

应力场中水泥-石灰改良土疲劳性能试验研究

司文琪¹, 张欣², 高涛³, 王俊杰³, 陈其帆⁴, 王晶⁵, 赵月航¹

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357;

2. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250021;

3. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250031;

4. 山东泰山交通规划设计咨询有限公司, 山东 泰安 271001;

5. 滨州市科技创新发展研究院, 山东 滨州 256603

摘要:为获得改良土在不同影响因素下的疲劳性能,以水泥、石灰为胶凝材料制备改良土,通过变幅应力循环加载试验分析改良土中胶凝材料的质量分数、养护龄期、应力水平等因素对改良土的无侧限抗压强度、疲劳强度、疲劳寿命的影响,建立改良土疲劳寿命回归方程。结果表明:胶凝材料的质量分数对改良土的疲劳强度和疲劳寿命有显著影响,无侧限抗压强度随胶凝材料质量分数的增大而增大,不同养护龄期改良土的疲劳强度和疲劳寿命与胶凝材料的质量分数正相关;在不同养护龄期下,水泥土的临界循环疲劳应力比随胶凝材料质量分数的增大而减小,在相同养护龄期下,石灰土的临界循环疲劳应力比受胶凝材料质量分数的影响比水泥土小;养护龄期与水泥土疲劳强度和疲劳寿命呈指数函数关系,与石灰土疲劳强度和疲劳寿命呈二次函数关系;改良土的临界循环疲劳应力比随养护龄期的增大而减小;循环加载应力幅值和平均应力越小,改良土的疲劳寿命越长,反之,改良土的疲劳寿命越短。

关键词:改良土;胶凝材料;循环荷载;疲劳性能

中图分类号:U213.1;U416.216

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)03-0069-08

引用格式:司文琪,张欣,高涛,等.应力场中水泥-石灰改良土疲劳性能试验研究[J].山东交通学院学报,2024,32(3):69-76.

SI Wenqi, ZHANG Xin, GAO Tao, et al. Experimental research on fatigue performance of cement-lime improved soil in stress field[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(3): 69-76.

0 引言

随着国家生态文明体制改革的推进,加快绿色发展、建设美丽中国成为我国经济持续健康发展的基本要求。合理处置建筑弃土是城市亟待解决的突出问题之一^[1-3]。改善土体时,在原位土中掺入一定比例的水泥、石灰等胶凝材料,能提高土体的疲劳寿命和疲劳稳定性能,提高土体的抗压强度和抗剪强度^[4-6]。水泥改良土为非均质材料,内部含有大量的微观孔隙和初始缺陷,在荷载反复作用下逐渐扩展和贯通,导致水泥改良土的抗压强度降低,甚至可能发生疲劳破坏,用作路基时严重威胁铁路等交通运营安全^[7-10]。研究水泥改良土、石灰改良土的疲劳特性具有重要的现实意义。

水泥改良土的疲劳寿命受较多因素影响,包括级配、土体的物理性质、胶凝材料的质量分数、压实度、含水率和围压强度等^[11-14]。鹿群等^[15]、陈峰等^[16]建立水泥改良土的疲劳寿命预测方程,分析水泥改良土的疲劳寿命。简文彬等^[17]、张敏霞等^[18-19]发现水泥改良土的疲劳寿命受养护龄期、水泥质量分数、应

收稿日期:2023-08-03

基金项目:山东省交通运输科技计划项目(2023B90)

第一作者简介:司文琪(1998—),女,山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:1722754212@qq.com。

力水平、加载频率和加载振幅等因素影响。Dash 等^[20]研究不同石灰质量分数对土体塑性的影响。王妍^[21]研究石灰改良土的含水率、密度、重型击实试验、界限含水率试验、固结试验、三轴试验等物理力学性能的变化及工程性能养护的时效规律。邵博源^[22]、任昆等^[23]研究冻融循环荷载下改良土的相关性能。现有关于改良土的研究大多集中在改良土的无侧限抗压强度和抗压抗剪能力,对改良土疲劳特性的试验研究较少。

本文以小清河滨州博兴港黄褐色黏土为研究对象,通过变幅应力循环加载试验,研究水泥改良土和石灰改良土中胶凝材料的质量分数、养护龄期等因素对疲劳寿命的影响,并根据大量疲劳试验数据建立疲劳寿命回归方程,以期对相关工程提供理论参考。

1 改良土疲劳性能试验

1.1 试验材料

试验选用小清河滨州博兴港取土拌和站附近的黄褐色黏土,按文献[24]对土样进行筛分试验和相对密度试验等,获得黏土的物理性质如表 1 所示。选用国家标准普通硅酸盐水泥 P·O 42.5,水泥的物理性质如表 2 所示。试验选用南京某公司生产的Ⅱ级钙质消石灰,其中 CaO 的质量分数为 61.8%,MgO 的质量分数为 3.5%,满足 CaO 和 MgO 的总质量分数不小于 60%的要求^[24]。

表 1 黏土的物理性质

密度/($10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	液限/%	塑限/%	塑性指数	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最优含水率/%
2.58	31.2	12.0	19.2	1.77	12.6

表 2 水泥的物理性质

标准稠度%	安定性	烧失量/%	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
28.4	合格	1.04	256	382	22.4	44.2	4.6	8.9

1.2 试件制备及试验仪器

制备直径为 100.0 mm、高 100.0 mm 和直径为 39.1 mm、高 80.0 mm 的圆柱体试件。将素土与水按质量比 1:2 混合后闷料静置 24 h,加入不同质量分数的胶凝材料;将混合均匀的材料填充到模具中,并在 100 kN 压力试验机上静压成型;将试件静置 4 h 后脱模并放入塑料袋中,在养护室中分别进行 7、28 d 的标准养护。

选择高精度电液伺服试验系统 MTS810 进行疲劳试验,工程中应用的改良土受动荷载作用,应力水平具有随机性,材料的疲劳损伤是多个复杂因素的耦合作用结果。为得到准确的水泥改良土和石灰改良土的疲劳寿命变化规律,且最大程度契合现场应用条件,对改良土试件采用等幅非对称正弦波加载,设计试验应力比

$$R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} \neq 1,$$

式中: $\sigma_{\max}$ 为应力循环中的最大应力(波峰应力), $\sigma_{\min}$ 为应力循环中的最小应力(波谷应力)。

1.3 试验操作步骤

1) 将试件放置在压力室上、下压头中央,对试件预压荷载 50 N,位移传感器归零。

2) 采用等幅非对称正弦波加载,设置测试加载频率为 5 Hz,在波峰、波谷处,测试软件设置加载的最小荷载均为 0.13 MPa,变幅加载的波峰应力呈阶梯型逐级增大,初始波峰应力为 0.38 MPa,每个应力水平下循环 300 次后波峰应力 $\sigma_{\max}$ 增加 1 kN,再进行 300 次循环加载,以掺加胶凝材料(胶凝材料在水泥混合料中的质量分数为 10%)的改良土的应变结果作为试件疲劳破坏极限,记录加载到试件破坏

时试件的疲劳寿命。峰值荷载与疲劳寿命的关系如图1所示,1个应力循环的循环应力与加载时间的关系如图2所示。

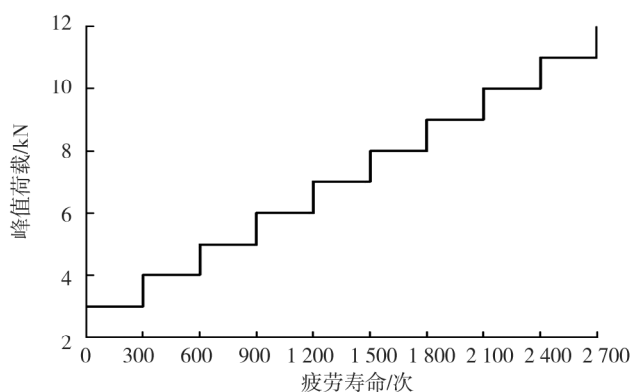


图1 峰值荷载与疲劳寿命的关系

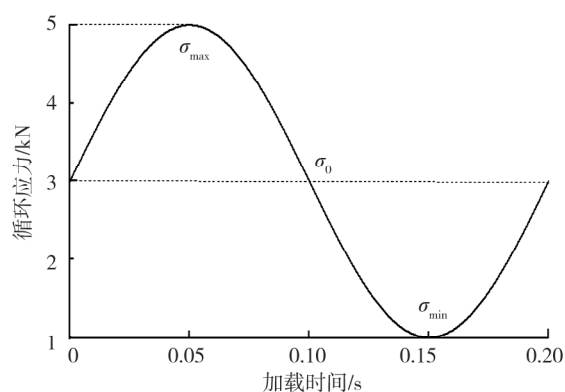
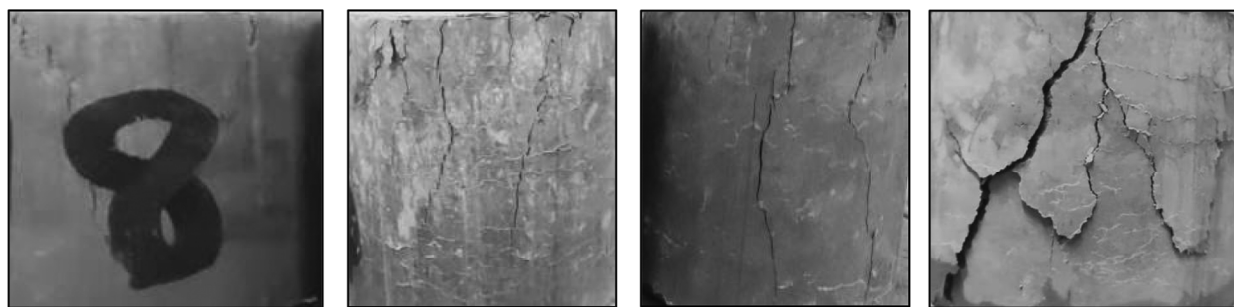


图2 循环应力与加载时间的关系

1.4 改良土疲劳破坏形态

以水泥质量分数为8%、养护120 d的水泥土疲劳破坏形态为例,试件疲劳破坏荷载为24.9 kN,疲劳强度为3.17 MPa,疲劳寿命为7 298次。如图3所示,试件的损伤过程可分为4个阶段:1)疲劳裂缝萌生阶段,水泥改良土的疲劳循环次数约为1 850,占疲劳寿命的25.3%,应力幅值(最大应力与最小应力之差)为7.0 kN,占破坏荷载的28.1%,在循环荷载作用下,试件表面开始出现微小裂缝,裂缝长5.0~8.0 mm,宽0.5~2.0 mm;2)疲劳裂缝扩展阶段,水泥改良土疲劳循环次数约为4 512,占疲劳寿命的61.8%,应力幅值为16.0 kN,占破坏荷载的64.2%,试件的裂缝数量和裂缝长度均增大,裂缝长10.0~25.0 mm,宽1.0~3.0 mm;3)疲劳裂缝快速贯穿阶段,水泥改良土疲劳循环次数约为5 499,为疲劳寿命的75.3%,应力幅值为19.0 kN,为破坏荷载的76.3%,裂缝间相互连接,部分裂缝扩展至试件全尺寸,裂缝长20.0~40.0 mm,宽2.0~4.0 mm;4)试件破坏阶段,疲劳循环次数等于试件疲劳寿命,试件被破坏,裂缝贯穿试件,裂缝长30.0~55.0 mm,宽3.0~8.0 mm。



a) 疲劳裂缝萌生阶段

b) 疲劳裂缝扩展阶段

c) 疲劳裂缝快速贯穿阶段

d) 试件破坏阶段

图3 水泥质量分数为8%、养护120 d的水泥改良土疲劳破坏形态

2 试验结果分析

2.1 胶凝材料质量分数对改良土疲劳寿命的影响

为研究胶凝材料的质量分数对改良土疲劳寿命及疲劳强度的影响,对水泥改良土和石灰改良土掺加质量分数分别为4%、6%、8%、10%的胶凝材料。选择最优含水率条件下制备试件,压实度为96%,分别标准养护28、120 d后进行抗压强度和疲劳破坏试验,获得改良土的单轴强度(无侧限抗压强度、疲劳强度)和疲劳寿命如表3所示,对不同条件下的试件进行疲劳寿命曲线拟合,结果如图4所示。

表 3 胶凝材料质量分数对改良土无侧限抗压强度、疲劳强度、疲劳寿命的影响

胶凝材料的质量分数/%	无侧限抗压强度/MPa				疲劳强度/MPa				疲劳寿命/次			
	水泥改良土		石灰改良土		水泥改良土		石灰改良土		水泥改良土		石灰改良土	
	28 d	120 d	28 d	120 d	28 d	120 d	28 d	120 d	28 d	120 d	28 d	120 d
4	1.48	2.32	1.27	1.93	1.02	1.66	0.89	1.15	2 139	3 769	1 970	2 606
6	2.60	3.88	1.64	2.75	1.78	2.04	1.15	1.66	3 909	4 554	2 406	3 680
8	3.81	6.04	2.01	3.15	2.29	3.18	1.27	1.78	5 115	7 298	2 815	4 009
10	5.78	7.03	2.35	3.38	3.06	4.08	1.66	2.04	7 072	9 521	3 709	4 742

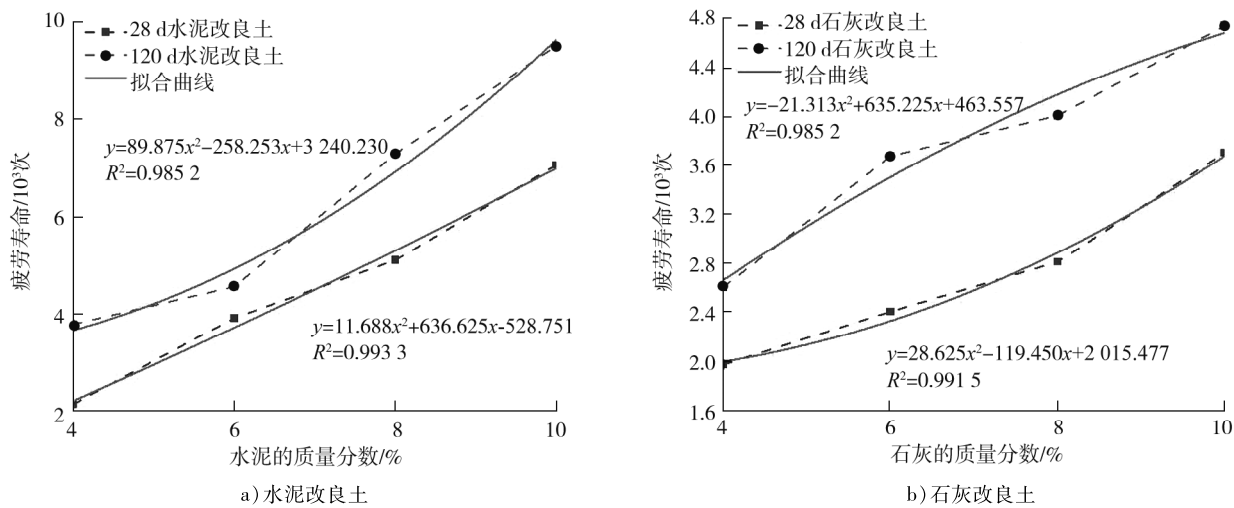


图 4 胶凝材料质量分数对改良土疲劳寿命的影响拟合曲线

由表 3 和图 4 可知:胶凝材料的质量分数对改良土的疲劳强度和疲劳寿命有显著影响,无侧限抗压强度随胶凝材料质量分数的增大而增大,不同养护龄期改良土的疲劳强度和疲劳寿命与胶凝材料的质量分数正相关;养护 28、120 d 的石灰改良土与养护 120 d 水泥改良土的疲劳寿命随胶凝材料质量分数的增大呈抛物线形变化,与胶凝材料质量分数对改良土无侧限抗压强度的影响近似;胶凝材料质量分数由 4% 增至 6%、8%、10% 时,养护 28 d 水泥改良土的疲劳寿命分别增大 82.7%、139.13%、230.62%,120 d 水泥改良土疲劳寿命分别增大 20.83%、93.63%、152.61%,28 d 石灰改良土疲劳寿命分别增大 22.13%、42.89%、88.27%,120 d 石灰改良土的疲劳寿命分别增大 41.21%、53.84%、81.96%。

胶凝材料的质量分数 w_1 为 4%~10% 时,不同养护龄期下水泥改良土和石灰改良土的临界循环疲劳应力比如表 4 所示。由表 4 可知:不同养护龄期下,水泥改良土的临界循环疲劳应力比随胶凝材料质量分数的增大而减小,相同龄期下石灰改良土的临界循环疲劳应力比受胶凝材料质量分数的影响比水泥土小。

表 4 不同养护龄期下改良土的临界循环疲劳应力比

养护龄期/d	水泥改良土的临界循环疲劳应力比				石灰改良土的临界循环疲劳应力比			
	$w_1=4\%$	$w_1=6\%$	$w_1=8\%$	$w_1=10\%$	$w_1=4\%$	$w_1=6\%$	$w_1=8\%$	$w_1=10\%$
28	0.689	0.685	0.604	0.529	0.701	0.701	0.632	0.706
120	0.716	0.526	0.526	0.580	0.596	0.604	0.565	0.604

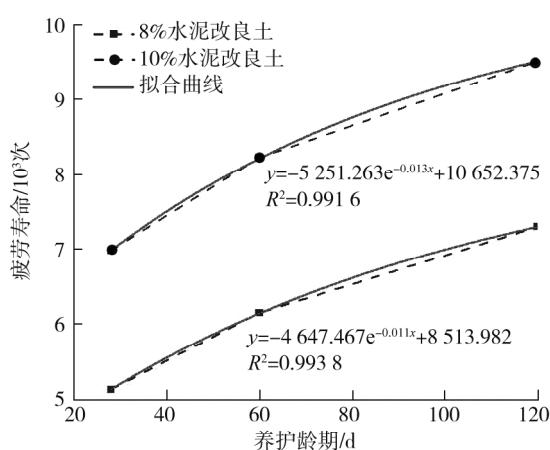
2.2 养护龄期对改良土疲劳寿命的影响

为研究养护龄期对改良土疲劳寿命及疲劳强度的影响,对水泥改良土和石灰改良土各设计 3 组试验,制备试件的其他条件相同,养护龄期分别为 28、60、120 d。养护龄期对改良土无侧限抗压强度与疲劳

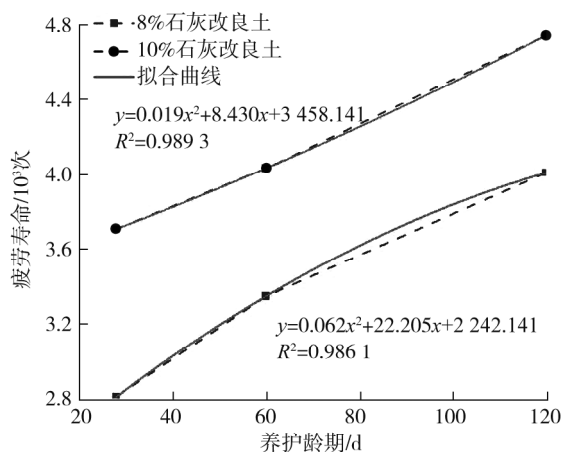
强度的影响结果如表5所示,疲劳寿命随养护龄期变化的拟合曲线如图5所示。

表5 养护龄期对改良土无侧限抗压强度、疲劳强度、疲劳寿命的影响

养护龄期/d	无侧限抗压强度/MPa				疲劳强度/MPa				疲劳寿命/次			
	水泥改良土		石灰改良土		水泥改良土		石灰改良土		水泥改良土		石灰改良土	
	$w_1=8\%$	$w_1=10\%$	$w_1=8\%$	$w_1=10\%$	$w_1=8\%$	$w_1=10\%$	$w_1=8\%$	$w_1=10\%$	$w_1=8\%$	$w_1=10\%$	$w_1=8\%$	$w_1=10\%$
28	3.81	5.78	2.01	2.35	2.29	3.06	1.27	1.66	5 115	6 982	2 815	3 709
60	4.98	6.43	2.66	2.94	2.68	3.57	1.53	1.78	6 114	8 226	3 350	4 032
120	6.04	7.03	3.15	3.38	3.18	4.08	1.78	2.04	7 298	9 521	4 009	4 742



a) 水泥改良土



b) 石灰改良土

图5 养护龄期对改良土疲劳寿命的影响

由表5和图5可知:养护龄期与水泥土疲劳强度和疲劳寿命呈指数函数关系,与石灰改良土疲劳强度和疲劳寿命呈二次函数关系。在胶凝材料质量分数相同条件下,随龄期增大,改良土的疲劳强度越大、疲劳寿命越高,曲线增长斜率越小。

比较疲劳强度与无侧限抗压强度的临界循环疲劳应力比,结果如表6所示。由表6可知:养护龄期从28 d增至120 d时,除水泥质量分数为10%的水泥土外,其他改良土的临界循环疲劳应力比均随养护龄期增大而减小。

表6 不同养护龄期下改良土的临界循环疲劳应力比

养护龄期/d	水泥改良土的临界循环疲劳应力比		石灰改良土的临界循环疲劳应力比	
	$w_1=8\%$	$w_1=10\%$	$w_1=8\%$	$w_1=10\%$
28	0.601	0.529	0.632	0.706
60	0.538	0.555	0.575	0.605
120	0.526	0.580	0.565	0.604

2.3 应力水平对改良土疲劳寿命的影响

应力水平是指对试件进行循环加载时最小荷载与最大荷载之比,在试验中应力水平由应力幅值 σ_a 和平均应力 σ_n 2个参数共同作用控制,是影响改良土疲劳寿命的显著因素。应力幅值 $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$, 平均应力 $\sigma_n = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ 。

对胶凝材料质量分数为8%、养护120 d的水泥改良土和石灰改良土进行不同应力水平的疲劳试验,应力幅值和平均应力对改良土疲劳寿命 N 的影响的拟合曲线如图6、7所示。

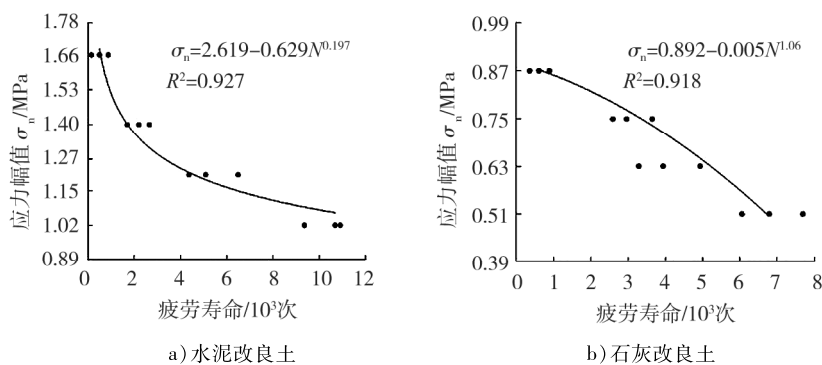


图6 改良土的应力幅值与疲劳寿命的关系

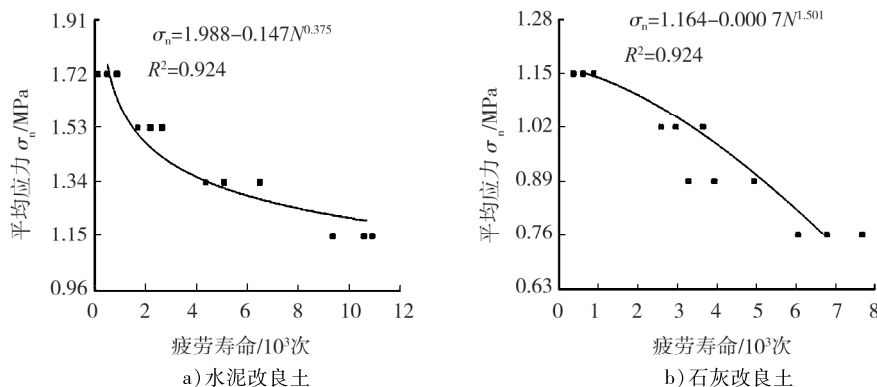


图7 改良土的平均应力与疲劳寿命的关系

由图6、7可知:相同质量分数和养护龄期的改良土试件的疲劳寿命不相同,循环加载应力幅值和平均应力越小,改良土的疲劳寿命越长,反之,疲劳寿命越短;水泥改良土的疲劳寿命曲线为外凸形曲线,石灰改良土的疲劳寿命曲线为内凹形曲线;应力幅值和平均应力越小,相同参数下改良土试件的数据离散性越大。

对试验数据采用三参数幂函数模型拟合养护120 d下水泥改良土和石灰改良土疲劳寿命随应力水平变化的发展趋势,当试样受到一定应力幅值或平均应力的循环荷载时,比较试件受到的应力循环次数,若大于在图6、7中得到的应力水平下疲劳极限次数,试样发生疲劳破坏。

2.4 无侧限抗压强度与疲劳寿命回归分析

采用回归分析法对改良土无侧限抗压强度与疲劳强度、疲劳寿命分别进行拟合,结果如图8、9所示。由图8、9可知:水泥改良土和石灰改良土的无侧限抗压强度与疲劳强度、疲劳寿命呈线性关系,拟合精度 R^2 为0.920~0.947,拟合程度较高。改良土的无侧限抗压强度越高,对应的疲劳强度、疲劳寿命也越高。比较水泥改良土和石灰改良土疲劳强度与无侧限抗压强度的临界循环疲劳应力比 σ_{-1}/σ_c ,可知水泥改良土抵抗循环荷载的能力优于石灰改良土。

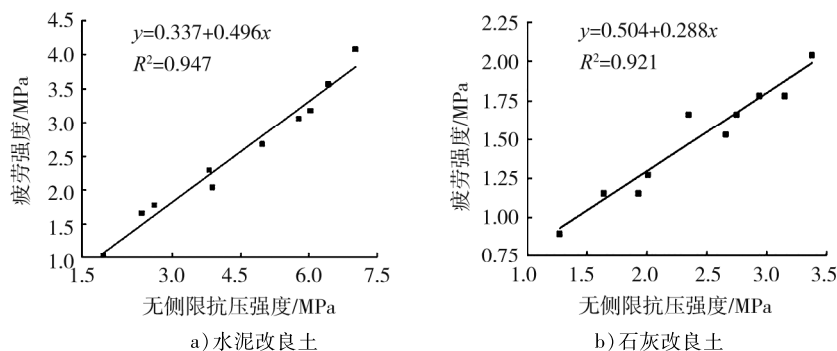


图8 改良土的无侧限抗压强度与疲劳强度关系

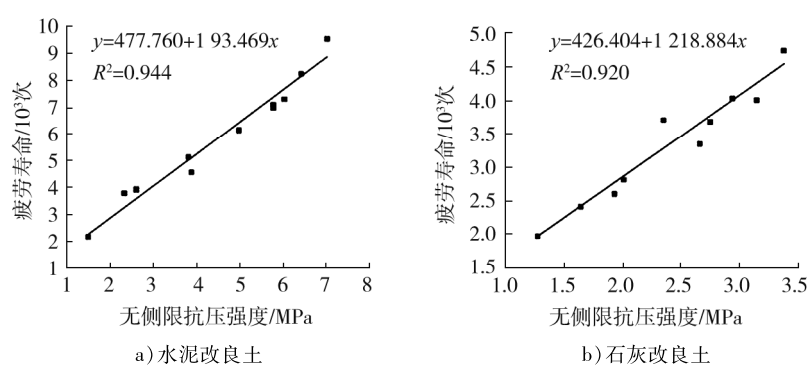


图9 改良土的无侧限抗压强度与疲劳寿命关系

因此,可通过无侧限抗压强度推算相同参数水泥土的疲劳强度和疲劳寿命,在工程设计或试验段设计施工配合比时,可采用无侧限抗压强度衡量疲劳强度是否满足要求。

3 结论

1)对改良土试件施加5 Hz的等幅非对称正弦波循环加载,研究胶凝材料的质量分数和养护龄期对改良土疲劳寿命的影响,比较和分析荷载应力水平对改良土疲劳寿命的影响。水泥土和石灰土的疲劳损伤过程一般分为4个阶段:疲劳裂缝萌生阶段、疲劳裂缝扩展阶段、疲劳裂缝快速贯穿阶段和试件破坏阶段,最大裂缝宽度为8.0 mm。

2)改良土的疲劳强度和疲劳寿命受胶凝质量分数影响显著,无侧限抗压强度随胶凝材料质量分数的增大而增大,养护龄期与水泥土疲劳强度、疲劳寿命呈指数函数关系,与石灰改良土疲劳强度、疲劳寿命呈二次函数关系。

3)水泥改良土的临界循环疲劳应力比随水泥质量分数的增大而减小,石灰改良土的临界循环疲劳应力比受质量分数的影响较小,增长趋势不显著。除水泥、石灰的质量分数外,养护龄期也是一个重要影响因素。水泥质量分数为10%的水泥改良土的临界循环疲劳应力比随养护龄期的增大而增大,水泥质量分数为8%的水泥改良土,以及石灰质量分数为8%、10%的石灰改良土的临界循环疲劳应力比随养护龄期的增大而减小。

参考文献:

- [1] 章炜. 新型无机复合固化土特性及在路基工程的应用[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [2] 张晓果,杨博,褚付克,等. 赤泥基胶凝材料改良粉砂土性能研究及应用[J]. 新型建筑材料,2022,49(10):119-122.
- [3] 樊微. 水泥改良湿陷性黄土技术研究[J]. 价值工程,2022,41(18):64-66.
- [4] 蒋应军,白晨帆,张智杰,等. 西韩城际铁路路基水泥改良黄土疲劳特性及影响因素[J]. 铁道建筑,2022,62(2):146-151.
- [5] 钱健,周琳,杨建冬,等. 不同纤维改性石灰土的力学特性研究[J]. 中外公路,2022,42(5):203-208.
- [6] 王春阳. 石灰改良软土填料路用性能试件研究[J]. 粉煤灰综合利用,2020,34(4):118-123.
- [7] 王旭. 石灰改良土路基试验段施工技术[J]. 交通世界,2023(11):89-91.
- [8] 陈林万,曹玉桃,杜杰,等. 改性纤维素和生石灰改良黄土的抗剪强度特性及微观结构试验研究[J]. 地质灾害与环境保护,2022,33(4):41-50.
- [9] 陈其帆,杨阳,姜玉荣,等. 高含水率改性土压剪特性试验研究[J]. 山东交通学院学报,2022,30(3):78-86.
- [10] 黄馨平. 不同含水率对于黄原胶改良土性能影响研究[J]. 山西建筑,2023,49(6):114-117.
- [11] 牛瑞. 水泥掺量和养护溶液对水泥改良黄土力学强度的影响[J]. 福建交通科技,2022(11):51-55.
- [12] 赵丹妮,曹宝花,许江波,等. 不同纳米黏土改良黄土试验结果对比分析[J]. 中外公路,2024,44(1):55-65.
- [13] 卢永,李剑波,庄宝利,等. 木质素磺酸盐+聚丙烯纤维路基分散性土性能复合改良研究[J]. 公路工程,2022,47

- (3):118-124.
- [14] 瞿海洋. 水泥改良黄土物理和力学特性试验研究[J]. 湖南交通科技, 2021, 47(3):35-39.
- [15] 鹿群, 郭少龙, 王闪闪, 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.
- [16] 陈峰, 童生豪. 纤维水泥土疲劳性能试验研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(5):815-820.
- [17] 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.
- [18] 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, 2005.
- [19] 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.
- [20] DASH K S, HUSSAIN M. Influence of lime on shrinkage behavior of soils[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(12):04015041.
- [21] 王妍. 养护龄期对石灰改善黄土工程特性影响的试验研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
- [22] 邵博源. 冻融与循环加卸载下路基改良土性能研究[D]. 张家口:河北建筑工程学院, 2023.
- [23] 任昆, 王海涛. 冻融循环下煤渣改良土微观结构演化研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(7):12-17.
- [24] 中华人民共和国交通运输部, 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社, 2020.

Experimental research on fatigue performance of cement-lime improved soil in stress field

SI Wenqi¹, ZHANG Xin², GAO Tao³, WANG Junjie³,
CHEN Qifan⁴, WANG Jing⁵, ZHAO Yuehang¹

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Luqiao Group Co., Ltd., Jinan 250021, China;

3. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250031, China;

4. Mount Taishan Traffic Planning & Design Consulting Co., Ltd., Tai'an 271001, China;

5. Shandong Binzhou Institute of Science and Technology Innovation and Development, Binzhou 256603, China

Abstract: In order to obtain the fatigue performance of improved soil under different influencing factors, cement and lime are used as cementitious materials to prepare the improved soil. By analyzing the mass fraction of cementitious materials, curing age, stress level, and other factors in the improved soil through cyclic loading tests, the influence of these factors on the unconfined compressive strength, fatigue strength, and fatigue life of the improved soil is studied to establish a regression equation for the fatigue life of the improved soil. The results show that the mass fraction of cementitious materials has a significant impact on the fatigue failure strength and fatigue life of the improved soil. The unconfined compressive strength increases with the increase in the mass fraction of cementitious materials. The fatigue failure strength and fatigue life of the improved soil at different curing ages are positively correlated with the mass fraction of cementitious materials. For different curing ages, the critical cyclic fatigue stress ratio of cement soil decreases with the increase in the mass fraction of cementitious materials, while for lime soil at the same age, the critical cyclic fatigue stress ratio is less affected by the mass fraction of cementitious materials compared to cement soil. The relationship between curing age and the fatigue strength and fatigue life of cement soil is exponential, while for lime soil, it is quadratic. The critical cyclic fatigue stress ratio of the improved soil decreases with the increase in curing age. The fatigue life of the improved soil is longer when the stress amplitude and mean stress of cyclic loading are smaller, and vice versa, the fatigue life is shorter.

Keywords: improved soil; cementitious material; cyclic load; fatigue performance

(责任编辑:王惠)