

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.014

# 泡沫稳定性对土压平衡盾构砂卵石渣土改良效果

齐飞<sup>1</sup>, 刘江涛<sup>2</sup>, 钟小春<sup>3,4</sup>, 张坤勇<sup>3,4</sup>, 丰土根<sup>3,4</sup>

(1. 南京地铁建设有限责任公司, 江苏 南京 210024; 2. 中铁(上海)投资集团有限公司, 江苏 南京 210024;  
3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为确保土压平衡盾构在砂卵石地层施工时切削的渣土具有良好的工程特性, 以成都轨道17号线明九区间2号风井—九江北区间为背景, 采用不同稳定性的泡沫剂分别掺入卵砾石含量为20%、40%和60%的砂卵石渣土中, 开展室内坍塌度试验、渗透试验和喷涌试验, 研究各种泡沫土流动性、渗透性和时效性的变化规律, 探讨泡沫剂稳定性与砂卵石渣土的适应性。结果表明: 稳定性好的泡沫能够适应卵砾石含量低于60%的砂卵石土层, 即泡沫稳定性的提高有利于扩大砂卵石地层的适用范围; 稳定性好的泡沫剂能够保持改良砂卵石渣土掘削排渣全过程良好的流动性、抗渗性; 过量的泡沫掺入改良的砂卵石渣土易发生离析, 造成改良后的渣土难以达到良好的和易性; 泡沫改良砂卵石渣土的喷涌压力可作为检验改良效果的重要指标。

**关键词:** 土压平衡盾构; 砂卵石地层; 泡沫剂; 渣土改良

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)01-0105-05

## Effect of foam stability on improvement of sandy pebble stratum in EPB shield tunneling

QI Fei<sup>1</sup>, LIU Jiangtao<sup>2</sup>, ZHONG Xiaochun<sup>3,4</sup>, ZHANG Kunyong<sup>3,4</sup>, FENG Tugen<sup>3,4</sup>

(1. Nanjing Metro Construction Co. Ltd., Nanjing 210024, China;

2. China Railway (Shanghai) Investment Group Co. Ltd., Nanjing 210024, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical and Dam Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to ensure the engineering properties of sandy pebble soil during EPB shield tunneling through the sandy pebble stratum, foam agents of different stability were added to the sandy pebble stratum with 20%, 40% and 60% pebble content under the background of Mingjiu section No. 2 air shaft to Jiujiangbei section of Chengdu rail line 17. Indoor slump test, seepage test and spewing test were carried out to study the changing laws of fluidity, permeability and time-dependent nature, which reflects the adaptability between the stability of foam agent sand and sandy pebble soil. The results show that: 1) The foam agent with good stability can adapt to sandy pebble soil with less than 60% pebble content, that is, foam stability is beneficial to enlarge the application scope of sand pebble soil; 2) The foam with good stability can keep the good fluidity and impermeability in the whole process of excavating and discharging the conditioned sandy pebble soil; 3) Excessive foam mixed into the improved sandy pebble soil is easy to disintegrate, which means that the improved soil is difficult to achieve good workability; 4) The gusher pressure of improved sandy pebble soil is an important index to test the improvement effect.

**Key words:** EPB shield; sandy pebble stratum; foam agent; soil improvement

土压平衡盾构具有土层适应性广、机械化程度高、开挖面稳定等优点, 在城市地铁隧道工程中有着广泛的发展前途<sup>[1-4]</sup>。但是, 对于适用性不强的砂卵石地层, 在土压平衡盾构施工过程中, 如何防止渣土在刀盘上形成泥饼, 在土舱内堆积沉舱, 在螺旋输送机出口产生堵塞、喷涌以及刀盘和刀具磨损等问题, 仍是目前盾构隧道施工所面临的主要难题<sup>[5-8]</sup>。对于上述难题, 渣土改良是一种较为有效的办法。

近年来, 泡沫作为土压平衡盾构隧道施工时进行渣土改良的改良剂之一, 凭借其环保、功能多样等优点得到了越来越广泛的应用, 且便于后续渣土的处理<sup>[9]</sup>。朱伟等<sup>[10]</sup>采用室内试验方法, 研究开发了多种新型

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178387, 51678217)

作者简介: 齐飞(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事地铁建设管理及盾构技术研究。E-mail: 106620212@qq.com

引用本文: 齐飞, 刘江涛, 钟小春, 等. 泡沫稳定性对土压平衡盾构砂卵石渣土改良效果[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 105-109.

QI Fei, LIU Jiangtao, ZHONG Xiaochun, et al. Effect of foam stability on improvement of sandy pebble stratum in EPB shield tunneling [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 105-109.

气泡剂,分析各种因素对气泡稳定性的影响,发现稳泡剂对气泡的稳定性起着决定性的作用并随着气泡剂浓度的加大,气泡的稳定性变好。魏康林<sup>[11]</sup>通过长期的室内土体改良试验,提出了膨润土和泡沫两种改良剂与土体相互作用的内在机理,并基于微观试验分别给出了适合膨润土和泡沫改良的土体。秦建设等<sup>[12]</sup>基于当前气泡剂在土压平衡盾构应用中遇到的问题,结合泡沫剂自身性质和泡沫混合土力学性质两方面,提出泡沫剂在盾构施工中应用效果评价的手段及相应指标。林健等<sup>[13]</sup>针对土压平衡盾构遇到的砂土地层,采用室内试验的方法,就泡沫的稳定性和土体改良效果之间的关系进行了探究,指出稳定性好的泡沫能较长时间保持对渣土的改良效果,随时间衰减缓慢,泡沫的稳定性是渣土效果的重要影响因素。

土压平衡盾构施工在遇到砂卵石地层时,由于内摩擦角大、渗透性高、流动性低等问题,很难将开挖面开挖的土体在压力舱内调整成一种塑性流动状态<sup>[14]</sup>,针对该问题,有关学者采用泡沫进行了渣土改良的相关研究。宋克志等<sup>[15]</sup>结合室内试验研究和现场应用,研究无水砂卵石地层使用泡沫改良与单独加泥的效果,发现使用泡沫后不仅有利于保持开挖面土压平衡,而且机械负荷及刀盘磨损大大减轻。隋东东<sup>[16]</sup>以石家庄地铁2号线盾构施工为依托,采用室内坍塌度试验和直剪试验对不同种类的重塑土进行改良效果研究,指出膨润土泥浆和泡沫剂对改良无水砂土具有明显的作用,并给出了中粗砂、粉细砂和粉质黏土最佳改良配比中泡沫剂和膨润土泥浆的体积比。张润来等<sup>[17]</sup>针对成都砂卵石地层分别采用泡沫、膨润土和聚合物进行改良,采用室内坍塌度试验、搅拌试验和泥浆黏度试验确定配比,发现泡沫改良时注入率受渣土含水率影响较大,且土体含水率越大,泡沫最佳注入率越小。

综上所述,目前对于泡沫剂的研究重点主要在泡沫剂自身性质或泡沫土(砂土地层、砂卵石地层)性质,较少考虑不同性质的泡沫剂与砂卵石地层渣土改良的适应性研究。因此,本文通过配制不同稳定性的泡沫剂进行发泡,与3种不同卵砾石含量的砂卵石地层进行拌合,对改良后的渣土进行坍塌度、渗透、喷涌试验,探究泡沫剂的性质对土压平衡盾构砂卵石地层渣土改良的影响。

## 1 砂卵石渣土改良试验方案

采用一种自行配制的泡沫剂进行发泡,主要材料为固体材料A、液体材料B及质量浓度为3 g/L的CMC溶液,见图1。取100 mL泡沫剂原液,分别按泡沫剂原液与水体积比为1:4、1:6和1:8配制成溶液,混合搅拌均匀后进行充分发泡,见图2,并进行半衰期测试,结果见表1所示。



图1 原料A和B

Fig.1 Raw material A and B



图2 泡沫剂发出的泡沫

Fig.2 Foam produced by foam agent

表1 不同泡沫半衰期

编号	兑水比例	半衰期/h	发泡倍率
①	1:4	5	15.1
②	1:6	2.5	16.3
③	1:8	0.75	16.4

由表1可以看出,随着泡沫剂溶液质量浓度的增大,泡沫半衰期大幅度延长,由0.75 h增至5 h,远远高于土压平衡盾构通常所使用泡沫的稳定性要求,且3种泡沫半衰期差别较大。

渣土采自成都轨道17号线九区间2号风井—九江北区间土压平衡盾构施工所遇到的砂卵石地层,在基坑开挖过程中取与区间隧道相同深度的砂卵石试样,将砂卵石进行筛分试验,发现该地层卵砾石含量达60%以上,含水率为4.5%。为探究不同性质的泡沫剂与砂卵石地层渣土改良的适应性,在保持含水率不变的情况下,设计了另外3种砂卵石地层,地层中卵砾石的含量(质量分数,下同)分别为20%、40%、60%。3种试验地层的筛分曲线见图3。

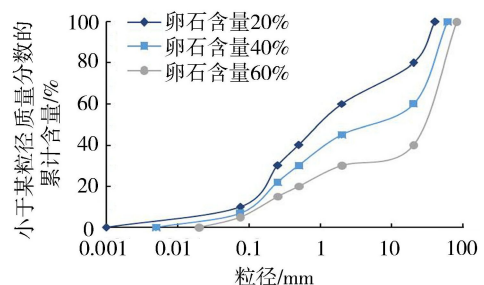


图3 设计砂卵石渣土筛分曲线

Fig.3 Particle distribution curve of designed sandy pebble soil

3种稳定性不同的泡沫分别加入卵石石含量为20%、40%和60%的砂卵石地层中,开展坍落度试验、渗透试验和喷涌试验,研究这9种工况下不同泡沫掺入量对改良渣土的流动性、稳定性和时效性的影响规律。

## 2 泡沫稳定性对泡沫土性质的影响

### 2.1 流动性

一般通过改良后泡沫土的坍落度试验进行泡沫土的流动性判断,坍落度为150~200 mm时表明泡沫土的流动性良好<sup>[18-20]</sup>。

配制方案中3种含水率为4.5%的砂卵石地层,分别掺入3种不同泡沫剂发出的泡沫,搅拌均匀后进行坍落度试验,坍落度试验步骤按照土工试验规程进行。

从图4的试验结果可以看出,同一地层随着泡沫掺入量的增多,坍落度逐渐增大。同样的体积掺入量下,泡沫①改良效果更好。卵石石含量20%的地层中,3种泡沫掺入后坍落度变化相近,在掺入比大于40%时均可达到良好的流动效果;卵石石含量40%的地层中,泡沫③无法达到另外两种泡沫改良后的坍落度;卵石石含量60%的地层中,同等掺入比下泡沫①仍可达到150~200mm的坍落度,而掺入泡沫②和③后坍落度不能达到150~200mm。究其原因,可能是卵石石含量太高,泡沫无法完全隔离卵石石之间的接触而导致摩擦加大,而泡沫①的稳定性强于泡沫②和③,泡沫具有更强的黏结强度,对砂卵石颗粒之间的隔离效果更好。而通过提高泡沫掺入量来提高改良效果也不可行,因为过多的泡沫剂掺入往往会出现离析,如图5所示,这也是泡沫改良砂卵石不同于砂土地层的一个显著的特征。

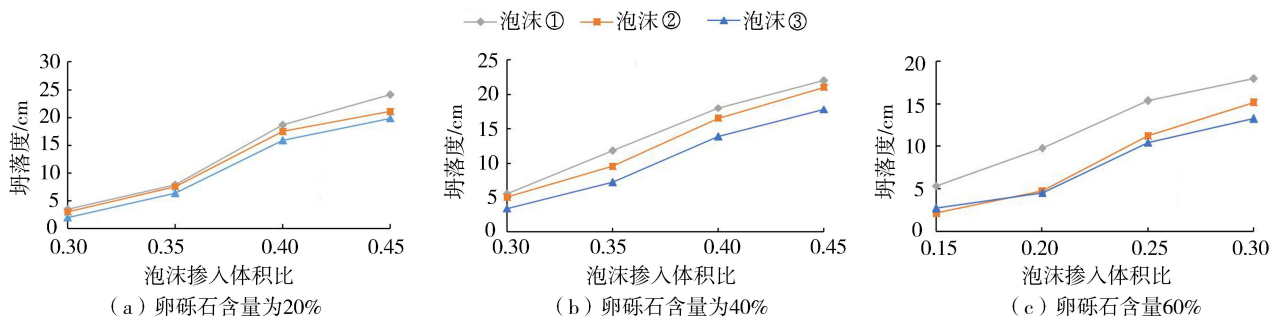


图4 掺入不同泡沫对坍落度的影响

Fig.4 Effect of different volume of foams on slump

### 2.2 渗透性

取改良后渣土装入渗透仪中,振捣密实厚度为20 cm。在其上部缓慢注入自来水达到一定高度后加盖顶盖,顶盖连接着空压机和稳压计,然后快速加气压至50~100 kPa(根据改良渣土预估某一值),渗水量稳定后每10 s记录一次渗水量,持续2 min后计算改良土的渗透系数。最后逐级加压直至出口大量泥水喷出,至此试验结束,有压渗透试验仪器如图6所示。

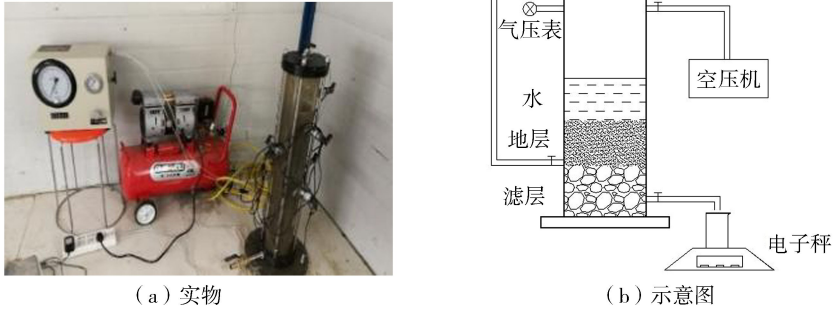
图7为不同稳定性泡沫的掺入体积比对不同卵石含量的砂卵石地层渗透性的影响。由图7可以看出,随着泡沫掺入体积比的增加,改良后渣土的渗透系数呈减小趋势,抗渗性不断增强,减小的趋势一般为先急后缓。在卵石石含量为20%的地层中使用3种不同的泡沫,改良效果近乎相同;卵石石含量为40%的地层中,由于卵石石含量的增多,掺入足量的泡沫③也已无法达到盾构施工中渗透系数小于 $10^{-4}$  cm/s的要求,可能是试验过程中泡沫的稳定性不够,导致泡沫损失过多,透水通道增加,因此仅泡沫①②可满足要求;卵石石含量达60%时,足量泡沫掺入下仅有泡沫①改良后的渣土渗透系数可降至满足要求。由此可以认为,稳定性较好的泡沫剂发出的泡沫能有更高的黏度和更加稳定的形式存在于颗粒间的孔隙中,阻碍砂卵石地层孔隙中水的流动。

改良后的流塑性渣土还要求具有抵抗一定地下水压的能力,因此有必要测定改良后渣土发生临界喷涌的压力,试验工况见表2。从表2可以看出,稳定性较好的泡沫①改良后渣土喷涌压力普遍高于泡沫②③,



图5 泡沫改良砂卵石的离析现象

Fig.5 Disintegration phenomenon of foam conditioned sandy pebble soil

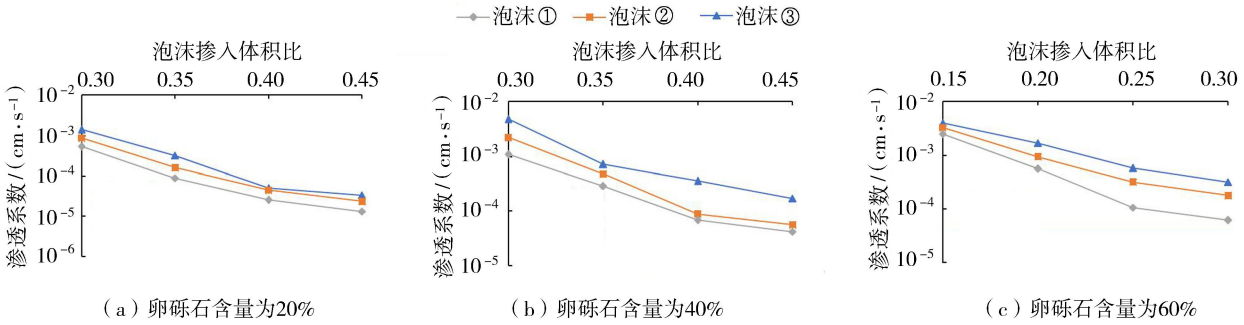


(a) 实物

(b) 示意图

图 6 有压渗透试验

Fig. 6 Permeability test with pressure



(a) 卵砾石含量为20%

(b) 卵砾石含量为40%

(c) 卵砾石含量为60%

图 7 掺入不同泡沫对渗透性的影响

Fig. 7 Effect of different volume of foams on permeability

这一情况在卵砾石含量不同的 3 种砂卵石地层中均存在。卵砾石含量较少时,改良后的渣土临界喷涌压力很高且相差很小,说明 3 种泡沫均有效地填充了颗粒间的孔隙,阻断了孔隙的渗水通道;随着卵砾石含量的增高,如卵砾石含量为 60% 时,泡沫②③改良后的渣土渗透系数较大,临界喷涌压力大幅度降低,在高水压的作用下易发生喷涌事故,而泡沫①则能够承受接近 0.1 MPa 的水压,可以认为高黏度的稳定泡沫对喷涌的发生起到一定的抑制作用。

### 3 泡沫稳定性对泡沫土时效性的影响

一般来说,随着时间的推移,泡沫土自身的流动性与渗透性也发生着变化。在土压平衡盾构的实际施工过程中,土体从进入压力舱到由螺旋排土器排出的时间为 1~2 h。因此取有代表意义的卵砾石含量为 40% 的泡沫土,测试其改良泡沫土 2 h 后的坍落度、渗透系数,探究泡沫稳定性对泡沫土时效性的影响。

图 8 为泡沫土坍落度随时间的变化规律。将即时拌合均匀的泡沫土坍落度曲线以虚线表示,2 h 后测试的结果以实线表示,得到如下结论:同等体积掺入量下,泡沫稳定性越好,改良后的泡沫土流动性越好;泡沫的稳定性越好,泡沫土流动性保持得更加持久,随时间其坍落度降低量较小。

由图 9 可以明显看出稳定性较好的泡沫①改良后的泡沫土在 2 h 后渗透性仍能保持在  $10^{-5}$  cm/s 的数量级,随着时间的变化幅度较小;泡沫②③改良后的泡沫土则无法满足所需的渗透性,前后变化较大。所以,随

表 2 各组渣土喷涌统计

Table 2 Statistics of water gushing in each soil group

卵砾石含量/%	泡沫类型及掺入比	喷涌压力/MPa
20	45% 泡沫①	0.40
	45% 泡沫②	0.35
	45% 泡沫③	0.35
40	45% 泡沫①	0.25
	45% 泡沫②	0.20
	45% 泡沫③	0.10
60	30% 泡沫①	0.10
	30% 泡沫②	喷涌压力过低
	30% 泡沫③	喷涌压力过低

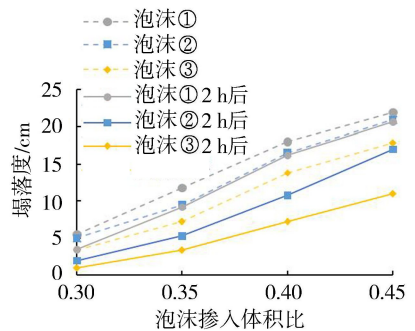


图 8 坍落度随时间的变化 ( 卵砾石含量 40% )

Fig. 8 Slump changes with time ( pebble content 40% )

着时间的延长,泡沫的稳定性对泡沫土的流动性和渗透性都存在较为明显的影响,总体来说稳定性较好的泡沫能够使泡沫土长时间保留在一个相对适宜施工的状态。

## 4 结 论

a. 随着泡沫掺入量的增加,砂卵石渣土改良效果增加明显,其流动性和渗透性不断降低。但对于卵石含量较低的砂卵石地层,泡沫掺入过量会析出,并不能有效改良砂卵石。

b. 稳定性好的泡沫对砂卵石渣土适应性更强。根据土压平衡盾构对渣土防喷涌的要求,泡沫剂①②③均适用于卵石含量为 20% 的砂卵石地层;仅泡沫剂①②适用于卵石含量为 40% 的砂卵石地层;卵石含量 60% 的砂卵石地层仅采用泡沫进行改良难以达到理想的流塑状态。

c. 经稳定性良好的泡沫改良后的砂卵石渣土在超过 2 h 后仍然保持在适宜土压平衡盾构施工状态,并能使改良后的砂卵石在整个土压平衡盾构掘削—进入压力舱并不断搅拌—进入螺旋输送机—排出过程中保持良好的流塑性。

d. 喷涌压力指标可以作为砂卵石渣土改良效果评价的一个重要指标,用于砂卵石地层防治喷涌研究。由于喷涌试验目前没有相关的试验标准,需要在后续的研究中持续完善。

e. 对于卵石含量达 60% 的砂卵石地层,仅采用泡沫进行改良,渣土抗喷涌能力和渗透性难以满足土压平衡盾构施工的要求,建议进一步开展泡沫+膨润土泥浆+高分子聚合物复掺方式进行改良。

f. 高稳定性的泡沫剂意味着渣土改良成本有所增加,工程中应根据盾构穿越的砂卵石地层进行含砂率等性质分析,初步选择渣土改良技术方案,并开展渣土改良试验以确认改良效果。

g. 本文的研究是针对成都地铁土压平衡盾构穿越的砂卵石地层开展的,对于其他城市砂卵石地层有一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 傅德明,周文波. 土压盾构技术在我国地铁隧道工程中的应用和发展[J]. 岩石力学与工程学报,2004(增刊2):4888-4892. (FU Deming,ZHOU Wenbo. Application and development of earth pressure shield technology in metro tunnel engineering in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004(Sup2):4888-4892. (in Chinese))
- [2] 刘冠梁. 土压平衡盾构在复杂地质中的应用与工艺改进[J]. 建筑施工,2016,38(2):218-220. (LIU Guanliang. Application and process improvement of EPB shield in complex geology[J]. Building construction,2016,38(2):218-220. (in Chinese))
- [3] 叶治,付岸然,刘华北. 盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):279-287. (YE Zhi,FU Anran,LIU Huabei. Effect of seepage erosion of tunnel crown on ground settlement and structural deformation in shield tunnelling[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(3):279-287. (in Chinese))
- [4] 叶治,付岸然,刘华北. 盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):279-287. (YE Zhi, FU Anran, LIU Huabei. Effect of seepage erosion of tunnel crown on ground settlement and structural deformation in shield tunnelling[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(3):279-287. (in Chinese))
- [5] 王明胜. 复杂地层中盾构法隧道渣土改良技术[J]. 地下空间与工程学报,2007(增刊2):1445-1447. (WANG Mingsheng. Improvement technology of slag soil in shield tunnel in complex stratum[J]. Journal of Underground Space and Engineering,2007(Sup2):1445-1447. (in Chinese))
- [6] 张淑朝. 兰州地铁低含砂率强渗透性砂卵石降低土压平衡盾构扭矩及防喷涌研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.
- [7] 荣雪宁,卢浩,王明洋,等. 基于刀盘扭转能量的土压平衡盾构刀具磨损分析[J]. 上海交通大学学报,2019,53(8):965-970. (RONG Xuening,LU Hao,WANG Mingyang,et al. Analysis of tool wear of EPB shield based on the twist energy of cutter head[J]. Journal of Shanghai JiaoTong University,2019,53(8):965-970. (in Chinese))
- [8] 王国义,张波. 土压平衡盾构泥饼防治技术浅析[J]. 施工技术,2016,45(增刊2):222-224. (WANG Guoyi,ZHANG Bo. Analysis of mud cake prevention technology of EPB shield[J]. Construction Technology,2016,45(Sup2):222-224. (in Chinese))

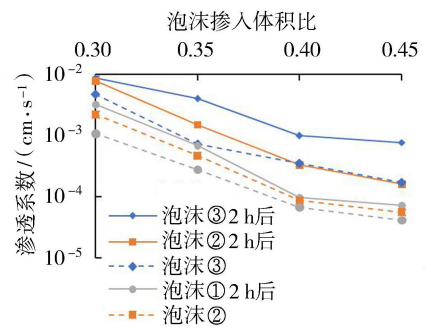


图 9 渗透系数随时间的变化(卵石含量 40%)

Fig. 9 Permeability changes with time (pebble content 40%)

- [15] 孙昕,武威,焦亚基,等. 盾构隧道管片接缝气密性模拟方法与影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(2):375-382. (SUN Xin,WU Wei,JIAO Yaji, et al. Simulation method for gas tightness of segment joints of shield tunnels and analysis of influencing factors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(2):375-382. (in Chinese))
- [16] 张亚洲. 考虑密封垫表面工作状态的盾构隧道接缝防水能力数值模拟研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(6):813-820. (ZHANG Yazhou. Numerical simulation on waterproof capacity of shield tunnel joints considering working state of sealing gasket surface[J]. Tunnel Construction,2020,40(6):813-820. (in Chinese))
- [17] 中国国家标准化管理委员会. 橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序:GB/T2941—2006[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2006.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定:GB/T528—2009[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2009.
- [19] PANDEY J K, REDDY K R, KUMAR A P, et al. An overview on the degradability of polymer nanocomposites[J]. Polymer Degradation and Stability,2005,88(2):234-250.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 高分子防水材料:GB18173.4—2010[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2010.

(收稿日期:2022-04-25 编辑:刘晓艳)

(上接第 109 页)

- [9] 朱伟,赵笛,范惜辉,等. 渣土改良为流动化回填土的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):134-139. (ZHU Wei,ZHAO Di,FAN Xihui, et al. Research on application of residue soil-based flowable fill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):134-139. (in Chinese))
- [10] 朱伟,张明晶,张志允. 土压平衡盾构气泡发泡剂的试验研究[C] //中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(下册). 北京:中国土木工程学会,2003:6.
- [11] 魏康林. 土压平衡盾构施工中泡沫和膨润土改良土体的微观机理分析[J]. 现代隧道技术,2007(1):73-77. (WEI Kanglin. Micromechanism analysis of foam and bentonite in improving earth mass in EPB shield tunneling[J]. Modern Tunnel Technology,2007(1):73-77. (in Chinese))
- [12] 秦建设,朱伟,林键. 盾构施工中气泡应用效果评价研究[J]. 地下空间,2004(3):350-353. (QIN Jianshe,ZHU Wei,LIN Jian. Evaluation of bubble application effect in shield construction[J]. Underground Space,2004(3):350-353. (in Chinese))
- [13] 林键,朱伟,钟小春. 气泡的稳定性对盾构施工中土体改良效果研究[J]. 岩土工程界,2005(12):38-41. (LIN Jian,ZHU Wei,ZHONG Xiaochun. Effect of bubble stability on soil improvement in shield construction[J]. Geotechnical Engineering,2005(12):38-41. (in Chinese))
- [14] 朱伟,陈仁俊. 盾构隧道技术问题和施工管理[J]. 岩土工程界,2001(12):14-16. (ZHU Wei,CHEN Renjun. Technical problems and construction management of shield tunnel[J]. Geotechnical Engineering,2001(12):14-16. (in Chinese))
- [15] 宋克志,汪波,孔恒,等. 无水砂卵石地层土压盾构施工泡沫技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(13):2327-2332. (SONG Kezhi,WANG Bo,KONG Heng, et al. Study on foam technology for earth pressure shield construction in anhydrous sandy pebble stratum[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(13):2327-2332. (in Chinese))
- [16] 隋冬冬. 无水砂层渣土改良技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2018.
- [17] 张润来,宫全美,周顺华,等. 砂卵石地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),2019,47(5):673-680. (ZHANG Runlai,GONG Quanmei,ZHOU Shunhua, et al. Soil conditioning tests for earth pressure balance shield applications in sandy pebble strata[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2019,47(5):673-680.
- [18] RAFFAELE V,CLAUDIO O I,DANIELE P. Soil conditioning of sand for EPB applications;a laboratory research[J]. Tunneling and Underground Space Technology,2008,23(3):308-317.
- [19] 姜厚停,龚秋明,杜修力. 卵石地层土压平衡盾构施工土体改良试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(2):284-294. (JIANG Houting,GONG Qiumin,DU Xiuli. Experimental study on soil improvement of earth pressure balanced shield construction in pebble stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(2):284-294. (in Chinese))
- [20] 刘大鹏. 新型泡沫对土压平衡盾构土体改良作用评价[D]. 北京:中国地质大学,2012.

(收稿日期:2022-02-25 编辑:胡新宇)