

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240417005

流态固化土基本物理力学性能试验与应用研究*

王明¹, 刘振忠¹, 薛泽^{2,3}, 叶梓^{2,3}, 陈龙^{2,3}

(1. 深圳市综合交通与市政工程设计研究总院有限公司, 深圳 518000; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 3. 河海大学苏州研究院, 江苏苏州 215100)

摘要: 深基坑、管廊肥槽、桥涵台背等工程常需要进行回填作业, 流态固化土由于其自密实、自流平、自硬化的优势, 近年来得到广泛关注, 具备替代传统碾压夯实回填材料的潜力。本文依托宁波西洪大桥某管廊回填工程, 研究了不同固化剂配比下流态固化土的无侧限强度、渗透系数、压缩特性与流动特性, 并且结合现场试验探讨了其工程应用的可行性。结果表明, 添加减水剂组流态固化土的强度、渗透性等服役性能指标与施工和易性均显著提升。9%水泥掺量+1%膨胀剂+0.5%减水剂试样相较9%水泥掺量+1%膨胀剂试样的7d无侧限抗压强度由0.79 MPa提升到1.36 MPa, 上升了72%, 渗透系数下降了20.6%, 压缩模量提升了25.7%; 该配比的拌合后含水率为64.6%, 拥有180 mm的坍落度。减水剂能有效增加固化土中的水化产物总量, 形成网状络合结构链接内部土颗粒, 具备良好的支撑效应, 提高胶凝材料的聚合度, 保证其内部结构更为致密。现场试验发现, 流态固化土7d无侧限抗压强度达0.61 MPa, 抗渗性能大幅提高, 但较实验室数据性能损失近50%。

关键词: 流态固化土; 废弃土; 资源化利用; 回填; 现场试验

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0941-08

Experiment and Application Study on Basic Physical-mechanical Properties of Soil-based Controlled Low-strength Materials

WANG Ming¹, LIU Zhenzhong¹, XUE Ze^{2,3}, YE Zi^{2,3}, CHEN Long^{2,3}

(1. Shenzhen Comprehensive Traffic & Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 51800, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 3. Suzhou Research Institute of Hohai University, Suzhou 215100, China)

Abstract: Backfill operations are often required for deep excavations, pipeline trenches, bridge abutments, and culverts. Soil-based controlled low-strength materials (CLSM), with advantages of self-compaction, self-leveling, and self-hardening, have gained widespread attention in recent years and have the potential to replace traditional compacted backfill materials. This study, based on the backfilling project of the pipeline corridor at the Ningbo Xihong Bridge, investigated the effect of curing agent proportions on the unconfined compressive strength (UCS), permeability, compressibility, and flowability of soil-based CLSM, and discussed the feasibility of its engineering application through field tests. The results showed that adding a polycarboxylate superplasticizer (PS) significantly enhanced

* 收稿日期: 2024-04-17; 修回日期: 2024-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52308348)、中国博士后科学基金面上项目(2023M740987)、江苏省卓越博士后计划(2023ZB109)资助

作者简介: 王明(1989—), 男, 高级工程师。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: 874032846@qq.com

通信作者: 叶梓(1995—), 男, 副研究员, 博士。主要从事岩土及地下工程方面的研究。E-mail: ziye_1995@163.com

the strength, permeability, and workability of soil-based CLSM. Specifically, the mixture with 9% cement, 1% expansion agent, and 0.5% PS exhibited a 7-day UCS increase from 0.79 MPa to 1.36 MPa, a 72% improvement, a 20.6% reduction in permeability coefficient, and a 25.7% increase in compressive modulus compared to the mixture with 9% cement and 1% expansion agent. The post-mixing moisture content of this mixture was 64.6%, exhibiting a slump of 180 mm. The PS significantly increased the total amount of hydration products in the soil-based CLSM, forming a network-like structure that connected the internal soil particles. It had a strong supporting effect, increased the polymerization degree of the binder, and ensured a denser internal structure. Field tests revealed that the 7-day UCS of the soil-based CLSM reached 0.61 MPa, with significantly improved impermeability, but showed nearly a 50% reduction in performance compared to laboratory results.

Keywords: soil-based controlled low-strength materials (CLSM); waste soil; resource utilization; backfilling; field test

0 引 言

我国沿海地区广泛分布大量的淤泥和淤泥质土壤,这类土壤具备高含水率、高压缩性、高孔隙率、低渗透性、低强度的特点^[1-3]。废弃土资源化利用是处理该类土壤的关键策略,传统弃土消纳手段为将其改良用作路基填料。鉴于淤泥的天然高含水率,常需添加石灰进行闷料预处理,降低含水率,这一过程占用场地,施工周期长,且易受天气的影响;若闷料后固化土的含水率还未降低至最优含水率,仍需要翻拌晾晒降低含水率;施工中对碾压方式和机械要求高,工期长且施工质量不易控制,对于狭窄空间如管沟、管廊等回填工程的适应性较差。

为了提高回填质量,通过管道输送或泵送、自密实、自硬化的流态固化土技术应运而生。流态固化土可直接回填难以压实的区域,保证了沟槽回填的密实度。但是目前为了满足可泵性,需要补充土体含水率,导致固化土后期强度低,耐久性差,呈现出高含水率、低强度、易开裂的特性^[4]。为满足工程施工的需要,流态固化土的流动性需要满足施工机械和回填空间的要求;固结时间既要满足施工作业的需要,也要考虑工期进度;固化后的强度则需要满足建筑设计的质量检测标准。

针对流态固化土的基本服役性能,已有众多学者展开了研究。Y. Su等^[5]对流态固化土的基本特性进行了详尽的分析,并总结了目前研究的进展与不足。D. Y. S. Yan等^[6]探索了利用固废焚烧残渣与高塑性黏土合成流态固化土的可行性,发现黏土的高吸水性和塑性决定了流态固化土需更多水分

保证足够的流动度。丁建文等^[7]分析固化剂掺量和初始含水率对固化土流动性的影响,并建立流动值的预测方法,提出相应的压缩模型。顾欢达等^[8]提出了将混合料粒径控制在 180 ± 20 mm、28 d UCS保持在80~100 kPa作为流态固化土质量标准。K. J. Folliard等^[9]研究加利福尼亚州四组流态固化土进行管道回填工程的案例,并指出外运填料,未利用多余挖掘土回填,将导致资源和资金的浪费。D. W. Duritsch^[10]用黏土与砂制作流态固化土,发现为达到所需的流动性,需要更多的水分。然而,高水分含量可能会导致骨料分离和强度降低。J. S. Qian等^[11]评估了上海建筑工地用开挖土部分替代沙子以制造受控低强度材料的可行性。A. K. Ravi^[12]发现随着水泥含量的增加,流态固化土的抗压强度和刚度会增加,但随着石灰含量的增加则会减少,相关理论在管道回填工程中得到了应用^[13-14]。实际上,流态固化土的强度与流动性是两组相悖的参数,如何在所需的工程性质和施工性能之间取得平衡,对于流态固化土的设计至关重要。

在实际应用方面,王丽筠等^[15]依托北京朝阳医院东院工程项目,研究了自密实流态固化土在基坑回填工程中的应用。张超等^[16]以及刘旭东^[17]采用流态固化土对道路下方综合管廊基坑进行回填,而非使用传统回填材料,有效解决了狭窄和异形基坑回填过程中的施工难题。

从上述研究中可以发现,现有研究大多聚焦于流态固化土的强度/流动性协同演化规律,针对其综合服役性能,例如压缩性与渗透性,涉及较少。同时缺乏室内与现场相结合的试验研究。因此,本文依托宁波西洪大桥某管廊回填工程,基于工程应

用需求,分析流态固化土的基本物性指标与现场试验结果,相关数据预期促进流态固化土工程推广应用。

1 试验准备

本文依托宁波西洪大桥某管廊回填工程,开展了流态固化土物理力学特性室内试验。为改善流态固化土的防渗性能,补偿收缩以减少裂缝,以膨胀剂作为室内试验掺料;为在降低含水率提升回填土强度的前提下,改善流态固化废弃土的流动性,以减水剂作为室内试验的掺料。在确定室内试验配合比后,通过无侧限抗压强度试验、变水头渗透试验、固结压缩、塌落度等试验,研究流态固化土基本性能。具体使用材料如下:(1)水泥:芜湖海螺水泥有限责任公司生产的PO42.5水泥;(2)土:选自接线工程废弃土方,基本性质见表1;(3)水:自来水;(4)膨胀剂:低碱UEA型砼膨胀剂;(5)减水剂:西卡高性能超塑化剂聚羧酸减水剂。

表1 试验用土物理性质指标

Table 1 Physical property indicators of experimental soil

指标	含水率 $w/\%$	比重 G_s	重度 $\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙比 e_0	$W_L/$ %	$W_P/$ %	I_p
数值	50.3	2.73	17.6	2.55	46.3	20.3	26.0

按照设计的配合比将水泥、膨胀剂、减水剂等外加剂称取一定质量,将其进行机械研磨并充分混合,按照制样需求称取一定量的固化剂粉剂,在搅拌设备内按照设计的配比和水灰比加入原状淤泥和固化剂浆剂,经水泥胶砂搅拌机搅拌5 min,确保均质性后,将其灌入70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的标准试膜中,经震荡敲击后确保试样内无空洞后进行带模养护,养护条件为标准养护,养护温度为18~22℃,养护环境的水分含量保持在95%以上,养护24~48 h后即可进行脱模。试验用各组试样的配比情况见表2。由于本次实验中部分试验组添加了减水剂,因此控制不添加减水剂组,即组3与组4,含水率为90%,添加减水剂组,即1与组2,通过调

表2 各组试样配比情况

Table 2 Mixture ratios of each sample

组别	配置后含水率/%	配比情况
1	70	9%水泥+1%膨胀剂+0.5%减水剂
2	70	7%水泥+1%膨胀剂+0.5%减水剂
3	90	9%水泥+1%膨胀剂
4	90	7%水泥+1%膨胀剂

配合水率,保证坍落度一致的基础上,可得到其含水率为70%。流态固化土的基本物性参数参照国家标准《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)^[18]进行测定,流动性试验参考了日本建设省《エアモルタル及びエアミルクの試験方法》(JHS A313-1992)^[19]测定。

2 试验结果

2.1 无侧限抗压强度

使用灰土无侧限强度仪对4种不同配比的试样进行无侧限抗压强度试验,得到的固化3 d与7 d龄期的无侧限抗压强度如图1所示。从图中可以看出,添加水泥对流态固化土的影响有限,组1较组2提高了2%的水泥含量,但其3 d UCS提升了24.8%,7 d UCS仅为4.9%,对于工程中常用的7 d强度影响并不明显。这意味着水泥含量的提高对流态固化土UCS的提升效果主要集中于固化前期,有利于流态固化土前期强度快速提升,但中后期提升效果并不明显。比较而言,减水剂相较于水泥对于试样强度的影响更为显著,从图中可以发现,添加0.5%减水剂后,9%水泥掺量+1%膨胀剂试样的3 d强度由0.61 MPa增加到0.97 MPa,提升了59%;而其7 d强度则由0.79 MPa增加到1.36 MPa,提升了72%。这是因为聚羧酸减水剂可有效使水泥颗粒相互分散,从而使水化反应更加充分,提高水化产物总量^[20]。

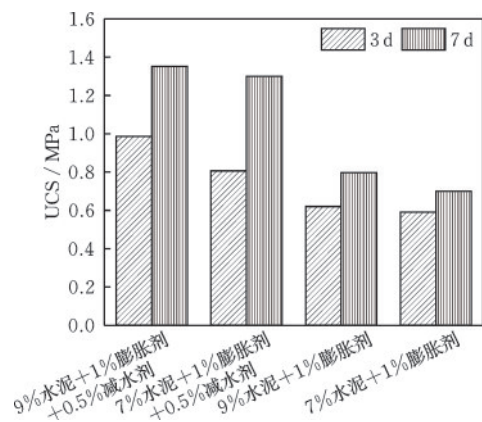


图1 不同配比和龄期试样的无侧限抗压强度

Fig.1 Unconfined compressive strengths of samples with different proportions and ages

2.2 渗透性

采用 TST-55 土壤渗透仪对不同配比的试样进

行渗透系数测定试验,得到各组试样不同龄期的渗透系数,如图2所示。原状土竖向渗透系数测定为 $10.86 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,流态固化土相较原状土抗渗能力显著提升,渗透系数降幅普遍达到85%以上,说明在固化剂作用下,流态固化土颗粒间的孔径减小,抗渗性能大大提升。当龄期从3 d增加到7 d,9%水泥掺量+1%膨胀剂+0.5%减水剂流态固化土试样渗透系数减小45.2%,龄期对渗透系数的影响显著。比较组1和组2可以发现,水泥掺量从7%增加至9%,流态固化土渗透系数由 $0.79 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 减小至 $0.46 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$,下降了41.7%。值得注意的是,添加减水剂也可以降低固化土的渗透性,更多的胶凝产物生成使土体孔隙结构更为致密,土间渗流路径更为曲折,渗透系数更小,比较组1和组3可以发现,添加0.5%减水剂后,3 d和7 d流态固化土渗透系数分别减小了12.7%与20.6%。

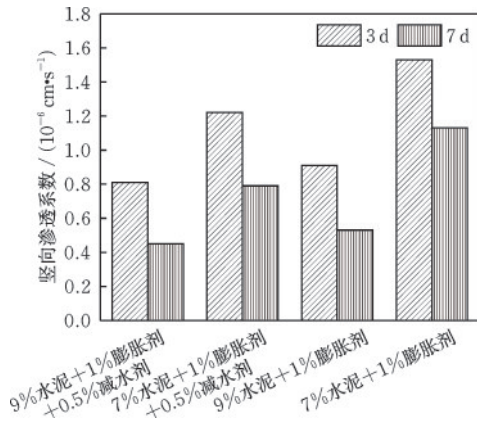


图2 不同配比和龄期试样的渗透系数
Fig.2 Permeability coefficients of samples with different proportions and ages

2.3 压缩特性

采用WG-三联固结仪测定流态固化土压缩特性,不同组别试样的压缩模量与压缩系数随龄期的变化趋势如图3所示。从图中可以发现,提高水泥掺量能有效提升流态固化土的压缩模量,对于不添加减水剂组的试样组3与组4,2%水泥掺量的提升使其3 d的压缩模量从1.5 MPa增加到3.7 MPa,提升了146.7%,7 d压缩模量从4.2 MPa增加到5.1 MPa,提升了21.4%;而对于添加减水剂的试样组1与组2,其3 d压缩模量从3.6 MPa增加到4.5 MPa,提升了25.0%,7 d压缩模量从7.4 MPa增加到9.3 MPa,提升了25.7%;因此,添加水泥掺量对未添加减水剂组的早期压缩模量增韧效应显著。对于流态固化

土的压缩系数,则可以显著发现7%水泥+1%膨胀剂组的3 d及7 d压缩系数显著高于其他试样,整体压缩性较强,变形效应显著。显然,高掺量水泥与减水剂组的水泥水化胶凝产物更多,颗粒间的孔隙被胶凝材料填充,土颗粒也被水化产物络合胶结,形成较强的结构,因此表现出更高的压缩模量与更低的压缩系数,抵抗变形能力更强。

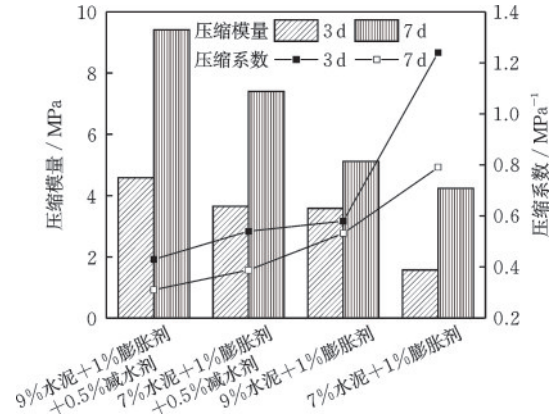


图3 各试样压缩模量与压缩系数
Fig.3 Compressive moduli and compressive coefficients of each sample

2.4 和易性

参考日本建设省《エアモルタル及びエアミルクの試験方法》^[19]方法,测定不同配比和不同含水率试样的塌落度情况,各个水泥组分别配置三种含水率工况,得到的试验结果见表3。值得说明的是,表中拌和后的土体含水率不同是基于同一原状淤泥的前提下,为研究含水率对塌落度的影响而添加拌合水配置的。四种不同配比试样的含水率和塌落度整理如图4所示。

表3 拌合后含水率与塌落度统计表

配比	拌合后土体含水率/%	塌落度/mm
5%水泥	71.9/78.5/92.1	50/155/210
6%水泥	70.2/80/90.6	50/150/210
7%水泥	68.7/80.2/89.9	50/150/200
8%水泥	69.8/79.6/91.9	40/135/195
9%水泥	71.1/81.3/89.9	30/130/185
9%水泥+1%膨胀剂+0.5%减水剂	64.6	180
7%水泥+1%膨胀剂+0.5%减水剂	65.5	185
9%水泥+1%膨胀剂	78.1	150
7%水泥+1%膨胀剂	80.2	155

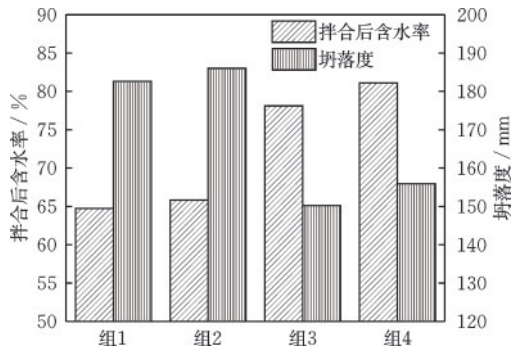


图4 不同配比试样的含水率和坍落度

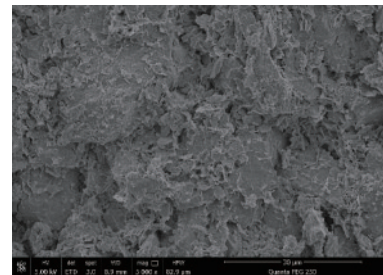
Fig.4 Water content and slump of samples with different proportions

从表中可以发现,添加水泥含量对流态固化土的拌合含水率影响较小,同样初始含水率下,5%水泥试样的拌合后含水率为71.9%,8%水泥则为69.8%;其坍落度则由50 mm下降到40 mm,下降20%。因此,仅添加水泥虽对流态固化土的强度有所提升,但其降水效果较差,且会影响流态固化土的和易性,影响其施工性能。考虑膨胀剂性能可以发现,当坍落度为150 mm时,9%水泥+1%膨胀剂组的拌合含水率为78.1%,而同样坍落度为6%水泥试样,其拌合后含水率为80%。拌合后含水率近似,但在水泥掺量显著增加的情况下,坍落度保持不变,因此,添加膨胀剂对提高流态固化土的施工性能具有一定效能。对提升流态固化土和易性最显著的添加剂为减水剂,从图4中可以看出,9%水泥+1%膨胀剂+0.5%减水剂组仅在64.6%拌合后含水率的工况下就拥有180 mm的坍落度,与其相近坍落度组的拌合后含水率为89.8%。日本建设省发布的《流动化处理工法》中明确了低强度流动材料在坍落度为180 mm±20 mm时具备良好的施工浇筑性能,图4中添加减水剂组1与组2皆满足施工条件。实际上,减水剂的加入使得颗粒孔隙率减小,用于填充孔隙的外部水量减小,因此体系内自由水量增加;同时减水剂颗粒存在分子排斥力,可以分散体系中的絮凝结构,减小颗粒摩阻力,提升材料的流动性。因此,减水剂在保证流态固化土服役性能的基础上,显著增强了其和易性,提高了其施工性能^[21]。

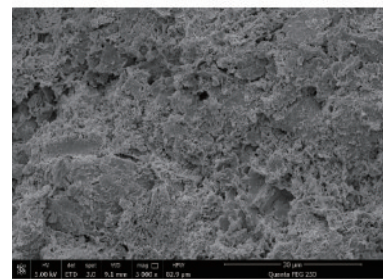
3 微观机理

采用 Hitachi Regulus 8100 扫描电子显微镜对

9%水泥+1%膨胀剂+0.5%减水剂组与9%水泥+1%膨胀剂组的7 d龄期试样微观结构扫描检测,探究其微观机理,结果如图5所示。从图5(a)中可以看出,9%水泥+1%膨胀剂组土颗粒为简单疏松的片状、粒状堆积,并且内部有较多显著孔洞未被水化产物填充,宏观性能上则反映出其抗压强度较差,较多的内部孔隙也决定了其渗透系数与压缩系数较高。而对比9%水泥+1%膨胀剂+0.5%减水剂组的电镜图(5(b)),可以发现试样内部存在大量水化反应生成的水化硅酸钙凝胶(C-S-H),并且其位置分布较无减水剂组更为致密,呈现树枝分叉状分布。这些C-S-H将土颗粒相互胶结、链接并填充土颗粒间孔隙,使孔隙在数量和体积上都有所减小,并最终与土颗粒一起组成了能够抵抗外部压力的骨架状结构,具备良好的支撑效应。这与许多学者的研究结果相吻合^[22-23]。因此在宏观性能上,表现出更好的抗压强度,同时由于致密的内部结构,流态固化土表现出的整体孔隙率更低,材料的抗渗性能更好,同时抵抗变形能力也更为优越。



(a) 9%水泥+1%膨胀剂



(b) 9%水泥+1%膨胀剂+0.5%减水剂

图5 不同试样SEM电镜结果

Fig.5 SEM results of different samples

4 现场试验

依托宁波西洪大桥某管廊回填工程,管廊位于通途路北侧,主要以明挖为主,断面尺寸7.30 m(B)×3.85 m(H),基坑开挖深度一般为5.4~6 m左右,设计如图6所示。管廊底部4 m深度采用相关

技术进行地基处理,明挖施工段管廊顶面覆土厚度一般3.0 m左右,需对管廊进行回填工作。原定方案为外购灰土回填,现结合室内试验结果,修改为液态固化土管廊回填。本工程建设开挖过程中将产生大量弃土,供需矛盾突出。若能减少工程弃土产生,并将产生的弃土再生利用,将具备显著的社会、环境及经济效益。因此,结合上述试验结果,依

托本工程开展了管廊液态固化土的应用研究,现场试验如图7所示。设置5%石灰+3%水泥+1%矿粉灰土与9%水泥+1%膨胀剂+0.5%减水剂液态固化土两组实验,灰土水灰比为0.24,液态固化土水灰比为0.6。现场回填完成后,取芯对灰土和液态固化土进行7 d无侧限抗压强度、压实度试验,得到的试验结果见表4。

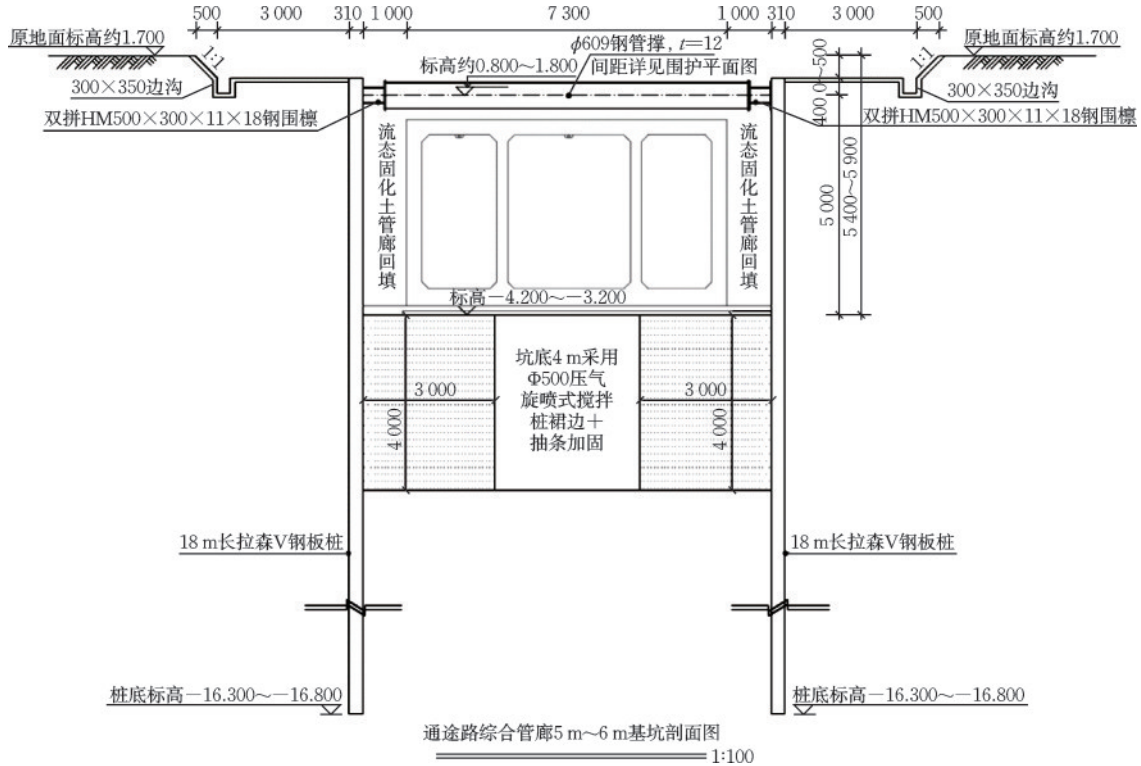


图6 管廊回填设计图

Fig.6 Pipeline corridor backfill design



图7 现场试验图

Fig.7 Field test

表4 试验段固化土7 d强度

Table 4 7 d UCS of solidified soil in test section

土类	配比	抗压强度/MPa	压实度/%
灰土	5%石灰+3%水泥+ 1%矿粉	0.584 0	96.2
液态 固化土	9%水泥+1%膨胀剂+ 0.5%减水剂	0.610 4	77.3

从结果可以发现,回填后现场取样的液态固化土抗压强度相比室内试验结果有所降低,材料服役性能显著下降,7 d UCS下降了53.7%。压实度方面,液态固化土仅为77.3%,与设计要求相差较大,而灰土则可以较好的满足规范要求。实际上液态固化土的强度并非由土颗粒的密实度来提供,而是由固化剂胶结骨料颗粒形成的结构形式提供的。本文中压实度测试中使用的最大干密度是通过击实试验测得,其原理是土颗粒达到自身饱和密实度,土体承载力提高,与液态固化土强度提供原理不同,故不建议将压实度作为液态弃土固化的质量控制指标;相较而言,无侧限抗压强度更适合作为液态弃土固化的质量控制指标。根据表4结果可知,在满足工程和施工要求的情况下,液态固化土UCS比灰土高4.6%,显然液态固化土更适用于本

试验段应用。

试验段原状土、回填后的灰土、流态固化土的竖向渗透系数见表5。虽然灰土的渗透系数和灰土比普遍小于流态固化土,但两者相对原状土均有大幅度的降低;随龄期增加,灰土和流态固化土的渗透系数均有显著降低。相较流态固化土渗透系数室内试验结果,现场取芯试验的7 d流态固化土渗透系数上升了109.1%,存在较大差异,这可能是由于施工质量、取芯不当等因素导致。

表5 试验段固化土渗透系数

Table 5 Permeability coefficient of solidified soil in test section

土类	配比	龄期/d	竖向渗透系数/ ($10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
灰土	5%石灰+3%水泥+ 1%矿粉	3	1.56
		7	0.49
流态 固化土	9%水泥+1%膨胀剂+ 0.5%减水剂	3	2.41
		7	0.92

5 结 论

(1) 减水剂能在保证流态固化土强度、压缩性能与渗透性等服役性能的基础上,有效提升其和易性,提高施工性能。从微观结构来看,添加减水剂组的内部C-S-H将形成更为致密的网状络合结构链接,提高其服役性能。

(2) 相较添加水泥掺量,添加少量减水剂就可以显著提升流态固化土的强度与压缩性能;相较而言,减水剂对渗透系数的影响并没有水泥显著。

(3) 依托现场施工情况,验证了新配比的实施效果。现场回填后9%水泥+1%膨胀剂+0.5%减水剂流态固化土的7 d无侧限抗压强度达0.61 MPa,抗渗性能大幅提高,固化效果显著。

(4) 回填后现场取样的流态固化土抗压强度与渗透系数相比室内试验结果有显著下降,各项指标约下降50%。由于流态固化土和灰土强度的施工方式存在差异,不建议将压实度作为流态固化土的质量管控指标。

参考文献:

[1] 牛恒,孙德安,阮坤林.掺粉煤灰和二灰上海软土的力学特性[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):992-1000.

Niu H, Sun D A, Ruan K L. Mechanical properties of shanghai soft clay mixed with fly-ash and lime fly-ash [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6):992-1000. (in Chinese)

[2] 闭东民,孔纲强,陈庚,等.废弃口罩加筋固化土的强度特性与破坏模式[J].防灾减灾工程学报,2022,42(5):993-998,1009.

Bi D M, Kong G Q, Chen G, et al. Strength characteristics and failure mode of solidified soil reinforced by waste masks [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 993-998, 1009. (in Chinese)

[3] 刘青云,李华安,孙信誉,等.钢渣型复合基材在浅层软土固化中的应用[J].防灾减灾工程学报,2020,40(5):811-817.

Liu Q Y, Li H A, Sun X Y, et al. Application of steel slag composite in in-situ solidification of shallow soft soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(5):811-817. (in Chinese)

[4] 周永祥,霍孟浩,侯莉,等.低强度流态填筑材料的研究现状及展望[J].材料导报,2024,38(15):23040087.

Zhou Y X, Huo M H, Hou L, et al. Current research and prospect of low strength flowable filling materials [J]. Materials Reports, 2024, 38(15): 23040087. (in Chinese)

[5] Su Y, Yan N, Bai X Y, et al. Research progress and application on engineering characteristics of ready-mixed fluid solidified soil[J]. Materials Reports, 2024, 38(9): 23070212.

[6] Yan D Y S, Tang I Y, Lo I M C. Development of controlled low-strength material derived from beneficial reuse of bottom ash and sediment for green construction [J]. Construction and Building Materials, 2014, 64: 201-207.

[7] 丁建文,洪振舜,刘松玉.疏浚淤泥流动固化处理与流动性试验研究[J].岩土力学,2011,32(增1):280-284.

Ding J W, Hong Z S, Liu S Y. Study of flow-solidification method and fluidity test of dredged clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (Sup1): 280-284. (in Chinese)

[8] 顾欢达,陈甦.河道淤泥的流动化处理及其工程性质的试验研究[J].岩土工程学报,2002,24(1):108-111.

Gu H D, Chen S. Engineering properties of river sludge and its stabilization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (1): 108-111. (in Chinese)

[9] Folliard K J, Du L, Trejo D, et al. Development of a recommended practice for use of controlled low-strength

- material in highway construction[R]. [S.l.]: NCHRP report 597, 2008.
- [10] Duritsch D W. The use of non-toxic spent foundry sand into controlled low-strength materials in Ohio[D]. [S.l.]: The Institute of Advanced Manufacturing Sciences, 1993.
- [11] Qian J S, Hu Y Y, Zhang J K, et al. Evaluation the performance of controlled low strength material made of excess excavated soil[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214:79-88.
- [12] Raavi A K. Design of controlled low strength material for bedding and backfilling using high plasticity clay [D]. Arlington: The University of Texas, 2012.
- [13] Bheemasetti T V, Puppala A J, Zou H, et al. Quality assurance method for assessment of stiffness of pipeline bedding material[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28 (4): 04015160.
- [14] Sheen Y N, Zhang L H, Le D H. Engineering properties of soil-based controlled low-strength materials as slag partially substitutes to Portland cement[J]. Construction Building and Materials, 2013, 48 (11): 822-829.
- [15] 王丽筠,孙伟东,文劲博.预拌流态固化土在深基坑回填工程中应用[J].建筑技术, 2021, 52(4):460-461.
Wang L Y, Sun W D, Wen J B. Application of pre-mixed liquid solidified soil in deep foundation pit backfill project [J]. Architecture Technology, 2021, 52 (4): 460-461. (in Chinese)
- [16] 张超,王立根.基槽用固化土回填施工技术[J].价值工程, 2018, 37(10):136-139.
Zhang C, Wang L G. Backfill construction technology of solidified soil for foundation trench[J]. Value Engineering, 2018, 37(10):136-139. (in Chinese)
- [17] 刘旭东.预拌流态固化土技术在地下综合管廊基槽回填工程中的应用[J].建筑技术开发, 2018, 45(4): 61-62.
- Liu X D. Application of ready-mixed fluid stabilized soil technique in foundation trench backfill construction of underground comprehensive pipe[J]. Building Technology Development, 2018, 45(4):61-62. (in Chinese)
- [18] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社, 2019.
- [19] 木幡行宏. 流動化处理土の力学特性と今後の課題 [J]. 土木学会論文集 F, 2006, 62(4): 618-627.
- [20] 张文生,王宏霞,叶家元.聚羧酸类减水剂对水化硅酸钙微观结构的影响[J].硅酸盐学报, 2006, 34(5): 546-550.
Zhang W S, Wang H X, Ye J Y. Effect of polycarboxylate-type superplasticizer on microstructure of calcium silicate hydrates[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(5): 546-550. (in Chinese)
- [21] 杨卫东,黎冰,马文昊.降低气泡混合轻质土吸水性的试验研究[J].防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 1061-1068.
Yang W D, Li B, Ma W H. Experimental study on reducing water absorption of air-foam treated lightweight soil [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 1061-1068. (in Chinese)
- [22] 邓永锋,吴子龙,刘松玉,等.地聚合物对水泥固化土强度的影响及其机理分析[J].岩土工程学报, 2016, 38(3): 446-453.
Deng Y F, Wu Z L, Liu S Y, et al. Influence of geopolymer on strength of cement-stabilized soils and its mechanism [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(3): 446-453. (in Chinese)
- [23] 赵庆新,才鸿伟,安赛,等.水泥-磨细矿渣固化滨海盐渍土强度及机理[J].建筑材料学报, 2020, 23(3): 625-630.
Zhao Q X, Cai H W, An S, et al. Strength and mechanism of stabilized coastal saline soil by cement and fine slag [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23 (3): 625-630. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)