

# 纤维水泥基材料固化盾构渣土路用试验研究

郑涵文, 迟瀚林, 帅俊杰

(成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610051)

**摘要:** 为了充分利用具有高含水率、低强度等特点的盾构渣土, 解决其直接用于路基填筑时强度不足、抗冻性差等问题, 实现其资源化利用。以硅酸盐水泥为主材料, 添加粉煤灰、水溶性环氧树脂 (WER)、偏高岭土以及聚丙烯纤维 (PP), 设计“五因素四水平”正交试验, 以 28 d 养护龄期固化土无侧限抗压强度、间接抗拉强度、加州承载比 (CBR) 以及冻融循环试验结果为评判指标, 确定复合固化剂的最佳配比, 制备盾构渣土固化用纤维水泥基材料。通过极差分析优化配比后, 结合电镜扫描和 X 射线衍射试验探究其微观结构和固化机理, 揭示宏观性能提升机制。结果表明: 不同配比复合固化剂对盾构渣土力学性能影响程度不同, 复合固化剂的最佳配比为 9% 水泥、12% 粉煤灰、0.25% 水溶性环氧树脂 (WER)、5% 偏高岭土、0.3% 聚丙烯纤维; 与未固化渣土相比, 盾构渣土的抗冻性能得到显著提高, 固化土冻融前后强度和损失分别低于 20%、5%。研究结果可为盾构渣土在道路工程中资源化利用提供参考。

**关键词:** 盾构渣土; 纤维水泥基材料; 正交试验; 路用性能; 抗冻性; 固化机理

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 01-0012-08

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.003

## Experimental Study on Road Performance of Fiber – Reinforced Cement – Based Stabilized Shield Tunnel Spoil

ZHENG Hanwen, CHI Hanlin, SHUAI Junjie

(School of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, China)

**Abstract:** To effectively utilize shield muck characterized by high moisture content and low strength, addressing issues such as insufficient strength and poor frost resistance when directly used for subgrade filling, and realize its resource utilization. Portland cement is the main material, adding fly ash, water – soluble epoxy resin (WER), metakaolin, and polypropylene fiber (PP). A "five – factor four – level" orthogonal experiment was designed, with the 28 – day curing age unconfined compressive strength, indirect tensile strength, California bearing ratio (CBR), and freeze – thaw cycle test results as evaluation indicators, to determine the optimal proportion of the composite curing agent and to prepare fiber – reinforced cement – based materials for solidifying shield muck. Following formulation optimization via range analysis, integrated SEM and XRD analyses were conducted to investigate microstructural characteristics and solidification mechanisms, thereby elucidating the enhancement mechanisms of macro – properties. The results indicate that different proportions of the composite curing agent have varying effects on the mechanical properties of shield muck. The optimal proportion of the composite curing agent is 9% cement, 12% fly ash, 0.25% water – soluble epoxy resin (WER), 5% metakaolin, and 0.3% PP fiber. Compared to the uncured muck,

the frost resistance of the shield muck is significantly improved, with strength and mass loss before and after freeze – thaw cycles being less than 20% and 5%. The findings provide technical references for the resource utilization of shield muck in road engineering applications.

**Key words:** shield muck; fiber cement – based materials; orthogonal yest; road performance; anti – freezing performance; solidification mechanism

## 0 引言

城市交通隧道建设产生的盾构渣土常被闲置堆放, 不仅浪费土地资源、污染环境, 还可能引发地质灾害<sup>[1]</sup>。为落实“双碳”行动, 可利用纤维水泥基材料将其固化, 制备成路基填材, 从而实现废弃物的规模化资源利用, 推动环境与社会经济的协同发展。

现有研究已探索了盾构渣土多种资源化路径, 例如作为注浆材料、种植土与免烧砖等应用, 均呈现出显著的特性导向特征<sup>[2]</sup>。Wu 等<sup>[3]</sup>确定了粉质黏土盾构渣土制浆的最佳配比水泥、粉煤灰、渣土、河沙、膨润土之比为 12:18:50:19.5:0.5, 水固比 0.465; Wu 等<sup>[4]</sup>验证了盾构渣土基同步注浆材料的工程优越性, 其在控制变形、稳定管片与密封防渗方面的效果均显著提升; 闫革等<sup>[5]</sup>探究渣土掺量及水胶比对注浆材料性能影响, 发现渣土掺量增加伴随着注浆材料流动度降低, 泌水现象得到改善, 推荐水胶比为 1.0~1.1; Wang 等<sup>[6]</sup>研究表明, 采用优化配比的盾构渣土浆体其宏观性能(如表观密度、抗压强度)显著提升, 这主要缘于 C-S-H 和 Aft 生成对颗粒间隙的有效填充; Wang 等<sup>[7]</sup>将成都地铁盾构废泥用于开发原位墙后灌浆材料, 并证实该材料在力学强度、抗渗与耐久性方面均有显著增强; 王树英等<sup>[8]</sup>利用杭州盾构渣土制备免烧砖时发现, 成型压力对性能提升起主导作用, 水玻璃与石灰作为添加剂, 则在适量时能为抗压强度和耐久性提供补充增强; Chen 等<sup>[9]</sup>明确了多种外加剂在渣土固化中的作用, 粉煤灰与聚乙烯醇分别主导提升抗压强度(达 13.69 MPa)与抗冻性(耐 15 次冻融循环); Zhang 等<sup>[10]</sup>探索了泥浆盾构渣土的资源化潜力, 证实掺入 1% 粉煤灰可使其作为优质绿化介质, 并能显著促进植物生长; Wang 等<sup>[11]</sup>通过掺入电石渣与粉煤灰等工业废料, 成功提升了盾构渣土的力学性能, 使其具备作为路基填充材料的潜力; 王俊艺<sup>[12]</sup>验证了 WK + 固结剂处理盾构渣土的优越性, 其固结体路

用性能显著超越水泥基材料, 为渣土资源化利用提供了更优方案; 尹贻观等<sup>[13]</sup>证实, 掺入聚丙烯纤维(PP)可显著优化水泥基材料的力学性能, 并确定 2% 为其最优掺量, 此时抗压与抗拉强度分别达 81.67、11.47 MPa; Pang 等<sup>[14]</sup>从微观机理出发, 结合数值模拟, 揭示了 PP 纤维在地聚合物固化风沙中的增强作用, 并明确当 NaOH 为 1.5%、PP 纤维(0.5%, 12 mm)时, 材料的无侧限压缩强度性能最佳; Hu 等<sup>[15]</sup>基于强度试验, 确定了聚丙烯纤维增强固化土的关键优化参数, 纤维长度 12 mm、掺量 0.3%, 可实现性能与成本的最佳平衡。

鉴于盾构渣土在路基填材中的应用研究尚不充分, 研究采用高利用率、低能耗的纤维水泥基材料对其进行固化, 并系统评估其路用性能。通过无侧限抗压、轴向压裂、加州承载比(CBR)及冻融循环等试验, 结合 Minitab 软件优化配比, 并借助微观分析揭示其固化机理。

## 1 试验材料

### 1.1 盾构渣土

渣土取自盾构施工产生的废弃渣土。由于原状渣土含有少量大粒径卵石, 为了提高试验的稳定性, 将其在 105 °C 下烘干 12 h 并敲碎研磨过 2 mm 标准筛。其基本物理性质见表 1, 化学组成见表 2。

表 1 盾构渣土基本物理性质

含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	最优含水率 /%	最大干密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	级配等级	pH
48	32.1	21.5	14	1.76	良好	9.8

表 2 盾构渣土主要化学成分

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO
62.55	19.52	13.32	2.14	1.02	0.94

### 1.2 固化材料

水泥为 P·O 42.5 硅酸盐水泥, 密度为 3.14 g/cm<sup>3</sup>, 主要化学成分见表 3; 粉煤灰为一级粉煤灰(FA), 其煤灰与炉渣的质量比为 6:4, 比表面积为

## 材料科学

95 m<sup>2</sup>/kg, 化学成分见表 3, 主要技术指标见表 4; 水溶性环氧树脂 (WER) 固化剂为水性环氧树脂、水性固化剂, 按 2:1 的比例进行配比; 偏高岭土, 主要化学成分见表 5; 聚丙烯纤维 (PP), 主要技术指标见表 6。

表 3 水泥和粉煤灰的主要化学成分

Table 3 Main chemical components of cement and fly ash /%

材料	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
水泥	52.66	23.09	6.96	3.31	2.81	2.57	0.52
粉煤灰	1.16	44.51	37.82	0.71	0.52		0.14

表 4 粉煤灰主要技术指标

Table 4 Main technical indexes of fly ash

密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	比表面 /(m <sup>2</sup> /kg)	细度 /%	需水量比 /%	烧失量 /%
2.52	95	11.4	94	1.3

表 7 正交试验表

Table 7 Orthogonal test table

试验号	水泥 掺量	粉煤灰 掺量	水溶性环氧 树脂掺量	偏高岭土 掺量	聚丙烯 纤维掺量	试验号	水泥 掺量	粉煤灰 掺量	水溶性环氧 树脂掺量	偏高岭土 掺量	聚丙烯 纤维掺量
1	3	4	0.25	3	0.15	10	9	8	1.75	7	0.15
2	3	8	0.75	5	0.20	11	9	12	0.25	5	0.30
3	3	12	1.25	7	0.25	12	9	16	0.75	3	0.25
4	3	16	1.75	9	0.30	13	12	4	1.75	5	0.25
5	6	4	0.75	7	0.30	14	12	8	1.25	3	0.30
6	6	8	0.25	9	0.25	15	12	12	0.75	9	0.15
7	6	12	1.75	3	0.20	16	12	16	0.25	7	0.20
8	6	16	1.25	5	0.15	17					
9	9	4	1.25	9	0.20						

## 2.2 试样制备

按最佳含水率制备试样, 参照 JTG 3441—2024 《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》<sup>[16]</sup>, 称取一定量预处理后的渣土, 根据所取渣土质量称取所需的水泥、粉煤灰、WER、偏高岭土、聚丙烯纤维。将其混合, 在搅拌叶片自转 140 r/min 公转 50 r/min 的情况下, 搅拌 5 min。在柱状钢模内壁涂抹适量的脱模剂, 将混合料分三次倒入模具里, 压力机再以 1 mm/min 的速度下降, 直至垫块与模具上沿平行停止, 制取直径×高分别为 50 mm×100 mm、50 mm×50 mm、150 mm×150 mm 的圆柱试样, 最后, 将试样放入 (20±2)℃, 湿度为 (95±3)% 条件的养护箱里, 养护 28 d。

## 2.3 试验方法

### 2.3.1 无侧限抗压强度试验 (UCS)

按照 GB/T 50081—2019 《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[17]</sup> 开展, 使用电子万能试验机以

表 5 偏高岭土主要化学成分

Table 5 The main chemical components of metakaolin /%

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
55.06	43.02	0.76	0.24	0.17	0.06	0.55	0.06

表 6 聚丙烯纤维主要技术指标

Table 6 Main technical indexes of polypropylene fiber

纤维长度 /mm	直径 /mm	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	拉伸强度 /MPa	弹性模量 /GPa	熔点 /℃
6	0.17	0.9	≥358	≥3.5	≥165

## 2 试验设计与试验方法

### 2.1 试验方案

为了得到各掺量的最佳配比, 研究通过无侧限抗压强度、轴向压裂、加州承载比试验, 对 28 d 龄期固化土设计“五因素四水平”正交试验。具体见表 7。

1 mm/min 的加载速度加载, 试件尺寸采用圆柱模具 (直径×高为 50 mm×100 mm), 对养护期 28 d 的试样进行无侧限抗压强度试验。做三组平行试验, 以平均数据作为最终指标。

### 2.3.2 轴向压裂试验

按照 GB/T 50081—2019 《混凝土物理力学性能试验方法标准》开展, 采用万能压力机进行轴向压裂试验来测定试件的抗拉强度。试件尺寸采用圆柱模具 (直径×高为 50 mm×50 mm), 在加载过程中需保证垫条荷载作用力的方向始终指向圆心, 对养护 28 d 的试样进行试验, 压缩速度为 1 mm/min。每组都做三组平行试验, 以平均数据作为最终指标。

### 2.3.3 加州承载比试验 (CBR 值)

参照 JTG 3430—2020 《公路土工试验规程》<sup>[18]</sup> 进行加州承载比试验。采用承载比试验仪评价试件的承载能力和抵抗局部变形能力。每组都做三组平行试验, 以平均数据作为最终指标。

### 2.3.4 冻融循环试验

按照 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》利用万能试验机对试件进行冻融循环试验。试件尺寸选用圆柱模具（直径×高为 150 mm×150 mm）。每组试验进行 5 次冻融循环。冻融循环前测量试件的质量和抗压强度，冻融循环结束后再次测量试件的质量和抗压强度，最后计算冻融循环情况下的质量损失和强度损失。每组都做三组平行试验，以平均数据作为最终指标。

### 2.3.5 扫描电镜试验 (SEM)

按照最佳配比制作试件并养护 28 d，将较为平整的试件作为微观扫描试块。将试件浸泡在无水乙醇中停止水化反应并脱水，再用吸水纸吸干表面无水乙醇，最后将试件放入滚子炉中烘干，随机进行扫描电镜试验，观察固化土的微观结构分析。每组都做三组平行试验，以平均数据作为最终指标。

### 2.3.6 X 射线衍射试验 (XRD)

按照最佳配比制作试件培养至 28 d 龄期，用小锤将其敲碎，将试块浸泡在无水乙醇中停止水化反应并脱水，再将其研磨，过 0.075 mm 筛，最后将试块放入滚子炉中烘干 24 h，随机进行 X 射线衍射试验，试验数据采用 jade 软件处理。每组都做三组平行试验，以平均数据作为最终指标。

## 3 试验结果分析

### 3.1 无侧限抗压强度分析

由图 1 可知，11 号固化土具有最大的无侧限抗压强度且满足 CJJ/T 286—2018《土壤固化剂应用技术标准》<sup>[19]</sup>中 1.5 MPa 的要求。然而，对照组 17 号固化土不添加任何固化剂，且含水率较大，养护 28 d 仍为流塑状态，不可进行无侧限抗压强度试验。

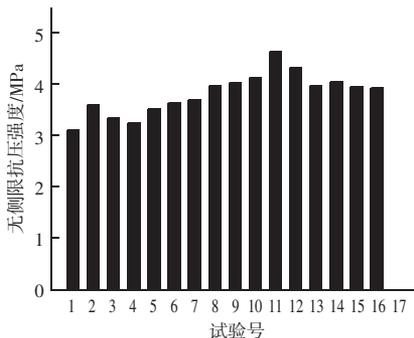
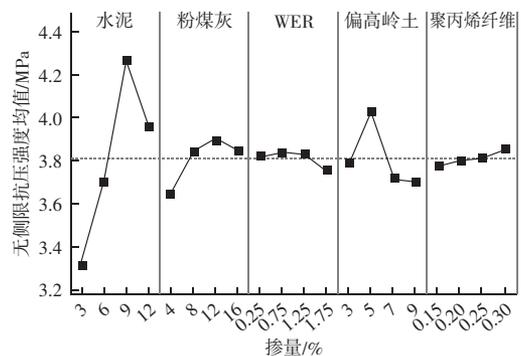


图 1 不同配比固化土无侧限抗压强度  
Fig. 1 Unconfined compressive strength of solidified soil with different ratios

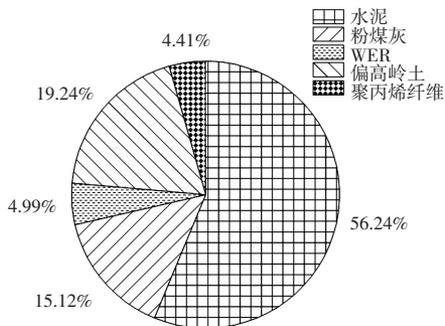
由图 2 (a) 可知，水泥对固化土强度具有明显的增强效果，由于水泥水化反应需要一定的含水量，未水化水泥形成微孔隙和微裂缝，破坏固化土的内部连续性，从而降低固化土的抗压强度。粉煤灰、WER、偏高岭土对抗压强度的影响曲线均为先增加后减少的趋势，纤维保持较小幅度的增长趋势。水泥水化反应后土体中的  $\text{OH}^-$  含量高，激发粉煤灰的活性，产生 C-S-H 凝胶，过多的粉煤灰会包裹水泥，阻碍水泥水化反应，抗压强度下降。偏高岭土具有火山灰效应，含有大量无定形  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，与水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应，产生 C-S-H 与 C-A-H 凝胶。这些凝胶填充到固化土颗粒间隙之间，提高其强度、抗渗性和耐久性。过量的偏高岭土会导致早期水化所需的水量不足，阻碍偏高岭土的水化反应，因此，随着偏高岭土的增加，抗压强度出现先增后减。聚丙烯纤维在固化土结构内形成三维网状，通过“桥接作用”抑制微裂纹的扩展，将单条主裂纹分散为多条微裂纹。在荷载作用下，将绝大部分荷载转移到未损伤区域，从而提高固化土的强度。适量的 WER 可以有效将渣土颗粒与各掺量与水化产物相互交联形成网状结构，进一步增强强度，过多的 WER 会抑制早期部分水泥水化反应。根据图 2 (a) 得到各掺量最佳配比水泥：粉煤灰：WER：偏高岭土：聚丙烯纤维为 9：12：0.75：5：0.3。

根据图 2 (b) 可知，各因素对养护 28 d 盾构固化渣土无侧限抗压强度影响主次关系为水泥 > 偏高岭土 > 粉煤灰 > WER > 聚丙烯纤维。对比各因素极差值大小，将水泥与偏高岭土定义为影响无侧限抗压强度的主要影响，将 WER、粉煤灰、聚丙烯纤维定义为次要影响。



(a) 抗压强度均值主效应图

## 材料科学



(b) 各因素极差 R 占比

图2 各因素水平与无侧限抗压强度评判指标

Fig. 2 The level of each factor and the evaluation index of unconfined compressive strength

## 3.2 抗拉强度分析

由图3可知, 11号固化土具有最大的间接抗拉强度, 满足 T/CECS 1757—2024《道路工程固化土试验方法标准》<sup>[20]</sup>。

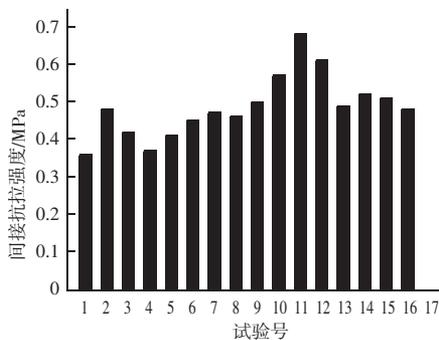


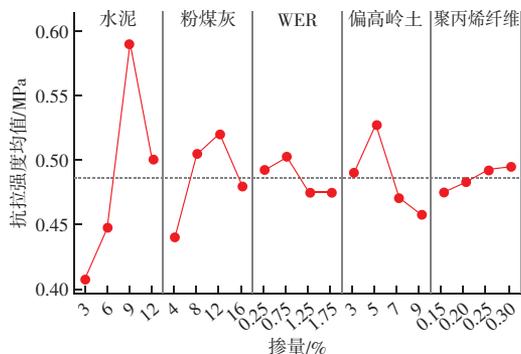
图3 不同配比固化土间接抗拉强度

Fig. 3 Indirect tensile strength of solidified soil with different ratios

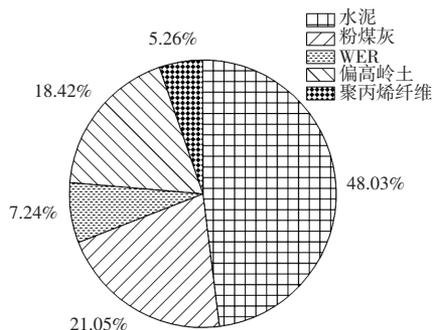
利用 Minitab Statistical 软件得到 5 种元素对试件间接抗拉强度均值主效应图, 由图 4 (a) 可知, 各掺量对固化土抗拉强度的影响趋势与抗压强度一致, 水泥水化产生的 C-S-H 凝胶是抗拉强度的基础骨架。粉煤灰和 WER 共同混合加入对提升试件的间接抗拉强度增强具有更佳的效果。生成的 WER 聚合物薄膜与胶粒能更好的降低试件的脆性。同时, 偏高岭土与水泥水化反应生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  进行二次水化反应, 生成 C-S-H 和 C-A-H 凝胶填充固化土的孔隙, 增强渣土颗粒的黏结力, 提升试件的抗拉强度。聚丙烯纤维通过“桥接效应”抑制颗粒间裂缝的发展, 共同填充联结水化产物和盾构渣土形成三维网状结构, 增强试件的力学性能。根据图 4 (a) 得到各掺量最佳配比水泥: 粉煤灰: WER: 偏高岭土: 聚丙烯纤维为 9: 12: 0.75: 5: 0.3。与无侧

限抗压强度试验的结果一致。

根据图 4 (b) 可知, 各因素对养护 28 d 盾构固化渣土无侧限抗压强度影响主次关系为水泥 > 粉煤灰 > 偏高岭土 > WER > 聚丙烯纤维。对比各因素极差值大小, 将水泥与粉煤灰定义为影响间接抗拉强度的主要影响, 将偏高岭土、WER、聚丙烯纤维定义为次要影响。



(a) 间接抗拉强度均值主效应图



(b) 各因素极差 R 占比

图4 各因素水平与抗拉强度评判指标

Fig. 4 The level of each factor and the evaluation index of tensile strength

## 3.3 加州承载比分析

由图 5 可知, 11 号固化土具有最大的 CBR 值为 121.31%, 较盾构渣土相比提高了 37.9 倍。根据 JTG D30—2015《公路路基设计规范》<sup>[21]</sup> 中高速公路或一级公路上、下路床承载比分别不小于 8%、5%, 可知满足固化渣土路基基层材料承载能力要求。

由图 6 (a) 可知, 水泥、粉煤灰、WER、偏高岭土对试件 CBR 值的影响均先增加后减少呈“上凹”的变化趋势, 存在强度峰值, 达到一定峰值后便下降。而聚丙烯纤维对试件 CBR 值的影响为逐渐上升的变化趋势。粉煤灰微珠和聚合物膜及偏高岭

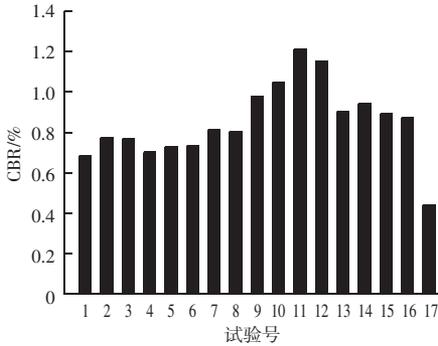


图 5 不同配比固化土加州承载比 (CBR)

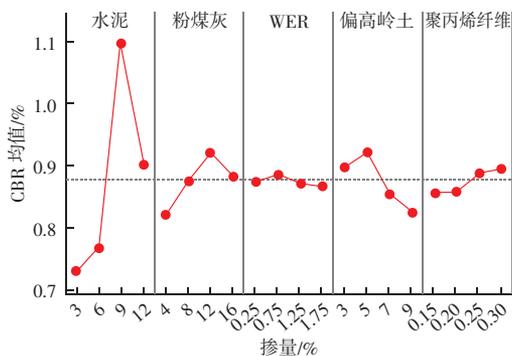
Fig. 5 California bearing ratio (CBR) of solidified soil with different ratios

土与水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  进行二次水化反应生成的 C-S-H 和 C-A-H 凝胶颗粒, 填充固化土颗粒之间的间隙, 共同承受贯入杆贯入产生的剪切力。聚丙烯纤维在固化土体中形成三维网状结构, 通过“桥接”效应分散剪切力, 抑制裂隙的发展。

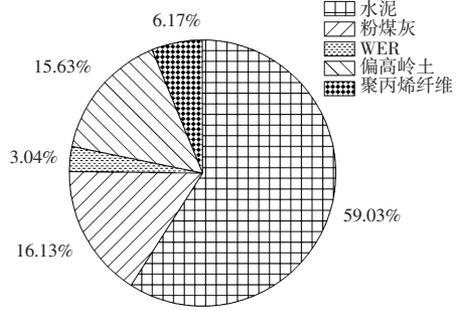
根据图 6 (a) 得到各掺量最佳配比水泥:粉煤灰:WER:偏高岭土:聚丙烯纤维为 9:12:0.75:5:0.3。与无侧限抗压强度试验、间接抗拉强度下最佳配比的结果一致。

根据图 6 (b) 可知, 各因素对养护 28 d 盾构固化渣土无侧限抗压强度影响主次关系为水泥 > 粉煤灰 > 偏高岭土 > 聚丙烯纤维 > WER。对比各因素极差值大小, 将水泥与粉煤灰定义为影响间接抗拉强度的主要影响, 将偏高岭土、聚丙烯纤维、WER 定义为次要影响。

基于前三者试验的无侧限抗压强度、间接抗拉强度、CBR 值均满足相关规范要求。11 号固化土可用于一般路基填材, 路用材料等, 进一步实现渣土资源化利用。



(a) 加州承载比 (CBR) 均值主效应图



(b) 各因素极差 R 占比

图 6 各因素水平与加州承载比 (CBR) 评判指标  
Fig. 6 Levels of various factors and California Bearing Ratio (CBR) evaluation index

### 3.4 冻融循环试验分析

由图 7 可知, 冻融前后对各试件无侧限抗压强度和质重都会有一定的损失, 但损失的幅度各不相同, 且 11 号固化土无侧限抗压强度损失率和质重损失率都是最低的, 无侧限抗压强度损失率和质重损失率分别为 18.8%、0.86%。可以看出所有试件的质重损失率和强度损失率都分别低于 5%、20%, 均满足 T/CECS 737—2020 《道路固化土应用技术规程》<sup>[22]</sup> 中对抗冻性的要求, 强度损失率和质重损失率分别低于 20%、5%。其中对照组试验 17 号质重损失率为 15.25%, 不满足要求。由此可见, 掺入纤维水泥基复合固化材料的渣土符合抗冻性要求, 试验 11 号固化土的效果最佳。

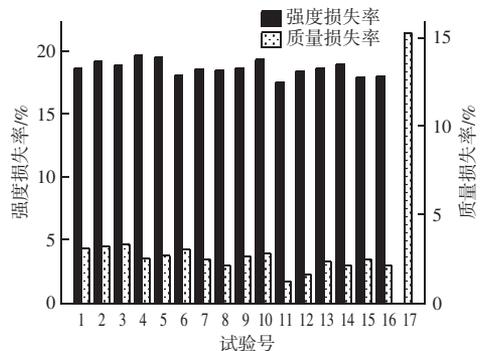


图 7 不同配比固化土强度损失和质重损失

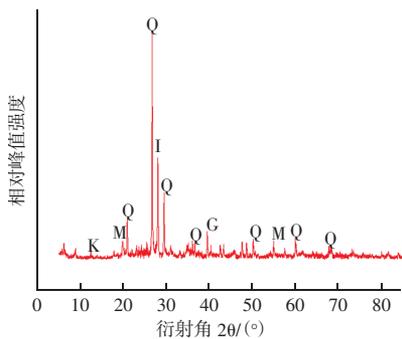
Fig. 7 Strength loss and mass loss of solidified soil with different ratios

### 3.5 复合固化机理分析

如图 8 可知, 盾构渣土主要由石英、高岭石、伊利石、蒙脱石等矿物成分组成。对比分析添加固化剂前后盾构渣土的各组分衍射峰值可知, 添加固化剂后发生水化反应, 生产钙矾石晶体 (AFt)、水化硅酸钙凝胶 (C-S-H)、水化铝酸钙凝胶 (C-A-H)

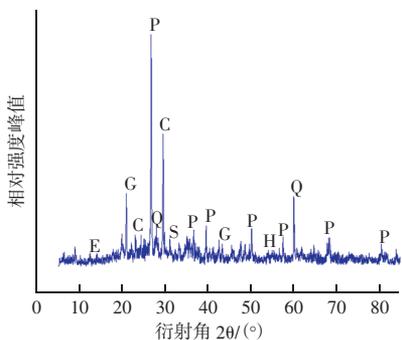
## 材料科学

等产物,提高了盾构渣土的力学强度。



Q: 石英; K: 高岭石; I: 伊利石; M: 云母; G: 蒙脱石;

(a) 盾构渣土



Q: 石英; E: 水化硅酸钙; I: 伊利石; K: 高岭石; M: 云母;  
S: 硅酸钙; C: 碳酸钙; H: 氢氧化钙; G: 二水硫酸钙; P: 钙矾石;

(b) 试验 11 号固化土

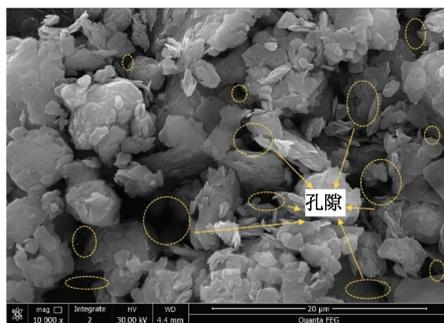
图 8 盾构渣土固化前后 XRD 图谱

Fig. 8 XRD pattern of shield muck before and after solidification

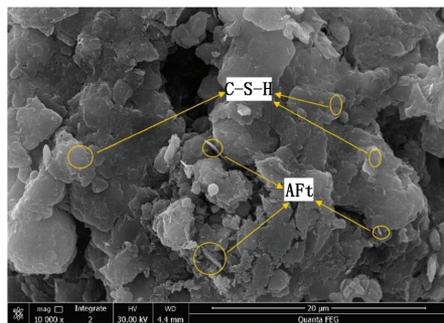
由图 9 (a) 可知, 盾构渣土土颗粒之间的接触方式主要为相互堆积, 少部分为边和角或面和角形式接触, 孔隙数量较多较大, 从而使黏结作用减弱、渣土结构较为松散。导致盾构渣土整体性较差, 强度较低。由图 9 (b) 可知, 固化渣土微观结构中存在大量钙矾石 (Aft) 以及水化硅酸钙凝胶 (C-S-H) 等水化产物。生成的水化凝胶产物发挥胶结作用和孔隙填充作用, 使盾构渣土中的土颗粒形成胶结团状结构, 从而提高土体的强度和结构性。

根据图 8 (XRD) 和图 9 (SEM) 试验结果分析固化机理。固化剂的加入, 首先由于水泥中的氧化钙与水发生水化反应生成的  $\text{OH}^-$  会溶解于游离水中, 导致盾构渣土处于碱性环境, 进一步激活粉煤灰和偏高岭土中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的活性, 与水泥水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生火山灰反应生成大量水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶与水化铝酸钙 (C-A-H) 凝胶等产物, 水化铝酸钙与水泥中少量的硫酸钙反应生成

钙矾石 (Aft)。WER 中氨基活性基团与羟基与 Aft、C-S-H 凝胶发生反应生成高黏性的共聚物分子胶粒, 填充于土颗粒孔隙之间<sup>[23]</sup>。固化剂中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  与土颗粒吸附的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  等离子发生离子交换。使得渣土颗粒间更加紧密。土颗粒之间的胶结性和土体强度得到增强。共聚物分子胶粒、水化凝胶产物和粉煤灰微珠共同连结形成三维网状结构。土体的强度、耐久性和整体性均得到显著提升。



(a) 盾构渣土



(b) 试验 11 号固化土

图 9 土试样 SEM 图

Fig. 9 SEM image of soil sample

## 4 结论

通过探究不同掺量配合比下养护 28 d 固化土的路用试验研究、微观结构特征及固化机理, 得到如下主要结论:

(1) 纤维水泥基复合固化剂能有效增强盾构渣土的各项力学性能。试验 11 号固化土养护 28 d 无侧限抗压强度、间接抗拉强度、CBR 分别为 4.63、0.68 MPa、121.31%。9% 水泥、12% 粉煤灰、0.25% WER、5% 偏高岭土、0.3% 聚丙烯纤维 (质量分数) 样品宏观性能最佳, 确定该掺量为纤维水泥基材料最优配比。

(2) 盾构渣土的抗冻性差, 不满足 T/CECS 737—2020《道路固化土应用技术规程》的要求, 不可用于路基填材。添加复合固化剂的盾构渣土抗冻性能得到有效改善, 固化土冻融前后强度损失和质量损失分别小于 20%、5%, 且试验 11 号固化土的抗冻性能最优。达到相关规范的要求。

(3) 微观试验结果和宏观力学表现具有良好的 consistency。固化剂各组分协同发生水化反应, 生成的水化产物主要为水化硅酸钙 (C-S-H) 凝胶与钙矾石 (AFt), 有效填充到颗粒孔隙间, 降低孔隙率的同时与共聚物分子胶粒、粉煤灰微珠连结成三维网状结构, 从而形成空间骨架结构。提高固化土的整体性, 强度显著增强。

## 参 考 文 献

- [1] 郭卫社, 王百泉, 李沿宗, 等. 盾构渣土无害化处理、资源化利用现状与展望 [J]. 隧道建设 (中英文), 2020, 40 (8): 1101-1112.
- [2] 张军辉, 李海, 杨豪, 等. 盾构渣土资源化再利用技术研究综述 [J]. 中外公路, 2022, 42 (6): 1-11.
- [3] WU Z X, YE C L, CAO F X. Performance and microstructure of grouting materials made from shield muck [J]. Materials, 2024, 17 (16): 4074-4074.
- [4] WU T H, GAO Y T, HUANG C F, et al. In situ resource reutilization of earth pressure balance (EPB) shield muck for the generation of novel synchronous grouting materials [J]. Construction and Building Materials, 2024, 135737.
- [5] 闫革, 范涛, 张平, 等. 盾构渣土制备同步注浆材料试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 55-59.
- [6] WANG W, WANG N N, BAO Y J, et al. Research and implementation of eco-grouting material derived from shield tunneling muck [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03852 - e03852.
- [7] WANG Z J, LI N N, DUAN S F, et al. Experimental study on in-situ preparation of post-wall synchronous grouting materials for shield mud in Chengdu tunnel [J]. Materials Today Communications, 2025, 43: 111596-111596.
- [8] 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.
- [9] CHEN S B, JIANG H, XING H T, et al. Research on Preparation and Performance of Clay-Based Shield Tunnel Nonsintered Bricks [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021 (1): 8186851.
- [10] ZHANG C, LIU X, FU J Y, et al. Evaluating the feasibility of muck from slurry shield tunnels as a growth medium for landscaping. [J]. Journal of the Air & Waste Management Association (1995), 2022, 72 (5): 455-462.
- [11] WANG S J, DING J W, GUO Q Y, et al. Mechanical properties of discarded shield residue improved by calcium carbide slag and fly ash as subgrade filling [J]. Plos One, 2024, 19 (12): e0314597.
- [12] 王俊艺. 固结渣土混合料的性能研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2018 (12): 174-176, 23.
- [13] 尹始观, 张庆, 杨懿鹏, 等. 聚丙烯纤维增强水泥基复合材料的基本力学性能研究 [J]. 江西建材, 2024 (3): 14-16.
- [14] PANG S, WANG W W, WANG X A. Study on the compressive performance and numerical simulation of fiber-reinforced geopolymer stabilized aeolian sand subgrade materials [J]. Scientific Reports, 2025, 15 (1): 8976-8976.
- [15] HU C, WENG X Z. Performance of polypropylene fiber-reinforced solidified soil [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021 (1): 8859358.
- [16] JTG 3441—2024 公路工程无机结合料稳定材料试验规程 [S].
- [17] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准 [S].
- [18] JTG 3430—2020 公路土工试验规程 [S].
- [19] CJJ/T 286—2018 土壤固化剂应用技术标准 [S].
- [20] T/CECS 1757—2024 道路工程固化土试验方法标准 [S].
- [21] JTG D30—2015 公路路基设计规范 [S].
- [22] T/CECS 737—2020 道路固化土应用技术规程 [S].
- [23] 黄展魏, 陈伟, 李秋, 等. 水性环氧树脂改性水泥砂浆力学性能及微观结构 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (8): 2530-2535, 2540.