

盾构渣土改良用膨润土泥浆试验分析

康健 路社斌 蔡洪飞 张荣波
北方重工富勒(沈阳)矿业有限公司

摘要: 盾构施工如果需要穿越不同地质条件,往往会导致刀盘结饼、刀盘严重磨损、螺旋输送机喷涌等问题,为了避免这些问题,有必要进行渣土改良。为此,首先阐述了渣土改良剂分类及改良效果评价方式、盾构机推进问题、渣土改良剂应用问题,其次以某地铁工程为例,通过坍落度试验、直剪试验、渗透性试验、摩擦系数试验、析水情况及黏附情况分析方式,分析了钠基膨润土泥浆在黏性渣土、粗砂渣土、砂卵石渣土改良试验中的应用及效果,可以发现钠基膨润土泥浆的盾构渣土改良效果较为理想,适合在地铁工程中推广应用。

关键词: 盾构施工; 渣土改良; 钠基膨润土泥浆; 改良试验; 坍落度试验

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.06.028

引言

盾构法属于常见地铁工程施工方式,具有适用地层多、施工周期短、自动化水平高、对周边环境影响小等施工优势,因此得到了广泛应用^[1]。但是随着地铁建设范围的逐渐扩大,越来越多地铁工程施工需要经过砂质粉土、砂卵石等复杂地层,不但会增加施工难度,还可能会导致施工安全问题,因此需要开展渣土改良。膨润土泥浆为常见盾构渣土改良剂,目前并未形成应用方式及配置方式统一标准,导致膨润土泥浆应用普遍存在随意性,会降低盾构渣土改良效果,可见有必要进一步开展盾构渣土改良用膨润土泥浆相关试验。

一、渣土改良剂分类及改良效果

(一) 渣土改良剂分类

渣土改良剂主要分为矿物类、水溶性高分子类、高吸水性树脂类、界面活性材料类,可以单独应用,也可以联合应用。

矿物类渣土改良剂为膨润土、黏土混合而成的泥浆,能够填充地层孔隙,一般应用于砂卵石渣土改良^[2]。

水溶性高分子类改良剂呈胶凝状态,能够吸收大量水分,一般应用于地下水资源丰富渣土改良。

高吸水性树脂类改良剂具有增稠、悬浮功能,能够提高土体的悬浮性、粘聚性,一般与泥浆共同应用,以提高泥浆黏度。

界面活性材料类改良剂由压缩空气、特殊气泡剂构成,能够提高土体的不透水性、流动性,但应用成本较高。

(二) 渣土改良剂改良效果评价方式

一般对地铁工程实际施工问题进行模拟或试验,以此来评价改良剂的渣土改良效果,坍落度试验为基础渣土改良剂试验方式。

此外,有学者基于土压平衡式盾构工作原理,从压缩性、流动性、渗透性、抗剪强度4个方面研究了土压仓内渣土状态^[3]。有学者通过试验室发泡剂、发泡装置开展了渣土改良,通过渗透试验、喷涌试验分析了土压平衡式盾构施工喷涌问题发生机理,发现渗透系数为喷涌问题发生的关键因素^[4]。有学者通过提桶试验分析了改良后黏性土的刀盘土压仓黏附情况^[5]。有学者通过滑动试验分析渣土改良剂减少盾体推进摩擦阻力、刀盘旋转摩擦阻力的效果^[6]。

二、盾构施工现存问题

(一) 盾构机推进问题

盾构机推进问题主要包括刀盘结饼、刀盘严重磨损、螺旋输送机喷涌。

刀盘结饼一般发生于黏性土层,由于黏性土的内聚力大、内摩擦角小,黏性土容易在刀盘切削作业时附着在刀盘上,进入土压仓,产生压密、固结排水,最终形成泥饼。如果问题得不到及时解决,泥饼会堵塞土压仓、增加刀盘扭矩、提高主轴承温度。

刀盘严重磨损主要发生于刀盘中心部位、刀盘周边部位。刀盘中心部位磨损与渣土流动性、刀盘开口率有关。刀盘周边部位磨损与刀具布置有关。

螺旋输送机喷涌指的是螺旋输送机出口位置处出现喷泥、喷砂、喷水情况,这是因为土压仓、螺旋输送机内部土体无法在盾构施工作业中抵抗掌子面水压力。如果出现了该问题,会增加隧道渣土处理难度,还可能会造成开挖面失稳^[7]。

(二) 渣土改良剂应用问题

盾构施工渣土改良剂应用问题较多,大致归结如下:①盾构渣土改良一般以膨润土泥浆、普通泡沫为改良剂,难以达到渣土改良要求^[8];②凭借经验添加膨润土泥浆,并且单一应用膨润土泥浆的效果较差,这一问题并不能通过增加膨润土泥浆添加量来解决;③泡沫等界面活性材料类改良剂的渣土改良效果较为良好,但是大部分改良剂需要进口,改良成本较高;④改良剂类型选择、性能参数设定、浆料比例控制基本依靠施工经验,很容易达不到预期渣土改良效果。

三、钠基膨润土泥浆盾构渣土改良试验分析

(一) 工程概况

某地铁工程线路总长为2150m,隧道结构最小埋深为17.21m、最大埋深为25.32m。地貌属浑河冲洪积扇,存在砂砾;冲洪积扇首部土体颗粒较大,向西逐渐变小;冲洪积扇尾部黏性土夹层较多。地下水含水层渗透性较强、径流条件较好,未见地表水。

盾构隧道衬砌为C50钢筋混凝土管片,每环管片衬砌由6块管片错缝拼装而成,衬砌环内径为5.40m、外径为6.00m,管片环宽为1.20m、厚度为0.30m。选择土压

平衡盾构机。

(二) 钠基膨润土泥浆配制

选择钠基膨润土泥浆作为盾构渣土改良用膨润土泥浆，因为该类型泥浆具备稳定开挖面、输送土仓内渣土的作用。具体来讲，针对黏性渣土，钠基膨润土泥浆能够将水分渗入其中，细粒成分会被掌子面表面吸附。针对粗砂渣土，钠基膨润土泥浆中的水分会顺着地层孔隙流走，细粒成分无法有效填充，被这就要求泥浆的性能更加优越。针对砂卵石渣土，钠基膨润土泥浆细粒成分可以有效填充。

钠基膨润土泥浆配制流程如下：①将100g钙基膨润土放入烘干箱，在100~120° 温度下烘干16~20 h。②将水放入砂浆搅拌机，在57~67r/min转速下进行搅拌，搅拌过程中加入烘干后的钙基膨润土；继续搅拌5~10min，加入2g烧碱、1g碳酸氢钠；在120~130r/min转速下搅拌5~10min。③将乙醇倒入烧杯，将均匀混合的1g黄原胶、1g瓜尔胶、1g羧甲基纤维素倒入烧杯，充分摇匀。④在57~67r/min转速下搅拌钙基膨润土，搅拌过程中加入小烧杯中的混合胶体溶液；在120~130r/min转速下搅拌5~10min^[9]。⑤静置18 h浆体，检测浆体达到大黏度后，得到试验钠基膨润土泥浆。⑥在试验前，将钠基膨润土泥浆放入砂浆搅拌机，在57~67r/min转速下搅拌2~3min，避免泥浆底部沉淀。

(三) 试验设计

1. 坍落度试验

坍落度试验主要测试渣土改良后的流动性，也能够测试钠基膨润土泥浆配比和用量。坍落度试验工具为捣实锤及上口直径为100mm、下口直径为200mm、高度为300mm的坍落筒。

坍落度试验流程如下：①浸湿坍落度筒内壁、搅拌机；②分三次填装改良渣土，每次填装后用捣实锤由外向内捣25下并且抹平；③提起坍落筒，填装改良渣土会自然出现塌落现象，塌落后改良渣土最高点与坍落筒最高点的高度差即为渣土改良后的坍落度；④取3次坍落度的平均值为最终结果。

2. 直剪试验

直剪试验主要测试渣土改良后的内摩擦角（能够代表渣土闭塞情况）、内聚力（能够代表渣土结饼情况）。直剪试验工具为测微计、捣实锤、应变控制式直剪仪、内径为61.8mm且高度为20mm的环刀。

直剪试验流程如下：①将改良渣土装入环刀，用捣实锤击实成型，形成试样。②应用直剪仪开展试验，测微表指针不再前进或后退，代表试样被破坏，停止试验^[101]；测微表指针缓慢前进且未出现峰值，等到试样剪切变形达到6mm时停止试验。③将试验数据代入公式1（库伦定律），计算内聚力；将试验数据代入公式2（库伦定律），计算内摩擦角。④取3次内摩擦角、内聚力的平均值为最终结果。

$$\tau = C \times k \quad (1)$$

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (2)$$

C代表量力环校正系数，k（mm）代表测微计读数，

σ （kPa）代表土体所受应力， φ （°）代表内摩擦角，C（kPa）代表内聚力。

3. 渗透性试验

渗透性试验主要测试渣土改良后的渗透系数（能够代表渣土渗透情况），这是因为在盾构推进压力较大的情况下，出现螺旋输送机喷涌问题的概率会大幅度提高，此时土体的渗透系数将会成为喷涌问题发生概率的主要影响因素。渗透性试验工具为环刀（参数同直剪试验环刀）、滤纸、烧杯、刻度管、止水夹、凡士林、橡胶导管、三孔玻璃导管、南55型渗透仪。

渗透性试验流程如下：①形成试样（过程同直剪试验）；②连接烧杯、渗透仪、刻度管、止水夹、橡胶导管、三孔玻璃导管；③在渗透仪底部放入涂抹凡士林的滤纸，将涂抹凡士林的环刀放入渗透仪，将涂抹凡士林的滤纸、透水板、密封圈、密封圈放入渗透仪，拧紧盖子；④打开渗透仪底部止水夹、烧杯止水夹，排出导管气泡；⑤关闭渗透仪底部止水夹，水头上升至刻度管既定高度后关闭烧杯止水夹、打开渗透仪顶部止水夹，从导管滴水时计时，记录 h_1 （水头高度）；水头下降至刻度管100mm后关闭渗透仪顶部止水夹，停止计时，记录 h_2 （水头高度）、 t （时差）。⑥将试验数据代入公式3，计算渗透系数。⑦取3次渗透系数的平均值为最终结果。

$$k = 2.3 \times \left(\frac{a \times L}{A \times t} \right) \log \left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} \right) \quad (3)$$

k （cm/s）代表渗透系数， a （mm²）代表刻度管横截面积， L （mm）代表试样高度， A （mm²）代表试样横截面积。

4. 摩擦系数试验

摩擦系数试验主要测试渣土改良后对刀盘的磨损程度。摩擦系数试验工具为长度为1100mm、宽度为400mm、厚度为5mm的钢板（一端设置挡板，一端设置提手，如图1所示），直径为200mm、高度为100mm的塑料圆环（上下无底），刻度尺。



图1 摩擦系数试验钢板实物图

摩擦系数试验流程如下：①将塑料圆环放在钢板设置提手的一端，将钢板放在地面；②将改良渣土装入塑料圆环，抹平顶部；③缓慢提起提手，填装改良渣土会自然出现滑动迹象，测量地面与钢板末端的距离；④通过正弦函数计算 φ （地面与钢板的夹角）；⑤将试验数据代入公式4，计算渗透系数。⑥取3次摩擦系数的平均值为最终结果。

$$\mu = \tan \varphi \quad (4)$$

(四) 黏性渣土改良试验分析

1. 坍落度试验分析

选择某地铁工程盾构施工现场含水量为20%的黏土为黏性渣土改良试验土体。

通过搅拌机充分搅拌试验土体与钠基膨润土泥浆，避免出现底部搅拌不均匀情况。搅拌机搅拌一段时间后，用小铁锹将坍落筒底部土体翻底搅拌，随后再用搅拌机搅拌。严格按照上述坍落度试验流程完成试验。试验结果显示渣土改良后的坍落度为177mm，符合某地铁工程盾构施工要求的150~200mm。

2. 析水情况及黏附情况分析

想要判断黏性渣土改良效果，除了进行坍落度试验外，还需要分析坍落筒底部的析水情况、坍落后渣土的黏附情况。

试验结果显示，如果渣土改良后的坍落度较大，坍落后渣土会黏附在螺旋式搅拌器上。当渣土坍落度超过200mm后，坍落后渣土黏附情况才能够得到明显降低，但是此时的渣土流动性较大，会对螺旋输送机排土造成阻碍，并且坍落筒底部析水情况不够理想。可见为了满足某地铁工程盾构施工对于渣土改良后的坍落度要求，需要适当忽略坍落后渣土黏附情况。

（五）粗砂渣土改良试验分析

1. 坍落度试验分析

选择某地铁工程盾构施工现场含水量为10%的粗砂土为粗砂渣土改良试验土体。

严格按照上述坍落度试验流程完成试验。试验结果显示渣土改良后的坍落度为180mm。

2. 析水情况及黏附情况分析

试验结果显示，如果渣土改良后的坍落度较大，渣土会有水析出，即坍落筒底部析水情况不够理想，土体颗粒黏性下降，部分渣土会出现松散坍塌问题。可见为了满足某地铁工程盾构施工对于渣土改良后的坍落度要求，需要适当忽略坍落筒底部析水情况。

3. 直剪试验分析

严格按照上述直剪试验流程完成试验。试验结果显示渣土改良后的内摩擦角为 17.54° 、内聚力为9.68kPa，符合某地铁工程盾构施工要求的 $15\sim 20^\circ$ 、 $5\sim 12$ kPa。表示钠基膨润土泥浆的添加能够明显减小渣土内摩擦角、增加渣土内聚力，但是随着渣土内聚力的下降、渣土内摩擦角会趋于平稳，这是因为渣土在改良过程中会趋于饱和状态。

（六）渗透性试验分析

严格按照上述渗透性试验流程完成试验。试验结果显示渣土改良后的渗透系数为 1.45×10^{-5} cm/s，符合某地铁工程盾构施工要求的大于 1×10^{-4} cm/s。

（七）砂卵石渣土改良试验分析

1. 坍落度试验分析

选择某地铁工程盾构施工现场含水量为0%的砂卵石土为砂卵石渣土改良试验土体。

严格按照上述坍落度试验流程完成试验。试验结果显示渣土改良后的坍落度为179mm。

2. 析水情况及黏附情况分析

试验结果显示，如果渣土改良后的坍落度较大，坍

落后渣土的土体塑性较差，即坍落后渣土黏附情况不够理想，会因为无法维持稳定而出现坍塌问题。如果渣土改良后的坍落度达到一定水平，渣土的土体塑性依然较差，并且渣土会有水析出，即坍落筒底部析水情况不够理想。可见为了满足某地铁工程盾构施工对于渣土改良后的坍落度要求，需要适当忽略坍落后渣土黏附情况、坍落筒底部析水情况。

3. 摩擦系数试验分析

严格按照上述坍落度试验流程完成试验。试验结果显示渣土改良后的摩擦系数为0.34，符合某地铁工程盾构施工要求的大于0.25。

结束语

现阶段，渣土改良剂类型及改良效果评价方式较为单一，但是已经足够完成对于渣土改良效果的准确评价。考虑到当前盾构施工渣土改良剂应用问题较多，有必要在进行渣土改良前开展改良试验分析。本次坍落度试验、直剪试验、渗透性试验、摩擦系数试验、析水情况及黏附情况分析结果显示，坍落度、内摩擦角、内聚力、渗透系数、摩擦系数、析水情况、黏附情况均符合某地铁工程渣土改良性能要求，即钠基膨润土泥浆能够有效改良某地铁工程的黏性渣土、粗砂渣土、砂卵石渣土。

参考文献

- [1]董敏琪, 陈志敏, 黄峰, 等. 砂-黏混合地层渣土改良及膨润土泥浆掺入规律研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(08): 103-106+111.
- [2]郭淑莹. 渣土改良与膨润土泥浆在粉质地层顶管施工中的应用[J]. 国防交通工程与技术, 2022, 20(04): 78-80.
- [3]李宏飞. 膨润土泥浆改良土压盾构粉细砂渣土流动性机制分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(02): 253-259.
- [4]雷华阳, 刘旭, 施福硕, 等. 顶管工程聚合物改性膨润土泥浆配比优化研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 51-55.
- [5]骆晚玥, 汪华文, 沈尔卜, 等. 压桩用新型减阻固化泥浆配制及性能研究[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(07): 43-46.
- [6]徐征杰, 郭晓阳. 基于响应面法的盾构施工膨润土改良参数优化[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(01): 194-200.
- [7]梅源, 田新宇, 胡长明, 等. 膨润土改性砂土工程性质及其在盾构施工中的应用[J]. 材料导报, 2020, 34(14): 14087-14092.
- [8]黄志强, 冯东林. 生石灰膨润土泥浆土压盾构渣土改良试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(01): 128-133.
- [9]王大永, 刘思国, 谢丽霞. 膨润土及黏土用于地铁盾构渣土性能改良的分析与研究[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(10): 37-40.