

# 冻融循环作用下玻璃纤维改性水泥土抗压强度特性研究

王 标<sup>1,2</sup>, 陈群尹<sup>1\*</sup>, 樊美欣<sup>1</sup>, 赵铁永<sup>2</sup>, 王建锋<sup>2</sup>

<sup>1</sup>绍兴大学土木工程学院, 浙江 绍兴

<sup>2</sup>同创工程设计有限公司, 浙江 绍兴

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月29日

## 摘 要

为解决季节性冻土区水泥土路基、地基在冻融循环作用下强度衰减快、易开裂失稳的工程难题, 以玻璃纤维作为增强材料, 掺量分别为0‰、4‰, 制备玻璃纤维改性水泥土(GC), 开展冻融循环作用下的无侧限抗压强度试验研究。以冻融循环次数为控制变量, 分别取0、1、3、5、7次, 分析冻融作用对水泥土抗压强度的影响规律。结果表明: 养护龄期为7 d时, 水泥土的无侧限抗压强度随着冻融循环次数的增加而降低, 添加玻璃纤维的水泥土, 无侧限抗压强度的降低率减小, 可知玻璃纤维的添加能够提升水泥土抵抗冻融的能力; 冻融后试样峰值应变较未冻融试样降低5%~24%, 说明冻融循环阻碍了水化反应, 削弱了材料的抗变形能力。该研究可为水泥土地基、路基加固等工程的抗冻设计与应用提供理论参考。

## 关键词

水泥土, 冻融循环, 玻璃纤维, 抗压强度

# Study on the Compressive Strength Characteristics of Glass Fiber Reinforced Cement Soil under Freeze-Thaw Cycles

Biao Wang<sup>1,2</sup>, Qunyin Chen<sup>1\*</sup>, Meixin Fan<sup>1</sup>, Tiejong Zhao<sup>2</sup>, Jianfeng Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing Zhejiang

<sup>2</sup>Tongchuang Engineering Design Co., Ltd., Shaoxing Zhejiang

Received: April 27, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 29, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 王标, 陈群尹, 樊美欣, 赵铁永, 王建锋. 冻融循环作用下玻璃纤维改性水泥土抗压强度特性研究[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 384-390. DOI: 10.12677/hjce.2026.155147

## Abstract

To address the engineering problems of rapid strength degradation and cracking instability of cement soil subgrades and foundations in seasonal frozen regions under freeze-thaw cycles, this study used glass fiber as the reinforcing material with contents of 0‰ and 4‰ to prepare glass fiber reinforced cement soil (GC), and conducted unconfined compressive strength tests under freeze-thaw cycles. Taking the number of freeze-thaw cycles as the control variable (0, 1, 3, 5, and 7 times), the influence law of freeze-thaw action on the compressive strength of cement soil was analyzed. The results show that when the curing age is 7 days, the unconfined compressive strength of cement soil decreases with the increase of freeze-thaw cycles, while the reduction rate of unconfined compressive strength of cement soil with glass fiber is smaller, indicating that the addition of glass fiber can improve the freeze-thaw resistance of cement soil. After freeze-thaw cycles, the peak strain of the samples decreases by 5%~24% compared with the unfrozen-thawed samples, indicating that freeze-thaw cycles hinder the hydration reaction and weaken the deformation resistance of the material. This study can provide theoretical reference for the design and application of anti-freezing measures in cement soil foundation and subgrade reinforcement projects in seasonal frozen regions.

## Keywords

Cement Soil, Freeze-Thaw Cycles, Glass Fiber, Compressive Strength

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在季节性冻土区进行地基基础、路基边坡等工程，都会面临冻融循环的严峻考验。冻融循环会使水分出现反复冻结膨胀与融化收缩现象，会导致土体内部孔隙发育、结构松散，进而引发强度衰减、变形累积等问题，诱发路基沉陷、边坡滑坡、地基失稳等工程病害，严重威胁基础设施的使用过程中的安全[1]-[3]。因此，如何有效改善季节性冻土区土体的抗冻融性能，成为岩土工程领域亟待解决的关键问题。

水泥作为一种取材便捷、加固效果显著的传统改良材料，可以应用于季节性冻土区的地基处理、防渗帷幕、路基填筑等工程中。水泥与土体颗粒的水化反应形成胶结结构，会显著提升原土体的抗压强度与整体性[4]。然而，冻融循环对水泥土的强度特性构成严峻挑战。在反复冻融过程中，水泥土内部水分变膨胀会破坏水化产物形成的胶结体系，导致出现开裂、剥落现象，力学性能急剧劣化[5]。康江等[6]采用植物基生物水泥改良黄土，发现随冻融次数增加，试样抗压强度显著降低，但是掺入纤维后，强度显著提升。

玻璃纤维作为一种高性能增强材料，凭借其高强度、高模量、耐腐蚀等优点，在土体改良领域展现出良好的应用前景[7]。姜恒超等[8]研究发现，玻璃纤维水泥改良土的劈裂抗拉强度随着纤维掺量和纤维长度的增大而先增大后减小，其中最优纤维掺量为2%，最优纤维长度为6 mm。许巍等[9]研究表明，掺量为0.3%长度为6 mm时，玻璃纤维对水泥土抗飞散性能增强效果最好，纤维掺量为0.3%纤维长度为12 mm的玻璃纤维对水泥土耐磨耗性能增强效果最好。

当前关于玻璃纤维改性水泥土的研究已取得一定进展，但仍存在一定的不足。现有研究多聚焦于常

温环境下玻璃纤维对水泥土力学性能的提升效果,针对冻融循环这一复杂环境条件的系统研究相对较少,尤其是冻融作用下玻璃纤维改性水泥土抗压强度的演化规律尚不清晰。鉴于此,本文以季节性冻土区典型软土为对象,开展冻融循环作用下玻璃纤维改性水泥土的无侧限抗压强度试验,系统研究不同冻融次数对试样抗压强度的影响规律,以期为季节性冻土区的软土处理与工程防灾提供科学参考。

## 2. 试验材料与试验方案

### 2.1. 试验材料

试验用淤泥土取自浙江绍兴某工程基坑开挖的废弃土,经自然风干、粉碎、过 2 mm 筛后备用,其基本物理指标见表 1。水泥采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,性能指标符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175-2007)要求,具体参数见表 2。玻璃纤维由河北泓耀矿产品加工有限公司提供,为束状单丝结构,平均直径 18  $\mu\text{m}$ ,长度 6 mm,具有抗拉强度高、弹性模量大、耐酸碱腐蚀性强、分散性好等特点,其性能指标见表 3。

**Table 1.** Physical property indicators of soil samples

**表 1.** 土样的物理性质指标

容量/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	孔隙比	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	液性指数	塑性指数
1.63	1.74	35	47	25	1.34	24

**Table 2.** Basic physical and mechanical indicators of cement

**表 2.** 水泥的基本物理力学指标

细度/%	初凝时间/min	终凝时间/min	烧矢量/%	3 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa	3 d 抗折强度/MPa	28 d 抗折强度/MPa
3.4	210	295	1.4	29.6	48.1	6.0	9.0

**Table 3.** Parameters of glass fiber materials

**表 3.** 玻璃纤维材料参数

纤维类型	纤维平均直径/mm	纤维长度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	耐酸性	分散性
束状单丝	18	6	>427	>4.1	极强	极好

### 2.2. 试验方案

根据已有研究成果,玻璃纤维掺量是影响水泥土力学性能的关键参数。王伟等[10]针对短龄期玻璃纤维水泥土开展多梯度掺量对比试验,结果表明:玻璃纤维掺量为 4‰时,玻璃纤维水泥土的峰值应力、峰值应变、残余强度以及脆性指数最优,并且其内摩擦角和粘聚力有明显提高,综合改性效果最佳。最后,确定玻璃纤维掺量为 0‰(空白对照组)和 4‰,试验固定含水率为 20%,水泥掺量 5%,对养护龄期 7 d 的纤维水泥土试样分别开展 0、1、3、5、7 次冻融循环试验,对比玻璃纤维添加前后水泥土在冻融作用下的无侧限抗压强度、变形特性及破坏形态变化规律。随着人类活动的增加,极端天气事件频繁发生,历史上东南沿海地区气温最低曾达到 $-9^{\circ}\text{C}$ 至 $-15^{\circ}\text{C}$ 。一般情况下,低温多发生在夜晚,白天温度通常超过 $0^{\circ}\text{C}$ 。土壤中的水分在高低温交替中会发生水冰两相的转化,导致冻融劣化。考虑到极端恶劣环境,本研究采用 $-15^{\circ}\text{C}$ 作为冻结温度,冻结时间为 12 小时,融化后放入 $20^{\circ}\text{C}$ 的养护室中 12 小时,为一次循环。

### 2.3. 试样制备

按照《土工试验方法标准》(GB/T50123-2019),无侧限试验试样的制作过程如下,图 1 展示了试样的

制备过程。

(1) 取经过机器粉碎后的淤泥土过 2 mm 筛后放入 110℃ 烘箱中 24 小时后拿出放凉备用。

(2) 将定量的淤泥土、一定掺量的水泥和玻璃纤维称好后放在搅拌锅里一起搅拌均匀, 大约 5 分钟后, 加入相对应含水率的水再次搅拌 5 分钟, 此时仍需用手继续搅拌将大颗粒的柔土揉碎。

(3) 将下垫块放入模具下部, 垫块上放上垫片, 用实验室精准天平称取 196 g (+0.2 g) 的混合料, 用漏斗灌入模具当中, 同时进行上下插实。灌入完毕以后进行压实并垫上垫片, 放入垫块, 最后将两端的垫块初步压入模具内。

(4) 将灌入混合料的模具放在反力架内千斤顶上承托板上部, 以匀速摇动千斤顶, 直到两端的垫块完全压入模具内部。用千斤顶静压维持, 1 min 以后, 将压力解除, 最后取出直径 39.1 mm, 高 80 mm 的圆柱体试样, 最后用保鲜膜将试样裹实。

(5) 试样制作完成后, 放入标准恒温养护箱养护 7 天。

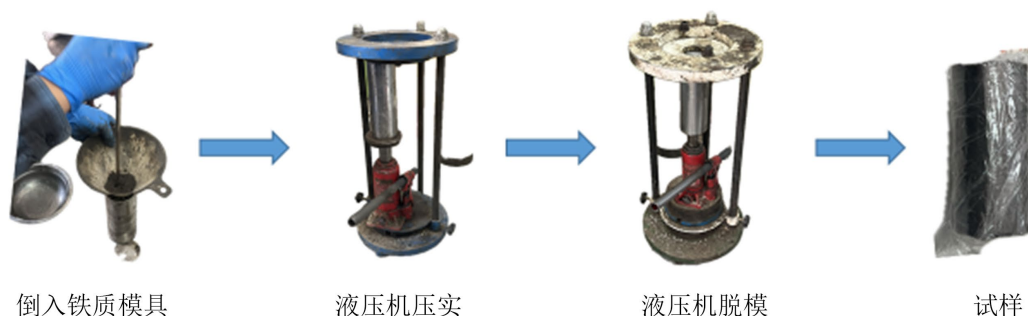


Figure 1. Sample preparation process  
图 1. 试样制备过程

### 3. 冻融循环对土样力学特征的影响

#### 3.1. 应力 - 应变曲线与破坏形式

无侧限抗压试验每组测试 3 个平行试样, 取平均值绘制应力 - 应变曲线。图 2 和图 3 为 7 d 养护龄期下, 素水泥土(GC0)与 4%玻璃纤维改性水泥土(GC4)在经历不同冻融循环次数后的无侧限抗压应力 - 应变曲线; 图 4 为两类试样的典型破坏形态。

由图 2 可知, GC0 的曲线演化规律随着冻融循环次数从 0 次增加到 7 次: 峰值应力单调降低, 未冻融试样 GC0-0 的峰值应力为 1915 kPa, 7 次冻融后降至 1533 kPa, 总降幅达 20.0%。其中前 3 次冻融强度累计衰减 6.5%, 3 次后衰减速率逐渐放缓; 峰值应变持续左移, 峰值应变从 GC0-0 的约 2.5%降至 GC0-7 的约 2.0%, 累计降低 20%, 表明冻融循环显著削弱了水泥土的抗变形能力, 试样在更小的应变下发生破坏; 脆性特征不断增强, 峰值后应力下降速率逐渐加快, 曲线陡度增大。未冻融试样 GC0-0 在峰值后应力迅速跌落至约 200 kPa, 而 7 次冻融后 GC0-7 的峰值后应力下降更为陡峭, 残余应力进一步降低, 说明冻融循环加剧了水泥土的脆性破坏倾向。最后呈现典型的脆性破坏。试样破坏时出现一条如图 4(a)的贯穿性裂缝, 裂缝宽度大、延伸长, 将试样劈裂为两个主要部分, 同时伴随大量碎块从裂缝处脱落。

由图 3 可知, GC4 试样的曲线演化趋势与 GC0 一致, 但整体力学性能显著优于同冻融次数的 GC0 试样: 峰值应力更高, 未冻融试样 GC4-0 的峰值应力为 2160 kPa, 较 GC0-0 提升 12.8%; 7 次冻融后仍保持 1634 kPa, 比 GC0-7 高 6.6%, 验证了 4%玻璃纤维对水泥土的增强效果; 峰值应变更大, 未冻融试样 GC4-0 的峰值应变约为 3.0%, 较 GC0-0 提升 20%, 说明玻璃纤维有效改善了水泥土的变形性能, 使

其能承受更大的变形而不破坏；应变软化特征更平缓，峰值后应力下降速率明显慢于 GC0 试样，残余应力更高。例如，GC4-0 在峰值后应力缓慢下降至约 500 kPa，而 GC0-0 仅降至约 200 kPa，表明玻璃纤维通过桥接作用抑制了裂缝的快速扩展，延缓了试样的破坏过程；冻融劣化程度更低，7 次冻融后，GC4 试样的峰值应力总衰减率为 17.6%，比 GC0 低 2.4 个百分点；峰值应变从 3.0% 降至 2.3%，累计降低 23.3%，虽劣化幅度略高于 GC0，但峰值应变仍大于同冻融次数的 GC0 试样。最后，GC4 呈现出如图 4(b) 的延性破坏，试样无明显贯穿性主裂缝，裂缝宽度小、分布均匀。由于玻璃纤维在裂缝处发挥桥接作用，将开裂的土体颗粒连接在一起，有效阻止了裂缝的快速扩展，试样整体性保持较好，碎块脱落现象显著减少。

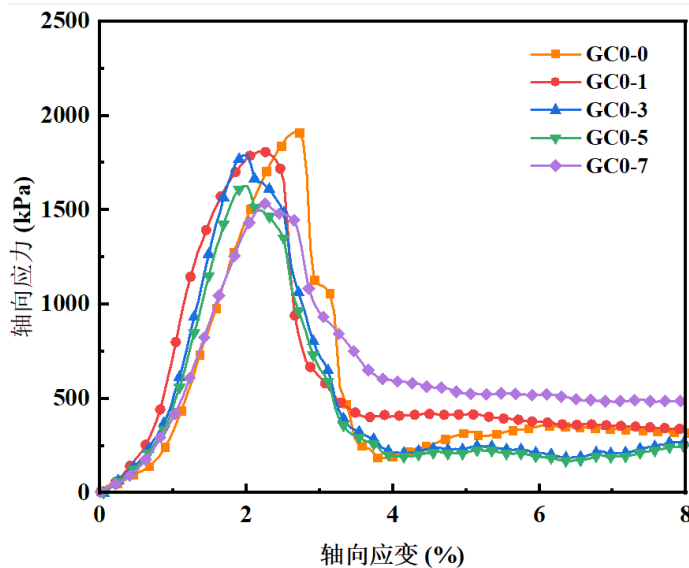


Figure 2. Stress strain curves of GC0 specimens with different freeze-thaw cycles at 7 d curing age

图 2. 7 d 龄期下不同冻融次数 GC0 试样应力应变曲线

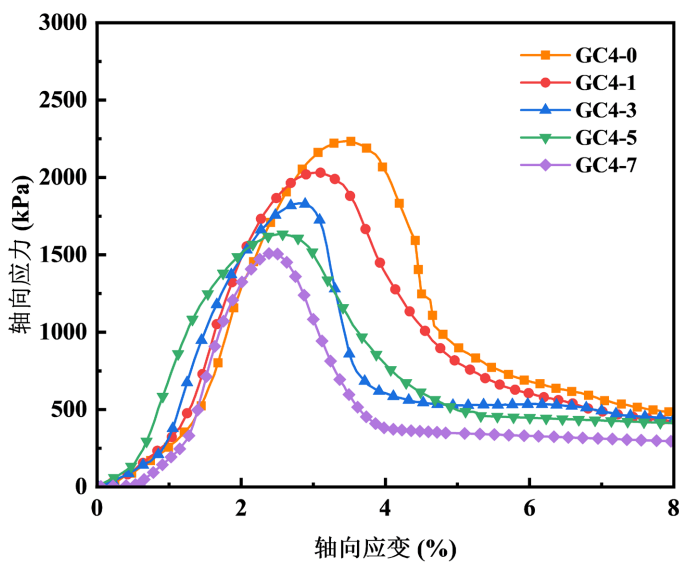
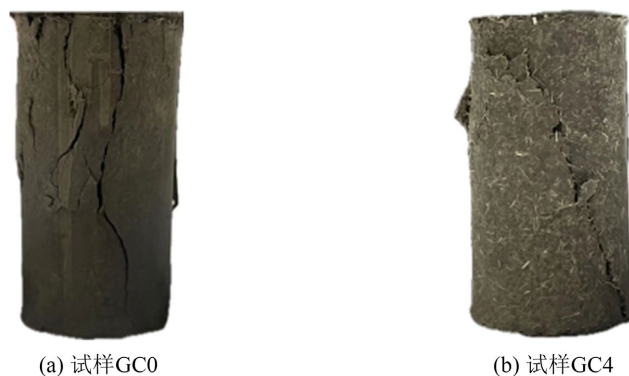


Figure 3. Stress strain curves of GC4 specimens with different freeze-thaw cycles at 7 d curing age

图 3. 7 d 龄期下不同冻融次数 GC4 试样应力应变曲线



**Figure 4.** Typical failure modes of GC specimens with different glass fiber contents

**图 4.** 不同玻璃纤维掺量下 GC 试样典型破坏形式

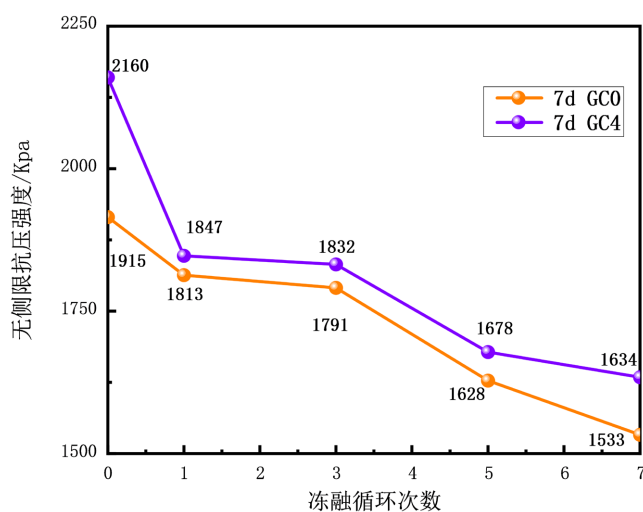
### 3.2. 无侧限抗压强度

根据图 2 和图 3 冻融循环后 GC 试样无侧限抗压强度的应力 - 应变曲线, 取应力 - 应变曲线中轴向应力最大值为无侧限抗压强度见表 4。根据表 4 展示的试样无侧限抗压强度绘制图 5。图 5 为冻融循环次数与无侧限抗压强度关系折线图。由图 5 可知, 在养护龄期为 7 d 时, GC 试样的无侧限抗压强度随着冻融循环次数的增加而降低。基于无侧限试验的结果, 玻璃纤维添加以后, 无侧限抗压强度的降低率减小, 可知玻璃纤维的添加能够提升水泥石抵抗冻融的能力。

**Table 4.** Peak unconfined compressive strength of GC specimens after freeze-thaw cycles

**表 4.** 冻融循环后 GC 试样的无侧限抗压强度峰值

龄期/d	试样编号	无侧限抗压强度/kPa				
		FT-0	FT-1	FT-3	FT-5	FT-7
7	GC0	1915	1813	1791	1628	1533
	GC4	2160	1847	1832	1678	1634



**Figure 5.** Relationship between different freeze-thaw cycles and unconfined compressive strength of GC samples

**图 5.** GC 试样不同冻融循环次数与无侧限抗压强度关系图

未冻融条件下, GC4 试样的无侧限抗压强度为 2160 kPa, 较 GC0 试样提升 12.8%, 与王伟等[10]的研究结果一致, 验证了 4%玻璃纤维对水泥土的增强效果。

在 7 d 龄期下, GC0-1、GC0-3、GC0-5、GC0-7 的峰值应变较 GC0 分别降低 5%、7%、15%和 20%; GC4-1、GC4-3、GC4-4、GC4-7 的峰值应变较 GC4 分别降低 14%、15%、22%和 24%。试样破坏应变的减小可能是冻融循环对试样的水化反应起到阻碍作用, 从而导致试样抵抗破坏的能力较差, 即表明玻璃纤维可有效提升水泥土的抗冻融劣化能力。

#### 4. 结论

本研究开展了冻融循环作用下玻璃纤维改性水泥土的无侧限抗压强度试验, 分析了冻融循环对水泥土强度、变形及破坏形态的影响规律, 得出以下主要结论:

(1) 7 d 养护龄期下, 素水泥土与玻璃纤维改性水泥土的无侧限抗压强度均随冻融循环次数增加呈单调降低趋势, 且前 3 次冻融强度衰减较快, 3 次后衰减速率逐渐放缓。

(2) 4%玻璃纤维可显著提升水泥土的抗冻融劣化能力。未冻融条件下, 改性水泥土强度较素水泥土提升 12.8%; 7 次冻融后, 改性水泥土总强度衰减率为 17.6%, 相比素水泥土低 2.4 个百分点, 且试样整体性更好, 破坏程度更轻。

(3) 冻融循环导致水泥土峰值应变显著降低。玻璃纤维可提升水泥土的初始抗变形能力, 但冻融后纤维与基体的界面粘结力削弱, 导致改性水泥土的峰值应变劣化率略高于素水泥土。

#### 参考文献

- [1] 李保琦, 刘铭, 卢尧, 等. 高纬度季节性冻土区土壤冻融特征变化及其归因分析[J]. 高原山地气象研究, 2026, 46(1): 93-101.
- [2] 郭浩天, 辛思澄, 赵鑫竹, 等. 季冻区土体多场耦合模型研究现状及展望[J]. 水利科学与寒区工程, 2025, 8(12): 1-7.
- [3] 苏玉涛. 季节性冻土区路基主动保温层厚度优化设计与施工工艺[J]. 交通世界, 2025(34): 120-122.
- [4] 杨佳伟, 王伟, 蒋铁铭, 等. 稻壳生物炭-水泥稳定道路再生集料的短龄期静力学特性和微观机制[J/OL]. 复合材料学报, 1-13. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250624.003>, 2026-05-21.
- [5] 田勇, 时广辉, 张波, 等. 冻融循环作用下黄土基水泥土物理力学特性及损伤机理研究[J]. 施工技术(中英文), 2026, 55(4): 92-98+139.
- [6] 康江, 张斌, 刘晓军, 等. 冻融循环下生物水泥改良黄土物理力学特性试验[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(6): 1211-1221.
- [7] 姜屏, 杨建冬, 李娜, 等. 纤维改性水泥稳定铁尾矿砂的无侧限抗压性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(8): 73-79.
- [8] 姜恒超, 李青林, 杨志勇, 等. 玻璃纤维水泥改良土劈裂抗拉强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2742-2747.
- [9] 许巍, 刘军忠, 张俊. 玻璃纤维加筋水泥土耐久性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 104-111.
- [10] 王伟, 戴梦丹, 俞文杰. 短龄期玻璃纤维水泥土的三轴力学特性研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 218-2251.