

玄武岩纤维砒砂岩水泥土抗压强度预测模型

董 伟^{1,2}, 李佳轩¹, 刘 鑫³, 薛 刚¹

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古自治区土木工程安全与耐久性重点实验室, 内蒙古 包头 014010; 3. 鄂尔多斯应用技术学院 土木工程系, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘 要: 为预测不同龄期、不同玄武岩纤维掺量下砒砂岩水泥土的无侧限抗压强度, 制备了掺有不同质量分数(0%~0.6%)玄武岩纤维的玄武岩纤维砒砂岩水泥土, 并进行了无侧限抗压强度试验和核磁共振试验。研究表明, 纤维掺量 0.15%~0.3% 可显著提高无侧限抗压强度, 最优掺量为 0.15%, 且无侧限抗压强度与割线模量呈线性关系。随养护龄期增加, 无侧限抗压强度增加, 孔隙率降低; 随纤维掺量增加, 无侧限抗压强度先增后降, 孔隙率先降后升。灰色关联分析表明, 束缚流体饱和度和小孔占比与无侧限抗压强度相关性较高。基于此, 建立了 GM(1, N) 灰色模型预测无侧限抗压强度, 估算值平均相对误差小于 9.27%。研究结果可为砒砂岩在路基工程中的应用提供参考。

关键词: 玄武岩纤维砒砂岩水泥土; 无侧限抗压强度; 孔隙结构; 灰色关联分析法; 预测模型

中图分类号: TU441 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)07-1860-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241345

Prediction model for compressive strength of basalt fiber pisha sandstone cement-soil

DONG Wei^{1,2}, LI Jia-xuan¹, LIU Xin³, XUE Gang¹

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability, Baotou 014010, China; 3. Department of Civil Engineering, Ordos Institute of Technology, Ordos 017010, China)

Abstract: In order to predict the unconfined compressive strength of Pisha Sandstone Cement-soil at different curing ages and different basalt fiber dosage, Basalt Fiber Pisha Sandstone Cement-soil mixed with basalt fiber of different mass fractions (0%~0.6%) was prepared, and the unconfined compressive strength test and nuclear magnetic resonance test were carried out. The results show that the fiber dosage of 0.15%~0.3% can significantly increase the unconfined compressive strength, and the optimal dosage is 0.15%, and the unconfined compressive strength has a linear relationship with the secant modulus. With

收稿日期: 2024-12-23.

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2024QN05066); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY22205); 鄂尔多斯应用技术学院重点科研项目(KYZD2020003); 鄂尔多斯应用技术学院学生科研一般项目(KYYB2023030); 大学生创新创业训练计划项目(202314532021, 202414532005); 中央支持地方高校改革发展项目-土木工程提质培育学科建设项目(0404052507).

作者简介: 董伟(1987-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 固体废弃物建材资源化利用. E-mail: dw617@126.com

通信作者: 刘鑫(1986-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 工程新材料研究与应用. E-mail: 490225291@qq.com

the increase of curing age, unconfined compressive strength increased and porosity decreased. With the increase of fiber dosage, unconfined compressive strength increased first and then decreased, and the porosity decreased first and then increased. Grey correlation analysis showed that the bound fluid saturation and the proportion of small pores were highly correlated with unconfined compressive strength. Based on this, a GM(1, N) grey model was established to predict unconfined compressive strength, and the average relative error of the estimated value was less than 9.27%. The research results provide a reference for the application of Pisha Sandstone in subgrade engineering.

Key words: basalt fiber pisha sandstone cement-soil; unconfined compressive strength; pore structure; grey correlation analysis method; prediction model

0 引言

砒砂岩是一种特殊的泥质砂岩,广泛分布于蒙、晋及陕交界,对黄河流域泥沙治理至关重要。砒砂岩常被用作路基、沟渠护坡及坝基的原材料,但其遇风成砂、遇水成泥的特性限制了其大范围的工程应用^[1]。在砒砂岩中掺入适量的水泥和玄武岩纤维(Basalt fiber, BF)可以改善砒砂岩的力学性能,提高无侧限抗压强度(Unconfined compression strength, UCS)^[2-4]。传统的抗压强度测试方法耗时费力,且难以全面反映材料在不同条件下的性能变化,基于核磁共振(Nuclear magnetic resonance, NMR)试验结果,对玄武岩纤维砒砂岩水泥土(Basalt fiber pisha sandstone cement-soil, BF-PSC)的UCS预测模型进行探究,可以提高预测UCS的准确性和效率。

BF-PSC本质是一种纤维水泥基改良土,通过水泥的胶凝作用提高土体的强度和耐久性^[5],减少土体的渗透性;同时利用纤维的“加筋作用”增强土体的抗拉性能,提高土体的整体稳定性^[6]。水泥和纤维的复合作用扩大了砒砂岩的应用范围,使其可以在作为路基填料时满足规范中承载力和稳定性的要求。在评估纤维水泥土的承载力和稳定性时,UCS是一个重要指标^[7],纤维水泥土的UCS受水泥含量、纤维掺量及纤维种类等多种因素影响^[8-10]。研究发现,PSC中掺入7%的水泥可以提高强度,优化微观结构^[11],同时水泥掺量过高则会增大水泥土的脆性,增加经济成本。将BF和水泥加入软弱土中改良时发现:长度为6 mm的BF掺量为0.6%时抗压强度最大,说明纤维掺量和纤维长度都存在最优掺量^[12,13],不同种类的纤维最优掺量与长度也不同,在水泥土中掺入适量纤维可以形成空间网状结构,提高抗压强

度,过少则无法形成网状结构,过多则会形成“纤维束”和产生“团聚效应”^[14,15]。

灰色关联分析理论在定量处理信息量较少的数据系统时具有显著优势,在建筑材料领域常被应用于力学性能预测^[16-19]。分析影响淤泥质黏土UCS的主要因素时发现,水泥掺量影响程度最大,含水率对其影响程度最小^[20]。分析不同水泥掺量的PSC中影响UCS的主要因素时发现,水泥掺量5%和10%时,灰色关联度最大的是束缚流体饱和度,水泥掺量15%和20%时,灰色关联度最大的是自由流体饱和度^[21]。对水泥掺量为4%、7%和10%的PSC进行研究,发现水泥掺量7%对试样孔隙结构的优化效率最高,同时分析不同养护龄期下影响UCS的主要因素,发现束缚流体饱和度、0~0.1 μm孔隙半径占比与UCS关联最大,并建立GM(1, 3)模型预测不同龄期PSC的UCS^[11]。虽已有对PSC关于龄期的UCS预测模型,但综合BF掺量和不同龄期的UCS预测模型仍缺乏研究。

本研究旨在利用NMR技术,结合灰色关联分析方法,对BF-PSC的UCS进行预测。通过UCS试验获取BF-PSC在水泥掺量(7%)、BF质量分数(0%~0.6%)和养护龄期(7 d、14 d、28 d及60 d)等条件下的UCS数据,并利用NMR技术进行材料微观结构分析。然后,利用灰色关联分析方法将UCS与微观结构试验数据进行关联,基于灰色关联分析结果,利用GM(1, N)灰色模型建立了强度预测模型。

1 试验概况

1.1 试验材料

砒砂岩取自鄂尔多斯市康巴什区,土体取回后进行敲碎碾压,自然风干处理,使用2.36 mm

孔径筛网进行筛分,筛选后的材料留存以备后续使用。砒砂岩材料中砂粒(粒径大于 75 μm)质量分数为 90.61%,粉粒(粒径为 5~75 μm)质量分数为 9.39%。试验土样颗粒级配如图 1 所示、物理性质见表 1,BF 物理性质见表 2,水泥采用蒙西 P·O42.5 普通硅酸盐水泥。

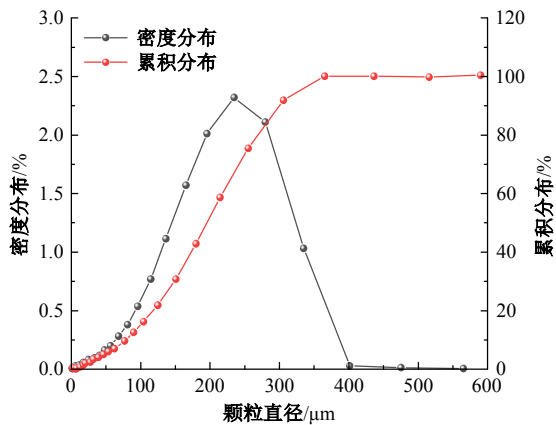


图 1 砒砂岩颗粒级配图

Fig. 1 Pisha sandstone particle gradation map

表 1 砒砂岩物理性质表

Table 1 Physical property table of feldspathic sandstone

性能指标	数 值
天然含水率/%	5.23
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.65
风干含水率/%	1.9
最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.77
最优含水率/%	14.5
塑限	18.29
液限/%	27.61
塑性指数	9.3

表 2 玄武岩纤维物理性质表

Table 2 Physical properties table of BF

性能指标	数值
直径/ μm	13
长度/mm	1.65
拉伸强度/MPa	1.90
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.77
弹性模量/GPa	14.50
断裂伸长率/%	18.29

1.2 试验步骤

参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[22]相关规定制作 $\Phi 39.1\text{ mm}\times\text{H}80\text{ mm}$ 的圆柱体试件,BF 掺量分别为 0%、0.15%、0.3%、0.45% 及 0.6%(对应各组分别编号为 BF-PSC-0、BF-PSC-0.15、BF-PSC-0.3、BF-PSC-0.45

及 BF-PSC-0.6),在温度(20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 95% 的环境中养护 7、14、28、60 d,在不同养护龄期下进行 UCS 试验与 NMR 试验。UCS 试验仪器为 WDW-300 微机控制电子万能试验机,NMR 试验仪器采用纽迈 MacroMR12-150H-I 低场核磁共振分析仪,NMR 试验前将各组 BF-PSC 放入真空保水装置中进行 24 h 真空保水后进行测试。

2 试验结果分析

2.1 UCS 试验

2.1.1 UCS 和峰值应变

图 2 为 UCS 与峰值应变变化图,由图 2 可知,不同龄期下 BF-PSC 随 BF 掺量增加,UCS 先增加后减小,峰值应变逐渐增加,随养护龄期增加,UCS 逐渐增加,峰值应变逐渐减小。以养护龄期 28 d 试件为例,与基准组 BF-PSC-0 相比,BF-PSC-0.15 和 BF-PSC-0.3 的 UCS 分别提高了 17.99%、6.88%,BF-PSC-0.45 和 BF-PSC-0.6 的 UCS 分别降低了 3.70%、10.58%;BF-PSC-0.15、BF-PSC-0.3、BF-PSC-0.45 和 BF-PSC-0.6 的峰值应变分别提高了 8.24%、7.06%、10.20% 及 18.04%。说明适量 BF(0.15%~0.3%)掺入具有阻裂和增强韧性的作用,BF 在 PSC 内部形成空间网状结构,阻止微裂缝的产生与发展,同时在外力作用时,即使发生开裂,BF 可以横跨裂缝承受拉应力,从而提高材料韧性;过量 BF(0.45%~0.6%)掺入 PSC 内部时会由于分散不均或团聚现象导致局部强度下降,从而影响整体结构的稳定性。随着养护龄期增加,由于 PSC 内部水泥水化凝胶体和拌合土料中活性物质之间的

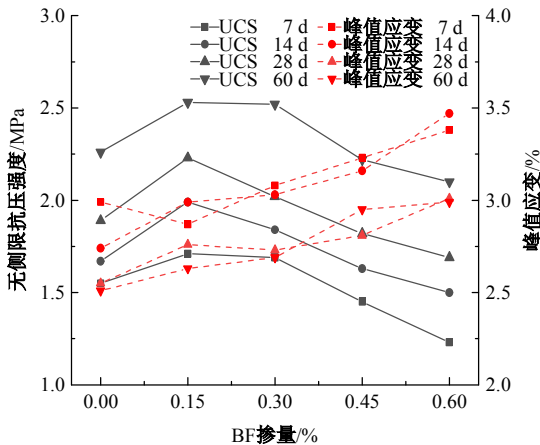


图 2 UCS 与峰值应变随 BF 掺量变化图

Fig. 2 Plot of UCS versus peak strain versus BF dosage

离子交换和团粒化作用,水泥水化产物不断形成并填充孔隙,从而增强BF-PSC强度。

图3为BF分布示意图,由图3可知,BF-PSC在UCS试验中破坏形态为具有一定倾斜角度的轴向裂缝,因此将BF依照其分布方向基本分为4种类型:竖直型、水平型、平行破坏线型和垂直破坏线型^[12,23]。在进行UCS试验时,平行于破坏线方向分布的BF阻止裂缝发展作用较小,垂直于破坏线的BF借助其与PSC颗粒间的机械摩擦力可以有效阻止裂缝的产生;竖直方向的BF可以有效增大试件抵抗竖向荷载的能力,水平方向的BF可以减缓裂缝的发展。空间网状分布的BF与PSC中的水泥颗粒具有良好的相容性,能有效增强颗粒间的固化结构。“纤维束”则对PSC试件的承载能力具有劣化效果,“纤维束”的产生减少了纤维与PSC颗粒间的接触面积,降低了摩擦力,同时阻碍了水泥颗粒与PSC颗粒的胶结。

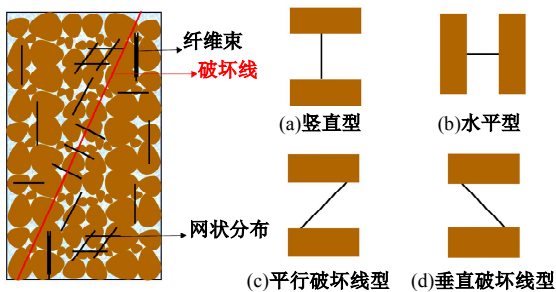


图3 BF分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of BF distribution

2.1.2 割线模量

采用岩土工程中的割线模量 E_{50} 表征PSC变形特性,其值由应力-应变曲线上50%峰值应力点的割线斜率确定^[24]。计算公式如下:

$$E_{50} = \frac{q_u}{2\varepsilon_{0.5}} \quad (1)$$

式中: E_{50} 为50% q_u 时BF-PSC的割线模量; q_u 为BF-PSC的峰值应力; $\varepsilon_{0.5}$ 为0.5 q_u 对应的应变值。

图4为BF-PSC割线模量与UCS关系图,由图4可知,BF-PSC的割线模量与UCS之间呈现出一种正相关关系,即随着UCS的增加,割线模量也随之增大。通过对试验数据进行回归分析,得到BF-PSC割线模量与UCS之间的关系为:

$$E_{50} = 41.186q_u \quad (2)$$

2.2 NMR试验

2.2.1 T_2 图谱分析

NMR试验的 T_2 谱图可以反映BF-PSC内部

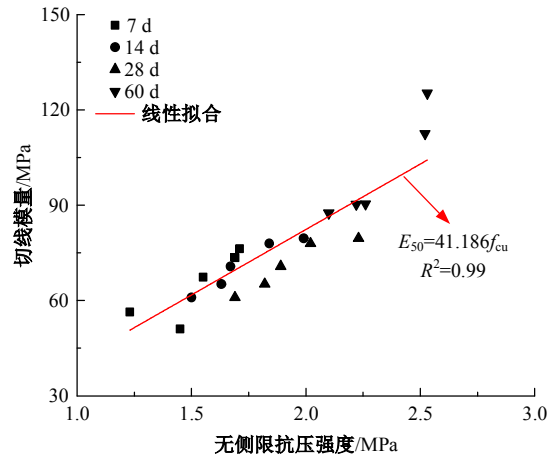


图4 BF-PSC割线模量与UCS关系

Fig. 4 Relationship between E_{50} and UCS of BF-PSC

孔隙尺寸分布,横坐标弛豫时间长短与孔隙半径成正比^[25]。图5为不同龄期下BF-PSC T_2 谱图,由图5可知,BF-PSC-0的 T_2 谱图呈现“双峰”结构,且随着BF掺量的增加,有出现“三峰”结构的趋势。原因是适量BF掺入时纤维分散性较好,对孔隙具有填充作用,过量BF掺入时由于纤维的团聚作用,反而增加了孔隙数量。说明适量BF掺入可以优化BF-PSC孔隙分布,减少内部孔隙数量,过量BF掺入对BF-PSC的孔隙分布则具有劣化作用。最可几孔径为 T_2 谱中出现概率最高的孔隙半径大小,从图4中可以看出,不同BF掺量的PSC最可几孔径尺寸基本相同,随BF掺量变化并不明显。

2.2.2 T_2 谱峰面积

T_2 谱峰面积可以反映试样孔隙数量,图6为BF-PSC T_2 谱峰面积随养护龄期变化图。图6(a)为 T_2 谱总面积,由图6(a)可知, T_2 谱总面积随BF掺量的增加先减小后增加,说明试件内部的孔隙数量先减后增,随养护龄期逐渐减小。这是由于适量BF与砷砂岩颗粒和水泥水化产物具有较好的相容性,改善了BF-PSC的孔隙结构,过量BF对PSC内部微观结构具有劣化作用,增加了PSC孔隙数量。图6(b)为 T_2 谱第2、3峰面积之和,由图6(b)可知, T_2 谱2、3峰面积和随BF掺量的增加先减小后增加,随养护龄期增加逐渐减小。这种现象说明BF-PSC-0.15和BF-PSC-0.3内部中、大型孔隙数量较少,BF-PSC-0.45和BF-PSC-0.6的中、大型孔隙数量较多。

2.2.3 孔隙率和束缚流体饱和度

孔隙率是表征水泥土UCS的重要指标,孔隙

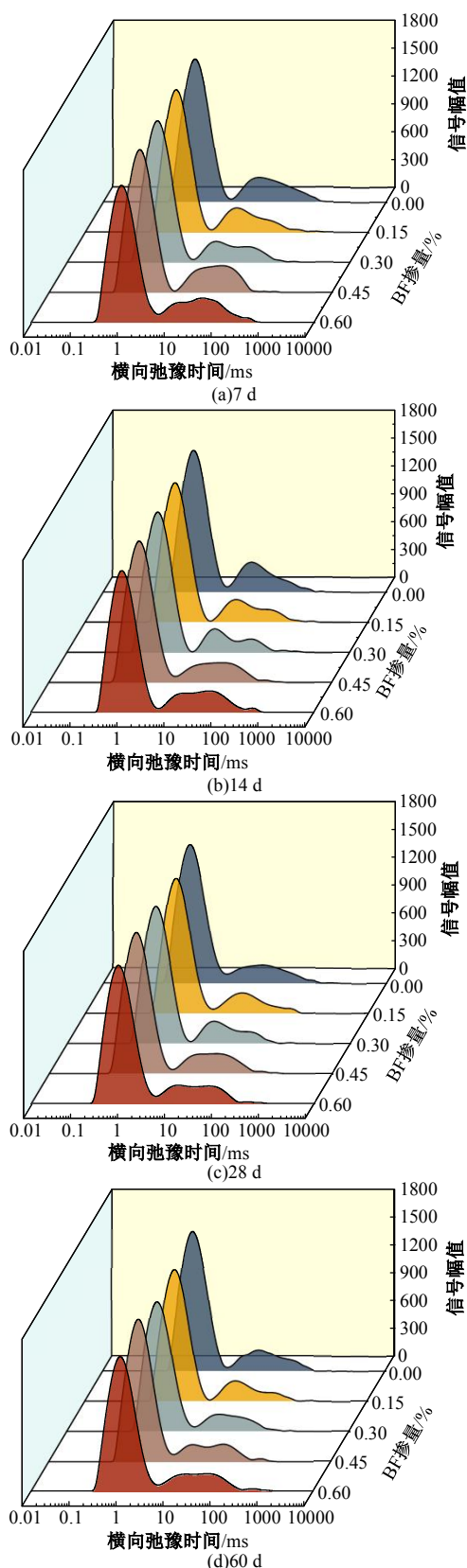


图 5 BF-PSC 不同养护龄期下 T_2 谱图

Fig. 5 T_2 spectra of BF-PSC at different curing age

率越小, UCS 越大。图 7 为 BF-PSC 孔隙率和束缚流体度随 BF 掺量变化图, 由图 7 可知, 养护龄

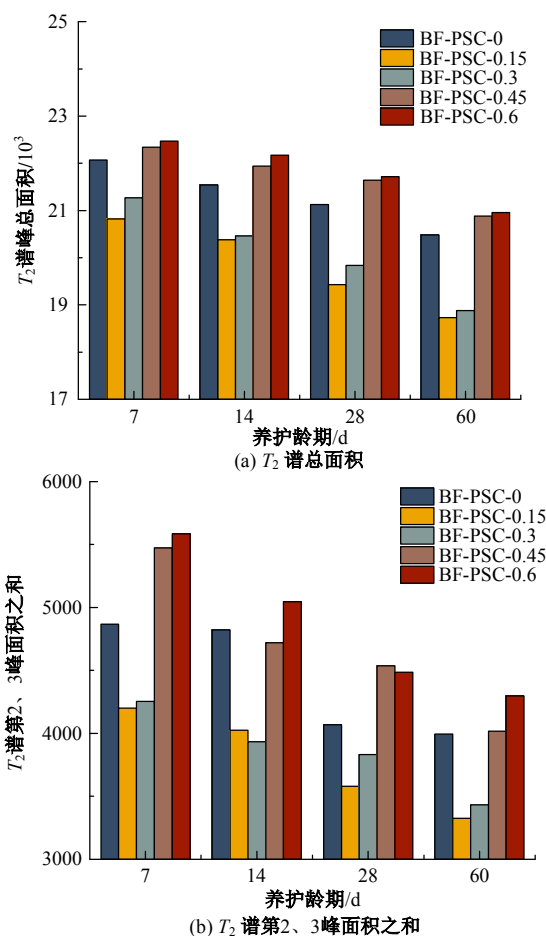


图 6 T_2 谱峰面积随养护龄期变化图

Fig. 6 Variation of T_2 spectral area with curing age

期 60 d 时 BF-PSC-0.15 的孔隙率最小, 其值为 19.48%。与 BF-PSC-0 相比, BF-PSC-0.15 和 BF-PSC-0.3 的孔隙率分别降低了 5.67%、4.16%, BF-PSC-0.45 和 BF-PSC-0.6 的孔隙率分别提高了 2.92%、3.62%。BF 质量分数对 PSC 孔隙率的影响呈先降后升趋势。BF 掺量较低时, BF 均匀分散并被水泥浆体完全包裹, 增强了砒砂岩材料强度与密实度, 降低孔隙率。随着 BF 掺量增加, 水泥浆体包裹不全, 纤维暴露, 浆体层密实性减弱, 且改变水泥土流动性, 导致土体间水泥浆厚度不均, 孔隙率增大; BF 掺量过大时, 水泥砂浆难以填充纤维细孔, 阻碍胶结, 孔隙率增大, 密实性降低, 易形成纤维团聚体, 劣化材料性能。

随着养护龄期增加, 水泥水化产物填充试件内部孔隙, 试件孔隙率逐渐降低, 与 7 d 时的孔隙率相比, 60 d 时 BF-PSC-0、BF-PSC-0.15、BF-PSC-0.3、BF-PSC-0.45 及 BF-PSC-0.6 分别降低了 7.20%、10.04%、11.24%、6.54% 及 6.72%。

养护龄期增加,水泥水化反应更充分,水化产物填充孔隙,使孔隙半径减小、孔隙率降低,并形成更细小均匀的孔隙结构,提高水泥土的密实度和强度。

由图 7 可知,束缚流体饱和度随 BF 掺量和养护龄期变化趋势与孔隙率的变化规律相反,与 UCS 的变化规律相同。束缚流体饱和度随 BF 掺量先增后减,这是由于适量纤维在试件内形成网状结构,分割大孔隙为小孔隙,增加表面积,从而提升束缚流体的滞留能力。同时,BF 与 PSC 的界面结合增强,形成更多的微孔。而过量 BF 导致纤维团聚,形成更大的孔隙和裂缝,减少了微孔的数量,导致束缚流体饱和度下降。束缚流体饱和度随养护龄期增加逐渐增大,是因为 BF-PSC 内部水泥水化反应的持续进行,减少了试件内部的大孔数量。

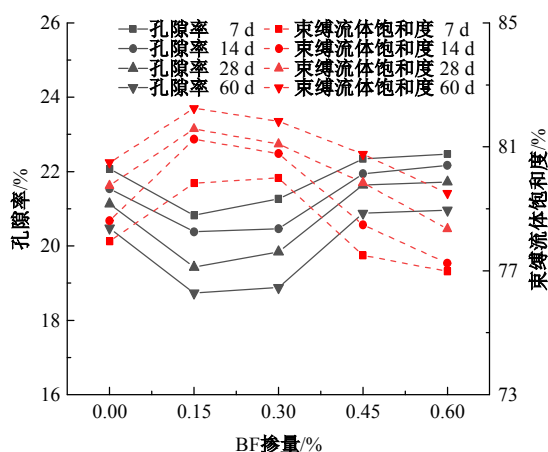


图 7 孔隙率和束缚流体度随 BF 掺量变化图

Fig. 7 Porosity and bound fluid saturation change with BF dosage

2.2.4 孔隙占比

参考 Deng^[26]和 Horpibulsuk^[27]对孔径的划分方法,将孔径类型划分为以下 4 类:微孔($<0.01 \mu\text{m}$)、小孔($0.01\sim0.1 \mu\text{m}$)、中孔($0.1\sim1.0 \mu\text{m}$)和大孔($>1.0 \mu\text{m}$)。图 8 为 BF-PSC 不同孔径占比分布图,由图 8 可知,中孔和大孔占比之和随 BF 掺量增加先减后增。适量 BF 掺入能减少 PSC 中、大孔占比,是因为 BF 被水泥浆体充分包裹,增大了胶结材料体积与密实度,形成紧密结合,降低了大孔隙数量。同时,纤维的均匀分布优化了孔隙结构,增加了小孔数量,减小了孔间距,使孔隙分布更均匀,提升了材料性能。然而,过量 BF 导致中、大孔占比增多,是由于水泥浆体无法

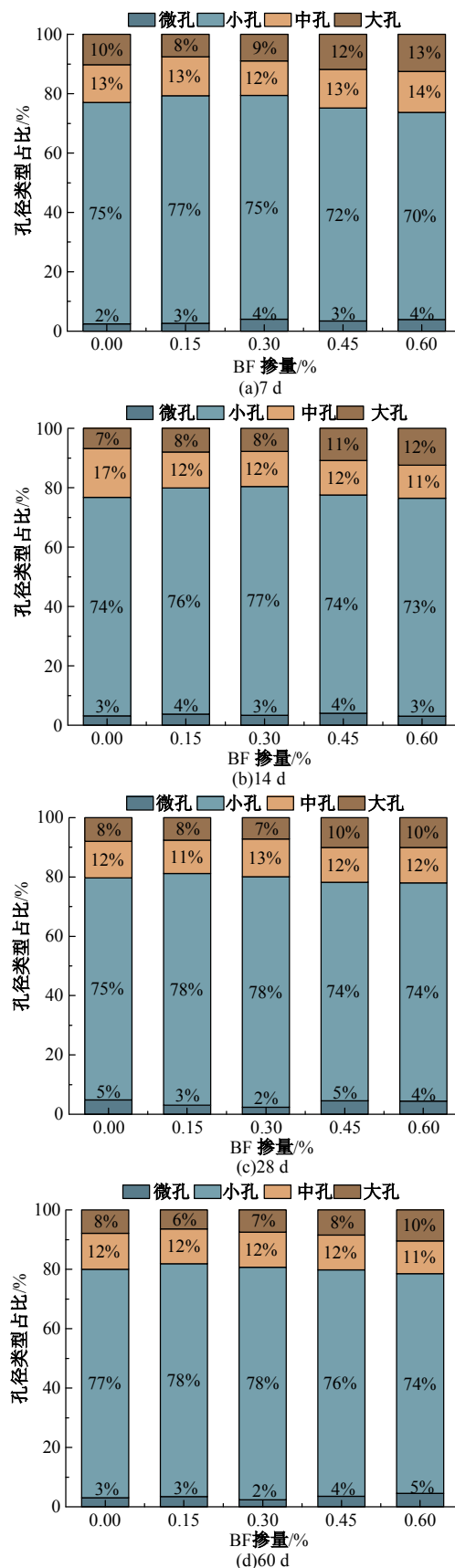


图 8 不同孔径占比分布图

Fig. 8 Distribution of different pore sizes

完全包裹所有纤维,未包裹纤维形成孔隙,同时还阻碍了水泥浆体与砒砂岩颗粒胶结,形成“纤维束”,影响浆体流动与渗透,导致土体胶结不紧密,产生大孔隙。

2.3 灰色关联分析方法

本文基于灰色关联分析方法进一步研究 BF-PSC 的微观结构参数和 UCS 之间的联系。

(1) 参考数列、比较数列选择

$X_0(k)$ 对应序列为参考序列, $X_i(k)$ 对应序列为比较序列。以不同 BF 掺量的 UCS 为参考序列 $X_0(k)$, 以 NMR 试验的微观结构参数为比较序列 $X_i(k)$ (i 分别为束缚流体饱和度、自由流体饱和度、孔隙率、 T_2 谱第 2、3 峰面积和、不同孔径占比)。假设 $X_0(k) = fX_i(k)$, 则变量 $X_0(k)$ 与变量 $X_i(k)$ 按 f 关系相关联。

(2) 运用均值法对原始数据进行无量纲化处理, 如下所示:

$$X'_i = \frac{X_i(k)}{\overline{X_i}} \quad (3)$$

$$\overline{X_i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_i(k), \quad k=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

(3) 构造关联离散函数, 计算关联系数

以参考序列集 $X'_0(k) = \{X'_0(k), k=1, 2, \dots, m\}$ 无量纲化后的值作为参考基准, 以比较序列无量纲化后的值 $X'_i(k) = \{X'_i(k), i=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, m\}$ 作为比较数据列, 灰色关联系数为:

$$\zeta_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (5)$$

式中: $\Delta_{\max}$ 、 $\Delta_{\min}$ 分别为最大和最小极差, $\Delta_{\max} = \max(i) \max(k) \{\Delta_i(k)\}$ 、 $\Delta_{\min} = \min(i) \min(k) \{\Delta_i(k)\}$ ($i \in (1, 2, \dots, n)$, $k \in (1, 2, \dots, m)$), 依据前人研究, ρ 的取值为 0.5^[11,20]。

由式(4)(5)所得结果计算微观结构参数与 UCS 的灰色关联度:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k) \quad (6)$$

图 9 为微观结构参数与 UCS 之间的灰色关联度图。由图 9(a)可知, 在孔结构参数中, 束缚流体饱和度的灰色关联度明显大于其他因素, 其值介于 0.712~0.819 之间。由图 9(b)可知, 在孔径类型分布中, 小孔占比的灰色关联度最大, 其值介于 0.782~0.856 之间。综上所述, 影响其 UCS 的主要因素是束缚流体饱和度和小孔占比。

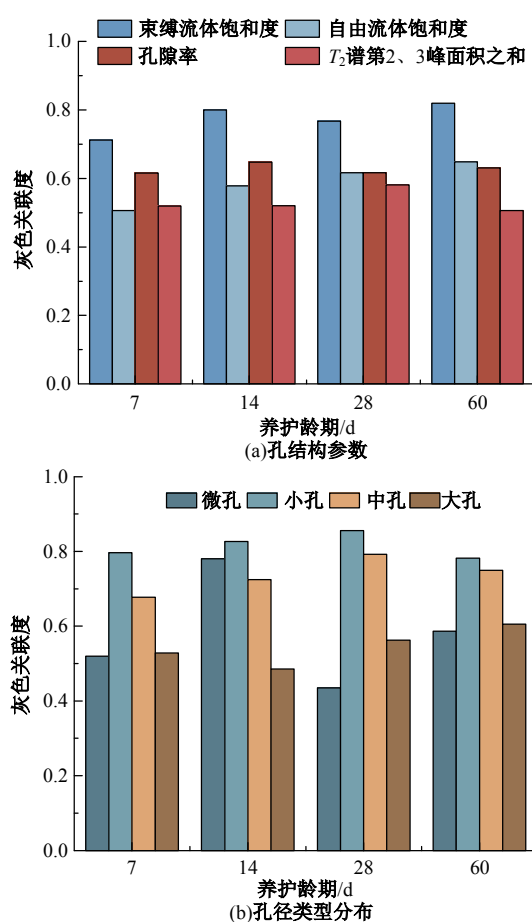


图 9 各种孔隙结构的灰色关联度

Fig. 9 Gray correlation coefficients for various pore structures

2.4 GM(1,N)强度预测模型

灰色模型基于部分已知和部分未知数据, 通过累加生成序列, 构建方程, 并采用最小二乘法求解参数, GM(1,N)模型展现 $(N-1)$ 个变量对主变量变化率的影响。因此, 建立灰色模型前需处理数据, 减弱随机性, 凸显趋势。相关处理步骤如下:

(1) 设 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$ 为原始序列, 其一阶累加生成序列定义为 $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$, 其中 $x^{(1)}(n) = \sum_{i=1}^n x^{(0)}(i)$ 。序列 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成 $Z^{(1)}$, 定义 $Z^{(1)} = (z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n))$, 其中 $z^{(1)}(n) = (x^{(1)}(n) + x^{(1)}(n-1))/2$ 。设 $x_1^{(0)}$ 为参考列, $x_i^{(0)} (i=2, 3, \dots, n)$ 为比较列, 建立的 GM(1,N) 模型如下式所示:

$$x_1^{(0)}(k) + az_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k) \quad (7)$$

式中: $k=1, 2, \dots, n$; 参数 a 为系统发展系数; $b_i x_i^{(1)}(k)$

为驱动项; b_i 为驱动系数; $x_1^{(0)}(k)$ 为参考列; $z_1^{(1)}(k)$ 为 $x_1^{(0)}(k)$ 的紧邻均值生成序列; $x_i^{(1)}(k)$ 为 $x_i^{(0)}(k)$ 的一阶累加生成序列($i=1,2,\dots,n$)。

(2) GM(1, N) 模型微分方程的参数列 $\hat{a} = [a, b_2, \dots, b_n]^T$ 的最小二乘估计满足:

$$\begin{cases} n < N+1, \hat{a} = B^T(B^T B)^{-1} Y, |B^T B| \neq 0 \\ n = N+1, \hat{a} = (B)^{-1} Y, |B| \neq 0 \\ n > N+1, \hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y, |B^T B| \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$B = \begin{bmatrix} -z_1^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & \cdots & x_N^{(1)}(2) \\ -z_1^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & \cdots & x_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ -z_1^{(1)}(n) & x_2^{(1)}(n) & \cdots & x_N^{(1)}(n) \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x_1^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(10)为式(7)的白化方程,其解为式(11):

$$\begin{aligned} \frac{dx_1^{(1)}}{dt} + ax_1^{(1)}(k) &= \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k) \quad (10) \\ \hat{x}_1^{(1)}(k+1) &= \left[x_1^{(1)}(0) - \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k+1) \right] e^{-ak} + \\ &\quad \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k+1) \quad (11) \end{aligned}$$

(3) 利用式(11)作累减还原,并取 $x_1^{(1)}(0)$ 为 $x_1^{(0)}(1)$, 可得第 $k+1$ 个预测值 $\hat{x}_1^{(0)}(k+1)$ 为式(12):

$$\hat{x}_1^{(0)}(k+1) = \hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k) \quad (12)$$

设 x_1^0 为不同 BF 掺量 PSC 的 UCS, x_i^0 ($i=2, 3$) 为束缚流体指数和小型孔隙的占比,依据式(7)建立的 GM(1, 3) 模型为:

$$x_1^{(0)}(k) + a z_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^3 b_i x_i^{(1)}(k) \quad (13)$$

该模型以不同 BF 掺量 (0%、0.15%、0.3%、0.45% 和 0.6%) PSC 的 UCS、束缚流体饱和度、小型孔隙占比的数据经过一阶累加 (1-AGO) 生成的序列作为建模集。将养护龄期 7 d、14 d、28 d 和 60 d 的建模集数据依次代入式(11)~(13)中,可得到相应 UCS 预测模型,分别为式(14)~(17)所示:

$$\hat{x}_1^{(1)}(k+1) = [1.55 + 0.103x_2^{(1)}(k+1) - 0.13x_3^{(1)} \times (k+1)] e^{-1.746k} - 0.103x_2^{(1)}(k+1) + 0.13x_3^{(1)}(k+1)$$

$$\hat{x}_1^{(0)}(k+1) = \hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k), k=0, 1, \dots \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_1^{(1)}(k+1) &= [1.67 - 0.039x_2^{(1)}(k+1) + 0.019x_3^{(1)} \times (k+1)] e^{-2.64k} + 0.039x_2^{(1)}(k+1) - 0.019x_3^{(1)}(k+1) \\ \hat{x}_1^{(0)}(k+1) &= \hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k), k=0, 1, \dots \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_1^{(1)}(k+1) &= [1.89 + 0.066x_2^{(1)}(k+1) - 0.095x_3^{(1)} \times (k+1)] e^{-2.461k} - 0.066x_2^{(1)}(k+1) + 0.095x_3^{(1)}(k+1) \\ \hat{x}_1^{(0)}(k+1) &= \hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k), k=0, 1, \dots \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_1^{(1)}(k+1) &= [2.26 + 0.118x_2^{(1)}(k+1) - 0.154x_3^{(1)} \times (k+1)] e^{-2.234k} - 0.118x_2^{(1)}(k+1) + 0.154x_3^{(1)}(k+1) \\ \hat{x}_1^{(0)}(k+1) &= \hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k), k=0, 1, \dots \end{aligned} \quad (17)$$

依据孔隙结构参数与 UCS 的灰关联度,建立如式(13)所示的 GM(1, 3) 灰色预测模型,然后利用式(14)~(17)计算 UCS 估算值,估算值与试验值的关系见表 3。由表 3 可知:估算值平均相对误差在 9.27% 以内,预测值与试验值之间的相对误差为 -17.12%~12.25%,拟合程度较高,说明 GM(1, 3) 模型有较高预测精度,可以通过 BF-PSC 的孔隙结构参数对其 UCS 进行预测。

表 3 预测值和试验值之间的相对误差

Table 3 Relative error between predicted and test values table %

龄期 /d	BF 掺量/%				平均相对 误差/%
	0.15	0.3	0.45	0.6	
7	-9.75	6.19	12.25	-2.17	7.58
14	-16.47	-0.43	5.16	10.25	8.07
28	-17.12	8.75	-2.55	8.68	9.27
60	-15.05	6.56	5.24	-1.01	6.96

3 结 论

(1) BF-PSC 的 UCS 随 BF 质量分数的增加呈现先增大后减小的变化趋势,随养护龄期的增大逐渐增大,BF 的最优掺量为 0.15%。割线模量与 UCS 呈线性关系,建立了二者之间的函数关系式 $E_{50} = 41.186q_u$ 。

(2) BF-PSC 的 T_2 谱总面积与 2、3 峰面积之和均随 BF 掺量的增加先减后增,随养护龄期的增大逐渐减小。BF 的适量掺入优化了 BF-PSC 的孔隙分布,减少了内部孔隙数量,BF 的过量掺入则对孔隙分布具有劣化作用。

(3)随着BF掺量的增加,BF-PSC中微、小孔所占百分比之和先增后减,中、大孔的百分比之和先减后增。适量BF掺入优化了PSC孔隙结构,使孔隙分布更为均匀,从而提高了BF-PSC材料的整体性能。

(4)束缚流体饱和度和小孔所占百分比随BF掺量增加先增后降,同时灰色关联分析表明二者与BF-PSC的UCS具有较高的相关性。基于灰色关联分析结果,利用GM(1,3)灰色模型建立了BF-PSC的UCS预测模型,估算值平均相对误差在9.27%以内。

参考文献:

- [1] 李晓丽. 砒砂岩抗蚀性力学机理研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [2] Dong J, Li C, Liu H, et al. Investigating the mechanical property and reaction mechanism of geopolymers cement with red pisha sandstone[J]. Construction and Building Materials, 2019, 201: 641-650.
- [3] 王辉, 李晓丽, 杨健, 等. 玄武岩纤维-砒砂岩水泥土力学特性试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(12): 1264-1269, 1290.
Wang Hui, Li Xiao-li, Yang Jian, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber-pisha sandstone cement soil[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(12): 1264-1269, 1290.
- [4] Geng K, Chai J, Qin Y, et al. Collapse inhibition mechanism analysis and durability properties of cement-stabilized pisha sandstone[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(144): 1-18.
- [5] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 127-146.
Zheng Gang, Gong Xiao-nan, Xie Yong-li, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 127-146.
- [6] 牛雷, 徐丽娜, 郑俊杰. 纤维对水泥土加固效果影响的试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2021, 43(2): 35-40.
Niu Lei, Xu Li-na, Zheng Jun-jie. Experimental study on the reinforcement effect of fiber on cement soil[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 35-40.
- [7] 徐文彬, 李乾龙, 田明明. 聚丙烯纤维加筋固化尾砂强度及变形特性[J]. 工程科学学报, 2019, 41(12): 1618-1626.
- Xu Wen-bin, Li Qian-long, Tian Ming-ming. Strength and deformation properties of polypropylene fiber-reinforced cemented tailings backfill[J]. Journal of Engineering Science, 2019, 41(12): 1618-1626.
- [8] Xue C, Wang X, Lian B, et al. Research on the mechanism of composite improvement of loess based on quantitative analysis of microstructure and mechanical strength[J]. Construction and Building Materials, 2023, 379: No. 131215.
- [9] Chen J, Mu J, Chen A, et al. Experimental study on the properties of basalt fiber-cement-stabilized expansive soil[J]. Sustainability, 2024, 16(17): No. 7579.
- [10] Seyed S H, Meysam B, Mohsen M, et al. Freeze-thaw durability of cement-stabilized soil reinforced with polypropylene/basalt fibers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(9): No. 04021232.
- [11] 刘鑫, 申向东, 薛慧君, 等. 水泥固化砒砂岩强度与孔隙结构演变的灰熵关联分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 125-133.
Liu Xin, Shen Xiang-dong, Xue Hui-jun, et al. Grey entropy analysis of strength and pore structure evolution of cement-solidified Pisha sandstone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 125-133.
- [12] 涂义亮, 张瑞, 任思雨, 等. 玄武岩纤维提升水泥土抗压性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(1): 36-46.
Tu Yi-liang, Zhang Rui, Ren Si-yu, et al. Experimental study on the compressive performance of hydraulic soil enhanced by basalt fiber[J]. China Railway Science, 2024, 45(1): 36-46.
- [13] 马芹永, 高常辉. 玄武岩纤维和砂对水泥土微观结构及拉压强度的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(1): 148-159.
Ma Qin-yong, Gao Chang-hui. Effects of basalt fiber and sand on microstructure and tensile strength of hydraulic soil[J]. Journal of Applied Basic Science and Engineering, 2020, 28(1): 148-159.
- [14] 鹿群, 郭少龙, 王闵闵, 等. 纤维水泥土力学性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 421-426.
Lu Qun, Guo Shao-long, Wang Min-min, et al. Experimental study of mechanical properties of fiber cement soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup. 2): 421-426.
- [15] 王闵闵, 鹿群, 郭少龙, 等. 循环荷载作用下纤维水泥土动力特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1753-1760.

- Wang Min-min, Lu Qun, Guo Shao-long, et al. Dynamic behavior of soil with fiber and cement under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1753-1760.
- [16] Xu J, Zhao X, Chen Z, et al. Novel prediction models for composite elastic modulus of circular recycled aggregate concrete-filled steel tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144: No. 106317.
- [17] 张钺, 王玲, 姚燕, 等. 碳化混凝土孔隙结构与 Autoclam 气体渗透性能的关联性研究[J]. 材料导报, 2023, 37(8): 50-54.
- Zhang Cheng, Wang Ling, Yao Yan, et al. On the relationship between pore structure and gas permeability from Autoclam test in carbonated concrete[J]. Materials Reports, 2023, 37(8): 50-54.
- [18] Jiang Q, Liu W, Wu S. Analysis on factors affecting moisture stability of steel slag asphalt concrete using grey correlation method[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 397, No. 136490.
- [19] 周翱翔, 张云升, 钱如胜, 等. 花岗岩石粉对机制砂混凝土基本性能及气体渗透特性的影响[J]. 复合材料学报, 2024, 41(7): 3704-3715.
- Zhou Ao-xiang, Zhang Yun-sheng, Qian Ru-sheng, et al. Influence of granite stone powder on the basic properties and gas permeability characteristics of mechanism sand concrete[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2024, 41(7): 3704-3715.
- [20] 范凌燕. 水泥土无侧限抗压强度影响因素的灰色关联度分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(3): 476-479.
- Fan Ling-yan. Influence factors of unconfined compressive strength of cement-treated soil based on grey relevant degree theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(3): 476-479.
- [21] Geng K, Li X. Performance analysis of sulfate pisha-sandstone cement soil based on the grey entropy theory[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(2): 584-595.
- [22] GB/T 50123—2019. 土工试验方法标准[S].
- [23] 涂义亮, 任思雨, 赵林, 等. 玄武岩纤维-粉煤灰提升水泥土抗剪性能试验研究[J]. 材料导报, 2025, 39(16):133-140.
- Tu Yi-liang, Ren Si-yu, Zhao Lin, et al. Experimental study of basalt fiber-fly ash to enhance the shear properties of cement soil[J]. Materials Reports, 2025, 39(16):133-140.
- [24] JGJ 79—2012. 建筑地基处理技术规范[S].
- [25] 周华, 李英亮, 高峰, 等. 低场单边核磁对砖石材料加固效果的评价[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 1097-1102.
- Zhou Hua, Li Ying-liang, Gao Feng, et al. Evaluation of consolidation of the brick materials by mobile single-side NMR[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(6): 1097-1102.
- [26] Deng Y, Yue X, Liu S, et al. Hydraulic conductivity of cement-stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution[J]. Engineering Geology, 2015, 193: 146-152.
- [27] Horpibulsuk S, Rachan R, Raksachon Y. Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay[J]. Soils and Foundations, 2009, 49(1): 85-98.