

冻融循环对玄武岩纤维水泥土力学性能的影响试验

郭少龙^{1,2}, 鹿群¹, 林永良³, 刘有志⁴

(1. 天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 天津城建大学信息化建设管理中心, 天津 300384; 4. 天津元旭工程咨询管理有限公司, 天津 300191)

摘要:对素水泥土及玄武岩纤维水泥土进行了冻融循环作用前后的无侧限抗压、劈裂抗拉试验, 探讨并对比了冻融循环次数、养护龄期、水灰比、纤维掺量等因素对两种水泥土力学性能的影响规律。结果表明: 掺入玄武岩纤维后水泥土的冻融强度损失率降低; 水泥土的冻融强度损失率随水灰比的增大而增大, 随龄期的增大而减小; 冻融后水泥土的无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度与其受到的冻融循环次数之间的关系可用双曲线拟合; 水泥土的劈裂抗拉强度与无侧限抗压强度的比值在14%~17%之间。

关键词:纤维水泥土; 冻融循环; 劈裂抗拉试验; 双曲线模型

中图分类号: TU4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2020)03-0036-08

Experiments on influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of basalt fiber cement soil//GUO Shaolong^{1,2}, LU Qun¹, LIN Yongliang³, LIU Youzhi⁴(1. *Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Information Construction and Management Center, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300348, China*; 4. *Tianjin Yuanxu Engineering Consultation and Management Co., Ltd., Tianjin 300191, China*)

Abstract: The unconfined compressive and split tensile tests of plain cement soil and basalt fiber cement soil before and after freeze-thaw cycles were carried out. The effects of freeze-thaw cycles, curing age, water cement ratio and fiber content on the mechanical properties of the two kinds of cement soil were discussed and compared. The results show that the loss rate of freeze-thaw strength of cement soil decreases after adding basalt fibers. The loss rate of freeze-thaw strength of cement soil increases with the increase of water cement ratio and decreases with the increase of age. The relationship between the unconfined compressive strength, the splitting tensile strength of cement soil after freeze-thaw and the number of freeze-thaw cycles can be fitted by hyperbolic curves. The ratio of splitting tensile strength to unconfined compressive strength is between 14% and 17%.

Key words: fiber cement soil; freeze-thaw cycle; split tensile test; hyperbolic model

我国季节性冻土和常年冻土分布广泛, 这些地区的路基和复合地基工程中, 水泥土因较差的抗冻性而受到一定的应用限制, 因此提高集料在循环冻融条件下的强度和改善其在恶劣环境下抵抗侵蚀的能力是水泥土在上述地区能够长期使用的关键^[1]。

水泥土中含有水化剩余的自由水, 在冻融条件下自由水结冰膨胀, 水泥石-土颗粒骨架受到损伤, 水泥土结构破坏, 产生大小不等的裂纹, 使水泥土的抗压、抗拉能力都有不同程度的降低。董慧等^[2-4]通过试验发现与未冻融水泥土相比, 冻融水泥土的强度受含水率的影响更大; 冻融水泥土的强度和剩余

质量均随冻融次数的增加而减小, 前期的冻融循环对其强度损失影响更大; 水泥土的渗透系数随冻融循环次数的增加而变大。

相关研究表明在水泥土中均匀地掺入适量纤维可以改善水泥土的抗压强度、抗拉强度和抗冻融性能^[5-8]。已有的纤维水泥土相关研究中掺入的纤维主要是聚丙烯纤维、玻璃纤维, 玄武岩纤维很少见到。玄武岩纤维作为一种新型无机高性能材料, 具有强度高、电绝缘、耐腐蚀、耐高温等特点, 是一种绿色、环保的材料, 将玄武岩纤维掺入水泥土中改善其力学性能是一种有益的尝试。高常辉等^[9]研究了

玄武岩纤维和砂对水泥土强度的影响,发现掺砂量适宜时,水泥土的强度有一定程度的提高,但掺砂量过小或过大,对水泥土强度的提高作用很小。王闵闵等^[10-11]通过试验发现纤维掺量相同时玄武岩纤维水泥土的抗压强度、最大动弹性模量均高于聚丙烯纤维水泥土。张迪迪等^[12]通过试验研究了玄武岩纤维水泥土在冻融循环条件下的力学特性,发现玄武岩纤维掺量为 1.5% 的水泥土的抗冻融特性优于普通水泥土,试样的高度、质量和波速随着冻融循环次数的增加总体呈先减小后增大的趋势。陈峰^[13]通过试验研究了玄武岩纤维水泥土的劈裂抗拉强度和无侧限抗压强度,建立了劈裂抗拉强度与无侧限抗压强度的经验关系式。目前,对玄武岩纤维水泥土冻融特性的研究非常缺乏。

纤维水泥土在工程方面的应用实例目前非常少,林兵^[14]将再生聚丙烯纤维掺入稳定土中,提高了道路结构的承载力及使用寿命;陈洁^[15]在海水混浆水泥土中掺入聚丙烯纤维,将纤维水泥土应用于舟山现代君苑商住小区基坑支护工程中,土体的膨胀得到了有效抑制,提高了土体的抗拉强度、抗压强度和抗折强度。目前尚无玄武岩纤维水泥土在工程方面的应用实例。本文通过室内试验对考虑冻融循环作用下的素水泥土、玄武岩纤维水泥土的抗压、抗拉特性进行了研究,得到了一些规律性认识,以期对玄武岩纤维水泥土在工程中的应用提供技术支持。

1 试验方法

试验的淤泥质黏土取自浙江温州龙湾区沿海滩涂地面以下 4.5~5.0 m 深度处,呈浅灰黄~灰色,性状饱和、流塑、高压缩性。其物理力学指标:天然密度为 1.85 g/cm³,含水量为 52%,液限为 48.5%,塑限为 28.5,塑性指数为 20,液性指数为 1.23,孔隙比为 1.49,压缩模量为 2.47 MPa,压缩系数为 1.603 MPa⁻¹,黏聚力为 18.5 kPa,内摩擦角为 7.6°。玄武岩纤维的耐酸碱性能极高,其单丝的性能指标:单丝直径为 13 μm,密度为 2 650 kg/m³,平均长度为 6 mm,抗拉强度大于 2 000 MPa,弹性模量在 90~110 GPa,极限延伸率为 3.5%,熔点为 1 250℃。图 1 为玄武岩纤维的照片,图 2 为纤维水泥土中的玄武岩纤维电镜照片。原状土经晾晒干燥、碾碎、过筛后妥善保存。采用骆驼牌 P·O 42.5 水泥,按照 JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》制成边长 70.7 mm 的立方体水泥土样。

具体制样过程为:将风干、碾碎、过筛后的土料配制成与原状土含水率相同的重塑土,静置 24 h。拌合用水采用现场取回的海水。按照设定的水灰比



图 1 玄武岩纤维



图 2 水泥土中的玄武岩纤维

配制水泥浆并加入到重塑土中充分搅拌。将准确称取的玄武岩纤维撵开,均分为 5~10 份,尽量做到玄武岩短切纤维的分散与独立。将一份玄武岩纤维均匀洒落在混合料中,待搅拌均匀后重复该步骤直至掺入全部的玄武岩纤维。将混合料分 3 层装入模具中,每装入一层放入振动台振捣一次以排净水泥土样中的气泡,然后刮平试样顶部多余的水泥土,盖上保湿膜,静置 24 h 时后拆模。将土样放入养护箱进行水下(从现场取的海水)养护,水温控制在 20±3℃。养护至设定的龄期后取出试块,淋干水分后放入恒温恒湿养护箱等待试验。在劈裂抗拉、无侧限抗压强度试验时,每组采用 6 个试样,剔除异常数据后计算标准差和变异系数,求取标准值。

为了研究不同水泥掺量 a_c 、纤维掺量 a_f 、龄期 T 、冻融循环次数 N 、水灰比 w/c 等因素对冻融(未冻融)水泥土的无侧限抗压强度的影响,根据 JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》、JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》的相关规定和张迪迪等^[12,16-17]的相关研究以及试配经验,设计试验方案见表 1,其中水泥土掺入比为水泥质量与天然土质量之比。无侧限抗压试验采用中国科学院武汉岩土所研制的 RMT-150C 型岩石压力试验机,加荷速率为 1 mm/min,当试样出现峰值应力后继续试验直至达到 5% 的应变后停止试验。冻融循环试验:先在 -20℃ 的恒温冷冻箱中进行 12 h 气冻,然后在 15~20℃ 的水中进行 12 h 融化,24 h 为一个循环。

为了重点研究不同纤维掺量、冻融循环次数对冻融(未冻融)水泥土的劈裂抗拉强度的影响,设计

表1 无侧限抗压强度试验方案

方案编号	水泥掺量 $a_c/\%$	纤维掺量 $a_f/\%$	龄期 T/d	冻融循环次数 N	水灰比 w/c
1~5	10、12、14、16、18	0.20	90	3	0.8
6~10	12	0、0.1、0.2、0.3、0.4	90	3	0.8
11~15	12	0.20	14、28、60、90、180	3	0.8
16~21	12	0.20	90	0、1、3、6、9、15	0.8
22~25	12	0.20	90	3	0.7、0.8、0.9、1.0

试验方案见表2。劈裂抗拉试验采用边长 70.7 mm 的水泥立方体试件,在试件上下支承面与压力机压板之间加一宽 15 mm 的垫条,使试件上下形成对应的条形加载,使试件沿立方体中心劈裂破坏,将劈裂时的力值进行换算即可得到水泥土的抗拉强度。

表2 劈裂抗拉试验方案

方案编号	纤维掺量 $a_f/\%$	冻融循环次数 T
26~30	0、0.1、0.2、0.3、0.4	6
31~36	0.20	0、1、3、6、9、15

水泥土的劈裂抗拉强度 f_{ts} 换算公式^[15]为

$$f_{ts} = \frac{2P_{max}}{\pi a^2} \quad (1)$$

式中: P_{max} 为试件破坏时的最大竖向荷载值; a 为试件的边长。

2 水泥土无侧限抗压和劈裂抗拉试验

2.1 无侧限抗压试验

图3(a)(b)分别为其他条件相同($a_c = 12\%$ 、 $T=90\text{ d}$ 、 $w/c=0.8$ 、 $N=0$)时的素水泥土、纤维水泥土($a_f=0.2\%$)的无侧限抗压试验破坏照片。由图3可看出素水泥土的脆性破坏特征非常明显,达到5%应变时试块已成碎散体。素水泥土的破坏方式通常为双剪型^[18],破坏实质为张裂破坏。试块端部由于受到承压板的约束作用因而出现斜裂缝。当水泥掺量和纤维掺量均达到一定的程度时,由于水泥土内部的纤维的拉结作用,纤维水泥土的脆性特征减弱,往往达到5%应变时试块尚能保持立方体的形



图3 无侧限抗压强度试验破坏形态

状,剥落现象较素水泥土轻。这主要是由于达到一定水泥掺量和纤维掺量的纤维水泥土的抗拉强度大于相同水泥掺量的素水泥土的抗拉强度^[7]以及纤维与水泥土之间的摩阻力随着应力的增大而增大。

图4为图3对应的两种水泥土的应力应变($\sigma-\varepsilon$)关系曲线。由图4可知,纤维水泥土和素水泥土达到峰值应力时的应变分别为3.2%与2.7%,纤维水泥土的无侧限抗压强度较素水泥土大;纤维水泥土的残余强度远大于素水泥土。纤维水泥土的延性较素水泥土的延性大,力学性能更好。

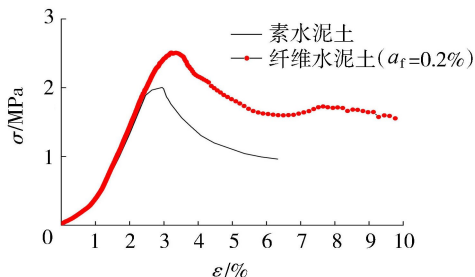


图4 无侧限抗压强度试验的 $\sigma-\varepsilon$ 关系曲线

2.2 劈裂抗拉试验

图5(a)(b)分别为其他条件相同($a_c = 12\%$ 、 $T=90\text{ d}$ 、 $w/c=0.8$ 、 $N=0$)时的素水泥土、纤维水泥土($a_f=0.2\%$)的劈裂抗拉试验破坏照片。试验中素水泥土和纤维水泥土的劈裂破坏形式基本一致,均为试块中部首先出现竖向裂缝,随着荷载的增大,裂缝不断延伸进而贯通整个试块,最终进展为突发性脆性破坏。相比而言,纤维水泥土在加荷破坏时表现出一定的塑性特征,表现为试块裂缝多而密,这是因为纤维在土体中交织形成空间约束力会限制裂缝的开展,引起应力重分布,表现出一定的塑性破坏特征。



图5 劈裂抗拉试验破坏形态

图6为图5对应的两种水泥土的应力应变关系曲线图。由图6可知,纤维水泥土达到峰值应力时的应变较大,说明其劈裂抗拉强度较高,纤维的掺入提高了水泥土的劈裂抗拉强度。

3 水泥土冻融试验结果

图7和图8分别为 $a_c = 12\%$ 、 $T=90\text{ d}$ 、 $w/c=0.8$

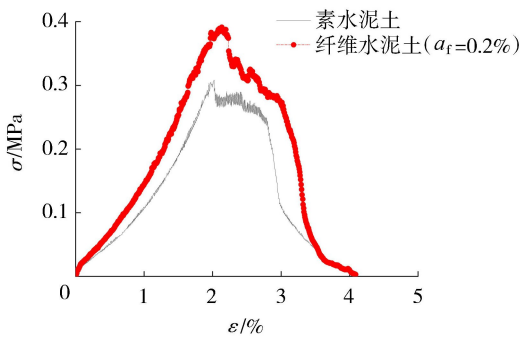


图6 劈裂抗拉强度试验的 σ - ε 关系曲线

时的素水泥土、纤维水泥土($a_f=0.2\%$)在冻融循环次数 $N=1, 3, 6, 9, 15$ 时的破坏照片。

由图7可看出,冻融1次时,水泥土试块出现较多细裂缝,当冻融次数达到6次以上时,水泥土试块出现了明显的剥落现象,而且随着冻融次数的增多,裂缝越来越宽、越来越长,剥落现象越明显,表明裂缝逐渐从局部型裂缝发展成为贯通型裂缝。

由图8可以看出,冻融1次时,水泥土试块出现微小的裂缝,随着冻融次数的增多,水泥土试块内部的裂缝越来越多,裂缝宽度逐渐增大,当冻融次数达到15次时,水泥土试块出现了较宽的裂缝,出现明显的剥落现象,水泥土的强度也受到较大损失。与素水泥土相比,在相同冻融次数情况下玄武岩纤维水泥土裂缝宽度、裂缝开展长度、裂缝数量相对较少。

4 试验结果分析

4.1 不同因素对水泥土无侧限抗压强度的影响

不同 a_c 和 a_f 时的水泥土在 $T=90\text{d}$ 、 $w/c=0.8$ 、 $N=0$ 和6情况下的 f_c 、抗压冻融强度损失率($1-\text{冻融后强度}/\text{未冻融强度}$)分别如表3和表4所示。由

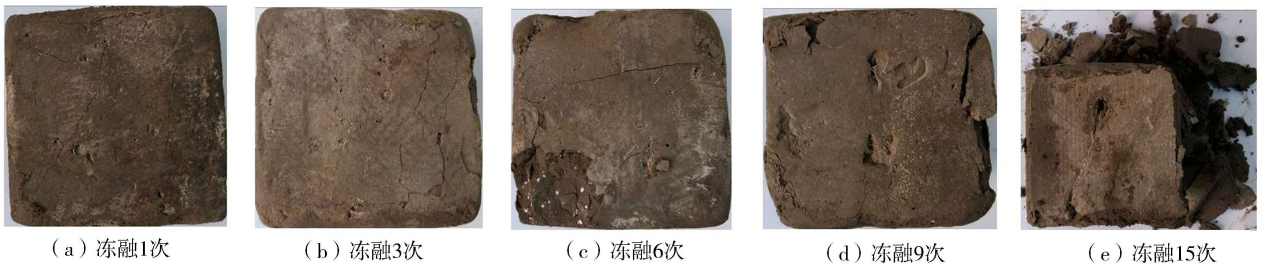


图7 素水泥土冻融试验破坏形态

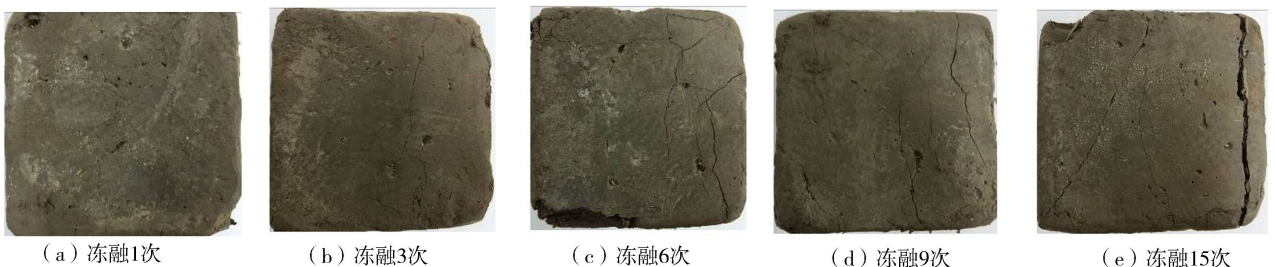


图8 纤维水泥土冻融试验破坏形态

表3可知,随着水泥掺量的提高,素水泥土和纤维水泥土的强度均增大,且纤维掺量越高,水泥土的强度也越高。相关研究^[13]发现纤维掺量并非越高越好,当纤维掺量超过某一比例,水泥土的强度反而逐渐减小,即存在一个最佳掺入比使得纤维水泥土的强度达到最大;冻融水泥土的强度明显低于未冻融水泥土的强度。由表4可知,纤维水泥土的冻融强度损失率小于素水泥土,且纤维掺量越高,冻融强度损失率越小。在水泥土中掺入纤维后,经搅拌后纤维均匀分散在水泥土中,使得水泥土的抗拉强度增大,随着纤维与水泥土接触处的应力重分布及不同位置纤维抗拉强度的发挥,纤维在土体中交织形成的空间约束力不断增加,水泥土抵抗冻融破坏的能力也不断增强。另外,水泥掺量越高,水泥土的冻融强度损失率越小。这主要是因为水泥掺量越高,水泥土的强度也越高,抵抗冻融破坏的能力也就越强。

不同 a_c 和 T 时的水泥土在 $a_f=0.2\%$ 、 $w/c=0.8$ 、 $N=0$ 和6情况下的 f_c 、抗压冻融强度损失率分别如表5和表6所示。随着水泥掺量和龄期的提高,水泥土的强度不断提高。龄期越长的水泥土的冻融强度损失率小于龄期较短的水泥土的冻融强度损失率,这是因为龄期越长,水泥水化越充分,水泥土中的自由水含量越低,生成的水泥土结晶体的强度越高,因此抵抗冻融破坏的能力越强,强度损失率越低。

不同 a_c 和 N 时的水泥土在 $a_f=0.2\%$ 、 $T=90\text{d}$ 、 $w/c=0.8$ 情况下的 f_c 、抗压冻融强度损失率分别如表7和表8所示。随着冻融循环次数的增加,水泥土的强度明显变小,水泥土的冻融强度损失率明显增大。

表3 不同 a_c 和 a_f 时水泥土的 f_c

$a_c/\%$	f_c/MPa									
	$a_f=0$		$a_f=0.1\%$		$a_f=0.2\%$		$a_f=0.3\%$		$a_f=0.4\%$	
	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$
10	1.51	0.57	1.69	0.71	2.02	0.95	2.42	1.21	2.58	1.39
12	2.02	0.79	2.21	0.97	2.51	1.23	2.92	1.52	3.16	1.77
14	2.53	1.04	2.68	1.21	3.03	1.55	3.37	1.82	3.64	2.11
16	3.13	1.35	3.42	1.57	3.68	1.91	4.08	2.24	4.32	2.55
18	3.62	1.59	3.92	1.84	4.17	2.21	4.60	2.58	4.83	2.90

表4 不同 a_c 和 a_f 时的抗压冻融强度损失率

%

a_c	抗压冻融强度损失率				
	$a_f=0$	$a_f=0.10\%$	$a_f=0.20\%$	$a_f=0.30\%$	$a_f=0.40\%$
10	62.3	58.0	53.0	50.0	46.1
12	60.9	56.1	51.0	47.9	44.0
14	58.9	54.9	48.8	46.0	42.0
16	56.9	54.1	48.1	45.1	41.0
18	56.1	53.1	47.0	43.9	40.0

表5 不同 a_c 和 T 时水泥土的 f_c

$a_c/\%$	f_c/MPa									
	$T=14\text{ d}$		$T=28\text{ d}$		$T=60\text{ d}$		$T=90\text{ d}$		$T=180\text{ d}$	
	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$
10	1.25	0.42	1.52	0.58	1.78	0.75	2.02	0.95	2.23	1.07
12	1.61	0.56	1.96	0.76	2.28	1.01	2.51	1.23	2.74	1.34
14	1.82	0.65	2.48	1.02	2.73	1.25	3.03	1.55	3.33	1.70
16	2.32	0.86	2.94	1.24	3.35	1.57	3.68	1.91	4.13	2.15
18	2.67	1.01	3.29	1.42	3.84	1.84	4.17	2.21	4.55	2.46

表6 不同 a_c 和 T 时的抗压冻融强度损失率

%

a_c	抗压冻融强度损失率				
	$T=14\text{ d}$	$T=28\text{ d}$	$T=60\text{ d}$	$T=90\text{ d}$	$T=180\text{ d}$
10	66.4	61.8	57.9	53.0	52.0
12	65.2	61.2	55.7	51.0	51.1
14	64.3	58.9	54.2	48.8	48.9
16	62.9	57.8	53.1	48.1	47.9
18	62.2	56.8	52.1	47.0	45.9

表7 不同 a_c 和 N 时水泥土的 f_c

$a_c/\%$	f_c/MPa					
	$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=6$	$N=9$	$N=15$
10	2.02	1.56	1.20	0.95	0.79	0.63
12	2.51	1.96	1.50	1.23	1.00	0.80
14	3.03	2.39	1.91	1.55	1.24	1.03
16	3.68	2.94	2.38	1.91	1.55	1.29
18	4.17	3.42	2.72	2.21	1.79	1.50

表8 不同 a_c 和 N 时的抗压冻融强度损失率

%

a_c	抗压冻融强度损失率				
	$N=1$	$N=3$	$N=6$	$N=9$	$N=15$
10	22.8	40.6	53.0	60.9	68.3
12	21.9	40.2	51.0	60.2	68.1
14	21.1	37.0	48.8	59.1	66.0
16	20.1	35.3	48.1	57.9	64.9
18	18.0	34.8	47.0	57.1	64.0

石的抗压、抗折强度随冻融次数的变化规律,其3项评价指标均良好。借鉴该规律,本文采用双曲线来拟合冻融后的纤维水泥土、素水泥土的无侧限抗压强度 p_u 与 N 之间的关系。拟合得到的双曲线方程如式(2)或式(3)所示:

$$p_0 - p_u = N/(d + bN) \quad (2)$$

$$N/(p_0 - p_u) = d + bN \quad (3)$$

式中: p_0 为未经冻融的水泥土无侧限抗压强度; p_u 为经 N 次冻融循环后水泥土的无侧限抗压强度; d 为截距, b 为斜率。表7中试验结果的拟合情况如图9所示,拟合效果比较理想。

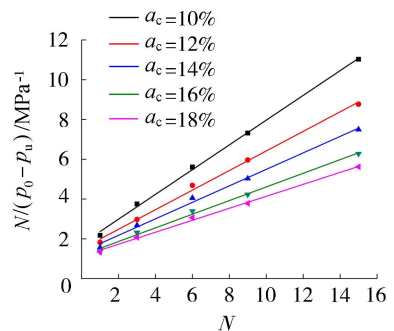


图9 $N/(p_0 - p_u)$ 与 N 关系

不同 a_c 和 w/c 时的水泥土在 $a_f=0.2\%$ 、 $T=90\text{ d}$ 、 $N=0$ 和 6 情况下的 f_c 、抗压冻融强度损失率分

别如表 9、表 10 所示。由表 9、表 10 可知,随着水灰比的增大,水泥土的强度减小。试验发现,随着水灰比的增大,水泥土抵抗冻融破坏的能力明显减小。这是因为水灰比越大,水泥水化后残留在水泥土中的自由水越多,水泥土冻融时越容易破坏。因此,在工程应用时,在满足水泥充分水化及搅拌均匀的前提下,应尽量降低水灰比进而提高水泥土的抵抗冻融破坏的能力。此外,试验还发现水灰比相同时,水泥掺量越高,水泥土冻融后的强度损失率越小。这是因为水泥掺量越高,水泥土的强度越高,抵抗冻融破坏的能力就越强。

表 9 不同 a_c 、 w/c 时水泥土的 f_c

$a_c/\%$	f_c/MPa							
	$w/c=0.7$		$w/c=0.8$		$w/c=0.9$		$w/c=1.0$	
	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$
10	2.72	1.69	2.02	0.95	1.54	0.62	1.10	0.36
12	3.31	2.09	2.51	1.23	1.80	0.73	1.29	0.43
14	4.08	2.61	3.03	1.55	2.83	1.19	2.08	0.73
16	4.94	3.21	3.68	1.91	3.43	1.48	2.53	0.91
18	5.51	3.69	4.17	2.21	3.92	1.73	2.89	1.07

表 10 不同 a_c 和 w/c 时的抗压冻融强度损失率 %

a_c	抗压冻融强度损失率			
	$w/c=0.7$	$w/c=0.8$	$w/c=0.9$	$w/c=1.0$
	10	37.9	53.0	59.7
12	36.9	51.0	59.2	66.7
14	36.0	48.8	58.0	64.9
16	35.0	48.1	56.9	64.0
18	33.0	47.0	55.9	63.0

不同 a_f 和 N 时的水泥土在 $w/c=0.8$ 、 $a_c=12\%$ 、 $T=90\text{d}$ 情况下的 f_c 、抗压冻融强度损失率分别如表 11 和表 12 所示。纤维水泥土在相同冻融循环次数时的无侧限强度高于素水泥土,且纤维掺量越高,水泥土抵抗冻融循环破坏的能力也越强。此外,从表 12 中还可发现当冻融循环次数较小时,随着纤维掺量的提高,水泥土的冻融强度损失率逐渐变小;当冻融循环次数较小时,不同纤维掺量水泥土的冻融强度损失率变化不明显。

不同 T 和 N 时的水泥土在 $w/c=0.8$ 、 $a_c=12\%$ 、 $a_f=0.2\%$ 情况下的 f_c 、抗压冻融强度损失率分别如表 13 和表 14 所示。随着龄期的增大,水泥土的强

表 11 不同 a_f 和 N 时水泥土的 f_c

$a_f/\%$	f_c/MPa					
	$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=6$	$N=9$	$N=15$
	0	2.02	1.50	1.22	0.79	0.71
0.1	2.21	1.67	1.36	0.97	0.81	0.66
0.2	2.51	1.92	1.57	1.23	0.97	0.78
0.3	2.92	2.26	1.84	1.52	1.17	0.91
0.4	3.16	2.46	2.01	1.77	1.27	1.01

度逐渐增大,水泥土的冻融强度损失率逐渐减小。这表明随着龄期的增大,水泥土抵抗冻融循环破坏的能力逐渐增强。

表 12 不同 a_f 和 N 时的抗压冻融强度损失率 %

a_f	抗压冻融强度损失率				
	$N=1$	$N=3$	$N=6$	$N=9$	$N=15$
	0	25.7	39.6	60.9	64.9
0.1	24.4	38.5	56.1	63.3	70.1
0.2	23.5	37.5	51.0	61.4	68.9
0.3	22.6	37.0	47.9	59.9	68.8
0.4	22.2	36.4	44	59.8	68.0

表 13 不同 T 和 N 时水泥土的 f_c

T/d	f_c/MPa					
	$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=6$	$N=9$	$N=15$
	14	1.61	1.16	0.93	0.56	0.48
28	1.96	1.43	1.17	0.76	0.63	0.45
60	2.28	1.71	1.42	1.01	0.80	0.57
90	2.51	1.92	1.57	1.23	0.97	0.78
180	2.74	2.08	1.75	1.34	1.07	0.85

表 14 不同 T 和 N 时的抗压冻融强度损失率

T/d	抗压冻融强度损失率/%				
	$N=1$	$N=3$	$N=6$	$N=9$	$N=15$
	14	25.7	39.6	60.9	64.9
28	24.4	38.5	56.1	63.3	70.1
60	23.5	37.5	51	61.4	68.9
90	22.6	37	47.9	59.9	68.8
180	22.2	36.4	44	59.8	68

不同 w/c 和 N 时的水泥土在 $T=90\text{d}$ 、 $a_c=12\%$ 、 $a_f=0.2\%$ 情况下的 f_c 、抗压冻融强度损失率分别如表 15 和表 16 所示。水灰比对水泥强度的影响十分明显,水灰比越大,水泥土的强度越小。随着水灰比的增大,水泥土冻融后的强度损失率也越大。

表 15 不同 w/c 和 N 时水泥土的 f_c

w/c	f_c/MPa					
	$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=6$	$N=9$	$N=15$
	0.7	3.31	2.57	2.19	2.09	1.38
0.8	2.51	1.92	1.57	1.23	0.97	0.78
0.9	1.79	1.32	1.04	0.73	0.57	0.48
1.0	1.29	0.94	0.72	0.43	0.39	0.32

表 16 不同 w/c 和 N 时的抗压冻融强度损失率

w/c	抗压冻融强度损失率/%				
	$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=6$	$N=9$
	0.7	22.4	33.8	36.9	58.3
0.8	23.5	37.5	51.0	61.4	68.9
0.9	26.3	41.9	59.2	68.2	73.2
1.0	27.1	44.2	66.7	69.8	75.2

4.2 不同因素对水泥土劈裂抗拉强度的影响

不同 a_c 和 a_f 时的水泥土在 $w/c=0.8$ 、 $N=0$ 和 6 、 $T=90\text{d}$ 情况下的 f_t 、劈裂抗拉冻融强度损失率分别如表 17 和表 18 所示。随着水泥掺量和纤维掺量

的提高,水泥土的劈裂抗拉强度也随之增大,而水泥土的冻融强度损失率则随之减小。而且纤维水泥土在冻融后的劈裂抗拉强度均大于相同水泥土掺量的

素水泥土的劈裂抗拉强度。经统计分析,本次试验水泥土的劈裂抗拉强度与无侧限抗压强度的比值在14%~17%之间。

表 17 不同 a_c 和 a_f 时水泥土的 f_t

$a_c/\%$	f_t/MPa									
	$a_f=0$		$a_f=0.1\%$		$a_f=0.2\%$		$a_f=0.3\%$		$a_f=0.4\%$	
	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$	$N=0$	$N=6$
10	0.24	0.09	0.27	0.13	0.32	0.16	0.38	0.19	0.41	0.20
12	0.32	0.12	0.35	0.18	0.40	0.20	0.47	0.24	0.51	0.26
14	0.41	0.16	0.43	0.22	0.48	0.25	0.54	0.28	0.59	0.30
16	0.51	0.22	0.56	0.29	0.60	0.32	0.66	0.35	0.70	0.38
18	0.60	0.27	0.65	0.34	0.68	0.36	0.75	0.41	0.79	0.44

表 18 不同 a_c 和 a_f 时的劈裂抗拉冻融强度损失率 %

a_c	劈裂抗拉冻融强度损失率				
	$a_f=0$	$a_f=0.1\%$	$a_f=0.2\%$	$a_f=0.3\%$	$a_f=0.4\%$
10	62.5	51.9	50.0	50.0	51.2
12	62.5	48.6	50.0	48.9	49.0
14	61.0	48.8	47.9	48.1	49.2
16	56.9	48.2	46.7	47.0	45.7
18	55.0	47.7	47.1	45.3	44.3

不同 a_c 和 N 时的水泥土在 $w/c = 0.8$ 、 $a_f = 0.2\%$ 、 $T=90\text{d}$ 情况下的 f_t 、劈裂抗拉冻融强度损失率分别如表 19 和表 20 所示。随着冻融循环次数的增加,水泥土的劈裂抗拉强度逐渐变小,水泥土的冻融强度损失率逐渐增大。试验发现冻融后水泥土的劈裂抗拉强度与受到的冻融循环次数之间的关系也可以用双曲线来近似拟合。表 19 试验结果的拟合情况如图 10(图中 p_s 为经 N 次冻融循环后水泥土的劈裂抗拉强度)所示。

表 19 不同 a_c 、 N 时水泥土的 f_t

$a_c/\%$	f_t/MPa					
	$N=0$	$N=1$	$N=3$	$N=6$	$N=9$	$N=15$
10	0.32	0.25	0.22	0.16	0.12	0.10
12	0.40	0.32	0.28	0.20	0.16	0.13
14	0.48	0.39	0.34	0.25	0.20	0.16
16	0.60	0.49	0.43	0.32	0.24	0.20
18	0.68	0.57	0.49	0.36	0.29	0.24

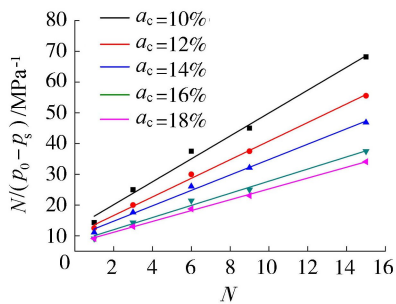
表 20 不同 a_c 、 N 时的劈裂抗拉冻融强度损失率 %

a_c	劈裂抗拉冻融强度损失率				
	$N=1$	$N=3$	$N=6$	$N=9$	$N=15$
10	21.9	31.3	50.0	62.5	68.8
12	20.0	30.0	50.0	60.0	67.5
14	18.8	29.2	47.9	58.3	66.7
16	18.3	28.3	46.7	60.0	66.7
18	16.2	27.9	47.1	57.4	64.7

5 结论

a. 加入纤维后可以提高水泥土的无侧限抗压强度和劈裂抗拉强度,纤维水泥土的延性较素水泥

图 10 $N/(p_0 - p_s)$ 与 N 关系



土的延性大,力学性能更好。纤维水泥土的冻融强度损失率小于素水泥土的冻融强度损失率。随着水泥掺量和龄期的提高,水泥土的强度不断提高,龄期越长的水泥土冻融循环后的强度损失率明显小于龄期较短的水泥土的强度损失率。

b. 试验发现冻融后水泥土的无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度与其受到的冻融循环次数之间的关系可以用双曲线模型拟合。

c. 随着水灰比的增大,水泥土的无侧限抗压强度及抵抗冻融循环破坏的能力明显减小;纤维水泥土在相同冻融循环次数时的无侧限强度高于素水泥土,且纤维掺量越高,水泥土抵抗冻融循环破坏的能力也越强,最佳纤维掺入比有待进一步研究。在工程应用时,在满足水泥充分水化及搅拌均匀的前提下,应尽量降低水灰比进而提高水泥土的抵抗冻融破坏的能力。

d. 随着纤维掺量的提高,水泥土的劈裂抗拉强度也随之增大。本次试验水泥土的劈裂抗拉强度与无侧限抗压强度的比值在14%~17%之间。

参考文献:

[1] 孔海峡,薛贵金,左立富. 低温环境下水泥土挤密桩的水泥土强度试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(5): 71-73. (KONG Haixia, XUE Guijin, ZUO Lifu. Strength tests on cement soil for cement soil compaction pile under low-temperature environment[J]. Advances in

- Science and Technology of Water Resources, 2019, 32 (5):71-73. (in Chinese))
- [2] 董慧, 胡俊, 刘勇. 冻融水泥土力学特性试验研究[J]. 森林工程, 2015, 31(5): 114-117. (DONG Hui, HU Jun, LIU Yong. Experimental study on mechanical properties of freeze-thaw cement-treated soil [J]. Forest Engineering, 2015, 31(5): 114-117. (in Chinese))
- [3] 陈四利, 史建军, 于涛, 等. 冻融循环对水泥土力学特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22 (2): 343-349. (CHEN Sili, SHI Jianjun, YU Tao, et al. Effect of freezing-thawing cycle on the mechanical behaviors of cemented soil[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 343-349. (in Chinese))
- [4] SHIHATA S A, BAGHDADI Z A. Simplified method to assess freeze-thaw durability of soil cement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13(4) : 243-247.
- [5] 曹雅娴, 申向东, 胡文利. 聚丙烯纤维加固水泥土的三轴试验研究[J]. 公路, 2011 (5) : 158-161. (CAO Yanxian, SHEN Xiangdong, HU Wenli. Triaxial test of cement soil reinforced with polypropylene fiber [J]. Road, 2011(5) : 158-161. (in Chinese))
- [6] ZHANG Y, SUN W, et al. The effect of high content of fly ash on the properties of glass fiber reinforced cementitious composites [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(12) : 1885-1891.
- [7] 李云峰, 李志国, 郑刚. 纤维水泥土力学性能试验研究[J]. 建筑科学, 2004(6) : 56-60. (LI Yunfeng, LI Zhiguo, ZHENG Gang. A study for properties of cement-soil reinforced with randomly distributed discrete fibers [J]. Building Science, 2004(6) : 56-60. (in Chinese))
- [8] CONSOLI N C, BASSANI M A, FESTUGATO L. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28 (4) : 344-351.
- [9] 高常辉, 马芹永. 玄武岩纤维掺砂水泥土压拉强度的试验分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(2) : 262-266. (GAO Changhui, MA Qinyong. Experiment and analysis on performance of compression and tension strength for basalt fiber and sand reinforced cement-soil [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (2): 262-266. (in Chinese))
- [10] 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) : 1-8. (WANG Minmin, LU Qun, GUO Shaolong, et al. Dynamic behavior of soil with fiber and cement under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (5): 1-8. (in Chinese))
- [11] 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 Shaolong, WANG Minmin, et al. Experimental study of mechanical properties of fiber cement soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (Sup2) : 421-426. (in Chinese))
- [12] 张迪迪, 甘小江, 侯焯, 等. 玄武岩纤维水泥土的冻融循环特性试验研究[J]. 中国铁路, 2019(1) : 84-90. (ZHANG Didi, GAN Xiaojiang, HOU Ye, et al. Experimental study on freeze-thaw cycle characteristics of basalt fiber cement soil [J]. China Railway, 2019(1) : 84-90. (in Chinese))
- [13] 陈峰. 玄武岩纤维水泥土抗拉性能试验研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2016, 33(2) : 188-193. (CHEN Feng. Experiment research on tensile strength of basalt fiber cement-soil [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2016, 33(2) : 188-193. (in Chinese))
- [14] 林兵. 土塑复合材料在道路结构中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [15] 陈洁. 短纤维海水混浆水泥土强度机理及工程应用研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2015.
- [16] 戈雪良, 苏文德, 陆采荣. 气候变化条件下水工混凝土的抗冻性能[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(6) : 37-40. (GE Xueliang, SU Wende, LU Cairong. Frost resistance properties of hydraulic concrete under climate change conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6) : 37-40. (in Chinese))
- [17] 闫西乐, 张萍, 秦鸿根, 等. 混凝土抗盐冻性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2) : 42-45. (YAN Xile, ZHANG Ping, QIN Honggen, et al. Experimental study of frost-salt resistance of concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (2):42-45. (in Chinese))
- [18] 孙钧. 岩土材料疲劳及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [19] 张晗冰. 长期冻融作用下水泥稳定碎石基床力学性能演化试验研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
- [20] 彭艳周, 高军, 徐港, 等. 盐冻融环境下钢筋混凝土结构锈蚀寿命预测[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (3) : 44-49. (PENG Yanzhou, GAO Jun, XU Gang, et al. Prediction for corrosion life of reinforced concrete structures under salt freeze-thaw environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3) : 44-49. (in Chinese))

(收稿日期:2019-04-24 编辑:郑孝宇)