

周期性温变作用下水泥砂浆相对含冰量变化及其与抗压强度的相关性

王建省^{1,2,3}, 宫经纬^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆兴农建筑材料检测有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为研究孔隙相对含冰量影响下的水泥砂浆力学性能演化规律,基于周期性温变作用下水泥砂浆的电阻率测试结果,计算并分析得到水泥砂浆相对含冰量时程变化规律,并利用PPR建模技术建立了不同相对含冰量影响下的相对抗压强度计算模型。结果表明:周期性温变作用下,水泥砂浆电阻率与相对含冰量呈现较强的相关性,建立的计算模型能较好地预测周期性温变作用下相对抗压强度随水泥砂浆的水胶比、饱和度、循环次数、最大相对含冰量的变化。

关键词:周期性温变;抗压强度;水泥砂浆;相对含冰量;PPR

中图分类号:TV41

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)06-0034-07

Changes of relative ice content of cement mortar under periodic temperature variations and its correlation with compressive strength//WANG Jiansheng^{1,2,3}, GONG Jingwei^{1,2}(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Xingnong Building Materials Testing Co., Ltd., Urumqi 830052, China)

Abstract: To study the evolution law of the mechanical properties of cement mortar under the influence of the relative ice content in pores, based on the resistivity test results of cement mortar under periodic temperature variations, the time-history variation law of the relative ice content of cement mortar was calculated and analyzed. Using the PPR modeling technology, a calculation model for the relative compressive strength under the influence of different relative ice contents was established. The results show that under periodic temperature variations, the resistivity of cement mortar has a strong correlation with the relative ice content, and the established calculation model can effectively predict the changes in relative compressive strength with changes in the water-to-binder ratio, saturation, number of cycles, and maximum relative ice content of cement mortar under periodic temperature variations.

Key words: periodic temperature variation; compressive strength; cement mortar; relative ice content; PPR

新疆大部分区域具有严寒、昼夜温差大、年际温差高、正负温交替频繁等气候特点。这种环境给水泥基材料的耐久性带来的破坏和危害已引起工程界和学术界的广泛关注^[1-2]。严寒地区周期性温变条件下水泥基材料孔隙溶液发生三相交替变化^[3-5],孔隙中相对含冰量的变化将直接影响水泥基材料的强度、耐久性等相关性能^[6-10]。为此,对于耐久性评价而言,亟需开展周期性温变作用下水泥基材料孔隙相对含冰量的演化规律这一基础性研究工作。

多年来,众多学者对温变作用下水泥砂浆孔隙

含冰量及抗冻性能方面的问题进行了研究^[11-13]。例如:Wang等^[14]通过冻融循环试验对水泥砂浆的含冰量进行了估算;Cai等^[15]基于电测法结果推导出冻融循环条件下水泥砂浆的含冰量;McCarter等^[16-17]通过电阻率测试结果提出了冻融循环条件下水泥砂浆的含冰量计算理论,并探索了饱和水泥砂浆结冰程度与温度的关系;王萧萧等^[18]用灰色理论分析了冻融循环条件下混凝土的孔隙含冰量和抗压强度的关系;Shen等^[19]通过温度监测、力学强度试验和微观结构试验,研究了因含冰量不同导致的

基金项目:国家自然科学基金项目(51869031,51641906,51541909)

作者简介:王建省(1996—),男,硕士研究生,主要从事寒旱区水工混凝土材料耐久性研究。E-mail:987603314@qq.com

通信作者:宫经纬(1984—),男,教授,博士,主要从事寒旱区水工混凝土材料耐久性研究。E-mail:gongjingwei034@163.com

混凝土力学性能的变化规律。

现有研究多是在完全饱和状态下进行水泥砂浆冻融循环试验,并对特定循环周期下的性能及耐久性进行研究。周期性温变作用下不同饱和度水泥砂浆的相对含冰量不同,本文对周期性温变作用下,不同水胶比和不同饱和度条件下的水泥砂浆进行电阻率实时监测,通过电阻率测试结果计算其相对含冰量,以水胶比、饱和度、循环次数、最大相对含冰量为影响因素,建立了相对抗压强度的投影寻踪回归 (projection pursuit regression, PPR) 计算模型,分析了各影响因素对周期性温变作用下水泥砂浆相对抗压强度的影响,并探讨了各影响因素作用下试件相对抗压强度的变化规律,以期为新疆等严寒地区水泥砂浆的耐久性研究提供参考。

1 试验设计与方法

1.1 试验原材料及配合比设计

试验原材料采用 P · I 42.5 水泥,ISO 标准砂。根据王腾等^[20-21]的研究成果选择水胶比、饱和度作为影响因素,水胶比 (W/C ,其中 W 为单方水泥基材料中水的质量, C 为单方水泥基材料中胶凝材料的质量) 为 0.3、0.4、0.5,饱和度 (S_r) 为 80%、90%、100%,试验配合比设计如表 1 所示。

表 1 试验配合比

组号	水胶比	砂体积分 数/%	1 m ³ 砂浆试件各组分材料用量/kg		
			水	水泥	砂
1	0.3	40	289	963	740
2	0.4	40	332	830	740
3	0.5	40	365	729	740

注:各配合比均设置 80%、90%、100% 3 种饱和度。

1.2 试验方法

常用的水泥基材料的电阻率测试方法有二电极法与四电极法,四电极法因能消除接触电阻、测试精度高等原因被广泛应用。试验采用 Keithley2010 电阻率测试仪。周期性温变作用采用高低温试验箱控制,温度变化范围为 -30℃ ~ 26℃,降温速率为 2℃/h,升温速率为 4℃/h,在 26℃ 及 -30℃ 分别恒温 1 h,电阻率采集间隔为 300 s。

根据 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》制作立方体水泥砂浆试件 (150 mm×150 mm×150 mm) 和抗压强度试件 (40 mm×40 mm×160 mm)。标准养护 28 d 后将立方体水泥砂浆试件切割为电阻率测试试件 (25 mm×25 mm×75 mm) 并把表面打磨光滑,按照四电极法制作电极,将电极与试件接触面用导电银浆进行填充,以保证电极与试件的良好耦合,如图 1 所示。电阻率与力学性能试件饱和度计算公式为

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% = \frac{(m_p - m_0)/\rho_w}{(m_s - m_0)/\rho_w} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V_w 、 V_v 分别为试件中水与孔隙的体积,cm³; m_p 为试件未饱和质量,g; m_0 、 m_s 分别为试件在完全干燥和完全饱和时的质量,g; ρ_w 为水的密度,g/cm³。

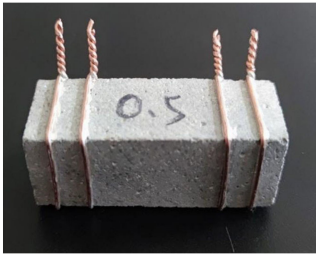


图 1 电阻率测试试件

试件饱和度控制步骤为:①将养护、打磨处理后的水泥砂浆试件 (电阻率试件与抗压强度试件) 放入 105℃ 干燥箱中进行干燥,直至试件恒重,记为试件干燥质量 (m_0);②将完全干燥试件置于真空饱水机中,先进行 3 h 干抽,随后注水,再进行 1 h 湿抽,接着注水,然后负压静停 20 h,静停结束后,将试件表面擦干并称重,记为试件完全饱和质量 (m_s);③对于未饱和试件,将其放入 50℃ 干燥箱中按式 (1) 进行质量控制,记为试件未饱和质量 (m_p);④将质量控制好的试件用聚乙烯薄膜进行包裹,然后用半透明硅胶将各试件再次进行密封处理,以备进行周期性温变循环试验。

2 试验结果与分析

2.1 电阻率

图 2 为不同水胶比、不同饱和度的试件在周期性温变作用下的电阻率变化。由图 2 可知,电阻率与温度呈现极强的相关性,温度降低时,电阻率增大,反之电阻率减小;当温度降至最低时,电阻率达到最大,反之电阻率达到最低。水胶比一定时,不同饱和度试件的电阻率在不同的温度范围内呈现明显的差异性,温度为负值时,不同饱和度对应的试件电阻率差异较小,反之电阻率差异较大,且与饱和度呈反比。随着循环次数 (F_T) 的增加,电阻率的峰值不断减小,谷值不断增大,且随着循环次数的增加电阻率峰值差异逐渐增大。水胶比 0.3 与 0.4 试件的孔隙率相近,电阻率最大值相近,随着水胶比的增大 (水胶比增至 0.5),电阻率最大值不断减小,以饱和度为 100%、循环次数为 12 为例,水胶比为 0.5 时水泥砂浆的最大电阻率是水胶比为 0.3 时的 51.78%。

2.2 相对含冰量

基于电阻率测试结果和 Wang 等^[22]推导的相

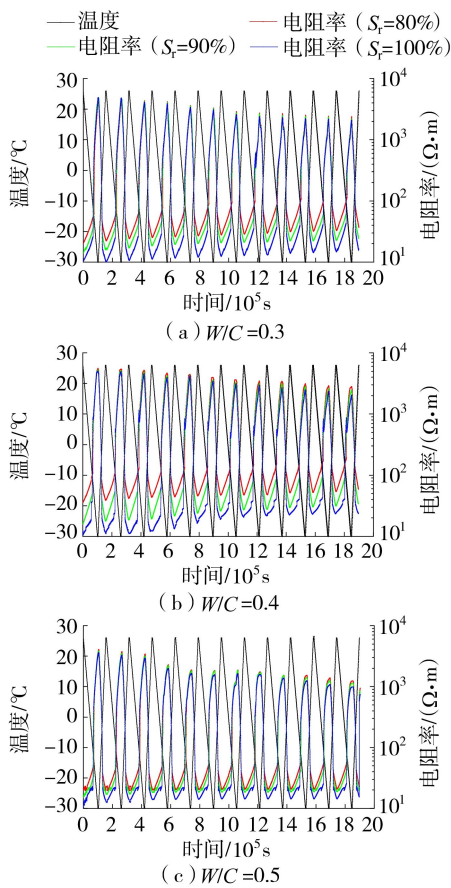


图2 周期性温变作用下电阻率的变化

对含冰量计算公式,可得周期性温变作用下不同水胶比、不同饱和度试件的相对含冰量。图3(a)为饱和度为80%时,水胶比为0.3、0.4、0.5的试件在周期性温变作用下相对含冰量的变化。由图3(a)可知,在周期性温变作用下,试件孔隙中的相对含冰量与其温度的相关性较明显,冻结降温过程中,温度达到 -10°C 时冰晶体开始不断生长,在最低温度 -30°C 时,相对含冰量达到最大;融化升温过程中,试件孔隙中的冰不断融化,温度达到 0°C 时相对含冰量降至0;同一负温条件下,水胶比与试件内部相对含冰量呈正相关关系,即水胶比越大,最大相对含冰量越大。同一循环周期内,相对含冰量与水胶比呈正比,与温度呈反比。

图3(b)为水胶比为0.5时,饱和度为80%、90%、100%的试件在周期性温变作用下相对含冰量的变化。由图3(b)可知,不同饱和度试件相对含冰量在正温条件下差异较小,在负温条件下存在差异,温度小于 -10°C 过程中的差异较为明显;同一循环周期内,相对含冰量与饱和度呈正相关关系,随着循环次数的增加,负温条件下不同饱和度试件相对含冰量差异逐渐降低。随着循环次数的增加,多孔结构材料孔隙逐渐粗化,且粗化程度与饱和度呈正相关关系,而周期性温变作用导致不同饱和度试件总

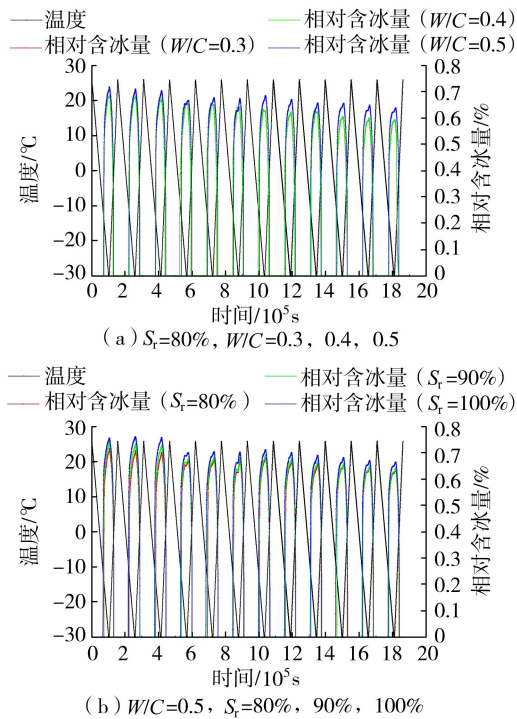


图3 周期性温变作用下相对含冰量的变化

含水量不变,所以随着循环次数的增加,不同饱和度的试件饱和度逐渐接近,进而导致相对含冰量差异不断减小。

为了深入分析水泥砂浆相对含冰量的变化规律,表2为水胶比为0.5时,饱和度为80%、90%、100%的水泥砂浆孔隙率及孔径分布占比在循环前后的测试结果。从表2可以看出,循环后孔隙率、平均孔径、有害孔多害孔占比(孔径在 $100\sim 200\text{ nm}$ 的孔隙为有害孔,大于 200 nm 的孔隙为多害孔)相较于循环前均有所增大,循环后孔隙率、平均孔径、有害孔多害孔占比随着饱和度的增大而不断增大。结合相对含冰量循环前后变化规律分析可知,第1次循环时 $S_r=80\%$ 水泥砂浆最大相对含冰量为 $S_r=100\%$ 时的94.66%,而第12次循环时为 $S_r=100\%$ 时的95.74%。随着循环次数的增加,最大相对含冰量呈现减小趋势,这是由于随着循环次数的增加,试件孔隙率及平均孔径不断增大,而孔隙率的增加导致饱和度不断降低,进而导致最大相对含冰量随着循环次数的增加不断降低。以 $W/C=0.5$ 、 $S_r=100\%$ 为例,第12次循环的水泥砂浆最大相对含冰量为第1次循环的87.91%。

表2 水泥砂浆孔隙率及孔径分布占比

试件	孔隙率/%	平均孔径/mm	不同孔径的孔占总孔比例/%		
			<20 nm	20~100 nm	>100 nm
循环前	17.02	21.57	35.02	43.49	21.49
循环后($S_r=80\%$)	18.58	21.83	30.68	42.41	26.91
循环后($S_r=90\%$)	19.10	25.29	30.58	40.99	28.43
循环后($S_r=100\%$)	19.46	27.01	30.30	39.14	30.56

2.3 抗压强度

水泥砂浆的抗压强度是衡量其在周期性温变环境中损伤情况的指标之一,为进一步分析相对含冰量对水泥砂浆力学性能的影响,分别测试了不同水胶比、饱和度、循环次数的抗压强度(σ_i)。

为分析各试件抗压强度变化规律,对抗压强度进行标准化处理:

$$f_i = (\sigma_i / \sigma_0) \times 100\% \quad (2)$$

式中: f_i 为水泥砂浆试件相对抗压强度,%; σ_i 为水泥砂浆经历 i 次周期性温变循环后的抗压强度,MPa; σ_0 为水泥砂浆试件在周期性温变循环之前的抗压强度,MPa。

不同试件相对抗压强度变化规律如图 4 所示。由图 4(a)可知, $W/C=0.5$ 时,相对抗压强度与循环次数呈明显的负相关关系,且整体下降速率不断增大,以 $S_r=80\%$ 为例,相较于上一循环, $F_T=12$ 和 $F_T=2$ 时水泥砂浆相对抗压强度分别下降 1.5%、3.2%;同一周期相对抗压强度与饱和度成反比,以 $F_T=12$ 为例, S_r 为 80%、90%、100% 时水泥砂浆相对抗压强度分别为 75.8%、70.7%、58.0%。由图 4(b)可知, $S_r=100\%$ 时,同一循环周期内相对抗压强度与水胶比呈反比,以 $F_T=12$ 为例, W/C 为 0.3、0.4、0.5 水泥砂浆相对抗压强度分别为 83.5%、82.6%、58.0%。

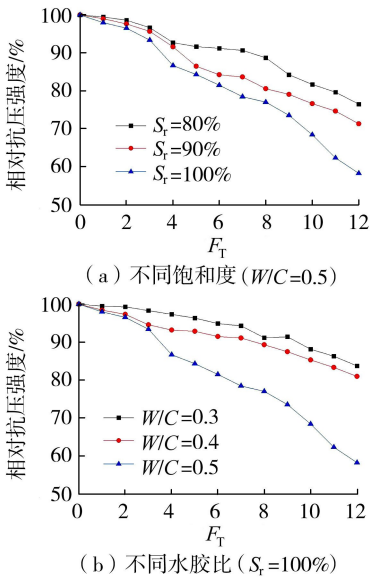


图 4 不同试件相对抗压强度变化规律

3 基于 PPR 的相对抗压强度计算模型

3.1 PPR 模型的构建

PPR 分析是在没有人为假设的条件下将高维数据处理至低维数据的一种数据处理技术,其主要思想是以投影降维的方式寻找最佳投影,低维数据

经过处理后,仍能反映高维数据的结构特征。实现步骤见文献[23-24]。

采用 PPR 建模以相对抗压强度为因变量,水胶比、饱和度、循环次数、最大相对含冰量(I_{max})为自变量进行建模分析。建模样本与检验样本来自不同试件在各循环周期的相对抗压强度及通过电阻率法计算的相对含冰量数据。

建模计算过程中,参数为: $P=4, Q=1, S=0.5, M=5, M_u=3, N=72$,其中 P 为自变量个数, Q 为因变量个数, S 为平滑系数, M 为岭函数个数, M_u 为最优岭函数个数, N 为建模数组个数。

为了检验模型的稳定性,当建模样本与测试样本的通过率较高且相似时,则认为该模型具有较高的准确性和较好的稳定性。计算得到的岭函数的权重及投影方向分别为

$$\beta = (0.9225, 0.1568, 0.1026) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.9997 & -0.0049 & -0.0255 & -0.0008 \\ -0.9999 & -0.0028 & -0.0054 & -0.0100 \\ 0.9857 & 0.0633 & -0.1281 & -0.0894 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: β 为各岭函数的权重; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为相对抗压强度 PPR 模型岭函数 f_1, f_2, f_3 的投影方向。

结合式(3)和式(4),PPR 模型采用一系列岭函数对投影方向上的随机变量 x 进行加权平均来逼近回归函数 $F(x)$:

$$F(x) = 91.2597 + 8.2206 \left[0.9225 f_1 \left(\sum_{j=1}^P \alpha_{j1} x_j \right) + 0.1568 f_2 \left(\sum_{j=1}^P \alpha_{j2} x_j \right) + 0.1026 f_3 \left(\sum_{j=1}^P \alpha_{j3} x_j \right) \right] \quad (5)$$

式中: x_j 为第 j 个自变量; $\alpha_{j1}, \alpha_{j2}, \alpha_{j3}$ 分别为第 j 个投影方向上第 1、2、3 个分量。

同时,用 PPR 建模技术对相对抗压强度进行计算,得到循环次数、水胶比、饱和度、最大相对含冰量对相对抗压强度的权重分别为 1.000、0.740、0.289、0.109。

3.2 模型精度分析

按照上述建模过程,将建模样本与检验样本的计算值、实测值进行比较,取相对误差 $|d| < 5\%$ 为合格标准,得到模型的建模、检验样本合格率分别为 95.83%、94.44%(图 5),说明该模型的模拟结果较好,且有较高的稳定性。

3.3 基于 PPR 模型的水泥砂浆相对抗压强度仿真计算

采用式(2)可对不同循环次数、水胶比、饱和度、最大相对含冰量条件下的相对抗压强度进行计算,各影响因素共同作用下水泥砂浆相对抗压强度

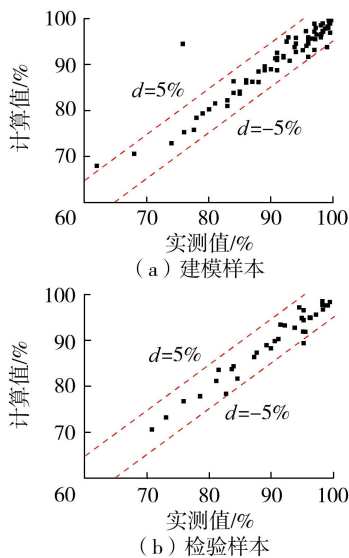


图5 PPR模型精度分析

的等值线如图6所示。

根据郭晓芳^[25]的研究可知,相对抗压强度为75%是慢冻法试验试件破坏的判定条件。图6(a)为 $S_r=100\%$ 、各循环周期内相对含冰量最大时,饱和度与水胶比、循环次数的关系,可见试件水胶比越低、循环次数越少,其相对抗压强度越高;图6(b)为 $W/C=0.5$ 、各循环周期内相对含冰量最大时,相对抗压强度与循环次数、饱和度的关系,可见试件循环次数越少、饱和度越小,其相对抗压强度越高;图6(c)为 $W/C=0.5$ 、 $F_T=11$ 时,相对抗压强度与饱和度、最大相对含冰量的关系,可见试件最大相对含冰量越大、饱和度越低,其相对抗压强度越高。在

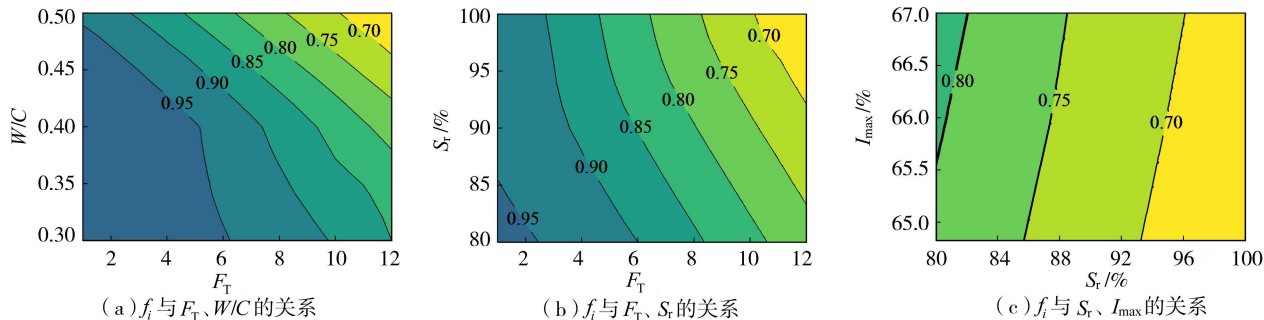


图6 相对抗压强度与各影响因素关系的等值线图

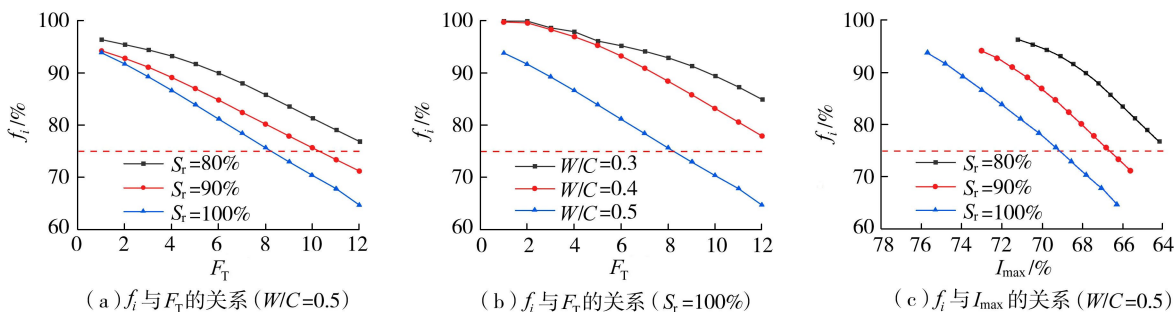


图7 不同水泥砂浆相对抗压强度与各影响因素之间的关系

$W/C=0.5$ 、 $F_T=11$ 时,临界破坏点出现在饱和度为86%~88%区间,印证了Liu等^[26]认为的水泥基材料饱和度大于88%时,更容易产生破坏这一结论。

为了分析各影响因素共同作用对试件相对抗压强度的影响,以及单一因素变化条件下试件的相对抗压强度变化规律,试件相对抗压强度与各影响因素的关系如图7所示。

由图7(a)可知,不同饱和度试件的相对抗压强度随着循环次数的增加呈现不断减小的规律,且循环前期相对抗压强度下降速率较慢,循环后期下降速率较快。此外,在同一循环周期内,试件的相对抗压强度与饱和度呈负相关关系。如饱和度为80%、90%、100%的三组试件经过12次周期性温变循环后,其相对抗压强度分别衰减为76.88%、71.21%、64.72%。

由图7(b)可知,不同水胶比的试件的相对抗压强度具有明显差异,相对抗压强度与水胶比呈负相关关系。水胶比为0.3、0.4、0.5试件在经历12次周期性温变循环后其相对抗压强度分别下降为85.00%、77.97%和64.72%。水胶比为0.3与0.4试件在循环过程中其相对抗压强度较为接近,这是由于水胶比为0.3与0.4试件孔隙率及其孔隙结构分布相差较小。

由图7(c)可知,相对抗压强度与最大相对含冰量呈正相关关系,且随着最大相对含冰量的减小,相对抗压强度下降速率不断增大,以 $S_r=80\%$ 为例, $F_T=2$ 时, $I_{max}=70.51\%$,其下降速率为 -1.39 ; $F_T=$

11 时, $I_{\max} = 64.83\%$, 其下降速率为 3.70。根据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》, 当相对抗压强度损失达到 25% 时视为破坏, $S_r = 90\%$ 、100% 试件分别在最大相对含冰量降至 66.7% 和 69.2% 时达到临界破坏点。

4 结 论

- a. 周期性温变循环作用下同一水泥砂浆最大相对含冰量随着循环次数的增加不断减小, 且随着循环次数的增加, 不同饱和度水泥砂浆相对含冰量差异性不断减小, 同一循环周期内水泥砂浆最大相对含冰量与水胶比及饱和度呈正相关关系。
- b. 在周期性温变作用下各影响因素对水泥砂浆相对抗压强度的影响大小顺序依次为循环次数、水胶比、饱和度、最大相对含冰量。
- c. 周期性温变作用下试件相对抗压强度与水胶比、循环次数、饱和度均呈负相关关系, 与最大相对含冰量呈正相关关系, PPR 相对抗压强度计算模型可对多因素作用下水泥砂浆相对抗压强度进行预测, 从而得出不同试件在达到临界破坏强度时最大相对含冰量的变化范围。
- d. 建立的 PPR 相对抗压强度计算模型能较好地预测周期性温变作用下相对抗压强度随水泥砂浆水胶比、饱和度、循环次数、最大相对含冰量的变化, 可为寒区水泥基材料抗冻害评估提供一定的依据。

参考文献:

[1] 邓铭江. 严寒地区碾压混凝土筑坝技术及工程实践 [J]. 水力发电学报, 2016, 35 (9): 111-120. (DENG Mingjiang. RCC dam building technology for extreme cold regions and engineering practices [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (9): 111-120. (in Chinese))

[2] 周良川. 新疆干旱荒漠区橡胶改性沥青 SMA 混合料路用性能研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.

[3] 孙伟. 现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 24-28.

[4] LIU Lin, QING Sainan, WANG Xuecheng. Poro-elastic-plastic model for cement-based materials subjected to freeze-thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2018, 184: 87-99.

[5] 刘琳, 孙伟, 陈惠苏, 等. 饱和状态下水泥浆体的微观结构冰冻损伤模型 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2011, 41 (5): 1059-1064. (LIU Lin, SUN Wei, CHEN Huisu, et al. Microstructure-based modeling of frost damage of saturated cement paste [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41 (5): 1059-1064. (in Chinese))

[6] 毋师. 毛细冰晶对混合骨料混凝土的性能影响 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.

[7] LIU Lin, WANG Xuecheng, ZHOU Jian, et al. Investigation of pore structure and mechanical property of cement paste subjected to the coupled action of freezing/thawing and calcium leaching [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 109: 133-146.

[8] 张城芋, 陈四利, 江双双, 等. 干湿与冻融耦合作用下稻壳灰水泥土疲劳特性 [J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41 (6): 562-567. (ZHANG Chengyu, CHEN Sili, JIANG Shuangshuang, et al. Fatigue characteristics of rice husk ash cement-soil under coupled action of dry-wet and freeze-thaw [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41 (6): 562-567. (in Chinese))

[9] 郭少龙, 鹿群, 林永良, 等. 冻融循环对玄武岩纤维水泥土力学性能的影响试验 [J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (3): 36-43. (GUO Shaolong, LU Qun, LIN Yongliang, et al. Experiments on influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of basalt fiber cement soil [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (3): 36-43. (in Chinese))

[10] 王萧萧, 高宇涛, 荆磊, 等. 冰磨损作用下天然浮石混凝土的寿命可靠性评估 [J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41 (10): 1015-1022. (WANG Xiaoxiao, GAO Yutao, JING Lei, et al. Life reliability evaluation of natural pumice concrete under ice abrasion [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41 (10): 1015-1022. (in Chinese))

[11] 苏安双, 王宇, 石北啸, 等. 冻融循环条件下粗粒料变形特性试验研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (6): 61-66. (SU Anshuang, WANG Yu, SHI Beixiao, et al. Experimental study on deformation characteristics of coarse aggregates under freeze-thaw cycling conditions [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (6): 61-66. (in Chinese))

[12] 秦赛男, 刘琳, 王学成. 冻融循环作用下水泥净浆孔结构和力学性能演变规律研究 [J]. 河南科学, 2018, 36 (2): 227-236. (QIN Sainan, LIU Lin, WANG Xuecheng. Evolution of pore structure and mechanical properties of cement paste under freeze-thaw cycles [J]. Henan Science, 2018, 36 (2): 227-236. (in Chinese))

[13] 蒋林华, 那彬彬, 周晓明, 等. 冻融与碳化交替作用下的混凝土性能试验 [J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (4): 33-36. (JIANG Linhua, NA Binbin, ZHOU Xiaoming, et al. Tests for properties of concrete under alternate freeze-thaw and carbonation actions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32 (4): 33-36. (in Chinese))

[14] WANG Yi, GONG Fuyuan, ZHANG Dawei, et al. Estimation of ice formation in mortar saturated with sodium

- chloride solutions [J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 238-251.
- [15] CAI H, LIU X. Freeze-thaw durability of concrete; ice formation process in pores [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(9): 1281-1287.
- [16] MCCARTER W J, STARRS G, CHRISP T M, et al. Conductivity/activation energy relationships for cement-based materials undergoing cyclic thermal excursions [J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(3): 1129-1140.
- [17] DIAMOND S, DOLCH W L. Generalized log-normal distribution of pore sizes in hydrated cement paste [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1972, 28(1): 234-244.
- [18] 王萧萧,刘畅,张菊,等. 常年冻土区混凝土孔隙结冰规律对抗压强度的影响 [J]. 工业建筑, 2021, 51(9): 197-201. (WANG Xiaoxiao, LIU Chang, ZHANG Ju, et al. Effect of freezing laws for concrete pores on compressive strength in permafrost regions [J]. Industrial Construction, 2021, 51(9): 197-201. (in Chinese))
- [19] SHEN Yanjun, LYU You, YANG Hongwei, et al. Effect of different ice contents on heat transfer and mechanical properties of concrete [J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 199: 103570.
- [20] 王腾. 碱矿渣混凝土介质传输性能及氯离子传输试验方法研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [21] LI Wenting, POUR-GHAZ M, CASTRO J, et al. Water absorption and critical degree of saturation relating to freeze-thaw damage in concrete pavement joints [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(3): 299-307.
- [22] WANG Yi, GONG Fuyuan, ZHANG Dawei, et al. Estimation of ice content in mortar based on electrical measurements under freeze-thaw cycle [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2016, 14(2): 35-46.
- [23] 姜春萌,宫经伟,唐新军,等. 基于 PPR 的低热水泥胶凝体系综合性能优化方法 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 333-340. (JIANG Chunmeng, GONG Jingwei, TANG Xinjun, et al. Optimization method of comprehensive properties of low heat cement cementitious system based on projection pursuit regression [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 333-340. (in Chinese))
- [24] 杨志豪,何建新,李志华,等. 基于 PPR-TOPSIS 分析法的沥青混凝土配合比方案优选 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 82-88. (YANG Zhihao, HE Jianxin, LI Zhihua, et al. Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 82-88. (in Chinese))
- [25] 郭晓芳. 混凝土快冻与慢冻试验方法浅析 [J]. 四川水泥, 2016(12): 336-337. (GUO Xiaofang. Simple analyzed researching on the speediness and low speed frost of concrete [J]. Sichuan Cement, 2016(12): 336-337. (in Chinese))
- [26] LIU Lin, SUN Can, GENG Guoqing, et al. Influence of decalcification on structural and mechanical properties of synthetic calcium silicate hydrate (C-S-H) [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 123: 105793.

(收稿日期: 2023 - 11 - 24 编辑: 俞云利)

(上接第 26 页)

- [19] 王丽琴,鹿忠刚,邵生俊. 黄土非线性应力-应变新模型及对比研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1724-1730. (WANG Liqin, LU Zhonggang, SHAO Shengjun. New nonlinear stress-strain model of loess and comparative research [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1724-1730. (in Chinese))
- [20] 沈珠江. 考虑剪胀性的土和石料的非线性应力应变模式 [J]. 水利水运科学研究, 1986(4): 1-14. (SHEN Zhujiang. A nonlinear dilatant stress-strain model for soils and rock materials [J]. Hydro-Science and Engineering, 1986(4): 1-14. (in Chinese))
- [21] 刘祖典,李靖,郭增玉,等. 陕西关中黄土变形特性和变形参数的探讨 [J]. 岩土工程学报, 1984, 6(3): 24-34. (LIU Zudian, LI Jing, GUO Zengyu, et al. Deformation behaviours and deformation parameter of loess in Shaanxi district [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(3): 24-34. (in Chinese))
- [22] AL-SHAYEA N, ABDULJAUWAD S, BASHIR R, et al. Determination of parameters for a hyperbolic model of soils [J]. Geotechnical Engineering, 2003, 156(2): 105-117.
- [23] LEE K H, JU Y T, SHIN D S, et al. Development of a modified Duncan-Chang model for soils [C] // BLOSS D M. Proceedings of the 10th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics. Leiden, Netherlands: Taylor and Francis, 2007: 93-98.
- [24] KONDRER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(1): 115-143.
- [25] 罗爱忠,邵生俊,陈昌禄,等. 黄土的修正上下加载面模型研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 128-133. (LUO Aizhong, SHAO Shengjun, CHEN Changlu, et al. Research on modified super-loading and sub-loading yield surface model of loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup2): 128-133. (in Chinese))

(收稿日期: 2023 - 11 - 04 编辑: 熊水斌)