

大粒径卵石地层土压平衡盾构施工的渣土改良

吉力此且^{1,2} 路军富¹ 王国义³

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 610059, 成都; 2. 四川开放大学高职院, 610073, 成都;

3. 中电建成都建设投资有限公司, 610212, 成都//第一作者, 副教授, 博士研究生)

摘要 大粒径卵石地层土压平衡盾构掘进过程中,需针对不同的地层、地下水位、施工工艺等情况对土仓渣土进行改良。以成都地铁 18 号线一期工程为例,通过室内试验和理论分析,确定砂卵石地层土压平衡盾构理想渣土的流塑状态、低渗透率和低内摩擦角,提出了 5 个渣土改良方案,并开展相关试验对渣土改良效果进行分析。通过现场实践验证,提出了运用多种渣土改良组合措施,进而获得最优改良方案的新思路。试验结果表明,大粒径砂卵石地层渣土改良最优方案是膨润土泥浆加泡沫剂方案或含有聚合物的膨润土泥浆方案。

关键词 地铁; 盾构施工; 大粒径卵石地层; 渣土改良

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.028

Muck Improvement in EPB Shield Construction in Large Pebble Stratum

JILI Ciqie, LU Junfu, WANG Guoyi

Abstract In the process of EPB shield tunneling in large pebble stratum, it is necessary to improve the muck in the soil according to conditions including different stratum, groundwater level, construction process. Taking the first phase project of Chengdu Metro Line 18 as an example, through laboratory tests and theoretical analysis, the flow plastic state, low permeability, and low internal friction angle of the ideal EPB shield muck in sandy pebble stratum are determined. Five muck improvement solutions are put forward, and relevant tests are carried out to analyze the muck improvement effect. Through field practice verification, multiple muck improvement measures are put forward, and new viewpoint of optimal improvement solution is obtained. Test results show that the optimal solution for the improvement of large particle size sandy pebble stratum muck is bentonite slurry plus foam agent or bentonite slurry containing polymer.

Key words metro; shield tunnel construction; large pebble stratum; muck improvement

First-author's address State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu

University of Technology, 610059, Chengdu, China

土压平衡盾构在大粒径卵石地层中掘进时,土仓内容易结泥饼,特别在富水地层中掘进时,容易诱发喷涌现象而导致地表沉降、塌方,进而使盾构主驱动损坏,造成工程停工等重大经济损失和重大安全事故^[1-2]。因此,研究和探讨大粒径卵石地层土压平衡盾构施工结泥饼的防治问题^[3],进行有效渣土改良,对于确保土压平衡盾构在大粒径卵石地层中的施工安全、实现高效掘进,具有极其重要的意义。

近年来,国内外专家和学者对渣土改良进行了大量的室内试验以及现场试验的研究。室内试验获得的渣土改良参数多未能充分考虑现场施工因素的影响,无法适应现场变化万千的施工条件,故难以推广应用^[4]。现场试验得到的渣土改良参数过于依赖经验,控制较粗糙,随意性较大,难以形成严谨、成系统的渣土改良标准体系,对于指导类似工程施工缺乏系统的理论支撑^[5]。

本文以位于大粒径砂卵石地层的成都地铁 18 号线一期工程(以下称为“18 号线”)为研究对象,通过一系列室内外试验对理想渣土的各项指标进行测定,获得适用于大粒径砂卵石地层的土压平衡盾构渣土改良指标。

1 渣土改良试验方案

1.1 试验渣土的选择

18 号线的盾构穿越地层区域原状土的颗粒级配见图 1。根据试验方案和地层情况,实验室的试验渣土由不同粒径的砂和卵石配制而成。根据级配曲线将试验用的现场渣土归整为 A 类和 B 类。其中:A 类土的颗粒级配见图 2,每次试验取 20 kg 渣土,相应渣土体积约为 9L,初始含水率取 3%;B 类土的颗粒组成和颗粒级配曲线由原状土剔除粒

径大于 40 mm 的颗粒得到,颗粒级配见图 3,每次试验取 20 kg 渣土,体积约 10 L,初始含水率取 5%。

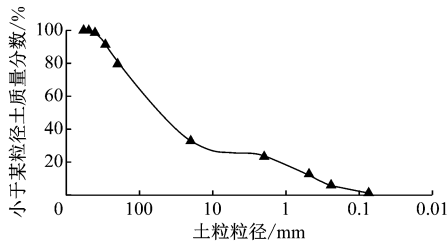


图 1 18 号线的盾构穿越地层原状土颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle grading curve of undisturbed soil in shield crossing stratum of Line 18

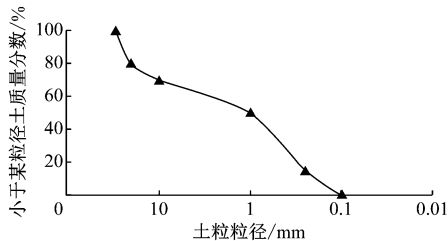


图 2 A 类试验土级配曲线

Fig. 2 Grading curve of class A test soil

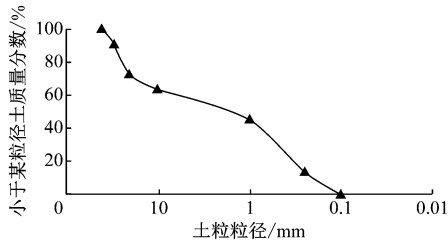


图 3 B 类试验土级配曲线

Fig. 3 Grading curve of class B test soil

1.2 试验目的及改良材料方案

通过试验,分析泡沫、膨润土基泥浆及高分子聚合物等改良材料在大粒径卵石层渣土改良中的作用。通过观测上述改良材料在不同组合情况下的泥浆黏度、坍落度,以及搅拌试验等得到的搅拌难易程度、内摩擦角、黏聚力、和易性及流塑状态,推出达到最佳渣土改良效果的改良材料组合及配比。结合渣土改良材料的特性及工程实践经验,本文选择膨润土泥浆、膨润土泥浆 + PAM(高分子聚合物聚丙烯酰胺)、膨润土泥浆 + CMC(羧甲基纤维素)、泡沫剂、膨润土泥浆 + 泡沫剂等 5 种改良材料组合方案进行试验研究。

1.3 渣土改良试验方法

1) 实验室发泡装置^[4-5]。本次所用的改良试验泡沫主要通过自制泡沫制造装置获得。由相关研究可知,合理的泡沫剂质量分数为 3% ~ 4%^[4-5]。

本试验所用泡沫剂的质量分数取 3%,经过检测所获得的发泡倍率是 18,而半衰期为 8 min。

2) 搅拌试验。利用搅拌机的搅拌过程来模拟土压平衡盾构压力仓中的土体搅拌过程,进而评价所岩石的改良剂对土体改良的效果;通过控制搅拌机的搅拌电流的变化来控制 and 调整渣土改良剂的掺入量。

3) 坍落度试验。每批次做 3 组平行坍落度试验,并取坍落度平均值对渣土流塑状态进行初步评定。

4) 黏度测定。本研究中,黏度以泥浆作相对运动时的内摩擦阻力来表示。黏度可划分为表观黏度和塑性黏度。表观黏度又称有效黏度,指在某一剪切速率下,剪切应力与剪切速率的比值。塑性黏度是浆液流动时固相颗粒之间、固相颗粒与周围浆液之间,以及液相分子间的内摩擦作用总反映,反映了液体黏滞力的大小。本研究使用六速旋转黏度计来测量土样的表观黏度及塑性黏度。

2 试验结果分析

2.1 膨润土泥浆方案渣土改良试验

由图 4 可见,泥浆的塑性黏度及表观黏度均随泥浆质量分数的提升而提升。但当膨润土泥浆质量分数超过 14.3% 后,泥浆的表观黏度迅速增加,若泥浆黏度过大,则现场泵送困难,不适合盾构施工。由工程经验及本试验结果可知,泥浆黏度为 12.5 ~ 22.5 MPa,即泥浆质量分数为 10.0% ~ 14.3%,泥浆状态较为理想。

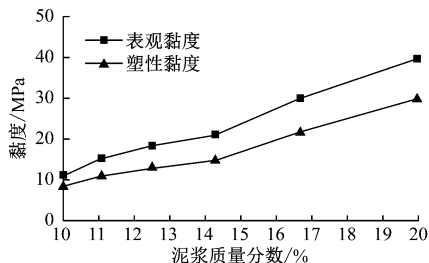


图 4 膨润土泥浆黏度指标

Fig. 4 Viscosity index of bentonite slurry

由图 5 可看出,搅拌电流随泥浆质量分数的提升而提升。当掺入率的数值达到 15% 时,电流数值要远远超过掺入率是 20% 以及 25% 情况下的电流,但掺入率处于 20% ~ 25% 时电流数值近似相等。由图 6 可见,坍落度随泥浆质量分数的提升而下滑。当膨润土泥浆质量分数为 14.3% 时,坍落度最大。

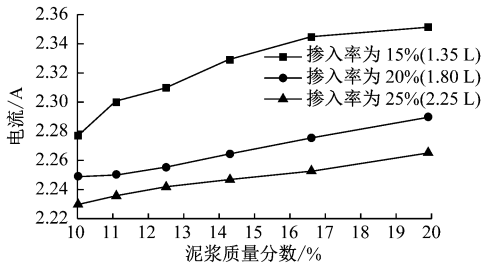


图 5 膨润土泥浆质量分数与搅拌电流关系图

Fig. 5 Relationship between bentonite slurry concentration and mixing current

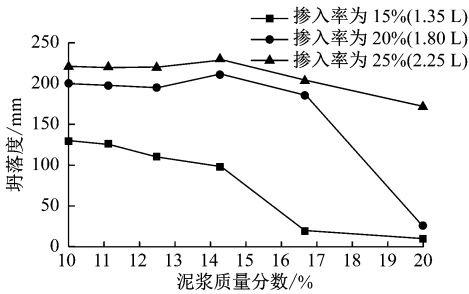


图 6 膨润土泥浆质量分数与坍落度关系图

Fig. 6 Relationship between bentonite slurry concentration and slump

2.2 膨润土泥浆 + PAM 方案渣土改良试验

观察图 7 及图 8 可得出,当泥浆质量分数相同的情况下,其搅拌电流会伴随 PAM 溶液掺入量的增加出现下滑,当 PAM 溶液掺入量达到 0.5 L 时,搅拌电流基本不变;坍落度伴随 PAM 溶液掺入量的提升展现出先增加后减少的趋势,且 PAM 溶液掺入量为 0.4 L 时坍落度最大。观察图 9 及图 10 可得出,当 PAM 溶液掺入量达到指定数值时,搅拌电流会伴随泥浆质量分数的提升而呈现出先减少后增加的趋势,且当泥浆质量分数为 12.5% 时搅拌电流最小。

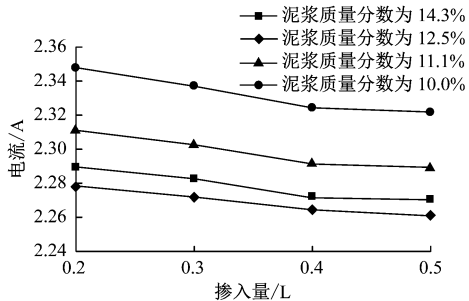


图 7 PAM 溶液(1‰)掺入量与搅拌电流关系图

Fig. 7 Relationship between addition amount of PAM solution (1‰) and mixing current

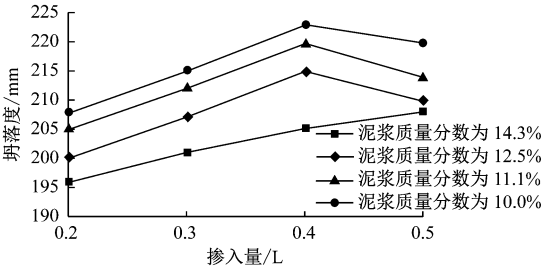


图 8 PAM 溶液(1.0‰)掺入量与坍落度的关系图

Fig. 8 Relationship between addition amount of PAM solution (1‰) and slump

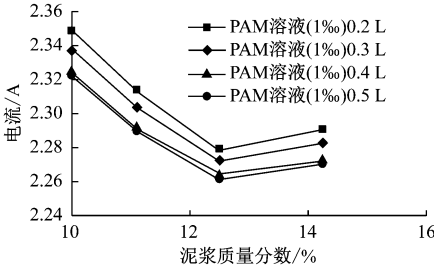


图 9 泥浆质量分数与搅拌电流关系图

Fig. 9 Relationship between slurry concentration and mixing current

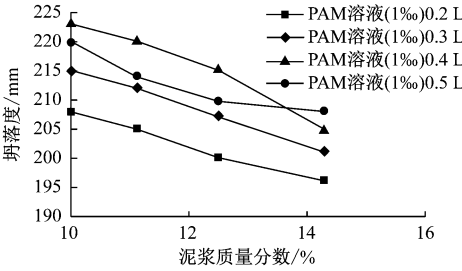


图 10 泥浆质量分数与坍落度的关系图

Fig. 10 Relationship between mud concentration and slump

由上述分析的结果可看出,如 PAM 溶液掺入量过大,其改良效果会下滑。故有 PAM 溶液最佳掺入量,可使渣土改良效果最优。

考虑 PAM 溶液掺入泥浆时有稀释作用,故对 PAM 溶液质量分数为 1.5‰ 和 2.0‰ 的溶液进行对比,泥浆质量分数选取保水性最差的土水比为 1:10 的泥浆进行试验。得到的试验结果如图 11、图 12 所示。

由图 11 可见,当 PAM 溶液质量分数为 1.0‰ 时,搅拌电流会伴随溶液掺入量的增加而下滑;当 PAM 溶液质量分数为 1.5‰ 时,搅拌电流会随溶液掺入量的增加而呈现出先下滑后增加的趋势;当 PAM 溶液质量分数为 2.0‰ 时,搅拌电流会随溶液掺入量的增加而增加。

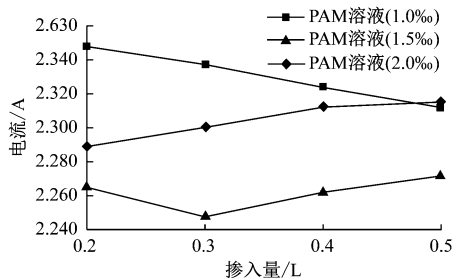


图 11 PAM 溶液掺入量与搅拌电流的关系图

Fig. 11 Relationship between PAM solution addition and mixing current

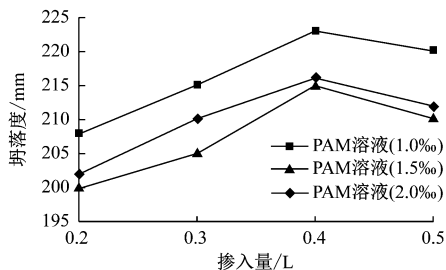


图 12 PAM 溶液掺入量与坍落度的关系图

Fig. 12 Relationship between PAM solution addition and slump

泥浆质量分数为 11.1% 和 10% 时,泥浆的保水性较差。测得加入 PAM 溶液后的泥浆黏度如图 13 及图 14 所示。改良后泥浆内部的表观黏度呈现出先下滑后提升的趋势;塑性黏度最开始保持不变,当掺入量达 0.4L 后,塑性黏度有所增加,泥浆保水性也随之得到了一定的改善。

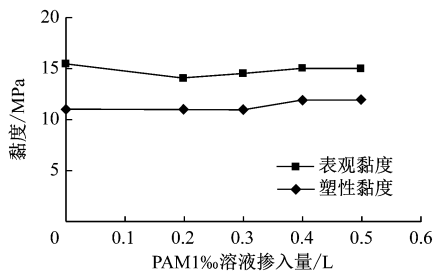


图 13 泥浆质量分数为 11.1% 时的泥浆黏度值

Fig. 13 Viscosity value of mud system with mud concentration 11.1%

2.3 膨润土泥浆 + CMC 方案渣土改良试验

分析图 15、图 16 可知,在泥浆的质量分数一定的情况下,增加 CMC 掺入量时,搅拌电流也随之增大。泥浆质量分数较高时,坍落度随 CMC 掺入量的增加而减小;泥浆质量分数较低时,坍落度随 CMC 掺入量的增加呈现先增大然后再减小的变化。

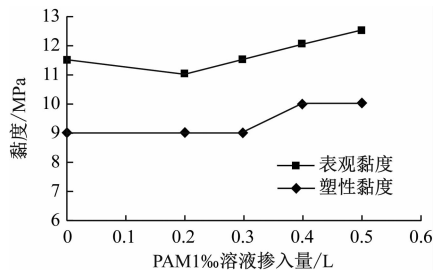


图 14 泥浆质量分数为 10% 时的泥浆黏度

Fig. 14 Viscosity value of mud system with mud concentration 10%

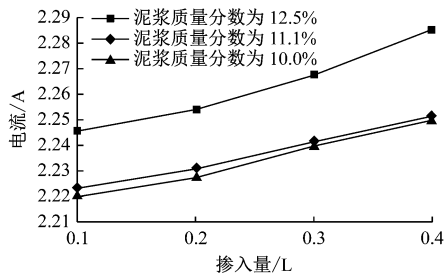


图 15 CMC 掺入量与搅拌电流关系图

Fig. 15 Relationship between CMC addition and stirring current

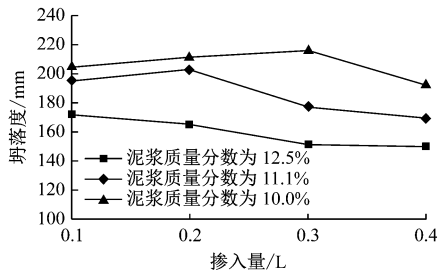


图 16 CMC 掺入量与坍落度关系图

Fig. 16 Relationship between CMC addition and slump

分析图 17、图 18 可知,当 CMC 掺入量保持不变时,随着泥浆质量分数的增加,搅拌电流先缓慢增大,而后快速增大;在泥浆质量分数较低时,搅拌电流值变化不明显;坍落度随泥浆质量分数的增加

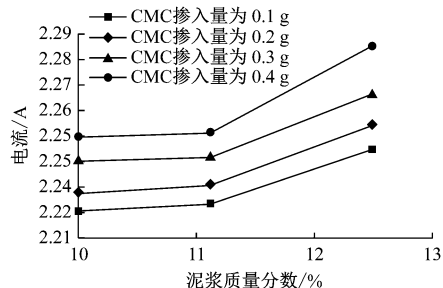


图 17 泥浆质量分数与搅拌电流关系图

Fig. 17 Relationship between mud concentration and mixing current

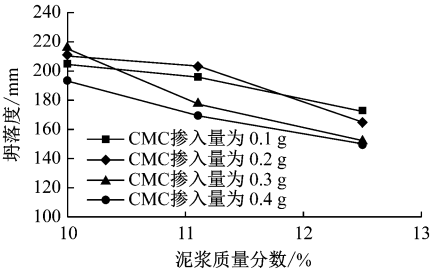


图 18 泥浆质量分数与坍落度关系图

Fig. 18 Relationship between mud concentration and slump

而减小。可见,在泥浆质量分数较高时,CMC 对渣土的黏度和摩擦系数影响较大,且 CMC 掺入量存在最优值。若 CMC 掺入量超过最优值,则渣土改良效果反而不佳。由试验结果,泥浆质量分数为 10% 时改良效果最佳。

当泥浆质量分数为 11.1% 和 10.0% 时,测得掺入 CMC 溶液后的泥浆体系的黏度值,见图 19、图 20。分析可知,改良后泥浆的表现黏度和塑性黏度起初基本不变,在 CMC 溶液掺入量达到一定量时变大,进而提高了泥浆的保水性。

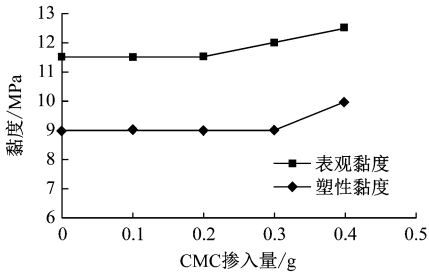


图 19 泥浆质量分数为 10.0% 时的泥浆体系黏度值

Fig. 19 Mud mass fraction 10%, viscosity value of mud system

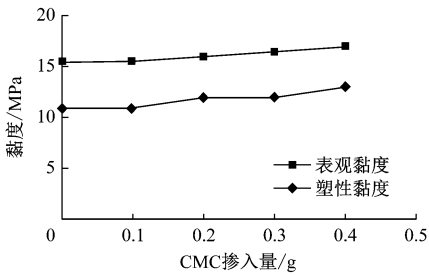


图 20 泥浆质量分数为 11.1% 时的泥浆体系黏度值

Fig. 20 Mud mass fraction 11.1%, viscosity value of mud system

2.4 泡沫剂方案渣土改良试验

分析图 21 可知,基于特定的含水率,若增加了 FIR(泡沫掺入率)值,搅拌电流先迅速减小,然后趋于基本不变的趋势。这说明用泡沫剂进行渣土改

良可明显降低渣土摩擦系数。但 FIR 超过某一限值后,渣土摩擦系数不再变小。分析图 22 可知:若泡沫剂注入过多,则泡沫析出,土体流塑性反而不会不佳;随渣土含水率变大,泡沫最佳掺入比变小,泡沫利用率有所增加;当渣土含水率过多时,泡沫剂改良渣土效果又会不佳。在不同渣土含水率下,只有泡沫剂掺入率适中,才能使改良效果较理想,使渣土达到较好的流塑状态。

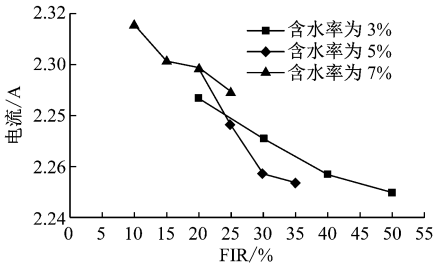


图 21 FIR 与电流的关系图

Fig. 21 Relationship between FIR and current

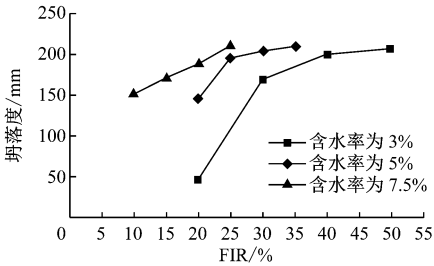


图 22 FIR 与坍落度关系图

Fig. 22 Relationship between FIR and slump

2.5 膨润土泥浆 + 泡沫剂方案渣土改良试验

通过图 23、图 24 可知:在泥浆掺入量一定时,增加 FIR 后,坍落度会先快速增大,随后增幅减缓;搅拌电流则随 FIR 的增加,先快速减少,再维持基本不变的状态。这说明:泡沫剂能有效减小渣土颗粒之间的摩擦力;当 FIR 超过一定限值后,土体颗粒间隙被泡沫填满,泡沫剂不再起改良作用。由试验结果还可得知,当 FIR 一定时,搅拌电流随泥浆掺入量

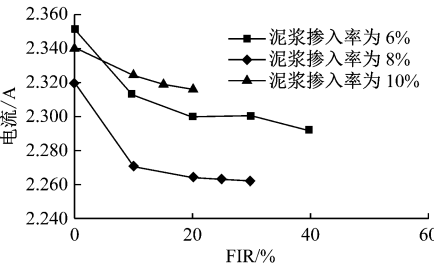


图 23 FIR 与电流的关系图

Fig. 23 Relationship between FIR and current

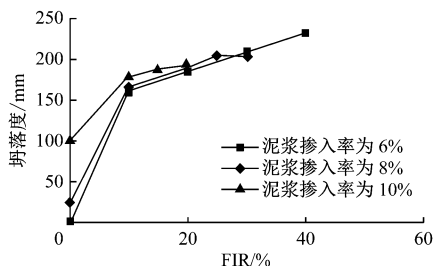


图 24 FIR 与坍落度关系图

Fig. 24 Relationship between FIR and slump

增加呈先增大后减小变化。当泥浆掺入率为 8% 时,搅拌电流达到最小,说明此时的泥浆掺入量是合理的。

3 结语

通过对成都地区大粒径砂卵石地层土压平衡盾构渣土进行改良试验,并进行系统分析,提出适应于成都地区大粒径砂卵石地层中施工的土压平衡盾构渣土改良最优方案是质量分数为 10% 膨润土泥浆加泡沫剂,或含有聚合物的膨润土泥浆。

参考文献

[1] 邱龔,杨新安,唐卓华,等.富水砂层土压平衡盾构施工渣土改良试验[J].同济大学学报(自然科学版),2015(11):1703.
 QIU Yan, YANG Xin'an, TANG Zhuohua, et al. Soil improvement for earth pressure balance shields construction in watered sandy stratum[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2015(11):1703.

[2] 贺少辉,张淑朝,李承辉,等.砂卵石地层高压水条件下盾构掘进喷涌控制研究[J].岩土工程学报,2017(9):1583.
 HE Shaohui, ZHANG Shuchao, LI Chenghui, et al. Blowout control during EPB shield tunnelling in sandy pebble stratum with high groundwater pressure[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2017(9):1583.
 [3] 许有俊,文中坤,闫履顺,等.多刀盘土压平衡矩形顶管隧道土体改良试验研究[J].岩土工程学报,2016(2):288.
 XU Youjun, WEN Zhongkun, YAN Lyushun, et al. Experimental study on soil improvement during construction of EPB rectangular pipe jacking with multi-cutter[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2016(2):288.
 [4] 钟毅,杨龙才,房涛涛,等.砂卵石地层的土压平衡盾构施工渣土改良试验研究[J].华东交通大学学报.2015(6):44.
 ZHONG Yi, YANG Longcai, FANG Shitao, et al. Research on soil conditioning of sand-pebble layer in EPB tunneling[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015(6):44.
 [5] 唐益群,宋永辉,周念清,等.土压平衡盾构在砂性土中施工问题的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005(1):52.
 TANG Yiqun, SONG Yonghui, ZHOU Nianqing, et al. Experimental research on troubles of EPB shield construction in sandy soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(1):52.
 [6] 魏康林.土压平衡盾构施工用泡沫混合土透水性试验研究[J].现代隧道技术,2005(5):17.
 WEI Kanglin. Experimental research on the permeability of the foamed-soil adopted in EPB shield tunneling[J]. Modern Tunneling Technology, 2005(5):17.

(收稿日期:2020-11-22)

(上接第 125 页)

ZHOU Jiankun, LI Zhihong. Numerical analysis on deformation effect of metro tunnels due to adjacent excavation project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010(S1):1398.
 [5] 张治国,张谢东,王卫东.临近基坑施工对地铁隧道影响的数值模拟分析[J].武汉理工大学学报,2007(11):993.
 ZHANG Zhiguo, ZHANG Xiedong, WANG Weidong. Numerical modeling analysis on deformation effect of metro tunnels due to adjacent excavation of foundation pit[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007(11):99.
 [6] 张立舟,夏毓超,杜逢彬.深基坑施工对邻近既有隧道的影响分析[J].城市轨道交通研究,2017(9):122.
 ZHANG Lizhou, XIA Yuchao, DU Fengbin. Impact analysis of deep pit excavation on the adjacent urban rail transit tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2017(9):122.
 [7] 林杭,陈靖宇,郭春,等.基坑开挖对邻近既有隧道变形影响范围的数值分析[J].中南大学学报(自然科学版),2015(46):4247.

LIN Hang, CHEN Jingyu, GUO Chun, et al. Numerical analysis on influence of foundation pit excavation on deformation of adjacent existing tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015(46):4247.
 [8] 郭永发,杨翔,叶林,等.某基坑支护方案对相邻地铁区间的影响分析[J].地下空间与工程学报,2015(3):726.
 GUO Yongfa, YANG Xiang, YE Lin, et al. Influence of foundation pit supporting scheme on adjacent existing subway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015(3):7261.
 [9] 孙斌彬.基坑开挖对邻近既有地铁隧道的影响[D].苏州:苏州大学,2017.
 SUN Binbin. Effects of existing subway tunnels due to adjacent excavation construction of foundation pit[D]. Suzhou: Soochow University, 2017.

(收稿日期:2020-05-27)