

Uncertainty Characterization of Ultrasonic Velocity Evolution in Concrete Repaired by Electrochemical Deposition

Jianmin Ding¹, Wenjun Liu¹, Kai Wan², Zhiyuan Zhu^{3*}

¹Wuxi Metro Group Co., Ltd., Wuxi Jiangsu

²Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd. of China Railway First Group Co., Ltd., Wuxi Jiangsu

³Department of Civil Engineering Materials, Tongji University, Shanghai

Email: 584423475@qq.com, 26770428@qq.com, 61988463@qq.com, *15900737182@163.com

Received: Apr. 22nd, 2019; accepted: May 7th, 2019; published: May 14th, 2019

Abstract

The process of electrochemical deposition restoration is influenced by many factors and even the restoration effect of the same batch of specimens presents a fluctuating feature. In this paper, the porous concrete specimens were used to simulate the damage specimen during the process of electrochemical deposition and the ultrasonic velocity was used to characterize the restoration effect. Gauss distribution, Lognormal distribution and Lorentz distribution were used to fit the evolution of the overall ultrasonic velocity and Bayesian Information Criterion (BIC criterion) and goodness of fit determination coefficient (R^2) were used to evaluate the corresponding goodness of fit. The results showed that the overall ultrasonic velocity of the specimens increased with the progress of the restoration process, but the restoration effect (ultrasonic velocity) of the same batch of specimens presented random characteristics under the same electrochemical environment setting. The fitting degree evaluation showed that compared with the Lognormal distribution and Lorentz distribution, the Gauss distribution was more consistent with the probabilistic characterization of the ultrasonic uncertainty of concrete in the repair process.

Keywords

Electrochemical Deposition, Concrete Repair, Ultrasonic Measurement, Gauss Distribution, Degree of Fit

电化学沉积修复过程混凝土超声波速度演化不确定性表征

丁剑敏¹, 刘文军¹, 万凯², 朱志远^{3*}

*通讯作者。

¹无锡地铁集团有限公司, 江苏 无锡

²中铁一局集团城市轨道交通工程有限公司, 江苏 无锡

³同济大学土木工程材料系, 上海

Email: 584423475@qq.com, 26770428@qq.com, 61988463@qq.com, *15900737182@163.com

收稿日期: 2019年4月22日; 录用日期: 2019年5月7日; 发布日期: 2019年5月14日

摘要

电化学沉积修复过程影响因素多, 同一批试件的修复效果呈现出波动性特征。本文采用多孔混凝土试件模拟损伤试件开展了电化学沉积修复试验, 用超声波速度等手段表征其修复效果, 分别使用Gauss分布、Lognormal分布以及Lorentz分布拟合修复过程整体超声波概率演化特征, 采用贝叶斯信息准则(BIC准则)与拟合优度可决系数(R^2)来评价对应拟合度, 结果显示, 随着修复过程推进, 试件整体超声波速度有增长趋势, 但是, 同一批试件, 在相同的电化学环境设置下, 修复效果(超声波速度)呈现随机性特征; 拟合度评价显示, 对比Lognormal分布以及Lorentz分布, 采用Gauss分布更符合修复过程混凝土超声波不确定性的概率表征。

关键词

电化学沉积, 混凝土修复, 超声测量, Gauss分布, 拟合度

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

水环境中钢筋混凝土结构裂缝的修复一直是关键的技术难题[1]。作为最近兴起的水环境下钢筋混凝土结构修复方法之一, 电化学沉积法充分利用钢筋混凝土自身特性及水环境条件, 通过施加一定的弱电流, 产生电解沉积作用, 在混凝土结构裂缝中、表面上生长并沉积一层化合物, 以此填充、愈合混凝土的裂缝[2] [3] [4] [5]。但是在电沉积修复混凝土的过程中, 由于混凝土的自身结构复杂性以及修复环境干扰, 修复过程随机性大, 需要建立基于不确定性的评价方法。

本文采用多孔混凝土模拟损伤混凝土[6] [7] [8], 通过电沉积修复前后的超声波速度变化来评价修复效果, 并结合同一批试件修复过程超声波速度的波动性, 通过 Gauss 分布、Lognormal 分布和 Lorentz 分布对超声波速度进行近似表征, 采用贝叶斯信息准则(BIC 准则)与拟合优度可决系数(R^2)来评价对应拟合度, 拟合度评价显示, 对比 Lognormal 分布以及 Lorentz 分布, 采用 Gauss 分布更符合修复过程混凝土超声波不确定性的概率表征。

2. 电化学沉积修复及其效果评价试验设计

2.1. 电化学沉积修复装置

电化学沉积法修复钢筋混凝土裂缝的试验装置如图 1。

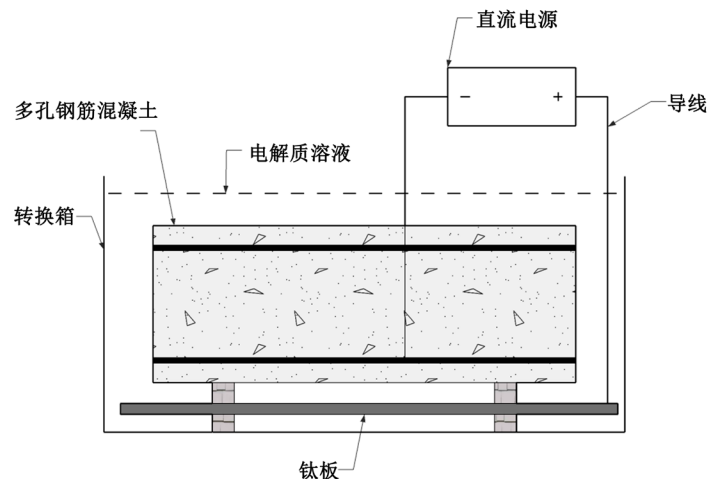


Figure 1. Electrochemical deposition restoration device
图 1. 电化学沉积修复装置

试验参数设置：电化学修复介质为 $Mg(NO_3)_2$ 溶液，电解质溶液浓度为 0.2 mol/L 。为了维持修复过程溶液浓度不变，每两周更换一次电解质溶液。电流为 0.16 A 。

其试验步骤如下：

- 1) 在转换箱底部放入钛板，并加上 3~5 cm 的垫块；修复试件放在垫块之上；
- 2) 将钛板和电源正极相连，将试件内部钢筋(笼)和电源阴极相连，形成闭合回路；
- 3) 加入已配置好的电解质溶液，打开电源开关，进行电化学沉积修复试验。

2.2. 试件制备

试验所采用的水泥为海螺牌 32.5 复合硅酸盐水泥。粗骨料为安山岩，主要采用粒径为 $5 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm}$ 的碎石。细骨料粒径范围为 $2.5 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$ ，砂子为中砂，细度模数为 2.3。

试验试件主要为多孔钢筋混凝土试件，其尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。试件通过导线和钢筋笼连接，以进行电化学沉积修复反应。钢筋笼制作采用光圆钢筋，直径为 8 mm 。钢筋笼位于试件中部，保护层厚度为 20 mm ，如图 2 所示。

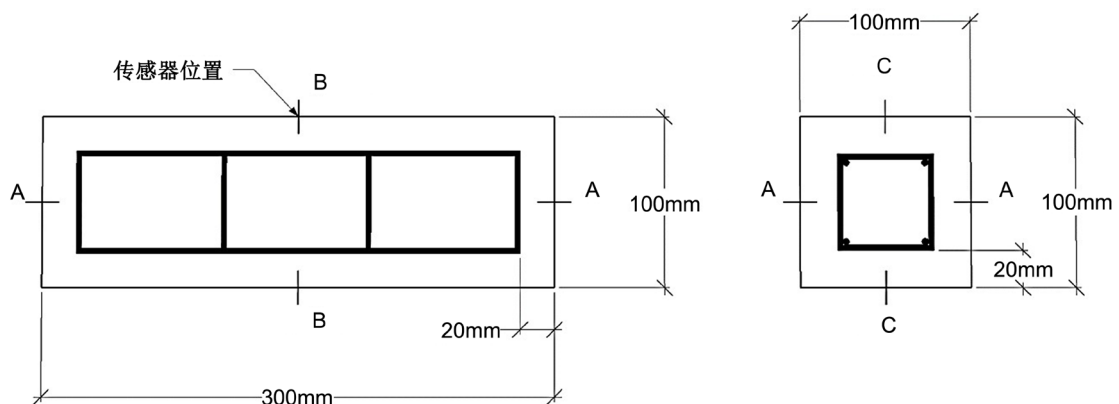


Figure 2. Steel bar distribution
图 2. 钢筋笼位置示意图

多孔混凝土的材料配比参见表 1。

Table 1. Proportion of porous concrete materials (kg/m³)
表 1. 多孔混凝土材料配合比(kg/m³)

| | 骨料 | | 水 |
|-----|----------------------|---------------------|-----|
| | 细骨料 (2.5 mm~5 mm) | 粗骨料 (5 mm~10 mm) | |
| 350 | 315 | 1260 | 105 |

2.3. 修复效果评价装置(超声检测)

本试验采用瑞士生产的 Pundit Lab 超声检测仪来检测超声波在混凝土的传播速度。获取超声波速度后，可以根据式(1)计算试件的动弹性模量：

$$E_d = \rho R^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu) / (1 - \nu) \tag{1}$$

式中 E_d 是材料的动弹性模量， ρ 是材料的密度， ν 是材料的泊松比， R 是超声波速度。当试件为混凝土材料时，考虑其泊松比大概在 0.2 左右，可以将以上计算式子做如下的简化[9]：

$$E_d = \rho R^2 \tag{2}$$

材料的密实度随着动弹性模量增大而增大，因此，由上式，可用超声波在混凝土中传播速度来判断混凝土的密实度变化，进而评价混凝土的修复效果。

考虑如果测量点选择不当，试件内部钢筋(笼)将影响超声检测的精度(钢筋的超声波速大于混凝土)，在进行超声检测时，试验中将传感器的位置放于测量表面的中点位置，具体如图 2 所示。

为了综合考虑电化学沉积修复作用，在进行超声试验时，检测了试件三对平行表面之间的超声波速度。在进行动弹性模量计算时，文章采用三者的平均值。为了表述方便，我们定义 100 mm 间距的两对平面分别为 A-A 和 B-B 面，300 mm 间距的一对平行表面为 C-C 面，详细可以参考图 2。

3. 电化学沉积修复试验结果与分析

3.1. 修复过程超声波速度

超声波试验时间选择为试件修复 0 天，14 天和 35 天后；测量对象总共有 13 个试件，每个试件分别测试 3 对平面；试件状态为修复试件经干燥(80 摄氏度) 24 小时后，冷却至常温。图 3 表示所有试件(3 对平面)修复过程超声波速度测量的结果。

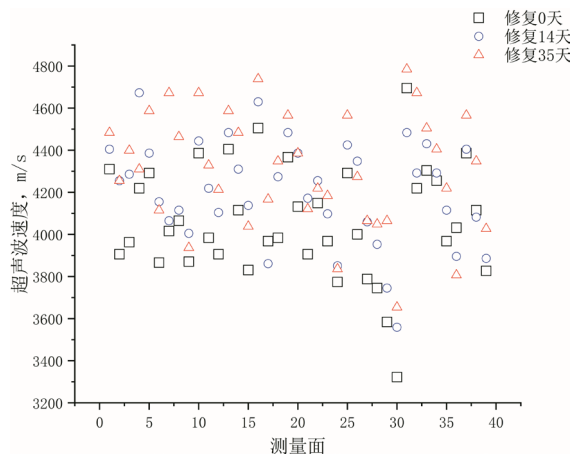


Figure 3. Ultrasonic velocity of 13 specimens
图 3. 13 个试件(每个试件 3 对平面，共 39 个平面)超声波速度

由图 3 可以看出, 尽管修复后不同测试平面间的超声波速度变化的幅度有所不同, 也存在修复后超声波速度变小的现象, 但是, 总体而言, 经过修复后, 超声波速度是呈现增长趋势

将 13 个试件按测量平面分组取平均值, 作出各平面的随时间变化的超声速度演变图, 如图 4 所示。三个测量平面的超声传播速度差异很大, 差异率分别为 10.6%, 7.9%, 10.5%。三个平面的超声传播速度随着修复时间的增长显著上升, 0~35 天的超声速度增长率为 5.2%, 7.9%, 5.4%, 混凝土逐渐密实。

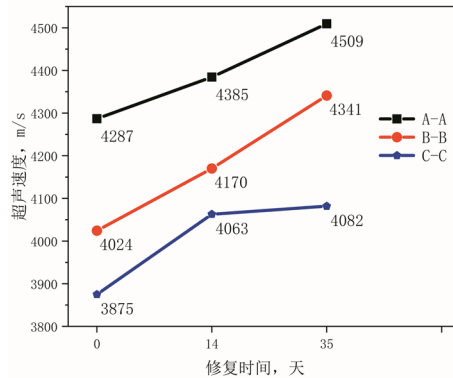


Figure 4. Ultrasonic velocity evolution during restoration

图 4. 修复过程超声波速度演化

以 A-A 平面为例, 作出 13 组试件 A-A 平面测量超声波速度随时间演变直方图。由图 5 可知 A-A 平面的超声波速度普遍随修复时间增长而增长, 且增长量呈现随机性。这表明电沉积修复混凝土的有效性 with 不确定性。

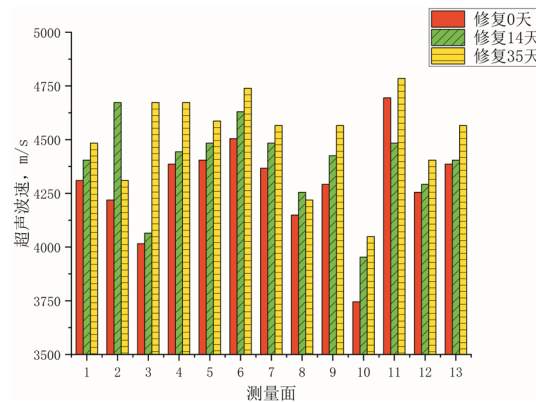


Figure 5. Ultrasonic velocity evolution of A-A plane

图 5. A-A 平面的超声波速度演化

3.2. 超声波速表征近似拟合

通过将修复 0 天、14 天、35 天的 13 个试件波速从 3200 m/s 至 5000 m/s 按 200 m/s 进行区间分布频数统计, 结果发现, 三组波速分布均呈中间高, 两端逐渐下降且具有一定对称性的钟状分布。因此, 可以通过对超声波速分布频数进行曲线拟合, 从而对混凝土电沉积修复过程的超声波速演化近似表征。

根据波速分布的特定形状特征, 本文分别采用 Gauss 分布、Lognormal 分布、Lorentz 分布对数据进行非线性拟合, 以修复 0 天超声波速分布函数拟合图, 图 6 为例。可以直观地发现三种函数拟合度都很高, 为此还需要定量对拟合程度进行评价, 以确定一最优函数对波速分布进行表征。

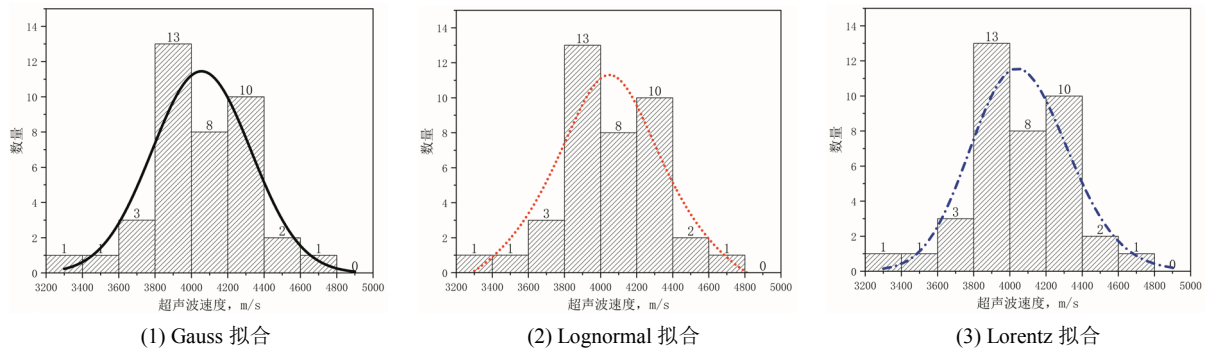


Figure 6. Fitting diagram of ultrasonic velocity distribution function for the specimens to be repaired

图 6. 待修复试件超声波速分布函数拟合图

4. 超声波速表征函数拟合评价

4.1. 拟合函数评价指标

为了确定上述拟合函数中的最优模型，本文将采取拟合优度可决系数 R^2 与 BIC 指数对上述模型进行评价。

函数模型拟合的优劣程度评价指标主要为拟合优度与模型复杂度。

拟合优度是指回归曲线对观测值的拟合程度。度量拟合优度的统计量是可决系数 R^2 [10] [11]。 R^2 等于回归平方和在总平方和中所占的比率，即回归方程所能解释的因变量变异性的百分比，公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (3)$$

其中， Y_i 为序列值， \bar{Y}_i 为序列平均值， y_i 为函数拟合值， TSS 为执行回归分析前，序列固有的方差， RSS 为残差平方和(回归模型不能解释的方差)。

R^2 的取值在 0 到 1 之间。 R^2 愈接近于 1，拟合函数的残差平方和愈小，拟合优度愈高。

但是，最优拟合函数选择并非只由拟合优度决定，还有模型复杂度影响。

若假设模型 1: $Y = A_1X_1 + B$; 模型 2: $Y = A_1X_1 + A_2X_2 + B$ 。如果在给定 X_1 的前提下， X_2 对 Y 值有重要贡献，那么模型 2 肯定比 1 更好。但是，如果在 A_2 等于 0 时， X_2 将对模型没有额外的贡献。把 X_2 加进模型里来， X_2 会把不必要的噪音带进来，并因此影响整个模型的估计精度，预测精度。因此，考虑到模型复杂度的影响，本文引入了 BIC 指数对拟合函数进行评价与对比验证。

BIC 准则是指在不完全情报下，对部分未知的状态用主观概率估计，然后用贝叶斯公式对发生概率进行修正，最后再利用期望值和修正概率做出最优决策[12]。BIC 指数愈小，拟合度愈高。BIC 准则公式如下：

$$BIC = q \times \ln(n) + n \times \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) \quad (4)$$

式中 n 指数据数量， q 指对应的模型的变量的个数， RSS 指残差平方和。

相比于 R^2 ，贝叶斯公式将拟合函数评价分为拟合优度部分与拟合函数复杂度惩罚部分，惩罚力度随着模型变量数增加而增大。因此，BIC 指数可以对模型复杂度有效管控。

4.2. 函数模型拟合度评价

针对 Gauss 分布、Lognormal 分布以及 Lorentz 分布对修复 0 天、14 天、35 天的超声波速分布的拟合模型，分别计算其 R^2 与 BIC 指数并做出分布图，如图 7、图 8 所示。

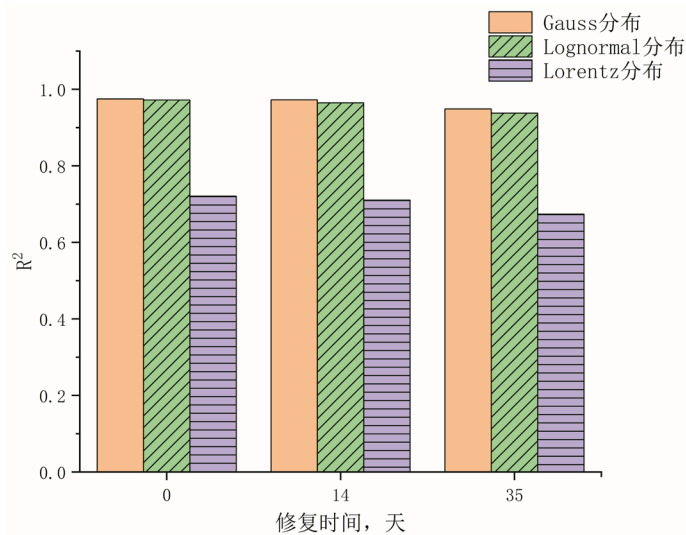


Figure 7. R^2 distribution diagram
图 7. R^2 分布图

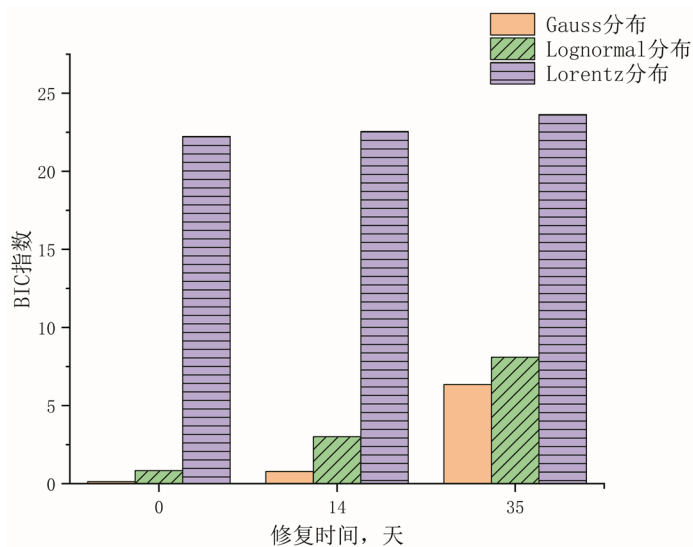


Figure 8. BIC coefficient distribution diagram
图 8. BIC 指数分布图

从图中可以看出, 对于不同修复龄期的超声波速分布的近似拟合中, Gauss 分布的 R^2 最接近于 1, BIC 指数也最小, 都证明 Gauss 较其他两种分布更适用于拟合电沉积修复混凝土的超声波速分布。而修复 14 天、35 天的混凝土试件的拟合指标优于待修复的混凝土的拟合指标, 这是由于采用的多孔混凝土作为损伤试件, 其孔隙分布不均匀导致, 而经过一段时间的电沉积修复后, 混凝土密实度上升, 使其超声分布趋于 Gauss 分布。

4.3. 电沉积修复混凝土超声波速表征评价分析

混凝土的超声波速近似符合 Gauss 分布。因此, 运用 Gauss 分布拟合修复混凝土的超声波速分布可以有效的对混凝土的修复效果进行评价。本文将修复 0 天, 14 天, 35 天的混凝土的超声波速分布图进行 Gauss 分布拟合对比, 如图 9。

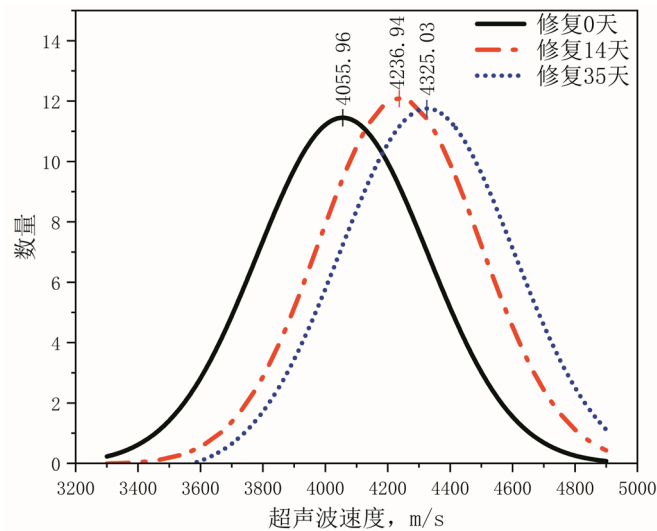


Figure 9. Gauss distribution of ultrasonic velocity over time
图9. 超声波速随时间变化的 Gauss 分布图

图中可以看出, 随着修复时间的进行, 超声波速的 Gauss 分布图逐渐右移, 整体波速逐渐增加, 表征了混凝土逐渐密实的过程。波峰横坐标波速的变化用来评估混凝土的修复进程。

5. 结论

电化学沉积修复过程影响因素多, 同一批试件的修复效果呈现出波动性特征。本文采用多孔混凝土试件模拟损伤试件开展了电化学沉积修复试验, 用超声波速度等手段表征其修复效果, 分别使用 Gauss 分布、Lognormal 分布以及 Lorenz 分布拟合修复过程整体超声波概率演化特征, 采用贝叶斯信息准则(BIC 准则)与拟合优度可决系数(R^2)来评价对应拟合度。得到如下几点结论:

- 1) 超声波速度分布表明修复过程多孔混凝土试件的平均超声波速度呈上升趋势, 沉积产物逐渐增多, 混凝土修复过程中逐渐密实。
- 2) 混凝土不同测量面的超声波速度差异较大, 体现了混凝土自身的随机性; 混凝土不同部位超声波速度随时间的增长率也各不相同, 体现了电沉积修复过程的随机性。
- 3) 混凝土的超声波速度分布可通过经典概率密度函数回归拟合, 比较 Gauss 分布、Lognormal 分布、Lorentz 分布, 可发现 Gauss 分布更适用于修复混凝土的超声分布。

参考文献

- [1] Mehta, P.K. (1997) Durability—Critical Issues for the Future. *Concrete International*, **19**, 1-12.
- [2] Ryu, J.S. and Otsuki, N. (2005) Experimental Study on Repair of Concrete Structural Members by Electrochemical Method. *Scripta Materialia*, **52**, 1123-1127. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.02.001>
- [3] Ryu, J.S. and Otsuki, N. (2002) Crack Closure of Reinforced Concrete by Electro Deposition Technique. *Cement and Concrete Research*, **32**, 159-264. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00650-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00650-0)
- [4] Mohankumar, G. (2005) Concrete Repair by Electrodeposition. *Indian Concrete Journal*, **79**, 57-60.
- [5] Monteiro, P. and Ryou, J.S. (2004) Electrodeposition as a Rehabilitation Method for Concrete Materials. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **31**, 776-781. <https://doi.org/10.1139/104-044>
- [6] Zhu, H.H., Chen, Q., Yan, Z.G., Ju, J.W. and Zhou, S. (2014) Micromechanical Model for Saturated Concrete Repaired by Electrochemical Deposition Method. *Materials and Structures*, **47**, 1067-1082. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0115-4>
- [7] Jiang, Z.W., Xing, F., Sun, Z.P. and Wang, P.M. (2008) Healing Effectiveness of Cracks Rehabilitation in Reinforced

Concrete Using Electrodeposition Method. *Journal of Wuhan University of Technology*, **23**, 917-922.
<https://doi.org/10.1007/s11595-007-6917-x>

- [8] Chen, Q., Jiang, Z.W. and Yang, Z.H. (2015) An Experimental Study on the Repair of Deteriorated Concrete by Electrochemical Deposition Method. *International Symposium on Systematic Approaches to Environmental Sustainability in Transportation*, Fairbanks Alaska, 2-5 August 2015, 87-94. <https://doi.org/10.1061/9780784479285.008>
- [9] Kewalramani, G. (2006) Concrete Compressive Strength Prediction Using Ultrasonic Pulse Velocity through Artificial Neural Networks. *Automation in Construction*, **15**, 374-379. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.07.003>
- [10] Braun, H., *et al.* (1980) A Simple Method for Testing Goodness of Fit in the Presence of Nuisance Parameters. *Journal of the Royal Statistical Society*, **42**, 53-63. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1980.tb01100.x>
- [11] Lantz, K. (1978) Small-Sample Comparisons of Exact Levels for Goodness of Fit Statistics. *Journal of the American Statistical Association*, **73**, 253-263. <https://doi.org/10.1080/01621459.1978.10481567>
- [12] Constantinopoulos, C., Titsias, M.K. and Likas, A. (2006) Bayesian Feature and Model Selection for Gaussian Mixture Models. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **28**, 1013-1018.
<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.111>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org