

基于响应面法的碱-硫酸根激发淤泥流态固化土性能影响分析

张玲^{1,2†}, 叶虔江^{1,2}, 周智游^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:将淤泥弃土处理成流态固化土是其变废为宝、资源化利用的新途径。本研究评估了碱-硫酸根复合激发水泥基固化剂在淤泥流态固化土中的应用性能,通过响应面中心组合法(CCD),深入揭示了水固比和固化剂掺量对流动度、无侧限抗压强度和水稳系数的作用机制,并结合细观孔隙结构演化阐明其强化机理。研究表明,流动度随水固比和固化剂掺量的增加呈线性叠加提升趋势;水稳性系数与水固比呈负相关关系,而与固化剂掺量呈正相关,但固化剂掺量的提升效应随掺量增加逐渐减弱;在强度发展规律方面,早期强度受水固比与固化剂掺量的协同作用控制,而中长期强度(≥ 7 d)则主要由固化剂掺量单一主导。降低水固比或提高固化剂掺量有助于固化土内部形成致密的凝胶网络结构,显著提升无侧限抗压强度。基于 CCD 法建立的模型预测值与试验值高度吻合($R^2 > 0.94$),验证了模型的可靠性。多目标优化结果表明,当水固比为 0.87、固化剂掺量为 12.1% 时,流态固化土不仅满足路基工程基本要求:流动度 > 80 mm、28 d 无侧限抗压强度 > 1.0 MPa、水稳系数 ≥ 0.8 ,而且各龄期强度也可得到充分发展。

关键词:固化;淤泥;碱-硫酸根复合激发;响应面法;细观特性

中图分类号:TU473

文献标志码:A

Performance Analysis of Alkali-sulfate Activated Sludge Fluid Solidified Soil Based on Response Surface Methodology

ZHANG Ling^{1,2†}, YE Qianjiang^{1,2}, ZHOU Zhiyou^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Transforming sludge into fluid solidified soil is a novel approach for recycling waste material into treasure and resource utilization. This study aims to evaluate the application performance of an alkali-sulfate activated cementitious curing agent in fluid solidified soil. Using the central composite design (CCD) method, the study elucidates the mechanisms by which water-to-solid ratio and curing agent dosage affect the fluidity, unconfined compressive strength, and water stability coefficient. It also explores the underlying strengthening

* 收稿日期:2024-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378340), National Natural Science Foundation of China(52378340)

作者简介:张玲(1982—),女,浙江临海人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail: zhanglhd@163.com

mechanisms through the evolution of the meso-pore structure. The results indicate that fluidity increases linearly with higher water-to-solid ratios and curing agent dosages. The water stability coefficient negatively correlates with the water-to-solid ratio but positively correlates with the curing agent dosage, although the positive effect diminishes with increasing dosage. In terms of strength development, early-age strength is controlled by the combined effects of water-to-solid ratio and curing agent dosage, while mid- to long-term strength (≥ 7 d) is primarily dominated by curing agent dosage alone. Lowering the water-to-solid ratio or increasing the curing agent dosage promotes the formation of a dense gel network within the solidified soil, significantly enhancing the unconfined compressive strength. The models established based on CCD show high consistency between predicted and experimental values ($R^2>0.94$), confirming the reliability of the models. Multi-objective optimization results reveal that when the water-to-solid ratio is 0.87 and the curing agent dosage is 12.1%, the fluid solidified soil not only meets the basic requirements for subgrade engineering (fluidity >80 mm, 28 d unconfined compressive strength >1.0 MPa, water stability coefficient ≥ 0.8), but also achieves full development of strength across all ages.

Key words: solidification; sludge soil; alkali-sulfate activated; response surface method; meso-structural characteristics

土木工程建设与河湖库清淤工作的持续推进,产生了大量淤泥质弃土. 如何合理处置和有效利用这些废弃淤泥,已成为亟待解决的环境问题. 传统处理方法如脱水固化,虽能实现资源化利用,但工艺复杂且成本较高. 近年来,流态固化土作为一种将废弃淤泥转化为工程材料的新方法,已逐步在水利、公路、环境、堤坝及矿洞等领域得到应用^[1-4].

然而,传统水泥固化剂的流态固化土存在干缩大、水稳性差等问题^[5-7],且水泥的大量使用会消耗资源并产生大量 CO₂,这与碳减排目标相悖^[8-9]. 因此,开发替代水泥的新型固化剂成为研究热点. 已有研究表明,将矿粉、粉煤灰、偏高岭土等复合基材料掺入水泥中制成固化剂,可有效提升固化土的强度和耐久性,且能优化其微观结构^[10-14].

基于此,本文采用碱-硫酸根复合激发水泥基固化剂处理淤泥,研究其在流态固化土中的应用性能. 该固化剂通过碱激发和硫酸根激发的协同作用,可促进水泥的水化反应,优化固化土的力学性能和耐久性^[15-18]. 然而,目前关于碱-硫酸根复合激发水泥基固化剂在淤泥流态固化土中的应用研究鲜有报道.

若将该新型流态固化土应用于道路路基工程,根据《预拌流态固化土工程应用技术标准》(DBJ51/T 188—2022)(以下简称《标准》)^[19],需满足以下要求:流动度 80~300 mm,28 d 无侧限抗压强度 >1 MPa,

水稳系数 ≥ 0.8 . 流态固化土的性能表现与固化剂掺量和水固比密切相关^[1,17]. 因此,本研究重点分析水固比和固化剂掺量对流态淤泥固化土流动度、无侧限抗压强度和水稳系数的影响,并结合细观分析揭示性能提升机理. 以期为淤泥流态固化土的工程应用提供理论依据和技术支持,同时为类似工程问题提供新的解决方案.

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验原料包括淤泥土、固化剂和水. 试验所用淤泥土取自常德洞庭湖区,其物理性质指标见表 1,主要成分见表 2,XRD 衍射图谱如图 1 所示.

表 1 试验用淤泥土主要物理性质指标
Tab.1 Main physical property indicators of sludge for testing

天然含水率/%	塑限/%	液限/%	比重/%	黏粒含量/%	pH 值
103.5	28.6	65.7	2.68	34.1	6.8

表 2 淤泥土主要成分
Tab.2 Main components of the sludge %

主要成分	石英	云母	绿泥石	钠长石	方解石	其他
质量分数	31.6	23.7	21.6	8.5	6.2	8.4

试验所用固化剂为碱-硫酸根复合激发水泥基固化剂(简称碱-硫酸根固化剂),由 P·O 42.5 普通硅

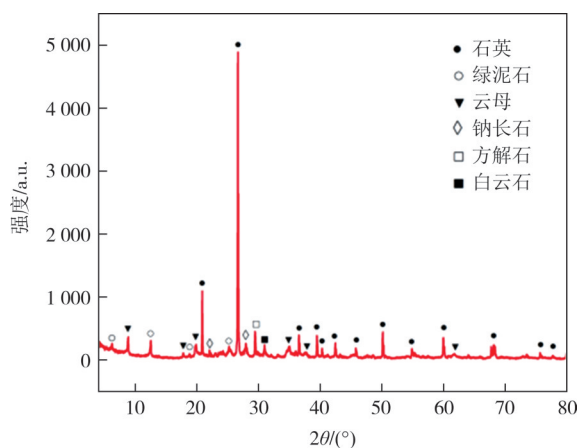


图 1 未固化淤泥 XRD 图谱

Fig.1 XRD spectrum of uncured sludge

酸盐水泥、S95 级矿粉和脱硫石膏按 3:6:1 的比例配制. 各固化材料的化学成分通过 X 射线荧光光谱 (XRF) 分析得到, 详见表 3.

表 3 碱-硫酸根固化剂各材料主要化学成分

Tab.3 The main chemical components of the alkali-sulfate curing agent materials %

材料类别	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO
水泥	60.7	18.8	4.6	4.5	1.8	2.3
矿粉	37.4	30.2	—	14.2	2.1	7.6
脱硫石膏	35.9	—	—	—	43.1	—

固化剂掺量按式(1)确定:

$$\text{固化剂掺量}(\%) = \frac{m_s}{m_d} \quad (1)$$

式中: m_s 、 m_d 分别为固化剂质量与干淤泥土质量.

试验用水为自来水, 加水量根据试验设计进行调整. 由于不同场地淤泥的天然含水率存在差异, 通过控制水相与固相比例, 可以减少天然含水率差异的影响, 便于试验的开展. 试验设计的加水量依据式(2)所示的水固比进行计算:

$$\text{水固比} = \frac{m_w}{m_s + m_d} \quad (2)$$

式中: m_w 为水的质量.

1.2 试验过程与方法

1) 试样制备与养护. 按比例将水与淤泥土混合制成泥浆, 加入配制好的固化剂后, 在净浆搅拌机中搅拌均匀, 得到流态固化土. 将流态固化土倒入试模中, 振捣多次以排除气泡. 样品制备完成后, 先在自然环境中养护 36 h 后脱模, 再移至标准养护箱中养护 3、7、14、28 和 90 d. 每组试样制备 4 个平行样, 若

某试样指标值与该组均值偏差超过 10%, 则剔除该试样, 取其余试样的均值作为结果.

2) 流动度试验. 流动测试使用内径和高度均为 80 mm 的亚克力圆筒进行流动度测试. 将圆筒置于光滑玻璃板上, 缓慢注入新拌流态土直至填满, 抹平后匀速提起圆筒, 测量流态土在玻璃板上的最大坍落直径 (mm), 并取垂直直径向测量数据的平均值作为流动度.

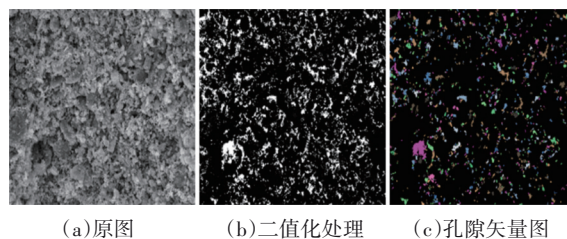
3) 无侧限抗压强度. 依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)^[20], 使用 THY-300 电液式压力试验机, 测试 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体试样在 3、7、14、28 和 90 d 龄期的无侧限抗压强度.

4) 水稳试验. 制备两组 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体试样. 一组在标准条件下养护 28 d, 另一组在养护 28 d 后浸水 1 d, 分别测定两组试样的无侧限抗压强度, 并根据式(3)计算水稳系数 K :

$$K = \frac{P_w}{P} \quad (3)$$

式中: P_w 为浸水 1 d 后的 28 d 试样无侧限抗压强度 (MPa), P 为未浸水的 28 d 试样无侧限抗压强度 (MPa).

5) 扫描电镜试验及后处理. 采用 JSM-IT500 型扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 对 28 d 龄期、不同水固比和固化剂掺量的流态固化土试样进行分析, 利用颗粒及裂隙图像识别与分析系统 (particle and crack analysis system, PCAS)^[21], 通过矢量化和二值化技术对 SEM 图像进行处理, 识别并分割颗粒与孔隙, 生成几何和统计参数, 实现对固化土孔隙结构的定量分析. 相关处理过程如图 2 所示.



(a)原图 (b)二值化处理 (c)孔隙矢量图

图 2 PCAS 图像处理过程示意

Fig.2 Schematic diagrams of the PCAS image processing procedure

1.3 试验设计思路

已有流态固化土研究^[22-24]表明: 固化剂掺量和 水固比对流态固化土性能存在交互作用. 例如: 随固

化剂掺量增加,流态固化土的抗压强度提高,但过高的固化剂掺量可能导致强度增长趋缓甚至下降,而水固比的增加一般会使抗压强度降低.水稳系数一般随固化剂掺量的增加而增大,但水固比的增加会使水稳系数降低.传统单因素试验由于变量独立性的局限,难以揭示上述两因素对固化土性能的交互作用规律.为此,本研究采用响应面法(response surface methodology, RSM)进行试验设计,以系统探究碱-硫酸根复合激发固化剂掺量及水固比对淤泥流态固化土性能的影响.

本研究的试验设计总体思路如下:采用“单因素分析-细观表征-响应面多目标优化决策”的方法体系.首先,通过单因素预试验对固化剂掺量和水固比进行独立变量控制,获取基础数据并明确响应面法的参数设置边界.其次,利用细观试验分析细观参数,阐释宏观现象的内在机制.最后,基于响应面中心组合法(central composite design, CCD)^[25],在前期研究基础上深入分析变量间的交互作用,拟合模型并进行优化决策,以确定最优参数组合.

2 单因素试验结果分析

本节通过单因素试验分析水固比和固化剂掺量对流态固化土流动度、无侧限抗压强度及水稳系数的影响,并据此确定后续响应面法研究中各因素的取值范围.

2.1 水固比单因素试验

预试验表明,水固比低于0.70时,固化土流动性不足;高于1.00时,固化土无法成型.因此选取水固比范围为0.75~0.95、增量为0.05进行试验,试验中固化剂掺量固定为15%.图3~图5为不同水固比对流态固化土无侧限抗压强度、流动度及水稳系数的影响.

由图3知,随着水固比增加,3、7和28 d龄期的无侧限抗压强度均呈下降趋势,但降幅较小.以28 d强度为例,水固比每增加0.05,强度下降4.2%~9.3%,其主要原因是水分稀释固化反应浓度.由图4知,水固比与流动度呈线性相关,其原因是水分润滑作用显著减少土颗粒摩擦.由图5知,水稳系数随水固比增加而降低,每增加0.05,水稳系数平均下降1.9%.其原因是高水固比条件下,水分过多限制了固化作用,土体孔隙率升高,抗水性降低.

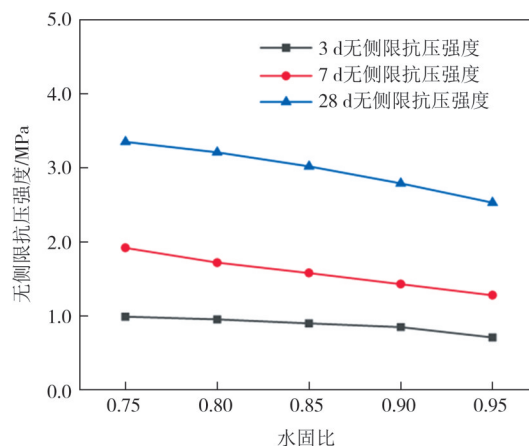


图3 水固比单因素对无侧限抗压强度影响

Fig.3 Effect of water-to-solid ratio on unconfined compressive strength

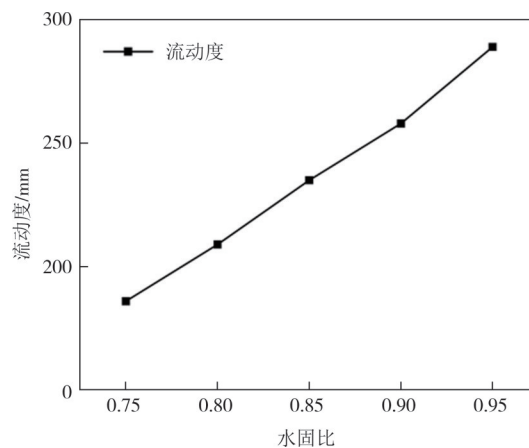


图4 水固比单因素对流动度影响

Fig.4 Effect of water-to-solid ratio on fluidity

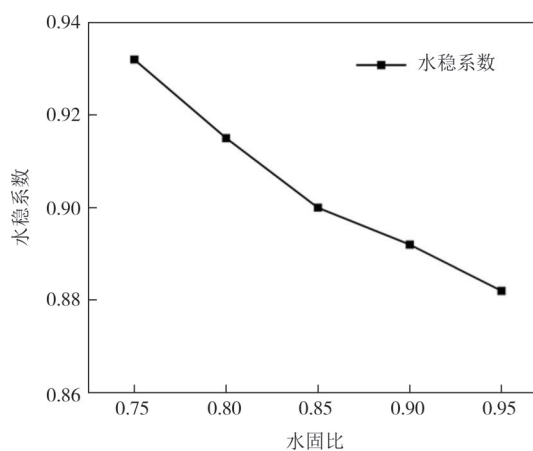


图5 水固比单因素对水稳系数影响

Fig.5 Effect of water-to-solid on water stability coefficient

2.2 固化剂掺量单因素试验

根据预实验固化剂掺量对流态固化土性能的影响,设定掺量梯度为5%~25%(增量5%)的单因素试验,水固比固定为0.85.试验结果如图6~图8所示.

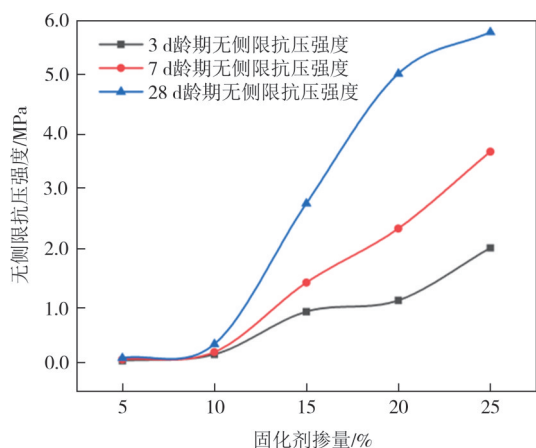


图 6 固化剂掺量对无侧限抗压强度影响

Fig.6 Effect of curing agent dosage on unconfined compressive strength

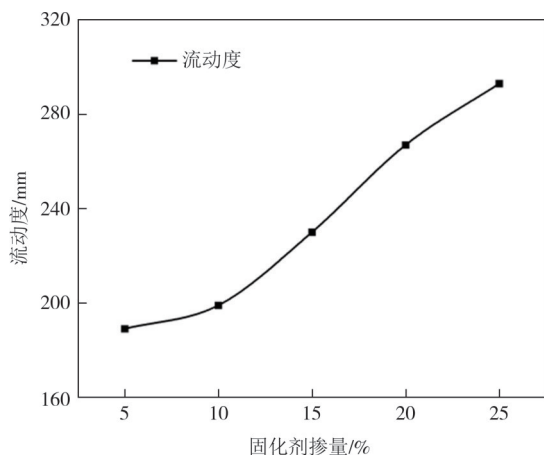


图 7 固化剂掺量对流动性影响

Fig.7 Effect of curing agent on fluidity

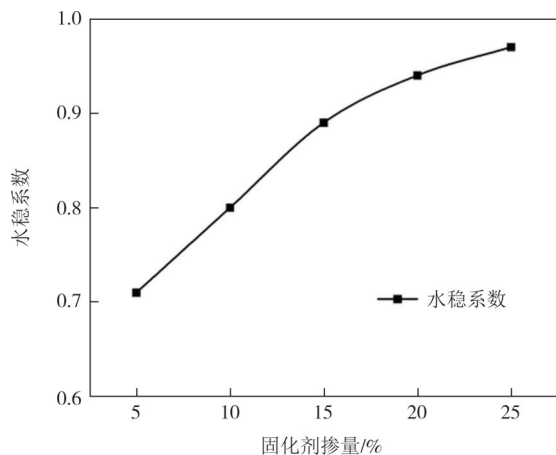


图 8 固化剂掺量对水稳系数影响

Fig.8 Effect of curing agent on water stability coefficient

由图 6 知:无侧限抗压强度(以下简称“强度”)随固化剂掺量(以下简称“掺量”)增加而提高,可分为两个区间:掺量<10%时,强度增幅较小,不同龄期间差异不明显(如 10% 掺量下,28 d 强度仅比 7 d 高

0.18 MPa);掺量>10%时,强度显著提升,龄期不同差异增大.由图 7 知:流动度随固化剂掺量增加而提高,10% 掺量为分界点.掺量<10%时,流动度增幅缓慢(5% 掺量下增加约 5.3%);掺量>10%时,流动度增幅显著(每增 5%,流动度提升约 15%).由图 8 知:水稳系数随固化剂掺量增加而上升,15% 掺量为分界点.掺量<15%时,水稳系数增幅较大(5%~10% 区间增 12.7%),掺量>15%时,增幅趋缓(20%~25% 区间增 3.2%).这是因为高掺量固化剂增强了淤泥土颗粒的胶结作用,提高了流态土的致密性,而当水稳系数接近 1 时,土体抗水性能已达阈值,继续提升的空间有限.

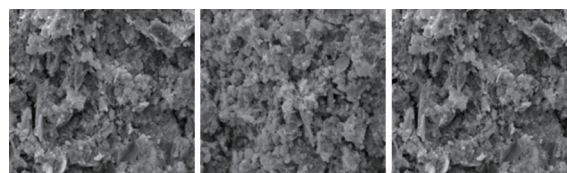
综合水固比与固化剂掺量单因素试验可知:1)较低的水固比有利于提高流态固化土的无侧限抗压强度和水稳系数,但会限制其流动度;2)增加固化剂掺量有利于提升固化土的强度、流动度和水稳系数,但存在分界值.为全面考察水固比与固化剂掺量对流态土性能的影响,避免成型不良,选取水固比 0.775~0.925、固化剂掺量 7.5%~22.5% 作为后续响应面试验的因素取值范围进行试验设计.

3 细观试验结果分析

为深入探讨水固比和固化剂掺量对流态固化土整体性能的影响,本节利用 SEM 分析固化土的细观特性,并研究其宏观性能与细观指标之间的关系.

3.1 不同水固比细观试验结果

固定固化剂掺量为 15%,分别对水固比为 0.775、0.850 和 0.925 的三组固化土利用 SEM 分析,结果如图 9 所示.



(a)0.775 (b)0.850 (c)0.925

图 9 不同水固比的 SEM 图像(放大 1 000 倍)

Fig.9 SEM images of different water-solid ratios (magnified 1 000 times)

经 PCAS 处理后,各细观参数如表 4 所示.以水固比 0.775 的固化为基准进行归一化处理,处理结果与强度的关系如图 10 所示,排列特征与强度的关系如图 11 所示.

表4 不同水固比固化土细观参数
Tab.4 Mesoscopic parameters of solidified soil with different water–solid ratios

水固比	尺度特征			排列特征
	平均孔隙面积/像素	孔隙率/%	面积概率分布指数	概率熵
0.775	143	9.8	1.803	0.983 2
0.850	185	10.4	1.792	0.983 8
0.925	199	11.2	1.789	0.984 0

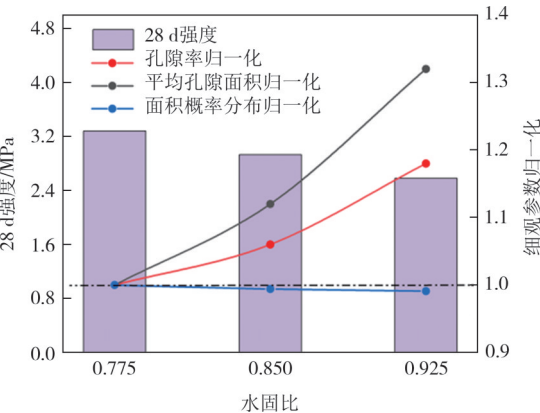


图10 不同水固比的固化土强度与尺度特征参数
归一化处理关系

Fig.10 The relationship between strength and normalized scale characteristic parameters of solidified soil with different water–solid ratios

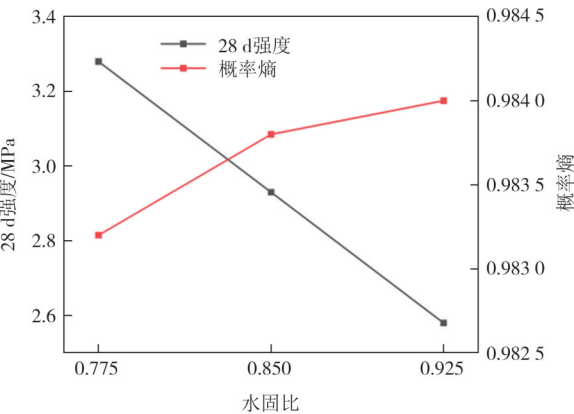


图11 不同水固比的固化土强度与排列特征参数关系

Fig.11 The relationship between strength and arrangement characteristic parameters of solidified soil with different water–solid ratios

由表4可知,随着水固比的增加,孔隙尺度特征参数显著变化:孔隙率和平均孔隙面积上升,而面积概率分布指数略有下降. 具体而言,水固比从0.775增加到0.925时,平均孔隙面积增加39.2%,孔隙率增加14.3%,面积概率分布指数下降0.78%. 这表明高水固比不利于固化土内部大孔隙的缩减,难以形成

致密结构. 同时,概率熵随水固比增加而略微上升,从0.983 2(水固比0.775)增加到0.984 0(水固比0.925),增幅约0.08%. 这表明高水固比下孔隙排列更随机无序.

结合图10和图11,孔隙率、平均孔隙面积和概率熵与强度呈负相关,而面积概率分布指数与强度呈正相关. 这说明低水固比有助于形成均匀、致密的孔隙结构,从而提高材料强度;高水固比则稀释浆液,导致孔隙增大及排列随机化,对强度产生不利影响.

3.2 不同固化剂掺量细观试验结果

固定水固比为0.850,对固化剂掺量分别为7.5%、15%和22.5%的三组固化土利用SEM分析,结果如图12所示.

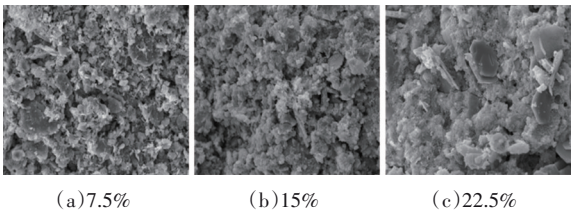


图12 不同固化剂掺量的SEM图像(放大1 000倍)

Fig.12 SEM images of different curing agent dosages (magnified 1000 times)

经PCAS处理后,各细观参数见表5. 以固化剂掺量7.5%的固化土为基准进行归一化处理,处理结果与强度的关系如图13所示,排列特征与强度的关系如图14所示.

表5 不同固化剂掺量固化土细观参数
Tab.5 Mesoscopic parameters of solidified soil with different dosage of curing agent

固化剂 掺量/%	尺度特征			排列特征
	平均孔隙面积/像素	孔隙率/%	面积概率分布指数	概率熵
7.5	191	17.9	1.742	0.992 1
15	175	10.4	1.792	0.984 0
22.5	89	2.5	2.110	0.958 0

由表5可知,固化剂掺量从7.5%增加到22.5%时,固化土的细观结构参数显著变化:平均孔隙面积减少53.4%,孔隙率下降86%,面积概率分布指数上升21.1%,概率熵下降3.4%. 结合图13、图14,孔隙率、平均孔隙面积、概率熵均与强度呈负相关,而面积概率分布与强度呈现正相关. 这表明高固化剂掺量使孔隙分布更均匀,大孔隙减少,结构致密性提高,从而显著提升材料强度.

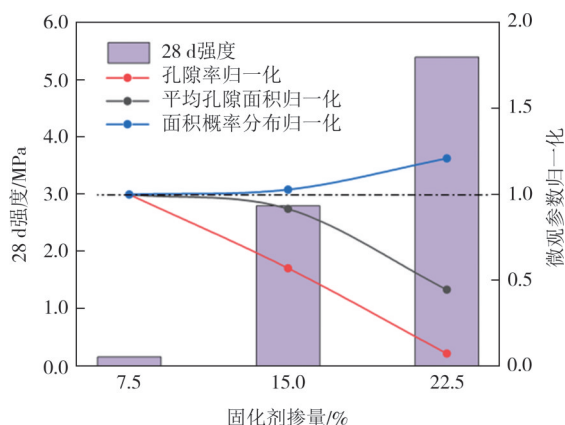


图 13 不同固化剂掺量固化土强度与尺度特征参数归一化处理关系

Fig.13 The relationship between strength and normalized scale characteristic parameters of solidified soil with different dosage of curing agent

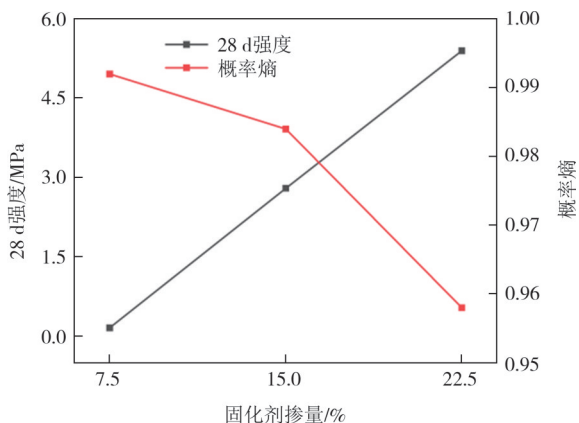


图 14 不同固化剂掺量固化土强度与排列特征关系

Fig.14 The relationship between strength and arrangement characteristic parameters of solidified soil with different dosage of curing agent

进一步分析表明,孔隙率与固化土强度呈线性关系(图 15),拟合公式为:

$$n = ap + b \quad (4)$$

式中: n 为孔隙率(%), p 为固化土 28 d 强度($0.16 \text{ MPa} \leq p \leq 5.40 \text{ MPa}$); a 和 b 为与固化土种类相关的系数,分别为-2.91和18.69.

式(4)可见,在试验范围内,孔隙率与无侧限抗压强度之间呈线性负相关.这表明材料的细观结构越致密(孔隙率越低),其能够承受的无侧限抗压强度就越大.

概率熵与固化土强度呈二次曲线关系(图 16),拟合公式为:

$$H_m = mp^2 + np + q \quad (5)$$

式中: H_m 为概率熵, m 、 n 、 q 是与固化土种类相关的系

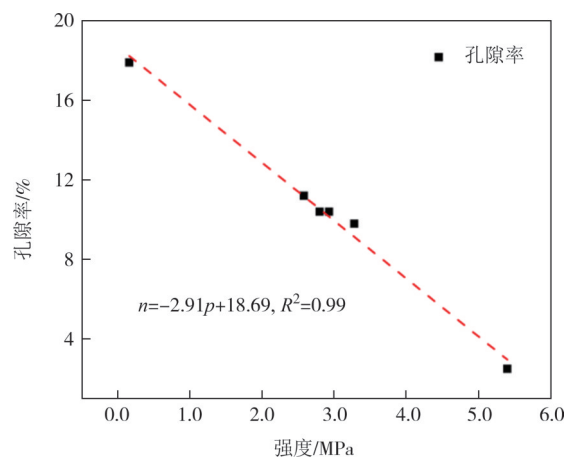


图 15 强度与孔隙率关系

Fig.15 The relationship between strength and porosity

数,分别为-0.001 4、0.001 5和0.992 8.

式(5)表明随着强度的增加,概率熵迅速下降,表明孔隙排列的有序性提高.

图 16 可见,在试验范围内,概率熵与无侧限抗压强度呈非线性负相关.当强度低于 1.0 MPa 时,概率熵变化较缓;强度越高,概率熵下降越快,表明孔隙排列趋于有序.上述两条曲线拟合度高,可用于预测给定强度下的细观参数.

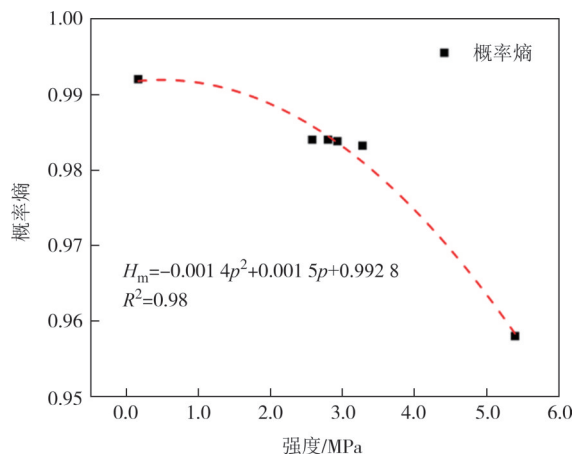


图 16 强度与概率熵关系

Fig.16 The relationship between strength and probabilistic entropy

4 响应面法试验设计与多目标优化

前述单因素试验分析结果可见:水固比和固化剂掺量对流态固化土各性能指标的影响呈现明显的相互制约关系,具体表现为:

1)工作性能方面:水固比从 0.75 增至 0.95 时,流动度从 186 mm 提升至 289 mm;固化剂掺量超过

10% 后, 每增加 5% 掺量可带来约 15% 的流动度提升.

2) 强度性能方面: 水固比在 0.75~0.95 范围内, 每增加 0.05, 28 d 强度下降 4.2%~9.3%; 固化剂掺量在 5%~25% 范围内, 掺量每增加 5%, 28 d 强度提升 0.26~2.42 MPa, 但掺量大于 15% 后强度增长趋缓.

3) 耐久性能方面: 水固比每增加 0.05, 水稳系数平均降低 1.9%; 固化剂掺量在 15%~25% 区间, 水稳系数增长趋缓, 每 5% 梯度仅提升 3.2%~5.6%.

这些量化关系说明: 提高强度需降低水固比, 但会限制流动度; 增加固化剂掺量可同时改善强度和流动度, 但对水稳系数的提升存在阈值效应.

基于上述制约关系与单因素试验确定的参数取值边界, 本节响应面法进行试验设计时, 以水固比和固化剂掺量为自变量, 以流动度、不同龄期无侧限抗

压强度和水稳系数为响应值, 重点考察:

1) 水固比 (0.775~0.925) 与固化剂掺量 (7.5%~22.5%) 对各响应值的交互作用;

2) 通过多目标优化确定适宜的水固比与固化剂掺量.

4.1 响应面法试验设计与结果分析

本次响应面试验采用中心组合设计 (CCD), 为两因素五水平的试验方案. 试验设计与数据分析均通过 Design-Expert 软件完成. 根据响应面设计的试验点数计算公式 $2k+2^k+M_0$ (k 为自变量总数, 本试验中 $k=2$; M_0 为中心点试验数, 本试验取 $M_0=5$), 共设置 13 组试验. 选取水固比 (X_1) 和掺量 (X_2) 为试验因素, 以流动度 L 、 $Y_1\sim Y_5$ ($Y_1\sim Y_5$ 分别为 3、7、14、28、90 d 的无侧限抗压强度) 以及水稳系数 K 为响应指标. 试验方案及结果如表 6 所示.

表 6 中心组合设计试验结果
Tab.6 Results of CCD

组别	水固比 X_1	掺量 $X_2/\%$	流动度 L/mm	无侧限抗压强度/MPa					水稳系数 K
				Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	
1	0.8	10	180	0.20	0.23	0.30	0.35	0.75	0.82
2	0.8	20	250	1.17	2.45	3.65	5.07	10.0	0.98
3	0.85	15	230	0.89	1.40	1.77	2.79	6.54	0.89
4	0.9	10	220	0.14	0.22	0.28	0.32	0.70	0.76
5	0.9	20	275	1.82	3.00	3.70	4.50	9.30	0.93
6	0.85	15	238	0.74	1.49	1.80	2.99	5.76	0.92
7	0.85	7.5	195	0.05	0.08	0.14	0.16	0.31	0.73
8	0.85	22.5	290	1.90	3.30	4.70	5.40	10.6	0.96
9	0.85	15	245	0.95	1.52	2.05	3.02	5.87	0.91
10	0.775	15	200	0.98	1.90	2.80	3.30	6.67	0.93
11	0.925	15	280	0.71	1.31	2.04	2.60	5.98	0.90
12	0.85	15	234	0.92	1.36	2.09	2.70	6.17	0.88
13	0.85	15	244	0.71	1.72	1.79	2.59	6.76	0.89

通过 Design-Expert 软件对表 6 中的试验数据进行多项回归拟合, 构建自变量与响应值之间的关系模型. 各响应面模型的方差分析结果如表 7~表 9 所示. 评估回归模型的显著性, F 值越大, 说明模型对数据的解释能力越强. P 值用于检验模型的显著性水平, 当 P 值 <0.05 时, 模型被认为具有显著性; P 值 $<0.000\ 1$ 则表明模型极显著. 相关系数 R^2 用于评估模型的拟合优度, R^2 值越接近 1, 表明模型与试验数据的拟合程度越高. 剔除各模型中不显著项 ($P>0.05$) 后保留的各项系数同见表 7~表 9. 从表 7~表 9 可知, 各响应值拟合模型的 P 值均小于 0.000 1, 表明模型具有极高的显著性; R^2 值均大于 0.94, 说明模型与实

际情况的拟合程度良好. 因此, 拟合模型能够较好地反映水固比与固化剂掺量与流态固化土各宏观性能之间的关系, 为优化其取值提供了可靠的依据.

流动度模型 (表 7) 可见: 水固比 X_1 与固化剂掺量 X_2 对复合激发流态淤泥固化土流动度的影响均极显著 ($P<0.000\ 1$), 且二者系数为正, 对流动度的增长呈现线性叠加关系, 但水固比与固化剂掺量两因素间无交互作用.

强度模型 (表 8) 可见: 水固比 X_1 与固化剂掺量 X_2 对强度响应值存在阶段性交互作用. 对于 3 d 强度, 交互项 X_1X_2 的 P 值为 $0.043<0.05$, 表明两者交互作用显著, 高水固比 (水固比 >0.9) 与高固化剂掺量

表 7 流动度回归模型系数显著性及方差分析

Tab.7 Significance of regression model coefficients and analysis of variance for fluidity

方差来源	F 值	P 值	保留项系数
流动度模型	92.99	<0.000 1	237
X_1	60.17	<0.000 1	21.76
X_2	125.81	<0.000 1	31.47
$R^2(L)=0.949$			

(掺量>20%)组合可协同提升流态土早期强度(图 17), 其原因是高水固比下浆体流动性增加,使更多固化剂颗粒均匀分散,提供了较适宜的反应环境,有利于早期水化反应的推进. 而对于 7、28 及 90 d 的中长期强度,交互作用消失,仅固化剂掺量 X_2 显著($P<0.000\ 1$), 其原因是此时水化反应进入稳定期,固化剂掺量决定了最终胶凝产物的总量,强度因此表现为受单一主效应的影响.

表 8 各龄期无侧限强度回归模型系数显著性及方差分析

Tab.8 Significance of regression model coefficients and analysis of variance for unconfined compressive strength at each age

方差来源	F 值				
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
强度模型	53.01	106.38	113.32	174.08	102.58
X_1	0.178	0.263	1.500	3.340	0.616
X_2	153.26	212.50	225.13	344.81	204.55
X_1X_2	5.58	—	—	—	—
方差来源	P 值				
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
强度模型	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1
X_1	0.683	0.620	0.249	0.908	0.451
X_2	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1
X_1X_2	0.043	—	—	—	—
方差来源	保留项系数				
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
强度模型	0.86	1.54	2.09	2.75	5.80
X_1	—	—	—	—	—
X_2	0.64	1.06	1.60	1.97	3.91
X_1X_2	0.18	—	—	—	—
$R^2(Y_1)=0.946, R^2(Y_2)=0.955, R^2(Y_3)=0.958, R^2(Y_4)=0.972, R^2(Y_5)=0.953$					

注: X_1X_2 表示水固比及固化剂掺量的交互项.

水稳系数模型(表 9)显示:水固比 X_1 与固化剂掺量 X_2 对流态土水稳系数的影响显著. 固化剂掺量 X_2 对水稳系数的提升呈二次项负效应,而水固比 X_1 对水稳性能产生线性负向影响,二者未表现出明显交互. 由图 18 可见,低水固比与高掺量组合可有效改

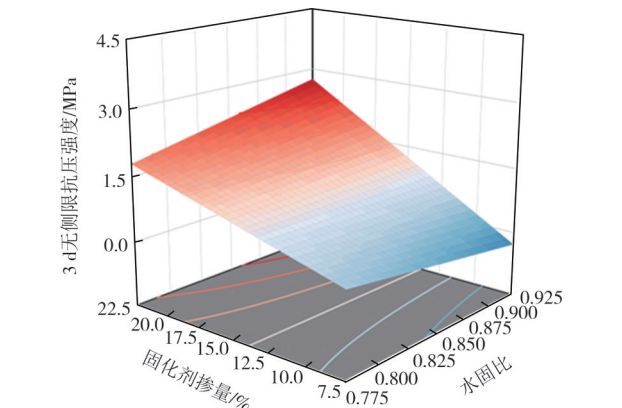


图 17 3 d龄期无侧限抗压强度响应面

Fig.17 Response surface of 3 d unconfined compressive strength

善水稳性能,尤其是在固化剂掺量 $X_1>15\%$ 且水固比 $X_2<0.83$ 时水稳系数增长更为明显.

表 9 水稳系数回归模型系数显著性及方差分析

Tab.9 Significance of regression model coefficients and analysis of variance for water stability coefficient

方差来源	F 值	P 值	保留项系数
水稳系数模型	43.88	<0.001	0.897 5
X_1	9.89	0.016 3	-0.018
X_2	187.5	<0.001	0.079
X_1X_2	0.087 4	0.779 0	—
X_1^2	0.934 6	0.365 9	—
X_2^2	18.74	0.003 4	-0.025
$R^2(K)=0.969$			

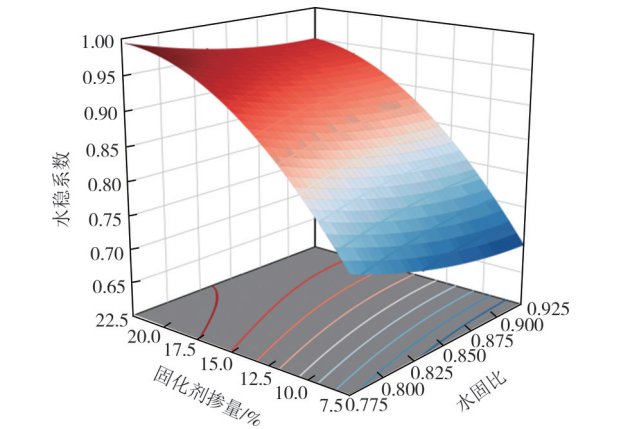


图 18 水稳系数响应面

Fig.18 Response surface of water stability coefficient

4.2 多目标优化决策及可靠性验证

基于响应面法建立的模型,通过将优化目标输入 Design-Expert 软件,软件自动进行计算并得出变量取值决策. 因流动度结果在 180~290 mm 之间,满足了下限保证施工和易性,上限控制离析风险的工程要求,因此不对流动度进行目标设定. 优化目标设

定为:

1)强度性能:《标准》规定的 28 d 强度为最低限值,但实际试验值可能因误差等因素无法达标. 响应面法需平衡多目标,若以最低限值作为强度目标,可能过度牺牲其他性能. 综合考虑强度安全裕度、性能权衡及试验便利性,将 28 d 强度目标设定为 1.5 MPa. 在此硬约束下,进一步引入最大化 3、7、14 和 90 d 强度优化条件,以确保流态土施工的初始稳定性与长期服役性能,促进固化土全龄期强度的充分发展,充分发挥固化潜力;

2)耐久性能:水稳系数>0.8.

优化结果 A(在满足《标准》基础上进一步综合考虑全龄期强度,见图 19)和结果 B(仅聚焦《标准》要求的 28 d 强度和水稳系数,见图 20)的预测值对比如表 10 所示.

对比两个优化结果表明,当水固比为 0.82,固化剂掺量为 11.3%,优化结果 B 可满足《标准》中对流态土性能的要求,而添加全龄期强度约束后,优化得到的水固比为 0.87,固化剂掺量为 12.1%的优化结果 A,流态土性能不仅可满足《标准》要求,还能在其他龄期内维持更大的强度(各龄期强度预测值较结果 B 提升 2.3%~18.3%). 尽管两个优化预测结果的水固比与掺量取值接近,但优化后的性能预测值差异明显. 这体现了响应面法对于多目标优化调节的精准性与便捷性,利于工程实践应用.

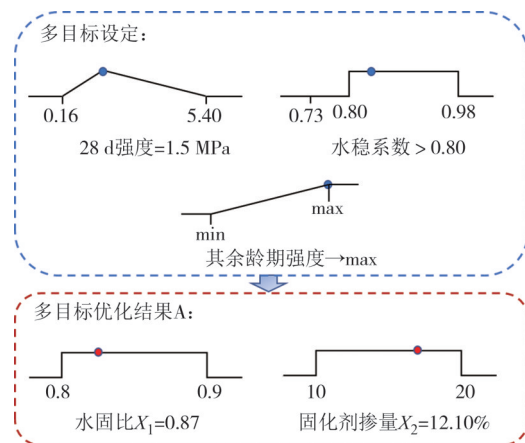


图 19 模型多目标优化结果 A

Fig.19 Multi-objective optimization results A

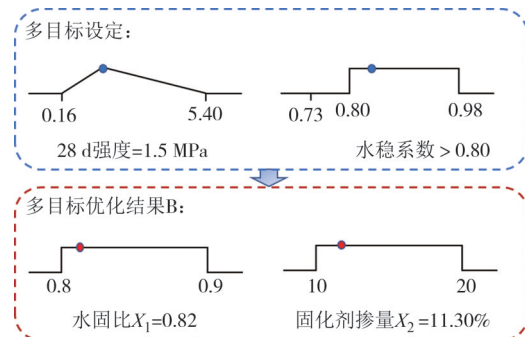


图 20 模型多目标优化结果 B

Fig.20 Multi-objective optimization results B

依据优化结果 A 重新制样并试验,得到试验实际值与预测值的对比见表 10. 可见,试验值与预测值之间的偏差较小,最大偏差值低于 5%,表明模型拟合效果良好,响应面法优化合理有效.

表 10 优化结果性能预测值与试验实际值比较

Tab.10 Comparison of the predicted values of the optimized result performance with the actual values from the experiments

优化结果	流动度/mm	3 d 强度/MPa	7 d 强度/MPa	14 d 强度/MPa	28 d 强度/MPa	90 d 强度/MPa	水稳系数
优化结果 A	231	0.44	0.84	1.08	1.50	3.41	0.83
优化结果 B	199	0.43	0.71	1.04	1.50	3.11	0.84
A 与 B 比较	+16.1%	+2.3%	+18.3%	+3.8%	—	+9.6%	-1.2%
试验结果 A	225	0.42	0.81	1.04	1.55	3.49	0.85
偏差/%	2.60	4.54	3.75	3.70	3.33	2.35	2.41

5 结论

本研究通过单因素试验和响应面法对碱-硫酸根复合激发流态固化土的流动性能、强度性能和水稳性进行了系统研究,并进行了细观机理分析,得出以下主要结论:

1)单因素试验表明,碱-硫酸根复合激发流态固

化土的无侧限抗压强度随水固比增加而下降,随固化剂掺量的增大而升高. 当固化剂掺量低于 10% 时,强度增长缓慢且龄期差异不显著;掺量超过 10% 时,强度显著提高且随龄期增长而增强. 响应面分析表明,固化剂掺量与水固比对各龄期的发展存在阶段性交互效应,二者对 3 d 早期强度的提升具有协同效应,而 7 d 后中长期强度则主要受固化剂掺量主效应影响. 此外,固化剂掺量和水固比的增加均显著提高

流动度,但固化剂掺量对水稳系数的提升效果随掺量增加而减缓,而水固比的增加则会降低水稳系数。

2)细观结构分析显示,水固比增加会导致流态固化土体系内部孔隙增大且排列随机化,而高固化剂掺量使孔隙分布更均匀,大孔隙减少,结构致密性明显提高。宏观性能与细观结构的相关性分析表明,无侧限抗压强度与孔隙率呈负线性关系,与概率熵呈负二次曲线关系,与面积概率分布呈正相关。

3)响应面多目标优化结果表明:当水固比为 0.87、固化剂掺量为 12.1% 时,流态固化土的流动度预测值为 231 mm、28 d 无侧限抗压强度预测值为 1.5 MPa,水稳系数预测值为 0.83,各项指标均满足《标准》的要求,且全龄期强度可在范围内达到最大,充分发挥了固化潜力。进一步验证表明,模型预测值与试验值非常接近,最大偏差仅为 4.54%,充分证明了模型的准确性和可靠性。

参考文献

- [1] 王艺程. 流态固化土在路基工程中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
WANG Y C. Research on application of fluid-solidified soil in subgrade engineering[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [2] 邓伟, 林长春, 王建林, 等. 流态固化土肥槽回填技术在项目中的应用[J]. 建筑技术开发, 2024, 51(6): 39-41.
DENG W, LIN C C, WANG J L, et al. Application of fluidized solidification soil backfilling in narrow spaces technology in projects[J]. Building Technology Development, 2024, 51(6): 39-41. (in Chinese)
- [3] 周永祥, 刘倩, 王祖琦, 等. 流态固化土用无熟料胶凝材料的性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(10): 3548-3555.
ZHOU Y X, LIU Q, WANG Z Q, et al. Properties of cementitious materials without clinker for fluid solidified soil[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(10): 3548-3555. (in Chinese)
- [4] 韩会林. 流态固化土压缩特性及其在工程中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(10): 125-127.
HAN H L. Research on the compression characteristic of fluidized solidified soil and its application in engineering[J]. Engineering and Technological Research, 2024, 9(10): 125-127. (in Chinese)
- [5] 张春雷, 汪顺才, 朱伟, 等. 初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 567-570.
ZHANG C L, WANG S C, ZHU W, et al. Influence of initial water content on cement solidification effect of dredged material [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup.1): 567-570. (in Chinese)
- [6] ASGARI M R, BAGHEBANZADEH DEZFULI A, BAYAT M. Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(3): 1439-1452.
- [7] 俞家人, 陈永辉, 陈庚, 等. 地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 364-371.
YU J R, CHEN Y H, CHEN G, et al. Mechanical behaviour of geopolymer stabilized clay and its mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 364-371. (in Chinese)
- [8] SAINI G, VATTIPALLI U. Assessing properties of alkali activated GGBS based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica [J]. Case Studies in Construction Materials, 2020, 12: e00352.
- [9] GAO T M, SHEN L, SHEN M, et al. Evolution and projection of CO₂ emissions for China's cement industry from 1980 to 2020[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 522-537.
- [10] 赵俊先, 李军伟, 夏旭江, 等. 矿粉-粉煤灰-偏高岭土复合基低碳地聚物疏浚淤泥固化材料力学特性试验研究[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(10): 55-60.
ZHAO J X, LI J W, XIA X J, et al. Experimental study on mechanical properties of mineral powder-fly ash-metakaolin composite based low carbon geopolymer dredged silt solidified material[J]. China Harbour Engineering, 2023, 43(10): 55-60. (in Chinese)
- [11] 王东星, 高向云, 邹维列, 等. 高温效应下 MgO-矿粉/粉煤灰固化土强度预测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 92-97.
WANG D X, GAO X Y, ZOU W L, et al. Study on strength predication of reactive MgO-slag/fly ash stabilized clay considering high temperature effect [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(6): 92-97. (in Chinese)
- [12] 祁冠豫, 张立, 景啸, 等. 矿渣基地聚合物固化土强度及微观特征试验研究[J]. 河南科学, 2021, 39(3): 395-402.
QI G Y, ZHANG L, JING X, et al. Experimental study on strength and microstructure of ground granulated blast furnace-slag based geopolymer-stabilized soil [J]. Henan Science, 2021, 39(3): 395-402. (in Chinese)
- [13] WANG A G, ZHENG Y, ZHANG Z H, et al. The durability of alkali-activated materials in comparison with ordinary Portland cements and concretes: a review [J]. Engineering, 2020, 6(6): 695-706.
- [14] LÜ Q F, WANG Z S, GU L Y, et al. Effect of sodium sulfate on strength and microstructure of alkali-activated fly ash based geopolymer[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(6): 1691-1702.

- [15] BASHA E A, HASHIM R, MAHMUD H B, et al. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(6): 448–453.
- [16] DIVYA KRISHNAN K, RAVICHANDRAN P T. Engineering characteristics of wood ash modified clay soils [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 50: 348–352.
- [17] HORPIBULSK S, RACHAN R, SUDDEEPONG A, et al. Strength development in cement admixed Bangkok clay: laboratory and field investigations[J]. *Soils and Foundations*, 2011, 51(2): 239–251.
- [18] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(5): 549–554.
- TANG Y X, LIU H L, ZHU W. Study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(5): 549–554. (in Chinese)
- [19] 预拌流态固化土工程应用技术标准: DBJ51/T 188—2022[S]. 成都: 西南交通大学出版社, 2022.
- Technical standard for engineering application by using premixed fluidized stabilized soil: DBJ51/T 188—2022 [S]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2022. (in Chinese)
- [20] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)
- [21] LIU C, SHI B, ZHOU J, et al. Quantification and characterization of microporosity by image processing, geometric measurement and statistical methods: application on SEM images of clay materials [J]. *Applied Clay Science*, 2011, 54(1): 97–106.
- [22] 杜建彪, 罗强, 蒋良淮, 等. 膨胀土流态固化改性试验与配合比研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2024, 58(10): 2137–2148.
- DU J B, LUO Q, JIANG L W, et al. Fluidized solidification modification tests on expansive soil and its mixing proportions study[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2024, 58(10): 2137–2148. (in Chinese)
- [23] 牛家栋, 杜运兴, 张自成, 等. 矿渣基地聚物流态盾构固化土的性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43(6): 2176–2185.
- NIU J D, DU Y X, ZHANG Z C, et al. Performance of slag-based geopolymer flow shield-cured soil [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 43(6): 2176–2185. (in Chinese)
- [24] 李琛. 砂土及海砂基流态固化土组成优化及其性能的研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- LI C. Study on composition optimization and performance of fluidized solidified soil based on sand and sea sand [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [25] 朱剑锋, 饶春义, 庾秋水, 等. 硫氧镁水泥复合固化剂加固淤泥质土的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增刊1): 3206–3214.
- ZHU J F, RAO C Y, TUO Q S, et al. Experimental study on the properties of the organic soil solidified by the composite magnesium oxysulfate cement-curing agent[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Sup. 1): 3206–3214. (in Chinese)