

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.266



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层渣土改良试验研究

朱碧堂^{1a,1b}, 余金^{1a}, 王凌², 张跃明², 蒋亚龙^{1a}, 杜林泉^{1a}, 黄展军³

(1. 华东交通大学 a. 土木建筑学院; b. 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 南昌 330013;
2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广州 510010; 3. 南昌轨道交通集团有限公司, 南昌 330013)

摘要:盾构穿越复合地层时,富水砾砂层含量高易发生“喷涌”、掌子面失稳,泥岩地层含量高则易发生结泥饼、刀具抱死及偏磨、出渣困难等问题。针对这些施工难题,以南昌地铁4号线七里站—民园路西站(七民)盾构区间穿越富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层为研究对象,基于5种不同复合程度掌子面地层渣土改良试验,研究土压平衡盾构在动态变化的复合地层中所需的合理渣土改良剂配比。结果表明:对于复合地层,随着泥岩占比从10%增加至90%,泡沫注入率从20%逐渐增大至50%,膨润土泥浆注入率从20%逐渐减小至0。现场应用结果表明,采用该改良方案可保证土仓内渣土流塑性较好、渗透性较低。

关键词:土压平衡盾构;富水砾砂;复合地层;渣土改良

中图分类号: U455.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)05-0029-09

Experimental study on soil conditioning with water bearing gravelly sand-argillaceous siltstone composite stratum

ZHU Bitang^{1a,1b}, YU Jin^{1a}, WANG Ling², ZHANG Yueming², JIANG Yalong^{1a},
DU Linquan^{1a}, HUANG Zhanjun³

(1a. School of Civil Engineering and Architecture; 1b. Engineering R & D Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, P. R. China; 3. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Nanchang 330013, P. R. China)

Abstract: When the shield passes through the composite stratum, the content of water rich gravelly sand layer is high, which is prone to "gushing", tunnel face instability, and the content of argillaceous siltstone stratum is high, which is more prone to mud cake, tool locking, eccentric wear and slag discharge. In view of these construction problems above, the shield section of Qili station-Minyuan Road West Station of Nanchang Metro Line 4 as an example, which passes through the water rich gravel sand-argillaceous siltstone composite stratum, this paper conducts the soil conditioning tests for five tunnel faces with

收稿日期: 2021-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(41972291, 52020105003); 江西省交通运输厅重点工程科技项目(2019C0010); 江西省交通运输厅科技项目(2021Z0004)

作者简介: 朱碧堂(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道、基坑、桩基和海上风电基础研究, E-mail: btangzh@hotmail.com.

Received: 2021-04-28

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 41972291, 52020105003); Engineering Science and Technology Project of Department of Transportation of Jiangxi Province (No. 2019C0010); Project of Department of Transportation of Jiangxi Province (No. 2021Z0004)

Author brief: ZHU Bitang (1974-), professor, doctoral supervisor, main research interests: tunnel, excavation, foundation and offshore wind power foundation, E-mail: btangzh@hotmail.com.

different composite degrees and examines the reasonable proportion of soil conditioning mixture ratio in these varying composite of earth pressure balance shield. The results show that: with the ratio increase of argillaceous siltstone from 10% to 90%, the foam injection ratio increases from 20% to 50%, and the injection ratio of bentonite slurry decreases from 20% to 0. The field application results show that the soil conditioning scheme above can ensure the good fluidity and low permeability of the muck, and solve the problems of gushing and mud cake during shield tunneling in different degrees of composite stratum.

Keywords: EPB shield; water bearing gravelly sand; composite stratum; soil conditioning

土压平衡盾构相对泥水盾构具有泥浆污染小、施工速度快等优点,根据土仓压力反馈调节螺旋输送机和刀盘转速,保证土仓渣土动态平衡,易维持掌子面稳定,减少地表沉降,被广泛应用于城市人口密集及建(构)筑物密集区的地铁隧道建设中^[1]。

许多学者针对不同地层进行了大量的渣土改良试验研究及改良效果评价。邱龔等^[2]针对深圳富水砂层采用泡沫、膨润土泥浆及高分子聚合物进行了渣土改良试验,通过对土样进行电镜扫描、坍塌度试验和渗透试验进行效果评价,发现膨润土泥浆注入比为 8%~10%的渣土可满足盾构施工要求。Cheng 等^[3]针对粉砂层,通过模型试验,采用刀盘扭矩指标评价渣土改良效果,并确定最佳改良剂配比。Mori^[4]通过压缩试验和十字板剪切试验,研究了实际应力状态下不同泡沫参数对砂土改良的影响,发现孔隙应力和有效应力是影响泡沫改良渣土性能的主要因素。叶新宇等^[5]针对泥质粉砂岩进行了渣土改良试验,得到渣土坍塌度与含水率、泡沫注入比的函数关系,并提出了渣土改良精细化控制措施。蔡兵华等^[6]对具有高液塑限、高黏聚力、富含黏土矿物的红黏土进行了室内渣土改良试验,通过坍塌度试验、稠度试验和液塑限联合试验评价土体改良效果,发现含水率为 40%时泡沫注入率为 30%的理想土体改良指标。刘卫^[7]通过现场统计和案例分析,提出富水砂层-泥质粉砂岩复合地层选取泡沫剂、膨润土泥浆及高分子聚合物进行渣土改良,防治砾砂地层渣土流动性差和喷涌问题以及泥质粉砂岩中刀盘结泥饼问题。在改良后渣土效果评价方面,魏康林^[8]提出改良后渣土必须具有低渗透性、较小的抗剪强度和较好的流动性。Huang 等^[9]提出,泡沫能否有效降低渣土的渗透系数取决于渣土的级配特性,通过改变土的有效粒径、曲率系数和不均匀系数,对泡沫改良后的渣土进行渗透试验得出有效粒径对渣土渗透系数影响较大,曲率系数和不均匀系数对渣土渗透系数影响较小。Avunduk 等^[10]通过

旋叶式剪切试验装置评价渣土改良效果,从而进一步优化渣土改良参数。王树英等^[11]设计变水头渗流试验装置,研究了改良后渣土渗透系数的时变效应。朱伟等^[12]推导了盾构机喷涌时掌子面水压力和渗流量的理论公式,提出了不同土层掘进过程中发生喷涌的临界条件。在富水及水压力大的地层,改良后渣土渗透系数应处于或低于 10^{-5} m/s 数量级,才不易发生喷涌事故^[13]。

目前,许多学者分别对富水砂层、泥质粉砂岩渣土改良进行了试验研究,对富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层进行了现场统计和案例分析,尚未对不同体积占比的富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层开展系统性室内改良试验及量化标准,也未从颗粒级配角度分析不同砾砂-泥质粉砂岩体积占比对渣土改良的影响。因此,在工程实践中,改良参数随意性较大且对地层体积损失无法控制,容易诱发地表沉降过大甚至坍塌等重大工程事故,如南昌地铁 2 号线学府大道东站-翠苑路站复合地层区间由于施工期间降雨量大、地下水位上涨、渣土改良方案调整不及时,导致地表路面出现坍塌;南昌地铁 3 号线国威路站-青山湖西站复合地层区间由于渣土改良不善导致地表沉降过大。因此,需要针对不同体积占比的富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层开展系统的渣土改良试验,提出定量的渣土改良控制标准。

笔者以南昌地铁 4 号线七民区间为例,对不同掌子面土层颗粒级配进行分析,探讨不同富水砂层-泥质粉砂岩体积比复合地层渣土改良试验方案,通过坍塌度试验、十字板剪切试验和加压渗透试验,综合判断渣土改良效果和量化泥岩改良控制指标,并通过现场统计分析和改良效果,验证上述室内试验研究结果。

1 工程地质与水文地质概况

1.1 地层条件

根据隧道地质纵剖面图,在七民区间 SK32+

020~326 段和 SK32+840~SK33+190 段,盾构穿越地层分界面动态变化,软硬交错,为上覆富水砾

砂、下卧泥质粉砂岩不同体积比复合地层,地质纵剖面如图 1 所示。

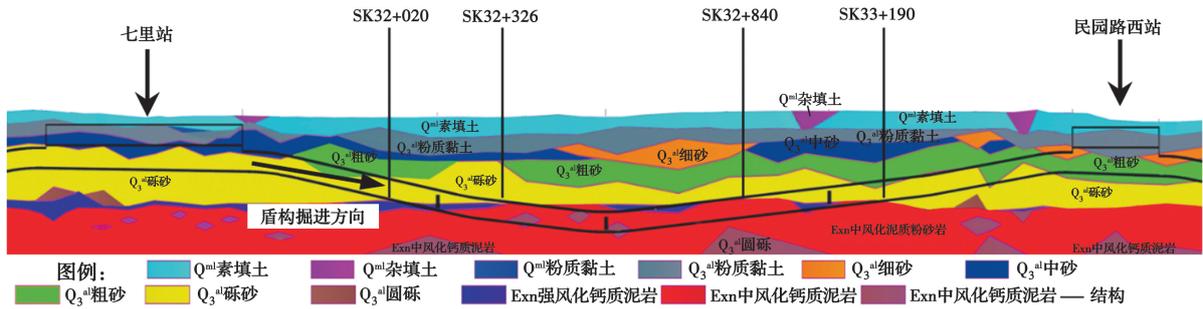


图 1 复合地层地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of composite stratum

1.2 水文条件

隧道埋深处于 17~25 m,地下水位埋深约 4~6 m,静水压力约 140~220 kPa。七里区间隧道为富水高压地层,砾砂的天然含水率在 21%~28% 之间,渗透系数约为 1.2×10^{-3} m/s,泥质粉砂岩天然含水率在 13%~18% 之间。由于地层中存在高含量黏性颗粒岩层,盾构掘进时容易在刀盘前部结泥饼及刀具抱死偏磨。同时,穿越富水、高压砾砂层时,螺旋机无法保持正常的压力梯降,易产生螺旋机出土口“喷水、喷砂、喷泥”现象^[12]。

2 颗粒级配及改良剂参数分析

根据不同体积占比的砾砂-泥质粉砂岩复合地层颗粒级配分析,研究适应不同复合程度地层的改良剂参数方案。

2.1 土层颗粒级配分析

在土层参数中,颗粒级配不仅对盾构机选型具有参考意义,而且对土压平衡盾构渣土改良及整个施工过程有着重要影响。渣土中细颗粒含量较多时,改良后土体易形成渗透系数小、类似牙膏状的流塑体,能够均匀传递推力至掌子面,平衡水土压力,减小地面沉降,如图 2 所示。粗颗粒含量高的土体经泡沫改良后流塑性较差、渗透系数较大,在掘进过程中难以实现土压动态、连续平衡^[14]。

土压平衡盾构最初用于细颗粒含量($d < 0.075$ mm)在 20%~30% 的土体^[15],所以,渣土改良前应根据土层颗粒级配曲线分析土体细颗粒含量。若细颗粒含量不足,应额外添加膨润土泥浆进行补充细颗粒后再添加泡沫进行改良,富水时还应加入聚合物对渣土进行絮凝;若细颗粒含量过大且具有较大

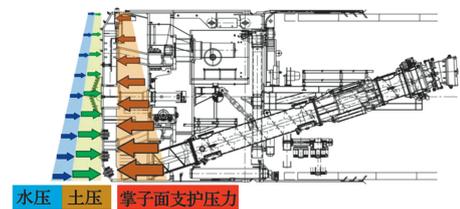


图 2 盾构掘进掌子面土压平衡示意图

Fig. 2 Schematic diagram of earth pressure balance of tunnel face

黏聚性,应添加分散剂溶液对其进行分散后再添加泡沫对渣土进行改良。

根据盾构隧道穿越富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层的特点,分别对砾砂和泥质粉砂岩进行颗粒级配分析,得出不同断面破碎后的细颗粒含量,确定相应复合地层的渣土改良方案。对砾砂用震筛机进行震动筛分试验,对破碎后的泥质粉砂岩用水分法分级过筛进行颗粒级配分析,分别得出砾砂和泥质粉砂岩的颗粒级配曲线,如图 3 所示。由级配曲线可知,砾砂中细粒含量几乎为 0,泥质粉砂岩中细粒含量达到 30% 左右。

2.2 泡沫的制备

根据彭磊等^[16]的研究,采用泡沫剂溶液浓度为 3% 发出的泡沫改良渣土效果最理想。实验室采用的泡沫剂取于施工现场,确保试验结果对施工的指导性。将泡沫剂溶液通过发泡系统制备泡沫,如图 4 所示。

2.3 膨润土泥浆的准备

对于缺乏细颗粒的富水砂层,需要添加膨润土泥浆填充颗粒间的空隙,降低渗透系数并增加土体流塑性。具有一定黏度的膨润土泥浆可以有效地包

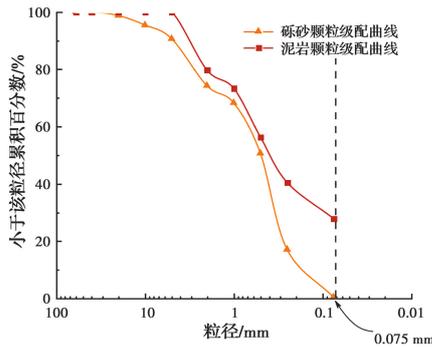


图 3 砾砂与泥质粉砂岩颗粒级配曲线

Fig. 3 Grading curve of gravelly sand and argillaceous siltstone



图 4 实验室制备泡沫

Fig. 4 Preparation of foam in laboratory

裹住大粒径土颗粒,增强土体的流动性,减少土体与刀盘之间的摩擦,但泥浆黏度过大可能会造成泥浆输送系统的压力过大,不利于流畅泵送。对于富水砂层,膨润土泥浆黏度在 20~30 mPa·s 之间改良效果较好^[17]。为获得理想黏度对应的膨润土泥浆质量分数,实验室采用旋转黏度计进行了 5 种不同质量分数的膨润土泥浆黏度测试,如图 5 所示。

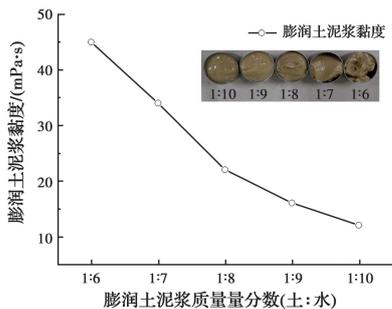


图 5 不同质量分数膨润土泥浆性能测试

Fig. 5 Performance testing of bentonite slurry with different mass fraction

通过膨润土泥浆试验分析发现,膨润土泥浆质量分数为 1:8 时,符合盾构施工用膨润土泥浆黏度要求。

2.4 渣土悬浮剂和泥岩分散剂溶液

当掌子面土层处于富水条件,仅仅用泡沫和膨润土泥浆改良时,渣土流动性过大,且水易从土样中

析出。此时需要另外添加渣土悬浮剂等聚合物,将自由水絮凝成胶体与渣土均匀搅拌混合,如图 6(a)所示。当掌子面地层细颗粒含量大于 20%且黏性较大时,仅仅添加泡沫和水无法将黏聚在一起渣土分散均匀改良,需要先添加泥岩分散剂溶液,将渣土搅拌均匀分散后,再添加泡沫对其进行改良,如图 6(b)所示。

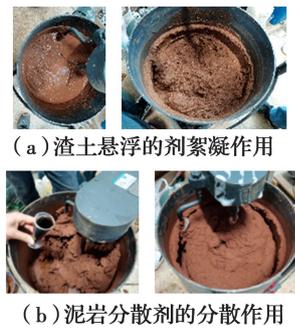


图 6 悬浮剂(聚合物)和分散剂作用效果

Fig. 6 Effect of suspension agent (polymer) and anti-polymer agents

3 渣土改良配比试验

3.1 渣土改良试验方案及断面的选取

盾构机在复合地层中掘进时,整个掌子面土层组成处在动态变化过程中。选取 5 种不同泥岩体积比例的掘进断面(掌子面泥质粉砂岩体积占比分别为 10%、30%、50%、70%、90%),并对不同掌子面土层进行颗粒级配分析,如图 7 所示。

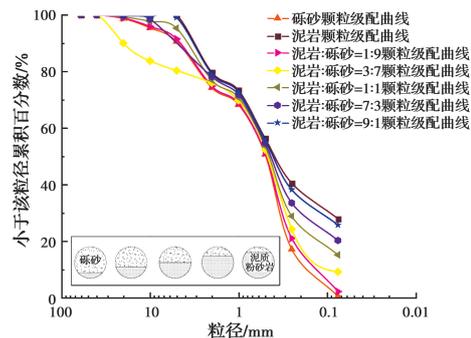


图 7 不同泥岩比例断面及颗粒级配曲线

Fig. 7 Sections with different ratios of argillaceous siltstone and grading curves

通过颗粒级配曲线分析,砾砂:泥质粉砂岩=9:1、7:3、1:1、3:7、1:9 断面对应的细颗粒含量分别约为 3%、9%、15%、21%、27%。初步可以根据细颗粒含量选择改良剂类型并计算膨润土泥浆用量。

3.2 10%泥质粉砂岩质量比渣土的改良试验

室内制备10%泥岩体积含量的复合地层,通过加水使含水率接近原位地层含水率的20%~25%。由于泥质粉砂岩含量较少,由级配曲线可知刀具破碎后细颗粒含量约为3%,根据理想渣土细颗粒含量可计算出膨润土泥浆注入比在17%~27%之间,改良方法主要以膨润土泥浆补充细颗粒、泡沫增加渣土流动性为主,经立式砂浆搅拌机充分均匀混合后测其坍落度。在只添加水、不添加泡沫和膨润土泥浆时,渣土不具有较好的流塑性,如图8(a)所示,改良效果不佳。采用泡沫注入率和膨润土泥浆注入率梯度为5%,高分子聚合物注入率梯度为0.5%,进行多组改良试验。当泡沫注入率为10%时,由于渣土含水率过高,在泡沫改良作用下坍落度达到246 mm,渗透系数为 5.68×10^{-4} m/s,此时渣土流动性过大,不利于排渣,渗透系数也未达到抗渗要求。重新配置土样,先添加聚合物,注入率为0.5%、1%、1.5%,当聚合物注入率为1%时,渣土中自由水絮凝呈胶状物,避免了含水率过高对渣土流动性的影响,随着聚合物注入率的增大,渣土中自由水絮凝过度,流动性太差。在聚合物注入率1%的基础上,添加注入率为5%、10%、15%、20%、25%、30%的泡沫,当泡沫注入率为20%时,渣土坍落度为178 mm,流动性较好,但渗透系数为 10^{-4} m/s数量级,未达到渣土抗渗要求,在聚合物和泡沫改良基础上添加注入率为5%、10%、15%、20%、25%、30%的膨润土泥浆,当膨润土泥浆注入率为20%~25%时,高分子聚合物用量为1%,泡沫注入率为20%左右时,改良后渣土坍落度为182 mm,如图8(b)所示,十字板剪切强度为0.66 kPa,渗透系数为 8.72×10^{-6} m/s,可见膨润土泥浆、聚合物和泡沫显著改善了大比例砂层断面渣土的流塑性,减小了土体与刀具间的摩擦,降低了渣土渗透系数,可避免发生喷涌。



(a) 单一水改良 (b) 水+泡沫改良

图8 10%泥岩比例断面的坍落度

Fig. 8 Slump of section with 10% argillaceous siltstone

3.3 30%、50%、70%泥质粉砂岩占比渣土的改良试验

在室内分别制备30%、50%、70%不同泥质粉砂岩体积含量的复合地层,通过加水使其含水率接近原位地层含水率。由于泥质粉砂岩含量逐渐增加,混合土体细颗粒含量增加,此时,改良以添加泡沫,增加土体流动性为主。

通过颗粒级配分析,为保证渣土细颗粒含量在20%~30%之间,泥岩含量为30%、50%、70%时,应分别添加膨润土泥浆11%~21%、5%~15%、0~9%,泡沫注入率梯度为5%,设置了5%、10%、15%、20%、25%、30%共6种不同泡沫注入率,通过渣土坍落度、渗透系数和剪切强度来确定不同泥岩含量复合地层渣土改良泡沫注入率和膨润土泥浆注入率。经立式砂浆搅拌机充分均匀混合后,分别测3种泥岩比例渣土的坍落度、剪切强度及渗透系数。泥岩含量为30%时:膨润土泥浆注入率为13%~18%,泡沫注入率为25%左右时,改良后渣土坍落度为198 mm,十字板剪切强度为0.55 kPa,渗透系数为 5.63×10^{-6} m/s;泥岩含量为50%时:膨润土泥浆注入率为8%~13%,泡沫注入率为30%左右时,改良后渣土坍落度为202 mm,十字板剪切强度为0.51 kPa,渗透系数为 4.21×10^{-6} m/s;泥岩含量为70%时:1:5泥岩分散剂溶液注入比为2%,泡沫注入率为40%左右时,改良后渣土坍落度为188 mm,十字板剪切强度为0.31 kPa,渗透系数为 3.46×10^{-6} m/s。如图9所示,渣土均具有较好的流塑性。



(a) 30%泥岩含量渣土 (b) 50%泥岩含量渣土



(c) 70%泥岩含量渣土

图9 不同泥岩比例断面坍落度

Fig. 9 Slump for sections with varying ratios of argillaceous siltstone

3.4 90%泥质粉砂岩质量比渣土改良试验

由于砂层含量较少,改良方法可近似采用全断面泥质粉砂岩改良参数^[5],采用泡沫和水改良渣土流动性,当渣土“结泥饼”或凝聚成团时,还应加入适量的泥岩分散剂溶液。经立式砂浆搅拌机充分均匀混合后测其坍落度,当泡沫注入率为 40%时,改良后渣土坍落度为 113 mm,如图 10(a)所示,此时渣土流塑性不好,易“结泥饼”卡住刀盘。当继续添加泡沫达到 50%、60%时,渣土流塑性变化不大,仍然黏结成团附着在搅拌机叶片上,如图 10(b)所示,显然,当渣土中细颗粒含量较大且黏性较强时,只添加泡沫改良无法达到流塑性要求,添加 3%的泥岩分散剂溶液后渣土具有较好的流塑性,坍落度为 198 mm,十字板剪切强度为 0.38 kPa,渗透系数为 2.08×10^{-6} m/s,如图 10(c)、(d)所示。

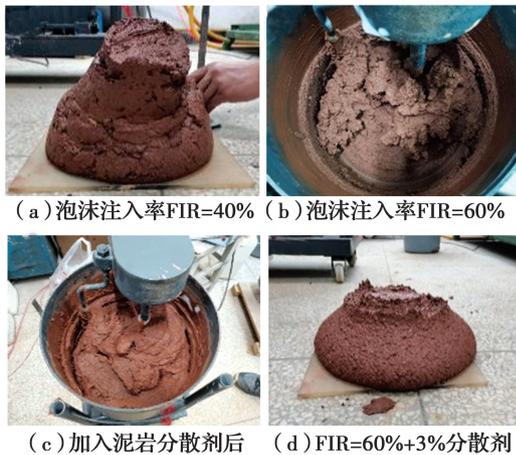


图 10 90%泥岩比例断面坍落度

Fig. 10 Slump of section with 90% argillaceous siltstone

3.5 渣土改良的建议参数

根据上述试验研究,不同泥岩体积占比的富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层渣土改良配比参数如图 11 所示,其他不同比例富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层可按图 11 进行线性差值确定改良剂配比方案。

由试验结果可知,随着泥质粉砂岩占比逐渐增大,刀具破碎后复合地层细颗粒含量增加,泡沫注入率从 20%增加至 50%时,膨润土泥浆注入率从 20%递减为 0。泥岩占比为 10%时,富水砾砂含量较大,在富水时需添加渣土悬浮剂等聚合物进行絮凝;当泥岩占比大于 50%时,泡沫注入率显著增加,需要更多的泡沫对渣土进行润滑和分散作用;当泥岩占比大于 70%时,不再需要膨润土泥浆作为封堵材料降低渣土渗透系数,渣土自身细颗粒含量较高,在刀盘破碎和搅拌作用下可有效填充颗粒

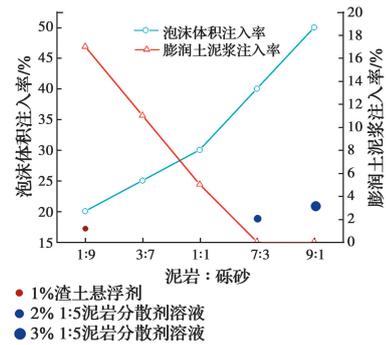


图 11 砾砂-泥质粉砂岩复合地层渣土改良的参数建议

Fig. 11 Recommendations of soil conditioning parameters for gravelly sand-argillaceous siltstone composite stratum

间隙,达到抗渗作用,同时,需要添加泥岩分散剂溶液对渣土进行分散作用,利于泡沫进入土颗粒间,改善渣土流动性。

4 渣土改良效果评价

为了验证改良后的渣土是否满足流塑性及盾构掘进要求,需要确定渣土评价指标,开展室内试验对渣土改良效果进行评价。从渣土的流塑性、抗剪强度、渗透性三方面评价渣土改良效果。

4.1 坍落度试验

由图 12 中坍落度试验数据可以发现,在坍落度 150~200 mm 范围内,富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层在不同比例断面下的最佳泡沫注入比在 20%~50%之间时,随着泥岩比例逐渐增加,泡沫用量也逐渐增加。

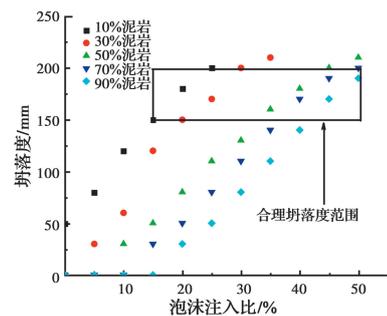


图 12 渣土改良后的坍落度

Fig. 12 Slump of conditioned soil

4.2 十字板剪切试验

渣土的剪切强度直接影响刀具的摩擦损耗,改良后的渣土可有效降低摩擦角和剪切强度,保护刀具。改良后的渣土流动性较大,无法通过直剪试验测得渣土剪切强度,因而采用数显便携式十字板剪切仪研究改良后富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层渣土的不排水剪切强度。试验过程如图 13 所示。



图 13 复合地层改良渣土十字板剪切试验

Fig. 13 Vane shear test for conditioned soil with composite strata

未添加改良剂之前,混合渣土剪切强度为 10~15 kPa,注入泡沫等改良剂均匀搅拌后,渣土剪切强度为 3~7 kPa。改良剂的加入显著降低了渣土的剪切强度,减少了土体与刀盘及刀具之间的摩擦,延长了刀具寿命。

4.3 加压渗透试验

加压渗透装置如图 14 所示,既能施加不同水压模拟不同埋深时盾构机的地下水压,还能施加不同围压模拟不同埋深时盾构机的土仓压力,可较好地再现土仓内的渣土环境。渗透试样高 40 mm,直径 70 mm,试样周围是压力腔,上方和下方放有透水石和滤纸,渗透压力和围压通过调节阀调节,压力调节范围为 0~0.8 MPa。

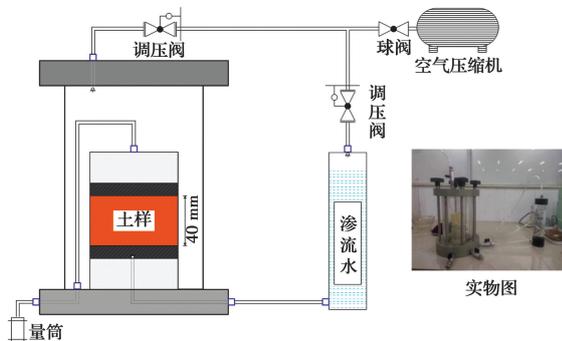
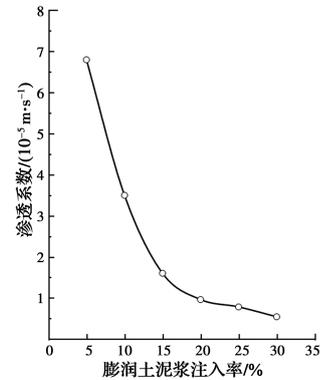


图 14 加压渗透试验装置

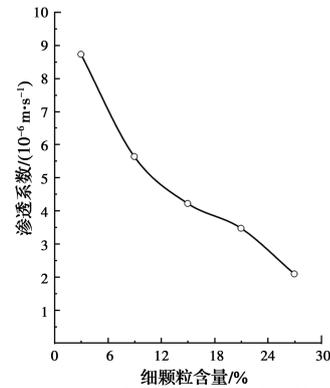
Fig. 14 Experimental equipment of pressurized permeability

在围压 200 kPa、渗透压力 150 kPa 工况下对不同比例复合地层改良后渣土进行渗透试验。5 种复

合地层改良后渣土渗透系数均小于 10^{-5} m/s,满足盾构施工要求,不会发生喷涌现象。通过对比不同泥岩比例地层,当泥岩含量增加或膨润土泥浆注入率增加时,渣土渗透系数都逐渐减小,如图 15 所示,即泥岩在刀盘破碎后,细颗粒和膨润土泥浆增强了复合地层渣土的堵水结构。



(a) 膨润土泥浆注入率与渣土渗透系数的关系



(b) 细颗粒含量与渣土渗透系数的关系

图 15 不同膨润土泥浆注入率和细颗粒含量与渣土渗透系数的关系

Fig. 15 Permeability coefficient of different fine-grained content and BIR with muck

5 现场渣土改良统计分析效益对比

根据图 11,针对现场不同体积占比的富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层,渣土改良参数及评价效果如表 1 所示。

表 1 复合地层渣土改良参数及效果评价表

Table 1 Paraments with soil conditioning and effectiveness evaluation of composite strata

砾砂/泥岩	泡沫体积注入比/%	平均泡沫原液用量/(L·环 ⁻¹)	膨润土泥浆质量注入比/%	平均膨润土泥浆用量/(m ³ ·环 ⁻¹)	聚合物/溶液/(L·环 ⁻¹)	1:5分散剂溶液/(L·环 ⁻¹)	坍落度/mm	十字板剪切强度/kPa	渗透系数/($10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
9:1	20	26	20~25	7.3	20~40	0	172	6.6	8.72
7:3	25	33	13~18	4.7	0	0	198	5.5	5.63
1:1	30	39	8~13	2.1	0	0	202	5.1	4.21
3:7	40	52	0	0	0	80	188	3.1	3.46
1:9	50	65	0	0	0	120	198	3.8	2.08

为评价试验得到的渣土改良配比及其改良效果,将七民区间右线隧道试验优化后的渣土改良配比、泡沫注入率与现场采用的改良配比和泡沫注入率进行对比,如图16所示。

从图16可以看出,右线平均每环泡沫原液用量为96 L,优化后平均每环泡沫原液用量为48 L。泡沫剂原液市场价格5 000~10 000元/t,优化后每环可节约施工成本约240~480元,整个区间节约90万~170万元。

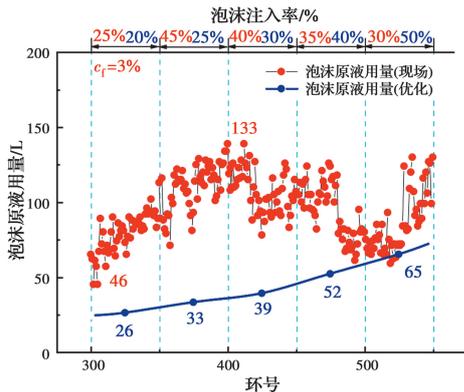


图16 现场与试验优化后的泡沫原液用量对比

Fig. 16 Comparison of foam agent dosages used on site and from experiments

6 结论

在已有渣土改良方法及改良效果评价基础上,通过不同体积占比的富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层颗粒级配分析,研究复合地层土层动态变化过程中的渣土改良方案,得到以下结论:

1)基于不同体积占比的复合地层掌子面土样颗粒级配分析及室内改良试验可得,随着泥岩占比从10%增加至90%,复合地层泡沫注入率从20%增加至50%,膨润土泥浆注入率从20%逐渐减小至0。

2)泥岩占比为10%时,富水砾砂地层含水率较高,应先添加1%左右悬浮剂和膨润土泥浆进行絮凝堵水,再添加泡沫改善其流塑性;泥岩占比大于70%的地层,黏粒含量较多,渣土成块,应先添加2%~3%分散剂溶液将黏性颗粒分散,再添加泡沫改善其流塑性。

3)通过渣土级配分析可知,土体被刀盘破碎后细颗粒含量在20%~30%区间效果最佳,只需添水和泡沫改良即可满足流塑性和渗透性要求。当细颗粒含量小于20%时,需添加膨润土泥浆降低渣土渗透性;当细颗粒含量大于30%时,需添加分散剂溶

液将细颗粒分散,有利于泡沫进入土颗粒间分散或润滑渣土,改善渣土流动性。

4)通过室内试验渣土改良方案研究及现场参数分析发现,在不同体积泥岩占比复合地层中,优化后的改良参数能够稳定控制改良效果,且泡沫原液用量约降低50%。

参考文献:

- [1] 朱伟, 钱勇进, 王璐, 等. 土压平衡盾构不满舱施工遇到的问题及对策[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 224-234.
ZHU W, QIAN Y J, WANG L, et al. Problems and measures of earth pressure balance shield during construction with the unfilled chamber [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 224-234. (in Chinese)
- [2] 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, 43(11): 1703-1708.
QIU Y, YANG X N, TANG Z H, et al. Soil improvement for earth pressure balance shields construction in watered sandy stratum [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11): 1703-1708. (in Chinese)
- [3] CHENG C H, LIAO S M, HUO X B, et al. Experimental study on the soil conditioning materials for EPB shield tunneling in silty sand [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8856569.
- [4] MORI L S, MOONEY M, CHA M S. Characterizing the influence of stress on foam conditioned sand for EPB tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 454-465.
- [5] 叶新宇, 王树英, 阳军生, 等. 泥质粉砂岩地层土压平衡盾构渣土改良技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(9): 1925-1933.
YE X Y, WANG S Y, YANG J S, et al. Soil conditioning technology for EPB shield tunnelling in argillaceous siltstone stratum [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(9): 1925-1933. (in Chinese)
- [6] 蔡兵华, 李忠超, 余守龙, 等. 土压平衡盾构施工中红粘土土体改良试验研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 218-227.
CAI B H, LI Z C, YU S L, et al. Experimental study on red clay conditioning for EPB shield tunnelling [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5): 218-

227. (in Chinese)
- [7] 刘卫. 南昌复合地层盾构渣土改良技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(5): 455-462.
LIU W. Ground conditioning technology for shield tunneling in composite strata in Nanchang [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(5): 455-462. (in Chinese)
- [8] 魏康林. 土压平衡式盾构施工用泡沫混和土透水性试验研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(5): 17-21.
WEI K L. Research on the permeability of the foamed-soil adopted in EPB shield tunneling [J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(5): 17-21. (in Chinese)
- [9] HUANG S, WANG S Y, XU C J, et al. Effect of grain gradation on the permeability characteristics of coarse-grained soil conditioned with foam for EPB shield tunneling [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(11): 4662-4674.
- [10] AVUNDUK E, COPUR H, TOLOUEI S, et al. Possibility of using torvane shear testing device for soil conditioning optimization [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103665.
- [11] 王树英, 胡钦鑫, 王海波, 等. 盾构泡沫改良砂性渣土渗透性及其受流塑性和水压力影响特征研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 94-102.
WANG S Y, HU Q X, WANG H B, et al. Study on permeability characteristics of the shield foam conditioned sand under influences of flow plasticity and water pressure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 94-102. (in Chinese)
- [12] 朱伟, 秦建设, 魏康林. 土压平衡盾构喷涌发生机理研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 589-593.
ZHU W, QIN J S, WEI K L. Research on the mechanism of the spewing in the EPB shield tunnelling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 589-593. (in Chinese)
- [13] BUDACH C, THEWES M. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 296-304.
- [14] MORI L. Advance understanding of the relationship between soil conditioning and earth pressure balance tunnel boring machine chamber and shield annulus behavior [D]. Colorado: Colorado School of Mines, 2016.
- [15] WEI Y J, WANG D L, LI J G, et al. Effects of soil conditioning on characteristics of a clay-sand-gravel mixed soil based on laboratory test [J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3300.
- [16] 徐琳琳, 余金, 蒋亚龙, 等. 泡沫性能测试及其在富水砂层渣土改良中应用[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增1): 345-353.
XU L L, YU J, JIANG Y L, et al. Testing of foam properties and its application in soil conditioning for water bearing sandy grounds [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(Sup1): 345-353. (in Chinese)
- [17] 于有强. 盾构渣土改良用膨润土泥浆试验分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
YU Y Q. Bentonite mud test and analysis for improvement of shield muck [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019. (in Chinese)

(编辑 胡玲)