresponding optimization and improvement measures are put forward. On this basis, a set of key technologies with operability for muck pumping in the initial stage of the EPB TBM is formed, and then adopted in the tunneling section of the Package B of Kuala Lumpur MRT Line 2 in the initial stage and successfully complete the muck-discharging task of totally 71 rings.

Key words metro; earth pressure balance TBM; muck

transportation; muck pumping technology; separate initiation of shield tunnel

First-author's address CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., 430040, Wuhan, China

城市轨道交通项目通常建设在城市闹市区或者建筑密集地带,不可避免地面临施工场地受到限制的问题。尤其是对于土压平衡盾构机分体始发施工而言,始发阶段的渣土运输问题显得颇为棘手。目前急需寻求一种既简便又安全的分体始发渣土运输工艺。

文献[1]为了能将盾构机分体始发阶段的渣土顺利运出,将出土水平运输方式分为 3 个阶段:第 1 阶段——利用卷扬机和小土斗进行前 10 m 的弃土水平运输;第 2 阶段——利用半截皮带机、电瓶车和小土斗进行 25 m 的弃土水平运输;第 3 阶段——当盾构机掘进距离满足皮带机整体长度时,采用正常的盾构渣土运输系统出渣。文献[2]同样将渣土运输按照始发井及隧道内可利用的空间分 3 阶段进行设计:负环管片施工阶段采用小土斗进行出渣,卷扬机作牵引,汽车吊配合进行吊运;盾构机完全进入隧道后,前 30 m 的掘进范围采用容量为 4 m³ 的渣土箱运送渣土,渣土箱由卷扬机作牵引、龙门吊吊出;随着掘进距离的增大,采用列车编组进行运输,通常采用渣土车出渣、电瓶车水平牵引、龙门吊吊出的渣土运输工艺。

由此可见,土压平衡盾构机分体始发阶段的渣土运输方式通常是利用电瓶车或卷扬机以及汽车吊或龙门吊来回多次地倒运小土斗来进行的,且需要随着可利用施工空间的增加而分阶段地进行工艺和设备的切换。该渣土运输方式施工操作难度大、工艺衔接繁琐,严重制约了盾构机始发阶段的施工效率;过于频繁的渣土水平、垂直运输还增加

* 中国路桥工程责任有限公司科技研发课题(EH-G-KY-2017-21)

了渣土运输过程中的安全风险。

吉隆坡地铁 MRT 2 号线(以下简为“MRT 2 号线”)地下段 B 标区间盾构机分体始发阶段,因场地限制,盾构掘进渣土运输受到极大限制。该工程的地勘资料显示:盾构机试掘进阶段开挖范围内的地质主要由砂质粉土、粉质砂土等土质构成,地层中的黏粒含量适当,土仓渣土经改良以及加水稀释、搅拌后,具有良好的携渣性能和可泵送性能。为此,提出采用渣土泵送技术来解决盾构机分体始发掘进阶段的渣土运输难题,将常规混凝土拖泵(见图 1)安装于盾构机 1 号台车内部,在盾构机分体始发期间,利用混凝土拖泵及配套的泵管等设备将螺旋机排出的渣土经过稀释、搅拌处理后直接泵送至地面渣土坑。通过这种创造性的分体始发渣土运输工艺,顺利完成了试掘进阶段共计 71 环的土压平衡盾构机的出渣工作。



图 1 混凝土拖泵安装在盾构机 1 号台车内

Fig. 1 Concrete pump installed in shield machine No. 1 trolley

1 泵送出渣设备的构造

混凝土拖泵是泵送出渣的主要设备,主要由料斗、搅拌机、分配阀和液压泵送系统等构件组成^[3]。混凝土拖泵的选型需考虑其尺寸的适用性、泵送能

力及速度的适用性,以及料斗的筛分及搅拌系统与地层的适应性等 3 个因素。

1.1 设备尺寸的适用性

本项目选用的混凝土拖泵尺寸为 $6.8\text{ m} \times 1.6\text{ m} \times 1.8\text{ m}$ (长度 \times 宽度 \times 高度)。始发阶段将其安装在 MRT 2 号线地下段 B 标区间上行线海瑞克 S-778 双模盾构机(掘进期间仅采用土压平衡模式)1 号后配套台车内部。1 号台车内部框架在拆除了泥水模式下的碎石机、泥水泵及泵管的设备之后,空余的空间尺寸为 11 m (长度) $\times 1.9\text{ m}$ (宽度) $\times 2.2\text{ m}$ (高度),因此设备在空间上完全满足要求。

1.2 设备性能的适用性

混凝土拖泵泵送渣土的速度直接决定了试掘进阶段盾构机的掘进速度。拖泵泵送压力分为 13 MPa 和 7 MPa 两档。经计算,本项目泵送出渣所需最大出口泵送压力为 6.11 MPa,故所选拖泵性能满足要求。出口泵送压力为 7 MPa 时,混凝土拖泵最大理论泵送速度为 $70\text{ m}^3/\text{h}$,对应的盾构掘进速度约为 $20\text{ mm}/\text{min}$,可满足盾构机试掘进期间的施工效率要求。

1.3 料斗筛网的适用性

混凝土拖泵料斗设置有筛网,可将螺旋机排出的渣土进行过滤。筛网的格栅尺寸为 40 mm ,既可以过滤掉粒径为 40 mm 以上的碎石等杂物,防止其堵塞分配阀或泵管,提高泵送效率;又可确保渣土塑性偏大时仍可顺利通过筛网,以免渣土在筛网上堆积,影响盾构机的掘进施工效率。

泵管型号为 DN 125 mm,单节长度为 3 m ,允许最大颗粒粒径为 40 mm 。泵管经过拖泵的分配阀出来之后再经过 2 个 90° 变接头,沿着拖泵底部向台车后部布置,在 3 号台车尾部安装软管;盾构机每前进 2 环,在软管后端进行管道的延伸。泵管布置如图 2 所示。

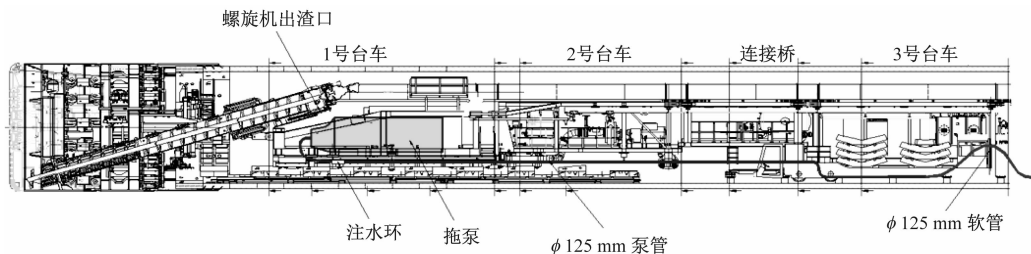


图 2 泵管的布置图

Fig. 2 Layout of the pump pipe

软管后部的管路固定在台车轨道外侧,并一直延伸至始发井外 70 m 处。通过 90°弯头以及支架固定,将管路最终竖直延伸至地面,且车站每层结构板均设置支架对竖直管路进行固定。水平管路的最大长度约 195 m,竖直管路长约 28 m。

高压注水环(见图 3)是 1 节沿内壁环向布置有 4 路高压水管的特殊管路。渣土泵送期间,可通过高压水泵沿着注水环内壁环向喷射高压水,最高压力达 20 MPa,在注水环内壁形成环向水箍,起到减小泵管内壁摩擦阻力、增加渣土含水量的作用,有助于提高渣土在泵管中的可泵性。



图 3 高压注水环

Fig. 3 High pressure water injection ring

2 盾构机掘进出渣的施工工艺流程

2.1 步骤 1

为满足盾构机掘进出渣可泵送的要求,始发前,在始发井区域的隧道开挖范围内取土进行试掘进阶段渣土改良试验,确定试掘进期间的渣土改良配比。试掘进期间,土仓内的渣土按照泡沫溶液质量分数为 1.5%、泡沫膨胀倍率为 1:7、泡沫注入率为 20% 的配比进行渣土改良。改良之后的渣土塌落度为 180 mm。通过叶片剪切试验(见图 4)测出渣土的剪切强度为 1.47 kPa,处于可泵送的范围(1~2 kPa)。盾构机掘进期间,若碰到含水量小或者土质较硬的地层时,要适当增大泡沫注入流量、泡沫溶液浓度或膨胀倍率等参数,以保证改良渣土的效果;若遇到含水量大或者土质较松散的地层时,适当减小相关泡沫改良参数。

泡沫参数调整的原则为:调整频率不宜过快,通常调整了泡沫参数后几分钟才能初步起效,完全起效通常需时间更久。这是因为泡沫主要用于改良正在开挖或刚从掌子面开挖下来的土体,对土仓内已开挖渣土的作用较小。因此,调整泡沫参数



图 4 叶片剪切试验

Fig. 4 Blade shear test

时,原先开挖的渣土仍然占据土仓,盾构相关掘进参数变化只能随着新配比改良后的渣土将旧渣土从土仓置换出去的程度而逐渐显现出来。

2.2 步骤 2

土仓内经过改良的渣土通过螺旋机后闸门排出,直接排到其下部的混凝土拖泵料斗上。料斗上接 1 根水管,掘进期间往料斗内加水对排出的渣土进行稀释,使之更适合于泵送,水流量根据渣土的干稀程度进行调整。掘进期间在混凝土拖泵料斗处安装 1 个摄像头,将信号连到主机室,使主司机在掘进期间可实时观察螺旋机所出渣土的改良效果以及料斗上渣土的堆积情况,如发现盾构机掘进速度与混凝土拖泵泵送速度不匹配时,可及时调整螺旋机转速以及螺旋机后闸门张开量,减少螺旋机出土量;若发现料斗堆满,则可立即关闭螺旋机后闸门,停止掘进,待料斗内渣土清空之后再恢复掘进。

2.3 步骤 3

从料斗格栅筛分下来的渣土和外加水经搅拌机充分搅拌之后,实现渣土第 2 次流塑性改良,并随即被泵送至管路中,经过混凝土拖泵下方高压注水环的润滑和稀释作用,沿着管路一直被泵送至地面。从料斗格栅过滤出的石块、玻璃纤维筋等则通过人工进行清除。

2.4 步骤 4

为了计量盾构机掘进时每环出土方量,渣土泵送至地面后,首先流入渣土斗(见图 5)内。当 1 个渣土斗即将盛满时,工人立即将渣土泵软管切换至另 1 个渣土斗上方继续出土,确保泵送出土施工不会因为换渣土斗而中断。装满的渣土斗通过龙门吊倾倒至渣土坑内。盾构机试掘进期间,前 39 环范围内每环平均出渣 7 斗,出渣量为 100 m³ 左右;第 40~71 环范围内,为了稀释硬塑黏土,大幅提升清水注入量,每环平均出渣 10 斗,出渣量为 150 m³

左右。



图 5 地面渣土斗

Fig. 5 Duck bucket used for muck measurement on the ground

2.5 步骤 5

为了提高渣土的可泵送性,渣土需较大的含水量,因而需在地面渣土坑设置隔膜泵。待排至渣土坑的渣土沉淀后,利用隔膜泵将渣土坑内的水及时抽排至场地内的污水处理系统(见图 6),经处理后排至市政管道。



图 6 污水处理系统

Fig. 6 Sewage treatment system

3 混凝土拖泵的泵送压力计算

混凝土拖泵投入使用前,需通过理论论证拖泵泵送出土的可行性。对混凝土拖泵的泵送能力进行了计算及验证。

经计算可得,单位长度水平管路的泵送压力损失量 ΔP_1 为:

$$\Delta P_1 = \frac{4}{d} \left[k_1 + k_2 \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) V_2 \right] a_2 \tag{1}$$

其中:

$$k_1 = (3 - 0.10 S) \times 102 \tag{2}$$

$$k_2 = (4 - 0.10 S) \times 102 \tag{3}$$

式中:

- k_1 ——粘着系数,Pa;
- S ——泵送料塌落度,mm;
- d ——泵管的内径,mm;
- k_2 ——泵送速度系数,Pa/(m/s);
- t_2 ——混凝土拖泵分配阀切换时间,s;
- t_1 ——活塞推压泵送料时间,s;
- V_2 ——泵送料在输送管内的平均速度,m/s;
- a_2 ——径向压力与轴向压力之比。

式(1)中, S 取 180 mm,可得 k_1 为 100 Pa, k_2 为 200 Pa/(m/s); d 取 125 mm, t_2/t_1 取 0.3, V_2 取 0.63 m/s, a_2 取 0.95,可得 ΔP_1 为 0.01 MPa。

根据 JGJ/T 10—2011《混凝土泵送施工技术规程》的规定,竖直管路、弯头及软管可等效为一定长度的水平管路。本项目中泵送出渣等效水平管路总长度如表 1 所示。

表 1 泵送出渣等效水平管路总长度统计

Tab. 1 Overall length of equivalent horizontal pipeline of muck pumping				
管路类别	规格	等效水平管路长度/m	实际数量	等效水平管路总长度/m
水平管路	125A	1	195 m	195
竖直管路	125A	4	28 m	112
90°弯头	半径为 0.5 m	12	12 根	144
软管	5~8 m	20	2 根	40

经计算,泵送出渣等效水平管路的总长度为 491 m,单位长度水平管路的泵送压力损失量为 0.01 MPa,混凝土拖泵启动压力损耗及分配阀压力损耗为 1.2 MPa。由此可得,管路总的泵送压力损失量为 6.11 MPa,小于 7 MPa。因此,本项目混凝土拖泵的泵送压力满足要求。

4 工效分析

MRT 2 号线地下段 B 标区间上行线试掘进第 1~71 环采用渣土泵送技术进行盾构机掘进出渣,总体工期为 30 d。受设备故障频繁、管片拼装和注浆等操作不熟练、工序安排不合理等影响,日均完成量为 2.37 环,但仍超出日均 2 环的计划完成量。

区间上行线从移除混凝土拖泵开始至负环管片和反力架拆除、道岔安装之前,试掘进段的盾构出渣方式已改用了常规的皮带机+单列电瓶车编组+龙门吊垂直运输的形式;从第72环掘进至第93环,共计22环,历时10 d,日均完成2.2环<2.37环,可见试掘进期间采用拖泵出渣方式的工效优于常规出渣方式。

5 泵送出渣施工阶段遇到的问题

5.1 黏粒含量较小的地层易发生堵管

盾构机试掘进期间偶尔会遇到砂性土地层。由于渣土中黏粒含量少,为了保证渣土的可泵性,必须多加水,使渣土更稀。遇到这种地层必须尽量保证连续泵送^[4],一旦泵送中断,渣土中的部分砂土、碎石会发生离析而滞留在泵管内;当泵送中断次数增多时,离析的砂土、碎石逐渐增多、聚集,导致堵管的发生。

5.2 盾构机始发穿越地连墙阶段的出渣方式

盾构机穿越地连墙期间,含有大量粒径为30~50 mm的混凝土块和长达数10 cm的玻璃纤维筋的渣土从螺旋机出闸口排出并大量堆积在料斗上,导致混凝土拖泵基本无法使用;部分通过格栅的渣土也极易造成堵管。最终只能通过混凝土拖泵料斗上焊溜槽将渣土排至台车左侧的走道板上,利用人工清理至台车旁边的小土斗上,再利用吊车吊运出土。

5.3 硬塑黏土地层掘进问题

盾构机掘进至第50环后,地层逐渐变硬,土性变黏。为控制地面沉降,业主要求第50~71环的土仓压力须控制在270~280 kPa。盾构机采用半仓掘进模式,虽可以减小推力,提高掘进速度,但由于土仓压力值较高,用气来保压,土仓压力极不稳定,施工风险比较大。因此,盾构机只能采用土仓内近于满仓的方式掘进。

土仓压力越高,掌子面作用于刀盘的反力越大;土仓内渣土越满,渣土作用于盾构机仓壁的反力越大^[5]。因此,盾构机推力可由1 400 t上升至1 800 t以上。地层黏性较大,在高推力和高压力的挤压作用下,切削下来的土体更难以被打散,难以与泡沫充分混合^[6],泡沫内的气体聚集起来,逐渐在土仓内形成气腔。因此,土仓内的渣土改良效果差、渣土塑性较大,导致混凝土拖泵泵送能力下降,同时也限制了盾构机的掘进速度;盾构机掘进速度

较慢,土仓内渣土流通速度缓慢,导致渣土在土仓内部堆积,以及渣土和易性降低^[7],从而进一步限制了盾构机掘进效率。经综合分析,盾构机掘进速度基本被限制在12 mm/min以内。

6 结语

1) 土压平衡盾构机始发阶段的出渣全过程均无需皮带机和电瓶车的水平运输以及龙门吊垂直运输,简化了土压平衡盾构机试掘进期间的出渣工序,大大缩短了龙门吊、电瓶车、皮带机的运行时长,节约了设备维修保养的成本和时间,减少了相关设备和工序的人力投入,也避免了渣土斗水平、垂直运输中的安全风险。

2) 对于盾构掘进速度要求较高的工程,可选择额定功率更高、单位时间泵送速度更大、料斗容积更充足,以及搅拌能力更强大的泵送设备。

3) 泵管堵管多数发生在始发井区域,采用泵送出渣工艺进行长距离掘进时,可在始发井增设中继泵,确保渣土长距离泵送性能。

4) 在混凝土拖泵额定功率一定的情况下,土仓内的渣土改良效果是决定泵送出渣期间盾构机掘进效率的关键。因此,采用泵送工艺进行出渣时,需按实际地层状况控制土仓压力,使其与掌子面压力相匹配,以改善渣土改良效果,提高泵送出土效率。

5) 渣土泵送工艺主要适用于黏粒含量约为15%~20%的土层,其经过加水稀释后具有良好的携渣能力和润滑效果,具备良好的可泵性,泵送出渣速度快且过程流畅。对于黏粒含量较大的地层,应重点控制盾构机土仓渣土改良效果;对于黏粒含量较小的土层(黏粒含量<15%~20%),可适当增大渣土含水量,注意保持连续泵送,避免堵管;对于纯砂、砂卵石、岩石等地层,则不建议使用该工艺。因此,施工前应注意做好地层渣样分析,以确定渣土泵送工艺的适用性。

参考文献

- [1] 蒋少武,高鹏,邱昌. 超狭窄竖井盾构分体始发施工技术研究[J]. 施工技术,2020(1):79.
JIANG Shaowu, GAO Peng, QIU Chang. Research on split-starting construction technology of shield tunneling in super-narrow shaft[J]. Construction Technology, 2020(1):79.
- [2] 卜星玮,曾波存,万飞明,等. 狭小空间条件下盾构分体始发施工技术研究[J]. 隧道建设(中英文),2018(增刊2):292.

- BU Xingwei, ZENG Bocun, WAN Feiming, et al. Research on the start-up construction technology of shield tunnels under narrow space conditions[J]. Tunnel Construction, 2018(S2):292.
- [3] 李阳,杨红. 工厂法沉管预制混凝土泵送施工技术[J]. 中国港湾建设,2015(5):56.
- LI Yang, YANG Hong. Pumping construction technology of factory-method sunk pipe precast concrete[J]. China Harbour Engineering, 2015(5):56.
- [4] 魏春春,杨盼龙,张保卫. 超高泵送混凝土施工技术在超高层建筑的应用[J]. 中国港湾建设,2019(7):33.
- WEI Chunchun, YANG Panlong, ZHANG Baowei. The application of ultra-high pumping concrete construction technology in ultra-high-rise building projects[J]. China Harbour Engineering, 2019(7):33.
- [5] 曾华波. 复合地层土压平衡盾构施工应用技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- ZENG Huabo. Research on application technology of earth pressure balance shield construction in composite ground[D]. Nanjing: Hehai University, 2006.
- [6] 杨洪希,黄伟,王树英,等. 粉质黏土地层土压平衡盾构渣土改良技术[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2020(2):76.
- YANG Hongxi, HUANG Wei, WANG Shuying, et al. Soil pressure balance shield muck improvement technology in silty clay [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020(2):76.
- [7] 赵则超. 软土地区面板式盾构在硬粘土中施工技术[J]. 天津建设科技,2015(2):60.
- ZHAO Zechao. Construction technology of panel shield in soft soil area in hard clay[J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2015(2):60.
- [8] 徐前卫,唐卓华,朱合华,等. 盾构隧道开挖面极限支护压力研究[J]. 岩土工程学报,2017(7):1234.
- XU Qianwei, TANG Zhuohua, ZHU Hehua, et al. Research on ultimate support pressure of shield tunnel excavation face [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017(7):1234.
- [9] 徐冲. 砂卵石地层泥水平衡盾构隧道掘进参数控制[J]. 铁道建筑,2019(2):94.
- XU Chong. Parameter control of mud-water balance shield tunnel excavation in sandy gravel stratum [J]. Railway Engineering, 2019(2):94.
- [10] 占传忠. 复合地层盾构的适应性及掘进参数的关联性分析[J]. 中国煤炭地质,2018(增刊1):97.
- ZHAN Chuanzhong. Adaptability of shield tunneling in composite strata and correlation analysis of tunneling parameters[J]. Coal Geology of China, 2018(S1):97.
- (收稿日期:2020-05-28)
- (上接第101页)
- GU Yin, LIU Jingbo, DU Yixin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element [J]. Engineering Mechanics, 2007(12):31.
- [9] 于鹤然,周晓军. 高速列车动荷载作用下立体交叉铁路隧道动力响应研究[J]. 铁道学报, 2015(6):103.
- YU Heran, ZHOU Xiaojun. Study on dynamic response of grade-separated railway tunnels under high-speed train induced dynamic load[J]. Journal of the China Railway Society, 2015(6):103.
- [10] 张曦,唐益群,周念清,等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土动力响应研究 [J]. 土木工程学报, 2007(2):85.
- ZHANG Xi, TANG Yiqun, ZHOU Nianqing, et al. Dynamic response of saturated soft clay around a subway tunnel under vibration load [J]. China Civil Engineering Journal, 2007(2):85.
- [11] 魏纲,庞思远. 双线平行盾构隧道施工引起的三维土体变形研究[J]. 岩土力学, 2014(9):2562.
- WEI Gang, PANG Siyaun. Study of three-dimensional soil deformation caused by double-line parallel shield tunnel construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(9):2562.
- [12] 杨春山,莫海鸿,陈俊生,等. 近距离下穿盾构隧道对上覆运营地铁隧道的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2015(5):145.
- YANG Chunshan, MO Haihong, CHEN Junsheng, et al. Influence of the approaching construction of underlying shield tunnels on overlying metro tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015(5):145.
- [13] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011(7):2085.
- ZHANG Zhiguo, ZHANG Mengxi, WANG Weidong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011(7):2085.
- (收稿日期:2020-05-06)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com