

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.018

掺粉煤灰水泥稳定碎石材料溶蚀特性及预测模型研究

彭俊锋¹, 黄少杰¹, 翁义建¹, 容洪流², 李大江¹

(1.广西桂能工程咨询集团有限公司, 广西 南宁 530023;2.广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 分析粉煤灰掺量对水泥稳定碎石材料溶蚀特性的影响,利用 BP 神经网络理论建立掺粉煤灰水泥稳定碎石材料溶蚀特性预测模型。结果表明,掺入适量粉煤灰和增大水泥掺量可以减少水泥稳定碎石材料钙离子溶出量,降低钙离子溶出率和空隙率,有效延缓水泥稳定碎石材料的溶蚀进程;BP 神经网络预测模型的预测结果和实测结果非常接近,相关系数大于 0.97,与逐步回归预测模型相比,BP 神经网络预测模型的预测结果更准确。

关键词: 公路;水泥稳定碎石;溶蚀特性;粉煤灰;预测模型

中图分类号:U418.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)05-0081-06

水泥稳定碎石材料的溶蚀一直是道路工程建设中的难题,溶蚀损伤容易造成胶凝材料大量损失,影响路面基层材料的力学性能,降低材料与结构的耐久性。刘冲发现水泥稳定碎石材料的抗压强度和间接抗拉强度随着钙溶出的增加而降低^[1]。Faucon P.等研究发现,在水泥浆体试件表层有大量钙和少量硅溶出,混凝土被软水溶蚀的过程受局部化学平衡控制,钙溶蚀过程受钙离子扩散控制^[2-3]。李响的研究表明掺 20%粉煤灰可以延缓水泥结构微裂纹的溶蚀发展^[4]。何绍丽研究发现单掺粉煤灰可以减缓水泥浆体的钙溶蚀进程,提高其在去离子水中的抗溶蚀性能^[5]。孙海燕通过微观分析发现当粉煤灰掺量不超过 50%时,水化硅酸钙含量不断增多,无害孔和少害孔数量增加,掺入一定粉煤灰可以减小空隙率^[6]。方正青等的研究表明粉煤灰的掺入虽然可减少氢氧化钙含量和钙离子溶出量,但会增大试件的空隙率,加速材料的钙溶蚀进程^[7]。Rozière E.等的研究表明粉煤灰的掺入可减少混凝土中氢氧化钙含量,使材料内部可溶蚀的氢氧化钙含量减少,溶蚀破坏程度降低^[8]。陈朋等的研究表明,低等级粉煤灰掺量为 15%时,粉煤灰气泡轻质土的各项物理力学指标均最优且经济效益显著^[9]。现有研究表明在水泥材料中掺入粉煤灰可以延缓其溶蚀进程,提高其耐久性能。但针对道路工程中水泥稳定碎石材料溶蚀特性的研究很少。

近年来众多学者利用 BP 神经网络预测了各种混凝土的强度和耐久性^[10-14],预测结果较精确。本文研究粉煤灰掺量对水泥稳定碎石材料溶蚀特性的

影响,并采用 BP 神经网络模型对其溶蚀进程进行预测,为水泥稳定碎石病害防治与寿命预估提供参考。

1 试验方案

1.1 原材料及试验方案

采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,粗集料采用 4.75~26.5 mm 级配碎石,细集料为河砂,粉煤灰为 I 级低钙粉煤灰。水泥稳定碎石材料中水泥掺量分别为 3%、4%、5%、6%、7%,水泥:粉煤灰分别按 1.0:0.0、1.0:0.1、1.0:0.2、1.0:0.3 的比例掺入,共设计 20 组试验(见表 1)。制备 6 mmol 氯化铵溶液,采用氯化铵加速溶蚀方法模拟溶蚀过程,测试水

表 1 水泥稳定碎石材料中水泥及粉煤灰掺量

试件 编号	水泥: 粉煤灰	水泥剂 量/%	试件 编号	水泥: 粉煤灰	水泥剂 量/%
A1		3	A11		3
A2		4	A12		4
A3	1.0:0.0	5	A13	1.0:0.2	5
A4		6	A14		6
A5		7	A15		7
A6		3	A16		3
A7		4	A17		4
A8	1.0:0.1	5	A18	1.0:0.3	5
A9		6	A19		6
A10		7	A20		7

泥稳定碎石材料未溶蚀及溶蚀 1 d、3 d、7 d、9 d、11 d、13 d、15 d、17 d、19 d、21 d、23 d、25 d、27 d 时钙离子溶出量、溶出率及空隙率变化^[15]。

1.2 试验方法

1.2.1 氯化铵加速溶蚀方法

采用氯化铵加速溶蚀方法模拟水泥稳定碎石材料的溶蚀过程。制备 6 mmol 氯化铵溶液,将试件放入氯化铵溶液中溶蚀,保证上下底面与溶液完全接触,溶蚀过程中容器保持密封。

1.2.2 钙离子浓度测试

充分搅拌溶蚀溶液,取 5 mL 待测溶液,向其中加入去离子水稀释 X 倍,取稀释后溶液 50 mL 装入锥形瓶中;向锥形瓶中滴入 3 滴 1:1 稀盐酸,摇匀,放置在电加热炉中加热煮沸,充分排放溶液中 CO_2 后冷却;再次向锥形瓶中加入 5 mL 体积分数为 20% 的氢氧化钠溶液、约 80 mg 钙黄绿素指示剂,充分摇匀后等待滴定;用配置好的 EDTA 溶液滴定,记录初始刻度 V_1 ,边滴定边摇晃,观察锥形瓶中溶液变化,当溶液由黄绿色变为橙红色时,结束滴定,记录最终刻度 V_2 。按式(1)计算钙离子浓度 C 。

$$C = \frac{(V_2 - V_1)MX}{V_w} \quad (1)$$

式中: M 为溶液的浓度 (mmol/L); V_w 为测试溶液体积 (mL)。

1.2.3 空隙率测试

通过饱水—干燥称重法称量溶蚀前后饱水质量,计算试件空隙率。取出溶蚀后试件并用湿毛巾擦去表面浮水,称其饱水质量 m_s ;将试件完全浸没在水中,用下挂式秤称其悬浮在水中的质量 m_x ;将试件放入 60 °C 烘箱中充分干燥至恒重,称其干燥质量 m_d 。通过式(2)计算试件空隙率 φ 。

$$\varphi = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_x} \times 100 \quad (2)$$

2 建立 BP 神经网络预测模型

2.1 BP 神经网络计算原理

BP 神经网络包括信号正向传播和误差反向传播两个过程。将给定的信号参数从输入层传递至隐含层,经隐含层处理后将结果传递至输出层,若输出结果与期望值不符,进入误差反向传播过程;按原正向传播路径将误差信号反馈至隐含层,通过对各层神经元权值的不断修正使网络的误差函数趋于最小^[16]。图 1 为 BP 神经网络结构,输出 y 的计算表

达式见式(3)。

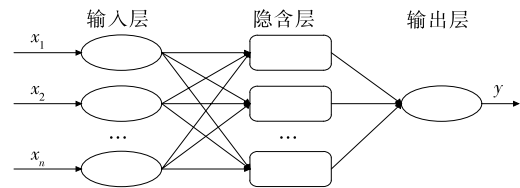


图 1 BP 神经网络的结构

$$y = F(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}} \quad (3)$$

式中: F 为激活函数,采用 sigmoid 函数。

BP 神经网络算法可根据误差函数的负值不断调整网络中的权值和阈值,直到将网络错误降至最低为止。更新后的权值和阈值分别见式(4)、式(5)。

$$w(k+1) = w(k) - \alpha \frac{\partial E(k)}{\partial w(k)} \quad (4)$$

$$b(k+1) = b(k) - \alpha \frac{\partial E(k)}{\partial b(k)} \quad (5)$$

式中: $w(k)$ 为第 k 次迭代时各层之间的连接权值向量; α 为训练速率; $\partial E(k)/\partial w(k)$ 为第 k 次迭代时神经网络输出误差对各权值的误差梯度; $E(k)$ 为第 k 次迭代时神经网络输出的总误差性能函数,由式(6)表示; $b(k)$ 为第 k 次迭代时各层之间的连接阈值向量; $\partial E(k)/\partial b(k)$ 为第 k 次迭代时神经网络输出误差对各阈值的误差梯度。

$$E(k) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|^2} \quad (6)$$

式中: e_i 为实测值与预测值的绝对误差; n 为数据总数。

2.2 训练集数据

采用掺粉煤灰水泥稳定碎石材料溶蚀特性研究中的数据建立 BP 神经网络预测模型,将水泥稳定碎石材料的水泥掺量、粉煤灰掺量、溶蚀时间作为 BP 神经网络的输入参数,预测水泥稳定碎石材料的空隙率和钙离子溶出量、溶出率。

2.3 网络层数和隐含层节点数

采用 3 层 BP 神经网络,分别为输入层、隐含层、输出层。输入层神经元数量为 3 个,分别为水泥掺量、粉煤灰掺量、溶蚀时间。隐含层节点数 l 按式(7)确定,计算得 l 的取值范围为 3~13 个,经多次尝试后确定隐含层节点数 l 为 7 个。

$$l = \sqrt{m+n} + a \quad (7)$$

式中: m 为输出层节点数; n 为输入层节点数; a 为 0~10 之间的任意常数。

3 掺粉煤灰水泥稳定碎石材料的溶蚀特性分析与预测

3.1 钙离子溶出量分析与预测

图2为不同水泥掺量、粉煤灰掺量下水泥稳定碎石材料中钙离子浓度变化。由图2可知:随着浸泡时间的增加,溶液中钙离子浓度逐渐增大。水泥

掺量一定时,随着粉煤灰掺量的增加,钙离子溶出量不断减小,粉煤灰对水泥稳定碎石材料钙离子溶出起到抑制作用。粉煤灰中的活性二氧化硅与水泥的水化产物充分反应生成较多水化硅酸钙,相较于氢氧化钙,水化硅酸钙更难以溶蚀,因而钙离子溶出量有所降低。在相同浸泡时间下,增大水泥掺量可减缓钙离子溶出量。

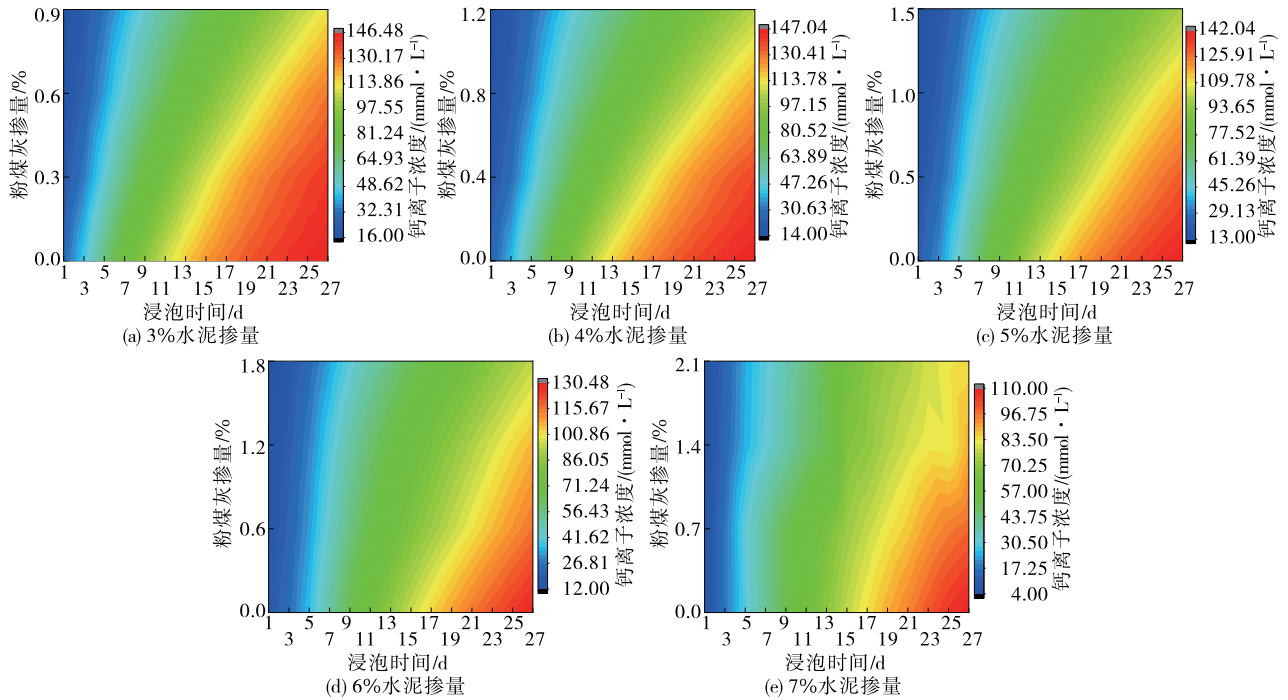


图2 水泥稳定碎石材料中钙离子浓度的变化

分别采用BP神经网络预测模型和逐步回归预测模型对20组水泥稳定碎石材料的钙离子溶出量进行预测,并对预测值和实测值进行线性拟合,结果见图3。由图3可知:BP神经网络模型预测值与实

测值的相关系数 R 为0.970,且数据点紧邻拟合直线;逐步回归模型预测值与实测值的相关系数为0.910,部分数据点距离拟合直线较远,数据较离散。BP神经网络模型预测值的拟合程度更高,更贴近实测值。

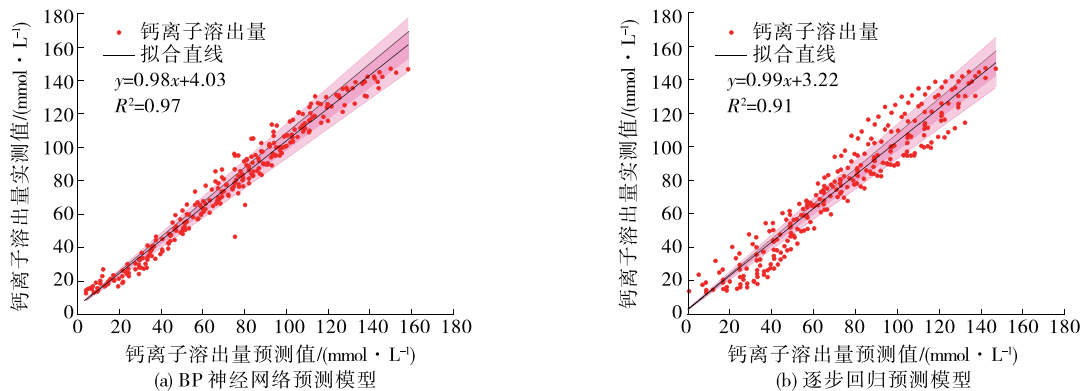


图3 钙离子溶出量预测值与实测值的线性拟合分析

3.2 钙离子溶出率分析与预测

图4为水泥稳定碎石材料中钙离子溶出率测试

结果。由图4可知:钙离子溶出率随着浸泡时间的增加而增大,与钙离子浓度变化情况吻合。粉煤灰

掺量一定时,钙离子溶出率整体随着水泥掺量的增大而逐渐降低。这是因为水泥掺量、粉煤灰掺量增大,试件空隙率降低,而水泥稳定碎石材料的溶蚀过程是从材料外部向内部的过程,空隙率降低,则腐蚀

溶液更难进入材料空隙中,钙离子溶出率降低。水泥掺量一致时,在相同时间内,增大粉煤灰掺量可以减少钙离子的析出,降低钙离子溶出率,从而减缓溶蚀进度,提高水泥稳定碎石材料抵抗溶蚀的能力。

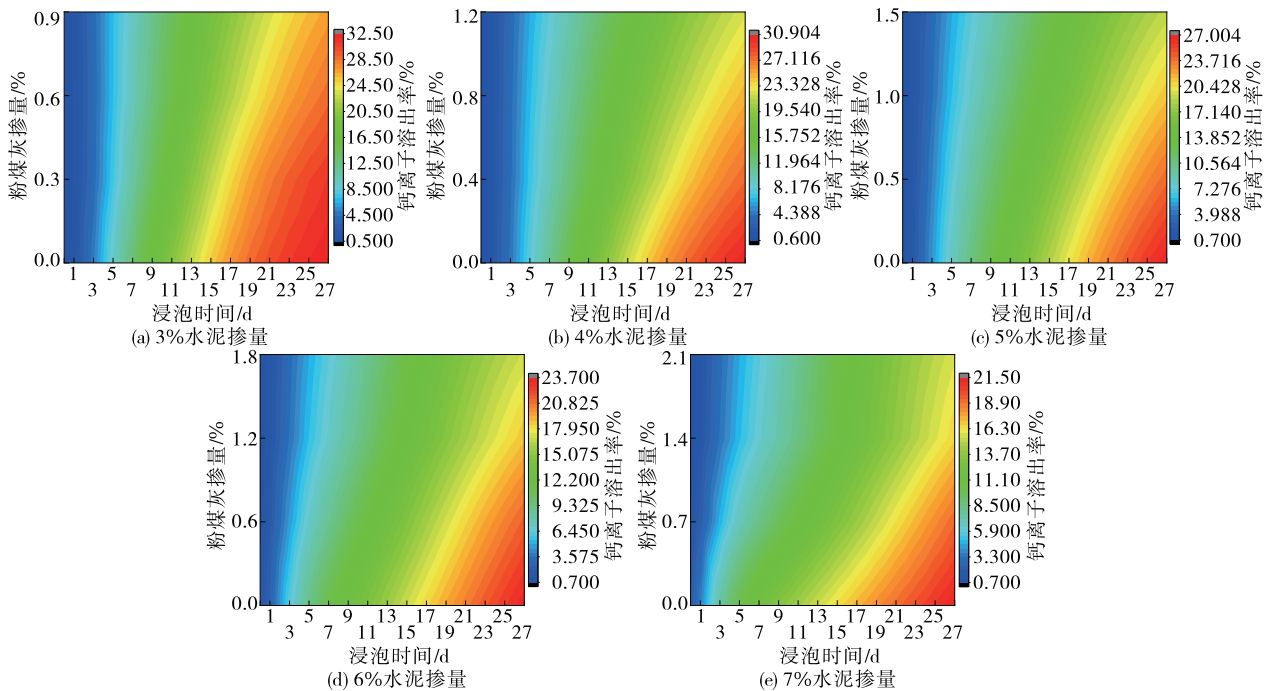


图4 水泥稳定碎石材料中钙离子溶出率的变化

图5为钙离子溶出率预测值与实测值的拟合结果。由图5可知:BP神经网络预测模型预测值基本位于拟合直线附近,相关系数为0.990,接近于1,拟合

程度高;逐步回归模型预测值与拟合直线偏差较大,相关系数仅0.950,预测准确性欠佳。BP神经网络预测模型预测结果与实测数据极为相近,更具真实性。

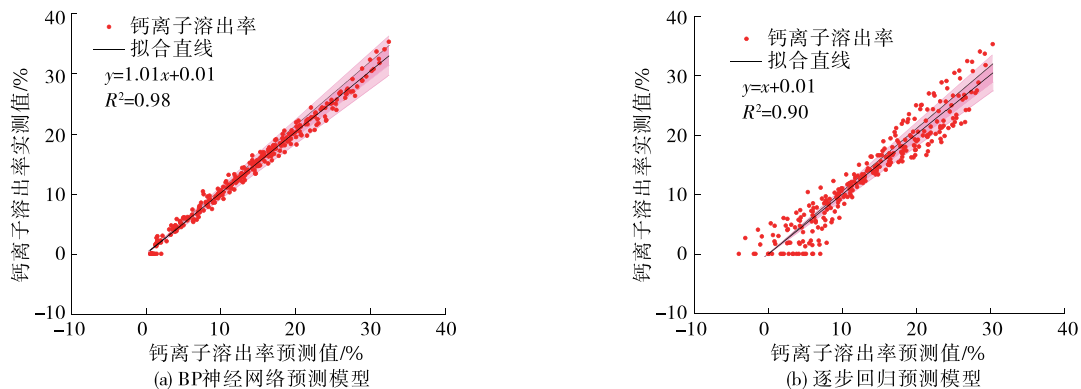


图5 钙离子溶出率预测值与实测值的线性拟合分析

3.3 空隙率分析与预测

图6为溶蚀过程中不同水泥掺量和粉煤灰掺量下水泥稳定碎石材料空隙率的变化。由图6可知:随着浸泡时间的增加,空隙率不断增大,空隙增多使水泥稳定碎石材料更容易被侵蚀,析出更多的钙离子,抵抗溶蚀的能力逐步减弱。但在整个溶蚀过程

中空隙率变化并不明显。在其他条件一定时,空隙率随着粉煤灰掺量的增大而降低。这是因为在水泥稳定碎石强度形成早期,水泥迅速水化产生大量氢氧化钙,而粉煤灰中活性二氧化硅可以与氢氧化钙反应生成空隙更小的水化硅酸钙,使材料空隙率降低。说明掺入粉煤灰可有效降低水泥稳定碎石材料

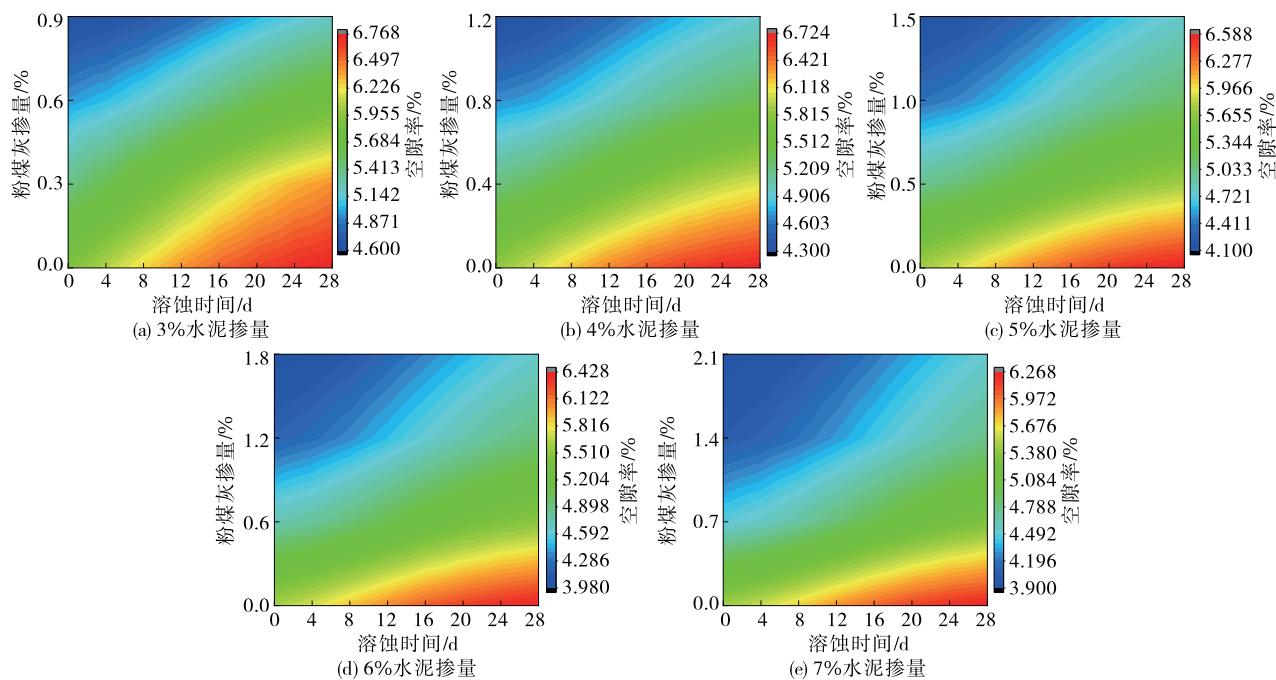


图 6 水泥稳定碎石材料空隙率的变化

的空隙率,增强其抵抗溶蚀的能力。此外,增大水泥掺量可以显著降低水泥稳定碎石材料的空隙率,进而延缓溶蚀的进程。

采用 BP 神经网络预测模型和逐步回归预测模型对水泥稳定碎石的空隙率进行预测,并对预测值

与实测值进行线性拟合,结果见图 7。由图 7 可知:BP 神经网络预测模型预测值比较集中地散落在拟合直线附近,线性相关系数为 0.985;逐步回归预测模型预测值离拟合直线较远,线性相关系数为 0.954,拟合程度比 BP 神经网络预测模型差。

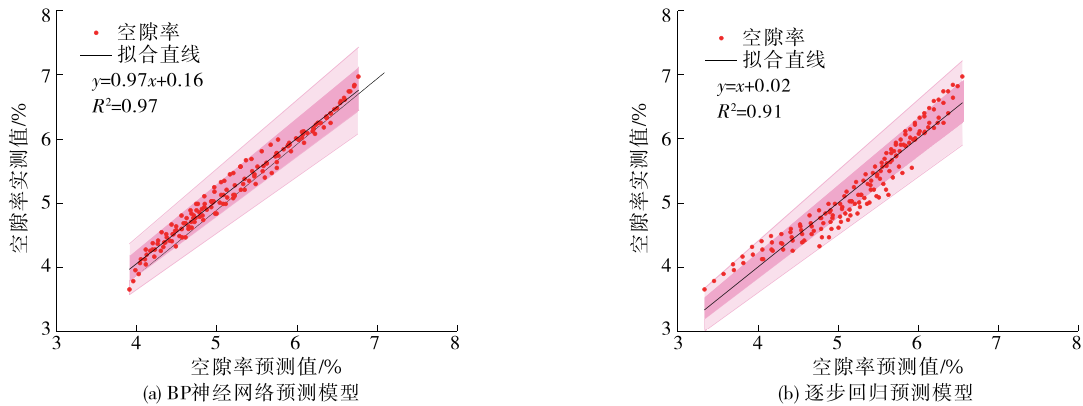


图 7 水泥稳定碎石材料空隙率预测值与实测值的线性拟合分析

4 结论

- (1) 随着浸泡时间的增加,水泥稳定碎石材料的钙离子溶出量、溶出率、空隙率不断增大。
- (2) 在相同条件下,增大水泥掺量可以降低水泥稳定碎石材料的空隙率、钙离子溶出量和溶出率,延缓材料的溶蚀进程。
- (3) 在水泥稳定碎石材料中掺入适量粉煤灰可以减少钙离子溶出量,降低钙离子溶出率和空隙率,

提高水泥稳定碎石材料抵抗溶蚀的能力。

(4) BP 神经网络模型对水泥稳定碎石材料溶蚀性能的预测结果和实测结果非常接近,相关系数大于 0.985,优于逐步回归预测模型,BP 神经网络模型可用于水泥稳定碎石材料溶蚀性能预测。

参考文献:

[1] 刘冲.水泥混凝土路面基层冲刷疲劳特性研究[D].西安:长安大学,2011.

- [2] FAUCON P, LE BESCOP P, ADEONT F, et al. Leaching of cement; Study of the surface layer[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(11): 1707—1715.
- [3] FAUCON P, ADEONT F, JACQUINOT J F, et al. Long-term behaviour of cement pastes used for nuclear waste disposal; Review of physico-chemical mechanisms of water degradation[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(6): 847—857.
- [4] 李响. 复合水泥基材料水化性能与浆体微观结构稳定性[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [5] 何绍丽. 软水条件下矿物掺合料混凝土溶蚀性能的实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [6] 孙海燕. 从微结构形成与劣化机理研究水工混凝土粉煤灰临界掺量[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [7] 方正青, 汤玉娟, 何绍丽, 等. 粉煤灰对水泥基材料溶蚀性能的影响[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(9): 9—13.
- [8] ROZIÈRE E, LOUKILI A, EL HACHEM R, et al. Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(12): 1188—1198.
- [9] 陈朋, 惠冰, 孟凌霄, 等. 粉煤灰基气泡轻质土配合比和抗压强度研究[J]. 公路与汽运, 2022(5): 47—49.
- [10] 陈洪根, 龙蔚莹, 李昕, 等. 基于 BP 神经网络的粉煤灰混凝土抗压强度预测研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 2): 1041—1045.
- [11] PARICHATPRECHA R, NIMITYONGSKUL P. Analysis of durability of high performance concrete using artificial neural networks[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 910—917.
- [12] BAL L, BUYLE-BODIN F. Artificial neural network for predicting drying shrinkage of concrete[J]. Construction & Building Materials, 2013, 38: 248—254.
- [13] 赵明亮, 水中和, 周华新, 等. 中低强度等级混凝土抗压强度的 BP 神经网络模型预测研究[J]. 混凝土, 2021(3): 35—38.
- [14] 金浏, 赵瑞, 杜修力. 混凝土抗压强度尺寸效应的神经网络预测模型[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(3): 260—268.
- [15] 史俊杰. 水泥稳定碎石材料钙溶蚀规律研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [16] 何玉彬, 李新忠. 神经网络控制技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

收稿日期: 2022-07-28

(上接第 71 页)

参考文献:

- [1] 程培峰, 佟天宇. 回收 PP/SBR 复合改性沥青的制备及性能[J]. 现代塑料加工应用, 2019, 31(5): 16—20.
- [2] 陈文生. 稳定型橡胶粉/SBS 复合改性沥青的制备及混合料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(10): 103—107.
- [3] 彭伟. SBS/橡胶粉复掺改性沥青性能试验研究[J]. 福建交通科技, 2020(5): 21—24.
- [4] WANG W, TAN G, LIANG C, et al. Study on viscoelastic properties of asphalt mixtures incorporating SBS polymer and basalt fiber under freeze-thaw cycles[J]. Polymers, 2020, 12(8): 1804.
- [5] 何志俊. SBS/橡胶粉复合改性沥青高温性能研究[J]. 山西交通科技, 2020(3): 8—9+16.
- [6] VAMEGH M, AMERI M, NAENI S F C. Experimental investigation of effect of PP/SBR polymer blends on the moisture resistance and rutting performance of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119197.
- [7] 刘梦梅, 韩森, 任万艳, 等. 橡胶和 SBS 对排水沥青混合料性能影响的试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(3): 269—274.
- [8] MANSOURKHAKI A, AMERI M, DARYAEE D. Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2019, 203: 83—94.
- [9] 勾俊芳, 韩森, 杨晓飞, 等. 废胶粉对热拌沥青混合料疲劳性能的影响[J]. 中外公路, 2017, 37(2): 241—245.
- [10] 魏斌. 基于橡胶粉与 SBS 复合改性技术钢桥面铺筑沥青混合料耐久性试验研究[J]. 公路工程, 2015, 40(5): 101—106+140.
- [11] AMERI M, VAMEGH M, ROOHOLAMINI H, et al. Investigating effects of nano/SBR polymer on rutting performance of binder and asphalt mixture[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 1—7.
- [12] 向丽. 废橡胶粉/SBS 复合改性沥青的机理和性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2011.
- [13] 程培峰, 佟天宇. 废旧 PP 复配 SBR 改性沥青及其混合料性能研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(10): 927—933.
- [14] 刘滢, 金云东, 周超, 等. SBR/PP 复合颗粒改性沥青及其混合料性能研究[J]. 应用化工, 2022, 51(1): 93—97+102.

收稿日期: 2022-11-07