



基于疏浚土的气泡混合轻质土性能及纤维改性的试验研究*

庄宁, 王涯琳, 夏旭江, 曾易

(河海大学 港口海岸及近海工程学院, 江苏南京 210098)

摘要: 针对长江疏浚土资源化利用难(含水量高、强度低、成型难), 且传统气泡混合轻质土抗拉强度不足、脆性大, 无法适配浮岛载体的问题, 开展相关轻质化及纤维改性研究。采用正交试验, 以灰砂比、泡沫体积掺量、水砂比为变量确定最优配合比, 再掺入不同参数的玄武岩纤维(basalt fiber, BF)和聚丙烯纤维(polypropylene fiber, PPF), 结合力学性能测试与微观分析探究改性效果。结果表明: 最优配合比为灰砂比0.40、泡沫掺量10%、水砂比0.35, 对应干密度 0.77 g/cm^3 、湿密度 0.84 g/cm^3 、28 d抗压强度最优、吸水率12.3%; BF最佳掺量0.5%(长度12 mm), 劈裂抗拉强度提升18%, 干缩率显著降低; PPF最优掺量0.3%(长度9 mm), 28 d韧性提升30%、饱水抗压强度提高、脆性破坏几率降低, 两种纤维均使界面黏结力有所提升。该材料密度与水接近, 可作为漂浮景观载体, 为长江疏浚土轻量化与生态化利用提供技术支持。

关键词: 疏浚土; 气泡混合轻质土; 纤维; 体积掺量; 最优配合比; 漂浮景观

中图分类号: U616; TV42+3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0041-11

Experimental study on properties of bubble-mixed lightweight soil based on dredged soil and its fiber modification

ZHUANG Ning, WANG Yalin, XIA Xujiang, ZENG Yi

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To address the challenges in resource utilization of dredged soil from the Yangtze River (high moisture content, low strength, and difficulty in forming), and the inadequacies of traditional bubble-mixed lightweight soil (insufficient tensile strength and high brittleness, rendering it unsuitable as a floating island substrate), research on lightweighting and fiber modification is conducted. Orthogonal experiments are conducted to determine the optimal mix proportion by varying the cement-sand ratio, foam volume content, and water-sand ratio. Basalt fiber (BF) and polypropylene fiber (PPF) with different parameters are then incorporated. The modification effects are investigated through mechanical property tests and microscopic analysis. Results indicate that the optimal mix proportion is a cement-to-sand ratio of 0.4, a foam volume fraction of 10%, and a water-to-sand ratio of 0.35, corresponding to a dry density of 0.77 g/cm^3 , a wet density of 0.84 g/cm^3 , the optimal 28-day compressive strength, and a water absorption rate of 12.3%. The optimal BF content is 0.5% (length: 12 mm), which increases the splitting tensile strength by 18% and significantly reduces the dry shrinkage rate. The optimal PPF dosage is 0.3% (length: 9 mm), which enhances the 28-day toughness by 30%, improves the saturated compressive strength, and reduces the probability of brittle failure. Both fibers improve the interfacial bonding strength to a certain extent. With a density close to that of water, this material can be used as a floating landscape carrier, providing technical support for the lightweight and ecological utilization of dredged soil from the Yangtze River.

Keywords: dredged soil; bubble-mixed lightweight soil; fibers; volume content; optimal mix proportion; floating landscape

收稿日期: 2025-09-06 录用日期: 2025-10-27

*基金项目: 广西重点研发计划项目(51679080)

作者简介: 庄宁(1977—), 男, 博士, 教授, 从事港口结构工程相关研究。

随着长江经济带生态保护战略的推进,长江下游产生了大量疏浚土^[1-3],叠加我国沿海、内河航道及河湖疏浚形成的巨量废弃淤泥,传统堆弃处置模式不仅加剧土地占用,且疏浚土中含有铅、汞、镉等重金属^[4-7],易造成生态污染,其高效资源化利用已成为亟待解决的关键问题。但因疏浚土具有含水量高、强度低、成型难等特性,难以直接作为工程材料使用。

为实现疏浚土的减量化与高值化利用,国内外学者提出了多种轻量化和固化处理技术。蔡辉等^[8]、许广才等^[9]通过储泥坑调控疏浚土的土水分离效率;张杨杨等^[10]开发的分级开挖—排水固结技术,可增强土体强度,抑制液化风险。张吕华等^[11]、李千^[12]、胡小波等^[13]验证了真空预压技术对地基承载力提升及固结时间缩短的积极作用。廖智磊^[14]提出水泥-粉煤灰固化结合分层脱水搅拌工艺,实现了疏浚土的无害化与资源化利用。张盼盼^[15]研究了循环荷载作用下淤泥轻量土的变形机理,揭示了EPS(expanded polystyrene,聚苯乙烯)颗粒对材料强度与变形性能的影响规律,为轻质土在复杂荷载条件下的应用提供了理论依据。浩婷等^[16]通过掺入改性EPS颗粒制备疏浚淤泥轻量土,发现适量改性剂可显著提高抗压强度并降低材料密度,拓展了淤泥轻量化利用途径。陈玮琳等^[17]系统总结了疏浚淤泥资源化利用的关键技术,提出了轻量化与固化结合的综合处理思路,为实现淤泥“减量化—无害化—资源化”提供了可行的技术路线。

气泡混合轻质土是一种通过将泡沫引入水泥基浆体中形成的多孔轻质材料,具有密度可调、流动性好、成型便捷等优点,已在软弱地基处理、填筑与生态工程中广泛应用^[18-27],但该材料在长期服役过程中仍存在抗拉强度不足、脆性较大等问题,限制了其在浮岛载体等受拉环境中的应用。纤维增强技术可通过在材料内部形成三维支撑网络,抑制微裂缝扩展,提高材料的韧性、抗裂性与抗拉性能。因此,将纤维复合改性应用于气泡

混合轻质土,具有显著的性能优化潜力。

综上所述,为探究利用长江下游疏浚土研制气泡混合轻质土作为浮岛载体的适用性,本文通过正交试验确定了最佳配合比。随后在气泡混合轻质土的基础上加入玄武岩纤维(basalt fiber, BF)和聚丙烯纤维(polypropylene fiber, PPF),通过纤维对材料进行优化,要求其密度与水接近且具备一定的强度,使其成为一种新型生漂浮景观载体材料,既实现疏浚土的轻量化处理,又弥补传统浮岛材料的可持续性缺陷,以期为疏浚土资源化与水生态修复的协同发展提供新思路。

1 试验

1.1 试验材料

试验所用疏浚土样来自长江下游南京河段八卦洲汊道河道整治工程,所选土源区位于河床床面以下10 m以内,主要由粉土、粉沙、细沙等组成,泥沙粒径分布范围为0.005~0.500 mm,在室外自然风干后使用,风干后的土样呈黄色,矿物组成见表1。

表1 疏浚土主要矿物组成

Tab.1 Main mineral composition of dredged soil

| 矿物组成 | 蛭石 | 水云母 | 闪石 | 绿泥石 | 石英 | 长石 | 方解石 | 白云石 |
|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|
| 含量/% | 4.2 | 9.3 | 15.1 | 14.6 | 33.2 | 15.2 | 5.3 | 3.1 |

泡沫作为气泡混合轻质土的主要材料,影响其质量的两大因素是发泡剂和发泡装置。发泡剂是使气泡混合轻质土中使土成孔的物质,发泡剂的好坏决定了制成的气泡混合轻质土的性质,选用发泡性能好、泡沫稳定持久、环保经济的植物蛋白发泡剂,当发泡剂经过稀释后,配合高压空气型发泡剂进行压缩空气发泡,所生成的泡沫群更加细腻且产沫更快,从而可以得到性能更好的泡沫混合轻质土。其性能参数见表2。

表2 发泡剂性能参数

Tab.2 Foaming agent performance parameters

| 沉降距/(mm·L ⁻¹) | 泌水量/(g·h ⁻¹) | 稀释倍数 | 发泡倍数 |
|---------------------------|--------------------------|------|------|
| 5 | 20 | 60 | 20 |

泡沫能否与水泥浆充分融合也将影响泡沫混合轻质土的性能,卧式搅拌机能通过搅拌叶反复地将浆料切割、提升、洒落,从而使泡沫和浆料更好的融合,且不会使泡沫消泡,所以试验选择卧轴式搅拌机,用于搅拌水泥浆与泡沫。

试验水泥选用海螺水泥有限公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其化学成分见表 3;试验所用纤维来源于长沙柠祥公司所产的聚丙烯纤维(白色丝状物)和玄武岩纤维(黑色条状物),两种纤维的性能参数见表 4。

表 3 水泥的化学组成

Tab. 3 Chemical composition of cement

| 化学成分 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | TiO ₂ | SO ₃ | Na ₂ O |
|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-----------------|-------------------|
| 质量分数/% | 20.58 | 5.64 | 3.95 | 62.25 | 2.48 | 0.32 | 3.18 | 0.36 |

表 4 纤维的性能参数

Tab. 4 Fiber performance parameters

| 材料 | 长度/ mm | 抗拉强度/ MPa | 密度/ (g·cm ⁻³) | 弹性模量/ GPa | 纤维直径/ μm |
|-------|-----------|--------------|------------------------------|--------------|-------------|
| 聚丙烯纤维 | 9 | 486 | 0.91 | 4.8 | 18~48 |
| 玄武岩纤维 | 6-12 | 1050 | 2.65 | 7.6 | 17 |

1.2 试验设计

试验采用正交试验法,考虑灰砂比(A)、泡沫体积掺量(B)和水砂比(C)3种因素,每个因素取3个水平,利用正交表设计三因素三水平试验。根据预试验结果可知,灰砂比<0.3时胶凝材料不足可能导致强度过低,灰砂比>0.4时材料密度无法达到轻量化的需求,所以设0.30、0.35、0.40三个水平。此外,当水砂比<0.35时,拌合物的流动性较差,成型难,水砂比>0.4时,水分过多容易导致孔隙率的增加,吸水率增大,所以最终设置0.35、0.37、0.4三个水平。正交试验因素水平见表5,正交试验配合比方案见表6。

表 5 正交试验因素水平

Tab. 5 Orthogonal experimental factor levels

| 水平 | 因素 | | |
|----|--------|-----------|--------|
| | 灰砂比(A) | 泡沫体积掺量(B) | 水砂比(C) |
| 1 | 0.30 | 8% | 0.35 |
| 2 | 0.35 | 10% | 0.37 |
| 3 | 0.40 | 12% | 0.40 |

表 6 正交试验配合比方案

Tab. 6 Orthogonal test mix design plan

| 组号 | 灰砂比 | 泡沫体积掺量 | 水砂比 |
|-----|----------|---------|----------|
| B-1 | A1(0.30) | B1(8%) | C1(0.35) |
| B-2 | A1(0.30) | B2(10%) | C2(0.37) |
| B-3 | A1(0.30) | B3(12%) | C3(0.40) |
| B-4 | A2(0.35) | B1(8%) | C2(0.37) |
| B-5 | A2(0.35) | B2(10%) | C3(0.40) |
| B-6 | A2(0.35) | B3(12%) | C1(0.35) |
| B-7 | A3(0.40) | B1(8%) | C3(0.40) |
| B-8 | A3(0.40) | B2(10%) | C1(0.35) |
| B-9 | A3(0.40) | B3(12%) | C2(0.37) |

将发泡剂稀释60倍后通过空气压缩机发泡至足量后停止,同时按配合比称取疏浚土、水泥和水放入搅拌锅中搅拌均匀;接着将制备好的泡沫群加入水泥浆体中搅拌至完全均匀后倒入模具中,每组制作3个100mm×100mm×100mm立方体试件,标准养护(温度(20±2)℃,相对湿度≥95%)至7、14、28d。测试指标包括干密度、湿密度、吸水率、抗压强度,综合评分筛选最适配疏浚土特性的最优配合比。

在此框架下,通过水泥浆体引入PPF与BF,再加泡沫群,构建纤维掺量配合比,以研究纤维参数(类型、长度、体积掺量)对材料性能的影响,其中水砂比、灰砂比和泡沫体积掺量为最优配合比,见表7。

表 7 两种纤维不同长度下的配合比

Tab. 7 Blend ratio for two fibers at different lengths

| 组号 | 纤维类型 | 纤维长度/mm | 纤维体积掺量/% |
|------|-------|---------|----------|
| D-1 | 玄武岩纤维 | 6 | 0.10 |
| D-2 | 玄武岩纤维 | 6 | 0.30 |
| D-3 | 玄武岩纤维 | 6 | 0.50 |
| D-4 | 玄武岩纤维 | 9 | 0.10 |
| D-5 | 玄武岩纤维 | 9 | 0.30 |
| D-6 | 玄武岩纤维 | 9 | 0.50 |
| D-7 | 玄武岩纤维 | 9 | 0.70 |
| D-8 | 玄武岩纤维 | 12 | 0.10 |
| D-9 | 玄武岩纤维 | 12 | 0.30 |
| D-10 | 玄武岩纤维 | 12 | 0.50 |
| D-11 | 聚丙烯纤维 | 9 | 0.10 |
| D-12 | 聚丙烯纤维 | 9 | 0.30 |
| D-13 | 聚丙烯纤维 | 9 | 0.50 |
| D-14 | 聚丙烯纤维 | 9 | 0.70 |

本文研究通过对掺入不同体积掺量及长度的BF与PPF的气泡混合轻质土进行系统测试综合分析纤维增强效应。

1.3 试验性能测试

试验性能测试根据 GB/T 11969—2020《蒸压加气混凝土性能试验方法》^[28]进行。

1.3.1 干、湿密度及吸水率试验

气泡混合轻质土试件经电热鼓风机阶梯烘干：60℃烘干24h(去除自由水)→80℃烘干24h(去除吸附水)→105℃烘干至恒重；干燥器冷却后，由电子游标卡尺测量来计算试件体积；之后时间在水箱中分3级浸水(1/3→2/3→高出顶面30mm，各24h)至饱和，擦干称重。干密度、湿密度和吸水率的计算公式见式(1)~(3)。

$$\rho = \frac{M_0}{V} \times 10^3 \quad (1)$$

$$\rho_0 = \frac{M_g}{V} \times 10^3 \quad (2)$$

$$W_r = \frac{M_g - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中： ρ 为干密度； ρ_0 为湿密度； V 为测量计算的试件体积； W_r 为吸水率； M_0 为试件烘干后的质量； M_g 为试件吸水后的质量。

1.3.2 劈裂抗拉强度测试

依据 GB/T 11969—2020《蒸压加气混凝土性能试验方法》，采用 SHT 4305 型电液伺服万能试验机对各龄期的泡沫轻质土试件进行劈裂抗拉强度测试，根据式(4)计算土浆试件的劈裂抗拉强度，结果精确到 0.01 MPa。

$$f_{ts} = \frac{2P_2}{\pi A_2} \approx 0.637 \frac{P_2}{A_2} \quad (4)$$

式中： f_{ts} 为劈裂抗拉强度； P_2 为破坏荷载； A_2 为试件劈裂面面积。

1.3.3 抗压强度

依据《蒸压加气混凝土性能试验方法》，采用 SHT4305 型电液伺服万能试验机测试。每个试验组制作 3 个试件，以其平均值作为各试验的结果。采用捷克 TESCAN MIRALMS 型扫描电子显微镜分析微观形貌，在真空喷金状态下观察试件。

2 试验结果讨论

2.1 配合比对指标的影响分析

2.1.1 干湿密度与吸水率变化规律

正交试验各组干密度、湿密度及吸水率见图 1。干密度变化范围为 0.43~0.77 g/cm³，B-3 组干密度最小，B-8 组干密度最大；湿密度变化范围为 0.54~0.85 g/cm³，B-3 组湿密度最小，B-5 组与 B-8 组湿密度最大；吸水率变化范围为 7.5%~31.5%，B-7 组吸水率最小，B-2 组吸水率最大。B-8 组在高干密度、高湿密度基础上保持较低吸水率(12.3%)，综合性能最优。

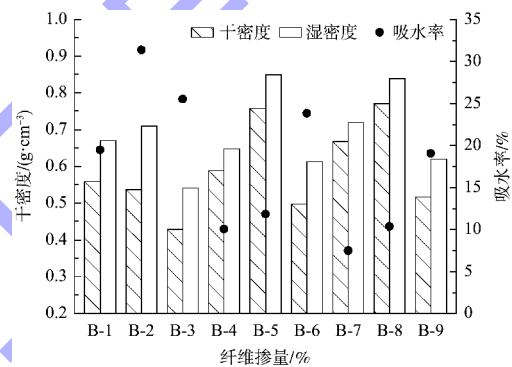


图 1 正交试验各组干湿密度及吸水率

Fig. 1 Dry and wet densities and water absorption rates of each group in the orthogonal test

2.1.2 强度变化规律

7、14、28 d 的抗压强度见图 2，随龄期的增加，抗压强度整体出现上升趋势，但 B-3 组的抗压强度始终在整组试验中最低，而 B-8 组的抗压强度始终在整组试验中最高；28 d 时，B-8 组抗压强度最高，为 1.32 MPa。

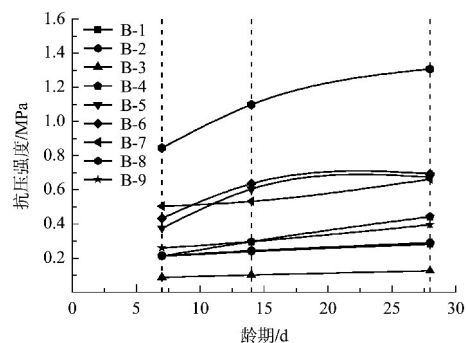


图 2 抗压强度随龄期变化曲线

Fig. 2 Compressive strength variation with age curve

2.1.3 应力-应变变化规律

正交试验中 7、14 及 28 d 龄期的应力-应变曲线见图 3。随着龄期的增长, 曲线的峰值应力会提高, B-8 组峰值应力最高, 能承受的应力较大, 不容易发生断裂; B-3 组峰值应力最低。从综合强度和变形能力来看, B-8 组合在相同应变下能承受更高的应力, 且具有更好的变形特性。

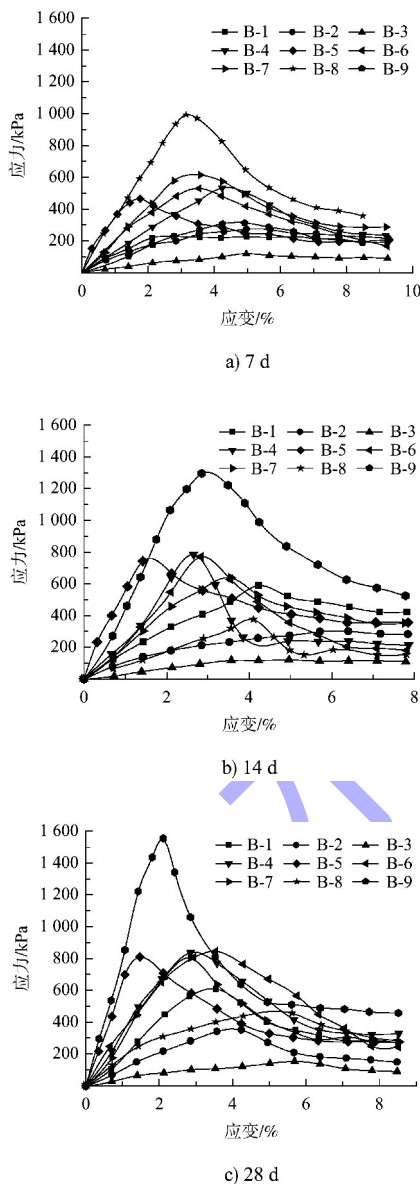


图 3 各龄期应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves at different ages

2.1.4 疏浚土气泡轻质化最优配合比

根据以上“干湿密度与吸水率变化规律、强度变化规律和应力-应变变化规律”, 可确认 B-8 组为最优配合比: 灰砂比为 0.4、泡沫体积含量为

10%, 水砂比为 0.35。在此配合比下, 材料在密度、吸水率、力学性能等方面表现出优异的综合性能, 并符合相关规范的要求。

2.2 纤维对气泡混合轻质土改性分析

在最优配合比条件下, 气泡混合轻质土的干湿密度均能满足生态浮台的技术要求, 但其抗压强度与劈裂抗拉强度仍未达到指标要求。为解决该问题, 基于 B-8 组, 通过引入 PPF 与 BF, 以研究纤维参数(类型、长度、体积掺量)对材料性能的影响。

2.2.1 基本力学性能变化规律

纤维改性后气泡混合轻质土饱水抗压强度见图 4。随浸水时间延长, 各组抗压强度均下降; PPF 体系中 0.3% 掺量组在所有浸水龄期强度最高, BF 体系中 0.5% 掺量组强度最优。

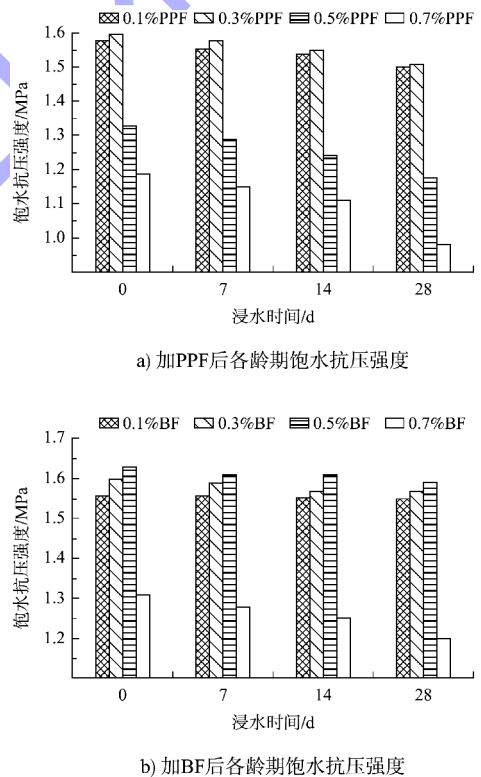
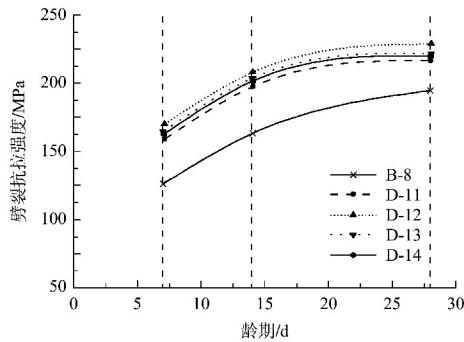


图 4 气泡混合轻质土饱水抗压强度

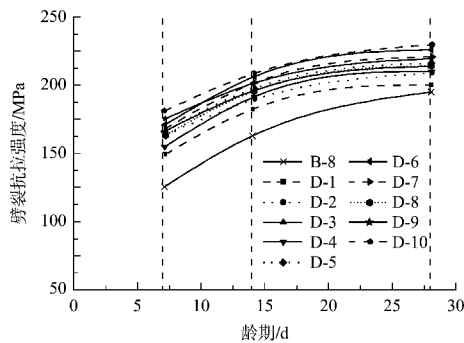
Fig. 4 Saturated compressive strength of bubble-mixed lightweight soil

纤维改性对气泡混合轻质土劈裂抗拉强度的影响见图 5。纤维显著提升劈裂抗拉强度: PPF 体系中 D-12 组(0.3% 掺量)强度最高, 掺量 > 0.3% 时增幅降低; BF 体系中强度随掺量增加而提高,

掺量>0.5%(D-7组)时增幅显著减弱;最优掺量下,PPF组强度值更高且增强效果更稳定。



a) 加PPF后各龄期劈裂抗拉强度



b) 加BF后各龄期劈裂抗拉强度

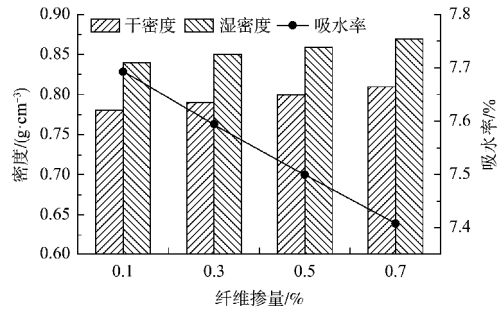
图5 气泡混合轻质土各龄期劈裂抗拉强度
Fig.5 Splitting tensile strength of bubble-mixed lightweight soil at different ages

2.2.2 吸水性能规律

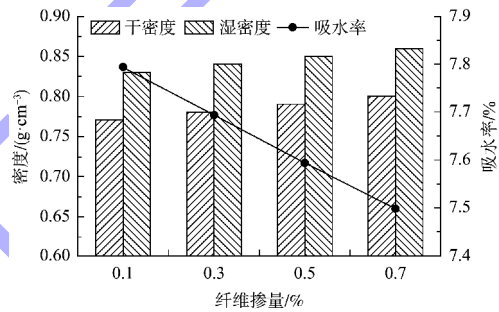
纤维改性后气泡混合轻质土的吸水性能见图6。未掺纤维时,材料干密度为0.77 g/cm³、湿密度为0.84 g/cm³;掺入PPF与BF后,干密度随纤维掺量增加呈正相关上升,低掺量下湿密度出现降低,且吸水率较未掺纤维组显著下降。

规范符合性验证显示,BF体积掺量>0.5%、PPF体积掺量>0.3%时,对应干密度下的抗压强度不满足JG/T 266—2011《泡沫混凝土》要求;两种纤维掺量>0.5%时,饱水抗压强度不符合JJ/T 177—2012《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》要求。仅当BF体积掺量≤0.5%时,干密度-抗压强度、湿密度-饱水抗压强度均满足双规范;PPF体积掺量≤0.3%时符合干密度强度规范,PPF体积掺量≤0.5%时满足饱水强度规范。

综合来看,BF体积掺量0.5%、PPF体积掺量0.3%时,材料吸水性能最优,且各项强度指标均符合规范要求。



a) 加PPF后吸水性能



b) 加BF后吸水性能

图6 气泡混合轻质土的吸水性能
Fig.6 Water absorption performance of bubble-mixed lightweight soil

2.2.3 变形特性分析

PPF、BF改性后气泡混合轻质土各龄期应力-应变曲线分别见图7、8。7d龄期时,加纤维组应力峰值位置较未掺纤维组向坐标轴后方移动,应变增大,能承受更大变形;D-4~D-7、D-11~D-14组应力峰值位置比未掺纤维组(B-8)更靠后;14d龄期时,加纤维组应力峰值位置较7d更靠后,破坏阶段应力下降也更为平缓;28d龄期时,曲线形态稳定,加纤维组峰值应力、应变优势持续,破坏阶段应力缓降特征显著。

加纤维后材料弹性模量变化见图9。D-4~D-7组(BF改性)与D-11~D-14组(PPF改性)的弹性模量均显著低于B-8组,且纤维掺量越大,弹性模量下降幅度越大;PPF体积掺量0.3%、BF体积掺量0.5%时,可实现刚度与韧性的平衡。

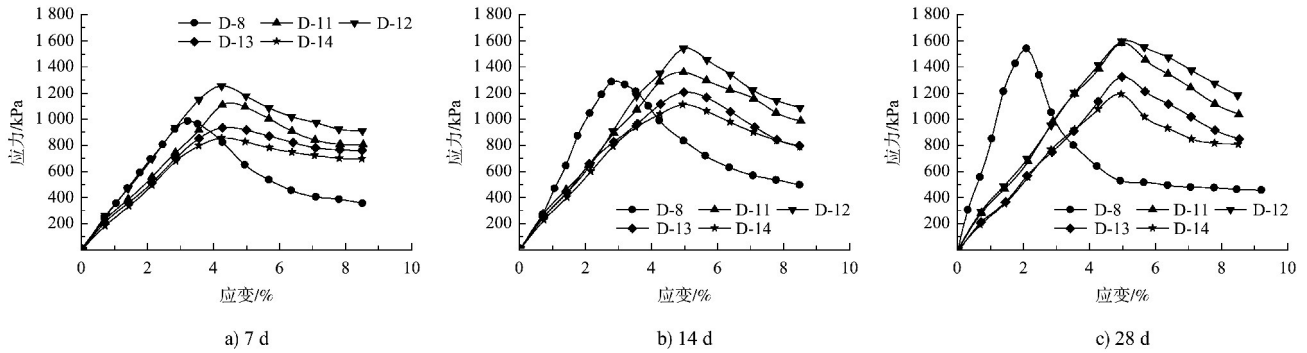


图 7 PPF 各龄期应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of polypropylene fibers at different ages

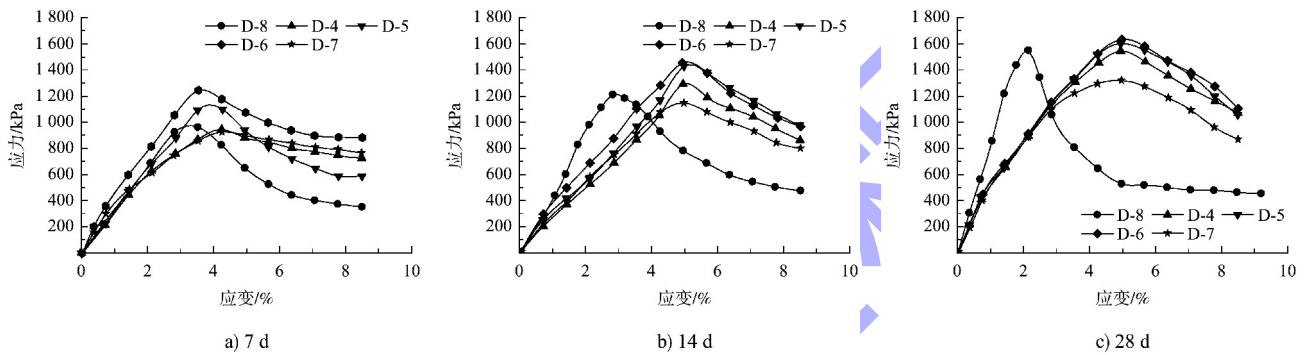


图 8 BF 各龄期应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of basalt fibers at different ages

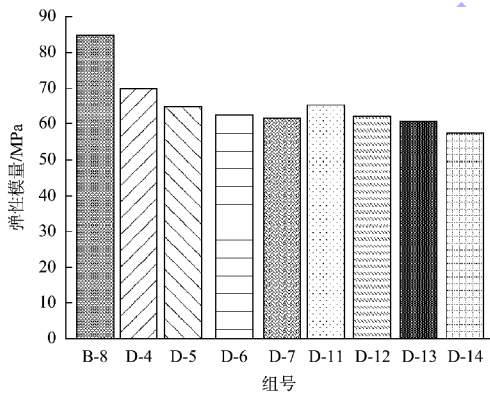
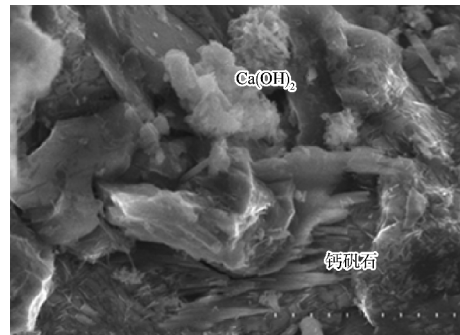


图 9 添加纤维后弹性模量变化

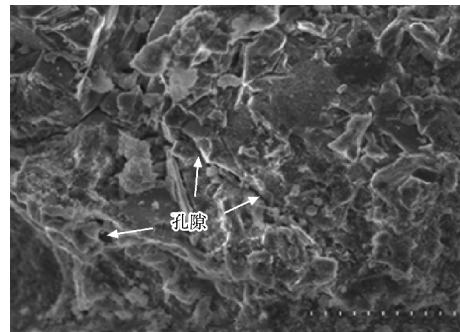
Fig. 9 Variation of elastic modulus after fiber addition

2.2.4 微观结构特征

未加入纤维的 B-8 组试样经 28 d 养护后, 其电镜测试结果见图 10。可以看见疏浚土表面有小块絮团状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体以及针棒状水化产物钙矾石, 并且存在大量孔隙, 均可能导致材料强度偏低。



a) 5 μm 下电镜图

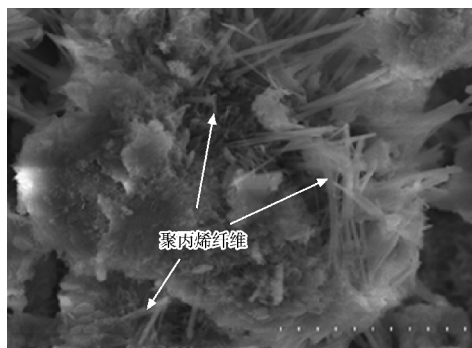


b) 20 μm 下电镜图

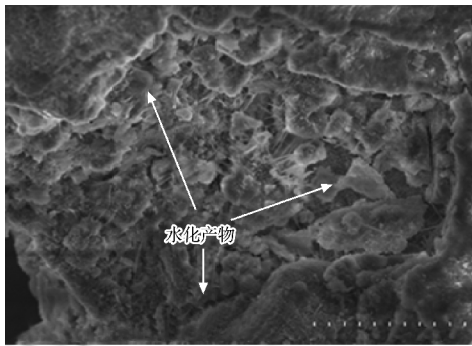
图 10 最优组合 B-8 组电镜测试结果

Fig. 10 Electron microscopy test results of optimal combination group B-8

加入聚丙烯纤维的 D-12 组试样经养护 28 d 后,其电镜测试结果见图 11。图中细长针状物为聚丙烯纤维,可将絮团状晶体戳破,并且可以看见疏松土表面有大量絮团状水化产物填充孔隙,因此加入纤维后试样强度略有提升。



a) 5 μm 下电镜图



b) 20 μm 下电镜图

图 11 0.3%PPF 掺量下 D-12 组电镜测试结果
Fig. 11 Electron microscopy test results of group D-12 with 0.3% polypropylene fiber by volume

3 纤维改性机理

纤维改性对气泡混合轻质土的性能提升主要通过两方面机制实现^[29-32]。

1) 三维网络构建与裂缝控制。纤维在混凝土内部均匀分散,与水泥浆体、骨料交织形成连续三维空间网络。当混凝土受荷载(静态压力、动态冲击)或环境作用(冻融、高温)产生微裂缝时,纤维可“桥接”裂缝两端,分散应力集中,阻止裂缝扩展为贯穿性破坏,显著提升混凝土抗裂性与韧性。

2) 微观密实度提升。纤维可填充混凝土内部微小孔隙,减少基体缺陷;同时优化骨料与水泥

浆体的界面接触,促进水化产物均匀附着,增强界面黏结强度,降低水分、有害离子的侵入通道,为力学性能与耐久性提升奠定基础。

本次试验与周兆环等^[33]、颜学渊等^[34]学者的研究结果共同表明,掺入纤维可使混凝土的抗压强度与劈裂抗拉强度得到提升。但与已有研究不同的是,试验中轻质土达到最优力学性能时所需纤维体积掺量相对较高。其原因在于:疏松土粒径较小,且气泡混合轻质土本身孔隙较多,这在一定程度上削弱了胶凝材料的作用,同时也降低了纤维因团聚而无法有效胶结混凝土骨架颗粒的影响,最终造成疏松土强度降低问题。

4 结论

1) 疏松土基气泡混合轻质土最优基准配合比为灰砂比 0.4、泡沫体积掺量 10%、水砂比 0.35 (B-8 组),该配比下材料干密度 0.77 g/cm³、湿密度 0.84 g/cm³、28 d 抗压强度最优、吸水率 12.3%,应力-应变曲线峰值应力与变形能力最佳,符合《泡沫混凝土》基础要求,为纤维改性提供适配基体。

2) 玄武岩纤维体积掺量 ≤ 0.5% 时,材料干密度-抗压强度、湿密度-饱水抗压强度均满足《泡沫混凝土》与《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》;聚丙烯纤维体积掺量 ≤ 0.3% 时符合干密度对应的强度规范,聚丙烯纤维体积掺量 ≤ 0.5% 时满足饱水强度规范,且两种纤维在最优掺量下吸水率表现最优。

3) 玄武岩纤维最优掺量为,0.5% 体积掺量及长度 12 mm,较未掺纤维试样 28 d 抗压强度提升 13%、劈裂抗拉强度提高 18%;聚丙烯纤维最优掺量为 0.3% 体积掺量及长度 9 mm,可使 28 d 韧性提升 30%、饱水抗压强度保留率提高 7.5 个百分点、脆性破坏发生率降低 40%,且能提升界面黏结力 20% 以上。

4) 纤维在适当掺量时可以通过“三维网络与裂缝控制”及“微观密实度的提升”来优化混凝土的力学性能,但过量掺入会导致纤维团聚对混凝土的不利影响。

5) 改进后的疏浚土基气泡混合轻质土密度控制在 $0.80\sim 0.82\text{ g/cm}^3$ (接近水的密度),可作为水上漂浮景观载体;既实现长江疏浚土减量化与无害化利用,规避传统有机浮岛材料二次污染问题,又因成本低于传统EPS轻质土、28 d后干缩率增速趋缓,具备大规模推广条件,为长江流域疏浚土资源化与水生态修复提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 何振洲. 基于资源化利用技术的入库航道清淤与疏浚土处理工艺研究[J]. 珠江水运, 2024(22): 40-42.
HE Z Z. Study on Dredging and dredged soil treatment technology for inbound waterway based on resource utilization [J]. Pearl River water transport, 2024 (22): 40-42.
- [2] 程海峰, 刘杰, 陈复奎, 等. 长江口航道疏浚土“十四五”综合利用研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(2): 331-338.
CHENG H F, LIU J, CHEN F K, et al. Study on comprehensive utilization of dredged soil in Yangtze Estuary channel during the 14th five-year period [J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(2): 331-338.
- [3] 刘杰, 程海峰, 韩露. 长江口航道疏浚土中长期利用探讨[C]//中国海洋学会海洋工程分会. 第二十一届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 青岛: 中国海洋大学出版社, 2024: 880-883.
LIU J, CHENG H F, HAN L. Discussion on medium-to-long-term utilization of dredged soil from the Yangtze River estuary channel [C]//Marine Engineering Branch of the Chinese Oceanographic Society. Proceedings of the 21st China Ocean (Coastal) Engineering Academic Conference (Part II). Qingdao: Ocean University of China Press, 2024: 880-883.
- [4] 王海啸, 夏文俊, 周欣. 长期浸水条件下重塑固化疏浚土中重金属浸出特性[J]. 河南科学, 2021, 39(10): 1642-1648.
WANG H X, XIA W J, ZHOU X. Heavy metals' leaching behavior of remolded stabilized dredged sediment under long-term immersion [J]. Henan science, 2021, 39(10): 1642-1648.
- [5] 胡红兵, 吴中乔, 高辰龙, 等. 长江航道疏浚土潜在的健康风险[J]. 水运工程, 2018(1): 45-49.
HU H B, WU Z Q, GAO C L, et al. Potential health risk of dredged soil contamination in the Yangtze River waterway [J]. Port & waterway engineering, 2018(1): 45-49.
- [6] TAO W, JIANG Z C, PENG X J, et al. Impact of dredged material disposal on heavy metal concentrations and benthic communities in Huangmao Island marine dumping area near Pearl River Estuary [J]. Applied sciences, 2021, 11(20): 9412.
- [7] 李博. 港口污染疏浚土的淋洗—钝化协同修复技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.
LI B. Research on synergistic remediation technology of leaching-passivation of port contaminated dredged soil [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.
- [8] 蔡辉, 郭冬冬, 黄小鹏. 储泥坑在航道疏浚土吹填中的创新与应用[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(8): 56-60.
CAI H, GUO D D, HUANG X P. Innovation and application of sediment storage pit in waterway dredging and filling [J]. China harbour engineering, 2021, 41(8): 56-60.
- [9] 许才广, 杨锡鏊, 王更, 等. 施工期临时航道建设规模仿真[J]. 水运工程, 2021(6): 183-187, 223.
XU C G, YANG X L, WANG G, et al. Simulation of temporary channel scale during construction period [J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 183-187, 223.
- [10] 张杨杨, 谢先坤. 新疏浚土吹填地区开挖成河方案探讨[J]. 水利规划与设计, 2020(10): 141-145.
ZHANG Y Y, XIE X K. Discussion on river forming scheme of dredger fill area of new dredged soil [J].

- Water resources planning and design, 2020 (10): 141-145.
- [11] 张吕华, 张浩. 真空预压法处理浅层吹填疏浚土效果分析与研究[J]. 珠江水运, 2021(24): 93-96.
ZHANG L H, ZHANG H. Analysis and study on the effect of vacuum preloading method in treating shallow dredged soil[J]. Pearl River water transport, 2021(24): 93-96.
- [12] 李千. 吹土填海造陆地基的真空预压法监测与应用效果研究[J]. 土工基础, 2020, 34(5): 633-638.
LI Q. Monitoring and application effect of vacuum preloading method for hydraulic reclaimed lands [J]. Soil engineering and foundation, 2020, 34(5): 633-638.
- [13] 胡小波. 超细颗粒悬浮状疏浚土真空预压加固特性研究[J]. 水运工程, 2024(6): 204-210.
HU X B. Characteristics of vacuum preloading reinforcement of ultrafine particle suspended dredgedsoil [J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 204-210.
- [14] 廖智磊. 淤泥固化技术在河道清淤疏浚工程中的应用[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(4): 106-108.
LIAO Z L. Application of silt solidification technology in river dredging engineering [J]. Hydro science and cold zone engineering, 2022, 5(4): 106-108.
- [15] 张盼盼. 循环荷载下淤泥轻量土的宏观变形及沉降机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019.
ZHANG P P. Study on macroscopic and microscopic deformation and settlement mechanism of silt lightweight soil under cyclic loading [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019.
- [16] 浩婷, 周颜, 田宇, 等. 改性 EPS 颗粒在疏浚淤泥混合轻量土中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 143-146.
HAO T, ZHOU Y, TIAN Y, et al. Application of modified EPS particles in lightweight soil mixed with dredged sludge [J]. South-to-north water transfers and water science & technology, 2014, 12(4): 143-146.
- [17] 陈玮琳, 季晓檬. 疏浚淤泥资源化利用技术综述[J]. 中国建材科技, 2013, 22(1): 50-53.
CHEN W L, JI X M. Overview on the resource utilization techniques of dredged mud [J]. China building materials science & technology, 2013, 22(1): 50-53.
- [18] 刘宝中. 碱激发剂对疏浚土免烧砖性能的影响及机理研究[J]. 新型建筑材料, 2025, 52(4): 65-69.
LIU B Z. Effect and mechanism of alkaline activators on the performance of non-burnt sludge bricks[J]. New building materials, 2025, 52(4): 65-69.
- [19] 闫士杰. 气泡混合轻质土在高速公路改扩建中的应用[J]. 交通世界, 2021(35): 70-71.
YAN S J. Application of bubble-mixed lightweight soil in expressway reconstruction and expansion projects [J]. Transportation world, 2021(35): 70-71.
- [20] 肖平. 气泡混合轻质土在小跨径通道桥桥头路基中的应用[J]. 江西建材, 2022(9): 205-207.
XIAO P. Application of foamed light soil in the filling of bridehead of small span channel bridge [J]. Jiangxi building materials, 2022(9): 205-207.
- [21] 胡明文, 刘辉, 邱远光. 气泡混合轻质土在特大桥桥头路基填筑中的应用研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(5): 168-170, 200.
HU M W, LIU H, QIU Y G. Research on the application of bubble mixed lightweight soil in the filling of roadbed at the head of a super large bridge [J]. Railway construction technology, 2024(5): 168-170, 200.
- [22] 廖祖栋, 蔡宪棠. 气泡混合轻质土在桥台台后填筑中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(21): 113-116.
LIAO Z D, CAI X T. Research on the application of bubble mixed light soil in the filling behind abutment[J]. Engineering and technological research, 2023, 8(21): 113-116.
- [23] YAN P, CHEN B, AFGAN S, et al. Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre[J]. Construction and building materials, 2021, 279: 122489.
- [24] 杨连明, 陈伟. 基于纤维增强的自密实混凝土收缩性能及数据驱动辅助的收缩预估研究[J]. 公路交通技术, 2025, 41(4): 44-51.

- YANG L M, CHEN W. Research on shrinkage performance of fiber-reinforced self-compacting concrete and data-driven assisted shrinkage prediction [J]. *Technology of highway and transport*, 2025, 41 (4): 44-51.
- [25] 胡晓鹏,孙佳佳,杨博,等.玻璃微珠-纤维混凝土力学和声学性能多目标优化[J/OL].*建筑材料学报*, 1-12 [2025-09-05]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1764.TU.20250818.1103.002>.
- HU X P, SUN J J, YANG B, et al. Multi-objective optimization of mechanical and acoustic properties of glass microbead and fiber concrete [J/OL]. *Journal of building materials*, 1-12 [2025-09-05]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1764.TU.20250818.1103.002>.
- [26] 王云飞.钢-聚乙烯混杂纤维对混凝土性能的影响[J].*地下水*, 2025, 47(4): 315-317.
- WANG Y F. Influence of steel-polyethylene hybrid fiber on concrete performance[J]. *Ground water*, 2025, 47(4): 315-317.
- [27] 刘军勇,张留俊.深厚软土地基泡沫轻质土路基应用技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2024.
- LIU J Y, ZHANG L J. Application technology of foam lightweight soil subgrade in deep soft soil foundation[M]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd., 2024.
- [28] 蒸压加气混凝土性能试验方法:GB/T 11969—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- Test methods of autoclaved aerated concrete: GB/T 11969—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [29] 贾毅,宋浩博,柳其钱,等.高韧性聚丙烯纤维混凝土的配合比及力学性能试验研究[J].*材料导报*, 2024, 38(S2): 647-651.
- JIA Y, SONG H B, LIU Q Q, et al. Experimental study on blending ratio and mechanical properties of high toughness polypropylene fiber concrete [J]. *Materials reports*, 2024, 38(S2): 647-651.
- [30] 李宝元,赵轩,游志鑫,等.聚丙烯纤维再生混凝土力学性能研究[J].*科技与创新*, 2025(19): 122-125.
- LI B Y, ZHAO X, YOU Z X, et al. Study on mechanical properties of polypropylene fiber recycled concrete [J]. *Science and technology & innovation*, 2025(19): 122-125.
- [31] 刘胜兵,梅浩华,黄依莹,等.玄武岩-聚丙烯混杂纤维轻骨料混凝土强度研究[J].*武汉大学学报(工学版)*, 2024, 57(12): 1725-1732.
- LIU S B, MEI H H, HUANG Y Y, et al. Strength study of basalt-polypropylene hybrid fiber lightweight aggregate concrete [J]. *Engineering journal of Wuhan University*, 2024, 57(12): 1725-1732.
- [32] 吴能.聚丙烯纤维改良水工混凝土耐久性能及损伤模型研究[J].*水利科技与经济*, 2025, 31(10): 18-22.
- WU N. Study on durability and damage model of polypropylene fiber improved hydraulic concrete [J]. *Water conservancy science and technology and economy*, 2025, 31(10): 18-22.
- [33] 周兆环,黄道斌.玄武岩—聚丙烯纤维混凝土力学性能及抗盐侵蚀性能研究[J].*盐科学与化工*, 2025, 54(10): 40-44.
- ZHOU Z H, HUANG D B. Research on the mechanical property and salt erosion resistance performance of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete [J]. *Journal of salt and chemical industry*, 2025, 54(10): 40-44.
- [34] 颜学渊,罗福斌,金贤洪,等.玄武岩纤维混凝土和聚乙烯纤维混凝土静动态力学性能[J].*建筑材料学报*, 2025, 28(9): 825-833.
- YAN X Y, LUO F B, JIN X H, et al. Static and dynamic mechanical properties of basalt fiber-reinforced concrete and polyethylene fiber-reinforced concrete [J]. *Journal of building materials*, 2025, 28(9): 825-833.