

纤维水泥土力学性能的试验研究

鹿群^{1,2,3}, 郭少龙^{1,2}, 王闵闵², 高萌²

(1. 中国电力建设集团 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州, 310014; 2. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384;
3. 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)

摘要: 为了解加入纤维对水泥土力学性能的影响, 对素水泥土及纤维水泥土进行了无侧限抗压和疲劳试验。研究结果表明, 添加纤维可小幅度提高水泥土的抗压强度; 与素水泥土相比, 纤维水泥土在达到应力峰值时的应变明显增大, 破坏后的残余强度也有所提高; 纤维的加入提高了水泥土的延性, 减少了裂缝的开展, 改善了其力学性能; 添加纤维后水泥土抵抗疲劳的能力明显增强; 掺入纤维对水泥土抗疲劳能力的提高程度远大于其对水泥土无侧限强度的提高程度; 水泥土的应力水平和疲劳寿命之间具有单对数线性关系; 在循环荷载作用下水泥土表现为低应力性破裂特征。

关键词: 水泥土; 纤维水泥土; 疲劳试验

中图分类号: TU 761

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)增2-0421-06

Experimental study of mechanical properties of fiber cement soil

LU Qun^{1,2,3}, GUO Shao-long^{1,2}, WANG Min-min², GAO Meng²

(1. Power Construction Corporation of China, Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 310014, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

3. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to understand the influence of fiber on the mechanical properties of cement soil, the unconfined compression test and fatigue test of cement soil and fiber reinforced cement soil are carried out. The results show that the compressive strength of cement soil can be improved slightly by adding fiber. Compared with plain cement soil, the strain of fiber cement soil increases obviously at the stress peak point; and its residual strength after failure also increases. The addition of fiber improves the ductility of the cement soil, reduces the crack development and improves its mechanical properties. After the fiber is added, the antifatigue ability of cement soil is significantly increased. The degree of the improvement of cement soil fatigue resistance is much greater than that of unconfined strength of cement soil. The relationship between stress level and fatigue life of cement soil is single logarithm linear. The cement soil is characterized by low stress rupture under cyclic loading.

Keywords: cement soil; fiber reinforced cement soil; fatigue test

1 引言

水泥土是由土、水泥等材料按某种比例混合制成的材料^[1], 广泛应用于水利、港口、公路、建筑等领域。我国东南沿海正进行大规模的开发, 水泥土在围海造陆、海上风电、跨海大桥等项目建设中的应用不断增多, 对这些建设项目中水泥土的力学性能的研究具有重要的意义。

由相关试验结果^[2]可知, 在水泥土中加入纤维(一般称为纤维水泥土)可以显著地提高其抗压和抗拉强度, 我国古代就已有在黏土中加入草筋提高

抗拉强度的经验。在水泥土中添加的纤维主要有玻璃纤维、聚丙烯纤维等, 其中玄武岩纤维是一种新型无机高性能纤维材料, 不仅强度高, 还具有电绝缘、耐腐蚀、耐高温等多种优异性能, 是一种名副其实的绿色、环保材料, 在水泥土中添加玄武岩纤维是一种有益的尝试。

与混凝土类似, 水泥土也具有疲劳特性, 开展疲劳力学特性试验研究, 不但可为工程长期安全性提供技术支持与参考, 亦可丰富和促进水泥土疲劳特性的研究。水泥土材料和金属材料的内部组成结构、强度特性差异很大, 水泥土属于多相复合材料,

收稿日期: 2016-07-27

基金项目: 中国电力建设集团科技项目(No. SD2013-10)。

This work was supported by the Science and Technology Program of Power Construction Corporation of China (SD2013-10).

第一作者简介: 鹿群, 男, 1970年生, 博士, 教授, 主要从事软土地基处理方面的研究。E-mail: zdlq585@126.com

通讯作者: 郭少龙, 男, 1988年生, 硕士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: 1801359295@qq.com

强度离散性较大, 内部存在许多微裂纹。此外, 在材料选取、制作工艺、试验条件以及环境温度等方面的不同也会影响水泥土疲劳试验的结果。与金属材料的疲劳特性相比, 水泥土的疲劳特性更为复杂, 试验结果的离散性更大, 目前对水泥土疲劳特性的研究很少。简文彬等^[3]采用载荷控制、非对称正弦波动态载荷变化方式对水泥土进行疲劳载荷试验, 发现在循环荷载作用下水泥土表现出低应力性破裂特征, 荷载振幅对疲劳寿命的影响远大于荷载频率对疲劳寿命的影响。张敏霞^[4]在试验中发现, 随着循环周数的增加, 水泥土内部的疲劳损伤不断累积, 水泥土的超声波波速也随之降低, 因此结合损伤力学理论, 建立了水泥土疲劳损伤过程中的损伤变量模型和提出了三参数幂函数和二次多项式两种疲劳寿命模型。欧明喜等^[5]研究表明, 水泥土的疲劳破坏循环周数随水泥掺入比的增加呈先增大后减小的趋势。目前对纤维水泥土疲劳特性的研究也很少, 本次试验在这方面进行了试验研究。

2 试验方法

土样取自浙江东南部瓯江口南侧的东海岸某围堤附近, 为淤泥质粉质黏土, 浅灰黄~灰色, 饱和,

流塑, 高压缩性。天然密度为 $1\,900\text{ kg/m}^3$, 天然含水率为 53%, 液限为 43%。取到的原状土经风干, 碾碎, 过筛后妥善保存, 供后续试验使用。制作水泥土时水泥比取 0.9, 采用骆驼牌 P.O 42.5 水泥, 水泥掺入比 (纤维掺入比) 取水泥质量 (纤维质量) 与天然土质量的百分比。水泥掺入比、聚丙烯纤维掺入比及玄武岩纤维掺入比分别用 a_w 、 a_1 、 a_2 表示, 聚丙烯纤维和玄武岩纤维的性能指标见表 1。试样的尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。为了与近海水下深层水泥土搅拌桩的环境条件相接近, 本次试验采用海水拌合, 水泥土样在海水中养护 90 d 后进行无侧限抗压和疲劳试验, 每组 6 个试样, 剔除异常数据后计算标准差、变异系数, 得到标准值。

采用 CBR 试验仪进行水泥土的无侧限强度试验, 加荷速率控制在 1 mm/min , 当达到强度峰值后继续进行试验, 直至达到 10% 的应变后停止试验。疲劳试验采用中国科学院武汉岩土所力学研究所研制的 RMT-150 C 型岩石压力试验机, 试验采用载荷控制进行加载, 波形为正弦波, 试验过程中所加的应力幅值的最大值为水泥土无侧限抗压强度的 70%~80%, 最小值为无侧限抗压强度的 10%, 载荷频率为 0.2 Hz。

表 1 纤维的性能指标
Table 1 Performance index of fiber

原料成分	类型	耐酸碱性	单丝直径 / μm	密度 / (kg/m^3)	平均长度 / mm	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / GPa	极限延伸率 / $\%$	熔点 / $^\circ\text{C}$
聚丙烯纤维	单丝	极高	30	910	6	≥ 300	3.793	30~50	160~170
玄武岩纤维	单丝	极高	13	2 650	6	$\geq 2\,000$	90~110	3.5	1 250

3 水泥土无侧限试验结果

图 1 为水泥掺入比 18% 的素水泥土和纤维水泥土的无侧限强度试验破坏图片。图 1(a) 中, 试块发生脆性破坏, 即试块随压力增大出现竖向裂缝, 裂缝宽而长, 整体被压碎。素水泥土的破坏方式主要为双剪型^[6], 尽管其最终破坏方式为剪切型, 但其破坏机制却为张破裂, 其破裂是内部微裂纹的张开、扩展的结果, 反映出最终破坏前试样出现的宏观裂缝为张开裂缝, 最终出现的剪切破坏方式是试样两端承压板约束的结果。图 1(b) 中, 玄武岩纤维掺入比取 0.2%, 纤维水泥土破坏时试块整体基本保持完整, 无剥落现象, 裂缝窄而细, 很少有贯穿性裂缝, 脆性明显降低。因为纤维水泥土随着压力增大, 纤维与水泥土之间的摩阻力也随之变大, 由于纤维互相交织, 使得颗粒间及颗粒与纤维间的结构变得更

加紧密。同时, 随着纤维与水泥土接触处的摩阻力重分布, 空间交织结构重新排列及不同位置纤维抗拉强度的发挥, 使得纤维与土体之间的咬合摩擦力和纤维在土体中交织形成的空间约束力不断增加, 即使错动以后, 纤维与土体之间的摩阻力和空间约束力仍然存在, 并随应力应变的变化维持在某一水平之上^[7], 所以试样破坏后产生裂缝, 但仍可保持原有圆柱状。

表 2 为不同方案时水泥土的无侧限抗压强度。从图中可以看出, 掺入纤维可以提高水泥土的无侧限抗压强度, 随着纤维掺入比的增大, 聚丙烯纤维水泥土和玄武岩纤维水泥土强度增长的幅度变小, 因此纤维水泥土中纤维掺入比不是越多越好, 而是应先进行强度、经济等方面的综合比较后再确定最佳掺入量。由表 2 及图 2 可看出, 添加纤维可以小幅度提高水泥土的抗压强度, 相同掺入比的条件下

玄武岩纤维对水泥土抗压强度的提高程度高于聚丙烯纤维。



(a) 素水泥土

(b) 纤维水泥土 ($a_2=0.2\%$)

图 1 水泥土的无侧限强度试验破坏图像

Fig.1 Failure of unconfined strength test of cement soil

表 2 不同方案时水泥土的无侧限抗压强度

Table 2 Unconfined compressive strengths of cemented soil in different schemes

水泥掺入比 / %	素水泥土 / MPa	纤维水泥土 / MPa					
		a_1 / %			a_2 / %		
		0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
16	3.4	3.5	3.8	3.9	3.8	4.0	4.2
18	3.9	4.0	4.3	4.5	4.4	4.7	4.8
20	4.3	4.5	4.9	5.1	4.9	5.3	5.4
22	4.8	4.9	5.4	5.5	5.4	5.9	6.0

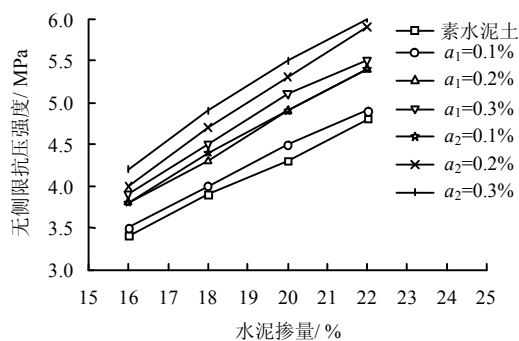


图 2 不同方案时水泥土的水泥掺量与无侧限抗压强度关系

Fig.2 Relationships between cement content and unconfined compressive strengths of cemented soil in different schemes

图 3 为素水泥土 ($a_w = 18\%$) 和玄武岩纤维掺入比为 0.2% 的纤维水泥土 ($a_w = 18\%$) 的应力-应变关系。掺入玄武岩纤维的水泥土试件达到峰值应力时对应的应变约为 3%，同等条件下素水泥土的应变约为 1.5%，玄武岩纤维水泥土的残余强度也明显高于素水泥土，其他水泥土试块的试验也有类似的特征，说明随着纤维掺入比的增加，水泥土达到应力峰值时的应变明显增大，破坏后的残余强度也有提高，可见纤维的加入提高了水泥土的延性，减

少了裂缝的开展，改善了其力学性能。

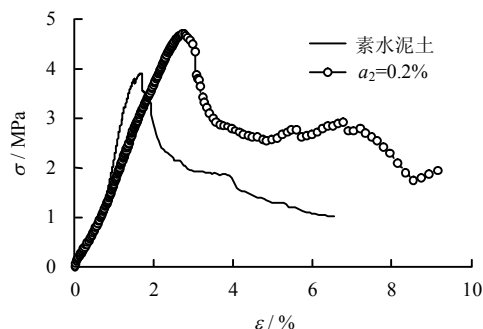
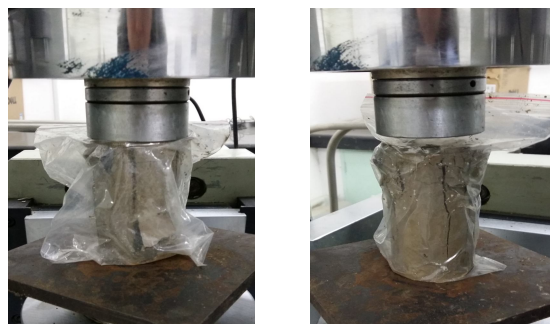


图 3 水泥土的应力-应变曲线 ($a_w=18\%$)

Fig.3 Stress-strain curves of cement soil ($a_w=18\%$)

4 水泥土疲劳试验结果

由于水泥土干燥失水后强度会明显下降和产生收缩裂缝，疲劳试验历时较长，为了避免因试样水分散失对试验结果造成影响，疲劳试验时采用自封袋包裹水泥土样，使水泥土样在试验过程中水分极少损失。图 4 为素水泥土和纤维水泥土的疲劳破坏照片。由图可见，破坏形态和无侧限强度试验的破坏形态类似，素水泥土疲劳破坏时试块呈明显的脆性破坏，裂缝宽而长，出现严重的土体剥落和掉渣现象；纤维水泥土在疲劳破坏时试块整体保持完整，无掉渣现象，裂缝较窄。



(a) 素水泥土

(b) 纤维水泥土 ($a_2=0.2\%$)

图 4 水泥土的疲劳试验破坏照片 ($a_w=18\%$)

Fig.4 Photo of fatigue test of cement soil ($a_w=18\%$)

4.1 试验结果分析

分析水泥土疲劳试验结果发现，在循环荷载的作用下水泥土会比起其无侧限抗压强度低的应力状态下由于变形累积到一定程度而发生疲劳破坏，表现出低应力性破坏特征，在循环荷载下水泥土的变形特性明显地受到试验中的最大应力幅值的制约。表 3 和图 5 为不同掺量时素水泥土的循环破坏周数。从图表中可以看出，随着荷载峰值的增大，素水泥土达到疲劳破坏时的循环周数明显减少；在相同的

荷载水平下,水泥掺入比越高,其强度越大,疲劳破坏时的周数也越多。表 4 和图 6 为 18%水泥掺量的水泥土的循环破坏周数,从图表中可以看出,添加纤维后水泥土的抵抗疲劳能力明显增强,在一定的纤维掺入比范围内,水泥土的循环破坏周数随着纤维掺入比的提高而增大,最佳纤维掺入比有待进一步研究;在相同纤维掺入比的条件下玄武岩纤维对水泥土抗疲劳能力的提高程度显著高于聚丙烯纤维;掺入纤维对水泥土抗疲劳能力的提高程度远大于其对水泥土无侧限强度的提高程度。图 7 为典型的水泥土疲劳应变全程曲线。从图中可以看出,水泥土试样破坏之前要经历一个疲劳损伤的累积过程,即裂纹形成、裂纹扩展直至最终的破坏。

表 3 不同掺量时素水泥土的循环破坏周数
Table 3 Cyclic failure cycles of different amounts of cement soil

正弦荷载峰值 P / MPa	$a_w / \%$		
	16	18	20
2.3	7 688	18 352	23 561
2.8	2 369	8 519	13 146
3.3	11	299	1 785
3.8	0	13	345

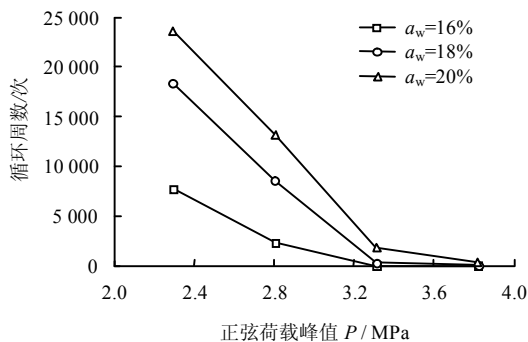


图 5 不同掺量时素水泥土的循环破坏周数
Fig.5 Cyclic failure cycles of different amounts of cement soil

表 4 纤维水泥土循环破坏周数 ($a_w=18\%$)
Table 4 Cyclic failure cycles of fiber reinforced cement ($a_w=18\%$)

正弦荷载 峰值 P / MPa	素水 泥土	纤维水泥土拟合后数据					
		$a_1 / \%$			$a_2 / \%$		
		0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
2.8	8 519	8 930	16 895	29 845	18 956	28 364	39 856
3.3	299	3 493	1 800	8 954	6 845	15 684	18 561
3.8	13	23	957	458	987	1 133	5 496
4.1	0	0	35	232	315	555	2 218
4.3	0	0	0	123	19	322	1 110
4.6	0	0	0	0	0	0	264

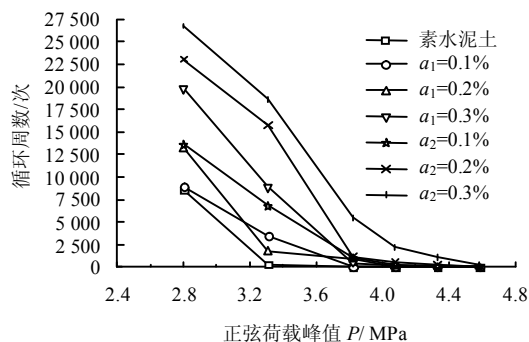


图 6 纤维水泥土循环破坏周数 ($a_w=18\%$)
Fig.6 Cyclic failure cycles of fiber reinforced cement ($a_w=18\%$)

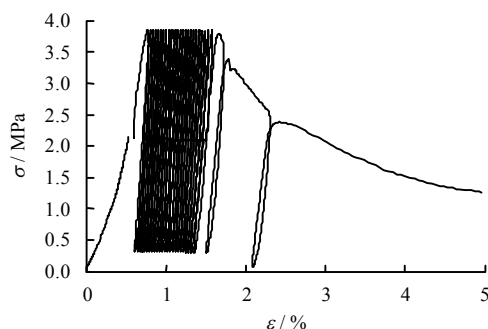


图 7 素水泥土循环破坏曲线 ($a_w=20\%$,
荷载峰值为 3.8 MPa, 345 次破坏)
Fig.7 Cyclic failure curve of plain cement soil ($a_w=20\%$,
load peak value is 3.8 MPa, 345 times damage)

4.2 S-N 关系

S-N 关系图是一种常用的评估疲劳寿命的方法,也称 wholer 曲线^[8]。水泥土在不同的应力水平 (σ_c / f_c) 下具有不同的疲劳寿命,可用直角坐标系来描述应力水平 S 和疲劳寿命 N 的关系。图 8 为不同方案水泥土疲劳应力水平和疲劳寿命之间经数理统计分析得出的单对数线性关系。S- $\lg N$ 采用回归分析方法,采用方程式^[9-10]拟合:

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

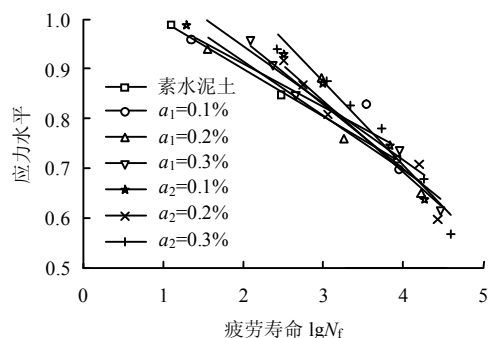


图 8 不同方案水泥土的 S-N 关系 ($a_w=20\%$)
Fig.8 S-N relations of cement soil in different schemes ($a_w=20\%$)

式中: a 、 b 为拟合参数。

不同试验方案的拟合参数见表 5 (其中 Adj. R-Square 表示数据和拟合曲线的相关性, 越接近 1 越好), 可由拟合公式估算出不同应力水平下的疲劳破坏次数, 由疲劳破坏次数确定对应的应力水平。

表 5 水泥土线性拟合参数
Table 5 Linear fitting parameters of cement soil

方案	a	b	Adj. R-Square
素水泥土	1.091	-0.095	0.997
$a_1=0.1\%$	1.085	-0.086	0.729
$a_1=0.2\%$	1.139	-0.111	0.783
$a_1=0.3\%$	1.232	-0.135	0.940
$a_2=0.1\%$	1.181	-0.117	0.857
$a_2=0.2\%$	1.274	-0.146	0.915
$a_2=0.3\%$	1.389	-0.172	0.910

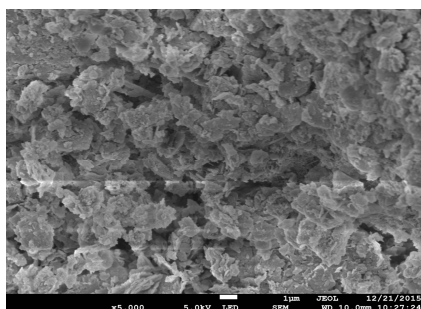


图 9 原状土的微结构
Fig.9 Microstructure of intact soil

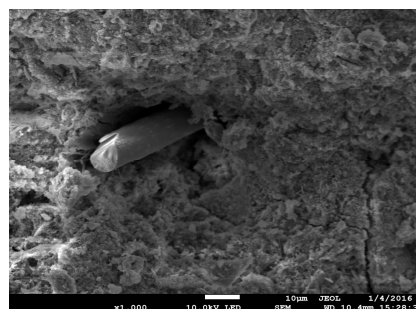
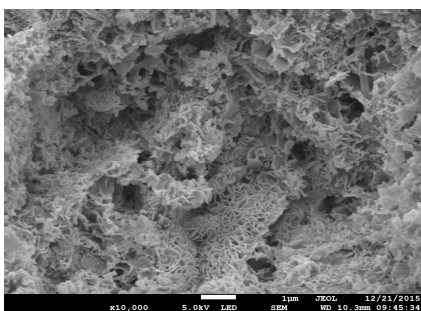
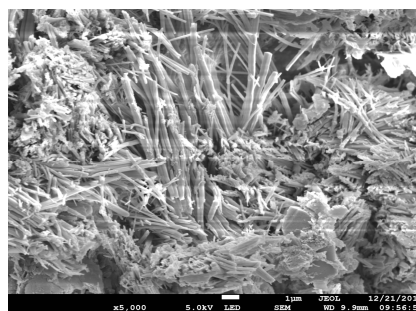


图 10 纤维水泥土中的玄武岩纤维
Fig.10 Basalt fiber in fiber reinforced cement soil



(a) 水泥水化后生成的片状水化物



(b) 水泥水化后生成的纤维状水化物

图 11 水泥土的微观结构
Fig.11 Microstructure of cement soil

6 结 论

(1) 添加纤维可小幅度提高水泥土的抗压强度, 随着纤维掺入比的增大, 聚丙烯纤维水泥土和玄武岩纤维水泥土强度增长的幅度变小。随着纤维掺入比的增加, 水泥土在达到应力峰值时的应变明显增大, 而且破坏后的残余强度也有提高。纤维的加入提高了水泥土的延性, 减少了裂缝的开展, 改

5 水泥土的微结构

为了深入研究素水泥土及纤维水泥土的强度及抗疲劳特性, 分别采集原状土和试验破坏后的水泥土样, 进行了扫描电镜微结构分析, 微观结果见图 9~11。图 9 中原状土的微结构, 孔隙比较大, 土体较松散, 团粒直接靠结合水膜相连, 强度较低。图 10、11 中水泥土的微结构与原状土的微结构相比, 水泥土中的团粒结构通过水泥硬化、水泥与土水化后的产物联结在一起^[11], 孔隙变少, 土体变得更加密实, 联结强度较高, 故水泥土被称为半刚性材料。由图 10 水泥土疲劳破坏后的扫描电镜图像可见, 玄武岩纤维一端被水泥土紧紧裹住, 另一端为玄武岩纤维被拉断后的断面。图 11 分别为水泥水化后生成的片状水化物和纤维状水化物微结构照片。

善了其力学性能。

(2) 在循环荷载作用下水泥土会在比峰值应力低的应力水平下, 由于变形累进到一定程度而导致破坏, 表现为低应力性破裂特征。水泥土在循环荷载下的变形特性明显地受到试验中的最大应力幅值的制约。

(3) 添加纤维后水泥土抵抗疲劳的能力明显增强。掺入纤维对水泥土抗疲劳能力的提高程度远大

于其对水泥土无侧限强度的提高程度。水泥土的应力水平和疲劳寿命之间具有单对数线性关系。

(4) 在相同掺入比的条件下玄武岩纤维对水泥土抗压强度、抗疲劳能力的提高程度显著高于聚丙烯纤维。

海水环境对水泥土的力学性能有一定影响^[12], 在海水环境下养护对纤维水泥土力学性能的劣化影响有待进一步研究。

参考文献

- [1] 袁雁, 倪煌俊, 黄卫, 等. 水泥砂浆土力学性质试验研究[J]. 安徽建筑工业学院学报, 2012, 20(2): 48—50.
YUAN Yan, NI Huang-jun, HUANG Wei, et al. Triaxial mechanics of cement mortar soil[J]. **Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry**, 2012, 20(2): 48—50.
- [2] 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, 2014, 20(6): 56—58.
LI Yun-feng, LI Zhi-hua, ZHENG Gang, et al. A study for properties of cement-soil reinforced with randomly distributed discrete fibers[J]. **Building Science**, 2014, 20(6): 56—58.
- [3] 简文彬, 黄春香, 吴维青, 等. 水泥土的疲劳试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1949—1953.
JIAN Wen-bin, HUANG Chun-xiang, WU Wei-qing, et al. Research on fatigue behavior of cement-sodium-silicate-grouted soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(11): 1949—1953.
- [4] 张敏霞. 循环荷载作用下水泥土的疲劳特性及其损伤行为研究[D]. 福州: 福州大学, 2004.
ZHANG Min-xia. Study on fatigue characteristics and damage behavior of cemented-stabilized soil under cyclic loading[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.
- [5] 欧明喜, 王晓平, 曾芳金, 等. 水泥土三轴疲劳特性试验研究[J]. 土工基础, 2009, 23(3): 80—83.
OU Ming-xi, WANG Xiao-ping, ZENG Fang-jin, et al. Research on fatigue behavior of soil cement under triaxial test[J]. **Soil Engineering and Foundation**, 2009, 23(3): 80—83.
- [6] 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.
- [7] 袁玉卿, 李伟, 孙兴亚, 等. 纤维水泥稳定土的无侧限抗压强度试验研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2012, 42(1): 106—108.
YUAN Yu-qing, LI Wei, SUN Xing-ya, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of fiber cement stabilized soil[J]. **Journal of Henan University(Natural Science)**, 2012, 42(1): 80—83.
- [8] 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.
XIAO Jian-zhuang, LI Hong. Investigation on the fatigue behavior of recycled aggregate concrete under uniaxial compression[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2013, 46(2): 63—65.
- [9] 刘雄. 岩石疲劳学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
LIU Xiong. Introduction to rock fatigue[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [10] 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.
ZHANG Zhi-liang, XU Wei-ya, WANG Wei. Study of triaxial creep tests and its nonlinear visco-elastoplastic creep model of rock from compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 132—140.
- [11] 李俊才, 赵泽三, 高国瑞, 等. 水泥土的微结构特征及分析[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(4): 389—391.
LI Jun-cai, ZHAO Ze-san, GAO Guo-rui, et al. Analysis and microstructure characters of cement-soil[J]. **Journal of Chengdu University of Technology**, 2000, 27(4): 389—391.
- [12] 裴向军, 杨国春. 防治海水对水泥土侵蚀的试验研究[J]. 长春工程学院学报, 2000, 1(1): 12—14.
PEI Xiang-jun, YANG Guo-cun. Research on preventing cement erosion in marine soil[J]. **Journal of Changchun Institute of Technology**, 2000, 1(1): 12—14.