

冻融条件下玄武岩纤维增强水泥土 抗疲劳性能的试验研究

郭少龙^{1,2}, 鹿群², 林永良³, 刘有志⁴

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 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;
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: 通过试验研究了冻融循环对素水泥土及纤维水泥土的抗疲劳性能的影响。试验结果表明: 掺入适量的玄武岩纤维可以改善水泥土的抗压、抗疲劳性能, 而且对后者的影响更显著; 纤维掺量越高, 水泥土抵抗冻融循环破坏的能力也越强; 水灰比对水泥土的抗压能力和抗疲劳能力的影响很大, 因此在保证水泥土均匀拌合的前提下尽可能降低水灰比; 应力水平越高, 水泥土的疲劳寿命越短, 且采用统计软件拟合出了应力水平 S 和疲劳寿命 N 之间的关系, 工程上可根据 $S-N$ 关系推测水泥土的应力水平或疲劳寿命。

关键词: 玄武岩纤维; 水泥土; 冻融循环; 疲劳试验; $S-N$ 关系

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0200-07

Experimental study on fatigue resistance of basalt fiber reinforced cement soil under freeze – thaw condition

GUO Shaolong^{1,2}, LU Qun², LIN Yongliang³, LIU Youzhi⁴

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University,
Tianjin 300384, 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 effects of freeze – thaw cycles on fatigue resistance of plain cement soil and fiber cement soil were studied experimentally. The results showed that adding appropriate amount of basalt fiber can improve the compressive and fatigue properties of cement soil, and the effect on the latter is more significant. The higher the content of fibers is, the stronger the resistance of cement soil to freeze – thaw cycles get. The water cement ratio has a great influence on the compressive and fatigue resistance of cement soil, so the water cement ratio can be reduced as much as possible under the premise of ensuring the uniform mixing of cement soil. The higher the stress level is, the shorter the fatigue life of cement soil become. The relationship between stress level S and fatigue life N is fitted by statistical software. The stress level or fatigue life of cement soil can be estimated according to $S-N$ relationship in engineering.

Key words: basalt fiber; cement soil; freeze-thaw cycle; fatigue test; $S-N$ relationship

1 研究背景

疲劳破坏是指材料在循环荷载作用下其内部产生局部损伤并不断扩展直至断裂的过程。水泥土的疲劳性能对水泥土构成的建筑物(构筑物)的长期受力性能有着直接的影响^[1]。目前对水泥土的疲

劳特性研究比较少, 针对水泥土的疲劳破坏特性、疲劳寿命预测和长期强度等方面的研究尚不完善, 亟需在这些方面开展相关研究^[2]。在季节性冻土地区, 水泥土经常用于路基、复合地基、堤防防渗墙中, 因此研究及评价冻融循环对水泥土疲劳性能的影响很有必要。

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-08-28

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2016CJ20)

作者简介: 郭少龙(1988-), 男, 河南孟津人, 博士研究生, 讲师, 主要从事工程新材料研究。

通讯作者: 鹿群(1970-), 男, 辽宁抚顺人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程研究。

研究发现在水泥土中掺入一定比例的纤维可以提高水泥土的抗压、抗拉、抗疲劳性能^[3-4]。以往掺入水泥土中的纤维主要是聚丙烯纤维和玻璃纤维。玄武岩纤维是近年来快速发展的一种无机环保材料,这种材料强度高,无毒、耐高温、耐腐蚀,目前已广泛应用于道路、桥梁、水利、港口等行业,具有良好的发展前景。

鹿群等^[5]通过试验发现在水泥土中掺入聚丙烯纤维和玄武岩纤维后,水泥土的抗拉强度、抗疲劳能力均明显提高,并且抗疲劳能力的提高程度更明显;纤维掺入量相同时,玄武岩纤维水泥土比聚丙烯纤维水泥土在抗压强度、抗疲劳能力等方面的提高程度更大。李云峰等^[6]研究了聚丙烯纤维水泥土,发现水灰比越大,纤维水泥土的抗折强度、抗拉强度和抗压强度均越小。纤维对水泥土的抗压强度影响不明显,对抗折强度影响明显。高常辉等^[7]通过无侧限抗压试验和劈裂抗拉试验研究了玄武岩纤维掺砂水泥土的力学强度,研究发现存在一个最佳掺入比使得纤维水泥土的抗拉强度取得最大值;掺入纤维后水泥土破坏时表现出一定的塑性特征。陈峰^[8]通过劈裂抗拉试验研究发现掺入纤维后可以明显提高水泥土的抗拉强度,但掺入过多的纤维无法带来明显的强度增长;建立了不同配比时的玄武岩纤维水泥土抗拉强度与抗压强度的经验公式。宋爱苹等^[9]通过试验研究了粉煤灰对水泥土的抗冻融性能的影响,发现随着粉煤灰掺量的增大,掺粉煤灰水泥土的抗冻性能也逐渐增大。杨墩等^[10]通过试验发现水泥土的强度随着溶液中的 CaCl_2 浓度的增大而增加,但当达到一定浓度后水泥土的强度反而下降;当冻融次数相同时,酸性环境下水泥土的强度降低明显,碱性环境下水泥土的强度有小幅度的提高。贺祖浩等^[11]通过试验发现聚丙烯腈纤维对水泥土劈裂抗拉和抗折强度的提高幅度大于对抗压强度的提高幅度,纤维能明显提高水泥土的黏聚力。江国龙等^[12]通过试验发现氯化钠溶液养护条件下的水泥土的早期强度较清水养护条件下的强度更高,但后期对水泥土的抗拉强度具有腐蚀效应。黄敏建^[13]研究了掺入玻璃纤维的水泥土的劈裂抗拉强度与纤维掺量、水泥掺量、土的含水量的关系,分析了纤维掺量对水泥土劈裂抗拉破坏模式的影响。

目前对考虑冻融循环作用下的素水泥土、纤维水泥土抗疲劳性能研究较少,本文通过试验对其开展研究,以指导工程实践。

2 试验材料与方法

本次试验土样的采集地点为浙江温州沿海某围堤地表以下5 m深度处,土的力学指标见表1。试验用水为该围堤附近的海水。水泥土中掺入的玄武岩纤维长度为6 mm,纤维各项指标见表2。图1、2分别为拌合前的玄武岩纤维照片和纤维水泥土中的玄武岩纤维电镜照片。从现场取回的原状土经干燥、碾碎、过筛后制成土料并密封保存。

水泥土试块的制作过程如下:将土料加海水配制成与原状土相同含水率的重塑土,静止24 h后加入一定水灰比配制的水泥浆和一定的玄武岩纤维,经搅拌机充分搅拌后取出一部分水泥土填入模具的三分之一体积,放入振动台振捣使气泡排净,重复上述操作直至填满模具,24 h后拆模,之后将取出的试块放入养护箱中进行海水养护,水温控制在 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 。本次试验的试块体积均为边长70.7 mm的立方体试块。每次试验重复6次,剔除异常数据后求取平均值。试验仪器采用RMT-150C岩石力学试验系统,见图3。

最小应力 $\sigma_{\min}$ 与最大应力 $\sigma_{\max}$ 的比值为循环特征值 r 。当 r 一定时,若材料在最大应力 $\sigma_{\max}$ 的作用下经过 N 次循环荷载后发生疲劳破坏,则 N 为 $\sigma_{\max}$ 时的疲劳寿命。为了研究不同水泥掺量、纤维掺量和龄期对水泥土无侧限抗压强度的影响规律,制定了相关试验方案见表3。为了研究不同纤维掺量、冻融循环次数和水灰比对水泥土的抗疲劳性能的影响,制定的疲劳试验方案见表4。表3和4中纤维掺量为纤维质量与天然土质量之比。疲劳试验采用RMT-150C试验机(见图3),试验采用正弦波进行加载。由于水泥土在破坏时的应变较小,参考相关文献^[1,12],本次疲劳试验以试件产生2%的应变作为破坏标准。试验过程所加的应力幅值的最小值为应力幅值最大值的10%(即循环特征值 r 取0.1),应力幅值的最大值在0.4~2.6 MPa之间,试验加载频率均为1.0 Hz。一次冻融循环为12 h气冻(-20°C)加12 h水中融化($15^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$)。

3 试验过程

3.1 水泥土的无侧限抗压试验过程

由于在进行水泥土疲劳试验前需要先确定水泥土的抗压强度,进而确定疲劳荷载施加的大小,本文对不同水泥掺量、不同纤维掺量及不同龄期的水泥土试块进行了无侧限抗压强度试验。

表 1 试验土样的物理力学性质指标

土的名称	取样地点	天然密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水量 / %	液限 $W_L / \%$	塑限 $W_P / \%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	孔隙比 e	压缩模量 E_{s1-2} / MPa	压缩系数 $a_{1-2} / \text{MPa}^{-1}$	凝聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
淤泥质黏土	温州龙湾	1.85	53.0	48.5	28.5	20	1.23	1.490	2.47	1.603	18.5	7.6

注:表中 c 、 φ 值均为直剪快剪指标。

表 2 玄武岩纤维单丝的性质指标

熔点/ $^\circ\text{C}$	弹性模量/GPa	极限延伸率/ %	抗拉强度/MPa	单丝直径/ μm	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	耐酸碱性
1 250	100	3.5	$\geq 2\,000$	13	2 650	极高

表 3 水泥土无侧限抗压强度试验方案

试验变量	试验不变量	试验目的
水泥掺量 $a_c / \%$ (10、12、14、16、18)	纤维掺量 $a_f = 0.20\%$; 龄期 $T = 90\text{ d}$; 冻融循环次数为 0; 水灰比 = 0.8	探讨水泥掺量对水泥土无侧限抗压强度的影响
纤维掺量 $a_f / \%$ (0、0.1、0.2、0.3、0.4)	水泥掺量 $a_c = 12\%$; 龄期 $T = 90\text{ d}$; 冻融循环次数为 0; 水灰比 = 0.8	探讨纤维掺量对水泥土无侧限抗压强度的影响
龄期 T / d (14、28、60、90、180)	水泥掺量 $a_c = 12\%$; 纤维掺量 $a_f = 0.2\%$; 冻融循环次数为 0; 水灰比 = 0.8	探讨龄期对水泥土无侧限抗压强度的影响

表 4 水泥土疲劳试验方案

试验变量	试验不变量	试验目的
冻融循环次数 (0、1、3、6、9)	纤维掺量 $a_f = 0$; 水泥掺量 $a_c = 12\%$; 龄期 $T = 90\text{ d}$; 水灰比 = 0.8 纤维掺量 $a_f = 0.1\%$; 水泥掺量 $a_c = 12\%$; 龄期 $T = 90\text{ d}$; 水灰比 = 0.8 纤维掺量 $a_f = 0.2\%$; 水泥掺量 $a_c = 12\%$; 龄期 $T = 90\text{ d}$; 水灰比 = 0.8 纤维掺量 $a_f = 0.3\%$; 水泥掺量 $a_c = 12\%$; 龄期 $T = 90\text{ d}$; 水灰比 = 0.8	探讨冻融循环次数对水泥土疲劳性能的影响
水灰比 (0.7、0.8)	纤维掺量 $a_f = 0.2\%$; 水泥掺量 $a_c = 12\%$; 龄期 $T = 90\text{ d}$; 冻融循环次数为 0 纤维掺量 $a_f = 0.2\%$; 水泥掺量 $a_c = 12\%$; 龄期 $T = 90\text{ d}$; 冻融循环次数为 1 纤维掺量 $a_f = 0.2\%$; 水泥掺量 $a_c = 12\%$; 龄期 $T = 90\text{ d}$; 冻融循环次数为 6	探讨水灰比对水泥土疲劳性能的影响



图 1 玄武岩纤维照片

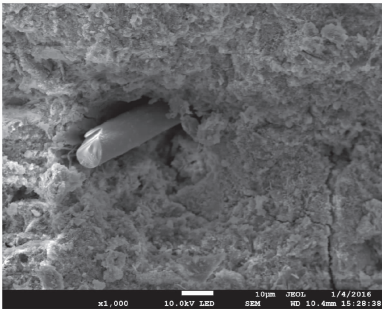


图 2 纤维水泥土中的玄武岩纤维^[4]

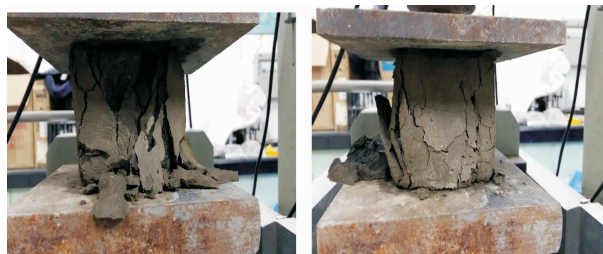


图 3 RMT-150C 试验机

图 4(a)、4(b) 分别为素水泥土(水泥掺量、水灰比、龄期分别为 12%、0.8、90 d)和相同配比的纤维水泥土(纤维掺量 a_f 为 0.2%)的无侧限抗压强度试验破坏照片。素水泥土的破坏模式一般为双剪

型^[14],破坏本质为张裂破坏,是水泥土内部的初始微裂缝在荷载的作用下不断扩展、变宽、变长,最终将试块切割成小柱体进而压碎的结果。纤维水泥土的破坏模式与素水泥土的破坏模式相似,但延性特

征更为明显。这是由于纤维水泥土内部的纤维与水泥土之间的摩阻力随着荷载应力的增大而增大,纤维与水泥土接触处的应力会发生重分布,使得纤维在土体中形成的空间约束力不断增大,因而纤维的掺入使得水泥土的抗拉能力增大,脆性破坏特征减弱。图5为图4对应的素水泥土和纤维水泥土的应力—应变曲线图。由图5可知,在水泥土中掺入纤维后,其强度明显大于素水泥土的强度。而且纤维水泥土的延性明显大于素水泥土的延性。



(a) 素水泥土

(b) 纤维水泥土

图4 无侧限抗压强度试验破坏形态

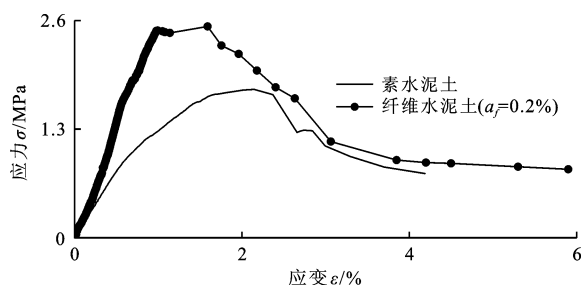


图5 无侧限抗压强度试验的应力—应变关系曲线

3.2 水泥土疲劳试验过程

由于水泥土的疲劳试验历时比较长,为避免试验过程中水泥土试块失水进而影响试验结果,故在疲劳试验过程中将水泥土试块装入自封袋中以减少试验过程中的水分损失,观察发现采取该措施后水泥土试块试验前后水分损失极少。试验过程照片见图6(水泥掺量为12%、纤维掺量为0.2%、龄期为60 d,冻融次数为0)。

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

图7为水灰比等于0.8,龄期为90 d,不同纤维掺量(用 a_f 表示)、不同水泥掺量(用 a_c 表示)情况下水泥土的无侧限抗压强度试验结果。由图7可看出,水泥土无侧限强度(用 p_u 表示)与水泥掺量 a_c 之间大致呈线性关系,随着纤维掺量的提高,水泥土的无侧限抗压强度也增大,表明掺入玄武岩纤维后

可以提高水泥土的抗压强度。图8为水灰比为0.8,纤维掺量为0.2%,不同龄期 T 、不同水泥掺量 a_c 情况下水泥土的无侧限抗压强度试验结果。由图8可看出,不同水泥掺量的水泥土的无侧限抗压强度均随着龄期的增大而增大,且水泥土强度的增长速度随着龄期的增大而逐渐减少,龄期在90 d以内的强度增长较快,超过90 d后强度增长明显放缓。

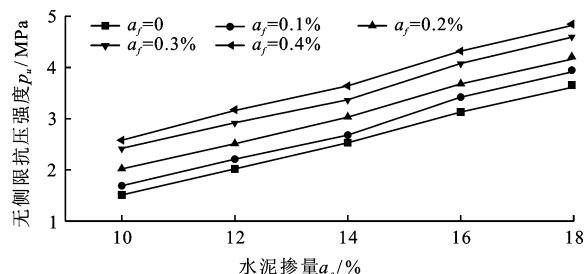
图6 疲劳试验照片($a_w = 12\%$)

图7 不同纤维掺量水泥土无侧限抗压试验结果

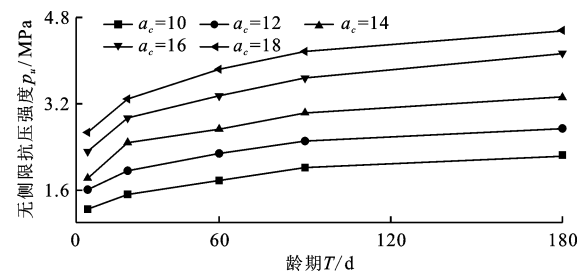


图8 不同水泥掺量水泥土无侧限抗压试验结果

4.2 不同因素对水泥土抗疲劳性能的影响

试验发现,水泥土在疲劳荷载作用下发生破坏时对应的最大应力往往小于其在静荷载作用下发生破坏时对应的应力,表明出低应力性破坏的特征。相关试验研究发现^[13],水泥土发生疲劳破坏的关键因素是水泥土受到的峰值应力与其抗压强度(受冻融的水泥土取冻融后的抗压强度)的比值(即应力水平)的大小,应力水平越大,水泥土越容易疲劳破坏。表5~9为不同纤维掺量水泥土的循环破坏周数,表中数据对应的水泥掺量均为12%,龄期均为90 d。由表5~9可以看出,应力水平越大,水泥土

的循环破坏周数明显减少。还可看出未冻融水泥土和受冻融水泥土的应力水平相同时,后者的疲劳寿命和前者的疲劳寿命接近或略有降低,由此可见,应力水平是决定水泥土材料疲劳寿命的关键因素。由表 5~8 对比可发现,水泥土的循环破坏周数随着纤维掺量的提高而明显增大,掺入适量的玄武岩纤维可以改善水泥土的抗压、抗疲劳性能,而且对后者的影响更显著。图 6 为水泥土(水泥掺量为 12%、纤维掺量为 0.2%、峰值应力为 2.0 MPa、2364 次破坏)的疲劳试验破坏照片,图 9 为该试块的应力—应变关系全过程曲线,由图 9 可知水泥土的疲劳破坏是个渐进的过程,该过程伴随着裂缝的不断扩展,此过程也是能量的耗散过程。

表 9 中的数据为不同水灰比情况下的纤维水泥土在冻融次数为 0、1、6 次情况下的疲劳破坏周数,表中数据对应的纤维掺量均为 0.2%,水泥掺量均为 12%。由表 9 可看出,水灰比越大,水泥土抵抗疲劳破坏的能力越差,水灰比是影响水泥土抗冻性的重要参数。这是因为水灰比直接影响水泥土的毛细孔数量和孔隙率,水灰比越大,水泥土中的孔隙越多,水泥土越不密实。水灰比越大,水泥土中的自由

水越多,冻融循环过程中自由水的结冰膨胀导致水泥土内部出现大量的微裂缝。随着冻融循环次数的增多,微裂缝进一步扩展,水泥土的内部结构受到损伤,抗压强度及抗疲劳能力必然受到影响。可见,水灰比越大对水泥土的抗冻性越不利。

对比表 5~9 可看出:在其他条件相同时,随着冻融次数的增大,相同峰值应力条件下水泥土的循环破坏周数明显降低,冻融对水泥土抗疲劳性能的影响是非常大的,在工程应用时,要考虑温度对水泥土长期强度、抗疲劳性能的不利影响。在寒冷地区,可采取一些针对性的措施,例如将水泥土体置于土层的冻结深度以下,或加入外加剂、减少拌和用水量以改善水泥土的密实性等来提高水泥土的抗冻性能。

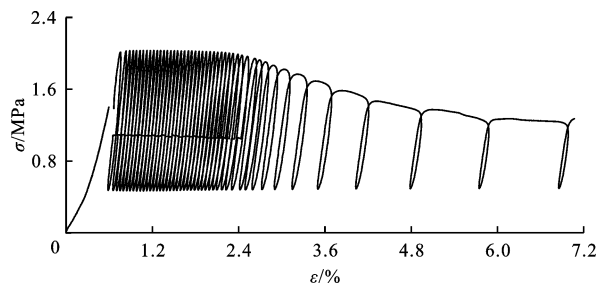


图 9 纤维水泥土的循环破坏应力—应变曲线

表 5 素水泥土的循环破坏周数($a_f = 0$)

$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	未冻融	冻融 1 次	冻融 3 次	冻融 6 次	冻融 9 次
0.4	>300000(0.20)	178644(0.27)	54896(0.33)	18261(0.49)	11451(0.56)
0.6	>300000(0.30)	46847(0.40)	25678(0.49)	2351(0.74)	367(0.85)
0.8	263517(0.40)	25514(0.53)	6875(0.66)	34(0.99)	
1.0	86421(0.50)	8715(0.67)	4512(0.82)		
1.2	22564(0.59)	1324(0.80)	21(0.98)		
1.4	2546(0.69)	58(0.93)			
1.6	652(0.79)				
1.8	126(0.89)				

注: $\sigma_{\max}$ 为正弦荷载的峰值应力,圆括号中的数值为应力水平,即峰值应力与抗压强度的比值,下同。

表 6 纤维水泥土的循环破坏周数($a_f = 0.1\%$)

$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	未冻融	冻融 1 次	冻融 3 次	冻融 6 次	冻融 9 次
0.4	>300000(0.18)	254785(0.24)	178924(0.29)	54452(0.41)	12450(0.49)
0.6	>300000(0.27)	145813(0.36)	54781(0.44)	9241(0.62)	2781(0.74)
0.8	>300000(0.36)	68476(0.48)	11354(0.59)	546(0.82)	16(0.99)
1.0	210165(0.45)	14684(0.60)	1568(0.74)		
1.2	43323(0.54)	2364(0.72)	146(0.88)		
1.4	18841(0.63)	215(0.84)			
1.6	3214(0.72)	25(0.96)			
1.8	346(0.81)				
2.0	53(0.90)				

表 7 纤维水泥土的循环破坏周数($a_f = 0.2\%$)

$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	未冻融	冻融 1 次	冻融 3 次	冻融 6 次	冻融 9 次
0.4	>300000(0.16)	278956(0.21)	198648(0.25)	85485(0.32)	54783(0.41)
0.6	>300000(0.24)	215665(0.31)	134577(0.38)	54684(0.48)	3156(0.62)
0.8	>300000(0.32)	178595(0.42)	54368(0.51)	3684(0.63)	236(0.82)
1.0	>300000(0.40)	68945(0.52)	6891(0.64)	462(0.79)	
1.2	189666(0.48)	9847(0.63)	3647(0.76)	47(0.95)	
1.4	86300(0.56)	4751(0.73)	367(0.89)		
1.6	13461(0.64)	1458(0.83)			
1.8	6641(0.72)	33(0.94)			
2.0	2364(0.80)				
2.2	394(0.88)				
2.4	143(0.96)				

表 8 纤维水泥土的循环破坏周数($a_f = 0.3\%$)

$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	未冻融	冻融 1 次	冻融 3 次	冻融 6 次	冻融 9 次
0.4	>300000(0.14)	>300000(0.18)	256123(0.22)	114578(0.26)	58749(0.34)
0.6	>300000(0.21)	214567(0.27)	157816(0.33)	67481(0.39)	21478(0.51)
0.8	>300000(0.27)	167813(0.35)	80647(0.43)	36412(0.52)	2468(0.68)
1	>300000(0.34)	91475(0.44)	39478(0.54)	8846(0.65)	626(0.85)
1.2	246971(0.41)	45689(0.53)	9278(0.65)	698(0.77)	
1.4	86943(0.48)	19478(0.62)	1038(0.76)	213(0.90)	
1.6	35881(0.55)	1243(0.71)	462(0.87)		
1.8	18624(0.62)	687(0.80)			
2	9542(0.68)	178(0.88)			
2.2	1328(0.75)				
2.4	326(0.82)				
2.6	35(0.89)				

表 9 纤维水泥土的循环破坏周数(水灰比为 0.7、0.8 时)

$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	水灰比 0.7			水灰比 0.8		
	未冻融	冻融 1 次	冻融 6 次	未冻融	冻融 1 次	冻融 6 次
0.4	>300000(0.12)	>300000(0.16)	>300000(0.19)	>300000(0.16)	278956(0.21)	85485(0.32)
0.6	>300000(0.18)	>300000(0.24)	>300000(0.29)	>300000(0.24)	215665(0.31)	54684(0.48)
0.8	>300000(0.24)	>300000(0.32)	294635(0.38)	>300000(0.32)	178595(0.42)	3684(0.63)
1.0	>300000(0.30)	286547(0.40)	194251(0.48)	>300000(0.40)	68945(0.52)	462(0.79)
1.2	>300000(0.36)	176984(0.48)	33541(0.57)	189666(0.48)	9847(0.63)	47(0.95)
1.4	296371(0.42)	95426(0.56)	7248(0.67)	86300(0.56)	4751(0.73)	
1.6	215648(0.48)	8832(0.63)	3957(0.76)	13461(0.64)	1458(0.83)	
1.8	96547(0.55)	6247(0.71)	1123(0.86)	6641(0.72)	33(0.94)	
2.0	11245(0.61)	2356(0.79)	246(0.95)	2364(0.80)		
2.2	8654(0.67)	375(0.87)		394(0.88)		
2.4	6584(0.73)	23(0.95)		143(0.96)		
2.6	3254(0.79)					
2.8	1456(0.85)					
3.0	425(0.91)					
3.2	125(0.97)					

4.3 S - N 关系

S - N 关系也称 wholer 曲线^[15], 是一种常用的预估疲劳寿命的方法。应力水平不同时, 水泥土的疲劳寿命不同, 应力水平 S 和疲劳寿命 N 之间的关系可以用直角坐标系来描述。

$S - \lg N$ 之间的关系可采用如下的线性方程^[16-17] 进行线性拟合:

$$S = a + b \lg N \quad (1)$$

式中: a 、 b 为拟合参数。

以 0.2% 纤维掺量、12% 水泥掺量、90 d 龄期的水泥土冻融试验数据为例, 拟合结果见表 10 所示 (拟合优度值越靠近 1.0 说明拟合效果越好)。通过拟合方程既可以测算出某一应力水平时对应的疲劳寿命, 也可以由疲劳寿命测算相应的应力水平。但由于水泥土材料内部存在孔洞、裂隙等初始缺陷, 试验结果离散性较大, 根据 $S - N$ 关系推测水泥土的应力水平或疲劳寿命时需要根据实际工况对公式进行验证后方可采用。

表 10 线性拟合参数表

冻融次数	a	b	拟合优度
0	1.310	-0.159	0.981
1	1.310	-0.177	0.912
3	1.497	-0.220	0.940
6	1.256	-0.177	0.956
9	1.229	-0.173	0.999
15	1.419	-0.202	0.935

5 结 论

通过对水泥土的疲劳试验, 可以得出以下结论:

(1) 掺入适量的玄武岩纤维可以改善水泥土的抗压、抗疲劳性能, 而且对后者的影响更显著。

(2) 纤维水泥土在相同冻融循环次数时的疲劳破坏周数明显高于素水泥土, 且纤维掺量越高, 水泥土抵抗冻融循环破坏的能力也越强, 最佳纤维掺量有待进一步研究。

(3) 水灰比对水泥土的抗压能力、抗疲劳能力的影响很大, 因此在保证水泥土均匀拌合的前提下尽可能降低水灰比。水泥土受到冻融循环后的抗压强度和疲劳破坏周数明显减少, 工程上应采取措施来降低冻融循环对水泥土体的不利影响。

(4) 应力水平越高, 水泥土的疲劳寿命越短, 应

力水平是决定水泥土材料疲劳寿命的关键因素。疲劳寿命 N 和应力水平 S 之间的关系可以用线性方程进行拟合, 工程上可根据 $S - N$ 关系推测出水泥土的应力水平或疲劳寿命。

参考文献:

- [1] 侯 芮. 环境侵蚀对水泥土疲劳特性影响的试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [2] 张迪迪, 甘小江, 侯 烨, 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, 679(1): 84 - 90.
- [3] ESTABRAGH A R, NAMDAR P, JAVADI A A. Behavior of cement - stabilized clay reinforced with nylon fiber [J]. Geosynthetics International, 2012, 19(1): 85 - 92.
- [4] XIAO Huawen, LIU Yong. A prediction model for the tensile strength of cement - admixed clay with randomly oriented fibers [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2016, 22(9): 1131 - 1145.
- [5] 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(S2): 421 - 426.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 宋爱苹, 张亚飞. 冻融条件下水泥土及掺粉煤灰水泥土的强度特性 [J]. 中外公路, 2017, 37(3): 221 - 223.
- [9] 杨 瞰, 赖天文. 侵蚀和冻融环境下水泥土强度的试验研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2014, 33(4): 89 - 92 + 104.
- [10] 贺祖浩, 李守德, 姚 燕, 等. 聚丙烯腈纤维水泥土的力学性质试验研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2015, 32(4): 42 - 46.
- [11] 江国龙, 陈四利, 毛学文, 等. 水泥土劈裂抗拉强度试验研究 [J]. 公路交通科技, 2017, 34(8): 29 - 33 + 56.
- [12] 黄敏建. 玻璃纤维水泥土劈裂抗拉强度试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(4): 110 - 114.
- [13] 张敏霞, 徐 平, 简文彬. 动荷载作用下水泥土的疲劳寿命分析 [J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1264 - 1268.
- [14] 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: 3 - 15.
- [15] 肖建庄, 李 宏. 再生混凝土单轴受压疲劳性能 [J]. 土木工程学报, 2013, 46(2): 63 - 65.
- [16] 刘 雄. 岩石疲劳学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [17] 张治亮, 徐卫亚, 王 伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴疲劳试验及非线性黏弹塑性疲劳模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 132 - 140.