



粤东滨海区盾构渣土固化与制备道路填料可行性研究

石文广¹, 刘华东¹, 邓声锐², 胡宇³, 陈保国³

(1. 广东粤海粤东供水有限公司, 广东 揭阳, 522000; 2. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081; 3. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 泥水盾构渣土的消纳与资源化利用具有重大的工程意义。为了研究盾构渣土用作道路填料的可行性, 以粤东水资源优化配置工程中的泥水盾构工程为依托, 结合大量的研究数据统计分析和室内试验, 总结出原状盾构渣土的一般物理性质和各类固化方法固化后不同粒径渣土的强度参数范围, 并与路基路面各结构层的相应指标要求进行了对比分析, 进而提出了固化剂相应的推荐配合比。结果表明: 以水泥和矿粉为主的固化剂固化砂土类渣土, 可用于高等级道路的底基层和二级公路的基层; 而水泥与生石灰(或粉煤灰)等固化的黏土类渣土则可应用于二级公路的底基层和道路工程的路基。本文成果可为盾构渣土无机结合料在道路工程中的应用提供借鉴。

关键词: 盾构渣土; 固化; 道路填料; 可行性研究

中图分类号: X799.1; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)09-0031-07

doi: 10.13402/j.gcejs.2025.09.111

Feasibility study on curing and preparation of road filler of shield muck in coastal area of eastern Guangdong

SHI Wenguang¹, LIU Huadong¹, DENG Shengrui², HU Yu³, CHEN Baoguo³

(1. Guangdong Yuehai Yuedong Water Supply Co., Ltd., Jieyang 522000, Guangdong, China;

2. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China;

3. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The consumption and resource utilization of mud shield muck is of great engineering significance. In order to study the feasibility of shield muck as road filler, based on the mud shield project in the water resources optimization allocation project in eastern Guangdong, combined with a large number of statistical analysis of research data and laboratory tests, the general physical properties of unchanged shield muck and the strength parameters of different particle sizes after curing by various curing methods are summarized, and the corresponding index requirements of each structural layer of the subgrade pavement are compared and analyzed, and then the corresponding recommended mix ratio of the curing agent is proposed. The results show that the solidifying agent based on cement and mineral powder can be used to solidify the sand muck soil, which can be used in the base layer of high-grade roads and the base layer of secondary highways. The solidified clay muck such as cement and quicklime (or fly ash) can be applied to the subbase layer of secondary highway and the roadbed of road engineering, and the results can provide references for the application of shield muck inorganic binders in road engineering.

Key words: shield muck; curing; road filler; feasibility study

随着我国经济的快速发展, 隧道施工建设的规模日益扩大, 由此产生的盾构渣土处理问题也

收稿日期: 2025-01-07

作者简介: 石文广(1975—), 男, 高级工程师, 从事大型水利工程建设技术分析与管理工作。

通信作者: 胡宇(2001—), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程领域方面的研究。

日趋严峻。截至 2023 年,广东省地下隧道的铺设总里程已达 1 131.17 km,换算得出的盾构渣土总量超过 3 000 万立方米^[1]。然而,泥水盾构渣土的筛分处理较为困难,仅依靠单一的筛分装置或旋流器分离泥沙颗粒,难以实现渣土的高效回收与资源化利用^[2]。目前,我国仍普遍采用传统的集中填埋方式处理盾构渣土,资源化利用率不足 5%^[3]。同时,盾构渣土中残留的大量发泡剂等化学助剂进入填埋场的原生土壤中,可能造成严重的环境污染^[3-4]。此外,由于不同区域盾构渣土的特性存在差异,以及渣土固化后的应用领域不同,使得固化处理时无法采用统一的固化剂,必须根据具体情况选择或研发适合的固化剂。盾构渣土的特性因地区和工程的不同而有所差异,如:张乾等^[5]对成都某地铁工程中的盾构渣土进行了含水特性评估,发现其含水率超过了液限,并具有较强的渗透性;邓焯等^[6]提出了一种盾构渣土松散型评估方法,并对某管廊工程进行了具体分析;张祖焱等^[7]对南京某地铁工程中的盾构渣土进行了工程特性评估与微观结构研究。

为了解决盾构渣土的固化及资源化处理问题,已有众多学者开展了相关研究。RIVIERA 等^[8]对阿尔卑斯山区的盾构渣土进行破碎处理,并发现不符合混凝土骨料标准的粗颗粒可用于道路基层填筑;ALIZADEH 等^[9]利用水泥-粉煤灰固化天然砂,并制备出用于流态回填料的材料;周铭汉等^[10]通过室内试验方法,研究了不同水泥掺量对淤泥质土固化产物的抗剪强度、杨氏模量等力学性能参数的影响。然而,上述研究并未对渣土固化后具体的资源化利用途径及其应用效果进行详细探讨。本文基于实际工程案例,采用室内试验与已有数据分析相结合的方法,研究泥水盾构渣土的物理性质及其固化方式,并进一步探讨固化渣土作为路面基层和路基填料的可行性,以期为盾构渣土的大规模资源化利用提供参考。

1 工程概况与问题分析

1.1 工程概况

韩江、榕江、练江水系连通后续优化工程是一项位于粤东潮州市、揭阳市等地区的补水工程。

工程利用已有取水口,通过新建封闭输水管道连通鹿湖隧洞和榕江关埠引水工程,构建“一干二支”供水网络,将韩江优质水资源输送至粤东沿海缺水地区。工程采用泥水平衡盾构施工方法,共穿越 4 个盾构区间:GX6~GX7, GX7~GX8, GX8~GX9 及 GX11~GX12,各区间具体情况如下。

(1) GX6~GX7:隧洞全长 2 100 m,区间岩土体以中粗砂土、淤泥质土及全风化花岗岩为主。

(2) GX7~GX8:隧洞全长 1 318 m,区间岩土体包含强风化岩、弱风化岩,组成较为复杂;隧洞末端约 540 m 的岩土体为中粗砂土、淤泥质土及全风化花岗岩。

(3) GX8~GX9:隧洞全长 1 904 m,区间岩土体为中粗砂土、淤泥质土及黏土。

(4) GX11~GX12:隧洞全长 2 280 m,区间岩土体为中粗砂土、淤泥质土及黏土。

地层分布依照成因类型自上而下依次为第四系覆盖层(Q)、侏罗系金鸡组(J1jn)沉积岩、三叠系上统上段(T3c)沉积岩以及燕山期侵入的花岗岩。其中,第四系覆盖层主要由淤泥质土、中粗粒砂土与黏性土交替分布构成。盾构施工所穿越的地层主要为第四系覆盖层、局部穿越少量沉积岩。工程标段的主要岩土特征如表 1 所示。

1.2 渣土固化存在问题

固化剂种类繁多,但由于盾构渣土成分差异较大,固化效果往往存在显著差异。此外,优质固化剂价格较高,会增加整体处理成本。同时,固化剂的用量难以精准控制:用量不足会导致固化效果不佳,无法满足渣土强度等性能要求;而用量过多则会造成浪费,甚至可能对固化后产物的性能产生负面影响。

固化过程对搅拌均匀程度要求较高。由于盾构渣土具有一定的黏性和颗粒特性,实现固化剂与渣土的充分均匀混合较为困难。若混合不均,固化体质量将参差不齐,影响整体工程性能。固化过程还对时间和环境条件有严格要求。不同固化剂配方需要匹配相应的固化时间和温湿度条件。然而,在实际工程中,很难始终维持理想的固化环境,这可能导致固化周期延长或固化效果下降。

此外,固化后渣土的物理力学性能(如强度)

表 1 地层岩土特征

岩土层编号	名称	状态	揭露层厚/m
①	人工填土	欠压实	1~7
②-1	淤泥~淤泥质土	流塑~软塑	6~30
②-2	黏性土	可塑	3~8
②-3	中粗砂	稍密~中密	3~20
②-4	淤泥质土	软塑	2~16
②-5	中粗砂	稍密~中密	2.8~17
②-6	淤泥质土	软塑	1.7~18
②-7	中粗砂、砂卵砾石	中密~密实	5~35
②-8	黏性土	可塑	5~27
②-9	中粗砂、砂卵砾石	中密~密实	2~8
③-1	淤泥~淤泥质土	流塑~软塑	1.2~6.7
③-2	黏性土	可塑	2.6~29
③-3	中粗砂	稍密~中密	1.2~22
③-4	黏性土	可塑	1.6~15
③-5	中粗砂	稍密~中密	1.7~11
③-6	黏性土	可塑	4.3~40
③-7	中粗砂、砾砂	中密~密实	3.2~27.6
③-8	黏性土	可塑	2.3~27
④	坡积黏土	可塑	5~7

可能因原始渣土成分的波动而不稳定。例如,渣土中有机质含量的变化会影响固化产物的承载能力和耐久性。在受到外部环境因素(如长期浸水、冻融循环等)影响时,固化渣土可能出现开裂、强度下降等不利现象。

2 泥水盾构渣土物理性质

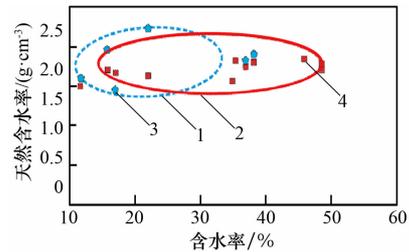
2.1 泥水盾构渣土特性分析

泥水盾构渣土的颗粒级配范围较广,通常包括黏土颗粒(粒径小于 0.005 mm)、粉粒(0.005~0.075 mm)、砂粒(0.075~2.000 mm)及砾石(粒径大于 2.000 mm)等多种粒径成分,其中以黏粒和砂粒为主。不同工程中盾构渣土的颗粒级配差异较大,部分渣土级配良好,另一些则级配不良。泥水盾构渣土的天然含水率分布范围较广。对于黏粒含量较高的渣土,其天然含水率通常超过或接近液限;而对于砂粒含量较高的渣土,天然含水率一般处于可塑状态。总体而言,泥水盾构渣土含水率普遍偏高,导致其抗剪强度显著降低,

无法直接用于工程回填或构筑用途。同时,渣土的压缩系数较大,在外荷载作用下易产生较大的沉降和变形。

2.2 泥水盾构渣土物理参数统计分析

通过对 13 组数据的统计分析,绘制出盾构渣土含水率与密度的分布图,如图 1 所示。

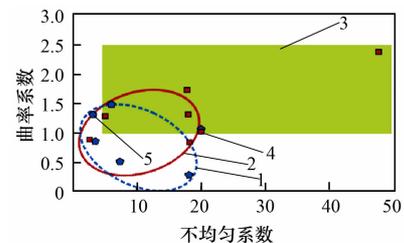


1—砂土主要范围;2—黏土主要范围;3—砂土;4—黏土。

图 1 泥水盾构渣土含水率及密度分布统计

由图 1 可知:盾构渣土中黏土的含水率分布范围较广,主要分布在 10%~50%,且较为集中于 20%~40%;其密度分布则相对集中,主要分布在 1.5~1.8 g/cm³。砂土的天然含水率主要集中在 15%~35%,其密度分布范围相对较宽,主要分布在 1.5~2.2 g/cm³,与黏性土相比,砂土的密度分布更广,且平均密度更大。

根据粒径级配数据的统计分析结果,绘制出相应的分布图,如图 2 所示。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中对颗粒级配的定名标准:当不均匀系数 $C_u \geq 5$,且曲率系数 C_c 为 1~3 时,判定为级配良好;其余情况则判定为级配不良。



1—砂土主要范围;2—黏土主要范围;
3—级配良好范围;4—黏土;5—砂土。

图 2 泥水盾构渣土不均匀系数与曲率系数统计

由图 2 可知:盾构渣土的颗粒级配整体偏不良,且各样本之间差异较大。对于砂土而言,其不均匀系数分布在 2.5~20.0,其中 75% 的样本集中在 2.5~10.0;曲率系数则主要分布在 0.2~1.5,其中 38% 的样本曲率系数大于等于 1,62%

小于 1。根据图 2 中对“级配良好”区间的对比判断,大部分砂土样本属于级配不良,仅有 25% 的样本满足级配良好的标准。对于黏土而言,其不均匀系数分布在 2.5 ~ 50.0,其中 86% 的样本集中在 5 ~ 18;曲率系数分布在 0.8 ~ 2.4,其中 71% 的样本曲率系数大于等于 1。根据图 2 的对比分析,70% 的黏土样本达到了级配良好的标准。

关于矿物成分的统计结果如表 2 所示,其中按矿物含量由高到低依次排序,以便更直观地反映各类矿物在渣土中的相对含量。

表 2 泥水盾构渣土矿物成分统计

样本	编号	矿物成分
黏土样本	①	石英 > 高岭石 > 钠长石等
	②	石英 > 伊利石 > 高岭石等
	③	石英 > 钠长石 > 蓝晶石
	④	伊利石 > 高岭石 > 蛭石 > 蒙脱石等
	⑤	石英 > 高岭石 > 伊利石 > 蒙脱石等
	⑥	石英 > 方解石 > 钠长石 > 伊利石 > 高岭石
	⑧	石英 > 高岭石 > 伊利石 > 蒙脱石等
	砂土样本	①
②		石英 > 方解石 > 钠长石 > 伊利石
③		石英 > 方解石 > 钠长石 > 伊利石 > 高岭石

由表 2 可知:盾构渣土中的砂土矿物成分主要由石英、长石等造岩矿物及伊利石等具有低膨胀性和低吸水性黏土矿物组成。因此,砂性渣土中结合水含量较低,自由水含量较高,通过筛分处理可实现较好的脱水效果。相比之下,黏性土的矿物成分以石英、长石、方解石等造岩矿物为主,并含有蒙脱石、高岭石等高膨胀性和高吸水性的黏土矿物,因此,其结合水含量较高,仅通过简单的筛分处理难以达到良好的脱水效果。

3 渣土固化及用于路基和基层填料的可行性

3.1 砂土固化机理与强度特性

盾构渣土经分离后,粒径介于 0.075 ~ 2.000 mm 的砂土颗粒多呈圆形或似圆形,颗粒间黏聚力较小,土体结构松散,因此具有较强的透水性和较高的渗透系数。针对此类砂土的工程特性,应选用凝胶能力强且凝胶颗粒直径与砂土颗粒粒径相近的固化剂,以有效增强颗粒间的黏聚力,提高其力学性能。

目前,砂土常用的固化剂主要为水泥,其固化机理主要包括物理填充、化学胶结以及火山灰反应等。在物理填充阶段,较细的水泥颗粒能够填充砂土颗粒之间的孔隙,从而降低孔隙率,使砂土结构更加致密。其次,在化学胶结过程中,水泥中的 CaO、Al₂O₃、Fe₂O₃ 及 SiO₂ 等成分在水合反应中生成硅酸三钙(C₃S)、硅酸二钙(C₂S)、铝酸三钙(C₃A)等多种水合物凝胶颗粒。这些水合物通过 C-A-S-H 键和 C-S-H 键将砂土颗粒黏结在一起,形成水泥石骨架结构,从而显著提高砂土固化土的整体强度。同时,细小的水泥颗粒还能进一步填充骨架中的孔隙,使砂土固化土更加致密,降低其含水率,从而进一步增强其强度。此外,砂土颗粒与胶结物质形成的团块在凝结硬化过程中可达到较高的强度,这一过程贯穿于水泥固化的初期、中期及后期。各阶段的水化反应分别在不同阶段达到高峰,宏观上表现为 3、7、14、28 d 等不同固化阶段强度的逐步增长。此外,砂土中部分含有火山灰活性的物质可与水泥水化产物中的 Ca(OH)₂ 发生火山灰反应,生成新的胶凝物质,进一步降低含水率,增强固化效果,从而提升砂土的强度和稳定性。表 3 为工程中部分常用固化剂配方下,固化砂土在 7、14、28 d 龄期的无侧限抗压强度测试结果。

3.2 黏土固化技术及机理

盾构渣土经分离后,粒径小于 0.075 mm 的颗粒占比显著,其形态多呈不规则状,颗粒间距小,且成分以黏土矿物及造岩矿物为主。此类颗粒吸水能力强,扩散层厚,导致黏土内聚力增大,非自由水含量升高。针对这些特性,宜选用胶凝性强且吸水性优于黏土矿物的固化材料,通过降低固化土含水量并构建骨架结构,从而提升其力学性能。

黏土固化剂主要包括水泥/矿粉等胶凝材料,以及生石灰、粉煤灰等吸水组分,其固化机理涵盖高温反应、胶凝反应、吸水作用与碳化等过程。除胶凝材料的化学作用外,粉煤灰中的 CaO 具有强吸水性,可剥离黏土颗粒表面结合水,反应生成 Ca(OH)₂ 并释放热量,加速胶凝反应。同时,生石灰能与黏土中的 SiO₂、Al₂O₃ 等组分胶凝

表 3 固化砂土类渣土无侧限抗压强度

MPa

组别	固化剂配方	龄期/d		
		7	14	28
S ₁	P·O42.5 水泥 12% + 粒化高炉矿渣 8% + 水玻璃	3.87	4.83	5.43
S ₂	水泥 17% + 土壤固化剂 1%	3.25	3.83	4.36
S ₃	水泥 25% + 矿粉 12.5% + 粉煤灰 7.5%	5.78	8.99	10.90
S ₄	硫铝酸盐水泥 10% + 粉煤灰 6% + 矿渣 2% + 生石膏 1%	2.23	—	—
S ₅	水泥 3.1% + 矿粉 10.5% + 粉煤灰 5.2% + 硅粉 1%	1.37	2.13	2.86
S ₆	水泥 3.7% + 粉煤灰 3.7% + 高分子聚合物 0.6%	1.57	1.72	1.98

形成复式盐类, 强化颗粒胶结。生成的 Ca(OH)₂ 持续吸附渣土水分促进凝胶化, 并与空气中的 CO₂ 反应生成碳酸钙结晶; 碳酸钙进一步与 Ca(OH)₂ 结合形成高强度硬壳层, 显著提升固化土强度。

为验证固化剂成分的适配性, 归纳总结了黏性土固化后的无侧限抗压强度试验数据, 如表 4 所示。

3.3 固化渣土用于路基和基层填料可行性

3.3.1 固化砂土类渣土

依据《公路路面施工技术细则》(JTG/T F20—2015), 针对重交通荷载分级要求, 路基材料在 7 d 龄期的无侧限抗压强度标准值如表 5 所示, 其中路基强度标准值至少为 0.4 MPa。

固化砂土类盾构渣土强度值与规范要求的道路各结构层强度值对比分析结果如图 3 所示。由图 3 可知: 水泥固化砂土类渣土的 7 d 无侧限抗压强度主要分布范围为 1.3 ~ 5.8 MPa。具体而言, 采用水泥 3%~5% + 粉煤灰 3%~5% 配比方案可获得 1.3 ~ 1.6 MPa 强度, 适用于中轻交通高等级道路底基层、重交通二级及以下道路基层; 采用水

泥 10%~20% + 粉煤灰 6%~10% 配比方案可获得 2.2 ~ 3.8 MPa 强度, 适用于重交通高等级道路基层、极重交通二级及以下道路底基层; 而水泥掺量 ≥ 20% 的固化方案则适用于极重交通高等级道路基层。基于上述分析结果, 表 6 给出了砂土类渣土固化剂的推荐配比方案。

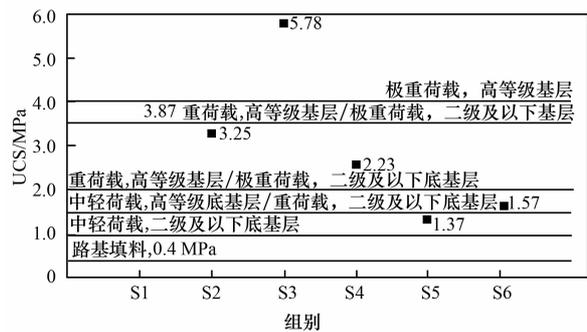


图 3 固化砂土类渣土强度与规范要求强度

3.3.2 固化黏性土类渣土

固化黏性土类盾构渣土的 7 d 龄期无侧限抗压强度值与道路各结构层规范要求值对比分析如图 4 所示。由图 4 可知: 水泥固化黏性土的 7 d 强度主要分布范围为 0.56 ~ 2.71 MPa, 其中采用水泥 3%~10% + 生石灰 4%~10% 配比方案可获得 0.56 ~

表 4 固化黏性渣土无侧限抗压强度

MPa

组别	固化剂配方	龄期		
		7 d	14 d	28 d
N ₁	水泥 2.8% + 粉煤灰 2.8% + 氧化钙 1.2% + 硫酸钙 0.7% + 聚丙烯酸钠 0.5%	1.57	1.72	1.98
N ₂	水泥 7% + 粉煤灰 3%	1.24	2.17	2.50
N ₃	水泥 10% + 生石灰 15%	0.90	0.90	—
N ₄	水泥 3% + 生石灰 4%	0.56	3.20	3.70
N ₅	水泥 13% + 粉煤灰 16%	1.07	—	2.23
N ₆	水泥 8% + 粉煤灰 10% + 添加剂①4% + 添加剂②2% + 聚丙烯酸钠 1.5%	2.71	—	—

表 5 7 d 龄期无侧限抗压强度标准值

		MPa			
材料	结构层	公路等级	特重交通	重交通	中、轻交通
水泥粉 煤灰	基层	高速及一级	4.0~5.0	3.5~4.5	3.0~4.0
		二级及以下	3.5~4.5	3.0~4.0	2.5~3.5
	底基层	高速及一级	2.5~3.5	2.0~3.0	1.5~2.5
		二级及以下	2.0~3.0	1.5~2.5	1.0~2.0

表 6 砂土类渣土的固化剂推荐配比

		%
水泥占比	粉煤灰与生石灰占比	适用结构层(该等级及以下道路结构层均适用)
3~5	3~5	中轻荷载高等级道路底基层,重荷载二级及以下底基层
10~20	6~10	重交通荷载高等级道路底基层,极重荷载二级及以下道路底基层
≥20	—	极重荷载高等级道路基层

0.90 MPa 强度,适用于各等级道路路基填料;采用水泥 7%~13% + 粉煤灰 3%~16% 配比方案可获得 1.07~1.24 MPa 强度,适用于中轻交通二级及以下道路底基层;采用水泥 3%~8% + 粉煤灰 3%~10% + 聚合物 <2% 复合配比方案可获得 1.57~2.71 MPa 强度,适用于中轻交通高等级道路底基层及重交通二级及以下道路底基层。基于此提出了黏性土类渣土固化剂推荐配比(表 7)。

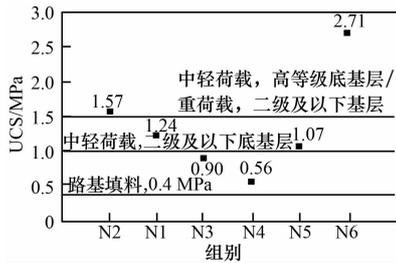


图 4 固化黏性土类渣土强度与规范要求强度

4 结论与建议

(1) 泥水盾构渣土是一类具有高天然含水率和不良级配特性的工程渣土,其分离后的砂土类渣土天然含水率为 15%~35%、密度为 1.5~2.2 g/cm³ 且颗粒级配不良,而黏性土类渣土则表现出 20%~40% 的天然含水率、1.5~1.8 g/cm³ 的密度和良好的颗粒级配特性。

(2) 分离出的砂土类渣土(粒径为 0.075~

2.000 mm) 矿物成分以石英、长石等造岩矿物及伊利石(低膨胀性、低吸水率黏土矿物)为主,具有结合水含量低、自由水含量高的特性,通过筛分可获得良好脱水效果;而黏性土类渣土(粒径 <0.075 mm) 则以石英、长石、方解石等造岩矿物及蒙脱石、高岭石(高膨胀性、高吸水率黏土矿物)为主,因其结合水含量高,采用简单筛分处理难以获得理想脱水效果。

(3) 针对分离出的砂土类渣土,采用不同配比的固化方案可获得相应工程性能:当水泥掺量为 3%~5%、粉煤灰掺量为 3%~5% 时,固化土 7 d 无侧限抗压强度可达 1.3~1.6 MPa,适用于中轻交通荷载下高等级道路底基层及重交通荷载下二级及以下道路底基层;当水泥掺量为 10%~20%、粉煤灰掺量为 6%~10% 时,固化土 7 d 无侧限抗压强度可达 2.2~3.8 MPa,适用于重交通荷载下高等级道路底基层及极重荷载下二级及以下道路底基层;而当水泥掺量 ≥20% 的固化方案则适用于极重交通荷载下高等级道路的基层施工。

(4) 分离出的黏性土类泥水盾构渣土可采用以下 3 种固化方案:当采用水泥掺量为 3%~10% 与生石灰掺量为 4%~10% 的固化方案时,固化土 7 d 无侧限抗压强度可达 0.56~0.90 MPa,适用于各等级道路的路基填料;当采用水泥掺量为 7%~

表 7 黏性土类渣土固化剂推荐配比

			%
水泥矿粉占比	粉煤灰、生石灰占比	高分子聚合物占比	适用结构层
3~10	4~10	—	各等级道路路基填料
7~13	3~16	—	中轻荷载二级及以下道路底基层
3~8	3~10	≤2	中轻荷载高等级道路底基层,重荷载二级及以下道路底基层

13% 与粉煤灰掺量为 3%~16% 的固化方案时, 固化土 7 d 无侧限抗压强度可达 1.07~1.24 MPa, 适用于中轻交通荷载下二级及以下道路的底基层; 当采用水泥掺量为 3%~8%、粉煤灰掺量为 3%~10% 并加入 <2% 高分子聚合物的复合固化方案时, 固化土 7 d 无侧限抗压强度可达 1.57~2.71 MPa, 适用于中轻交通荷载下高等级道路的底基层及重交通荷载下二级及以下道路的底基层。

(5) 当砂土类或黏性土类渣土中掺入 $\geq 3\%$ 的水泥、矿粉、粉煤灰或生石灰时, 均可满足路基填料的工程要求。

参考文献:

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2024(3): 11-21.
- [2] 王浩宇, 宋战平, 刘乃飞, 等. 盾构渣土分析及处理研究进展综述[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(9): 74-79; 113.
- [3] 朱考飞, 张云毅, 薛子斌, 等. 盾构渣土的环境问题与绿色处理[J]. 城市建筑, 2018, 298(29): 108-110.
- [4] YIN Y P, LI B, WANG W P, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization [J]. Engineering, 2016, 2(2): 230-249.
- [5] 张乾, 王风, 温斯顿, 等. 泥岩砂卵石复合地层盾构渣土含水特征分析[J]. 四川建筑, 2023, 43(5): 145-147.
- [6] 邓焯, 陈益人, 郑好, 等. 考虑地层不均和塑流化过程的土压平衡盾构渣土松散特性评估方法[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(6): 644-648.
- [7] 张祖焯, 顾琳琳, 张于晔, 等. 南京盾构渣土工程特性及其微观结构[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15252-15258.
- [8] RIVIERA P P, BELLOPEDE R, MARINI P, et al. Performance-based re-use of tunnel muck as granular material for subgrade and sub-base formation in road construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 40: 160-173.
- [9] ALIZADEH V, HELWANY S, GHORBANPOOR A, et al. Rapid-construction technique for bridge abutments using controlled low-strength materials[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28(1): 149-156.
- [10] 周铭汉, 冉航源. 淤泥质软土水泥固化特性室内试验研究[J]. 黑龙江交通科技, 2017, 40(5): 14-15.