

富水砂层土压平衡盾构施工渣土改良试验

邱 龔¹, 杨新安¹, 唐卓华², 李亚翠³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250101; 3. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 上海 200235)

摘要: 针对深圳的富水砂层, 采用泡沫、膨润土以及高分子聚合物等添加剂, 改良盾构施工渣土, 进行现场坍塌度试验。基于现场试验结果, 通过对土样进行电镜扫描以及压缩、渗透等室内试验研究, 分析了改性渣土微观结构以及渗透、压缩特性的变化。对添加剂改善富水砂性土的流塑性、保水性以及开挖面动态土压平衡机理作了较深入的探讨。结果表明, 富水砂层中, 采用质量比为 1:7、外掺量为 8%~10% 的膨润土进行渣土改良, 可满足施工需求。

关键词: 富水砂层; 土压平衡盾构; 渣土改良; 电镜扫描; 渗透试验

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

Soil Improvement for Earth Pressure Balance Shields Construction in Watered Sandy Stratum

QIU Yan¹, YANG Xinan¹, TANG Zhuohua², LI Yacui³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Jinan Rail Transit Group Co. Ltd., Jinan 250101, China; 3. Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, Shanghai 200235, China)

Abstract: In order to improve the residue in shield construction, slump tests for watered sandy stratum in Shenzhen were conducted by using foam, bentonite and polymer. Based on the results of field test, laboratory tests including electron microscope scanning, permeability test and compression test were performed. The variation of soil sample properties as meso-structure, the seepage and squeezing were analyzed. Based on the tested data, the effects of additives on improving plasticity-fluid and capability of retaining water of sandy strata as well as the balance mechanics of shield work-face were discussed in detail. As reasonable proportion, bentonite with mass ratio of 1:7, incorporation 8% to 10% were determined providing valuable experience for shield

construction in the similar strata.

Key words: watered sandy stratum; earth pressure balance shield; soil improvement; electron microscope scanning; permeability test

土压平衡式盾构需要在盾构密封舱内充满开挖泥土, 通过对开挖土体施加压力来平衡开挖面上的水土压力, 因此土压平衡式盾构压力舱内土体的理想状态应为“塑性流动状态”^[1]。目前的研究成果一般认为, 从土力学的角度分析, 这种塑性流动状态主要包括土体不易固结排水、具有较低的透水率、较低的内摩擦角等特征。其力学指标主要包括渗透系数、内摩擦角和内聚力、坍塌度、压缩系数。

为保证土压平衡盾构顺利施工, 国内外学者在对盾构施工改良土体性质方面展开了大量研究。Quebaud 等^[2]的研究表明, 气泡混合土的渗透性和气泡添加量有直接关系。Bezuijen 等^[3]通过向压力舱模型注入气泡, 研究了砂土与气泡混合土的渗透性、压缩性、黏滞性。Jancsecz 等^[4]的研究表明, 使用泡沫可以有效地改善被开挖土体的性能, 改良后土体合理的坍塌度范围在 200~250 mm 之间。Raffaele 等^[5]通过坍塌度试验研究改良土的性质。Sotiris^[6]通过搅拌、压缩、渗透和直剪试验, 研究了泡沫对砂性地层的改良作用, 发现颗粒的大小是决定土体性能的重要参数。唐益群等^[7]以泡沫剂和肥皂水为改良剂, 对在添加剂作用下砂性土的流塑性、保水性以及开挖面动态土压平衡机理作了较深入的探讨。胡长明等^[8]针对穿越砂层的盾构施工进行了渣土改良试验, 通过对比处理前后渣土的抗剪强度、渗透性及坍塌度, 得到了合理的膨润土用量及泥浆掺入比。张立

收稿日期: 2014-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(51178336)

第一作者: 邱 龔(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为隧道工程, 城市地下工程。E-mail: qiyansdust@163.com

通讯作者: 杨新安(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为隧道工程, 城市地下工程。

E-mail: xyang@tongji.edu.cn

泉^[9]针对无水砂层,采用泡沫剂和膨润土进行渣土改良,通过调整添加剂用量,观察盾构机掘进参数的变化,优化了添加剂的配比.王春河等^[10]结合北京地铁的工程实践,通过流塑性、稠度、离稀程度等指标,确定了钠基膨润土在粉质黏土、细中砂以及砂卵石地层中的改良配比.石晶等^[11]阐述了发泡原理以及泡沫的作用,确定了泡沫注入率与土的渗透系数及土质颗粒级配的关系.宁士亮^[12]确定了以膨润土浆液为主,泡沫剂为辅的改良方案,提出了以掘进速度和出渣稠度为主要依据调节膨润土掺入量和膨润土浆液注入量;以刀盘扭矩和螺旋机出渣情况为依据调整泡沫剂掺量和注入量的改良策略.通过上述文献分析可以发现,虽然前人对于盾构穿越砂性地层进行了大量的渣土改良试验研究,但试验内容多为添加剂对土样的物理、力学参数的改善,对于土样掺入添加剂后细观结构的改变及其改善机理,改良渣

土配比、特性及其细观结构的关系等的研究还未见报道.

本文首先通过现场坍塌度试验,确定添加剂的配比,再对相应配比的土样进行室内压缩、渗透试验,观测其物理、力学参数,最后采用扫描电镜对改性渣土的细观结构进行分析,得出适用于富水砂层中盾构施工渣土改良添加剂的合理配比,为类似地层中的盾构施工提供参考.

1 工程概况

深圳某地铁区间隧道长约 3 km,线间距约 12~14 m,位于城市主干道下方,施工控制要求高.根据勘察报告,左线 400~600 环,右线 380~680 环,隧道埋深约 14~16 m,主要穿越⑤₁₁砾砂层,其典型纵断面地质剖面如图 1 所示.

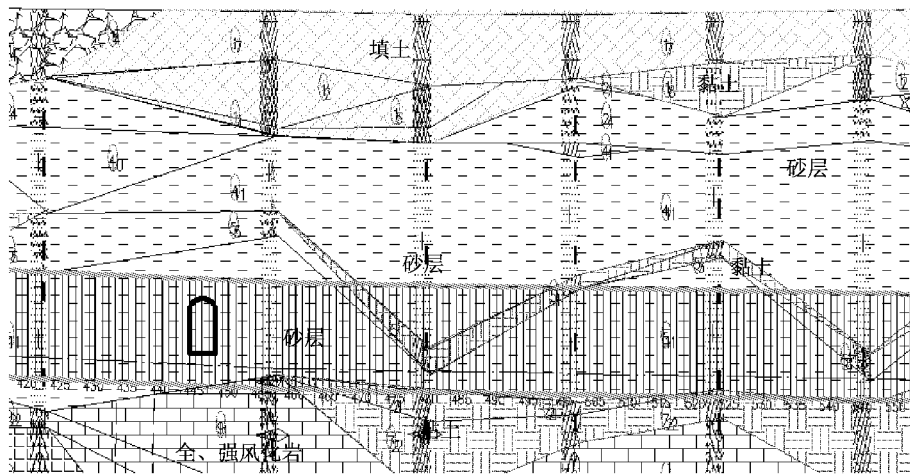


图 1 深圳地铁某区间隧道纵断面地质剖面图

Fig.1 Longitudinal geological profile of tunnel in Shenzhen

区间地下水位埋深约 3.5 m,受海水和河流的侧向补给,地表水与地下水之间的水力联系密切.砾砂结构松散,天然重度 $20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,黏聚力为 0,内摩擦角 35° ,变形模量 40 MPa,渗透系数 $36 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$,含水量约 20%,透水性强,属于典型的富水砂层,为不稳定土体,对盾构掘进时开挖面的稳定性极为不利,施工中易发生涌水、涌砂、坍塌等,盾构施工风险水平高.

渣土改良塌落度试验所用砂土取自左线 445 环处⑤₁₁砾砂层,含水率约 20%,对所取砂土烘干后进行筛分试验,得到其级配曲线,见图 2.

由图 2 中数据计算可知,砂土的不均匀系数 C_u 约为 2.8,曲率系数 C_c 约为 7.2.当不均匀系数 C_u 不小于 5,曲率系数 C_c 处于 1~3 之间时,土颗粒配良

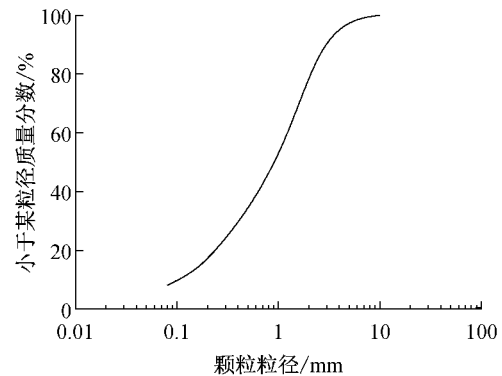


图 2 砂土的级配曲线

Fig.2 Grading curve of sand

好,故可判断试验所用砂土级配不良,这会导致盾构掘进时砂土中的细颗粒容易被水流从大颗粒间隙中带走,形成涌水通道,可能造成喷涌.

2 渣土改良剂的选择

2.1 地层性质与盾构施工的关系

坍塌度直观地反映渣土的流塑性、和易性及保水性,坍塌度过高或过低均不利于盾构施工.渗透系数综合反映土体的渗透能力,盾构通过渗透系数过大的地层时,若控制不当,易发生涌水、涌砂事故.土压平衡盾构切削下来的、充满密封舱内的渣土是盾构平衡刀盘前方土体水土压力的介质,其压缩性能直接影响了土压平衡的建立.

2.2 渣土改良的目的

富水砂层盾构掘进渣土改良的目的是:①提高土舱内渣土的抗渗透能力,避免开挖面因排水固结而造成较大的地表沉降甚至坍塌事故;②降低土舱内渣土以及开挖面土体的内摩擦角,减少渣土对刀盘刀具的磨损,降低刀盘扭矩;③提高土舱内渣土的可塑性,防止渣土黏附在刀盘上结成泥饼.

目前,施工中常用的渣土改良添加剂主要有泡沫剂、膨润土以及高分子聚合物,其各自优缺点及适用地层见表 1.

表 1 盾构施工中常用添加剂对比

Tab.1 Common additives in shield construction

添加剂	代表材料	主要效果	适用地层	缺点
矿物类	膨润土	降低透水性、增加流动性	各种地质	需要使用大规模的设备
水溶性高分子	高分子聚合物	增大黏性	无黏性土	废弃处理困难
界面活性材料	泡沫	降低透水性、提高流动性	各种地质	无

3 渣土改良试验分析

首先根据现场条件对土样进行坍塌度试验.通过对掺入添加剂的渣土坍塌度进行分析,初步确定合理的配比范围,再根据坍塌度试验结果,对所取的⑤₁₁砾砂进行室内渗透、压缩及电镜扫描试验,对改性渣土的渗透、压缩特性及细观结构变化进行深入的研究,最终为富水砂层中的盾构渣土改良提供科学合理的添加剂与配比.

3.1 现场坍塌度试验

3.1.1 泡沫改良

考虑盾构施工实际情况,试验按泡沫剂与水的体积比(文中体积比为添加剂与水的体积之比、质量比为添加剂与水的质量之比)为 3% 进行配制,充分发泡后掺入砂土,进行渣土改良坍塌度试验.现场试验结果表明,采用体积比为 3%、外掺量(添加剂与水拌合后的混合物与土的体积比)为 3%~5% 的泡沫对砂土进行改良,其坍塌度在 200~210 mm 范围内,和易性较好.

3.1.2 膨润土改良

参考以往施工经验,用钠基膨润土,按质量比为 1:6,1:7 及 1:8 分别配制膨润土泥浆进行渣土改良坍塌度试验.现场试验表明,采用质量比为 1:7、外掺量为 8%~10% 的膨润土泥浆对砂土进行改良,其坍塌度在 195~205 mm 范围内,和易性及保水性均较好.

3.1.3 高分子聚合物改良

采用质量比为 0.3% 的高分子聚合物配合质量比为 1:7、外掺量为 8% 的膨润土泥浆对砂土进行坍塌度试验(由于现场实际施工中,不会单独使用高分子聚合物进行渣土改良,故文中采用的高分子聚合物改良的土样事先经过了质量比为 1:7、外掺量为 8% 钠基膨润土的改良).现场试验表明,当高分子聚合物的外掺量在 2%~3% 时,渣土的和易性及保水性均已很好,坍塌度在 195~210 mm 范围内.

通过对现场的坍塌度试验结果进行对比分析,确定了泡沫、膨润土和高分子聚合物添加剂的合理配比,即体积比为 3% 的泡沫、质量比为 1:7 的膨润土、质量比为 0.3% 的高分子聚合物,以此进行室内压缩试验及渗透试验,然后根据其结果进行电镜扫描试验.

3.2 压缩试验

采用环刀装土的杠杆式压缩仪,分别对烘干后配水的重塑土样;体积比为 3%,外掺量分别为 2%,3%,4% 泡沫的土样;质量比为 1:7,外掺量分别为 6%,8%,10% 膨润土的土样;质量比为 0.3%,外掺量分别为 2%,3% 高分子聚合物的土样进行压缩试验. e (孔隙比)- p (压力)曲线见图 3.

由图 3 可知,泡沫的掺入对土样的孔隙比基本无影响,膨润土的掺入对砂土的孔隙比改善效果作用明显,高分子聚合物对土样的孔隙比具有一定的改善作用.

压缩系数 α 、压缩模量 E_s 分别采用式(1),(2)计算.

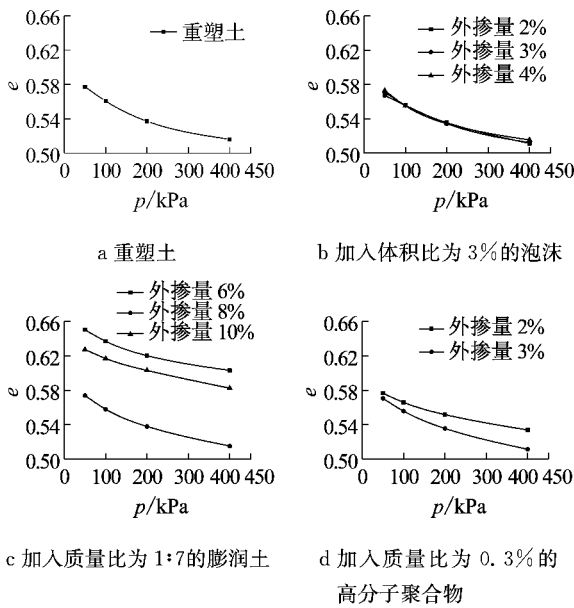


图 3 改良土的 $e-p$ 曲线

Fig.3 $e-p$ curve of improved soils

$$\alpha = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i} \quad (1)$$

$$E_s = \frac{1 + e_0}{\alpha} \times 10^3 \quad (2)$$

式中： e_0 为未施加荷载时的孔隙比； e_i 为施加 i 次荷载时对应的孔隙比； p_i 为第 i 次施加的压力。 e_0, p_i, e_i 分别为未加荷载时的孔隙比，施加某波荷载的压力值，该压力值对应的孔隙比。

一般采用 100~200 kPa 压力区间内对应的压缩系数 α_{1-2} 来评价土的压缩性，试验结果见表 2。

表 2 压缩试验结果

Tab.2 Test results for compression test

土性	外掺量/%	压缩系数 $\alpha_{1-2}/10^{-4}$	压缩模量 E/MPa
重塑土		2.356	6.8
	2	2.028	7.9
泡沫	3	2.124	7.5
	4	3.964	4.0
	6	1.681	9.5
	8	1.588	10.0
膨润土	10	1.399	11.4
	2	1.528	10.5
高分子聚合物	3	1.424	11.2

由表 2 可知，对于富水砂层的土样，掺入泡沫后压缩系数、压缩模量变化均较小，且随着泡沫掺入量的增大，压缩模量逐渐减小甚至低于重塑土，说明泡沫对改良土体的压缩性质影响不大，而由于地层本身含水量较大，过多地掺入液态泡沫反而会降低砂性地层的土体压缩模量；膨润土对于土体的压缩性能改良效果显著，随着膨润土掺入量的增大，压缩系

数减小，压缩模量显著增大，土体密实度增加；高分子聚合物能够改善土体的压缩性能，随着高分子聚合物掺入量的增大，压缩系数减小，压缩模量增大。

3.3 渗透试验

基于压缩试验结果，通过常水头渗透试验仪，分别对烘干后配水的水重塑土样；体积比为 3%、外掺量为 4% 泡沫的土样；质量比为 1:7，外掺量分别为 6%、8%、10% 膨润土的土样以及质量比为 0.3%、外掺量为 2% 高分子聚合物的土样进行渗透试验。表 3 为渗透试验结果，可见，富水砂层中，泡沫作为渣土改良添加剂，对地层的渗透性能有一定的改善作用，但作用不大，渗透系数仅降低了 27.54%。膨润土对地层的渗透特性有较为明显的改善，且随着膨润土掺入量的增加，土样的渗透系数降低幅度从 25.56% 提高到 67.00%，透水性降低，可以有效地防止盾构施工中涌水、涌砂、坍塌等风险。高分子聚合物对地层的渗透特性也具有较好的改善，渗透系数降低了 39.34%，有效地降低了土样的渗透系数。由于室内渗透试验的渗透系数是在常压下利用常水头渗透试验仪所测得，而地勘参数是现场抽水试验所测得，现场原位土体受地应力作用，比室内密实度高，因此室内试验测得的渗透系数高于原位试验值。

表 3 渗透试验结果

Tab.3 Test results for permeability test

土性	外掺量/%	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
重塑土		70.379 916 62
泡沫	4	50.995 156 000
	6	52.395 808 22
膨润土	8	32.011 622 59
	10	17.291 360 55
高分子聚合物	2	19.417 599 29

3.4 电镜扫描结果

利用高倍率扫描电子显微镜，分别对烘干后配水的水重塑土样；体积比为 3%、外掺量为 4% 泡沫的土样；质量比为 1:7、外掺量为 8% 膨润土的土样以及质量比为 0.3%、外掺量为 2% 高分子聚合物配合质量比为 1:7、外掺量为 8% 膨润土的土样进行电镜扫描。结果见图 4。

图 4a 为原状土烘干配水制成的重塑土微观结构。由于砂土的颗粒级配较差，土样中的细颗粒较少，结构较为松散，扫描图像中主要成分为颗粒较大的砂砾。图 4b 为体积比为 3%、外掺量为 4% 泡沫的土样的微观结构。与重塑土样相比，无明显变化。实际渣土改良过程中，泡沫为气液混合态，扫描试验土样制备过程中，由于土样要被烘干才可以进行扫描，

土样中已无泡沫的液态成分,故泡沫对土体固态的细观结构的改变作用不大.图 4c 为质量比为 1:7、外掺量为 8%膨润土的细观结构.由于膨润土细颗粒充分与土样拌合,填充到砂土粗颗粒的空隙中,其细观结构发生明显变化,使得土体更密实,细观结构更为紧密.图 4d 为质量比为 0.3%、外掺量为 2%高分子聚合物和质量比为 1:7、外掺量为 8%膨润土的土样细观结构.由于膨润土的填充作用,土样细观结构变密实.但是,高分子聚合物会将土样中的一部分细颗粒胶结成块状大颗粒,与致密的土样整体分离.

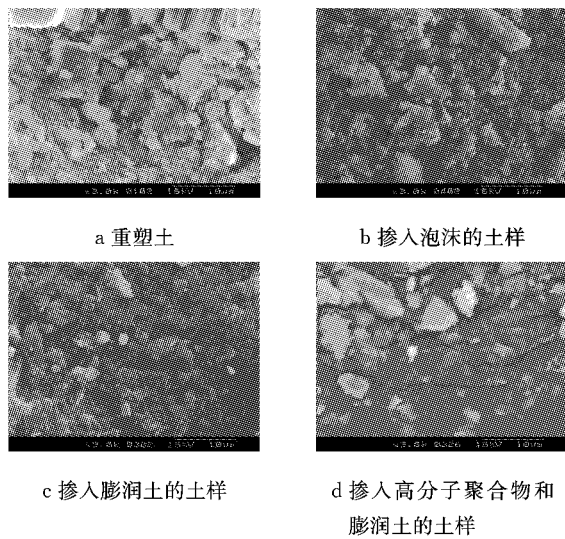


图 4 改良土样品电镜扫描结果

Fig.4 Test results for scanning of improved soils

由此可见,对于砂性地层的细观结构的改良,膨润土具有最佳的效果,高分子聚合物效果次之,泡沫效果最差.

4 现场渣土改良效果分析

为方便现场施工,并考虑成本,采用以泡沫、膨润土为主,高分子聚合物为辅的渣土改良方案,即主要采用体积比为 3%~4%、外掺量为 2%~6%的泡沫和质量比为 1:7、外掺量为 8%~10%的膨润土对富水砂层进行改良,同时,常备质量比为 0.3%的高分子聚合物防喷涌. 按此方案,盾构在富水砂层中掘进时,推进速度在 35~45 mm·min⁻¹之间,扭矩在 1 200~1 500 kN·m 之间,每环出土量在 56~60 m³ 之间,推进参数基本正常,表明盾构掘进过程中渣土改良效果总体较好.

图 5 为盾构掘进时刀盘扭矩、刀盘转速、推进速度与添加剂之间的关系.由图 5 可以看出,盾构在富水砂层掘进过程中,未进行渣土改良时的刀盘扭矩与理论计算值 1 160~1 328 kN·m 相比偏大,刀盘转速波动也较大,说明刀盘及刀具在未改良的地层掘进时工作环境较差.460 环左右开始对土舱内注入体积比为 3%~4%、外掺量为 2%~6%的泡沫,刀盘扭矩明显降低,说明泡沫在现场施工中具有较好的改良效果,但是推进速度波动依然较大,刀盘转速变化不大.结合此处地质条件,隧道断面有黏土夹层,使得 470 环左右刀盘转速略低且推进速度不稳定.490 环左右开始同时使用体积比为 3%~4%、外掺量为 2%~6%的泡沫和质量比为 1:7、外掺量为 8%~10%的膨润土对富水砂层进行改良,刀盘扭矩、转速、推进速度均较为稳定,且在理论计算值范

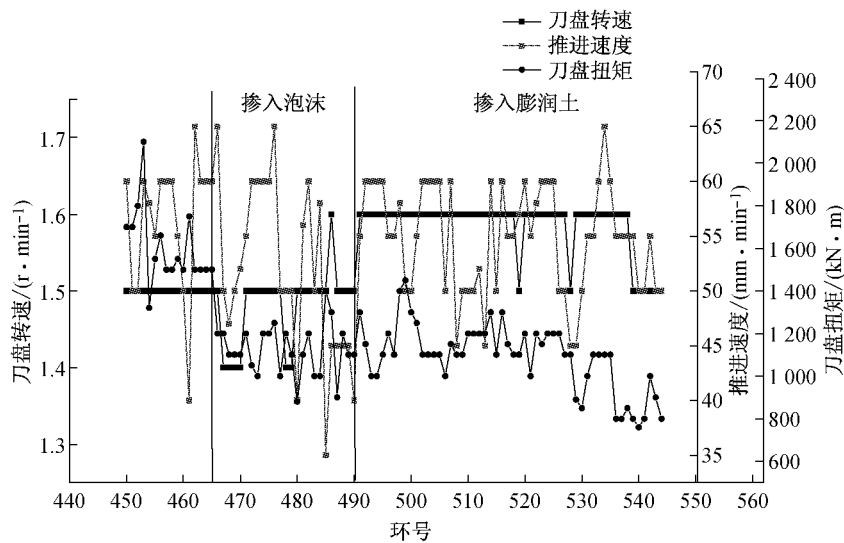


图 5 盾构推进刀盘扭矩、转速、推进速度与添加剂之间关系

Fig.5 Relationship between cutterhead torque, rotational speed advance speed and additives

围内. 结合此处地质条件,隧道穿越地层为全断面砂层,添加剂很好地稳定了刀盘扭矩及推进速度,且提高了刀盘转速,说明同时用泡沫、膨润土对富水砂性地层进行渣土改良,刀盘的工作参数稳定,工作环境良好,渣土改良的效果显著. 结合图 1 可知,盾构隧道穿越的地层中亦包括粗砂、中砂、粉砂、砾石等地层,说明上述改良方案在此类砂性地层中,均有较好的改良效果.

5 结论

通过对渣土改良的塌落度试验及现场盾构掘进渣土改良效果分析,可得出以下结论:

(1) 富水砂层中,采用质量比为 1:7、外掺量为 8%~10%的膨润土进行改良后的渣土,其流塑性较好,能够满足施工需求.

(2) 泡沫可导致富水砂性地层的压缩性降低;膨润土对富水砂性地层的压缩特性有很好的改良效果;高分子聚合物对此类地层的压缩性亦有一定的改良作用.

(3) 掺入泡沫的土体,其渗透系数仅降低了 27.54%,可见,泡沫对地层的渗透性能有一定的改善,但作用不大;掺入膨润土的土体,土样的渗透系数最大降低了 67.00%,对于改良地层的渗透性能,膨润土有着非常良好的效果;高分子聚合物对地层的渗透特性也具有较好的改善,渗透系数降低了 39.34%.

(4) 泡沫对砂性土的固态细观结构改良基本无作用;膨润土作为细颗粒,能够填充到砂砾粗颗粒的孔隙中,对富水砂层土体细观结构有非常显著的改良效果;而高分子聚合物虽然也有一定的填充作用,但是高分子聚合物会将一部分细颗粒胶结成块状大颗粒物质,与致密的土样整体分离.

参考文献:

- [1] 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, 4(12): 18.
ZHU Wei, CHEN Renjun. Technical problems and construction management for shield tunnel[J]. Geotechnical Engineering World, 2001, 4(12): 18.
- [2] Quebaud S, Sibai M, Henry J P. Use of chemical foam for improvement in drilling by earthpressure balanced shields in granular soils [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(2): 173.
- [3] Bezuijen A, Schaminee P E L, Kleinjan J A. Additive testing for earth pressure balance shields [C] // Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure. Balkema: [s. n.], 1999: 1991-1996.
- [4] Jancsecz S, Krause R, Langmaack L. Using the slump test to assess the behavior of conditioned soil for EPB tunneling [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2009, 8(3): 167.
- [5] Raffaele Vinai, Claudio Oggeri, Daniele Peila. Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 308.
- [6] Sotiris Psomas. Properties of foam/sand mixtures for tunnelling applications [D]. Oxford: St Hugh's College, 2001.
- [7] 唐益群,宋永辉,周念清,等. 土压平衡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, 24(1): 52.
TANG Yiqun, SONG Yonghui, ZHOU Nianqing, et al. Experimental research on troubles of EPB shield construction sandy soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 52.
- [8] 胡长明,崔耀,王雪艳,等. 土压平衡盾构施工穿越砂层渣土改良试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2013, 45(6): 761.
HU Changming, CUI Yao, WANG Xueyan, et al. Soil improvement for earth pressure balance shields construction in full section sand layer [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science, 2013, 45(6): 761.
- [9] 张立泉. 西安地铁全断面无水砂层盾构施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2012(7): 103.
ZHANG Liquan. Full section shield construction technology of Xi'an metro anhydrous sand stratum[J]. Railway Construction Technology, 2012(7): 103.
- [10] 王春河,张顶立. 无水砂卵石盾构施工分区注入式渣土改良技术[J]. 铁道建筑技术, 2013(4): 47.
WANG Chunhe, ZHANG Dingli. Study on soil conditioning techniques of shield tunneling in waterless gravel strata through conditioner partition injection [J]. Railway Construction Technology, 2013(4): 47.
- [11] 石晶,章旭,郭明明. 浅谈泡沫技术在土压平衡盾构中的应用[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2009, 8(3): 46.
SHI Jing, ZHANG Xu, GOU Mingming. On the application of foam technology in the earth pressure balance shield [J]. Journal of Shijiazhuang Institute of Railway Technology, 2009, 8(3): 46.
- [12] 宁士亮. 富水砂层盾构渣土改良技术[J]. 铁道建筑技术, 2014(3): 86.
NING Shiliang. Improvement techniques for residue soil of shield tunneling in waterrich sand bed [J]. Railway Construction Technology, 2014(3): 86.