

冬季早强型流态固化土研究与工程应用

查行健¹ 夏涛² 刘文化^{3*}

- 1.南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210000
- 2.纳思同(江苏)高科技发展有限公司, 江苏 无锡 214000
- 3.江南大学 纤维工程与装备技术学院, 江苏 无锡 214000

[摘要]流态固化土在回填工程中具有流动性好、抗渗优等优势,但冬季低温环境严重制约其早期硬化。本文旨在开发冬季早强型流态固化土,对比了水泥(OPC)和WFS(工业固废复合固化剂)在25℃和5℃下对流态土流动度、7d/28d无侧限抗压强度及渗透系数的影响。研究发现,WFS体系流动性更佳。5℃低温显著抑制 OPC 固化土的强度发展和抗渗性能,而 WFS 固化剂凭借其复合组分,在低温下仍能保持良好的早强、后期强度及优异的抗渗特性。结论表明,WFS 固化剂是实现冬季早强型流态固化土的关键,为冬季流态土施工提供了有效解决方案。

[关键词]冬季施工;流态固化土;流动度;无侧限抗压强度;渗透系数

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18339

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Research and Engineering Application of Winter Early-strength Flowable Solidified Soil

ZHA Xingjian¹, XIA Tao², LIU Wenhua^{3*}

1. School of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu, 210000, China
2. Leistung (Jiangsu) High-tech Development Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China
3. School of Fiber Engineering and Equipment Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu, 214000, China

Abstract: Flowable solidified soil offers advantages such as excellent flowability and superior impermeability in backfill engineering, but its early hardening is severely constrained by low winter temperatures. This study aims to develop a winter-early-strength flowable solidified soil system. It compares the effects of ordinary Portland cement (OPC) and WFS (industrial solid waste composite solidifier) on the flowability, 7-day/28-day unconfined compressive strength, and permeability coefficient of fluidized soil at 25℃ and 5℃. The study reveals that the WFS system exhibits superior fluidity. At 5℃, low temperatures significantly inhibit the strength development and impermeability of OPC-stabilized soil. In contrast, the WFS stabilizer, leveraging its composite components, maintains excellent early strength, late strength, and outstanding impermeability even under low-temperature conditions. The conclusions indicate that the WFS stabilizer is key to achieving winter-grade early-strength fluid-stabilized soil, providing an effective solution for winter fluid soil construction.

Keywords: winter construction; flowable stabilized soil; flowability; unconfined compressive strength; permeability coefficient

引言

流态固化土(以下简称“流态土”)是近年来在回填工程领域得到广泛关注的一类新型材料,该材料以工程渣土、弃土、淤泥或工程泥浆为主材,配以适量水和固化剂,经搅拌制备成具有一定流动性的浆体^[1]。与传统回填材料相比,流态土具有施工流动性好、抗渗性能高、匀质性较佳、整体施工成本较低等突出优势,能够有效提升回填质量与施工效率,因而在市政工程、地下工程及管线回填等领域的应用前景十分广阔^[1-2]。

现有关于流态土的研究主要集中在两个方面:其一是流态土浇筑阶段的流动性及固化后的力学性能。根据不同工程

工况,对材料拌合物的流动性能和硬化后强度提出了不同要求,如何在流动性与强度之间实现合理平衡,是该类材料设计与应用的关键问题之一^[3];其二是流态固化剂体系的优化与创新。传统水泥基固化体系存在环境负担较重、在高含水率条件下强度发展受限等问题^[4],促使学界和工程界积极探索多元固废基固化剂在流态土中的应用路径。已有研究表明^[5],以粒化高炉矿渣粉、脱硫粉煤灰、脱硫石膏等工业固废为主要原料,并掺入一定比例水泥所制备的固化剂,可用于制备满足一般回填工程强度要求的流态固化黄土;也有学者对不同赤泥和钢渣粉掺量下流态固化土的工作性能、抗压强度、电化学阻抗谱和微观结构进行了系统研究^[6];此外,研

究还表明,合理掺加减水剂不仅有助于降低水灰比、改善施工和易性,还能显著提高流态土的强度与抗渗等服役性能指标,从而进一步拓展其工程适用性^[7-8]。

然而,在实际工程条件下,流态土在冬季施工过程中面临与混凝土类似的问题^[9]:低温环境显著减缓其硬化速度和强度增长速率,且一旦在早期受冻,往往会对材料的耐久性产生不利影响。这不仅制约了冬季施工进度,也对工程质量控制提出了严峻挑战。迄今为止,有关流态土在低温条件下强度发展规律的系统研究仍然相对匮乏,特别是针对冬季工况下早期快速增强调控的研究尚不完善。

基于此,本文以冬季早强型流态固化土为研究对象,围绕其材料设计、早期强度发展特性及工程应用效果展开系统研究,旨在揭示低温条件下流态土早期强度发展的影响机理与控制规律,为解决行业冬季流态土施工中存在的强度发展缓慢、易受冻害等难点痛点问题提供理论依据与工程技术支撑。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

(1) 土样: 试验土样取自无锡某工地,属于高液限黏土,土样初始含水率(w)、塑限(w_p)、液限(w_L)、塑性指数(I_p)等土工参数见表1,土样粒径分布曲线见图1。XRD图谱见图2,由图2可知,土样主要矿物成分为石英、蛭石、白云母、微斜长石和钠长石等。

(2) 固化材料: 选用市售天山P·O 42.5水泥(简称: OPC)和冬季流态土固化剂(简称: WFS)开展固化试验,其中WFS是以具有活性硅铝组分的工业固废为主要原材料(包括钢渣、赤泥、粉煤灰、矿粉等),复配一定量的硫铝酸盐水泥、活性激发剂以及复合早强防冻组分,两种固化材料的化学组成如表2所示。

表1 土样基本参数

土性	w /%	w_p /%	w_L /%	I_p
高液限黏土	46.5	23.4	52.9	29.5

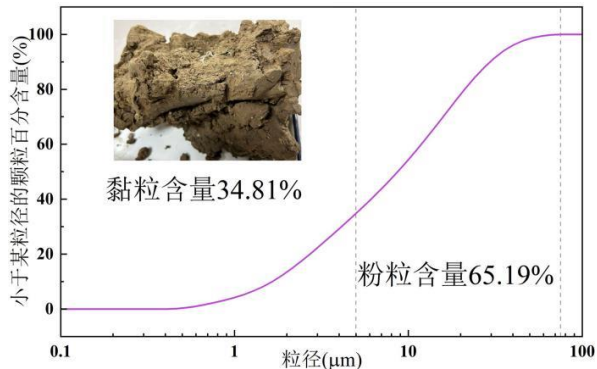


图1 工地黏土粒径分布

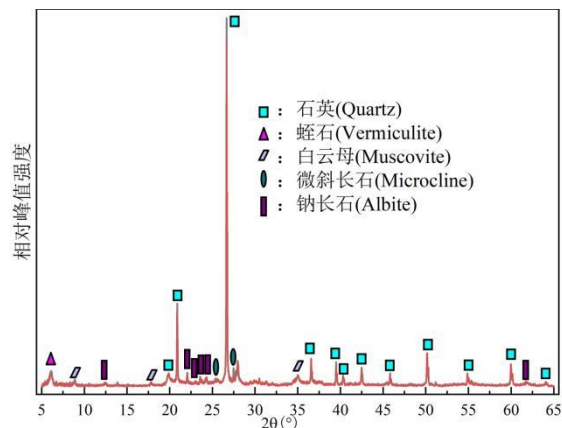


图2 工地黏土 XRD 图

表2 固化材料的氧化物组成(单位: %)

材料	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	LOI
OPC	63.8	21.1	4.1	2.3	3.2	2.1	2.9
WFS	42.8	19.9	16.4	3.4	0.8	14.5	2.2

1.2 试验方案

为了探究 OPC 和 WFS 在不同工况下对工地黏土的流态固化效果,设置了3种固化剂掺量,3种含水率,2种养护温度,试验配合比如表3所示,试样命名方式为“固化材料-掺量”,例如“OPC-10”表示在泥浆中掺入10%的 OPC。

表3 试验配合比

固化材料	固化剂掺量/%	泥浆含水率/%	养护温度
OPC	10、12、15	100、120、150	5℃、25℃
WFS			

试验方法: 将原状土加定量水搅拌调成三种含水率(100%、120%、150%)的泥浆后,分别按泥浆质量的10%、12%、15%加入 OPC 和 WFS,在搅拌机中搅拌均匀后立即参照现行行业标准 JG/T 266—2011《泡沫混凝土》中规定采用 $\varnothing 80\text{mm} \times 80\text{mm}$ 圆柱桶进行流态土的流动度测试。将拌合好的流态土倒入 $70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm}$ 的三联试模中,轻微振捣排出气泡后表面覆上 PVC 膜放入温度可调的养护柜中。参考规范 JGJ/T 233—2011《水泥石灰配合比设计规程》进行无侧限抗压强度(UCS)测试,参照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行渗透试验。

2 结果与讨论

2.1 流动性

图3为 OPC 组和 WFS 组在不同含水率及掺量条件下流态土的流动度试验结果。由图3可见,流态土的流动度随含水率的增加呈显著上升趋势,这主要是由于水分增加使混合料体系黏度降低、内摩阻力减小,从而提

升了拌合物的流动性能。当含水率由 100%提高至 150%时, 各组试样的流动度均明显增大, 增长幅度约为 80~150mm。

从固化剂种类来看, WFS 组的流动度整体高于同掺量下的 OPC 组。这主要是因为 WFS 固化剂的吸水作用较弱, 使得体系中可自由流动的水分更多, 从而提高了流动度。相比之下, OPC 在拌合初期易发生水化反应并吸附部分自由水, 导致流动度略有降低。就固化剂掺量而言, 随掺量从 10%增加至 15%, 两种固化体系的流动度均呈下降趋势。原因在于固化剂掺量增加使浆体中固体颗粒比例上升、浆体黏度增大, 限制了拌合物流动性。综合来看, 含水率对流态土流动度的影响最为显著, 其次为固化剂掺量; 固化剂类型也存在一定差异。WFS 固化剂在相同条件下表现出更好的流动性能, 说明其拌合体系更适用于对流动性要求较高的冬季施工场景。

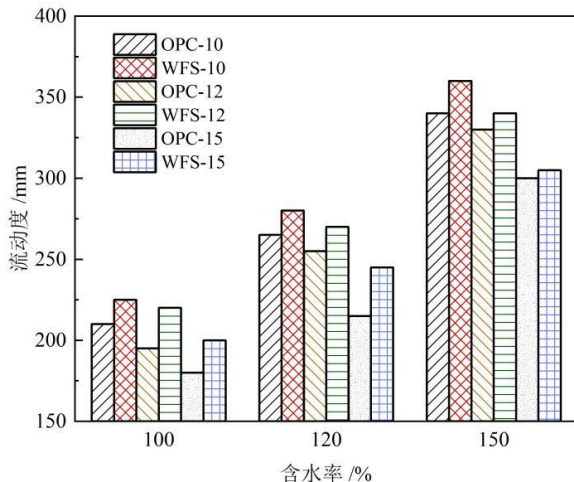


图 3 OPC 组和 WFS 组在不同掺量和不同含水率下的流动度

2.2 无侧限抗压强度

图 4 为在 25℃和 5℃条件下 OPC 组和 WFS 组的 7dUCS 随含水率和固化剂掺量变化的结果。总体而言, 无论固化剂类型、掺量如何, 流态土的 7dUCS 均随含水率的增加而显著下降。这主要是由于高含水率使得固化土内部形成更多的孔隙, 固化剂颗粒和土颗粒之间的距离增大, 导致胶结作用的连续性和密实性降低, 从而削弱了固化土的整体承载能力。

温度对流态土的 7dUCS 具有显著影响。就 OPC 组而言, 5℃下的强度远低于 25℃下的强度, 且在 5℃下掺量增加对强度的提升作用有限。例如, 在含水率 100%时, OPC-10 在 25℃下强度可达 0.75 MPa, 但在 5℃下仅为 0.2MPa 左右; 当掺量增至 15%时, 25℃下 OPC-15 强度可达 1.1MPa, 而 5℃下仅为 0.25MPa。这主要是因为低温

环境会显著抑制水泥水化反应的速率和程度, 导致胶凝物质生成缓慢, 从而严重影响 OPC 固化土的早期强度发展。相反, 对于 WFS 组, 5℃下的强度与 25℃下的强度差异相对较小。例如, 在含水率 100%、掺量 15%时, WFS-15 在 25℃下的强度约为 1.25MPa, 而在 5℃下也能达到 1.15MPa。这表明 WFS 固化剂在低温环境下仍能保证反应的持续进行, 其固化机制对温度的敏感性较低, 使其在低温条件下仍能有效发挥固化作用。

综上所述, 含水率是影响流态固化土 7dUCS 的首要因素, 应在满足流动性要求的前提下, 尽量控制较低的含水率以保证强度。其次, 固化剂类型对强度具有决定性影响, WFS 固化剂在低温环境下表现出更优秀的早强性能。固化剂掺量的优化对于 WFS 体系而言是有效的强度提升手段, 但对于 OPC 体系则受限于温度影响。

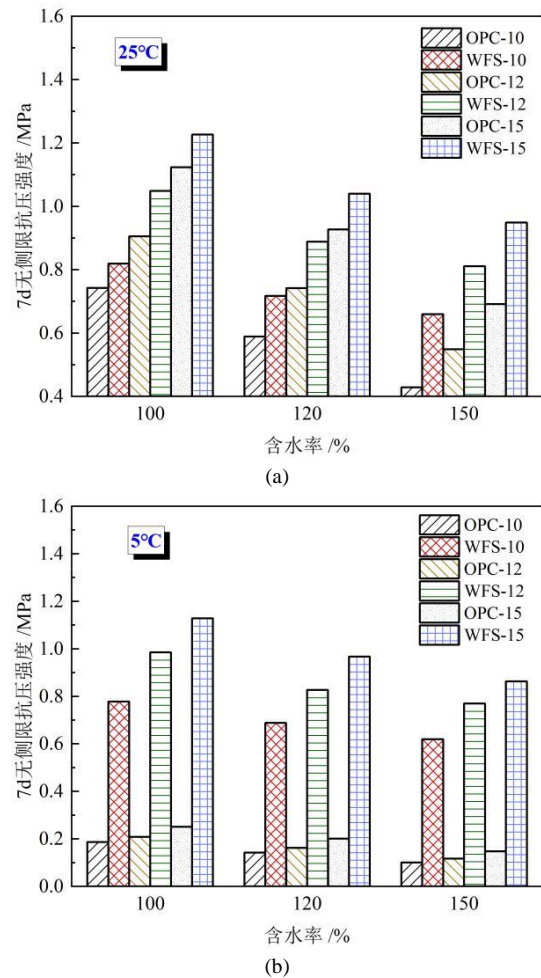


图 4 (a)25℃和(b)5℃条件下 OPC 组和 WFS 组的 7d 无侧限抗压强度

图 5 为当泥浆含水率 120%时, OPC 组和 WFS 组在 25℃和 5℃环境中的 7d 和 28dUCS 试验结果。从图 5 可以看出, 无论是 25℃还是 5℃环境, 所有试样的 28dUCS

均高于 7dUCS，表明流态固化土的强度随龄期延长持续发展，这符合胶凝材料的普遍特性，即水化反应或火山灰反应在早期快速进行，并随着龄期延长而持续，生成更多的胶凝产物，形成更致密的结构，从而不断提高固化体的强度。

温度对流态固化土的强度发展具有决定性影响，尤其体现在不同固化剂体系的早期强度(7d)和后期强度(28d)上。 5°C 低温对 OPC 组的强度发展具有极强的抑制作用。在 5°C 下，OPC-10 的 7d 强度仅为 0.15MPa，28d 强度也仅为 0.23MPa。即使掺量增至 15%，7d 和 28d 强度也分别仅为 0.2MPa 和 0.3MPa 左右。与 25°C 下的相应强度相比， 5°C 下的 OPC 组强度显著降低。这主要是因为普通硅酸盐水泥的水化反应速率对温度高度敏感，低温显著减缓了硅酸钙的水化过程，导致早期胶凝产物形成缓慢且数量不足，从而严重影响了其早期及后期强度的形成。相比之下，WFS 组在 5°C 低温下的强度表现出优异的性能，其 7d 和 28d 强度均远高于同等条件下的 OPC 组。例如，在 5°C 下，WFS-10 的 7d 强度可达 0.68 MPa，28d 强度达到 1.1MPa；WFS-15 的 7d 强度更是高达 0.98MPa，28d 强度接近 1.5MPa。尽管 5°C 下的 WFS 组强度略低于 25°C ，但这种差异远小于 OPC 组。WFS 固化剂以活性硅铝组分的工业固废为主要原材料，并复配了硫铝酸盐水泥、活性激发剂以及复合早强防冻组分。这些成分的协同作用，尤其是硫铝酸盐水泥的快硬早强特性、活性激发剂对工业固废火山灰活性的激发，以及早强防冻组分在低温下的促凝和抗冻能力，使得 WFS 固化剂在低温环境下仍能有效地进行胶凝反应，保障了流态固化土的早期和后期强度发展，展现出明显的冬季早强特性。在 5°C 低温下，WFS 固化剂的强度优势更为显著，其复合组分有效克服了单一 OPC 在低温下水化受阻的难题。

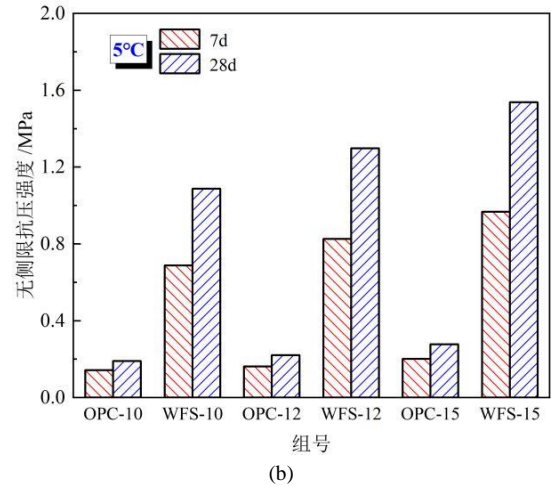
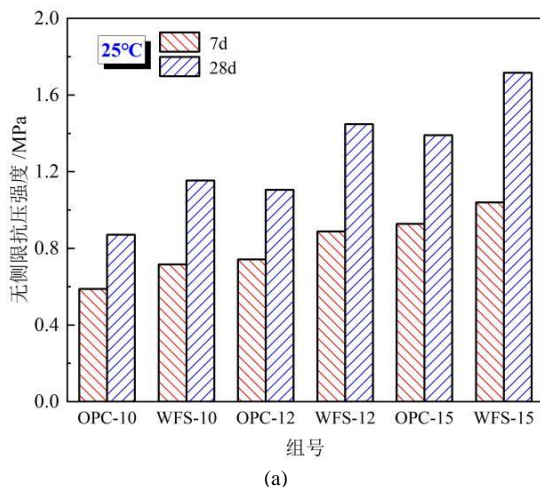


图5 (a) 25°C 和(b) 5°C 条件下 OPC 组和 WFS 组的 7d 和 28d 无侧限抗压强度

2.3 渗透系数

渗透系数是评价固化土水力特性的重要指标，反映了其抵抗水渗透的能力，与固化体的孔隙结构、密实度及胶凝程度密切相关。图 6 为在泥浆含水率 120%条件下，OPC 组和 WFS 组在 25°C 和 5°C 环境中 7d 和 28d 的渗透系数试验结果。整体而言，所有试样的 28d 渗透系数均低于其 7d 渗透系数。这表明随着固化龄期的延长，固化土内部的胶凝反应持续进行，生成更多的水化产物和凝胶体，这些产物填充了土颗粒间的孔隙，形成连续的胶结网络，从而降低了孔隙率、减少了连通孔隙的数量和尺寸，使得固化土的密实度增加，有效阻止了水的渗透，渗透系数随之降低。

温度对流态固化土的渗透系数具有显著影响，尤其是在不同固化剂体系中表现出巨大差异。 5°C 低温对 OPC 固化土的渗透系数产生了严重的负面影响。在 5°C 下，OPC-10 的 7d 渗透系数高达 $4.9 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，28d 渗透系数为 $3.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。即使掺量增至 15%，7d 和 28d 渗透系数也分别达到了 $2.8 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 和 $2.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。与 25°C 常温下 OPC 体系 $0.7 \sim 0.8 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 的渗透系数相比， 5°C 环境下的渗透系数高出近一个数量级。这主要是由于低温严重抑制了普通硅酸盐水泥 (OPC) 的水化反应，导致早期胶凝产物生成不足，孔隙填充不充分，固化结构疏松，从而大大增加了水流通道，使得渗透系数急剧升高。相比之下，WFS 固化体系在 5°C 低温下的渗透系数表现出显著的优势。在 5°C 下，WFS-10 的 7d 渗透系数为 $0.98 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，28d 渗透系数为 $0.6 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ；WFS-15 的 7d 渗透系数仅为 $0.65 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ，28d 渗透系数为 $0.45 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。这些数值与 25°C 常温下的 WFS 组渗透系数 ($0.5 \sim 0.8 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$)

处于同一量级,并且远低于低温下的 OPC 体系。WFS 固化剂中硫铝酸盐水泥的快硬特性和复合早强防冻组分在低温下的促凝、抗冻作用,能够有效抵御低温对水化和胶凝反应的抑制。同时,工业固废的火山灰活性在激发剂作用下,能够持续填充和胶结土颗粒间的孔隙,形成更为致密、连续的固化结构,从而有效地降低了低温环境下的渗透系数。

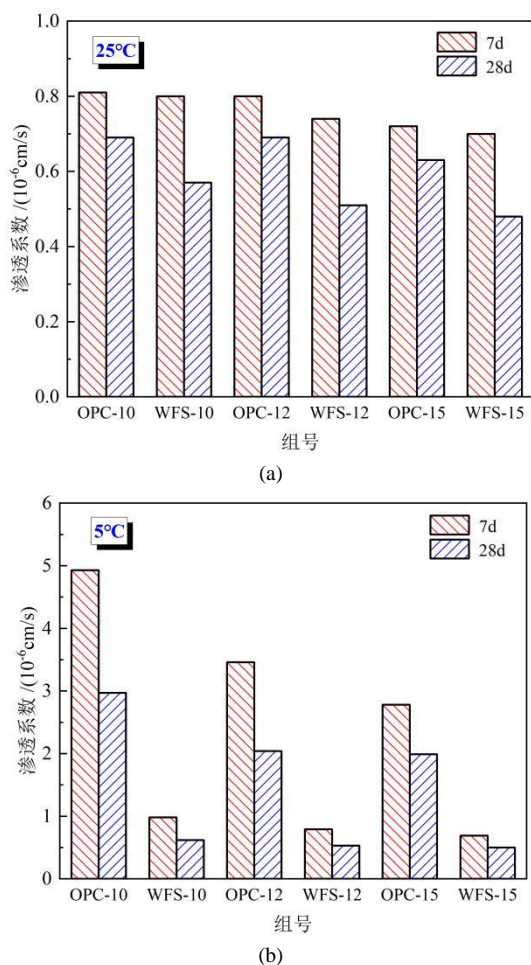


图6 (a)25°C和(b)5°C条件下 OPC 组和 WFS 组的 7d 和 28d 渗透系数

3 工程应用

依托无锡市某管廊回填项目,深度 2m,宽度 1~2m,采用传统灰土回填难以压实,故选用流态土回填工艺,项目要求流态土 28d 无侧限抗压强度达到 1MPa 以上。根据以上试验结果,项目采用 12% 掺量 WFS 固化剂进行流态土制备。将成品流态土用水泥罐车运输至现场,直接浇筑。流态土由于具有高流动性可以实现自流平、自密实,施工便捷。浇筑完成后表面覆一层塑料膜防止失水开裂。项目处于冬季施工,温度为 5~10°C,在浇筑完 1d 后表面硬化,达到可以上人强度,现场情况如图

7 所示。

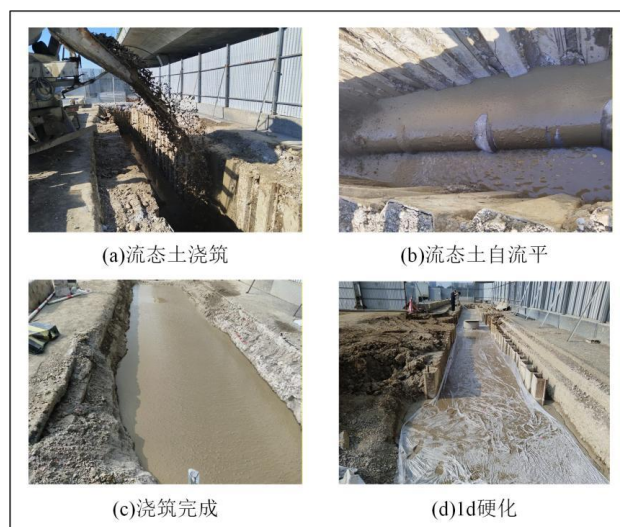


图7 项目现场图

项目现场进行泥浆含水率测试,流态土流动度测试,成型伴随件现场养护,测试 7d 和 28d 无侧限抗压强度(UCS),试验结果见表 4。现场含水率为 126%,275mm 流动度保证流态土能够长距离流动且自流平。现场伴随件强度略低于实验室试验结果,这主要是由于现场施工时难以保证泥浆和固化剂充分搅拌均匀。该项目在冬季施工使用 WFS 固化剂的固化效果达到项目设计指标。

表4 项目现场试验结果

试验项目	含水率/%	流动度/mm	7dUCS/MPa	28dUCS/MPa	28d 渗透系数/(10 ⁻⁶ cm/s)
试验结果	126	275	0.81	1.23	0.59

4 结语

(1) 流动度特性:流态土的流动度随含水率增加而显著提升,随固化剂掺量增加而降低。WFS 固化剂体系的流动度整体优于 OPC 体系,这对于冬季施工中保持良好的可泵送性和自流平性具有重要意义。

(2) 强度发展规律:固化土强度随龄期延长持续发展,并随含水率增加而显著下降。温度对强度的影响巨大,OPC 固化土在 5°C 下的 7d 和 28d 强度均受到严重抑制,远低于 25°C 强度。相比之下, WFS 固化剂在 5°C 下仍能保持良好的强度发展,其强度值与 25°C 强度相近,且远高于同等条件下的 OPC 体系,充分展现了其优异的冬季早强特性。WFS 固化剂掺量的增加能有效提升强度,而 OPC 掺量增加在低温下对强度提升作用有限。

(3) 渗透特性:固化土渗透系数随龄期延长而降低,并受温度影响显著。5°C 导致 OPC 固化土的渗透系数急剧

升高,结构疏松。而 WFS 固化剂在 5℃下仍能维持较低的渗透系数,其抗渗性能远优于 OPC 体系,表明 WFS 在低温环境下能形成更致密的固化结构。WFS 掺量的增加有助于进一步降低渗透系数。

[参考文献]

- [1]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):130-138.
- [2]吴文庆.肥槽回填施工中流态固化土技术的应用研究[J].新城建科技,2025,34(9):166-168.
- [3]胡秋辉,罗强,张良,等.基于水膜厚度理论的流态固化土流动性能试验分析[J].浙江大学学报(工学版),2025,59(7):1344-1352.
- [4]苏悦,闫楠,白晓宇,等.预拌流态固化土的工程特性研究进展及应用[J].材料导报,2024,38(9):66-72.
- [5]肖杰,刘静,向家骏,等.流态多源固废固化黄土固化剂配比优化及强度形成机理[J].中国公路学报,2025,38(3):250-263.
- [6]王聪聪,刘茂青,宋红旗,等.赤泥-钢渣粉-水泥固化流态土性能试验研究[J].硅酸盐通报,2023,42(7):2488-2496.
- [7]王明,刘振忠,薛泽,等.流态固化土基本物理力学性能试验与应用研究[J].防灾减灾工程学报,2025,45(4):941-948.
- [8]赫明胜,秦庆金,高慧,等.减水剂对镁渣-粉煤灰基流态固化土流变性及强度的影响[J].硅酸盐通报,2025,44(7):2710-2719.
- [9]张占宇,李岩,陆云涛.低温施工对混凝土性质影响综述[J].科技创新与应用,2022,12(30):165-168.

作者简介:查行健(2005—),男,汉族,江苏扬州人,本科,研究方向:固化土材料与施工技术;*通讯作者:刘文化(1987—),男,汉族,江西吉安人,博士,副教授,研究方向:固废资源化利用。