

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.03.051

# 盾构渣土的绿色处理及路基填料性能研究

吴琰,朱晓东,陈玥,薛丹旋

(中国市政工程华北设计研究总院有限公司,天津市 300132)

**摘要:** 随着我国地铁建设,产生了巨大量的盾构渣土。目前国内多采用消纳弃置,这种处理方式会造成土地资源浪费和环境污染。研制一种专业处理盾构渣土的复合固化剂,降低含水率,改良固化土颗粒组成,降低有机物含量,提高强度及稳定性。通过系列试验,对绿色处理后的盾构渣土的无侧限抗压强度、抗剪强度、加州承载比等力学性能指标进行分析,试验证明,绿色处理后的盾构渣土具有较高的强度和较好的工程特性,可用作道路路基填料。为盾构渣土的工程再利用提供了有益的参考。

**关键词:** 盾构渣土;复合固化剂;路基填料

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)03-0215-05

## 0 引言

中国的城市轨道交通建设,这几年得到了快速的发展。根据《2022年度城市轨道交通统计与分析报告》,截至2022年底,国内有55个城市开通了城市轨道交通,共计308条运营线路,运营线路总长度达到10 287.45 km,其中地铁运营线路长度为8 008.17 km,占比77.84%。预计城市轨道交通运营线路在“十四五”期末将有近1.3万km的规模。

地铁交通准时、便捷、环保,给居民出行带来了很大的方便。由于我国地铁施工多采用盾构法,地铁建设中产生了大量的盾构渣土。盾构渣土工程性能远低于一般渣土,无法直接应用于工程建设。目前,国内对地铁盾构渣土的处置以消纳弃置为主,消纳处置要占用大量的土地,随着地铁建设的蓬勃发展,消纳场地日益短缺。盾构渣土资源化利用是解决城市轨道交通发展带来的废土污染问题的重要途径,在资源短缺和生态文明建设的大背景下,极具市场应用价值和社会环境效益。

张华<sup>[1]</sup>采用盾构渣土掺沙法用于路基填料;张建勇<sup>[2]</sup>将改进固化剂、聚丙烯纤维用于盾构渣土填料,利用火山灰反应胶结硬化机制,将盾构渣土土壤固化剂固化为胶凝材料;李杰等<sup>[3]</sup>利用盾构渣土制备了免烧陶粒;王树英等<sup>[4]</sup>使用土壤固化剂和石灰降低盾构渣土含水率制备免烧空心砖;习智琴等<sup>[5]</sup>采

用碱激发工业废渣固化原状盾构土。这些研究多采用传统固化剂进行固化,固化周期长,固化土早期力学性能差,掺量比较大,固化成本较高,且不利于环境保护。

本文在将盾构渣土进行无害化、资源化处理后,创新性的利用有机材料和无机材料的特性,制定CCA复合固化剂,改善盾构渣土遇水崩解的缺陷,改善固化土的内部结构,提高固化土强度。通过系列实验,来探讨固化盾构渣土用作路基填料的可行性,并对其力学性能进行详细研究。

## 1 CCA复合固化剂固化机理

地铁盾构施工多采用土压平衡盾构施工的方式。为了方便盾构施工,在盾构掘进中采取渣土改良措施,向刀盘前、土仓内和螺旋输送机内注入泡沫剂、膨润土浆、聚合物等添加剂,泡沫剂中有高分子材料导致盾构渣土吸水性强,膨润土导致盾构渣土自由膨胀率高、内摩擦角和黏聚力较低,土颗粒与土颗粒之间存在泡沫剂成分导致盾构渣土土颗粒间联结微弱,强度低。

本文探讨加入合适的吸水性材料将盾构渣土中的自由水变成结合水,提高盾构渣土的液塑性,盾构渣土将从流动状态转变为可塑状态,对于进一步处理盾构渣土提供条件;加入硅酸盐水泥改善膨润土吸水性;加入一定量的粉煤灰有利于提高固化土的密实度和抗压强度,改善土颗粒与土颗粒间的胶结作用,一定程度上降低固化土的崩解性。粉煤灰具有填充的功能,微米级粉煤灰填充于盾构渣土固化土的孔隙,可

收稿日期: 2023-06-07

作者简介: 吴琰(1978—),女,硕士,高级工程师,从事道路设计与研究工作。

显著提高固化土的强度,因此本文探讨以水泥、粉煤灰和外加剂 A 为主要成分的 CCA 复合固化剂处理后的盾构渣土的物理化学性能。

## 2 原材料性质

本文以南京地铁五号线盾构渣土为原料,制备 CCA 复合固化剂固化土,通过系列试验开展工程性能研究。

如表 1 所示,该盾构渣土含水率高,压缩性中等。XRD 成分分析结果表明,本文所用盾构渣土含有较多粘土矿物,主要以石英为主;SEM 微观电镜揭示土颗粒主要呈片状分布,联结方式以面面接触为主,排列比较松散,细小颗粒填充在粗颗粒之间,形成孔隙较小,均匀蓬松的分散体系。

表 1 盾构渣土的主要物理性质

密度 / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	干密度 / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性指数
1.82	1.26	44	33.7	18.2	15.5

## 3 试验结果与分析

### 3.1 CCA 复合固化剂固化土物理特性试验

#### 3.1.1 含水率试验

盾构渣土固化采用 8%CCP 复合固化剂固化后,与未固化的盾构渣土比较,探究 CCA 复合固化剂对固化土含水量变化的影响。

根据《土工试验方法标准》(GBT 50123—2019)采用烘干法来测定固化土含水率,测定结果如下:

如图 1 所示,盾构渣土经复合固化剂固化后,24 h 含水率由 44%下降至 37%,且随着时间的推移,固化土含水率降低速率更快。盾构渣土 7 d 的含水率降至 27%,而固化土 7 d 的含水率降至 13%,为盾构渣土含水率的 48%。试验证明 CCA 复合固化剂能在短时间内快速降低盾构渣土的含水率,节省工程时间,便于运输和工程高效利用。

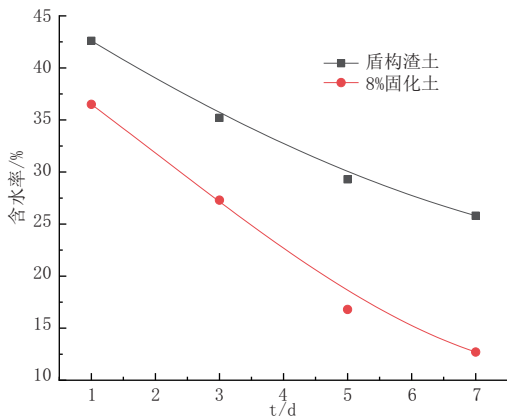


图 1 含水率随时间变化关系曲线

#### 3.1.2 界限含水率试验

通过界限含水率实验,可以确定土的液塑限,计算塑性指数、液性指数,从而判别土的分类。在实际工程中,土的液塑限对工程有很重要的意义。本文通过液塑限联合测定法测量固化土的液限和塑限。

依图 2 锥形下沉深度与含水率关系计算可知,盾构渣土经 CCA 复合固化剂改良后,塑限为 21.5%,液限为 33.5%,塑性指数 12,液性指数为 1.91。CCA 复合固化土相对于盾构渣土,塑性指数降低 22.6%,大大改善盾构渣土的稳定性的。

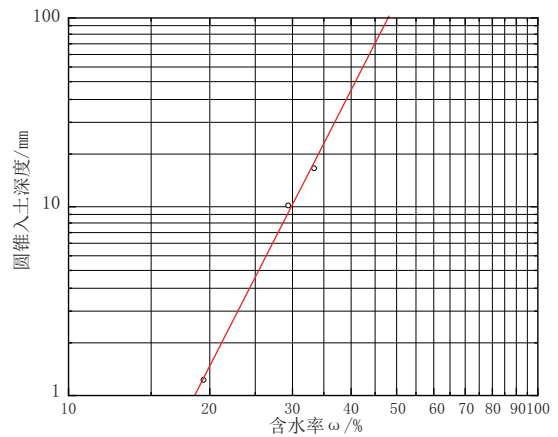


图 2 圆锥下沉深度与含水率关系图

#### 3.1.3 颗粒分析试验

对盾构渣土进行颗粒分析试验,如图测试结果试验结果:

如图 3 所示,采用 8% 固化剂的固化土相对未固化的盾构渣土而言,明显有较多大颗粒生成,限制粒径  $d_{60}$  由盾构渣土的  $55 \mu m$  增大至  $720 \mu m$ ,有效粒径  $d_{10}$  由盾构渣土的  $4 \mu m$  增大至  $10.5 \mu m$ 。由此可见,盾构渣土在复合固化剂作用下,土颗粒聚集成团,土颗粒增大,本固化剂对盾构渣土级配组成由一定的改变,大颗粒增加,改善级配组成,提高盾构渣土的强度。

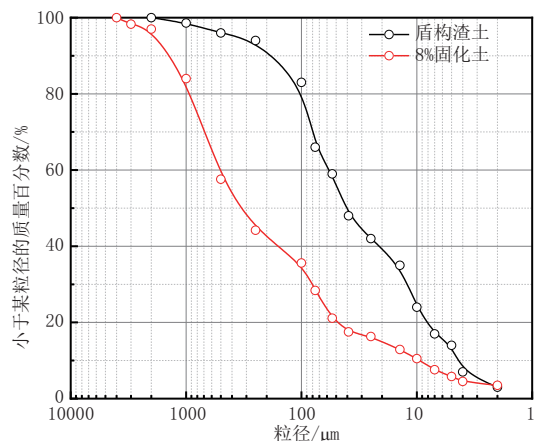


图 3 固化土颗粒级配曲线

### 3.1.4 有机质含量试验

有机质含量会影响固化剂对土颗粒吸附性和持水性,盾构渣土中有机质抑制了复合固化剂中水化反应的进行,同时影响水化产物与黏土颗粒的粘结作用,固化剂中的高聚物能与部分有机物发生加聚反应降低固化土中有机质的含量,减小有机物对固化剂水化反应的不利影响。

本文参考《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),采用马沸炉进行试验(见图4),对盾构渣土和固化土分别进行测量,发现固化土中有机物含量为1.6%,低于盾构渣土中有机质含量5.8%,复合固化剂能有效降低盾构渣土中的有机物含量,提高固化土的耐水性,增强固化土的强度和稳定性。



图4 马沸炉

## 3.2 CCA 复合固化剂固化土力学特性试验

### 3.2.1 CCA 复合固化剂固化土无侧限抗压强度

通过改变水泥固化剂掺量、CCA 复合固化剂掺量及固化土养护龄期比较 CCA 固化剂对盾构渣土力学性质的影响。不同固化剂掺量下各龄期固化土强度见表2。

表2 不同固化剂掺量下各龄期固化土强度

名称	固化剂掺量 /%	无侧限抗压强度 /kPa			
		7 d	28 d	90 d	180 d
水泥	4	647	726	748	763
	8	685	772	793	807
	12	842	924	941	953
	16	931	976	981	993
复合固化剂	4	1 339	1 728	1 739	1 768
	8	1 573	1 987	2 023	2 141
	12	1 963	2 974	3 149	3 274
	16	2 741	3 957	4 128	4 377

如图5所示,水泥作为盾构渣土固化剂时,盾构渣土固化土无侧限抗压强度随水泥掺量增加而增加。水泥掺量4%增加为16%时,水泥掺量提高300%,7 d无侧限抗压强度仅增加43.9%;水泥剂量的改变对固化土抗压强度的改变影响不大。

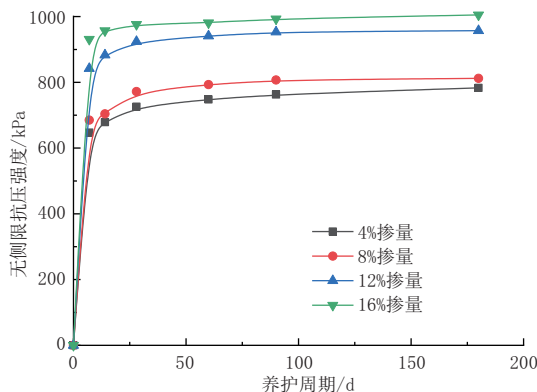


图5 水泥固化剂的各龄期固化土强度变化

龄期对固化土抗压强度影响有限:水泥掺量4%时7 d无侧限抗压强度为647 kPa,180 d无侧限抗压强度为783 kPa,抗压强度仅提高了21%;水泥掺量为16%时,7 d无侧限抗压强度为931 kPa,180 d无侧限抗压强度为1 005 kPa,抗压强度仅提高了7%。试验结果表明,水泥作为固化剂对固化土无侧限抗压强度的提升作用,基本在早期7 d完成79%~93%,且随着水泥掺量的增加,早期强度影响更为显著。

如图6所示,CCA 复合固化剂固化土较水泥固化土,明显提高抗压强度:养护7 d,4%复合固化剂固化土抗压强度为同剂量水泥固化土抗压强度的207%;8%复合固化剂土抗压强度为同剂量水泥固化土抗压强度的230%;12%复合固化剂土抗压强度为同剂量水泥固化土抗压强度的233%;16%复合固化剂土抗压强度为同剂量水泥固化土抗压强度的294%。复合固化剂掺量越高,对比水泥固化剂强度提升效果更显著。

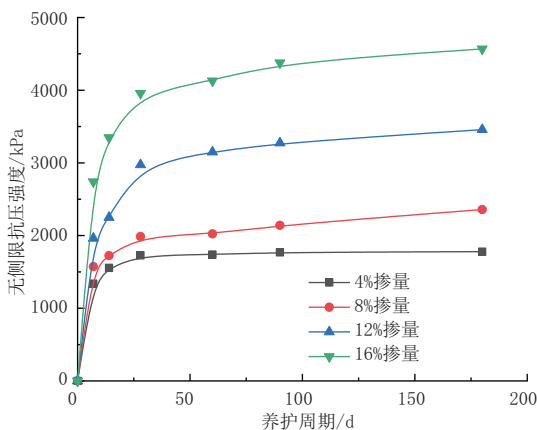


图6 CCA 复合固化剂的固化土各龄期强度变化

CCA 复合固化剂作用于盾构渣土, 固化土无侧限抗压强度随龄期增加而提高, 但改善程度不显著: 复合固化剂掺量 4%, 14 d 抗压强度较 7 d 抗压强度提高 16%, 28 d 抗压强度较 7 d 抗压强度提高 29%, 180 d 抗压强度较 7 d 抗压强度提高 32%。

### 3.2.2 CCA 复合固化剂固化土的抗剪强度

本实验采用直剪快剪试验, 研究复合固化剂固化土的抗剪强度。

如图 7 所示, 抗剪强度随垂直压力的增大而增大, 盾构渣土的抗剪强度变化不大。经 CCA 复合固化剂处理后的盾构渣土, 抗剪强度较未处理的盾构渣土有明显提升, 且随固化剂掺量的增加, 斜率更大, 变化更明显。

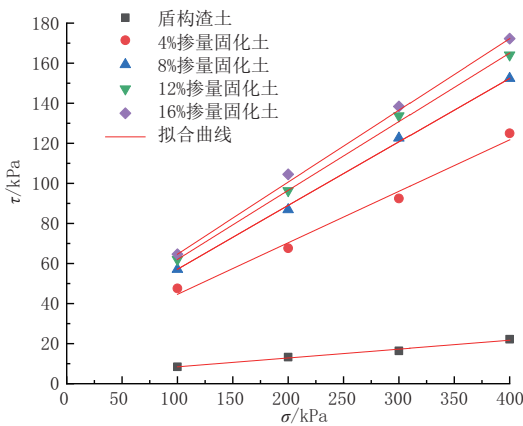


图 7 抗剪强度与垂直压力关系曲线

根据不同垂直压力下的抗剪强度曲线进行线性回归方程计算摩擦角  $\psi$  和黏聚力  $C$ 。其计算公式如下所示:

$$\tan \varphi = \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad (1)$$

$$c = \hat{b} = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2)$$

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (3)$$

各试样黏聚力和摩擦角见表 3。

表 3 各试样黏聚力和摩擦角

土体试样	黏聚力 $C$	摩擦角 $\psi$
盾构渣土	3.99	2.54
4%掺量固化土	18.89	14.41
8%掺量固化土	25.34	17.63
12%掺量固化土	27.66	18.96
16%掺量固化土	28.74	19.74

如图 8 和图 9 所示, 固化土的黏聚力和摩擦角随固化剂掺量的增加而增加, 当固化剂掺量为 0 ~

4%, 摩擦角  $\psi$  和黏聚力  $C$  增长速率最快, 随着固化剂掺量在 4% ~ 16% 范围内, 两者增长斜率逐渐变缓。试验证明, 低剂量固化剂对固化土的黏聚力和摩擦角的影响较大, 高剂量固化剂对固化土的黏聚力和摩擦角的影响程度不明显。

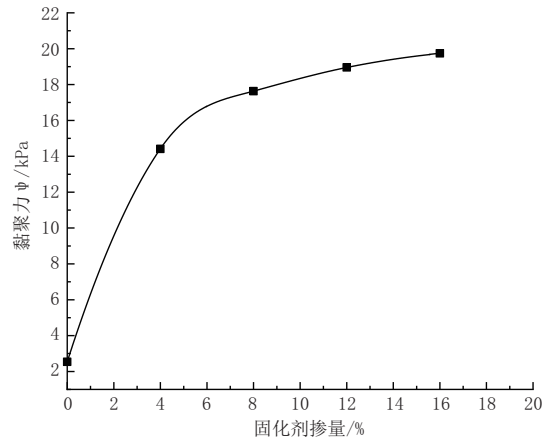


图 8 固化剂掺量与黏聚力关系曲线

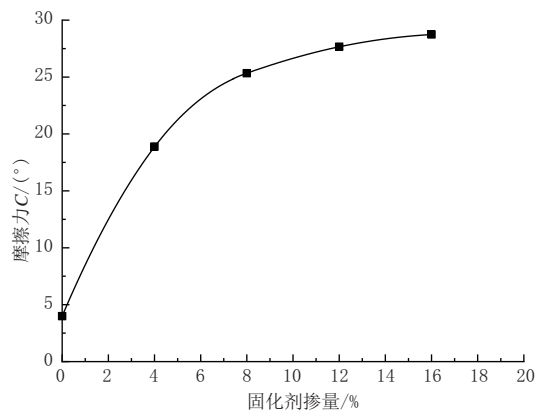


图 9 固化剂掺量与摩擦角关系曲线

### 3.2.3 加州承载比 CBR

加州承载比 (California bearing ratio, CBR) 是衡量道路路基承载能力的指标, 也是选择路基填料的重要指标之一。采用 CBR-1 型载重比试验仪, 依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020), 对试样进行最优含水率和最大干密度的重击实试验。试验样本按最优含水率 17%、干密度最大 1.77 配制而成。在 2.5 mm 的贯入量下, 采用式 (4) 的计算承载比。

$$CBR_{2.5} = \frac{P}{7\ 000} \times 100 \quad (4)$$

式中:  $CBR_{2.5}$  为贯入量 2.5 mm 时的承载比, %;  $P$  为单位压力, kPa; 7 000 为贯入量 2.5 mm 时的标准压力, kPa。

贯入量为 5.0 mm 时采用式 (5) 计算承载比:

$$CBR_{5.0} = \frac{P}{10\ 500} \times 100 \quad (5)$$

式中:  $CBR_{5.0}$  为贯入量 5 mm 时的承载比, %;  $P$  为单

位压力, kPa; 10 500 为贯入量 2.5 mm 时的标准压力, kPa。

轴向压力与贯入量之间关系见图 10, 8% CCA 复合固化剂固化土进行承载比试验。最大轴向压力达到 4 000 kPa, 通过 CBR 曲线图计算 CBR 值,  $CBR_{2.5}$  大于  $CBR_{5.0}$ , 取  $CBR_{2.5}$  的值 49.34 作为 8% 固化剂含量固化土 CBR 值。根据《城市道路路基设计规范》(CJJ 194—2013) 规定, 城市主干路路基填料 CBR 值为 3~8, CCA 复合固化土的 CBR 值远远大于规范对路基填料的要求, 可以作为路基填料使用。

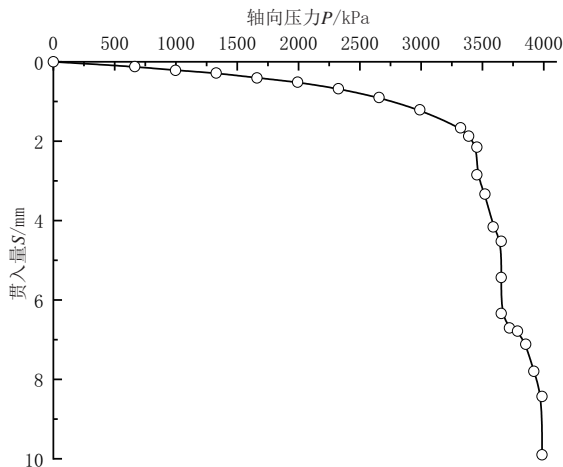


图 10 固化土 CBR 曲线

## 4 结论

(1) CCA 复合固化剂相对水泥等传统固化剂而言, 快速降低了固化土的含水率, 增大固化土颗粒粒

径, 改善固化土的级配组成, 显著提高固化盾构渣土的抗压强度。

(2) CCA 复合固化剂固化土的抗压强度随固化剂掺量的增加而有所增加, 较相同剂量的水泥固化剂提高明显, 但随龄期的增长, 抗压强度增加幅度不理想。

(3) CCA 复合固化剂固化土的粘聚力和摩擦角都随固化剂掺量的增加而增加, 当掺入固化剂由 0 变为 4% 过程中摩擦角和粘聚力增长速率最快, 随着固化剂掺量的增加, 两者增长斜率逐渐变缓。

(4) 试验表明, 经 CCA 复合固化剂改良后的盾构渣土, 具有较高的强度, 力学性能较好, CBR 值远大于规范要求值, 可以作为路基填料使用, 具有非常广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 张华. 富水地层盾构渣土用作路基填料的试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35(1):75-78, 128.
- [2] 张建勇. 聚丙烯纤维改性盾构渣土强度特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2):400-409.
- [3] 李杰, 陈儀涛, 董毅萌, 等. 盾构渣土免烧陶粒的制备及其性能[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2021, 38(3):250-254.
- [4] 王树英, 占永杰, 杨秀竹, 等. 淤泥质粉质黏土地层盾构渣土免烧空心砖固化机理与质量评价[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(7):710-718.
- [5] 习智琴, 李水生. 碱激发废渣固化原状盾构渣土力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S2):611-618.

(上接第 208 页)

- [5] 马健萍, 许新权, 范倩, 等. 基于加速加载试验的 SMA-13 沥青混合料抗滑性能研究[J]. 公路, 2022, 67(7):388-394.
- [6] 覃金寿. 抗滑表层沥青混合料 GAC-13 组成及性能研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- [7] 宗有杰, 熊锐, 吕红莉, 等. 基于煅烧铝矾土集料的沥青混合料抗滑性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(2):116-

- 123.
- [8] 刘连国. 沥青路面抗滑衰变特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [9] 周兴林, 刘万康, 肖旺新, 等. 沥青混合料体积指标对沥青路面抗滑性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6):1-9.
- [10] 王元元, 何亮, 孙璐. 矿料分异处理对沥青混合料抗滑性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(6):1216-1220.