

冻融循环与疲劳荷载作用下水泥土力学特性试验研究

赵百超, 陈四利*, 侯芮

(沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:为了研究水泥石在实际应用中经冻融循环和疲劳荷载作用后的力学特性,该文通过室内无侧限抗压试验,分析了水泥石抗压强度随冻融次数、疲劳次数及幅值荷载的变化规律。试验结果表明:水泥石抗压强度随冻融次数、疲劳次数、幅值荷载的增加均逐步降低;冻融次数及幅值荷载对水泥石抗压强度影响最为显著;构建了水泥石抗压强度随冻融次数、疲劳次数、幅值荷载变化的回归方程及抗压强度随其中两因素变化的三维曲面图。

关键词:水泥石;抗压强度;冻融循环;冻融次数;疲劳次数;幅值荷载;回归方程

1 引言

水泥石作为一种取材方便,施工简便,价格低廉的新型建筑材料,已经广泛应用于渠道防渗、大坝护坡、公路及飞机跑道路基加固等实际工程中。在中国季节性冻土地区,水泥石受冻融破坏影响较大,同时,还会承受车辆等动力荷载的作用,必将引起水泥石内部结构劣化,强度降低,甚至影响整个水泥石工程的安全性和耐久性。近年来,国内外学者进行了关于在冻融循环条件下水泥石各项性能的研究,如宋爱苹等研究了水泥掺量、粉煤灰掺量、龄期和冻融循环次数对水泥石无侧限抗压强度的影响;侯淑鹏等采用扫描电镜分析水泥石的微观结构变化,探讨冻融循环条件下水泥石的损伤劣化机制;庞文台、陈四利等研究了不同冻融循环次数对水泥石抗压强度、抗剪强度以及渗透系数的

影响规律;张敏霞等探讨了影响水泥石疲劳寿命的主要因素及在单轴动荷载作用下水泥石超声波波速的变化规律;江国龙等通过正交试验得出加载次数、幅值应力对水泥石抗压强度的影响较大,对频率影响较小;王闵闵、龐群等研究了纤维水泥石应力水平与疲劳寿命之间呈现单对数关系及水泥石动应力、动弹性模量随动应变的变化规律。目前,对于冻融循环和疲劳荷载双重作用下的水泥石耐久性研究还相对较少,该文对冻融循环及疲劳荷载作用下水泥石的力学性能进行研究,探讨冻融次数、疲劳次数、幅值荷载对水泥石抗压强度的影响规律。

2 试验概况

2.1 试验方法

试验采用3因素4水平正交试验的方法,在冻融

- *****
- [11] Torres-Suarez M C, Alarcon-Guzman A, Moya B D. Effects of Loading - Unloading and Wetting - Drying Cycles on Geomechanical Behaviors of Mudrocks in the Colombian Andes [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(3): 257-268.
- [12] 苗强强, 陈正汉, 田卿燕, 等. 非饱和含黏土砂毛细上升试验研究[J]. 岩土力学, 2011(S1).
- [13] 蔡国庆, 盛岱超, 周安楠. 考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数方程[J]. 岩土工程, 2014(5).

- [14] 付宏渊, 马吉倩, 史振宁, 等. 非饱和土抗剪强度理论的关键问题与研究进展[J]. 中国公路学报, 2018(2).
- [15] Zeng Ling, Bian Hanbing, Shi Zhenning, et al. Forming Condition of Transient Saturated Zone and its Distribution in Residual Slope under Rainfall Conditions [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(8): 1 866-1 880.
- [16] JTG F10-2006 公路路基施工技术规范[S].
- [17] JTG E40-2007 公路土工试验规程[S].

收稿日期:2020-05-25(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51608332,51279109)

作者简介:赵百超,男,硕士研究生. E-mail:877849239@qq.com

*通信作者:陈四利,男,博士,教授,博士生导师. E-mail:chen1458@163.com

箱温度达到-15℃时放入试件,进行冻结试验,冻结时间为12h,冻结试验结束后,取出试件立即放入能使水温保持为15~20℃的水槽中进行融化,融化时间为12h。冻融试验次数设定后,在疲劳试验机上进行疲劳试验,加载频率为5Hz,循环荷载加载指定次数后,进行水泥土单轴抗压试验。探讨疲劳次数、冻融次数、幅值荷载三因素对水泥土无侧限抗压强度影响规律。具体影响因素及水平见表1。

表1 影响因素及水平

水平	疲劳次数/次	冻融次数/次	幅值荷载/kN
1	4 000	0	10
2	8 000	2	15
3	12 000	4	20
4	16 000	6	25

2.2 水泥土试样制备

选取沈阳市铁西区某工地的粉质黏土为试验用土,其物理性能指标为:天然含水率27%,天然重度19.2kN/m³,液限35%,塑限19.4%,液性指数0.59,塑性指数15.6。将土样风干,碾碎,并经过5mm筛备用,试验水泥选用工源牌425号普通硅酸盐水泥。

试验设定水泥掺量为16%,根据JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》制备边长为70.7cm的立方体试件,经过24h脱模后,放入清水中养护。养护龄期为180d,如图1(a)所示。最终破坏情况如图1(b)所示。

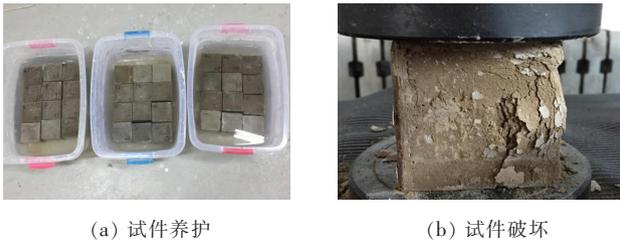


图1 水泥土试件养护及最终破坏

2.3 水泥土疲劳加载模型

试验选用MTS疲劳试验机,循环荷载加载方式为:先以0.5kN/s的速度斜波加载至目标荷载 σ_0 ;荷载以非对称正弦波形式恒幅加载指定次数,波峰为设定的应力幅值,波谷为1kN;持荷10s,进入斜波加载阶段,加载速度为0.5kN/s,直至试件破坏,记录极限荷载值,加载模型如图2所示。

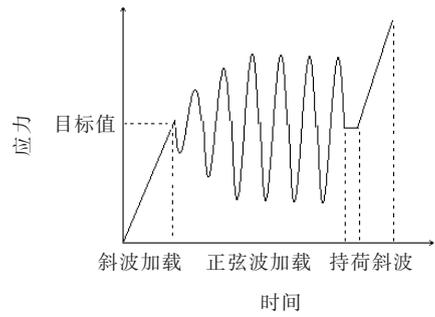


图2 试验加载模型

3 试验结果及分析

3.1 极差分析

为分析疲劳次数、冻融次数、幅值荷载对水泥土抗压强度的影响规律,对试验结果进行极差分析,极差分析结果见表2。

表2 正交试验设计及抗压强度极差分析

项目	因素			误差列	抗压强度/MPa
	疲劳次数/次	冻融次数/次	幅值荷载/kN		
PY1	4 000	0	10	1	11.72
PY2	4 000	2	15	2	9.82
PY3	4 000	4	20	3	8.67
PY4	4 000	6	25	4	7.31
PY5	8 000	0	15	3	11.78
PY6	8 000	2	10	4	8.17
PY7	8 000	4	25	1	7.63
PY8	8 000	6	20	2	9.61
PY9	12 000	0	20	4	10.22
PY10	12 000	2	25	3	8.49
PY11	12 000	4	10	2	9.82
PY12	12 000	6	15	1	8.38
PY13	16 000	0	25	2	9.97
PY14	16 000	2	20	1	9.61
PY15	16 000	4	15	4	8.26
PY16	16 000	6	10	3	8.86
\bar{K}_1	9.38	10.92	9.64	9.33	抗压强度 总和 $\sum K =$ 148.32
\bar{K}_2	9.30	9.02	9.56	9.80	
\bar{K}_3	9.23	8.60	9.53	8.80	
\bar{K}_4	9.17	8.54	8.35	8.49	
极差R	0.21	2.38	1.29	0.84	

由表 2 可知:疲劳次数、冻融次数、幅值荷载三因素均对抗压强度产生影响,冻融次数、幅值荷载对抗压强度影响较大,疲劳次数的影响相对较小,对抗压强度的影响程度依次为:冻融次数>幅值荷载>疲劳次数。

3.2 冻融次数对力学特性的影响

由极差分析结果可知:抗压强度随冻融次数增加而降低,但降低幅度较小,冻融 6、4、2 次较冻融 0 次时抗压强度分别降低 21.8%、21.24%、17.4%,水泥掺量为 16% 的试件在 -15℃ 温度下冻融 6 次后,剩余强度为初始强度的 78.2%,说明水泥掺量为 16% 的试件在 -15℃ 的冻融环境下可以经受更多次数的冻融循环作用。抗压强度随冻融次数的变化规律及拟合曲线如图 3 所示。

依据水泥土抗压强度随冻融次数的变化趋势,两者关系近似呈线性,拟合方程为:

$$\sigma = -0.757n + 11.16 \quad (1)$$

式中: σ 为抗压强度(MPa); n 为冻融次数。

3.3 疲劳次数对力学特性的影响

由极差分析结果可知:疲劳次数影响因素的极差值为 0.21,说明疲劳次数对抗压强度的影响较小,疲劳 16 000 次较疲劳 4 000 次抗压强度降低 2.23%,可视为无影响,说明幅值荷载为 10~25 kN,约为极限荷载的 20%~50%,在疲劳次数小于 16 000 次时,疲劳次数对抗压强度几乎无负影响。

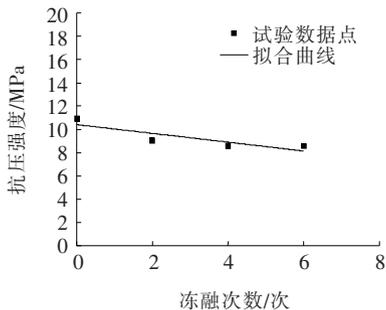


图 3 抗压强度随冻融次数变化规律

水泥土抗压强度随疲劳次数的变化关系基本呈线性,其回归方程为:

$$\sigma = -0.096N + 9.44 \quad (2)$$

式中: σ 为抗压强度(MPa); N 为疲劳次数($\times 10^3$ 次)。

3.4 幅值荷载对力学特性的影响

由极差分析结果可知:幅值荷载影响因素的极差值为 1.29,说明幅值荷载对抗压强度的影响较大,从总体上,抗压强度随幅值荷载的增加而降低,幅值荷载为 20、15、10 kN,抗压强度降低小于 1%,抗压强度几

乎不变,幅值荷载为 25、10 kN 抗压强度降低 14%,这说明,当幅值荷载小于单轴最大静荷载的 40%,疲劳荷载对水泥土抗压强度几乎无影响,当幅值荷载大于极限荷载的 40%,抗压强度随幅值荷载的增加而降低,抗压强度随幅值荷载的变化规律及拟合曲线如图 4 所示。

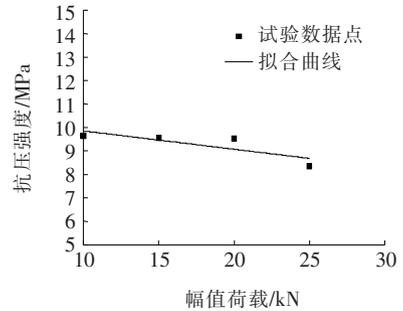


图 4 抗压强度随幅值荷载的变化规律

依据水泥土抗压强度随幅值荷载的变化趋势,两者关系可以近似用二次多项式表示,其拟合方程为:

$$\sigma = -0.274P_m^2 + 0.98P_m + 8.876 \quad (3)$$

式中: σ 为抗压强度(MPa); P_m 为幅值荷载(kN)。

3.5 抗压强度与三因素回归模型的建立

抗压强度关于冻融次数、疲劳次数呈线性规律,关于幅值荷载呈二次多项式关系,抗压强度随三因素回归方程可表示为:

$$\sigma = (x_1n + y_1)(x_2N + y_2)(x_3P_m^2 + y_3P_m + z_3) \quad (4)$$

整理得到回归方程如式(5)所示:

$$\sigma = k_1nNP_m^2 + k_2nNP_m + k_3nN + k_4nP_m^2 + k_5nP_m + k_6n + k_7NP_m^2 + k_8NP_m + k_9N + k_{10}P_m^2 + k_{11}P_m + k_{12} \quad (5)$$

式中: k_i ($i=1, 2, \dots, 12$) 为回归系数; σ 为抗压强度; n 为冻融次数; N 为疲劳次数($\times 10^3$ 次); P_m 为幅值荷载(kN)。

应用 Matlab 软件对矩阵求解,可以解得 k_i ($i=1, 2, \dots, 12$) 值如表 3 所示。所得 k_i 值代入到式(5)中,得到水泥土抗压强度随疲劳次数、冻融次数、幅值荷载变化的方程,所得方程为超静定方程。Matlab 采用矩阵左除或矩阵右除得到能使平均误差最小的最小二乘解。

3.6 回归空间曲面图的建立

将表 3 系数代入到公式得到水泥土抗压强度关于冻融次数、疲劳次数、幅值荷载的方程,当其中一个因素为定值时,可得抗压强度关于其他两个因素的回归曲面(图 5~7)。

表3 回归系数 $k_i (i=1,2,\dots,12)$

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}	k_{11}	k_{12}
0.001	-0.038	0.375	0.005	0.004	-0.125	0.315	0.745	-4.356	-0.083	2.099	-1.304

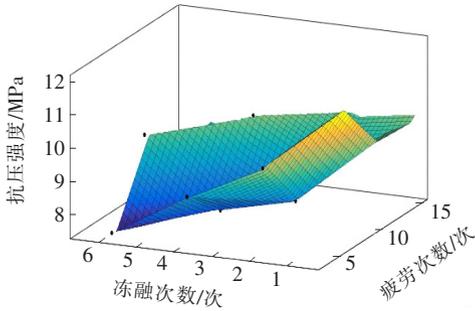


图5 抗压强度随冻融次数和疲劳次数变化的曲面图

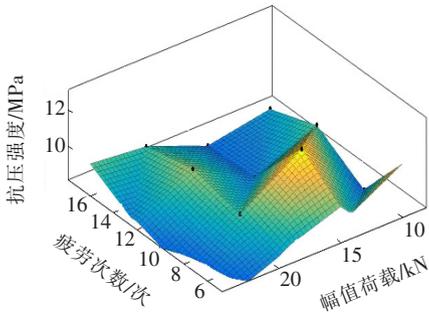


图6 抗压强度随幅值荷载和疲劳次数变化的曲面图

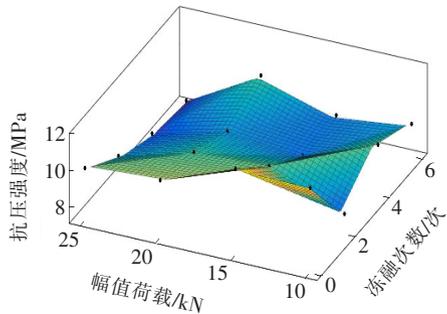


图7 抗压强度随冻融次数和幅值荷载变化的曲面图

4 结论

对冻融循环与疲劳荷载作用下水泥土无侧限抗压强度进行研究,得到冻融次数、疲劳次数、幅值荷载对抗压强度的影响规律。主要结论如下:

(1) 水泥土抗压强度随着冻融次数增加而降低,水泥掺量为16%的试件在-15℃的冻融环境下,冻融6次较冻融0次时抗压强度降低21.8%。

(2) 水泥土抗压强度随着幅值荷载的增加而降低,当幅值荷载大于极限荷载的40%,水泥土抗压强度降低程度显著。

(3) 疲劳次数对水泥土抗压强度影响较小,疲劳16 000次较疲劳4 000次抗压强度仅降低2.23%。

(4) 根据极差分析的结果,对水泥土抗压强度影响的主次顺序依次为:冻融次数、幅值荷载、疲劳次数;建立了水泥土抗压强度关于三因素的回归方程;建立了当其中一个因素为定值时,抗压强度关于另两因素变化的三维曲面图。

参考文献:

- [1] 陈四利,宁宝宽. 岩土材料的环境效应[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
- [2] 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(3).
- [3] 侯淑鹏,陈礼仪,王胜,等. 冻融循环条件下水泥土损伤劣化特征研究[J]. 长江科学院院报,2016(12).
- [4] 庞文台,申向东. 冻融循环对水泥土力学性能的影响[J]. 公路,2012(9).
- [5] 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(2).
- [6] 陈四利,江国龙,王军祥. 酸碱环境下硫酸钠侵蚀对水泥土的力学特性影响[J]. 沈阳工业大学学报,2019(4).
- [7] 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(4).
- [8] 张敏霞,徐平,简文彬. 水泥土疲劳损伤特性的超声波速试验研究[J]. 工业建筑,2011(增刊).
- [9] 江国龙,陈四利,王军祥. 循环荷载作用下水泥土力学特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2017(2).
- [10] 王闪闪,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(5).
- [11] 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(2).