

振动搅拌工作参数对混凝土抗氯离子渗透性能的影响

赵 悟^{1,2}, 高 爽¹, 田 军³, 王东恒¹, 陈 阳¹

¹长安大学工程机械学院, 陕西 西安

²长安大学道路施工技术装备教育部重点实验室, 陕西 西安

³陕西西阎城际铁路有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2023年3月22日; 录用日期: 2023年6月5日; 发布日期: 2023年6月12日

摘 要

为了探索提高水泥混凝土抗氯离子渗透能力的新方法, 对搅拌过程中影响混凝土抗氯离子渗透性能的部分因素及其影响规律进行了初步研究。主要从振动搅拌装置的振幅、频率和搅拌线速度等参数发生变化时对混凝土抗氯离子渗透性能的影响规律进行了正交试验研究。研究表明, 当选用振幅取1.93 mm, 振动频率取35 Hz, 搅拌线速度取1.4 m/s, 新拌混凝土的抗氯离子渗透性能较好。且三个因素对混凝土抗氯离子渗透性的影响主次顺序为: 振幅 > 振动频率 > 搅拌线速度。根据测试结果, 提出了混凝土抗氯离子渗透性能的BP神经网络预测模型, 为工程设计提供参考。振动搅拌为提高混凝土耐久性提供了一种新的途径。

关键词

混凝土, 振动搅拌, 抗氯离子渗透, 耐久性, BP神经网络模型

Influence of Vibration Mixing Parameters on the Resistance to Chloride Ion Penetration of Concrete

Wu Zhao^{1,2}, Shuang Gao¹, Jun Tian³, Dongheng Wang¹, Yang Chen¹

¹School of Engineering Machinery, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

²Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

³Shaanxi Xiyan Intercity Railway Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 22nd, 2023; accepted: Jun. 5th, 2023; published: Jun. 12th, 2023

文章引用: 赵悟, 高爽, 田军, 王东恒, 陈阳. 振动搅拌工作参数对混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. 机械工程与技术, 2023, 12(3): 253-261. DOI: 10.12677/met.2023.123029

Abstract

In order to explore a new method to improve the anti-chloride ion permeability of cement concrete, some factors that affect the anti-chloride ion permeability of the concrete during the mixing process and their influence rules have been preliminary studied. Orthogonal experiments were conducted mainly from the influence of the vibrational mixing device's amplitude, frequency and mixing linear speed on the impact of the concrete's anti-chloride ion penetration performance. The research results show that when the amplitude is 1.93 mm, the vibration frequency is 35 Hz, and the mixing linear velocity is 1.4 m/s, the fresh concrete has better resistance to chloride ion penetration. And the primary and secondary order of the influence of three factors on the anti-chloride ion permeability of concrete is: amplitude > vibration frequency > mixing linear velocity. According to the test results, a BP neural network prediction model for the anti-chloride ion permeability of concrete is proposed to provide a reference for engineering design. Vibration mixing provides a new way to improve the durability of concrete.

Keywords

Concrete, Vibration Mixing, Resistance to Chloride Ion Penetration, Durability, BP Neural Network Model

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土具有良好的和易性、力学性能和经济效益,被广泛应用于基础建设中。然而在现实生活中,混凝土的耐久性会受到氯离子腐蚀的影响,氯离子的侵入加快了混凝土的腐蚀,造成了钢筋表面的钝化膜破坏,尤其是对位于沿海、海洋和近海地区的钢筋混凝土结构,锈蚀破坏现象加剧引起了国内外专家的注意[1] [2] [3]。现行的针对混凝土抵抗氯离子的方法主要是从混凝土的材料入手,采用颗粒粒径更小的材料可以降低混凝土的孔隙率,从而降低氯离子的渗透性,如周岳,周健[4]等研究发现在混凝土搅拌中掺入粉煤灰与硅灰可以改善混凝土抗氯离子性能,并且随着掺量的增加,抗渗性能改善明显。孙伟[5]等人研究发现在混凝土中通过添加不同类型不同尺寸的纤维,可以减小混凝土在硬化收缩过程中的裂缝,有效地提高混凝土的抗渗性能。除了从原材料的角度,对搅拌工艺进行改进,同样也能提高氯离子的抗渗透性。近年来,振动搅拌技术得到了广泛的关注,其技术是在普通搅拌的基础上,添加振动激励,从而对物料搅拌效果的均匀性和强度带来一定程度的改善。付昌会和冯忠绪[6]等人研究了振动搅拌对混凝土含气量及孔结构的影响,认为在参数匹配的情况下,采用合理的振动搅拌方式,可以提高混凝土中的含气量,同时可以改善混凝土中的孔隙结构,增强混凝土的耐久性,最终提高混凝土的强度。因此采用振动搅拌是有效提高混凝土耐久性的一种方式。

20世纪末以来,基于BP神经网络预测模型对混凝土的各项性能进行预测的手段被广泛采用,可以对混凝土行业的生产起到一定程度的辅助作用。万崔星,孙敏[7],陈守开[8]等人采用此方法建立了纤维混凝土的力学性能预测模型以及再生骨料透水混凝土(RAPC)亚高温-冷却性能的模型,通过将预测数据和实际数据进行对比,对模型的准确性进行了验证,提高了特种混凝土的生产效率。

因此本文通过采用正交试验研究了振动搅拌工作参数对混凝土抗氯离子渗透能力的影响,并利用 BP 神经网络,建立了预测模型,进一步提高生产效率;根据试验结果,确定了最优的工作参数,为后续的振动搅拌工作参数的合理匹配与优化提供一定的参考价值。

2. 原理

2.1. 振动搅拌机理

混凝土的氯离子渗透系数反映的是混凝土抗渗透力,也就是密实性[9]。传统的强制式搅拌机搅拌出的混凝土在微观状态下存在着水泥团聚的现象,呈现出较差的和易性。振动搅拌是在普通强制搅拌基础上发展起来的一种新的搅拌方法,旨在提高振动效果,防止水泥团出现胶凝凝结现象,使搅拌机内的物料加速水化反应,将振动能量传递给物料,物料在振动作用下无论是宏观均匀性还是微观均匀性都得到了极大的改善,大大提高混凝土的整体性能。

对其改善原因进一步分析可得,振动搅拌可以显著增加混凝土的容重和硬化混凝土试块的密度。在新拌混凝土配制过程中,采用振动搅拌,改变了混合料的初始状态,破坏掉黏聚在一起的水泥团,更适宜水化反应,水化反应产生的 C-S-H 凝胶黏结在较大孔隙中,减小孔径,增加了封闭小孔隙的数量并均匀分布,混凝土内部浆体强度增加,形成了更加致密的混凝土结构;此外,激振器的振动作用降低了混合料的塑性粘度,各组分之间阻力减小,使混合物有更好的流动性,在物料的宏观性能上,物料分布更均匀,试块更加密实,工作性能提高。在振动作用下,振动能量使黏聚的水泥团颤振破裂,从而破坏了最初聚集在一起的胶凝结构,水泥颗粒包裹在骨料表面,混合料水化反应进一步得到改善。水化反应产物水合硅酸钙 C-S-H 增多,填补了混凝土内部结构,降低了内摩擦阻力,从而实现混凝土强度的提升[10]。

2.2. 振动能量在混凝土中的传播

振动搅拌过程中,混凝土的流变特性与振动波在混凝土中的传播密不可分,振动搅拌所产生的振动,本质上是以波的形式向外传播,其传播的特点是从震源处向四周扩散,因此它与地震波的传播形式相同。地震波需要通过介质才能向外传播,而介质通常分为固态、液态、气态三种类型,波在这三种介质中的传播速度大不相同,这主要与介质的密度有关。在振动搅拌机中,振动波以激振器的位置为波源处,在整个搅拌机中激振器产生的振动波动以弹性波的形式向壳体四周传播。在开始阶段,由于物料刚开始拌合,均匀性较差,因此振动波向各方向的传播速度和范围有较大的差距。随着物料均匀性的增加,振动波在各个方向上的传播特性逐渐相同。振动搅拌机中的振动能量以波的形式向周围物料传递,使搅拌缸中的物料同时产生振动。在这个过程中,会形成连续的波阵面,这时从波源理论上认为是无限的。但实际上,振动波在传播过程中必然受到混凝土混合料的阻尼作用产生能量损耗,由于混凝土混合料中各组份颗粒大小相差较大,而且物料颗粒间隙中存在空气,故振动波在混凝土介质中传播衰减较快,靠近振动源附近的振动波最强(振幅、加速度最大),并随距离增大而逐渐减弱,最后消失。

3. 试验

3.1. 试验准备

根据实际试验条件以及混凝土的物理力学特性,试验样机采用 DT60ZBW 型试验用双卧轴振动搅拌机。样机主要由机架、搅拌驱动与传动装置、振动 n 驱动与传动装置、振动搅拌装置及双圆筒并联的搅拌仓组成,可以同时使用搅拌和振动功能,即振动搅拌模式工作;也可只启动搅拌电机进行普通强制搅拌。搅拌总时间按照课题组以往试验选用 90 s;投料顺序为砂、石子、水泥、粉煤灰、水、减水剂,本次试验的原材料如下。

水泥: P·O 42.5 R 水泥, 唐山冀东牌普通硅酸盐水泥。

粉煤灰: II 级, 陕西正源股份有限公司产, 密度 2.23 g/cm^3 , 细度 $8.7 \mu\text{m}$ 。

粗骨料: 陕西泾阳县石灰岩碎石, 规格为 5~10 mm 和 10~20 mm 两档, 压碎指标 8.74%, 吸水率 0.62%。

细骨料: 由机制砂按照一定比例掺入天然砂而成的混合砂。

外加减水剂: BTC-106 型聚羧酸, 含固率 15%, 减水率 35%。

水: 西安市生活饮用自来水。

根据 JGJ 55-2011《普通水泥混凝土配合比设计规程》, 再结合课题组以往的经验, 最终设计的 C40 混凝土配合比如表 1 所示。

Table 1. Concrete mix ratio

表 1. 混凝土配合比

配 比	每立方砼中各种材料用量(kg/m^3)							
	水泥	粉煤灰	水	机制砂	天然砂	5~10 mm 碎石	20~31.5 mm 碎石	减水剂
	310.84	54.86	157.25	539.57	231.25	346.87	809.36	3.66

3.3. 试验方案

试验结果的影响因素是多方面的, 为了研究振动搅拌工作参数对混凝土抗渗性的影响, 确立以正交试验设计思路。对试验的可行性、经济性等综合考虑分析, 选定正交试验的因素为: 振幅、振动频率, 搅拌叶片线速度; 本试验选用 3 因素 5 水平的正交试验, 试验因素水平见表 2。

本文主要讨论了振动搅拌参数对混凝土抗氯离子性能的影响, 但混凝土的抗压强度和含气量应同时达标。因此, 本试验还测定了混凝土的 28 d 抗压强度和新拌混凝土的含气量。

目前, 混凝土的抗氯离子渗透性测定方法按试验时间长短可以分为慢速测试法和快速测试法, 但慢速测试法测试时间长、实用性差, 因此实验室和现场较少采用这些慢速测试方法。快速测试方法较多, 本试验中所搅拌混凝土为 C40 标号不适用氯离子迁移系数法(RCM)法; 因此, 本次试验采用电通量法进行混凝土抗氯离子渗透的耐久性检测。

本次电通量根据国家试验标准如表 3 所示, 来对各系列清水混凝土抗氯离子侵蚀性能进行评价分析。试验方法按照标准进行, 试验仪器和过程如图 1 所示。

Table 2. Level table of vibration stirring factors

表 2. 振动搅拌因素水平表

水平	因数	A 振幅(mm)	B 振动频率(Hz)	C 搅拌线速度(m/s)
	1		1.05	30.0
2		1.44	32.5	1.4
3		1.75	35.0	1.5
4		1.93	37.5	1.6
5		2.00	40.0	1.7

Table 3. Classification of chloride ion permeability resistance of concrete

表 3. 混凝土抗氯离子渗透性的等级划分

电通量(C)	>4000	2000~4000	1000~2000	500~1000	<500
等级	I	II	III	IV	V
耐久性水平 推荐意见	差	较差	较好	好	很好

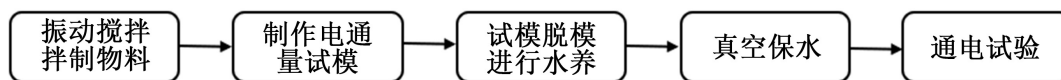


Figure 1. Electrical flux test process

图 1. 电通量试验过程

4. 试验结果与分析

4.1. 混凝土抗压强度和含气量分析

混凝土 28 d 的抗压强度和含气量测试结果如图 2 和图 3 所示, 从试验结果可以看出, 含气量大多在 2%~3% 之间, 试验结果较好, 28 d 抗压强度值大部分在标准强度线以上, 只有少部分不满足要求。

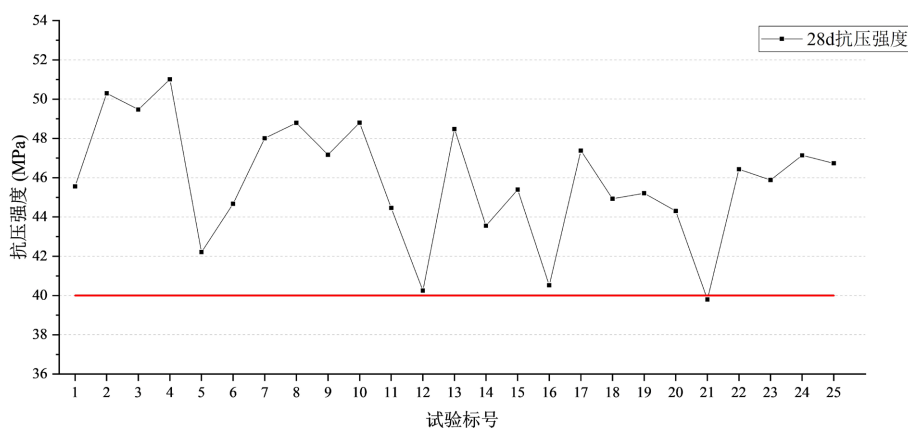


Figure 2. 28 d compressive strength test results

图 2. 28 d 抗压强度测试结果

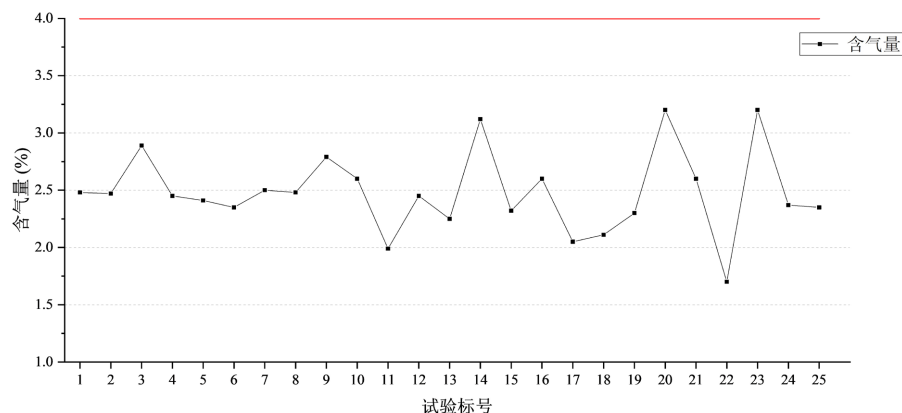


Figure 3. Intuitive diagram of gas content test results

图 3. 含气量测试结果直观图

4.2. 混凝土电通量实验结果分析

本次电通量测试根据国家试验标准(《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T50082), 按照评价标准表 3, 从试验结果可以看出, 见图 4 所有试验组测试值均在 2000 C 以下, 还有部分达到了 1000 C 以下。值越小表明抗氯离子渗透性能越好, 因此, 评价电通量时, 电通量值越小越好, 而试验结果均在要求范围内, 这说明, 振动搅拌能改善搅拌质量, 大幅度提高混凝土抗氯离子渗透性能。

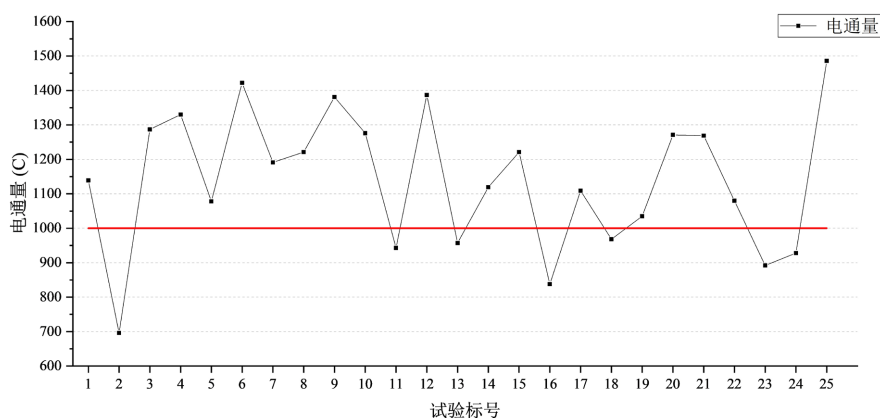


Figure 4. Electrical flux test results

图 4. 电通量试验结果

4.3. 混凝土电通量极差分析

Table 4. Electroflux range analysis table of machined sand concrete

表 4. 机制砂混凝土电通量极差分析表

	A	B	C
K ₁	6005	5611	5582
K ₂	6491	5463	5266
K ₃	6903	5325	5620
K ₄	5221	5793	5760
K ₅	5655	6332	5357
k ₁	1201	1122	1116
k ₂	1298	1092	1053
k ₃	1380	1065	1124
k ₄	1044	1158	1152
k ₅	1131	1266	1071
R	336.4	201.4	98.8
主次顺序		A > B > C	
较优组合		A4 B3 C2	

机制砂混凝土电通量极差分析如表 4 所示, 经过直观分析影响混凝土电通量的因素主次顺序为振幅、振动频率、搅拌线速度。对于混凝土的电通量来说在规范范围内电通量越小越好, 因此选择每个因素下对应的使 k 值最小的水平为较优水平, 即得到较低电通量的因素水平组合目标: 振幅取 1.93 mm, 振动频率取 35 Hz, 搅拌线速度取 1.4 m/s。

5. BP 神经网络模型仿真计算结果与试验值的分析

5.1. BP 神经网络模型建立

为了比较准确地预测混凝土耐久性能, 为工程设计提供参考, 可以利用 BP 神经网络建立预测混凝土耐久性能的数学模型。20 世纪末以来, BP 神经网络被广泛应用于实际工程, 进行成本的预测以及材料的各项性能预测[10] [11] [12]。采用传统的数学建模方式难以对振动搅拌工作参数对混凝土抗氯离子性能建立数学模型, BP 神经网络采用隐式模拟方法, 无需建立精确的数学模型以试验数据为基础和其自有的

学习特性来完成建模[13]。采用 BP 神经网络的方法，在振动搅拌工作参数对氯离子电通量影响的试验的基础上建立预测模型。

将振动搅拌的三个工作参数振幅、振动频率、搅拌线速度设置为输入层，氯离子的电通量设置为输出层，隐藏层节点数 n 取 10，采用 Trainlm 函数，Levenberg-Marquardt 算法训练神经网络，采用该方法，训练速度快且训练精度较高。

训练样本、验证样本、测试样本神经网络训练后的预测值和试验值的分布和相关关系如图 5 所示，可以看出相关性系数基本都接近于 1，具有较好的预测效果。

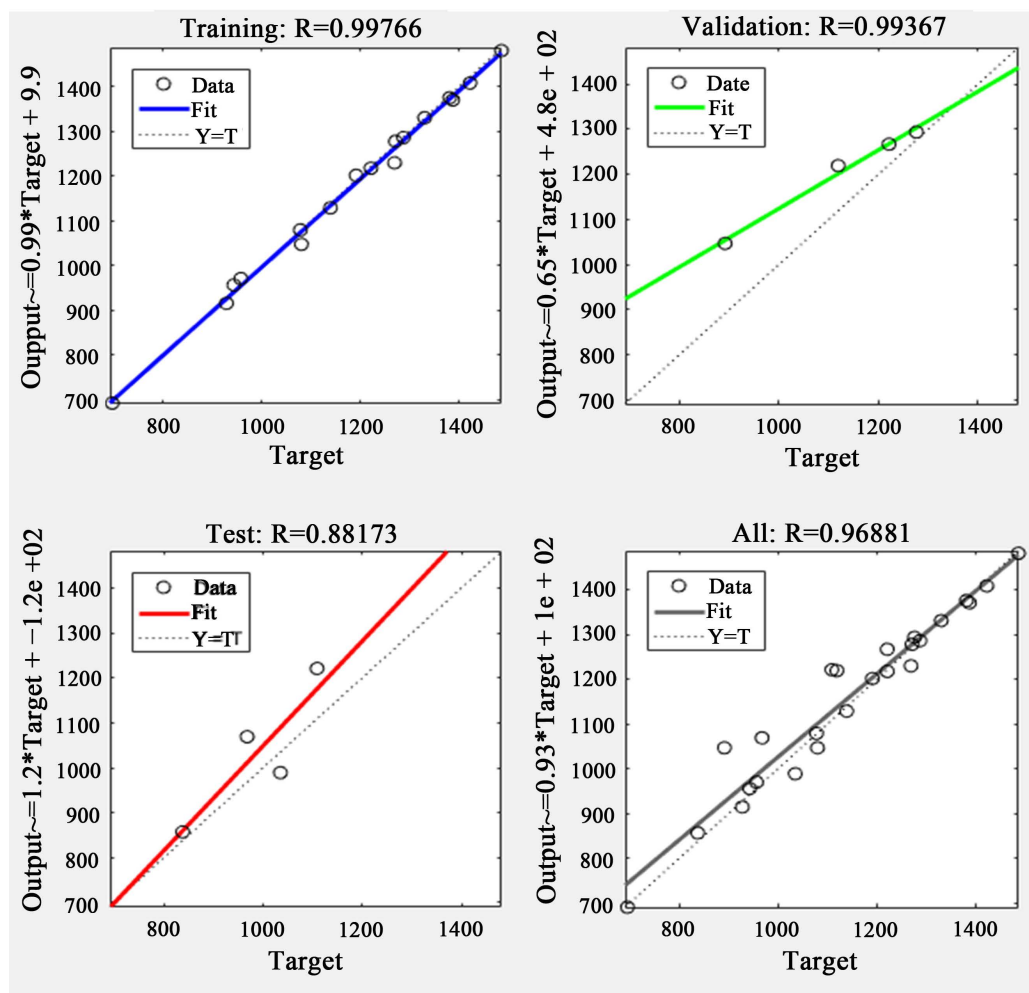


Figure 5. Correlation linear coefficient plot
图 5. 相关线性系数图

5.2. BP 神经网络模型训练结果分析

由混凝土电通量试验数据，确定输入层神经元数为 3，分别为振幅、振动频率、搅拌线速度，设置输出层为混凝土的电通量。对模型样本进行训练，训练完的数据代入到 BP 神经网络结构中进行预测，并把预测的数据与试验所得的数据进行比较，图 6 为不同试验条件下 BP 神经网络预测模型的电通量实验结果的对比，从图中可以看出 BP 神经网络预测结果与试验结果吻合较好。采用本文训练过的网络模型，可以较准确地预测不同振动搅拌工作参数下的混凝土的电通量，对于采用振动搅拌工艺生产混凝土

的耐久性预测具有一定的参考意义。

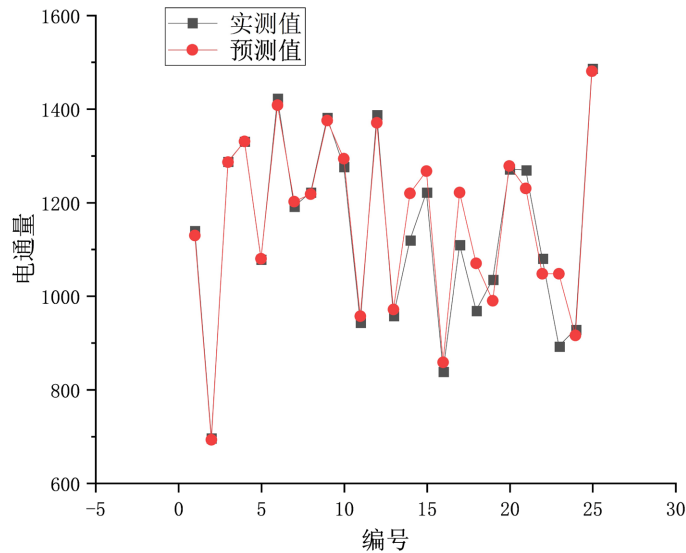


Figure 6. Comparison of experimental values with electrical flux predicted by BP neural network
图 6. 试验值与 BP 神经网络预测的电通量的结果对比

6. 结论

本文通过正交试验研究了振幅、振动频率以及搅拌线速度对混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响，并建立了 BP 神经网络模型对其进行预测，初步结论如下：

(1) 振动搅拌相对于普通搅拌，所制得的混凝土更加均匀致密，孔隙裂纹缺陷明显减少，气相微结构得到改善，有效提高了混凝土的抗氯离子渗透性能，这是提高混凝土耐久性的一种新途径。

(2) 通过正交优化设计试验得出三个因数对混凝土抗氯离子渗透性的影响程度为：振幅 > 振动频率 > 搅拌线速度，较理想的搅拌工作参数为振幅取 1.93 mm，振动频率取 35 Hz，搅拌线速度取 1.4 m/s，在此工作参数下混凝土具有较强的抗氯离子渗透性能。

(3) 建立了预测混凝土抗氯离子渗透性能的 BP 神经网络模型，为振动搅拌技术改善混凝土耐久性提供了参考。

基金项目

陕西省交通运输厅科技项目：水泥混凝土振动搅拌技术在铁路工程中的应用(编号：17-28K/211825180109)。

参考文献

- [1] Zhao, H., Jiang, K., Yang, R., Tang, Y. and Liu, J. (2020) Experimental and Theoretical Analysis on Coupled Effect of Hydration, Temperature and Humidity in Early-Age Cement-Based Materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **146**, Article ID: 118784. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118784>
- [2] 李本发. 钢筋混凝土的腐蚀研究现状与进展[J]. 城市建筑, 2013(8): 280-281+283.
- [3] 薛斌, 孙启荣, 王辰宇, 朱保印. 腐蚀钢筋混凝土结构研究现状及展望[J]. 能源与环保, 2017, 39(4): 174-179.
- [4] 周岳, 周健, 唐孟雄, 李鹏, 彭巨情, 王创, 张硕. 粉煤灰和矿渣粉对混凝土抗氯离子渗透和抗碳化性能的影响[J]. 混凝土, 2021(7): 60-64.
- [5] Sun, W., Chen, H., Luo, X., et al. (2001) The Effect of Hybrid Fibers and Expansive Agent on the Shrinkage and Per-

meability of High-Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*, **31**, 595-601.

[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00479-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00479-8)

- [6] 付昌会, 冯忠绪, 张磊. 搅拌方式对混凝土含气量及孔结构的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(2): 42-45.
- [7] 万崔星, 孙敏. 基于 BP 神经网络的纤维混凝土力学性能预测模型[J]. 科技通报, 2021, 37(8): 90-93+99.
- [8] 陈守开, 蒋海峰, 郭磊, 汪伦焰. 再生骨料透水混凝土亚高温-冷却性能研究[J]. 水力发电, 2020, 46(10): 122-126.
- [9] 闫少杰, 宋少民, 张良奇. 振动搅拌对大流动性混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2017(8): 152-155.
- [10] 胡顺新, 殷琪. 基于 BP 神经网络的活性粉末混凝土(RPC)强度预测研究[J]. 四川水泥, 2021(3): 14-15.
- [11] 施国栋. 纤维增强混凝土增强增韧机理分析及对比实验研究[J]. 安徽工程大学学报, 2020, 35(2): 85-94.
- [12] 贺倩. 基于 BP 神经网络的铁路桥梁混凝土工程造价模型[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(17): 106-108.
- [13] 林加剑, 韦天下, 施国栋, 王朝成, 王辉, 周理洋. 准静态玄武岩纤维混凝土力学性能及其 BP 神经网络预测模型研究[J]. 防护工程, 2020, 42(6): 8-17.